

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физические основы квантовой информатики
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: М.В. Федоров, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры лазерных систем и структурированных материалов 04.06.2020

## Аннотация

Одним из основных инструментов науки и технологий квантовой информатики является процесс генерации коррелированных пар фотонов, известный как Спонтанное Параметрическое Рассеяние Света (СПРС) в нелинейных двулучепреломляющих кристаллах. В рамках курса будет описана физика СПРС, его основные режимы и свойства генерируемых бифотонных состояний, одним из главных свойств которых является перепутывание (entanglement). Будет дано общее определение понятия перепутывания двухчастичных состояний, и его связь со знаменитым эффектом Эйнштейна-Подольского-Розена. Для состояний с непрерывными и дискретными переменными будет дано определение параметров, характеризующих степень перепутывания, таких как параметр К, основанный на разложении Шмидта для волновых функций, а также параметр R, определяемый как отношение ширин безусловного и условного одночастичных распределений. Будут подробно описаны свойства перепутывания простейших поляризационных бифотонных состояний – кутритов. Будет рассмотрено спектральное и угловое перепутывание СПРС состояний, будут описаны такие популярные явления как интерференционный эффект Хонга-Оу-Манделя и квантовая телепортация.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области лазерной спектроскопии, получения практических навыков решения задач, овладение методами их решения, а также понимание способов их практического применения.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области лазерной спектроскопии как дисциплины, интегрирующей общефизическую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей технологические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов основным принципам решения задач в области лазерной спектроскопии и освоение основных теоретических методов, применимых в этой области физики;
- формирование правильных теоретических подходов к выполнению исследований студентами в области лазерной спектроскопии в рамках выпускных работ на степень магистра.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Знать материал лекционного курса.

уметь:

Самостоятельно применять полученные знания для решения других задач.

владеть:

Аппаратом квантовой механики применительно к задачам квантовой информатики.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Понятие перепутывания двухчастичных состояний с непрерывными переменными. Разложение Шмидта. Параметр степени перепутывания $K$ на основе разложения Шмидта	3	3		3
2	Условные и безусловные одночастичные распределения двухчастичных состояний. Параметр степени перепутывания $R$ – отношение ширины безусловного и условного распределений. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена.	3	3		3
3	Спонтанное параметрическое рассеяние света	3	3		3
4	Кубиты, кудиты и поляризационные двухфотонные кутриты	3	3		3
5	Разложение Шмидта для бифотонных поляризационных кутритов. Векторы Стокса на сфере Пуанкаре.	3	3		3
6	Эффект Хонга-Оу-Манделя	3	3		3
7	Квантовая телепортация	3	3		3
8	Поляризационно-частотные бифотонные кукварты	3	3		3

9	Эффект протрансвенного сноса (walk-off) необкновенной волны накачки в нелинейном анизотропном кристалле и его роль в задаче получения бифотонных состояний с максимальной степенью углового перепутывани	3	3		3
10	Эффект спектрального сноса (walk-off) необкновенной волны накачки в нелинейном анизотропном кристалле и обусловленная этим аномально высокая стпень спектрального перепутывания	3	3		3
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

1. Понятие перепутывания двухчастичных состояний с непрерывными переменными. Разложение Шмидта. Параметр степени перепутывания  $K$  на основе разложения Шмидта

Будет изложено содержание теоремы Шмидта, дано определение мод Шмидта и параметров разложения как для волновой функции двухчастичного состояния, так и для соответствующей редуцированной матрицы плотности. Будет дано определение параметра степени перепутывания как обратного следа от «квадрата» редуцированной матрицы плотности.

2. Условные и безусловные одночастичные распределения двухчастичных состояний. Параметр степени перепутывания  $R$  – отношение ширин безусловного и условного распределений. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена.

Будут описаны два способа перехода от двух-частичных распределений к одночастичным условным и безусловным распределениям путем или иным переменным. Будет дано определение параметра степени перепутывания  $R$  как отношения ширин этих распределений. Будет продемонстрировано что в случае модельных двойных-гауссовых волновых функций  $R=K$ . Будет показано, что в эксперименте указанные ширины соответствуют результатам одночастичных измерений и измерений по схеме совпадений, что может быть использовано для прямого измерения степени перепутывания двухчастичных состояний. Будет дано осуждение парадокса Эйнштейна-Подольского-Розена и его интерпретация в терминах разложения Шмидта перепутанных состояний.

3. Спонтанное параметрическое рассеяние света

Будут описаны содержание эффекта спонтанного параметрического рассеяния Шмидта и его реализуемых режимов

4. Кубиты, кудиты и поляризационные двухфотонные кутриты

Будут даны определения элементарных квантовых однофотонных и двухфотонных, однг- и многомодовых состояний. Будут детально проанализированы свойства бифотонных поляризационных кутритов, их перепутывание и основные параметры степени перепутывания: конкарренс и параметр Шмидта  $K$ .

5. Разложение Шмидта для бифотонных поляризационных кутритов. Векторы Стокса на сфере Пуанкаре.

Будет дано описание структуры состояний поляризационных кутритов в представлении мод Шмидта. Будет проанализировано соотношение между степенью перепутывания и степенью поляризации кутритов. Будет описано описание свойств кутритов в терминах векторов Стокса на сфере Пуанкаре.

6. Эффект Хонга-Оу-Манделя

Будет дано описание интерференционного эффекта Хонга-Оу-Манделя. Будет представлено исследование ширины провала Хонга-Оу-Манделя от соотношения поляризаций фотонов и от времени задержки одного из них.

7. Квантовая телепортация

Будет дано описание одной из экспериментально реализованных схем квантовой телепортации. Будет обсужден вопрос о степени квантовости этого явления.

8. Поляризационно-частотные бифотонные кукварты

Будет дано описание свойств двухфотонных состояний с двумя степенями свободы, поляризационной и частотной, при том что в каждой из СПРС пар частоты фотонов различны и соответствующая частотная переменная может принимать только одно из двух различных значений, высокой или низкой частоты. Такие состояния являются суперпозицией четырех базисных состояний и поэтому называются куквартами. Степень перепутывания таких состояний в целом выше чем у поляризационных кутритов, и будут продемонстрировано, каковы в этом случае параметры степени перепутывания.

9. Эффект пространственного сноса (walk-off) необыкновенной волны накачки в нелинейном анизотропном кристалле и его роль в задаче получения бифотонных состояний с максимальной степенью углового перепутывания

Будет дано описание эффекта пространственного сноса (walk-off) волны накачки, распространяющейся в кристалле по типу необыкновенной волны. Будет продемонстрировано, каким образом снос радикально влияет на степень углового перепутывания состояний фотонов, распространяющихся в плоскости оптической оси кристалла.

10. Эффект спектрального сноса (walk-off) необыкновенной волны накачки в нелинейном анизотропном кристалле и обусловленная этим аномально высокая степень спектрального перепутывания

Будет рассмотрено спонтанное параметрическое рассеяние в режиме коротких импульсов накачки с широким спектром. Будет продемонстрировано, что в этом случае имеет место эффект спектрального сноса, обуславливающий возникновение аномально высокой степени спектрального перепутывания.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном, доской.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 8 : Электродинамика сплошных сред : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— М. : Наука, 1992, 2001, 2003, 2005 .— 662 с.
2. Фотоны и нелинейная оптика [Текст]/Д. Н. Клышко, -М., Наука, 1980

Дополнительная литература

1. M.V. Fedorov, N.I. Miklin, Schmidt modes and entanglement, Contemporary Physics, v. 55, No. 2, 94–109 (2014)

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как OpenOffice.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра лазерных систем и структурированных материалов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	М.В. Федоров, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физические основы квантовой информатики» обучающийся должен:

### знать:

Знать материал лекционного курса.

### уметь:

Самостоятельно применять полученные знания для решения других задач.

### владеть:

Аппаратом квантовой механики применительно к задачам квантовой информатики.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия или в конце занятия по пройденной теме.



#### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

1. Определение перепутывания двухчастичных состояний
2. Что такое кубит, кудиты, куттры и кукватры,
3. Каковы основные параметры степени перепутывания бифотонных поляризационных кутритов
4. Что такое конкарренс двухкубитных состояний?
5. Что такое сфера Пуанкаре и векторы Стокса

Примеры контрольных заданий:

1. Найти конкарренс бифотонных поляризационных кутритов
2. Найти параметр (угол) сдвига необыкновенной волны в кристалле ВВО при длине волны 0.5 мкм
3. Найти конкарренс двухкубитных куквартов
4. Сформулировать условия фазового синхронизма в координатном и некоординатном режима спонтанного параметрического рассеяния
5. Описать зависимость правила Хонга-Щу-Манделя от соотношения поляризаций фотонов

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Разложение Шмидта
2. Эффект Хонга-Оу-Манделя.

Билет 2.

1. Перепутывные и неперепутанные поляризационные двухфотонные состояния
2. Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

Билет 3.

1. Параметр степени перепутывания основанный на разложении Шмидта
2. Степень поляризации и векторы Стокса бифотонных кутритов

Билет 4.

1. Условные и безусловные одночастичные распределения двухчастичных состояний
2. Квантовая телепортация

Билет 5.

1. Соотношение между параметром степени перепутывания Шмидта и конкарренс двухкубитных поляризационных кутритов.
2. Представление бифотонных частотно-поляризационных состояний через волновые функции состояний Белла.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении дифференцированного зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.