

§ 7. Явление Доплера для световых волн

В разделе акустики уже указывалось, что частота воспринимаемых наблюдателем колебаний зависит от движения источника колебаний и от движения наблюдателя.

Аналогичный эффект Доплера наблюдается и для световых волн. В случае световых волн изменение частоты сказывается на изменении цвета, т. е. как смещение спектральных линий к красной части спектра при движении источника от наблюдателя и к синей — при движении к наблюдателю.

Однако между звуковым явлением Доплера и световым есть принципиальное различие. В случае звука было существенным движение источника и наблюдателя по отношению к среде, в которой происходит распространение колебаний (воздух). В случае света, как показывает опыт Майкельсона, совместное движение источника и наблюдателя по отношению к эфиру не может быть обнаружено. Для света существенным является только относительное движение источника и наблюдателя, поскольку скорость света по отношению к любому источнику постоянна.

В этом случае для получения правильной формулы надо исходить из теории относительности, поэтому мы ограничимся написанием уже готовой формулы. Поскольку в данном случае играет роль только относительная скорость источника и наблюдателя, формула для светового эффекта Доплера получается одна, причем уже не приближенная, а точная:

$$v' = v \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}}, \quad (16)$$

где v — относительная скорость, v и v' — частоты, испускаемая и наблюдаемая. Когда $v \ll c$, что обычно имеет место, поскольку $c \approx 300\,000$ км/сек, формула (16) может быть с достаточной точностью заменена более простой.

В самом деле,

$$\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}} \approx 1 \pm \frac{2v}{c} \text{ с точностью до } \frac{v^2}{c^2} \text{ и}$$

$$\sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}} \approx \sqrt{1 \pm \frac{2v}{c}} \approx 1 \pm \frac{v}{c}$$

с точностью до величин второго порядка.

Благодаря тому что скорости тел, встречающиеся в природе, обычно весьма малы по сравнению со скоростью света, явление Доплера у световых волн можно, вообще говоря, наблюдать лишь при помощи чувствительной спектральной аппаратуры.

А. А. Белопольский в 1900 г. при помощи остроумного приема обошел это затруднение и дал первое экспериментальное доказательство существования эффекта Доплера для световых волн. Надо сказать, что под влиянием неудач при попытках экспериментального

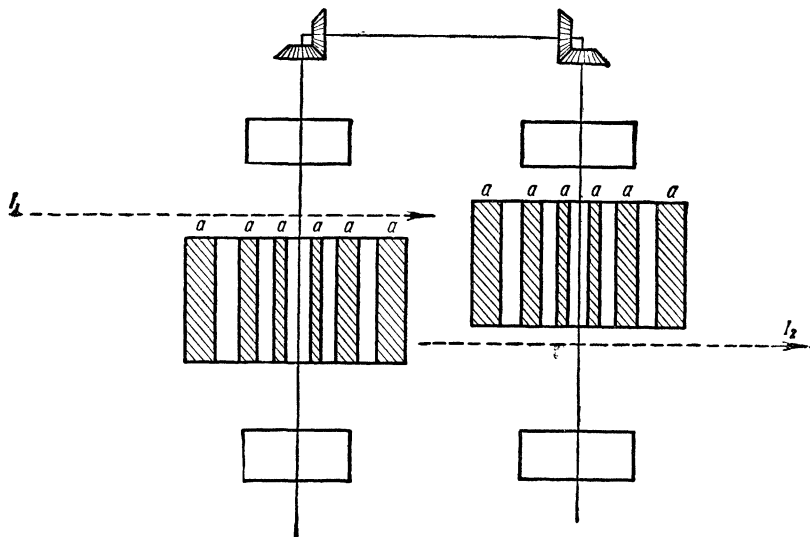


Рис. 10. Схема опыта Белопольского.

обнаружения этого явления некоторые физики к тому времени стали даже сомневаться в существовании эффекта Доплера для световых волн.

В опытах А. А. Белопольского источник света (Солнце) мог считаться неподвижным по отношению к спектральному прибору, но свет от источника наблюдался только после многократных отражений от двух движущихся зеркал. Нетрудно видеть, что изображение источника света в подвижном зеркале двигается со скоростью, в 2 раза большей скорости зеркала. При многократных отражениях этот эффект усиливается в соответствующее число раз и, таким образом, можно получить изображение источника света, движущееся с весьма значительной скоростью (в опытах А. А. Белопольского — до 1 км/сек). Это изображение и служило «движущимся источником света» в опытах А. А. Белопольского.

На рис. 10 дана оригинальная схема его прибора. «Прибор состоит из двух колес наподобие мельничных или паровых со стек-

лянными зеркальными лопастями. Оси колес параллельны и сцеплены зубчатыми колесами так, что вращаются одновременно с равными скоростями, но в разные стороны. Пучок солнечных лучей I_1 от гелиостата направлялся на одно из зеркал a , отражался на параллельное с ним на другом колесе, откуда опять на первое и т. д.» После ряда отражений луч I_2 направлялся на щель спектрографа. Наблюдалось смещение темных фраунгоферовых линий в солнечном спектре при изменении направления вращения зеркал на противоположное (что давало удвоение эффекта). Было получено хорошее количественное согласие с приближенной формулой для эффекта Доплера. В 1907 г. на том же приборе А. А. Голицыным были проведены еще более точные измерения, подтвердившие с большой точностью результаты А. А. Белопольского.

Явление Доплера позволяет определять скорости движения звезд по измерению смещения линий в их спектрах. Часто спектральные линии звезды являются расширенными. Это может указывать на вращение звезды: противоположные края звезды движутся один навстречу Земле, а другой — от нее; в то же время различные промежуточные точки диска имеют всевозможные слагающие скоростей по лучу зрения; благодаря тому что в спектроскоп видна суммарная картина, спектральная линия кажется расширенной. Исследование строения спектральных линий дает, таким образом, возможность делать заключения о движении звезд, об их вращении, а также позволяет иногда обнаруживать сложное строение звездных систем (двойные звезды).

Кроме того, при наблюдении свечения какого-либо газа в электрической разрядной трубке или в пламени мы также можем обнаружить уширение линий, вызванное явлением Доплера. Атомы и молекулы светящегося газа находятся в быстром тепловом движении. Атомы, движущиеся *от* наблюдателя, будут давать спектральные линии, смещенные в красную часть спектра; атомы, движущиеся *к* наблюдателю, дадут спектральные линии, смещенные в фиолетовую сторону. Величина смещения будет тем больше, чем больше относительная скорость атомов. Отсюда ясно, что с повышением температуры будет возрастать расширение линий.

В ряде случаев можно по уширению линий судить о температуре излучающего газа.

До сих пор речь шла о явлении Доплера, наблюдаемом при сближении или удалении источника света и наблюдателя (*продольный эффект Доплера*). Однако из теории относительности вытекает с необходимостью существование так называемого *поперечного эффекта Доплера*, наблюдаемого при движении источника в направлении, перпендикулярном к линии, соединяющей источник света с наблюдателем. Такой эффект должен, например, наблюдаться при движении источника по окружности, в центре которой находится наблюдатель.

При помощи последнего из уравнений (12) получим формулу для поперечного эффекта Доплера. Пусть светящийся атом покоится в точке x системы K , а спектрограф покоится в точке x' системы K' . Тогда можно сказать, что светящийся атом движется по отношению к спектрографу со скоростью u . Спектрограф служит в данном случае своеобразными часами K' , при помощи которых наблюдаются колебания светящегося атома. Эти часы отсчитывают время t' . Любому интервалу времени $t_2 - t_1$ будет соответствовать при заданном x (атом в x , $x_2 = x_1$) интервал $t'_2 - t'_1$, определяемый, согласно последнему уравнению (12) или (14), следующей формулой:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}. \quad (17)$$

Возьмем за $t_2 - t_1$ период колебания светящегося атома T , измеренный по часам K , относительно которых атом покоится. Тогда, согласно выражению (17), спектрограф (часы K') измерит больший период T' , равный

$$T' = \frac{T}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

Так как частота ν равна $\frac{1}{T}$, спектрограф измерит частоту

$$\nu' = \frac{1}{T'} = \nu \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \approx \nu \left(1 - \frac{1}{2} \frac{u^2}{c^2}\right), \quad (18)$$

т. е. будет обнаружено уменьшение частоты или сдвиг спектральной линии в красную сторону. Поскольку $u \ll c$ и в формулу (18) входит $\frac{u^2}{c^2}$, эффект очень мал, значительно меньше обычного продольного эффекта Доплера. Экспериментальное доказательство существования поперечного эффекта Доплера было получено в 1938 г. При наблюдении свечения канальных лучей водорода остроумным приемом было исключено влияние продольного эффекта Доплера и подтверждена формула (18).