

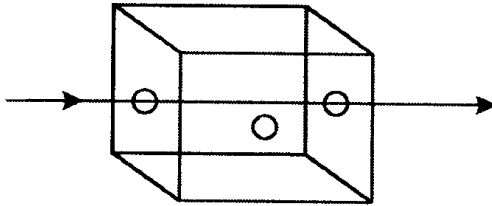
Глава 5. Световые волны

Упражнение 5

Задание № 1

Пучок света входит в коробку через отверстие в боковой стенке и выходит через отверстие в противоположной стенке. Увидите ли вы световой пучок, заглянув в коробку через отверстие в передней стенке, если воздух в коробке чист?

Ответ:

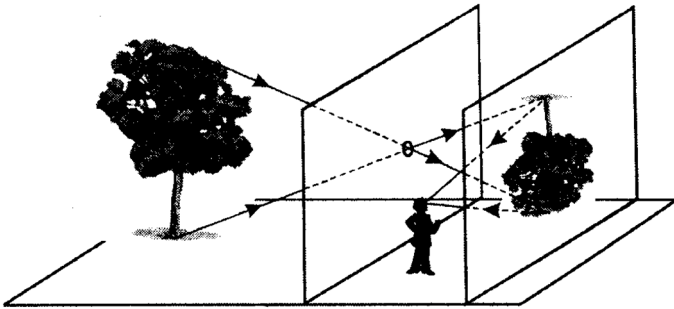


Через отверстие в передней стенке световой пучок виден не будет, так как в однородной среде свет распространяется прямолинейно. Для того, чтобы увидеть его через это отверстие, необходимо прохождение пучка там. Также увидеть пучок можно, поместив в коробку пыли и встряхнув ее. Тогда свет отразится от пылинок, и часть пучка попадет в отверстие.

Задание № 2

«Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пестрый ландшафт из крыши, деревьев и развешанного на дворе платья, все только в обращенном виде» (Н.В. Гоголь. «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните происхождение этого явления.

Ответ:

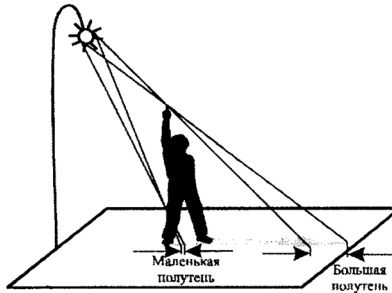


Данное явление объясняется геометрическим построением, так как свет, отраженный от противоположной стены и попавший в глаз человека, входит в сарай через маленькую дырочку в стене и распространяется в воздухе прямолинейно.

Задание № 3

Почему тень ног человека на земле от фонаря резко очерчена, а тень головы более расплывчата?

Ответ:



Фонарь не является точечным источником. Это создает расплывчатость тени, а лучи, вышедшие из разных точек фонаря, попадают в разные точки на земле. Если провести два луча из разных точек фонаря, касающихся поднятой руки в одной точке, то видно, что далее эти лучи расходятся пропорционально расстоянию от точки их пересечения. Так как расстояние от ног до земли меньше, чем от головы до земли, то и на земле тень от головы больше.

Задание № 4

На рисунке 113 представлена схема опыта Майкельсона по определению скорости света. С какой частотой должна вращаться восьмиугольная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если световой луч проходит расстояние, равное приблизительно 71 км?

Ответ:

Дано:

$$L = 71 \text{ км} = 7,1 \cdot 10^4 \text{ м}$$

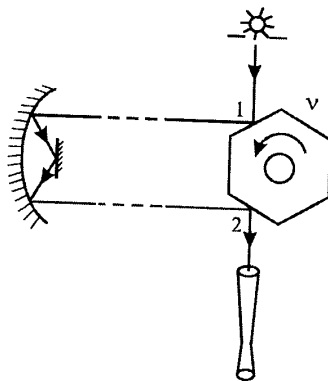
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\kappa = 8$$

$$\gamma - ?$$

Решение:

Для того, чтобы луч был виден в трубу, необходимо его двойное отражение от призмы под прямым углом (см. рисунок).



Между двумя отражениями луча проходит время $t = \frac{L}{c}$. За

это время призма должна повернуться на угол $\frac{2\pi n}{\kappa}$, где n – натуральное число. Следовательно, частота вращения призмы равна:

$$\gamma = \frac{n}{\kappa t} = \frac{c}{\kappa L} n, \text{ где } n = 1, 2, 3 \dots$$

$$\gamma = \frac{3 \cdot 10^8}{8 \cdot 7,1 \cdot 10^4} n \text{ об/с} \approx 528 n \text{ об/с},$$

n – натуральное число.

Задание № 5

Пучок параллельных лучей идет из проекционного фонаря в горизонтальном направлении. Под каким углом к горизонтальной плоскости следует расположить плоское зеркало, чтобы после отражения пучок шел вертикально? Останется ли пучок параллельным?

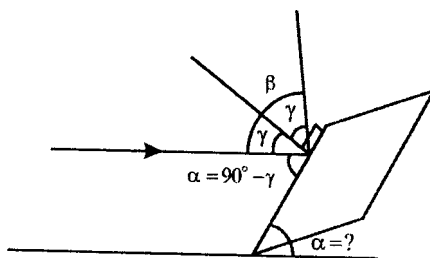
Ответ:

Дано:

$$\beta = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$$

$\alpha = ?$

Решение:



Угол падения луча γ равен углу отражения. Следовательно, угол поворота луча $\beta = 2\gamma$.

Из геометрических построений очевидно, что

$$\alpha = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - \frac{\beta}{2},$$

$$\alpha = 90^\circ - \frac{90^\circ}{2} = 45^\circ.$$

Задание № 6

Небольшой предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, образующими друг с другом угол $\alpha = 30^\circ$. Предмет находится на расстоянии $l = 10$ см от линии пересечения зеркал и на одинаковом расстоянии от обоих зеркал. Каково расстояние между мнимыми изображениями этого предмета в зеркалах?

Ответ:

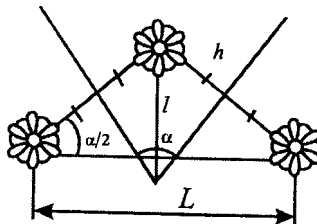
Дано:

$$\alpha = 30^\circ$$

$$l = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

L - ?

Решение:



Расстояние от предмета до любого зеркала равно:

$$h = l \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Следовательно, расстояние от предмета до его мнимого изображения равно:

$$2h = 2l \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Расстояние между мнимыми изображениями равно:

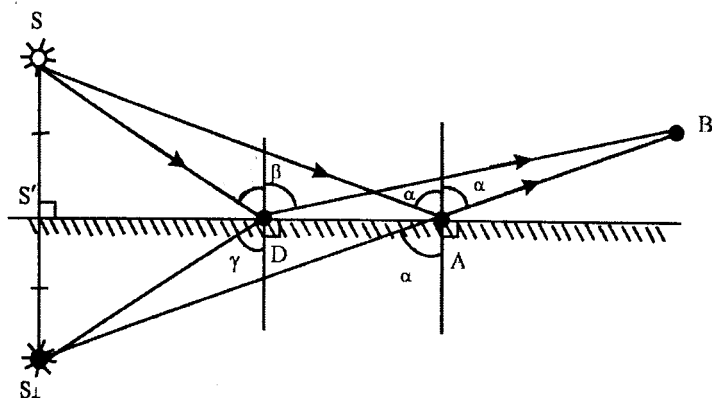
$$L = 2 \cdot 2h \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot 2l \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 2l \sin \alpha.$$

$$L = 2 \cdot 0,1 \text{ м} \cdot \sin 30^\circ = 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}.$$

Задание № 7

Луч от точечного источника S падает на плоское зеркало в точке A и, отражаясь, проходит через точку B (рис. 114). Докажите, что если бы луч от того же источника прошел через точку B , отразившись от зеркала в точке D , соседней с A , то: 1) не был бы выполнен закон отражения; 2) путь SDB был бы пройден светом за большее время, чем путь SAB .

Ответ:



Пусть S' – проекция источника S на поверхность зеркала, S_{\perp} – мнимое изображение источника S . Тогда:

$$SS' = S_{\perp}S',$$

$$SA = S_{\perp}A,$$

$$SD = S_{\perp}D.$$

Пусть α – угол падения луча SA , равный углу его отражения; γ – угол падения луча SD , β – угол его отражения.

Сумма углов треугольника $S_{\perp}DA$ равна 180° .

$$\angle S_{\perp}DA = 90^{\circ} + \gamma, \angle DAS_{\perp} = 90^{\circ} - \alpha,$$

$$\angle S_{\perp}DA + \angle DAS_{\perp} + \angle DS_{\perp}A = 180^{\circ},$$

$$90^{\circ} + \gamma = 90^{\circ} - \alpha + \angle DS_{\perp}A = 180^{\circ},$$

$$\gamma = \alpha - \angle DS_{\perp}A < \alpha$$

Сумма углов $\triangle BDA$ равна 180° .

$$90^\circ - \beta + 90^\circ + \alpha + \angle ABD = 180^\circ,$$

$$\beta = \alpha - \angle ABD > \alpha.$$

Следовательно, $\gamma < \alpha < \beta$. Закон отражения не выполнен.

Рассмотрим $\triangle S_{\perp}DB$.

Поскольку сумма длин двух сторон треугольника всегда больше длины третьей, то:

$$S_{\perp}D + DB > S_{\perp}B = S_{\perp}A + AB.$$

Поскольку $S_{\perp}D = SD$, $S_{\perp}A = SA$, $SD + DB > SA + AB$.

Путь SDB больше пути SAB , поэтому он будет пройден светом за большее время.

Задание № 8

Какой высоты должно быть плоское зеркало, повешенное вертикально, чтобы человек высотой H видел себя в нем во весь рост?

Ответ:

Дано:

H

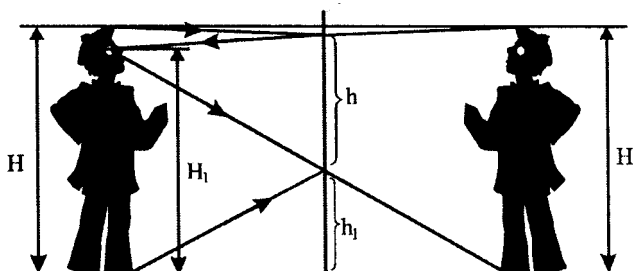
H_1

$h - ?$

$h_1 - ?$

Решение:

Возьмем H – высота человека, H_1 – высота уровня глаз.



Если бы любой луч, исходящий от любой точке на теле человека, отраженный на зеркале, попал бы человеку в глаза, то он бы смог увидеть себя в зеркале полностью.

Возьмем мнимое изображение в зеркале. Не выше, чем в точке пересечения луча от ног мнимого изображения в глаза человека, и вертикальной стены, на которой висит зеркало, должна располагаться нижняя точка зеркала.

Из равенства расстояний до зеркала от человека и его мнимого изображения следует, что:

$$h_1 = \frac{H_1}{2}, \quad ah = \frac{H}{2},$$

значит высота зеркала должна быть равна как минимум половине роста человека, а его нижняя точка расположена на половине расстояния от глаз до ног.

На величину меньшей роста человека высоте находится верхняя точка зеркала. Эта величина равна:

$$H - (h + h_1) = H - \frac{H + H_1}{2} = \frac{H - H_1}{2}.$$

Она равна половине расстояния от глаз до макушки.

Задание № 9

Вычислите показатель преломления воды относительно алмаза и сероуглерода относительно льда.

Ответ:

Дано:

$$n_1 = 2,42$$

$$n_1 = 2,42$$

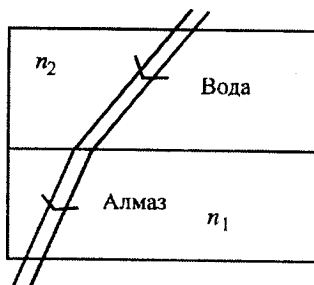
$$n_1 = 2,42$$

$$n_1 = 2,42$$

$$n_{1-2} - ?$$

$$n_{4-3} - ?$$

Решение:



Показатель преломления воды относительно алмаза равен отношению скорости света в алмазе v_1 к скорости света в воде v_2 .

$$n = \frac{v_1}{v_2}, \quad v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2};$$

$$n_{1-2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{2,42} \approx 0,55.$$

Показатель преломления сероуглерода относительно льда вычисляется аналогично:

$$n_{4-3} = \frac{n_4}{n_3} = \frac{1,63}{1,31} \approx 1,24.$$

Задание № 10

Угол падения параллельных лучей на плоскопараллельную пластину равен 60° . Найдите расстояние между точками, в которых из пластины выходят параллельные лучи, если расстояние между лучами, прошедшими сквозь пластину. Равно $0,7$ см.

Ответ:

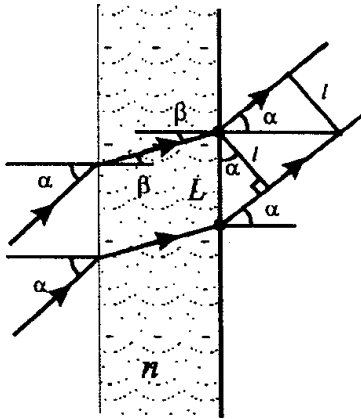
Дано:

$$l = 0,7 \text{ см}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$L - ?$

Решение:



Значение величины угла β , который составляют между собой нормаль к пластике и направление распространения луча в ней, определяется законом преломления света:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n, \text{ где } n - \text{показатель преломления материала}$$

пластины.

Луч выходит из пластины под углом γ таким образом, что:

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

Следовательно, $\sin\alpha = \sin\gamma$, $\gamma = \alpha$. Лучи выходят из пластины под углом α , поэтому:

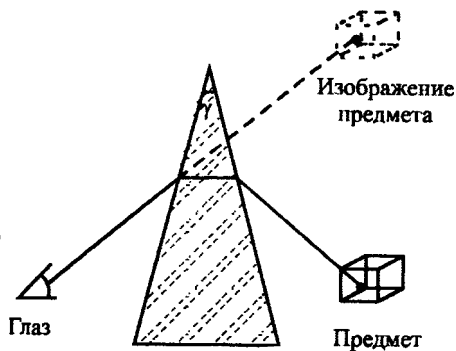
$$L = \frac{1}{\cos\alpha},$$

$$L = \frac{0,7}{\cos 60^\circ} \text{ см} = 2 \cdot 0,7 \text{ см} = 1,4 \text{ см}.$$

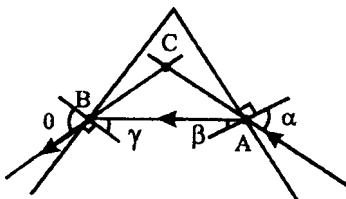
Задание № 11

Если рассматривать какой-либо предмет через треугольную призму, то изображение кажется смещенным. В какую сторону?

Ответ:



В зависимости от угла падения луча, показателя преломления призмы и ее преломляющего луча, входящий луч поворачивает на некоторый угол. Вдобавок луч поворачивает к основанию призмы. Значит, изображение смещается в сторону вершины преломляющегося угла призмы.



Замечание: Так как показатель преломления вещества призмы всегда больше 1 ($n > 1$), то луч поворачивает всегда в сторону основания.

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \text{ и } \beta < \alpha \text{ (} \alpha \text{ – угол падения на лицевую часть,}$$

β – угол к лицевой грани внутри).

Следовательно, луч повернул в сторону основания.

Аналогично:

$$\sin \theta = n \sin \gamma, \text{ т. е. } \theta > \gamma \text{ (} \gamma \text{ – угол падения на заднюю грань,}$$

θ – угол выхода луча из призмы).

Луч снова повернул в сторону основания.

Задание № 12

Луч света, идущий из толщи воды, претерпевает полное отражение на ее поверхности. Выйдет ли луч в воздух, если на поверхность воды налить слой кедрового масла?

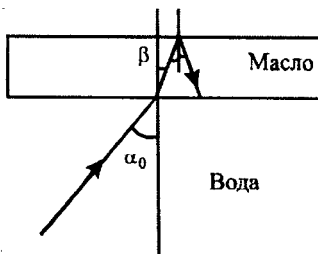
Ответ:

Дано:

$$N_e = 1,33$$

$$N_m = 1,52$$

Решение:



Угол полного отражения воды определяется соотношением:

$$\sin \alpha_{0в} = \frac{1}{n_в},$$

а угол полного отражения кедрового масла:

$$\sin \alpha_{0м} = \frac{1}{n_м}$$

Пусть луч, идущий из толщи воды, падет на границу раздела вода – масло под углом $\alpha > \alpha_{0в}$, то есть полностью отражается в случае отсутствия масла. Тогда в масле, согласно закону преломления света, он идет под углом β таким образом, что:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_в}{n_м},$$

$$\sin \beta = \frac{n_в}{n_м} \sin \alpha.$$

Поскольку $\alpha > \alpha_{0в}$, то $\sin \alpha > \frac{1}{n_в}$. Следовательно,

$$\sin \beta > \frac{1}{n_м} \text{ и } \beta > \alpha_{0м}.$$

Значит, луч выходит на границу воздух – масло под углом, большим угла полного отражения масла. Следовательно, луч в воздух не выйдет.

Задание № 13

Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч проходит сквозь призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины (рис. 115). Каково наибольшее допустимое значение показателя преломления n вещества призмы?

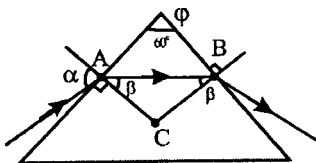
Ответ:

Дано:

$$\varphi = 60^\circ$$

n_{\max} - ?

Решение:



Угол между нормальями к сторонам равностороннего треугольника равен 120° . Луч в призме идет параллельно основанию, следовательно, угол преломления луча β на первой грани призмы равен углу падения луча на вторую грань призмы.

Рассмотрим $\triangle ABC$, где A – точка падения луча на призму, B – точка выхода луча из призмы, C – точка пересечения нормалей к граням, проведенным из точек A и B . Сумма углов $\triangle ABC$ равна:

$$\beta + \beta + 120^\circ = 180^\circ, \beta = 30^\circ.$$

Угол β должен быть больше предельного угла полного отражения α_0 ; где $\alpha_0 = \frac{1}{n}$. Следовательно,

$$\frac{1}{n} < \sin \beta \text{ или } n > \frac{1}{\sin \beta} = n_{\max},$$

$$n_{\max} = \frac{1}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin 30^\circ} = 2.$$

Задание № 14

Изобразите ход лучей через треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный треугольник. Лучи падают на призму, как показано на рисунке 116, а, б. Останется ли ход лучей таким же, если призму погрузить в воду?

Ответ:

Дано:

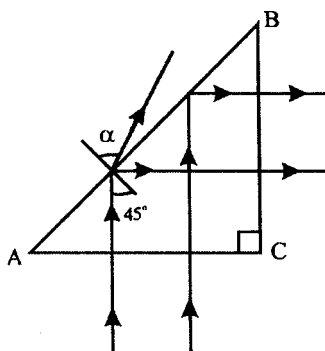
$$n_{cm1} = 1,47$$

$$n_{cm2} = 2,04$$

$$n_{H_2O} = 1,33$$

$$n_{возд} = 1,0$$

Решение:



Преломление луча на границе двух сред определяется относительным показателем преломления n , равным отношению показателей преломления сред.

Из данных таблицы 2 § 43 учебника известно, что показатель преломления стекла зависит от его сорта и находится в некотором интервале от n_{cm1} до n_{cm2} . Так как показатель преломления воздуха равен $n_{возд} = 1$, то относительный показатель преломления на границе воздух – стекло находится в интервале от n_{cm1} до n_{cm2} . Относительный показатель преломления на границе вода – стекло находится в интервале от:

$$\frac{n_{cm1}}{n_{H_2O}} = \frac{1,47}{1,33} = 1,1 \quad \text{до} \quad \frac{n_{cm2}}{n_{H_2O}} = \frac{2,04}{1,33} = 1,53 .$$

а) Введем обозначения углов призмы ABC как показано на рисунке:

$$\angle C = 90^\circ, \angle A = \angle B = 45^\circ.$$

Луч падает на грань AC под нулевым углом. При этом часть луча отражается, а часть проходит через грань AC без преломления. Затем луч падает на грань AB под углом 45° к ее нормали. При этом часть луча отражается от грани AB и падает на грань BC под нулевым углом, а часть луча преломляется и выходит через грань AB под углом $\alpha > 90^\circ$, где α определяется соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 45^\circ} = n, \quad \sin \alpha = \frac{n}{\sqrt{2}}.$$

Если призма находится в воздухе, то показатель преломления $n > \sqrt{2} = 1,41$ для любого сорта стекла, и наблюдается явление полного отражения. Угол полного отражения β_0 в данном случае меньше 45° , так как:

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n} < \frac{1}{\sqrt{2}} = \sin 45^\circ.$$

Если призма находится в воде, то в призме из стекла с низким показателем преломления:

$$1,1 = \frac{n_{cm1}}{n_{H_2O}} < n = \frac{n_{cm}}{n_{H_2O}} < \sqrt{2}.$$

Луч на грани AB будет преломляться под углом α :

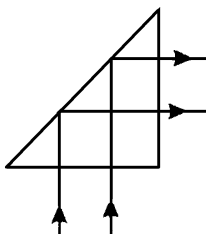
$$\sin \alpha = \frac{n}{\sqrt{2}}.$$

В призме из стекла с высоким показателем преломления:

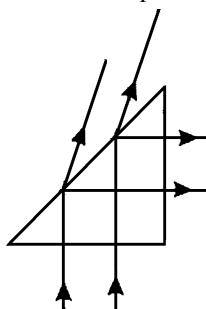
$$\sqrt{2} = n = \frac{n_{cm}}{n_{H_2O}} < 1,53 = \frac{n_{cm2}}{n_{H_2O}}$$

будет, как в воздухе, наблюдаться полное отражение.

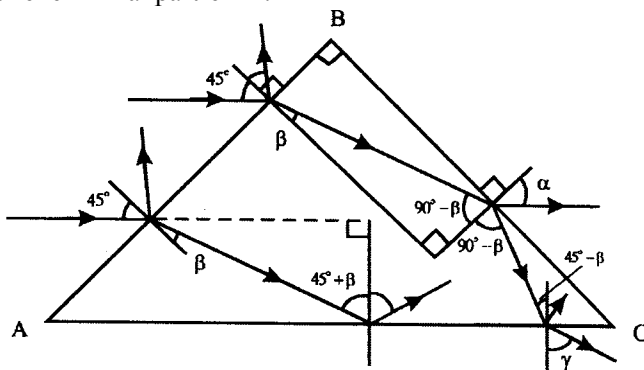
Призма в воздухе или призма с высоким показателем преломления в воде.



Призма с низким показателем преломления в воде.



Отразившись от грани AB , лучи падают на грань BC под нулевым углом, где частично отражаются и выходят из призмы без изменения направления.



б) Введем обозначения углов призмы ABC как показано на рисунке:

$$\angle B = 90^\circ, \angle A = \angle C = 45^\circ$$

лучи падают на грань AB под углом 45° , частично отражаются и преломляются. Преломленный луч идет в призму к грани AB под углом β , который согласно закону преломления равен:

$$\frac{\sin \beta}{\sin 45^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \sin \beta = \frac{1}{n\sqrt{2}}.$$

Когда призма находится в воде, относительный показатель преломления n меньше, чем для призмы в воздухе. Поэтому луч преломляется сильнее, когда призма находится в воздухе.

В зависимости от точки падения луча на грань AB преломленный луч может упасть как на грань BC , так и на грань AC . Рассмотрим оба эти варианта:

1) если луч падает на BC , то из геометрических соображений величина угла падения равна $90^\circ - \beta$. необходимо определить, при каких значениях показателя преломления n угол $90^\circ - \beta$ будет углом полного отражения. Для этого сравним:

$$\sin(90^\circ - \beta) \vee \beta_0 = \frac{1}{n},$$

$$\sin(90^\circ - \beta) = \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}},$$

$$\sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} \vee \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \vee \frac{1}{n^2},$$

$$1 \vee \frac{3}{2n^2},$$

$$1 \vee \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 1,23.$$

Если призма в воздухе, то угол $(90^\circ - \beta)$ больше угла полного отражения, так как $n > 1,23$. если призма в воде, то в зависимости от сорта стекла угол $(90^\circ - \beta)$ может быть как

больше, так и меньше угла полного отражения. Таким образом, если призма в воздухе, то независимо от сорта стекла, при падении луча на грань **BC** наблюдается полное отражение. Если призма в воде, то в зависимости от сорта стекла может наблюдаться как полное отражение, так и преломление с частичным отражением. При этом отраженный луч падает на грань **AC** под углом $(45^\circ - \beta)$. Преломленный луч выходит из призмы под углом α .

$$\frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \beta)} = n, \sin \alpha = n \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} = \sqrt{n^2 - \frac{1}{2}}$$

Выясним, не является ли угол $(45^\circ - \beta)$, под которым отраженный от грани **BC** луч падает на **AC**, углом, большим угла полного отражения. Для этого сравним:

$$\sin(45^\circ - \beta) \vee \sin \beta_0 = \frac{1}{n},$$

$$\sin(45^\circ - \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \beta - \sin \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} - \frac{1}{2n},$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} - \frac{1}{2n} \vee \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \vee 2 \cdot \left(\frac{3}{2n}\right)^2,$$

$$1 \vee \frac{5}{n^2},$$

Так как $n_{см2} = 2,04$, то $n_2 < 5$. Следовательно, $(45^\circ - \beta)$ всегда меньше угла полного отражения независимо от сорта стекла и от того, в воздухе или в воде находится призма. Это значит, что на границе **AC** луч частично отражается и преломляется. Преломленный луч выходит из призмы под углом γ .

$$\frac{\sin \gamma}{\sin(45^\circ - \beta)} = n,$$

$$\sin \gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n^2 - \frac{1}{2}} - \frac{1}{2}.$$

2) Если луч, преломленный на грани AB , падает на AC , то геометрически легко вычислить, что он падает на AC под углом $(45^\circ - \beta)$. Сравним этот угол с углом полного отражения:

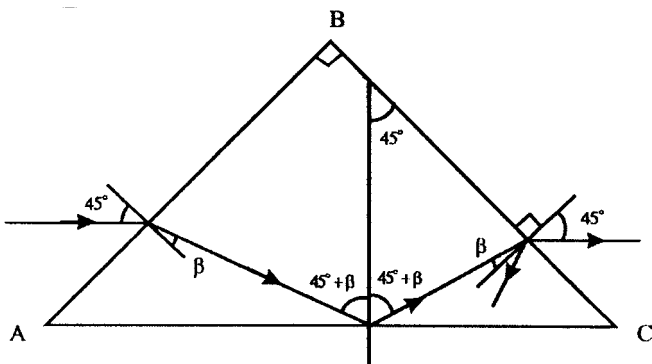
$$\sin(45^\circ + \beta) \leq \frac{1}{n},$$

$$\sin(45^\circ + \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\beta + \cos\beta) = \frac{1}{2n} + \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} \leq \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \leq \frac{1}{2n^2},$$

$$1 \leq \frac{1}{n^2}.$$

Так как всегда $n > 1$, то угол $(45^\circ + \beta)$ больше угла полного отражения независимо от сорта стекла и от того, в воздухе или в воде находится призма. Следовательно, на грани AC всегда наблюдается полное отражение. Отраженный от AC луч падает на BC под углом β (из простых геометрических рассуждений). Частично отражается и преломляется, выходя из призмы под углом 45° к BC . При этом луч, проходя через призму, не меняет своего первоначального направления.



Упражнение 6

Задание № 1

Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Источники находятся друг от друга на расстоянии $d = 0,3$. Экран расположен на расстоянии 9 м от источников. Что будет наблюдаться в точке A экрана (рис. 141): светлое пятно или темное?

Ответ:

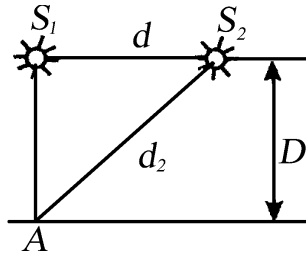
Дано:

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

$$d = 0,3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$D = 9 \text{ м}$$

Решение:



Расстояние от S_2 до точки A равно:

$$d_2 = \sqrt{D^2 + d^2};$$

При этом разность расстояний от точки A до источников равна:

$$d_2 - D = \sqrt{D^2 + d^2} - D,$$

$$(d_2 - D)(d_2 + D) = d^2$$

Так как $d_2 + D \approx 2D$, то

$$d_2 - D \approx \frac{d^2}{2D}.$$

Отношение разности расстояний к длине волны равно:

$$\frac{d^2 - D}{\lambda} \approx \frac{d^2}{2D\lambda} = \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{9 \cdot 5 \cdot 10^{-7}} = 2,$$

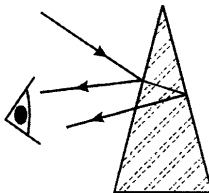
$$d_2 - D \approx 2 \lambda.$$

Максимум освещенности будет наблюдаться в точках, для которых выполнено условие $\Delta d = d_2 - D = k\lambda$, где Δd – разность расстояний от точки до источников, $k = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа. Следовательно, в точке A будет наблюдаться светлое пятно.

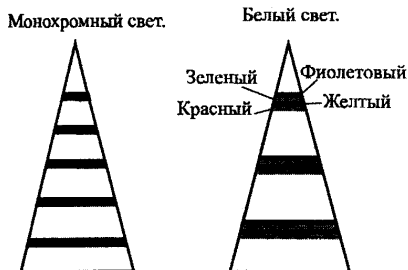
Задание № 2

Нарисуйте примерную картину интерференционных полосок на мыльной пленке, образовавшейся на треугольной рамке. Рамка с пленкой расположена вертикально (рис. 142).

Ответ:



Толщина пленки растет в направлении сверху вниз из-за силы тяжести. Из-за отражения от передней и задней поверхности пленки будет возникать интерференционная картина. А разность фаз отраженных световых волн будет зависеть от толщины пленки. При освещении пленки разным светом будут наблюдаться разные интерференционные картины. Так например, при освещении монохромным светом появится чередующиеся темные и светлые полосы. При освещении белым светом пленка будет переливаться всеми цветами радуги. Эти полосы будут содержать в себе весь спектр видимых длин волн. Вверху полоса будет окрашена в фиолетовый, а внизу в красный.



Задание № 3

Увеличение отверстия в экране может привести к уменьшению освещенности на оси пучка. Как это согласовать с законом сохранения энергии? Ведь при увеличении отверстия за экран проникает больше энергии.

Ответ:

Объяснением уменьшения освещенности на оси пучка при увеличении отверстия служит дифракция. Происходит перераспределение энергии вдоль экрана, но ее суммарное значение не меняется. Вместо одного светлого пятна на экране наблюдается чередование светлых и темных полос. Освещенность падает на оси пучка и растет на некотором расстоянии от нее.

Задание № 4

На дифракционную решетку, имеющую период $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ см, нормально падает монохроматическая волна. Оцените длину волны λ , если угол между спектрами второго и третьего порядков $\Delta\varphi = 2 \text{ } 30^\circ$.

Ответ:

Дано:

$$d = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

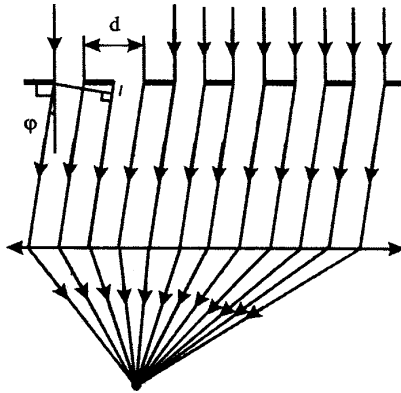
$$\Delta\varphi = 2^\circ 30' = \frac{2,5}{180} \pi \text{ рад}$$

$$\approx 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$$

λ - ?

Решение:

Дифракционная решетка отражает и рассеивает свет. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим волны, распространяющиеся под углом φ к нормали решетки.



Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна $d \sin \varphi$. Максимумы будут наблюдаться, когда разность хода кратна длине волны:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2 \dots$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{d} \ll 1, \quad \sin \varphi_2 = \frac{2\lambda}{d} \ll 1,$$

$$\sin \varphi_1 \approx \varphi_1, \quad \sin \varphi_2 \approx \varphi_2;$$

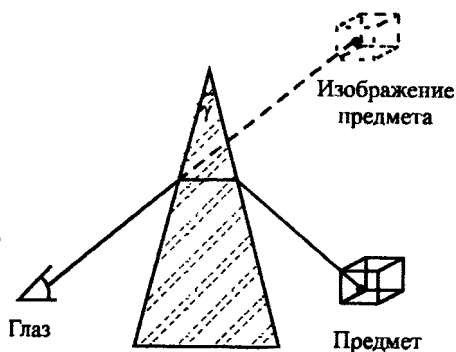
$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{\lambda}{d}, \quad \lambda = \Delta\varphi \cdot d, \text{ где } \Delta\varphi - \text{ выражена в радианах.}$$

$$\lambda = 4,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \approx 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

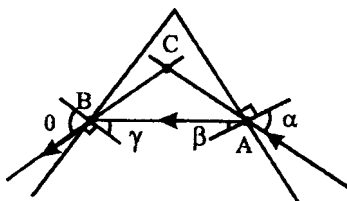
Задание № 11

Если рассматривать какой-либо предмет через треугольную призму, то изображение кажется смещенным. В какую сторону?

Ответ:



В зависимости от угла падения луча, показателя преломления призмы и ее преломляющего луча, входящий луч поворачивает на некоторый угол. Вдобавок луч поворачивает к основанию призмы. Значит, изображение смещается в сторону вершины преломляющегося угла призмы.



Замечание: Так как показатель преломления вещества призмы всегда больше 1 ($n > 1$), то луч поворачивает всегда в сторону основания.

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \text{ и } \beta < \alpha \text{ (} \alpha \text{ – угол падения на лицевую часть,}$$

$$\beta \text{ – угол к лицевой грани внутри).}$$

Следовательно, луч повернул в сторону основания.

Аналогично:

$$\sin \theta = n \sin \gamma, \text{ т. е. } \theta > \gamma \text{ (} \gamma \text{ – угол падения на заднюю грань,}$$

$$\theta \text{ – угол выхода луча из призмы).}$$

Луч снова повернул в сторону основания.

Задание № 12

Луч света, идущий из толщи воды, претерпевает полное отражение на ее поверхности. Выйдет ли луч в воздух, если на поверхность воды налить слой кедрового масла?

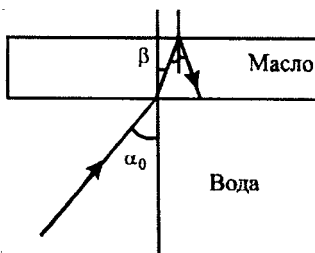
Ответ:

Дано:

$$N_{\text{в}} = 1,33$$

$$N_{\text{м}} = 1,52$$

Решение:



Угол полного отражения воды определяется соотношением:

$$\sin \alpha_{0в} = \frac{1}{n_в},$$

а угол полного отражения кедрового масла:

$$\sin \alpha_{0м} = \frac{1}{n_м}$$

Пусть луч, идущий из толщи воды, падет на границу раздела вода – масло под углом $\alpha > \alpha_{0в}$, то есть полностью отражается в случае отсутствия масла. Тогда в масле, согласно закону преломления света, он идет под углом β таким образом, что:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{n_в}{n_м},$$

$$\sin \beta = \frac{n_в}{n_м} \sin \alpha .$$

Поскольку $\alpha > \alpha_{0в}$, то $\sin \alpha > \frac{1}{n_в}$. Следовательно,

$$\sin \beta > \frac{1}{n_м} \text{ и } \beta > \alpha_{0м} .$$

Значит, луч выходит на границу воздух – масло под углом, большим угла полного отражения масла. Следовательно, луч в воздух не выйдет.

Задание № 13

Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч проходит сквозь призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины (рис. 115). Каково наибольшее допустимое значение показателя преломления n вещества призмы?

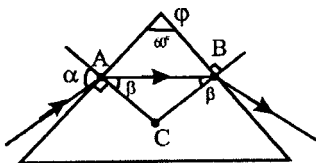
Ответ:

Дано:

$$\varphi = 60^\circ$$

n_{\max} - ?

Решение:



Угол между нормальными к сторонам равностороннего треугольника равен 120° . Луч в призме идет параллельно основанию, следовательно, угол преломления луча β на первой грани призмы равен углу падения луча на вторую грань призмы.

Рассмотрим $\triangle ABC$, где A – точка падения луча на призму, B – точка выхода луча из призмы, C – точка пересечения нормалей к граням, проведенным из точек A и B . Сумма углов $\triangle ABC$ равна:

$$\beta + \beta + 120^\circ = 180^\circ, \beta = 30^\circ.$$

Угол β должен быть больше предельного угла полного отражения α_0 ; где $\alpha_0 = \frac{1}{n}$. Следовательно,

$$\frac{1}{n} < \sin \beta \text{ или } n > \frac{1}{\sin \beta} = n_{\max},$$

$$n_{\max} = \frac{1}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin 30^\circ} = 2.$$

Задание № 14

Изобразите ход лучей через треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный треугольник. Лучи падают на призму, как показано на рисунке 116, а, б. Останется ли ход лучей таким же, если призму погрузить в воду?

Ответ:

Дано:

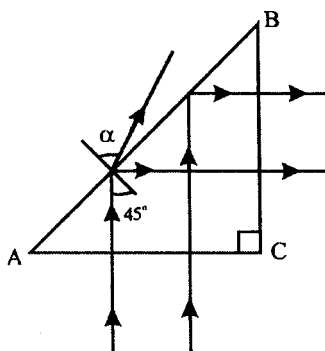
$$n_{cm1} = 1,47$$

$$n_{cm2} = 2,04$$

$$n_{H_2O} = 1,33$$

$$n_{возд} = 1,0$$

Решение:



Преломление луча на границе двух сред определяется относительным показателем преломления n , равным отношению показателей преломления сред.

Из данных таблицы 2 § 43 учебника известно, что показатель преломления стекла зависит от его сорта и находится в некотором интервале от n_{cm1} до n_{cm2} . Так как показатель преломления воздуха равен $n_{возд} = 1$, то относительный показатель преломления на границе воздух – стекло находится в интервале от n_{cm1} до n_{cm2} . Относительный показатель преломления на границе вода – стекло находится в интервале от:

$$\frac{n_{cm1}}{n_{H_2O}} = \frac{1,47}{1,33} = 1,1 \quad \text{до} \quad \frac{n_{cm2}}{n_{H_2O}} = \frac{2,04}{1,33} = 1,53 .$$

а) Введем обозначения углов призмы ABC как показано на рисунке:

$$\angle C = 90^\circ, \angle A = \angle B = 45^\circ.$$

Луч падает на грань AC под нулевым углом. При этом часть луча отражается, а часть проходит через грань AC без преломления. Затем луч падает на грань AB под углом 45° к ее нормали. При этом часть луча отражается от грани AB и падает на грань BC под нулевым углом, а часть луча преломляется и выходит через грань AB под углом $\alpha > 90^\circ$, где α определяется соотношением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 45^\circ} = n, \quad \sin \alpha = \frac{n}{\sqrt{2}}.$$

Если призма находится в воздухе, то показатель преломления $n > \sqrt{2} = 1,41$ для любого сорта стекла, и наблюдается явление полного отражения. Угол полного отражения β_0 в данном случае меньше 45° , так как:

$$\sin \beta_0 = \frac{1}{n} < \frac{1}{\sqrt{2}} = \sin 45^\circ.$$

Если призма находится в воде, то в призме из стекла с низким показателем преломления:

$$1,1 = \frac{n_{cm1}}{n_{H_2O}} < n = \frac{n_{cm}}{n_{H_2O}} < \sqrt{2}.$$

Луч на грани AB будет преломляться под углом α :

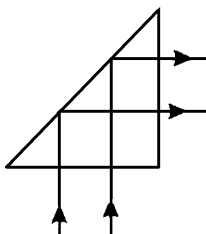
$$\sin \alpha = \frac{n}{\sqrt{2}}.$$

В призме из стекла с высоким показателем преломления:

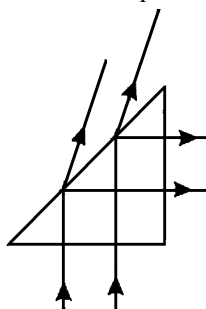
$$\sqrt{2} = n = \frac{n_{cm}}{n_{H_2O}} < 1,53 = \frac{n_{cm2}}{n_{H_2O}}$$

будет, как в воздухе, наблюдаться полное отражение.

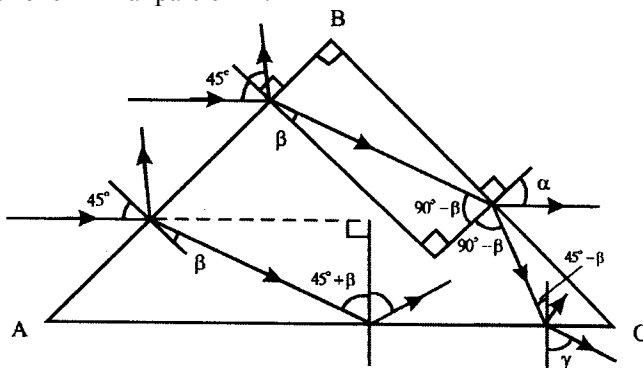
Призма в воздухе или призма с высоким показателем преломления в воде.



Призма с низким показателем преломления в воде.



Отразившись от грани AB , лучи падают на грань BC под нулевым углом, где частично отражаются и выходят из призмы без изменения направления.



б) Введем обозначения углов призмы ABC как показано на рисунке:

$$\angle B = 90^\circ, \angle A = \angle C = 45^\circ$$

лучи падают на грань AB под углом 45° , частично отражаются и преломляются. Преломленный луч идет в призму к грани AB под углом β , который согласно закону преломления равен:

$$\frac{\sin \beta}{\sin 45^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \sin \beta = \frac{1}{n\sqrt{2}}.$$

Когда призма находится в воде, относительный показатель преломления n меньше, чем для призмы в воздухе. Поэтому луч преломляется сильнее, когда призма находится в воздухе.

В зависимости от точки падения луча на грань AB преломленный луч может упасть как на грань BC , так и на грань AC . Рассмотрим оба эти варианта:

1) если луч падает на BC , то из геометрических соображений величина угла падения равна $90^\circ - \beta$. необходимо определить, при каких значениях показателя преломления n угол $90^\circ - \beta$ будет углом полного отражения. Для этого сравним:

$$\sin(90^\circ - \beta) \vee \beta_0 = \frac{1}{n},$$

$$\sin(90^\circ - \beta) = \cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}},$$

$$\sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} \vee \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \vee \frac{1}{n^2},$$

$$1 \vee \frac{3}{2n^2},$$

$$1 \vee \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 1,23.$$

Если призма в воздухе, то угол $(90^\circ - \beta)$ больше угла полного отражения, так как $n > 1,23$. если призма в воде, то в зависимости от сорта стекла угол $(90^\circ - \beta)$ может быть как

больше, так и меньше угла полного отражения. Таким образом, если призма в воздухе, то независимо от сорта стекла, при падении луча на грань **BC** наблюдается полное отражение. Если призма в воде, то в зависимости от сорта стекла может наблюдаться как полное отражение, так и преломление с частичным отражением. При этом отраженный луч падает на грань **AC** под углом $(45^\circ - \beta)$. Преломленный луч выходит из призмы под углом α .

$$\frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \beta)} = n, \sin \alpha = n \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} = \sqrt{n^2 - \frac{1}{2}}$$

Выясним, не является ли угол $(45^\circ - \beta)$, под которым отраженный от грани **BC** луч падает на **AC**, углом, большим угла полного отражения. Для этого сравним:

$$\sin(45^\circ - \beta) \vee \sin \beta_0 = \frac{1}{n},$$

$$\sin(45^\circ - \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \beta - \sin \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} - \frac{1}{2n},$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} - \frac{1}{2n} \vee \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \vee 2 \cdot \left(\frac{3}{2n}\right)^2,$$

$$1 \vee \frac{5}{n^2},$$

Так как $n_{см2} = 2,04$, то $n_2 < 5$. Следовательно, $(45^\circ - \beta)$ всегда меньше угла полного отражения независимо от сорта стекла и от того, в воздухе или в воде находится призма. Это значит, что на границе **AC** луч частично отражается и преломляется. Преломленный луч выходит из призмы под углом γ .

$$\frac{\sin \gamma}{\sin(45^\circ - \beta)} = n,$$

$$\sin \gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{n^2 - \frac{1}{2}} - \frac{1}{2}.$$

2) Если луч, преломленный на грани AB , падает на AC , то геометрически легко вычислить, что он падает на AC под углом $(45^\circ - \beta)$. Сравним этот угол с углом полного отражения:

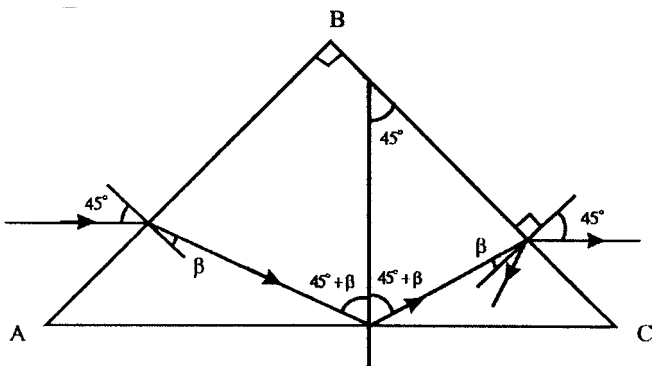
$$\sin(45^\circ + \beta) \leq \frac{1}{n},$$

$$\sin(45^\circ + \beta) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sin\beta + \cos\beta) = \frac{1}{2n} + \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{1}{2n^2}} \leq \frac{1}{n},$$

$$1 - \frac{1}{2n^2} \leq \frac{1}{2n^2},$$

$$1 \leq \frac{1}{n^2}.$$

Так как всегда $n > 1$, то угол $(45^\circ + \beta)$ больше угла полного отражения независимо от сорта стекла и от того, в воздухе или в воде находится призма. Следовательно, на грани AC всегда наблюдается полное отражение. Отраженный от AC луч падает на BC под углом β (из простых геометрических рассуждений). Частично отражается и преломляется, выходя из призмы под углом 45° к BC . При этом луч, проходя через призму, не меняет своего первоначального направления.



Упражнение 6

Задание № 1

Два когерентных источника S_1 и S_2 испускают свет с длиной волны $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м. Источники находятся друг от друга на расстоянии $d = 0,3$. Экран расположен на расстоянии 9 м от источников. Что будет наблюдаться в точке A экрана (рис. 141): светлое пятно или темное?

Ответ:

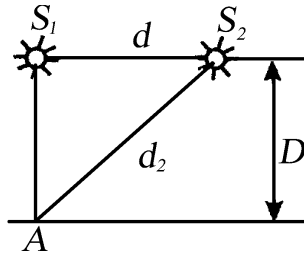
Дано:

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

$$d = 0,3 \text{ см} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$D = 9 \text{ м}$$

Решение:



Расстояние от S_2 до точки A равно:

$$d_2 = \sqrt{D^2 + d^2};$$

При этом разность расстояний от точки A до источников равна:

$$d_2 - D = \sqrt{D^2 + d^2} - D,$$

$$(d_2 - D)(d_2 + D) = d^2$$

Так как $d_2 + D \approx 2D$, то

$$d_2 - D \approx \frac{d^2}{2D}.$$

Отношение разности расстояний к длине волны равно:

$$\frac{d^2 - D}{\lambda} \approx \frac{d^2}{2D\lambda} = \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{9 \cdot 5 \cdot 10^{-7}} = 2,$$

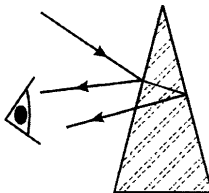
$$d_2 - D \approx 2 \lambda.$$

Максимум освещенности будет наблюдаться в точках, для которых выполнено условие $\Delta d = d_2 - D = k\lambda$, где Δd – разность расстояний от точки до источников, $k = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа. Следовательно, в точке A будет наблюдаться светлое пятно.

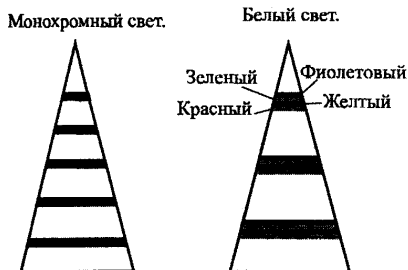
Задание № 2

Нарисуйте примерную картину интерференционных полосок на мыльной пленке, образовавшейся на треугольной рамке. Рамка с пленкой расположена вертикально (рис. 142).

Ответ:



Толщина пленки растет в направлении сверху вниз из-за силы тяжести. Из-за отражения от передней и задней поверхности пленки будет возникать интерференционная картина. А разность фаз отраженных световых волн будет зависеть от толщины пленки. При освещении пленки разным светом будут наблюдаться разные интерференционные картины. Так например, при освещении монохромным светом появится чередующиеся темные и светлые полосы. При освещении белым светом пленка будет переливаться всеми цветами радуги. Эти полосы будут содержать в себе весь спектр видимых длин волн. Вверху полоса будет окрашена в фиолетовый, а внизу в красный.



Задание № 3

Увеличение отверстия в экране может привести к уменьшению освещенности на оси пучка. Как это согласовать с законом сохранения энергии? Ведь при увеличении отверстия за экран проникает больше энергии.

Ответ:

Объяснением уменьшения освещенности на оси пучка при увеличении отверстия служит дифракция. Происходит перераспределение энергии вдоль экрана, но ее суммарное значение не меняется. Вместо одного светлого пятна на экране наблюдается чередование светлых и темных полос. Освещенность падает на оси пучка и растет на некотором расстоянии от нее.

Задание № 4

На дифракционную решетку, имеющую период $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$ см, нормально падает монохроматическая волна. Оцените длину волны λ , если угол между спектрами второго и третьего порядков $\Delta\varphi = 2 \text{ } 30^\circ$.

Ответ:

Дано:

$$d = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

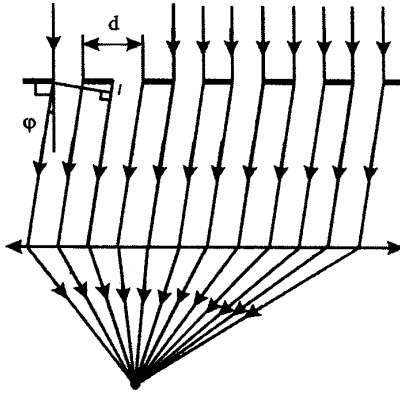
$$\Delta\varphi = 2^\circ 30' = \frac{2,5}{180} \pi \text{ рад}$$

$$\approx 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$$

λ - ?

Решение:

Дифракционная решетка отражает и рассеивает свет. Найдем условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим волны, распространяющиеся под углом φ к нормали решетки.



Разность хода между волнами от краев соседних щелей равна $d \sin \varphi$. Максимумы будут наблюдаться, когда разность хода кратна длине волны:

$$d \sin \varphi = k \lambda, \text{ где } k = 0, 1, 2 \dots$$

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{d} \ll 1, \quad \sin \varphi_2 = \frac{2\lambda}{d} \ll 1,$$

$$\sin \varphi_1 \approx \varphi_1, \quad \sin \varphi_2 \approx \varphi_2;$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \approx \frac{\lambda}{d}, \quad \lambda = \Delta\varphi \cdot d, \text{ где } \Delta\varphi - \text{ выражена в радианах.}$$

$$\lambda = 4,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \approx 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

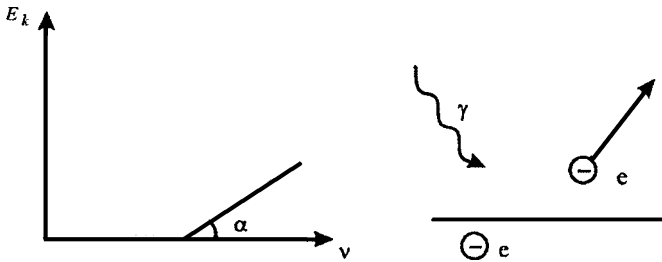
Глава 8. СвЕТОВЫЕ КВАНТЫ

Упражнение 8

Задание № 1

Нарисуйте график зависимости кинетической энергии фотоэлектронов от частоты света. Как с помощью такого графика определить постоянную Планка?

Ответ:



Для выхода электрона из металла необходимо, чтобы энергия поглощенного фотона $h\nu$ была больше работы выхода электрона из металла A . Оставшаяся часть энергии фотона идет на сообщение электрону кинетической энергии E_k :

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

$$E_k = h\nu - A.$$

График зависимости $E_k(\nu)$ - прямая, начинающаяся из точки $E_k = 0$, $\nu = \nu_{min} = \frac{A}{h}$, ν_{min} называется красной границей фотоэффекта. Тангенс угла наклона прямой к оси ν равен постоянной Планка h .

Задание № 2

Найдите абсолютный показатель преломления среды, в которой свет с энергией $E = 4,4 \cdot 10^{-19}$ Дж имеет длину волны $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7}$ м.

Ответ:

Дано:

$$E = 4,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$v = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Решение:

Длина волны фотона связана с частотой соотношением:

$$v = \frac{v}{\lambda},$$

где v – скорость распространения волны в среде.

Энергия фотона связана с его частотой согласно формуле Планка:

$$E = hv = \frac{hv}{\lambda},$$

$$v = \frac{E\lambda}{h}.$$

Абсолютный показатель преломления среды по определению равен:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{hc}{E\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме. Следовательно,

$$n = \frac{hc}{E\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^8}{4,4 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{-7}} \approx 1,5.$$

Задание № 3

Определите энергию фотона, соответствующего длине волны $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7}$ м.

Ответ:

Дано:

$$\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$
$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

E - ?

Решение:

Энергия фотона E выражается формулой Планка:

$$E = h\nu, \text{ где } \nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Следовательно,

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{-7}} \text{ Дж} \approx 4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Задание № 4

Определите длину волны λ света, которым освещается поверхность металла, если фотоэлектроны имеют кинетическую энергию $W_k = 4,5 \cdot 10^{-20}$ Дж, а работа выхода электрона из металла равна $A = 7,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Ответ:

Дано:

$$W_k = 4,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$
$$A = 7,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$
$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$$

λ - ?

Решение:

Согласно закону сохранения энергии, энергия фотона $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, идет на совершение работы выхода A и сообщает электрону кинетическую энергию W_k .

$$\frac{hc}{\lambda} = A + W_k.$$

Следовательно,

$$\lambda = \frac{hc}{A+W_k}; \lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,5 \cdot 10^{-20} + 7,6 \cdot 10^{-19}} \text{ м} \approx 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Задание № 5

Какова красная граница ν_{min} фотоэффекта, если работа выхода электрона из металла $A = 3,3 \cdot 10^{-19}$ Дж?

Ответ:

Дано:

$$A = 3,3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

ν_{min} - ?

Решение:

Согласно закону сохранения энергии

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Учитывая условие $v = 0$ (ν_{min}), имеем:

$$h \nu_{min} = A,$$

$$\nu_{min} = \frac{A}{h};$$

$$\nu_{min} = \frac{3,3 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \text{ с}^{-1} \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}.$$

Задание № 6

Излучение с длиной волны $\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7}$ м падает на вещество, для которого красная граница фотоэффекта $\nu_{min} = 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц. Чему равна кинетическая энергия фотоэлектронов?

Ответ:

Дано:

$$\lambda = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\nu_{min} = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$W_k - ?$$

Решение:

Запишем закон сохранения энергии для фотоэффекта: $h\nu = A + W_k$.

Красная граница фотоэффекта – это предельная частота ν_{min} , то есть частота, при которой $W_k = 0$. при этом

$$h\nu_{min} = A.$$

Частота фотона связана с его длиной волны соотношением

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Следовательно, закон сохранения энергии для фотоэффекта можно переписать в виде:

$$h \frac{c}{\lambda} = h \nu_{min} + W_k, \quad W_k = h \left(\frac{c}{\lambda} - \nu_{min} \right),$$

$$W_k = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{-7}} - 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Дж} = 3,8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Задание № 7

Каков импульс фотона, если длина световой волны $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-7}$ м?

Ответ:

Дано:

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

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$p = ?$$

Решение:

Импульс фотона определяется выражением (формула 8.6 § 68 учебника):

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

$$p = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^2} = 1,326 \cdot 10^{-27} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$$

Глава 9. Атомная физика

Упражнение 9

Задание № 1

Каковы скорость v и ускорение α электрона на первой боровской орбите, радиус которой определяется формулой $r_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}$, где m и e – соответственно масса и заряд электрона, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ – электрическая постоянная?

Ответ:

Дано:

$$r_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{М}^2}$$

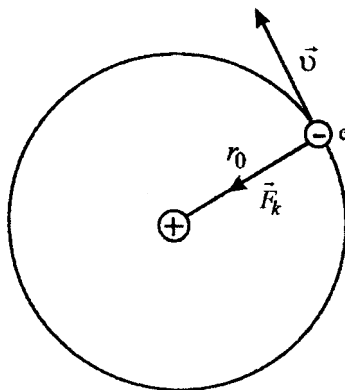
$$\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$v - ?$ $a - ?$

Решение:



Согласно модели Бора электрон в атоме водорода представляет собой классическую частицу, вращающуюся вокруг ядра по круговой орбите. Запишем второй закон Ньютона для электрона: $m\vec{a} = \vec{F}_k$, где \vec{F}_k – Кулоновская сила притяжения. По закону Кулона:

$$\vec{F}_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0^2}.$$

$$\text{Следовательно, } ma = F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0^2}.$$

Скорость и ускорение при движении по окружности связаны соотношением:

$$a = \frac{v^2}{r_0}.$$

Перепишем закон Ньютона в виде:

$$\frac{mv^2}{r_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0^2},$$

$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mr_0} = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{e^4}{\hbar^2}.$$

$$v = \frac{e^2}{4\pi e_0 \hbar},$$

$$v = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{4 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}} \text{ м/с} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ м/с};$$

$$a = \frac{v^2}{r_0} = \frac{m}{(4\pi e_0)^3} \frac{e^6}{\hbar^4},$$

$$a = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^6}{(4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}) \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^4} \approx 10^{23} \text{ м/с}^2.$$

Задание № 2

На какое минимальное расстояние сблизятся при центральном ударе α – частица и ядро олова? Скорость α – частицы равна 10^9 см/с, ее масса – $6,7 \cdot 10^{-24}$ г. (Ядро олова считать неподвижным).

Ответ:

Дано:

$$v = 10^9 \text{ м/с}$$

$$m = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$q_\alpha = 2 e$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$q_{Sn} = 50 e$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}}$$

$$r_{min} - ?$$

Решение:

Запишем закон сохранения энергии для α – частицы. На большом расстоянии от ядра олова α – частица обладает только кинетической энергией

$$W_k = \frac{mv^2}{2}$$

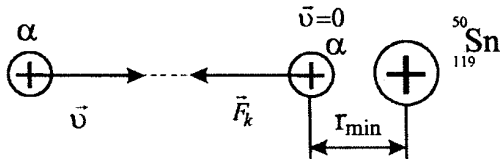
На минимальном расстоянии сближения скорость α – частицы равна 0, и частица обладает только потенциальной энергией Кулоновского взаимодействия с ядром:

$$W_p = q_\alpha \varphi_{Sn} = k \frac{q_\alpha q_{Sn}}{r_{min}}.$$

Согласно закону сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{kq_\alpha q_{Sn}}{r_{min}}; r_{min} = \frac{2kq_\alpha q_{Sn}}{mv^2} = \frac{200ke^2}{mv^2},$$

$$r_{min} = \frac{200 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{6,7 \cdot 10^{-27} \cdot (10^7)^2} \text{ м} \approx 6,9 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$



Задание № 3

Определите длину волны света, испускаемого атомом водорода при его переходе из стационарного состояния с энергией $E_4 = -0,85$ эВ ($k = 4$) в состоянии с энергией $E_2 = -3,4$ эВ ($n = 2$).

Ответ:

Дано:

$$E_4 = -0,85 \text{ эВ}$$

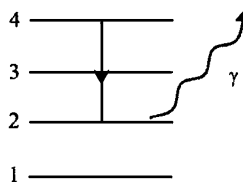
$$E_2 = -3,4 \text{ эВ}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\lambda - ?$$

Решение:



Согласно второму постулату Бора энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний атома:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_4 - E_2,$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_4 - E_2},$$

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{1}{3,4 - 0,85} \text{ м} \approx 4,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Задание № 4

Определите по рисунку 168 энергию ионизации атома водорода.

Ответ:

Дано:

$$E_1 = -13,55 \text{ эВ}$$

$v_i - ?$

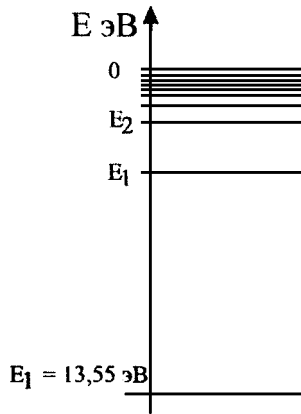
Решение:

Электрон в атоме водорода находится на самом нижнем энергетическом уровне.

Для того, чтобы ионизировать атом водорода, необходимо передать ему энергию U , достаточную для отрыва электрона. Излишек энергии идет на сообщение электрону кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$.

По закону сохранения энергии:

$$\frac{mv^2}{2} = E_1 + U.$$



Очевидно, что если $\nu = 0$, то энергия U – минимальная. Минимальная энергия, достаточная для ионизации называется энергией ионизации U_i :

$$E_1 + U_i = 0, \quad U_i = -E_1 = 13,55 \text{ эВ.}$$

Глава 10. Физика атомного ядра

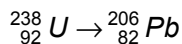
Упражнение 10

Задание № 1

В результате последовательной серии радиоактивных распадов уран ${}_{92}^{238}\text{U}$ превращается в свинец ${}_{82}^{206}\text{Pb}$. Сколько α - и β -превращений он при этом испытывает?

Ответ:

Дано:



$N\alpha$ - ?

$N\beta$ - ?

Решение:

Запишем распад урана в символическом виде



Эта символическая запись выражает правило смещения Содди: при каждом α – распаде ядро теряет заряд 2, а его масса убывает на 4. При β – распаде заряд увеличивается на 1, масса практически не меняется. Запишем условия сохранения массы и заряда:

$$238 = 206 + 4N\alpha,$$

$$92 = 82 + 2N\alpha - N\beta.$$

Из первого уравнения получим $N\alpha = 8$, а из второго $N\beta = 6$.

Уран испытывает 8 α – превращений и 6 β – превращений.

Задание № 2

Период полураспада радия $T = 1600$ лет. Через какое время число атомов уменьшится в 4 раза?

Ответ:

Дано:

$$T = 1600 \text{ лет}$$

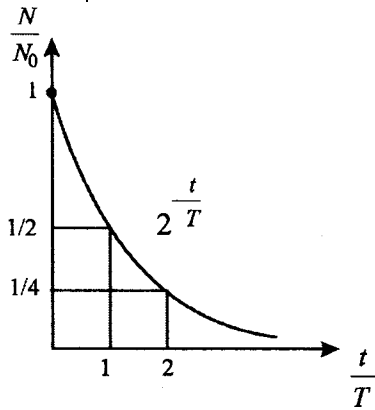
$$k = 4$$

$$t - ?$$

Решение:

Согласно основному закону радиоактивного распада

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$



$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{k} \quad N = 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$\log_2 \frac{1}{k} = -\frac{t}{T}, \quad \log_2 k = \frac{t}{T},$$

$$t = T \log_2 k = T \log_2 4 = 2T = 3200 \text{ лет.}$$

Задание № 3

Во сколько раз уменьшится число атомов одно из изотопов радона за 1,91 сут? Период полураспада этого изотопа радона $T = 3,82$ сут.

Ответ:

Дано:

$$T = 3,82 \text{ сут.}$$

$$T = 1,91 \text{ сут.}$$

$$\frac{N_0}{N} - ?$$

Решение:

Согласно основному закону радиоактивного распада:

$$\frac{N}{N_0} = 2^{\frac{t}{T}}, \quad \frac{N_0}{N} = 2^{\frac{t}{T}}$$

$$\frac{N_0}{N} = 2^{\frac{1,91}{3,82}} = 2^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} \approx 1,41.$$

Задание № 4

Пользуясь периодической системой элементов Д.И. Менделеева, определите число протонов и число нейтронов в ядрах атомов фтора, аргона, брома, цезия и золота.

Ответ:

Дано:



Решение:

Символическое обозначение элемента в таблице Менделеева: m_nF ,

где m – массовое число, n – зарядовое число.

Заряд ядра определяется числом протонов: n – число протонов, m – сумма протонов и нейтронов, $m - n$ – количество нейтронов в ядре.

Элемент	протоны	нейтроны
<i>F</i>	9	10
<i>Ar</i>	18	22
<i>Br</i>	35	45
<i>Cs</i>	55	78
<i>Au</i>	79	118

Задание № 5

Чему равна энергия связи ядра тяжелого водорода – дейтрона? Относительная атомная масса ядра дейтрона $m_D = 2,01355$, протона $m_p = 1,00728$, нейтрона $m_n = 1,00866$; масса атома углерода $m_C = 1,995 \cdot 10^{-26}$ кг.

Ответ:

Дано:

$$m_p = 1,00728 \cdot \frac{m_C}{12}$$

$$m_n = 1,00866 \cdot \frac{m_C}{12}$$

$$m_D = 2,01355 \cdot \frac{m_C}{12}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$m_C = 1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$$

Решение:

Энергией связи ядра называют энергию, которую необходимо передать ядру для его полного расщепления. Найдем энергию связи с помощью соотношения Эйнштейна:

$$E = mc^2,$$

$$m_D < m_n + m_p$$

$$\Delta M = m_n + m_p - m_D.$$

$$E_{св} = \Delta M c^2 = (m_p + m_n - m_D) c^2;$$

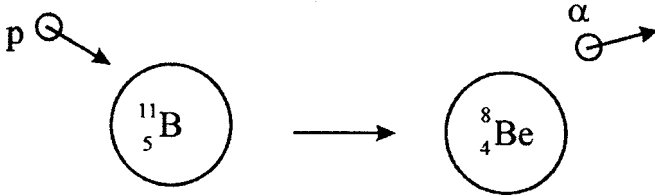
$$E_{св} = (1,00728 + 1,00866 - 2,01355) \cdot 1,995 \cdot 10^{-26} \cdot \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{12} \approx$$

$$\approx 3,57 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 2,2 \text{ МэВ}.$$

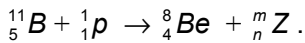
Задание № 6

При бомбардировке ядер бора ${}^{11}_5\text{B}$ протонами получается бериллий ${}^8_4\text{Be}$. Какое еще ядро образуется при этой реакции?

Ответ:



Запишем ядерную реакцию в символическом виде:



Воспользуемся законом сохранения заряда и массы:

$$11 + 1 = 8 + m,$$

$$m = 4;$$

$$5 + 1 = 4 + n,$$

$$n = 2;$$

${}^4_2\text{Z}$ – ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$.

Задание № 7

В результате деления ядра урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, захватившего нейтрон, образуются ядра бария ${}_{56}^{142}\text{Ba}$ и криптона ${}_{36}^{91}\text{Kr}$, а также три свободных нейтрона. Удельная энергия связи ядер бария $8,38 \text{ МэВ/нуклон}$, криптона – $8,55 \text{ МэВ/нуклон}$ и урана – $7,59 \text{ МэВ/нуклон}$. Чему равна энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана?

Ответ:

Дано:



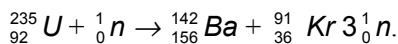
$$E_{\text{свBa}} = 8,38 \frac{\text{Мэв}}{\text{нуклон}}$$

$$E_{\text{свKr}} = 8,55 \frac{\text{Мэв}}{\text{нуклон}}$$

$$E_{\text{свU}} = 7,59 \frac{\text{Мэв}}{\text{нуклон}}$$

$E - ?$

Решение:



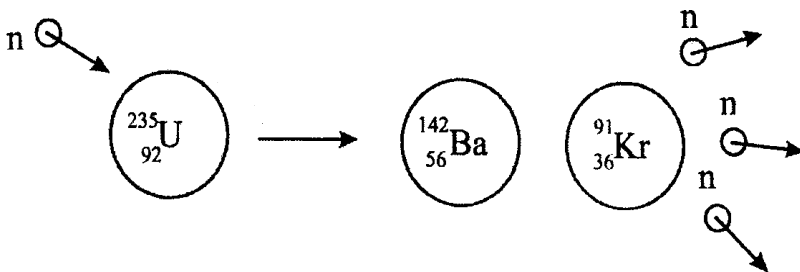
Массовые числа равны U , Ba , Kr . равны:

$$A_U = 235, A_{Ba} = 142, A_{Kr} = 91.$$

Запишем закон сохранения энергии для данной реакции:

$$E = A_U \cdot E_{\text{свU}} = A_{Ba} \cdot E_{\text{свBa}} + A_{Kr} \cdot E_{\text{свKr}} + E,$$

где E – выделившаяся в результате реакции энергия.



$$E = A_U \cdot E_{ceU} - A_{Ba} \cdot E_{ceBa} - A_{Kr} \cdot E_{ceKr},$$

$$E = (235 \cdot 7,59 - 142 \cdot 8,38 - 91 \cdot 8,55) \text{ МэВ},$$

$$E \approx 200 \text{ МэВ}$$

Лабораторные работы

Эта часть книги поможет вам при подготовке к лабораторным работам курса физики и при их выполнении. Она содержит некоторые рекомендации и комментарии к выполнению работ курса, а также образцы лабораторных работ, выполненных в соответствии с заданиями учебника. Следует, конечно, помнить, что учитель по своему усмотрению и возможностям кабинета может вносить изменения и дополнения в ход работ, описанных в учебнике, а также в обеспечение работы материалами и инструментами. Но в общих чертах цель работы и способ ее выполнения остается неизменным. Поэтому знакомство с

приведенными образцами работ поможет подробнее познакомиться с предстоящими вам измерениями и вычислениями. Однако, полученные в выполненных нами работах результаты могут сильно отличаться от тех, которые вы будете получать на уроках. Происходит это, потому что использованное оборудование и материалы, возможно, отличаются от предложенных вам учителем, кроме того, даже при использовании одинакового оборудования результаты могут существенно различаться по всевозможным причинам.

Лабораторная работа № 1.

Изучение явления электромагнитной индукции

Цель работы:

экспериментальное изучение явления магнитной индукции и проверка правила Ленца.

Теоретическая часть:

Явление электромагнитной индукции заключается в возникновении электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном по времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется. В нашем случае разумнее было бы менять во времени магнитное поле, так как оно создается движущимися (свободно) магнитом. Согласно правилу Ленца, возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван. В данном случае наблюдать это мы можем по отклонению стрелки миллиамперметра.

Оборудование:

Миллиамперметр, источник питания, катушки с сердечниками, дугообразный магнит, выключатель кнопочный, соединительные провода, магнитная стрелка (компас), реостат.

Вывод по проделанной работе:

1. Вводя магнит в катушку одним полюсом (северным) и выводя ее, мы наблюдаем, что стрелка амперметра отклоняется в разные стороны. В первом случае число линий магнитной индукции, пронизывающих катушку (магнитный поток) растет, а во втором случае наоборот. Причем в первом случае линии индукции, созданные магнитным полем индукционного тока, выходят из верхнего конца катушки,

так как катушка отталкивает магнит, а во втором случае, наоборот, входят в этот конец. Так как стрелка амперметра отклоняется, то направление индукционного тока меняется. Именно это показывает нам правило Ленца.

Вводя магнит в катушку южным полюсом, мы наблюдаем картину, противоположную первой.

2. (Случай с двумя катушками)

В случае с двумя катушками при размыкании ключа стрелка амперметра смещается в одну сторону, а при замыкании в другую.

Это объясняется тем, что при замыкании ключа, ток в первой катушке создает магнитное поле. Это поле растет, и число линий индукции, пронизывающих вторую катушку, растет. При размыкании число линий падает. Следовательно, по правилу Ленца в первом случае и во втором индукционный ток противодействует тому изменению, которым он вызван. Изменение направления индукционного тока нам показывает тот же амперметр, и это подтверждает правило Ленца.

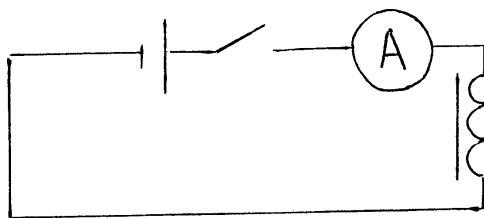


Рис. 1.

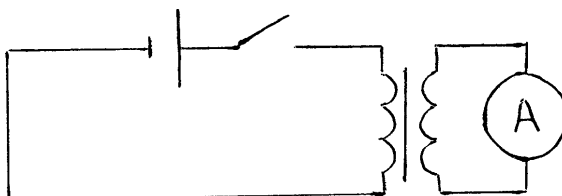
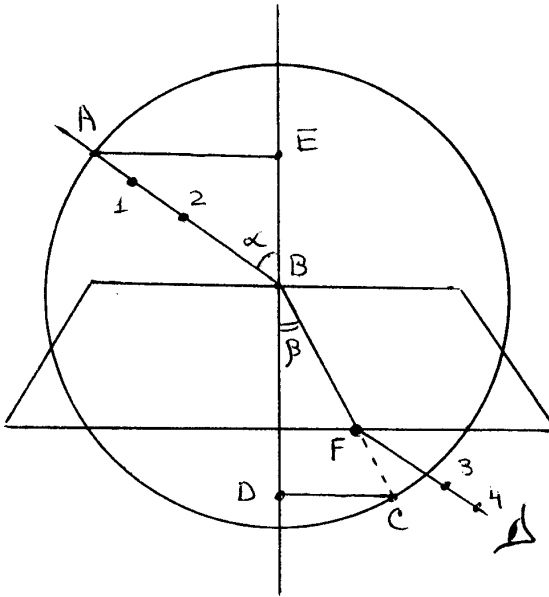


Рис. 2.

Лабораторная работа № 2.

Измерение показателя преломления стекла

Цель работы: измерение показателя преломления стеклянной пластины, имеющей форму трапеции.



Оборудование:

Источник света (электрическая лампочка), металлический экран с щелью, трапециевидная стеклянная пластина.

Спецификация измерительных приборов:

Наименование	Предел измерения	Цена деления	Абсолютная погрешность
линейка	50 см	1 мм	0,5 мм

Расчетные формулы:

Показатель преломления стекла относительно воздуха определяется по формуле:

$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, где $\sin \alpha$ – угол падения на грань пластины из воздуха в стекло, β – угол преломления светового пучка в стекле.

Т.к. $\sin \alpha = \frac{AE}{AB}$, $\sin \beta = \frac{CD}{BC}$ и $AB = BC$ (как радиусы), то формула примет вид:

$$n_{пр} = \frac{AE}{DC} \quad (1).$$

Максимальная абсолютная погрешность определяется по формуле:

$$\Delta n = n_{пр} \cdot \varepsilon,$$

где ε – относительная погрешность измерения показателя преломления

$$\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}.$$

Таблица измерений:

Измерено		Вычислено				
AE , мм	$ДС$, мм	$n_{пр}$	ΔAE , мм	$\Delta ДС$, мм	ε , %	Δn
			0,5 0,5			

Окончательный результат:

$$n_1 =$$

$$n_2 =$$

Вывод по проделанной работе:

Экспериментально определив показатель преломления стекла, мы доказали, что эта величина постоянна для двух сред, не зависящая от угла падения.

Лабораторная работа № 3.

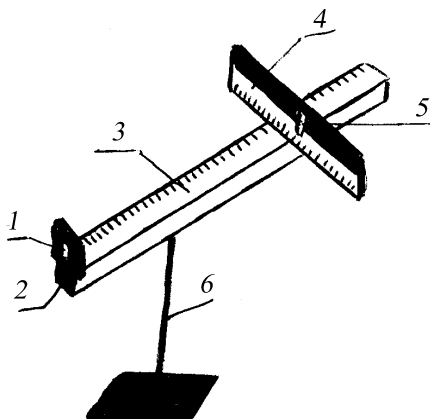
Измерение длины световой волны

Цель работы: экспериментальное определение световой волны с помощью дифракционной решетки.

Оборудование:

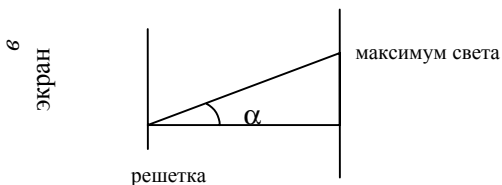
Дифракционная решетка с периодом 1/100 мм или 1/50 мм, экран, линейка, источник света.

Схема установки:



- 1 – решетка
- 2 – держатель
- 3 – линейка
- 4 – черный экран
- 5 – щель
- 6 – штатив

Расчетные формулы:



Длина волны определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k},$$

где d – период решетки, k – порядок спектра, φ - угол, под которым наблюдается максимум света.

Так как углы максимумов света первого и второго порядков не превышают 5° , можно вместо синусов брать тангенсы.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{a}.$$

Расстояние a – отсчитывают по линейке от решетки до экрана, v – по шкале экрана до выбранной линии спектра.

Окончательная формула имеет вид:

$$\lambda = \frac{d v}{ka},$$

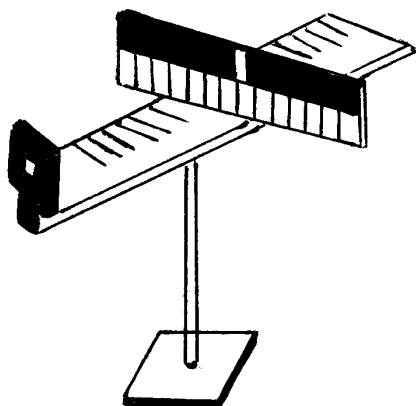
В данной работе погрешность измерений длин волн не оценивается из-за некоторой неопределенности выбора середины части спектра.

Таблица для записи результатов измерений:

Свет	d	k	a	v слева	v справа	v ср.	λ
красный							
фиолетовый							

Вывод по проделанной работе:

Измерив экспериментально длину волн красного и фиолетового света с помощью дифракционной решетки, мы пришли к выводу, что она позволяет очень точно измерять длины световых волн.



Лабораторная работа № 4.

Наблюдение интерференции и дифракции света

Цель работы: экспериментальное наблюдение явления интерференции и дифракции света.

Теоретическая часть:

Интерференция световых волн – сложение двух волн, вследствие которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления результирующих световых

колебаний в различных точках пространства. Результат интерференции зависит от угла падения на пленку, ее толщины и длины волны. Усиление света произойдет в том случае, если преломленная отстанет от отраженной на целое число длин волн. Если вторая волна отстанет от первой на половину длину волны или на нечетное число полуволн, то произойдет ослабление света.

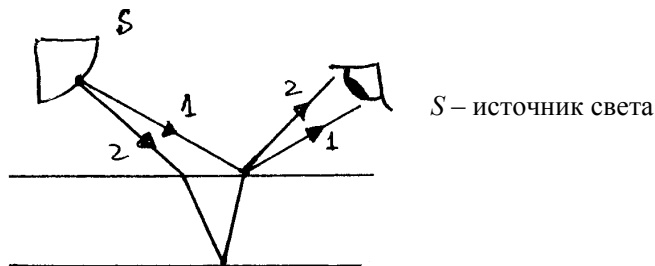
Дифракция – огибание волнами краев препятствий.

Оборудование:

Пластины стеклянные – 2 шт, лоскуты капроновые или батистовые, засвеченная фотопленка с прорезью, сделанной лезвием бритвы, грампластинка, штангельциркуль, лампа с прямой нитью накала.

Вывод по проделанной работе:

1. Интерференция света



Проведя опыт по наблюдению интерференции света с помощью двух пластин мы заметили, что с изменением нажима изменяется форма и расположение интерференционных полос. Это связано с тем, что при изменении толщины пленки, меняется разность хода волн. Максимумы меняются минимумами и наоборот. При проходящем свете картину интерференции наблюдать нельзя, так как для этого необходимы согласованные волны с одинаковыми длинами и постоянной разностью фаз. Получить интерференционную картину с помощью двух

независимых источников света невозможно. Включение еще одной лампочки лишь увеличивает освещенность, но не создает чередование *min* и *max* освещенность.

2. Дифракция

Применяя различные методы мы наблюдали явление дифракции света, изменение дифракционных спектров. Данная работа является экспериментальным подтверждением теории дифракции света.

Лабораторная работа № 5.

Наблюдение сплошного и линейчатого спектров

Цель работы: с помощью необходимого оборудования наблюдать (экспериментально) сплошной спектр, неоновый, гелиевый или водородный.

Оборудование:

Проекционный аппарата, спектральные трубки с водородом, неоном или гелием, высоковольтный индуктор, источник питания, штатив, соединительные провода, стеклянная пластина со скошенными гранями.

Вывод по проделанной работе:

1. Непрерывный спектр

Направив взгляд через пластину на изображение раздвижной щели проекционного аппарата, мы наблюдали основные цвета полученного сплошного спектра в следующем порядке:

Фиолетовый, синий, голубой, зеленый, желтый, оранжевый, красный.

Данный спектр непрерывен. Это означает, что в спектре представлены волны всех длин. Таким образом, мы выяснили, что (как показывает опыт) сплошные спектры дают тела, находящиеся в твердом или жидком состоянии, а также сильно сжатые газы.

2. Водородный и гелиевый

Каждый из этих спектров – это частокол цветных линий, разделенных широкими темными полосами. Наличие линейчатого спектра означает, что вещество излучает свет только вполне определенной длины волны.

Водородный: фиолетовый, голубой, зеленый, красный

Гелия: голубой, зеленый, желтый, красный.

Таким образом, мы доказали, что линейчатые спектры дают все вещества в атомарном газообразном состоянии. В этом случае свет излучают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом. Это самый фундаментальный тип спектров. Изолированные атомы излучают строго определенные длины волн.

Лабораторная работа № 6.

Изучение треков заряженных частиц

Цель работы: в работе требуется провести идентификацию заряженной частицы по результатам сравнения ее трека с треком протона в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Оборудование:

Готовая фотография двух треков заряженных частиц. I трек – протон, II – частица, которую необходимо идентифицировать.

Расчетные формулы:

Идентификация неизвестной частицы осуществляется путем сравнения ее удельного заряда q/m с удельным зарядом протона. Это можно сделать, измерив радиус кривизны треков на начальных участках и сравнив их.

Для заряженной частицы, движущейся перпендикулярно вектору индукции магнитного поля, можно записать:

$$qBv = \frac{mv^2}{R} \text{ или } \frac{q}{m} = \frac{v}{BR}.$$

Отсюда видно, что отношение удельных зарядов частиц равно обратному отношению радиусов треков.



Радиус трека определяется следующим образом: вычерчивают как на рисунке две хорды и восставляют к ним в их серединах перпендикуляры. На их пересечении лежит центр окружности. Измеряют их линейкой.

Спецификация измерительного прибора:

Наименование	Предел измерения	Цена деления	Абсолютная погрешность
линейка	50 см	1 мм	0,5 мм

Формула погрешности удельного заряда:

$$\Delta \frac{q}{m} = \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{\Delta r_2}{r_2} ,$$

где $\Delta r_1, \Delta r_2$, – абсолютная погрешность прибора, r_1, r_2 – радиусы треков.

Таблица результатов измерений:

Трек №	Радиус, r , мм
1.	
2.	

$$\Delta \frac{q}{m} = \frac{0,5}{0,5} + \frac{0,5}{0,5} ,$$

$$\frac{q}{m} = \frac{q}{m} \text{ эксп.} \pm \Delta \frac{q}{m}$$

Вывод по проделанной работе:

Проведя идентификацию заряженной частицы методом сравнения ее трека с треком протона, мы определили, что данная частица является ... (полученный результат).