



**Школа**  
РОСАТОМА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

# ПОДГОТОВКА К ЕГЭ по ФИЗИКЕ

**Преподаватель:** доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры общей физики МИФИ,

*Сурков Вадим Вадимович*



РОСАТОМ

TENEX

Благотворительный фонд  
поддержки и развития  
"Ренессанс"

## СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ 12

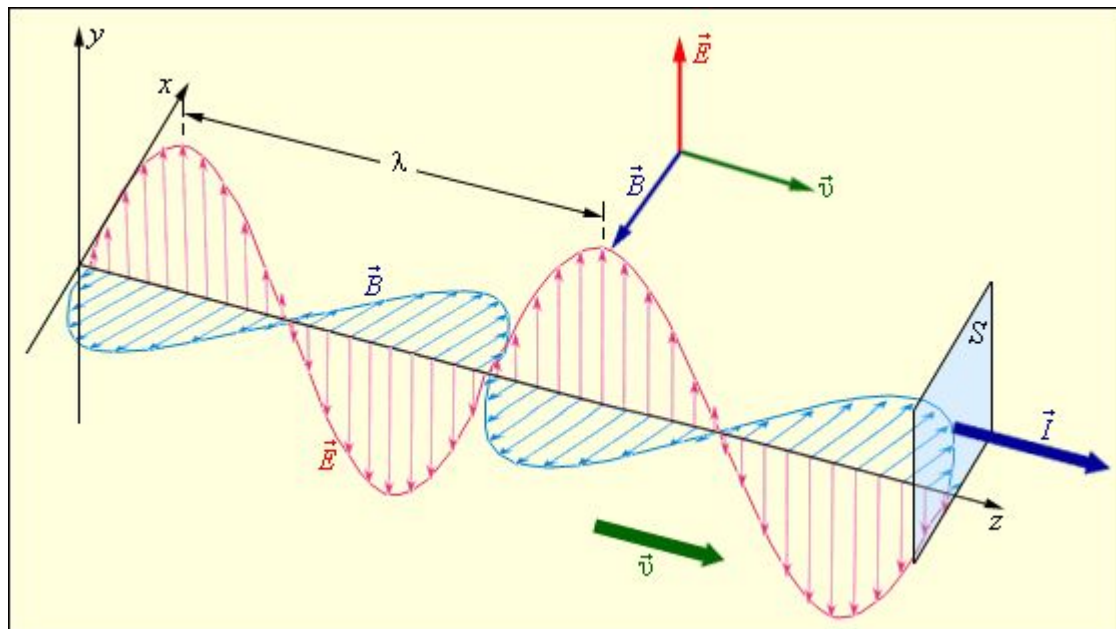
- 1. Введение. Природа и свойства света**
- 2. Интерференция света**
- 3. Дифракция света**



# ОПТИКА

Физическая оптика есть раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света.

В этом разделе свет рассматривается как частный случай электромагнитных волн, т.е. изучаются волновые свойства света.



# 1. Введение. Природа и свойства света

## 1.1. Свет – электромагнитная волна

Скорость электромагнитных волн в вакууме одинакова во всех системах отсчёта:  $c \approx 3 \cdot 10^8$  км/с.

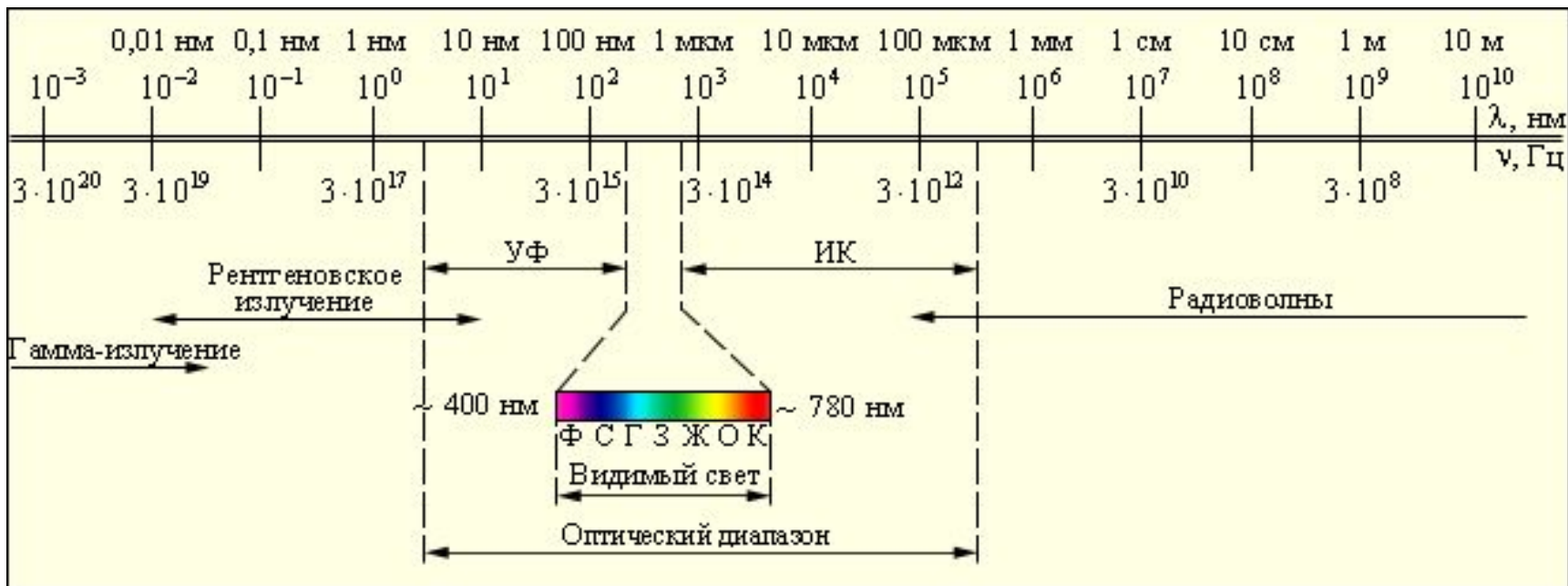
Электромагнитная волна – поперечная, т.е. колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  в волне перпендикулярны друг другу и вектору скорости волны.

Фазы колебаний векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  одинаковы:

$$\begin{cases} E = E_m \cos(\omega(t - x/v) + \alpha) \\ B = B_m \cos(\omega(t - x/v) + \alpha) \end{cases}$$

Электромагнитные волны переносят энергию и импульс.

## 1.2. Шкала электромагнитных волн



В широком смысле под светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему области инфракрасного и ультрафиолетового излучений.

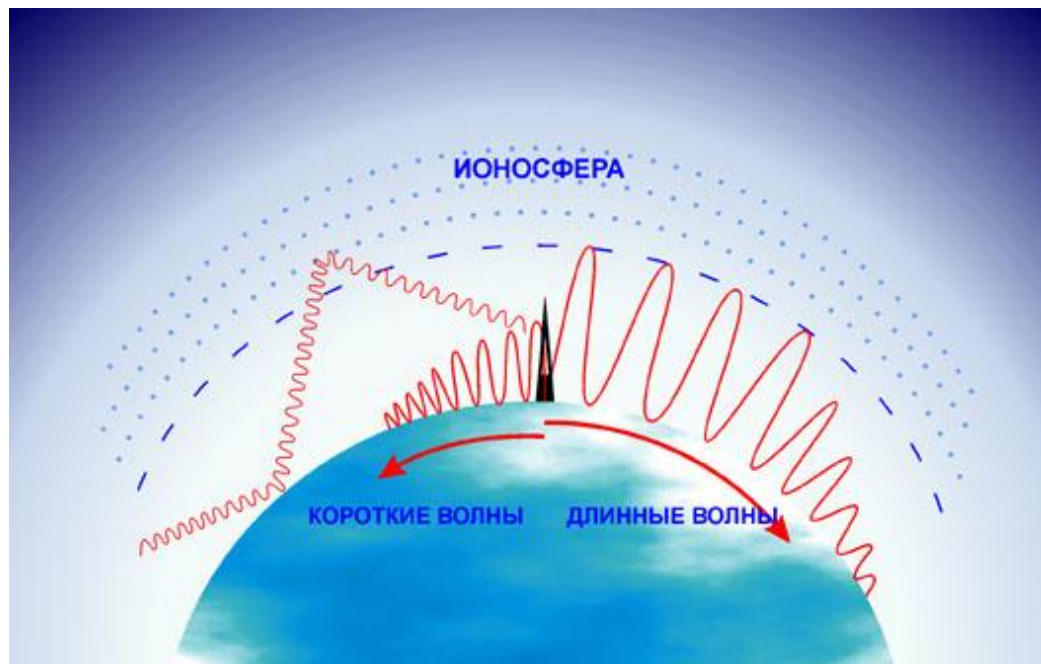


Школа  
РОСАТОМА



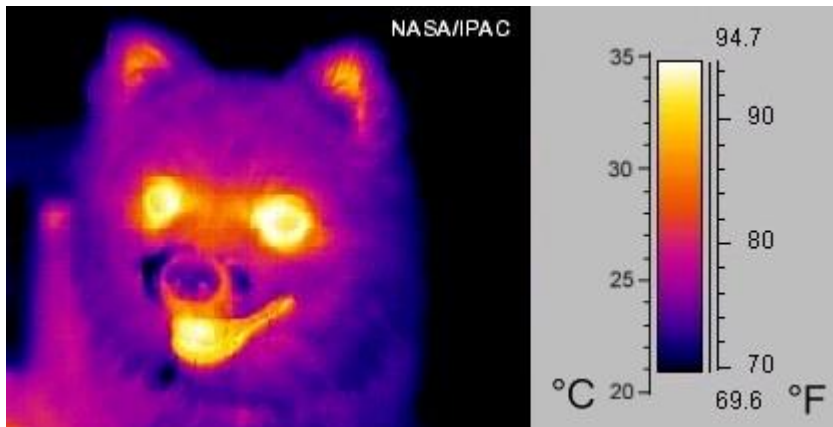
Антенна является конвертером электрического тока радиочастотного диапазона в электромагнитное излучение и наоборот.

## Радиоволны



Распространение радиоволн в атмосфере.

## Инфракрасное излучение

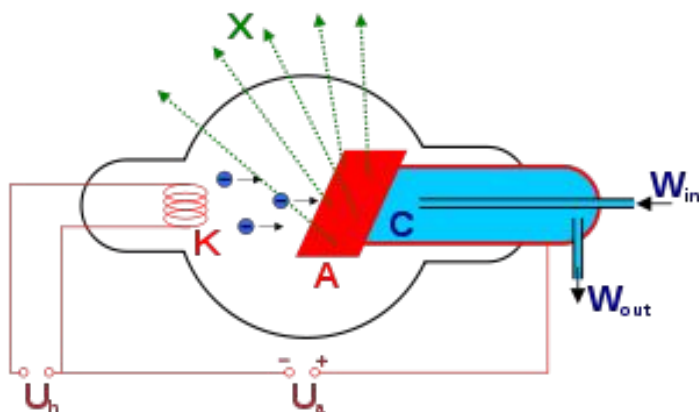


На этом широкоугольном подробном изображении, полученном космическим телескопом Спитцера, видно инфракрасное излучение пыли (показано красным цветом) и старых звезд (голубым цветом) в Андромеде - массивной спиральной галактике, удаленной от нас всего на 2.5 миллиона световых лет





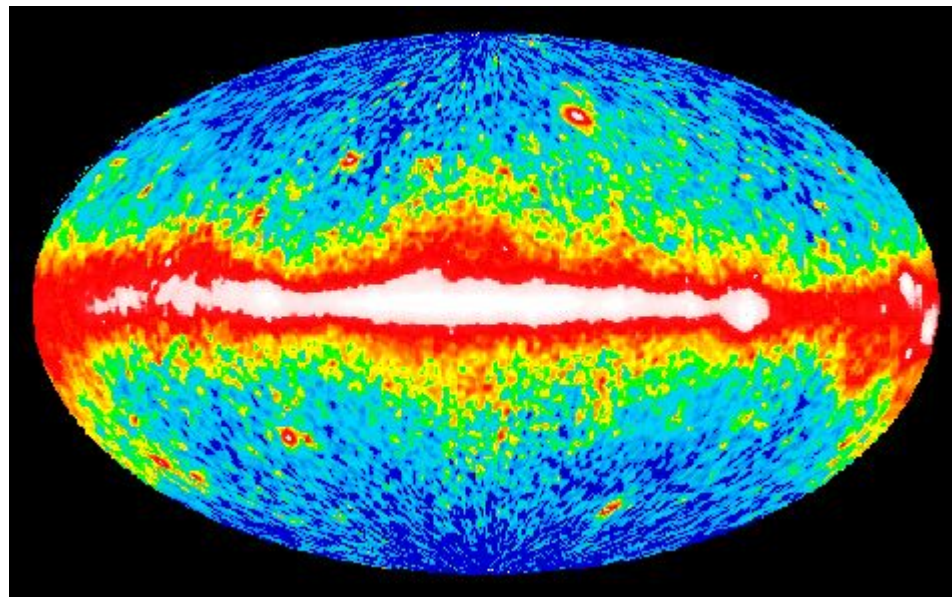
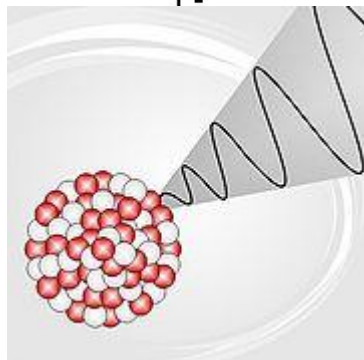
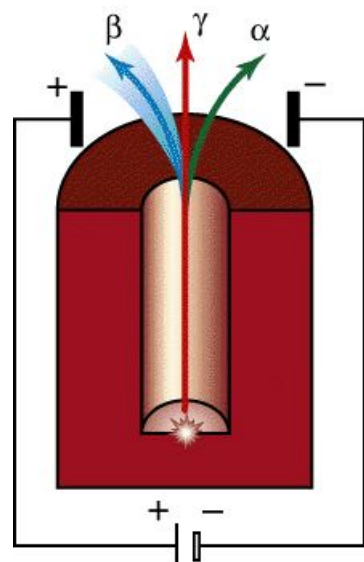
## Рентгеновское излучение



Рентгеновское излучение гигантской области звездообразования NGC 604 (около 1300 световых лет) в близкой спиральной галактике M33, удаленной от нас на три миллиона световых лет. На этой цветной картинке объединены данные о рентгеновском излучении, полученные обсерваторией Чандра (показаны синим цветом), и оптическое изображение с космического телескопа Хаббла.



## Гамма-излучение



Чтобы мы увидели, если бы наши глаза чувствовали гамма-излучение? На картинке изображены обработанные компьютером данные со всего неба, полученные в диапазоне энергий фотонов больше 100 миллионов электрон-вольт.

## 1.3. Дисперсия света. Разложение белого света в спектр

Показателем преломления среды называется величина

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

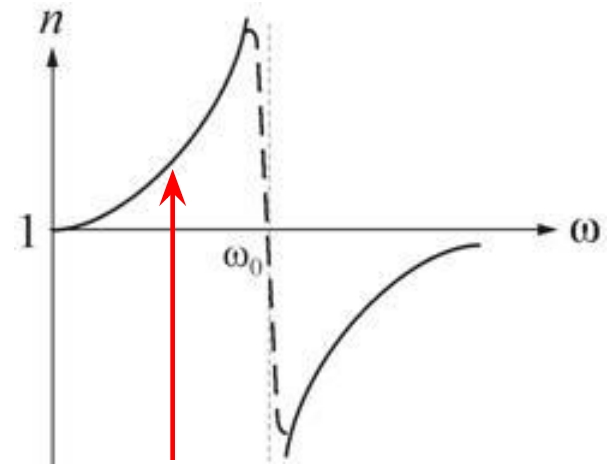
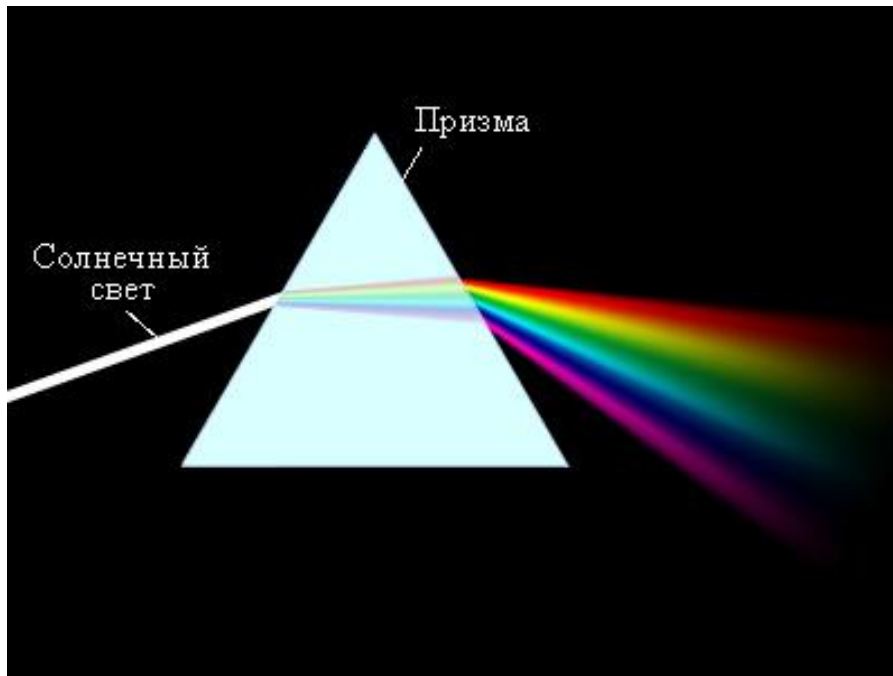
где  $c$  – скорость света в вакууме, а  $v$  – скорость света в среде:

$$v = \lambda \nu,$$

где  $\lambda$  – длина волны света, а  $\nu$  – частота.

Дисперсией называется зависимость показателя преломления среды от длины волны или частоты света. Обычно дисперсия возникает при длине волны, меньшей 1 см.

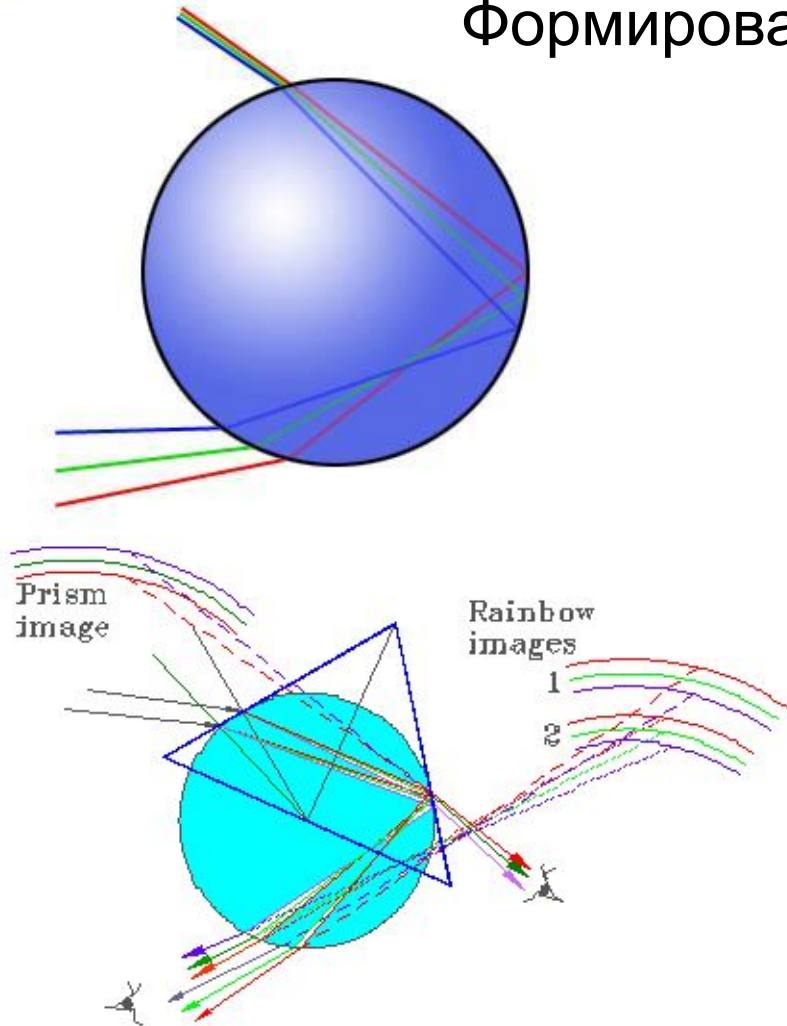
$$n = n(\lambda) \quad n = n(\nu)$$

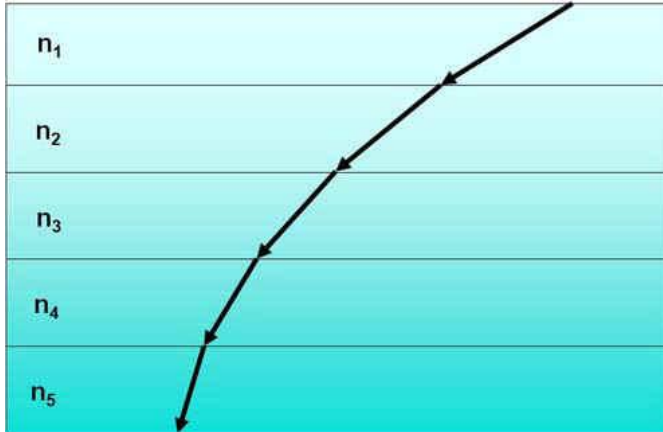


Показатель преломления  
стекла в зависимости от  
частоты видимого света.



## Формирование радуги





$$n_1 < n_2 < n_3 < n_4 < n_5$$

**Рефракция** – отклонение света от прямолинейного распространения в среде с переменным показателем преломления



**Зеленый луч** возникает на какие-то мгновения перед исчезновением солнца за горизонтом, или непосредственно перед рассветом. Представляет собой небольшую вспышку зеленого цвета и вызывается рефракцией и дисперсией света в атмосфере.

### Пример 1.

**A23.** При распространении электромагнитной волны в вакууме

- 1) происходит только перенос энергии
- 2) происходит только перенос импульса
- 3) происходит перенос и энергии, и импульса
- 4) не происходит переноса ни энергии, ни импульса

### Пример 2.

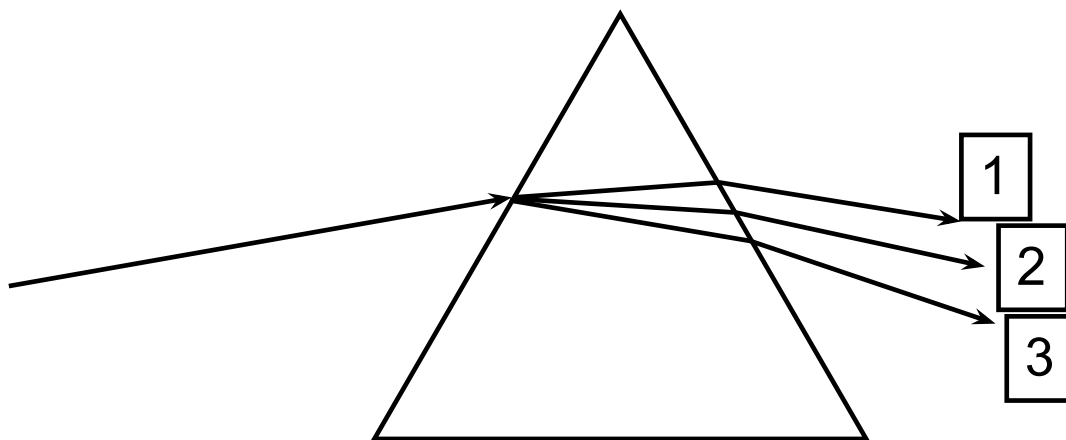
**A23.** Электромагнитное излучение оптического диапазона испускают

- 1) возбужденные атомы и молекулы вещества
- 2) атомы и молекулы в стационарном состоянии
- 3) электроны, движущиеся в проводнике, по которому течет переменный ток
- 4) возбужденные ядра атомов



**Пример 3.** Луч белого света после прохождения стеклянной призмы разлагается в спектр (см. рисунок). Расположить лучи 1, 2 и 3 по цветам.

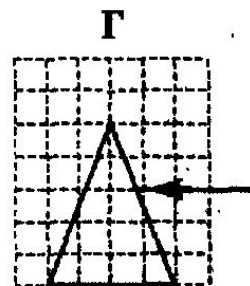
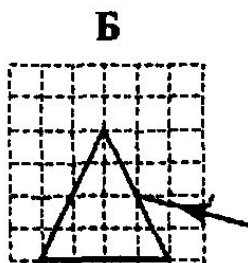
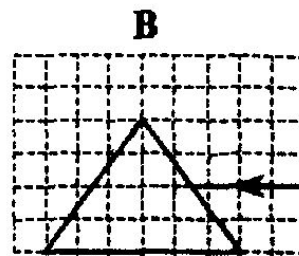
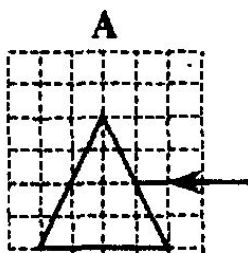
1. 1 – зеленый, 2 – красный, 3 – фиолетовый;
2. 1 – красный, 2 – фиолетовый, 3 – зеленый;
3. 1 – фиолетовый, 2 – зеленый, 3 – красный;
4. 1 – красный, 2 – зеленый, 3 – фиолетовый





## Пример 4.

**A24.** Пучок белого света, пройдя через призму, разлагается в спектр. Была выдвинута гипотеза, что ширина спектра, получаемого на стоящем за призмой экране, зависит от угла падения пучка на грань призмы. Необходимо экспериментально проверить эту гипотезу. Какие два опыта нужно провести для такого исследования?



- 1) А и Б
- 2) Б и В
- 3) Б и Г
- 4) В и Г

Призмы должны быть одинаковыми, а лучи разными, т.е. случаи А и Б.

### Пример 5.

Пучок света переходит из воздуха в стекло. Частота световой волны  $\nu$ , скорость света в воздухе  $c$ , показатель преломления стекла относительно воздуха  $n$ . Чему равны длина волны и скорость света в стекле?

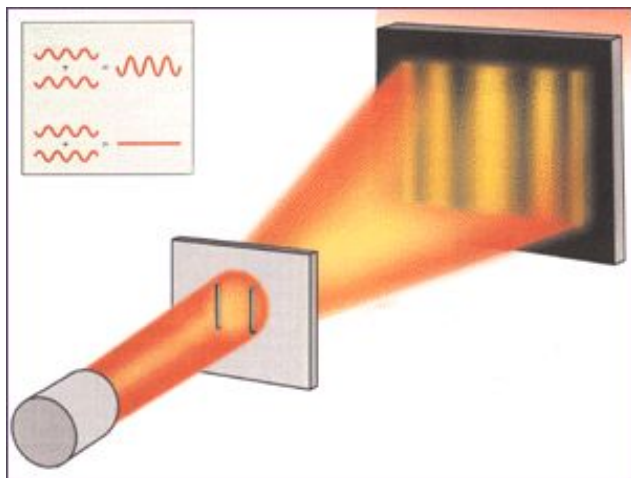
1)  $cn$ , 2)  $c\nu n$ , 3)  $\frac{c}{n}$ , 4)  $\frac{c}{\nu n}$ .

$$n = \frac{c}{v}, \quad \Rightarrow \quad v = \frac{c}{n}, \quad \lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{\nu n}.$$

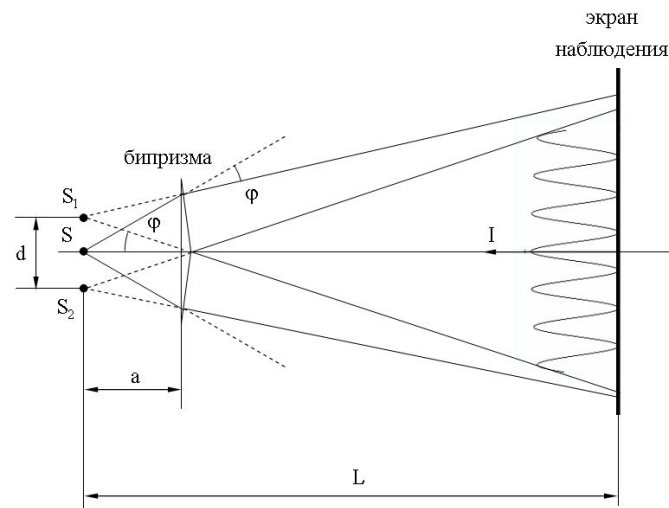
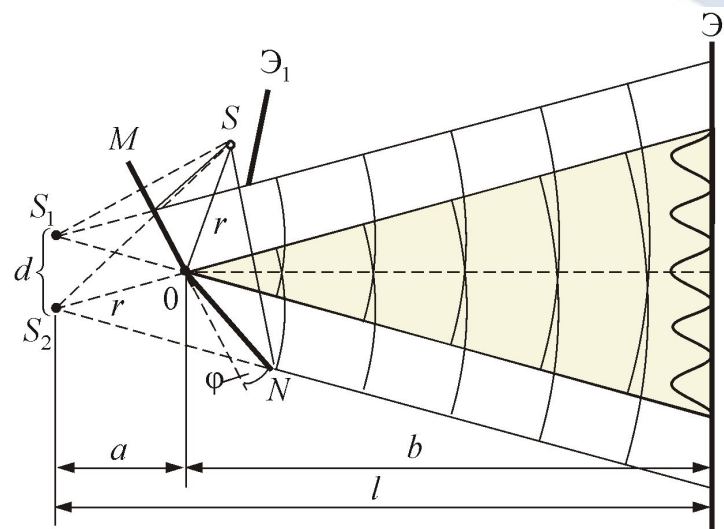
## 2. Интерференция света



Интерференция волн на воде, образовавшихся после падения капель воды.



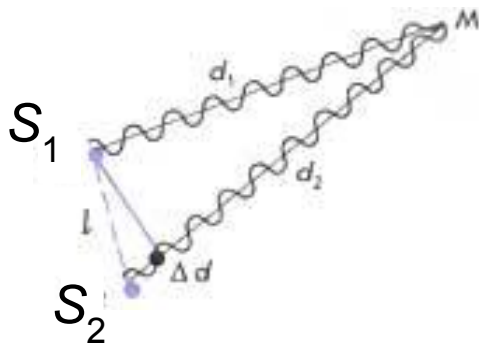
Эксперимент Томаса Юнга. Свет от источника (в данном случае лазер) пропускается через две узкие щели и падает на экран, на котором возникает интерференционная картина в виде светлых и тёмных полос.



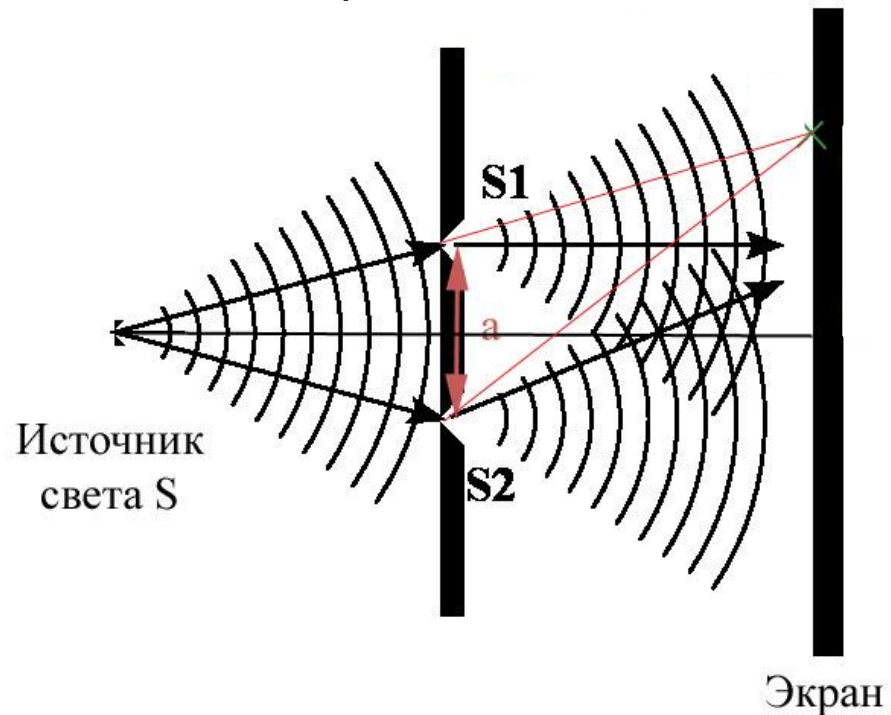
Зеркала и бипризма Френеля



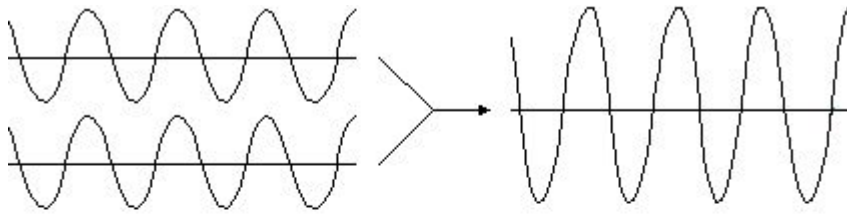
Пропуская свет через две щели или два отверстия, получим два вторичных источника света  $S_1$  и  $S_2$ , которые имеют одинаковые частоты. Такие источники называются когерентными.



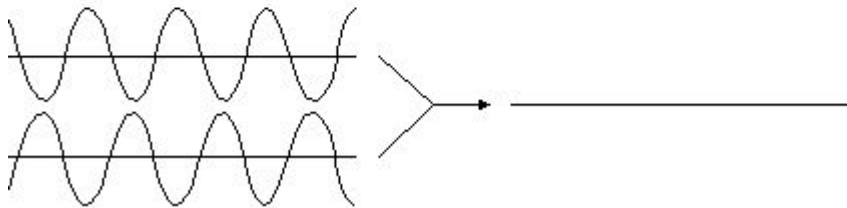
Результат сложения двух волн зависит от расстояний  $d_1$  и  $d_2$ .



## 2.1. Элементарные представления об интерференции



Волны усиливают друг друга.  
Амплитуда увеличивается.



Волны ослабляют друг друга.  
Амплитуда уменьшается.

Интерференцией называется такое сложение двух или нескольких когерентных волн, при котором в одних точках пространства амплитуда результирующей волны увеличивается, а в других точках – уменьшается.

## 2.2. Условия интерференционных максимума и минимума

Условие интерференционного  
максимума:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Условие интерференционного  
минимума:

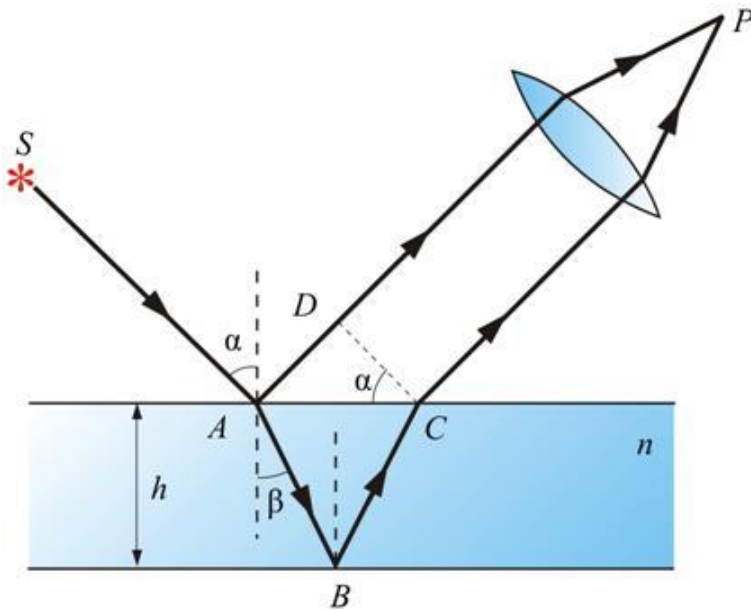
$$\Delta d = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Интерференционные  
полосы в опыте Юнга.

## 2.3. Интерференция света в тонких плёнках

$$\Delta d = n(AB + BC) - AD$$



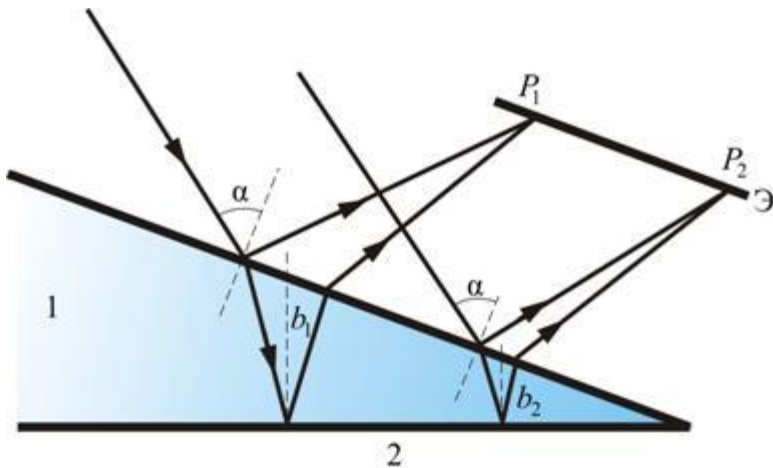


## Интерференция света в тонких плёнках







## Интерференция света на ТОНКОМ КЛИНЕ



## Кольца Ньютона

$r_m = r_1 m^{1/2}$   
 $r_1 = (R\lambda)^{1/2} = 0.77 \text{ мм}$

$\lambda = 600$   НМ

$R = 100$   СМ

**Пример 6.** Что такое интерференция волн?

1. Сложение волн (?)
2. Разложение волн в спектр
3. Огибание волнами препятствий
4. Преломление волн

**Пример 7.** Мыльные пузыри часто имеют радужную окраску. Какое физическое явление лежит в основе этого эффекта?

- |                  |              |
|------------------|--------------|
| 1. Интерференция | 2. Дифракция |
| 3. Поляризация   | 4. Дисперсия |

**Пример 8.** При прохождении белого света через призму свет разлагается в спектр. Это явление происходит благодаря:

1. Зависимости показателя преломления от частоты света
2. Дифракции света при преломлении в призме
3. Интерференции падающего и преломленного света
4. Различному поглощению света с разной частотой веществом призмы

**Пример 9.** Два точечных источника света находятся близко друг от друга и создают на удаленном экране устойчивую интерференционную картину. Это возможно, если эти два источника являются:

- 1) двумя лампами накаливания;
- 2) двумя солнечными зайчиками от разных зеркал;
- 3) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещенными светом одного и того же точечного источника;
- 4) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещенными светом двух точечных источников разных цветов

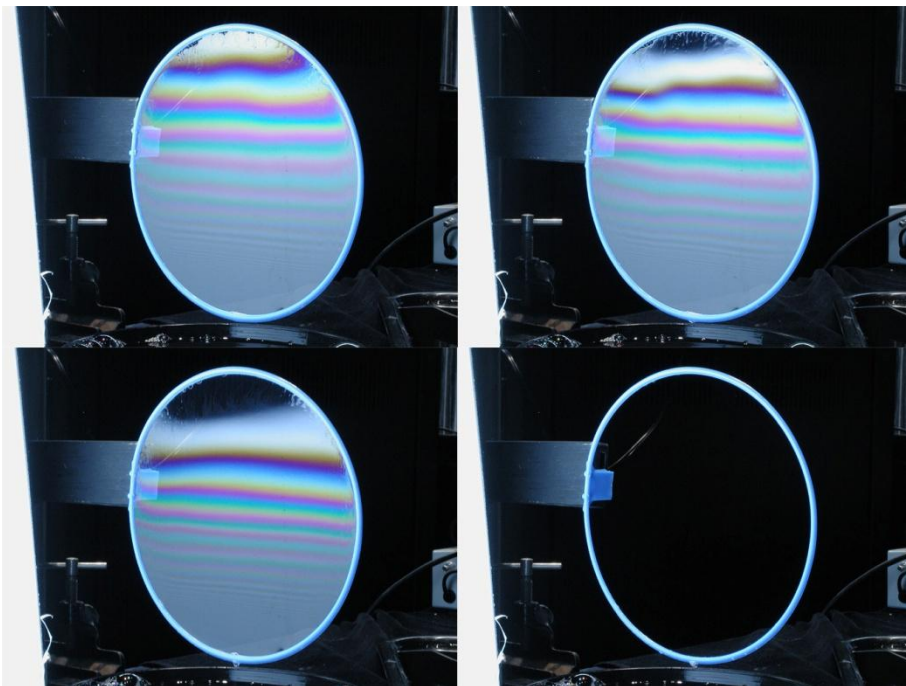
## Пример. 10.

A16

Сложение в пространстве когерентных волн, при котором образуется постоянное во времени пространственное распределение амплитуд результирующих колебаний, называется

- 1) дисперсией
- 2) поляризацией

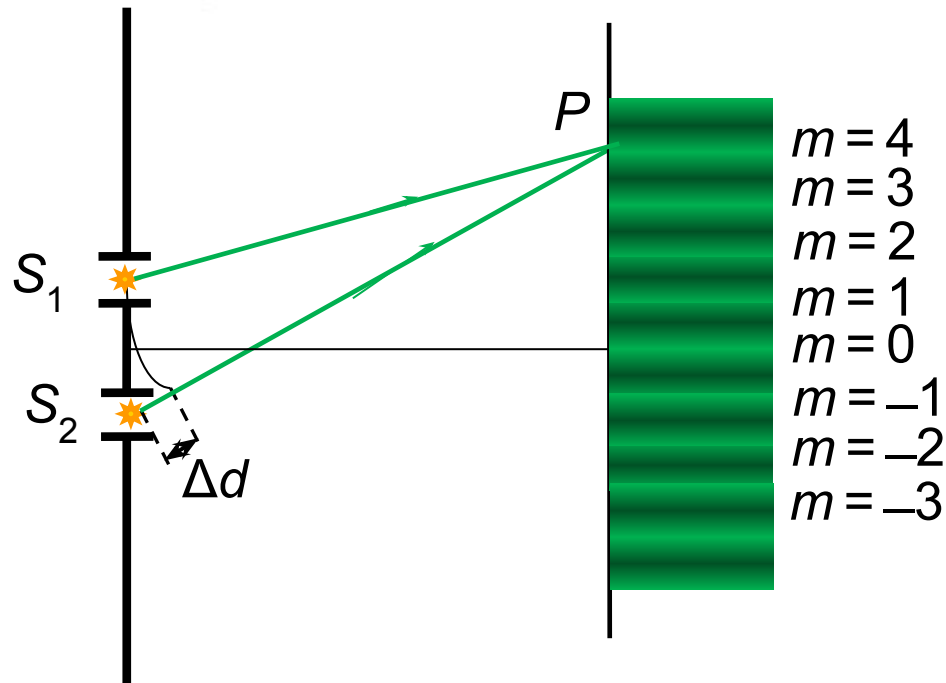
- 3) интерференцией
- 4) преломлением



## Пример 11.

**A21.** На плоскую непрозрачную пластину с двумя узкими параллельными щелями падает по нормали плоская монохроматическая волна из зеленой части видимого спектра. За пластиной на параллельном ей экране наблюдается интерференционная картина из многих полос. Если использовать монохроматический свет из красной части видимого спектра, то

- 1) расстояние между интерференционными полосами увеличится
- 2) расстояние между интерференционными полосами уменьшится
- 3) расстояние между интерференционными полосами не изменится
- 4) интерференционная картина повернется на  $90^\circ$

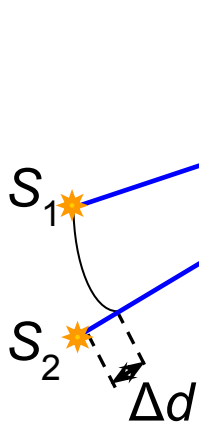


$$\Delta d = d_1 - d_2 = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Чем больше  $\lambda$  тем больше  $\Delta d$ . Расстояние между интерференционными полосами увеличится.

**Пример 12.** Два точечных источника расположены в вакууме и испускают световые волны с частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц и одинаковыми начальными фазами. Разность расстояний от источников до некоторой точки равна 0,9 мкм. В этой точке наблюдается:

1. Интерференционный максимум.
2. Интерференционный минимум.
3. Промежуточная между максимумом и минимумом интенсивность света.
4. Мало информации для ответа.



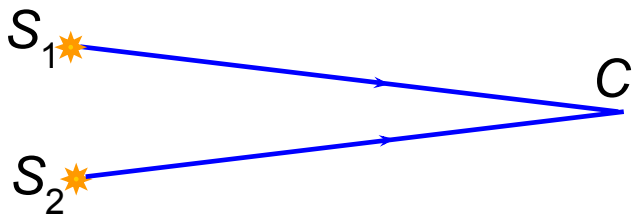
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{14}} = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 0,6 \text{ мкм}$$

$$\Delta d = 0,9 \text{ мкм} = 1,5\lambda \quad \Rightarrow \quad \text{МИНИМУМ}$$



**Пример 13.** Имеются два точечных источника  $S_1$  и  $S_2$ , испускающих электромагнитные волны с одинаковыми частотами и начальными фазами. Точка  $C$  на экране находится на равном расстоянии от источников. В точке  $C$  будет наблюдаться:

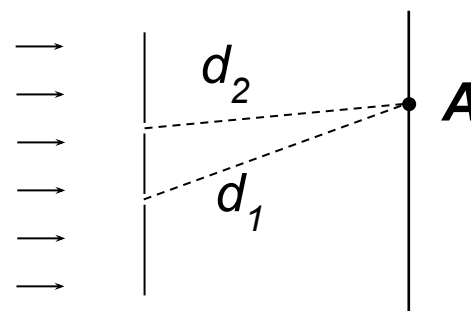
1. Максимум интенсивности света независимо от его частоты.
2. Минимум интенсивности света независимо от его частоты.
3. Максимум или минимум интенсивности света в зависимости от его частоты.
4. Среди ответов 1-3 нет правильного



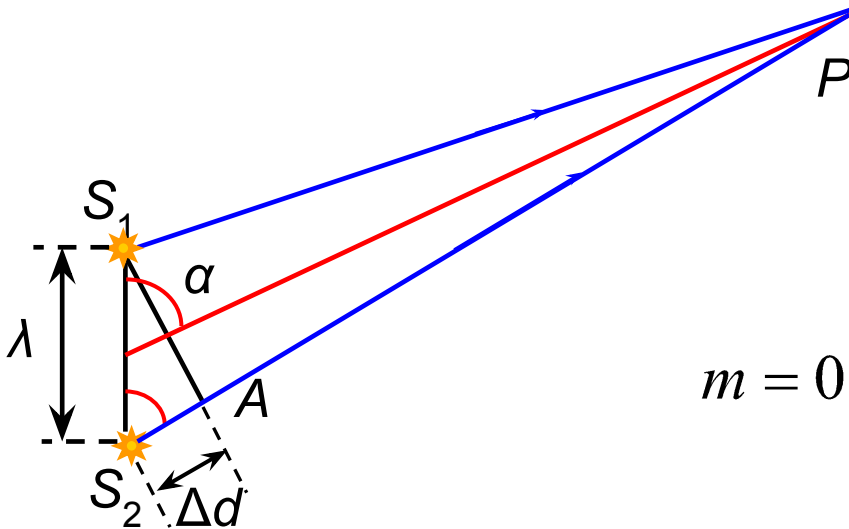
$$\Delta d = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{максимум}$$

**Пример 14.** Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda = 550$  нм падает на непрозрачную пластину с двумя очень маленькими отверстиями перпендикулярно пластине. За пластиной расположен экран, на котором наблюдается интерференционная картина. В точке А (см. рисунок) разность хода лучей, прошедших отверстия, составляет  $d_1 - d_2 = 550$  нм. В точке наблюдается:

1. Интерференционный максимум.
2. Промежуточная между максимумом и минимумом интенсивность.
3. Интерференционный минимум.
4. Среди приведенных ответов нет правильного.



**Пример 15.** Два точечных источника  $S_1$  и  $S_2$  испускают электромагнитные волны с одинаковыми частотами и начальными фазами. Расстояние между ними равно длине волны излучения. Под каким углом к линии  $S_1S_2$  наблюдается интерференционный минимум. Наблюдение ведётся на расстояниях намного превышающих длину волны.



$$\Delta d \approx \lambda \cos \alpha = \left( m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

$$m = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos \alpha = \frac{1}{2}, \quad \alpha = 60^\circ$$

### Пример 16.

A16

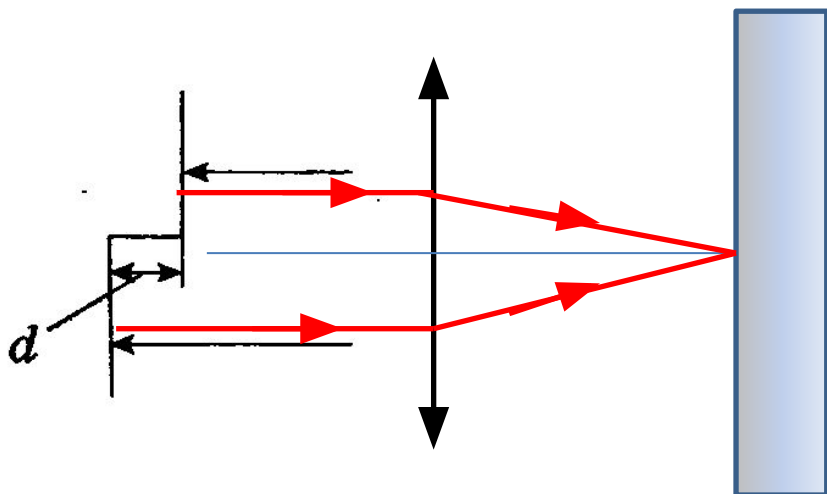
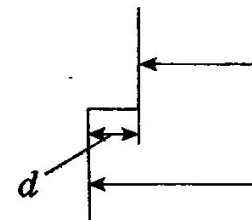
Одна сторона толстой стеклянной пластины имеет ступенчатую поверхность, как показано на рисунке. На пластину, перпендикулярно ее поверхности, падает световой пучок, который после отражения от пластины собирается линзой. При какой наименьшей, но отличной от нуля высоте  $d$  ступеньки интенсивность света в фокусе линзы будет максимальной?

1)  $\lambda$

2)  $2\lambda$

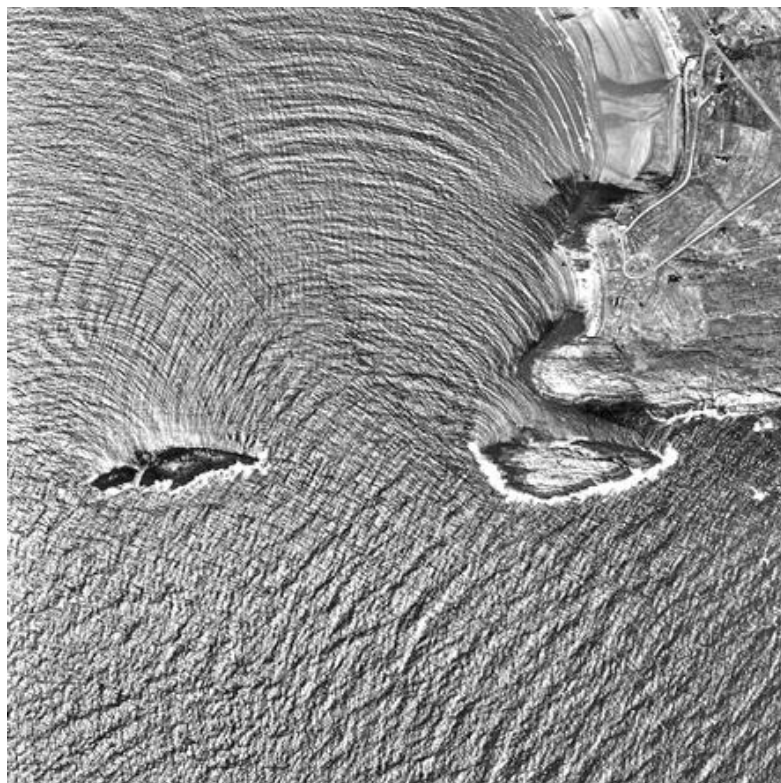
3)  $\frac{1}{2}\lambda$

4)  $\frac{1}{4}\lambda$



$$\Delta = 2d = \lambda \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\lambda}{2}$$

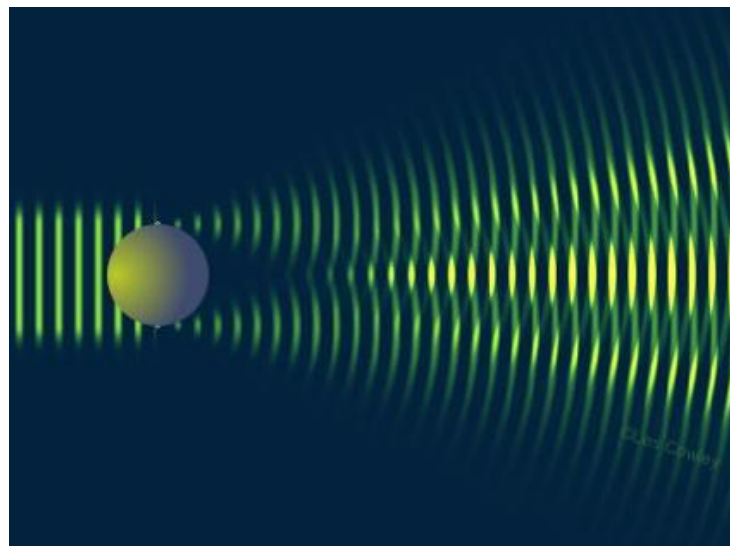
### 3. Дифракция света



Дифракция волн на поверхности воды



Дифракция света на облаке

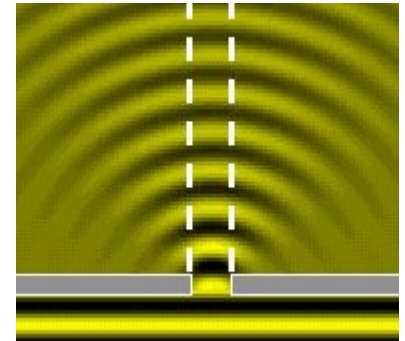
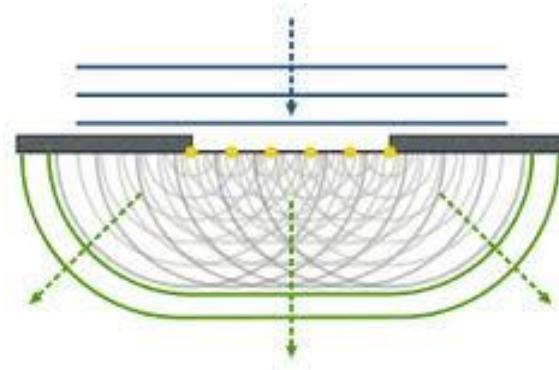


Дифракция света на шарике

Под дифракцией в узком смысле слова понимают огибание волнами препятствий. В более широком смысле слова дифракция – это любое отклонение от законов геометрической оптики.

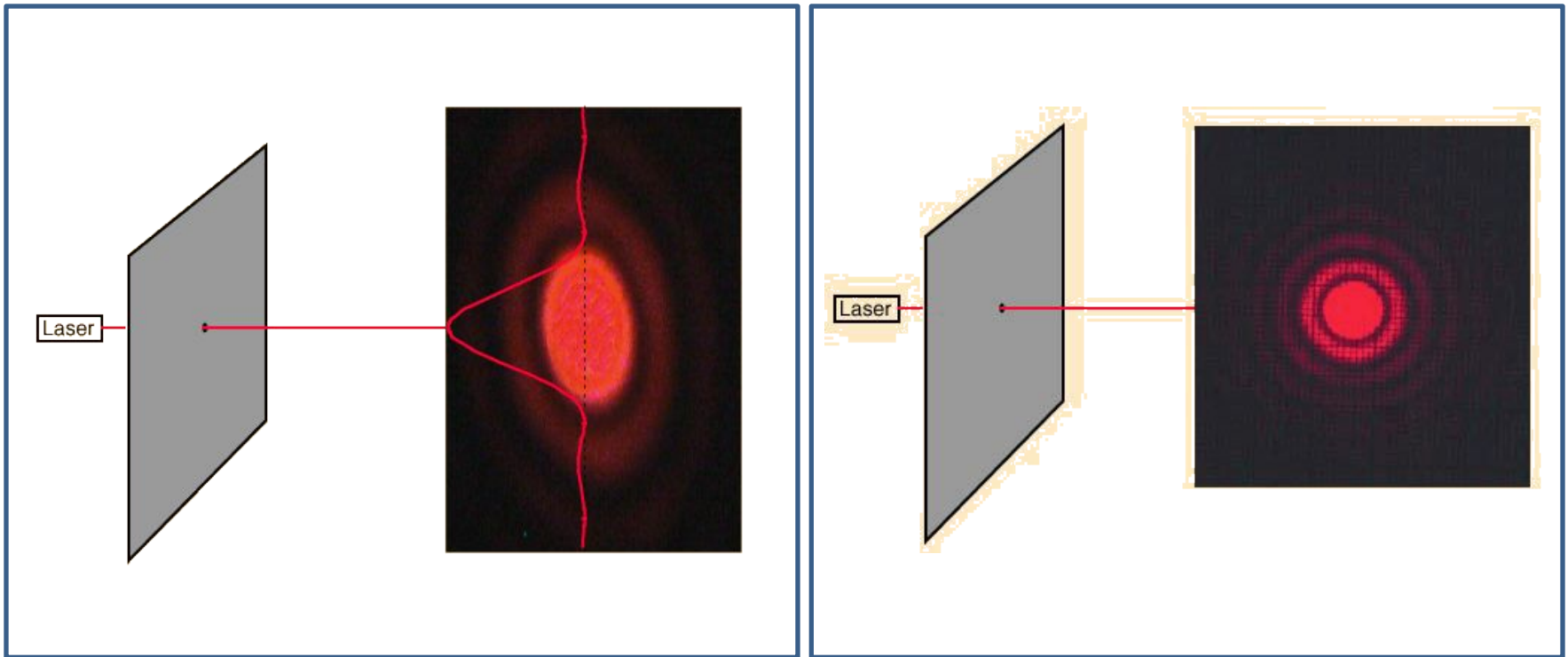
### 3.1. Принцип Гюйгенса

Каждая точка волновой поверхности является источником вторичных волн, огибающая которых становится новой волновой поверхностью.

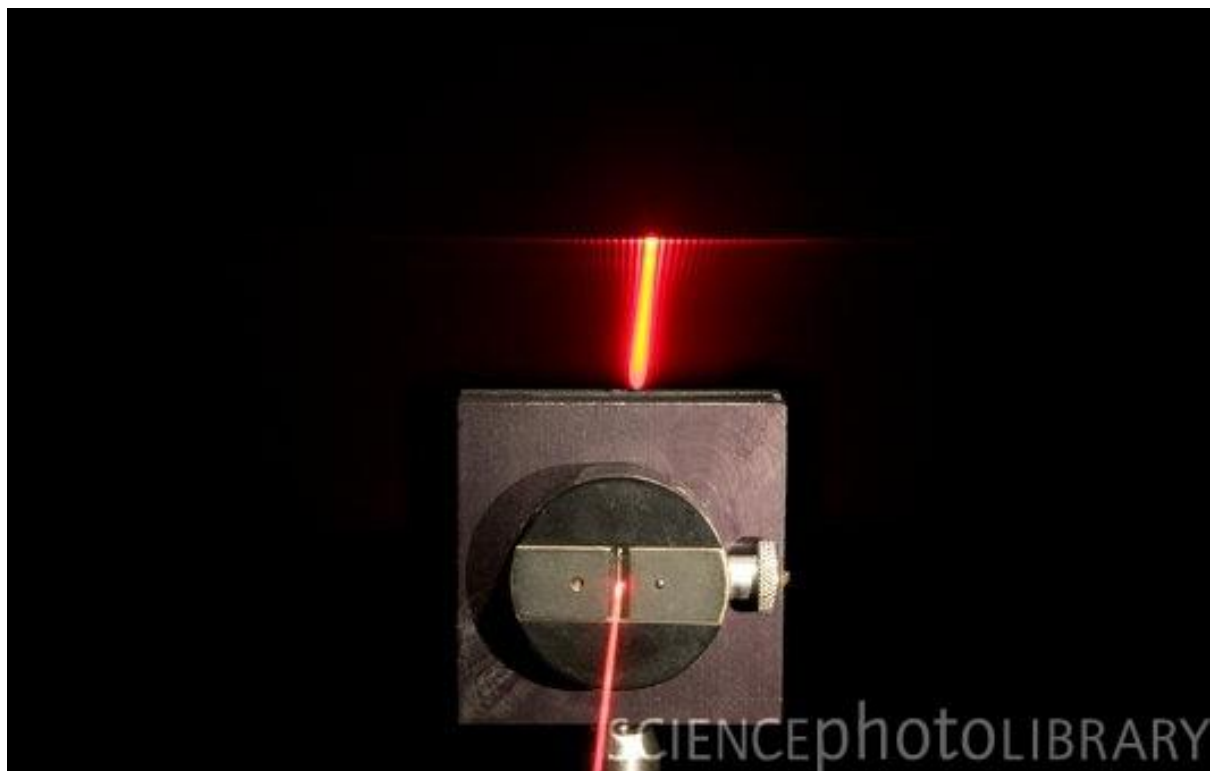


## 3.2. Дифракция света на отверстиях и щелях

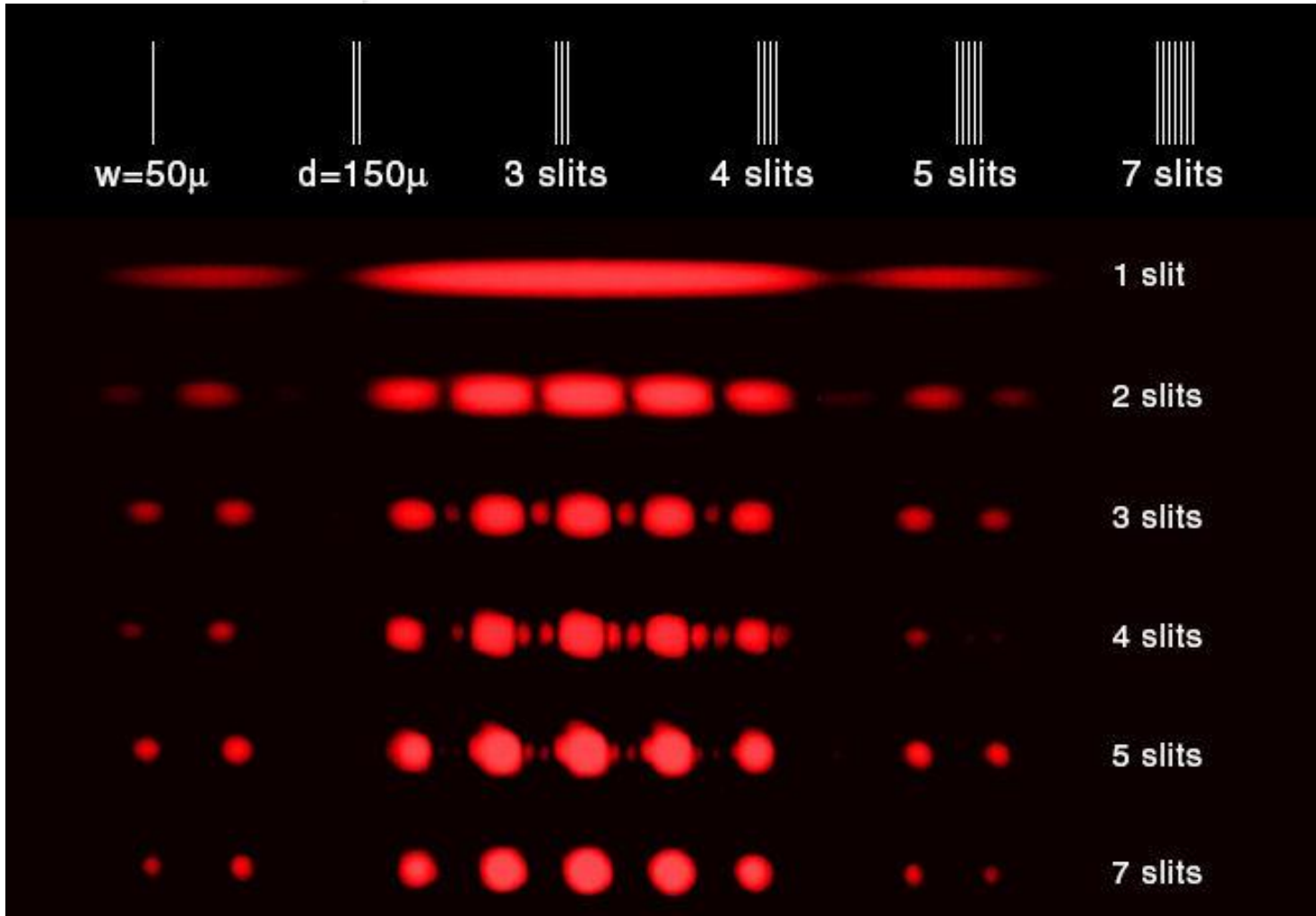
Дифракция Фраунгофера и Френеля на круглом отверстии.



## Дифракция лазерного излучения на щели

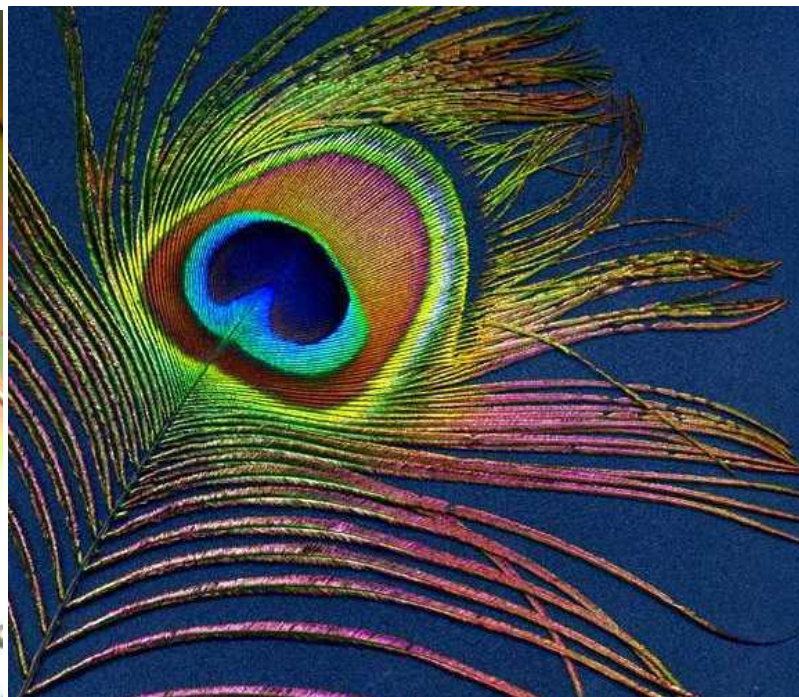
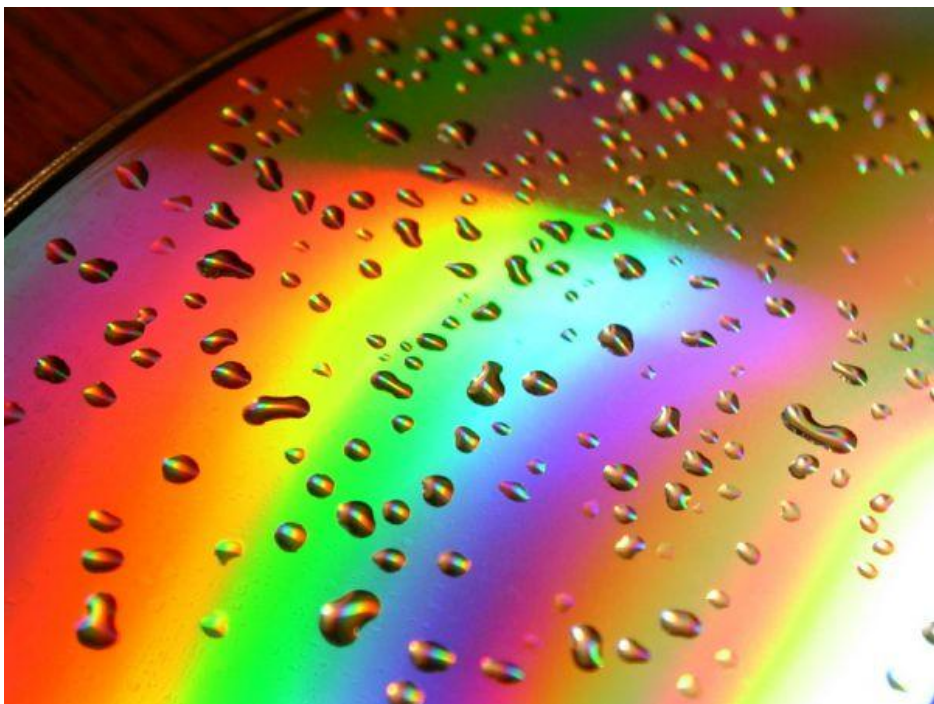








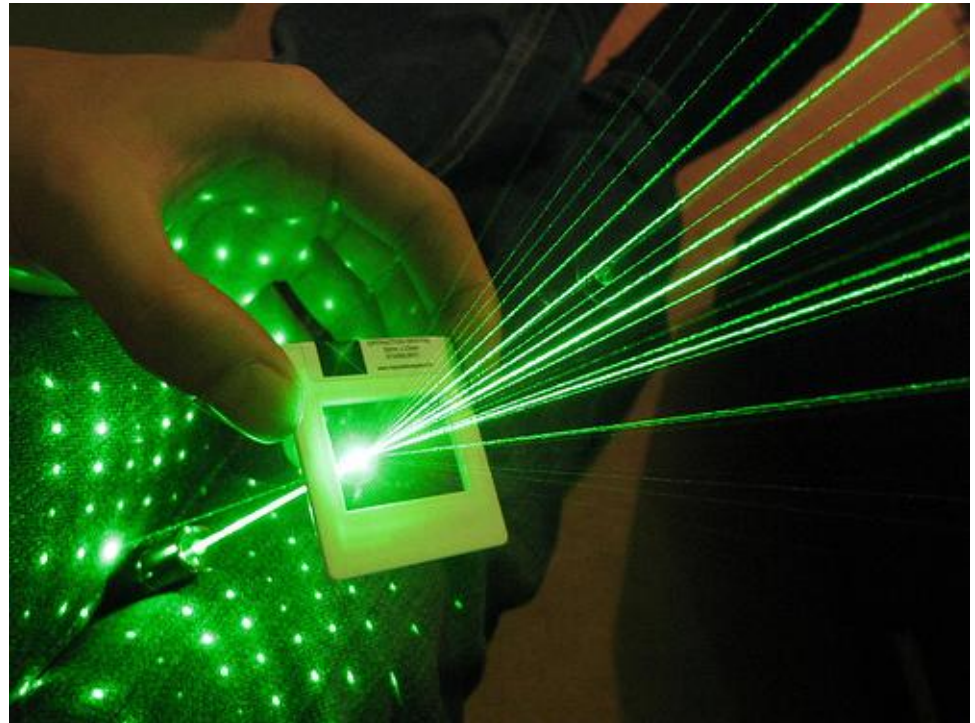
ШКОЛА  
РОСАТОМА

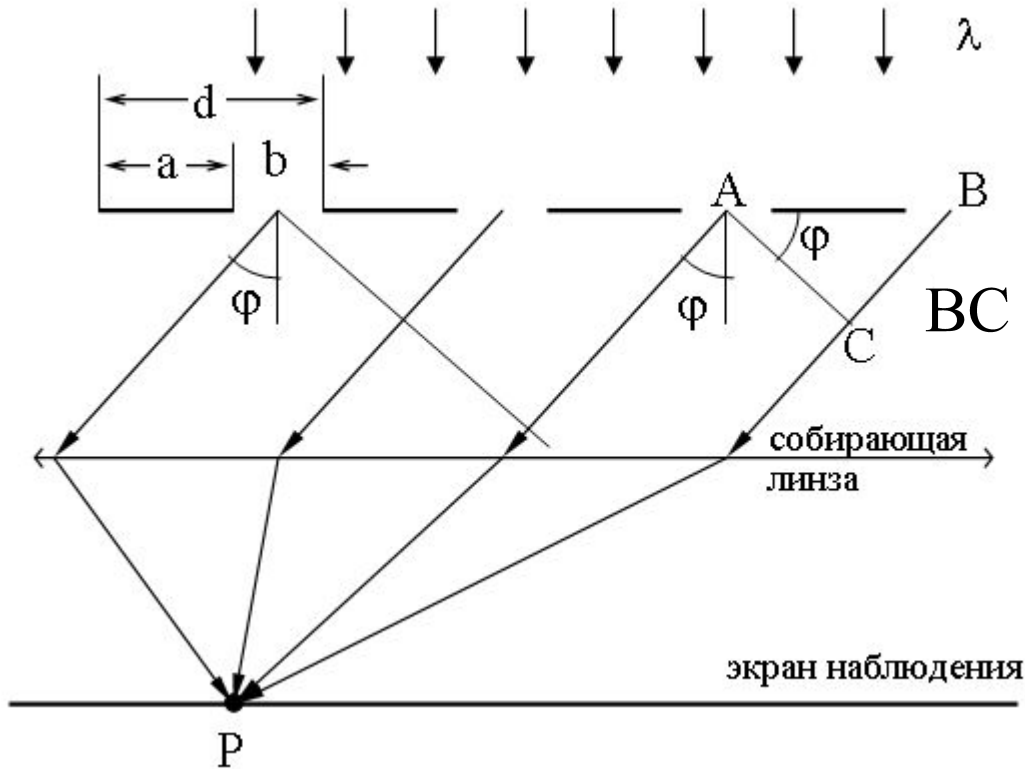


### 3.3. Дифракционная решётка

Дифракционная решётка – это спектральный прибор, предназначенный для разложения света в спектр и для измерения длин волн.

Дифракционная решётка – это стеклянная или металлическая плоская пластина, на которой делительной машиной нарезано очень большое число прямых равноотстоящих штрихов.





$b$  – ширина  
одной щели

$d$  – период  
решётки

$\varphi$  – угол  
дифракции

$$BC = d \sin \varphi$$

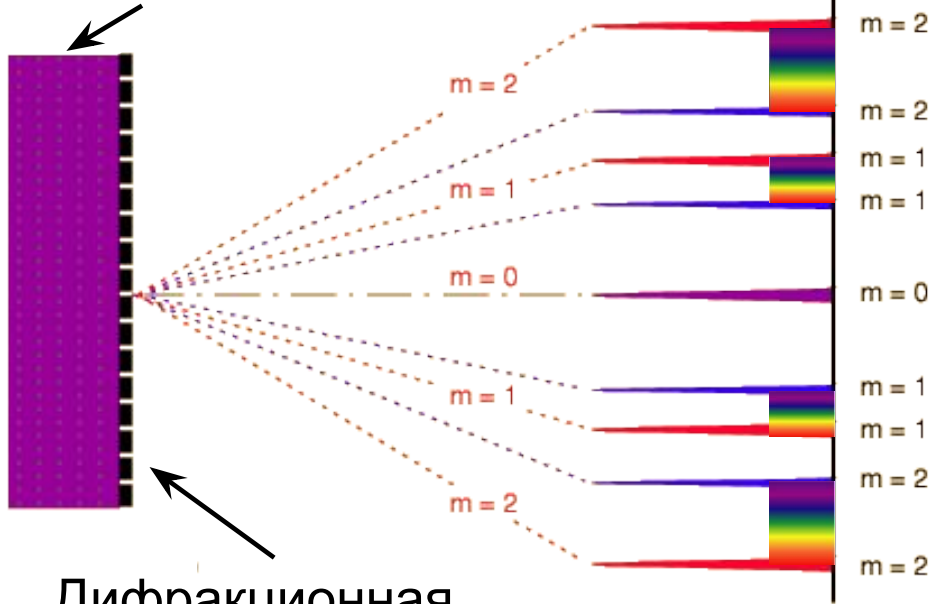
Условие для дифракционных максимумов:

$$d \sin \varphi = m\lambda,$$
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



Дифракционная решётка как спектральный прибор. Падающая волна – смесь волн, отвечающих всем цветам от красного до синего.

Падающая волна



Дифракционная  
решётка и линза

$$d \sin \varphi = m \lambda$$

Число  $m$  называется  
порядком спектра.

При дифракции красные  
лучи отклоняются  
больше, чем  
фиолетовые!

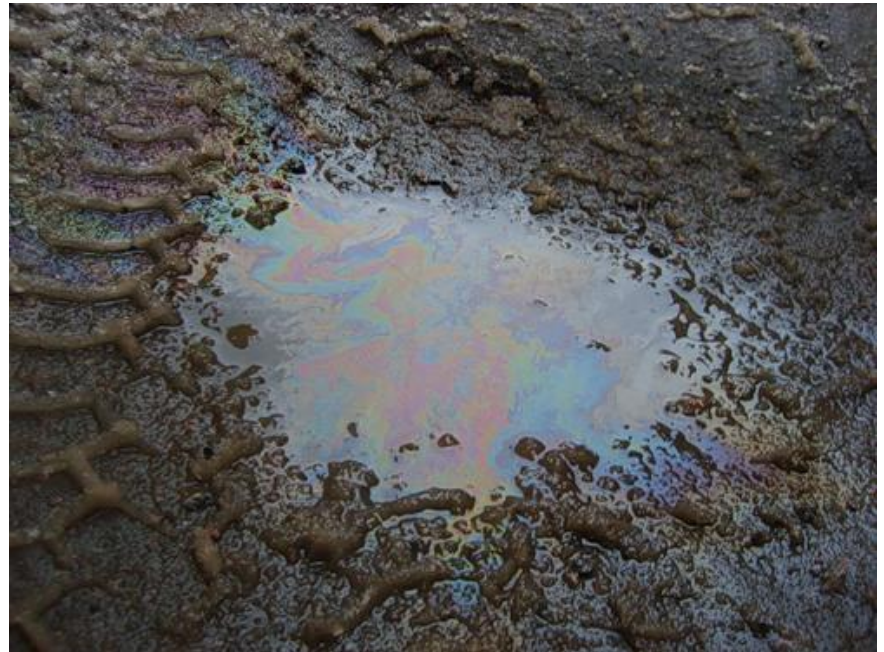


**Пример 17.** Отклонение света от прямолинейного направления распространения при прохождении около препятствий называется

1. интерференцией
2. дифракцией
3. дисперсией
4. поляризацией

**Пример 18.** Каким явлением объясняется цвет нефтяной плёнки?

1. интерференцией
2. дифракцией
3. дисперсией
4. поляризацией

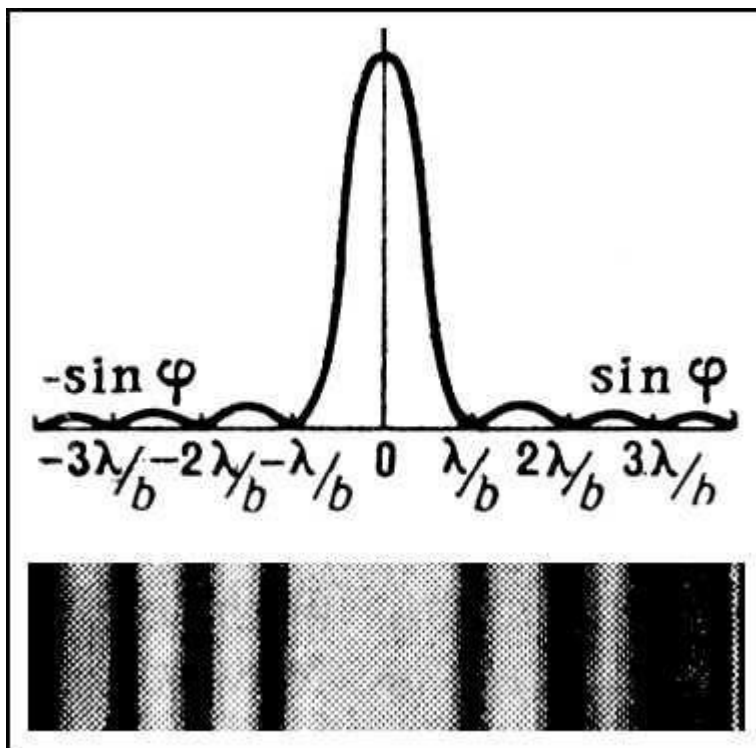


## Пример 19.

A16

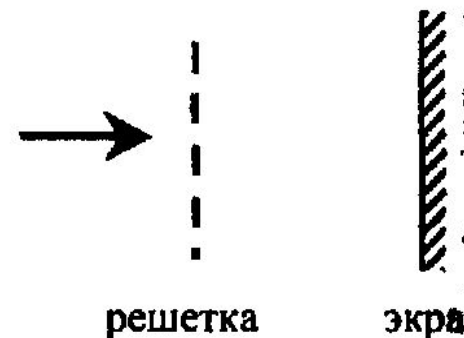
Параллельный пучок монохроматического красного света падает на препятствие с узкой щелью. На экране за препятствием, кроме центральной светлой полосы, наблюдается чередование красных и темных полос. Данное явление связано с

- 1) поляризацией света
- 2) дисперсией света
- 3) дифракцией света
- 4) преломлением света



## Пример 20.

**A17.** Лучи от двух лазеров, свет которых соответствует длинам волн  $\lambda$  и  $1,5\lambda$ , поочередно направляются перпендикулярно плоскости дифракционной решетки (см. рисунок). Расстояние между первыми дифракционными максимумами на удаленном экране



- 1) в обоих случаях одинаково
- 2) во втором случае в 1,5 раза больше
- 3) во втором случае в 1,5 раза меньше
- 4) во втором случае в 3 раза больше

$$d \sin \varphi = m\lambda$$

Чем больше  $\lambda$ , тем больше  $\varphi$  и тем больше расстояние.





**Пример 21.** Плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda = 400$  нм падает на дифракционную решетку, имеющую 500 штрихов на миллиметр, перпендикулярно ее плоскости. Под каким углом к направлению первоначального распространения лучей наблюдается первый дифракционный минимум (максимум?) ? Для малых углов справедливо равенство  $\sin \varphi \approx \varphi$ .

1.  $\varphi = 0,2^\circ$      $\varphi = 0,2$  рад    3.     $\varphi = 0,2^\circ$      $\varphi = 0,2$  рад

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad m = 1 \quad d = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

$$\Rightarrow \sin \varphi = \frac{\lambda}{d} = \frac{400 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-6}} = 0,2 \quad \Rightarrow \quad \varphi \approx 0,2 \text{ рад}$$

**Пример 22.** На дифракционную решетку с периодом 0,006 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна длиной волны 550 нм. Какое максимальное количество дифракционных максимумов можно наблюдать с помощью этой решетки для данной световой волны?

- 1) 11                    2) 21                    3) 3                    4) 22

$$d \sin \varphi = m\lambda, \quad |\sin \varphi| = \frac{|m|\lambda}{d} < 1,$$

$$|m| < \frac{d}{\lambda} = \frac{0,006 \cdot 10^{-3}}{550 \cdot 10^{-9}} = \frac{6}{0,55} = 10,9 \quad \Rightarrow \quad m = 10 \quad \Rightarrow \quad N = 21$$

## Пример 23.

**A24**

На дифракционную решетку с периодом  $0,004$  мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Количество дифракционных максимумов, наблюдаемых с помощью этой решетки, равно  $19$ . Какова длина волны света?

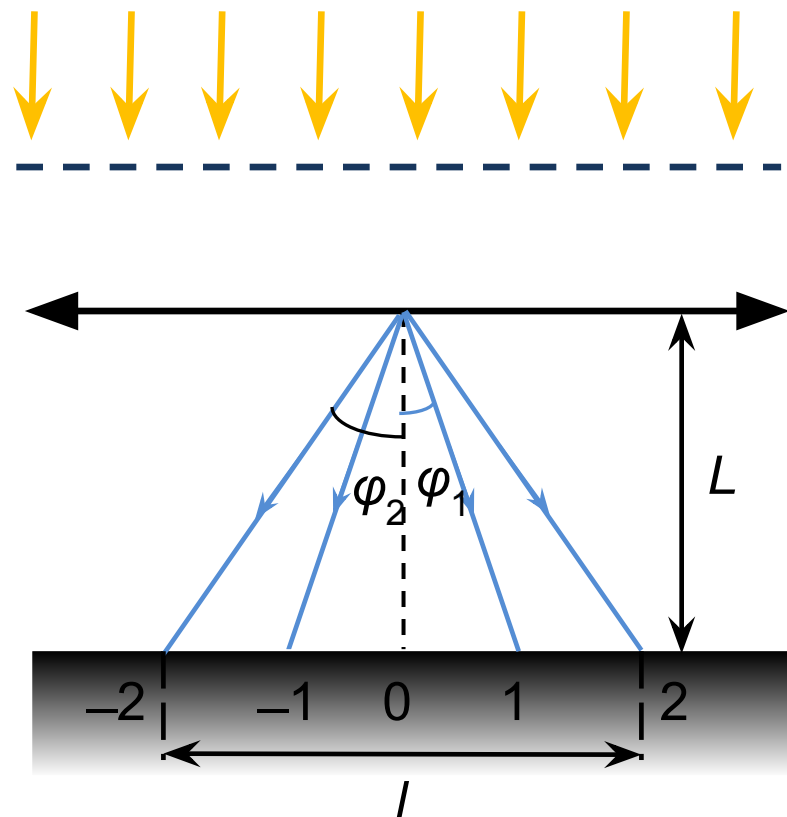
1)  $640$  нм

2)  $560$  нм

3)  $440$  нм

4)  $580$  нм

**Пример 24.** Дифракционная решётка, имеющая 750 штрихов на 1 см, расположена параллельно экрану на расстоянии 1,5 м от него. На решётку перпендикулярно её плоскости направляют пучок света. Определите длину волны света, если расстояние на экране между вторыми максимумами, расположенными слева и справа от центрального (нулевого), равно 22,5 см. Ответ выразите в микрометрах (мкм) и округлите до десятых. Считать  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ .



$$L = 1,5 \text{ м} \quad l = 22,5 \text{ см}$$

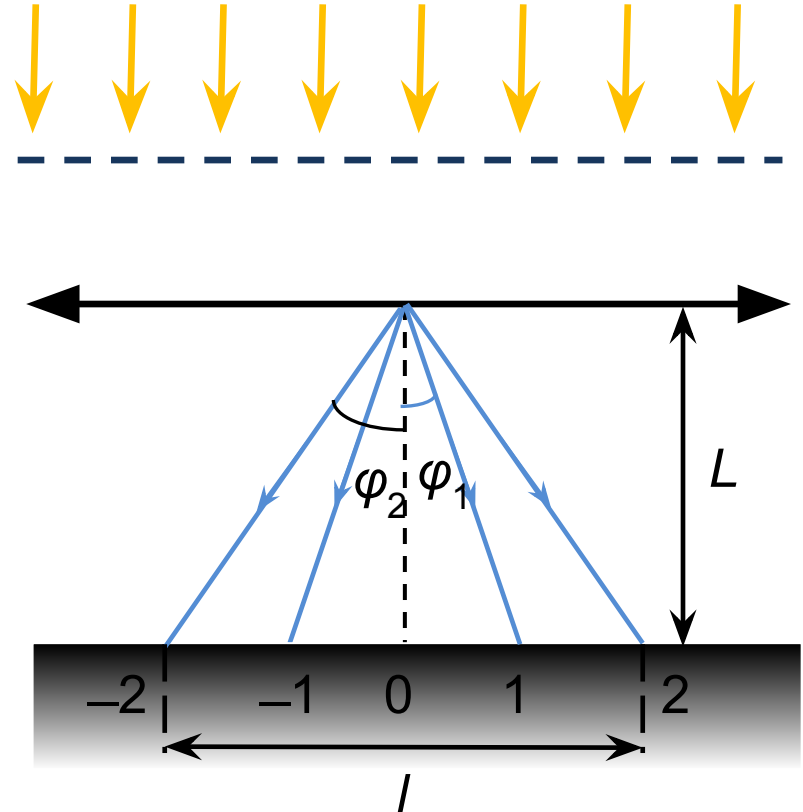


$$d = \frac{1}{750} \text{ см}, \quad d \sin \varphi_2 = 2\lambda$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{l}{2L} \approx \sin \varphi_2 = \frac{2\lambda}{d}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{ld}{4L} = \frac{22,5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 750 \cdot 1,5} =$$

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





### Пример 25.

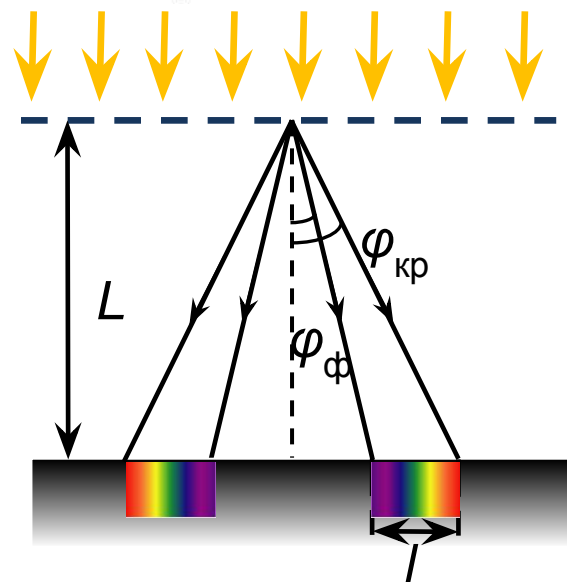
**В4.** На дифракционную решетку, имеющую период  $2 \cdot 10^{-5}$  м, падает нормально параллельный пучок белого света. Спектр наблюдается на экране на расстоянии 2 м от решетки. Чему равно расстояние между красным и фиолетовым участками спектра первого порядка (первой цветной полоски на экране), если длины волн красного и фиолетового света соответственно равны  $8 \cdot 10^{-7}$  м и  $4 \cdot 10^{-7}$  м? Считать  $\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi$ . Ответ выразите в см.

$$m = 1, \Rightarrow d \sin \varphi_{\phi} = \lambda_{\phi} \quad d \sin \varphi_{\text{кр}} = \lambda_{\text{кр}}$$

$$l = L (\operatorname{tg} \varphi_{\text{кр}} - \operatorname{tg} \varphi_{\phi}) \approx L (\sin \varphi_{\text{кр}} - \sin \varphi_{\phi}) =$$

$$= L \left( \frac{\lambda_{\text{кр}}}{d} - \frac{\lambda_{\phi}}{d} \right) = \frac{L}{d} (\lambda_{\text{кр}} - \lambda_{\phi}) =$$

$$= \frac{2 \cdot (8 - 4) \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^{-2}$$



## Домашнее задание

**Пример 1.** Выберите среди приведённых примеров электромагнитные волны с минимальной длиной волны.

1. инфракрасное излучение Солнца
2. ультрафиолетовое излучение Солнца
3. излучение  $\gamma$ -радиоактивного препарата
4. излучение антенны радиопередатчика

**Пример 2.**

**A23.** Инфракрасное излучение испускают

- 1) электроны при их направленном движении в проводнике
- 2) атомные ядра при их превращениях
- 3) любые заряженные частицы
- 4) любые нагретые тела



**Пример 3.** Скорость распространения света в некоторой прозрачной среде составляет половину от скорости света в вакууме. Чему равен показатель преломления света для этой среды?

1.  $n = \sqrt{2}$    2.  $n = 2$    3.  $n = 4$    4. скорость света и показатель преломления никак не связаны друг с другом



## Пример 4.

**A21.** На плоскую непрозрачную пластину с двумя узкими параллельными щелями падает по нормали плоская монохроматическая волна из зеленой части видимого спектра. За пластиной на параллельном ей экране наблюдается интерференционная картина, содержащая большое число полос. При переходе на монохроматический свет из фиолетовой части видимого спектра

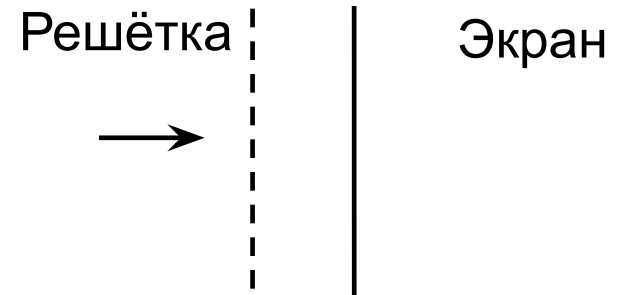
- 1) расстояние между интерференционными полосами увеличится
- 2) расстояние между интерференционными полосами уменьшится
- 3) расстояние между интерференционными полосами не изменится
- 4) интерференционная картина станет невидимой для глаза

**Пример 5.** Сложение в пространстве когерентных волн, при котором образуется постоянное во времени пространственное распределение амплитуд результирующих колебаний, называется

1. интерференцией
2. поляризацией
3. дисперсией
4. преломлением

**Пример 6.** Луч от лазера направляется перпендикулярно плоскости дифракционной решётки (см. рисунок) в первом случае с периодом  $d$ , а во втором – с периодом  $2d$ . Расстояние между нулевым и первым дифракционным максимумами на удалённом экране

1. в обоих случаях одинаково
2. во втором случае в 2 раза меньше
3. во втором случае в 2 раза больше
4. во втором случае в 4 раза больше



**Пример 7.** На дифракционную решётку, имеющую 500 штрихов на мм, перпендикулярно ей падает плоская монохроматическая волна. Чему равна длина падающей волны, если дифракционный максимум 4-го порядка наблюдается в направлении, перпендикулярном падающим лучам? Ответ дайте в нанометрах.

**Пример 8.**

**В4.** Плоская монохроматическая световая волна с длиной волны 400 нм падает по нормали на дифракционную решетку с периодом 5 мкм. Параллельно решетке позади нее размещена собирающая линза с фокусным расстоянием 20 см. Дифракционная картина наблюдается на экране в задней фокальной плоскости линзы. Найдите расстояние между ее главными максимумами 1-го и 2-го порядков. Ответ запишите в миллиметрах (мм), округлив до целых. Считать для малых углов ( $\varphi \ll 1$  в радианах)  $\text{tg } \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi$ .



Школа  
РОСАТОМА

**Благодарю  
за  
внимание!**

