

где $2\pi\hbar$ — постоянная Планка, а e — заряд протона. Постоянная тонкой структуры играет важную роль в атомной физике и будет рассмотрена в т. IV. Мы не располагаем теорией, которая предсказывала бы величину этой постоянной.

В этой главе рассматриваются главным образом эксперименты и экспериментальные результаты. Мы разберем способы измерения скорости света и экспериментального подтверждения инвариантности ее величины в любой инерциальной системе отсчета. Мы не будем здесь обсуждать вопросы об электромагнитной природе света и о законах его распространения в рефракционных и дисперсионных средах *), как, например, в твердых и жидких веществах. Эти вопросы изложены в т. III.

10.2. Измерение c

Для определения скорости света применялись многие методы **). Здесь мы перечисляем и кратко описываем некоторые из них.

Время прохождения светом диаметра орбиты Земли. Предположение, что скорость света должна иметь конечную величину, было сделано за много столетий до того, как люди смогли доказать

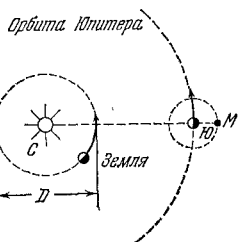


Рис. 10.1. Затмение спутника (М) Юпитера происходит тогда, когда Юпитер (Ю) находится между Солнцем (С) и спутником. Это происходит примерно через каждые 42 часа, в течение которых спутник М совершает оборот вокруг Юпитера.

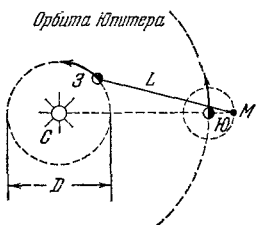


Рис. 10.2. На Земле (З) затмение наблюдается с запаздыванием на время $\Delta t = L/c$ после фактического затмения, потому что скорость света c имеет конечную величину.

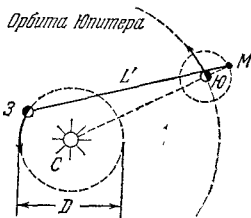


Рис. 10.3. Затмение, наблюдаемое на Земле через 6 месяцев. Теперь $L' \approx L + D$, так что $\Delta t' \approx L'/c + D/c = \Delta t + D/c$. Рёмер 1676 г. измерил $\Delta t + \Delta t'$ и использовал также принятое в его время значение D для определения c .

это экспериментально. Первое экспериментальное подтверждение конечности величины скорости света было дано Рёмером в 1676 г. Он обнаружил, что движение Ио, крупнейшего спутника Юпитера, совершается не совсем регулярно по времени. Было установлено,

*) Среда, показатель преломления которой не равен в точности единице, называется *рефракционной*. Если показатель преломления среды зависит от частоты, то такая среда называется *дисперсионной*.

***) Прекрасный обзор методов измерения скорости света дан на английском языке Бергстрандом в «Handbuch d. Physik» под ред. S. Flügge, т. 24, стр. 1—43 (Berlin, Springer-Verl., 1956). Значения c , которые мы приводим, взяты из таблицы Бергстранда. См. также J. F. Milligan, D. F. M. c. Donald, Am. J. Phys. 25, 180 (1957).

что нарушается периодичность затмений Ио Юпитером. За полгода наблюдения нарушения периодичности наблюдаемого начала затмения Ио Юпитером возрастали, достигая величины около 20 мин. Но это почти равно времени, за которое свет проходит расстояние, равное диаметру орбиты движения Земли вокруг Солнца. Средний диаметр D этой орбиты составляет около $3 \cdot 10^{13}$ см (2 а. е.) *); время, необходимое для того, чтобы свет дошел с одной стороны орбиты на противоположную, равно

$$T = \frac{D}{c} \approx \frac{3 \cdot 10^{13}}{3 \cdot 10^{10}} \text{ сек} \approx 1000 \text{ сек} \approx 17 \text{ мин}, \quad (1)$$

что хорошо согласуется со значением времени прохождения 16,6 мин, полученным на основании проводимых в настоящее время фотометрических наблюдений тех же затмений Ио. В нашем расчете мы приняли для скорости света величину $3 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Рёмер установил при наблюдении затмений, что время прохождения светом диаметра орбиты Земли равно 22 мин; значение этого диаметра было взято им из других источников, и притом неточное. Из расчета по этим данным он получил следующую величину скорости света:

$$c = 214\,300 \text{ км/сек}. \quad (2)$$

Угловая скорость обращения Юпитера вокруг Солнца меньше, чем угловая скорость обращения Земли (периоды обращения равны соответственно 12 годам и 1 году); следовательно, результат расчета зависит главным образом от диаметра орбиты Земли, а не Юпитера. Метод Рёмера был не очень точен, но именно его расчет показал астрономам, что для определения истинного движения планет и их спутников, производимого на основании измерений наблюдаемого движения планет, необходимо учитывать время распространения светового сигнала.

Аберрация света звезд. В 1725 г. Джеймс Бредли начал интересную серию точных определений кажущихся сезонных изменений положения звезд, в частности звезды γ Дракона. После введения всех необходимых поправок он обнаружил, что эта звезда, находящаяся в зените (т. е. непосредственно над головой), совершает кажущееся движение с периодом в один год по почти круговой орбите с диаметром 40,5 дуговой секунды. Для звезд, видимых в других местах небесного свода, Бредли также наблюдал подобное кажущееся движение — в общем случае эллиптическое.

Явление, наблюдавшееся Бредли, называется *абберацией*. Оно не имеет ничего общего с собственным движением звезды. Причина абберации заключается в том, что величина скорости света конечна, а наблюдение ведется с Земли, движущейся с некоторой скоростью по орбите вокруг Солнца. Фактически это был первый прямой опыт, показавший, что система отсчета, связанная с Солнцем, является

*) а. е. — астрономическая единица длины. (Прим. ред.)

более надежной в качестве инерциальной системы, чем система отсчета, связанная с Землей. Этот опыт подтверждает, что правильнее считать Землю движущейся вокруг Солнца, а не Солнце — вокруг Земли: при наблюдении абберации непосредственно обнаруживается происходящее в течение года изменение направления скорости Земли относительно звезд.

Абберацию проще всего можно объяснить, проведя аналогию между распространением света и падением дождевых капель (рис. 10.7). Когда нет ветра, капли падают вертикально и человек не промокнет, если он будет неподвижно стоять под зонтиком, держа

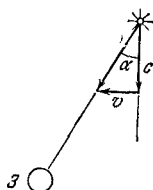
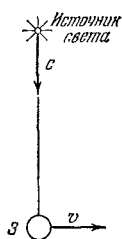


Рис. 10.4. В 1725 г. Бредли использовал явление абберации света для определения c . Предположим, что свет от удаленного источника падает на объект $З$, который движется со скоростью v , перпендикулярной к направлению падающего света.

Рис. 10.5. Для наблюдателя, находящегося на Земле ($З$), свет имеет горизонтальную составляющую скорости v и вертикальную составляющую c . Следовательно, световой луч, идущий от источника, наклонен под углом α , причем $\operatorname{tg} \alpha = v/c$.

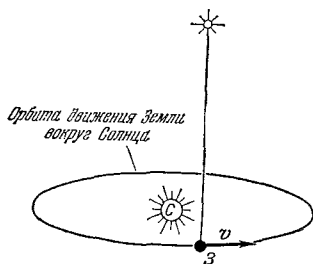


Рис. 10.6. Для определения c по измерению α и известной величине скорости Земли ($v_3 = 30 \text{ км/сек}$, $\operatorname{tg} \alpha = v_3/c$) Бредли воспользовался светом от удаленной звезды, находящейся в зените.

его прямо над головой. Если человек побежит вперед, держа зонтик в том же положении, то его пальто промокнет спереди. Относительно движущегося человека дождевые капли уже не падают точно по вертикали.

Приведем интересный рассказ о том, каким образом Бредли нашел объяснение своим наблюдениям *). «В конце концов, когда Бредли потерял надежду объяснить наблюдаемые им явления, ему вдруг пришло на ум удовлетворительное объяснение в тот момент, когда он и не искал его **). Он участвовал в прогулке на паруснике по Темзе. Парусник, на котором находились участники прогулки, имел мачту с флюгером на ее верхушке. Дул умеренный ветер, и в течение значительного промежутка времени парусник двигался

*) Т. Т h o m s o n, History of the Royal Society, London, 1812, p. 346.

***) Многие изобретения и открытия были сделаны в тот момент, когда после неудачных попыток решений ученый, казалось бы, отвлекался от мыслей о решаемой проблеме. Выдающийся математик Адамар указывает на это явление в интересной и занимательной книге «An essay on the psychology of invention in the mathematical field» («Очерк о психологии открытий в области математики»), 2-е изд., Dover, New York, 1954.

то вверх, то вниз по реке. Доктор Бредли заметил, что каждый раз, когда парусник менял курс, флюгер на его мачте немного поворачивался, как будто бы слегка изменялось направление ветра. Он молча наблюдал это три или четыре раза и наконец обратился

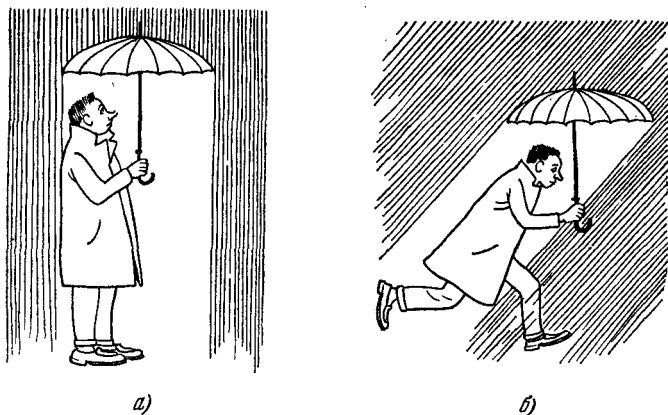


Рис. 10.7. Простой пример абберации. Этот студент попал под вертикально идущий дождь. Если он будет неподвижно стоять под зонтиком, то останется сухим (а). Но если он побежит, то обязательно промокнет (б). В его новой системе отсчета капли дождя имеют горизонтальную слагающую скорости $-v$, где v — скорость студента относительно земли.

к матросам на паруснике, выразив свое удивление тем, что направление ветра регулярно меняется каждый раз, когда они меняют курс парусника. Матросы ответили ему, что ветер не меняет направление, а это кажущееся изменение вызвано переменой направления движения парусника, и заверили его, что такое явление неизменно происходит всегда. Это случайное наблюдение навело его [Бредли] на мысль, что астрономическое явление, так озадачившее его, вызвано сочетанием движения света с движением Земли».

Вот объяснение абберации в том виде, как его дал Бредли *): «Я рассмотрел это явление следующим образом. Я представил себе, что CA [рис. 10.8] — это луч света, падающий перпендикулярно на линию BD ; тогда, если глаз наблюдателя неподвижен и находится в точке A , то он будет видеть предмет в направлении AC , независимо от того, распространяется ли свет в течение какого-то времени или мгновенно. Но если наблюдатель движется в направлении от B к A , а свет распространяется за некоторое время со скоростью, которая относится к скорости наблюдателя, как CA

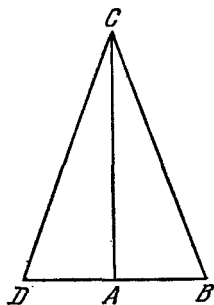


Рис. 10.8.

*) J. Bradley, Phil. Trans. Roy. Soc., London, 35, 637 (1728).

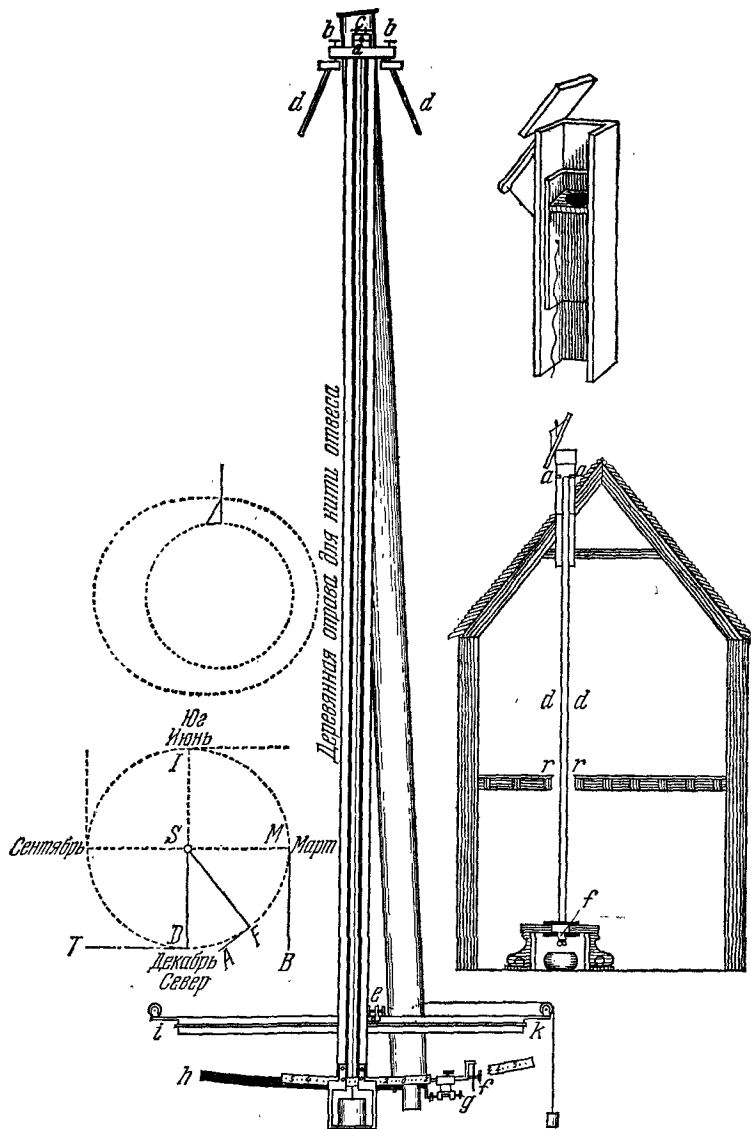


Рис. 10.9. Рисунок из оригинала статьи Бредли.

○ — конец оси с меткой для нити отвеса. *a* — опора, на которой закреплена нить отвеса. *c* — винт для регулировки длины нити отвеса. *b, b* — установочные винты. *d, d* — железные опоры. *i-k* — латунная подставка. *e* — винт с упором для закрепления деревянной оправы на латунной подставке. *f* — микрометрический винт. *g* — винт, предназначенный для того, чтобы телескоп не оказывал давления на микрометрический винт, когда прибор не работает. Телескоп выводится из вертикального положения, чтобы закрепить деревянную оправу нити отвеса. На дуге справа от телескопа изображен разрыв, в котором показан микрометрический винт. *h* — задняя подставка, в которой движется закрепленный в ней микрометрический винт.

RBA , то свет проходит расстояние от C до A за то время, за которое глаз наблюдателя проходит расстояние от B до A , и частица его [света], дающая изображение предмета, когда глаз движущегося наблюдателя проходит в точку A , находилась в точке C , когда глаз находился в точке B . Соединив точки B и C , я предположил, что линия CB — это труба (наклоненная к линии BD под углом DBC) такого диаметра, что в нее поступает только одна частица света; тогда легко было представить себе, что частица света в точке C (из-за которой предмет должен быть виден, когда глаз движущегося наблюдателя достигает точки A) должна была бы двигаться по трубе BC , если эта труба наклонена к BD под углом DBC и движется вместе с глазом от B к A ; но что она не поступит в глаз, находящийся позади такой трубы, если бы она была наклонена под другим углом к линии BD ».

Для звезды, находящейся непосредственно в зените, абберация является максимальной, когда скорость Земли перпендикулярна к линии наблюдения. При этом угол отклонения, или абберации, телескопа, как видно из рисунка, определяется таким равенством:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_3}{c}, \quad (3)$$

где v_3 — скорость Земли. Скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца равна $3,0 \cdot 10^6$ см/сек; здесь можно пренебречь в 100 раз меньшей линейной скоростью вращения Земли вокруг своей оси. Таким образом,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{3,0 \cdot 10^6}{3,0 \cdot 10^{10}} \text{ рад} \approx 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ рад} \approx \alpha, \quad (4)$$

потому что для малых углов $\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$. В дуговых секундах

$$\alpha = 20,5''. \quad (5)$$

Вдвое большая величина, или $41''$, сравнима с величиной $40,5''$ углового диаметра кажущейся орбиты звезды, наблюдавшейся Бредли.

На рис. 10.9 показан чертеж телескопа Бредли. Этот телескоп имел длину около 12 футов (3,7 м) и был специально предназначен для точного наблюдения звезд вблизи зенита. Совпадение результатов наблюдений Бредли над звездой γ Дракона с предложенной им гипотезой иллюстрируется таблицей (см. стр. 339), взятой из его же статьи.

В гл. 11 мы вновь рассмотрим опыт Бредли с точки зрения специальной теории относительности и получим подтверждение уравнения (3) с точностью до величин высшего порядка относительно α . (Следует заметить, что применение теории относительности часто не влияет на величину и характер эффектов первого порядка относительно v/c , однако так бывает не всегда.)

Методы измерения, основанные на применении зубчатых колес и вращающихся зеркал. Первое определение скорости света, не

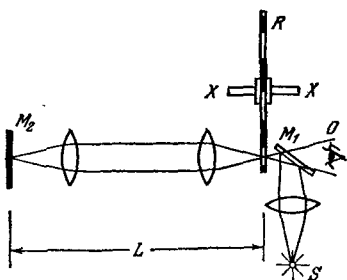


Рис. 10.10. Прибор Физо с зубчатым колесом (1849 г.). Свет от точечного источника S отражается полупрозрачным зеркалом M_1 в направлении к зубчатому колесу R , вращающемуся на оси XX' . Затем свет отражается от зеркала M_2 и возвращается к наблюдателю O , проходя через просвет между зубцами колеса R и пластинку M_1 .

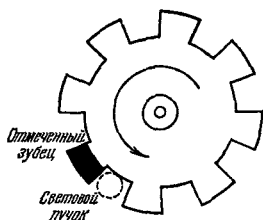


Рис. 10.11. Вид на световой пучок и зубчатое колесо R со стороны наблюдателя O (см. рис. 10.10). Вращение колеса R прерывает световой поток, идущий от S и отраженный зеркалом M_1 , разделяя его на ряд коротких импульсов, — свет может пройти от M_1 к M_2 только в том случае, если на пути его нет зубца.

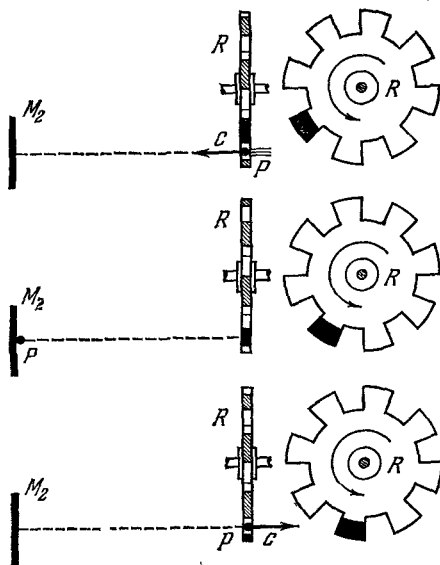


Рис. 10.12. Чтобы световой импульс P , имеющий скорость c , прошел к наблюдателю O (см. рис. 10.10), этот импульс должен пройти до M_2 и, отразившись, вернуться к R (общая длина пробега равна $2L$) за то время, в течение которого зубцы колеса повернутся на один интервал. Физо определил c , измерив расстояние L и угловую скорость вращения зубчатого колеса R .

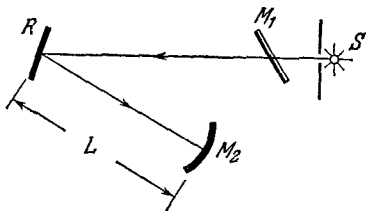


Рис. 10.13. Прибор Фуко с вращающимся зеркалом (1850 г.). Этот прибор состоит из источника света S со щелью, полупрозрачного зеркала M_1 , вращающегося зеркала R (плоскость вращения перпендикулярна к странице) и сферического зеркала M_2 . Показан ход пучка света только от S к M_2 .

Год	Месяц и число	Разность склонений, определенная экспериментально, дуговые секунды	Разность склонений, рассчитанная на основании гипотезы, дуговые секунды
1727	20 октября	$4 \frac{1}{2}$	$4 \frac{1}{2}$
	17 ноября	$11 \frac{1}{2}$	12
	6 декабря	$17 \frac{1}{2}$	$18 \frac{1}{2}$
	28 декабря	25	26
1728	24 января	34	34
	10 февраля	38	37
	7 марта	39	39
	24 марта	37	38
	6 апреля	36	$36 \frac{1}{2}$
	6 мая	$28 \frac{1}{2}$	$29 \frac{1}{2}$
	5 июня	$18 \frac{1}{2}$	20
	15 июня	$17 \frac{1}{2}$	17
	3 июля	$11 \frac{1}{2}$	$11 \frac{1}{2}$
	2 августа	4	4
6 сентября	0	0	

связанное с астрономическими измерениями, было выполнено Физо в 1849 г. Он нашел, что скорость света в воздухе равна *)

$$c = (315\,300 \pm 500) \text{ км/сек.}$$

В качестве затвора для определения времени прохождения светового сигнала по пути, равному 2·8633 мм, Физо использовал вращающееся зубчатое колесо.

Приспособление с зубчатым колесом было вскоре заменено приспособлением с вращающимся зеркалом, дающим больше света и возможность лучшей фокусировки. На рис. 10.13 приведена схема установки, примененной Фуко в 1850 г. Самая надежная из величин скорости света в воздухе, полученная им, равна (1862 г.)

$$c = (298\,000 \pm 500) \text{ км/сек.}$$

В 1927 г. Майкельсоном была применена усовершенствованная схема установки с вращающимся зеркалом (рис. 10.14, 10.15). В этом опыте Майкельсона свет проходил путь в 22 мили (35,4 км)

*) Точный расчет показывает, что скорость света в вакууме на 91 км/сек больше, чем в воздухе.

между горами Маунт Вильсон и Маунт Сан-Антонио в Калифорнии (США). Источник света был помещен в фокусе линзы таким образом, что выходящий из нее пучок сохранял параллельность на большом расстоянии. Результат измерений Майкельсона:

$$c = (299\,796 \pm 4) \text{ км/сек.}$$

Эта работа намного превосходит по точности все предыдущие. Некоторые подробности опыта Майкельсона приводятся в задаче 3.

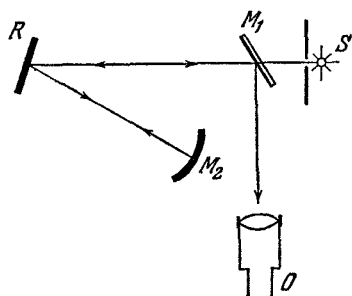


Рис. 10.14. Когда зеркало R неподвижно, пучок света, идущий через M_1 к R и M_2 , отражается обратно по тому же пути к M_1 и оттуда — по направлению к O .

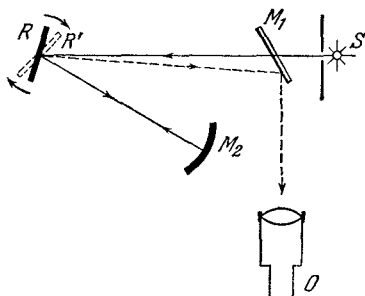


Рис. 10.15. Если зеркало R вращается, то свет, идущий от S к R и M_2 , возвращается в тот момент, когда вращающееся зеркало находится в новом положении R' . Через трубу O наблюдается смещение изображения в зеркале M_1 . Фуко определял c , измерив смещение изображения L (см. рис. 10.13) и угловую скорость вращающегося зеркала.

Метод объемного резонатора. Можно очень точно определить частоту, при которой в объемном резонаторе (металлическом ящике) известных размеров укладывается определенное число длин полу-волн электромагнитного излучения. Скорость света определяется из соотношения

$$c = \lambda \nu, \quad (6)$$

связывающего ее с длиной волны λ и частотой ν . В полости резонатора обычно поддерживается вакуум. К внутренним размерам полости необходимо прибавить поправку, учитывающую проникновение электромагнитного поля на незначительную глубину внутрь металла*). Эссен (1950 г.), пользуясь частотами 5960, 9000 и 9500 Мгц, получил

$$c = (299\,792,5 \pm 1) \text{ км/сек.}$$

*Метод «Шоран»**).* В методе «Шоран» используется радиолокационный маяк. Радиолокационный маяк, или импульсный повто-

*) Глубина проникновения электромагнитного излучения внутрь металла называется *толщиной скин-слоя*. Для меди при комнатной температуре и частоте излучения 10^{10} гц она имеет величину порядка 1 мкм (10^{-4} см). Есть также и другие необходимые поправки.

**) Сокращение «Шоран» (Shoran) получено из начальных букв английского названия метода «Short Range Navigation» (навигация на коротких расстояниях).

ритель,— это прибор, который, получая радиолокационный импульс, немедленно испускает другой импульс. По существу, этот прибор в какой-то степени похож на зеркало, но, в отличие от зеркала, он усиливает поступающий сигнал прежде, чем «отразить» (испустить) его.

При измерении скорости света этим методом радиолокационные маяки устанавливаются в точках A и B . Радиолокационный передатчик, расположенный где-то на прямой между этими точками, испускает импульсы электромагнитного излучения, а приемник, находящийся в том же месте, измеряет время, за которое импульс достигает одного из маяков и возвращается от него. Расстояния между передатчиками и радиолокационными маяками могут быть весьма точно измерены с помощью стандартных геодезических методов. Для расстояний порядка 10^7 см (100 км) ошибка измерений имеет порядок всего около 10 см. Пользуясь часами с кварцевым кристаллом, можно очень точно измерять промежутки времени порядка 10^{-9} сек.

Если t_A — время, за которое импульс проходит от передатчика до маяка в точке A , то измеренный промежуток времени равен

$$T_A = 2t_A + \delta_A, \quad (7)$$

где δ_A — время запаздывания реакции маяка, легко определяемое специальным измерением. Можно было бы измерить скорость света, поместив передатчик в точку B и рассчитав c из следующего соотношения:

$$c = \frac{2L_{AB}}{2t_A}, \quad (8)$$

где L_{AB} — расстояние между A и B . Однако мы можем значительно уточнить измерения, увеличив дальность прямой видимости. Для этого надо поместить передатчик импульсов на самолете, летящем на большой высоте, и измерять время, за которое возвратятся сигналы от маяков A и B . При измерении самолет должен лететь по прямой линии между этими пунктами. Таким способом Аслаксон получил следующую величину:

$$c = (299\,794 \pm 1,9) \text{ км/сек.}$$

Точность этого метода зависит от точности измерения опорных расстояний и от атмосферных условий. Полученное значение c является очень надежным. В оригинале работы Аслаксона анализируются систематические ошибки, не учитывавшиеся в прежних измерениях.

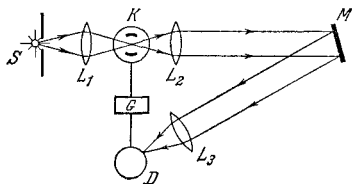


Рис. 10.16. Современный метод определения величины c . Свет, идущий от источника S , подвергается амплитудной модуляции в ячейке Керра K , затем поступает через линзу L_2 на зеркало M и, отражаясь от него, через линзу L_3 — на фотоэлектрический индикатор D . С помощью генератора радиочастотных колебаний G чувствительность фотоэлемента также модулируется синхронно с модуляцией интенсивности света в ячейке Керра.

Применение индикатора модулированного света. Свет от источника S отражается зеркалом M на индикатор — фотоэлемент D (рис. 10.16). Интенсивность света от источника модулируется с помощью радиочастотного генератора; с этой частотой и этим же прибором модулируется также чувствительность фотоэлемента. Для того чтобы сила тока фотоэлемента была максимальной, необходимо, чтобы свет максимальной интенсивности попал на этот фотоэлемент точно в момент его максимальной чувствительности. Это условие выполняется, если время, за которое свет проходит от S до D , равно целому числу периодов модуляции, производимой с частотой ν , т. е. равно N/ν , откуда следует:

$$c = \frac{2L\nu}{N}, \quad (9)$$

где L — расстояние от S и от D до зеркала. Длина пробега светового луча имеет порядок 10 км.

Пользуясь этим методом измерения, Бергstrand получил

$$c = (299\,793,1 \pm 0,3) \text{ км/сек.}$$

Заметьте, что погрешность измерения очень мала. Тот же самый прибор применяется (при условии, что величина c известна) для определения геодезических длин вплоть до 40 км; в этом применении прибор называется *геодиметром*.

Особый интерес представляют два источника ошибок в опытах этого типа. Во-первых, в измеренный интервал времени входит не только время прохождения света, но также и время пробега электронов, переносящих сигнал между электродами фотоэлемента. Время пробега электронов зависит от положения изображения источника света на фотокатод. Перемещение изображения на несколько миллиметров вызывает разность во временах пробега порядка 10^{-9} сек. В ранних опытах этого типа сравнивались промежутки времени для двух световых пучков. Длина пробега одного пучка была постоянной, а длина пробега другого менялась. Однако было невозможно сфокусировать на фотокатод совпадающие изображения от обоих пучков. Используя один пучок, Бергstrand получал только одно изображение. При этом надо было вводить поправку на время пробега электронов, но благодаря надлежащей фокусировке он смог добиться того, чтобы поправка была постоянной для данного прибора. Во-вторых, в точках максимума и минимума силы тока фотоэлемента, изменяющейся по синусоидальному закону, прибор менее чувствителен, потому что верхушка синусоиды не является достаточно острой. Для более точного определения максимума силы тока применяется вторая частота модуляции.

За последние сто лет этими и множеством других методов были произведены сотни измерений c . В настоящее время общепризнанным значением скорости света в вакууме является

$$c = (2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10} \text{ см/сек.} \quad (10)$$

Это значение получено как итог согласования результатов наиболее надежных измерений c , выполненных за последние годы с помощью различных методов, в которых исследовались электромагнитные волны с частотой от 10^8 $гц$ (радиочастота) до 10^{23} $гц$ (гамма-лучи). Точность при наиболее высоких частотах не так высока, как при радиочастотах или оптических частотах, но в настоящее время нет никаких оснований считать, что величина c изменяется с изменением частоты излучения.

10.3. Эффект Доплера

Целесообразно рассмотреть теперь нерелятивистскую теорию эффекта Доплера. Под эффектом Доплера или смещением Доплера понимается определенная связь между измеряемой частотой волнового движения и относительными скоростями источника волн, среды и приемника. Удобно начать рассмотрение этого явления со звуковых волн, распространяющихся в жидкости или газе, потому что для звуковых волн очевидна роль среды. Мы знаем, что не может быть звуковых волн без той вещественной среды, в которой они распространяются. Как мы увидим ниже, из экспериментальных данных следует, что для световых волн не существует соответствующей вещественной среды.

Источник движется относительно среды; приемник неподвижен. Пусть источник волн находится в начале координат галилеевой системы отсчета T , которая движется относительно приемника, помещенного в начале координат другой галилеевой системы отсчета R . Временно предположим, что среда M , в которой распространяются волны, неподвижна относительно системы отсчета R , так что система отсчета R тождественна с системой отсчета M , неподвижно связанной со средой. Система отсчета источника T движется относительно R (и M) со скоростью

$$\mathbf{V} = V\hat{\mathbf{x}}. \quad (11)$$

Если число V положительно, то источник движется по направлению к приемнику.

Скорость звука *относительно* среды зависит только от механических свойств этой среды и совсем не зависит от скорости движения источника относительно среды. Это чем-то напоминает движение предметов на ленте конвейера. Независимо от того, как быстро вы бежите параллельно ленте в момент, когда кладете на нее предмет, скорость этого предмета, как только он лег на ленту, будет в точности равна скорости движения самой ленты конвейера. Если имеется какая-то определенная среда, то определенной является и скорость звука $v_{\text{зв}}$ в этой среде. Известно следующее соотношение между длиной волны, частотой и скоростью распространения волнового процесса:

$$\lambda_R \nu_R = v_{\text{зв}}. \quad (12)$$