

Работа 3.06

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

М. Ю. Липовская
Ю. П. Яшин

ВВЕДЕНИЕ

Скорость света c является одной из основных констант нашего мира и определяет предельную скорость передачи взаимодействий в вакууме. Она может быть определена из уравнений Максвелла

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, μ_0 – магнитная постоянная.

Естественно, что свет, распространяясь в прозрачных средах, изменяет свою скорость. Для описания скорости света в веществе служит одна из основных оптических характеристик – показатель (или коэффициент) преломления n . Показатель преломления показывает во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в веществе. Согласно решению системы уравнений Максвелла для сред

$$n = \sqrt{\varepsilon \mu}$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, μ – магнитная проницаемость вещества. Для большинства прозрачных сред можно принять $\mu = 1$. В общем случае скорость света в веществе зависит от длины волны (дисперсия). В данной лабораторной работе длина волны источника (светодиод) фиксирована и именно для нее определяется n .

Свойства скорости света и сама её величина играют огромную роль в природе. Предельный характер этой скорости существенно меняет наши представления о пространстве и времени. Для определения скорости света применялись разные методы. Рассмотрим некоторые из них.

1. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

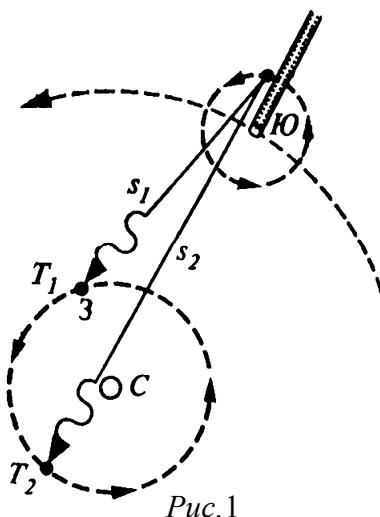


Рис. 1

Впервые скорость света была измерена в 1676 г. Рёмером (1644 – 1710 гг.). Наблюдения затмений спутников Юпитера показали, что видимый период их обращения уменьшается, когда Земля в своем годовом движении приближается к Юпитеру, и увеличивается, когда Земля удаляется от него. Рёмер понял, что этот эффект связан с конечной скоростью распространения света, и по результатам наблюдений вычислил эту скорость.

Поскольку период обращения Юпитера вокруг Солнца (12 лет) много больше периода обращения Земли, при расчете можно считать Юпитер неподвижным. Пусть в некоторый момент времени спутник Юпитера выходит из его тени, что будет зафиксировано земным наблюдателем в момент

$$T_1 = t_1 + s_1/c,$$

где s_1 – расстояние между Землей и точкой выхода спутника из тени, c – скорость света. После еще одного оборота выход спутника из тени произойдет в момент t_2 , а земной наблюдатель заметит это в момент времени

$$T_2 = t_2 + s_2/c.$$

Тогда для земного наблюдателя период обращения спутника

$$T_{набл} = T_2 - T_1 = T_{ист} + (s_2 - s_1)/c,$$

где $T_{ист} = t_2 - t_1$.

Вследствие изменения расстояния s от Земли до Юпитера в процессе проведения измерений наблюдаемый период обращения спутника будет отличаться от истинного.

Если проделать измерения как при приближении Земли к Юпитеру, так и при удалении от него, то среднее значение наблюдаемого периода $T_{набл}$ можно принять равным $T_{ист}$, т.к. члены $(s_2 - s_1)/c$, имеющие различные знаки, взаимно уничтожатся. Теперь, зная

$$T_{ист} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{i,набл}}{n}$$

можно определить скорость света:

$$c = \frac{s_2 - s_1}{T_{набл} - T_{ист}}.$$

Используя известные из астрономических вычислений значения s_1, s_2 и учитывая движение Юпитера, Рёмер получил значение скорости света $c = 214300 \text{ км/с}$. Это было первое надежное измерение скорости света с удовлетворительной по тем временам точностью.

2. АБЕРРАЦИЯ СВЕТА

В астрономии абберацией называют изменение видимого положения звезды на небесной сфере, то есть отклонение видимого направления на звезду от истинного, вызываемое конечностью скорости света и движением наблюдателя. Суточная абберация обусловлена вращением Земли; годовая – обращением Земли вокруг Солнца; вековая – перемещением Солнечной системы в пространстве.

Для понимания этого явления можно провести простую аналогию. Капли дождя, падающие в безветренную погоду вертикально, оставляют на боковом стекле движущегося автомобиля наклонный след.

В результате абберации света кажущееся направление на звезду отличается от истинного на угол $\frac{\pi}{2} - \alpha = \beta$, называемый *углом абберации*. Из

рисунка видно, что $\text{tg } \beta = \frac{v_{\perp}}{c}$, где v_{\perp} – составляющая

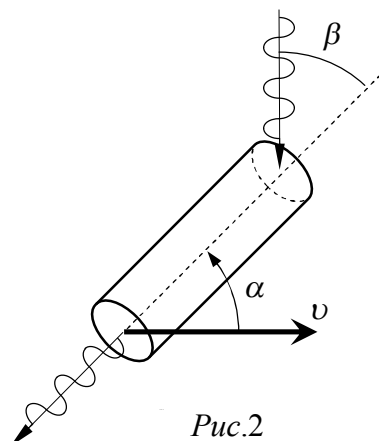


Рис.2

скорости движения Земли, перпендикулярная направлению на звезду.

Практически явление абберации (годовой) наблюдается следующим образом. Ось телескопа при каждом наблюдении ориентируется в пространстве одинаковым образом относительно звездного неба, и при этом изображение звезды фиксируется в фокальной плоскости телескопа. Это изображение в течение года описывает эллипс. Зная параметры эллипса и другие данные, отвечающие геометрии опыта, можно вычислить скорость света. В 1727 г. из астрономических наблюдений Дж. Брэдли нашел $2\alpha = 40,9''$ и получил $c = 303000 \text{ км/с}$.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В 1849 г. Арман Физо (1819 – 1896 гг.) впервые измерил скорость света, не прибегая к наблюдениям за небесными телами.

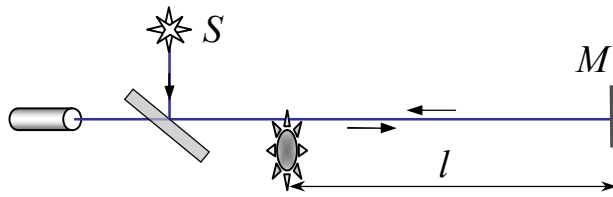


Рис.3 Принципиальная схема опыта Физо

Луч света падал на полупрозрачное зеркало S , отразившись от которого попадал на край быстро вращающегося зубчатого диска. Проходя между зубцами, свет отражался от зеркала M и возвращался к диску. Если на пути пучка оказывалась прорезь, то отраженный световой импульс через полупрозрачное зеркало попадал к наблюдателю. За время прохождения светом участка l в прямом и обратном направлении $\tau = \frac{2l}{c}$ диск, вращаясь с угловой скоростью ω , успевал повернуться на угол

$$\Delta\varphi = \omega\tau = \frac{2l\omega}{c}.$$

Если N – число зубцов, то угол между их серединами равен $\alpha = \frac{2\pi}{N}$. Свет попадал к наблюдателю в тех случаях, когда за время τ диск поворачивался на угол, кратный α , т.е. выполнялось условие

$$\Delta\varphi = m\alpha \quad \text{или} \quad \frac{2l\omega_m}{c} = \frac{2\pi}{N}m.$$

В опыте Физо база экспериментальной установки составляла $l = 8,6 \text{ км}$. Измеренная таким способом скорость света оказалась равной $c = 313000 \text{ км/с}$.

В дальнейшем этот опыт совершенствовался, прежде всего, в части использования различных прерывателей светового пучка, и позволил получить очень хорошие результаты. Так Фуко в 1862 г., используя вращающееся зеркало, при базе всего 20 м получил $c = (298000 \pm 500) \text{ км/с}$.

Майкельсон в 1927 г., проводя измерения на усовершенствованной установке с вращающимся зеркалом, в которой свет проходил расстояние 22 мили (35,4 км), получил результат, намного превосходивший по точности все остальные: $c = (299796 \pm 4) \text{ км/с}$, который вошел в международные таблицы физических величин.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является измерение скорости распространения света в воздухе, синтетической смоле и воде и определение показателей преломления этих веществ.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной лабораторной работе показатель преломления и, соответственно, скорость света в веществе измеряются по сдвигу фазы световой волны, прошедшей различные оптические пути. Экспериментальная схема установки представлена на рис. 4. (фото). Под номером 1 указан блок для излучения, модуляции и приема излучения с длиной волны $\lambda = 0.65 \text{ мкм}$ и относящиеся к нему линзы. Осциллограф 2 позволяет измерять изменение фазы света, прошедшего различные оптические пути (с прозрачными средами и без них), 3 – размеченная станина для измерения геометрической длины пути луча, 4 – блок синтетической смолы, 5 – горизонтальный сосуд с водой, 6 – система отражающих зеркал.

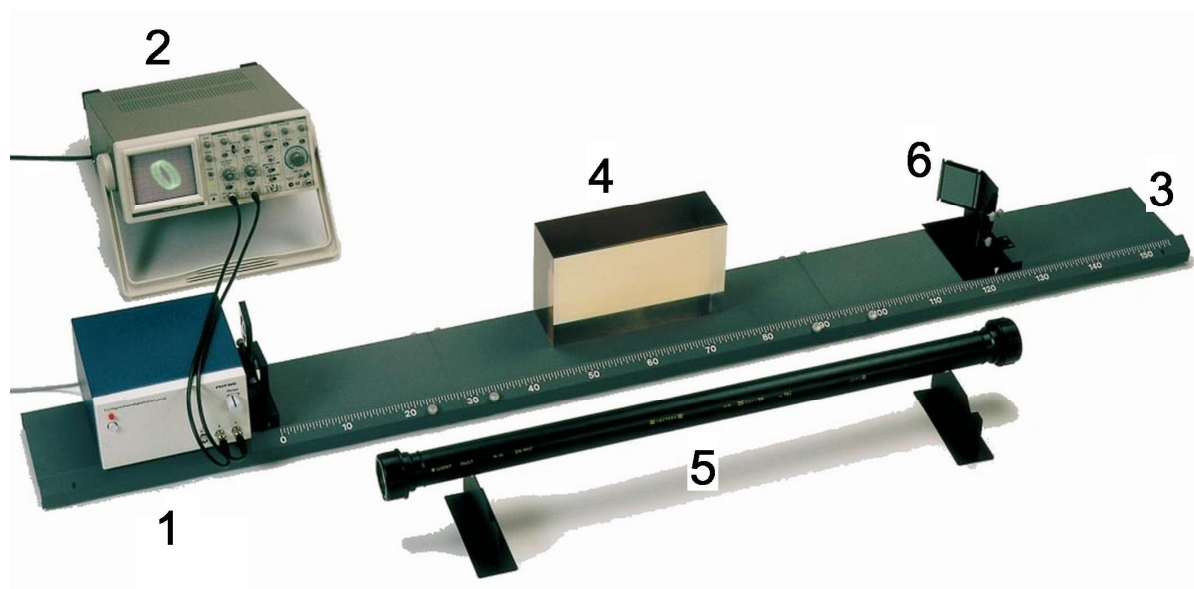


Рис.4 Экспериментальная установка для измерения скорости света

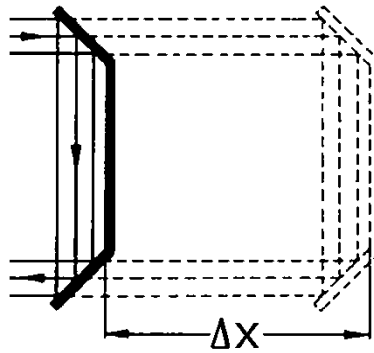
Измерение скорости света в воздухе поясняет рис. 5. Сначала при каком-то положении отражающих зеркал синхронизуют фазы сигнала на входе и выходе оптической схемы, а затем отодвигают зеркала на Δx до тех пор, пока не появится сдвиг фаз на π из-за увеличения оптической длины пути на $\Delta l = 2\Delta x$. Чтобы пройти это расстояние свету потребуется время

$$\Delta t = \frac{1}{2f}$$

где $f = 50.1 \text{ МГц}$ – частота модуляции светового сигнала.

Таким образом, скорость света в воздухе можно сосчитать по формуле

$$c = \frac{\Delta l}{\Delta t} = 4f \cdot \Delta x \quad (1)$$



система отражающих зеркал

Рис.5 Отодвигание зеркал при измерении скорости света в воздухе

Скорость света в воде и синтетической смоле определяется по сравнению со скоростью света в воздухе, что поясняет рис 6. Первое измерение x_1 местоположения отражающих зеркал проводится со средой, при этом синхронизируются фазы модулированного светового сигнала на входе и выходе оптической схемы. В первом измерении свету для прохождения всего оптического пути понадобится время t_1

$$t_1 = \frac{l_1 - l_m}{c} + \frac{l_m}{v}$$

где $l_1 = 2x_1$ – оптическая длина пути без среды, l_m – геометрическая длина прозрачной среды, c – скорость света в воздухе, v – скорость света в среде.

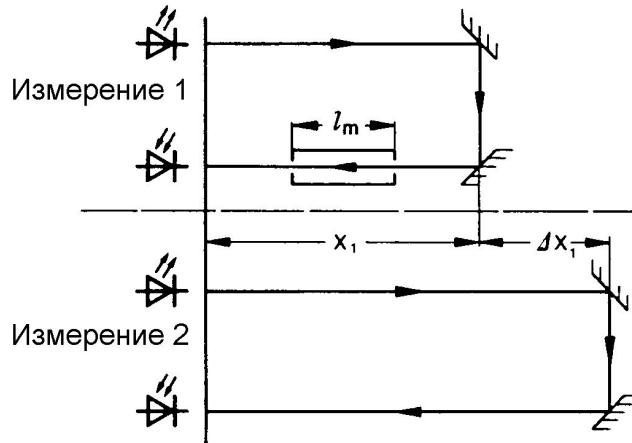


Рис.5 Измерение скорости света в прозрачных средах

После извлечения прозрачной среды будет некоторое опережение фазы на выходе схемы, так как оптическая длина пути уменьшилась. При отодвигании зеркал на некоторое расстояние Δx_1 (второе измерение) можно компенсировать эту разность фаз за счет увеличения длины пути и снова добиться синфазности сигналов. При втором измерении (без среды) свет проходит расстояние l_2

$$l_2 = l_1 + 2\Delta x_1$$

При этом ему понадобится время t_2 :

$$t_2 = \frac{l_2}{c} = \frac{l_1 + 2\Delta x_1}{c}$$

Так как фазы передатчика и приемника синхронизованы, то

$$t_1 = t_2 + \frac{k}{f}, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Коэффициент k учитывает возможный сдвиг фазы на $n \cdot \pi$.

Значит скорость света в среде равна:

$$v_1 = \frac{l_m}{\frac{2\Delta x_1 + l_m}{c} + \frac{k}{f}} \quad (2)$$

В нашем случае величина коэффициента k равна нулю.

Показатель преломления среды можно рассчитать по формуле:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА В ВОЗДУХЕ

1. Установите систему отражающих зеркал 6 на минимальном расстоянии от светоизлучающего блока с линзами. Это положение должно соответствовать нулевому делению на станине 3.
 2. При помощи ручки на лицевой поверхности блока 1 добейтесь по осциллографу синфазности выходящего и принимаемого сигнала.
 3. Отодвигайте систему отражающих зеркал до тех пор, пока фаза принимаемого сигнала по осциллографу относительно излучаемого не изменится на π .
 4. Запишите, какому расстоянию Δx по станине соответствует это положение зеркал.
- Повторите измерения 10 раз.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА В ПРОЗРАЧНЫХ СРЕДАХ

1. Отодвиньте систему зеркал 6 и поместите между ними и излучающим блоком 1 на специальные подставки сосуд с водой.
2. При каком-то положении зеркал добейтесь по осциллографу синфазности входного и выходного сигнала. Запишите, какой длине x_1 по станине соответствует это положение.
3. Извлеките сосуд с водой из оптической схемы. По осциллографу убедитесь, что теперь сигнал с выхода приходит раньше, чем в предыдущем случае.
4. Отодвигайте систему зеркал 6 из первоначального положения до тех пор, пока фазы входного и выходного сигнала по осциллографу опять не совпадут, как первоначально при наличии воды.
5. Запишите, какому расстоянию Δx по станине соответствует это положение зеркал.

Повторите измерения 10 раз.

Пункты 1–5 повторите для синтетической смолы.

Длина сосуда с водой равна 1 метр. Длину блока синтетической смолы измерить самим по показаниям на станине.

УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Сосчитайте по формуле (1) скорость света в воздухе, сравните с известным значением.
2. Сосчитайте по формуле (2) скорость света в воде и синтетической смоле и по формуле (3) соответствующие им показатели преломления. Сравните полученные значения с табличными.