

М.Б. Дусмуратов,
Ш.Б. Ахмедов, Л.Ю. Тураева

ФИЗИКА

(ОПТИКА И
АТОМНАЯ ФИЗИКА)

(ЧАСТЬ III)



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

М.Б. Дусмуратов, Ш.Б. Ахмедов, Л.Ю. Турпеев.

ФИЗИКА

(Оптика и атомная физика)
(Часть III)

- Основы фотометрии
- Геометрическая оптика
- Волновая оптика
- Теория относительности
- Квантовая природа электромагнитного света
- Физика атома, ядра и элементарных частиц



ЎЗБЕКИСТОН RESPUBLIKASI O'LY TAYLIM,
FAN VA INNOVATSIONALAR VAZIRLIGI
CHIRCHIQ DAVLAT PEDAGOGIKA UNIVERSITETI
AXBOROT RESURS MARKAZI

УДК: 535:539
КБК:22.343
Д-90

Данный учебник написан на основании примерной программы по "Физике", утверждённой министерством высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан и предназначен для академических курсов углубленного изучения физики. В нем освещены такие разделы как механика, основы молекулярной физики и термодинамики, основы электродинамики, оптика, атомная и ядерная физика и физика элементарных частиц. В конце каждой главы даны примерные решения задач и даны тесты и задачи для самостоятельного решения. В приложении учебника приведены табличные данные для решения задач, различные физические постоянные величины, даны определения единицам измерения основных физических величин.

This coursebook has been created on the basis of exemplary curriculum in "Physics" confirmed by the Ministry of higher and secondary specialized education of the Republic of Uzbekistan and it is appropriate to be used at the academic courses where physics is a specialized discipline. The coursebook comprises the units concerning mechanics, the bases of molecular physics and thermodynamics, the bases of electrodynamics, optics and the physics of atom, nuclear and elementary particles. At the end of each unit there are examples and tests and examples for solving independently. In appendix there are tables, different physical constants and descriptions of physical units of measurements.

Рецензенты:

К.Т. Сууров	-	Доцент, д.ф.н. заведующий кафедрой "Методика преподавания физики и астрономии" ТВЧПТИ
Н.З. Колдиров	-	Заведующий кафедрой "Физика", академический лицей имени И. Каримова
Р.Т. Касимов	-	Полковник, директор академический лицей имени "Темурбеклар мактаби"
У.Б. Абдиев	-	Доктор наук по педагогических наук, заведующий кафедрой «Теоретическая физика», Термезского государственного педагогического университета
Ф.Т. Боймуратов	-	Доктор философии по физика-математическим наукам (PhD), доцент кафедры «Физика и электротехника», Ташкентского текстильного и легкопромышленного института

ISBN 978-9943-9166-8-5

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика рассматриваемая как наука о природе, эта наука изучает различные проявления и свойства материи, их многообразные изменения, законы, описывающие эти изменения, соотношения между явлениями, свойства времени и пространства. От других наук физика отличается тем, что при изучении свойств материи, ее изменений вводятся различные физические величины, которые можно измерить и выразить числами. Благодаря этому течение явлений и важнейшие связи между ними называются законами, которые также выражаются в виде математических аксиом.

До сих пор существует множество природных явлений и процессов, которые не все свойства материи известны человечеству и не нашли своего решения. Однако прогресс физики и других наук показывает, что в мире нет ничего, что нельзя изучить и понять. Возможность познания материального мира также можно считать его главным свойством. Поэтому каждая вновь открывшаяся теория не отвергает предыдущую, а дополняет и обогащает ее, т. е. выполняется принцип совместности, тем самым приближая человечество к абсолютной истине. Знание свойств материи, законов ее изменения соответствует ее естественному стремлению познать окружающий мир. Поэтому эти науки о природе имеют первостепенное практическое значение. Потому что они позволяют предугадать, как будет протекать явление природы. Без него не было бы ни одного успешного производства. Особенно важно уметь предвидеть будущее, опираясь на законы природы, в нынешнюю эпоху, когда деятельность людей, обладающих мощной техникой, оказывает огромное влияние на окружающую нас среду. Чтобы это воздействие не принесло человеку непоправимых разрушений, необходимо предвидеть его последствия. А для этого необходимо как можно больше узнать о законах природы, в том числе и о том, что изучает физика.

Задача любой науки состоит в том, чтобы дать методы исследования, которые позволяют предсказать, каким образом событие произойдет в человеческих руках. Другими словами, наука должна помочь предвидеть будущее и уметь интерпретировать прошлое. Только тогда природные явления могут быть использованы на благо общества и экономики.

Как нам известно, основная цель преподавания физики состоит, во-первых, в научном осмыслении фундаментальных законов природы, в развитии у учащихся навыков научного мировоззрения и философского мышления, в формировании представлений о физических процессах, объясняющих принципы работы техники и применяемых в быту приборов и средств, а во-вторых, в продолжении образования, углублении полученных знаний и

создании прочной основы для продолжения дальнейших научных исследований.

Этот учебник также был подготовлен на основе учебной программы, разработанной для академических лицеев с углубленным изучением физики, исходя из вышеуказанных целей. Данное учебное пособие разработано на основе постановления Президента Республики Узбекистан от 3 декабря 2020 года № ШП-4910 "О системе отбора талантливой молодежи и мерах по совершенствованию деятельности академических лицеев", утвержденного заместителем премьер-министра Республики Узбекистан 8 мая 2021 года "Об использовании учебной литературы на основе образовательных и предметных программ, адаптированных к двухлетнему курсу для академических лицеев и направленных на формирование у учащихся определенных компетенций". — программа мер по совершенствованию системы создания учебников, учебных и учебно-методических пособий, разработанная в целях обеспечения выполнения задач, определенных в "программе".

В этой третьей части учебника освещены разделы оптики, в частности, теория относительности, основы квантовой физики, а также физика атома, ядра и частиц. При освещении темы в каждой главе были тщательно проанализированы многочисленные материалы по теме, а также были приняты во внимание последовательность и междисциплинарность темы. Тематические рисунки и графики получены с помощью современных программ, которые служат для расширения физического представления учащихся о предмете.

Каждая тема учебника разбита на более мелкие темы, которые служат для конкретизации знаний у учащихся. После каждой темы дается несколько вопросов по теме и решение нескольких задач, что приводит к повторному запоминанию темы и формированию у учащихся навыков. После каждой главы даны лабораторные задания по данной главе, тесты и задания для самостоятельного решения. Кроме того, приводятся краткие сведения о жизни и творчестве ученых, внесших значительный вклад в развитие физики, проводивших фундаментальные опыты и принимавших законы.

Использование учебника также полезно для учащихся средних и старших классов специальных школ, специализирующихся на физико-математических науках, абитуриентов, поступающих в высшие учебные заведения, а также учителей физики, что помогает им повысить свои знания и уровень знаний по физике.

ОПТИКА

Оптика-раздел физики, изучающий часть электромагнитных волн, воспринимаемых человеческим глазом. Электромагнитные волны состоят из радиоволн, микроволн, инфракрасных лучей, белого света,

ультрафиолетовых лучей, рентгеновских лучей и гамма-лучей, из которых лучи с длиной волны $\lambda = 400 - 760$ нм называются белым светом. Когда

белый свет попадает в глаза человека, он создает в нем ощущение зрения.

Раздел оптики изучает именно белый свет, его свойства, взаимодействие с различными веществами и различные законы, связанные с ним.

В этом учебнике мы изучим раздел "Оптика, атомная и ядерная физика" в 4 частях:

- Основы фотометрии
- Геометрическая оптика
- Физическая оптика (или волновая оптика)
- Квантовая природа света (или основы квантовой физики)

● ГЛАВА I. ОСНОВЫ ФОТОМЕТРИИ

Фотометрия — раздел оптики, изучающий методы измерения световой энергии. Фотометрия изучает только источники света и освещенные поверхности энергетически, не изучая внутреннюю природу света. Энергетическая количественная оценка излучения, рассеяния и взаимодействия света с объектами является основной задачей фотометрии. При этом изучаются такие новые понятия, как пространственный угол, световой поток, сила света, освещенность, светимость. Вводится новая величина, которая оценивается по психофизиологической особенности человеческого мозга, то есть по зрению.



§ 1. СВЕТ И ЕГО ИСТОЧНИКИ. СВЕТОВОЙ ПОТОК И СИЛА СВЕТА.

Свет и его источники:

Представления древних ученых о свете были очень просты. Они считали, что "из глаза выходит очень маленькие специальные щупальца, и когда они идут и ощупывают вещи, создается ощущение зрения". В настоящее время ни для кого не секрет, что мы можем видеть вещи, когда свет попадает в наши глаза в результате формирования чувства зрения в мозге. Если объект не попадает в наши глаза от источника света или от поверхности, мы не можем видеть источник и объект.

В качестве ответа на вопрос о том, какова природа света, в XIII веке почти одновременно возникли две теории, совершенно противоположные друг другу. Одна из этих теорий была связана с именем Ньютона, а другая — с именем Гюйгенса. Ньютон был создателем корпускулярной теории света. Согласно его теории свет состоит из корпускул (частиц), рассеянных во всех направлениях от источника. Согласно воображению Гюйгенса, существует особая гипотетическая упругая среда, называемая эфиром, которая охватывает все, вселенную и пронизывает все тела, и именно в этом эфире распространяется свет (так же, как механические волны распространяются в упругой среде). Обе теории долгое время не могли победить друг друга, только репутация Ньютона заставила большинство ученых склониться на его сторону. Корпускулярная теория смогла хорошо объяснить распространение света по прямой линии и образование на ней четких теней. Но то, что при пересечении двух световых пучков они не отклоняются от прямой линии, не

мешая друг другу и не рассеиваясь, хорошо объяснила волновая теория. Только к началу XX века была создана истинная природа света, корпускулярно-волновой дуализм. Согласно ему свет — это вид материи, состоящий в себе свойства волны и частицы.

Согласно современным представлениям, электромагнитные излучения находятся в очень широком диапазоне, и часть этих излучений, видимая человеческим глазом, называется светом. Свет также иногда называют видимыми лучами или белым светом.

Световое излучение состоит из ту часть электромагнитного излучения, которая оценивается зрением.

Согласно современным представлениям, любое тело при определенной температуре испускает электромагнитное излучение от себя, и мы не видим эти лучи при низких температурах. Мы знаем, что он становится красным по мере нагревания тела. Следовательно, источником света может быть любое нагретое тело. Можно привести множество примеров источников света. Например, плита, свеча, электролампа, Солнце, Луна и звезды.

Точечный источник:

Источники света обычно не излучают равномерный свет во всех направлениях. Если размер источника намного меньше расстояния, на которое оценивается световое воздействие, такой источник света можно назвать точечным источником. Кроме того, считается, что точечные источники равномерно распределяют свет во всех направлениях. Например, звезды являются лучшей моделью точечного источника, несмотря на то, что их размеры невероятно велики из-за того, что они находятся очень далеко от нас. Точечный источник также является идеализированной моделью, как и другие модели, изучаемые в физике (материальная точка, идеальный газ, абсолютное твердое тело, абсолютное черное тело). По мере увеличения расстояния от источника света до наблюдаемой точки источник приближается к точечному источнику. Если расстояние до наблюдаемой точки превышает размеры источника более чем в 10 раз, вычисление источника как точечного облегчает работу, и допустимая погрешность становится незначительной. Например, предполагая, что светорассеивающая сфера радиусом 25 см является точечной, погрешность для точки на расстоянии 50 см от поверхности сферы составляет 25%, для точки на расстоянии 2 м — 1,5%, а для точки на расстоянии 5 м — не более 0,25%.

Телесный угол:

От стены проведем поверхность так, чтобы форма была нужной, а точки кривой, ограничивающие эту поверхность, соединим с точкой о, удаленной от поверхности. Эти линии образуют конусообразную сферу в пространстве.

Такую область пространства называют пространственным углом и обозначают Ω (рис.1.1, а). Предположим, что существует сфера радиусом R , центр которой находится в точке O . Пространственный угол Ω отделил от сферы отрезок с площадью S .

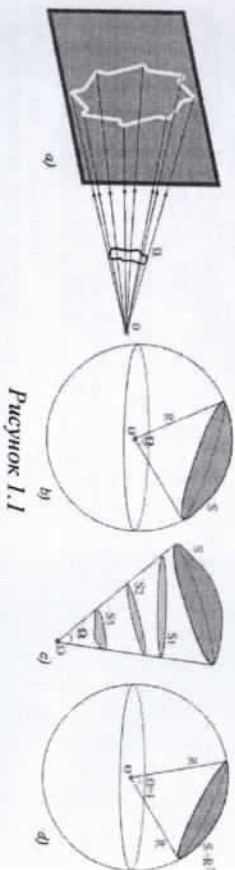


Рисунок 1.1

Величина, равная отношению площади отрезка к квадрату радиуса сферы, дает величину телесного угла (рис.1.1, б).

$$\Omega = \frac{S}{R^2} \quad (1.1)$$

Если поверхность S видна из центра сферы под пространственным углом Ω , то произвольные поверхности $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, расположенные внутри конуса, удерживающего поверхность S , также видны из центра сферы под тем же телесным углом Ω (рис.1.1, в).

Телесный угол измеряется в стерadianах (стр), в отличие от плоского угла.

Телесный угол, отделяющий поверхность, равную квадрату радиуса от сферы, называется пространственным углом 1стр.

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{1m^2}{1m^2} = 1 \text{ [стр]} \quad (1.2)$$

Полный телесный угол, охватывающий все пространство вокруг точки, равен:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi \text{ [стр]} \quad (1.3)$$

Световой поток:

В предыдущих главах мы видели, как радиоволны генерируются с помощью колебательного контура. Радиоволна-это длинноволновая электромагнитная волна. Оказалось, что по современным расчетам электромагнитные волны могут излучать любое нагретое тело.

Электромагнитное излучение, как и другие волны, несет энергию из одной точки в другую, когда оно распространяется в среде. Если на некотором расстоянии от источника электромагнитных волн условно

выделить произвольную поверхность, то через эту поверхность в единицу времени пройдет энергия излучения.

Энергия электромагнитной волны, прошедшая через поверхность за единицу времени, называется потоком электромагнитного излучения.

$$\Phi = \frac{W}{t} \left[\frac{Дж}{с} = Вт \right] \quad (1.4)$$

Поток электромагнитного излучения имеет размер мощности. Здесь: W -энергия всех электромагнитных волн (радиоволн, микроволн, инфракрасных лучей, белого света, ультрафиолетовых лучей, рентгеновских лучей и гамма-лучей), длина волны которых находится в интервале $0 < \lambda < \infty$, проходящем через поверхность.

В оптике нас интересует не полная энергия электромагнитной волны, проходящей через поверхность, а та часть электромагнитных волн, которая непосредственно воздействует на глаз. Лучи, длина волны которых находится в диапазоне $\lambda=400 - 760$ нм, называются белым светом (видимыми лучами). Когда белый свет падает в глаза человека, он создает в нем ощущение зрения. Но не все видимые лучи создают одинаковое зрение. Пусть у нас будет возможность получить спектры одинаковой мощности для каждого узкого интервала белого света. Когда эти спектры попадают в человеческий глаз, оказывается, что не все они вызывают одинаковую чувствительность. Из них видно, что зеленый свет с длиной волны $\lambda=555$ нм ($\nu=540$ ТГц) очень хорошо воспринимается человеческим глазом.

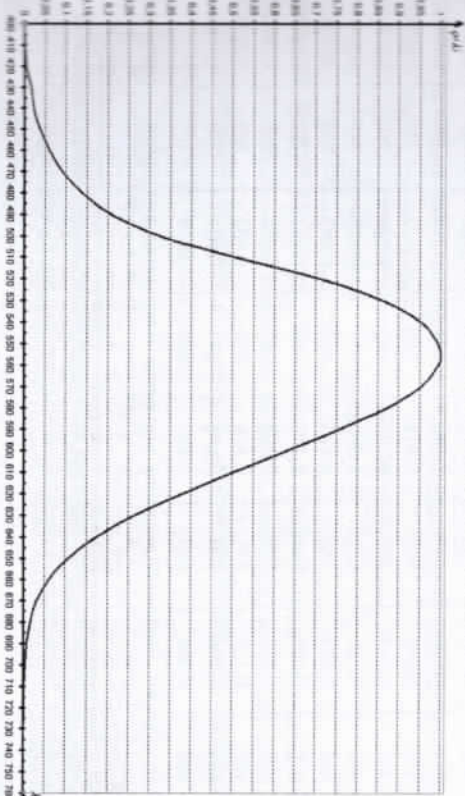


Рисунок 1.2

Далее предположим, что лампа мощностью $P=1$ Вт излучает только зеленый свет с длиной волны $\lambda=555$ нм. Оказывается, что мощность лампы,

излучающей красноватую волну $\lambda=610$ нм, должна составлять $P=2$ Вт, а мощность лампы, излучающей воздушную волну $\lambda=495$ нм, должна составлять $P=4$ Вт, чтобы создать ощущение, будто эти зеленые лучи генерируются осенью. Введем новую величину, называемую коэффициентом чувствительности, на основе экспериментов с целью оценки зависимости чувствительности глаза от длины волны $\phi(\lambda)$. Значение коэффициента чувствительности для наилучшего видимого зеленого света ($\lambda=555$ нм) равно $\phi(\lambda)=1$ для всех остальных лучей $\phi(\lambda)<1$, включая для красной $\lambda=610$ нм длины волны $\phi(\lambda)=0,5$, для голубого $\lambda=495$ нм длины волны равно $\phi(\lambda)=0,25$. График зависимости коэффициента чувствительности от длины волны называется кривой чувствительности. Кривая чувствительности изображена на рисунке 1.2, а числовые значения приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

$\lambda, \text{ нм}$	ϕ_λ	$\lambda, \text{ нм}$	ϕ_λ	$\lambda, \text{ нм}$	ϕ_λ	$\lambda, \text{ нм}$	ϕ_λ
400	0,0004	495	0,260	590	0,757	685	0,0126
405	0,0007	500	0,323	595	0,694	690	0,0082
410	0,0012	505	0,408	600	0,631	695	0,0060
415	0,0024	510	0,503	605	0,567	700	0,0041
420	0,004	515	0,605	610	0,503	705	0,0031
425	0,009	520	0,710	615	0,442	710	0,0021
430	0,016	525	0,786	620	0,381	715	0,00155
435	0,019	530	0,862	625	0,343	720	0,00105
440	0,023	535	0,914	630	0,265	725	0,00078
445	0,030	540	0,954	635	0,220	730	0,00052
450	0,038	545	0,978	640	0,175	735	0,00038
455	0,047	550	0,995	645	0,140	740	0,00025
460	0,06	555	1,000	650	0,107	745	0,00018
465	0,074	560	0,995	655	0,083	750	0,00012
470	0,091	565	0,977	660	0,061	755	0,00009
475	0,113	570	0,952	665	0,046	760	0,00006
480	0,139	575	0,918	670	0,032	765	0,00003
485	0,170	580	0,870	675	0,024	770	0,00001
490	0,208	585	0,816	680	0,017		

Для оценки световой энергии вводится отдельная величина – световой поток.

Световая энергия, проходящая через поверхность в единицу времени и оцениваемая зрительным восприятием, называется световым потоком.

Другими словами, световой поток-это мощность световых лучей, которую мы оцениваем нашими глазами. Световой поток-это не величина, которая регистрируется или измеряется прибором, а величина, которая оценивается психофизиологическим свойством человеческого мозга, то есть

френем. Поэтому эта величина измеряется не в ваттах на единицу мощности, а в новых величинах Лм. Теперь нам нужно определить связь между единицей мощности Вт и единицей светового потока Лм.

Расчеты показывают, что если бы мощность зеленого света $P=1$ Вт в узком диапазоне ($\lambda=555$ нм), видимость которого равна $\phi(\lambda)=1$, то этот световой поток был бы равен $\Phi=683$ Лм. Подобно тому, как красноватый свет $\lambda=610$ нм с одинаковой мощностью $P=1$ Вт создает световой поток, равный $\Phi=0,5 \cdot 683 \text{ Лм}=341,5 \text{ Лм}$, в то время как голубой свет $\lambda=495$ нм с такой же мощностью создает световой поток, равный $\Phi=0,25 \cdot 683 \text{ Лм}=170,75 \text{ Лм}$.

Другими словами, чтобы создать точно такой же световой поток $\Phi=1$ Лм, равный мощности зеленого света должна быть равна $P=\frac{1}{683} \text{ Вт}=0,01464 \text{ Вт}$, мощность красного света равна $P=\frac{1}{0,5 \cdot 683} \text{ Вт}=0,02928 \text{ Вт}$, а мощность воздушного света должна быть равна $P=\frac{1}{0,25 \cdot 683} \text{ Вт}=0,05856 \text{ Вт}$.

Мощность, необходимая для создания светового потока ($\lambda=555$ нм), равного 1 Лм с помощью максимально видимого зеленого света, называется механическим эквивалентом света.

$$A = \frac{1}{683} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{Лм}} \right] = 0,01464 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{Лм}} \right] \quad (1.5)$$

Если источник света мощностью P излучает монохроматические лучи с длиной волны λ , поток света равна:

$$\Phi = \phi(\lambda) \cdot \frac{P}{A} = 683 \phi(\lambda) \cdot P \quad [\text{Лм}] \quad (1.6)$$

Когда источники света, находящиеся в одном месте с одинаковой мощностью $P_1, P_2, \dots, P_n$, излучают видимые монохроматические волны с соответствующими длинами $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, результирующий световой поток, в этих источниках будет следующим:

$$\Phi_{\text{рез}} = 683 (\phi_1 P_1 + \phi_2 P_2 + \dots + \phi_n P_n) = 683 \sum_{i=1}^n \phi_i P_i \quad [\text{Лм}] \quad (1.7)$$

В состав естественного источника света входят все электромагнитные волны, находящиеся в интервале $0 \leq \lambda \leq \infty$, а также видимые лучи различной длины $\lambda=400-760$ нм. Чтобы найти световой поток, возникающий источником естественного света, мы разделим видимые волны на элементарные полосы толщиной $d\lambda$. Пусть-излучательная способность

участка источника в произвольном интервале λ и $\lambda+d\lambda$, его коэффициент чувствительности Φ , элементарная мощность излучения $dP = E_\lambda d\lambda = \frac{\partial P}{\partial \lambda} d\lambda$ и элементарный световой поток $d\Phi = 683 \Phi \frac{\partial P}{\partial \lambda} d\lambda$. Интегрируя это в интервал $\lambda = 400 - 760$ нм, можно найти полный световой поток, генерируемый естественным источником света.

$$\Phi = \int_{400 \text{ нм}}^{760 \text{ нм}} d\Phi = 683 \int_{400 \text{ нм}}^{760 \text{ нм}} \Phi E_\lambda d\lambda = 683 \int_{400 \text{ нм}}^{760 \text{ нм}} \Phi \frac{\partial P}{\partial \lambda} d\lambda \quad (1.8)$$

Сила света:

Реальные источники света излучают разный поток в разных направлениях. Для характеристики зависимости светового потока, излучаемого источником света, от направления излучения вводится новая величина, называемая силой света.

Световая сила источника, размер которой дает, количественно равен величине светового потока, распространяемого этим источником в заданном направлении в пределах одного телесного угла.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1.9)$$

При определении силы света источника в каком-либо направлении измеряется и рассчитывается элементарный световой поток $d\Phi$ при очень малом телесном угле $d\Omega$.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.10)$$

У природных источников света рассеивается различный свет во всех направлениях. Следовательно, сила света в разных направлениях также будет разной. Далее при решении задач считаем, что сила света во всех направлениях одинакова. Силой света I источника называется световой поток, созданный источником в единичном телесном углу.

Если источник света излучает одинаковый свет во всех направлениях, средняя сферическая сила этого источника по всему пространству будет равна:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (1.11)$$

В системе СИ единицей измерения силы света является Кандела, которая является основной единицей измерения.

Определение 1: 1 Кд равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540

ТГц (или $\lambda = 555$ нм), сила света которого в этом направлении составляет 1/683.

Определение 2: При измерителе зафиксированная представительная мощность (3946,6 К) сил света, создающих перпендикулярно плоской поверхности 1/60 см², составляет 1 Кандела (Кд).

Таким образом, можно сказать, что мощность источника света будет равна 1 Кд, если световой поток 1 Лм рассеивается под пространственным углом 1ср.

Световой поток, приходящийся на электрическую мощность 1 Вт, называется светопропусканием лампы.

$$k = \frac{\Phi}{P} \quad \text{или} \quad k = \frac{\Phi(\lambda)}{A} = 683 \cdot \Phi(\lambda) \quad (1.12)$$

Например, электролампа мощностью 100 Вт имеет среднюю световую силу, близкую к 100 Кд, равную световому потоку $\Phi = 4 \cdot 3,14 \cdot 100 \text{ Кд} = 1256 \text{ Лм}$, который лампа отдает в окружающую среду. А светопропускание будет равно $k = 1256 \text{ Лм} / 100 \text{ Вт} = 12,56 \text{ Лм} / \text{Вт}$. В таблице 1.2 приведена светоточка ламп накаливания различной мощности.

Таблица 1.2

Мощность, Вт	Полный световой поток, Лм	Дать свет, лм/Вт	Средняя сферическая сила света, Кд
15	124	8,25	10
25	225	9,00	18
40	380	9,50	30
60	645	10,75	51
100	1275	12,75	103
150	2175	14,50	173
200	3050	15,25	243
300	4875	16,25	388
500	8725	17,45	695
1000	19000	19,00	1530

Светопропускание ламп накаливания очень низкое, а также КПД не превышает $\eta = 5 - 6\%$. Большая часть потребляемой электроэнергии излучается инфракрасными лучами, то есть в виде тепла. Светоточка ламп дневного света и КЛД излучения будет значительно выше, чем у ламп накаливания. Лампы дневного света преобразуют основную часть потребляемой электроэнергии в свет. Поэтому лампы дневного света не нагреваются так сильно, как лампы накаливания.

Вопросы по теме

1. Расскажите о свете и его источниках.
2. Что такое телесный угол? Какова его единица измерения и наибольшее

значения?

3. Что такое световой поток? В чем разница между световым потоком и потоком электромагнитного излучения?
4. Что такое коэффициент чувствительности?
5. Запишите связь между мощностью и потоком для источника света, излучающего видимую монохромную λ -волну.
6. Что такое механический эквивалент света? Как определяется полный световой поток?
7. Что называется силой света? Запишите его формулу и единицу измерения.
8. Чем равна сила света точечного источника света?
9. Дайте определение величин силы света I Кд.
10. Что называют светопропусканием ламп накаливания? Что называют КПД?

Решение задачи.

1. Световой поток источника света, излучающего монохроматический свет мощностью 1,8 Вт, равен 310 Лм. Чему равен коэффициент чувствительности для этого монохроматического света? На каких длинах волн это соответствует?

Дано

Решение

$$P = 1,8 \text{ Вт}$$

$$\Phi = 310 \text{ Лм}$$

Монохроматический источник света при зависимости энергетической и фотометрической величины светового потока используется следующая формула.

$$\Phi(\lambda) = ?$$

$$\lambda = ?$$

$$\Phi = \Phi(\lambda) \cdot \frac{P}{A} = 683 \Phi(\lambda) \cdot P$$

Из этой формулы определим значение коэффициента чувствительности.

$$\Phi(\lambda) = \frac{\Phi}{683 \cdot P} = \frac{310}{683 \cdot 1,8} = 0,252$$

Теперь с помощью таблицы 1.1 определим, значение коэффициента чувствительности $\Phi(\lambda) = 0,252$ соответствующее лучам голубого и красного цвета с длинами волн $\lambda_1 = 494 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 631 \text{ нм}$.

Ответ: $\Phi(\lambda) = 0,252$; $\lambda_1 = 494 \text{ нм}$; $\lambda_2 = 631 \text{ нм}$

2. Найдите световой поток, находящийся на расстоянии 3 м от источника с силой света 300 Кд и падающий перпендикулярно на поверхность, имеющую площадь 15 см².

Дано

Решение

$$S = 15 \text{ см}^2$$

$$r = 3 \text{ м}$$

$$I = 300 \text{ кд}$$

$$\alpha = 0^\circ$$

Считаем, что источник находится в центре сферы радиусом 3 м. Поверхность представляет собой часть сферической поверхности S . Тогда освещенность такой поверхности равна $E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$. А на второй стороне $E = \frac{\Phi}{S}$.

$\Phi = ?$

Приравняв правую часть этих выражений, получим следующее уравнение для светового потока, падающего на поверхность S . $\Phi = \frac{I S}{r^2} \cos \alpha$ В результате расчетов получим ответ $\Phi = \frac{300 \text{ кд} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2}{9 \text{ м}^2} \cos 0^\circ = 0,05 \text{ Лм}$.

Ответ: 0,05 Лм.



§ 2. ЗАКОНЫ ФОТОМЕТРИИ

Освещенность:

Фотометрия (от фото... и ...метрия), раздел физической оптики, в котором рассматриваются энергетические характеристики оптического излучения, испускаемого источниками, распространяющегося в различных средах и взаимодействующего с телами. В темном месте человек не видит предметов. Только когда свет распространяется от какого-либо объекта, он попадает в человеческий глаз и видит его. Если объект сам по себе не излучает свет, мы видим его, когда он преломляет свет от другого источника света. Чем больше светового потока падает на рассматриваемое тело, тем больше светового потока возвращается с его поверхности, и тем лучше мы видим это тело. Источник света не освещает поверхности предметов равномерно. Например, не вся поверхность стола освещается равномерно из-за лампы, висящей на столе. Потому что разные точки стола расположены на разном расстоянии относительно лампы. Край стола наиболее слабо освещен, а точка под лампой освещена сильнее всего из-за близости. При равномерном распределении светового потока, падающего на поверхность, освещенность поверхности измеряется световым потоком, приходящимся на единицу поверхности этой поверхности.

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (2.1)$$

Если поверхность не освещена равномерно, освещенность в разных ее точках также различна, и для каждой точки необходимо будет измерить элементарный поверхностный dS и элементарный световой поток $d\Phi$, падающий на эту поверхность. В нем освещенность элементарная поверхность dS равна

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.2)$$

Если на поверхность 1 м^2 равномерно падает светового потока 1 Лм , освещенность этой поверхности будет равна 1 Лк (люкс).

$$\frac{1\text{ Лм}}{1\text{ м}^2} = 1\text{ Лк} \quad (2.3)$$

Давайте приведем несколько примеров, чтобы оценивать, насколько велика освещенность 1 Лк . В сумерках солнечный свет, падающий вертикально на Землю, создает $100\,000\text{ Лк}$, в то время как ночью полная луна создает $0,2\text{ Лк}$, освещенность лампы накаливания мощностью 100 Вт , подвешенной на высоте 1 м , будет равна 100 Лк . В таблице ниже приведены примеры освещенности, создаваемой некоторыми природными и искусственными источниками света.

Таблица 2.1

Освещение участков	Освещенность, Лк
При освещении солнечными лучами в сумерках	100 000
В сумерочной площади	10 000
В пасмурный день на открытой местности	1000
В помещениях, где выполняются delicate работы	100–200
В светлой комнате	100
В кабинетах и лабораторных кабинетах	75
На экране кинотеатра	20–80
В коридорах и на лестницах	До 15
При искусственном освещении улиц	До 4
В ночь полнолуния	0,2
На звездном небе, где не возмущающая луна	0,0003

Яркость:

Читая книгу, мы видим буквы и читаем ее. Белая бумага и черные буквы на ней не отражали лучи света, падающие на поверхность. Белая бумага имеет большую отдачу, а черные буквы имеют большую впитывающую способность. Поскольку световые потоки, идущие от обоих, различны, мы также видим буквы. Очень мелкие предметы мы различаем по разности световых потоков, идущих от их поверхностей.

Величина, характеризующая различное отображение отдельных участков поверхности, распространяющих световой поток в зависимости от светового потока, называется яркостью.

При равномерном освещении поверхности яркость поверхности излучается силой света, излучаемого от единичной поверхности этой поверхности в направлении, перпендикулярном ей.

$$B = \frac{I}{S} \quad (2.4)$$

Если с каждого 1 м^2 поверхности равномерно освещенной поверхности исходить силу света, равную 1 Кд , то яркость поверхности будет равна 1 нт (нт).

$$\frac{1\text{ Кд}}{1\text{ м}^2} = 1\text{ нт} \quad (2.5)$$

Яркость 1 нт считается относительно небольшим яркостью, и если яркость точки не меньше 10^{-6} нт , человек может видеть эту яркую поверхность. Если яркость источника света превышает $1,6 \cdot 10^5\text{ нт}$, боль оушается в глазах, и смотреть на такие поверхности не рекомендуется. Яркость поверхности солнечного фланца равна $1,5 \cdot 10^9\text{ нт}$, а яркость лунной поверхности равна $2,5 \cdot 10^3\text{ нт}$. Из определения силы света следует, учесть, что при затвердевании пластины светоточа по вертикали на ее поверхности составит 1 Кд , то получается, яркость поверхности будет равна $\frac{1}{60}\text{ см}^2$. В этом яркость $B = \frac{1\text{ Кд}}{1/60\text{ см}^2} = 6 \cdot 10^5\text{ нт}$

В таблице ниже представлена яркость источников света а также отражающих поверхностей.

Таблица 2.2

Источник, поверхность	Яркость, Нт
Поверхность Солнца	$1,5 \cdot 10^9$
Кратер угля	$1,5 \cdot 10^8$
Металлическое волокно лампы накаливания	$1,5 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^6$
Снег под прямыми солнечными лучами	$3 \cdot 10^4$
Пластина ксероинковой лампы	$1,5 \cdot 10^4$
Пластина свечей	$5 \cdot 10^3$
Чистое голубое небо	$4 \cdot 10^3$
Лунная поверхность	$2,5 \cdot 10^3$
Поверхность экрана в кинотеатре	$5 - 20$
Лист белой	$10 - 15$
Ночное небо без похода Луны	10^{-4}

Законы освещенности:

Проведем сферическую поверхность радиусом r вокруг точечного источника света с силой света I . При этом освещенность во всех точках внутренней части сферы одинакова, и лучи направлены по радиусу в перпендикулярном положении к поверхности сферы. При этом угол падения световых лучей на поверхность сферы будет равен нулю. Если в этом условиях освещенность внутренней поверхности сферы B , то яркость

поверхностью всей сферы $S_{ш}$, с полным световым потоком Φ_T , то по формуле освещенности имеет вид

$$E_0 = \frac{\Phi_T}{S_{ш}}$$

Зная, что здесь, $S_{ш} = 4\pi r^2$, $\Phi_T = 4\pi I$ мы получаем следующие выражение

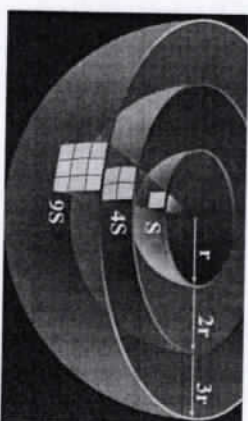
$$E_0 = \frac{4\pi I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2} \quad \text{И так}$$

$$E_0 = \frac{I}{r^2} \quad (2.6)$$

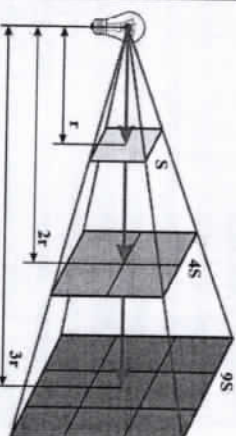
Это выражение является математическим выражением первого закона освещенности.

Освещенность поверхности при падении лучей перпендикулярно прямо пропорциональна точечной силе света и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до освещенной поверхности.

Попробуем объяснить закон обратных квадратов. Радиусы ориентируют точку, в которой находится точечный источник света r , $2r$, $3r$, ... нарисуем несколько концентрических сфер (рис.2.1-а). Поверхности сфер S , $4S$, $9S$, по формуле, определяющей поверхность сферы будет иметь значения $S=4\pi r^2$. А свет, излучаемый от источника, распространяется на эти поверхности. В результате получаются освещенности на внутренних поверхностях сфер будет иметь значения E , $1/4E$, $1/9E$, ... Для более точного понимания выделим из сферы с радиусом r небольшую поверхность S . Здесь пространственный угол, который покрывает эту поверхность S . Здесь поверхности $4S$ из сферы радиусом $2r$ и $9S$ из сферы радиусом $3r$. Увеличенное изображение этого представлено на рисунке 2.1-б.



а)



б)

Рисунок 2.1

Теперь рассмотрим зависимость освещенности от угла падения лучей на поверхность. Пусть лучи света падают вертикально на поверхность Земли.

Пусть задано найти освещенность наклонной плоскость прямоугольной формы $ABCD$, образующей угол α относительно земной поверхности. При этом нормаль наклонной поверхности и луч света также образуют угол α . Проекцией прямоугольника $ABCD$ на горизонтальную поверхность будет прямоугольник $AB_1C_1D_1$ (рис.2.2).

Освещенность наклонной поверхности $ABCD$ имеет вид

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{AB \cdot AD}$$

Если мы удалим поверхность $ABCD$, луч света ABC_1D_1 падает вертикально на поверхность и осветит ее. Освещенность в этом равна

$$E_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{\Phi}{AB \cdot AD_1}$$

Соотношение освещенности E и E_0 равна

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi / (AB \cdot AD)}{\Phi / (AB \cdot AD_1)} = \frac{AD}{AD_1} = \cos \alpha$$

Таким образом, освещенность поверхности при падении светового луча на поверхность в наклонном плоскости равна:

$$E = E_0 \cos \alpha = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad (2.7)$$

Это выражение является математическим выражением второго закона освещенности.

Освещенность поверхности при освещении наклонными лучами прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей, падающих на эту поверхность.

Из второго закона освещенности можно сделать вывод, что при уменьшении угла падения освещенность поверхности уменьшается. Причина, по которой зимой жарко, а летом холодно, также может быть объяснена через это.

Теперь определим, как изменяется освещенности поверхности одного источника света в зависимости от угла падения света (рис.2.3). Пусть источник света на высоте h от поверхности освещает элементарную поверхность под этим источником с яркостью E_0 . Обозначим освещенность на элементарной поверхности E , при которой лучи источника падают на поверхность под углом α . Требуется определить, по какому закону

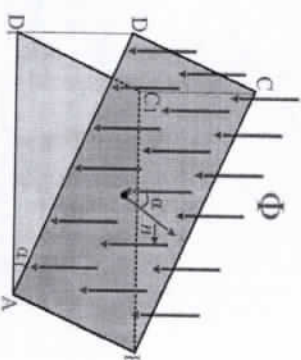


Рисунок 2.2

изменится E , если нам известны углы α и E_0 . Эта связь будет в следующем виде:

$$E = E_0 \cos^3 \alpha \quad (2.8)$$

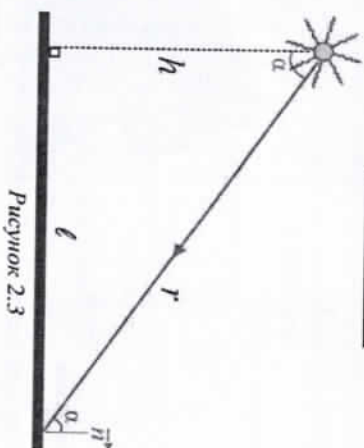


Рисунок 2.2

Давайте докажем эту же формулу. Из рисунка 2.2 видно, что $r = \frac{h}{\cos \alpha}$. Освещенность у основания источника света равна по первому закону освещенности $E_0 = \frac{I}{h^2}$, а освещенность у поверхности, падающей на

поверхность под углом α , равна по второму закону освещенности $E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$. Продолжая можно записать следующее выражение

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha = \frac{I}{\left(\frac{h}{\cos \alpha}\right)^2} \cos \alpha = \frac{I}{h^2} \cos^3 \alpha = E_0 \cos^3 \alpha$$

Из приведенного выше формулы можно понять, что по мере увеличения угла поверхности освещенность уменьшается по сравнению с поверхностью освещенностью у основания источника. Например, разность освещенности на поверхностях составляет 1,54 раза при $\alpha = 30^\circ$, 2,83 раза при $\alpha = 45^\circ$, 8 раз при $\alpha = 60^\circ$, 25 раз при $\alpha = 70^\circ$, 191 раз при $\alpha = 80^\circ$ и т. д.

Сравнение силы света двух источников. Фотометры:

Зная силу источника света, легко определить другие фотометрические величины. При измерении силы света используется прибор, называемый фотометром. В обычном фотометре сила света неизвестного источника определяется путем создания той же освещенности, что и эталонный источник, для которого известна сила света.

Различно освещенные поверхности хорошо различимы человеческим глазом, но трудно различить, сколько раз они различаются. Но при равномерном

освещении поверхностей это хорошо заметно. Именно на этом основана работа оптического прибора, называемого фотометром.

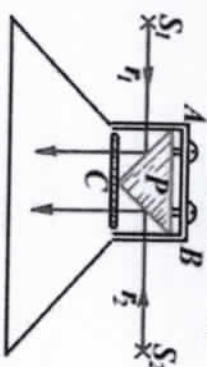


Рисунок 2.4

Один из простейших фотометров схематически изображен на рисунке 2.4. При этом: а) вид сверху; б) вид спереди. Фотометр представляет собой трехстороннюю 1-призму, покрытую белой краской, которая хорошо отражает свет. Источники света размещают с левой и правой сторон призмы. Лучи, отражаясь через призму, попадают в 2 тусклых стекла, а 3 проходят сквозь темный экран и направляются к глазу наблюдателя. Один из источников света, например эталонный, помещают на расстоянии r_1 от призмы, а второй, перемещая источник, оптическая сила которого неизвестна, помещают на расстоянии r_2 таким образом, чтобы две стороны стеклянной призмы освещались точно так же. Согласно первому закону освещенности равна

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}$$

Так как освещенность E_1 и E_2 одинакова

$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}, \quad \rightarrow \quad \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

Из этого сформируются следующая формула

$$I_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_1 \quad (2.9)$$

По этой формуле можно определить силу света I_2 неизвестного источника. Результаты, полученные с помощью этого фотометра, будут менее точными. А в тех случаях, когда требуется получение точных результатов, используются люксметры, оснащенные значительно усовершенствованными фотометрами и фотозлементами.

Вопросы по теме

1. Что называется освещенностью? Запишите его формулу и единицу измерения.
2. Что называется яркостью? Запишите его формулу и единицу измерения.

- Чему равна яркость поверхности пластины при температуре плавления?
- Скажите 1-й закон освещенности и запишите его формулу.
- Объясните закон обратных квадратов.
- Скажите 2-й закон освещенности и запишите его формулу.
- Запишите формулу зависимости освещенности от угла падения.

Решение задачи:

1. Посчитав, что город Ташкент расположен на северных широтах $\phi \approx 41^\circ$, определите, во сколько раз отличаются освещенность города Ташкента в дневное время летом и зимой. Угол отклонения земной оси относительно оси эклиптики равен $\delta \approx 23,5^\circ$.

Дано

$\phi \approx 41^\circ$

$\delta \approx 23,5^\circ$

1) летом

2) зимой

Решение

Летом солнечные лучи падают на город Ташкент под углом $\alpha_1 = \phi - \delta = 41^\circ - 23,5^\circ = 17,5^\circ$, а зимой под углом $\alpha_2 = \phi + \delta = 41^\circ + 23,5^\circ = 64,5^\circ$. Если расстояния от Земли до Солнца r , а также о сила света Солнца I , можно сказать, что освещенность в летнее и зимнее время будет равна

$\frac{E_1}{E_2} = ?$

$E_1 = \frac{1}{r^2} \cos \alpha_1$ и $E_2 = \frac{1}{r^2} \cos \alpha_2$. А их соотношение будет равно

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{\cos 17,5^\circ}{\cos 64,5^\circ} = \frac{0,9537}{0,4305} = 2,215. \text{ Так, летом в Ташкент}$$

поступает примерно в 2,2 раза больше энергии, чем зимой.

Ответ: в 2,2 раза больше

2. На высоте h от горизонтальной поверхности вешается лампа. На каком расстоянии от основания лампы освещенность в точке будет в n раз меньше освещенности у основания лампы?

Дано

h

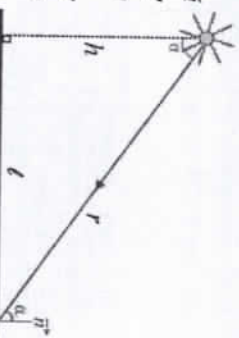
$\frac{E_1}{E_2} = n$

$\ell - ?$

Решение

Освещенность под лампой будет равна по первому закону $E_0 = \frac{I}{h^2}$. А на расстоянии ℓ от основания лампы по второму закону освещенности будет равна:

$$E = \frac{1}{r^2} \cos \alpha = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{h}{r} = \frac{1}{r^3} \cdot \frac{h}{r^2} = \frac{1}{r^3} \cdot \frac{h^3}{(h^2 + \ell^2)^{3/2}} = E_0 \cdot \frac{h^3}{(h^2 + \ell^2)^{3/2}}$$



Учитывая, что задача по условию $\frac{E_0}{E} = n$, она будет равна $\frac{(h^2 + \ell^2)^{3/2}}{h^3} = n$.

Из этого мы можем найти искомую величину, то есть

$$(h^2 + \ell^2)^3 = n^3 h^6, \rightarrow h^2 + \ell^2 = \sqrt[3]{n^3} h^2, \rightarrow \ell = \sqrt{\sqrt[3]{n^3} - 1} h$$

Ответ: $\ell = \sqrt{\sqrt[3]{n^3} - 1} h$



ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ I

Лабораторная работа: № I.

Определение силы света источника с помощью фотометра.

Цель работы: Определение оптической силы неизвестного источника света по закону фотометрии и с помощью фотометрического прибора.

Необходимые приборы и оборудование: фотометр, источник тока, линейка, эталонная лампа, лампа с неизвестной оптической силой.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Прибор, который путем проверки освещенности поверхностей определяет силу света неизвестного источника путем сравнения силы света 2 источников, называется фотометром. Фотометр определяет силу света по закону освещенности. $I_1 = I_2$, достигая той же освещенности, выставляя фотометр относительно источника на

ту или иную сторону источника

$$\frac{I_1}{r_1^2} \cos \alpha = \frac{I_2}{r_2^2} \cos \alpha, \frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2}$$

Измерив r_1, r_2 из выражения I_1 зная I_2 ,

$$I_2 = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_1$$

результаты измерений и расчетов заносимся в эту таблицу.

Порядок выполнения работ:

- Измерим расстояние r_2 до тех пор, пока правая и левая освещенность фотометра не станут равными.
- Определим силу света неизвестного источника света по формуле (1).
- Заполним таблицу.

Рисунок I

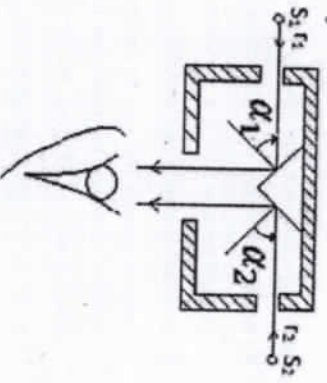


Таблица I I

№	$I_1 [Cd]$	$r_1 [sm]$	$r_2 [sm]$	$I_2 [Cd]$	$\bar{I}_2$	ΔI_2	$\overline{\Delta I_2}$	$\epsilon = \frac{\overline{\Delta I_2}}{\bar{I}_2} \cdot 100\%$
1								
2								
3								

$$I_2 = \bar{I}_2 \pm \Delta I_2$$

Контрольные вопросы

1. Что называется силой света? Какова его единица измерения?
2. Что называется освещенностью? Какова его единица измерения?
3. Опишите закон обратных квадратов фотометрии.
4. Опишите закон косинусов фотометрии.
5. Опишите строение прибора фотометра.

ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ I

1. Телесным углом называется ...
 А) умножение площади поверхности на квадрат радиуса
 Б) отношение площади поверхности к квадрату радиуса
 В) отношение радиуса к поверхности
 Г) сумма квадрата радиуса и поверхности
2. Чему равно наибольшее значение телесного угла?
 А) 2π В) 3π С) 4π Д) 6π
3. Дайте определение световому потоку 1 Лм.
 А) когда источник с мощностью $\frac{1}{683}$ Вт излучает только зеленую волну с длиной волны 555 нм, ее световой поток равен 1 Лм.
 Б) если источник с мощностью $\frac{1}{683}$ Вт излучает только красную волну с длиной волны 760 нм, ее световой поток равен 1 Лм.
 В) если источник с мощностью 683 Вт излучает только зеленую волну с длиной волны 555 нм, ее световой поток равен 1 Лм.
 Г) если источник с мощностью $\frac{1}{683}$ Вт излучает только фиолетовую волну с длиной волны 410 нм, ее световой поток будет равен 1 Лм.
4. Запишите формулу светового потока.
 А) $E = \frac{\Phi}{S}$ В) $E = \frac{\Phi}{S^2}$ С) $E = \Phi S$ Д) $E = IS$
5. Во сколько раз уменьшается освещенность поверхности при удалении от источника в 3 раза?

- А) три раза В) 9 раз С) 27 раз Д) 1/3 раз

6. Чему равен световой поток лампы накаливания со 100 Квт?

- А) 628 лм В) 314 лм С) 1256 лм Д) 157 лм

7. Если лампа накаливания мощностью 150 Вт имеет световую мощность 120 Квт, то чему равна световоотдача этой лампы?

- А) 15 лм/Вт В) 10,05 лм/Вт С) 105 лм/Вт Д) 12,56 лм/Вт

8. Запишите формулу яркости.

- А) $B = \frac{I}{S}$ В) $B = \frac{I}{S^2}$ С) $\Phi = IS$ Д) $\Phi = S/I$

9. Если поверхность лампы накаливания силой света 100 кд составляет 40 см², то какова яркость этого источника?

- А) 100 000 нт В) 50 000 нт С) 1256 нт Д) 25 000 нт

10. Что характеризует освещенность и яркость?

- А) освещенность характеризует поверхность источника, излучающего свет, в то время как яркость характеризует поверхность источника, от которой исходит свет.

- В) и освещенность, и яркость характеризуют поверхность, от которой исходит свет.

- С) Освещенность характеризует поверхность, от которой исходит свет, в то время как яркость характеризует поверхность источника, излучающего свет.

- Д) освещенность и четкость характеризуют поверхность источника.

11. Подвешенная лампа на высоте h от пола освещает поверхность пола под лампой с полсветкой E_0 . Какой будет освещенность поверхности пола, на которую лучи света падают под углом α ?

- А) $E_0 \sin^3 \alpha$ В) $E_0 \cos^3 \alpha$ С) $E_0 \cos^2 \alpha$ Д) $E_0 \sin^3 \alpha$

12. Лампа, подвешенная на высоте h над горизонтальной поверхностью, создает полсветку E_0 на поверхности под ней. Он установлен на перпендикулярной поверхности в точке горизонтальной поверхности, где луч света падает под углом α . Какова освещенность этой поверхности?

- А) $E_0 \sin \alpha \cos \alpha$ В) $E_0 \cos^3 \alpha \sin \alpha$
 С) $E_0 \cos^2 \alpha \sin \alpha$ Д) $E_0 \sin^3 \alpha \cos \alpha$

13. На сферическую поверхность площадью 10 см², расположенную на расстоянии 20 см от точечного источника света, падает световой поток 4 лм. Определить силу света точечного источника.

- А) 80 кд В) 180 кд С) 120 кд Д) 160 кд

14. К самому потолку подкреплению электрическая лампа мощностью 200 кД. Определите полный поток света, падающий на боковые стены и пол комнаты.

- A) 1256 Лк B) 628 Лк C) 2512 Лк D) 314 Лк

15. На поверхность площадью 3 м^2 падает 150 лм светового потока. Какова освещенность поверхности?

- A) 450 Лк B) 50 Лк C) 150 Лк D) 30 Лк

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ I

1. Между двумя экранами, находящимися на расстоянии 20 см друг от друга, размещают источник света. На каком расстоянии от левого экрана разместить источник, чтобы левый экран освещался на 3 раза больше, чем правый?

2. На расстоянии 6 м по отношению друг к другу на двух проводочных опорах, установленных вертикально длиной 4 м подвешиваются источники света со световыми силами $I_1 = I_2 = 200 \text{ Кд}$. Найдите, освещенность поверхность земли под каждой лампой и между источниками света.

3. Точечный источник, установленный на конце телесного угла $0,6 \text{ стр.}$ излучает световой поток 240 лм. Определите силу света источника.

4. Фотометр освещается лампой с силой света 100 кд, находящейся на расстоянии 50 см с одной стороны. Какой должна быть световая сила света лампы, находящейся на расстоянии 30 см от другой ее стороны, чтобы части фотометра (обе стороны) освещались одинаково?

5. Освещенность точки плоской поверхности в ближайшей к точечному источнику равна 100 лк. Чему равны освещенности в местах с углами падения луча $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ на одну и ту же поверхность?

6. Две лампы с силой света 25 кд и 100 кд расположены на расстоянии 1 м друг от друга. В каком месте нужно расположить его между источниками, чтобы обе стороны фотометра освещались одинаково?

7. Освещается ли лист бумаги с поверхностью 300 см^2 лампочкой сила света 100 кд? На него падает 0,5 процентов всего света от лампочки. Найдите, освещенность лист этой бумаги.

8. Прямые падающие лучи солнца создают освещенность 10^5 Лк . На каком расстоянии от лампы, сила света которой равен 1000 кд, можно создать такую же освещенность?

9. Световые лучи освещаются от вертикально падающей поверхности лампой мощностью 500 Вт, составляет 28 лк. Расстояние между лампой и поверхностью 5 м. Найдите светопропускание лампы (лм/Вт).

10. Для выполнения одной работы настольная освещенность должна равна 10 лк. На какую высоту от центра стола нужно установить лампу мощностью 100 кд?

11. Определите, освещенность поверхности Земли нормальным падающим солнечным светом. Яркость Солнца $1,2 \cdot 10^9 \text{ нт}$.

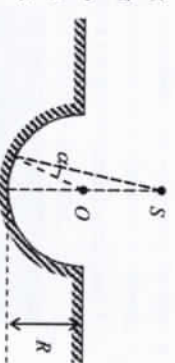
12. В Средние века для освещения морских судов ночью на мачте вешали фонари. На каком расстоянии от основания мачты освещенность горизонтальной поверхности будет равна 2 лк, если на мачте высотой 5 м висит фонарь с силой света 200 кд?

13. Стол квадратной формы с поверхностью 9 м^2 должен освещаться таким образом, чтобы освещенность углов стола была максимальной. На какую высоту повесить светильник от центра стола?

14. Над освещаемой площадью на высоте 15 м устанавливается прожектор. Освещенность горизонтальной поверхности в точке равна 1 лк, а освещенности вертикальной поверхности равна 2 лк. Чему равна сила света лампы в этом направлении?

15. Потолок комнаты высотой 3 м состоит из зеркала. На высоте 2,5 м от пола висит маломощную лампу с силой света 200 кд (возьмем лампу точечную). Определите, освещенности пола под лампой.

16. Над полусферой на высоте, равной диаметру полусферы, находится точечный источник с силой света 50 кд. Определить освещенность в точке полусферы, куда лучи света падают под углом 35° . Радиус полусферы равен 1 м.



17. Подвешенная к потолку лампа обеспечивает сила света 60 кд в горизонтальном направлении. Если на стене на расстоянии 2 м от лампы висит большое зеркало, то какой световой поток подается на изображение площадью $0,5 \text{ м}^2$, которое висит на противоположной стене на расстоянии 2 м от лампы?

18. На глубине Н от поверхности воды находится точечный источник, сила света которого равна I. Это экран на высоте Н над поверхностью воды в одной вертикали с источником. Показатель преломления света воды равен n.

Определите освещенность на экране, не обращая внимания на поглощение световых лучей в воде.

19. Освещенность рабочих мест на станках должна составлять 20 лк и должна быть освещена двумя лампами, расположенными симметрично. Светильники подвешивают на высоте 1,5 м от станка, а расстояние между ними 2 м. Какой должна быть сила света каждой лампы?

20. Дневная люминесцентная лампа имеет цилиндрическую форму длиной 420 мм и диаметром 22 мм. Сила света в направлении, перпендикулярном оси цилиндра лампы, равна 65 кд. Определите яркость лампы.

● ГЛАВА II. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Геометрическая оптика—раздел физики, изучающий законы отражения и преломления света, оптические приборы, глаз и его дефекты и др. В геометрической оптике, рассматривая луч света как прямую линию, по которой распространяется световая энергия, его внутреннее свойство не учитывается. Считается, что луч света не меняет своего направления при столкновении с препятствиями и щелями, не отклоняется в сторону геометрической тени.

В геометрической оптике действует в основном на основе 4 законов:

1. Закон распространения световых лучей по прямой линии;
2. Закон независимости световых лучей;
3. Закон отражения света;
4. Закон преломления света.

Из них при решении задач мы часто сталкиваемся с законами отражения и преломления света.

§ 3. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА. ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО И ПОСТРОЕНИЕ В НЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

Закон прямолинейного распространения света:

Как известно, ближайшее расстояние между двумя точками является частью прямой линии. Луч—это прямая, идущая из одной точки в бесконечность (они известны науке геометрии). А луч света—это линия в направлении распространения световой энергии от источника света (рис.3.1). Другими словами, луч света—это прямая линия без начала и конца.



Рисунок 3.1



Рисунок 3.2

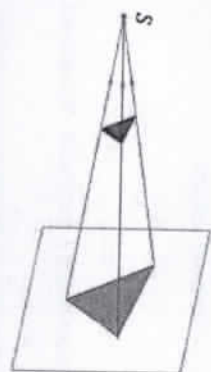
В однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Под однородной средой мы понимаем среду, оптические свойства которой абсолютно одинаковы во всех точках. Этот закон встречается в

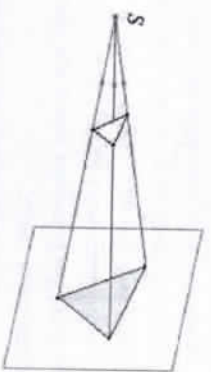
трудах греческого философа Евклида, жившего в III веке до н. э. об оптике.

Закон распространения света прямолинейно можно рассматривать как закон, хорошо определенный в эксперименте. Этот закон имеет очень глубокий смысл, а само понятие прямой линии-это понятие, которое давно пришло из оптических наблюдений. Сейчас мы попробуем объяснить несколько природных явлений и примеров на основе закона распространения света по прямой линии.

Во время рассеивания тумана в лесу можно четко наблюдать, как солнечные лучи проходят по прямым линиям сквозь ветви деревьев и падают на землю (рис.3.2). Наблюдения над резкими тенями, образованными точечными источниками, или изображениями, образованными отверстиями, подтверждают, что свет является результатом рассеяния света точно по прямой линии (рис.3.3).



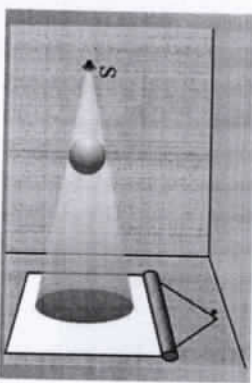
a)



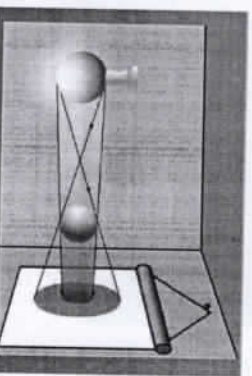
b)

Рисунок 3.3

Если источник света точечный, то тень предметов на экране будет отчетливо черным (рис.3.4-а). Если источник света имеет значительный размер, не будучи точечным, то кроме четкого оттенка объектов на экране в черно-белых тонах появляется и полутень темного (или коричневого) тона (рис.3.4-б). Темный тон в этом полушарии сам по себе не является однородным, он меняется от темно-коричневого до светло-черного по мере удаления от тени. Причина образования полушария заключается в том, что лучи, исходящие от источника, попадают в эту область не целиком, а частично



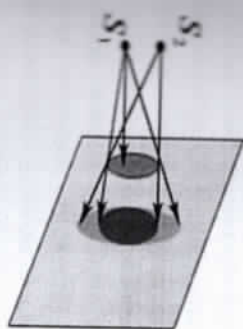
a)



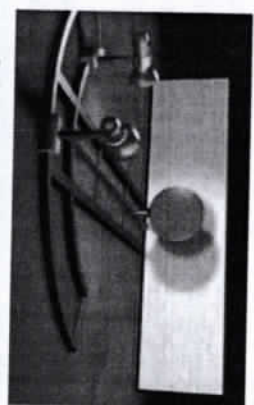
b)

Рисунок 3.4

Тень и полушарие также могут быть образованы двумя источниками света (рис.3.5-а). При этом зоны тени и полушария остаются строго неизменными. Если мы хотим наблюдать за процессом их динамического изменения, то требуется возможность сдвига источников света на 3.5-в, как на рисунке.

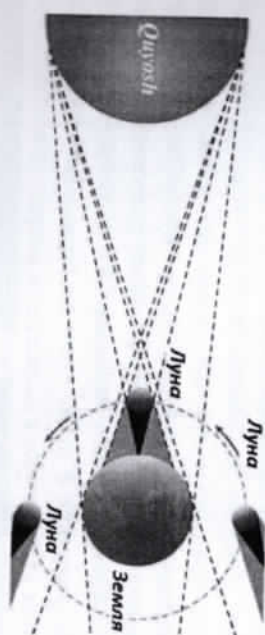


a)

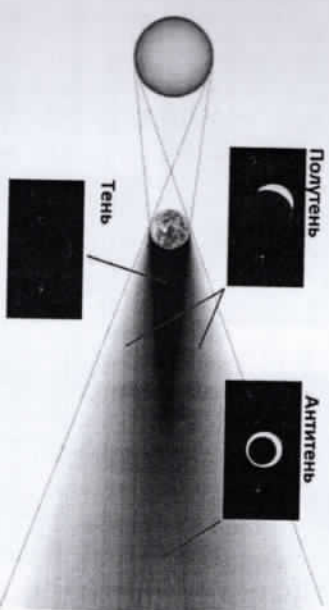


b)

Рисунок 3.5



a)



b)

Рисунок 3.6

Закон распространения световых лучей по прямой линии можно встретить и в природных явлениях, происходящих с небесными телами и небесными светилами. Например, явления солнечных и лунных затмений также могут быть объяснены на основе этого закона. На рисунке 3.6-а изображены зоны тени и полушария на обратной стороне Луны, из чего можно будет сказать, в каких местах полное затмение Солнца, а в каких

частичное. На рисунке 3.6-б изображены зоны тени, полушария и антипина на обратной стороне Земли, из которых можно получить информацию о том, в каких зонах Солнце вообще не видно, частично видно и полностью не видно.

Можно привести еще много примеров закона распространения света по прямой, на основе этого закона можно решить многие геометрические и астрономические задачи. Но есть задачи, которые не могут быть решены этим законом. Например, отклонения света от геометрической тени начинают ощущаться, когда световой пучок сталкивается с гораздо меньшими телами ($\ell < 15-20$ мкм). Это явление называется дифракцией. Кроме того, световые лучи распространяются по кривой в неоднородной прозрачной среде. Например, примером этого является явление рефракции солнечного света при его проникновении в атмосферу. Подробнее о явлениях дифракции и рефракции, мы расскажем в волновой оптике.

Закон независимости световых лучей:

Мы хорошо знаем из механики, что тела, движущиеся по пересекающимся прямым (например, камни бильярда), сталкиваются и меняют направление своего движения (рассеиваются). Вполне естественно возникает вопрос, что световые лучи также рассеиваются, когда они пересекаются. Многочисленные проведенные опыты подтверждают, что такого явления рассеяния в лучах света не происходит. Давайте возьмем некоторые из этих экспериментов в качестве примера.

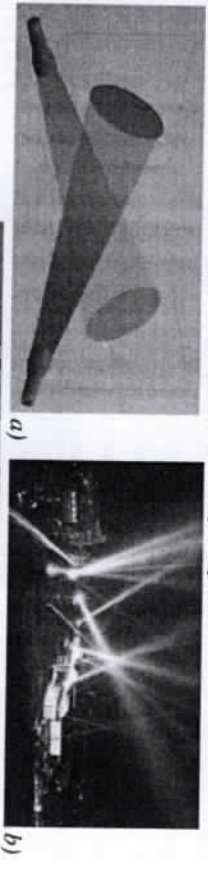


Рисунок 3.7 3.7-г-д

Экспериментируя на изображении 3.7-а, можно наблюдать, что цвета на экране не меняются при пересечении лучей, образованных фонарями, излучающими различные монохроматические лучи. Даже при выключении

лампы поочередно никаких изменений не происходит. Следовательно, до тех пор, пока один световой поток не будет мешать другому световому потоку. Этому мнению также можно доверять из явления на картинке 3.8-б. Когда источники света вращаются, световые потоки, которые они генерируют, пересекаются по-разному, но никакого рассеивания не наблюдается. Аналогичная ситуация описана на рис.3.7-с. Ночью лучи, исходящие от фар автомобиля, приближающихся к перекрестку, пересекаются, но не рассеиваются.

Изложенные выше пункты подтверждают закон независимости световых лучей.

Когда лучи света пересекаются, они не отклоняются от первоначального направления, рассеивания не происходит.

Закон независимости светового луча абсолютно верно для обычных интенсивностей (например, интенсивностей света, генерируемых солнечными лучами и компактными огнями). Однако для световых лучей сверхвысокой интенсивности (например, в лазерных лучах с интенсивностью, в миллионы, миллиарды раз превышающей обычную) этот закон становится менее точным. В таких случаях наблюдается частичное рассеивание лучей при пересечении световых пучков. Но мы пока не изучаем с такими лучами света.

Закон отражения света:

При игре в баскетбол под любым углом, под которым мяч ударяется о землю, мяч отскакивает от земли под таким углом, что траектории падения и возврата мяча лежат в одной плоскости. То же самое должно было произойти по закону сохранения импульса. Точно так же аналогичное явление происходит, когда луч света падает на блестящую поверхность. Это называется законом отражения света.

Падющий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела двух сред, стоящий в точке падения луча, лежат в одной плоскости. Угол отражения равен углу падения (рис.3.8).

$$\alpha = \gamma \quad (3.1)$$

Для объяснения закона отражения света необходимо будет отметить характерные лучи и углы (рис.3.8).

- 1 – падающий свет;
- 2 – отраженный луч;
- n – нормаль, перпендикулярная в точку падения;
- α – угол падения;
- γ – угол отражения

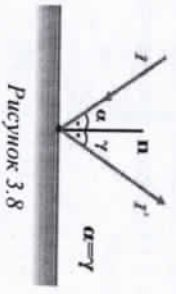


Рисунок 3.8

На рисунке 3.9 приведено пространственное изображение закона отражения света.

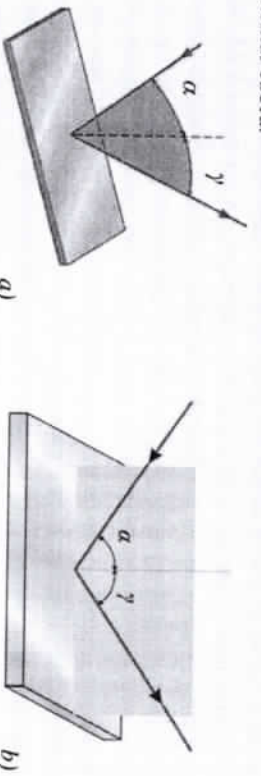


Рисунок 3.9

Угол между лучом I падающим на зеркало, и лучом I' , отражающимся из зеркала, всегда равен $\varphi = 2\alpha$ (рис.3.10-а).

Угол между биссектрисами луча I , падающего на зеркало, и луча I' , отражающегося из зеркала, всегда равен α (рис.3.10-б).

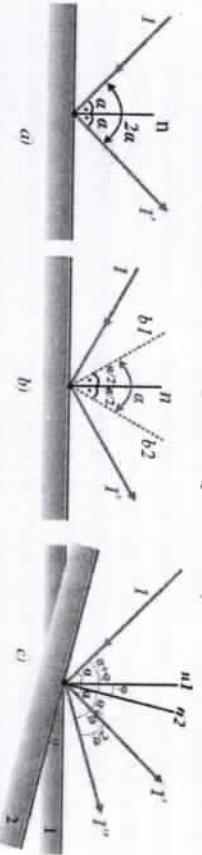


Рисунок 3.10

Если зеркало повернуть на угол φ , то луч, отражающийся от зеркала, повернется на угол 2φ (рис.3.10-в).

Если зеркало начинает вращаться с угловой скоростью ω , луч, отражающийся из зеркала, начинает вращаться с угловой скоростью 2ω .

Плоское зеркало и построение изображения в нем:

Поверхность плоского зеркала обладает свойством отражать свет, падающий на ее поверхность, благодаря своему блеску. Согласно закону отражения света, свет отражается под тем же углом, под каким бы углом он упал на зеркальную поверхность. Глядя в зеркало, мы видим отражение себя и других объектов (рис.3.11). Итак, как построить изображение в зеркале?



Рисунок 3.11

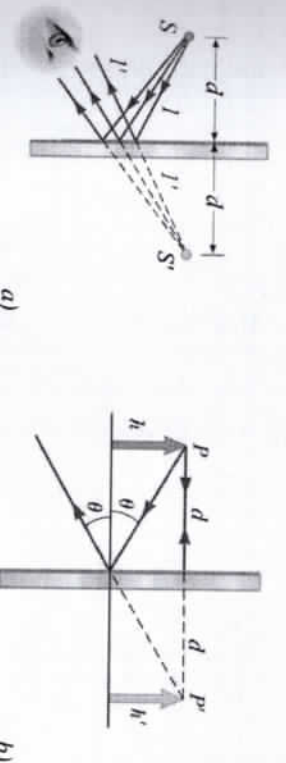


Рисунок 3.12

Как видно из рисунка 3.12-а, лучи, исходящие от источника S , отражаются из зеркала и попадают в глаз наблюдателя как лучи I' . Но наблюдатель видит I' луч так, как будто он исходит от источника S' . Обратные продолжения всех лучей, отражающихся с зеркальной поверхности, пересекаются в одной точке S' . В точке S' возникает изображение источника S , который называется мнимым источником. На рисунке 3.12-б, плоское зеркале образовано изображение предмета, имеющего размерность h . При этом выбираются 2 характерных луча, исходящих из точки P , и их противоположные продолжения пересекаются в точке P' .

Когда источник S находится на расстоянии d от зеркальной поверхности, его изображение S' построится точке в зеркале на расстоянии d . Здесь наблюдатель видит изображение на расстоянии d зади зеркала (рис.3.13). Т. к. обратное продолжение лучей, исходящих от источника S и отражающихся с поверхности зеркала, пересекается именно в точке S' . Наблюдатель, который видит лучи, отражающиеся с зеркальной поверхности, видит их так, как будто они исходят из точки S' .

Если расстояние между предметом в точке A и зеркалем K равно x , тогда расстояние между изображением A' и зеркалем так же равно x . Расстояние между предметом и его изображением равно $AA' = 2x$ (рис.3.14-а).

Если объект прибывает в точку A_2 , приближаясь к расстоянию Δx от точки A_1 до зеркала, то изображение придёт в точку, приближаясь к расстоянию Δx от точки в зеркале. А расстояние между предметом и его изображением уменьшится на расстояние $A_1A_1' - A_2A_2' = 2\Delta x$ (рис.3.14-б).

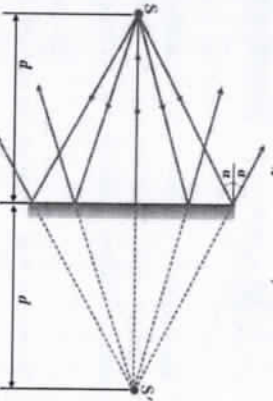


Рисунок 3.13

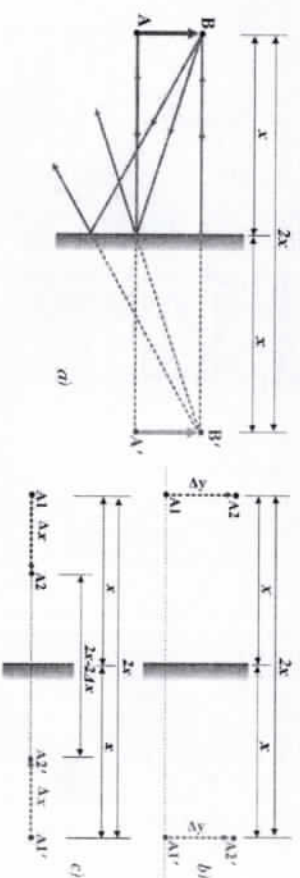


Рисунок 3.14

Если объект прибывает в точку A_2 из точки A_1 , двигаясь на расстояние Δu , параллельное зеркалу, то изображение придёт в точку в зеркале, двигаясь от точки Δu приближаясь к точке A'_2 параллельно к зеркалу. При этом расстояние между предметом и его изображением остаётся прежним (рис.3.14-в).



Рисунок 3.15

Для того чтобы человек мог видеть в зеркале все свое тело, высота зеркала должна быть не менее половины высоты человека (рис.3.15). Это можно доказать по закону отражения света или по подобию треугольников. Видеть собственное изображение человека в зеркале – это то же самое, что снять зеркало и поставить на место образа своего двойника.

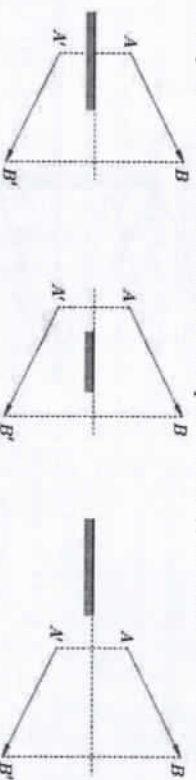


Рисунок 3.16

Вопрос в том, зависит ли размер зеркала от формирования изображения. Можно ответить, что это не зависит. Оказывается, что независимо от того, как объект АВ расположен относительно зеркала, как показано на рисунке

3.16, его $A'B'$ - изображения все равно будет сформирован. Потому что, если мы представим произвольную точку пересечения А или В или АВ как источник света, лучи от этого источника все равно будут присутствовать в зеркале.

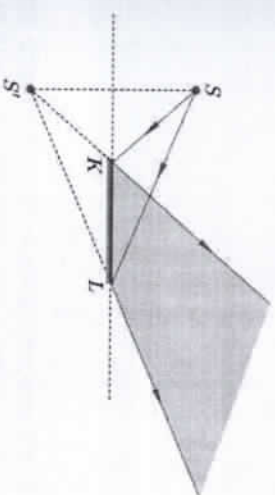


Рисунок 3.17

Возникает вопрос, с каких мест можно будет наблюдать изображение источника света S в зеркале издалека. Если плоское зеркало бесконечно длинное, то S' можно будет наблюдать из произвольной точки над горизонтальной осью на рисунке 3.17. Если размер зеркала ограничена, как на рисунке 3.17, то наблюдать изображения S' можно будет только из области, изображенной на рисунке.

Путь света в плоских зеркалах:

Закон отражения света широко используется в технике и жизни. В любом случае, биссектриса падающего и отражающегося света даёт нормаль зеркалу, тогда как нормаль перпендикулярна к зеркалу.

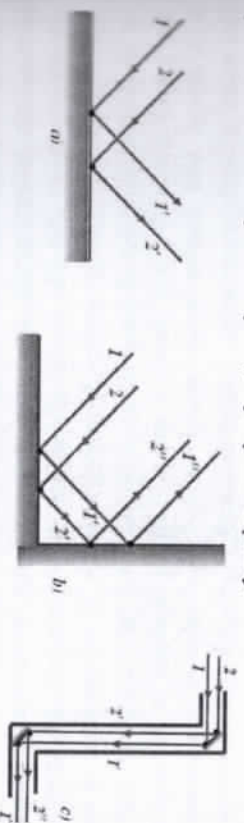


Рисунок 3.18

На рисунке 3.18 изображены пути двух параллельных лучей 1 и 2 в плоском зеркале, в прямоугольном зеркале и в перископе. Как видно из рисунка, каждый раз, когда лучи отражаются из зеркала, лучи меняются местами.

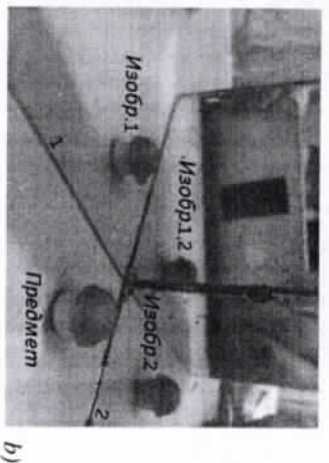
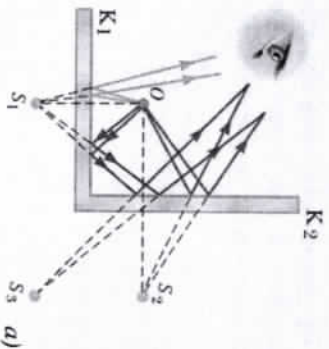


Рисунок 3.19

Если человек хочет увидеть изображение какого-либо предмета в двух зеркалах, расположенных под углом 90° друг к другу, то изображение формируется из тех же плоскостей, что и на рисунке 3.19-а. При этом через обратное продолжение лучей, отражающихся от зеркал, определяется место изображений. Так получается, что в данном случае образовалось бы 3 изображения. 3.19-б, а на рисунке изображена полученная в эксперименте картина того же состояния.

Объяснение причины закона отражения света:

Закон отражения света может быть доказан двумя различными способами. Первый метод-это закон сохранения импульса, в котором мы рассматриваем свет как поток корпускул (частиц), как сказал бы Ньютон. Каждая частица имеет свой вектор импульса $\vec{p}$ в направлении своего движения (но, подробнее о корпускулярно – квантовой природе света мы познакомимся в главе IV). Пусть пучок света падает под углом α к поверхности и отражается под углом γ ($\gamma \neq \alpha$) к поверхности (рис.3.20). Давайте выделим одну из корпускул. Пусть вектор его импульса равен до удара о поверхность $\vec{p}_1$ и после удара $\vec{p}_2$. Пусть проекции этих векторов импульсов на оси координат будут P_{1x} , P_{1y} и P_{2x} , P_{2y} . Согласно закону сохранения импульса, проекция импульса на произвольную ось, также является сохраняющейся величиной. Из этого получаем следующую выражению:

$$P_{1x} = P_{2x}, \quad P_{1y} = P_{2y}$$

Теперь, когда мы используем тангенсы углов падения и отражения, возникает закон отражения света.

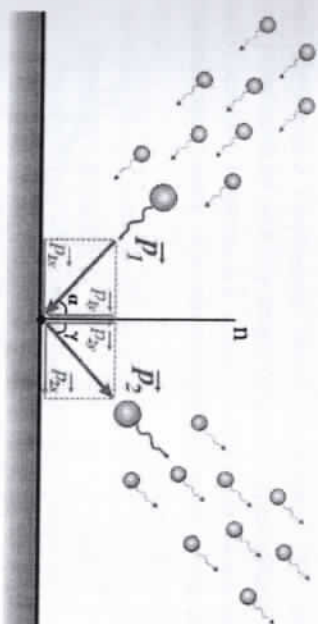


Рисунок 3.20

$$\text{tg } \alpha = \frac{P_{1x}}{P_{1y}} = \frac{P_{2x}}{P_{2y}} = \text{tg } \beta, \rightarrow \alpha = \beta$$

Получается, что угол падения равен углу отражения. В этом также можно убедиться, посмотрев на рисунок 3.21. На рис.3.21-а изображено, что пучок параллельных лучей, падающий на плоскую поверхность под углом, отражается под таким же углом, и отражающиеся лучи также не теряют своей параллельности. На рисунке 3.21-б изображено, что при падении на шероховатого поверхность пучка одинаковых параллельных лучей, отраженные лучи рассеиваются во всех направлениях. Ситуация на рисунке 3.21 была бы повторена, даже если бы на месте светового потока был поток маленьких шариков.

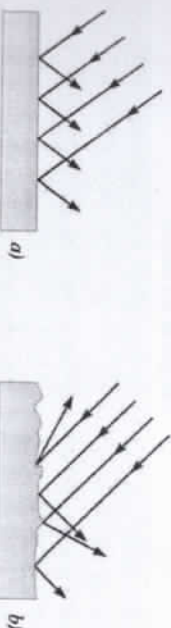


Рисунок 3.21

Теперь давайте докажем закон отражения света вторым способом. Этот метод называется принципом наименьшего воздействия.

Свет проходит из одной точки в другую по наименьшему, то есть минимальному оптическому пути. При любой траектории, отличной от той, по которой проходит луч света, оптический путь увеличивается.

Мы хорошо знаем, что в пространстве луч света проходит из одной точки в другую только по прямой линии. Ближайшим расстоянием между этими точками является длина отрезка, соединяющего эти точки. Этот принцип сохраняется, даже если свет проходит из одной точки в другую, отражаясь с поверхности. Другими словами, луч света распространяется вдоль линии горизонта, как до того, как он достигнет поверхности, так и после отражения

с поверхности. Но количество таких траекторий бесконечно велико. На рисунке 3.22 изображены три траектории – MAN, MBN и MCN на примере бесконечного числа траекторий. Здесь мы должны указать, какая длина траектории является самой короткой среди этих траекторий. Возьмем клетки как квадрат со стороной 1м.

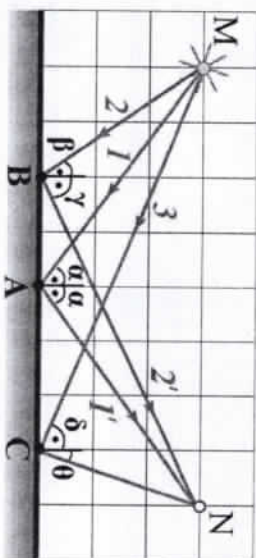


Рисунок 3.22

$$\ell_1 = MA + AN = \sqrt{3^2 + 4^2} + \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 + 5 = 10 \text{ м}$$

$$\ell_2 = MB + BN = \sqrt{3^2 + 2^2} + \sqrt{6^2 + 3^2} = \sqrt{13} + 3\sqrt{5} \approx 10,314 \text{ м}$$

$$\ell_3 = MC + CN = \sqrt{3^2 + 7^2} + \sqrt{1^2 + 3^2} = \sqrt{58} + \sqrt{10} \approx 10,778 \text{ м}$$

Таким образом, оказывается, что из трех выбранных длин траекторий самой короткой была $MA=AN$, то есть траектория $\alpha=\beta$. Даже если бы была выбрана другая траектория, она все равно вышла бы на 10 метров длиннее.

Вопросы по теме

1. Опишите прямолинейное закон распространения света и объясните его на примерах из жизни.
2. Опишите закон независимости световых лучей и объясните его на примерах из жизни.
3. Укажите на чертеже угол падения и угол отражения.
4. Опишите закон отражения света.
5. Как построить изображение точки в плоском зеркале? Сделайте плоское зеркальное отображение точки и карандаша.
6. Чем равно расстояние между предметом и изображением?
7. Какие явления происходят, когда объект приближается к плоскому зеркалу, удаляется, движется параллельно зеркалу и поворачивает зеркало?
8. Нарисуйте пути параллельных лучей в двух плоских зеркалах, расположенных под углом.
9. Понять закон отражения света по закону сохранения импульса, протина свет за поток частиц.
10. Понять закон отражения света по принципу наименьшего воздействия.

Решение задачи:

1. Плоское зеркало движется перпендикулярно к источнику света со скоростью 1,5 м/с. Со скольких см/с и в какую сторону должен двигаться источник света, чтобы его изображение в зеркале было неподвижным?

А) 1,5, от зеркала Б) 3, к зеркалу В) 3, от зеркала Д) 1,5, к зеркалу

Дано: $v_1 = 1,5 \text{ м/с}$

$v_2 = 1,5 \text{ м/с}$

$v_n = ?$

Решение: Усложнение: Согласно принципу относительности движения, скорости относительно движущихся тел относительно друг друга равны сумме их скоростей, т. е. $v_n = v_1 + v_2 = 3 \text{ м/с}$, и в зеркало должно двигаться в направлении движения.

Ответ: в) 3, из зеркала.

2. Луч света падает на одно из двух зеркал, расположенных под углом 30° друг к другу. Каким будет угол между лучом, отражающимся от обоих зеркал, и лучом, падающим на него?

Дано: $\gamma = 35^\circ$

Решение:

Если предположить, что угол падения луча на 1-ю зеркальную поверхность равен углу γ его отражения γ_0 , а угол падения на второе зеркало равен углу φ его отражения равен φ_0 . По закону отражения света известно, что $\gamma = \gamma_0$ и $\varphi = \varphi_0$. Если обозначить искомый угол θ , то

$$\theta = 2\gamma + 2\varphi \text{ и } \alpha + 90^\circ - \varphi + 90^\circ - \gamma = 180^\circ$$

решая уравнения, получаем выражение $\theta = 2\alpha$.

$$\theta = 2 \cdot 30^\circ = 60^\circ.$$

Ответ: 60°.



§ 4. ПОНЯТИЕ О СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛАХ. ФОРМУЛА ЗЕРКАЛА. УВЕЛИЧЕНИЕ ЗЕРКАЛА

Сферическое зеркало и его виды, путь света в сферическом зеркале:

Плоская сферическая поверхность, обладающая свойством отражать свет, называется сферическим зеркалом. Существуют вогнутые и выпуклые типы сферических зеркал. На практике при изготовлении сферических зеркал берется не вся сфера, а определенная часть сферы. Центр кривизны зеркала называется центром кривизны, а ось симметрии-главной оптической осью. Точку К, в которой сферическая поверхность пересекается с главной оптической осью, называют оптическим центром (рис.4.1).

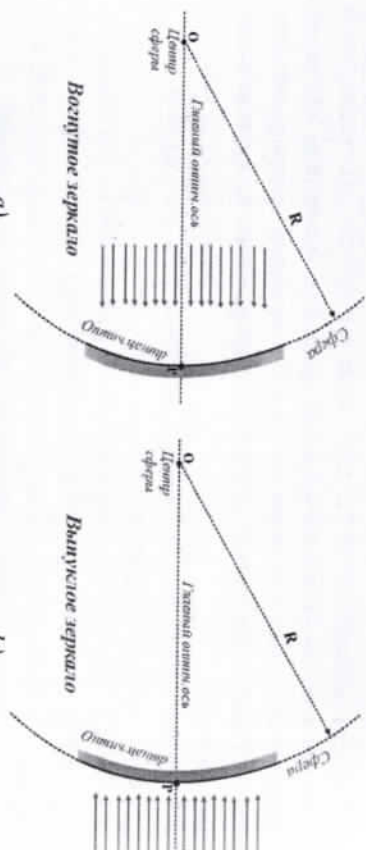


Рисунок 4.1

Если луч света отражается от внутренней поверхности сферической поверхности, такое зеркало называется вогнутым зеркалом. При падении светового луча, параллельного главной оптической оси вогнутого зеркала, отраженные световые лучи приобретают свойство собираться, а собранные лучи пересекаются в одной точке F , называемой фокусом (рис.4.2-а). Плоскость, проведенная от фокуса отражения перпендикулярно главной оптической оси, называется фокальной плоскостью. Если пучок параллельных лучей падает на вогнутое зеркало под углом, то отраженные лучи пересекаются в конечной точке фокальной плоскости (рис.4.2-б).

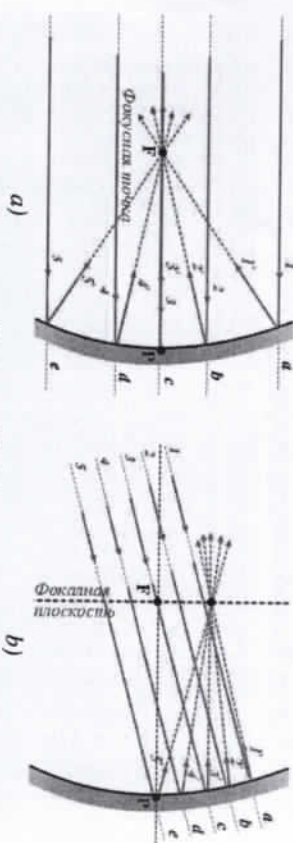


Рисунок 4.2 а, б

Поскольку пучок параллельных лучей, падающих на вогнутое зеркало, собирается в фокальной точке или точке в фокальной плоскости, что произойдет, если мы поместим источник света в фокальную точку или точку в фокальной плоскости? — При этом получается пучок параллельных лучей, как показано на рисунке 4.3 ниже.

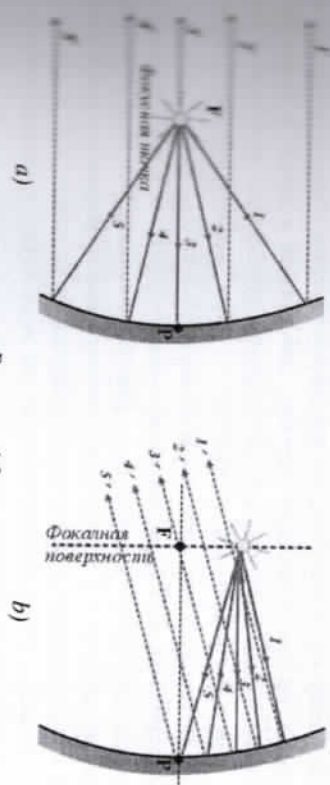


Рисунок 4.3

Если луч света отражается от внешней поверхности сферической поверхности, такое зеркало называется выпуклым зеркалом. Лучи света, отражающиеся от выпуклого зеркала, обладают свойством рассеивания, когда противоположные продолжения рассеянных лучей пересекаются в одной точке F , называемой фокусом (рис.4.4-а). Если в выпуклое зеркало под углом падает пучок параллельных лучей, то противоположные продолжения отраженных лучей пересекаются в одной точке фокальной плоскости (рис.4.4-б).

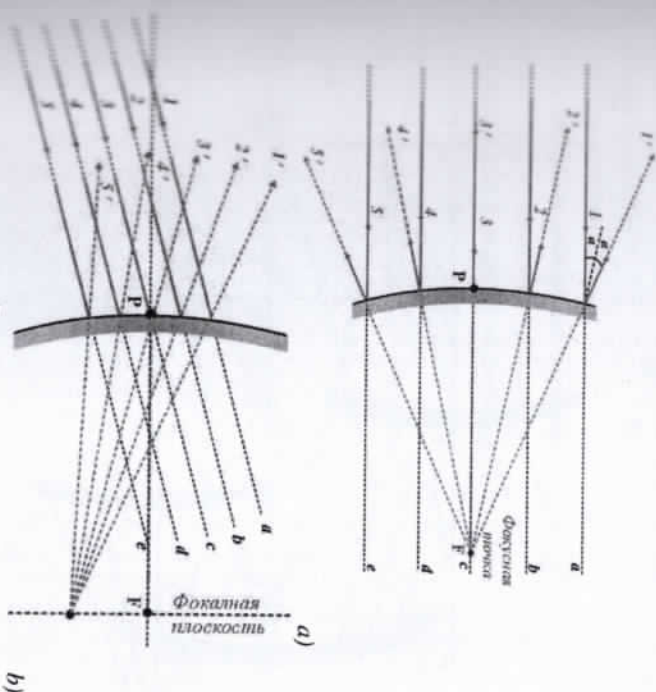


Рисунок 4.4

Поскольку противоположные продолжения пучка параллельных лучей, падающих на рассеивающую зеркалу, собираются в точке в фокальной плоскости, что произойдет, если мы направим лучи в фокусную точку или точку в фокальной плоскости? — При этом получается пучок параллельных лучей, как показано на рисунке 4.5-а, б.

Что произойдет, если источник света будет помещен в фокусе рассеивающей зеркала или в точку в фокальной плоскости? — При этом лучи сильно рассеиваются в зеркале, противоположные продолжения рассеянных лучей концентрируются на половине фокусного расстояния, т. е. в точке $F/2$ или в точке в плоскости, проходящей от этой точки перпендикулярно к главной оптической оси (рис. 4.5-с, д).

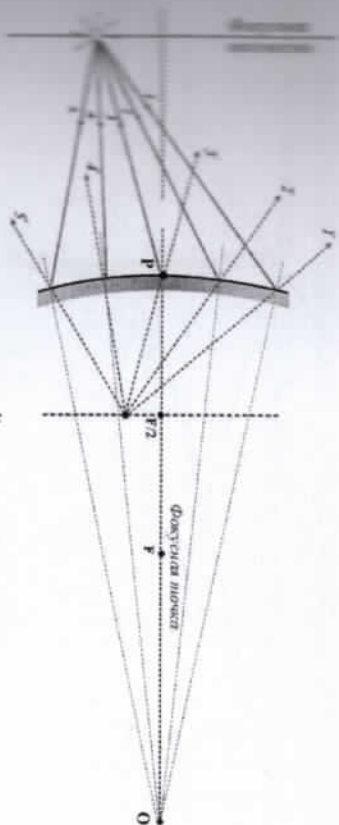
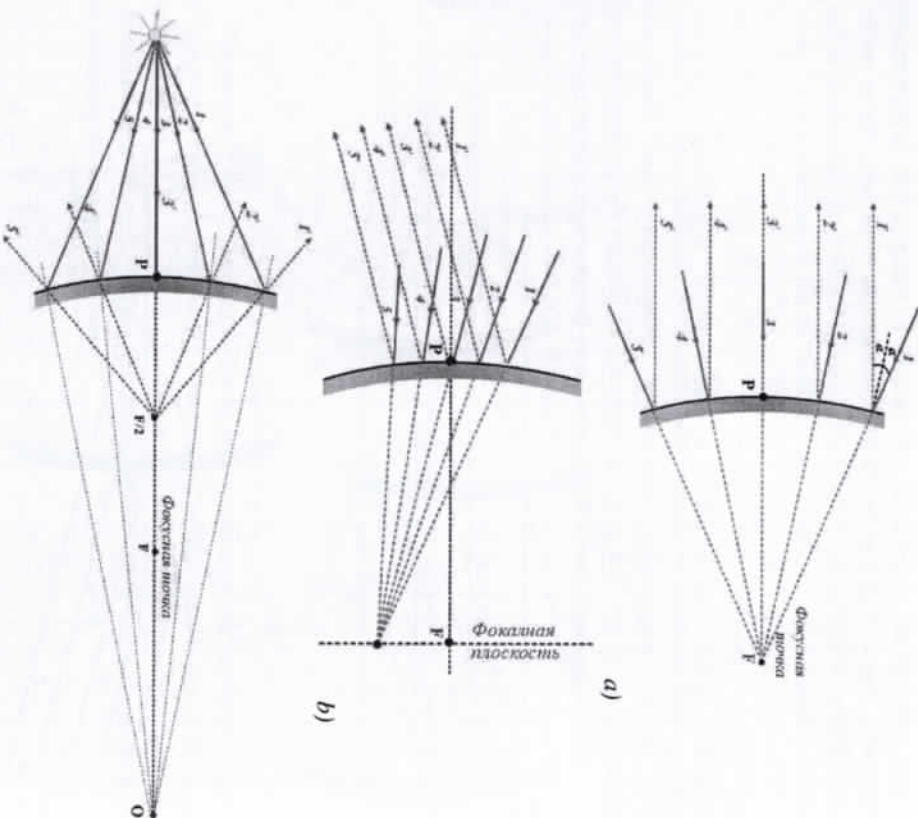


Рисунок 4.5

Немного проще, как построит изображение источника света или предмета в выпуклом зеркале, о чем мы уже говорили в начале темы. Но, построит изображение предмета в сферических зеркалах немного сложнее, об этом мы сможем узнать в следующей теме.

Формулы зеркал, увеличение зеркала:

Напишите вместе некоторые обозначения, прежде чем приводить формулу зеркала (рис. 4.7-а).

$AB = h$ — высота предмета;

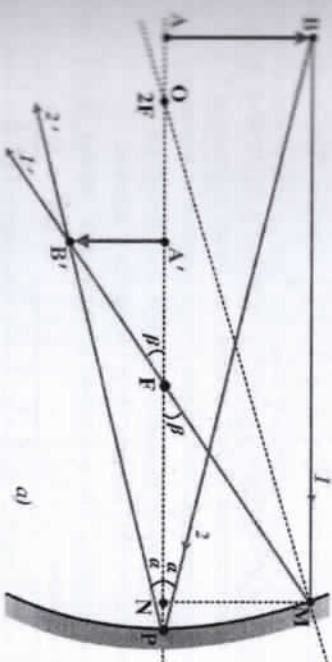
$A'B' = H$ — высота изображения;

$OF = FR = f$ — фокусное расстояние зеркала;

$AP = d$ — расстояние от зеркала до предмета;

$A'P = l$ — расстояние от зеркала до изображения;

K — увеличение зеркала.



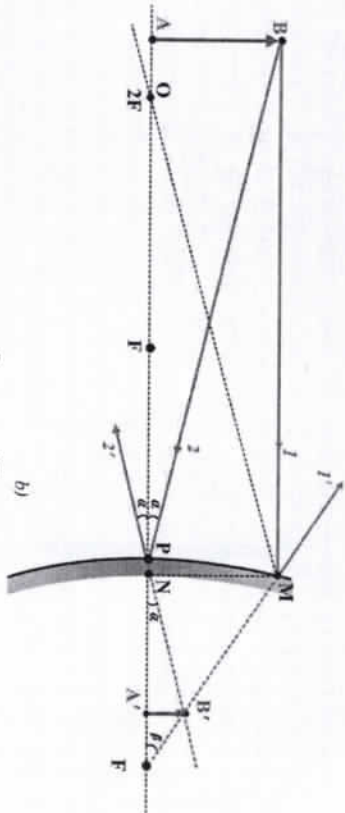


Рисунок 4.7

Из рисунков 4.7-а, б формируем формулу зеркала. И из $\triangle ABR$ и $\triangle A'B'R$ получаем

$$\begin{cases} \frac{AB}{AP} = \frac{h}{d} \\ \frac{A'B'}{A'P} = \frac{h'}{d'} \end{cases} \Rightarrow \frac{h}{d} = \frac{h'}{d'} \Rightarrow \frac{h}{h'} = \frac{d}{d'} = K \quad (4.1)$$

Из $\triangle MNP$ и $\triangle A'B'P$ получаем следующие формулы

$$\begin{cases} \frac{MN}{FN} = \frac{AB}{FP} = \frac{h}{F} \\ \frac{A'B'}{A'P} = \frac{h'}{f} \end{cases} \Rightarrow \frac{h}{F} = \frac{h'}{f} \Rightarrow \frac{h}{h'} = \frac{F}{f} = K \quad (4.2)$$

Выравнивая формулы увеличения в двух системах, получаем следующие результаты.

$$K = \frac{h}{h'} = \frac{f - F}{F} \Rightarrow f - F = f F / (F d) \Rightarrow \frac{1}{F} - \frac{1}{d} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$$

Итак, мы сформировали формулу $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}$ зеркала. При использовании

формулы зеркала величины d, f, F могут принимать различные знаки.

Если зеркало вогнутое $F > 0$, а если оно будет выпуклым $F < 0$.

Если источник (предмет) действительное $f > 0$, а если оно мнимым $f < 0$.

Но мнимый источник вообще не встречается в задачах.

Формулы зеркала для вогнутых и выпуклых зеркал будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (4.3)$$

Вогнутое в зеркале $d > F$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad (4.3a)$$

Вогнутое в зеркале $d < F$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} \quad (4.3b)$$

Выпуклое зеркало

Вещи, расположенные относительно размера изображения к размеру предмета, называются увеличением зеркала.

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad (4.4)$$

Зеркальное увеличение также может быть выражено через фокусное расстояние. Чтобы найти увеличение в каждом случае, мы будем использовать формулу зеркала для этих случаев.

$$1) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f - F}{F}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f - F}{F}$$

$$2) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{d} + \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f + F}{F}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{d} + \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f + F}{F}$$

$$3) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f - F}{F}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F} \Rightarrow K = \frac{f - F}{F}$$

Следовательно, увеличение зеркала через фокусное расстояние можно выразить так:

$$K = \frac{f - F}{F} = \frac{f}{F} - 1 \quad (4.5)$$

Вогнутое в зеркале $d > F$

$$K = \frac{f + F}{F} = \frac{f}{F} + 1 \quad (4.5a)$$

Вогнутое в зеркале $d < F$

$$K = \frac{f - F}{F} = \frac{f}{F} - 1 \quad (4.5b)$$

Выпуклое зеркало

Выражение расстояния между зеркалом и изображением f и расстоянием между зеркалом и предметом d выражение через увеличения будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} f = (K + 1)F \\ d = \frac{K + 1}{K} F \end{cases} \quad (4.6)$$

Вогнутое в зеркале $d > F$

$$\begin{cases} f = (K - 1)F \\ d = \frac{K - 1}{K} F \end{cases} \quad (4.6a)$$

Вогнутое в зеркале $d < F$

$$\begin{cases} f = (1 - K)F \\ d = \frac{1 - K}{K} F \end{cases} \quad (4.6b)$$

Выпуклое зеркало

Изображение изображения вогнутых зеркалах. Частный случай для выпуклых зеркал:

Переворачивая предмет, находящийся перед зеркалом, в разные места, можно получить прямые и обратные изображения разных размеров, а также действительные и мнимовые изображения. А положение изображения

можно определить, измерив его или вычислив по формуле зеркала. На рисунке 4.8 приведены примеры действительных и реальных изображений, полученных в вогнутых зеркалах.

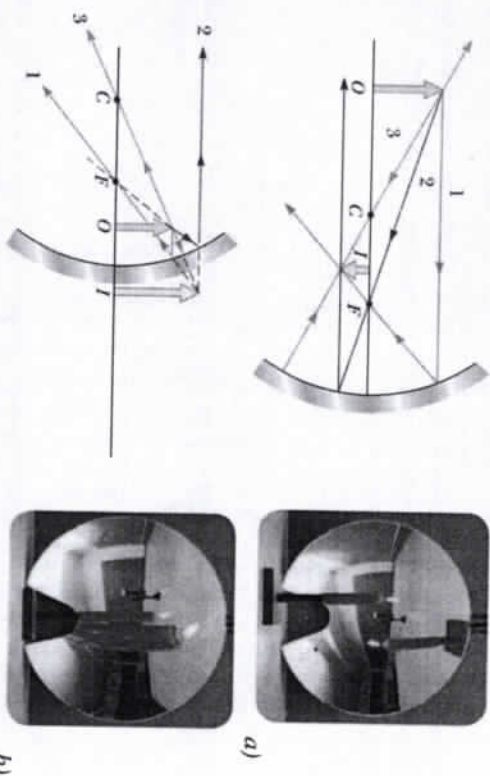


Рисунок 4.8.4.8-гизм

С помощью вогнутого зеркала можно построить изображение, увеличенное или уменьшенное, действительное или мнимое, прямое или перевернутое, в зависимости от местоположения предмета. Остановимся на каждом частном случае в отдельности.

1) при $d < F$: За зеркалом формируется прямое, мнимое, увеличенное изображение (рис.4.9-а).

1.1) при $d = \frac{1}{3}F$: за зеркалом, прямое, мнимое, увеличенное в 1,5 раза изображение.

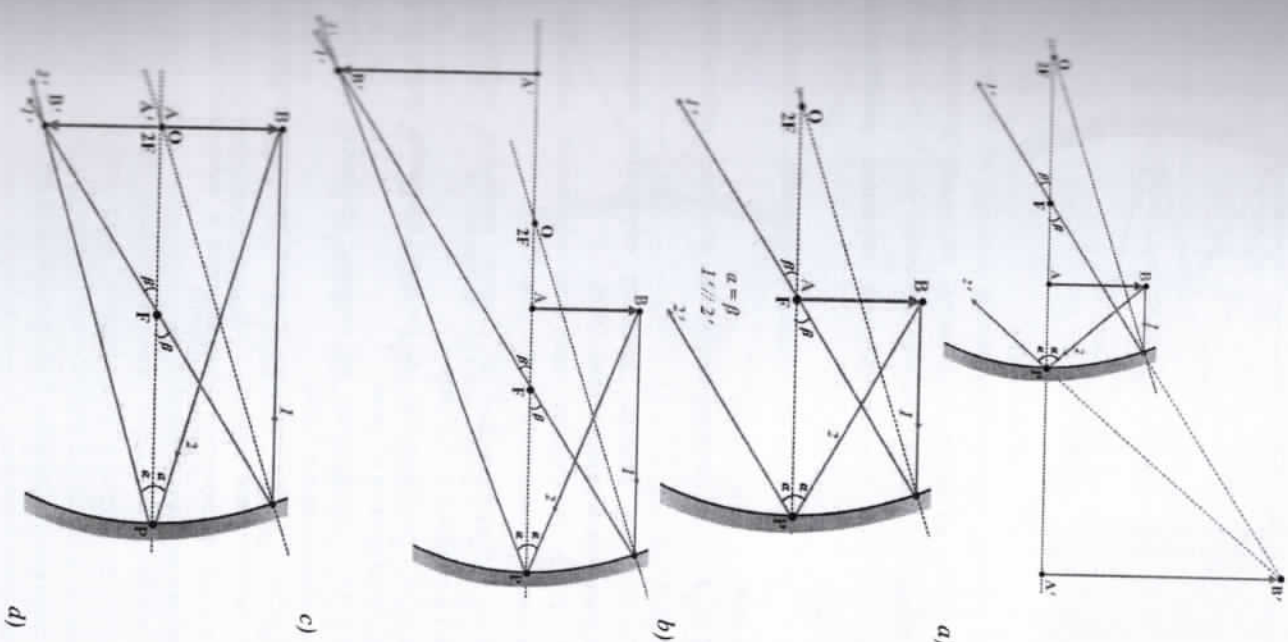
1.2) при $d = \frac{1}{2}F$: за зеркалом, прямое, мнимое, увеличенное в 2 раза изображение.

1.3) при $d = \frac{2}{3}F$: за зеркалом, прямое, мнимое, увеличенное в 3 раза изображение.

1.4) при $d = \frac{3}{4}F$: за зеркалом, прямое, мнимое, увеличенное в 4 раза изображение.

2) при $d = F$: изображение не формируется (рис.4.9-б).

3) при $F < d < 2F$: на стороне предмета формируется перевернутое, действительное, увеличенное изображение (рис.4.9-с).



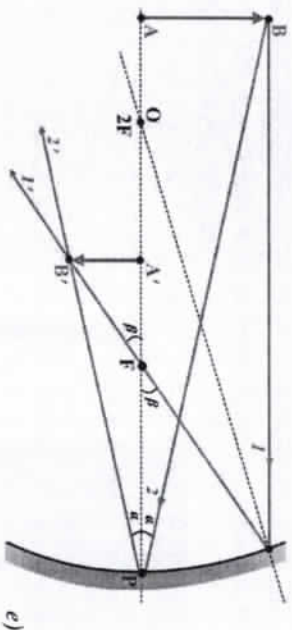


Рисунок 4.9

- 3.1) При $d = \frac{5}{3}F$: на стороне предмета, обратной, действительной, увеличенной в 1,5 раза.
 - 3.2) При $d = \frac{3}{2}F$: на стороне предмета, обратная, действительная, увеличенная в 2 раза.
 - 3.3) При $d = \frac{4}{3}F$: на стороне предмета, обратная, действительная, увеличенная в 3 раза.
 - 3.4) При $d = \frac{5}{4}F$: на стороне предмета, обратная, действительная, увеличенная в 4 раза.
 - 4) При $d = 2F$: на стороне предмета образуется перевернутое, действительное, равное изображению (рис.4.9-д).
 - 5) При $d > 2F$: на стороне предмета образуется перевернутое, действительное, уменьшенное изображение (рис.4.9-е).
 - 5.1) При $d = \frac{5}{2}F$: изображение на стороне предмета, перевернутое, действительное, уменьшенное в 1,5 раза.
 - 5.2) При $d = 3F$: изображение на стороне предмета, перевернутое, действительное, уменьшенное в 2 раза.
 - 5.3) При $d = 4F$: изображение на стороне предмета, перевернутое, действительное, уменьшенное в 3 раза.
 - 5.4) При $d = 5F$: изображение на стороне предмета, перевернутое, действительное, уменьшенное в 4 раза.
- Частный случай построения изображения в выпуклом зеркале и частный случай для вогнутого зеркала:**
- Перемещая предмет, находящийся перед выпуклым зеркалом, в разные места, можно получить правильные, мнимые, уменьшенные изображения разных размеров. А положение изображения можно определить, вычислив его по формуле зеркала. На рисунке 4.10 представлено мнимое изображение, полученное в выпуклом зеркале.

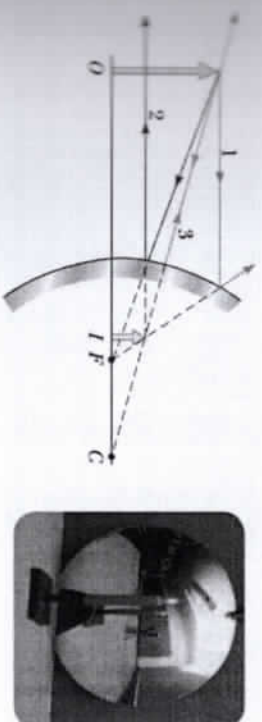


Рисунок 4.10

- 1) при $d \approx 0$: За зеркалом формируется прямое, мнимое, приблизительно равное изображение.
- 2) при $d = \frac{1}{2}F$: за зеркалом, прямое, мнимое, в 1,5 раза уменьшенное изображение.



Рисунок 4.9

- 3) при $d = F$: за зеркалом, прямое, мнимое, в 2 раза уменьшенное изображение.
 - 4) при $d = 2F$: за зеркалом, прямое, мнимое, в 3 раза уменьшенное изображение.
 - 5) при $d = 3F$: за зеркалом, прямое, мнимое, в 4 раза уменьшенное изображение.
- Выпуклое зеркальное отображение предмета, находящегося в бесконечности, становится мнимой точкой.

Вопросы по теме

1. Как построить изображение в вогнутом сферическом зеркале? Каким будет изображение в этом?
2. Как построится изображение в выпуклом сферическом зеркале? Каким будет изображение в этом?
3. Напишите формулы зеркала для вогнутого и выпуклого сферических зеркал.
4. Какое в вогнутом зеркале расстояние между изображением и предметом

будет равно нулю?

- Напишите формулы увеличения для возмущенных и выпуклых сферических зеркал.
- Можно ли построить мнимое изображение в возмущенном зеркале?
- Можно ли сформировать действительное изображение в выпуклом зеркале? А увеличенное изображение?
- Опишите несколько частных случаев возмущенного сферического зеркала.
- Опишите несколько частных случаев выпуклого сферического зеркала.

Решение задачи:

- На расстоянии 15 см от зеркала с фокусным расстоянием 20 см сформировалось уменьшенное мнимое изображение предмета. Какой тип зеркала? На каком (см) расстоянии находится предмет от зеркала?

Дано:

Решение:

$$F=20 \text{ см}$$

Уменьшенное мнимое изображение может быть сформировано только рассеивающим зеркалом, то есть выпуклым зеркалом. Следовательно, зеркало в задаче является выпуклым зеркалом.

$$f=15 \text{ см}$$

Теперь давайте прорешаем задачу, используя формулу зеркала для рассеивающего зеркала.

Теперь давайте прорешаем задачу, используя формулу зеркала для рассеивающего зеркала.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}, \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{F} + \frac{1}{d}, \rightarrow d = \frac{fF}{F-f} = \frac{15 \text{ см} \cdot 20 \text{ см}}{20 \text{ см} - 15 \text{ см}} = 60 \text{ см}$$

Ответ: выпуклое зеркало; 60 см

- Предмет находится перед выпуклым зеркалом на расстоянии mF . На каком расстоянии от зеркала образуется мнимое изображение и во сколько раз оно меньше самого предмета?

Дано:

Решение:

$$d=mF$$

Выпуклое зеркало, то есть рассеивающее зеркало, может формировать за зеркалом только уменьшенное мнимое изображение. Поэтому изображения в задаче станут уменьшенное-мнимым.

$$f=?$$

Теперь давайте прорешаем задачу, используя формулу зеркала для рассеивающего зеркала.

$$\frac{1}{K}=?$$

Теперь давайте прорешаем задачу, используя формулу зеркала для рассеивающего зеркала.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}, \rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{F} + \frac{1}{d} = \frac{1}{mF} + \frac{1}{mF}, \rightarrow f = \frac{m}{m+1} F$$

Теперь разберемся, во сколько раз изображение меньше предмета.

$$\frac{1}{K} = \frac{d}{f} = \frac{mF}{\frac{m}{m+1} F} = m+1$$

Ответ: $f = \frac{m}{m+1} F$; $m+1$ раз меньше

- С помощью возмущенного зеркала с фокусным расстоянием 5 см на расстоянии 10 см от зеркала сформировалось мнимое изображение предмета. Каково увеличение зеркала?

Дано:

Решение:

$$F=5 \text{ см}$$

При этом создается увеличенное, прямое, мнимое изображение зеркала на стороне предмета. Эта формула зеркала используется при условии, задач:

$$K=?$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$$

Опираясь на формулу расстояния d от точки до зеркала.

$$\frac{1}{d} = \frac{1}{f} + \frac{1}{F}, \rightarrow d = \frac{fF}{F+f} = \frac{10 \text{ см} \cdot 5 \text{ см}}{5 \text{ см} + 10 \text{ см}} = \frac{10}{3} \text{ см}$$

Теперь определим увеличение зеркала.

$$K = \frac{f}{d} = \frac{10 \text{ см}}{\frac{10}{3} \text{ см}} = 3$$

Ответ: $K=3$

§ 5. ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. ЯВЛЕНИЕ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Источники света:

Вещество или среда, обладающая свойством преломлять световой луч, называется прозрачной средой.

При переходе луча света из вакуума в полупрозрачную среду или из одной полупрозрачной среды в другую полупрозрачную свет меняет свое направление, то есть преломляется. В этом можно убедиться, посмотрев на карандаш, опущенный в стакан, преломления видна если смотреть сбоку на стакан (рис. 4.1).

Предположим, что луч света падает из вакуума в прозрачную среду под углом α . Этот луч при переходе в прозрачную среду меняет свое начальное направление, образуя угол $\beta < \alpha$ с нормалью, проведенной из точки падения. Этот угол называется углом преломления (рис. 5.2).



Рисунок 5.1

I - падающий луч;
 I' - отраженный луч;
 I'' - преломленный луч;
 α - угол падения и угол отражения;
 β - угол преломления;

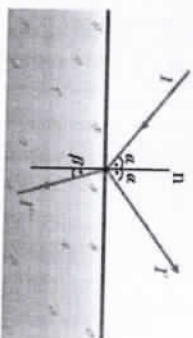


Рисунок 5.2

Закон преломления света: падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, воспринятый в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При переходе луча из среды с низкой оптической плотностью в среду с высокой оптической плотностью преломленный луч отклоняется от границы двух сред и приближается к нормальному.

Пусть два взаимно параллельных луча 1 и 2 падают из вакуума в прозрачную среду. Пусть преломленные лучи в среде будут 1' и 2' (рис.5.3). Найдем абсолютной показатель преломления среды относительно вакуума. Для этого и будем использовать синусы $\triangle ABC$ и $\triangle ABD$.

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{c \Delta t}{AB} & (1) \\ \sin \beta = \frac{AD}{AB} = \frac{g \Delta t}{AB} & (2) \end{cases} \Rightarrow (1):(2) \Rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{g} = \frac{\lambda_{\text{ваку}}}{\lambda_{\text{среда}}} = n$$

Абсолютным показателем преломления света относительно вакуума прозрачной среды называют величину, равную отношению синуса угла падения к синусу угла преломления.

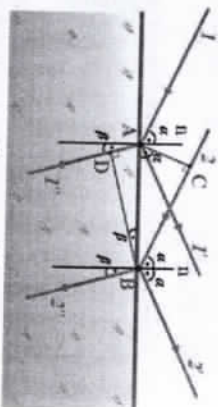


Рисунок 5.3

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{g} = \frac{\lambda_{\text{ваку}}}{\lambda_{\text{среда}}} \quad (5.1)$$

В приведенной выше формуле $c = \lambda_{\text{ваку}} \nu$ и $g = \lambda_{\text{среда}} \nu$ на основании формул было учтено, что при переходе луча света (электромагнитной волны в целом) из вакуума в среду длина и скорость волны уменьшаются, а частота остается неизменной.

Чем больше значение абсолютного показателя преломления луча, тем больше отклонение луча от его первоначального направления в нормальном направлении. Среду, в которой абсолютной показатель преломления света больше, называют оптически более плотной средой, а среду, в которой

показатель преломления света меньше, называют оптически менее плотной средой.

Абсолютной показатель преломления света прозрачной среды также может быть выражен через ее электрические и магнитные свойства.

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (5.2)$$

Из приведенной выше формулы скорость распространения светового луча в прозрачной среде можно записать в виде:

$$g = \frac{c}{n} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} \quad (5.3)$$

Значение абсолютного показателя преломления света для вакуума и воздуха при решении задач принимается равным $n=1$. Для прозрачных сред абсолютный показатель преломления света равен $n>1$.

Если луч света проходит из одной полупрозрачной среды во вторую полупрозрачную среду, то отношение синуса угла падения к синусу угла преломления дает относительный показатель преломления света первой среды по отношению ко второй среде. Отношение абсолютной показателя преломления света второй среды к абсолютной показателю преломления света первой среды называется относительным показателем преломления света первой среды ко второй среде.

Относительный показатель преломления света определяется так же, как и абсолютный показатель преломления света.

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{c \Delta t}{AB} & (1) \\ \sin \beta = \frac{AD}{AB} = \frac{g \Delta t}{AB} & (2) \end{cases} \Rightarrow n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{g_1}{g_2} = \frac{\lambda_{2\nu}}{\lambda_{1\nu}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Следовательно, оказывается, что относительный показатель преломления света будет следующим (рис. 4.2):

$$n_{2,1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{g_1}{g_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (5.4)$$

В приведенной выше формуле $g_1 = \lambda_{1\nu}$ и $g_2 = \lambda_{2\nu}$ на основании формул было учтено, что при переходе луча света (электромагнитной волны в целом) из одной среды в другую длина и скорость волны изменяются, а частота остается неизменной.

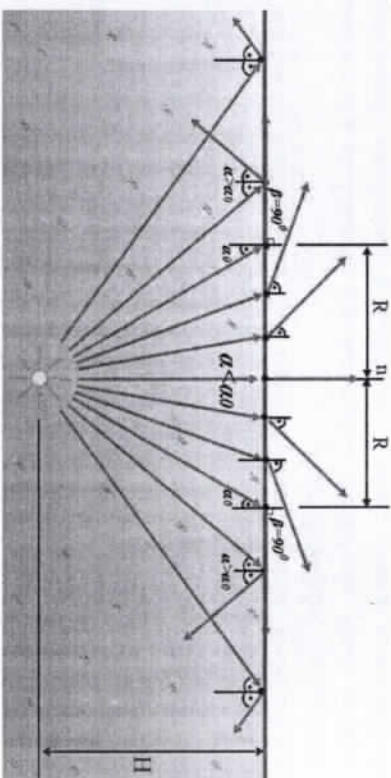
Закон полного внутреннего отражения:

Выше мы познакомились с тем, что световой луч переходит из вакуума в прозрачную среду или из оптически менее плотной среды в оптически плотную среду. При этом луч света отклонялся от границы двух сред и приближался к нормальному. А теперь рассмотрим обратное

состояние, то есть состояние, при котором световой луч переходит из прозрачной среды в вакуум или из оптически плотной среды в оптически менее плотную среду. Итак, какое событие происходит в этом?

Когда луч света проходит из прозрачной среды в вакуум или из оптически плотной среды в оптически менее плотную среду, преломленный свет отклоняется от нормального и приближается к границе двух сред. Чем выше значение угла падения, тем быстрее начинает увеличиваться угол преломления. Существует такое значение угла падения $\alpha = \alpha_0$, при котором значение угла преломления достигает 90° , т. е. становится равной $\beta = 90^\circ$. При этом преломленный свет распространяется вдоль границы двух сред. Если значение угла падения снова увеличить $\alpha > \alpha_0$, т. е., то луч без преломления полностью вернется в самую первую среду. При этом граница двух сред становится зеркальной (рис. 5.4). Это явление называется явлением полной внутренней отражения.

Значение угла падения, при котором происходит явление полного внутреннего отражения, называется углом полного внутреннего отражения.



5.4-табл

Пусть луч света проходит из прозрачной среды в вакуум, и в этом случае происходит явление полного внутреннего отражения. При этом угол падения будет равен $\alpha = \alpha_0$, а угол преломления равен $\beta = 90^\circ$. Так как абсолютный показатель преломления света относительно вакуума равен $n > 1$.

$$n = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \alpha_0} = \frac{1}{\sin \alpha_0}$$

При этом полный внутренний угол отражения равна

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} \quad \text{или} \quad \alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n}$$

Следовательно, получается, что полный внутренний угол отражения будет равен (рис. 5.4):

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n} \quad \text{или} \quad \alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n} \quad (5.5)$$

Но весь свет, излучаемый источником света, падающим в жидкость, может выйти наружу из жидкости. Луч внутри радиуса кольца преломляется и выходит наружу в воздух, луч, падающий на само кольцо, распространяется по границе двух сред, в то время как луч, падающий за пределы кольца, возвращается обратно в первую среду, т. е. в жидкость, из-за явления полного внутреннего отражения (рис. 5.4). Другими словами, для света, падающего за пределы кольца, граница двух сред служит зеркалом.

Радиус кольца, по которому луч, распространяющийся от источника на глубине H от поверхности жидкости, выходит наружу, равен:

$$R = H \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (5.6)$$

Здесь: α_0 — предельный угол полного внутреннего отражения.

Явление полного внутреннего отражения можно наблюдать и при излучении лучей, исходящих из жидкости под разными углами, как на рисунке 5.5-а. Аналогичная ситуация изображена на рисунке 5.5-б, в котором стеклянная призма вставлена на путь рассеянных лучей. Лучи, исходящие из другой стороны призмы, подвергаются полному внутреннему отражению.

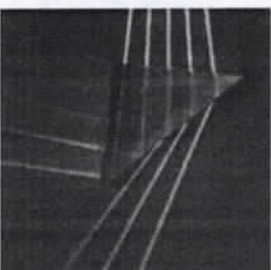


Рисунок 5.5-табл

Значение явления полного внутреннего отражения в нашей жизни:

Мы часто сталкиваемся с явлением полного внутреннего отражения в жизни. В жаркий летний день разогретая асфальтовая поверхность издавна излучает блистатель. Поскольку поверхность, прилегающая к асфальту, нагревается, ее показатель преломления света отличается от показателя преломления света более холодного слоя воздуха сверху. В результате наблюдается явление полной внутренней отражения. Кроме того, анало-

тичным образом можно объяснить явление образования миражей (озер) в пустынях (рис.5.6).

Явление полной внутренней отражения также можно проверить, проведя домашний эксперимент. Давайте включим световой луч с задней стороны этого крана, когда кран на дне прозрачного сосуда, заполненного жидкостью, откроется. Затем в жидкости, вытекающей из крана, мы можем увидеть свет, отражающийся изнутри несколько раз. Этот луч не может выйти за пределы потока жидкости из-за полной внутренней отражения (рис.5.7).

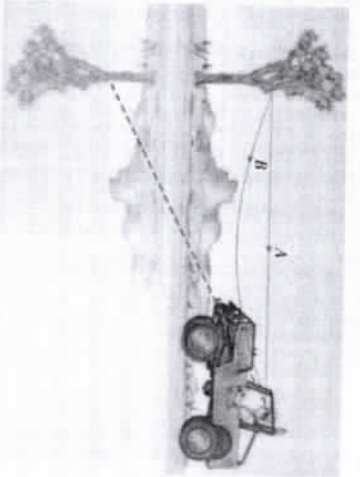


Рисунок 5.6-газ

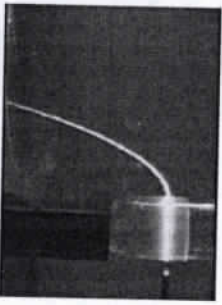


Рисунок 5.7



Рисунок 5.8

Явление полного отражения также широко используется в коммуникациях. Примером может служить оптическое волокно (рис.5.8). Радиоволна или луч света направляется в оптическое стекловолокно. Эта волна или луч отражается с внутренних поверхностей стекловолокна в сто тысяч раз и достигает пункта назначения. Затем поступивший сигнал усиливается. В то время как это оптическое волокно изгибается или отклоняется по пути, сигнал не выходит за пределы этого волокна.

Вопросы по теме

1. Опишите закон преломления света. Что такое оптическая плотность?
2. Запишите формулы абсолютных и относительных показателей преломления света.
3. Запишите выражение зависимости показателя преломления света от свойств среды.
4. Что такое явление полного внутреннего отражения? Что такое угол внутреннего отражения?

5. Когда луч света распространяется вдоль границы двух сред?
6. Когда наблюдается явление полного внутреннего отражения?
7. Что такое оптическое волокно? Объясните принцип их использования.
8. Объясните причину появления Миража на асфальтированной дороге в жаркий летний день или вдали от пустынных мест.

Решение задачи:

1. При переходе луча света из среды 1 в среду 2 угол падения составляет 30° , а угол преломления -60° . Каков показатель преломления второй среды по сравнению с первой средой?

- A) 0,5 B) 2 C) $\sqrt{3}$ D) $\frac{\sqrt{3}}{3}$

Дано: $\alpha = 30^\circ$
 $\beta = 60^\circ$
 $n_1 = ?$

Решение:

По закону преломления света отношение синуса угла падения к синусу угла преломления при падении света на границу двух прозрачных сред выражает показатель преломления света второй средой по отношению к первой.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

Подставив значения в условие задачи в это выражение

$$n_{21} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin 60^\circ} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \text{ получаем результат.}$$

Ответ: D) $\frac{\sqrt{3}}{3}$

2. Если свет за какое-то время прошел в пространстве расстояние в 45 км, а в жидкости за такое время прошел расстояние в 30 км, чему равен показатель преломления этой жидкости?

Дано:

$$S_1 = 45 \text{ км}$$

$$S_2 = 30 \text{ км}$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$n = ?$

Решение:

Поскольку в вакуум, и жидкость являются однородными средами, известно, что свет распространяется в этих средах с равномерной. Для равномерного движения отношение пройденных путей за одно и то же время выражает отношение его скоростей в одних и тех же средах.

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v}{v_2} \text{ из этого } v = \frac{c S_2}{S_1} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

подставив показатель преломления жидкости, используя скорость света в жидкости. $n = \frac{c}{v} = 1,5$

Ответ: $n = \frac{c}{v} = 1,5$

3. При переходе световой волны из одной среды в другую ее скорость увеличивается в 2 раза. Каков предельный угол полного внутреннего отражения для этой же системы?

Дано:

$$\frac{v_2}{v_1} = 2$$

$$\beta = 90^\circ$$

$$\alpha = ?$$

Решение:

Согласно закону преломления света

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Из этого предельный угол полного внутреннего отражения равен

$$\alpha = \arcsin \frac{1}{2} = 30^\circ \text{ га } \text{тeng}$$

Ответ: 30°

§ 6. ПУТЬ СВЕТА В РАЗЛИЧНЫХ ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛАХ.

Эта тема будет освещена, как луч света проходит через различные прозрачные тела. Во всех случаях мы полагаемся на закон преломления света. При переходе луча света в оптически более плотную среду преломленный луч приближается к нормальному направлению, а при переходе в оптически менее плотную среду к границе двух сред.

Путь луча в треугольной призме:

Давайте проверим путь света в стеклянной призме. Сначала луч падает на левую сторону стеклянной призмы I. Поскольку свет проходит от воздуха к стеклу, преломленный луч отклоняется на i' в нормальном направлении, то есть становится $\beta < \alpha$. Из закона преломления света можно найти угол преломления β (рис. 6.1).

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \rightarrow \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \rightarrow \beta = \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \quad (6.1)$$

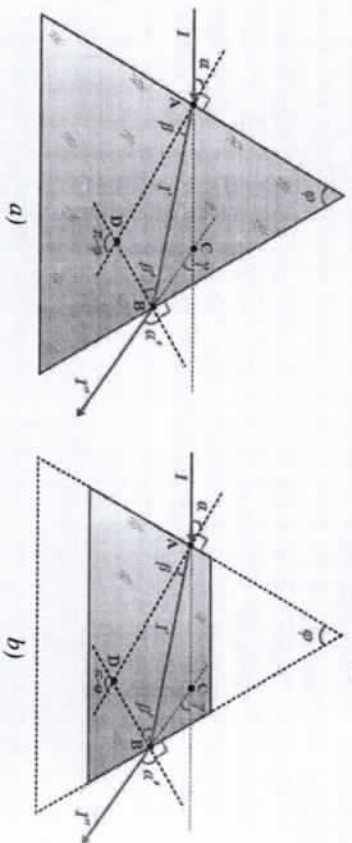


Рисунок 6.1

Используя то, что сумма внутренних углов произвольного треугольника равна 180° , можно найти угол падения луча i' на вторую сторону призмы β' .

$$\beta + \beta' + \pi - \varphi = \pi, \rightarrow \beta' = \varphi - \beta = \varphi - \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \quad (6.2)$$

Поскольку свет проходит через стекло в воздух в точке В, преломленный свет отклоняется от нормали и приближается к границе двух сред, то есть $\beta' < \alpha'$.

$$\begin{aligned} n &= \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'}, \rightarrow \sin \alpha' = n \cdot \sin \beta' = n \cdot \sin \left(\varphi - \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \right) = n \cdot \sin \varphi \cdot \cos \left(\arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \right) + \\ &+ n \cdot \cos \varphi \sin \left(\arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \right) = \sin \varphi \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \cos \varphi \cdot \sin \alpha, \rightarrow \\ &\rightarrow \alpha' = \arcsin \left(\sin \varphi \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \cos \varphi \cdot \sin \alpha \right). \end{aligned}$$

Найдем угол смещения γ от первоначального направления, используя тот факт, что сумма внутренних углов произвольного прямоугольника равна 360° .

$$\alpha + \alpha' + (\pi - \varphi) + (\pi - \gamma) = 2\pi, \rightarrow \gamma = \alpha + \alpha' - \varphi \quad (6.3)$$

Таким образом, при падении луча на первую сторону равнобедренной треугольной призмы с углом на вершине под углом α угол преломления β , угол падения с внутренней стороны на вторую сторону β' , угол выхода со второй стороны α' угол отклонения от первоначального направления γ вычислит следующим образом (рис. 6.1-а):

$$\begin{cases} \beta = \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \\ \beta' = \varphi - \beta = \varphi - \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \\ \alpha' = \arcsin \left(\sin \varphi \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \varphi \cdot \sin \alpha \right) \\ \gamma = \alpha + \alpha' - \varphi \end{cases} \quad (6.4)$$

Приведенные выше формулы выполняются не только для равнобедренной треугольной призмы, но и для равнобедренной трапециевидной призмы, вырезанной из этой призмы (рис. 6.1-б). Из этого видно, что при падении на сторону преломленный луч отклоняется в сторону основания трапециевидной призмы, а трапециевидной-в сторону большего основания.

Используя приведенную выше формулу и рисунок, можно найти условие, при котором луч i' падает вертикально на вторую сторону призмы.

Теперь определим условие, при котором преломленный луч выходит из второй стороны призмы вертикально. Поскольку преломленный луч падает вертикально на другую сторону призмы, он будет $\alpha' = \beta' = 0$. Воспользуемся приведенной выведенной формулой.

$$\beta' = \varphi - \beta = \varphi - \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} = 0, \rightarrow \varphi = \arcsin \frac{\sin \alpha}{n}, \rightarrow \sin \alpha = n \sin \varphi.$$

Угол между лучами $1''$ и 1 будет равен:

$$\gamma = \alpha + \alpha' - \varphi = \alpha - \varphi = \alpha - \beta$$

Отсюда следует, что преломленный луч выйдет из второй стороны призмы вертикально, когда угол падения равен (рис.6.2).

$$\begin{cases} \varphi = \beta \text{ или } \sin \alpha = n \sin \varphi \\ \gamma = \alpha - \varphi = \alpha - \beta \end{cases} \quad (6.5)$$

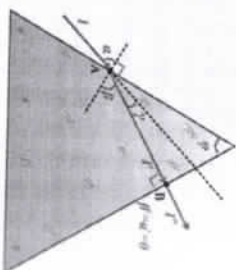


Рисунок 6.2

Из рисунка 6.1 возникает вопрос: Может ли свет исходить из второго стороны призмы при любом значении угла падения α ? Нет, это не всегда выполнимо. Угол β' , при котором преломленный луч падает на второе стороны призмы $1'$, имеет такое значение, что луч распространяется по границе двух сред, не выходя наружу, т.е. $\alpha' = 90^\circ$, когда $\beta' = \alpha_0$ (рис.6.3).

Теперь определим условие, при котором во втором стороны призмы происходит предельное полное внутреннее отражение. Для того чтобы луч B прошел по границе двух сред, не выходя за пределы точки B , угол падения в точку B должен быть равен предельному значению полного внутреннего отражения $\beta' = \alpha_0 = \arcsin \frac{1}{n}$. От этого происходит $\sin \beta' = \frac{1}{n}$ и $\cos \beta' = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n}$ из этого следует, что угол падения луча 1 в точку A можно найти α или его синус ($\sin \alpha$).

$$\sin \alpha = n \sin \beta = n \sin(\varphi - \beta') = n(\sin \varphi \cos \beta' - \cos \varphi \sin \beta') = n \left(\sin \varphi \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} - \cos \varphi \frac{1}{n} \right) =$$

$$= \sin \varphi \sqrt{n^2 - 1} - \cos \varphi$$

Отсюда и угол падения равна

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sqrt{n^2 - 1} - \cos \varphi \text{ или}$$

$$\alpha = \arcsin(\sin \varphi \sqrt{n^2 - 1} - \cos \varphi)$$

Поскольку сумма внутренних углов произвольного выпуклого многоугольника равна 360° , мы можем найти угол γ между лучом 1 и $1''$.

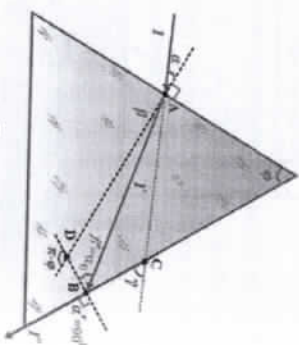


Рисунок 6.3

$$\angle A + \angle B + \angle C + \angle D = 2\pi, \rightarrow \alpha + \frac{\pi}{2} + (\pi - \gamma) + (\pi - \varphi) = 2\pi, \rightarrow \gamma = \frac{\pi}{2} + \alpha - \varphi$$

Отсюда следует, что при падении луча на первое стороны треугольной призмы под углом, равным следующему, луч из второго стороны не выйдет наружу. (рис. 6.3):

$$\begin{cases} \sin \alpha = \sqrt{n^2 - 1} \cdot \sin \varphi - \cos \varphi \\ \gamma = \frac{\pi}{2} + \alpha - \varphi \end{cases} \quad (6.6)$$

Если на рисунке 6.3 луч падает на точку B под углом, большим предельного значения полного внутреннего угла отражения, то точка B будет зеркалом для луча $1'$. Это приводит к полному внутреннему отражению, когда $1''$ луч попадает в точку основания призмы E . В этой точке луч также преломляется и выходит наружу (рис.6.4).

$$\beta' + \beta = \varphi$$

$$\beta' = \varphi - \beta = \varphi - \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right)$$

Если внутренние углы $\triangle BEF$ равна 180° .

$$(\varphi/2 - \beta') + (\pi/2 - \beta'') + (\pi/2 - \varphi/2) = \pi, \rightarrow \beta'' = \pi/2 - (\varphi/2 + \beta')$$

Из закона преломления света получается.

$$\alpha'' = \arcsin(n \sin \beta'')$$

Поэтому, при $\beta' = \alpha_0$ углы β' , β'' и α'' будут следующими (рис. 7.4):

$$\begin{cases} \beta' = \varphi - \beta = \varphi - \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) \\ \beta'' = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\varphi}{2} + \beta' \right) \\ \alpha'' = \arcsin(n \sin \beta'') \end{cases} \quad (6.7)$$

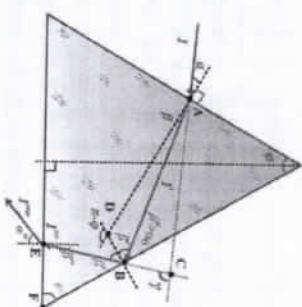


Рисунок 6.4

Если лучи в параллельной пластине:

Давиме полнотересуемся, что будет, если прозрачные грани падает на параллельную пластину. Луч, поступивший из точки A , падает в точку D в точке C на вторую сторону 1 преломленной пластины. Используя $\triangle ABE$ и $\triangle ACD$, можно найти смещение $CD = x$ по горизонтали.

$$x = AB \cos \alpha - AB \cos \beta = AB (\cos \alpha - \cos \beta) = d \left(\cos \alpha - \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} \right) = d \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha / n}{\sqrt{1 - (\sin \alpha / n)^2}} \right) = \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) d$$

Угол падения луча на пластину равна углу отражения луча от пластины. Преломленный $1'$ луч распространяется в воздух как $1''$ луч по прямой.

проходящей через точку D . Где луч I'' параллелен лучу I' , а расстояние между этими параллельными лучами равно $CE=y$. Из этого расстояние сдвига $CE=y$ можно найти.

$$y = x \cos \alpha = \left(\frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \cos \alpha d$$

Следовательно, если луч падает под углом α , к первому сторону стеклинной пластины толщиной d и абсолютным показателем преломления n , луч отклоняется от второго сторона на расстояние x , а от его первоначального направления параллельно расстоянию y . Эти

сдвиги можно найти по следующим формулам (рис. 6.5):

$$\begin{cases} x = \left(\frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) d \\ y = \left(\frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \cos \alpha d \end{cases} \quad (6.8)$$

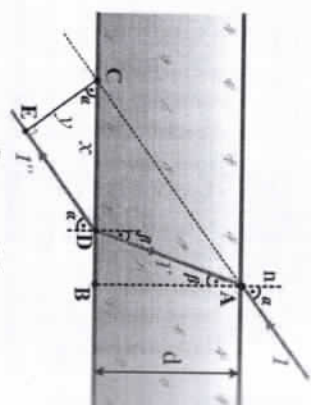


Рисунок 6.5

Можно сделать выводы из приведенных выше рисунков и формул. Если в воде на какой-то глубине d , в точке D , находится рыба, то охотник снаружи думает, что она находится в точке C , и стреляет копьем в точку C , а не в точку D . Точно так же, как охотник ожидает, что копы падает в точку C , но рыба в точке D дрожит и убегает. Точно так же, когда вы смотрите на предметы через прозрачный тела, кажется, что его положение изменилось. Определим этот сдвиг (рис. 6.6).

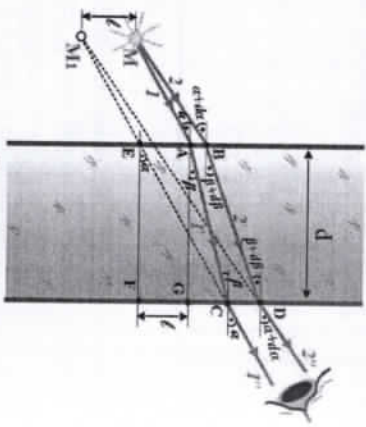


Рисунок 6.6

Если наблюдатель смотрит на источник света в точке M через стеклинную пластину толщиной d , абсолютным показателем преломления света n , то наблюдатель видит источник в точке M' . При этом лучи 1 и 2, исходящие от источника, проникают в пластину из точек A и B и преломляются в ней. Преломленные лучи $1'$ и $2'$ падают на вторую сторону пластины в точках C и

D и вторично преломляются в этих точках. Преломленные $1'$ и $2'$ лучи падают в направлении наблюдателя.

Противоположные продолжения лучей $1'$ и $2'$ пересекаются в точке M' . Наблюдатель видит источник M в этой точке M' . В этом случае расстояние между точками M и M' — это расстояние видимого сдвига, которой нас интересует.

$$l = MM' = AE = FG = CF - CG = d \lg \alpha - d \lg \beta = d \left(\lg \alpha - \frac{\sin \beta}{\cos \beta} \right) = d \left(\lg \alpha - \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} \right) =$$

$$= d \left(\lg \alpha - \frac{\sin \alpha / n}{\sqrt{1 - (\sin \alpha / n)^2}} \right) = \left(\lg \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) d$$

Следовательно, при взгляде на тела через более толстый прозрачный тела расстояние видимого смещения тела равна к следующим выражениям:

$$l = \left(\lg \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) d \quad (6.9)$$

Нужно сказать на шар:

В каком направлении происходит если луч света падает на шарообразное тело? Преломится ли в этом явление полное внутреннее отражение? Попробуем найти ответы на эти вопросы (рис. 6.7).

Угол γ основания равнобедренного треугольника будут равны. Поскольку $\triangle AOB$ имеет $OA=OB=R$, $\beta'=\beta$. В соответствии с законом преломления

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'}$$

и равен $\alpha'=\alpha$, что означает, то есть под каким же углом луч падает на сферу, он отражается под тем же углом. От $\triangle ABC$ получается $\angle CAB = \angle CBA = \alpha - \beta$.

Найдем преломленные внутренние углы треугольника будут равны третьему внешнему углу. Соответственно $\angle C = \angle AMB = 2(\alpha - \beta)$ будет. Что сумма внутренних углов треугольника равна 180°

получается следующая выражения $\alpha + \alpha + (\beta + \beta) = \pi - 2\beta$

т.е. в итоге, если луч света падает на непрозрачное прозрачное тело под произвольным углом α , угол выхода из сферы равен α' , угол отклонения луча от первоначального направления равен γ , а центральный угол ϕ равен:

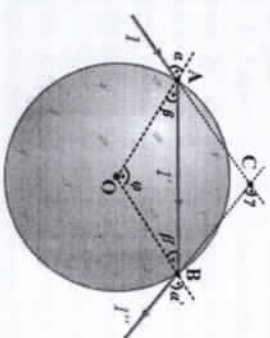


Рисунок 6.7

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha \\ \gamma = 2(\alpha - \beta) \\ \varphi = \pi - 2\beta \end{cases}$$

(6.10)

Это означает, что даже когда луч света падает на шар под произвольным углом, он выходит из шара под тем же углом и никогда не наблюдается явления полного внутреннего отражения.

Путь света в жидкости, видима глубина жидкости:

Когда луч света падает из воздуха на поверхность жидкости под углом, преломленный свет отклоняется в нормальном направлении, как и в случае с другими прозрачными телами. Из-за этого отклонения кажется, что его геометрическое положение изменилось по сравнению с телами, которые находятся внутри жидкости. При взгляде на дно жидкости ее дно выглядит так, как будто оно близко.

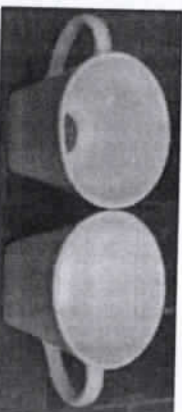


Рисунок 6.8

В этом можно убедиться только при заполнении пустого сосуда жидкостью. По мере увеличения столба жидкости дно сосуда начинает подходить все ближе и ближе. (рис.6.8).

Давайте определим эту глубину видимости (рис.6.9).

Пусть высота столба жидкости в сосуде равна h , а в точке M на его дне источник света излучает свет. Пусть наблюдатель наблюдает за этим источником в вертикальном положении. Два луча 1 и 2, расходящиеся от точки M , падают на поверхность жидкости к точкам A и B под значительно меньшим углом β и преломляются в этих точках под углом α ($\alpha > \beta$). Преломленные лучи 1' и 2' падают в зрительный диапазон глаза наблюдателя. Противоположные продолжения преломленных лучей 1' и 2' пересекаются в точке M_1 .

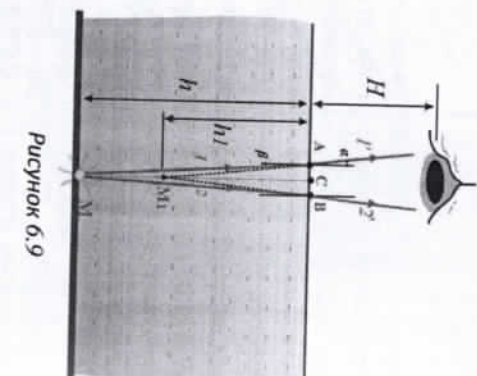


Рисунок 6.9

Наблюдатель видит источник света в этой M_1 точке.

Размер передней части глаза наблюдателя составляет примерно $t = 1,2-1,8$ см. Это расстояние также значительно отличается от лучшего расстояния зрения

наблюдателя $L_0 = 25$ см, то есть $L_0 \gg t$. Поэтому углы α и β можно рассматривать как маленькие углы, не превышающие максимум $4-5^\circ$. А в малых углах можно считать $\begin{cases} \lg \alpha \approx \sin \alpha \\ \lg \beta \approx \sin \beta \end{cases}$

и из треугольников ΔMAC и ΔM_1AC получается

$$\begin{cases} \lg \beta = \frac{AC}{CM} = \frac{AC}{h} \approx \sin \beta \\ \lg \alpha = \frac{AC}{CM_1} = \frac{AC}{h_1} \approx \sin \alpha \end{cases}$$

А соотношение этих выражений равно

$$n = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{h}{h_1}$$

Из этого получаем

$$h_1 = \frac{h}{n}$$

Это означает, что видимая глубина жидкости будет в n раз меньше первоначальной.

Таким образом, при вертикальном взгляде на дно жидкости, высота столба жидкости которого равна h , получается, что его видимая величина h_1 будет равна (рис. 7.9):

$$h_1 = \frac{h}{n}$$

(6.11)

Следовательно, из приведенной выше формулы можно сделать вывод, что это видимое расстояние будет меньше геометрического расстояния. Это также можно узнать, наблюдая за рыбой, плавающей в прозрачных реках, или глядя на подводные камни (рис.6.10).

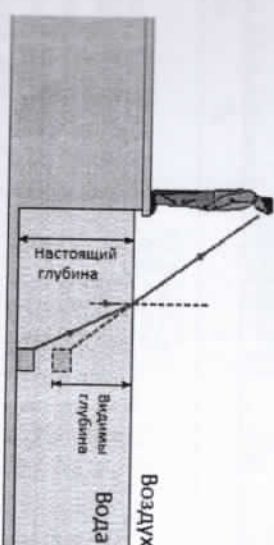


Рисунок 6.10

Если известны расстояние между глазом наблюдателя и поверхностью воды H , глубина воды h и показатель преломления воды n , то можно определить расстояние между наблюдателем и местом видимости источника M на дне воды (рис.6.9).

$$H_{\text{un}} = H + h_1 = H + \frac{h}{n}$$

(6.12)

Следовательно, из обеих приведенных выше формул можно сделать вывод, что это видимое расстояние будет меньше геометрического расстояния. Это явление заметно не только при наблюдении тела в воде, но и при введении прозрачной пластины определенной толщины в пространство между наблюдателем и наблюдаемым телом или источником (рис. 6.11). При этом расстояние между наблюдателем и источником M кажется приближенным, т. е. место видимости источника M перемещается в точку M_1 . Если задано расстояние l между наблюдателем и источником M , толщина d вставленной прозрачной пластины и абсолютной показатель преломления n пластины, то можно легко определить расстояние Δl приближения источника к наблюдателю и расстояния l_1 от наблюдателя до видимого места источника.

$$\Delta \ell = \frac{n-1}{n} \ell, \quad \ell_1 = \ell - d + \frac{d}{n}$$

(6.13)

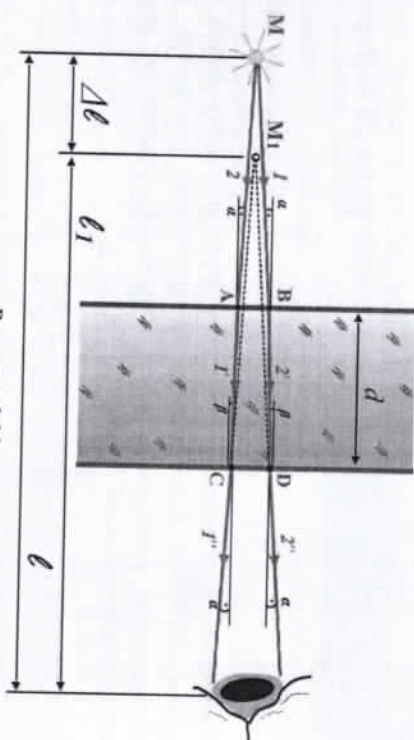


Рисунок 6.11

На рисунках 6.9 и 6.10 изображен при взгляде на тела, находящийся в жидкости, или на какой-либо источник света, находящийся снаружи, видимое положение тела или источника изображается так, как будто он приблизится к наблюдателю не только в таких случаях, но и в тех случаях, когда видимое положение тела или источника изменяется для наблюдателя, как если бы он находился внутри жидкости, по сравнению с телом снаружи или источником света. Следует отметить, что в таких случаях видимое положение тела или источника света кажется наблюдателю как бы отдаленным (рис.6.12).

Пусть расстояние от источника света M , находящегося вне жидкости, до поверхности жидкости равно h , расстояние от глазного зрачка наблюдателя внутри жидкости до поверхности жидкости равно H , абсолютная показатель преломления среды жидкости равен n , и мы определим видное место источника M в точке M_1 .

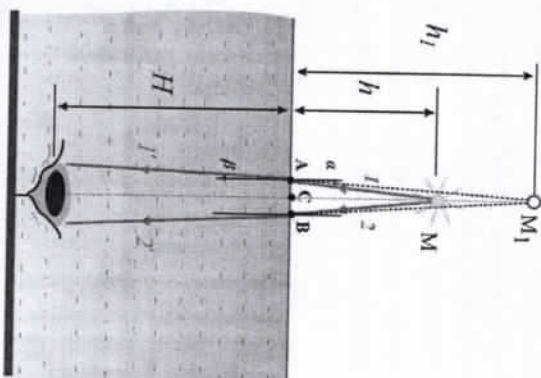


Рисунок 6.12

продолжениях предельных лучей 1' и 2' пересекаются в точке M_1 . Наблюдатель видит источник света в этой точке M_1 . Так как углы α и β на рис. 6.12 не более $4-5^\circ$, то можно считать

M nuqtadan taralayotgan nurlardan ikkitasini 1 va 2 nurlar suyuqlik sathiga A va B nuqtalarga ancha kichik α burchak ostida tushadi va bu nuqtalarda $\alpha(\alpha > \beta)$ burchak ostida sinadi. Singan 1' va 2' nurlar kuzatuvchi ko'zining ko'rish diapazoniga tushadi. Singan 1' va 2' nurlarning teskari davomlari M_1 nuqtada kesiladi. Kuzatuvchi yorug'lik manbaini ana shu M_1 nuqtada ko'radi. 6.12-rammaga α va β burchaklarni ko'pi bilan $4-5^\circ$ dan oshmaydigan kichik burchaklar berilgan uchun

и из треугольников ΔMAC и ΔM_1AC получается

$$\begin{cases} 1g\alpha \approx \sin \alpha \\ 1g\beta \approx \sin \beta \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lg \beta &= \frac{AC}{CM} = \frac{AC}{h_1} \approx \sin \beta \\ \lg \alpha &= \frac{AC}{CM_1} = \frac{AC}{h} \approx \sin \alpha \end{aligned} \right.$$

Прописаны соотношения уравнений в системе

Итак, происходит выражения

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{h_1}{h}$$

$$h_1 = nh$$

Это означает, что видимая глубина жидкости будет в n раз меньше первоначальной.

Таким образом, при взгляде на тела или источник света, находящийся снаружи, находясь внутри жидкости, высота видимости h_1 , расстояния h от поверхности жидкости источника будет равна (рис. 6.12):

$$h_1 = nh \quad (6.14)$$

При этом расстояние между наблюдателем и местом видимости источника M будет:

$$H_{\text{виз}} = H + h_1 = H + nh \quad (6.15)$$

Если наблюдатель смотрит на дно жидкости не находясь сверху, а наклонившись под каким-то углом, то кажется, что дно жидкости находится ближе. Кроме того, будет возможность увидеть точки находящийся в геометрических тени.

Если источник с глубиной h от поверхности жидкости виден внешнему наблюдателю под углом α , то видимая глубина h_2 от поверхности жидкости и горизонтальное смещение Δx будут следующими (рис. 6.13):

$$\Delta x = \frac{\sin^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h, \quad h_2 = \frac{\cos^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h \quad (6.16)$$

Докажем вышеприведенную формулу. Пусть высота столба жидкости в сосуде равна h , а в точке M на его дне источник света излучает свет. От лучей, исходящих из этой точки, лучи 1 и 2 падают на уровень жидкости к точкам A и B под углом β и $\beta + d\beta$. Затем преломляются под углом β и $\beta + d\beta$, и преломленные лучи 1' и 2' попадают в поле зрения глаза наблюдателя. Противоположные продолжения преломленных лучей 1' и 2' пересекаются в точке M_2 . Размер передней части глаза наблюдателя составляет примерно $t = 1,2-1,8$ см. Это расстояние также значительно отличается от лучистого расстояния зрения наблюдателя $L_0 = 25$ см, что означает, что $L_0 \gg t$ или $h \gg AB$. Поэтому углы α и β можно считать малыми углами, не превышающими $1-2^\circ$. Расстояния до точек пересечения уровней жидкости лучей 1 и 2 представим AD и BD через заданные величины h и α .

Угловидеи формулы известны, келитиб шйраганмиз. Ауаулык ийшдагеи сууцлык устиминг баландлигеи h га тенг бо'либ, ипинг тубида M нуқтада уотуг'лик тапбай нур таркатуотган бо'лин. Бу нуқтадан шйчапан нуқтардан 1 ва 2 нуқтар сууцлык сатлигеа A ва B нуқталарга β ва $\beta + d\beta$ булчак остида тushadi. Со'нгга β ва $\beta + d\beta$ булчак остида синидаи ва синган 1' ва 2' нуқтар кузатувчи ко'знинг ко'риш дйарозомига тushadi. Синган 1' ва 2' нуқтарнинг тескари давомлати M_2 нуқтада кесилhadi. Кузатувчи ко'знинг old qismining o'Ichamini тахминан $t = 1,2-1,8$ см

bo'lib, bu masofa kuзatuvchi eng yaxshi ko'rish masofasi $L_0 = 25$ см dan tushib qaytganida ham ancha farq qiladi, ya'ni $L_0 \gg t$ yoki $h \gg AB$ bo'laydi. Shu boisdan ham α va β buлchaklar $1-2^\circ$ dan oshmaydigan kichik buлchaklar deb hisoblash mumkin. 1 va 2 нуқтарнинг сууцлык сатлини кесадиган нуқталаригасха masofalar AD va BD ni белгилан h va α каттайлклар орqali ifodalaymiz.

$$\begin{cases} AD = h \cos \beta = h \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} = h \frac{\sin \alpha / n}{\sqrt{1 - (\sin \alpha / n)^2}} = h \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \\ BD = h \cos \beta = h \frac{\sin(\beta + d\beta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\beta + d\beta)}} = h \frac{\sin(\alpha + d\alpha) / n}{\sqrt{1 - (\sin(\alpha + d\alpha) / n)^2}} = h \frac{\sin(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} \end{cases}$$

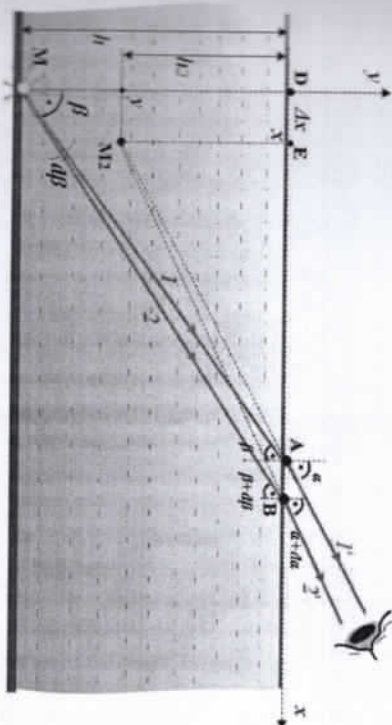


Рисунок 6.13

Перенесем декартову систему координат в центр точки D и запишем уравнение прямой линии в виде $y = kx + b$ преломленных 1' и 2' лучей в этой системе координат.

$$\begin{cases} y = k_1 x + b_1 = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) x + b_1 = \operatorname{ctg} \alpha x + b_1 \\ y = k_2 x + b_2 = \operatorname{tg}(90^\circ - (\alpha + d\alpha)) x + b_2 = \operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) x + b_2 \end{cases}$$

при $y=0$ эти прямые пересекаются с осью Ox , из которой находим свободные члены b_1 и b_2 :

$$\begin{cases} \operatorname{ctg} \alpha \cdot AD + b_1 = 0 \\ \operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) \cdot BD + b_2 = 0 \end{cases} \rightarrow$$

$$\begin{cases} b_1 = -\operatorname{ctg} \alpha \cdot AD = -\frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} h \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = -\frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h \\ b_2 = -\operatorname{ctg}(\alpha + d\alpha) \cdot BD = -\frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sin(\alpha + d\alpha)} h \frac{\sin(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} = -\frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} h \end{cases}$$

Необходимо, уравнения прямой линии для лучей 1' и 2' будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} y = ctg \alpha x + b_1 = ctg \alpha x - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h = \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} x - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h \\ y = ctg(\alpha + d\alpha) x + b_2 = ctg(\alpha + d\alpha) x - \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} h = \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} x - \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} h \end{cases}$$

Координаты точки пересечения этих прямых-величины, которые мы ищем. А при пересечении графиков их координаты становятся равными.

$$\begin{aligned} \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} x - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h &= \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sin(\alpha + d\alpha)} x - \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} h, \rightarrow \\ \frac{\sin(\alpha + d\alpha) \cdot \cos \alpha - \cos(\alpha + d\alpha) \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + d\alpha) \cdot \sin \alpha} x &= \left[\frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} - \frac{\cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha + d\alpha)}} \right] h, \rightarrow \\ \frac{\sin(\alpha + d\alpha - \alpha)}{\sin(\alpha + d\alpha) \cdot \sin \alpha} x &= \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + d\alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h, \rightarrow \frac{\sin d\alpha}{\sin^2 \alpha} x \approx \frac{\sin d\alpha}{\sin^2 \alpha} h, \\ \frac{\cos \alpha - \cos \alpha \cdot \cos d\alpha + \sin \alpha \cdot \sin d\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h, \rightarrow \frac{\sin d\alpha}{\sin^2 \alpha} x &= \frac{\sin \alpha \cdot \sin d\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h, \rightarrow x = \frac{\sin^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h, \\ y &= \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} x - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \frac{\sin^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h = \frac{\cos \alpha (\sin^2 \alpha - 1)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h = -\frac{\cos^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h. \end{aligned}$$

Таким образом, противоположные продолжения лучей 1' и 2' находятся в точке $M_2(x; y)$

$$x = \frac{\sin^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h \quad \forall \alpha \quad y = -\frac{\cos^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h$$

так как она пересекается в точке, имеющей координаты. От этого смещение в горизонтальном направлении будет равно

$$\Delta x = x = \frac{\sin^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h$$

$$h_2 = -y = \frac{\cos^3 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} h$$

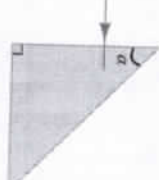
Вопросы по теме

1. В какую сторону отклоняется луч света при прохождении через треугольный призму.
2. Запишите, под каким углом луч света выйдет при прохождении через треугольную призму и на сколько он отклоняется от первоначального направления.
3. При выполнении каких условий наблюдается предельное состояние полной

- внутренней отражения во втором стороне треугольной призмы.
4. Нарисуйте путь луча на параллельной пластине и запишите сдвиг.
 5. Вычислите длину шisha пластинка билан qatalganda tining o'ni qanchigina siljigandek ko'rinadi.
 6. При взгляде на предмет с более толстой стеклянной пластиной видно, насколько сильно сдвинуто его положение.
 7. Нарисуйте путь света на стеклянном шаре. Каков будет при этом угол выхода, будет ли наблюдаться полная внутренняя отражения?
 8. Какой будет видимая глубина, если смотреть сверху на дно емкости с жидкостью?
 9. Как происходит горизонтальное смещение невидимой глубины при взгляде на дно сосуда с жидкостью под косым углом?

Решение задачи:

1. На сколько градусов составляет наименьшее значение угла α , чтобы луч, падающий с воздуха, полностью отражался внутрь призмы с показателем преломления 2, как показано на рисунке?



Дано: $n = 2$

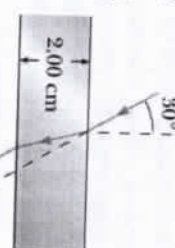
Решение

Из рисунка видно, что предельный угол полного отражения равен $\alpha_0 = 90^\circ - \alpha$. Таким образом, согласно выражению предельного угла полного отражения

$$\cos \alpha_0 = \frac{1}{n} = \frac{1}{2}, \quad \alpha_0 = 30^\circ$$

Ответ: А) 30°

2. Kasta ko'rsatilgandek shaffof yassi parallel plastinka shirida $\alpha = 30^\circ$ burchak ostida nur tushmoqda. Plastinkaning absduti nur sindirish ko'rsatkichi $n = 1,5$ bo'lganida $d = 2$ sm ga teng. Quyidagilarni aniqlang: a) Nurning plastinaga kirishidagi sinish burchagi β ni; b) nurning plastinadan chiqqandan keyingi parallel siljishi y ni; c) nurning plastina ichidan chiqish vaqti t ni.



3. Свет падает под углом $\alpha = 30^\circ$ на поверхность непрозрачной плоской параллельной пластины, как показано на рисунке. Абсолютный показатель преломления пластины равен $n = 1,5$, а толщина $d = 2$ см. Определите: а) угол преломления луча на входе в пластину б) параллельное смещение луча после выхода из пластины у; в) время выхода луча из пластины t.

Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$n = 1,5$$

$$d = 2 \text{ см}$$

$$\beta, \gamma, \delta - ?$$

Решение:

Угол преломления света по закону преломления будет равен

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \rightarrow \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} = \frac{\sin 30^\circ}{1,5} = \frac{1}{3} \rightarrow \beta = \arcsin \left(\frac{1}{3} \right) = 21,63^\circ$$

Расстояние сдвига y определяем по формуле, приведенной в теме.

$$y = \left(\lg \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \cos \alpha \cdot d = \left(\lg 30^\circ - \frac{\sin 30^\circ}{\sqrt{1,5^2 - \sin^2 30^\circ}} \right) \cos 30^\circ \cdot d =$$

$$= \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1/2}{\sqrt{2,25 - 0,25}} \right) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2 \text{ см} = \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \right) \text{ см} \approx 0,388 \text{ см}$$

Находим геометрический путь луча внутри пластины, а также скорость его распространения.

$$\cos \beta = \frac{d}{\ell} \rightarrow \ell = \frac{d}{\cos \beta} = \frac{2 \text{ см}}{\cos 21,63^\circ} = \frac{2 \text{ см}}{\sqrt{1 - \frac{1}{9}}} = \frac{3}{\sqrt{2}} \text{ см} = 2,12 \text{ см}$$

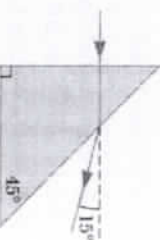
$$n = \frac{c}{g} \rightarrow g = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Теперь определим время выхода луча из пластины t

$$g = \frac{\ell}{t} \rightarrow t = \frac{\ell}{g} = \frac{2,12 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{2 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ с} = 106 \text{ пс}$$

$$\text{Ответ: } \beta = 21,63^\circ; \gamma \approx 0,388 \text{ см}; t = 106 \text{ пс}$$

3. Лазерная рукоятка опускается вертикально на одну сторону равнобедренной стеклянной призмы с внутренними углами $45^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, как показано на рисунке. Луч, исходящий из гипотенузы призмы, имеет угол 15° с направлением исходного падающего луча. Определите абсолютный показатель преломления призмы.



Дано:

$$\alpha = 0^\circ$$

$$\Delta \varphi = 15^\circ$$

$$n - ?$$

Решение:

Как видно из рисунка, к гипотенузе призмы лазерный луч попадает с внутренней стороны под углом $\beta' = 45^\circ$, а наружу выходит под углом $\alpha' = \beta' + \Delta \varphi = 45^\circ + 15^\circ = 60^\circ$. С ее помощью можно определить абсолютный показатель преломления призмы.

$$n = \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'} = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 45^\circ} = \frac{\sqrt{3}/2}{\sqrt{2}/2} = \sqrt{1,5} \approx 1,225$$

Ответ: $n = 1,225$

§ 7. ЛИНЗА И ЕЕ ВИДЫ. ПУТЬ СВЕТА В ЛИНЗЕ. ПОСТРОЕНИЕ ПРЯМЫХ В ЛИНЗЕ. ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ ФОРМУЛЫ ЛИНЗЫ.

Линза и ее виды:

Прозрачная среда, ограниченная двумя сферическими поверхностями, называется линзой. Есть вогнутый и выпуклый типы линз. Если сфера, в которой пересекаются две сферы, является непрозрачной средой, то такая линза будет выпуклой линзой (рис. 7.1-а). Если две сферы не пересекаются, прозрачная среда между ними образует вогнутую линзу (рис. 7.1-б).

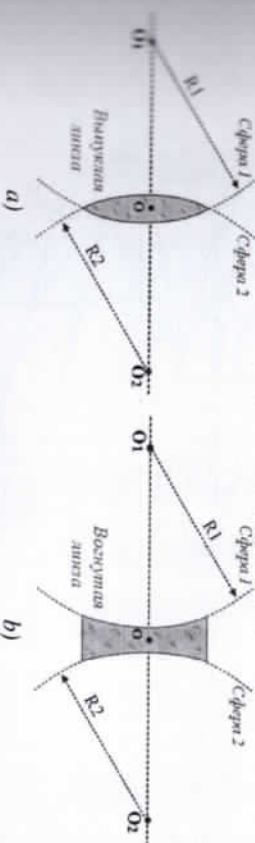


Рисунок 7.1

Средняя часть вогнутой линзы будет тоньше, чем край (рис. 7.1-а). Средняя часть выпуклой линзы толще краевой (рис. 7.1-б).

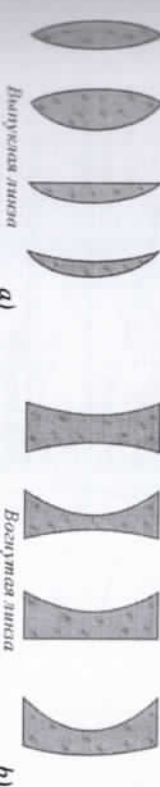


Рисунок 7.2

Центр кривизны линзы называют центром кривизны, а ось симметрии главной оптической осью. Оптическим центром называют точку O , а центром линзы точку O . Любая ось, проходящая через оптический центр, называется оптической осью (рис. 8.3-а, б).

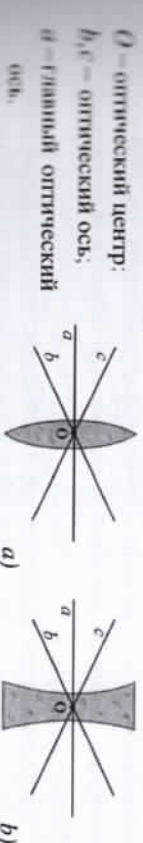


Рисунок 7.3

Выпуклая линза также называется собирающей линзой. При падении светового луча параллельно главной оптической оси собирающей линзы параллельные световые лучи приобретают свойство собираться, а собранные

лучи пересекаются в одной точке F , называемой фокусом (рис.7.4-а). Плоскость, проведенная от фокуса линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется фокальной плоскостью. Если на собирающую линзу под углом падает пучок параллельных лучей, то отраженные лучи пересекаются в одной точке фокальной плоскости (рис.7.4-б).

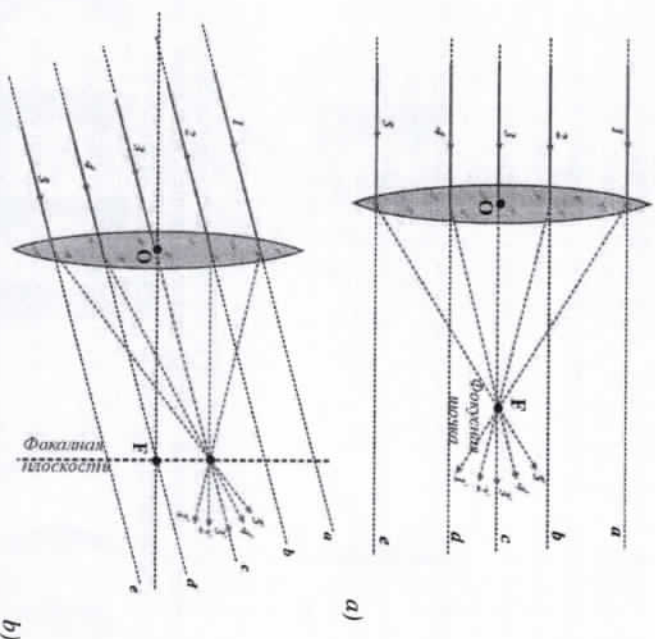


Рисунок 7.4

Как видно из приведенных выше рисунков, свет, проходящий через оптический центр линзы через точку O , проходит без преломления (на рисунке луч 3 не преломляется). Лучи, проходящие дальше от оптического центра, преломляются сильнее, и все лучи пересекаются в одной точке. Эта точка может быть фокальной точкой или точкой, лежащей в фокальной плоскости. Все лучи собраны в точке пересечения луча, проходящего через оптический центр, с фокальной плоскостью. Отсюда и возникает такой вопрос:

Поскольку пучок параллельных лучей, падающих на собирающую линзу, собирается в фокусе или в фокальной плоскости, что произойдет, если мы поместим источник света в фокусе или в точку в фокальной плоскости? — При этом получается пучок параллельных лучей, как показано на рисунке ниже.

Испускает линза также называется рассеивающей линзой. При падении светового луча параллельно главной оптической оси рассеивающей линзы отраженные световые лучи приобретают свойство рассеивания, когда противоположные продолжения рассеянных лучей пересекаются в одной точке F , называемой фокусом (рис.7.6-а). Если на рассеивающую линзу под углом падает пучок параллельных лучей, то противоположные продолжения отраженных лучей пересекаются в фокальной плоскости в одной точке (рис.7.6-б).

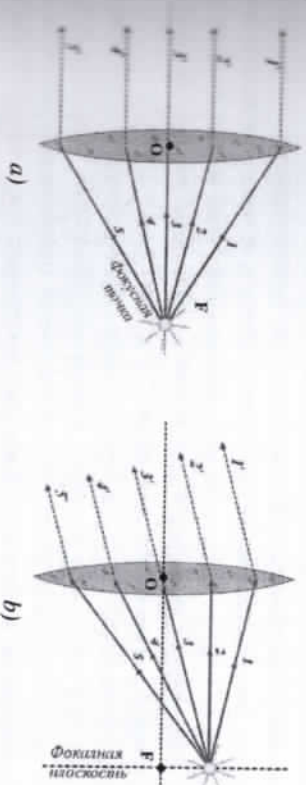
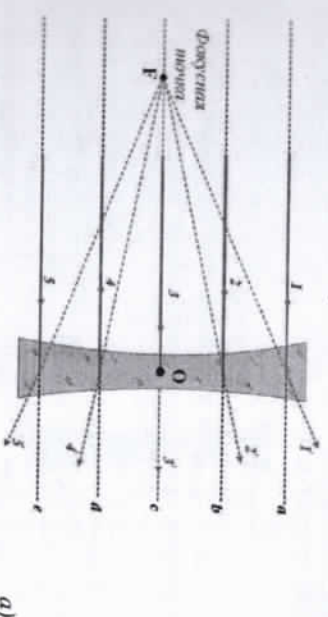
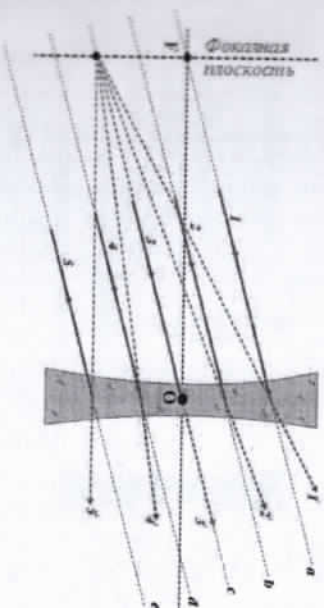


Рисунок 7.5



а)



б)

Рисунок 7.6

Как видно из приведенных выше изображений, свет, проходящий через оптический центр линзы, проходит без преломления (на рисунке луч 3 не преломляется). Лучи, прошедшие дальше от оптического центра, преломляются сильнее, и противоположные продолжения всех лучей пересекаются в одной точке. Эта точка может быть фокусом или точкой, лежащей в фокальной плоскости. Обратные продолжения всех лучей собраны в точке пересечения луча, проходящего через оптический центр, с фокальной плоскостью. Отсюда и возникает вопрос:

Поскольку противоположные продолжения луча параллельных лучей, падающих на рассеивающую линзу, собираются в фокусе или фокальной плоскости, что произойдет, если мы направим световые лучи в фокусную точку или точку в фокальной плоскости? — При этом получается пучок параллельных лучей, как показано на рис. 7.7-а, б.

Что произойдет, если источник света будет помещен в фокус рассеивающей линзы или в точку в фокальной плоскости? — При этом лучи сильно рассеиваются в линзе, противоположные продолжения рассеянных лучей собираются на половине фокусного расстояния, т. е. в точке $F/2$ или в точке в плоскости, проходящей перпендикулярно от этой точки к главной оптической оси (рис. 8.7-а, б).

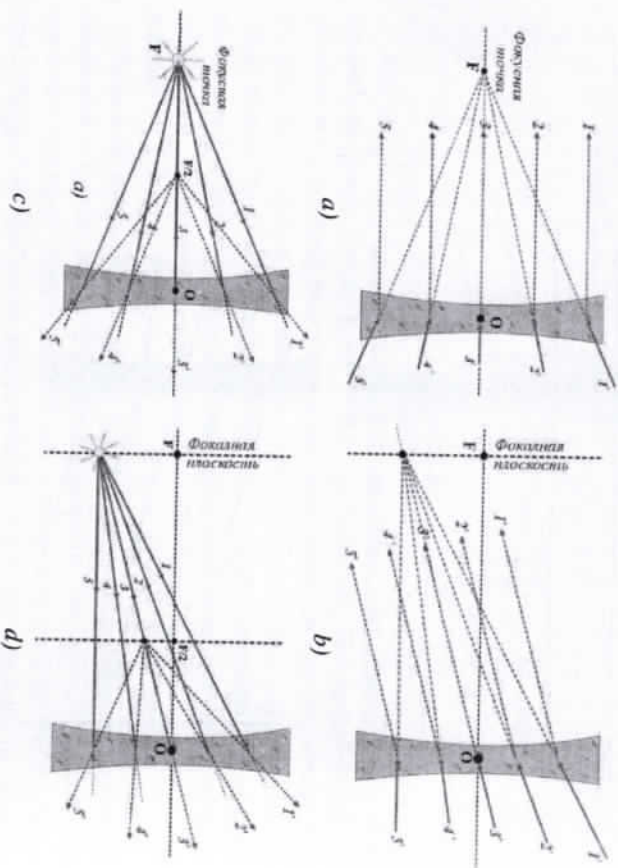


Рисунок 7.7

Объясним причину, по которой линза собирает или рассеивает свет, сходящимся образом. Давайте мысленно разложим линзу на бесконечное число трапециевидных призм. На рисунке 38.1-б, изображено отклонение преломленный лучи в сторону большого основания трапеции. При каждой трапеции в линзе преломленный луч отклоняется к большому основанию. В выпуклой линзе большие основания трапеций находятся близко к главной оптической оси, поэтому преломленный луч отклоняется к главной оптической оси, т. е. лучи собираются (рис. 7.8-а). А в вогнутой линзе большие основания трапеций находятся далеко от главной оптической оси, поэтому преломленный луч отклоняется от главной оптической оси, т. е. лучи рассеиваются (рис. 7.8-б).

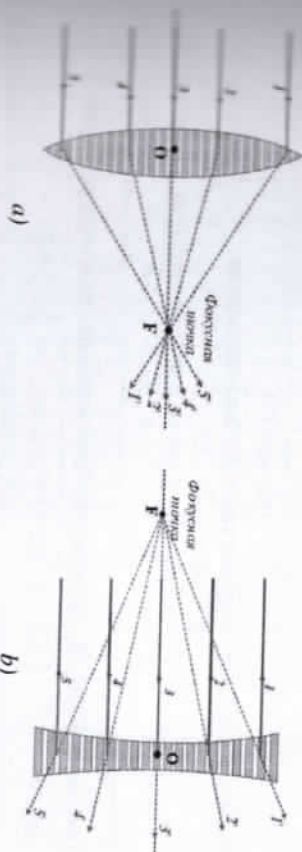


Рисунок 7.8

Формула тонкой линзы, увеличение линзы:

Давайте введем некоторые обозначения, прежде чем приводить формулу тонкой линзы.

$AB = h$ — высота предмета;

$A'B' = H$ — высота изображения;

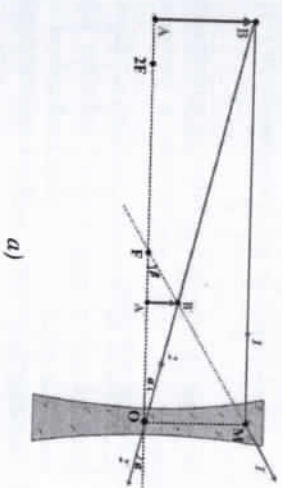
$OP = f$ — фокусное расстояние линзы;

$AP = d$ — расстояние от линзы до предмета;

$A'O = f$ — расстояние от линзы до изображения;

K — увеличение линзы.

Из рисунков 7.9-а, б формируем формулу линзы. Из рисунка ΔABO и $\Delta A'B'O$ получается следующая выражения



а)

Из рисунков 7.9-а, б формируем формулу линзы. Из рисунка ΔABO и $\Delta A'B'O$ получается следующая выражения

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{AP} = \frac{h}{d} \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{A'B'}{A'P} = \frac{H}{f} \end{cases} \Rightarrow \frac{h}{d} = \frac{H}{f} \Rightarrow \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = K \quad (7.1)$$

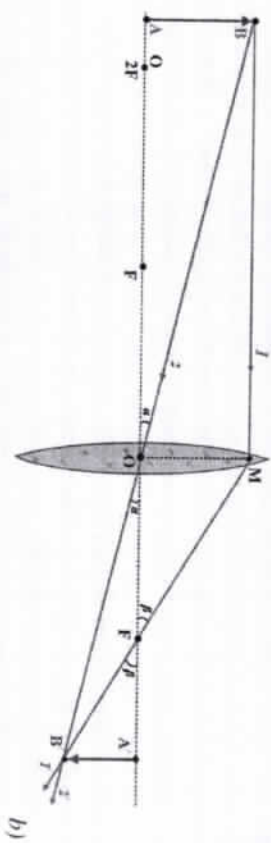


Рисунок 7.9

Из $\triangle MOF$ и $\triangle A'B'F$ получается следующее выражения

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \beta = \frac{MN}{FN} = \frac{AB}{FP} = \frac{h}{f} \\ \operatorname{tg} \beta = \frac{A'F}{A'F'} = \frac{H}{f-f} \end{cases} \Rightarrow \frac{h}{f} = \frac{H}{f-f} \Rightarrow \frac{H}{h} = \frac{f-f}{f} = K \quad (7.2)$$

Уравнивая формулы увеличения в двух системах, получаем результат.

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f-f}{d} = \frac{f}{d} \Rightarrow f d - F d = f F \quad (f F d), \rightarrow \frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{1}{F} \Rightarrow \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

Итак, мы сформировали формулу для тонкой линзы $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$

При использовании формулы линз величины d, f, F в формуле принимают различные знаки.

Если линза собирающая то $F > 0$, если линза рассеивающая то $F < 0$.

Если изображение действительное то $f > 0$, Если изображение мнимое то $f < 0$.

Но мнимой источник вообще не встречается в задачах.

Формулы линз для собирающих и рассеивающих линз будут выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (7.3)$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad (7.3a)$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} \quad (7.3b)$$

В собирающей линзе, $d > F$

В собирающей линзе, $d < F$

Рассеивающая линза

Величина, равная отношению размера изображения к размеру предмета, называется увеличением линзы.

$$K = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} \quad (7.4)$$

Увеличение линзы также может быть выражено через фокусное расстояние. Чтобы найти увеличение в каждом случае, мы будем использовать формулу линзы для этих случаев.

$$1) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{K+1}{f} \Rightarrow K = \frac{f}{d} - 1 = \frac{f-f}{d}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{K+1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{d-f}{fd} \Rightarrow K = \frac{f}{d-f}$$

$$2) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{K-1}{f} \Rightarrow K = \frac{f}{d} + 1 = \frac{f+f}{d}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{K-1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{f+d}{fd} \Rightarrow K = \frac{f}{f-d}$$

$$3) \frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{K-1}{f} \Rightarrow K = 1 - \frac{f}{d} = \frac{d-f}{d}$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{K-1}{f} \Rightarrow \frac{1}{Kd} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{d-f}{fd} \Rightarrow K = \frac{f}{f-d}$$

Следовательно, увеличение линзы через фокусное расстояние будет следующим:

$$K = \frac{f-f}{F} = \frac{f}{d-f} \quad (7.5)$$

$$K = \frac{f+f}{F} = \frac{f}{f-d} \quad (7.5a)$$

$$K = \frac{f-f}{F} = \frac{f}{f+d} \quad (7.5b)$$

в собирающей линзе, $d > F$

в собирающей линзе, $d < F$

рассеивающая линза

Выражение расстояния между линзой-изображением f и расстоянием между линзой-предметом d через увеличение K будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} f = (K+1)F \\ d = \frac{K+1}{K}F \end{cases} \quad (7.6)$$

$$\begin{cases} f = (K-1)F \\ d = \frac{K-1}{K}F \end{cases} \quad (7.6a)$$

$$\begin{cases} f = (1-K)F \\ d = \frac{1-K}{K}F \end{cases} \quad (7.6b)$$

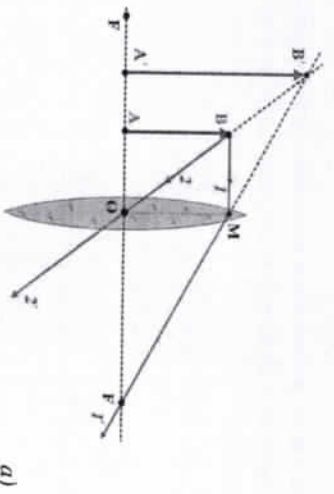
в собирающей линзе $d > F$

в собирающей линзе $d < F$

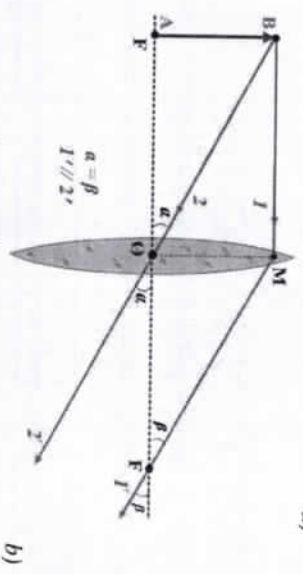
рассеивающая линза

Числитель случаев построения изображения на собирающей линзе:

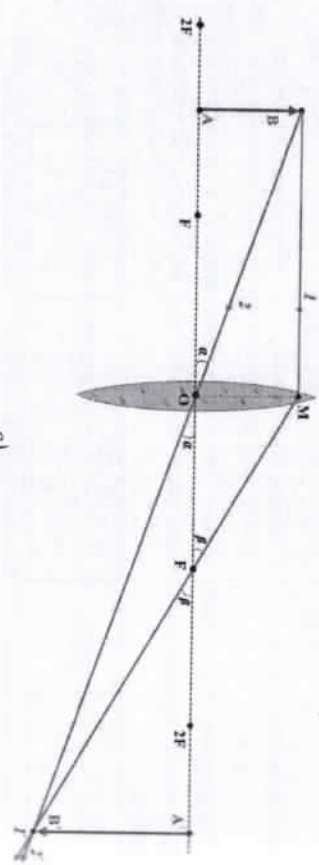
С помощью собирающей линзы предмет может быть увеличен или уменьшен в зависимости от его местоположения, чтобы сформировать действительное или мнимое, прямое или перевернутое изображение. Этого можно добиться на каждом частном случае в отдельности.



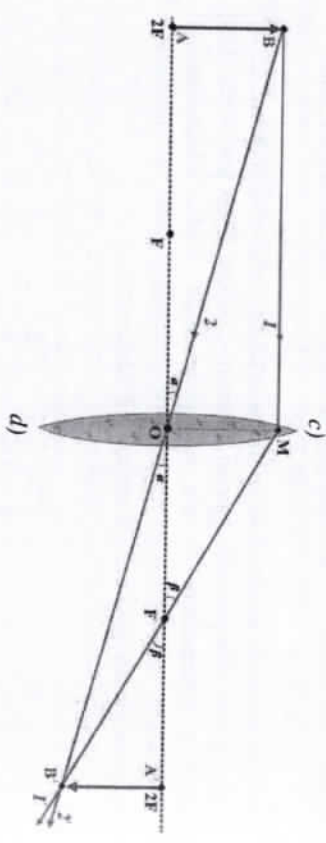
a)



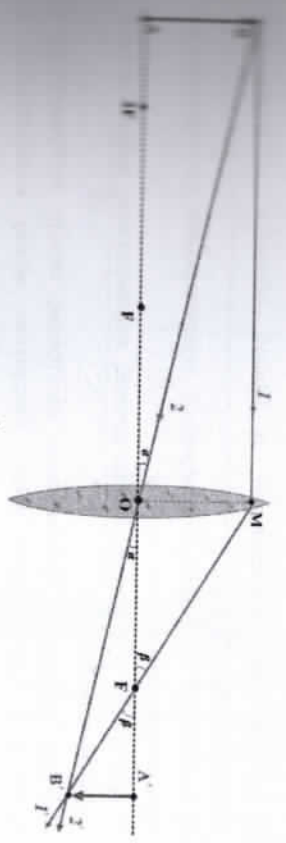
b)



c)



d)



e)

Рисунок 7.10

- 1) при $d < F$: на стороне предмета формируется прямая, действительная, увеличенный изображения (рис.7.10-а).
- 2) при $d = \frac{1}{2}F$: изображение на стороне предмета, прямое, мнимое, увеличенное в 1,5 раза.
- 3) при $d = \frac{1}{3}F$: изображение на стороне предмета, прямое, мнимое, увеличенное в 2 раза.
- 4) при $d = \frac{1}{4}F$: изображение на стороне предмета, прямое, мнимое, увеличенное в 3 раза.
- 5) при $d = \frac{1}{5}F$: изображение на стороне предмета, прямое, мнимое, увеличенное в 4 раза.
- 6) при $d = F$: изображение не формируется (рис.7.10-б).
- 7) при $F < d < 2F$: за линзой формируется перевернутое, действительное, увеличенное изображение (рис.7.10-в).
- 8) при $d = \frac{3}{2}F$: за линзой, обратная, действительная, увеличенная в 1,5 раза.
- 9) при $d = \frac{4}{3}F$: за линзой, обратная, действительная, увеличенная в 2 раза.
- 10) при $d = \frac{5}{3}F$: за линзой, обратная, действительная, увеличенная в 3 раза.
- 11) при $d = \frac{6}{3}F$: за линзой, обратная, действительная, увеличенная в 4 раза.
- 12) при $d > 2F$: за линзой формируется перевернутое, действительное, уменьшенное изображение (рис.7.10-г).
- 13) при $d = \frac{3}{2}F$: изображение за линзой, перевернутое, действительное, уменьшенное в 1,5 раза.

5.2) при $d = 3F$: изображение за линзой, обратное, действительное, уменьшенное в 2 раза.

5.3) при $d = 4F$: за линзой, перевернутое, действительное, уменьшенное в 3 раза изображение.

5.4) при $d = 5F$: изображение за линзой, перевернутое, действительное, уменьшенное в 4 раза.

Давайте определим минимальное расстояние между изображением и предметом в собирающей линзе. Расстояние между изображением и предметом определяется следующей формулой

$$\ell = d + f = d + \frac{dF}{d-F} = \frac{d^2}{d-F}$$

Следовательно, переменная функция, имеющая переменную d , является производной функции

$$\ell'(d) = \frac{d^2}{d-F}$$

Для нахождения точек экстремума этой функции производная по условной переменной равняется нулю.

$$\ell'(d) = \left(\frac{d^2}{d-F} \right)' = \frac{2d \cdot (d-F) - 1 \cdot d^2}{(d-F)^2} = \frac{d^2 - 2dF}{(d-F)^2} = 0, \rightarrow d \cdot (d - 2F) = 0, \rightarrow \begin{cases} d = 0 \\ d = 2F \end{cases}$$

Из этих двух ответов мы выберем только $d = 2F$. Расстояние до изображения в этом равно

$$f = \frac{dF}{d-F} = \frac{2FF}{2F-F} = 2F$$

Отсюда формируется кратчайшее расстояние между изображением и предметом

$$\ell = d + f = 2F + 2F = 4F$$

Это происходит, когда предмет помещается на двойное фокусное расстояние, создавая равное изображение на заднем двойном фокусном расстоянии линзы.

Таким образом, расстояние между изображением, полученным в собирающей линзе, и предметом может быть, по крайней мере, следующим:

$$\ell_{\min} = d + f = 4F \quad (7.7)$$

Построения изображения на рассеивающей линзе и частные случаи

С помощью рассеивающей линзы можно формировать только уменьшенное, прямое, мнимое изображение (рис.7.11). Остановимся на нескольких частных случаях даже для рассеивающей линзы.

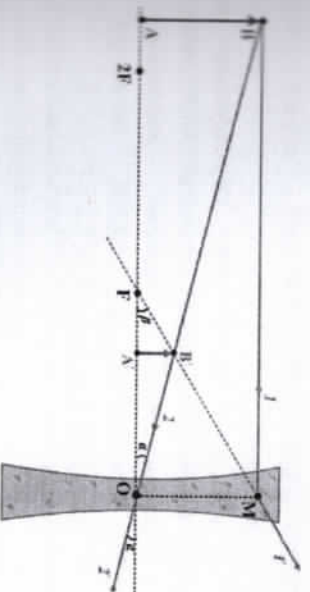


Рисунок 7.11

1) при $d \approx 0$: на стороне предмета образуется прямое, мнимое, примерно равное изображение.

2) при $d = \frac{1}{2}F$: на стороне предмета, прямое, мнимое, 1,5 раза уменьшенное изображение.

3) При $d = F$: на стороне предмета, прямое, мнимое, 2 раза уменьшенное изображение.

4) При $d = 2F$: на стороне предмета, прямое, мнимое, 3 раза уменьшенное изображение.

5) При $d = 3F$: на стороне предмета, прямое, 4 раза уменьшенное изображение.

Изображение предмета, находящегося в бесконечности, в рассеивающей линзе становится абстрактной точкой.

Вопросы по теме

1. Что называется линзой? Какие бывают виды линз?
2. Линзы определяют оптической осью, главной оптической осью, фокусного расстояния и фокальной плоскостью.
3. Построение изображения в собирающей линзе? Каким будет изображение в этом?
4. Построение изображения в рассеивающей линзе? Каким будет изображение в этом?
5. Напишите формулы линз для собирающих и рассеивающих линз.
6. Напишите формулы увеличения для собирающих и рассеивающих линз.
7. Приведите частные случаи для собирающей линзы.
8. Приведите частные случаи для рассеивающей линзы.

Решение задачи:

1. На сколько см от линзы формируется уменьшенное мнимое изображение предмета, расположенного на расстоянии 18 см от линзы с фокусным расстоянием 36 см?

A) 36 B) 18 C) 12 D) 9 E) 6

Дано:

$$F = 36 \text{ см}$$

$$d = 18 \text{ см}$$

Решение:

по тому $d < F$, как формируется увеличенное изображение, можно узнать, что линза является рассеивающей. Найдем расстояние между изображением и линзой, используя формулу рассеивающей линзы $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$

$$f = \frac{Fd}{F-d} = 36 \text{ см}$$

Это означает, что изображение формируется на расстоянии 36 см слева от линзы.

Ответ: A) 36 см

2. Какой с оптической силой линза необходим для формирования изображения предмета, увеличенного в 5 раз? На каком расстоянии от предмета нужна расположить линзу? Расстояние от предмета до экрана 3 м.

Дано:

$$k = 5$$

$$d + f = 3 \text{ м}$$

Решение:

От увеличения линзы $d + f = 3$

$$d + 5d = 6d = 30$$

$$d = 0,5 \text{ м}$$

Из формулы линзы $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ используя

$$D = \frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{3}{1,25} = 2,4 \text{ дптр}$$

Ответ: 0,5 м; 2,4 дптр

§ 8. ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ. ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ЛИНЗЫ ОТ ВИДА МАТЕРИАЛА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ.

Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем больше его способность преломлять свет, то есть, чем больше угол отклонения преломленного света. Другими словами, чем меньше фокусное расстояние, тем ближе собирается пучок параллельных лучей, падающих на линзу. А у линз с большим фокусным расстоянием все наоборот. Для характеристики этого свойства линз вводится обратная величина, фокусное расстояние. Эта величина называется оптической силой линзы и обозначается D .

$$D = \frac{1}{f} \quad (8.1)$$

Величина, обратная фокусному расстоянию линзы, называется оптической силой линзы. Линза, оптическая сила которой больше, резкое изображение дает.

Оптическая сила линзы с фокусным расстоянием l м равна диоптрии (дптр)

$$1 \text{ дптр} = \frac{1}{1 \text{ м}} \quad (8.2)$$

Следовательно, оказывается, что формулы линз в предыдущей теме также могут быть записаны следующими образом.

$$D = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} \quad (8.3)$$

$$D = \frac{1}{d} - \frac{1}{f} \quad (8.3a)$$

$$D = \frac{1}{f} - \frac{1}{d} \quad (8.3b)$$

в собирающей линзе, $d > F$ в рассеивающей линзе, $d < F$

В предыдущих темах говорилось, что фокусное расстояние линз и его оптическую силу можно определить с помощью эксперимента (фокусируя пучком параллельных лучей). Но эти величины также можно определить по геометрическим размерам линзы и типу материала. Для линз в вакууме оптическая сила и фокусное расстояние будут равны:

$$D = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad F = \frac{R_1 R_2}{(n_2 - 1)(R_1 + R_2)} \quad (8.4)$$

Здесь D — оптическая сила линзы [1/м=диоптрия]; R_1, R_2 — радиусы кривизны сфер линзы; n_2 — абсолютный показатель преломления линзы.

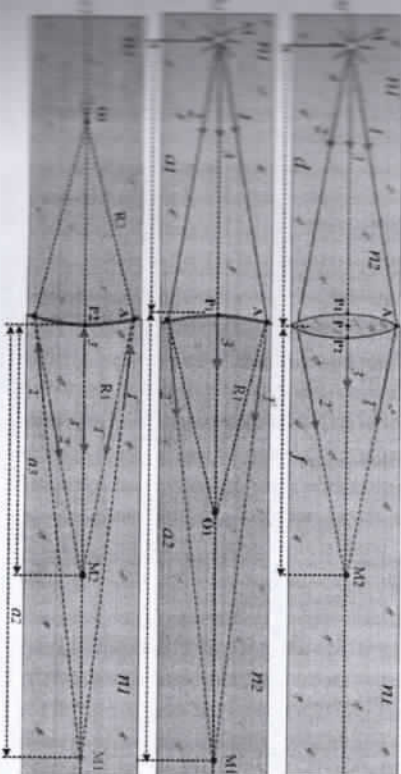


Рисунок 8.1

Выведенная выше формула применима для двухсторонней выпуклой линзы. Если линза также имеет вогнутую поверхность, то принимается $R < 0$. В линзах, которые толще середины, чем края, выражение в скобках будет

положительным $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} > 0\right)$, и, следовательно, оптическая сила линзы также

бюджет положительной ($D > 0$). Такие линзы будут иметь свойство собирать луч. В линзах, которые тоньше середины, чем край, выражение в скобках будет отрицательным $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) < 0$, и, следовательно, оптическая сила линзы

Также будет отрицательной ($D < 0$). Такие линзы будут иметь свойство рассеивать свет. В случае вогнуто-выпуклых линз с одинаковой толщиной выражение в скобках равно нулю $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 0\right)$ или, $R_1 = R_2$ следовательно,

оптическая сила линзы также равна нулю ($D=0$). Такие линзы не изменяют направление света, то есть луч проходит через линзу без преломления (рис.8.2).

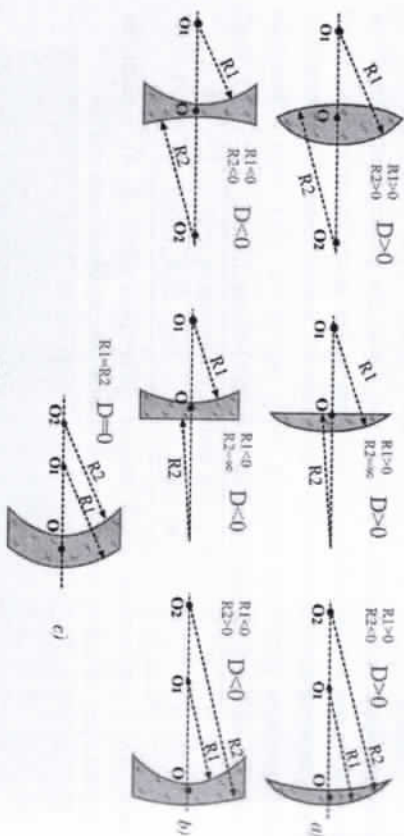


Рисунок 8.2

Для симметричной линзы в вакууме оптическая сила и фокусное расстояние равна:

$$D = (n_s - 1) \frac{2}{R}, \quad F = \frac{R}{2(n_s - 1)} \quad (8.5)$$

Если линза находится в какой-либо прозрачной среде, то получается относительный показатель преломления света, т. е. $n = \frac{n_2}{n_1}$. Когда линза

находится в среде, вместо абсолютного показателя преломления света берется относительный показатель преломления света. Относительный показатель преломления линзы относительно среды равна $n = \frac{n_L}{n_M}$.

Следовательно, для линз находящийся в среде оптическая сила и фокусное расстояние будет равно:

$$D = \left(\frac{n_x - 1}{n_{cp}} \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad F = \frac{R_1 R_2}{\left(\frac{n_x - 1}{n_{cp}} \right) (R_1 + R_2)} \quad (8.6)$$

n_{sp} – абсолютный показатель преломления среды.

Для симметричной линзы в вакууме оптическая сила и фокусное расстояние равны:

$$\begin{aligned} D &= \left(\frac{n_a - 1}{n_{cp}} \right) \frac{2}{R}, & F &= \frac{R}{2 \left(\frac{n_a - 1}{n_{cp}} \right)} \end{aligned} \quad (8.7)$$

Далее посмотрим, как изменится фокусное расстояние, которое линза находится в среде. Первоначально фокусное расстояние будет равно, когда линза находится в вакууме.

$$F_1 = \frac{R_1 R_2}{(n_g - 1)(R_1 + R_2)}$$

Линза при перемещении линза в прозрачную среду фокусное расстояние

$$F_2 = \frac{R_1 R_2}{\left(\frac{n_2}{n_{cp}} - 1 \right) (R_1 + R_2)}$$

Отношение двух фокусных расстояний равно

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{n_i - 1}{n_i - 1}$$

На этом получаем следующую фразу

$$F_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2 - 1} F_1$$

1. Следовательно, если фокусным расстоянием собирающей линзы F_1 с предельным показателем преломления n_1 , то фокусное расстояние будет равно F_2 при введении этой линзы в среду с показателем преломления n_2 .

$$F_2 = \frac{n_a - 1}{n_b - 1} F_1 \quad (8.8)$$

Из полученных выше формул можно сделать следующие выводы:

1. При переносе лампы из вакуума в среду фокенное расстояние увеличивается, а оптическая сила уменьшается.

2. При введении собирающей линзы в среду, в которой абсолютный показатель больше, чем у линзы, собирающая линза превращается в рассеивающую линзу (рис.8.3).

3. Рассеивающая линза превращается в собирающую линзу (рис.8.4), если рассеивающая линза входит в среду, в которой абсолютный показатель преломления больше, чем у линзы.

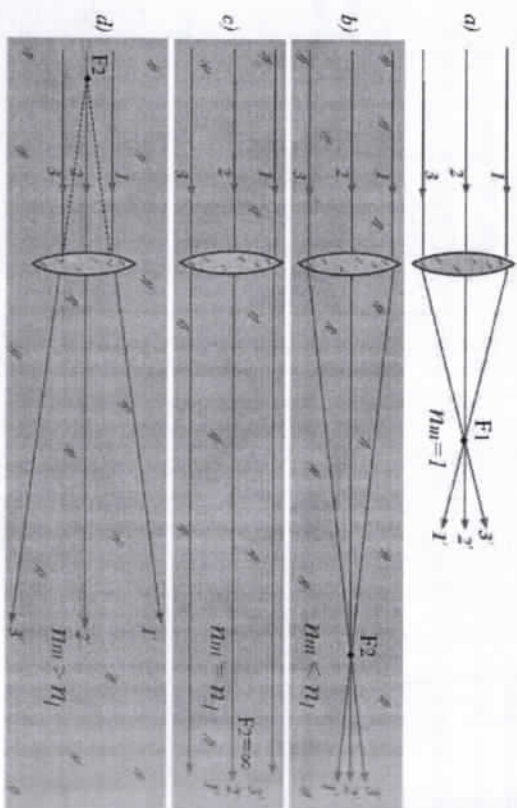


Рисунок-8.3

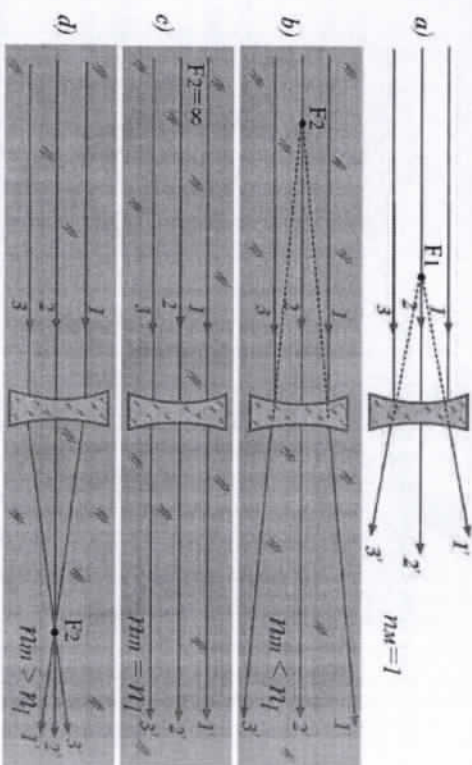


Рисунок-8.4

Если несколько линз сосредоточены в одном месте, оптические силы каждой линзы складываются алгебраически, чтобы найти оптическую силу этой оптической системы. При этом оптическая сила собирающей линзы принимается за положительную, а рассеивающей-за отрицательную.

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n \quad (8.9)$$

Например, если состоящей из пяти линз оптические

силы представленных на рисунке, соответственно

$$D_1 = 8 \text{ дптр}, D_2 = -6 \text{ дптр}, D_3 = 10 \text{ дптр}$$

$$D_4 = -3 \text{ дптр}, D_5 = 4 \text{ дптр},$$

то результирующая оптическая сила оптической

системы равна (рис.9.5).

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 = 8 - 6 + 10 - 3 + 4 = 13 \text{ дптр}$$

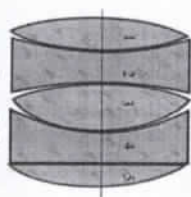


Рис 8.5

Вопросы по теме

1. Что называется оптической силой линзы и какова ее единица измерения?
2. Запишите формулу зависимости оптической силы линзы от геометрического размера и вида материала стекла.
3. Как изменится фокусное расстояние и оптическая сила линзы, если ее поместить из вакуума в прозрачную среду?
4. Что произойдет, если линза будет помещен в прозрачную среду, которая больше, чем показатель преломления линзы?
5. Как определяется оптическая сила системы линз?

Решение задачи:

1. Радиус кривизны сторон симметричной выпуклой линзы, изготовленной из стекла с показателем преломления $n_L = 1,56$, равен 40 см. Определите фокусное расстояние, создаваемое линзой, когда линзу поместить в воду. Чему будет равен радиус кривизны сторон другого симметрично выпуклого линза с одинаковым фокусным расстоянием?

Дано:

$$n_L = 1,56$$

$$n_W = 1,33$$

$$R_0 = 40 \text{ см}$$

$$F_0 = F_2$$

$$F_1 = ?$$

$$R_1 = ?$$

Решение:

Сначала найдем фокусное расстояние линза в воздухе.

$$\frac{1}{F_1} = (n_L - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} \right) = (n_L - 1) \frac{2}{R_1} \rightarrow F_1 = \frac{R_1}{2(n_L - 1)}$$

$$= \frac{40}{2 \cdot (1,56 - 1)} = 35,7 \text{ см}$$

Теперь определим фокусное расстояние, которое получается при погружении этой линзы в воду.

$$F_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2 - 1} F_1 = \frac{1,56 - 1}{1,33 - 1} \cdot 35,7 \text{ см} = 115,6 \text{ см}$$

Теперь найдем радиус кривизны линзы, фокусное расстояние которой равно $F_2 = 115,6$ см и представляет собой двойной симметричный выпуклый линза, находящийся в воздухе.

$$\frac{1}{F_2} = (n_2 - 1) \frac{2}{R_2} \rightarrow R_2 = 2(n_2 - 1)F_2 = 2 \cdot (1,56 - 1) \cdot 115,6 \text{ см} = 129,5 \text{ см}$$

Ответ: $F_2 = 115,6$ см; $R_2 = 129,5$ см

§ 9. ГЛАЗ-ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛАЗА.

Глаз-оптический прибор:

Глаз человека имеет шаровидную форму, отсюда его название – *шаровидное яблоко*. Он состоит из трех оболочек: наружной, сосудистой и сетчатки, а также внутреннего содержимого.

Передняя часть наружной оболочки – *роговица* – подобна прозрачному окошку во внешний мир, через нее лучи света попадают внутрь глаза. Имея выпуклую форму, она не только пропускает, но и преломляет эти лучи. Остальная часть наружной оболочки – *склера* – непрозрачна и внешне похожа на вареный яичный белок.

Вторая оболочка – *сосудистая* – состоит из множества мелких сосудов, по которым кровь снабжает глаз кислородом и питательными веществами. В этой оболочке также выделяют несколько частей: переднюю – *радужка*, среднюю – *цилиарное тело* и заднюю – *хориоидея*. Цвет наших глаз определяется содержанием пигмента в радужке, которая видна через роговицу. В центре радужки находится круглое отверстие – *зрачок*. Его размеры меняются в зависимости от освещенности: в темноте он увеличивается, на ярком свете – уменьшается.

Пространство между роговицей и радужкой называют *передней камерой*. Цилиарное тело вырабатывает внутриглазную жидкость, которая циркулирует внутри глаза, омывая и питая роговицу, хрусталик, стекловидное тело. Эта жидкость оттекает через специальную дренажную систему в углу передней камеры. В толще цилиарного тела находится и аккомодационная мышца, которая с помощью связок регулирует форму хрусталика.

Хориоидея – задняя часть сосудистой оболочки – непосредственно контактирует с сетчаткой, обеспечивая ей необходимое питание.

Передняя оболочка глаза – *сетчатка* (или *сетчатка*) состоит из нескольких слоев нервных клеток и выстилает его изнутри. Именно она обеспечивает нам зрение. На сетчатке отображаются предметы, которые мы видим. Информация о них затем передается по *зрительному нерву* в головной мозг. Однако не вся сетчатка видит одинаково: наибольшей чувствительной способностью обладает *макула* – центральная часть сетчатки, где расположено основное количество зрительных клеток (колбочек).

Внутри оболочек заключены передняя и задняя (между радужкой и хрусталиком) камеры, заполненные внутриглазной жидкостью, а главное – *хрусталиком* и *стекловидное тело*. Хрусталик имеет форму двояковыпуклой линзы. Как и роговица, он пропускает и преломляет лучи света, фокусируя изображение на сетчатке. Стекловидное тело имеет консистенцию желе и отделяет хрусталик от глазного дна. (рис. 9.1).

Лучи, попадающие в глаз, больше всего преломляются на поверхности роговицы. Зрачок также немного поглощает свет дополнительно. Внутреннюю систему глаза можно рассматривать как собирающую линзу, фокусное расстояние которой является переменным, но глубина (расстояние от радужной оболочки до сетчатки) не меняется.

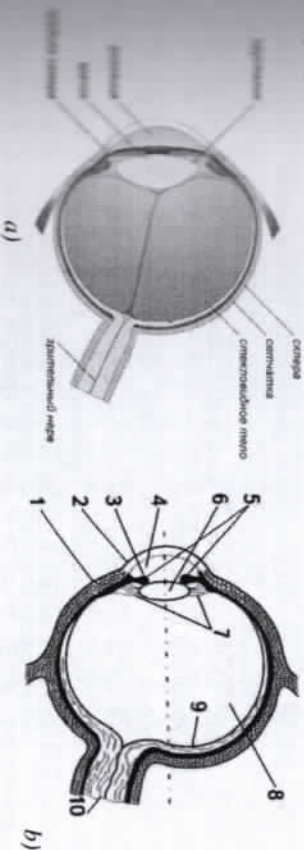


Рисунок 9.1

На сетчатке формируется действительное, перевернутое, уменьшенное изображение предмета. Свет, попадающий в глаз, воздействует на нервные окончания (палочки и трубки), создавая зрительное ощущение. Эти палочки и трубки передают обратное изображение в мозг, и мозг переворачивает это изображение еще раз, создавая правильное изображение.

Аккомодация, адиптация и конвергенция глаз:

Глаз представляет собой сложную оптическую систему, в которой падающий на него свет преломляется через роговицу, радужную оболочку, зрачок, радужную оболочку и специальную бесповающую жидкость. Из них больше всего преломляется луч света в зрачке. Для упрощения в расчетах глаз изображается одной собирающей линзой.

Если предмет находится далеко, изображение формируется на нормальной сетчатке без напряжения мышц ротовицы. Когда человек смотрит слишком далеко (к бесконечности, например, к звездам), мышцы, удерживающие волну, расслабляются, в то время как мышцы отдыхают. Фокусное расстояние глаза, взгляд которого направлен в бесконечность, будет наибольшим, примерно равным $F_1 \approx 17$ мм, а оптическая сила $D_1 \approx 58$ дптр.

Если предмет находится ближе, формирование изображения на сетчатке достигается за счет уменьшения фокусного расстояния глаза. При этом мышца, изменяющая кривизну туповища, немного напрягается. Сосредоточение взгляда на близком предмете осуществляется с помощью сжатия туповища мышцами. Поскольку прикосновение к предметам, находящимся слишком близко, требует, чтобы глаз находился в напряженном состоянии, мышцы устают. При нормальном взгляде на предмет на расстоянии $d_0 = 25$ см фокусное расстояние глаза примерно равно $F_2 \approx 14$ мм, а оптическая сила равна $D_1 \approx 70$ дптр.

Адаптация глаза к изменению наблюдаемого расстояния называется аккомодацией глаза.

Ближайшая точка аккомодации называется расстоянием наилучшего зрения. Для нормального глаза это расстояние $d_0 = 25$ см. Аккомодация глаза не бесконечна. Еще с помощью кольцевых мышц, оптической силы глаза может быть увеличен до 12 дптр.

Человеческий глаз способен хорошо видеть предметы не только в дневное время, но и в вечернее и ночное. Человек начинает видеть образы предметов после некоторого пребывания в темноте. Способность светочувствительных нервных окончаний в глубине глаза приспосабливаться к различному свету, то есть к разной яркости наблюдаемых предметов, называется адаптацией.

Когда человек смотрит на предмет, он направляет стрелки своего глаза так, что эти стрелки пересекаются на предмете (рис.9.2). Если предмет находится близко к наблюдателю, вам нужно будет напрягать мышцы, чтобы пересекать оси глаз на предмете. В зависимости от величины этого напряжения измеряется расстояние до предмета, которое отливается от того, находится предмет далеко или близко. Пересечение осей глаз в определенной точке называется *конвергенцией* (от лат. Convergence — встреча). При движении тела изменяется и положение осей глаз, направленных к этому телу. Соответственно, замечается, что тела движется. Оси глаз будут почти параллельны, если смотреть на объект слишком далеко. Поскольку положение глазных осей практически не меняется при движении этого тела,

это движение трудно заметить. Таким образом, с помощью явления конвергенции можно получить информацию о том, находится ли тела далеко или близко, и находится ли он в движении или в покое.

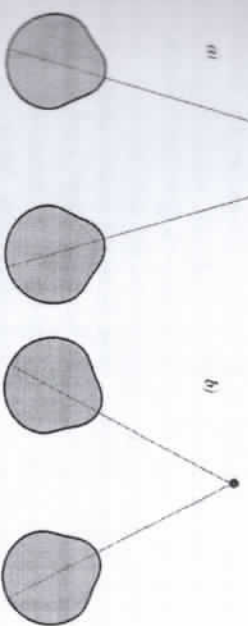


Рисунок 9.2

Длительность зрительного ощущения:

Если мы очень быстро перемещаем в темноте тела, наконецник которого торчит пальцем, то наблюдающий издали увидит вращающееся кольцо. Даже после того, как лампа погаснет перед глазами человека, смотрящего на неподвижную электрическую лампу, ее свечение не исчезнет в течение некоторого времени. Если человек смотрит на тела, то даже после того, как эти тела были удалены, его можно увидеть в течение 0,1 с в ближайшем время. Не види быстро вращающегося велосипедного или мотоциклетного колеса, мы видим круговую дорожку. Точно так же мы не можем зацепиться за стрелу, которая быстро пролетает мимо нас. Эти явления свидетельствуют о наличии своеобразной инерции в процессе человеческого зрения.

Если человек быстро пробегает мимо стены с узкой прорезью, сделанной из дерева, то он отчетливо увидит, что происходит за стеной. Это явление называется стробоскопическим эффектом. Стробоскопический эффект — явление современного кинематографа. 25 кадров в секунду проходят в кинотеатрах. Во время обмена изображениями объектов фотоаппарата увеличивается, а экран остается не освещенным. Но, это не замечено зрителем, они видят движущийся процесс в результате последовательного обмена изображениями.

Угол зрения:

Когда мы смотрим на здания издали, кажется, что их размеры меньше, чем размеры близких зданий. Объясняется это следующим образом: хотя все здания имеют одинаковую высоту, они образуют на сетчатке глаза

изображения разного размера, то есть изображение здания в глубине глаза меньше. Поэтому предметы на расстоянии кажутся меньше. Размеры изображения предметов на сетчатке определяются углом зрения ϕ .

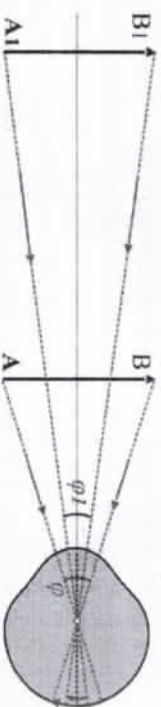


Рисунок 9.3

Угол между предметом, рассматриваемым от оптического центра глаза и картинным точкам предмета, называется углом зрения.

Чем больше угол зрения ϕ , тем большее число светочувствительных нервных окончаний (палочек и трубочек) закрывает изображение в глубине глаза. В результате человек различает множество мелких деталей наблюдаемого предмета. А чтобы увеличить угол зрения, придется присмотреться к предмету поближе. Но, как увеличить угол зрения не будет даже полезно, чтобы приблизить предмет от лучшего расстояния просмотра $d_0 = 25 \text{ см}$. Для достижения цели используются дополнительные оптические приборы (лупа, окуляр, микроскоп и др.) необходимо будет использовать).

График 9.1

Освещенность фона, лк	Предельный угол зрения, мин.	Освещенность фона, лк	Предельный угол зрения, мин.
0,0001	50	0,5	2
0,0005	30	1	1,5
0,001	17	5	1,2
0,005	11	10	0,9
0,01	9	100	0,8
0,05	4	500	0,7
0,1	3	1000	0,7

Когда рассматриваемый предмет находится слишком далеко, его изображение закрывает только одно светочувствительное нервное волокно в глубине глаза. В результате изображение выглядит как точка. Это происходит, когда угол зрения составляет $30''$. На практике человеческий глаз становится неспособным различать мелкие детали предмета, когда угол зрения меньше $1'$. Следовательно, предельный угол, под которым тела становятся точкой, принимается равным $1'$, и этот угол называется предельным углом зрения. Предельный угол зрения также зависит от

величины тела. В таблице 9.1 приведено соотношение между предельным углом зрения нормального глаза и освещенностью тела.

Вспомогательный глаз и рекомендуемые очки для этого глаза:

У некоторых людей глаз без напряжения формирует изображение удаленного предмета не на сетчатке, а перед ней (рис.9.4-а). Близорукий глаз собирает лучи сильнее, чем нормальный глаз, что означает, что оптическая сила близорукого глаза больше, чем у нормального глаза. Обладатели таких дефектных глаз не могут хорошо видеть на расстоянии. Такой дефект глаза называется близорукостью. Близорукий глаз отчетливо видит предмет на некотором расстоянии, при удалении от него зрение начинает ухудшаться, и самая дальняя точка accommodation глаза не находится в бесконечности. Самое лучшее расстояние просмотра близорукого глаза будет меньше 25 см . Например, близорукий глаз хорошо видит, начиная с 10 см и увеличивая на расстоянии 100 м . Дефект близорукости исправляется ношением очков (— очков) с рассеивающими линзами. Проходя через такую линзу, параллельные лучи кажутся глазу исходящими из бесконечности, и изображение формируется в сетчатке (рис.9.4-б).

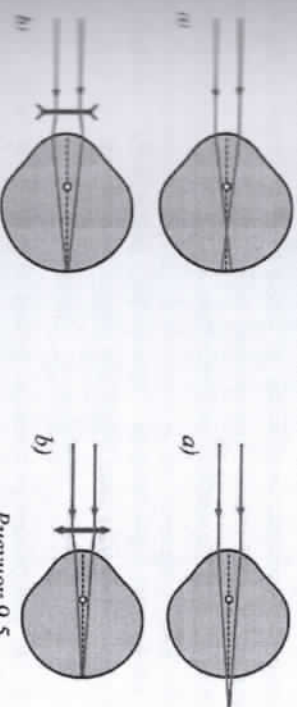


Рисунок 9.4

Дальновзорный глаз и рекомендуемые очки для этого глаза:

Дефект зрения, связанный с тем, что изображение удаленных предметов попадает за сетчатку, называется дальновзорностью (рис.9.5-а). Дальновзорный глаз не может собирать лучи так сильно, как нормальный глаз, то есть оптическая сила дальновзорного глаза меньше, чем у нормального глаза. Поэтому дальновзорный глаз видит расстояние от 50 см до бесконечности. Когда обладатель этого глаза хочет читать книгу, он не может различить буквы на расстоянии 50 см в то время как рядом с этим расстоянием буквы будут видны. Дальновзорность исправляется ношением очков (+ очков) со собирающими собирающими линзами. Для просмотра удаленных тел

Оптическая сила линзы должна быть такой, чтобы параллельные лучи фокусировались на сетчатке глаза (рис.9.5-6).

Нормальный глаз, близорукий глаз и дальнозоркий глаз хорошо видны на в качестве примера рисунке 9.6. Нормальный глаз видит от 25 см до бесконечности, близорукий от 10 см до некоторого расстояния, а дальнозоркий от 40 см до бесконечности без напряжения. Дальнозоркий глаз может видеть за глазами даже минимальные источники, начиная с некоторого расстояния и заканчивая бесконечностью. Это означает, что он может видеть не только параллельные лучи, но и собранные лучи.

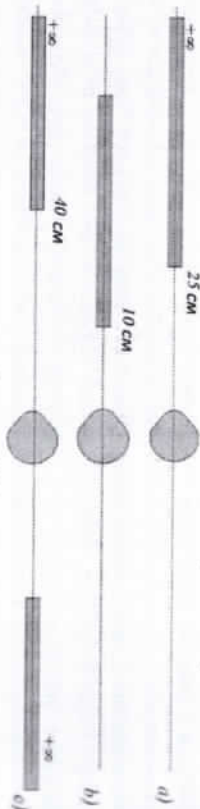


Рисунок 9.6

Для дефектного глаза оптическая сила очки выбирается таким образом, чтобы оптическая система, состоящая из глаза и очки, стала нормальным глазом. Зная наилучшее расстояние зрения дефектного глаза и нормального глаза, можно будет рассчитать оптическую силу очки, рекомендуемую дефектному глазу.

Если наилучшее расстояние просмотра дефектного глаза d_1 , то рекомендуемая оптическая сила очков для этого глаза такова:

$$D = \frac{1}{d_0} - \frac{1}{d_1} \quad [\text{дптр}]$$

Здесь: $d_0=25$ см — наилучшее расстояние зрения нормального глаза.

Вопросы по теме

1. Опишите строение глаза? Какая линза глаза?
2. Какая линза глаза? Чем глаз отличается от фотоаппарата?
3. Что такое аккомодация, адаптация и конвергенция глаз?
4. Расскажите о дальнозоркости зрительных ощущений и угле зрения.
5. Что такое близорукый глаз? Как устранить этот дефект?
6. Что такое дальнозоркий глаз? Как устранить этот дефект?

Решение задачи:

1. Оптимальное расстояние наилучшего зрения дефектного глаза 25 см. Какой оптической силой (D) должен обладать этот человек, если расстояние наилучшего зрения дальнозоркого человеческого глаза составляет 1 м?

А) невозможно определить В) +1 С) +4 D) -3 E) +3

Дано:

$$l_0 = 25 \text{ см}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$D_k = ?$$

Решение:

Для нормального зрения дефектного глаза сумма оптических сил очки с оптической силой дефектного глаза k должна быть равна оптической силе нормального глаза то есть

$$D_n = D_o + D_k$$

Из этого $D_k = \frac{1}{l_0} - \frac{1}{l} = +3 \text{ дптр}$

Ответ: E) +3 дптр

§ 10. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ.

Оптические устройства используются для просмотра мелких предметов, которые трудно увидеть, или предметов, которые находятся слишком далеко. Оптические приборы позволяют не только увеличивать наблюдаемый объект и предметы, но и увеличивать угол зрения.

Увеличением оптического прибора называют отношение угла зрения наблюдаемого предмета прибором ϕ_k углу зрения ϕ_0 открытым глазом.

$$K = \frac{\phi_k}{\phi_0} \quad (10.1)$$

Поскольку углы ϕ и ϕ_0 обычно являются очень маленькими углами при наблюдении мелких объектов, увеличение будет примерно равно следующей формуле.

$$K \approx \frac{f_0 \phi_0}{f_k \phi_k} \quad (10.2)$$

Дано:

Простейшим оптическим прибором, позволяющим увеличить угол зрения при наблюдении за мелкими объектами, является лупа. Фокусное расстояние лупы находится в пределах $F = 5 - 10$ см диапазона, что увеличивает угол зрения не более чем в 5 - 6 раз.

Расстояние наилучшего зрения здорового глаза $d_0=25$ см держать мелкие предметы близко к глазу чем это расстояние не выгодно, т. е. ухудшается качество изображения, глаз напрягается.

Угол зрения при наблюдении небольшого предмета размером с $AB=h$ на расстоянии наилучшего зрения (рис.10.1-а).

$$\phi_0 \approx \frac{AB}{d_0} = \frac{h}{d_0}$$

(рис.10.1-а).

При использовании лупы

лупа подносится на расстояние, близкое к глазу, и наблюдаемый маленький объект помещается в задний фокус лупы. В результате в лупе преломленные лучи превращаются в пучок взаимно параллельных лучей. Поскольку глаз также является собирающей линзой, он собирает пучок параллельных лучей во

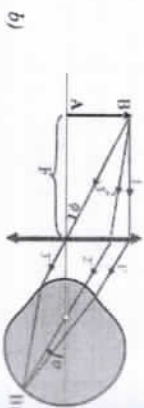
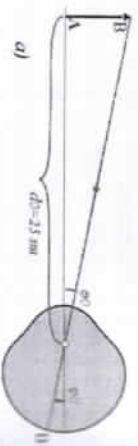


Рис 10.1

внутренней фокальной плоскости глаза, то есть на дне глаза. При этом только луч $2'$, проходящий через оптический центр глаза, попадает в точку B_1 в глазом дне, не преломляясь в глаз. Все остальные лучи, включая лучи $1'$ и $3'$, падают в точку B_1 , когда они преломляются в глазу. Так формируется перевернутое изображение точки B на дне глаза.

$$\varphi \approx \text{tg} \varphi = \frac{AB}{F} = \frac{h}{F}$$

Угол зрения небольшого по размеру предмета $AB = h$ будет равен K следующему выражениям (рис. 10.1-б).

Соотношение углов зрения при взгляде на маленький объект в масштабе лупы и углов зрения при взгляде с открытым глазом дает увеличение лупы.

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0} \approx \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \varphi_0} = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F} = \frac{0,25}{F}$$

Таким образом, увеличение лупы будет равно:

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{d_0}{F} = \frac{0,25}{F} \quad (10.3)$$

Ву holda ko'z cheksizlikka akkomodatsiyalangan bo'lib, AB buyumi odam zo'rtmasdan va uzoq vaqt to'liqmasdan kuzatishi mumkin.

Глаз в этом случае аккомодирован до бесконечности, и этот предмет может наблюдаться человеком без напряжения и длительное время без утомления.

Агар AB buyumi luringing fokal tekisligidan luraга уақинроқда сўтасак ($d < F$), luringing kattalashtirishi oldingidan b'roz kattaroq bo'ladi, ammo ko'z zo'rtqadi. Bunda eng yaxshi ko'rish masofasi $d_0 = 25$ sm da buyumning $A'B'$ tavvini tasviti olish mumkin. Singan barcha nurlar, jumladan $1', 2', 3'$ nurlar sochiladi. Lekin, ko'z yig'uvchi linza bo'lgani uchun bu nurlar qaytadan ko'z tubida B_1 nuqtada to'playdi. Bunda hosil bo'lgan tasvir buyum luringing fokal tekisligida turgandagi hosil bo'ladigan tasvirdan kattaroq bo'ladi, shuningdek ko'rish burchagi ham kattaroq bo'ladi (10.2-a, rasn).

Если мы переместим объект AB из фокальной плоскости лупы ближе к

лупе, увеличение лупы будет немного больше, чем раньше, но глаз будет напряжен. При наилучшем расстоянии зрения $d_0 = 25$ см можно получить минное изображение предмета. Все преломленные лучи, в том числе и лучи, рассеиваются. Но, поскольку глаз является собирающей линзой, он собирает эти лучи обратно в точку B_1 в глазом дне. Полученное при этом изображение будет больше, чем полученное при нахождении предмета в фокальной плоскости лупы, а также будет иметь больший угол зрения (рис. 10.2-а).

Из рисунка видно $\text{tg} \varphi = \frac{AB}{d} = \frac{h}{d}$. Это будет увеличение лупы.

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0} \approx \frac{\text{tg} \varphi}{\text{tg} \varphi_0} = \frac{h/d}{h/d_0} = \frac{d_0}{d} = \frac{1}{F} \cdot d_0 = \left(\frac{1}{F} + \frac{1}{d_0} \right) \cdot d_0 = \frac{d_0}{F} + 1 = \frac{0,25}{F} + 1$$

Таким образом, когда объект помещается внутри фокальной плоскости лупы, увеличение лупы будет следующим:

$$K = \frac{d_0}{F} + 1 \quad (10.4)$$

Следовательно, оказывается, что увеличение лупы может быть увеличено максимум на одну единицу в обмен на напряжение глаз.

При увеличении предмета от фокальной плоскости лупы от лупы ($d > F$) увеличение лупы становится несколько меньше, чем при нахождении предмета в фокальной плоскости (рис. 10.2-б). Если предмет поместить от лупы на расстояние наилучшего зрения $d_0 = 25$ см, то изображение не формируются.

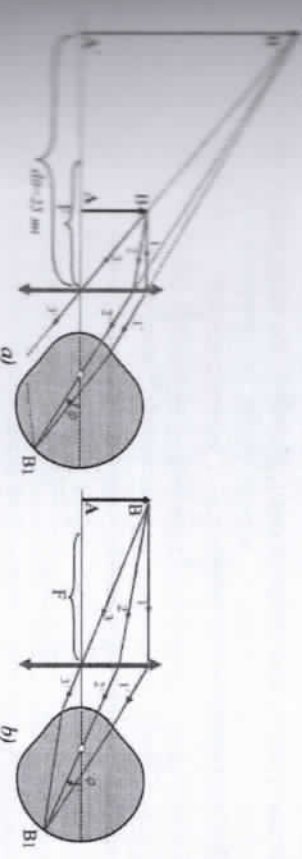
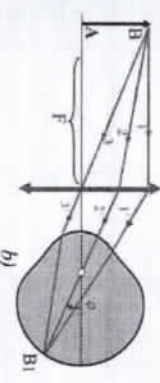


Рисунок 10.2



Поскольку диаметр лупы невелик, их фокусное расстояние также будет небольшим. Поэтому лупа не позволяет увеличить угол зрения так сильно, как хотелось бы. Тогда для дальнейшего увеличения уровня увеличения придется использовать другие оптические приборы.

Микроскоп!

Микроскоп используется для просмотра очень мелких частей. Микроскоп будет иметь две линзы, фокусное расстояние которых намного меньше, чем у лупы. Линза, который находится на стороне предмета, называется объективом, а линза, который находится на стороне наблюдателя, называется окуляром. Фокусное расстояние объектива будет меньше (следовательно, оптическая сила больше), чем у окуляра. Возьмем фокусное расстояние объектива $F_{обк} = F_1$, а фокусное расстояние окуляра $F_{ок} = F_2$. Возьмем расстояние между объективом и окуляром a , а расстояние между их фокусными расстояниями Δ . Здесь Δ — называется длина трубки микроскопа. Наблюдаемое небольшое тело AB (например, биологические клетки) помещается ($d_1 > F_1, d_1 \approx F_1$) за фокальной плоскости объектива. На расстоянии $f_1 \gg F_1$ образуется перевернутое действительное изображение A_1B_1 , этого небольшого предмета. Размещаем окуляр таким образом, чтобы изображение A_1B_1 лежало в фокальной плоскости окуляра. Лучи, исходящие от окуляра, превращаются в пучок параллельных лучей и падают на глаз под углом φ . А глаза, собирая пучок этих параллельных лучей, превращает A_2B_2 в правильное изображение в глубине глаза. Следовательно, изображение A_1B_1 , образованный объективом, человек видит под углом φ (рис. 10.3). Определим, что из рисунка.

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{A_1B_1}{F_2} = \frac{f_1 \tan \varphi_1}{F_2} = \frac{f_1}{F_2} \cdot \frac{AB}{d_1} = \frac{f_1}{F_2} \cdot AB \cdot \left(\frac{1}{F_1} - \frac{1}{f_1} \right) = \frac{f_1 - F_1}{F_1 \cdot F_2} \cdot AB \\ &= \frac{\Delta}{F_1 \cdot F_2} \cdot AB = \frac{\Delta \cdot AB}{F_1 \cdot F_2} \end{aligned}$$

При наблюдении небольшого AB предмета на расстоянии наилучшего тангенса угла зрения будет равен $\tan \varphi_0 = \frac{AB}{d_0}$. По найденным углам можно найти увеличение микроскопа.

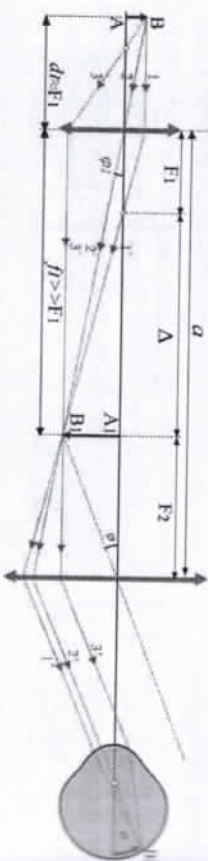


Рисунок 10.3

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0} \approx \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \left(\frac{\Delta \cdot AB}{F_1 \cdot F_2} \right) : \left(\frac{AB}{d_0} \right) = \frac{\Delta \cdot d_0}{F_1 \cdot F_2}$$

Таким образом, увеличение микроскопа равно:

$$K = \frac{\Delta}{F_1} \cdot \frac{d_0}{F_2}$$

(10.5)

Умножив формулу на объектив каталаштишні $K_1 = \frac{\Delta}{F_1}$ біля, окулярінь

каталаштишні еса $K_2 = \frac{d_0}{F_2}$ біля веліасак, мікроскопінг каталаштишні

формула во'ля екап:

Біля на прирешенной выше формулы увеличение объектива $K_1 = \frac{\Delta}{F_1}$ и

увеличение окуляра $K_2 = \frac{d_0}{F_2}$, то увеличение микроскопа будет выглядеть

следующим образом:

$$K = K_1 \cdot K_2$$

(10.6)

Увеличение микроскопа будет равно умножению увеличения объектива и увеличения окуляра.

Обычно микроскоп отримі чатагандя, маудя јіслапінг маушп, то'кати́ган, (названий 1000) пилта каталаштишніган тасу'ітіні ко'гаді.

При вигляде через микроскоп человек видит минное, перевернутое, увеличенное изображение мелких тел примерно в 1000 раз.

Фотомікроскоп:

Фотомікроскоп — устройство для регистрации неподвижных изображений (получения фотографий). Запись изображения в фотоаппарате осуществляется фотохимическим способом при воздействии света на светочувствительный фотоматериал. Получаемое таким способом скрытое изображение преобразуется в видимое при лабораторной обработке. В цифровом фотоаппарате фотофиксация происходит путём фотоэлектрического преобразования оптического изображения в электрический сигнал, цифровые данные о котором сохраняются на электронном независимом носителе. Фотоаппараты способны обнаруживать объекты, видимые невооружённым глазом, то есть объекты, размер которых составляет порядка метра (например, дерево, здание, человек, машина и т. д.) и используются для фотографирования. При этом уменьшенное, действительное и перевернутое изображение объектов создается в результате разложения чувствительной к свету пленки внутри фотоаппарата. Такая пленка называется негативной. Внутри фотоаппарата находится собирающая линза, которая называется *объективом*. Объектив может быть направлен вперед или назад. При съемке удаленного объекта объектив отодвигается назад, то есть к самому изображаемому ($f > F, f \approx F$). Расстояние до объекта должен быть намного больше, чем фокусировка объектива. Поэтому

изображение формируется за углом к фокусному расстоянию объекта, на расстоянии, немного большем фокусного расстояния (рис.10.4). В результате увеличения фотоаппарата будет выглядеть следующим образом:

$$K = \frac{f}{d} \approx \frac{F}{d}$$

Теперь давайте разберемся, каким будет размер изображения при съемке объекта с какого-то расстояния. Используем формулы увеличения линзы $K = \frac{f}{d} \approx \frac{F}{d}$ и $K = \frac{H}{h}$ в результате получаются искомым выражения.

$$\frac{H}{h} = \frac{F}{d}, \rightarrow H = \frac{F}{d} h$$

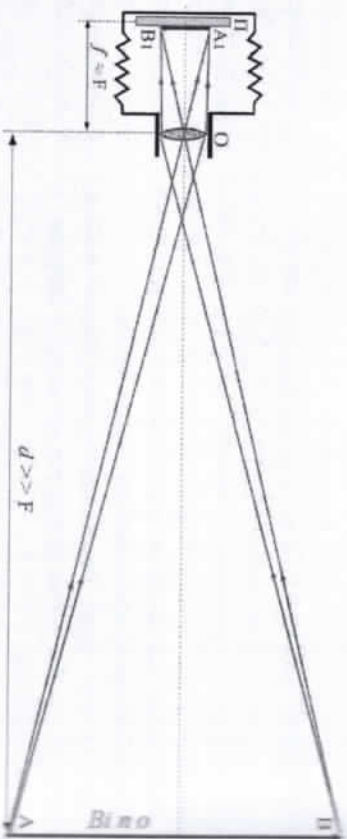


Рисунок 10.4

Следовательно, при съемке с расстояния d фотоаппаратом с фокусным расстоянием F объектива для появления предмет с высотой h высоты изображения на негативе будет равна:

$$H \approx \frac{F}{d} h$$

(10.7)

Фотоаппарат уюндамда бйот объектлр иккй хй усулда сур'атга олганда тасвир о'йчанларг ма'лум бо'lsa, объектнинг о'йчанлр, linzaning optik kuchi va fokus masofasini aniqlash mumkin экан. Shu kattaiklatmi torayik. Buyummi d_1 masofadan suratga olganda tsvir $f_1 = \frac{H_1}{h} d_1$ masofada, d_2 masofadan suratga olganda esa tsvir $f_2 = \frac{H_2}{h} d_2$ masofada hosil bo'ladi. Fokus masofa ushul

Оказывается, что при съемке объекта с помощью фотоаппарата двумя различными способами можно определить размер объекта, оптическую силу объектива и фокусное расстояние, если известны размеры изображения. Давайте найдем эти величины. При съемке объекта d_1 изображение

появляется на расстоянии $f_1 = \frac{H_1}{h} d_1$, а при съемке d_2 изображение появляется на расстоянии $f_2 = \frac{H_2}{h} d_2$.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}$$

Найдем высоту предмета по формуле для фокусного расстояния.

$$\frac{1}{d_1} + \frac{h}{H_1 d_1} = \frac{1}{d_2} + \frac{h}{H_2 d_2} \rightarrow \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1}{H_1 H_2 d_1 d_2} = \frac{d_1 - d_2}{d_1 d_2} \rightarrow h = \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1}{H_1 H_2 d_1 d_2} (d_1 - d_2) H_1 H_2$$

Найдем оптическую силу линзы.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{h}{H_2 d_2} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{(d_1 - d_2) H_2}{(H_2 d_2 - H_1 d_1) d_1} = \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1 + H_2 d_1 - H_1 d_2}{(H_2 d_2 - H_1 d_1) d_1} = \frac{H_2 - H_1}{H_2 d_2 - H_1 d_1}$$

Фокусное расстояние объектива является величиной, противоположной оптической силе получается выражения

$$F = \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1}{H_2 - H_1}$$

Таким образом, если высота изображения H_1 при съемке объекта на расстоянии d_1 высоте изображения H_2 при съемке на расстоянии d_2 , то высота h , оптическая сила D и фокусное расстояние F объекта будут выражаться:

$$h = \frac{(d_1 - d_2) H_1 H_2}{H_2 d_2 - H_1 d_1}; \quad D = \frac{H_2 - H_1}{H_2 d_2 - H_1 d_1}; \quad F = \frac{H_2 d_2 - H_1 d_1}{H_2 - H_1} \quad (10.8)$$

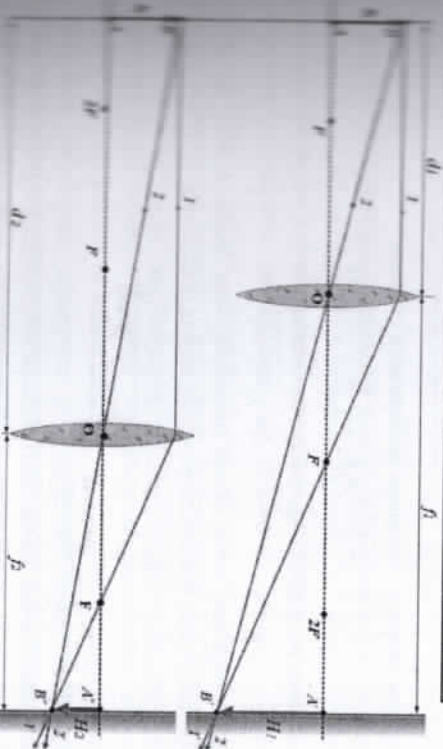


Рисунок 10.5

Естественно, можно дважды сформировать действительное изображение предмета, переместив линзу между предметом и экраном. Давайте определим

размер предмета, зная размеры изображения. Из условия задачи также известно, что расстояние между предметом и линзой в обоих случаях сохраняется неизменным, т. е. $\ell = d_1 + f_1 = d_2 + f_2$. Кроме того, линза, который используется, является одним.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{d_2} + \frac{1}{f_2}$$

Из этих равенств получаем следующие выражения

$$\begin{cases} d_1 + f_1 = d_2 + f_2 \\ d_1 f_1 = d_2 f_2 \end{cases}$$

Если мы поместим $f_2 = \frac{d_1 f_1}{d_2}$ из уравнения 2 в уравнение 1 в системе получимся следующие выражения.

$$d_1 + f_1 = d_2 + \frac{d_1 f_1}{d_2}$$

Из этого

$$d_2^2 - (d_1 + f_1)d_2 + d_1 f_1 = 0$$

получится уравнение. Решив его найдем

$$\begin{cases} d_2 = f_1 \\ f_2 = d_1 \end{cases}$$

Теперь для увеличения объектива

$$\begin{cases} K_1 = \frac{f_1}{d_1} = \frac{H_1}{h} \\ K_2 = \frac{f_2}{d_2} = \frac{H_2}{h} \end{cases}$$

формируем систему. Умножая уравнения в системе

$$K_1 K_2 = \frac{f_1 f_2}{d_1 d_2} = \frac{H_1 H_2}{h^2} = 1$$

А отсюда находим следующие выражения

$$h = \sqrt{H_1 \cdot H_2}$$

Таким образом, если путем перемещением линзы между предметом и экраном получены фактические изображения предмета H_1 и H_2 его высоты, то высота предмета h определяется по формуле (рис. 10.5):

$$h = \sqrt{H_1 \cdot H_2} \quad (10.8)$$

Проекционный аппарат:

Проекционный аппарат (проектор) предназначен для получения на экране действительного увеличенного изображения. Следовательно, и здесь объектив представляет собой собирающую линзу, только предмет помещают между F и $2F$ ($F < d < 2F$), а изображение получается на расстоянии, большем $2F$ ($f > 2F$).

Проекционные аппараты — это хорошо известные фильмоскопы, эпипроекторы, диапроекторы, эпидиаскопы, киноаппараты, кодакопы и др. Оптическое устройство, позволяющее снимать небольшие картины, картины на стену с увеличением, называется проекционным аппаратом. Типичный прибор, служащий для просмотра снимков на прозрачных предметах, таких как стекло, пленка — Диапозитив, называется диакопом (от греческого "Диа" — сквозь, "скопео" — вижу). Если аппарат предназначен для просмотра неперстойных изображений, его называют эпидиаскопом. Если аппарат предназначен для просмотра рисунков как на прозрачных, так и на непрозрачных предметах, его называют эпидиаскопом. Просмотр диафильмов и кинолент в кинозалах осуществляется с помощью проекционных аппаратов.

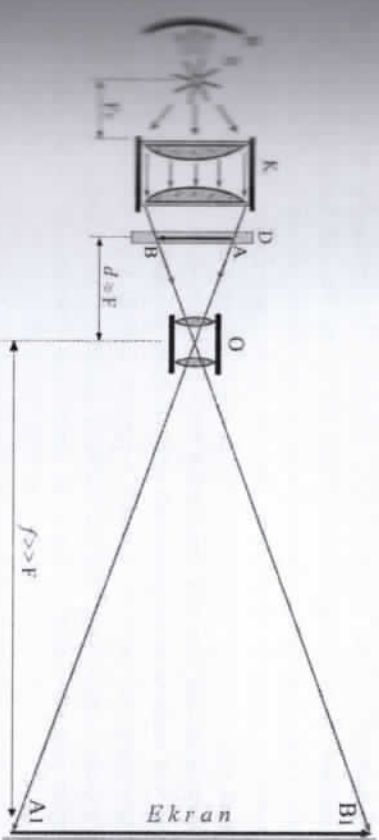


Рисунок 10.6

На рисунке 10.6 изображена рисунок диакопа. Он состоит в основном из конденсора К и объектива О, которые состоят из линз. Конденсор представляет собой две одинаковые плоско-выпуклые линзы, расположенные на фокусном расстоянии линзы слева от источника света S. С целью получения светового потока, падающего на линзы, на задние стороны размещают утопленное зеркало. Диапозитив АВ помещается в перевернутом положении между конденсором и объективом. Расстояние от диапозитива до объектива будет немного больше, чем фокусное расстояние объектива ($d \approx F, d > F$). Расстояние от объектива до экрана будет намного больше, чем фокусное расстояние объектива ($f \gg F$). В результате на стене образуется правильное изображение диапозитива, значительно увеличенное в размерах $A_1 H_1$. Проверьте пальцем вправо и влево по объективу, чтобы изменить размер изображения на экране.

Увеличение проекционного аппарата имеет следующий вид:

$$K = \frac{f}{d} \approx \frac{f}{F}$$

(10,9)

Примеры применения геометрической оптики:

Волновая природа света ограничивает возможность различения деталей предмета или очень мелких предметов при просмотре их под микроскопом. Дифракция (явление дифракции изучается в волновой оптике) не позволяет сформировать точное изображение мелких объектов. Поэтому что свет распространяется не по прямой линии, а обходит мелкие предметы. В результате изображения остаются нетронутыми. Изображение низкого качества не может получить четкое изображение при любом увеличении. Это происходит только тогда, когда линейные размеры объектов меньше длины волны света.

Дифракция также ограничивает способность телескопа. В результате дифракции волн изображение звезды выглядит не как пятно на фоне линзы, а как система светлых и темных колец. Если две звезды находятся на небольшом угловом расстоянии друг от друга, эти кольца накладываются друг на друга, глаз не может различить, два источника света или один.

Исследования явления дифракции дали совершенно ясное представление о том, что законы геометрической оптики носят нелинейный характер. Закон распространения света по прямой и другие законы геометрической оптики достаточно точно выполняются только в условиях, где размеры препятствий на пути распространения света во много раз превышают длину световой волны.

Вопросы по теме

1. Что такое увеличение оптических приборов?
2. Для чего используется лупа? Запишите формулу его увеличения. В каком диапазоне будут увеличиваться лупы?
3. Для чего используется микроскоп? Запишите формулу его увеличения. В каком диапазоне будут находиться увеличения микроскопов?
4. Для чего используются фотоаппараты? Объясните принцип его работы.
5. Для чего используются проекционные аппараты? Объясните принцип его работы.
6. Что вы подразумеваете под зрительной трубой?

Решение задач:

1. С помощью лупы с фокусным расстоянием 5 см на расстоянии 10 см от лупы формировалось мнимое изображение предмета. Как увеличивался лупа.

- A) 10 B) 6 C) 5 D) 3 E) 2

Дано:
 $f = 1 \text{ м}$
 $f = 3 \text{ м}$
 $K = ?$

Решение:
 Лупы используются в качестве рассеивающих линз. Следовательно, $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} - \frac{1}{F}$ из выражения $d = \frac{Ff}{f+F} = \frac{10}{3} \text{ см}$.
 Линейное увеличение лупы равно $K = \frac{f}{d} = 3$.

ответ: D)

2. На сколько метров было снято здание, если изображение здания длиной 0,1 м, снятое фотоаппаратом с фокусным расстоянием 5 см, имело длину 0,01 м?

- A) 4 B) 40,05 C) 41 D) 13 E) 4,1.

Дано:

Решение:

Так как линза в фотоаппарате-собирающей
 изображение увеличения линзы $K = \frac{f}{d} = \frac{H}{h}$
 используем $f = \frac{dH}{h}$ $f = 800d$. Из формулы

собирающей линзы

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{F} = \frac{801}{d} \quad \text{из этого } d = 801F = 40,05 \text{ м}$$

ответ: B) 40,05 м

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ II

Лабораторная работа № 2.

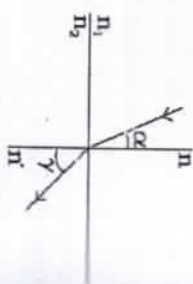
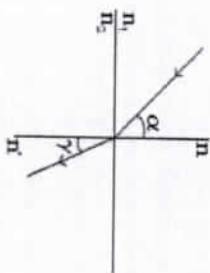
Определение показателя преломления стекла.

Цель работы: Изучения закона преломления света.

Необходимые инструменты и оборудование: Стеклопластическая призма, белый экран, 1 лист картона бумага, картона бумага, измерительная линейка.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Луч света меняет свое направление при переходе из одной среды в другую (с различной оптической плотностью). Оптическая плотность пз при переходе из меньшей среды в большую отклоняется от нормальной в границе двух сред.



При переходе из большей оптической плотности среды в меньшую оптической плотности среды луч отклоняется на лево от нормали. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления по закону преломления называется показателем относительного преломления второй среды относительно первой.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2} = n_{21}$$

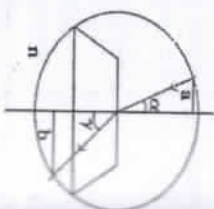
Порядок выполнения работ:

1. Закрепив белый лист на картоне, через середину белого листа проведите прямую линию для установки стеклнной пластинки.
2. Проведите нормальную линию. Проведите прямую линию для падающего луча по направлению падения луча и отметьте углами характерные точки на этом луче.
3. Проследите за результатами измерений и расчетов, введи их в таблицу.
4. Рассчитайте показатели относительной погрешности и показатели преломления по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 100\% = 23$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{a}{b} = n$$

№	a(sm)	b(sm)	n	n	Δn	•Δn	s%
1							
2							
3							



Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным показателем преломления света?
2. Что называется относительным показателем преломления света?
3. Опишите закон преломления света.
4. Опишите явления полное внутреннее отражения света.

4. Как определяется предельное значение полной внутренней отражения?

Лабораторная работа: № 3.

Определение фокусного расстояния линзы.

Цель работы: научиться на практике пользоваться двойной выпуклой линзой и определять ее фокусное расстояние по формуле.

Необходимое оборудование и приборы: а) двойная выпуклая линза; б) экран; в) источник света; г) экран.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

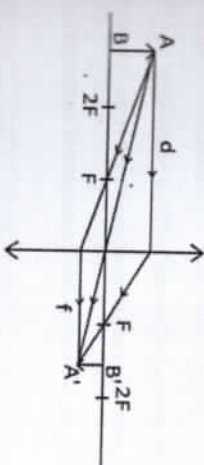


рис 1

Порядок выполнения работ:

- 1) Проецирование увеличенного, действительного и обратного изображения:
 - а) размещение линзы между экраном и источником;
 - б) путем перемещения линзы влево или вправо достигается увеличенное, действительное и обратное изображение;
 - в) измеренность расстояния от линзы до источника d, от линзы до экрана f;
 - д) результаты заносится в таблицу.
 - 2) Проецирование уменьшенного, действительного и обратного изображения:
 - а) размещение линзы между экраном и источником;
 - б) уменьшенное, действительное и обратное изображение достигается путем перемещения линзы влево или вправо;
 - в) измеренность расстояния от линзы до источника d, от линзы до экрана f;
 - д) результаты заносится в таблицу.
 - 3) Определение фокусного расстояния линзы:
 - а) по формуле двойного выпуклого линзы $\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$ находят фокусное расстояние линзы;
 - б) полученные результаты заносится в таблицу.
 - в) Проверить;
- Как создать действительное и обратное изображение, равное источнику?

Линза помещается между источником и экраном таким образом, что выполняется равенство $d=2F$. Если равенство не выполняется, значит, значение опытного и рассчитанного фокусного расстояния неверно. В этом случае вышеуказанные эксперименты проводят повторно.

5. Оптическая сила линзы:

Оптическая сила линзы определяется в диоптриях по формуле

$$D = \frac{1}{F}$$

Методом средней арифметики находят абсолютную и относительную погрешности измерений.

$$\bar{F} = \frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} - \text{среднее арифметическое выражения};$$

$$\Delta F = |\bar{F} - F_1| - \text{значения абсолютной погрешности};$$

$$\overline{\Delta F} = \frac{\Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3}{3} - \text{среднее арифметическое значение погрешности};$$

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta F}}{\bar{F}} \times 100\% - \text{относительная погрешность измерения}.$$

Таблица 1

N ^o	d, см	f, см	F, см	$\bar{F}$, см	ΔF , см	$\overline{\Delta F}$, см	ε , %
1							
2							
3							

Контрольные вопросы

1. Что называется линзой?
2. Какие типы линз вы знаете?
3. Опишите характерные величины для линзы (оптический центр, оптическая ось, главная оптическая ось, фокусное расстояние, фокальная плоскость).
4. Запишите формулы линз для собирающей линзы.
5. Запишите формулы линз для рассеивающей линзы?
6. Что такое увеличение линзы? Запишите формулы увеличения.



ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ II

1. Что такое луч света?
 - А) прямая, соединяющая наблюдаемую точку с источником света
 - Б) линия, указывающая направление колебаний
 - С) линия, указывающая направление колебаний
 - Г) линия, по которой распространяется световая энергия
 - Д) НПО.
2. Найти частоту света длиной 0,75 мкм в вакууме (Гц).

- А) $5 \cdot 10^{14}$
- Б) $4 \cdot 10^{14}$
- С) $7,5 \cdot 10^{14}$
- Д) $5 \cdot 10^{15}$

1. Плоское зеркало движется перпендикулярно своей плоскости к источнику света со скоростью 1,5 см/с. Со скольких см/с и в какую сторону должен двигаться источник света, чтобы его изображение в зеркале было неподвижным?

- А) 1,5, от зеркала.
- Б) 3, к зеркалу.
- С) 3, от зеркала.
- Д) 1,5, к зеркалу.

1. При переходе света из одной среды в другую угол падения равен 60° , а угол преломления -30° . Определите относительный показатель преломления второй среды к первой средой.

- А) 1/2
- Б) $\frac{1}{\sqrt{3}}$
- С) 1,5
- Д) $\sqrt{3}$

1. Свет проходит через стекло в воздух. Угол падения 30° . Каков показатель преломления стекла, если при преломлении луч изменил свое направление на 10° ?

- А) $\sqrt{2}$
- Б) $\sqrt{3}$
- С) 2
- Д) $\frac{2}{\sqrt{2}}$

1. Может ли угол преломления быть больше угла падения?

- А) большой во всех случаях
- Б) когда луч переходит из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей оптической плотностью
- С) когда луч переходит из среды с большей оптической плотностью в среду с меньшей оптической плотностью
- Д) когда свет переходит из вакуума в среду
- Е) такого случаи не бывает

1. Если угол падения луча на границу двух сред увеличить, то относительное показание преломления сред...

- А) увеличивается
- Б) не изменяется
- С) резко увеличивается
- Д) уменьшается
- Е) НПО

1. Угол между преломленным лучом и отраженным лучом равен 90° . Каков показатель преломления, если угол падения α равен $\sin \alpha = 0,8$?

- А) 1
- Б) 1,25
- С) 1,33
- Д) 1,5
- Е) 1

1. Каково отношение скоростей лучей в воде, если для света с длиной волны $\lambda_1 = 0,75$ мкм в вакууме показатель преломления воды равен $n_1 = 1,329$, а для света с длиной волны $\lambda_2 = 0,7$ мкм показатель преломления $n_2 = 1,344$?

- А) 1,01
- Б) 1,05
- С) 1,10
- Д) 1,20
- Е) 1,40

10. Если при переходе света с длиной волны 600 нм из вакуума в среду его скорость уменьшилась на 40%, какова длина волны света в этой среде (нм)?
 А) 240 В) 360 С) 750 Д) 1000 Е) 1500

11. Когда свет переходит от воды к стеклу, может ли произойти полное внутреннее отражение?
 А) можно, т. к. стекло преломляет свет
 В) можно, т. к. показатель преломления воды больше, чем у стекла
 С) нельзя, т. к. показатель преломления воды меньше, чем у стекла
 Д) нельзя, т. к. показатели разбитости воды и стекла одинаковы
 Е) НПО

12. Показатели преломления воды, стекла и алмаза по отношению к воздуху равны 1,33, 1,5 и 2,42. В каком из этих веществ предельный угол полного внутреннего отражения будет наименьшим?
 А) в алмазе В) в стекле С) в воде
 Д) во всех веществах одинаково
 Е) явление полного внутреннего отражения не наблюдается в этих веществах.

13. Свет проходит через стекло в вакуум. Как определить скорость света в стекле, если полный внутренний угол отражения равен α_0 ?
 А) $c \cdot \sin \alpha_0$ В) $\frac{c}{\sin \alpha_0}$ С) α_0 Д) $\frac{c}{\sin \alpha_0}$ Е) $c \cdot \sin \alpha_0$

14. С помощью линзы с фокусным расстоянием 5 см на расстоянии 10 см от линзы формировалось минное изображение предмета. Какова увеличение линзы?
 А) 10 В) 6 С) 5 Д) 3 Е) 2

15. Расстояние с собирающей линзой с предметом 3F. Во сколько раз размер изображения больше размера предмета, если фокусное расстояние линзы равно F?
 А) 3 В) 2 С) 1 Д) 0,5 Е) 0,25

16. Каков коэффициент увеличения, если расстояние от собирающей линзы до изображения в три раза больше фокусного расстояния?
 А) 3 В) 2 С) 1,5 Д) 0,75 Е) 0,5

17. На каком расстоянии предмет находится от линзы, если действительное изображение в 3 раза меньше предмета? Фокусное расстояние линзы F.
 А) $\frac{4}{3F}$ В) $1,5F$ С) $2F$ Д) $4F$ Е) $6F$

18. Свет проходит через систему, состоящую из двух линз с фокусными расстояниями F_1 и F_2 . Каким должно быть расстояние между линзами, чтобы лучи, выходя из второй линзы, оставались параллельными при выходе из этой системы?
 А) F_1 В) $F_1 + F_2$ С) $\frac{(F_1 + F_2)}{2}$ Д) F_2 Е) $|F_1 - F_2|$

19. Фокусное расстояние линзы 4 см. Сколько диоптрий имеет оптическая сила линзы?
 А) 25 В) 4 С) 0,4 Д) 0,25 Е) 75

20. Предмет находится на расстоянии 1 м от рассеивающей линзы с оптической силой 4 дптр. На каком расстоянии (м) от линзы формируется изображение?
 А) 3 В) 1,25 С) 1,33 Д) 1 Е) 0,8

21. При съемке вагона высотой 3 м высота ее фотографии составляла 12 мм. Какого расстояния (м) была сделана фотография, если фокусное расстояние объектива фотоаппарата 20 см?
 А) 60 В) 50 С) 40 Д) 30 Е) 20.

22. Оптимальное расстояние просмотра нормального глаза 25 см. Когда самое лучшее расстояние зрения дальнорядного человеческого глаза составляет 1 м, какой оптической силой (дптр) должен обладать этот человек, чтобы носить очки?
 А) невозможно определить В) +1 С) +4 Д) -3 Е) +3

23. Человек читает книгу с расстояния 0,5 м. Какие очки с оптической силой ему понадобятся для нормального чтения с расстояния 25 см (дптр)?
 А) 2,5 В) -2 С) +2 Д) +2,5 Е) +3

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ II

1. Угол между зеркальцем и падающим светом равен 35° . Определите угол отражения света.

2. Какова будет скорость света в алмазе (м/с), если длина волны света с частотой $2,73 \cdot 10^{14}$ кГц равна 450 нм?

3. При переходе света из одной среды в другую угол падения равен 60° , а угол преломления -30° . Определите относительное показание преломления второй среды к первой средой.

4. При падении луча из воздуха в среду с показателем преломления $n = \sqrt{3}$ угол между отраженным лучом и преломленным лучом стал равен 90° . Каков угол падения луча?
5. Световой луч переходит из жидкости в вакуум. Угол падения 30° . Отражающиеся и преломленные лучи перпендикулярны друг другу. Каков показатель преломления этой жидкости?
6. Каким будет предельный угол полного внутреннего отражения, если показатель преломления первой среды по отношению ко второй среде равен 2?
7. Найдите предельный угол полного отражения, зная, что угол преломления равен 45° , когда угол падения луча на границу двух сред равен 30° .
8. Расстояние между предметом и его действительным изображением в собирающей линзе составляет 2,5 м. Каков коэффициент увеличения линзы, если расстояние от линзы до изображения составляет 2 м?
9. На каком расстоянии от линзы образуется уменьшенное изображение предмета, находящегося на расстоянии 10 см от линзы с фокусным расстоянием 15 см?
10. На каком расстоянии от линзы формируется изображение предмета, находящегося на расстоянии 1 м от рассеивающей линзы с оптической силой -4 дптр?
11. Оптимальное расстояние видимости дальнотворного 40 см. Найдите оптическую силу очки (дптр), необходимую этому человеку.
12. Если близорукий человек может читать с расстояния 12,5 см, ему придется носить очки с какой оптической силой (дптр)?
13. Человек снимает очки с глаз и читает книгу на расстоянии 20 см. Какова оптическая сила очки (дптр)?
14. Перед плоским зеркалом находится настольная лампа. На сколько изменится расстояние между лампой и ее изображением, если от лампы отвести зеркало на 10 см?
15. Горизонтальный луч света падает на вертикально расположенное плоское зеркало. На сколько углов повернется отраженный луч, если зеркало повернуть вокруг своей оси на 15° ?
16. Как расположить плоское зеркало относительно вертикально падающего света, чтобы луч отражался в горизонтальном направлении?
17. Какое фокусное расстояние у плоского зеркала?

18. На каком расстоянии от зеркала необходимо расположить предмет, чтобы в выпуклом сферическом зеркале образовалось изображение в два раза большее самого предмета? Фокусное расстояние зеркала 20 см.
19. Фокусное расстояние выпуклого сферического зеркала равно 30 см. Каким будет его радиус кривизны и оптическая сила?
20. Изображение светящейся точки, находящейся на расстоянии 1 м от выпуклого зеркала, делит равные две части оптической оси между полюсом зеркала и фокусом. Найдите радиус кривизны зеркала.
21. Радиус кривизны выпуклого сферического зеркала 60 см. На расстоянии 10 см от зеркала находится предмет высотой 2 см. Найдите положение и высоту изображения.
22. Фокусное расстояние вогнутого сферического зеркала равно 1 м. На каком расстоянии от зеркала следует расположить источник, чтобы точечный источник света и его изображение перекрывали друг друга?
23. Свет падает под углом 0° к боковому краю стеклянной призмы. Угол преломления призмы равен 3° . Найдите угол отклонения луча от призмы.
24. На дне реки лежит небольшой камень. Ребенок хочет толкнуть камень палочкой. Мальчик целился в камень и держал палку под углом 40° . Если глубина реки 50 см, то на каком расстоянии от камня будет стучать палка по дну реки.
25. На дне бассейна вбивают колышек высотой 1 м. Если солнечный свет падает на поверхность воды под углом 60° , а свая полностью находится под водой, найдите длину тени сваи на дне бассейна.
26. На стекла с показателем преломления 1,56 необходимо изготовить линзу с оптической силой 8 дптр. Чему равны радиусы кривизны этих поверхностей, если радиус кривизны линзы одинаков?
27. Чему равен радиус кривизны стекла, если фокусное расстояние выпуклой стеклянной линзы равно радиусу кривизны этой линзы?
28. Изображение предмета на расстоянии 40 см от выпуклой линзы формируется на расстоянии 15 см от линзы. Какое фокусное расстояние линзы, если размер предмета 60 см? Каким будет размер изображения предмета?
29. На каком расстоянии следует держать зеркало, когда человек с нормальным зрением внимательно смотрит на изображение своего лица в плоском зеркале?

30. Предельный угол зрения для нормального глаза составляет 40° , когда освещенность в чистом воздухе средняя. На каком расстоянии черный круг диаметром 10 см, расположенный перпендикулярно лучу зрения на белом фоне, становится невидимым?

31. Насколько близко эти отсеки могут быть друг к другу, чтобы ученик, сидящий за последней партой на расстоянии 8 м от стола учителя, мог видеть отсеки измерительного прибора, резко отличающиеся друг от друга? Предположим, что предельный угол зрения равен 2° .

ГЛАВА III. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Волновая оптика-раздел оптики, изучающий свойства света и его взаимодействие с веществом. В геометрической оптике свет, проходя через препятствие или щель, образует четкие тени, в то время как в физической оптике изучаются свойства света, проходящего через препятствие или щель.

Кроме того, изучаются такие явления, как дисперсия, интерференция, поляризация. Физическая оптика также называется волновой оптикой. Волновую оптику также иногда называют физической оптикой.



§ 11. СКОРОСТЬ СВЕТА И РАЗЛИЧНЫЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ.

Когда включается комнатная лампа, комната внезапно становится светом яркой. Не займет много времени, чтобы световой луч достиг стен комнаты. Было бесчисленное множество попыток измерить скорость света. Когда ученые стали думать, что распространение света не отнимает времени, оно проходит любое расстояние за один миг. Но только к столетию стало ясно, что скорость света ограничена.

Астрономический метод (метод Рюмера):

Первый раз скорость света измерялась астрономическим методом датским астрономом Рюмером в 1676 году. Причина, по которой ему удалось вычислить скорость света, заключается в том, что он использовал в своих измерениях огромные расстояния, равные межпланетным расстояниям. В этом методе ученые определили скорость света, основываясь на задержке прохождения спутника планеты Юпитер Ио за Юпитером. Рюмер наблюдал затмение планеты Юпитера, самой большой планеты Солнечной системы. При наблюдении Ио, ближайшего к Юпитеру спутника, затмение будет происходить намного быстрее, чем у других спутников. Ио прошел мимо диска Юпитера и спрятался за противоположную сторону. Через некоторое время он снова появится. Время между каждыми двумя появлениями Ио составляло 42 часа 28 минут, то есть период обращения Ио вокруг Юпитера.

Первоначально измерения Рюмера проводились тогда, когда Юпитер находился ближе всего к Земле (рис.11.1). Последующие измерения были произведены через 6 месяцев после того, как Земля перешла на противоположную сторону своей орбиты. При этом расстояние между Ио и Землей было примерно увеличено до диаметра орбиты Земли. В этом ученый

получил неожиданный результат. Зная, что период вращения Ио равен 42 часам и 28 минутам, Ромер подсчитал, сколько раз за последние 6 месяцев вращение Юпитера и во сколько часов произойдет выход из тени на Земле, Ио вышел из тени Юпитера на 22 минуты позже, чем рассчитывал Ромер.



Рисунок 11.1

Ромер выяснил причину задержки следующим образом: "если бы я стоял на другом конце орбиты Земли 6 месяцев назад, Ио вышел бы из тени вовремя, световой луч потратил бы 22 минуты, чтобы преодолеть диаметр Земли".

Измерения Ромера были не совсем точными. По его расчетам расстояние от Земли до Солнца составляет примерно 142 млн. км. Соответственно, разделив диаметр орбиты Земли на время задержки, он вычислил значение скорости света.

$$c = \frac{d}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 142000000 \text{ км}}{22 \cdot 60 \text{ сек}} \approx 215000 \text{ км/сек} \quad (11.1)$$

Ромер определил скорость света как 215 000 км/с. Эта величина была хоть и не совсем точной, но ценной информацией о скорости света.

Лабораторный метод (метод Физо):

Впервые скорость света была измерена лабораторным методом в 1849 году французским физиком И.Физо. Луч света был направлен между зубчатыми колесами, вращающимися через линзу и зеркало. Если бы частота вращения зубчатого колеса была увеличена, наблюдатель мог бы видеть или не видеть свет, возвращающийся из зеркала. Это было связано с тем, что свет, прошедший через зубья, возвращался из зеркала на расстояние 8,6 км. Путь лучу соответствовал то ли шель, то ли препятствию. Путь луча, проходящего

через вращающиеся зубчатые колеса, обратно в зеркало на расстоянии 8,6 км, имел число зубьев колеса и частоту вращения, нашел значение скорости света. При этом он исходил из того, что скорость света равна 313 000 км/с (рис. 11.2). Расстояние 8600 м от фокусных расстояний линзы очень велико $\ell \gg F_1 + F_2 + F_3 + F_4$. Поэтому не будем пользоваться фокусное расстояние на рисунках. Путь, пройденный лучом света до попадания в человеческий глаз, равен примерно 2ℓ . Луч света проходит расстояние 2ℓ со скоростью c во $\Delta t = \frac{2\ell}{c}$ времени. В это время зубчатое колесо, вращающееся с частотой ν , повернется на угол $\Delta\varphi = \omega \Delta t = \frac{2\pi}{N} k$. С другой стороны, это угол поворота через частоту вращения можно написать в следующем виде $\Delta\varphi = \omega \Delta t = 2\pi \nu \Delta t$

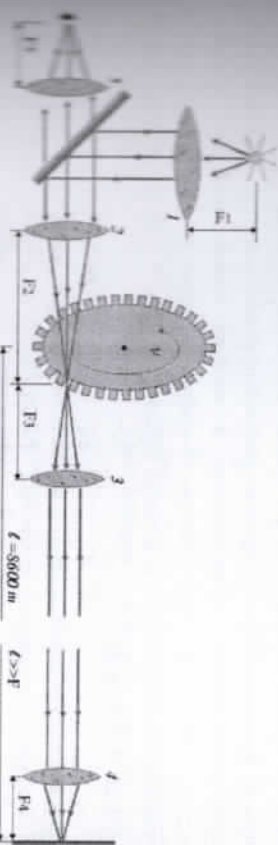


Рисунок 11.2

Приведенная выражение, мы находим скорость света.

$$2\pi \nu \Delta t = \frac{2\pi}{N} k; \rightarrow \Delta t = \frac{k}{\nu N} = \frac{2\ell}{c}; \rightarrow c = \frac{2N}{k} \nu \ell$$

Итак, давайте предположим, что расстояние между зеркалом и зубчатым колесом равно ℓ , частота вращения колеса ν , а число зубьев на колесе равно N . Когда луч, посланный между зубьями, отражается от зеркала, колесо повернется на угол k зубьев и снова попадает в щель. При этом скорость света будет равна:

$$c = \frac{2N}{k} \nu \ell \quad (11.2)$$

Если число зубцов, повернутых в приведенной выше формуле, является неким числом ($k = 1; 2; 3; 4; \dots; Z$), наблюдатель всегда увидит свет, отражающийся из зеркала.

Если число зубцов, повернутых в приведенной выше формуле, является равно половине целого числа то ($k = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; \dots; (2Z - 1)/2$), наблюдатель никогда не увидит свет, отражающийся из зеркала.

Если число зубцов, повернутых в приведенной выше формуле, является ни целым числом, ни половинным целым числом, наблюдателю кажется, что свет, отражающийся из зеркала, либо виден, либо не виден.

Лабораторный метод (метод Майкельсона):

Американский физик Майкельсон, усовершенствовав опыты Физо и Фуко, вместо зубчатого колеса использовал 8-гранное вращающееся призматическое зеркало. Эксперимент был проведен в районе между горами Вильсон и Сан-Антония $\ell = 35,373 \text{ км}$. Майкельсон вывел скорость света 299796 км/с (рис. 11.3-а, б). Точки А и В представляли собой сферическое зеркало в горах Вильсона и Сан-Антония, предназначенные для отражения света. Призматическое зеркало S, которое вращается с большой частотой за прошедшее время, пока луч света, исходящий от источника, не вернется из призматического зеркала и сферического зеркала, а затем не попадет в другую сторону призматического зеркала, также повернется на угол. Большая часть экспериментального оборудования, а именно призматическое зеркало, плоское зеркало и наблюдатель А были на горе Вильсона, и только отражающее сферическое и плоское зеркало были на $\ell = 35,373 \text{ км}$ удаленной горе Сан-Антония В.

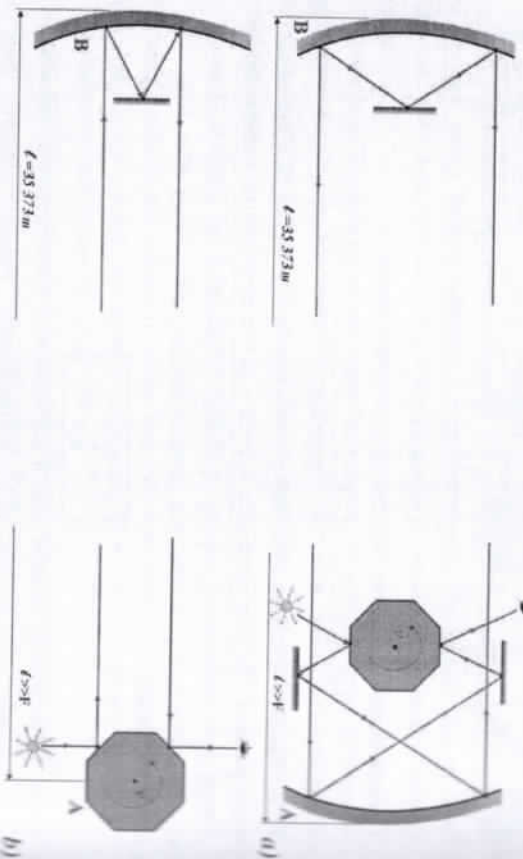


Рисунок 11.3

Пусть число ребер призматического отражения в эксперименте Майкельсона равно N , частота вращения ν , а расстояние между точками А и В равно ℓ . Пусть зеркало повернуто на гранью k , когда свет проходит весь путь и падает на другую грань зеркала. Расстояние 35373 м намного больше

чем фокусных расстояний сферических зеркал. Поэтому мы не учитываем фокусные расстояния при расчетах. Путь, пройденный лучом света до попадания в человеческий глаз, равен примерно 2ℓ . Луч света проходит расстояние 2ℓ со скоростью c во времени $\Delta t = \frac{2\ell}{c}$. В это время призматическое зеркало, вращающееся с частотой ν , поворачивается на угол $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N} \nu \Delta t$. С другой стороны, этот угол поворота можно записать как $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{N} k$. Приравняв их, мы находим

$$2\pi \nu \Delta t = \frac{2\pi}{N} k, \rightarrow \Delta t = \frac{k}{\nu N} = \frac{2\ell}{c}, \rightarrow c = \frac{2N}{k} \nu \ell$$

Таким образом, Майкельсон сформулировал эту формулу, позволяющую определять скорость света.

$$c = \frac{2N}{k} \nu \ell \quad (11.3)$$

Если число зубцов, повернутых в приведенной выше формуле, является половинным целым ($k = 1; 2; 3; 4; \dots; Z$), наблюдатель всегда увидит свет, возвращающийся из зеркала.

Если число зубцов, повернутых в приведенной выше формуле, является целым числом ($k = 0; 5; 1; 5; 2; 5; 3; 5; \dots; (2Z + 1)/2$), наблюдатель никогда не увидит свет, возвращающийся из зеркала.

Если число повернутых зубцов является ни целым числом, ни половинным целым числом, наблюдателю кажется, что свет, возвращающийся из зеркала, либо виден, либо не виден.

Лабораторный метод (метод Фуко):

Фуко использовал другой метод для измерения скорости света. В нем вращающееся зеркало двухстороннее зеркало (рис. 11.4).

Свет, идущий в направлении SA, попадает во вращающееся зеркало, а затем снова направляется обратно в стеклинное кольцо. Отражаясь от зеркала в на конце кольца, он снова попадает в точку А. При этом луч проходит расстояние 2ℓ , а вращающееся зеркало поворачивается на определенный угол $\Delta\varphi$ за время Δt , отражающийся из зеркала В, отражается из зеркала А тоже попадает в глаз наблюдателя который находился на расстоянии S' . Здесь угол между лучами AA' и AS' будет равен 2φ .

Путь, пройденный лучом света до попадания в человеческий глаз, равен примерно 2ℓ . Луч света проходит расстояние 2ℓ со скоростью c во времени

$\Delta t = \frac{2\ell}{c}$. В это время двойное зеркало вращается с частотой ν отклонившись на некоторый угол.

Зная их, мы найдем скорость света.

$$\varphi = \omega \Delta t = 2\pi \nu \Delta t$$

$$\varphi = 2\pi \nu \Delta t = 2\pi \nu \frac{2\ell}{c}, \rightarrow c = \frac{4\pi}{\varphi} \nu \ell$$

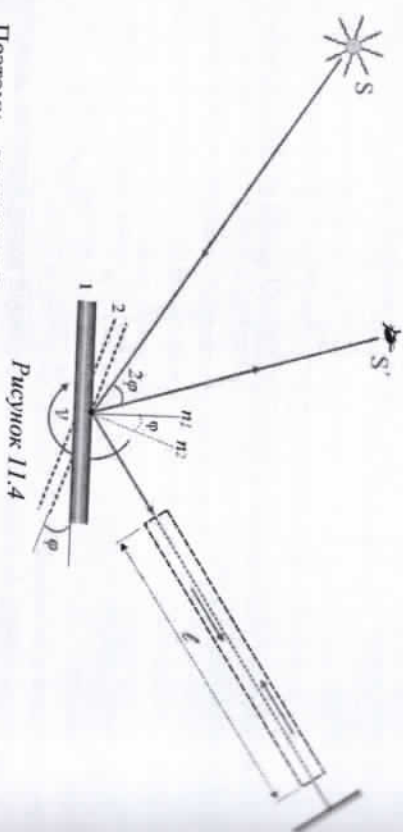


Рисунок 11.4

Поэтому, отраженный луч регистрируется в точке, в которой он отражается от вращающейся зеркала. Флюк вычислили скорость света 296 000 км/ч (рис.12.5). Если вращающееся зеркало повернуть на произвольный угол α до того, как луч достигнет пункта назначения туда и обратно и частота вращения зеркала равна ν , то скорость света будет равна:

$$c = \frac{4\pi}{\varphi} \nu \ell$$

(11.4)

Флюк первым измерил скорость света в воде. Она в 4/3 раза меньше скорости в воздухе, то есть скорость света для воды получилась около 222000 км/с.

Самые современные методы позволили очень точно измерить скорость света в вакууме. Скорость света в вакууме равна $c = 299\,792\,456,2 \pm 0,8 \text{ м/с}$, что является самой большой скоростью во Вселенной. Скорость любого тела не может быть равна этой скорости.

Вопросы по теме

1. Расскажите об астрономическом способе измерения скорости света.
2. Объясните метод Физо. Какую значенно он получил?
3. Объясните метод Майкельсона. Какую значенно он получил?

4. При каких значениях постоянного числа k в эксперименте Физо и Майкельсона наблюдать всегда виден свет? При каких значениях k наблюдать всегда не виден свет?

Решение задачи:

1. Если эксперимент Майкельсона по определению скорости света приведен на рисунке 11.3. Луч света проходит 71 км пути. Сколько раз в секунду должна вращаться восьмизеркальная зеркальная призма, чтобы из промежуточной трубы всегда был виден свет?

Дано:

$\ell_{\text{путь}} = 71 \text{ км}$

$N = 8$

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Решение:

Рассчитаем скорость света по формуле:

$$c = \frac{N}{k} \nu \ell_{\text{путь}}, \rightarrow \nu = \frac{k c}{N \ell_{\text{путь}}} = k \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{8 \cdot 71 \cdot 10^3 \text{ м}} = k \cdot 528 \text{ [Гц]}$$

или?

или $528 \cdot k \text{ [Гц]}$

§ 12. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА.

Мы не дисперсия:

Английский ученый Ньютон обратил внимание на то, что при работе с призмами края изображения, образованного объективом, окрашивались в разные цвета. Ньютон заинтересовался этим явлением и впервые в мире обнаружил, что световые лучи состоят из множества цветов. Свет проходит через оконную щель в лаборатории Ньютона, и эти лучи света падают в стеклянную призму с треугольным отверстием на столе. В результате на стене появляется семь разных цветов радуги. Эта радуга представляет собой непрерывную, окрашенную в особый цвет, расположенную на ней в определенном порядке. Сверху были полосы красного, оранжевого, желтого, зеленого, синего, голубого и фиолетового цветов. Когда Ньютон закрыл щель в окне красным стеклом, на стене появилась только красная полоса, а когда поверх синим стеклом, появилась только синяя полоса и т. д., а остальные полосы исчезли. До тех пор идея о том, что призма окрашивает свет в разные цвета, казалась ошибочной. Разноцветные полосы радуги Ньютон назвал спектром (рис.12.1). Естественный световой луч (лучи солнца и звезд, свет лампы накаливания и т. д.) называется белым светом. Белый свет является сложным, и когда он падает на призму, от него расходятся 7 разных лучей. Каждый цвет имеет свою частоту и длину волны. Свет, который имеет один цвет, называется монохроматическим светом.

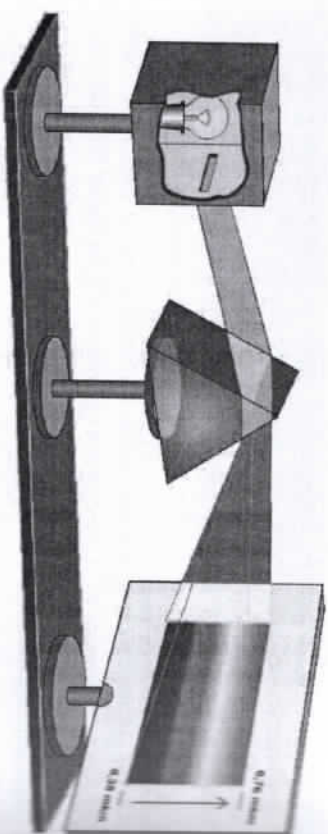


Рисунок 12.1

Это означает, что естественный световой луч состоит из смеси различных спектров или монохроматических лучей, поскольку стеклянная призма по-разному преломляет эти лучи. В результате получается, что геометрическое место спектров в стене будет в разных местах. В частности, чувствительность красного света к стеклянной призме является самой низкой, поскольку он преломляется на наименьший угол. Чувствительность фиолетового света к стеклянной призме самая высокая, так как она отклоняется на наибольший угол. Следовательно, поскольку прозрачная среда по-разному поглощает различные спектры.

Зависимость показателя преломления света среды от длины волны света n (или) частоты называется дисперсией света.

Слово дисперсия-это латинское слово, *dispergo* означающее распадаться. Явление дисперсии также можно описать следующим образом:

Зависимость показателя преломления света от цвета света называется дисперсией.

Причина, по которой белый свет распадается на лучи при прохождении через призму, заключается в том, что для разных цветов показатель преломления света призмы различен и отклоняется на разные углы. В предыдущей главе мы говорили, что в законе преломления света абсолютный показатель преломления света воды равен $n=1,3$, а стекла $n=1,6$ и так далее. Но на самом деле эти величины являются усредненными значениями, что уместно для зеленой волны с длиной волны $\lambda = 555 \text{ nm}$. Абсолютный показатель преломления света для зеленой волны стекла равен $n=1,6$, тогда как для красной волны он равен $n=1,6$, а для фиолетовой волны $n>1,6$. Таким образом, для всех спектров находится в порядке убывания абсолютный показатель преломления

света

$n_{\text{red}} < n_{\text{green}} < n_{\text{blue}} < n_{\text{violet}} < n_{\text{ultraviolet}}$ т. е. с увеличением частоты возрастают и значения показателя преломления света. В таблице 12.1

приведена зависимость показателя преломления от длины волны для некоторых прозрачных сред.

Увеличение значения показателя преломления света с увеличением длины называется нормальной дисперсией. И наоборот, уменьшение значения показателя преломления света с увеличением частоты называется аномальной дисперсией. Нормальная дисперсия возникает, когда все спектры, содержащиеся в белом свете, попадают в прозрачную среду.

График 12.1

Цвет	Красный (660 nm)	Красноватый (610 nm)	Желтый (580 nm)	Зеленый (550 nm)	Синий (470 nm)	Фиолетовый (410 nm)
Вода	1,331	1,332	1,333	1,335	1,338	1,342
Алмаз	2,410	2,415	2,417	2,426	2,444	2,458
Стекло (обычное)	1,512	1,514	1,518	1,519	1,524	1,530
Стекло (DIN)	1,662	1,665	1,667	1,674	1,684	1,698
Полиэтилен	1,488	1,490	1,492	1,493	1,499	1,506
Корич.	1,455	1,456	1,458	1,459	1,462	1,468

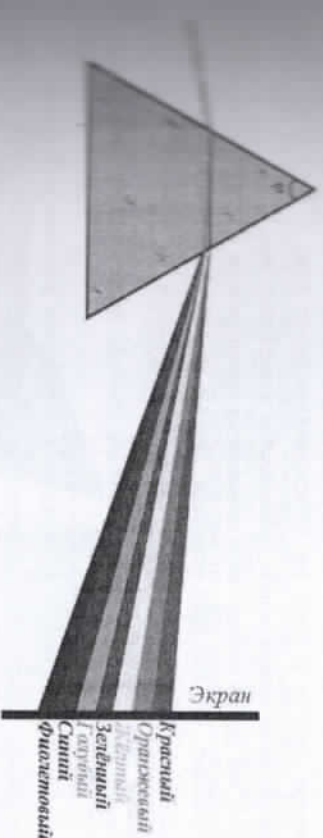


Рисунок 12.2

Нормальная дисперсия разделения белого света на монохроматические лучи в результате дисперсии изображена на рисунке 12.2. С какой длиной волны соответствуют эти лучи, приведено в таблице 12.2.

График 12.2

Цвет	Длина волны, nm	Цвет	Длина волны, nm
Красный	770 - 620	Зеленый	550 - 510
Красноватый	620 - 585	Темно-зеленый	510 - 480
Желтый	585 - 575	Синий	480 - 450
Синевато-желтый	575 - 550	Фиолетовый	450 - 390

При переходе луча света из вакуума в прозрачную среду или из одной среды в другую неменяется только частота света, а его длина волны и скорость изменяется. При переходе монохроматического света из вакуума в полупрозрачную среду частота и цвет не меняются, а скорость и длина волны уменьшаются.

$$v = \frac{c}{n}, \quad \lambda_{\text{мил}} = \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n} \quad (12.1)$$

Как видно из приведенной выше формулы, в прозрачной среде красный свет рассеивается быстрее всего, а фиолетовый — медленнее. Другими словами, можно упорядочить скорости монохроматических лучей в прозрачной среде

$$v_{\text{красный}} > v_{\text{оранжевый}} > v_{\text{желтый}} > v_{\text{зеленый}} > v_{\text{голубой}} > v_{\text{синий}} > v_{\text{фиолетовый}} \quad (12.2)$$

Когда свет проходит через параллельную пластину определенной толщины, красный свет излучается первым, а фиолетовый — последним. В пространстве, то есть в вакууме, лучи всех цветов распространяются с одинаковой скоростью $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Если бы это было не так, то в наблюдениях астронома Ремера Ио, спутник Юпитера, перед выходом в тень, был бы виден фиолетовый цвет, а при выходе из тени — красный. При переходе одного и того же монохроматического луча в оптически более плотную среду длина волны уменьшается и наоборот (рис. 12.3).

То, что длина волны света изменяется при переходе в прозрачную среду, не означает, что его цвет меняется. Даже в среде свет сохраняет свой цвет. Белый свет образуется, если лучи, расходящиеся от призмы в разные стороны, снова сложить (рис. 12.4).

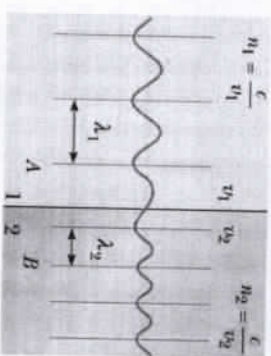


Рисунок 12.3



Рисунок 12.4

Мы много раз были свидетелями того, как радуга появляется под облаками, когда солнце встает из-за облаков в дождливое время. Это явление также связано с дисперсией. Солнечные лучи, падающие на капли дождя у основания облаков, преломляются дважды, как на рисунке 12.4. Если в первый раз при входе в каплю луч попадает внутрь капли на внешней поверхности, то во второй раз при выходе из капли какая-то часть луча

возвращается обратно на внутреннюю поверхность. В этом двойном преломлении солнечный свет дважды дисперсируется и рассеивается в разные цвета. Соответствующие монохроматические лучи, дисперсированные от разных капель, соединяются, образуя своеобразный набор цветов — радугу. В большинстве случаев наблюдатель может наблюдать радугу под углом 42° по отношению к солнечным лучам (рис. 12.5).

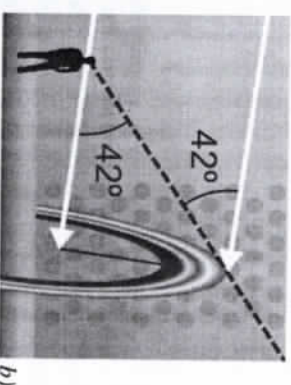
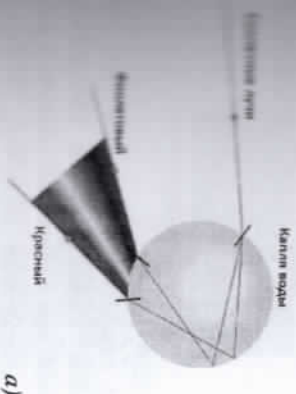


Рисунок 12.5

Наша вселенная:

Структура белого света очень сложна, и каждый из семи основных цветов света и ней разделен еще на тысячи цветов. Именно поэтому природа так разнообразна. И наоборот, если бы не было цветов, все тела выглядели бы одинаково черно-белыми или темно-коричневыми.

Мы так много говорили о цветах, что вполне естественно, что возникает вопрос о том, что такое цвет. Почему мы видим некоторые лучи красными, а некоторые — синими?

Монохроматический свет каждого цвета имеет свою частоту и длину волны, а свет является электромагнитной волной. Фактически, без какого-либо цвета в природе, это отражение нашего мозга от лучей, падающих на нас, то есть цвет является продуктом психофизиологической особенности мозга. Много того, что чувствительность мозга ко всем лучам абсолютно пропорциональна, но и реакция мозга к разным лучам различно. Когда красный свет попадает в наши глаза, в мозге создается ощущение красного зрения, а когда синий свет падает, возникает ощущение синего зрения и так далее. Если на наши глаза попадают инфракрасные лучи с длинами волн $\lambda > 760 \text{ нм}$ или ультрафиолетовые лучи с длинами волн $\lambda < 760 \text{ нм}$, мозг не испытывает никакой чувствительности, реакция или ощущения по отношению к этим лучам. Значит, эти лучи мы не видим, не чувствуем. Наши глаза больше всего любят зеленые лучи? Это означает, что чувствительность мозга к этому свету самая высокая.

Теперь возникает вопрос, почему вещества выглядят по-разному. Допустим, цвет яблока красный, растения зеленые и так далее. Что, молекулы красного яблока окрашены в красный цвет, а молекулы растений - в зеленый?

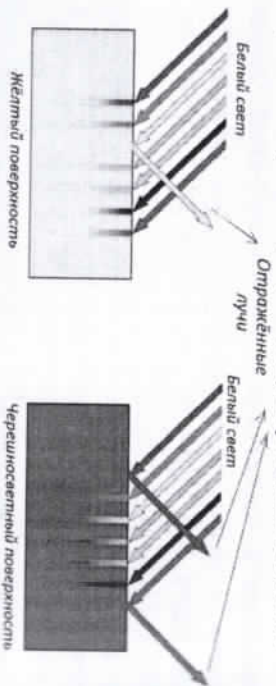


Рисунок 12.6

— Любое тело состоит из молекул какого-либо типа, при этом эти молекулы имеют электронные оболочки. Самая внешняя электронная оболочка называется оптической оболочкой или химической оболочкой или валентной оболочкой. Эти внешние электронные оболочки, поглощая падающий на них луч одной частоты, отражают луч другой частоты и пропускают луч другой частоты. Это состояние отгибается в молекулах разных тел. Например, кожа красного яблока обладает свойством отражать красный свет от всех лучей, попадающих на нее, и поглощать остальные. Растения, однако, обладают способностью отражать зеленый свет и поглощать остальное. Именно поэтому яблоки выглядят красными, а растения - зелеными. Это означает, что мы видим тела так, как будто они окрашены в цвет света, который они отражают. На рисунке 12.6 показано, что белый свет, падающий на желтые и красные поверхности, отражает только желтый и красный лучи. Следует также отметить, что молекулы веществ и тел не окрашены ни в один цвет. Если бы это было так, даже в темноте мы бы увидели яблоки в красном, а растения в зеленом.

Прозрачные тела имеют различный цвет, в чем причина? Почему стекла выглядят по-разному синими, желтыми, зелеными?

— В прозрачных телах сильно свойство пропускать падающий на них луч света, и это свойство не является абсолютно одинаковым для всех лучей, содержащихся в свете. Любое прозрачное тело пропускает некоторый свет и поглощает все остальное. Например, красное стекло пропускает именно красный свет, поглощая другие лучи. Это означает, что мы видим прозрачные тела, как будто они окрашены в цвет света, который они пропускают, не поглощая его. Сказать, что прозрачное тело полностью пропускает только один монохроматический свет и на 100% поглощает все остальные лучи, - немного ошибочная идея. Дело в том, что при

прохождении через прозрачное тело какая-то часть каждого монохроматического света поглощается, а какая-то другая проходит. Правильнее сказать, что мы видим цвет прозрачного тела больше в цвете прошедшего света. На рисунке 12.7 показано, что зеленое стекло пропускает зеленую часть зеленого света и в основном поглощает оставшийся свет, в то время как остальные лучи пропускают очень мало. Точно так же было показано, что синее стекло пропускает большую часть синего света и почти не пропускает остальные лучи.

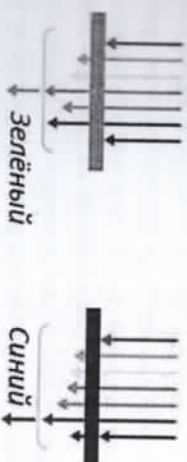


Рисунок 12.7

Почему в спектрах радуги существуют семь разных цветов, а белого и черного нет?

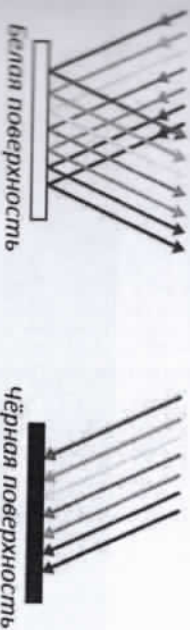


Рисунок 12.8

Если тело поглощает лучи всех цветов, падающих на его поверхность, это тело мы видим черным. И наоборот, когда тела отражает все падающие на него лучи, этот цвет кажется белым. Тело, поглощающее почти все лучи, выглядит темным, а тело, отражающее почти все лучи, - белым (рис. 12.8).

Если на предмет одного цвета смотреть через стекло другого цвета, то в нем причина того, что он выглядит черным?

Если смотреть на тело одного цвета через стекло другого цвета, он обязательно будет выглядеть черным. Например, если смотреть на синее тело в зеленой бутылке, оно будет выглядеть черным. Потому что только один синий свет отражается с поверхности синего тела. А поскольку зеленое стекло обладает свойством поглощать все лучи, кроме зеленого, оно также поглощает синий свет. Следовательно, область, где поглощаются все цвета, должна выглядеть черной. Тела будут видны только в его собственном цвете, если смотреть на тела в стекле того же цвета. Точно так же, когда мы смотрим на изображение, скажем, на красном стекле, изображение выглядит

черным и красным. Специальные стекла, пропускающие свет только одного цвета, называются светофильтрами.

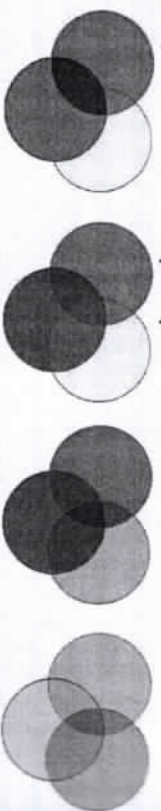


Рисунок 12.9

От соединения двух разных красок образуется такой цвет, что этот цвет определяется смешением цветов, отражаемых обеими красками. Но цвет, образуемый при соединении лучей двух разных цветов, отличается от цвета, образуемого смесью красок. Выше на рисунке изображены цвета, образованные смесью разноцветных монохроматических лучей. Например, черный цвет образуется при слиянии зеленых и красных лучей, зеленый-при слиянии синих и желтых лучей, коричневый-при слиянии салатовых и красноватых лучей (рис.12.9).

Спектроскоп:

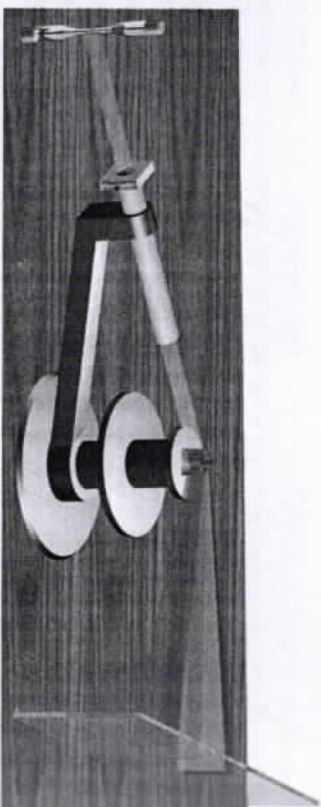


Рисунок 12.10

Прибор, разделяющий лучи естественного света или свет, излучаемый лампой, на составляющие-спектры, называется спектроскопом. С помощью спектроскопа можно получить высокочастотный монохроматический пучок в очень узкой области (рис.12.10). С помощью спектроскопа исследуются составляющие лучей, исходящих от далеких звезд, чтобы определить, из каких элементов состоят эти звезды и каков их состав, возраст и т. д. Кроме того, с помощью спектроскопа изучается, с какой частотой образуются лучи в той или иной химии.

Вопросы по теме

1. Что называется дисперсией света? Кто первый это выяснил? На какие спектральные составляющие распадается белый свет?
2. Какой луч отклоняется под наибольшим углом в треугольной стеклянной призме?

призме?

1. Какой свет распространяется с наибольшей скоростью в прозрачной среде?
2. Какой спектральный состав белого света, падающего вертикально на плоскопараллельную пластину, выходя из пластинки неравно? Какой из них окажется последним?
3. С помощью какого прибора производится разделение белого света на спектральные составляющие?

Решение задачи:

1. Сколько длин волн красного излучения с частотой $4 \cdot 10^{14}$ Hz помещается на длине 0,75 мкм?

А) 400 В) 750 С) 1000 D) 1500

Дано:

$\lambda = 0,75 \text{ мкм}$

$\nu = 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$N = ?$

Решение:

Чтобы узнать, сколько волн находится в этом интервале, сначала определим длину волны света

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{14}} = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

В интервале L может располагаться N волн, длина которых равна λ .

$$N = \frac{L}{\lambda} = \frac{0,75 \cdot 10^{-3}}{0,75} \cdot 10^{-6} = 1000 \text{ шт.}$$

Ответ: С) 1000.

2. Какова будет скорость света в алмазе (м/с), если длина волны света с частотой $2,73 \cdot 10^{14}$ кГц равна 450 Нм?

Дано:

$\nu = 2,73 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$\lambda = 450 \text{ нм}$

$v = ?$

Решение:

Принимая во внимание, что скорость света в среде меньше скорости света в вакууме, получаем выражение: $v = \lambda \cdot \nu = 2,73 \cdot 10^{14} \cdot 45 \cdot 10^{-8} = 1,23 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$

Ответ: 1,23 · 10⁸ м/с.

13. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА. РАСЧЕТ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ.

В разделе механики мы видели, как механические волны в сочетании друг с другом усиливают или ослабляют друг друга (явление интерференции). Поскольку световые волны также являются волнами, возникает вопрос о том, имеют ли они усиление или ослабление в сочетании друг с другом. Интерференция привела к тому, что на волнах у поверхности воды образовались зоны прилива и отлива, а на звуковых волнах-зоны шума и

тишина. Как они проявляются, если в световых волнах также возникает явление интерференции?

Когерентные волны. Интерференция света. Различия в ходе.

Как и механические волны, световые волны могут усиливать или ослаблять друг друга при встрече.

Интерференцией света называется явление просуществования перпендикулярной световой энергии при наложении двух (или нескольких) световых волн.

Усиление или ослабление друг друга при встрече волн, частоты которых одинаковы, разности фаз незначительны, наблюдаются интерференции.

Волны, имеющие одинаковую частоту и неизменную разность фаз, называются когерентными волнами. Незначительны, генерирующие когерентные волны, называются когерентными источниками.

На самом деле световые волны от двух источников не могут быть когерентными. По этой причине необходимо искусственно разделить монохроматический свет, проходящий через световой фильтр от одного источника, на две или более частей, а затем снова встретиться им.

В результате интерференции наблюдается усиление или ослабление интенсивности света. Интенсивность света в области перекрытия пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность больше, а в минимумах меньше суммарной интенсивности пучков. При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, радужный перелив мыльных пузырей, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых насекомых — все это проявление интерференции света.

Выполнение условия максимума или минимума в точке зависит от разности ходов, пройденных световыми волнами, достигшими этой точки.

Из взаимно когерентных источников, испускающих одинаковые монохроматические лучи, первый M_1 , а второй M_2 , пусть точка, в которой эти волны встречаются, N . Пусть-пусть, пройденный каждой волной до встречи $\ell_1 = M_1N$ и $\ell_2 = M_2N$ — разность между путями, пройденными этими волнами до встречи равна $\Delta\ell = \ell_2 - \ell_1 = M_2N - M_1N$ (рис. 13.1-а, б).

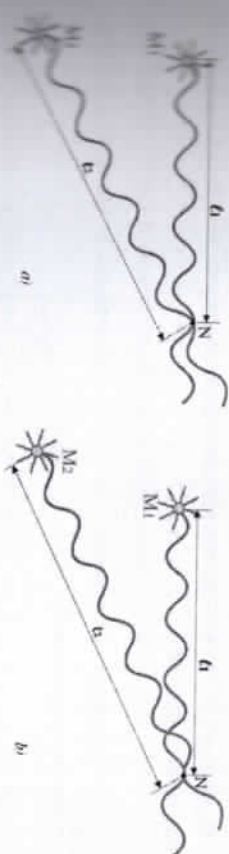


Рисунок 13.1

Если вторая волна приходит с задержкой от первой до четного числа λ (или целого числа) длин волн, то эти волны складываются в одну фазу ($\Delta\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$), в точке слияния они усиливают друг друга, образуя светлую полосу монохроматического цвета света. в точке N выполняется условие максимума, и оно будет:

$$\delta = \ell_2 - \ell_1 = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (13.1)$$

Если вторая волна приходит с задержкой от первой до нечетного числа длин волн, то эти волны складываются в противоположную фазу ($\Delta\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$), в точке слияния они гасят друг друга, образуя темную полосу. в точке N выполняется условие минимума, и оно будет:

$$\delta = \ell_2 - \ell_1 = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (13.2)$$

Иные мы ознакомились с условиями формирования интерференционной картины в общем случае. Теперь попробуем раскрыть причины некоторых из тех явлений, которые чаще всего встречаются в природе.

Интерференция, образованная двумя точечными источниками.

Даже из двух источников, расположенных очень близко друг к другу и испускающих одинаковые монохроматические лучи, на экране можно наблюдать интерференционную картину.

Допустим представим, что два источника света M_1 и M_2 , расположенные на расстоянии ℓ от экрана и d друг от друга, излучают взаимно когерентные лучи. Допустим возьмем произвольную точку D на экране. Пусть эта точка находится на расстоянии ℓ_1 и ℓ_2 от источников и на расстоянии x от центральной линии экрана. Вычислим интерференционную картину, образуемую на экране из этих источников (рис. 45.2-а). Где ℓ_1 и ℓ_2 вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} \ell_2^2 = \ell^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \\ \ell_1^2 = \ell^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (13.3)$$

В результате вычитания второй из первой формулы в системе уравнений получаем выражение

$$(\ell_2 - \ell_1)(\ell_2 + \ell_1) = 2d x \quad (13.3a)$$

Если принять во внимание $\delta = \ell_2 - \ell_1$, что разница в ходах будет равна следующим выражению:

$$\delta = \ell_2 - \ell_1 = \frac{2d x}{\ell_1 + \ell_2} \quad (13.4)$$

Это можно считать потому, что источники находятся очень близко друг к другу ($\ell \gg d$), $\ell_1 + \ell_2 \approx 2\ell$ а экран-далеко. Тогда вышеприведенная формула принимает следующий вид:

$$\delta = \frac{d x}{\ell} \quad (13.5)$$

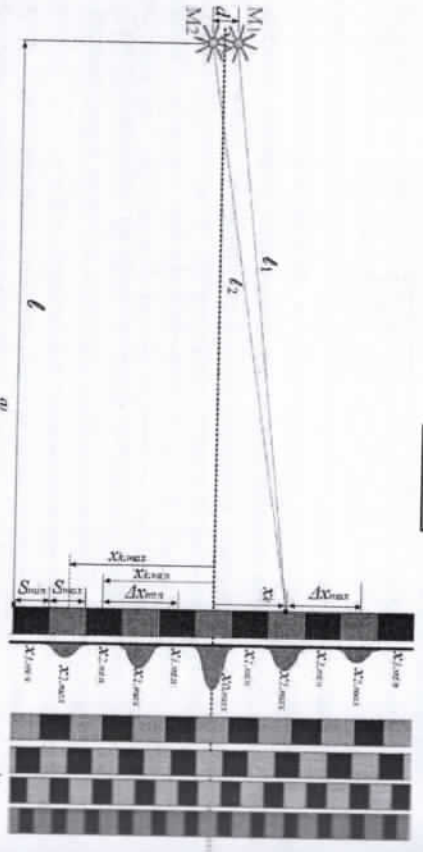


Рисунок 13.2

Если вторая волна приходит с опозданием от первой волны на целый длину волны, лучи, достигающие когерентных источников, колеблются в одной и той же фазе. Эти волны складываются и усиливают друг друга. Это называется выполнением условия максимумов. В зоне, где выполняется условие максимумов, образуется полоса, окрашенная в цвет монохроматического света, например, красная полоса образуется, если источники излучают красный свет (рис.13.2-а).

Если вторая волна приходит с задержкой в нечетное число раз длины полуволны, чем первая, то лучи, достигающие когерентных источников, колеблются в противоположной фазе. Эти волны складываются и ослабляют друг друга. Это называется выполнением условия минимумов. В зоне, где

выполняется условие минимумов, всегда образуется темная полоса (рис.13.2-а).

Условие максимумов и минимумов имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \delta_{\max} = k \lambda & - \text{max.} \\ \delta_{\min} = \frac{2k-1}{2} \lambda & - \text{min.} \end{cases} \quad (13.6)$$

Здесь, принято считать, что для светлых колец $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, а для темных колец $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Теперь, по приведенным выше формулам можно определить, где находится геометрическое место максимумов или минимумов произвольного порядка k . Для этого воспользуемся условиями максимум и минимум.

$$\begin{cases} \delta_{\max} = k \lambda \\ \delta_{\min} = \frac{2k-1}{2} \lambda \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \frac{d x}{\ell} = k \lambda \\ \frac{d x}{\ell} = \frac{2k-1}{2} \lambda \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x_{\max} = k \lambda \frac{\ell}{d} \\ x_{\min} = \frac{2k-1}{2} \lambda \frac{\ell}{d} \end{cases}$$

Таким образом, расстояние от центра экрана до произвольных максимумов и минимумов k -го порядка определяется по формуле:

$$\begin{cases} x_{\max} = k \lambda \frac{\ell}{d} \\ x_{\min} = \frac{2k-1}{2} \lambda \frac{\ell}{d} \end{cases} \quad (13.7)$$

Как видно из приведенной выше формулы, это именно то, что расстояние от некоторой интерференционной полосы k -порядка до центральной линии экрана будет прямо пропорционально длине волны. Поэтому интерференционная полоса точно такого же порядка располагается для красного света дальше всего от центральной линии, а для фиолетового-ближе всего к центральной линии (рис.13.2-б).

Определим расстояние между двумя соседними интерференционными полосами. Чтобы найти расстояние между соседними максимумами, мы найдем расстояние между максимумами k -го порядка и $k-1$ -го порядка.

$$\Delta x_{\max} = x_{k, \max} - x_{k-1, \max} = k \lambda \frac{\ell}{d} - (k-1) \lambda \frac{\ell}{d} = k \lambda \frac{\ell}{d}$$

Таким же образом находят расстояние между двумя минимумами.

$$\Delta x_{\min} = x_{k, \min} - x_{k-1, \min} = \frac{2k-1}{2} \lambda \frac{\ell}{d} - \frac{2(k-1)-1}{2} \lambda \frac{\ell}{d} = \frac{2k-1-2k+2+1}{2} \lambda \frac{\ell}{d} = \lambda \frac{\ell}{d}$$

Отсюда следует, что расстояние между соседними максимумами равно расстоянию между соседними минимумами, т. е. $\Delta x_{\max} = \Delta x_{\min}$.

Таким образом, расстояние между двумя соседними максимумами равно расстоянию между двумя соседними минимумами и будет:

$$\Delta x_{\max} = \Delta x_{\min} = \frac{\lambda \ell}{d}$$

(13.8)

Из приведенной выше формулы видно, что расстояние между соседними интерференционными полосами будет прямо пропорционально длине волны. Поэтому эта величина будет наибольшей в красном свете и наименьшей в фиолетовом (рис.13.2-6).

Максимальная ширина полосы равна ширине минимальной полосы и выглядит следующим образом.

$$S_{\max} = S_{\min} = \frac{\lambda \ell}{2d}$$

(13.9)

Как видно из приведенной выше формулы, ширина полос интерференции будет прямо пропорциональна длине волны. Следовательно, эта величина будет наибольшей в красном свете и наименьшей в фиолетовом (рис.13.2-6). Самый высокий порядок максимумов, который возникает на экране, будет выглядеть следующим образом:

$$K = \frac{d}{\lambda}$$

(13.10)

Общее количество максимумов, возникаемых на экране, будет следующим:

$$N = 2K + 1 = 2 \frac{d}{\lambda} + 1$$

(13.11)

Из формулы видно, что общее число максимумов прямо пропорционально расстоянию между источниками, обратно пропорционально длине волны. Другими словами, с увеличением расстояния между источниками количество максимумов увеличивается, полосы сжимаются, а с увеличением длины волны количество максимумов уменьшается, полосы утолщаются.

Интерференция в зеркалах Френеля:

Система зеркал, называемая зеркалами Френеля, представляет собой оптическую систему, состоящую из двух зеркал K_1 и K_2 , расположенных относительно друг друга под углом меньшим $\varphi \approx 180^\circ$ (рис.13.3). На пути белого света, исходящего от источника яркого светораспределителя M , помещается световой фильтр F , пропускающий необходимый свет, скажем, красный свет. Монохроматические лучи, проходящие через фильтр, попадают в зеркала K_1 и K_2 . Лучи, падающие на эти зеркала, рассеиваются, но протнвоположные продолжения рассеянных лучей пересекаются за зеркалом в точках M_1 и M_2 . Эти точки являются изображениями источника в зеркалах K_1 и K_2 . Это похоже на то, как монохроматические лучи света выходят из точек M_1 и M_2 . Если расстояние d между точками M_1 и M_2 и проведем

перпендикулярную линию через середину этого расстояния, а также переместим экран на расстоянии l ($l \gg d$) вдоль центральной линии, то получится интерференционная картина, образованная двумя точечными источниками. Если интерференционным картинкам, образованным двумя точечными источниками, мы познаккомились выше. При этом, как и в случае с первым, в центре экрана появляется красная полоса, а затем чередующиеся черные и красные полосы.

Если вместо красного фильтра поставить последовательно красный, зеленый, синий и фиолетовый фильтры, то будут наблюдаться интерференционные картинки, состоящие из чередующихся красноватых и черных, зеленых и черных, синих и черных, фиолетовых и черных полос. Только по мере того, как длина волны уменьшается, полосы также сдвигаются влево.

Стоит лишь отметить, что интерференционная картина, который формируется с помощью зеркал Френеля, будет ограничено. Другими словами, интерференционная картина наблюдается только внутри определенной области, тогда как область снаружи окрашена в цвет светового фильтра (рис.13.3).

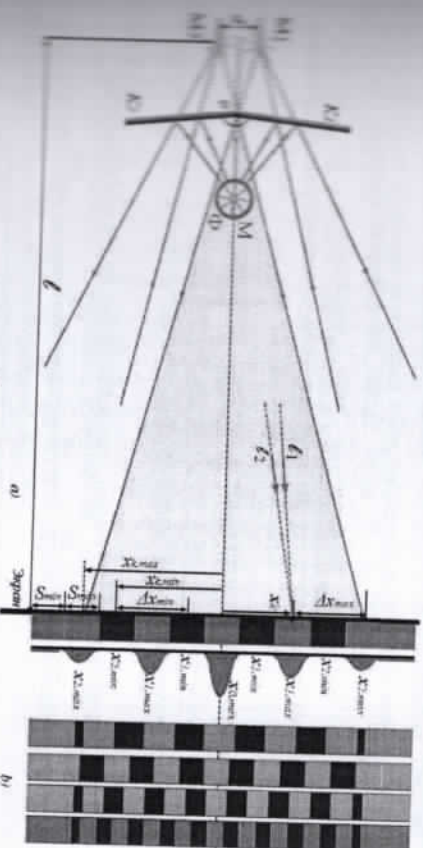


Рисунок 13.3

Френелевые зеркала еще называют бисзеркалами. Помимо билинза, интервала, источника и его отражение в зеркале, также можно наблюдать интерференционные источники, формируя два источника из одного реального источника.

Интерференция на тонких пластинках:

Каждый из нас хорошо знает, что в разлитом по поверхности воды масле или мыльном пузыре образуются пятна разного цвета. Первым причину

определил английский ученый Томас Юнг. Объясняя, он выдвинул эту гениальную идею.

Мыльный пузырь или масло на поверхности воды представляет собой тонкую слой толщиной порядка микрометра, образованную интерференционным картинкам, в котором лучи, отражаясь от внутренних и внешних стен этой пленки, смешиваются. Он получил масляную пленку как прозрачную пластину толщиной d и изучал интерференцию для этой пластины.

Пусть пучок параллельных лучей падает на поверхность тонкой пластины под некоторым углом α . Из того же параллельного пучка лучей выберем произвольные 1 и 2 луча. 1-й луч, преломленный на пластине, отражается как 1'-й луч от внутренней стенки пластины и выходит наружу как 1''-й луч. Луч 1''-й, выходящий наружу, встречает в этом месте луч 2', отражающийся с поверхности пластины 2-го луча, и, сливаясь с ним, интерферирует (рис.13.4).

Для того, чтобы 1''-й и 2'-й лучи были интерферирующими, должны подчиняться условию максимумов или минимумов не разность геометрических путей, по которым идут эти лучи, а разность их оптических путей.

Длина оптического пути — это величина, которая показывает, какой путь свет может пройти в вакууме за время, необходимое световой волне для прохождения некоторого расстояния в среде с показателем преломления n .

Геометрические пути двух волн, соответственно, будут следующими:

$$\begin{cases} \ell_{1, \text{геометр}} = AB + BC = 2AB = 2 \frac{BE}{\cos \beta} = \frac{2d}{1 - \sin^2 \beta} = \frac{2d}{1 - (\sin \alpha / n)^2} = \frac{2nd}{n^2 - \sin^2 \alpha} \\ \ell_{2, \text{геометр}} = DC = 2AE = 2BE \cdot \tan \beta = 2d \frac{\sin \beta}{1 - \sin^2 \beta} = \frac{2d(\sin \alpha / n)}{1 - (\sin \alpha / n)^2} = \frac{2d \sin^2 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \end{cases} \quad (13.12)$$

Оптических путей обеих волн соответственно будет равна:

$$\begin{cases} \ell_{1, \text{опт}} = (AB + BC) \cdot n = \frac{2nd}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \\ \ell_{2, \text{опт}} = DC \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{2d \sin^2 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \cdot \frac{\lambda}{2} \end{cases} \quad (13.12a)$$

Разница оптических путей будет равна:

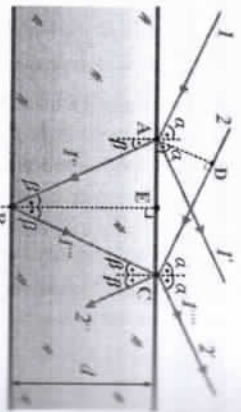


Рисунок 13.4

$$\delta = \ell_{1, \text{опт}} - \ell_{2, \text{опт}} = \frac{2nd}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} - \left(\frac{2d \sin^2 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} - \frac{\lambda}{2} \right) = \frac{2d(n^2 - \sin^2 \alpha)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (13.12b)$$

Вычитание оптических путей двух лучей дает разность оптических путей.

$$\delta = \ell_{1, \text{опт}} - \ell_{2, \text{опт}} = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} \quad (13.13)$$

Если разность оптических путей слагаемых волн будет равна четному числу половин или целому числу длин волн, произойдет максимальное усиление результирующего колебания, присоединяясь к одной и той же фазе ($\Delta \varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$) в точке С. При этом выполняется условие максимумов, и поверхность, выглядит так, будто она окрашена в цвет монохроматического луча. Например, поверхность, освещенная красным светом, будет как бы окрашена в кровь.

Если разность оптических путей слагаемых волн равна нечетному числу половин, произойдет ослабление результирующего колебания, присоединяясь в противоположной фазе ($\Delta \varphi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$) в точке С. При этом выполняется условие минимумов, чтобы поверхность выглядела так, как будто она была окрашена в черный цвет, независимо от того, каким цветом она была освещена.

Условие максимумов и минимумов имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \delta = k\lambda & \text{или} & 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda & - \text{ макс.} \\ \delta = \frac{2k+1}{2}\lambda & \text{или} & 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} = \frac{2k+1}{2}\lambda & - \text{ мин.} \end{cases} \quad (13.14)$$

Здесь: $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ и n — абсолютный показатель преломления вещества.

Если поверхность пластины освещается ($\alpha = 0^\circ$) в вертикальном направлении пучком монохроматических лучей, приведенная выше формула приобретает следующий более простой вид:

$$\begin{cases} \delta = k\lambda & \text{или} & 2dn + \frac{\lambda}{2} = k\lambda & - \text{ макс.} \\ \delta = \frac{2k+1}{2}\lambda & \text{или} & 2dn + \frac{\lambda}{2} = \frac{2k+1}{2}\lambda & - \text{ мин.} \end{cases} \quad (13.15)$$

Если пластину какой-либо толщины осветить белым светом, при определенных условиях максимумов для света какой длины волны, то поверхность пластины будет выглядеть так, будто она окрашена в тот же цвет света. Для всех остальных длин волн выполняется условие минимумов.

Если толщина пластины везде одинакова, поверхность будет видна либо в черном, либо в цвете наблюдаемого монохроматического света. Если толщина пластины изменчива, некоторые участки поверхности выглядят черными, а некоторые-монохроматическими светлыми. Если пластина переменной толщины освещена белым светом, то выполняется условие максимумов пучков с разной длиной волны в разных точках поверхности пластины. В результате различные точки поверхности пластины выглядят так, как будто они окрашены по-разному, что означает, что поверхность имеет разноцветный блеск. Такая же ситуация наблюдается в слое нефти, разлитой по поверхности воды, в мыльном пузыре.

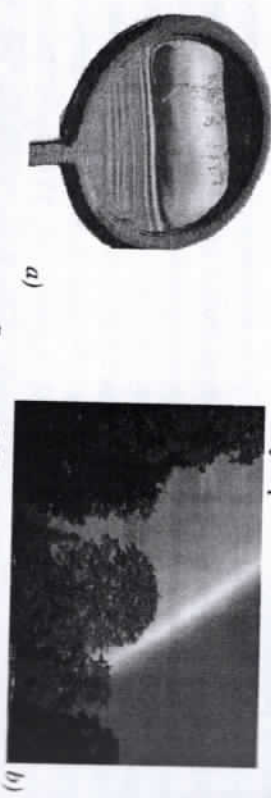


Рисунок 13.5

На рисунке 13.5 изображены интерференционная картина, искусственно созданный в мыльном пузыре, и радуга, образованная весной после дождя. Поскольку толщина слоя в мыльном пузыре различна, интерференционная картина разнообразна. А в радуге световой луч дважды преломляется при входе в крошечные капли дождя и при выходе из капли. Из-за явления дисперсии белый свет распадается на монохроматические лучи. Радуга образуется в результате слияния и интерференции возвращающихся лучей внутри и снаружи капли.

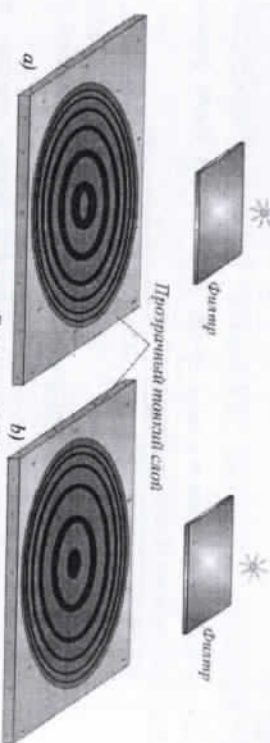


Рисунок 13.6

До сих пор мы во всех случаях сталкивались с интерференционными картинками, которые возникают при освещении поверхности пучком параллельных лучей. Если источник монохроматических лучей установить

на пластину тонкой толщины на небольшом расстоянии, то какое событие происходит?

Для получения такого источника монохроматических лучей достаточно, чтобы лампа накаливания была световым фильтром, пропускающим одну волну. Лучи, идущие от такого источника, падают на разные участки пластины под разными углами. Например, если источник падает вертикально ($\theta = 0^\circ$) в ближайшую точку у основания, угол падения также увеличивается по мере удаления от основания источника. В результате иногда выполняется условие минимума, иногда максимума, и наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередующихся колец, как кольца Ньютона (рис.13.6).

Интерференция в клинообразных слоях с небольшим углом:

Мы познакомились с окрашиванием в различные тона в разных точках натурального мыльного пузыря, различная толщина слоя. Какое явление возникает в таких слоях, если толщина слоя равномерно увеличивается, не изменяясь хаотично?

Пусть толщина слоя равномерно линейно увеличивается. Так как размер самого толстого места слоя также равен доли миллиметра, то эту слой можно назвать клинообразной слоем с небольшим углом (рис.13.7).

Пусть пучок монохроматических параллельных лучей падает в перпендикулярном положении на одну из сторон клина с малым углом α , абсциссой которого является показатель преломления света вещества n . При этом перебегают темные и светлые полосы, параллельные краю, в отличие от непрозрачной многослойной занавески формируется.

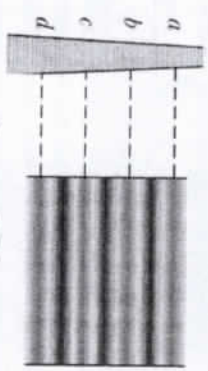


Рисунок 13.7

По мере удаления от края барьера слой занавеса становится толще. Поэтому разница между оптическими путями между лучами, отражающимися с внутренней и внешней поверхности занавеса, также увеличивается. Предположим, что в произвольной точке A наблюдается картина максимальной интерференционной картины. Тогда даже на некотором расстоянии Δx от точки A есть такая точка B , что из-за увеличения толщины слоя снова образуется максимальный интерференционный картина. При этом оптическая разность путей может увеличиваться $\lambda_M = \frac{\lambda}{n}$ по отношению к разности путей в точке A . А с другой стороны будет

$\lambda_m = 2BC \cdot \lg \alpha = 2\Delta x \cdot \lg \alpha \approx 2\Delta x \cdot \alpha$. Мы воспользовались тем, что на малых углах $\lg \alpha \approx \alpha$. Тогда имеем следующее выражение (рис. 13.8).

$$2\Delta x \cdot \alpha = \frac{\lambda}{n} \quad (13.16)$$

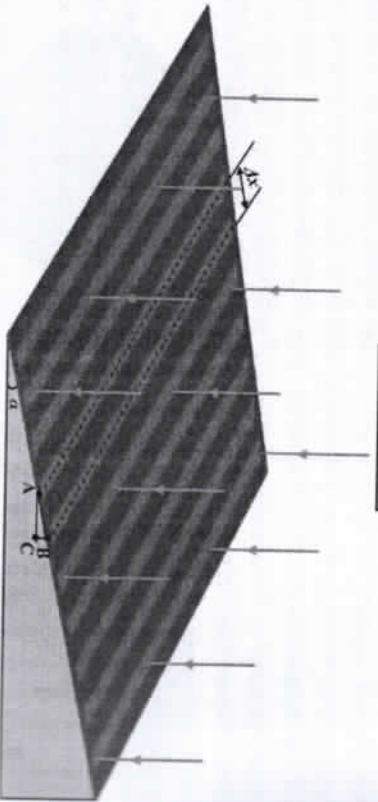


Рисунок 13.8

Расстояние между соседними максимумами равно расстоянию между соседними минимумами и составляет:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2n\alpha} \quad (13.17)$$

Ширина максимальных полос равна ширине минимальных полос и составляет:

$$S = \frac{\Delta x}{2} = \frac{\lambda}{4n\alpha} \quad (13.18)$$

Как видно из формулы, чем меньше угол на конце, тем толще становятся ширина полосок, что видно невооруженным глазом. Например, если мыльный пузырь ($n=1.4$) образует линию с углом $\alpha=1^\circ$, то при освещении этого же слоя красным светом ($\lambda=780 \text{ nm}$) будут видны черные и красные полосы толщиной $S=0.021 \text{ мм}$, а при освещении фиолетовым ($\lambda=390 \text{ nm}$) светом — черные и фиолетовые полосы толщиной $s=0.021 \text{ мм}$. А этот размер глаз практически не воспринимает. Для наблюдения интерференционного картины необходимо будет использовать дополнительные оптические приборы, увеличивающие угол обзора. Поэтому при значениях $\alpha=1^\circ$ и более, поскольку полосы находятся так близко друг к другу, становится невозможным различить их невооруженным глазом. И наоборот, в десятках, сотнях долей градуса угла α интерференционная картина выглядит очень отчетливо. В результате, благодаря возможности измерения расстояния Δx

между соседними максимумами, можно найти ожидаемую монохроматическую длину волны, основанную на формуле $\lambda = 2n\Delta x\alpha$. Если угол приближается слишком близко к нулю ($\alpha \rightarrow 0$), интерференционная картина полностью исчезает, поскольку ширина полос становится бесконечно больше. Потому что он превращается в пластину неизменной толщины. Поверхность кажется либо только темной, либо только светлой.

Как видно из формулы, ширина полос оказывается прямо пропорциональной длине освещаемой монохроматической волны. В этом можно убедиться, даже взглянув на картинку.

Кстати Ньютон:

Мы видели, как наименьший угловой фони образует чередующийся поперечный интерференционный картины одинаковой ширины. Если представить плоско-выпуклую линзу, состоящую из бесконечного числа точек, угол которых непрерывно увеличивается, то следует наблюдать интерференционную картину, которая уменьшается по мере удаления от центра.

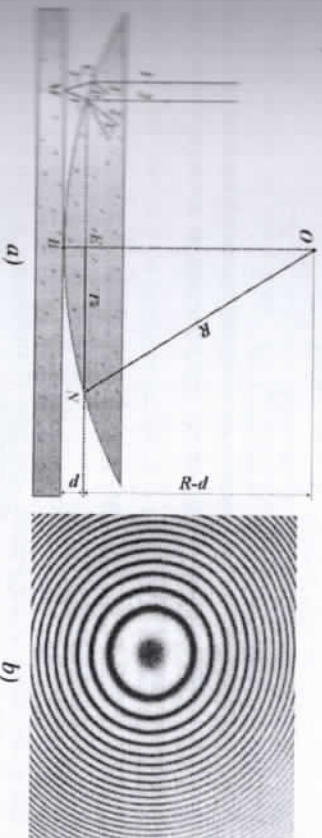


Рисунок 13.9

Интерференционная картина возникает и в слое воздуха, образуемом между плоскоокруглой линзой с радиусом кривизны, наложенным на стеклянную пластину. Эта интерференционная картина имеет форму концентрических колец, называемых кольцами Ньютона. Чем больше радиус кривизны линзы, тем более отчетливо виден интерференционная картина. Центр интерференционного картина всегда будет черным, независимо от того, каким цветным монохроматическим светом вы освещаете тела.

На плоскую стеклянную пластину помещают плоско-выпуклую линзу радиусом $R=1-2 \text{ м}$ (рис. 13.9-а). На рисунке изображен срез этой системы. Между линзой и стеклянной пластиной находится слой воздуха, и этот слой увеличивается, начиная с точки В, где линза и пластина соприкасаются. Прямые параллельные монохроматические лучи падают вертикально на

плоскую сторону линзы. Один из этих лучей I , достигнув точки C , частично отражается частично переходит в слой воздуха. Пройденный I'' луч отражается из точки M как I''' и выходит а из точки D как I'''' . В точку D также попадает луч 2. Лучи I''' и $2'$ взаимно когерентны, они перекрывают друг друга и интерферируются. В результате наблюдаются кольца когерентности (рис.13.9-6). Впервые этот эксперимент провел английский физик И. Ньютон. Эта картина называется кольцами Ньютона.

Центр линзы касается стеклянной пластины. По мере удаления от центра зазор между линзой и пластиной утолщается воздушным слоем. Пусть произвольная интерференционная петля k -порядка образуется на расстоянии r_k от центра линзы. Это кольцо будет находиться на некотором расстоянии d от плоской стеклянной пластины. Зависимость между ними имеет следующий вид.

$$R^2 = r_k^2 + (R-d)^2, \rightarrow R^2 = r_k^2 + R^2 - 2Rd + d^2, \rightarrow 2Rd = r_k^2 + d^2$$

Принимая во внимание, что $r_k \gg d$ и не учитывая очень маленький член d^2 , мы получаем следующую формулу:

$$d \approx \frac{r_k^2}{2R} \quad (13.19)$$

Чтобы найти разность оптических путей лучей, вычитается оптические пути, пройденные каждым лучом, до тех пор пока они не достигнут точки D , где они встречаются, т. е.

$$\delta = \ell_1 - \ell_2 = \left(CM + MD + \frac{\lambda}{2} \right) - 0 = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r_k^2}{2R} + \frac{\lambda}{2}$$

Здесь принимает выражение следующим образом $CM + MD = 2d$

Следовательно, если учесть, что луч I'' переходит в противоположную фазу при прохождении через точку M , разность оптических путей лучей I''' и $2'$ будет следующей:

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2} = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (13.20)$$

Кольцо, в котором выполнено условие максимумов, видно в свете освещаемого монохроматического света, в то время как кольцо, в котором выполнено условие минимумов, всегда черное.

Условие максимумов и минимумов имеет вид:

$$\begin{cases} \delta = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda & \text{условия максимумов} \\ \delta = \frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = \frac{2k+1}{2}\lambda & \text{условия минимумов} \end{cases} \quad (13.21)$$

Темные кольца начинаются в центре интерференционной картины. Следовательно, счет темных колец начинается с $k=0$ (главный минимум), а счет светлых колец начинается с $k=1$.

Можно определить произвольной радиус темной или светлой полосы. Используя условие максимумов, определим радиус светлой полосы k -го порядка.

$$\frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda, \rightarrow r_{k,\max} = \sqrt{\frac{2k-1}{2}} \lambda R$$

Используя условие минимумов, определим радиус k -порядковый номер темной полосы.

$$\frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = \frac{2k+1}{2}\lambda, \rightarrow \frac{r_k^2}{R} = k\lambda, \rightarrow r_{k,\min} = \sqrt{k\lambda R}$$

Следовательно, формулы нахождения радиусов светлого и темного колец k -го порядка имеет вид:

$$\begin{cases} r_{k,\max} = \sqrt{\frac{2k-1}{2}} \lambda R & (k=1, 2, 3, \dots) \\ r_{k,\min} = \sqrt{k\lambda R} & (k=0, 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (13.22)$$

Как видно из формулы, $r_k \sim \sqrt{k}$ следовательно, по мере удаления от центра кольца уплотняются и сужаются. Например, если расстояние между минимумами 1-го порядка равно $\Delta r = \sqrt{\lambda R}$, то расстояние между минимумами 1-го и 2-го порядка равно $\Delta r = 0,414\sqrt{\lambda R}$, расстояние между минимумами 2-го и 3-го порядка равно $\Delta r = 0,318\sqrt{\lambda R}$, а расстояние между минимумами 3-го и 4-го порядка равно $\Delta r = 0,268\sqrt{\lambda R}$ и т.д.

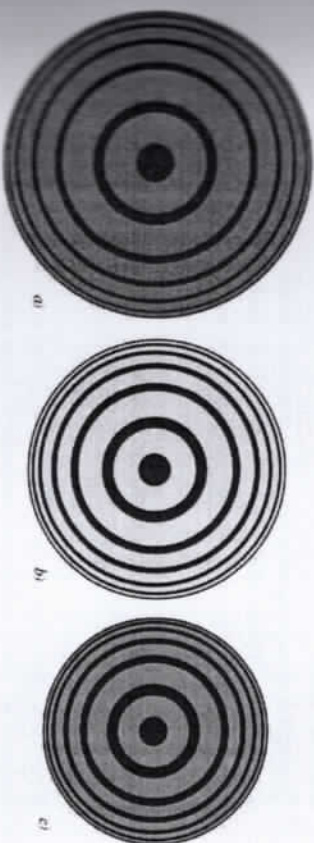


Рисунок 13.10

Как видно из формулы, $r_k \sim \sqrt{\lambda}$ следовательно, с увеличением длины волны увеличиваются и радиус колец. Например, радиусы произвольного порядка k -порядка, образованного красным светом с длиной волны $\lambda=780$ нм и фиолетовым светом с длиной волны $\lambda=390$ нм, отличаются на $\sqrt{2}$. Поэтому

при освещении фиолетовым светом образуется интерференционная картина, в котором размер колец наименьший по сравнению с другими лучами, число колец наибольшее, а кольца самые плотные (13,10-рис).

Например, радиусы произвольного кольца k -порядка, образованного красным светом с длиной волны $\lambda = 780$ нм и фиолетовым светом с длиной волны $\lambda = 390$ нм, отличаются. Поэтому при освещении фиолетовым светом образуется интерференционный пейзаж, в котором размер колец наименьший по сравнению с другими лучами, число колец наибольшее, а кольца самые плотные (рис.13.10).

Если в эксперименте использовать белый свет, а не монохроматический, то интерференционная картина будет окрашена в разные цвета.

При введении прозрачной среды между линзой и пластиной чисто интерференционных колец увеличивается, расстояние между максимумами уменьшается, ширина колец уменьшается.

Если вместо сферической плоско-выпуклой линзы поместить на стеклянную пластину цилиндрическую плоско-выпуклую линзу, интерференционная картина будет состоять из полос вместо колец. В центре экрана появляется двойное черное цвета, за которым следуют чередующиеся светлые и темные полосы.

Вопросы по теме

1. Что называют взаимно-когерентными волнами? Какими будут взаимно-когерентные источники волн?
2. Что называется интерференцией света? Запишите условие максимумов и минимумов. Какое явление наблюдается в точках, где эти условия выполняются?
3. Напишите формулы, вычисляющие разность путей, условие максимумов и минимумов, расстояние до произвольного максимума или минимума, расстояние между соседними максимумами или соседними минимумами, ширину полосы произвольного минимума или максимума для интерференционной картины, образованной двумя взаимно когерентными источниками.
4. Объясните причину формирования интерференционной картины в зеркалах Френеля.
5. Напишите формулы, вычисляющие разность путей, условие максимумов и минимумов для интерференционного картина, образованного тонкой масляной пленкой.
6. Чему равно расстояние между соседними максимумами или соседними минимумами в малом угловом клиновидном слое? Что такое длина волны?
7. Напишите формулы, вычисляющие разность путей, условие максимумов и минимумов для интерференционной картина, возникающего при

взаимно-когерентном падении света на тонкую масляную пленку.

Напишите формулы для колец Ньютона, которые вычисляют разность путей, условие максимумов и минимумов, а также радиус полосы максимумов и минимумов произвольного порядка.

Решение задачи:

1. Когда разность хода между двумя когерентными волнами, имеющими одинаковую амплитуду a , равна двойной длине полуволны, какова будет результирующая амплитуда колебаний, возникающих в результате их сложения?

- A) 0 B) $\frac{a}{2}$ C) a D) $2a$ E) a^2

Дано:

Решение:

$A_1=a$	interferensiyalı	maksimallar	shartıda	ko'ra
$A_2=a$	interferensiyalı	to'qinlaning	yo'llar	farqi
$A_n=?$	to'qin uzilishlari	niqatiga	yaqin	uzilishlari
	natijavi	to'qin kishtiradi,	ya'ni	$A_n=A_1+A_2=2a$
				ga teng.

Если разность путей интерферирующих волн по условию интерференционных максимумов равна k четному числу полуволн их длины волны результирующей амплитуды, тогда она равна $A_n=A_1+A_2=2a$.

Ответ: D)

Два когерентных источника звука колеблются в одной фазе. В точке, расположенной на расстоянии 3 м от первого источника и 4 м от второго, звук не слышен. Какова частота звука [Гц], если скорость звука равна 340 м/с? ($n=0,1,2,\dots$)

Дано:

Решение:

$x_1=3\text{ м}$

По условию минимума интерференции

$$\Delta x = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} = (2n + 1) \frac{v}{2\nu}$$

$$v = 340 \text{ м/с}$$

в этом

$$n=1,2,3,\dots$$

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 1 \text{ м}$$

$$\nu = ? \quad \nu = (2n + 1) \frac{v}{2\Delta x} = (2n + 1) 170 \text{ Гц}$$

$$\text{Ответ: } \nu = (2n + 1) 170 \text{ Гц}$$

§ 14. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. ПРИНЦИП ФРАНЕЛЬ-ГЮЙЕНСА. РАСЧЕТ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ДИФРАКЦИИ

Дифракция света:

Поскольку свет является волной, это означает, что он также должен иметь дифракционную частоту, как механическая волна. Потому что явление, когда геометрическая тень проходит через сферу, когда она сталкивается с препятствием или щелью, относится ко всем волнам. Однако дифракцию света нелегко наблюдать. Это потому, что гораздо сложнее создать препятствие или щель, достаточно маленькую, чтобы ее можно было сравнить с длиной световой волны.

Впервые дифракцию света удалось наблюдать Томасу Юнгу в 1802 году с помощью своего классического эксперимента. Он протыкает иглой две точки, расположенные близко друг к другу на непрозрачном слое. Когда световой луч попадает в эти отверстия через другое отверстие, на экране появляются чередующиеся светлые и темные полосы. Согласно принципу Гюйенса, каждый достигнутый фронт светового луча образует вторичный источник света. Следовательно, две щели становятся вторичным взаимно-когерентным источником. А это уже сама интерференция, образованная двумя когерентными источниками, с которыми мы познакомились в предыдущей теме.

Юнг этим же экспериментом измерил очень точно длины волн спектров света разных цветов.

Принципы Франселя-Гюйенса:

Исследование дифракции света было завершено работами Отюстена Франселя. Франсель не только исследовал различные случаи дифракции, но и обнаружил, что световой луч может отражаться от любого препятствия (круговой барьер, круговая щель, линейный барьер, линейная щель и т. д.) создавал теорию, позволяющую количественно вычислить интерференционную картину, возникающую при вращении. Кроме того, Франсель первым доказал, что свет распространяется по прямой в однородной среде.

Дифракция света-это свойство света проходить через препятствия в области геометрической тени.

Слово дифракция происходит от латинского "diffractio" "изгибаться". Световые волны значительно обходят препятствия, размеры которых близки к световой волне.

Интересен исторический факт и математик, ученый Христиан Гюйгенс, создавший первую волновую теорию, родился в Голландии в 1629 году. Основы волновой теории были изложены в его труде "Трактат о свете" в 1690 году. Гюйгенс первым предложил математик для обеспечения равномерного хода волн, и математик и физик давал формулу периода колебаний волн. Помимо огромного количества работ в области оптики, он также преуспел в математике. Его работы посвящены исследованию конических сечений, циклоиды и других кривых. Одна из первых его работ по теории волновой оптики принадлежит перу Гюйгенса. С помощью математического анализа, который усовершенствовал своими работами Гюйгенс, он открыл принцип Сатурна-Титана. Он умер в 1695 году.



Христиан Гюйгенс
(1629–1695)

Принцип Гюйгенса — Франселя: каждая точка волнового фронта является вторичным источником волн. Вторичные источники волн когерентные источники и колебания в произвольной точке пространства являются результатом интерференции вторичных когерентных волн, достигших этой точки.

Чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, необходимо очертить источник света таким образом, чтобы он был случайно окружен шарообразной закрытой поверхностью. Интерференция вторичных волн, распространяющихся из этих сферических точек поверхности, определяет их результирующую амплитуду в произвольной точке пространства.

Идея Франселя:

Чтобы вычислить амплитуду световой волны в любой точке пространства, необходимо представить источник света закрытой поверхностью. Интерференция волн от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, дает амплитуду в исследуемой точке пространства. Луч, распространяющийся со скоростью v в среде от источника M , в момент t рисует сферу с радиусом $R=vt$. Необходимо найти сумму вторичных когерентных волн, которые достигают произвольной точки P из всех точек поверхности сферы S . Точка O , лежащая на прямой MP , является ближайшей точкой сферы S к точке D . Обозначим расстояние OD как r_0 . Рисуем сферы, центры которых расположены в точке D и отстояются друг от друга на половину длины волны, следующим образом (рис.14.1). Их длина радиусов будут:

Эти нарисованные сферы отделиют от поверхности специальные сферические кольца (зоны). Эти зоны называются зонами Франселя. Самая центральная зона называется 1-зоной, а последующие— 2,3,4 зонами. Зоны

Френеля имеют равные поверхности. Следовательно, эти поверхности имеют равное количество вторичных когерентных источников.

Обозначим A_1 результирующую амплитуду, приходящую в точку D из зоны 1, и в том же порядке-результирующую амплитуду $A_2, A_3, A_4, \dots$, приходящую в точку D из зоны 2, 3, 4.

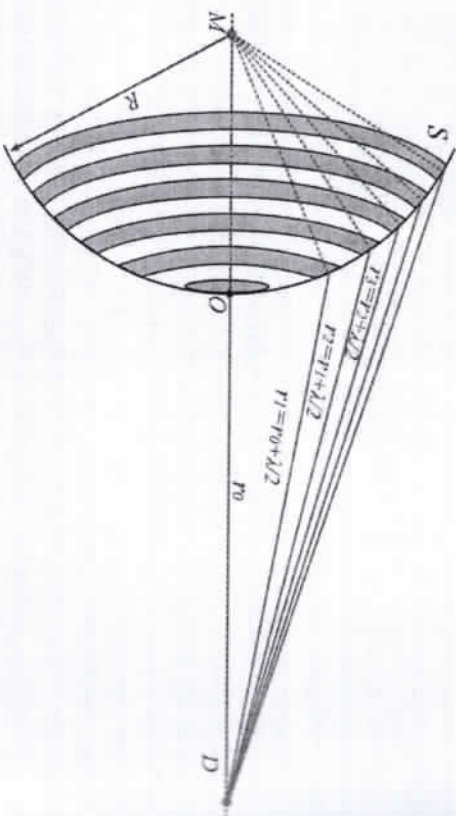


Рисунок 14.1

По мере увеличения порядкового номера зон расстояния до точки D также линейно увеличиваются, т. е. Становятся $r_1 > r_2 > r_3 > r_4 > \dots$.

Также начинают увеличиваться углы обзора этих зон от точки D . Поэтому результирующие амплитуды $(A_1, A_2, A_3, A_4, \dots)$ световых волн, достигающих точки D от всех вторичных источников когерентных волн в зонах, образуют монотонно убывающую числовую последовательность.

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_5 > \dots$$

С другой стороны, расстояния от крайних точек соседних зон Френеля до точки D отличаются на $\lambda/2$. Следовательно, фазы колебаний соседних зон, возбужденных в точке D , отличаются на π , т. е. колеблются в противофазной фазе. Общая амплитуда в точке D равна сумме амплитуд в отдельных зонах. Амплитуды нечетных зон принимаются за знак $(+)$, а амплитуды четных зон-за знак $(-)$.

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5 - \dots \quad \text{или} \quad (14.1)$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \dots + \left(\frac{A_{k-1}}{2} - A_k + \frac{A_{k+1}}{2} \right) + \dots \quad (14.1a)$$

Если учесть $A_k = \frac{A_{k-1}}{2} + \frac{A_{k+1}}{2}$, что уравнение имеет вид:

$$A \approx \frac{A_1}{2} \quad (14.2)$$

Следовательно, результирующая колебания, вызванная в точке D из-за всех зон Френеля, будет такой же, как половина 1-зоны Френеля.

На рисунке 14.1 показано, как будет выглядеть результирующая интенсивность в точке D . Если световая волна, исходящая от источника M , идет в точку D не из всех зон уздечки, а из некоторой части зон уздечки. Это видно на примере кругового диска и кругового отверстия.

Дифракция, вызванная круговым отверстием (дифракция Фриделя):

Разместим на пути световых лучей, распространяющихся от точечного монохроматического источника света M , T -образную преграду с отверстием в форме круга. Когда мы помещаем экран E параллельно препятствию, прямая линия, проходящая через источник M и центр кругового отверстия, пересекает экран в точке D . Выделим параллельные зоны от волнового фронта, достигшего препятствия, выбрав в качестве точки наблюдения точку D (рис. 14.2). Пусть отверстие в сетке оставило открытой полосу k из зон. Результирующая амплитуда колебаний в точке D равна сумме амплитуд колебаний из зон k .

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + A_5 - \dots \pm A_k$$

Для случая, когда число зон в отверстии k является нечетным, а четным, результирующая амплитуда в точке D равна:

$$\begin{cases} A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_k}{2}, & k = \text{odd} \\ A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_k}{2}, & k = \text{even} \end{cases} \quad (14.3)$$

Если число зон мало ($k=3-5$), то при нечетных k (рис. 14.2-В) и четных (рис. 14.2-С) значениях k результирующая амплитуда имеет вид:

$$\begin{cases} A = A_1, & k = \text{odd} \\ A = 0, & k = \text{even} \end{cases} \quad (14.4)$$

Если число зон в щели k значительно больше, то будет $A_k \ll A_1$, а при четных и нечетных значениях k результирующая амплитуда будет равна:

$$\begin{cases} A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_k}{2} \approx \frac{A_1}{2}, & k = \text{odd} \\ A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_k}{2} \approx \frac{A_1}{2}, & k = \text{even} \end{cases} \quad (14.5)$$

Следовательно, приведенная выше формула выражает, что свет распространяется так же, как если бы он был непрозрачной средой.

Дифракция, образованная круговым диском (дифракция Френеля):

Разместим на пути световых лучей, распространяющихся от точечного монохроматического источника света M , круговую дискообразную непрозрачную преграду T (рис. 14.3-а). А экран давайте расположим параллельно преграде E . Прямая, проходящая через центр источника M и диск окружности, пересекает экран в точке D . Если мы выберем точку D в качестве точки наблюдения, преграда закроет полюсу k из параллельных зон на волновом фронте S . Следовательно, амплитуда световой волны в точке D будет равна сумме амплитуд волн, идущих из зон Френеля с номерами $k+1$ и более.

$$A = A_{k+1} - A_{k+2} + A_{k+3} - \dots = \frac{A_{k+1}}{2} + \left(\frac{A_{k+1}}{2} - A_{k+2} + \frac{A_{k+3}}{2} \right) + \dots = \frac{A_{k+1}}{2} \quad (14.6)$$

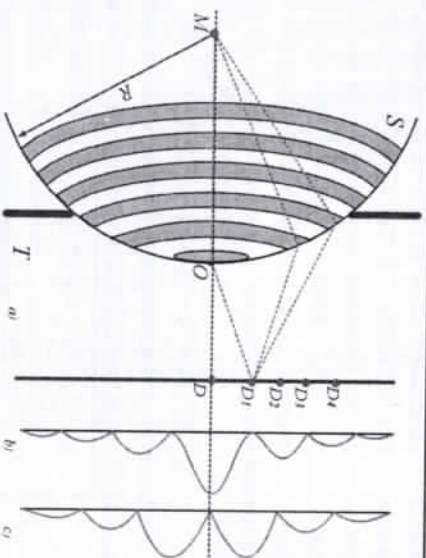


Рисунок 14.2

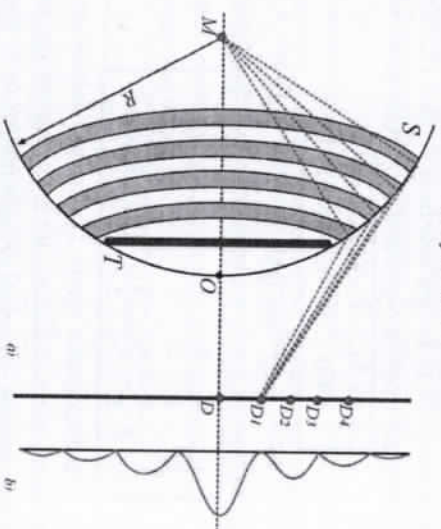


Рисунок 14.3

к происходит, когда он не очень большой $A_{k+1} \approx A_1$, и по этой причине интенсивность света в точке D будет такой же, как если бы между экраном и источником не было никаких препятствий. Но, выбрав в качестве точки наблюдения точку D_1 на некотором расстоянии от точки D , диск окружности $(k+1)$ -частично закрывает зону, в то время как k -зона частично открывается. В результате интенсивность света в точке D_1 будет слабее, чем в точке D . Еще дальше от точки D_1 , когда мы выберем точку D_2 в качестве точки наблюдения, препятствий еще больше закрывает зоны туннели. В результате интенсивности света в разных удаленных от точки D точках экрана будут такими же, как на рисунке 14.3-б. Дифракционная картина, с другой стороны, имеет вид чередующихся светлых и черных колец, и точка D светится как при нечетных, так и четных значениях k . Дифракционная картина становится незаметно размытым, когда он выходит из геометрической тени, удаляясь от точки D на экране. Это происходит из-за сильного падения света на дифракционную цену в этой области.

Дифракционная решетка:

Под дифракционной решеткой понимается оптический прибор, состоящий из набора щелей одинаковой ширины a , расположенных на расстоянии b друг от друга

Расстояние между соответствующими точками соседних щелей называется длиной или периодом дифракционной решетки. Если обозначить ширину полупрозрачных щелей a , а ширину непрозрачного промежутка b , то период решетки будет выглядеть следующим образом (рис. 14.4):

$$d = a + b$$

(14.7)

Поточивые источники в щелях образуют световые волны, распространяющиеся во всех направлениях. Давайте проверим рассеянный свет под произвольным углом φ из щели. Разность ходов между волнами, исходящими от краев соседних щелей, равен длине поперечного сечения AC и выглядит следующим образом (рис. 14.4):

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$$

(14.8)

Условие максимумов и минимумов для дифракционной решетки будет следующим:

$$\begin{cases} d \sin \varphi = k \lambda & \text{— максимум} \\ d \sin \varphi = \frac{2k+1}{2} \lambda & \text{— минимум} \end{cases}$$

(14.9)

Здесь $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$; в положении $k=0$

в центре экрана наблюдается чередующаяся интерференционная картина с центральным максимумом, то есть максимумом 0-го порядка, затем минимумом 1-го порядка, затем максимумом 1-го порядка и т. д. (Рис. 14.5).

В центре экрана наблюдается максимум, независимо от того, освещена ли дифракционная решетка каким-либо монохроматическим светом или белым светом.

Поскольку положение максимумов, отличных от центрального максимума, соответствующего $k=0$ при освещении решетки белым светом, зависит от длины волны, решетка разделит белый свет на спектры. Чем он больше, тем дальше от центрального максимума находится максимум, соответствующий той же длине волны.

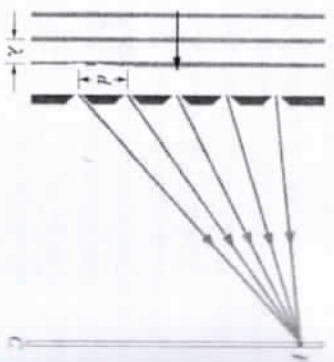


Рисунок 14.4

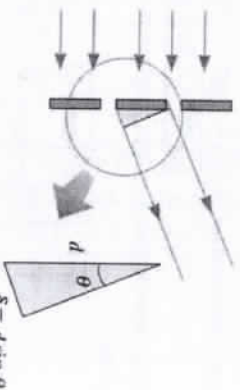
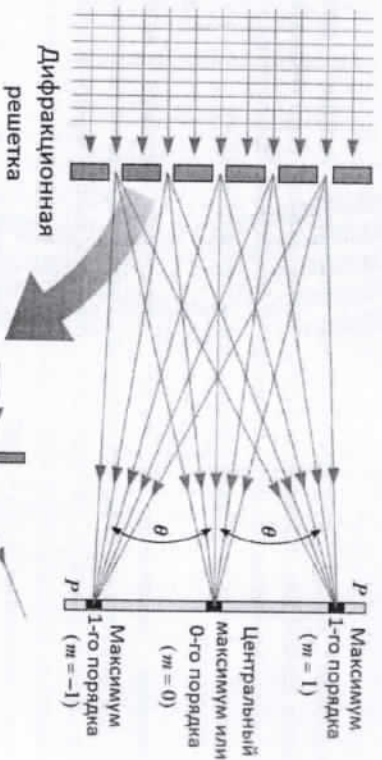


Рисунок 14.5

Порядок максимума, который можно наблюдать в дифракционной решетке, равен

$$k = \frac{d}{\lambda}$$

Увеличением периода решетки увеличивается число интерференционных колец, уменьшается расстояние между максимумами, уменьшается ширина колец.

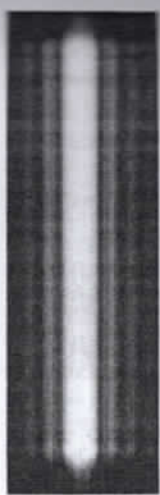


Рисунок 14.5

Выше на рисунке представлены изображения, полученные на дифракционной решетке. На рисунке 14.5-а изображена интерференционная картина, образованная лучами, проходящими через дифракционную решетку. На рисунке 14.5-б изображен компакт-диск в виде интерференционного кольца, образованного отраженными от него лучами, выполняющими роль дифракционной решетки.

Вопросы по теме

1. Что такое дифракция света? Когда это явление наблюдается?
2. Опишите принцип Френеля-Гюйгенса.
3. Что такое зоны Френеля?
4. Рассчитать дифракцию Френеля, образованную круговым диском.
5. Рассчитать дифракцию Френеля, образованную круговой щелью.
6. Что такое дифракционная решетка, какова ее период?
7. Для дифракционной решетки запишите разность хода, условие максимумов и минимумов, наивысший порядок максимумов.

Решение задачи:

1. Монохроматический свет с длиной волны 500 нм падает на дифракционную решетку с 200 штрихами в миллиметре. Найти угол между двумя спектрами первого порядка.

- A) 34° B) 23° C) 11° D) 6° E) 3°

Дано:

$\lambda = 500 \text{ нм}$
 $N = 200 \text{ штук}$
 $k = 1$
 $\alpha = ?$

Решение:

Формула дифракционной решетки $d \sin \alpha = k \lambda$, принимая во внимание, что $d = \frac{1}{N}$ используя

$\alpha = \arcsin \left(\frac{N k \lambda}{1} \right) \approx 5,5^\circ$. Теперь, учитывая, что угол между двумя 1-максимумами равен 2α , мы получаем $\beta = 2\alpha = 11^\circ$.

Ответ: С) 11°

2. Какой будет длина волны падающего света(нм), если угол между двумя симметричными максимумами первого порядка, наблюдаемыми на дифракционной решетке с периодом $d = 10^{-3}$ м, равен 60° ?

Дано:	Решение:
$d = 10^{-6}$ м	Формула дифракционной решетки $d \sin \alpha = k \lambda$
$k = 1$	Учитывая, что $d = \frac{\lambda}{n}$, используя $\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k} = 500$ нм
$\alpha = 60^\circ$	Ответ: 500 нм
$\lambda = ?$	

§ 15. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЧАСТИЧНО И ПОЛНОСТЬЮ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ. ЗАКОНЫ БРЮСТЕРА И МАЛЮСА.

Естественный и поляризованный свет:

Световой луч — это направление распространения поперечных электромагнитных колебаний в интервале длин волн $\lambda = 400-760$ нм. Под светом, излучаемым солнцем или свечой, понимается смесь световых волн, исходящих от атомов (элементарных излучателей) этого источника. Каким бы маленьким не был размер источника света, все равно количество "облучателей" в нем будет невероятно велико. Другими словами, каждый момент, когда миллиарды атомов заканчивают волновое излучение, еще миллиарды атомов начинают волновое излучение. Давайте возьмем одну из этих элементарных волн (рис.15.1). Эта волна зависит от направления распространения света и состоит из взаимно перпендикулярных $\vec{E}$ и $\vec{B}$ векторных колебаний. При этом векторную колебательную плоскость называют плоскостью колебаний $\vec{E}$, а векторную колебательную плоскость — плоскостью поляризации $\vec{B}$.

Когда волна попадает в среду, она взаимодействует с электронами и ионами в среде. Расчеты показывают, что электрический эффект будет намного больше магнитного. Поэтому в целях наглядности изображении электромагнитную волну принято описывать только как колебания вектора $\vec{E}$.

Световые волны, колебания векторов напряженности (E) которых происходят только в одной плоскости, называются плоскополяризованными световыми волнами.

Ярким примером плоско поляризованного света является световая волна, испускаемая одним излучением от одного атома естественного источника света.

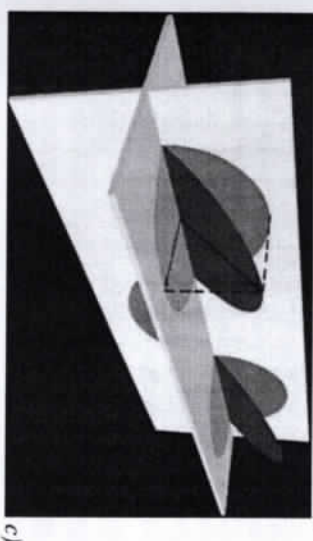
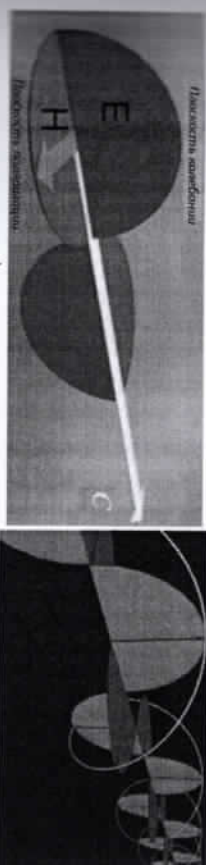


Рисунок 15.1

Плоский поляризованный свет, плоскость колебаний которого совпадает с плоскостью чертежа, можно изобразить либо в виде векторного колебания, либо в виде прямых, проведенных перпендикулярно оси Ох (рис.15.2-а, в). Плоскостной поляризованный свет, плоскость колебаний которого перпендикулярна плоскости чертежа, можно изобразить либо в виде векторного колебания, либо в виде ряда точек в направлении оси Ох (рис.15.2-б, г).

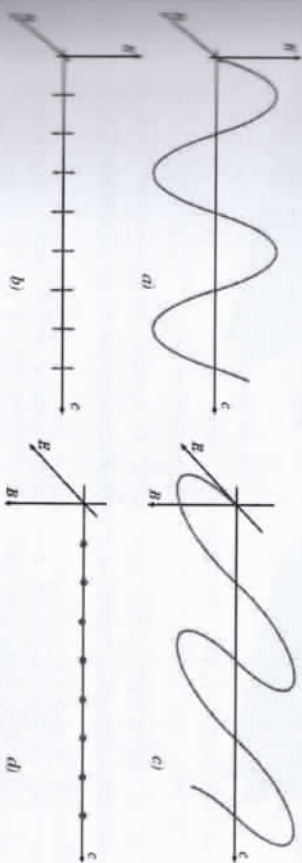


Рисунок 15.2

Плоский поляризованный свет, плоскость колебаний которого совпадает с плоскостью чертежа, можно изобразить либо в виде векторного колебания $\vec{E}$ либо в виде прямых, проведенных перпендикулярно оси Ox (рис.15.2-а, б). Плоскостной поляризованный свет, плоскость колебаний которого перпендикулярна плоскости чертежа, можно изобразить либо в виде векторного колебания $\vec{E}$, либо в виде ряда точек в направлении оси Ox (рис.15.2-с, д).

Приведенные рассуждения уместны для диапазона волн, излучаемых одним атомом естественного источника света в одном излучении. Облучение длится около 10^{-8} с. При этом длина излучаемой волны составляет около 3 м. После этого атом начинает излучать новую волновую цепь. Но плоскость колебаний и направление распространения света в следующей системе не совпадают с плоскостью колебаний и направлением распространения света в предыдущей системе. Векторы $\vec{E}$ (т. е. плоскости колебаний) волн, излучаемых разными атомами в естественном источнике света, имеют разное направление, причем все направления одинаково вероятны. Поэтому что мы не можем сказать, что колебания в одном направлении происходят чаще и медленнее в других направлениях. Другими словами, ни одно направление не является более предпочтительным, чем другое, ни одно направление не является предпочтительным. Векторы естественного света, распространяющиеся от источника света к наблюдателю, будут такими же, как на рисунке 15.3-А. Такой свет называется неполяризованным светом.

Естественный свет представляет собой смесь плоских поляризованных светов во всех направлениях.



Рисунок 15.3

Если в структуре света колебаний в одном направлении больше, чем колебаний в другом, такой свет называется частично поляризованным светом (рис.15.3-б).

Частично поляризованный свет представляет собой смесь естественного и плоского поляризованного света.

Поляризация света при отражении и преломлении:

Пусть естественный световой луч падает из вакуума в диэлектрическую, преломляющую среду. Этот луч частично отражается (I') и частично преломляется (I''). Эксперименты показывают, что I' и I'' лучи частично поляризованы. Но, когда лучи I' и I'' взаимно перпендикулярны, отражающийся луч I' полностью поляризован, и его колебания происходят в плоскости, перпендикулярной плоскости падения (эти колебания описываются точками).

Преломленный луч I'' будет частично поляризован (эти колебания описываются точками и отрезками). Когда угол падения равен $\alpha=0^\circ$ или $\alpha=90^\circ$, отражающийся луч вообще не поляризуется. Отраженный луч становится частично поляризованным, когда угол падения находится в диапазоне $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. При угле падения $\alpha=90^\circ$ отраженный луч становится полностью поляризованным, а преломленный — частично поляризованным (рис.15.5).

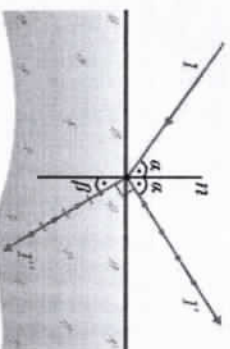


Рисунок 15.4

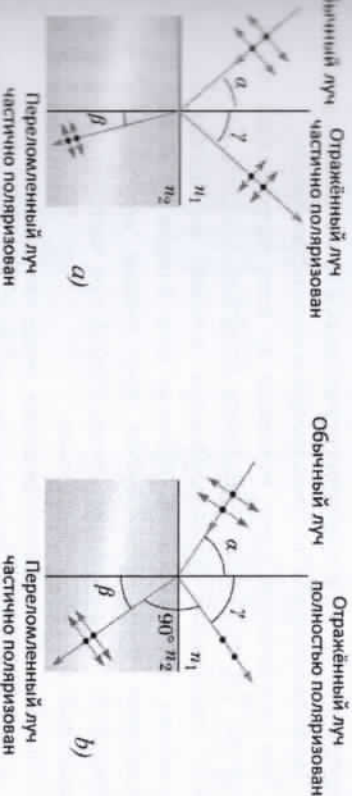


Рисунок 15.5

Пусть свет падает на прозрачную поверхность под таким углом, результате преломленного луча и отраженный луч оставались взаимно перпендикулярными. Такой угол падения называется углом Брюстера. Давайте определим угол Брюстера. Можно сказать $\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}$, когда преломленные и отражающиеся лучи взаимно перпендикулярны. Далее следует $\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha$. (рис.15.4). Из закона преломления света формируется следующая формула

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \quad (15.1)$$

Угол падения равен

$$\alpha = \alpha_{\text{Брюстера}} = \operatorname{arctg} n \quad (15.1a)$$

Угол Брюстера будет равен:

$$\alpha_{\text{Брюстера}} = \operatorname{arctg} n \quad (15.2)$$

Например, для стекла с $n=1,53$ угол Брюстера составляет около 56° . Другими словами, когда естественный световой луч падает на стеклянную поверхность под углом 56° , свет, отражающийся в направлении, перпендикулярном плоскости падения, полностью поляризован, в то время как преломленный свет частично поляризован. Объясним причину следующим образом:

Под действием электрического поля падающей световой волны электроны в диэлектрике совершают колебательное движение. Колеблющиеся электроны, в свою очередь, излучают вторичные когерентные волны. Вторичные волны взаимно когерентны с первичными. В результате взаимной интерференции этих волн колебания затухают во всех направлениях, кроме направления отраженных и преломленных лучей. Частичная поляризация преломленного света объясняется:

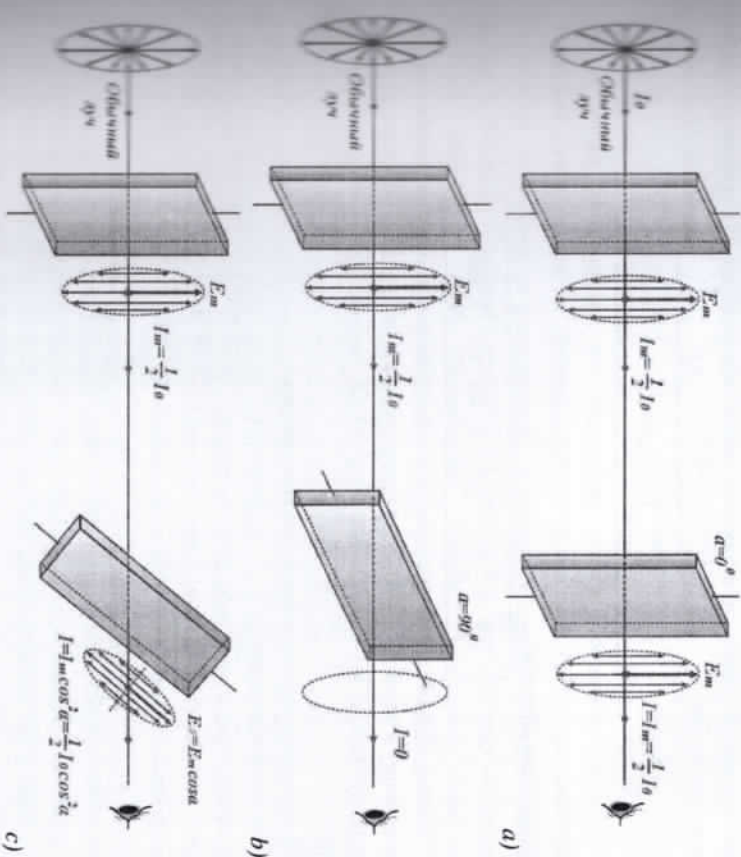
При естественном свете колебания во всех направлениях одинаково вероятны. Так как энергия падающего естественного света распределяется между отраженным и преломленным лучами, то, исходя из закона сохранения энергии, если в обратном луче больше колебаний в одном направлении, то в преломленном луче меньше колебаний в том же направлении. Следовательно, преломленный луч частично поляризован, а отражаемый — полностью поляризован.

Опыты с кристаллом турмалина, закон Малюса:

Устройство, которое используется для получения поляризованного света от естественного света, называется поляризаторами. Вектор поляризованной световой волны $\vec{E}$, который можно получить с помощью поляризаторов, будет колебаться точно в одной плоскости. В качестве поляризаторов могут выступать призмы, изготовленные из кристалла турмалина, тонкой целлюлоидной пленки, испанского шпата (CaCO_3).

Поляризаторы используются не только для получения поляризованного света, но и для определения поляризованного или неполяризованного света, определения плоскости колебаний поляризованного света. Поляризаторы, используемые для такой цели, называются анализаторами.

Пусть естественный свет падает перпендикулярно турмалиновой пластине, которая действует как поляризатор. Луч, проходящий через поляризатор, является плоскополяризованным, его колебания происходят в направлении, параллельном оптической оси поляризатора. Давайте поместим вторую турмалиновую пластину на пути этого плоского поляризованного света. Он действует как анализатор (а). Опыты показали, что если оптические оси (P) и (A) параллельны (рис. 15.6-а), то свет, проходящий через (P), полностью пропускает (A), то есть $I=I_m$. Когда спиральная пластинка (P) и (A) взаимно перпендикулярны, свет от (A) не проходит полностью (рис. 15.6-б), то есть $I=0$. А в промежуточных ситуациях, т. е. когда свет, проходящий через (A), изменяется в интервале $0 < I < I_m$ (рис. 15.6-с).



15.6-рисунок

Рассмотрим последний случай подробнее. Амплитудное значение вектора световой волны E_m , проходящей через (P), будет $\vec{E}_m$. Разделим вектор на две составляющие таким образом, чтобы первая составляющая была параллельна оптической оси $E/(\Delta)$, а вторая составляющая перпендикулярна $E_{\perp}$ ей.

Анализатор (А) пропускает волну через себя $E_H = E_m \cos \alpha$ и поглощает волну $E_L = E_m \sin \alpha$ целиком.

Интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды E , т. е. $I \sim E^2$. Так как интенсивность световой волны, прошедшей через (А), равна:

$$I = I_m \cos^2 \alpha \quad (15.3)$$

Это выражение называется законом Малюса.

Закон Малюса: интенсивность света, прошедшего через анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между оптической осью анализатора и поляризатора.

Если интенсивность света, падающего на поляризатор, равна I_0 , то интенсивности света, прошедшего через поляризатор и анализатор, имеют следующий вид:

$$I_p = \frac{1}{2} I_0, \quad I_A = I_p \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \quad (15.4)$$

Если интенсивность света, падающего на поляризатор, равна I_0 , то световые лучи, поглощаемые в поляризаторе и анализаторе, выглядят следующим образом:

$$\Delta I_p = \frac{1}{2} I_0, \quad \Delta I_A = I_p \sin^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \sin^2 \alpha \quad (15.5)$$

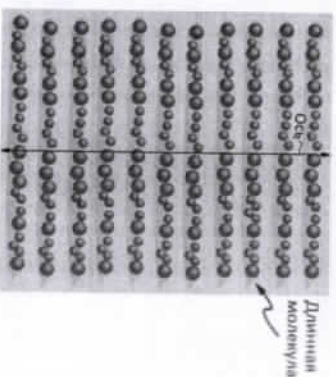
Таким образом, получается, что интенсивность естественного света, проходящего через поляризатор, уменьшается в два раза независимо от угла, а при прохождении через анализатор снова уменьшается в зависимости от угла.

Молекулярная структура поляризаторов:

Поляризационные

фильтры

(поляризаторы) имеют ось, которая ведет себя как решетка, а анализатор электромагнитных волн (в основном света), параллельный этой оси, может проходить через поляризаторы. Это связано с молекулярной структурой поляризаторов. Поляризаторы состоят из длинных молекул, эти длинные молекулы расположены перпендикулярно оси поляризатора (рис. 15.7). Прохождение составляющей электромагнитных волн параллельно оси поляризатора означает поглощение колебаний в направлении молекул.



15.7-рисунок

Рисунок 15.8 объясняет появление оси поляризатора. Когда электромагнитная волна попадает на вещество, она заставляет электроны в веществе колебаться, и эти колебания вызывают вторичные колебания электромагнитных волн. Эти составляющие колебаний, параллельные длинным молекулам, колеблются слабо (рис. 15.8-а). Это вызвано колебаниями электронов в этом направлении мешает то, что молекулы длинные.

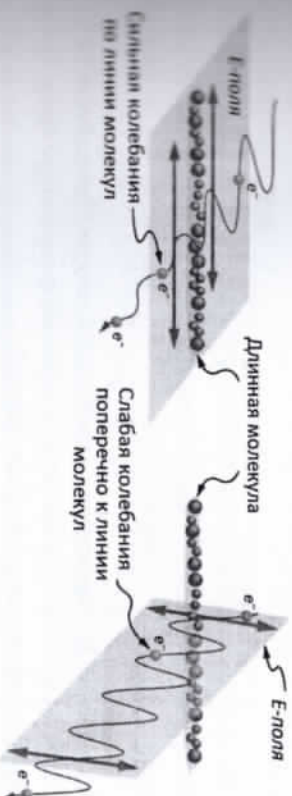


Рисунок 15.8

Колебания электронов в направлении, перпендикулярном длинной линии молекулы, хорошо отражаются (рис. 15.8-б). Потому что нет длинных молекул, которые мешают в этом направлении. Именно благодаря этому в поляризаторах появляется стрелка, перпендикулярная линии молекул.

Вопросы по теме

1. Опишите, что такое плоскости колебаний и поляризации.
2. Дайте определение полного и частично поляризованного света.
3. Поляризован ли свет при преломлении и отражении на границе двух сред?
4. Что такое угол Брюстера? Какое событие происходит, когда отражающийся и преломляющийся лучи взаимно перпендикулярны? Какой будет их координатная плоскость?
5. Опишите закон Малюса. Запишите математическое выражение закона Малюса.
6. По сколько раз уменьшается интенсивности света, проходящего через поляризатор и анализатор?
7. Если пламя электрической дуги горит в воде, это не повредит глазу. Почему?
8. Можно ли изменить от солнца в комнате с закрытым окном, освещенной солнечными лучами?

Решение задачи:

1. При падении луча из воздуха в среду с показателем преломления $n = \sqrt{3}$ угол

между отраженным лучом и преломленным лучом стал равен 90° . Каков угол падения луча?

- A) 0° B) 30° C) 45° D) 60°

Дано:

Решение:

Принимая во внимание, что угол падения света по закону отражения равен углу отражения ($\alpha = \beta$), мы получаем, что $\alpha + \beta + \gamma + \varphi = 180^\circ$, а по заданному условию $\alpha + \beta = 90^\circ$

$\alpha = ?$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

из этого выражения определим угол падения $\alpha = \operatorname{arctg}(\frac{n_2}{n_1}) = 60^\circ$

Ответ: D) 60° .

2. Световой луч переходит из жидкости в вакуум. Угол падения 30° . Отражающиеся и преломленные лучи перпендикулярны друг другу. Каков показатель преломления этой жидкости?

Дано:

Решение:

Поскольку $\varphi + \alpha = 90^\circ$, где φ - угол, отраженным лучом с границей двух сред, а α - угол, образованный преломленным лучом с границей двух сред, мы получаем выражение $\alpha + \beta = 90^\circ$. Выражая угол преломления по закону преломления через полученное выражение

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

определим показатель преломления света первой среды n_1 .

$$n_1 = \frac{n_2}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}$$

Ответ: 1,73



ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ III

Лабораторная работа: № 4.

Определение длины волны света с помощью дифракционной решетки.

Цель работы: измерение длины волны спектра света, соответствующей красному свету. Определение угла отклонения лазерного луча в дифракционном картинки

Необходимые инструменты и оборудование: Стеклопаяная призма, вращающийся, картонная бумага 1 лист картонной бумаги измерительная линейка.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Дифракционная решетка, источник лазерного света, линейка, экран.

Когда разность хода $\Delta d = d_2 - d_1 = 2k \frac{\lambda}{2}$, волны могут усиливать друг друга, и разность хода

$\Delta d = d_2 - d_1 = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ наблюдается, что волны ослабляют друг друга.

Разность хода связана со схемой дифракционной решетки следующим образом.

$$\Delta d = d \cdot \sin \alpha$$

Соответственно, условие дифракционного максимума

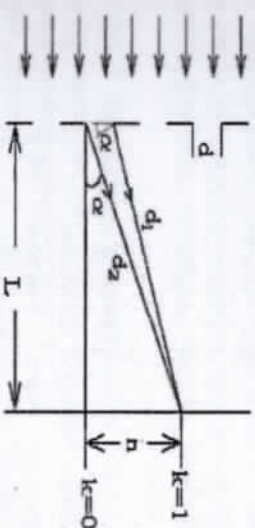
$$d \sin \alpha = k \lambda \quad k=0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Через параметры дифракционной решетки $\sin \alpha = \frac{h}{L}$ и длина волны

$$d \frac{h}{L} = k \lambda \cdot \lambda = d \frac{h}{kL}$$

В данной работе период дифракционной решетки $d = 0,005$ мм

Порядок выполнения работ.



1. Установите красный лазерный прибор напротив дифракционной решетки.

2. Создайте максимумы интерференции, включив лазер в положение экрана и решетки

3. Измерьте результат, измерив расстояние от решетки до экрана, а также расстояние от центрального максимума до первого максимума.

4. Повторите эксперимент при разных значениях расстояния между экраном и решеткой.

5. Запишите результаты измерений в эту таблицу, взяв первый за второй максимум. $K=1; k=2$

№	$h(m)$	$h(m)$	$L(m)$	$\lambda_1 \cdot 10^{-10}$	$\lambda_1 \cdot 10^{-10}$	$\Delta \lambda_1 \cdot 10^{-10}$	$\Delta \lambda_1 \cdot 10^{-10}$	$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot 100\%$
1				λ_1	λ_2	$\Delta \lambda_1$	$\Delta \lambda_2$	
2				λ_1	λ_2	$\Delta \lambda_1$	$\Delta \lambda_2$	
3				λ_1	λ_2	$\Delta \lambda_1$	$\Delta \lambda_2$	

Контрольные вопросы

1. Что называется абсолютным показателем преломлением света?
2. Что называется относительным показателем преломления света?
3. Опишите закон преломления света.
4. Опишите явления полное внутреннее отражения света.
5. Как определяется предельное значение полной внутренней отражения света?

Лабораторная работа: № 5.

Определение радиуса кривизны линзы с помощью Ньютоновских колец.

Цель работы: источник света, короткофокусная линза, плоско-выпуклая линза, плоскопараллельная пластина, светофильтр, фокусирующая линза, экран, штангенциркуль.

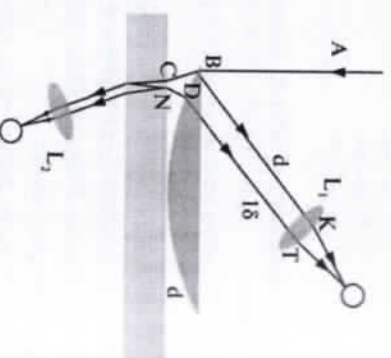
Необходимые инструменты и оборудование: наблюдение интерференционной картины, наблюдаемой в тонких слоях в первой части работы, определение радиуса кривизны плоско-выпуклой линзы на заданной длине волны.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Когда мы помещаем плоскую выпуклую линзу в верхнюю часть плоской параллельной пластины, между ними образуется слой воздуха.

n_1 - показатель преломления линзы, n_2 - показатель преломления воздуха, n_3 - показатель преломления стеклянной пластины.

Если на плоскую линзу падает пучок параллельных волн, она частично отражается, частично преломляется через нее и проходит через слой воздуха, частично преломляется через стеклянную



пластину и частично преломляется через нее. На рисунке 1 условно показано направление волн.

Когда первая волна на чертеже пересекает путь BC в слое стекла. Вторая волна проходит путь ND+DC.

В результате возникает разность фаз. Плоско-выпуклая линза может рассматриваться как слой воздуха такой же толщины на очень небольшом расстоянии из-за большого радиуса кривизны. В результате наблюдается интерференционная картина, которая формируется в тонком слое. В это время фаз вектора напряженности электрического поля не изменяется из-за того, что световые волны проходят через стеклянную пластину в воздухе.

$$R = \frac{(r_{m+1} - r_m) \times (r_{m+1} + r_m)}{\lambda}$$

Порядок выполнения работ.

1. Источник света подключается к электросети, на одной оси размещаются конденсаторы, устройство Ньютона, фильтр.

2. K_2 - конденсатор перемещается влево или вправо вдоль оптической оси до тех пор, пока на экране не образуются цветные концентрические кольца. K_1 - конденсатор также должен быть надвинут на оптическую ось, если он явно не собождается.

3. После того, как на экране сформированы концентрические кольца, устанавливается фильтр с определенной длиной волны, и с помощью штангенциркуля измеряются диаметры цветных колец, присутствующих на экране. Хорошо, если будут измерены диаметры многих соседних окружностей.

4. На основании полученных результатов и с помощью выражения определяется радиус кривизны плоско-выпуклой линзы. Найти его среднее значение и среднеквадратическую погрешность.

5. Поместив несколько фильтров, диаметры видимых для всех концентрических окружностей измеряют с помощью штангенциркуля.

№	r_m, mm	r_{m+1}, mm	R, mm	$\bar{R}, \text{mm}$	$\Delta R, \text{mm}$	$\Delta \bar{R}, \text{mm}$	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							

Контрольные вопросы

1. Что называют кольцами Ньютона?
2. На каком явлении возникают кольца Ньютона?

3. Как изменяются радиусы кольца при увеличении длины монохроматической волны, падающей на линзы? А как изменяются в сжатии?
4. Как меняются радиусы колец при увеличении радиуса кривизны линзы? А как изменяются в сжатии?

Лабораторная работа: № 6.
Исследование поляризации света.

Цель работы: Источник света, поляризатор, анализатор, фотоэлемент, микроамперметр.

Необходимые приборы и оборудование: знакомство с поляризацией световой волны, степенью поляризации, преобразованием световой энергии в электрическую и методом регистрации слабых электрических токов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Большинство источников света излучают неполяризованную волну. Направление векторов напряженности электрического поля в них либо произвольное, либо хаотическое. Из неполяризованных световых волн образуются поляризованные волновые волны: когда они отражаются, проходят и преломляются через границу двух сред.

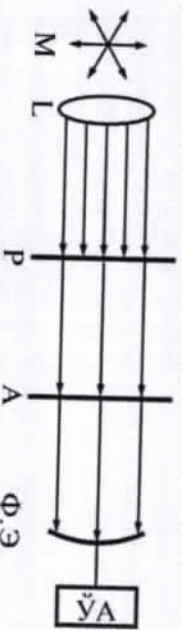


Рисунок 1

В лабораторной работе используем прибор, собранный на основе чертежа, представленного на рисунке 1. Волны, распространяющиеся от источника M, расположенного в фокусе линзы, проходят через поляризатор P и анализатор A и падают на фотоэлемент FE. Фотоэлемент преобразует световую энергию в электрический сигнал и регистрирует его с помощью измерительного прибора а (измерительный прибор). Интенсивность волны, падающей на поляризатор

$$I_0 = E_0^2 \times \cos^2 \alpha >$$

Интенсивность волны, проходящей через поляризатор среднее значение $\cos^2 \alpha >$ по времени равно 1/2.

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) \times I_0 = E_0^2 \times \cos^2 \alpha > \quad (1)$$

Таким образом, через поляризатор проходит половина интенсивности падающей волны. Если оптическая ось анализатора и оптическая ось поляризатора параллельны друг другу, все волны, проходящие через поляризатор, проходят через анализатор, то есть $I_2 = I_1$. Если оси поляризатора и анализатора образуют угол относительно друг друга, то интенсивность волны, проходящей через эти системы определяется выражением.

$$I_2 = I_1 \times \cos^2 \alpha \quad (2)$$

Принимая во внимание выражение (1), то интенсивность волны, проходящей через анализатор, в общем случае можно определить по выражению.

$$I = \left(\frac{1}{2}\right) \times I_0 \times \cos^2 \alpha \quad (3)$$

Выражение (3) называется законом Малюса.

Основная цель лабораторной работы состоит в определении степени поляризации K естественного света и проверке закона Малюса.

Порядок выполнения работ.

1. Источник света подключают к электросети и нагревают 2-3 минуты.
2. Поляризатор и анализатор размещаются на пути световой волны по одной оси.
3. Фотоэлемент с кремнием должен располагаться таким образом, чтобы падающий на него микроамперметр достигал наибольшего показателя.
4. Вращая анализатор относительно поляризатора, необходимо 4-5 раз зафиксировать минимальные и максимальные значения тока по показанию микро амперметра.
5. Поворотом анализатора на $5^\circ - 10^\circ$ относительно поляризатора увеличивается показатель микро амперметра.
6. Вращая анализатор до 360° с шагом 5-10, фиксируется величина фототока.
7. Работа над пятым и шестым пунктом повторяется 4-5 раз.
8. С помощью второго выражения находят среднее значение и погрешность степени поляризации.
9. Средние значения полученных результатов и закон Малюса проверяются с помощью таблицы и строится график.

1-я таблица

№	φ	$I, \text{ W/m}^2$	$\bar{I}, \text{ W/m}^2$	$\Delta I, \text{ W/m}^2$	$\Delta \bar{I}, \text{ W/m}^2$	$\epsilon, \%$
1						
2						
3						

Контрольные вопросы

1. Что называется поляризацией?
2. Выполняется ли сохранение энергии в явлении поляризации?
3. Опишите закон Малюса.
4. Во сколько раз интенсивность света, проходящего через анализатор, уменьшается от интенсивности естественного света, падающего на поляризатор, в тех случаях, когда угол между поляризатором и анализатором равен 45° , 60° и 90° ?
5. Как насчет лучей, которые отражаются и преломляются, когда свет падает на границу прозрачной среды (неполяризованный, частично поляризованный, полностью поляризованный)?
6. Когда действует закон Брюстера?



ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ III

1. Показатель преломления среды зависит от частоты падающего света ...
называется.
А) интерференция В) дисперсия С) поляризация
Д) фотоэффект Е) дифракция
2. Какое из приведенных ниже определений дисперсии света является абсолютным неверным:
1) показатель преломления среды зависит от длин падающих световых волн ...
2) зависимость показателя преломления среды от скорости распространения света в среде ...;
3) зависимость показателя преломления среды от цвета света ...;
4) показатель преломления среды должен зависеть от частоты света ...;
5) показатель преломления среды зависит от длины волны или частоты падающего света ... что называется дисперсией света?
А) 1, 5 В) 1, 5, 2 С) 3, 4 Д) 2, 3 Е) НПО
3. Какой из красных, зеленых, фиолетовых лучей распространяется с наибольшей скоростью в однородной прозрачной среде?
А) скорости всех лучей одинаковы В) зеленые в) красные
Г) фиолетовый Д) красный и фиолетовый

4. Какая из видимых световых волн, распространяющихся в прозрачной среде, имеет наибольшую скорость?
А) фиолетовый В) красный С) синий Д) зеленый Е) желтый
5. Какая частота света в видимой части спектра самая большая?
А) красный В) зеленый С) фиолетовый Д) желтый Е) синий
6. От какого параметра зависит цвет освещения?
А) длина волны и амплитуда В) скорость С) частота
Д) амплитуда Е) НПО
7. На белой бумаге красными буквами написан текст. Каким цветом будут выглядеть буквы, если смотреть через голубой стекло?
А) красный В) зеленый С) синий Д) черный Е) розовый
8. Когда красный предмет освещается голубым светом, какого цвета он выглядит?
А) зеленый В) черный С) фиолетовый Д) желтый Е) синий
9. Определить скорость электромагнитных волн в среде, показатель преломления которой равен $1,5$ (m/c).
А) $2 \cdot 10^8$ В) $1,5 \cdot 10^7$ С) $1,5 \cdot 10^8$ Д) $5 \cdot 10^7$ Е) $6,7 \cdot 10^7$
10. Как изменилась скорость его распространения, если при переходе монохроматического света из одной среды в другую длина волны уменьшилась в 2 раза?
А) уменьшенный в 2 раза. В) уменьшенный в $\sqrt{2}$ раза.
С) увеличение в $\sqrt{2}$ раза. Д) увеличение в 2 раза. Е) не изменилась.
11. Какой показатель преломления среды, если частота электромагнитной волны, распространяющейся в однородной среде, составляет 10^{15} Гц, а длина волны 225 nm ?
А) 1,33 В) 1,5 С) 1,7 Д) 2 Е) 2,5
12. Показатель преломления воды $n_1 = 1,33$, скиндриников $n_2 = 1,49$. Каково отношение расстояний, на которые световой луч проходит через один и те же вещества в одно и то же время?
А) 1,22 В) 1,21 С) 1,20 Д) 1,12 Е) НПО
13. Частота волны видимого света лежит в диапазоне $4 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14} \text{ кГц}$. В каком интервале лежат длины одних и тех же волн (nm).
А) 400-700 В) 450-700 С) 500-700 Д) 400-750 Е) 400-800

14. Когда монохроматический свет последовательно проходит через три среды, его длина волны в этих средах составляла $\lambda_1=550$ нм, $\lambda_2=550,1$ нм и $\lambda_3=549,5$ нм и $n_3=549,5$ нм. Какое из следующих соотношений является разумным для показателей преломления среды?

- A) $n_1 > n_2 > n_3$ B) $n_3 > n_1 > n_2$ C) $n_1 < n_2 < n_3$
D) $n_1 = n_2 = n_3$ E) $n_2 > n_3 > n_1$

15. Свет падает из первой среды во вторую под углом α_1 . Угол преломления α_2 . Если длина волны света в первой среде равна λ_1 , какова длина волны λ_2 во второй среде?

- A) $\lambda_2 = \lambda_1 \sin \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ B) $\lambda_2 = \lambda_1 \tan \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ C) $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$
D) $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2}$ E) $\lambda_2 = \lambda_1 \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1}$

16. Какое явление называют интерференцией волн?

- A) явление отклоняющегося распространения волн, падающих на препятствие или щель, размеры которой находятся в порядке длины волны, в область препятствия.
B) явление слияния волн в определенных точках пространства, вызывающее неизменное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний.
C) явление обратного распространения волн, сталкивающихся с препятствием, под некоторым углом от препятствия
D) явление резкого увеличения или уменьшения амплитуды результирующих колебаний в результате сложения двух волн.
E) НПО

17. Когда наблюдается интерференция волн?

- A) при сложении волн с разной частотой и разностью фаз.
B) при сложении волн с одинаковыми частотами и переменной разностью фаз.
C) при сложении волн, частоты которых различны, а разность фаз постоянна.
D) при распространении волн, частоты различны и разность фаз которых не изменяются.
E) При сложении волн с одинаковыми частотами и неизменной разностью фаз

18. Какова разность фаз волн, когда разность ходов двух интерферирующих волн $\frac{\lambda}{2}$?

- A) $\frac{\pi}{2}$ B) $\frac{\pi}{3}$ C) $\frac{\pi}{4}$ D) $\frac{\pi}{6}$ E) π

19. Какие волны называются когерентными?

- A) с одинаковой частотой B) с одинаковой амплитудой
C) колебания которой являются гармоническими
D) длины волн одинаковы, а разность фаз постоянная
E) длины волн одинаковы

20. Когда разность хода между двумя когерентными волнами, имеющими одинаковую амплитуду A , равна к нечетному половине длины волны, какова будет результирующая амплитуда колебаний, возникающих в результате их сложения?

- A) 0 B) $\frac{a}{2}$ C) a D) $2a$ E) a^2

21. В каком из приведенных ниже ответов перечислены только физические явления?

- A) интерференция света, дисперсия электромагнитных волн, поляризация.
B) плотность потока излучения, дифракция, поляризация.
C) дифракция, дифракционное решетка
D) собирающая линза, поляризация, дифракция
E) электромагнитное поле, волна, отражение света

22. Когда естественный свет проходит через турмалин или другие поляризующие кристаллы, какая его максимальная часть по интенсивности будет поляризованным?

- A) 0,75 B) 0,25 C) 0,5 D) 0,125 E) 0

23. С помощью какого явления можно определить, является ли световая волна продольной или поперечной?

- A) дисперсия B) поляризация C) интерференция
D) дифракция E) НПО

24. Какие из перечисленных ниже волн относятся к типу поперечных волн:

- 1) волны на поверхности воды; 2) звуковые волны в газе;
3) световые волны; 4) радиоволны;
5) ультразвуковые волны в жидкостях
A) 2, 4, 5 B) 1, 2, 3 C) 4, 5 D) 2, 3, 4 E) 1, 3, 4

25. Чем световые волны отличаются от звуковых? Найти правильные ответы:

- 1) звуковые волны длиннее
 - 2) световые волны продольные, звуковые поперечные
 - 3) и свет, и звук являются продольными волнами
 - 4) свет-поперечная, звук-продольная волна
 - 5) свет интерферируется, звук не интерферируется.
- А) 1 и 4 В) 4 и 5 С) только 1 Д) только 4 Е) 2 и 5
26. Какое явление называется дифракцией?
- А) явление отклоняющегося распространения волн, падающих на препятствие или щель, размеры которой находятся в порядке длины волны, в область препятствия.
- В) явление слияния волн, вызывающее неизменное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний в определенных точках пространства.
- С) явление обратного распространения волн, сталкивающихся с препятствием, под некоторым углом от препятствия.
- Д) явление резкого увеличения или уменьшения амплитуды колебаний в результате сложения двух волн.
- Е) НПО
27. Отклонение световых волн от прямой линии в распространении и перехода в область тени путем огибание препятствие ... называется.
- А) интерференция В) поляризация света
- С) фотоэффект Д) дисперсия Е) дифракция
28. При каких условиях свет отклоняется от распространения по прямой?
- А) в неоднородной среде
- В) при столкновении с препятствиями, размеры которых сравнимы с длиной волны света
- С) когда свет проходит через щели или отверстия, размеры которых сопоставимы с длиной волны
- Д) в сильном гравитационном поле
- Е) все ответы А-Д верны
29. Какие из перечисленных ниже лучей обладают свойством дифракции: 1) видимого света; 2) радиоволн; 3) рентгеновских лучей; 4) инфракрасных лучей?
- А) 1, 2 В) 1, 2, 3 С) 1, 2, 3, 4 Д) 3, 4 Е) 1, 3, 4
30. Две когерентные инфракрасные световые волны длиной 800 нм падают в точку пространства с оптической разностью путей 2 мкм. Какая явления

наблюдается интерференция или дифракция в точке, куда падает лучи? Волны усиливаются или ослабевать в этой точке из-за этого явления?

- А) интерференция, заглушает Б) дифракция, заглушает
- С) интерференция, усиливается Д) дифракция, ослабевает Е) НПО

31. Первый волны монохроматического света с длиной волны 500 нм перпендикулярно дифракционной решетке с длиной волны 2 мкм. Под каким углом виден дифракционный максимум второго порядка?

- А) 90° Б) 60° С) 45° Д) 30° Е) 20°

32. На дифракционную решетку с постоянной d вертикально падает пучок монохроматических параллельных лучей с длиной волны λ . Какое условие должно быть выполнено для угла первого максимума φ ?

- А) $\sin \varphi = \frac{\lambda}{d}$ В) $\sin \varphi = \frac{d}{\lambda}$ С) $\cos \varphi = \frac{\lambda}{d}$
- Д) $\cos \varphi = \frac{d}{\lambda}$ Е) $\cos \varphi = \lambda d$

33. Какое из приведенных выражений является условием дифракционного минимума? d - постоянная решетки. Свет падает перпендикулярно к решетке.

- А) $d \sin \alpha = k\lambda$ В) $d \cos \alpha = \frac{(2k-1)\lambda}{2}$ С) $d \cos \alpha = k\lambda$
- Д) $d \sin \alpha = \frac{(2k+1)\lambda}{2}$ Е) НПО



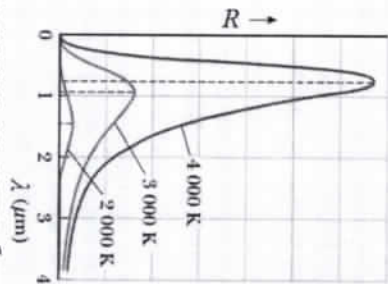
ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ III

1. Показатель преломления воды для фиолетового света составляет 1,343. Найти скорость распространения этой световой волны в воде (км/с).
2. Каков показатель преломления среды, если частота света в прозрачной среде составляет $4 \cdot 10^{14}$ Гц, а длина волны-500 нм?
3. На сколько метров равна длина электромагнитной волны в среде с показателем преломления 1,5, если частота электромагнитных колебаний 10^{15} кГц? Скорость света в пространстве $3 \cdot 10^8$ м/с.
4. Длина световой волны в воздухе составляет 0,6 мкм. Сколько мкм его длина волны в воде? Показатель преломления воды $n=4/3$.
5. Волна с частотой колебаний 3 кГц распространяется со скоростью 2,4 м/с. При какой разности фаз колебаний в точках, расположенных на расстоянии 30 см друг от друга?
6. От источника звука, расположенного в начале координат, распространяются колебания с длиной волны 2 м. Какова разность фаз между волновыми точками с координатами $x_1 = 2$ м и $x_2 = 6$ м?

7. Какова разность фаз колебаний этих точек, если разниц расстояний от двух точек звуковой волны частотой 680 кГц до источника равна 25 см? Скорость звука в воздухе составляет 340 м/с.
8. Разность фаз двух интерферирующих когерентных световых волн с длинами волн, равными λ , равна $\frac{\pi}{4}$. Какого разность оптических путей?
9. В какую-либо точку пространства попадают когерентные лучи с длиной волны 600 нм, разность оптических путей 1,2 мкм. Какое явление наблюдается в этот момент?
10. Определить константу (мкм) дифракционной решетки, имеющей 1000 штрихов в 1 мм.
11. На дифракционной решетке, если разность хода между волнами, исходящими от краев двух соседних щелей, равна 2,5 мкм, а угол дифракции равен 30° , то на сколько мкм равна константа этой же решетки?
12. Под каким углом в спектре первого порядка, образованном дифракционной решеткой с периодом 0,001 мм, видна зеленая ($\lambda=0,5$ мкм) линия?
13. При дифракции вертикально падающего на дифракционную решетку белого света линия с длиной волны $\lambda=780$ нм в спектре 3-го порядка совпадает с линией с длиной волны (нм) в спектре 4-го порядка?
14. Монохроматический свет с длиной волны 600 нм с периодом 3,6 мкм падает вертикально на дифракционную решетку. Определите порядок дифракционного максимума, видимого под углом 30° .
15. Анализатор вдвое ослабляет интенсивность поляризованного света, падающего на него. Каков угол между осями анализатора и начального анализатора?
16. Луч естественного света последовательно проходит через поляризатор и анализатор с углом между началом плоскостями 60° . Какая часть исходного светового потока выходит из анализатора?
17. Угол между начальными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 45° . Во сколько раз уменьшается интенсивность света, излучаемого анализатором при увеличении этого угла до 60° ?

ГЛАВА IV. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА

Квантовая природа света стала известна науке в конце XIX-начале XX веков. К тому времени волновая природа света была очень хорошо изучена европейскими учеными-исследователями, и причины многих оптических явлений природы были объяснены на основе волновой теории. Однако впоследствии объяснение результатов некоторых проведенных экспериментов на основе этой волновой теории оказалось неэффективным. Например, абсолютное излучение черного тела, распределение энергии в излучении, фотоэффект, эффект Комптона и другие причины явления не могли быть объяснены волновой теорией. Тогда Макс Планк предположил, что энергия света излучается порциями, то есть в виде квантов, и что это излучение прямо пропорционально частоте. Альберт Эйнштейн, однако, выдвинул идею о том, что свет не только излучается в форме квантов, но также распространяется в форме квантов и поглощается в форме квантов. Таким образом, согласно Планку и Эйнштейну, энергия в пучке света не является непрерывной, но эта энергия может быть поглощена только в частях, называемых фотонами.



§ 16. ВИДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ. ЗАКОНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Виды излучения:

Свет-это электромагнитная волна с длиной волны около $\lambda=400-770$ нм. А электромагнитные волны вылетают во время ускоренного движения заряженных частиц. А заряженная частица-это электроны, содержащиеся в атомах, из которых состоит вещество. Подобно тому, как в струне рояля нет звука, внутри атомов нет света. Точно так же, как звук исходит от рояля, когда его бьют по струне, свет исходит от атома, когда атомы также возбуждены.

Чтобы разбудить атом, нужно дать ему некоторое количество энергии. Подождав, атом мгновенно излучает полученную им энергию в виде электромагнитной волны. Чтобы атом всегда излучал свет, к нему всегда должна поступать энергия извне. В зависимости от источника получения энергии, необходимой для возбуждения атома, различают следующие виды излучения:

Излучение от тепла: это самый простой и распространенный тип излучения. При этом энергия, необходимая для возбуждения атомов, получается из теплового движения атомов и молекул, а также свободных электронов. То есть, когда атом, молекула и свободные электроны сталкиваются неэластично, часть кинетической энергии расходуется на возбуждение атома.

Примерами теплового излучения являются излучение Солнца, излучение лампы накаливания, нагрев печи и т. д.

Электродлюминесценция: в этом излучении энергия, необходимая для возбуждения атомов, получается из движения быстро летящих электронов. Когда быстро летящие электроны сталкиваются неупруго с атомами, часть кинетической энергии расходуется на возбуждение атома. Возбужденные атомы начинают излучать свет.

Газовый разряд, северное сияние являются примерами этого. Электродлюминесценция используется в трубах, на которых образуются рекламные надписи.

Катодоллюминесценция: свечение твердых тел, когда они бомбардируются электронами, является катодоллюминесценцией. Экран электронно-лучевой трубки телевизора освещается за счет катодоллюминесценции.

Хемилюминесценция: в некоторых химических реакциях с выделением энергии часть выделяемой энергии превращается в энергию света. То есть энергия, необходимая для возбуждения атома, генерируется химическим путем. Это явление называется хемилюминесценцией.

Светящийся ночью золотистый жук, некоторые рыбы, обитающие на морском дне, излучают свет за счет хемилюминесценции. Тот, кто их держит, не пожмет руку. Гниющая древесина также иногда излучает свет в темноте.

Фотоллюминесценция: явление, при котором тела излучает свет при воздействии света, называется фотоллюминесценцией. Свет возбуждает атомы вещества. В результате вещество само начинает излучать свет. Еловые иголки покрываются светящимися красками. Они излучаются после того, как на них падает свет. Длина волны света, излучаемого во время фотоллюминесценции, больше, чем длина волны света, вызывающего возбуждение. Например, если в емкость с флуоресцирующим веществом (органическим красителем) опустить ручку фиолетового света, эта жидкость будет светиться зеленовато-желтым оттенком.

Абсолютное черное тело:

Различные части спектров излучения обладают разными свойствами и по-разному проявляют себя при взаимодействии с веществом. Например, луч

инфракрасного излучения проходит через ионосферу, но для радиоволн этот слой служит отражателем. В результате получаются распределенные радиоволны, возвращающиеся из ионосферы и передающие их в невидимое место. Основным слоем пропускает другие лучи, но служит отражателем для ультрафиолетовых лучей. В некоторых длинноволновых лучах химическая реакция имеет свойство вызывать фотосинтез, в то время как некоторые лучи вызывают фотоэффект.

Пусть поток излучения (Φ) падает на поверхность параллельного плоскостного тела. Этот поток частично отражается ($\Phi_{отр}$), частично поглощается ($\Phi_{погл}$), а оставшаяся часть проходит через тело ($\Phi_{прох}$) (рис. 16.1).

$$\Phi_{погл} + \Phi_{отр} + \Phi_{прох} = \Phi \quad (16.1)$$

Разделим обе стороны этого равенства на F .

$$\rho = \frac{\Phi_{погл}}{\Phi} \quad \text{светопоглощающая}$$

$$\alpha = \frac{\Phi_{отр}}{\Phi} \quad \text{светоотражающая}$$

$$d = \frac{\Phi_{прох}}{\Phi} \quad \text{светопропускающая}$$

$$\rho + \alpha + d = 1$$

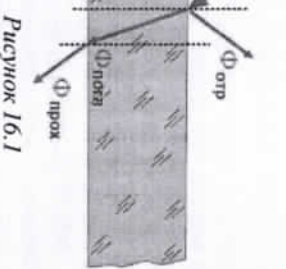


Рисунок 16.1

Для непрозрачных тел $d=0$. Тогда вышеприведенное выражение принимает следующий вид.

$$\rho + \alpha = 1 \quad (16.2a)$$

Это выражение также справедливо для света с любой длиной волны ($\lambda < \infty$). Эксперимент показал, что значения ρ и α зависят от температуры тела и длины волны света, падающего на тело. Поэтому, если мы определим светоотражающую способность тела с температурой T свет с длиной волны λ через $\rho_{\lambda,T}$ а светопропускающую способность тела через $a_{\lambda,T}$ приведенная выше формула будет выглядеть следующим образом:

$$\rho_{\lambda,T} + a_{\lambda,T} = 1 \quad (16.2b)$$

В общем случае $\rho_{\lambda,T}$ и $a_{\lambda,T}$ коэффициенты могут измениться в диапазоне от 0 до 1. Видим для граничных случаев.

1) $\rho_{\lambda,T} = 1$ и $a_{\lambda,T} = 0$. При этом свет, падающий на тело, полностью отражается. Такое тело называется абсолютного белого тела.

2) $\rho_{\lambda,T} = 0$ и $a_{\lambda,T} = 1$. При этом падающий на тело свет полностью поглощается. Такое тело называется абсолютного черного тела.

В природе нет ни абсолютного белого тела, ни абсолютного черного тела. Любое тело, поглощая какую-то часть падающего на него света, отражает остальное. Чем больше тело поглощает больше падающего света, тем темнее является тела. Для самого черного тела в природе черной моли $\lambda = 400-770$ нм для лучей с длиной волны $a_{\lambda,T} = 0,99$.

Для объяснения абсолютного черного тела



Рисунок 16.2

используется модель, которая по своим свойствам мало чем отличается от абсолютного черного тела. Такое тело состоит из закрытой поры с очень маленьким отверстием. Свет с произвольной длиной волны, попав в отверстие, может выйти из него только после многократного отражения через его внутренние стенки. Часть энергии поглощается каждый раз, когда свет отражается с внутренней поверхности стенки. В результате только очень малая часть энергии света может покинуть отверстие. Поэтому светопоглощающая способность такой модели очень близка к 1, то есть $a_{\lambda,T} \approx 1$ (рис.16.2).

Помимо светополотражающая способность тела и светопоглощающая способность тела, существует еще одна характеристика, которая выражает энергию электромагнитных волн, излучаемых в единицу времени с единичной поверхности тела при T температуре. Эту величину называют световизлучающей способностью тела и обозначают r_t при T температуре.

$$r_t = \frac{W}{S t} \left[\frac{Bm}{M^2} \right] \quad (16.3)$$

ρ и a являются безразмерными величинами, r_t измеряется в Вт/м², r_t называется полный световизлучающей способностью, то есть излучает лучи в интервале $0 < \lambda < \infty$. Кроме того, способность тела при T температуре испускать свет длиной λ величина $r_{\lambda,T}$ также используется.

$$r_{\lambda,T} = \frac{d r_t}{d \lambda} \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.4)$$

Способность абсолютного черного тела излучать полный свет обозначается как $R_{\lambda,T}$, а способность испускать свет R_t и длиной волны λ обозначается как $R_{\lambda,T}$.

$$R_t = \frac{W}{S t} \left[\frac{Bm}{M^2} \right] \quad \text{и} \quad R_{\lambda,T} = \frac{d R_t}{d \lambda} \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.5)$$

Иногда пишут:

Пусть тело при температуре T окружено оболочкой (рис.16.3). Предположим, что оболочка сделана из идеального тела, которое не проводит тепло и полностью отражает излучение.

Давните высосать воздух из оболочки. Излучение, излучаемое телом, попадает на оболочку и, отражаясь из нее один или несколько раз, снова попадает на тело. И тела поглощает этот свет частично или полностью. Если он частично поглощает, а остальное отражает. Таким образом, обмен энергией излучения между телом и внутри оболочки продолжается. Поскольку и излучатель, и поглотитель света являются телами, энергия, излучаемая телом за единицу времени с его поверхности, равна энергии, поглощаемой за это время. Поэтому температура не меняется, а тепловой баланс сохраняется. Эксперименты показывают, что этот состояние равновесия сохраняется так долго. Тепловое излучение также называют неограниченным излучением. До тех пор, пока тепловой баланс не нарушается в излучении какого-либо другого вида в течение длительного времени. Например, при химилуминесценции излучение прекращается до тех пор, пока не закончится химическая энергия или если мы отвлечем ток в катодолуминесценции, экран не будет светиться и т. д.

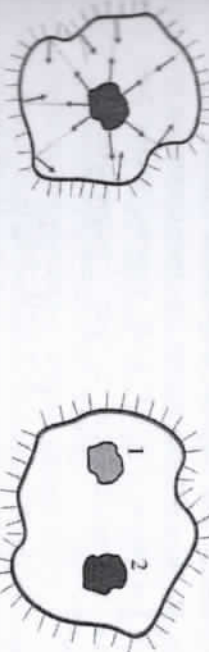


Рисунок 16.3

Рисунок 16.4

Что делать, если на рисунке 16.3 энергия, выделяемая телом за единицу времени, больше, чем энергия, поглощаемая за это время? Следовательно, тело охлаждается, потому что оно выделяет больше энергии. По мере охлаждения излучение света уменьшается, и когда оно охлаждается до определенной температуры, энергия, выделяемая за единицу времени, становится равной энергии, поглощенной за это время. Именно при этой температуре устанавливается равновесие, и температура остается неизменной в течение длительного времени, как и хотелось бы. Теперь пусть внутри оболочки находятся два тела одинаковой температуры, то есть находящихся в термодинамическом равновесии (рис.16.4). Если одно из тел

излучает больше энергии и поглощает меньше энергии, температура этого тела должна уменьшаться. В свою очередь, температура 2-го тела должна увеличиваться. В результате мы осуществляем процесс передачи тепла от более холодного тела к более тепловому телу. Но этого никогда не произойдет. Это противоречит 2-му главному закону термодинамики. Следовательно, каждый тела, относящийся к системе тел в состоянии термодинамического равновесия, поглощает столько энергии, сколько излучает. Тело, который поглощает больше энергии, излучает больше энергии.

Пусть одно из тел, изображенных на рисунке 16.4, является простым, а второй абсолютно-черной. Тогда полная световозлучающая способность 1-го тела будет R_1 , а светопоглощающая способность будет a_1 . Полная световозлучающая способность второго тела R_2 , а светопоглощающая способность объекта равна R_2 , а полная светопоглощающая способность равна.

Тогда полная световозлучающая способность 1-го тела будет R_1 , а полная светопоглощающая способность — a_1 . 2-Полная световозлучающая способность тела равна R_2 , а полная светопоглощающая способность равна 1.

1-тело поглощает a_1 часть R_2 энергии, излучаемой телом 2, то есть поглощает $a_1 \cdot R_2$ энергии. Следовательно, для 1-го тела баланс энергий будет следующим:

$$R_1 = a_1 \cdot R_2 \quad (16.6)$$

2-тело поглощает всю энергию, излучаемую 1 телом, то есть R_1 энергию. Кроме того, R_2 энергии, излучаемой 2-м телом, является частью энергии, отражаемой 1-м телом, т. е. $(1-a_1)R_2$ энергии, равная 2-му телу, также поглощается 2-м телом. Для 2 тела энергетический баланс будет следующим:

$$R_2 = R_1 + (1-a_1) \cdot R_2 \quad (16.6a)$$

Из приведенных выше двух балансовых уравнений получим следующий зависимость.

$$\frac{R_1}{a_1} = \frac{R_2}{1} = R_2 \quad (16.7)$$

Это выражение является интегральным законом Кирхгофа:

Отношение полной световозлучающей и полной светопоглощающей способности любого тела при данной температуре-неизменная величина, равная способности абсолютно черного тела при той же температуре излучать полный свет.

Если поместить в интервал между двумя телами на рис.16.4 фильтр, пропускающий только излучение в интервале длин волн $[\lambda; \lambda + d\lambda]$ и

полностью отражающий другие излучения, то получится дифференциальный закон Кирхгофа, аналогичный приведенным соотношениям.

$$\frac{R_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = R_{\lambda,T} \quad (16.8)$$

Дифференциальный закон Кирхгофа:

Отношение световозлучающей и поглощающей способности черного тела зависит от природы этого тела, это соотношение является универсальной функцией длины волны и температуры для всех тел, и это соотношение является обобщением световозлучающей способности черного тела радиуса $R_{\lambda,T}$.

Из интегрального и дифференциального закона Кирхгофа вытекают следующие основные выводы:

$$1) R_1 = a_1 \cdot R_2, \quad R_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot R_{\lambda,T}$$

Световозлучающей способности произвольного тела излучать свет при определенной температуре равна произведению абсолютной способности черного тела излучать свет на светопоглощающую способность этого тела.

2) Светопоглощающая способность нормального тела меньше 1, т. е. $a_{\lambda,T} < 1$ Следовательно, световозлучающей способности произвольного тела излучать свет меньше, чем световозлучающей способности абсолютного черного тела при той же температуре.

$$R_1 < R_2, \quad R_{\lambda,T} < R_{\lambda,T}$$

3) Если для волны λ светопоглощающая способность тела равна $a_{\lambda,T} = 0$, тогда $R_{\lambda,T} = a_{\lambda,T} \cdot R_{\lambda,T} = 0$. Это означает, что если тела не поглощает свет с данной волны, он даже не излучает то же излучение.

Законы излучения для абсолютного черного тела:

Наибольшей задачей теории теплового излучения является определение кванта зависимости способности абсолютного черного тела излучать свет от температуры и длины волны. Давайте познакомимся с основными законами, которые были открыты в этом отношении.

1-закон. Закон Стефана-Больцмана.

Способность абсолютного черного тела излучать полный свет увеличивается в зависимости от четвертой степени температуры

$$R_T = \sigma \cdot T^4 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right] \quad (16.9)$$

Здесь: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ — Постоянная Стефана-Больцмана, найденная

на основе экспериментов.

Стефан и Больцман экспериментально определили график зависимости абсолютной способности черного тела к излучению света λ для различных температур ($T_1 < T_2 < T_3$) (рис. 16.5).

Из этого опыта вытекают следующие 2 вывода:

1. Излучение абсолютного черного тела непрерывное;
2. Кривая, представляющая энергетическое распределение излучения, приходящегося на каждую температуру, имеет ровно один максимум, который смещается в коротковолновую область по мере увеличения температуры.

2-закон. Закон смещения Вина.

Абсолютное черное тело соответствующее максимуму спектральной способности λ_m , достигаетеи собой произведение длины волны на абсолютную температуру постоянной величиной.

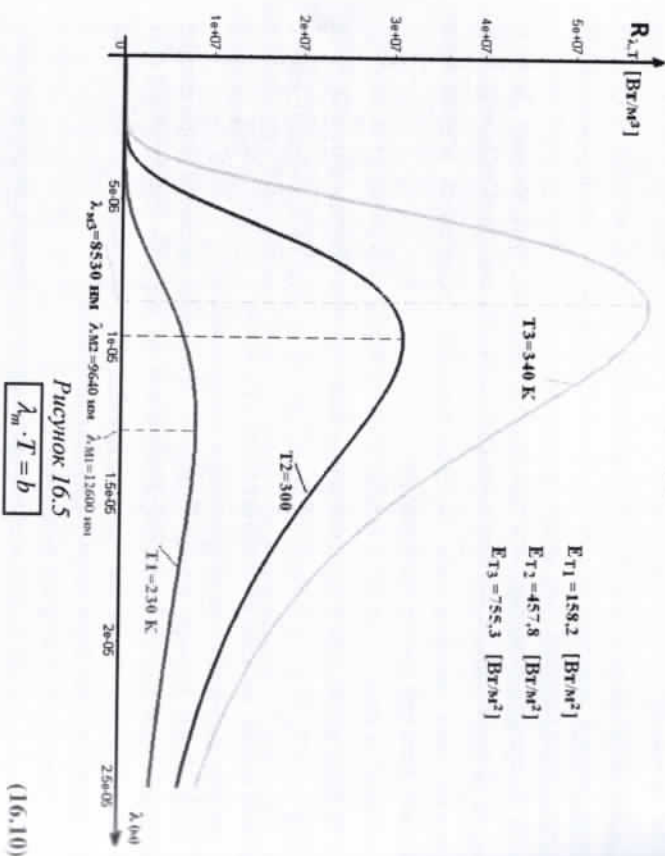


Рисунок 16.5

$$\lambda_m \cdot T = b$$

(16.10)

Здесь: $b = 2,898 \cdot 10^{-3} [m \cdot K]$ - постоянная Вина.

Из рисунка видно, что чем выше T , тем меньше становится λ_m .

Закон 3. 2-й закон Вина.

Абсолютное черное тело способно излучать свет λ_m с длиной волны, увеличивающейся в зависимости от пятой степени температуры.

$$R_{\lambda,T} = c \cdot T^5 \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.11)$$

Здесь: $c = 1,29 \cdot 10^{-5} \left[\frac{Vt}{m^2 \cdot K^5} \right]$ - константа.

На пути к объяснению кривой на рисунке 16.5 было сделано много попыток сформулировать выражение зависимости $R = R(\lambda, T)$ на основе законов термодинамики и статистической физики. Из них наиболее заметными являются эти 2 попытки:

1. На основе термодинамических соображений Вин предложил следующую формулу.

$$R_{\lambda,T} = \frac{\alpha}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{\beta}{\lambda T}} \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.12)$$

Где: α и β - выборочные числа, полученные таким образом, что график Вина на рисунке 16.6 максимально совпадает со значениями (точками на рисунке), найденными в эксперименте.

График, сформированный формулой Вина, хорошо совпал с результатами эксперимента в коротковолновом пространстве, в то время как в длинноволновом пространстве результат эксперимента оказался меньше.

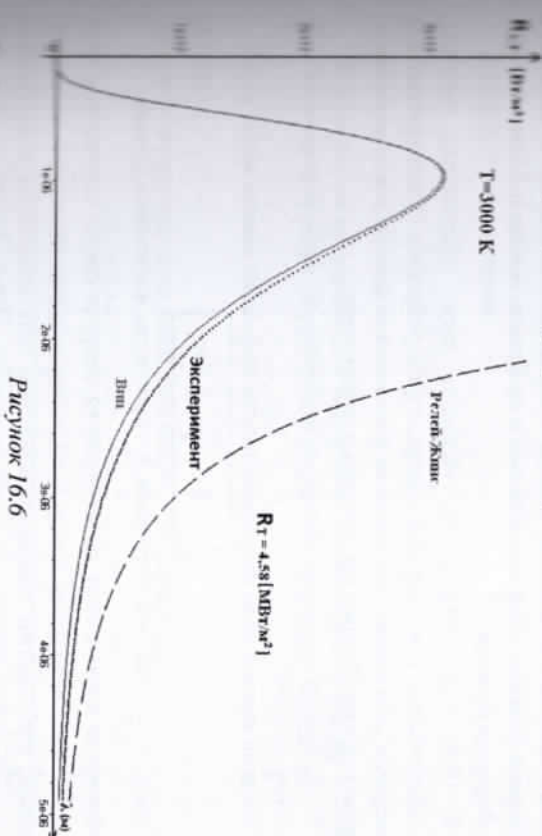


Рисунок 16.6

В. Редер и Джинс применили статистические методы к тепловому излучению и получили следующее выражение для способности абсолютного черного тела излучать свет.

$$R_{\lambda,T} = \frac{2\pi c k T}{\lambda^4} \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.13)$$

Где: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [J/K]$ – постоянная Больцмана, $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ – скорость света.

Значения, вычисленные по этой формуле (рис.16.6, пунктирная линия), хорошо совпали с результатами эксперимента (точки на рис.) на длинноволновом поле, в то время как на коротковолновом пространстве получалось бесконечно большое значение. Однако, начиная со значения λ_{min} , значение $R_{\lambda,T}$ должно уменьшаться до нуля, что означает, что должна произойти “ультрафиолетовая катастрофа”. Также не повезло вывести формулу Стефана-Больцмана из формулы Рейлей-Джинса.

$$R_T = \int_0^\infty R_{\lambda,T} \cdot d\lambda = 2\pi c k T \int_0^\infty \frac{d\lambda}{\lambda^4} = 2\pi c k T \left(-\frac{1}{3\lambda^3} \right) \Big|_0^\infty = \infty \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

С точки зрения совместности с экспериментом формула Вина кажется более предпочтительной, чем формула Рейлей-Джинса. Но это не так. В формуле Рейлей-Джинса не использовались такие произвольно выбранные константы, как в формуле Вина, т. е. она рассчитывалась, строго опираясь на классическую физику. Поэтому “ультрафиолетовая катастрофа”, вызванное результатами экспериментов, классическая физика объяснить и дать не в состоянии. Именно это обстоятельство и привлекло внимание Макса Планка.

Формула Планка:

В 1920 году Макс Планк выдвинул свою собственную гипотезу, противоречащую классической теории, чтобы устранить “ультрафиолетовую катастрофу”. Он считал, что в основе классической физики лежит недостаток. Основа гипотезы Планка заключалась в следующем:

Излучение тел испускается не непрерывно, а в виде отдельных долей (квантов, порций).

Энергия каждой доли излучения, то есть излучения кванта, имеет вид:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad [Дж] \quad (16.14)$$

Здесь: $\nu = \frac{c}{\lambda}$ – частота излучения, h – константа, постоянная Планка.

Исходя из приведенной выше формулы, энергия кванта излучения в поле коротких волн возрастает. Когда $\lambda \rightarrow 0$, энергия кванта становится настолько большой, что энергии теплового движения тела становится недостаточно даже для испускания одного кванта. Таким образом, можно объяснить, что в области коротких волн значение $R_{\lambda,T}$ резко уменьшается.

Планк, основываясь на своей гипотезе и используя законы статистической физики, сформулировал следующую формулу для излучения абсолютно черного тела излучать свет.

$$R_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \left[\frac{Bm}{M^3} \right] \quad (16.15)$$

Значения, полученные на основе формулы Планка, совпали по всей длине волны со значениями, найденными в эксперименте. С помощью формулы Планка можно сформулировать все эмпирически определенные законы излучения абсолютно черного тела.

1. Чтобы сформировать закон Стефана-Больцмана интегрируем формулу Планка на интервале $0 < \lambda < \infty$.

$$R_T = \int_0^\infty R_{\lambda,T} \cdot d\lambda = 2\pi h c^2 T \int_0^\infty \frac{d\lambda}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right)}$$

Чтобы упростить задачу, $x = \frac{\lambda k T}{hc}$ давайте введем новую переменную. Представим λ и $d\lambda$ через x .

$$\lambda = \frac{hc}{kT} x, \quad d\lambda = \frac{hc}{kT} dx$$

В результате формулируем:

$$R_T = 2\pi h c^2 \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 \int_0^\infty \frac{dx}{x^5 \cdot \left(e^x - 1 \right)}$$

В этом случае интегрируется, выражения под интегралом распространяя функцию на рядов. В результате получаем следующие выражение

$$\int_0^\infty \frac{dx}{x^5 \cdot \left(e^x - 1 \right)} = \frac{\pi^4}{15}$$

Соответственно результат интеграла имеет следующий вид:

$$R_T = 2\pi h c^2 \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 \cdot \frac{\pi^4}{15} = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

Следовательно, формула Стефана-Больцмана имеет вид:

$$R_T = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \quad \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,642 \cdot 10^{-8} \left[\frac{Bm}{M^2 K^4} \right] \quad (16.16)$$

2. Найдем точку, в которой производная формулы Планка равна 0, чтобы составить закон смещения Винна. В этот момент кривая достигает своего значения $\lambda_{\text{мн}}$.

$$R_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad \text{найдем точку } \lambda_{\text{мн}} \text{ от } R'(\lambda, T) = 0 \text{ функции. Мы решаем}$$

эту уравнение, путем введение обозначение.

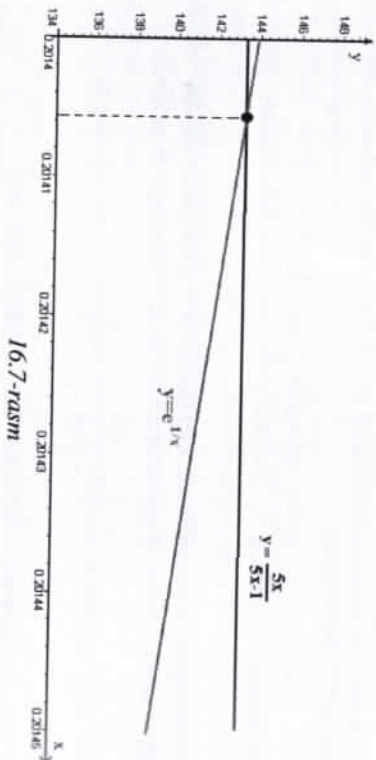
$$x = \frac{\lambda kT}{hc}, \rightarrow \lambda = \frac{hc}{kT} x, \rightarrow d\lambda = \frac{hc}{kT} dx.$$

$$R_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\left(\frac{hc}{kT}\right)^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{1}{x}} - 1} = 2\pi hc^2 \left(\frac{kT}{hc}\right)^5 \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{e^x - 1}\right) \cdot x^5}.$$

$$R'_{\lambda,T} = 2\pi hc^2 \left(\frac{kT}{hc}\right)^5 \cdot \frac{0 - 5x^4 \left(\frac{1}{e^x - 1}\right) - x^5 \cdot \left(-\frac{1}{x^2}\right) \cdot e^x}{\left(\frac{1}{e^x - 1}\right)^2 \cdot x^{10}} = 0, \rightarrow$$

$$\rightarrow -5x^4 \left(\frac{1}{e^x - 1}\right) + x^3 \cdot e^{\frac{1}{x}} = 0 / : (-x^3),$$

$$5x \left(\frac{1}{e^x - 1}\right) = 5x, \rightarrow e^x (5x - 1) = 5x, \rightarrow e^x = \frac{5x}{5x - 1}.$$



Итак, для решения $\begin{cases} y = e^x \\ y = \frac{5x}{5x-1} \end{cases}$ уравнения необходимо построить графики

функций, а затем найти координату точки пересечения этих графиков. Найденная координата и будет решением уравнения. Графики $x = 0.20141 = \frac{1}{4.965}$ пересекаются в точке (рис.16.7). Отсюда можно найти постоянную смещения Вина.

$$x = \frac{\lambda kT}{hc} = \frac{1}{4.965}, \rightarrow \lambda_{\text{мн}} T = \frac{hc}{4.965 K} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4.965 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23}} = 0.0029 \text{ [м} \cdot \text{К]}$$

Отсюда следует, что из формулы Планка следует закон смещения Винна.

$$\lambda_{\text{мн}} T = \frac{hc}{4.97 K}, \quad b = \frac{hc}{4.97 K} = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ [м} \cdot \text{К]} \quad (16.17)$$

Таким образом, формула Планка смогла раскрыть все причины тепловое излучения. Эта формула представляет распределение энергии в спектре излучения.

Вопросы по теме

1. Что такое электромагнитное излучение? Какие быковт его виды?
2. Дайте определение светопозиционной, светополучающей, светопредающей способности тел. Каковы их значения для прозрачных тел? Что такое абсолютного белого и абсолютно черного тел?
3. Запишите формулы светополучающей способности тела и полной светополучающей способности абсолютно черного тела измерения. Напишите формулы способности абсолютно черного тела излучать свет и полной светополучающей и излучение единицы измерения.
4. Объясните модель абсолютного черного тела.
4. Чем тепловое излучение отличается от других видов излучения?
6. Опишите интегральный и дифференциальный законы Кирхгофа и запишите формулу.
7. Скажите закон Стефана-Больцмана и запишите его формулу.
8. Скажите 1-й закон Вина (закон смещения) и запишите его формулу. Чему равна постоянная Вина?
9. Скажите 2-й закон Вина и запишите его формулу.
10. Какую формулу на основе термодинамических соображений предложил Вин для определения характера зависимости способности абсолютно черного тела излучать свет от температуры и длины волны? Каким образом он получил константы в формуле? Насколько это совпало с опытом?
11. Какую формулу предложил абсолютное, применяя статистические методы для определения характера зависимости способности черного тела излучать свет от температуры и длины волны? Насколько это совпало с опытом?
12. Какую формулу предложил Макс Планк. Насколько это совпало с опытом? Что лежит в основе идеи Планка?
13. Как вычислить константы Стефана-Больцмана и Вина из формулы Планка?

Решение задач:

1. На сколько сокращается длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения, при нагревании находящегося при температуре 400 К абсолютно черного тела до температуры 500 К?

Дано:

$$T_1=400 \text{ К}$$

$$T_2=500 \text{ К}$$

$$b=2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

Решение:

Для этого воспользуемся законом смещения Вина.

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

Для каждого случая определим длины волн, соответствующие максимуму.

$$\lambda_{m,1} = \frac{b}{T_1} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}}{400 \text{ К}} = 7,25 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 7,25 \text{ мкм}$$

$$\lambda_{m,2} = \frac{b}{T_2} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}}{500 \text{ К}} = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 5,8 \text{ мкм}$$

Теперь определим, на сколько сокращена длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения.

$$\lambda_{m,1} - \lambda_{m,2} = 7,25 \text{ мкм} - 5,8 \text{ мкм} = 1,45 \text{ мкм}$$

2. Два абсолютно черных тела были нагреты до температур $T_1=800 \text{ К}$ и $T_2=1000 \text{ К}$. С какой поверхности S_2 второго тела исходит энергия излучения первого тела $S_1=1 \text{ м}^2$?

Дано:

$$T_1=800 \text{ К}$$

$$T_2=1000 \text{ К}$$

$$P_1=P_2$$

Решение:

Светоизлучающей способностью для абсолютного черного тела

$$R_T = \sigma \cdot T^4 \text{ и } R_T = \frac{W}{S} = \frac{P}{S}$$

$d=?$

воспользуемся формулой. Приравняв их, найдем мощность.

$$P = R_T S = \sigma T^4 S$$

Теперь определим искомую поверхность.

$$\begin{cases} P_1 = \sigma T_1^4 S_1; \\ P_2 = \sigma T_2^4 S_2; \end{cases} \Rightarrow P_1 = P_2, \rightarrow \sigma T_1^4 S_1 = \sigma T_2^4 S_2, \rightarrow$$

$$\rightarrow S_2 = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^4 S_1 = \left(\frac{800}{1000} \right)^4 S_1 = 0,8^4 \cdot 1 \text{ м}^2 \approx 0,41 \text{ м}^2$$

Ответ: $0,41 \text{ м}^2$



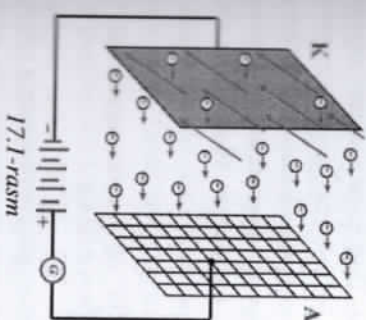
§ 17. ЗАКОНЫ ФОТОЭФФЕКТА И ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА.

Законы фотоэффекта:

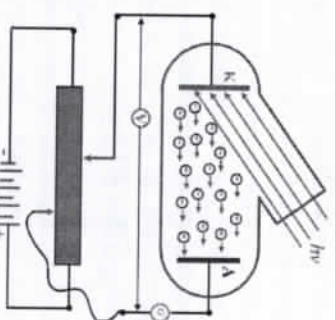
Фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света.

Первые это явление наблюдал Генри Герц в 1887 году. А количественные проверки А.Г.Столетов выполнил. На рисунке 17.1 представлена схема эксперимента Столетова. Из двух металлических электродов один представлял собой металлическую пластину, а другой — сетку. Эти электроды были подключены к батарее через гальванометр. Металлическая пластина действует как катод, а сетка — как анод.

При помещении прибора в темное время суток гальванометр показывал ноль. Когда катод затворился, гальванометр сразу показал, что ток проходит. Это означает, что частицы, выходящие при воздействии света, являются отрицательными частицами. Они отрываются от катода и притягиваются к аноду, а лавина заряженных частиц создает ток в цепи. Этот ток назвали фототоком.



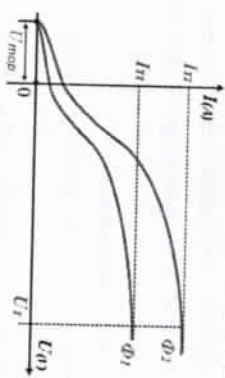
17.1-г-шт



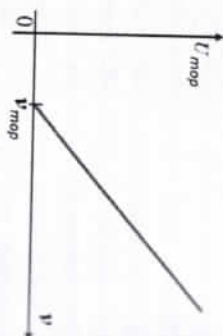
17.2-г-шт

1898 Леонард и Томсон определили отношение заряда к массе в зависимости от отклонения частиц, выделяющихся из катода, в магнитном поле. $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$ оказалось по этому. Следовательно, был сделан вывод, что эта неизвестная частица является электроном. В экспериментах было установлено, что явление фотоэффекта зависит от материала пластины и степени чистоты ее поверхности. Для лучшего изучения этого явления было изготовлено устройство на рисунке 49.2. Стеклообразный сосуд, воздух из которого высасывался, покрывался металлом, катод которого должен был быть проверен. Его обычно называют фотокатодом. Пучок монохроматических лучей проходит через окно стеклянного сосуда и падает на поверхность катода. Потенциометр в схеме изменяет величину и направление напряжения между электродами. Напряжение измеряется вольтметром, а фототок — гальванометром. На рисунке 49.3 изображен график

зависимости напряжения фототока между катодом и анодом для случаев, когда световой поток равен Φ_1 и Φ_2 .



17.3-г-гзм



17.4-г-гзм

Как видно из рисунка, когда электрическое поле приобретает ускоряющий характер (При К (-), а при А (+)), значение фотона монотонно возрастает до насыщения. Начиная с некоторого значения напряжения, значение фототока остается неизменным, то есть насыщенным. При этом каждый электрон, выходящий из катода, достигает анода, дальнейшее повышение напряжения бесполезно. Такое значение фототока называется током насыщения. Однако, если световой поток, падающий на фотокатод, увеличивается, значение фотокатода также увеличивается. Например, на рисунке 49.3 $\Phi_2 > \Phi_1$, будет $I_{T2} > I_{T1}$.

$$\begin{cases} \Phi = \frac{W}{t} = \frac{N h \nu}{t} & \text{из формулы} \\ I_T = \frac{q}{t} = \frac{N e}{t} & \Phi_2 \approx \frac{I_{T2}}{I_{T1}} \end{cases} \text{получается выражение.}$$

Отсюда можно сделать вывод, что во сколько раз увеличивается световой поток, во сколько раз увеличивается и сила тока насыщения. Но следует также упомянуть, что в обеих характеристиках насыщение происходит точно так же, как если оно происходило в одинаковым напряжениям, то есть $U_{T2} = U_{T1} = U_T$.

Этот опыт порождает первый закон фотоэффекта.

Если спектральный состав света, падающего на конкретный фотокатод, остается неизменным, то величина фотонного насыщения прямо пропорциональна световому потоку:

На рисунке 17.3 показан фототок существует даже при нулевом напряжении между катодом и анодом. Даже в тех случаях, когда $U < 0$ (в К (+), а в А (-)), наблюдается фототок. В этом случае электрическое поле носит тормозной характер, а фотозлектрон, движущийся от катода (К) к аноду (А), выполняют работу против сил поля. Эта работа выполняется за счет кинетической энергии фотозлектронов. Если электрическое поле достаточно велико, фотозлектрон будут тратить свою энергию, не доходя до анода. Значение тормозного напряжения, соответствующее этому состоянию,

называется тормозным напряжением $U_{\text{торм}}$ (иногда потенциалом торможения). Из рисунка видно, что при $U < 0$ фототок плавно уменьшается по мере увеличения тормозного поля. Тогда $U = U_{\text{торм}}$ как $I = 0$. Это означает, что электроны, отделившиеся от фотокатода, имеют разные скорости, и при $U = U_{\text{торм}}$ даже фотозлектрон с самой большой скоростью не хватает кинетической энергии, чтобы достичь к аноду. Запишем этот предельный случай следующим образом:

$$e U_{\text{торм}} = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 \quad (17.1)$$

где: $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ — заряд и масса электрона, v_{max} — максимальная скорость фотозлектрона.

Из приведенного выше выражения находим, v_{max}

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 e U_{\text{торм}}}{m_e}} = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U_{\text{торм}}} \quad [\text{м/с}] \quad (17.2)$$

В результате экспериментов с монохроматическими лучами, частота которых различна, возникает второй закон фотоэффекта.

Максимальные значения начальной скорости фотозлектронов, выходящих от конкретного фотокатода, не зависят от светового потока. При изменении частоты света изменяются и максимальные скорости фотозлектронов.

На рисунке 17.4 изображен график зависимости тормозного напряжения от частоты света. Из рисунка видно, что тормозное напряжение линейно связано с частотой света. При каком ν_0 -то значении частоты получается $U_{\text{торм}} = 0$, $v_{\text{max}} = 0$. Значит свет с частотой $\nu < \nu_0$ не создает фотоэффект. Для того чтобы произошел фотоэффект, необходимо воздействие света $\nu > \nu_0$ частоты, предельная частота $\nu = \nu_0$ называется красным пределом частоты.

Первый закон фотоэффекта заключается в выводе об этой красной границе.

Для каждого фотокатода существует своего рода "красная граница", которую отмечают, что при свете с частотой, меньшей этой границы, фотоэффект не возникает, величина ν_0 абсолютно не зависит от интенсивности света, она зависит только от материала фотокатода и от природы поверхности.

Из наблюдений выяснилось, что как только на фотозлемент попадал свет, тахометр показывал, что проходит ток, то есть времени на просмотр фототока не тратилось. Наконец, четвертый закон фотоэффекта определяется

выходе из катода и движении к аноду. Так что $eU_{\text{max}} = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2$ это так. Зная это, можно найти постоянную Планка.

$$\begin{cases} h\nu_1 = A_{\text{вых}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2} = A_{\text{вых}} + eU_{\text{max},1} \\ h\nu_2 = A_{\text{вых}} + \frac{m v_{\text{max}}^2}{2} = A_{\text{вых}} + eU_{\text{max},2} \end{cases} \rightarrow h\nu_2 - h\nu_1 = eU_{\text{max},2} - eU_{\text{max},1} \rightarrow h = \frac{e(U_{\text{max},2} - U_{\text{max},1})}{\nu_2 - \nu_1}$$

Таким образом, если при освещении фотоэлектронной монохроматическим светом с частотой ν_1 потенциал остановки фототока равен $U_{1,0}$, а при освещении монохроматическим светом с частотой ν_2 потенциал остановки фототока равен $U_{2,0}$, то формула нахождения константы Планка будет следующей:

$$h = \frac{e(U_{2,0} - U_{1,0})}{\nu_2 - \nu_1} \quad (17.5)$$

Поскольку электрон выделяется из металла наружу, приведенная выше формула называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Уравнение Эйнштейна может объяснить все законы фотоэффекта. В частности, наименьшее значение фотона, необходимое для возникновения фотоэффекта, будет равно значению работы электрона на выходе из металла.

$$A_{\text{вых}} = h\nu_q = \frac{hc}{\lambda_q} \quad (17.6)$$

Это выражение определяет "красную границу" фотоэффекта. "Красная граница" абсолютно не зависит от интенсивности падающего света. Интенсивность света характеризует только количество фотонов. При освещении более интенсивным светом на поверхность металла падает больше фотонов, что приводит к увеличению количества фотоэлектронов. Следовательно, сила тока также увеличивается.

Красная граница частоты или длины волны находится следующим образом:

$$\nu_q = \frac{A_{\text{вых}}}{h}, \quad \lambda_q = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} \quad (17.7)$$

Здесь $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ [J} \cdot \text{s]}$ - константа, Планка.

В приведенной выше формуле для простоты решения задач СИ можно рассматривать $hc = 1,9878 \cdot 10^{-25} \text{ [J} \cdot \text{m]} \approx 2 \cdot 10^{-25} \text{ [J} \cdot \text{m]}$ как величину.

Уравнение Эйнштейна основано на идее, что электрон поглощает только один фотон. Если поверхность металла освещена светом с очень большой интенсивностью, на электрон могут одновременно падать два фотона. Энергия, поглощенная электроном, равна энергии обоих фотонов.

фотоэффект, который возникает при этом, называется многофотонным фотоэффектом. Естественно, что "красная граница" многофотонного фотоэффекта смещается в область малых частот. Фотоэффект является одним из доказательств, демонстрирующих квантовую природу света.

Вопросы по теме

1. Что называется фотоэффектом?
2. Опишите законы фотоэффекта. Какие из этих законов нельзя объяснить волновой теорией?
3. Напишите формулу Эйнштейна для фотоэффекта.
4. Что такое красная граница? Напишите формулу длины волны частоты, определяющую красную границу.
5. Что такое тормозной потенциал? Что вы подразумеваете под максимальной кинетической энергией электрона?
6. Выпишите формулу, определяющую максимальную скорость фотоэлектрона.

Решение задач:

1. Для конкретного металла красная граница фотоэффекта равна 331 нм, какое минимальное значение энергии фотона (эВ) вызывает фотоэффект? (эВ)? $h = 6,6310^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

А) 2,45 В) 2,6 С) 2,75 Д) 3,75 Е) 4,5

Дано:

$$\lambda_q = 331 \text{ нм}$$

Решение:

Чтобы произошел фотоэффект, энергия падающего света должна быть равна работе электрона на выходе из металла. Значит,

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda_q} = 3,75 \text{ эВ}$$

Ответ: Д) 3,75 эВ

2. Свет с какой длиной волны мкм может отделить электроны от металла с работой выхода равной $6,9 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$? $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Дано:

$$A = 6,9 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Решение:

Минимальная длина волны, на которой происходит фотоэффект, называется красной границей фотоэффекта $h\nu = A$. Из этого

$$\lambda_q = \frac{hc}{A} = 0,29 \mu\text{м}$$

результат получается.

Ответ: 0,29 м

3. До сколько вольт потенциала заряжается металлическая пластина с работой выхода равной 1,6 эВ при длительном освещении потоком фотонов энергии 3 эВ?

Дано:

$$A = 1,6 \text{ эВ}$$

$$h\nu = 3 \text{ эВ}$$

$$U = ?$$

Решение

Согласно уравнению Эйнштейна для фотоэффекта

$$h\nu = A + E_{\text{кин}} \text{ кинетическая энергия электронов равна}$$

$$E = h\nu - A = 1,4 \text{ эВ. Следовательно, когда } e \text{ движется в}$$

электрическом поле с кинетической энергией $\frac{mv^2}{2} = eU$, оно также имеет потенциальную энергию. Значит, поддается

$$U = \frac{mv^2}{2e} = \frac{E}{e} = 1,4 \text{ В}$$

Ответ: 1,4 В



§ 18. ФОТОН И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ. ОБЪЯСНЕНИЕ ЭФФЕКТА КОМПТОНА И ДАВЛЕНИЯ СВЕТА КВАНТОВОЙ ТЕОРИЕЙ.

Характеристики фотона:

Тепловое излучение, явления фотоэффекта были объяснены на основе квантовой теории света. Свет состоит из потока частиц, то есть потока фотонов, и именно в этих фотонах воплощается световая энергия. Связь между энергией фотона и частотой колебаний определяется $\varepsilon = h\nu$. Во-вторых, учитывая связь между массой и энергией $W = mc^2$, можно найти массу фотона.

$$m_f = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

(18.1)

Вычисленная при этом масса-это величина, при которой фотон движется со скоростью $\nu = c$. Итак, какова масса фотона в покое? Находим его по формуле в теории относительности.

$$m_0 = m_f \sqrt{1 - (\nu/c)^2} = m_f \sqrt{1 - (c/c)^2} = m_f \sqrt{1 - 1} = 0$$

(18.2)

Следовательно, масса фотона света в покое равна $m_f = 0$. Другими словами, когда "фотон останавливается", все его свойства также теряются. И масса, и энергия будут равны нулю. "Остановка" фотона-это его поглощение другим телом. В процессе остановки энергии и масса фотона переходят на поглощающее его тело. В результате масса и энергия поглощающего тела увеличиваются.

Остается следует, что фотон света может поглощаться другими частицами (атомом, молекулой, электроном и т. д.). важным отичнем от является то, что он не будет иметь массы в покое. Фотон существует только в процессе своего движения, скорость которого равна скорости света.

Как и любая движущаяся частица, фотоны обладают импульсом. Как и любая движущаяся частица, фотоны обладают моментом.

$$P_f = m_f c = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad [\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}]$$

(18.3)

Фотон, как и другие частицы, характеризуется энергией $\varepsilon = h\nu$, массой $m_f = \frac{h\nu}{c^2}$, импульсом $P_f = \frac{h\nu}{c}$. Наличие массы и энергии является признаком существования частицы.

Фотон не имеет массы в покое, то есть масса фотона в покое равна нулю. Фотоны достигают скорости света, как только они появляются.

Если лампочка с мощностью P излучает фотоны с частотой ν , количество фотонов, излучаемых во времени Δt , будет следующим:

$$N = \frac{P \Delta t}{h\nu}$$

(18.4)

Импульс, который фотон отдает абсолютноному черному поверхности, будет:

$$P = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c}$$

(18.5)

Импульс, который фотон отдает на абсолютноному белой поверхности, будет:

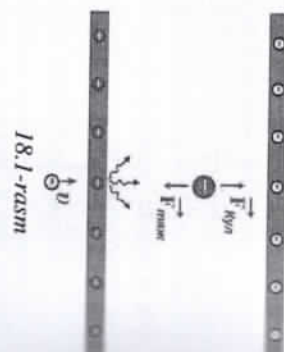
$$P = \frac{2h}{\lambda} = \frac{2h\nu}{c}$$

(18.5а)

Существование фотона было подтверждено несколькими экспериментами, и с некоторыми из них мы познакомимся.

А.Ф.Иоффе и Н.И. Добронравовыми, проведенном эксперименте, направленная частица вискута (В) оказывается между плоскими обложками конденсатора. Сила тяжести частицы уравновешивается силой Кулона (рис. 18.1). В эксперименте обложка А конденсатора одновременно излучает в качестве анода рентгеновской трубки. Поток электронов очень малой интенсивности тормозится при ударе о анод А и испускает рентгеновский лучи. В течение 1 секунда испускается около 1000 рентгеновских импульсов. Под воздействием этих лучей примерно в 30

минут частица вибрирует и выходит из положения равновесия. Расчеты показывают, что за это время в направлении частицы излучается один квант рентгеновского излучения. Явление фотоэффекта возникает, когда этот квант сталкивается с частицей. В результате частица, чей заряд изменился, выходит из положения равновесия.



Отсюда следует, что взаимодействие рентгеновских лучей с частицей имеет квантовый характер. Если предположить, что рентгеновское излучение распространяется в форме волны, энергия, необходимая для отделения электрона от частицы, должна быть сосредоточена до тех пор, пока работа выхода не достигнет $A_{вых}$. Поскольку интенсивность рентгеновского излучения очень мала, оказалось, необходимо сутка для накопления энергии, равного $A_{вых}$.

Согласно С.И. Вавилову, если световой поток состоит из суммы фотонов, то по законам статистики должна наблюдаться флуктуация фотонов (флуктуация—случайное отклонение физической величины от среднего значения). В наблюдениях за 1933-1942 гг. это мнение подтвердилось. В результате было получено еще одно доказательство фотонной природы света.

Эффект Комптона:

Явление, известное как эффект Комптона, было описано в 1923 году А.Комптоном обнаружил в эксперименте, касающемся рассеяния рентгеновских лучей. Схема эксперимента изображена на рисунке 18.2. С помощью дифракта D_1 и D_2 рентгеновские лучи, представленные в виде тонких пучков, попадают в рассеивающий кристалл Kr . Он анализирует рассеянные лучи по длинам волн на рентгеновском спектрографе Sp . Комптон, изучая рассеяние рентгеновских лучей в различных веществах, заметил, что в составе рассеянных лучей наряду с первичной длиной волны λ есть и лучи, которые имеют большую длину волны λ' . Но заметил, что в начальном направлении падения длина волны неизменна, то есть $\lambda = \cos \phi$, а от направления падения больше длины волны излучают рассеянные лучи, образуя угол ϕ . Поскольку $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ разность длин волн не зависит ни от λ , ни от природы рассеивающего вещества. Комптон опытным путем установил, что разность длин волн падающего и рассеянного лучей зависит только от угла рассеяния,

$$\Delta\lambda = K(1 - \cos \phi) = 2K \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (18.6)$$

Рис. 18.2. Комптона, полученная опытным путем.

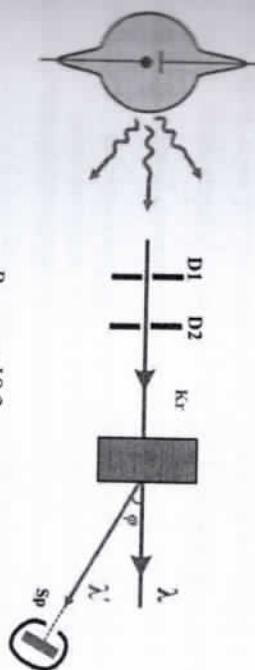


Рисунок 18.2

В 1923 году Артур Комптон провел в Вашингтонском университете свой знаменитый эксперимент, который доказал, что энергия и импульс переносятся из одной точки в другую только фотонами. Комптон направил пучок рентгеновских лучей длиной волны $\lambda = 70,1$ нм на цель, состоящую из углеродного кристалла. Поскольку частота рентгеновского излучения велика, длина волны мала. Комптон измерил длину волны и интенсивность лучей, рассеянных во всех направлениях. Он увидел, что только рассеянный луч в направлении падения будет таким же, как и раньше, в то время как остальные лучи падающий под углом ϕ будут на $\Delta\lambda$ больше, чем падающий луч, то есть $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$, а при больших значениях ϕ будет еще больше $\Delta\lambda$.

Попробуем объяснить эффект Комптона волновой теорией. Под действием переменного электрического поля рентгеновских лучей электроны атомов кристалла вынуждены колебаться, и они излучают вторичные волны. Частота этих вторичных волн (рассеянных рентгеновских лучей) будет такой же, как частота рентгеновских лучей, падающих на кристалл. Уменьшение частоты рассеянных лучей, наблюдаемое в эксперименте, объясняется не вполне объяснимым волновой теорией.

Эффект Комптона был объяснен на основе квантовой теории света. Эффект Комптона можно объяснить как результат упругого столкновения рентгеновских фотонов с электронами, которые считаются практически свободными. Электроны, очень слабо связанные с атомом, энергии связи (потенциал ионизации) которых намного меньше энергии, которую фотон отдаст электрону при столкновении, можно считать свободными электронами. Пусть фотон, обладающий энергией $W_f = h\nu$ и импульсом $p_f = \frac{h\nu}{c}$, падает на электрон, который в начальный момент находится в состоянии покоя (рис.50.3). До столкновения энергия равна $W_e = m_0 c^2$ и импульс электрона равен $p_e = 0$. Где m_0 — масса электрона в покое. При

столкновении электрон принимает часть энергии фотона и движется со скоростью β . В результате этот рассеянный электрон достигает энергии $W'_e = m_e c^2$ и импульса $p'_e = m \beta$. Здесь определяется $m = m_0 \sqrt{1 - (\beta/c)^2}$. А фотон рассеивается, образуя угол φ от исходного направления. Будет энергия $W'_f = h\nu'$ и импульс $p'_f = \frac{h\nu'}{c}$ рассеянного фотона. Поскольку фотон отдает часть своей энергии электрону, его энергия уменьшается. Это означает, что частота фотона уменьшается, а длина волны увеличивается.

Для теоретического доказательства формулы Комптона воспользуемся законом сохранения вектора энергии и импульса.

$$\begin{cases} W_f + W_e = W'_f + W'_e \\ \vec{p}_f = \vec{p}'_f + \vec{p}'_e \end{cases}$$

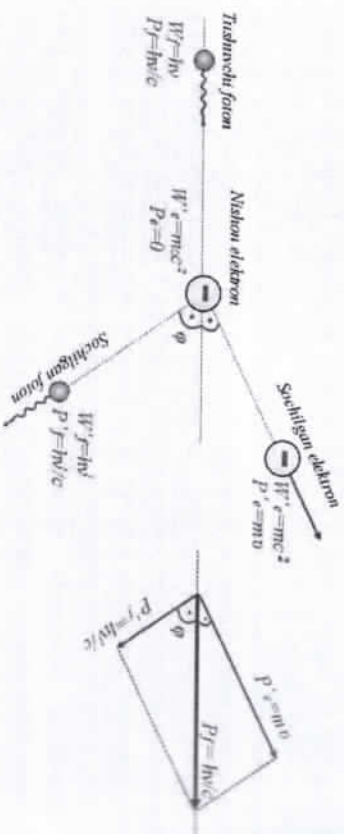


Рисунок 18.3

Здесь:

$$\begin{cases} W_f = h\nu \\ p_f = \frac{h\nu}{c} \end{cases} \quad \begin{cases} W_e = m_e c^2 \\ p_e = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} W'_f = h\nu' \\ p'_f = \frac{h\nu'}{c} \end{cases} \quad \begin{cases} W'_e = m_e c^2 \\ p'_e = m\beta \end{cases}$$

импульс фотона и электрона до и после столкновения.

$$\begin{cases} h\nu + m_e c^2 = h\nu' + m_e c^2 & (*) \\ \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 = \left(\frac{h\nu'}{c} \right)^2 + (m\beta)^2 & (**) \end{cases}$$

разделим (*) на c , найди из него $m\beta c$, а затем возведем его в квадрат.

$$\frac{h\nu}{c} + m_e c = \frac{h\nu'}{c} + m_e c \rightarrow m_e c = m_e c + \frac{h}{c}(\nu - \nu')$$

$$(m_e c)^2 = (m_e c)^2 + 2m_e c \cdot \frac{h}{c}(\nu - \nu') + \left(\frac{h}{c}(\nu - \nu') \right)^2$$

найди из (**) импульс электрона, возведем его в квадрат.

$$(\overline{m\beta})^2 = \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 - \left(\frac{h\nu'}{c} \right)^2$$

$$(m\beta)^2 = \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c} \right)^2 - 2 \left(\frac{h\nu}{c} \right) \left(\frac{h\nu'}{c} \right) \cos \varphi$$

$(m_e c)^2 - (m\beta)^2$ выполняем действие.

$$m_e^2 (c^2 - \beta^2) = (m_e c)^2 + 2m_e h(\nu - \nu') - 2 \left(\frac{h\nu}{c} \right) \left(\frac{h\nu'}{c} \right) (1 - \cos \varphi)$$

Выполнив следующие математические подстановки, получим результат.

$$\frac{m_e^2}{1 - \beta^2/c^2} (c^2 - \beta^2) - (m_e c)^2 - 2m_e h(\nu - \nu') = -2 \left(\frac{h\nu}{c} \right) \left(\frac{h\nu'}{c} \right) (1 - \cos \varphi) \rightarrow$$

$$= 2m_e h(\nu - \nu') = -2 \left(\frac{h\nu}{c} \right) \left(\frac{h\nu'}{c} \right) (1 - \cos \varphi) \rightarrow m_e h(\nu - \nu') = \frac{h}{c^2} \nu \nu' (1 - \cos \varphi) \rightarrow$$

$$m_e \left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda'} \right) = \frac{h}{c^2} \frac{c}{\lambda \lambda'} (1 - \cos \varphi) \rightarrow m_e \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda \lambda'} c = \frac{h}{\lambda \lambda'} (1 - \cos \varphi) \rightarrow \lambda - \lambda' = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi)$$

$$K = \frac{h}{m_e c} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 2,424 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Таким образом, мы получили теоретическое доказательство формулы Комптона, полученной опытным путем, и константы Комптона, полученной эмпирическим путем, и оказалось, что они соответственно равны:

$$\begin{aligned} \Delta \lambda &= \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \varphi) = K (1 - \cos \varphi) \\ K &= \frac{h}{m_e c} = 2,424 \cdot 10^{-12} \text{ [м]} \end{aligned} \quad (18.7)$$

Мы вывели значение комptonовской постоянной более точно теоретическим путем. И мы получили $K = 2,41 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ благодаря опыту.

Световое давление:

Согласно теории Максвелла, любая электромагнитная волна, падающая на поверхность тела, оказывает давление на этот телу. Объясняем возникновение давления следующим образом. Пусть плоская световая волна падает на поверхность металла нормально (рис. 18.4). Тогда векторы световой волны $\vec{E}$ и $\vec{B}$ будут направлены вдоль поверхности металла. Под действием электрического поля света $\vec{E}$ электроны, находящиеся вблизи поверхности металла, начинают двигаться в направлении, противоположном полю. Но в этот момент на электрон, движущийся магнитным полем световой волны $\vec{B}$, действует сила Лоренца F_L . Эта сила направлена внутрь, перпендикулярно поверхности металла. Сумма сил Лоренца, действующих на единицу поверхности освещаемой поверхности металла, создает световое давление. В

результате расчетов, основанных на теории Максвелла, были сформулированы следующая формула для давления света.

$$P = (1 + \rho)\omega \quad (18.8)$$

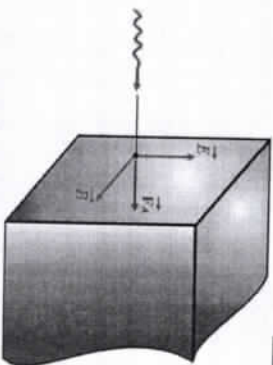


Рисунок 18.4

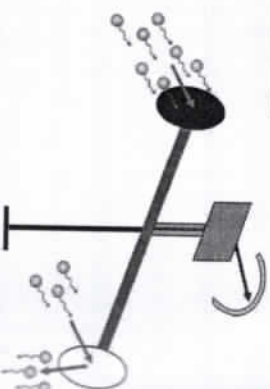


Рисунок 18.5

Здесь: $\omega = \frac{W}{V} \left[\frac{J}{m^2} \right]$ – объемная плотность энергии светового потока падающего на поверхность, ρ – коэффициент отражения света от поверхности.

В экспериментах давление, которое свет отдает на блестящее крыло, оказалось в два раза больше $P_{\text{прон}}$, чем давление, которое свет отдает на затемненное крыло $P_{\text{затм}}$. Этот результат хорошо соответствовал теоретическому заключению Максвелла.

Первым, измерить световое давление, в 1900 году удалось русскому физики П.Н.Лебедеву. П.Н.Лебедеву в эксперименте установил следующее. 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”. 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 света, которое зависит от отражательной способности поверхности тела и от потока падающего света.

Для действительно идеальной зеркальной поверхности $\rho=1$, а давление будет:

$$P = (1 + \rho)\omega = 2\omega \quad (18.8a)$$

Для черной поверхности, которая полностью поглощает свет $\rho=0$, и давление будет:

$$P = (1 + \rho)\omega = \omega \quad (16.8b)$$

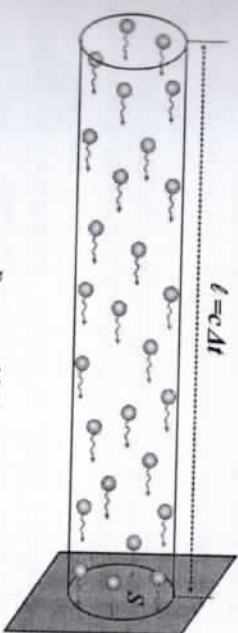


Рисунок 18.6

Мы объясним свет на основе квантового поперечного сечения следующим образом. Пусть поток света падает вертикально на поверхность с площадью S . Предположим, что на эту поверхность за Δt время успевает попасть N фотонов в объеме $V = S \ell = S c \Delta t$. В естественных условиях поверхность, на которую падает свет, не является ни абсолютно белой, ни абсолютно черной. Следовательно, светотелача этой поверхности будет иметь ρ ($0 < \rho < 1$). Поверхность отражает ρN из N фотонов, попадающих на нее, и поглощает два из $(1-\rho)N$. Отражающиеся фотоны дают поверхности импульс, равный $\rho N \cdot 2 m_f c$, в то время как поглощенные фотоны дают поверхности импульс, равный $(1-\rho)N \cdot m_f c$. В результате за время Δt поверхность получает импульс следующим образом (рис.18.6).

$$\Delta p = 2\rho N m_f c + (1-\rho)N \cdot m_f c = N \cdot m_f c (2\rho + 1 - \rho) = (1 + \rho)N \cdot m_f c$$

Изменение импульса во времени дает силу. А отношение силы к поверхности дает давление.

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{S \Delta t} = \frac{(1 + \rho)N \cdot m_f c}{S \Delta t} = \frac{(1 + \rho)N \cdot m_f c}{V}$$

Здесь: $W_0 = m_f c^2$ – энергия одного фотона;

$W = N W_0$ – энергия, падающая на поверхность Δt за время;

$$\omega = \frac{W}{V} \left[\frac{J}{m^3} \right] \text{ – объемная плотность энергии света.}$$

Световое давление принимает вид:

$$P = \Delta p = (1 + \rho) \frac{N \cdot m_f c^2}{V} = (1 + \rho) \frac{N \cdot W_0}{V} = (1 + \rho) \frac{W}{V} = (1 + \rho)\omega \quad (18.9)$$

Эта формула является своего рода формулой, выведенной в соответствии с теорией Максвелла.

В 1864 году Дж.К.Определено Максвеллом. Экспериментально П.Н.Лебедевым в 1900 г. $\rho=4,8 \cdot 10^{-8}$ па.

Тот факт, что свет имеет давление определено Максвеллом в 1864 году. Экспериментально измерено $P = 4,8 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}$ П.Н. Лебедевым в 1900 г.

Тот факт, что свет имеет давление, означает, что фотон имеет импульс, то есть сумму импульсов, которые дают бесчисленные фотоны, складывается и создает давление, которое он дает поверхности. Импульсы, которые получает поверхность при падении одного фотона на абсолютно-белую поверхность и на абсолютно-черную поверхность, отличаются в два раза. Точно так же давление, создаваемое всеми фотонами, падающими на белые и черные поверхности абсорбисы, также отличается в два раза.

Давление для абсолютно белой поверхности равно

$$P = (1 + 1) \omega = 2 \omega = 2 \frac{W}{V} = 2 \frac{W}{S \ell} = \frac{2W}{c S \Delta t}$$

Следовательно, если вся световая энергия W , падающая на поверхность, с S поверхностью в данный момент времени Δt , отражается с поверхности, давление, которое свет оказывает на поверхность (абсолютно белой поверхности), будет следующим:

$$P = \frac{2W}{c S \Delta t} \quad (18,9a)$$

Для абсолютно черной поверхности световое давление выражается следующим образом:

$$P = (1 + 0) \omega = \omega = \frac{W}{V} = \frac{W}{S \ell} = \frac{W}{c S \Delta t}$$

Следовательно, если вся световая энергия W , падающая на поверхность, с поверхностью S в течение Δt времени, поглощается поверхностью, давление, которое свет (абсолютно черное тело) оказывает на поверхность, равно:

$$P = \frac{W}{c S \Delta t} \quad (18,9b)$$

Таким образом, формула, количественно оценивающая давление, которое свет оказывает на поверхность, стала возможной только по квантовой теории.

Вопросы по теме

1. Что такое фотон? Запишите формулы массы, энергии и импульса фотона.
2. Кто ввел термин фотон? Каким образом Нодде и Доброуэров определили, что свет-это частицы белого цвета? А Вавилов?
3. Что такое эффект Комптона? На основании какой теории был объяснен этот эффект?
4. Запишите формулу и числовое значение константы Комптона. От чего зависит изменение длины волны в эффекте Комптона?
5. Световое давление было первоначально объяснено кем? На основе какой

теории?

5. Кто и когда измерял давление света?

6. Запишите формулу светового давления. На основании какой теории выведена эта формула?

7. Запишите выражения давлений, которые свет оказывает на абсолютно белую и абсолютно черную поверхность. Во сколько раз они отличаются?

Решение задач:

1. Какой будет энергия (эВ) фотона с длиной волны 10^{-7} м ? $h = 4 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$.

A) 1 B) 2 C) 4 D) 8 E) 12

Дано:

$$h = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$$

$$\lambda = 10^{-7} \text{ м}$$

Решение:

Принимая во внимание, что энергия фотона равна $E = h\nu$, а для электромагнитных лучей $\nu = \frac{c}{\lambda}$

$$E = h \frac{c}{\lambda} = 12 \text{ эВ}$$

Ответ: E)

8. Найти массу фотона излучения с длиной волны 2 мкм . $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Дано:

$$\lambda = 2 \text{ мкм}$$

Решение:

Суммируя выражения энергии фотона $E = h\nu$ и теории Эйнштейна $E = m_f c^2$, мы получаем выражение

$$m_f = \frac{h\nu}{c^2} \cdot \text{Принимая во внимание, что } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$m_f = \frac{h}{c\lambda} = 1,1 \cdot 10^{-36} \text{ Кг}$$

$$\text{Ответ: } m_f = 1,1 \cdot 10^{-36} \text{ Кг}$$

§ 19. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН.

Инфракрасные и ультрафиолетовые лучи:

С именем дисперсии мы познакомились в предыдущей главе. При исследовании явления дисперсии на лучи, разделенные на спектры, температура поднималась до определенного уровня, когда термометр удерживался в течение некоторого времени. Если взять семь термометров и держать их в течение периода, равного семи цветам радуги, то наибольшую температуру показывает термометр, выдержанный в красном свете, самую низкую температуру-термометр, выдержанный в фиолетовом свете, а остальные термометры показывают промежуточные температуры. Из этого можно будет сделать вывод, что красный свет проявляет себя ярко.

Если термометр держать от красного света вверх, то можно наблюдать все более сильный нагрев термометра. Итак, оказывается, что есть какой-то свет, невидимый нашим глазам сверху от красного света. Этот свет проявляет

себя в виде тепла даже больше, чем красный свет. Невидимые невооруженным глазом лучи, расположенные в спектре раньше красных, называются инфракрасными лучами. Длина волны инфракрасных лучей больше, чем у красных лучей, а частота меньше. Поскольку любое нагретое тело испускает инфракрасные лучи, оно называется излучением тепла. Горячая плита или отопительная батарея в помещении излучают инфракрасные лучи, которые значительно нагревают окружающие предметы. Инфракрасные лучи используются для сушки лакокрасочных покрытий, овощей и фруктов. Почти у всех плотоядных животных, собак и других животных диапазон зрения шире, чем у человека, и он также видит инфракрасное поле. Поэтому глаза у этих животных очень хорошо видят по ночам. Но у некоторых птиц, таких как курица, голубь, диапазона зрения уже, чем у человеческого глаза, и они не любят красный свет или вообще не видят его. Если к курочке или голубю подойти в алом наряде, они плохо заметят человека. Птенцы и голуби теряют зрение, как только начинают темнеть. Потому что, когда Солнце краснеет перед закатом, другие лучи поглощаются атмосферой, и красный свет достигает поверхности Земли, не поглотившись. Это также причина, почему он краснеет перед закатом.

Если термометр держать ниже фиолетового света, можно увидеть, что термометр нагревается даже слабее, чем если бы он был фиолетовым. Это означает, что под фиолетовым светом есть какой-то свет, невидимый для наших глаз. Невидимые невооруженным глазом лучи, расположенные после фиолетовых лучей в спектре, называются ультрафиолетовыми лучами ($0.05 - 0.4 \text{ мкм}$). Длина волны ультрафиолетовых лучей мала по сравнению с фиолетовыми лучами, а частота больше. Эти лучи не создают ощущения зрения в мозге человека. Ультрафиолетовые лучи можно заметить с помощью экрана, покрытого люминесцентным веществом. Только часть экрана, противоположная лучам, лежащим за пределами фиолетовой области спектра, начинает светиться сине-зеленым. Ультрафиолетовые лучи химически очень активны. Фотомульсия становится очень чувствительной к ультрафиолетовым лучам. Хотя ультрафиолетовые лучи невидимы для глаз, они оказывают сильное воздействие на сетчатку глаза и кожу. Поскольку стекло поглощает много ультрафиолетовых лучей, даже очки с белым стеклом защищают глаза от этих лучей. Ультрафиолетовые лучи в определенной дозе полезны для здоровья и способствуют росту организма, а также закаливанию тканей. Эти лучи воздействуют на кожу, заставляя ее.

Все лучи волнового спектра в ряду Лаймана и следующие за ним 5 лучей в ряду Бальмера лежат в ультрафиолетовом поле, первые четыре ряда в ряду Бальмера-в поле зрения, а все лучи во всех остальных сериях (серии

Ланглена, брекста, Пфунда и др.) - в инфракрасном поле. Об этой серии будет подробно рассказано в следующих главах.

Рентгеновские лучи:

Хотя не слышали об ультрафиолетовом и инфракрасном свете, но все слышали о рентгеновских лучах. Также почти все мы знаем, что с помощью этого луча можно получать изображения костей и суставов. Для этого света непрозрачные вещества с меньшей плотностью (кожа и мясо, текстиль, бумага и т. д.) являются прозрачными. Рентгеновский свет проходит через эти вещества так же, как свет проходит через стекло.

Волны с длиной волны в пределах $10^{-8} - 10^{-11}$ м называются рентгеновскими лучами. Открыт в 1895 году немецким физиком Вильгельмом Рентгеном. Образуется от удара быстро движущихся электронов о металлическую или стеклянную пластину. В те времена большое значение имело изучение газового разряда в условиях малых давлений. Электроны, которые очень быстро проходят через газовую трубку, принято называть катодными лучами. Во время исследования катодных лучей он стал свидетелем того, как затворелась пленка, завернутая в черную бумагу. Когда катодные лучи были опущены в раствор тетрацианоанилина бария, он начал разрушаться. Когда рентген блокировал экран рукой, его глаза смотрели на изображение костей руки и пальца на экране. Тогда рентген понял, что здесь есть невидимые лучи, которые очень поглощают. Рентген назвал эти лучи X-лучами (неизвестными лучами). Длина волны этих лучей, должно быть, даже меньше, чем у ультрафиолетовых лучей, и поэтому реализовал гипотеза, что рентгеновские лучи обладают большей проникающей способностью. Но эта гипотеза нашла свое подтверждение спустя 15 лет после смерти Вильгельма Рентгена.

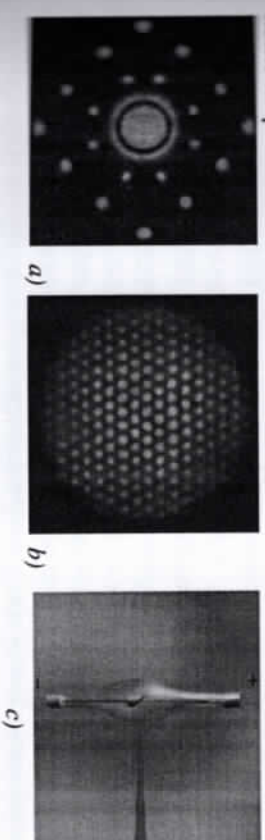


Рисунок 19.1

Рентгеновские лучи ионизируют воздух, воздействуют на фотопластину, но не преломляются и не отклоняются в непрозрачных веществах, плотность которых невелика. При введении этих лучей в электрические и магнитные

Основные труды Вильгельма Рентгена посвящены изучению излучений и их природы в области атомной физики. Его считают великим немецким физиком, который в 1895 году открыл коротковолновые электромагнитные лучи — рентгеновские лучи. Первоначально он назвал этот свет рентгеновскими лучами, но впоследствии невооруженным глазом. Открытие этих лучей оказало необычайно положительное влияние на дальнейшее развитие физики, в том числе привело к открытию радиоактивности. Рентген стал причиной быстрого распространения его открытий на практике в медицине. Конструкция первой рентгеновской трубки, использованной для получения рентгеновского излучения, сохранилась до настоящего времени в основном в неизменном виде. Вильгельм Рентген был удостоен Нобелевской премии в 1901 году за это изобретение.



Вильгельм Рентген
(1845–1923)

поля отклонений не наблюдалось. Рентгеновские лучи используются в медицине для исследования костей и суставов, диагностики болячек.

Чтобы доказать, что рентгеновское излучение является электромагнитной волной, необходимо, чтобы оно проявлялось явлениями дифракции или интерференции, проявляющимися волновое свойство. Однако из-за того, что длина его волны была настолько мала, сделать дифракционную решетку такого размера не представлялось возможным. Первоначально дифракционного явления не наблюдалось при прохождении рентгеновских лучей через очень узкие щели в свинцовой пластине, интерференционная картина на экране также не формировалась. Тогда немецкий физик Макс Лауэ подумал о том, что для этих лучей вполне возможно, что сами тела представляют собой естественные дифракционные решетки. Действительно, поскольку длина волны рентгеновских лучей на порядок меньше атомного размера, а тем более меньше, то сами тела играют для этих лучей роль пространственной дифракционной решетки (рис. 19.1-в). Кроме того, по дифракционной картине, возникающей при пропускании рентгеновских лучей через кристаллы, можно определить расположение и размеры атомов в пространстве (рис. 19.1-б). Рентгеновские лучи генерируются в рентгеновских трубках (рис. 19.1-а).

Электрическое поле оказывает ускоряющее действие на электрон. Кинетическая энергия, достигаемая электроном, равна работе, выполненной электрическим полем при ускорении электрона $W_k = A_e$. От этого мы сможем определить запрашиваемую величину.

$$\frac{m_e g^2}{2} = eU, \rightarrow g = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot U}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \approx 5,93 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U} \text{ [м/с]}.$$

Следовательно, скорость, с которой электрон, прошедший разность потенциалов в рентгеновской трубке, достигает в электрическом поле, равной:

$$g = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \approx 5,93 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U} \text{ [м/с]} \quad (19.1)$$

Из приведенной выше формулы видно, что электрон, прошедший разность потенциалов 1 В, достигает скорости 593 км/с, электрон, прошедший разность потенциалов 4 В, достигает скорости 1186 км/с, а электрон, прошедший разность потенциалов 9 В, достигает скорости 1779 км/с.

Шкала электромагнитных волн:

Все волны, кроме механических, которые мы рассмотрели до сих пор (радиоволны, инфракрасные лучи, белый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и γ-лучи), составляют электромагнитные волны. Электромагнитные волны возникают из-за колебаний заряженной частицы и распространяются электромагнитной волной с частотой, равной частоте колебаний электрического заряда. Кроме того, электромагнитные волны излучаются в различных переходах атома и ядра.

Шкала электромагнитных волн в порядке убывания длины волны или в порядке возрастания частоты приведена в таблице ниже и на рисунке 19.2:

Таблица 19.1

Радиоволны	Инфракрасны е лучи	Белый свет	Ультрафио летовые лучи	Рентгенов ские лучи	Гамма- лучи
$\lambda > 360 \cdot 10^{-6}$	$360 - 0,76 \cdot 10^{-6}$		$400 - 5 \cdot 10^{-9}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-13}$
$\nu < 8,33 \cdot 10^{11}$	$3,95 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{19}$
$8,33 \cdot 10^{11}$	$3,95 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{21}$

Радиоволны образуются в колебательных контурах от колебаний заряда. Инфракрасные лучи распространяются по поверхности любого нагретого объекта кроме того, микроволновые печи также излучают микроволновые инфракрасные лучи. Инфракрасные лучи, белый свет и ультрафиолетовые лучи образуются при различных переходах электронов в атоме элементов, находящихся в начале периодической системы. Кроме того, эти лучи могут образовываться и при переходах электронов во внешних оболочках элементов периодической системы вплоть до ее середины. Рентгеновские лучи образуются при различных переходах электронов в средних и внутренних оболочках элементов периодической системы, начиная с

середины и заканчивая концом. Рентгеновские лучи, в свою очередь, также подразделяются на мягкие, средние и твердые рентгеновские лучи. Мягкие рентгеновские лучи пересекаются твердыми ультрафиолетовыми лучами, а твердые рентгеновские лучи — γ лучами.

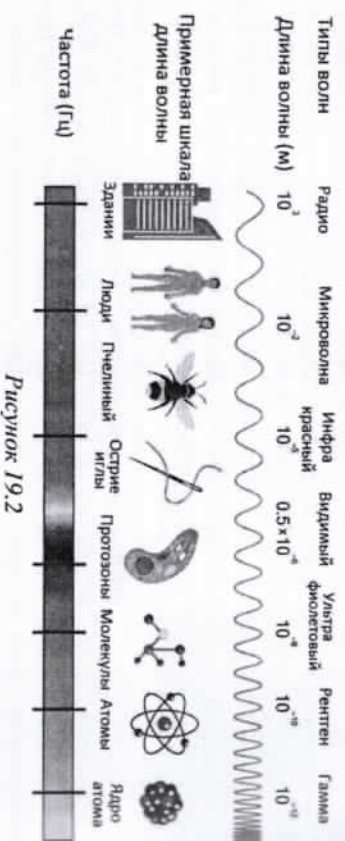


Рисунок 19.2

Наконец, γ -лучи образуются при переходе нуклонов в ядрах всех элементов из возбужденного состояния в основное или при α -и β -распадах.

Энергия рентгеновских лучей $10^3 - 10^5$ раз больше энергии видимых лучей, а энергия γ -лучей $10^6 - 10^7$ раз больше энергии видимых лучей. Поскольку длины волн γ -лучей близки к порядку размеров ядра, их пропускная способность невероятно сильна. Они пропускают даже твердые металлы и металлы так же, как световые лучи проходят через прозрачную среду.

Только толстая свинцовая стена может быть препятствием от γ -лучей.

Электромагнитного излучения диэлектрическая единица

корпускулярно-волновых свойств:

В результате изучения явлений, связанных с оптикой, приходит к следующим выводам:

1) О квантовых свойствах света свидетельствуют такие явления, как распределение энергии в спектре излучения абсолютного черного тела, фотоэффект, эффект Комптона.

2) О волновых свойствах света свидетельствуют такие явления, как интерференция, дифракция, дисперсия, поляризация света.

При объяснении этих двух групп явлений использовались две теории, отражающие природу света, а именно волновая и корпускулярная теории света. В этом случае возникает вопрос "что такое свет на самом деле, невозможно объяснить световые теории не на основе нескольких противоречивых теорий, а на основе более современной теории?"

Свет, проходя через две близко расположенные щели, образует на экране чередующиеся темные и светлые области. Это очень хорошо объясняется волновой теорией. Но это невозможно объяснить на основе квантовой теории. Подобный фотоэффект и его красная граница могут быть объяснены квантовой теорией, невозможно объяснить по волновой теории света.

Следовательно, пока все оптические явления не могут быть объяснены только на основе волновой теории или только на основе корпускулярной теории. Какую бы из этих двух теорий мы ни обсуждали, она преуспевает в объяснении одной группы явлений, то время как другая группа делает ее бессильной в объяснении явлений. Поэтому вместо того, чтобы рассуждать о том, какая из двух применяемых теорий является более современной, предпочтительнее уточнить наши представления о природе света.

Известно, что благодаря влиянию среды в сознании человека формируется картина мира, возникает ряд систем представлений. Например, когда мы говорим "волновое движение", перед нами возникают впечатления, различные волнообразным движением поверхности воды или наблюдением за колебаниями натянутой нити. Но представления, возникающие из-за влияния чувств человека, не всегда могут быть поддержаны микропроцессором. В целом, на основе информации и гипотез, собранных в результате измерений или проверок, формируется идеализированная модель исследуемого предмета или явления. Любая модель является выражением объективной в первом приближении природы. Поэтому волновая модель света оказалась большой помощью в объяснении ряда оптических явлений. Однако в некоторых случаях эта модель приводит к ошибочному представлению. Это не удивительно. Потому что, хотя любая модель не может точно отображать объект во всех случаях. Корпускулярная модель света, подобная этой, тоже не всегда доступна. Это потому, что электромагнитное излучение на самом деле не является ни волной, ни корпускулой.

Большая часть информации о свете поступает не через непосредственные органы чувств человека, а опосредованно через специальные устройства. В то время как свет оказывает волнообразное воздействие на некоторые устройства, он оказывает корпускулярное воздействие на некоторые. Поэтому волновые и корпускулярные свойства света, наблюдаемые в экспериментах, не следует противопоставлять друг другу. Возможно, следует считать, что свет обладает обоими свойствами одновременно. Другими словами, в электромагнитном излучении наблюдается диэлектрическое единство волновых и корпускулярных свойств. Однако эти свойства проявляются в силу определенной закономерности. С уменьшением длины

волны корпускулярные свойства электромагнитного излучения проявляются в большей степени. И наоборот, с увеличением длины волны волновая функция начинает выходить на поверхность.

Поскольку в электромагнитном излучении оба свойства существуют одновременно, конечно связь между ними должна быть. Используя волновое свойство, мы сказали, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды волны. При рассмотрении излучения как потока фотонов интенсивность была равна числу фотонов. Следовательно, вероятность того, что фотон упадет где-то в пространстве, пропорциональна квадрату амплитуды волны.

Следовательно, электромагнитная волна-это реальный объект с физической точки зрения, который не похож ни на волну, ни на корпускулу. Волновые и корпускулярные представления-это модели, используемые для интерпретации явлений, отражающие различные свойства излучения, неразрывно связанные друг с другом, при некоторых условиях природа излучения определяется в основном корпускулярными свойствами, а волновые свойства выражают не столь существенные свойства исследуемого явления. При других условиях волновая природа излучения приобретает все большее значение, определяя основные свойства изучаемого явления. Корпускулярная характеристика излучения в этих случаях помогает выделить вторичные свойства явления.

Вопросы по теме

1. Как генерируются электромагнитные волны?
2. Перечислите электромагнитные волны в порядке увеличения частоты (или уменьшения длины волны).
3. Как генерируются инфракрасные лучи? В каком интервале будут находиться их длины волн? Назовите свойства.
4. Как генерируются ультрафиолетовые лучи? В каком интервале будут находиться их длины волн? Назовите свойства.
5. Как генерируется рентгеновское излучение? В каком интервале будут находиться их длины волн? Назовите свойства.
6. Как образуются γ-лучи? В каком интервале будут находиться их длины волн? Назовите свойства.

1. Когда фотокатод освещается монохроматическим светом, из него выбиваются электроны. Как изменится максимальная кинетическая энергия излучаемых электронов при уменьшении частоты света в 2 раза?

- A) не изменяется B) уменьшается менее чем в 2 раза
C) уменьшается в 2 раза D) уменьшается более чем в 2 раза

В) увеличивается в 2 раза.

Дано: Решение:

$$\frac{v_2}{v_1} = 2$$

Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта согласно закону сохранения энергии

$$\frac{h\nu_2}{h\nu_1} = 2 \quad h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

Кинетическая энергия электронов $E = h\nu - A$. Это означает, что при уменьшении частоты света в 2 раза кинетическая энергия электронов уменьшается более чем в 2 раза

Ответ: E)



ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ IV

Лабораторная работа: № 7.

Исследование явления фотоэффекта

Цель работы: Изучение явления внешнего фотоэффекта. Исследование определения мощности в потребителях, подключенных к фотоземлетру.

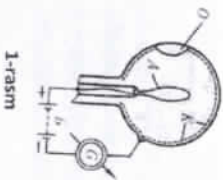
Необходимые приборы и оборудование: лабораторный универсальный источник тока, источник света, миллиамперметр, вольтметр, светофильтры, потребители (светодиод, рагакі dvigatel' двигатель, лампочка) и соединительные провода.

Лабораторный универсальный источник тока	Источник света	Миллиамперметр	Вольтметр
Светофильтры	Потребители	Соединительные провода	

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Явление отрыва электронов от вещества под действием света называется внешним фотоэффектом. Это явление было открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и изучён 1890 году русским физиком А. Столетовым. На основе проведенных опытов А. Столетов перечислил, что для фотоэффекта существуют следующие закономерности:

1. Количество электронов, выделяющихся из вещества, зависит от падающего на него светового потока.
2. Энергия электронов, выделяющихся из вещества, пропорциональна частоте света, падающего на вещество.
3. Количество фотоэлектронов, отделяющихся от вещества, не зависит от частоты света.
4. Энергия электронов, выделяющихся из вещества, не зависит от светового потока.



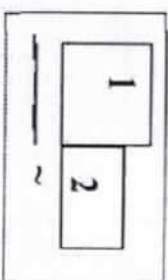
Устройство, работающее на основе фотоэффекта, называется фотоэлементом. Фотоэлемент имеет следующее строение: светочувствительная поверхность стеклянного баллона, воздух из которого высасывается, покрыта тонким слоем чувствительного к свету вещества. Этот слой обычно состоит из различных соединений щелочных металлов (чаще всего из сурьмяно-цезиевого сплава) и служит катодом. Внутри баллона оставляют небольшое прозрачное Д-окно для прохождения света (рис. 1). Металлическое кольцо, установленное в центре баллона, действует как анод. Из колец С и А выводятся соединительные провода для подключения к источнику тока.

Внутренним фотоэффектом называется, если электрон, отделившийся от атома, остается внутри вещества в виде свободных электронов. Внутренний фотоэффект наблюдается в основном в полупроводниках. Явление внутреннего фотоэффекта наблюдал русский физик А. Иоффе. Если в р-полупроводнике, состоящего из кристаллов с дырочной р-проводимостью и электронами n-типа, отправить луч света на р-область кристалла, который имеет поле перехода р-п, то под действием луча света в нем образуются свободные электроны и дырочная пара. Образующаяся под действием света пара свободных зарядов в результате диффузии достигает р-п-переходного поля, а под действием поля р-п-переходного поля распадается на две части, т. е. в р-поле накапливает дырки, в п-поле-электроны. Если поля р и п замкнуть, соединив их внешним сопротивлением, то по цепи начнет протекать ток. Этот ток называется фототок (I_{ph}). При внешнем сопротивлении, равном

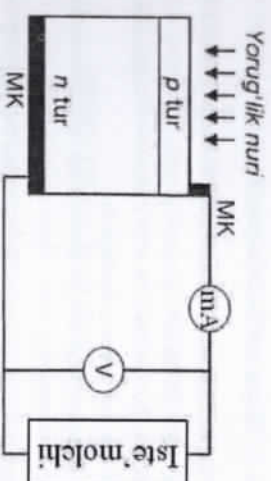
нулю, фототок в цепи достигает наибольшего значения, такое значение тока называется током короткого замыкания фотоэлемента (I_{ph}). Фототок равен нулю, когда внешнее сопротивление бесконечно велико, и в этом случае падение напряжения на внешнем сопротивлении достигает наибольшего значения. Это значение напряжения называется напряжением разомкнутой цепи ($U_{обр}$).

СТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТРОЙСТВА

Для изучения принципа работы полупроводникового фотоэлемента и расчета потребляемой мощности потребителя, подключенного к фотоэлементу, собирается электрическая цепь, приведенная на чертеже 1.



Для измерения тока короткого замыкания контакт, выходящий из поля р (области, в которую попадает луч света) фотоэлемента, подключают к положительному полюсу р миллиампер-метра, а контакт, выходящий из поля п фотоэлемента, с помощью соединительного кабеля подключают к отрицательному полюсу миллиампер-метра. Миллиамперметр подключается к специальной сети $\pm 5,5$ В/8В, питающей потребители лабораторного манометра универсального питания.



1-chizma

Миллиамперметр приводится в положение 1. При подключении лабораторной к сети постоянного тока универсального питания проверяется рабочее состояние миллиамперметра. Затем на фотоэлемент подается луч света и измеряется ток короткого замыкания. Для измерения напряжения разомкнутой цепи положительный полюс вольтметра соединяют с контактом р поля фотоэлемента (+), а отрицательный полюс вольтметра-с контактом п поля фотоэлемента (-). Вольтметр подключается к специальной сети 8 В/1В, питающей потребители лабораторного манометра универсального питания. Проверяется рабочее состояние вольтметра, затем на фотоэлемент подается

луч света и измеряется напряжение разомкнутой цепи. Для определения потребляемой потребителем электрической мощности, подключенной к фотозлементу, измеряя ток, проходящий через потребитель, и напряжение на его концах, определяется по следующему выражению:

$$P = I \cdot U \quad (1)$$

Общий вид устройства, собранного на основе чертежа 1, представлен на рисунке 1

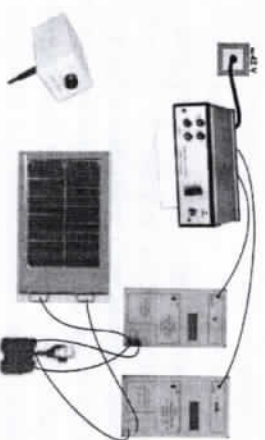


Рисунок-1

Порядок выполнения работ

1. К зажимам фотозлемента присоединяются соответствующие полюсы миллиамперметра.
2. На поверхность фотозлемента вертикально падает луч света.
3. Измеряется ток короткого замыкания.
4. К зажимам фотозлемента подключаются соответствующие полюса вольтметра.
5. На поверхность фотозлемента вертикально падает луч света.
6. Измеряется напряжение разомкнутой цепи.
7. Полностью собирается цепь, представленная на чертеже 1.
8. Потребляемая потребителем мощность по показаниям вольтметра и миллиамперметра, освещающего поверхность фотозлемента, рассчитывается по выражению (1).
9. Эксперимент повторяется, помещая на поверхность фотозлемента один из светофильтров.
10. На основании результатов эксперимента заполняется следующая таблица.

№	Ток короткого замыкания и (мА)	Напряжение разомкнутой цепи (В)	Сила тока, проходящего через потребителя (мА)	Напряжение на концах потребителя и (В)	Потребляемая мощность (мВт)
1					
2					
3					

Контрольные вопросы

1. Что называется фотоэффектным явлением? Какие его виды существуют?
2. Что такое фотозлемент и для каких целей он используется?
3. Какими учеными были изучены законы фотоэффекта?
4. Напишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и объясните его.

Лабораторная работа: № 8.

Принцип работы фотозлементного реле.

Цель работы: изучить строение и работу фотозлементного реле.

Необходимые приборы и оборудование: лабораторный универсальный источник тока, фоторезистор (фоторезистор), омметр, световой манометр и соединительные провода.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Фотосопротивления (фоторезистор) - это устройство, которое работает на основе явления внутреннего фотоэффекта. Устройство, изменяющее свое сопротивление под воздействием света, называется фоторезистором. Когда на фоторезистор не падает свет, его сопротивление становится очень большим. При воздействии на него света его сопротивление уменьшается, а электропроводность увеличивается. При падении луча света на поверхность фоторезистора луч света частично поглощается атомами кристаллической решетки. В результате световая энергия передается валентным электронам в атоме. Кинетической энергии валентных электронов много в атоме увеличивается, преодолевает гравитационное притяжение и переходит в свободное состояние. А на месте электрона образуется яма. Этот процесс приводит к увеличению концентрации свободных электронов в полупроводнике и снижению электрического сопротивления проводника.

Фоторезистор используется в звуковом кино, на телевидении и в качестве сигнализатора в автоматизированных устройствах.

СТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТРОЙСТВА

1-Рисунку представлен схематическим изображением прибора исследования зависимости электрического сопротивления полупроводникового фоторезистора от освещенности. Прибор состоит из полупроводникового фоторезистора, лабораторного источника универсального тока, светового источника и омметра. Устанавливается на поверхность фоторезистора таким образом, чтобы луч света падал вертикально. Для определения сопротивления фоторезистора параллельно к нему подключают омметр. Изменяя расстояние между фоторезистором и источником света, измеряется сопротивление фоторезистора.

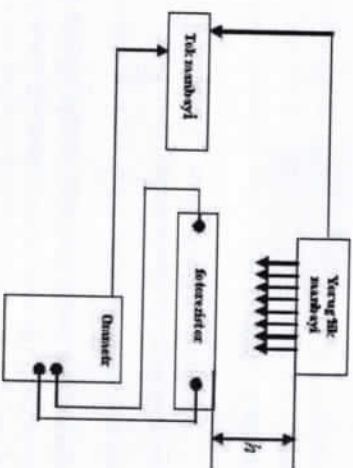


Рисунок-1

Порядок выполнения работ:

1. На основании рисунка 1 составляется электрическая схема.
2. Источник света устанавливается вертикально на поверхности фоторезистора
3. Расстояние между источником света и поверхностью фоторезистора измеряется линейкой, $l_1 = \dots, \text{см}$
4. Свет падает на поверхность фоторезистора, и его сопротивление измеряется омметром, $R_1 = \dots, \Omega$.
5. Источник света приближают к поверхности фоторезистора и измеряют расстояние между ними, $l_2 = \dots, \text{см}$
6. С помощью омметра измеряется сопротивление фоторезистора, $R_2 = \dots, \Omega$.
7. Для разных расстояний между фоторезистором и источником света эксперимент повторяется.
8. На основании полученных результатов заполняется следующая таблица.

№	1	2	3	4
$l, \text{см}$				
R, Ω				

Таблица-1

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы фотозлемментного реле.
 2. Какие виды фотозлемента вы знаете?
- Приведите примеры применения фотозлемментного реле.

ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ IV

1. С. И. Вавилов исследовал какое из перечисленных явлений?
 - А) тепловое излучение
 - В) фотолюминесценция
 - С) катодное люминесценция
 - Д) химилюминесценция
 - Е) электрическая люминесценция
2. Какое из перечисленных ниже излучений относится к тепловому излучению?
 - А) излучение экрана телевизора
 - В) полярное сияние
 - С) излучение лампы дневного света
 - Д) солнечное излучение
 - Е) рентгеновское излучение
3. Какое из перечисленных ниже тел не излучает электромагнитную волну?
 - А) телевизор
 - В) электр чайник
 - С) металлический стол
 - Д) деревянный стол
 - Е) НПО
4. В каком состоянии вещества излучают свет с линейным спектром?
 - А) во всех случаях
 - В) ни в коем случае
 - С) в кристаллическом состоянии
 - Д) в жидком состоянии
 - Е) в разреженном атомарном газообразном состоянии.
5. В каком состоянии вещества наблюдается полосатый спектр?
 - А) в состоянии молекулярного газа
 - В) в жидком состоянии
 - С) в твердом и жидком состояниях
 - Д) в твердом состоянии
 - Е) в атомарном газообразном состоянии
6. Какова кинетическая энергия электронов, достигающих анода рентгеновской трубки с анодным напряжением 100 кВ (эВ)? Начальная скорость электронов равна нулю.

- А) 10^2 В) 10^3 С) 10^4 Д) 10^5 Е) 0
7. Сколько Джоулей кинетической энергии электронов достигает анода рентгеновской трубки при анодном напряжении 50 кВ?
А) $5 \cdot 10^{-15}$ В) $5 \cdot 10^{-14}$ С) $2,5 \cdot 10^{-15}$ Д) $5 \cdot 10^{-14}$ Е) $8 \cdot 10^{-15}$
8. От какого из перечисленных явлений зависит, что на коротковолновой стороне спектра рентгеновского излучения имеется резкий предел окончания?
А) на количество электронов в рентгеновской трубке
В) на вещество катода С) на вещество анода
Д) на напряжение между анодом и катодом
Е) на ток между анодом и катодом
9. Какое из перечисленных излучений имеет наименьшую длину волны?
А) ультрафиолетовые лучи В) радиоволны С) видимый свет.
Д) рентгеновские лучи Е) инфракрасные лучи
10. Какой из перечисленных лучей наблюдается явление дифракция?
1) видимый свет; 2) радиоволны; 3) рентгеновские лучи; 4) инфракрасные лучи?
А) 1 В) 1, 2 С) 1, 2, 3 Д) 1, 3, 4 Е) 1, 2, 3, 4
12. Какое значения имеет красная граница фотоэффекта для электрона (м), работа выхода которого равна $3 \cdot 10^{-19}$ Дж? $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
А) $6,6 \cdot 10^{-7}$ В) $6,6 \cdot 10^{-8}$ С) $3 \cdot 10^{-7}$ Д) $6,6 \cdot 10^{-6}$ Е) $3,3 \cdot 10^{-6}$
14. При освещении фотоэлементного катода монохроматическим светом с частотой ν_1 наибольшая кинетическая энергия фотоэлектронов была E_1 , а при освещении светом с частотой $\nu_2 = 3\nu_1$, E_2 . Какое зависимость существует между E_1 и E_2 ?
А) $E_2 > 3E_1$ В) $E_2 > 3E_1$ С) $E_2 > \sqrt{3}E_1$
Д) $E_2 = 3E_1$ Е) $E_2 < 3E_1$
15. Какова максимальная кинетическая энергия электронов (эВ), когда фотон с энергией 5 эВ падает в металл с работой выхода электрона 3 эВ?
А) 0,6 В) 2 С) 3 Д) 5 Е) 8
16. На цезиевый катод падает оранжевый свет с длиной волны 600 нм. Работа выхода электрона из цезия равна 1,8 эВ. При каких значениях запирающего потенциала фототок останавливается (В)? $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ
А) 2,5 В) 1,8 С) 0,6 Д) 0,3 Е) 0,25

17. На поверхность вольфрама падает свет с длиной волны 220 нм. Какова максимальная скорость (км/с) вылетающих электронов, если работа выхода для вольфрама составляет 4,50 эВ? ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл)
А) 430 В) 6150 С) 3400 Д) 4300 Е) 630
18. При освещении стронция лучом света с длиной волны в скольких нм максимальная кинетическая энергия вылетающих из него электронов составит $1,8 \cdot 10^{-19}$ Дж? Красная граница фотоэффекта для стронция составляет 550 нм.
А) 550 В) 250 С) 367 Д) 130 Е) 734
19. Сколько фотонов будет иметь энергия 1 мДж в излучении с длиной волны 520 нм в вакууме? Постоянная Планка $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
А) $78 \cdot 10^{14}$ В) $52 \cdot 10^{14}$ С) $13 \cdot 10^{14}$ Д) $65 \cdot 10^{14}$ Е) $26 \cdot 10^{14}$
20. Как изменится энергия фотона, если длина волны света увеличится в 2 раза?
А) уменьшается в 2 раза В) увеличивается в 2 раза В) не изменяется
Г) увеличивается в 4 раза Д) уменьшается в 4 раза
21. Определите массу фотона с длиной волны 220 нм (kg), $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
А) $3 \cdot 10^{-36}$ В) $1,5 \cdot 10^{-36}$ С) $1,6 \cdot 10^{-36}$ Д) $1 \cdot 10^{-35}$ Е) $3,3 \cdot 10^{-35}$
22. При электрон-позитронном аннигиляции образуются два идентичных кванта. Найдите длину волны испускаемого излучения, кинетическая энергия до реакции не учитывайте. $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.
А) 240 В) 2,4 С) 24 Д) 0,24 Е) 0,024
23. Летящему электрону соответствует волна длиной 0,18 нм. Каков импульс электрона ($kg \cdot m/s$)?
А) $3,1 \cdot 10^{-25}$ В) $11,3 \cdot 10^{-25}$ С) $21,6 \cdot 10^{-25}$ Д) $36,8 \cdot 10^{-25}$ Е) 119
24. Какова длина волны (нм) ультрафиолетового излучения с импульсом $1 \cdot 10^{-22}$ Н·с? $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
А) 220 В) 300 С) 410 Д) 555 Е) 760
25. Какова будет длина волны (нм) исходящего света, если из источника света мощностью 450 Вт каждую секунду вылетает 10^{21} фотон? $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
А) 150 В) 330 С) 442 Д) 550 Е) 663

26. Источник света мощностью 50 Вт испускает в среднем $2,5 \cdot 10^{20}$ фотонов каждые 2 с . Какова средняя длина волны излучения (нм).
 А) $0,25$ В) $0,5$ С) $0,6$ Д) 1 Е) $1,25$

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ IV

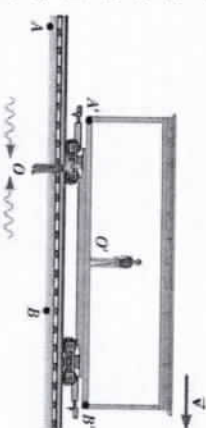
1. Какое напряжение ($\kappa В$) приложено к трубке, если минимальная длина волны рентгеновского излучения, излучаемого рентгеновской трубкой, составляет $3,1 \cdot 10^{-11} \text{ м}$? $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
2. На рентгеновскую трубку подается напряжение 30 кВ . Найти коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра (нм). $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
3. С какой скоростью электроны достигают анода рентгеновской трубки, работающей при напряжении 50 кВ (Мм/с)?
4. Найти красную границу фотоэффекта для данного вещества ($\kappa \text{Гн}$), зная, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вылетающих из вещества под действием света с частотой $1,5 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$, равна $3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
5. Длинноволновый (красный) предел фотоэффекта для серебра составляет $0,29 \text{ мкм}$. Определите работа выхода (эВ).
6. Из вещества с красной границей фотоэффекта 10^{15} Гн под действием света частотой $1,5 \cdot 10^{15} \text{ Гн}$ вылетают фотоэлектроны. Какова их максимальная кинетическая энергия (Дж)?
7. Если частота света, падающего на вещество, равна $5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, а максимальная кинетическая энергия испускаемых фотоэлектронов равна $1,7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$? $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ Какова работа выхода фотоэлектронов из этого вещества (Дж)?
8. Какова будет скорость (м/с) фотоэлектрона, если частота лучей, падающих на серебро, равна $3 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$? $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $A = 4,3 \text{ эВ}$.
9. Свет с какой длиной волны испускает фотоэлектрон из платины со скоростью $1,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}$? ($A = 5,3 \text{ эВ}$).
10. С какой частотой (Гц) должен освещаться, чтобы максимальная кинетическая энергия фотонов, испускаемых литием, составляла $1,74 \text{ эВ}$? $A = 2,4 \text{ эВ}$.
11. Сколько $M \text{эВ}$ энергии необходимо, чтобы масса фотона была равна массе покоя электрона? $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $m = 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

12. На сколько эВ изменится энергия атома при поглощении атомом кванта излучения с частотой $3,2 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$? $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
13. Какова энергия ионизации атомов, если лучи с частотой $3,4 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ являются лучами наименьшей частоты, способными ионизировать атомы индия? $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
14. Какой количество квант красного излучения с длиной волны 662 нм будет иметь массу 1 г ? $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
15. Какова соответствующая длина волны (нм), если импульс фотона равен $3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$? $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
16. Мощность лазерного светового потока, работающего на длине волны $6,62 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, составляет $0,1 \text{ Вт}$. Сколько фотонов излучает лазер за 3 с ? $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
17. Какова температура печи, если через отверстие размером $6,1 \text{ см}^2$ в печи каждую секунду излучается энергия в $8,28 \text{ кДж}$? Пусть излучение считается близким к абсолютного черного тела.
18. Сколько энергии излучает Солнце за 1 минуту? Пусть солнечное излучение считается близким к абсолютного черного тела. Примите, что температура поверхности Солнца составляет 5800 К .
19. Сколько энергии излучается в 1 с с поверхности затвердевшего 1 м^2 свинца? Температура плавления свинца 327°С . При данной температуре свинца способностью свинца равна $0,6$.
20. Абсолютного черного тела мощность излучения 34 кВт . Определить его температуру, если поверхность тела равна $0,6 \text{ м}^2$.
21. Найдите, сколько энергии излучает абсолютное черное тело в 1 с на 1 см^2 поверхности, если длина волны, соответствующая максимуму излучающей способности, составляет 484 нм .
22. Мощность излучения абсолютного черного тела 17 Вт . Определить величину светящейся поверхности тела, если длина волны, соответствующая максимуму светящейся способности, равна 700 нм .
23. Найти мощность излучения абсолютного черного шара радиусом 10 см , находящегося в помещении с температурой 20°С .
24. Температура абсолютного черного тела была увеличена с 727°С до 1727°С . Во сколько раз увеличивается энергия, излучаемая этим телом?

25. Температура абсолютного черного тела составляет 127°C . После повышения температуры суммарная мощность излучения увеличивается в 3 раза. На сколько повысилась температура при этом?
26. Рентгеновские лучи с длиной волны $56,3\text{ нм}$ рассеиваются на графитовой доске. Найти длину волны рентгеновских лучей, рассеянных под углом 120° к исходному направлению.
27. γ -лучи с длиной волны $2,7\text{ нм}$ рассеиваются за счет эффекта Комптона. Во сколько раз длина волны излучения, рассеянного под углом 180° к исходному направлению, больше длины волны падающего излучения?

● ГЛАВА V. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В этом разделе рассматриваются преобразование при переходе с одной ИСС на другую, а также результаты, полученные в результате преобразования, как изменяется координатное время и механические величины. Преобразование бывает двух типов, первый из которых представляет собой связь между координатной и временем для низких скоростей, а второй — для высоких. Далее объясняются принципы относительности для малых скоростей и больших скоростей, зависимость механических величин от скоростей, а также то, что классическая механика является частным случаем релятивистской механики, применимой для малых скоростей.



§ 20. ПРОВАЛ ГИПОТЕЗЫ ЭФИРА. ПОСЛЕДСТВИЯ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОРЕНЦА

Провал гипотезы эфира:

Скорость движения ИСО, согласно преобразование Галилея, не может быть определена никакими механическими экспериментами. Поэтому возник вопрос, нельзя ли это определить с помощью оптических явлений. В конце XIX века А. Майкельсон и Э. Морли проводили эксперименты.

Они рассуждали следующим образом: если рассматривать эфир Вселенной как относительно состояния покоя по отношению к Солнцу, то он одновременно дает и движение Земли вокруг Солнца относительно эфира. Поскольку Земля совершает годовое круговое движение вокруг Солнца, скорость распространения светового луча на поверхности Земли должна быть различной. Скорости распространения света по орбите Земли и в направлении, перпендикулярном орбите, должны быть разными, и на основе этой разницы можно определить скорость движения Земли относительно эфира Вселенной. Майкельсон и Морли сравнивали скорость распространения света в этих двух направлениях по результату интерференции. Опыт повторялся много раз и каждый раз давал один и тот же результат. Эксперименты повторялись в разное время года (весна, лето, осень, зима), в разное время суток (утро, полдень, вечер и ночь), в разных направлениях (образуя разные углы с орбитой Земли). Но каждый раз получал один и тот же ответ $c \approx 3 \cdot 10^8\text{ м/с}$.

Альберт Эйнштейн родился в Цюрихе в 1879 году. Он великий гениальный физик двадцатого века. Эйнштейн создал учение о пространстве и времени. В 1905 году он основал специальную теорию относительности, а в 1916 году-общую теорию относительности. Он выдвинул идею, что свет излучается, рассредоточен и поддается порционному-порционно. Работы Эйнштейна по теории броуновского движения привели к мировой победе молекулярно-кинетической теории строения вещества. Он утверждает, что идея де Бройля о волновой природе частицы верна, только если наблюдается дифракция электронов. Эйнштейн применяет закон сохранения энергии к фотозонному и пишет собственное уравнение. В 1921 году ему присуждают Нобелевскую премию за великие фотозонные работы. Он также провел много научных работ в области физики ядра и элементарных частиц. В частности, он считается одним из основателей атомной бомбы. Эйнштейн умер в США в 1955 году.



Альберт Эйнштейн
(1879-1955)

Следовательно, движение Земли никак не влияет на распространение светового луча. Не было зарегистрировано ни одного эфирного ветра. Это можно понять, как если бы пассажир, идущий со скоростью 120 km/h , высунул голову из окна машины, но не заметил никакого ветра. Кроме того, ряд экспериментов по определению скорости эфира и света провели такие ученые, как Лоренц, Герц, Физо, Брэдли, Рил. По результатам эксперимента не было выявлено ни одного эфирного ветра. Гипотеза эфира была отвергнута учеными.

Постулаты теории относительности:

Основу релятивистской механики составляет специальная теория относительности (СТО), созданная А.Эйнштейном в 1905 году, представляет собой физическую теорию пространства и времени, в основном для слабых гравитационных полей. Эта теория Ньютона это потребовало пересмотра всех представлений о механике, особенно представлений о пространстве и времени. СТО изучает законы физического явления только на ИСО.

В основе специальной теории относительности А.Эйнштейна лежат два следующих постулата (принципа): 1) принцип относительности; 2) принцип неизменности скорости света.

1-постулат: все процессы в природе происходят одинаково в любой инерциальной системе отсчета.

Это означает, что законы физики (уравнения, описывающие закон) имеют одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета. Скорость не влияет на законы (формулы) протекания физических процессов. Например, для неподвижной ИСО скорость определяется по формулам $\rho = \frac{m}{V}$, $\rho = \frac{F}{d + f}$, плотность,

$\rho = \frac{m}{V}$, сила тока $I = \frac{Q}{t}$, фокусное расстояние $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$, тогда как для

движущейся ИСО скорость определяется по формулам $\rho = \frac{m}{V}$, плотность

$\rho = \frac{m}{V}$, сила тока $I = \frac{Q}{t}$, фокусное расстояние $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$. Внешний вид

формулы, определяющей величину, не меняется. Другими словами, законы инварианты ИСО по отношению к законам. Галилей утверждал, что этот принцип применим только к механическим явлениям, а Эйнштейн утверждал, что этот принцип применим ко всем явлениям природы.

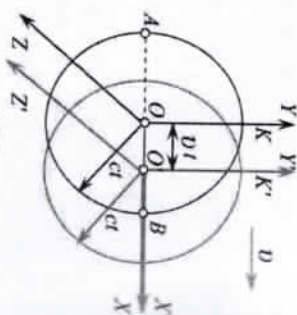
2-постулат: скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета. Она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости света, с которой движется приемник.

Эти два постулата нашли свое подтверждение в многочисленных проведенных экспериментах. Например, эксперименты Физо показали, что скорость света не зависит от скорости среды, в которой распространяется свет, в то время как эксперименты Майкельсона и Морли показали, что скорость света не зависит от скорости его источника. Изучение движения двойной звезды, вращающейся с большой скоростью вокруг центра масс, и результаты других экспериментов доказали, что значение скорости света не зависит ни от скорости источника света, ни от скорости наблюдателя. Также скорость распространения света в вакууме является самой большой из скоростей в природе, величина которой равна $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Скорость передачи любого эффекта не может быть больше скорости света в пространстве.

Противоречие постулатов Эйнштейна с классической механикой:

Постулаты теории относительности полностью противоречат свойствам пространства и времени, принятым в классической (Ньютоновской) механике и отраженным в преобразованиях Галилея. По законам классической механики течение времени одинаково на всех ИСО, т. е. абсолютная времени и ритм прохождения неизменны. Кроме того, если на одной ИСО одновременно происходят два события, то на всех других ИСО эти два события регистрируются одновременно. Однако на больших скоростях этого не происходит. Таких разногласий между классической механикой и релятивистской механикой встречается очень много. Вот объяснение одного из таких разногласий.

Пусть в момент начала отсчета времени ($t=t'=0$) в обеих системах K и K' происходит мгновенная вспышка света в точке O в тот момент, когда их координатные начала совпадают с точками O и O' . Свет распространяется в вакууме со скоростью c , в какой-то момент времени t лежит в системе отсчета K в точке O , в точках на поверхности сферы с радиусом ct .



20.1-газ

Можно считать, что вспышка света в системе K' произошла в точке O' в момент времени $t'=0$. Поэтому в основе постулатов специальной теории относительности лежат точки сферы с радиусом ct , как в системе отсчета K' в момент времени $t'=t$, но радиус этой сферы лежит не в точке O , а в точке O' , находящейся на vt расстоянии от нее. В какой точке на самом деле находится центр светового фронта?

Таким образом, совмещение постулатов специальной теории относительности с классическими представлениями об абсолютном времени, проходящем одинаково во всех системах, приводит к нелогичности, т. е. вспышка света должна одновременно достигать точек, принадлежащих двум разным сферам. Пришло время отказаться от концепции абсолютного времени. Это обусловило необходимость пересмотра законов классической механики, основанных на классических представлениях, и содержащейся в ней концепции пространства и времени. Первым на эту работу обратили внимание голландский ученый Х. Лоренц.

Преобразования Лоренца:

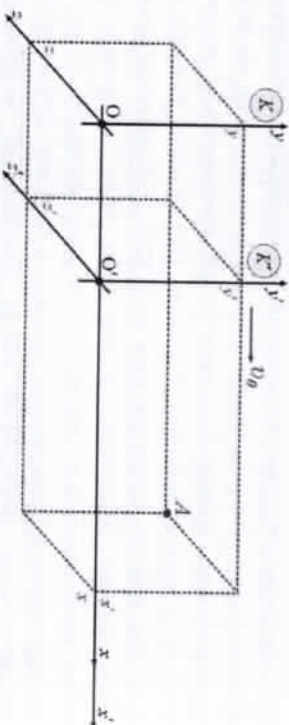


Рисунок 20.2

В преобразованиях Лоренца при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой x, y, z вместе с координатами время рассматривается как переменная величина. Если на ИСС, связанной с Землей, пространство и время обозначаются x, y, z, t , то на другой ИСС, относительно которой действует

ускорение, пространство и время обозначаются x', y', z', t' . Это означает, что времена в ИСС не будут одинаковыми, то есть будет $t \neq t'$. Лоренц создал свои собственные преобразования, внося поправки в подстановки Галилея.

Пусть K и K' даны инерциальные системы отсчета. Если система K' движется относительно системы K со скоростью v_0 , то положения произвольной точки A в системах K и K' и преобразования Лоренца между временами, проходящими в системах, будут следующими (рис. 20.2):

$$\begin{aligned} K' \rightarrow K \quad & \begin{cases} x = \frac{x' + v_0 t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, & y = y', & z = z', & t = \frac{t' + \frac{v_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \end{cases} \\ K \rightarrow K' \quad & \begin{cases} x' = \frac{x - v_0 t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}, & y' = y, & z' = z, & t' = \frac{t - \frac{v_0}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}} \end{cases} \end{aligned} \quad (20.1)$$

Доказательство: Лоренц внес γ -поправку в преобразование Галилея. Координаты при переходе с ИСС на 2-е по ней будет следующий выражения

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + v_0 \cdot t') \\ x' = \gamma(x - v_0 \cdot t) \end{cases}$$

Умножив уравнения в системе друг на друга, получаем

$$x x' = \gamma^2 (x' + v_0 \cdot t') (x - v_0 \cdot t)$$

Если учесть $\begin{cases} x = ct \\ x' = ct' \end{cases}$, то получается

$$c^2 t t' = \gamma^2 (ct' + v_0 t') (ct - v_0 t) \rightarrow c^2 t t' = \gamma^2 (c^2 - v_0^2) t t'$$

Из этого получаем следующие выражения

$$\gamma = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Однако, согласно преобразованиям Лоренца, вид координаты при переходе от системы K к системе K'

$$x = \gamma(x' + v_0 \cdot t') = \frac{x' + v_0 \cdot t'}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

при переходе от системы K' к системе K получаем выражение

$$x' = \gamma(x - v_0 \cdot t) = \frac{x - v_0 \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}}}$$

Теперь давайте продолжим формулу, связанную с координатами, введя обозначение как $\beta = \frac{v_0}{c}$. В ней мы находим формулу, выражающую связь между временами при переходе от систем счисления друг к другу.

$$x = \frac{x' + \beta_0 t'}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left(x' + \beta_0 t' \right) \rightarrow x(-\beta^2) = x - \beta_0 t + \beta_0^2 (1 - \beta^2) \rightarrow$$

$$\rightarrow x - x \beta^2 = x - \beta_0 t + \beta_0 t' \rightarrow t' = \frac{\beta_0 - x \beta^2}{\beta_0 \sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{t - \frac{x \beta^2}{\beta_0}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Таким образом, связь между временами, когда переходит из системы К в систему К' имеет вид

$$t' = \frac{t - \frac{\beta_0}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{\beta_0^2}{c^2}}}$$

Если переходит из системы К' в систему К, это связь

$$t = \frac{t' + \frac{\beta_0}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{\beta_0^2}{c^2}}}$$

принимает вид. Связь между двумя другими координатами при переходе из одной системы координат в другую имеет вид

$$\begin{cases} y = y', & z = z' \\ y' = y, & z' = z \end{cases}$$

Потому что движение на этих осях не происходит. Формулы Лоренца были полностью доказаны.

Поправка γ , введенная Лоренцом в преобразование Галилея, позже стала называться фактором Лоренца. В наших следующих темах очень удобно использовать фактор Лоренца для краткого определения замечательных результатов, полученных из подстановок Лоренца.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\beta_0^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (20.2)$$

При релятивистских скоростях формулы для определения времени, длины, массы, импульса, кинетической энергии и других величин всегда выглядят иначе, чем мы знаем. При этом они превращаются в формулы, зависящие от фактора Лоренца. Из приведенной выше формулы также видно, что значение коэффициента Лоренца зависит только от скорости. В таблице 20.1 приведены образцы его значений, зависящих от скорости.

таблица 20.1

№	$\beta = v/c$	γ
1	0	1
2	0,001	1,000 000 5
3	0,01	1,000 05
4	0,1	1,005
5	0,2	1,021
6	0,3	1,048
7	0,4	1,091
8	0,5	1,155
9	0,6	1,25
10	0,7	1,4
11	0,8	1,667
12	0,9	2,294
13	0,92	2,552
14	0,94	2,931
15	0,96	3,571
16	0,98	5,025
17	0,99	7,089
18	0,995	10,05
19	0,999	22,37
20	0,9999	70,71

Преобразование, с которыми мы познакомились выше, принадлежат не латскому ученому Д. Лоренцу (1829 - 1891), а голландский ученым Х. Лоренцам выведен (1853-1928) в 1904 году.

Таким образом, как видно из приведенных выше формул, в этих подстановках оказывается, что пространство и время не являются абсолютными, как в подстановках Галилея, и они не существуют без подстановок. Пространство зависит от времени, а время зависит от пространства. Другими словами, на координату влияет время, и наоборот, на ритм прохождения времени влияют координата и скорость.

Формулировки Лоренца внесли кардинальные изменения в историю развития физики и вызвали огромный обсуждение среди ученых. Лоренц требовал отказаться от своих классических представлений, к которым мы привыкли в повседневной жизни, и сформировать новые взгляды на пространство-время, чтобы представить свои преобразование.

Вопросы по теме

1. Что такое эфир Векенной? Кто выдвинул гипотезу эфира и чем она закончилась?
2. Сформулируйте постулаты теории относительности. Когда кем были введены эти постулаты?
3. Какой эксперимент послужил причиной введения постулатов Эйнштейна?

4. Каковы будут преобразования Лоренца при переходе от системы K' к системе K ?
5. Каковы будут преобразования Лоренца при переходе от системы K к системе K' ?
6. Почему Лоренс пересмотрел вопросы простируемости и времени?
7. Что такое фактор Лоренца? Приведите примеры зависимости скорости от ее значений.

Решение задачи:

1. При значениях коэффициента Лоренца, равном 3, 5, 10, определите, какова была скорость системы счисления K' .

Дано:

$$\gamma_1 = 3 \\ \gamma_2 = 5 \\ \gamma_3 = 10$$

Решение
Определим искомую величину по формуле коэффициента Лоренца.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} \rightarrow \frac{1}{\gamma^2} = 1 - (g/c)^2 \rightarrow (g/c)^2 = \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \rightarrow g = \frac{\sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma} c$$

Теперь определим значения запрошенной скорости для различных значений фактора Лоренца.

$$g_1 = \frac{\sqrt{\gamma_1^2 - 1}}{\gamma_1} c = \frac{\sqrt{3^2 - 1}}{3} c = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \approx 0,9428c;$$

$$g_2 = \frac{\sqrt{\gamma_2^2 - 1}}{\gamma_2} c = \frac{\sqrt{5^2 - 1}}{5} c = \frac{2\sqrt{6}}{5} c \approx 0,9798c;$$

$$g_3 = \frac{\sqrt{\gamma_3^2 - 1}}{\gamma_3} c = \frac{\sqrt{10^2 - 1}}{10} c = \frac{\sqrt{99}}{10} c \approx 0,995c$$

Ответ: $g_1 \approx 0,9428c$; $g_2 \approx 0,9798c$; $g_3 \approx 0,995c$



§ 21. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОРЕНЦА. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИ И ДЛИНЫ

Синхронизация часов:

Прежде чем мы углубимся в то, какие результаты могут быть получены из измерений Лоренца, нам нужно будет убедиться, что часы ходят точно одинаково, то есть часы работают синхронно. Задача синхронизации часов-дедю более серьезное. Если мы настроим наши часы на 12¹⁵ после того, как услышим по радио, что прошло 12-15 минут, наши часы не будут синхронизироваться с часами, сказанными по радио, а будут немного отставать. Когда мы исправляем наши часы, мы должны учитывать, что

звуковые волны от радио до нас приходят течение времени $\Delta t_1 = \frac{\ell}{g}$, и наша

сравнения часов также занимает определенное время из-за инерции Δt_2 .

Таким образом, оказывается, что мы должны сдвинуть наши часы на время $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, чем когда мы их услышим. Для наиболее точной синхронизации часов размещаем два часа, работающих за счет фотокамеры, в темном месте на определенном расстоянии ℓ друг от друга. В середину расстояния между этими часами вставляем источник света, излучающий мощный свет. Когда мы включаем этот источник света, световой сигнал достигает обоих часов в одно и то же время $\Delta t = \frac{\ell}{2c}$, и часы запускаются в

одно и то же время, и они начинают работать синхронно между собой. Но время, которое показывают часы, отстает от времени $\Delta t = \frac{\ell}{2c}$, когда мы включаем источник света.

Относительность одновременности:

Даже во всех системах счисления, согласно преобразования Галилея, ход часов был одинаковым, то есть интенсивность прохождения времени была одинаковой. Другими словами, часов, помещенных в точку О начало координат неподвижной системы счисления, было достаточно для измерения хода времени во всех точках пространства и во всех системах счисления. Однако, поскольку скорость передачи импульса имеет конечное значение, преобразования Лоренца в основном требуют синхронных часов для каждой точки пространства и для каждой ИСС в отдельности.

Пусть два события происходят в одно и то же время t' в точках системы счисления K' и K . Чтобы два события произошли точно в одно и то же время, мы устанавливаем электрический переключатель в точке $x_0' = \frac{x_1' + x_2'}{2}$ между

точками x_1' и x_2' в системе счисления K' . Когда этот переключатель включен, электрический сигнал x_1' и x_2' точки достигают одновременно, и эти часы начинают работать синхронно. Предположим, что событие 12⁰⁰ удвоит этих часов также записывается наблюдателем в системе счисления K в одно и то же время 12⁰⁰, или эти события происходят в разное время в системе счисления K ?

Координаты и время возникновения каждого события в системе счисления K по перестановкам Лоренца будут следующими (рис. 21.1):

$$x_1 = \frac{x'_1 + g_0 \cdot t'}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2}; \quad t_1 = \frac{t' + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_1}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2} \quad \text{ва} \quad x_2 = \frac{x'_2 + g_0 \cdot t'}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2}; \quad t_2 = \frac{t' + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_2}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2}$$

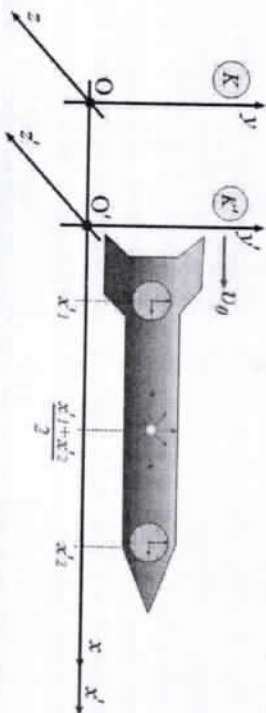


Рисунок 21.1

Таким образом, как видно из приведенной выше формулы, события, которые происходят одновременно в разных точках в системе K' , не происходят одновременно в системе K . Наблюдатель в системе с фиксирует событие, произошедшее в точке x_2 запозданием, чем событие в точке x_1 . При этом время задержки Δt будет:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\frac{g_0}{c^2} \cdot (x'_2 - x'_1)}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2} \quad (21.1)$$

Это означает, что наблюдатель в системе K регистрирует первое событие раньше, а второе событие Δt позже во времени. Но оба события регистрируются позднее 12⁰⁰ часов. Потому что небольшая скорость, передачи сигнала равна c , что, конечно, требует времени, чтобы преодолеть расстояние. Например, если первый сигнал достигает 12¹⁰, то второй сигнал достигает 12¹¹.

Как видно из приведенной выше формулы, x'_1 и x'_2 чем больше расстояние между точками, тем больше увеличивается время задержки. Оказывается, что для того, чтобы время задержки $\Delta t=0$, события в системе K' должны происходить одновременно в одной и той же точке x' . Тогда наблюдатель в системе K фиксирует оба события ровно в одно и то же время t . Или, если наблюдатель K в системе чтобы зафиксировать оба события в одно и то же время t , событие в точке должно произойти раньше, чем событие в точке $\Delta t'$. Тогда K придет к наблюдателю в системе без задержки события в точке x'_2 .

Теперь давайте определим $\Delta t'$, когда это происходит раньше. Предположим, что наблюдатель в системе K записал оба события в один

момент времени t . Другими словами, $t=t_1=t_2$. Из этого мы сможем определить запрашиваемую величину.

$$t = \frac{t'_1 + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_1}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2} = \frac{t'_2 + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_2}{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2}; \quad \rightarrow \quad t'_1 + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_1 = t'_2 + \frac{g_0}{c^2} \cdot x'_2; \quad \rightarrow \quad \Delta t' = t'_1 - t'_2 = \frac{g_0}{c^2} (x'_2 - x'_1)$$

Следовательно, в этом случае время $\Delta t'$ будет следующим:

$$\Delta t' = \frac{g_0}{c^2} (x'_2 - x'_1) \quad (21.2)$$

Таким образом, однородность-понятие относительное. Одновременность двух событий уместна только для ИСС, на которой происходит события, а для других ИСС однократно нарушается.

Однородность времени и интервалов:

Согласно представлению Ньютоновской механики, течение времени абсолютно одинаково во всех ИСС, то есть течение времени является абсолютной. Согласно теории относительности, время протекания события в разные моменты времени различно, то есть течение времени относительно. Предположим, что событие в произвольной точке x' движущейся системы K' начинается в данный момент t'_1 и заканчивается в t'_2 данный момент. При этом продолжительность события K' будет равна $t'_0 = \Delta t' = t'_2 - t'_1$ часам в системе. В системе K' начало и завершение события происходят ровно в одной точке x' . Время, измеренное на этой ИСС, называется частным временем, когда события происходят в одной и той же точке. Теперь, когда часы в системе K' движутся со скоростью g_0 относительно системы K , наблюдатель в системе K записывает эти события, которые начинаются в момент t_1 и заканчиваются в момент t_2 . В результате длительность события K будет равна $t = \Delta t = t_2 - t_1$ по часам в системе. При этом возникает вопрос, являются ли точно такие же продолжительности событий, измеренные по часам на разных ИСС, или они отличаются друг от друга.

Связь между частным временем t_0 прошедшим в системе K' , и временем t , прошедшим в системе K , выглядит следующим образом:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2}} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (21.3)$$

Эту формулу можно доказать двумя способами:

способ-1

В произвольной точке x' системы K' есть время начала t_1' и окончания событий t_2' , в то время как в системе K эти события начинаются в момент t_1 и заканчиваются в момент t_2 . Нам попросили определить связь между продолжительностью события в системах $t_0 = \Delta t' = t_2' - t_1'$ и $\tau = \Delta t = t_2 - t_1$ между ними. Наблюдатель в системе K по преобразованием Лоренца определяет начало и конец события отмечает

$$t_1 = \frac{t_1' + (g_0/c^2) \cdot x'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}} \quad \text{и} \quad t_2 = \frac{t_2' + (g_0/c^2) \cdot x'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}}$$

В результате в системе K -это время, прошедшее по системным часам

$$\tau = \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t_2' + (g_0/c^2) \cdot x'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}} - \frac{t_1' + (g_0/c^2) \cdot x'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}} = \frac{t_2' - t_1'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}}$$

будет равна.

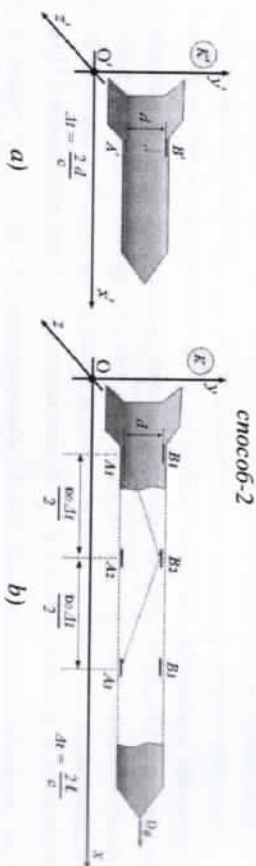


Рисунок 21.2

Допустим, космический корабль движется со скоростью g_0 относительно Земли. Пусть система K будет ИСС, прикрепленной к Земле, а система K' к космическому кораблю. Пусть на двух боковых стенках космического корабля в точках A' и B' ($A'B' = d$) установлены зеркала. В какой-то момент времени пусть пилот посылает световую луч, направленную от точки A' к точке B' (например, включает фонарь включением). Это будет равно времени $t_0 = \frac{2d}{c}$, в течение которого световой луч вернется из зеркала на

другой стене. Наблюдатель на Земле отмечает, что луч, посланный из точки A_1 , отражается из зеркала в точке B_1 и достигает точки A_2 . В результате он также учитывает движение космического корабля и обнаруживает, что свет прошел расстояние, равное сумме $2\ell = 2\sqrt{\left(\frac{g_0\tau}{2}\right)^2 + d^2}$, при отражении из другого зеркала. Это означает, что при наблюдении с Земли свет проходит больший путь, то есть $2d < 2\ell$. Когда луч света пройдет $2d$ -расстояние со скоростью c , а 2ℓ -расстояние со скоростью c , возникает идея, что для

прохождения большего расстояния требуется больше времени. Отсюда следует вывод, что чем меньше путь прошел луч света на каком-либо ИСС, тем меньше должно быть и время, измеренное на этом ИСС, то есть частное время-это наименьшее время. Для наблюдателя на Земле луч света будет претерпевать $\tau = \frac{2\ell}{c} = \frac{2\sqrt{(g_0\tau/c)^2 + d^2}}{c}$ прохождения расстояния 2ℓ .

Используя эти данные, можно определить искомый величину.

$$\left(\frac{c\tau}{2}\right)^2 = \left(\frac{g_0\tau}{2}\right)^2 + d^2, \rightarrow \frac{c^2 - g_0^2}{4} \tau^2 = d^2, \rightarrow \frac{c^2 - g_0^2}{4} \tau^2 = \frac{c^2 t_0^2}{4}, \rightarrow \tau = \frac{c}{\sqrt{c^2 - g_0^2}} t_0 = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Таким образом, поскольку событие искры в космическом корабле и событие его повторной записи происходят именно в одной точке A' , это будет наименьшее (частное время) время, прошедшее в системе отсчета. Так как в любой другой системе счисления пройдет больше времени, чем в частной.

Поскольку на движущейся ИСС (космическом корабле) происходит замедление течения времени. Чем быстрее он движется со скоростью, близкой к скорости света, тем сильнее это замедление, то есть время как бы останавливается. Но это замедление не замечено пилотами внутри космического корабля. Например, если космический корабль движется со скоростью, очень близкой к скорости света, то в время, когда космонавт совершает привычный полет в течение 1 часа, на Земле наступают 100 лет, 1000 лет, а может быть, и вовсе другая эра (ледниковая эра или эра глобального потепления и т.д.) это началось бы. Замедление времени возникнет не только на механические явления, но и на все явления в природе. Все процессы в природе замедляются одинаково, как физические, так и химические, обмен веществ, фотосинтез и др.

Если известны времена, то скорость K' системы можно определить. Используя введенной ранее формулой относительности длины и определив искомую величину, выполнив алгебраические подстановки.

$$\tau = \frac{t_0}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}}, \rightarrow \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^2 = 1 - \left(\frac{g_0}{c}\right)^2, \rightarrow \left(\frac{g_0}{c}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^2, \rightarrow g_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^2} c$$

Следовательно, если задано время, прошедшее в разные моменты времени, то скорость движения системы K' будет следующей:

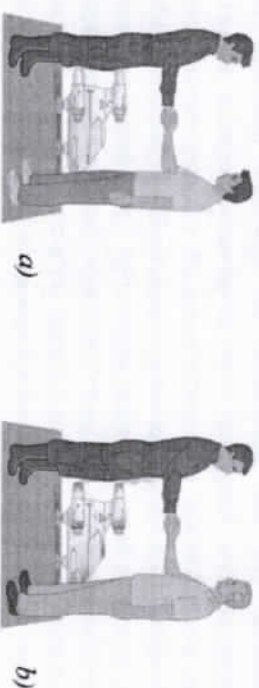
$$g_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^2} c \quad (21.4)$$

Парадокс близнецов:

Одним из труднодостижимых результатов замедления времени является парадокс близнецов. Предположим, что эксперимент проводится с близнецами — Хасаном и Хусаном (рис.21.3). По характеру Хасан очень сдержан, скромный, не любит путешествия и приключения. Хусан юмористический, очень любит путешествия и приключения. Хусан отправляется в космическое путешествие на планету Х земного типа, которая находится на расстоянии $\ell = 20$ световых лет от Земли, где их авантюризм преобладает, когда им исполняется 20 лет (обратите внимание, что 1 световой год — это расстояние, которое световой луч проходит за 1 год, что составляет около 9,5 триллионов километров). Кроме того, космический корабль Хусана способен двигаться со скоростью 0,95 с. Близнецы прощаются после празднования 20-летия (рис.21.3-а). Космический расчет Хасана, оставшегося на Земле, заключается в том, что до прибытия Хасана пройдет время

$$\Delta t = \frac{2\ell}{v} = \frac{2 \cdot (20 \text{ y.l.} \cdot c)}{0,95 \cdot c} = \frac{40}{0,95} \approx 42,1 \text{ год}$$

Хасан может встретить брата Хусана, когда ему исполнится 62 года. Хусан отправляется на Планету Х и сразу же возвращается, не тратя много времени.



21.3-таш

$$\Delta t_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot \Delta t \approx \sqrt{1 - 0,95^2} \cdot 42,1 \approx 13 \text{ y.l.}$$

Релятивистский расчет путешественника Хусана предполагает, что пройдет время, прежде чем он отправится на планету Х и снова вернется на Землю, и он сможет увидеть своего брата Хасана, когда ему исполнится 33 года. Когда братья встретились, они сначала не узнали друг друга. Причина в том, что Хасану, оставшемуся на Земле, было 62 года, и он сильно изменился, в то время как путешественнику Хусану, который не сильно изменился, было всего 33 года (рис.21.3-б).

Здесь близнецы столкнулись с удивительным, удивительно интересным явлением, то есть парадоксом. Причина этого парадокса очень проста — явление замедления времени. Когда человек совершает космическое путешествие, он неосознанно испытывает замедление времени, и в системе отсчета, связанной с космическим кораблем, время замедляется в 3,2 раза. К концу путешествия путешественнику Хасану исполнится 13 лет, а его брату Хусану, оставшемуся на Земле, — 42 года. В результате между ними возникает разница в 29 лет. Единственная причина этого парадокса заключается в том, что ритм прохождения времени в разных системах отсчета различен.

Экспериментальное подтверждение замедления времени. Распад мюонов:

Чтобы теория относительности о замедлении времени нашла свое полное подтверждение, ее также необходимо было проверить в эксперименте. Замедление времени — вполне реальное явление, подтвержденное многочисленными экспериментами, в том числе и измерениями, полученными с помощью натуральных часов. Один из таких экспериментов по замедлению времени был проведен в 1972 году американскими учеными Дж.С.Хафелем и Р.Э.Киттингами опубликовано. Временные интервалы, измеренные в 4-х цезиевых атомных часах, установленных на ракетах, сравненные с временными интервалами в атомных часах в земной системе отсчета. Многие факторы были приняты во внимание, чтобы сопоставить полученные результаты с специальной теорией относительности. Это были факторы, учитывающие ускорение и замедление относительно Земли, изменения в направлениях движения ракет, замедление времени из-за более сильной гравитации на поверхности земли. Дж.С.Хафелем и Р.Э.Киттингами принят в своем блокаде, что " По сравнению со временем, которое показывали атомные часы военно-морской обсерватории США, ракеты интервали 59 ± 10 не во время полета на восток и 273 ± 7 не во время полета на запад". Результаты были хорошо согласованы с предсказанным расчетом специальной теории относительности, и это соответствие было объяснено относительным движением между Землей и ракетой.

Эффект замедления течения времени будет замечен только при очень больших Δ скоростях движения, близких к скорости света в вакууме. Например, в эксперименте с мюонами (мю-мезонами) было подтверждено. Мюон нестабильная элементарная частица, масса которой в 207 раз больше массы электрона. Среднее частное время жизни мюона составляет $\tau_0 \approx 2,2 \mu\text{s}$ (то есть в инерциальной системе отсчета, которая находится в состоянии в покое по отношению к мюону). Мюоны возникают в верхних слоях

атмосферы под действием первичных космических лучей и движутся со скоростью β , близкой к c относительно Земли. Если бы не наблюдались замедление времени-релятивистский эффект синия-мион за время своего существования прошел бы путь, не превышающий в среднем $\ell_0 = 660$ м в сторону атмосферы относительно земного наблюдателя (рис.21.4-а). Другими словами, мюоны не достигли бы на поверхности Земли. Но в действительности приборы, установленные на поверхности Земли, фиксируют их, потому что движущийся мюон будет иметь среднее время жизни по часам наблюдателя на Земле имеет значение.

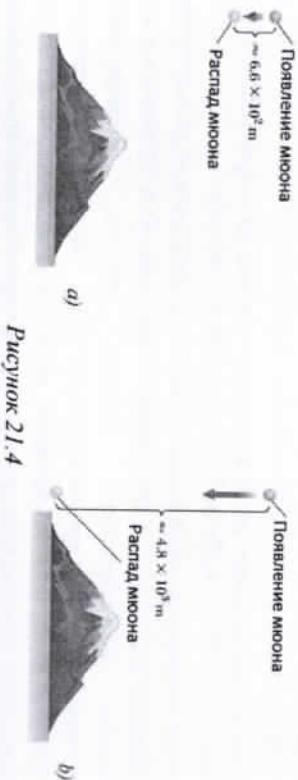


Рисунок 21.4

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - (\beta/c)^2}} \gg \tau_0.$$

В это время путь, пройденный частицей мюона, будет $\ell = \tau \beta \gg 660$ м. В результате частица достигает на поверхности Земли, и детекторы, установленные на Земле, регистрируют частицу. Например, если скорость мюона $\beta = 0.99$, то коэффициент Лоренца $\gamma = 7.1$, время, измеренное на Земле $\tau \approx 1$ бзд, при этом расстояние, пройденное мюоном относительно Земли в это время $\ell = 4800$ м (рис.21.4-б).

Относительность длины и объема:

Другой вывод из преобразования Лоренца заключается в том, что в различных инерциальных системах отсчета, находящихся в движении друг относительно друга, длины тел различны. При измерении длины стержня ℓ_0 в движущейся системе счисления K' (на космическом корабле), находящегося на неподвижной системе счисления K (на Земле), получается ℓ . Расчеты показывают, что это всегда будет $\ell < \ell_0$. Стержень K' находится в покое относительно в системе отсчета K' (космический корабль). Относительно какой системы счисления стержень находится в покое, длина, измеренная в этой системе счисления, называется частной длиной, а частная длина является самой длинной. Другими словами, длина, измеренная на любой ИСС, оказывается короче частной длины (рис.21.5).

Связь между частной длиной ℓ_0 , измеренной в системе K' , и длиной ℓ , измеренной в системе K , будет следующей:

$$\ell = \ell_0 \sqrt{1 - (\beta_0/c)^2} = \ell_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (21.5)$$

Эту формулу можно доказать двумя способами:

Метод-1

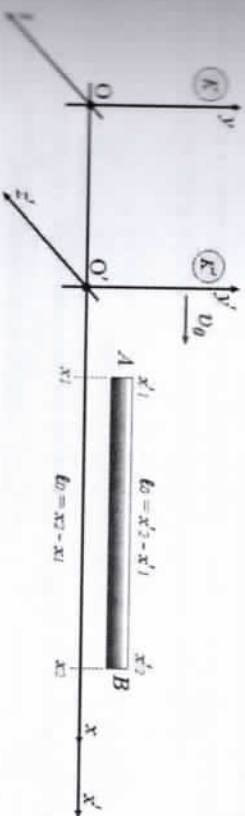


Рисунок 21.5

Пусть, в системе K' стержень AB длиной ℓ_0 параллелен оси Ox . Промежуточным времени t' - когда координаты x'_1 и x'_2 начало стержня, а если K' в системе - длина стержня равна $\ell_0 = x'_2 - x'_1$. Просили найти длину этого стержня в системе K . Наблюдатель в системе K определяет, что в момент t часов конца стержня находятся в координатах x_1 и x_2 (рис.21.5). Согласно преобразованиям Лоренца, координаты стержня на обеих ИСС связаны следующим образом:

$$x'_1 = \frac{x_1 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad x'_2 = \frac{x_2 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Вычитая их,

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{x_1 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

ны найдем. Из этого можно определить требуемый величину.

$$\ell_0 = \frac{x_2 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} - \frac{x_1 - \beta_0 t}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{\ell}{\sqrt{1 - \beta^2}} \rightarrow \ell = \ell_0 \sqrt{1 - (\beta_0/c)^2} = \ell_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Метод-2

Допустим, космический корабль движется со скоростью β_0 относительно Земли. Пусть система K будет ИСС, прикрепленной к Земле, а система K' к космическому кораблю.

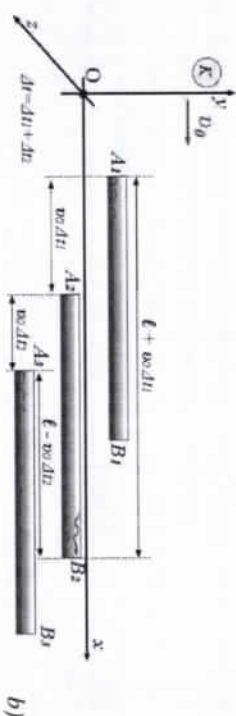
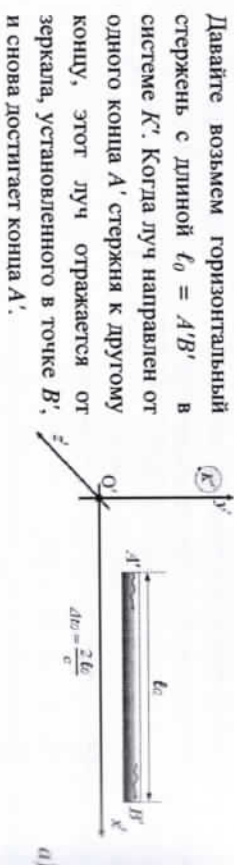


Рисунок 21.6

К' система, то есть наблюдатель в космическом корабле, может рассчитать, сколько времени потребуется $\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c}$, чтобы луч прошел через

другой конец стержня и вернулся.

Наблюдатель в системе К видит, что стержень длиной $l = AB$ движется. Стержень находится в состоянии A_1B_1 , когда луч излучается из точки A_1 , в состоянии A_2B_2 , когда этот луч достигает второго конца и отражается из него, и в состоянии A_3B_3 , когда он снова отражается к исходному концу. Следовательно, пройдет время Δt_1 , прежде чем луч выйдет из точки A_1 и достигнет точки B_2 , а стержень тем временем переместится на расстояние $v_0 \Delta t_1$. От зеркала в точке B_2 до отражения обратно в точку A_3 пройдет Δt_2 времени, а стержень тем временем сместится на $v_0 \Delta t_2$ расстояния. Зная их, составим систему уравнений (рис.21.6).

$$\begin{cases} c\Delta t_1 = l + v_0\Delta t_1, & \rightarrow \begin{cases} (c - v_0)\Delta t_1 = l \\ c\Delta t_2 = l - v_0\Delta t_2, & \rightarrow \begin{cases} (c + v_0)\Delta t_2 = l \end{cases} \\ \Delta t_1 = \frac{l}{c - v_0} \\ \Delta t_2 = \frac{l}{c + v_0} \end{cases} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{l}{c - v_0} + \frac{l}{c + v_0} = \frac{2lc}{c^2 - v_0^2} \\ \Delta t_0 = \frac{2l_0}{c} \end{cases}$$

Теперь в формулу относительности времени положим значения, найденные в системе.

В результате получается формула.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} \rightarrow \frac{\frac{2lc}{c^2 - v_0^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}}{\frac{2l_0}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}} \rightarrow \frac{l}{c^2 - v_0^2} = \frac{l_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} \rightarrow l = l_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2}$$

Если известны длины, то можно определить скорость К' системы. Используемся введенной ранее формулой относительности длины и определим искомую величину, выполнив алгебраические подстановки.

$$l_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} \rightarrow \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 = 1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2 \rightarrow \left(\frac{v_0}{c}\right)^2 = 1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2 \rightarrow v_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2} c$$

Следовательно, если заданы длины, измеренные в разных точках, скорость движения системы К' будет следующей:

$$v_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{l}{l_0}\right)^2} c \quad (21.6)$$

Стоит напомнить, что сокращение длины происходит только по направлению движения. В других направлениях никаких изменений не происходит. Поскольку на изображениях выше стержень расположен горизонтально, сокращение длины также наблюдается в этих направлениях. Это означает, что поверхность поперечного сечения стержня остается неизменной во время движения.

Если известны объемы, то скорость К' системы можно определить. Если умножить формулу относительности длины с обеих сторон на поверхность поперечного сечения стержня, то получится объем

$$V = V_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2} \rightarrow V = V_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2} = V_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Следовательно, в инерциальных системах отсчета К и К' объемы будут связаны следующим образом:

$$V = V_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2} = V_0 \sqrt{1 - \beta^2} \quad (21.7)$$

Как видно из приведенной выше формулы, чем укоротится длина, тем меньше объем. Это сокращение наблюдается не только в стержнях, но и во всех движущихся телах в направлении движения. Например, при движении круг может превратиться в эллипс, прямоугольник - в квадрат или параллелограмм, а карандаш - в монету (толщиной).

Вопросы по теме

1. Что вы подразумеваете под синхронизацией часов и как это делается?
2. Расскажите об относительности одновременности.

3. В системе К напишите формулу времени задержки между событиями.
4. При выполнении какого условия К регистрируется два события в системе одновременно?
5. Напишите формулу относительности временного интервала. Что такое частное время? Запишите формулу для нахождения скорости, когда даны времена.
6. Что такое парадокс близнецов? Расскажите подробнее.
7. Расскажите об относительности временного интервала в мюонном распаде.
8. Напишите формулу относительности длины. Что такое частная длина? Запишите формулу для нахождения скорости при заданной длине.
9. Запишите формулу относительности объема.

Решение задачи:

1. Если линейка длиной 1 м находится в покое движется в какой-либо системе отсчета со скоростью 0,6 с, какова будет ее длина (км) в этой системе?

A) 80 B) 84 C) 89 D) 90 E) 95

Дано:

$$\ell_0 = 1 \text{ м}$$

По законам специальной теории относительности длина тела обратно пропорциональна скорости движения, т. е. с увеличением скорости его длина уменьшается. Эта связь

$$l = ?$$

имеет вид $\ell = \ell_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Из этого следует, что $\ell = 1 \sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}} = 0,8 \text{ м} = 80 \text{ см}$.

Ответ: A)

2. Если на Земле пройдет 70 лет, сколько лет пройдет межзвездному летящему кораблю, движущемуся со скоростью 0,99с относительно Земли?

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Дано:

$$t_0 = 70 \text{ лет}$$

Согласно законам теории относительности, время-это понятие относительное, которое означает, что в системе, движущейся со скоростью, близкой к скорости движения или скорости света, течение времени происходит медленнее, чем в покоящейся системе. В соответствии с этим время в движущейся системе зависит со временем в неподвижной системе:

$$t = ?$$

Согласно законам теории относительности, время-это понятие относительное, которое означает, что в системе, движущейся со скоростью, близкой к скорости движения или скорости света, течение времени происходит медленнее, чем в покоящейся системе. В соответствии с этим время в движущейся системе зависит со временем в неподвижной системе:

$$t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Из этого следует, $t = 70 \cdot 0,141 \approx 10 \text{ лет}$.

Ответ: 10 лет



§ 22. СЛОЖЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ.

РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

При сложении скоростей в классической механике

$$\vec{g}_{\text{ит}} = \vec{g}_1 + \vec{g}_2$$

определение относительной скорости одного тела относительно другого было бы определено по формуле:

$$\vec{g}_{12} = \vec{g}_1 - \vec{g}_2$$

Но на больших скоростях эти примитивные формулы переходят в гораздо более сложные формы. Если движение тел имеет в пространстве, то их координаты на каждой оси складываются или вычитаются на основе релятивистских уравнений. Приведем формулы сложения релятивистских скоростей или определения релятивистских относительных скоростей только для тел, движущихся с большой скоростью вдоль оси Ох.

Сложение релятивистских скоростей:

Пусть даны инерциальные системы отсчета К и К' и система К' движется со скоростью g_0 относительно системы К. А в системе К' если тело движется со скоростью g' в направлении оси Ох', то с какой скоростью это тело движется относительно системы К?

В системе К элементарная перемещение и элементарное время будут:

$$dx = \frac{dx' + g_0 \cdot dt'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}}, \quad dt = \frac{dt' + \frac{g_0}{c^2} \cdot dx'}{\sqrt{1 - (g_0/c)^2}}$$

Если учесть, что $g = \frac{dx}{dt}$ и $g' = \frac{dx'}{dt'}$, то получим:

$$g = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + g_0 \cdot dt'}{dt' + \frac{g_0}{c^2} \cdot dx'} = \frac{\frac{dx'}{dt'} + g_0}{1 + \frac{g_0}{c^2} \cdot \frac{dx'}{dt'}} = \frac{g' + g_0}{1 + \frac{g_0 \cdot g'}{c^2}}$$

Следовательно, если тело в системе К', движущееся со скоростью g_0 , движется со скоростью g' относительно системы К', скорость этого тела в системе К будет:

$$g = \frac{g_0 + g'}{1 + \frac{g_0 \cdot g'}{c^2}} \quad (22.1)$$

Из приведенной выше формулы видно, что результирующая скорость, согласно преобразованием Галилея, равна $\vartheta_0 + \vartheta'$, так как она превышает меньше, чем скорость.

Если тело в системе K' , движущееся со скоростью ϑ_0 , движется относительно системы K'' в направлении, противоположном оси K' со скоростью ϑ' , скорость этого тела в системе K будет:

$$\vartheta = \frac{\vartheta_0 - \vartheta'}{1 - \frac{\vartheta_0 \vartheta'}{c^2}} \quad (22.2)$$

Как видно из приведенной выше формулы, результирующая скорость оказывается больше, чем скорость равна $\vartheta_0 - \vartheta'$, которая, согласно преобразованием Галилея.

Предположим, что поезд разогнан до релятивистской скорости, и его скорость равна $0,5c$. Пусть внутри этих вагонов движется частица со скоростью $0,4c$. Определим результирующую скорость частицы относительно Земли для случая, когда направление движения этой частицы совпадает и противоположно движению поезда.

$$1 \text{ случай: } \vartheta = \frac{\vartheta_0 + \vartheta'}{1 + \frac{\vartheta_0 \vartheta'}{c^2}} = \frac{0,5c + 0,4c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,4c}{c^2}} = \frac{0,9c}{1,2} = 0,75c; \Rightarrow \vartheta < \vartheta_0 + \vartheta'$$

$$2 \text{ случай: } \vartheta = \frac{\vartheta_0 - \vartheta'}{1 - \frac{\vartheta_0 \vartheta'}{c^2}} = \frac{0,5c - 0,4c}{1 - \frac{0,5c \cdot 0,4c}{c^2}} = \frac{0,1c}{0,8} = 0,125c; \Rightarrow \vartheta > \vartheta_0 - \vartheta'$$

Давайте проверим правильность второго постулата Эйнштейна по правилу сложения релятивистских скоростей. Предположим, что система K является системой счисления, связанной с Землей, а система K' является системой счисления, связанной с поездом, движущимся со скоростью ϑ_0 . Когда поезд включает переднюю фару, фотоны, исходящие из фары, удаляются со скоростью c относительно поезда. Давайте проверим, что скорость этого фотона относительно Земли также равна c .

$$\vartheta = \frac{\vartheta_0 + \vartheta'}{1 + \frac{\vartheta_0 \vartheta'}{c^2}} = \frac{\vartheta_0 + c}{1 + \frac{\vartheta_0 c}{c^2}} = \frac{\vartheta_0 + c}{1 + \frac{\vartheta_0}{c}} = c$$

Следовательно, мы должны сделать вывод, что до тех пор, пока абсолютная скорость материальной точки никогда не может быть больше скорости света.

Формула сложения релятивистских скоростей является обшей, и при скоростях, значительно меньших скорости света ($\vartheta_0 \ll c, \vartheta' \ll c$), эта формула принимает простой классический вид.

Таким образом, релятивистская механика имеет широкую фундаментальную природу, поскольку при относительно малых скоростях тела ($\vartheta \ll c$) она подчиняется законам механики Ньютона.

Релятивистская относительная скорость:

Пусть даны ИСС K, K' и K'' . Пусть система K является системой счисления, связанной с землей, а системы счисления K' и K'' являются системами счисления, движущимися с скоростями ϑ_1 и ϑ_2 соответственно относительно системы счисления K . Для простоты предположим, что оси Ox всех трех осей совпадают, а движения систем счисления K' и K'' происходят только в этом направлении. Естественно, что возникает вопрос о том, как системы счисления K' и K'' относятся друг к другу. Релятивистская относительная скорость также определяется как правило сложения релятивистских скоростей.

$$dx' = \frac{dx - \vartheta_1 \cdot dt}{\sqrt{1 - (\vartheta_1/c)^2}}, \quad dt' = \frac{dt - \frac{\vartheta_1}{c^2} \cdot dx}{\sqrt{1 - (\vartheta_1/c)^2}}$$

Если учесть, что $\vartheta_2 = \frac{dx}{dt}$ и $\vartheta_{ин} = \vartheta' = \frac{dx'}{dt'}$, то получим:

$$\vartheta_{ин} = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - \vartheta_1 \cdot dt}{dt - \frac{\vartheta_1}{c^2} \cdot dx} = \frac{dx/dt - \vartheta_1}{1 - \frac{\vartheta_1}{c^2} \cdot \frac{dx}{dt}} = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{1 - \frac{\vartheta_1 \vartheta_2}{c^2}}$$

Следовательно, если системы счисления K' и K'' относительно системы счисления K движутся со скоростями ϑ_1 и ϑ_2 , то относительная скорость системы счисления K'' относительно системы счисления K' будет следующей:

$$\vartheta_{ин} = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{1 - \frac{\vartheta_1 \vartheta_2}{c^2}} \quad (22.4)$$

Если системы счисления K' и K'' относительно системы счисления K движутся по противоположным осям оси Ox со скоростями, равными ϑ_1 и ϑ_2 , то относительная скорость системы счисления K'' относительно системы счисления K' будет равна:

$$\vartheta_{ин} = \frac{\vartheta_2 + \vartheta_1}{1 + \frac{\vartheta_1 \vartheta_2}{c^2}} \quad (22.5)$$

Теперь давайте найдем скорость двух фотонов, движущихся в разных направлениях на Земле, относительно друг друга.

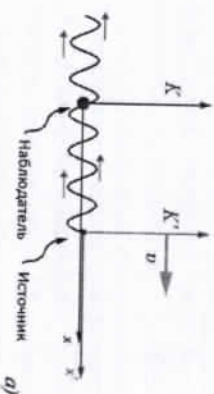
$$g = \frac{g_0 + g'}{1 + \frac{g_0 g'}{c^2}} = \frac{c + c}{1 + 1} = c$$

Следовательно, в природе ни одна скорость не может быть больше, чем скорость c .

Релятивистский эффект Доплера. Сдвиг в красном и фиолетовом:

Нам известен эффект Доплера, который возникает при звуковых явлениях. При этом при наличии относительной скорости между источником звука и наблюдателем ухо наблюдателя воспринимает звуковую частоту, увеличивая или уменьшая ее. Эффект Доплера носит универсальный характер, так как это явление может происходить со всеми видами волн в природе. Это явление может происходить не только в звуковых волнах, но и в волнах у поверхности воды, сейсмических волнах, всевозможных электромагнитных волнах, а также в световых волнах. Только в этом случае скорость света $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} = \text{const}$ постоянно, и скорость источника света или наблюдателя всегда меньше этой скорости.

Предположим, что наблюдатель в системе счисления K видит свет, исходящий от системы счисления K' , движущейся со скоростью β относительно этой системы. Длина волны света может быть измерена находясь в системе отсчета K' . Например, в системе счисления K' устойчивая волна возникает с помощью источника света и зеркалом, а длина волны может быть определена путем измерения расстояния между узлами. Длина, измеренная в этой системе счисления K' , является действительной длиной, в то время как длина волны изменяется при измерении наблюдателем в K системе счисления $\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}} = \sqrt{1 - \beta^2}$.



а)



б)

Рисунок 22.1

Если бы источник света был неподвижен в системе счисления K , наблюдатель увидел бы волновой фронт длиной $c\Delta t$ через время Δt . Но из-за движения системы с относительно системы K , рассматриваемой только в рамках системы K , наблюдатель видит волновой фронт, что время растягивается как показано на рис. 22.1-б

$$\frac{c\Delta t + g\Delta t}{c\Delta t} = 1 + \frac{g}{c}$$

И результате двух вышеописанных эффектов получаем следующую формулу.

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{g}{c}\right) \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{g^2}{c^2}}{1 - \frac{g}{c}}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \frac{g}{c}}{1 - \frac{g}{c}}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

При этом изменение частоты определяется как:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + g/c}{1 - g/c}} \rightarrow \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\nu_0} \sqrt{\frac{1 + g/c}{1 - g/c}} \rightarrow \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - g/c}{1 + g/c}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Такое изменение длины волны и частоты называется доплеровским сдвигом.

Здесь: λ , ν — длина волны и частота, измеренная наблюдателем в системе счисления K ;

λ_0 , ν_0 — длина волны и частота, измеренная наблюдателем в системе счисления K' .

Таким образом, если источник света удаляется от наблюдателя со скоростью β , как на рисунке 22.1, то удлинение длины волны и уменьшение частоты вычисляется по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + g/c}{1 - g/c}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - g/c}{1 + g/c}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad (22.7)$$

Если источник света приближается к наблюдателю, то в приведенной выше формуле вместо скорости β берется скорость $-\beta$. В результате происходит сокращение длины волны и увеличение частоты.

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 - g/c}{1 + g/c}} = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad \nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + g/c}{1 - g/c}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (22.8)$$

Как правило, при удалении любого источника электромагнитной волны от наблюдателя длина волны увеличивается, а частота уменьшается. И наоборот, когда источник волны приближается к наблюдателю, длина волны уменьшается, а частота увеличивается. А в световых волнах это называется смещением Доплера к красному или смещением к фиолетовому. Явление красного смещения было впервые открыто в 1924 году в астрономических наблюдениях американского ученого Эдвина Хаббла. Когда он смотрел в телескоп на далекие галактики, на фланце объектива появились красные пятна. Сначала он думал, что это из-за недостатка линз. Хотя покраснение во фланцах не было одинаковым для всех галактик, покраснение огушалося сильнее, чем в далекой галактике. В результате исследований и расчетов Хаббл обнаружил, что Вселенная расширяется, поскольку галактики

удалются друг от друга с большей скоростью, эта скорость еще больше увеличивается в более отдаленных галактиках.

Вопросы по теме

1. Запишите правильно сложения релятивистских скоростей.
2. Как определяется результирующая скорость космического корабля относительно системы K при взаимно противоположных направлениях его движения относительно системы K' и направления движения космического корабля относительно системы K ?
3. Напишите релятивистскую формулу для определения относительной скорости для случая, когда движение частиц происходит в одном направлении и в противоположном направлении.
4. Чем отличаются правила сложения релятивистских скоростей и определения релятивистских относительных скоростей?
5. Опишите релятивистский эффект Доплера, опишите причину.
6. Запишите формулу эффекта Доплера для длины волны и частоты.
7. Что такое сдвиг в красной? Что такое сдвиг в фиолетовый? Объясните их причину.

Решение задачи

1. С Земли стартовали два космических корабля, каждый со скоростью $0,5$ с относительно Земли в противоположных направлениях. Какова скорость первого корабля относительно второго?

A) с B) 0 C) $0,8c$ D) $8c$ E) $0,5c$

Дано: $u_1 = 0,5c$ $u_2 = 0,5c$ $u_n = ?$	Решение Согласно релятивистскому закону сложения скоростей $u_n = \frac{u_1 + u_2}{1 + \frac{u_1 u_2}{c^2}} = 0,8c$ получается выражения.
---	---

Ответ: C)

7. Предположим, что галактика удаляется от Земли со скоростью $0,825$ с. Эта галактика испускает радиоволны длиной $0,525$ м. Наблюдатель на Земле с какой длины волны воспринимает эту волну?

Дано: $\lambda_0 = 0,525$ м $v = 0,825c$ $\lambda = ?$	Решение: Определяем искомую величину по эффекту Доплера. $\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1 + \beta/c}{1 - \beta/c}} = 0,525 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,825}{1 - 0,825}} = 0,525 \cdot \sqrt{\frac{1825}{175}} = 1,695$ м $\approx 1,7$ м
--	---

Следовательно, длина волны увеличивается в $3,29$ раза.
Ответ: $\lambda = 1,7$ м

§ 23. ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ МАССЫ. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ. СВЯЗЬ МЕЖДУ МАССОЙ, ЭНЕРГИЕЙ И ИМПУЛЬСОМ. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Относительность массы и плотности:

Расчеты показывают, что с увеличением скорости тела увеличивается и его масса. Массы тела в покое и в движении связаны между собой скоростью так же, как относительность длины и времени.

Связь между массами тела в системах K и K' будет следующей:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\beta/c)^2}} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma m_0 \quad (23.1)$$

Из приведенной выше формулы можно построить графики $m = m(\beta)$ и $\beta = \beta(m)$ (рис. 23.1). Как видно из приведенного выше рисунка 23.1-а, поскольку скорость тела приближается к скорости света, его масса увеличивается бесконечно. Например, $\beta = 0,7c$ при скорости $m = 1,4m_0$, $\beta = 0,8c$ при скорости $m = 1,666m_0$, $\beta = 0,9c$ при скорости $m = 2,294m_0$, $\beta = 0,99c$ при скорости $m = 7,089m_0$, $\beta = 0,999c$ при скорости $m = 22,37m_0$ и т. д. Следовательно, по мере увеличения массы ускорение этой тяжелой массы становится все труднее. Как видно из приведенного выше рисунка 23.1-б, скорость тела сначала линейно связана со временем на гораздо более низких скоростях. По мере приближения к скорости света увеличение скорости становится уменьшающимся и занимает гораздо больше времени. А приравнивание к скорости света занимает бесконечно много времени.

Масса тела в покое наименьшая и называется собственной массой. Например, масса, измеренная находиться в космическом корабле, является собственной массой, которая при измерении с Земли всегда оказывается больше собственной массы.

Если известны массы, то можно определить скорость системы K' . Используя формулу относительности массы и определив искомую величину, выполнив алгебраические подстановки.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\beta/c)^2}} \rightarrow \left(\frac{m_0}{m}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\beta}{c}\right)^2 \rightarrow \left(\frac{\beta}{c}\right)^2 = 1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2 \rightarrow \beta = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2} c$$

Следовательно, если даны массы, измеренные в разных точках, скорость движения системы K' будет:

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0}{m}\right)^2} c \quad (23.2)$$

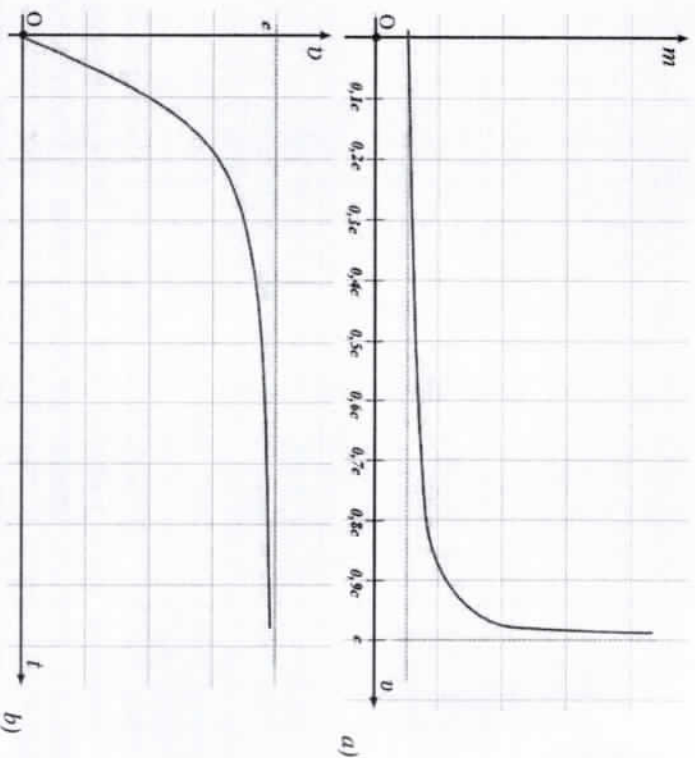


Рисунок 23.1

Так как при увеличении скорости увеличивается масса тела, то и его плотность должна увеличиваться. Когда тела движется, его масса увеличивается, а объем уменьшается. Если тело имеет плотность в покое $\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$, то при движении оно равно $\rho = \frac{m}{V}$. Из формулы для массы

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

а по объему

$$V = V_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

используя формулу, мы можем найти запрошенную величину.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}}{V_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{m_0}{V_0 (1 - (v/c)^2)} = \frac{\rho_0}{1 - (v/c)^2}$$

Таким образом, связь между плотностями тела и в системах K и K' будет следующей:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - (v/c)^2} = \frac{\rho_0}{1 - \beta^2} = \gamma^2 \rho_0 \quad (23.3)$$

Плотность тела в покое является наименьшей и называется собственной плотностью. Например, плотность, измеренная находя в космическом корабле, является собственной плотностью, которая при измерении с Земли не всегда оказывается больше этой собственной плотности.

Если известны плотности, то можно определить скорость движения системы K' . Воспользуемся формулой относительности плотности и определим искомую величину, выполнив алгебраические подстановки.

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - (v/c)^2} \rightarrow \frac{\rho_0}{\rho} = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 \rightarrow \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \rightarrow v = \sqrt{1 - \frac{\rho_0^2}{\rho^2}} c$$

Следовательно, если даны плотности, измеренные в разных точках, скорость движения системы K' будет:

$$v = \sqrt{1 - \frac{\rho_0^2}{\rho^2}} c \quad (23.4)$$

Таким образом, получается, что с помощью результатов, полученных из преобразования Лоренца, можно было бы составить таблицу зависимости интервала времени, длины, массы и плотности от скорости движения.

Таблица 21.1

№	β	γ	$\Delta t = \gamma \Delta t_0$	$l = \frac{l_0}{\gamma}$	$m = \gamma m_0$	$\rho = \gamma^2 \rho_0$
1	0,1c	1,00504	1,00504· Δt_0	0,99498· l_0	1,00504· m_0	1,01010· ρ_0
2	0,2c	1,02062	1,02062· Δt_0	0,97979· l_0	1,02062· m_0	1,04166· ρ_0
3	0,3c	1,04828	1,04828· Δt_0	0,95394· l_0	1,04828· m_0	1,09889· ρ_0
4	0,4c	1,09109	1,09109· Δt_0	0,91651· l_0	1,09109· m_0	1,19048· ρ_0
5	0,5c	1,15470	1,15470· Δt_0	0,86603· l_0	1,15470· m_0	1,33333· ρ_0
6	0,6c	1,25000	1,25000· Δt_0	0,80000· l_0	1,25000· m_0	1,56250· ρ_0
7	0,7c	1,40028	1,40028· Δt_0	0,71414· l_0	1,40028· m_0	1,96078· ρ_0
8	0,8c	1,66667	1,66667· Δt_0	0,60000· l_0	1,66667· m_0	2,77778· ρ_0
9	0,9c	2,29415	2,29415· Δt_0	0,43390· l_0	2,29415· m_0	5,26289· ρ_0
10	0,95c	10,2564	10,2564· Δt_0	0,09750· l_0	10,2564· m_0	105,194· ρ_0
11	0,98c	25,2525	25,2525· Δt_0	0,03960· l_0	25,2525· m_0	637,688· ρ_0
12	0,99	50,2513	50,2513· Δt_0	0,19900· l_0	50,2513· m_0	2525,19· ρ_0

Основное уравнение релятивистской динамики:

Поскольку скорость движения тела приближается к скорости света, а его масса увеличивается, возникает идея, что его импульс также должен увеличиваться. Дело в том, что когда скорость приближается к скорости света, импульс тела увеличивается не только за счет увеличения скорости, но и за счет увеличения массы. Таким образом, релятивистский импульс тела будет выглядеть следующим образом:

$$p = \frac{m_0 \vartheta}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}}$$

(23.5)

Увеличение импульса тела по классическим и релятивистским правилам показано на рисунке 23.2. Как видно из рисунка, при расчете по Ньютоновской механике импульс тела будет иметь конечное значение $p = m_0 c$, а по релятивистской механике — бесконечно большое значение.

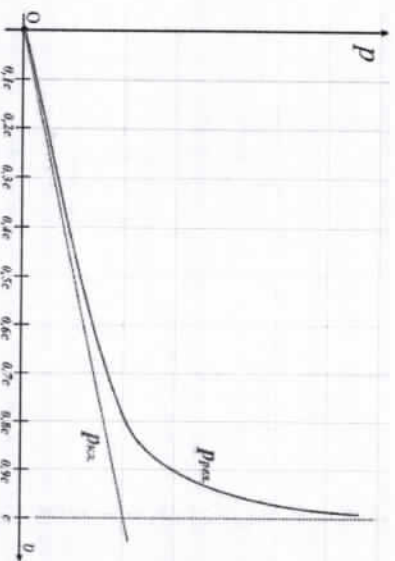


Рисунок-23.2

Если тела или частица передаётся релятивистский импульс и спрашиваю, с какой скоростью она движется, она определяется как:

$$p = \frac{m_0 \vartheta}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} = \frac{m_0 \vartheta c}{\sqrt{c^2 - \vartheta^2}}, \rightarrow p^2 c^2 - p^2 \vartheta^2 = (m_0 c)^2 \vartheta^2, \rightarrow$$

$$\rightarrow p^2 c^2 = (p^2 + (m_0 c)^2) \vartheta^2, \rightarrow \vartheta = \frac{pc}{\sqrt{p^2 + (m_0 c)^2}}$$

Таким образом, скорость движения частицы или тела с релятивистским импульсом, равным p , определяется по формуле:

$$\vartheta = \frac{pc}{\sqrt{p^2 + (m_0 c)^2}}$$

(23.6)

Согласно Ньютоновской механике, изменение импульса тела во времени было бы равно силе, действующей на него.

В релятивистской механике также сохраняется тот же закон, но его внешний вид будет немного другим

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \vec{\vartheta}}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \right) = \frac{d}{dt} (m_0 \vec{\vartheta} \gamma)$$

(23.7)

Приведенное выше уравнение называется основным уравнением релятивистской механики. В релятивистской механике уравнение движения тела выводится из этого же уравнения.

Связь между массой и энергией:

Рассмотрим задачу о зависимости массы и энергии. Для этого найдем производную в основном уравнении релятивистской динамики выше. Раскроем скобки по правилу нахождения производной от многочлена.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 \vec{\vartheta}}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \right) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} + m_0 \vec{\vartheta} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \right) =$$

$$= \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} + m_0 \vec{\vartheta} \cdot \left(-\frac{1}{2} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\vartheta}{c} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(-\frac{2\vartheta}{c^2} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} \right) =$$

$$= \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} + \frac{m_0 \vartheta \vec{\vartheta}}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \cdot \frac{d\vartheta}{dt}$$

Когда тела движется, ему передается кинетическая энергия. Эта кинетическая энергия равна работе, совершаемой силой.

$$dE_k = dA = \vec{F} \cdot d\vec{r} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} \cdot d\vec{r} + \frac{m_0 \vartheta \vec{\vartheta}}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \frac{d\vartheta}{dt} \cdot d\vec{r} =$$

$$= \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} \cdot \frac{m_0 \vartheta \vec{\vartheta}}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot d\vartheta = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \vartheta d\vec{\vartheta} +$$

$$+ \frac{m_0 \vartheta}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} \cdot \frac{m_0 \vartheta \vec{\vartheta}}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \frac{d\vec{r}}{dt} \cdot d\vartheta = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}} \vartheta d\vartheta + \frac{m_0 \vartheta^3}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} d\vartheta =$$

$$= \frac{m_0 \vartheta d\vartheta (c^2 - \vartheta^2 + m_0 \vartheta^3 d\vartheta)}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} = \frac{m_0 \vartheta d\vartheta (c^2 - \vartheta^2 + \vartheta^2)}{c^2 \sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \vartheta d\vartheta$$

Полученное выражение является дифференциалом кинетической энергии. Определим кинетическую энергию, интегрируя ее.

$$E_k = \int dE_k = \int_0^{\vartheta} \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} \vartheta d\vartheta = \frac{m_0}{2} \int_0^{\vartheta} \frac{d(\vartheta^2)}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} = \frac{m_0 c^2}{2} \int_0^{\vartheta^2/c^2} \frac{d\left(\frac{\vartheta^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - (\vartheta/c)^2}^3} =$$

$$= -\frac{m_0 c^2}{2} \int_0^{\frac{g^2}{\sqrt{1-(g/c)^2}}} \frac{d\left(1 - \frac{g^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1-(g/c)^2}} = \left| 1 - \frac{g^2}{c^2} = u \right| = -\frac{m_0 c^2}{2} \int_1^{\frac{g^2}{c^2}} \frac{du}{u^{3/2}} = -\frac{m_0 c^2}{2} \left[-\frac{2}{\sqrt{u}} \right]_1^{\frac{g^2}{c^2}} =$$

$$= m_0 c^2 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{g^2}{c^2}}} - 1 \right) = m_0 c^2 (\gamma - 1)$$

Работа, выполненная с учетом, давала кинетическую энергию ускоряющемуся телу или частице. В результате увеличение энергии привнес к увеличению массы.

$$\Delta E_k = m_0 c^2 (\gamma - 1) = \gamma m_0 c^2 - m_0 c^2 = m c^2 - m_0 c^2 = (m - m_0) c^2 = \Delta m c^2$$

Мы ознакомились с тем, что при увеличении скорости увеличивается и его масса. Когда скорость увеличивается, мы даем ей кинетическую энергию. Поэтому возникает вопрос, может ли увеличение массы быть связано с кинетической энергией, передаваемой ему. Точно так же этот вопрос очень важен в физике ядра и элементарных частиц. Когда ядро урана распадается на нейтроны, образуются новые ядра и несколько свободных нейтронов. При этом выделяется огромное количество тепла. Расчеты показывают, что сумма масс ядра и нейтрона до столкновения будет больше, чем сумма масс ядер и нейтронов, образовавшихся после распада урана. Из этого можно сделать вывод, что энергия, выделяющаяся при распаде ядра, забирает с собой и определенную массу. И наоборот, оказывается, что когда тела получают энергию, его масса должна увеличиваться.

Таким образом, связь между массой и энергией будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (23.9)$$

Где: Δm — увеличенная масса тела, получившего энергию, ΔE — энергия, переданная телу, не зависящая от того, каким способом она была передана. Энергия ΔE , получаемая телом, может быть потенциальной энергией, кинетической энергией, теплотой плавления, теплотой испарения, теплотой сгорания, теплотой, получаемой при нагревании, и т. д.

$$\Delta E = \frac{m g^2}{2}, \quad \Delta E = m g h, \quad \Delta E = \frac{k x^2}{2}, \quad \Delta E = \lambda m, \quad \Delta E = r m, \quad \Delta E = q m, \quad \Delta E = c m \Delta$$

(23.10)

Из приведенной выше формулы видно, что масса находилась в покое автомобиля меньше при движении, масса тела, поднимающегося над полом,

больше, масса тела, закрепленного на пружине, больше, когда оно находится в самом крайнем положении из положения равновесия, масса больше, когда лед тает и превращается в воду, масса больше, когда кипящая вода превращается в пар и т. д.

Поскольку, когда телу дается энергия ΔE , он получает дополнительную массу Δm пропорционально энергии, возникает вопрос, обладает ли он энергией даже в состоянии покоя. В конце концов, тела имеют массу m_0 , когда он находится в покое, так почему бы не иметь энергию E_0 . Дело в том, что все тела, даже находясь в покое, обладают еще не возбужденное энергией в скрытом состоянии, которая выглядит следующим образом:

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (23.11)$$

Из приведенной выше формулы видно, что любое тело массой $m_0 = 1$ кг (одеяло, вода, камень, металл, бензин, газ, древесина, кислорода и т. д.) имеет массу, равную) обладает энергией покоя $E_0 = 9 \cdot 10^{16}$ Дж. Эта энергия-энергия, которая существует в ней независимо от типа вещества. Энергия, выделяющаяся при химических реакциях, составляет очень небольшую долю энергии в покое. Например, при сгорании хорошо горячего бензина массой $m_0 = 1$ кг из него выделяется энергия $Q = 46$ МДж, при которой бензин преобразует лишь часть своей массы в тепло $\Delta m = 5,11 \cdot 10^{-10}$ кг $\approx 0,000511$ мг. Каждый из нас прекрасно знаем, какой разрушительной силой обладает ядерное оружие — водородная бомба, атомная бомба. Подсчитано, что даже при ядерных реакциях энергия диссоциации значительно меньше — около 1/2000 доли от энергии покоя. Если бы можно было превратить тело в полное электромагнитное поле, то из него можно было бы получить энергию такой величины $E_0 = 9 \cdot 10^{16}$ Дж. Это явление превращения в электромагнитное поле происходит, когда частица и ее античастица встречаются, и это явление называется аннигиляцией. Например, если электрон и его античастица позитрон при встрече превращаются в 2-γ-кванта по 0,511 МэВ, то есть массы частиц полностью излучаются.

Релятивистская кинетическая энергия:

Нам известно, что когда тела движутся с малыми скоростями, его кинетическая энергия определяется формулой $E_k = \frac{m g^2}{2}$. Но нас интересует, как выглядит выражение кинетической энергии, когда тела движутся со скоростями, близкими к скорости света. Именно на этот вопрос мы и попытаемся ответить.

Энергия покоя тела определяется выражением $E_0 = m_0 c^2$, а релятивистская энергия определяется выражением

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} c^2 = \gamma m_0 c^2$$

Согласно закону сохранения энергии, разность этих энергий должна быть кинетической энергией, данной для ускорения тела.

Релятивистская кинетическая энергия тела имеет вид:

$$E_K = E - E_0 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} - 1 \right) = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad (23.12)$$

Из приведенной выше формулы видно, что для приближения скорости тела к скорости света требуется огромное количество энергии. Например, когда тела имеет скорость $v = \frac{\sqrt{3}}{2} c \approx 0,866 c$, его масса увеличивается в 2 раза.

Чтобы достичь этой скорости, телу дается энергия, равная его энергии покоя $E_K = m_0 c^2$. Для приведения тела массой $m_0 = 1$ кг к такой скорости необходима энергия $E_K = 9 \cdot 10^{16}$ Дж, что составляет около 2 млн тонн бензина можно было бы получить при сгорании. А для того, чтобы довести скорость до скорости тела $v = \frac{2\sqrt{2}}{3} c \approx 0,9428 c$ с массой $m_0 = 1$ кг, потребуется около энергии, которая выделяется при сгорании 4 млн тонн бензина. А для того, чтобы довести скорость тела до скорости света, нужна бесконечно большая энергия. Поэтому можно не только довести скорость тела до скорости света, но и приблизиться к нему.

Как известно, каждая новая созданная теория должна не отрицать предыдущую, а дополнять ее, то есть должен соблюдаться принцип совместности. Точно так же для кинетической энергии этот принцип должен соблюдаться. Для этого мы используем эту форму, которая помогает нам перейти от представления произвольной степени суммы чисел к представлению многочлен.

$$(1 + \alpha)^n = 1 + n\alpha + \frac{n(n-1)}{2!} \alpha^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \alpha^3 + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{4!} \alpha^4 + \dots$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{g}{c}\right)^2}} \approx 1 + \frac{g^2}{2c^2} + \frac{3g^4}{8c^4} + \dots \quad (*)$$

Если в формуле релятивистской кинетической энергии записать эту дробь в виде многочленов, основываясь на формуле, написанной выше, и учесть первые два значения для малых скоростей, то релятивистская кинетическая энергия перейдет в форму этой классической кинетической энергии.

$$E_K = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} - 1 \right) = m_0 c^2 \left(1 + \frac{g^2}{2c^2} - 1 \right) = \frac{m_0 g^2}{2}$$

По мере того, как скорость тела или частицы увеличивается и приближается к скорости света, необходимо учитывать как 3-й член в формуле (*), так и 4-й член, 5-й член и т. д.

Связь между энергией и импульсом:

Когда тела движется, он получает энергию, а также импульс. Поэтому естественно задать вопрос, существует ли какое-либо уравнение, которое выражает связь между импульсом и энергией, которую получает тела. Определим эту зависимость.

Релятивистская энергия при движении тела будет равна

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{g}{c}\right)^2}} c^2 = \gamma c^2$$

Подставив это выражение в квадрат, получим математическое преобразование $E^2 - \frac{E^2 g^2}{c^2} = m_0^2 c^4$, из которого в результате сложения получим выражение $E^2 = m_0^2 c^4 + \frac{E^2 g^2}{c^2}$. Заменяя E в левой части уравнение на mc^2 , получим $E^2 = m_0^2 c^4 + c^2 (mg)^2$. Учитывая, что здесь импульс $p = mg$, мы найдем знаменитое соотношение между E и p , о котором идет речь.

Таким образом, связь между энергией и импульсом будет равна:

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} = \sqrt{E_0^2 + (pc)^2} \quad (23.13)$$

Из этой формулы импульс тела будет выглядеть следующим образом:

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c} \quad (23.14)$$

Если мы применим формулы, найденные выше, для кванта света — фотона, мы получим отличные результаты. Как известно, фотон в покое не имеет массы, а значит, и энергии, то есть для фотона $m_0 = 0$, $E_0 = 0$. Учитывая это, мы можем найти импульс фотона.

$$E_f = pc \quad \text{или} \quad p_f = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (23.15)$$

Следовательно, оказывается, что фотон можно представить как частицу с энергией $E_f = h\nu$ и импульсом $p_f = \frac{h}{\lambda}$.

1. Напишите формулу относительности массы. Что такое собственная масса? Напишите формулу для нахождения скорости при заданных массах.
2. Напишите формулу относительности плотности. Запишите формулу для нахождения скорости, когда даны плотности.
3. Напишите основное уравнение релятивистской динамики. От каких величин зависит сила, ускоряющая тела при этом?
4. Нарисуйте графики релятивистского импульса и классического импульса, связанные со скоростью.
5. Запишите связь между массой и энергией. Что такое энергия покоя?
6. Запишите релятивистскую кинетическую энергию и выведите из нее выражение классической кинетической энергии.
7. Нарисуйте графики релятивистской кинетической энергии и классической кинетической энергии, связанной со скоростью.
8. Запишите зависимость между энергией и импульсом. Как будет выглядеть эта зависимость для фотона?

Решение задачи:

1. Как изменяется плотность тела, движущегося со скоростью 0,5 c относительно тела в состоянии покоя? c - скорость света в вакууме.

Дано:
 $v=0,5c$

Решение:
Согласно законам теории относительности масса тела в движении зависит с его массой в покое $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

принимая во внимание, что $m = \rho V$ и $m_0 = \rho_0 V_0$

получаем выражение $\rho l = \frac{\rho_0 l_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ Поставив вместо l выражение

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ получим выражение } \rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ из которого следует,}$$

что $\rho = \frac{\rho_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1,3$ раза.

Ответ: Увеличивается в 1,3 раза

2. Кинетическая энергия электрона $E_k=2$ МэВ. Определите скорость электрона по классическим и релятивистским формулам.

Дано:
 $E_k=2$ МэВ
 $m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

Решение:
Перенесем кинетическую энергию в систему СИ.
 $E_k = 2 \text{ МэВ} = 2 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 2 \cdot 10^6 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}) = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$

Для начала определим скорость по классической формуле кинетической энергии.

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}, \rightarrow v_{\text{класс}} = \sqrt{\frac{2E_k}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-13}}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 8,39 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Эта скорость даже больше скорости света. Поэтому использование классической формулы в задачах является неправильным. Теперь применим формулу, определяющую скорость, используя релятивистскую формулу кинетической энергии.

$$E_k = m_e c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} - 1 \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1 - (g/c)^2}} = 1 + \frac{E_k}{m_e c^2} \rightarrow 1 - (g/c)^2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{m_e c^2}\right)^2} \rightarrow$$

$$\left(\frac{g}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{m_e c^2}\right)^2} \rightarrow g = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{m_e c^2}\right)^2}} \cdot c$$

$$\frac{g}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_k}{m_e c^2}\right)^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{3,2 \cdot 10^{-13}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}\right)^2}} \cdot 3 \cdot 10^8 \approx 2,937 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Ответ:

3. Солнечная излучения приносит на Землю $5,4 \cdot 10^{24}$ Дж энергии в течение года. На сколько кг увеличилась бы его масса за 10 лет, если бы Земля не излучала эту энергию в космос?

Дано:
 $E = 5,4 \cdot 10^{24} \text{ Дж}$

$\Delta m = ?$

Решение:
Согласно принципу относительности, масса-это величина, эквивалентная энергии, и тела увеличивают свою массу, поглощая энергию, и наоборот. Между ними существует связь $E = \Delta m \cdot c^2$. Где Δm - изменение массы. Следовательно, масса Земли за 1 год $\Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 6 \cdot 10^7$ в пересчете на кг. И в 10 лет он увеличился бы на $6 \cdot 10^8 \text{ кг}$.

Ответ: $6 \cdot 10^8 \text{ кг}$

ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ V

1. В пространстве две частицы летят по одной прямой навстречу друг другу со скоростями 0,8c и 0,9c. Определите скорость второй частицы относительно первой. (c - скорость света в вакууме.)
A) 0,8c B) c C) 1,7c D) 0,99c E) 0,1c
2. Нафти масу частицы с масой m в покое, движущейся со скоростью 0,6c.
A) 1,83m B) 1,67m C) 1,25m D) 2,78m E) 1,56m
3. Во сколько раз масса электрона, скорость которого равна 0,87c, больше его массы в покое?
A) 2,0 B) 2,5 C) 4,0 D) 5,0 E) 10,0

4. Скорость протона 240000 км/с . Во сколько раз его масса больше массы в покое? Скорость света в вакууме составляет 300000 км/с .
 А) 1,67 В) 0,60 С) 0,48 Д) 2,24 Е) 1,00
5. Ракета движется со скоростью $0,9c$ (c – скорость света) относительно наблюдателя на Земле. Содержит вещество плотностью 950 кг/м^3 . Сколько кг/м^3 составляет плотность этого вещества относительно наблюдателя?
 А) 9500 В) 950 С) 2500 Д) 5000 Е) 7500
6. Сколько джоулей полной энергии имеет тела массой 1 кг ?
 А) $3 \cdot 10^9$ В) $3 \cdot 10^{16}$ С) $18 \cdot 10^{16}$ Д) $9 \cdot 10^{24}$ Е) $9 \cdot 10^{16}$
7. Суммарная мощность излучения Солнца $3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$. Сколько кг массы теряет Солнце каждую секунду из-за этого излучения?
 А) $22 \cdot 10^{11}$ В) $3,5 \cdot 10^8$ С) $1,7 \cdot 10^8$ Д) $15 \cdot 10^{10}$ Е) $4,3 \cdot 10^9$
8. С какой скоростью движется частица, ее кинетическая энергия равна ее энергии в покое? c – скорость света в вакууме.
 А) $0,5c$ В) $0,87c$ С) $0,75c$ Д) $0,25c$ Е) $7/9c$
9. Какова полная энергия Протона, если его кинетическая энергия равна $0,5mc^2$? m_0 – масса протона в покое.
 А) $1,5mc^2$ В) $0,5mc^2$ С) mc^2 Д) $2mc^2$ Е) $0,25mc^2$
10. Электрон свободно движется со скоростью $0,8c$. Его энергия покоя равна $0,511 \text{ МэВ}$. Какова кинетическая энергия электрона (МэВ)?
 А) 0,511 В) 0,341 С) 0,285 Д) 0,1 Е) $7/9$
11. Если кинетическая энергия движущейся элементарной частицы в 7 раз больше ее энергии в покое, во сколько раз ее масса больше массы в покое?
 А) 5 В) 6 С) 7 Д) 8 Е) 9
12. Как изменится масса груза массой 90 т при подъеме на высоту 10 м ?
 А) не изменится В) уменьшается на 10^{-10} кг
 В) увеличивается на 10^{10} кг Д) уменьшается на $5 \cdot 10^{10} \text{ кг}$
 Е) увеличивается на $5 \cdot 10^{10} \text{ кг}$
13. На сколько увеличивается масса (кг) при нагревании 1 кг воды до 81 К ? $c = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.
 А) $3,78 \cdot 10^{-12}$ В) $2,8 \cdot 10^{-13}$ С) $8,1 \cdot 10^{-13}$ Д) $3,78 \cdot 10^{-13}$ Е) $4,2 \cdot 10^{-13}$
14. Как изменится масса 1 кг воды при нагревании ее на 90 К ? Удельная теплоемкость воды составляет $c = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

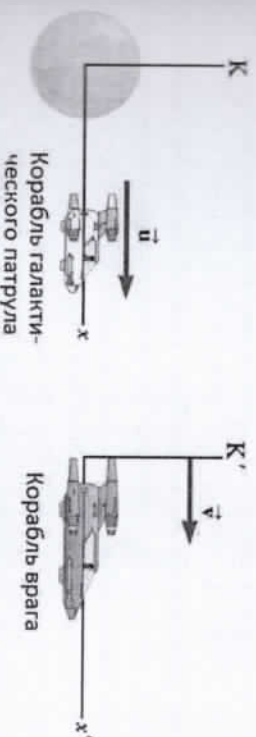
- А) не изменяется В) увеличивается на $42 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$
 С) уменьшается на $42 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$ Д) увеличивается на $84 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$
 Е) уменьшается на $84 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$
15. С какой скоростью движется объект, его масса в два раза превышает его массу в покое?
 А) $0,87c$ В) $0,9c$ С) $0,8c$ Д) $0,72c$ Е) $0,92c$
16. Относительно ИСС два тела удаляются друг от друга в противоположные стороны с одинаковыми релятивистскими скоростями. Их релятивистская относительная скорость относительно друг друга равна $0,6c$. Какими были модули скоростей каждого из тел?
 А) $0,555c$ В) $0,777c$ С) $0,333c$ Д) $0,363c$ Е) $0,222c$
17. Сколько процентов кинетической энергии частицы, составляет ее энергия в покое при движущейся со скоростью $0,5c$?
 А) 31 % В) 25,5 % С) 0,333с Д) 15,5 % Е) 18,5 %
18. Определить кинетическую энергию и импульс электрона, движущегося со скоростью $0,9c$.
 А) $E_k = 1,06 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}; p = 5,64 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
 В) $E_k = 2,16 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}; p = 8,32 \cdot 10^{-20} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
 С) $E_k = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}; p = 5,64 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
 Д) $E_k = 1,06 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}; p = 5,64 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$
 Е) $E_k = 3,46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}; p = 5,64 \cdot 10^{-21} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ V

1. Скорость электрона 180000 км/с . Во сколько раз его масса больше массы в покое? Скорость света в вакууме составляет 300000 км/с .
2. Объект движется со скоростью $0,89c$. Как изменится при этом его плотность?
3. Объект движется со скоростью $0,6c$. Во сколько раз кинетическая энергия частицы меньше энергии покоя?
4. При растяжении пружины с упругости 20 кН/м на 30 см на сколько увеличивается ее масса?
5. Алюминий массой 20 кг нагревали от 0 до 200°C при неизменном давлении. На сколько увеличилась при этом масса азота? Удельная теплоемкость азота при неизменном давлении составляет $1,05 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

6. Две частицы движутся навстречу друг другу относительно Земли $\beta_1 = 0,5c$ и $\beta_2 = 0,8c$ со скоростью. Чему равна скорость первой частицы в системе отсчета, связанной со второй частицей?
7. Длина линейки находящийся в состоянии покоя $l_0 = 1 \text{ м}$. Какой будет длина линейки, движущейся в продольном направлении со скоростью $0,6c$?
8. Во сколько раз измеренная земными часами продолжительность жизни космической частицы, движущейся со скоростью $\beta = 0,98c$ относительно Земли t , больше, чем ее собственный время жизни t_0 ?
9. На ракете, движущейся со скоростью $\beta = 0,33c$ относительно Земли, прошло $t_0 = 50 \text{ лет}$. Сколько лет прошло на Земле?
10. Какова масса протона, движущегося со скоростью $\beta = 2,4 \cdot 10^8 \text{ м/с}$? Масса протона в покое $m_0 = 1 \text{ а.е.м.}$
11. Какую скорость должен набрать движущийся объект, чтобы его продольный размер уменьшился в n раз?
12. Какова критерий измерения длины мезона, если в составе космических лучей движется со скоростью 95% скорости света?
13. Нестабильная частица составляет 99% светового скорости. Во сколько раз удлинится время его жизни при взгляде на земного наблюдателя?
14. Докажите, что свет, излучаемый звездой, движущейся со скоростью β по направлению к Земле, приближается к Земле со скоростью c , а не со скоростью $c+\beta$.
15. Ускоритель даст радиоактивному ядру скорость $1,2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. При выходе из ускорителя ядро испускает электрон, который имеет скорость $2,25 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ относительно ускорителя в его направлении. Определите скорость электрона относительно ядра.
16. Во сколько раз релятивистская масса электрона, движущегося со скоростью $\beta = 0,99c$, больше его массы в покое?
17. Релятивистская масса движущегося объекта увеличилась на 20% по сравнению с его массой в покое. Во сколько раз при этом его длина уменьшалась?
18. Электрон движется со скоростью $2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. Вычислить кинетическую энергию электрона по классической и релятивистской формулам и сравнить полученные результаты.
19. Изменение энергии 1 Дж приводит какую изменению массы?

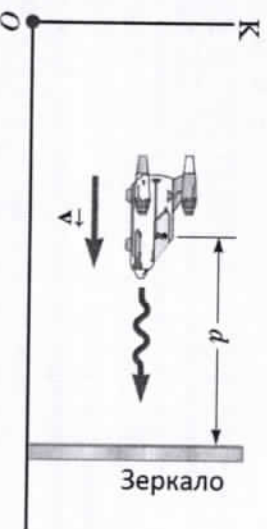
20. Как изменить энергию, чтобы ее масса изменилась как масса электрона в состоянии покоя?
21. Нейтронная частица живет около 900 с, относительно наблюдателя в покое, а затем испаряется. Если нейтрон движется с какой-то скоростью, то в годах наблюдателя эта частица живет 2065 с. С какой скоростью движется нейтрон?
22. Если релятивистские эффекты не должны превышать 1%, то коэффициент Лоренца не должен быть $\gamma = 1,01$. При какой относительной скорости $\gamma = 1,01$. Какой должна быть относительная скорость, чтобы релятивистские эффекты не превышали 3%?
23. Вражеский космический корабль удаляется от Земли со скоростью $0,8c$. Галактический патрульный корабль, однако, преследует его со скоростью $0,9c$ относительно Земли (см. изображение ниже). Наземный наблюдатель думает, что патрульный корабль догонит вражеское судно со скоростью $0,1c$. Как думают экипажи патрульных кораблей, с какой скоростью они преследуют вражеский корабль?



24. Две планеты сближаются с одной и той же скоростью $0,25c$ по траектории отклонения относительно системы отсчета. Космический корабль был вынужден с первой планеты на вторую. Это фиксирует, наблюдатель на второй планете что космический корабль приближается со скоростью $0,75c$. Какова скорость космического корабля в выбранной системе отсчета? С какой скоростью космический корабль был запущен относительно первой планеты?
25. Две планеты сближаются по встречной траектории с относительной скоростью, равной $0,25c$. Космический корабль был запущен с первой планеты на вторую. Это фиксирует наблюдателю на второй планете, что космический корабль приближается со скоростью $0,75c$. С какой скоростью космический корабль был запущен относительно первой планеты?
26. Один из двух космических кораблей, движущихся с релятивистской скоростью, запускает дрон в другой. Этот дрон удаляется от корабля 1 со

скоростью $0,75c$ и приближается к последнему со скоростью $0,95c$. Какова была скорость космических кораблей относительно друг друга?

27. Космонавт на космическом корабле движется со скоростью $0,65c$ относительно системы отсчета К на изображении в направлении зеркала. Зеркало находится в покое по отношению К системе отсчета. Космонавт посылает световой импульс от корабля к зеркалу, и импульс возвращается от зеркала обратно к кораблю. В момент передачи импульса корабль находится на расстоянии $d = 5,66 \cdot 10^{10} \text{ м}$ от зеркала (по расчету наблюдателя в системе К). Чему равно общее время прохождения импульса К наблюдателями в системе на космическом корабле?



28. Работа радиолокационного прибора, используемого сотрудником ГАИ, находящим на трассе, основана на доплеровском смещении, которое определяет скорость движения автомобилей за счет этого сдвига. Частота выхода микроволнового радиолокатора составляет 100 ГГц , а частота обратного эхосигнала на 15 кГц больше. Какова была скорость автомобиля?

29. Если импульс Протона равен $4,48 \cdot 10^{19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$, какова его скорость? Масса протона в покое $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

30. Считается, что после Большого взрыва образовалось 10^{68} Дж энергии. Сколько звезд может образоваться с этой энергией с массой $4 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ каждая?

(АТОМ, ЯДРО

И ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ)

Древнегреческий философ Демокрит высказал, что "все тела в природе состоят из неделимых частиц—атомов". Долгое время в науке господствовало мнение, что атом—неделимая часть материи, "самые элементарные кирпичики мирового устройства". Атом, о котором говорил Демокрит, считался последней частицей материи до конца XIX века. Нынешние, современные представления о внутреннем строении атома приходят не сразу. К концу века XIX, благодаря ряду известных экспериментов, идея о сложном строении атома стала более ясной. Остановимся на некоторых из них:

1. В 1896 году А.Беккерель открыл радиоактивность и обнаружил, что радиоактивные излучения воздействуют на фотопластинку и ионизируют ее.

2. В 1898 году П.Кюри и М.Склодовская установила, что соли урана также имеют радиоактивную природу. Они также обнаружили, что излучение может иметь три различных вида и что интенсивность этого излучения не зависит от внешних воздействий.

3. 1897 году Дж.Томсон открыл электрон. В 1903 году он предложил свою атомную модель.

4. 1900 году Кюри, Э.Резерфорд, Ф.Содди исследователи обнаружили, что α -лучи, испускаемый радиоактивными излучениями, является дважды ионизированным, в-лучи—это быстрый поток электронов, а γ -лучи—короткая электромагнитная волна.

5. 1911 году Резерфорд предлагает ядерную (планетарную) модель атома.

6. В 1913 году датский физик Нильс Бор сформулировал три своих постулата и показал, что классическая физика не может быть оппеленена к физике микрому.

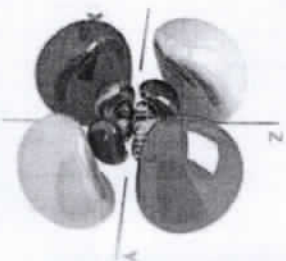
7. Чтобы проверить постулаты Бора, Франк и Герц провели эксперимент в 1913 году.

В этом уроке мы изучим раздел атома, ядра и частиц на 3 части:

- Атомная физика
- Ядерная физика
- Физика элементарных частиц

VI ГЛАВА. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Раздел физики атома, ядра и частиц, который изучается как последний раздел общей физики, в свою очередь делится на три части, как видно из его названия. Из них часть атомной физики изучается как начальная глава. Это связано с тем, что в результате знаменитых экспериментов, проведенных в начале XX века над стадией исторического развития, прежде всего был открыт путь в глубину атома. В результате появилось совершенно новое направление в физике. Атомная физика изучает молекулы, из которых состоят все тела и вещества в природе, как составленные из химических элементов — атомов. В этой главе изучается строение атомов, различные энергетические уровни, электронные оболочки на уровнях и какие величины принимают физические величины в этих оболочках.



§ 24. РАЗВИТИЕ КЛАССИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ АТОМЕ.

Понятие об атоме как о наименьшей неделимой части материи было впервые сформулировано древнеиндийскими и древнегреческими философами (см.: атомизм).

В XVII и XVIII веках химикам удалось экспериментально подтвердить эту идею, показав, что некоторые вещества не могут быть подвергнуты дальнейшему расщеплению на составляющие элементы с помощью химических методов. Однако в конце XIX — начале XX века физиками были открыты субатомные частицы и составная структура атома, и стало ясно, что реальная частица, которой было присвоено имя атома, в действительности не является неделимой.

На международном съезде химиков в Карлсруэ (Германия) в 1860 году были приняты определения понятий молекулы и атома. Атом — наименьшая частица химического элемента, входящая в состав простых и сложных веществ.

Нынешние, современные представления о внутреннем строении атома не сразу приходилось. К концу XIX века, благодаря ряду известных экспериментов, идея о сложном строении атома стала более ясной. Выделим несколько из них.

Спектральные series:

Ученые, посвятившие себя изучению строения атома, для получения информации о нем основное внимание уделяли изучению атомного

линейчатого спектра. Для этого требовалось измерение длин волн спектра с максимальной возможной точностью.

Эти измерения обычно проводились с помощью спектроскопа. Первое измерение провел Фраунгофер, изучавший структуру атомного линейчатого спектра. Для этого он использовал спектроскоп, состоящий из двух параллельных зрительной трубки, призмы и сигаретного коробку. В последующих измерениях этот спектроскоп был значительно усовершенствован. Со временем он освободил свое место для спектроскопов, состоящих из дифракционной решетки. С помощью такого прибора в течение нескольких десятилетий с большой точностью были измерены длины волн более 10 000 спектральных линий различных элементов.

Первым на эту работу обратил внимание Иоганн Балмер, который обнаружил, что в области чисел существует некая система.

Он установил, что 4 спектральные линии в видимом поле спектра атома водорода располагаются не хаотично, а их расположение и длина волны подчиняются определенному закону. Балмер назвал этот закон спектральным рядом и записал его выражение в следующем виде:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (24.1)$$

Здесь: n — натуральные числа, которые принимают значения 3, 4, 5, 6,

B — константа, которая равна $B = 3645,6 \text{ \AA}$.

Эта простая формула настолько ясна, что ее также можно увидеть в таблице 24.1 ниже.

Таблица 24.1

Штрихи	Длина волны, измеренная в Ангстреме	Длина волны, рассчитанная Балмером	n
C	6562,1	6562,08	3
F	4860,74	4860,8	4
G	4340,1	4340	5
H	4101,2	4101,3	6

В первом столбце этой таблицы приведены названия, данные спектральным линиям атома водорода Фраунгофером, во втором столбце — длины волн этих линий, измеренные шведским физиком Ангстремом, в третьем столбце — длины волн этих линий, рассчитанные по формуле Балмера, а в пятом столбце — натуральные чисел, вошедших в формулу Балмера и использованных при расчете длин волн линий.

Измеренные и рассчитанные значения длин волн спектральных линий чрезмерно совпадают друг с другом. Такое совпадение не могло быть случайным. Именно поэтому его открытие привело к целому ряду новых исследований.

С этого открытия началась эра науки об атоме. В 1886 году Рунге показал, что формула Бальмера более точна не по длине волн, а по ее частоте, и предложил записать эту формулу в виде:

$$\nu = \frac{4c}{B} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (24.2)$$

А в 1890 году шведский физик Ридберг записал эту формулу следующим образом:

$$\nu = cR_H \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (24.3)$$

Где: n и k – натуральные числа. $R_H = 10967759,37 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}$ был назван волновой константой Ридберга для атома водорода (в то время как частотная константа Ридберга для атома водорода будет $R_H = R_{\infty} = 10967759,37 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} = 3,29032 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$). Эта формула называется обобщенной формулой Бальмера. При $k=2$ образуется ряд Бальмера, т. е. формула Бальмера, характеризующая видимую область спектра атома водорода, подтвержденная экспериментом. По этой формуле были определены длины волн спектральных линий до $n=50$.

В дальнейших исследованиях было установлено, что частота спектральных линий, характеризующих ультрафиолетовое поле спектра атома водорода, также подчиняется следующему закону:

$$\nu = cR_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (24.4)$$

Здесь: n принимает значения 2, 3, 4, Это выражение получило название серии Лаймана.

Установлено, что частота спектральных линий, характеризующих инфракрасное поле спектра аналогичного атома водорода, подчиняется следующим закономерностям:

$$\begin{aligned} \nu &= cR_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=4,5,6,7,8,\dots), \\ \nu &= cR_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=5,6,7,8,\dots), \\ \nu &= cR_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=6,7,8,\dots), \\ \nu &= cR_H \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n=7,8,\dots). \end{aligned} \quad (24.5)$$

Первая формула называется серией Пашена, вторая-серией Брекета, третья-серией Пфунда, а последняя-серией Хемфри.

После этого было предложено записать обобщенную формулу Бальмера в виде вычитания двух чисел, и эти числа стали называть спектральными числами:

$$\nu = \frac{cR_H}{k^2} - \frac{cR_H}{n^2} = T(k) - T(n) \quad (24.6)$$

Кажется, что это выражение не имеет никакого смысла. В 1908 году швейцарский ученый Ридс объяснил значение этого выражения. Продолжая работу Ридберга, Ридс описал на его основе комбинационный принцип: частоту произвольной линии в спектре любого атома можно записать в виде вычитания двух слагаемых. Такое вычитание также можно будет записать, когда спектральный термин не может быть выражен в обычном виде (как атом водорода).

При таком рассмотрении кажется, что нет смысла переходить от формулы Бальмера к принципу комбинации. Но это не так. Здесь количество номеров значительно сократилось. Например, при определении частоты 50 спектральных линий водорода будет достаточно знать не 50, а около 10 спектральных линий.

Следовательно, набор неупорядоченных спектральных линий атома водорода был разложен в упорядоченные спектральные ряды. А теперь их нужно было объяснить. Эта работа была осуществлена в 1913 году Н.Бором. Он разработал классическую теорию атома водорода и объяснил возникновение спектральных рядов. Тем самым была заложена основа квантовой теории. Из этого можно увидеть, что спектральные ряды играют важную роль в начале квантовой теории.

Атомная модель Томсона:

В 1903 году Э.Томсон предложил такую модель атома, согласно которой атом состоит из сферы, равномерно заполненной положительным зарядом, внутри которой находится электрон (рис.24.1). Суммарный положительный заряд сферы равен заряду электрона, а атом в целом нейтрален. По идею

Томсона атомная масса равномерно распределена по всему ее объему, а внутри атома также имеется более слабое электрическое поле, чем на поверхности.

Чтобы объяснить характер спектра, который испускает изолированный атом, необходимо было предположить, что электрон в излучаемом атоме совершает гармоническое колебание и, следовательно, удерживается квазиэлектрической силой в виде $F = -\alpha r$ вокруг равновесного состояния. Где r — отклонение электрона от равновесного состояния.

Напряженность поля внутри равномерно заряженной сферы определяется выражением:

$$E(r) = k \frac{e}{R^3} \cdot r \quad (0 \leq r \leq R) \quad (24.7)$$

Здесь: e — заряд сферы, R — ее радиус;

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{H \cdot M^2}{K r^2} \right] - \text{коэффициент}$$

пропорциональности;

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{K r^2}{H \cdot M^2} \right] - \text{электрическая}$$

постоянная.

Следовательно, на электрон, находящийся в интервале r от равновесного состояния, действует следующая сила.

$$F = (-e) E = -k \frac{e^2}{R^3} \cdot r = -\alpha r \quad (24.8)$$

В этих условиях электрон, выведенный из равновесного состояния, вибрирует с частотой ν .

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{m_e}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k e^2}{m_e R^3}} \quad (24.9)$$

Здесь: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона.

Из последнего выражения можно определить размер атома.

$$R = \sqrt[3]{\frac{k e^2}{4\pi^2 \nu^2 m_e}} \quad (24.10)$$

$\lambda = 600$ нм длине волны (видимая область спектра) соответствует частота $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц.

$$R = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4\pi^2 \cdot (5 \cdot 10^{14})^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}} = \sqrt[3]{\frac{2,304 \cdot 10^{-28}}{8,981}} = 2,95 \cdot 10^{-10} \text{ м} \approx 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

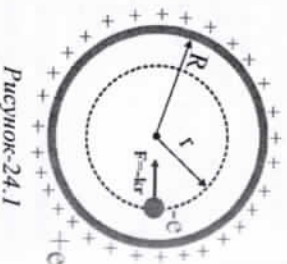


Рисунок-24.1

Полученное значение соответствовало по порядку газокинетическому размеру атома, что также можно было рассматривать как подтверждение модели Томсона. Но позже выяснилось, что эта модель непригодна для использования. Поэтому в настоящее время он имеет лишь историческое значение как одно из звеньев в цепи прогресса в отношении строения атомов.

Опыты Резерфорда по рассеянию α -частиц:

Для изучения распределения положительных и отрицательных зарядов в атоме необходимо было "зондировать" внутреннее поле атома. Такое "зондирование" осуществлялось Резерфордом и его сотрудниками, наблюдая, как α -частицы меняют направление при прохождении тонкого слоя. На момент проведения Резерфордом своих опытов было известно, что α -частица имеет двойной элементарный положительный заряд и при потере заряда (когда два электрона соединяются между собой) превращается в нейтральный атом He. Скорость полета α -частиц из радиоактивного вещества порядка 10^7 м/с.

Эксперимент проводился следующим образом (рис.24.2). В ямку на куске свинца вводит радиоактивное вещество R, которое служит источником α -частиц. α -частицы могут выходить наружу только через небольшую щель. Тонкий металлический пластина (золотая фольга) помещается на пути α -частиц. α -частицы отклоняются под разными углами при прохождении через фольгу. Рассеянные частицы идут к экрану E, на который нанесен сульфид цинка, и при ударе образуют свинтциллиции (высыпки). Эти высыпки наблюдаются через М-микроскоп. Микроскопа и экран можно поворачивать вокруг оси, проходящей через центр рассеивающих осей, и устанавливать под любым углом α . Чтобы α -частицы не сталкивались с молекулами воздуха, все устройство помещают в вакуум, в которой высасывается воздух.

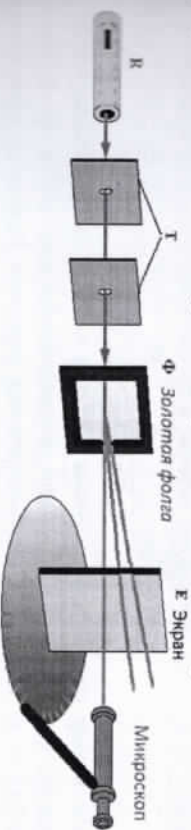


Рисунок 24.2

Оказалось, что определенное количество α -частиц рассеивается под очень большим (почти 180°) углом. Проанализировав результаты эксперимента, Резерфорд пришел к следующему выводу: столь большое угловое отклонение α -частиц обусловлено исключительно чрезвычайно сильным электрическим полем очень массивного заряда, сосредоточенного внутри атома в очень малом объеме. Исходя из этого вывода, Резерфорд в 1911 году предлагает

ядерную модель атома. В его представление атом состоит из системы зарядов с Z положительным зарядом в центре, с тяжелым ядром размером не более 10^{-14} м. Вокруг ядра находится система зарядов с Z электронами по всему объему, занимаемому атомом. Практически вся масса атома воплощена в ядре.

Резерфорд разработал теорию рассеяния α -частиц по этим представлениям, вывел формулу углового распределения рассеянных частиц по α -частицы отклоняются из-за влияния атомных ядер. В результате взаимодействия с электронами невозможно получить большое отклонение, так как масса электрона примерно в 7500 раз меньше массы α -частицы. Когда частица пролетает вблизи ядра, на нее действует следующая Кулоновская сила.

$$F = \frac{2Zk e^2}{r^2} [H], \quad k = 9 \cdot 10^9 \left[\frac{H \cdot M^2}{Kil^2} \right] \quad (24.11)$$

Асимптоты траектории частицы в этом случае будут состоять из гиперболы, образующей между собой угол α . Расстояние b от ядра до начального направления α -частицы называется *параметром прицеливания*. Чем ближе частица проходит к ядру (чем меньше b), тем сильнее ее отклонение (чем больше α) естественно.

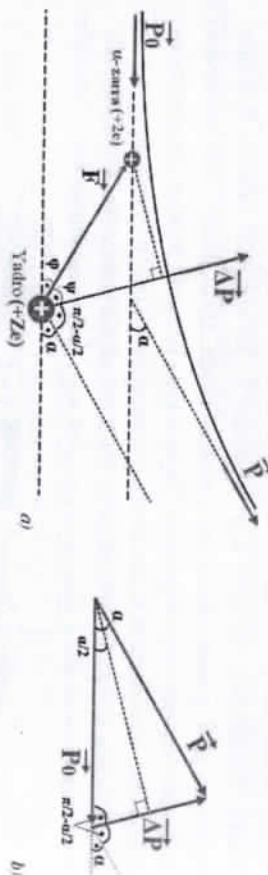


Рисунок 24.3

По закону сохранения импульса импульс частицы до рассеяния в ядре равен P_0 , а импульс при удалении от рассеянного ядра равен р.т. е. $P=P_0$ (рис.24.3-а, в). Используя закон сохранения импульса, Резерфорд определил связь между b и α следующим образом, то есть определил угол рассеяния α -частицы.

$$\cot \frac{\alpha}{2} = \frac{m_\alpha g^2}{2Zk e^2} \cdot b \quad (24.12)$$

Давайте рассмотрим слой рассеивающего вещества как настолько тонкий, что каждая частица пролетает вблизи только одного ядра, когда проходит через него, то есть каждая частица рассеивается только один раз.

Пусть частица пролетает вблизи одного из ядер по такой траектории, чтобы она была рассеяна на угол между α и $\alpha-d\alpha$, чтобы ее параметр прицеливания совпал с параметрами b и $b+db$ (рис.24.4). При этом $d\alpha$ и db связаны в соответствии с приведенной выше формулой следующим образом:

$$-\frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{d\alpha}{2} = \frac{m_\alpha g^2}{2Zk e^2} \cdot db \quad (24.13)$$

Знак минус в этом выражении появился в результате уменьшения α с увеличением b ($db > 0$). В дальнейшем нас интересует только абсолютное значение в функции db , зависящей от α и $d\alpha$. Поэтому мы можем оставить знак минус.

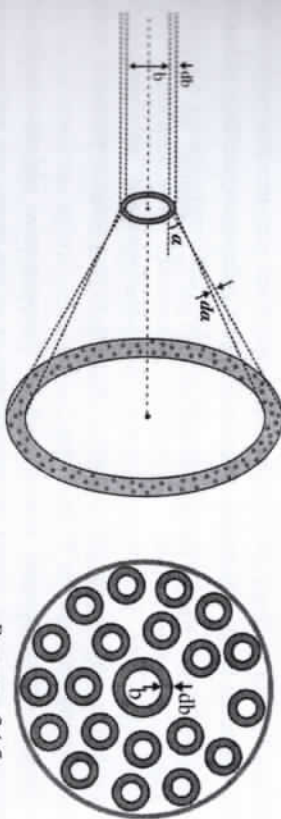


Рисунок 24.4

Рисунок 24.5

Обозначим буквой S поперечное сечение потока α -частиц. В нем число атомов на пути пучка дисперсионной фольги будет $N_{at} = nSd$. n — концентрация атомов, d — толщина фольги. Если толщина пучка α -частиц равномерно распределена по сечению пучка, то относительное число α -частиц, пролетающих вблизи одного из ядер по параметрической траектории прицеливания от b до $b+db$ (откуда и угловое отклонение от α), равно (рис. 24.5):

$$\frac{dN_\alpha}{N_\alpha} = \frac{N_{at} \cdot S_0}{S} = \frac{nSd \cdot 2\pi b db}{S} = nd 2\pi b db \quad (24.14)$$

Здесь: N_α — общее количество α -частиц в потоке; dN_α — число частиц, рассеянных под углом от $\alpha - d\alpha$ к α .

В результате вычислений приведем приведенную выше формулу к следующему виду

$$\frac{dN_\alpha}{N_\alpha} = nd \cdot \left(\frac{2Zk e^2}{m_\alpha g^2} \right)^2 \cdot \frac{2\pi \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{4 \sin^4 \frac{\alpha}{2}} \quad (24.15)$$

Наконец, учитывая, что элементарный телесный угол,

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{2\pi b db}{r^2} = \frac{2\pi(r \sin \alpha) \cdot (r d\alpha)}{r^2} = 2\pi \sin \alpha d\alpha$$

относительное число α -частиц будет:

$$\frac{dN_\alpha}{N_\alpha} = n d \cdot \left(\frac{2Zk e^2}{m_\alpha g^2} \right)^2 \cdot \frac{d\Omega}{4\pi \sin^4 \frac{\alpha}{2}} \quad (24.15a)$$

Это выражение называется формулой Резерфорда рассеяния α -частиц. В 1913 году сотрудниками Резерфорда была проведена проверка этой формулы путем подсчета количества синтиллиций, наблюдаемых под разными углами α за один и тот же промежуток времени. В экспериментальных условиях (рис.24.2) вычислялись α -частицы с одинаковым (определяемым с гранью экрана и его удаленностью от кости) пространственным угловым расстоянием. Поэтому число синтиллиций, наблюдаемых под разными углами, должно быть пропорционально $1/\sin^4 \frac{\alpha}{2}$, исходя из формулы Резерфорда. Этот результат теории был подтвержден экспериментом. Зависимость дисперсии от толщины фольги и скорости α -частицы также соответствовала формуле Резерфорда.

Правильность теории, основанной на Кулоновском эффекте между α -частицей и атомным ядром, подтверждает даже тот факт, что отброшенная назад α -частица не может проникнуть в положительно заряженное поле атома (мы видели, что взаимодействие определяется силой $2Zk e^2 r/R^3$ в место $2Zk e^2/r^2$, когда мы видим модель Томсона). Также α -частица, направленная к точному ядру, может приблизиться к его центру на такое расстояние, чтобы его можно было найти равным потенциальной энергии взаимодействия α -частицы с ядром в момент его полной остановки.

$$\frac{m_\alpha g^2}{2} = \frac{2Zk e^2}{r_{\min}} \quad (24.16)$$

Здесь: $r_{\min}$ — минимальное расстояние между α -частицей и центрами ядра;

$$m_\alpha = 4 m.p = 6,44 \cdot 10^{-27} \text{ кг} - \alpha\text{-ускоряющая масса.}$$

Давайте рассмотрим задачу для случая, когда $Z=79$ для золотых фольгой и α -скорость частицы $v_\alpha = 10^7 \text{ м/с}$.

$$r_{\min} = \frac{4Zk e^2}{m_\alpha g^2} = \frac{4 \cdot 79 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38}}{6,44 \cdot 10^{-27} \cdot 10^4} \approx 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}$$

Если мы прорешаем ту же задачу для алюминия ($Z=13$), у нас будет следующее решение:

$$r_{\min} = \frac{4Zk e^2}{m_\alpha g^2} = \frac{4 \cdot 13 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2,56 \cdot 10^{-38}}{6,44 \cdot 10^{-27} \cdot 10^4} \approx 1,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}$$

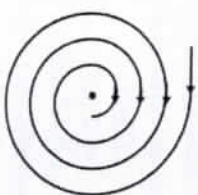


Рисунок 24.6

Таким образом, результат экспериментов по рассеянию α -частиц был решен в пользу ядерной модели атома, предложенной Резерфордом. Однако модель ядра оказалась противоречащей законам классической механики и электродинамики. Система неподвижных зарядов не может находиться в неподвижном состоянии. Поэтому Резерфорду пришлось отказаться от статической модели атома и предположить, что электроны вращаются вокруг ядра по замкнутой траектории. Но в этом случае электрон движется с ускорением. В связи с этим, согласно классической электродинамике, электрон должен излучать электромагнитные волны (свет) непрерывно. А процесс излучения приводит к затрате энергии. Следовательно, электрон должен постепенно разрушаться в ядре (рис.24.6). Абсолютно точные расчеты, основанные на законах Ньютона и Максвелла, показали, что электрон должен коллизировать в ядре за чрезвычайно короткий (10^{-8} с) промежуток времени. В результате атом должен исчезнуть. Но недостатком является то, что он не работает так долго, как хотелось бы.

Резерфорд создал планетарную модель атома: электроны вращаются вокруг ядра так же, как планеты вращаются вокруг Солнца. Эта модель не могла объяснить стабильность атомов. Но, тем не менее, его работы были универсальными.

Вопросы по теме

1. Какую формулу предложил Бальмер для определения 4-х длин волн спектра в видимом диапазоне? Чему равна константа В в этом случае?
2. Какую формулу предложил Рунге Бальмер в 1886 году, выражая ее через частоту?
3. Каким образом шведский физик Ридберг 1890-х годов вывел формулу Рунге, которая является более общей?
4. Из какой формулы следует формула Ридберга для рядов Лаймана, Бакера, Пашена, Брекета, Пфунда?
5. Объясните модель Томсона. Какая формула привела к определению размера атома?
6. Какая сила заставляет электрон колебательно двигаться в модели Томсона? Перечислите недостатки модели Томсона.
7. Напишите формулу Резерфорда, определяющую угол рассеяния.
8. Напишите формулу Резерфорда рассеяния α -частиц.
9. Перечислите недостатки модели Резерфорда.

Решение задачи:

1. Найдите интервал длин волн, в котором будет уместен ряд серии Лаймана атома водорода.

Дано:

$$n=2 \dots \infty$$

$$c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$R_H=10967759,37 \text{ м}^{-1}$$

Решение:

Используем формулу нахождения ряда серии

Лаймана.

$$\nu = cR_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\lambda = ?$$

Наименьшая частота, то есть самая длинная волна, генерируется при переходе от $n=2$ к $n=1$.

$$\nu_{\min} = \nu_{2 \rightarrow 1} = cR_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 10967759,37 \text{ м}^{-1} \left(1 - \frac{1}{4} \right) = 2,4677 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$\lambda_{\max} = \lambda_{2 \rightarrow 1} = \frac{c}{\nu_{2 \rightarrow 1}} = \frac{c}{2,4677 \cdot 10^{15} \text{ Гц}} = 1,2157 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 1215,7 \text{ нм}$$

Наибольшая частота, то есть самая короткая волна, генерируется при переходе от $n=\infty$ к $n=1$.

$$\nu_{\min} = \nu_{\infty \rightarrow 1} = cR_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 10967759,37 \text{ м}^{-1} \left(1 - \frac{1}{\infty} \right) = 3,2903 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\infty \rightarrow 1} = \frac{c}{\nu_{\infty \rightarrow 1}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м}}{3,2903 \cdot 10^{15} \text{ Гц}} = 9,1176 \cdot 10^{-8} \text{ м} = 911,76 \text{ нм}$$

$$\text{Ответ: } \lambda = [911,76 \text{ нм} - 1215,7 \text{ нм}]$$

2. Используя атомную модель Томсона, определите, сколько дисперсион имеет радиус атома, испускающего излучение с длиной волны 550 нм.

Дано:

$$\lambda = 550 \text{ нм}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$e = 9 \cdot 10^9 \text{ С}$$

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Решение:

Используем формулу Томсона, связывающей

атомный размер и частоту излучаемого атомом света

$$R = \sqrt[3]{\frac{k e^2}{4 \pi^2 \nu^2 m_e}} = \sqrt[3]{\frac{k e^2}{4 \pi^2 (c/\lambda)^2 m_e}} = \sqrt[3]{\frac{k}{m_e} \left(\frac{\lambda e}{2 \pi c} \right)^2}$$

$$R = ?$$

Производим расчет, подставляя цифры вместо величин,

$$R = \sqrt[3]{\frac{k}{m_e} \left(\frac{\lambda e}{2 \pi c} \right)^2} = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}} \left(\frac{5,5 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}}{2 \cdot 3,1416 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} \right)^2} = 2,782 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,782 \text{ нм}$$

$$\text{Ответ: } R = 2,782 \text{ нм}$$

4. С помощью эксперимента Резерфорда наблюдалось рассеяние α -частиц, движущихся со скоростью $3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ в золотой фольге. Какой размер ядра я при этом получается?

Дано:

$$v = 3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$\rho = 19300 \text{ кг/м}^3$$

$$m_\alpha = 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$Z = 79$$

Решение:

Кинетическая энергия α -частицы затрачивается на выполнение работы при приближении к ядру, ионизируемому электрического поля ядра золота.

$$\frac{m_\alpha v^2}{2} = \frac{2 Z k e^2}{r_{\min}}$$

$$r_{\min} = ?$$

Из этого определим искомый радиус.

$$r_{\min} = \frac{4 Z k e^2}{m_\alpha v^2} = \frac{4 \cdot 79 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2}{6,68 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2} = 1,21 \cdot 10^{-14} \text{ м}$$

$$\text{Ответ: } r_{\min} = 1,21 \cdot 10^{-14} \text{ м}$$



§ 25. ПОСТУЛАТЫ БОРА И ВЫТЕКАЮЩИЕ ИЗ НИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Постулаты Бора:

В предложенной Резерфордом модели атома наряду с классической механикой и электродинамикой было обнаружено, что ни атом не является стационарным, ни он не может объяснить характер атомного спектра. Выход из крайне затруднительного положения в атомной теории показал в 1913 году датский физик Нильс Бор в результате дальнейшего развития квантовых представлений о процессах в природе.

Уинштейн оценил это открытие, которое предложил Нильс Бор, как "плотнейшей способности в мире мышления". Благодаря великому внутреннему чувству, которое существует на основе разнообразных экспериментальных фактов, заранее определено существо вопроса.

Однако Бор не смог дать последовательной теории атома. Основные положения новой теории он излагает в форме постулатов. В то же время Бор не отвергал и законы классической физики. Это только положило конец некоторым попыткам, которые допускала классическая физика.

Тем не менее, успех теории Бора был ошеломляющим, и он нашел правильный путь для развития теории. Этот путь впоследствии привел к созданию совершенной теории движения микрочастиц — квантовой механики.

Предположение, которое предложил Бор, нашло свое содержание в постулатах трех постулатах, которые он описал (рис.25.1).

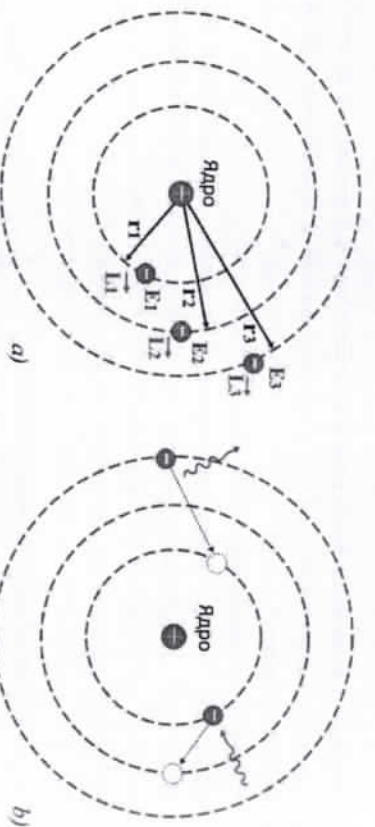


Рисунок 25.1

1. Постулат о стационарных (устойчивых) состояниях:

Система атомов может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, которым соответствует стационарные орбиты электронов. Электроны находятся только в этих стационарных орбитах и не излучают, даже если движутся с ускорением.

Этот постулат полностью противоречит классической механике. Согласно классической механике, энергия движущегося электрона может быть любой. Из бесконечного числа возможных с точки зрения классической механики электронных орбит в действительности могут существовать только дискретные орбиты, удовлетворяющие некоторым квантовым условиям. Этот постулат также противоречит электродинамике Максвелла, поскольку согласно этому постулату электроны могут двигаться с ускорением даже без испускания электромагнитной волны.

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.

$$h\nu = E_m - E_n \quad (25.1)$$

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

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} \quad (25.2)$$

При поглощении света электрон переходит из стационарного состояния с низкой энергией в стационарное состояние с большей энергией и, наоборот, электрон переходит из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с низкой энергией излучает свет.

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

Третий постулат:

Момент импульса электрона в атоме имеет дискретные значения.

$$L = n\hbar \quad \text{или} \quad m\vartheta r = n\hbar \quad [кг \cdot м^2/с = Дж \cdot с] \quad (25.3)$$

Этот постулат также противоречит законам классической механики. Потому что, согласно классической механике, момент импульса тела, совершающего вращение, может иметь произвольные значения. Согласно третьему постулату, момент импульса из бесконечного множества значений может принимать только выбранные значения, т. е. кратные значения $\hbar$.

Выводы из постулатов Бора:

Если энергия атома минимальна, электрон движется по первой орбите, ближайшей к ядру.

Это состояние атома называется невозбужденным состоянием или основным состоянием. В этом случае электрон будет наиболее прочно связан с ядром. Атом переходит в возбужденное состояние, когда получает дополнительную энергию. В это время электрон перемещается с внутренней орбиты на другую, одну из орбит, удаленных от ядра, и движется там же. Энергия возбужденного атома превышает энергию не возбужденного атома. Но возбужденное состояние атома невероятно кратковременно. За небольшой промежуток времени до одной сотой доли секунды он переходит на более низкую орбиту или основную орбиту (рис. 25.2).

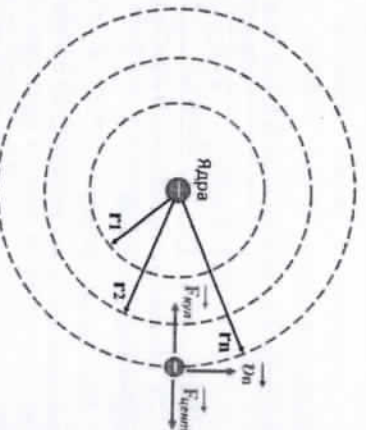


Рисунок 25.2

В соответствии с третьим постулатом теории Бора момент импульса электрона $L = m\vartheta r$, движущегося по квантованной орбите, кратен по величине $= \hbar/(2\pi)$.

$$m\vartheta r = n \frac{\hbar}{2\pi} \quad (25.4)$$

Из теории Бора для атома водорода можно вывести множество исходных формул. Чтобы не путать, давайте пронумеруем каждую формулу.

1) Можно вычислить радиус вращения электрона на произвольном энергетическом уровне

Согласно к третьему постулату импульс момент квантуется, $L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$. От этого скорость равна $v = \frac{n\hbar}{rm_e}$ (*). Когда электрон движется по орбите, центробежная сила равна Кулоновской силе $\frac{m_e v^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}$. Мы станем (*) на это выражению.

$$\frac{m_e n^2 \hbar^2}{r^2 m_e^2} = \frac{ke^2}{r^2}, \rightarrow r = n^2 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = n^2 r_{1,H}$$

Здесь:

$$r_{1,H} = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = \frac{(1,05456 \cdot 10^{-34})^2}{9 \cdot 10^9 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2} = 5,291 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 5,291 \text{ \AA}$$

радиус стационарной орбиты электрона в $n=1$ не возбужденном состоянии.

Следовательно, радиус вращения электрона в атоме водорода на n -ую энергетическом уровне r будет равен ($a = r_{1,H}$ — радиус вращения электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$r = n^2 r_{1,H}, \quad a = r_{1,H} = \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,5291 \text{ \AA} \quad (25.5)$$

2) Можно вычислить скорость вращения электрона на произвольном энергетическом уровне

Подставляя формулу (25.5) в (*), находим скорость электрона по произвольной n -ую стационарной орбите.

$$v = \frac{n\hbar}{rm_e} = \frac{n\hbar}{n^2 a m_e} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\hbar}{a m_e} = \frac{v_{1,H}}{n}$$

Здесь:

$$v_{1,H} = \frac{\hbar}{a m_e} = \frac{\hbar}{\frac{\hbar^2}{m_e e^2}} = \frac{m_e e^2}{\hbar} = 1,05456 \cdot 10^{-34} \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^2 = 2190266,624 \text{ м/с} \approx 2190,27 \text{ км/с}$$

значение скорости для невозбужденного состояния электрона.

Следовательно, скорость вращения электрона в атоме водорода на n -ую энергетическом уровне равна ($v_{1,H}$ — скорость вращения электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$v = \frac{v_{1,H}}{n}, \quad v_{1,H} = \frac{m_e e^2}{\hbar} \approx 2190,27 \text{ км/с} \quad (25.6)$$

3.1) Можно вычислить частоту вращения электрона на произвольном n -ую энергетическом уровне.

Частота вращения электрона находится по формуле, $\nu = 2\pi \nu r$

$$\nu = \frac{v}{2\pi r} = \frac{v_{1,H}/n}{2\pi n^2 a} = \frac{1}{n^3} \cdot \frac{v_{1,H}}{2\pi a} = \frac{v_{1,H}}{n^3}$$

Здесь частота вращения электрона в не возбужденном состоянии.

$$\nu_{1,H} = \frac{v_{1,H}}{2\pi a} = \frac{\frac{m_e e^2}{\hbar}}{2\pi \cdot \frac{\hbar^2}{m_e e^2}} = \frac{m_e k^2 e^4}{2\pi \hbar^3} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (9 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^4}{2 \cdot 3,1416 \cdot (1,05456 \cdot 10^{-34})^3} = 6,58846 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

Следовательно, частота вращения электрона на n -ую энергетическом уровне в атоме водорода ν будет равна ($\nu_{1,H}$ — частота вращения электрона в не возбужденного состояния атоме водорода):

$$\nu = \frac{\nu_{1,H}}{n^3}, \quad \nu_{1,H} = \frac{m_e k^2 e^4}{2\pi \hbar^3} = 2R_\infty = 6,58846 \cdot 10^{15} \text{ Гц} \quad (25.7a)$$

3.2) Можно вычислить период обращения электрона на произвольном энергетическом уровне

Найти его можно будет по формулам $T=1/\nu$ и (3.1).

Следовательно, период T обращения электрона в атоме водорода на n -ую энергетическом уровне будет равен ($T_{1,H}$ — период обращения электрона в не возбужденного состояния атоме водорода):

$$T = n^3 T_{1,H}, \quad T_{1,H} = \frac{2\pi \hbar^3}{m_e k^2 e^4} = \frac{1}{2R_\infty} = 1,517805 \cdot 10^{-16} \text{ с} \quad (25.7b)$$

3.3) Можно вычислить угловую скорость электрона на произвольном энергетическом уровне.

Найти его можно будет по формулам $\omega=2\pi \nu$ и (3.1).

Следовательно, угловая скорость ω электрона в атоме водорода на n -ую энергетическом уровне будет равна ($\omega_{1,H}$ — угловая скорость электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$\omega = \frac{\omega_{1,H}}{n^3}, \quad \omega_{1,H} = \frac{m_e k^2 e^4}{\hbar^3} = 4\pi R_\infty = 4,139661 \cdot 10^{16} \text{ рад/с} \quad (25.7c)$$

4.1) Можно вычислить кинетическую энергию электрона в атоме водорода на произвольном энергетическом уровне.

Для нахождения кинетической энергии электрона на произвольном n -ую уровне в атоме водорода воспользуемся известной всем формулой.

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{m_e}{2} \cdot \left(\frac{v_{1,H}}{n} \right)^2 = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{m_e v_{1,H}^2}{2} = \frac{E_{k1,H}}{n^2}$$

Здесь:

$$E_{k1,H} = \frac{m_e v_{1,H}^2}{2} = \frac{m_e}{2} \cdot \left(\frac{ke^2}{\hbar} \right)^2 = \frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (9 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^4}{2 \cdot (1,05456 \cdot 10^{-34})^2} = 21,827568 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 13,6252 \text{ эВ}$$

кинетическая энергия электрона на 1-ой орбите.

Следовательно, кинетическая энергия E_k электрона в атоме водорода на n-ую энергетическом уровне будет равна (E_{kin} - кинетическая энергия электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$E_k = \frac{E_{kin}}{n^2}, \quad E_{kin} = \frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} = 13,6252 \text{ [эВ]} \quad (25.8a)$$

4.2) Можно вычислить потенциальную энергию электрона в атоме водорода на произвольном энергетическом уровне.

Для нахождения потенциальной энергии электрона на произвольном n-ую уровне в атоме водорода воспользуемся известной всем формулой.

$$E_p = -\frac{k e^2}{r} = -\frac{k e^2}{n^2 a} = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{k e^2}{a} = -\frac{E_{kin}}{n^2}$$

Здесь

$$E_{kin} = -\frac{k e^2}{a} = -\frac{k e^2}{\hbar^2} = -\frac{m_e k^2 e^4}{\hbar^2} = -\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (9 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^4}{(1,05456 \cdot 10^{-34})^2} = -43,655136 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -27,2504 \text{ [эВ]}$$

Потенциальная энергия электрона на 1-ую орбите.

Следовательно, потенциальная энергия E_p электрона в атоме водорода на произвольном n-энергетическом уровне будет равна ($E_{p,1n}$ - потенциальная энергия электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$E_p = \frac{E_{p,1n}}{n^2}, \quad E_{p,1n} = -\frac{m_e k^2 e^4}{\hbar^2} = -27,2504 \text{ [эВ]} \quad (25.8b)$$

4.3) Можно вычислить полную энергия электрона на произвольном энергетическом уровне.

Полная энергия электрона равна сумме кинетической и потенциальной энергий. На не возбужденной орбите равна полная энергия к следующую выражению.

$$E_1 = E_{kin} + E_{p,1n} = \frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} - \frac{m_e k^2 e^4}{\hbar^2} = -\frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} = -E_{kin} = -13,6252 \text{ эВ}$$

и на произвольном уровне будет равна:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{n^2} E_{kin} + \frac{1}{n^2} E_{p,1n} = \frac{1}{n^2} (E_{kin} + E_{p,1n}) = \frac{1}{n^2} \cdot E_{1,n}$$

Следовательно, общая энергия электрона E в атоме водорода на n-ую энергетическом уровне будет равна ($E_{1,n}$ - полная энергия электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$E = \frac{E_{1,n}}{n^2}, \quad E_{1,n} = -\frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} = -13,6252 \text{ [эВ]} \quad (25.8c)$$

5) Выше указанным (4.1), (4.2), (4.3) из выражений следует, что кинетическая энергия в количестве выражении равна общей энергии, а потенциальная энергия в 2 раза больше общей энергии.

$$\begin{cases} E_k = -E = -\frac{1}{2} E_p \\ E_p = 2E = -2E_k \end{cases} \quad (25.9)$$

Из выражений (25.8) и (25.9) можно сделать следующие выводы:

Когда атом поглощает энергию, электрон переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий энергетический уровень.

Когда электрон переходит с более низкой орбиты на более высокую орбиту, кинетическая энергия электрона уменьшается, его потенциальная энергия увеличивается, его общая энергия также увеличивается.

6.1) Можно вычислить частоту волны, излучаемой электроном в атоме водорода при переходе с произвольного энергетического уровня на другой.

Согласно 2-му постулату Бора, испускаемый или поглощаемый квант света равен разности его энергий в стационарных состояниях, то есть $h\nu = E_m - E_n$. Из этого получается излучаемая квантовая частота

$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{\frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{m^2}}{h} = \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{m_e k^2 e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R_{Hn} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Здесь: $R_{Hn} = \frac{m_e k^2 e^4}{4\pi\hbar^3} = 3,29423 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ - частота для атома водорода, называемая постоянной Ридберга.

Следовательно, в атоме водорода частота фотона, излучаемого при переходе электрона с верхнего m-уровня на нижний n-уровень, будет равна $\nu_{m \rightarrow n}$:

$$\nu_{m \rightarrow n} = \frac{|E_n|}{h} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R_{Hn} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ [Гц]} \quad (25.10)$$

Мы также написали приведенную выше формулу в предыдущем теме. Но если в нем формула Ридберга была сформулирована путем выбора чисел, то в этой теме мы доказали это теоретическим путем.

В частности, различные переходы при заданных значениях n-го уровня образуют своеобразную совокупность рядов. Перечислим ряд для атома водорода (рис.25.3).

Серия Лаймана

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 2, 3, 4, 5, \dots \quad (25.10a)$$

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 3, 4, 5, 6, \dots \quad (25.10b)$$

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 4, 5, 6, 7, \dots \quad (25.10c)$$

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 5, 6, 7, 8, \dots \quad (25.10d)$$

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 6, 7, 8, 9, \dots \quad (25.10e)$$

$$\nu = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad m = 6, 7, 8, 9, \dots \quad (25.10f)$$

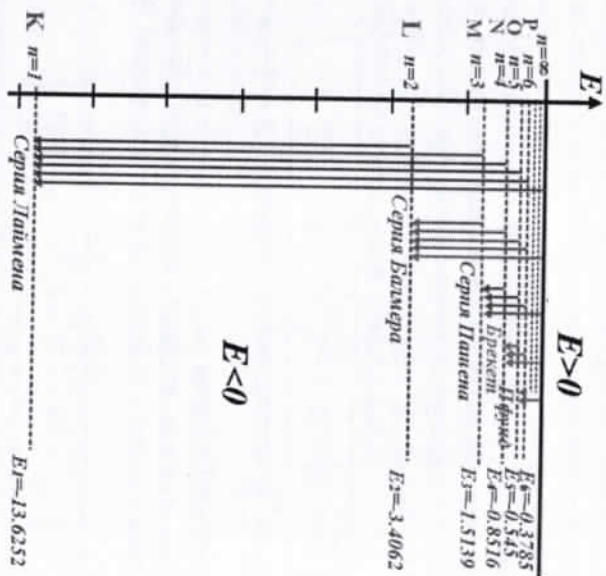


Рисунок 25.3

6.2) Можно вычислить длину волны, которая излучается при переходе электрона с произвольного энергетического уровня на другой.

Это можно легко определить, используя связь $c = \lambda \nu$ между частотой и длиной волны и выражения (6.1).

Следовательно, в атоме водорода длина волны фотона, излучаемого при переходе электрона с верхнего m-уровня на нижний n-уровень, будет $\lambda_{m \rightarrow n}$.

$$\frac{1}{\lambda_{m \rightarrow n}} = \frac{|E_n|}{hc} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = R_{\text{вн}} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad [\text{м}^{-1}] \quad (25.11)$$

Здесь: $R_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{c} = 10980766,12 \text{ м}^{-1}$ — длина волновая постоянная Ридберга.

Для ряда атомов водорода, которые мы привели выше, частоты и длины волн могут быть получены с помощью формул (25.10) и (25.11), которые можно представить в виде следующей таблицы:

Таблица 25.1

Серия Лаймана									
2 → 1	3 → 1	4 → 1	5 → 1	6 → 1	7 → 1	8 → 1	∞ → 1		
ν [ТГц]	2470,67	2928,2	3088,34	3162,46	3202,72	3227	3242,75	3294,23	
λ [nm]	121,42	102,45	97,14	94,863	94,2	93,67	92,514	91,068	
Серия Бальмера									
3 → 2	4 → 2	5 → 2	6 → 2	7 → 2	8 → 2	∞ → 2			
ν [ТГц]	457,53	617,67	691,79	732,05	756,33	772,08	823,56		
λ [nm]	655,7	485,7	433,66	409,81	396,65	388,56	364,27		
Серия Пашена									
4 → 3	5 → 3	6 → 3	7 → 3	8 → 3	∞ → 3				
ν [ТГц]	160,14	234,25	274,52	298,8	314,55	366,025			
λ [nm]	1873,36	1280,7	1092,8	1004	953,74	819,61			
Серия Бреккета									
5 → 4	6 → 4	7 → 4	8 → 4	∞ → 4					
ν [ТГц]	74,12	114,383	138,66	154,417	205,89				
λ [nm]	4047,5	2622,8	2163,6	1642,8	1457,1				
Серия Пфунда									
6 → 5	7 → 5	8 → 5	∞ → 5						
ν [ТГц]	40,263	64,54	80,297	131,769					
λ [nm]	7451	4648,3	3736,1	2276,71					
Серия Хемфри									
7 → 6	8 → 6	∞ → 6							
ν [ТГц]	24,277	40,03	915,064						
λ [nm]	12357,4	7494,4	3278,46						

7) С помощью формул (6.1) и (6.2) можно сформулировать формулы расчета значений частотных и волновых постоянных Ридберга для атома водорода.

Для атома водорода частотная и волновая константы Ридберга будут следующими:

$$R_{\text{вн}} = \frac{m_e k^2 e^4}{4 \pi \hbar^3} = 3,29423 \cdot 10^{15} [\text{Гц}], \quad R_{\text{вн}} = \frac{R_{\text{вн}}}{c} = \frac{m_e k^2 e^4}{4 \pi c \hbar^3} = 10980767,12 [\text{м}^{-1}] \quad (25.12)$$

8) Частота излучения также может быть выражена в виде вычитания спектральных слагаемых, соответствующих каждому случаю.

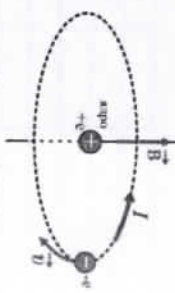
$$\nu_{m+n} = \frac{R_H}{n^2} - \frac{R_H}{m^2} = T(n) - T(m) \quad [T(n)] \quad (25.13)$$

Спектральная термическая частота, соответствующая произвольной n-ую Борной орбите, определяется по формуле $T(n) = \frac{R_H}{n^2}$, а волновое число определяется по формуле $T(n) = \frac{R_H}{n^2}$, причем спектральная термическая частота и волновые числа для каждой стационарной орбиты приведены в таблице ниже.

Таблица 25.2

Спектральные термы	T(1)	T(2)	T(3)	T(4)	T(5)	T(6)	T(7)	T(8)
Частота (ТГц)	3294,23	823,5575	366,0255	205,8893	131,7692	91,5064	67,2292	51,4723
Волновая число (м ⁻¹)	10980767	2745191	1220085	686298	439231	305021	224097	171574

9) Известно, что при любом движении тела по криволинейной траектории создается центростремительная ускорения. Кроме того, когда электрон также вращается вокруг ядра, создается центростремительное ускорение, направленное в сторону ядра. Ну и возникает вопрос, каково будет значение ускорения, если стремиться к этому центру (рис.25.4).



Центростремительное ускорение вращающийся электрона на произвольной орбите Бора:

$$a_n = \frac{g^2}{r} = \frac{\left(\frac{g}{n}\right)^2}{r} = \frac{1}{n^2} \frac{g^2}{r_1} = \frac{a_{n,1}}{n^4}$$

Здесь:

$$a_{n,1} = \frac{g^2}{r_1} = \frac{\left(\frac{k e^2}{h}\right)^2}{\frac{h^2}{4\pi^2 m_e}} = \frac{m_e k^3 e^6}{h^4} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (9 \cdot 10^9)^2 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19})^6}{(1,05456 \cdot 10^{-34})^4} = 9,067 \cdot 10^{22} \frac{m}{s^2}$$

центростремительное ускорение электрона в не возбужденном атоме водорода.

Следовательно, значение центростремительного ускорения, возникающего у атома водорода на произвольной n-ую Борной орбите, будет

следующим ($a_{n,1}$ – центростремительное ускорение электрона в не возбужденном атоме водорода):

$$a_n = \frac{a_{n,1}}{n^4}, \quad a_{n,1} = k m_e \left(\frac{4\pi^2 k e^2}{h^2} \right)^2 = 9,067 \cdot 10^{22} \left[\frac{m}{c^2} \right] \quad (25.14)$$

Таблица 25.3

Исчисление	Орбита Бора	1	2	3	4	5	6	7
1. Излученный момент (10 ⁻¹⁴ Дж·с)		1,05456	2,1091	3,1636	4,2182	5,273	6,3273	7,3819
2. Радиус орбиты (d)		0,5291	2,1164	4,7619	8,4556	13,227	19,047	25,925
3. Линейная скорость (км/с)		2190,27	1095,51	730,09	547,56	438,05	365,04	312,89
4.1. Частота вращения (ГГц)		6588,46	823,56	244,02	102,94	52,707	31,478	19,823
4.2. Период обращения (10 ¹⁵ с)		0,15178	1,2142	4,098	9,714	18,972	32,784	52,06
4.3. Угловая скорость (10 ¹⁵ рад/с)		41,3966	5,1745	1,5332	0,6468	0,3312	0,1916	0,1212
5.1. Кинетическая энергия (эВ)		13,6252	3,4063	1,5139	0,8515	0,545	0,3785	0,2781
5.2. Потенциальная энергия (эВ)		-27,2504	-6,8126	-3,0278	-1,7030	-1,09	-0,757	-0,5561
5.3. Полная энергия (эВ)		-13,6252	-3,4063	-1,5139	-0,8515	-0,545	-0,3785	-0,2781
6. Импульс (10 ⁻⁴ кг·м/с)		1,99314	0,9966	0,6644	0,4983	0,3986	0,3322	0,2847
7. Центростремительное ускорение (10 ¹¹ м/с ²)		90,67	5,6668	1,1194	0,3542	0,145	0,07	0,0378

Итак, используя все приведенные выше 9 формул, выведенных из постулатов Бора для атома водорода, приведем величины, рассчитанные для первых восьми орбитах Бора, в таблице 25.3.

Из постулатов Бора можно сделать еще много выводов. Например, сила нисходящего тока на произвольной Боровской орбите, магнитная индукция, создаваемая силой этого тока, и частные формулы, которые помогут определить магнитный момент и другие величины, могут быть сформулированы.

Длины волн в спектрах, определенные по теории Бора, совпадали с результатами экспериментов с очень высокой точностью. Правильность теории Бора, т. е. существование квантовых состояний в атоме, была впоследствии доказана экспериментами Франка и Герца.

Теория Бора смогла в полной мере объяснить спектры атома водорода и его изотопов. Однако он также не смог объяснить атом гелия, который находится в ячейке 2 периодической системы. Позже выяснилось, что теория Бора справедлива только для атомов водорода.

Вопросы по теме

1. Опишите постулаты Бора и запишите их формулы.
2. Для не возбужденного состояния запишите формулы, выражающие радиус

- Бора, скорость, частоту, период, угловую скорость, центростремительное ускорение электрона в этом состоянии и их числовые значения.
- Для произвольного возбужденного состояния запишем формулы, выражающие радиус Бора, скорость, частоту, период, угловую скорость, центростремительное ускорение электрона в этом состоянии
 - Запишем формулы, выражающие кинетическую энергию, потенциальную энергию и полную энергию электрона в атоме водорода для не возбужденного состояния, а также их числовые значения.
 - Запишем формулы, выражающие кинетическую энергию, потенциальную энергию и полную энергию электрона в атоме водорода для произвольного возбужденного состояния.
 - Запишем формулу, определяющую частоту фотонов, которые поглощаются или испускаются при переходе атома водорода с одной стационарной орбиты на другую. Вот как определяется длина волны.
 - Напишем формулы, позволяющие вычислить ряды серий Лаймана, Балмера, Пашена, Бреккета и Пфунда.
 - Запишем формулу, определяющую частотную константу Ридберга для атома водорода и его числовое значение.
 - Запишем формулу, определяющую постоянную Ридберга длины волны для атома водорода и его числовое значение.

Решение задачи:

1. На сколько увеличится энергия (Дж), если атом поглотит фотон с импульсом $1,5 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$?

- A) $1,5 \cdot 10^{-19}$ B) $4,5 \cdot 10^{-19}$ C) $3 \cdot 10^{-19}$ D) $1,5 \cdot 10^{-19}$ E) $4,5 \cdot 10^{-19}$

Дано:

$p = 1,5 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Решение:

$\Delta E = ?$
 Энергия, выделяемая электроном при переходе из одного энергетического состояния в другое ΔE излучения между соответствующим ему импульсом фотона $E = mc^2 = pc$ из этой выражения $\Delta E = 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Ответ: $\Delta E = 4,5 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$

2. Найти энергию, соответствующую четвертой орбите для атома водорода (эВ).

Дано:

$E_0 = 13,6 \text{ эВ}$

Решение:

Решение для атома водорода по распределению энергии по энергетическим уровням: энергия, выделяемая электроном при переходе из одного энергетического состояния в другое ΔE , возникает из соответствующего ему импульса

фотона
 $E = mc^2 = pc$ из выражения получается
 $E_n = \frac{E_0}{n} = -3,4 \text{ эВ}$.

Ответ: $-3,4 \text{ эВ}$

3. Коротковолновая граница спектра атома водорода $\lambda = 910 \text{ \AA}$. Какова скорость удаленного от ядра электрона (км/с), выбитого фотоном с энергией $E = 15,5 \text{ эВ}$ из атома водорода?

Дано:

$\lambda = 9,1 \text{ нм}$

$E_1 = 2,48 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$

$v = ?$

Решение:

Энергия ионизации электрона, вращающегося по орбите вокруг атома, равна $E = h\nu = \frac{ch}{\lambda}$. Часть энергии фотона, превышающая энергию отрыва электрона, превращается в кинетическую энергию электрона равна $E_k = E_f - \frac{ch}{\lambda}$.

Отсюда $v = \sqrt{\frac{2(E_f \lambda - ch)}{m\lambda}} = 810 \frac{\text{км}}{\text{с}}$.

Ответ: A) 810 км/с



§26. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ МАТЕРИИ.

ВОЛНА ДЕ БРОЙЛЯ.

Волна де Бройля:

Когда мы изучали свет как электромагнитную волну, он оказался частицей, то есть волна проявила в себе корпускулярное свойство. Теперь элементарные частицы, которые мы называем частицами, не являются ли волнами? Другими словами, поскольку природа склонна к симметрии, вопрос о том, что корпускулярно-волновой дуализм (двойственность) относится не только к излучениям, но и к частицам, заинтересовал Луи де Бройля. В 1924 году он выдвинул новую гипотезу. Согласно ему: поскольку природа склонна к симметрии, должны возникнуть не только корпускулярные свойства частиц вещества, но и волновые свойства. Другими словами, исходя из гипотезы де Бройля, корпускулярно-волновой дуализм применим как к электромагнитному излучению, так и к частицам вещества. В этом случае для частиц вещества также может быть применен следующий отношение, который уместен для фотона электромагнитного излучения.

Другими словами, исходя из гипотезы де Бройля, корпускулярно-волновой дуализм применим как к электромагнитному излучению, так и к частицам вещества.

$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ (26.1)

Поэтому следует сделать вывод, что в процессе движения частицы с импульсом $p = m\dot{\nu}$ должны проявляться свойства волны, длина которой.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\dot{\nu}} \quad (26.2)$$

Приведенную выше формулу принято называть *формулой де Бройля*, а λ - *длиной волны де Бройля*. Познакомившись с идеей де Бройля, Эйнштейн сказал: "Если де Бройль прав, то должно наблюдаться явление дифракции с электронами".

Действительно, вскоре после того, как в 1927 году Дэвисон и Джермер провели эксперименты с электронами, идея де Бройля была подтверждена. Брег обнаружил преломление электронного луча в кристаллах.

Затем в опытах других ученых с α -частицами, водородом и другими легкими атомами также произошло явление дифракции, и было признано, что корпускулярно-волновой дуализм распространяется на всю природу, то есть на проявления материи и поля. Отсюда следует, что корпускулярно-волновой дуализм, как говорил Луи де Бройль, носит универсальный характер.

В целом, приведенная выше формула справедлива для всех тел, а не только для электронов или элементарных частиц. Возникает вопрос тогда почему бы не наблюдать волновые или дифракционные явления в движении тел, встречающихся в повседневной жизни, например, в характере брошенного камня?

Чтобы ответить на этот вопрос, давайте вычислим де-Бройлевую волну волны частицы пыли ($m = 10^{-9}$ кг, $v = 10^{-3}$ м/с), движущейся к поверхности земли под действием силы тяжести.

$$\lambda_{\text{Бройль}} = \frac{h}{m\dot{\nu}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{10^{-9} \text{ кг} \cdot 10^{-3} \text{ м/с}} = 6,626 \cdot 10^{-22} \text{ м}$$

Из оптики известно, что волновые свойства (отклонение в сторону геометрической тени) проявляются только тогда, когда длина волны равна по сравнению с размером препятствия или щели. Волна де Бройля частицы пыли имеет размер 10^{-22} м и очень мала, чем 10^{-5} м. Поэтому волновые свойства в таких условиях не проявляются. Независимо от того, насколько мала частица пыли, все равно ее масса и размер намного превышают массу и размер электронов и других элементарных частиц, то есть частица пыли является макромолекулой. Поэтому макромолекулы с большой массой создают в нашем сознании только корпускулярное изображение. Другими словами, макромолекулы сохраняют волновую природу в скрытой виде.

Физический смысл длины волны де Бройля:

Было отмечено, что волны де-Бройля хорошо наблюдаются в движении легких массивных тел, то есть микрообъектов, элементарных частиц, в то время как волны де-Бройля скрыто наблюдаются в движении макробиблиотек. Но все же в каждом движении микро-или макротел более или менее проявляются некоторая волновая свойства. Поэтому естественно возникает вопрос, как выглядит волна де Бройля, если она существует.

Мы обычно имеем в виду волну, плывущую по поверхности воды, волну на натянутом шнуре или продолжные звуковые волны, то ли сжимающиеся, то ли разрежающиеся, словом, механические волны. Вполне естественно, что так и будет. Потому что все, что происходит с нами, от нашего рождения в мир до того, как весь наш жизненный путь проходит через мир, является механическими событиями, в то время как макротелы являются реальными, связанными с движением. Другими словами, мы живем в механических явлениях, и наш разум полностью приспособлен к этим явлениям. В механических волнах внешнее воздействие передается от данной точки воздействия к соседним точкам (от молекулы к соседним молекулам) со скоростью $v = \lambda \nu$, и с этой скоростью происходит распространение волны. А волна де Бройля - это волна, возникающая в результате движения одной частицы. В волне де Бройля не говорится о соседних частицах, каждая частица создает свою собственную волну де Бройля. Поэтому сравнивать волну де Бройля с какой-либо механической волной, искать ее аналог в механическом мире неуместно. Поскольку элементарные частицы не похожи на механическое тело в макром мире, движение этих частиц также не похоже на движение механических тел в нашем воображении.

Можно ли сравнить волну де Бройля с излучением, то есть электромагнитной волной? - Нет. Потому что электромагнитная волна - это распространение в пространстве изменяющихся электрических и магнитных полей. Электромагнитная волна порождает заряженную частицу, в равноускоренном движении. Если заряженная частица, такая как электрон, ускорится равномерно по закону $v = at$, длина электромагнитной волны, которую она распространяет, будет $\lambda = \text{const}$, в то время как длина волны де Бройля будет становиться все меньше по закону $\lambda = \frac{h}{m\dot{\nu}} = \frac{h}{ma t}$. Если этот электрон движется прямолинейно равномерно ($\dot{\nu} = \text{const}$) тогда он не излучает электромагнитную волну но неизменная волна де Бройля универсальной длины равной $\lambda = \frac{h}{m\dot{\nu}} = \text{const}$ существуют. Если незаряженная частица, такая как нейтрон хотя она движется с ускорением, она не излучает электромагнитную волну, потому что она не заряжена, но

$\lambda = \frac{h}{m\theta} = \frac{h}{m\alpha c}$ волна де Бройля с переменной длиной будет существовать. Следовательно, оказывается, нет никакой связи между электромагнитными и де-Бройльскими волнами.

В 1926 году М.Борн статистически объяснил физический смысл волны де Бройля, основываясь на совокупности дуалистических свойств электромагнитного излучения и движущихся микрочастиц. Вероятность попадания фотонов в точку пространства определялась бы квадратом $|E_m|^2$ амплитуды световой волны в этой точке. Исходя из этого, М.Борн объясняет волну де Бройля, образованную движущейся микрочастицей:

Кадром амплитуды волны де Бройля, связанный с характерном микрочастицей, характеризует вероятность найти микрочастицу в одной и той же точке пространства.

Следовательно, в экспериментах по дифракции электронов квадрат амплитуды волны де Бройля в точках полей, где наблюдается максимум экрана, достигает максимального значения (именно в этом месте фотопленка горит больше всего). Наоборот, в точках на участках, где наблюдается минимум экрана, квадрат амплитуды волны де Бройля достигает минимального значения (в этом месте фотопленка горит меньше всего). Соответственно, можно сказать, что волна де Бройля-это информационная волна. Эта волна несет с собой информацию о возможности или вероятности встречи частицы. Волна де Бройля не похожа ни на одну материальную волну.

Определение волны де Бройля в различных случаях:

Формула $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\theta}$, которую мы создали выше, является общим выражением волны де Бройля для всех скоростей. Если скорость частицы очень мала, чем скорость света $v \ll c$, то можно принять, что масса частицы в движении почти равна ее массе в покое $m \approx m_0$.

Если частица движется со скоростью, близкой к скорости света, масса частицы становится релятивистской массой, то есть нельзя игнорировать тот факт, что масса частицы увеличивается по закону $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$. В зависимости от того, какие величины заданы из формулы $\lambda = \frac{h}{p}$, могут быть сформированы другие частные формулы. Ниже мы остановимся на нескольких частных случаях. Чтобы избежать путаницы, давайте пронумеруем каждую формулу.

1) Давайте определим, какой будет волна де Бройля, если известна кинетическая энергия частицы на малых скоростях. Кинетическая энергия выражается через импульс:

$$W_k = \frac{m\theta^2}{2} = \frac{(m\theta)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$

Отсюда импульс можно выразить через кинетическую энергию следующим образом.

$$p = \sqrt{2mW_k}$$

Из этого следует, что длина волны де Бройля равна:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mW_k}}$$

Следовательно, если бы кинетическая энергия частицы с массой m была дана W_k , длина волны де Бройля была бы:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mW_k}} \quad [m] \quad (26.3)$$

2). Давайте определим, какой будет волна де Бройля молекулы или атома, участвующего в тепловом движении.

$$W_k = \frac{3}{2} kT$$

Учитывая, что это кинетическая энергия частицы в поступательном движении, формула де Бройля принимает вид

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0W_k}} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \frac{3}{2} kT}} = \frac{h}{\sqrt{3m_0 kT}}$$

Здесь: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [Дж/К]$ - Константа Больцмана

Следовательно, если атом или молекула с массой m_0 при температуре T движется в тепловом движении со средней квадратичной скоростью, ее длина волны де Бройля будет равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3m_0 kT}} \quad [m] \quad (26.4)$$

Если в приведенной выше формуле мы принимаем массу молекулы или атома как относительную атомную массу

$$m_0 = M_r \cdot 1m.a.b. = 1,6605 \cdot 10^{-27} kg \cdot M_r,$$

то мы получаем:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3m_0 kT}} = \frac{h}{\sqrt{3 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27} kg \cdot M_r \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} J/K \cdot T}} = \frac{25,27}{\sqrt{M_r \cdot T}} \text{ \AA}$$

3) Определим, какой будет волна де Бройля заряженной частицы, ускоренной до малых скоростей в электрическом поле. Мы рассмотрим это на примере электронов, протонов и α -частиц, ускоренных в электрическом поле.

3.1) Вначале определим длину волны де Бройля электрона. В ускоряющемся электрическом поле, создаваемом между катодом и анодом, работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем, преобразуется в кинетическую энергию $W_k = \frac{m_0 v^2}{2}$ электрона, $eU=W_k$ то есть получается следующий результат

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} \cdot \sqrt{U}} \approx \frac{12,279}{\sqrt{U}} \text{ нм}$$

Таким образом, если электрон, ускоренный до малых скоростей между катодом и анодом, преодолевает разность потенциалов U , его длина волны де Бройля будет равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \approx \frac{12,279}{\sqrt{U}} \text{ [нм]} \quad (26.5a)$$

3.2) Теперь определим длину волны де Бройля протона. Работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем при ускорении протона, преобразуется в кинетическую энергию $W_k = \frac{m_p v^2}{2}$ протона, то есть $eU=W_k$. Из этого получается выражения:

$$\lambda = \frac{h}{m_p v} = \frac{h}{\sqrt{2m_p eU}} = \frac{h}{\sqrt{2m_p e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{0,28656}{\sqrt{U}} \text{ нм}$$

Следовательно, если протон, ускоренный до малых скоростей в электрическом поле, преодолевает разность потенциалов U , его длина волны де Бройля будет равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_p eU}} \approx \frac{0,28656}{\sqrt{U}} \text{ [нм]} \quad (26.5b)$$

3.3) Теперь определим длину волны де Бройля α -частицы. Работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем при ускорении α -частицы, преобразуется в кинетическую энергию $W_k = \frac{m_\alpha v^2}{2}$ α -частицы, то есть становится $eU=W_k$. Из этого получается следующий выражения:

$$\lambda = \frac{h}{m_\alpha v} = \frac{h}{\sqrt{2m_\alpha eU}} = \frac{h}{\sqrt{2m_\alpha e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{4 \cdot 6,644 \cdot 10^{-27} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U}} = \frac{0,1013}{\sqrt{U}} \text{ нм}$$

Если α -частица, ускоренная до малых скоростей в электрическом поле, преодолевает разность потенциалов U , ее длина волны де Бройля равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_\alpha eU}} \approx \frac{0,1013}{\sqrt{U}} \text{ [нм]} \quad (26.5c)$$

4) Если частица ускоряется до очень больших скоростей, ее скорость называется релятивистической скоростью. Давайте вычислим длину волны де Бройли частицы, движущейся с релятивистической скоростью. Из связи между энергией и импульсом $W = \sqrt{(pc)^2 + (m_0 c^2)^2}$ найдем импульс.

$$W^2 - (m_0 c^2)^2 = p^2 c^2; \rightarrow (W - m_0 c^2) \cdot (W + m_0 c^2) = p^2 c^2, \rightarrow W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2) = p^2 c^2, \rightarrow p = \frac{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}}{c}$$

Используя найденное значение импульса, найдем релятивистскую длину волны де Бройли.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}}$$

Следовательно, релятивистская длина волны де Бройли частицы будет равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}} \text{ [м]} \quad (26.6)$$

5.1) Если в циклотроне ускоренный электрон пересекает разность потенциалов U , то работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем в ускоряющем электрическом поле циклотрона, преобразуется в кинетическую энергию электрона, $eU=W_k$. Из этого получается следующий выражения:

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}} = \frac{h}{\sqrt{eU(eU + 2m_0 c^2)}}$$

Следовательно, релятивистская длина волны де Бройли электрона будет равна:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{eU(eU + 2m_0 c^2)}} \text{ [м]} \quad (26.7a)$$

5.2) Если в циклотроне ускоренный электрон пересекает разность потенциалов U , то работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем в ускоряющем электрическом поле циклотрона, преобразуется в кинетическую энергию электрона, $eU=W_k$.

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}} = \frac{h}{\sqrt{eU(eU + 2m_0 c^2)}}$$

Отсюда и получается результат.

Следовательно, релятивистская длина волны де Бройли ускоренного протона в циклотроне будет равна:

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{eU(eU + 2m_p c^2)}} \quad [m] \quad (26.7b)$$

5.3) Если в циклотроне ускоренный электрон пересекает разность потенциалов U , то работа $A=eU$, выполняемая электрическим полем в ускоряющем электрическом поле циклотрона, превращается в кинетическую энергию электрона, $eU=W_k$.

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{W_k \cdot (W_k + 2m_0 c^2)}} = \frac{hc}{\sqrt{eU(eU + 2m_0 c^2)}}$$

Отсюда и получается результат.

Следовательно, релятивистская длина волны де Бройля ускоренного протона в циклотроне будет равна:

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{eU(eU + 2m_p c^2)}} \quad [m] \quad (26.7c)$$

С помощью волны де Бройля можно вывести еще множество частных формул. Мы сделали еще один шаг вперед в наших знаниях, изучая волну де Бройля. Следующая задача состоит в том, чтобы немного расширить наши представления о микромирных явлениях и приспособить их к микромиру и проявлению волновых свойства движения микрочастиц.

Вопросы по теме

1. Напишите математическое выражение, определяющее волну де Бройля.
2. Какие ученые проверили волну де Бройля в эксперименте?
3. Волна де Бройля похожа на механическую или электромагнитную волну? Что это за волна?
4. Напишите формулу, определяющую длину волны де Бройля атома или молекулы в тепловом движении.
5. Как определяется волна де Бройля, когда известна кинетическая энергия частицы, движущейся с небольшой скоростью?
6. Когда частица, ускоренная до малых скоростей, преодолевает разность потенциалов U , как определяется ее волна де Бройля?
7. Как определяется его волна де Бройля, когда известна кинетическая энергия частицы, движущейся с релятивистской скоростью?
8. Если частица, ускоренная до релятивистских скоростей, преодолевает разность потенциалов, как определяется ее волна де Бройля?

Решение задачи:

1. Определите длину волны де Бройля частицы с импульсом $2,21 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с (А). Постоянная Планка равна $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Дано:

Решение:

$$p=2,21 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \quad \text{Рассчитаем по формуле нахождения длины волны де Бройля.}$$

$$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$\lambda=?$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{2,21 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3 \text{ \AA}$$

$$\text{Ответ: } \lambda = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 3 \text{ \AA}$$

2. Во сколько раз длина волны де Бройля молекулы азота при нормальных условиях отличается от собственного размера молекулы азота? Предположим, что молекулы движутся со средней квадратичной скоростью. Возьмем собственный размер молекулы азота как $2,6 \text{ \AA}$. Постоянная Планка равна $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Дано:

Решение:

$$M=28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T=273 \text{ К}$$

$$d=2,6 \text{ \AA}$$

$$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Запишем массу молекулы и формулу средней квадратичной скорости.

$$m_0 = \frac{M}{N_A}, \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

Используя их, мы можем вывести и рассчитать формулу, которая определит импульс молекулы.

$$p = m_0 \bar{v} = \frac{M}{N_A} \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \frac{\sqrt{3} R M T}{N_A} = \frac{\sqrt{3 \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 273 \text{ К}}}{6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}} = 2,3 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Теперь рассчитаем длину волны де Бройля.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{2,3 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}} = 2,88 \cdot 10^{-11} \text{ м} = 0,288 \text{ \AA}$$

Определим, во сколько раз собственный размер молекулы азота отличается от длины волны де Бройля.

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{2,6 \text{ \AA}}{0,288 \text{ \AA}} \approx 9$$

Ответ: d/λ отличается в 9 раз

3. Вычислите длины волн де Бройля для случаев, когда кинетическая энергия электрона равна: а) 10 кэВ ; б) 1 МэВ . Постоянная Планка равна $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Дано:

- a) $E_k = 10 \text{ кэВ}$
 б) $E_k = 1 \text{ МэВ}$
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
 $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
 $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

Решение:

Сначала мы рассчитаем энергию покоя электрона в электронвольтах, основываясь на формуле Эйнштейна для связи между массой и энергией.

$$E_0 = m_e c^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2 = 81,33 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \approx 510 \text{ кэВ}$$

Теперь давайте прорешаем вопрос для каждого условия.

$\lambda = ?$

а) В этом случае релятивистских эффектов не наблюдается, так как кинетическая энергия электрона намного меньше энергии покоя. Поэтому для этого условия мы возьмем электрон как классическую частицу.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}}} = 1,23 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

б) В этом случае, поскольку кинетическая энергия электрона больше, чем энергия покоя, наблюдаются релятивистские эффекты. Поэтому для этого условия мы принимаем электрон как релятивистскую частицу.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{E_k(E_k + 2m_e c^2)}} = \frac{h c}{\sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\sqrt{1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} \cdot (1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж} + 2 \cdot 81,33 \cdot 10^{-15} \text{ Дж})}} = 8,76 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Ответ: а) $1,23 \cdot 10^{-11} \text{ м}$; б) $8,76 \cdot 10^{-12} \text{ м}$



§ 27. ПОНЯТИЕ КВАНТОВЫХ ЧИСЕЛ И ЭЛЕКТРОННЫХ ОБЛАКОВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ.

Понятие квантовых чисел:

Исторически сложилось так, что атомная физика очень молода, и она начала развиваться с начала двадцатого века. Но наука о химии начала развиваться два столетия назад. На языке химии состояние атома описывается в периодической системе на основе групп, периодов, электронных ступеней и электронных ступеней. Согласно современным представлениям об атомной физике и квантовой физике, состояние электрона в атомах объясняется на основе квантовых величин, которые полностью противоречат классическим представлениям. Квантовые величины бывают 4 типов, и они следующие:

- 1) начальное квантовое число; 2) орбитальное квантовое число;
- 3) магнитное квантовое число; 4) спинное квантовое число.

Теперь давайте кратко остановимся на том, что означает каждая из этих квантовых величин.

- 1) Начальное квантовое число: это квантовое число характеризует энергию электрона в атоме, и эта энергия определяется по этой формуле для атома водорода

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13,6252}{n^2} [\text{эВ}] \quad (27.1)$$

и по этой формуле для других атомов водорода в периодической системе.

$$E_n = -\frac{m_e e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2 n^2} = -13,6252 \frac{Z^2}{n^2} [\text{эВ}] \quad (27.2)$$

Здесь: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} [\text{Дж}\cdot\text{с}]$ — постоянная Планка,

$E_{1n} = -13,6252 [\text{эВ}]$ — энергия электрона в не возбужденном атоме водорода

$e_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{Кл}^2}{\text{Н}\cdot\text{м}^2} \right]$ — электрическая постоянная

$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} [\text{кг}]$ — масса электрона.

$e = -1,602 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ — электрический заряд электрона, Z — порядковый номер. Наиболее важной величиной выше называется n — начальное квантовое число, которое характеризует энергию электрона в атоме. Общее квантовое число принимает натуральные числа, то есть принимает значения.

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (27.3)$$

Например, в атоме водорода электрон будет иметь энергии не возбужденные состояние.

$n=1$ уровень $E_1 = -13,6252 [\text{эВ}]$, $n=2$ уровень $E_2 = -\frac{13,6252}{4} [\text{эВ}]$,

$n=3$ уровень $E_3 = -\frac{13,6252}{9} [\text{эВ}]$.

- 2) Орбитальное квантовое число: известно, что в атомах электроны совершают круговое движение вокруг ядра, и это движение создает импульсный момент. Напомним, что момент импульса является векторной величиной, равной произведению импульса электрона и радиуса вращения ($L = p_e r = m_e v r$). Орбитальное квантовое число характеризует момент орбитального импульса электрона в атоме. Термин импульсный момент также иногда называют моментом количества движения или кратко механическим моментом. Импульсный момент электрона определяется по формуле.

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)} h \quad [\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}] \quad (27.4)$$

Здесь: $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0545 \cdot 10^{-34} [\text{Дж} \cdot \text{с}]$ — линейная постоянная Планка.

Наиболее важной величиной выше является так называемое L -орбитальное квантовое число, которое характеризует момент орбитального импульса, создаваемого вращением электрона вокруг ядра в атоме. Орбитальное квантовое число L принимает значения

$$\ell = 0, 1, 2, 3, 4, \dots, n-1 \quad (27.5)$$

Например, в атоме, который электрон не возбужден, принимая значение $\ell = 0$ на уровне $n=1$, момент импульса будет $L=0$.

Принимая значения $\ell = 0$ и $\ell = 1$ на уровне $n=2$, моменты импульса также будут $L=0$ и $L = \sqrt{2}\hbar$ соответственно.

Принимая значения $\ell = 0$, $\ell = 1$ и $\ell = 2$ на уровне $n=3$, моменты импульса также будут соответственно $L=0$, $L = \sqrt{2}\hbar$ и $L = \sqrt{6}\hbar$ и т. д.

Движение электрона вокруг ядра создает не только импульсный момент, но и магнитный момент. Это связано с тем, что электрон является заряженной частицей, его движение создает вращательный ток и имеет орбитальный магнитный момент, основанный на формуле $\mu = IS = \pi r^2 ev$. Орбитальный магнитный момент определяется по формуле $\frac{\mu}{L} = \frac{e}{2m_e}$.

$$\mu = \frac{he}{4\pi m_e} \sqrt{\ell(\ell+1)} = \mu_{\text{Bohr}} \sqrt{\ell(\ell+1)} \quad [\text{А} \cdot \text{м}^2] \quad (27.6)$$

Здесь: $\mu_{\text{Bohr}} = \frac{he}{4\pi m_e} = 9,2772 \cdot 10^{-24} [\text{А} \cdot \text{м}^2]$, μ_{Bohr} называется магнетоном Бора. Когда электрон находится в разных состояниях, его орбитальный магнитный момент принимает значения, пропорциональные магнетону Бора.

Например, атом имеет магнитный момент $\mu = 0$ на $n=1$ уровне ($\ell = 0$), который не возбуждает электрон.

На уровне $n=2$ ($\ell = 0, \ell = 1$) магнитные моменты будут иметь значения $\mu = 0$ и $\mu = \sqrt{2}\mu_{\text{Bohr}}$. На уровне $n=3$ ($\ell = 0, \ell = 1, \ell = 2$) магнитные моменты будут иметь значения $\mu = 0, \mu = \sqrt{2}\mu_{\text{Bohr}}$ и $\mu = \sqrt{6}\mu_{\text{Bohr}}$.

Напомним, что орбитальное квантовое число определяет значение момента орбитального импульса или орбитального магнитного момента электрона в различных состояниях атома, но не может объяснить направление моментов. Потому что, поскольку импульсный момент и магнитный момент являются векторными величинами, они имеют величину и направление. Величину крутящего момента можно определить, а направление — нет.

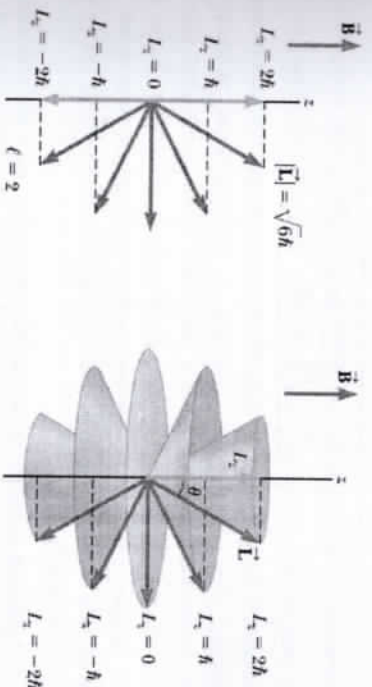


Рисунок 27.1

3) Магнитное квантовое число: Если на атом воздействует магнитное поле, векторы орбитального импульса электронов в нем начинают двигаться хаотически, образуя прецессию вокруг направления магнитного поля. Чаще всего направление магнитного поля совпадает с направлением оси Oz . Проекция вектора момента импульса на направление (ось Oz) магнитного поля будет иметь значение. Расчеты, основанные на квантовых представлениях, показывают, что эта проекция также принимает квантовые значения, которые противоречат классическим представлениям. Эта квантовая величина называется магнитным квантовым числом. Таким образом, оказывается, что магнитное квантовое число характеризует момент орбитального импульса или проекцию орбитального магнитного момента в направлении магнитного поля. Они определяются по формуле (рис. 27.1):

$$L_z = m\hbar, \quad \mu_z = m\mu_{\text{Bohr}} \quad (27.7)$$

Здесь: m — магнитное квантовое число, которое, принимая эти значения, имеет всего $2\ell + 1$ проекцию.

$$m = -\ell, -\ell + 1, -\ell + 2, \dots, \ell - 2, \ell - 1, \ell \quad (27.8)$$

На рисунку згадані *angular momentum* (рис. 27.1).

Эти проекции могут быть отрицательными (рис. 27.1).

Например, магнитное квантовое число принимает значения $\ell = 0$ в $m = 0$, $\ell = 1$ в $m = -1, 0, 1$, $\ell = 2$ в $m = -2, -1, 0, 1, 2$. Следовательно, проекции момента импульса и магнитного момента будут иметь значения $\ell = 0$ в $\begin{cases} L_z = 0 \\ \mu_z = 0 \end{cases}$, $\ell = 1$ в $\begin{cases} L_z = 0, \pm\hbar \\ \mu_z = 0, \pm\mu_{\text{Bohr}} \end{cases}$, $\ell = 2$ в $\begin{cases} L_z = 0, \pm\hbar, \pm 2\hbar \\ \mu_z = 0, \pm\mu_{\text{Bohr}}, \pm 2\mu_{\text{Bohr}} \end{cases}$.

Зная момент импульса L и его проекцию на направление магнитного поля L_z , можно определить угол между ними (рис. 27.1).

$$\cos \varphi = \frac{L_z}{L} = \frac{m \hbar}{\sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar} = \frac{m}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} \quad (28.9)$$

4) Квантовое число спина: Оказывается, годовое вращательное движение Земли вокруг Солнца можно сравнить с орбитальным механическим моментом, возникающим от кругового движения электрона вокруг ядра.

Тогда оказывается, что суточное вращательное движение Земли вокруг своей оси можно сравнить с вращательным движением электрона также вокруг своей оси. Но возникает вопрос, вращается ли электрон также вокруг своей оси. Да, вращается.

Вокруг своей оси вращаются не только электроны, но и все элементарные частицы. Импульсный момент, возникающий при вращении частицы вокруг своей оси, называется частным импульсным моментом или частным магнитическим моментом, или кратко спином. Поскольку электрон является заряженной частицей, любое его движение вызывает магнитное поле, а также вращательное движение вызывает частный магнитный момент или спиновой магнитный момент.

Поскольку электрон имеет спин, существует также спиновой магнитный момент (собственный магнитный момент). Идея о том, что электрон имеет спин и спиновой магнитный момент, была выдвинута в 1925 году С. Гудсмит и Уланбеком. Слово "Spin" в переводе с английского означает "вращаться". Причина использования этого термина заключается в том, что первоначально предполагалось, что электрон представляет собой сферу, вращающуюся вокруг своей оси. Однако вскоре Гудсмит и Уланбеки отказались от этой идеи. Это связано с тем, что если электрон совершает вращательное движение вокруг своей оси, то значение линейной скорости в его диаметре оказывается даже больше скорости света. Но использование термина "спин" все еще продолжается. По современным представлениям, спин электрона является таким неотъемлемым свойством, как его масса и заряд.

И спин, и спин-магнитный момент электрона основаны на квантовых понятиях, которые противостоят законам макроэлементов и классическим представлениям о том, что электрон принимает квантовые величины.

Спиновой магнитный момент определяется по формуле $\mu_s = \frac{e \hbar}{m_e}$.

$$L_s = \sqrt{s(s+1)} \hbar, \quad \mu_s = 2\sqrt{s(s+1)} \mu_{Bor} \quad (28.10)$$

Здесь: s-спин-это квантовое число, которое принимает только два значения, т. е. $s = \pm \frac{1}{2}$. Для частиц принимается за $s = +\frac{1}{2}$, а для античастиц

$s = -\frac{1}{2}$ (об античастицах и их свойствах пойдет речь в последней главе этого учебника). Поскольку элементарные частицы, такие как электрон, протон и нейтрон, являются частицами, то их спины равны $s = \pm \frac{1}{2}$. Соответственно, приведенная выше формула для электрона переходит в вид.

$$L_s = \sqrt{3} \hbar, \quad \mu_s = \sqrt{3} \mu_{Bor} \quad (28.11)$$

Когда на электрон воздействует магнитное поле, проекция его спина и спинового магнитного момента на ось направления магнитного поля (Oz) также квантуется.

$$L_{sz} = \pm s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar, \quad \mu_{sz} = \pm s \mu_{Bor} = \pm \mu_{Bor} \quad (28.12)$$

Следовательно, так как проекция магнитного момента спина электрона в направлении внешнего поля может иметь только два значения, а его абсолютное значение равно магниту Бора.

Понятие об электронной оболочке.

Согласно современным представлениям, в микромире нет понятия траектории и уравниения движения. В микромире невозможно заранее сказать, где находится частица и в каких еще местах она может встретиться в будущем. Столкновение частицы в том или ином месте носит вероятностный характер, при котором движение частицы также приобретает волновой характер. Следовательно, электрон в атоме движется не по определенным орбитам, лежащим в плоской плоскости, как в представлении Бора, а по сферам, в которых электрон встречается чаще всего, давая радиусы Бора. Волновость при движении частицы образует пространственное электронное облако или электронную оболочку. Мы дадим вам представление об этих электронных оболочках.

Мы знаем, что набор точек, в которых электроны встречаются чаще всего, называется s, p, d, f оболочками. s оболочка состоит из одной, p оболочка состоит из трех p_x, p_y, p_z и d оболочка состоит из пяти $d_{xy}, d_{xz}, d_{yz}, d_{x^2-y^2}, d_{z^2}$ орбитов.

В атомах электроны находятся на орбиталях разных порядков. Если самая внешняя конечная орбитель находится в s-оболочке, то есть последний валентный электрон находится в s-электронной оболочке, такие атомы называются s-элементами. Плотнейший вероятностный слой движения

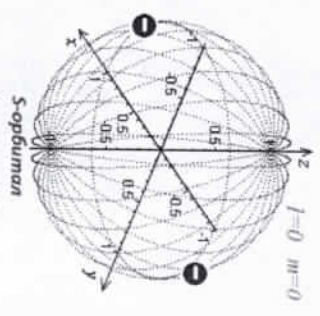


Рисунок 27.2
5-орбитал

электрона в оболочке s имеет форму сферы, он симметричен относительно всех осей. Красным цветом изображены s -элементы в периодической системе, их будет 2 (рис.27.2).

p -орбитали имеют форму гантеле, то есть похожими на лису. На рисунке 58.3 изображены три орбитали по отдельности и вместе. Элементы, у которых последняя заполненная оболочка является p -орбиталью, называются p -элементами. p -элементы изображены желтым цветом в периодической системе, они состоят из 6.

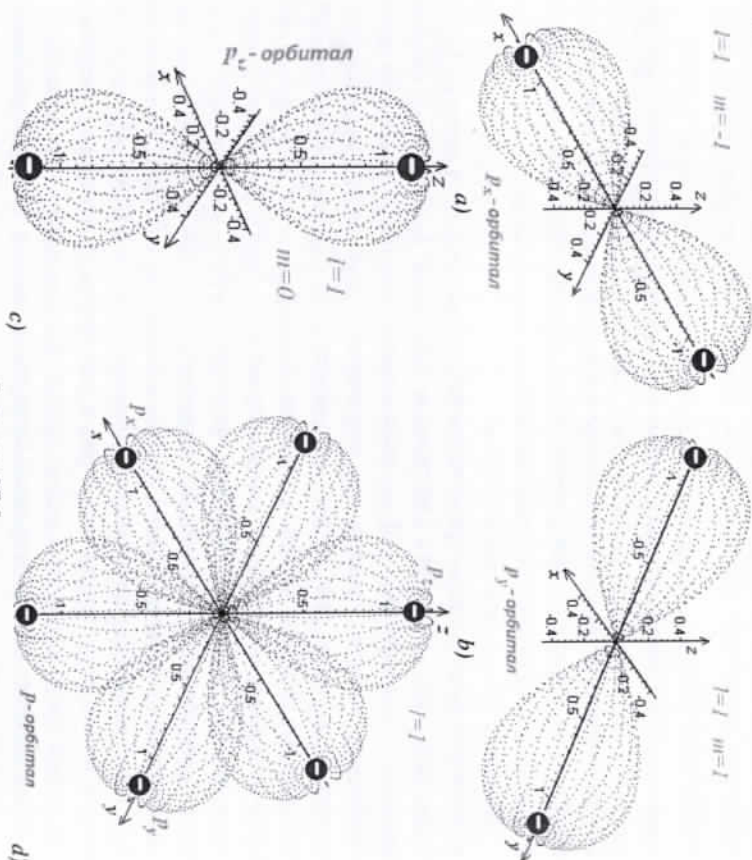


Рисунок 27.3

Если самая внешняя орбиталь находится в d -оболочке, то есть последний валентный электрон находится в d -электронной оболочке, такие атомы называются d -элементами. Наиболее плотный вероятностный слой движения электронов в d -оболочке будет листовидным, то есть похожим на гантели, оси которых взаимно перпендикулярны. В d -оболочке находятся пять d_{xy} , d_{yz} , d_{xz} , $d_{x^2-y^2}$, d_{z^2} -орбиталей, пространственные проявления которых

представлены на рисунке 27.4. d -элементы изображены синим цветом в периодической системе, их будет 10.

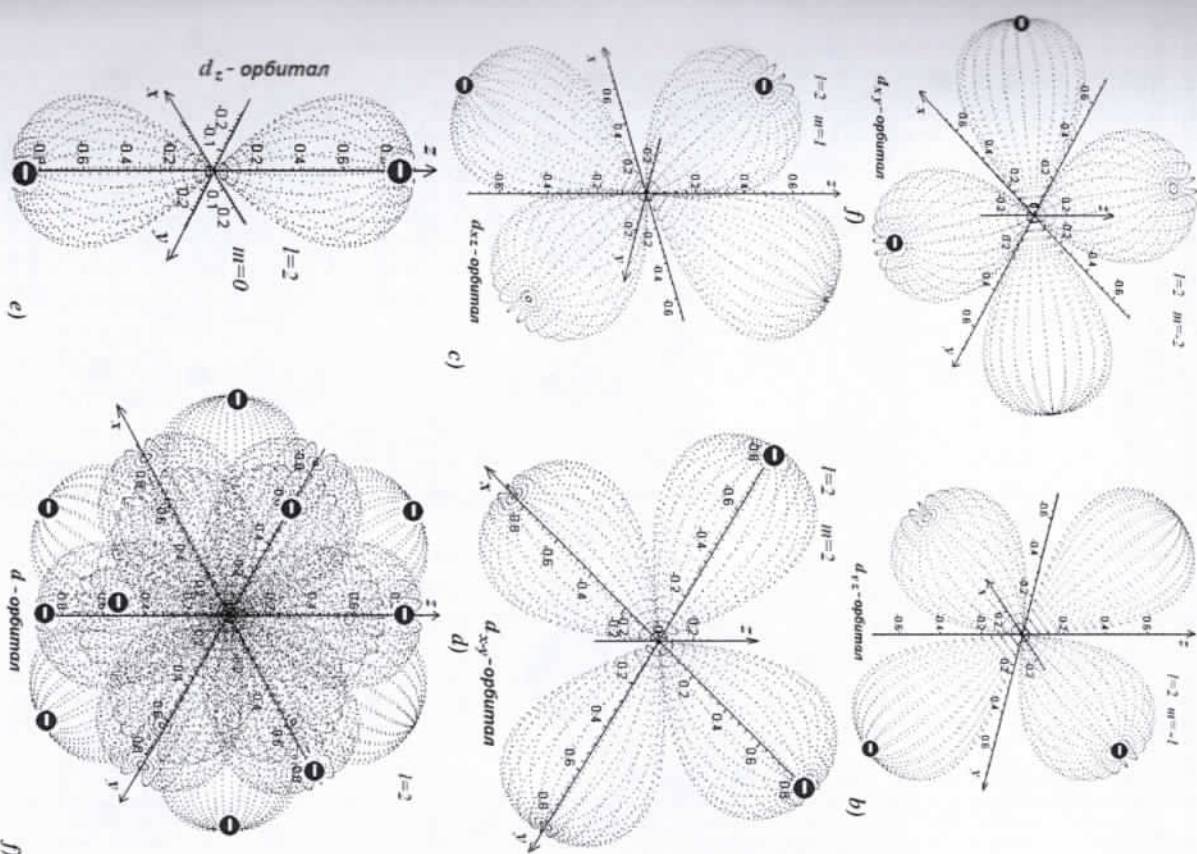
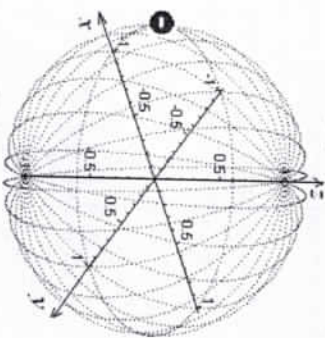


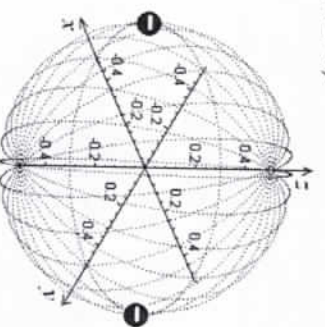
Рисунок 27.4

Появление об атомов:

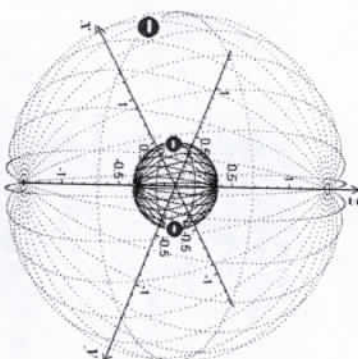
Для формирования у учащихся более широкого представления об атоме и его электронных оболочках, орбиталях, заполненных электронами, приводятся примеры пространственных изображений атомов, полученных с помощью инфракрасных технологий (рис. 27, 5).



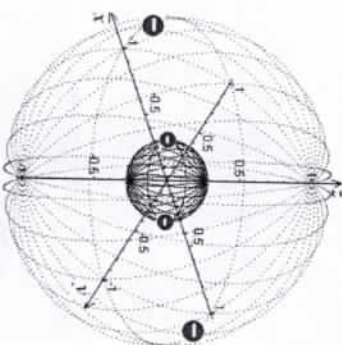
Водород ($z=1$)



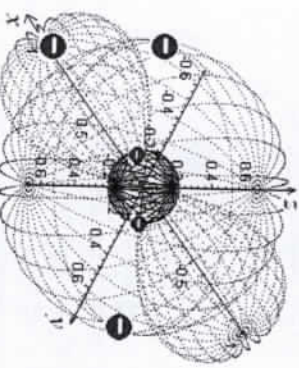
Гелий ($z=2$)



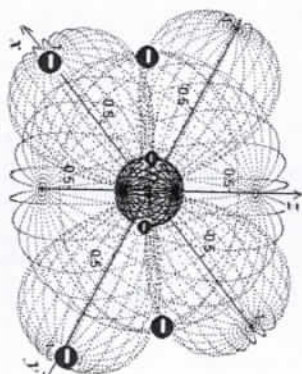
Литий ($z=3$)



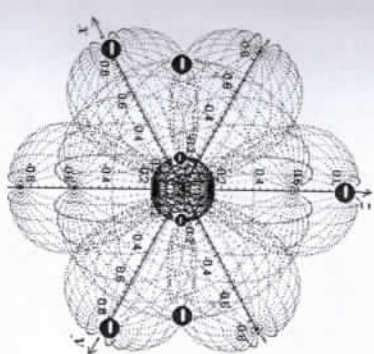
Бериллий ($z=4$)



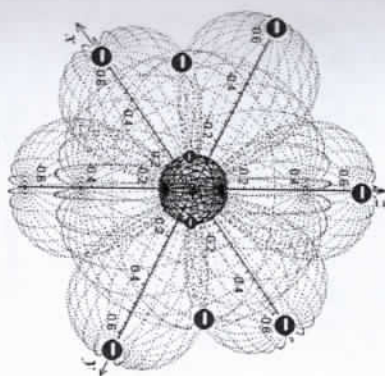
Бор ($z=5$)



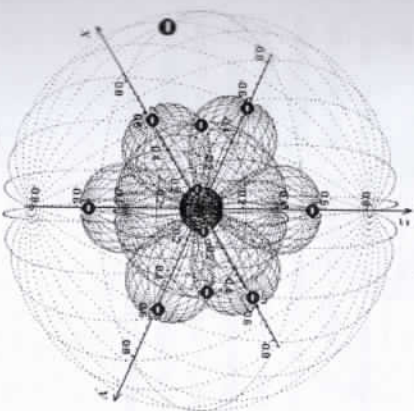
Углерод ($z=6$)



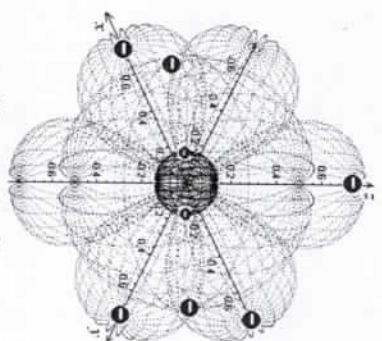
Азот ($z=7$)



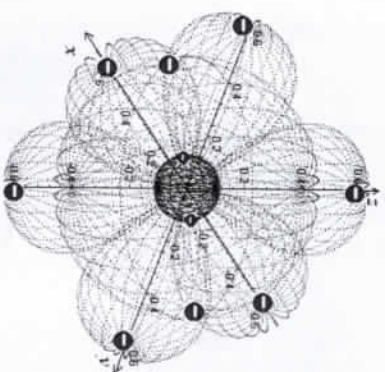
Фтор ($z=9$)



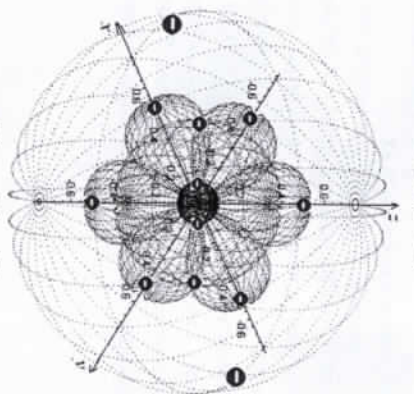
Натрий ($z=11$)



Кислород ($z=8$)



Неон ($z=10$)



Магний ($z=12$)

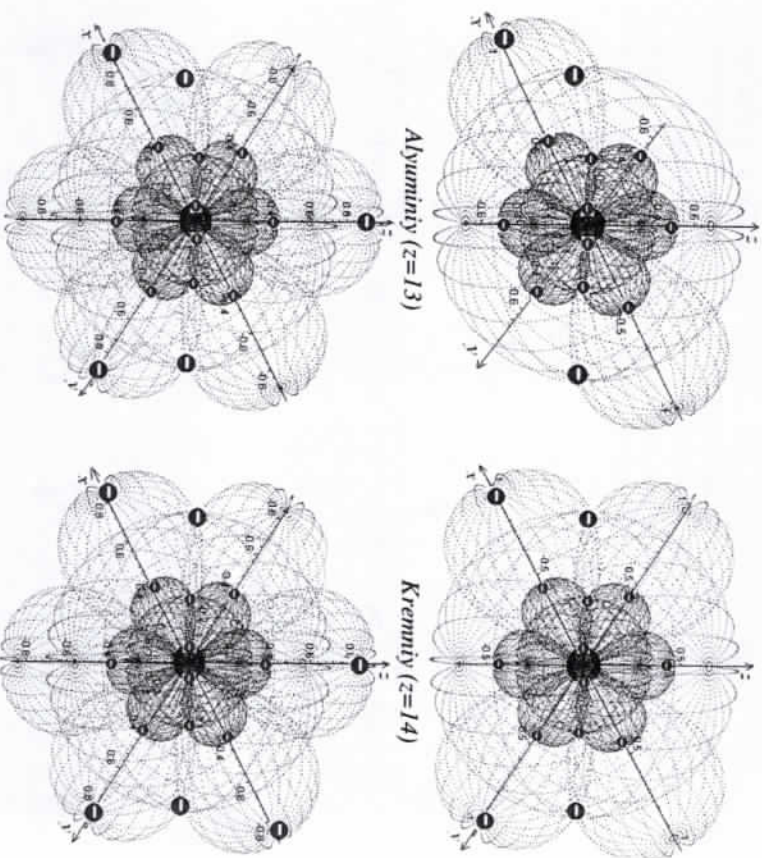
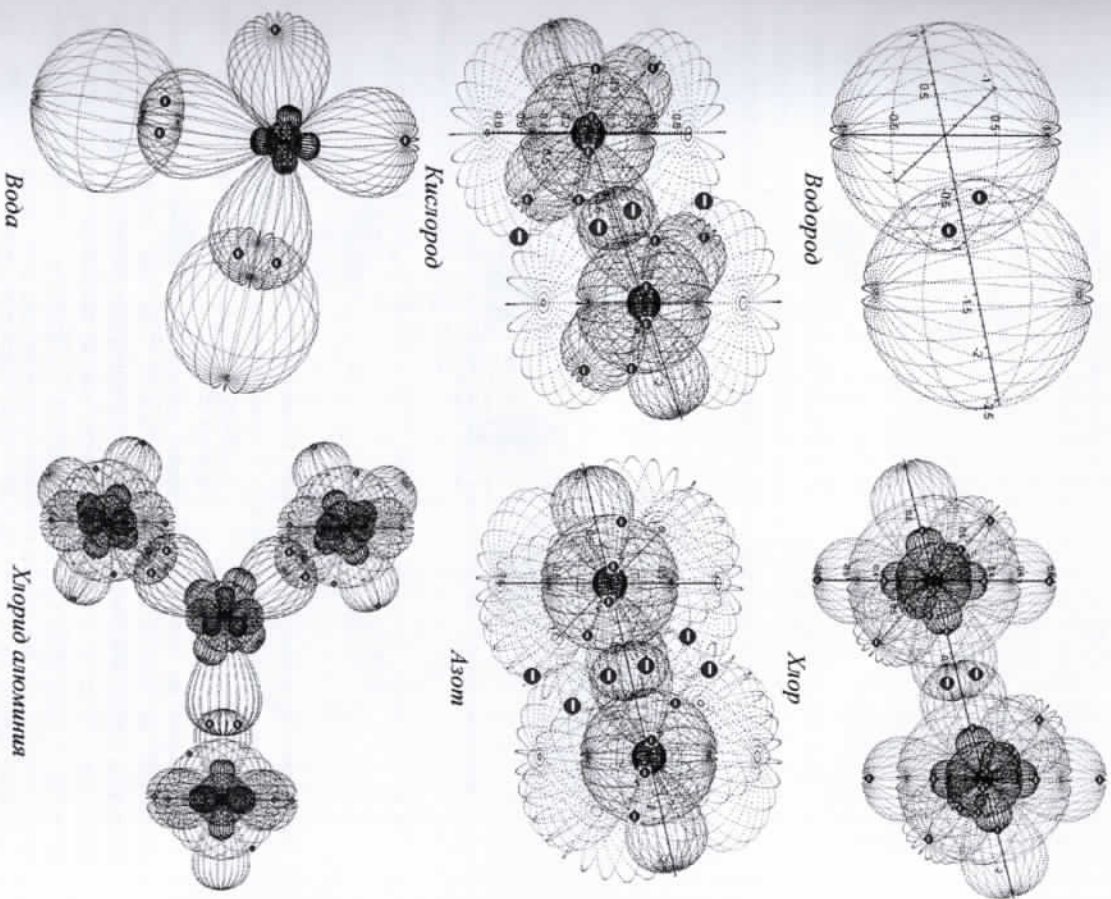
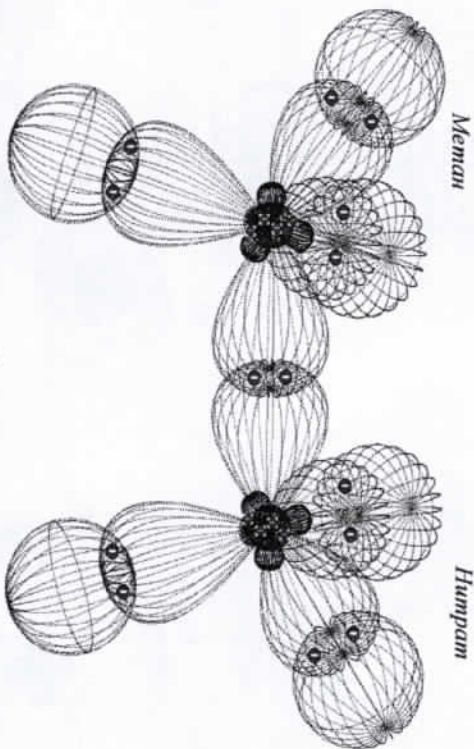
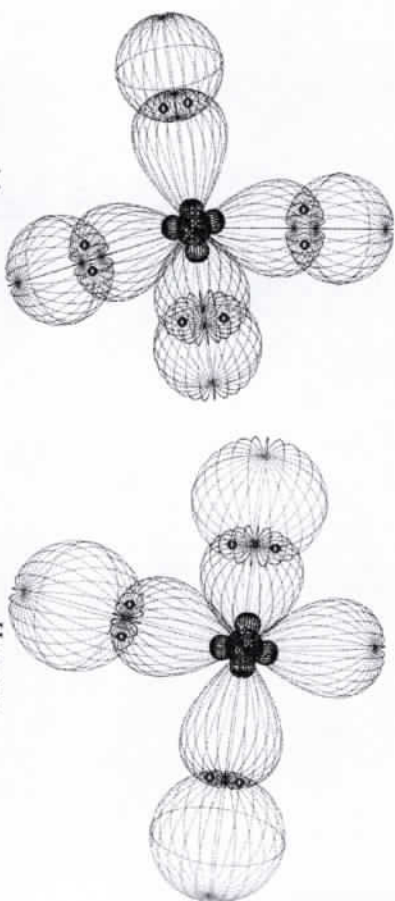


Рисунок 27.5

Появление молекул:

Молекулы образуются в результате химического соединения атомов. Этот процесс происходит через электроны в самой внешней электронной оболочке, которая не заполнена электронами. Электроны во внутренней оболочке, заполненной электронами, не участвуют в образовании молекул. Ковалентная связь возникает, когда идентичные атомы соединяются. В других случаях ионная связь образует связи, такие как молекулярная связь, металлическая связь. На рисунке 2 ниже изображены электронные оболочки некоторых молекул с помощью информационных технологий (рис.27.6).





Этан
Рисунок 27.6

Как видно из приведенных выше рисунков, электроны во внутренних оболочках не двигаются со своего места. Так как связи, образующие молекулы путем объединения атомов, осуществляются только через внешние неполные оболочки (валентные электроны и вакантные места). Другими словами, оказывается, что внешние электроны атомов образуют молекулярные связи в обмен на некоторое покрытие друг друга.

Вопросы по теме

1. Как ведут себя частицы в микромире? Есть ли в нем понятие о траектории?
2. Сколько квантовых величин существуют в микромире?
3. Что означает главное квантовое число?
4. Что означает орбитальное квантовое число?
5. Что означает магнитное квантовое число?

6. Что означает квантовое число спина?
7. Что такое s-орбиталь и в какой форме она находится? Сколько число этих орбиталей?
8. Что такое p-орбиталь и в какой форме она находится? Сколько число этих орбиталей?
9. Что такое d-орбиталь и в какой форме она находится? Сколько число этих орбиталей?
10. Каким цветом окрашены s-, p-, d-, f-элементы в периодической системе?

Решение задачи:

1. Определите орбитальный механический момент, создаваемый вокруг ядра электроном с орбитальным квантовым числом $\ell=3$, а также орбитальный магнитный момент. Возьмите постоянную Планка как $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Дано:

$$\ell=3$$

$$h=6,626 \cdot 10^{-34}$$

$$\text{Дж·с}$$

$$c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$L=? \quad \mu=?$$

Решение:

Сначала вычислим механический момент по формуле зависимости момента импульса от орбитального квантового числа.

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar = \sqrt{\ell(\ell+1)} \cdot \frac{h}{2\pi} = \sqrt{3 \cdot (3+1)} \cdot \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж·с}}{2 \cdot 3,1416} = 3,649 \cdot 10^{-34} \text{ кг·м}^2/\text{с}$$

Теперь определим магнитный момент, создаваемый вращательным движением электрона вокруг ядра.

$$\mu = \frac{he}{4\pi m_e} \sqrt{\ell(\ell+1)} = \mu_{\text{Бор}} \sqrt{\ell(\ell+1)} = 9,272 \cdot 10^{-34} \text{ А·м}^2 \cdot \sqrt{3(3+1)} = 3,363 \cdot 10^{-34} \text{ А·м}^2$$

$$\text{Ответ: } L = 3,649 \cdot 10^{-34} \text{ кг·м}^2/\text{с}; \quad \mu = 3,363 \cdot 10^{-34} \text{ А·м}^2$$

2. Определите, какие углы составляет механический момент электрона, имеющего орбитальное квантовое число $\ell=2$ и вращающегося вокруг ядра, с направлением магнитного поля (см. рисунок).

Дано:

$$\ell=2$$

$$h=6,626 \cdot 10^{-34}$$

$$\text{Дж·с}$$

$$c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\varphi=?$$

Решение:

Сначала вычислим механический момент по формуле зависимости момента импульса от орбитального квантового числа.

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar = \sqrt{\ell(\ell+1)} \cdot \frac{h}{2\pi} = \sqrt{3 \cdot (3+1)} \cdot \frac{h}{2\pi} = 2\sqrt{3} \cdot \hbar$$

Теперь определим значения магнитных квантовых чисел.

$$m = -2, m = -1, m = 0, m = 1, m = 2$$

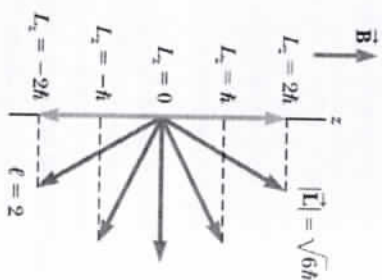
Теперь запишем формулу косинуса угла между механическим моментом электрона L и его проекцией на направление магнитного поля L_z

$$\cos \varphi = \frac{L_z}{L} = \frac{m \hbar}{\sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar} = \frac{m}{\sqrt{\ell(\ell+1)}}$$

Теперь вычислим значения искомого угла.

$$\begin{aligned}\cos \varphi_1 &= \frac{m_1}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} = \frac{-2}{\sqrt{6}}, \quad \varphi_1 = \arccos\left(\frac{-2}{\sqrt{6}}\right) \approx 145^\circ \\ \cos \varphi_2 &= \frac{m_2}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} = \frac{-1}{\sqrt{6}}, \quad \varphi_2 = \arccos\left(\frac{-1}{\sqrt{6}}\right) \approx 110^\circ \\ \cos \varphi_3 &= \frac{m_3}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} = \frac{0}{\sqrt{6}} = 0, \quad \varphi_3 = \arccos(0) = 90^\circ \\ \cos \varphi_4 &= \frac{m_4}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} = \frac{1}{\sqrt{6}}, \quad \varphi_4 = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) \approx 70^\circ \\ \cos \varphi_5 &= \frac{m_5}{\sqrt{\ell(\ell+1)}} = \frac{2}{\sqrt{6}}, \quad \varphi_5 = \arccos\left(\frac{2}{\sqrt{6}}\right) = 35^\circ\end{aligned}$$

Ответ: $\varphi_1 = 145^\circ$; $\varphi_2 = 110^\circ$; $\varphi_3 = 90^\circ$;
 $\varphi_4 = 70^\circ$; $\varphi_5 = 35^\circ$



§ 28. ЗАДАЧА О УСИЛЕНИИ СВЕТА. ПОНЯТИЕ О ЛАЗЕРАХ.

Спонтанные и вынужденные излучения. Задача о усилении света.

Спонтанное излучение (лат. spontaneus — свободный) — самопроизвольное (без внешнего излучения) электромагнитных волн атомом, молекулой и другими квантовыми системами. Они возникают в процессе спонтанного перехода из возбужденного высокоэнергетического состояния в низкоэнергетическое. В частности, время, прошедшее до того, как число атомов в возбужденном состоянии уменьшится в e раз, называется временем жизни возбужденного состояния и находится в интервале $10^{-8} - 10^{-9}$ с. Энергия каждого фотона в спонтанном излучении выражается формулой $h\nu$. В отличие от вынужденных излучений, спонтанное излучение не зависит от внешнего электромагнитного излучения, воздействующего на квантовую систему (рис.28.1).

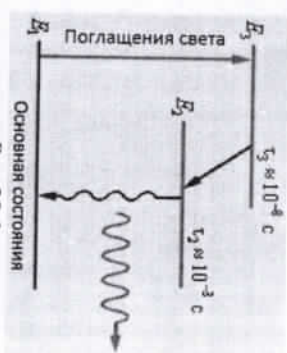


Рис.28.1

Большинство источников света, например, лампа накаливания под воздействием тепла, являются самопроизвольными излучателями. При спонтанном излучении колебания в разных направлениях чередуются друг с другом очень быстро и хаотично. Поэтому спонтанное излучение не может быть монохроматическим, когерентным и поляризованным.

Понятия о лазерах:

Слово "лазер" происходит от английского слова Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что означает усиление света с помощью компульсивного излучения.

Оптический квантовый генератор-это устройство, которое генерирует излучения в ультрафиолетовом, инфракрасном и видимом диапазонах полей, что делает его одним из основных устройств в квантовой электронике. Первый лазер был изобретен в 1960 году на рублинах американским ученым создано Т.Мейманом.

Его работа основана на вынужденным излучении атомов и молекул. Лазер излучает различную энергию (электрическую, световую, химическую, тепловую и т. д.), преобразуя его в энергию когерентного электромагнитного света в оптическом диапазоне.

Он состоит из 3 элементов — источника энергии, активной среды (вещества), обратной связи (обратная связь не нужна, если лазер служит для усиления когерентного луча). От других источников света лазер отличается когерентностью, монохроматичностью, ориентацией под очень малым углом, тем, что мощность света имеет большую спектральную плотность, очень высокую частоту колебаний. По активной среде лазеры делятся на следующие группы:

- 1) лазеры из твердого тела и жидкости;
- 2) газовые лазеры;
- 3) полупроводниковые лазеры.

Кроме них, существуют еще такие разновидности лазеров, как эксимерные, химические и др. В лазерах обратная связь осуществляется с помощью оптического резонатора (двойного зеркала). Между зеркалами помещается активное вещество. Световая волна, отражаясь от зеркал, вновь проходит через активное вещество, создавая в нем вынужденные переходы. Одно из зеркал частично прозрачно, служит для того, чтобы усиленный свет после бесконечного количества переходов выходил наружу.

В принципе работы лазера важна структура атома. Энергетические состояния (орбитали) атомов, из которых состоят вещества, различны. Атом с частицей на более низкой орбите будет стабильным, а атом с частицей на более высокой орбите будет нестабильным. На высокой орбите частица долго не задерживается.

Через определенное время частица опускается на более низкую орбиталь, и атом излучает луч.



Рисунок 28.2

Самопроизвольное понижение в высокоэнергетических состояниях (орбитах), т. е. когда атом не переходит в более устойчивое состояние, можно «толкнуть» ее вниз. Это называется в науке вынужденным облучением.

Подобно тому, как один камень, брошенный над горой, раскалывает несколько камней, когда одна частица вещества отталкивается, частицы на всех орбитах возбуждаются. К свету, излучаемому атомом, добавляется поглощенный свет, причем два-четыре, четыре-восемь и т. д. превращается в лазерный луч. Эти лучи усиливаются квантовым генератором (по аналогии с усилителем электрического сигнала), преобразующим их в чрезвычайно прамонийный луч (энергию) (рис.28.2).

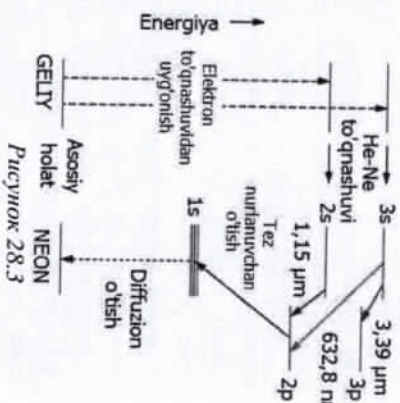
За счет источника энергии (постоянного тока, тока высокой или сверхвысокой частоты, оптического или лазерного луча, пучок электронного луча) электроны в активном веществе переходят на верхние (возбужденные) уровни, возникает состояние инверсии (число электронов на верхнем уровне больше, чем на нижнем уровне n). При воздействии на них какого-либо источника энергии (например, луча света) срабатывает активное вещество. При этом энергия, отдаваемая электронам, увеличивается в несколько тысяч раз и в этот момент принимает форму лазерного луча. При этом коэффициент усиления лазерного луча в приборе k_1 должен быть значительно больше, чем коэффициент потерь энергии, происходящих в нем k_2 . При соблюдении этих условий можно добиться генерации (генерации) лазерного луча.

Лазер имеет 2 различных режима работы. Непрерывный тонкий луч может быть получен, если в нем используются непрерывный источник энергии. Если источник испускает импульсную энергию, лазер испускает лучевые импульсы.

Понятие о видах лазеров:

В Лазере из твердых тел (например, в рубиновом Лазере) используются красная кристаллическая стеклынная палочка из оксида алюминия (Al_2O_3) с добавлением до 0,05% ионов хрома (Sg^{3+}) (активатор). При этом Рубин имеет форму цилиндра, а зеркала, образующие оптический резонатор, размещены на двух концах рубиновой оси. Свет, исходящий от импульсной лампы, создает колебанию.

Когда свет лампы падает на



Рубин, ионы хрома переходят в «возбужденное» активированное состояние, поглощая зеленую и желтую части спектра излучения, исходящего от лампы. В результате образуется активная среда, готовая к излучению, а вдоль оси Рубина появляются увеличивающиеся кванты света в виде облаков, направленных вертикально к зеркалу. Мощность генерируемого света в рубиновых лазерах достигает до 20 кВт.

Их КПД находится в диапазоне от 0,1% до 10%. Генерация лазерного луча зависит от прохождения между энергетическими уровнями активатора. Длина волны излучаемого в нем инфракрасного света $\lambda = 0,69$ мкм. Твердотельные лазеры используют стеклынную ($CaWO_4$) палочку с ионами неодима (Nd^{3+}) в качестве активного вещества в неодимовом лазере. Эти лазеры излучают инфракрасный свет $\lambda = 1,06$ мкм.

В Лазере, изготовленном из жидких тел, в качестве активного вещества используются «фродамин-61», пиранин, триафлавин и др. Используя спирт, ацетон, толуол и т. д. в качестве растворителя краски, действующее вещество осаждается в стеклынной ванне. Краситель, вызываемый азотным лазером, показан на схематической структуре лазера. Первый газовый лазер (He-Ne) с примесью был изобретен американским ученым А. Джаваном. Активная среда (созданная Джаваном) состоит из газа (или газовой смеси). Активная среда Ne, гелий-неоновая (He-Ne), состоит из смеси гелиевых и неоновых газов (рис.28.3).

Газовая смесь приходит в состояние, активированное электрическим разрядом.

В таком лазере генерация происходит при прохождении Ne между уровнями. При этом получается свет с 3 длинами волн: $\lambda_1 = 0,63$ мкм (красный свет), $\lambda_2 = 1,15$ мкм и $\lambda_3 = 3,39$ мкм (инфракрасные лучи).

В газовом лазере ($CO_2 + N_2$) излучается свет длиной $\lambda = 10,6$ мкм. Ионные и химические лазеры также являются газовыми лазерами.

В ионном лазере активной средой являются ионизированные атомы, а в химическом-атомы, которые в ходе химических реакций переходят в «возбужденные» состояние (аргоновый лазер, работающий на ионных уровнях, излучает синий свет) (рис.28.5). На кафедре квантовой радиофизики Национального университета Узбекистана создан компактный легкий SO_2 -лазер, работающий на высокочастотных транзисторных автогенераторах.

В полупроводниковых лазерах, таких как газовые лазеры $GdAs$, активная среда состоит из полупроводников. В таком лазере среда доводится до активного состояния с помощью оптики и потока электронов. В лазерах этого типа лазерные переходы происходят между проводимо-валентными зонами и донорно-акцепторными уровнями. Они называются лазерными диодами. Полупроводниковый диод состоит из кристаллической пластины толщиной 0,1 мм и поверхностью в несколько mm^2 . Состояние инверсии возникает, когда электроны перемещаются в более высокие зоны или уровни, когда

через эти диоды проходит правильный ток. При переходе электронов в нижнюю зону (или уровни) наблюдается генерация лазерного луча за счет энергии, выделяемой в результате рекомбинации электрон-пучок. Длина волны инфракрасного света, излучаемого лазером GaAs равна $\lambda = 0,84$ мкм. Из полупроводниковых лазеров существуют лазеры, в которых активным веществом является CdS (синий свет), CdTe (красный, темно — красный свет-фиолетовый), GaSb (красный; инфракрасный свет). Структура полупроводниковых лазеров проста, их размер невелик, и они могут работать долго.

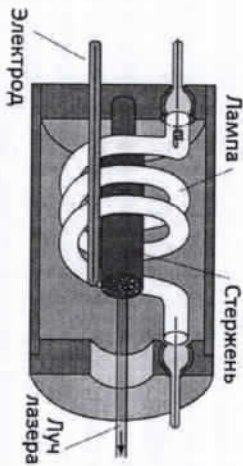


Рисунок 28.4

Внешний вид большинства лазеров будет схематично таким же, как на рисунке 28.4.

Использование лазеров в быту и технике:

Лазер широко используется в различных областях, таких как:

- о твердотельные лазеры в лазероспектроскопии, в лазерной технике (резка твердых тел, сварка, прокалывание), в нелинейной оптике;
- о газовые лазеры используются в стандартизации частоты и длины, в поиске оптических систем и в работе маркшейдера, в химии лазеров и в медицине;
- о полупроводниковые лазеры компактны, легки и широко используются в системах оптической связи, аудио-и видеосистемах, устройствах ночного видения, оптической обработке информации и проекционном лазерном телевидении.
- о химические лазеры используются в системах контроля состава атмосферы. Лазеры используются в кристаллифике, наземной, дальней и подводной оптической связи, системах телефонной связи с лучевым волокном, изготовлении лазерных компакт-дисков, хирургических операциях, офтальмологии, управлении термодермном синтезе и т. д. используется.

Кроме того, мощность света в лазерах уменьшается в следующем порядке:

- о твердотельный лазер;

- о лазер для жидких тел;
- о газовый лазер;
- о полупроводниковые лазеры.

Тонкость света (направленный под узким углом) лучше всего подходит для газовых лазеров и хуже всего подходит для полупроводниковых лазеров. Размеры, вес устройства будут самыми большими в твердотельных лазерах, средними в газовых и жидкостных лазерах и наименьшими в полупроводниковых лазерах. Свет различных лазеров охватывает диапазон от ультрафиолета до видимой области и инфракрасного диапазона.

Вопросы по теме

1. Что такое спонтанное излучение??
2. Что такое вынужденное излучение?
3. Как усиливается свет?
4. Что такое лазер? Объясните принцип его работы.
5. Какие бывают виды лазеров?
6. Использование лазеров в быту и технике.
7. Использование лазеров в военной технике?

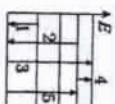
ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ VI

1. Из какого выражения определяется частота излучаемого кванта при переходе атома из возбужденного состояния с энергией E_m в основное состояние с энергией E_1 ?

A) $\frac{E_m - E_1}{h}$ B) $\frac{E_1}{h}$ C) $\frac{(E_m + E_1)}{h}$ D) $\frac{E_m - E_1}{h}$ E) $\frac{E_m}{h}$

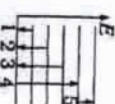
2. При каком переходе между энергетическими уровнями атома, представленными на чертеже, поглощается фотон с наименьшей частотой?

- A) 1 B) 2 C) 3 D) 4 E) 5

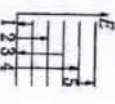


3. На рисунке приведена схема атомных энергетических уровней. Цифровыми стрелками отмечены переходы электронов. В каком из указанных переходов электронов излучается фотон с наибольшей частотой?

- A) 1 B) 2 C) 3 D) 4



4. На рисунке представлена схема атомных энергетических уровней. Цифровыми стрелками отмечены переходы электронов. В каком из указанных переходов электронов поглощается фотон с наименьшей частотой?



- A) 5 B) 4 C) 3 D) 2 E) 1

5. На рисунке изображены условно стационарные электронные орбитали атома. На какой орбите электроны будут иметь наибольшую энергию? На какой орбите электроны будут иметь наименьшую энергию?



- A) НПО Б) самый маленький на орбите 4, самый большой на орбите 1
В) самый большой на орбите 3, самый маленький на орбите 2
С) самый большой на орбите 4, самый маленький на орбите 1
D) Все орбиты будут иметь одинаковую энергию.

6. Найти радиус атома (Å), испускающего излучение, имеющее длину волны 550 нм, используя атомную модель Томсона.

- A) 2,77 B) 1,5 C) 2 D) 3 E) 1,7

7. Используя атомную модель Томсона, определить радиус (Å) атома водорода с потенциалом ионизации 13,6 эВ.

- A) 0,16 B) 1,6 C) 0,6 D) 3,6 E) 2,7

8. С помощью эксперимента Резерфорда наблюдалось рассеяние α -частиц, движущихся со скоростью $3 \cdot 10^7$ м/с в золотой фольге. Какой размер ядра мы получаем при этом?

- A) $1,22 \cdot 10^{-14}$ м B) $1,22 \cdot 10^{-13}$ м C) $2,1 \cdot 10^{-15}$ м D) $2,2 \cdot 10^{-10}$ м
E) $2,22 \cdot 10^{-14}$ м

9. С какой частотой (Гц) атом поглощает свет, если при переходе из нижнего стационарного состояния в верхнее его энергия изменилась на 8,28 эВ?

- A) 80 B) 1650 C) 2000 D) 2300 E) 1400

10. Найти момент импульса электрона на пятой орбите атома.

- A) h B) $2h$ C) $3h$ D) $4h$ E) $5h$

11. Найти скорость электрона на этой орбите (Мм/с), если радиус 7-й орбиты электрона в атоме равен $35A^0$.

- A) 0,023 B) 0,23 C) 2,3 D) 3,2 E) 0,32

12. Найти длину волны (нм) с волновым числом $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

- A) 80 B) 150 C) 200 D) 200 E) 100

13. Найти частоту (Гц) второй спектральной линии ряда Лаймана.

- A) 824 B) 150 C) 1924 D) 924 E) 2928

14. Найти частоту четвертой спектральной линии (Гц) ряда Бальмера.

- A) 2732 B) 320 C) 732 D) 1732 E) 224

15. Найти волновое число (см^{-1}), соответствующее второй спектральной линии ряда Пашена.

- A) 800 B) 7804 C) 780 D) 1780 E) 3700

16. Найти частоту (Гц) третьей спектральной линии ряда Брекста.

- A) 138 B) 380 C) 200 D) 480 E) 38

17. Найти частоту (Гц) второй спектральной линии ряда Пфунда.

- A) 35 B) 164 C) 200 D) 64,5 E) 48

18. Вычислите спектральный термин (см^{-1}), соответствующий пятому энергетическому уровню атома водорода.

- A) 480 B) 7889 C) 780 D) 4389 E) 379

19. Сколько энергетических уровней атома водорода будет иметь спектральный термин $3048,25 \text{ см}^{-1}$?

- A) 5 B) 6 C) 2 D) 1 E) 3

20. Найти радиус 7-й стационарной орбиты электрона в атоме водорода (Å).

- A) 52 B) 25,9 C) 22 D) 18,5 E) 36

21. Какой радиус стационарной орбиты $33,86 \text{ Å}$ будет у электрона в атоме водорода?

- A) 8 B) 6 C) 2 D) 4 E) 3

22. Найти скорость электрона в атоме водорода по 3-й стационарной орбите (мм/с).

- A) 5,28 B) 3,28 C) 2,28 D) 0,728 E) 1

23. Найти кинетическую энергию (эВ) атома водорода на 6-й стационарной орбите.

- A) 4,8 B) 0,38 C) 2,28 D) 0,78 E) 1,8

24. Найти потенциальную энергию (эВ), если кинетическая энергия электрона в атоме водорода на одной стационарной орбите равна 0,28 эВ.

- A) -5,6 B) -0,56 C) -3,2 D) -0,32 E) -1,8

25. Найдите длину волны де Бройля частицы (Å) с импульсом $4,4 \cdot 10^{-24} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

- A) 0,5 B) 3,5 C) 0,15 D) 2,5 E) 1,5

26. Найдите импульс ($\text{кг} \cdot \text{м/с}$) частицы с длиной волны де Бройля ($8\text{\AA}$).
 A) $8,28 \cdot 10^{-25} \text{ м}$ B) $8,28 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ C) $8,28 \cdot 10^{-34} \text{ м}$ D) $8,28 \cdot 10^{-22} \text{ м}$ E) $1,28 \cdot 10^{-25} \text{ м}$

27. Найдите длину волны де Бройля частицы ($\text{\AA}$) со скоростью $1,5 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, массой $4,4 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.
 A) 5 B) 2 C) 0,15 D) 0,5 E) 1

28. Найдите длину волны де Бройля ($\text{\AA}$) электрона с кинетической энергией $8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
 A) 0,5 B) 2,5 C) 5,5 D) 2,5 E) 1,5

29. Найдите кинетическую энергию (Дж) электрона с длиной волны де Бройля $7\text{\AA}$. Рассмотрим электрон как классическую частицу.
 A) $4,9 \cdot 10^{-19} \text{ м}$ B) $9,4 \cdot 10^{-19}$ C) $3,8 \cdot 10^{-19}$ D) $8,28 \cdot 10^{-22}$ E) $4,9 \cdot 10^{-18}$

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ VI

1. Найдите радиус ($\text{\AA}$) атома используя атомную модель Томсона, испускающего излучение с длиной волны 660 нм .

2. Какой длины волны (нм) излучает атом по модели Томсона, если он имеет радиус $3,5\text{\AA}$.

3. Найдите напряженность электрического поля (В/м) внутри атома, испускающего излучение с частотой (700 ТГц), используя атомную модель Томсона. Отклонение электрона внутри атома от равновесного состояния ($0,012 \text{\AA}$).

4. С помощью эксперимента Резерфорда $2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ наблюдалось рассеяние α -частиц, движущихся со скоростью, близкой к золотой фольге. Чему равна дальность прицеливания, если отсчет ведется под углом 45° ?

5. Какова будет дальность прицеливания, если вышеописанная задача проводится с использованием алюминиевой фольгой?

6. Под каким углом α -частицы, движущиеся со скоростью 10^7 м/с , рассеиваются в золотой фольге, когда расстояние до цели $b = 10^{-14} \text{ м}$?

7. С какой частотой (ТГц) образуется излучение, если при переходе атома из верхнего стационарного состояния в нижнее его энергия изменилась на $4,5 \text{ эВ}$?

8. Найдите момент импульса электрона на третьей орбите атома.

9. Найдите радиус орбиты ($\text{\AA}$), если скорость электрона в атоме по шестой орбите равна 24 км/с .

10. $\text{To 'Idn soni } 1,25 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1} \text{ bo 'Igan to 'qinling uzlinigi (nm) topisin.}$
 10. Найдите длину волны (нм) с волновым числом $1,25 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

11. Найдите волновое число (см^{-1}), соответствующее четвертой спектральной линии ряда Лаймана.

12. Найдите частоту (ТГц) третьей спектральной линии ряда Бальмера.

13. Найдите волновое число (см^{-1}), соответствующее третьей спектральной линии ряда Пашена.

14. Найдите частоту (ТГц) четвертой спектральной линии ряда Брекета.

15. Найдите волновое число (см^{-1}), соответствующее третьей спектральной линии ряда Пфунда.

16. Вычислите спектральный термин (см^{-1}), соответствующий третьему энергетическому уровню атома водорода.

17. Какое энергетических уровней атома водорода будет иметь спектральный термин 6859 см^{-1} ?

18. Найдите радиус 4-й стационарной орбиты электрона в атоме водорода ($\text{\AA}$).

19. Какой стационарной орбиты радиус ($19\text{\AA}$) у электрона в атоме водорода?

20. Найдите скорость электрона в атоме водорода по 5-й стационарной орбите (мм/с).

21. Найдите кинетическую энергию (эВ) атома водорода на 3-й стационарной орбите.

22. Найдите потенциальную энергию (эВ), если кинетическая энергия электрона в атоме водорода на одной стационарной орбите равна $3,4 \text{ эВ}$.

23. Сколько работы нужно выполнить, чтобы выбить электрон со второй орбиты в атоме водорода из гравитационного поля ядра?

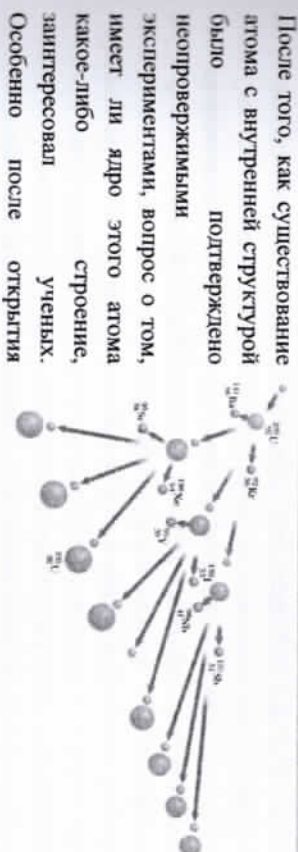
24. Атом водорода был переведен из основного состояния в возбужденное состояние с начальным квантовым числом 3. Какие линии могут образовываться в спектре водорода при переходе атома из возбужденного состояния обратно в основное?

25. Найдите 1) Период обращения электрона атома водорода по первой Борной орбите, 2) его угловую скорость.

26. Определите начальный потенциал возбуждения атома водорода.

27. Найти числовое значение кинетической, потенциальной и полной энергии электрона на его первой орбиты.
28. Найдите длину волны де Бройля частицы (λ) с импульсом $3,3 \cdot 10^{-24}$ кг·м/с.
29. Найти импульс (кг·м/с) частицы с длиной волны де Бройля $10 \text{ \AA}$.
30. Найдите длину волны де Бройля частицы со скоростью $(2 \cdot 10^7 \text{ м/с})$, массой $(1,65 \cdot 10^{-31} \text{ кг})$.
31. Найдите длину волны де Бройля (λ) электрона с кинетической энергией $6,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.
32. Найдите кинетическую энергию (Дж) электрона с длиной волны де Бройля (λ). Рассмотрите электрон как классическую частицу.
33. Найдите длину волны де Бройля.
 - 1) для электрона, летящего со скоростью 10^6 м/с ;
 - 2) для атома водорода, движущегося со скоростью, равной средней квадратичной скорости при температуре 300 К ;
 - 3) для шара массой 1 г , движущегося со скоростью 1 см/с .
34. Найдите длину волны де Бройля для электрона, кинетическая энергия которого равна: 1) 10 кэВ 2) 1 МэВ .
35. Перечислите квантовые числа ℓ и m для случая, когда $n=2$.
36. Найдите значения момента импульса и магнитного момента электрона, когда $\ell=3$.
37. Найдите проекции момента импульса электрона и магнитного момента, когда $\ell=2$.

● ГЛАВА VII. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



После того, как существование атома с внутренней структурой было подтверждено неопровержимыми экспериментами, вопрос о том, имеет ли ядро этого атома какое-либо строение, заинтересовал ученых. Особенно после открытия радиоактивного излучения и распада выяснилось, что эти излучения исходят не от оболочек атома, а от его ядра. Так как в ядре тоже будут какие-то возбужденные состояния, как в электронных оболочках, то в этом случае ядро будет обладать свойством излучать свет. После открытия Чедвиком нейтрона в 1932 году было установлено, что ядра имеют протонно-нейтронную структуру, которой они обладают сегодня, и их масса составляет почти атомную массу. В этой главе мы изучаем такие темы, как характеристики атомного ядра, ядерные распады и их виды, ядерные и термоядерные реакции и использование ядерной энергии в мирных целях.

§ 29. РАДИОАКТИВНОСТЬ. ПРАВИЛО СДВИГА. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА. РАДИОАКТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ И ДОЗИРОВКА

Открытие радиоактивности:

1896 йили Fransuz olimi A.Bekkerel utpan tuzlati usqinida toxtimada turgan fotoplastinkalar kuyib uqarqsiz holda kelib qolganiini guvohi bo'ldi. Dastlab buni sababini anglamagan bo'lsa-da, keyinchalik rlyonkalarg kuyib qolishini asosiy sababini utpan tuzlati ekanini aniqladi. Xuddi shuningdek, utpaning turli bitkimalari uoki sof utpan elementini o'zi ham bir xil nomalym utpan chiqartib fotoplastinka kuyishiga sababchi bo'lar ekan. Utpan elementi molekula holda, bitkima tarkibida uoki yakkala atom holda bo'lishidan qat'iy nazar, bir xil pirlanalar ekan. Bu parlanish intensivligiga hech qanday tashqi ta'sirlar (bosim, temperatura, elektr va b.) o'z ta'sirini ko'rsatolmas ekan. Keyinchalik fotoplastinkani kuyitadigan yonday pirlar boshqa elementlar (iotiy, radiy, polony) tomonidan ham chiqarilishini Ryet Kuutiy va Mariya Kuutiy-Skladovskayalar tomonidan aniqlandi.

В 1896 году французский ученый А.Беккерель стал свидетелем того, как фотопластины, стоявшие рядом с солями урана, горели и приходили в негодность. Хотя он сначала не понял причину этого, позже он обнаружил,

что основной причиной, по которой пленки сторают, являются соли урана. Точно так же различные соединения урана или сам элемент чистого урана могут вызывать фотопластинку, испуская одни и те же неизвестные лучи. Получается, что элемент Уран излучает одинаково, независимо от того, находится ли он в соединении или без отдельного атома, без молекулы. Это означает, что никакие внешние воздействия (давление, температура, электричество и т. д.) не влияют на интенсивность излучения.) до тех пор, пока он не сможет оказать влияние. Позже Пьер Кюри и Мария Кюри-Склодовская обнаружили, что такие лучи, сжигающие фотопластинку, испускаются и другими элементами (торием, радием, полонием).

Мелкие самопроизвольного (спонтанного) излучения вещества называются радиоактивными.

В дальнейшем широко изучалась причина происхождения радиоактивных лучей, их влияние на другие тела и другие свойства. В частности, установлено, что при воздействии магнитного поля на пучок радиоактивного излучения этот пучок распадается на три пучка (рис. 29.1). Установлено, что лучи первого типа отклоняются от первоначального направления влево, лучи второго типа — вправо, а лучи третьего типа образуют прямую линию без отклонений. Лучи первого типа называются α -лучами, лучи второго типа β -лучами, а лучи третьего типа γ -лучами. Известно, что в магнитном поле отклоняются только заряженные частицы. Отсюда следует вывод, что α - и β -лучи — это потоки заряженных частиц с противоположным знаком, γ -лучи — это потоки незаряженных частиц.

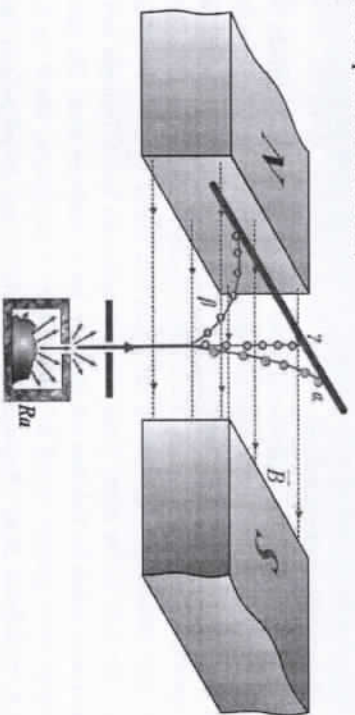


Рисунок 29.1

Результаты комплексного исследования радиоактивности показали, что α -лучи — это потоки положительно заряженных α -частиц, β -лучи — это потоки отрицательно заряженных β -частиц, а γ -лучи — это короткие электромагнитные волны. В зависимости от радиусов кривизны отклонения α - и β -

частиц в магнитном поле сначала определялись удельные веса этих частиц, а затем их заряд и масса.

По результатам опытов оказалось, что α -частицы — это ядра гелия, движущиеся со скоростью ~ 2000 км/с, а β -частицы — это поток электронов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света.

Таким образом, тот факт, что атомы некоторых природных и искусственных химических элементов самопроизвольно испускают α -, β -частицы и γ -кванты и превращаются в атомы других химических элементов, называется радиоактивностью. При этом α -лучи, являющиеся ядрами атома гелия, испускаются со скоростью $\sim 10^7$ м/с, β -лучи — это быстро движущийся поток электронов, скорость которого от $\sim 10^8$ м/с достигает скорости $\sim 0,999$ с. γ -лучи, состоят из электромагнитных волн, которые короче, чем рентгеновские лучи с длиной волны 10^{-11} — 10^{-13} м.

М.Кюри и П.Кюри обнаружили два радиоактивных элемента — радий и полоний. К элементу полония М.Кюри был назван в честь его родины Польши. Радиоактивность радия была в миллион раз больше, чем у урана. С помощью спектрального анализа Резерфорд в 1908 году открыл радиоактивный газ — радон. Позже выяснилось, что все элементы после полония, 84-го элемента периодической системы Менделеева, излучают радиоактивный свет.

Открытие радиоактивности поставило перед физиками новый вопрос: «как возникает это излучение». Особенно поразительной была спонтанность этого излучения. Ученые Резерфорд и Содди в 1903 году выдвинули гипотезу о том, что радиоактивное излучение возникает в результате самопроизвольного распада атомов. Согласно ему, ядра радиоактивных элементов время от времени испускают лучи в результате радиоактивного распада. Это означает, что ядра радиоактивных элементов отличаются от ядер обычных элементов тем, что они не являются стабильными, в то время как в этих ядрах периодически происходят распады. В результате этих распадов из ядра выходят α -, β -частицы и γ -кванты.

Виды радиоактивного распада, правила сдвига в распадах:

Процесс превращения радиоактивных ядер в другое ядро путем выброса из него частиц называется *радиоактивным распадом*. Заряд и массовое число ядра могут измениться или не измениться в этом процессе. Ядро, подвергшееся радиоактивности, называется первичным или материнским ядром, а ядро, образовавшееся в результате распада, — вторичным или дочерним ядром.

Атом испускает α - и β -лучи и превращается в другой элемент, называется α - и β -распадом. γ -излучение, однако, не используется, потому что само α -

и β -излучение также содержит γ -излучение. Остановимся отдельно на α - и β -распадах.

1. α -распад

Мы уже говорили, что α -частицы – это ядра гелия, которые движутся с приближительной скоростью ~ 20000 км/с. Эти ядра атома гелия, которые выходят из ядра с очень большой ($4-9$ МэВ) энергией, ионизируют вещество, с которым они сталкиваются на своем пути. В нормальных условиях в воздухе на 1 см пути образуется в среднем 50 000 пар ионов. Путь свободного пробега α -частицы в воздухе лежит в пределах 2-12 см, а в твердых телах достигает нескольких микрометров.

Ядро X, испускающее из себя α -частицу, самопроизвольно распадается и превращается в другое Y-ядро. В результате происходит сдвиг ядра по периодической системе на несколько ячеек. При α -распаде правило сдвига будет следующим:

$$\begin{matrix} A & X & \rightarrow & A-4 & Y & + & 4 & He \\ Z & X & \rightarrow & Z-2 & Y & + & 2 & He \end{matrix} \quad (29.1)$$

Из приведенной выше формулы сдвига можно сделать следующий вывод:

При α -распаде ядро теряет положительный заряд, равный 2e, а число протонов уменьшается на 2, масса ядра уменьшается на 4 атомные единицы массы, элемент перемещается на 2 ячейки в периодической таблице.

Например, ядро полония ($^{210}_{86}Po$) в результате самопроизвольного распада превращается в ядро свинца ($^{206}_{82}Pb$), выбрасывая из себя α -частицу (4_2He) (рис.29.2-а).



Приведем еще один пример α -распада. Так как ядро урана ($^{238}_{92}U$) в результате самопроизвольного распада испускает из себя α -частицу (4_2He) и превращается в ядро тория ($^{234}_{90}Th$) (рис.29.2-б).



Так же, как и выше, ядро радия ($^{226}_{88}Ra$) превращается в ядро радона ($^{222}_{86}Rn$), испуская из себя α -частицу (4_2He) в результате самопроизвольного распада (рис.29.2-с).

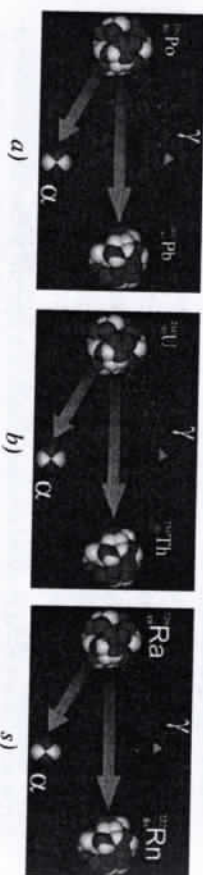


Рисунок 29.2



α -распад может идти путем излучения энергии или поглощения энергии. Но чаще всего она идет с излучением энергии. Следует напомнить, что в процессе распада заряд и масса сохраняются. В уравнении реакции сумма нижних индексов уравнения взаимно равна, а сумма верхних индексов также взаимно равна.

2. β -распад

Мы уже упоминали, что β -лучи – это поток электронов, движущихся со скоростью, близкой к скорости света. Их энергия значительно больше и достигает 2,3 МэВ. Эта энергия также примерно в 5 раз больше энергии покоя электрона. Поскольку при воздействии на вещество образуются значительно меньшее количество ионов (до 50 пар ионов), чем у α -частицы, путь свободного пробега β -частиц значительно больше, чем у α -частицы. Путь свободного пробега β -частиц в металлах составляет около 3 мм, а в воздухе может достигать нескольких сотен метров.

Ядро X, испускающее из себя β -частицу, самопроизвольно распадается и превращается в другое Y-ядро. В результате происходит смещение ядра в одну клетку по периодической системе. β -распад можно разделить на три типа. Во всех трех типах β -распада массовое число ядра остается неизменным. Но заряд ядра изменяется на единицу.

2.1) β^- -распад.

Этот тип распада называется электронным распадом, и правило сдвига для этого распада будет следующим:

$$\begin{matrix} A & X & \rightarrow & A & Y & + & e^- & + & \bar{\nu} \\ Z & X & \rightarrow & Z+1 & Y & + & e^- & + & \bar{\nu} \end{matrix} \quad (29.3)$$

При β^- -распаде один электрон отделяется от ядра, то есть один нейтрон в ядре превращается в протон, электрон и антинейтрино (фотон с большой массой).

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \quad (29.4)$$

Из приведенной выше формулы сдвига можно сделать вывод:

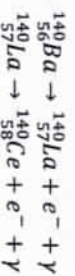
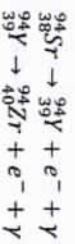
при β^- -распаде ядро теряет отрицательный заряд, равный e, а число протонов увеличивается на 1, масса ядра не меняется, элемент смещается на 1 клетку в сторону конца периодической системы.

Например, ядро осмия ($^{191}_{76}Os$) в результате самопроизвольного распада, испуская из себя β^- -частицу ($^0_{-1}e$) превращается в ядро иридия ($^{191}_{77}Ir$) (рис.29.3-а).



Приведем еще несколько пример β^- (электронного) распада.





2.2) β^+ -распад.

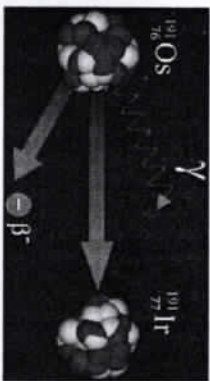
Этот тип распада называется позитронным (античастицам электрона) распадом, и правило сдвига для этого распада будет следующим:



При β^+ -распаде из ядра выделяется один позитрон (положительно заряженная частица, масса которой равна массе электрона), то есть один протон превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино.



При β^+ -распаде ядро теряет положительный заряд, равный e , а число протонов уменьшается на 1, масса ядра не меняется, элемент смещается на 1 клетку в сторону начала периодической системы.



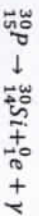
a)



b)

Рисунок 29.3

Например, ядро фосфора (${}^{30}_{15}\text{P}$) превращается в ядро кремния (${}^{30}_{14}\text{Si}$), испуская из себя один позитрон (e^+) в результате позитронного распада (рис.29.3-6).



2.3) Поглощение электронов.

При так называемом электронный охват поглощения или электронном поглощении правило сдвига выглядит следующим образом:



Третий тип β -распада в процессе поглощения электронов ядро поглощает электроны в ближайшей к нему электронной оболочке (преимущественно в К-оболочке). Этот электрон соединяется с протоном в ядре и превращается в нейтроны и нейтрино.



При поглощении электронов ядро теряет положительный заряд, равный e , а число протонов уменьшается на 1, масса ядра не меняется.

Элемент смещается на 1 клетку в сторону начала периодической системы.

Явление поглощения электронов следующее L-, M-,... с электронами оболочками практически не происходит.

Дочернее ядро, образованное в результате радиоактивного распада, также может быть радиоактивным элементом. Следовательно, процесс радиоактивного распада образует цепочку радиоактивных элементов, которая обычно заканчивается стабильным элементом. Такая цепочка элементов называется **радиоактивным семейством**. В настоящее время существует четыре радиоактивных семейства: 1) семейство урана, 2) семейство актиния; 3) семейство тория; 4) семейство нептуния.

Закон радиоактивного распада:

Расчеты показывают, что очень долгоживущий изотоп урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ имеет около $2,5 \cdot 10^{18}$ атомов массой 1 мг, и каждую секунду 12 из них распадается за счет испускаемой из себя α -частиц и превращаются в изотоп тория ${}^{234}_{90}\text{Th}$. Но мы не можем сказать, какие еще 12 ядер будут распадаться в следующую секунду. Мы можем только сказать, что количество ядер ($\frac{dN}{dt}$), распавшихся в секунду, прямо пропорционально общему количеству ядер в данном образце N . Значит, $\frac{dN}{dt} \sim N$ будет. Чтобы перейти от пропорциональности к равенству, введем константу, характеризующую изучение.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (29.9)$$

Здесь: λ – постоянная распада, зависящая от типа радиоактивного элемента, $[\lambda] = [c^{-1}]$. Константа распада указывает, сколько радиоактивных ядер распадется за 1 с времени. Знак (-) в уравнении означает, что общее количество ядер уменьшается, когда происходит радиоактивность.

Решая приведенное выше дифференциальное уравнение, сформируем уравнение радиоактивного распада.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (29.10)$$

Докажем это следующим образом: определив формулу из дифференциального уравнения и интегрируя ее $\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$, находим, что $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$. Из этого следует запрашиваемый выражения равна.

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t, \rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}, \rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Приведенное выше уравнение радиоактивного распада определяет количество ядер, которые остаются нераспавшимися, т. е. N_0 – это начальное

количество ядер, а N – количество ядер, следующих за $N-t$ с течением времени.

Если в приведенном выше выражении $t = 1/\lambda$, то оказывается, что это равно $N = \frac{N_0}{e}$. Это время называется средним временем жизни и обозначается буквой τ .

Связь между константой распада и средним временем жизни выглядит следующим образом:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (29.11)$$

Среднее время жизни это такое величина, показывающий количество ядер за время уменьшается в $e = 2,718182...$ раз.

Для радиоактивных элементов, кроме среднего времени жизни, существует еще один период времени, в течение которого равная половина ядер распадается и превращается в другое ядро.

Для каждого радиоактивного вещества существует определенный временной интервал, в течение которого активность уменьшается в два раза, и это время называется периодом полураспада.

Если число ядер радиоактивного элемента в момент $t=0$ равно $N = N_0$, то время $t=T$ (один период полураспада) через некоторое время будет равно числу атомов $N_0/2$, а время $t=2T$ будет равно $N = N_0/4$ и так далее. Для радиоактивных веществ, чтобы найти число ядер через t времени, основной закон радиоактивного распада-закон полураспада-будет следующим:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \quad (29.12)$$

Где: N_0 – число исходных ядер, N – число нераспавшихся ядер.

Между постоянной распада, средним временем жизни и периодом полураспада существует следующая связь:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} \quad (29.13)$$

Докажем это следующим образом: уравнения радиоактивного распада и полураспада $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} = N_0 e^{-\lambda t}$ определим связь, запрошенную из уравнения

выражения. Если в получившие выражения $2^{-\frac{t}{T}} = e^{-\lambda t}$ выражении $t=\tau$, $2^{-\frac{\tau}{T}} = e^{-\lambda \tau}$, $\rightarrow 2^{\frac{\tau}{T}} = e^{\lambda \tau}$, $\rightarrow 2^{\frac{\tau}{T}} = e$, $\rightarrow \frac{\tau}{T} = \log_2 e = \frac{1}{\ln 2}$, $\rightarrow \tau = \frac{T}{\ln 2}$

то получается искомым выражение.

Количество ядер, которые в результате распада превратились в другое ядро, будет следующим:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 \left(1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (29.14)$$

Из приведенной выше формулы период полураспада радиоактивного элемента T находится следующим образом:

$$T = \frac{t}{\log_2(N_0/N)} \quad (29.15)$$

Если число атомов радиоактивного вещества уменьшилось за время t k ($k = N_0/N$) раз, то период полураспада вещества находится в:

$$T = \frac{t}{\log_2 k} \quad (29.16)$$

Величина, определенная выше λ, τ, T , зависит только от типа радиоактивного элемента и полностью не зависит от внешних воздействий (света, тепла, электрического тока, давления, электрического и магнитного полей) и от того, в каком соединении находится радиоактивный элемент.

Радиационная активность:

Вещества, содержащие радиоактивные элементы, называются **радиоактивными препаратами**. В качестве характеристики радиоактивных препаратов вводится понятие активность.

В приведенной выше теме мы использовали выражение $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$ для генерации уравнения радиоактивности. Если мы введем обозначение как $A = \frac{dN}{dt}$, из этого уравнения получится следующая выражения

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda A \quad (29.17)$$

Решая вышеуказанное дифференциальное уравнение, сформируем уравнение активности для радиоактивного распада.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (29.18)$$

Докажем это следующим образом: определив из дифференциального уравнения $\frac{dA}{A} = -\lambda dt$, найдем, что это $\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$, интегрируя его. Из этого следует, запрашиваемая выражения.

$$\ln \frac{A}{A_0} = -\lambda t, \rightarrow \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t}, \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Приведенное выше уравнение активности определяет экспоненциальное уменьшение активности, то есть A_0 – начальная активность, $A-t$ последующая активность с течением времени.

Активность радиоактивного препарата выражает количество распада в единицу времени.

Если за 1 с происходит 1 распад, активность такого препарата называется 1 Бк (Беккерель).

$$1 \text{ Бк} = \frac{1 \text{ распад}}{1 \text{ секунда}} \quad (29.19)$$

В литературе по ядерной физике встречаются более крупные единицы измерения активности-Ки (курий) и Кд (Резерфорд).

В радиации массой 1 г каждую секунду распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомных ядер, обозначим этой активности как 1 Ки.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Активность, при которой за 1 с происходит 10^6 распадов, называется 1 Рд.

$$1 \text{ Рд} = 10^6 \text{ Бк} \quad (29.20)$$

В то время как радиационная активность является величиной, зависящей от источника излучения. Существует также величина, называемая не зависящей от источника дозой излучения, которая характеризует поглощение излучения веществами или живыми организмами.

Доза излучения:

Излучение радиоактивных веществ оказывает мощное воздействие на все живые организмы. Для подавления жизнедеятельности клеток организма достаточно излучения, способного поднять температуру тела на 10^{-3} °С при полном поглощении его энергии. Живая клетка-это сложный механизм, некоторые части которого не могут продолжать свое нормальное существование даже при нарушении дыхания. Даже излучения очень малой интенсивности могут нанести серьезный вред клетке и вызвать опасные заболевания (лучевая болезнь, рак). Когда интенсивность излучения велика, живые организмы погибают, при этом живой организм не чувствует боли. Радиация оказывает сильное влияние на генетику в результате гибели генов в хромосомах.

Воздействие радиации на живые организмы характеризуется дозой облучения (поглощенной дозой). Энергия поглощенного ионизирующего излучения, соответствующая единице массы излучаемого вещества, называется *дозой излучения* и обозначается буквой D и равна:

$$D = \frac{E}{m} \quad (29.21)$$

Доза поглощенного излучения в системе СИ измеряется в единицах Грей (Гр). 1 г облучаемого вещества массой 1 кг равен поглощенной дозе облучения при передаче 1 Дж энергии ионизирующего излучения.

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad (29.22)$$

Естественный радиационный фон (космические лучи, радиация окружающей среды и организма человека) дает человеку дозу облучения 2 мГр в год. Международная комиссия по радиационной защите установила допустимую предельную дозу $0,05 \text{ Гр}$ для людей, работающих с облучениями. Доза облучения $3-10$ з, принятая за короткий промежуток времени, приводит к смерти.

Доза облучения в единицу времени называется мощностью дозы облучения (мощность поглощенной дозы).

$$N = \frac{D}{t} \quad (29.23)$$

Единицей мощности дозы принято считать Гр/с.

Доза излучения, одинаковая по энергии и типу частицы, зависящая от геометрических размеров и свойств источника излучения, называется *экспозиционной дозой*. На практике широко используется так называемая рентгеновская (R) единица экспозиционной дозы, не входящая в систему единиц. 1R – 0°C температуры и 760 мм ртутного столба ионы, образующиеся при давлении 1 см³ сухого воздуха, называются дозой облучения, суммарный заряд которой при взятии по отдельности составляет $3 \cdot 10^{10}$ К.

Энергетическая характеристика излучения, оцениваемая по ионизационному эффекту сухой атмосферы, называется экспозиционной дозой рентгеновского и γ -излучения. В системе СИ эта доза измеряется в единицах Кл/кг. 1 R связан с этой единицей следующим образом:

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} \quad (29.24)$$

Доза излучения, генерируемая рентгеновскими лучами или частицами, отличными от γ -квантов, измеряется в физическом эквиваленте рентгеновского излучения, то есть в единицах *Фер*. Экспозиционная доза, образующая $2,08 \cdot 10^3$ пары ионов в 1 см³ сухого воздуха при нормальных условиях, называется 1 *Фер*.

Ядерное излучение вызывает различные химические реакции в веществах. Механизм этих реакций можно объяснить следующим образом. Поток ядерного излучения может возбуждать, ионизировать и диссоциировать молекулы среды, через которую он проходит. Возбужденные молекулы и ионы, возникающие за счет них, вступают в химические реакции. В таких реакциях могут участвовать и молекулы, не подвергшиеся облучению.

Простейшим способом защиты от радиационного излучения является удаление людей от источника излучения на достаточно большое расстояние. Даже без учета поглощения воздуха интенсивность радиоактивности уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния, пройденного до источника. Поэтому ампулы с радиоактивными препаратом нельзя держать рукой. Захватывать их нужно длинными щипцами-ручками. В тех случаях, когда от источника излучения невозможно удалиться на достаточное расстояние, для защиты от излучения применяют ограждения из поглощающих материалов.

Вопросы по теме

1. Что называется радиоактивностью? Кто первым его открыл?
2. Что такое α -, β -, γ -лучи?
3. Объясните α -распад и правило смещения в нем.
4. Объясните β -распад, его виды и правила сдвига в них.
5. Напишите закон радиоактивного распада. Объясните период полураспада, среднее время жизни и постоянную распада и запишите формулы, которые их связывают.
6. Что такое радиационная активность? Как это связано со временем?
7. Охарактеризуйте единицы измерения активности.
8. Что такое доза облучения? Опишите его единицу измерения.
9. Что такое эквивалентная доза? Какова его единица измерения?

Решение задачи:

1. Период полураспада элемента составляет 70 дней. Какой процент радиоактивных ядер останется через 35 дней?

A) 75 B) 50 C) 70 D) 30 E) 60

Дано: $T = 70 \text{ кил}$

$t = 35 \text{ кил}$

Решение: По закону распада радиоактивных веществ:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

здесь N_0 - число исходных атомов в веществе;

N - количество атомов, оставшихся нераспавшимися после времени t ;
 T - период полураспада. Из закона распада радиоактивных веществ

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2^{\frac{t}{T}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,7$$

будет. Это означает, что 70% остается нераспавшим.

Ответ: C)

2. При радиоактивном распаде полония массой 0,1 мг счетчик зарегистрировал выделение $3 \cdot 10^{17}$ α -частиц. При этом масса полония уменьшилась на 2%. Найти массу атома гелия (α -частицы) (82).

Дано:

Решение:

$$\begin{aligned} k &= 3 \cdot 10^{17} \text{ та} & \text{Отсюда, согласно заданному условию } m &= 0,02M = \\ M &= 0,1 \text{ г;} & \text{кг, следует, что.} & \\ m &= 0,02M & m_{\alpha} &= \frac{0,02M}{k} = 6,7 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ m &=? & \text{Ответ: } m_{\alpha} &= 6,7 \cdot 10^{-24} \text{ г} \end{aligned}$$



§ 30. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АТОМНЫХ ЯДЕР.

Общее понятие о структуре ядра:

Открытие радиоактивности показывает, что атомные ядра в периодической системе имеют сложное строение. Согласно ядерной модели атома, предложенной Резерфордом, почти вся (более 99,9%) масса атома сосредоточена в очень малом объеме, называемом ядром. Возьмем, к примеру, атом водорода, с которым мы часто сталкиваемся в задачах. Обычно при работе с атомным размером используется размер ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), а при работе с ядерным размером - размер ферми ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ м}$). Размер одного и того же атома водорода $d = 1,06 \text{ \AA} \approx 1 \text{ \AA}$ согласно теории Бора. Исходя из результатов бомбардировки ядра различными частицами, размеры протонов и нейтронов будут примерно $d \approx 1 \text{ fm}$, а размеры различных ядер будут находиться в диапазоне $d \approx 1 - 10 \text{ fm}$. Из этого видно, что отношение размеров атома и ядра равно $10^4 - 10^5$, тогда как отношение их объемов равно кубу отношения линейных размеров, то есть равно $10^{12} - 10^{15}$. Если сравнить атом водорода с большим арбузом с диаметром $d_{\text{атом}} = 40 \text{ см}$, массой $m_{\text{атом}} = 20 \text{ кг}$, то можно будет сравнить его ядро с невидимой точкой с диаметром $d_{\text{ядро}} = 4 \text{ мкм}$, массой $m_{\text{ядро}} = 19,989 \text{ кг}$. Отсюда можно сделать вывод, что плотность арбуза можно назвать $\rho_{\text{атом}} \sim 10^3 \text{ кг/м}^3$, а плотность его ядра - $\rho_{\text{ядро}} \sim 10^{18} \text{ кг/м}^3$. Если предположить, что одно зерно пшеницы состоит только из ядер, его масса была бы даже тяжелее, чем у большого нефтяного танкера. Точно так же, предполагая, что сфера с радиусом 200 м является ядром, ее масса будет такой же, как масса Земли. В общем случае размер ядра зависит от количества нуклонов в нем и определяется по формуле:

$$R = r_0 \sqrt[3]{A} \quad (30.1)$$

Здесь: $r_0 = 1,3 - 1,4 \text{ fm}$ – интервал, величина которого получена в результате различных опытов; A – число масс (нуклонов) ядра.

После Резерфорда такие ученые, как Чедвик, Ван ден Брук, смогли измерить ядерный заряд. Они установили, что заряд ядра элемента указывает на его порядковый номер в периодической системе. Поскольку место химических элементов в периодической системе определяется не массой этих элементов, а зарядом их ядра. В периодической системе, когда таблица сдвигается на одну ячейку в зависимости от конца, заряд ядра также увеличивается на единицу. Ядро имеет наименьший заряд – положительный знаковый заряд, кратный ($e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$) заряду электрона, т. е. $q_z = +e, +2e, +3e, \dots, +Ne$.

Ядерная физика процветала после открытия Чедвиком нейтрона в 1932 году. В том же году ученые Иваненко и Гейзенберги независимо разработали протонно-нейтронную модель ядра, которая существует до сих пор. Согласно этой модели ядро состоит из Z протонов и $A-Z$ нейтронов. Позже протоны и нейтроны принято было называть одним словом нуклонами (нуклид – значит относящийся к ядру). Здесь: A – число нуклонов ядра, или относительная атомная масса. Другими словами, масса ядра показывает, во сколько раз он тяжелее относительной атомной массы $1 \text{ а.е.м.} \approx 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Массовое число ядра (число нуклонов) будет равно сумме количества протонов и нейтронов в ядре.

$$A = Z + N \quad (30.2)$$

Ядро атома химического элемента состоит из положительно заряженных протонов и нейтронов, не имеющих электрического заряда. Протоны и нейтроны называются нуклонами.

Обозначение ядер обозначают так же, как и в периодической системе, записывая число зарядов и число масс (нуклонов) соответственно его нижнему и верхнему индексам.

$${}^A_Z X \quad (30.3)$$

Здесь: X – обозначение элемента, A – массовое число (нуклонов) ядра, Z – зарядовое число ядра, $N = A - Z$ – число нейтронов в ядре. Масса атомов несколько отличается от целого числа. Массовое число ядра (число нуклонов) к целому числу, наиболее близкому к его значению в а.е.м., называется A .

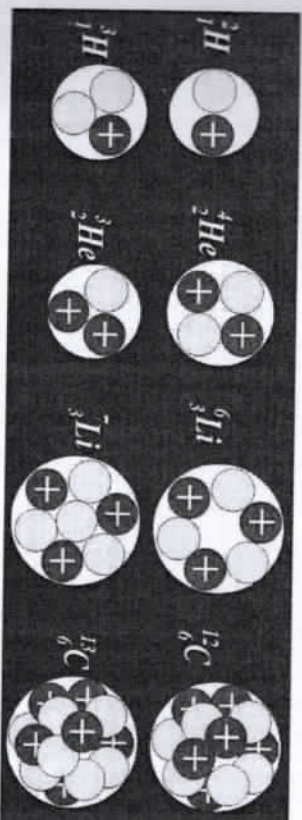


Рисунок 30.1

Например, представим в виде ядра никеля ${}^{58}_{28}\text{Ni}$ с массовым числом 58 и ядра урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ с массовым числом 238. На рисунке 30.1 изображены ядра некоторых легких элементов.

1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490	1491	1492	1493	1494	1495	1496	1497	1498	1499	1500	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1507	1508	1509	1510	1511	1512	1513	1514	1515	1516	1517	1518	1519	1520	1521	1522	1523	1524	1525	1526	1527	1528	1529	1530	1531	1532	1533	1534	1535	1536	1537	1538	1539	1540	1541	1542	1543	1544	1545	1546	1547	1548	1549	1550	1551	1552	1553	1554	1555	1556	1557	1558	1559	1560	1561	1562	1563	1564	1565	1566	1567	1568	1569	1570	1571	1572	1573	1574	1575	1576	1577	1578	1579	1580	1581	1582	1583	1584	1585	1586	1587	1588	1589	1590	1591	1592	1593	1594	1595	1596	1597	1598	1599	1600	1601	1602	1603	1604	1605	1606	1607	1608	1609	1610	1611	1612	1613	1614	1615	1616	1617	1618	1619	1620	1621	1622	1623	1624	1625	1626	1627	1628	1629	1630	1631	1632	1633	1634	1635	1636	1637	1638	1639	1640	1641	1642	1643	1644	1645	1646	1647	1648	1649	1650	1651	1652	1653	1654	1655	1656	1657	1658	1659	1660	1661	1662	1663	1664	1665	1666	1667	1668	1669	1670	1671	1672	1673	1674	1675	1676	1677	1678	1679	1680	1681	1682	1683	1684	1685	1686	1687	1688	1689	1690	1691	1692	1693	1694	1695	1696	1697	1698	1699	1700	1701	1702	1703	1704	1705	1706	1707	1708	1709	1710	1711	1712	1713	1714	1715	1716	1717	1718	1719	1720	1721	1722	1723	1724	1725	1726	1727	1728	1729	1730	1731	1732	1733	1734	1735	1736	1737	1738	1739	1740	1741	1742	1743	1744	1745	1746	1747	1748	1749	1750	1751	1752	1753	1754	1755	1756	1757	1758	1759	1760	1761	1762	1763	1764	1765	1766	1767	1768	1769	1770	1771	1772	1773	1774	1775	1776	1777	1778	1779	1780	1781	1782	1783	1784	1785	1786	1787	1788	1789	1790	1791	1792	1793	1794	1795	1796	1797	1798	1799	1800	1801	1802	1803	1804	1805	1806	1807	1808	1809	1810	1811	1812	1813	1814	1815	1816	1817	1818	1819	1820	1821	1822	1823	1824	1825	1826	1827	1828	1829	1830	1831	1832	1833	1834	1835	1836	1837	1838	1839	1840	1841	1842	1843	1844	1845	1846	1847	1848	1849	1850	1851	1852	1853	1854	1855	1856	1857	1858	1859	1860	1861	1862	1863	1864	1865	1866	1867	1868	1869	1870	1871	1872	1873	1874	1875	1876	1877	1878	1879	1880	1881	1882	1883	1884	1885	1886	1887	1888	1889	1890	1891	1892	1893	1894	1895	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050	2051	2052	2053	2054	2055	2056	2057	2058	2059	2060	2061	2062	2063	2064	2065	2066	2067	2068	2069	2070	2071	2072	2073	2074	2075	2076	2077	2078	2079	2080	2081	2082	2083	2084	2085	2086	2087	2088	2089	2090	2091	2092	2093	2094	2095	2096	2097	2098	2099	2100	2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	2116	2117	2118	2119	2120	2121	2122	2123	2124	2125	2126	2127	2128	2129	2130	2131	2132	2133	2134	2135	2136	2137	2138	2139	2140	2141	2142	2143	2144	2145	2146	2147	2148	2149	2150	2151	2152	2153	2154	2155	2156	2157	2158	2159	2160	2161	2162	2163	2164	2165	2166	2167	2168	2169	2170	2171	2172	2173	2174	2175	2176	2177	2178	2179	2180	2181	2182	2183	2184	2185	2186	2187	2188	2189	2190	2191	2192	2193	2194	2195	2196	2197	2198	2199	2200	2201	2202	2203	2204	2205	2206	2207	2208	2209	2210	2211	2212	2213	2214	2215	2216	2217	2218	2219	2220	2221	2222	2223	2224	2225	2226	2227	2228	2229	2230	2231	2232	2233	2234	2235	2236	2237	2238	2239	2240	2241	2242	2243	2244	2245	2246	2247	2248	2249	2250	2251	2252	2253	2254	2255	2256	2257	2258	2259	2260	2261	2262	2263	2264	2265	2266	2267	2268	2269	2270	2271	2272	2273	2274	2275	2276	2277	2278	2279	2280	2281	2282	2283	2284	2285	2286	2287	2288	2289	2290	2291	2292	2293	2294	2295	2296	2297	2298	2299	2300	2301	2302	2303	2304	2305	2306	2307	2308	2309	2310	2311	2312	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320	2321	2322	2323	2324	2325	2326	2327	2328	2329	2330	2331	2332	2333	2334	2335	2336	2337	2338	2339	2340	2341	2342	2343	2344	2345	2346	2347	2348	2349	2350	2351	2352	2353	2354	2355	2356	2357	2358	2359	2360	2361	2362	2363	2364	2365	2366	2367	2368	2369	2370	2371	2372	2373	2374	2375	2376	2377	2378	2379	2380	2381	238
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-----

1/A	2	18/MIA
1	2/A	13/MIA 14/MIA 15/MIA 16/MIA 17/MIA
H	He	5 6 7 8 9 10
Li	Be	B C N O F Ne
Na	Mg	13 14 15 16 17 18
Al	Si	Al Si P S Cl Ar
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr	Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe	Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe
55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86
Cs Ba La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
87 88 89	90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103	90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103
Fr Ra Ac	Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr	Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr

Рисунок 30.3

Поскольку массы атомов и ядер слишком малы, чтобы их можно было выразить в килограммах, в 1960-х годах было введено понятие относительной атомной массы. Согласно международному соглашению, масса изотопа углерода ^{12}C равняется 12 000 000 единиц, а его 1/12 часть принято 1 а.е.м. Значение 1 а.е.м в системе СИ и ее энергии в покое будет:

$$1 \text{ а.е.м} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}, \quad E_0 = 1,494513 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 932,905 \text{ МэВ} \quad (30.5)$$

Массы и энергии электронов, протонов и нейтронов в покое будут следующими:

$$\begin{cases} m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 0,0005486 \text{ а.е.м} \\ E_e = 8,199 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} = 0,5118 \text{ МэВ} \\ m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ а.е.м} \\ E_p = 1,5054 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 939,69 \text{ МэВ} \\ m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а.е.м} \\ E_n = 81,5075 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 941 \text{ МэВ} \end{cases} \quad (30.6)$$

Если сравнить массы протона и нейтрона с массами электронов, то они выражаются через следующую выражению:

$$m_p = 1836,1 \cdot m_e, \quad m_n = 1838,6 \cdot m_e \quad (30.7)$$

Оказывается, масса нейтрона на $2,5 \cdot m_e$ больше массы протона.

Понятие об изотопах, изобарах и изотониках:

Ядра, которые имеют одинаковое зарядовое число (Z_e), но разное массовое число (A), называются изотопами. Другими словами, изотопы

имеют одинаковое количество протонов и разное количество нейтронов. Например, в природе существует два ^1H , ^2H стабильных изотопа водорода, два ^6Li , ^7Li стабильных изотопа лития, два ^{12}C , ^{13}C стабильных изотопа углерода, три ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O стабильных изотопа кислорода, три ^{28}Si , ^{29}Si , ^{30}Si стабильных изотопа кремния, четыре ^{32}S , ^{33}S , ^{34}S , ^{36}S стабильных изотопа серы. Точно так же другие элементы имеют стабильные и нестабильные изотопы. Сколько стабильных изотопов имеет каждый элемент в периодической системе, показано на рисунке 30.4.

Поскольку нестабильные изотопы подвергаются радиоактивному распаду, они становятся ядром другого элемента через определенный период времени. Например, изотопы водорода против ^1H и дейтерий ^2H являются стабильными, тогда как изотоп трития ^3H является нестабильным. Точно так же изотоп лития ^6Li , изотоп кислорода ^{15}O , изотоп стронция ^{90}Sr , изотоп бария ^{140}Ba и другие изотопы являются стабильными изотопами.

1/A	2	18/MIA
1	2/A	13/MIA 14/MIA 15/MIA 16/MIA 17/MIA
H	He	2 2 2 3 1 3
Li	Be	B C N O F Ne
Na	Mg	1 3 1 4 2 3
Al	Si	Al Si P S Cl Ar
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54	37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54
K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr	Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe	Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe
55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86	62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86
Cs Ba La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu
87 88 89	90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103	90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103
Fr Ra Ac	Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr	Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr

Рисунок 30.4

В естественном состоянии изотопы встречаются в составе ископаемой руды в смешанном состоянии. Данная относительная атомная масса в периодической системе является относительной атомной массой этого соединения. Например, природный литий представляет собой смесь изотопов ^6Li и ^7Li в различных пропорциях, причем его относительная атомная масса дана как 6,941 в периодической системе. Изотопы имеют одинаковую химическую и оптическую природу. Действительно, химические и

физические свойства атома определяются числом заряда, а не массовым числом. Например, несмотря на то, что массы изотопов $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$ различны, они являются атомами одного и того же элемента. Кроме того, несмотря на то, что $^{13}_7\text{N}$ и $^{15}_8\text{O}$ атомы имеют одинаковую массу, они являются атомами разных химических элементов.

Ядра, которые имеют одинаковое массовое число (A), но разное зарядовое число (Ze), называются изобарами. Другими словами, изобары имеют разное количество протонов, в то время как нейтроны имеют разное или одинаковое количество. Например, изобары ^3_1H – ^3_2He , ^7_3Li – ^7_4Be и $^{15}_7\text{N}$ – $^{15}_8\text{O}$ изображены на рисунке 30.5.

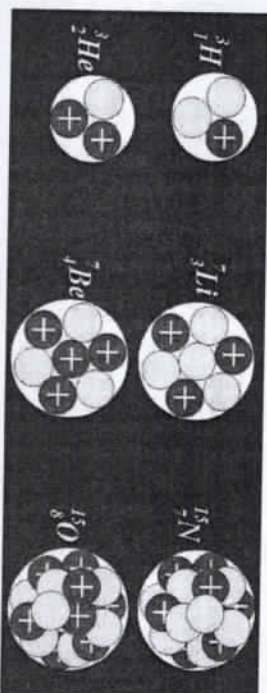
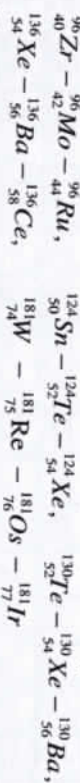


Рисунок 30.5

Опыты показали, что изобары ядер с массовым числом пар, начиная с $A=36$, встречаются парно. Например, $^{36}_{16}\text{S}$ – $^{36}_{17}\text{Cl}$, $^{40}_{18}\text{Ar}$ – $^{40}_{19}\text{K}$, $^{46}_{20}\text{Ca}$ – $^{46}_{21}\text{Sc}$ и другие пары могут быть примерами. Всего в периодической системе 58 изобаров, кроме которых встречаются триады (триады) и четверки.



Помимо того, что изобары имеют одинаковое массовое число, в изобарах встречаются ядра с одинаковым зарядовым числом, поэтому, несмотря на то, что они являются ядрами одного и того же элемента, их радиоактивность различна. Это называется свойством изомерии. Изомеры-это ядра одного типа, но с различной радиоактивностью. В настоящее время идентифицировано более 300 изомерных ядер.

Ядра, которые имеют одинаковое количество нейтронов, но разное количество протонов, называются изотонами. Изотон включает в себя ядра с 1 нейтроном ^2_1H – ^2_2He , 2 нейтронами ^3_1H – ^3_2He , 3 нейтронами ^4_1H – ^4_2He , 5 нейтронами ^6_1H – ^6_2He , 6 нейтронами ^7_1H – ^7_2He , 7 нейтронами ^8_1H – ^8_2He , 10 нейтронами $^{18}_8\text{O}$ – $^{18}_9\text{F}$, 11 нейтронами

$^{19}_9\text{F}$ – $^{20}_{10}\text{Ne}$, 12 нейтронами $^{22}_{10}\text{Ne}$ – $^{23}_{11}\text{Na}$ – $^{24}_{12}\text{Mg}$, 14 нейтронами $^{26}_{12}\text{Mg}$ – $^{27}_{13}\text{Al}$ – $^{28}_{14}\text{Si}$, 16 нейтронами $^{30}_{14}\text{Si}$ – $^{31}_{15}\text{P}$ – $^{32}_{16}\text{S}$, 18 нейтронами $^{34}_{16}\text{S}$ – $^{35}_{17}\text{Cl}$ – $^{36}_{18}\text{Ar}$, 20 нейтронами примером могут служить ядра $^{36}_{18}\text{Ar}$ – $^{37}_{19}\text{K}$ – $^{38}_{20}\text{Ca}$.

Все ядра элемента, кроме протия ^1_1H , содержат нейтроны, и во всех ядрах выполняется условие

$$\frac{N}{Z} \geq 1.$$

Например,

^4_2He , $^{10}_5\text{B}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{14}_7\text{N}$, $^{16}_8\text{O}$, $^{20}_{10}\text{Ne}$, $^{24}_{12}\text{Mg}$, $^{28}_{14}\text{Si}$, если для ядер $^{32}_{16}\text{S}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, будет $\frac{N}{Z} = 1$ для $^{22}_{10}\text{Ne}$, $\frac{N}{Z} = 1.2$ для $^{40}_{20}\text{Zr}$, $\frac{N}{Z} = 1.25$ для $^{142}_{60}\text{Nd}$, $\frac{N}{Z} = 1.36$ для $^{202}_{80}\text{Hg}$ и $\frac{N}{Z} = 1.52$ т. д.

Вопросы по теме

1. Кто является основателем современной Протон-нейтронной модели ядра?
2. Напишите формулу, определяющую размер ядра.
3. Что такое изотон? Приведите несколько примеров изотонов.
4. Что такое изотон? Приведите несколько примеров изотонов.
5. Что такое изотон? Приведите несколько примеров изотонов.
6. Что такое изотонное ядро?
7. Запишите массы и энергии электронов, протонов, нейтронов в покое.

Решение задачи:

1. $^{92}_{38}\text{U}^{238} = ^{92}_{38}\text{U}^{238} + X$ что такое неизвестный продукт ядерного распада?

А) α -частица Б) нейтрон В) электрон Г) позитрон Д) Протон

Решение:

По закону радиоактивного сдвига $^{238}_{92}\text{U} = ^{237}_{92}\text{U} + ^1_2\text{He}$ образуется частица электрон, заряд которой равен $-e$, с массовым числом 0.

Ответ: В)

2. Каким элементом становится изотон урана $^{238}_{92}\text{U}$ после трех α -и двух β -распадов?

А) $^{86}_{38}\text{Kr}$ Б) $^{87}_{39}\text{Y}$ В) $^{84}_{36}\text{Kr}$ Г) $^{92}_{38}\text{U}$ Д) $^{92}_{38}\text{U}$ Е) $^{88}_{36}\text{Kr}$

Дано: Решение:

По закону радиоактивного сдвига

$$^{238}_{92}\text{U} = 3 \cdot ^4_2\text{He} + 2 \cdot ^0_{-1}\text{e} = ^{226}_{88}\text{Ra}.$$

У = ? Следовательно, становится $^{226}_{88}\text{Ra}$.

Ответ: Е)

3. Определите элемент, в котором в реакции образуется следующее ядро:

$${}^2_0\text{N}^{14} + {}^4_2\text{He}^4 = {}^6_2\text{He}^4 + X$$

A) ${}^2_2\text{He}^4$ B) ${}^5_2\text{B}^{10}$ C) ${}^8_2\text{O}^{16}$ D) ${}^5_2\text{B}^{11}$ E) ${}^6_2\text{C}^{12}$

Решение:

По закону радиоактивного сдвига ${}^{14}_2\text{N} + {}^4_2\text{He} = X + {}^4_2\text{He}$. Значит ${}^{11}_5\text{B} = {}^{11}_5\text{X}$
это частица ${}^{11}_5\text{B}$.

Ответ: E)



§ 31. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ, УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ И ДЕФЕКТ МАССЫ. МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ЯДРО.

Ядерные силы:

В ядре гелия два взаимодействующих протона отталкиваются с силой, действующей по закону Кулона.

$$F_k = k \frac{e^2}{r^2} \sim 100 \text{ Н} \quad (31.1)$$

В тяжелых ядрах значение Кулоновской силы будет еще больше. Поэтому что каждый протон в ядре отталкивается остальными протонами. В результате протоны в ядре должны были быть раздвинуты и рассеяны. Тем не менее, ядра элементов в периодической системе стабильны. Естественно, что возникает вопрос о том, что такое сила, которая уравновешивает такую большую силу отталкивания. Возможно, эта сила является гравитационной силой. Тогда значение силы тяжести будет основано на законе притяжения Вселенной для двух протонов в этом ядре гелия.

$$F_G = G \frac{m_p^2}{r^2} \sim 10^{-35} \text{ Н} \quad (31.1a)$$

Следовательно, поскольку Кулоновская сила в $\sim 10^{37}$ раз больше гравитационной, гравитационная сила не может быть уравновешивающей силой. Поэтому существование стабильных ядер объясняется огромной силой, которая имеет в них характер притяжения – ядерной силой.

Силы между протонами и нейтронами в ядре называются **ядерными силами**. Свойства ядерных сил очень хорошо изучены в экспериментах. Ядерные силы в основном обладают следующими свойствами:

- обладает свойством гравитации, т. е. когда расстояние между нуклонами $r = 1 - 2 \text{ фм}$, ядерные силы приобретают характер гравитации, которая в 100 раз больше Кулоновской силы;
- действует на очень коротком расстоянии, т. е. ядерные силы имеют характер отталкивания, когда расстояние между нуклонами $r < 1 \text{ фм}$;

в) величина ядерной силы не зависит от наличия заряда нуклонов, т. е. ядерные силы одинаковы между протон-протонами, протон-нейтронами, нейтрон-нейтронами;

г) ядерные силы имеют характер насыщения, то есть каждый нуклон взаимодействует с ядерной силой не со всеми остальными нуклонами в ядре, а с несколькими нуклонами, расположенными близко к нему. Это можно сравнить с валентностью в химии. Подобно тому, как атомы связаны друг с другом посредством валентных электронов, в ядерных силах нуклоны взаимодействуют друг с другом через частицу-посредника. Эта частица называется π мезоном и имеет 3 типа, которые называются π^+ , π^0 , π^- . Ядерная связь образуется, когда нуклоны поглощают или испускают одну из этих трех частиц.

Ядерная сила (сильное взаимодействие)-это 3 из 4 фундаментальных взаимодействий. Результатом этого мощного взаимодействия является работа атомных реакторов, ценные ядерные реакции в атомных и водородных бомбах, термоядерные реакции в оболочках Солнца и звезд.

Энергия связи, удельная энергия связи и дефект массы:

Массы каждого изотопов элемента измеряются очень точно с помощью устройства, называемого масс-спектрометром. В результате измерений этим прибором стало ясно, что масса ядра оказывается меньше суммы масс нуклонов, содержащихся в этом ядре. Например, ядро гелия (${}^4_2\text{He}$) имеет массу 4,002603. Это сумма масс двух протонов и двух нейтронов, образующих ядро, равная

$$2m_p + 2m_n = 2 \cdot (1,007276 + 1,008665) \text{ а.е.м.} = 4,031882 \text{ а.е.м.}$$

Следовательно, оказывается, что масса ядра гелия (${}^4_2\text{He}$) меньше, чем сумма масс нуклонов, составляющих это ядро. Мы объясним этот случай следующим образом:

$$\Delta m = 2 \cdot (m_p + m_n) - m_{\text{яд.г}} = 4,031882 - 4,002603 \text{ а.е.м.} = 0,029279 \text{ а.е.м.}$$

Давайте представим случай, когда нуклоны связаны друг с другом в одном месте, и два случая, когда они находятся очень далеко друг от друга. Между этими состояниями возникает разница масс Δm . Эту разность масс называют **дефектом массы**. Дефект массы равен вычитанию массы ядра из суммы масс нуклонов.

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{яд.г}} \quad (31.2)$$

Какая-то ΔE энергия расходуется, чтобы эти нуклоны бесконечно удалились друг от друга. Давайте вспомним связь между массой и энергией в теории относительности.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

(31.4)

Исходя из приведенной выше формулы, оказывается, что для расщепления ядра гелия на нуклоны, то есть распада связей между нуклонами, необходимо затратить энергию.

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,029279 \text{ а.е.м.} \cdot 932,9 \text{ МэВ} = 27,314 \text{ МэВ}$$

Таким образом, энергия, необходимая для разрыва связей между нуклонами, составляющими ядро, называется **энергией связи**. Значение энергии связи будет следующим:

$$E_{\text{связ}} = (Z m_p + N m_n - m_{\text{ядро}}) c^2$$

(31.5)

Отношение энергии связи к числу нуклонов в ядре называется **относительной энергией связи**. Средняя энергия, необходимая для отрыва одного нуклона от ядра, будет равна удельной энергии связи.

$$\omega = \frac{E_{\text{связ}}}{A}$$

(31.6)

Относительная энергия связи измеряется в $\frac{\text{Дж}}{\text{нуклон}}$ или $\frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$.

Для определения энергии связи ядер достаточно знать массу этого ядра или относительную атомную массу. В таблице ниже приведены относительные атомные массы некоторых атомов изотопов, наиболее часто встречающихся при решении задач.

Таблица 31.1

$m(^2_1\text{H}) = 2,014102$	$m(^{14}_7\text{N}) = 13,999234$	$m(^{23}_{12}\text{Mg}) = 24,982587$	$m(^{56}_{26}\text{Ar}) = 35,967545$
$m(^1_1\text{H}) = 3,016046$	$m(^{13}_6\text{C}) = 15,000108$	$m(^{27}_{13}\text{Al}) = 26,981539$	$m(^{58}_{28}\text{Ar}) = 37,962730$
$m(^3_2\text{He}) = 3,016049$	$m(^{16}_8\text{O}) = 15,990526$	$m(^{28}_{14}\text{Si}) = 27,976927$	$m(^{60}_{28}\text{Ar}) = 39,962383$
$m(^4_2\text{He}) = 4,002603$	$m(^{17}_8\text{O}) = 16,999133$	$m(^{29}_{14}\text{Si}) = 28,976496$	$m(^{62}_{28}\text{K}) = 38,963707$
$m(^6_3\text{Li}) = 6,013479$	$m(^{18}_9\text{F}) = 17,999161$	$m(^{30}_{16}\text{S}) = 30,973770$	$m(^{60}_{19}\text{K}) = 39,964001$
$m(^7_3\text{Li}) = 7,016004$	$m(^{19}_9\text{F}) = 18,998404$	$m(^{31}_{17}\text{P}) = 30,973763$	$m(^{40}_{19}\text{K}) = 39,964001$
$m(^9_4\text{Be}) = 9,012182$	$m(^{20}_{10}\text{Ne}) = 19,992435$	$m(^{32}_{16}\text{S}) = 32,973763$	$m(^{41}_{19}\text{K}) = 40,961826$
$m(^{10}_5\text{B}) = 10,012939$	$m(^{21}_{11}\text{Na}) = 20,993843$	$m(^{33}_{17}\text{Cl}) = 36,965904$	$m(^{50}_{20}\text{Ca}) = 47,952534$
$m(^{11}_5\text{B}) = 11,009305$	$m(^{22}_{12}\text{Mg}) = 21,991383$	$m(^{34}_{18}\text{Ar}) = 31,972071$	$m(^{50}_{20}\text{Ca}) = 39,962589$
$m(^{12}_6\text{C}) = 12,000000$	$m(^{23}_{13}\text{Al}) = 22,989767$	$m(^{35}_{19}\text{K}) = 32,971455$	$m(^{48}_{20}\text{Ca}) = 41,958618$
$m(^{13}_6\text{C}) = 13,003355$	$m(^{24}_{14}\text{Si}) = 23,985043$	$m(^{36}_{20}\text{S}) = 33,967865$	$m(^{48}_{20}\text{Ca}) = 42,958767$
	$m(^{25}_{15}\text{P}) = 24,985838$	$m(^{37}_{21}\text{Sc}) = 34,967079$	$m(^{46}_{20}\text{Ca}) = 43,955479$
		$m(^{38}_{22}\text{Ti}) = 34,968853$	$m(^{48}_{20}\text{Ca}) = 45,953690$
		$m(^{39}_{21}\text{Sc}) = 36,965904$	$m(^{48}_{20}\text{Ca}) = 47,952534$

извне, потенциальная энергия свободной поверхности также изменяется за счет перераспределения нуклонов ядра.

Эмпирический расчет жидкостно-капельной модели ядра выполнили немецкий ученый К.Ф. Вайсзекр продолжил. В 1935 году Вайсзекр обосновал формулу нахождения энергии связи ядра через величины Z, N, A по капельной модели и в результате расчетов, основанных на этой модели, получил следующую графику:

Как видно из рисунка выше, удельная теплота связи ядер с атомными массами в диапазоне 45 – 90 соответствуют верхней части графика. Следовательно, именно это ядро труднее всего разрушить. Другими словами, излучение энергии происходит либо тогда, когда легкие ядра образуют более тяжелые ядра (приближаясь к ядрам с атомной массой 45 – 90), либо когда очень тяжелые ядра распадаются и образуют ядра с атомной массой 45 – 90 (рис.31.1).

Вопросы по теме

1. Охарактеризуйте свойства ядерных сил.
2. Что такое дефект массы? Запишите его формулу.
3. Что такое энергия связи? Запишите его формулу.
4. Что такое относительная энергия связи?
5. Какие модели вы знаете, которые описывают ядро?
6. Кто предложил капельную модель и кем были произведены эмпирические расчеты?

Решение задачи:

1. Укажите выражение энергии связи ядра алюминия $^{27}_{13}\text{Al}$ m_p -масса протона, m_n -масса нейтрона, $M_{\text{я}}$ -масса ядра.

- A) $M_{\text{я}}c^2$ B) $(13m_p - 14m_n - M_{\text{я}})c^2$ C) $(27m_p + 13m_n - M_{\text{я}})c^2$
D) $(27m_p + 13m_n - M_{\text{я}})c^2$ E) $(13m_p + 14m_n - M_{\text{я}})c^2$

Дано:

$^{27}_{13}\text{Al}$	
$E = ?$	

Решение:

Заданное ядро $^{27}_{13}\text{Al}$ является алюминиевым ядром, где $Z=13$, $N = A - Z = 14$. Отсюда и дефект массы, соответствующий атомному сердечнику $\Delta m = Zm_p + Nm_n - M$. А энергия, соответствующая дефект массы, равна $E = \Delta mc^2 = (13m_p + 14m_n - M)c^2$.

Ответ: E)

2. Сколько энергии потребуются, чтобы разбить ядро изотопа лития ^7_3Li на нуклоны? Сколько энергии потребуются ядру в среднем на один нуклон?

Решение:

Используя приведенную выше таблицу относительных атомных масс ядра изотопа ^7_3Li и протона и нейтрона, находим, что $m(^7_3\text{Li}) = 7,016004 \text{ а.е.м.}$, $m_p = 1,007276 \text{ а.е.м.}$, $m_n = 1,008665 \text{ а.е.м.}$

Получается дефект массы

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\text{ядро}} = 3 \cdot 1,007276 + 4 \cdot 1,008665 - 7,016004 = 3,021828 + 4,03466 - 7,016004 = 0,040484 \text{ а.е.м.}$$

Зная, что частица с массой 1 а.е.м. является энергией покоя $E_0 = 932,9 \text{ МДж}$, получается энергия связи $\Delta E = \Delta m \cdot E_0 = 0,040484 \text{ а.е.м.} \cdot 932,9 \text{ МДж} = 37,768 \text{ МДж} = E_{\text{связи}}$. А для того, чтобы каждый нуклон оторвать от ядра, потребуется затратить среднюю $\omega = \frac{E_{\text{связи}}}{A} = \frac{37,768}{7} = 5,395 \left[\frac{\text{МДж}}{\text{нуклон}} \right]$ энергию.

§ 32. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Ядерные реакции, цепная реакция:

Процесс изменения состава ядра или частиц путем интенсивного взаимодействия между собой за счет ядерных сил, когда два ядра или ядра и частица приближаются друг к другу на расстояние до 10^{-15} м , называется **ядерными реакциями**. Во время ядерных реакций происходит перераспределение энергии и импульсов ядер. Это вызывает образование другого ядра или частиц.

Ядерные реакции - это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом. Ядерные реакции можно записать в общем виде следующим образом (рис. 32.1):



Исходное ядро, используемое в ядерной реакции, называется ядром-мишенью, а частица или ядро, которое вызывает эту реакцию, называется снарядной частицей или ядром-снарядной частицей.

В зависимости от энергии частиц, участвующих в ядерной реакции, ядерные реакции бывают трех типов: 1) ядерные реакции малых энергий;

2) ядерные реакции средних энергий; 3) ядерные реакции высоких энергий.

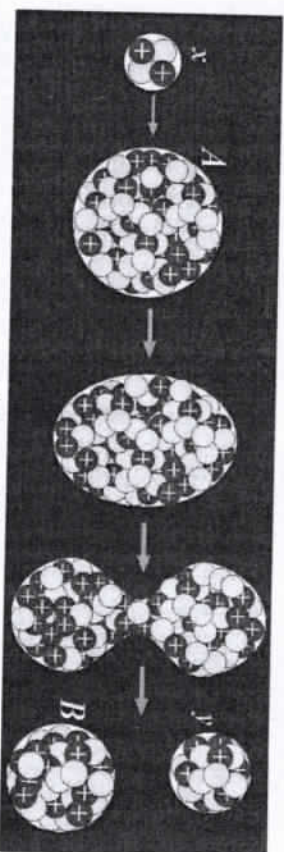


Рисунок 32.1

Ядерные реакции делятся на реакции, протекающие с протонами, дейтеронами, α -частицами, γ -квантами, многоядерными нонами тяжелых химических элементов, в зависимости от типа участвующих в них частиц. Ядерные реакции, происходящие под действием γ -квантов, называются *фотоядерными реакциями*.

Все реакции характеризуются энергией, которая выделяется или поглощается в процессе реакции. При протекании ядерной реакции энергия либо выделяется-экзотермическая реакция, либо поглощается-эндотермическая реакция.

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения: электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса, момента импульса.

1) закон сохранения электрического заряда: сумма электрических зарядов ядра и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме электрических зарядов ядра и частиц, образующихся после реакции.

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$$

(32.2)

2) закон сохранения массового (нуклонного) числа: общее массовое (нуклонное) число реагирующих ядер и частиц равно общему массовому (нуклонному) числу образующихся после него ядер и частиц.

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

(32.2)

3) закон сохранения энергии: сумма энергий ядра и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме энергий ядра и частиц, образующихся после реакции.

$$E_A + E_x = E_B + E_y$$

(32.3)

4) закон сохранения импульса, который можно описать следующим образом: полный импульс частицы и ядра, предшествующих реакции, равен полному импульсу частицы и ядра, образующихся после реакции.

$$\vec{P}_A + \vec{P}_x = \vec{P}_B + \vec{P}_y$$

(32.4)

При ядерных реакциях, помимо перечисленных выше, соблюдаются также законы сохранения (изотопный спин, барионный заряд, лептонный заряд, галейность, очарование и другие законы сохранения). Но, о них изучают в специальных направлениях физики высших учебных заведений.

Разность энергий ядра и частиц до и после реакции называется *разностью энергий ядерной реакции*. Первостепенной целью искусственного проведения ядерных реакций является получение из них энергии. Приведем несколько примеров из первых проведенных экспериментов по ядерным реакциям.

Первый эксперимент, в котором наблюдались ядерные превращения (1919, Резерфорд):



(32.5a)

Открытие нейтрона (1932, Чедвик):



(32.5b)

Первое использование ускоренных протонов (1932):

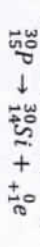


(32.5c)

Первое получение искусственного радиоактивного элемента и открытие протона (1932, Ф.Дж.Лео-Кюри):



(32.5d)



(32.5e)

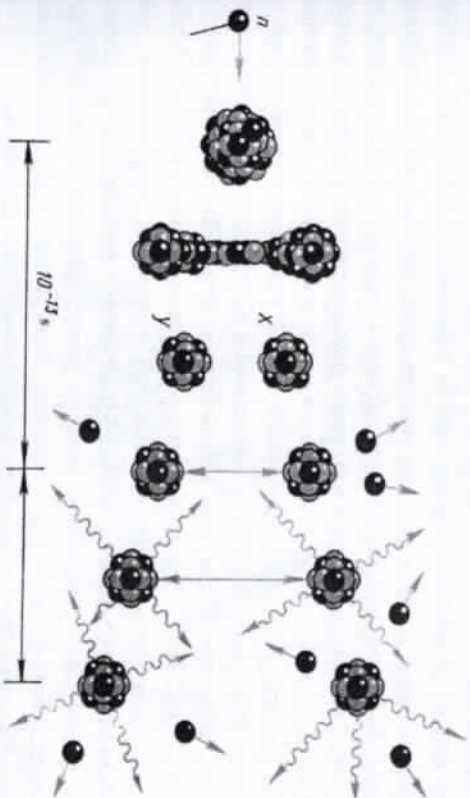


Рисунок 32.2

В ядерных реакциях энергия может быть поглощена или выделена. Реакции, которые идут с выделением энергии, называются экзотермическими.

реакциями, а реакции, которые идут с поглощением, называются эндотермическими реакциями. В ядерных реакциях чаще встречаются реакции с выделением энергии, то есть экзотермические реакции.

Ядерная реакция, при которой тяжелые ядра распадаются на две части путем поглощения нейтронов, называется делением ядра (рис. 32.2).

Реакция деления ядра была впервые проведена Ганом, Штрассманом, Мейтнером в 1939 году путем бомбардировки нейтронами изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$.



В результате реакции $^{145}_{56}\text{Ba}$, $^{88}_{36}\text{Kr}$ изотопов, кроме трех нейтронов, выделилось огромное количество тепла. При этом каждому из всех участвующих в реакции нуклонов соответствует средняя $\frac{200}{236} \approx 0,8475 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ энергия.

Если в результате протекания реакции снова происходят такие последовательные реакции, то она называется цепной реакцией. Цепная реакция происходит за счет нескольких нейтронов, выделяющихся при делении ядра-мишени. Вылетающие нейтроны, попав в последующие ядра на своем пути, расщепляют их, и в этом распаде нейтроны следующей стадии распадаются и так далее. В цепной реакции разномножение происходит в геометрической прогрессии. Нейтрон, вылетевший при ядерном распаде, также может выйти за пределы тела и рассеяться вокруг, не разрушая следующее ядро. В таких случаях реакция сразу затухает, не задерживаясь надолго. Но нейтроны не должны выходить наружу, чтобы реакция не затухала. Для этого значение массы урана (радиоактивного элемента) должно быть достаточно большим. Наименьшая масса, необходимая для протекания цепной реакции, называется *предельной массой* или *критической массой*.

Когда ядро урана делится, в дополнение к нейтрону, используемому для деления, образуются два или три нейтрона. Эти нейтроны участвуют в делении новых ядер. При делении число нейтронов резко возрастает. Чтобы реакция была непрерывной, количество нейтронов, вылетающих при переходе от одного цикла к следующему, должно увеличиваться. Отношение числа нейтронов в следующем цикле к числу нейтронов в первом цикле называется коэффициентом умножения. Коэффициент умножения можно сравнить как знаменатель геометрической прогрессии в математике.

Если $k = 1$ в реакции, реакция является постоянной, если $k < 1$, реакция является затухающей, а когда $k > 1$, реакция увеличивается и происходит взрыв. Цепная реакция начинается, когда коэффициент разномножения $k \geq 1,01$.

При распаде каждого $^{235}_{92}\text{U}$ ядра выделяется 200 МэВ энергии. Для сравнения возьмем самый легко воспламеняющийся бензин. При сгорании бензина массой 1 кг выделяется большое количество $Q_1 = 46 \text{ МДж}$ тепла. При распаде 1 кг урана $^{235}_{92}\text{U}$ выделяется энергия, то есть в $\frac{Q_2}{Q_1} = 1,776 \cdot 10^6$ раз больше энергии.

$$Q_2 = \frac{m}{M} N_A \cdot 200 \text{ МДж} = \frac{1}{0,235} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 8,17 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 8,17 \cdot 10^7 \text{ МДж}$$

Другими словами, получается, что энергия, выделяемая при распаде 1 кг урана, равна теплу, выделяемому при сгорании 1776 тонн бензина. Горение бензина, керосина, газа, каменного угля, древесины, пластмасс и всех других углеводородов является химической реакцией, при которой образуется в миллион раз меньше энергии, чем при ядерных реакциях.

Таким образом, оказывается, что в недрах ядра скрыта огромная энергия. Реализация этого использования энергии была насущной проблемой в мире.

Использование ядерной энергии в мирных целях:

Как видно из рисунка 61.1, удельная теплота связи ядер, атомная масса которых находится в пределах 45-90, соответствует самой верхней точке графика. Следовательно, оказывается, что удельная теплота связи более легких ядер больше, чем у более тяжелых. Исходя из этого, возникает идея, что энергия должна выделяться, когда тяжелое ядро распадается и образуется более легкое ядро. Мы действительно познакомились с выделением энергии в количестве 200 МэВ, когда ядро урана $^{235}_{92}\text{U}$ распадается на более легкие ядра $^{145}_{56}\text{Ba}$ и $^{88}_{36}\text{Kr}$. Цепная реакция протекает очень быстро, бурно. Поэтому обычно эта реакция протекает со взрывом. Для использования ядерной энергии необходимо будет управлять ядерной цепной реакцией.

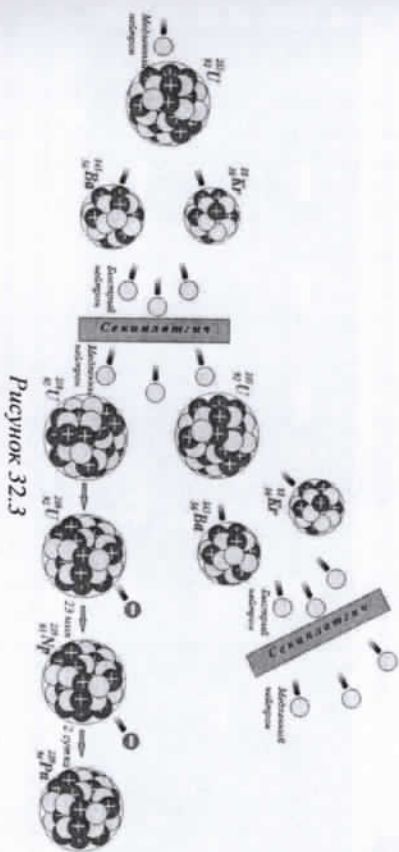


Рисунок 32.3

Успешно, осуществляющее реакцию, при которой контролируется течение ядра, называется ядерным реактором.

Природный уран состоит из 2-х изотопов, а именно изотопов ^{235}U и ^{238}U , что составляет 1/140 от общей массы изотопа ^{235}U . ^{235}U изотоп очень энергетически полезен, он может распадаться как под действием быстрых нейтронов, так и под действием медленных, особенно хорошо поглощает слабые нейтроны. ^{238}U изотоп распадается только под действием сверхбыстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ. Примерно 60% нейтронов всего, которые образуются при делении, будут иметь энергию, большую, чем такая энергия. Но только один ^{238}U из каждых пяти нейтронов может разрушить изотоп, а остальные будут поглощены этим изотопом. Поэтому цепная реакция с Ураном, состоящим из чистого ^{238}U изотопа, не протекает. Для того, чтобы произошла контролируемая цепная реакция, необходимо либо выделить чистый ^{235}U изотоп (обогащение урана), либо получить в составе смеси не менее определенного количества изотопа ^{235}U , содержащегося в рудной части соединения. Вероятность поглощения слабых нейтронов в 106 раз больше, чем вероятность поглощения быстрых нейтронов. Поэтому в ядерных реакторах, работающих на природном уране, замедлители нейтронов используются для повышения коэффициента размножения. Процессы, протекающие в ядерных реакторах, работающих на природном уране, изображены на рисунке 32.3. Изотоп ^{238}U поглощает нейтрон и превращается в изотоп ^{239}U , а через 23 минуты после этого электронное β -распадается и превращается в изотоп ^{239}Np . Примерно через 2 суток снова распадается на электронное β -распад и превращается в изотоп ^{239}Pu .

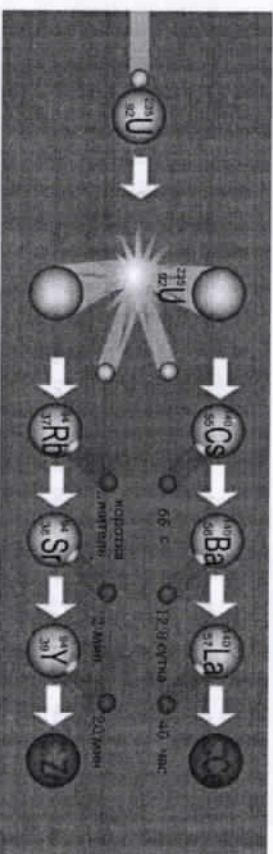


Рисунок 32.4

Изотопы ^{235}U , изотопы ^{145}Ba и ^{88}Kr также являются нестабильными, они тоже распадается. Изотопы ^{145}Ba и ^{88}Kr , в свою очередь, также подвергаются последовательно распадается (рис.32.4).

На рисунке ниже представлена схема ядерного реактора. Основными элементами ядерного реактора являются (рис. 32.5):

- 1) ядерное топливо ^{235}U , ^{235}U , ^{239}Pu изотопы – основной источник энергии;
- 2) замедлитель нейтронов – обычная или тяжелая вода, графит и т.д.;
- 3) прибор для теплоносителя – вода, жидкий натрий и т.д.;
- 4) тела, поглощающие нейтроны и регулирующие скорость реакции – стержни, изготовленные из бора, кадмия и вводимые в рабочую фазу реактора;
- 5) защитная оболочка из железобетона, удерживающая нейтроны γ -лучи, окружающая реактор.

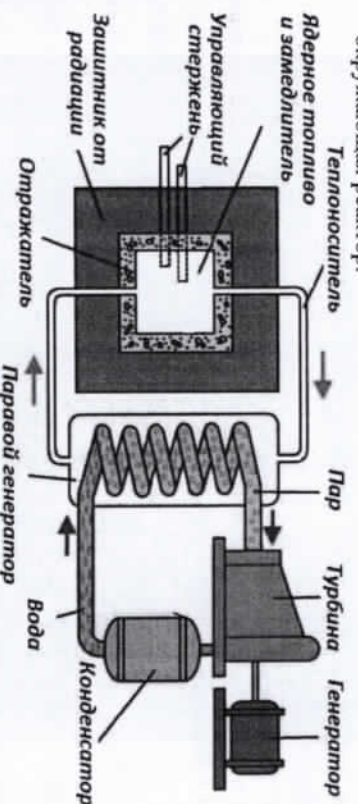


Рисунок 32.5

Тяжелая вода является лучшим замедлителем и превращается в тяжелый водород в результате захвата нейтронов. Графит тоже хоть и не поглощает нейтроны, но действует как замедлитель.

Наименьшая масса делющегося вещества, при которой происходит ядерная цепная реакция, называется критической массой. Если масса ядерного топлива меньше критической массы, нейтроны вылетают наружу, не достигнув ядра. В результате размножение не происходит. Например, для чистого урана ^{235}U в форме сферы критическая масса имеет 50 кг.

Управление реактором осуществляется с помощью стержней из кадмия или бора. При удалении стержней из активной зоны реактора $k > 1$, а при полном введении в активную зону $k < 1$. Современные современные ядерные реакторы управляются дистанционно.

Ядерный реактор, который мы познакомились выше, представляет собой ядерный реактор, работающий на медленных нейтронах. Ядерный реактор, работающий на быстрых нейтронах, не может работать на природном уране. Потому что вероятность деления ядер урана на быстрых нейтронах невелика. Поэтому необходимо будет обогатить природный уран содержанием не менее 15% ^{235}U . Одним из преимуществ ядерных реакторов, работающих на быстрых нейтронах, является то, что в них образуется большое количество изотопа плутония ^{239}Pu , который используется в качестве ядерного топлива следующей ступени.

Термоядерные реакции:

Как видно из рисунка 31.1, удельная теплота связи ядер, атомная масса которых находится в пределах 45-90, соответствует самой верхней точке графика. Следовательно, удельная теплота связи более тяжелых ядер больше, чем у легких. Поэтому возникает идея, что энергия должна выделяться, когда более легкие ядра соединяются и образуются более тяжелое ядро.

При высоких температурах (10^7-10^8 К) сливаются легкие ядра с образованием тяжелых и выделяется термоядерной реакции.

В этой реакции ядро трития соединяется с ядром дейтерия, образуя ядро гелия и выделяя энергию 17,6 МэВ.



В этой реакции возникает энергия связи $\frac{17,6}{5} = 3,46 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$, соответствующая

одному нуклону. При этом на каждый нуклон выделяется в $\frac{3,46}{0,8475} \approx 4,1$ раз

больше энергии, чем при распаде ядра урана.

Кроме того, при соединении ядра с дейтерием ${}^3\text{He}$ также образуется ядро гелия, и в этой реакции также выделяется очень большая энергия 18,3 МэВ.



В этой реакции возникает энергия связи, соответствующая одному нуклону $\frac{18,3}{5} = 3,66 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$. При этом на каждый нуклон выделяется

$\frac{3,46}{0,8475} \approx 4,32$ раз больше энергии, чем при распаде ядра урана.

Для того чтобы происходили ядерные реакции, необходимо, чтобы легкие ядра сблизались на достаточно близкое расстояние, то есть необходимо было бы выполнить работу против кулоновской силы. Для этого легким ядрам придется сталкиваться друг с другом с достаточно большой скоростью. Такая большая скорость может быть достигнута при очень высоких температурах.

Поэтому эти реакции также называют термоядерными (горячими ядерными) реакциями. Такие условия существуют только в присутствии Солнца и звезд. У каждого из Солнца и звезд в их центрах происходит термоядерные реакции. Например, в центре Солнца температура составляет 13 млн. градусов. В этих условиях атомы водорода полностью ионизированы. В результате их сближения сначала образуются ядра дейтерия, трития, а затем ядра гелия. В этой реакции они нагреваются и излучают свет за счет огромного выделения энергии (рис. 62.6). Из-за энергии, выделяющейся при термоядерной реакции, звезды светятся миллиарды лет. В нем легкие ядра соединяются, образуя следующие тяжелые ядра.

Солнце содержит 70% водорода, 29% гелия и 1% тяжелых нейтронов, общая масса которых приблизительно равна $2 \cdot 10^{30}$ кг. Солнце, каждую секунду излучает энергию $4 \cdot 10^{26}$ Дж, оно светит еще 100 млн. лет.



Рисунок 32.6

На фоне звезд могут протекать и другие реакции синтеза. Для этого их фоне должна быть очень горячая. Если на фоне звезд значения температура превышает 100 млн. градусов начинается следующая термоядерная реакция и выделяется энергия следующей стадии.



Принцип действия водородной бомбы также основан на термоядерной реакции. В нем газобразный водород будет заключен в атомную бомбу. Температура увеличивается до огромных значений за счет огромной энергии, выделяющейся при взрыве атомной бомбы. Эта температура достаточно для начала термоядерной реакции. В результате начинается вторая стадия реакции — термоядерная. При взрыве водородной бомбы выделяется в 5-7 раз больше тепла, чем при атомной бомбе. Важно отметить, что для запуска

атомной бомбы масса урана в ней должна быть выше критической массы, тогда как в водородной бомбе термоядерная реакция может протекать с произвольной массой.

Вопросы по теме

1. Что называется ядерной реакцией? Приведите примеры начальных ядерных реакций.
2. Что называется цепной реакцией? Энергия какого порядка расходуется при этом?
3. Опишите использование ядерной реакции в мирных целях. Что такое ядерный реактор и какова его структура?
4. Что называется термоядерной реакцией? Приведите примеры термоядерной реакции.
5. В каком порядке в термоядерной и цепной реакции доля энергии, деленная на один нуклон?

Решение задачи:

1. Сколько энергии выделяется в этой ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ ядерной реакции? Взять из таблицы массы вступающих и образующихся в результате реакции ядер и частиц.

Решение:

Чтобы решить задачу, необходимо найти разность (дефект массы) между начальной суммой масс вступающих в реакцию ядра и частицы

$$m_1 = m({}^7_3\text{Li}) + m({}^2_1\text{H}) \text{ и суммой масс ядра и частицы } ({}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}), \text{ полученных в результате реакции } m_2 = m({}^8_4\text{Be}) + m({}^1_0\text{n}).$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 = (7,016004 + 2,014102) - (8,005307 + 1,008665) = 9,030106 - 9,013972 = 0,016134 \text{ а.е.м.}$$

По нему разность масс будет равна. Зная, что частица с массой имеет энергию покоя $E_0 = 932,9 \text{ МДж}$, возникает энергия диссоциации.

$$Q = \Delta m \cdot E_0 = 0,016134 \text{ а.е.м.} \cdot 932,9 \text{ МДж} = 15,51 \text{ МДж.}$$



ТЕСТЫ ПО ГЛАВЕ VIII

1. Какая из трех (α, β, γ) излучений обладает наибольшей проникающей способностью?
 - А) γ -излучение
 - В) β -излучение
 - С) α -излучение.
 - Д) все примерно одинаково
 - Е) НПО
2. Какое из следующих выражений описывает закон радиоактивного сдвига:
 - 1) ${}^M_ZX = {}^{M-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He}$
 - 2) ${}^M_ZX = {}^{M+1}_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e$
 - 3) ${}^M_ZX + {}^4_2\text{He} = {}^{M+4}_{Z+2}C + {}^1_0\text{n}$

$$4) {}^M_ZX + {}^1_0\text{n} = {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$$

А) 1, 2 В) 1, 3 С) 1, 4 Д) 2, 3 Е) 2, 4

3. Определите соответствующее выражение вместо точек. В результате одного β -распада элемент периодической системы... перемежается.
 - А) на три клетки к началу
 - В) на одну клетку к началу
 - С) на две клетки к концу
 - Д) на одну клетку к концу
 - Е) на две клетки к началу

4. Каков порядковый номер элемента в таблице Менделеева, образующегося в результате α -распада ядра элемента с порядковым номером Z?
 - А) Z-1
 - В) Z-2
 - С) Z
 - Д) Z+2
 - Е) Z+1

5. В результате какого радиоактивного распада торий ${}^{232}_{90}\text{Th}$ превращается в Радий ${}^{228}_{88}\text{Ra}$?
 - А) α
 - В) β
 - С) при облучении протонами.
 - Д) γ
 - Е) при облучении нейтронами.

6. Как изменится порядковый номер элемента после 1 раз α и 3 раза β распада?
 - А) увеличивается на 2
 - В) уменьшается на 2
 - С) увеличивается на 1
 - Д) увеличивается на 3
 - Е) уменьшается на 3

7. Во что превращается ${}^{210}_{81}\text{Tl}$ (изотоп таллия) после трех последовательных β -распадов?
 - А) ${}^{210}_{94}\text{Po}$
 - В) ${}^{207}_{84}\text{Po}$
 - С) ${}^{210}_{78}\text{Pt}$
 - Д) ${}^{207}_{78}\text{Pt}$
 - Е) ${}^{213}_{78}\text{Pt}$

8. Период полураспада изотопа радона равен 3,82 суток. Во сколько раз число атомов в этом изотопе уменьшается через 1,91 суток?
 - А) 1,6
 - В) 1,2
 - С) 1,1
 - Д) 1,41
 - Е) 1,5

9. Радий имеет $25 \cdot 10^6$ атомов. Сколько атомов распадётся за 1 сутки, если период полураспада радия составляет 1620 лет?
 - А) 2
 - В) 29
 - С) 47
 - Д) 93
 - Е) НПО

10. За первые 8 часов суток активность радиоактивного вещества снизилась в 3 раза. Во сколько раз снижётся активность вещества в течение суток?
 - А) 8
 - В) 9
 - С) 12
 - Д) 24
 - Е) 27

11. На сколько суток равен период полураспада радиоактивного элемента, если за 160 суток его активность снизилась в 16 раз?
 - А) 80
 - В) 40
 - С) 20
 - Д) 16
 - Е) 10

12. Когда две частицы с массой покоя m_0 слились вместе, энергия E выделилась. Какова масса образующейся частицы в покое?

- A) $2m_0 + \frac{E}{c^2}$ B) $2m_0 c^2 + \frac{E}{c^2}$ C) $2m_0 - \frac{E}{c^2}$ D) $2m_0 E c^2$ E) $2m_0 c^2 + E$

13. Сколько частиц в ядре, если нон имеет 8 электронов и 12 нейтронов, заряд которых равен заряду 2 протонов?

- A) 20 B) 24 C) 22 D) 18 E) 16

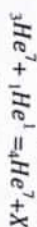
14. Сколько электронов в электронной оболочке нейтрального атома, если в ядре атома 9 протонов и 11 нейтронов?

- A) 2 B) 9 C) 11 D) 20 E) 0

15. Какое число нейтронов в ядре атома элемента, если элемент с молярной массой 235 г/моль имеет порядковый номер в периодической системе Менделеева 92?

- A) 143 B) 235 C) 327 D) 92 E) 238

16. Назовите неизвестную частицу в следующей ядерной реакции:

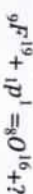


- A) гамма-квант B) электрон C) нейтрон D) позитрон E) Протон

17. Какая частица образуется при получении искусственным путем Технеция: ${}^{42}\text{Mo}^{94} + {}^1\text{H}^1 = {}^{43}\text{Tc}^{95} + ?$

- A) электрон B) протон C) фотон D) позитрон E) нейтрон

18. Определите неизвестную частицу в следующей ядерной реакции:



- A) электрон B) ${}^8\text{O}^{16}$ C) протон D) нейтрон E) ${}^2\text{He}^4$

19. Какое из этих веществ используется в качестве теплоносителя в ядерных реакторах:

1) Уран; 2) графит; 3) кадмий; 4) обычная вода; 5) плутоний; 6) жидкий натрий.

- A) 1 B) 2 C) 3 ва 4 D) 2 ва 5 E) 4 ва 6

20. Некоторые из перечисленных ниже веществ используются в качестве поглотителей нейтронов в ядерных реакторах:

1) Уран; 2) графит; 3) кадмий; 4) тяжелая вода; 5) бор; 6) плутоний?

- A) 2, 4 B) 3, 5 C) 2, 3 D) 3, 4 E) 1, 6

21. Какие из перечисленных ниже веществ используются в качестве ядерного топлива в ядерных реакторах:

1) Уран; 2) графит; 3) кадмий; 4) тяжелая вода; 5) бор; 6) плутоний?

- A) 1 и 5 B) 1 и 2 C) 1 и 3 D) 1 и 6 E) 1 и 4

22. Каков второй продукт ядерной реакции ${}_{47}\text{Li}^6 + n = {}_2\text{He}^4 + X$?

- A) позитрон B) β -частица C) протон D) Дейтрон E) Тритон

ЗАДАНИЯ ПО ГЛАВЕ VII

1. Во сколько раз увеличится их масса, если в ускорителе в институте физики высоких энергий в Серпухове будут находиться электроны с протонами $W = 76 \text{ ГэВ}$? Энергия покоя протона $E_0 = 938 \text{ МэВ}$.

2. Электроны с энергией $W = 6 \text{ ГэВ}$ могут быть получены на ускорителе в ереванском физическом институте. Какова масса таких электронов и во сколько раз их масса больше массы покоя? Энергия покоя электрона равна $E_0 = 0,511 \text{ МэВ}$, а масса - $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

3. Сколько дней длится период полураспада ядер вещества, если через месяц остается 75% радиоактивного вещества? (1 день - 24 часа.)

4. ${}_{53}^{131}\text{I}$ период полураспада ядер изотопа йода составляет 8 суток. Если первоначальное количество радиоактивных ядер составляет 109, сколько радиоактивных ядер этого изотопа останется через 80 суток?

5. Полураспад изотопа йода-131 $T = 8$ суток. Каков средний период жизни t этого изотопа?

6. Среднее время жизни $t = 7,35$ год радиоактивного кобальта ${}_{27}^{60}\text{Co}$. Каков его период полураспада T ?

7. Активность радиоактивного элемента снижалась в $n = 4$ раз в $t = 8$ суток. Каков период полураспада T ?

8. Углерод ${}_{12}^{238}\text{C}$ испускает α -лучи ${}^4_2\text{He}$ и β -лучи ${}^0_{-1}\text{e}$. Запишите эти ядерные реакции.

9. Для Урана (I) напишите реакцию разложения (I), а для свинца (I) напишите реакцию разложения (I).

10. Радиоактивный марганец ${}_{25}^{54}\text{Mn}$ получают двумя способами. В первом методе изотоп железа ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ с дейтронами ${}^2_1\text{H}$. Во втором методе изотоп железа ${}_{26}^{54}\text{Fe}$ получают путем облучения нейтронами. Запишите эти ядерные реакции.

11. Когда элемент Эйнштейна ${}_{99}^{253}\text{Es}$ был облучен частицами, нейтрон отделился, и элемент Менделеева образовался. Запишите эту реакцию.

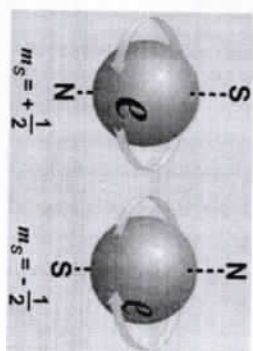
11. Из ядра, образующегося при бомбардировке изотопа Бора ${}^{10}_5B$ нейтронами, выбрасывается α -частица. Запишите эту реакцию.
12. Напишите ядерную реакцию, при которой при бомбардировке α -частицами Бора ${}^{11}_5B$ испускаются нейтроны.
13. Запишите реакцию, которая происходит при бомбардировке алюминия ${}^{27}_{13}Al$ α -частицами.
14. Ядро урана ${}^{235}_{92}U$ раскололось на две части, поглотив один нейтрон. При этом образуется два элемента. Оказалось, что одним из элементов является ядро ксенона ${}^{140}_{54}Xe$. Из какого ядра состоит вторичная частица?
15. Найдите дефект масс изотопа лития 7_3Li , изотопа лития 6_3Li . Массы изотопов 3_1H , 7_3Li , 1_0n и нейтрона равны соответственно 3,016046, 7,016004, 1,007825 и 1,008665 а. е. м. $g \approx 1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.
16. Найдите энергию связи ядра дейтрона 2_1H , ядра гелия 4_2He и ядра кальция ${}^{40}_{20}Ca$. Массы изотопов 1_1H , 2_1H , 4_2He и ${}^{40}_{20}Ca$ нейтрона соответственно 1,007825, 2,014102, 4,002603, 39,962589 и 1,008665 а. е. м. и равен.
17. Выделяется или поглощается энергия в следующих ядерных реакциях:
 1) ${}^6_3Li + {}^1_0n \rightarrow {}^4_2He + {}^3_1H$; 2) ${}^7_3Li + {}^4_2He \rightarrow {}^{10}_5B + {}^1_0n$;
 6_3Li , 1_1H , 4_2He , 3_1H , ${}^{10}_5B$ массы изотопов и нейтронов соответственно 6,015125, 1,007825, 4,002603, 7,016004, 10,012939 и 1,008665 равен.
18. ${}^{14}_7N + {}^4_2He \rightarrow {}^{17}_8O + {}^1_1H$ рассчитайте энергию, выделяемую в ядерной реакции. ${}^{14}_7N$, 4_2He , ${}^{17}_8O$ и 1_1H массы изотопов равны соответственно 14,003074, 4,002603, 16,999133 и 1,007825 а. е. м.
19. ${}^{19}_9F + {}^1_0n \rightarrow {}^7_3Li + {}^4_2He$ определите энергию, выделяемую в ядерной реакции. ${}^{19}_9F$, 7_3Li , 4_2He массы изотопов и нейтрона равны соответственно 10,012939, 7,016004, 4,002603 и 1,008665 а. е. м.
20. ${}^6_3Li + {}^2_1H \rightarrow 2{}^4_2He$ определите энергию, выделяемую в ядерной реакции. 6_3Li , 2_1H , и 4_2He массы изотопов равны соответственно 6,015125, 2,014102 и 4,002603 а. е. м.
21. ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$ сколько энергии выделяется в реакции синтеза?
 2_1H , 3_1H , 4_2He массы изотопов и нейтрона равны соответственно 2,014102, 3,016046, 4,002603 и 1,008665 а. е. м.
22. Найдите энергию связи ядра алюминия ${}^{27}_{13}Al$. ${}^{27}_{13}Al$ масса атома $M = 26,981539 \text{ а. е. м.}$, массы протона, нейтрона и электронов равны

соответственно: $m_p = 1,007276 \text{ а. е. м.}$, $m_n = 1,008665 \text{ а. е. м.}$ и $m_e = 0,000549 \text{ а. е. м.}$

23. Найдите удельные энергии связи ядер лития 7_3Li и кислорода ${}^{16}_8O$. Массы этих ядер, протона и нейтрона составляют соответственно 7,014358, 15,990526, 1,007276 и 1,008665 (а. е. м) равно.

● ГЛАВА VIII. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Мы узнали о таких частицах, как электрон, протон, нейтрон, фотон и позитрон. Оказалось, что "атомы Демокрита", когда-то называвшиеся "неделимыми", на самом деле имеют сложную внутреннюю структуру. Оказывается, что все изменения вещества, происходящие во вселенной, состоят из простых изменений места в атомах. Однако результаты исследований космических лучей во 2-й половине XX века показали, что элементарные частицы чрезвычайно разнообразны. Так появилось и начало бурно развиваться новое направление в науке — физика элементарных частиц.



§ 33. МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. ПЕРВЫЕ ОБНАРУЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ.

После того, как выяснилась структура атома, появились новые теории о строении ядра и элементарных частицах. В качестве доказательства этих теорий следует отметить частицы. Существует несколько способов наблюдения за движением заряженной частицы или атомных ядер. В этих методах используются различные инструменты и приспособления. Принцип работы всех приборов, регистрирующих элементарные частицы, основан на переходе системы в новое состояние в результате воздействия пролетающей частицы. Давайте познакомимся с некоторыми из этих устройств.

Счетчик Гейгера:

Этот инструмент считает заряженные частицы, которые летят в автоматическом состоянии. Внутренняя сторона счетчика представляет собой стеклянную флейту, покрытую металлическим покрытием (катод), а через центр стеклянной флейты проходит тонкое металлическое волокно (анод). Работа счетчика основана на импульсной ионизации. Электрон, протон или частицы, проникающие извне, ионизируют газ (газ аргона) внутри флейты, то есть выбивают электрон из нейтрального атома аргона. В результате образовавшиеся электрон и положительный ион попадают в лавину в сильном электрическом поле между катодом и анодом. Электроны вторично ионизируют атомы газа из шлага. Сила тока, прошедшего через счетчик, резко возрастает. В нагдушке возникает импульс напряжения. Этот импульс при этом передается на регистрирующее устройство (рис.33.1).

Счетчик регистрирует почти все падающие на него электроны, в то время как γ-кванты регистрируют только одну сотую. Поскольку он тяжелый, зарегистрировать α-частицы немного сложнее. Потому что из счетчика сложнее сделать достаточно тонкостенную флейту, через которую могли бы проходить α-частицы.

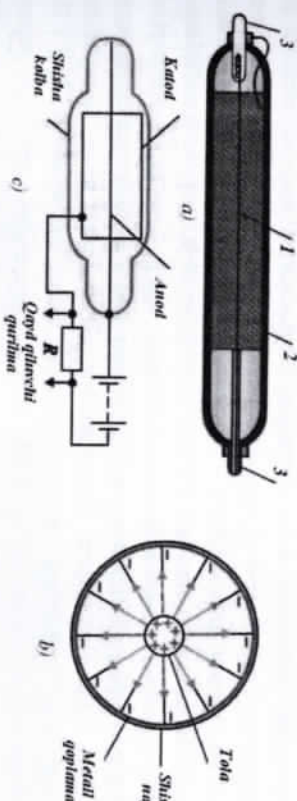


Рисунок 33.1

Камера Вильсона:

Счетчики отсчитывают только пройденные частицы, в то время как камера Вильсона, созданная в 1912 году, позволяет отслеживать или фотографировать следы этих частиц. Принцип работы камеры Вильсона основан на конденсации и образовании капель воды в месте, куда вылетает частица из перенасыщенного водяного пара.

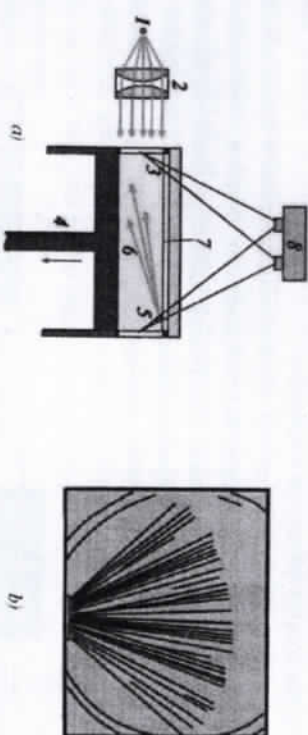


Рисунок 33.2

Камера Вильсона состоит из поршневой емкости, заполненной водяным или спиртовым паром, близким к насыщению. При резком движении поршня вниз пар, близкий к насыщению, в цилиндре переходит в состояние перенасыщения (рис.33.2). Перенасыщение-это неустойчивое состояние, при котором пар начинает конденсироваться в осцилляторе. Частица, летящая внутри камеры, служит центром конденсации. Крошечные крошечные капли воды появляются на пути частицы, образуя дорожку частицы. После прекращения наблюдения под действием электрического поля заряженные

частицы в камере очищаются и действие электрического поля прекращается до следующего расширения. Процесс начнется снова. В зависимости от размера и размера камеры время восстановления может варьироваться от нескольких секунд до нескольких минут.

С помощью камеры Вильсона можно получить гораздо больше информации, чем с помощью счетчика. Определяется энергия частицы в зависимости от длины треков, скорость частицы в зависимости от количества капель на единицу длины трека, количество заряда в зависимости от длины треков. Это означает, что чем больше капель воды в единице длины, тем ниже скорость частицы. Чем больше двосточный, тем больше заряд частицы.

Русские физики П.Л.Капица и Д.В.Скобелевич предлагают ввести камеру Вильсона в магнитное поле. Известно, что в магнитном поле заряженные частицы под действием силы Лоренца движутся криволинейно. В зависимости от кривизны дорожки можно определить удельный заряд заряженной частицы. Заряженная частица может определить свой заряд, если известна ее масса, и наоборот, если известен ее заряд.

Пузырьковая камера:

Пузырьковая камера была изобретена в 1952 году американским ученым Д.Г.Лейзером, в котором вместо насыщенного пара рекомендовалось использовать перегретую жидкость. Его работа основана на образовании пузырьков, когда заряженные частицы соли проходят через эту перегретую жидкость, ионизируя молекулы жидкости.

Жидкость сначала находится под давлением, значительно превышающим атмосферное. Это давление удерживает жидкость от кипения, хотя жидкость остается при температуре кипения. При резком снижении давления жидкость переходит в состояние перенасыщения и ненадолго находится в неустойчивом состоянии. В этот момент летящие частицы образуют на своем пути пузырьки (рис.33.3).

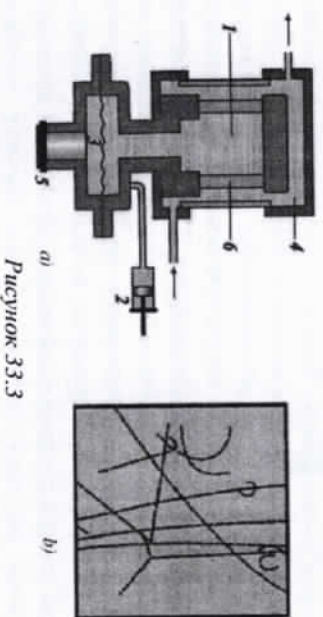


Рисунок 33.3

В качестве жидкости в основном используется жидкий водород или жидкий пропан. Рабочий цикл пузырьковой камеры малого короче, и он вращается вокруг 0,1 с. Преимущество пузырьковой камеры перед камерой Вильсона состоит в том, что при большей плотности используемого рабочего вещества трассировка частиц и радиусы кривизны невелики. С помощью пузырьковой камеры можно сфотографировать несколько вращений частицы в магнитном поле.

Фотоэмульсионный метод:

Явление ионизации фотоэмульсионки при попадании на эмульсионный слой их потока очень быстро движущихся заряженных частиц открыл французский ученый А.Это привел Беккерели к открытию радиоактивности в 1896 году.

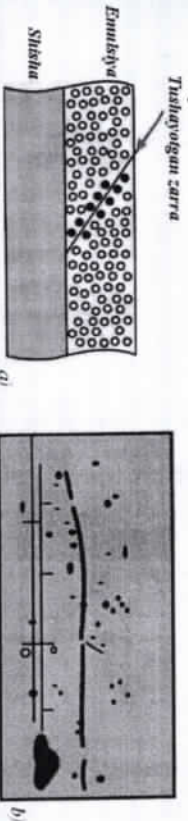


Рисунок 33.4

Фотоэмульсия содержит большое количество кристаллов бромида серебра. Быстро движущаяся заряженная частица отталкивает электроны от атомов серебра и ионизирует его. В кристаллах образуется внутреннее скрытое изображение. При раскрытии этого изображения металл серебра восстанавливается в кристаллах, образуя цепочку зерен серебра в виде треков частиц (рис.33.4). На основании длины и ширины треков можно определить энергию и массу частицы. Из-за большой плотности фотоэмульсионного вещества длина треков будет очень короткой 10^{-3} см. При съемке используется увеличение. Преимущество фотоэмульсии перед камерами заключается в том, что время экспозиции в них настолько велико, насколько это возможно.

Наблюдая за заряженными частицами с помощью перечисленных и других методов, было доказано не только существование частиц, но и получены количественные результаты об их относительных зарядах, энергиях, импульсных и магнитных моментах, скоростях и других величинах.

Первые обнаруженные частицы:

Элементарными частицами на современном этапе развития физической науки называют простейшую, не имеющую внутренней структуры частицу, состоящую только из одной частицы — самой себя.

До 1932 года количество элементарных частиц составляло всего 3. К 1956 году их число увеличилось до 30. В настоящее время таблица элементарных частиц содержит более 400 элементарных частиц (включая антизаряды). Вот некоторые из них, история открытия и физические свойства которых будут следующими:

1) **электрон (e)** – предсказанный в 1891 г. Стони в статье постулата. Но открытие этой частицы в большинстве случаев связывают с именем Томсона. Причина в том, что он точно измерил удельный заряд электрона в эксперименте в 1897 году.

Современная физика рассматривает электрон как реальную элементарную частицу, которая не имеет внутренней структуры и размера. В соответствии с измерениями линейный размер (радиус) электрона считается меньшим, чем 10^{-18} м. Электрон участвует в электромагнитных, слабых и гравитационных взаимодействиях и является самым легким из заряженных частиц. Вот почему он также стабилен.

2) **Протон (P)** – элементарная частица, входящая в состав атомного ядра, открытая Резерфордом в 1919 году. Но трудно сказать, какое именно явление было открыто протоном. Потому что он был известен как ион водорода с давних пор. Открытие протона было связано с экспериментом, проведенным Резерфордом в 1911 году, а также с тем, что между 1906 и 1919 годами Дж. Томсон, Ф. Содди, Ф. Астоном открытие изотопов и наблюдение за ядрами водорода, выбитыми α -частицами из ядра азота, также сыграли свою роль.

3) **Фотон (γ)** – появился в физике на основе работ Планка и Эйнштейна. Он был признан элементарной частицей после эксперимента Комптона. Он не входит в состав атома, появляется и исчезает в процессе перехода электронов с одного энергетического уровня на другой. Это нейтральная частица. Спин-квантовое число фотона равно 1. Фотон в свободном состоянии является абсолютно стабильным. Фотон также можно рассматривать как реальную элементарную частицу. Он участвует только в электромагнитных и гравитационных взаимодействиях и является носителем электромагнитных взаимодействий. Он является частью всех типов электромагнитных волн. В 1964 году американские радиострономы А. Пензас и Р. Вильсон обнаружили, что пространство Вселенной заполнено миллиметровыми радиоволнами. Оказалось, что во Вселенной количество фотонов в миллиард раз превышает количество протонов.

4) **Гравитон (G)** – эта частица является носителем гравитационного взаимодействия. Существование гравитона вытекает из теории гравитации Эйнштейна, принципов квантовой механики и теории относительности. До

сих пор он не был зарегистрирован, так как интенсивность этого воздействия была намного меньше.

5) **нейтрон (n)** – вторая элементарная частица, входившая в состав атомного ядра, открытая Чедвиком в 1932 году. Нейтроны активны только в стабильных атомных ядрах. В свободном состоянии вне атома он распадается примерно за 16 минут, не становясь стабильным.

6) **позитрон ($\bar{e}$)** – теоретически предсказанная Оппенгеймом в 1930 году, первая античастица, открытая Андерсоном в составе космических лучей в 1932 году. Это античастица электрона, масса которой такая же, как масса электрона. Модуль заряда также одинаков. Отличается от электрона знаком своего заряда. Позитрон имеет положительный электрический заряд.

7) **мюон (μ)** – частица, открытая в 1937 году Андерсоном и Недермайером в составе космических лучей. Масса больше массы электрона и намного меньше массы протона. Модуль его заряда равен заряду электрона. В природе существует два типа мюонов с электрическим знаком, то есть (μ^- - минус) и (μ^+ - плюс). Сначала эта частица рассматривалась как носитель сильного взаимодействия в соответствии с теорией Юкавы и называлась мезоном. Но оказалось, что эта частица не имеет ничего общего с сильным взаимодействием. Мюон-нестационарная частица, среднее время жизни которой составляет $2,2 \cdot 10^{-8}$ с.

8) **нейтрино (ν)** – частица, теоретически введенная Паули в 1930 году и зафиксированная в эксперименте, когда дело дошло до середины 50-х годов прошлого века. Вводится с точки зрения выполнения закон сохранения энергии. Нейтрино не имеет электрического заряда, его масса в покое близка к нулю, проникающая способность намного больше. В 1934 году теория бета-распада Ферми была подтверждена в экспериментах. Потребовалось 20 лет, чтобы поймать его. 1953 год Ф. Рейнис и К. Коуэном было зафиксировано в эксперименте, проведенном на атомном реакторе. В настоящее время существует три его типа: ν_e – электронные нейтрино, ν_μ – мюонные нейтрино, ν_τ – таоновые нейтрино. Нейтрино-стабильная частица.

9) **пион (π)** – частица, теоретически введенная Юкавой в 1935 году для объяснения природы ядерных сил. Юкава теоретически ввел три типа пионов π^+ , π^- , π^0 . Его существование было открыто в эксперименте Пауэллом, Оккаллини, Беркундом в 1947-50 годах.

Вопросы по теме

1. Как работает счетчик Гейгера?
2. Как работает камера Вильсона?
3. Как работает пузырьковая камера?

4. Какие параметры элементарной частицы можно определить фотомультипликаторным методом?
5. Опишите элементарные частицы.

§ 34. ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. АННИГИЛЯЦИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Величины, характеризующие элементарные частицы:

Все элементарные частицы также характеризуются массой, электрическим зарядом, средним временем жизни, спином и другими величинами. Давайте кратко остановимся на этих величинах.

а) Все элементарные частицы имеют массу. Между их массой и энергией существует эта связь.

$$W^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 = m^2 c^4 \quad (34.1)$$

Поскольку фотон не имеет массы в покое, у фотона эта взаимосвязь имеет следующий вид.

$$W = pc \quad (34.2)$$

б) Большинство элементарных частиц имеют электрический заряд. Их заряд e равен $+1$ и -1 в элементарной единице заряда. Не существует частиц с двумя или более зарядами. Есть также незаряженные частицы. Например, нейтрон и нейтрино имеют заряд 0.

в) Большинство элементарных частиц нестабильны и имеют очень короткое среднее время жизни. Оказывается, эти частицы не могут выжить намного больше времени $2 \cdot 10^{-6}$ с, даже если нет внешнего воздействия. Стабильны только четыре частицы – фотон, электрон, протон и нейтрино. Каждая из этих частиц сохранила бы свою неизменность во Вселенной только тогда, когда существовала бы только одна частица.

д) Все элементарные частицы характеризуются спином. Спин большинства элементарных частиц равен $\hbar \left(\hbar = \frac{h}{2\pi} \right)$ в единице $\frac{1}{2}$. Например, спин электрона, протона и нейтрона равен $\frac{1}{2}$. Кроме него существуют фотон со спином 1, а также с-

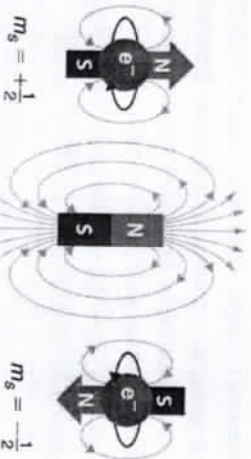


Рисунок 34.1

Мезон, π -Мезон, η -Мезон со спином 0. Говоря о понятии спина, можно сказать, что это собственный механический момент, возникающий при

вращении частицы вокруг своей оси, то есть частный импульсный момент. Из раздела механики известно, что вращающееся тело будет иметь импульсный момент $L = I\omega$. Точно так же вращающиеся частицы, также будут иметь спин. Спин частиц не может быть изменен так же, как можно изменить только механический момент, ускоряя или замедляя импульс тел. Каждая частица имеет свой собственный спин, который является ее неотъемлемым свойством, таким как масса и заряд. От движения заряженной частицы возникает магнитный момент. Магнитный момент, создаваемый его вращением вокруг своей оси, называется вращательным моментом. Есть частица со спином, которая также будет иметь вращательный момент. Спinoвые моменты частиц создают вокруг них магнитное поле, похожее на магнитный стержень. На рисунке 34.1 изображена такая ситуация.

е) Античастица элементарных частиц. Еще одной характерной особенностью элементарных частиц является наличие их античастицы. Частица и античастица будут иметь одинаковое количество массы, электрического заряда, спина. Но они указывают на противоположные заряды и спины направлены в противоположных направлениях. А при отсутствии электрического заряда они отличаются только своими спинами, направленными в противоположные стороны. Например, Протон p и антипротон $\bar{p}$, электрон e и позитрон $\bar{e}$, нейтрон n и антинейтрон $\bar{n}$ являются примерами частиц и античастиц. Античастица из четырех частиц – γ -фотон, π^0 -Мезон, K_1^0 -Мезон, K_2^0 -Мезон не существует. Эти частицы называются абсолютно-нейтральными частицами. Понятие абсолютная нейтральность не следует путать с понятием электронейтральность. Например, нейтрон, хотя и электронейтральный, имеет античастицу.

Из античастица позитрон является самой первой обнаруженной античастицей. Его существование было теоретически заявлено в уравнениях Дирака в 1930 году, а в 1932 году К. Андерсоном он был определен в составе космических лучей. В 1955-1956 годах американские физики Б.Корк, Г.Ламбертсон, О.Пичинони, В.Вензели наблюдали антинейтрон и антинейтрон в ускорителях. Позднее было установлено, что среди продуктов ядерных реакций высокоэнергетических частиц имеются антинейтроны (ядро, состоящее из антинейтрона и антинейтрона). В 1970 году в Институте физики высоких энергий в Серпухове был получен антинейтрон-3 (ядро, состоящее из двух антинейтронов и одного антинейтрона). Теоретически из антинейтрона и антинейтрона можно построить антинейтрон, а вместе с ним и позитрон, образующий антинатом. Антинатомы могут объединяться и образовывать антивещество. Но пока антивещество не обнаружено.

Взаимные превращения элементарных частиц, аннигиляция:

Одним из главных свойств частиц является их способность превращаться друг в друга, рождаться и уничтожаться в результате взаимодействия.

Открытие позитрона, частицы по своим характеристикам похожей на электрон, но имеющей в отличие от электрона положительный единичный заряд, было исключительно важным событием в физике. Еще в 1928 году П. Дирак предложил уравнение для описания релятивистской квантовой механики электрона. Оказалось, что уравнение Дирака имеет два решения, как с положительной, так и с отрицательной энергией. Состояние с отрицательной энергией описывает частицу аналогичную электрону, но имеющую положительный электрический заряд. Позитрон был первой открытой частицей из целого класса частиц, которые получили название античастиц. До открытия позитрона казалась необъяснимой неодинаковая роль положительных и отрицательных зарядов в природе. Почему существует тяжелый положительный заряженный протон, и нет тяжелой частицы с массой протона и отрицательным зарядом? Зато существовал легкий отрицательно заряженный электрон. Открытие в 1932 г. позитрона по существу восстановило зарядовую симметрию для легких частиц и поставило перед физиками проблему поиска античастицы для протона. Другая неожиданность - позитрон является стабильной частицей и может в пустом пространстве существовать бесконечно долго. Однако при столкновении электрона и позитрона происходит их аннигиляция. Электрон и позитрон исчезают, и вместо них рождаются два γ -кванта $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ $m(e^-) = m(e^+) = 0.511$ Мэв. Происходит превращение частиц с массой покоя отличной от нуля в частицы с нулевой массой покоя (фотоны), т.е. масса покоя не сохраняется, а превращается в кинетическую энергию.

Наряду с процессом аннигиляции был обнаружен и процесс рождения пары электрон-позитрон. Электрон-позитронные пары легко рождались γ -квантами с энергией в несколько Мэв в кулоновском поле атомного ядра. В классической физике понятия частицы и волны резко разграничены - одни физические объекты являются частицами, а другие - волнами. Превращение пары электрон-позитрон в фотоны стало дополнительным подтверждением представления о том, что между излучением и веществом много общего. Процессы аннигиляции и рождения пар заставили по-новому осмыслить, что же такое частицы, которые ранее называли элементарными. Частица перестала быть неизменным "кирпичиком" в строении материи. Возникла новая чрезвычайная глубокая концепция взаимного превращения частиц. Оказалось, что частицы могут рождаться и исчезать, превращаясь в другие частицы. В созданной Э. Ферми теории β -распада было показано, что испускаемые в процессе β -распада электроны не существуют в ядре, а

рождаются в результате распада нейтрона. В результате этого распада исчезает нейтрон n и рождается протон p , электрон e^- и электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (34.3)$$

$$m(n) = 939,6 \text{ Мэв.}$$

$$m(p) = 938,3 \text{ Мэв.}$$

$$t(n) = 887 \text{ с.}$$

В результате реакций между антипротоном $\bar{p}$ и протоном p , в зависимости от энергии сталкивающихся частиц, могут рождаться различные частицы

Взаимодействие элементарных частиц приводит к тому, что они превращаются друг в друга. Это изменение может заключаться в том, что они самопроизвольно распадаются и распадаются на несколько более легких частиц. Фотон, электрон, протон, электронное нейтрино и мю-мезонное нейтрино не относятся к ним. Потому что они стабильные частицы. Самопроизвольный распад происходит для каждой нестабильной частицы через определенный промежуток времени, который называется средним временем жизни. Кроме того, они могут превращаться друг в друга во время взаимодействия, что является их характерным свойством.

Когда частица и античастица сталкиваются друг с другом, они превращаются в другие элементарные частицы и теряют свое существование. Это явление называется аннигиляцией. Например, аннигиляция пар приводит к тому, что протон и антипротон встречаются и превращаются в пи-нуль-мезон

$$p + \bar{p} \rightarrow 2\pi^0 \quad (34.4a)$$

или протон и антипротон встречаются и превращаются в нейрон и антинейтрон

$$p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n} \quad (34.4b)$$

или, в противном случае, электрон и позитрон встречаются и превращаются в позитрон

$$e + \bar{e} \rightarrow 2\gamma \quad (34.4c)$$

можно привести как пример процесса.

Также происходят процессы, обратные аннигиляции. При этом образуются частицы и античастицы. Это явление называется появлением пар. В качестве примера можно привести то, что из взаимодействия электромагнитного поля с электроном

$$e + \gamma \rightarrow e + e + \bar{e} \quad (34.4d)$$

при столкновении двух электронов

образуются пары.

$$e+e\rightarrow e+e+e+\bar{e} \quad (34.4e)$$

Слово аннигиляция означает исчезновение. Но при этом материя не исчезает полностью.

Помимо антинейтрино, наблюдаются и превращения частиц друг в друга. Когда ядро β^- распадается, нейтрон превращается в три частицы. Кроме того, когда β^- распадается,

$$p \rightarrow n + e + \nu_e \quad (34.5a)$$

Так получается, что элементарные частицы могут превращаться друг в друга.

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \quad (34.5b)$$

При изменениях в элементарных частицах они строго подчиняются законам массы, энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и другим законам сохранения.

Классы элементарных частот:

Все элементарные частицы делятся на 4 класса в порядке возрастания их массы в покое и с учетом ряда их свойств (табл.34.1).

1. Фотоны ($m_0 = 0$).
2. Лептоны, или легкие частицы ($0 < m_0 < m_e$).
3. Мезоны или промежуточные частицы ($m_e < m_0 < m_p$).
4. Бароны, или твердые частицы ($m_p < m_0 < m_a$).

Здесь: m_d - масса дейтрона. Бариионы, в свою очередь, снова делятся на нуклоны и гипероны. Бариионы и мезоны вместе называются адронами. Поскольку многие свойства тау-мезона близки к свойствам лептонов, их относят к классу лептонов. В таблице приведены массы частиц в массах электронов, заряды в единицах заряда электрона, а спины в единицах

$$h \left(h = \frac{h}{2\pi} \right).$$

Ταβήματα 34.1

Название частицы	Частица	Античастица	Масса	Заряд e	Среднее время жизни, с	Спин
Фотон	γ	-	0	0	стабильн	1
Электронная нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	стабильн	$\frac{1}{2}$
Мю-мезонная нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	стабильн	$\frac{1}{2}$
Тау-мезон нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	стабильн	$\frac{1}{2}$
Лептоны						
Тау-мезон нейтрино						

Электрон	e^-	e^+	1	-1	стабил	$\frac{1}{2}$
0-минус-мезон	μ^-	μ^+	206.7	-1	$2.2 \cdot 10^{-6} c$	$\frac{1}{2}$

γ -минус-мезон	τ^+	τ^-
$\frac{1}{2}$	2,8	-1
$\frac{3}{2}$	352,8	

π^0	2641	0	$\cdot 10^{-13} \text{C}$	0
$\pi^+ - \text{meson}$				

И-МСЭОН	π^+	π^-	0	$2 \cdot 10^{-17} \text{ c}$	$2.6 \cdot 10^{-8} \text{ c}$	0
И-МСЭОН	π^+	π^-	0	$2 \cdot 10^{-17} \text{ c}$	$2.6 \cdot 10^{-8} \text{ c}$	0

инус-мезон	K^+	K^-
966,4	+1	1,22
0		

Содержание	K^0	n^0	σ
0I-Me3OH	0	9/4,2	$\cdot 10^{-8}c$
0-Me3OH	0	1074	$10^{-10}c$

	10 ⁻⁵ C	10 ⁻¹⁰ C
1		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

1836,1	+1	сравн	$\frac{1}{2}$
p	p		
p			

eytron	n	$\tilde{n}$	1838,6	0	960 c	$\frac{1}{2}$
--------	---	-------------	--------	---	-------	---------------

λ-нол-гиперон			25
---------------	--	--	----

 $\cdot 10^{-10} \text{ S}$

σ -минус- нормирован	Λ^0 $\bar{v}^+$	Λ^0 $\bar{v}^+$	$\frac{1}{2}$
2183	0	8,1	

Σ^0	+1	$\cdot 10^{-11} \text{ s}$	$\frac{1}{2}$
Σ^+	0	10^{-14} s	$\frac{1}{2}$
гиперон			

ζ -КСИ-НОЛ-ГИПЕРОН	Σ^-	Σ^-	Σ^-	Σ^-
	2340,6	-1	$1,65 \cdot 10^{-11} \text{ s}$	$1/2$

ξ -КНИ-МИНУС-	ξ^0 [ξ^0]	ξ^0 [ξ^0]	$3 \cdot 10^{-10} S$	$\frac{1}{2}$
	2572	0		
	2585	1		

Гиперон	η^-	$\bar{\eta}^-$	η^-	$\bar{\eta}^-$
2065	-1	-1	10^{-10}	10^{-10}
3273	-1	-1	10^{-10}	10^{-10}
3/2	1/2	1/2	1/2	1/2

гиперон	1,75
---------	------

					. $\cdot 10^{-10} s$	
--	--	--	--	--	----------------------	--

ует особо отметить, что помимо перечисленных в таблице

защитный слой, они также характеризуются такими величинами, как

...квантовое число, изотопный спин.

Вопросы по теме

то называется элементарной частицей?

кие элементарные частицы вы знаете?

Перечислите основные признаки опасности

compartmentalizing *exemplum*

qanday zarra? Absalyut neytral zarra nima? Ammilyatsiya nima?

...то такое античужестранная? Досколотная нечужестранная? Что такое античужестранная?

Какие частицы относятся к стабильным?

трициклические классы элементарных частиц.

100 *Journal of Management Inquiry* 16(1)



§ 35. ЕДИНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА.

Итак, изучение школьного курса физики вами закончено. В большей или меньшей степени каждый из вас приобщился к результатам той огромной работы по изучению различных форм движения материи, строения и свойств материальных тел, которая была проделана на протяжении многих веков учеными всего мира. Физика знакомит нас с наиболее общими законами природы, управляющими течением процессов в окружающем нас мире и во Вселенной в целом.

Цель физики заключается в отыскании общих законов природы и в объяснении конкретных процессов на их основе. По мере продвижения к этой цели перед учеными постепенно вырисовывалась величественная и сложная картина единства природы. Мир представляет собой не совокупность разрозненных, независимых друг от друга событий, а разнообразные и многочисленные проявления одного целого.

Механическая картина мира:

Многие поколения ученых поражала и продолжает поражать величественная и цельная картина мира, которая была создана на основе механики Ньютона. Согласно Ньютону весь мир состоит «из твердых, весомых, непроницаемых, подвижных частиц». Эти «первичные» частицы абсолютно тверды: они неизмеримо более тверды, чем тела, которые из них состоят, настолько тверды, что они никогда не изнашиваются и не разбиваются «вдребезги». Отличаются они друг от друга главным образом количеством, своими массами. Все богатство, все качественное многообразие мира — это результат различий в движении частиц. Внутренняя сущность частиц остается на втором плане.

Основанием для такой единой картины мира послужил всеобъемлющий характер открытых Ньютоном законов движения тел. Этим законам с удивительной точностью подчиняются как громадные небесные тела, так и мельчайшие песчинки, тонкие ветром. И даже ветер — движение невидимых глазом частиц воздуха — подчиняется тем же законам. На протяжении долгого времени ученые были уверены, что единственными фундаментальными законами природы являются законы механики Ньютона. Французский ученый Лагранж считал, что «нет человека счастливее Ньютона: «...ведь только однажды одному человеку суждено построить картину мира».

Однако простая механическая картина мира оказалась несостоятельной. При исследовании электромагнитных процессов выяснилось, что они не подчиняются механике Ньютона. Дж. Максвелл открыл новый тип

фундаментальных законов, которые не сводятся к механике Ньютона, — это законы поведения электромагнитного поля.

Электромагнитная картина мира:

В механике Ньютона предполагалось, что тела непосредственно через пустоту действуют друг на друга и эти взаимодействия осуществляются мгновенно (теория дальнодействия). После создания электродинамики представления о силах существенно изменились. Каждое из взаимодействующих тел создает электромагнитное поле, которое с конечной скоростью распространяется в пространстве. Взаимодействие осуществляется посредством этого поля (теория близко-действия).

Электромагнитные силы чрезвычайно широко распространены в природе. Они действуют в атомном ядре, атоме, молекуле, между отдельными молекулами в макроскопических телах. Это происходит потому, что в состав всех атомов входит электрически заряженные частицы. Действие электромагнитных сил обнаруживается и на очень малых (ядро), и на космических (электромагнитное излучение звезд) расстояниях.

Развитие электродинамики привело к попыткам построить *единую электродинамическую картину мира*. Все события в мире по этой картине управляются законами электромагнитных взаимодействий.

Кульминация электромагнитная картина мира достигла после создания специальной теории относительности. Было понятие фундаментальное значение конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий, создано новое учение о пространстве и времени, найдены релятивистские уравнения движения, заменившие уравнения Ньютона при больших скоростях.

Если во времена расцвета механической картины мира делались попытки свести электромагнитные явления к механическим процессам в особой среде (мировом эфире), то теперь уже стремилась, наоборот, вывести законы движения частиц из электромагнитной теории. Частицы вещества пытались рассматривать как «сгустки» электромагнитного поля. Однако свести все процессы в природе к электромагнитным не удалось. Уравнения движения частиц и закон гравитационного взаимодействия не могут быть выведены из теории электромагнитного поля. Кроме того, были открыты электрически нейтральные частицы и новые типы взаимодействий. Природа оказалась сложнее, чем предполагали вначале: ни единый закон движения, ни единственная сила не способны охватить всего многообразия процессов в мире.

Единство строения материи:

Мир чрезвычайно разнообразен. Но как это ни удивительно, вещество звезд точно такое же, как и вещество, из которого состоит Земля. Атомы, из которых состоят все тела Вселенной, совершенно одинаковы. Живые организмы состоят из тех же атомов, что и неживые.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из элементарных частиц трех видов. У них есть ядра из протонов и нейтронов, окруженные электронами. Ядра и электроны взаимодействуют друг с другом посредством электромагнитного поля, квантами которого являются фотоны.

Взаимодействие же между протонами и нейтронами в ядре осуществляют в основном те мезоны, которые представляют собой кванты ядерного поля. При распаде нейтронов появляются нейтрино. Кроме того, открыто много других элементарных частиц. Но только при взаимодействии частиц очень больших энергий они начинают играть заметную роль.

В первой половине XX в. был открыт фундаментальный факт: *все элементарные частицы способны превращаться друг в друга.*

В 70-е гг. было установлено, что все сильно взаимодействующие частицы состоят из субэлементарных частиц — кварков шести видов. Истинно элементарными частицами являются лептоны и кварки.

После открытия элементарных частиц и их превращений на первый план единой картины мира выступило *единство в строении материи.*

В основе этого единства лежит материальность всех элементарных частиц. *Различные элементарные частицы — это различные конкретные формы существования материи.*

Современная физическая картина мира:

Единство мира не исчерпывается единством строения материи. Оно проявляется и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе, по современным данным, имеются лишь четыре типа сил. Это *гравитационные силы, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия.* Последние проявляются главным образом при превращениях элементарных частиц друг в друга. С проявлением всех четырех типов сил мы встречаемся в безграничных просторах Вселенной, в любых телах на Земле (в том числе и в живых организмах), в атомах и атомных ядрах, при всех превращениях элементарных частиц.

Революционное изменение классических представлений о физической картине мира произошло после открытия квантовых свойств материи. С появлением квантовой физики, описывающей движение микрочастиц, начали вырисовываться новые элементы единой физической картины мира.

Разделение материи на вещество, имеющее прерывное строение, и непрерывное поле потеряло абсолютный смысл. Каждому полю соответствуют кванты этого поля: электромагнитному — фотоны, ядерному — мезоны, а на более глубоком уровне — глюоны, осуществляющие взаимодействие кварков.

В свою очередь, все частицы обладают волновыми свойствами. Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.

Описание, казалось бы, взаимосключающих корпускулярных и волновых свойств в рамках одной теории оказалось возможным благодаря тому, что законы движения всех без исключения микрочастиц носят статистический (вероятностный) характер. Этот факт делает невозможным однозначное предсказание того или иного поведения микрочастиц.

Принципы квантовой теории являются совершенно общими, применимыми для описания движения всех частиц, взаимодействий между ними и их взаимных превращений.

Итак, современная физика, несомненно, демонстрирует нам черты единства природы. Но все же многого, быть может, даже саму физическую суть единства мира выяснить пока еще не удалось.

Неизвестно, почему существует столь много различных элементарных частиц, почему они имеют те или иные значения массы, заряда и других характеристик. До сих пор все эти величины определяются экспериментально.

Однако все отступившее вырисовывается связь между различными типами взаимодействий. Электромагнитные и слабые взаимодействия уже объединены в рамках одной теории. Выяснена структура большинства элементарных частиц.

«Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, еще не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий все еще продолжает существовать». Эти слова, сказанные Галилеем три с половиной столетия назад, насколько не устарели.

Научное мировоззрение, фундаментальные законы, устанавливаемые в физике, по своей сложности и общности намного превосходят те факты, с которых начинается исследование любых явлений. Но они столь же достоверны и объективны, как и знания о простых явлениях, наблюдаемых непосредственно. Эти законы не нарушаются никогда, ни при каких условиях.

Все большее и большее число людей осознают, что объективные законы, которым следует природа, исключают чудеса, а познание этих законов позволяет человечеству выжить.

1. Опишите механическую картину Везеловой
2. Опишите электромагнитную картину Везеловой
3. Опишите современную картину Везеловой
4. Объясните Лейбонно-кварковая модель

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ГЛАВЕ VIII

Лабораторная работа: № 9

Исследование треков заряженных частиц и их анализ.

Общая цель работы: получить полную информацию о частице в зависимости от следа заряженной частицы в следующих 4 работах.

Необходимые общие инструменты и оборудование: Пузырьковая камера, Камера Вильсона, фотомультиплексный слой.

РАБОТА-1.

Цель работы: познакомить учащихся с устройством и принципом работы камеры Вильсона, сформировать элементарные навыки и умения анализа фотографий следов заряженных частиц.

Необходимые инструменты и оборудование: Треки, взятый в камере Вильсона.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Учеников обучают основным знаниям о методах наблюдения и регистрации заряженных частиц. Ученики самостоятельно изучают устройство и принцип работы камеры Вильсона. Следы заряженных частиц в камере Вильсона представляют собой цепочки микроскопических капель жидкости (воды или спирта), образующихся в результате конденсации насыщенного пара жидкости на ионы. Длина пути зависит от начальной энергии заряженной частицы и плотности среды. Толщина пути зависит от заряда и скорости частицы: чем она больше, тем больше заряд частицы и тем меньше ее скорость. Когда заряженная частица движется в магнитном поле, ее след оказывается искривленным. Изменяя радиус изгиба пути, можно определить направление движения заряженной частицы и изменение ее скорости.



Рисунок-1

РАБОТА-2

Цель работы: познакомить учащихся с устройством и принципом работы пузырьковой камеры, сформировать элементарные навыки и умения анализа фотографий следов заряженных частиц.

Необходимые инструменты и оборудование: Трек, взятый в пузырьковой камере.

Ученики самостоятельно изучают устройство и принцип работы пузырьковой камеры.

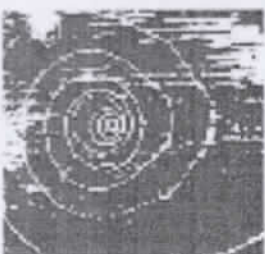


Рисунок-2

РАБОТА-3

Цель работы: познакомить учащихся с методом толстослойных фотографических эмульсий, сформировать элементарные умения и навыки фотографического анализа следов заряженных частиц.

Необходимые инструменты и оборудование: изображения дорожки заряженных частиц, полученные методом фотомульсии.

Ученики самостоятельно знакомятся с методом толстослойных фотографических эмульсий.

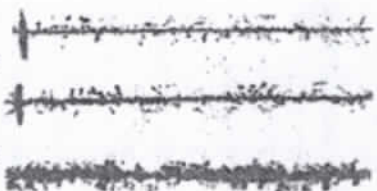


Рисунок-2

РАБОТА-4

Цель работы: Приобретение экспериментальных навыков считывания фотографий движения заряженных частиц, сделанных камерой Вильсона.

Материалы и оборудование: фотоаппарат, прозрачная бумага (калька) или копировальная бумага, квадрат, компас или изогнутый линейчатый карандаш.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

След заряженной частицы в камере Вильсона представляет собой цепь микроскопических капель воды или спирта, образующихся в результате конденсации насыщенных паров жидкости на ионы. Ионы образуются при взаимодействии заряженной частицы с атомами и молекулами паров и газов в камере.

На фото видны следы частиц в магнитном поле с индукцией $B = 2,2 \text{ Тл}$. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости фотоаппарата. Нижняя дорожка принадлежит протону с начальной энергией $1,6 \text{ МэВ}$.

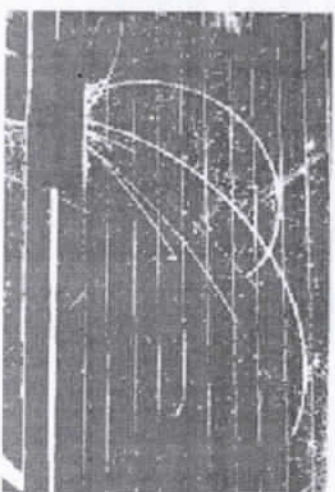


Рисунок-4

Последовательность выполнения работ

1. Используйте кальку или копировальную бумагу, наблюдайте следы частиц и размер фотоаппарата.
2. Определите направление движения частиц и направление линий магнитного поля. Объясните, почему протонный след становится толще к концу пробега.
3. Рассчитайте отношение общей массы протона к массе покоя по величине его энергии и покажите, что изменение массы можно пренебречь.
4. Определите отношение заряда к массе для этой частицы, зная, что вышеуказанный способ принадлежит частице с той же начальной скоростью, что и протон. К какой частице относится этот трек? Почему он толще протонного следа?
5. Вычислите начальную энергию частицы, оставившей высокий след.

ОТВЕТЫ НА ТЕСТЫ

ГЛАВА I

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	B	B	A	A	B	C	B	A	D
1	C	B	C	D	A	B			

ГЛАВА II

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	B	C	D	B	B	B	C	A
1	B	E	A	E	D	E	D	B	A
2	C	B	E	C					

ГЛАВА III

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	B	A	C	B	C	C	D	B	A
1	A	A	D	B	C	A	C	C	A
2	A	A	C	B	E	A	E	E	C
3	C	D	A	A					

ГЛАВА IV

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	B	D	E	E	A	D	E	D	D
1	E	A	B	A	B	D	E	C	E
2	A	D	B	D	A	C	B		
3									

ГЛАВА V

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	C	A	A	D	E	E	B	A
1	B	D	B	B	A	C	D	D	

ГЛАВА VI

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	A	A	C	A	B	A	B	A	C
1	E	B	C	E	C	B	A	D	B
2	B	A	D	B	E	A	E	C	A

ГЛАВА VII

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	A	A	B	A	A	C	B	D	D
1	E	B	C	B	A	C	C	E	E
2	B	D	E						

ОТВЕТЫ НА ЗАДАНИЯ

ГЛАВА I

1. 0,37 м; 2. 14,6 Дж; 14,6 Дж; 12,8 Дж; 3. 400 КэВ; 4. 36 КэВ; 5. 65 Дж; 12, 5 Дж; 6. На расстоянии 0,33 м от маленькой лампы; 7. 210 Дж; 8. 0,1 м; 9. 17,6 Дж/Вт; 10. 3,16 м; 11. 8 · 10⁴ Дж; 12. 6,15 м; 13. 1,5 м; 14. 2515,6 КэВ; 15. 44,5 Дж; 16. 8,33 Дж; 17. 15,3 Дж; 18. $E = \frac{I}{(n+1)^3 H^2}$; 19. $I_1 = I_2 = 104 \text{ КэВ}$; 20. 7000 нм

ГЛАВА II

1. 55°; 2. 1,23 · 10⁸ м/с; 3. $\sqrt{3}$; 4. 60°; 5. $\sqrt{3}$; 6. 30°; 7. 45°; 8. $K = 4$; 9. 6 см; 10. 20 см; 11. 1,5; 12. -4; 13. -1,14; 0,2 м; 15. 30°; 16. 45°; 17. Бесконечности; 18. 0,3 м; 19. 0,6 м; 20. 2 м; 21. 7,5 см; -1,5 см; 22. 2 м; 23. 1,5°; 24. 18,6 см; 25. 0,86 м; 26. $R_1 = R_2 = 0,4 \text{ м}$; 27. 1,5; 28. 11 см; 29. 12,5 см; 30. 520 м; 31. 0,5 см.

ГЛАВА III

1. 223380 $\frac{\text{км}}{\text{с}}$; 2. 1,5; 3. 2 · 10⁻⁷ м; 4. 0,45 $\mu\text{м}$; 5. $\pi/2$; 6. 4 π ; 7. π ; 8. $\frac{\lambda}{8}$; 9. Максимум; 10. 1; 11. 5 $\mu\text{м}$; 12. 30°; 13. 585; 14. $k = 3$; 15. 45°; 16. 0,125; 17. 2.

ГЛАВА IV

1. 40; 2. 4,1 · 10⁻¹¹ м; 3. 130; 4. 10⁵ Гс; 5. 4,3 эВ; 6. 3,3 · 10⁻¹⁹; 7. 1,6 · 10⁻¹⁹; 8. 1,7 · 10⁶ м/с; 9. 98,6 нм; 10. 10⁵ Гс; 11. 0,5 Г; 12. 132; 13. 14 эВ; 14. 3 · 10²²; 15. 200 нм; 16. 10¹⁸ та; 17. $T = 1000 \text{ К}$; 18. $W = 6,53 \cdot 10^{21} \text{ кВт} \cdot \text{сод}$; 19. 4,41 нДж; 20. $T = 1000 \text{ К}$; 21. $W = 7,35 \cdot 10^3 \text{ Дж}$; 22. $S = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; 23. 52,5 Вт; 24. увеличивается в 6 раз; 25. $\Delta T = T_1 \left(\sqrt{\frac{E_2}{E_1}} - 1 \right) = 126 \text{ К}$; 26. $\lambda' = \lambda + 2\lambda \sin^2 \frac{\theta}{2} = 59,9 \text{ нм}$; 27. 2,8 раз.

ГЛАВА V

1. 1,25 раз; 2. увеличивается в 1,26 раз; 3. 4 раза; 4. 10⁻¹⁴ кг; 5. 4,667 · 10⁻¹² кг увеличивается; 6. $\frac{13}{14}$; 7. $\ell = 0,8 \text{ м}$; 8. 5 раз; 9. 53 год; 10. 1,67 а.е.м.; 11. $g = \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} c$; 12. 68,6%; 13. 7,1 раз; 14. Доказать; 15. 1,5 · 10⁸ м/с; 16. 22,37 раз; 17. 1,2 раз; 18. $E_x^{\text{пол}} = 114 \text{ КэВ}$; $E_x^{\text{от}} = 175 \text{ КэВ}$; 19. 1,11 · 10⁻¹⁷ кг; 20.

8. $2 \cdot 10^{-14}$ J; 21. 0,9с; 22. 42 000 км/с; 71900 км/с; 23. 0,357с; 24. $\frac{8}{13}$ с; $\frac{19}{44}$ с; 25. 0,615с; 26. 0,696с; 27. 229 с; 174 с; 28. 45 м/с; 29. 2000 км/с; 30. $2,78 \cdot 10^{20}$.

ГЛАВА VI

1. 3,13; 2. 775; 3. $13,4 \cdot 10^7$; 4. $3,31 \cdot 10^{14}$ м; 5. $5,44 \cdot 10^{15}$ м; 6. $\alpha \approx 160^\circ$; 7. 1087; 8. 3h; 9. 288,5; 10. 800; 11. 105348; 12. 691; 13. 9145; 14. 154; 15. 2675; 16. 12193; 17. 4; 18. 8,46; 19. 6; 20. 0,438; 21. 1,51; 22. -6,8; 23. 3,42eV; 24. $\lambda_{1,2} = 121,6$ нм; $\lambda_{1,3} = 102,6$ нм; $\lambda_{2,3} = 656,3$ нм; 25. 1) $T = 1,43 \cdot 10^{-16}$ с, $\omega = 4,4 \cdot 10^{16}$ рад/с; 26. 10,2 эВ; 27. $K = 13,6$ eV; $P = -2K = -27,2$ eV; $E_{\text{ит}} = K + P = -13,6$ эВ; 28. 2; 29. $6,62 \cdot 10^{-25}$; 30. 2; 31. 5,95; 32. $2,68 \cdot 10^{-18}$; 33. 1) $\lambda = 7,3 \cdot 10^{-7}$ м; 2) $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-7}$ м; 3) $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-25}$ м; 34. $0,122 \cdot 10^{-18}$ А; 35. $\ell = 1$; $m = -1,0, 1$; 36. $L = 0, \pm \hbar, \pm 2\hbar$; $\mu = 0, \pm \mu_{\text{Бор}}, \pm 2\mu_{\text{Бор}}$; 37. $L = 2\sqrt{3}\hbar$, $\mu = 2\sqrt{3}\mu_{\text{Бор}}$.

ГЛАВА VII

1. 82 раз; 2. 11 742 раз; 3. 72 час; 4. $9,76 \cdot 10^5$; 5. $\tau = \frac{T}{\ln 2} = 11,5$ сутка; 6. $T = \tau \cdot \ln 2 = 5,09$ сутка; 7. $T = \frac{t}{\log_2 n} = 4$ сутка; 8. ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$; ${}^{209}_{83}\text{Pb} \rightarrow {}^{209}_{83}\text{Bi} + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$; 9. ${}^{56}_{26}\text{Fe} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{54}_{26}\text{Mn} + {}^4_2\text{He}$; ${}^{54}_{26}\text{Fe} + {}^0_{-1}e \rightarrow {}^{54}_{26}\text{Mn} + {}^1_1\text{H}$; 10. ${}^{253}_{99}\text{Es} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{256}_{101}\text{Md} + {}^1_0n$; 11. ${}^{10}_{5}\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$; 12. ${}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{14}_6\text{N} + {}^1_0n$; 13. ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{Si} + {}^1_1\text{H}$; 14. ${}^{94}_{38}\text{Sr}$; 15. $1,513 \cdot 10^{-29}$ кг; 6,996 $\cdot 10^{-29}$ кг; 16. 2,224 МэВ; 28,3 МэВ; 342,05 МэВ; 17. 4,04 МэВ выделяется энергия; 2,792 МэВ энергия поглощается; 18. -1,193 МэВ энергия поглощается; 19. 2,792 МэВ; 20. 22,38 МэВ; 21. 17,59 МэВ; 22. $\Delta E = (Zm_p + Nm_n - M + Zm_e) \cdot 931,5 \text{ МэВ} = 224,9 \text{ МэВ}$; 23. 5,606 МэВ/нуклон.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Единицы измерения физических величин в международной системе (СИ)

Единица измерения величины

Название величины	Название	Обозначение	Описание
1	2	3	4
Длина	Метр	м	Принято, что длина волны излучения 1 650 763 730 метров в вакууме соответствует расстоянию между уровнями Криттон-86 21 ¹⁰ и 5d ₅
Масса	Килограмм	кг	Принято, что масса международного килограммового прототипа составляет 1 кг.
Время	Секунда	с	Цезий-133 считается 9 192 631 770 периодом облучения 1 секунда, соответствующим переходу между двумя чрезвычайно тонкими уровнями основного состояния атома
Сила тока	Ампер	А	Две параллельные, расположенные на расстоянии 1 метра друг от друга в вакууме, имеют бесконечную длину, а поперечное сечение представляет собой неизменную силу тока, которая при пропускании тока через очень маленькие прямые проводники создает силу взаимодействия $2 \cdot 10^{-7}$ Н на метр длины проводника.
Абсолютная температура	Кельвин	К	Доля 1/273,16 от термодинамической температуры, которая характеризует тройную точку воды, считается 1 Кельвином.
Количество вещества	Моль	моль	Углерод - элемент, равный числу атомов в массе 12 0,012 кг (атомный, молекулярный, ионный,...) учитывалось количество вещества в системе, состоящее из 1 моля.
Сила света	Кандела	Кд	Полный свет при температуре, равной температуре плавления платины под давлением 101325 Па - предполагается, что мощность света, излучаемого перпендикулярно от поверхности якоря 1/600000 м ² , составляет 1 Канделу.
Плоский угол	Радян	рад	Центральный угол наклона к дуге, равный радиусу по длине, принимается за 1 радян.
Телесный Угол	Стерadian	ср	Пространственный угол, при котором наблюдатель находится в центре сферы и отдален от поверхности, равную квадрату радиуса, от центра этой сферы, считается равным 1 стерadianу.
Площадь	Квадрат метр	м ²	1 м ² - площадь квадрата, стороны которого имеют длину от 1 м
Объем	Куб метр	м ³	1 м ³ - длина ребер равна объему куба от 1 м
Скорость	Метр на секунду	м/с	Если материальная точка движется по прямой на расстоянии 1 м в точке 1 с, то его скорость равна 1 м/с.
Ускорения	Метр на секунду квадрат	м/с ²	Если материальная точка, движущаяся прямолинейно равноускоренно, изменяет свою скорость в точке 1 с на 1 м/с, его ускорение равно 1 м/с ²

Угловое скорость	Радиан на секунду	рад/с	Если все точки тела, движущегося по окружности равномерно движением, вращаются со скоростью от 1 с до 1 рад, его угловая скорость равна 1 рад/с.
Плотность	Килограмм на кубический метр	кг/м ³	1 кг/м ³ - плотность такого однородного вещества, что масса 1 м ³ объема, отделенного от этого вещества, составляет 1 кг.
Импульс	Килограмм метр на секунду	кг·м/с	1 кг·м/с - импульс материальной точки массой 1 кг со скоростью 1 м/с.
Момент импульса	Килограмм квадрат метр на секунду	кг·м ² /с	1 кг·м ² /с - это импульсный вращающийся момент материальной точки, импульс которой, движущийся по окружности 1 м, составляет 1 кг·м/с.
Сила	Килограмм метр на секунду	Н	1 Н - неизменяющаяся за 1 секунду скорость тела массой 1 кг на 1 м/с в направлении действия силы.
Сила момента	Нютон метр	Н·м	1 Н·м - момент силы, значение которого равно 1 Н относительно точки на расстоянии 1 м на линии действия силы.
Сила импульса	Нютон секунда	Н·с	1 Н·с - импульс силы 1 Н, действующей в течение 1 секунды.
Давления	Паскаль	Па	1 Па - давление, оказываемое на поверхность площадью 1 м ² перпендикулярно направлению силы.
Коэффициент поверхност- ной плотности	Нютон на метр	Н/м	1 Н/м - поверхностное натяжение жидкости, что сила 1 Н влияет на длину контура 1 м, что ограничивает свободную поверхность жидкости.
Работа (энергия)	Джоуль	Дж	1 Дж - Работа, выполняемая при воздействии силы 1 Н в направлении силы, перемещает тело на расстояние 1 м.
Мощность	Ватт	Вт	1 Вт - Производительность машины, которая может выполнить 1 Дж работы в течение 1 секунды.
Температура Сельский	Градус Сельский	°C	В пересчете на шкалу Цельсия это равно Кельвину.
Количества теплоты	Джоуль	Дж	1 Дж - количество тепла, эквивалентное механической операции, размер которой составляет 1 Дж.
Теплоемкость	Джоуль на Кельвин	Дж/К	1 Дж/К - теплоемкость системы, что когда этой системе дается количество тепла 1 Дж, ее температура повышается до 1 К.
Удельное теплоемкость	Джоуль на килограмм Кельвин	Дж/(кг·К)	1 Дж/(кг·К) - удельная теплоемкость тела, на теплоемкость 1 Дж/К массы 1 кг
Количества заряда	Кулон	Кл	1 Кл - величина электрического заряда, прошедшего за 1 с поперечного сечения, равна 1 А.
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	В/м	1 В/м - разность потенциалов двух точек, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга вдоль линии электропередачи, что одинаковое напряжение электрического поля составляет 1 В, на заряд 1 Кл, включенный в такую область, влияет

Электрическая индукция (смещения)	Кулон на квадрат метр	Кл/м ²	1 Кл/м ² - площадь, представляет собой электрическую индукцию, в которой электрический поток индукции, равный 1 Кл, проходит через поперечное сечение 1 м ² .
Магнитная индукция	Тесла	Тл	1 Тл - площадь, представляет собой магнитную индукцию, при которой магнитный поток, равный 1 Вб, проходит через поперечное сечение 1 м ² .
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	А/м	1 А/м - напряженность магнитного поля, что магнитная индукция в этой точке составит 4π·10 ⁻⁷ Тл.
Магнитный поток	Вебер	Вб	1 Вб - магнитный поток пропускает заряд 1 Кл с поперечного сечения электрической цепи, электрическое сопротивление которой равно 1 Ом, которое поддерживается этим магнитным током.
Индуктивность	Генри	Гн	1 Гн - индуктивность проводника, что при прохождении через него тока 1 А полный магнитный поток, равен 1 Вб.
Электрическое сопротивление	Ом	Ом	1 Ω - электрическое сопротивление проводника, пропускающего ток 1 А, когда разность потенциалов на двух концах составляет 1 В.
Электрическое напряжение	Вольт	В	1 В - напряжение в потребляемой части питания 1 В электрических цепи с постоянным током 1 А.
Электрическая емкость	Фарад	Ф	1 Ф - это электрическая емкость проводника, которая увеличивается до 1 В при зарядке 1 Кл.
Удельное электрическое сопротивление	Ом·метр	Ом·м	1 Ом·м - поперечное сечение 1 м ² , удельное электрическое сопротивление проводника, которое будет иметь электрическое сопротивление 1 Ом при длине 1 м.
Частота	Герц	Гц	1 Гц - означает одно исполнение (реализацию) такого процесса за одну секунду, другими словами - одно колебание в секунду.
Световой поток	Люмен	лм	1 лм - Один люмен равен световому потоку, испускаемому точечным изотропным источником, с силой света, равной одной канделе, в телесный угол величиной в один стерадиан (1 лм = 1 кл·ср).
Световая энергия	Люмен- секунда	лм·с	1 лм·с - Характеризует способность энергии, переносимой светом, вызывать у человека зрительные ощущения.
Светимость	Кандела на квадрат метр	Кд/м ²	1 Кд/м ² - мощность света, которая распределяется свет с 1 м ² поверхности, что составляет 1 Кд.
Яркость	Люмен на квадрат метр	лм/м ²	1 лм/м ² - это яркость поверхности площадью 1 м ² , которая излучает световой поток 1 лм
Освещенность	Люкс	лк	1 лк - освещенности поверхности площадью 1 м ² при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм.

Удельное сопротивление металлов и сплавов (ρ) (20°C) и температурный коэффициент сопротивления (α)

Вещество	$\rho \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$	α, K^{-1}	Вещество	$\rho \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$	α, K^{-1}
Алюминий	2.8	0.0042	Нихром	110	0.0001
Вольфрам	5.5	0.0048	Свинец	21	0.0037
Вый	7.1	0.001	Серебро	1.6	0.004
Железо	1.7	0.0043	Сталь	12	0.006
Мель	42	0.0001			
Никель					

Электрохимические эквиваленты, мг/Кл

Алюминий (Al^{3+})	0.093	Мель	(Cu^{2+})	Серебро (Ag^{+})	1.12
Водород (H^{+})	0.0104	0.33	Хром (Cr^{3+})	0.18	
Кислород (O^{2-})	0.083	Олово (Sn^{2+})	0.62	Цинк (Zn^{2+})	
		Никель	(Ni^{2+})	0.34	
		0.30			

Работа выхода электронов, эВ

Вольфрам	4.5	Оксид бария	1.0	Цинк	4.2
Калий	2.2	Платина	5.3		
Литий	2.4	Серебро	4.3		

Показатель преломления (для видимых лучей)

Алмаз	2.4	Лед	1.31	Стекло	1.6
Вода	1.3	Сернистый углерод			
Воздух	1.00029	Этиловый Спирт	1.36		

Доли единиц измерения

Тера, Т	10^{12}	Дека, да	10	Нано, н	10^{-9}
Гига, Г	10^9	Дети, д	10^{-1}	Пико, п	10^{-12}
Мега, М	10^6	Санти, см	10^{-2}	Фемто, ф	10^{-15}
Кило, к	10^3	Милли, м	10^{-3}	Атто, а	10^{-18}
Гекто, г	10^2	Микро, мк	10^{-6}		

Постоянные

Ускорение свободного падения на поверхности Земли	$g = 9.81 \text{ м/с}^2$
Постоянная гравитации	$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Ж/К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8.31 \text{ Ж/(мол} \cdot \text{К)}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1.6613 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Число Лошмидт	$N_A = N_A / V_0 = 2.686 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$
1 моль объема газа при нормальных условиях	$V_0 = 22.414 \text{ л/мол}$
Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Постоянная Кулона	$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Число Фарадея	$F = 96500 \text{ Кл/мол}$
Удельная заряд электрона	$q/m_e = 1.7588 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Вина	$b = 2898 \text{ м} \cdot \text{К}$
Постоянная Планка	$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Ж} \cdot \text{с}$
Постоянная Ридберга	$R = 3.293 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$
Масса электрона в покое	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5.484 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса протона в покое	$m_p = 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1.00759 \text{ а.е.м.}$
Масса нейтрона в покое	$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1.00899 \text{ а.е.м.}$
Энергия электрона в покое	$W_{0,e} = 8.2 \cdot 10^{-14} \text{ Ж} = 0.512 \text{ МеВ}$
Энергия протона в покое	$W_{0,p} = 1.505 \cdot 10^{-10} \text{ Ж} = 939 \text{ МеВ}$
Энергия нейтрона в покое	$W_{0,n} = 1.508 \cdot 10^{-10} \text{ Ж} = 941 \text{ МеВ}$
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.	934 МеВ
Масса протона и нейтрона (в электронном единицы)	$m_p = 1836 \cdot m_e$ $m_n = 1838.5 \cdot m_e$

Поверхность и объем

Поверхность	Объем
$1 \text{ мм}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$	$1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3 = 10^{-6} \text{ л}$
$1 \text{ см}^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$	$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3 = 10^{-3} \text{ л}$
$1 \text{ дм}^2 = 10^{-2} \text{ м}^2$	$1 \text{ дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3 = 1 \text{ л}$
$1 \text{ га} (1 \text{ гектар} = 100 \text{ соток}) = 10000 \text{ м}^2$	$1 \text{ км}^3 = 10^9 \text{ м}^3 = 10^{12} \text{ л}$

Молярная масса некоторых веществ [кг/моль]

Атом кислорода (O)	$16 \cdot 10^{-3}$	Пропан (C ₃ H ₈)	$44 \cdot 10^{-3}$
Молекула кислорода (O ₂)	$32 \cdot 10^{-3}$	Гелий (He)	$4 \cdot 10^{-3}$
Атом водорода (H)	$1 \cdot 10^{-3}$	Железо (Fe)	$56 \cdot 10^{-3}$
Молекула водорода (H ₂)	$2 \cdot 10^{-3}$	Алюминий (Al)	$27 \cdot 10^{-3}$
Атом азота (N)	$14 \cdot 10^{-3}$	Цинк (Zn)	$65 \cdot 10^{-3}$
Молекула азота (N ₂)	$28 \cdot 10^{-3}$	Олово (Sn)	$119 \cdot 10^{-3}$
Атом хлора (Cl)	$35,5 \cdot 10^{-3}$	Свинец (Pb)	$207 \cdot 10^{-3}$
Молекула хлора (Cl ₂)	$70 \cdot 10^{-3}$	Ртуть (Hg)	$201 \cdot 10^{-3}$
Углекислый газ (CO ₂)	$44 \cdot 10^{-3}$	Медь (Cu)	$63,6 \cdot 10^{-3}$
Аргон (Ar)	$40 \cdot 10^{-3}$	Литий (Li)	$7 \cdot 10^{-3}$
Углекислый газ (CO)	$28 \cdot 10^{-3}$	Золото (Au)	$200 \cdot 10^{-3}$
Вода (H ₂ O)	$18 \cdot 10^{-3}$	Серебро (Ag)	$108 \cdot 10^{-3}$
Метан (CH ₄)	$16 \cdot 10^{-3}$	Уран (U)	$238 \cdot 10^{-3}$
Этан (C ₂ H ₆)	$30 \cdot 10^{-3}$	Воздух	$29 \cdot 10^{-3}$

Некоторые величины не входящие в СИ

1 м/с = 3,6 км/ч	1 Ж = 1/4,2 кал.	1 сутка = 86400 сек.
1 км/час = 1/3,6 м/с	1 кВт·час = 3,6 МДж	1 мм, рт.ст.б = 133,32 Па
1 лоша. сила = 736 Вт	1 В = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Ж	1 астр. ед.лн. = $1,5 \cdot 10^8$ м
1 кВт = 1,36 лоша. сила	1 ДЖ = $6,25 \cdot 10^{18}$ эВ	1 световой год = $9,5 \cdot 10^{15}$ м
1 кал. = 4,2 Ж	1 т/см ³ = 1000 кг/м ³	1 Парсек = $3,1 \cdot 10^{16}$ м

Функции измерительных приборов

Психрометр---относительная влажность	Амперметр---сила тока
Гигрометр---точка роса	Вольтметр---напряжения
Болометр---температура металлов	Гальванометр---сила тока и напряжения
Термометр---температура	Электрометр---зарядов и составляет разность потенциалов.
Ареометр---плотность, жидкости	Электроскоп---количества зарядов
Анероид барометр---атмосферное давление	Тахометр---вращательный момент
Ртутная барометр--- атмосферное давление	Статометр--- коэффициент
Манометр--- давление газа в сосуде	поверхностного натяжения
Динамометр---сила	Вязкозиметр---вязкость
Алтиметр---высота (в самолётах)	

D.I.Mendeleevning elementlar davriy sistemasi										VII	VIII	Nisbiy atom massasi	Elementning belgilanishi			
										(H)						
1	1											9	10	12,01 6 C УГЛЕРОД	Atom nomeri	
2	2											19,00	20,18			
3	3											35,45	39,90			
4	4											54,94	58,93	63,55	68,94	72,64
5	5											79,90	83,80	88,91	92,91	95,94
6	6											127,60	126,91	158,91	157,25	174,10
7	7											127,60	126,91	158,91	157,25	174,10
8	8											127,60	126,91	158,91	157,25	174,10
9	9											127,60	126,91	158,91	157,25	174,10
10	10											127,60	126,91	158,91	157,25	174,10
* Lantanaoidlar																
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
Ce 140,12	Pr 140,91	Nd 144,24	Pm [145]	Sm 150,40	Eu 151,96	Gd 157,25	Tb 158,93	Dy 162,50	Ho 164,93	Er 167,26	Tm 168,93	Yb 173,04	Lu 174,97			
** Aktinaoidlar																
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Th 232,04	Pa 231,04	U 238,03	Np 237,05	Pu 244	Am 243	Cm 247	Bk 247	Cf 251	Es 254	Fm 257	Md 258	(No) 255	(Lr) 256			
ТОРИЙ	ПРОТАКТИЙ	УРАН	НЕПУНИЙ	ПЛУТОНИЙ	АМЕРИЦИЙ	КУРИЙ	БЕРКЛИЙ	КАЛИФОРНИЙ	ЭЙНШТЕЙНИЙ	ФЕРМИЙ	МЕНДЕЛЕВИЙ	НОБЕЛИЙ	ЛОУРЕНСИЙ			

Тригонометрические тождества

1. $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$	4. $\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1$
2. $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$	5. $1 + \operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$
3. $\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}$	6. $1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha = \frac{1}{\sin^2 \alpha}$

Формулы сложения и вычитания

1. $\begin{cases} \sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ \sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta \end{cases}$	2. $\begin{cases} \cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ \cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta \end{cases}$
3. $\begin{cases} \operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \\ \operatorname{tg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \end{cases}$	4. $\begin{cases} \operatorname{ctg}(\alpha + \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta - 1}{\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta} \\ \operatorname{ctg}(\alpha - \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta + 1}{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta} \end{cases}$

Формулы двойного угла

1. $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$	2. $\cos 2\alpha = \begin{cases} \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \\ 2 \cos^2 \alpha - 1 \\ 1 - 2 \sin^2 \alpha \end{cases}$
3. $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$	4. $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$

Формулы сложения и вычитания синусов и косинусов

1. $\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$	3. $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$
2. $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$	4. $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$

Формулы умножения синусов и косинусов

1. $\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$
2. $\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)]$
3. $\sin \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} \cdot [\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$

Таблица производных по математике

Простые функции	Сложные функции
$(kx + b)' = k$	$(ku + b)' = k \cdot u'$
$(x^n)' = n \cdot x^{n-1}$	$(u^n)' = n \cdot u^{n-1} \cdot u'$
$\left(\frac{1}{x}\right)' = -\frac{1}{x^2}$	$\left(\frac{1}{u}\right)' = -\frac{1}{u^2} \cdot u'$
$(\sin x)' = \cos x$	$(\sin u)' = \cos u \cdot u'$
$(\cos x)' = -\sin x$	$(\cos u)' = -\sin u \cdot u'$
$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$	$(\operatorname{tg} u)' = \frac{1}{\cos^2 u} \cdot u'$
$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$	$(\operatorname{ctg} u)' = -\frac{1}{\sin^2 u} \cdot u'$
$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\arcsin u)' = \frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$
$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$(\arccos u)' = -\frac{1}{\sqrt{1-u^2}} \cdot u'$
$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}$	$(\operatorname{arctg} u)' = \frac{1}{1+u^2} \cdot u'$
$(\operatorname{arccctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}$	$(\operatorname{arccctg} u)' = -\frac{1}{1+u^2} \cdot u'$
$(e^x)' = e^x$	$(e^u)' = e^u \cdot u'$
$(a^x)' = a^x \cdot \ln a$	$(a^u)' = a^u \cdot \ln a \cdot u'$
$(\ln x)' = \frac{1}{x}$	$(\ln u)' = \frac{1}{u} \cdot u'$
$(\log_a x)' = \frac{1}{x \cdot \ln a}$	$(\log_a u)' = \frac{1}{u \cdot \ln a} \cdot u'$

Таблица интегралов по математике

Простые функции	Сложные функции
$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$	$\int (kx+b)^n dx = \frac{1}{k} \cdot \frac{(kx+b)^{n+1}}{n+1} + C$
$\int \frac{dx}{\sqrt{x}} = 2\sqrt{x} + C$	$\int \frac{dx}{\sqrt{kx+b}} = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{kx+b} + C$
$\int \sin x dx = -\cos x + C$	$\int \sin(kx+b) dx = -\frac{1}{k} \cdot \cos(kx+b) + C$
$\int \cos x dx = \sin x + C$	$\int \cos(kx+b) dx = \frac{1}{k} \cdot \sin(kx+b) + C$
$\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$	$\int \frac{dx}{\cos^2(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \operatorname{tg}(kx+b) + C$
$\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C$	$\int \frac{dx}{\sin^2(kx+b)} = -\frac{1}{k} \cdot \operatorname{ctg}(kx+b) + C$
$\int \operatorname{tg} x dx = -\ln \cos x + C$	$\int \operatorname{tg}(kx+b) dx = -\frac{1}{k} \cdot \ln \cos(kx+b) + C$
$\int \operatorname{ctg} x dx = \ln \sin x + C$	$\int \operatorname{ctg}(kx+b) dx = \frac{1}{k} \cdot \ln \sin(kx+b) + C$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x + C$	$\int \frac{dx}{kx+b} = \frac{1}{k} \cdot \ln kx+b + C$
$\int e^x dx = e^x + C$	$\int e^{kx+b} dx = \frac{1}{k} \cdot e^{kx+b} + C$
$\int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin x + C$	$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2-x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C$
$\int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C$	$\int \frac{dx}{a^2+x^2} = \frac{1}{a} \cdot \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C$
$\int \frac{dx}{\sin x} = \ln \left \operatorname{tg} \frac{x}{2} \right + C$	$\int \frac{dx}{\sin(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left \operatorname{tg} \frac{kx+b}{2} \right + C$
$\int \frac{dx}{\cos x} = \ln \left \operatorname{tg} \left(\frac{x}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right + C$	$\int \frac{dx}{\cos(kx+b)} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left \operatorname{tg} \left(\frac{kx+b}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right + C$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. М.Х.О'лмасова. Механика ва молекуляр физика, академик litseyлар uchun o'quv qo'llanma, 1-kitob. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2004, 433 b.
2. M.X.O'lmassova. Elektrodinamika asoslari, tebranishlar va to'lqinlar, akademik litseylar uchun o'quv qo'llanma, 2-kitob. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2004, 360 b.
3. M.X.O'lmassova. Optika, atom va yadro fizikasi, akademik litseylar uchun o'quv qo'llanma, 3-kitob. "Cho'пон" nashriyoti. Toshkent.: 2010, 384 b.
4. Axmedov Sh. B., Dusmurotov M.B. "Fizika (1-qism)", akademik litsey o'quvchilari uchun darslik. Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2019, 435-b.
5. Axmedov Sh. B., Dusmurotov M. B. "Fizika (2-qism)", akademik litsey o'quvchilari uchun darslik. Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2019, 470-b.
6. A.S.Nu'monxo'jayev, R.Y.Komilova, K.A.Tursummetov, A.X.Yunusov, B.Normatov, A.M.Xudoyberganov. Fizika, ma'ruzalar matni, akademik litseylar uchun qo'llanma, 2-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2003, 415 b.
7. A.S.Nu'monxo'jayev, K.A.Tursummetov, A.M.Xudoyberganov, M.A.Fatxov, B.Normatov, N.A.Nurmatov. Fizika, ma'ruzalar matni, akademik litseylar uchun qo'llanma sifatida tavsiya etilgan, 3-qism. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2001, 352 b.
8. N.M.Shaxmayev, S.N.Shaxmayev, D.Sh.Shodiyev. Fizika, 10-sinf. O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1993, 238b.
9. G.YA.Myakishov, I.B.Buxovseva. Fizika, uchebnik dlya 10 klassa sredney shkoly. -M.: Prosveshchenie, 1990.-223 s.
10. G.Ya.Myakishov, B.B.Buxovseva. Fizika, 11-sinf. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1996, 304 b.
11. M.Muhidinov, Sh.Ahmedov, B.Qulimurotov. Fizikadan testlar va ularning yechimi, oliy o'quv yurtlariga kiruvchi abituriyentlar uchun qo'llanma, 1-qism. "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 2016, 423 b.
12. M.B.Dusmurotov. Fizika (oliy ta'lim massalari) kiruvchilar uchun qo'llanma. Nizomiy nomidagi TDPPI bosmaxobasi. Toshkent.: 2016, 521 b.
13. A.Qosimov, X.Jo'raqulov, A.Safarov. Fizika kursi, mexanika, 1-qism. "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 1994, 320 b.
14. A.P.Rimkevich. Fizikadan masalalar to'plami. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1993.
15. K.A.Tursummetov, A.A.Uzoqov, I.Bo'rtiboyev, A.M.Xudoyberganov. Fizikadan masalalar to'plami. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 2001, 256 b.
16. O'Q.Nazarov, X.Z.Ikromova, K.A.Tursummetov. Umumiy fizika kursi (Mexanika va molekulyar fizika). "O'zbekiston" nashriyoti. Toshkent.: 1992, 280b.
17. Q.P.Egamov, O'Egamov. Fizika, darslik. "Aloqachi" nashriyoti. Toshkent.: 2013, 507b.

Дополнительная литература

1. Сборник задач по физике. Часть I. Ш. Б. Ахмедов, С. Г. Талжи-Аглаева, Ш. А. Низамутдинова, Н. З. Кодиров. Toshkent.: 2019.
2. Сборник задач по физике. Часть II. Ш. Б. Ахмедов, С. Г. Талжи-Аглаева, Ш. А. Низамутдинова, Н. З. Кодиров. Toshkent.: 2019.
3. Ноғиёв В.И. Физика. 2008. "Fan" nashriyoti.
4. Усманов М. Физикадан масалалар то'рламини (Oliy o'quv yurtlariga kitovchilar uchun). Navro'z nashriyoti. Toshkent.: 2018. 558-b.
5. Uzoqov A. Fizikadan testlar to'rlarini (Oliy o'quv yurtlariga kitovchilar uchun). "Yangi Asr" nashriyoti. Toshkent.: 2017. 311-b.
6. Abitxent (1-8). "Spectum media group". Toshkent.: 2018.311-b.
7. Shorigov R. va boshqalar. O'g'a maxsus kasb-hunar ta'limi masalasalarida laboratoriya ishlari. T. "Talqin" 2002
8. Suyatov Q. T. va boshqalar. Mexanika va molekulyar fizika - T.: "O'qituvchi", 2002.
9. Xusanov A. X. va boshqalar. Elektrodinamika. Elektromagnit tebranishlar. - T.: "O'qituvchi", 2003.
10. Suyatov Q.T. va boshqalar. Fizikadan laboratoriya va namoyishi tajriba ishlari. -T.: "Talqin", 2002.
11. Suyatov Q. T va boshqalar. Fizika. I kitob. Mexanika. - T.: "Yangi nashr", 2009.
12. Suyatov Q. T., Usmonov Sh., Usatov J. Fizika. II kitob. Molekulyar fizika. - T. "Yangi nashr", 2010.
13. Физика часть I. «Механика. Молекулярная физика, термодинамика» Т. М. Олпачко, К. А. Турмунов.
14. Физика часть II. «Электродинамика. Оптика. Атомная физика» Т. М. Олпачко, К. А. Турмунов.
15. Juraev U.B., Umatov A. M., Qo'ubodov X. R. Fizika. I-qism. SamDU talifiy-nashriyot. 2020.
16. Juraev U. B., Umatov A. M., Qo'ubodov X. R. Fizika. II-qism. SamDU talifiy-nashriyot. 2020.
17. Turdiyev N. Sh. va boshqalar. Fizika 10-sinf darsligi. "Niso poligrafi" Toshkent: 2017.
18. Turdiyev N. Sh. va boshqalar. Fizika 11-sinf darsligi. "Niso poligrafi" Toshkent: 2018.
19. A. A. Korpov, A. A. Pasko, A. A. Varanov. Maple v inzhenernykh raschetax. Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. - Tambov.: 2003
20. Prigunova, R. Turgunbaev, G. Eshchanova, Sh. Ismailov. Maple da matematik masalalarini yechish metodlari (metodik qo'llanma). Nizomiy nomidagi Toshkent pedagogika Universiteti. Toshkent.:2009.

21. A.V. Pogorelov. Geometriya. 7-11 sinflar. "O'qituvchi" nashriyoti. Toshkent.: 1992.
22. D.Djankoli. Fizika, 1-chast. Izdatelstvo "Mir". Moskva.: 1989. 656 s.
23. D.Djankoli. Fizika, 2-chast. Izdatelstvo "Mir". Moskva.: 1989. 673s.
24. A.N.Remizov, A.Ya.Rolarenko. Kurs fiziki. OOO «Drofa». Moskva.: 2002, 720 s.
25. Ronald J. Hershberger, James J. Reynolds. Calculus with Applications, the 2nd edition. Lexington, Massachusetts.: Copyright © 1993 by D.C. Heath and Company.
26. Halliday & Resnick. Principles of physics. Cleveland state university. Cover image from © M.Darush/Shutterstock, 9th edition. 2011. 1248 pages.

Электронные ресурсы

1. 10 класс. Физика. Механика. Г.Я. Мякишев.
2. 11 класс. Физика. Оптика квантовая физика. Г. Я. Мякишев.
3. 10 класс. Физика. В.А. Касьянов.
4. 11 класс. Физика. В.А. Касьянов.
5. Nigmatov J. va boshqalar. Fizikadan laboratoriya ishlari. T.: "O'qituvchi", 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Оптика	5
ГЛАВА I. ОСНОВЫ ФОТОМЕТРИИ	6
§ 1. Свет и его источники. Световой поток и сила света	6
§ 2. Законы фотометрии	15
Лабораторные работы по главе I	23
Тесты по главе I	24
Задания к главе I	26
ГЛАВА II. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА	29
§ 3. Законы геометрической оптики. Закон отражения света. Плоское зеркало и создание изображения в нем	29
§ 4. Понятие о сферических зеркалах. Создание изображения в сферических зеркалах. Формула зеркала. Увеличение зеркала	41
§ 5. Закон преломления света. Полное внутреннее отражение	53
§ 6. Путь света в различных прозрачных телах	60
§ 7. Линза и ее виды. Путь света в линзе. Создание изображения в линзе. Формула тонкой линзы. Результаты, полученные из формулы линзы	75
§ 8. Оптическая сила. Зависимость оптической силы линзы от вида материала и геометрических размеров	86
§ 9. Глаз-оптический прибор. Оптические свойства глаза	92
§ 10. Оптические приборы	99
Лабораторные работы по главе II	109
Тесты по главе II	112
Задания к главе II	115
ГЛАВА III. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА	119
§ 11. Скорость света и различные исторические методы ее измерения	119
§ 12. Дисперсия света	125
§ 13. Интерференция света. Вычисление интерференционной картины	133
§ 14. Дифракция света. Принцип Фраунгофера-Гюйгенса. Вычисление интерференционных картин возникающих от дифракции	150
§ 15. Поляризация света. Частично и полностью поляризованный свет. Законы Брюстера и Малюса	158
Лабораторные работы по главе III	166
Тесты по главе III	172
Задания к главе III	177
ГЛАВА IV. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА	179
§ 16. Виллы излучения. Законы излучения	179
§ 17. Законы фотоэффекта и теории фотоэффекта	192
§ 18. Фотон и его характеристики. Объяснение эффекта Комптона и давления света в квантовой теории	200
§ 19. Шкала электромагнитных волн	209
Лабораторные работы по главе IV	217
Тесты по главе IV	223

Задания к главе IV	226
ГЛАВА V. СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ	229
§ 20. Проверка гипотезы эфира. Постулаты теории относительности. Преобразование Лоренца	229
§ 21. Результаты из преобразования Лоренца. Относительность односторонности, временного интервала и длины	236
§ 22. Сложение релятивистских скоростей. Релятивистская относительная скорость. Релятивистский эффект Доплера	249
§ 23. Относительность массы. Основное уравнение релятивистской динамики. Связь между массой, энергией и импульсом. Релятивистская кинетическая энергия	255
Тесты по главе V	265
Задания к главе V	267
ФУЗИКА АТОМА, ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	271
ГЛАВА VI. АТОМНАЯ ФИЗИКА	272
§ 24. Развитие классических представлений об атоме	272
§ 25. Постулаты Бора и результаты вытекающие из них	283
§ 26. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Волна де Бройля	295
§ 27. Понятие квантовых чисел и электронных облаков атомов и молекул	304
§ 28. Задача о усилении света. Понятие о лазерах	318
Тесты по главе VI	323
Задания к главе VI	326
ГЛАВА VII. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА	329
§ 29. Радиоактивность. Распад и ее виды. Правило сдвига. Закон радиоактивного распада. Радиационная активность и дозировка.	329
§ 30. Общая характеристика атомных ядер	341
§ 31. Энергия связи, удельная энергия связи и дефект массы. Модели, описывающие ядро	348
§ 32. Ядерные реакции	353
Тесты по главе VII	362
Задания к главе VII	365
ГЛАВА VIII. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ	368
§ 33. Регистративы элементарных частиц. Первые обнаруженные частицы	368
§ 34. Величины, характеризующие элементарные частицы. Аннигиляция. Классификация элементарных частиц	374
§ 35. Единная физическая картина Вселенной	380
Лабораторные работы по главе VIII	384
Ответы на тесты и задания	388
ПРИЛОЖЕНИЯ	389
Список использованной литературы	401

М.Б. Дусмуратов, Ш.Б. Ахмедов, Л.Ю. Тураева.

ФИЗИКА

(Оптика и атомная физика)
(Часть III)

Редактор: Х. Тахиров
Художественный редактор: Т. Рахматуллаев
Компьютерная верстка: А. Мухаммадиев

Лицензия издательства № 2244. 25.08.2020.
Разрешение на печать 03.02.2023.
Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.
«Times New Roman» гарнитура. Уч. изд. л. 25.
Тираж 100. Заказ № 14.

Отпечатано в типографии «YANGI SHIRSHU BOOK».
Адрес: о. Ташкент г. Чирчиқ, ул. Саодат.