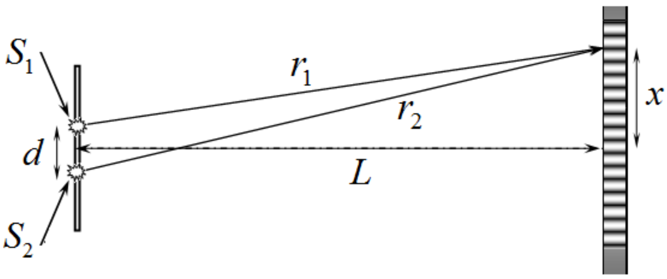
Задача 11- 2. Опыт Физо

Часть 1. Воспоминание об интерференции

Решение этой части задачи традиционное, оно изложено практически во всех учебниках физики. Поэтому ограничимся кратким изложением этого решения, с выделением деталей, существенных при описании экспериментов И. Физо.

1.1 В схеме Юнга интерферирую волны, идущие от двух источников S_1 и S_2. В точке экрана с координатой x (измеренной от оси симметрии системы) интенсивность будет максимальна, если разность хода от источников до точки наблюдения равна целому числу длин волн, т.е.



$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2...) \tag{1}$$

Для расчета этой разности запишем на основании теоремы Пифагора

$$\begin{aligned} r_2^2 &= L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \\ r_1^2 &= L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \end{aligned} . \tag{2}$$

Вычтем второе равенство из первого

$$r_2^2 - r_1^2 = (r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2xd \tag{3}$$

Так как значения r_2, r_1 мало отличаются от расстояния L, которое значительно больше как расстояния между отверстиями d, так и длины волны λ, можно положить $(r_2 + r_1) \approx 2L$. Поэтому разность расстояний описывается формулой

$$(r_2 - r_1) = \frac{xd}{L} \tag{3}$$

Использование условия максимумов интерференции (1) позволят найти координаты точек максимальной интенсивности:

$$\frac{x_m d}{L} = m\lambda \quad \Rightarrow \quad x_m = m\frac{\lambda L}{d}. \tag{4}$$

Расстояние между соседними максимумами (т.е. ширина полосы) равно

$$\Delta x = x_{m+1} - x_m = \frac{\lambda L}{d}. \tag{5}$$

Подстановка численных значений дает результат

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d} = \frac{0{,}55 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}0}{1{,}0 \cdot 10^{-3}} = 1{,}1 \cdot 10^{-3}\,\text{м} = 1{,}1\,\text{мм} \tag{6}$$

1.2 Самый простой способ решения этой части задачи можно найти, используя следующие простые (но общие для любой интерференционно схемы) рассуждения. Переход от одной интерференционной полосы к следующей соответствует увеличение разности хода на одну длину волны! Поэтому если оптическая длина пути в одном из каналов увеличивается на одну длину волны, то интерференционная картина смещается на одну полосу!

Сделаем еще одно замечание, касающееся понятия оптической длины пути. В теории интерференции основную роль играет разность фаз между интерферирующими волнами. Эта разность фаз зависит от длины волны, а именно изменение расстояния на одну длину волны приводит к изменению фазы на 2π. Поэтому для изменения фазы можно записать соотношение

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{\Delta r}{\lambda}. \qquad (7)$$

Если свет распространяется в среде с показателем преломления n, то длина волны уменьшается в n раз, поэтому изменение фазы при распространении света в среде будет равно

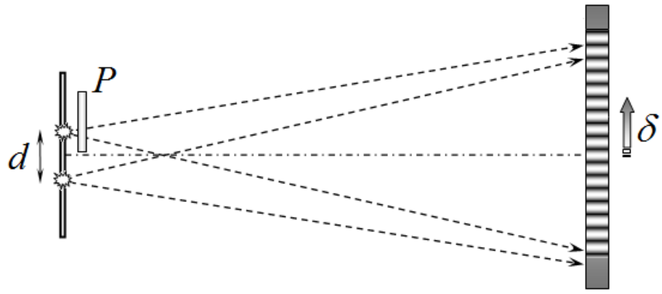
$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{\Delta r}{(\lambda_0/n)} = 2\pi\frac{n\Delta r}{\lambda_0}. \qquad (8)$$

где λ_0 - длина волны в вакууме.

При подобных расчетах удобно считать, что длина волны остается неизменной и равной λ_0, а увеличивается длина пути. Именно в этом смысл введения такого понятия, как оптическая длина пути $l = n\Delta r$.

Теперь совсем просто найти смещение интерференционной картины при наличии стеклянной пластинки. Пластинка увеличивает оптическую длину пути для волн от верхнего источника на величину

$$\Delta l = (n-1)h. \qquad (9)$$



Если это увеличение разделить на длину волны (в вакууме!), то получим величину смещения интерференционной картины в единицах ширины полосы, т.е.

$$\frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{\delta}{\Delta x} = \Delta m \qquad (9)$$

В рассматриваемой задаче это смещение равно

$$\Delta m = \frac{(n-1)h}{\lambda} = \frac{(1{,}6-1)\cdot 5{,}0\cdot 10^{-6}}{0{,}55\cdot 10^{-6}} \approx 5{,}5\ . \qquad (10)$$

Таким образом, интерференционная картина сместится на пять с половиной полос вверх.

Часть 2. Эксперимент И. Физо – скорость света в движущейся воде.

2.1 Скорость света в неподвижной воде в n раз меньше скорости света в вакууме

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3{,}00\cdot 10^8}{1{,}33} = 2{,}26\cdot 10^8\ \frac{м}{с}. \qquad (11)$$

2.2 В рамках гипотезы неподвижного эфира движение воды не влияет на скорость света, поэтому

$$v = \frac{c}{n}. \qquad (12)$$

2.3 Если справедлива гипотеза полного увлечения эфира, то

$$v = \frac{c}{n} + V. \qquad (13)$$

2.4 В общем случае следует записать

$$v = \frac{c}{n} + \gamma V. \qquad (14)$$

При неподвижном эфире $\gamma = 0$, при полном увлечении $\gamma = 1$.

2.5 В данном эксперименте сдвиг интерференционных полос обусловлен изменением скорости света при изменении скорости течения воды, в результате чего изменяется длина волны света. Рассчитаем изменение длины волны в общем случае частичного увлечения эфира. Так как частота и период колебаний остаются неизменными, можно записать:
Для длины волны ($\lambda_{(\pm)}$ - длины волн при движении «по и против» течения воды):

$$\frac{\lambda_0}{c} = \frac{\lambda_{(\pm)}}{\frac{c}{n} \pm \gamma V} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{(\pm)} = \lambda_0 \frac{\frac{c}{n} \pm \gamma V}{c} \qquad (15)$$

Для изменения разности хода в каждой трубе в единицах длин волн получим

$$\frac{L}{\lambda_{(\pm)}} = \frac{L}{\lambda_0 \frac{\frac{c}{n} \pm \gamma V}{c}} = \frac{L}{\lambda_0} \cdot \frac{c}{\frac{c}{n} \pm \gamma V} = \frac{L}{\lambda_0} \frac{n}{1 \pm n\gamma \frac{V}{c}} \qquad (16)$$

Теперь учтем, что $V << c$, поэтому можно это выражение упростить:

$$\frac{L}{\lambda_{(\pm)}} = \frac{L}{\lambda_0} \frac{n}{1 \pm n\gamma \frac{V}{c}} = \frac{Ln}{\lambda_0}\left(1 \mp n\gamma \frac{V}{c}\right) \qquad (17)$$

Итак, при движении воды между волнами, распространяющимися в противоположных направлениях, возникает разность хода (и равный ей сдвиг полос)

$$\Delta m_1 = \frac{L}{\lambda_{(-)}} - \frac{L}{\lambda_{(+)}} = 2\frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c}. \qquad (18)$$

Так как свет проходит две трубы, то окончательное значение сдвига будет еще в два раза больше

$$\Delta m = 4\frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c}. \qquad (19)$$

Подставим численные значения и рассчитаем

$$\Delta m = 4\frac{Ln^2}{\lambda_0} \gamma \frac{V}{c} = 4\frac{1{,}49 \cdot 1{,}33^2}{526 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{7{,}06}{3{,}00 \cdot 10^8} \gamma = 0{,}472\gamma. \qquad (20)$$

Таким образом, при полном увлечении эфира сдвиг полос должен составить 0,478 ширины интерференционной полосы.

В результате измерений И. Физо получил значение сдвига

$$\Delta m_{\exp} = \frac{1{,}2}{5} \approx 0{,}24, \qquad (21)$$

что почти в 2 раза меньше теоретического сдвига.

2.6 Для объяснение наблюдаемого сдвига следует предположить, что коэффициент увлечения эфира водой равен

$$\gamma = \frac{0{,}24}{0{,}47} \approx 0{,}51 \qquad (22)$$

Часть 3. Но эфира то нет!

3.1 Используя формулу для сложения скоростей в СТО для скорости света в движущейся среде получим

$$v = \frac{\frac{c}{n} + V}{1 + \frac{\frac{c}{n} \cdot V}{c^2}} = \frac{c}{n} \frac{1 + n\frac{V}{c}}{1 + \frac{1}{n}\frac{V}{c}} \approx \frac{c}{n}\left(1 + n\frac{V}{c} - \frac{1}{n}\frac{V}{c}\right) = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)V\,. \qquad (23)$$

3.2 Из формулы (23) следует, что коэффициент увлечения связан с показателем преломления соотношением

$$\gamma = 1 - \frac{1}{n^2}\,. \qquad (24)$$

Его численное значение для воды равно

$$\gamma = 1 - \frac{1}{1{,}33^2} = 0{,}435\,. \qquad (25)$$

Это значение близко к значению, найденному экспериментально.

3.3 При рассчитанном значении коэффициента увлечения сдвиг полос должен быть равен $\Delta m = 0{,}472\gamma \approx 0{,}205$, что несколько меньше полученного экспериментально. Основной причиной такого расхождения является метод измерения скорости жидкости. Использованное значение скорости является средней скоростью по площади поперечного сечения труб. В действительности свет проходил вблизи оси трубы, где скорость течения больше, чем среднее по сечению значение. В результате чего реальный сдвиг оказался немного больше рассчитанного. Это повлияло и на значение коэффициента увлечения.