

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:

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

Это соотношение очевидно, когда $v_{зв}$ — постоянная величина, так как ν_R — это число полных колебаний, совершаемых за секунду, а λ_R — расстояние (скажем, в сантиметрах), проходимое волной за время каждого из этих колебаний. Таким образом, число сантиметров, проходимое волной за секунду, выражается произведением $\lambda_R \nu_R$. Скорость звука определяется плотностью и упругими постоянными среды. Если мы используем волны с частотой ν_R , то длина волны λ_R однозначно определяется из уравнения (12). Более подробно упругие волны рассматриваются в т. III.

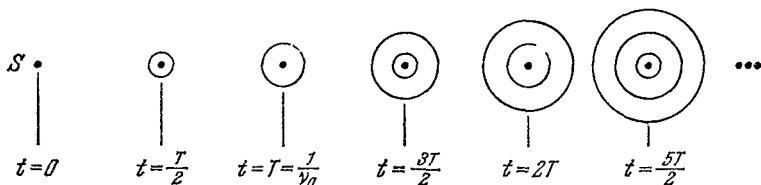


Рис. 10.18. Звуковые волны, образуемые неподвижным источником: S испускает сферические звуковые волны с длиной волны λ_0 , частотой ν_0 и скоростью $v_{зв} = \nu_0 \lambda_0$.

Предположим, что источник колебаний испускает в направлении $+\hat{x}$ за время t последовательный цуг волн, число которых равно N (под волной мы подразумеваем одну полную длину волны). За это время первая волна пройдет в среде расстояние $v_{зв} t$; последняя волна только успевает выйти из источника к концу этого промежутка времени, а сам источник переместится относительно среды на расстояние Vt . Расстояние между началом и концом цуга волн равно $(v_{зв} - V)t$, и на этом расстоянии помещаются N волн. Следовательно, длина волны равна

$$\lambda_R = \frac{(v_{зв} - V)t}{N}, \quad (13)$$

а частота волн относительно среды, т. е. частота, с которой эти волны поступают в приемник R , равна

$$\nu_R = \frac{\nu_{зв}}{\lambda_R} = \frac{N}{t} \frac{v_{зв}}{v_{зв} - V}. \quad (14)$$

Однако источник испускает N волн за t сек, так что частота волн в его собственной системе отсчета равна

$$\nu_T = \frac{N}{t}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получим

$$\boxed{\nu_R = \frac{\nu_T}{1 - V/v_{зв}}}. \quad (16)$$

Следовательно, если скорость V положительна (источник движется по направлению к приемнику), то частота, воспринимаемая приемником, больше, чем излучаемая частота. Если скорость V отрицательна (источник движется в направлении от приемника), то воспринимаемая частота меньше, чем излучаемая. Этот сдвиг частот называется *эффектом Доплера* или *смещением Доплера*. Для реактивного самолета V имеет тот же порядок величины, что и скорость звука в воздухе, и эффект Доплера довольно велик. Если $V/v_{зв} \ll 1$, то, ограничиваясь слагаемыми порядка $V/v_{зв}$, можно приближенно преобразовать (16) в следующее выражение:

$$v_R \approx v_T \left(1 + \frac{V}{v_{зв}} \right). \quad (17)$$

Источник неподвижен; приемник движется относительно среды. Пусть источник T неподвижен относительно системы отсчета M , а приемник R движется справа налево в направлении к источнику со скоростью $V = -V\hat{x}$, где V — положительное число. Последовательность из N волн, вышедших за время t , занимает в среде расстояние $v_{зв}t$. Скорость звуковой волны относительно приемника равна $(v_{зв} + V)$, так что приемник воспринимает N волн за время

$$\frac{v_{зв}t}{v_{зв} + V},$$

и поэтому частота, воспринимаемая приемником, равна

$$v_R = \frac{N}{v_{зв}t/(v_{зв} + V)} = \frac{N}{t} \frac{(v_{зв} + V)}{v_{зв}}. \quad (18)$$

Подставив $v_T = N/t$, получаем

$$v_R = v_T \left(1 + \frac{V}{v_{зв}} \right). \quad (19)$$

Этот результат не равен в точности результату (16) предыдущей задачи, но, сравнивая (17) и (19), мы видим, что оба результата можно считать одинаковыми, если ограничиться слагаемыми первого порядка относительно $V/v_{зв}$. В гл. 11 мы увидим, что результаты (16) и (19) справедливы и для световых волн в свободном от вещества пространстве, но только с точностью до величин первого порядка относительно V/c . Для звуковых волн уравнения (17) и (19) различаются слагаемыми второго порядка относительно $V/v_{зв}$, так что при распространении звуковых волн мы в состоянии определить экспериментально, движется ли относительно среды источник или приемник. Для звуковых волн среда имеет существенное значение. Для световых волн окажется, что слагаемые второго порядка в обоих случаях одинаковы.

Источник и приемник движутся вместе. Предположим, что как источник, так и приемник движутся в одном направлении с одинаковой скоростью V относительно среды. Легко можно видеть, что в этом случае $v_R = v_T$, потому что импульсы, испускаемые отдельно

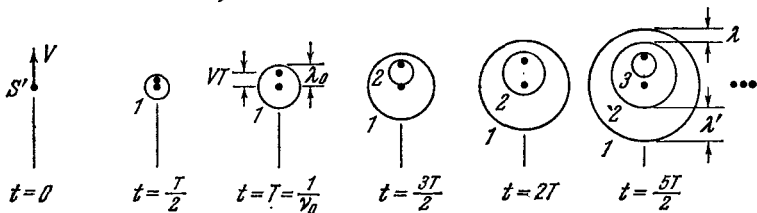


Рис. 10.19. Эффект Доплера; источник S' движется относительно среды со скоростью $\dot{y}=V$ и испускает волны с частотой ν_0 . Волна 1 испускается, когда S' находится в точке $y=0$. Эта волна распространяется радиально во все стороны. Волна 2 испускается, когда S' находится в точке $y=VT$. Эта волна тоже распространяется радиально во все стороны и т. д.

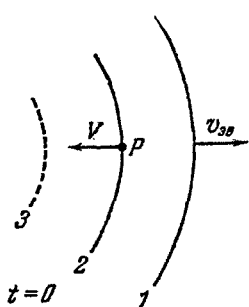


Рис. 10.20. Наблюдатель в точке P неподвижный относительно среды, наблюдает волны (1, 2, 3) с длиной волны λ .

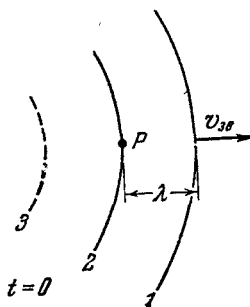


Рис. 10.21. Частота этих волн относительно наблюдателя в точке P равна $\nu = \nu_{3B}/\lambda$.

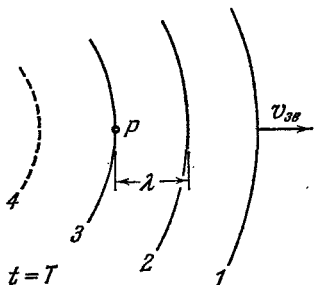


Рис. 10.22. Теперь представим себе, что наблюдатель движется относительно среды со скоростью V . Предположим, что в момент $t=0$ волновой фронт 2 достигает точки P .

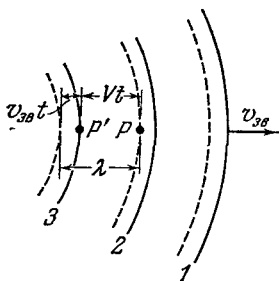


Рис. 10.23. Наблюдатель достигнет следующего волнового фронта, когда $(\nu_{3B} + V)t = \lambda$. Таким образом, для движущегося наблюдателя

$$\nu_R = \nu \left(1 + \frac{V}{v_{3B}} \right).$$

через промежутки времени $T=1/\nu_T$, принимаются также отдельно через промежутки времени T . Этот же результат можно получить и иным способом, скомбинировав уравнения (16) и (19), написанные со знаками \pm перед $V/v_{зв}$, соответствующими направлению движения источника и приемника:

$$\nu_R = \frac{1}{1 \pm \frac{V}{v_{зв}}} \left(1 \pm \frac{V}{v_{зв}} \right) \nu_T = \nu_T. \quad (19a)$$

Следовательно, частота волн не меняется; конечно, из-за течения среды изменится кажущаяся скорость распространения волн.

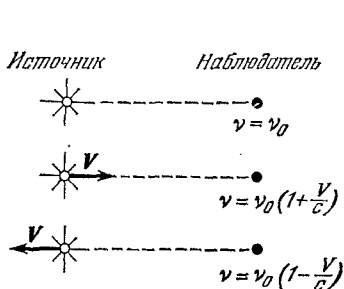


Рис. 10.24. Для световых волн это соотношение (см. рис. 10.23) все еще выполняется при условии, что $V \ll c$, но мы уже не можем решить вопрос, что движется — источник или наблюдатель.

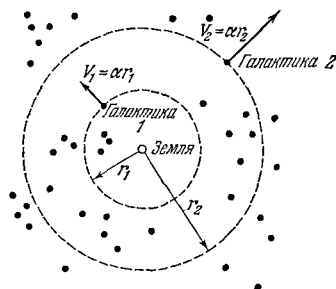


Рис. 10.25. Эффект Доплера, наблюдаемый для света от далеких звезд, показывает, что другие галактики удаляются от нас со скоростью, пропорциональной их расстоянию от Земли.

Пример. Красное смещение излучения от удаляющихся звезд и галактик. Спектральный анализ света от далеких галактик показывает, что частоты определенных опорных спектральных линий



Рис. 10.26. Две спектрограммы двойной звезды α^1 Близнецов, снятые в различные моменты времени. Только одна из двух звезд этой системы излучает свет, достаточно интенсивный для наблюдения. Заметьте, что линии спектра звезды сдвинуты относительно линий контрольного спектра, полученного в лаборатории, в различных направлениях соответственно двум стадиям движения звезды. В первой стадии звезда движется по направлению к Земле и частота света возрастает; во второй стадии звезда удаляется от Земли и частота уменьшается.

1, 4 — контрольные спектры, полученные в лаборатории; 2 — звезда приближается; 3 — звезда удаляется.

весьма заметно смещены к красному краю, т. е. к низкочастотному краю видимого спектра. Такое смещение можно истолковать как эффект Доплера, причиной которого является удаление источника

излучения с определенной скоростью. Известно также, что относительная величина смещения частот $\Delta\nu/\nu$ или смещения длин волн $\Delta\lambda/\lambda$ прямо пропорциональна расстоянию от источника до нас при условии, что эта величина значительно меньше единицы. Этот экспериментальный факт кажется необычайным и парадоксальным. Наиболее простое нерелятивистское объяснение подобного характера зависимости между расстоянием до источников излучения и скоростью их относительного движения дает так называемая «теория взрыва», согласно которой Вселенная образовалась около 10^{10} лет тому назад в результате взрыва. Продукты этого первоначального взрыва, обладающие наибольшей скоростью, в настоящее время образуют наружные области Вселенной. Таким образом, чем больше радиальная скорость вещества относительно нас, тем дальше оно находится от нас и тем больше красное смещение. Известны также и другие объяснения красного смещения излучения, вызванного удалением его источников, но ни одно из них нельзя считать доказанным.

Две легко распознаваемые линии поглощения спектра калия (линии К и Н) хорошо видны в спектрах многих звезд. В спектрах, полученных в лабораториях на Земле, эти линии имеют длину волны около 3950 \AA *). Предположим, что наблюдатели, находящиеся в лаборатории, т. е. движущиеся относительно системы отсчета, неподвижно связанной с какой-либо звездой, измеряют длину волны этих же линий в спектре звезды. В свете, идущем от туманности в созвездии Волопаса, мы наблюдаем эти линии уже при длине волны 4470 \AA , т. е. смещение в сторону красного края равно $4470 - 3950 = 520 \text{ \AA}$. Это соответствует относительному смещению

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{520}{3950} = 0,13. \quad (20)$$

Пользуясь уравнением (16) и заменив в нем $v_{\text{зв}}$ на c (применимость этого уравнения к световым волнам будет доказана в гл. 11), а затем дифференцируя равенство $\nu = c/\lambda$ **) при постоянном c , получаем, что

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx -\frac{V}{c}, \quad (21)$$

где мы использовали уравнение (17), подставив в него c вместо $v_{\text{зв}}$ (правомерность этого также будет доказана в гл. 11). Из расчета по формулам (20) и (21) мы видим, что туманность удаляется от нас с довольно большой относительной скоростью $|V| \approx 0,13c$. Для еще больших скоростей нам следует использовать формулу

*) 1 \AA (ангстрем) = 10^{-8} см .

**) Обратите внимание на следующий несложный расчетный прием. Пусть $y = Ax^n$, где A и n — постоянные, и нам надо выразить dy/y через dx/x . Возьмем натуральный логарифм от обеих частей этого равенства: $\ln y = \ln A + n \ln x$, а затем продифференцируем обе части. Получим $dy/y = n dx/x$. Здесь мы используем равенство $d \ln x = dx/x$.

смещения Доплера, видоизмененную с учетом теории релятивистской модели Вселенной *).

Можно сопоставить результаты подобных наблюдений над излучением большого числа галактик с определением расстояния до них независимыми методами и прийти к удивительному эмпирическому выводу: относительная скорость удаления галактики, находящейся на расстоянии r от нас, может быть выражена следующей формулой:

$$V = \alpha r, \quad (22)$$

где константа α , определенная эмпирически, равняется $3 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$ (методика определения расстояний до галактик является довольно сложной; с ней можно ознакомиться в руководствах по астрономии). Величина, обратная α , имеет размерность времени:

$$1/\alpha \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ сек} \approx 10^{10} \text{ лет}. \quad (23)$$

Помножив $1/\alpha$ на c , мы получим величину, имеющую размерность длины:

$$\frac{c}{\alpha} \approx (3 \cdot 10^{10}) \cdot (3 \cdot 10^{17}) \text{ см} \approx 10^{28} \text{ см}. \quad (24)$$

Время (23) нестрого называется «возрастом Вселенной», а длина (24) также нестрого — «радиусом Вселенной» **). Точный смысл этих величин сейчас еще неясен, хотя было предложено несколько различных космологических теорий, объясняющих соотношение (22).

10.4. Скорость света в инерциальных системах отсчета при относительном движении

Применение элементарного преобразования Галилея к задаче о величине скорости света, определяемой относительно движущегося приемника, приводит к требованию, чтобы в системе отсчета, связанной с этим приемником, скорость света отличалась от c . Согласно так называемому «здравому смыслу» мы ожидали бы, что скорость света c_R относительно движущегося приемника должна определяться из следующего уравнения:

$$c_R = c \pm V, \quad (25)$$

где V — скорость света приемника, который движется навстречу источнику (+) или от источника (—).

Этот способ сложения скоростей кажется совершенно обоснованным. Казалось бы, что то же соотношение должно было бы выполняться, когда источник и приемник неподвижны, а среда, в которой распространяется свет, движется со скоростью V . Соотношение (25), очевидно, соблюдается в бесчисленных случаях повсед-

*) См. G. C. McVitties, Physics Today, июль 1964, стр. 70.

**) Ср. гл. 1, «Оценки кривизны мирового пространства», стр. 30—32. (Прим. ред.)