Волны в среде.

Связь с автором:
Тел. 8-4872-36-88-80
Tchernysheff.sania@yandex.ru

В данной статье рассматриваются причины возникновения эффекта Доплера. Во многих книгах по физике приводятся либо непонятные объяснения самого эффекта, либо не верные формулы и ошибочные выводы, противоречащие опыту.

Объяснение Фейманом эффекта Доплера основано на волнообразном движении материальной точки, что сразу же ставит под сомнение все дальнейшие рассуждения, т.к. в любом волновом процессе нет движения материи вдоль волны. Если движется платформа с установленным на ней маятником, то груз маятника действительно движется в пространстве по синусоиде. Но тогда о волновом процессе речи быть не может.

В физике Явронского утверждается: «Предположим, что источник волны движется относительно среды, а приемник покоится. Движение источника приведет к изменению длины волны: в направлении движения она сократится и станет равна $\lambda = (u - \upsilon) \cdot T$; в противоположном направлении — удлинится по сравнению с длиной волны, которую излучает неподвижный источник, и будет равна $\lambda = (u + \upsilon) \cdot T$. Скорость распространения волны определяется лишь упругими свойствами среды, и движение источника на нее не влияет.

Соотношение между длиной волны в направлении движения источника λ и длиной волны λ_0, которую излучает неподвижный источник, выразится так:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{u - \upsilon}{u} \qquad 20.13$$

Для длины волны в направлении, противоположном направлению движения источника, $\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{u + \upsilon}{u}$. 20.14

Согласно $\lambda = u \cdot T = \frac{u}{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot u}{\omega}$ имеем $\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot u}{\omega}$ и $\lambda_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot u}{\omega_0}$. Подставив в (20.13) и (20.14), получим выражение для круговой частоты, которую приемник, неподвижный относительно среды, регистрирует в случае движения источника:

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - \frac{\upsilon}{u}}$$ (источник приближается),

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 + \frac{\upsilon}{u}}$$ (источник удаляется)»

Можно заменить круговую частоту обычной:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\upsilon}{\lambda} \qquad \frac{\upsilon}{\lambda} = \frac{\frac{\upsilon_0}{\lambda_0}}{\frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0}} = \frac{\upsilon_0^{\,2}}{\lambda_0 \cdot (\upsilon_0 - \upsilon)}$$

$\frac{\upsilon}{\lambda} = f$ $\quad \frac{\upsilon_0}{\lambda_0} = f_0$ подставляя получим $f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0}{\upsilon_0 - \upsilon}$

Далее. В физике Явронского читаем следующие рассуждения: «Если источник покоится относительно среды, а приемник движется относительно нее со скоростью v, то также будет наблюдаться изменение частоты, но по другой причине. Здесь длина волны не меняется, ибо источник неподвижен:

$\lambda = \lambda_0$. Однако скорость волны относительно движущегося приемника V равна алгебраической сумме скорости волны u и скорости приемника относительно среды v:

$V = u + \upsilon$ (приемник приближается)

$V = u - \upsilon$ (приемник удаляется) 20.16

Согласно $\lambda = u \cdot T = \dfrac{u}{v} = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot u}{\omega}$ имеем для круговой частоты, регистрируемой приемником:

$$\omega' = \frac{2 \cdot \pi \cdot V}{\lambda}$$

Сопоставляя с (20.16) и учитывая, что $\omega_0 = \dfrac{2 \cdot \pi \cdot u}{\lambda}$ (так как $\lambda = \lambda_0$), получим

$\omega' = \omega_0 \cdot \left(1 + \dfrac{\upsilon}{u}\right)$ (приемник приближается)

$\omega' = \omega_0 \cdot \left(1 - \dfrac{\upsilon}{u}\right)$ (приемник удаляется)

Мы видим, что движение как источника, так и приемника приводят к изменению частоты, но механизм и результат несколько различны. Особенно это заметно, если скорость источника или приемника близка к скорости волны.»

Не совсем понятно, зачем вводится круговая частота, когда вполне можно обойтись нормальным представлением:

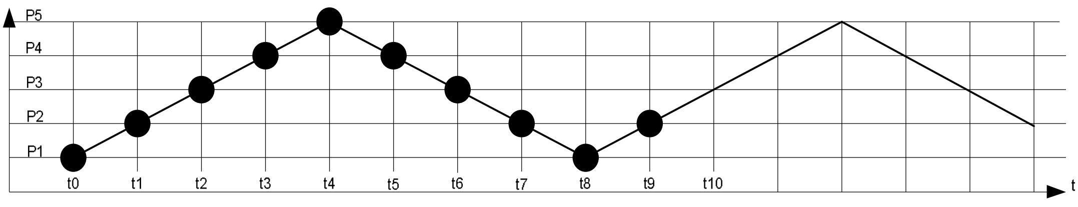
Так как $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, то $f = f_0 \cdot \left(1 \pm \dfrac{\upsilon}{u}\right) = f_0 \cdot \dfrac{u \pm \upsilon}{u}$

В теории колебаний используется характеристика $\omega = \dfrac{2 \cdot \pi}{T}$. Как видно, этот параметр имеет смысл частоты с безразмерным коэффициентом $2 \cdot \pi$ и называется круговой частотой.

В учебниках по физике можно встретить определение: круговая частота показывает, сколько колебаний совершается за $2 \cdot \pi$ секунд. Очевидно, что такое определение совершенно лишнее, когда принято обычное определение частоты. Вообще использование круговой частоты в колебательных процессах ни чем не помогает и только часто запутывает осмысление происходящих процессов. То же можно сказать и о волновом числе, якобы выражающем длину волны.

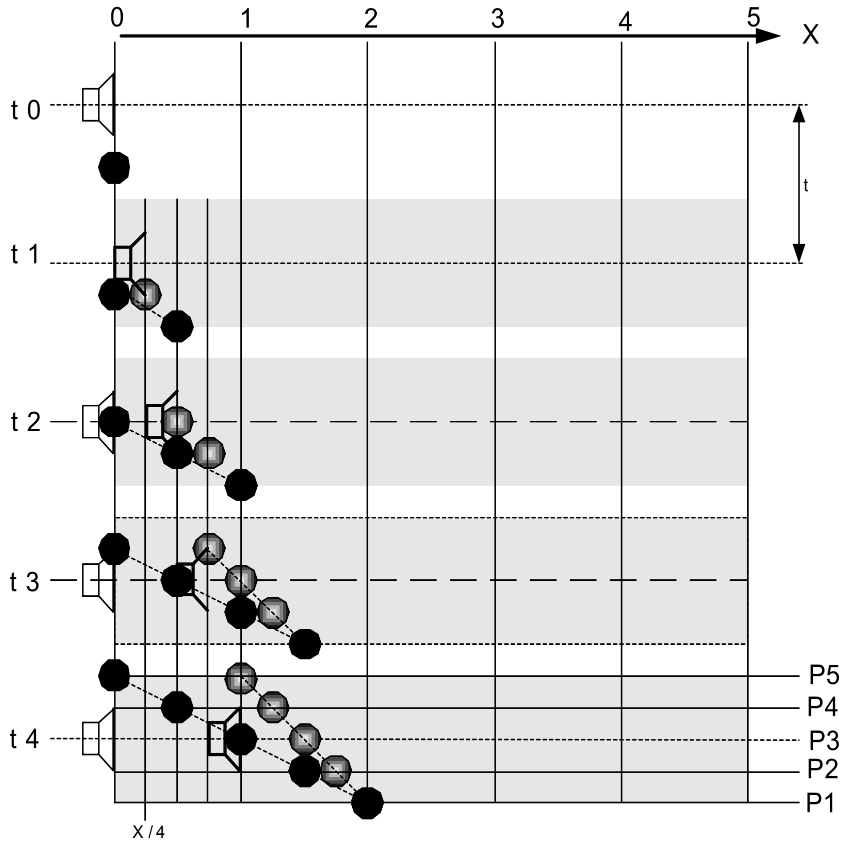
I. Давайте построим эксперимент с движущимся динамиком и посмотрим, что происходит с давлением воздуха в короткие интервалы времени.

Подадим на динамик сигнал для равномерного движения мембраны так, чтобы получить треугольные колебания плотности воздуха:



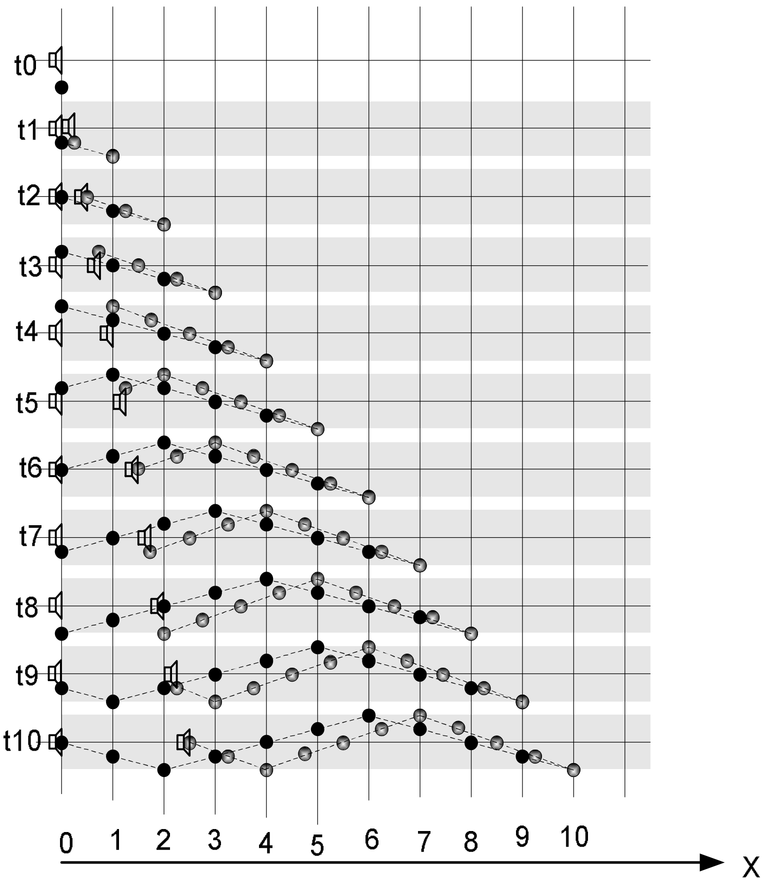
Пусть период колебаний T будет равен восьми делениям на оси времени.

Пусть также скорость звука будет такова, что длина волны равна восьми делениям на пространственной оси.



На рисунке: черные пятна соответствуют уровню давления в каждый момент времени при неподвижном динамике; светлые пятна соответствуют уровню давления от движущегося динамика; динамик перемещается на (1/4)X за каждый интервал t. За такой же интервал времени t мембрана динамика создает давление P. Если скорость звука, например, в два раза больше скорости источника, то за такое же время t участок среды с плотностью P переместиться на X/2.

За интервал времени t1 мембрана динамика создаст давление P2. Это давление будет передаваться частицами среды со скоростью $\upsilon_{зв}$. За это же время t динамик переместится на расстояние $\upsilon_{И} \cdot t = X/4$. Но участок среды с давлением P2 переместится на расстоянии $\upsilon_{зв} \cdot t = X/2$. В течении следующего интервала времени t2 динамик переместится на расстояние X/4, а мембрана создаст давление P3. Таким образом расстояние между участками P2 и P3 изменится, т.е. происходит уменьшение длины волны.



На рисунке: черные пятна соответствуют уровню давления в каждый момент времени при неподвижном динамике; светлые пятна соответствуют уровню давления от движущегося динамика; динамик перемещается на (1/4)X за каждый интервал t. За такой же интервал времени t мембрана динамика создает давление P.

При неподвижном динамике за один период T колебаний мембраны такой же участок плотности P1 будет создан частицами среды (это перемещение состояния среды - перемещение плотности со скоростью $\upsilon_{зв}$) на расстоянии длины волны $T \cdot \upsilon_{ЗВ} = \lambda_0$.

Иными словами: к моменту создания мембраной еще одного участка с таким же давлением $P1_8$, т.е. к моменту t_8, первый участок такого же давления $P1_1$ «переместится» со скоростью $\upsilon_{зв}$ на расстояние длины волны $X8 = t8 \cdot \upsilon_{ЗВ} = \lambda_0$.

Если же динамик движется, то к моменту t_8 он окажется на расстоянии $t8 \cdot \upsilon_{И}$ и в этом месте мембрана создаст участок с начальным давлением $P1_8$.

Пусть скорость динамика в K раз меньше скорости упругих волн в среде $\upsilon_{И} = \frac{\upsilon_{ЗВ}}{K}$ или $K = \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{И}}$. Тогда при движущемся динамике расстояние между участками с одинаковым давлением (одинаковой фазой) $P1_1$ и $P1_8$, т.е. длина волны $\lambda = t8 \cdot \upsilon_{ЗВ} - t8 \cdot \upsilon_{И}$. Т.к. мы взяли длительность t8, равную периоду колебаний мембраны T, то $t8 = T = \frac{\lambda_0}{\upsilon_{ЗВ}}$ и $\upsilon_{ЗВ} = K \cdot \upsilon_{И}$, получим

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \text{ или } \lambda = \lambda_0 \cdot \left(\frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_{И}}{\upsilon_{ЗВ}}\right) \text{ или } \lambda = \frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_{И}}{f_0}$$

где λ_0 - длина волны плотности частиц упругой среды при неподвижном излучателе;

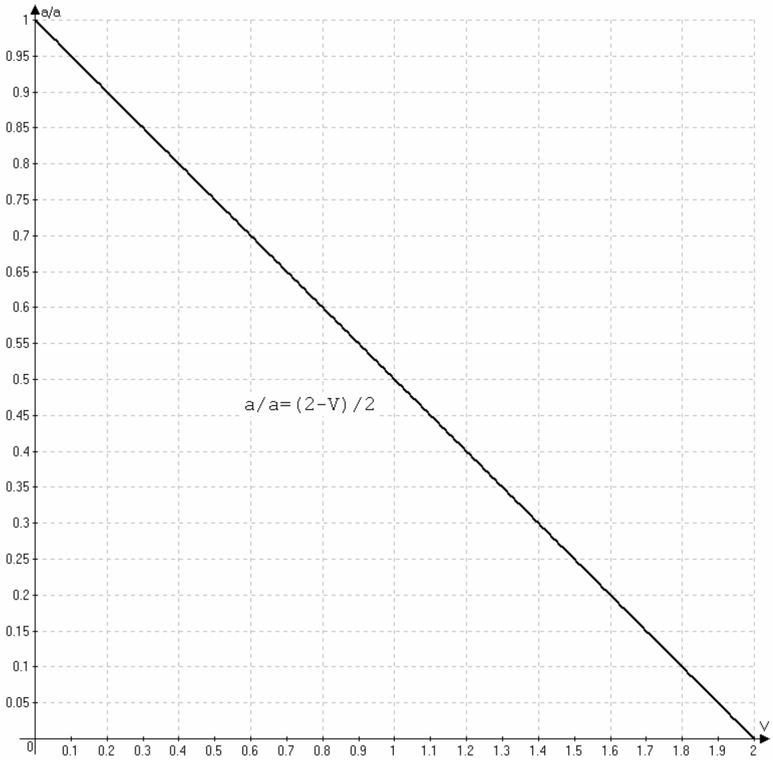
λ - длина волны плотности частиц упругой среды при движущемся излучателе;

$\upsilon_{ЗВ}$ - скорость волн плотности в упругой среде;

$\upsilon_{И}$ - скорость равномерного движения излучателя (динамика)

f_0 – частота колебаний мембраны источника.

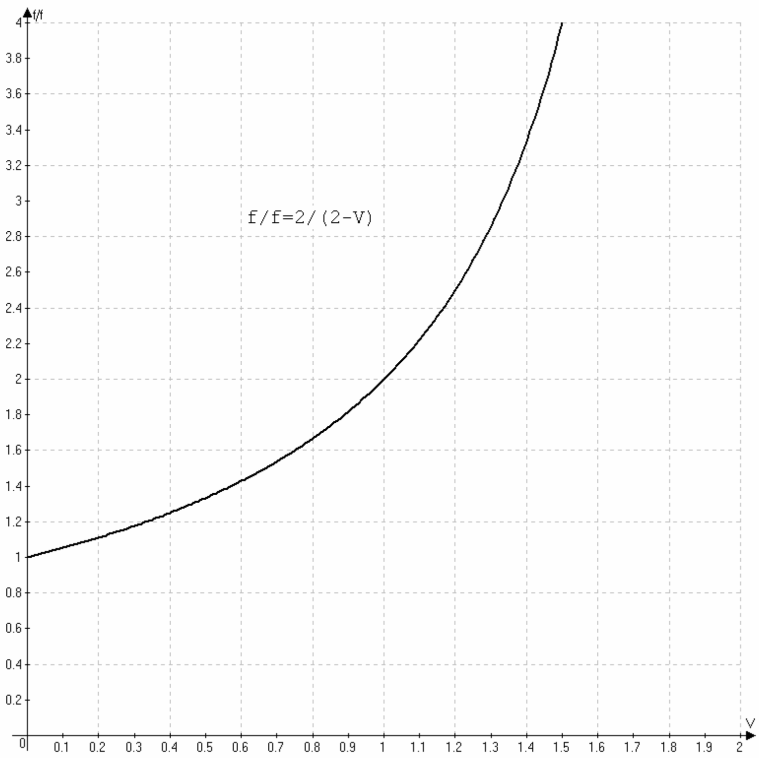
График зависимости $\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}}$:



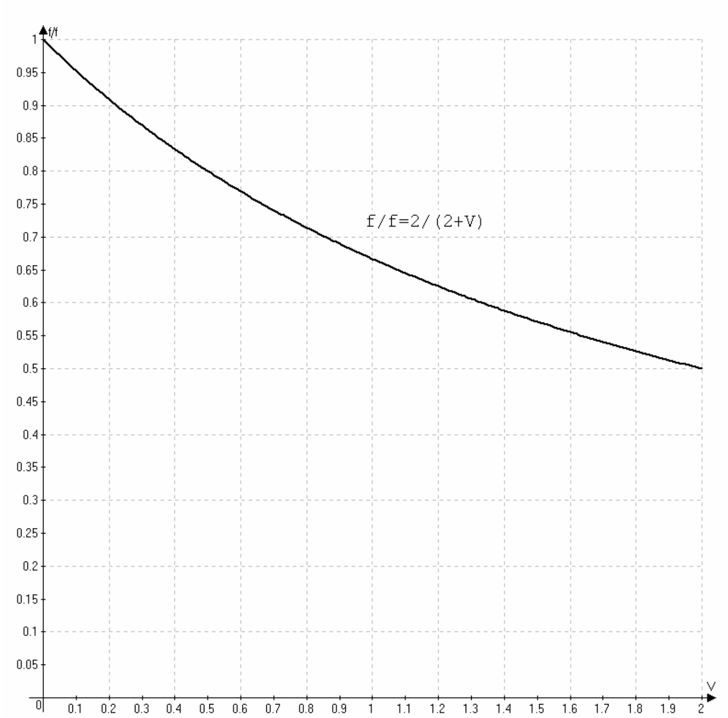
Как видим, при приближении скорости источника к скорости упругих волн в среде длина волн стремится к нулю.

Вывод 1:

И так мы выяснили, что движущийся источник изменяет длину волны, а не длительность периода. Но приемник устроен так, что не может фиксировать изменение длины волны. По этому приемник будет фиксировать изменение частоты. Более того, показания приемника будут зависеть от того, удаляется от него источник или приближается. При приближении источника к приемнику, приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}$.



При удалении источника от приемника, приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}$, а длина волны будет увеличена: $\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}}$



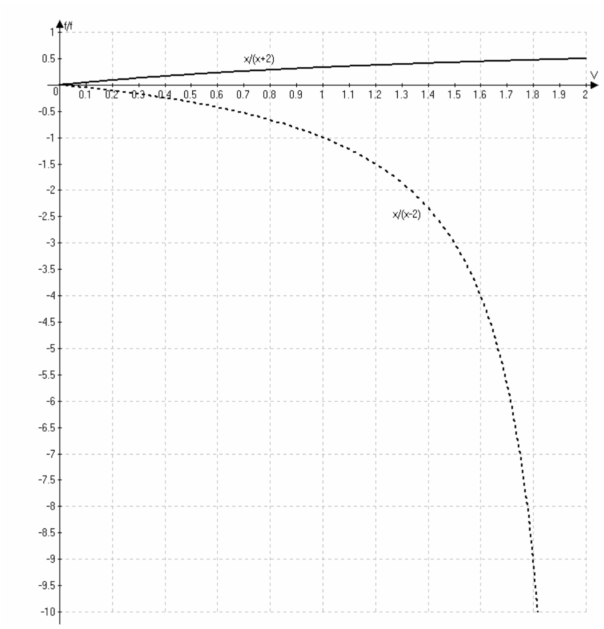
Мы видим, что приемник фиксирует состояние среды, а не состояние источника. Можно сказать, что приемник не регистрирует колебания источника, а лишь последствие воздействия источника на среду.

Сдвиг частоты $\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{\upsilon}{\upsilon_0 \pm \upsilon}$

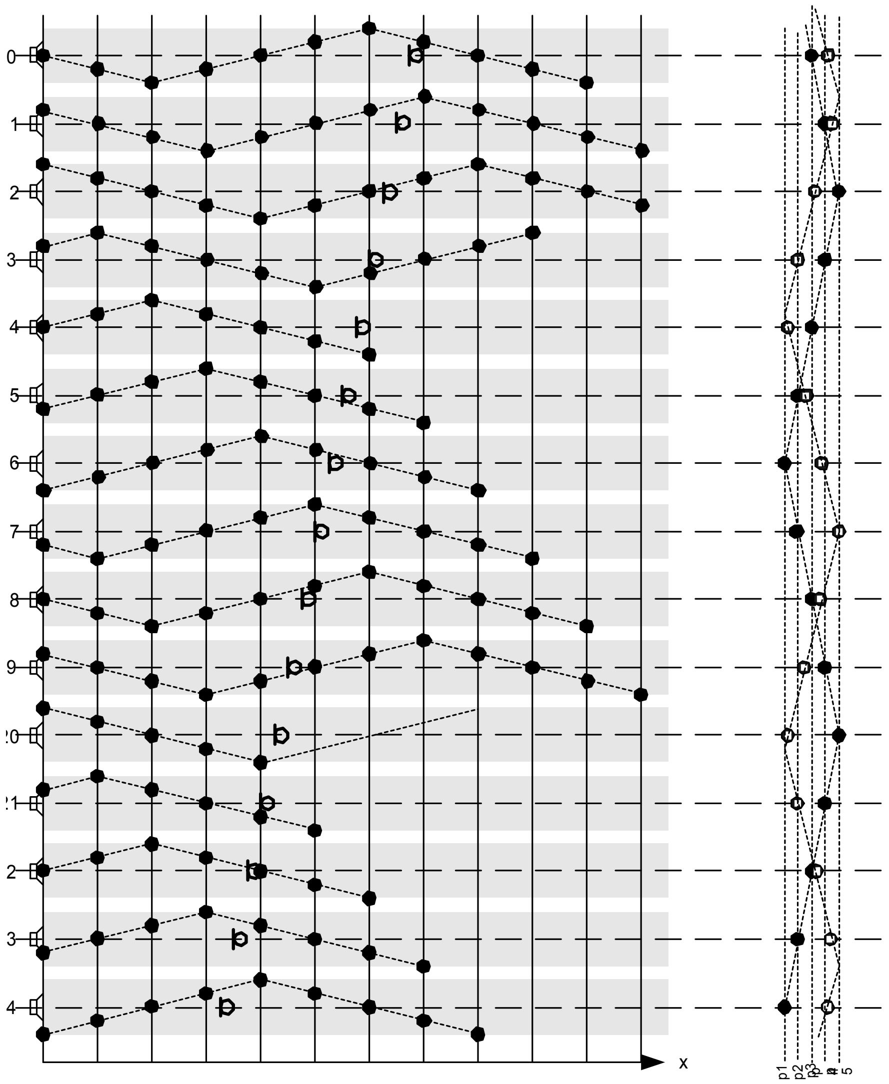
1. $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\upsilon}{\upsilon_0 + \upsilon}$

2. $\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\upsilon}{\upsilon_0 - \upsilon} = \frac{\upsilon}{\upsilon - \upsilon_0}$

В общем виде $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\upsilon}{\upsilon \pm \upsilon_0}$



II. Построим такой же эксперимент, но теперь пусть движется приемник к источнику.



На рисунке: черные пятна соответствуют уровню давления в каждый момент времени при неподвижном динамике; серые пятна соответствуют уровню давления в месте нахождения движущегося приемника; приемник перемещается на (1/4)X за каждый интервал t. За такой же интервал времени t мембрана динамика создает давление P. Справа показан уровень давления среды в моменты времени t.

Как видно, в данном эксперименте длина волны не меняется. Но меняется периодичность принимаемого сигнала за счет того, что движущийся приемник фиксирует давление среды раньше, чем если бы он не двигался. По этому частота принимаемого сигнала будет больше, чем действительная частота излучателя. Длина волны плотности в упругой среде $\lambda = T_0 \cdot \upsilon_{ЗВ}$. Так как приемник движется навстречу волне, то их относительная скорость $\upsilon = \upsilon_{ЗВ} + \upsilon_{П}$. Тогда при неизменной длине волны имеем период принимаемого сигнала $T_{П} = \dfrac{\lambda}{\upsilon} = \dfrac{\lambda}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_{П}}$.

Так как $\lambda = T_0 \cdot \upsilon_{ЗВ}$, то $T = \dfrac{T_0 \cdot \upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_{П}}$ и частота $f_{П} = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_{П}}{\upsilon_{ЗВ}}$.

Относительное изменение частоты $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \pm \dfrac{\upsilon}{\upsilon_0}$

Это Доплеровский сдвиг частоты.

Вывод 2:

Изменение частоты прямо пропорционально изменению скорости.

Если при движении источника имеем изменение длины волны, то в случае движения приемника изменяется частота приема при неизменной длине волны:

движется источник - меняется длина волны:

удаление $\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}}$; приемник регистрирует частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}$

приближение $\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}}$; приемник регистрирует частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}$

движется приемник - длина волны не меняется, но датчик фиксирует изменение частоты за счет своего движения:

удаление $f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_П}{\upsilon_{ЗВ}}$

приближение $f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_П}{\upsilon_{ЗВ}}$

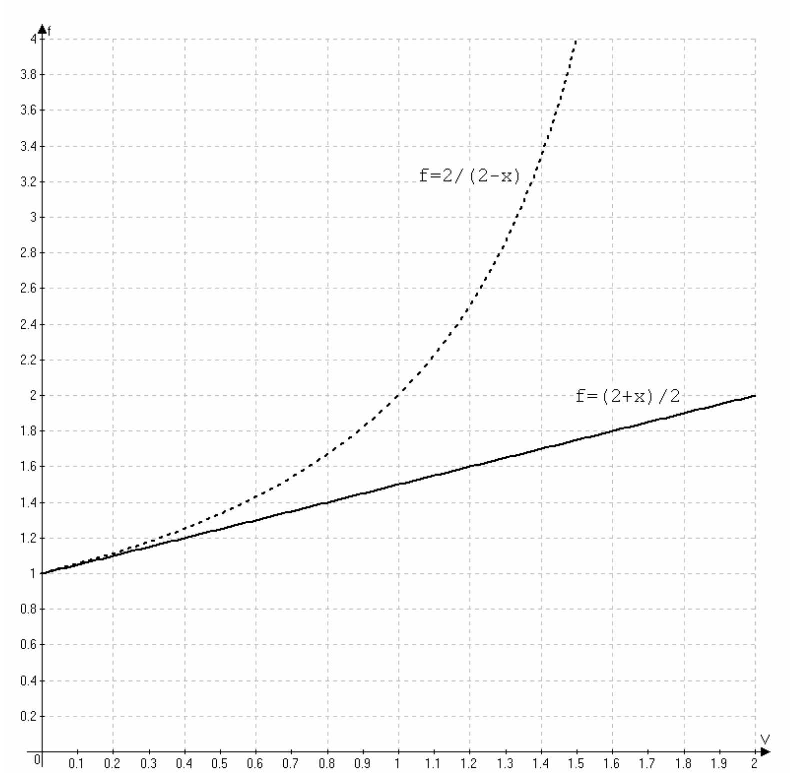
Это весьма важное наблюдение, позволяющее избежать ошибок при интерпретации экспериментальных данных. Оказывается, для того, чтобы фиксировать частоту источника, необходимо знать состояние среды в области приемника и знать, что источник и приемник не движутся относительно среды.

Например, если мы регистрируем частоту упругих волны от какого-либо источника, то принимаемая частота может не соответствовать периодичности источника.

Отметим также, что в том и в другом случае приемник будет фиксировать изменение частоты, но изменение не одинаковое:

в случае движения излучателя к приемнику приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}$;

в случае движения приемника к излучателю приемник будет фиксировать частоту $f_2 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_П}{\upsilon_{ЗВ}}$.



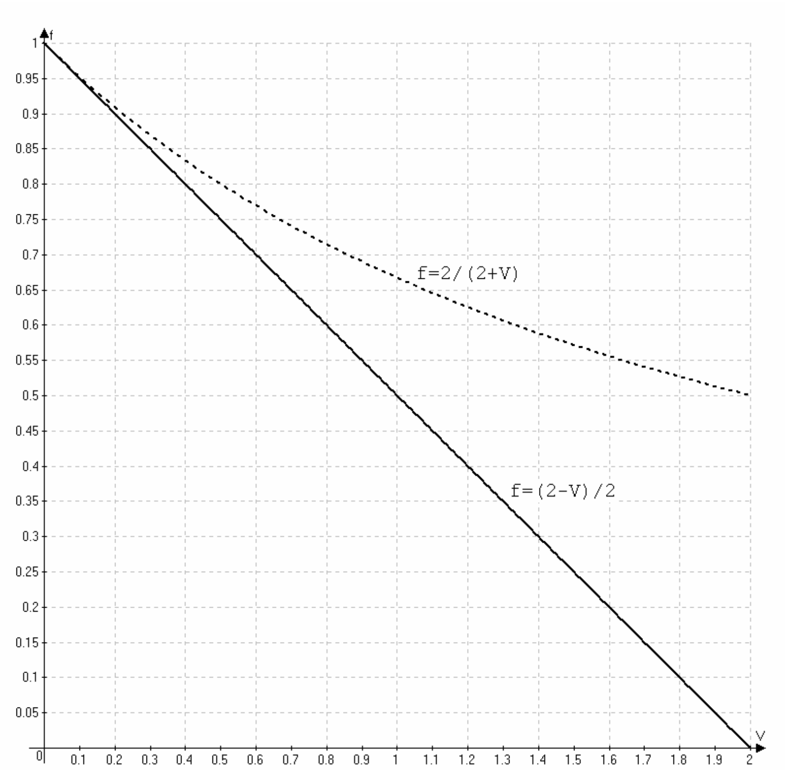
в случае движения излучателя от приемника, приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_{ЗВ} \cdot \dfrac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}$.

в случае движения приемника от излучателя, приемник будет фиксировать частоту $f_2 = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_П}{\upsilon_{ЗВ}}$.

Как видим, принцип относительности движения здесь не работает. Почему?

Потому, что мы судим о движении по данным от приемника, а эти данные зависят от состояния среды.

Если приемником являются наши глаза, а средой - светоносный эфир, то мы можем видеть не то, что происходит на самом деле.

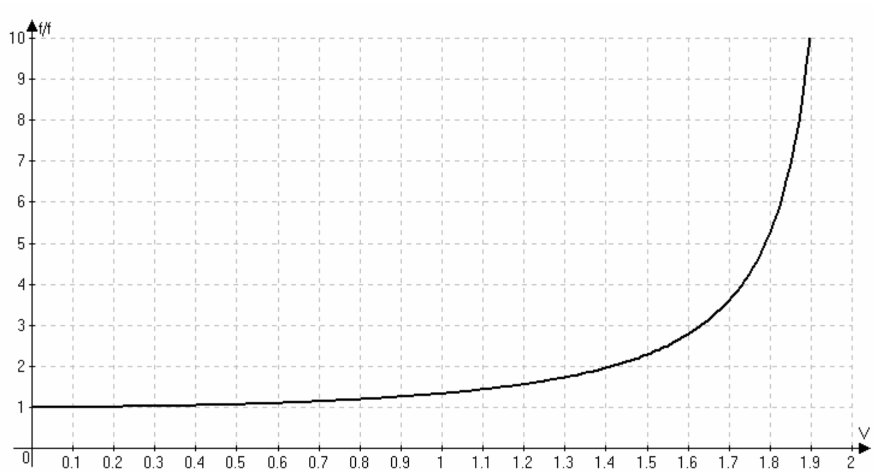


Отношение этих частот при $\upsilon_{ЗВ} = \upsilon_0$:

При приближении $\dfrac{f_1}{f_2} = \dfrac{\upsilon_0^{\;2}}{(\upsilon_0 - \upsilon_И)\cdot(\upsilon_0 + \upsilon_П)}$

При удалении $\dfrac{f_1}{f_2} = \dfrac{\upsilon_0^{\;2}}{(\upsilon_0 + \upsilon_И)\cdot(\upsilon_0 - \upsilon_П)}$

При $\upsilon_И = \upsilon_П = \upsilon$ имеем $\dfrac{f_1}{f_2} = \dfrac{\upsilon_0^{\;2}}{\upsilon_0^{\;2} - \upsilon^2}$ не зависимо от направления движения.



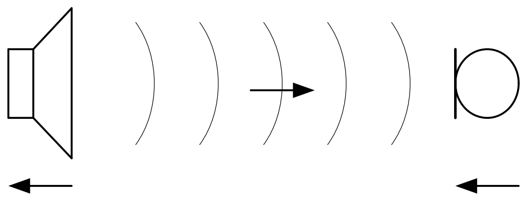
Не зависимо от того, приближается ли источник к приемнику или удаляется (либо приближается ли приемник к источнику или удаляется), различие регистрируемых частот при движении источника и при движении приемника будет тем больше, чем ближе скорость этого движения к скорости волн в среде.

III. Излучатель и приемник движутся в одну сторону одновременно.

Это означает, что относительно среды $\upsilon_И = \upsilon_П = \upsilon$, а относительно друг друга движения нет.

Обозначим $\upsilon_{ЗВ} = \upsilon_0$

Движение навстречу звуковым волнам:

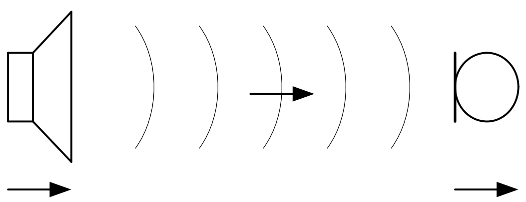


Для источника имеем $\lambda_И = \lambda_0 \cdot \left(\frac{\upsilon_0 + \upsilon_И}{\upsilon_0} \right)$ или $\lambda_И = \frac{\lambda_0}{\upsilon_0} \cdot (\upsilon_0 + \upsilon_И) = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_И}{f_0}$.

Для приемника при неподвижном источнике мы нашли $T_П = \frac{\lambda}{\upsilon} = \frac{\lambda}{\upsilon_0 + \upsilon_П}$.

Тогда $f_П = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_П}{\lambda_И}$. Подставляя длину волны движущегося источника, получим $f_П = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 + \upsilon_П}{\upsilon_0 + \upsilon_И}$. Но так как $\upsilon_И = \upsilon_П$, то $f_П = f_0$.

Если излучатель и приемник движутся в сторону звуковых волн



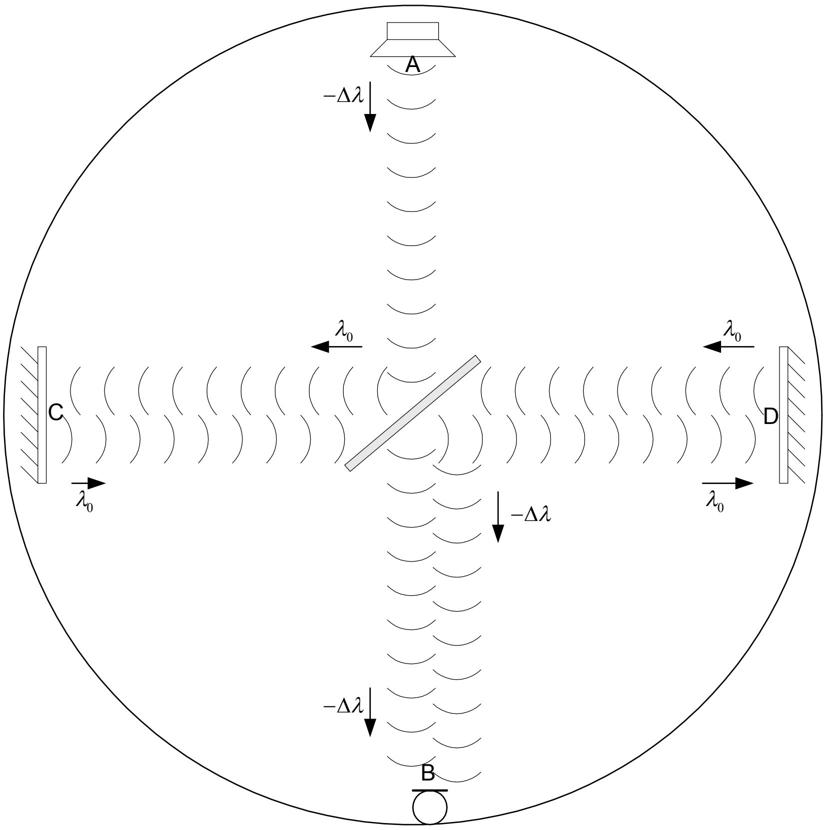
то $\lambda_И = \frac{\upsilon_0 - \upsilon_И}{f_0}$; $f_П = \frac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\lambda_И}$ и подставляя $\lambda_И$, получим $f_П = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\upsilon_0 - \upsilon_И} = f_0$.

Вывод 3.

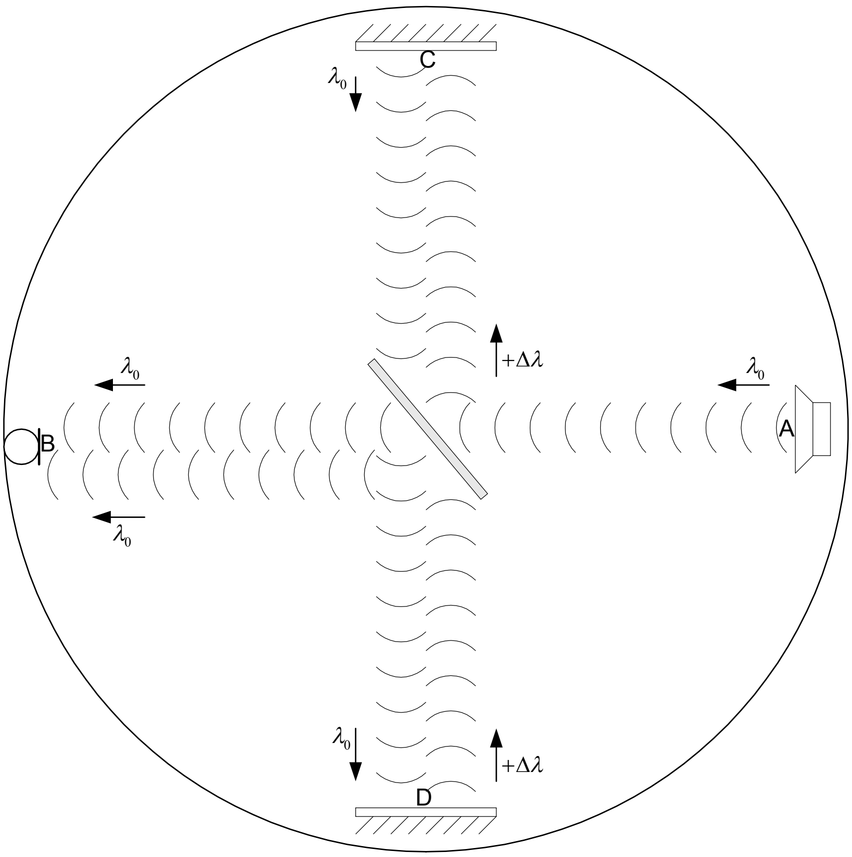
Таким образом приемник регистрирует действительную частоту источника. Очевидно, что этот же вывод мы получим при движении среды относительно пары источник-приемник, т.е. при рассмотрении действия ветра. Этот факт говорит о том, что **как движение пары источник-приемник относительно среды, так и движение среды относительно пары источник-приемник ни как не сказывается на показаниях частотного детектора**. Иначе говоря, мы ни как не сможем определить относительное движение среда-(источник-приемник).

Учитывая этот вывод разберем интерферометр Майкельсона-Морли.

Часть волны проходит от источника к приемнику (A-B) через полупрозрачное зеркало. При линейном движении всей системы вдоль пути A-B происходит изменение длины волны $\Delta\lambda$ сразу же за излучателем. Эта измененная волна отражаясь от зеркала H1 изменит свою длину на первоначальную λ_0. Так что зеркало C отразит до зеркала D волну с длиной волны λ_0. Далее дойдя до зеркала H2 волна λ_0 отразится от зеркала измененной на $\Delta\lambda$ и, таким образом, на приемнике возникает интерференция двух одинаковых волн длиной $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$, но одна из них придет на приемник с запаздыванием φ. Интерференция эта будет постоянной, т.е. не зависит от движения всей системы вдоль пути $A \to B$.



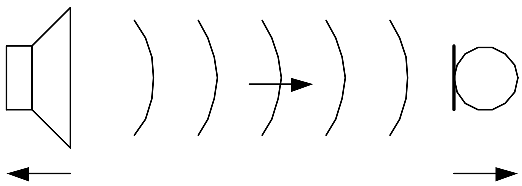
Если повернуть систему так, что движение будет по пути $C \to D$:



Как видно, в обоих случаях на приемник постоянно будут приходить одинаковые волны вне зависимости от скорости.

IV. Источник и приемник движутся в разные стороны одновременно.

Источник и приемник разбегаются

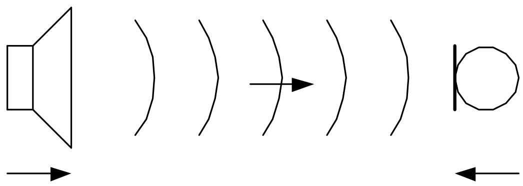


Источник формирует в среде волну $\lambda_И = \lambda_0 \cdot \left(\dfrac{\upsilon_0 + \upsilon_И}{\upsilon_0} \right)$

Приемник регистрирует: $T_П = \dfrac{\lambda}{\upsilon} = \dfrac{\lambda}{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_П}$ или $f_П = \dfrac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\lambda_И}$;

Подставляем $\lambda_И$ $f_П = \dfrac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\lambda_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 + \upsilon_И}{\upsilon_0}} = \dfrac{\upsilon_0}{\lambda_0} \cdot \dfrac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\upsilon_0 + \upsilon_И} = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\upsilon_0 + \upsilon_И}$

Источник и приемник сближаются:



Приемник регистрирует: $f_П = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 + \upsilon_П}{\upsilon_0 - \upsilon_И}$

В общем виде $f = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 \mp \upsilon}{\upsilon_0 \pm \upsilon}$

Относительное изменение частоты $\Delta f = f_0 - f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 \mp \upsilon}{\upsilon_0 \pm \upsilon} = f_0 \cdot \dfrac{\pm 2 \cdot \upsilon}{\upsilon_0 \pm \upsilon}$

1. $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \dfrac{2 \cdot \upsilon}{\upsilon + \upsilon_0}$

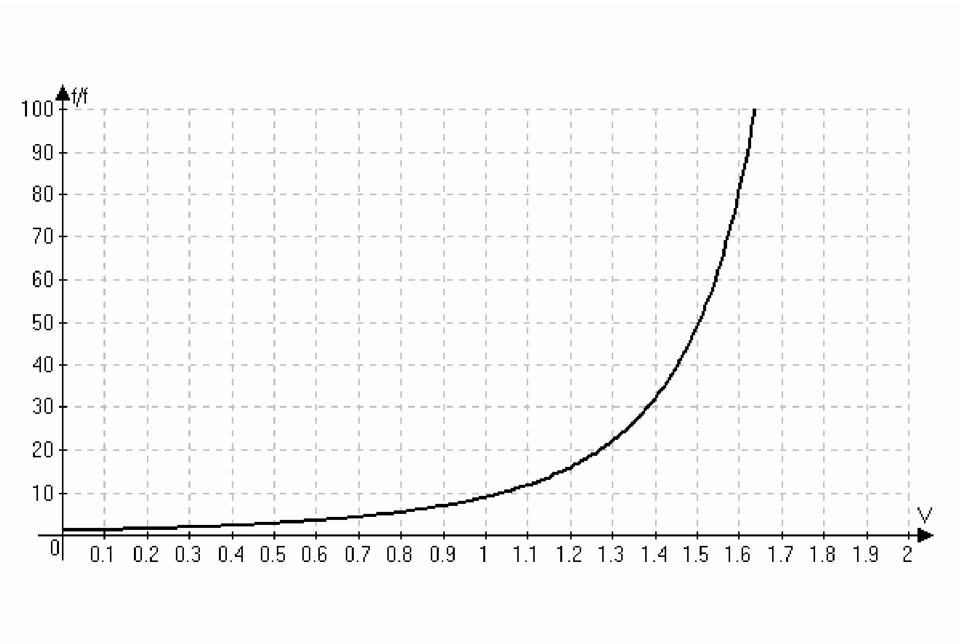
2. $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \dfrac{-2 \cdot \upsilon}{\upsilon_0 - \upsilon} = \dfrac{2 \cdot \upsilon}{\upsilon - \upsilon_0}$

В итоге $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \dfrac{2 \cdot \upsilon}{\upsilon \pm \upsilon_0}$

Отношение частот при разбегании и сближении:

$$\frac{f_{ПС}}{f_{ПР}} = \frac{\upsilon_0^{\,2} + \upsilon_0 \cdot (\upsilon_И + \upsilon_П) + \upsilon_И \cdot \upsilon_П}{\upsilon_0^{\,2} - \upsilon_0 \cdot (\upsilon_И + \upsilon_П) + \upsilon_И \cdot \upsilon_П}$$

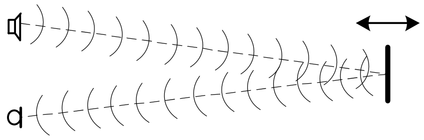
При одинаковых скоростях $\upsilon_И = \upsilon_П = \upsilon$ имеем $\dfrac{f_{ПС}}{f_{ПР}} = \dfrac{\upsilon_0^{\,2} + \upsilon_0 \cdot 2 \cdot \upsilon + \upsilon^2}{\upsilon_0^{\,2} - \upsilon_0 \cdot 2 \cdot \upsilon + \upsilon^2}$



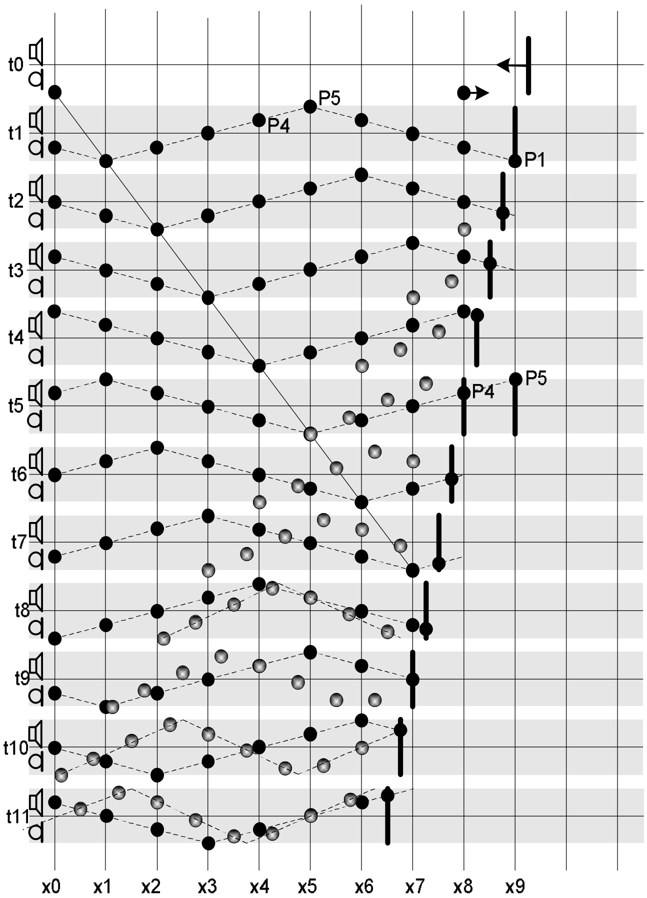
Вывод 4.

Зависимость отношения частот от скорости такая же, как в части 2. Но там движение источника и приемника происходит отдельно. Здесь же приемник и источник движутся одновременно. Видимо по этой причине результат в этом случае существенно увеличивается.

V. Теперь разберем случай с подвижным отражательным экраном при неподвижных излучателе и приемнике.



Как видно из рисунка, расположенного ниже, при движении отражателя справа налево происходит уменьшение отраженной длины волны, попадающей в приемник.



Движущийся отражатель встречается с приближающимися участками волны раньше потому, что относительная скорость, т.е. скорость волны относительно движущегося навстречу отражателя, больше, чем скорость волны относительно неподвижного источника $\upsilon_1 = \upsilon_0 + \upsilon$. Например участок волны P4 за интервал 4t встретится с отражателем не через 5X (как при неподвижном отражателе), а через 4X. Т.е. можно записать $4 \cdot t = \dfrac{4 \cdot X}{\upsilon_0 + \upsilon}$ или $t = \dfrac{X}{\upsilon_0 + \upsilon}$. Для длины волны $t = \dfrac{\lambda_0}{\upsilon_0 + \upsilon}$. Следовательно длина отраженной волны будет короче:

$$t = \frac{\lambda}{\upsilon_0} = \frac{\lambda_0}{\upsilon_0 + \upsilon} \quad \text{и} \quad \lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_0}{\upsilon_0 + \upsilon}.$$

Таким образом можно заключить, что движущийся отражатель меняет длину волны. А приемник фиксирует частоту этой измененной волны $f = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0}$.

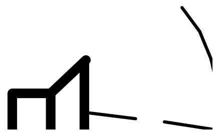
Теперь пусть отражатель движется в противоположную сторону.

При этом меняется знак в знаменателе $f = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0}$.

Общая формула для движущегося отражателя $f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 \pm \upsilon}{\upsilon_0}$.

Изменение частоты при движении отражателя в ту или другую сторону $\Delta f = \pm f_0 \cdot \frac{\upsilon}{\upsilon_0}$ или $\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{\upsilon}{\upsilon_0}$. Это и есть Доплеровский сдвиг частоты.

VI. Теперь разберем случай с неподвижным отражательным экраном при движении системы излучатель-приемник.



1. Источник и приемник приближаются к экрану.

Движущийся источник излучает волну с длиной $\lambda_0 - \Delta\lambda$ или, как показано в части 1, $\lambda = \frac{\upsilon_0 - \upsilon_И}{f_0}$. Эта волна отражается от неподвижного экрана без изменений и попадает на приближающийся приемник. При этом приемник фиксирует частоту $f = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_П}{\lambda}$. Подставляя сюда измененную длину волны λ от движущегося источника, получим $f_П = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0 - \upsilon}$.

2. Источник и приемник удаляются от экрана.

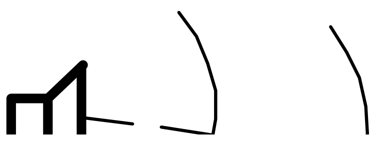
Движущийся источник излучает волну с длиной $\lambda_0 + \Delta\lambda$ или, как показано в части 1, $\lambda = \frac{\upsilon_0 + \upsilon_И}{f_0}$. Эта волна отражается от неподвижного экрана без изменений и попадает на удаляющийся приемник. При этом приемник фиксирует частоту $f = \frac{\upsilon_0 - \upsilon_П}{\lambda}$. Подставляя сюда измененную длину волны λ от движущегося источника, получим $f_П = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 - \upsilon}{\upsilon_0 + \upsilon}$.

Вывод 6.

При неподвижном экране результат такой же как если бы экрана не было вовсе. Принимаемая частота зависит от движения точно так же, как рассмотрено в части 4. Относительный частотный сдвиг $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{2 \cdot \upsilon}{\upsilon \pm \upsilon_0}$.

VII. Теперь рассмотрим изменения длины волны при движении среды относительно системы источник-экран-приемник.

Разберем случай с ветром: неподвижный отражательный экран, неподвижная система излучатель-приемник, но среда перемещается с постоянной скоростью υ.



Среда удаляется от источника с постоянной скоростью υ. Но и сама волна удаляется от источника с постоянной скоростью υ_0.

Таким образом общая скорость движения волны $\upsilon_{ЗВ} = \upsilon_0 + \upsilon$. Тогда длина волны $\lambda = T \cdot \upsilon_{ЗВ} = T \cdot (\upsilon_0 + \upsilon)$. Т.е. длина волны увеличена на $\Delta\lambda$.

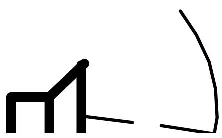
Эта волна отражается от неподвижного экрана без изменений, но распространяется против движения среды. Теперь скорость распространения волны $\upsilon_{ЗВ} = \upsilon_0 - \upsilon$. При этом длина волны уменьшается на $\Delta\lambda$ и в итоге $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda - \Delta\lambda = \lambda_0$. Далее эта волна регистрируется приемником

который выдает частоту $f_П = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0}$, как показано в части 2.

Те же рассуждения можно привести в случае движения среды от экрана к системе источник-приемник. В итоге будем иметь общую формулу $f_П = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 \pm \upsilon}{\upsilon_0}$.

Формула такая же, как в предыдущем примере с движущимся отражателем. Значит в неподвижной системе ветер может нам дать эффект Доплера.

Относительно среды со скоростью υ движется и отражатель и система источник-приемник.



Пусть отражатель и система источник-приемник движутся в направлении распространения волны.

1.

Движущийся источник излучает длину волны $\lambda_0 - \Delta\lambda$.

2.

Движущийся экран отражает длину волны $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda - \Delta\lambda = \lambda_0$

3.

Движущийся приемник регистрирует частоту $f_П = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0}$, как показано в части 2.

В общем случае $f_П = f_0 \cdot \dfrac{\upsilon_0 \pm \upsilon}{\upsilon_0}$. Относительное изменение частоты $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \pm \dfrac{\upsilon}{\upsilon_0}$.

Вывод 7.

В рассмотренном явлении невозможно определить что движется: среда или оптическая установка.

Вывод 1:

И так мы выяснили, что движущийся источник изменяет длину волны, а не частоту. Если скорость звука считать неизменной, то с изменением длины волны меняется частота. Но приемник устроен так, что не может фиксировать изменение длины волны, по этому приемник будет фиксировать изменение частоты. Более того, показания приемника будут зависеть от того, удаляется от него источник или приближается. При приближении источника к приемнику, приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}$.

При удалении источника от приемника, приемник будет фиксировать частоту $f_1 = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ}}{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}$, а длина волны будет увеличена: $\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}}$

Вывод 2:

В случае движения источника изменяется длина волны, тогда как в случае движения приемника изменяется частота при неизменной длине волны:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} - \upsilon_И}{\upsilon_{ЗВ}} \qquad \text{движется источник}$$

$$f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_{ЗВ} + \upsilon_П}{\upsilon_{ЗВ}} \qquad \text{движется приемник}$$

Это весьма важное наблюдение, позволяющее избежать ошибок при интерпретации экспериментальных данных. Оказывается, для того, чтобы фиксировать частоту источника, необходимо точно знать, что источник не движется относительно приемника и что приемник не движется относительно источника.

Например, если мы регистрируем частоту упругих волны от какого-либо источника, то периодичность этих волн может не соответствовать периодичности источника.

Отметим также, что в том и в другом случае приемник будет фиксировать увеличение частоты, но увеличение не одинаковое.

Вывод 3

Вывод 4.

Если пара источник-приемник движутся в одну сторону, то приемник регистрирует действительную частоту источника. Очевидно, что этот же вывод мы получим при движении среды относительно пары источник-приемник, т.е. при рассмотрении действия ветра. Этот факт говорит о том, что как движение пары источник-приемник относительно среды, так и движение среды относительно пары источник-приемник ни как не сказывается на показаниях частотного детектора.

Этот вывод важен для интерферометра Майкельсона-Морли.

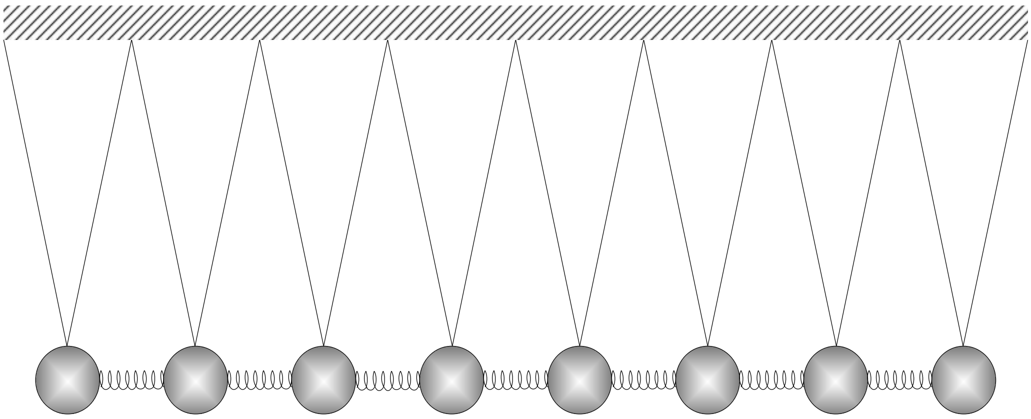
Вывод 5

Движущийся отражатель меняет длину волны. А приемник фиксирует измененную частоту $f = f_0 \cdot \frac{\upsilon_0 + \upsilon}{\upsilon_0}$. Изменение частоты при движении отражателя в ту или другую сторону $\Delta f = \pm f_0 \cdot \frac{\upsilon}{\upsilon_0}$ или $\frac{\Delta f}{f_0} = \pm \frac{\upsilon}{\upsilon_0}$. Это и есть Доплеровский сдвиг частоты.

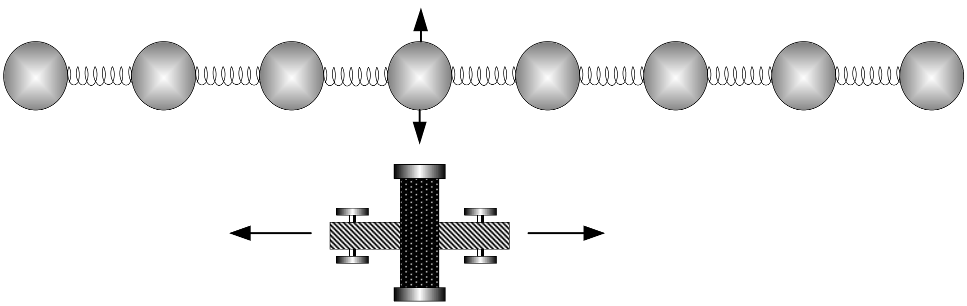
Самый важный вывод: **Частота есть информация не о механизмах явления, а информация о взаимодействии среды с датчиком. А рас так, то этот результат зависит не только от состояния среды относительно датчика, но и от состояния датчика относительно среды.**

Теперь рассмотрим эффект Доплера для поперечных колебаний.

Для этого заменим упругую среду (воздух) на линейную цепочку стальных шаров, связанных пружинами. Шары подвешены так, что их колебания возможны только поперек.



Излучателем в нашем эксперименте будет служить электромагнит, установленный на подвижной платформе. Вид сверху:



Чернышев А.А.