

«УТВЕРЖДАЮ»

директор Института металлургии  
и промышленной инженерии



Турсыбекова Г.С.

заведующий кафедрой  
инженерной физики

Бейсенов Р.Е.

3 декабря 2019 г.

## СИЛЛАБУС

Дисциплина РНУ1492 «Квантовая механика»

для специальностей 5B071000 «Материаловедение и технология новых материалов»,  
5B072300 «Техническая физика»

3 кредита, 2/0/1

Семестр: весенний, 2019/20 учебный год

Институт металлургии и промышленной инженерии  
Кафедра инженерной физики

1. Информация о преподавателе

профессор Мустафин Алмаз Тлемисович (лекции и практические занятия)

Офисные часы – будет объявлено дополнительно

E-mail: a.mustafin@satbayev.university

2. Краткое содержание курса

Дуализм явлений микромира, дискретные свойства волн, волновые свойства частиц. Соотношение неопределённостей. Принцип суперпозиции. Наблюдаемые и состояния. Чистые и смешанные состояния. Эволюция состояний и физических величин. Соотношения между квантовой и классической механикой. Теория представлений. Общие свойства одномерного движения гармонического осциллятора. Туннельный эффект. Квазиклассическое движение. Теория возмущений. Теория момента импульса. Движение в центрально-симметричном поле. Спин. Принцип тождественности одинаковых частиц. Релятивистская квантовая механика. Атом. Периодическая система элементов. Химическая связь, молекулы. Квантование электромагнитного поля. Общая теория переходов. Вторичное квантование. Системы с переменным числом частиц. Теория рассеяния.

3. Краткое описание дисциплины. Планируемые результаты освоения дисциплины

Дисциплина «Квантовая механика» относится к профессиональному циклу модульной образовательной программы. Цель данного курса – дать обучающимся достаточно полное и строгое представление о закономерностях присущих явлениям микромира и математическом аппарате, позволяющем адекватно описывать эти явления.

Знания, умения и навыки, получаемые в результате освоения дисциплины:

- Знать: основные положения квантовой механики, элементы теории представлений, решения простейших задач квантовой механики, приближённые методы квантовой механики (теория возмущений, квазиклассическое приближение, прямой вариационный метод), основные идеи и подходы к решению задач рассеяния, основы теории атомов и молекул, обобщения квантовой механики на релятивистский случай.
- Уметь: использовать математический аппарат квантовой механики в нерелятивистском и релятивистском случаях, физически интерпретировать квантовые процессы, применять полученную теоретическую базу для решения конкретных практических задач, грамотно работать с научной литературой с использованием новых информационных технологий.
- Владеть основными методами научных исследований, навыками проведения физического (лабораторного) эксперимента, статистической обработки экспериментальных данных с помощью современных информационных технологий.

Формируемые компетенции: способность собирать, обобщать и интерпретировать с использованием современных информационных технологий информацию, необходимую для формирования суждений по соответствующим специальным, научным, социальным и этическим проблемам (ОК-11); способность к правильному использованию общенаучной и специальной терминологии (ОК-12); способность использовать базовые теоретические знания (в том числе по дисциплинам профилизации) для решения профессиональных задач (ПК-1); способность применять на практике базовые профессиональные навыки (ПК-2).

4. Пререквизиты

Математический анализ; методы математической физики; молекулярная физика и термодинамика; теоретическая механика; электричество и магнетизм; колебания и волны; оптика; атомная физика.

5. Постреквизиты

Статистическая физика и термодинамика; физика конденсированного состояния; теоретические основы для самостоятельных исследований в рамках подготовки дипломной работы.

6. Список литературы для изучения

Основная

1. Мултановский В.В., Василевский А.С. Курс теоретической физики: Квантовая механика: Учебн. пособие. М.: Просвещение, 2011.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). 6-е изд. М.: Физматлит, 2004.
3. Griffiths D.J. Introduction to quantum mechanics. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005. ix, 468 p.
4. Шифф Л. Квантовая механика. 2-е изд. М.: Иностранная литература, 1959.

Дополнительная

5. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 8, 9. Квантовая механика. М.: Мир, 1977.
6. Савельев И.В. Основы теоретической физики: Учебн. руководство. Т. 2. Квантовая механика. 2-е изд. М.: Наука. Физматлит, 1996.
7. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. Курс теоретической физики. Т. 2. Квантовая механика. Квантовая статистика и физическая кинетика. 2-е изд. М.: Наука, 1971.
8. Ферми Э. Лекции по квантовой механике. 2-е изд. Ижевск: НИЦ «РХД», 2000.

7. Календарно-тематический план

Неделя	Аудиторные занятия			№ задания для СРС
	Лекции	Практические и СРСП	Главы по учебнику	
1	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ. Проблема стабильности атомов и излучения света атомами. Обнаружение корпускулярных свойств света. Эффект Комптона. Открытие дискретных уровней энергии атома. Полуклассическая теория Бора. Гипотеза де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм. ФУНКЦИЯ СОСТОЯНИЯ. Необходимость вероятностно-статистической интерпретации волн де Бройля. Невозможность последовательного использования классических представлений о движении частицы. Волновая функция (функция состояния). Принцип суперпозиции состояний.	Теоретические и экспериментальные работы, инициировавшие возникновение квантовой механики. Корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц: почему ни модель «материальная точка», ни модель «плоская волна» неадекватны микрочастице? Математический аппарат теории вероятностей.	Гл. 1, пп. 1, 2.	
2	УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА. Вид уравнения и общие свойства его решений. Стационарные состояния. Плотность потока вероятности. Закон сохранения числа частиц. Волновая функция свободного движения частицы. СООТНОШЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ. Состояние с неопределённым значением импульса. Волновой пакет. Соотношения неопределённости Гейзенберга. Соотношения неопределённости и измерение	Решение задач на темы: волны де Бройля, соотношения неопределённости, полуклассическая теория Бора.	Гл. 1, пп. 3, 4.	1

Неделя	Аудиторные занятия			№ задания для СРС
	Лекции	Практические и СРСП	Главы по учебнику	
	физических величин. Соотношение неопределённостей для энергии и времени.			
3	ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ БАРЬЕРЫ. Фinitное и инфинитное движения. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме. Прямоугольный потенциальный барьер.	Задача на прохождение потенциального барьера. Задача о трёхмерной потенциальной яме.	Гл. 2, п. 5.	
4	ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР. Постановка задачи. Решение уравнения Шрёдингера для гармонического осциллятора. Анализ решения задачи о гармоническом осцилляторе. Квазиклассическое приближение.	Системы, поведение которых можно моделировать квантовым осциллятором. Полиномы Эрмита.	Гл. 2, п. 6.	2
5	ЛИНЕЙНЫЕ САМОСОПРЯЖЁННЫЕ ОПЕРАТОРЫ. Разложение функций в обобщённый ряд и интеграл Фурье. Линейные операторы. Собственные функции и собственные значения операторов. Самосопряжённые операторы. АКСИОМАТИКА КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. Математический аппарат квантовой механики. Операторы и допустимые значения физических величин. Описание состояния квантовой системы и его изменения со временем. Вероятности отдельных значений физической величины. Вычисление средних значений физических величин. Коммутация операторов – условие существования определённых значений двух физических величин в одном и том же состоянии системы. О связи математического аппарата квантовой механики с опытом и классической механикой. К вопросу о размерностях в квантовой механике.	Ортонормированная система функций. $\delta$ -функция. Правило вычисления коэффициентов Фурье. Примеры сложения и умножения операторов. Операторное уравнение для собственных функций. Примеры собственных функций и собственных значений. Постулаты, связывающие математический аппарат квантовой механики с физическими объектами. Физический смысл ситуации, при которой величина не имеет определённого значения. Математическое описание этой ситуации. Что происходит при реальном измерении в таком случае.	Гл.3, пп. 7, 8.	
6	ИЗМЕНЕНИЕ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН СО ВРЕМЕНЕМ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ. Изменение средних значений физических величин со временем. Уравнения движения в форме Гейзенберга. Уравнения Эренфеста. Переход от квантовых соотношений к классическим. Законы сохранения физических величин в квантовой механике. Связь законов сохранения с инвариантностью оператора Гамильтона относительно преобразований симметрии. Связь законов сохранения импульса, момента импульса и энергии со свойствами пространства и времени. Чётность и закон сохранения чётности.	Вывод теорем Эренфеста и качественный анализ их содержания. Законы сохранения в квантовой механике и условия, в которых они выполняются. Связь между законами сохранения и уравнением Шрёдингера, с одной стороны, симметриями пространства-времени – с другой. Определение (по функциям состояния) чётности состояний частицы в потенциальной яме и гармонического осциллятора. Расчёт чётности кванта, испускаемого при переходе между соседними уровнями для ямы, для осциллятора.	Гл. 3, п. 9.	3
7	ДВИЖЕНИЕ В ЦЕНТРАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОМ ПОЛЕ. Свойства оператора момента импульса и его проекций. Собственные значения и собственные функции операторов $L^2$ и $L_z$ . Движение частицы в центрально-симметричном поле. ЗАДАЧА ОБ АТОМЕ ВОДОРОДА. Постановка задачи об атоме водорода. Решение	Специфика квантово-механического момента импульса по сравнению с классическим. Оператор момента импульса и его собственные функции. Сохраняющиеся и имеющие определённое значение величины при движении частицы в кулоновском поле. Основные этапы решения задачи об атоме водорода. Применение результатов решения	Гл. 4, пп. 10, 11.	

Неделя	Аудиторные занятия			№ задания для СРС
	Лекции	Практические и СРСП	Главы по учебнику	
	радиального уравнения. Итоги решения задачи об атоме водорода. Водородоподобные системы.	для описания пространственной структуры атома. Построение рисунков электронных облаков ряда состояний атома водорода.		
8	ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА АТОМА ВОДОРОДА В СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЯХ. Угловое и радиальное распределение плотности электронного облака. Вращение электронного облака. Орбитальный магнитный момент электрона. Спектр водорода. СПИН ЭЛЕКТРОНА. Гипотеза о спине электрона. Математическое описание спина электрона. Спиновые операторы и функции. Описание квантового состояния электрона с учётом его спина.	Спин как совокупность определённых свойств элементарной частицы. Сопоставление формул спинового и орбитального механического моментов. Связь магнитного спинового момента с зарядом. Гиромагнитное отношение и его выражение через другие величины, характеризующие механические и магнитные свойства частицы. Смысл различных конкретных наборов квантовых чисел электрона в атоме.	Гл. 4, пп. 12, 13.	4
1-я (промежуточная) аттестация				
9	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ СИСТЕМЫ МИКРОЧАСТИЦ. Волновая функция системы частиц. Операторы физических величин, характеризующих систему в целом. Задача двух частиц. Волновая функция системы взаимодействующих частиц. Тождественность частиц одного и того же вида и принцип Паули. Волновые функции для систем, состоящих из одинаковых бозонов и фермионов. Запрет Паули. Обменное взаимодействие. МОМЕНТ ИМПУЛЬСА ДЛЯ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ. Правило сложения моментов. Свойства оператора момента импульса системы. Два способа описания системы, состоящей из двух взаимодействующих частей. Задача о сложении моментов импульса.	Сопоставление аксиоматических положений механики частицы и системы частиц. Обобщение основных понятий механики частицы на систему. Невозможность различения микрочастиц одного и того же вида друг от друга в одном и том же состоянии. Влияние принципа тождественности на операторы и функции состояния. Общий вид симметричных и антисимметричных функций состояния для системы из двух, трех частиц без учёта спина, с учётом спина. Различные формулировки принципа Паули. Правила сложения моментов импульса и их графическая иллюстрация при сложении двух моментов.	Гл. 5, пп. 14, 15.	
10	ПРИБЛИЖЁННЫЕ МЕТОДЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. Волновые функции и уровни энергии в первом приближении теории возмущений. Уровни энергии во втором приближении теории возмущений. Теория возмущений при наличии вырождения. Тонкая структура спектра атома водорода.	Применение теории возмущений в качественном анализе снятия вырождения уровней энергии некоторой системы за счет возмущения.	Гл. 5, п. 16.	5
11	АТОМ ГЕЛИЯ. Энергия и функция состояния атома гелия в нулевом приближении теории возмущений. Классификация состояний атома гелия. Парагелий и ортогелий. Уровни энергии атома гелия в первом приближении теории возмущений. Энергия обменного взаимодействия. СТРУКТУРА И СОСТОЯНИЯ МНОГОЭЛЕКТРОННЫХ АТОМОВ. Уровни энергии валентного электрона в щелочном атоме. Теория периодической системы элементов. Рентгеновские спектры атомов.	Характер силового поля, в котором движется валентный электрон в атоме щелочного элемента. Смысл выражения: «Вырождение уровня энергии по квантовому числу $\ell$ снимается, если поле имеет некулоновский характер». Допущения, лежащие в основе теории периодической системы элементов. Гамильтониан задачи об атоме гелия; смысл его слагаемых. Природа двух разновидностей состояний атомов гелия. Возникновение обменных взаимодействий и связь их со спинами частиц Связь между величиной	Гл. 6, пп. 17, 18.	

Неделя	Аудиторные занятия			№ задания для СРС
	Лекции	Практические и СРСП	Главы по учебнику	
	Стационарные состояния и уровни энергии многоэлектронных атомов. Понятие о методе самосогласованного поля.	взаимодействий в атоме с приближениями в анализе атомных уровней энергии. Примеры электронных конфигураций и соответствующих им термов.		
12	ПОНЯТИЕ О ПРИРОДЕ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ. Расчёт энергии связи молекулы водорода по методу Гайтлера–Лондона. Адиабатическое приближение. Наглядная интерпретация сил химической связи между атомами. Силы Ван-дер-Ваальса. АТОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ. Магнитный момент атома. Уровни энергии атома, находящегося в магнитном поле. Парамагнитные и диамагнитные свойства атомов.	Разбор этапов решения задачи о молекуле водорода на качественном уровне: постановка задачи, гамильтониан и т.д.	Гл. 6, пп. 19, 20.	6
13	ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ. Функция состояния нестационарной задачи в разложении по стационарным состояниям. Вычисление коэффициентов разложения при «включении» и «выключении» возмущения. Вероятность квантовых переходов. Вероятность переходов в сплошном спектре. Статистика процесса квантовых переходов. Квазистационарные состояния. Ширина энергетических уровней. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ. Вероятность перехода атома из одного стационарного состояния в другое под действием электромагнитных волн. Правила отбора для испускания и поглощения света атомами. Проявление законов сохранения при излучении света. Квантование электромагнитного поля.	Постулат Бора о переходах квантовой системы из одного состояния в другое. Анализ характера зависимости от времени $\psi$ -функции системы в стационарном состоянии, влияние этого изменения на измеримые величины, характеризующие состояние. Постановка вопроса об изменении состояния на основе уравнения Шрёдингера. Решение вопроса об изменении состояния в теории нестационарных возмущений. Анализ зависимости вероятности перехода от параметров внешнего поля и системы. То же для конкретного случая взаимодействия электромагнитной волны с атомом. Связь законов сохранения с процессом излучения и поглощения света атомом, с его основными закономерностями, выясненными при квантово-механическом решении задачи об излучении.	Гл. 7, пп. 21, 22.	
14	УПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ. Дифференциальное и полное сечения рассеяния. Рассеяние на силовом центре. Амплитуда рассеяния. Общий вид амплитуды рассеяния на силовом центре. Определение амплитуды рассеяния в первом приближении теории возмущений. РАССЕЯНИЕ ЧАСТИЦ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ. Сечение рассеяния в борновском приближении. Формула Резерфорда. Матрица рассеяния.	Упругое и неупругое рассеяние. Дифференциальное и интегральное сечения рассеяния, взаимосвязь классического и квантово-механического подхода к этим понятиям, связь амплитуды рассеяния с сечением. Постановка задачи о рассеянии в квантовой механике: запись формулы на основании качественных соображений. Формула амплитуды рассеяния в первом приближении теории возмущений. Вывод амплитуды рассеяния на силовом центре и переход к первому приближению. Объяснение применения формулы к центральному полю и вывод формулы Резерфорда. Отображение теоретических понятий и формул рассеяния на практические опыты и измерения в них. Иллюстрация применения формул рассеяния на простых и физически наглядных случаях.	Гл. 8, пп. 23, 24.	7
15	РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ЧАСТИЦ С НУЛЕВЫМ И ЦЕЛЫМ СПИНОМ. Границы применимости нерелятивистской квантовой механики и переход в релятивистскую область. Уравнение Клейна–Гордона. Частицы и античастицы.	Вывод уравнения Дирака для всех четырех составляющих спинора $\Psi$ из матричной формы. Получение уравнения непрерывности в дираковской теории.	Гл. 9, пп. 25, 26.	

Неделя	Аудиторные занятия			№ задания для СРС
	Лекции	Практические и СРСП	Главы по учебнику	
	УРАВНЕНИЕ ДИРАКА. Матрицы Дирака и уравнение Дирака. Некоторые свойства решений уравнения Дирака. Частицы и античастицы, спины частиц и теория Дирака.			
	2-я аттестация			
16, 17	Письменный экзамен			

8. Задания и краткие методические указания по их выполнению:

Самостоятельная работа студента (СРС, домашнее задание):

СРС выполняется по индивидуальным вариантам, выдаваемым преподавателем, охватывает несколько тем. Выполненная работа должна включать теоретический материал и решение задач.

Совместная работа с преподавателем (СРСП):

Еженедельные СРСП проводятся по темам лекций и практических занятий. Выполняется по индивидуальным вариантам, выдаваемым преподавателем. Выполненная работа должна включать теоретический материал и применение теории к решению практической задачи, анализ полученного решения.

Практическая работа:

Практическая работа заключается в выполнении заданий на практических занятиях. Каждому практическому занятию соответствует файл «Практическое занятие № (номер недели)», в котором даются методические указания по их выполнению (размещено на сайте в образовательном портале). Темы занятий перечислены выше в таблице.

Рубежная письменная контрольная работа № 1 состоит из двух задач по темам, пройденным за первые 7 недель семестра. Рубежная письменная контрольная работа № 2 состоит из двух задач по темам, пройденным за 8-14 недели семестра.

Экзамен:

Охватывает и обобщает весь материал курса. Экзамен проводится по билетам в письменной форме. Билет состоит из трёх задач. Продолжительность экзамена – 120 мин. Письменный ответ должен быть аккуратно оформлен, содержать правильное решение задач строго в соответствии с заданием, сформулированным в экзаменационном билете. Изложение хода решений должно быть внятным и кратким.

Максимальная оценка знаний по видам работ/заданий

№	Работа	Баллы
1	Активность на лекционных и практических занятиях и выполнение СРСП	10
2	Выполнение домашних заданий (СРС)	10
3	Рубежная контрольная работа 1	10
4	<b>Первая аттестация</b> (сумма строк с 1 по 3)	<b>30</b>
5	Активность на лекционных и практических занятиях и выполнение СРСП	10
6	Выполнение домашних заданий (СРС)	10
7	Рубежная контрольная работа 2	10
8	<b>Вторая аттестация</b> (сумма строк с 5 по 7)	<b>30</b>
9	<b>Семестровая оценка</b> (строки 4+8)	<b>60</b>
10	Экзамен	40
11	<b>Итоговая оценка по дисциплине</b> (строки 9+10)	<b>100</b>

График оценки работ и заданий

Вид работы	Неделя															Баллы		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		16, 17	
Лекции	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Практ. и СРСП	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x				20
СРС		x		x		x		x		x		x		x				20
Руб. контр.								x								x		20
Экзамен																	x	40
<b>Итого</b>																		<b>100</b>

9. Критерии оценивания работ:

Оценка по буквенной системе	Цифровой эквивалент оценки	Критерий
A	95 – 100	отличное выполнение лишь с незначительным количеством ошибок
A -	90 – 94	
B +	85 – 89	выше среднего уровня с несколькими ошибками
B	80 – 84	в целом правильная работа с определённым количеством грубых ошибок
B -	75 – 79	
C +	70 – 74	
C	65 – 69	весьма посредственно; необходима серьёзная последующая работа
C -	60 – 64	
D +	55 – 59	выполнение удовлетворяет минимальным критериям
D	50 – 54	
F	0 – 49	неудовлетворительно

10. Политика поздней сдачи работ:

Соблюдать сроки сдачи практических работ, СРС, СРСП. При несвоевременной сдаче работ предусматривается снижение максимального балла на 10%.

11. Политика посещения занятий:

Не опаздывать и не пропускать занятия, во время занятий отключать сотовые телефоны, быть подготовленными к занятиям, пунктуальными и обязательными. Если Вы вынуждены пропустить рубежный контроль или финальный экзамен по уважительным причинам, Вы должны предупредить преподавателя заранее до контроля или экзамена.

12. Политика академического поведения и этики:

Будьте толерантны, уважайте чужое мнение. Возражения формулируйте в корректной форме. Плагиат и другие формы нечестной работы недопустимы. Недопустимы подглядывание и списывание во время экзаменов, сдача экзамена за другого студента. Студент, уличенный в фальсификации любой информации курса, получит итоговую оценку «F». В рамках обучения по дисциплине недопустимы любые коррупционные проявления в любой форме. Организатор таких действий (преподаватель, студенты или третьи лица по их поручению) несут полную ответственность за нарушение законов РК.

Рассмотрено на заседании кафедры инженерной физики 3 декабря 2019 г., протокол № 4

Составитель, профессор



Мустафин А.Т.