the general science journal

Классическое Объяснение Эксперимента Физо

Геннадий и Виталий Соколовы
sokolov@oceantan.us

В интерферометрическом эксперименте Физо с движущейся водой смещение полос оказывается в $\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$ меньше ожидаемого. Из-за предположения, что свет увлекается движущейся водой не полностью, а лишь частично, эксперимент с движущейся водой рассматривается как одно из важнейших подтверждений специальной теории относительности.

В данной работе показано, что на самом деле в интерферометре Физо свет полностью увлекается движущейся водой, а ожидаемое смещение полос δ_V отличается от наблюдаемого значения из-за того, что в общепринятом расчете не учитывается изменение частоты интерферирующих лучей и смещение ошибочно определяется только по разности времен $\Delta t = t_2 - t_1$.

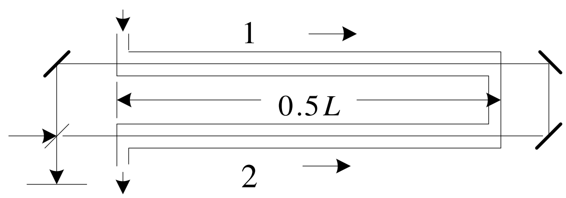

Рис.1

В интерферометре Физо лучи 1 и 2 идут в противоположных направлениях и в движущейся воде проходят одно и то же расстояние L (Рис.1). Когда вода движется со скоростью V, луч 1 относительно интерферометра движется со скоростью $\frac{C}{n}+V$ и проходит расстояние L за время $t_1 = \frac{L}{\left(\frac{C}{n}+V\right)}$. Луч 2 идет со скоростью $\frac{C}{n}-V$ и расстояние L проходит за время $t_2 = \frac{L}{\left(\frac{C}{n}-V\right)}$, большее чем t_1.

Физо при расчёте смещения ошибочно предположил, что лучи идут с одинаковой частотой и поэтому в его интерферометре, как и в любом обычном интерферометре, к моменту t_2, когда синхронный волновой фронт в трубе 2 проходит расстояние L и выходит из воды, волновой фронт первого луча уже проходит в воздухе расстояние $C\Delta t$ и смещение полос определяется просто выражением.

$$\delta_V = \frac{C\Delta t}{\lambda_0} = \frac{2LVC}{\lambda_0\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}. \tag{1}$$

Ниже показано, что с учетом изменения частоты лучей смещение полос в интерферометре Физо определяется не этим выражением, а выражением

$$\delta = \frac{C\Delta t}{\lambda_0}\left(1-\frac{1}{n^2}\right) = \frac{2LVC}{\lambda_0\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}\left(1-\frac{1}{n^2}\right) = \delta_V\left(1-\frac{1}{n^2}\right), \tag{2}$$

Ошибка общепринятого расчета заключается в том, что предполагается, что расчетное смещение полос не зависит от доплеровского смещения частоты и лучи идут в движущейся воде с одинаковой частотой ν_0. Выражение (1) позволяет определять смещение полос в любом обычном интерферометре, где лучи всегда идут с одинаковой частотой. Но в интерферометре с движущейся водой это выражение даёт расчетное смещение δ_V, которое оказывается почти вдвое больше действительного смещения δ.

В соответствии с эффектом Доплера свет изменяет частоту, когда входит в движущуюся воду. Частота изменяется точно так же, как в случае, когда свет входит, например, в движущийся стеклянный стержень. В интерферометре Физо луч 1 идет в воде частотой $\nu_1 = \nu_0(1-\frac{V}{C}) < \nu_0$, периодом $T_1 = \frac{1}{\nu_1} = T_0\frac{C}{C-V}$ и длиной волны $\lambda_1 = CT_1 = \lambda_0\frac{C}{C-V}$. Луч 2 имеет частоту $\nu_2 = \nu_0(1+\frac{V}{C}) > \nu_0$, период $T_2 = \frac{1}{\nu_2} = T_0\frac{C}{C+V}$ и идет с длиной волны $\lambda_2 = CT_2 = \lambda_0\frac{C}{C+V}$. Когда лучи выходят из воды, их частоты снова изменяются и они интерферируют на экране с одинаковой частотой.

Чтобы понять, **как изменение частоты лучей влияет на величину смещения интерференционных полос**, рассмотрим упрощенную схему Рис.2, где лучи 1 и 2 проходят в интерферометре через две одинаковые трубы с неподвижной водой.

На Рис.2,а оба луча идут в неподвижной воде с одинаковой частотой ν_0 и расстояние L проходят с одинаковой скоростью $\frac{C}{n}$ за одно и то же время $t_0 = \frac{Ln}{C}$. В воде лучи идут с одинаковой длиной волны $\frac{C}{n}T_0 = \frac{\lambda_0}{n}$ и за время t_0 из каждой трубы выходит одинаковое количество волновых фронтов $N_0 = \frac{L}{\frac{\lambda_0}{n}}$.

Интерференционные полосы находятся в некотором исходном положении ($\delta = 0$).

Теперь представим, что лучи так же идут в неподвижной воде, но имеют разные частоты $\nu_1 < \nu_0$ и $\nu_2 > \nu_0$ (Рис.2,b). Лучи проходят расстояние L за то же самое время t_0 (дисперсией пренебрегаем). Но так как лучи идут с разными частотами, на длине L укладываются разные количества длин волн $N_1 = \dfrac{L}{\lambda_1}$, $N_2 = \dfrac{L}{\lambda_2}$ и поэтому за время t_0 из трубы 1 выходит меньшее количество волновых фронтов, чем из трубы 2 ($N_1 < N_2$), в результате чего интерференционные полосы смещаются на $\delta_\lambda = N_2 - N_1$.

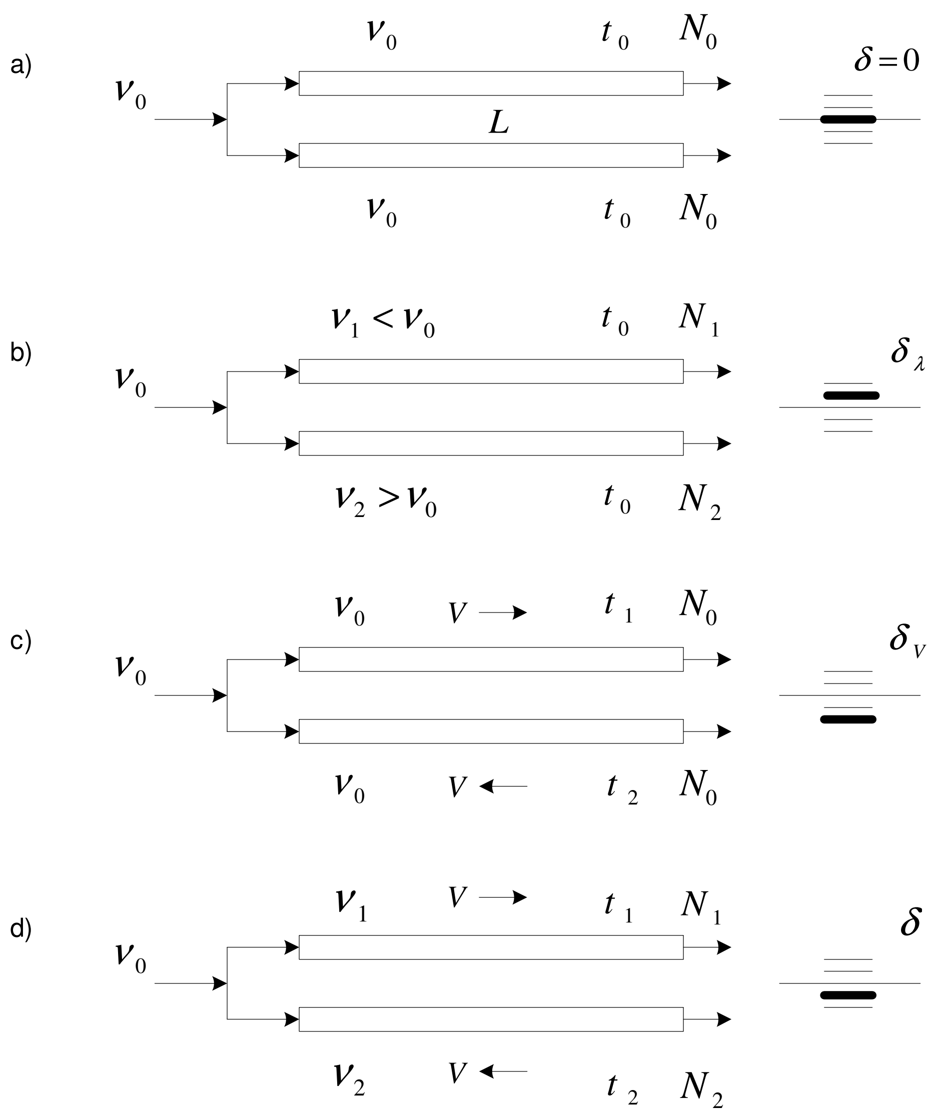

Рис.2

В том случае, когда вода в трубах движется со скоростью V , но, как предположил Физо, лучи идут с одинаковой частотой ν_0, волновые фронты лучей 1 и 2 проходят расстояние L за разные промежутки времени $(t_1 < t_2)$ и интерференционные полосы смещаются на δ_V (Рис.2,c).

В интерферометре Физо вода движется со скоростью V, но лучи проходят расстояние L с разными частотами $\nu_1 < \nu_0$ и $\nu_2 > \nu_0$, и поэтому кроме смещения δ_V возникает дополнительное обратное смещение δ_λ и результирующее смещение полос δ оказывается равным разности смещений δ_V и δ_λ (Рис.2,d).

Обратное смещение δ_λ определяется выражением

$$\delta_\lambda = N_2 - N_1 = L\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = L\left(\frac{C+V}{\lambda_0 C} - \frac{C-V}{\lambda_0 C}\right) = \frac{2LV}{\lambda_0 C} \quad \text{и}$$

результирующее смещение полос $\delta = \delta_V - \delta_\lambda$ равно

$$\delta = \frac{2LVC}{\lambda_0\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)} - \frac{2LV}{\lambda_0 C} = \frac{2LVC}{\lambda_0}\left(\frac{1}{\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)} - \frac{1}{C^2}\frac{\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}{\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}\right) =$$

$$= \frac{2LVC}{\lambda_0\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}\left(1 - \frac{1}{C^2}\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)\right) = \delta_V\left(1 - \frac{1}{C^2}\left(\frac{C^2}{n^2} - \frac{VC}{n} + \frac{VC}{n} - V^2\right)\right) =$$

$$= \delta_V\left(1 - \frac{1}{n^2} - \frac{V^2}{C^2}\right) \approx \delta_V\left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Таким образом, расчетное смещение δ оказывается в $(1 - \frac{1}{n^2})$ меньше того смещения δ_V, которое получается в общепринятом расчете. Смещение δ согласуется с результатами всех экспериментов.

Ошибка, допущенная Физо при анализе его эксперимента, более 150 лет повторялась другими экспериментаторами. Это позволило рассматривать данный эксперимент как подтверждение специальной теории относительности.