

Описание курса ФТФ Университета ИТМО / Syllabus of course of Physics and Engineering Department ITMO University

1. Название: Дополнительные главы физики

2. Лектор: Роман Полозков

Ассистенты:

3. Краткая аннотация (500-700 символов, на простом и доступном языке):

Физика создает универсальную базу для изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, закладывает фундамент последующего обучения в магистратуре, аспирантуре. Она даёт цельное представление о физических законах окружающего мира в их единстве и взаимосвязи, вооружает бакалавров необходимыми знаниями для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах.

Дисциплина «Дополнительные главы физики», входящая в Общепрофессиональный модуль Базовой части рабочего учебного плана, предназначена для ознакомления студентов с основами квантовой физики. В результате освоения дисциплины «Дополнительные главы физики» студент должен начать изучение явлений и законов квантовой физики, границы их применимости, применение квантовых законов в важнейших практических приложениях.

4. Название программы и семестр: **Нанопотоника и квантовая оптика, Техническая физика, четвертый семестр**

5. Детальное описание курса с разбиением по лекциям/семинарам/практикам:

Теоретические занятия (лекции)

№ недели	№ модуля дисциплины	Наименование лекции	Объем часов
1	Модуль №8.	Тепловое излучение. Равновесная плотность теплового излучения. Абсолютно черное тело (АЧТ). Излучение абсолютно черного тела. Связь между испускательной способностью АЧТ и спектральной плотностью энергии равновесного теплового излучения. Закон Кирхгофа.	2
	Модуль №8.	Закон Стефана-Больцмана. Критерий Вина. Закон смещения Вина. Вывод формулы Релея-Джинса.	2
2	Модуль №8.	Гипотеза Планка. Формула Планка. Предельные случаи формулы Планка. Вывод формулы Планка по Эйнштейну: спонтанное и вынужденное излучение.	2
	Модуль №8.	Квантовые свойства электромагнитного излучения: фотоэффект и эффект Комптона, опыт Боте, опыт Иоффе-Добронравова. Корпускулярно-волновой дуализм, импульс фотона.	2
3	Модуль №8.	Линейчатые спектры излучения и формула Бальмера. Модель Томсона для строения атома. Опыты Резерфорда по рассеянию α - частиц, ядерная модель атома.	2

	Модуль №8.	Модель атома Бора. Опыт Франка-Герца.	2
4	Модуль №8.	Волновые свойства частиц: гипотеза де-Бройля, экспериментальные подтверждения волновых свойств частиц (например, опыт Дэвиссона-Джермера). Обсуждение физического смысла волн де-Бройля. Несостоятельность гипотезы о волновом пакете.	2
	Модуль №8.	Статистическое толкование волн де-Бройля. Волновая функция. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для импульса и координат, для энергии и времени. Границы применимости классической механики.	2
5	Модуль №8.	Уравнение Шредингера. Квантование энергии. Примеры решения стационарного уравнения Шредингера: частица в одномерной потенциальной яме с бесконечными стенками, частица в сферической потенциальной яме с бесконечными стенками.	2
	Модуль №8.	Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннелирование.	2
6	Модуль №8.	Квантово-механические операторы: представление физических величин операторами, операторы координат, импульса, момента импульса, потенциальной и кинетической энергии, гамильтониан квантовой системы как оператор полной энергии, вычисление средних значений физических величин в квантовых системах.	2
	Модуль №8.	Квантово-механические операторы: представление физических величин операторами, операторы координат, импульса, момента импульса, потенциальной и кинетической энергии, гамильтониан квантовой системы как оператор полной энергии, вычисление средних значений физических величин в квантовых системах.	2
7	Модуль №8.	Движение в центральном поле. Теория водородоподобного атома: квантовые числа как параметры состояния, вырождение энергетических уровней. Схема уровней атома водорода и спектр его излучения, правила отбора для разрешенных переходов.	2
	Модуль №8.	Движение в центральном поле. Теория водородоподобного атома: квантовые числа как параметры состояния, вырождение энергетических уровней. Схема уровней атома водорода и спектр его излучения, правила отбора для разрешенных переходов.	2
8	Модуль №8.	Спин. Дублетная структура линий в спектрах щелочных металлов. Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Орбитальные и собственные механические и магнитные моменты электронов, гиромагнитные отношения..	2
	Модуль №8.	Спин - орбитальное взаимодействие. Магнитный и механический моменты атома. L-S и j-j-связи, множитель Ланде. Эффект Зеемана. Мультиплетность	2

		энергетических уровней и спектральных линий, правила отбора для разрешенных переходов.	
9	Модуль №8.	Квантовые системы из одинаковых частиц. Принцип тождественности одинаковых микрочастиц. Симметричные и антисимметричные состояния (волновые функции) тождественных микрочастиц. Бозоны и фермионы. Принцип Паули.	2
	Модуль №8.	Строение атомов и периодическая система химических элементов Д.М.Менделеева. Порядок заполнения электронных оболочек. Квантовые статистические распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака. Плотность числа квантовых состояний. Энергия Ферми.	2
10	Модуль №9.	Спонтанное и вынужденное излучение. Двухуровневая квантовая система в поле равновесного излучения, принцип детального равновесия, спонтанные и индуцированные переходы, соотношения Эйнштейна и его вывод распределения Планка.	2
	Модуль №9.	Лазеры: прохождение излучения через среду, условие усиления (инверсная заселённость уровней). Принцип работы лазера и его устройство.	2
11	Модуль №9.	Ядерный и электронный магнитный резонанс (квантовомеханическая трактовка). Строгие и нестрогие правила отбора при поглощении и испускании фотонов атомами (на примере эффекта Зеемана и ЯМР).	2
	Модуль №9.	Элементы физики молекул: молекула - связанная система атомов. Типы химической связи: ионная и ковалентная. Энергетическое состояние молекулы: энергия вращения, энергия колебаний, энергия электронной конфигурации	2
12	Модуль №9.	Элементы физики молекул: вращательные, вращательно-колебательные и электронно-колебательные спектры, принцип Франка - Кондона, правила отбора для разрешенных переходов. Диссоциация. Рентгеновские спектры.	2
	Модуль №9.	Ядерные модели: эксперименты Резерфорда и Гейгера по рассеянию α -частиц в газах. Открытие нейтрона Чадвиком. Экспериментальная зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа. Свойства ядерных сил: радиус действия, глубина потенциала, насыщение ядерных сил, спиновая зависимость. Ядерные силы как проявление сильного взаимодействия. Модель Юкавы. Модель жидкой заряженной капли. Формула Вайцзеккера для энергии связи ядра. Оболочечная модель и магические числа в осциллятором потенциале. Одночастичные и коллективные возбуждённые состояния ядра.	2
13	Модуль №9.	Радиоактивность: Альфа, бета, гамма распады. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни, вековое уравнение. Альфа-распад, закон Гейгера-Нэттола и его вывод (формула Гамова). Бета-распад, энергетический спектр бета-распада, гипотеза	2

		нейтрино и его опытное обнаружение, внутренняя конверсия электронов, К-захват. Гамма-излучение, изомерия ядер. Спонтанное деление ядер, механизм формирования барьера деления — зависимость кулоновской и поверхностной энергии от деформации, параметр делимости, энергия, выделяемая при делении ядер, предел стабильности ядер относительно деления.	
	Модуль №9.	Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы: фундаментальные частицы (лептоны, кварки и переносчики взаимодействий). Законы сохранения и внутренние квантовые числа. Кварковая структура адронов — мезоны, барионы и резонансы.	2
14	Модуль №9.	Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы: квантовая хромодинамика, асимптотическая свобода. Гипотеза конфайнмента кварков и глюонов, кварковый потенциал. Открытие W- и Z- бозонов, t-кварка и бозона Хиггса. Стандартная модель. Несохранение чётности при бета-распаде, опыт Ву. Проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции.	2
	Модуль №9.	Резерв.	2

Практические занятия

№ недели	№ модуля дисциплины	Наименование и объем практического занятия	Объем часов
1	Модуль №8.	Излучение АЧТ. Закон Стефана-Больцмана. Критерий Вина. Закон смещения Вина. Формула Планка.	3
2	Модуль №8.	Квантовые свойства электромагнитного излучения: фотоэффект и эффект Комптона. Корпускулярно-волновой дуализм, импульс фотона.	3
3	Модуль №8.	Атом Резерфорда-Бора.	3
4	Модуль №8.	Волновые свойства микрочастиц.	3
5	Модуль №8.	Волновая функция и уравнение Шредингера (часть 1).	3
6	Модуль №8.	Волновая функция и уравнение Шредингера (часть 2).	3
7	Модуль №8.	Контрольная работа 1.	3
8	Модуль №8.	Операторы в квантовой механике. Четность.	3
9	Модуль №8.	Эволюция операторов во времени. Интенсивность и ширина спектральных линий.	3
10	Модуль №9.	Спин. Магнитные свойства атома. Эффект Зеемана.	2
11	Модуль №9.	Двухатомная молекула.	2

12	Модуль №9.	Ядро атома.	2
13	Модуль №9.	Контрольная работа 2.	2
14	Модуль №9.	Зачетное занятие.	2

Лабораторные работы :

1) Лабораторные установки предприятия “Опытные приборы” г. Новосибирск

1. Измерение температуры и интегрального коэффициента излучения тела методом спектральных отношений
2. Внешний фотоэффект. Исследование характеристик фотоэлемента с внешним фотоэффектом
3. Внутренний фотоэффект. Исследование характеристик фоторезистора.....
4. Фотодиод
5. Контактная разность потенциалов.....
6. Распределение электронов по скоростям при термоэлектронной эмиссии

2) Лабораторные установки по атомной физике ЛКФ ИТМО, Росучприбор

1. Определение постоянной Ридберга по спектру атома водорода - 3 шт
2. Изучение колебательно-вращательного спектра молекулы йода. 1 шт
3. Изучение оптического квантового генератора-1 шт
4. Определение концентрации возбуждённых атомов в газоразрядной плазме.-1 шт.

7. Рекомендованная литература:

Теория (основная):

1. Конспект.
2. Э.В. Шпольский «Атомная физика», тома 1 и 2.
3. Д. В. Сивухин «Общий курс физики», тома 5-1 и 5-2.
4. И. Е. Иродов, «Квантовая физика. Основные законы».

Теория (дополнительная):

1. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский «Курс физики», том 3.
2. Фейнмановские лекции по физике, тома 3 и 6.
3. Фано У., Фано Л., «Физика атомов и молекул»
4. Р.В. Поль, «Оптика и атомная физика»
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Квантовая механика. Нерелятивистская теория», том 3.
6. Зелевинский В.Г., Квантовая физика, тома 1,2
7. Мухин К.Н., Занимательная ядерная физика
8. Окунь Л.Б., Элементарное введение в физику элементарных частиц
9. Мухин К.Н., Экспериментальная ядерная физика, тома 1,2,3

10. Окунь Л.Б., Лептоны и кварки
11. YouTube Канал «LightCone»,
<https://www.youtube.com/channel/UCyeF4TqSnmLDXWk-qRWTezQ>
12. YouTube канал МИФИ, лекционные демонстрации В.И. Гервидса,
https://www.youtube.com/user/NRNUMEPHI/playlists?view=50&sort=dd&shelf_id=11
13. YouTube канал кафедры общей физики МФТИ:
<https://www.youtube.com/watch?v=FYPbw4TPrZ0&list=PLtkGmqQ5HKX5Ds5imWnrD73W9zgc0p5xk>

Задачники:

1. И.Е. Иродов, «Задачи по общей физике»
2. В.А. Овчинкин, «Сборник задач по общему курсу физики», том.3
3. И.Е. Иродов, «Задачи по квантовой физике»

8. Предварительно пройденные курсы, необходимые для изучения предмета:

Математический анализ, Линейная алгебра, Физика

9. Тип самостоятельных заданий (пожалуйста, приложите также несколько примеров):

Для контрольных работ использованы задачники из списка литературы.

Контрольная работа 1:

1.4*: Согласно общей теории относительности (ОТО) энергия любого объекта в статическом гравитационном поле $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0(1 + 2\varphi/c^2)^{-1/2}$, где \mathcal{E}_0 — энергия объекта в «пустом» (т. е. свободном от гравитационных полей) пространстве, а φ — гравитационный потенциал в точке нахождения объекта. Показать на основе этого соотношения, что разница энергий $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ между двумя состояниями объекта, расположенного на поверхности Земли и на высоте H от нее, оказывается эквивалентной разнице «гравитационных энергий» излученного объектом γ -кванта с энергией $\mathcal{E}_\gamma = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ и массой $m_\gamma = \mathcal{E}_\gamma/c^2$, как это было показано в опытах Паунда и Ребки с помощью эффекта Мессбауэра.

1.26*: В результате комптоновского рассеяния фотона на покоящемся электроны последний получил импульс отдачи p . Определить, под какими углами по отношению к направлению падающего фотона мог вылететь электрон с таким импульсом.

1.39*: При прохождении γ -квантов через вещество образуются две группы быстрых электронов: одна в результате фотоэффекта, а другая — комптоновского рассеяния. Каково должно быть энергетическое разрешение регистрирующей аппаратуры, чтобы отличать фотоэлектроны от комптоновских электронов с максимальной энергией? Энергия γ -квантов известна: $\mathcal{E}_\gamma = 5$ МэВ.

1.52*: В системе глобального позиционирования (GPS) используется высокоточный цезиевый генератор, установленный на спутнике. Определить высоту полета спутника, если при прохождении над приемником на Земле регистрируемая частота совпадает с частотой генератора. Учесть, что энергии квантовых уровней любой системы зависят от гравитационного потенциала в месте нахождения системы. Вращение Земли не учитывать. (См. также задачу 1.4 в этом разделе.)

1.47*: Показать, что представление о фотонах позволяет получить формулу для продольного Доплер-эффекта из преобразования Лоренца для энергии.

1.42* Показать, что в вакууме рождение пары e^+e^- γ -квантом невозможно.

1.49* Лазер на рубине излучает в импульсе длительностью $\tau = 0,5$ мс энергию $\mathcal{E} = 10$ Дж в виде почти параллельного светового пучка сечением $S = 1$ см². Рабочая длина волны лазера $\lambda = 6943$ Å, ширина линии $\Delta\lambda = 0,01$ Å. Определить по спектральной плотности излучаемой энергии эффективную температуру $T_{\text{эфф}}$ в лазерном пучке а) до фокусировки, б) при максимально возможном сужении пучка (в фокусе).

1.50* Определить температуру абсолютно черного тела, спектральная яркость излучения которого равна яркости лазерного излучения с энергией в импульсе $\mathcal{E} = 1$ Дж. Считать, что расходимость лазерного пучка определяется только дифракцией на выходном отверстии, а монохроматичность — длительностью импульса.

1.53* Измерение интенсивности реликтового излучения Вселенной производится радиоскопом вблизи $\lambda = 3$ см. Его антенный тракт находится при температуре $T = 300$ К и поглощает $a = 1\%$ поступающей мощности. Какой эффективной температуре абсолютно черного тела $T_{\text{эфф}}$ соответствует тепловой шум антенного тракта в области данной длины волны?

1.29* В свободном пространстве находится железная пластина, одна поверхность которой абсолютно «черная», а другая — идеально отражающая. В начальный момент пластина покоилась и ее температура была равна $T = 10^3$ К. До какой максимальной скорости v_{max} может разогнаться пластина при остывании? Теплоемкость пластины считать подчиняющейся закону Дюлонга—Пти.

1.18* Линза со светосилой 1:16 (это отношение D^2/F^2) собирает солнечный свет на поверхность черного шарика, помещенного в вакуум. До какой температуры T может нагреться шарик, диаметр которого равен диаметру изображения Солнца? Считать Солнце абсолютно черным телом с температурой $T_C = 6000$ К.

2.12* На рис. 5 приведена кривая, полученная в опытах Дэвиссона и Джермера по рассеянию электронов от монокристалла никеля, падающих под углом скольжения 80° . По оси абсцисс отложено значение \sqrt{V} , где V — энергия электронов в вольтах, по оси ординат — относительная интенсивность рассеянных электронов. При больших порядках отражения m максимумы эквидистантны (расстояние между ними $3,06$ В^{1/2}), а при малых эта закономерность, показанная стрелками, нарушается. Оценить монохроматичность используемых электронов и показатель преломления никеля для волны де Бройля электронов, соответствующих 3-му, 4-му и 5-му максимумам, которые наблюдаются при \sqrt{V} , равном соответственно 8,16, 11,42 и 14,68 В^{1/2}. Найти межплоскостное расстояние d никеля.

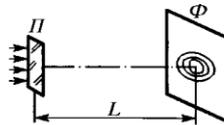


Рис. 4

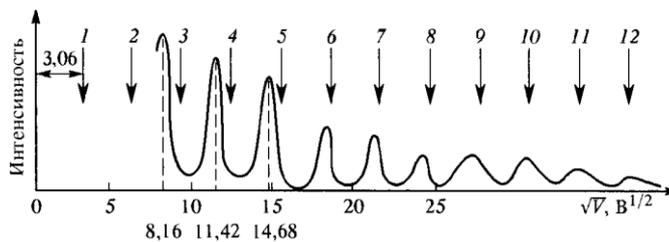


Рис. 5

1.14. Над плоскостью, зачерненной с обеих сторон, на высоте h расположен круглый диск радиусом a , являющийся источником равновесного теплового излучения с температурой T_0 . Радиус диска $a \ll h$, диск расположен параллельно плоскости. Найти стационарное распределение температуры $T = T(r)$ на плоскости, где r — расстояние от проекции центра диска. Считать, что система находится в вакууме, фон теплового излучения отсутствует и теплопроводностью вдоль плоскости можно пренебречь.

3.1: Найти плотность потока вероятности для: а) плоской волны $\psi = \exp\left(i \frac{p_z}{\hbar} z\right) = \exp(ikz)$, б) сферической волны $\psi = \frac{1}{kr} \exp(ikr)$, в) суммы сходящейся и расходящейся волн $\psi = \frac{1}{2kr} (se^{ikr} - e^{-ikr})$.

3.8: Взаимодействие между нуклонами в дейтроне может быть описано потенциалом Юкавы $U(r) = -U_0 \frac{\exp(-r/a)}{r/a}$, где r — относительное расстояние, a — радиус взаимодействия ядерных сил, $U_0 = 40$ МэВ. Если аппроксимировать волновую функцию основного состояния как водородоподобную $\psi(r, a) = \sqrt{\frac{a^3}{8\pi a^3}} \exp\left(-\frac{ar}{2a}\right)$, где

2.31: Предполагая, что ядерные силы между нуклонами обусловлены обменом квантами ядерного поля — виртуальными пионами, оценить радиус Δr действия ядерных сил, если известно, что энергия покоя пионов $m_\pi c^2 \approx 140$ МэВ.



Рис. 7

2.15: Чтобы получить пучок нейтронов, обладающих заданной энергией $\mathcal{E} = 1$ эВ, используют брэгговское отражение первого порядка от кристалла LiF, для которого расстояние между плоскостями кристаллической решетки $d = 2,32$ Å (рис. 7). На кристалл падает пучок нейтронов с различными энергиями. Оценить разброс нейтронов по энергиям $\Delta \mathcal{E}$ в отраженном пучке, если угловая ширина этого пучка $\Delta \varphi = 0,1^\circ$. Какую толщину кристалла D следует выбирать в этом эксперименте? Кристалл вырезан так, что отражающие плоскости параллельны поверхности кристалла.

2.16: На рис. 8 представлены результаты опыта Штерна и Эстермана (1930 г.) по дифракции молекул водорода на кристаллических плоскостях решетки хлористого лития, отстоящих друг от друга на расстояние $d = 1,65$ Å. В опыте использовались молекулы, которые вылетали из окошка печи и, пройдя отверстие коллиматора, падали узким пучком на поверхность кристалла под углом скольжения θ к рассеивающей плоскости кристалла. Определить, пользуясь рис. 8, температуру T печи, считая распределение молекул по скоростям в пучке максвелловским.

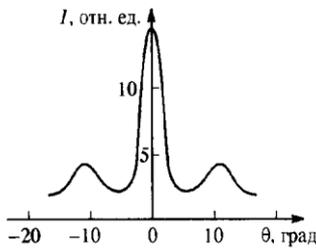


Рис. 8

α — параметр, при котором достигается минимальная энергия основного состояния, то энергия связи оказывается равной $\mathcal{E}_0 = -1,08$ МэВ. Определить величину a .

2.25: Скорость макроскопического тела измеряется по доплеровскому изменению частоты световой волны при отражении от этого тела (зеркала). Показать, что соответствующие неточности измерений импульса и положения тела удовлетворяют соотношению неопределенностей Гейзенберга.

2.17. В одном из способов монохроматизации медленных нейтронов при-

2.46* Желание измерить координату x электрона с хорошей точностью путем уменьшения длины волны λ измерительного фотона, т. е. локализация его в размере λ , приводит к тому, что появляется вероятность рождения виртуальных (e^-e^+)-пар. В силу неразличимости электронов мы не можем отличить исходный электрон от электрона рожденной пары. Оценить, к какой погрешности Δx , которая практически определяет размер электрона, это приводит?

2.48* Рассмотрим опыт по дифракции электронов на двух щелях в незакрепленном экране. Определив место попадания частицы (положение максимума 1-го порядка) и измерив x -компоненту импульса отдачи экрана со щелями Δp_x (рис. 14), можно, казалось бы, определить, через какую щель проходит электрон. Этот мысленный опыт Эйнштейн предлагал Бору в качестве аргумента против соотношения неопределенностей. Показать, что измерение импульса отдачи экрана с необходимой точностью приводит к неопределенности в импульсе рассеянного электрона и тем самым к размытию интерференционной картины в полном соответствии с соотношением неопределенностей.

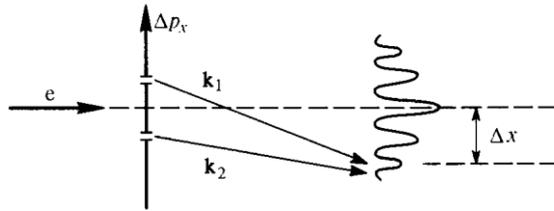


Рис. 14

3.20* Потенциальную энергию взаимодействия $U(z)$ атома гелия с плоской поверхностью твердого тела $z = 0$ можно аппроксимировать прямоугольной ямой некоторой глубины U_0 и шириной $a = 5 \text{ \AA}$, при-

чем $U(z = 0) = +\infty$ (рис. 24). Полагая, что волновая функция адсорбированного атома в основном состоянии достигает максимума при $z = 0,99a$, найти среднее значение координаты $\langle z \rangle$ для адсорбированных атомов в основном состоянии.

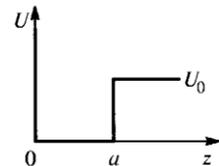


Рис. 24

3.24* Частица, находящаяся в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, излучает фотон, переходя из состояния с номером $(n + 1)$ в состояние n . Найти связь частоты фотона с периодом колебаний между стенками классической ямы частицы с энергией \mathcal{E}_n .

3.25* Свободно движущаяся частица массой m с энергией \mathcal{E} подходит к границе раздела двух областей I и II, на которой потенциальная энергия частицы скачкообразно меняется от постоянного значения U_1 до постоянного значения U_2 (рис. 26). Определить коэффициенты отражения и пропускания частицы на этой границе по амплитуде (r и d) и по энергии (R и D). Исследовать случаи, когда: 1) $\mathcal{E} > U_2$ и 2) $\mathcal{E} < U_2$. Во втором случае определить среднюю глубину проникновения l частицы во вторую среду.

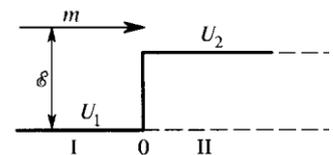


Рис. 26

Рис. 27

3.30* Частица массой m и энергией \mathcal{E} из области I проходит в область II через одномерный потенциальный барьер (или яму) прямоугольной формы с шириной l (рис. 28). Определить для случаев $\mathcal{E} > U$ и $\mathcal{E} < U$ амплитудные коэффициенты отражения r и пропускания d частицы на этом препятствии, предполагая, что потенциальные энергии частицы в областях I, II и внутри барьера постоянны и равны соответственно U_1 , U_2 , U .

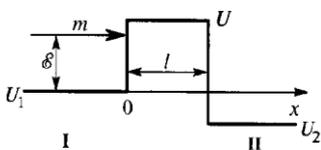


Рис. 28

3.31. В предыдущей задаче $U_1 = U_2$.

3.36* Вывести для α -распада закон Гейгера—Неттола, связывающий период полураспада $T_{1/2}$ с энергией \mathcal{E} вылетающих частиц соотношением $\ln T_{1/2} = A + \frac{B}{\sqrt{\mathcal{E}}}$, где A и B — постоянные. Считать, что потенциальный барьер $U(r)$ имеет вертикальную стенку при $r = R$ (радиус ядра) и определяется законом Кулона при $r \geq R$ (рис. 32). Энергия вылетающей α -частицы $\mathcal{E} \ll U_0$ (высоты барьера). Задачу считать одномерной.

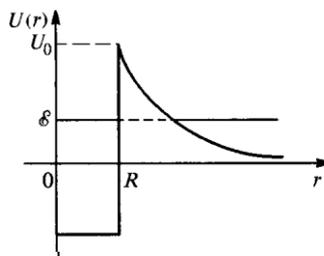


Рис. 32

3.37* В сканирующем туннельном микроскопе (изобретен Г. Биннингом и Г. Рорером в 1982 г.; Нобелевская премия 1986 г.) регистрируется туннельный ток электронов \mathcal{I} через вакуумный зазор между поверхностью проводящего образца и установленной перпендикулярно к ней острой металлической иглой. Оценить, как изменится туннельный ток, если игла при своем поступательном движении параллельно поверхности образца пройдет над ступенькой высотой $b = 1 \text{ \AA}$. Работы выхода электронов из иглы $A_1 = 4,5 \text{ эВ}$ и об-

разца $A_2 = 4,0 \text{ эВ}$. На иглу подано напряжение $V = +0,2 \text{ В}$ относительно образца.

Указание. считать, что до приложения напряжения уровни максимальной энергии электронов в материалах иглы и образца совпадают.

4.3. Классические формулы следуют из квантовых в пределе высоковозбужденных состояний (т. е. при $n \rightarrow \infty$). В атоме водорода, как и в задаче Кеплера, потенциальная энергия $U(r) \propto \frac{1}{r}$. Исходя из квантовых формул для уровней энергии $\mathcal{E}_n = -Ry/n^2$ и радиусов состояний $r_n = an^2$ электрона в атоме водорода, получить для больших n третий закон Кеплера.

4.17. Отрицательные мюоны могут захватываться атомом и замещать в нем электроны электронной оболочки. Практически может замещаться лишь один электрон. Получающиеся в результате такой замены системы называются мезоатомами. Масса мюона $m_\mu = 207m_e$. Вычислить по теории Бора радиус первой круговой орбиты (K -орбиты) мюона в мезоатоме. Рассчитать энергетические уровни мезоатома. Какое излучение будет наблюдаться при переходе на K -орбиту мюона с более высоких орбит? Почему исследование такого излучения применяется для выявления структуры тяжелых атомных ядер? Массой мюона по сравнению с массой ядра пренебречь.

4.18. Позитроний представляет собой связанную систему из электрона и его античастицы — позитрона. Найти уровни энергии, энергию ионизации и соответствующую ей длину волны резонансной линии позитрония. Резонансным называют переход из первого возбужденного состояния в основное.

4.29* В 1989 г. в ЦЕРНе при пропускании медленных антипротонов через водородную камеру наблюдалось образование протониума — атома состава $(p\bar{p})$. Энергия излучения, соответствующая переходу протониума из состояния $2p$ в $1s$, оказалась равной $10,1 \text{ кэВ}$. Определить вклад сильного взаимодействия в разность энергий указанных уровней. Для какого из этих уровней вклад сильного взаимодействия оказывается наибольшим?

4.34. При аннигиляции позитронов с электронами образуются два γ -кванта, уносящие энергию покоя аннигилировавших частиц. Если бы электрон и позитрон перед аннигиляцией покоились, γ -кванты разлетались бы в строго противоположных направлениях. В реальном процессе аннигиляции замедленные в веществе позитроны сталкиваются с движущимися атомными электронами, и угол конуса разлета γ -квантов отличается от 180° . Оценить, насколько этот угол отличается от развернутого, если аннигиляция происходит на электронах L -оболочки углерода.

4.35. Позитроний поглощает фотон, образовавшийся при переходе атомарного водорода из первого возбужденного состояния в основное. Определить скорости электрона и позитрона в случае их симметричного относительно направления движения фотона разлета. Атом в исходном состоянии считать неподвижным.

4.36. При комптоновском рассеянии квантов на атомных электронах явление осложняется тем, что электроны в атомах не находятся в покое. Оценить связанный с этим разброс в углах разлета электронов отдачи, выбиваемых из атомов водорода при рассеянии рентгеновских квантов ($\lambda = 1 \text{ \AA}$) строго назад.

4.53. Исходя из формулы, определяющей интенсивность дипольного излучения $I = \frac{2}{3c^3} \ddot{\mathbf{d}}^2$, где \mathbf{d} — дипольный момент излучающей системы, оценить время жизни возбужденного состояния иона Be^{3+} по отношению к переходу с уровня $n = 10$ на уровень с $n = 9$. Считать атом гармоническим осциллятором.

4.41.* Задача об отыскании уровней энергии атомов обычно решается в предположении, что заряд ядра точечный. На самом деле ядро имеет размер, и радиусы ядер $R_{\text{я}} = 1,3 \cdot 10^{-13} A^{1/3} \text{ см}$, где A — атомная масса. Определить знак и оценить порядок величины относительной поправки $\Delta \epsilon / \epsilon$ к энергии мюона на K -оболочке в мезоатоме неона ($Z = 10, A = 20$), связанной с тем, что часть времени мюон находится внутри ядра, т. е. в поле с потенциалом, отличным от Ze^2/r . Волновая функция основного состояния электрона в атоме водорода $\psi = \frac{1}{\sqrt{\pi r_1^3}} e^{-r/r_1}$, где r_1 — радиус первой боровской орбиты.

Масса мюона $m_{\mu} = 207 m_e$.

4.51.* Релятивистский пучок однократно ионизованных атомов гелия, находящихся в основном состоянии, движется навстречу лазерному излучению с длиной волны $\lambda_0 = 248 \text{ нм}$. Ионы поглощают это излучение, переходят в первое возбужденное состояние, а затем испускают кванты света при обратном переходе. Найти длину волны этого излучения (в направлении движения ионов) в ЛСО (лабораторной системе отчета), а также кинетическую энергию ионов.

4.52. Исходя из формулы, определяющей интенсивность дипольного излучения $I = \frac{2}{3c^3} \ddot{\mathbf{d}}^2$, где \mathbf{d} — дипольный момент излучающей системы, оценить время жизни первого возбужденного уровня однократно ионизованного атома гелия. Считать атом гармоническим осциллятором.

4.55. Оценить, какой радиус должна иметь звезда с массой, равной массе Солнца $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$, и магнитным полем на поверхности $B = 5 \text{ кТл}$, чтобы на экваторе звезды могла происходить ионизация атома водорода межзвездного газа, падающего из бесконечности. Считать, что ионизация атома происходит, когда вершина возникающего для электрона потенциального барьера сравнивается с энергией основного состояния.

Контрольная работа 2:

6.12.* Пучок атомов натрия, находящихся в основном состоянии, вылетает из печи, температура которой $T = 350 \text{ К}$. Пучок расщепляется в поперечном неоднородном магнитном поле с градиентом $dB/dx = 50 \text{ Тл/м}$ на пути $l = 1 \text{ см}$. Детектор удален от магнита на расстояние $L = 6,5 \text{ м}$. Найти расстояние s между пятнами на экране.

6.16: В опытах Шалла (1968 г.) наблюдалось расщепление пучка нейтронов на два пучка при преломлении на границе однородного магнитного поля. Найти малый угол θ между направлениями преломления пучков. Однородное магнитное поле имеет индукцию $B = 2,5$ Тл. Нейтроны с дебройлевской длиной волны $\lambda = 0,5$ нм падают под углом $\varphi = 30^\circ$ к достаточно резкой границе магнитного поля.

6.21: При переходе $P \rightarrow S$ из возбужденного состояния атома в основное испускается дублет $\lambda_1 = 455,1$ нм и $\lambda_2 = 458,9$ нм. Какие линии, соответствующие переходу ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$, будут наблюдаться в спектре поглощения газа, состоящего из таких атомов, при наложении магнитного поля 50 кГс при температуре $T = 0,5$ К?

6.27: Определить расщепление спектральной линии ${}^2P_{3/2} \rightarrow {}^2S_{1/2}$ в слабом магнитном поле. Для натрия эта линия является коротковолновой компонентой ($\lambda = 589,0$ нм) двойной линии D с $\Delta\lambda = 0,6$ нм. Какие магнитные поля в этом случае являются слабыми?

6.30: В сильном магнитном поле \mathbf{B} при наблюдении в направлении, перпендикулярном полю (поперечный эффект Зеемана), в спектре излучения имеется три линейно поляризованных линии: несмещенная спектральная линия с длиной волны λ и электрическим вектором, направленным вдоль магнитного поля, и две смещенные — с электрическим вектором $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$. Это излучение пропускается через два скрещенных поляризатора, между которыми находится анизотропная кристаллическая пластинка с заданными Δn и d . Оптическая ось пластинки составляет углы 45° с направлениями поляризаторов. При какой величине магнитного поля в спектре излучения будут видны лишь две крайние линии?

6.37: Найти зеемановское расщепление $\Delta\omega$ спектральной линии ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$. Указать число компонент в расщепленной линии.

6.44: Оценить, какое минимальное магнитное поле B можно обнаружить у звезды типа Солнца (период вращения $\tau = 10^6$ с, радиус $R = 10^{10}$ см, температура поверхности Солнца $T = 6 \cdot 10^3$ К) с помощью эффекта Зеемана в оптической области спектра ($\omega_0 = 10^{15}$ с $^{-1}$).

6.51: Взаимодействие магнитных моментов нейтрона и электрона может формально привести к связанному стабильному состоянию этих частиц. Каков получается характерный размер такой системы? Движение электрона считать нерелятивистским.

6.138. Атомарный водород находится в термодинамическом равновесии со своим излучением. Найти:

а) отношение вероятностей индуцированного и спонтанного излучений атомов с уровня $2P$ при температуре $T = 3000$ К;

6.139. Через газ с температурой T проходит пучок света с частотой ω , равной резонансной частоте перехода атомов газа, причем $\hbar\omega \gg kT$. Показать, учитывая индуцированное излучение, что коэффициент поглощения газа $\kappa = \kappa_0(1 - e^{-\hbar\omega/kT})$, где κ_0 — коэффициент поглощения при $T \rightarrow 0$.

6.137. Атомарный Li с концентрацией $n = 3,6 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ находится при температуре $T = 1500$ К. При этом мощность излучения резонансной линии $\lambda = 671$ нм ($2P \rightarrow 2S$) в расчете на единицу объема газа $P = 0,30$ Вт/см 3 . Найти среднее время жизни атомов лития в состоянии резонансного возбуждения.

6.136. Разреженные пары ртути, атомы которой практически все находятся в основном состоянии, осветили резонансной линией ртутной лампы с длиной волны $\lambda = 253,65$ нм. При этом мощность испускания данной линии парами ртути оказалась $P = 35$ мВт. Найти число атомов в состоянии резонансного возбуждения, среднее время жизни которого $\tau = 0,15$ мкс.

6.135. Вычислить среднее время жизни возбужденных атомов, если известно, что интенсивность спектральной линии, обусловленной переходом в основное состояние, убывает в $\eta=25$ раз на расстоянии $l=2,5$ мм вдоль пучка атомов, скорость которых $v=600$ м/с.

6.133. Определить отношение числа атомов газообразного натрия в состоянии $3P$ к числу атомов в основном состоянии $3S$ при температуре $T=2400$ К. Известно, что переходу $3P \rightarrow 3S$ соответствует спектральная линия с длиной волны $\lambda=589$ нм.

6.122. Установить, какие из нижеперечисленных переходов запрещены правилами отбора: ${}^2D_{3/2} \rightarrow {}^2P_{1/2}$, ${}^3P_1 \rightarrow {}^2S_{1/2}$, ${}^3F_3 \rightarrow {}^3P_2$, ${}^4F_{7/2} \rightarrow {}^4D_{5/2}$.

6.124. Найти кратность вырождения состояний 2P , 3D и 4F с максимально возможными полными механическими моментами.

6.127. Используя правила Хунда, найти основной терм атома, незаполненная подоболочка которого содержит:

а) три p -электрона; б) четыре p -электрона.

6.128. Найти с помощью правил Хунда полный механический момент атома в основном состоянии, если его незаполненная подоболочка содержит:

а) три d -электрона; б) семь d -электронов.

6.129. Воспользовавшись правилами Хунда, найти число электронов в единственной незаполненной подоболочке атома, основной терм которого:

а) 3F_2 ; б) ${}^2P_{3/2}$; в) ${}^6S_{5/2}$.

6.130. Написать с помощью правил Хунда спектральный символ основного терма атома, единственная незаполненная подоболочка которого заполнена:

а) на $1/3$, и $S=1$; б) на 70% , и $S=3/2$.

6.131. Единственная незаполненная подоболочка некоторого атома содержит три электрона, причем основной терм атома имеет $L=3$. Найти с помощью правил Хунда спектральный символ основного состояния данного атома.

6.121. Система состоит из d -электрона и атома в ${}^2P_{3/2}$ -состоянии. Найти возможные спектральные термы этой системы.

9. Как оценивается успеваемость по курсу:

Оценивание уровня учебных достижений обучающихся по дисциплине осуществляется в виде текущего и промежуточного контроля. Текущий контроль успеваемости по дисциплине осуществляется в форме (формах) контрольных работ, тестов, индивидуальных заданий, групповых заданий. Промежуточный контроль по дисциплине осуществляется в форме экзамена, при этом проводится оценка компетенций, сформированных по дисциплине.

Список экзаменационных вопросов:

1. Тепловое излучение. Равновесная плотность теплового излучения. Абсолютно черное тело (АЧТ). Излучение абсолютно черного тела. Закон Кирхгофа.

2. Связь между испускательной способностью АЧТ и спектральной плотностью энергии равновесного теплового излучения.
3. Закон Стефана-Больцмана. Критерий Вина. Закон смещения Вина.
4. Вывод формулы Релея-Джинса.
5. Гипотеза Планка. Формула Планка. Предельные случаи формулы Планка.
6. Квантовые свойства электромагнитного излучения: фотоэффект и эффект Комптона.
7. Квантовые свойства электромагнитного излучения: опыт Боте, опыт Иоффе-Добронравова.
8. Корпускулярно-волновой дуализм: импульс электромагнитного излучения и импульс фотона.
9. Линейчатые спектры излучения и формула Бальмера. Модель Томсона для строения атома.
10. Опыты Резерфорда по рассеянию α - частиц, ядерная модель атома. Нестабильность в модели атома Резерфорда.
11. Модель атома Бора: постулаты, правило квантования орбит, основное состояние атома водорода в модели Бора.
12. Опыт Франка-Герца.
13. Волновые свойства частиц: гипотеза де-Бройля, экспериментальные подтверждения волновых свойств частиц (например, опыт ДэвиссонаДжермера).
14. Обсуждение физического смысла волн де-Бройля. Несостоятельность гипотезы о волновом пакете.
15. Статистическое толкование волн де-Бройля. Волновая функция. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для импульса и координат, для энергии и времени. Границы применимости классической механики.
16. Уравнение Шредингера - «вывод». Стационарные состояния и уравнение Шредингера.
17. Примеры решения стационарного уравнения Шредингера: частица в одномерной потенциальной яме с бесконечными стенками.
18. Примеры решения стационарного уравнения Шредингера: частица в сферической потенциальной яме с бесконечными стенками.
19. Частица, налетающая на потенциальный барьер.
20. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Туннелирование.
21. Квантово-механические операторы: представление физических величин операторами, операторы координат, импульса, потенциальной и кинетической энергии, гамильтониан квантовой системы как оператор полной энергии.
22. Квантово-механические операторы: собственные значения и собственные функции, эрмитовость.
23. Квантово-механические операторы: наблюдаемые, вычисление средних значений физических величин в квантовых системах, принцип суперпозиции, коммутационные соотношения и принцип неопределенности.
24. Квантово-механический оператор момента импульса: представление в декартовых и полярных координатах, коммутационные соотношения, собственные значения и функции.
25. Квантово-механические операторы: Гильбертово пространство, вектор состояния, амплитуда вероятности, скалярное произведение.

26. Движение в центральном поле: гамильтониан в сферических координатах, оператор Лежандра и собственные функции квадрата углового момента, центробежный барьер и эффективная потенциальная энергия.
27. Движение в центральном поле: решение радиального уравнения для дискретного спектра, асимптотики при малых и больших r , спектр энергий водородоподобного атома.
28. Спектр энергий водородоподобного атома: квантовые числа как параметры состояния, вырождение энергетических уровней. Схема уровней атома водорода и спектр его излучения.
29. Спин. Дублетная структура линий в спектрах щелочных металлов. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Орбитальные и собственные механические и магнитные моменты электронов, гиромагнитные отношения.
30. Собственные функции и собственные значения оператора спина. Матрицы Паули.
31. Спин - орбитальное взаимодействие. Тонкая структура атомных уровней.
32. Магнитный и механический моменты атома: L-S и j-j-связи, множитель Ланде.
33. Эффект Зеемана: сильное и слабое поле.
34. Мультиплетность энергетических уровней и спектральных линий, правила отбора для разрешенных переходов.
35. Квантовые системы из одинаковых частиц. Принцип тождественности одинаковых микрочастиц. Симметричные и антисимметричные состояния (волновые функции) тождественных микрочастиц. Бозоны и фермионы. Принцип Паули.
36. Нормальное состояние атома гелия.
37. Проблема атома гелия. Общий случай.
38. Строение атомов и периодическая система химических элементов Д.М.Менделеева. Порядок заполнения электронных оболочек. Правила Хунда и Маделунга-Клечковского.
39. Квантово-механическое описание оптических переходов в атоме: теория возмущений, зависящих от времени, вероятность перехода, «золотое» правило Ферми.
40. Правила отбора для дипольных электрических переходов: линейный гармонический осциллятор, электрон в центральном поле.
41. Спонтанное и вынужденное излучение. Двухуровневая квантовая система в поле равновесного излучения, принцип детального равновесия, спонтанные и индуцированные переходы, соотношения Эйнштейна и его вывод распределения Планка.
42. Лазеры: прохождение излучения через среду, условие усиления (инверсная заселённость уровней). Принцип работы лазера и его устройство.
43. Электронный парамагнитный резонанс (квантовомеханическая трактовка). Строгие и нестрогие правила отбора при поглощении и испускании фотонов атомами (на примере эффекта Зеемана и ЭПР).
44. Элементы физики молекул: молекула - связанная система атомов. Типы химической связи: ионная и ковалентная. Энергетическое состояние молекулы: энергия вращения, энергия колебаний, энергия электронной конфигурации.
45. Ядерные модели: эксперименты Резерфорда и Гейгера по рассеянию α -частиц в газах. Открытие нейтрона Чадвиком. Нуклоны. Экспериментальная зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа.

46. Свойства ядерных сил: радиус действия, глубина потенциала, насыщение ядерных сил, спиновая зависимость. Ядерные силы как проявление сильного взаимодействия.
47. Модель жидкой заряженной капли. Формула Вайцеккера для энергии связи ядра. Оболочечная модель и магические числа в осцилляторном потенциале.
48. Радиоактивность: альфа, бета, гамма распада. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни.
49. Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы: фундаментальные частицы (лептоны, кварки и переносчики взаимодействий). Законы сохранения и внутренние квантовые числа. Кварковая структура адронов — мезоны, барионы и резонансы. Стандартная модель
50. Несохранение чётности при бета-распаде, опыт Ву. Открытие W- и Z- бозонов и бозона Хиггса.

Критерии оценивания результатов обучения по дисциплине:

Знания, умения и навыки обучающихся при промежуточном контроле в форме экзамена (дифференцированного зачета) определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно» (зачтено (отлично), зачтено (хорошо), зачтено (удовлетворительно), не зачтено (неудовлетворительно)).

1. «Отлично» – обучающийся глубоко и прочно усвоил весь программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагает, не затрудняется с ответом при видоизменении задания, свободно справляется с задачами и практическими заданиями, правильно обосновывает принятые решения, умеет самостоятельно обобщать и излагать материал, не допуская ошибок.

2. «Хорошо» – обучающийся твердо знает программный материал, грамотно и по существу излагает его, не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, может правильно применять теоретические положения и владеет необходимыми умениями и навыками при выполнении практических заданий.

3. «Удовлетворительно» – обучающийся усвоил только основной материал, но не знает отдельных деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушает последовательность в изложении программного материала и испытывает затруднения в выполнении практических заданий.

4. «Неудовлетворительно» – обучающийся не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с большими затруднениями выполняет практические задания, задачи.

Знания, умения и навыки обучающихся при промежуточном контроле в форме зачета определяются «зачтено», «не зачтено».

«Зачтено» – обучающийся знает курс на уровне лекционного материала, базового учебника, дополнительной учебной, научной и методологической литературы, умеет привести разные точки зрения по излагаемому вопросу.

«Не зачтено» – обучающийся имеет пробелы в знаниях основного учебного материала, допускает принципиальные ошибки в выполнении предусмотренных программой заданий.

11. Дополнительные комментарии:

Курс читается на русском языке.