

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе
А. А. Воронов
17 июня 2025 г.

ПРОГРАММА

по дисциплине: Общая физика: квантовая физика
по направлениям подготовки: ВСЕ

физтех-школы: ВСЕ
кафедра: общей физики

курс: 3

семестр: 5

лекции – 30 часов

Диф. зачёт – 5 семестр

практические (семинарские)

занятия – 30 часов

лабораторные занятия – 60 часов

Диф. зачёт – 5 семестр

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ – 120

Самостоятельная работа:

теор. курс – 30 часов

физ. практикум – 75 часов

Программу и задание составили:

д.ф.-м.н., проф. В. Н. Глазков

к.ф.-м.н., доц. А. С. Кобякин

к.т.н., доц. В. А. Овчинкин

д.ф.-м.н., проф. Ю. В. Петров

к.ф.-м.н., доц. А. О. Раевский

к.ф.-м.н., доц. П. В. Попов

к.ф.-м.н., доц. К. М. Крымский

д.ф.-м.н., доц. А. И. Сафонов

к.ф.-м.н., доц. А. О. Светличный

Программа принята на заседании
кафедры общей физики 13 мая 2025 г.

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор

А. В. Гавриков

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

1. Корпускулярные свойства электромагнитных волн. Основные нерешенные проблемы классической физики на рубеже XIX–XX веков. Основные экспериментальные результаты по внешнему фотоэффекту. Гипотезы Планка и Эйнштейна относительно квантов света. Уравнение Эйнштейна и объяснение фотоэффекта. Импульс фотона. Эксперимент Комптона по рассеянию рентгеновских лучей на лёгких ядрах, изменение длины волны фотонов при рассеянии на свободных электронах, комптоновская длина волны.

2. Законы излучения АЧТ. Подсчет числа состояний поля в заданном объеме; фазовый объем, приходящийся на одно квантовое состояние, плотность состояний. Формула Рэлея–Джинса и ультрафиолетовая катастрофа, формула Вина. Гипотеза Планка, распределение Планка. Закон смещения Вина. Равновесное излучение как идеальный газ фотонов. Абсолютно черное тело. Законы Кирхгофа, Ламберта и Стефана–Больцмана.

3. Волновые свойства частиц. Соотношение неопределенностей. Гипотеза де Бройля о волновых свойствах материальных частиц – корпускулярно-волновой дуализм. Длина волны де Бройля нерелятивистской частицы. Опыты Девиссона – Джермера и Томсона по дифракции электронов. Критерий квантовости системы. Соотношения неопределенностей (координата-импульс; энергия-время). Волновая функция свободной частицы (волна де Бройля). Вероятностная интерпретация волновой функции, выдвинутая Борном.

4. Формализм нерелятивистской квантовой механики. Понятие об операторах физических величин. Операторы координаты, импульса, потенциальной и кинетической энергии системы, гамильтониан. Собственные функции и собственные значения. Уравнение Шредингера (нестационарное и стационарное). Свойства волновой функции стационарных задач: непрерывность, конечность, однозначность, непрерывность производной. Принцип суперпозиции квантовых состояний. Формула для среднего значения физической величины в заданном состоянии. Закон сохранения вероятности, вектор плотности потока вероятности. Процесс квантового измерения физической величины — возможность получения только ее собственных значений в процессе идеального измерения. Редукция волновой функции в процессе измерения. Необходимость серии идентичных измерений. Критерий возможности одновременного измерения нескольких физических величин. Понятие о скрытых параметрах (гипотеза Эйнштейна) и неравенствах Белла.

5. Потенциальные барьеры. Потенциальные ямы. Осциллятор. Рассеяние частиц на потенциальной ступеньке конечной высоты, прохождение частицы над ямами и барьерами конечной ширины, эффект Рамзауэра. Прохождение частицы через прямоугольный потенциальный барьер конечной ширины (туннельный эффект), вывод приближенной формулы для прозрачности барьера

произвольной формы. Бесконечно глубокая потенциальная яма. Связанные состояния частицы в одномерной симметричной потенциальной яме конечной глубины. Уровни энергии одномерного гармонического осциллятора (без вывода).

6. Движение в центральном поле. Колебательные и вращательные спектры молекул. Оператор момента импульса. Квантование собственных значений проекции момента на выделенную ось и квадрата момента импульса, сложение моментов. Движение в центральном поле, центробежная энергия, радиальное квантовое число, кратность вырождения; s -состояния в трёхмерной сферически симметричной яме конечной глубины, условие существования связанного состояния. Адиабатическое приближение в теории молекул. Вращательный и колебательный спектры, энергетические масштабы соответствующих возбуждений.

7. Водородоподобные атомы. Движение в кулоновском поле. Энергетический спектр атома водорода и водородоподобных атомов, главное квантовое число, кратность вырождения. Волновая функция основного состояния атома водорода. Качественный характер поведения радиальной и угловой частей волновых функций возбужденных состояний. Тонкая и сверхтонкая структура спектра атома водорода. Изотопический сдвиг, мезоатомы. Связь точного решения задачи об атоме водорода и модели Бора. Магнитный орбитальный момент электронов, гиромагнитное отношение, магнетон Бора. Опыт Эйнштейна – де Гааза. Опыт Штерна – Герлаха, гипотеза о спине электрона, спиновый g -фактор.

8. Тожественность частиц. Обменное взаимодействие. Сложные атомы. Спин-орбитальное взаимодействие. Тожественность частиц, симметрия волновой функции относительно перестановки частиц, бозоны и фермионы, принцип Паули. Обменное взаимодействие. Самосогласованное поле в сложных атомах, электронная конфигурация атома. Правило Маделунга–Клечковского. Таблица Менделеева. Атомные термы, метод нахождения термов для заданной электронной конфигурации, спектроскопическая запись состояния атома. Спин-орбитальное взаимодействие. Оператор полного момента импульса, g -фактор Ланде. Типы связи: Рассела–Саундерса (LS) и $j-j$. Правила Хунда. Характеристическое рентгеновское излучение (закон Мозли).

9. Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана. Излучение, правила отбора. ЭПР и ЯМР. Тонкая структура терма для случая LS -связи. Эффект Зеемана для случаев слабого и сильного магнитных полей. Классификация фотонов по полному моменту и чётности (E - и M -фотоны). Строгие и нестрогие правила отбора при поглощении и испускании фотонов. Соотношение интенсивностей излучения фотонов различных типов и мультипольностей. Естественная ширина уровня. Электронный парамагнитный резонанс и ядерный магнитный резонанс.

10. Спонтанное и вынужденное излучение. Лазеры. Двухуровневая квантовая система в поле равновесного излучения, принцип детального равновесия, спонтанные и индуцированные переходы, соотношения Эйнштейна. Прохождение излучения через среду, инверсная заселённость уровней. Принцип работы лазера.

11. Ядерные модели. Открытие ядра атома (опыты Резерфорда, Гейгера и Марсдена) и его строения (опыты Блэккетта и Чедвика). Энергия связи ядра, экспериментальная зависимость удельной энергии связи ядра от массового числа. Свойства ядерных сил: радиус действия, глубина потенциала, насыщение ядерных сил. Ядерные силы как проявление сильного взаимодействия. Модель Юкавы. Виртуальные частицы. Радиус взаимодействия как следствие обмена виртуальными частицами. Капельная модель ядра. Формула Вайцзекера. Оболочечная модель ядра, спин-орбитальное расщепление. Магические числа. Одночастичные и коллективные возбуждения ядер.

12. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада, константа распада, период полураспада, среднее время жизни, вековое уравнение. Альфа-распад, закон Гейгера – Нэттола и его объяснение. Бета-распад и его виды. Энергетический спектр бета-распада, гипотеза нейтрино и его опытное обнаружение. Гамма-излучение, изомерия ядер. Внутренняя конверсия электронов. 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.

13. Ядерные реакции. Экзотермические и эндотермические ядерные реакции. Порог реакции. Сечения реакций (полное и парциальные), каналы реакции, ширины каналов. Модель Бора составного ядра: классическое геометрическое сечение, поправки на волновой характер движения частиц, закон Бете. Резонансные реакции, формула Брейта – Вигнера. Деление ядер под действием нейтронов, мгновенные и запаздывающие нейтроны, цепная реакция деления. Принцип работы ядерного реактора. Ядерный синтез.

14. Фундаментальные взаимодействия. Элементарные частицы и способы их регистрации. Стандартная модель. Понятие взаимодействия в физике элементарных частиц. Виды фундаментальных взаимодействий. Характерный радиус взаимодействия. Законы сохранения и внутренние квантовые числа, «цвет». Графическое представление взаимодействий, понятие о диаграммах Фейнмана. Кварковая структура адронов: мезоны, барионы и резонансы. Элементы квантовой хромодинамики: асимптотическая свобода, конфайнмент кварков и глюонов, кварковый потенциал. Оценка адронных сечений при высоких энергиях, теорема Померанчука. Несохранение чётности при слабом взаимодействии. Проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции.

Литература

Основная

1. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.5. Атомная и ядерная физика. Москва : Физматлит : МФТИ, 2020.
2. *Иишанов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П.* Частицы и атомные ядра. М. : ЛЕНАНД, 2019.
3. *Ципенюк Ю.М.* Квантовая микро- и макрофизика. Москва : Физматкнига, 2019.
4. *Карлов Н.В., Кириченко Н.А.* Начальные главы квантовой механики. М.: Физматлит, 2006.
5. *Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М.* Основы физики. Т.II / под ред. Ю.М. Ципенюка. Москва : Физматлит, 2007.
6. «Сборник задач по общему курсу физики. Ч.3. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц. Излучение» / под ред. В. А. Овчинкина. Москва : Физматкнига, 2023.

Дополнительная

1. *Гольдин Л.Л., Новикова Г.И.* Введение в квантовую физику. Москва : Наука, 1988.
2. *Фаддеев М.А., Чупрунов Е.В.* Лекции по атомной физике. Москва : Физматлит, 2008.
3. *Крылов И.П.* Основы квантовой физики и строение вещества: учебное пособие. Москва : МФТИ, 1989.
4. *Рубаков В.А.* К открытию на Большом адронном коллайдере новой частицы со свойствами бозона Хиггса. // УФН. 2012. Т. 182, №10. С.1017.
5. *Казаков Д.И.* Хиггсовский бозон открыт: что дальше? // УФН. 2014. Т. 184, №10. С. 1004.
6. *Казаков Д.И.* Перспективы физики элементарных частиц // УФН. 2019. Т. 189, № 4. С. 387.
7. *Кобякин А.С.* Введение в физику элементарных частиц : учебно-методическое пособие. Москва : МФТИ, 2018.
8. *Кобякин А.С.* Введение в физику нейтрино : учебно-методическое пособие. Москва : МФТИ, 2019.

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ
для студентов 3-го курса на осенний семестр 2025-2026 учебного года

№ сем.	Даты	Темы семинарских занятий	Задачи		
			0	1	2
1	1 – 7 сен.	Фотоэффект. Эффект Комптона.	0-1-1, 0-1-2	1.7, T1, T2,	1.35, 1.48, T3,
2	8 – 14 сен.	Законы излучения АЧТ	0-2-1, 0-2-2	11.26, 11.38, 11.50	11.44, T.4, T5
3	15 – 21 сен.	Волны де Бройля. Соотношение неопределенностей.	0-3-1, 0-3-2	2.12, 2.15, 2.26,	2.30, 2.38, 2.44
4	22 – 28 сен.	Уравнения Шредингера. Потенциальные барьеры. Туннельный эффект	0-4-1, 0-4-2	3.35, 3.53, 3.56,	3.45, T6, T.7
5	29 сен. – 5 окт.	Потенциальные ямы. Квазиклассическое приближение	0-5-1, 0-5-2	3.5, 3.15, 3.21,	3.6, 3.23, 3.50
6	6 – 12 окт.	Колебательные и вращательные уровни. Водородоподобные атомы.	0-6-1, 0-6-2	4.32, 5.16, 5.25	4.38, 4.45, 5.50
7	13 – 19 окт.	Магнитный момент. Спин. Обменное взаимодействие.	0-7-1, 0-7-2	6.8, 6.10, 6.15,	6.46, 6.68, 6.78
8	20 – 26 окт.	Контрольная работа (по группам). Сдача 1-го задания.			
9	27 окт. – 2 нояб.	Сложные атомы. Тонкая и сверхтонкая структуры. Эффект Зеемана.	0-9-1, 0-9-2	6.20, 6.75, T.8	6.35, 6.77, 6.80,
10	3 – 9 нояб.	Излучение, правила отбора. ЭПР.	0-10-1, 0-10-2	6.21, 6.88 7.39	6.56, 6.89, 11.57
11	10 – 16 нояб.	Ядерные модели. ЯМР.	0-11-1, 0-11-2	7.5, 7.16, 7.64	7.18, 7.36, T.9,
12	17 – 23 нояб.	Радиоактивность.	0-12-1, 0-12-2	7.69, 7.51, 7.20	7.11, 9.11, T.10
13	24 – 30 нояб.	Ядерные реакции	0-13-1, 0-13-2	8.45, 8.53, 9.4	8.68, 9.5, T.11
14	1 – 7 дек.	Фундаментальные взаимодействия и частицы.	0-14-1, 0-14-2	10.69, 10.62, 10.92	10.21, 10.99, T.12
15	8 – 14 дек.	Контрольная работа (по группам). Сдача 2-го задания.			
16	15 – 21 дек.	КОЛЛОКВИУМ. ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ЗАЧЕТ			

Номера задач указаны по задачнику «Сборник задач по общему курсу физики. Ч.3. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц. Излучение» / под ред. В. А. Овчинкина. — М.: Физматкнига, 2023.

В каждой теме семинара имеются задачи 3-х групп:

0 — задачи для самостоятельного решения студентами к предстоящему семинару. При необходимости эти задачи разбираются на семинаре.

1 — задачи, рекомендованные для обсуждения на семинаре.

2 — задачи, рекомендованные для самостоятельного решения.

Все задачи должны быть решены и оформлены в тетради для сдачи задания. Преподаватель по своему усмотрению разбирает часть задач на семинаре. Возможен разбор и других равноценных задач.

Задачи группы 0

0-1-1. В опытах П. Н. Лебедева, доказавшего существование светового давления, падающий световой поток составлял $S = 6 \text{ Вт/см}^2$. Вычислить давление, которое испытывали зачернённые и зеркальные лепестки его измерительной установки.

0-1-2. Монохроматическое гамма-излучение рассеивается на покоящихся электронах. Найти частоту излучения, рассеиваемого назад, если энергия налетающего фотона равна энергии покоя электрона.

0-2-1. Вследствие повышения температуры положение максимума спектральной энергетической светимости абсолютно черного тела переместилось с 2 мкм на 1 мкм. Во сколько раз изменилась его интегральная энергетическая светимость?

0-2-2. Оценить давление теплового излучения во внутренней области Солнца, где температура равна $T=1,3 \cdot 10^7 \text{ К}$.

0-3-1. Определить кинетическую энергию электрона, при которой его дебройлевская и комптоновская длины волн равны между собой.

0-3-2. Исходя из соотношения неопределенностей, оцените минимальную энергию осциллятора с частотой ω .

0-4-1. Найти минимальную кинетическую энергию электрона, при которой он без отражения пройдёт над одномерной прямоугольной потенциальной ямой глубиной $U = 2,5 \text{ эВ}$ размером $a = 2r_b$, r_b — боровский радиус.

0-4-2. Потенциальный барьер представляет собой прямоугольный треугольник с катетами $2a = 2 \text{ \AA}$ и $U_0 = 5 \text{ эВ}$. Оценить вероятность туннелирования через такой барьер электрона с энергией $E = 3U_0/5$.

0-5-1. Частица массы m заключена в одномерном потенциальном ящике шириной l с непроницаемыми стенками. Найти работу, которую надо затратить

на квазистатическое сжатие ящика вдвое, если частица находится в основном состоянии.

0-5-2. Частица массы m заключена в одномерном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Какова масса частицы, если при ширине ящика $l = 3 \text{ \AA}$ расстояние между первым и третьим уровнями частицы в яме составляет $\Delta E = 5 \text{ эВ}$?

0-6-1. При какой температуре средняя энергия поступательного движения молекулы O_2 равна энергии, необходимой для возбуждения ее на первый вращательный уровень? Межъядерное расстояние в молекуле равно $d = 1,2 \text{ \AA}$.

0-6-2. Электрон с энергией $E = 12,5 \text{ эВ}$ сталкивается с неподвижным атомом водорода, находящимся в основном состоянии. Найдите минимально возможную энергию рассеянного электрона. Энергию отдачи атома не учитывать.

0-7-1. Найти возможные значения полного спина атома водорода в основном состоянии с учетом спина ядра.

0-7-2. Оценить энергетическое расщепление состояний, найденных в предыдущей задаче, при учете магнитного взаимодействия протона и электрона, рассматриваемых, как точечные магнитные диполи.

0-9-1. Определить возможные значения полного углового момента электрона и его проекции на выделенную ось в атоме водорода, находящемся в возбужденном состоянии с главным квантовым числом $n = 3$.

0-9-2. Атом водорода находится в $2p$ -состоянии. Определить возможные значения полного момента количества движения атома с учетом спина протона.

0-10-1. Для получения тепловых нейтронов (с максвелловским распределением скоростей, отвечающим температуре $T = 300 \text{ К}$) поток нейтронов из реактора направляют в сосуд с тяжелой водой (модератор), размер которого много больше длины пробега нейтрона в воде. Избавляясь от избытка энергии в столкновениях с ядрами дейтерия, нейтроны термализуются после нескольких десятков столкновений. Найти, чему будет равна относительная разность чисел тепловых нейтронов, магнитные моменты которых направлены по полю или против поля, если модератор поместить в магнитное поле индукцией $B = 10 \text{ Тл}$. g -фактор нейтрона равен $-3,8$.

0-10-2. Возбужденный атом находится в поле излучения абсолютно черного тела. При какой температуре излучения, вероятность индуцированного излучения фотона видимой области спектра превосходит вероятность спонтанного излучения?

0-11-1. Оценить в капельной модели разность энергий связи зеркальных ядер ${}_{13}^{27}\text{Al}$ и ${}_{14}^{27}\text{Si}$, и сравнить ее с экспериментальным значением $\Delta = 4,812 \text{ МэВ}$.

0-11-2. В основном состоянии ядра $^{17}_8\text{O}$ неспаренный нейтрон находится в состоянии с $l = 2$ и $j = 5/2$. Для перехода этого нуклона в возбужденное состояние с $l = 2$, $j = 3/2$ требуется энергия 5 МэВ. Определить константу спин-орбитального взаимодействия, а также типы фотонов, поглощаемых при данном переходе с наибольшей вероятностью.

0-12-1. Препараты с радиоактивным изотопом натрия-24 используются в медицине для диагностики переноса веществ в организме. С этой целью пациенту ввели внутривенную дозу раствора, содержащего изотоп ^{24}Na . Активность 1 см³ этого раствора $\alpha_0 = 2000$ распадов в секунду. Период полураспада изотопа ^{24}Na равен $T = 15,3$ часа. Через $t = 3$ ч 50 мин активность 1 см³ крови пациента стала равна $\alpha = 0,28$ распадов в секунду. Каков объём введённого раствора, если общий объём крови пациента $V = 6$ л?

0-12-2. Препарат полония активностью $3,7 \cdot 10^9$ распад/с помещен в калориметр теплоёмкостью 1 кал/К. Найти повышение температуры калориметра за 1 час, если известно, что полоний испускает α -частицы с энергией 5,3 МэВ. Считать период полураспада полония много большим времени эксперимента.

0-13-1. В реакции синтеза ядер дейтерия и трития $d + t \rightarrow \alpha + n + Q$ выделяется энергия $Q = 17,8$ МэВ. Какова энергия, уносимая нейтроном?

0-13-2. Сечение поглощения нейтрино с энергией более 5 МэВ ядром железа составляет $\sigma = 10^{-42}$ см². Какова вероятность поглотиться для такого нейтрино, движущегося по диаметру в ядре Земли? Считать, что ядро состоит из железа ($A = 56$ а.е.м., $\rho = 7,8$ г/см³), его радиус $R = 3000$ км.

0-14-1. Определите минимальную кинетическую энергию протона, налетающего на неподвижный протон, необходимую для рождения пары протон-антипротон.

0-14-2. Определить энергию релятивистского электрона, если радиус кривизны его следа в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле $B = 10^5$ Гс, составляет $R = 2$ м.

Текстовые задачи

Т.1. Детектор нейтрино SUPERKAMIOKANDE (Япония) используется для детектирования нейтрино с энергией выше 3.5 МэВ. При взаимодействии нейтрино с водой, наполняющей детектор, выбиваются энергичные электроны, которые производят обнаруживаемое датчиками черенковское излучение. Определить максимальный угол (по отношению к направлению движения исходного нейтрино), под которым движутся производящее черенковское излучение электроны отдачи при энергии нейтрино, равной

порогу детектирования. Показатель преломления воды $n = 1.333$, нейтрино считать безмассовыми частицами.

Ответ: $\theta_{\max} \simeq 59^\circ$

Т.2. Покажите, что электрон, движущийся в среде с показателем преломления $n > 1$ со скоростью $V > c/n$, способен излучать фотоны (излучение Вавилова—Черенкова). Найдите энергию фотона $\varepsilon(\theta)$ в зависимости от направления излучения θ относительно исходного направления движения электрона. Каково максимально возможное значение θ_{\max} ? Энергию фотона считать малой по сравнению с энергией покоя.

Ответ:
$$\varepsilon = \frac{mc^2}{n^2} \left(\cos \theta - \frac{c}{nV} \right), \quad \theta_{\max} = \arccos \frac{c}{nV}$$

Т.3. При прохождении гамма-квантов с энергией $E_\gamma = 1$ МэВ через органический сцинтиллятор образуется две группы первичных быстрых электронов: в результате внутреннего фотоэффекта (ионизации атомов) и в результате комптоновского рассеяния. При каком энергетическом разрешении регистрирующей аппаратуры удастся отличить фотоэлектроны от комптоновских электронов с наибольшей энергией?

Ответ: для комптоновских электронов $E_\gamma - E_{\max} = mc^2 / (2 + mc^2 / E_\gamma) = 0,2$ МэВ. При фотоэффекте на лёгких атомах (кислород, углерод) энергия ионизации внутренних оболочек не более 10 кэВ, $E_\gamma - E = 10$ кэВ $\ll 0.2$ МэВ. Разрешение аппаратуры должно быть лучше 0.2 МэВ.

Т.4. Нитинол (сплав никеля и титана) обладает эффектом "памяти формы": он восстанавливает ее при нагреве выше температуры $t=130^\circ\text{C}$. Проволока из нитинола, подогреваемая пропускаемым через неё током, используется в качестве привода для раскрытия антенн космических аппаратов. Насколько различаются токи через проволоку, необходимые для запуска такого привода у искусственного спутника Земли, находящегося на теневой и солнечной сторонах геостационарной орбиты? Температуру проволоки считать однородной по объёму, сопротивление — не зависящим от температуры. Солнечная постоянная равна $J=1,4 \cdot 10^3$ Вт/м². Диаметр проволоки $d = 1,5$ мм удельное сопротивление $\rho=0,8 \cdot 10^{-6}$ Ом м, коэффициент серости $\varepsilon = 0,66$. Считать, что на солнечной стороне орбиты проволока находится на освещённой стороне спутника. Тепловым излучением Земли на геостационарной орбите и тепловым излучением корпуса спутника можно пренебречь

Ответ: $\Delta I = I_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{J}{\pi \sigma T^4}} \right) = 0,52 \text{ А}$, где $I_0 = 0,5 \pi d T^2 \sqrt{\frac{\varepsilon \sigma d}{\rho}} = 3,2 \text{ А}$.

Т.5. Средняя температура поверхности Земли составляет 15°C . В результате природных процессов или влияния промышленных выбросов прозрачность атмосферы может измениться. Оценить, как изменится равновесная температура земной поверхности если прозрачность атмосферы уменьшится на 5% для излучения: а) с длиной волны меньше $\lambda_0 = 20000 \text{ \AA}$; б) с длиной волны более $\lambda_0 = 20000 \text{ \AA}$. Под прозрачностью понимается доля излучения, преодолевающая расстояние от верхних слоёв атмосферы до поверхности. Считать для оценки, что прозрачность атмосферы постоянна для $\lambda > \lambda_0$ и $\lambda < \lambda_0$

Ответ: случай а): «ядерная осень», температура понизится на 4°C ;

случай б): «глобальное потепление», температура повысится на 4°C

Т.6. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной $d = 0 \text{ \AA}$ в основном состоянии. Энергия ионизации электрона $E_0 = 20 \text{ эВ}$. Электрон поглощает фотон с энергией $1.0001 E_0$, оценить время, которое электрон будет находиться над ямой. Процесс релаксации с испусканием фотона и возвратом в исходное состояние не рассматривать. Глубина ямы $U = 20.32 \text{ эВ}$. Сравнить уширение уровня с его энергией.

Ответ: $\tau \approx 10^{-14} \text{ с}$; $\delta E = \hbar/\tau \approx 0,06 \text{ эВ} \gg 10^{-4} E_0 = 0,002 \text{ эВ}$

Т.7. Электрон с энергией $E = 3 \text{ эВ}$ проходит через прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 5 \text{ эВ}$ и шириной $l = 3 \text{ \AA}$. Определить, во сколько раз должна возрасти высота барьера, чтобы вероятность прохождения через барьер упала в 10 раз: а) при использовании приближенной формулы для проницаемости барьера; б) точной формулы для проницаемости прямоугольного барьера.

Ответ: а) в 1,54 раз ($U_x \approx 7,68 \text{ эВ}$), б) в 1,70 раза ($U_x \approx 8,51 \text{ эВ}$).

Т.8. Найти все термы невозбужденного атома углерода, на внешней оболочке $2p$ оболочке которого находятся два электрона (электронная конфигурация $1s^2 2s^2 2p^2$).

Ответ: $^1D, ^3P, ^1S$.

Т.9. Деление тяжелых стабильных ядер может быть вызвано попаданием в них энергичного нейтрона. Оцените, какая энергия выделится в реакции деления энергичным нейтроном ядра ^{207}Pb на два симметричных осколка? Считайте, что нейтрон остановился внутри покоящегося ядра.

Ответ: $Q = 133,6 \text{ МэВ}$

Т.10. С какой относительной точностью нужно измерять границу спектра кинетической энергии электронов от бета-распада трития, чтобы достичь точности эксперимента Troitsk Nu-mass, если было поставлено ограничение на массу нейтрино $m_\nu < 2.2 \text{ эВ}$. Масса атома $^3\text{H} = 3,016049 \text{ а.е.м.}$, а $^3\text{He} = 3.016029 \text{ а.е.м.}$

Ответ: $\delta T/T = m_\nu / (M(1,3) - M(2,3)) \approx 1,2 \times 10^{-4}$, $M(Z,A)$ – масса атома.

Т.11. В некоторых ядрах возможно выбивание нейтрона при поглощении гамма-кванта (так называемые фотонейтроны). Например, ядро висмута-209 может испускать нейтрон при поглощении гамма кванта с энергией более $E_0 = 7,46 \text{ МэВ}$. Оценить время, через которое фотонейтрон покинет родительское ядро ^{209}Bi после поглощения гама-кванта, если энергия гамма-кванта больше пороговой на $\delta E = 0,01 \text{ МэВ}$. Для оценки считать эффективный потенциал в ядре висмута прямоугольной одномерной потенциальной ямой глубиной $U = 50 \text{ МэВ}$ и шириной $d = 14 \text{ фм}$. Сравнить уширение уровня с его энергией

Ответ: $\tau = 2,55 \cdot 10^{-21} \text{ с}$; $\delta E = \hbar/\tau \approx 250 \text{ кэВ} \gg \delta E = 10 \text{ кэВ}$

Т.12. Мюонное нейтрино, попав в жидководородную камеру, рождает W-бозон при рассеянии на протоне. Порог образования - энергия нейтрино 3.5 ТэВ . Определите заряд образующегося W-бозона. Оцените по этим данным массу бозона и характерный радиус слабого взаимодействия.

Ответ: $+1$; 81 ГэВ ; 10^{-16} см