Оптика движущихся сред
Тема 13 лекция 26

Скорость света и ее измерения . Астрономические методы измерения скорости света. Метод Ремера. Метод аберрации света. Метод прерываний. Метод вращающегося зеркала.

Преобразование координат и времени в теории относительности. Опыты Физо и Майкельсона. Сложение скоростей. Продольный и поперечный эффекты Доплера. Эффект Саньяка. Оптические измерения в неинерциальных системах.

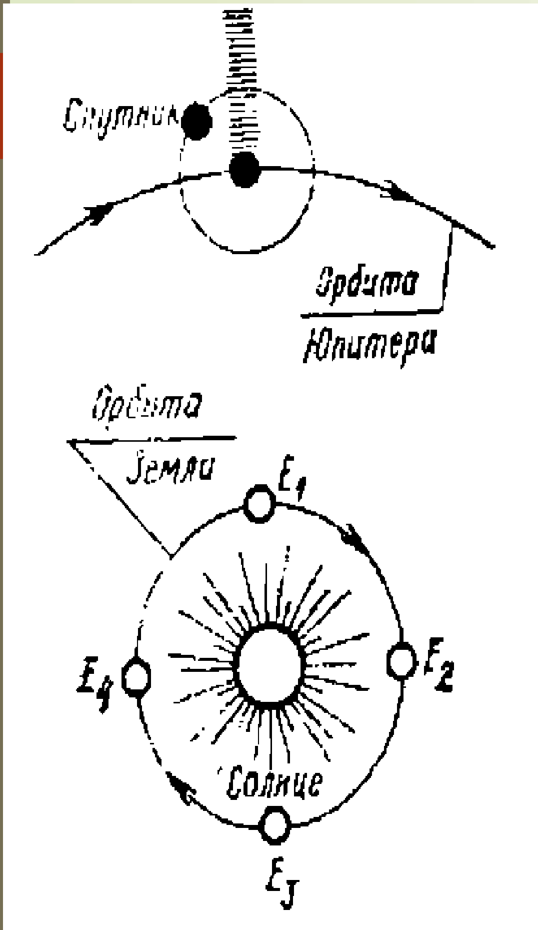


Рис. 13.1.1 Определение скорости света методом Ремера

Определения скорости света по методу Ремера

В качестве периодического процесса использовал затмения одного из спутников Юпитера. Ремер проводил наблюдения за спутником Ио, период обращения 42ч 27мин 33с. При движении Земли по участку орбиты $E_1E_2E_3$ (рис.13.1.1) она удаляется от Юпитера и должно наблюдаться увеличение периода. Наоборот, при движении Земли по участку орбиты $E_3E_4E_1$ наблюдаемый период будет меньше истинного.

Если наблюдать затмения в течение полугода, начиная с момента противостояния Земли (точка E_1 на орбите), то промежуток времени между первым и последним затмениями будет на 1320 с больше вычисленного теоретически.

Величина запаздывания, определенная Ремером, составляла 22 мин. Принимая диаметр орбиты Земли равным $3 \cdot 10^8$ км, можно получить для скорости света величину 226 000 км/с

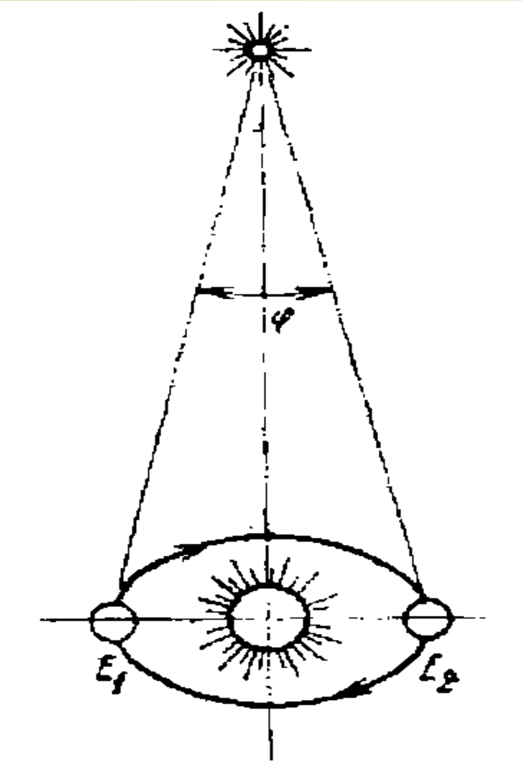


Рис. 13.1.2 Параллактический угол звезды

В 1725-1728 гг. Брадлей произвел измерения годичного параллакса неподвижных звезд. Она описала небольшую окружность, угловые размеры которой были равны 40,9 ´´. В общем случае в результате движения Земли по орбите звезда описывает эллипс.

Величина смещения, измеренная Брадлеем, оказалась значительно больше ожидаемого параллактического смещения. Брадлей объяснил это явление, названное им аберрацией света, конечностью скорости света.

Из рис. 13.1.3 следует, что

$$a = \upsilon\tau$$

$$tg\alpha = a/b = \upsilon\tau/c\tau = \upsilon/c$$

Из измерений Брадлея известно, что при двух положениях Земли, лежащих на одном диаметре орбиты, звезда кажется смещенной от истинного положения на один и тот же угол α. Угол между этими направлениями наблюдения 2^{α}= 40,9 ´´, откуда, зная скорость v Земли Брадлей нашел, что скорость света c=306 000 км/с.

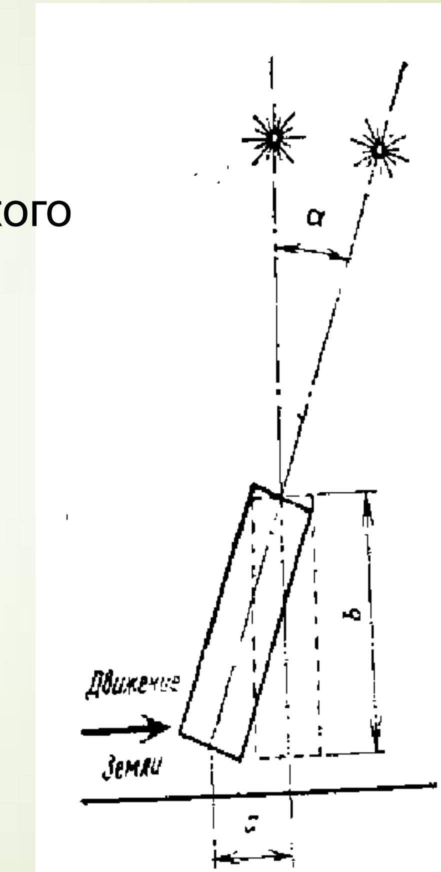


Рис. 13.1.3 К объяснению аберрации света

на рис. 13.1.4, а. Свет от источника *S*. Частично отражается от полупрозрачной пластинки *P* и идет к зеркалу *M.* На пути луча расположен прерыватель света – быстро вращающееся зубчатое колесо К, ось которого *OO*´ парал-лельна лучу. Лучи света проходят через промежутки между зубьями, отражаются зеркалом *M* и направляются обратно через зубчатое колесо и пластинку *P* к наблюдателю.

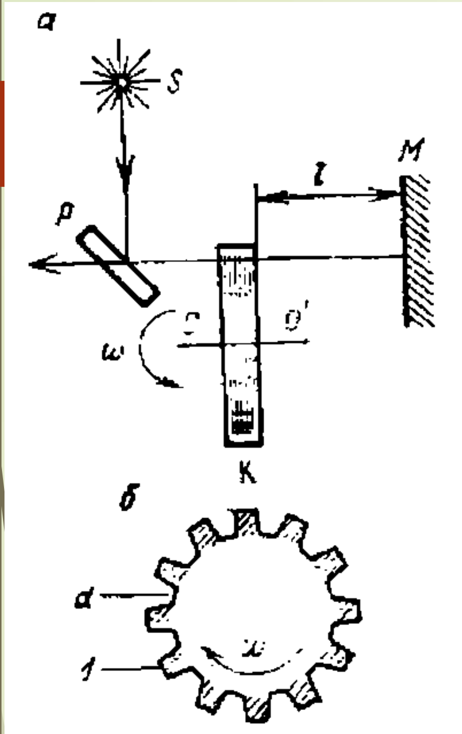


Рис. 13.1.4

При медленном вращении колеса К свет, пройдя через промежуток между зубьями, например *d* на рис.13.1.4, б, успевает возвратиться через этот же промежуток и попадает в глаз наблюдателя. Если увеличить скорость вращения колеса, то свет, прошедший через промежуток *d* между зубьями, дойдя до зеркала *M* и вернувшись обратно, не попадает в тот самый промежуток, а будет перекрыт зубцом *1.* Время поворота колеса на ползубца :

$$t_1 = \left(\frac{1}{2n}\right)\left(\frac{2\pi}{\omega_1}\right)$$

Время прохождения светом расстояния от колеса до зеркала *M* и обратно:

$$t = \frac{2l}{c}$$

Следовательно:

$$c = \frac{2l \cdot 2n \cdot \omega_1}{2\pi} = 4ln\nu$$

Вычисленное Физо значение скорости света *c*=313 300 км/с

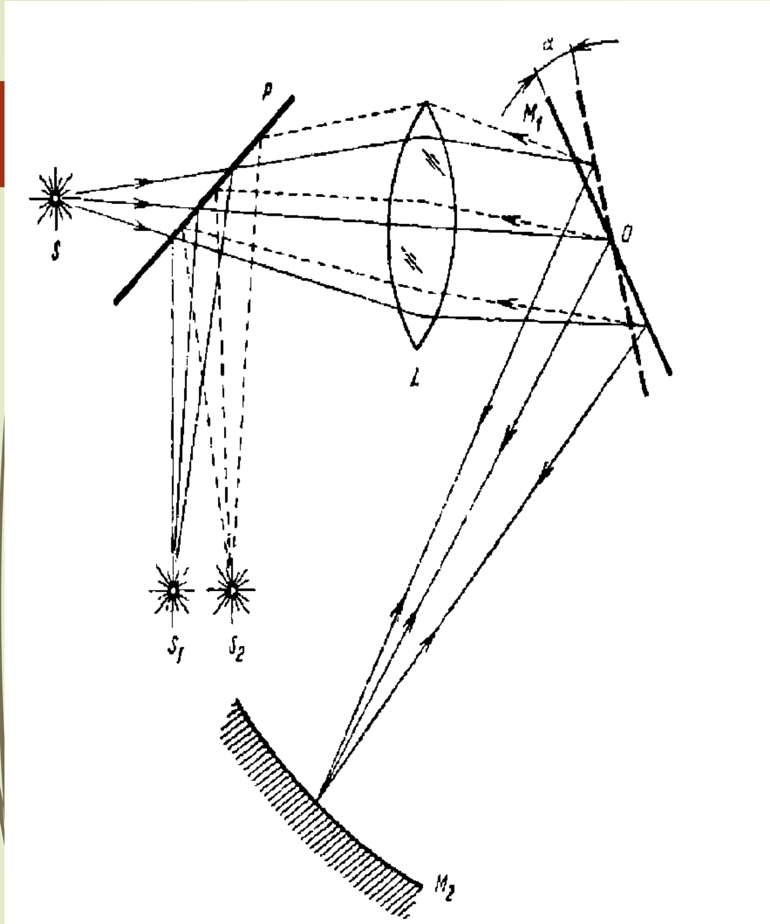


рис.13.1.5Схема установки Фуко

Свет от источника S проходит через полупрозрачную пластинку P, линзу L и падает на плоское зеркало M_1, которое может вращаться вокруг оси O, перпендикулярной к плоскости чертежа. После отражения от зеркала M_1 луч света направляется на неподвижное вогнутое зеркало M_2, расположенное так, чтобы этот луч всегда падал перпендикулярно к его поверхности и отражался по тому же пути на зеркало M_1. Если зеркало M_1 неподвижно, то отраженный от него луч возвратится по своему первоначальному пути к пластинке P, частично отражаясь от которой он даст изображение источника S в точке S_1

В опытах Фуко скорость вращения зеркала достигла 800 об/с, база L изменялась от 4 до 20 м. Измерив расстояние S_1S_2 и зная геометрию установки, можно определить угол α и вычислить скорость света:

$$c = 2l\frac{\cdot\omega}{\alpha} = \frac{4\pi l\nu}{\alpha}$$

Получено значение c=298 000±500 км/с

Установка Майкельсона была выполнена между двумя горными вершинами Расстояние, проходимое лучом от S до S´ после отражений от первой грани восьмигранной зеркальной призмы, зеркал M_2—M_7 и пятой грани, составляло 35,4 км. Скорость вращения призмы (приблизительно 528 об/с) выбиралась такой, чтобы за время распространения света от первой грани до пятой призма успевала повернуться на 1/8 оборота. Возможное смещение зайчика при неточно подобранной скорости играло роль поправки. Скорость света, определенная с помощью описанной установки, *c*=299 796±4 км/с.

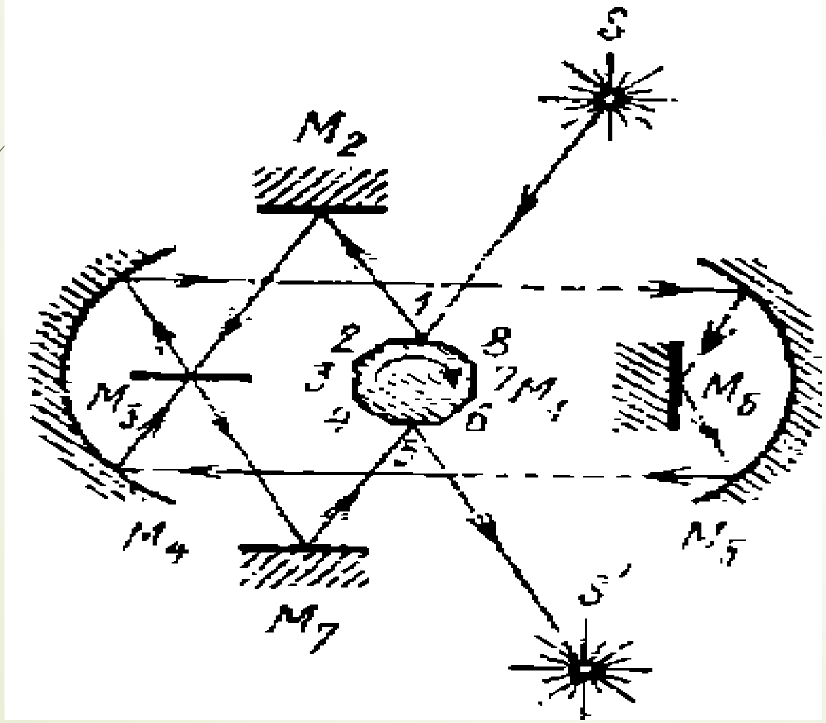


рис.13.1.6

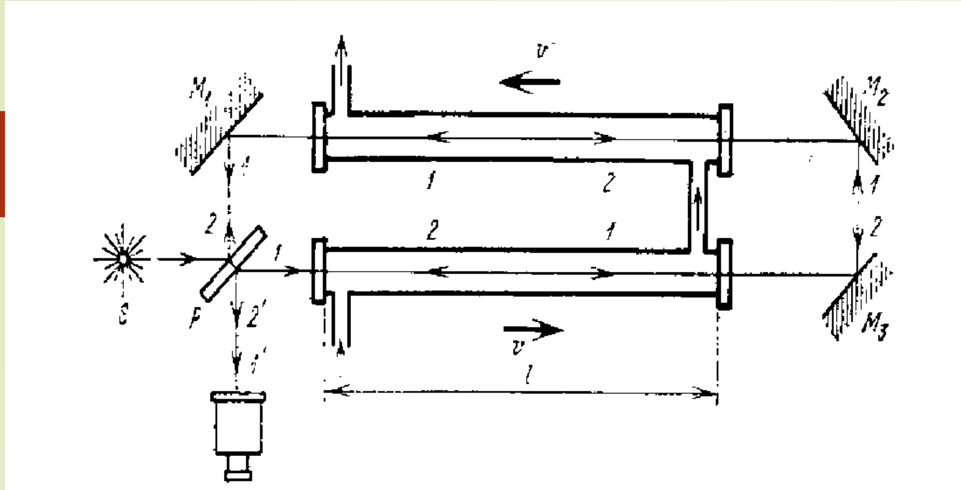
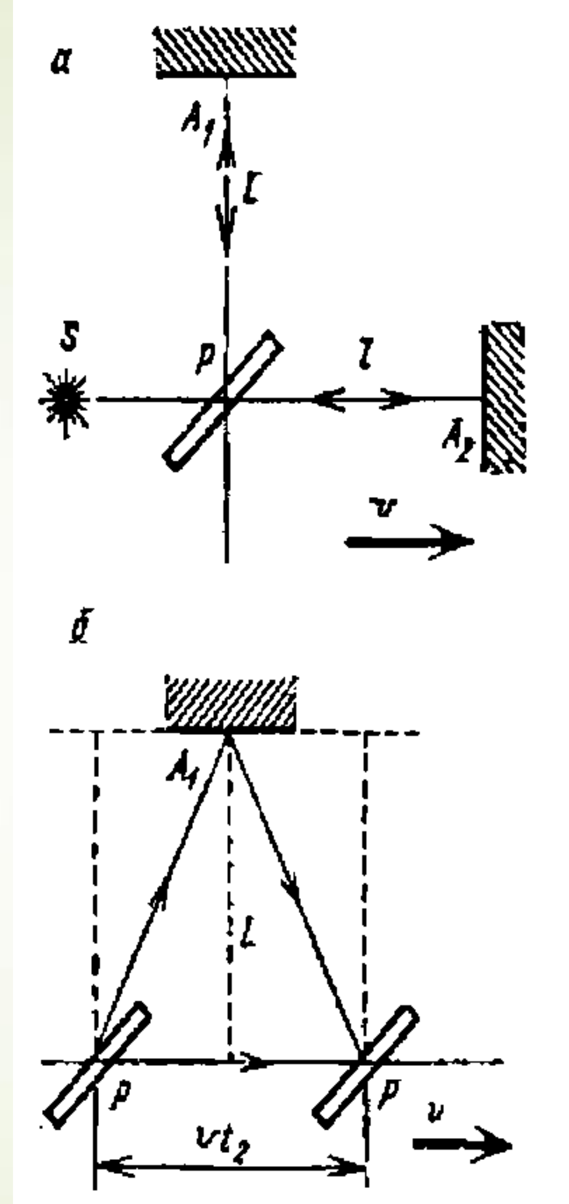


Рис. 13.1.7 Схема опыта Физо по определению увлечения эфира движущейся волной



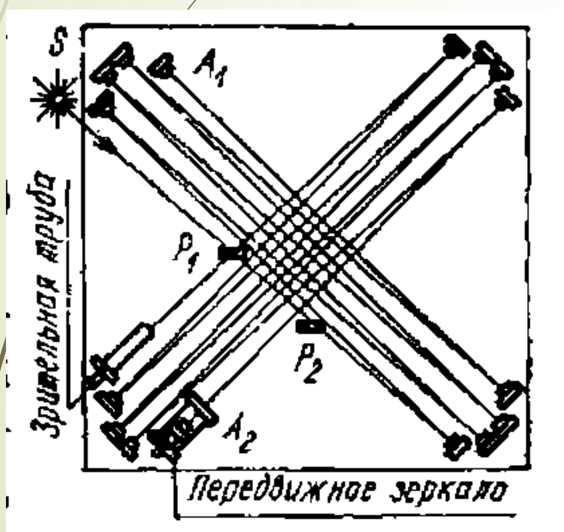


Рис. 13.1.9 Увеличение пути света в интерферометре Майкельсона

Рис.13.1.8 Опыт Майкельсона-Морли по определению абсолютного движения

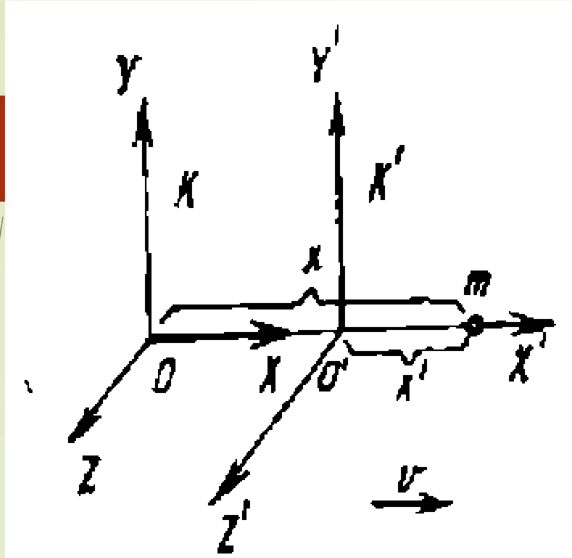


Рис. 13.1.10 Две инерциальные системы координат

Обозначим координаты движущейся точки в системе XYZ (рис.13.1.10) в некоторый момент времени t через x, y, z, а координаты этой же точки в системе X´Y´Z´ в тот же момент времени через x/,y/,z,. Тогда будут справедливы следующие соотношения:

$$\left.\begin{aligned} x^{/} &= x - vt; y^{/} = y; z^{/} = z; t^{/} = t; \\ x &= x^{/} + vt; y = y^{/}; z = z^{/}; t = t^{/}, \end{aligned}\right\}$$

преобразования Галилея

$$t_1 = \frac{l}{c-\upsilon} + \frac{l}{c+\upsilon} = \frac{2l}{c}\frac{1}{1-\upsilon^2/c^2} \approx \frac{2l}{c}\left(1+\beta^2\right)$$

$$\frac{t_2}{2}c = \sqrt{l^2 + \left[\left(t_2/2\right)\upsilon\right]^2}$$

$$t_2 = \frac{2l}{c\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}} \approx \frac{2l}{c}\left(1+\frac{\beta^2}{2}\right)$$

$$\Delta t = \frac{2l}{c}\left(1+\beta^2\right) - \frac{2l}{c}\left(1+\frac{\beta^2}{2}\right) = \frac{l}{c}\beta^2$$

$$\Delta = \frac{2l}{cT}\beta^2 = \frac{2l}{\lambda}\beta^2$$

$$u_x = u'_x + v; u_y = u'_y; u_z = u'_z$$

В общем случае преобразования Лоренца имеют вид

$$x' = F_1(x,y,z,t); y' = F_2(x,y,z,t); z' = F_3(x,y,z,t); t' = F_4(x,y,z,t);$$

F_i – некоторые функции, вид которых надо найти. Общий вид этих функций определяется свойствами пространства и времени.

Преобразования Лоренца от движущейся системы к неподвижной

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

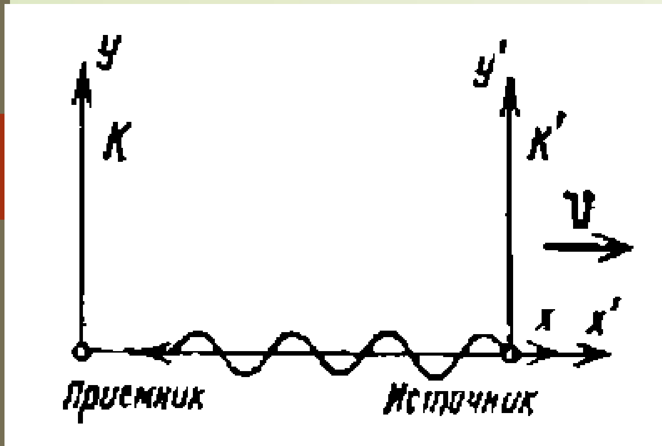
$$t' = \frac{t - \left(v/c^2\right)x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$x = \frac{x' - vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \left(v/c^2\right)x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$



Уравнение плоскости световой волны, испускаемой источником по направлению к приемнику, в системе *K*´ будет иметь вид

$$E\left(x', t'\right) = A' \cos\left[\omega'\left(t' + x'/c\right) + \alpha'\right] \qquad (13.1.1)$$

где ω´ - частота, регистрируемая в системе отсчета, связанной с источником, т.е. частота света, испускаемого источником; α´ - начальная фаза

Согласно принципу относительности в системе *K* волна описывается уравнением

$$E(x,t) = A\cos\left[\omega\left(t + x/c\right) + \alpha\right] \qquad (13.1.2)$$

$$E(x,t) = A'\cos\left[\omega' \frac{1 - \upsilon/c}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t + x/c\right) + \alpha'\right] \qquad (13.1.3)$$

Уравнения описывают в системе *K* одну и ту же волну, поэтому должно выполняться соотношение

$$\omega = \omega' \frac{1-\upsilon/c}{\sqrt{1-\beta^2}} = \omega'\sqrt{\left(1-\upsilon/c\right)\left(1+\upsilon/c\right)} \qquad (13.1.4)$$

$$\nu = \nu_0\sqrt{\left(1-\upsilon/c\right)\left(1+\upsilon/c\right)} \qquad (13.1.5)$$

Из сопоставления уравнений (31.13) и (31.14) следует, что *α=α*´ , т.е., положив в уравнении (31.12) *α* ´=0, нужно и в (31.13) считать, что *α=0*. Если с системой *K*´ связать приемник, а с системой *K* – источник, то получим такую же формулу, как и (31.15), которая характеризует *продольный эффект Доплера.*

При *v*<<*c* формулу (31.15) можно приближенно записать следующим образом:

$$\nu \approx \nu_0 \frac{1-{}^{v}\!/_{2c}}{1+{}^{v}\!/_{2c}} = \nu_0\left(1-{}^{v}\!/_{2c}\right)\left(1-{}^{v}\!/_{2c}\right)$$

ограничиваясь членами первого порядка относительно ${}^{v}\!/_{c}$

$$\nu = \nu_0\left(1-{}^{v}\!/_{c}\right)$$

относительное изменение частоты: $\dfrac{\nu-\nu_0}{\nu_0} = \dfrac{\Delta\nu}{\nu_0} = -\dfrac{v}{c}$

В случае, когда линия, соединяющая источник и приемник, составляет угол *φ* с направлением вектора скорости перемещения, то аналогичное рассмотрение дает следующее соотношение:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\left({}^{v}\!/_{c}\right)\cos\varphi}$$

$\varphi = 0$ переходит в формулу (31.15)

$\varphi = {}^{\pi}\!/_{2}$ имеет вид $\nu = \nu_0\sqrt{1-\beta^2}$

Таким образом, согласно теории относительности эффект Доплера должен иметь место и в том случае, когда направление распространения света перпендикулярно к направлению движения, т.е. для световых волн существует и *поперечный эффект Доплера* (например, источник движется по окружности, в центре которой находится приемник)