Оптический эксперимент Физо с движущейся водой и «коэффициент увлечения» Френеля.

Геннадий Соколов, Виталий Соколов
sokolovg@yahoo.com

Показано, что эксперимент Физо на самом деле доказывает не частичное, а полное увлечение света движущейся средой. Уменьшение смещения полос в двухлучевом интерферометре Физо объясняется не ошибочной гипотезой Френеля о «частичном увлечении» света, а дополнительным фазовым сдвигом, возникающим из-за доплеровского изменения частот интерферирующих лучей.

Введение

200 лет назад Френель, пытаясь объяснить результаты оптических экспериментов Араго, предположил, что движущаяся со скоростью V среда лишь частично увлекает эфир и поэтому скорость света изменяется не на V, а на $V\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$. В 1851 году Физо выполнил интерферометрический эксперимент с движущейся водой. При скорости движения воды V = 7,059 м/с, длине труб L = 2.974 м, длине волны света λ_0 = $526 \cdot 10^{-9}$ м и показателе преломления $n = 1.33$ он получил смещение полос 0.23, практически в $\left(1-\frac{1}{n^2}\right) = 0.4346$ меньшее смещения 0.47099, которое Физо ожидал получить при полном увлечении света водой. Хотя к тому времени Доплер уже показал, что при изменении скорости свет изменяет частоту, Физо не попытался как-то иначе объяснить результат своего эксперимента и решил, что подтвердил френелевское частичное увлечение света движущейся средой. В результате этого ошибочного объяснения эксперимент Физо до сих пор рассматривается как одно из основных подтверждений специальной теории относительности.

Ниже показано, что лучи в интерферометре Физо движутся со скоростями $\left(\frac{C}{n}+V\right)$ и $\left(\frac{C}{n}-V\right)$, то есть имеет место не частичное, а полное увлечение света движущейся водой, и эксперимент Физо на самом деле не подтверждает, а наоборот, опровергает специальную теорию относительности.

Что означает коэффициент «частичного увлечения» Френеля?

Прежде чем рассматривать реальный эксперимент Физо, рассмотрим простейшую схему, в которой луч проходит только в одной трубе (Рис.1.).

В неподвижной воде фотоны частоты ν_0 идут со скоростью $\frac{C}{n}$, и каждый фотон проходит расстояние L за время $t_0 = \frac{Ln}{C}$.

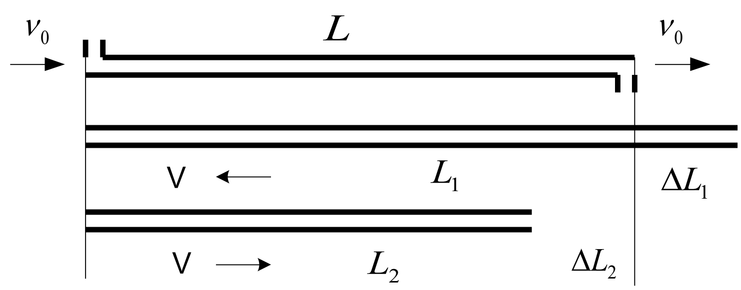

Рис1.

Когда вода со скоростью V движется навстречу лучу, фотоны идут со скоростью $\left(\frac{C}{n} - V\right)$ и к выходу из трубы приходят за время $t_1 = \frac{L}{\frac{C}{n} - V}$, большее чем t_0. Относительно воды каждый фотон движется со скоростью $\frac{C}{n}$ и за время t_1 относительно воды проходит расстояние $L_1 = \frac{C}{n} t_1 = \frac{LC}{n\left(\frac{C}{n} - V\right)}$, на $\Delta L_1 = \frac{LV}{\left(\frac{C}{n} - V\right)}$ большее, чем расстояние L. Если вода в трубе движется в направлении луча, луч относительно трубы идёт со скоростью $\left(\frac{C}{n} + V\right)$, расстояние L проходит за время $t_2 = \frac{L}{\frac{C}{n} + V}$, меньшее чем t_0, и относительно воды проходит расстояние $L_2 = \frac{C}{n} t_2 = \frac{LC}{n\left(\frac{C}{n} + V\right)}$, на

$\Delta L_2 = \dfrac{LV}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$ меньшее, чем L. В обоих случаях, когда лучи проходят расстояния L_1 или L_2, они выходят из воды на том же расстоянии от экрана, как и при неподвижной воде.

Чтобы определить, на сколько позже или раньше лучи выходят из трубы с движущейся водой, на Рис.2 и Рис.3 введена вторая труба с неподвижной водой, в которой расстояние L фотоны проходят за время $t_0 = \dfrac{Ln}{C}$. Включив обе трубы в двухлучевой интерферометр, мы можем сравнить времена по отклонению интерференционных полос.

Предположим сначала, что фотоны частоту не изменяют и в движущейся воде идут с той же частотой ν_0. В этом случае, когда вода движется навстречу лучу, в соответствии с общепринятым расчётом смещение должно быть равно

$$\delta_{V1} = \frac{C(t_1 - t_0)}{\lambda_0} = \frac{C}{\lambda_0}\left(\frac{L}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)} - \frac{Ln}{C}\right) = \frac{C}{\lambda_0}\frac{LC - Ln\left(\dfrac{C}{n}-V\right)}{C\left(\dfrac{C}{n}-V\right)} = \frac{n}{\lambda_0}\frac{LV}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)},$$

а когда луч идёт в направлении движения воды, должно возникнуть смещение

$$\delta_{V2} = \frac{C(t_0 - t_2)}{\lambda_0} = \frac{C}{\lambda_0}\left(\frac{Ln}{C} - \frac{L}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}\right) = \frac{C}{\lambda_0}\frac{Ln\left(\dfrac{C}{n}+V\right) - LC}{C\left(\dfrac{C}{n}+V\right)} = \frac{n}{\lambda_0}\frac{LV}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}.$$

Однако такие смещения в интерферометре не возникнут, так как лучи, входя в движущуюся воду, изменяют частоты и расстояния L_1 или L_2 проходят с разными частотами. Из-за изменения частот возникают дополнительные фазовые сдвиги, приводящие к дополнительному изменению полос в интерферометре. Возникает фазовый сдвиг следующим образом.

В обе трубы с одинаковой начальной фазой одновременно входят фотоны частоты ν_0 (Рис.2).

В дополнительной трубе с неподвижной водой фотоны идут со скоростью $\frac{C}{n}$, расстояние L проходят за время $t_0 = \frac{Ln}{C}$, и на этом расстоянии укладываются $N_0 = \frac{t_0}{T_0} = \frac{Ln}{C}$ длин волн $\frac{C}{n} T_0 = \frac{\lambda_0}{n}$.

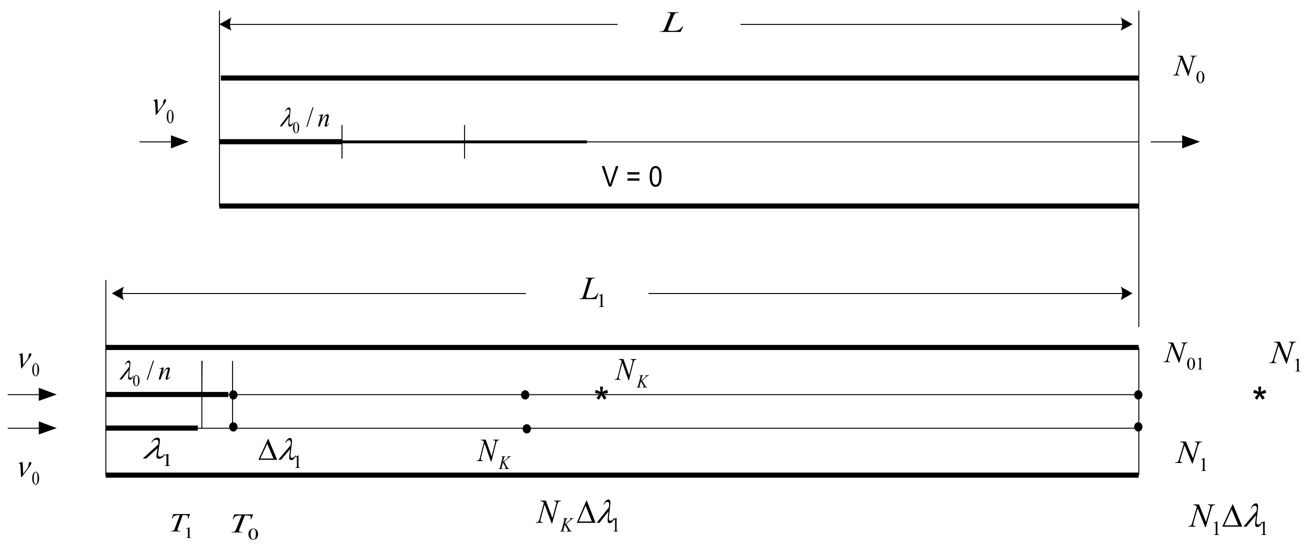

Рис.2

В основной трубе фотоны со скоростью $\frac{C}{n}$ проходят расстояние L_1 за время $t_1 = \frac{L_1}{\frac{C}{n}} = \frac{L}{\frac{C}{n} - V}$, большее, чем $t_0 = \frac{Ln}{C}$. Из дополнительной трубы фотоны выходят на время $\Delta t_1 = \frac{LVn}{\left(\frac{C}{n} - V\right) C}$ ранюше и в интерферометре, если не учесть изменение частоты, должно возникнуть смещение $\delta_{V1} = \frac{C \Delta t_1}{\lambda_0} = \frac{LVn}{\lambda_0 \left(\frac{C}{n} - V\right)}$.

В основную трубу входит такое же количество фотонов, как и в дополнительную трубу. Но входя в основную трубу, каждый фотон увеличивет частоту от ν_0 до $\nu_1 = \nu_0 \left(1 + \frac{V}{C}\right)$ и всё расстояние $L_1 = \frac{LC}{n\left(\frac{C}{n} - V\right)}$ проходит с длиной волны

$$\lambda_1 = \frac{C}{n}T_1 = \frac{C}{n}T_0\left(\frac{C}{C+V}\right) = \frac{\lambda_0}{n}\left(\frac{C+V}{C+V} - \frac{V}{C+V}\right) = \frac{\lambda_0}{n} - \frac{\lambda_0 V}{n(C+V)} = \frac{\lambda_0}{n} - \Delta\lambda_1 .$$

В основной трубе в любой момент времени содержится такое же количество фотонов, как и в случае, если бы фотоны шли в ней с длиной волны $\frac{\lambda_0}{n}$. И поэтому из неё выходит такое же количество фотонов $N_{01} = \frac{L_1 n}{\lambda_0}$, как и в случае, если бы фотоны шли с длиной волны $\frac{\lambda_0}{n}$. Однако фаза фотонов ν_1 изменяется быстрее: она изменяется на 2π не на расстоянии $\frac{\lambda_0}{n}$, а на расстоянии $\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n} - \Delta\lambda_1$, то есть каждый фотон совершает полный оборот, опережая синхронный с ним фотон ν_0 по расстоянию на $\Delta\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C+V)}$. Если представить, что одновременно с фотонами ν_1 в основной трубе идут и фотоны ν_0, в момент, когда оба фотона находятся, например, расстоянии $N_K\lambda_1$ от входа и в фотоне ν_1 совершается N_K оборотоов, фотон ν_0, совершивший такое же количество N_K оборотов, уже оказывается впереди его на расстоянии $N_K\Delta\lambda_1$. К моменту t_1, когда фотон ν_1 выходит из воды и изменяет частоту на ν_0, в нём совершается $N_1 = \frac{L_1}{\lambda_1} = \frac{t_1}{T_1} = \frac{L(C+V)}{\left(\frac{C}{n} - V\right)CT_0}$ оборотов, а эквивалентный ему фотон ν_0 оказывается смещённым вперёд на расстояние $\Delta\lambda_1 N_1 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C+V)}\frac{L(C+V)}{\left(\frac{C}{n} - V\right)CT_0} = \frac{LV}{n\left(\frac{C}{n} - V\right)}$. В результате этого смещение полос уменьшается до $\delta_1 = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)} - \frac{LV}{n\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)} = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = \delta_{V1}\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$.

Смещение отличается от δ_V в $\left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$, как это предсказывал Френель, однако это уменьшение смещения объясняется не «частичным увлечением» света движущейся водой относительно несуществующего эфира, а дополнительным фазовым сдвигом: вода, движущаяся навстречу лучу со скоростью V, полностью увлекает луч, изменяя скорость света от $\frac{C}{n}$ до $\left(\frac{C}{n} - V\right)$, но из-за фазового сдвига полосы смещаются не на $\delta_{V1} = \frac{C\Delta t_1}{\lambda_0} = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)}$, а только на $\delta_1 = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)}\left[1 - \frac{1}{n^2}\right]$

Аналогичная ситуация имеет место в случае, когда вода со скоростью V движется в направлении луча (Рис.3). Относительно воды фотоны движутся со скоростью $\frac{C}{n}$ и относительно трубы и лаборатории их скорость равна $\left(\frac{C}{n} + V\right)$. Если не учесть влияние изменения частоты, полосы в интерферометре должны сместиться на $\delta_{V2} = \frac{C\Delta t_2}{\lambda_0} = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} + V\right)}$, Но так как фотоны, входя в движущуюся воду, уменьшают частоту от ν_0 до $\nu_2 = \nu_0\left(1 - \frac{V}{C}\right)$, расстояние L_1 они проходят с периодом $T_2 = T_0\left(\frac{C}{C - V}\right)$ и длиной волны $\lambda_2 = \frac{C}{n}T_2 = \frac{\lambda_0}{n} - \frac{\lambda_0 V}{n(C - V)} = \frac{\lambda_0}{n} + \Delta\lambda_2$, большей на $\Delta\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C - V)}$.

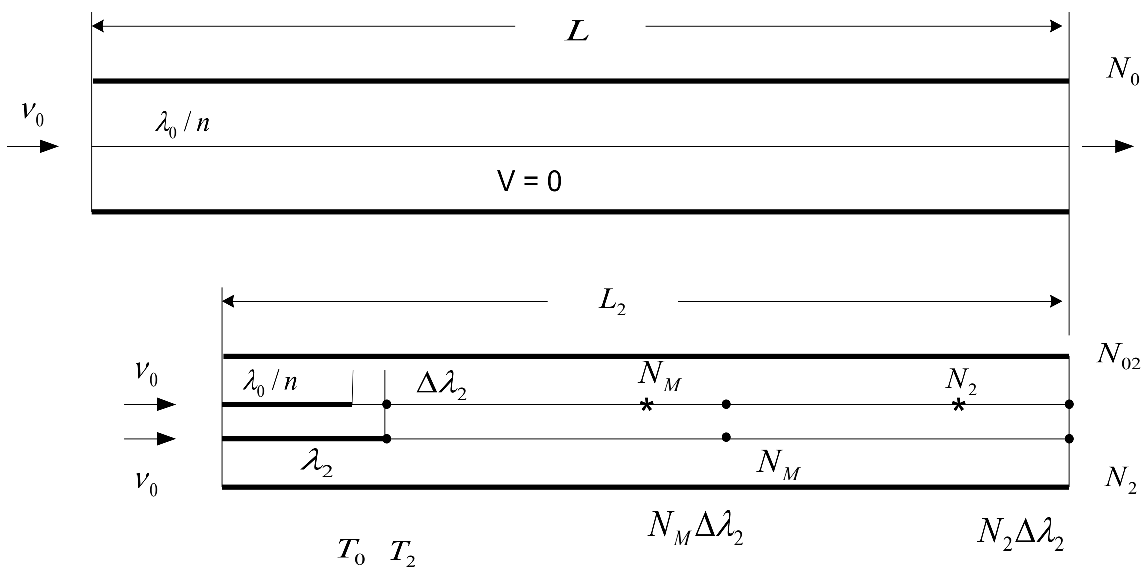

Рис.3

Фаза фотона ν_2 изменяется на 2π со смещением на $\Delta\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C - V)}$ относительно синхронного с ним фотона ν_0. К моменту выхода фотона из воды в нём совершается $N_2 = \dfrac{L(C-V)}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)CT_0}$ оборотов и эквивалентный ему фотон ν_0 оказывается смещённым на расстояние $\Delta\lambda_2 N_2 = \dfrac{\lambda_0}{n}\dfrac{V}{(C-V)}\dfrac{L(C-V)}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)CT_0} = \dfrac{LV}{n\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$, из-за чего результирующее смещение полос уменьшается с $\delta_{V2} = \dfrac{LVn}{\lambda_0\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$ до $\delta_2 = \dfrac{LVn}{\lambda_0\left(\dfrac{C}{n}+V\right)} - \dfrac{LV}{n\lambda_0\left(\dfrac{C}{n}+V\right)} = \delta_{V1}\left(1-\dfrac{1}{n^2}\right)$.

Смещение полос в интерферометре Физо.

В интерферометре Физо лучи проходят во встречных направлениях одно и то же расстояние L в воде. Если вода неподвижна, фотоны проходят это расстояние за одинаковое время $t_0 = \dfrac{Ln}{C}$ и смещение полос в интерферометре отсутствует.

Когда вода движется со скоростью $V = 7.059$ м/с, луч 1 идёт относительно лаборатории со скоростью $\left(\dfrac{C}{n}-V\right)$ и расстояние L проходит за время $t_1 = \dfrac{L}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)}$, на $\Delta t_1 = \dfrac{L}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)} - \dfrac{Ln}{C} = \dfrac{LVn}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)C}$ большее, чем $t_0 = \dfrac{L}{\dfrac{C}{n}}$.
Относительно воды каждый фотон луча 1 проходит расстояние $L_1 = \dfrac{C}{n}t_1 = \dfrac{LC}{n\left(\dfrac{C}{n}-V\right)}$, на $\Delta L_1 = \dfrac{LV}{\left(\dfrac{C}{n}-V\right)}$ большее, чем L.

Луч 2 идёт в движущейся воде со скоростью $\left(\dfrac{C}{n}+V\right)$ и выходит из воды в момент $t_2 = \dfrac{L}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$, на $\Delta t_2 = \dfrac{LVn}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)C}$ раньше, чем $t_0 = \dfrac{L}{\dfrac{C}{n}}$.
Относительно воды каждый фотон луча 2 проходит расстояние $L_2 = \dfrac{C}{n}t_2 = \dfrac{LC}{n\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$, на $\Delta L_2 = \dfrac{LV}{\left(\dfrac{C}{n}+V\right)}$ меньшее, чем L.

Если не учитывать изменение частоты лучей,

- из-за изменения скорости луча 1 должно возникнуть смещение

$$\delta_{V1} = \frac{C\Delta t_1}{\lambda_0} = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} - V\right)} = \frac{1.33x2.974x7.059}{5.26e-9\left(\frac{C}{n} - V\right)} = 0.235494622518842\ 891629,$$

- из-за изменения скорости луча 2 должно возникнуть смещение

$$\delta_{V1} = \frac{C\Delta t_1}{\lambda_0} = \frac{LVn}{\lambda_0\left(\frac{C}{n} + V\right)} = \frac{1.33x2.974x7.059}{5.26e-9\left(\frac{C}{n} + V\right)} = 0.235494607758\ 630\ 554778$$

и результирующее смещение полос должно оказаться равным

$$\delta_V = \delta_{V1} + \delta_{V2} \quad = \quad \mathbf{0.4709892302774734464}07.$$

Смещение в эксперименте оказывается меньше, так как лучи, входя в движущуюся воду, из-за эффекта Доплера изменяют частоты и расстояния в воде проходят с разными частотами $\nu_1 = \nu_0\left(1 + \frac{V}{C}\right)$, $\nu_1 = \nu_0\left(1 - \frac{V}{C}\right)$. На выходе лучи снова изменяют частоты до частоты ν, практически равной ν_0, и интерферируют с одинаковой частотой.

Фотон луча 1 с частотой ν_1 и длиной волны $\lambda_1 = \frac{C}{n}T_1 = \frac{\lambda_0}{n} - \frac{\lambda_0 V}{n(C+V)} = \frac{\lambda_0}{n} - \Delta\lambda_2$ проходит расстояние в воде $L_1 = \frac{LC}{n\left(\frac{C}{n} - V\right)}$ и его фаза изменяется до $N_1 = \frac{t_1}{T_1} = \frac{L(C+V)}{\left(\frac{C}{n} - V\right)CT_0}$, что соответствует опережению эквивалентного фотона частоты ν_0 на $\Delta\lambda_1 N_1 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C+V)}\frac{L(C+V)}{\left(\frac{C}{n} - V\right)CT_0} = \frac{LV}{n\left(\frac{C}{n} - V\right)}$ и уменьшению смещения полос на $\frac{\Delta\lambda_2 N_2}{\lambda_0} = \frac{LV}{\lambda_0 n\left(\frac{C}{n} - V\right)} = \frac{2.974x7.059}{526\text{x}10^{-9}x1.33\left(\frac{C}{1.33} - 7.059\right)}$ = **0.1331305458300**8

Фотон луча 2 с частотой ν_2 и длиной волны $\lambda_2 = \frac{C}{n}T_2 = \frac{\lambda_0}{n} - \frac{\lambda_0 V}{n(C-V)} = \frac{\lambda_0}{n} + \Delta\lambda_2$ проходит расстояние в воде $L_2 = \frac{LC}{n\left(\frac{C}{n}+V\right)}$ и его фаза изменяется до $N_2 = \frac{t_2}{T_2} = \frac{L(C-V)}{\left(\frac{C}{n}+V\right)CT_0}$, что соответствует отставанию эквивалентного фотона частоты ν_0 на $\Delta\lambda_2 N_2 = \frac{\lambda_0}{n}\frac{V}{(C-V)}\frac{L(C-V)}{\left(\frac{C}{n}+V\right)CT_0} = \frac{LV}{n\left(\frac{C}{n}+V\right)}$ и уменьшению смещения полос на $\frac{\Delta\lambda_2 N_2}{\lambda_0} = \frac{LV}{\lambda_0 n\left(\frac{C}{n}+V\right)} = \frac{2.974x7.059}{526\text{x}10^{-9}x1.33\left(\frac{C}{1.33}+7.059\right)}$ = **0.1331305374 8579**

Суммарное уменьшение смещения равно **0.26626108331587** и результирующее смещение полос в интерферометре вместо $\delta_V = \delta_{V1} + \delta_{V2}$ оказывается равным

0.470989230277473446407 - 0.26626108331587 = **0.2047281469616**

Заключение

Тот факт, что в эксперименте Физо вместо предполагаемого смещения $\delta_V = \frac{2LVC}{\lambda_0\left(\frac{C}{n}+V\right)\left(\frac{C}{n}-V\right)}$ = 0.4709 получается смещение $\delta == \delta_V\left(1-\frac{1}{n^2}\right)$ = 0.20473, не означает, что лучи увлекаются движущейся водой не полностью, а частично, как на основе ошибочной гипотезы эфира предсказал Френель. Лучи полностью увлекаются движущейся средой и в эксперименте Физо движутся со скоростями $\left(\frac{C}{n}-V\right)$ и $\left(\frac{C}{n}+V\right)$. Уменьшение смещения объясняется не тем, что лучи не полностью увлекаются водой, а тем, что входя в движущуюся воду, они из-за эффета Доплера изменяют частоты и в воде идут с разными частотами, в результате чего возникает фазовый сдвиг, который в интерферометре приводит к дополнительному смещению полос. Таким образом, результат эксперимента Физо не означает, что скорость света, как это утверждает основной постулат специальной теории относительности, не может превысить значение С=299 792 458 м/с. Этот эксперимент, наоборот, доказывает, что свет, распространяющийся в движущейся среде, относительно наблюдателя движется со скоростью $C+V$.