

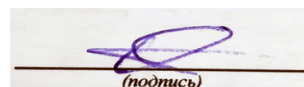
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Кафедра микроэлектроники и общей физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета



(подпись)

И.С.Огнев

« 23 » мая 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины  
«Атомная физика»**

Направление подготовки

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль)

«Интегральная электроника и нанoeлектроника»

Форма обучения

очная

Программа рассмотрена  
на заседании кафедры  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 5

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от «25» апреля 2023 года

Ярославль

### **1. Цели освоения дисциплины**

Целями освоения дисциплины «Атомная физика» является изучение основных понятий микромира, основных экспериментальных данных о строении вещества, квантово-механических представлений о строении атома, макроскопических квантовых явлений.

### **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Атомная физика» относится к обязательной части образовательной программы и входит в модуль «Общая физика». «Атомная физика» является предпоследней дисциплиной курса общей физики, предполагает формирование основ физического мировоззрения, современной физической картины мира.

Полученные в курсе «Атомная физика» знания необходимы для изучения курсов блока «Теоретическая физика».

### **3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП бакалавриата**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

<b>Формируемая компетенция (код и формулировка)</b>	<b>Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)</b>	<b>Перечень планируемых результатов обучения</b>
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>		

<p>ОПК-1. Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности</p>	<p>ИД-ОПК-1.1 Знает фундаментальные законы природы и основные физические и математические законы..</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– корпускулярно-волновой дуализм в микромире,</li> <li>– принцип неопределенности;</li> <li>– квантовые уравнения движения;</li> <li>– строения атома, магнетизм микрочастиц, молекулярные спектры;</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- осуществлять постановку задачи;</li> <li>- выбирать способы решения.</li> </ul>
	<p>ИД-ОПК-1.2 . Способен применять физические законы и математические методы для решения задач теоретического и прикладного характера..</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– систему атомных единиц измерения величин;</li> <li>– универсальные физические константы и их размерности;</li> <li>– современную физическую картину мира.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять математический аппарат, физические законы и теории для решения прикладных и теоретических задач.</li> </ul> <p><b>Владеть навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– решения типовых, оригинальных, познавательных задач;</li> <li>– аналитического мышления, методиками обработки экспериментальных данных;</li> <li>– навыками аналитического мышления, методиками обработки опытных данных.</li> </ul>
	<p><b>ИД-ОПК-1.3</b> Демонстрирует навыки использования знаний физики и математики при решении практических задач.использования знаний физики и математики при решении практиче-</p>	<p><b>Владеть навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- практического применения математики при решении физических задач;</li> <li>- использования методов вероятностного описания состояния частицы;</li> </ul> <p>использования методов математической формализации законов атомной физики.</p>

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единиц, 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	Семестр	Виды учебных занятий, включая самостоятельную ра- боту студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего кон- троля успеваемости
			Контактная работа						Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			лекции	практические	лабораторные	консультации	аттестационные испытания	самостоятельная работа	
1	Корпускулярно- волновой дуализм света	4	6						
2	Планетарная модель атома	4	4		3			2	Задания для самостоя- тельной работы
3	Волновые свойства ча- стиц.	4	4					3	Задания для самостоя- тельной работы
4	Уравнение Шредингера	4	4		4	1		4	Задания для самостоя- тельной работы. Кон- трольная работа № 1
5	Постулаты квантовой механики.	4	4		4			2	Задания для самостоя- тельной работы
6	Таблица Д.И. Менделеева	4	4		6	1		2	Задания для самостоя- тельной работы
7	Экспериментальные подтверждения выводов квантовой механики	4	4					2	Задания для самостоя- тельной работы
8	Магнитные свойства атомов	4	4			1		3	Задания для самостоя- тельной работы
						2	0,5	33,5	экзамен
	Всего за 4 семестр		34		17	5	0,5	51,5	

#### СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 1. Корпускулярно-волновой дуализм света.

Излучение абсолютно черного тела. Фотоэффект. Теория фотоэффекта. Фотоэлементы. Радиометр Крукса.

##### 2. Планетарная модель атома

Первые модели атома. Опыт Резерфорда. Формула Резерфорда. Планетарная модель атома. Спектр атома водорода. Постулаты Бора. Боровская модель атома водорода. Опыты Франка и Герца. Вывод формулы Ридберга из модели Бора.

### **3. Волновые свойства частиц**

Гипотеза де Бройля. Опыты Джермера и Дэвисона. Волновая функция электрона. Дифракция электронов на двух щелях. Парадокс наблюдателя. Соотношение неопределенностей. Гейзенберга. Ширина спектральной линии. Преобразование Фурье. Связь соотношения неопределенностей и преобразования Фурье.

### **4. Уравнение Шредингера**

Временное уравнение Шредингера. Стационарное уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Частица в одномерной и трехмерной потенциальных ямах. Квантовый принцип суперпозиций. Парадокс Кота Шредингера. Прохождение частицы над и под потенциальным барьером. Гармонический осциллятор.

**5. Постулаты квантовой механики.** Эрмитовы операторы и их использование в математическом аппарате квантовой механики. Коммутатор. Оператор углового момента. Оператор магнитного момента. Постулаты квантовой механики.

**6. Таблица Д.И. Менделеева.** Частица в сферически симметричном поле. Водородоподобные атомы. Энергетические уровни. Потенциалы возбуждения и ионизации. Спектры водородоподобных атомов. Принцип Паули. Стандартный закон заполнения электронных оболочек. Правило Маделунга-Кличковского. Правила Хунда. Термы основных состояний.

### **7. Экспериментальные подтверждения выводов квантовой механики.**

Формирования представления о спине электрона. Опыты Штерна и Герлаха. Фермионы и бозоны. Принцип работы лазера.

### **7. Магнитные свойства атомов**

Связь углового и магнитного момента в классической физике. Взаимодействие собственных и орбитальных магнитных моментов. Факторы Ланде. Эффект Зеемана.

## **5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

Электронный учебный курс «Физика атомов и атомных явлений»(лекции и практические занятия) (РФ-31БО, ЭН-31БО, Ф-31БО)» в LMS Электронный университет MoodleЯрГУ, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы обучающихся по темам дисциплины;
- осуществляется проведение отдельных мероприятий текущего контроля успеваемости студентов;
- представлены тексты лекций по отдельным темам дисциплины;
- представлены правила прохождения промежуточной аттестации по дисциплине;
- представлен список учебной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- посредством форума осуществляется синхронное и (или) асинхронное взаимодействие между обучающимися и преподавателем в рамках изучения дисциплины.

#### **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

#### **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

#### **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

##### **а) основная литература**

1. Савельев, И. В. Курс физики : учебное пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. — 7-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, [б. г.]. — Том 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2019. — 308 с. — ISBN 978-5-8114-4254-6. <https://e.lanbook.com/book/117716>

- Иродов, И.Е. Задачи по общей физике : учебное пособие / И.Е. Иродов. – 11-е изд. (эл.). – Москва : Лаборатория знаний, 2017. – 434 с. : ил., табл., схем. – ISBN 978-5-00101-491-1.. [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=462150](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=462150)

**б) дополнительная литература**

- Сивухин Д. В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов: [в 5 т.] / Д. В. Сивухин; М-во высш. и сред. спец. образования СССР.
- Тер-Крикоров А.М. Курс математического анализа [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/ Тер-Крикоров А.М., Шабунин М.И.— Электрон.текстовые данные.— Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015.— 673 с.—ISBN:978-5-9963-2987-8 <http://www.iprbookshop.ru/88987.html>
- 
- Савельев И.В. Курс общей физики, т.3, М.: Наука, 1982.- 432 с.
- Матвеев А.Н. Курс общей физики. - М.: Высшая школа, 1989 т. 5.

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа и практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, хранящиеся на электронных носителях и обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие рабочим программам дисциплин.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации.

Число посадочных мест в лекционной аудитории больше либо равно списочному составу потока, а в аудитории для практических занятий (семинаров)— списочному составу группы обучающихся.

Автор(ы) :

Профессор кафедры микроэлектроники  
и общей физики, доктор ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись) Д.Ф. Белоножко

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины**  
**«Атомная физика»**  
**Фонд оценочных средств**  
**для проведения текущего контроля успеваемости**  
**и промежуточной аттестации студентов**  
**по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,**  
**используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы**

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно и преподавателем в обязательном порядке проверяются, проверка сформированности ОПК-1, индикаторы ИД\_ОПК\_1.1, ИД\_ОПК\_1.2)*

**Контрольная работа № 1**

*(проверка сформированности ОПК-1, индикаторы ИД\_ОПК\_1.1, ИД\_ОПК\_1.2, ИД\_ОПК\_1.3)*

**Задача.1** Уединенный цинковый шарик облучается ультрафиолетовым светом с длиной волны  $\lambda = 250$  нм. До какого максимального потенциала зарядится шарик? Работа выхода электронов для цинка равна  $A_{\text{вых}} = 3.74$  эВ.

**Задача 2** Определить энергию фотона, соответствующего второй линии в первой инфракрасной серии (серия Пашена) атома водорода.

**Задача 3.**

Электрон в модели Н. Бора электрон атома водорода движется в кулоновском поле ядра. Можно ли в эксперименте создать электрическое поле, способное ионизировать атом водорода? Практически достижимые значения напряженности  $10^7 - 10^8$  В/м.

**Задача 4**

Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля такого протона

**Контрольная работа № 2**

*(проверка сформированности ОПК-1, индикаторы ИД\_ОПК\_1.1, ИД\_ОПК\_1.2, ИД\_ОПК\_1.3)*

**Задача 1.** Доказать самосопряженность оператора проекции углового момента. Действовать аналогично доказательству самосопряженности проекции импульса.

**Задача 2.** Среднее время жизни пи-нуль мезона  $1,9 \cdot 10^{-16}$  с. Какой должна быть разрешающая способность прибора для регистрации таких частиц?

**Задача 3.** Электрон находится в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Ширина ямы  $1,4 \cdot 10^{-9}$  м. Определить энергию, излучаемую электроном при переходе с третьего уровня на второй.

**Задача 4.** Частица находится в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме заданной ширины на втором энергетическом уровне. В каких точках ямы плотность вероятности обнаружения частицы совпадает с классической плотностью вероятности?



### Правила выставления оценки по результатам контрольных работ № 1-№ 2:

Оценка по результатам контрольной работы № 2 считается в баллах по следующему принципу: правильно выполненное

- задание № 1 – 1 балл;
- задание № 2 – 2 балла,
- задание № 3 – 1 балл;
- задание № 4 – 1 балл.

Каждое из заданий может быть оценено половиной заявленных по нему баллов, в случае, когда при его выполнении правильно применены расчётные формулы, но имеются ошибки в расчетах.

Полностью неправильно выполненное задание – 0 баллов.

Максимальное количество баллов по итогам контрольной работы № 1 – 5 баллов,

5 баллам соответствует оценке «отлично», 4 баллам – оценке «хорошо», 3 баллам – оценке «удовлетворительно», 2 и менее баллов – оценке «неудовлетворительно» (умения на данном этапе освоения дисциплины не сформированы).

## 2. Список формул и понятий, которые требуется знать наизусть

(проверка сформированности ОПК-1, индикатор ИД\_ОПК\_1.1, ИД\_ОПК\_1.2)

### 1. Колебания и волны.

$x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  - простейшее гармоническое колебание;

$x = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$  - простейшая гармоническая волна;

$T = \frac{2\pi}{\omega}$  - период колебаний;

$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$  - циклическая частота; показывает число повторений в единицу времени;  $[\nu] = \Gamma\text{ц} = \text{с}^{-1}$ ;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  - круговая частота; равна быстрой изменению фазы колебательного или волнового движения;  $[\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - волновое число для волны с длиной  $\lambda$ ;

$v = \frac{\omega}{k}$  - фазовая скорость волны (скорость перемещения гребня);

$v = \frac{d\omega}{dk}$  - групповая скорость (скорость перемещения огибающей волнового пакета и распространения сигнала);

### 2. Сведения из механики.

$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}$  - кинетическая энергия в нерелятивистском приближении;

$E_0 = mc^2$  - энергия покоя в релятивистском приближении;

$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  - полная энергия в релятивистском приближении;

$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2$  - кинетическая энергия в релятивистском приближении;

$E_k \ll mc^2$  или (и)  $v \ll c$  - критерий применимости нерелятивистского приближения.

$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$  - связь энергии и импульса в релятивистском приближении;

$p = \frac{mv^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  - релятивистский импульс;

### 3. Сведения из волновой оптики.

$R = \sigma T^4$  - закон Стефана-Больцмана;

$R$  - энергетическая светимость абсолютно черного тела;

$T$  - абсолютная температура тела;

$\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана.

$\lambda_{\max} T = b$  - закон смещения Вина;

$\lambda_{\max}$  - длина волны, на которой спектральная плотность излучения абсолютно черного тела максимальна;

$b$  - постоянная Вина.

$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \hbar \omega$  - энергия фотона;

$h$  - постоянная Планка;  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  - постоянная Дирака;

$\vec{p} = \hbar \vec{k}$  - импульс фотона;

$P = \frac{I}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho)$  - давление света;

$I$  - интенсивность света;

$\rho$  - коэффициент отражения;

$w$  - объемная плотность энергии.

$h\nu = A_{\text{вых}} + E_{k \max}$  - уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта;

$A_{\text{вых}}$  - работа выхода электронов из металла;

$E_{k \max}$  - максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов.

$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos(\theta_m))$  - изменение длины волны в эффекте Комптона;

$\lambda_c = \frac{h}{mc} = \frac{hc}{E_0}$  - комптоновская длина волны частицы.

$2d \sin(\theta) = m\lambda; m = 1; 2; \dots$  - закон Вульфа-Брэгга

$d$  - расстояние между атомными плоскостями кристалла;

$\theta$  - угол рассеяния рентгеновских лучей;

$a \sin(\theta_m) = \pm m\lambda; m = 1; 2; \dots$  - направления дифракционных минимумов при дифракции от одной щели;

$\frac{1}{\lambda} = RyZ^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$  - обобщенная формула Бальмера;

$Z$  - заряд ядра;  $Ry$  - постоянная Ридберга;

$n = 1, 2, 3, \dots; m = n + 1, n + 2, n + 3, \dots$

$n = 1$  - серия Лаймана; (УФ область)

$n = 2$  - серия Бальмера; (видимая область)

$n = 3$  - серия Пашена; (инфракрасная область)

$n = 4$  - серия Брэкета; (инфракрасная область)

#### 4. Волновая функция (амплитуда вероятности)

Важные обозначения

<u>точка пространства</u>	
$\mathbf{r} = \begin{cases} x & \text{если задача одномерна: } N = 1 \\ x, y & \text{если задача двухмерна: } N = 2 \\ x, y, z & \text{если задача трехмерна: } N = 3 \end{cases}$	
<u>элементарный объем</u>	
$d\mathbf{v} = \begin{cases} dx & \text{если задача одномерна: } N = 1 \\ dx dy & \text{если задача двухмерна: } N = 2 \\ dx dy dz & \text{если задача трехмерна: } N = 3 \end{cases}$	
$\mathbf{R}^N = \begin{cases} \text{вся числовая прямая } \mathbf{R}^1 & \text{если задача одномерна: } N = 1 \\ \text{вся числовая прямая } \mathbf{R}^2 & \text{если задача двухмерна: } N = 2 \\ \text{вся числовая прямая } \mathbf{R}^3 & \text{если задача трехмерна: } N = 3 \end{cases}$	

$$|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{v} = \Psi^*(\mathbf{r}, t)\Psi(\mathbf{r}, t)d\mathbf{v} = dP(\mathbf{r}, t) - \text{физический смысл;}$$

$dP(\mathbf{r}, t)$  - вероятность обнаружить частицу в элементарном объеме  $d\mathbf{v}$ , содержащем точку  $\mathbf{r}$ ;

$|\Psi(\mathbf{r}, t)|^2 \equiv \frac{dP(\mathbf{r}, t)}{d\mathbf{v}}$  - плотность вероятности обнаружить частицу в малой окрестности точки  $\mathbf{r}$ ;

$$P(V) = \int_V \Psi^* \Psi d\mathbf{v} - \text{вер. обнаружить частичку в конечном объеме } V;$$

В одномерном случае  $V$  это отрезок или система отрезков, в двухмерье – плоская фигура или система плоских фигур, в трехмерье – объемная фигура или система объемных фигур;

$$\int_{\mathbf{R}^N} \Psi^* \Psi d\mathbf{v} = 1 - \text{условие нормировки;}$$

$$\langle F \rangle = \int_{\mathbf{R}^N} \Psi^* \hat{F} \Psi d\mathbf{v} - \text{среднее значение физической величины } F;$$

$$\int_{\mathbf{R}^N} \Psi^* [\hat{F}, \hat{G}] \Psi d\mathbf{v} = 0 - \text{критерий совместной измеримости физических величин } F \text{ и } G; [\hat{F}, \hat{G}] \equiv \hat{F}\hat{G} - \hat{G}\hat{F} - \text{коммутатор операторов заданных физических величин;}$$

$\hat{F}\Psi = F\Psi$  - задача определения собственных функций  $\psi$  и собственных значений  $F$  оператора  $\hat{F}$ . Это состояния и значения, которые регистрируются в эксперименте;

$$\int_{\mathbf{R}^N} \Psi_1^* \Psi_2 d\mathbf{v} = 0 \text{ - условие ортогональности волновых функций } \Psi_1 \text{ и } \Psi_2;$$

### 5. Соотношения неопределенностей Гейзенберга

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta p_y \Delta y \geq \frac{\hbar}{2}; \quad \Delta p_z \Delta z \geq \frac{\hbar}{2};$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2};$$

Здесь символ  $\Delta$  означает стандартное (среднеквадратическое) отклонение измеряемой величины от среднего значения. **Знак равенства** реализуется, только если плотность распределения вероятности измеряемой величины  $|\Psi|^2$  подчиняется гауссовому нормальному распределению. В остальных случаях реализуется неравенство.

### 6. Волна де-Бройля

$\Psi = A e^{i(kx - \omega t)} = A e^{\frac{i}{\hbar}(px - Et)}$  - простейшая волновая функция – волна де-Бройля, распространяющаяся вдоль оси  $Ox$ ;

$p = \hbar k$  - импульс волны де-Бройля;

$E = \hbar \omega$  - энергия волны де-Бройля;

$\lambda = \frac{h}{p}$  - длина волны де-Бройля;

### 7. Уравнение Шредингера

$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U\Psi$  - полное уравнение Шредингера для одной частицы;

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + U\psi &= E\psi \\ \hat{H}\psi &= E\psi \\ \Delta \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} 3 \text{ разных способа записи} \\ \text{стационарного уравнения Шредингера} \end{array}$$

В стационарных состояниях (когда наблюдаемые величины не меняются с течением времени, а энергия принимает фикс. значение)  $\Psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r}) e^{\frac{i}{\hbar} Et}$ , где  $\psi(\mathbf{r})$  - координатная часть волновой функции.

$U \equiv U(\mathbf{r}, t)$  - потенциальная энергия частицы в классическом внешнем поле.

$U = 0$ - для свободной частицы;
$U = U(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq d \\ \infty & x < 0 \text{ или } x > d \end{cases}$
Для частицы в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме;
$U = U(x) = \begin{cases} C & 0 \leq x \leq d \\ 0 & x < 0 \text{ или } x > d \end{cases}$
Для частицы, преодолевающей прямоугольный потенциальный барьер ширины $d$

## 8. Операторы физических величин

$\hat{x}\Psi = x\Psi$  - оператор  $x$  - координаты;

$\hat{y}\Psi = y\Psi$  - оператор  $y$  - координаты;

$\hat{z}\Psi = z\Psi$  - оператор  $z$  - координаты;

$\hat{p}_x\Psi = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x}\Psi$  - оператор  $x$  - компоненты импульса;

$\hat{p}_y\Psi = -i\hbar\frac{\partial}{\partial y}\Psi$  - оператор  $y$  - компоненты импульса;

$\hat{p}_z\Psi = -i\hbar\frac{\partial}{\partial z}\Psi$  - оператор  $z$  - компоненты импульса;

$\hat{p}^2\Psi = -\hbar^2\Delta\Psi$  - оператор квадрата импульса ( $\Delta$  - опер. Лапласа);

$\hat{E}_k\Psi = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\Psi$  - оператор кинетической энергии;

$\hat{L}_z\Psi = -i\hbar\frac{\partial}{\partial \varphi}\Psi$  - оператор  $z$  - проекции углового момента ( $\varphi$  - угол поворота

вокруг  $Oz$  в направлении правого винта);

$\hat{H}\Psi = (\hat{E}_k + \hat{U})\Psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U\right)\Psi$  - оператор Гамильтона

(оператор полной энергии частицы)

### Свойства операторов физических величин

$\hat{F}(\alpha\Psi_1 + \beta\Psi_2) = \alpha\hat{F}\Psi_1 + \beta\hat{F}\Psi_2$ $\alpha, \beta$ - комплексные числа
линейность оператора $\hat{F}$ ;
$\int_{\mathbf{R}^N} \Psi_1^* \hat{F}\Psi_2 d\mathbf{v} = \int_{\mathbf{R}^N} (\hat{F}\Psi_1)^* \Psi_2 d\mathbf{v}$
Эрмитовость (самосопряженность) оператора $\hat{F}$
Собственные значения Эрмита оператора – <u>действительные числа</u> .

$$\int_{\mathbf{R}^N} \Psi_1^* \Psi_2 d\mathbf{v} = 0,$$

### Ортогональность собственных функций.

Если  $\Psi_1, \Psi_2$  - собственные функции эрмитового оператора, отвечающие разным собственным значениям, то они ортогональны.

## **9. Электричество и магнетизм.**

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r \quad (\text{СИ}); \quad \vec{F} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r \quad (\text{СГС}) - \text{закон Кулона}$$

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \quad (\text{СИ}); \quad U = \frac{q_1 q_2}{r} \quad (\text{СГС}) - \text{потенциальная энергия взаимодействия двух точечных зарядов};$$

$$\vec{M} = I S \vec{n} \quad (\text{СИ}) \quad \vec{M} = \frac{I}{c} S \vec{n} \quad (\text{СГС}) - \text{магнитный момент плоского малого витка с током } I, \text{ площадью } S \text{ и нормалью } \vec{n}, \text{ образующей правый винт с направлением тока. (Магнитный диполь).}$$

$$\vec{M} = \frac{q}{2m} \vec{L} \quad (\text{СИ}) \quad \vec{M} = \frac{q}{2mc} \vec{L} \quad (\text{СГС}) - \text{магнитный момент классической частицы с зарядом } q, \text{ массой } m \text{ и угловым моментом } \vec{L}. \text{ Коэффициент пропорциональности между } \vec{M} \text{ и } \vec{L} \text{ называется гиромагнитным отношением};$$

$$\vec{L}_F = [\vec{M} \times \vec{B}] - \text{момент сил, действующий на магнитный диполь в магнитном поле } \vec{B};$$

$$\vec{F} = (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{B} - \text{сила, действующая на магнитный диполь в магнитном поле } \vec{B}. \text{ Если } \vec{B} \text{ параллельно } Oz, \text{ то } F_z = M_z \frac{\partial B}{\partial z};$$

$$U = -(\vec{M} \cdot \vec{B}) - \text{потенциальная функция магнитного диполя в магнитном поле } \vec{B}.$$

## **10. Правило квантования моментов**

Орбитальный угловой момент электрона	$ \vec{L}  = \hbar \sqrt{l(l+1)} \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots$ $L_z = m \hbar; \quad m = -l, -(l-1), \dots, (l-1), l$
Собственный угловой момент электрона (спин)	$ \vec{L}_s  = \hbar \sqrt{s(s+1)} = \hbar \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} + 1 \right)} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{3}$ $L_{s_z} = \pm \frac{\hbar}{2}.$

Орбитальный магнитный момент электрона	$ \vec{M}  = \mu_B \sqrt{l(l+1)} \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots$ $M_z = m \mu_B; \quad m = -l, -(l-1), \dots, (l+1), l$
Собственный магнитный момент электрона	$ \vec{M}_s  = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)} = 2\mu_B \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)} = \mu_B \sqrt{3}$ $L s_z = \pm 2\mu_B s = \pm \mu_B \cdot$

$l$  - орбитальное квантовое число;

$s$  - спиновое квантовое число;

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \text{ (СВ)} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} \text{ (СГС)} - \text{магнетон Бора}$$

### 11. Обозначения состояний электрона в атоме.

Обозначение оболочек

Символ Оболочки	K	L	M	N	O
Гл. кв. число $n$	1	2	3	4	5

Дальше по алфавиту

Обозначение орбиталей (подоболочек)

Символ Орбитали	s	p	d	f	G
Орб. кв. число $l$	0	1	2	3	4

Дальше по алфавиту

### 12. Диапазоны изменения квантовых чисел.

Квантовое число	Диапазон	Всего значений
Главное кв. число $n$	$n = 1, 2, 3, \dots$	$\infty$
Орбитальное кв. число $l$	$l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$	$n$
Магнитное (азимутальное) кв. число	$m = -l, -(l-1), \dots, (l+1), l$	$2l+1$
Спиновое кв. число	$m_s = \pm 1/2$	2

### 13. Масштабы физических величин

$E_1 = -13.6 \text{ эВ}$  - энергия основного уровня атома водорода;

$r_1 = 0.53 \text{ \AA}$  - первый Боровский радиус

$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$  - один ангстрем;

$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$

$E_0(e) = 0.51 \text{ МэВ}$  - энергия покоя электрона;

$E_0(p) = 940 \text{ МэВ}$  - энергия покоя протона.



**2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**  
(проверка сформированности ОПК-1, индикатор ИД\_ОПК\_1.1, ИД\_ОПК\_1.2, ИД\_ОПК\_1.3)

**Вопросы к экзамену «Атомная физика»**

1. Законы теплового излучения: закон Вина, закон Стефана-Больцмана, закон Рэлея-Джинса. Ультрафиолетовая катастрофа. Гипотеза М. Планка. Рождение квантовой механики. Постоянная Планка. Постоянная Дирака.
2. Явления, подтверждающие гипотезу М. Планка: эффект Комптона (кратко: формула и почему он противоречит классической физике), фотоэффект (законы фотоэффекта, экспериментальное определение постоянной Планка, противоречие с классической физикой), давление света (формула и качественное объяснение).
3. Модель атома Томсонов. Ее основная идея. Теоретическая оценка размера атома в модели Томсонов.
4. Схема опыта Резерфорда по рассеянию альфа частиц. Прицельный параметр. Зависимость угла рассеяния от прицельного параметра (без вывода, но с объяснением откуда формула взялась). Формула Резерфорда (без вывода). Почему модель Томсонов не объясняет результаты опытов Резерфорда?
5. Вывод формулы Резерфорда. Общие выводы по экспериментам Резерфорда. Планетарная модель атома.
6. Недостатки планетарной модели. Постулаты Бора. Опыты Франка и Герца.
7. Спектральные закономерности атома водорода. Формула Ридберга. Постоянная Ридберга. Пять первых серий (Лаймана, Бальмера, Пашена, Фунда). Комбинационный принцип Ритца.
8. Объяснение Н. Бора спектральных закономерностей атома водорода. Формула для энергии различных состояний атома водорода. Основное и возбужденное состояние атома. Диаграмма Гроттриана.
9. Количественная модель атома водорода по Бору. Радиусы стационарных орбит. Первый Боровский радиус. Выражение для энергии стационарных состояний через мировые константы.
10. Вывод формулы Ридберга для водородоподобных ионов. Достоинства и недостатки модели Бора.
11. Экспериментальные доказательства наличия волновых свойств электрона. Опыты Дэвисона и Джеомера. Опыты Томсона и Тартаковского.
12. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де-Бройля. Волны де-Бройля и Боровская модель атома водорода.
13. Дифракция фотонов на двух на двух щелях. Классическая интерпретация опыта Юнга. Несовершенство классической интерпретации при слабой интенсивности светового пучка. Вероятностная интерпретация интенсивности. Новая концепция, объясняющая опыт и со слабым и с интенсивным пучком.
14. Волновая функция. Состояние системы в классической механике и в квантовой. Первый постулат квантовой механики. Волновая функция. Ос-

новая задача квантовой механики. Вероятностный характер законов квантовой механики.

15. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Его связь с преобразованием Фурье (коротко). Сопряженные физические величины. Погрешности их совместного определения. Принцип дополнительности Бора. Естественная ширина спектральной линии. **Самостоятельно:** неопределенность координаты и импульса в опыте со щелью (см. учебник Иродова, параграф 3.4)

16. Уравнение Шредингера. Волна де-Бройля, как решение уравнения Шредингера. Свойства волновой функции.

17. Стационарные состояния. Определение стационарных состояний. Стационарное уравнение Шредингера. Свойства стационарных состояний.

18. Пример решения уравнения Шредингера. Свободная частица (с выводом). Одномерная бесконечно глубокая потенциальная яма: постановка, формула для квантования энергии (без вывода), вид волновых функций различных состояний и их смысл (без вывода). Условия перехода к задаче классической механики.

19. Одномерная бесконечно глубокая потенциальная яма. Решение уравнение Шредингера. Квантование энергии. Построение волновых функций.

20. Квантовый принцип суперпозиции. Парадокс кота Шредингера. Свойства решения уравнения Шредингера для бесконечно глуб. потенциальной ямы.

21. Прохождение квантовой частицы через потенциальный барьер. Постановка. План решения. Туннельный эффект. Коэффициент прохождения частицы через барьер (формула без вывода). Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа.

22. Операторы физических величин в квантовой механике. Недостаточность числового описания физических величин. Второй постулат квантовой механики. Линейность операторов физических величин. Суперпозиция, коммутатор. Примеры операторов физических величин.

23. Задача на собственные значения и собственные функции линейного оператора. Третий и четвертый постулаты квантовой механики. Рецепт проверки двух физических величин на совместную измеримость.

24. Унитарные пространства. Эрмитовы операторы. Доказательство эрмитовости оператора проекции импульса на ось абсцисс.

25. Момент импульса (угловой момент). Оператор углового момента. Неизмеримость одновременно трех компонент углового момента. Квантование проекции углового момента на выделенное направление.

26. Модуль углового момента. Правила квантования. Квантовые числа углового момента. Собственные функции оператора квадрата углового момента. Наблюдение углового момента заряженной частицы.

27. Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Магнитный момент. Связь углового и магнитного моментов. Магнетон Бора. Фактор Ланде.

28. Обзор теории водородоподобного атома. Многоэлектронные атомы. Электронные оболочки. Принцип запрета Паули. Принцип тождественности элементарных частиц.

29. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева. Правило Хунда.  
(Самостоятельно по параграфу 6.6 учебника Иродова.)

**Правила выставления оценки**

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который воспроизводит основные положения Атомной физики, выполняет в полном объеме математические выкладки и воспроизводит физические и математические рассуждения в процессе их вывода, точно использует терминологию общей физики, стилистически грамотное, логически правильное излагает ответы на вопросы, умеет делать обоснованные выводы, выполняет постановку задачи, ориентируется в основных теориях, концепциях и направлениях по изучаемой дисциплине и давать им критическую оценку, участвует в активной самостоятельной работе на практических занятиях, ответил на вопрос экзамена 4-5 из 5 баллов, сдал контрольные работы № 1 и 2 на оценку «отлично» или «хорошо» или выполнил задания из данных контрольных работ на экзамене правильно на 80%.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, который воспроизводит основные положения Атомной физики, выполняет основные части математических выкладок и воспроизводит базовые физические и математические рассуждения в процессе их вывода, стилистически грамотное, логически правильное излагает ответы на вопросы, умеет делать выводы; владеет инструментарием дисциплины, умеет его использовать в решении задач, ответил на вопрос экзамена 4-5 из 5 баллов, сдал контрольные работы № 1 и 2 на оценку «отлично» или «хорошо» или выполнил задания из данных контрольных работ на экзамене правильно на 60%.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который воспроизводит основные положения Атомной физики, воспроизводит основные формулы и знает границы их применимости, сдал контрольные работы № 1 и 2 на оценку «удовлетворительно» или «хорошо» или выполнил задания из данных контрольных работ на экзамене правильно на 40%.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы, ответил на вопрос экзамена хуже 2-х из 5 баллов, не сдал контрольные работы № 1 и 2 на положительную оценку. Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

## Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины «Атомная физика»

### Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Атомная физика» являются лекции. По большинству тем предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным физическим задачам и отработка навыков работы с математическим аппаратом.

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель решения задач – помочь усвоить основные законы Атомной физики. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Большое внимание должно быть уделено выполнению домашней работы. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач.

В Атомной физике необходимо основное внимание уделить усвоению принципа вероятностной природы явлений микромира, начиная с уже с одной свободной частицы.

При изучении уравнения Шредингера необходимо отметить различные формы его, записи, в том числе использованной в качестве эпиграфа на могиле Эрвина Шредингера. Обратить внимание на различие стационарного и общего уравнения Шредингера.

В разделе «Магнитные свойства атомов» необходимо понимать условность классических представлений о связи углового и магнитного момента и не стараться полностью свести вопрос к сугубо механической интерпретации.

В разделе «Таблица Менделеева» изучается не химические, а физические принципы её устройства – её объяснение является квинтэссенцией всего предыдущего материала, который должен быть твердо усвоен.

В теме переменные токи целесообразно для наглядности решения задач (где это возможно) строить векторную диаграмму. При аналитическом решении рекомендуется использовать метод комплексных амплитуд.

Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется 3 дня, во время подготовки к экзамену предусмотрена групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Атомная физика» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать экзамен по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.