

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ МЕТРОЛОГИИ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практических подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
8	2	72	6	24	0	42	0	3	
Итого	2	72	6	24	0	10	42	0	

## АННОТАЦИЯ

Целями освоения учебной дисциплины является ознакомление студентов с современными представлениями квантовой теории и ее применение для задач метрологии. В рамках изучения курса рассматриваются следующие темы: Матричная формулировка квантовой механики. Техника бра-кет. Преобразование базисов. Операторы. Собственные векторы и собственные числа. Гармонический осциллятор в классической механике. Гамильтониан осциллятора. Порядки величин в задаче о гармоническом осцилляторе. Собственные значения и собственные функции гамильтониана гармонического осциллятора. Спектр осциллятора. Колебания ядер двухатомной молекулы. Ангармонизм. Уравнение Шредингера для атома водорода. Квантовые числа атома водорода. Классификация и обозначение состояний. Правила отбора. Спектральные серии атома водорода. Спин-орбитальное взаимодействие. Квантование моментов импульса и их проекций. Понятие самосогласованного поля. Периодическая система. Принцип Паули. Сложение орбитальных и спиновых моментов. Типы связи. Нормальная связь. Двухуровневые системы. Осцилляции Раби и частота Раби. Трехуровневые системы. Линейная квадрупольная ловушка. Уравнения Матье. Области стабильности в ловушке Пауля. Макродвижение. Режим Лэмба – Дике. Критерий Лэмба – Дике. Конструкция ловушки. Нормальные колебания и их квантование. Двухионный кристалл. Взаимодействие ионной цепочки с лазерным излучением в режиме Лэмба – Дике. Лазерное и симпатическое охлаждение. Спектроскопия атомных состояний на основе квантовой логики. Понятие кубита. Примеры реализации кубитов. Задача Дойтча – Джоза. Логические операции на квантовых регистрах. Алгоритм Дойтча – Джоза. Модельный квантовый компьютер.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины является ознакомление студентов с современными представлениями квантовой теории и ее применением для задач метрологии.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс предполагает знание основ квантовой физики.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание	Код и наименование индикатора достижения профессиональной
--	---------------------------	---	---

		(профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	компетенции
научно-исследовательский			
Исследование, разработка оптических и оптико-электронных приборов для нужд метрологии, в том числе, создания стандартов времени и частоты нового поколения	Научно-исследовательский процесс создания новых стандартов времени и частоты	<p>ПК-1.1 [1] - Способен к проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области физики конденсированного состояния вещества и лазерной физики с целью создания новых эталонов, методик ведения измерений и средств измерений с их последующей аттестацией и вводом в реестр средств измерений для нужд нанометрологии</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>З-ПК-1.1[1] - Знать основы физик конденсированного состояния вещества и лазерной физики, основы методик ведения измерений; У-ПК-1.1[1] - Уметь использовать знания для создания новых эталонов, методик ведения измерений и средств измерений с их последующей аттестацией и вводом в реестр;</p> <p>В-ПК-1.1[1] - Владеть навыками работы с основными средствами технических измерений, применяемыми для</p>
Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной техники и лазерных технологий; - математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом;	процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное моделирование в лазерной технике и лазерных	<p>ПК-1 [1] - Способен к математическому моделированию процессов и объектов лазерной техники и технологий на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и самостоятельно разработанных программных продуктов</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004, 40.011</p>	<p>З-ПК-1[1] - Знать возможности стандартных пакетов автоматизированного проектирования при математическом моделировании объектов лазерной техники и технологий.;</p> <p>У-ПК-1[1] - Уметь решать типичные математические задачи на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования;</p> <p>В-ПК-1[1] - Владеть навыками самостоятельной разработки программ при математическом моделировании процессов и объектов лазерной техники и</p>

<p>проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;</p>	<p>технологиях.</p>		<p>технологий</p>
<p>Анализ поставленной задачи исследований в области лазерной техники и лазерных технологий; - математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований, разработка программ и их отдельных блоков, отладка и настройка для решения задач лазерной техники и лазерных технологий; проведение экспериментальных исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом; проведение измерений по заданным методикам с выбором технических средств и обработкой результатов; составление описаний проводимых исследований и</p>	<p>процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом, включая биологические объекты; лазерные приборы, системы и технологии различного назначения; процессы генерации, усиления, модуляции, распространения и детектирования лазерного излучения; программное обеспечение и компьютерное моделирование в лазерной технике и лазерных технологиях.</p>	<p>ПК-3 [1] - Способен к наладке, настройке, юстировке и опытной проверке приборов и систем</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004, 40.011</p>	<p>3-ПК-3[1] - знать основы теории измерений, основы работы с измерительной аппаратурой, основы оптико-физических измерений; ; У-ПК-3[1] - Уметь - пользоваться основными измерительными и сервисными приборами - юстировать оптические установки ; В-ПК-3[1] - Владеть методами и приемами наладки, настройки, юстировки и опытной проверки приборов и систем.</p>

разрабатываемых проектов; осуществление наладки, настройки, юстировки и опытной проверки лазерных приборов и лазерных технологических систем;			
проектно-конструкторский			
Организация и планирование производственного процесса; наладка технологического оборудования; изготовление оптических волокон; контроль качества изготовления оптических волокон	Производство легированных редкоземельными ионами оптических волокон, включающее в себя производство заготовок, вытяжку активного оптического волокна и его тестирование	ПК-1.2 [1] - Способен к разработке и исследованию в области лазерной спектроскопии; эффектов когерентного пленения населенности уровней; оптических и ядерных стандартов частоты  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.038	З-ПК-1.2[1] - Знание основы лазерной спектроскопии, эффектов когерентного пленения населенности уровней, оптических и ядерных стандартов частоты; У-ПК-1.2[1] - Уметь использовать в своей профессиональной деятельности основные методики и средства измерения для разработок в области лазерной спектроскопии; эффектов когерентного пленения населенности уровней; оптических и ядерных стандартов частоты; В-ПК-1.2[1] - Владеть основами разработки и исследования оптических систем для лазерной спектроскопии; эффектов когерентного пленения населенности уровней; оптических и ядерных стандартов частоты

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
Профессиональное	Создание условий,	1.Использование

воспитание	<p>обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (В22)</p>	<p>воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2. Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного колlettивизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p>
------------	---	--

## 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>8 Семестр</i>						
1	Техника бра-кет. Гармонический осциллятор. Спин. Атом водорода. Многоэлектронные атомы	1-8	6/16/0		25	КИ-8	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
2	Двухуровневые и трехуровневые системы. Ионные ловушки. Система двух ионов в ионной ловушке. Биты и кубиты. Квантовые компьютеры	9-12	0/8/0		25	КИ-12	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		6/24/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	3	3-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1, 3-ПК-1.1, У-ПК-1.1, В-ПК-1.1, 3-ПК-1.2, У-ПК-1.2, В-ПК-1.2, 3-ПК-3, У-ПК-3, В-ПК-3

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
3	Зачет

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	8 Семестр	6	24	0
1-8	<b>Техника бра-кет. Гармонический осциллятор. Спин. Атом водорода. Многоэлектронные атомы</b>	6	16	0
1 - 8	Тема 1 Матричная формулировка квантовой механики. Техника бра-кет. Преобразование базисов. Операторы. Собственные векторы и собственные числа. Гармонический осциллятор в классической механике. Гамильтониан осциллятора. Порядки величин в задаче о гармоническом осцилляторе. Собственные значения и собственные функции гамильтониана гармонического осциллятора. Спектр осциллятора. Колебания ядер двухатомной молекулы. Ангармонизм. Уравнение Шредингера для атома водорода. Квантовые числа атома водорода. Классификация и обозначение состояний. Правила отбора. Спектральные серии атома водорода. Спин-орбитальное взаимодействие. Квантование моментов импульса и их проекций. Понятие самосогласованного поля. Периодическая система. Принцип Паули. Сложение орбитальных и спиновых моментов. Типы связи. Нормальная связь.	Всего аудиторных часов 6 Онлайн 0	16 0	0
9-12	<b>Двухуровневые и трехуровневые системы. Ионные ловушки. Система двух ионов в ионной ловушке. Биты и кубиты. Квантовые компьютеры</b>	0	8	0
9 - 12	Тема 9 Двухуровневые системы. Осцилляции Раби и частота Раби. Трехуровневые системы. Линейная квадрупольная ловушка. Уравнения Матье. Области стабильности в ловушке Пауля. Макродвижение. Режим Лэмба – Дике. Критерий Лэмба – Дике. Конструкция ловушки. Нормальные колебания и их квантование. Двухионный кристалл. Взаимодействие ионной цепочки с лазерным излучением в режиме Лэмба – Дике. Лазерное и симпатическое охлаждение. Спектроскопия атомных состояний на основе квантовой логики. Понятие кубита. Примеры реализации кубитов. Задача Дойтча – Джоза. Логические операции на квантовых регистрах. Алгоритм Дойтча – Джоза. Модельный квантовый компьютер.	Всего аудиторных часов 0 Онлайн 0	8 0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
-------------	---------------------

ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс реализует компетентностный подход и предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-1	З-ПК-1	3, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-1	3, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-1	3, КИ-8, КИ-12
ПК-3	З-ПК-3	3, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-3	3, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-3	3, КИ-8, КИ-12
ПК-1.1	З-ПК-1.1	3, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-1.1	3, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-1.1	3, КИ-8, КИ-12
ПК-1.2	З-ПК-1.2	3, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-1.2	3, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-1.2	3, КИ-8, КИ-12

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко иочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69		E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64	3 – «удовлетворительно»		
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ S39 Advanced Quantum Mechanics : , Schwabl, Franz. , Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,, 2008
2. ЭИ М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, Опенов Л.А., Маслов М.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
3. 53 М31 Введение в физику наноструктур : учебное пособие для вузов, Опенов Л.А., Маслов М.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
4. ЭИ Б 18 Квантовая механика : учебное пособие, Байков Ю. А., Кузнецов В. М., Москва: Лаборатория знаний, 2020

5. ЭИ Б 82 Квантовая статистическая механика. : учебное пособие, Кондратьев А. С., Борисёнок С. В., Москва: Физматлит, 2011

6. ЭИ К31 Методы точной диагонализации в квантовой физике : учебное пособие, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 539.1 Б90 Атомная физика. Освоение через задачи : , Кимбелл Д., ДеМилль Д., Будкер Д., Москва: Физматлит, 2009

2. 53 Н66 Квантовые вычисления и квантовая информация : , Чанг И., Нильсен М., Москва: Мир, 2006

3. 539.1 Б26 Основы атомной физики : , Ельяшевич М.А., Барсуков О.А., Москва: Научный мир, 2006

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

### **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

### **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При изучении курса студенту необходимо: усвоить матричную формулировку квантовой механики, формализм вторичного квантования, основные положения теории многоэлектронных атомов, схемы и характеристики ионных ловушек, основные положения квантовой теории информации; уметь применять теоретические знания для решения задач и исследования моделей в области атомной физики, квантовой теории информации; владеть методами вторичного квантования, формализмом атомной физики, методами квантовой теории информации.

Текущий контроль представлен следующим видом аттестации:

– Контроль итогов

На выбор преподавателя студенту выдается 5 вопросов из списка вопросов. Время на подготовку – 20 минут. В рамках предложенных тем вопросов, преподаватель может задавать обобщающие вопросы, охватывающие несколько тем, или конкретные задачи-проблемы группе

(два и более) студентов с целью оценить работу студентов в коллективе, а так же роль и активность отдельных студентов.

Методика проведения оценивания студентов на рубежном контроле основывается на «Контроле итогов» (КИ). В рамках данной методики, оценка в баллах выставляется студенту на основании результатов Текущего контроля отдельно для первой половины семестра (КИ-8) и отдельно для второй (КИ-15). Успешное прохождение студентом рубежного контроля отвечает диапазону 15-25 баллов по итогам каждого КИ.

Форма реализации промежуточного контроля - зачёт. К зачёту допускаются студенты, имеющие по итогам КИ-8 и КИ-15 в сумме не менее 30 баллов. Максимальная оценка на зачёте составляет 50 баллов.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

При изучении курса студенту необходимо: усвоить матричную формулировку квантовой механики, формализм вторичного квантования, основные положения теории многоэлектронных атомов, схемы и характеристики ионных ловушек, основные положения квантовой теории информации; уметь применять теоретические знания для решения задач и исследования моделей в области атомной физики, квантовой теории информации; владеть методами вторичного квантования, формализмом атомной физики, методами квантовой теории информации.

Текущий контроль представлен следующим видом аттестации:

– Контроль итогов

На выбор преподавателя студенту выдается 5 вопросов из списка вопросов. Время на подготовку – 20 минут. В рамках предложенных тем вопросов, преподаватель может задавать обобщающие вопросы, охватывающие несколько тем, или конкретные задачи-проблемы группе (два и более) студентов с целью оценить работу студентов в коллективе, а так же роль и активность отдельных студентов.

Методика проведения оценивания студентов на рубежном контроле основывается на «Контроле итогов» (КИ). В рамках данной методики, оценка в баллах выставляется студенту на основании результатов Текущего контроля отдельно для первой половины семестра (КИ-8) и отдельно для второй (КИ-15). Успешное прохождение студентом рубежного контроля отвечает диапазону 15-25 баллов по итогам каждого КИ.

Форма реализации промежуточного контроля - зачёт. К зачёту допускаются студенты, имеющие по итогам КИ-8 и КИ-15 в сумме не менее 30 баллов. Максимальная оценка на зачёте составляет 50 баллов.

Автор(ы):

Васильев Олег Станиславович, к.ф.-м.н.

Борисюк Петр Викторович, к.ф.-м.н., доцент

Рецензент(ы):

Пальчиков В.Г.