

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ЦЕНТР СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО,
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

*А. Г. Ганиев, А. К. Авлиякулов,
Г. А. Алмардонова*

Ф И З И К А

Часть II

*Учебник для учащихся академических лицеев
и профессиональных колледжей*

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ
ТВОРЧЕСКИЙ ДОМ «O'QITUVCHi»
ТАШКЕНТ -- 2006

Под редакцией
кандидата физико-математических наук,
доцента ГАНИЕВА А.Г.

Рецензенты: кандидаты физико-математических наук,
доценты
НИГМАТХОДЖАЕВ А.С., ИСАЕВ Х.И.
кандидаты технических наук, доценты
ИСРАИЛОВ М. , НУРМАТОВ Ж.

Данный учебник подготовлен на основе учебной программы по курсу физики для академических лицеев и профессиональных колледжей.

В нем изложено содержание разделов «Оптика» и «Основы квантовой физики». В конце каждой темы приводятся вопросы для проверки, а в конце каждой главы даются образцы решения задач, задачи для самостоятельного решения и тесты.

Учебник предназначен для учащихся академических лицеев и профессиональных колледжей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный учебник является второй частью учебника по курсу физики, предназначенного для учащихся академических лицеев и профессиональных колледжей. Учебник подготовлен на основе учебной программы по курсу физики, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан. В нем освещаются разделы «Оптика» и «Основы квантовой физики».

В начале каждой темы приводится ее краткое содержание, а в конце даются вопросы для проверки.

Метод написания учебника дает возможность проводить занятия по определенной модели, которая может служить основой для самостоятельного изучения материала учащимися.

После каждой главы приводятся образцы решения задач, задачи для самостоятельного решения, тесты и основные выводы.

Учебник подготовлен коллективом авторов: Ганиев А.Г. (I–IV главы), Алмарданова Г.А. (I глава) и А.И. Авлиякулов (IV глава).

Приносим глубокую благодарность кандидату физико-математических наук, доценту Нигматходжаеву А.С. и кандидату технических наук, доценту Исраилову Ш. за ценные советы в ходе подготовки учебника.

Авторы

Г 1604010000–178 бланк-заказ – 2006
353(04)–2006

ISBN 978-9943-02-005-4

© ИПТД «O'qituvchi», перевод
с узбекского, 2006.



О П Т И К А

Глава I

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТИКИ

Оптика — раздел физики, изучающий излучение, поглощение и распространение света. Так как свет состоит из электромагнитных волн, оптика рассматривается в качестве части теории электромагнитного поля — электродинамики. Свет состоит из электромагнитных волн длиной от $4,0 \cdot 10^{-7}$ – $7,6 \cdot 10^{-7}$, лежащих между радиоволнами и рентгеновскими лучами. Обычно оптику делят на *геометрическую, физическую и физиологическую*.

Геометрическая оптика. В ней обычно не рассматривается природа света, а изучается его распространение по прямой линии, отражение и преломление.

Все расчеты, производимые при изготовлении обыкновенных очков и сложных объективов в астрономических устройствах, ведутся на основе геометрической оптики.

Физическая оптика. Изучает природу света и все проблемы, связанные со световыми явлениями.

Физиологическая оптика изучает воздействие света на развитие организмов.

§ 1. Развитие учения о свете.

Электромагнитная природа света

Содержание: первоначальные законы оптики; дальнейшие этапы развития оптики; корпускулярная природа света; волновая природа света; электромагнитная природа света.

Первоначальные законы оптики. Учение о воздействии света возникло в древности. Слово «оптика» (от *optos* — видимый глазу) означает «наука о зрительных восприятиях».

О прямолинейном распространении света было известно за пять тысяч лет до нашей эры: еще древние египтяне использовали эту информацию при строительстве. Пифагор говорил: причина того, что мы видим тела, — в испускании ими частиц. Тем самым он выражал мысли, очень близкие к современным теориям.

Один из двух основных законов геометрической оптики — это закон о равенстве угла падения и угла отражения. Закон преломления света был открыт лишь через несколько веков.

В XI веке были изготовлены очки, в 1590 году нидерландский ученый З. Янсен изобрел микроскоп, а в 1609 году итальянский физик Г. Галилей создал телескоп.

Дальнейшие этапы развития оптики. Дальнейшее развитие оптики было связано с дифракцией и интерференцией света. Так как эти явления невозможно было объяснить в рамках геометрической оптики, английский физик Р. Гук и голландский ученый Х. Гюйгенс выдвинули теорию о волновой природе света. М. Фарадей в результате своих опытов пришел к выводу, что эти волны являются электромагнитными. Ж. Майкельсон теоретически, а Г. Герц экспериментально доказали, что электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью, равной скорости света. В результате ничего не оставалось, как признать тот факт, что свет состоит из электромагнитных волн.

Корпускулярная природа света. Мысли о природе света всегда были в центре внимания ученых.

Итак, что такое свет, занимающий очень важное место в нашей повседневной жизни? Первым человеком, кто дал ясный ответ на этот вопрос, считается И. Ньютон. Он выдвинул гипотезу о том, что свет — это поток корпускул (частиц), испускаемых светящимся телом и прямолинейно распространяющихся в пространстве. Законы прямолинейного распространения, преломления и отражения света опираются на эту гипотезу.

Волновая природа света. Но объяснить интерференцию и дифракцию света корпускулярной теорией было абсолютно невозможно. В 1818 г. французский физик О. Френель представил свет в виде потока волн и дал объяснение его прямолинейного распространения. После этого получила широкое распространение теория о волновом отражении света. Так что такое свет? Мы еще не можем дать полного ответа на этот вопрос и вновь вернемся к нему при изучении следующих тем.

Теперь подробнее остановимся на волновой природе света.

Электромагнитная природа света. Нам известно, что согласно гипотезе Максвелла свет состоит из электромагнитных волн, распространяющихся в среде со скоростью

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1.1)$$

где c — скорость света в вакууме, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, μ — магнитная проницаемость среды.

Векторы \vec{E} и \vec{B} в свете взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света (1 часть, рис. 200).

Они одновременно достигают своего максимального и минимального значений и изменяются в соответствии с гармоническими законами. *Длиной волны света называют расстояние, которое свет проходит за один период, т.е.*

$$\lambda = cT. \quad (1.2)$$

Длина волны и частота связаны следующим соотношением:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (1.3)$$

Таким образом, в соответствии со шкалой электромагнитных волн, свет состоит из электромагнитных волн длиной от 0,4 мкм до 0,76 мкм, которые распространяются как в среде, так и в вакууме.



Вопросы для самопроверки

1. Что изучает оптика? 2. На какие разделы делится оптика? 3. Что изучает геометрическая оптика? 4. Что изучает физическая оптика? 5. Что изучает физиологическая оптика? 6. Что означает слово «оптика»? 7. Когда был открыт закон прямолинейного распространения света? 8. Какую мысль высказал Пифагор о причине, по которой мы можем видеть тела? 9. Когда был открыт закон отражения света? 10. Когда были изобретены очки? 11. А телескопы? 12. Какую гипотезу о природе света высказал И. Ньютон? 13. Какие законы объясняются на основе этой гипотезы? 14. В чем причина возникновения теории о волновом отражении света? 15. Кто выдвигал гипотезу о волновой природе света? 16. На чем основываются выводы об электромагнитной природе света? 17. Из каких электромагнитных волн состоит свет? 18. Как представлял себе волны света Х. Гюйгенс? 19. Как представлял себе свет О. Френель? 20. Что такое свет?

§ 2. Скорость света

Содержание: бесконечно ли велика скорость света? Метод Ремера по определению скорости света; опыт Майкельсона; значение скорости света.

Бесконечно ли велика скорость света? Ученые И. Кеплер, Р. Декарт и другие считали, что скорость света бесконечно велика. Этот вывод был принят за основу в классической механике. А на самом деле чему равна скорость света? Первые попытки определить скорость света предпринял Г. Галилей. Хотя эти опыты и не дали точных результатов, но привели к закреплению точки зрения о том, что скорость света конечна. Первым значение скорости света, близкое к современным данным, удалось получить датскому ученому О. Ремеру.

Метод Ремера по определению скорости света. В 1675 г., наблюдая за затмением спутника Юпитера, О. Ремер пришел к выводу о конечности скорости света. Положение, использованное Ремером, приведено на рис. 1. Расстояние от Юпитера до Солнца примерно в пять раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Ремер наблюдал затмение спутника Юпитера, когда Земля и Юпитер находились друг от друга на наиболее близком расстоянии (Земля₁ и Юпитер₁). Он наблюдал также затмение спутника С₁ в тот момент, когда Юпитер и Земля находились друг от друга на самом большом расстоянии (Земля₂ и Юпитер₂). Это затмение произошло с опозданием на некоторое время. Причиной этого послужило то, что скорость света имеет границы и проходит дополнительное расстояние, равное диаметру орбиты Земли. Во втором состоянии Ремер определил время Δt запаздывания затмения спутника Юпитера и, зная диаметр (D) орбиты Земли, вычислил скорость света с помощью выражения

$$c = \frac{D}{\Delta t}$$

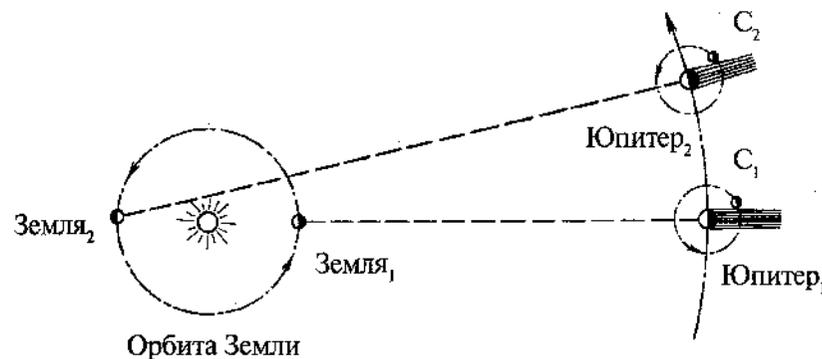


Рис. 1

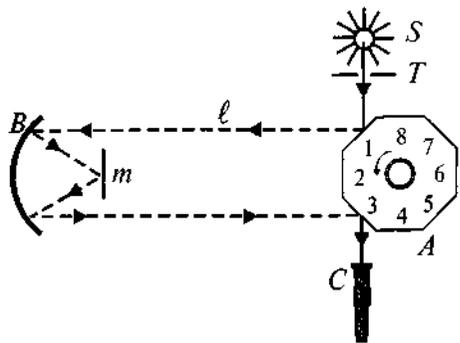


Рис. 2

В то время диаметр орбиты Земли не был точно определен, допускались неточности в определении времени, и поэтому О. Ремер не смог найти точного значения скорости света. А. Физо определил это значение как близкое к 300000 км/с . В дальнейшем метод Физо был усовершенствован американским физиком А. Майкельсоном (1852–1931).

Опыт А. Майкельсона. На рис. 2 приводится схема опыта Майкельсона. Свои опыты он проводил с помощью двух гор (Антонио и Вильсон), расстояние между которыми ℓ было измерено с очень большой точностью. Свет от источника S , установленного на одной горе, проходит через щель T и попадает на восьмигранное зеркало A . Отраженный от одной грани призмы луч направляется на вогнутое зеркало, установленное на другой горе, и, отразившись, попадает на вторую грань призмы A . Отраженный от призмы свет наблюдался с помощью зрительной трубы C . Призма вращалась с такой скоростью, что только при ее повороте на $1/8$ часть свет проходил расстояние 2ℓ . Только в этом случае в зрительную трубу непрерывно была видна щель T . Майкельсон, проводя опыт, также определил значение скорости света, близкое к 300000 км/с . Кроме того, Майкельсон определил скорость света не только в вакууме, но и в другой среде. Из своих опытов он сделал следующие выводы: во-первых, скорость света в вакууме больше скорости света в другой среде; во-вторых, скорость света не зависит от скорости источника.

Значение скорости света. Так чему же равна скорость света? В природе не существует скорости больше, чем скорость света в вакууме. Она равна $c = (299792,5 \pm 0,4)$. Таким образом, электромагнитные волны распространяются в вакууме со скоростью $c \approx 300\,000 \text{ км/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.



Вопросы для самопроверки

1. Бесконечна ли скорость света? 2. Кто первым попытался измерить скорость света и в чем состоит значение этого опыта? 3. Сущность опыта Ремера по измерению скорости света. 4. Почему произошло запоздание затмения спутника Юпитера? Объясните причину этого явления по схеме, изображенной на рис. 1. 5. При помощи какого выражения Ремер определил скорость света? В чем состоит причина неточности при определении скорости света? 6. Кому и когда удалось измерить скорость света с большой точностью? 7. Приведите схему опыта Майкельсона. 8. Когда в щели зрительной трубы свет будет виден непрерывно? 9. Отличается ли скорость света в вакууме от его скорости в другой среде? 10. Зависит ли скорость света от скорости источника? 11. Чему равна скорость света? 12. Существует ли в природе скорость выше скорости света?

§ 3. Характеристики света. Элементы фотометрии

Содержание: источники света; точечный источник; фотометрия; характеристики света.

Источники света. Когда говорят об источниках света, то имеют в виду вещества, испускающие свет при превращении любого вида энергии в световую энергию. Они могут быть как естественными, так и искусственными.

Примерами естественных источников могут быть Солнце, звезды и другие объекты. Основными источниками света во Вселенной являются звезды, в которых происходит превращение термоядерной энергии в световую энергию.

Примером искусственных источников могут быть электрические лампы накаливания, газовые лампы и др. В них происходит превращение электрической энергии в световую и тепловую энергию.

Точечный источник. В таком разделе физики, как механика, используется понятие материальной точки, в разделе электричества – понятие точечного заряда. В оптике также используется понятие точечного источника. *Источник света считается точечным, если его размеры намного меньше расстояний, на которых происходит его действие.*

Точечный источник является идеальным понятием, о котором принято говорить, что он посылает свет равномерно по всем направлениям.

Фотометрия. Раздел оптики, изучающий энергетические характеристики света, называют *фотометрией*. В фотометрии используют следующие единицы:

— энергетические: здесь энергетические параметры оптического излучения — света — рассматриваются безотносительно к его воздействию на приемники излучения;

— характеристики света: сила физиологического действия света определяется по его воздействию на глаз или другие приемники излучения.

Основной энергетической величиной в фотометрии является световой поток. *Световым потоком* называют мощность излучения, то есть энергию в единицу времени (см. § 17). Световой поток точечного источника во всех направлениях, т. е. через любой фазовый угол, будет одинаковым.

Характеристики света. Следует отметить, что *действие света на приемники, в частности на глаз, с одной стороны, зависит от энергии света, с другой — от длины волны света.* Глаз наиболее чувствителен к зеленому цвету. Поэтому важно знать не просто количество световой энергии, регистрируемое соответствующими измерительными приборами, а интенсивность света, непосредственно оцениваемую нашим глазом. Для такой оценки пользуются понятием *светового потока*. Другими словами, световой поток, а значит, все характеристики света, вызывающие ощущение в глазу, суть величины, относящиеся к электромагнитным лучам.

1. *Световым потоком* называют протекающую через некоторую поверхность в единицу времени световую энергию. На рис. 3 показан световой поток, излучаемый точечным источником через поверхность S , лежащую против телесного угла Ω . Если теперь сложить световые потоки по всем направлениям, то получим полный световой поток источника.

2. Силой света I источника называется световой поток, созданный источником в единичном телесном углу.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

Единица силы света в СИ — *кандела (кд)* (лат. *kandela* — «свеча») является основной световой единицей.

1 кд равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, сила энергии которого в этом направлении составляет $\frac{1}{683}$.

Если иметь в виду, что полный телесный угол содержит $\frac{\Phi}{4\pi}$, то получим

$$I = \frac{\Phi}{4\pi}. \quad (3.2)$$

Из (3.1) получим выражение для светового потока:

$$\Phi = I \cdot \Omega. \quad (3.3)$$

С помощью полученного выражения можно определить единицу светового потока люмен (лм) в СИ.

1 люмен — это световой поток, испускаемый точечным источником, сила света которого 1 кд, а телесный угол равен 1 ср.

3. *Освещенностью E* называется отношение светового потока Φ , падающего на некоторый участок поверхности площади S этого участка:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (3.4)$$

Единица освещенности — люкс (лк).

Люкс определяется как освещенность, при которой на 1 м² поверхности равномерно распределен световой поток в 1 лм.

Освещенность тоже зависит от силы источника света, а также от расстояния между источником света и освещенной поверхностью. Предположим, что в центре сферы радиусом R помещен точечный источник света с силой света I . Если теперь принять во внимание, что все лучи падают перпендикулярно внутреннему радиусу сферы и площадь поверхности сферы $S = 4R^2$, тогда, используя выражение (3.2), для освещенности можно найти следующее выражение:

$$E = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}. \quad (3.5)$$

Следовательно, *освещенность поверхности прямо пропорциональна силе света и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещаемой поверхности.*

С целью повышения производительности труда и сохранения нормального зрения установлены гигиенические нормы освещенности рабочих мест. Ниже приводятся некоторые из них.

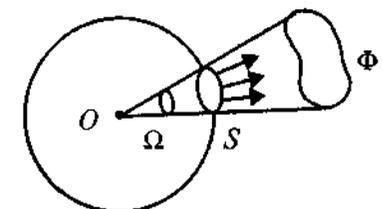


Рис. 3

Таблица 1

Вид деятельности	Освещенность (лк)
Чтение	30–50
Тонкая работа	100–200
Фотографирование	10000 и выше
Просмотр кино	20–80
При облачной погоде	1000 и выше
В безоблачный полдень	100000
Ночью в полнолуние	0,2

Вопросы для самопроверки

1. Что называют источником света? Какие виды источников света существуют? 2. Что называют точечным источником? 3. Что изучает фотометрия и какие единицы в ней используются? 4. Назовите энергетические единицы света. 5. Назовите характеристики света. 6. Что такое поток излучения? 7. От чего зависит действие света на глаз? 8. С какой целью введено понятие потока света? 9. Что называют потоком света? 10. Дайте определение силы света и назовите ее единицу. 11. Как определяется кандела и что это за единица? 12. Что является единицей потока света? 13. Что такое освещенность и какова ее единица? 14. Зависит ли освещенность от силы света и расстояния до освещаемого объекта? 15. Назовите правила освещенности рабочего места.

§ 4. Законы отражения и преломления света.

Полное отражение

Содержание: закон прямолинейного распространения света; закон отражения; закон преломления; абсолютный показатель преломления среды; полное отражение.

Закон прямолинейного распространения света. В оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно. Появление тени от предметов, стоящих перед точечным источником, доказывает истинность этого закона (рис. 4).

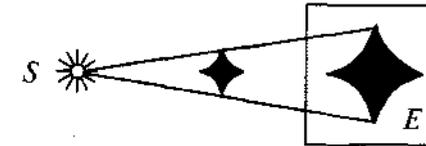


Рис. 4

Закон отражения света. Если свет падает на границу двух сред, тогда падающий луч делится на два луча – отраженный и преломленный. На рис. 5 падающий луч обозначен (I), отраженный луч (II) и преломленный луч (III).

Под световым лучом понимают направление распространения световой энергии.

А интенсивность светового луча определяется энергией, которая проходит через единичную поверхность, перпендикулярную направлению луча в единицу времени.

Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, стоящий в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения i'_1 равен углу падения i_1 ; $i'_1 = i_1$.

Закон преломления света. Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, стоящий в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла отражения есть величина постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}, \quad (4.1)$$

где n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

Индексы в обозначениях углов показывают, в какой среде двигаются лучи (см. рис. 5).

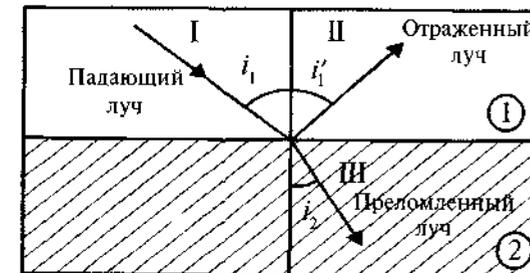


Рис. 5

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления.

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (4.2)$$

Абсолютный показатель преломления среды. Абсолютным показателем преломления данной среды называют показатель преломления среды относительно вакуума. Он определяется отношением скорости света в вакууме к скорости света в данной среде.

$$n = \frac{c}{v}. \quad (4.3)$$

Если воспользоваться выражением (1,1), то получим

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (4.4)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды,
 μ — магнитная проницаемость среды.

Теперь, используя выражение (4.1), запишем выражение (4.2) в следующем виде:

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2. \quad (4.5)$$

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления (оптически менее плотную) ($n_1 > n_2$), то тогда

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1. \quad (4.6)$$

Здесь преломленный луч удаляется от перпендикуляра и угол преломления i_2 больше, чем угол падения i_1 (рис. б). С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. б, б, в). При некотором угле падения ($i_1 = i_{\text{пр}}$) угол преломления будет равным $i_2 = \frac{\pi}{2}$. И начиная со значения угла падения $i_1 > i_{\text{пр}}$, все падающие лучи полностью отражаются (рис. б, г). Угол $i_{\text{пр}}$ называется *предельным углом полного отражения*.

Полное отражение. По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного — растет (рис. б, а, в). При $i_1 = i_{\text{пр}}$ интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность падающего равна интенсивности отраженного (рис. б, г). Таким образом, при значениях угла падения от $i_{\text{пр}}$ до $\frac{\pi}{2}$ луч не

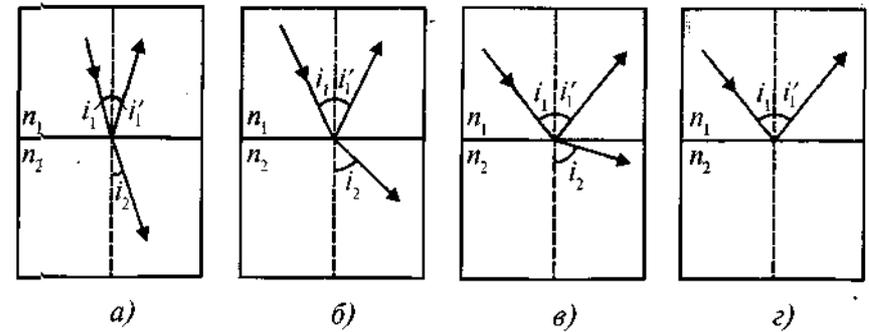


Рис. 6

преломляется, а полностью отражается в первой среде; интенсивности падающего и отраженного луча одинаковы. Это явление называется *полным отражением*.



Вопросы для самопроверки

1. Как распространяется свет в оптически однородной среде?
2. Как можно доказать, что свет распространяется прямолинейно?
3. Расскажите закон отражения света.
4. Расскажите закон преломления света.
5. Как определяется относительный показатель преломления второй среды относительно первой?
6. Как определяется абсолютный показатель преломления среды?
7. Что происходит, когда свет переходит из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления?
8. Что называют полным внутренним отражением?
9. Чему будет равна интенсивность света, если угол падения будет равен предельному углу?
10. Зависит ли значение предельного угла от абсолютного показателя преломления второй среды?

§ 5. Линзы. Формула тонкой линзы

Содержание: линзы и их виды; тонкая линза и ее главная оптическая ось; фокусное расстояние; оптическая сила линзы; формула тонкой линзы; построение изображений в линзах.

Линзы и их виды. Прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, называют линзой. Линзы обычно делают из стекла, кварца, пластмассы и похожих на них материалов. По форме линзы делятся на: двояковыпуклые (рис. 7, а); плосковыпуклые (рис. 7, б); двояковогнутые (рис. 7, в); плосковогнутые (рис. 7, г); выпукло-вогнутые (рис. 7, д); вогнуто-выпуклые (рис. 7, е).

По оптическим свойствам они делятся на *собирающие* и *рассеивающие*.

Тонкая линза и ее главная оптическая ось. Если толщина линзы, то есть расстояние между ограничивающими ее поверхностями, значительно меньше, чем радиусы этих поверхностей, то такая линза называется *тонкой*.

Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется *главной оптической осью линзы* (рис. 8). У каждой линзы существует такая точка O , называемая *оптическим центром линзы*, проходящий через которую луч не преломляется. Для двояковыпуклой и двояковогнутой линз эта точка совпадает с геометрическим центром линзы.

Фокусное расстояние. Оптическая сила линзы. Теперь рассмотрим случай, когда на двояковыпуклую линзу падает пучок параллельных лучей (рис. 9). Все лучи, падающие на линзу, преломляются в ней и собираются в одной точке F , которую называют *фокусом линзы*. Фокус линзы располагается по обе стороны линзы на одном и том же расстоянии. Расстояние от оптического центра линзы до фокуса ($f = OF$) называют *фокусным расстоянием линзы*.

Величину, обратную фокусному расстоянию, называют *оптической силой линзы*.

$$D = \frac{1}{f}. \quad (5.1)$$

Ее единица — **диоптрия (дптр)**. *Оптической силой в одну диоптрию обладает линза с фокусным расстоянием 1 м; 1 дптр = $\frac{1}{1 \text{ м}}$.* Линзы с положительной оптической силой (выпуклые) — *собирающие*, с отрицательной оптической силой (вогнутые) — *рассеивающие*. Значит, в отличие от собирающих, у рассеивающих линз фокусы *мнимые*.

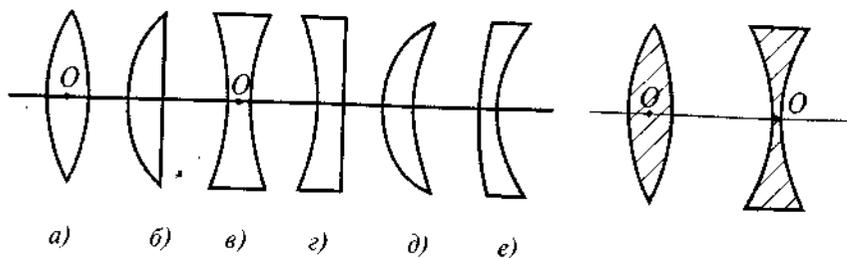


Рис. 7

Рис. 8

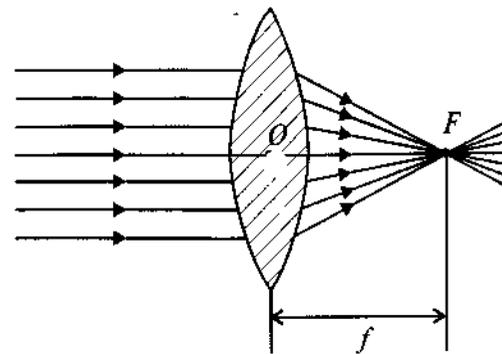


Рис. 9

Если на линзу направляют лучи, параллельные главной оптической оси, они преломляются, а их продолжения пересекаются в главном фокусе *рассеивающей линзы* (рис. 10).

Формула тонкой линзы. Формула тонкой линзы связывает три величины: расстояние (a) от предмета до линзы, расстояние (b) от изображения до линзы и фокусное расстояние (f) (рис. 11).

Для собирающей линзы эта формула имеет следующий вид:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (5.2)$$

Если учесть выражение (5.1), то формулу тонкой линзы можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D. \quad (5.3)$$

Для рассеивающей линзы расстояние f и b надо считать *отрицательными*, и формулу тонкой линзы можно записать так:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}. \quad (5.4)$$

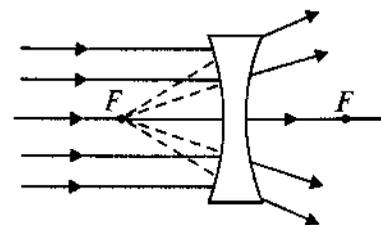


Рис. 10

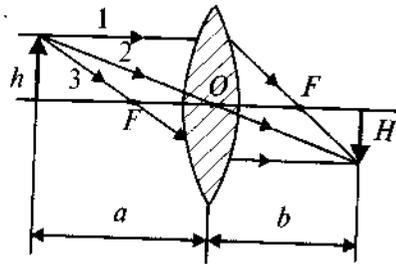


Рис. 11

Построение изображений в линзах. Построение изображения предмета в линзах осуществляется с помощью следующих трех лучей:

1. Луч, идущий параллельно главной оптической оси, после преломления проходит через второй фокус линзы (рис. 11, 1 луч).

2. Луч, проходящий через оптический центр линзы и не изменяющий своего направления (рис. 11, 2 луч).

3. Луч, проходящий через первый фокус линзы, после преломления выходит из линзы параллельно главной оптической оси (рис. 11, 3 луч).

На рис. 11 показано изображение предмета H размером h , полученного с помощью собирающей линзы. Отношение линейного размера изображения H к линейному размеру предмета h называют *линейным увеличением линзы K* . Значит,

$$K = \frac{H}{h}. \quad (5.5)$$

Изображение с помощью рассеивающей линзы строится также продолжением лучей (рис. 12).

Для решения сложных технических задач иногда приходится использовать комбинацию из собирающих и рассеивающих линз.



Вопросы для самопроверки

1. Какие тела называют линзой? 2. Из каких материалов делают линзы и почему? 3. На какие виды делятся линзы по форме? 4. А по оптическому свойству? 5. Какая линза называется тонкой линзой? 6. Что называют главной оптической осью линзы? 7. Что представляет собой оптический центр линзы? 8. Какую точку называют фокусом линзы? 9. Сколько фокусов имеется у линзы и как они расположены? 10. Что такое фокусное расстояние линзы? 11. Что называют оптической силой линзы и какова ее единица измерения в СИ?

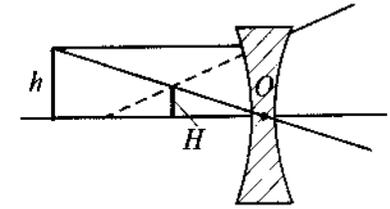


Рис. 12

12. Какие линзы называют собирающими, а какие — рассеивающими? 13. Как определяется фокус рассеивающей линзы? 14. Что обозначает формула тонкой линзы? 15. Напишите формулу тонкой линзы. 16. Какими будут f и b для рассеивающей линзы? 17. При помощи каких лучей получают изображение с помощью линзы?

18. Что называют линейным увеличением линзы? 19. Как получают изображение с помощью рассеивающей линзы? 20. Используют ли одновременно собирающую и рассеивающую линзу?

§ 6. Волновая теория света. Принцип Гюйгенса

Содержание: основы волновой теории; принцип Гюйгенса; недостатки волновой теории.

Основы волновой теории. Как было отмечено в § 1, интерференцию и дифракцию света невозможно было объяснить на основе корпускулярной теории. Проводившие исследования на эту тему английский физик Р. Гук (1635–1703) и голландский физик Х. Гюйгенс (1629–1695) выдвинули теорию о волновой природе света. В соответствии с этой теорией, распространение волн от источника рассматривается как распространение волны на поверхности воды, если туда бросить камень. Согласно волновой теории, свет представляет собой упругую волну, распространяющуюся в особой среде, называемой *эфиром*. То есть как механические волны распространяются по поверхности воды, так и световые волны распространяются в эфире.

Принцип Гюйгенса. Чтобы объяснить распространение света, Гюйгенс предложил следующий принцип (см. I часть, § 29). Каждая точка среды, до которой доходит волна, сама становится источником вторичных волн.

Поверхность, касательная ко всем вторичным волнам, представляет собой волновую поверхность в следующий момент времени (рис. 13). Геометрическое место точек,



Х. ГЮЙГЕНС
(1629–1695)

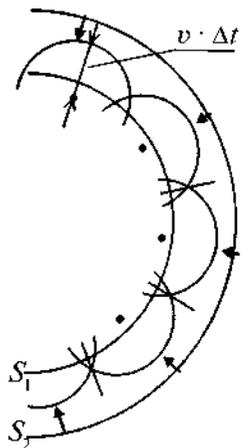


Рис. 13

колеблющихся в одной фазе, называется *волновой поверхностью*; геометрическое место точек, до которого в данный момент доходит колебание, называется *фронтом волны*. В зависимости от вида фронта волны бывают *плоскими* или *сферическими*.

Пусть фронт волны, распространяющейся в однородной избранной среде, в момент времени t будет S_1 . Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка, лежащая на S_1 , превращается во вторичный точечный источник сферических волн радиусом $v \cdot \Delta t$, и фронт волны в момент времени $t + \Delta t$ будет состоять из поверхности, касательной к этим вторичным волнам. Вместе с тем нам

известно, что световые волны состоят из электромагнитных волн.

Недостатки волновой теории. Хотя волновая теория сумела объяснить очень многие явления (с этими явлениями мы подробно ознакомимся в следующих темах), она имеет и некоторые недостатки. Один из самых основных — это рассуждение о том, что волна распространяется в среде, называемой эфиром. Множество экспериментов, проводившихся с целью «обнаружения» эфира, закончились неудачей. Кроме того, волновая теория света не смогла объяснить явления, которые мы будем изучать в следующей главе: фотоэффект, эффект Комптона и другие явления.

? Вопросы для самопроверки

1. Что явилось предпосылкой для создания волновой теории света?
2. Кто из ученых являются авторами этой теории?
3. Как были представлены световые волны?
4. Какую среду представляет собой эфир?
5. Объясните принцип Гюйгенса.
6. Что такое волновая поверхность и волновой фронт?
7. Каковы недостатки волновой теории света?

§ 7. Интерференция света

Содержание: интерференция световых волн; когерентность волн; суперпозиция световых волн; условия максимума и минимума; выражения условий максимума и минимума через разность хода.

Интерференция световых волн. До сих пор мы знакомились с законами прямолинейного распространения света, отраже-

ния и преломления. Эти законы можно объяснить на основе обеих теорий: корпускулярной и волновой. Теперь познакомимся с некоторыми явлениями, которые может объяснить лишь волновая теория. Один из них — интерференция света.

Интерференцией света называют сложение двух (или нескольких) когерентных световых волн, в результате которого происходит пространственное перераспределение светового потока, то есть усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства.

Как было отмечено выше, не любая световая волна, а только когерентные световые волны могут дать интерференционную картину. Так какие волны называются когерентными?

Когерентность волн. Когерентными называют волны, у которых частоты (длины волн) равны и разность фаз остается постоянной.

Таким условиям могут удовлетворять только монохроматические волны. *Монохроматические волны* — это волны с одинаковой частотой (длиной волны) и постоянной амплитудой. Волны же, испущенные разными источниками, не дают интерференционной картины, так как они не являются монохроматическими. Именно по этой причине на столе, освещенном двумя электрическими лампочками, не наблюдается интерференционная картина. Чтобы объяснить, почему свет, исходящий из разных источников, не монохроматичный, надо проанализировать механизм появления излучения. Свет испускается при переходе атома источника из возбужденного состояния в основное за очень короткое время (10^{-8} с). Такое излучение свойственно только самому атому, и свет, испускаемый двумя источниками, не может быть монохроматичным.

Тогда что нужно сделать, чтобы создать интерференционную картину? Единственный путь для решения этой проблемы — это разделить луч, выходящий из одного источника, на два луча (тогда они будут монохроматическими) и после прохождения разных оптических путей сложить. Если разность оптических путей будет постоянной, то постоянной будет и разность фаз.

Существует множество методов достижения этого. О них мы узнаем позже. Теперь познакомимся с механизмом появления максимумов и минимумов.

Суперпозиция световых волн. Как и для всех других волн, для световых волн применим принцип суперпозиции. Други-

ми словами, напряженность электрического (магнитного) поля волны, образованного в результате сложения волн, равна векторной сумме напряженностей электрических (магнитных) полей слагаемых волн в данной точке. При сложении двух когерентных плоских световых волн $x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ и $x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$ в известной точке пространства возникает колебание с амплитудой

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (7.1)$$

где $(\varphi_2 - \varphi_1)$ — разность фаз слагаемых волн.

Если учтем, что интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды ($I \sim A^2$), то (7.1) можно записать следующим образом:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). \quad (7.2)$$

Это выражение говорит об интенсивности I волны, образованной сложением двух когерентных волн через интенсивности начальных волн I_1 и I_2 .

Условия максимума и минимума. Из (7.2) видно, что интенсивность результирующей волны (интенсивность света) зависит от значения $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$. Из курса тригонометрии известно, что значение косинуса изменяется в пределах от +1 до -1.

1) $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$, т.е. принимает свое самое большое значение. Тогда

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, 2k\pi, \quad (7.3)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

В этом случае выражение (7.1) принимает вид

$$A = A_1 + A_2, \quad (7.4)$$

и происходит усиление результирующего колебания. Если $A_1 = A_2$, то наблюдается двукратное усиление амплитуды света

$$A_{\max} = 2A_1; \quad (7.5)$$

2) $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$, т.е. принимает свое самое маленькое значение. Тогда

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, 2(k+1)\pi, \quad (7.6)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Тогда выражение (7.1) принимает следующий вид:

$$A = |A_1 - A_2|, \quad (7.7)$$

и происходит ослабление результирующего колебания. Если $A_1 = A_2$, то

$$A_{\min} = 0, \quad (7.8)$$

наблюдается полное гашение амплитуды света.

Выражение условий максимума и минимума через разность хода.

Обычно условия усиления (максимум) и ослабления (минимум) результирующей амплитуды колебания считается удобным выражать не через разности фаз $\varphi_2 - \varphi_1$, а через разности хода волн δ . Если период электромагнитной волны 2π и здесь он переходит путь длиной λ , то увидим, что волна при $\varphi = \pi$ проходит путь, соответствующий $\frac{\lambda}{2}$.

Согласно этим рассуждениям, условия максимумов (7.3) можно записать следующим образом:

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda. \quad (7.9)$$

Если разность хода слагаемых волн будет равна четному числу полуволен или целому числу длин волн, произойдет максимальное усиление результирующего колебания.

Снова напишем условия минимумов (7.6):

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (7.10)$$

Если разность хода слагаемых волн будет равна нечетному числу полуволен, произойдет ослабление результирующего колебания.

Значения $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ называют порядком интерференционных максимумов и минимумов. На рис. 14 показана интерференция волн с одинаковыми амплитудами. Если разность хода будет равна четному числу полуволен, $A = A_1 + A_2 = 2A_1$ — происходит усиление волны (рис. 14, а), если разность хода будет равна нечетному числу полуволен, $A = |A_1 - A_2| = 0$ — происходит ослабление света, то есть затухание волны (рис. 14, б).

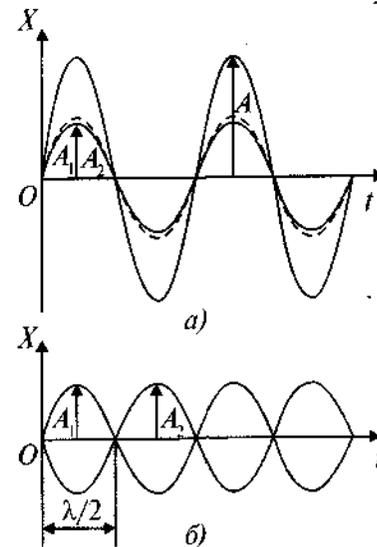


Рис. 14



Вопросы для самопроверки

1. Какую природу света доказывает явление интерференции?
2. Что такое интерференция света?
3. Какие световые волны могут

интерферировать? 4. Какие волны называют когерентными? 5. А какие — монохроматичными? 6. Почему при освещении двумя электрическими лампочками на столе не наблюдается интерференционная картина? 7. Почему световые волны, выходящие из разных источников, не могут быть монохроматичными? 8. Как образуются когерентные световые волны? 9. Дайте определение принципа суперпозиции для световых волн. 10. Как определяется амплитуда колебания, образованного сложением двух когерентных волн? 11. А интенсивность волн? 12. Когда происходит усиление результирующего колебания? 13. А ослабление? 14. Чему будет равно максимальное и минимальное значение амплитуды колебания при $A_1 = A_2$? 15. Чем удобно выразить значение амплитуды колебания: разностью фаз или разностью пути? 16. Какому изменению длины волны соответствует изменение фазы $\varphi = \pi$? 17. Когда происходит максимальное усиление результирующего колебания? Напишите условие максимумов. 18. Когда происходит ослабление результирующего колебания? Напишите условие минимумов. 19. Что показывает k ? 20. Охарактеризуйте картину, изображенную на рис. 14.

§ 8. Методы наблюдения интерференции света. Использование интерференции света

Содержание: метод Юнга; зеркала Френеля; бипризма Френеля; интерференция на тонкой пленке; кольца Ньютона; использование интерференции света.

Теперь познакомимся с методами наблюдения интерференции света. Все эти методы основаны на разделении световых лучей, исходящих из одного и того же источника, на два луча и их сложении вновь после прохождения различных оптических путей.

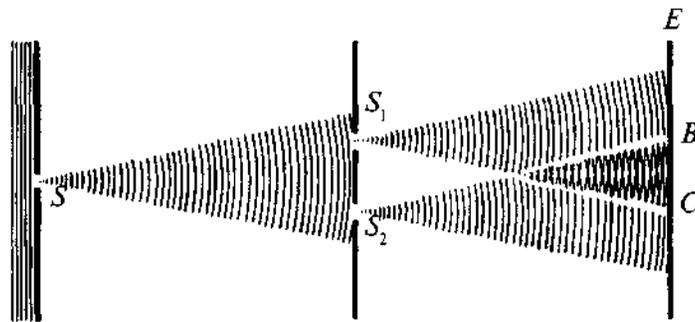


Рис. 15

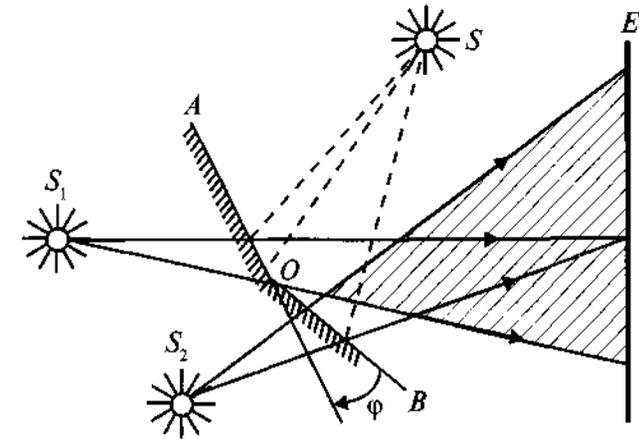


Рис. 16

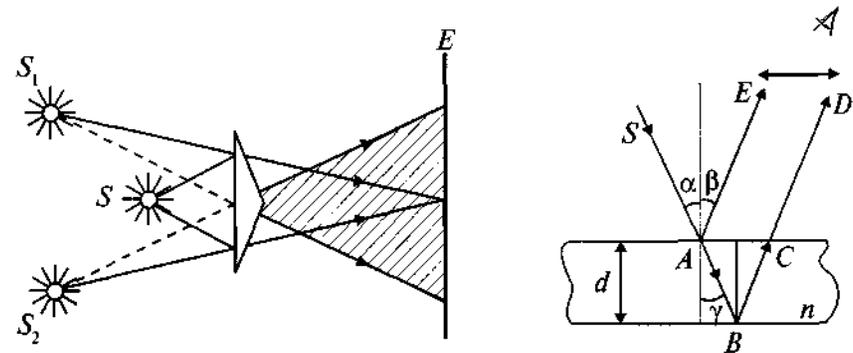


Рис. 17

Рис. 18

Метод Юнга. Это метод, с помощью которого впервые наблюдалось явление интерференции (рис. 15). Свет, испускаемый источником S , падает на две равноудаленные щели S_1 и S_2 . Именно эти щели выполняют роль источников когерентных волн, и на экране E наблюдается интерференционная картина.

Зеркала Френеля. Пучок света от источника S падает на зеркала AO и OB , расположенные относительно друг друга под маленьким углом φ (рис. 16). Отраженные от зеркал лучи создают на экране E интерференционную картину. Их можно считать выходящими из двух мнимых источников S_1 и S_2 .

Бипризма Френеля. Она состоит из двух одинаковых призм, основания которых склеены (рис. 17). Пучок света от источника S преломляется в бипризме в качестве когерентных волн,

исходящих из двух фиктивных источников S_1 и S_2 , которые создают на экране E интерференционную картину.

Интерференция на тонкой пленке. В повседневной жизни на тонких стеклянных пластинках, на мыльной пленке и похожих на них пленках наблюдается явление интерференции (радужная картинка). На рис. 18 показана тонкая пленка и толщиной d . В точку A падает пучок света SA , составляющий с перпендикуляром, проведенным в точку A , угол α . Этот луч в точке A частично отражается и движется в направлении AE . Частично преломленный луч снова отражается от точки B и, выйдя из пленки, движется в направлении CD , параллельном AE . Так как лучи AE и CD образованы от одного луча SA , они будут когерентными и наблюдается интерференция. Следует отметить, что длина волны отраженного луча света изменится на $\frac{\lambda}{2}$, т.е. к разности хода надо прибавить $\frac{\lambda}{2}$. Другими словами, отраженная световая волна меняет фазу на π .

Интерференция на тонкой пленке определяется при помощи следующих выражений.

Условие максимумов:

$$\delta = 2k \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (8.1)$$

Условие минимумов:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (8.2)$$

В зависимости от состава падающего луча, согласно условию (8.1), можно наблюдать различную интерференционную картину.

Кольца Ньютона. Пусть на плоско-параллельную пластину положили плоско-выпуклую линзу большого радиуса ($R = 10-100$ см) (рис. 19, а). В этом случае интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название *колец Ньютона*. Если на линзу падает монохроматический пучок света, то волны, отразившиеся от верхнего и нижнего слоя воздушной прослойки, интерферируют. Радиусы темных колец для отраженного света определяются выражением

$$r_T = \sqrt{kR\lambda} \quad (8.3)$$

В центре наблюдается темное пятно (рис. 19, б), где $k = 0, 1, 2, \dots$ — порядковый номер колец. Радиусы световых колец определяются как

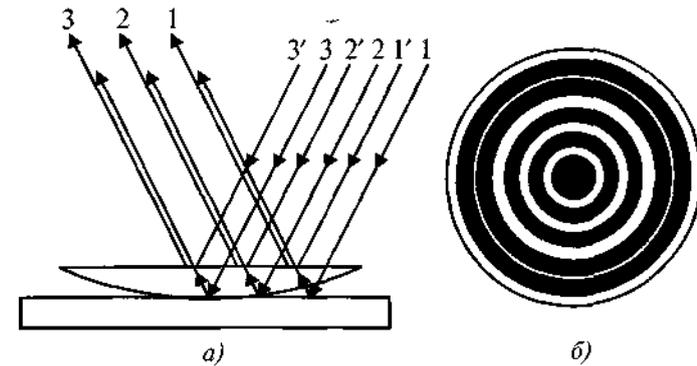


Рис. 19

$$r_{cs} = \sqrt{(2k - 1)R \frac{\lambda}{2}} \quad (8.4)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ — порядковый номер светлых колец.

Так как оптическая разность хода для проходящего и отраженного света отличается на $\frac{\lambda}{2}$, то максимумы и минимумы в них поменяются местами. Другими словами, для проходящего луча выражение (8.3) определяет радиус светлого кольца, а выражение (8.4) — темного кольца.

Использование интерференции света. Так как количественные закономерности явления интерференции зависят от длины волны λ , его применяют для определения длины волны (интерференционная спектроскопия). К примеру, можно измерить радиус кольца Ньютона, определив длину волны.

Явление интерференции применяется также для улучшения качества оптических приборов (просветление оптики) и для получения высокоотражающих покрытий.

Явление интерференции широко применяется в измерительных приборах — *интерферометрах*. Принцип работы всех этих приборов один и тот же, но они отличаются по конструкции. С помощью таких приборов можно с большой точностью измерить длину волны света, размеры тел, установить зависимость размеров тел от температуры и др.

Например, интерферометр Майкельсона показывает точность, равную 10^{-7} м. С помощью такого интерферометра впервые было проведено сравнение международного эталона длины — метра — с длиной стандартной световой волны.

С помощью интерферометров можно контролировать качество оптических деталей, точность углов, их можно также

применять для исследования быстро протекающих процессов, происходящих в воздухе.

С помощью микроинтерферометров, состоящих из интерферометра и микроскопа, можно контролировать чистоту обработки поверхности.

С помощью интерференционных рефрактометров изучается зависимость показателя преломления прозрачных тел (газов, жидкостей и твердых тел) от температуры и наличия примесей. Таким образом, области применения явления интерференции безграничны.



Вопросы для самопроверки

1. Какое свойство присуще всем методам наблюдения интерференции света?
2. Опишите метод Юнга. Раскройте содержание рис. 15.
3. Что такое зеркала Френеля? Раскройте содержание рис. 16.
4. Что такое бипризма Френеля? Раскройте содержание рис. 17.
5. Как можно объяснить появление различных цветов на мыльной пленке?
6. Как возникает интерференция на тонкой пленке? Раскройте содержание рис. 18.
7. Изменяется ли длина волны отраженного света?
8. А фаза?
9. Запишите условия минимума и максимума для интерференции на тонкой пленке.
10. Как образуются кольца Ньютона?
11. Каков радиус темных колец для отраженного света?
12. А радиус светлых колец?
13. Какими будут эти радиусы для проходящего света?
14. Почему радиусы колец для отраженного и проходящего света не совпадают?
15. Можно ли определить с помощью интерференции длину световых волн?
16. Для какой цели используются интерферометры?
17. Что вы знаете об интерферометре Майкельсона?
18. Что можно контролировать с помощью микроинтерферометра?
19. Что изучается при помощи интерференционного рефрактометра?

§ 9. Дифракция света

Содержание: дифракция волн; дифракция света; принцип Гюйгенса-Френеля.

Дифракция волн. Слово «дифракция» (лат. *diffractus*) означает «слом, изменение направления». Поэтому когда говорят о дифракции волн, имеют в виду огибание ими препятствий.

Благодаря дифракции волны могут попадать в область геометрической тени, огибать препятствия, проникать через небольшие отверстия в экранах и т. п. Звук хорошо слышен за углом дома, т.е. звуковая волна огибает дом.

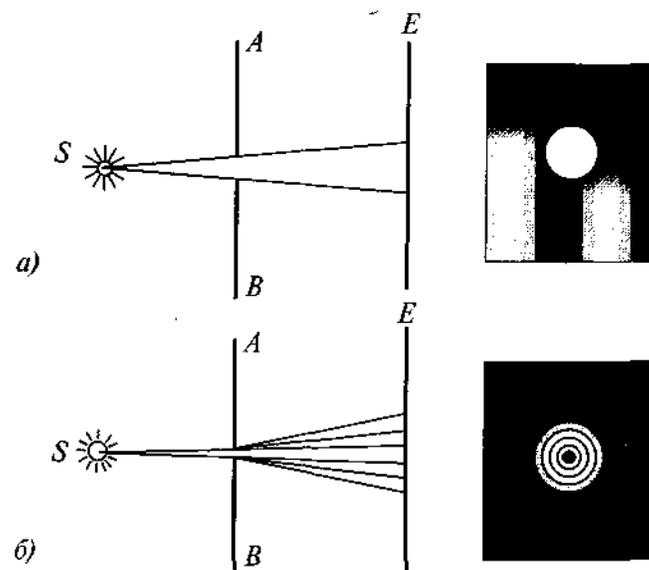


Рис. 20

Дифракция света. Возникает вопрос: происходят ли описанные выше явления со светом? Для этого проведем опыт, схема которого приведена на рис. 20. Пусть перед источником света находится препятствие AB с маленькой щелью. На экране E образуется тень щели, светлое пятно (рис. 20, а). Теперь будем уменьшать ширину щели в препятствии AB . Когда размер щели будет в тысячу раз меньше расстояния от препятствия AB до экрана, на экране возникает сложная картина, состоящая из светлых и темных колец (рис. 20, б).

Такую картину создает только дифракция света. Так как свет создает дифракционную картину, то он имеет волновую природу.

Поэтому явление дифракции считается одним из процессов, проявляющим волновую природу света.

Дифракцией света называют огибание световыми волнами препятствий и отклонения в сторону геометрической тени.

Значит, любое отклонение от прямолинейного распространения будет результатом дифракции света и доказывает волновую природу света.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Теперь проведем более глубокий анализ картины, представленной на рис. 20, а. Если свет имеет волновую природу, то как можно объяснить резкую гра-

ницу светлого пятна? Точно такое же рассуждение можно привести и о резкой тени препятствия, стоящего напротив источника света (см. рис. 4).

Принцип Гюйгенса не в силах решить проблему, приведенную выше, так как он не затрагивает по существу вопроса об амплитуде волны, а следовательно, и об интенсивности волн, распространяющихся в разных направлениях.

Согласно принципу Гюйгенса, *всякую точку, которую достиг фронт волны, можно рассматривать как источник независимых колебаний*. Французский физик О. Френель (1788–1877) и внес в этот принцип дополнение о том, что *колебания в любой точке пространства могут рассматриваться как результат интерференции вторичных волн, «излучаемых» фиктивными источниками и состоящих из отдельных частей волнового фронта*. По его мнению, *эти фиктивные источники излучают когерентные волны, интерферируют в любой точке пространства и могут усиливать или ослаблять друг друга*.

Френель, опираясь на свой принцип, предложил разбить фронт волны на такие участки (зоны Френеля), где фазы волн доходят до противоположной, рассматриваемой из соседней зоны, точки, т.е. $\Delta\varphi = \pi$, и значит, разность хода будет равна $\delta = \frac{\lambda}{2}$. Значит, колебания из двух рассматриваемых зон гасят друг друга.

Например, найдите амплитуду световой волны точечного источника S в любой точке M (рис. 21).

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, заменим действие источника S действием участков волнового фронта Φ , состоящих из фиктивных источников. Френель выбрал их такими, что разность от краев кольцеобразных зон до точки M будет равна $\frac{\lambda}{2}$.

$$P_1M - P_0M = P_2M - P_1M = P_3M - P_2M = \frac{\lambda}{2}.$$

Так как фазы колебаний, дошедших до точки M , будут противоположными, результирующая амплитуда колебаний определяется следующим образом:

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots + A_m, \quad (9.1)$$

где $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ — амплитуды колебаний соответственно возбуждающими зонами 1, 2, 3... m .

Из выражения следует, что если число зон в щели будет четным, в точке M будет темное пятно, если нечетным —

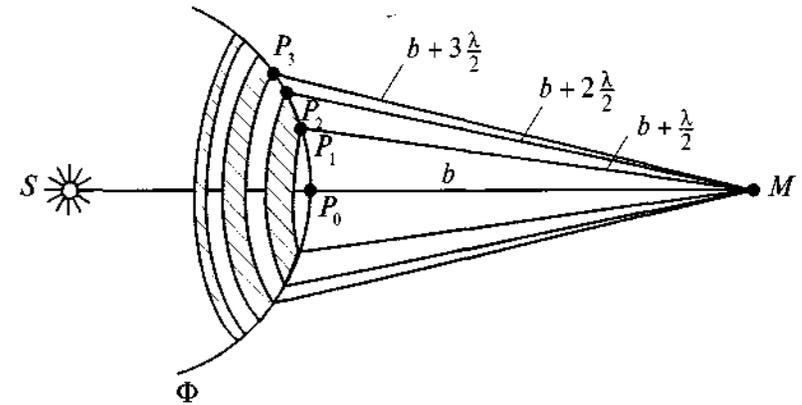


Рис. 21

светлое. Если в щели будет расположена одна зона, то в точке M будет максимальная чувствительность.

Вопросы для самопроверки

1. Что означает слово «дифракция»? 2. Что имеется в виду, когда говорят о дифракции волн? 3. Как можно объяснить слышимость звука в укрытом месте? 4. Объясните картину на рис. 20, а. 5. Объясните картину на рис. 20, б. 6. Какие условия должны выполняться, чтобы возникла картина на рис. 20, в? 7. Что такое принцип Гюйгенса? 8. Какое дополнение ввел Френель в принцип Гюйгенса? 9. Какую мысль высказал Френель о фиктивных источниках? 10. На основании какого принципа были разделены зоны Френеля? 11. Чему равна разность пути волн, идущих из соседней зоны? 12. Объясните рис. 21. 13. В каких отношениях друг с другом будут амплитуды колебаний, идущих из соседних зон? 14. Чему равна результирующая амплитуда в точке M ? 15. Когда в точке M образуется темное пятно, а когда — светлое? 16. Что происходит, когда в щели располагается одна зона?

§ 10. Дифракция параллельных световых пучков на отдельной щели. Дифракционная решетка. Использование дифракции

Содержание: дифракция параллельных световых пучков на отдельной щели; условия максимумов и минимумов; строение дифракционной решетки; дифракция на дифракционной решетке; использование дифракции.

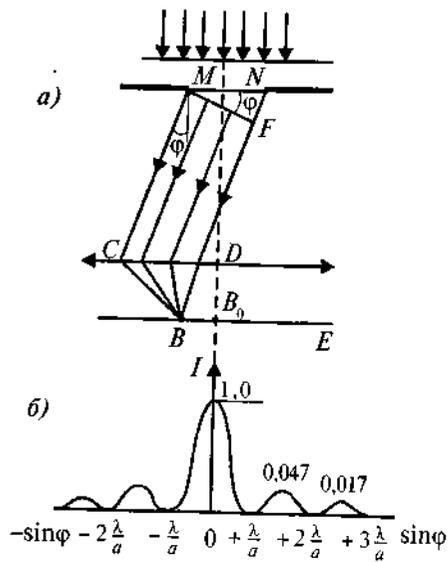


Рис. 22

Дифракция параллельных световых пучков на отдельной щели. Немецкий физик И. Фраунгофер (1787–1826) изучил дифракцию параллельных световых лучей, имеющих большое практическое значение. Поэтому эту дифракцию часто называют *дифракцией Фраунгофера*.

Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально плоскости щели шириной a (рис. 22, а). Оптическая разность хода между крайними лучами MC и ND , отклоненными от щели на φ , будет равна

$$\delta = NF = a \cdot \sin \varphi, \quad (10.1)$$

где F — основание перпендикуляра, опущенного из точки M на луч ND .

Открытую часть волновой поверхности на плоскости щели MN разобьем параллельно ребру щели M на зоны Френеля, имеющие вид полос. Ширина каждой зоны выбирается такой,

чтобы разность хода от краев этих зон была равна $\frac{\lambda}{2}$. Из выра-

жения (10.1) видно, что число зон, укладываемых в зоне на ширину щели, зависит от угла φ . В свою очередь, результат сложения вторичных волн зависит от числа зон Френеля. Из приведенного построения следует, что при интерференции света от каждой пары соседних зон амплитуда результирующих колебаний равна нулю, так как колебания от каждой пары соседних зон взаимно поглощают друг друга.

Условия максимумов и минимумов. Если число зон Френеля четное:

$$\delta = a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (10.2)$$

в точке B наблюдается дифракционный минимум (полная темнота), если же число зон Френеля нечетное:

$$\delta = a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (10.3)$$

наблюдается дифракционный максимум, соответствующий действию одной нескомпенсированной зоны. Следует отметить, что в прямом направлении ($\varphi = 0$) щель действует как одна зона Френеля, и в этом направлении свет распространяется с наибольшей интенсивностью, т.е. в точке B наблюдается центральный дифракционный максимум.

На рис. 22, б приведено распределение интенсивности на экране (дифракционный спектр) в результате дифракции.

Строение дифракционной решетки. Теперь ознакомимся с системой, состоящей из множества щелей. *Дифракционной решеткой* называется система параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

Если ширина щели равна a , а непрозрачной зоны b , то величина $d = a + b$ называется *постоянной (периодом) дифракционной решетки*. На рис. 23 представлена дифракционная решетка. Хотя на рисунке для наглядности показаны две щели — $MN = CD = a$ и $NC = b$, этого достаточно, чтобы возникло представление о дифракционной решетке.

Дифракция на дифракционной решетке. Пусть плоская монохроматическая волна падает нормально к плоскости решетки. Так как щели находятся друг от друга на одинаковом расстоянии, то разность хода лучей, идущих от двух соседних щелей, будет равна

$$\delta = CF = (a + b) \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi. \quad (10.4)$$

Для дифракционной решетки, как и для отдельной щели, условие минимумов (главное) определяется как

$$a \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (10.5)$$

Если выполняется условие

$$d \cdot \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (10.6)$$

то действие одной щели усиливается со стороны второй щели, поэтому данное условие называется *условием главного максимума*.

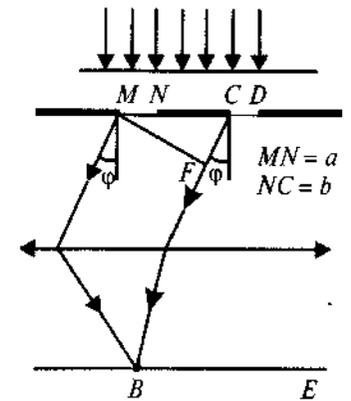


Рис. 23

Кроме того, можно определить условие дополнительного минимума, возникающее на дифракционной решетке.

Использование дифракции. Явление дифракции широко используется в науке и технике. В качестве примера можно привести спектрограф, работающий на основе дифракционной решетки. С помощью таких установок можно получить представление о составе и качестве веществ.

Особенно широко дифракционные решетки используются в спектральном анализе, где определяется длина волны. Из формулы (10.6) следует: чтобы найти длину волны λ , достаточно определить угол дифракции φ . Так как постоянная решетки d , порядок главных максимумов k известен. Чем меньше будет постоянная решетки d , тем легче будут выделены главные максимумы и появится возможность более точно определить длину волны λ .

Дифракционная решетка, как и все спектральные приборы, характеризуется разрешающей способностью. Эта характеристика определяется способностью прибора разрешать две близко находящиеся спектральные линии с длинами волн λ и $\lambda + \Delta\lambda$. Эти спектральные линии можно разрешить, если они не поглощаются более широким максимумом. В качестве меры разрешающей способности решетки используют следующее выражение:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN,$$

где N — число штрихов в решетке. Из приведенного выражения видно, что разрешающая способность решетки зависит от числа штрихов в ней.

В зависимости от того, где используются современные дифракционные решетки, число штрихов в них может быть от 6000 до 0,25 в одном миллиметре.

С помощью таких решеток изучаются области спектра от инфракрасного до ультрафиолетового.



Вопросы для самопроверки

1. Какая дифракция называется дифракцией Фраунгофера? 2. Чему равна разность пути крайних лучей, отклонившихся от щели на угол φ ? 3. Как отбираются зоны Френеля? 4. Чему равна амплитуда колебаний, возникающих от соседних зон Френеля? 5. Когда возникает дифракционный минимум? А дифракционный максимум? 6. Как возника-

ет дифракционный максимум? 7. Какой процесс происходит при $\varphi = 0$? 8. Объясните картину на рис. 22. 9. Что называют дифракционной решеткой? 10. Чему равна постоянная решетки? 11. Объясните картину на рис. 23. 12. Каковы условия появления минимумов на дифракционной решетке? 13. А условия главных максимумов? 14. Как возникает главный максимум? 15. Где применяется дифракционная решетка? 16. Можно ли определить с помощью дифракционной решетки длину волны? 17. Как определяется разрешение дифракционной решетки? 18. Зависит ли разрешение от числа штрихов в решетке? 19. Сколько штрихов имеется в 1 мм современных решеток? 20. Какая цель преследуется получением такого количества штрихов?

§ 11. Понятие о голографии

Содержание: из истории голографии; основа голографии; получение голограммы; восстановление голографической картины; применение голографии.

Из истории голографии. Голография (греч. — «полная запись») — специальный метод восстановления записи и светового поля с помощью интерференционной картинке. Этот метод основан на законах интерференции и дифракции.

Этот новый способ — фиксирование и воспроизведение пространственного изображения предметов — был изобретен английским физиком Д. Габором (1900–1979) в 1947 г. За это открытие Д. Габор в 1971 г. был удостоен Нобелевской премии. В первые годы после открытия голографии ей уделяли недостаточное внимание. Основная причина заключалась в том, что невозможно было получить четкой интерференционной картинке с помощью световых волн, испускаемых нагретыми телами. Но после изобретения лазеров, источников лучей с высокой степенью монохроматичности, наметился резкий поворот к практическому применению этого метода.

Основы голографии. Теперь приступим к изучению основ голографии. Как же происходят регистрация и восстановление информации о предмете (его изображении)? Для этого надо регистрировать и восстанавливать амплитуду и фазу идущей от предмета волны. Это можно сделать на практике. При интерференции распределение интенсивности



Д. ГАБОР
(1900–1979)

в интерференционной картине определяется как амплитудой, так и разностью их фаз (см. § 7).

Поэтому для регистрации как фазовой, так и амплитудной информации, кроме волны, идущей от предмета (предметная волна), используют когерентную с ней волну, идущую от источника света (опорную волну).

Идея голографирования состоит в том, что фотографируется распределение интенсивности на интерференционной картине, возникающей при суперпозиции предметной и опорной волны. Затем фотопластинка проявится, и зафиксированные потемневшие распределения вновь восстанавливаются с помощью дифракции, и даже если нет объекта наблюдения, возникает возможность его изучения.

Получение голограммы. Голограммой называется интерференционная картина, образованная при сложении опорной и предметной волны и зарегистрированная на фотопластинке. Эта идея осуществлена с помощью схемы, приведенной на рис. 24, а.

Лазерный луч делится на две части, одна из которых отражается зеркалом на фотопластинку (опорная волна), а вторая попадает на фотопластинку, отразившись от предмета (предметная волна). Так как эти волны когерентны, они образуют на фотопластинке интерференционную картину. На фотопластинке получают интерференционную картину от опорной волны и от волны, отраженной от предмета, пластинку проявляют и получают голограмму.

Восстановление голографической картины. Для восстановления изображения голограмма помещается на прежнее место (рис. 24, б). Его освещают опорным лучом, а часть лазерного луча перекрывается. В результате дифракции света на интерференционной структуре голограммы восстанавливается копия предметной волны, т.е. объемное мнимое изображение предмета. На картинке отображаются все присущие предмету свойства и его расположение в том месте, где предмет находился при голографировании. Он кажется настолько реальным, что его хочется потрогать. Кроме того, если теперь вести наблюдение справа от голограммы под острым углом, то можно увидеть и действительное изображение. Но в этом случае рельеф предмета изменится на обратный. Например, вогнутые места будут выпуклыми, и наоборот. Но обычно используют мнимое изображение, которое создает иллюзию реального предмета.

Следует отметить, что даже часть голограммы позволяет восстановить полное изображение. Но если эта часть будет

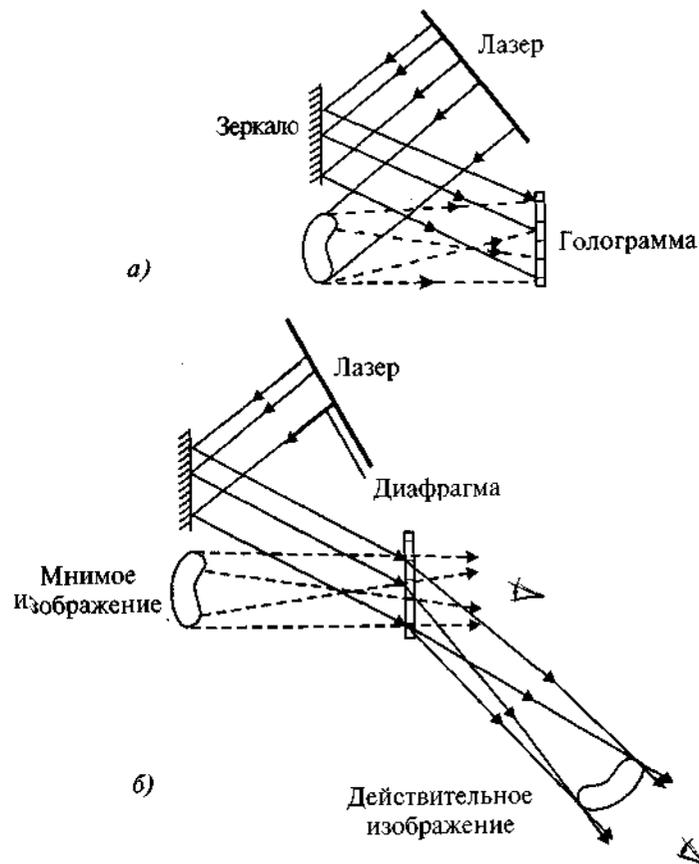


Рис. 24

Маленькой, то это приведет к ухудшению четкости изображения.

Применение голографии. Метод голографии в настоящее время используется во многих областях. Но основными из них являются запись и хранение информации. Метод голографии по сравнению с методом микрофотографии позволяет при одинаковом объеме записать в сотни раз больше информации. Например, на фотопластинке размером 32×32 мм можно записать 1024 голограммы площадью каждой из них 1 мм^2 , т.е. вместить книгу объемом в 1024 страницы. В настоящее время начинают развиваться такие перспективные направления, как применение ЭВМ с голографической памятью, голографического Электронного микроскопа, а также голографическое кино и Телевидение, голографическая интерферометрия и т.д.



Вопросы для самопроверки

1. Что означает слово «голография» и что это за метод? 2. Кто и когда изобрел голографию? 3. Когда начали серьезно относиться к применению голографии и почему? 4. Какую волну называют предметной волной? 5. А опорной волной? 6. Интерferируют ли эти волны? 7. В чем заключается основная идея голографии? 8. Что называют голограммой? 9. Объясните схему на рисунке 24, а. 10. Какие лучи создают интерференционную картину на фотопластинке? 11. Как образуется голограмма? 12. Что делают с голограммой, чтобы восстановить картину? 13. Объясните состояние на рис. 24, б. 14. Какие лучи создают дифракционную картину? 15. Что выполняет роль дифракционной решетки? 16. Что возникает в результате дифракции? 17. Каково изображение предмета и где оно возникает? 18. Как восстанавливается действительное изображение предмета? 19. Может ли часть голограммы восстановить изображение? 20. С какой целью пользуются голографией и в чем ее преимущество? 21. Книгу какого объема можно вместить на одной фотопластинке? 22. В каких областях можно использовать голографию в будущем?

§ 12. Поляризация света. Поляризаторы

Содержание: естественный свет; поляризованный свет; поляризация механических волн; поляризаторы; закон Малюса; закон Брюстера; использование поляризации.

Естественный свет. Нам известно, что, в соответствии с теорией Максвелла, свет состоит из поперечных волн, векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей взаимно перпендикулярны и колеблются в плоскости, перпендикулярной вектору скорости \vec{v} распространения волны. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора, т.е. вектора напряженности \vec{E} электрического поля.

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Так как эти излучения производятся независимо друг от друга, распределения светового вектора по всем направлениям одинаково (рис. 25, а).

Свет, у которого \vec{E} вектор распределен по всем направлениям одинаково, называют *естественным светом*.

Поляризованный свет. *Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний каким-либо образом упорядочены.*

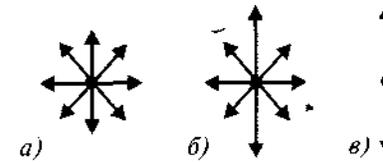


Рис. 25

Скажем, если в результате каких-либо внешних воздействий проявляется преимущественное направление колебаний вектора \vec{E} (рис. 25, б), такой свет называют *частично поляризованным*.

Свет, в котором вектор \vec{E} колеблется в определенной плоскости, называется *плоско-поляризованным (линейно-поляризованным)*.

Плоскость, в которой лежат направления колебания вектора \vec{E} плоско-поляризованного света и направление распространения волны, называется *плоскостью поляризации*.

Поляризация механических волн. Чтобы лучше представить себе поляризацию световых волн, познакомимся с поляризацией механических волн.

В продольных волнах (звуковые волны) направление колебания совпадает с направлением распространения. В поперечных же волнах направление колебания перпендикулярно направлению распространения.

Так же бесконечно много направлений, перпендикулярных направлению распространения волны (рис. 26, а).

Чтобы создать поляризованную волну, проведем следующий опыт. Пусть поперечная волна движется по шнуру SO и на ее пути находится препятствие с щелью (рис. 26, б). Даже если волна может колебаться во всех направлениях, перпендикулярных направлению движения, через препятствие проходят волны, параллельные щели AB , другими словами, это направление имеет преимущество перед другими, т.е. волна поляризуется. Если теперь препятствие, а значит, щель повернуть на 90° (рис. 26, в), колебания не проходят сквозь нее и гаснут. Опыт показывает, что колебание на шнуре поперечное, а поляризация — это свойство, присущее поперечным волнам. Продольные волны переходят через щель независимо от их направления.

Поляризаторы. Теперь, чтобы определить природу световых волн, проведем опыт, похожий на уже проведенный. Воз-

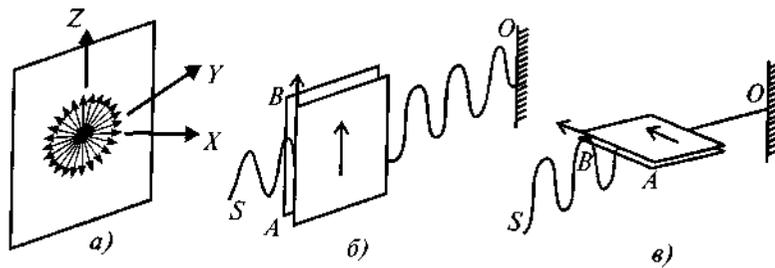


Рис. 26

никает вопрос, что может выполнить роль препятствия с «щелью» для случая световой волны.

Эту задачу могут выполнить некоторые кристаллы, например, *турмалин*. Так как эти кристаллы имеют свойство анизотропии, они пропускают световые колебания определенного направления, а остальные не пропускают. Другими словами, они имеют свойство поляризовать свет, и поэтому их называют *поляризаторами*.

Свойство световых волн поляризоваться говорит о том, что они являются поперечными.

Закон Малюса. Теперь проведем опыт с турмалином. Для этого естественный свет направляется перпендикулярно оптической оси OO' пластинки турмалина (рис. 27). (Если пластинка турмалина выполняет роль препятствия, приведенного на рис. 26, то его оптическая ось OO' выполняет роль щели. *Оптической осью* называют направление в турмалине, по которому колебания проходят без изменения). Вращая первый турмалин вокруг направления луча, видим, что интенсивность проходящего через турмалин света остается неизменной. Если теперь на пути луча поставим вторую пластинку турмалина T_2 и будем вращать ее вокруг направления луча, наблюдается изменение интенсивности проходящего света. Интенсивность выходящего из второй пластинки света зависит от угла α между оптическими осями кристаллов турмалина (рис. 28) и связана с интенсивностью падающего света по закону, названному в честь французского физика Э. Малюса (1775–1812):

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (12.1)$$

где I — интенсивность света, выходящего из второй пластинки, I_0 — интенсивность света после первой пластинки.

Если $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то $\cos \alpha = 0$ и $I = 0$, т.е. вторая пластинка гасит световую волну. Это, в свою очередь, показывает, что через

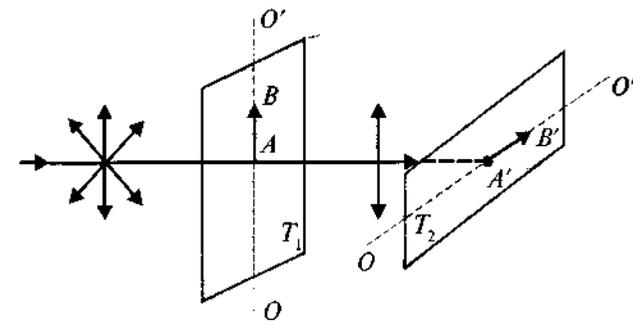


Рис. 27

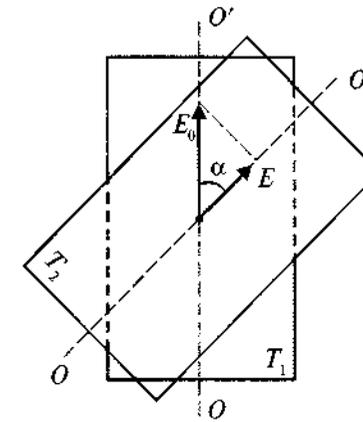


Рис. 28

первую пластину проходят волны, колеблющиеся в определенном направлении (на рис. 27 это направление показано стрелкой AB), другими словами, это показывает, что первый турмалин превращает естественный свет в плоско-поляризованный.

Закон Брюстера. Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и воды), часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Устанавливая на пути этих лучей пластинку турмалина, убеждаемся в том, что они частично поляризованы. опыты показывают, что в отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (на рис. 29 они обозначены точками), а в преломленном — колебания, параллельные плоскости падения (изображены стрелками).

Степень поляризации зависит от угла падения и показателя преломления. Шотландский физик О. Брюстер (1781–1868)

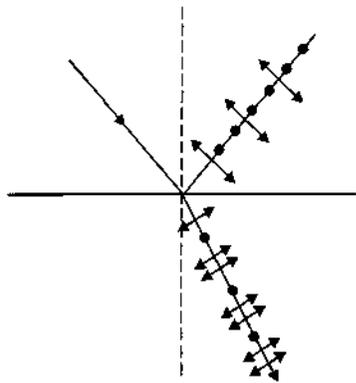


Рис. 29

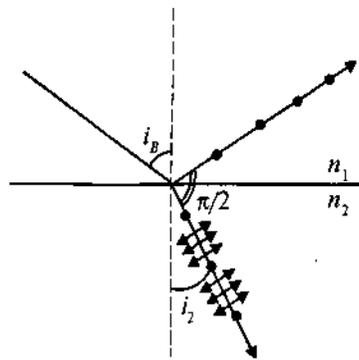


Рис. 30

установил закон, согласно которому угол падения i_B (n_1) определяется соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}, \quad (12.2)$$

где n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой.

Если естественный свет падает на границу диэлектриков под углом Брюстера, то отраженный луч является плоско-поляризованным (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения) (рис. 30). Преломленный же луч поляризуется максимально (но не полностью).

Использование поляризации. Явление поляризации широко применяется в народном хозяйстве. Примером этого может служить определение места упругого напряжения при механических нагрузках, изучение быстро протекающих процессов при записи и воспроизведении звука.

Опыты показывают, что при прохождении поляризованного света через некоторые кристаллы и растворы органических веществ наблюдается вращение плоскости поляризации. *Вещества, поворачивающие плоскость поляризации, называются оптически активными веществами.* Примером таких веществ могут быть кварц, раствор сахара в воде и др. Именно это явление широко используется при определении концентрации оптически активных веществ.



Вопросы для самопроверки

1. Какой волной является свет, согласно теории Максвелла?
2. Какой вектор называется световым? 3. Как распределяется свето-

- вой вектор по всем направлениям? 4. Какой свет называют естественным? 5. Какой свет называют поляризованным? 6. Какой свет называют частично поляризованным? А плоско-поляризованным? 7. Какую плоскость называют плоскостью поляризации? 8. Какую механическую волну называют поляризованной? 9. Если преграду повернуть на 90° , что при этом произойдет? Объясните причину. 10. Какие механические волны могут поляризоваться? 11. Какими свойствами обладает турмалин? 12. Как объясняются эти свойства турмалина? 13. Что называют поляризатором? 14. На основании чего можно говорить, что свет состоит из поперечных волн? 15. Как меняется составляющая колебания, направленная по оптической оси турмалина? 16. Изменяется ли интенсивность света при повороте первого турмалина? А при повороте второго? 17. Зависит ли свет, вышедший из второго турмалина, от угла между оптическими осями турмалина? 18. Чему будет равна интенсивность света после второго турмалина при $\alpha = \frac{\pi}{2}$? 19. Объясните состояние на рис. 27. 20. Объясните закон Малюса. 21. Объясните рис. 28. 22. Что произойдет, если свет упадет на границу раздела двух диэлектриков? 23. Как будут поляризованы отраженные и преломленные лучи? 24. Объясните закон Брюстера. 25. Какие вещества называются оптически активными? 26. Где используется явление поляризации?

§ 13. Дисперсия света

Содержание: дисперсия света; природа дисперсии света; сложение цветов спектра; цвет веществ; виды спектров; значение дисперсии; поглощение света.

Дисперсия света. Слово «дисперсия» (*лат.* dispersio) означает «рассеяние». Первым, кто изучил дисперсию света, считается английский физик И. Ньютон. Он пропустил пучок света через стеклянную призму и наблюдал на экране изображение с радужным чередованием цветов, т.е. спектр (рис. 31). И. Ньютон определил, что белый свет состоит из семи основных цветов — красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового. Разложение белого света при его прохождении через призму на различные цвета есть результат дисперсии.

Дисперсией называют зависимость показателя преломления среды от длины волны (частоты) падающего света.

Таким образом, дисперсия является одним из процессов, который объясняет волновую природу света и где важную роль играет длина волны.

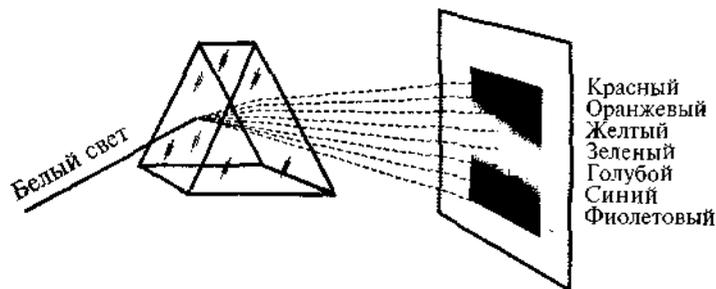


Рис. 31

Природа дисперсии света. В вакууме скорость распространения электромагнитной волны с любой длиной одинаковая ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), а в веществах она зависит от длины волны. Поэтому показатель преломления для разных длин волн, входящих в состав белого света, будет различным. В результате при прохождении через призму разным длинам волн будут соответствовать различные показатели преломления: они преломляются по-разному и поэтому на выходе разделяются.

Следует отметить, что явление дисперсии наблюдается не только на призме, но и во многих других случаях. Например, преломление солнечного луча на каплях воды, образующихся в атмосфере, приводит к разложению его на разные цвета и появлению радуги.

В нормальной дисперсии с увеличением длины волны показатель преломления среды уменьшается. Поэтому на верху спектра располагаются красные лучи, имеющие большую длину, а внизу — фиолетовые с меньшей длиной волны. Остальные цвета тоже располагаются по мере уменьшения длины волны.

Внизу приводится зависимость показателя преломления некоторых веществ от длины волны.

Таблица 2

λ , μm	n		
	Флюорит	Кварц	Поваренная соль
0,2	1,5	1,65	1,75
1,6	1,43	1,53	1,53
3,2	1,41	1,47	1,51

Сложение цветов спектра. Продолжив свой опыт, Ньютон линзой собрал цветные лучи, вышедшие из призмы, в одно место и получил на экране белый свет. Значит, в результате сложения цветных лучей получается белый свет, т.е. семь цветных лучей, полученных в результате дисперсии (рис. 32).

В общем, можно сложить два (или больше) цветов и получить *белый цвет*. Примером могут быть желтый и синий цвет. При сложении в определенной пропорции трех основных цветов — красного, зеленого и фиолетового — можно получить различные цвета.

Цвет веществ. Цвет прозрачного тела (не отражающий и не поглощающий) определяется составом проходящего через него света.

Если на покрашенное краской стекло падает белый свет, тогда стекло, в основном, пропускает луч цвета краски. Например, стекло, покрашенное красной краской, пропускает луч красного цвета, а покрашенное зеленой — луч зеленого цвета и т.д. На этом свойстве основывается использование различных цветовых фильтров.

Что происходит, если тело отражает падающий на него свет? Естественно, тело будет иметь этот цвет. Например, тело красного цвета отражает луч красного цвета, а тело зеленого — луч зеленого цвета. Цвет непрозрачного тела определяется смесью цветов отраженного им света. Значит, нанесение на тело краски какого-либо цвета — это нанесение на тело вещества, отражающего луч этого цвета.

Тела, отражающие лучи всех цветов, будут выглядеть белыми. Тело, поглощающее весь падающий на него свет, будет черным. В природе не существует абсолютно черного и абсолютно белого тела. То есть все тела в какой-то мере отражают и поглощают свет.

Виды спектров. Спектры, полученные в результате дифракции и дисперсии, резко отличаются друг от друга. Свет,

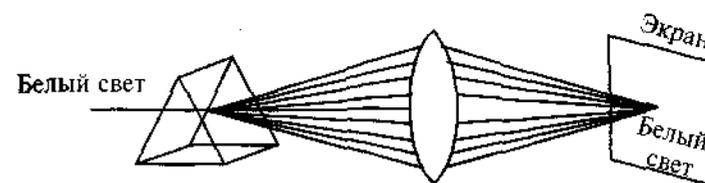


Рис. 32

падающий на дифракционную решетку, распределяется на дифракционные максимумы в зависимости от длины волны. Синус угла преломления пропорционален длине волны (см. выражение 10.6). Поэтому *красные лучи, имеющие большую длину волны, отклоняются больше, чем фиолетовые, имеющие меньшую длину волны.*

При дисперсии же свет разлагается в зависимости от показателя преломления среды. С увеличением длины волны падающего света уменьшается показатель преломления призмы (см. табл. 2). Поэтому *красные лучи, имеющие большую длину волны, отклоняются меньше, чем фиолетовые, имеющие меньшую длину волны.*

Значение дисперсии. Открытие явления дисперсии позволило получить важную информацию о природе света, а с помощью излучения — информацию о строении вещества.

Кроме того, сведения, полученные о цветах, играют важную роль при выполнении оформительских работ и выборе необходимых цветов. Другими словами, можно определить, какую и сколько добавить краску, чтобы получить нужный цвет.

Поглощение света. *Поглощением (абсорбцией) света называется явление потери энергии световой волны, проходящей через вещество.* Причина этого — преобразование энергии волны во внутреннюю энергию вещества. В результате поглощения изменяется интенсивность прошедшего света.

Поглощение света в веществе определяется законом Бутера:

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где I и I_0 — интенсивности падающего и прошедшего через вещество толщиной x световой волны соответственно;

α — коэффициент поглощения, величина, зависящая от химического состава вещества, состояния и длины волны падающего излучения.



Вопросы для самопроверки

1. Какое значение имеет слово «дисперсия»? 2. Кто первым наблюдал явление дисперсии? 3. Объясните опыты Ньютона. 4. Что называют дисперсией? 5. Как происходит явление дисперсии? 6. Как возникает радуга? 7. Как меняется показатель преломления среды с увеличением длины световой волны? 8. Почему в спектре дисперсии наверху располагается красный, а внизу — фиолетовый цвет? 9. Пе-

редайте содержание табл. 2. 10. Объясните картинку на рис. 33. 11. Какой вывод можно сделать, глядя на экран? 12. Какие цвета называют дополнительными? 13. Какое тело называется прозрачным? 14. Как определяется цвет прозрачного тела? 15. Какой цвет пропускает покрашенное стекло? 16. На чем основываются при изготовлении стеклянных призм? 17. Если тело отражает какой-то свет, то как изменяется его цвет? 18. Какого цвета излучение отражает желтое тело? 19. Как определяется цвет непрозрачного тела? 20. Что означает окраска тел? 21. Какое тело отражает все цвета? 22. Какое тело поглощает весь падающий на него свет? 23. Имеется ли в природе абсолютно черное и абсолютно белое тело? 24. Как отклоняются лучи в дифракционном спектре? 25. А в спектре дисперсии? 26. Что называется поглощением (абсорбцией) света? 27. Изменяется ли интенсивность света, проходящего через тело в результате поглощения? 28. Назовите формулу закона Бутера. 29. Что называется коэффициентом поглощения? 30. От чего зависит коэффициент поглощения?

§ 14. Спектры испускания и поглощения. Спектральный анализ

Содержание: спектр испускания; спектр поглощения; спектры Солнца и звезд; понятие о спектральном анализе; спектральные приборы; применение спектрального анализа.

Спектр испускания. Любое нагретое тело излучает электромагнитные волны. Совокупность этих волн называется *спектром испускания*. В зависимости от состояния вещества и механизма излучения спектры испускания бывают различными.

Если свет, излучаемый нагретым твердым телом, пропустить через призму, на экране появится целый, непрерывный спектр испускания.

Если газ или пар становится источником света, то вид спектра резко меняется. Наблюдается совокупность ярких линий, отделенных темными полосами. Такие спектры называются *линейными*. Примером линейных спектров могут быть спектры натрия, водорода и гелия (рис. 33, а, б, в).

Вид спектров испускания газов зависит от химической природы газа. Каждый газ или пар имеет спектр, присущий только ему. Поэтому по виду спектра испускания газа можно определить его химический состав.

Если источником испускания являются молекулы вещества, то наблюдается полосатый спектр.

Спектр поглощения. Кроме рассмотренных выше спектров испускания, существуют еще и спектры поглощения. Они получаются следующим образом. Белый свет пропускают через исследуемое вещество и направляют в спектральный прибор. Здесь в сплошном спектре будут видны черные линии, расположенные в определенном порядке. Число и расположение этих линий дает возможность говорить о составе исследуемого вещества. Например, если на пути белого света будут находиться пары ртути, то в этом случае на месте желтой линии в спектре испускания будет черная линия в спектре поглощения (рис. 33, а и 33, в). Этому явлению Кирхгоф дал следующее объяснение: *атом поглощает ту длину волны, которую он излучает.*

На рис. 33, д, е, ж показаны спектры поглощения натрия, водорода и гелия. На рисунке 33, г показан спектр Солнца, доказывающий, что в его состав входят приведенные выше вещества.

В дальнейшем мы вернемся к обсуждению спектров испускания и поглощения атомов.

Спектры Солнца и звезд. Солнце и звезды в зависимости от температуры и цвета делятся на следующие виды: у самых горячих звезд температура равна порядка 100000 К; у голубых звезд — 30000 К; у желтых звезд — порядка 6000 К, а у самых холодных звезд — порядка 3000 К (Солнце является самой близкой к нам звездой, температура поверхности которой равна 6000 К).

Источником энергии звезд является реакция превращения водорода в гелий в недрах звезд при температуре 10000000 К. Поэтому основную часть атмосферы всех звезд (в том числе и Солнца) составляют водород и гелий.

Спектры звезд показывают, что в их составе, кроме водорода и гелия, имеются различные химические соединения и элементы. Если в спектрах очень горячих звезд выделяются яркие линии, характерные для водорода и гелия, то в спектрах холодных звезд больше встречаются линии поглощения различных молекулярных соединений.

Можно убедиться, что спектр Солнца содержит множество линий (рис. 33, г). Эти линии названы в честь Фраунгофера, первым наблюдавшим их, *фраунгоферовыми*. По мнению Кирхгофа, эти линии есть спектры поглощения элементов, входящих в состав атмосферы Солнца и звезд. В зависимости от места этих линий в спектре можно судить, через какие вещества в атмосфере Солнца проходит солнечный луч.

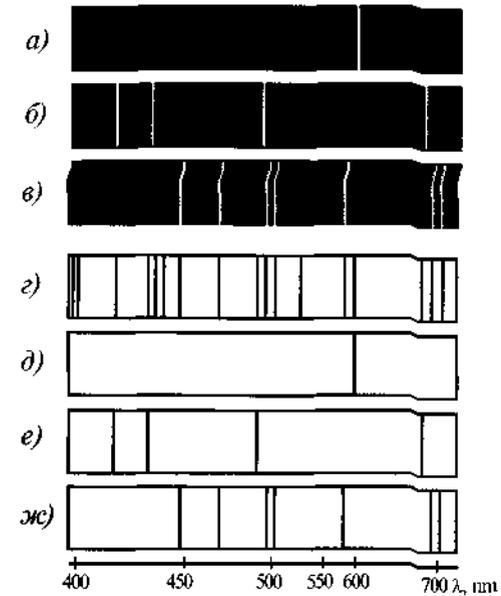


Рис. 33

В атмосфере Солнца присутствуют такие элементы, как водород, натрий, кальций, железо и другие, которые имеются на Земле. Изучение спектра Солнца показало существование не известного до этого времени элемента. Его назвали гелий (*греч. gelios — «солнце»*). Спустя 26 лет гелий был открыт на Земле.

Понятие о спектральном анализе. Было отмечено, что изучение спектров испускания и поглощения дает возможность определить состав веществ. Яркость этих линий дает возможность определить количество элемента в соединении. **Спектральным анализом** называется метод исследования химического состава различных веществ по их спектрам испускания и поглощения.

Например, если в спектре имеется желтая линия, это показывает, что в составе изучаемого вещества содержится натрий. Если в спектре обнаружится ранее не известная линия, то это говорит о том, что открыт новый элемент. Спектральный анализ — очень чувствительный метод, с его помощью можно определить количество элемента 10^{-10} г. Определить такое малое количество вещества химическим методом абсолютно невозможно.

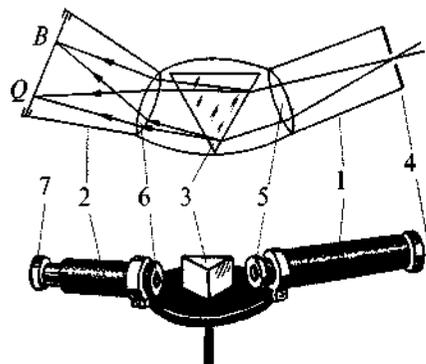


Рис. 34

Спектральные приборы.

Для изучения спектра в видимой области используется прибор *спектроскоп*. Самый простой спектроскоп приведен на рис. 34. Он состоит из: спектроскопического коллиматора — 1; зрительной трубы с призмой — 2; столика с призмой — 3; щели — 4; линзы — 5; объектива — 6 и окуляра — 7. Луч света, идущий от щели через

коллиматор, попадает на линзу. После призмы луч разлагается на различные цвета и наблюдается с помощью зрительной трубы и окуляра.

Прибор, позволяющий сфотографировать спектр, называется *спектрографом*.

Еще более усовершенствованный, т.е. снабженный третьей трубой, прибор называется *спектрометром*.

Применение спектрального анализа. Спектральный анализ имеет огромное значение для науки. Особое значение он имеет для астрономии. Единственный путь получения сведений о составе небесных тел — это *спектральный анализ*. Этим методом изучались состав Солнца, звезд и звездных скоплений, было открыто 25 элементов таблицы элементов Менделеева. В настоящее время спектральный анализ широко используется в геологии, металлургии, химии, медицине и в пищевой промышленности.

? Вопросы для самопроверки

1. Что называют спектром испускания? 2. Какие виды спектров испускания вы знаете? 3. Какой спектр называют линейным? 4. Зависит ли от природы света спектр испускания? 5. Как образуются спектры поглощения? 6. Какой вид имеют спектры поглощения? 7. Сравните рис. 33, а и д. 8. Какую мысль высказал Кирхгоф о спектрах? 9. Сравните рисунки 33, б и в, 33, е и ж. 10. Какими бывают спектры Солнца и звезд? 11. Солнце — это звезда? 12. На сколько видов делятся звезды по цвету? К какому виду относится Солнце? 13. Что является источником

энергии звезд? 14. Из каких элементов состоит основная масса атмосферы звезд? 15. Сравните рисунок 33, з с другими рисунками и проанализируйте их. 16. Какие линии называются фраунгоферовыми линиями? 17. Как Кирхгоф охарактеризовал фраунгоферовы линии? 18. Какие одинаковые элементы имеются на Земле и в составе Солнца? 19. Как был открыт гелий? 20. Как можно определить состав вещества с помощью спектрального анализа? 21. Какое количество вещества можно зарегистрировать этим методом? 22. С какой целью используется спектроскоп? 23. Что это за прибор — спектрограф? А спектрометр? 24. Значение спектрального анализа. 25. Приведите примеры применения спектрального анализа.

§ 15. Шкала электромагнитных волн.

Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи

Содержание: шкала электромагнитных волн; инфракрасные лучи; ультрафиолетовые лучи.

Шкала электромагнитных волн. В § 122 части I учебника были даны сведения о шкале электромагнитных волн. Там мы в основном вели речь о радиоволнах. Далее мы изучили видимые глазом световые волны длиной волны от $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ до $7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$. Продолжая изучать шкалу электромагнитных волн, теперь будем изучать инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. О рентгеновских лучах будем говорить в следующей теме, а на γ -лучах остановимся в следующей главе.

Инфракрасные лучи. Инфракрасные лучи в шкале электромагнитных волн располагаются между радиоволнами и видимым глазу красным светом. Длина его волны лежит в пределах от 2 мм до 760 нм. Так как частота у этих лучей меньше, чем у красного луча, его называют *инфракрасным*, т.е. ниже, чем у красного. Он был открыт в 1800 г. английским ученым В. Гершелем. Инфракрасные лучи отличаются очень большой энергией. Эти лучи сильно нагревают то место, куда попадают, и поэтому их называли *тепловыми*.

Источниками инфракрасного излучения могут быть лампы накаливания с вольфрамовой нитью и различные лампы, наполненные газом. Самым сильным естественным источником инфракрасного излучения является Солнце. Почти половину солнечного излучения составляют инфракрасные лучи. Они поглощаются тканями организма человека и других живых организмов и оказывают положительное влияние на ход

всех биологических процессов. Инфракрасные лучи имеют большое значение для сельского хозяйства. Проникая через стекло и пленку в парниках, они превращаются в тепловую энергию (парниковый эффект). Эти лучи также используются для сушки фруктов, овощей и др. Существуют приборы, преобразующие инфракрасное изображение в видимое. С помощью инфракрасных лучей можно отмечать местоположение тел в темноте. Инфракрасные лазеры используются на земле и в космосе для установления связи.

Ультрафиолетовые лучи. Ультрафиолетовые лучи следуют после фиолетовых лучей, длина их волны находится в пределах от 400 до 10 нм. (Слово «ультрафиолетовый» означает, что у этих лучей частота больше, чем у фиолетовых, другими словами, означает «сильно фиолетовый»).

Ультрафиолетовые лучи не видимы глазу и условно делятся на: близкие ультрафиолетовые лучи (длиной волны 400–200 нм), открытые в 1801 г. немецким физиком И. Риттером и английским физиком У. Волластоном; далекий и вакуумный ультрафиолет (200–10 нм) были изучены немецким физиком В. Шуманом и английским физиком Т. Лайманом.

Источником ультрафиолетовых лучей могут быть тела, нагретые до 3000 К. Роль таких источников выполняют ртутные, неоновые и другие лампы и любая высокотемпературная плазма.

Естественными источниками ультрафиолетового излучения могут считаться Солнце, звезды и другие космические тела.

Ультрафиолетовые лучи оказывают сильное биологическое воздействие на живые организмы и человека. Ультрафиолетовые лучи длиной волны 400–320 нм оказывают закаливающее и оздоравливающее действие, помогают образованию в организме витамина Д. Лучи длиной волны 320–280 нм приводят к загару, а 280–210 нм – обладают бактерицидным действием. В больших дозах эти лучи приводят к поражению сетчатки глаза и ожогам на теле.

Ультрафиолетовые лучи сильно поглощаются атмосферой Земли, поэтому их изучают высоко в горах. Обычно их фиксируют на фото- и люминесцентных материалах, превращающих ультрафиолетовые лучи в видимые, а затем изучают.

Изучение областей ультрафиолетового излучения в спектрах испускания и поглощения помогает получить представление об электронном строении атомов, молекул, ионов и твер-

дых тел. Изучение этих лучей дает сведения о небесных телах. Изучение влияния ультрафиолетовых лучей на материалы широко используется в криминалистике и искусствоведении. С помощью ультрафиолетовых лучей можно также определить содержание в атмосфере различных вредных соединений.



Вопросы для самопроверки

1. Проанализируйте шкалу электромагнитных волн. 2. Какие лучи называются инфракрасными? 3. Что означает слово «инфракрасный»? 4. Какова длина волны инфракрасного излучения? 5. Кем и когда оно было открыто? 6. Чему равна энергия инфракрасного излучения? 7. Что является источником инфракрасного излучения? 8. Каково биологическое воздействие инфракрасных лучей? 9. Какова роль инфракрасного излучения в сельском хозяйстве? 10. Приведите примеры применения инфракрасного излучения. 11. Опишите ультрафиолетовые лучи. 12. Что означает слово «ультрафиолетовый»? 13. Видимы ли ультрафиолетовые лучи? 14. Что является источником ультрафиолетовых лучей? 15. Каково биологическое воздействие ультрафиолетовых лучей? 16. Почему ультрафиолетовые лучи изучаются в высокогорных районах? 17. В чем заключается значение ультрафиолетовых лучей?

§ 16. Рентгеновские лучи

Содержание: рентгеновские лучи; рентгеновская трубка; рентгеновские лучи – это электромагнитные волны; применение рентгеновских лучей.

Рентгеновские лучи. В 1895 г. немецкий физик В. Рентген, изучая процесс протекания тока в газах, открыл неизвестный луч. Позднее эти лучи назвали *рентгеновскими*. Они были зафиксированы по характерному зеленому излучению, появляющемуся в месте попадания высокоскоростных электронов, вылетающих из катода. Рентген определил, что эти лучи имеют способность легко проходить сквозь непрозрачные тела, такие, как человеческое тело, черная бумага, картон и тонкие металлические листы.

Рентгеновская трубка. Чтобы получить представление о механизме появления рентгеновских лучей, ознакомимся со специальным устройством для их получения – *рентгеновской трубкой* (рис. 35). Рентгеновская трубка состоит из стеклянного баллона, давление внутри которого равно 0,1 мПа. Вольф-



В. РЕНТГЕН
(1845–1923)

рамовый катод, изготовленный в виде спирали, является источником электронов. Поток электронов, появляющихся за счет термоэлектронной эмиссии, ускоряется в сильном электрическом поле. Ускоренный поток электронов попадает на тяжелый анод, установленный под углом 45° . Причина такого расположения анода — это необходимость управления направлением выходящих из него лучей.

Электрон, получивший кинетическую энер-

гию $E_k = \frac{mv^2}{2} = eU$ в ускоряющем поле, тормозится в веществе анода. В результате торможения высокоскоростных электронов в аноде появляется рентгеновское излучение.

Возникающее в результате торможения рентгеновское излучение имеет непрерывный, сплошной спектр, так как скорость электронов, ударяющихся в анод, а значит, и кинетическая энергия различны. Следует отметить, что энергия рентгеновских лучей не может быть больше энергии электронов, создающих их.

Мы ознакомились с механизмом появления рентгеновских лучей, но еще не ответили на вопрос, а какова природа этих лучей.

Рентгеновские лучи — это электромагнитные волны. Определение рентгеновских лучей как электромагнитных волн возникло с первых дней их открытия. Но чтобы убедиться в этом, следовало доказать, что рентгеновские лучи обладают волновым «свойством». Все попытки получить дифракцию рентгеновских лучей на щели потерпели неудачу. Но в 1912 г. немецкий физик М. Лауэ предложил в качестве дифракционной решетки использовать кристаллы и разработал теорию дифракции рентгеновских лучей в кристаллах, поскольку кристаллическая решетка с расстоянием между узлами порядка нескольких нанометров, расположенными в определенном порядке, может выполнять роль дифракционной решетки. Опыты, проведенные В. Фридрихом и П. Книппингом, полностью подтвердили теорию М. Лауэ и позволили наблюдать дифракцию рентгеновских лучей. Таким образом, было доказано, что рентгеновские лучи являются электромагнитными волнами. Рентгеновские лучи в шкале электромагнитных волн располагаются между ультрафиолетовыми и γ -лучами и являются электромагнитной волной длиной от 100 до 10^{-5} нм.

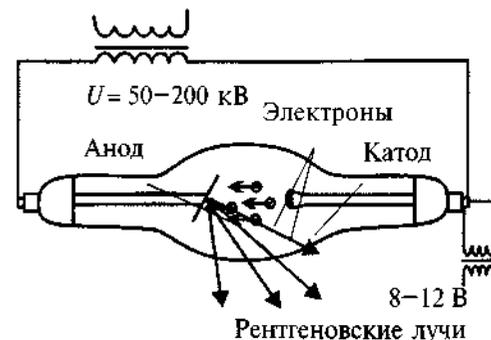


Рис. 35

Применение рентгеновских лучей. Высокая проникающая способность рентгеновских лучей, действие на фотопластины, способность вызывать ионизацию в веществах, сквозь которые эти лучи проходят, дали возможность широко применять их в науке, технике и на практике. Самая широкая область применения рентгеновских лучей — это рентгеновская дефектоскопия. Целью этого метода является выявление с помощью рентгеновских лучей внутренних дефектов в телах, их места, величины и природы. Суть метода основана на различии поглощения рентгеновского излучения при прохождении неоднородных веществ. Удобным методом является фотографирование. Он особенно широко применяется в медицине (рентгенодиагностика).

С помощью дифракционной картины, возникающей на этих лучах, можно изучить строение вещества, определить расположение атомов. Этот метод называется *рентгеноструктурным анализом*.

Кроме того, рентгеновские лучи очень широко применяются при лечении различных заболеваний, в микроскопах, в спектроскопии, в спектральном анализе, в астрономии и во многих других областях.

? Вопросы для самопроверки

1. Кто и когда открыл рентгеновские лучи?
2. Как они были открыты?
3. Какие их свойства были установлены?
4. Как образуются рентгеновские лучи?
5. Опишите картину на рис. 35.
6. В чем заключается причина установления анода под углом 45° ?
7. Как образуются рентгеновские лучи?
8. Каков спектр тормозного рентгеновского излучения?
9. Почему энергия рентгеновских лучей не может быть больше энергии электронов, образующих их?
10. Для чего нужно было доказывать волновую природу рентгеновских лучей?
11. В чем зак-

лчается значение предложения М. Лауэ? 12. Была ли доказана экспериментально идея Лауэ? 13. Какой вывод можно сделать из результатов опыта? 14. Какова длина волны рентгеновских лучей? 15. Почему дифракция рентгеновских лучей не наблюдается на простой шели? 16. Какое свойство рентгеновских лучей способствовало их широкому применению? 17. В чем суть рентгеновской дефектоскопии? 18. Что позволяет определить рентгеноструктурный анализ? 19. Где еще используются рентгеновские лучи? 20. Приведите три примера использования рентгеновских лучей, в котором вы сами принимали участие.



Образцы решения задач

Задача 1. Пусть разность оптических путей лучей, вступающих в интерференцию, будет $\delta 1,9 \cdot 10^{-6}$ м. Определить длину волны для видимого цвета (от $7,6 \cdot 10^{-7}$ м до $3,8 \cdot 10^{-7}$ м): 1) для максимально усиленного; 2) для максимально ослабленного.

Подстановка в (2) выражение численных значений при

Дано:

$$\begin{aligned} \delta &= 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ м;} \\ \lambda_1 &= 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м;} \\ \lambda_2 &= 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м.} \end{aligned}$$

$$1) \lambda_{\max} = ?$$

$$2) \lambda_{\min} = ?$$

Решение:

1. Максимальное усиление световых волн в результате интерференции определяется из следующего условия:

$$\delta = k\lambda, \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

$$\text{Отсюда:} \quad \lambda = \frac{\delta}{k} \quad (2)$$

значении k , равном $k = 3, k = 4, k = 5$, длины волн лежат в требуемом интервале:

2. Максимальное ослабление световых волн в результате

$$\lambda_{\max} = \frac{1,9 \cdot 10^{-6}}{3} = 6,33 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 3)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1,9 \cdot 10^{-6}}{4} = 4,75 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 4)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1,9 \cdot 10^{-6}}{5} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 5)$$

интерференции определяется из следующих условий:

$$\delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

Отсюда

$$\lambda = \frac{2\delta}{2k+1} \quad (4)$$

Подстановка численных значений в (4) при значении k , равном $k = 2, k = 3, k = 4$, длины волн лежат в требуемом интервале:

$$\lambda_{\min} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 2 + 1)} \text{ м} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 2)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 3 + 1)} \text{ м} = 5,43 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 3)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 4 + 1)} \text{ м} = 4,22 \cdot 10^{-7} \text{ м, } (k = 4)$$

Ответ:

$$1. \lambda_{\max} = 6,33 \cdot 10^{-7} \text{ м; } \lambda_{\max} = 4,75 \cdot 10^{-7} \text{ м; } \lambda_{\max} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$2. \lambda_{\min} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м; } \lambda_{\min} = 5,43 \cdot 10^{-7} \text{ м; } \lambda_{\min} = 4,22 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Задача 2. Какую длину волны может выделить дифракционная решетка для красного луча $5 \cdot 10^{-6}$ м в спектре второго порядка ($k = 2$), если ее ширина $S = 2$ см, а период $d = 5 \cdot 10^{-6}$ м.

Дано:

$$s = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$d = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м;}$$

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

$$k = 2.$$

$$\Delta\lambda = ?$$

Решение:

Способность решетки выделять определяется следующим образом:

$$kN = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Отсюда:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k \cdot N} \quad (2)$$

где

$$N = \frac{s}{d} \quad (3)$$

— число штрихов в дифракционной решетке, d — постоянная решетки. С учетом (3) перепишем (2):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda \cdot d}{k \cdot s} \quad (4)$$

Подставив численные значения, находим:

$$\lambda = \frac{7 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \text{ м} = 0,875 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Ответ: $\Delta\lambda = 0,875 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Задача 3. Угол Брюстера при падении луча из воздуха в поваренную соль равен $i_B = 57^\circ$. Найти скорость света в этом кристалле.

Дано:

$$i_B = 57^\circ;$$

$$n_1 = 1$$

$$v_2 = ?$$

Решение:

На основании закона Брюстера

ра

$$\text{tg } i_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1)$$

Если учесть, что $n_1 = 1$ и $n_2 = \frac{c}{v_2}$, получим

$$\text{tg } i_B = \frac{c}{v_2} \quad (2)$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ — скорость света в вакууме. Из выражения (2) находим v_2 :

$$v_2 = \frac{c}{\text{tg } i_B}. \quad (3)$$

Подставив численное значение величин, находим:

$$v_2 = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{tg } 57^\circ} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ: $2 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Задачи для самостоятельного решения

- Какой световой поток падает на поверхность 100 см^2 в солнечный день, если освещенность равна 100000 лк ($\Phi = 1000 \text{ лм}$).
- Луч света переходит из диэлектрика в вакуум. Найти скорость света в диэлектрике, если угол полного отражения равен 42° ($v_2 = 2,02 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).
- Луч света направлен из воздуха в стекло. Найти угол падения и преломления, если угол между падающим и отраженным лучом равен 90° ($n = 1,5$) ($i_1 = 56^\circ$, $i_2 = 34^\circ$).
- Найти показатель преломления спирта, если предельный угол полного отражения для спирта равен 47° ($n \approx 1,4$).

- Параллельный пучок монохроматического луча длиной волны $0,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ падает под углом $61^\circ 10'$ на мыльный пузырь, находящийся в воздухе. При какой толщине пленки наблюдается интерференционная картина, если наблюдения производятся при отраженном свете? ($d = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}$)
- Монохроматический луч длиной волны $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ нормально падает на щель шириной $0,589 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Определить все углы, где наблюдаются максимумы света. ($\varphi_1 = 26^\circ$; $\varphi_2 = 47^\circ 24'$)
- На дифракционную решетку, содержащую 500 штрихов на 1 мм падает плоская монохроматическая волна длиной $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Найти самый высокий порядок, который можно наблюдать, если луч падает перпендикулярно. ($k_{\text{max}} = 4$)
- Под каким углом к горизонту должно находиться солнце, чтобы отраженный от поверхности озера солнечный луч был максимально поляризован? ($\gamma = 37^\circ$)

Тестовые вопросы

- Длиной волны света называют...
 - Путь, пройденный за определенное время;
 - Путь, пройденный за один период;
 - Непрерывно распределяющийся свет;
 - Расстояние за очень короткое время.
- Какова природа света?
 - Корпускулярная;
 - Волновая;
 - Электромагнитная;
 - Дифракция;
 - Правильный ответ А и В.
- Как называется физическая величина, определяемая как отношение светового потока, распространяющегося от источника внутри фазового угла, к величине этого фазового угла?
 - Поток света;
 - Фотометрия;
 - Освещенность;
 - Сила света;
 - Поток излучения.
- Какова единица измерения светового потока в СИ?
 - Люкс;
 - Люмен;
 - Кандела;
 - Свеча;
 - Стерadian.
- Интерференционная картина, образованная на фотопластинке опорным и отраженным от предмета лучами, называется...
 - Дифракцией;
 - Голограммой;
 - Дисперсией;
 - Монохроматическими волнами;
 - Интерференцией.

Основные выводы главы

Световые волны состоят из световых волн длиной $4,0 \cdot 10^{-7} - 7,6 \cdot 10^{-7}$ м.

Скорость света имеет границу, для вакуума она равна $c = 300000$ км/с = 10^8 м/с.

Под лучом света понимают направление распространения световой энергии.

Абсолютный показатель преломления среды n определяется как отношение скорости света в вакууме к скорости света в среде $n = \frac{c}{v}$.

Формула тонкой линзы: $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

Принцип Гюйгенса: каждая точка среды, до которой дошла световая волна, становится точечным источником вторичных волн.

Когерентными называются волны, у которых равны частоты (длины волн равны и разность фаз остается постоянной).

Интерференцией света называется сложение двух (или нескольких) когерентных световых волн, в результате которого происходит перераспределение светового потока, т.е. усиление или ослабление результирующих световых колебаний в различных точках пространства.

Дифракцией света называется огибание световыми волнами препятствия и отклонение в сторону геометрической тени.

Голографией (греч. «полная запись») называется специальный метод восстановления записи и светового поля с помощью интерференционной картинки.

Поляризованным называется свет, в котором направления колебаний каким-то образом упорядочены.

Закон Малюса: $I = I_0 \cos^2 \alpha$.

Закон Брюстера: $\operatorname{tg} i_B = n_{21}$.

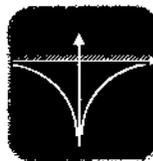
Дисперсией называется зависимость показателя преломления среды от длины волны (частоты) падающего света.

Излучением называется испускание нагретым телом потока электромагнитных волн.

Какую длину волны излучает атом — такую длину волны он поглощает.

Спектральным анализом называется метод исследования химического состава вещества и поглощения по их спектрам излучения.

Рентгеновские лучи являются электромагнитными волнами длиной от 100 нм до 10^{-5} км.



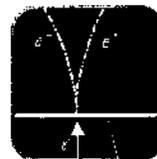
ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

В предыдущей главе мы познакомились с процессами, доказывающими (геометрическая оптика), что свет состоит из потока частиц (корпускулярная теория), а также процессами, доказывающими (интерференция, дифракция, поляризация), что свет состоит из электромагнитных волн (волновая теория). Кроме них, наблюдались явления фотоэффекта, эффекта Комптона, подтверждающие корпускулярную природу света. Итак, не пришло ли время поточнее ответить на вопрос: что такое свет?

Изученная до сих пор классическая механика бессильна объяснить строение атома и природу его спектра. Так какими будут законы движения атомов и элементарных частиц?

Поиск ответа на поставленные выше вопросы и увязка их друг с другом привели к созданию квантовой механики.

Ниже мы познакомимся с возникновением квантовой механики и с физическими процессами, получающими объяснение на ее основе, а точнее, с основами квантовой механики.



Глава II

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ

Как было отмечено выше, задача определения природы света была одной из основных проблем, стоявших перед физиками. Эта проблема особенно явно дала о себе знать в процессе изучения теплового излучения. На пути решения этой проблемы немецкий физик М. Планк выдвинул в 1900 г. смелую гипотезу о том, что «энергия испускается и поглощается только маленькими порциями, т.е. в виде квантов». В 1905 г. А. Эйнштейн создал свою формулу для явления фотоэффекта и развил гипотезу Планка.

Существование явлений, подтверждающих две природы света, стала причиной рождения идеи: а не обладает ли свет обоими этими свойствами? Это привело к появлению теории корпускулярно-волнового дуализма света.

§ 17. Тепловое излучение.

Законы теплового излучения

Содержание: тепловое излучение; характеристики теплового излучения; закон Кирхгофа; закон Стефана-Больцмана; закон смещения Вина.

Тепловое излучение. Тепловое излучение — это самое распространенное в природе электромагнитное излучение. Оно свойственно всем телам с температурой выше 0 К и совершается за счет внутренней энергии вещества. В результате уменьшается внутренняя энергия вещества, температура понижается, т.е. вещество остывает. Чтобы тело излучало тепло длительное время, надо постоянно восполнять уменьшающуюся энергию. Следует отметить, что тело одновременно с излучением поглощает энергию излучения, испускаемую другими телами. В результате этого растет внутренняя энергия тела, повышается температура, т.е. тело нагревается.

Значит, тело, с одной стороны, излучает энергию, с другой — поглощает ее. В результате в течение некоторого времени наступает равенство поглощаемой и испускаемой энергии, т.е. температура тела остается постоянной. Излучение в таком состоянии называется *тепловым равновесным излучением*.

Термодинамическим равновесием называется такое состояние системы, при котором термодинамические параметры системы остаются с течением времени неизменными.

Если не меняются внешние условия, то термодинамическая система сама собой не выходит из равновесного состояния.

Характеристики теплового излучения. Самой основной характеристикой излучения считается энергия излучения W .

Потоком излучения $\Phi_{из}$ называют величину, определяемую отношением энергии излучения W ко времени излучения t .

$$\Phi_{из} = \frac{W}{t}. \quad (17.1)$$

Другими словами, поток излучения характеризуется потоком энергии в единицу времени и измеряется в дж/с.

Излучением тела ($R_{из}$) называют величину, определяемую отношением потока излучения $\Phi_{из}$, испускаемого телом, к площади поверхности тела S :

$$R_{из} = \frac{\Phi_{из}}{S} \quad (17.2)$$

Следовательно, излучение — это поток излучения через единичную поверхность тела. Излучение измеряется в $\frac{Вт}{м^2}$.

Приведенные выше характеристики есть величины, присущие всему спектру излучения. На практике же имеет место излучение, относящееся к некоторому интервалу длин волн. Скажем, пусть будет рассматривается участок спектра с длиной волны $\Delta\lambda$. Часть энергии, относящаяся к этому промежутку, характеризуется спектральной плотностью излучения.

Спектральной плотностью излучения (R_{λ}) называют величину, определяемую отношением излучения ($\Delta R_{из}$), приходящегося на какую-то часть спектра, к длине волны $\Delta\lambda$ этой части:

$$r_{из} = \frac{\Delta_{из}}{\Delta\lambda} \quad (17.3)$$

Таким образом, спектральная плотность излучения — это излучение, приходящееся на единичную длину волны.

Спектральная плотность излучения измеряется в $\frac{Вт}{м^3}$ и зависит от температуры тела. С целью определения степени поглощения энергии излучения вводится понятие коэффициента поглощения.

Коэффициентом поглощения (α) называется отношение поглощенного телом потока излучения $\Phi_{из}$ к подаваемому на тело потоку излучения $\Phi'_{из}$.

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Delta\Phi_{из}}{\Delta\Phi'_{из}} \quad (17.4)$$

Коэффициент поглощения α можно рассматривать и для некоторого промежутка $\Delta\lambda$.

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Delta\Phi_{из\lambda}}{\Delta\Phi'_{из\lambda}} \quad (17.5)$$

Закон Кирхгофа. Пусть рассматриваемая нами система состоит из нескольких тел и обмен энергией между телами происходит только за счет излучения и поглощения. Другими словами, между телами не происходит теплообмена (через молекулы в местах соприкосновения) и конвекции (перемещения молекул). И в таком состоянии через определенное время на-

ступает уравнивание температуры тел системы. Причина этого — более теплые тела излучают больше, чем поглощают, и часть своей энергии передают более холодным телам. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не установится тепловое равновесие, и прекращается после уравнивания температур.

Отношение спектральной плотности тел, обменивающихся энергией только за счет излучения и поглощения и находящихся в термодинамическом равновесии, к коэффициенту поглощения есть величина постоянная и не зависит от природы тела. Для всех тел оно одинаково и является универсальной функцией длины волны λ и температуры T :

$$\frac{r_{\lambda_1}}{\alpha_{\lambda_1}} = \frac{r_{\lambda_2}}{\alpha_{\lambda_2}} = f(T, \lambda). \quad (17.6)$$

В соответствии с этим *какой длины электромагнитную волну тело излучает, такой же длины электромагнитную волну оно поглощает.*

Абсолютно черным называют тело, полностью поглощающее падающие на него электромагнитные волны. Для абсолютно черного тела $\alpha_\lambda = 1$. Абсолютно черному телу по своим свойствам близки: сажа, черный бархат и др. Идеальной моделью абсолютно черного тела является замкнутая полость с небольшим отверстием, внутренняя поверхность которой зачернена (рис. 36). Луч света, попавший через отверстие внутрь такой полости, после многократных отражений от внутренних стенок почти полностью поглощается.

Тела с коэффициентом поглощения $\alpha_\lambda < 1$ называются *серыми телами*.

Теперь изучим зависимость излучения от температуры.

Закон Стефана-Больцмана. Хотя закон Кирхгофа и показывает, что спектральная плотность излучения пропорциональна температуре и длине волны, важную роль приобретает запись этой связи в явном виде. Австрийские физики И. Стефан и Л. Больцман, решившие эту задачу лишь частично, вывели закон, названный их именем. *Излучение абсолютно черного тела пропорционально четвертой степени его термодинамической температуры:*

$$R_{\text{из}} = \sigma T^4. \quad (17.7)$$

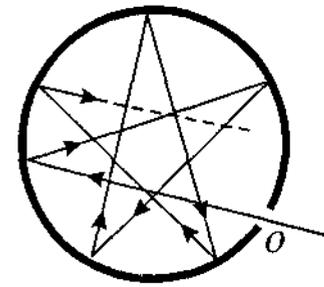


Рис. 36

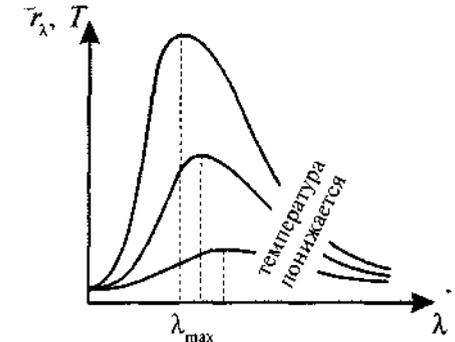


Рис. 37

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$ — постоянная Стефана-Больцмана. На

рис. 37 изображены зависимости спектральной плотности излучения от длины волны при различных температурах, полученные опытным путем. Из них видно, что все кривые имеют явно выраженный максимум, который по мере повышения температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Закон смещения Вина. Мы видим, что с повышением температуры кривые смещаются в сторону более коротких волн, т.е. λ_{max} уменьшается. Это смещение немецкий физик В. Вин сформулировал в виде следующего закона смещения.

Длина волны λ_{max} обратно пропорциональна термодинамической температуре абсолютно черного тела:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{c}{T}. \quad (17.8)$$

Этот закон называется *законом смещения Вина*. Постоянная Вина равна $c = 2,898 \cdot 10^{-3} м \cdot К$. С помощью закона Вина можно объяснить, почему при понижении температуры тела в спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение, например, переход белого каления в красное при остывании металла.

Следует отметить, что хотя эмпирически найденные законы Стефана-Больцмана и Вина играют важную роль в теории теплового излучения, они являются частными законами. Другими словами, если закон Стефана-Больцмана может объяснить полученные опытным путем кривые, изображенные на рис. 37, только в коротковолновой части, то закон Вина соответствует длинноволновой части. Результаты опыта, соответствующие среднему значению длин волн, ни один из этих законов объяснить не может.



Вопросы для самопроверки

1. Какие явления доказывают корпускулярную теорию света? А какие — волновую теорию? 2. Какие задачи решает квантовая физика? 3. Какими свойствами обладает свет? 4. Какую идею выдвинул М. Планк? 5. В чем состоят особенности теплового излучения? 6. Как меняется внутренняя энергия тела в результате теплового излучения? 7. Какое изменение происходит в веществе при поглощении теплового излучения? 8. Как вы объясните понижение температуры излучающего тела и повышение температуры поглощающего тела? 9. Какое излучение называют равновесным? 10. Какое состояние называют термодинамическим равновесием? 11. Что такое поток излучения? Назовите его единицу. 12. Что такое излучение тела? Назовите его единицу. 13. Что такое спектральная плотность излучения и в чем состояла необходимость ее введения? 14. Что такое коэффициент поглощения? 15. Дайте определение закона Кирхгофа. 16. Какое тело называют абсолютно черным телом? 17. Опишите модель абсолютно черного тела. 18. Что такое серое тело? 19. Закон Стефана-Больцмана и его значение. 20. Охарактеризуйте зависимости на рис. 37. 21. Как изменяются линии при повышении температуры? 22. Дайте определение закона смещения Вина. 24. Какие имеются недостатки в законах Стефана-Больцмана и Вина?

§ 18. Закон Рэлея-Джинса. Гипотеза Планка

С о д е р ж а н и е : закон Рэлея-Джинса; гипотеза Планка; фотон и его характеристики.

Закон Рэлея-Джинса. После того как потерпели неудачу попытки описать спектральное поведение излучения с помощью законов Стефана-Больцмана и Вина, английские физики Д. Рэлей и Дж. Джинс предложили новую формулу. На основе классического закона равномерного распределения энергии по степеням свободы для спектральной плотности излучения они записали следующее выражение:

$$r_{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda^2} kT. \quad (18.1)$$

Но и это выражение сумело объяснить только длинноволновую часть (для малых частот) зависимости, изображенную на рис. 37. Она была абсолютно не пригодна для коротковолновой части (для больших частот). Например, при при-

ближении длины волны к нулю спектральная плотность излучения принимает бесконечно большое значение. (При стремлении к нулю знаменателя выражения (18.1) значение r_{λ} стремится к бесконечности). Этот результат получил в науке название «ультрафиолетовой катастрофы».

Таким образом, все попытки объяснить спектр излучения тела исходя из классического представления о том, что энергия излучается непрерывно, наталкивались на непреодолимые препятствия. Решение проблемы требовало новой идеи.

Гипотеза Планка. Эта идея должна была опираться на представление, противоположное классическому, т.е. энергия излучения прерывна, ее значение меняется скачкообразно.

Первым, кто понял это, был немецкий физик М. Планк, который выдвинул следующую гипотезу.

Энергия излучения, в отличие от представления классической физики, не является непрерывной, а состоит из квантов с энергией E , пропорциональной частоте колебания ν , т.е. состоит из отдельных порций энергии:

$$E = h \cdot \nu, \quad (18.2)$$

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка. Она показывает величину скачкообразного изменения энергии.

Нам известно, что вещество состоит из большого числа атомов, и каждый из этих атомов, согласно гипотезе Планка, излучает электромагнитную волну. Другими словами, энергия излучения атома изменяется кратно энергии кванта и может принимать значение $E, 2E, 3E, \dots, nE$. Скажем, пусть требуется найти энергию кванта света с частотой $\nu = 10^{10}$ Гц (радиоволны с $\lambda = 3 \cdot 10^2$ м).

$$E = h \cdot \nu = 6,62 \cdot 10^{-24} \text{ Дж.}$$

Это достаточно малое число, и, согласно классической физике, можно считать, что такая величина изменяется непрерывно.

Если теперь найдем энергию кванта света с частотой $\nu = 10^{15}$ Гц (ультрафиолетовая волна $\lambda = 3 \cdot 10^{-7}$ м:

$$E = h \cdot \nu = 6,62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж,}$$

то получим величину, которую необходимо учитывать в фи-



М. ПЛАНК
(1858–1947)

зике микрочастиц. Поэтому формула, найденная на основе гипотезы Планка, не только полностью объясняет спектр излучения тела, но и позволяет получить законы классической физики, в том числе законы Стефана-Больцмана и Вина.

Фотон и его характеристики. Гипотеза Планка привела к появлению понятия о квантах света, которое назвали *фотоном*. Фотон имеет следующие характеристики:

энергия:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (18.3)$$

масса:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}, \quad (18.4)$$

импульс:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (18.5)$$

В приведенных выражениях учитывалось, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме.

Фотон движется со скоростью, равной скорости света. Его нельзя ни затормозить, ни ускорить. Поэтому не имеет смысла говорить о массе покоя фотона.

? Вопросы для самопроверки

1. Напишите уравнение Рэлея-Джинса. 2. Какую часть спектра может объяснить формула Рэлея-Джинса? 3. Что называют «ультрафиолетовой катастрофой»? 4. Почему законы Стефана-Больцмана, Вина и Рэлея-Джинса не могут полностью объяснить спектр излучения тела? 5. Дайте определение гипотезы Планка. 6. Расскажите о постоянной Планка и ее физическом смысле. 7. Каким будет излучение атома по гипотезе Планка? 8. Вычислите энергию кванта для электромагнитных волн различной частоты. 9. Можно ли из формулы Планка получить законы Стефана-Больцмана и Вина? 10. Если можно, то как вы это объясните? 11. Что такое фотон? 12. Чему равна энергия фотона? 13. Чему равна масса фотона? 14. Чему равен импульс фотона? 15. Чему равна скорость фотона? 16. Как можно затормозить фотон? 17. Чему равна масса покоя фотона?

§ 19. Явление фотоэффекта

Содержание: явление фотоэффекта; опыт Столетова; ток насыщения; задерживающий потенциал; законы Столетова; объяснение явления фотоэффекта; уравнение Эйнштейна; красная граница фотоэффекта; объяснение законов Столетова; внутренний фотоэффект.

Явление фотоэффекта. *Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света.* Это явление в 1887 г. открыл Г. Герц и в 1890 г. оно было изучено русским физиком А. Столетовым.

Если принять во внимание, что внешний фотоэффект в основном происходит в металлах и что энергия связи электронов в атомах и молекулах очень маленькая, то можно поверить, что электроны отрываются от атомов и молекул.

Если электроны, вырванные из атома или молекулы под действием света, остаются в веществе в качестве свободных электронов, то такое явление называется внутренним фотоэффектом. Внутренний фотоэффект, в основном наблюдаемый в полупроводниках, в 1908 г. был изучен русским физиком А. Иоффе (1880–1960).

Опыт Столетова. Схема опыта Столетова по исследованию внешнего фотоэффекта приведена на рис. 38.

В вакуумной трубке располагаются исследуемая пластинка K , выполняющая роль катода, и электрод A , выполняющий роль анода. Катод и анод через сопротивление R подключены к источнику тока. Напряжение между электродами (анодное напряжение) измеряется вольтметром V , а ток в цепи — гальванометром G (прибор, измеряющий маленький ток). В первый момент, когда катод не освещен, тока в цепи не бывает, так как в пространстве между катодом и анодом нет частиц носителей заряда. Если катод освещается через кварцевое окошко, гальванометр показывает появление тока в цепи (его называют фото-



А.Г. СТОЛЕТОВ
(1839–1896)



А.Ф. ИОФФЕ
(1880–1960)

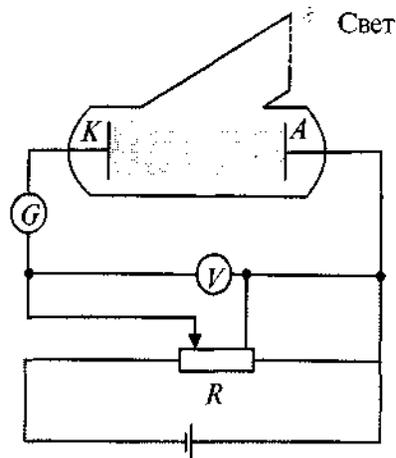


Рис. 38

током). Причина этого – свет, попадающий на катодную пластинку, выбивает из нее электроны (их называют *фотоэлектронами*), и эти электроны начинают под действием электрического поля упорядоченное движение в сторону анода. С помощью потенциометра можно изменять не только значение, но и знак подаваемого на них напряжения. В это время гальванометр показывает соответствующее изменение силы тока.

Ток насыщения. На рис. 39 приводится зависимость фототока от анодного напряжения. Эта зависимость носит название *вольт-амперной характеристики фототока*. Из нее видно, что при увеличении напряжения между катодом и анодом нарастает и сила тока. При некотором напряжении она перестает увеличиваться, поскольку все выбитые из катода электроны достигают анода. Этот ток называют *током насыщения* ($I_{\text{н}}$). Следует отметить, что значение тока насыщения зависит от потока излучения, падающего на катод: с увеличением потока света увеличивается и значение тока насыщения (см. рис. 39).

Задерживающий потенциал. Из вольт-амперной характеристики следует, что даже когда анодное напряжение равно нулю, фототок не исчезает. (Когда анодное напряжение равно нулю, отсутствует электрическое поле,двигающее фотоэлектроны в сторону анода), так как выбитые из катода электроны обладают достаточной кинетической энергией, чтобы

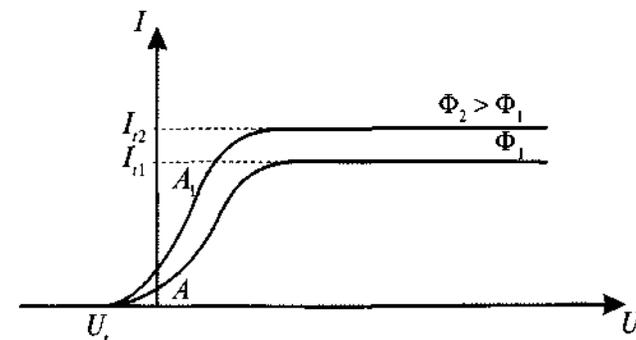


Рис. 39

достичь анода без внешнего воздействия. Чтобы остановить эти электроны, должна быть тормозящая сила. Чтобы создать эту силу, изменяют полярность батареи, и образовавшееся электрическое поле препятствует движению электронов в сторону анода. В результате, начиная с некоторого значения задерживающего напряжения, все электроны останавливаются, и ток в цепи становится равным нулю. Это значение напряжения называют задерживающим напряжением (U_1). Зная значение задерживающего напряжения, можно определить скорость вылетающих электронов.

Пусть электрон массой m выходит со скоростью v . Тогда кинетическая энергия электрона будет равна $\frac{mv^2}{2}$. С другой стороны, электрон с зарядом e , чтобы преодолеть поле с задерживающим потенциалом, должен затратить энергию eU . Если кинетическая энергия электрона будет больше энергии задерживающего поля $\frac{mv^2}{2} > eU$, то электрон долетит до анода.

В противном случае, т.е. когда $\frac{mv^2}{2} < eU$, электрон не долетает до анода.

$$\text{Условие} \quad \frac{mv^2}{2} = eU_1 \quad (19.1)$$

называют граничным, и, начиная с этого значения задерживающего потенциала, электрон удерживается задерживающим полем. Значит, из приведенного выше уравнения можно найти граничную скорость, обеспечивающую электрону возможность долететь до анода.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_s}{m}} \quad (19.2)$$

Законы Столетова. Проведя очень много опытов, Столетов открыл следующие законы фотоэффекта.

1. Сила фототока насыщения пропорциональна потоку света, падающего на катод:

$$I_n = k \cdot \Phi_{\text{пад}}, \quad (19.3)$$

где k — коэффициент, характеризующий чувствительность катода к свету, т.е. чем выше (интенсивнее) будет поток света, тем выше будет фототок.

2. Кинетическая энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте падающего света и не зависит от потока света.

3. Независимо от того, какой будет интенсивность падающего света, фотоэффект начинается с определенной частоты (длины волны), и эта частота зависит от материала катода.

Объяснение явления фотоэффекта. Можно ли объяснить явление фотоэффекта на основе волновой природы света? Первый закон можно объяснить, так как падающий на катод свет приводит электроны на поверхности металла в вынужденное колебание.

Амплитуда колебания зависит от интенсивности падающего света. Чем больше будет интенсивность, тем больше будет и кинетическая энергия электрона, и, преодолев силу притяжения положительных ионов, электрон покидает катод.

С увеличением интенсивности увеличивается число электронов, покидающих катод, а значит, и возрастает значение тока насыщения.

Если продолжить рассуждение в этом направлении, то увеличение потока света должно было бы привести к увеличению кинетической энергии электрона. Но опыты Столетова не подтверждают это рассуждение. Значит, второй закон нельзя объяснить на основе волновой теории. Объяснение третьего закона тоже приводит к этому результату.

Тогда возникает вопрос, какой природой света можно объяснить явление фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна. После глубокого анализа законов Столетова А. Эйнштейн принял решение объяснить явление фотоэффекта на основе гипотезы Планка. Он развил гипотезу Планка и высказал мысль, что свет ведет себя как поток фотонов не только при излучении, но и при распространении в пространстве, и при поглощении другими веществами.

Эйнштейн так объяснил явление фотоэффекта. Фотон, падающий на катод, передает свою энергию электрону. Если эта энергия будет больше работы выхода электрона A , электрон покидает катод. Но чтобы долететь до катода, он должен иметь кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$. В противном случае он может вновь вернуться в катод (см. § 81, часть 1). Таким образом, чтобы произошло явление фотоэффекта, энергия фотона должна быть достаточной, чтобы вырвать электрон из вещества и сообщить ему кинетическую энергию, т.е.

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}. \quad (19.4)$$

Это уравнение называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта и выражает закон сохранения и превращения энергии.

Эйнштейн в своих размышлениях считал, что электрон получает энергию только у одного фотона.

Красная граница фотоэффекта. Работа выхода электрона из металла зависит от рода металла. Она принимает различные значения для разных металлов. Рассмотрим случай, когда энергии фотона хватает только на то, чтобы вырвать электрон из металла, т.е. достаточно для совершения работы выхода:

$$h\nu_q = A, \quad (19.5)$$

Если учесть, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то

$$\frac{hc}{\lambda_q} = A \quad (19.6)$$

Обычно это условие выполняется для фотона с маленькой энергией, и поэтому его называют *красной границей фотоэффекта*. Причина в том, что среди видимого света самую длинную волну — самую маленькую частоту, а значит, самую маленькую энергию имеет фотон красного цвета. Именно с этой красной границы начинается явление фотоэффекта.

Из выражений (19.5) и (19.6) получаем

$$\nu_q = \frac{A}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_q = \frac{hc}{A} \quad (19.7)$$

Предельную частоту ν_q или длину волны λ_q , при которой начинается фотоэффект, называют *красной границей фотоэффекта*.

Объяснение законов Столетова. Теперь проведем обсуждение законов Столетова с помощью уравнения Эйнштейна.

I. Чем больше будет поток падающего света, тем больше будет число фотонов в нем. Большое число фотонов выбивает больше электронов, и значит, будет больше и значение тока насыщения.

II. Если электрон получает энергию от одного фотона, то его кинетическая энергия зависит не от числа падающего фотона (потока света), а от энергии каждого фотона. Поэтому с ростом энергии фотона, т.е. частоты, увеличивается и кинетическая энергия электрона. Другими словами, кинетическая энергия фотоэлектронов будет прямо пропорциональна частоте падающего света.

III. Формула (19.7), найденная для красной границы фотоэффекта, объясняет третий закон. Как только энергия фотона будет равна работе выхода, будет происходить явление фотоэффекта. Фотон с энергией ниже работы выхода, независимо от интенсивности света, не сможет выбить электрон из металла, и поэтому не будет происходить фотоэффект.

Так как значение работы выхода для разных металлов различно, то для них и красная граница фотоэффекта разная.

Приведенные выше рассуждения позволяют смотреть на свет как на поток фотонов (частиц), и поэтому явление фотоэффекта считается процессом, доказывающим корпускулярную теорию света.

Внутренний фотоэффект. Мы уже знаем, что если электрон, вырванный из атома или молекулы под действием света, остается внутри вещества в качестве свободного электрона, то такое явление называется внутренним фотоэффектом. Например, если это явление происходит в полупроводнике, то фотоэлектроны приводят к увеличению числа частиц носителей заряда — и росту числа электронов и дырок. Другими словами, фотон переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости. В результате увеличивается число электронов и дырок в зоне проводимости, т.е. улучшается проводимость полупроводников. Поэтому внутренний фотоэффект называют *фотопроводимостью*. Следует отметить: чтобы произошла фотопроводимость, энергия фотона должна быть больше энергии запрещенной зоны. В противном случае электрон, получивший энергию фотона, не сможет перейти запрещенную зону, и значит, не произойдет явления внутреннего фотоэффекта.



Вопросы для самопроверки

1. Что называют фотоэффектом? 2. Какое явление называют внешним фотоэффектом? 3. А какое — внутренним фотоэффектом? 4. Объясните опыт Столетова. 5. Будет ли ток в цепи, когда катод не освещается? 6. А когда он освещается? 7. Объясните механизм появления тока. 8. Какие электроны называются фотоэлектронами? 9. Дайте вольт-амперную характеристику фотоэффекта. 10. Объясните, что такое ток насыщения. 11. Зависит ли ток насыщения от потока света, падающего на катод? 12. Будет ли ток в цепи, если анодное напряжение будет равно нулю? Как вы это объясните? 13. Что такое задерживающий потенциал? 14. Какой должна быть кинетическая энергия фотона, чтобы электрон мог достичь анода? 15. Начиная с какого значения энергии электрона он удерживается в задерживающем поле? 16. Какой должна быть граничная скорость электрона, чтобы он не смог достичь катода? 17. О чем гласит первый закон Столетова? 18. А второй закон Столетова? 19. А третий закон Столетова? 20. Можно ли объяснить фотоэффект исходя из волновых свойств света? 21. Какое дополнение к гипотезе Планка сделал Эйнштейн? 22. Какой должна быть энергия фотона, чтобы произошел фотоэффект? 23. Приведите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. 24. По мысли Эйнштейна, из какого количества фотонов берет энергию электрон? 25. Зависит ли от рода вещества работа выхода электрона из металла? 26. Как определяется красная граница фотоэффекта? 27. Что называют красной границей фотоэффекта? 28. Обсудите первый закон Столетова. 29. Обсудите второй закон Столетова. 30. Обсудите третий закон Столетова. 31. Обсудите третий закон Столетова. 32. На основании какого свойства света можно объяснить явление фотоэффекта? 33. Как происходит внутренний фотоэффект в полупроводниках? 34. Что называют фотопроводимостью? 35. Какой должна быть энергия фотона, чтобы произошла фотопроводимость? 36. Какое явление произойдет, если энергия фотона будет меньше энергии запрещенной зоны?

§ 20. Применение фотоэффекта

С о д е р ж а н и е : фотоэлемент; вакуумный фотоэлемент; газонаполненный фотоэлемент; применение фотоэлементов; фото-сопротивление; фотоэлектродвижущая сила; вентильный гальванический фотоэлемент.

Фотоэлемент. Устройства, работающие на основе явления фотоэффекта — фотоэлементы, — очень широко применяют-



Рис. 40

ся в технике. Самые распространенные среди них — это вакуумный и газонаполненный фотоэлементы.

Вакуумный фотоэлемент. На рис. 40 приведен фотоэлемент, состоящий из стеклянного баллона, часть внутренней поверхности которого покрыта светочувствительным слоем металла, выполняющим роль катода. Обычно в качестве светочувствительного металла используются щелочные металлы с маленькой работой выхода.

Внутри баллона устанавливается металлическое кольцо или сетка, выполняющая роль анода. На рис. 41 приведена схема применения фотоэлемента. Катод (*K*) подключен к отрицательному полюсу батареи, а анод (*A*) — к положительному. Вольтметр (*V*) показывает разность потенциалов между электродами, напряжение регулируется с помощью потенциометра (*R*). Также в цепь включен гальванометр (*G*) для измерения фототока.

Электроны, выбитые из катода светом, двигаются в сторону анода, и гальванометр показывает наличие тока в цепи. Современные фотоэлементы чувствуют не только видимый свет, но и инфракрасное излучение.

Газонаполненный фотоэлемент. Несмотря на это, чувствительность фотоэлементов считается не очень хорошей (световой поток в один люмен может создать ток около десяти микроампер). В результате ток в цепи вакуумного фотоэлемента будет очень маленьким. Для усиления тока, т.е. для увеличения чувствительности фотоэлемента, баллон заполняется разреженным газом — его называют *газонаполненным фотоэлементом*. Здесь выбитый из катода электрон сталкивается с молекулами газа в фотоэлементе и ионизирует их, т.е. происходит ударная ионизация. Для этого необходимо, чтобы напряжение между анодом и катодом было достаточно большим, а кинетическая энергия высокоскоростного электрона — доста-

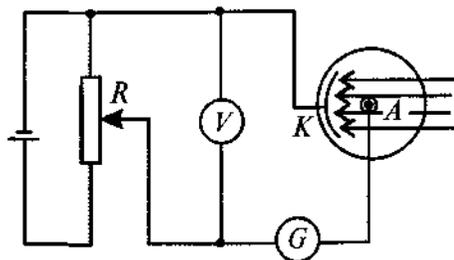


Рис. 41

точной для ионизации молекул газа. В свою очередь, образованные ионы начинают двигаться в сторону электродов, по пути сталкиваются с молекулами и тоже ионизируют их. Таким образом, увеличивается число электронов,двигающихся в сторону анода, а значит, увеличивается анодный ток, т.е. чувствительность фотоэлемента.

Применение фотоэлемента. Самая большая область применения фотоэлементов — это беспроводная передача изображения (фототелеграфия). Хорошим примером этого может быть телевидение. Как было отмечено в § 126 (1 часть), превращение изображения в электрические сигналы осуществляется устройством, называемым иконоскопом. Иконоскоп — прибор, поверхность которого состоит из большого числа фотоэлементов. Они создают электромагнитные волны, соответствующие падающему на них свету, и эти волны передаются на большие расстояния. Сигналы, принятые антенной в кинескопе, снова преобразовываются в световые сигналы, т.е. в изображение.

Фотореле, работающие при помощи фотоэлементов, составляют основу счетчиков, устройств автоматического запуска и контроля различных механизмов. Фотореле может работать в момент попадания света или в момент его прерывания.

Фотореле составляет основу устройств, начиная с чувствительных элементов современных роботов (глаза) до устройства контролирующего входа в метро, системы освещения улиц города, запуска маяков на водных путях, отбора деталей по форме и цвету.

Фотосопротивление. Фотосопротивление считается прибором, работающим на основе внутреннего фотоэффекта. Фотосопротивлением называется полупроводниковое устройство, сопротивление которого зависит от интенсивности падающего на него света. Чтобы понять принцип работы фотосопротивления, обсудим принцип работы полупроводника. Следует отметить, что в неосвещенном полупроводнике тоже имеется определенное количество свободных электронов, образу-

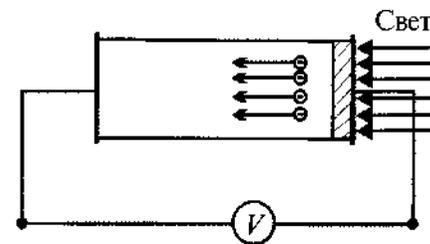


Рис. 42

ющих собственную проводимость полупроводника. Если к полупроводнику приложить напряжение, то в нем возникнет электрический ток, который называют собственным током (I_c). Если теперь осветить полупроводник, то появятся дополнительные электроны и дырки, улучшается его проводимость, и ток в цепи возрастает до тока светимости (I_{cs}). Разность тока светимости и собственного тока $I = I_{cs} - I_c$ называют *фототоком*. Фотосопротивление используется в звуковых фильтрах, на телевидении, в телемеханике, в автомеханике используется в качестве звукоподающего средства.

Фотоэлектродвижущая сила (фото-ЭДС). Самым распространенным устройством, работающим на основе принципа внутреннего фотоэффекта, является устройство, создающее фотоэлектродвижущую силу. Иногда его называют *фотогальваническим элементом*. Возникновение фото-ЭДС относительно просто. Скажем, пусть освещается часть полупроводника (рис. 42). Падающий свет создает дополнительные носители зарядов (электронов и дырок). В результате в освещенной части полупроводника число носителей зарядов будет больше, чем в неосвещенной части. Это же будет причиной возникновения электродвижущей силы между обеими частями полупроводника. Такую ЭДС называют *диффузионной фото-ЭДС*.

Вентильный фотогальванический элемент. В элементах фото-ЭДС между металлом и полупроводником или между полупроводниками p и n типа создается запирающий слой, обладающий свойством пропускать ток в одном направлении. Чтобы представить себе этот процесс, проанализируем схему, представленную на рис. 43.

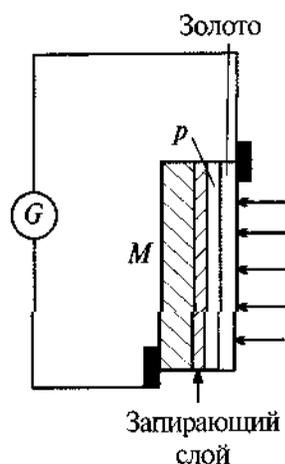


Рис. 43

Металлическая пластина M , выполняющая роль электрода, покрыта тонким слоем полупроводника (p).

В свою очередь, этот слой покрыт тонким металлическим слоем, выполняющим роль электрода. Электроды соединены друг с другом через гальванометр (G).

Пусть теперь полупроводник освещается через второй электрод. Тогда в p слое за счет внутреннего фотоэффекта образуются свободные

электроны. Эти электроны, беспорядочно двигаясь, переходят в слой M . Запирающий слой, образованный на границе «металл — полупроводник», препятствуют прохождению дырок. В результате в металлическом слое M образуется излишек электронов, а в полупроводниковом слое p — излишек дырок. Другими словами, наличие запирающего слоя приводит к появлению между двумя слоями фото-ЭДС. Если цепь замкнута, то по ней потечет ток, и мы увидим это с помощью гальванометра. Таким образом, вентильный фотогальванический элемент — это устройство, непосредственно превращающее энергию света в электрическую. Это дает возможность создавать устройства, превращающие солнечную энергию в электрическую. А их работа без каких-либо источников тока порождает новые возможности. Особенно производительность запирающих фотогальванических элементов $p-n$ типа достаточно высокая и достигает 10%. В настоящее время элементы такого типа очень много используются в качестве солнечных батарей на космических кораблях. Наша родина является солнечным краем, и она имеет большие перспективы в получении электрической энергии этим методом.

Вопросы для самопроверки

1. Какое устройство называется фотоэлементом?
2. А вакуумным фотоэлементом?
3. Объясните устройство вакуумного фотоэлемента.
4. Почему в качестве катода используются щелочные металлы?
5. Объясните схему на рис. 41.
6. Каковы функции вольтметра, сопротивления и гальванометра?
7. Какова чувствительность вакуумного фотоэлемента?
8. Как поступают, чтобы повысить его чувствительность?
9. Что такое газовый фотоэлемент?
10. В чем состоит причина повышения чувствительности газового фотоэлемента?
11. Где используется иконоскоп?
12. Принцип работы иконоскопа?
13. Функция кинескопа?
14. Принцип работы фотореле?
15. Приведите пять примеров на использование фотореле и объясните их.
16. Какое устройство называют фоторезистором?
17. Объясните принцип работы фоторезистора.
18. Как возникает I_c ?
19. А световой ток I_{cs} ?
20. Как определяется фототок?
21. Как применяется фоторезистор?
22. Какие устройства называют фотогальваническими?
23. Объясните картину на рис. 42.
24. Как возникает диффузионная фото-ЭДС?
25. За счет чего появляется фото-ЭДС в пороговых фотогальванических элементах?
26. Объясните схему на рис. 43.
27. Откуда в металлическом слое появляются лишние электроны?
28. А в

p-слое — лишние дырки? 29. Как появляется фото-ЭДС? 30. Какими свойствами обладают пороговые фотогальванические элементы? 31. Для каких целей их можно использовать? 32. Нужен ли источник тока для их работы? 33. На основании каких принципов работают солнечные батареи? 34. А солнечный концентратор в Паркентском районе? 35. Каковы перспективы использования солнечной энергии в Узбекистане?

§ 21. Давление света

С о д е р ж а н и е : появление идеи о давлении света; опыт Лебедева; объяснение давления света с точки зрения волновой теории; объяснения давления света с точки зрения корпускулярной теории; значение давления света; значение опыта Лебедева; проявление давления света.

Появление идеи о давлении света. Астрономы в своих наблюдениях определили, что хвост комет, состоящий из газов и пыли, при движении вблизи Солнца отклоняется в обратную от Солнца сторону (рис. 44). Это явление И. Кеплер пытался объяснить как результат давления солнечных лучей. Но множество опытов, проведенных для доказательства правоты этой идеи, не дали ожидаемого результата.

Опыт Лебедева. Первым измерить давление света в 1889 г. удалось русскому физика П.Н. Лебедеву. На рис. 45 приведена схема опыта Лебедева, проведенного для измерения давления света, оказываемого на твердые тела. Прибор помещен в стеклянный баллон, из которого был откачан воздух, и состоял из очень легкого стерженька на тонкой стеклянной нити, по краям которого были прикреплены легкие «крылышки».



П.Н. ЛЕБЕДЕВ
(1866–1912)

Крылышки были в форме зеркальных и зачерненных дисков толщиной от 0,01 до 0,1 мм. Они устанавливались симметрично вокруг оси вращения. Падающий свет оказывает разное давление на зеркальные и зачерненные диски. В результате тонкая нить, поддерживающая стержень, поворачивается под действием крутящего момента. Давление света определялось по углу закручивания нити подвеса. В свою очередь, это закручивание показывает, что существует давление падающего на крылышки све-

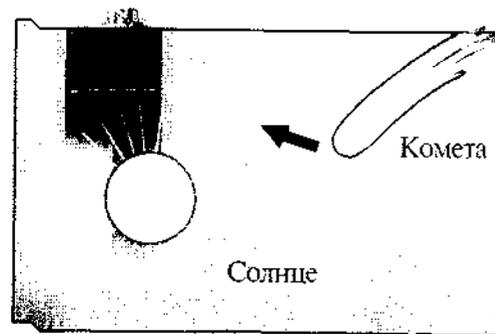


Рис. 44

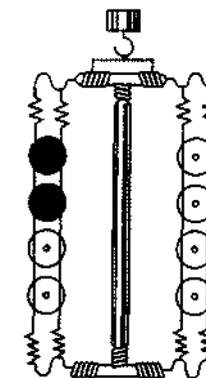


Рис. 45

та, которое зависит от отражательной способности поверхности тела и от потока падающего света.

Итак, как можно объяснить давление света? Следует отметить, что это свойство света можно объяснить с точки зрения волновой и корпускулярной теории.

Объяснение давления света с точки зрения волновой теории. Согласно теории, гласящей, что свет состоит из электромагнитных волн, причина существования давления света в том, что электрические и магнитные составляющие электромагнитного поля оказывают воздействие на электроны освещаемого тела. Согласно теории Максвелла, падающая электромагнитная волна оказывает давление на поверхность.

$$P_n = \frac{E_{\text{ос}}}{c} \quad (21.1)$$

где $E_{\text{ос}} = \frac{\Phi_{\text{ос}}}{S}$ — освещенность поверхности, c — скорость света

в вакууме. Вместе с тем, часть падающей волны отражается от поверхности, и эта отраженная волна оказывает давление на поверхность:

$$P_{\text{от}} = \frac{E_{\text{ос}}}{c} \cdot \rho \quad (21.2)$$

где ρ — коэффициент отражения поверхности, который определяется отношением отраженного потока света к падающему потоку.

Если учесть, что полное давление, оказываемое электро-

магнитными волнами на поверхность, равна сумме давлений падающей и отраженной волны, т.е. $p = p_n + p_{от}$, то для полного давления получим выражение

$$p = \frac{E_{\text{эл}}}{c}(1 + \rho) \quad (21.3)$$

Объяснение давления света с точки зрения корпускулярной теории. Согласно теории, гласящей, что свет состоит из потока фотонов, причина существования давления света в том, что фотоны падающего света передают свой импульс атомам или молекулам освещаемого тела.

Пусть на поверхность площадью S каждую секунду падает N фотонов с частотой ν . Если $N_{от} = \frac{N_{от}}{N} \cdot N = \rho N$ фотонов отражается от поверхности, то $N_{погл} = (N - N_{от}) = (N - \frac{N_{от}}{N} \cdot N) = (1 - \rho)N$ фотонов поглощаются. Если принять во внимание, что импульс фотона равен $P_f = \frac{h\nu}{c}$, поглощаемые фотоны передают атомам или молекулам тела и импульс, равный

$$P_n = P_f(1 - \rho)N = \frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N \quad (21.4)$$

Каждый отраженный фотон передает поверхности тела импульс $\vec{P}_f - (-\vec{P}_f) = 2P_f$ (рис. 46). Тогда отраженные фотоны передают поверхности тела импульс, определяемый выражением

$$P_{от} = 2P_f \rho N = 2 \frac{h\nu}{c} \rho N \quad (21.5)$$

Если учесть, что полный импульс, полученный телом, равен сумме импульсов, получаемых от поглощенных и отраженных фотонов $P_{полн} = P_{погл} + P_{от}$, давление света определяется импульсом, приходящимся на поверхность (для этого полный импульс делим на площадь крылешек S), для давления света находим

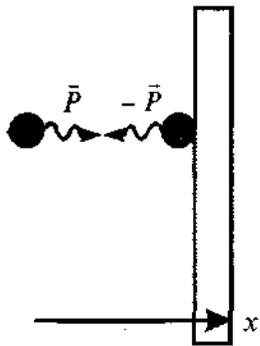


Рис. 46

$$p = \frac{P_f}{S} = \frac{1}{3} \left[\frac{h\nu}{c}(1 - \rho)N + 2 \frac{h\nu}{c} \rho N \right] = \frac{h\nu N}{cS}(1 + \rho). \quad (21.6)$$

Здесь из $\frac{h\nu}{c}N = E_{\text{эл}}$ получим выражение

$$p = \frac{E_{\text{эл}}}{c}(1 + \rho). \quad (21.7)$$

Сравнение выражений (21.3) и (21.7) показывает, что эти формулы, выведенные на основе квантовых представлений и полученные из электромагнитной (волновой) теории, совпадают.

Значение давления света. Давление естественного света очень маленькое. На тело, расположенное на поверхности Земли и имеющее коэффициент отражения, равный единице, давление, оказываемое солнечными лучами, лежит в пределах $5 \cdot 10^{-6}$ Па ($3,7 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.). Видно, что это давление меньше нормального атмосферного давления в десятки миллиардов раз. Поэтому в повседневной жизни давление света можно не учитывать.

Значение опыта Лебедева. Вместе с тем, это давление занимает очень большое место в движении космических тел и процессах, происходящих в микроскопических системах. Именно поэтому Лебедев заслуживает глубокого уважения за то умение, которое он проявил при определении столь малого давления. Результаты его опытов отличались от теоретических расчетов всего на 20%. Большое значение опытов Лебедева в том, что он на деле доказал существование давления света. Эти опыты показывают, что свет, как и другая форма материи, имеет массу.

Проявление давления света. Давление света оказывает большое влияние на состояние космических тел. Например, причина сохранения размеров звезд в определенных границах — это наличие давления света. С увеличением массы звезды увеличивается гравитационное притяжение слоев звезды к центру. Поэтому внутренние слои звезды сильно сжимаются, и там температура повышается на миллионы градусов. При этом возрастает давление света, направленное вверх. В нормальных звездах гравитационные силы, старающиеся сжать их, и дав-

ление света, старающиеся разорвать звезду, уравниваются. Именно это равновесие и сохраняет звезду в состоянии устойчивости.

В процессах, происходящих в мире микрочастиц, абсолютно нельзя не учитывать давление света. Так как импульс частицы будет почти равен импульсу фотонов, значение импульсов, получаемых и отдаваемых при столкновениях, имеют и тот же порядок.



Вопросы для проверки

1. Как появилась идея о давлении света? 2. Объясните картину на рис. 44. 3. Кто и когда первым определил давление света? 4. Объясните схему на рис. 45. 5. Почему Лебедев установил устройство в сосуде с откачанным воздухом? 6. Какова толщина крылышек в устройстве? 7. Почему диски сделаны разноцветными? 8. Как они установлены? 9. Как было определено давление света? 10. Как на основании электромагнитной волновой теории объясняется давление света? 11. Какое давление на поверхность оказывает падающий свет? 12. А отраженный? 13. Как определяется коэффициент отражения? 14. Чему равно полное давление, оказываемое световыми волнами на поверхность? 15. Как объясняется существование давления света с точки зрения корпускулярной теории? 16. Чему равен импульс, передаваемый поглощающими фотонами телу? 17. А отраженными фотонами? 18. Объясните картину на рис. 46. 19. Как в различных теориях объяснялись результаты давления света? 20. Чему равно значение давления света? 21. Соответствуют ли теоретическим расчетам результаты, полученные Лебедевым? 22. В чем состоит значение опытов Лебедева? 23. В чем значение существования давления света для состояния звезды? 24. В чем причина устойчивого состояния нормальных звезд? 25. В чем состоит значение давления света в мире микрочастиц?

§ 22. Химическое действие света

Содержание: фотохимическая реакция; расщепление углекислой кислоты; фотография.

Фотохимическая реакция. *Фотохимическими реакциями* называются химические превращения, происходящие в некоторых веществах под действием света. Фотохимические изменения бывают различными: иногда сложные молекулы расщепляются на составляющие части, иногда образуются сложные

молекулы. В первом случае примером будет расщепление бромида серебра на бром и серебро, во втором — реакция образования хлорида водорода из смеси водорода и хлора под действием света. Последняя реакция происходит настолько бурно, что заканчивается взрывом.

Расщепление углекислой кислоты. Большинство фотохимических реакций имеют огромное значение в природе и технике. Одна из самых достойных внимания — фотохимическое расщепление углекислой кислоты на зеленых листьях растений под действием света.

Именно эта реакция обеспечивает круговорот углерода в природе, создает необходимые условия для существования живых организмов. Известно, что в результате жизнедеятельности животных и растений (дыхания) происходит непрерывное окисление углерода (образование CO_2). В результате фотохимической реакции, которая происходит в зеленых листьях по схеме $2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$ углерод восстанавливается. В свою очередь, эта реакция приводит к выделению кислорода, необходимого для существования живых организмов.

Фотография. Основу фотографии составляет расщепление бромида серебра (AgBr) под действием света. В общем, причина появления различных цветов — это фотохимическое окисление этих цветов под действием света. Этот процесс играет важную роль в распознавании глазом человека и животных зрительных ощущений. Теперь подробнее остановимся на значении фотохимической реакции при фотографировании. Для этого на фотопластинку наносится бромид серебра. При попадании света на пластинку она расщепляется и выделяются частицы чистого серебра. Их количество зависит от интенсивности падающего света. Поэтому образовавшиеся на пластинке молекулы чистого серебра отображают картинку, связанную с интенсивностью света, образуя скрытую картину (не видимую глазу) фотографируемого предмета. При проявлении фотопластинки место, куда попадает больше света, темнеет сильнее, а куда попадает меньше света — темнеет слабее, и таким методом получается негатив. Следует отметить, что в настоящее время большинство химических реакций непосредственно используется в производстве, и они занимают важное место в промышленности.



Вопросы для самопроверки

1. Что называют фотохимической реакцией? 2. Назовите виды фотохимических реакций. 3. Как разлагается углекислая кислота? 4. В чем состоит значение разложения углекислой кислоты? 5. Как происходит восстановление углерода? 6. В чем состоит значение этой реакции для живых организмов? 7. Какая реакция составляет основу фотографии? 8. В чем значение фотохимического окисления для проявления зрительных ощущений? 9. Что наносится на фотопластинку для получения фотографии? 10. Как образуется негатив?

§ 23. Люминесценция

Содержание: люминесценция; возникновение люминесценции; применение люминесценции.

Люминесценция. Слово «люминесценция» (от *лат.* *luminescent*) означает слабое воздействие света. Люминесценцией называется своеобразное излучение некоторых веществ под действием света. При этом вещество может быть в любом состоянии: твердом, жидком и газообразном. В процессе люминесценции вещество поглощает падающий на него свет, а затем излучает свет, по составу отличающийся от падающего. Некоторые виды люминесценции были известны и раньше: например, *флюоресценция* – кратковременное излучение (время излучения 10^{-8} с), которое сразу же прекращается, как только прекращается облучение тела, и *фосфоресценция* – излучение, которое продолжается еще определенное время после прекращения облучения (время излучения больше 10^{-8} с). Но отсутствовало научное понимание, как происходит это излучение, как оно появляется и чем разные виды излучения отличаются друг от друга. На эти вопросы до сих пор нет определенных ответов.

Возникновение люминесценции. Поиск законов люминесценции привел к созданию различных эмпирических правил. Одно из них является законом Г. Стокса, но результаты опытов иногда не соответствовали этому закону.

Русскому ученому С.И. Вавилову (1891–1951), изучавшему процесс люминесценции в процессе опыта и теоретически, удалось создать истинную теорию этого процесса. Эти законы стали не только основой теории люминесценции, но и привели к ее широкому применению.

Люминесценцией называется неравновесное излучение, преобладающее при данной температуре над тепловым излучением тела.

Другими словами, фотон, падающий на тело, поглощается. Часть этой энергии тратится на энергию колебания атома, т.е. на тепловую энергию, остальная часть тратится на люминесцентное излучение.

Процесс люминесценции на основе законов квантовой механики объясняется очень просто; с этими законами вы ознакомитесь в будущем. Вещества, в которых происходит люминесценция, называются *люминофорами*.

Применение люминесценции. Вавилов предложил получить из ультрафиолетового излучения ртутной лампы с помощью люминофоров видимый свет. В результате он создал люминесцентные лампы, способные излучать свет, близкий к дневному. На стенки таких ламп наносятся слои различных люминофоров, что позволяет получать любой цвет излучения, а сами лампы при этом заполняются парами ртути при низком давлении. Коэффициент полезного действия таких ламп очень большой, и срок их работы довольно длительный. Поэтому люминесцентные лампы широко применяются для освещения и украшения улиц, заводов и фабрик, различных учреждений, магазинов и других объектов.

Люминесценция применяется и при анализе веществ. Этот метод называется *люминесцентным анализом*. Например, если в составе вещества даже в очень малом количестве присутствуют люминофоры, его можно идентифицировать. Нефтяники, изучая образцы грунта, добытые из глубин, с помощью люминесцентного анализа определяют расстояние до нефтяного слоя и даже запасы нефти.

Этим методом определяется сорт стекол, изучаются биологические объекты.



Вопросы для самопроверки

1. Что означает слово «люминесценция»? 2. Что называют люминесценцией? 3. Как происходит процесс люминесценции? 4. Что называют флюоресценцией? А фосфоресценцией? 5. Кто создал теорию люминесценции? 6. Какое излучение называют люминесценцией? 7. На что расходуется энергия поглощенного фотона? 8. Какие вещества называют люминофорами? 9. Каков принцип работы лю-

минесцентных ламп? 10. Как создаются лампы, излучающие различные цвета? 11. Каковы их КПД и срок службы? 12. Приведите пять примеров использования люминесцентных ламп. 13. В чем состоит значение люминесцентного анализа? 14. Объясните применение люминесцентного анализа.

§ 24. Корпускулярно-волновой дуализм света

С о д е р ж а н и е : волновая природа света; корпускулярная природа света; корпускулярно-волновой дуализм света.

Волновая природа света. Мы ознакомились с такими явлениями, как интерференция, дифракция и поляризация, подтверждающими, что свет состоит из электромагнитных волн. Мы убедились, что свет обладает всеми свойствами, присущими волнам, и состоит из волн, занимающих определенное место в шкале электромагнитных волн.

Но, вместе с тем, мы отметили, что взгляд на свет как электромагнитную волну не может объяснить такие явления, как тепловое излучение и фотоэффект.

Корпускулярная природа света. Объяснение явлений теплового излучения и фотоэффекта предполагает их рассмотрение как состоящих из потока фотонов, поэтому их можно объяснить только на основе корпускулярной теории.

Кроме того, преломление света и его давление можно объяснить как волновой, так и квантовой теориями. Тогда возникает вопрос: а не имеет ли свет волновую и корпускулярную природу? Это, в свою очередь, породило корпускулярно-волновой дуализм света.

Корпускулярно-волновой дуализм света. Таким образом, свет проявил себя в качестве волны и в качестве частицы, которые взаимоисключают друг друга. В то же время они дополняют друг друга и объясняют все явления, связанные со светом.

Следует отметить, что выражения, записанные для энергии фотона $E = h\nu$ и импульса $P = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$, связывают корпускулярные свойства света с волновыми свойствами, частотой и длиной волны. Поэтому обе теории о природе света нельзя противопоставлять, а надо рассматривать как теории, дополняющие друг друга. Каждая из них проявляет себя в известных условиях. Например, если длина волны больше, а значит, энергия меньше, проявляется волновая природа света.

Наоборот, чем меньше длина волны, а значит, больше энергия и импульс фотона, проявляется корпускулярная природа света. Таким образом, *свет является сложной формой материи, обладающей двойственной природой — и корпускулярной, и волновой. Это называется корпускулярно-волновым дуализмом.*

К этому свойству света вернемся в § 28.



Вопросы для проверки

1. Какие явления доказывают волновую природу света? 2. А корпускулярную природу? 3. Какое явление можно объяснить на основе обеих теорий? 4. Существует ли связь между величинами, характеризующими корпускулярную и волновую теорию, в выражениях, записанных для энергии и импульса фотона? 5. Когда проявляется волновая природа света? А корпускулярная природа? 6. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?



Образцы решения задач

З а д а ч а 1. Начальная температура черного тела $T_1 = 500$ К. Чему равна конечная температура тела T_2 , если после нагревания излучение возросло в $n = 4$ раза?

Дано:

$$T_1 = 500 \text{ К}$$

$$n = \frac{R_{из2}}{R_{из1}} = 4$$

$$T_2 = ?$$

Решение:

Излучение черного тела определяется законом Стефана-Больцмана. Закон напишем для обоих состояний:

$$R_{из1} = \delta T_1^4 \text{ и } R_{из2} = \delta T_2^4.$$

Из этих выражений для рассматриваемого процесса напишем следующее отношение:

$$n = \frac{R_{из2}}{R_{из1}} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^4.$$

Отсюда

$$T_2 = \sqrt[4]{n} T_1.$$

Подставив данные в это выражение, находим

$$T_2 = \sqrt[4]{4} \cdot 500 \text{ К} \approx 1,41 \cdot 500 \text{ К} = 705 \text{ К}.$$

О т в е т : $T_2 = 705 \text{ К}$.

Задача 2. Найдите температуру поверхности Солнца, считая его черным телом, если длина волны максимального значения спектральной плотности излучения Солнца

$$\lambda_{\max} = 0,48 \text{ мкм}.$$

Дано:

$$\lambda_{\max} = 0,48 \text{ мкм} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

$T - ?$

Решение: Согласно закону смещения Вина, температура поверхности Солнца определяется следующим образом.

$$T = \frac{c}{\lambda_{\max}}.$$

где $c = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ — постоянная Вина. Выполняя вычисления, получим следующее:

$$T = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{4,8 \cdot 10^{-7}} \text{ К} = 6040 \text{ К} = 6,04 \cdot 10^3 \text{ К} = 6,04 \text{ кК}$$

О т в е т : $T = 6,04 \text{ кК}$

Задача 3. Определите красную границу фотоэффекта λ_k для натрия, если работа выхода электрона $A_{\text{вых}} = 2,3 \text{ эВ}$

$$\text{Дано: } A_{\text{вых}} = 2,3 \text{ эВ} = 2,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$\lambda_k - ?$

Решение: Из выражения, записанного для красной гра-

ницы фотоэффекта $\frac{hc}{\lambda_k} = A_{\text{вых}}$ находим λ_k : $\lambda_k = \frac{hc}{A_{\text{вых}}}$,

где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ — постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ — скорость света в воздухе.

Выполним вычисления:

$$\lambda_k = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,68 \cdot 10^{-19}} \text{ м} = 5,4 \cdot 10^{-7} = 0,54 \text{ мкм}$$

О т в е т : $0,54 \text{ мкм}$.

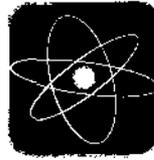


Задачи для самостоятельного решения

1. На сколько процентов возрастет излучение тела, если его температура возросла на один процент? ($\Delta n = 4,06\%$)
2. Во сколько раз надо уменьшить температуру тела, чтобы его излучение уменьшилось в 16 раз? ($n = 2$ раза)
3. Температура Солнца равна $T = 5,3 \text{ кК}$. Найдите длину волны максимального значения спектральной плотности Солнца λ_{\max} , если считать Солнце черным телом. ($\lambda_{\max} = 0,547 \text{ мкм}$)
4. Определить длину волны фотона, падающего на платиновую пластинку, если скорость фотоэлектронов равна $v = 3000 \text{ км/с}$. ($\lambda = 0,039 \text{ мкм}$)
5. Красная граница фотоэффекта для цинка $\lambda_q = 0,031 \text{ мкм}$. Найдите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов в электрон-вольтах, если на цинковую пластинку падает свет длиной волны $\lambda = 0,002 \text{ мкм}$. ($E_{\max} = 2,2 \text{ эВ}$)
6. Свет длиной волны $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$ вертикально падает на зеркальную поверхность и оказывает давление $p = 4 \text{ мПа}$. Найдите число фотонов, падающих на поверхность площадью $S = 1 \text{ мм}^2$ в течение 10 с . ($n = 1,8 \cdot 10^{16}$)
7. Найдите длину волны фотона, если его масса равна массе электрона. ($\lambda = 0,024 \text{ мкм}$)
8. Фотоны длиной волны $\lambda = 600 \text{ мкм}$ падают на пластинку с коэффициентом отражения, равным 0,2. Найдите число фотонов, падающих на пластинку в единицу времени, если они давят с силой 10^{-13} Н/м^2 ($N = 755 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$)

Тестовые вопросы

1. Чему будет пропорциональна кинетическая энергия фотоэлектронов?
 - A. Частоте падающего света;
 - B. Потoku падающего света;
 - C. Интенсивности излучения;
 - D. Задерживающему полю;
 - E. Задерживающему напряжению.
2. Среди приведенных формул найдите формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
 - A. $hn_k = A$;
 - B. $E = hn$;
 - C. $E = mc^2$;
 - D. $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$;
 - E. Правильный ответ C и D.



3. Чему равна энергия фотона красного света длиной волны $6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$?
 А. $3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; В. $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; С. $4,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$;
 D. $2,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; E. $3 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$.
4. В чем причина сохранения размеров звезды в определенных пределах?
 А. Химическое действие света;
 В. Фотографическое действие света.
 С. Давление света;
 D. Корпускулярная природа света;
 E. Волновая природа света.
5. Покажите формулу, определяющую «красную границу» фотоэффекта.
 А. $m = \frac{h\nu}{c^2}$; В. $v = \frac{A}{h}$; С. $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$;
 D. $E = h\nu$; E. $M = \frac{h\nu}{c}$.

Основные выводы главы

Термодинамическим равновесием называют состояние, при котором термодинамические параметры системы с течением времени остаются без изменения.

Гипотеза Планка: Энергия излучения тела, как представляется в классической физике, не является непрерывной, а излучается порциями энергии, пропорциональными частоте ν , т.е. состоит из отдельных порций.

$$E = h\nu.$$

Фотон является квантом света и имеет следующие характеристики: энергия равна $E = h\nu$; масса $m = \frac{E}{c^2}$; импульс $P = mc$.

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света.

Если электроны, вырванные из атома или молекулы под действием света, остаются в веществе в качестве свободных электронов, такое явление называется внутренним фотоэффектом.

Формула Эйнштейна для фотоэффекта: $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$.

$$\text{Давление света: } P = \frac{E_{\text{эл}}}{c} (1 + \rho)$$

Все вещества состоят из множества неделимых частиц (атомов). Эта идея впервые была предложена в античные времена греческими учеными Демокритом, Эпикуром и Лукрецием (слово «атом» (по-гречески – atomus) означает «неделимый»). Но в течение долгого времени по разным причинам ей не уделялось должного внимания. Однако в результате стараний ученых: француза А. Лавуазье (1779–1794), англичанина Дж. Дальтона (1766–1844), итальянца А. Авогадро (1776–1851), русского М. Ломоносова (1711–1765), шведа Й. Берцелиуса (1779–1848) – не осталось сомнений в существовании атома. Д.И. Менделеев в 1869 г. создал периодическую систему элементов и доказал, что атомы всех элементов имеют похожее строение. Но, вместе с тем, к началу XX в. возникла проблема, заставившая заглянуть внутрь считавшегося неделимым атома, т.е. заняться изучением его строения. В 1903 г. английский ученый Дж. Томсон создал первую модель атома. Другой английский ученый, Д. Резерфорд, на основании своих опытов отверг модель атома Томсона и предложил планетарную модель атома. Согласно этой модели, атом состоит из ядра (сердечника) и вращающихся вокруг ядра электронов. В дальнейшем было определено, что ядро атома состоит из положительно заряженных протонов и электронейтральных нейтронов.

§ 25. Модели атома. Опыт Резерфорда

С о д е р ж а н и е : модель Томсона; опыт Резерфорда; выводы из опыта Резерфорда; планетарная модель атома.

Модель Томсона. В 1897 г. английский физик Дж. Томсон открыл частицу, названную электроном, с отрицательным зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ и массой $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$. Опыты, в частности, опыты по ионизации атомов, подтвердили, что эта частица входит в состав атома: когда электронейтральный атом теряет или присоединяет к себе электрон, то превращается в ион. Если стало известно, что в состав атома входит



Д.Ж. ТОМСОН
(1856–1940)

отрицательно заряженная частица – электрон, то возникает вопрос, что еще может находиться в атоме. Естественно, что существует положительный заряд, равный заряду электрона. В противном случае атом не был бы электрически нейтральным. Рассуждая именно так, Дж. Томсон в 1903 г. предложил свою модель строения атома.

Согласно модели Томсона, атом представляется в виде положительно заряженного шара размером 10^{-10} м с равномерно распределенной массой. Внутри нее находятся отрицательно заряженные частицы

(электроны), которые совершают колебательное движение около положения равновесия. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду анода. Теперь надо было проверить правильность этой модели и заглянуть внутрь ее. Другой английский ученый, Д. Резерфорд, решил сделать это.

Опыт Резерфорда. Чтобы понять цель, которую поставил перед собой Резерфорд, представим себе модель Томсона в виде обыкновенного арбуза: если мякоть арбуза заряжена положительно, то семена пусть будут электронами.

В каком направлении следует идти, чтобы поверить в это? Такой арбуз нельзя разбить на куски, т.к. он имеет очень маленький размер – 10^{-10} м. Единственный путь – направить на арбуз частицы еще меньше, чем сам арбуз, т.е. стрелять в него.

Пуля, пробившая арбуз, позволяет получить сведения о внутреннем строении арбуза. А если пуля, направленная в центр арбуза, не пробьет его и отскочит обратно? Тогда какой вывод можно сделать? Значит, в центре арбуза имеется тяжелый сердечник, который пуля не может пробить. В противном случае она не отскочила бы назад. Теперь познакомимся со схемой опыта Резерфорда (рис. 47). В опыте Резерфорда атом бомбардировали потоком α -частиц. Заряд α -частицы равен

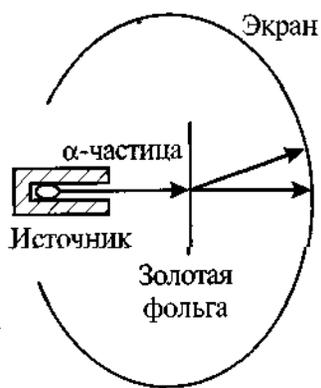


Рис. 47

$+2e$, а масса – $6,64 \cdot 10^{-27}$ кг. Если источник находился в свинцовом сосуде с узкой щелью, частицы выпускались в определенном направлении; в других направлениях они поглощаются стенками сосуда. Перед α -частицами помещали золотую фольгу толщиной 1 мкм. После рассеяния α -частицы попадали на экран, где и регистрировались. В своем опыте Резерфорд наблюдал отклонение части α -частиц от первоначального направления на определенные углы и даже их отражение от золотой фольги. Хотя такое явление наблюдалось одно на 10000 частиц, оно было совершенно непонятно с точки зрения Томсоновской модели.

Выводы из опыта Резерфорда. Какой вывод мы сделали, когда пуля, направленная в центр «арбуза», не пробила его, а отразилась назад? Резерфорд сделал точно такой же вывод. Согласно ему, в центре атома должен находиться сердечник размером в 10000 раз меньше атома, т.е. его размер равен 10^{-14} м. В ядре сосредоточены положительный заряд атома и основная часть (порядка 95%) массы. Если α -частица пролетает далеко от ядра золотой фольги, она не меняет своего направления (рис. 48), если сталкивается с ядром, то отражается назад. Так как ядро меньше атома в 10000 раз, то с ядром сталкивается одна из 10000 α -частиц, отражается назад и регистрируется.

Так каково же строение атома?

Ядерная (планетарная) модель атома. На основании результатов опыта Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель атома. Согласно этой модели, атом представляется в виде миниатюрной Солнечной системы. Электроны вращаются вокруг ядра по орбитам (замкнутым), т.е. вдоль электронной оболочки атома, и их заряд равен заряду ядра (рис. 49).

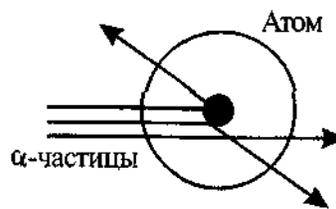


Рис. 48

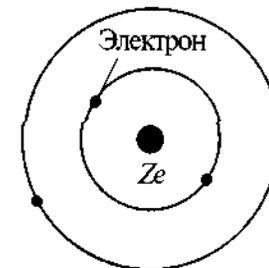


Рис. 49

Дает ли предложенная модель полное представление о строении атома? К сожалению, не дает.

Модель атома Резерфорда вошла в противоречие с законами классической механики и электродинамики и не смогла объяснить спектральные законы излучения. В следующей теме более подробно остановимся на этих проблемах.

? Вопросы для самопроверки

1. Какие идеи о строении вещества выдвигали греческие философы? 2. Что означает слово «атом»? 3. В чем состояла заслуга Менделеева, когда он утверждал, что вещества состоят из атомов? 4. Что это за частица электрон и кто ее открыл? 5. Входит ли в состав атома электрон? 6. Что еще может быть в составе атома? 7. Какова модель атома Томсона? 8. Похожа ли на арбуз модель Томсона? 9. Когда пуля, направленная в «арбуз», может вернуться назад? 10. Объясните схему опыта Резерфорда. 11. Что вы знаете об α -частицах? 12. Куда были направлены α -частицы? 13. Почему взяли такую тонкую золотую фольгу? 14. Где регистрировались частицы, прошедшие золотую фольгу? 15. Отклонялись ли частицы от прежнего направления после прохождения золотой фольги? 16. Были ли возвращающиеся частицы? 17. Какой вывод сделал Резерфорд из своих опытов? 18. Каковы размеры атома, его масса и заряд? 19. В чем причина возвращения α -частиц назад? 20. Почему один из 10000 α -частиц возвращается назад? 21. Когда и кем была предложена ядерная модель атома? 22. Опишите ядерную (планетарную) модель атома. 23. Равен ли заряд электронов заряду ядра согласно этой модели? 24. Дает ли модель атома, предложенная Резерфордом, возможность сделать окончательный вывод о строении атома?

§ 26. Спектр атома водорода

С о д е р ж а н и е : строение атома и его спектр излучения; серия Бальмера; серии Пашена и Лаймана; обобщенная формула Бальмера; комбинационный принцип; спектры атомов и модель Резерфорда.

Строение атома и его спектр излучения. Как было отмечено выше, размеры атома чрезвычайно малы ($\approx 10^{-10}$ м), и поэтому очень трудно изучать его непосредственно. Поэтому целесообразно изучать строение атома не непосредственно, а через характеристики, отражающие его внутреннее строение. Одной из таких характеристик является его спектр излучения.

Спектры излучения атома, т.е. оптические спектры, возникающие при испускании (или поглощении) электромагнитных лучей, изучены достаточно подробно. Созданы некоторые законы, позволяющие объяснить их на основании опытов. Например, спектральные линии всех элементов можно разделить на несколько серий. По своему строению подобные серии различных химических элементов очень похожи друг на друга. Подтвердим сказанное на примере самого простого атома — атома водорода.

Серия Бальмера. Швейцарский физик И. Бальмер в 1885 г. подобрал эмпирическую формулу, описывающую все известные в то время спектральные линии водорода в видимой области спектра.

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots), \quad (26.1)$$

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ — постоянная Ридберга (названа так в честь шведского физика И. Ридберга (1854–1919), который ввел эту величину в научный оборот).

Если учесть, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, то формулу Бальмера можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{R}{c} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots), \quad (26.2)$$

где $R' = \frac{R}{c} = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ тоже называется *постоянной Ридберга*.

В зависимости от значений n образуются группы линий, которые называют *серией Бальмера*.

На рис. 50 приведена серия Бальмера, видимые линии которой обозначены $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$; а H_∞ соответствует самой крайней линии серии Бальмера.



Рис. 50

Серии Пашена и Лаймана. Изучение не видимых глазу частей спектра водорода доказало существование серий в инфракрасной и ультрафиолетовой областях. В ультрафиолетовой области спектра находится серия Лаймана:

$$\nu = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n=2, 3, 4, \dots). \quad (26.3)$$

В инфракрасной области спектра находится серия Пашена

$$\nu = R\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n=4, 5, 6, \dots). \quad (26.4)$$

Обобщенная формула Бальмера. Сравнение формул (26.1), (26.2) и (26.3) показывает, что они похожи. Раз так, то возникает вопрос: а нельзя ли их объединить в одну формулу? Это формула:

$$\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right). \quad (26.5)$$

Это выражение есть обобщенная формула Бальмера, где m имеет в каждой данной серии постоянное значение $m=1, 2, 3, 4, \dots$ и определяет серию, а n принимает целочисленные значения начиная с $m+1$ и определяет отдельные линии этой серии. Серии можно выразить и с помощью следующей таблицы.

Т а б л и ц а 3

Серии	M	N
Лаймана	1	2, 3, 4, ...
Бальмера	2	3, 4, 5, ...
Пашена	3	4, 5, 6, ...

В спектре водорода еще существуют серии Брэкета, Пфунда и Хэмфри, но мы на них не будем останавливаться. Вместе с тем поставим вопрос: а какой вид имеют спектры излучения других элементов?

Комбинационный принцип. Как показывают опыты, спектры, похожие на приведенные выше, наблюдаются не только у водорода, но и у щелочных металлов (Li, Na, K). У них тоже расположение спектральных линий определяется формулой, похожей на формулу Бальмера. Швейцарский физик В. Ритц, который изучал эти спектры, обратил внимание на

то, что частота некоторой спектральной линии становится равной сумме частот двух других линий. Чтобы объяснить это явление, он выдвинул названный комбинационным принцип Ридберга-Ритца: для каждого атома существует такая последовательность чисел, названных спектральными термами, что можно частоты всех спектральных линий этого атома выразить в виде разности двух таких спектральных термов, т.е.

$$\nu = T(m) - T(n). \quad (26.6)$$

Правильность этого принципа подтверждена множеством опытов. Это же доказывает, что он связан со строением и процессами, происходящими внутри атома при его излучении.

Спектры атомов и модель Резерфорда. Хотя ядерная модель Резерфорда явилась большим успехом атомной физики, она не смогла объяснить спектральные закономерности атома. Кроме того, она противоречила законам классической механики и электродинамики.

Во-первых, движение электрона вокруг ядра — это криволинейное движение, т.е. движение, происходящее с ускорением. При таком движении, по законам электродинамики, электрон должен излучать свет, электромагнитную волну, т.е. в процессе движения энергия электрона понижается, орбита вращения уменьшается и приближается к ядру. Другими словами, через определенное время электрон должен был упасть на ядро, и атом должен был прекратить свое существование. Это, согласно модели Резерфорда, доказывает, что атом — нестабильная система.

На практике же атом является очень стабильной системой.

Во-вторых, по мере приближения электрона к ядру радиус орбиты уменьшается ($R \rightarrow 0$), а скорость остается постоян-

ной ($v = \text{const}$). В результате с увеличением ускорения $\left(\frac{mv^2}{R}\right)$

частота излучения должна непрерывно увеличиваться, а значит, должен наблюдаться непрерывный спектр излучения. Мы же при изучении этой темы узнали, и опыты доказывают, что спектры излучения линейные, т.е. непрерывные.

Все это доказывает, что модель атома Резерфорда за короткое время выполнила свою миссию.

Кроме того, формулы, записанные для спектральных се-

рий, доказали универсальность постоянной Ридберга и свидетельствовали о необходимости возникновения новой идеи, создания новой теории для объяснения экспериментальных данных.

При изучении следующей темы продолжим знакомство с теорией, имеющей огромное значение для развития современной физики.



Вопросы для самопроверки

1. Почему строение атома нельзя изучать непосредственно?
2. Как изучается строение атома? 3. Изучались ли оптические спектры атомов на опыте и необходимы ли они? 4. Почему возникла необходимость изучения спектра атома водорода? 5. Напишите формулу Бальмера. 6. В какой части спектра располагается серия Бальмера? 7. Чему равна постоянная Ридберга? 8. Какова формула Бальмера для длины волны? 9. Прокомментируйте спектральные линии в серии Бальмера. 10. Какие серии расположены в невидимой части спектра водорода? 11. Какова формула серии Лаймана? 12. А серии Пашена? 13. Есть ли что-либо похожее в формулах, приведенных выше? 14. Какова обобщенная формула Бальмера? 15. Какие значения принимает m и что это доказывает? А n ? 17. Прокомментируйте таблицу с указанными сериями. 18. Какие еще серии имеются в спектре водорода? 19. Какой вид имеют спектры других элементов? 20. Что определил В. Ритц? 21. Что такое комбинационный принцип? 22. Соответствует ли результатам опыта комбинационный принцип? 23. Каким является движение электрона вокруг ядра согласно модели Резерфорда? 24. Почему электрон, движущийся вокруг ядра, должен испускать свет? 25. Почему электрон должен упасть на ядро? 26. Падает ли электрон на ядро и исчезает ли атом на практике? 27. Почему частота излучения электрона должна быть непрерывной? 28. Какую частоту излучения атомов показывают опыты? 29. Что не смогла объяснить модель Резерфорда? 30. Какие еще основания свидетельствуют о необходимости создания новой теории?

§ 27. Модель атома водорода по Бору

С о д е р ж а н и е : постулаты Бора; первый радиус Бора; энергетические уровни в атоме; линейные спектры; постоянная Ридберга; опыт Франка-Герца; недостатки теории Бора.

Постулаты Бора. Создание теории, которая могла бы решить накопившиеся проблемы, выпало на долю одного из

выдающихся физиков XX века датчанина Н. Бора. Основной его целью было объяснение закономерностей линейных спектров, найденных опытным путем, на основе ядерной модели Резерфорда. Бор выдвинул идею о том, что излучение, испускаемое или поглощаемое атомами, состоит из квантов.

Таким образом, в 1913 г., применив к ядерной модели Резерфорда квантовую теорию, Н. Бор создал модель атома водорода, полностью объясняющую результаты опытов. В общем случае *свойство физических величин принимать не любые, а избранные значения, подчиняющиеся определенным правилам, называют квантованием. Теория, созданная на основе квантования, называется квантовой теорией.*

Основу теории Бора составляют следующие два постулата. Каждый из этих постулатов направлен на устранение двух недостатков в модели Резерфорда, которые мы отметили выше.

1. Постулат о стационарных (устойчивых) состояниях: система атомов может находиться только в особых стационарных состояниях, которым соответствует стационарная орбита электронов.

Электроны находятся только в этих стационарных орбитах и не излучают, даже если двигаются с ускорением.

Момент количества движения (момент импульса) электрона в стационарной орбите бывает квантованным и определяется следующим условием:

$$m_e v_n r_n = n\hbar, \quad (27.1)$$

где m_e — масса электрона; r_n — радиус n -орбиты; v_n — скорость электрона в этой орбите; $m_e v_n r_n$ — момент импульса электрона в этой орбите; n — целое число, не равное нулю, которое

называют *главным квантовым числом*; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h — постоянная

Планка).

Значит, в соответствии с первым постулатом Бора, электрон не может двигаться по любым орбитам, а движется только по определенным стационарным орбитам. В процессе этого движения он не излучает, т.е. энергия не уменьшается. Если не уменьшается энергия, то электрон не падает на ядро и атом не прекращает своего существования. Таким образом,



Н. БОР
(1885–1962)

этот постулат Бора устраняет первый недостаток модели Резерфорда.

2. **Постулат о частотах:** при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (или поглощается) один фотон, энергия которого равна разности энергий соответствующих стационарных состояний:

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (27.2)$$

где E_n и E_m — соответственно энергии электрона в n - и m -стационарных орбитах.

Если $E_n > E_m$, фотон излучается. Другими словами, происходит переход атома из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т.е. переход электрона с более удаленной от ядра орбиты на более близлежащую.

Если $E_n < E_m$, фотон поглощается, т.е. происходит процесс, обратный изложенному выше.

Из выражения (27.2) можно определить частоту излучения, т.е. определить линейный спектр атома:

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}. \quad (27.3)$$

Значит, в соответствии со вторым постулатом Бора, электрон не может испускать излучение любой частоты, а испускает излучение, удовлетворяющее условию (27.3). И именно поэтому спектр излучения атома бывает не непрерывным, а имеет прерывистый (линейный) вид. Значит, второй постулат Бора устраняет второй недостаток модели Резерфорда.

Первый радиус Бора. Рассмотрим самый простой атом — атом водорода. Он состоит из ядра, состоящего, в свою очередь, из одного протона и одного электрона, вращающегося вокруг ядра. Ядро притягивает к себе электрон с кулоновской силой и сообщает ему центростремительное ускорение, т.е.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e \cdot e}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}. \quad (27.4)$$

где e — заряд электрона и протона, ϵ_0 — электрическая постоянная. Теперь из выражения (27.1) найдем v_n и подставим в (27.4), а из полученного выражения для r_n найдем следующее:

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2}, \quad (27.5)$$

где n — порядковое число стационарной орбиты электрона

(точнее, стационарного состояния атома). Например, если возьмем $n = 1$, то получим значение радиуса первой стационарной орбиты электрона в атоме водорода. Этот радиус называют *первым радиусом Бора*, который используется в атомной физике в качестве единицы длины

$$r_B = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Также: $r_2 = 4r_B$ и т.д.

Энергетические уровни в атоме. Определенные значения, которые может принимать энергия атома в стационарном состоянии, называют его *энергетическими уровнями*.

По теории Бора, ядро атома считается неподвижным. Поэтому полная энергия атома E равна сумме кинетической энергии вращательного движения электрона E_k и взаимной потенциальной энергии электрона с ядром E_p , т.е.

$$E = E_k + E_p \quad (27.6)$$

Если принять во внимание, что

$$E_k = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (27.7)$$

и

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}, \quad (27.8)$$

то полная энергия атома находится из следующего выражения:

$$E = E_k + E_p = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n}. \quad (27.9)$$

При получении выражения (27.7) использовали выражение (27.4), а для выражения (27.8) использовали правило определения потенциальной энергии взаимодействия между двумя зарядами.

Теперь выражение (27.5), найденное для r_n , подставим в выражение (27.9) и найдем энергию атома E_n любого энергетического уровня:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (27.10)$$

Из этого выражения видно, что полная энергия водорода отрицательная, и она показывает, сколько энергии нужно затратить, чтобы превратить электрон и протон в свободные частицы. Другими словами, именно эта энергия удерживает эти частицы как единое целое, как атом. Поэтому состояние

с $n = 1$ считается самым устойчивым: в этом состоянии атом обладает самой маленькой энергией, и его называют *основным энергетическим состоянием*.

Для ионизации атома водорода в этом состоянии необходимо затратить самую большую энергию. Состояния с $n > 1$ называются *возбужденными состояниями*, когда энергия атома бывает меньше, и, чтобы ионизировать атом в этом состоянии, тратится меньше энергии.

Линейные спектры. Согласно второму постулату Бора при переходе из одного стационарного состояния в другое электрон излучает или поглощает фотон с энергией.

$$h\nu = E_2 - E_1 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (27.11)$$

Если электрон переходит со второй орбиты (формула) на первую ($n_1 = 1$), фотон излучается (рис. 51), в обратном случае — поглощается. Для перевода электрона с орбиты ($n_1 = 1$) на орбиту ($n_2 = \infty$), другими словами, чтобы вырвать электрон из ядра атома (для ионизации атома), тратится самая большая энергия. Значение этой энергии равно 13,53 эВ — это есть энергия ионизации атома водорода.

Значит, энергия электрона в основном состоянии атома равна 13,53 эВ. Как было отмечено выше, отрицательное значение энергии показывает, что электрон находится в связанном состоянии. Энергию электрона в свободном состоянии принято считать равной нулю.

С помощью выражения (27.11) можно найти частоту и длину волны излученного или поглощенного фотона:

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (27.12)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2 c} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (27.13)$$

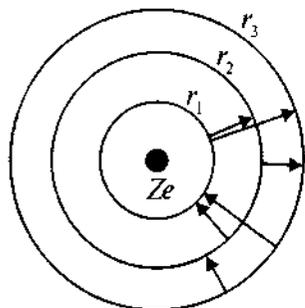


Рис. 51

Эти формулы называют формулами серий. С их помощью можно образовать все серии спектра атома водорода (рис. 52).

Постоянная Ридберга. Сравнение выражения (27.12) с обобщенной формулой Бальмера (27.5) показывает, на-

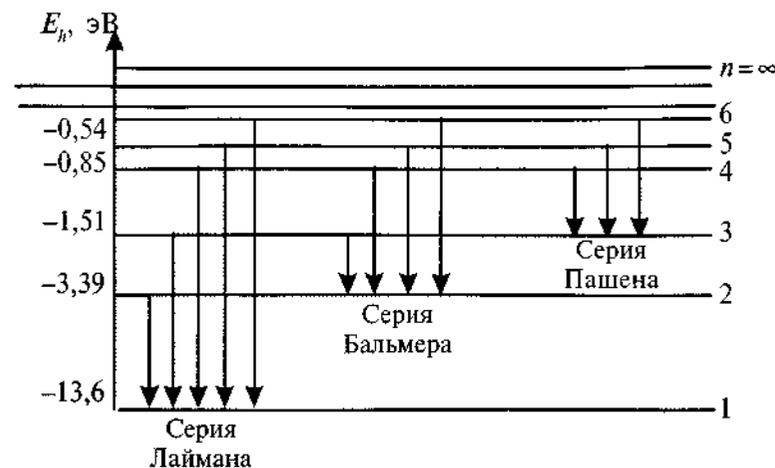


Рис. 52

сколько они подобны. Только постоянная Ридберга в (27.12) равна

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2}.$$

Значение постоянной Ридберга, найденное из выражения (27.14), полностью соответствует результатам опытов. Это же есть явное доказательство истинности теории Бора для атома водорода.

Хотя теория Бора решила все проблемы в атомной физике, существовавшие до ее создания, но наличие стационарных состояний в атоме и дискретность энергетических уровней еще не были доказаны экспериментально. Ниже мы познакомимся с одним из опытов, проведенных с этой целью.

Опыт Франка-Герца. Немецкие физики Д. Франк и Г. Герц, изучая методом задерживающего потенциала столкновение электронов с атомами газа (1913 г.), экспериментально доказали дискретность значения энергии атома. Схема опыта приведена на рис. 53.

Стеклянный сосуд с электродами — катод (K), анод (A) — и сетками (T_1 и T_2) заполнен парами ртути при низком давлении. Вылетающие из катода электроны ускоряются в 1-й области и соударяются во 2-й области с атомами паров ртути. При этом они могут возбудить атомы ртути. Согласно теории Бора, если действительно энергетические уровни атома ртути дискретны, они поглощают определенную энергию и пе-

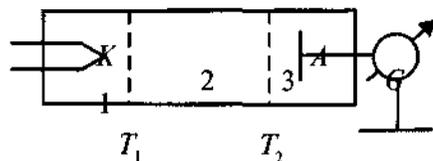


Рис. 53

переходят в одно из возбужденных состояний. Поэтому при столкновении с атомами ртути электрон теряет энергию, равную разности энергий стационарных состояний.

На рис. 54 приводится зависимость анодного тока от ускоряющего напряжения. Из рисунка видно, что при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В сила анодного тока возрастает монотонно, а затем резко падает. Это состояние повторяется при $U = 2 \times 4,86$ В и $U = 3 \times 4,86$ В.

В чем причина такого изменения анодного тока? Пока энергия электрона не достигнет значения $eU = 4,86$ эВ, он не может возбудить атом ртути и поэтому анодный ток растет. Когда энергия электрона будет достаточной для возбуждения атома ртути, он отдает ему свою энергию, и в результате электрон не долетает до анода и анодный ток резко уменьшается. С увеличением ускоряющего потенциала электрон дважды соударяется с атомами ртути и может перевести их в возбужденное состояние.

Как показывает опыт Франка-Герца, электрон после соударения с атомами ртути может передавать им только определенную часть своей энергии. Эта энергия равна 4,86 эВ — наименьшей возможной порции энергии, которая может быть

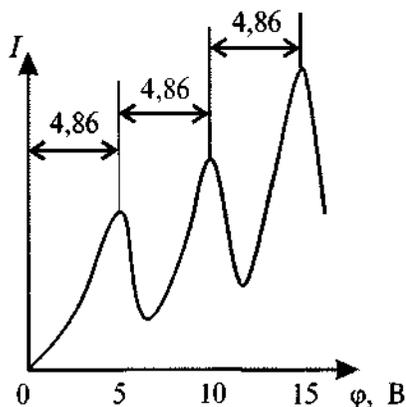


Рис. 54

поглощена атомом ртути в основном энергетическом состоянии. Так экспериментально была полностью доказана теория Бора о существовании стационарных состояний в атоме.

В соответствии со вторым постулатом Бора, атомы ртути, получившие энергию $\Delta E = 4,86$ эВ, переходят в возбужденное состояние и должны возвратиться в основное состояние, излучая при этом световой квант, соответствующий этой

энергии. Если учесть, что $\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$, то $\lambda \approx 0,255$ мкм соответствует ультрафиолетовому излучению. На опыте действительно наблюдалось излучение с длиной волны $\lambda \approx 0,254$ мкм. Это является доказательством правильности второго постулата Бора.

Недостатки теории Бора. Теория Бора внесла большой вклад в развитие атомной физики и явилась важным этапом в создании квантовой механики. Хотя она и давала возможность вычислить спектры и спектральные линии водорода и водородоподобных атомов, но была бессильна объяснить интенсивности этих линий и причины этих и других переходов. Действительный кризис теории проявился при объяснении спектра атома гелия, следующего за самым простым элементом — водородом. Причину этого Бор сам видел в том, что теория была полуклассической, т.е., с одной стороны, применялись квантовые постулаты, а с другой — законы классической физики. Чтобы еще смелее заглянуть в глубь атома, возникла необходимость в новой теории.

? Вопросы для самопроверки

1. Какую теорию создал Н. Бор?
2. В чем заключается ее основная цель?
3. На основе какой идеи Бор создал свою теорию?
4. Что называют квантованием?
5. А квантовой теорией?
6. Что составляет основу теории Бора?
7. Какая цель преследовалась в постулатах Бора?
8. Из чего состоят постулаты о стационарном состоянии?
9. Объясните квантование количества движения электрона.
10. Какие значения принимает главное квантовое число?
11. Какой недостаток модели Резерфорда устраняет первый постулат Бора?
12. Из чего состоит постулат о частотах?
13. Когда излучается фотон?
14. На какую орбиту переходит электрон, когда излучает фотон?
15. Когда поглощается фотон и на какую орбиту переходит электрон?
16. Как определяется частота излучения?
17. Какой недостаток модели Резерфорда устраняет второй постулат Бора?
18. Под действием каких сил

находится электрон в атоме водорода? 19. Как определяются радиусы орбиты электрона в атоме водорода? 20. Подсчитайте, чему равен первый радиус Бора. 21. Что называют энергетическим условием? 22. Каким считается уровень ядра атома согласно теории Бора? 23. Чему равна полная энергия атома? 24. Чему равна кинетическая энергия вращательного движения электрона? 25. Чему равна потенциальная энергия взаимодействия электрона и ядра? 26. Как определяется энергия атома на любом энергетическом уровне? 27. Как вы объясните, что энергия атома водорода отрицательная? 28. Какое это состояние $n = 1$? 29. А состояние с $n > 1$? 30. Какая энергия тратится на ионизацию атома водорода, находящегося в этом состоянии? 31. Как определяется энергия электрона при его переходе с одного энергетического уровня на другой? 32. Когда излучается и когда поглощается фотон? 33. Какая энергия тратится на ионизацию атома? 34. Чему равно значение этой энергии для атома водорода? 35. Чему равна энергия электрона в основном состоянии атома водорода? 36. На что указывает отрицательный знак этой энергии? 37. Энергия какого электрона принимается равной нулю? 38. Напишите формулы для серий. 39. Объясните картину на рис. 52. 40. Чему равна постоянная Ридберга? 41. Соответствуют ли значения постоянной Ридберга полученным теоретически и экспериментально? 42. Цель опыта Франка-Герца? 43. Объясните ситуацию на рис. 54. 44. Какова причина того, что анодный ток меняется таким образом? 45. Какая эта энергия (4,86 эВ)? 46. Доказал ли опыт Франка-Герца существование стационарных орбит у атомов ртути? 47. Какое излучение должен излучать атом ртути при переходе из возбужденного состояния в основное? 48. Какой результат показывает эксперимент? 49. Какой вывод можно сделать из этого эксперимента? 50. В чем значение теории Бора? 51. В чем состоят недостатки теории Бора? 52. Причина существования этих недостатков?

§ 28. Гипотеза Луи де Бройля. Волновые свойства частиц

Содержание: гипотеза Луи де Бройля; опыт Девиссона-Джермера; квант действия.

Гипотеза Луи де Бройля. Необходимость создания более совершенной теории, чем теория Бора, подтолкнуло ученых обратиться к идеям, связанным с волновой механикой. Основная причина этого — *корпускулярно-волновой дуализм излучения*. Нам известно, что с введением понятия фотона было установлено отношение между энергией и частотой $E = h\nu$ и

определено, что существование фотона непосредственно связано с дуализмом.

Если фотон обладает таким свойством, то возникает вопрос: не обладают ли свойством корпускулярно-волнового дуализма другие частицы, в частности электрон? Положительно ответивший на этот вопрос французский физик Луи де Бройль в 1923 г. выдвинул следующую гипотезу об *универсальности корпускулярно-волнового дуализма*. По его мысли, *не только фотон, но и электрон, и другие частицы наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами*.

Другими словами, с одной стороны, каждая частица обладает корпускулярными свойствами — энергией (E) и импульсом (P), с другой стороны, волновыми — частотой (ν) и длиной волны (λ). Количественные соотношения, связывающие корпускулярные и волновые свойства частиц, такие же, как и у фотонов.

$$E = h\nu, \quad P = \frac{h}{\lambda}. \quad (28.1)$$

По мнению Луи де Бройля, выражение (28.1) имеет место для любой частицы с отличной от нуля массой покоя. Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, соответствует волна, длина которой вычисляется по формуле Луи де Бройля.

$$\lambda = \frac{h}{P} \quad (28.2)$$

Если частицы обладают свойством волны, то возникает вопрос: подвергаются ли они, как и волны, интерференции и дифракции?

Познакомимся с опытами, проведенными с целью найти ответ на эти вопросы.

Опыт Девиссона-Джермера. В 1927 г. американские физики К. Девиссон и Л. Джермер изучили рассеяние электронов на монокристалле никеля. Как показал опыт, при заданном угле падения электроны отражаются от поверхности кристалла под разными углами. При этом в одном направлении число отраженных электронов было больше, а в другом — меньше, и в результате на регистрирующей фотопластинке наблюдалась



Л. де БРОЙЛЬ
(1892–1987)

дифракционная картинка. Как показал опыт Девиссона и Джермера, при рассеянии электроны вели себя как волны, и длина их волны совпадала с длиной волны Луи де Бройля.

Волновое свойство присуще не только движущемуся потоку частиц, но и отдельной частице. В 1948 г. В.А. Фабрикант, Биберман и Шишкин наблюдали дифракцию отдельных электронов. Впоследствии обнаружили, что дифракционные явления свойственны также для нейтронов, протонов, атомов и молекулярных пучков. Таким образом, корпускулярно-волновой дуализм присущ не только фотону, но и любым частицам материи.

Действительно, возникает вопрос: а обладают ли волновыми свойствами макротела? Конечно, обладают, в частности и мы. Но длина нашей волны настолько мала, что ее не удается зарегистрировать. Для примера, найдем длину волны пули массой 1 г, летящей со скоростью 100 м/с. Согласно формуле де Бройля,

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{10^{-3} \cdot 100} \text{ м} = 6,62 \cdot 10^{-33} \text{ м}.$$

Волну такой длины невозможно зарегистрировать, поэтому пулю мы рассматриваем только в качестве частицы. Но если посчитать длину волны электрона, движущегося со скоростью 10^8 м/с, то она будет равна $\lambda = 7,3 \cdot 10^{-12}$ м, и не учитывать такую волну абсолютно невозможно.

Квант действия. Таким образом, мы убедились в том, что корпускулярно-волновой дуализм материи имеет универсальный характер, т.е. материя может одновременно обладать свойствами корпускулы и волны, а также установили взаимосвязь между величинами, характеризующими эти свойства:

$$E = h\nu \text{ и } P = \frac{h}{\lambda}.$$

Но мы подробно не останавливались на величине h — постоянной Планка, связывающей эти величины. Если принять $v = 1c^{-1}$, то увидим, что энергия будет равна постоянной Планка. Значит, постоянная Планка показывает величину изменения энергии кванта, т.е. чему будет равно наименьшее значение изменения энергии кванта. Точно так же, если во втором выражении возьмем $\lambda = 1 \text{ м}$, то увидим, что импульс будет равен постоянной Планка. Значит, эта величина

характеризует изменение не только энергии, но и величины импульса, поэтому ее называют квантом действия. Таким образом, *постоянная Планка — это величина, показывающая изменение квантовых характеристик, т.е. степень дискретности.*

Чтобы представить себе вышеизложенное, проведем следующее сравнение. Если представим себя в мире микрочастиц, то увидим дискретное изменение энергии этих частиц, подобное подъему по ступеням. Разница между соседними ступенями будет равна постоянной Планка, другими словами, величины квантуются. Теперь переместимся в мир макротел. Мир микрочастиц будет настолько далеко от него, что мы не увидим ступеней и не почувствуем их высоты. Дорога на подъем будет представляться гладкой и будет казаться, что при подъеме наверх мы можем делать очень маленькие шаги, т.е. величины изменяются непрерывно.

Будем надеяться, что такое сравнение позволит получить первоначальное представление о физическом смысле постоянной Планка. При изучении следующей темы мы снова вернемся к ней.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое корпускулярно-волновой дуализм?
2. Почему говорят, что в фотоне непосредственно отражен корпускулярно-волновой дуализм?
3. Существует ли такой дуализм у электрона?
4. Дайте определение гипотезе об интенсивности корпускулярно-волнового дуализма?
5. Кто автор этой гипотезы?
6. Какие величины считаются корпускулярными характеристиками, а какие — волновыми?
7. Какая взаимосвязь существует между ними?
8. Каждой ли частице, имеющей импульс, соответствует длина волны?
9. С какой целью был проведен опыт Девиссона-Джермера и какой результат он дал?
10. Наблюдается ли явление дифракции для других частиц?
11. Предположив, что вы двигаетесь вместе с Землей, подсчитайте длину своей волны.
12. Почему не чувствуется ваше волновое свойство?
13. Чувствуется ли длина волны электрона?
14. Какое место занимает постоянная Планка в определении корпускулярно-волнового дуализма?
15. Что показывает постоянная Планка?
16. Почему ее называют квантом действия?
17. Как вы представляете себе место постоянной Планка в мире микрочастиц?
18. Какое место постоянная Планка занимает в мире макрочастиц?

§ 29. Элементы квантовой механики

Содержание: понятие о квантовой механике; соотношения неопределенностей; электронное облако; квантовые числа; принцип Паули; объяснение периодической системы элементов Менделеева.

Понятие о квантовой механике. Таким образом, теория Бора оказалась бессильной объяснить многие процессы, происходящие в микромире, в частности, строение многоэлектронных атомов и молекул, химические связи и др. Теория Луи де Бройля о волновых свойствах частиц стала толчком для создания новой теории с учетом этих свойств. Основной частью этой теории было создание в 1925–1926 гг. немецким физиком В. Гейзенбергом и австрийским физиком Е. Шредингером квантовой механики. *В квантовой механике обобщены два свойства вещества: квантовые числа и волновые свойства частиц.*



В. ГЕЙЗЕНБЕРГ
(1901–1976)



Е. ШРЕДИНГЕР
(1887–1961)

Вместе с тем возникают следующие вопросы: Откуда начинается граница применимости квантовой механики? Когда одновременно проявляются и корпускулярные, и волновые свойства частиц? До каких пор будет достаточным рассматривать частицу как частицу? Существует ли такое? Да, существует. Это постоянная Планка. Мы частично останавливались на этой задаче при изучении предыдущей темы. Сейчас напрямую можем дать ответ на поставленный вопрос. В рассматриваемом случае законы квантовой механики начнут работать с той границы, где необходимо будет учитывать значение постоянной Планка. Значит, до границы, где можно не учитывать постоянную Планка, можно использовать законы классической физики. Кроме того, мы должны по-новому взглянуть на некоторые понятия, которые стали для нас обыденными. Чтобы прояснить это, познакомимся с соотношением неопределенностей.

Соотношение неопределенностей. Знать состояние частицы — это значит знать ее

координату (место в пространстве) x , импульс P , энергию E и другие характеристики. (Для простоты движение взято в направлении оси X). В классической физике эти величины можно одновременно измерить с возможно большей точностью. Но в квантовой механике ситуация совсем другая.

Так как движущаяся частица обладает корпускулярно-волновым дуализмом, то не удастся одновременно определить ее координату x и импульс P_x .

Как указывает В. Гейзенберг, существует известная граница для точного определения приведенных выше величин. Если неопределенность в определении координаты обозначим через Δx , а неопределенность в определении импульса обозначим через ΔP_x , то эти величины будут связаны между собой следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta P_x &\geq \hbar, \\ \Delta y \cdot \Delta P_y &\geq \hbar, \\ \Delta z \cdot \Delta P_z &\geq \hbar. \end{aligned} \quad (29.1)$$

Последние два неравенства записаны похожими на первое.

Соотношение (29.1) называется *соотношением неопределенностей Гейзенберга*. Из них видно: чем с большей точностью мы определяем координату ($\Delta x \rightarrow 0$), тем большая ошибка допускается при определении импульса ($\Delta P \rightarrow \infty$), и наоборот.

Так же соотношение неопределенностей можно записать для энергии (E) и времени (t):

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar. \quad (29.2)$$

Соотношение неопределенностей следующим образом определяет границу применимости квантовой механики. *Если значение произведения $\Delta x \cdot \Delta p$ будет соизмеримо с постоянной Планка, то состояние системы описывается квантовой механикой. Если произведение $\Delta x \cdot \Delta p$ будет намного больше постоянной Планка, то состояние частицы изучается с помощью законов классической физики.*

Электронное облако. Соотношение неопределенностей показывает, что в квантовой механике теряет свой смысл понятие точного определения местоположения частицы. Другими словами, приходится иметь дело не с точным нахождением частицы в данном месте, а с вероятностью ее нахождения в данном месте. Вероятность нахождения частицы в том или

другом месте определяется квадратом $|\Psi|^2$ его функции состояния Ψ . Функция Ψ является уравнением движения частицы в квантовой механике, т.е. решением уравнения Шредингера. Значит, если теряет свой смысл нахождение частицы в данной точке, то теряет свое значение и идея о движении электрона по определенной орбите, и планетарная модель атома. Теперь приходится иметь дело с плотностью вероятности нахождения электрона в атоме – «электронным облаком». Плотность электронного облака есть мера нахождения электрона в любом месте, где плотность отлична от нуля. В том месте, где плотность наибольшая, и большая вероятность нахождения электрона.

Естественно возникает вопрос: а каким будет электронное облако в атоме, от чего оно зависит?

Квантовые числа. Форма электронных облаков, их размеры и место в пространстве определяются квантовыми числами. Шредингер, основываясь на решении своего уравнения, утверждал, что состояние частицы в атоме характеризуется тремя квантовыми числами: n – главное; ℓ – орбитальное и m – магнитное.

Главное квантовое число n определяет энергетические уровни электрона в атоме и характеризует среднее расстояние между электроном и атомом, т.е. величину электронного облака. Может принимать любые целочисленные значения начиная с единицы: $n = 1, 2, 3, \dots$

Орбитальное квантовое число ℓ определяет значение момента импульса электрона в атоме и характеризует форму электронного облака. Оно принимает значения $\ell = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$.

Магнитное квантовое число m определяет проекцию момента импульса электрона в заданном направлении и характеризует место электронного облака в пространстве. Может принимать значения $m = 0; \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$.

В дальнейшем было определено, что электрон еще обладает и квантовым числом, называемым *спиновым моментом* (S). Расчеты показали, что электрон может иметь только два квантовых числа: $S = +\frac{1}{2}$ и $S = -\frac{1}{2}$.

Таким образом, состояние электрона в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами: n, ℓ, m, S .

Принцип Паули. Швейцарский физик В. Паули определил очень важное для атомной физики правило: *в одном атоме не*

может быть два электрона с одинаковыми квантовыми числами (n, ℓ, m, S).

Это правило называется *принципом Паули*. Согласно этому принципу, в состоянии с главным квантовым числом n может быть всего $2n^2$ электронов.

Обычно электроны с одинаковым главным квантовым числом n образуют одну электронную оболочку и обозначаются следующим образом:

- $n = 1$, K оболочка,
- $n = 2$, L оболочка,
- $n = 3$, M оболочка,
- $n = 4$, N оболочка.

Объяснение периодической системы элементов Менделеева.

Возникает вопрос: а есть ли связь между упорядоченным расположением электронов в оболочках атома и периодической системой элементов Менделеева? В периодической системе элементы в зависимости от электронной оболочки разбиты на различные периоды. Чтобы определить существование такой связи, составим следующую таблицу.

Таблица 4

Большое квантовое число (n)	1	2	3	4
Обозначение оболочки	K	L	M	N
Число электронов, которые могут быть в оболочке, $2n^2$	2	8	18	32
Суммарное число электронов, которые могут быть	2	$2+8=10$	$2+8+18=28$	$2+8+18+32=60$
Элементы	1. H 2. He	3. Li 4. Be 5. B 6. C 7. N 8. O 9. F 10. Ne	11. Na 12. Mg 13. Al 14. Si 15. P 16. S 17. Cl 18. Ar	19. K 20. Ca 21. Sc 22. Ti 23. V 24. Cr 25. Mn ...

Из таблицы видно, что на самом деле электронные оболочки и периоды в периодической системе – это одно и то же. Значит, периодичность элементов зависит от строения их атомов.



Вопросы для самопроверки

1. Что явилось основным толчком для развития квантовой механики? 2. Кто создал основную часть этой теории? 3. Что собрано в квантовой механике? 4. Как определяется граница применимости квантовой механики? 5. Когда используются законы квантовой механики, а когда — классической физики? 6. Что подразумевают, когда говорят, что надо знать состояние частицы? 7. Можно ли в квантовой механике знать состояние частицы? 8. Почему в квантовой механике невозможно одновременно определить координату и импульс частицы? 9. Напишите соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса. 10. Объясните соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса. 11. Объясните соотношение неопределенностей Гейзенберга для энергии и времени. 12. Имеет ли смысл в квантовой механике понятие «место частицы»? 13. Как определяется вероятность нахождения частицы в данном месте? 14. Имеет ли смысл в квантовой механике понятие «движение электрона по орбите»? 15. А планетарная модель атома? 16. Что такое «электронное облако»? 17. Где больше вероятность нахождения электрона? 18. Как определяются форма, размер и местонахождение в пространстве электронного облака? 19. Какими квантовыми числами определяется место электрона в атоме? 20. Что такое главное квантовое число? 21. А орбитальное квантовое число? 22. А магнитное квантовое число? 23. А спиновое квантовое число? 24. Объясните принцип Паули. 25. Сколько электронов может быть в состоянии с главным квантовым числом, равным n ? 26. Как определяются электронные оболочки? 27. Можно ли на основе принципа Паули объяснить периодическую систему элементов Менделеева? 28. Взаимосвязаны ли электронные оболочки и периоды в периодической системе? 29. Проанализируйте табл. 4 и периодическую систему элементов Менделеева.

§ 30. Квантовые генераторы света и их применение

С о д е р ж а н и е : что такое лазер; вынужденное излучение атома; рубиновый лазер; свойства лазера; применение лазеров.

Что такое лазер? Появление оптических квантовых генераторов, называемых лазерами, является большой победой новой области физики — квантовой электроники. Когда говорят о лазере, то подразумевают *источник света с остро направленным когерентным лучом*. Термин «лазер» возник от со-



Н. БАСОВ
(1922–2001)



А. ПРОХОРОВ
(род. 1916)



Ч. ТАУНС
(род. 1915)

крашения английской фразы «усиление света при помощи индуцированного излучения» («Light amplification by stimulated emission of radiation»).

Первые квантовые генераторы были созданы русскими физиками Н. Басовым и А. Прохоровым и американским физиком Ч. Таунсом. Чтобы понять принцип работы таких генераторов, подробнее ознакомимся с процессом излучения.

Вынужденное излучение атома. Как было отмечено в предыдущих темах, когда атом находится в основном состоянии, он не излучает и может находиться там бесконечно долго. Но атом от внешнего воздействия (электромагнитное поле, другие частицы) может перейти в возбужденное состояние. Обычно атом недолго находится в возбужденном состоянии, а снова переходит в основное состояние и при этом излучает фотон с энергией, равной разности энергетических уровней. Такой переход происходит самопроизвольно, поэтому испускаемое излучение является некогерентным. Но, как отмечал А. Эйнштейн, такие переходы могут быть не только самопроизвольными, но и вынужденными. Такое вынужденное излучение может быть под действием фотона, проходящего рядом с атомом (рис. 55).



Рис. 55

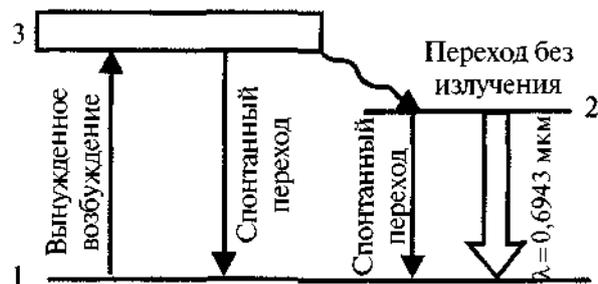


Рис. 56

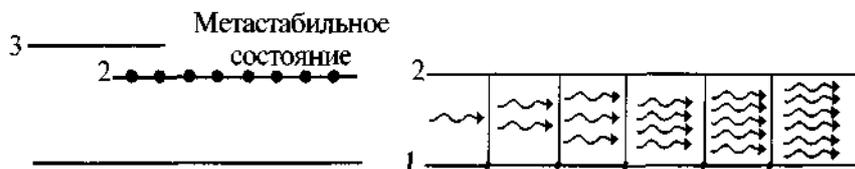


Рис. 57

Рис. 58

В результате фотон, испущенный атомом, при переходе из возбужденного состояния в основное будет похож на фотон, спровоцировавший этот переход. Другими словами, оба фотона будут иметь одинаковую частоту, направление движения, фазу и направления поляризации. Русский физик В. Фабрикант предложил метод усиления света при помощи вынужденного излучения. Для понимания сути этого метода рассмотрим следующий пример. У атомов некоторых веществ имеются такие возбужденные состояния, в которых они могут находиться сравнительно долго. Эти состояния называются *метастабильными состояниями*. С метастабильными состояниями подробно познакомимся на примере кристалла рубина.

Рубиновый лазер. Рубин — это ярко-красный кристалл окиси алюминия Al_2O_3 . Некоторые места атома алюминия занимают трехвалентные ионы хрома Cr^{3+} . В результате сильного освещения атомы хрома вынужденно переводятся из основного состояния 1 в возбужденное состояние 3 (рис. 56).

Так как время жизни атома хрома в возбужденном состоянии очень мало (10^{-7} с), он или спонтанно перейдет (сам собой) в состояние 1, или перейдет в состояние 2 (метастабильное состояние) без излучения. При этом излишек энер-

гии передается кристаллу рубина. Переход из состояния 2 в 1 запрещен принципом отбора, и это приводит к накоплению атома хрома в состоянии 2. Если вынужденное возбуждение будет очень сильным, то концентрация атомов в состоянии 2 будет намного больше, чем в состоянии 1, и происходит «перенаселенность» состояния 2 (рис. 57). Если теперь в рубин попадет фотон с энергией, равной разности энергий метастабильного состояния хрома (E_2) и основного состояния (E_1), тогда происходит вынужденный переход ионов из состояния 2 в 1, испускаются фотоны с энергией $E_2 - E_1 = h\nu$, равной энергии первоначального фотона. Этот процесс происходит лавинообразно, и число фотонов резко возрастает (рис. 58). У этих фотонов будут одинаковыми не только частоты, но и фазы, направления распространения и плоскости поляризации. В результате из рубина выходит когерентный пучок света, т.е. *лазерный луч*.

На рис. 59 показана схема создания рубинового лазера. Вокруг рубинового стержня 1 располагается газовая лампа 2, обеспечивающая переход атомов хрома в метастабильное состояние. Чтобы поддерживать определенную температуру рубинового стержня, подводится система охлаждения 3.

Схема других лазеров подобна этой. Возникает резонный вопрос: чем привлекателен лазер, который мы изучили так подробно? Чтобы узнать это, познакомимся со свойствами лазеров.

Свойства лазера. Лазерное излучение обладает следующими свойствами:

1. *Высокая степень когерентности*, т.е. фазы фотонов одинаковые.
2. *Строгая монохроматичность*. Разность длин волн, входящих в пучок фотонов $\Delta\lambda < 10^{-11}$ м, не превышает 10^{-11} м.

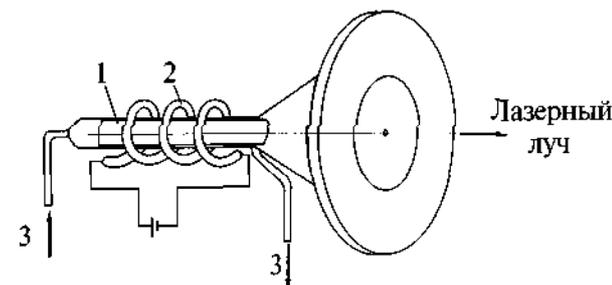


Рис. 59

3. *Большая мощность излучения.* В лазерном луче мощность излучения может достигать значения $10^{16} - 10^{20} \text{ Вт/м}^2$. Это считается очень большой мощностью. В то время как мощность излучения Солнца достигает $7 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ суммарно ко всему спектру.

4. *Очень малое угловое расхождение в пучке.* Например, на Луне пучок, испущенный с Земли, дает пятно диаметром всего 3 км. Обычный прожектор давал бы пятно диаметром 40000 км.

В чем причина таких уникальных свойства лазера? Дело в том, что лазер на основе законов квантовой механики любую энергию (электрическую, тепловую, световую, химическую и т.д.) превращает в энергию когерентного луча. Эти его удивительные свойства являются причиной широкого использования лазерного излучения.

Применение лазеров. Удобство и использование маленькой энергии позволило применять лазеры при повторной обработке твердых материалов и при сварке. Например, если раньше, чтобы сделать алмазом маленькое отверстие, тратилось 24 часа, сейчас эта работа выполняется с помощью лазера за 6–8 минут. На рубиновых и алмазных камнях, используемых в часовой промышленности, с помощью лазеров делаются углубления диаметром 1–10 мкм и глубиной 10–100 мкм.

Еще одна область, где лазеры находят широкое применение, — это резка и сварка материалов. Эти работы выполняются не только в таких областях, как микроэлектроника и полиграфия, но и в машиностроении, автомобилестроении, в производстве строительных материалов.

Лазерные лучи являются хорошими помощниками при определении дефекта в изделиях, в исследовании механизмов, ускорении химических реакций, получении сверхчистых материалов. Лазеры широко применяются и при измерительных работах. С их помощью можно на расстоянии измерить оползни, показатель преломления среды, температуру. Лазерный луч помог при определении расстояния от Земли до Луны, при внесении изменений в карту Луны.

Лазеры также широко применяются в медицине. Выполняя роль бескровного скальпеля, лазер продлевает человеку жизнь, восстанавливает зрение.

Еще одна перспективная область применения лазеров — это получение и исследование высокотемпературной плазмы.

Эта область находится в центре внимания ученых, так как позволяет осуществлять управляемый термоядерный синтез.

Понятие «лазерный диск» стало неотъемлемой частью повседневной жизни программистов и просто любителей музыки.

В настоящее время область применения лазеров настолько велика, что нет возможности остановиться на каждом из них. Но мы надеемся, что любознательные учащиеся проделают эту работу самостоятельно.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое лазер? 2. Откуда было взято слово «лазер»? 3. Кто является автором лазера? 4. Какое излучение называют спонтанным излучением? 5. Будет ли когерентным спонтанное излучение? 6. Как создается вынужденный переход? 7. Проанализируйте состояния на рис. 55. 8. Похож ли фотон, испущенный при вынужденном переходе, на первоначальный фотон? 9. Что предложил В. Фабрикант? 10. Какое состояние называют метастабильным? 11. Какое строение имеет рубин? 12. Каким образом атомы хрома переходят в возбужденное состояние? 13. В какое состояние может переходить атом хрома, находящийся в возбужденном состоянии? 14. На что тратится лишняя энергия при переходе атома хрома в состояние 2? 15. Почему атомы хрома накапливаются в состоянии 2? 16. Проанализируйте состояние на рис. 57. 17. Что является причиной вынужденного перехода ионов из состояния 2 в состояние 1? 18. Охарактеризуйте состояние на рис. 58. 19. Что является одинаковым у фотонов? 20. Как образуется лазерный луч? 21. Охарактеризуйте рис. 56. 22. Объясните схему на рис. 57. 23. Какие свойства лазера знаете? 24. Что такое когерентность лазера? 25. А монохроматичность? 26. Что такое угол расхождения? 27. Приведите примеры использования лазеров в промышленности. 28. Приведите примеры использования лазеров при проведении измерительных работ. 29. Приведите примеры использования лазеров в медицине.

§ 31. Строение атомного ядра. Изотопы

С о д е р ж а н и е : атомное ядро; строение атомного ядра; обозначение ядра; изотопы; изобары; размер ядра.

Атомное ядро. Резерфорд в результате своих опытов (см. § 24) пришел к выводу, что у атома есть положительно заряженное ядро (сердечник). Размер атома равен 10^{-10} м , а размер

ядра составляет $0^{-14}-10^{-15}$ м. Другими словами, ядро меньше атома в 10000–100000 раз. В то же время около 95% всей массы атома сосредоточено в ядре. Если принять во внимание, что 95% массы какого-либо тела занимает объем, в 100000 раз меньший, чем объем этого тела, то остается только удивляться тому, что все тела в основном состоят из пустоты. Теперь определим, каково же строение самого ядра.

Строение атомного ядра. Русский физик Д.И. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули идею о том, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

Протон (p) – ядро атома водорода, был открыт в 1919 г. Резерфордом и его сотрудниками. Имеет положительный заряд, равный заряду электрона. Масса покоя равна $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, где m_e – масса электрона.

Нейтрон (n) – был открыт в 1932 г. английским физиком Т. Чедвиком. Электрически нейтральная частица. Масса покоя равна $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$.

Протон и нейтрон вместе называют нуклонами (от лат. nucleus – «ядро»). Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом (A).

Обозначение ядра. Атомное ядро характеризуется количеством заряда Ze. Здесь e – заряд протона, Z называют зарядным числом ядра, которое равно числу протонов в ядре и совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе элементов Менделеева.

Ядро обозначается точно так же, как и нейтральный атом: ${}^A_Z X$, где X – обозначение химического элемента, Z – порядковое число ядра (число протонов в ядре), A – массовое число (число нуклонов в ядре). Так как атом электрически нейтрален, то число протонов в ядре равно числу электронов в атоме.

Изотопы. Изотопами называют элементы с одним и тем же порядковым номером (Z), но с разными массовыми числами (A). Изотопы отличаются разным числом нейтронов в ядре ($N = A - Z$). Например, у водорода ($Z = 1$) существует три изотопа: ${}^1_1\text{H}$ – протий ($Z = 1, N = 0$), ${}^2_1\text{H}$ – дейтерий ($Z = 1, N = 1$), ${}^3_1\text{H}$ – тритий ($Z = 1, N = 2$).

У олова имеется десять изотопов. В большинстве случаев изотопы имеют одинаковые химические и фактически одинаковые физические свойства (исключением являются только

изотопы водорода). Так как эти свойства зависят в основном от электронной оболочки, то для изотопов она одинаковая.

Изобары. Изобарами называют элементы с одним и тем же массовым числом (A), но с разным порядковым числом (Z). Изобары отличаются числом изотопов в ядре ($Z = A - N$).

Примером изобарных ядер могут служить ${}^{10}_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{10}_6\text{C}$.

В настоящее время известно более 2000 ядер, отличающихся порядковым номером (Z), массовым числом (A) или обоими.

Размер ядра. Радиус ядра определяется формулой, записанной на основе результатов опыта:

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (31.1)$$

где $R_0 = (1,2-1,7) \cdot 10^{-15}$ м. Следует отметить, что когда говорят о радиусе атомного ядра, то подразумевают линейный размер области, где проявляется действие ядерных сил. Хотя хотя объем ядра и зависит от числа нуклонов A, входящих в ядро, но во всех ядрах плотность нуклонов одна и та же. Плотность ядра очень большая и составляет порядка $\rho = 2 \cdot 10^{11}$ кг/м³. Другими словами, 1 м³ ядерной материи весит 200 миллионов тонн. Как такая большая масса может быть связана?



Вопросы для самопроверки

1. Кто ввел понятие атомного ядра? 2. На чем основывалось введение этого понятия? 3. Во сколько раз ядро меньше атома? 4. Какая часть массы атома сосредоточена в ядре? 5. Какую часть материи составляет пустота? 6. Кто предложил протонно-нейтронную модель ядра? 7. Что за частица протон и каковы его характеристики? 8. Что за частица нейтрон и каковы его характеристики? 9. Что за частица нуклон? 10. Что показывает массовое число атома? 11. А зарядное число ядра? 12. Как обозначается ядро? 13. Равно ли число протонов в ядре числу электронов в атоме? 14. Какие элементы называют изотопами? 15. Чем отличаются изотопы? 16. Сколько изотопов имеет водород? 17. Приведите примеры изотопов. 18. Одинаковы ли химические и физические свойства изотопов? 19. Отличаются ли электронные оболочки изотопов? 20. Какие элементы называют изобарами? 21. Чем отличаются изобары? 22. Как определяется радиус ядра? 23. Какая величина подразумевается, когда говорят о радиусе ядра? 24. Чему равна плотность ядра?

§ 32. Энергия связи атомного ядра

Содержание: энергия связи атомного ядра; дефект массы; удельная энергия связи; магические ядра; атомная единица энергии.

Энергия связи атомного ядра. Исследования показывают, что атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Значит, в ядре между нуклонами существует определенная связь. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется *энергией связи ядра*. Энергия связи ядра является мерой устойчивости ядра. Из закона сохранения энергии следует: сколько энергии необходимо затратить на разделение ядра, столько же энергии выделяется при образовании ядра.

Так чему равна эта энергия и как она проявляется?

Дефект массы. Массу ядер можно определить очень точно с помощью *масс-спектрометров*. Такие измерения показали, что масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов. Другими словами, при образовании атомного ядра из нуклонов происходит уменьшение массы всех нуклонов на следующую величину:

$$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \quad (32.1)$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ — соответственно массы протона, нейтрона и ядра. Эту часть недостающей массы называют *дефектом массы*. Нам известно (см. § 35, часть 1), что каждому изменению массы Δm соответствует изменение энергии Δmc^2 . Именно эта энергия удерживает ядро как единое целое и равна энергии связи.

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2. \quad (32.2)$$

Естественно, что у разных ядер энергия различная. Как можно, сравнивая их, определить, которое из ядер устойчивое, а которое неустойчивое. Единственный путь — это сравнить энергию, отнесенную к ядерному нуклону.

Удельная энергия связи. Удельной энергией связи $E_{\text{уд.св}}$ называют энергию связи, относящуюся к одному нуклону.

$$E_{\text{уд.св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \quad (32.3)$$

где A — число нуклонов в ядре.

На рис. 60 приводится график зависимости удельной энергии связи $E_{\text{уд.св}}$ от массового числа A , откуда следует, что значение $E_{\text{св}}$ различно для разных ядер. Наиболее устойчивыми

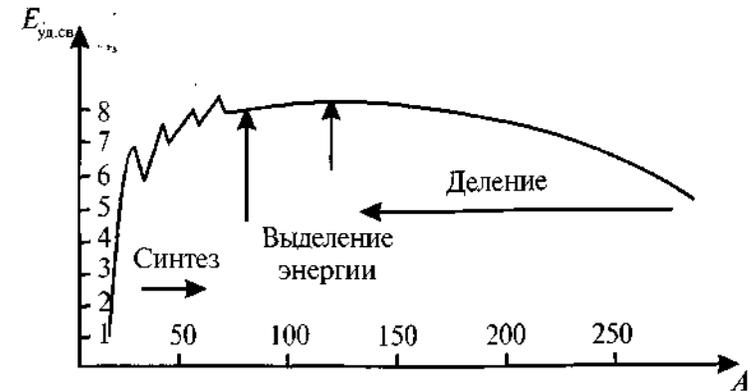


Рис. 60

являются ядра средней части таблицы Менделеева. Энергия связи для таких ядер близка к 8,7 МэВ. С увеличением числа нуклонов в ядре энергия связи уменьшается. Для элементов, расположенных в конце периодической таблицы (например, для урана) она бывает в районе 7,6 МэВ, поскольку с увеличением числа протонов увеличивается сила отталкивания между ними.

Энергия связи электрона в атоме равна 10 эВ. Значит, энергия связи нуклона в ядре в миллион раз больше энергии связи электрона в атоме. Точно так же в легких элементах удельная энергия связи довольно маленькая. Так, для дейтерия она составляет всего-навсего 1,1 МэВ.

Поэтому существует два метода выделения ядерной энергии, и значит, два направления в ядерной энергетике. Одно из них — слияние легких ядер друг с другом, второе — деление тяжелых ядер. В дальнейшем мы подробнее остановимся на этих направлениях.

Магические ядра. Как показывают эксперименты, ядра с числом протонов или нейтронов, равным 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, являются самыми устойчивыми. Поэтому такие ядра называются *магическими*. Еще более устойчивыми являются дважды магические ядра, т.е. ядра, у которых как число протонов, так и число нейтронов является магическим. Таких ядер всего пять: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{258}_{82}\text{Pb}$.

Атомная единица энергии. В ядерной физике используется атомная единица энергии (а.е.э.). Одной атомной единицей энергии называют энергию, приходящуюся на одну атомную единицу массы:

$$1 \text{ а.е.э.} = 1 \text{ с}^2 \cdot 1 \text{ а.е.м.} = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} =$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,1 \text{ МэВ.}$$

1 атомная единица массы ^{12}C равна 1/12 части нуклида углерода: $1 \text{ а.е.э.} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.



Вопросы для самопроверки

1. Какую энергию называют энергией связи? 2. Мерой чего она является и как вы это понимаете? 3. Сколько энергии тратится на расщепление ядра? 4. Равна ли масса ядра сумме масс, составляющих ядро нуклонов? 5. Что такое дефект массы? 6. Чему равна энергия связи? 7. Одинакова ли для всех ядер энергия связи? 8. Для чего вводится понятие удельной энергии связи? 9. Чему равна удельная энергия связи? 10. Объясните связь на рис. 60. 11. Для каких ядер значение удельной энергии связи самое большое? 12. Для каких ядер оно маленькое? 13. Сколько направлений существует в ядерной энергетике? 14. Что больше: энергия связи электрона с атомом или энергия связи нуклона с ядром? 15. Какие ядра называют магическими? 16. А дважды магическими?

§ 33. Ядерные силы. Понятие о модели ядра

С о д е р ж а н и е : ядерные силы; свойства ядерных сил; капельная модель ядра; оболочечная модель ядра.

Ядерные силы. В предыдущей теме мы говорили об энергии связи, удерживающей ядро как единое целое. Но ничего не говорили о том, что является удерживающей силой в ядре. Что это за сила? Если назвать ее силой притяжения между нуклонами, то это не укладывается в голове, так как сила притяжения в этом случае очень маленькая. Например, сила взаимного притяжения между двумя протонами в 10^{36} раз меньше, чем кулоновская сила. Эта сила не может быть и кулоновской, так как в ядре между протонами должна существовать сила не притяжения, а отталкивания, а между протоном и электронейтральным нейтроном и между нейтронами вообще не должно быть кулоновской силы. Кроме того, энергия электрона, имеющая электрический характер, бывает нередко порядка эВ, как было отмечено в предыдущей теме, а энергия

нуклонов в ядре в миллион раз больше. Все это наводит на мысль, что в ядре действует не известная нам другая сила.

Сила, удерживающая ядро от распада под действием кулоновской силы отталкивания, называется ядерной силой.

Сила, действующая между нуклонами, называется сильным взаимодействием, которое имеет следующие свойства.

Свойства ядерных сил.

1. *Ядерные силы являются силами притяжения.*
2. *Ядерные силы являются короткодействующими.* Их действие проявляется только на расстоянии примерно 10^{-15} м . Расстояние, на котором действуют ядерные силы, называется *радиусом действия ядерных сил.*

3. *Ядерным силам свойственна зарядная независимость.* Ядерные силы, действующие между протоном и нейтроном, между двумя протонами и двумя нейтронами, одинаковы по величине.

4. *Ядерные силы, подобно силам притяжения и кулоновским силам, не являются центральными.*

5. *Ядерным силам свойственно насыщение.*

Каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Вместе с тем считается, то в ядре нет чистого «протона» и чистого «нейтрона», а есть заряженная положительно и отрицательно ядерная материя. Согласно теории японского физика Х. Юкавы, они непрерывно обмениваются между собой частицами, названными π -мезонами.

Таким образом, физики, стремившиеся представить себе, каким должно быть ядро, создали различные его модели. Каждая из этих моделей хорошо описывает только определенные свойства ядра и, тем не менее, мы решили дать сведения о двух из этих моделей.

Капельная модель ядра. Эта модель была предложена в 1936 г. Н. Бором и русским физиком Я. Френкелем (1894–1952). Она основана на аналогии между поведением нуклонов в ядре и поведением молекул в капле жидкости. В обоих случаях объем капли, так же, как и объем ядра, пропорционален числу частиц.

Капельная модель ядра позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре. С ее помощью было дано объяснение механизму ядерных реакций, особенно реакции деления ядер. Но в рамках этой модели невозможно было объяснить рост устойчивости ядер, особенно существование магических ядер.

Оболочечная модель ядра. Эта модель была предложена в 1949–1950 гг. американским физиком М. Гепперт-Майером (1906–1975) и немецким физиком Х. Йенсенем (1907–1973). Согласно этой модели, нуклоны в ядре располагаются по определенным уровням в соответствии с принципом Паули. Устойчивость ядра зависит от заполненности этих уровней, и ядро с полностью заполненным уровнем считается наиболее устойчивым. Таким образом объясняется устойчивость магических ядер.

Оболочечная модель ядра позволила объяснить спины и магнитные моменты ядер, различную устойчивость атомных ядер, а также периодичность их изменений. Эта модель особенно хорошо применима для описания легких и средних ядер. Но вместе с тем, эта модель не смогла объяснить возбужденное состояние ядер и еще много других опытных данных. В результате возникли обобщенная модель ядра и другие модели.

Вопросы для самопроверки

1. Почему силы притяжения не могут быть ядерными силами?
2. Почему кулоновские силы не могут быть ядерными силами?
3. Какие силы называют ядерными? 4. Ядерные силы – это силы притяжения или отталкивания? 5. На каком расстоянии действуют ядерные силы? 6. Что называется радиусом действия ядерных сил? 7. Зависят ли ядерные силы от электрического заряда? 8. Являются ли ядерные силы центральными? 9. Что подразумевается, когда говорят, что ядерные силы имеют характер насыщения? 10. Полностью ли в настоящее время изучена природа ядерных сил? 11. В чем суть идеи Юкавы? 12. Кто предложил капельную модель ядра? 13. На чем основывалось введение этой модели? 14. Что смогла объяснить капельная модель, а что не смогла? 15. Кто ввел оболочечную модель ядра? 16. Каким представляется ядро на основе этой модели? 17. Что смогла объяснить оболочечная модель, а что не смогла? 18. Еще какие модели ядра вы знаете?

§ 34. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада

С о д е р ж а н и е : открытие радиоактивности; радиоактивное излучение; естественная радиоактивность; закон радиоактивного распада; период полураспада; активность; семейство радиоактивных элементов.

Открытие радиоактивности. Французский физик А. Беккерель (1852–1908) в 1896 г. при изучении люминесценции солей урана обнаружил необычное явление. Беккерель оставил на фотопластинке соли урана и после ее проявления обнаружил, что на пластинке остались отпечатки соли урана. После проведения опытов с различными солями урана Беккерель пришел к выводу, что эти соли испускают неизвестные лучи, проникающие сквозь бумагу и тонкие металлические пластинки, ионизируют воздух и вызывают люминесценцию ряда веществ.



А. БЕККЕРЕЛЬ
(1852–1908)

Это излучение было названо *радиоактивным излучением* (от лат. radius – «луч»), а само явление – испусканием радиоактивного излучения – *радиоактивностью*. Возникает вопрос: а какое это излучение?

Радиоактивное излучение. Резерфорд с помощью опытов обнаружил, что радиоактивное излучение не однородно, а состоит из нескольких лучей. Его пропускали через магнитное поле, расположенное перпендикулярно плоскости рисунка, и при этом оно расщеплялось на три компонента: α -, β - и γ -излучение (рис. 61).

Первый из них – поток ядер гелия; второй – поток электронов; третий – поток γ -квантов (фотонов). В следующей теме подробнее остановимся на этих излучениях.

Естественная радиоактивность. Уран не является единственным элементом, испускающим радиоактивное излучение. Супругам Марии и Пьеру Кюри удалось выделить из урановой руды два радиоактивных элемента – полоний (Po) и радий (Ra). Естественно, радиоактивные элементы существуют в лю-

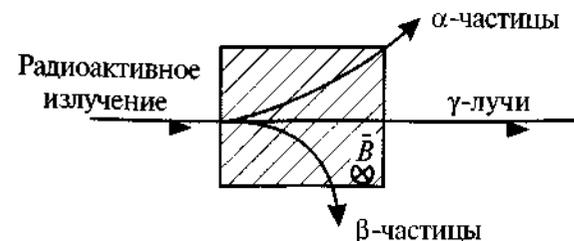


Рис. 61

бом месте Земли. Их можно сколько угодно найти в воздухе, в воде, в почве, в живых организмах, в продуктах питания. Самыми широко распространенными радиоактивными изотопами в природе являются ^{40}K , ^{14}C и изотопы семейства урана и тория.

Следует отдельно отметить, что на радиоактивность не оказывает никакого влияния то, в чистом виде встречается изотоп или он входит в состав химического соединения, в каком агрегатном состоянии он находится. Вместе с тем на естественную радиоактивность не оказывает влияния ни механическое давление, ни температура, ни электрическое и магнитное поля. Следовательно, радиоактивное свойство элемента обусловлено лишь структурой его ядра.

Естественной радиоактивностью называется превращение нестабильных изотопов в стабильные путем испускания ядрами атомов частиц и выделения энергии.

Таким образом, радиоактивность является источником, дающим сведения об атомном ядре и процессах, происходящих в нем.

Закон радиоактивного распада. Под *радиоактивным распадом*, или просто *распадом*, понимают превращение ядра в другое ядро с испусканием излучения. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется *материнским*, возникающее ядро — *дочерним*. Итак, подчиняется ли этот распад каким-либо законам? Как показывают многочисленные опыты, число радиоактивных атомов в рассматриваемом объекте со временем уменьшается. Если в некоторых элементах это уменьшение происходит в течение минуты или даже секунды, то в других оно происходит за миллиарды лет. В общем, распад ядра — это случайный процесс. Поэтому распад того или иного ядра подчиняется законам статистики. Одна из основных характеристик радиоактивного элемента — это величина, определяемая вероятностью распада ядра за одну секунду. Она обозначается буквой λ и называется *постоянной радиоактивного распада*.

Если в начальный момент времени $t = 0$ существует N_0 радиоактивных атомов, то число атомов в момент времени t определяется в соответствии со следующим законом:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (34.1)$$

где $e \approx 2,72$ — основание натурального логарифма. Выражение (34.1) называется *законом радиоактивного распада*.

Период полураспада. Одной из величин, характеризующих интенсивность радиоактивного распада, является период полураспада. *Периодом полураспада* ($T_{1/2}$) называется промежуток времени, за который в среднем число нераспавшихся ядер уменьшается вдвое.

Если $t = T_{1/2}$, тогда $N = \frac{N_0}{2}$, то на основании закона радиоактивного распада

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Потенцируя эту формулу, получаем

$$-\lambda T_{1/2} = \ln 2$$

или

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (34.2)$$

Для разных изотопов период полураспада изменяется в широком интервале. Если для урана он равен 4,56 млрд лет, для изотопа полония он составляет всего лишь $1,5 \cdot 10^{-4}$ с.

Активность. Огромное значение имеет знание того, какое количество ядер распадается в единицу времени. Именно при использовании такой характеристики применяется термин *нуклид*. Нуклид — общее название ядер атома, различающихся числом протонов Z и нейтронов N . *Активностью* (A) нуклида в радиоактивном источнике называют число распадов за 1 с:

$$A = \lambda N. \quad (34.3)$$

Единица активности в СИ — *беккерель* (*Бк*): 1 Бк — *активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада*. 1 Бк = 1 расп./1 с = 1 с⁻¹. До сих пор в ядерной физике применяется и внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике — *кюри* (*Ku*): 1 Ku = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Семейство радиоактивных элементов. Изотопы элементов, порядковые номера которых больше 83, являются радиоактивными. Естественно, радиоактивные элементы обычно располагают в четырех рядах. Все остальные элементы образуются в результате радиоактивного распада первого элемента.

Семейство урана $^{238}_{92}\text{U}$ заканчивается стабильным изото-

пом свинца ${}^{206}_{82}\text{Pb}$. Семейство тория ${}^{232}_{90}\text{Th}$ заканчивается другим стабильным изотопом свинца ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, семейство актиния ${}^{235}_{89}\text{Ac}$ — изотопом свинца ${}^{207}_{82}\text{Pb}$, семейство нептуния ${}^{237}_{93}\text{Np}$ — стабильным изотопом висмута ${}^{209}_{83}\text{Bi}$.

Вопросы для самопроверки

1. Кто открыл радиоактивность? 2. Как была открыта радиоактивность? 3. Что означает слово «радиоактивность»? 4. Какие лучи называются радиоактивными? 5. Что называется радиоактивностью? 6. Из каких лучей состоят радиоактивные лучи? 7. Объясните картину на рис. 61. 8. Существуют ли еще другие радиоактивные элементы? 9. Где в природе встречаются радиоактивные элементы? 10. Имеются ли радиоактивные элементы в воздухе, воде, в почве? 11. А в клетках живых организмов? 12. А в составе пищевых продуктов? 13. Какие изотопы очень распространены в природе? 14. Зависит ли радиоактивность от того, в каком состоянии находится изотоп? 15. А от его агрегатного состояния? 16. А от того, под каким давлением он находится и от его температуры? 17. А от того, в каком поле он находится — электрическом или магнитном? 18. Является ли радиоактивность результатом процессов, происходящих внутри ядра? 19. Что называют естественной радиоактивностью? 20. Может ли радиоактивность дать сведения о процессах, происходящих внутри ядра? 21. Что называют радиоактивным распадом? 22. Каким ядром называют распадающееся ядро? 23. А образованное ядро? 24. Каким законам подчиняется радиоактивный распад? 25. На какое время может растянуться распад ядра? 26. Что это за величина — постоянная распада? 27. Дайте определение закону радиоактивного распада. 28. Как определяется период полураспада? 29. Чему равен период полураспада для различных изотопов? 30. Что называют нуклидом? 31. А активностью нуклида? 32. Назовите единицы активности в системе СИ и ее внесистемную единицу. 33. Назовите семейства радиоактивных элементов.

§ 35. Альфа-, бета- и гамма-излучение

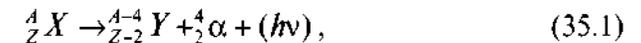
С о д е р ж а н и е : альфа-излучение; бета-излучение; нейтрино, гамма-излучение; фотоэффект; комптоновское рассеяние; образование электронно-позитронной пары.

Альфа-излучение. Нуклоны в ядре постоянно находятся в движении и взаимном превращении. Самым устойчивым про-

дуктом, образующимся внутри ядра, является продукт, состоящий из двух протонов и двух нейтронов. При распределении энергии внутри ядра именно эта частица забирает основную энергию ядра и в определенных условиях в виде α -частицы может покинуть ядро.

Альфа-излучением (распадом) называют превращение атомного ядра с испусканием α -частицы в другое ядро.

Если ${}^A_Z X$ является материнским ядром, то превращение этого ядра в другое в результате α -излучения происходит по следующей схеме:



где ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ — обозначение дочернего ядра, ${}^4_2\alpha$ — α -частица, ядро атома гелия (${}^4_2\text{He}$), $h\nu$ — квант, испущенный возбужденным ядром ${}^{A-4}_{Z-2} Y$.

Из (35.1) видно, что в результате α -излучения массовое число ядра уменьшается на 4, а заряд — на 2 элементарных заряда. Другими словами, в результате α -излучения элемент в периодической системе элементов Менделеева смещается на две клетки влево. Это явление называется *правилом смещения*. Это есть результат законов сохранения электрического заряда и массового числа.

В результате радиоактивного распада суммарный заряд продуктов распада равен заряду первоначального ядра.

Точно такой же закон сохранения выполняется и для массового числа.

Бета-излучение. В ядре происходят и другие изменения, связанные с превращением нуклонов друг в друга. Например, ядро может испускать поток электронов. Это явление носит название *β -излучения (распад)*.

В соответствии с правилом смещения при β -излучении массовое число не изменяется:



Из этого выражения видно, что в результате β -излучения элемент в периодической системе элементов Менделеева смещается на одну клетку вправо. При этом, так как не изменяется массовое число A , то не должен изменяться и спин ядра.

Но электрон, вылетающий из ядра, имеет $+\frac{1}{2}$ или $-\frac{1}{2}$. Тогда

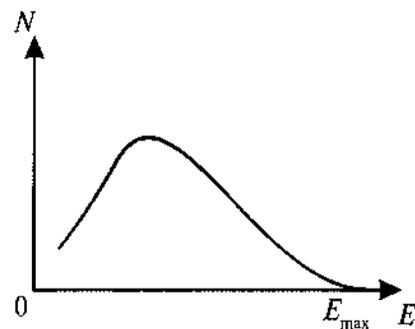


Рис. 62

возникает вопрос, почему спин ядра не должен изменяться. Как показывают опыты, электрон, вылетающий из ядра данного элемента, имеет различную энергию вплоть до максимальной энергии E_{\max} . Вместе с этим, энергия вылетающего электрона всегда бывает меньше разности энергий ядра до β -распада и после β -распада. Другими словами,

будто при β -распаде часть энергии ядра исчезает бесследно. Это явление видно и из непрерывности энергетического спектра электронов при β -распаде (рис. 62).

В соответствии с законом сохранения энергии, такое состояние не должно возникать.

Глубоко проанализировав результаты опытов, В. Паули пришел к выводу, что при β -распаде появляется еще одна частица, уносящая недостающую часть энергии и являющаяся причиной того, что спин ядра остается постоянным.

Нейтрино. Значит, по мысли Паули, при β -распаде из ядра вместе с электроном вылетает еще одна частица, названная *нейтрино* (ν). Слово «нейтрино» по-итальянски означает *нейтрончик, маленький нейтрон*. Оно не имеет заряда и масса покоя равна нулю. При вылете из ядра электрон и нейтрино имеют противоположные спины, которые компенсируют друг друга, и поэтому спин ядра остается постоянным. Также при β -распаде для энергии имеет место выражение

$$E_{\beta} + E_{\nu} = E_{\max}, \quad (35.3)$$

т.е. недостающая часть энергии — это энергия нейтрино. Но возникает вопрос: откуда берутся электроны, вылетающие из ядра? Ведь ядро состоит из протонов и нейтронов! Поэтому объяснение β -распада стало одной из самых трудных проблем ядерной физики. Решить эту проблему удалось знаменитому итальянскому физiku Э. Ферми. Согласно гипотезе Ферми, в ядре постоянно происходят превращения нуклонов друг в друга и в результате этого появляются электрон и антинейтрино (частица, противоположная нейтрино).

Гамма-излучение. В 1900 г. французский физик П. Виллар определил, что при облучении свинца α - и β -частицами по-

является какое-то остаточное излучение. Это излучение не отклоняется в магнитном поле. Ионизирующее свойство довольно слабое, но проникающая способность намного больше, чем у рентгеновских лучей. Его назвали γ -излучением.

γ -излучение, так же, как и рентгеновские лучи, является электромагнитной волной. Они отличаются друг от друга только образованием и энергией. Если рентгеновские лучи появляются при возбуждении орбитальных электронов и при торможении быстрых электронов, γ -излучение появляется при ядерных превращениях.

В общем случае, при радиоактивном распаде ядра или в результате искусственного превращения ядер друг в друга они переходят в возбужденное состояние. При переходе из возбужденного состояния в основное ядро испускает γ -излучение. Энергия его может быть от нескольких килоэлектронвольт до нескольких миллионов электронвольт. При прохождении через вещество интенсивность γ -излучения ослабляется. Причиной этого являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электронно-позитронной пары.

Фотоэффект. Мы подробно ознакомились с явлением фотоэффекта в § 19. Следует отметить, что фотоэффект является преобладающим механизмом поглощения γ -квантов с энергией меньше 1 МэВ.

Комптоновское рассеяние. Если энергия γ -кванта будет намного больше 1 МэВ, то при проникновении в вещество может рассеиваться на свободных или слабо связанных электронах, в результате этого γ -квант отклоняется от своего первоначального направления, изменяется длина волны и уменьшается энергия. Электрон, на котором рассеялся γ -квант, получает энергию, равную разности энергии γ -кванта до столкновения ($h\nu$) и после столкновения ($h\nu'$): $h\nu - h\nu'$. Это явление носит название *Комптоновского рассеяния*.

Образование электронно-позитронной пары. При довольно больших энергиях γ -квантов наблюдается образование электронно-позитронной пары. Здесь γ -квант полностью поглощается в кулоновском поле и образуется электронно-позитронная пара (${}^0_{-1}e - {}^0_{+1}e$). При образовании пары для образования



Э. ФЕРМИ
(1901–1954)

каждой частицы необходима энергия, равная 0,5 МэВ (это их энергия покоя).

Значит, чтобы образовалась электронно-позитронная пара, энергия γ -кванта должна быть равна как минимум $E_\gamma = 2m_0c^2 = 1,02$ МэВ. Если энергия γ -кванта будет больше 1,02 МэВ, то лишняя энергия превращается в кинетическую энергию частиц.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое самый устойчивый элемент, образующийся внутри ядра? 2. Что называют α -излучением? 3. Объясните схему α -излучения. 4. Как обозначается материнское ядро? 5. На сколько уменьшается массовое число ядра в результате α -излучения? 6. Что такое закон смещения? 7. Объясните закон сохранения заряда для α -излучения. 8. Объясните закон сохранения массового числа для этого излучения. 9. Что называют β -излучением? 10. Изменяется ли массовое число при β -излучении? 11. Объясните схему β -излучения. 12. Меняется ли место химического элемента при β -излучении? 13. Изменяется ли сумма спинов нуклонов в ядре? 14. А с учетом спина электрона? 15. Равна ли энергия электрона разности энергии ядра до и после излучения? 16. К какому выводу пришел Паули при анализе экспериментов по β -излучению? 17. Что за частица нейтрино? 18. Каков закон сохранения энергии при β -излучении? 19. Как в ядре образуются электроны? 20. Расскажите о гипотезе Ферми. 21. Кто открыл γ -излучение? 22. Что это за лучи — γ -лучи? Чем они отличаются от рентгеновских лучей? 23. Как образуются γ -лучи? 24. Каким образом ядро переходит в возбужденное состояние? 25. Какие процессы могут происходить при прохождении γ -лучей через вещество? 26. Что такое фотоэффект? 27. Объясните эффект Комптона. 29. Как образуется электронно-позитронная пара? 30. Каким должна быть энергия γ -кванта, чтобы образовалась пара?

§ 36. Ядерные реакции. Радиоактивные превращения

С о д е р ж а н и е: ядерные реакции; виды ядерных реакций; теория Бора; открытие протона и нейтрона; радиоактивные превращения; β -радиоактивность.

Ядерные реакции. Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения: электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса. Все реакции характеризуются энергией, которая выделяется или поглощается в процессе реакции. При протекании ядерной реакции энергия либо выделяется — *экзотермическая реакция*, либо поглощается — *эндотермическая реакция*.

Виды ядерных реакций. Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1. *По роду участвующих в них частиц:* реакции, происходящие под действием нейтронов, γ -квантов, заряженных частиц (протонов, дейтронов, α -частиц и др.).

2. *По энергии участвующих в реакции частиц:* реакции при малых энергиях (≈ 100 эВ); реакции при средних энергиях (≈ 1 МэВ); реакции при высоких энергиях (≈ 50 МэВ).

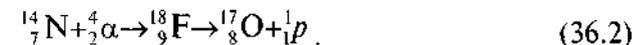
3. *По роду участвующих в них ядер:* реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$).

4. *По характеру происходящих ядерных превращений:* реакции с испусканием нейтрона; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата.

Теория Бора. Согласно теории, предложенной Бором, ядерные реакции протекают в две стадии. Первая стадия — ядро-мишень A захватывает приближившуюся к нему частицу и образует первое возбужденное ядро $A + a \rightarrow C$. Вторая стадия — возбужденное ядро C распадается на продукты реакции: $C \rightarrow b + B$. Таким образом, ядерная реакция происходит по следующей схеме:



Открытие протона и нейтрона. Первой реакцией было соединение ядра азота с ядром гелия (α -частицей). Эта реакция была осуществлена в 1919 г. Резерфордом. В результате бомбардировки ядер азота α -частицами был образован протон. Ядро азота после захвата α -частицы образовало возбужденное ядро фтора ${}^{18}_9\text{F}$, а он распался на конечный продукт реакции ${}^{17}_8\text{O}$ и ${}^1_1\text{p}$:



Образование протона сначала было зафиксировано вспышкой (сцинтилляцией), а затем в камере Вильсона.

каждой частицы необходима энергия, равная 0,5 МэВ (это их энергия покоя).

Значит, чтобы образовалась электронно-позитронная пара, энергия γ -кванта должна быть равна как минимум $E_\gamma = 2m_0c^2 = 1,02$ МэВ. Если энергия γ -кванта будет больше 1,02 МэВ, то лишняя энергия превращается в кинетическую энергию частиц.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое самый устойчивый элемент, образующийся внутри ядра? 2. Что называют α -излучением? 3. Объясните схему α -излучения. 4. Как обозначается материнское ядро? 5. На сколько уменьшается массовое число ядра в результате α -излучения? 6. Что такое закон смещения? 7. Объясните закон сохранения заряда для α -излучения. 8. Объясните закон сохранения массового числа для этого излучения. 9. Что называют β -излучением? 10. Изменяется ли массовое число при β -излучении? 11. Объясните схему β -излучения. 12. Меняется ли место химического элемента при β -излучении? 13. Изменяется ли сумма спинов нуклонов в ядре? 14. А с учетом спина электрона? 15. Равна ли энергия электрона разности энергии ядра до и после излучения? 16. К какому выводу пришел Паули при анализе экспериментов по β -излучению? 17. Что за частица нейтрино? 18. Каков закон сохранения энергии при β -излучении? 19. Как в ядре образуются электроны? 20. Расскажите о гипотезе Ферми. 21. Кто открыл γ -излучение? 22. Что это за лучи — γ -лучи? Чем они отличаются от рентгеновских лучей? 23. Как образуются γ -лучи? 24. Каким образом ядро переходит в возбужденное состояние? 25. Какие процессы могут происходить при прохождении γ -лучей через вещество? 26. Что такое фотоэффект? 27. Объясните эффект Комптона. 29. Как образуется электронно-позитронная пара? 30. Каким должна быть энергия γ -кванта, чтобы образовалась пара?

§ 36. Ядерные реакции. Радиоактивные превращения

С о д е р ж а н и е: ядерные реакции; виды ядерных реакций; теория Бора; открытие протона и нейтрона; радиоактивные превращения; β -радиоактивность.

Ядерные реакции. Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом.

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения: электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса. Все реакции характеризуются энергией, которая выделяется или поглощается в процессе реакции. При протекании ядерной реакции энергия либо выделяется — *экзотермическая реакция*, либо поглощается — *эндотермическая реакция*.

Виды ядерных реакций. Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

1. *По роду участвующих в них частиц:* реакции, происходящие под действием нейтронов, γ -квантов, заряженных частиц (протонов, дейтронов, α -частиц и др.).

2. *По энергии участвующих в реакции частиц:* реакции при малых энергиях (≈ 100 эВ); реакции при средних энергиях (≈ 1 МэВ); реакции при высоких энергиях (≈ 50 МэВ).

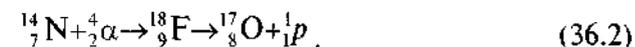
3. *По роду участвующих в них ядер:* реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$).

4. *По характеру происходящих ядерных превращений:* реакции с испусканием нейтрона; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата.

Теория Бора. Согласно теории, предложенной Бором, ядерные реакции протекают в две стадии. Первая стадия — ядро-мишень A захватывает приближившуюся к нему частицу и образует первое возбужденное ядро $A + a \rightarrow C$. Вторая стадия — возбужденное ядро C распадается на продукты реакции: $C \rightarrow b + B$. Таким образом, ядерная реакция происходит по следующей схеме:



Открытие протона и нейтрона. Первой реакцией было соединение ядра азота с ядром гелия (α -частицей). Эта реакция была осуществлена в 1919 г. Резерфордом. В результате бомбардировки ядер азота α -частицами был образован протон. Ядро азота после захвата α -частицы образовало возбужденное ядро фтора ${}^{18}_9\text{F}$, а он распался на конечный продукт реакции ${}^{17}_8\text{O}$ и ${}^1_1\text{p}$:



Образование протона сначала было зафиксировано вспышкой (сцинтилляцией), а затем в камере Вильсона.

Предсказание Резерфорда о существовании в ядре электронейтральной частицы (нейтрона) после опытов В. Боте и Г. Беккера в 1932 г. превратилось в реальность. В опыте ядро бериллия бомбардировалось α -частицами:



Образовавшуюся при этом частицу Д. Чедвик назвал *нейтроном*.

В дальнейшем было определено, что нейтрон является радиоактивным и среднее время его жизни $\tau \approx 15,3$ мин.

Радиоактивные превращения. Из приведенных выше реакций видно, что с их помощью можно одни химические элементы превратить в другие и таким путем получить новые химические элементы. Такие реакции называются *радиоактивными превращениями*.

В общем, между естественной и искусственной радиоактивностью никакой разницы нет, так как свойство изотопа абсолютно не зависит от способа их образования и искусственный изотоп ничем не отличается от естественного.

Следует отметить, что радиоактивность связана с устойчивостью ядра. Ядра с одинаковым числом протонов и нейтронов считаются *устойчивыми*.

β -радиоактивность. Если в легких ядрах ($A < 50$) искусственным путем создать излишек нейтронов, то устойчивость ядра нарушается и возникает β -радиоактивность.

Например, при бомбардировке устойчивого изотопа ${}^{28}_{13}\text{Al}$ дейтронами образуется изотоп ${}^{27}_{13}\text{Al}$. Он же, в свою очередь, по следующей схеме испускает β -излучение:



Если в ядрах искусственно создать избыток протонов, это приводит к β^+ -радиоактивности. Эта реакция происходит по следующей схеме:



В соответствии с правилом смещения, образованный элемент сместится в периодической таблице Менделеева на одну клетку влево.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое ядерные реакции? 2. Какие законы сохранения выполняются при ядерной реакции? 3. Какие реакции называют экзотермическими? Какие реакции называют эндотермическими? 4. На сколько типов делятся ядерные реакции? 5. Реакции первого типа: какие это реакции? 6. А реакции второго типа? 7. А реакции третьего типа? 8. А реакции четвертого типа? 10. Объясните схему теории Бора. 11. Какую реакцию осуществил Резерфорд? 12. Какова схема реакции, приведшая к открытию протона? 13. Какова схема реакции, приведшая к открытию нейтрона? 14. Чему равен период полураспада нейтрона? 15. Что называют радиоактивными превращениями? 16. В чем разница между искусственной и естественной радиоактивностью? 17. Какие ядра считаются устойчивыми? 18. Как возникает β -радиоактивность? 19. А β^+ -радиоактивность? 20. Меняется ли место элемента в периодической системе Менделеева при β -радиоактивности?

§ 37. Элементарные частицы. Частицы и античастицы

С о д е р ж а н и е : элементарные частицы; электрон, фотон; протон; позитрон; нейтрон; нейтрино; мюоны; π -мезоны; K -мезоны; гипероны; резонансы; античастицы; взаимное превращение вещества и поля; антивещество.

Элементарные частицы. По своему смыслу слово «элементарный» означает «самый простой». Но частицы, известные до настоящего времени, трудно назвать элементарными, однако, введенный на заре ядерной физики, этот термин используется до сих пор. В общем, когда частицы только начали открывать, они считались самыми маленькими частицами материи и действительно были элементарными. Но впоследствии стало известно, что некоторые из них (в частности, нуклоны) имеют сложное строение. В настоящее время известно более 200 элементарных частиц. Большинство из них являются нестабильными и медленно превращаются в легкие частицы.

Электрон. Первой открытой элементарной частицей является электрон. Изучавший свойства катодных лучей Дж. Томсон определил, что эта отрицательно заряженная частица состоит из потока электронов. Это событие произошло 29 апреля



П. ДИРАК
(1902–1984)

1897 г., и эта дата считается днем открытия первой элементарной частицы.

Фотон. В 1900 г. М. Планк доказал, что свет состоит из потока частиц, называемых фотоном. Фотон не имеет электрического заряда, масса покоя равна нулю, т.е. фотон существует только при движении со скоростью света.

Протон. В 1919 г. в опытах Э. Резерфорда, в результате бомбардировки атомов азота α -частицами, было открыто ядро атома водорода – протон. Это положительно заряженная частица, заряд которой равен заряду электрона.

Масса протона больше массы электрона в 1836 раз.

Позитрон. В 1928 г. П. Дирак предсказал существование позитрона, и он был открыт К. Андерсоном в составе космических лучей. Хотя его масса покоя равна массе покоя электрона, но заряд равен заряду протона. Позитрон является античастицей электрона.

Нейтрон. В 1932 г. был открыт Д.Н. Чедвиком. Масса его близка массе протона: $m_n = 1838m_e$, электрический заряд равен нулю.

Нейтрино. В 1931–1935 гг. давший объяснение законам β -распада В. Паули предсказал существование еще одной частицы – нейтрино с массой покоя, равной нулю. Эта частица была открыта в 1956 г. К. Коуэном в ядерном реакторе.

Мюоны. В 1938 г. К. Андерсон и С. Ниддермейер открыли в составе космических лучей частицу с массой, приблизительно равной $207m_e$, с временем жизни $2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Эти частицы были названы μ -мезонами или мюонами (μ^+ , μ^-).

π -мезоны. В 1947 г. С. Пауэлл открыл частицы, масса покоя которых была равна $273m_e$. Эти частицы были названы π -мезонами или пионами (π^+ , π^-). Время их жизни в свободном состоянии равно $2,55 \cdot 10^{-8}$ с. В 1950 г. был открыт электронейтральный π^0 -мезон с массой $264,2m_e$.

K-мезоны. Начиная с 1950-х годов резко возросло число открытых частиц. К ним относятся и K-мезоны. Заряд их может быть положительным, отрицательным и нулем. Массы же бывают в пределах $966-974m_e$.

Гипероны. Следующая группа частиц называется гиперонами. Их массы лежат в пределах от $2180m_e$ до $3278m_e$.

Резонансы. В последнее время были открыты частицы с очень коротким временем жизни. Их назвали резонансами. Непосредственно наблюдать их не удается, образование резонансов определяется лишь по продуктам их распада.

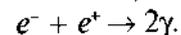
Если вначале несколько элементарных частиц считались маленькими кирпичиками материи, в дальнейшем они оказались очень разнообразными и сложными.

Античастицы. После открытия первой античастицы – античастицы электрона (противоположной частицы) – позитрона возник вопрос, а не существует ли античастица у других частиц. Антипротон был открыт в 1955 г. при бомбардировке мишени из меди протонами. В 1956 г. был открыт антинейтрон.

В настоящее время определено, что у каждой частицы есть античастица, т.е. частица, у которой масса и спины одинаковые, а заряды противоположные. Если античастицы электрона и протона отличаются знаком заряда, то нейтрон и антинейтрон отличаются знаком собственного магнитного момента. Физические свойства незаряженных частиц фотона π^0 -мезона и их античастиц одинаковые.

После получения сведений об античастицах у учащихся может возникнуть резонный вопрос: а что будет, если они встретятся? Ответ на этот вопрос найдете в следующих строках.

Взаимное превращение вещества и поля. При столкновении электрона со своей античастицей позитроном происходит их превращение в квант излучения и выделение энергии. Это явление называется *аннигиляцией*.



Не только электрон и позитрон, но все частицы при столкновении со своими античастицами аннигилируют. Другими словами, они превращаются в квант электромагнитного поля (в фотоны).

В этом случае слово «аннигиляция» выбрано не очень правильно, так как на латинском оно означает «исчезновение». На самом деле при столкновении частицы и античастицы никакого исчезновения не происходит. Все законы сохранения полностью выполняются. Материя в форме вещества превращается в материю в форме электромагнитного поля, и только.

Возникает вопрос: если вещество превращается в квант электромагнитного поля, то не происходит ли превращение кванта электромагнитного поля в вещество? В общем, мы зна-

комы с этим процессом (см. § 35). Если энергия γ -кванта будет больше суммы энергий покоя электрона и позитрона $E_\gamma > 2m_0c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$, то в теле ядра γ -квант может образовать электронно-позитронную пару.

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+.$$

Образование электронно-позитронной пары и их аннигиляция доказывают взаимное превращение двух форм материи (вещества и поля).

Антивещество. Если у всех частиц существуют античастицы, то не существует ли антиядро, точнее, антивещество, состоящее из античастиц? Первое антиядро — антинейтрон (связанное состояние \bar{p} и \bar{n}) — было получено в 1965 г. американскими физиками. Впоследствии на Серпуховском ускорителе были синтезированы ядра антигелия (1970) и антипротия (1973).

Следует, однако, отметить, что возможность аннигиляции при встрече с частицами не позволяет античастицам длительное время существовать среди частиц. Дело в том, что в процессе аннигиляции выделяется очень большая энергия. Для сравнения можно сказать, что выделяющаяся энергия в миллионы раз больше энергии, которая выделяется при ядерной реакции. Таким образом, при аннигиляции вся энергия взаимодействующих частиц превращается в энергию другого вида, т.е. аннигиляция — самый большой среди существующих источников энергии. Если бы вблизи известной нам части Вселенной существовало скопление антивещества, то должны были бы наблюдаться мощное аннигиляционное излучение, колоссальные взрывы с выделением огромного количества энергии. Однако пока астрофизики ничего подобного не зарегистрировали. Исследования, проводимые в целях поиска антинейтронов, имеют фундаментальное значение для дальнейшего познания строения вещества.

Дорогие ученики, надеюсь, что и вы вскоре внесете достойную лепту в эти исследования.



Вопросы для самопроверки

1. Что означает слово «элементарный»? 2. Действительно ли элементарны элементарные частицы? 3. Существование скольких частиц определено в настоящее время? 4. Какой день считается днем

открытия элементарных частиц? 5. Кем, когда и в каком состоянии был открыт электрон? 6. Что вы знаете о фотоне? 7. Когда был открыт протон и каковы его характеристики? 8. Как был открыт позитрон и каковы его характеристики? 9. Каковы характеристики нейтрона? 10. Что вы знаете о нейтрино? 11. Что за частицы мюоны? 12. А π -мезоны? 13. А K -мезоны? 14. А гипероны? 15. Что это за частицы — резонансы? 16. Что это такое — античастицы? 17. Чем они отличаются от частиц? 18. У скольких частиц имеются античастицы? 19. Что происходит, когда встречаются частица и античастица? 20. Какой процесс называют аннигиляцией? 21. Что означает слово «аннигиляция»? 22. Исчезает ли материя при аннигиляции электрона и позитрона? 23. Когда образуется электронно-позитронная пара? 24. Происходит ли взаимопревращение вещества и поля? 25. Существуют ли антиядра? 26. Сколько энергии выделяется при аннигиляции? 27. Зарегистрировано ли существование антивещества во Вселенной? 28. Что произошло бы, если бы где-то существовало антивещество?

§ 38. Основные свойства элементарных частиц и их классификация. Кварки

Содержание: типы взаимодействий элементарных частиц; сильное или ядерное взаимодействие; электромагнитное взаимодействие; слабое взаимодействие; гравитационное взаимодействие; «теория великого объединения»; фотоны; лептоны; мезоны; барионы; кварки.

Типы взаимодействий элементарных частиц. Согласно современным представлениям, в природе существует четыре типа фундаментальных взаимодействий. Это сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное взаимодействия. Для каждого из них существуют частицы, которые осуществляют эти взаимодействия, и соответствующие поля.

Сильное или ядерное взаимодействие. Это взаимодействие обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и обеспечивает исключительную прочность этих образований. Именно за счет их обеспечивается стабильность вещества. Сильное взаимодействие проявляется на расстояниях, равных радиусу атомных ядер $\sim 10^{-15} \text{ м}$. Оно происходит путем обмена между нуклонами π -мезонов.

Электромагнитное взаимодействие. Это взаимодействие существует между всеми заряженными частицами. Оно слабее

сильного взаимодействия в 137 раз. Радиус действия неограниченный. Носителем энергии электромагнитного поля является фотон. Оно ответственно за существование атома. Считается самым изученным взаимодействием.

Слабое взаимодействие. В основном проявляется при распаде элементарных частиц. Хорошими примерами слабого взаимодействия могут быть β -распад, μ -распад. Оно слабее сильного взаимодействия в 10^{14} раз, осуществляется посредством промежуточных бозонов (z , w).

Гравитационное взаимодействие. Оно присуще всем без исключения частицам, т.е. они притягивают друг друга. Оно меньше сильного взаимодействия в 10^{39} раз, поэтому в процессах макромира несущественно. Осуществляется в гравитационном поле гипотетическими частицами — гравитонами.

Теория «Великого объединения». Как было отмечено выше, у каждого взаимодействия существуют свои законы. Но, по мысли ученых, все эти взаимодействия должны подчиняться единому закону и он должен быть прост в объяснении. Другими словами, должно произойти такое объединение всех четырех взаимодействий, что рассматриваемые взаимодействия должны стать частным случаем нового взаимодействия, проявляющегося в определенных условиях. Значит, имеется в виду, что новая теория должна быть обобщением существующих теорий. Но множество попыток, сделанных в этом направлении, еще не дали желаемого результата. Пока удалось только объединить электромагнитное и слабое взаимодействия в единое электрически слабое взаимодействие. На повестке дня стоит «теория великого объединения» сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий. Изучается и теория «суперобъединения», затрагивающего все четыре взаимодействия.

Еще одна заветная мечта физиков — расположить элементарные частицы на основе известных закономерностей в таблице, т.е. классифицировать. С этой целью договорились делить их на четыре группы (см. табл. 5).

Фотоны. Эта группа состоит только из одной частицы фотона — кванта электромагнитного излучения.

Лептоны. Лептоны (греч. leptos — «легкий») участвуют в электромагнитных и слабых взаимодействиях. К лептонам относятся нейтрино электронное, нейтрино мюонное, тау нейтрино, электрон, мюон, тау лептон и их античастицы.

Мезоны. Группу мезонов образуют частицы, у которых

Таблица элементарных частиц

Наименование частиц		Символ		Масса в электронных массах	Электрический заряд	Время жизни, с	
		Частица	Античастица				
	Фотон	γ	γ	0	0	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	Стабильно	
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	Стабильно	
	Тау нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	Стабильно	
	Электрон	e^-	e^+	1	-1	Стабилен	
	Мюон	μ^-	μ^+	207	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	3492	-1	$1,46 \cdot 10^{-12}$	
Мезоны	Пи-мезоны (пионы)	π^0	π^0	264,1	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$	
		π^+	π^-	273,1		$2,6 \cdot 10^{-8}$	
	Ка-мезоны (каоны)	K^+	K^-	966,4	1	$1,2 \cdot 10^{-8}$	
		K^0	\bar{K}^0	974,1		K_s^0 $8,9 \cdot 10^{-11}$ K_L^0 $5,2 \cdot 10^{-8}$	
Эта-нуль мезон	η^0	$\bar{\eta}^0$	1074	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$		
Барions	Нуклоны	Протон	p	\bar{p}	1836,1	1	Стабилен
		Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	(?) 10^3
	Гипероны	Гиперон-лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Гиперон-сигма	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	$8 \cdot 10^{-11}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Гиперон-кси	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2572,8	-1	$1,64 \cdot 10^{-10}$
Омега-минус-гиперон	Ω^-	Ω^+	3273	-1	$8,2 \cdot 10^{-11}$		

масса больше массы электрона в 207 раз, но меньше массы протона.

Барионы. Тяжелые частицы. Начинаются с протона и включают в себя нуклоны и гипероны. Участвуют во всех взаимодействиях. Вместе с этим, в зависимости от значения спина, частицы делятся на фермионы (частицы со спином $S = \frac{1}{2}$) и бозоны (частицы со спинами $S = \frac{1}{2}$ или $S = 1$). От времени жизни частицы делятся на *стабильные* и *нестабильные*.

Кварки. После того, как стало известно, что элементарные частицы, считавшиеся самыми маленькими кирпичиками материи, имеют сложную структуру, возникла необходимость в поиске действительно самых маленьких кирпичиков материи. Если такие частицы существуют, то все известные нам и имеющие сложное строение частицы должны состоять из них. В 1964 г. американский физик М. Гелл-Манн и австрийский физик Дж. Цвейг выдвинули гипотезу, что все мезоны и барионы состоят из простых частиц, называемых кварками. Согласно этой гипотезе, барионы состоят из трех типов кварков — *u*, *d*, *s*, а антибарионы — из антикварков. Эти кварки должны иметь спин, равный половине, а заряды должны быть равны $\frac{1}{3}$ и $\frac{2}{3}$ заряда электрона. В дальнейшем были введены еще два кварка: *c*-кварк «очарование» (от *англ.* charm) и *b*-кварк «преlestь» (от *англ.* beauty) и их антикварки. На основе современных гипотез кварков, так же, как и лептонов, должно быть шесть. Сейчас ведутся поиски шестого, *t*-кварка, который решено назвать «истинным» (от *англ.* truth). Комбинация кварков и антикварков сумела объяснить возникновение всех мезонов. С этой точки зрения, кварки никакого внутреннего строения не имеют и их можно назвать действительно элементарными частицами.

Хотя кварки и сумели чудесно объяснить строение и свойства элементарных частиц, но все попытки обнаружить их в качестве свободных частиц были безуспешны.



Вопросы для самопроверки

1. Сколько типов взаимодействия элементарных частиц существует? 2. Объясните принцип сильного взаимодействия. 3. Что за взаимодействие — электромагнитное взаимодействие? 4. А слабое взаимодействие? 5. А гравитационное взаимодействие? 6. В чем смысл

«великого объединения»? 7. Отрицает ли рассмотренные выше взаимодействия «великое объединение»? 8. Что это за взаимодействие — слабое электрическое взаимодействие? 9. Обсудите табл. 5. 10. Какие это частицы — фотоны, лептоны, мезоны, барионы, фермионы и бозоны? 11. А устойчивые и неустойчивые частицы? 12. Из чего состоят все частицы по гипотезе Гелл-Манна и Цвейга? 13. Что это за частицы — кварки? 14. Чему равен спин и заряд этих частиц? 15. Что означает *c*-кварк? 16. А *b*-кварк? 17. С какой целью был введен *t*-кварк? 18. Зарегистрирован ли *t*-кварк? 19. Можно ли считать кварки элементарными частицами? 20. Зарегистрированы ли кварки в качестве свободных частиц?

§ 39. Космическое излучение

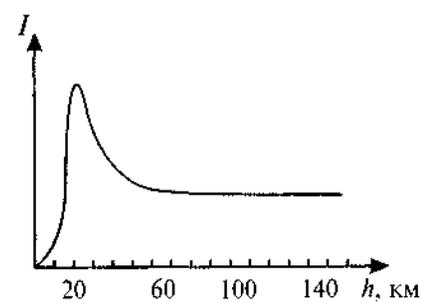
Содержание: космическое излучение; первичное космическое излучение; вторичное космическое излучение; мягкая составляющая; жесткая составляющая; радиационный пояс Земли.

Космическое излучение. В 1912 г. австрийский физик В.Ф. Гесс, изучавший ионизацию воздушного слоя над поверхностью Земли, получил интересный результат. По его мнению, ионизацию воздуха в основном осуществляют радиоактивные лучи, идущие с поверхности Земли, и поэтому с подъемом вверх ионизация должна была уменьшаться. Но по результатам опыта степень ионизации воздуха на высоте 5000 м была в 3 раза больше, чем на поверхности Земли.

Проанализировав это явление, ученые пришли к выводу, что воздух ионизируют не только радиоактивность Земли, но и лучи, идущие из космоса и от Солнца. Это излучение было названо *космическим излучением*.

Как показали опыты, интенсивность космического излучения быстро растет с высотой и, достигнув своего максимального значения, затем уменьшается. Начиная с высоты 50 км, интенсивность практически остается постоянной (рис. 63). Различают *первичное* и *вторичное* космическое излучение.

Первичное космическое излучение. Излучение, приходящее непосредственно из



космоса, называют *первичным космическим излучением*. Исследование его состава показало, что первичное космическое излучение представляет собой поток элементарных частиц высокой энергии. Причем более 90% из них составляют протоны, около 7% — α -частицы и лишь около 1% — ядра более тяжелых элементов ($Z > 20$). Первичное космическое излучение имеет в основном галактическое происхождение с энергией порядка 10^{21} эВ. Ускорение частиц до столь высоких энергий происходит при столкновении с движущимися межзвездными магнитными полями.

Следует отметить, что интенсивность космического излучения изменяется со временем. Она зависит от активности Солнца. Во время вспышки на Солнце интенсивность космического излучения может измениться на десятки и сотни процентов. Это доказывает, что определенная часть космического излучения образуется на Солнце. Первичное космическое излучение достигает 50 км от поверхности Земли и поэтому при $h \geq 50$ км его интенсивность постоянна.

Вторичное космическое излучение. Космические лучи, достигшие верхних слоев атмосферы, взаимодействуют с атомными ядрами и порождают *вторичное космическое излучение*. С высоты ниже 20 км космическое излучение является вторичным. С уменьшением высоты интенсивность излучения понижается, поскольку вторичные частицы, по мере продвижения к поверхности Земли, испытывают поглощение. В составе вторичного космического излучения можно выделить два компонента: *мягкий* и *жесткий*.

Мягкая составляющая. Мягкая составляющая вторичного космического излучения сильно поглощается в свинце. Это происходит следующим образом: имеющиеся в составе космического излучения γ -кванты с энергией $E > 2m_e c^2$ тормозятся в поле атомного ядра и образуют электронно-позитронную пару. Образовавшиеся таким образом электроны и позитроны, тормозясь, в свою очередь, создают γ -кванты, которые с энергией выше $2m_e c^2$ образуют новую электронно-позитронную пару. Этот

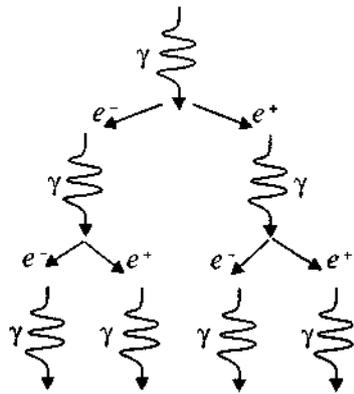
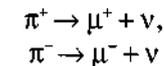


Рис. 64

процесс будет идти до тех пор, пока энергия γ -квантов не будет меньше $2m_e c^2$. Описанный процесс называется *электронно-позитронно-фотонным ливнем* (рис. 64). Хотя первичные частицы, приводящие к образованию этих ливней, и обладают огромными энергиями, но ливневые частицы являются «мягкими» — не проходят через небольшие толщи вещества. Таким образом, ливневые частицы — электроны, позитроны и γ -кванты — представляют собой мягкий компонент вторичного космического излучения.

Жесткая составляющая. Она обладает в свинце большой проникающей способностью. В 1938 г. К. Андерсон и С. Нидермейер определили, что жесткая составляющая представляет собой поток частиц, заряженных положительно и отрицательно с массой $207 m_e$ и временем жизни $2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Этим частицам дали название *мюоны* (μ^+ , μ^-). В 1947 г. С. Пауэлл определил, что в результате столкновения первичного космического излучения с ядрами атомов образуются ранее не известные заряженные частицы массой $273 m_e$. Эти частицы были названы π -мезонами (π^+ , π^-), или *пионами*. Время их жизни в свободном состоянии равняется $2,55 \cdot 10^{-8}$ с. В 1950 г. был открыт нейтральный π -мезон с массой $264,2 m_e$ и временем жизни меньше $1,8 \cdot 10^{-16}$ с. Пионы считаются частицами, сильно взаимодействующими с нуклонами.

Существование этих частиц предсказал Х. Юкава, объяснивший природу ядерных сил. Как было отмечено выше, они имеют очень маленькое время жизни, распадаются по следующей схеме:



и образуют частицы, составляющие жесткую компоненту космического излучения. В отличие от пионов, мюоны не участвуют в ядерных взаимодействиях и тратят свою энергию на ионизацию.

радиационный пояс Земли. Первые сведения о распределении заряженных частиц вокруг Земли были получены с помощью искусственных спутников Земли. В пространстве вокруг Земли имеется такой пояс, возникший под действием магнитного поля Земли, плотность заряженных частиц в котором в сотни миллионов раз больше плотности частиц первичного космического излучения в межпланетной пустоте. Такой

пояс, состоящий из заряженных частиц, называют *радиационным поясом*.

Высота радиационного пояса в западном полушарии от плоскости экватора составляет 600 км от поверхности Земли, а высота в восточном полушарии — около 1600 км. Высота внешней границы пояса равна 8–10 радиусам Земли. Несимметричное расположение радиационного пояса Земли, в зависимости движения заряженных частиц от расположения магнитного поля Земли. Изучение радиационного пояса и космического излучения, с одной стороны, служит источником процессов, происходящих в космосе, с другой — имеет большое значение для изучения их влияния на живые организмы.



Вопросы для самопроверки

1. Кто открыл космическое излучение? 2. Что изучал В. Гесс? 3. На каком основании была выдвинута идея о существовании космического излучения? 4. Почему это излучение названо космическим? 5. Как изменяется интенсивность космического излучения в зависимости от высоты? 6. Опишите рис. 63. 7. Какое излучение называют первичным космическим? 8. Что представляет собой первичное космическое излучение? 9. Откуда приходит первичное космическое излучение? 10. Откуда возникает такая высокая энергия? 11. Чему равна энергия космического излучения, идущего от Солнца? 12. До каких пределов доходит первичное космическое излучение? 13. Как образуется вторичное космическое излучение? 14. В чем причина уменьшения интенсивности излучения с уменьшением высоты? 15. Что представляет собой вторичное космическое излучение? 16. Как образуется мягкая составляющая этого излучения? 17. γ -квант какой энергии может образовать электронно-позитронную пару? 18. Как образуется электронно-позитронно-фотонный ливень? 19. Из чего состоит мягкая составляющая вторичного космического излучения? 20. Поглощается ли оно в свинце? 21. Охарактеризуйте рис. 64. 22. Из чего состоит жесткая составляющая вторичного космического излучения? 23. Что это за частицы — пионы? 24. А π -мезоны? 25. Кто открыл π -мезоны? 26. Равны ли массы заряженных и электронейтральных π -мезонов? 27. Взаимодействуют ли пионы с ядром? 28. Кто предсказал существование пионов? 29. Какова схема распада пионов? 30. Откуда были взяты первоначальные сведения о распределении заряженных частиц вокруг Земли? 31. Что такое радиационный пояс Земли? 32. Какова толщина и высота радиационного пояса? 33. В чем причина несимметричного расположения радиационного пояса Земли? 34. В чем состоит значение излучения радиационного пояса Земли?

§ 40. Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц

Содержание: типы приборов, регистрирующих частицы; сцинтилляционный счетчик; газоразрядный счетчик; камера Вильсона; метод фотоэмульсии.

Типы приборов, регистрирующих частицы. Основная цель изучения излучения радиоактивных веществ — определение природы частиц, испущенных при радиоактивном распаде, энергии и интенсивности излучения (число частиц, испускаемых радиоактивным веществом за одну секунду). Самые распространенные методы их регистрации основаны на свойстве частиц ионизировать и оказывать фотохимическое действие. Приборы, выполняющие эту задачу, делятся на две группы:

1. Приборы, позволяющие регистрировать прохождение частицы через определенный участок пространства и в некоторых случаях определять ее характеристики, например, энергию. Примером таких приборов могут быть сцинтилляционный счетчик, полупроводниковый счетчик, импульсная ионизационная камера.

2. Приборы, позволяющие наблюдать, например, фотографировать, следы частиц в веществе. Примером таких приборов могут быть камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмульсии. Ниже мы ознакомимся с некоторыми из них.

Сцинтилляционный счетчик. Принцип его работы основан на наблюдении сцинтилляций — вспышек света при попадании быстрых частиц на флюоресцирующий экран. Образующиеся при этом слабые световые вспышки преобразуются в электрические импульсы, регистрируемые электронной аппаратурой. Именно таким счетчиком впервые была визуально зарегистрирована α -частица (1903).

Газоразрядный счетчик. Газоразрядный счетчик обычно представляет собой наполненный газом металлический цилиндр (катод) с тонкой проволокой (анод), натянутой по его оси. При прохождении регистрируемой частицы между электродами она ионизирует газ. Ионы сталкиваются с атомами и молекулами стенок и газа и ионизируют их вторично. Можно говорить о двух типах газоразрядных счетчиков. Первый называют *пропорциональным счетчиком*, в котором газовый разряд несамостоятельный. В *счетчиках Гейгера-Мюллера* — это вто-

рой тип счетчиков — разряд самостоятельный. Временное разрешение счетчиков Гейгера-Мюллера составляет 10^{-3} – 10^{-7} с, т.е. регистрируются частицы, попадающие в этот временной интервал. Для газоразрядных счетчиков эффективность регистрации равна примерно 100% для заряженных частиц и примерно 5% для γ -квантов.

Камера Вильсона. Камера была создана в 1911 г. английским физиком Ч. Вильсоном. Когда быстро летящие частицы пролетают через парообразное вещество, они ионизируют молекулы этого вещества: на этом основана ее работа. Схема камеры Вильсона представлена на рис. 65. Объем камеры (1) заполняется насыщенными парами воды или спирта. При резком движении поршня (2) вниз газ в объеме 1 адиабатически расширяется и охлаждается. В результате газ становится перенасыщенным. Пролетевшая через камеру частица создает на своем пути ионы, и при расширении из конденсированного пара образуются капельки. Таким образом на траекториях частиц, пролетевших через камеру, образуются треки из тумана.

Альфа-частица сильно ионизирует молекулы газа и поэтому оставляет сплошной жирный след (рис. 66). Бета-частица оставляет очень тонкий след. Гамма-излучение регистрируется за счет выбитых им из газа в камере Вильсона фотоэлектронов. Этот след можно наблюдать или фотографировать. Русский ученый Д.В. Скобельцын в 1927 г. значительно расширил возможности камеры Вильсона, поместив ее в сильное магнитное поле. Теперь по искривлению трека в магнитном поле можно судить о знаке заряда, энергии и о других характеристиках частиц.

Метод фотоэмульсии. В 1927 г. русский физик Л.В. Мысовский предложил простой метод регистрации следа заряжен-

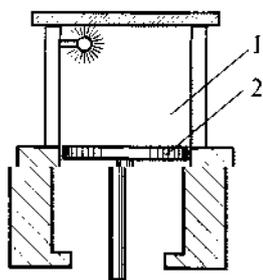


Рис. 65



Рис. 66

ных частиц. Прохождение частицы через фотоэмульсию вызывает ионизацию, приводящую к образованию центров скрытого изображения. После проявления следы заряженных частиц становятся видимыми. Так как эмульсия — среда более плотная, длина трека в эмульсии более короткая. Поэтому фотоэмульсии применяются для изучения реакций, вызываемых частицами в ускорителях сверхвысоких энергий и в космических лучах.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается цель изучения излучения радиоактивных веществ? 2. На чем основаны самые распространенные методы регистрации заряженных частиц? 3. На сколько типов делятся приборы, регистрирующие частицы? 4. Перечислите эти приборы. 5. В чем состоит принцип работы сцинтилляционного счетчика? 6. На каком приборе впервые была зарегистрирована α -частица? 7. Каков принцип работы газоразрядного счетчика? 8. Каковы принцип работы и эффективность счетчика Гейгера-Мюллера? 9. Когда была изобретена камера Вильсона? 10. В чем заключается принцип ее работы? 11. Как образуется след частицы в камере Вильсона? 12. Какими будут следы α -, β -, γ -частиц в камере Вильсона? Охарактеризуйте рис. 66. 13. Каким образом Д. Скобельцын увеличил возможности камеры Вильсона? 14. В чем состоит метод фотоэмульсии? 15. Где используется метод фотоэмульсии?

Образцы решения задач

Задача 1. Определить энергию фотона, испущенного электроном при переходе с третьей стационарной орбиты водорода на вторую.

Дано:
 $z = 1; n = 3; m = 2.$

$E_{\phi} = ?$

Решение: В соответствии со вторым постулатом Бора энергия фотона, испущенного электроном в атоме водорода при переходе со стационарной орбиты n на орбиту m определяется следующим образом:

$$E_{\phi} = E_n - E_m \quad (1)$$

где E_n и E_m — энергии электрона на n - и m -стационарных орбитах соответственно:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad (2)$$

$$E_m = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{m^2}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим следующее выражение:

$$E_\phi = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Если учесть, что $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и с учетом данных находим E_ϕ :

$$E_\phi = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{8 \cdot (6,63 \cdot 10^{-34})^2 \cdot (8,86 \cdot 10^{-12})^2} \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \text{ Дж} = 0,3 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 1,89 \text{ эВ}.$$

О т в е т : $E_\phi = 1,89$ эВ.

З а д а ч а 2. Найти длину волны де Бройля электрона, если масса электрона в движении больше массы покоя в 2 раза.

Дано: $m = 2m_0$. **Решение:** Длину волны де Бройля найдем из следующего выражения:

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (1)$$

Из условия задачи следует, что $m = 2m_0$. Значит,

$$\lambda = \frac{h}{2m_0 \cdot v}. \quad (2)$$

Скорость электрона v определим из его выражения для релятивистской массы:

$$m = 2m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

или

$$2\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1.$$

Отсюда находим:

$$v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot c. \quad (3)$$

Если выражение (3) подставим в (2), то для λ получим выражение

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3} \cdot m_0 \cdot c}. \quad (4)$$

Начнем вычисления, учитывая, что $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{3} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} \text{ м} = 1,4 \text{ нм}.$$

О т в е т : $\lambda = 1,4$ нм.



Задачи для самостоятельного решения

1. Найти максимальную энергию фотона в серии Бальмера спектра излучения атома водорода. ($E_{\max} = 3,4$ эВ)
2. На основании теории Бора найти радиус r_2 второй стационарной орбиты водорода и скорость электрона v_2 в ней. ($r_2 = 212$ нм; $v_2 = 1,1$ мм/с)
3. На основании теории Бора найти период обращения электрона T на второй стационарной орбите. ($T = 1,2 \cdot 10^{-15}$ с)
4. Найти длину волны де Бройля протона, если кинетическая энергия протона больше энергии покоя в два раза: ($\lambda = 1,19$ фм).
5. Чему будет равна самая маленькая неопределенность координаты электрона, если кинетическая энергия электрона равна своей энергии покоя. ($\Delta x = 0,27$ нм)
6. Найти дефект массы и энергию связи ядра ${}^4_7\text{N}$. ($\Delta m = 0,186 \cdot 10^{-27}$ кг; $E_{\text{св}} = 104,3$ МэВ)
7. Какая энергия выделяется при образовании протонами и нейтронами 5 г гелия? ($E = 3,42 \cdot 10^{12}$ Дж)
8. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра атома ${}^{24}_{12}\text{Mg}$. ($\Delta m = 0,21$ а.е.м; $E_{\text{св}} = 192$ МэВ; $E_{\text{уд.св}} = 2,6$ МэВ)
9. Период полураспада радия равен 1600 годам. Чему равно среднее время жизни ядра радия? ($\tau = 2240$ лет)
10. При бомбардировке ядра бора ${}^{11}_5\text{B}$ протонами образуется ядро бериллия ${}^8_4\text{Be}$. Еще какое ядро образуется при этой реакции? (${}^4_2\text{He}$)
11. Порядковые номера кальция и циркония в периодической таблице равны 10 и 40 соответственно. Во сколько раз заряды всех ядер в 1 моле циркония больше зарядов всех ядер в 2 молях кальция? (1).

12. Найдите энергию связи в МэВ ядра кадмия, если дефект массы изотопа составляет 0,008 а.е.э. (7,47 МэВ)
13. При облучении ядра плутония α -частицами получили элемент кюрий ^{242}Pu и нейтрон. Найдите массовое число плутония. (239)
14. Если для ионизации некоторого атома необходима энергия 0,825 эВ, подсчитайте минимальную частоту электромагнитного излучения в ТГц, необходимого для осуществления этой ионизации. (200 ТГц)

Тестовые вопросы

1. Что это за положительная частица, занимающая 95% массы атома и имеющая размер 10^{-14} ?
- А. Частица; В. Протон; С. Электрон; D. Ядро; E. Нейтрон.
2. Почему электрон не падает на ядро?
- А. Не позволяет сила Кулона, существующая в атоме между электроном и протоном.
 В. В атомах существуют стационарные состояния, и орбиты электронов соответствуют этим состояниям.
 С. Не допускают электромагнитные силы в атоме.
 D. Электроны находятся именно на этих стационарных орбитах и не излучают, даже если двигаются с ускорением.
 E. Правильный ответ С и D.
3. Как называются силы, удерживающие ядра от распада под действием кулоновских сил?
- А. Притяжения; В. Слабые; С. Ядерные;
 D. Гравитационные; E. Правильный ответ А и С.
4. Какая частица выделится при данной реакции?
- $${}^1_1\text{H} + {}^{14}_6\text{C} = {}^{15}_7\text{N} + ?$$
- А. Электрон; В. Протон; С. Нейтрон;
 D. α -частица; E. β -частица.
5. Определите состав ядра урана ^{238}U .
- А. 92 протона, 238 нейтронов;
 В. 92 протона, 146 нейтронов;
 С. 92 протона, 146 нейтронов;
 D. 238 протонов, 92 нейтрона;
 E. 146 протонов, 238 нейтронов.

Модель атома Томсона состоит из положительно заряженного шара размером 10^{-10} м с равномерно распределенной массой, внутри которого находятся электроны, совершающие колебательные движения около положения равновесия. Сумма положительного и отрицательного зарядов равны друг другу.

Планетарная модель атома – электроны двигаются по орбитам вдоль электронных оболочек атома, и их заряд равен положительному заряду ядра.

Обобщенная формула Бальмера: $\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$.

$m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$ – серия Лаймана;

$m = 2, n = 3, 5, \dots$ – серия Бальмера;

$m = 3, n = 4, 5, 6, \dots$ – серия Пашена.

Постулаты Бора.

Постулат о стационарных (устойчивых) состояниях: в атомах существуют стационарные состояния, которым соответствуют стационарные орбиты электронов.

Постулат о частотах: при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую он излучает (или поглощает) один фотон с энергией, равной разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu = E_n - E_m.$$

$r_B = 0,528 \cdot 10^{-10}$ м – радиус Бора; в атомной физике используется в качестве единицы длины.

Энергетические уровни в атоме: $E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2}$.

Постоянная Ридберга: $R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2}$.

Гипотеза Луи де Бройля. Не только фотон, но и электрон и другие частицы наравне с корпускулярными свойствами обладают еще и волновыми свойствами.

В квантовой механике обобщены два свойства вещества: квантование величин и волновые свойства частиц.

Соотношение неопределенностей:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar, \quad \Delta y \cdot \Delta p_y \geq \hbar, \quad \Delta z \cdot \Delta p_z \geq \hbar.$$

Квантовые числа. Форма электронных облаков, их размеры и место в пространстве определяются квантовыми числами.

Главное квантовое число n определяет энергетические уровни электрона в атоме. Может принимать любые целые числа: $n = 1, 2, 3, \dots$

Орбитальное квантовое число ℓ определяет значения момента импульса электрона и характеризует форму электронного облака. Оно может принимать значения $\ell = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$.

Магнитное квантовое число m определяет проекцию момента импульса электрона в заданном направлении и характеризует место электронного облака в пространстве. Может принимать значения $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$.

Принцип Паули. В одном атоме не может быть два электрона с одинаковыми квантовыми числами (n, ℓ, m, S).

Когда имеют в виду лазер, то подразумевают источник света с остро направленным когерентным лучом.

Строение атомного ядра. Ядро атома состоит из протона и нейтрона.

Протон (p) — ядро атома водорода.

Масса покоя: $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1836 m_e$.

Нейтрон (n). Электрически нейтральная частица.

Масса покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1839 m_e$.

Энергия связи ядра. Энергия, которая необходима для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны, называется энергией связи ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z)m_n - m_a] \cdot c^2.$$

Естественной радиоактивностью называется превращение нестабильных изотопов в стабильные путем испускания ядрами атомов частиц и выделения энергии.

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

Ядерные реакции — превращение ядер в другие ядра при взаимодействии их друг с другом или с ядерными частицами.



Как было отмечено в § 32, энергия связи ядра в миллионы раз больше энергии связи атома. Поэтому при синтезе легких ядер и при делении тяжелых ядер выделяется колоссальная энергия. Естественно, человечество ищет пути использования этой энергии. Итак, каковы успехи в использовании ядерной энергии и с какими мыслями о будущем мы живем? В этой главе вы подробно ознакомитесь с работами, выполненными в этой области, и имеющимися проблемами.

§ 41. Деление тяжелых ядер.

Непрерывная цепная реакция

Содержание: деление тяжелых ядер; деление ядра урана; непрерывная цепная реакция; коэффициент размножения нейтрона.

Деление тяжелых ядер. Возможность деления тяжелых ядер можно объяснить на основании графика зависимости удельной энергии связи от массового числа, приведенного на рис. 67. Из этого графика видно, что удельная энергия связи тяжелых ядер меньше удельной энергии связи для элементов середины таблицы Менделеева на 1 МэВ. Следовательно, при делении тяжелого ядра на два осколка должна освобождаться энергия, равная примерно 1 МэВ на один нуклон.

Если будет делиться ядро, у которого 200 нуклонов, то будет выделяться энергия порядка ≈ 200 МэВ, основная доля которой превращается в кинетическую энергию осколков ядра (≈ 165 МэВ).

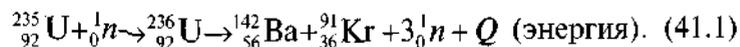
Деление ядра урана. В 1938—1939 гг. немецкими физиками Дж. Ганном и Ф. Штрассманом было доказано, что при облучении урана нейтронами ядро урана делится на два (иногда на три) осколка, и при этом выделяется огромная энергия. При этом делении образуются элементы из середины периодической системы — лантам, барий и др.

Результаты опыта получили следующее объяснение. Ядро урана, поглотившее нейтрон, переходит в возбужденное со-

стояние и делится на две части. Причина этого — кулоновская сила отталкивания между протонами становится сильнее ядерных сил притяжения. Осколки ядра становятся положительно заряженными и отталкиваются друг от друга под действием кулоновской силы и разлетаются с большой скоростью. Одновременно деление ядра сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов. Как показывают опыты, основная часть вторичных нейтронов выделяется из вылетающих возбужденных осколков.

Осколки деления могут быть очень разнообразными и иметь до 200 видов. Наибольшую вероятность образования имеют ядра с массовым числом от 95 до 139.

Вероятность деления на осколки с одинаковой массой намного меньше, такое деление происходит очень редко. Очень часто происходит следующая реакция деления:



Дальнейшие исследования показали, что под действием нейтрона могут делиться и ядра других элементов. Это ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{90}^{232}\text{Th}$ и др.

Непрерывная цепная реакция. Как было отмечено выше, при делении каждого ядра урана, кроме деления на осколки, происходит испускание еще 2–3 нейтронов. В свою очередь, вторичные нейтроны могут вызвать деление других ядер урана. В результате образуется 4–9 нейтронов и расщепляется столько же ядер, что становится причиной появления от 8 до 27 нейтронов. Таким образом, возникает процесс, усиливающий деление ядра (рис. 67). Этот процесс называется *непрерывной цепной реакцией*.

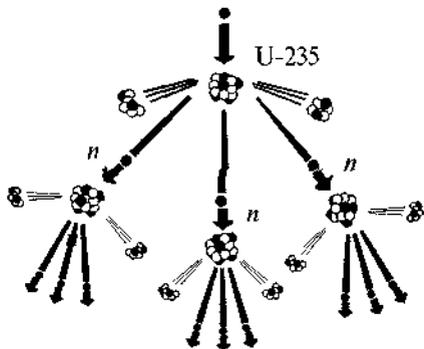


Рис. 67

Цепная реакция — это экзотермическая реакция, которая происходит с выделением огромного количества энергии. Выше мы отмечали, что при делении одного ядра урана выделяется 200 МэВ энергии. Теперь подсчитаем, сколько энергии выделится при делении 1 кг урана (в 1 кг урана содержится $2,5 \cdot 10^{24}$ ядер):

$$E \approx 200 \text{ МэВ} \cdot 2,5 \cdot 10^{24} = 5 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 8 \cdot 10^{13} \text{ Дж}. \quad (41.2)$$

Такое количество энергии выделяется при сжигании 1800 т бензина или 2500 т каменного угля. Именно выделение такого большого количества энергии побудило ученых искать пути практического применения цепной реакции (в мирных и военных целях). Осуществление цепной реакции — не такая уж легкая задача. Причина этому то, что в природе существует только два изотопа урана: 99,3% — ${}_{92}^{238}\text{U}$ и 0,7% — ${}_{92}^{235}\text{U}$. Ядерным топливом может служить только уран-235.

Поэтому сначала из урановой руды выделяют уран-235, с которым происходит цепная реакция, а затем создают условия для протекания реакции. В настоящее время эта проблема успешно решена.

Коэффициент размножения нейтронов. Для осуществления цепной реакции большое значение имеет участие вторичных нейтронов в последующих актах деления ядра. Поэтому вводится понятие *коэффициента размножения нейтронов*:

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \quad (41.3)$$

где величина N_i — число нейтронов в i -м поколении, N_{i-1} — число нейтронов в предыдущем поколении.

Коэффициент размножения показывает не только число нейтронов, но и число делящихся ядер.

При $k < 1$ идет *затухающая* реакция.

При $k = 1$ идет *самоподдерживающаяся* реакция, при которой число нейтронов с течением времени не меняется.

При $k > 1$ идет *развивающаяся* реакция, число делений непрерывно растет, и реакция может привести к взрыву.



Вопросы для самопроверки

1. Объясните связь удельной энергии связи тяжелых ядер с массовым числом.
2. Почему при превращении тяжелых ядер в средние ядра выделяется энергия?
3. Сколько энергии выделится, если рас-

падает ядро, имеющее 200 нуклонов? 4. А если распадется ядро, имеющее 400 нуклонов? 5. Во что превращается основная часть выделившейся энергии? 6. Что определили О. Ганн и Ф. Штрассман? 7. Что выделяется, когда распадается ядро урана? 8. Запишите самую распространенную реакцию распада. 9. Ядра каких еще элементов распадаются под действием нейтрона? 10. Как происходит непрерывная цепная реакция? 11. Что это за реакция — непрерывная цепная реакция? 12. Охарактеризуйте рис. 67. 13. Сколько энергии выделится при распаде 1 кг урана? 14. При сгорании скольких литров бензина выделяется такая энергия? 15. Все ли изотопы урана участвуют в цепной реакции? 16. Какой процент в урановой руде составляет уран-235? 17. Как определяется коэффициент размножения k ? 18. Как продолжается цепная реакция при $k < 1$? 19. А при $k = 1$? 20. Какие значения должен принять k , чтобы произошел ядерный взрыв?

§ 42. Ядерный реактор. Управляемая цепная реакция

С о д е р ж а н и е : ядерный реактор; управление ядерным реактором; критическая масса; воспроизводство ядерного топлива; типы ядерных реакторов; защита ядерного реактора; атомная бомба.

Ядерный реактор. Для человечества большое значение приобретает не только осуществление цепной реакции деления, но и управление ею в целях ее использования. *Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, называются ядерными реакторами.*

Пуск первого ядерного реактора был осуществлен в 1942 г. в Чикагском университете под руководством Э. Ферми.

Схема реактора, использовавшего в качестве топлива естественный уран, обогащенный до 5% ураном-235, приведена на рис. 68.

Осуществление цепной реакции на ядре урана-235 осуществляется тепловыми нейтронами (нейтроны, энергии которых лежат в пределах 0,005–0,5 эВ, называют *тепловыми*). Энергия нейтронов, образующихся в результате деления ядер, бывает в пределах 2 МэВ. Поэтому, чтобы обеспечивать протекание цепной реакции, вторичные нейтроны надо замедлить до тепловых нейтронов. С этой целью используются специальные вещества, называемые *замедлителями*. Замедлители должны замедлять нейтроны, но не поглощать их. В качестве замедлителей используются тяжелая вода, простая вода, гра-

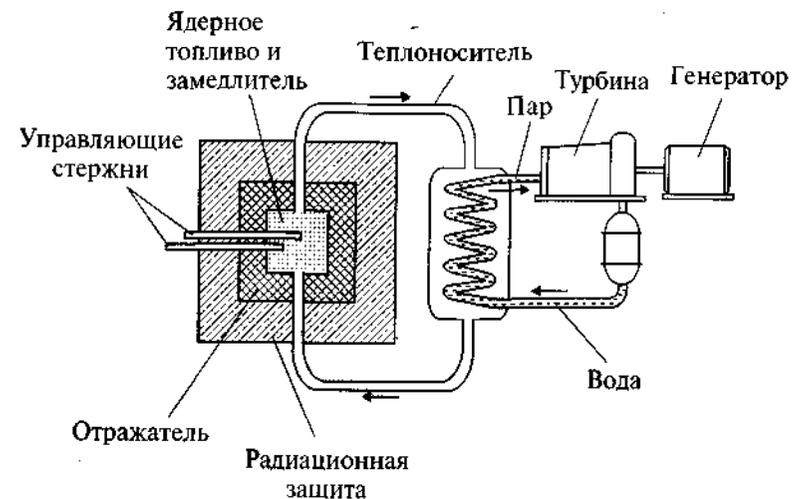


Рис. 68

фит и бериллий. Получение тяжелой воды представляет определенные трудности, поэтому в качестве замедлителей используются простая вода или графит.

Активная зона реактора, где происходит самоподдерживающаяся цепная реакция, окружена графитовым цилиндром.

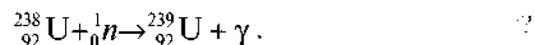
Управление ядерным реактором. В активной зоне реактора расположены тепловыделяющие элементы (уран) и замедлители. При цепной реакции температура в активной зоне поднимается до 800–900 К. Для отвода тепла через активную зону пропускают трубы с теплоносителями. Для примера, таким теплоносителем может быть обычная вода или жидкий натрий. Управление цепной реакцией осуществляется специальными управляющими стержнями, сильно поглощающими нейтроны, ими могут быть бор или кадмий. Чтобы цепная реакция не стала неуправляемой, надо поддерживать коэффициент размножения равным единице. Это осуществляется с помощью управляющих стержней. Когда управляющие стержни вынимают из активной зоны реактора, $k > 1$, а когда они полностью вставлены, $k < 1$. С помощью стержней в любой момент можно остановить развитие цепной реакции.

Критическая масса. Размер активной зоны, где может идти самоподдерживающаяся цепная реакция, ($k > 1$) не может быть меньше некоторой критической величины. Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществ-

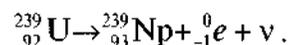
ствление цепной реакции, называются *критическими размерами*. Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, называется *критической массой*.

В зависимости от формы устройства и вида горючего, критическая масса может быть от нескольких сот граммов до нескольких тонн.

Воспроизводство ядерного топлива. В реакторе, работающем на природном уране, часть вторичных нейтронов поглощается ураном-238 и превращается в уран-239:



Изотоп урана-239 радиоактивен. Период его полураспада равен 23,5 мин. В процессе β -распада он превращается в изотоп нептуния:



Ядро нептуния еще одним β -распадом превращается в ядро плутония-239:



Период полураспада плутония-239 равен 24 тысячам лет, и он распадается так же, как и уран-235. Его можно использовать в качестве ядерного топлива в реакторах. Таким образом, использование урана-235 в качестве ядерного топлива приводит к получению плутония-239, который не уступает урану.

При делении одного ядра урана-235 выделяется 2,5 нейтрона. Для продолжения цепной реакции достаточно одного нейтрона. Значит, 1,5 нейтрона используется для получения плутония. Таким образом, при делении ядер урана-235 не только выделяется энергия, но и воспроизводится ядерное топливо в большем количестве, чем использовалось.

Типы ядерных реакторов. В настоящее время существует много различных реакторов, которые делятся на следующие типы:

— по энергии нейтронов, используемых для расщепления ядра горючего: реакторы на тепловых нейтронах; реакторы на быстрых нейтронах (нейтроны с энергией выше 1 МэВ);

— по типу горючего: реакторы, работающие на природном уране, на обогащенном уране, на чистом горючем;

— по назначению: реакторы научно-исследовательские; по производству плутония; по производству электрической энергии.

Защита ядерного реактора. При цепной реакции образуются ядерные осколки, являющиеся источником нейтронов, β - и γ -излучений. Другими словами, урановый реактор — источник различных излучений. Особую опасность представляют нейтроны и γ -излучения, обладающие большой проникающей способностью. Поэтому большое значение имеет организация защиты обслуживающего персонала. Для биологической защиты используют воду толщиной слоя до 1 м, толстый слой бетона и сталь толщиной до 3 м.

Атомная бомба. Атомную бомбу можно рассматривать в качестве ядерного реактора с неуправляемой цепной реакцией ($k > 1$). В качестве топлива в основном используется уран-235 или плутоний-239. Как было отмечено выше, и в этом случае для осуществления цепной реакции необходимо, чтобы были критические размеры и критическая масса ядерного горючего. Для урана-235 и плутония-239 критическая масса составляет 10–20 кг.

Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, ее ядерный заряд делится на две удаленные друг от друга части с массами меньше критической. Когда эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция — происходит взрыв. В результате взрыва образуются нейтроны и γ -излучение, температура и давление резко повышаются. Основными поражающими факторами при ядерном взрыве являются ударная волна, распространяющаяся от места взрыва со сверхзвуковой скоростью, и радиоактивное заражение окружающей среды.



Вопросы для самопроверки

1. Что такое ядерный реактор? 2. Где и когда был построен первый ядерный реактор? 3. Что было в нем использовано в качестве топлива? 4. Как осуществляется цепная реакция на ядре урана-235? 5. Какие нейтроны называются тепловыми? 6. Чему будет равна энергия нейтронов при ядерном распаде? 7. Как тормозятся эти нейтроны? 8. Каким будет активная зона реактора? 9. В каком виде ядерное топливо вводится в активную зону? 10. До каких показателей поднимается температура в активной зоне? 11. Как выводится тепло из активной зоны? 12. Как управляется цепная реакция в активной зоне? 13. Что произойдет, если управляемые стержни удалить из активной зоны реактора? 14. А если ввести управляющие стержни в

активную зону реактора? 15. Каким должен быть объем активной зоны, чтобы произошла самоподдерживающаяся цепная реакция? 16. Какую массу называют критической? 17. Чему может быть равна критическая масса? 18. Как в реакторе образуется уран-239? 19. А нептун-239? 20. Объясните схему образования плутония-239. 21. Какими свойствами обладает плутоний-239? 22. К образованию каких продуктов приводит распад урана-235? 23. На какие типы делятся реакторы в зависимости от скорости нейтронов? 24. На какие типы делятся реакторы в зависимости от используемого вида топлива? 25. Какие типы реакторов существуют в зависимости от назначения? 26. Какие продукты, образующиеся в ядерном реакторе, считаются особо опасными? 27. Какие работы проводятся для защиты от них? 28. В качестве какого реактора можно рассматривать атомную бомбу? 29. Что используют в качестве топлива в атомных реакторах? 30. Чему равна критическая масса для такого топлива? 31. Как сохраняется ядерный заряд до взрыва? 32. Почему так делают? 33. Когда происходит неуправляемая цепная реакция? 34. Как осуществляется воссоединение ядерных зарядов? 35. Какие поражающие факторы атомного взрыва являются основными?

§ 43. Ядерная энергетика и ее использование в мирных целях

С о д е р ж а н и е : преимущества ядерной энергетики; мобильные атомные двигатели.

Преимущества ядерной энергетики. Человечество всегда стремилось получить дешевые и удобные источники энергии. Создание ядерных реакторов привело к промышленному применению ядерной энергии, т.е. появилась возможность использовать их для нужд человечества. Энергетические запасы ядерного горючего в сотни раз превышают запасы химических видов топлива. Если, как предполагается, основная доля электроэнергии будет вырабатываться на АЭС, то это, с одной стороны, снизит стоимость электроэнергии, а с другой – решит энергетическую проблему на несколько столетий. Следует отметить, что АЭС занимают сравнительно мало места. В Обнинске в 1954 г. была введена в эксплуатацию первая атомная электростанция. После этого было построено и введено в эксплуатацию много мощных АЭС.

Мобильные атомные двигатели. Большая производительность ядерного топлива и способность ядерных двигателей

работать в автономном режиме позволили использовать их на подводных лодках и надводных кораблях. В настоящее время множество подводных кораблей, такие, как ледоколы «Арктика», «Сибирь», и множество атомных подводных лодок бороздят воды Мирового океана.

На АЭС надо строго соблюдать правила техники безопасности. В противном случае это может привести к катастрофическим последствиям. Примером может служить авария на Чернобыльской АЭС.



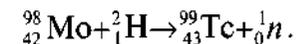
Вопросы для самопроверки

1. Какие возможности получило человечество с созданием ядерных реакторов? 2. Какие преимущества имеются при выработке электрической энергии на АЭС? 3. Где была введена в строй первая АЭС? 4. Можно ли самостоятельно использовать ядерные двигатели? 5. Приведите примеры самостоятельного использования таких двигателей. 6. Что вы знаете об аварии на Чернобыльской АЭС?

§ 44. Получение и применение искусственных изотопов

С о д е р ж а н и е : получение радиоактивных изотопов; использование радиоактивных изотопов.

Получение радиоактивных изотопов. Открытие искусственной радиоактивности, т.е. образование в результате ядерных реакций радиоактивных ядер, привело к получению искусственных радиоактивных изотопов. Первый элемент, полученный искусственным путем, это технеций $^{99}_{43}\text{Tc}$. Он был получен в 1937 г. при бомбардировке молибдена дейтерием:



В дальнейшем были открыты изотопы элементов пустующих клеток 43, 61, 85, 87 в периодической системе элементов Менделеева. До настоящего времени искусственным путем получены элементы с 93 по 109.

Использование радиоактивных изотопов. Использование радиоактивных изотопов основано на свойстве испускаемого ими излучения поглощать и ионизировать. Поэтому они в последнее время широко используются в научных исследованиях, в промышленности, в сельском хозяйстве и в медицине.

К примеру, радиоактивный изотоп, введенный в исследуемый объект, дает информацию о дальнейшем своем присутствии. Этот *метод меченых атомов* или радиоактивных индикаторов считается несравненным по своей универсальности, точности, быстродействию и достоверности. Использование радиоактивных изотопов в медицине предоставляет новые возможности при диагностике злокачественных образований (рака) и других заболеваний, а также при их лечении.

В настоящее время области использования радиоактивных изотопов настолько широки, что нет возможности их все перечислить. Дорогой ученик, надеемся, что ты ознакомишься с ними самостоятельно.



Вопросы для самопроверки

1. Что называют искусственной радиоактивностью? 2. Какие возможности предоставляет искусственная радиоактивность? 3. Изотопы каких элементов были открыты искусственным путем? 4. На чем основано использование радиоактивных изотопов? 5. В чем заключается сущность метода меченых атомов? 6. Какие преимущества имеет этот метод? 7. Используется ли радиоактивность в медицине? 8. Приведите три примера использования радиоактивности.

§ 45. Биологическое воздействие радиоактивного излучения

С о д е р ж а н и е : действие радиоактивного излучения на живые организмы; виды излучения; устойчивость органов к излучению; доза излучения; биологическая доза.

Действие радиоактивного излучения на живые организмы. Под действием радиоактивного излучения происходит ионизация атомов и молекул живых организмов. Это приводит к разрушению молекулярных связей и химического строения соединений. Разрушение химических связей в клетке приводит к нарушению обмена веществ и становится причиной гибели клетки. С повышением энергии, поглощенной единичной массой клетки, т.е. дозы поглощенной энергии, повышается и степень облучения.

Общая реакция организма на действие излучения зависит от дозы, типа излучения, размеров облучаемой поверхности, чувствительности облучаемого органа, индивидуальных свойств

организма. Например, биологическое воздействие одинаковой дозы различного излучения не бывает одинаковой. Причина этого — неодинаковая плотность ионизации, создаваемая этими излучениями.

Виды излучения. При оценке действия излучения на организм надо отличать внешнее и внутреннее облучение. Некоторые виды излучения (например, α -лучи) не очень опасны при внешнем облучении, но если оно излучается внутри какого-то внутреннего органа, это может представлять серьезную угрозу. Альфа-частица проникает в кожу всего на несколько микрометров, задерживается во внутренних слоях и не причиняет серьезных повреждений.

При внешнем облучении следует обратить особое внимание на защиту от гамма (рентгеновских) лучей и нейтронов, так как эти излучения имеют большую проникающую способность. Бета-частицы проникают в ткани всего на несколько миллиметров, поглощаются кожей и подкожными клетками.

Устойчивость организмов к излучению. Устойчивость различных организмов к ионизирующему излучению меняется в больших пределах. Следовательно, чем больше и сложнее будет организм, тем сильнее будет действовать на него излучение. Например, устойчивость бактерий к ядерному излучению в тысячи раз больше, чем у человека.

Быстро размножающиеся организмы более чувствительны к облучению: развивающийся орган по сравнению с хорошо развитыми тканями мускул, развивающийся эмбрион животных по сравнению с большим, растущее семя по сравнению с нерастущим.

Еще следует отметить следующее: облучение в малых дозах, хотя и становится причиной неблагоприятных генетических изменений, может способствовать росту и развитию живых организмов.

Доза излучения. Воздействие излучения на живые организмы характеризуется дозой *ионизирующего излучения*.

Экспозиционной дозой излучения называют степень ионизации воздуха под действием данного излучения.

Единица экспозиционной дозы излучения в СИ — кулон на килограмм (*Кл/кг*).

Если 1 кг воздуха ионизируется так, что сумма электрических зарядов всех ионов одного знака будет равна 1 Кл, то доза излучения будет равна 1 Кл/кг.

Внесистемной единицей экспозиционной дозы является *рентген (R)*: $1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Воздействие различных излучений одинаковой дозы D_0 на организм бывает различной. Поэтому для оценки степени безопасности излучения вводится коэффициент k , названный *относительной биологической активностью*.

Для рентгеновских гамма-лучей и электронов $k = 1$, для медленных нейтронов $k = 5$ и для альфа-частиц $k = 10$ и т.д.

Биологическая доза. Биологическая доза — величина, определяющая воздействие излучения на организм.

Единица биологической дозы — биологический эквивалент рентгена (бэр): 1 Бэр — доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое воздействие, как и доза рентгеновского или гамма-излучения в 1 R.

Естественный фон радиации (космические лучи, радиоактивность окружающей среды и человеческое тело) составляет годовую биологическую дозу излучения $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/кг}$.

Предельная доза для лиц, работающих с излучением, установлена $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/кг}$. Биологическая доза излучения $0,15 \text{ Кл/кг}$, полученная за короткое время, смертельна.



Вопросы для самопроверки

1. Какие изменения происходят в живых организмах под действием радиоактивного излучения? 2. К каким результатам приводят эти изменения? 3. От чего зависит степень облучения? 4. От чего зависит общая реакция организма на облучение? 5. От чего зависит возникающая ионизация? 6. Отличаются ли друг от друга внутреннее и внешнее облучения? 7. Каким будет внешнее облучение альфа-частицами? 8. Почему облучение гамма-лучами и нейтронами считается опасным? 9. Насколько проникает в кожу бета-излучение? 10. Какой организм быстро разрушается под действием излучения? 11. Кто более устойчив к облучению: бактерия или человек? 12. Какова чувствительность развивающегося организма к облучению? 13. Какой плод под действием излучения разрушается быстрее: развивающийся или не развивающийся? Что быстрее разрушается — размножающийся орган или развитая ткань мускул? 14. Может ли радиоактивное излучение оказать положительное воздействие на развитие растений и живых организмов? 15. Что характеризует доза облучения? А экспозиционная доза в СИ? 17. Какая доза излучения называется дозой 1 Кл/кг ? 18. С какой целью был введен относительный биологический коэффициент излучения? 19. Каковы его

значения? 20. Существует ли внесистемная единица экспозиционной дозы? 21. Какая величина называется биологической дозой? 22. Чему равна ее единица? 23. Чему равна естественная доза радиации? 24. Какова предельная доза для лиц, работающих с излучением? 25. Какая доза может привести к летальному исходу?

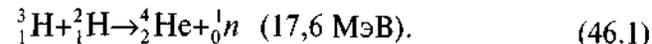
§ 46. Термоядерные реакции

С о д е р ж а н и е : термоядерный синтез; энергетический баланс; проблемы термоядерной энергетики.

Термоядерный синтез. Как было отмечено в § 32, не только при распаде тяжелых ядер, но и при образовании из легких ядер более тяжелых (при синтезе) выделяется энергия.

При нормальных условиях слияние ядер невозможно, потому что на положительные заряды действует очень сильная кулоновская сила отталкивания. Чтобы произошло слияние этих ядер, их надо сблизить на такое расстояние, чтобы ядерные силы притяжения стали больше кулоновских сил отталкивания. Для этого надо увеличить их кинетическую энергию, т.е. поднять температуру. При очень высоких температурах эти ядра могут сблизиться друг с другом, под действием ядерных сил соединиться и образовать более тяжелое ядро. Это происходит при температуре 10^7 K и выше. Поэтому такие реакции называются *термоядерными реакциями*, а образование путем слияния легких ядер более тяжелых — *термоядерной реакцией синтеза*.

Энергетический баланс. При слиянии легких ядер выделяется колоссальная энергия, так как удельная энергия связи образованных ядер будет большой (см. рис. 61). Если при делении ядра урана энергия, выделяемая на один нуклон, равна примерно 1 МэВ, то при синтезе дейтерия и трития эта величина равна 3,52 МэВ:



Энергия связи ядра дейтерия 2,2 МэВ, ядра трития — 8,5 МэВ, а у гелия — 28,3 МэВ. Значит, в результате реакции выделяется следующая энергия:

$$28,3 \text{ МэВ} - (2,2 + 8,5) \text{ МэВ} = 17,6 \text{ МэВ} \quad (46.2)$$

Если найдем энергию, выделяемую на один нуклон,

$$\frac{17,6 \text{ МэВ}}{5} \approx 3,52 \text{ МэВ}. \quad (46.3)$$

Т.е. на один нуклон при реакции синтеза приходится почти в четыре раза больше энергии, чем при реакции деления.

В основе водородной бомбы лежит приведенная реакция слияния дейтерия и трития. В такой бомбе сначала взрывается атомная бомба, образуется высокая температура 10^7 К, затем происходит неуправляемая термоядерная реакция (взрыв).

Проблемы термоядерной энергетики. Осуществление управляемых термоядерных реакций сулит человечеству дешевый, практически неисчерпаемый источник энергии, потому что ядерным горючим могли бы стать воды Мирового океана. Поэтому поиск путей осуществления управляемой термоядерной реакции по различным направлениям ведется во многих развитых странах.

Как было отмечено выше, основные трудности на пути решения этой проблемы — это получение высокой температуры. В настоящее время ведутся работы по получению высокой температуры в плазме водорода. В общем, в маленьком объеме при помощи сфокусированного лазерного луча была получена высокая температура (10^8 К) и осуществлена термоядерная реакция. Но чтобы сохранить высокую температуру, надо термоизолировать плазму от стенок рабочего объема. В противном случае плазма мгновенно остынет и исчезнет. Значит, единственный путь удержания плазмы — это окружить ее вакуумом (пустотой). С этой целью для удержания плазмы используется магнитное поле. Самой перспективной установкой в этом направлении является «Токамак» (тороидальная камера с магнитным полем).

Следует отметить, что достигнутая в настоящее время температура недостаточна, чтобы долго удерживать плотность плазмы и осуществить управляемый синтез большого количества легких ядер. На установке «Токамак-15», что находится в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова, была получена плазма с температурой $\sim 10^6$ К всего в течение 80 мс. Но остается только надеяться, что решение этих проблем — дело недалекого будущего.



Вопросы для самопроверки

1. Выделяется ли энергия при синтезе легких ядер? 2. Происходит ли слияние ядер в обычных условиях? 3. Как было достигнуто слияние легких ядер? 4. При какой температуре легкие ядра могут

образовать одно ядро? 5. Какие реакции называют термоядерными? 6. А термоядерным синтезом? 7. Сколько энергии выделяется при синтезе дейтерия и трития? 8. Сколько энергии приходится на каждый нуклон при этом синтезе? 9. Эта энергия больше или меньше энергии распада ядра? 10. Какая реакция происходит при взрыве водородной бомбы? 11. Какие возможности дает управляемая термоядерная реакция? 12. В чем заключаются основные трудности в этом направлении? 13. Для чего нужно изолировать плазму от стенки установки? 14. Каким образом плазма отделяется от стенки установки? 15. Что это за установка «Токамак»? 16. Какие результаты достигнуты в настоящее время в получении управляемой термоядерной реакции?

§ 47. Солнце и звезды. Энергия Солнца и звезд

С о д е р ж а н и е : строение Солнца; ядро Солнца и звезд в качестве термоядерного реактора; протонно-протонный цикл; углеродный цикл.

Строение Солнца. Солнце является самой близкой к Земле звездой. Поэтому знание его строения и изучение процессов, происходящих на Солнце, позволяет нам получить представление обо всех звездах. *Около 80% массы Солнца составляет водород и 18% — гелий.* Термоядерная реакция, являющаяся основным источником энергии Солнца, происходит у него в ядре (рис. 69). Радиус ядра Солнца, состоящего из плазмы, равен одной трети радиуса Солнца, его температура равна десяти миллионам градусов Кельвина ($10\,000\,000$ К). После ядра располагается *зона переноса лучистой энергии*, по размеру равная радиусу ядра. После нее располагается *зона конвекции* толщиной до двух тысяч километров. Эта зона примыкает к внешнему слою Солнца — атмосфере. Атмосфера Солнца состоит из *фотосферы, хромосферы и короны*. Хотя температура внешних слоев Солнца достигает 1 МК, их излучение составляет лишь малую часть от общего излучения Солнца. Основную часть энергии, излучаемой Солнцем, составляет излучение фотосферы. Поэтому температуру фотосферы 6000 К принимают за температуру Солнца. Время от времени на фотосфере Солнца появляются активные зоны — солнечные пятна. Место и размеры пятен меняются с периодичностью в 11 лет. Причину такого изменения активности Солнца связывают с взаимодействием ионизированных веществ с магнитным полем Солнца.

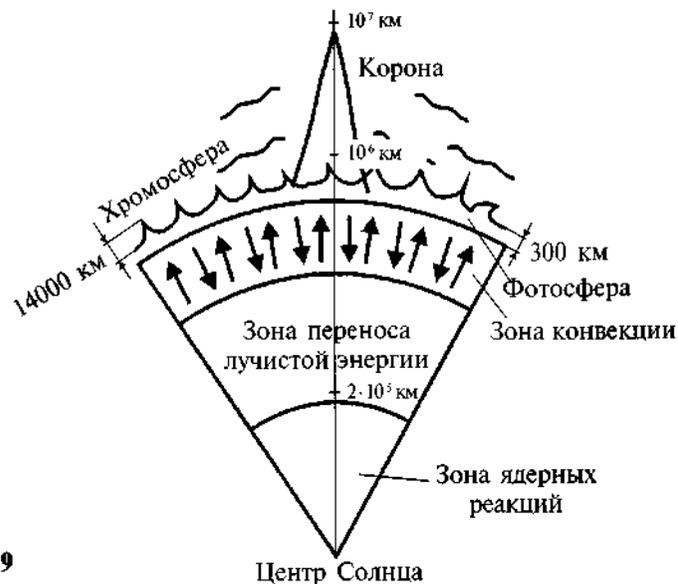
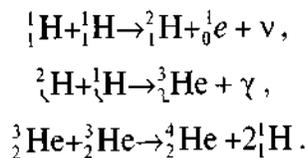


Рис. 69

Солнце — одна из бесчисленных звезд во Вселенной.

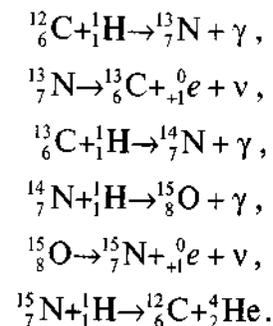
Ядро Солнца и звезд в качестве термоядерного реактора. В ядрах всех звезд, в частности Солнца, происходит термоядерный синтез. У звезд, подобных Солнцу, 80% массы составляет водород и 20% — гелий. Температура их ядер равна 10^7 – 10^8 К, все атомы полностью ионизированы, т.е. бывают в виде плазмы. В их ядрах непрерывно идет термоядерная реакция. Поэтому ядро Солнца и других звезд можно рассматривать в качестве термоядерного реактора. В них могут происходить следующие два цикла реакций.

Протонно-протонный цикл. Один из циклов термоядерных реакций, которые могут происходить в недрах Солнца, называется *протонно-протонным циклом*. В него входят следующие реакции:



В результате этих термоядерных реакций четыре ядра водорода (протон) превращаются в одно ядро гелия. В протонно-протонном цикле выделяется энергия, равная 27 МэВ.

Углеродный цикл. В звездах более ярких, чем Солнце, происходят реакции углеродного цикла. В этом цикле реакций, как и в протонно-протонном цикле, четыре ядра водорода превращаются в ядро гелия. Ядра же углерода, число которых остается неизменным, участвуют в реакции в качестве катализаторов. В этом цикле в промежуточных реакциях углерод превращается в азот. Азот же является вспомогательным продуктом при превращении водорода в гелий. Реакции углеродного цикла происходят следующим образом:



В результате реакций этого цикла выделяется энергия, равная 26,7 МэВ.

? Вопросы для самопроверки

1. Солнце — это тоже звезда? 2. Из каких элементов состоит Солнце? 3. Чему равны температура и размеры ядра Солнца? 4. Каково строение Солнца? 5. Опишите рис. 69. 6. Как устроена атмосфера Солнца? 7. Откуда выходит основная часть излучения Солнца? 8. Чему равна температура поверхности Солнца? 9. В чем причина появления пятен на Солнце? 10. Что является источником энергии Солнца? 11. Чему равна температура в ядре звезд? 12. На что похожи ядра Солнца и звезд? 13. Из каких реакций состоит протонно-протонный цикл? 14. Сколько энергии выделяется при протонно-протонном цикле? 15. Как образуется углеродный цикл? 16. Меняется ли количество углерода в углеродном цикле? 17. Образуется ли азот в углеродном цикле? 18. Сколько энергии выделяется при углеродном цикле?

§ 48. Исследования, проводимые в Узбекистане в области ядерной физики, и использование их результатов в народном хозяйстве

С о д е р ж а н и е : исследования, проводимые в области ядерной физики; использование результатов исследований в народном хозяйстве.

Исследования, проводимые в области ядерной физики. В Узбекистане работы в области ядерной физики начались в 20-х годах прошлого века. Но систематические исследования начались в 1949 г. в Физико-техническом институте. После того, как в 1956 г. при Академии наук Узбекистана был создан Институт ядерной физики, появилась возможность расширить их. В настоящее время здесь проводятся работы по следующим направлениям: *ядерная спектроскопия и строение ядра, ядерные реакции, квантовая теория поля, физика элементарных частиц, релятивистская ядерная физика* и др.

Исследования, проводимые по радиационной физике и материаловедению, имеют большое значение не только для науки и техники, но и для народного хозяйства. В этом направлении изучается влияние радиоактивного излучения на полупроводники, диэлектрики, керамику, на электропроводимость высокотемпературных сверхпроводящих материалов, на механические, оптические и другие свойства.

В Узбекистане осуществляется большая работа в области физики высоких энергий. Исследования в этом направлении проводятся в Физико-техническом институте производственного объединения «Физика Солнца», в Институте прикладной физики Национального университета Узбекистана и в Самаркандском государственном университете. Исследования в основном проводятся по двум направлениям: физика космических лучей и взаимодействие ускоренных до высоких энергий частиц и ядер, нуклонов и ядер.

В 1970 г. была создана установка, основанная на Черенковском излучении, и изучались характеристики полученных частиц.

С целью изучения взаимодействия ускоренных частиц с ядром был создан центр по обработке फिल्मов данных, полученных в пузырьковых камерах. В результате исследований, проведенных в центре, было изучено образование кумулятивных изобаров и получены сведения о существовании двух

узких барионных резонансов с массами 1903, 1922, 1940, 1951 и 2017 МэВ.

Явления, происходящие в атмосфере Солнца, могут непосредственно влиять на жизнь Земли, поэтому исследования по их изучению имеют большое значение. Именно поэтому Институт астрономии Академии наук Узбекистана совместно с французскими учеными с середины 80-х годов начал проводить широкомасштабные работы по исследованию глобального колебания Солнца.

Результаты широкомасштабных работ, проводимых узбекскими учеными в области ядерной физики, с успехом применяются в народном хозяйстве.

Использование результатов исследований в народном хозяйстве. Первые исследования, проводившиеся в Узбекистане, имели непосредственное отношение к народному хозяйству. Примером может служить разработанный У. Арифовым метод «Умерщвление с помощью гамма-лучей гусеницы шелкопряда внутри кокона». В дальнейшем изучались естественная радиоактивность воды, почвы, фруктовых деревьев, диких и культурных растений.

Институт ядерной физики Академии наук Узбекистана является ведущей организацией по производству радиоактивных изотопов, в частности, фармацевтических радиоактивных препаратов. Здесь в 1995 г. производилась продукция 60 наименований.

Изучение влияния радиоактивного и гамма-излучения на растения имеет большое значение в сельском хозяйстве, особенно семеноводстве. Изучение чувствительности хлопчатника к радиоактивному излучению и использование этого метода в селекции хлопчатника является наглядным примером непосредственного применения в производстве результатов исследований в области ядерной физики.

Исследования в области ядерной физики широко применяются в медицине. Примером этого является применение радиоактивных лучей и потока частиц в лечении раковых заболеваний. Первые работы в области рентгенологии и радиологии были начаты совместно с лабораторией радиохимии Института ядерной физики. В результате были созданы новые методы диагностики с использованием радиоактивных изотопов. В настоящее время ведутся исследовательские работы в области рентгено-эндовакулярной хирургии, ангиографии, компьютерной томографии и ядерно-магнитного резонанса.

Было начато производство рентгеноконтрастных веществ (препараты «Рекон», «ММ-75» и др.).



Вопросы для самопроверки

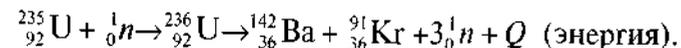
1. Когда в Узбекистане начались работы в области ядерной физики? 2. По каким направлениям в настоящее время проводятся научно-исследовательские работы? 3. Где проводятся работы в области физики высоких энергий? 4. По каким направлениями они проводятся? 5. В чем заключается значение работ, проводимых в целях изучения хромосферы Солнца? 6. Какие работы проводятся в Узбекистане в этой области? 7. Чему были посвящены первые работы в Узбекистане в этой области? 8. Что производится в Институте ядерной физики? 9. Приведите примеры применения радиоактивного излучения в сельском хозяйстве. 10. Можно ли вылечить рак? 11. На чем основаны работы по рентгенологии и радиологии? 12. Какие успехи достигнуты в этой области?

Тестовые вопросы

1. Сколько энергии на каждый нуклон выделится при превращении тяжелых ядер в средние?
А. 200 МэВ; В. 1 МэВ; С. 4 МэВ; D. 400 МэВ; E. 100 МэВ.
2. Какие изотопы используются в качестве горючего в ядерных реакторах?
А. Уран-235; В. Торий-135; С. Плутоний-239;
D. Уран-239; E. Правильного ответа нет.
3. Какая допустимая доза облучения в год в Кл/кг установлена для работающих с излучением?
А. 0,15 Кл/кг; В. $1,3 \cdot 10^{-6}$ Кл/кг; С. $1,1 \cdot 10^{-5}$ Кл/кг;
D. $1,3 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг; E. $1,5 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг.
4. При какой температуре легкие ядра могут образовать одно ядро?
А. 10^7 К; В. 10^{17} К; С. 10^{15} К; D. 10^4 К; E. 10^8 К.
5. При слиянии двух протонов при термоядерной реакции образуются дейтрон и нейтрино. Еще какая частица при этом образуется?
А. Электрон; В. Нейтрино; С. Фотон;
D. Позитрон; E. π -мезон.

Основные выводы главы

Очень часто встречается следующая реакция деления:



Ядерными реакторами называются устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления.

Реакции, которые происходят на Солнце при температуре 10^7 К и выше, называются *термоядерными реакциями*, а образование из более легких ядер более тяжелых — *термоядерным синтезом*.

Строение Солнца. Атомы водорода занимают более 80% массы Солнца, а атомы гелия — 18%.



СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

С о д е р ж а н и е : из чего состоит Вселенная; атомы и молекулы; электроны и ядра; элементарные частицы; кварки; фундаментальные взаимодействия; гравитационное взаимодействие; электромагнитное взаимодействие; сильное взаимодействие; слабое взаимодействие; поля взаимодействий; универсальность законов природы; теория великого объединения; заключение.

Человечество всегда стремилось познать и объяснить окружающий мир. Вся работа, проделанная в этом направлении, в основном сводилась к поиску ответа на следующие вопросы:

- Из чего состоит материя?
- Что ее объединяет?

Мы тоже кратко остановимся на этих вопросах с точки зрения физической картины мира.

Из чего состоит Вселенная. Ответ на этот вопрос начали искать с древнейших времен. Древние греки философски отнеслись к этому вопросу: «Если все будет делиться, тогда не должно быть материального мира». Затем они пришли к выводу, что должен существовать предел деления, т.е. должны быть неделимые частицы. По мнению Демокрита, Левкиппа и Эпикура, мир состоит из «неделимых» частиц, т.е. из атомов. Левкипп считал, что атомы имеют разнообразную форму: круг, пирамида, плоскость и другие, — поэтому мир, состоящий из них, такой разнообразный.

Атомы и молекулы. Но на то, чтобы идея нашла свое подтверждение и сформировалось представление об атоме, ушло несколько сотен лет. Только к началу XIX в. в трудах Дж. Дальтона, А. Авогадро, И. Берцелиуса и других ученых атом размером 10^{-10} м представлялся самой маленькой частицей химических элементов. К середине XIX в. установили резкую границу между атомом и молекулой. Открытие Д.И. Менделеевым периодической системы элементов доказало, что атом имеет сложное строение.

Открытие в 1895 г. рентгеновских лучей, в 1896 г. радиоактивности, в 1897 г. электрона развеяло представление о неделимости атома как кирпичика материи.

Электроны и ядра. Изучая рассеяние α -частиц на атомах тяжелых элементов, Резерфорд в 1911 г. предложил планетарную модель атома. Согласно этой идее, считавшийся неделимым атом состоял из ядра в 1000 раз меньше атома и вращающихся вокруг него электронов.

В 1932 г. была предложена протонно-нейтронная модель ядра. Согласно этой модели, ядро атома любого химического элемента состояло из двух частиц — протонов и нейтронов. Эти частицы были неделимыми, т.е. считались элементарными, и их называли *нуклонами*.

Элементарные частицы. В то время вроде бы прояснились представления о строении материи. В результате электромагнитного взаимодействия электроны и ядра объединились в единый атом и молекулы. Нейтроны и протоны под влиянием сильного взаимодействия образовали ядро. Всего существовало 14 элементарных частиц и их античастиц, между которыми происходило четыре вида фундаментальных взаимодействий. Казалось, что человечество открыло самые маленькие кирпичики, из которых состояла материя. Но ученых ждали неожиданные «сюрпризы». Задача начала усложняться. Почти каждый день стали открывать «элементарные» частицы, точно похожие на предыдущие. К началу 60-х годов прошлого века элементарных частиц стало больше, чем элементов в периодической системе Менделеева. Их множество и взаимопревращения требовали внести ясность в задачу. Снова на повестке дня встал вопрос: «Из чего состоит Вселенная?». Тогда ученые выдвинули идею о том, что не все частицы являются элементарными и что некоторые из них состоят из еще более элементарных частиц.

Кварки. В 1964 г. М. Гелл-Манном и Дж. Цвейгом была высказана гипотеза о том, что нейтроны и протоны состоят из трех *кварков* — *u*, *d*, *s*. Кварки не имеют внутреннего строения и поэтому действительно являются элементарными частицами. Затем были введены еще два кварка: *c*-кварк — *очаровательный* и *b*-кварк — *прелестный*. Допускалось еще существование и *t*-кварка — *истинного*.

Таким образом, современное состояние проблемы можно выразить так: вещества состоят из молекул и атомов. Атом, в свою очередь, состоит из ядра и вращающихся вокруг него электронов, а ядро — из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны состоят из кварков.

Фундаментальные взаимодействия. Итак, частицы — это самые маленькие кирпичики Вселенной. Ядра, атомы, молекулы, химические соединения, биологические ткани, планеты, гигантские звезды, тела во Вселенной, в том числе мы с вами, состоят из этих частиц. Но какие силы связывают эти частицы друг с другом? Между элементарными частицами существуют четыре типа взаимодействия, четыре типа силы. Это притяжение (гравитационное), электромагнитное, сильное (ядерное) и слабое взаимодействие.

Гравитационное взаимодействие. Самое слабое среди существующих фундаментальных взаимодействий, оно присуще всем без исключения частицам и имеет характер тяготения. Гравитационное притяжение между двумя протонами, находящимися друг от друга на расстоянии 10^{-15} м, в 10^{36} раз слабее их электростатического взаимодействия. Из-за размеров их участие в процессах взаимодействия между элементарными частицами не учитывается, но значение в движении макрочастиц большое. Именно эта сила притяжения сохраняет существующее строение всей Вселенной — планет, звезд, галактик и других небесных тел. Именно благодаря ей мы связаны с Землей.

Электромагнитное взаимодействие возникает между частицами, имеющими электрический заряд. В зависимости от заряда взаимодействующих частиц оно имеет характер притяжения или отталкивания. Электромагнитное взаимодействие, в частности, ответственно за существование атомов, обуславливая взаимодействие в них положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов.

Сильное взаимодействие проявляется на маленьких расстояниях 10^{-15} м, обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов и удерживает их вместе. Благодаря сильному взаимодействию существуют различные ядра, атомы и химические элементы. Существование химических элементов является фактором, обеспечивающим наличие различных сложных молекул, органических соединений и самой жизни.

Слабое взаимодействие намного слабее не только сильного, но и электромагнитного, но значительно сильнее гравитационного. Радиус его действия очень мал и составляет порядка $2 \cdot 10^{-18}$ м.

Но в то же время незаменимо место слабого взаимодействия в природе. Именно благодаря ему внутри ядра происходит реакция превращения протона в нейтрон, позитрон и ней-

трино. Это взаимодействие играет огромную роль в реакции образования из четырех протонов ядра гелия, т.е. в термоядерном синтезе. Значит, слабое взаимодействие имеет большое значение для протекания термоядерной реакции, которая является источником энергии Солнца и звезд.

Поля взаимодействий. Теперь поищем ответ на вопрос, как осуществляются эти взаимодействия. Каждое взаимодействие осуществляется посредством своего поля с соответствующим названием. Для примера, самое хорошо изученное взаимодействие, электромагнитное, осуществляется посредством электромагнитного поля, через квант поля — фотон. Электромагнитное поле — это материя или абстрактное понятие? Электромагнитное поле является одним из видов материи, и оно может превратиться в материю в форме вещества. Примером этого может служить превращение фотона в электронно-позитронную пару, а также обратный процесс — аннигиляция электронно-позитронной пары, т.е. превращение материи в форму вещества в материю в форме электромагнитного поля. Точно так же можно рассуждать про другие поля.

Следует отметить, что поле в большей степени является материей, чем вещество.

Универсальность законов природы. «Самые сложные вещи — в действительности самые простые вещи», — отмечал еще Эйнштейн. Ученые, хорошо понимавшие это, всегда старались упростить законы природы, т.е. унифицировать их. Например, Галилей, увидев горы на Луне с помощью телескопа, обобщил: «Все физические законы во всей Вселенной одинаковые, т.е. имеют вид универсальности». Проводя опыты на Земле, Ньютон открыл закон всемирного тяготения, Фарадей и Ампер определили, что вокруг заряда образуется не только электрическое поле, но и магнитное, когда заряд находится в движении. В результате удалось объединить электрическое и магнитное поля в единое электромагнитное поле, т.е. появилась возможность создать теорию электромагнитного поля. Затем стало известно, что свет является электромагнитной волной, и радиоволны, тепловое излучение, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и гамма-лучи расположили в единой шкале электромагнитных волн.

Идея Планка о том, что «электромагнитное излучение испускается в виде фотонов (частиц)», имело огромное значение для изучения строения мира. Эйнштейн пришел к мысли, что «излучение испускается не только в виде фотонов, оно

распространяется в виде фотонов и поглощается в виде фотонов». Луи де Бройль, еще более обобщив эту идею, пришел к выводу, что «все частицы обладают волновыми свойствами». В результате стало известно, что корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.

Возникает вопрос: а нельзя ли унифицировать, т.е. объединить рассмотренные выше четыре фундаментальные взаимодействия? Исследования в этом направлении ведутся давно. Например, Эйнштейн последние 35 лет своей жизни посвятил объединению взаимодействий. Были и другие попытки.

Теория великого объединения. Пока самая удачная попытка – создание американскими физиками Ш. Глешоу и С. Вайнбергом и пакистанским физиком А. Саламом теории слабого электрического взаимодействия. За это открытие в 1979 г. они были удостоены Нобелевской премии. Окрыленные успехом, физики предложили «Теорию великого объединения» (ТВО). В этой теории объединены электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия. Насколько они правы, покажет эксперимент.

Согласно ТВО, существует непрерывная связь между современной теорией строения материи и событиями, происходящими в окружающем нас мире. Другими словами, современное состояние элементарных частиц непосредственно связано с начальным этапом возникновения Вселенной, т.е. с образованием вещества. Согласно современной модели Вселенной, она расширяется, т.е. галактики удаляются друг от друга. Все это – результат Большого взрыва, произошедшего за 10^{10} лет.

В настоящее время предложена теория суперобъединения, которая вобрала в себя все четыре взаимодействия.

Заключение. С точки зрения современной физики, материя имеет две формы: форму вещества и форму материи.

Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.

Любое изменение в окружающем нас мире – это результат движения материи. Источником этого движения является взаимодействие. Поле взаимодействий объединяет элементарные частицы *в ядра, атомы, молекулы, макротела, планеты* и многое другое.

Таким образом, Вселенная состоит из вечно существовавшего и вечно существующего, а также всегда движущейся материи. Человек живет, чтобы изучить, понять и познать окружающий его мир. Процесс познания сложен и бесконечен.



ФИЗИКА И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Физика является естественной наукой, законы которой лежат в основе всех других наук. Физику долгое время называли философией природы, и это является доказательством того, насколько физика слилась с философией. Каждое открытие, сделанное в физике, становится новым шагом в познании материи и бытия. Самым поразительным результатом сегодня является то, что теория элементарных частиц напрямую связывается с проблемой возникновения Вселенной (космология). Теория великого объединения и объяснение картины Большого взрыва, создавшего Вселенную, становятся темой глубоких философских исследований.

Открытия в области физики помогали создавать новое. Если при помощи микроскопов изучались микрочастицы, то при помощи телескопа – небесные тела. Открытие электромагнитных волн привело к созданию средств связи, организации передачи информации. Изучение строения атома расширило наши знания о строении материи и дало человечеству возможность использовать атомную энергию. Открытие лазерного излучения, кроме использования его для удовлетворения нужд человечества, привело к созданию термоядерного синтеза. И таких примеров можно привести множество.

Использование открытий в области физики привело к образованию новых отраслей науки – биофизики, физической химии, астрофизики, электротехники, радиотехники, теплотехники, гелиотехники и др.

Успехи физики способствуют решению многих проблем человечества и могут сделать его жизнь еще легче. Ниже мы остановимся на некоторых из них.

Физика и энергетика. С самого зарождения человечества оно всегда нуждалось в источниках энергии, необходимых для обогрева, освещения, приготовления пищи и удовлетворения многих других потребностей. В этих целях человек использовал и продолжает использовать до сих пор естественное горючее – дрова, уголь, нефть, газ.

Однако из-за неудобства их транспортировки пришлось изобретать различные методы передачи энергии. Самым удоб-

ным из них оказался электрический ток. Электрическая энергия, ставшая неотъемлемой частью образа жизни человека, преобразуется с помощью электрических двигателей из других видов энергии. Принцип работы электродвигателей основывается на величайшем открытии физики — электромагнитной индукции.

Как сегодня обстоит дело с обеспечением энергией? К сожалению, не совсем благополучно. Поэтому человечество ищет новые источники энергии.

Один из них — *реакция деления тяжелых ядер*. В качестве горючего используется уран-235, плутоний-239 и другие тяжелые ядра. Прошло уже полвека с тех пор, как была введена в строй первая атомная электростанция. Доля АЭС в выработке электрической энергии во многих странах очень ощутима. В настоящее время имеются подводные и надводные корабли, использующие энергию атомных двигателей.

Еще один источник энергии — это *термоядерный синтез*. Но все попытки сделать его управляемым пока не дали желаемого результата. Однако это не значит, что результата нет. Человечество решало и еще более трудные проблемы.

В последнее время заговорили о еще одном источнике энергии — *аннигиляции вещества и антивещества*. Например, реактор, осуществляющий аннигиляцию водорода и антиводорода, может стать источником огромного количества энергии.

В распоряжении человечества имеются и другие источники энергии — солнечные генераторы, магнитогидродинамические генераторы и др. Ведется поиск путей сокращения потерь энергии при ее передаче, которому могут способствовать сверхпроводящие материалы. И все же не секрет, что в будущем единственным источником, который сможет удовлетворить потребности человечества в энергии, будет ядерная энергетика.

Физика и медицина. Самое дорогое для человека — это его здоровье. Поэтому мы не можем не остановиться на применении в медицине достижений физики, которые используются с двойной целью.

Первая — помощь при диагностировании. В этой области невозможно переоценить роль рентгенодиагностики. С ее помощью получают точную информацию о состоянии костной ткани, об изменениях во внутренних органах. В последнее время эту функцию выполняют относительно безвредные ультразвуковые аппараты. После изобретения компьютеров у медиков

появился еще один помощник — компьютерная томография. С ее помощью не только получают исчерпывающую информацию о внутренних органах человека, но и делают снимки.

Вторая — лечение различных заболеваний. Все знают, что нервную усталость лечат ультразвуком, магнитным полем, слабым током, лазерным лучом. Особую роль в этом выполняют лазерные лучи. С их помощью можно лечить, а в случае необходимости удалять больные клетки. Лазерные лучи особенно успешно применяются в операциях на глазах, самомо нежном органе человека.

В настоящее время физики ищут пути решения проблемы борьбы с таким опасным заболеванием, как рак. В этом направлении уже достигнуты определенные успехи. Опытным путем было выявлено, что протонный пучок может отделить клетку, пораженную раком, и остановить развитие болезни. Однако препятствием для широкого использования этого метода лечения является его дороговизна. Но мы уверены, что решение этой проблемы не за горами.

Физика и технический прогресс. В настоящее время нет ни одной области производства, где бы не использовались достижения физики. В свое время различные потребности производства стали толчком к ее развитию. Так, повышение КПД паровых машин привело к развитию термодинамики. Изобретение полупроводников произвело революцию в системе электронно-вычислительной техники и связи. Основу современных персональных компьютеров и гигантских ЭВМ составляют миниатюрные транзисторы и резисторы. Благодаря им была создана гигантская сеть Internet и стало возможным создать систему дистанционного обучения.

В будущем предполагается создать роботов, которых можно будет использовать для выполнения несложных операций и в качестве помощников в домашнем хозяйстве. Их мозг будет представлять собой транзисторные схемы, а глаза — фотоэлементы.

Ни для кого не является секретом, что с помощью рентгеновских лучей можно определять внутреннее состояние деталей, интерференции и дифракции — молекулярное строение кристаллов, поляризации света — концентрацию растворов, спектров — неизвестное соединение или состав руды.

Одно из перспективных направлений непосредственного использования достижений физики в производстве — применение голографии для хранения информации.

Таблица 6

Основные физические постоянные
(округлены до трехзначных чисел)

Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9,81 \text{ м/с}^2$
Постоянная тяготения (гравитации)	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}^{-1}$
Стандартный объем	$V = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Постоянная Фарадея	$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Элементарный заряд	$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса электрона	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Удельный заряд электрона	$e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Скорость света в пустоте (вакууме)	$c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная закона смещения Вина	$c = 2,90 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ $R' = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Орбита первого радиуса Бора	$a = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Длина волны электрона Комптона	$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Энергия ионизации атома водорода	$E_i = 2,16 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Ядерный магнетон	$\mu_N = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$

Таблица 7

Массы некоторых элементарных частиц и ядер
и их энергии покоя

Частица	Масса		Энергия	
	$m_0, \text{ кг}$	$m_0, \text{ (а.е.м.)}$	$E_0, \text{ Дж}$	$E_0, \text{ МэВ}$
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,511
Нейтральный мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14526	—	135
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,68 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,51 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
α -частица	$6,4 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733

Масса нейтральных атомов

Элемент	Порядковый номер	Изотоп	Масса (а.е.м.)
Нейтрон	0	n	1,00867
Водород	1	^1H	1,00783
		^2H	2,01410
		^3H	3,01605
Гелий	2	^3He	3,01603
		^4He	4,00260
Литий		^6Li	6,01513
		^7Li	7,01601
Бериллий	3	^7Be	7,01693
		^9Be	9,01219
		^{10}Be	10,01354
Бор	5	^9B	9,01333
		^{10}B	10,01294
		^{11}B	11,00931
		^{12}C	12,00000
Углерод	6	^{12}C	12,00168
		^{13}C	14,00324
		^{14}C	14,00324
Азот	7	^{13}N	13,00574
		^{14}N	14,00307
		^{15}N	15,00011
Кислород	8	^{16}O	15,99491
		^{17}O	16,99913
		^{18}O	17,99916
Фтор	9	^{19}F	18,99840
Натрий	11	^{22}Na	21,99444
		^{23}Na	22,98997
Магний	12	^{23}Mg	22,99414
Алюминий	13	^{30}Al	29,99817
Кремний	14	^{31}Si	30,97535
Фосфор	15	^{31}P	30,97376
Калий	19	^{41}K	40,96184
Кальций	20	^{44}Ca	43,95549
Свинец	82	^{206}Pb	205,97446
Полоний	84	^{210}Po	209,98297

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Оптика	
<i>Глава I. Элементы оптики</i>	4
§ 1. Развитие учения о свете. Электромагнитная природа света	4
§ 2. Скорость света	6
§ 3. Характеристики света. Элементы фотометрии	9
§ 4. Законы отражения и преломления света. Полное отражение ..	12
§ 5. Линзы. Формула тонкой линзы	15
§ 6. Волновая теория света. Принцип Гюйгенса	19
§ 7. Интерференция света	20
§ 8. Методы наблюдения интерференции света. Применение интерференции света	24
§ 9. Дифракция света	28
§ 10. Дифракция параллельных световых пучков на одной щели. Дифракционная решетка. Применение дифракции	31
§ 11. Понятие о голографии	35
§ 12. Поляризация света. Поляризаторы	38
§ 13. Дисперсия света	43
§ 14. Спектры испускания и поглощения. Спектральный анализ ...	47
§ 15. Шкала электромагнитных волн. Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи	51
§ 16. Рентгеновские лучи	53
Образцы решения задач	56
Задачи для самостоятельного решения	58
Тестовые вопросы	59
Основные выводы главы	60
Основы квантовой физики	
<i>Глава II. Элементы квантовой оптики</i>	61
§ 17. Тепловое излучение. Законы теплового излучения	62
§ 18. Закон Рэлея-Джинса. Гипотеза Планка	66
§ 19. Явление фотоэффекта	69
§ 20. Применение фотоэффекта	75
§ 21. Давление света	80
§ 22. Химическое действие света	84
§ 23. Люминесценция	86
§ 24. Корпускулярно-волновой дуализм света	88
Образцы решения задач	89
Задачи для самостоятельного решения	91
Тестовые вопросы	91
Основные выводы главы	92

<i>Глава III. Атом и атомное ядро</i>	93
§ 25. Модели атома. Опыт Резерфорда	93
§ 26. Спектр атома водорода	96
§ 27. Модель атома водорода по Бору	100
§ 28. Гипотеза Луи де Бройля. Волновые свойства частиц	108
§ 29. Элементы квантовой механики	112
§ 30. Квантовые генераторы света и их применение	116
§ 31. Строение атомного ядра. Изотопы	121
§ 32. Энергия связи атомного ядра	124
§ 33. Ядерные силы. Понятие о модели ядра	126
§ 34. Естественная радиоактивность. закон радиоактивного распада	128
§ 35. Альфа-, бета- и гамма-излучение	132
§ 36. Ядерные реакции. Радиоактивные превращения	136
§ 37. Элементарные частицы. Частицы и античастицы	139
§ 38. Основные свойства элементарных частиц и их классификация. Кварки	143
§ 39. Космическое излучение	147
§ 40. Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц ..	151
Образцы решения задач	153
Задачи для самостоятельного решения	155
Тестовые вопросы	156
Основные выводы главы	157
<i>Глава IV. Ядерная энергетика</i>	159
§ 41. Деление тяжелых ядер. Непрерывная цепная реакция	159
§ 42. Ядерный реактор. Управляемая цепная реакция	162
§ 43. Ядерная энергетика и ее использование в мирных целях ...	166
§ 44. Получение и применение искусственных радиоактивных изотопов	167
§ 45. Биологическое воздействие радиоактивного излучения	168
§ 46. Термоядерные реакции	171
§ 47. Солнце и звезды. Энергия Солнца и звезд	173
§ 48. Исследования, проводимые в Узбекистане в области ядерной физики и использования их результатов в народном хозяйстве	176
Тестовые вопросы	178
Основные выводы главы	179
Современная физическая картина мира	180
Физика и научно-технический прогресс	185
Приложение	188

Ганиев А. Г. и др.

Физика: Учебник для учащихся академических лицеев и профессиональных колледжей. (ч. II)/ А. Г. Ганиев, А. К. Авлиякулов, Г.А. Алмардонова; МВ и ССО РУз, Центр сред. спец. проф. образования. —Т.: «O‘QITUVCHI», 2006. — 192 с.

И. Авлиякулов А.К. II. Алмардонова Г.А.

ББК 22.3я722

Учебное издание

**АБДУКАХХАР ГАДОЙЕВИЧ ГАНИЕВ,
АБДУРАШИД КАРИМОВИЧ АВЛИЯКУЛОВ,
ГУЛЬНОРА АШУРОВНА АЛМАРДОНОВА**

ФИЗИКА

II часть

*Учебник для учащихся академических лицеев
и профессиональных колледжей*

Перевод с узбекского **Т. С. Асилова**

*Издательско-полиграфический творческий дом «O‘qituvchi»
Ташкент — 2006*

Редактор *О. Клюева*
Художественный редактор *Ш. Ходжаев*
Технический редактор *С. Турсунова*
Компьютерная верстка *О. Клюевой*

ИБ № 8835

Подписано в печать с оригинала-макета 15.12.2006. Формат 60×90¹/₁₆.
Келья 10,5 н/шп. Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,0.
Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 5000. Заказ № 162.

Издательско-полиграфический творческий дом «O‘qituvchi»
Узбекского агентства по печати и информации. Ташкент—129,
ул. Навои, 30//Ташкент, Юнусабад, ул. Мурадова, д. 1.
Договор № 14–119–06