УДК 621.3: 530.1

О.А. Витязь, канд. техн. наук

*Мы должны быть благодарны Господу за то,*
*что Он создал мир таким,*
*что все простое в нем истинно,*
*а все сложное – ложно.*
*Григорий Сковорода*
*(украинский философ XVIII века)*

# Эффект Доплера и абсолютное движение

**На основе анализа эффекта Доплера приводятся доказательства несостоятельности постулата теории относительности о равноправии инерциальных систем отсчета. Получено кинематическое уравнение, описывающее движение в возмущенной среде, возбуждаемой движущимся источником.**

**Evidence of insolvency of the relativity theory postulate on the equality of inertial frames of reference is provided based on a Doppler effect analysis. A cinematic equation describing the motion in a medium excited by a moving source is derived.**

**Ключевые слова:** *абсолютное движение, состояние покоя, возбуждение среды, возмущенная среда, пространственный период, пространственное событие, одновременность в пространстве.*

## Введение

Мир материален. Пространство и время необходимы для описания законов движения материи. Одним из примеров того, как движение проявляет себя в пространстве и времени, является эффект, обнаруженный Кристианом Доплером в 1842 г. и названный его именем.

Классическая формулировка эффекта Доплера состоит в следующем: частота колебаний среды, регистрируемая приемником, отличается от частоты сигнала источника, если источник и приемник находятся в относительном движении.

Теоретическое исследование этого эффекта традиционно проводится с привлечением двух инерциальных систем отсчета: одна связана с движущимся источником сигнала, а вторая – с движущимся приемником. Но кроме них в движении участвует также и среда, возбуждаемая источником. Для описания закона возбуждения среды источником необходимо время.

Движение среды имеет особый характер: среда, свободная от внешних воздействий, приходит к неподвижному состоянию, в то время как вещественное тело, свободное от внешних воздействий, продолжает движение. Следовательно, существует два вида движения: один – перемещение вещественного тела, другой – движение возмущенной среды. Для описания этих видов движения необходимо пространство.

Перемещение тела характеризуется направлением, возмущение среды происходит во всех направлениях. Оба вида движения характеризуются скоростью. Скорость распространения возмущения в однородной изотропной среде постоянна и является свойством среды, скорость перемещения тела может изменяться и является характеристикой перемещения в пространстве.

Покажем, что классическая формулировка эффекта Доплера не раскрывает всей его сути.

## 1. Эффект Доплера

Выведем соотношения, характеризующие эффект Доплера, следующим образом. Введем три инерциальные системы отсчета: одну, неподвижную в пространстве, свяжем со средой, а подвижные системы – с источником и приемником. Движение в системе, связанной со средой, будем считать абсолютным. Для описания движения воспользуемся одномерным пространством, так как для возбуждения колебаний в среде будет использоваться источник сферических волн, движущийся равномерно и прямолинейно в однородной изотропной среде.

На рис.1 приведено расположение источника и приемника, а также указаны точки пространства, в которых расположены неподвижные наблюдатели в движущихся системах отсчета. В точке $A$ расположен наблюдатель системы источника (наблюдатель $A$), в точке $B$ – наблюдатель системы приемника (наблюдатель $B$). Источник перемещается в среде с абсолютной скоростью $V$, приемник – с абсолютной скоростью $V_r$. Направление перемещения источника считаем положительным. Пространство возбуждается точечным источником по закону, описываемому периодической функцией с периодом $T_0$. Момент времени, когда оба наблюдателя

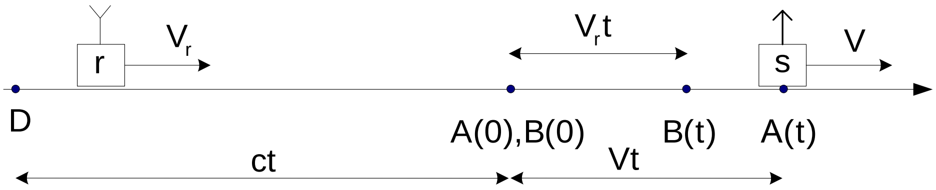



**Рис. 1. Эффект Доплера при движении приемника позади источника**

окажутся в одной точке пространства, примем за начало отсчета времени.

По истечении времени t от начала отсчета (время будем считать абсолютным) положение наблюдателей в пространстве окажется таким, как показано на рис.1. За это же время возмущенная точка среды, находившаяся при t=0 в той же точке пространства, что и наблюдатели, переместится в точку D.

Каждый из наблюдателей вследствие своей неподвижности может наблюдать изменения среды только в одной точке своей системы отсчета. Пользуясь часами, он сможет зафиксировать периодические изменения состояния среды, определить период и количество периодов за время наблюдения. Этого достаточно для определения частоты. Пусть $n_s$, $n_r$ – количество периодов, посчитанных наблюдателем $A$ и наблюдателем $B$ соответственно за время от начального момента и до момента t, тогда наблюдаемые ими частоты в своей системе отсчета будут равны

$$f = \frac{n_s}{t}, \quad \nu = \frac{n_r}{t}. \tag{1}$$

Наблюдатель в неподвижной системе отсчета, зная длину волны возмущенной среды $\lambda$ и значения $n_s$, $n_r$, может определить расстояние, которое прошла волна за время $t$, периодическое воздействие которой на неподвижную точку в движущихся системах отсчета изучал каждый из наблюдателей:

$$l_s = n_s\lambda, \quad l_r = n_r\lambda. \tag{2}$$

Для наблюдателя A это расстояние будет равно длине отрезка [D, A(t)] , а для наблюдателя B – длине отрезка [D, B(t)]:

$$l_s = cT + Vt, \quad l_r = cT + V_r t. \tag{3}$$

Подставив (3) в (2), а затем в (1), получим известное соотношение

$$\nu = f\frac{c + V_r}{c + V}, \tag{4}$$

которое описывает эффект Доплера, возникающий, когда приемник перемещается в пространстве позади источника и оба они движутся в одном направлении, каждый со своей абсолютной скоростью.

Поменяв местами источник и приемник (см. рис. 2) и проделав аналогичные рассуждения, получим другое известное соотношение

$$\nu = f\frac{c - V_r}{c - V}, \tag{5}$$

которое описывает эффект Доплера, возникающий, когда приемник перемещается в пространстве впереди источника и оба они движутся в одном направлении, каждый со своей абсолютной скоростью.

Аналогичным образом выводятся формулы и для разнонаправленных движений. Мы обозначили частоту, наблюдаемую в инерциальной системе источника как $f$, но еще требуется доказать, что на ее величину не влияет движение, способное изменить период возбуждения $T_0$.

Каждая из формул устанавливает связь между доплеровской частотой $\nu$, частотой источника $f$, абсолютными скоростями перемещения источника и приемника для каждого из возможных вариантов движения приемника. Эти варианты приведены в табл.1.

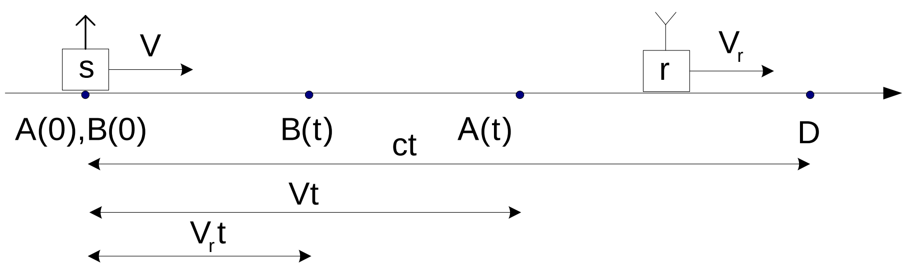



**Рис. 2. Эффект Доплера при движении приемника впереди источника**

**Таблица 1. Варианты движения приемника относительно источника в одномерном пространстве и соответствующие им доплеровские частоты**

| | |
|---|---|
| $\nu = \nu_{ba} = f\dfrac{c+V_r}{c+V}$   | $\nu = \nu_{fd} = f\dfrac{c-V_r}{c-V}$   |
| *Позади к источнику* | *Впереди от источника* |
| $\nu = \nu_{bd} = f\dfrac{c-V_r}{c+V}$   | $\nu = \nu_{fa} = f\dfrac{c+V_r}{c-V}$   |
| *Позади от источника* | *Впереди к источнику* |

## 2. Эффект абсолютного движения

Если эффект Доплера – это следствие относительного движения источника и приемника, то согласно принципу относительности проявление эффекта должно быть одинаковым при одинаковом относительном движении источника и приемника. В табл. 2 приведены четыре возможных варианта однонаправленного движения пар источник-приемник, полученные исходя из того, что один из участников движения абсолютно неподвижен. Там же приведены формулы для доплеровских частот в каждой паре, полученные из соответствующих формул в табл.1.

Относительное движение в парах, помещенных в диагональные клетки табл. 2, одинаковое, если $V = V_r$, что должно было бы вызвать и одинаковый эффект, т.е. приемники в этих парах должны фиксировать одинаковую частоту. Однако приведенные формулы показывают, что это не так:

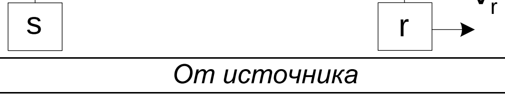
– Парадокс: если частота источника $f$ не изменяется при его перемещении в пространстве, тогда фиксируемая приемниками частота разная при одинаковом относительном движении источника и приемника: при сближении $\nu_b \neq \nu_a$, а при удалении $\nu_d \neq \nu_f$, что свидетельствует о нарушении равноправия инерциальных систем отсчета.

Чтобы разобраться, является ли ситуация действительно парадоксальной, рассмотрим движение в парах, помещенных в строки табл. 2.

В парах первой строки оба источника одинаковы и абсолютно неподвижны, следовательно, частота каждого равна $f$ и ничего не изменится, если заменить их одним источником, обозначив его частоту в состоянии абсолютной неподвижности $f_0$. Отличие частот движущихся приемников $\nu_b$ и $\nu_f$ является эффектом движения приемников в пространстве относительно абсолютно неподвижного источника.

В парах второй строки оба источника движут-

**Таблица 2. Варианты движения приемника относительно источника и соответствующие им доплеровской частоты, когда один из них абсолютно неподвижен, а другой движется с абсолютной скоростью $V$ или $V_r$**

| | |
|---|---|
| $\nu = \nu_r = \nu_a = f\dfrac{c+V_r}{c}$   | $\nu = \nu_r = \nu_d = f\dfrac{c-V_r}{c}$   |
| *К источнику* | *От источника* |
| $\nu = \nu_s = \nu_b = f\dfrac{c}{c+V}$   | $\nu = \nu_s = \nu_f = f\dfrac{c}{c-V}$   |
| *Позади источника* | *Впереди источника* |

ся с одинаковой абсолютной скоростью, их можно заменить одним источником, частота которого в состоянии абсолютной неподвижности равна $f_0$. Однако считать, что частота $f$ равна $f_0$, пока нет оснований, так как изначально предполагалось, что она может зависеть от скорости движения источника. Отличие частот $\nu_d$ и $\nu_a$ неподвижных приемников является эффектом абсолютного движения источника в среде.

Таким образом, эффект Доплера может быть вызван как движением приемника относительно источника, так и абсолютным движением источника в среде. Необходимо выяснить природу эффекта абсолютного движения источника. Для этого рассмотрим взаимодействие источника со средой, в результате которого возбуждение среды приводит к ее возмущению.

### 3. Возбуждение и возмущение

Неподвижная однородная среда отличается от возмущенной тем, что в неподвижной среде все физические параметры, характеризующие состояние среды, постоянны. Такое состояние среды назовем состоянием покоя. Пусть значение некоторого физического параметра $P$, характеризующего среду, одинаковое в каждый момент времени в каждой точке пространства, занимаемого средой. Возмущение среды в некоторой точке пространства состоит в том, что параметр среды $P$ в этой точке начинает изменять свое значение во времени в результате возбуждения среды источником.

Момент времени, когда параметр начал изменять свое значение, назовем начальным моментом возбуждения среды, а последующее изменение параметра в этой точке – процессом возбуждения среды. Изменение значения параметра в пространстве назовем процессом возмущения среды. Процесс возмущения среды зависит от ее свойств, а процесс возбуждения – от свойств источника и его взаимодействия со средой.

Процесс возбуждения среды в точке пространства можно описать некоторой функцией времени $p(t)$, пример которой приведен на рис.3a, где $\tau_e$ – продолжительность возбуждения среды. Возбуждение, продолжительность которого равна нулю, назовем событием. Пример события $\tilde{p}(t)$ приведен на рис. 3b, где $\delta(t)$ – импульсная функция Дирака. Рассмотрим процесс возмущения среды, возникающий при возбуждении, характеризуемом функцией $\tilde{p}(t)$, положив $P=0$.

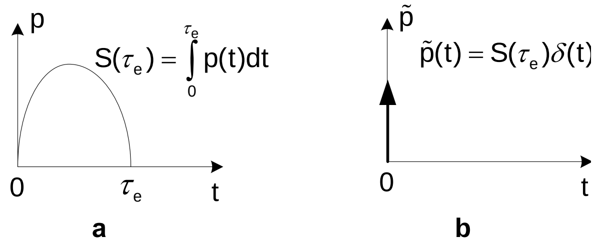
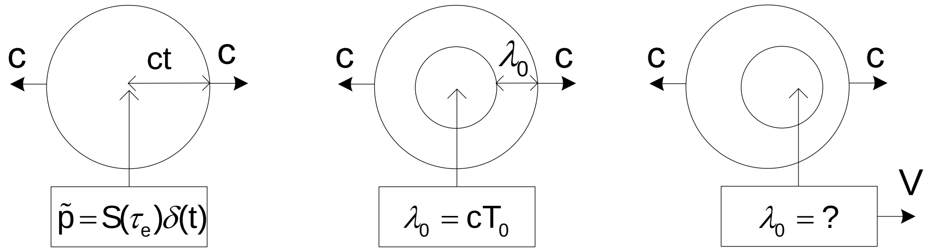



**Рис. 3. Пример функций, описывающих закон возбуждения среды в точке: a) непрерывное возбуждение продолжительностью $\tau_e$; b) возбуждение нулевой продолжительности – событие $\tilde{p}$**

Такое возбуждение изотропной среды приведет к её сферическому волновому возмущению. На рис.4a показано сечение сферической волны плоскостью, проведенной через точку возбуждения в момент времени $t>0$, которое представляет собой окружность радиуса $ct$ с центром в точке возбуждения. Сферическую волну можно рассматривать как реакцию среды на событие, произошедшее в некоторой точке пространства в состоянии покоя среды. Она представляет собой импульсную характеристику среды, когда $S(\tau_e)=1$.

Возбуждение среды источником периодического возбуждения с периодом $T_0$ приводит к образованию периодической последовательности сферических волн. В этом случае центры сфер расположены в точке возмущения среды. На рис. 4b показано сечение периодической сферической волны плоскостью, проходящей через точку возбуждения. Источник возбуждения абсолютно неподвижен, поэтому все окружности расположены концентрично. Частота возбуждения среды $f_0=T_0^{-1}$ и скорость распространения возмущения в среде $c$ определяют длину сферической волны $\lambda_0$ неподвижного источника.

Движущийся в среде источник также возбуждает периодические сферические волны, но волны уже не являются концентрическими, так как точка возбуждения среды непрерывно меняет свое положение в пространстве (рис. 4c). В результате происходит смещение волн в направлении движения источника, и центральная симметрия возмущенной среды сменяется симметрией осевой. При прямолинейном движении источника происходит возмущение среды, которое имеет пространственную регулярность только на линии движения. Поэтому длину сферической волны $\lambda_0$ неподвижного источника уже нельзя использовать в качестве простран ственной характеристики возмущенной среды.




**a** **b** **c**

**Рис. 4. Сферические волны, возбужденные а) неподвижным источником события $\tilde{p}$; в) неподвижным источником периодических событий $\tilde{p}$ с периодом $T_0$; с) таким же источником, движущимся с абсолютной скоростью** $V$

На рис. 5 показано сечение сферической волны, возбужденной в точке $x = 0$ движущимся источником, и положение источника в момент возбуждения следующей сферической волны. Время, проходящее между моментами возбуждения двух соседних волн, равно периоду $T_0$. Позади источника на линии движения возникает периодический процесс, длина волны которого равна $\lambda_b$. Длина волны впереди источника меньше и равна $\lambda_f$. Расстояние, на которое источник перемещается в пространстве за один период, равно $VT_0$, а радиус окружности равен $\lambda_0$, так как движение источника не может влиять на мгновенное возмущение среды.

Таким образом, частота возбуждения среды источником и длина волны возмущенного пространства связаны следующими соотношениями, справедливыми только на линии движения источника:

$$\lambda_b = \frac{c+V}{f_0}, \quad \lambda_f = \frac{c-V}{f_0} \tag{6}$$

или

$$\lambda f_0 = c - \alpha V, \tag{7}$$

где $\alpha = 1$, когда приемник находится впереди источника, и $\alpha = -1$, когда позади.

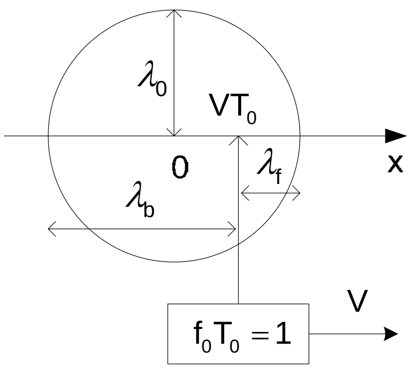



**Рис. 5. Сечение сферической волны и положение источника возбуждения, который движется с абсолютной скоростью $V$, в момент возникновения очередной волны**

Зная длину волны и скорость распространения возмущения в среде, можно определить период волны:

$$T_b = \frac{\lambda_b}{c} = \frac{c+v}{f_0 c}. \tag{8}$$

Аналогичным образом можно определить и период волны $T_f$ впереди источника и получить обобщенную формулу для периода $T$:

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{c - \alpha v}{f_0 c} \tag{9}$$

Соответствующая ему частота $\nu_s = T^{-1}$ совпадает с частотой эффекта абсолютного движения $\nu_b$ или $\nu_f$, приведенной в табл. 2, если заменить $f$ на $f_0$:

$$\nu_s = f_0 \frac{c}{c - \alpha V}. \tag{10}$$

Таким образом, на основе анализа эффекта Доплера в рамках принятых допущений о сферическом виде волны возмущенной среды, возбуждаемой в точке пространства с периодом $T_0$, можно сделать следующие выводы:

1. Частота возбуждения среды источником не зависит от абсолютной скорости движения в пространстве, если его движение равномерно и прямолинейно, т.е. отсутствуют ускорения, способные изменить стационарные процессы.

2. Постулат о равноправии инерциальных систем отсчета не нашел физического подтверждения. Анализ физических процессов, происходящих в возмущаемой среде, требует привлечения привилегированной инерциальной системы, связанной с неподвижной средой.

3. Доплеровская частота, измеренная приемником, движущимся с абсолютной скоростью $V$ относительно абсолютно неподвижного источника, является эффектом относительного движения источника и приемника.

4. Доплеровская частота приемника, находящегося в состоянии абсолютной неподвижно-

сти зависит от того, в каком направлении от движущегося источника он находится. Эта частота связана с эффектом абсолютного движения источника, возбуждающего пространство.

5. Возмущение среды имеет периодический во времени и регулярный в пространстве характер только на линии равномерного прямолинейного движения источника.

6. При малых абсолютных скоростях численные значения доплеровских частот отличаются незначительно, что позволяет не учитывать отличие движения в среде (движение источника) от движения в пространстве (движение приемника). Принципиальное отличие этих движений становится очевидным при движениях со скоростями, близкими к скорости возмущения среды $c$.

7. В случае, когда источник движется равномерно и прямолинейно с абсолютной скоростью $V$, пространственно-временная связь двух видов движения характеризуется кинематическим уравнением абсолютного движения (7), справедливым на линии движения.

8. Фундаментальное пространственно-временное соотношение $\lambda_0 f_0 = c$ имеет место в любой области пространства, занятого средой, возбужденной абсолютно неподвижным источником.

9. При движении источника со скоростью возмущения среды колебательный периодический процесс имеет место только на линии движения позади источника, где пространственно-временная связь характеризуется соотношением $\lambda f_0 = 2c$. Впереди источника волновой процесс не возбуждается.

10. Обобщенная характеристика пространственно-временной связи имеет следующий вид: $\lambda(t) = T_0(c - \alpha V(t))$. Она характеризует связь возбуждения среды в точке пространства с возмущением среды в пространстве при неравномерном движении источника.

11. Возмущенная среда хранит информацию об абсолютном движении тела, возбуждающего или возбуждавшего среду при своем движении. Время хранения информации определяется процессами затухания и поглощения.

12. Возмущения среды удовлетворяют принципу суперпозиции.

## 4. Одновременность и неподвижность

На рис. 6а показано сечение сферической волны, возбужденной в точке пространства $O$, когда среда находилась в состоянии покоя. Используя понятие события в точке, и учитывая причинно-следственный характер связи между возбуждением и возмущением, сферическую волну можно считать событием, распределенным в пространстве, а каждую ее движущуюся точку – пространственным событием возмущения. Каждое такое событие несет в пространстве информацию о возбуждающем воздействии. Таким образом, одно событие в точке пространства порождает бесчисленное множество одновременных пространственных событий, образующих сферическую волну.

На том же рисунке показано, как первое пространственное событие 1 приближается к неподвижной в пространстве точке $B$, находящейся в невозмущенной области среды. Следовательно, значение физического параметра $P$ в точке $B$, по сделанному ранее допущению, равно нулю. Тогда, измеряя и интегрируя функцию, характеризующую изменение этого параметра в точке $B$, можно определить факт попадания события 1 в эту точку. В этот момент интегратор зафиксирует некоторое значение $P_B$:

$$P_B = \int_0^\infty p_B(\tau) d\tau = \int_0^\infty \frac{1}{r} S(\tau_e) \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) d\tau = \frac{1}{r} S(\tau_e), \tag{11}$$

где $r$ – расстояние точки $B$ от точки $O$, $r^{-1}$ – функция затухания сферической волны в пространстве. Соотношение (11) описывает

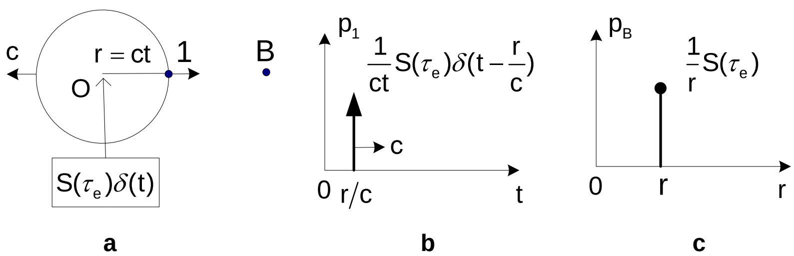



**Рис. 6. Сферическая волна в среде: а) источник события 1; b) параметр $p_1$ события 1, распространяющегося в пространстве; с) параметр события, определенный в неподвижной точке $B$**

взаимосвязь события возбуждения в точке пространства $O$ и соответствующего ему пространственного события в абсолютно неподвижной точке $B$, удаленной на расстояние $r$. В этом соотношении влияние поглощения среды на значение параметра $P_B$ не учитывается, но может быть учтено при необходимости. Тогда сферическая волна первого события будет представлять собой импульсную характеристику среды с учетом поглощения при условии, что $S(\tau_e)=1$. Её можно использовать для синхронизации часов в разных точках пространства, занимаемого средой.

При периодическом возбуждении среды неподвижным источником, события которого имеют частоту $f_0$, величина $P_B$ в неподвижной точке $B$ будет фиксироваться с такой же частотой. При перемещении источника со скоростью $V$ в направлении точки $B$ расстояние между событиями уменьшится согласно (7), следовательно, частота фиксации событий в точке $B$ увеличится, и станет равной $\nu_f$. Если в качестве источника возбуждения выбрать гармонический осциллятор с частотой $f_0$, то каждой волне, возбуждаемой за период, можно поставить в соответствие возбуждающее событие, равное, например, максимальному значению параметра среды в точке возбуждения за период.

На рис. 7a показаны пространственные события периодического возбуждения, обозначенные номерами $k-1$, $k-2$ и т.д., зафиксированные в момент времени $t_k$, соответствующий моменту появления возбуждающего события $k$. Чем меньше номер, тем раньше возникло событие. Первое из возбуждающих событий имеет номер 1, и с ним связано начало отсчета времени и относительного положения источника в пространстве.

В момент времени $t_k$ источник расположен в вершине некоторого конуса высотой $Vt_k$. Основание конуса расположено на плоскости, перпендикулярной линии движения и пересекающей её в точке $x=0$. Угол $\theta$ между образующей конуса и его высотой зависит от абсолютной скорости перемещения источника. Поверхность конуса можно использовать для определения положения в пространстве одновременных событий. Например, $x_{k-2}=V(t_k-t_{k-2})$ – это точка на линии движения, в которой произошло событие $k-2$. Центр сферы, поверхность которой образована пространственными событиями $k-2$, расположен в точке $x_{k-2}$, а ее радиус равен расстоянию от точки $x_{k-2}$ до поверхности конуса по нормали к линии движения источника. Сфера радиуса $r=Vt_k$ с центром в точке $x=0$ есть место расположения всех первых пространственных событий.

Все события, показанные на рис 7, возникли в прошлом относительно момента времени $t_k$, зафиксировавшего настоящее. Пусть наблюдатель $A$, неподвижный в системе отсчета источника, находится в том же месте пространства, что и событие $m$ (см. рис. 7b). Для наблюдателя $A$ все события с номерами $k>m$ находятся в будущем, событие $m$ – в настоящем, а события с номерами $k<m$ – в прошлом. На рис. 7b показана волна между событиями $m$ и $m-1$ в момент времени $t_k$.

Расстояние между любой парой последовательных событий $k$ и $k-1$ равно длине волны $\lambda$ (см.(6)). Это расстояние событие $k$ преодолевает со скоростью $c$ за время, равное $T$ (см. (9)), которое назовем пространственным периодом. Пусть событие $m$ расположено впереди источника в точке $x_m$ в момент времени $t_k$. Зная номер события в некоторой точке $x_m$ на линии движения впереди источника и номер

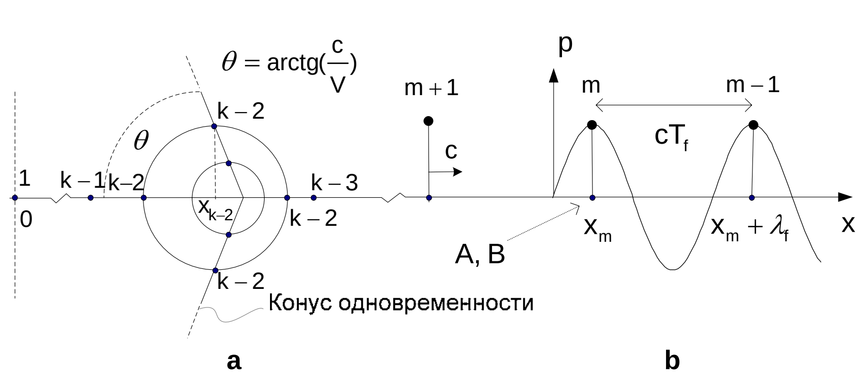



**Рис. 7. Картина возмущенного пространства при движении источника с абсолютной скоростью $V$, зафиксированная в некоторый момент времени $t_k$: a) конус одновременности; b) волна в пространстве между событиями $m$ и $m-1$ на линии движения**

еще не распространившегося события в текущий момент времени $t_k$, можно определить, сколько времени потребуется источнику, чтобы оказаться в точке $x_m$:

$$\Delta t_m = (k - m)T_f . \qquad (12)$$

В момент времени $t_r = t_k + \Delta t_m$ источник окажется в точке $x_m$, и доплеровская частота изменит свое значение с $\nu_f$ на $\nu_b$:

$$\Delta \nu = \nu_f - \nu_b = 2f_0 \frac{c}{c^2 - V^2} . \qquad (13)$$

Назовем момент $t_r$ поворотным моментом времени в точке $x_m$. Таким образом, зная пространственный период, можно определить поворотный момент в любой точке на линии движения источника, а также определить, сколько времени до него осталось.

Пространственный период и доплеровские частоты $\nu_b$ и $\nu_f$ удовлетворяют следующему пространственно-временному соотношению:

$$\nu_f \lambda_f = \nu_b \lambda_b = c . \qquad (14)$$

Оно является инвариантным к изменению направления движения источника.

Количество событий на единицу длины линии движения назовем пространственной густотой, которая является величиной, обратной длине волны:

$$d = \frac{1}{\lambda} = f_0 \frac{1}{c - \alpha V} \qquad (15)$$

Если отпустить время, абсолютное движение источника будет продолжаться, и неподвижный наблюдатель $A$ будет фиксировать события с пространственным периодом $T_f$, причем $f_0 T_f = \frac{f_0}{\nu_f} = \frac{c - V}{c} \neq 1$. Таким образом, в любой точке на линии движения источника, движущегося со скоростью $V$, параметры возбуждения и возмущения связаны следующим соотношением:

$$f_0 T = \frac{f_0}{\nu_s} = \frac{c - \alpha V}{c} \neq 1 . \qquad (16)$$

## 5. Эффект относительного движения

Рассмотрим равномерное прямолинейное движение наблюдателя $B$, находившегося в момент $t_k$ в точке события $m$ на линии движения (см. рис. 7b). Он перемещается в направлении от неподвижного источника с абсолютной скоростью $V_r$. Начальный момент движения совпадает с моментом $t_k$ и далее принят равным нулю как начало отсчета движения. Номера всех событий уменьшим на $m$ из соображений удобства счета.

На рис. 8a показаны две волны, зафиксированные в момент $t = 0$ и в некоторый момент $t = t_1$. Момент $t_1$ характерен тем, что событие 1 догнало наблюдателя $B$. Моменты фиксирования таких событий наблюдателем $B$ будем помечать индексом: $t_1^B = t_1$. За время $t_1^B$ наблюдатель переместился на расстояние $l_1 = V_r t_1^B$ от точки $x_m$, а догнавшее его со скоростью $c$ событие 1 – на расстояние $\lambda_0 + V_r t_1^B$, затратив на это время $t_1^B$. Время, которое затратит событие $k$ на движение к наблюдателю $B$, удовлетворяет следующему уравнению:

$$t_k^B = \frac{k\lambda_0 + V_r t_k^B}{c} \qquad (17)$$

Решив (1.17), находим $t_k^B$:

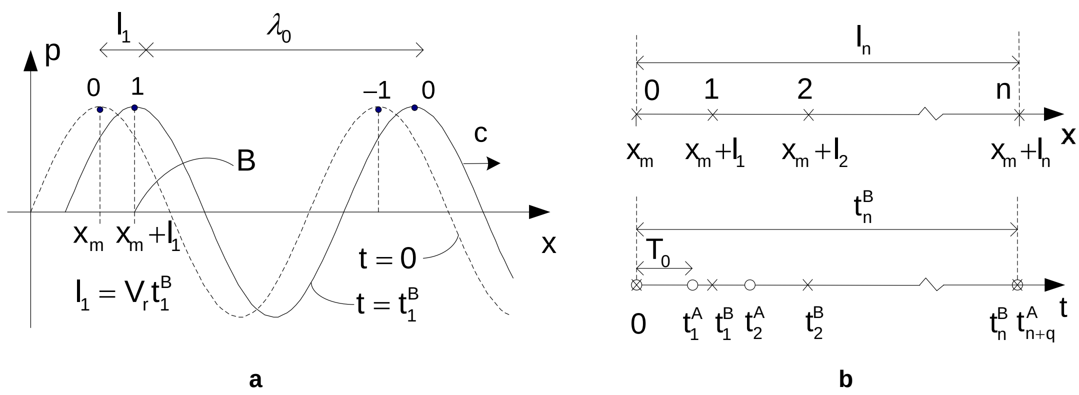



**Рис. 8. Сферическая волна неподвижного источника: a) в моменты времени $t = 0$ и $t = t_1^B$; b) пространственная и временная фиксация событий наблюдателями**

$$t_k^B = k\frac{\lambda_0}{c - V_r}. \qquad (18)$$

Из (18) можно определить интервал $\Delta t^B$ между двумя последовательными событиями, фиксируемыми наблюдателем $B$:

$$\Delta t^B = t_k^B - t_{k-1}^B = \frac{\lambda_0}{c - V_r} > T_0. \qquad (19)$$

Тогда доплеровская частота $\nu_d$, с которой удаляющийся от источника наблюдатель $B$ фиксировал события, определяется следующим образом:

$$\nu_d = \frac{1}{\Delta t^B} = f_0\frac{c - V_r}{c}. \qquad (20)$$

Во время движения наблюдателя $B$, абсолютно неподвижный наблюдатель $A$ фиксировал те же события с интервалом, равным периоду $T_0$. Момент времени $t_1^A$, когда он зафиксировал первое событие после начала движения наблюдателя, равен: $t_1^A = T_0$ (см. рис.8b). Поскольку неподвижный наблюдатель находится ближе к источнику, он фиксирует события раньше, а движущийся наблюдатель – с запаздыванием, т.е. наблюдатель $B$ фиксирует события, соответствующие разным фазам волны, изображенной на рис. 8a для $t = 0$. Запаздывание $\Delta t_k$ определяется следующим образом:

$$\Delta t_k = t_k^B - t_k^A = t_k^B\frac{V_r}{c}. \qquad (21)$$

В момент времени $t_n$, когда запаздывание достигнет величины $T_0$, оба наблюдателя зафиксируют события одновременно, т.е. будут наблюдать одну и ту же фазу волны:

$$\Delta t_n = t_n^B - t_n^A = t_n^B\frac{V_r}{c} = T_0, \qquad (22)$$

где согласно (18)

$$t_n^B = n\frac{\lambda_0}{c - V_r}. \qquad (23)$$

Подставив (23) в (22) находим $n$:

$$n = \frac{c - V_r}{V_r}. \qquad (24)$$

Следовательно, оба наблюдателя могут зафиксировать синфазные события только в том случае, если скорость перемещения наблюдателя $B$ удовлетворяет следующему соотношению:

$$V_r = \frac{c}{n+1}. \qquad (25)$$

В этом случае синфазное фиксирование событий приемником будет происходить с периодичностью $t_n^B = T_0(n+1)^{-1}$ и пространственной регулярностью $l_n = \lambda_0$. Доплеровская частота приемника при движении со скоростью (25) равна

$$\tilde{\nu}_d = f_0\frac{n}{n+1} \qquad (26)$$

При движении с любой другой скоростью синфазное фиксирование событий приемником невозможно.

Если наблюдатель $B$ изменит направление движения на противоположное и станет приближаться к неподвижному источнику, то запаздывание событий сменится опережением и вывод всех соотношений можно повторить, следуя той же логике. Формула для доплеровской частоты $\nu_a$ отличается от (20) только знаком перед $V_r$. Поэтому обобщенные соотношения для (20) и (27) примут такой вид:

$$\nu_r = f_0\frac{c - \beta V_r}{c}, \qquad (28)$$

$$\tilde{\nu}_r = f_0\frac{n}{n+\beta}, \qquad (29)$$

где $\beta = 1$, когда приемник движется от источника, $\beta = -1$, когда движется к источнику.

Соотношения для доплеровской частоты $\nu$, характеризующей эффект при участии в абсолютном движении и источника, и приемника, можно получить аналогичным образом. Для этого необходимо лишь учесть, что длина волны возмущенной среды находится из кинематического уравнения движения (7).

### 6. Уравнение относительного движения

Обобщая полученные результаты можно прийти к выводу, что эффект Доплера состоит из двух составляющих: одна вызвана абсолютным движением источника в среде, а другая – движением приемника относительно источника. Все полученные ранее соотношения сведены в табл. 3.

Доплеровские частоты, выражающие эффекты абсолютного и относительного движений в разных вариантах относительного движения приемника и источника, при условии, что их абсолютные скорости остаются неизменными, связаны следующим соотношением:

$$\nu_b\nu_f\nu_a\nu_d = f_0^4\frac{c^2 - V_r^2}{c^2 - V^2}. \qquad (30)$$

Парные произведения частот $\nu_b, \nu_f, \nu_a, \nu_d$ в допустимых комбинациях дают четыре доплеровские частоты, приведенные в табл. 1,

**Таблица 3. Эффект Доплера: основные соотношения**

| Приемник | | | | Доплеровская частота | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Относительное положение | | Относительное движение | | Составляющие эффекта | | Общее выражение |
| Впереди источника | Позади источника | От источника | К источнику | Движение источника | Движение приемника | |
| $\alpha = 1$ | $\alpha = -1$ | $\beta = 1$ | $\beta = -1$ | $\nu_S = f_0 \dfrac{c}{c - \alpha V}$ | $\nu_r = f_0 \dfrac{c - \beta V_r}{c}$ | $\nu = \dfrac{1}{f_0} \nu_S \nu_r$ |

каждая из которых соответствует одному варианту относительного движения.

Общее выражение для доплеровской частоты можно записать в следующем виде:

$$\nu = f_0 \frac{c - \beta V_r}{c - \alpha V}. \tag{31}$$

Если выразить абсолютную скорость движения приемника $V_r$ через абсолютное значение его относительной скорости $\upsilon$ в системе источника, то получим следующее соотношение:

$$V_r = \upsilon + \alpha\beta V. \tag{32}$$

Введя в соотношение (31) длину волны из кинематического уравнения абсолютного движения (7) и подставив абсолютную скорость приемника (32), получим кинематическое уравнение относительного движения:

$$\nu\lambda = c - \alpha V - \beta\upsilon. \tag{33}$$

Оно выражает связь абсолютного и относительного в движении и позволяет разработать инструментальные методы определения всех входящих в него величин.

Уравнение относительного движения (33) было получено с использованием только одного параметра однородной изотропной среды – скорости распространения возмущения $c$. Поэтому оно справедливо для любых сред, имеющих постоянную скорость распространения возмущений, в том числе и для таких, в которых эта скорость равна скорости распространения света.

Следовательно, находясь в согласии с известным экспериментальным данными, кинематическое уравнение относительного движения отражает фундаментальные свойства движения материи и позволяет понять, почему электрон неуловим, частица он или волна, почему волна – не материя, а состояние материи, почему глаз видит фотон, почему нам тепло или холодно, почему происходит красное смещение и многое другое.

## Выводы

Каждая из двух популярных физических теорий базируется на паре постулатов:

- классическая механика – на постулатах об абсолютности времени и относительности скорости;
- специальная теория относительности – на постулатах об абсолютности скорости и относительности времени.

Природа посредством эффекта Доплера утверждает следующее:

- Состоятельной является пара постулатов об абсолютности времени в пространстве и абсолютности скорости в среде, а значит, и об абсолютности движения как такового. Как называется среда – воздух, эфир, вакуум или темная материя – не суть важно.
- Абсолютное движение вещества в пространстве вызывает возмущение среды, а возмущенная среда влияет на абсолютное движение вещества. В этом взаимодействии вещества и среды материя стремится к состоянию покоя, которое характеризуется соотношением $\nu = 0$ в любой точке пространства.
- Для самосогласованного описания движения материи потребуются уравнения взаимодействия всех субъектов движения. Они должны описывать движение в интуитивно понятном трехмерном пространстве.

Достоверно известны два вида фундаментальных силовых взаимодействий: взаимодействие гравитационных масс $m$ (закон Ньютона) и взаимодействие электрических зарядов $q$ (закон Кулона). Говорят, что в микромире существуют также слабое и сильное взаимодействия. Исходя из дуализма, как главного принципа организации Природы, можно “измыслить” гипотезу о том, что гравитационное и электрическое взаимодействия являются единственными в списке фундаментальных взаимодействия. Исходя из дуализма, как главного принципа организации Природы, можно “измыслить” гипотезу о том, что гравитационное и электрическое взаимодействия являются единственными в списке фундаментальных взаимодействий. Эффект Доплера – одно из доказательств этого.

Состояние покоя среды характеризуется нулевым градиентом физических величин и отсутствием любого вида движения. Следовательно, если принять непрерывность как свойство среды, то в таком состоянии среда должна быть электрически нейтральной и плотность массы должна быть везде одинаковой. В этом случае фундаментальные взаимодействия будут отсутствовать по причине отсутствия зарядов и тел. В такой среде нет физических отличий одной точки пространства от другой, нет ни кинетической, ни потенциальной энергий. Энергию такой среды можно принять равной нулю.

Если предположить, что по причине внутренних флуктуаций неизвестного происхождения, плотность массы увеличится в некоторой области пространства, в другой области плотность массы должна уменьшиться. Это приведет к возникновению гравитационной силы притяжения областей с разными плотностями масс и к движению, в результате которого среда снова вернется в состояние покоя. Аналогичным образом, появление положительного заряда в одной области пространства означает появление отрицательного заряда в другой области. Это приведет к возникновению электрической силы притяжения и к движению, в результате которого среда снова вернется в состояние покоя. Могут ли рассмотренные явления быть независимыми?

Если непрерывность не является свойством среды, т.е. среда дискретна, то возникает вопрос, является ли электрическая нейтральность среды в состоянии покоя проявлением электрической нейтральности ее элементарной частицы? Из утвердительного ответа следует, что заряд есть проявление движения элементарной частицы и свидетельство нарушения ее пространственной симметрии при движении. Обладает ли частица гравитационной массой? Утвердительный ответ на этот вопрос свидетельствует о пространственной симметрии среды в состоянии покоя, а, значит, и о пространственной симметрии элементарной частицы, при которой гравитационные силы уравновешены и не вызывают перемещение частиц в пространстве.

Обладает ли частица массой покоя? Инертная масса частицы характеризует количество движения частицы, перемещающейся с некоторой скоростью в пространстве. Если предположить, что этот параметр движения не зависит от скорости перемещения, то масса покоя частицы равна гравитационной массе и равна массе инертной. Таким образом, движение элементарной частицы вызывает как изменение плотности массы в пространстве, так и изменение пространственного заряда. Фундаментальные взаимодействия материи в пространстве и времени направлены на установление состояния покоя. Среда в состоянии покоя есть материя, в которой отсутствуют внутренние причины, способные нарушить ее покой, если исключить флуктуации неизвестного происхождения. Это состояние, лишенное информации.

Оно характерно тем, что в пространстве течет только время, но оно себя ничем не проявляет. Это состояние материи можно описать как в пространстве как таковом: $\gamma = 0,\ \lambda \to \infty.$; так и в любой его точке: $V = 0,\ q = 0$. Надежда на то, что покой не может быть вечным, таится в кинематическом уравнении движения, предельным случаем которого является описание свойства среды при наличии в пространстве одного вида движения – точечного возмущения: $f_0\lambda_0 = c$ .

Многообразие явлений в наблюдаемом мире Природы – это проявление многообразия двух видов движения материи: возмущения и перемещения. Эти виды движения двуедины. Уверенности в том, что движение материи будет вечным, нет, но есть уверенность в том, что заряд и масса – это те фундаментальные свойства, которые поддерживают ее вечное движение в мире.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*