

Рабочая программа дисциплины

1. Название дисциплины: Линейно-оптические квантовые вычисления

2. Уровень высшего образования – магистратура

3. Направление подготовки: 03.04.02 Физика (магистратура)

4. Аннотация:

Курс «Линейно-оптические квантовые вычисления» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области реализации алгоритмов квантовых вычислений с помощью линейных оптических устройств и одиночных фотонов. В рамках курса рассматриваются математические модели линейных оптических элементов, математическую модель системы неразличимых фотонов, распространяющихся в линейно-оптической схеме, различные способы кодировки квантовых состояний с помощью пространственной, поляризационной, частотной и временной степеней свободы фотонов, особенности реализации многокубитных квантовых гейтов в линейно-оптических системах, теоретические модели построения универсальных квантовых компьютеров с использованием вероятностных квантовых гейтов и примеры экспериментальной реализации квантовых вычислительных алгоритмов с помощью линейно-оптических 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 часа 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
1. Введение Обзор проблематики выбора физической системы для квантовых вычислений. Преимущества линейно-оптической системы. Основные линейные оптические элементы. Источники и детекторы фотонов. Альтернативные оптические системы для реализации квантовых алгоритмов – системы с непрерывными переменными. Особенности квантовых систем с непрерывными переменными.		2			2	3 час Знакомство с обзорами по теме линейно-оптических квантовых вычислений.		3

<p>2. Квантовые вычисления с помощью одиночных фотонов</p> <p>§1. Физика системы неразличимых фотонов. Фоковское состояние. Базис фоковских состояний. Понятие неразличимости. Эффект Хонга-Оу-Манделя. N-портовый интерферометр, унитарная матрица интерферометра, преобразование операторов рождения и уничтожения фотона в моде. Имманант матрицы, частные случаи – перманент и детерминант. Преобразование входного фоковского состояния линейным интерферометром, связь коэффициентов выходного состояния в фоковском базисе и перманентов матрицы. Постселекция выходных состояний.</p> <p>§2. Гейтовая модель линейно-оптических квантовых вычислений. Универсальный набор квантовых гейтов. Гейты CNOT и CZ. 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. Верхняя граница вероятности успешного срабатывания CZ-гейта. Оптимальный CZ-гейт в схеме с двумя фотонами. Условная реализация гейтов. Оптимальный CZ-гейт в схеме с 4 фотонами. Экспериментальная демонстрация двухкубитных</p>	16		<p>2 часа Коллоквиум по темам «Физика системы неразличимых фотонов» и «Гейтовая и кластерная модели линейно-оптических квантовых вычислений»</p>	18	<p>1 час Вывод формулы для эффекта Хонга-Оу-Манделя.</p> <p>1 час Вывод выражения для вероятности CZ гейта с использованием дополнительных ресурсов в модели КЛМ.</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по теме «Кластерная модель линейно-оптических квантовых вычислений».</p>		6
--	----	--	--	----	---	--	---

<p>гейтов. Экспериментальная демонстрация выполнения квантовых алгоритмов в гейтовой модели.</p> <p>§3. Кластерная модель линейно-оптических квантовых вычислений.</p> <p>Недостатки гейтовой модели КЛМ. Кластерное состояние. Свойства кластерных состояний. Парадигма квантовых вычислений, основанных на измерениях (MBQC). Симуляция гейтовой модели с помощью MBQC парадигмы. Протокол Йорана-Резника. Протокол Нильсена. Протокол Брауна-Рудольфа. Баллистические квантовые вычисления. Пороговое значение вероятности успешного срабатывания двухкубитного гейта для формирования универсального вычислительного кластерного состояния.</p>								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

<p>3. Особенности реализации линейно-оптических квантовых вычислительных устройств.</p> <p>§6. Оптические компоненты и вносимые ими ошибки. Архитектуры построения универсальных интерферометров. Схема Река и схема Клементса. Анализ качества преобразований, реализуемых N-портовыми интерферометрами. Проблема определения оптимальной интерферометрической схемы. Связь задачи о поиске оптимального интерферометра с выпуклой оптимизацией.</p> <p>§7. Модель источника фотонов. Учет конечной степени различимости фотонов. Учет вклада многофотонных состояний. Современные источники фотонов. Источник фотонов на основе эффекта спонтанного параметрического рассеяния. Учет потерь фотонов. Источник фотонов на основе эффекта четырехволнового смешения. Источники фотонов на основе одиночных эммитеров (холодные атомы и ионы, центры окраски в кристаллах, квантовые точки в полупроводниковых гетероструктурах).</p> <p>§8. Модель детектора фотонов. Учет конечной квантовой эффективности. Учет временных характеристик детектора. Детектор с разрешением по числу фотонов. Типы современных детекторов одиночных фотонов. Детекторы на основе лавинных фотодиодов. Сверхпроводниковые детекторы.</p> <p>§9. Устойчивость линейно-оптических вычислений к потерям фотонов. Устойчивость к дефектам линейных многокубитных гейтов. Схема линейно-оптического квантового компьютера устойчивого к ошибкам.</p>	10			10	<p>1 час Вывод формулы, выражающей заданное $SU(N)$ преобразование через $SU(2)$ преобразования .</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по темам «Источники одиночных фотонов» и «Детекторы одиночных фотонов».</p> <p>5 часов Подготовка к коллоквиуму</p>	10
---	----	--	--	----	--	----

<p>4. Неуниверсальные линейно-оптические квантовые вычислительные устройства</p> <p>§8. Задача boson sampling. Вычислительная сложность функции перманента матрицы. Задача сэмпинга из распределения, задаваемого эволюцией неразличимых фотонов в линейно-оптической схеме. Квантовое превосходство. Точный и приближенный boson sampling. Проблема верификации результатов boson sampling. Модификации boson sampling.</p> <p>§9. Линейно-оптические квантовые симуляторы. Реализациях квантовых вариационных алгоритмов с использованием линейно-оптических систем. Квантовая симуляция колебательных спектров молекул с помощью boson sampling.</p>	6			6	<p>1 час Повторение схемы доказательства сложности задачи точного boson sampling</p> <p>1 час Повторение лекционного материала по теме «Линейно-оптические квантовые симуляторы»</p>		17
<p>5. Квантовые вычисления с непрерывными переменными</p> <p>§10. Генерация и преобразование квантовых состояний с непрерывными переменными. Получение квантовых состояний с непрерывными переменными. Многомодовые перепутанные состояния. Критические параметры, определяющие качество перепутанных состояний. Сжатие как ресурс для реализации квантовых алгоритмов.</p> <p>§11. Квантовые алгоритмы с непрерывными переменными. Кластерные квантовые вычисления. Оценка параметров качества квантовых состояний с</p>					<p>2 часа Решение задач по теме «Генерация и преобразование квантовых состояний с непрерывными переменными»</p> <p>15 часов Подготовка к промежуточной аттестации (за-</p>		

непрерывными переменными для масштабируемых квантовых вычислений.						чету).		
Промежуточная аттестация - зачет								
Итого		18		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.

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

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Преобразования, выполняемые элементарными линейными оптическими элементами.
2. Эффект Хонга-Оу-Мандела.
3. Модель Книлла-Лафламма-Милберна.
4. Протокол Нильсена кластерных линейно-оптических квантовых вычислений
5. Баллистические квантовые вычисления.
6. Схемы Река и Клементса построения линейных интерферометров.
7. Современные источники одиночных фотонов.
8. Современные детекторы одиночных фотонов
9. Сложность boson sampling
10. Квантовые симуляции с помощью линейно-оптических систем.
11. Квантовые состояния с непрерывными переменными

Типовые вопросы к зачету:

1. Модели основных линейных оптических элементов. Светоделитель, фазовращатель и интерферометр Маха-Цандера.

2. Фоковские состояния света. Размерность базиса фоковских состояний. Размерность подсистемы.
3. Понятие неразличимости. Вывод общего выражения для эффекта Хонга-Оу-Манделя. Случай сбалансированного светоделителя.
4. Преобразование входного фоковского состояния унитарной матрицей линейно-оптической системы. Матрицы плотности подсистем.
5. Постселекция выходных состояний. Условное приготовление квантовых состояний.
6. Вероятностные двухкубитные гейты. Теорема о невозможности детерминистического измерения в полном белловском базисе в линейно-оптических системах.
7. Модель Книлла-Лафламма-Милберна. Гейт нелинейного сдвига фаз.
8. Квазидетерминистический двухкубитный CZ гейт в модели Книлла-Лафламма-Милберна.
9. Теорема о верхней границе вероятности успешного срабатывания CZ гейта, построенного без использования классической постобработки.
10. Оптимальный CZ гейт в линейной системе с двумя фотонами.
11. Оптимальный CZ гейт в системе с четырьмя фотонами.
12. Кластерные квантовые состояния. Свойства кластерных состояний.
13. Модель квантовых вычислений, основанная на измерениях. Симуляция гейтовой модели квантовых вычислений.
14. Кластерные линейно-оптические квантовые вычисления. Протокол Нильсена. Формула для вероятности квазидетерминистического CZ гейта.
15. Протокол Брауна-Рудольфа. Гейты слияния первого и второго типов.
16. Модуляционная неустойчивость интенсивного светового поля в среде с кубичной нелинейностью.
17. Баллистические квантовые вычисления. Пороговое значение вероятности успешного срабатывания многокубитных гейтов.
18. Универсальные архитектуры построения линейных интерферометров. Схемы Река и Клементсы, сравнительный анализ.
19. Определение оптимального линейно-оптического интерферометра, реализующего заданное преобразование. Системы полиномиальных уравнений для нахождения унитарной матрицы интерферометра.
20. Источники фотонов. Типы современных источников одиночных фотонов.
21. Детекторы фотонов. Типы современных детекторов одиночных фотонов.
22. Boson sampling. Постановка задачи. Сложность точной и приближенной задачи boson sampling.
23. Линейно-оптические квантовые симуляторы. Реализация симуляций с помощью boson sampling.
24. Квадратурные компоненты электромагнитного поля. Квантовые состояния с непрерывными переменными.
25. Сжатые и перепутанные состояния.
26. Способы измерения квантовых состояний с непрерывными переменными.
27. Квантовые гейты для систем с непрерывными переменными.

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>

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, 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. P. Kok, B. W. Lovett. Introduction to optical quantum information processing. Cambridge University Press, 2014.
2. H.-A. Bachor, T. C. Ralph. A guide to experiments in quantum optics. Wiley & Sons, 2004.
3. P. Kok, W. J. Munro, K. Nemoto, T. C. Ralph, J. P. Dowling, G. J. Milburn. Linear optical quantum computing with photonic qubits. Rev. Mod. Phys. 79, 135 (2007)
4. S.L. Braunstein, P. van Loock, Quantum information with continuous variables. Rev. Mod. Phys. Vol. 77, 513 (2005).
5. N.J. Cerf, G. Leuchs, E.S. Polzik, Quantum information with continuous variables of atoms and light. Imperial College Press, 2007.

Дополнительная литература

1. E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn. A scheme for efficient quantum computation with linear optics. Nature 409, 46-52 (2001)
2. 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)
3. M. A. Nielsen. Optical quantum computing using cluster states. Phys. Rev. Lett. 93, 0440503 (2004).

4. 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)
5. T. Rudolph. Why I am optimistic about the silicon-photonics route to quantum computing. APL Photonics 2, 030901 (2017)
6. S.L. Braunstein, Squeezing as an irreducible resource. Phys. Rev. A., vol. 71, 055801 (2005).
7. N.C. Menicucci, Fault-tolerant measurement-based quantum computing with continuous-variable cluster states. Phys. Rev. Lett., vol. 112, 120504 (2014).
8. S. Takeda, A. Furusawa, Universal quantum computing with measurement-induced continuous-variable gate sequence in a loop-based architecture. Phys. Rev. Lett., vol. 119, 120504 (2017).
9. J. Yoshikawa et al., Generation of one-million-mode continuous-variable cluster state by unlimited time-domain multiplexing. APL Photonics, vol. 1, No 6, 060801 (2016).

11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:

12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Для большей части тем курса имеются электронные презентации.

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 «Линейно-оптические квантовые вычисления» 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.