

Санкт-Петербургский государственный университет

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКОРОСТИ СВЕТА

**Описание лабораторной работы № 47
ПРОБНАЯ ВЕРСИЯ**

Разработчик описания: М. В. Архипов

Санкт-Петербург

2014

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Эксперименты по измерению скорости света от Галилея до наших дней....	4
1.1 Опыт Галилея и определение скорости света из астрономических наблюдений Ремера.....	6
1.2 Эксперименты Физо, Фуко, Майкельсона	9
1.3 Эксперименты по измерению скорости света в наши дни	16
1.4 Понятия групповой и фазовой скорости волн	19
2. Измерения скорости света в Первой физической лаборатории.....	22
2.1 Знакомство с установкой и подготовка эксперимента.....	23
3. Техника безопасности при работе с приборами	26
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	27
5. Обработка результатов эксперимента.....	30
Список рекомендуемой литературы и справочные данные	33

Введение

Фактически с момента первой известной попытки определить скорость света в 17 веке ученые в течение следующих четырех столетий постоянно возвращаются к измерениям ее величины в разных условиях. Какую роль сыграли измерения скорости света в развитии науки, и как они выполнялись – с такими вопросами предлагается ознакомиться студентам физического факультета и самостоятельно провести ее измерения в данной работе.

Описание работы содержит краткую историческую справку с напоминанием основных причин, которые в разное время заставляли ученых выполнять ее измерение. Без технических подробностей излагаются идеи основных экспериментов по измерению скорости света. Следует разобраться, какие принципиальные вопросы решали измерения скорости света, понимать основные идеи экспериментов по измерению скорости света. Рассматривается вопрос о групповой и фазовой скоростях света. В практической части работы предлагается самостоятельно измерить скорость света в атмосфере, в стекле и в воде на учебном оборудовании немецкой фирмы «Leybold Didactic».

Описание содержит контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы, которые должны помочь в освоении материала. Дополнительные материалы позволяют заинтересованным студентам получить более полное представление о рассматриваемых в работе предметах.

1. Эксперименты по измерению скорости света от Галилея до наших дней

Конечна ли скорость света или свет передается от источника до наблюдателя мгновенно? Мнения естествоиспытателей и философов с античных времен до начала 17 века были различны. Они не основывались на результатах экспериментов, а были построены лишь на рассуждениях богословского и философского характера. И только Галилей предложил провести опыт по определению скорости света, измеряя время, которое требуется свету для прохождения известного расстояния. Опыт не удался. Однако в середине 17 века на основе результатов астрономических наблюдений астроному Ремеру удалось найти указание на то, что свет распространяется с конечной и очень большой скоростью. Заметим, что в практической деятельности людей в те годы конечность скорости света не играла никакой роли.

В 19 веке был достигнут большой прогресс в оптике. Велись исследования в области изучения электрических и магнитных явлений. В середине 19 века Максвелл дал теоретическое обобщение известных электрических и магнитных явлений, которое дошло до наших дней в форме системы дифференциальных уравнений. Теория Максвелла предсказывала существование электромагнитных волн. Их скорость была конечна и предсказывалась на основе теории по результатам электрических измерений. Вспомним, что в ту эпоху в оптике было две точки зрения на природу света. *Корпускулярная теория*: свет есть особые частицы. *Волновые представления*: свет – это волны в особой пронизывающей все вещества «светоносной» среде, так называемом «эфире». Поэтому был важен прямой эксперимент по определению скорости света: если она совпадает с предсказываемой теорией Максвелла, то появляется серьезный аргумент в пользу волновой теории и электромагнитной природы света. Эксперименты с положительным результатом для волновых представлений о свете, затем подтверждение их электромагнитной природы провели Физо, Фуко, Майкельсон и их последователи.

Следующий этап начался с попыток обнаружения «светоносного эфира» – среды, в которой, согласно существовавшим в те годы представлениям, происходит распространение электромагнитных волн и света. В связи с этим и был выполнен эксперимент Майкельсона с интерферометром, затем многократно повторенный физиками в различных вариантах. Эксперимент был задуман для доказательства существования неподвижного «светоносного эфира». Однако Майкельсон сообщил об отрицательном результате своих опытов в 1887 году. Это послужило толчком к началу работ, которые привели к созданию специальной теории относительности (СТО), базирующейся на двух принципах или постулатах. *Первый постулат* – все законы природы одинаковы в инерциальных системах отсчета. *Второй постулат* – скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета. В СТО скорость света имеет особенное значение. Последующие эксперименты до середины 20 века были направлены на проверку этих положений с все возрастающей точностью. Их результаты не оставили никаких сомнений в справедливости СТО.

Эксперименты фундаментального характера продолжаются с тех пор и до наших дней с новыми типами источников света, новым высокоточным измерительным оборудованием. Описание одного из них будет дано ниже.

Таким образом, в истории экспериментов по определению скорости света можно выделить четыре важных этапа:

1. установление конечной величины скорости света;
2. определение волновой и электромагнитной природы света;
3. проверка гипотезы о «светоносном эфире» и постулатов специальной теории относительности;
4. с середины 20 века до наших дней наступил период экспериментов методического характера для проверки специальной теории относительности с лучшим уровнем точности, постановки экспериментов по проверке новых представлений о пространстве и времени.

1.1 Опыт Галилея и определение скорости света из астрономических наблюдений Ремера

Галилей первым предложил провести следующий эксперимент для определения скорости света. Два экспериментатора, имеющие фонари, располагаются на некотором расстоянии друг от друга (рис. 1).

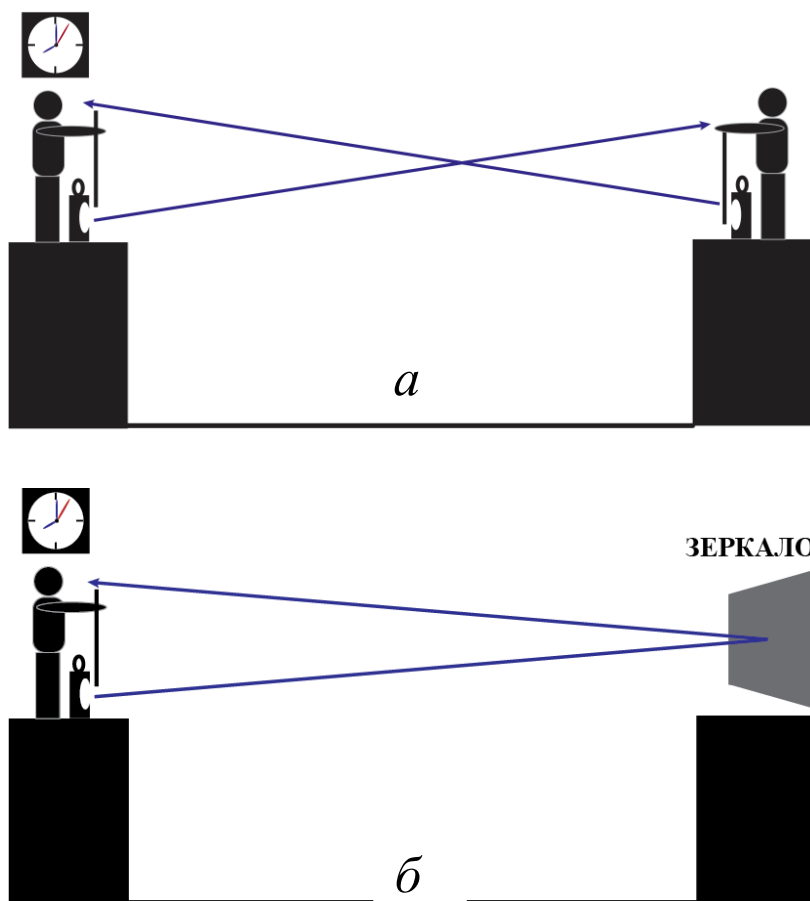


Рис. 1. Опыт Галилея по измерению скорости света

Исходно фонари закрыты шторками. Первый экспериментатор, размещенный слева на рис. 1а, открывает фонарь. В тот момент, когда расположенный справа второй экспериментатор увидит свет первого фонаря, он должен открыть свой фонарь. После чего свет от второго фонаря должен увидеть первый экспериментатор. Он фиксирует разницу во времени между моментом открытия им своего фонаря и приходом света от фонаря второго экспериментатора. Поделив удвоенное расстояние между экспериментаторами на это время, можно определить скорость света. Экспериментатор может быть и

один, но в этом случае второго участника опыта следует заменить зеркалом (рис. 16).

В 17 веке эти опыты были проведены. Скорость света определить не удалось. Время реакции наблюдателя существенно больше времени прохождения света между наблюдателями, расположенными на земной поверхности на расстоянии прямой видимости. Свет проходит земные расстояния за столь малые интервалы времени, что с помощью технических возможностей того времени определить его скорость было нельзя. Совершенно иную величину имеют расстояния между космическими объектами.

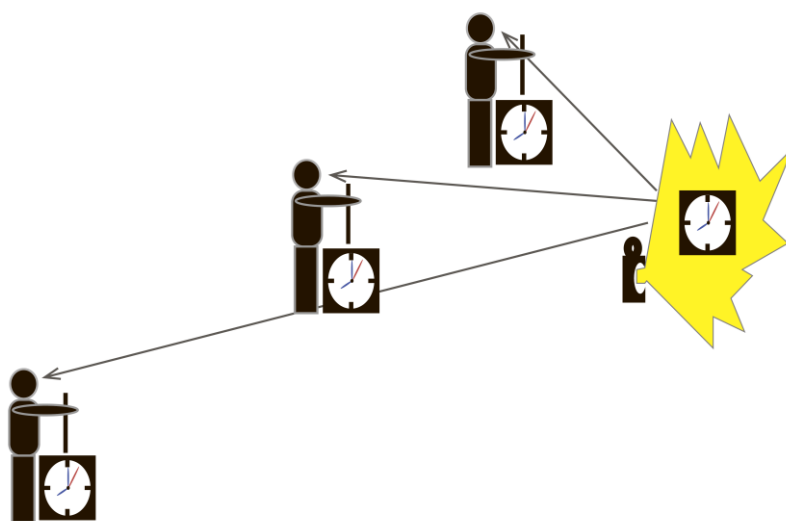


Рис. 2. Три наблюдателя с часами.

Рассмотрим следующий мысленный опыт (рис. 2), поясняющий, как можно определить скорость света по результатам астрономических наблюдений. Пусть у нас есть источник света, который освещает циферблат часов. У часов находятся три наблюдателя с такими же часами. Они сверяют показания часов, выставляют одинаковое время и расходятся. На следующий день они оказываются на разных расстояниях от часов, освещаемых фонарем. И, например, если они посмотрят на часы, которые освещаются фонарем и увидят, что те показывают время 10 часов 0 минут 0 секунд, то время, которое покажут их часы, будет больше. Чем дальше наблюдатель от часов, тем большую разницу увидит наблюдатель в показаниях между его часами и часами, освещаемыми фонарем.

Но сколь далеко надо отойти наблюдателю от освещенных часов, чтобы

без специальных приборов заметить разницу во времени? Мы, конечно, знаем, что скорость света составляет 300 000 км/с. Расстояние от Земли до Луны составляет примерно 385 000 км, а до Солнца – 150 000 000 км. Время, которое потребуется свету для прохождения от Земли до Луны, составит более 1 секунды, а до Солнца – уже 500 секунд (8 минут 33 секунды). При таких расстояниях уже можно надеяться наблюдать задержки в событиях, имеющих место в движении планет солнечной системы при разном положении Земли.

Первое определение скорости по результатам астрономических наблюдений за затмениями спутников Юпитера было сделано датским астрономом Ремером. В этом наблюдении Солнце играло роль фонаря, а Юпитер с движущимся вокруг него спутником – роль гигантских природных часов.

Галилею не удалось определить скорость света, но он изобрел первый телескоп и с его помощью открыл четыре спутника Юпитера. Астрономы очень тщательно изучили их движения, определили периоды обращения и времена начала и конца «затмений», когда спутники становились сначала невидимыми, попадая в тень от Юпитера, и вновь наблюдались после выхода из тени. На рис. 3 схематически показаны расположения Солнца, Земли, Юпитера и его спутника.

Первоначально наблюдения были сделаны в наилучших условиях наблюдения за Юпитером и его спутниками, когда Земля находилась между Солнцем и Юпитером. И когда были предприняты попытки повторить измерения в другом положении Земли, обнаружилось весьма заметное запаздывание между ожидаемым временем вхождения спутника Юпитера в его тень и наблюдаемым. Чем дальше Земля удалялась от Юпитера, тем запаздывание становилось больше. А затем, когда Земля вернулась в положение первых измерений между Солнцем и Юпитером, запаздывание исчезло. Объяснение этому явлению и было дано Ремером. Он предположил, что задержка связана с конечной скоростью распространения света. С учетом существующих на тот момент знаний о расстояниях между объектами оценка скорости составила 214 000 км/с.

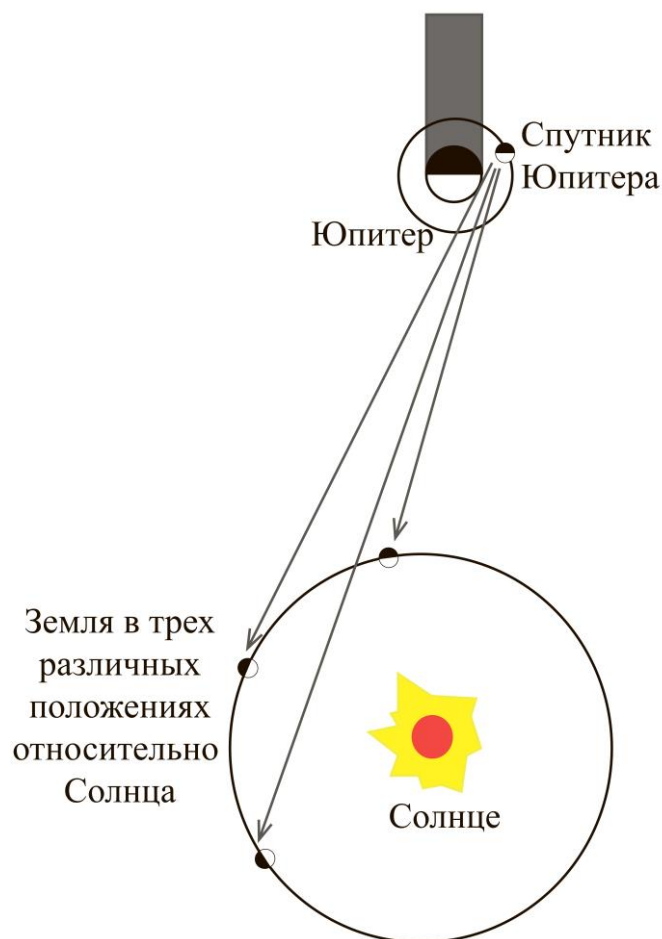


Рис. 3. Юпитер со спутником и Земля в трех различных положениях относительно Солнца.

1.2 Эксперименты Физо, Фуко, Майкельсона

Для решения вопроса является ли свет потоком частиц (Ньютон, Декарт) или волной (Гюйгенс, Юнг, Френель), следовало выполнить эксперимент по измерению скорости света в пустоте или сильно разреженной среде, например, атмосфере и в плотной среде, чей показатель преломления значительно больше единицы. Согласно корпускулярным представлениям о свете явление преломления должно было сопровождаться увеличением скорости света в среде (частицы «втягиваются» в среду), а согласно волновым представлениям – уменьшением скорости света.

Идея опыта Физо повторяет идею опыта Галилея с фонарем, шторкой и зеркалом. Только теперь шторка – затвор, который работает периодически с высокой частотой повторения, открывая и закрывая зеркало от света и

одновременно закрывая зеркало от наблюдателя (рис. 4).

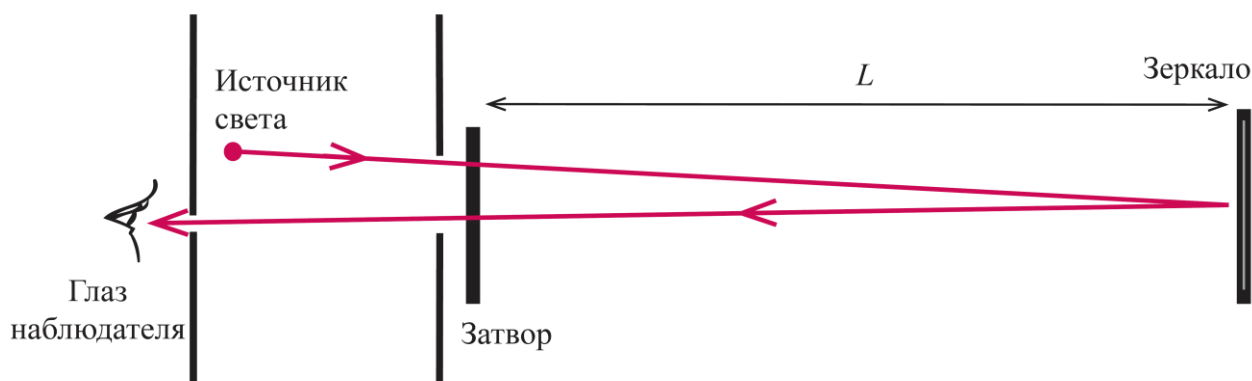


Рис. 4. Схема опыта с периодически действующим затвором

Затвор создает последовательность световых импульсов, бегущих в направлении зеркала. Возвращаясь назад, они попадают в закрытый или открытый затвор. Если затвор будет открыт, тогда наблюдатель увидит свет. Это будет зависеть от расстояния L до зеркала, скорости света, периода T действия затвора. Скорость света c в таком опыте можно найти из соотношения $2L/c = nT$ ($n = 1, 2, 3 \dots$).

В экспериментах Физо роль периодически действующего затвора выполняло быстро вращающееся зубчатое колесо. Схема такой установки с зубчатым колесом дана на рис. 5.

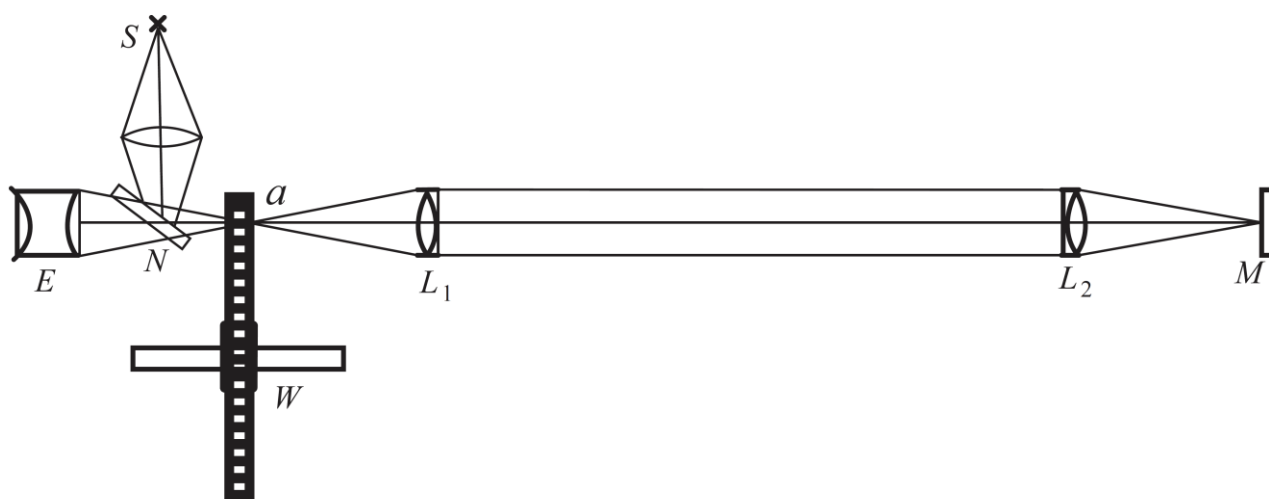


Рис. 5. Схема установки Физо с вращающимся зубчатым колесом. S – источник света, W – вращающееся зубчатое колесо, N – полупрозрачное зеркало, L_1 и L_2 линзы, M – отражающее зеркало, E – окуляр.

Зубцы колеса одновременно перекрывают свет от источника и свет, возвращающийся от зеркала. Наблюдатель помещает глаз за окуляром E и регистрирует свет наибольшей яркости, когда время прохождения светом расстояния между колесом и зеркалом и обратно равно времени поворота W на целое число зубцов (1, 2, 3 и т. д.). Пучок лучей света при этом проходит строго посередине между зубцами как на участке от колеса зеркала, так и при обратном ходе от зеркала до колеса. Период действия затвора зависит от скорости вращения и числа зубцов.

В первом опыте Физо расстояние от колеса до зеркала составляло 8,6 км. Измерения скорости света дали значение 315 000 км/с.

Недостаток эксперимента Физо состоял в том, что наблюдатель должен был на глаз определять момент минимальной и максимальной яркости света, отраженного от зеркала, удаленного на несколько километров. В те годы еще не было фотоэлектрических средств регистрации света, что ограничивало точность измерений. Надо было как-то видоизменить опыт. Опыт, в котором бы глаз наблюдателя не регистрировал интенсивность, а проводились бы измерения положения изображения источника света, был выполнен Фуко. Вместо «модулятора» интенсивности света – вращающегося диска с зубьями, Фуко, а затем Майкельсон в своих опытах использовали быстро вращающиеся зеркала. Для понимания идей их опытов покажем, что можно собрать оптическую схему с поворачивающимся зеркалом, в которой бы положение изображения источника света не зависело от положения зеркала, а менялось бы в зависимости от скорости его вращения. Вариант схемы представлен на рисунке 6.

Луч света от источника S падает в центр вращающегося зеркала. Ось вращения перпендикулярна плоскости рисунка. От зеркала луч направляется на неподвижное *сферическое зеркало* I . Центр кривизны сферического зеркала совпадает с центром вращающегося зеркала, поэтому отраженный луч, независимо от места падения, пойдет обратно, не меняя своего направления.

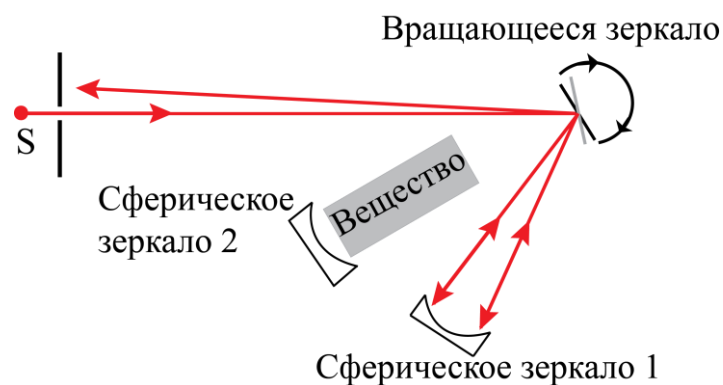


Рис. 6. Схема с вращающимся зеркалом.

При высокой скорости вращения за время прохождения светом участка от вращающегося зеркала до неподвижного сферического зеркала и обратно вращающееся зеркало повернется на небольшой угол. В результате отраженный луч изменит направление, и не будет совпадать с направлением луча от источника света. Поэтому изображение источника сместится. Заметим, что рядом с неподвижным сферическим зеркалом можно поместить второе сферическое зеркало, а на пути света расположить прозрачное вещество с показателем преломления больше единицы. Тогда можно одновременно провести измерения скорости света в атмосфере и веществе, сразу сравнив смещения изображения источников. Если скорость света в веществе меньше скорости света в атмосфере, то задержка будет больше. Зеркало успеет повернуться на больший угол, смещение изображения будет больше. Такой эксперимент показал, в подтверждение волновой теории света, например, что скорость света в воде меньше скорости света в воздухе. Более детально схема установки показана на рис. 7.

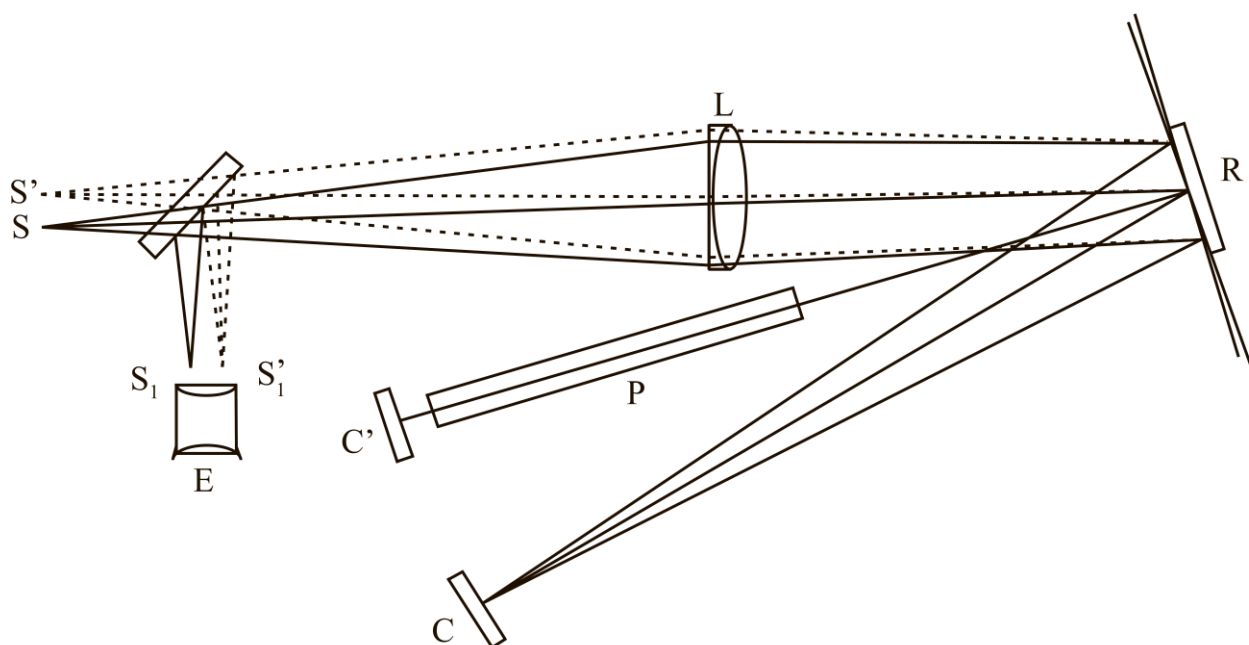


Рис. 7. Более подробная схема установки с вращающимся зеркалом.

Линза L строит изображение источника S на поверхности сферического зеркала C . В центре кривизны сферического зеркала расположено вращающееся зеркало R . Имеется возможность поместить второе сферическое зеркало и трубу с водой P . Между источником и линзой располагается наклонная стеклянная пластинка. Через окуляр E наблюдают за отраженным от вращающегося зеркала изображением S_1 источника, которое при высокой скорости вращения смещается в положение S_1' . На таких установках скорости вращения зеркал достигали нескольких сотен оборотов в секунду, расстояния между зеркалами десятки метров. Это позволяло проводить измерения в помещениях лабораторий.

Идея вращающихся зеркал была использована и в экспериментах Майкельсона. Вместо зеркал он использовал многогранные призмы с отражающими поверхностями на гранях. На рис. 8 приводим схему установки для измерения скорости света из книги Майкельсона «Studies in Optics» со всеми деталями установки, которые опущены в современных учебниках.

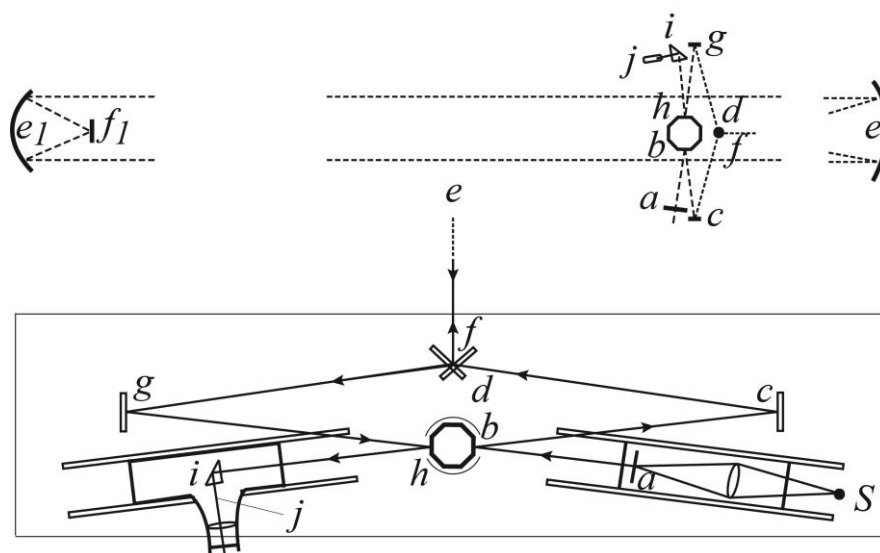


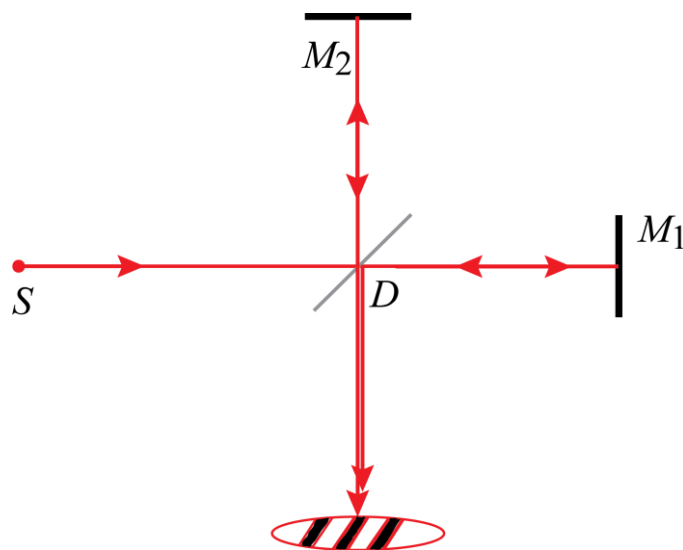
Рис. 8. Схема установки Майкельсона с вращающейся призмой.

Проследим путь света в установке. Свет от источника S падает на грань b вращающейся восьмигранной призмы. Затем, отражаясь от зеркала c , идет на зеркало d , сферическое зеркало e , e_1 , плоское зеркало f_1 , снова e_1 и обратно на сферическое зеркало e , плоские зеркала f , g , отражающую грань восьмиугольной призмы h , зеркало i , затем в измерительный окуляр j . Наблюдатель видит изображение источника тогда, когда за время прохождения света призма повернется на одну грань. Расстояние между зеркалами e , e_1 составляло 35 км.

В течение всей своей жизни от первого опыта в 1887 году до 1931 года Майкельсон возвращался к постановке экспериментов по прямому измерению скорости света, модифицируя и совершенствуя технику эксперимента. Ему удалось получить значение скорости света $c = 299\,796$ км/с с погрешностью 4 км/с.

Более известный эксперимент Майкельсона – сравнение времен прохождения светом одинаковых расстояний в разных направлениях – был поставлен в связи с поиском «светоносного эфира». По представлениям ученых тех лет «эфир» должен был заполнять пространство и (подобно воздуху для звука) обеспечивать распространение световых волн. Наша планета движется по орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/с. Майкельсон надеялся обнаружить это движение, используя для регистрации разного времени распространения явление интерференции света. Представим, что мы находимся в неподвижной

системе отсчета, связанной с «эфиром» и наблюдаем за движущейся со скоростью V лабораторией, в которой размещена установка – интерферометр Майкельсона – схематически изображенная на рисунке 9.



Наблюдение интерференции волн

Рис. 9. Схема интерферометра Майкельсона

Излучение от источника света S достигает светоделительной пластинки D . Половина света проходит D в направлении зеркала M_1 , половина идет в направлении зеркала M_2 . Расстояния от делителя до зеркал одинаковы и равны L . Найдем время прохождения T_1 от делителя до зеркала M_1 . За это время свет пройдет расстояние L , и зеркало («убегая» от света) сместится на расстояние VT_1 . Так T_1 находится из выражения:

$$T_1 c = L + VT_1, \quad (1)$$

где c – скорость света, V – скорость движения лаборатории.

Время движения света назад T_2 найдем, учитывая, что светоделительная пластинка D «набегает» на движущуюся со скоростью c световую волну:

$$T_2 c = L - VT_2. \quad (2)$$

Время T_{DM_1D} прохода светом пути «туда–обратно» между D и M_1 составит:

$$T_{DM_1D} = (2L/c)/(1 - (V/c)^2) \approx (2L/c)(1 + (V/c)^2). \quad (3)$$

От светоделительной пластинки D до зеркала M_2 свет движется в направлении, перпендикулярном направлению движения интерферометра. Делитель D перемещается, как показано на рис. 10.

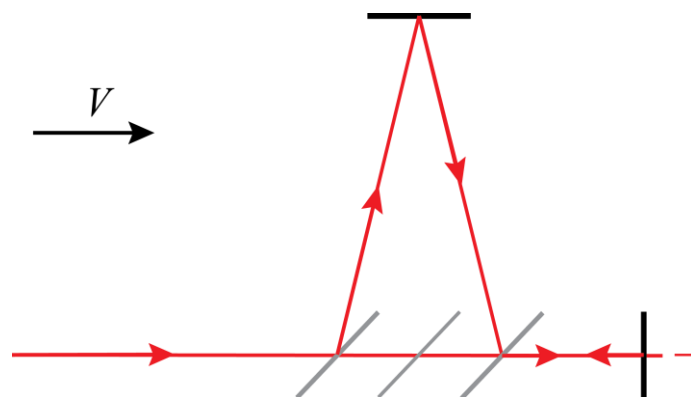


Рис. 10. Учет движения интерферометра при расчете времен прохождения расстояний.

Поэтому, время прохождения света T от D до зеркала M_2 с учетом смещения D :

$$Tc = (L^2 + (VT)^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Такое же время потребуется свету и на обратный путь от зеркала до светоделительной пластинки. Время T_{DM_2D} прохода светом пути от D до M_2 и обратно составит:

$$T_{DM_2D} = 2T = (2L/c) / (1 - (V/c)^2)^{1/2} \approx (2L/c)(1 + 1/2 (V/c)^2). \quad (5)$$

Получается, что время прохождения света в разных направлениях от светоделительной пластинки различно:

$$T_{DM_1D} - T_{DM_2D} \approx (L/c) (V/c)^2. \quad (6)$$

Если установку развернуть на 90 градусов, пути распространения света поменяются местами. Разность поменяет знак. Поэтому при повороте интерферометра Майкельсон надеялся увидеть смещение полос интерференции. Эксперимент дал отрицательный результат. В этом и последующих экспериментах Майкельсону и его последователям не удалось зафиксировать изменение интерференционной картины вследствие ожидаемого изменения времени распространения света. Опыт Майкельсона является первым экспериментальным обоснованием специальной теории относительности.

1.3 Эксперименты по измерению скорости света в наши дни

Физика в своём развитии постоянно возвращается к воспроизведению и уточнению основополагающих экспериментов, осуществляя их с новыми

техническими возможностями. В 2011 году группа российских ученых (Александров Е. Б. с соавторами) выполнили эксперимент по измерению скорости света. Цель эксперимента состояла в очередной проверке второго постулата теории относительности – измерению скорости света в зависимости от скорости движения источника.

Напомним, что постулат о независимости скорости света от скорости движения источника прямо подтверждается, например, астрономическими наблюдениями двойных звёзд. Однако это наблюдение встречает возражение сторонников баллистической гипотезы. (Согласно баллистической гипотезе Ритца скорость света должна складываться со скоростью источника по аналогии со скоростью снаряда, вылетающего из движущейся пушки.) Они связывают этот результат с ролью межзвёздного газа, который рассматривается как вторичный источник света. Сторонники баллистической теории считают, что свет, испущенный вторичным источником, «теряет память» о скорости первичного источника по мере распространения в межзвёздной среде, потому что фотоны источника поглощаются, а затем вновь излучаются неподвижной средой.

Рассмотрим эксперимент Александрова, для очередной проверки второго постулата и баллистической гипотезы (рис. 11).

В эксперименте был использован синхротронный излучатель, в котором очень ярким импульсным источником света служит сгусток электронов,двигающийся в вакууме со скоростью $0,9999c$, практически близкой к скорости света. С позиций баллистической гипотезы скорость света в такой ситуации должна быть равна удвоенной скорости света от неподвижного источника, а при прохождении светом сквозь неподвижное прозрачное вещество снова становиться равной c .

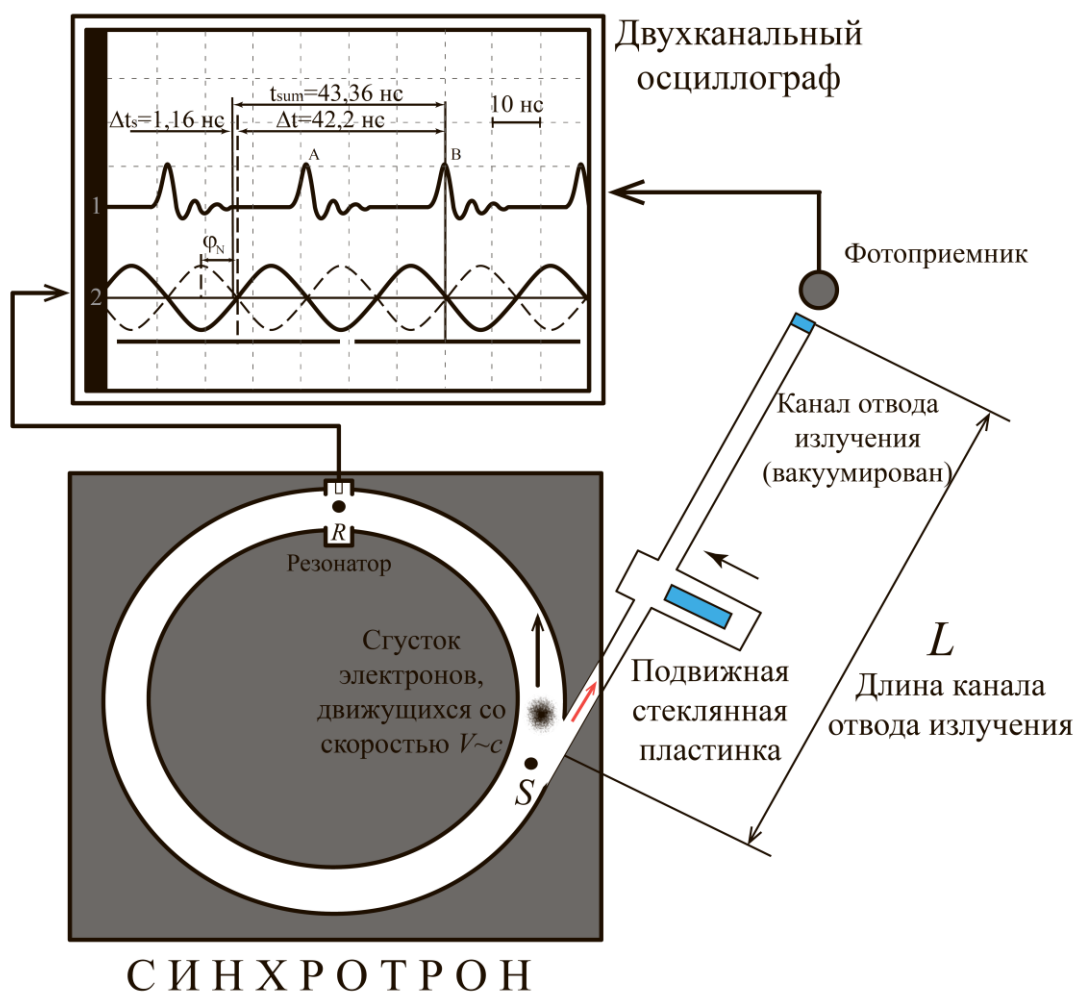


Рис. 11. Схема эксперимента Александрова.

Сгусток электронов движется с очень большой скоростью внутри кольца синхротрона (светлая область на рисунке) по круговой траектории (магнитное поле направленно перпендикулярно плоскости рисунка). В точке R кольца расположен резонатор, в котором создается переменное электрическое поле. Оно разгоняет электроны, компенсирует потери энергии на излучение при движении по кольцу синхротрона. Фаза поля связана с прохождением сгустка электронов через резонатор. В точке S кольца сделан канал длиной L для отвода излучения. Пучок света в канале можно перекрывать стеклянной прозрачной пластиной. После прохождения пути длиной L в вакууме излучение выводится через прозрачное окно и попадает на фотоприёмник. Сигнал с фотоприемника и сигнал от поля в резонаторе по электрическим кабелям одинаковой длины поступает на входы двухканального осциллографа. Синхронизация развертки осциллографа осуществлялась по сигналу поля в резонаторе. По осциллограмме определяется

время T_{Sum} между моментом прохождения сгустка электронов через резонатор и максимумом светового импульса. Это время складывается из времени T_{RS} прохождения электронами расстояния от точки R до точки S и времени T_L прохождения света пути L длиной 7,2 метра в вакууме до фотоприемника. Время $T_{\text{Sum}} = 43,36$ нс, $T_{\text{RS}} = 19,26$ нс, $T_L = T_{\text{Sum}} - T_{\text{RS}} = 24,10$ нс. Отсюда скорость света $L / T_L = 7,2 / 24,1 \times 10^{-9} = 2,99 \times 10^8$ м/с.

Прямое измерение скорости света от релятивистского источника показало, что в полном соответствии со вторым постулатом СТО скорость света не зависит от скорости источника; баллистическая гипотеза не подтвердилась.

1.4 Понятия групповой и фазовой скорости волн

С точки зрения волновой теории света преломление лучей на границе воздух – прозрачное вещество возникает из-за различия скоростей распространения волн в разных средах. Величина показателя преломления среды есть отношение скоростей света в воздухе к скорости света в веществе. Однако Майкельсон обнаружил, что величина показателя преломления сероуглерода, определенная обычным методом измерения углов преломления, отличается от значения, полученного из измерений скорости света в веществе. Объяснение результату дал Релей, который показал, что скорость перемещения группы волн в среде с дисперсией (зависимостью показателя преломления от длины волны) будет отличаться от фазовой скорости волны. Определение же показателя преломления по изменению направления распространения на границе раздела двух сред дает отношение фазовых скоростей. В опытах же Физо, Фуко и Майкельсона измерялась скорость импульсов света, ограниченных во времени и пространстве. Приведем рассуждения Релея, который показал как в среде с дисперсией скорость группы волн отличается от фазовой скорости.

На рис. 12 схематически показана сумма двух гармонических волн одинаковой амплитуды с разными частотами. Она имеет вид последовательности перемещающихся в пространстве импульсов.

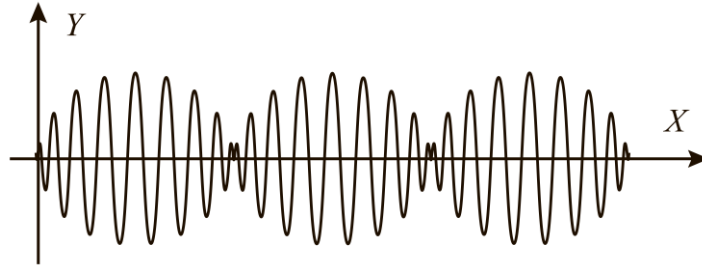


Рис. 12. Группы волн при суперпозиции двух гармонических волн.

Посмотрим, как поведут себя такие импульсы, если фазовые скорости распространения волн не равны из-за дисперсии среды. Запишем выражения для двух распространяющихся в пространстве гармонических волн.

$$\begin{aligned} Y_1 &= a \cos(\omega_1 t - k_1 x), \\ Y_2 &= a \cos(\omega_2 t - k_2 x), \end{aligned} \quad (7)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (8)$$

Амплитуды волн a равны, частоты и длины волн мало отличаются друг от друга.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_0 + \delta\omega, & \omega_2 &= \omega_0 - \delta\omega, \\ k_1 &= k_0 + \delta k, & k_2 &= k_0 - \delta k. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение для суммы двух гармонических волн можно записать в виде произведения:

$$Y = Y_1 + Y_2 = 2a \cos(t\delta\omega - x\delta k) \sin(\omega_0 t - k_0 x) \quad (10)$$

или

$$Y = A(t, x) \sin(\omega_0 t - k_0 x). \quad (11)$$

Выделим сомножитель:

$$A(t, x) = 2a \cos(t\delta\omega - x\delta k). \quad (12)$$

Он выделяет в пространстве группу волн. Амплитуда волн будет максимальна в области, где:

$$t\delta\omega - x\delta k = 0; \pm 2\pi; \pm 4\pi \dots \quad (13)$$

Скорость перемещения группы волн в пространстве найдем, дифференцируя выражение (13) по времени. Получим выражение для скорости перемещения группы волн – *групповой скорости*:

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{\delta\omega}{\delta k} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (14)$$

Скорость перемещения фазы (фазовая скорость) для монохроматической волны:

$$v = \frac{\omega}{k} \quad (15)$$

Найдем связь между групповой, фазовой скоростью и дисперсией. Преобразуем выражение для групповой скорости следующим образом:

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk}. \quad (16)$$

Воспользуемся тем, что $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, и, следовательно, $dk = -(2\pi / \lambda^2)d\lambda$.

Преобразуем последний член в предыдущем уравнении:

$$k \frac{dv}{dk} = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{dv}{d\lambda} = -\lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (17)$$

И получаем так называемую формулу Релея:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (18)$$

Ее можно записать в более явном виде, если учесть зависимость показателя преломления среды от частоты. Используем связь частоты и длины волны $n\lambda = 2\pi C / \omega$. Тогда получаем следующее выражение:

$$u = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (19)$$

Таким образом, на примере группы волн, образованной суперпозицией двух монохроматических волн, мы показали, что фазовая скорость и скорость группы волн – групповая скорость – могут быть различны. Фазовая скорость и групповая скорость совпадают только в отсутствии дисперсии. Это условие выполняется при распространении света в вакууме.

Еще раз отметим, что в экспериментах Физо, Фуко и Майкельсона (за исключением опыта с интерферометром) зубчатые колеса и вращающиеся зеркала создавали импульсы света. Поэтому в данных методах определяли групповую скорость. Только опыт с интерферометром был рассчитан на сравнение фазовых скоростей.

В лаборатории Вы будете измерять групповую скорость света.

2. Измерения скорости света в Первой физической лаборатории

Эксперименты по измерению скорости света предлагается провести на оборудовании немецкой фирмы «Leybold Didactic» (см. фото 1).

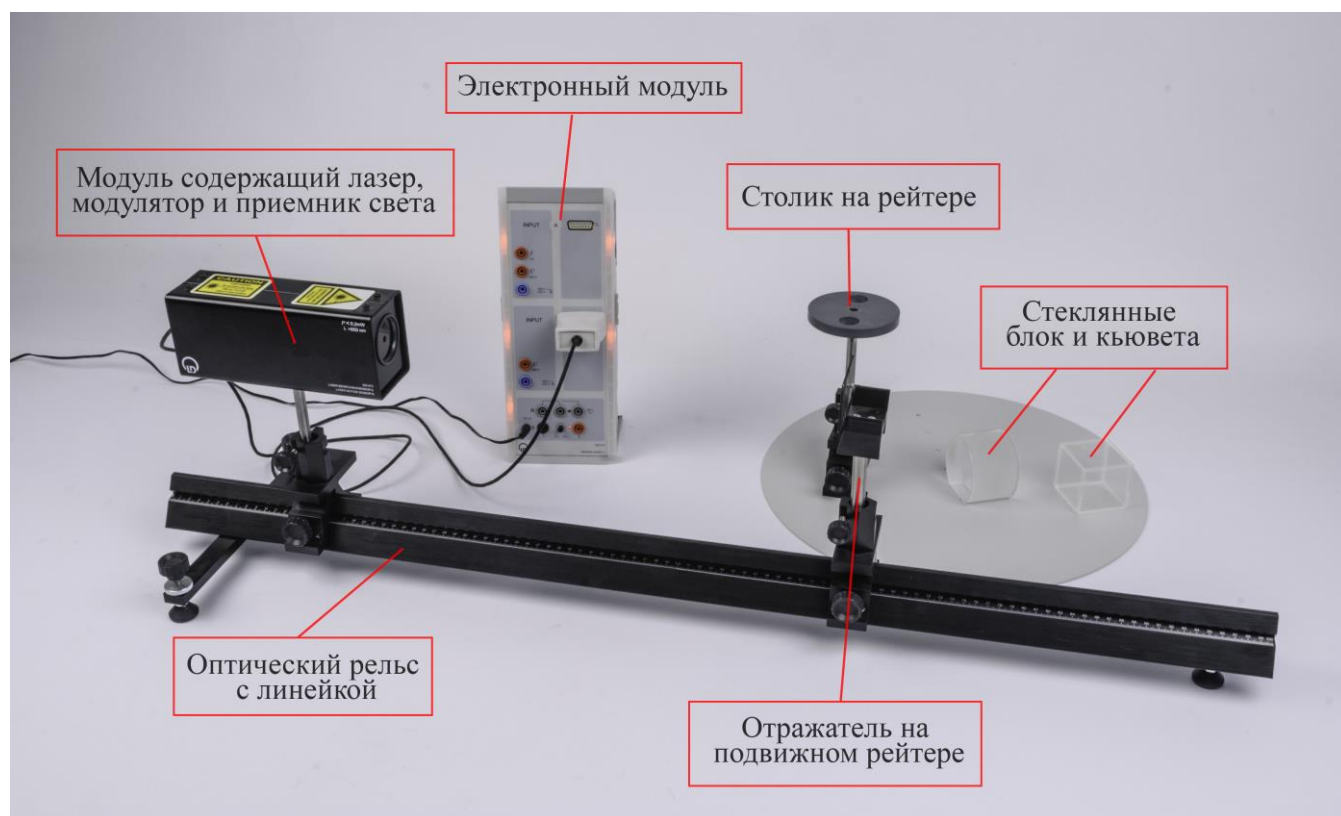


Фото 1. Экспериментальная установка в Первой физической лаборатории

В состав экспериментальной установки входят следующие основные элементы:

- лазерный модуль, содержащий лазер, модулятор света и фотоприемник,
- электронный модуль,
- оптический рельс с линейкой,
- отражатель на подвижном рейтере,
- объекты – стеклянный блок и кювета, которую следует заполнить водой при проведении эксперимента,
- столик на рейтере,
- персональный компьютер (на фото не показан).

Идея измерения скорости света на основе данной системы такая же, как была в опытах Галилея и Физо. Модулятор изменяет интенсивность лазерного излучения. На некотором расстоянии размещается отражатель. Свет отражается

и направляется обратно. Фотоприемник преобразует свет в электрический сигнал. Электронная схема находит время задержки между электрическим сигналом, воздействовавшим на свет и электрическим сигналом от фотоприемника, в котором присутствуют эти изменения. Зная расстояние до отражателя и время возврата света от отражателя, мы можем найти скорость света в атмосфере лаборатории.

Вам предстоит провести две серии экспериментов. Цель первой серии экспериментов – определить скорость света в воздухе. Цель второй серии – определить скорость света в воде и стекле.

В первой серии экспериментов следует провести измерения времени прохождения света от лазерного модуля до отражателя в зависимости от расстояния до отражателя. Время задержки определяет измерительная система установки. Вам необходимо перемещать отражатель и стараться с максимальной точностью определять его положение, фиксировать результаты измерений.

Во второй серии экспериментов следует поставить отражатель на некотором расстоянии от лазерного модуля. Определить время задержки до отражателя без среды на пути пучка, а затем внести среду и вновь определить время задержки. Определить возрастание задержки. Измерить длину объекта. Определить величину отношения скорости света в воздухе к скорости в веществе.

2.1 Знакомство с установкой и подготовка эксперимента

Работу на установке можно условно разбить на две группы действий. Первая группа будет состоять из работы с компьютером, который управляет работой электронных модулей установки и выводит данные о времени задержки света. Вторая группа – действия на лабораторном столе, перемещения элементов, определения расстояний.

Начнем с описания порядка работы с программным обеспечением. Экран программы должен выглядеть следующим образом (рис. 13).

Перед началом работы персонал лаборатории запускает уже сконфигурированную для проведения эксперимента программу. Вам следует убедиться, что окно программы имеет вид как на рис. 13 и обратить внимание на следующие области окна.

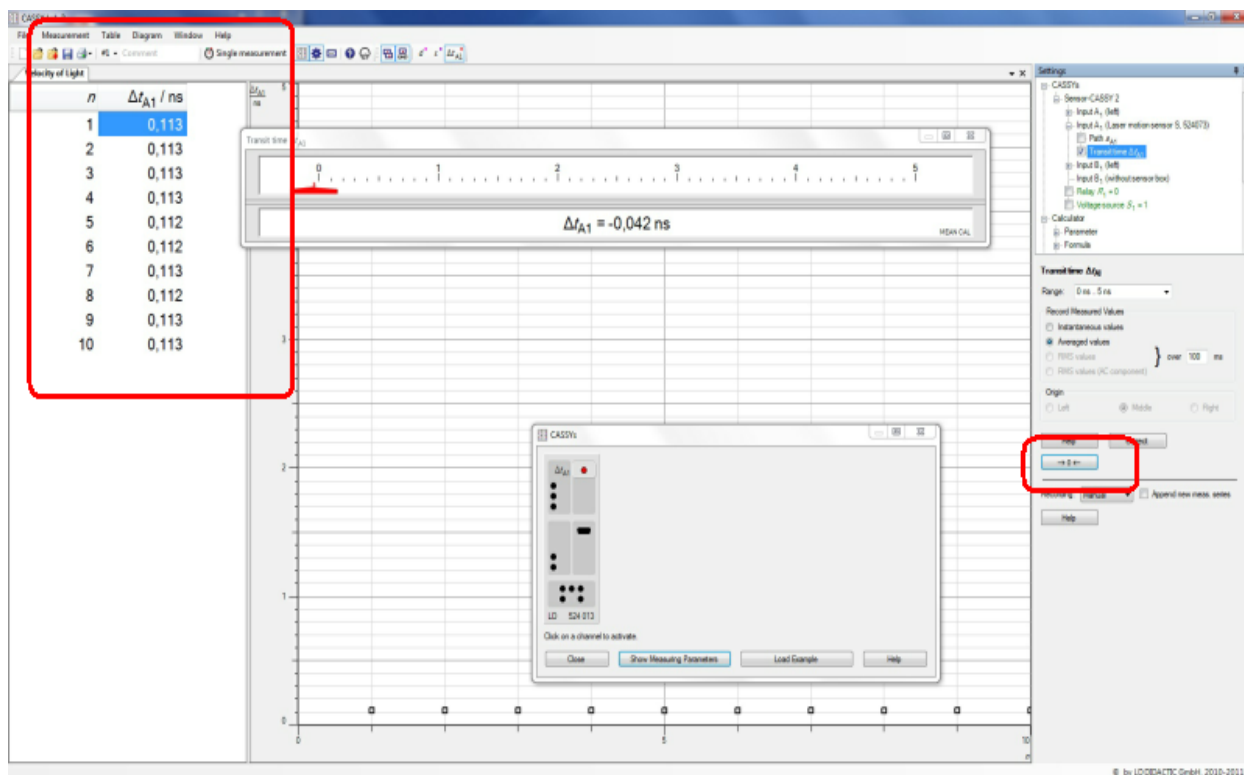


Рис. 13. Общий вид окна программы.

Текущая задержка с электронного модуля отображается программой в дополнительном окне, которое имеет вид линейки со шкалой. Под ней расположено окно управления функциями электронных модулей. Не следует щелкать мышкой по кнопкам и пиктограммам в этом окне.

В левой части отображаются результаты измерений времени задержки. Там должны присутствовать следующие элементы (обведены красным на рис. 14). Вкладка с надписью «Velocity of Light», кнопка с надписью «Single Measurement» и пиктограммой часов, кнопочка Δt_{A1} . Важно – измерение происходит при щелчке мышкой по кнопке с пиктограммой часов и надписью «Single Measurement». После чего в таблице появляется номер измерения и значение задержки в наносекундах.

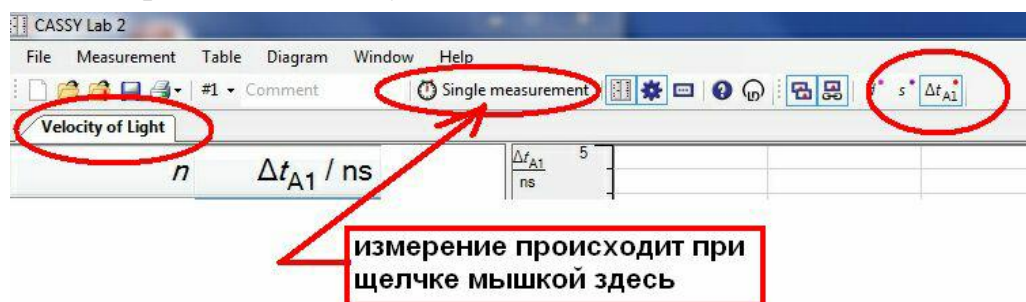


Рис. 14. Фрагмент левой верхней части окна программы.

Для удаления значения измерений из таблицы надо нажать одновременно на клавиатуре клавиши «Alt» и «L».

В правой части находится окно настроек. Для работы с программой необходимо найти кнопку с надписью « $\rightarrow 0 \leftarrow$ ». Фрагмент окна настроек показан на рис. 15.

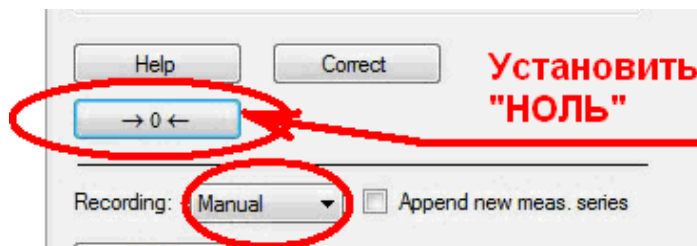


Рис. 15. Фрагмент окна настроек с кнопкой установки «нуля».

Еще раз перечислим элементы управления в окне программы, которые потребуются при выполнении измерений:

Кнопка с пиктограммой часов и надписью «Single Measurement» – измерение.

Кнопка с надписью « $\rightarrow 0 \leftarrow$ » – установка задержки 0.

Комбинация клавиш клавиатуры «Alt» и «L» – очистка таблицы измерений построчно.

Разберем Ваши действия на лабораторном столе при проведении измерений.

Убедитесь, что на лабораторном столе есть лазерный модуль, рельс, рейтер с отражателем, рейтер со столиком, кювета для воды, прозрачный блок из стекла, емкость с дистиллированной водой.

Проверьте, что луч света, выходящий из лазера, идет параллельно оптическому рельсу.

Проверьте работоспособность установки. На пути пучка установите рейтер с отражателем на расстоянии около 30 см от края лазерного модуля. Отражающая поверхность должна быть установлена перпендикулярно лазерному пучку. Пучок должен попадать на отражающую поверхность. Установите ноль задержки для этого положения, щелкнув по кнопке с надписью « $\rightarrow 0 \leftarrow$ ». Затем отодвиньте отражатель на 15 см от выбранного положения. Снова посмотрите на значение времени задержки. Оно должно увеличиться примерно на 1 наносекунду (1 наносекунда, сокращенно ns или ps, равна 10^{-9} секунды). Меняйте положение отражателя и следите, как изменяются времена задержки, согласуются ли они с положением отражателя. Если время задержки согласуется с положениями отражателя, установка работоспособна, и можно приступать к выполнению экспериментов. В противном случае следует обратиться за помощью к сотрудникам лаборатории.

3. Техника безопасности при работе с приборами

Источником опасности для Ваших глаз является лазерное излучение. Прямое попадание излучения на сетчатку глаза может вызвать ее необратимые повреждения. Не следует также с близкого расстояния и долго смотреть на пятно лазера на отражателе.

Ваши неправильные действия могут повредить оборудование установки. Это относится к кювете, прозрачному стеклянному блоку. Вы должны правильно брать эти объекты. Ваши пальцы не должны касаться прозрачных поверхностей объектов.

Правильно



Неправильно



При работе в лаборатории надо быть спокойным, внимательным. Продумывать свои действия. Избегать неуклюжих движений, в результате которых Вы можете толкнуть, опрокинуть, сбросить, уронить на пол детали установки.

Перед началом работы следует внимательно осмотреть элементы установки. Если Вы заметите какие-либо повреждения, сообщите о них персоналу лаборатории или Вашему преподавателю.

4. Порядок выполнения лабораторной работы

После включения всех блоков установки должно пройти не менее пяти минут для прогрева. Согласно указаниям раздела 2.1 правильно разместите элементы установки на столе и проведите проверку работоспособности установки.

Часть 1. Определение скорости света в воздухе

Подготовьте таблицу следующего вида для записи данных (таблица 1).

№ измерения \ Расстояние	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
1				
2					
...					
...					
10					



Фото 2. Шкала на рельсе и рейтер.

Установите отражатель на расстоянии примерно 30 см от края лазерного модуля. Определите координату положения края рейтера (например, левого) с отражающей поверхностью по шкале на рельсе (фото 2). При измерении фиксируйте рейтер на рельсе, закручивая фиксирующий винт. Внесите это значение в таблицу. Установите нулевое значение задержки (щелкните по кнопке « $\rightarrow 0 \leftarrow$ ») для данного положения отражателя. Затем с интервалом в 10 – 20 секунд проведите не менее 10 измерений времени задержки в таком положении отражателя (измерение происходит при щелчке мышкой по кнопке с пиктограммой часов и надписью «Single Measurement»). Перепишите результаты из окна программы в столбец таблицы. Очистите окно программы с результатами (клавиши «Alt» и «L»). Вы провели измерение при условно «нулевой» задержке. Затем, отодвигая рейтер с отражателем от лазера, надо провести измерения задержки для нескольких (не менее четырех) положений отражателя с примерно одинаковым шагом (10 – 20 см). Следует максимально точно определять координаты рейтера.

После этой серии измерений, можно провести такую же серию измерений, только перемещая отражатель обратно к положению условного нуля задержки. Измерения следует проводить при уже использованных положениях отражателя. Тем самым Вы проконтролируете повторяемость результатов.

Часть 2. Измерение скорости света в веществе

Установите отражатель на расстоянии 30 – 50 см от лазерного модуля. Установите «ноль» задержки. Проведите не менее 10 измерений времени задержки. Запишите результаты. Поместите рейтер со столиком на пути лазерного пучка перед отражателем. Поместите на столик стеклянный блок. Обратите внимание, что свет будет отражаться от граней объекта. Отраженный свет от граней не должен попадать в фотоприемник лазерного модуля. При попадании света на фотоприемник, задержка станет отрицательной. Для этого надо слегка отклонить отражающие грани от положения, в котором они перпендикулярны пучку. После этого проводите измерения времени задержки ΔT . Измерьте длину d объекта при помощи имеющейся линейки. Оцените

ошибку измерения.

Переходим к измерению скорости света в воде. Уберите стеклянный блок и поместите вместо него пустую кювету. Проследите, чтобы отраженный от граней свет не попадал на фотоприемник лазерного модуля. Установите ноль задержки. Проведите не менее 10 измерений времени задержки. Запишите результаты. Аккуратно заполните кювету дистиллированной водой. Проследите, чтобы пучок лазера проходил через воду. Проведите снова не менее 10 измерений времени задержки. При помощи линейки определите расстояние между внутренними поверхностями граней кюветы. Запишите полученные результаты. Получим выражение для определения скорости света c_M из полученных данных. Свет проходит в атмосфере расстояние d , равное длине объекта за время T . Скорость света $c = 2d / T$. Если теперь путь длиной d заполнен веществом, время прохождения возрастает на ΔT . Скорость света в веществе можно найти из выражения

$$c_M = 2d / (T + \Delta T) = 2d / (2d / c + \Delta T). \quad (20)$$

5. Обработка результатов эксперимента

Определение скорости света в воздухе

Для определения скорости света из полученных данных можно использовать разные варианты обработки. Обратимся к таблице с результатами измерений.

Таблица 1.

Результаты измерений.

<div>Растояние</div> <div>№ измерения</div>	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
1	$\Delta t_0(1)$	$\Delta t_1(1)$	$\Delta t_2(1)$	$\Delta t_3(1)$	$\Delta t_4(1)$
2	$\Delta t_0(2)$	$\Delta t_1(2)$	$\Delta t_2(2)$	$\Delta t_3(2)$	$\Delta t_4(2)$
...	$\Delta t_0(..)$	$\Delta t_4(..)$
10	$\Delta t_0(10)$	$\Delta t_1(10)$	$\Delta t_2(10)$	$\Delta t_3(10)$	$\Delta t_4(10)$

1. Вычислите средние значения задержки $\langle \Delta t_i \rangle$ для каждого i столбца таблицы.
2. Определите значения $\Delta T_i = \langle \Delta t_i \rangle - \langle \Delta t_0 \rangle$ (разность между средней задержкой в положении ΔZ_i и средней задержкой в положении ΔZ_0).
3. Вычислите разность $\Delta Z_i = Z_i - Z_0$.
4. Используя соотношение $c = 2\Delta Z_i / \Delta T_i$ можно найти скорость света c для каждого положения отражателя.
5. Можно в стандартных пакетах обработки данных воспользоваться линейной аппроксимацией зависимости удвоенного расстояния отражателя $2\Delta Z_i$ от времени задержки ΔT_i . Коэффициент наклона есть искомая скорость света.
6. Оцените погрешность. Погрешность оценивается с учетом отклонения от среднего значения измеренных времен задержки и погрешности измерения координат отражателя.

Определение скорости света в веществе

1. Вычислите средние значения показаний задержки при калибровке $\langle \Delta t_0 \rangle$ и при внесении объекта $\langle \Delta t_1 \rangle$ и их погрешности.
2. Вычислите разность $\Delta T = \langle \Delta t_1 \rangle - \langle \Delta t_0 \rangle$.
3. Для определения скорости света в веществах c_M (вода и стекло) воспользуйтесь вторым равенством соотношения (20), где c – скорость света, измеренная в предыдущем опыте, d – длина пути света в образце.
4. Укажите погрешность результатов.
5. Вычислите отношение скоростей света c / c_M , укажите погрешность, сравните со значениями 1,33 для воды и 1,5 для стекла.

Требования к оформлению отчета

В заголовке отчета следует написать название работы, ФИО автора работы, номер группы.

Отчет должен содержать следующие материалы:

- Краткая формулировка целей работы.
- Схема экспериментальной установки с указанием основных частей, описание их назначения.
- Описание порядка выполнения работы.
- Таблицы с данными первичных измерений.
- Рабочие формулы определения искомых величин и формулы для вычисления их погрешностей.
- Полученные значения в результате обработки экспериментальных данных, значения скоростей света с указанием их погрешностей.
- Сравнение Ваших результатов с известными данными по значениям скоростей света. При наличии расхождений, обсудить причины этих расхождений.
- Ваши выводы о том, насколько точно можно определить значение скорости света в использованной установке. Отметить факторы, ограничивающие точность измерений.

6. Контрольные вопросы

1. С какими научными целями выполнялись эксперименты по определению скорости света в разное время?
2. Как предлагал провести опыт по измерению скорости света Галилей и почему он не удался?
3. Каким образом из астрономических наблюдений Ремер сделал заключение о конечной скорости света?
4. Какую схему реализовал Физо для измерения скорости света? Каким образом в ней осуществлялось измерение скорости света?
5. В чем отличалась идея экспериментов Физо от экспериментов Фуко и Майкельсона по измерению скорости света?
6. Как в установке Фуко для одновременного измерения скорости света в воздухе и веществе будут вести себя изображения щели при увеличении скорости вращения зеркала? Что произойдет, если плечи установки поменять местами?
7. Какую роль играли измерения скорости света при создании теории относительности?
8. Чем обусловлены постоянные обращения физиков к повторению разных вариантов экспериментов по измерению скорости света?
9. Зачем был выполнен эксперимент по измерению скорости света от источника, движущегося с ультрарелятивистской скоростью, какой результат был получен?
10. Ваше мнение: существуют ли основания для продолжения измерений скорости света в разных условиях и с все нарастающим уровнем точности?
11. Понятие о фазовой и групповой скорости световых волн.
12. Почему групповая скорость отличается от фазовой скорости?
13. Какая скорость измерялась в экспериментах Физо и Фуко?
14. Фазовая или групповая скорость будет измерена в эксперименте, который Вам предстоит сделать в учебной лаборатории?
15. Отличается ли фазовая скорость от групповой скорости в вакууме?

Список рекомендуемой литературы и справочные данные

1. Ландсберг Г. С. *Оптика*. М.: Наука. 1976

(Теоретический материал описания близок к главе XX «Скорость света и методы ее определения». Опыты Майкельсона с интерферометром разобраны в главе XXII «Оптика движущихся сред».)

2. Е. Б. Александров, П. А. Александров, В. С. Запасский, В. Н. Корчуганов, А. И. Стирин. Эксперименты по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника// УФН, 2011 г., т. 181, № 12, стр. 1344 – 1351.

(Рекомендуется для ознакомления. В доступной форме рассказано о причинах постановки эксперимента и его результатах.)

Дополнительные материалы

1. Марио Льюцци. *История физики*. М.: Мир, 1970.

(Можно рекомендовать читать эту книгу на протяжении всего времени обучения на физическом факультете. История физики от античных времен до эпохи квантовой механики и теории относительности включительно.)

2. Бернард Джефф. *Майкельсон и скорость света*. Изд-во ИЛ, М., 1963.

(Научно-популярная биография ученого, с чьим именем связаны блестящие эксперименты.)

3. Майкельсон А. А. *Исследования по оптике*. УРСС, 2004.

(Современные учебники содержат лишь фрагменты и ссылки на эксперименты Майкельсона. Здесь же их описывает сам автор.)

4. Вавилов С. И. *Экспериментальные основания теории относительности*.

С.И.Вавилов. Собрание сочинений, т.4, АН СССР, М., 1956.

(До сих пор можно столкнуться с работами авторов, критикующих СТО и утверждениями о недостаточности ее экспериментального подтверждения. В предлагаемой работе С. И. Вавилов рассматривает вопрос о достаточности экспериментального материала, подтверждающего справедливость СТО. Работа С. И.Вавилова была написана еще в 1927 году.)

Вопросы и замечания можно высылать автору на почту m.arkhipov@spbu.ru