

## 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 «Фундаментальные основы квантовых технологий» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовая криптография». Дисциплина обеспечивает необходимую теоретическую подготовку студентов в области физики квантовой обработки информации, а также знакомство с основными физическими эффектами и протоколами. В курсе рассматриваются основные физические модели реализации кубитов и преобразований над ними, выполняемых с помощью унитарных операций. Имеется достаточно обширная вводная часть, посвященная аппарату квантовой механики, построенному на матрице плотности. Ряд разделов посвящен введению в классическую теорию информации, а также аналогам с поляризационными состояниями света в оптике и преобразованию над ними.

**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) 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», «Квантовая механика», «Статистическая физика и термодинамика» и теоретической физики «Электродинамика», а также дисциплин «Линейная алгебра» и «Дифференциальные уравнения». Желательно предварительное освоение материала вариативной части программы бакалавриата: дисциплин профиля «Квантовая электроника».

## **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. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КВАНТОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ (КОИ) Структура КОИ. Квантовые вычислители и квантовые симуляторы. Оптоволоконные каналы связи и системы КРК. Атмосферные и космические каналы связи и системы КРК. Квантовая память и квантовые интерфейсы.		1			1	1 час Знакомство с обзорами по теме квантовых технологий [1-3].		1

<p>2 ВВЕДЕНИЕ. КУБИТЫ И ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД НИМИ.</p> <p>Что такое квантовая информация. Квантовые биты, двухуровневая система. Основные операции над единичными кубитами. Операторы Паули. Преобразование Адамара, интерферометр Маха-Цандера. Принцип суперпозиции, квантовая интерференция. Интерференция одного фотона. Свойства поляризованных фотонов. Закон Мура, роль квантовых эффектов. Биты и их реализация. Регистры. Понятие машины Тьюринга. Классические вычисления. Логические операции. Сложение по модулю 2. Требования, предъявляемые к квантовому компьютеру. Основные проблемы на пути к его созданию.</p>	1	1		2	<p>1 час Вывод формул преобразования операторами Паули и их комбинаций. [1, 6].</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «кубиты и основные операции над ними».</p>	3
<p>3. ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ, ВОЛНОВАЯ ФУНКЦИЯ И МАТРИЦА ПЛОТНОСТИ.</p> <p>Уравнение Шредингера, теория представлений. Описание состояний в квантовой механике. Волновая функция. Принцип суперпозиции. Чистые и смешанные состояния. Вычисление средних величин. Матрица и оператор плотности. Аналогия с классическими поляризационными состояниями. Линейные операторы. Энтропия фон Неймана. Случаи чистых и смешанных состояний. Вычисление энтропии фон Неймана и Шеннона для двухуровневой системы.</p>	2	1		3	<p>1 час Вывод формулы энтропии фон Неймана для конкретных состояний (задается на семинаре).</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме</p>	3

						«вектор состояния, волновая функция и матрица плотности».		
<p>4. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ И КВАНТОВАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ. КВАНТОВЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ - КУДИТЫ.</p> <p>Интерферометры Маха-Цандера и Юнга. Продольная и поперечная когерентность. Интерференция одиночных фотонов и интерпретации интерференционных экспериментов. Биты, наты, диты. Их реализация. Основные модели квантовых состояний высокой размерности (<math>D &gt; 2</math>).</p>	2	1	2 часа Коллоквиум по темам «Филаментация фемтосекундного лазерного излучения» и «Нелинейная оптика филамента»	3	1 час Знакомство с понятиями продольной и поперечной интерференцией [6].  2 часа Повторение лекционного материала по теме «Принцип суперпозиции и квантовая интерференция. Квантовые состояния высокой размерности - кудиты».		3	
<p>5. ТЕОРЕМА О ЗАПРЕТЕ КЛОНИРОВАНИЯ</p> <p>Композиционные системы. Различие между</p>	3	1		2	1 час Знакомство по		3	

<p>классической и квантовой информацией. Достижимая информация. Теорема о запрете клонирования квантовых состояний. Ее связь с достижимой информацией. Передача (transposition) квантовой информации. Понятие квантового канала связи. Точность воспроизведения информации (fidelity). Теорема Б.Шумахера о кодировании при отсутствии шума.</p>					<p>литературе с теоремой Б.Шумахера о кодировании при отсутствии шума [4].</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «теорема о запрете клонирования»</p>		
<p><b>ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ КРИПТОГРАФИИ</b> Криптология, криптография и криптоанализ. Основные задачи криптографии. Понятия открытого текста, криптограммы, ключа и криптосистемы. Принцип Керкхгоффа. Приложения криптографии. Симметричные криптографические системы. Криптосистема с открытым ключом - асимметрия шифровки и дешифровки. Протокол RSA. Понятия криптографического протокола и криптографического алгоритма. Корректность и полнота протокола. Криптоанализ и основные виды атак. Подслушиватели (нарушители). Активный и</p>	3	2		5	4 часа Повторение лекционного материала по теме «основные понятия классической криптографии».	4 часа Подготовка коллоквиума на тему «классическая криптография» (по выбору)	4(8)

<p>пассивный, внутренний и внешний подслушиватели.  Стеганография и ее задачи.  Типы секретности сообщений (по Шеннону).  Безусловно и условно стойкие шифры. Пример: код Вернама (одноразовый блокнот).  Распределение ключей. Генерация ключей, их хранение и уничтожение.  Одноключевые (симметричные) методы шифрования. Рассеивание и перемешивание.  Понятие о криптосистемах DES и ГОСТ 28147-89, их достоинства и недостатки. Основные проблемы симметричных протоколов. Аутентификация секретного ключа. Двухключевые (асимметричные) методы шифрования. Механизм распределения ключей по открытому каналу по У.Диффи и М.Хеллману. Понятие о криптосистемах RSA и Эль-Гамала. Электронная подпись.  Проблема распределения ключа в классической криптографии и пути ее решения.  Физические основы квантового распределения ключа: теорема о запрете копирования и неразличимость неортогональных состояний.  Общая схема протокола квантового распределения ключей (КРК).</p>								
<p><b>ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ФОТОНОВ.</b>  Вектор Джонса. Поляризационные преобразования. Фазовые пластинки. Некоторые сведения из теории квантовых измерений. Сопряженные базисы.</p>		1	1		2	1 час Вычисление преобразований, выполняемых пластинками $\lambda/2$ и		3

						<p><math>\lambda/4</math> – по заданию преподавателя [5]. 2 часа Повторение лекционного материала по теме «основные свойства поляризованных фотонов» [5]</p>	
<p><b>СОСТАВНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ И ПЕРЕПУТАННЫЕ СОСТОЯНИЯ</b> Роль неклассических полей в физике квантовой информации. Определение (I) неклассического света и его недостатки. Составные квантовые системы, двухкомпонентные коррелированные системы. Роль ПС в квантовых алгоритмах. Примеры: ионы в ловушках, коррелированные ядерные спины в молекулах, атом в оптическом резонаторе. Определение перепутанных состояний. Пример приготовления двухчастичного ПС. Состояния Белла, как частный случай ПС. Преобразования состояний Белла при смене базиса. Оптическая реализация ПС. Спонтанное параметрическое рассеяние (СПР) света, Перепутывание по времени, временная пост-селекция. Пространственно-частотные, поляризационно-частотные, поляризационно-угловые ПС. Амплитудная пост-селекция.</p>		2	1		3	<p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «составные квантовые системы и их свойства»</p>	2

<p><b>ОСНОВНЫЕ МЕРЫ ПЕРЕПУТЫВАНИЯ</b>  Понятие пибита (ebit). Кубиты и пибиты как прямые и косвенные ресурсы квантовой информации.  Чистые перепутанные состояния. Разложение Шмидта двухкомпонентной системы. Число Шмидта. Энтропия перепутывания. Степень перепутывания. Локальные операции и классические сообщения.  Параметр Федорова.</p>	1	1		2	2 часа Повторение лекционного материала по теме «основные меры перепутывания»	4 часов Подготовка коллоквиума на тему «Перепутанные состояния» (по выбору)	2(6)
<p><b>ПАРАДОКС ЭЙНШТЕЙНА-ПОДОЛЬСКОГО-РОЗЕНА И НЕРАВЕНСТВА БЕЛЛА</b>  Парадокс ЭПР в варианте Боба. Антисимметричные состояния. Их инвариантность относительно поворота базиса. Аналогия между состояниями частиц со спином <math>1/2</math> и поляризационными состояниями света.  Примеры реализации.  Неравенства Белла. Классическая модель с двумя дихотомными переменными. Измеряемая Белла. Модель скрытых параметров. Квантовая модель.  Примеры реализации.  Парадокс Белла для трех наблюдаемых. Состояния Гринберга - Хорна - Цайлингера.  Парадокс Гринберга-Хорна-Цайлингера.  Примеры реализации.</p>	2	1		3	2 часа Повторение лекционного материала по теме «Парадокс ЭПР и неравенства Белла» [1, 2]		2
<p><b>КВАНТОВАЯ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ КУБИТОВ</b>  Копирование и передача квантовых состояний. Протокол квантовой телепортации. Требования, предъявляемые к нему: ненарушение теоремы о</p>	1	1		2	2 часа Повторение лекционного	4 часов Подготовка коллоквиума «реализация	6

<p>запрете клонирования; наличие неизвестного входного состояния; идентичность выходного состояния входному; отсутствие сверхсветовых сигналов; полное измерение оператора Белла.          Протокол сверхплотной кодировки кубитов (dense coding).          Протокол обмена перепутыванием (swapping).</p>					<p>материала по теме «Квантовая телепортация кубитов» [1, 2]</p>	<p>основных протоколов квантовой информации»</p>	
<p><b>ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ</b>          Классические вероятностные модели. Приготовление и измерение классического состояния. Аналог смешанного состояния. Квантовые вероятностные модели. Прямые и косвенные измерения. Опыты Штерна и Герлаха. Двухуровневые системы (примеры). Формула Раби для вероятности перехода. Измерительный (Борна) и проекционный постулаты (фон Неймана). Понятие о квантовой томографии. Фиксированные и адаптивные протоколы.</p>	1	1		2	<p>2 часа          Повторение лекционного материала по теме «Основы квантовой теории измерений»</p>		2
<p><b>ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.</b>          В чем проблема? Компьютерное моделирование физических процессов. Дискретизация. Ограничение, накладываемое на классический компьютер. Полиномиальный класс задач P.          Моделирование времени. Алгоритм клеточного автомата. Моделирование вероятности. Экспоненциальный рост объема вычислительного устройства. Класс задач NP.</p>	1	1		2	<p>2 часа          Повторение лекционного материала по теме «Основные модели квантовых вычислений» [1, 4]</p>		2

<p>Моделирование квантовых эффектов. Квантовый компьютер и построение его гамильтониана.</p> <p>Квантовый компьютер и квантовый симулятор.</p> <p>Декогерентизация квантовой системы. Эволюция состояния в квантовом компьютере. Программный счетчик (курсор). Недостатки компьютера и необратимые потери энергии. Квантовый регистр. Случай N кубитов.</p> <p>Общие требования, необходимые для реализации полномасштабных квантовых компьютеров. Условия Ди Винченцо.</p> <p>Основные физические модели для реализации квантовых вычислений.</p> <p>Квантовый компьютер на фотонах. Сверхпроводниковые квантовые компьютеры. Квантовые компьютеры на квантовых точках. Квантовые компьютеры на нейтральных атомах и ионах в ловушках.</p>							
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>		4			4	15 часов Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).	13
<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:

1. Основные операции над единичными кубитами.
2. Операторы Паули
3. Описание состояний в квантовой механике
4. Энтропия фон Неймана
5. Биты, наты, диты.
6. Теорема о запрете клонирования квантовых состояний
7. Симметричные и асимметричные криптографические системы
8. Код Вернама (одноразовый блокнот)
9. Поляризационные преобразования. Фазовые пластинки.
10. Составные квантовые системы, двухкомпонентные коррелированные системы. Состояния Белла.
11. Разложение Шмидта двухкомпонентной системы.
12. Парадокс ЭПР в варианте Боба.
13. Неравенства Белла.
14. Квантовая телепортация кубитов.
15. Формула Раби для вероятности перехода.
16. Квантовый компьютер и квантовый симулятор.

Типовые вопросы к зачету:

1. Операторы Паули. Преобразование Адамара, интерферометр Маха-Цандера..
2. Требования, предъявляемые к квантовому компьютеру.
3. Уравнение Шредингера, теория представлений.
4. Чистые и смешанные состояния. Вычисление средних величин.
5. Матрица и оператор плотности.
6. Вычисление энтропии фон Неймана и Шеннона для конкретного состояния двухуровневой системы.

7. Основные модели квантовых состояний высокой размерности ( $D > 2$ ).
8. Интерференция одиночных фотонов и интерпретации интерференционных экспериментов.
9. Композиционные системы. Различие между классической и квантовой информацией. Достижимая информация. Теорема о запрете клонирования квантовых состояний. Ее связь с достижимой информацией.
10. Теорема Б.Шумахера о кодировании при отсутствии шума.
11. Криптология, криптография и криптоанализ. Основные задачи криптографии. Понятия открытого текста, криптограммы, ключа и криптосистемы. Принцип Керкхгоффа. Приложения криптографии.
12. Криптоанализ и основные виды атак. Подслушиватели (нарушители). Активный и пассивный, внутренний и внешний подслушиватели.
13. Криптология, криптография и криптоанализ. Основные задачи криптографии. Понятия открытого текста, криптограммы, ключа и криптосистемы. Принцип Керкхгоффа. Приложения криптографии.
14. Симметричные криптографические системы. Криптосистема с открытым ключом - асимметрия шифровки и дешифровки. Протокол RSA.
15. Типы секретности сообщений (по Шеннону). Безусловно и условно стойкие шифры. Распределение ключей. Генерация ключей, их хранение и уничтожение.
16. Одноключевые (симметричные) методы шифрования. Рассеивание и перемешивание. Понятие о криптосистемах DES и ГОСТ 28147-89, их достоинства и недостатки. Основные проблемы симметричных протоколов. Аутентификация секретного ключа. Двухключевые (асимметричные) методы шифрования. Механизм распределения ключей по открытому каналу по У.Диффи и М.Хеллману. Понятие о криптосистемах RSA и Эль-Гамала. Электронная подпись. Общая схема протокола квантового распределения ключей.
17. Вектор Джонса. Поляризационные преобразования. Фазовые пластинки. Некоторые сведения из теории квантовых измерений. Сопряженные базисы.
18. Определение (I) неклассического света и его недостатки.
19. Состояния Белла, как частный случай перепутанных состояний (ПС). Преобразования состояний Белла при смене базиса.
20. Перепутывание по времени, временная пост-селекция. Пространственно-частотные, поляризационно-частотные, поляризационно-угловые ПС. Амплитудная пост-селекция.  
Чистые перепутанные состояния. Разложение Шмидта двухкомпонентной системы. Энтропия перепутывания. Степень перепутывания. Локальные операции и классические сообщения. Параметр Федорова.
21. Парадокс ЭПР в варианте Бома.
22. Неравенства Белла. Классическая модель с двумя дихотомными переменными. Измеряемая Белла. Модель скрытых параметров. Квантовая модель.
23. Парадокс Белла для трех наблюдаемых. Состояния Гринберга - Хорна - Цайлингера.
24. Протокол квантовой телепортации.
25. Протокол сверхплотной кодировки кубитов (dense coding).

26. Протокол обмена перепутыванием (swapping).
27. Измерительный (Борна) и проекционный постулаты (фон Неймана).
28. Понятие о квантовой томографии. Фиксированные и адаптивные протоколы.
29. Общие требования, необходимые для реализации полномасштабных квантовых компьютеров. Условия Ди Винченцо.
30. Основные физические модели для реализации квантовых вычислений.

#### 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 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 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>	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков	В целом успешное, но не систематическое	В целом успешное, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое применение

<p>навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).</p>		<p>анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>навыков анализа методологических проблем, возникающих 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. Монография. Пер. с англ - М.: Мир, 2006. - 824с.
- 2 Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. Физика квантовой информации. Москва: Постмаркет, 2002. – 376с.
3. А. С. Холево. Введение в квантовую теорию информации. М.: МЦНМО, 2002. —128с

### Дополнительная литература

4. Д. Прескилл. Квантовая информация и квантовые вычисления. Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2008, 464с.
5. У.Шерклифф. Поляризованный свет. (пер. с англ.) - Мир, М. С.264 (1965).

6. Д.Н.Клышко. Физические основы квантовой электроники. Наука, М., 1986, с.293.

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

- [www.filamentation.org](http://www.filamentation.org)
- [ofvp.phys.msu.ru/science\\_education/lections/detail.php?ID=2691](http://ofvp.phys.msu.ru/science_education/lections/detail.php?ID=2691)

**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.