

Министерство образования и науки
Кыргызской Республики

Кыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова

Кафедра «Прикладная физика»

ФИЗИКА

Часть 2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ, ВОЛНОВАЯ ОПТИКА, КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

**Рабочая программа, методические указания и
контрольное задание № 2 для студентов дистанционной
формы обучения по специальности 552801 - Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем**

Бишкек 2012

Рассмотрены
на заседании кафедры
«Прикладная физика».
Протокол № 7 от 20.03.2012

Одобрены
решением учебно-
методического совета ИДО и ПК
Протокол № от

УДК 53

Составители: ИСМАНОВ Ю.Х., ТУРГУМБАЕВ К.Т., МАРИПОВ А.

Физика ч. 2. Электромагнитная индукция, электромагнитные колебания и волны, волновая оптика, квантовая физика: рабочая программа, методические указания и контрольное задание № 2 для студентов дистанционной формы обучения по специальности 552801 - Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем / КГТУ. Сост.: Исманов Ю. Х., Тургумбаев К. Т., Марипов А. Б.: ИЦ «Текник», 2012. - 49 с.

Излагаются программа и методика изучения дисциплины, методика выполнения контрольных заданий и варианты контрольной работы № 2. Приводится список литературы.

Предназначены для студентов дистанционной формы обучения по специальности 552801 - Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем, изучающих курс физики в течение двух семестров

Рецензент: доцент, к. т. н. Абакирова Ж. А.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

Явление электромагнитной индукции

Электромагнитная индукция. Опыты Фарадея. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Явление самоиндукции. Индуктивность. Экстратоки замыкания и размыкания. Взаимная индукция. Энергия магнитного поля. Объемная плотность энергии магнитного поля.

Методические указания

Успешно разобраться в физической сущности явления электромагнитной индукции помогут опыты Фарадея в различных вариантах. На основании этих опытов формулируется закон электромагнитной индукции. Теоретическое объяснение явления электромагнитной индукции связано с образованием вихревого электрического поля в контуре под действием изменяющегося магнитного поля. Здесь принципиально важно подчеркнуть, что вихревое электрическое поле порождается переменным вихревым магнитным полем и, что возможно обратное - переменное вихревое электрическое поле может порождать магнитное поле. Явления самоиндукции и взаимной индукции рассматриваются как частные случаи явления электромагнитной индукции. Магнитное поле, как и электрическое поле, обладает энергией и характеризуется объемной плотностью энергии.

Контрольные вопросы

1. Какие опыты поставил Фарадей, и какой вывод можно сделать по результатам этих опытов?
2. Как записывается закон электромагнитной индукции Фарадея, и как объясняется знак минус в этом законе?
3. На какой идее основано теоретическое объяснение явления электромагнитной индукции?
4. Что такое самоиндукция, и как описывается это явление?
5. Какое явление называется взаимной индукцией?
6. От каких величин и как зависят энергия и плотность энергии магнитного поля?

Уравнение Максвелла

Ток смещения. Уравнения Максвелла в интегральной форме. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме. Материальные уравнения. Относительность электрического и магнитного полей.

Методические указания

Важно отметить, что Фарадей, открывший явление электромагнитной индукции, впервые выдвинул идею о том, что электрические и магнитные поля взаимосвязаны, они взаимно порождают друг друга. Открытие тока смещения показало справедливость этой идеи. Максвелл, создав электромагнитную теорию, теоретически доказал, что в природе существует единое электромагнитное поле. Основу этой теории составляют уравнения Максвелла, представляющие собой основные законы электрических и магнитных явлений.

Контрольные вопросы

1. Что называется током смещения?
2. Как определяется направление плотности тока смещения?
3. Напишите уравнения Максвелла в интегральной и дифференциальной формах и раскройте их физический смысл.
4. Какие уравнения называются материальными?
5. Какой фундаментальный вывод можно сделать, исходя из уравнений Максвелла?
6. Относительно каких преобразований инвариантны уравнения Максвелла?

Электромагнитные колебания и волны

Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики. Колебательный контур. Дифференциальное уравнение гармонических колебаний. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Резонанс.

Понятие об электромагнитных волнах. Вибратор Герца. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны. Основные свойства электромагнитных волн. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии. Вектор Умова-Пойнтинга. Излучение диполя.

Методические указания

При изучении электромагнитных колебаний и волн нужно воспользоваться опытом изучения механических колебаний и волн, поскольку математическое описание их одинаковое. Теоретическое рассмотрение возникновения электромагнитных волн с помощью уравнений Максвелла позволит установить основные свойства электромагнитных волн, которые подтверждаются экспериментально.

Контрольные вопросы

1. Опишите процессы, происходящие при свободных электромагнитных колебаниях в контуре. Найдите период этих колебаний.
2. Какой вид имеют уравнения гармонических и затухающих колебаний для заряда.
3. Что такое логарифмический декремент затухания, и как он связан с периодом колебаний?
4. Что такое электрический резонанс?
5. Объясните, как происходит излучение электромагнитных волн.
6. Какие свойства электромагнитных волн вам известны?
7. Как, исходя из поперечности электромагнитных волн, доказать, что колеблющийся электрический диполь не может излучать вдоль своей оси?

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Интерференция света. Необходимое условие интерференции – когерентность волн. Условия максимумов и минимумов. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Интерференция света в тонких пленках. Кольца Ньютона. Интерферометры.

Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии.

Дифракция Фраунгофера от одной щели. Дифракционная решетка. Дифракция рентгеновских лучей. Понятие о голографии. Поляризация света. Способы поляризации света. Закон Брюстера. Закон Малюса.

Дисперсия света. Электронная теория дисперсии света.

Методические указания

Следует подчеркнуть общие закономерности явлений интерференции и дифракции, а также их отличительные особенности.

Нужно показать, что интерференция возникает только в случае наложения когерентных волн, и объяснить, почему в интерференционной картине происходит чередование максимумов и минимумов. Рассмотрение расчета интерференционной картины двух точечных источников позволит выяснить, от каких параметров и как зависит размер интерференционных полос. В качестве примера интерференции света рассматриваются интерференция света на тонких пленках и кольца Ньютона. В качестве практического приложения явления интерференции рассматриваются интерферометры. При рассмотрении дифракции света следует отметить различие теоретических подходов для установления условий возникновения максимумов и минимумов дифракции и интерференции.

Современным важнейшим применением интерференции и дифракции света является голография.

Явление поляризации света следует пояснить на основе электромагнитных представлений природы света и с учетом анизотропии электрических свойств кристаллов.

Контрольные вопросы

1. Какими способами получают когерентные световые волны?
2. В чем состоит явление интерференции света?
3. Условия возникновения максимумов (минимумов) интерференционной картины?
4. Что называется дифракцией света?
5. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
6. Каковы условия возникновения максимумов и минимумов для дифракций Френеля и Фраунгофера?
7. Чем отличается естественный свет от поляризованного, и какие существуют способы поляризации света?
8. Как формулируются законы Брюстера и Малюса?
9. Какое явление называется дисперсией света, и на какие виды оно делится?

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Квантовая природа излучения

Тепловое излучение и его характеристики. Закон Кирхгофа. Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза и формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Закон Вина. Внешний фотоэффект и его законы. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Эффект Комптона. Корпускулярно-волновой дуализм излучения. Энергия, масса и импульс фотона.

Методические указания

Для теоретического объяснения излучения абсолютно черного тела Планк впервые высказал гипотезу о квантовой природе излучения. Квантовая идея получает дальнейшее развитие при теоретическом объяснении явления внешнего фотоэффекта, Комpton эффекта. Главный вывод при изучении тепловых и фотоэлектрических явлений – это двойственная, корпускулярно-волновая природа полевой материи.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Кирхгофа. Каков физический смысл функции Кирхгофа?
2. Что утверждают законы Стефана-Больцмана и Вина?
3. Какую гипотезу высказал Планк?
4. Сформулируйте законы Столетова для внешнего фотоэффекта.
5. Как теоретически объясняется внешний фотоэффект?
6. Каково современное представление о природе света?

7. В чем заключается эффект Комптона и каково его теоретическое объяснение?

Элементы квантовой механики и атомной физики

Гипотеза де Бройля о волновых свойствах микрочастиц и его математическая формулировка. Экспериментальное подтверждение волновых свойств микрочастиц. Волновая функция и её статистический смысл. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Уравнение Шредингера. Частица в потенциальном ящике. Квантование энергии частицы. Собственные значения энергии частицы. Собственная волновая функция. Туннельный эффект. Прозрачность барьера. Линейный гармонический осциллятор. Квантование энергии осциллятора. Боровская теория строения атома водорода. Применение уравнения Шредингера для одноэлектронного атома. Квантовые числа. Полная энергия атома. Орбитальные механический и магнитный моменты электрона. Пространственное квантование.

Опыт Штерна-Герлаха. Спин электрона. Спиновые квантовые числа. Принцип Паули. Принцип неразличимости тождественных частиц. Распределение электронов в атомах. Электронные оболочки и подоболочки атомов. Электронные конфигурации атомов. Строение молекул. Энергия молекул. Вынужденные излучения. Лазеры.

Методические указания

Опыты Джермера и Дэвиссона по дифракции электронов впервые показали, что частицы вещественной материи также обладают двойственным корпускулярно-волновым свойством. Опытное обоснование двойственной природы частиц материи и квантованности их состояний дало мощный толчок к развитию квантовой физики. Следует подчеркнуть физический смысл соотношения неопределенностей, как одного из квантовых законов, отражающего свойство микрочастиц и ограничивающего применения понятий и законов классической физики, разъяснить при этом необоснованность его идеалистической трактовки. Необходимо отметить, что уравнение Шредингера является основным законом нерелятивистской квантовой механики. Применение этого закона позволяет раскрыть особые свойства микрочастиц, открыть новые явления, не присущие макротелам.

Применив уравнение Шредингера к одноэлектронному атому можно получить более подробную информацию о строении атома, молекулы. В этом можно убедиться, сравнивая результаты, полученные по теории Бора и с помощью уравнения Шредингера.

Особо следует обратить внимание на квантовые числа. Принцип Паули - один из важнейших законов квантовой физики, который применяется для системы микрочастиц, в частности, для объяснения распределения электронов в атомах.

Контрольные вопросы

1. Что утверждает гипотеза де Бройля?
2. Как были экспериментально подтверждены волновые свойства микрочастиц?
3. Запишите соотношения неопределенностей для импульса и координаты, а также для энергии и времени.
4. В чём заключается статистический смысл волновой функции?
5. Как квантуется полная энергия частицы в потенциальном ящике и линейного гармонического осциллятора?
6. Почему уравнение Шредингера называют основным законом нерелятивистской квантовой механики?
7. Какие квантовые числа вы знаете, и что они определяют?
8. Что такое спин?
9. Что утверждает принцип Паули?
10. Как распределяются электроны в атомах первых двадцати элементов?
11. Какими особенностями обладают вынужденные излучения.
12. Объясните принцип действия рубинового лазера.

Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Строение атомного ядра и его основные характеристики. Дефект массы. Энергия связи ядра. Ядерные силы. Закономерности α -распада. Разновидности β -распада. Возникновение γ -излучения. Эффект Мёссбауэра. Ядерные реакции и их общие закономерности. Реакция деления. Цепная реакция. Термоядерная реакция. Трудности управляемой термоядерной реакции.

Элементарные частицы. Четыре вида взаимодействия. Античастицы. Понятие о кварках. Классификация элементарных частиц.

Методические указания

Историческая справка об экспериментах Резерфорда по рассеянию α -частиц, открытиях протона и нейтрона весьма полезна для понимания строения ядра. Чтобы успешно изучить свойства ядер, нужно хорошо знать их характеристики. Огромные энергии связи ядер по сравнению с энергией связи электронов в атомах свидетельствуют о мощных ядерных силах взаимодействия нуклонов в ядре. При изучении α -распада ядер обратить внимание на туннельное просачивание α -частиц сквозь потенциальный барьер, создаваемый ядерными силами. Разновидности β -распада, как и в случае α -распада, удобно рассмотреть с помощью правила смещения.

При изучении цепной реакции следует ввести понятия о коэффициенте размножения нейтронов, критической массе ядерного вещества и критических размерах активной зоны.

При изучении термоядерной реакции показать её важность для практического использования и трудности на пути осуществления управляемой термоядерной реакции.

Контрольные вопросы

1. Каковы современные представления о строении ядер?
2. Приведите основные характеристики ядер.
3. Как можно рассчитать энергию связи ядра?
4. Какими свойствами обладают ядерные силы?
5. Приведите правила смещения для α -распада и трех разновидностей β -распада.
6. Что называется ядерной реакцией, и какими общими закономерностями обладают ядерные реакции?
7. Запишите первую ядерную реакцию, реакцию открытия нейтрона и реакцию возникновения радиоуглерода в атмосфере.
8. Могут ли существовать термоядерные реакции в естественных условиях?
9. Каковы проблемы осуществления управляемой термоядерной реакции?
10. Что называется элементарной частицей, и в каких взаимодействиях она участвует?
11. Из каких кварков состоят нейтрон, протон и π^+ мезон?
12. Чем отличаются античастицы от основных частиц?

Элементы квантовой статистики и физики твёрдого тела

Понятие о фазовом пространстве. Квантовая статистика Бозе-Эйнштейна. Бозоны. Квантовая статистика Ферми-Дирака. Фермионы.

Теплоемкость кристаллической решетки. Классическая и квантовая теории теплоемкости кристалла. Теплоемкость электронного газа.

Квантовая теория электропроводности металлов. Явление сверхпроводимости. Высокотемпературные сверхпроводники. Понятие о БКШ – теории сверхпроводимости.

Методические указания

Изучение квантовой статистики удобно начинать с введения понятия «фазовое пространство». Квантовая статистика основана на законах квантовой механики – дискретности энергетических состояний систем, принципе Паули, соотношении неопределенностей, неразличимости тождественных частиц. Поэтому необходимо иметь хорошее представление о квантовой механике. Важно знать, системы каких микрочастиц являются объектами исследований: подчиняющиеся статистике Ферми-Дирака или Бозе-Эйнштейна, и чем они отличаются друг от друга.

Изучение теплоемкости кристаллической решетки начать с рассмотрения экспериментального закона Дюлонга-Пти, классической теории теплоемкости, а потом перейти к квантовой теории в связи с результатами дальнейших исследований температурной зависимости теплоемкости кристаллов.

Показать, что квантовая теория теплоемкости Дебая полностью позволяет объяснить температурную зависимость теплоемкости кристаллов.

Изучение квантовой теории электропроводности металлов начать с представления температурной зависимости удельного сопротивления металлов в широком интервале температур. Эта зависимость сложна, и её можно объяс-

нить только с помощью квантовой теории электропроводности, основанной на квантовой статистике.

Явление сверхпроводимости объясняется с помощью квантовой БКШ-теории, где учитывается и квантовая статистика Бозе-Эйнштейна.

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальное отличие квантовой статистики от статистики классической?
2. Что означают понятия фазовое пространство и элементарная ячейка фазового пространства?
3. В чём различие квантовых статистик Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака?
4. Что такое фермионы и бозоны?
5. Что такое уровень Ферми?
6. Какие принципы составляют основу квантовой статистики?
7. На каких положениях основана квантовая теория теплоемкости кристаллической решетки?
8. Какие дефекты влияют на температурную зависимость удельного сопротивления металлов?
9. Что такое сверхпроводимость, и какие бывают сверхпроводники?
10. В чём суть квантовой БКШ-теории сверхпроводимости?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.

Основные формулы

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.

Закон Фарадея (ЭДС индукции):

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Индуктивность контура:

$$L = \Phi/I, \quad [L] = 1 \text{ Гн (Генри)}.$$

ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Индуктивность соленоида

$$L = \mu\mu_0 n^2 V,$$

где n – отношение числа витков соленоида к его длине, V – объем соленоида.

Мгновенное значение силы тока в цепи, обладающей сопротивлением R и индуктивностью L при замыкании цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-Rt/L}),$$

где ε – ЭДС источника тока; t – время, прошедшее с момента замыкания цепи.

То же самое при размыкании цепи

$$I = I_0 e^{-Rt/L},$$

где I_0 – сила тока в цепи при $t=0$; t – время, прошедшее с момента размыкания цепи.

Энергия магнитного поля, создаваемого током I в замкнутом контуре с индуктивностью L

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля (отношение энергии магнитного поля соленоида к его объему)

$$w = BH/2 \text{ или } w = B^2/(2\mu\mu_0), \text{ или } w = \mu\mu_0 H^2/2,$$

где B – магнитная индукция; H – напряженность магнитного поля.

УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

Плотность тока смещения

$$j_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t},$$

где \vec{D} – электрическое смещение, $\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ – плотность тока смещения в вакууме,

$\frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$ – плотность тока поляризации в диэлектрике.

Полная система уравнений Максвелла:

1) в интегральной форме

$$\oint_{(L)} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{(S)} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \quad \oint_{(S)} \vec{D} d\vec{S} = \int_{(V)} \rho dV;$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \int_{(S)} (\vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt}) d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0;$$

2) в дифференциальной форме

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{div} \vec{D} = \rho;$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \text{div} \vec{B} = 0,$$

где $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, ε_0 и μ_0 – соответственно электрическая и магнитная постоянные; ε и μ – соответственно, диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества; $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, γ – удельная проводимость среды, \vec{j} – плотность тока.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

Формула Томсона для периода электромагнитных колебаний в идеальном контуре

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где L – индуктивность, а C – емкость контура.

Уравнение гармонических электромагнитных колебаний величины заряда

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где q_m – амплитудное значение заряда, ω_0 – собственная частота контура, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, φ_0 – начальная фаза колебаний.

Уравнение затухающих колебаний в реальном контуре

$$q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0),$$

где β – коэффициент затухания, $\beta = R/2L$ (R – сопротивление контура); ω –

частота затухающих колебаний, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}$

Период затухающих колебаний: $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}$

Логарифмический декремент затухания

$$\lambda = \ln\left(\frac{q_m e^{-\beta t}}{q_m e^{-\beta(t+T)}}\right) = \beta T.$$

Примеры решения задач

1. Замкнутая накоротко катушка диаметром 10 см, имеющая 200 витков, находится в магнитном поле, индукция которого увеличивается от 2 до 6 Тл в течение 0,1 с. Определить среднее значение э. д. с. индукции в катушке, если плоскость витков перпендикулярна к силовым линиям поля.

Дано:

$$d=10 \text{ см}=0,1\text{м}$$

$$N=200$$

$$B_1=2 \text{ Тл}$$

$$B_2=6\text{Тл}$$

$$\Delta t=0,1\text{с}$$

$$\varepsilon_i - ?$$

Решение:

Э. д. с. индукции определим из соотношения $\varepsilon_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = S(B_2 - B_1)$ – изменение магнитного потока при изменении магнитного поля; B – индукция поля, S – площадь витка. $S = \frac{\pi d^2}{4}$. Э. д. с. равен

$$\varepsilon_i = \frac{N\pi d^2}{4\Delta t}(B_2 - B_1). \quad \varepsilon_i = \frac{200 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2}{4 \cdot 0,1}(6 - 2) = 62,8(\text{В}).$$

Ответ: $\varepsilon_i = 62,8\text{В}$

2. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L=25 \text{ мГн}$, конденсатора емкостью $C=10 \text{ мкФ}$ и резистора. Определить:

1) сопротивление резистора, если известно, что амплитуда тока в контуре уменьшилась в e раз за 16 полных колебаний; 2) логарифмический декремент затухания; 3) добротность контура.

Дано:

$$L = 25 \text{ мГн} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$C = 10 \text{ мкФ} = 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$N_e = 16$$

R -? Δ -? Q -?

где $\tau = \frac{1}{\beta}$ - время релаксации, β - коэффициент затухания ($\beta = \frac{R}{2L}$),

$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}$ - период затухающих колебаний.

С учетом этих выражений перепишем (1):

$$N_e = \frac{\frac{2L}{R} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4L}{R^2 C} - 1},$$

отсюда находим сопротивление резистора:

$$R = 2 \sqrt{\frac{L}{C(1 + 4\pi^2 N_e^2)}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{25 \cdot 10^{-3}}{10^{-5}(1 + 4 \cdot 3,14^2 \cdot 16^2)}} = 0,995 \text{ Ом}$$

Логарифмический декремент затухания: $\Delta = \beta T$;

$$\Delta = \frac{R}{2L} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{4L}{R^2 C} - 1}};$$

$$\Delta = \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{\frac{4 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{0,995^2 \cdot 10^{-5}} - 1}} = 6,28 \cdot 10^{-2}.$$

$$\text{Добротность контура: } Q = \frac{\pi}{\Delta} = \frac{3,14}{6,28 \cdot 10^{-2}} = 50.$$

Ответ: $R = 0,995 \text{ Ом}$; $\Delta = 6,28 \cdot 10^{-2}$; $Q = 50$.

ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Основные формулы

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Абсолютный показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v},$$

где c – скорость света в вакууме, v – скорость света в среде.

Оптическая длина пути световой волны $L = nl$, где l – геометрическая длина пути светового луча в среде.

Оптическая разность хода двух световых волн $\Delta = L_1 - L_2$.

Условие максимума при интерференции: $\Delta = 2k \lambda/2$ ($k=0,1,2,3\dots$).

Условие минимума при интерференции: $\Delta = (2m+1)\lambda/2$ ($m=0,1,2,3\dots$),

где λ – длина волны, k и m – номера, соответственно, интерференционных максимумов и минимумов.

Ширина интерференционной полосы $\Delta x = l\lambda/d$, где d – расстояние между двумя когерентными источниками, l – расстояние от источников до экрана, λ – длина волны света.

Условие максимума для интерференции отраженных от тонкой пленки световых волн

$$2dn \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda.$$

Условие минимума для этого случая

$$2dn \cos \beta + \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2},$$

где d – толщина пленки, n – показатель ее преломления, β – угол преломления, α – угол падения, ($k=0,1,2,3\dots$).

Радиусы светлых колец в отраженном или темных колец в проходящем свете с длиной волны λ

$$r_k = \sqrt{(2k-1)R\lambda/2}.$$

Радиусы темных колец в отраженном или светлых колец в проходящем свете с длиной волны λ

$$r_k = \sqrt{kR\lambda}, \quad (k=1,2,3\dots),$$

где R – радиус кривизны линзы.

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Радиусы внешней границы k -й зоны Френеля для сферической волны (длина волны λ)

$$r_k = \sqrt{\frac{a \cdot b}{a+b} k\lambda}$$

где k – номер зоны, a и b – соответственно расстояния диафрагмы с круглым отверстием от точечного источника и от экрана.

Условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально

$$a \sin \varphi = (2k + 1) \lambda / 2;$$

$$a \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 1, 2, 3 \dots),$$

где a – ширина щели, φ - угол дифракции.

Условие главных максимумов дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots),$$

где d – период решетки.

Период дифракционной решетки $d = \frac{1}{N_0}$, где N_0 – число щелей, приходящихся на единицу длины решетки.

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \lambda / \Delta \lambda = KN,$$

где $\Delta \lambda$ - разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta \lambda$), при которой эти линии могут быть видны отдельно, N – полное число щелей решетки, K - порядок спектра.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

$$\text{Степень поляризации света } P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\max} и I_{\min} - соответственно максимальная и минимальная интенсивности поляризованного света, пропускаемого анализатором.

Закон Малюса $I = I_0 \cos^2 \alpha$, где I – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор, I_0 - интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор, α - угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Закон Брюстера $\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$, где α_B - угол падения луча, при котором отраженный свет максимально поляризован, n_{21} – относительный показатель преломления.

Угол поворота плоскости поляризации при прохождении света через кристаллы $\varphi = \varphi_0 l$, через растворы $\varphi = [\varphi_0] Cl$, где φ_0 - удельное вращение, l – длина пути луча в оптически активном веществе, C – концентрация раствора.

Примеры решения задач

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

1. От двух когерентных источников монохроматического света с $\lambda = 600 \text{ нм}$ лучи попадают на экран. На экране наблюдается интерференционная картина. Если на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместить

мыльную пленку ($n=1,33$), то интерференционная картина изменится на противоположную. При какой наименьшей толщине d_{min} пленки это возможно?

Дано:

$$\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = 1,33$$

$$d_{min} - ?$$

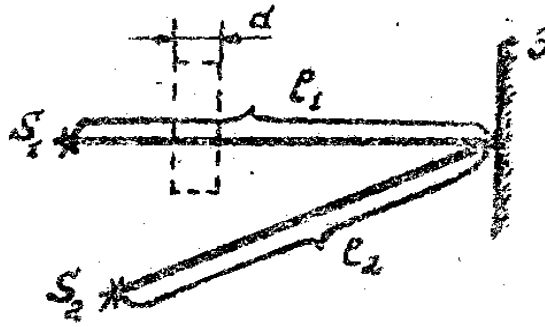


Рис. 1

Так как интерференционная картина (рис.1) изменилась на противоположную, то там, где в начале наблюдали максимум, теперь будет наблюдаться минимум. Это связано с изменением оптической разности хода лучей. До внесения пленки оптическая разность хода была равна: $\Delta_1 = l_1 - l_2$. После внесения пленки:

$$\Delta_2 = l_1 - d_{min} + nd_{min} - l_2 = (l_1 - l_2) + d_{min}(n - 1).$$

$$\text{Изменение оптического хода лучей: } \Delta_2 - \Delta_1 = d_{min}(n - 1) \quad (1)$$

$$\text{Условие минимума: } \Delta_2 - \Delta_1 = (2m + 1)\lambda/2, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Наименьшая толщина пленки соответствует значению $m=0$. Значит,

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \lambda/2. \quad (2)$$

Из (1) и (2) получим:

$$d_{min} = \frac{\lambda}{2(n - 1)} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,33} = 9,1 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $d_{min} = 0,91 \text{ мкм.}$

2. Плоско-выпуклая линза ($n=1,6$) выпуклой стороной прижата к стеклянной пластинке. Расстояние между первыми двумя кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно $0,5 \text{ мм}$. Если освещение производится монохроматическим светом, падающим нормально, то чему равен радиус кривизны линзы? Какова ее оптическая сила? Длина волны падающего света $\lambda = 550 \text{ нм}$.

Дано:

$$n = 1,6$$

$$r_2 - r_1 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$R - ? \quad D - ?$$

Радиусы темных колец Ньютона в отраженном

свете: $r_m = \sqrt{m\lambda R}$; $m = 0, 1, 2, \dots$. Тогда

$$r_1 = \sqrt{\lambda R}; \quad r_2 = \sqrt{2\lambda R},$$

$$r_2 - r_1 = \sqrt{R}(\sqrt{2\lambda} - \sqrt{\lambda}).$$

$$\text{Отсюда: } R = \frac{(r_2 - r_1)^2}{\lambda(\sqrt{2} - 1)^2} = \frac{25 \cdot 10^{-8}}{5,5 \cdot 10^{-7}(1,4 - 1)^2} = 2,84 \text{ м.}$$

Оптическая сила плосковыпуклой линзы : $D = (n - 1)/R = (1,6 - 1)/2,84 = 0,211 \text{ дптр.}$

Ответ: $R = 2,84 \text{ м; } D = 0,211 \text{ дптр.}$

3. Для устранения отражения света в просветленной оптике на поверхность линзы наносится тонкая пленка с показателем преломления ($n=1,26$), меньшим, чем у стекла. При какой минимальной толщине пленки отражение света от линзы не будет наблюдаться?

Длина волны падающего света $0,550$ мкм, угол падения 30° .

Дано:

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$n = 1,26$$

$$d_{\min} - ?$$

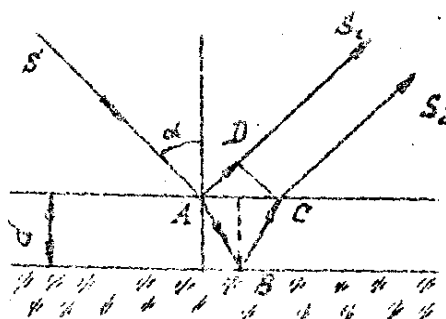


Рис. 2

Свет, падая на систему «пленка-стекло», отражается как от верхней, так и от нижней поверхности пленки (рис. 2). В результате появляются два когерентных луча S_1 и S_2 . Результат их интерференции зависит от оптической разности хода лучей:

$$\Delta = (AB + BC)n - ADn_1$$

Для воздуха $n_1=1$. Оптическую разность хода можно выразить через толщину пленки d и угол падения света α : $\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$.

$$\text{По условию минимума: } 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2},$$

$k=1,2,3\dots$ - порядок интерференционного минимума.

Отсюда:

$$d = \frac{(2k + 1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \quad \text{или} \quad d_{\min} = \frac{3\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}.$$

$$d_{\min} = \frac{3\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = \frac{3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{4\sqrt{1,26^2 - \sin^2 30}} = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: $d_{\min} = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

1. По середине между точечным источником монохроматического света с длиной волны $\lambda=450$ нм и экраном установлена (рис. 3) непрозрачная диафрагма с круглым отверстием. Дифракционная картина от круглого отверстия наблюдается на экране, расположенном на расстоянии 5 м от источника. Определить радиус отверстия, при котором центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным. На каком расстоянии от отверстия нужно поместить экран, чтобы в центре дифракционной картины получился более яркий максимум?

Дано:

$$a = b = 2,5 \text{ м}$$

$$\lambda = 450 \cdot 10^{-9} \text{ нм} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$r - ? \quad b - ?$$

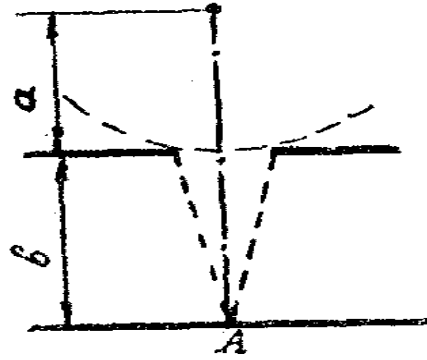


Рис. 3

В центре экрана возникает минимум, когда отверстие открывает четное число зон m . Минимум будет наиболее темным при $m=2$.

Радиус m -й зоны соответствует радиусу отверстия:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda} = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 2,5 \cdot 2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7}}{5}} = 10,5 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

$r = 1,05 \text{ мм}$. При нечетном числе зон ($m=3$) возникает максимум:

$$\text{Условие максимума: } r = \sqrt{\frac{ab}{a+b} 3 \lambda}.$$

Отсюда находим расстояние b от отверстия до экрана

$$b = \frac{ar^2}{3a\lambda - r^2} = \frac{2,5 \cdot 10,5^2 \cdot 10^{-8}}{3 \cdot 2,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} - 10,5^2 \cdot 10^{-8}} = \frac{2,76 \cdot 10^{-5}}{212,5 \cdot 10^{-8}} = 12,96 \text{ м}.$$

Ответ: $r=1,05 \text{ мм}$; $b=12,96 \text{ м}$.

2. На щель шириной $a=0,05 \text{ мм}$ нормально падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda=430 \text{ нм}$. Дифрагированные от щели волны собираются линзой, расположенной за щелью, в различных точках экрана (рис. 4). Найти расстояние от экрана до щели, если расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны от центрального максимума, равно 2 см .

Дано:

$$a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$\lambda = 430 \text{ нм} = 4,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$d = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$m = 1$$

$$L - ?$$

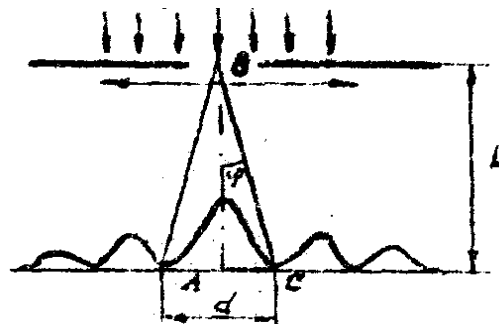


Рис. 4

Условие минимума для дифракции Фраунгофера от щели:

$$a \sin \varphi = m \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad \sin \varphi = \frac{\lambda}{a} = \frac{4,3 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-5}} = 0,087;$$

$$\text{Из } \Delta ABC: \quad \frac{d}{2} = L \operatorname{tg} \varphi;$$

$$L = \frac{d}{2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,087} = 0,1 \text{ м.}$$

Ответ: $L = 0,1 \text{ м}$

3. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$. На экран, находящийся от решетки на расстоянии $L = 1 \text{ м}$, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина (рис. 5). Первый главный максимум наблюдается на расстоянии $l = 12 \text{ см}$ от центрального. Найдите: 1) период дифракционной решетки; 2) число штрихов на 1 см ее длины; 3) общее число максимумов; 4) угол дифракции, соответствующий последнему максимуму.

Дано:

$$\lambda = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$L = 1 \text{ м}$$

$$m = 1$$

$$l = 0,12 \text{ м}$$

$$l' = 0,01 \text{ м}$$

$$1) d - ? \quad 2) n - ?$$

$$3) N - ? \quad 4) \varphi_{\max} - ?$$

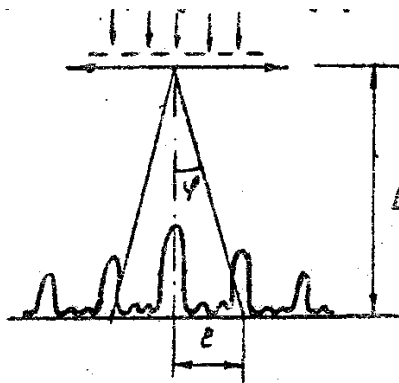


Рис. 5

По условию максимума: $d \sin \varphi = m\lambda$, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L}$. Так как $l \ll L$, то

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi. \text{ Поэтому: } d \operatorname{tg} \varphi = m\lambda \text{ или } d = \frac{m\lambda}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{m\lambda L}{l};$$

$$d = \frac{5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1}{0,12} = 4,58 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 4,58 \text{ мкм.}$$

Число штрихов на 1 см:

$$n = \frac{l'}{d} = \frac{0,01}{4,58 \cdot 10^{-6}} = 2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}.$$

Наибольший угол отклонения лучей не может быть больше, чем $\pi/2$. Поэтому, приняв $\sin \varphi_{\max} = +1$, из условия максимума находим $m_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}$. Общее число максимумов, даваемых решеткой:

$$N = 2m_{\max} + 1 = \frac{2d}{\lambda} + 1 = \frac{2 \cdot 4,58 \cdot 10^{-6}}{5,5 \cdot 10^{-7}} + 1 = 17.$$

Условие максимума для последнего дифракционного максимума:

$$d \sin \varphi_{\max} = m_{\max} \lambda; \quad \varphi_{\max} = \arcsin \frac{m_{\max} \lambda}{d} = 73,9^\circ.$$

Ответы: $d = 4,58 \text{ мкм}$; $n = 2,18 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$; $N = 17$; $\varphi_{\max} = 73,9^\circ$.

Поляризация света

1. Два николя N_1 и N_2 (рис. 6) расположены так, что угол между их плоскостями пропускания равен 60° . Определить: 1) во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через один николю (N_1); 2) во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через оба николя? При прохождении каждого из николей потери на отражение и поглощение света составляют 5%.

Дано:

$$\alpha = 60^\circ$$

$$k=0,05$$

$$1) I_0/I_1 - ?$$

$$2) I_0/I_2 - ?$$

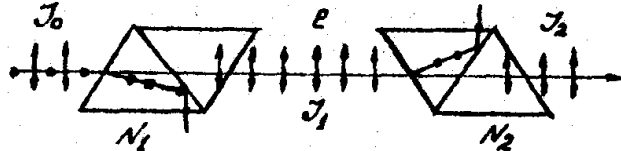


Рис. 6

Пусть интенсивность естественного света, падающего на николю N_1 , будет I_0 . При прохождении через N_1 естественный свет расщепляется на два пучка – обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный дальше не проходит. Поэтому интенсивность света, прошедшего через николю N_1 , будет

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 (1 - k).$$

Относительное уменьшение интенсивности естественного света при его поляризации:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{I_0}{\frac{1}{2} I_0 (1 - k)} = \frac{2}{1 - k} = \frac{2}{1 - 0,05} = 2,10.$$

Интенсивность света, прошедшего через николю N_2 (анализатор), определяется законом Малюса:

$$I_2 = I_{10} \cos^2 \alpha.$$

Из-за потери на поглощение и отражение $I_{10} = I_1 (1 - k)$.

Следовательно, $I_2 = I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha$.

Относительное уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя:

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{I_0}{I_1 (1 - k) \cos^2 \alpha} = \frac{I_0}{\frac{1}{2} I_0 (1 - k)^2 \cos^2 \alpha} = \frac{2}{(1 - k)^2 \cos^2 \alpha};$$

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{2}{(1 - 0,05)^2 \cdot \cos^2 60^\circ} = 8,86.$$

Ответ: $\frac{I_0}{I_1} = 2,10$; $\frac{I_0}{I_2} = 8,86$.

4. Пучок естественного света падает на стекло с показателем преломления $n = 1,73$. Определить, при каком угле падения отраженный от стекла пучок света будет полностью поляризован. Чему при этом равен угол преломления и угол между отраженным и преломленным лучами?

Дано:
 $n = 1,73$

$\alpha - ?$ $\beta - ?$ $\gamma - ?$

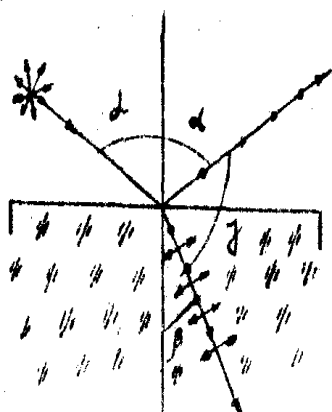


Рис. 7

По закону Брюстера отраженный свет (рис.7) полностью поляризован при условии $\operatorname{tg} \alpha = n_{21}$. Относительный показатель преломления стекла относительно воздуха $n_{21} = \frac{n}{n_1} = n$. Для воздуха $n_1 = 1$.

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} n = 60^{\circ}$$

Согласно закону преломления света $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$.

Отсюда $\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}$ и $\sin \beta = \frac{1}{2}$.

Значение синуса $\frac{1}{2}$ соответствует $\beta = 30^{\circ}$. Угол между отраженными и преломленными лучами:
 $\gamma = 180 - (\alpha + \beta) = 180 - 90 = 90^{\circ}$.

Ответ: $\alpha = 60^{\circ}$; $\beta = 30^{\circ}$; $\gamma = 90^{\circ}$.

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Основные формулы

КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Закон Стефана – Больцмана:

$$R_T = \sigma T^4,$$

где R_T - энергетическая светимость абсолютно черного тела, σ - постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$), T - абсолютная температура.

Этот закон для серого тела:

$$R_T = A \sigma T^4,$$

где A - поглощательная способность (коэффициент черноты) серого тела.

Закон смещения Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T},$$

где λ_m - длина волны, соответствующая максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела, b - постоянная Вина ($b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$)

Максимальное значение спектральной плотности энергетической светимости:

$$r_{\lambda T_m} = CT^5,$$

где C - постоянная ($C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5)$)

Формула Планка для энергии кванта:

$$E = h\nu = hc/\lambda,$$

где h - постоянная Планка ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$), ν - частота, λ - длина волны излучения, c - скорость света в вакууме ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$).

Формула Планка для излучения абсолютно черного тела:

$$r_{\lambda T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad \text{или} \quad r_{\nu T} = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}.$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:

$$h\nu = A + T_m,$$

где $h\nu$ - энергия фотона, падающего на поверхность металла, A - работа выхода электрона из металла, T_m - максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

При $h\nu \approx 5 \text{ кэВ}$, максимальная скорость фотоэлектрона $V_m \ll c$ и максимальная кинетическая энергия определяется по формуле:

$$T_m = \frac{m_0 V_m^2}{2},$$

где m_0 - масса покоя электрона ($m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$).

При $h\nu \gg 5 \text{ кэВ}$ (релятивистский случай), максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона:

$$T_m = (m - m_0)c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - V_m^2/c^2}} - 1 \right),$$

где m - масса релятивистского электрона.

«Красная граница» фотоэффекта

$$\nu_0 = \frac{A}{h}, \quad \lambda_0 = \frac{hc}{A},$$

где ν_0 - минимальная частота (λ_0 - максимальная длина волны), при которой фотоэффект возможен.

$$\text{Масса фотона } m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

$$\text{Импульс фотона } P_\phi = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском эффекте:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где λ и λ' - длины волн падающего и рассеянного рентгеновского излучения, θ - угол рассеивания рентгеновских лучей.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Длина волны де Бройля:

а) для нерелятивистской частицы $\lambda = h/p = h/mV$;

б) для релятивистской частицы

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{(2E_0 + T)T}} = \frac{h\sqrt{1 - V^2/c^2}}{mV},$$

где E_0 - энергия покоя ($E_0 = m_0c^2, c = 3 \cdot 10^8$ м/с), T - кинетическая энергия микро-частицы, m - масса, V - скорость микрочастицы.

Соотношение неопределенностей Гейзенберга:

а) для координаты и импульса

$$\Delta x \cdot \Delta P_x \geq \hbar,$$

б) для энергии и времени $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$,

где Δx - неопределенности координаты,

ΔP_x - неопределенность проекции импульса,

ΔE - неопределенность энергии данного квантового состояния, Δt - время пребывания микрочастицы в данном энергетическом состоянии.

Стационарное уравнение Шредингера:

$$\nabla^2 \Psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \Psi = 0,$$

где ∇^2 - оператор Лапласа, m - масса микрочастицы, E - полная энергия, U - потенциальная энергия, Ψ - волновая функция, $|\Psi|^2 = \frac{dW}{dx}$ - плотность вероятности.

Вероятность обнаружения микрочастицы в области от x_1 и до x_2 :

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi|^2 dx.$$

Собственная (полная) энергия микрочастицы в потенциальной яме

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m\ell^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где ℓ - ширина ямы, m - масса микрочастицы.

Собственная волновая функция

$$\Psi = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin \frac{\pi n}{\ell} x.$$

ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

Обобщенная формула Бальмера:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где λ - длина волны спектральных линий, R - постоянная Ридберга ($R \approx 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$), m - число, определяющее серию, n - номер линии в спектре ($n = m + 1, m + 2, \dots$).

Для серии Лаймана $m = 1$, Бальмера $m = 2$, Пашена $m = 3$, Брэкета $m = 4$ и Пфунда $m = 5$.

Радиусы боровских орбит:

$$r = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e Z e^2}.$$

Скорость электрона на боровских орбитах:

$$V = \frac{Z e^2}{2 \varepsilon_0 h n}.$$

Потенциальная энергия электрона:

$$U = -\frac{Z e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r} = -\frac{m_e Z^2 e^4}{4 \varepsilon_0^2 h^2 n^2}.$$

Кинетическая энергия электрона:

$$E_K = \frac{m_e Z^2 e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2}.$$

Полная энергия электрона:

$$E = E_K + U = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2}.$$

В этих формулах m_e - масса электрона, Z - порядковый номер элемента, e - элементарный заряд ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$), ε_0 - электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$), n - квантовое число, определяющее номер электронной орбиты ($n = 1, 2, 3, \dots$).

ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА К ОДНОЭЛЕКТРОННОМУ АТОМУ

Полная энергия водородоподобного атома:

$$E = -\frac{m_e Z^2 e^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2},$$

n - главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Орбитальный момент импульса электрона

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1,$$

где l - орбитальное квантовое число.

Проекция орбитального момента импульса

$$L_z = m_l \hbar, \quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l,$$

где m_l - магнитное квантовое число.

Связь между орбитальным магнитным моментом и моментом импульса электрона

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}$$

Проекция магнитного момента

$$\mu_z = -\frac{e}{2m_e} L_z,$$

где e - заряд, а m_e - масса электрона.

Спиновые моменты электрона и их проекции:

$$\begin{aligned} L_s &= \hbar\sqrt{s(s+1)}, & s &= \frac{1}{2}, \\ L_{sz} &= m_s \hbar, & m_s &= \pm \frac{1}{2}, \\ \vec{\mu}_s &= -\frac{e}{m_e} \vec{L}_s, & \mu_{sz} &= \frac{e}{m_e} L_{sz} = \pm \frac{e\hbar}{2m_e} = \pm \mu_B, \end{aligned}$$

где s - спиновое квантовое число, m_s - магнитное спиновое квантовое число, μ_B - магнетон Бора ($\mu_B = 9,3 \cdot 10^{-24}$ Джс/Тл).

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

Радиус ядра $r = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3}$, где A - массовое число (число нуклонов в ядре).

Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{св} = [Zm_p + (A-Z)m_n - m_a]c^2 = [Zm_H + (A-Z)m_n - m_a]c^2 = \Delta mc^2 = 931,4 \Delta m \text{ МэВ},$$

где Δm - дефект массы, Z - зарядовое число (число протонов), m_p - масса протона, m_H - масса атома водорода (${}_1H^1$), $(A-Z)$ - число нейтронов, m_n - масса нейтрона, m_a - масса ядра, m_a - масса атома, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Удельная энергия связи $E = E_{св}/A$.

Закон радиоактивного распада: $N = N_0 e^{-\lambda t}$,

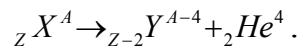
где N - число нераспавшихся ядер к моменту времени t , N_0 - первоначальное число радиоактивных ядер, λ - постоянная распада.

Период полураспада $T = \ln 2/\lambda$.

Среднее время жизни радиоактивного ядра $\tau = 1/\lambda$.

Активность нуклида $A = dN/dt = \lambda N$.

Правило смещения α - распада:



Правила смещения:

1) для β^- - распада ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^{A+1} e^0 + {}_0 \tilde{\nu}^0$,

2) для β^+ - распада ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^{A+1} e^0 + {}_0 \nu^0$,

3) для $K(e)$ - захвата ${}_Z X^{A+1} e^0 \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + {}_0 \nu^0$.

Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)] = 931,4 \Delta m \text{ МэВ},$$

где Δm - дефект массы, $(m_1 + m_2)$ - суммарная масса ядра-мишени и бомбардирующей частицы, $(m_3 + m_4)$ - суммарная масса продуктов реакции.

Примеры решения задач

КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

1. Максимум спектральной плотности излучательности солнца приходится на длину волны $\lambda_{\max} = 0,48 \text{ мкм}$. Считая, что солнце излучает как абсолютно черное тело, определить: 1) температуру поверхности солнца; 2) мощность излучения с поверхности солнца; радиус солнца равен $6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$.

Дано:
 $\lambda_{\max} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
 $r = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$

Из закона смещения Вина находим температуру поверхности солнца: $T = \vartheta / \lambda_{\max}$, где ϑ - постоянна Вина: $\vartheta = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

1) T - ? 2) P - ?

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}}{4,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 6040 \text{ К}.$$

Мощность излучения $P = R_{\lambda} S$, где R_{λ} - излучательность солнца (абсолютно черного тела), S - площадь поверхности солнца.

По закону Стефана-Больцмана

$$R_{\lambda} = \sigma T^4, \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) - \text{ постоянная Стефана-Больцмана}$$

$$P = \sigma T^4 \cdot 4\pi r^2 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 6040^4 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 6,95^2 \cdot 10^{16} = 4,58 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

Ответ: $T = 6040 \text{ К}; P = 4,58 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

2. На поверхность литиевой пластинки падает монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Найти максимальную скорость фотоэлектронов и красную границу фотоэффекта для лития. Работа выхода для лития $A = 2,3 \text{ эВ}$.

Дано:
 $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$
 $A = 2,3 \text{ эВ} = 3,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

Согласно уравнению Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$\varepsilon = \frac{mV_{\max}^2}{2} + A,$$

V_{\max} - ? λ_0 - ?

где $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ - масса электрона.

Энергия фотона: $\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$, $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - постоянная Планка,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - скорость света в вакууме. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A.$$

Отсюда:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2hc}{m\lambda} - \frac{2A}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 5 \cdot 10^{-7}} - \frac{2 \cdot 3,68 \cdot 10^{-19}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Красная граница, ниже которой внешний фотоэффект прекращается, определяется из условия

$$h\nu_0 = A, \text{ так как } \frac{mV_{\max}^2}{2} = 0 \text{ или } h\frac{c}{\lambda_0} = A.$$

$$\text{Отсюда } \lambda_0 = \frac{hc}{A} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{3,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 5,38 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$$\text{Ответ: } V_{\max} = 2,2 \cdot 10^5 \text{ м/с}; \quad \lambda_0 = 538 \text{ нм}.$$

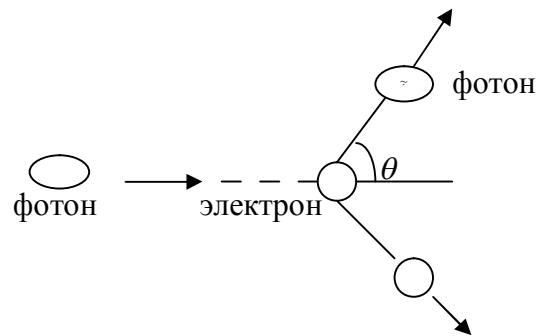
3. При эффекте Комптона рентгеновский фотон, сталкиваясь с электроном, рассеивается на угол $\theta = 60^\circ$ (см. рис.). Чему равна энергия отдачи электрона при этом? Длина волны рентгеновских лучей $\lambda = 100 \text{ нм}$.

Дано:

$$\lambda = 100 \text{ нм} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$\theta = 60^\circ$$

$W = ?$



При упругом столкновении с электроном фотон теряет часть своей энергии. По закону сохранения энергии она равна энергии отдачи электрона W :

$$W = \varepsilon - \varepsilon'. \text{ Энергия фотона до столкновения } \varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \text{ после столкновения}$$

$$\varepsilon' = h\nu' = \frac{hc}{\lambda'}.$$

$$\text{Следовательно, } W = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = \frac{hc\Delta\lambda}{\lambda \cdot \lambda'},$$

где $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ - изменение длины волны фотона.

$$\text{Согласно формуле Комптона } \Delta\lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где m_0 - масса покоя электрона ($m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$); h - постоянная Планка ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$).

Длина волны фотона после столкновения

$$\lambda' = \lambda + \Delta\lambda = \lambda + \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

$$W = \frac{2h^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{m_0 \lambda \left(\lambda + \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)} = 9,2 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 575 \text{ эВ}.$$

Ответ: $W = 575 \text{ эВ}$.

4. Для фотона с длиной волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ определить его:

1) энергию; 2) импульс; 3) массу.

Дано:

Энергия фотона определяется по фор-

$$\lambda = 0,5 \text{ мкм} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

муле $\varepsilon = h\nu$. Частота ν связана с длиной волны $\nu = c/\lambda$.

$$\varepsilon - ? \quad P - ? \quad m - ?$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c \cdot 10^8 \text{ м/с}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 3,96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = \\ &= 3,96 \cdot 10^{-19} \cdot 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ} = 2,47 \text{ эВ}. \end{aligned}$$

Импульс фотона

$$P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c}{5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,32 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Масса фотона

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c}{5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ кг}.$$

Ответ: $\varepsilon = 2,47 \text{ эВ}$; $P = 1,32 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$; $m = 4,4 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ И АТОМНОЙ ФИЗИКИ

1. Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов U . Найти длину волны де Бройля электрона для двух случаев: 1) $U_1 = 51 \text{ В}$; 2) $U_2 = 510 \text{ кВ}$.

Дано:

$$U_1 = 51 \text{ В}$$

$$U_2 = 510 \text{ кВ} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ В}$$

Если электрон движется со скоростью значительно меньшей скорости света в вакууме, то длина волны де Бройля определяется формулой:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mV} = \frac{h}{\sqrt{2m_0T}}.$$

$$\lambda_1 - ? \quad \lambda_2 - ?$$

Для релятивистского электрона ($V \approx c$)

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\sqrt{(2E_0 + T)T}},$$

$E_0 = m_0c^2$ - энергия покоя электрона (m_0 - масса электрона), T - кинетическая энергия электрона.

В первом случае $T_1 = eU_1 = 51 \text{ эВ} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ МэВ}$

Энергия покоя электрона $E_0 = m_0c^2 = 0,51 \text{ МэВ}$; так как $E_0 > T$, то скорость электрона $V \ll c$.

Поэтому длина волны де Бройля определяется:

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0T}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU_1}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 51 \text{ В}}} = 171 \text{ нм}.$$

Во втором случае $T_2 = eU_2 = 5,1 \cdot 10^5 \text{ эВ} = 0,51 \text{ МэВ}$; т.к. $T_2 = E = m_0c^2$, то для определения длины волны де Бройля используется релятивистская формула

$$\lambda_2 = \frac{hc}{\sqrt{(2E_0 + T_2)T_2}} = \frac{hc}{\sqrt{(2m_0c^2 + m_0c^2)m_0c^2}} = \frac{h}{\sqrt{3}m_0c} =$$

$$= \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{1,7 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,4 \text{ нм}.$$

Ответ: $\lambda_1 = 171 \text{ нм}$; $\lambda_2 = 1,4 \text{ нм}$.

2. Линейный размер атома водорода в основном состоянии равен $0,53 \text{ \AA}$. Используя соотношение неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta P_x \geq h$, оценить полную энергию атома для этого состояния.

Дано:
 $r_1 = 0,53 \text{ \AA} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
 $Z = 1$
 $n = 1$

$E = ?$

Согласно соотношению неопределенностей, если неопределенность координаты стремится к нулю ($\Delta x \rightarrow 0$), то неопределенность проекции импульса должна стремиться к бесконечности ($\Delta P_x \rightarrow \infty$), т.е. неопределенным становится импульс, и следовательно, кинетическая энергия частицы. Если же задать неопределенность координаты достаточно большой, но так, чтобы электрон при этом оставался в пределах линейного размера атома, т.е. $\Delta x = \ell/2$, то можно ожидать, что неопределенность импульса не превысит его значение, т.е. $\Delta P_x \leq P_x$. Импульс связан с кинетической энергией: $P_x = \sqrt{2mE_x}$.

Подставляя в соотношение значение Δx , а также P_x , мы не нарушим его:

$$\frac{\ell}{2} P_x \geq \hbar \quad \text{или} \quad \frac{\ell}{2} \sqrt{2mE_{k \min}} \geq \hbar.$$

Минимальное значение кинетической энергии

$$E_{k \min} = \frac{2\hbar^2}{m\ell^2} = \frac{2 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-68} \text{ Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{9 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 4 \cdot 0,53^2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2} = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}.$$

$$E_{k \min} = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}.$$

Потенциальная энергия электрона

$$U = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = -\frac{1,6^2 \cdot 10^{-38} \text{ Кл}^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 0,53^2 \cdot 10^{-20} \cdot \text{ м}^2} =$$

$$= -4,4 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -27,2 \text{ эВ}.$$

Минимальное значение полной энергии атома водорода в основном состоянии

$$E_{\min} = E_{k \min} + U = (13,6 - 27,2) \text{ эВ} = -13,6 \text{ эВ}$$

Ответ: $E_{\min} = -13,6 \text{ эВ}$.

3. Микрочастица ($m = 10^{-30} \text{ кг}$) в одномерной прямоугольной яме с бесконечно высокими стенками находится в состоянии, характеризуемом $n = 4$. Определить: 1) энергию микрочастицы; 2) вероятность обнаружения микрочастицы в первой четверти ямы. Ширину ямы принять равной 200 пм .

Дано:

Собственные значения полной энергии

$$\begin{aligned}
m &= 10^{-30} \text{ кг} \\
n &= 4 \\
l &= 200 \text{ нм} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м} \\
x_1 &= 0 \\
x_2 &= l/4
\end{aligned}$$

микрочастицы в потенциальной яме:

$$\begin{aligned}
E_n &= \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2} \\
E_4 &= \frac{\pi^2 \hbar^2 \cdot 16}{2ml^2} = \frac{3,14^2 \cdot 1,05^2 \cdot 10^{-68} \text{ Дж} \cdot \text{с}^2 \cdot 16}{2 \cdot 10^{-30} \cdot 4 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2} =
\end{aligned}$$

$$1) E_4 - ? \quad 2) W - ?$$

$$= 2,4 \cdot 10^{-17} \text{ Дж} = 150 \text{ эВ}$$

Собственная волновая функция микрочастицы в состоянии с $n = 4$

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{4\pi}{l} x.$$

Вероятность обнаружения частицы в интервале $x_1 < x < x_2$:

$$\begin{aligned}
W &= \int_{x_1}^{x_2} |\psi|^2 dx = \int_0^{l/4} \frac{2}{l} \sin^2 \frac{4\pi}{l} x dx; \\
\sin^2 \left(\frac{4\pi x}{l} \right) &= \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{8\pi x}{l} \right) \right], \\
W &= \frac{1}{l} \left[\int_0^{l/4} dx - \int_0^{l/4} \cos \left(\frac{8\pi x}{l} \right) dx \right] = \frac{1}{l} \left(\frac{l}{4} - \frac{l}{8\pi} \sin \frac{8\pi x}{l} \Big|_0^{l/4} \right) = \frac{1}{4} - \frac{1}{8\pi} (\sin 2\pi - \sin 0) = 0,25
\end{aligned}$$

Ответ: $E = 150 \text{ эВ}$; $W = 0,25$.

ТЕОРИЯ АТОМА ВОДОРОДА ПО БОРУ

4. Определить частоту света, излучаемого возбужденным атомом водорода при переходе электрона на второй энергетический уровень, если радиус орбиты электрона изменился в 9 раз.

Дано:	
$m = 2$;	
$r_n/r_2 = 9$	
$\nu - ?$	

Частоту света, излучаемого атомом водорода можно определить по обобщенной формуле Бальмера:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = cR \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $R' = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$.

Радиус боровской орбиты определяется по формуле:

$$r = \frac{\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{\pi m Z e^2}.$$

По условию задачи $\frac{r_n}{r_2} = \frac{n^2}{2^2} = 9$.

Отсюда $n^2 = 36$.

Следовательно,

$$\nu = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{36} \right) = \frac{3,29 \cdot 10^{15} \cdot 2}{9} = 7,31 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}.$$

5. Электрон в атоме водорода находится в состоянии $2P$. Чему равна полная энергия атома? Найдите также значения орбитального магнитного момента электрона и его проекции на направление внешнего магнитного поля.

Дано:
 $2P: n = 2,$
 $\ell = 1$
 $Z = 1$

Формула полной энергии одноэлектронного атома

$$E = -\frac{mZ^2e^4}{8\varepsilon_0^2h^2n^2}; n = 1, 2, 3, \dots$$

$E = ? \mu_\ell = ? \mu_{\ell z} = ?$

Для $2P$ состояния $n = 2$.

В этой формуле: m - масса электрона ($m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$), e - элементарный заряд ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$), ε_0 - электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$), h - постоянная Планка ($h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$).

Подставив значения постоянных и выразив энергию в электронвольтах, получим

$$E = -\frac{13,6}{n^2} \text{ эВ} = \frac{13,6}{4} \text{ эВ} = -3,4 \text{ эВ}.$$

Орбитальные моменты импульса и магнитный момент электрона связаны соотношением $\vec{\mu}_\ell = -\frac{e}{2m} \vec{L}$.

Согласно квантовой механике значение момента импульса определяется формулой $L = \hbar\sqrt{\ell(\ell+1)}$, где ℓ - орбитальное квантовое число, принимающее значение $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, \ell = 1$.

Для P состояния $\ell = 1$.

Модуль магнитного момента

$$\mu_\ell = \frac{\ell}{2m} L = \frac{e\hbar}{2m} \sqrt{\ell(\ell+1)} = \mu_B \sqrt{\ell(\ell+1)},$$

где μ_B - магнетон Бора, служит единицей измерения магнитных моментов микрочастиц:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}.$$

Следовательно, $\mu_\ell = 9,3 \cdot 10^{-24} \sqrt{1(1+1)} \text{ Дж/Тл} = 1,3 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Тл}$.

Проекция орбитальных моментов электрона по законам квантовой механики выражается формулами

$$L_z = m_\ell \hbar \quad \text{и} \quad \mu_{\ell z} = \mu_B m_\ell,$$

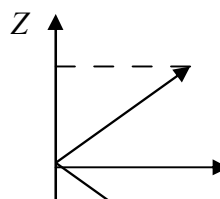
где m_ℓ - магнитное квантовое число ($m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$).

Для состояния $2P$ $\ell = 1$. Поэтому $m_\ell = 0, \pm 1$.

Следовательно, магнитный момент электрона в этом случае имеет три ориентации (см. рис.) в пространстве и соответственно три проекции:

$$\mu_{\ell z1} = \mu_B \cdot 0 = 0, \mu_{\ell z2} = \mu_B \cdot (-1) = -9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл},$$

$$\mu_{\ell z3} = \mu_B \cdot 1 = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$$



Ответ: $E = -3,4эВ;$	$+\mu_B$	$\mu_{\ell 2}$
$\mu_{\ell} = 1,3 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{Тл};$		
$\mu_{\ell Z1} = 0;$	0	$\mu_{\ell 1}$
$\mu_{\ell Z2} = -9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} / \text{Тл};$		
$\mu_{\ell Z3} = 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} / \text{Тл}.$	$-\mu_B$	$\mu_{\ell 3}$

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Первоначальная масса радиоактивного изотопа радона ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 3,82$ суток равна $1,5 \text{ г}$. Определить: 1) начальную активность изотопа; 2) его активность через 5 суток; 3) в какое ядро превратится ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ после двух α -распадов и трех β -распадов?

Дано:

${}_{86}\text{Rn}^{222}$

$T = 3,82 \text{ сут.} = 3,82 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 3,3 \cdot 10^5 \text{ с}$

$t = 5 \text{ сут.} = 5 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 4,3 \cdot 10^5 \text{ с}$

$m_0 = 1,5 \text{ г} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$

Начальная активность радиоактивного изотопа $A_0 = \lambda N_0$,
где λ - постоянная распада; N_0 - число радиоактивных ядер в момент времени $t = 0$:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}; \quad N_0 = \frac{m_0 N_A}{M}$$

$A_0 - ? \quad A - ? \quad Y - ?$

Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Молярная масса радона $M = 222 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}$.

Следовательно, $A_0 = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m_0 N_A}{M} = \frac{0,693}{3,3 \cdot 10^5} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{222 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}} = 8,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} = 8,5 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$.

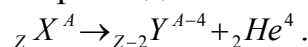
Активность изотопа через 5 суток:

$A = \lambda N$, где N - число радиоактивных ядер через 5 суток, N определяется по закону радиоактивного распада:

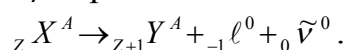
$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} \cdot t} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{222 \cdot 10^{-3} \text{ кг} / \text{моль}} \cdot e^{-\frac{\ln 2}{3,3 \cdot 10^5} \cdot 4,3 \cdot 10^5} = 3,5 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$$

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} \cdot N = \frac{0,693}{3,3 \cdot 10^5 \text{ с}} \cdot 3,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} = 7,35 \cdot 10^9 \text{ Бк}$$

Правило смещения для α -распада:



Правило смещения для β^- -распада:



При α -распаде зарядовое число (порядковый номер) дочернего ядра Y уменьшается на 2, а массовое число A - на 4.

При β^- -распаде массовое число не изменяется, а зарядовое число увеличивается на единицу. Зарядовое число изотопа, получившегося после двух α и трех β^- -распадов:

$$Z_1 = (Z - 4) + 3 = (86 - 4) + 3 = 85.$$

Массовое число получившегося ядра $A_1 = A - 8 = 222 - 8 = 214$.

Следовательно, получившийся изотоп является ядром астата ${}_{85}\text{At}^{214}$.

Ответ: $A_0 = 8,5 \cdot 10^5$ Бк; $A = 3,5 \cdot 10^{15}$ Бк; ${}_{85}\text{At}^{214}$.

2. Для ядра бора ${}_5\text{B}^{11}$ определить: 1) дефект массы; 2) энергию связи; 3) удельную энергию связи; 4) какую энергию нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра.

Дано:
 ${}_5\text{B}^{11}$; $Z = 5$; $A = 11$
 $m_{{}_1\text{H}^1} = 1,00783$
 $m_n = 1,00867$
 $m_B = 11,00931$

а) Дефект массы:

$$\Delta m = Zm_{{}_1\text{H}^1} + (A - Z)m_n - m_B.$$

Массы атомов водорода, бора и массы нейтрона находим из таблиц.

$$\Delta m = 5 \cdot 1,00783 + (11 - 5) \cdot 1,00867 - 11,00931 = 0,08186 \text{ а.е.м.}$$

$\Delta m - ?$ $E_{св} - ?$ $\varepsilon - ?$ $E - ?$

б) Энергия связи определяется с помощью формулы Эйнштейна $E_{св} = \Delta mc^2$ в МэВ (1 а. е. м. соответствует энергетический эквивалент в 931,4 МэВ):

$$E_{св} = 931,4 \cdot \Delta m \text{ МэВ} = 931,4 \cdot 0,08186 = 76,2 \text{ МэВ}$$

в) Удельная энергия связи

$$\varepsilon = \frac{E_{св}}{A} = \frac{76,2 \text{ МэВ}}{11 \text{ нукл.}} = 6,9 \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл.}}$$

г) Энергия, необходимая для отрыва одного нейтрона из ядра ${}_5\text{B}^{11}$, должна равняться энергии, выделившейся при присоединении нейтрона к ядру ${}_5\text{B}^{10}$ и образовании ${}_5\text{B}^{11}$:

$$E = E_{св} = 931,4 \Delta m \text{ МэВ},$$

$$\Delta m = m_{{}_5\text{B}^{10}} + m_n - m_{{}_5\text{B}^{11}} = 10,01294 + 1,00867 - 11,00931 = 11,02167 - 11,00931 = 0,0123 \text{ а.е.м.}$$

$$E = 931,4 \cdot 0,0123 \text{ МэВ} = 11,5 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $\Delta m = 0,0818$ а.е.м., $E_{св} = 76,2$ МэВ, $\varepsilon = 6,9$ МэВ / нукл. $E = 11,5$ МэВ.

3. В атмосфере при столкновении нейтрона с ядром азота ${}_7\text{N}^{14}$ протекает реакция образования углерода ${}_6\text{C}^{14}$. Напишите ядерную реакцию. Какая при этом возникает радиоактивная частица? Найдите энергетический эффект ядерной реакции. ${}_6\text{C}^{14}$ является β^- -радиоактивным. Найдите энергию β^- -распада ядра ${}_6\text{C}^{14}$.

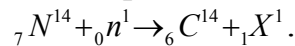
а) Ядерная реакция протекает с

Дано:
 ${}_7N^{14} \rightarrow {}_6C^{14}$

- а) написать ядерную реакцию
б) Q - ? в) Q_β - ?

соблюдением законов сохранения зарядового и массового чисел. Сумма массовых чисел частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме массовых чисел продуктов реакции: $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$. Аналогично для зарядовых чисел: $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$.

С учетом этих законов запишем реакцию образования углерода:



Получившаяся радиоактивная частица ${}_1H^1$ - это протон ${}_1P^1$.

б) Энергия ядерной реакции: $Q = 931,4 \Delta m$ МэВ, Δm - дефект массы.

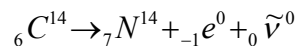
$$\Delta m = (m_{N^{14}} + m_{n^1}) - (m_{C^{14}} + m_{H^1}).$$

Из таблиц находим массы атомов и нейтронов и подставляем в данную формулу:

$$\Delta m = (14,00307 + 1,00867) - (14,00324 + 1,00783) = 15,01174 - 15,01107 = 0,0067 \text{ а.е.м.}$$

$$Q = 0,0067 \cdot 931,4 \text{ МэВ} = 0,62 \text{ МэВ}$$

Запишем реакцию β^- - распада:



По закону сохранения полной релятивистской энергии имеем

$$m_C c^2 = m_N c^2 + T_N + m_e c^2 + T_e + T_{\bar{\nu}},$$

где $T_N, T_e, T_{\bar{\nu}}$ - соответственно кинетические энергии ядра азота, получившегося при β^- - распаде, электрона и антинейтрино. Энергия покоя антинейтрино равна нулю. Энергия β^- - распада равна сумме кинетических энергий:

$$Q = T_N + T_e + T_{\bar{\nu}}.$$

Из предыдущей формулы находим

$$T_N + T_e + T_{\bar{\nu}} = m_C c^2 - m_N c^2 - m_e c^2.$$

Значит:

$$Q = c^2(m_C - m_N - m_e) = 931,4(m_C - m_N - m_e) \text{ МэВ}$$

Массы ядер $m_C = m_{Ca} - 6m_e$; $m_N = m_{Na} - 7m_e$,

где m_{Ca}, m_{Na} - соответственно массы атомов углерода и азота.

Подставляя последние в предыдущую формулу, получим

$$Q = c^2(m_C - m_N - m_e) = 931,4(m_C - m_N - m_e),$$

$$Q = 931,4(14,00324 - 14,00307 - 0,00055) = 0,00038 \cdot 931,4 \text{ МэВ} = 0,35 \text{ МэВ}.$$

Ответ: ${}_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1$; ${}_1H^1$ - это протон ${}_1P^1$; $Q = 0,62 \text{ МэВ}$; $Q_\beta = 0,35 \text{ МэВ}$.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА II

Варианты	Номера задач											
	П 01	П 02	П 03	П 04	П 05	П 06	П 07	П 08	П 09	П 010	П 011	П 012
0	П 01	П 02	П 03	П 04	П 05	П 06	П 07	П 08	П 09	П 010	П 011	П 012
1	П 11	П 12	П 13	П 14	П 15	П 16	П 17	П 18	П 19	П 110	П 111	П 112
2	П 21	П 22	П 23	П 24	П 25	П 26	П 27	П 28	П 29	П 210	П 211	П 212
3	П 31	П 32	П 33	П 34	П 35	П 36	П 37	П 38	П 39	П 310	П 311	П 312
4	П 41	П 42	П 43	П 44	П 45	П 46	П 47	П 48	П 49	П 410	П 411	П 412
5	П 51	П 52	П 53	П 54	П 55	П 56	П 57	П 58	П 59	П 510	П 511	П 512
6	П 61	П 62	П 63	П 64	П 65	П 66	П 67	П 68	П 69	П 610	П 611	П 612
7	П 71	П 72	П 73	П 74	П 75	П 76	П 77	П 78	П 79	П 710	П 711	П 712
8	П 81	П 82	П 83	П 84	П 85	П 86	П 87	П 88	П 89	П 810	П 811	П 812
9	П 91	П 92	П 93	П 94	П 95	П 96	П 97	П 98	П 99	П 910	П 911	П 912

П01. Колебательный контур содержит катушку индуктивностью $L=25 \text{ мГн}$, конденсатор емкостью $C=10 \text{ мкФ}$ и резистор сопротивлением $R=1 \text{ Ом}$. Конденсатор заряжен количеством электричества $q=1 \text{ мКл}$. Определить: 1) период колебаний контура; 2) логарифмический декремент затухания; 3) уравнение зависимости изменения напряжения на обкладках конденсатора от времени.

П02. На экране наблюдается интерференционная картина в результате наложения лучей от двух когерентных источников ($\lambda = 500 \text{ нм}$). На пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили стеклянную пластинку ($n = 1,6$) толщиной $d=5 \text{ мкм}$. Определить, на сколько полос сместится при этом интерференционная картина.

П03. Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим по нормали к поверхности пластинки. После того, как пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнили жидкостью, радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1,25 раза. Найти показатель преломления n жидкости.

П04. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определить изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен 45° .

П05. При работе электрической лампы накаливания вольфрамовый волосок нагрелся, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1,4 до 1,1 мкм . Во сколько раз увеличилась при этом максимальная излучательная способность, если волосок принять за абсолютно черное тело? На сколько изменилась при этом его температура?

П06. Рентгеновский фотон с энергией $E = 0,75 \text{ МэВ}$ рассеялся на свободном электроны под углом 45° . Найти энергию рассеянного фотона и его массу, импульс электрона отдачи. Кинетической энергией электрона до соударения пренебречь.

П07. Электронный пучок с постоянной скоростью падает на поверхность фторида лития. Найти ускоряющую разность потенциалов, при которой наблюда-

ется второй дифракционный максимум под углом $\theta = 1^\circ 20'$. Расстояние между атомными плоскостями кристалла $d = 380 \text{ нм}$.

П08. Протон с энергией $E = 5 \text{ эВ}$ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой 10 эВ и толщиной $\ell = 0,1 \text{ нм}$. Определить: 1) вероятность прохождения протоном этого барьера; 2) во сколько раз надо уменьшить высоту барьера, чтобы вероятность прохождения его протоном была такой же, как для электрона при вышеприведенных условиях.

П09. Атом водорода, находившийся первоначально в основном состоянии, поглотил квант света с энергией $10,2 \text{ эВ}$. На сколько при этом изменяется орбитальный момент импульса электрона?

П010. Найти число электронов в атоме, у которого заполнены K и L оболочки, $3S$ -подоболочка, а также $3P$ подоболочка наполовину. Напишите электронную конфигурацию этого атома. Какой это атом? Чему равен спиновый магнитный момент электрона?

П011. Сколько ядер распадается за 1 с в препарате радиоактивного изотопа иридия ${}_{77}\text{Ir}^{192}$, и сколько останется ядер этого препарата через 30 суток, если первоначальная масса его равна $5,0 \text{ г}$.

П012. Определить, какую часть массы нейтрального атома ${}_{6}\text{C}^{12}$ составляет масса его электронов? Сколько протонов и нейтронов имеется в ядре этого атома, и чему равен дефект массы ядра?

П11. Уравнение изменения со временем разности потенциалов на обкладках конденсатора в колебательном контуре дано в виде $U = 50 \cos 10^4 \pi t \text{ В}$. Емкость конденсатора $0,1 \text{ мкФ}$. Найти: 1) период колебаний, 2) индуктивность контура, 3) закон изменения со временем силы тока в цепи, 4) длину волны, соответствующую этому контуру.

П12. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой прозрачной жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1,21 раза. Определить показатель преломления жидкости.

П13. На щель шириной $a = 0,1 \text{ мм}$ падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Дифракционная картина проецируется на экран, параллельный плоскости щели, с помощью линзы, расположенной вблизи щели. Определить расстояние от экрана до линзы, если расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума, равно 1 см .

П14. Пучок естественного света падает на стекло с показателем преломления $n=1,6$. Определить, при каком угле преломления отраженный от стекла пучок света будет полностью поляризован.

П15. В излучении абсолютно черного тела максимум излучательной способности падает на длину волны 680 нм . Сколько энергии излучает это тело поверхностью, площадь которой равна 1 см^2 , за 1 мин., и какова потеря его массы за 1 мин. вследствие излучения?

П16. Определить длину волны де Бройля у электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов для двух случаев:

1) $U = 0,4 \text{ МВ}$; 2) $U = 0,7 \text{ МВ}$;

П17. Красная граница фотоэффекта рубидия 810 нм . Какое задерживающее напряжение нужно приложить к фотоэлементу, чтобы ни одному из электронов, испускаемых рубидием под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 100 нм , не удалось преодолеть задерживающее поле. С какой скоростью могут вылететь фотоэлектроны с поверхности рубидия?

П18. Чему равен заряд ядра ${}_4\text{Be}^9$? Сколько в нем имеется нейтронов и протонов? Какова плотность ядерного вещества ядра?

П19. Определить, какая энергия требуется для полного отрыва электрона от ядра однократно ионизованного атома гелия, если: 1) электрон находится в основном состоянии; 2) электрон находится в состоянии, соответствующем главному квантовому числу $n = 3$.

П110. Две частицы, электрон и протон, обе с энергией $E = 5 \text{ эВ}$, движутся в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10 \text{ эВ}$ и шириной $\ell = 1 \text{ нм}$. Вероятность прохождения барьера у какой частицы больше и во сколько раз?

П111. Оценить с помощью соотношения неопределенностей скорость электрона в атоме водорода, полагая размер атома $\ell = 0,10 \text{ нм}$. Сравнить полученную величину со скоростью электрона на первой боровской орбите данного атома.

П112. Покоившееся ядро полония ${}_{84}\text{Po}^{210}$ испускает α -частицу с кинетической энергией $E_K = 5,77 \text{ МэВ}$. Определить: 1) скорость отдачи дочернего ядра; 2) какую долю кинетической энергии α -частицы составляет энергия отдачи дочернего ядра.

П21. Катушка диаметром $d=2 \text{ см}$, содержащая один слой плотно прилегающих друг к другу $N=500$ витков алюминиевого провода сечением $S=1 \text{ мм}^2$, помещена в магнитное поле. Ось катушки параллельна линиям индукции. Магнитная

индукция поля равномерно изменяется со скоростью 1 мТл/с . Определить тепловую мощность, выделяющуюся в катушке, если ее концы замкнуты накоротко. Удельное сопротивление алюминия $\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$.

П22. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L=2,5 \text{ мГн}$ и двух параллельно соединенных конденсаторов емкостью $C_1=2 \text{ мкФ}$ и $C_2=3 \text{ мкФ}$. Конденсаторы зарядили до напряжений $U=180 \text{ В}$. Найти: 1) период собственных колебаний контура; 2) амплитудное значение тока через катушку.

П23. Монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$ падает нормально к поверхности дифракционной решетки. С помощью линзы, расположенной вблизи решетки, на экран, находящийся от решетки на расстоянии $L=1 \text{ м}$, проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии $l=12 \text{ см}$ от центрального. Определить: 1) период дифракционной решетки; 2) число штрихов на 1 см ее длины.

П24. Свет, проходя через жидкость налитую в стеклянный сосуд ($n=1,5$), отражается от дна, причем отраженный свет плоскополяризован при падении его на дно сосуда под углом 41° . Определить: 1) показатель преломления жидкости; 2) угол падения света на дно сосуда, при котором наблюдается полное отражение.

П25. Фотоэлектроны, вырываемые с поверхности некоторого металла светом с частотой $2,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, полностью задерживаются потенциалом $6,6 \text{ В}$, а вырываемые светом с частотой $4,6 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ - потенциалом $16,5 \text{ В}$. Найти постоянную Планка, энергии и импульсы соответствующих фотонов.

П26. На грань кристалла никеля падает под углом $\theta = 65^\circ$ к поверхности грани параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Межатомное расстояние кристалла $d = 200 \text{ нм}$. Какова максимальная скорость электронов, если они испытывают дифракционное отражение 1-го порядка.

П27. Электронный пучок ускоряется в электронно-лучевой трубке разностью потенциалов $U = 0,5 \text{ кВ}$. Принимая, что неопределенность импульса равна $0,1\%$ от его числового значения, определить неопределенность координаты электрона. Какой, квантовой или классической, частицей является в данных условиях электрон?

П28. Протон находится в основном состоянии в одномерной потенциальной яме шириной $\ell = 0,2 \text{ А}^\circ$ с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти: 1) полную энергию протона; 2) вероятность обнаружения протона в области $\frac{1}{3}\ell \leq x \leq \frac{2}{3}\ell$.

П29. На атом водорода падает фотон и выбивает из атома электрон с кинетической энергией 4 эВ . Вычислить энергию падающего фотона, если атом водорода находился в возбужденном состоянии с квантовым числом $n = 2$.

П210. Во сколько раз орбитальный магнитный момент электрона в атоме водорода, находящемся в основном состоянии, отличается от его спинового магнитного момента.

П211. Ядро ${}_{30}\text{Zn}^{62}$ захватило электрон из K -оболочки и, спустя некоторое время, испустило позитрон. Какое ядро получилось в результате таких превращений? Чему равен радиус этого ядра?

П212. Сколько энергии выделится при ядерном делении урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ массой 1 кг ? Сколько угля необходимо сжечь для получения такого же количества теплоты (удельная теплота сгорания угля $29,3 \text{ МДж/кг}$). Определить, какой груз можно поднять на высоту 5 км за счет энергии, освобожденной при реакции деления. Считать, что средняя энергия, выделившаяся при делении одного ядра урана, составляет 200 МэВ .

П31. Соленоид без сердечника, с однослойной обмоткой из проволоки диаметром $d=0,5 \text{ мм}$, имеет длину $l=0,4 \text{ м}$ и поперечное сечение $S=50 \text{ см}^2$. Какой ток течет по обмотке при напряжении $U=10 \text{ В}$, если за время $t=0,5 \text{ мс}$ в обмотке выделяется количество теплоты, равное энергии поля внутри соленоида? Поле считать однородным.

П32. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 10 мкФ и катушки индуктивностью $0,2 \text{ Гн}$ и сопротивлением 40 Ом . Конденсатор заряжен количеством электричества $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$. Найти: 1) период колебаний контура; 2) логарифмический декремент затухания колебаний; 3) уравнение колебания разности потенциалов на обкладках конденсатора.

П33. Между плосковыпуклой линзой и стеклянной пластинкой, на которой она лежит, нет контакта вследствие попадания пыли. При этом радиус 5-го темного кольца Ньютона $0,8 \text{ мм}$. Если пыль удалить, то радиус этого кольца станет $0,1 \text{ см}$. Найти толщину слоя пыли, если радиус кривизны линзы 10 см . Наблюдение ведется в проходящем свете.

П34. На дифракционную решетку длиной $l=1,5 \text{ мм}$, содержащей $N=3000$ штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$. Определить: 1) число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки; 2) угол соответствующий последнему максимуму.

П35. Железный шар диаметром 4 см , нагретый до температуры 1227°C , остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 К ? При расчете принять, что отношение энергетических светимостей железа и абсолютно черного тела равно $0,5$. Теплопроводностью воздуха пренебречь.

П36. Фотон жестких рентгеновских лучей ($\lambda = 24 \text{ нм}$) при соударении со свободным электроном передал ему 9% своей энергии. Определить длину волны рассеянного рентгеновского излучения, его энергию и массу.

П37. Электрон находится в потенциальном ящике с непрозрачными стенками шириной $\ell = 0,1 \text{ нм}$. Какова полная энергия электрона в первом возбужденном состоянии? Какова вероятность нахождения частицы в средней трети ящика?

П38. Вычислить частоту вращения электрона в атоме водорода на второй орбите. Сравнить эту частоту с частотой излучения при переходе электрона с третьей орбиты на вторую.

П39. При переходе электрона в атоме водорода из основного состояния в возбужденное орбитальный момент импульса электрона изменился на $1,5 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$. Какое количество энергии при этом поглотил атом?

П310. Электрон, движущийся со скоростью $5000 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$, попадает в однородное ускоряющее поле напряженностью $10 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Какое расстояние должен пройти электрон в поле, чтобы длина дебройлевской волны стала равной 1 \AA .

П311. За какое время произойдет распад ${}_{84}\text{Po}^{210}$ массой 2 мг , если в начальный момент его масса $0,2 \text{ г}$?

П312. Найти плотность ядерного вещества, считая, что в ядре с массовым числом A все нуклоны плотно упакованы в пределах его радиуса. Радиус солнца $6,95 \text{ Мм}$, а средняя плотность $1410 \text{ кг} / \text{м}^3$. Каким был бы радиус солнца, если, при той же массе, его плотность равнялась бы плотности ядерного вещества?

П41. Определить частоту собственных колебаний колебательного контура, содержащего конденсатор емкостью $C = 0,50 \text{ мкФ}$, если максимальная разность потенциалов на его обкладках достигает $U_m = 100 \text{ В}$, а максимальная сила тока в катушке равна $I_m = 50 \text{ мА}$. Активным сопротивлением катушки пренебречь.

П42. Плосковыпуклая линза ($n = 1,6$) выпуклой стороной прижата к стеклянной пластинке. Расстояние между первыми двумя кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно $0,5 \text{ мм}$. Определить оптическую силу линзы, если освещение производится монохроматическим светом с $\lambda = 550 \text{ нм}$, падающим нормально.

П43. Дифракционная решетка длиной $l = 5 \text{ мм}$ может разрешить в первом порядке две спектральные линии натрия ($\lambda_1 = 589 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 589,6 \text{ нм}$). Определить, под каким углом в спектре 3-го порядка будет наблюдаться свет с $\lambda_3 = 600 \text{ нм}$, падающий на решетку нормально?

П44. Определить, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями $\alpha = 60^\circ$, а в каждом из николей теряется 8% интенсивности падающего на него света.

П45. Какую энергию излучает в течение суток каменное оштукатуренное здание с поверхности площадью 1000 м^2 , если температура излучающей поверхности 0°C ? Отношение энергетических светимостей каменного оштукатуренного здания и абсолютно черного тела при данной температуре равно $K = 0,8$. Какой длине волны соответствует максимальное излучение?

П46. Какую энергию приобретает комптоновский электрон отдачи при рассеянии фотона под углом 60° , если длина волны падающего фотона 4 нм ? Какая длина волны де Бройля соответствует электрону отдачи? Кинетической энергией электрона до соударения пренебречь.

П47. Наименьшая неточность, с которой можно найти координату электрона в атоме водорода, порядка 10^{-10} м . Найти неопределенность средней кинетической энергии электрона в невозбужденном атоме водорода.

П48. Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 нм ? Какая масса соответствует этой энергии?

П49. Прямоугольный потенциальный барьер имеет ширину $\ell = 0,1 \text{ нм}$. Разность между высотой потенциального барьера и энергией движущегося в положительном направлении оси x электрона $U - E = 5 \text{ эВ}$. Определить, во сколько раз изменится прозрачность барьера для электрона, если разность $U - E$ возрастает в 4 раза?

П410. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $\lambda = 121,5 \text{ нм}$. Определить радиус электронной орбиты возбужденного атома.

П411. Энергия излучения Солнца возникает вследствие цепочки ядерных реакций слияния, результатом которого является превращение четырех атомов водорода в один атом гелия. Определить, сколько воды можно было бы нагреть от 0°C до кипения за счет превращения в гелий 4 г водорода? Средняя энергия, выделяющаяся в одном цикле реакции слияния, равна $25,7 \text{ МэВ}$.

П412. Найти массу изотопа ${}^14_7\text{N}$, если дефект массы ядра составляет $0,2508 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Чему равна удельная энергия связи ядра?

П51. Через катушку, индуктивность которой $L=21 \text{ мГн}$, течет ток, изменяющийся со временем по закону $I = I_0 \sin \omega t$, где $I_0=5 \text{ А}$, $\omega = 2\pi/T$ и $T=0,02 \text{ с}$. Найти

зависимость от времени t : а) э.д.с. \mathcal{E} самоиндукции, возникающей в катушке; б) энергии W магнитного поля катушки.

П52. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом ($\lambda = 590 \text{ нм}$). Радиус кривизны R линзы равен 5 см. Определить толщину d воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается третье световое кольцо.

П53. Параллельный пучок монохроматического света ($\lambda = 0,55 \text{ мкм}$) нормально падает на щель шириной 0,05 мм. Определить ширину центрального максимума в дифракционной картине, проецируемой с помощью линзы, находящейся непосредственно за щелью, на экран, отстоящий от линзы на расстоянии $L = 1 \text{ м}$.

П54. Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света составляет $\alpha_1 + \alpha_2 = 95^\circ$ с падающим пучком. Определить показатель преломления n жидкости, если отраженный от пластины свет полностью поляризован.

П55. Температура абсолютно черного тела $T = 2 \text{ К}$. Определить длину волны λ_m , на которую приходится максимум энергии излучения, и спектральную плотность энергетической светимости $r_{\lambda T}$ для этой длины волны.

П56. На поверхность никеля падает монохроматический свет ($\lambda = 200 \text{ нм}$). Красная граница фотоэффекта для никеля 248 нм. Определить энергию падающих фотонов, работу выхода электронов, максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов и их скорости.

П57. Какова неопределенность скорости электрона в атоме водорода? Во сколько раз найденное значение скорости больше скорости электрона на первой боровской орбите? Считать, что наибольшая ошибка в определении координаты электрона будет того же порядка, что и размер атома водорода ($d \approx 10^{-10} \text{ м}$).

П58. Электрон в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной $\ell = 200 \text{ нм}$ с бесконечно высокими стенками находится в возбужденном состоянии ($n = 4$). Определить: 1) минимальную энергию электрона; 2) вероятность обнаружения электрона в первой четверти ямы.

П59. Экспериментально установлено, что вторая спектральная линия водородной серии Брэкета соответствует длине волны 2,63 мкм. На основании этих данных установить значение постоянной Ридберга.

П510. Электрон в атоме водорода поглотил квант энергии $3,4 \text{ эВ}$. Чему равны полная энергия возбужденного атома и орбитальный магнитный момент электрона?

П511. Определить наименьшую энергию, необходимую для разделения ядра углерода ${}^6\text{C}^{12}$ на три одинаковые части. Какое при этом ядро получится? Сколько протонов и нейтронов оно содержит?

П512. Считая, что в одном акте деления ядра урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ освобождается энергия 200 МэВ , определить массу m этого изотопа, подвергшегося делению при взрыве атомной бомбы с тротильным эквивалентом $30 \cdot 10^6 \text{ кг}$, если тепловой эквивалент тротила q равен $4,19 \text{ МДж/кг}$.

П61. Проволочную катушку из 100 витков помещают в магнитное поле так, что линии индукции магнитного поля перпендикулярны к плоскости витков, и с помощью гибких проводов подсоединяют к гальванометру. При быстром удалении катушки из магнитного поля по цепи протекает некоторый заряд $q=5 \text{ нКл}$, измеряемый гальванометром. Определить индукцию магнитного поля B . Площадь витков $S=2 \text{ см}^2$, полное сопротивление цепи $R=3 \text{ Ом}$.

П62. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $0,2 \text{ мкФ}$ и катушки индуктивностью $5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$. Определить: 1) при каком логарифмическом декременте затухания разность потенциалов на обкладках конденсатора за 10^{-3} с уменьшится в 3 раза; 2) сопротивление контура.

П63. На щель шириной $0,08 \text{ мм}$ падает нормально пучок параллельных лучей белого света ($0,38 - 0,76 \text{ мкм}$). На экране, отстоящем от щели на расстоянии 1 м , наблюдается дифракционная картина. Найти ширину дифракционного максимума второго порядка.

П64. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых равен α . Поляризатор и анализатор как поглощают, так и отражают 10% падающего на них света. Определить угол α , если интенсивность света, вышедшего из анализатора, равна 12% интенсивности света, падающего на поляризатор.

П65. Фотон при эффекте Комптона на свободном электроном был рассеян на угол $\theta = \pi/2$. Определить импульс, приобретенный электроном, если энергия фотона до рассеяния была $\varepsilon_1 = 1,02 \text{ МэВ}$.

П66. Изменение длины волны рентгеновских лучей при комптоновском рассеянии $2,4 \text{ нм}$. Вычислить угол рассеяния и энергию, переданную при этом электрону.

тронам отдачи, если длина волны рентгеновских лучей до взаимодействия 10 нм .

П67. Точечный источник света потребляет мощность $N = 100 \text{ Вт}$ и равномерно испускает свет во все стороны. Длина волны испускаемого при этом света $\lambda = 589 \text{ нм}$. К.п.д. источника $0,1\%$. Вычислить число фотонов, испускаемых источником за 1 с , а также импульс фотона.

П68. Используя соотношение неопределенностей в форме $\Delta P_x \Delta x \geq \hbar$, оценить минимально возможную полную энергию электрона в атоме водорода. Найти полную минимальную энергию атома водорода по теории Бора и сравнить с первым результатом.

П69. Электрон в водородоподобном атоме He^+ находится в $2P$ -состоянии. Чему равна: 1) полная энергия атома; 2) орбитальный момент импульса?

П610. Во сколько раз увеличится радиус орбиты электрона у атома водорода, находящегося в основном состоянии, при возбуждении его фотоном энергией $12,09 \text{ эВ}$?

П611. Покоившееся ядро ${}_{86}\text{Rn}^{220}$ выбросило α -частицу со скоростью $v = 16 \text{ Мм/с}$. В какое ядро превратилось ядро радона при этом? Какова энергия отдачи ядра? Сколько протонов и нейтронов в нем находится?

П612. При облучении нейтронами атомов ${}_{11}\text{Na}^{23}$ последний превращается в радиоактивный изотоп ${}_{11}\text{Na}^{24}$ с периодом полураспада $15,3 \text{ ч}$. Напишите ядерную реакцию. Определите, какая доля первоначальной массы радиоактивного натрия останется через 30 часов после прекращения облучения нейтронами?

П71. Из проволоки диаметром $0,5 \text{ мм}$ изготовлен соленоид длиной $0,5 \text{ м}$ и поперечным сечением 45 см^2 . При пропускании тока через соленоид силой 1 А , за время, равное 2 мс , выделяется теплота, равная энергии магнитного поля внутри соленоида. Найти напряжение, которым питается соленоид.

П72. Емкость идеального колебательного контура $0,03 \text{ мкФ}$ и индуктивность $1,5 \text{ Гн}$. Конденсатор заряжен до $q = 3 \text{ мкКл}$. Найти: 1) уравнение изменения силы тока в цепи в зависимости от времени при замыкании контура; 2) значения разности потенциалов на обкладках конденсатора в моменты времени

$$\frac{T}{8}, \quad \frac{T}{4} \text{ и } \frac{T}{2}.$$

П73. На плоскопараллельную пленку с показателем преломления $n = 1,33$ под углом $\alpha = 45^\circ$ падает параллельный пучок белого света. Определить, при какой

наименьшей толщине пленки зеркально отраженный свет наиболее сильно окрасится в желтый свет ($\lambda = 0,6 \text{ мкм}$).

П74. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых равен α . Поляризатор и анализатор как поглощают, так и отражают 10 % падающего на них света. Определить угол, если интенсивность света, вышедшего из анализатора, равна 12 % интенсивности света, падающего на поляризатор.

П75. При освещении катода вакуумного фотоэлемента монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 310 \text{ нм}$ фототок прекращается при некотором задерживающем напряжении. При увеличении длины волны на 25% задерживающее напряжение оказывается меньше на 0,8 В. Определить по этим экспериментальным данным постоянную Планка.

П76. Железный шар диаметром 10 см, нагретый до температуры 1227°C , остывает на открытом воздухе. Через какое время его температура понизится до 1000 К? При расчете принять, что отношение светимостей железа и абсолютно черного тела 0,5. Теплопроводностью воздуха пренебречь.

П77. Узкий пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов $U = 30 \text{ кВ}$, падает нормально на тонкий листок золота и, проходя через него, рассеивается. На фотопластинке, расположенной за листком на расстоянии $\ell = 20 \text{ см}$ от него, получена дифракционная картина, состоящая из ряда концентрических окружностей. Радиус первой окружности $r = 3,4 \text{ мм}$. Определить: 1) угол рассеяния электронов, соответствующий первой окружности; 2) длину волны де Бройля электронов; 3) постоянную кристаллической решетки золота.

П78. Электрон находится в потенциальном ящике с бесконечно высокими стенками. При какой ширине ящика энергия электрона на первом уровне равна энергии 1S- электрона в атоме водорода? Какова длина дебройлевской волны электрона?

П79. Электрон в возбужденном атоме водорода находится в 3d состоянии. Определить: 1) изменение полной энергии атома при переходе электрона в 2P состояние; 2) изменение магнитного момента орбитального движения электрона при этом.

П710. Найти квантовое число n , соответствующее возбужденному состоянию иона He^+ , если при переходе в основное состояние этот ион испустил последовательно два фотона с длинами волн 108,5 нм и 30,4 нм.

П711. Образец α - радиоактивного радона ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ содержит 10^{10} радиоактивных ядер с периодом полураспада 3,825 сут. Сколько атомов распадается за сутки? Какая энергия при этом выделяется?

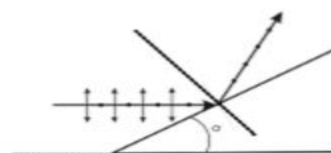
П712. При обстреле α -частицами ядра азота ${}^7\text{N}^{14}$ протекает ядерная реакция, в результате которой образуется новое ядро ${}^8\text{O}^{17}$ и радиоактивная частица. Написать уравнение реакции и определить, какая частица возникает? Определить энергию реакции.

П81. Проволочный виток, имеющий площадь 100 см^2 , разрезан в некоторой точке, и в разрез включен конденсатор емкостью $C=10 \text{ мкФ}$. Виток помещен в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны к плоскости витка. Индукция магнитного поля равномерно изменяется во времени со скоростью $\Delta B/\Delta t = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/с}$. Определить заряд конденсатора.

П82. В установке Ньютона плосковыпуклая линза ($n=1,5$) выпуклой стороной прижата к стеклянной пластинке. Расстояние между первыми двумя темными кольцами Ньютона, наблюдаемыми в отраженном свете, равно $0,5 \text{ мм}$. Определить оптическую силу линзы, если освещение производится монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$, падающим нормально.

П83. Монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 550 \text{ нм}$ нормально падает на дифракционную решетку. С помощью линзы, расположенной за решеткой, дифракционная картина проецируется на экран, находящийся на расстоянии 1 м от решетки. Первый главный максимум наблюдается на расстоянии $l=12 \text{ см}$ от центрального максимума. Определить: 1) период дифракционной решетки; 2) угол дифракции, соответствующий последнему максимуму.

П84. Пучок естественного света падает (см. рис.) на стеклянную призму с углом $\alpha = 30^\circ$. Определить показатель преломления стекла, если отраженный луч является плоскополяризованным.



П85. При работе электрической лампы накаливания вольфрамовый волосок нагрелся, в результате чего длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от $1,4$ до $1,1 \text{ мкм}$. Во сколько раз увеличилась при этом максимальная излучательная способность, если волосок принять за абсолютно черное тело? Насколько при этом изменилась температура волоска?

П86. На грань некоторого кристалла под углом $\alpha = 60^\circ$ к ее поверхности падает параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью 2 Мм/с . Определить расстояние d между атомными плоскостями кристалла, если электроны испытывают дифракционное отражение первого порядка.

П87. Электрон с энергией $E = 4 \text{ эВ}$ движется в положительном направлении оси x , встречая на своем пути прямоугольный потенциальный барьер высотой $U = 10 \text{ эВ}$ и толщиной $\ell = 0,1 \text{ нм}$. Определить прозрачность потенциального барьера.

П88. Какую наименьшую скорость должен иметь электрон, чтобы при соударении с невозбужденным атомом водорода вызвать излучение хотя бы одной линии спектра водорода? Вычислить длину волны этой линии.

П89. Найти число электронов в атоме, у которого в основном состоянии заполнены: K – и L - слои, $3S$ подоболочка и наполовину $3P$ подоболочка. Чему равны: 1) кинетическая энергия $3S$ - электрона и 2) магнитный момент $3P$ - электрона?

П810. Фотон жестких рентгеновских лучей ($\lambda = 24 \text{ нм}$) при соударении со свободным электроном передал ему 9% своей энергии. Определить длину волны рассеянного рентгеновского излучения.

П811. При облучении α - частицами ${}_{13}\text{Al}^{27}$ испускается нейтрон и образуется новое ядро. Написав ядерную реакцию, определите какое это ядро. Образовавшееся ядро, являясь радиоактивным, распадается с испусканием позитрона. Какое при этом получится ядро?

П812. При захвате теплового нейтрона ядром урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ образуется два осколка деления с массовыми числами 95 и 139. Записать реакцию. Определить энергию реакции деления. Определить окончательные изотопы, если первый осколок претерпевает два, а второй три β^- - распада.

П91. Соленоид диаметром $d=3 \text{ см}$ имеет однослойную обмотку из плотно прилегающих друг к другу витков алюминиевого провода ($\rho = 26 \text{ нОм} \cdot \text{м}$) диаметром $d_l=0,3 \text{ мм}$. По соленоиду течет ток $I_0=0,5 \text{ А}$. Определить количество электричества q , протекающее по соленоиду, если его концы замкнуть.

П92. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью $L=25 \text{ мГн}$, конденсатора емкостью $C=10 \text{ мкФ}$ и сопротивления. Найти сопротивление контура, если известно, что амплитуда тока в контуре уменьшилась в e раз за 16 полных колебаний.

П93. Дифракционная картина наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 600 \text{ нм}$) . На расстоянии $a = 0,5 l$ от источника помещена круглая непрозрачная преграда диаметром $D=1 \text{ см}$. Найти расстояние l , если преграда закрывает только центральную зону Френеля.

П94. Пластинка кварца толщиной 2 мм, вырезанная перпендикулярно оптической оси, помещена между двумя скрещенными николями. Пренебрегая потерями света в николях, определить, во сколько раз уменьшается интенсивность света, прошедшего эту систему? Удельное вращение кварца 15 град/мм.

П95. На поверхность никеля падает монохроматический свет ($\lambda = 200 \text{ нм}$). Красная граница фотоэффекта для никеля 248 нм. Определить энергию падающих фотонов, работу выхода электронов, максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов и их скорость.

П96. Определить импульс отдачи электрона P_e , если фотон с энергией $\varepsilon = 1,53 \text{ МэВ}$ в результате рассеяния на свободном электроны потерял 1/3 своей энергии.

П97. Вычислить постоянную Ридберга R , если известно, что для ионов He^+ разность длин волн между головными линиями серий Бальмера и Лаймана $\Delta\lambda = 133,7 \text{ нм}$.

П98. Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома. Чему равна длина волны де Бройля?

П99. Заполненный электронный слой атома характеризуется квантовым числом $n = 3$. Какое максимальное число s -, p - и d - электронов может находиться в этом слое? Чему равны орбитальные моменты импульсов s - и p - электронов?

П910. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его импульс был равен импульсу фотона с длиной волны $\lambda = 520 \text{ нм}$?

П911. Покоившееся ядро ${}_{92}\text{U}^{238}$ выбросило α - частицу с кинетической энергией $T = 4,5 \text{ МэВ}$. Какое при этом получилось дочернее ядро? Какова энергия отдачи этого ядра? Какая энергия выделяется при α - распаде?

П912. Определить расход ядерного горючего ${}_{92}\text{U}^{235}$ за сутки в ядерном реакторе атомной электростанции, если тепловая мощность станции 10 МВт. При одном акте деления ядра урана выделяется энергия 200 МэВ. К.п.д. атомной станции 20%.

Литература

1. Савельев И. В. Курс общей физики: В 3-х т. М.: Наука, 1977-1989.
2. Детлаф А. А., Яворский Б. М., Милковская Л. Б. Курс физики: В 3-х т. М.: Высшая школа, 1973-1989.
3. Детлаф А. А., Яворский Б. М. Курс физики. М.: Высшая школа, 1989.

4. Трофимова Т. И. Курс общей физики. М.: Высшая школа, 1985.
5. Чертов А. Е., Воробьев А. А. Задачник по физике. М.: Высшая школа, 1981.
6. Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Наука, 1979-1990.
7. Фирганг Е. В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. М., 1978.
8. Физика: Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-технических специальностей вузов, включая сельскохозяйственные вузы. Воробьев А. А. и др. М.: Высшая школа, 1987.
9. Прокофьев В. Л. Физика: Программы, методические указания и контрольные задания для студентов-заочников технологических и инженерно-экономических специальностей высших учебных заведений. М.: Высшая школа, 1985.
10. Джуманалиев Н.Д., Кудобаев З.И., Тургумбаев К.Т., Абдразаков А.А. Оптика. Квантовая физика. Методические указания и контрольные задания 3 и 4 для студентов – заочников технологических и технических специальностей. Бишкек, КТУ, 1994.