

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра общей и технической физики**

# **ФИЗИКА**

## **КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата и специалитета  
всех направлений*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
**2019**

УДК 53 (073)

**ФИЗИКА. Квантовая и ядерная:** Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *В.В. Фицак, С.С. Прошкин*. СПб, 2019. 29 с.

Приведено 25 вариантов по 7 заданий в каждом. Варианты заданий разработаны в соответствии с требованиями к уровню подготовки бакалавров и специалистов всех направлений и форм обучения

Индивидуальные задания также могут быть использованы преподавателями для промежуточного контроля знаний студентов и для самостоятельной работы студентов других инженерно-технических специальностей.

Научный редактор проф. *А.С. Мустафаев*

Рецензент доц. *Н.И. Егорова* (Санкт-Петербургский университет МЧС России)

## **Введение**

В процессе обучения в вузе самостоятельная работа студентов является одной из форм образовательных технологий. Она способствует формированию у студентов комплекса компетенций, таких как: способность к познавательной и творческой деятельности; способность использовать навыки работы с информацией из различных источников для решения профессиональных задач и др.

Сборник индивидуальных заданий предназначен для самостоятельной работы студентов. Он содержит 25 вариантов по 7 заданий в каждом.

К выполнению индивидуальных заданий целесообразно приступать только после изучения теоретического и методического материала, соответствующего данному разделу.

Студенту необходимо решить задачу, вывести основную расчётную формулу, выполнить проверку размерности и выполнить математические вычисления.

Для некоторых заданий необходимо знание точной формулировки закона, определения той или иной физической величины или определяющего соотношения.

Кроме формирования необходимых для выпускников вуза компетенций, самостоятельное решение заданий способствует подготовке студентов к сдаче экзамена в тестовой форме.

## Задания для самостоятельной работы

### ВАРИАНТ №1

#### 1. Волна де Бройля

При какой скорости электрона его дебройлевская длина волны будет равна а) 500 нм; б) 0,1 нм?

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Среднее расстояние электрона от ядра в невозбужденном атоме водорода равно 52,9 пм. Вычислить минимальную неопределенность скорости электрона.

#### 3. Фононы и теплоемкость

Вычислить молярные теплоемкости алмаза и цезия при температуре 200 К. Температура Дебая для алмаза и цезия соответственно равна 1860 и 38 К.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Как изменится положение уровня Ферми относительно потолка валентной зоны в беспримесном полупроводнике, если  $E_g$  уменьшится в 2 раза?

#### 5. Строение атомных ядер

Какую часть массы нейтрального атома плутония составляет масса его электронной оболочки?

#### 6. Радиоактивность

Какая часть атомов радиоактивного вещества остается нераспавшейся по истечении времени  $t$ , равного трем средним временам жизни  $\tau$  атома?

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Оценить разность масс атома водорода в состояниях 2P и 1S.

### ВАРИАНТ №2

#### 1. Волна де Бройля

Какой кинетической энергией должен обладать электрон, чтобы дебройлевская длина волны была равна его комптоновской длине волны?

## 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Используя соотношение неопределённостей, показать, что в ядре не могут находиться электроны. Линейные размеры ядра принять равными  $5,8 \cdot 10^{-15}$  м.

## 3. Фононы и теплоемкость

Вычислить удельную теплоемкость рублидия при температурах 3 и 300 К. Температура Дебая для рублидия 56 К.

## 4. Полупроводники и диэлектрики

Во сколько раз энергия Ферми электронов в беспримесном полупроводнике при  $T_2$  отличается от энергии Ферми электронов при  $T_1$ , если ширина запрещенной зоны увеличилась на  $0,5E_g$ ?

## 5. Строение атомных ядер

Укажите сколько нуклонов, протонов и нейтронов содержат следующие ядра: а)  ${}^3_2\text{He}$ ; б)  ${}^{10}_5\text{B}$ ; в)  ${}^{23}_{11}\text{Na}$ ; г)  ${}^{54}_{26}\text{Fe}$ ; д)  ${}^{104}_{47}\text{Ag}$ ; е)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

## 6. Радиоактивность

Какая часть атомов радиоактивного вещества распадается за время  $t$ , равное трем периодам полураспада  $T$ ?

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Воспользовавшись таблицей масс изотопов, определить энергию связи (в мегаэлектронвольтах) на один нуклон для ядер: а)  ${}^4\text{He}$ ; б)  ${}^{20}\text{Ne}$ ; в)  ${}^{207}\text{Pb}$ ; г)  ${}^{235}\text{U}$ .

## ВАРИАНТ №3

### 1. Волна де Бройля

Чему должна быть равна кинетическая энергия протона, чтобы дебройлевская длина волны совпадала с его комптоновской длиной волны?

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Чему равна неопределенность координаты покоящегося электрона?

### 3. Фононы и теплоемкость

Молярная теплоемкость селена при температуре 5 К равна  $0,333$  Дж/(моль·К). Вычислить по значению теплоемкости температуру Дебая селена.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить уровень Ферми при комнатной температуре, в собственном полупроводнике, если ширина запрещенной зоны  $E_g$  равна 1,12 эВ. За нулевой уровень отсчета энергии электронов принять уровень потолка валентной зоны. Эффективная масса дырок в два раза больше эффективной массы электронов.

#### 5. Строение атомных ядер

Найти число протонов и нейтронов, входящих в состав ядер трех изотопов магния: а)  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ ; б)  ${}_{12}^{25}\text{Mg}$ ; в)  ${}_{12}^{26}\text{Mg}$ .

#### 6. Радиоактивность

Какая доля радиоактивных ядер кобальта 58 распадется за месяц?

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи дейтерия.

### ВАРИАНТ №4

#### 1. Волна де Бройля

При каком значении скорости дебройлевская длина волны частицы равна ее комптоновской длине волны?

#### 2. Соотношения

##### неопределённости Гейзенберга

Вычислить неопределенность координаты покоящегося протона?

#### 3. Фононы и теплоемкость

Удельная теплоемкость молибдена при температуре 25 К равна 3,47 Дж/(кг·К). Вычислить по значению теплоемкости дебаевскую температуру молибдена.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определите ширину запрещенной зоны  $E_g$  германия, пользуясь данными рис.1. ( $\gamma$  - удельная проводимость).

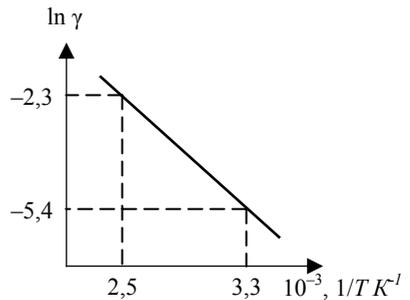


Рис.1

### 5. Строение атомных ядер

Определите атомные номера, массовые числа и химические символы зеркальных ядер, которые получаются, если в ядрах  ${}^7_4\text{Be}$ ,  ${}^3_2\text{He}$  и  ${}^{15}_8\text{O}$  протоны заменить нейтронами, а нейтроны – протонами. Привести символическую запись получившихся ядер.

### 6. Радиоактивность

Среднее время жизни атомов радиоактивного вещества  $\tau = 1$  с. Определить вероятность того, что ядро распадется за время  $t$ , равное: а) 1 с, б) 10 с, в) 0,1 с.

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи  $\alpha$ -частицы.

## ВАРИАНТ №5

### 1. Волна де Бройля

Кинетическая энергия электрона в три раза меньше его энергии покоя. Чему равна дебройлевская длина волны электрона?

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Чему равна при этом минимальная неопределенность координаты протона?

### 3. Фононы и теплоемкость

Найти количество теплоты, необходимое для нагревания 50 г железа от 10 до 20 К. Температура Дебая для железа равна 470 К.

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho = 0,48$  Ом·м. Определить концентрацию собственных носителей заряда, если подвижность электронов  $0,36$  м<sup>2</sup>/(В·с), а подвижность дырок равна  $0,16$  м<sup>2</sup>/(В·с).

### 5. Строение атомных ядер

Определить диаметры следующих ядер: а)  ${}^8_3\text{Li}$ ; б)  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ; в)  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ ; г)  ${}^{125}_{50}\text{Sn}$ .

## 6. Радиоактивность

Чтобы определить возраст  $t$  древней ткани, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода  $^{14}\text{C}$ . Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация  $^{14}\text{C}$  в живых растениях соответствует 14 распадам в минуту на один грамм углерода.

Исходя из этих данных, оценить  $t$ .

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи а)  $^{11}_5\text{B}$ ; б)  $^{48}_{20}\text{Ca}$ ; в)  $^{238}_{92}\text{U}$ ; г)  $^{12}_6\text{C}$ .

## ВАРИАНТ №6

### 1. Волна де Бройля

Масса движущегося электрона в два раза больше его массы покоя. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона.

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Масса движущегося электрона в два раза больше его массы покоя. Вычислить минимальную неопределенность координаты электрона.

### 3. Фононы и теплоемкость

Какое количество теплоты необходимо для нагревания 1 моля никеля от 5 до 15 К? Температура Дебая для никеля равна 450 К.

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить уровень Ферми при комнатной температуре, в собственном полупроводнике, если ширина запрещенной зоны  $E_g$  равна 0,7 эВ. За нулевой уровень отсчета энергии электронов принять уровень дна зоны проводимости. Эффективная масса дырок в три раза больше эффективной массы электронов.

### 5. Строение атомных ядер

Во сколько раз объем ядра изотопа плутония  $^{243}_{94}\text{Pu}$  больше объема ядра изотопа бериллия  $^9_4\text{Be}$ ?

## 6. Радиоактивность

В настоящее время в природном уране содержится  $k_1 = 99,28\%$   $^{238}\text{U}$  и  $k_2 = 0,72\%$   $^{235}\text{U}$ . Какое соотношение между  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  было в момент образования Земли, если ее возраст равен  $4 \cdot 10^9$  лет? Считать, что в период образования Земли в природе не было других более короткоживущих изотопов урана.

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Определить минимальную энергию (в мегаэлектронвольтах), необходимую для разделения ядра  $^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы.

## ВАРИАНТ №7

### 1. Волна де Бройля

Чему равна дебройлевская длина волны протона, движущегося со скоростью  $0,6c$  ( $c$  – скорость света в вакууме)?

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Чему равна минимальная неопределенность координаты фотона, соответствующего видимому излучению с длиной волны  $0,55$  мкм.

### 3. Фононы и теплоемкость

Определите энергию  $U_0$  нулевых колебаний охлажденного до затвердевания моля аргона ( $\theta_D = 92$  К).

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Найти минимальную энергию образования пары электрон-дырка в беспримесном полупроводнике, проводимость которого возрастает в 5 раз при увеличении температуры от  $T_1 = 300$  К до  $T_2 = 400$  К.

### 5. Строение атомных ядер

Оценить какую часть от объема кобальта составляет объем его ядра. Плотность кобальта равна  $4,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

### 6. Радиоактивность

Определить возраст древних деревянных предметов, если удельная активность изотопа  $^{14}\text{C}$  у них составляет  $\eta = 3/5$  удельной активности этого же изотопа в только что срубленных деревьях.

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Определить энергию, которую нужно затратить для отрыва нейтрона от  ${}_{11}^{23}\text{Na}$ .

### ВАРИАНТ №8

#### 1. Волна де Бройля

Вычислить дебройлевскую длину волны электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 511 кВ.

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Среднее время жизни *эта-мезона* составляет  $2,4 \cdot 10^{-19}$  с, а его энергия покоя равна 549 МэВ. Вычислить минимальную неопределенность массы частицы.

#### 3. Фононы и теплоемкость

Вычислить энергию нулевых колебаний, приходящуюся на один грамм меди с дебаевской температурой  $\theta_D = 330$  К.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Ширина запрещенной зоны германия  $E_g = 0,72$  эВ. Определите, во сколько раз возрастает его удельная проводимость, если образец нагревают от 0 до 17 °С.

#### 5. Строение атомных ядер

Во сколько раз радиус ядра бора  ${}_{5}^8\text{B}$  меньше радиуса ядра никеля  ${}_{28}^{64}\text{Ni}$  ?

#### 6. Радиоактивность

В урановой руде отношение числа ядер  ${}^{238}\text{U}$  к числу ядер  ${}^{206}\text{Pb}$  составляет  $\eta = 2,8$ . Оценить возраст руды, считая, что весь свинец  ${}^{206}\text{Pb}$  является конечным продуктом распада уранового ряда.

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Найти энергию связи ядер: а)  ${}_{1}^3\text{H}$ ; б)  ${}_{2}^3\text{He}$ . Какое из этих ядер наиболее устойчиво?

## ВАРИАНТ №9

### 1. Волна де Бройля

Вычислить дебройлевскую длину волны протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 120 кВ.

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Среднее время жизни возбужденного состояния атома равно 12 нс. Вычислить минимальную неопределенность длины волны  $\lambda = 0,12$  мкм излучения при переходе атома в основное состояние.

### 3. Фононы и теплоемкость

Найти отношение среднего числа фононов в кристалле, имеющих энергию в два раза меньше максимальной, к среднему числу фононов с максимальной энергией при температуре 300 К. Дебаевская температура кристалла равна 150 К.

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить ширину  $\ln \gamma$  запрещенной зоны полупроводника, график зависимости логарифма проводимости от обратной температуры ( $T$ , К) показан на рис.2. ( $\gamma$  - удельная проводимость).

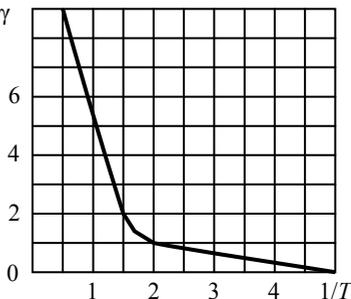


Рис.2

### 5. Строение атомных ядер

Определить концентрацию нуклонов в ядре  $^{238}\text{U}$ .

### 6. Радиоактивность

В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего  $^{24}\text{Na}$  с активностью  $A=2 \cdot 10^3$  Бк. Активность 1 см<sup>3</sup> крови через  $t=5$  ч оказалась  $A'=0,267$  Бк/см<sup>3</sup>. Период полураспада данного радиоизотопа  $T=15$  ч. Найти объем крови человека.

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Сравнить удельную энергию связи ядер  $^7_3\text{Li}$  и  $^{27}_{13}\text{Al}$ . Какое из этих ядер наиболее устойчиво?

## ВАРИАНТ №10

### 1. Волна де Бройля

Чему равна дебройлевская длина волны теплового нейтрона, обладающего энергией, равной средней энергии теплового движения при температуре 300 К?

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Естественная ширина спектральной линии  $\lambda = 0,55$  мкм, соответствующей переходу атома в основное состояние, равна 0,01 пм. Определить среднее время жизни возбужденного состояния атома.

### 3. Фононы и теплоемкость

Определите в электронвольтах энергию  $E$  фонона, который может возбуждаться в кристалле NaCl, характеризуемом температурой Дебая  $\theta_D = 320$  К. Фотон какой длины волны обладал бы такой энергией?

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить концентрацию собственных носителей в GaAs при  $T = 300$  К, если ширина запрещенной зоны  $E_g = 1,424$  эВ, а эффективные массы электронов и дырок равны соответственно  $m_n = 0,067m_e$  и  $m_p = 0,48m_e$  ( $m_e$  – масса электрона).

### 5. Строение атомных ядер

Используя соотношение  $Z = A/2$  которое справедливо для многих легких ядер, определить среднюю объемную плотность заряда ядра.

### 6. Радиоактивность

За какое время распадается 87,5 % атомов  $^{45}_{20}\text{Ca}$  ?

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Какое количество термоядерной энергии содержится в 1 л обычной воды?

## ВАРИАНТ №11

### 1. Волна де Бройля

Средняя кинетическая энергия электрона в невозбужденном атоме водорода, равна 13,6 эВ. Вычислить дебройлевскую длину волны электрона.

## 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Ширина следа электрона (обладающего кинетической энергией 1,5 кэВ) на фотопластинке, полученного с помощью камеры Вильсона, составляет  $\Delta x = 1$  мкм. Определите, можно ли по данному следу обнаружить отклонение в движении электрона от законов классической механики.

## 3. Фононы и теплоемкость

При давлении  $p = 1013 \cdot 10^2$  Па аргон затвердевает при  $T = 84$  К, температура Дебая для аргона  $\theta_D(\text{Ar}) = 92$  К. Экспериментально установлено, что при  $T_1 = 4$  К молярная теплоемкость аргона  $C_1 = 0,174$  Дж/(моль·К). Определить значение молярной теплоемкости  $C_2$  при  $T_2 = 2$  К.

## 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить собственную проводимость в Si при  $T = 300$  К, если  $E_g = 1,424$  эВ,  $m_n = 0,067m_e$  и  $m_p = 0,48m_e$ , а подвижности  $\mu_n = 0,13$  и  $\mu_p = 0,05$  м<sup>2</sup>/(В·с).

## 5. Строение атомных ядер

Ядро радия  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  выбросило  $\alpha$ -частицу. Найти массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  вновь образовавшегося ядра.

## 6. Радиоактивность

Какая доля первоначального количества радиоактивного изотопа распадается за время жизни этого изотопа?

## 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Определить энергию, освобождающуюся в водородной бомбе при синтезе 1 кг гелия.

# ВАРИАНТ №12

## 1. Волна де Бройля

Кинетическая энергия нейтрона равна его энергии покоя. Определить дебройлевскую длину волны нейтрона.

## 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов  $U = 1$  кВ. Известно, что неопределенность

скорости составляет 0,1 % от ее числового значения. Определите неопределенность координаты электрона. Являются ли электроны в данных условиях квантовой или классической частицей?

### 3. Фононы и теплоемкость

Атомная масса серебра  $A_r = 107,9$ , плотность  $\rho = 10,5 \text{ г/см}^3$ . Исходя из этих данных, оценить максимальное значение  $p_m$  импульса фонона в серебре.

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Найти энергию активации  $\ln \gamma$  донорных уровней полупроводника, график зависимости  $\ln \gamma$  от  $1/T$  ( $T$  в КК) показан на рис. 3. ( $\gamma$  - удельная проводимость).

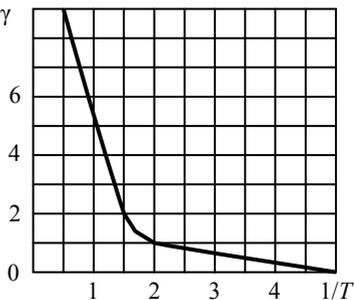


Рис. 3

### 5. Структура атомных ядер

Ядро азота  ${}^{14}_7\text{N}$  захватило  $\alpha$ -частицу и испустило протон. Найти массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  вновь образовавшегося ядра.

### 6. Радиоактивность

Найти период полураспада радиоактивного препарата, если за сутки его активность уменьшается в три раза.

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

В процессе термоядерного синтеза  $5 \cdot 10^4$  кг водорода превращаются в 49644 кг гелия. Определить, сколько энергии выделяется при этом.

## ВАРИАНТ №13

### 1. Волна де Бройля

Найти дебройлевскую длину волны молекул водорода, соответствующую их наиболее вероятной скорости при комнатной температуре.

### 2. Соотношения неопределённости Гейзенберга

Определите отношение неопределенностей скорости электрона, если его координата установлена с точностью до  $10^{-5}$  м, и

пылинки массой  $m = 10^{-12}$  кг, если ее координата установлена с такой же точностью.

### **3. Фононы и теплоемкость**

Какое число фононов максимальной частоты возбуждается в среднем при температуре  $T = 400$  К в кристалле, дебаевская температура которого  $\theta_D = 200$  К?

### **4. Полупроводники и диэлектрики**

Определить примесную электропроводность алмаза, содержащего бор с концентрацией  $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  и мышьяк с концентрацией  $1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Подвижность электронов и дырок для алмаза соответственно равна 0,18 и 0,12  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### **5. Строение атомных ядер**

Ядро цинка  ${}_{30}^{65}\text{Zn}$  захватило электрон из  $K$ -оболочки атома ( $K$ -захват). Найти массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  вновь образовавшегося ядра.

### **6. Радиоактивность**

Какое время периода полураспада изотопа, если за сутки распадается в среднем а) 900 атомов из 1000; б) 750 атомов из 1000; в) 1 атом из 1000?

### **7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции**

При обстреле ядер фтора  ${}_{9}^{19}\text{F}$  протонами образуется кислород  ${}_{8}^{16}\text{O}$ . Сколько энергии освобождается при этой реакции и какие еще ядра образуются?

## **ВАРИАНТ №14**

### **1. Волна де Бройля**

Найти дебройлевскую длину волны молекул  $\text{CO}_2$ , соответствующую их средней скорости при комнатной температуре.

### **2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга**

Электронный пучок ускоряется разностью потенциалов  $U = 200$  В. Определить, можно ли одновременно измерить траекторию электрона с точностью до 100 пм (с точностью порядка диаметра атома) и его скорость с точностью до 10 %.

### 3. Фононы и теплоемкость

Определить температуру Дебая  $\theta_D$  для Be, если концентрация равна  $n = 1,23 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_{\perp} = 8830 \text{ м/с}$  и  $v_{\parallel} = 12550 \text{ м/с}$ .

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить примесную электропроводность кремния, содержащего бор с концентрацией  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  и сурьму с концентрацией  $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Подвижность электронов и дырок для кремния соответственно равна 0,13 и  $0,05 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

### 5. Строение атомных ядер

Ядро  ${}^7_4\text{Be}$  захватило электрон с  $K$ -оболочки атома. Какое ядро образовалось в результате  $K$ -захвата?

### 6. Радиоактивность

За какое время количество атомов  ${}^{131}_{53}\text{I}$  уменьшится в 1000 раз?

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

При использовании дейтерия, содержащегося в литре обычной воды, в реакции термоядерного синтеза выделяется столько же энергии, сколько получается при сжигании 350 л бензина. Подсчитать эту энергию.

## ВАРИАНТ №15

### 1. Волна де Бройля

Найти дебройлевскую длину волны молекул азота, двигающихся с наиболее вероятной скоростью при температуре 77 К.

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Электрон движется в атоме водорода по первой боровской орбите. Принимая, что допускаемая неопределенность скорости составляет 10 % от ее числового значения, определите неопределенность координаты электрона. Применимо ли в данном случае для электрона понятие траектории?

### 3. Фононы и теплоемкость

Определить температуру Дебая  $\theta_D$  для Ag, если концентрация равна  $n = 0,586 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_{\perp} = 1590 \text{ м/с}$  и  $v_{\parallel} = 3600 \text{ м/с}$ .

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить сдвиг  $\Delta\lambda$  края собственного поглощения германия при изменении температуры от  $T_1 = 77$  К до  $T_2 = 273$  К. Зависимость ширины запрещенной зоны германия от температуры имеет вид  $E_g = 0,782 - 3,9 \cdot 10^{-4} T$  эВ.

#### 5. Строение атомных ядер

Ядро изотопа кобальта  ${}_{27}^{60}\text{Co}$  выбросило отрицательно заряженную  $\beta$ -частицу. В какое ядро превратилось ядро кобальта?

#### 6. Радиоактивность

В образцах урановой руды всегда содержится некоторое количество атомов тория-234, образовавшихся в результате  $\alpha$ -распада урана-238. Торий также радиоактивен. Сколько атомов тория содержится в урановой руде, в которой находится  $m = 0,5$  г урана - 238?

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Какую массу воды, взятой при  $t = 0$  °С, можно довести до кипения, используя энергию термоядерного синтеза гелия из дейтерия и трития, если КПД преобразования энергии равен 10 %? Масса синтезированного гелия равна 1 г

### ВАРИАНТ №16

#### 1. Волна де Бройля

Найти дебройлевскую длину волны молекул кислорода, соответствующую их средней скорости при температуре 70 °С.

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Используя соотношение неопределенностей, оцените минимально возможную полную энергию электрона в атоме водорода. Примите неопределенность координаты равной радиусу атома.

#### 3. Фононы и теплоемкость

Определить температуру Дебая  $\theta_D$  для Pb, если концентрация равна  $n = 0,328 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_{\perp} = 700$  м/с и  $v_{\parallel} = 2160$  м/с.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

На рис. 4 показан спектр собственного поглощения антимонида индия для двух различных температур. Найдите ширину запрещенной зоны при указанных температурах.

#### 5. Строение атомных ядер

Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц выбрасывается при превращении ядра урана  ${}^{233}_{92}\text{U}$  в ядро висмута  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ ?

#### 6. Радиоактивность

Период полураспада радиоактивного изотопа один год. Определить среднюю продолжительность жизни этого изотопа.

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Определить энергию, выделяющуюся в акте синтеза дейтерия:  $p + n \rightarrow {}^2\text{H}$ .

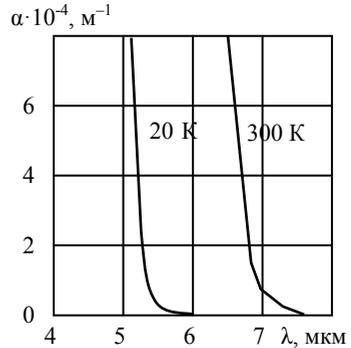


Рис. 4

### ВАРИАНТ №17

#### 1. Волна де Бройля

Кинетическая энергия электрона в три раза меньше его энергии покоя. Чему равна дебройлевская длина волны электрона?

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Кинетическая энергия протона равна его энергии покоя. Чему равна при этом минимальная неопределенность координаты протона?

#### 3. Фононы и теплоемкость

Найти количество теплоты, необходимое для нагревания 50 г железа от 10 до 20 К. Температура Дебая для железа равна 470 К.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Собственный полупроводник имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho=0,48$  Ом·м. Определить концентрацию собственных носителей заряда, если подвижность

электронов в германии  $0,36 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , а подвижность дырок равна  $0,16 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

### 5. Структура атомных ядер

Определить диаметры следующих ядер: а)  ${}^8_3\text{Li}$ ; б)  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ ; в)  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ ; г)  ${}^{125}_{50}\text{Sn}$ .

### 6. Радиоактивность

Чтобы определить возраст  $t$  древней ткани, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода  ${}^{14}\text{C}$ . Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация  ${}^{14}\text{C}$  в живых растениях соответствует 14 распадам в минуту на один грамм углерода. Период полураспада  ${}^{14}\text{C}$  равен 5730 лет. Исходя из этих данных, оценить  $t$ .

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи а)  ${}^{11}_5\text{B}$ ; б)  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ; в)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ; г)  ${}^{12}_6\text{C}$ .

## ВАРИАНТ №18

### 1. Волна де Бройля

Найти дебройлевскую длину волны молекул водорода, соответствующую их наиболее вероятной скорости при комнатной температуре.

### 2. Соотношения неопределённости Гейзенберга

Определите отношение неопределенностей скорости электрона, если его координата установлена с точностью до  $10^{-5} \text{ м}$ , и пылинки массой  $m = 10^{-12} \text{ кг}$ , если ее координата установлена с такой же точностью.

### 3. Фононы и теплоемкость

Какое число фононов максимальной частоты возбуждается в среднем при температуре  $T = 400 \text{ К}$  в кристалле, дебаевская температура которого  $\theta_D = 200 \text{ К}$ ?

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Определить примесную электропроводность алмаза, содержащего бор с концентрацией  $2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  и мышьяк с концентрацией  $1 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Подвижность электронов и дырок для алмаза соответственно равна 0,18 и  $0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

#### 5. Строение атомных ядер

Ядро цинка  ${}_{30}^{65}\text{Zn}$  захватило электрон из  $K$ -оболочки атома ( $K$ -захват). Найти массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  вновь образовавшегося ядра.

#### 6. Радиоактивность

Каков период полураспада изотопа, если за сутки распадается в среднем а) 900 атомов из 1000; б) 750 атомов из 1000; в) 1 атом из 1000?

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

При обстреле ядер фтора  ${}_{9}^{19}\text{F}$  протонами образуется кислород  ${}_{8}^{16}\text{O}$ . Сколько энергии освобождается при этой реакции и какие еще ядра образуются? (Удельная теплота сгорания древесного угля 31 МДж/кг)

### ВАРИАНТ №21

#### 1. Волна де Бройля

Вычислить дебройлевскую длину волны электрона, имеющего кинетическую энергию 100 эВ.

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Длина волны  $\lambda$  излучаемого атомом фотона составляет 0,6 мкм. Принимая время жизни возбужденного состояния  $\Delta t = 10^{-8} \text{ с}$ , определите отношение естественной ширины энергетического уровня, на который был возбужден электрон, к энергии, излученной атомом.

#### 3. Фононы и теплоемкость

Приняв для Ag температуру Дебая  $\theta_D = 208$  К определить максимальное значение энергии фонона и среднее количество фононов с этой энергией при  $T = 300$  К.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Вычислить минимальную длину световой волны, для которой GaAs, имеющий  $E_g = 1,43$  эВ при температуре 300 К, является оптически прозрачным. Как изменяется ширина запрещенной зоны с понижением температуры?

#### 5. Строение атомных ядер

В какое ядро превратилось ядро изотопа фосфора  ${}_{15}^{30}\text{P}$ , выбросив положительно заряженную бета-частицу?

#### 6. Радиоактивность

На сколько процентов снизится активность иридия  ${}^{92}\text{Ir}$  через месяц?

#### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить энергию ядерной реакции и выяснить, выделяется или поглощается энергия в этой реакции  ${}_0^1\text{n} + {}_5^{10}\text{B} \rightarrow {}_3^7\text{Li} + {}_2^4\text{He}$ .

### ВАРИАНТ №22

#### 1. Волна де Бройля

Вычислить дебройлевскую длину волны протона, имеющего кинетическую энергию 200 эВ.

#### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Принимая, что электрон находится внутри атома диаметром 0,3 нм, определите (в электронвольтах) неопределенность энергии данного электрона.

#### 3. Фононы и теплоемкость

В кристалле NaCl при температуре  $T = 10$  К теплоемкость единицы объема  $C_V = 830 \cdot 10^{-4}$  Дж/(м<sup>3</sup>·К). Оценить скорость звука в кристалле и его  $\theta_D$ . Постоянная решетки NaCl равна  $a = 0,3$  нм.

#### 4. Полупроводники и диэлектрики

Вычислить удельную проводимость кремния  $n$ -типа, если постоянная Холла для него  $R_H = -2,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , а подвижность электронов равна  $0,13 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

### 5. Структура атомных ядер

Определить порядковый номер и массовое число изотопа, который получится из тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  после трех  $\alpha$ - и двух  $\beta$ -превращений.

### 6. Радиоактивность

Какая доля радиоактивных ядер кобальта, период полураспада которых  $71,3 \text{ сут}$ , распадется за месяц?

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Вычислить энергию ядерной реакции и выяснить, выделяется или поглощается энергия в этой реакции  ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$ .

## ВАРИАНТ №23

### 1. Волна де Бройля

Вычислить дебройлевскую длину волны атома урана, имеющего кинетическую энергию  $100 \text{ эВ}$ .

### 2. Соотношения неопределённости Гейзенберга

При движении вдоль оси  $x$  скорость оказывается определенной с точностью  $\Delta v_x = 1 \text{ см/с}$ . Оценить неопределенность координаты  $\Delta x$ : а) для электрона, б) для броуновской частицы массы  $m = 10^{-13} \text{ г}$ , в) для дробишки массы  $m = 0,1 \text{ г}$ .

### 3. Фононы и теплоемкость

Определить среднюю скорость распространения акустических колебаний в алюминии, дебаевская температура которого  $\theta_D = 396 \text{ К}$

### 4. Полупроводники и диэлектрики

Найти постоянную Холла кристалла кремния  $p$ -типа, если концентрация примесей  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а подвижность дырок  $0,05 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

### 5. Структура атомных ядер

В ядре изотопа углерода  $^{14}_6\text{C}$  один из нейтронов превратился в протон ( $\beta$ -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?

### 6. Радиоактивность

Сколько  $\beta$ -частиц испускает за один час  $1,0 \text{ мкг } ^{24}\text{Na}$ , период полураспада которого  $T = 15 \text{ ч}$ ?

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

При бомбардировке алюминия  $^{27}_{13}\text{Al}$   $\alpha$ -частицами образуется фосфор  $^{30}_{15}\text{P}$ . Записать эту реакцию и подсчитать выделившуюся энергию.

## ВАРИАНТ №24

### 1. Волна де Бройля

Частица движется слева направо в одномерном потенциальном поле, показанном на рис. 5. Левее барьера, высота которого  $U = 15 \text{ эВ}$ , полная энергия частицы равна  $20 \text{ эВ}$ . Как изменится дебройлевская длина волны частицы при переходе через барьер?

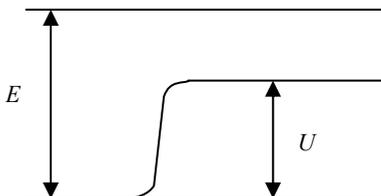


Рис. 5

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Электрон с кинетической энергией  $E = 4 \text{ эВ}$  локализован в области размером  $L = 1 \text{ мкм}$ . Оценить относительную неопределенность его скорости.

### 3. Фононы и теплоемкость

Найти максимальную частоту  $\omega_{\text{max}}$  собственных колебаний в железе, если при  $T = 20 \text{ К}$  его удельная теплоемкость  $c_V = 2,7 \text{ мДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  и  $T \ll \theta_D$ .

### 4. Полупроводники и диэлектрики

При измерении эффекта Холла пластинку из полупроводника  $p$ -типа ширины  $d = 10 \text{ мм}$  и длины  $L = 50 \text{ мм}$  поместили в магнитное

поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл. К концам пластинки приложили разность потенциалов  $U = 10$  В. При этом холловская разность потенциалов  $U_H = 50$  мВ и удельное сопротивление  $\rho = 2,5$  Ом·см. Найти концентрацию дырок.

### 5. Строение атомных ядер

Два ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  слились в одно ядро, и при этом был выброшен протон. Укажите, ядро какого элемента образовалось в результате такого превращения.

### 6. Радиоактивность

При изучении  $\beta$ -распада  ${}^{23}\text{Mg}$  в момент времени  $t = 0$  был включен счетчик. К моменту времени  $t = 2,0$  с он зарегистрировал  $N_1$  частиц, а к моменту времени  $t_2 = 3t_1$  в 2,66 раз больше. Найти среднее время жизни данных ядер.

### 7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции

Определить максимальную кинетическую энергию электрона, испускаемого при распаде нейтрона.

## ВАРИАНТ №25

### 1. Волна де Бройля

Частица движется слева направо в одномерном потенциальном поле, показанном на рис.6. Высота барьера  $U = 15$  эВ, кинетическая энергия частицы равна 5 эВ. Как изменится дебройлевская длина волны частицы при переходе через барьер?

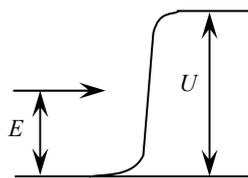


Рис. 6

### 2. Соотношения неопределённостей Гейзенберга

Оценить наименьшие ошибки, с которыми можно определить скорость электрона, протона и шарика массы 1 мг, если координаты частиц и центра шарика установлены с неопределенностью 1 мкм.

### 3. Фононы и теплоемкость

Можно ли считать температуры 20 и 30 К низкими для кристалла, теплоемкость которого при этих температурах равна 0,226 и 0,760 Дж/(моль·К)?

#### **4. Полупроводники и диэлектрики**

При измерении эффекта Холла пластинку из полупроводника  $p$ -типа ширины  $d = 10$  мм и длины  $L = 50$  мм поместили в магнитное поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл. К концам пластинки приложили разность потенциалов  $U = 10$  В. При этом холловская разность потенциалов  $U_H = 50$  мВ. Найти подвижность дырок.

#### **5. Строение атомных ядер**

В ядре атома изотопа кремния  ${}_{14}^{27}\text{Si}$  один из протонов превратился в нейтрон ( $\beta^+$ -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?

#### **6. Радиоактивность**

Активность некоторого изотопа уменьшается в 2,5 раза за 7,0 сут. Найти его период полураспада.

#### **7. Дефект массы и энергия связи атомных ядер. Ядерные реакции**

Найдите минимальную энергию и частоту гамма-кванта, способного «разбить» ядро дейтерия на протон и нейтрон.

## Рекомендательный библиографический список

### Основная литература

1. *Трофимова Т.И.* Курс физики : учеб. пособие/ Т.И.Трофимова. - 21-е изд., стер. - М. : Академия, 2015. - 560 с. и пред.изд. (2008, 2007, 2004, 1997)
2. *Детлаф А.А.* Курс физики : учеб. пособие / А.А. Детлаф, Б.М.Яворский. - 5-е изд., стер. - М. : АСADEМIA, 2005. - 720 с.и пред. изд. (2003, 2002, 2001, 1998)
3. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.1. Механика. Молекулярная физика /И.В. Савельев – Изд. 5-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 352 с.и пред. изд. (2008, 1998, 1989)
4. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.2. Электричество. Колебания и волны /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 480 с.и пред. изд. (2008, 1998, 1989)
5. *Савельев И.В.* Курс физики : учеб. пособие: в 3 т. Т.3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц /И.В. Савельев – Изд. 4-е, стер. - СПб.[и др.]: Лань,2016. - 308 с.и пред. изд. (2007,1989, 1987)

### Дополнительная литература

1. *Иродов И.Е.* Задачи по общей физике: учеб. пособие / И. Е. Иродов. - Москва: Лань, 2009. - 416 с.— 434 с. и пред. изд. (2007, 2004, 2003, 1988)
2. *Мустафаев А.С.* Введение в ядерную физику: учеб. пособие /А.С.Мустафаев. Н.С.Пшелко; Нац. минер.-сырьевой ун-т "Горный". С-Пб.: Горн.ун-т, 2013.-132 с.
3. *Чуркин Ю.В.* Физика твердого тела: учеб. пособие/ Ю. В. Чуркин, С. В. Субботин ; СЗТУ. - СПб. : Изд-во СЗТУ, 2008. - 144 с.

## Справочные материалы

Таблица 1

### Атомные массы некоторых изотопов

Изотоп	<i>a.е.м</i>	Изотоп	<i>a.е.м</i>
H <sub>1</sub> <sup>1</sup>	1,00782522	Na <sub>11</sub> <sup>22</sup>	22,9897707
D <sub>1</sub> <sup>2</sup>	2,01410222	K <sub>19</sub> <sup>40</sup>	39,964000
T <sub>1</sub> <sup>3</sup>	3,01604971	Ca <sub>20</sub> <sup>40</sup>	39,962592
He <sub>2</sub> <sup>3</sup>	3,01602968	Co <sub>27</sub> <sup>59</sup>	58,933188
He <sub>2</sub> <sup>4</sup>	4,00260361	Co <sub>27</sub> <sup>60</sup>	59,933811
Li <sub>3</sub> <sup>6</sup>	6,0151432	Sr <sub>38</sub> <sup>90</sup>	89,9077490
Li <sub>3</sub> <sup>7</sup>	7,0160053	Sr <sub>38</sub> <sup>94</sup>	93,91547
Be <sub>4</sub> <sup>7</sup>	7,0169293	Y <sub>39</sub> <sup>89</sup>	88,9058628
Be <sub>4</sub> <sup>9</sup>	9,0121858	Y <sub>39</sub> <sup>91</sup>	90,9069
C <sub>6</sub> <sup>12</sup>	12,0000000	Xe <sub>54</sub> <sup>139</sup>	138,91844
C <sub>6</sub> <sup>13</sup>	13,003355	La <sub>57</sub> <sup>139</sup>	138,906404
C <sub>6</sub> <sup>14</sup>	14,0032420	Rn <sub>86</sub> <sup>222</sup>	222,017605
N <sub>7</sub> <sup>14</sup>	14,0030744	Ra <sub>88</sub> <sup>226</sup>	226,025433
N <sub>7</sub> <sup>15</sup>	15,0001091	U <sub>92</sub> <sup>234</sup>	234,040971
O <sub>8</sub> <sup>16</sup>	15,99491494	U <sub>92</sub> <sup>235</sup>	235,043941
O <sub>8</sub> <sup>17</sup>	16,9991334	U <sub>92</sub> <sup>238</sup>	238,050812
O <sub>8</sub> <sup>18</sup>	17,9991598	Pu <sub>94</sub> <sup>239</sup>	239,051223

Таблица 2

### Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива

Вещество	Удельная теплота сгорания, МДж/кг	Вещество	Удельная теплота сгорания, МДж/кг
Бурый уголь	9,3	Бензин, нефть	46,0
Древесный уголь	29,7	Дизельное топливо	42,0
Дрова сухие	8,3	Керосин	43,0
Древесные чурки	15,0	Мазут	40,0
Каменный уголь марки А-I	20,5	Спирт этиловый	27,0
Каменный уголь марки А-II	30,3	Водород	120
Кокс	30,3	Генераторный газ	5,5
Порох	3,0	Коксовый газ	16,4
Торф	15,0	Природный газ	35,5

Таблица 3

## Периоды полураспадов химических элементов

Номер элемента	Название элемента	Массовое число	Период полураспада
1	Водород	3	12,3 лет
6	Углерод	14	5730 лет
8	Кислород	15	124 с
11	Натрий	22	2,6 лет
		24	15 ч
15	Фосфор	32	14,3 сут.
16	Сера	35	87сут.
17	Хлор	36	$3 \cdot 10^5$ лет
		38	38 мин
19	Калий	40	$1,28 \cdot 10^6$ лет
20	Кальций	45	164 сут.
21	Скандий	46	84 сут.
24	Хром	51	27,8 сут.
26	Железо	59	45 сут.
27	Кобальт	58	71 сут.
		60	5,26 лет
30	Цинк	65	246 сут.
47	Серебро	111	7,5 сут.
51	Сурьма	124	60 сут.
53	Иод	131	8,04 сут.
55	Цезий	137	30 лет
74	Вольфрам	185	74 сут.
84	Полоний	210	138,4 сут.
86	Радон	222	3,83 сут.
88	Радий	226	1601 год
90	Торий	232	$1,41 \cdot 10^{10}$ лет
		234	24 сут.
91	Протактиний	231	$3,25 \cdot 10^4$ лет
		233	27,4 сут.
92	Уран	233	$1,6 \cdot 10^5$ лет
		234	$2,5 \cdot 10^5$ лет
		235	$7,1 \cdot 10^8$ лет
		238	$4,5 \cdot 10^9$ лет
93	Нептуний	237	$1,15 \cdot 10^5$ лет
		239	2,3 сут.
94	Плутоний	239	$2,44 \cdot 10^4$ лет

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Задания для самостоятельной работы .....	4
Рекомендательный библиографический .....	26
Справочные материалы.....	27

**ФИЗИКА**  
**КВАНТОВАЯ И ЯДЕРНАЯ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата и специалитета  
и всех направлений*

Сост.: *В.В. Фицак, С.С. Прошкин*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
общей и технической физики

Ответственный за выпуск *В.В. Фицак*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.04.2019. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,7. Усл.кр.-отг. 1,7. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 412. С 157.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2