

обратно пропорциональны расстоянию от источника (т. II, § 89, 1959 и пред. изд.), то в абсолютно плоской волне  $E$  и  $H$  должны быть равны нулю. Практически плоской волной с конечными  $E$  и  $H$  считают часть волновой поверхности любой формы, кривизной которой можно в данной конкретной задаче пренебречь.

Поток энергии в световой волне определяется *вектором Умова* — *Пойнтинга* (т. II, § 89). Световые лучи совпадают с направлениями этого вектора. В изотропной среде световые лучи нормальны к волновым поверхностям. Согласно сказанному абсолютно плоская волна не может нести конечный поток энергии. Конечные потоки световой энергии всегда заключены в конечных телесных углах, образуемых световыми лучами. Если в выражении для численного значения вектора Умова — Пойнтинга заменить  $H$  через  $E$  [пользуясь соотношением (11), т. II, § 89], то мы получим, что поток энергии световой волны пропорционален  $E^2$ . Таким образом, энергия световых волн, так же как и волн любой другой природы, пропорциональна квадрату амплитуды.

### § 3. Скорость света

Свет, посылаемый каким-либо источником, достигает наблюдателя не мгновенно, а через некоторое время.

Скорость распространения в пустоте всех электромагнитных волн одинакова.

Благодаря колоссальной величине этой скорости свет пробегает большие расстояния в чрезвычайно короткие промежутки времени. Понятно поэтому, что для опытного определения скорости света необходимы либо расстояния астрономических масштабов, либо приборы, позволяющие измерять промежутки времени порядка ничтожных долей секунды.

При астрономическом наблюдении какого-либо явления, происходящего на удаленном от нас небесном светиле, мы тем позже получим световой сигнал об этом явлении, чем дальше находится Земля от светила. Очевидно, что мы будем наблюдать явление с запозданием, равным времени, которое необходимо свету для прохождения пути от светила до Земли. Это время равно расстоянию от светила до Земли, деленному на скорость света.

Если мы наблюдаем какой-либо периодический процесс, происходящий в удаленной от Земли системе, то при неизменном расстоянии между Землей и системой указанное выше запоздывание не будет влиять на наблюдаемый период процесса. Времена, соответствующие началу и концу периода, мы определим с одинаковыми запозданиями, и разность этих времен, равная величине периода, останется неизменной. Иное дело, если за время периода Земля удалится или приблизится к системе. В первом случае конец периода будет зарегистрирован с большим запозданием, чем начало, что при соответствующем вычитании приведет к кажущемуся увеличению периода.

Во втором случае, наоборот, конец периода будет зарегистрирован с меньшим запозданием, чем начало, что приведет к кажущемуся уменьшению периода.

Кажущееся изменение периода равно в обоих случаях разности расстояний между Землей и системой в начале и в конце периода, деленной на скорость света.

Изложенные соображения позволяют без труда понять принцип первого определения скорости света, сделанного астрономом Ремером (1666 г.). При этом в качестве периодического процесса были использованы затмения одного из спутников Юпитера. Затмения наблюдаются, когда спутник входит в тень, отбрасываемую Юпитером (рис. 1). Затмения имеют период, равный 42 ч. 27 м. 33 с. При движении Земли по участку орбиты *НВЕ* благодаря удалению Земли от Юпитера должно наблюдаться указанное выше увеличение периода; наоборот, при движении Земли по участку орбиты *ЕАН* наблюдаемый период будет меньше истинного.

Однако изменение отдельного периода было слишком мало, чтобы Ремер мог его непосредственно заметить. Эффект обнаружился лишь при сопоставлении результатов наблюдений за 6 месяцев, причем наблюдения были начаты в момент «противостояния» Земли (точка *Н* на орбите). За полгода наблюдалось более 40 затмений, причем промежуток времени между первым и последним затмениями оказался примерно на 22 мин больше вычисленного теоретически. При вычислении было использовано истинное значение периода затмений, определенное в точках орбиты, близких к «противостоянию», где расстояние между Землей и Юпитером почти не меняется со временем.

Полученное расхождение было совершенно правильно объяснено Ремером тем, что в течение полугодия Земля перешла из точки *Н* в *Е*, и свету приходится в конце полугодия проходить путь, больший, чем в начале, на величину отрезка *НЕ*, равного диаметру земной орбиты. Незаметные для отдельного периода запаздывания накапливаются и образуют результирующее запаздывание. Величина этого запаздывания показывает, что свет проходит диаметр земной орбиты 300 000 000 км за 22 мин. Отсюда Ремер заключил, что скорость света около 220 000 км/сек.

Ремер получил несколько преуменьшенное значение скорости света, так как переоценил запаздывание затмений; на самом деле запаздывание равно 16½ мин., что соответствует скорости света,

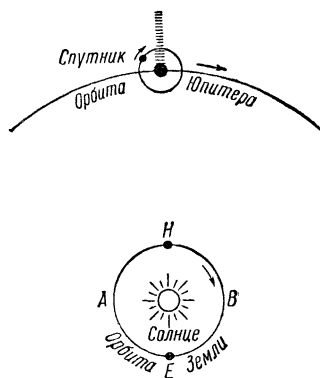


Рис. 1. Способ Ремера определить скорости света.

равной 300 000 км/сек. Следовательно, явления, совершающиеся на Солнце, мы видим такими, какими они были  $8\frac{1}{4}$  мин. назад. Свет от звезд достигает Земли за время от нескольких лет до сотен тысяч лет. Поэтому иногда мы можем принимать свет, излученный звездой, прекратившей уже несколько тысяч лет назад свое существование.

При точных астрономических измерениях необходимо учитывать время распространения света в телескопе. Когда свет звезды  $S$  (рис. 2) попадает в телескоп, то за время, пока он дойдет от объектива  $O$  до окуляра  $F$ , Земля вместе с телескопом успевает несколько сдвинуться. Вследствие этого звезда кажется смещенной. Это явление называют *абберацией* <sup>1)</sup> света.

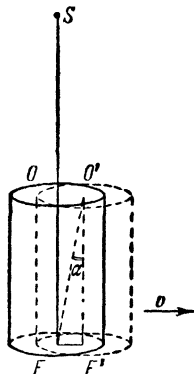


Рис. 2. Абберация света.

Мы будем иметь в виду движение Земли по орбите, происходящее со скоростью  $v=30$  км/сек. Пусть расстояние между объективом и окуляром телескопа свет проходит за время  $t$ . В течение времени  $t$  телескоп смещается на расстояние  $vt$ . Изображение звезды получается при этом не в центре поля зрения  $F'$ , а в  $F$ . Расстояние  $FF'=vt$ . Из треугольника  $FO'F'$ , в котором длина телескопа  $F'O'=ct$  ( $c$  — скорость света), можно определить угол  $\alpha$ , на который следует повернуть телескоп, для того чтобы изображение звезды получилось в центре поля зрения  $F'$ . Именно:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c} = \frac{30}{300\,000} = \frac{1}{10\,000}, \text{ откуда } \alpha \approx 20''.$$

При этом телескоп надо наклонять в направлении движения Земли. При двух положениях Земли на одном диаметре орбиты (рис. 3) звезда будет казаться смещенной в противоположные стороны от истинного положения на один и тот же угол  $\alpha$ . Угол между этими направлениями наблюдения равен  $2\alpha$ .

Проведенное рассуждение, несмотря на свою наглядность, не лишено слабых сторон. Прежде всего неясно, по отношению к чему измеряется скорость Земли. Ведь Земля не только вращается вокруг Солнца, но и участвует в общем поступательном движении всей солнечной системы и т. д. Более строгое рассмотрение показывает, что в случае абберации имеет смысл говорить только об эффектах, связанных с *изменением* скорости Земли. При переходе Земли из одного положения в другое на противоположном конце диаметра орбиты (рис. 3) направление скорости изменится на противоположное и разность скоростей будет равна  $2v$ . Вот это изменение скорости  $2v$  приведет к возникновению абберационного угла  $2\alpha$ . Формула для  $2\alpha$

<sup>1)</sup> От лат. aberratio — удаление, отклонение.

в строгой теории остается той же. Брэдли, открывший в 1727 г. aberrацию света, измерил угол  $2\alpha$  и воспользовался им для определения скорости света. Он нашел, что отношение скорости света к скорости движения Земли равно 10 210, что соответствует скорости света 306 300 км/сек. Если обратить рассуждение и считать скорость света известной, то можно сказать, что aberrация света позволяет определить скорость движения Земли по орбите.

Первое определение скорости света в земном опыте было сделано в 1849 г. Физо, который измерял время, необходимое для прохождения света от источника  $S$  (рис. 4) до зеркала  $M$  и обратно к наблюдателю  $O$ , находящемуся близ источника  $S$ . Для измерения весьма малых промежутков времени Физо применял быстро вращающийся зубчатый диск  $D$ , помещенный на пути световых лучей.

Оптическая система позволяла пропустить через один и тот же промежуток между зубцами как луч  $SM$ , идущий к зеркалу, так и  $MO$ , отраженный от него. При некоторой скорости вращения диска глаз не видел отраженного света. Это происходило потому, что за время прохождения светом расстояния  $dM + Md \approx 2a$  диск успевал повернуться так, что зубец закрывал отраженный луч. Если диск имеет  $t$  зубцов и делает  $n$  оборотов в секунду, то время, необходимое для поворота на ползубца, будет  $t = \frac{1}{2mn}$ . Число зубцов было равно 720, и первое затмение наблюдалось при  $n$ , равном 12,5 оборота в секунду. Тогда скорость света будет  $c = \frac{2a}{t} = 4 mn \cdot a$ , где  $a$  — расстояние между диском  $D$  и зеркалом  $M$ . Из-за большой скорости света расстояние  $a$  в опытах Физо было взято в несколько километров. Физо нашел скорость света  $c = 313\,300$  км/сек.

Другой метод, примененный Физо и Фуко и усовершенствованный позже Майкельсоном, заключается в следующем. Световой луч падает от источника  $S$  (рис. 5) на вращающееся плоское зеркало  $M_1$ . Отраженный от него свет падает на вогнутое зеркало  $M_2$ , после чего

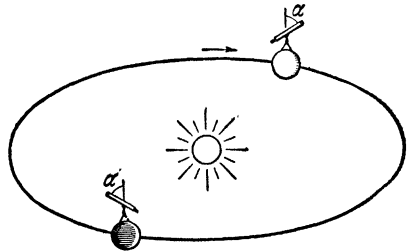


Рис. 3. Способ Брэдли определения скорости света.

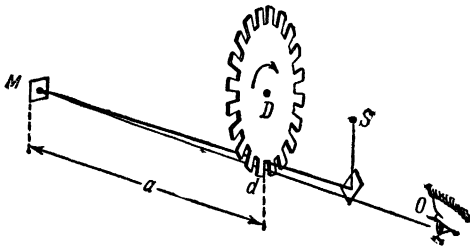


Рис. 4. Способ Физо определения скорости света.

Тогда скорость света будет  $c = \frac{2a}{t} = 4 mn \cdot a$ , где  $a$  — расстояние между диском  $D$  и зеркалом  $M$ . Из-за большой скорости света расстояние  $a$  в опытах Физо было взято в несколько километров. Физо нашел скорость света  $c = 313\,300$  км/сек.

Другой метод, примененный Физо и Фуко и усовершенствованный позже Майкельсоном, заключается в следующем. Световой луч падает от источника  $S$  (рис. 5) на вращающееся плоское зеркало  $M_1$ . Отраженный от него свет падает на вогнутое зеркало  $M_2$ , после чего

возвращается к  $M_1$  и  $S$ . Если зеркало  $M_1$  вращается медленно, то изображение совпадает с источником  $S$  (при помощи оптического приспособления можно наблюдать  $S$  и его изображение раздельно). Когда зеркало  $M_1$  приводят в быстрое вращение, то за время, пока свет проходит расстояние  $M_1M_2$  и обратно  $M_2M_1$ , зеркало  $M_1$  успевает повернуться на небольшой угол, вследствие чего изображение  $O$  оказывается смещенным. Смещение  $SO$  измеряют микрометром. По

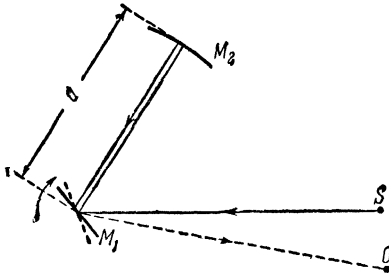


Рис. 5. Измерение скорости света посредством вращающегося зеркала.

величине этого смещения определяют, на какой угол повернулось зеркало  $M_1$ , пока свет прошел удвоенное расстояние  $M_1M_2 = a$ , и отсюда, зная скорость вращения зеркала  $M_1$ , определяют время  $t$ , за которое свет прошел расстояние  $2a$ . Таким образом находят скорость света:  $c = \frac{2a}{t}$ . Путь, пройденный светом, достигал в опытах Майкельсона 70 746,42 м и был измерен с точностью до нескольких сантиметров.

По измерениям Майкельсона, сделанным в 1926 г. с точностью до 4 км/сек, скорость света в пустоте  $c = 299\,796$  км/сек. В настоящее время на основании многих измерений считают, что

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

Поскольку скорость света известна теперь с большой точностью, это позволяет применять в геодезии метод определения расстояний, основанный на измерении времени прохождения света.

Наряду с определениями скорости света в пустоте чрезвычайно большой интерес представляли непосредственные измерения скорости света в различных веществах. Первую удачную попытку в этом направлении сделал Фуко, поместивший на пути светового луча сосуд с водой. Измерения Фуко показали, что скорость света в воде меньше, чем в воздухе. Этот факт послужил одним из основных доказательств несостоятельности ньютоновой корпускулярной теории света, согласно которой объяснение преломления света могло быть дано только при обратном предположении. Точное сравнение скорости света в воде и в воздухе, проделанное Майкельсоном, показало, что скорость в воде в 1,33 раза меньше, чем в воздухе. Последнее соотношение прекрасно согласуется с экспериментальными данными о преломлении света и с волновой теорией преломления. Однако это согласие нарушилось при опытах Майкельсона с сероуглеродом. Прямые измерения скорости света в сероуглероде дали величину заметно меньшую, чем величина, вытекающая из значения показателя преломления сероуглерода. Объяснение этого расхождения

связано с важным уточнением и углублением самого понятия скорости света (§ 43).

Скорость света в воздухе также меньше, чем в пустоте. Несмотря на то, что отношение этих скоростей весьма близко к единице (оно равно 0,99971), в ряде случаев приходится считаться не только с его отклонением от единицы, но и с изменениями этого отклонения при изменениях плотности воздуха.

Например, Майкельсону при точном определении скорости света приходилось производить эксперименты в откачанных до низкого давления трубах колоссальной длины, чтобы устранить влияние колебаний плотности воздуха. В настоящее время конечность скорости света даже нашла себе практическое применение. Наряду с радиолокацией (т. II, § 98, 1959 г.; в пред. изд. § 103) существует *оптическая локация*, при которой расстояние до локируемого предмета определяется по времени прохождения короткого светового импульса, отраженного предметом и регистрируемого фотоэлементом. При помощи оптической локации определяют, например, высоту облаков.

#### § 4. Опыт Майкельсона

Описывая опыты по определению скорости света, мы как бы забываем о том, что все эти опыты производятся на Земле, несущейся в мировом пространстве с огромной скоростью, превышающей в десятки раз скорость артиллерийского снаряда. Правда, в этих опытах наблюдатель и источник света неподвижны относительно друг друга, но если считать, что Земля движется по отношению к неподвижному эфиру, в котором распространяются световые волны, то следует ожидать влияния этого движения на результаты наблюдений.

Разберем описанные выше методы определения скорости света, считая мировой эфир неподвижным, а Землю движущейся. В обоих методах — и Физо и Фуко — определялось время, необходимое световому лучу для того, чтобы пройти от какой-то точки *A* до точки *B* и вернуться обратно в точку *A*. Мы считали, что это время равно просто  $\frac{2a}{c}$ , где *a* — длина отрезка *AB*, *c* — скорость света.

Теперь мы должны уточнить наше рассуждение. Прежде всего мы определим *c* как скорость света по отношению к неподвижному эфиру. Затем надо учесть, что в результате движения Земли, согласно законам механики Ньютона, скорость света по отношению к Земле уже не будет равна *c*. Если направление распространения светового луча совпадает с направлением движения Земли, то эта скорость должна быть равна *c-v*; если свет и Земля движутся в противоположных направлениях, то *c+v*, где *v* — скорость Земли по отношению к эфиру. В первом случае свет должен «догонять» Землю, во втором, наоборот, свет и Земля движутся навстречу друг другу.