

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области описания принципов и методов квантовых измерений и томографии квантовых состояний с целью их использования в задачах квантовых вычислений, квантовой связи и квантовой метрологии. Важное значение придается принципам адекватности, полноты и точности в задачах квантовых измерений и томографии. Особое внимание уделяется построению методов квантовых измерений, обеспечивающих точность восстановления квантовых состояний, близкую к фундаментальному физико-статистическому пределу.

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 квантовых вычислений.

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

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 «Электродинамика», «Квантовая механика», а также математических дисциплин «Математический анализ», «Теория функций комплексной переменной», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», «Теория вероятностей и основы математической статистики».

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 |
| 1. Введение. Три кита, на которых держится мир квантовых явлений. 1.1. Объективная случайность 1.2. Принцип дополнительности Нильса Бора 1.3. Квантовая запутанность и квантовые корреляции | 3 | 1 | 1 | | 2 | 1 час Решение задач по вычислению распределений вероятности при измерении однокубитовых и двухкубитовых чистых квантовых состояний | | 1 |

| | | | | | | | |
|--|----|---|---|---|---|--|---|
| <p>2. Природа квантовых статистических явлений.</p> <p>2.1. Взаимно-дополнительные координатное и импульсное представления в квантовой механике</p> <p>2.1.1. Статистическая интерпретация прямого и обратного преобразований Фурье. Координатное и импульсное распределения</p> <p>2.1.2. Принцип дополнительности Н. Бора в контексте координатного и импульсного распределений</p> <p>2.1.3. Взаимно-дополнительные распределения в опыте Юнга. Анализ экспериментов «который путь».</p> | 2 | 1 | | 1 | 1 час Повторение лекционного материала по теме «Взаимно-дополнительные координатное и импульсное представления в квантовой механике» | | 1 |
| <p>2.2. Характеристические функции.</p> <p>2.2.1. Представление характеристической функции распределения в виде свёртки в канонически-сопряженном пространстве.</p> <p>2.2.2. Вычисление среднего и моментов.</p> <p>2.2.3. Неполнота классической и полнота квантовой статистики.</p> <p>2.2.4. Связь характеристических функций с операторами координаты и импульса в координатном и импульсном представлении.</p> <p>2.2.5. Фундаментальные коммутационные соотношения и квантовые статистические явления.</p> <p>2.3. Точность статистических характеристик в квантовой информатике</p> <p>2.3.1. Неравенство Коши-Буняковского для векторов</p> | 11 | 4 | 3 | 7 | 4 часа Решение задач по теме «Точность статистических характеристик в квантовой информатике» | | 4 |

| | | | | | | | |
|--|----|---|---|---|---|--|---|
| <p>состояния и его статистическая интерпретация</p> <p>2.3.2. Неравенство Коши-Буняковского в приложении к случайным величинам</p> <p>2.3.3. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса</p> <p>2.3.4. Соотношение неопределенностей Шредингера-Робертсона</p> <p>2.3.5. Многомерное соотношение неопределенностей</p> <p>2.3.6. Понятие информации Фишера</p> <p>2.3.7. Неравенство Рао-Крамера</p> <p>2.3.8. Многомерное неравенство Рао-Крамера.</p> <p>2.3.9. Статистические свойства корневых оценок многопараметрических распределений вероятности.</p> <p>2.4. Проблема построения аксиоматики науки о случайном. Принципы квантовой информатики и шестая проблема Гильберта</p> <p>2.4.1. Постулаты квантовой информатики в контексте квантовых статистических явлений.</p> <p>2.4.2. Шестая проблема Гильберта . История вопроса и связь с квантовой информатикой.</p> | | | | | | | |
| <p>3. Основы томографии квантовых состояний</p> <p>3.1. Корневая оценка плотности</p> <p>3.1.1. Метод максимального правдоподобия и информационная матрица Фишера</p> | 12 | 1 | 1 | 2 часа Коллоквиум по темам «Метод максимального правдоподобия и информационная матрица | 4 | 1 час Решение задач по теме «Метод максимального правдоподобия и информационная | 8 |

| | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|--|---|
| <p>3.1.2. Корневой подход к оцениванию плотности. Пси – функция и уравнение правдоподобия</p> <p>3.1.3. Статистические свойства корневых оценок</p> <p>3.1.4. Набор плотностей распределений, обобщающий гауссово распределение. Корневая оценка плотности в базисе Чебышева- Эрмита.</p> <p>3.1.5. Некоторые другие важные наборы базисных состояний и их применение. Наборы функций, основанные на полиномах Лагерра, Кравчука, Шарлье и др.</p> <p>3.1.6. Оптимальные свойства корневых оценок. Сравнение корневой оценки плотности с ядерными и проекционными оценками.</p> <p>3.1.7. Аппроксимация распределений с тяжёлыми хвостами. Волновая функция, приводящая к распределениям Пирсона IV типа и базисный набор на ее основе</p> | | | | <p>Фишера» и « Статистические свойства корневых оценок»</p> | | <p>матрица Фишера» 7 часов Подготовка к коллоквиуму</p> | | |
| <p>3.2. Томография квантовых состояний, основанная на концепции адекватности, полноты и точности квантовых измерений</p> <p>3.2.1. Понятие протокола квантовых измерений. Амплитуда вероятности и интенсивность генерации событий. Аппаратная матрица. Неортогональное разложение единицы (POVM).</p> <p>3.2.2. Матрица измерений и её сингулярные значения. Полнота протокола квантовых измерений. Метод псевдо-инверсии Мура-Пенроуза</p> <p>3.2.3. Унифицированный метод квантовой томографии,</p> | 8 | 3 | 2 | | 5 | <p>3 часа Решение задач по теме «Точность восстановления квантовых состояний. Универсальное распределение для точности восстановления квантовых</p> | | 3 |

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|------------|--|--|
| <p>основанный на процедуре дополнения смешанного состояния до чистого. Алгоритм статистического восстановления квантовых состояний. Корневая оценка очищенного вектора состояния. Уравнение правдоподобия.</p> <p>3.2.4. Матрица полной информации для вектора очищенного состояния и её свойства.</p> <p>3.2.5. Точность восстановления квантовых состояний. Универсальное распределение для точности восстановления квантовых состояний.</p> <p>3.2.6. Проверка адекватности статистической модели квантового состояния. Критерий хи-квадрат. Оценка адекватного ранга квантового состояния.</p> <p>3.2.7. Примеры протоколов квантовых измерений. Протоколы, основанные на правильных многогранниках и многогранниках с высокой симметрией.</p> <p>3.2.8. Симметричные информационно полные протоколы. Протоколы, основанные на взаимно несмещённых базисах. Проектирование на запутанные состояния.</p> <p>3.2.9. Нижняя граница для неточности квантовых измерений. Понятие эффективности квантовых измерений. Эффективные и сверхэффективные протоколы.</p> <p>3.2.10. Адаптивные и байесовские стратегии томографии квантовых состояний.</p> <p>3.2.11. Проблема восстановления смешанных состояний, близких к чистым. Слабо-возмущающие квантовые измерения. Сверхэффективные адаптивные протоколы квантовых измерений, основанные на преобразованиях Лоренца.</p> | | | | | состояний» | | |
|--|--|--|--|--|------------|--|--|

| | | | | | | | | |
|--|----|---|---|--|----|--|--|---|
| <p>4. Томография оптических квантовых состояний.</p> <p>4.1. Преобразование Радона. Функция Вигнера.</p> <p>4.1.1. Радоновские образы. Теорема о центральном сечении. Формула обращения.</p> <p>4.1.2. Функция распределения квазивероятности Вигнера. Квадратурные состояния. Реконструкция функции Вигнера на основе обратного преобразования Радона. Ограниченность метода реконструкции квантовых состояний посредством обратного преобразования Радона.</p> <p>4.2. Статистическое восстановление оптических квантовых состояний на основе взаимно-дополнительных квадратурных квантовых измерений</p> <p>4.2.1 Пространство состояний Фока. Операторы сдвига и сжатия. Набор базисных функций, на основе сжатых сдвинутых фоковских состояний. Примеры его использования.</p> <p>4.2.2. Корневой подход к статистическому восстановлению квадратурных квантовых состояний.</p> <p>4.2.3. Дробное преобразование Фурье</p> <p>4.2.4. Уравнение правдоподобия для восстановления квадратурных квантовых состояний.</p> <p>4.2.5. Реконструкция квантового состояния и информация, содержащаяся в квантовых измерениях</p> <p>4.2.6. Критерий адекватности томографического эксперимента</p> <p>4.2.7. Эффективность квантовой томографии, основанной на регистрации фотонов.</p> <p>4.2.8. Полнота протокола квантовых измерений по отношению к решению обратной задачи.</p> <p>4.2.9. Универсальное распределение точности</p> | 18 | 8 | 5 | | 13 | 5 часов Решение задач по теме «Томография оптических квантовых состояний» | | 5 |
|--|----|---|---|--|----|--|--|---|

| | | | | | | | | |
|--|-----------|----|----|---|----|---|---|----|
| 4.2.10. Алгоритм разработки адекватной конечномерной модели | | | | | | | | |
| 4.3. Исследование статистики фотонов с использованием компаунд-распределения Пуассона и квадратурных измерений 4.3.1. Производящие функции, статистика фотонов и корреляции. Свойства производящих функций и статистических распределений. 4.3.2. Условные распределения, отвечающие вычитанию (отщеплению) фотонов, а также добавлению фотонов 4.3.3. Квадратурные распределения 4.3.4. Делитель пучка: перевод одномерного распределения в двумерное распределение, корреляция каналов 4.3.5. Многоуровневая иерархия компаунд-распределений Пуассона 4.3.6. Сжатый вакуум: производящие и корреляционные функции | | | | | | | | |
| Промежуточная аттестация - зачет | 18 | | 4 | | 4 | 14 часов | к | 14 |
| Итого | 72 | 18 | 16 | 2 | 36 | Подготовка промежуточной аттестации (зачету). | | 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 контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Разложение Шмидта и статистический анализ многомерных данных. SVD- разложение и моды Шмидта.
2. Гауссовы корреляции. Число Шмидта и коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции Шмидта.
3. Информационные статистические аспекты интерференционных экспериментов «который путь» с микрочастицами
4. Статистические характеристики дифракции микрочастиц на экране с произвольным числом щелей
5. Универсальное распределение для точности восстановления квантовых состояний.
6. Статистическое восстановление квадратурных квантовых состояний.
7. Статистическое восстановление тепловых квантовых состояний с отщеплением заданного числа фотонов

Типовые вопросы к зачету:

1. Статистическая интерпретация прямого и обратного преобразований Фурье. Координатное и импульсное распределения
- Принцип дополнительности Н. Бора.
2. Характеристические функции и их свойства.
3. Представление характеристической функции распределения в виде свёртки в канонически-сопряженном пространстве.
4. Неравенство Коши-Буняковского для векторов состояния и его статистическая интерпретация
5. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса
6. Соотношение неопределенностей Шредингера- Робертсона
7. Многомерное соотношение неопределенностей
8. Метод максимального правдоподобия и информационная матрица Фишера.
9. Неравенство Рао-Крамера
10. Корневой подход к оцениванию плотности. Пси – функция и уравнение правдоподобия
11. Статистические свойства корневых оценок
12. Матрица измерений и её сингулярные значения. Полнота протокола квантовых измерений.
13. Матрица полной информации для вектора очищенного состояния и её свойства.
14. Точность восстановления квантовых состояний. Универсальное распределение для точности восстановления квантовых состояний.
15. Проверка адекватности статистической модели квантового состояния. Критерий хи-квадрат. Оценка адекватного ранга квантового состояния.

16. Примеры протоколов квантовых измерений. Протоколы, основанные на правильных многогранниках и многогранниках с высокой симметрией.
17. Адаптивные и байесовские стратегии томографии квантовых состояний. Проблема восстановления смешанных состояний, близких к чистым. Слабо-возмущающие квантовые измерения. Сверхэффективные адаптивные протоколы квантовых измерений, основанные на преобразованиях Лоренца.
18. Уравнение правдоподобия для восстановления квадратурных квантовых состояний.
19. Производящие функции, статистика фотонов и корреляции. Свойства производящих функций и статистических распределений.
20. Условные распределения, отвечающие вычитанию (отщеплению) фотонов, а также добавлению фотонов

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

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

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

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

УМЕТЬ: анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области 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 квантовых вычислений (У2, СПК-2).

УМЕТЬ: организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 квантовых вычислений (З1, СПК-1).

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

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (ЗЗ, 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 квантовых вычислений (В1, СПК-1). | Отсутствие навыков | Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений | В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений | Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области квантовых вычислений |
| <i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений (В2, СПК-2). | Отсутствие навыков | Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений | В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений | В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений | Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области квантовых вычислений |

| | | | | | |
|---|---------------------------|--|--|--|---|
| <p><i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений (ВЗ, СПК-3).</p> | <p>Отсутствие навыков</p> | <p>Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений</p> | <p>В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений</p> | <p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений</p> | <p>Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области квантовых вычислений</p> |
| <p><i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области 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 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 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 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 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 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 квантовых вычислений</p> | <p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p> | <p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p> | <p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области квантовых вычислений</p> |
| <p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области 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 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 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 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 квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p> |

| | | | | | |
|---|--------------------------|---|---|---|--|
| <p>ЗНАТЬ: методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области 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 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 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 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 квантовых вычислений</p> |
| <p>ЗНАТЬ: способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области 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 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 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 квантовых вычислений</p> | <p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области квантовых вычислений</p> |

| | | | | | |
|---|-------------------|---|---|---|--|
| ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области 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 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 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 квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования | Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования |
|---|-------------------|---|---|---|--|

10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература

1. Нильсен М, Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация: Пер. с англ. Под ред. М.Н. Вялого и П.М. Островского с предисловием К.А. Валиева. - М.: Мир. 2006. 824 с.
2. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: Надежды и реальность. 2-е изд., исп. М.–Ижевск: НИЦ РХД, 2002. 320 с.
3. В.П. Шляйх, Квантовая оптика в фазовом пространстве. –М.: ФИЗМАТЛИТ, (2005),760с.
4. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. Москва: Физматлит, 2000. 896 р.
5. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая Оптика. Москва: Физматлит, 2003. 512 р.

Дополнительная литература

1. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // Успехи Физических Наук. 2005. Т.175. №1. С.3-39.
2. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Kulik S.P. et al. Statistical reconstruction of qutrits // Phys. Rev. A. 2004. Vol. 70. 042303. 16 p.

3. Bogdanov Yu.I., Chekhova M.V., Kulik S.P. et al. Qutrit state engineering with biphotons // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. 230503. 4p.
4. Ю.И. Богданов, Унифицированный метод статистического восстановления квантовых состояний, основанный на процедуре очищения // ЖЭТФ. 2009. Т.135. Вып.6.с.1068-1078.
5. Bogdanov Yu.I., Brida G, Genovese M., Kulik S.P., Moreva E.V., Shurupov A.P. Statistical Estimation of the Efficiency of Quantum State Tomography Protocols // Phys. Rev. Lett. 2010. V.105. 010404. 4p.
6. Yu. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, A. P. Shurupov Statistical Estimation of Quantum Tomography Protocols Quality // Phys. Rev. A. 2011. V.84. 042108. 19 p.
7. Богданов Ю.И., Авосопянц Г.В., Белинский Л.В., Катамадзе К.Г., Кулик С.П., Лукичев В.Ф. Статистическое восстановление оптических квантовых состояний на основе взаимно-дополнительных квадратурных квантовых измерений // ЖЭТФ. 2016. Т.150. №2. вып. 2(8). с. 246- 253.
8. Yu. I. Bogdanov, K. G. Katamadze, G. V. Avosopyants, L. V. Belinsky, N. A. Bogdanova, A. A. Kalinkin, S. P. Kulik Multi-photon subtracted thermal states: description, preparation and reconstruction // Physical Review A. 2017 V.96. № 6. 063803
9. James D.F., Kwiat P.G., Munro W.J., and White A.G. Measurement of qubits // Phys. Rev. A. 2001. V.64. 052312. 15p.
10. Lvovsky A.I., Raymer M.G. Continuous-variable optical quantum-state tomography // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 1. P. 299–332.

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 ЦКТ ФФ МГУ. 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 «Квантовая томография и обработка результатов квантовых измерений» 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.