

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»
Кафедра теоретической и экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ
Декан ЕНМФ
_____ Ю.И.Тюрин
«__»_____ 2010 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Методическое указание к выполнению лабораторной работы
по курсу общей физики № О-16
для студентов всех специальностей

Томск 2010

УДК 53. 076

Определение скорости света.

Методические указания к лабораторной работе по курсу общей физики
№ О-16 для студентов всех специальностей. – Томск: Изд - во ТПУ, 2010.- 9
с.

Составители: доц. доктор, физ.-мат. наук С.И. Борисенко

Рецензент: доц. канд. физ.-мат. наук Н.С. Кравченко

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры теоретической и экспериментальной физики _____ 2010 г.

Зав. кафедрой

Проф., доктор физ.- мат. наук

В.Ф. Пичугин

Одобрено учебно-методической комиссией ЕНМФ.

Председатель учебно-методической комиссии

Г.В.Ерофеева

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № О-16 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Цель работы: измерение времени прохождения коротким световым импульсом известного расстояния с помощью осциллографа.

Приборы и принадлежности (рис. 1): 1) прибор для измерения скорости света - источник света; 2) двухканальный аналоговый осциллограф с частотой $2 \times 150 \text{ МГц}$; 3) оптическая скамья; 4) линза Френеля; 5) стойка с отражателем.

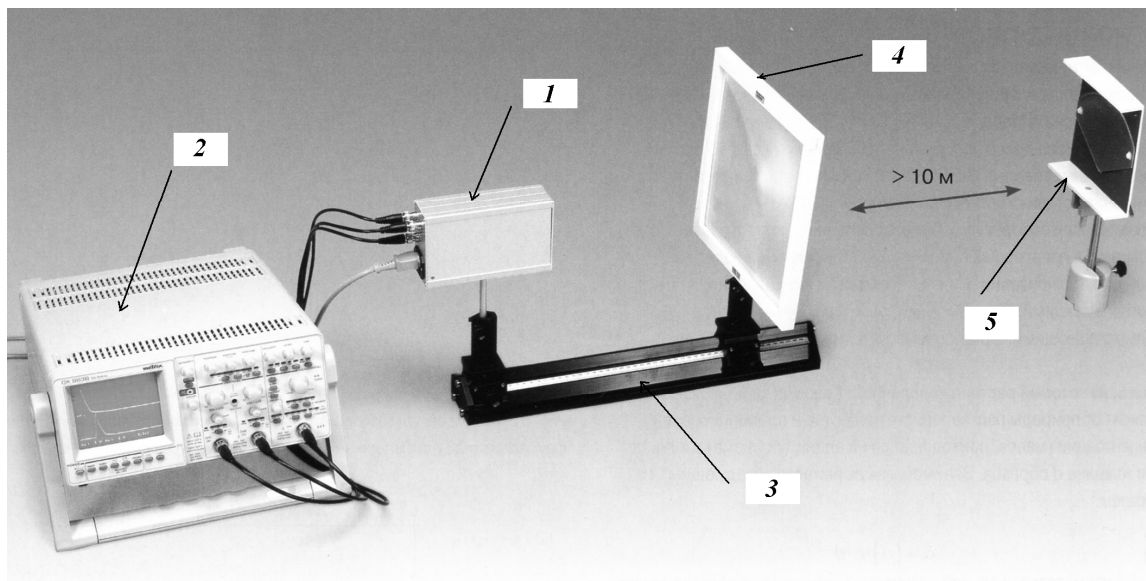


Рис. 1

Краткое теоретическое введение

Первым большим успехом в изучении природы света было измерение его скорости. Самый простой способ сделать это заключается в измерении времени распространения светового сигнала на известное расстояние. В первых научных попытках [1], предпринятых еще Галилеем (1607 г.), один из наблюдателей открывал фонарь, свет от которого через некоторое время доходил до второго наблюдателя, который в тот же миг открывал свой фонарь. Свет от второго фонаря спустя определенное время доходил до первого наблюдателя. Последний мог отметить время t , протекшее от момента подачи им сигнала до момента его возвращения. Предполагая, что наблюдатели реагируют на сигнал мгновенно и что свет обладает одной и той же скоростью при движении в обоих направлениях, можно рассчитать скорость света по формуле

$$c = \frac{2l}{t}, \quad (1)$$

где l расстояние между наблюдателями. Однако попытки осуществления такого рода опытов оканчивались неудачей, т.к. из-за огромной скорости света по существу измерялось не время распространения светового сигнала, а время, потраченное наблюдателями на реакцию. Положение можно улучшить, если заменить второго наблюдателя зеркалом, отражающим свет, избежав таким образом ошибки, вносимой вторым наблюдателем. Однако измерить очень малое значение времени t с достаточной точностью даже при больших расстояниях l долгое время было невозможно.

Астрономический метод измерения скорости света

Впервые экспериментально скорость света была определена астрономическим методом [1]. Датский ученый Олаф Рёмер (1644-1710) в 1676 г. обнаружил, что при увеличении расстояния между Землей и планетой Юпитер вследствие их обращения вокруг Солнца происходит запаздывание времени появления спутника Юпитера Ио из его тени по

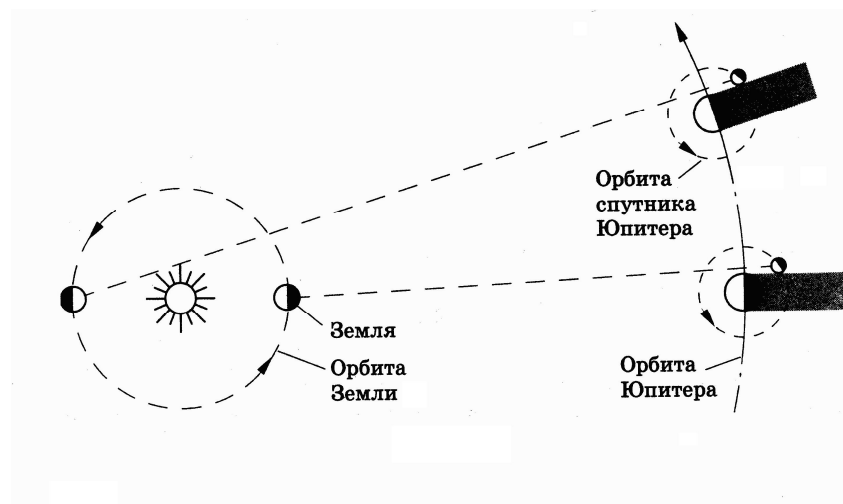


Рис. 2

сравнению с расчетным значением, выполненным с учетом неизменности периода вращения спутника (рис. 2). Максимальное запаздывание 22 минуты соответствовало увеличению расстояния между Землей и Юпитером на диаметр орбиты Земли. Рёмер догадался, что причиной этого запаздывания является конечность скорости света. Принимая размеры диаметра земной орбиты равными 300 млн. км, и разделив это расстояние на кажущееся время запаздывания, Рёмер нашел, что скорость света превышает 200 000 км/с.

Лабораторные методы измерения скорости света

Впервые скорость света лабораторным методом удалось измерить французскому физику И. Физо в 1849 г. В опыте Физо [1] свет

от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис. 3). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находившегося на расстоянии нескольких километров от колеса. Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был опять пройти между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отраженный от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. Пока

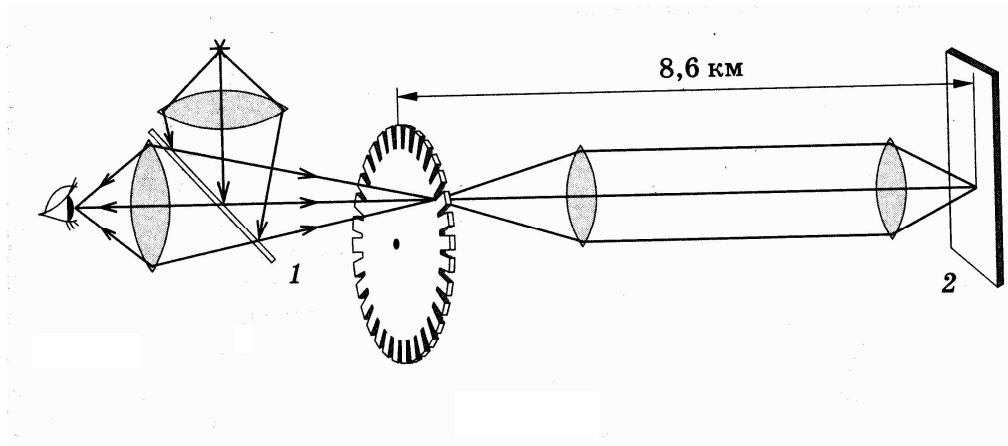


Рис. 3

свет, прошедший между двумя зубцами, шел до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец и свет переставал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время путешествия света до зеркала и обратно колесо успевало повернуться настолько, что на место прежней прорези вставала новая прорезь. Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо расстояние равнялось 8,6 км, и для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано еще много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод измерения скорости света с применением вместо зубчатого колеса вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных веществах. Скорость света в воде была измерена в 1856 г. Она оказалась в $\frac{4}{3}$ раза меньше, чем в вакууме. Во всех других веществах она также меньше, чем в вакууме.

Наиболее точные измерения скорости света основаны не на определении времени прохождения светом определенного расстояния, а

на независимом очень точном измерении частоты и длины световой волны.

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с. Ошибка в измерении скорости не превышает 0,3 м/с. В 1983 г. на заседании Генеральной конференции мер и весов было принято новое определение метра: «Метр есть длина пути, пройденного светом в вакууме в течение временного интервала, равного $1/299\,792\,458\text{с}$ ». Из этого определения следует, что скорость света отныне принимается точно равной 299 792 458 м/с. Это сделано для того, чтобы каждый раз не менять определение метра по мере увеличения точности измерения расстояний.

Электромагнитная природа света

Определение скорости света сыграло в науке очень важную роль. Оно в значительной степени способствовало выяснению природы света. На основании совпадения экспериментально измеренного значения скорости света в вакууме со значением скорости распространения электромагнитных волн Максвелл высказал предположение, что свет представляет собой электромагнитные волны. Эта гипотеза подтверждается многими экспериментальными фактами. Представлениям электромагнитной теории света полностью соответствуют экспериментально открытые законы отражения и преломления света, явления интерференции, дифракции и поляризации света. Особое значение скорости света лежит в основе постулата Специальной Теории Относительности, из которого следует, что ни одно тело, имеющее массу покоя, не может иметь скорость, равную или превышающую скорость света в вакууме. Согласно теории Максвелла [2] скорость света в вакууме равна

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (2)$$

где ϵ_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянная. При распространении света в среде его фазовая скорость определяется формулой

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

где

$$n = \sqrt{\epsilon \mu} \quad (4)$$

– показатель преломления среды, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды. Из формулы (4) следует, что скорость света в веществе определяется его электрическими и магнитными свойствами.

Методика измерения скорости света

Свет распространяется с конечной скоростью, что можно продемонстрировать простым измерением времени его прохождения с помощью современных методик измерения. Это достигается путем использования очень коротких световых импульсов длительностью несколько наносекунд и определения времени, которое им требуется для прохождения известного расстояния. Такие импульсы представляют собой волновой пакет [3], состоящий из суперпозиции плоских волн с близкими по величине волновыми векторами $\mathbf{k}$ и частотами $\omega(k)$. Уравнение волнового пакета, движущегося вдоль оси x , в общем случае имеет следующий вид

$$E(x,t) = \int_{k-\frac{\Delta k}{2}}^{k+\frac{\Delta k}{2}} A(k') e^{i(k'x - \omega t)} dk', \quad (5)$$

где по определению $\Delta k \ll k$. С учетом этого условия уравнение (5) приближенно можно представить в виде бегущей волны, амплитуда которой зависит от координаты и времени

$$E(x,t) \simeq E_0(x,t) e^{i(kx - \omega t)},$$

где

$$E_0(x,t) = 2A(k) \frac{\sin \left[\left(x - \frac{d\omega}{dk} t \right) \frac{\Delta k}{2} \right]}{\left(x - \frac{d\omega}{dk} t \right)}. \quad (6)$$

Схематически вид амплитуды E_0 при $t=0$ изображен на рис. 4. Точку, соответствующую максимальному значению амплитуды, равному

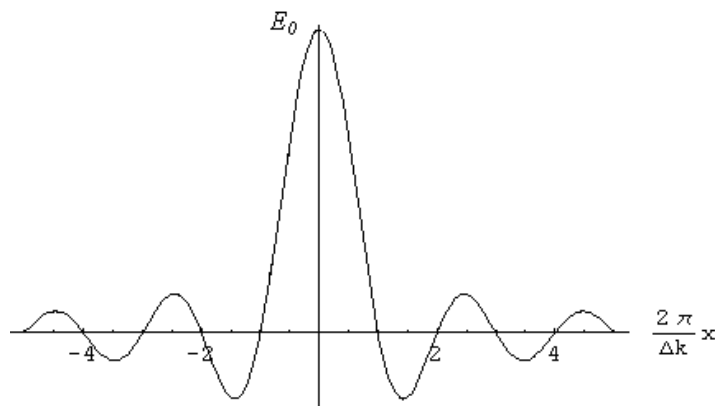


Рис. 4

$A(k)\Delta k$, можно рассматривать как среднюю точку волнового пакета. Скорость перемещения этой точки представляет собой скорость перемещения волнового пакета, которая называется групповой скоростью. В отличие от фазовой групповая скорость представляет собой скорость переноса энергии. Из формулы (6) находим, что эта скорость

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}. \quad (7)$$

Для света в диэлектрической среде частота $\omega = vk$, где v – фазовая скорость, определяемая формулой (3). Подставляя выражение для ω в формулу (7) находим связь групповой скорости светового импульса в среде со скоростью света в вакууме

$$v_g = \frac{c}{n} \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right). \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что при наличии дисперсии, т.е. зависимости показателя преломления среды от длины волны или ее частоты, групповая скорость светового импульса отличается от фазовой скорости света. При нормальной дисперсии ($\frac{dn}{d\lambda} < 0$) групповая скорость меньше фазовой, при аномальной ($\frac{dn}{d\lambda} > 0$) наоборот.

В данной работе измеряется групповая скорость коротких световых импульсов, которую за счет показателя преломления воздуха близкого к единице можно считать равной фазовой скорости света в вакууме

$$v_g \approx c.$$

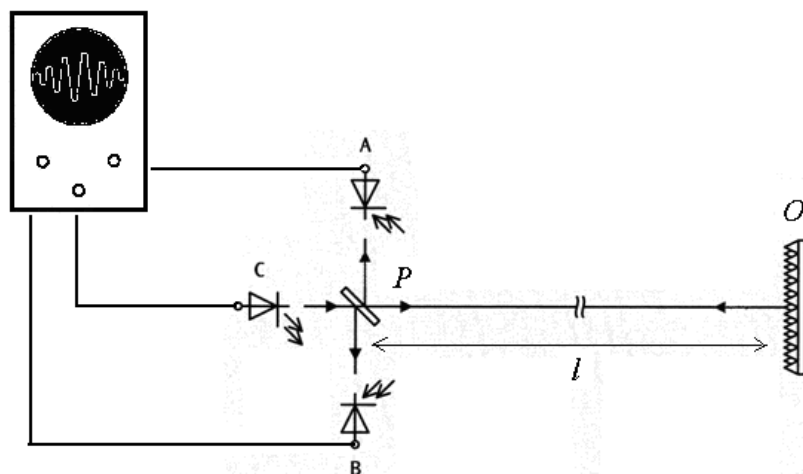


Рис. 5

Световые импульсы [4] от импульсного светодиода С проходят через разделитель луча Р и падают на два фотозлемента А и В (рис. 5). Усиленные сигналы с этих фотозлемента регистрируются двухканальным осциллографом, как импульсы напряжения. Первый световой импульс после разделителя падает на фотозлемент В и регистрируется осциллографом в качестве начального импульса. Второй световой импульс после разделителя проходит до отражателя О, затем от отражателя до разделителя, после чего падает на фотозлемент А и регистрируется осциллографом в качестве конечного импульса. С помощью осциллографа измеряется время t прохождения светом расстояния $2l$ как разница во времени между конечным и начальным положением импульсов на ос-

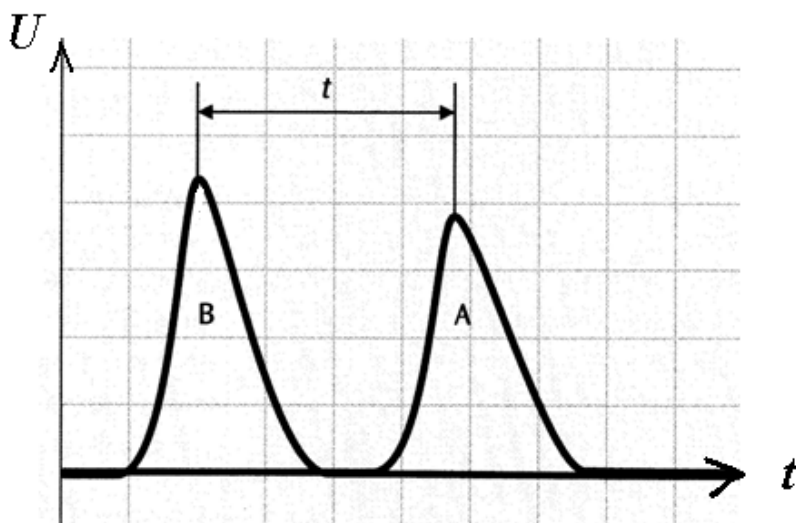


Рис. 6

циллограмме (рис. 6). По этой величине и расстоянию l от источника света до отражателя мы можем рассчитать скорость света в вакууме по формуле (1).

Задание:

1. Измерьте зависимость времени прохождения t световых импульсов от l расстояния между излучателем и отражателем.
2. Постройте график этой зависимости.
3. Определите тангенс угла наклона этой зависимости – $\operatorname{tg}(\varphi)$.
4. Рассчитайте c фазовую скорость света в вакууме с учетом линейной интерполяции по формуле.

$$c = \frac{2}{\operatorname{tg}(\varphi)}. \quad (9)$$

5. Из данных таблицы рассчитайте относительную и абсолютную погрешность измерения скорости света.

Рекомендации по выполнению работы:

1. Подключить блок источника и приемника света к сети электропитания.
2. Включить осциллограф и установить развертку 50 нс/деление.
3. Установить отражатель на расстоянии не менее 10 м от блока источника и приемника света и ориентировать его таким образом, чтобы красное пятно света источника располагалось в центре отражателя.
4. Выполнить дополнительную регулировку ориентации линзы Френеля и отражателя так, чтобы амплитуда отраженного светового сигнала на осциллографе была максимальной.
5. Отрегулировать индикацию сигналов на экране осциллографа таким образом, чтобы оба сигнала имели приблизительно одинаковую высоту.
6. Измерить расстояние l между блоком источника и приемника света и отражателем и также внести в таблицу 1.

Таблица 1

l , м					
t , нс					
c , м/нс					
$c_{ср}$, м/нс					

7. Измерить интервал времени t между двумя сигналами на осциллографе и внести значение в таблицу 1.
8. Изменить расстояние между блоком источника и приемника света, и отражателем и повторить п. 6-7.
9. Рассчитать скорость света по формуле (1)
10. Рассчитать среднее значение скорости, абсолютную и относительную погрешность.
11. Построить график зависимости $t(l)$.
12. Рассчитать скорость света с учетом линейной интерполяции по формуле (9)
13. Сравнить скорость света, рассчитанную по формулам (1) и (9), с известным значением скорости.

Контрольные вопросы.

1. Какие существуют методы определения скорости света?
2. В чем заключается метод измерения скорости света Рёмера?
3. В чем заключается метод измерения скорости света Физо?
4. Какие методы измерения скорости света являются наиболее точными?
5. Какова физическая природа света?

6. В чем состоит принципиальное отличие скорости света от скоростей движения материальных тел?
7. От каких величин зависит величина скорости света в веществе?
8. Что называется волновым пакетом?
9. Чем отличается волновой пакет от плоской волны?
10. Как называется и чему равняется скорость светового импульса в веществе?
11. Физический смысл групповой скорости?
12. При каком условии фазовая скорость отличается от групповой?
13. При какой дисперсии фазовая скорость меньше групповой?
14. На чем основан способ измерения света в данной лабораторной работе?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика.— М.: Наука. Физматлит, 1976.—928 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4, Волны . Оптика.— М.: Наука. Физматлит, 1998.—256 с.
3. Давыдов А.С. Квантовая механика. — М.: Физматлит, 1963.—748 с.
4. Определение скорости света (UE406010). — www.3bscientific.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СВЕТА

Методическое указание к выполнению лабораторной работы

Составитель Сергей Иванович Борисенко