

Эффект Доплера

М. В. СИМОНОВ

1. Что такое эффект Доплера

Эффектом Доплера называют изменение частоты и, соответственно, длины волны колебаний, воспринимаемых наблюдателем (приемником), при движении источника колебаний и наблюдателя относительно друг друга [1].

На явление эффекта Доплера физики обратили внимание в XIX веке. Эффект нашел первое подтверждение для звуковых колебаний уже в 1845 г. Голландец Бойс-Баллот провел опыт с горнистами, которые находились на движущейся со скоростью 70 км/ч платформе. Воспринимавшийся звук был на полтона выше, если платформа с играющими горнистами приближалась к слушателю, и на полтона ниже, если удалялась [2]. Сам Кристиан Доплер (*нем. Christian Doppler*), наблюдая за распространением волн по водной глади, заметил, что расстояния между гребнями зависят от движения источника относительно водной поверхности. Следуя волновой теории, он распространил действие эффекта и на свет. В 1842 году вышла его работа “*Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels*” («*О цветном свете двойных звезд и некоторых других звезд на небесах*»), где исследователь указал, что приближение и удаление небесных тел от наблюдателя на Земле должно приводить к изменениям частоты испускаемого света.

Пояснить это явление можно следующим образом. Пусть источник колебаний движется по направлению к приемнику. Измеряемая приемником частота ν регистрируемых волн будет больше, чем если бы источник покоился, так как за период колебаний $T_0 = 1/\nu_0$ (в системе, где осциллятор неподвижен) источник проходит некоторое расстояние и большее количество гребней волн успевают достигать приемника. Для волн оптического спектра в таком случае будет наблюдаться фиолетовое смещение в область коротких волн, для акустических — повышение высоты звука.

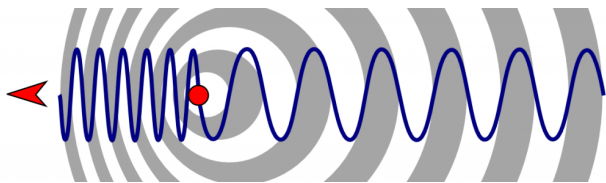


Рис. 1. Изменение длины регистрируемых волн в эффекте Доплера [3]

На рис. 1 демонстрируется сокращение длины волны, наблюдаемое при приближении источника (при помещении детектора слева от источника). При удалении источника регистрируемая частота меньше ν_0 .

Некоторые авторы (например, [1]) предлагают изменить определение эффекта Доплера, исходя из следующей идеи: несовпадение «собственной частоты» источника и частоты, регистрируемой приемником может происходить не только из-за взаимного движения источника и приемника. Если использовать понятие «оптической длины пути» для фотона, то эффект Доплера можно определить как «неравенство частот излучаемой и принимаемой гармонических волн, если в процессе приёма изменяется оптическая длина пути». Оптическая длина пути зависит от положения источника в момент испускания кванта света относительно направления распространения света, положения приемника в момент регистрации и состояния среды (к примеру, на пути луча может находиться движущееся зеркало или на пути луча встречается подвижная граница раздела сред).

2. Классическое описание

Рассмотрим для начала случай распространения акустической волны или же световой волны в концепции эфира, когда источник движется по направлению к приемнику (рис. 2).

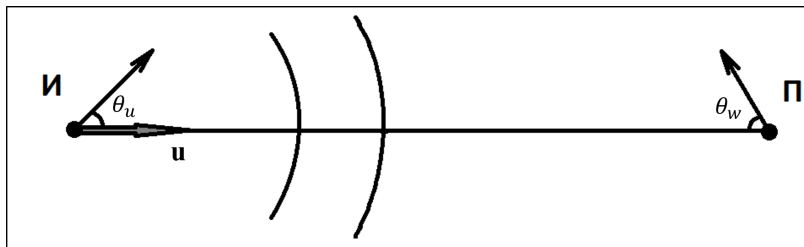


Рис. 2. Простейший случай: движение источника

Регистрируемая длина волны:

$$\lambda_1 = cT_0 - uT_0 = \frac{c - u}{\nu_0} \quad (1)$$

где T_0 – период собственных колебаний источника, c и u – скорости света и источника в системе, связанной со средой (рис. 2). Фиксируемая детектором частота:

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \nu_0 \frac{c}{c - u} \quad (2)$$

Если же и приемник движется по отношению к среде навстречу приемнику со скоростью w , то дополнительное количество регистрируемых за 1 секунду колебаний:

$$\nu = \nu_1 + \Delta\nu = \nu_1 + \frac{w}{\lambda_1} = \nu_1 \left(1 + \frac{w}{c}\right) \quad (3)$$

Следовательно, частоты регистрируемой и испускаемой волн ν_0 и ν связаны соотношением:

$$\nu = \nu_1 \left(1 + \frac{w}{c}\right) = \nu_0 \frac{c + w}{c - u} \quad (4)$$

Можно показать, что в случае равномерного движения с произвольными по направлению скоростями с углами θ_w и θ_u , которые образуют векторы скоростей с вектором \mathbf{R} , соединяющим приемник и источник, соотношение частот выглядит как:

$$\nu = \nu_0 \frac{1 + \frac{w}{c} \cos \theta_w}{1 + \frac{u}{c} \cos \theta_u} \quad (5)$$

Поскольку, по современным представлениям, свет не нуждается в среде, то изменение частот должно выражаться через относительную скорость $\mathbf{V} = \mathbf{u} - \mathbf{w}$ [4]. Если θ – угол между векторами \mathbf{V} и \mathbf{R} , то при $u \ll c$ получаем классическую формулу для эффекта Доплера вне эфирных представлений:

$$\nu \approx \nu_0 \left(1 + \frac{w}{c} \cos \theta_w\right) \left(1 + \frac{u}{c} \cos \theta_u\right) = \nu_0 \left(1 + \frac{V}{c} \cos \theta\right), \quad (6)$$

с учетом

$$V = u \cos \theta_u - w \cos \theta_w \quad (7)$$

Стоит отметить, что в более общем случае отношение частот ν_0/ν есть функция времени: оно зависит от проекции $u(t_1) \cos \theta_u(t_1)$ в момент испускания волны и проекции $w(t_2) \cos \theta_w(t_2)$ момент приема сигнала [1].

3. Релятивистское описание

Как уже было сказано, изменение частот должно зависеть от скорости приемника относительно источника. Свяжем с приемником систему отсчета R (receiver), а с источником — систему S (source), движущуюся относительно R со скоростью V . Как указано в [5], из общих правил преобразований 4-векторов запишем волновой 4-вектор k в системе S через координаты в системе R:

$$k_0^R = \frac{k_0^S - \frac{V}{c} k_1^S}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \iff \frac{\omega_0}{c} = \frac{\frac{\omega}{c} - \frac{V\omega}{c^2} \cos \theta}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (8)$$

где $k_0 = \omega/c = 2\pi\nu/c$, $k_1 = k \cdot \cos \theta = \omega/c \cdot \cos \theta$, где θ — угол между направлением испускания фотона и направлением движения источника в системе R. Отсюда получаем общую формулу:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 - \frac{V}{c} \cos \theta} \quad (9)$$

Из этой формулы при $V \ll c$, если θ не слишком близок к $\pi/2$, получим в 1-м порядке формулу для *продольного эффекта Доплера*:

$$\nu \approx \nu_0 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{V}{c} \cos \theta\right) = \nu_0 \left(1 - \frac{V}{c} \cos \theta\right) \quad (10)$$

Если же $\theta = \pi/2$, то для частоты при небольших V имеем:

$$\nu \approx \nu_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} = \nu_0 \left(1 - \frac{V^2}{2c^2}\right) \quad (11)$$

Последняя формула является отражением *поперечного эффекта Доплера*, который классическая теория не предсказывает. Отметим, что поперечный эффект проявляется значительно меньше, т.к. относительное изменение частот $\delta\nu_0/\nu_0 = |\nu - \nu_0|/\nu_0$ пропорционально отношению V^2/c^2 .

4. Экспериментальная проверка эффекта Доплера

Эксперимент по проверке эффекта Доплера в оптике долго поставить не удавалось из-за трудности достижения таких скоростей, чтобы

изменение частоты можно было измерить. Первый эксперимент поставил А. А. Белополюский в 1905 году, используя 2 зеркала, движущиеся навстречу друг другу. Монохроматический свет попадал в зазор между зеркалами (см. рис. 3); за счет большого числа отражений мнимый источник, свет от которого попадал в спектрограф, двигался со скоростью порядка 1 км/с, что и позволило впервые наблюдать эффект Доплера [4].

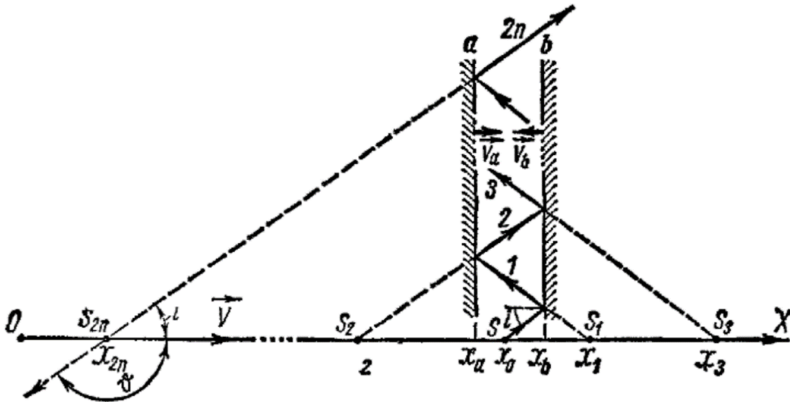


Рис. 3. Схема опыта Белополюского [4]

Опыт по проверке поперечного эффекта Доплера был поставлен в 1938 г. Г. Айвсом и Д. Стилуэллом [4, 6]. Регистрировалось излучение движущихся со скоростью 106 м/с атомов водорода по движению и против их движения. Среднее от двух полученных частот отклонялось от собственной частоты излучения атомов на половину квадрата отношения V/c . Группа ученых в составе Д. Чемпни, Г. Айзека, А. Хана и Д. Муна провела в 1961–63 гг. серию опытов по мессбауэровской спектроскопии с источником и приемником, установленными на вращающемся диске. Как показал эксперимент, при помещении приемника в центр диска и детектора на периферию диска наблюдается поперечный эффект Доплера (рис. 4, а): спектр смещается в синюю область. Если поменять местами приемник и детектор, наблюдаемый спектр сместится в красную область (рис. 4, б). В случае расположения излучателя и наблюдателя в противоположные точки одного диаметра изменение частоты не происходит: это в некотором смысле наложение красного и синего смещения спектра, приводящее к отсутствию эффекта (рис. 4, с) [7].

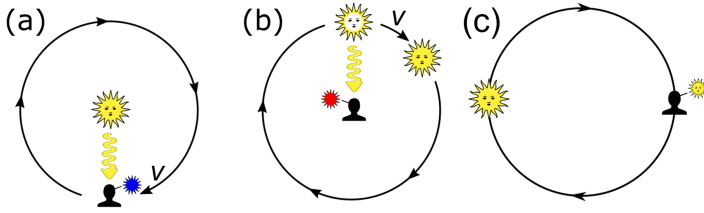


Рис. 4. Схемы опытов Чемпи et al. [8]

5. Проявление и использование эффекта Доплера

Доплер был прав, когда предположил, что частота регистрируемого излучения зависит от лучевой скорости, т.е. от скорости по направлению к наблюдателю. Используя эффект Доплера, можно оценить расстояние до звезд и скорость их удаления от Земли. Среди множества звезд выбирается группа с одинаковым периодом изменения светимости, рассчитывается их средняя лучевая скорость по эффекту Доплера относительно звезд, которые считаются неподвижными за рассматриваемый промежуток времени (например, сравнивают спектральные линии водорода, рис. 5). Предполагая, что в среднем тангенциальные и лучевые скорости примерно одинаковы, вычисляют расстояние R по формуле:

$$R = \frac{\bar{v}T}{\varphi} \quad (12)$$

где \bar{v} — средняя скорость, φ — дуговое перемещение звезды (перпендикулярно лучу) [9]. По постоянному смещению спектра (т.е. не по периодическим изменениям частоты) можно определить скорость удаления звезды. Кроме того, спектры могут быть уширены. Это может быть связано с вращением звезды: различные точки звездной поверхности движутся с разными скоростями от минимальной до максимальной на краях видимого диска. Иногда анализ спектра позволяет сделать заключение об устройстве звездной системы, например, о наличии двойных звезд в ее составе [10]. С эффектом Доплера связывают также и анизотропию реликтового излучения. Дипольную анизотропию — увеличение температуры излучения на 0,1% по сравнению со средней в выделенном направлении и уменьшение на 0,1% в противоположном направлении — связывают с движением Солнечной системы относительно реликтового фона в сторону созвездия Гидры [12]. По величине изменения температуры измеряется

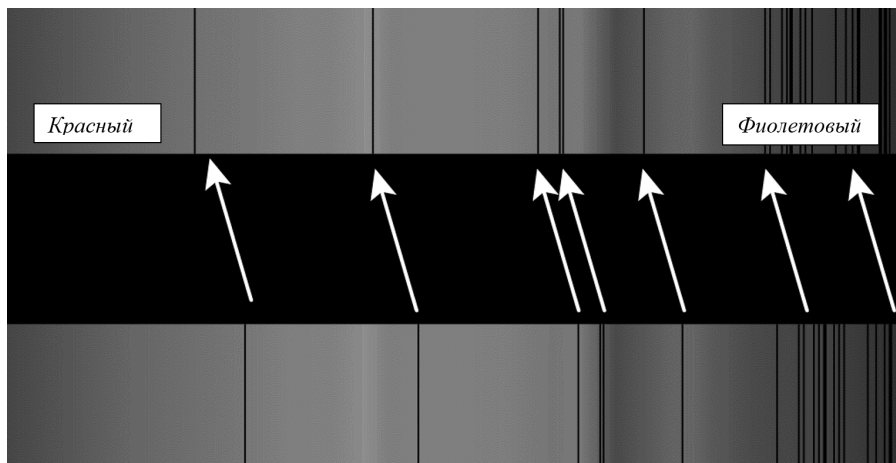


Рис. 5. Красное смещение спектров звезд [11]

скорость движения Солнца, а также Местного скопления галактик. При наблюдении за пламенем или свечением газоразрядной трубки мы также можем заметить уширение линий, вызванное тепловым движением молекул и атомов. Спектральные линии от удаляющихся от детектора частиц будут смещены в красную область, от приближающихся — в фиолетовую. Ясно, что уширение зависит от средней энергии движения излучателей. Так что иногда становится возможным определить температуру источника излучения по уширению его спектральных линий, пример — фотосфера (внешняя оболочка) звезд. В технике эффект привел к созданию радаров: при движении объекта по изменению частоты радиоволны при отражении можно судить о скорости движения. Эффект Доплера используется в навигации и системах позиционирования. Доплеровские расходомеры позволяют определять поле скоростей в потоках жидкости или газа.

Литература

1. В. Н. Кологривов. Эффект Доплера в классической физике. — М.: МФТИ, 2012.
2. *Buijs-Ballot C. H. D.* Akustische Versuche auf der Niederlandischen Eisenbahn, nebst gelegentlichen Bemerkungen zur Theorie des Prof. Doppler // Ann. Phys. 1845. **66**. P. 321–351.
3. <https://spacegid.com/effekt-doplera.html>
4. А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. Курс физики. Том 3: Волновые процессы. Оптика. Атомная и ядерная физика. —

- М.: Высш. школа, 1979.
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теоретическая физика. Том II: теория поля. — М.: Наука, 1988.
 6. В. Н. Стрельцов. Опыт Айвса-Стилуэлла и релятивистская длина // Сообщения ОИЯИ. — Дубна, 1992
 7. Champeneu, D. C., Isaak, G. R., and Khan, A. M. A time dilatation experiment based on the Mössbauer effect. Proceedings of the Physical Society, 1965. **85(3)**. P. 583–593.
 8. https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect
 9. А. И. Китайгородский. Физика для всех: фотоны и ядра. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
 10. К. А. Путилов, В. А. Фабрикант. Курс физики. Том III. Оптика, атомная физика, ядерная физика. — М.: ГИ ФМЛ, 1963.
 11. https://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_Doppler_effect
 12. Д. С. Горбунов, В. А. Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. — М.: КРАСАНД, 2015.