

# Волны

Волна: процесс распространения колебаний в пространстве

При распространении волны частицы совершают колебания около своих положений равновесия

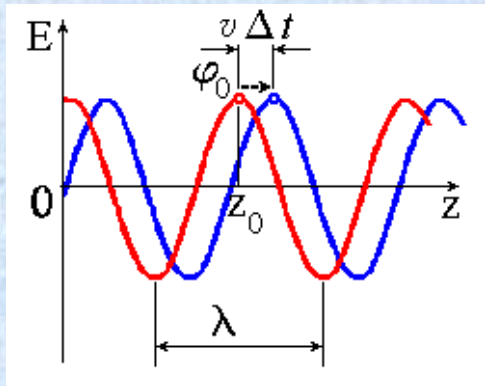
Периодичность временная: период  $T$  – минимальное время, через которое фаза колебаний повторяется в некоторой точке пространства.

Круговая частота  $\omega = \frac{2\pi}{T}$   $[\omega] = \text{рад/с (с}^{-1}\text{)}$

Периодичность пространственная: длина волны  $\lambda$  – минимальное расстояние, на котором фаза колебаний одинакова в один и тот же момент времени.

Волновое число  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$   $[k] = \text{рад/м (м}^{-1}\text{, см}^{-1}\text{)}$

# Монохроматическая волна



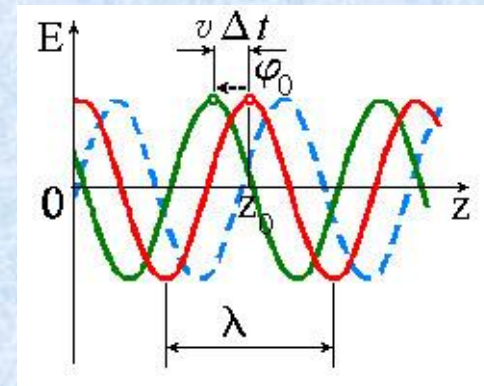
Волна распространяется в положительном направлении оси Z.

$$y(z, t) = A \cos \left[ \omega \left( t - \frac{z}{v} \right) \right]$$

За время, равное одному периоду, волна проходит расстояние, равное длине волны

$v$  — **фазовая** скорость волны,  $v = \lambda/T$

$$y(z, t) = A \cos \omega t - kz \quad v = \omega/k$$



Волна распространяется в отрицательном направлении оси Z.

$$y(z, t) = A \cos \omega t + kz$$

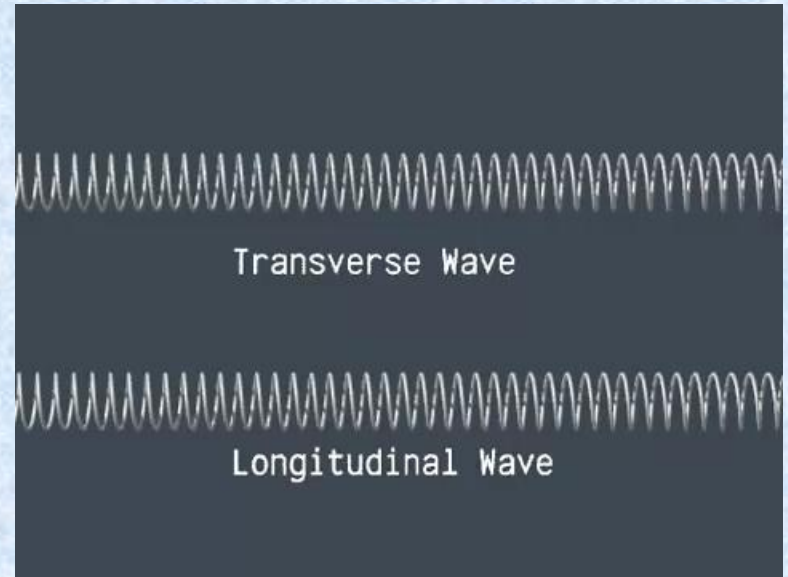
# Типы волн

## Поперечные

Смещение частиц перпендикулярно направлению распространения

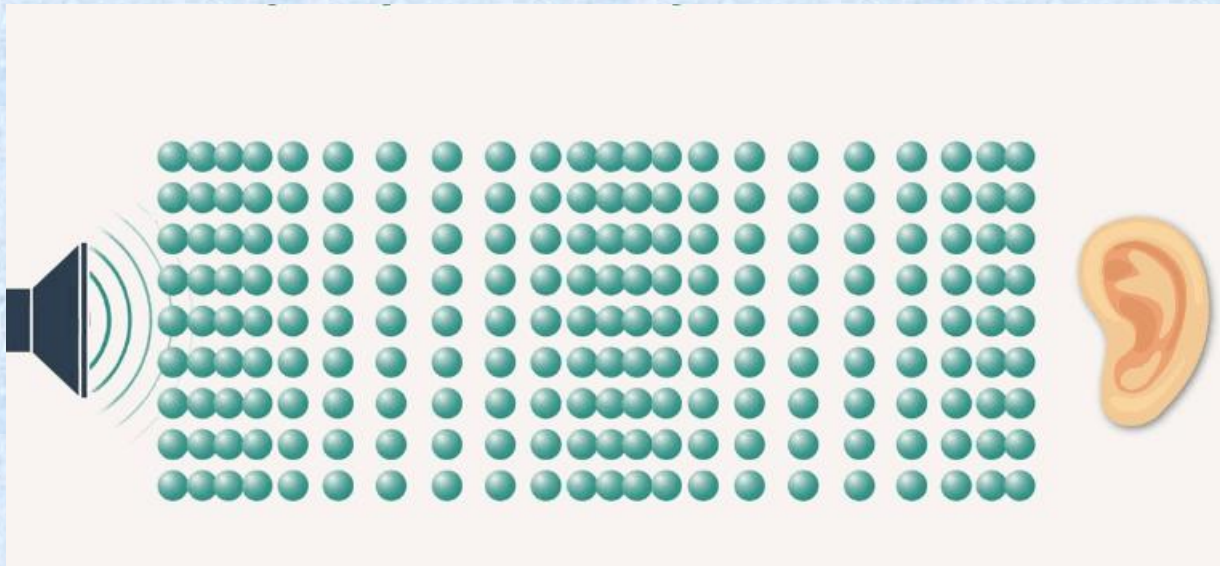
## Продольные

Смещение частиц происходит вдоль направления распространения



# Продольные волны

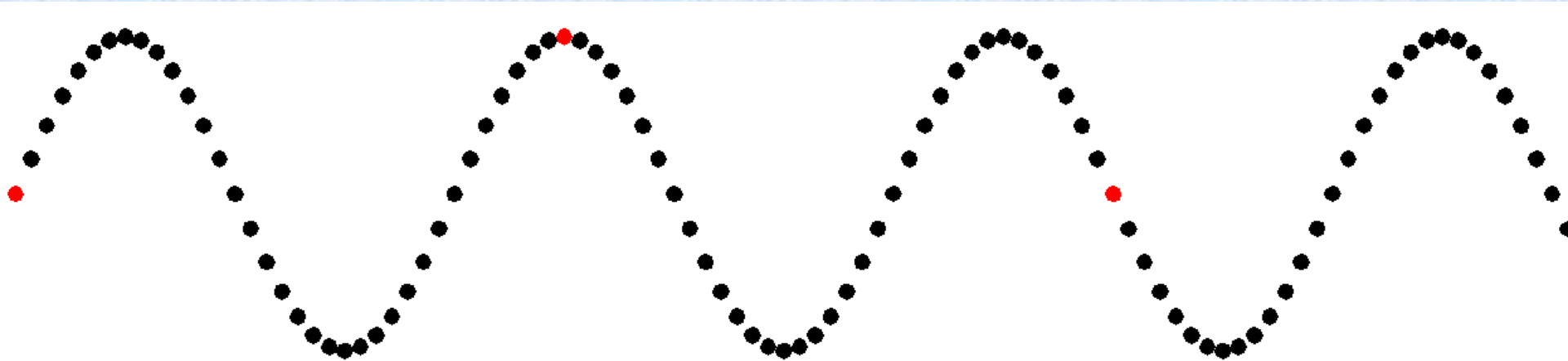
Могут распространяться в любых типах сред.





# Поперечные волны

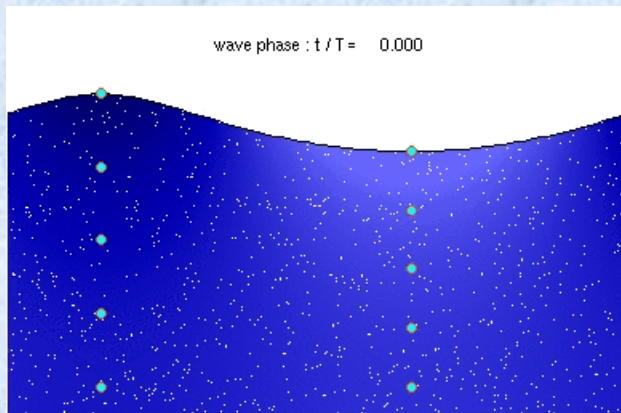
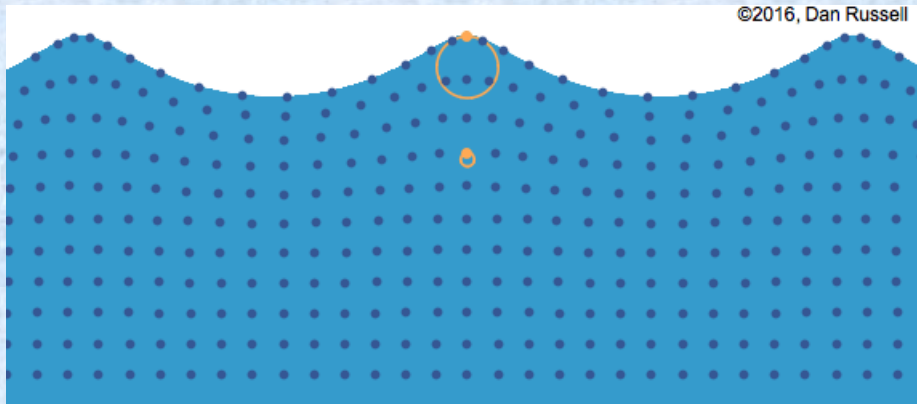
Механические поперечные волны могут распространяться только в средах, обладающих сопротивлением сдвигу (твердые тела).



© L.Perera

Электромагнитные волны поперечные и могут распространяться в любых средах и в вакууме

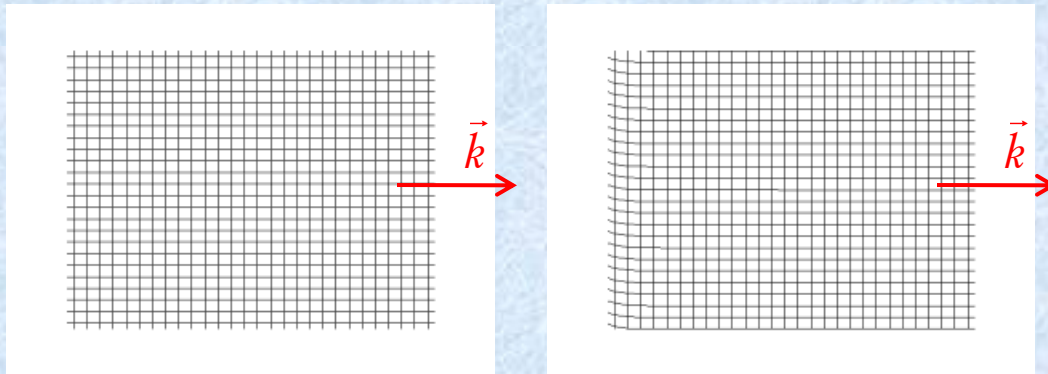
# Поверхностные волны



# Плоские волны

$$y(z, t) = A \cos \omega t - kz$$

Волновой фронт = поверхность постоянной фазы:  $z = \text{const}$



$$y(\vec{r}, t) = A \cos \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} \quad \vec{k} - \text{волновой вектор}$$

# Поляризация поперечных волн

$$\vec{y}(\vec{r}, t) = \vec{A} \cos \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$$

Поперечная волна характеризуется двумя направлениями: волновым вектором и перпендикулярным к нему вектором амплитуды.

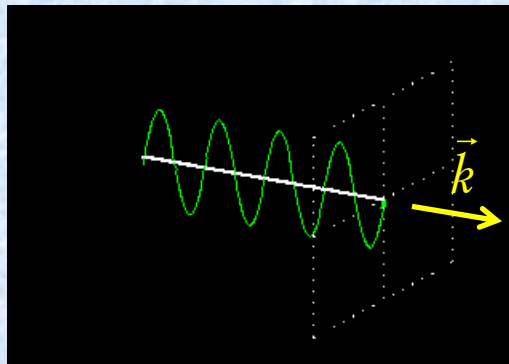
Волновой вектор показывает направление распространения волны, а вектор амплитуды показывает, в какую сторону происходят колебания.

**Поляризация** – характер движения вектора амплитуды относительно волнового вектора.

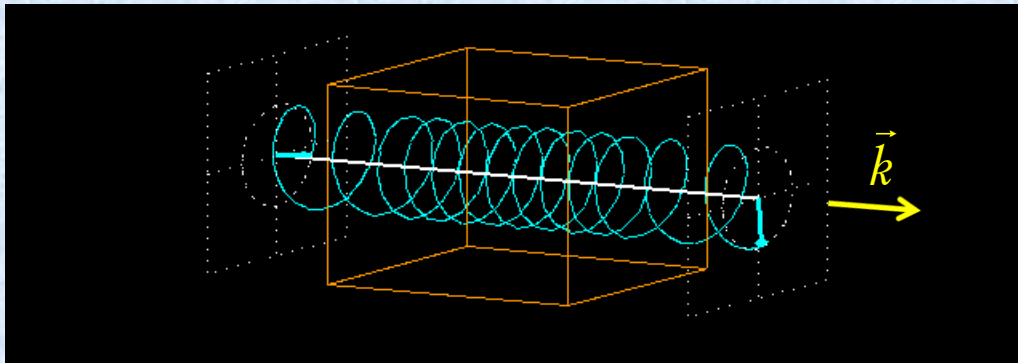


# Поляризация поперечных волн

$$\vec{y}(\vec{r}, t) = \vec{A} \cos \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$$



Линейная (плоская)  
поляризация

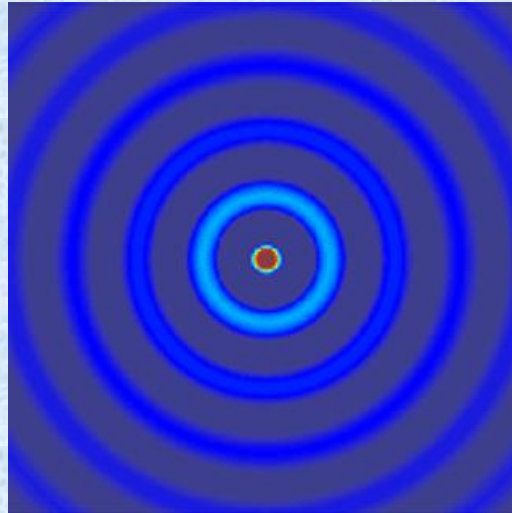
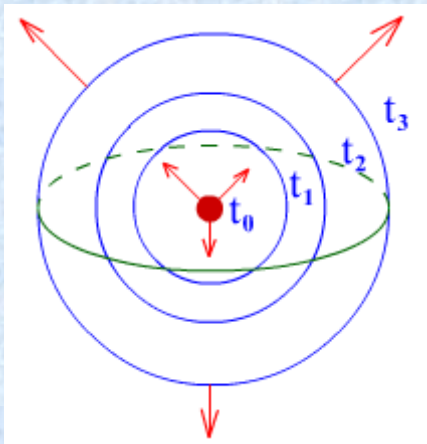


Круговая (циркулярная)  
поляризация

Эллиптическая  
поляризация

# Сферические волны

$$y(z, t) = \frac{A}{r} \cos \omega t - kr$$



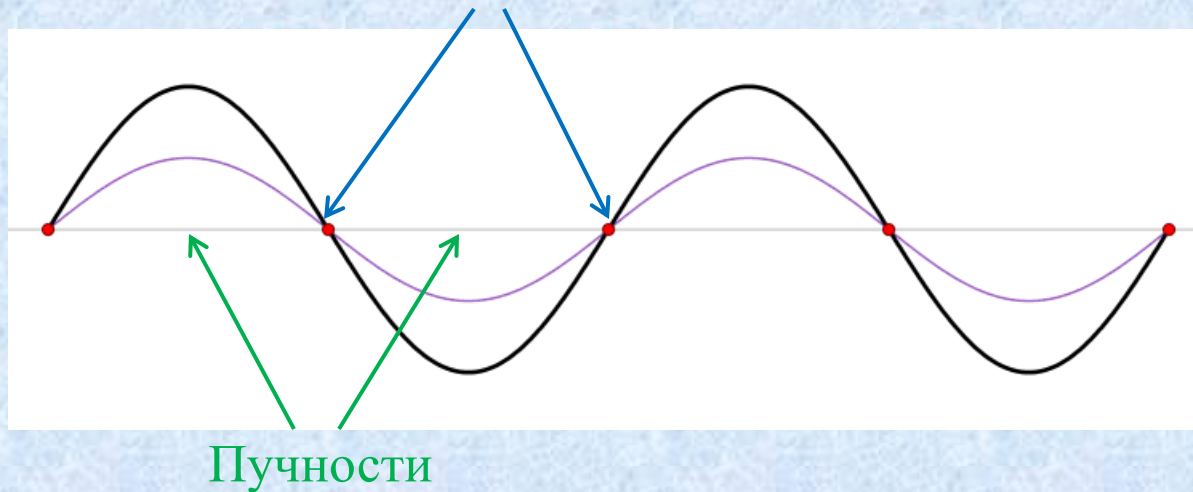
Вопрос: Почему волны от брошенного в воду кирпича круглые, а не прямоугольные?

# Стоячие волны

Стоячая волна образуется при наложении двух встречных волн с одинаковыми частотами и амплитудами

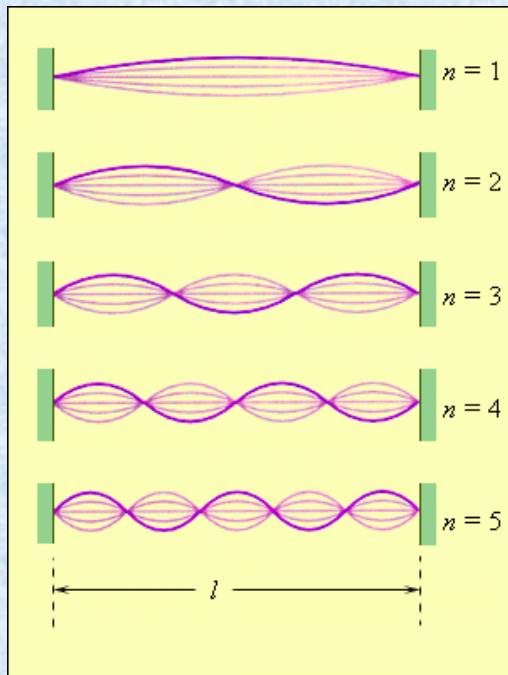
$$y_1(z, t) = A \cos \omega t - kz \quad y_2(z, t) = -A \cos \omega t + kz$$

$$y(z, t) = \overset{A(z)}{2A \sin kz} \sin \omega t$$



# Стоячие волны

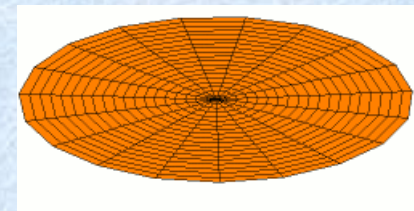
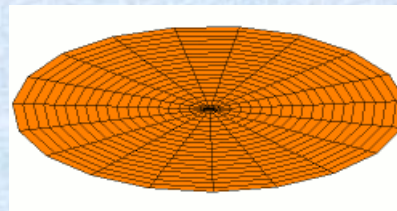
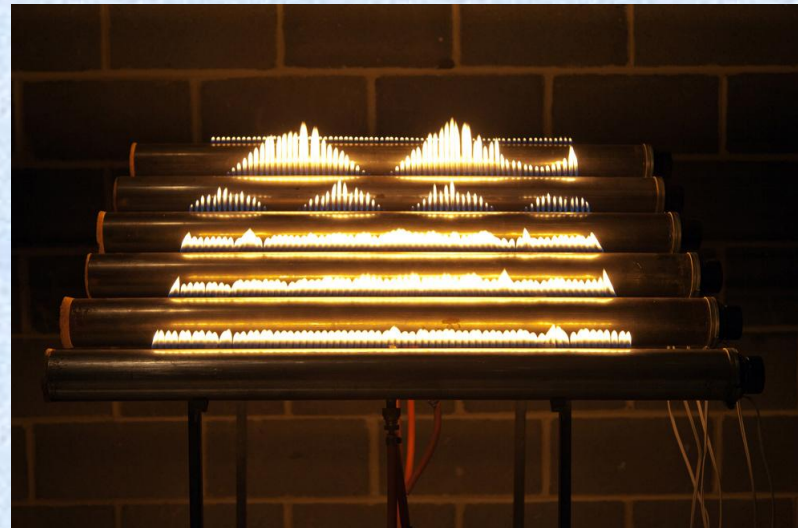
Стоячая волна в струне



$$y(0) = y(l) = 0$$

$$\lambda = \frac{2l}{n}$$

Труба Рубенса





# Дисперсия волн

Дисперсия: зависимость скорости волны от частоты (или длины волны)

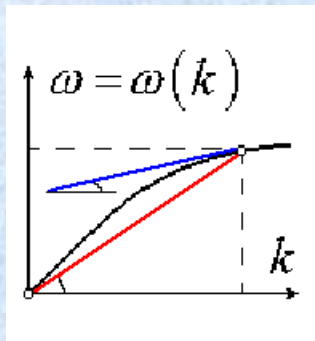
**Фазовая скорость  $v$**  – скорость перемещения волнового фронта, т.е. поверхности равной фазы.

**Групповая скорость  $U$**  – скорость импульса как целого.

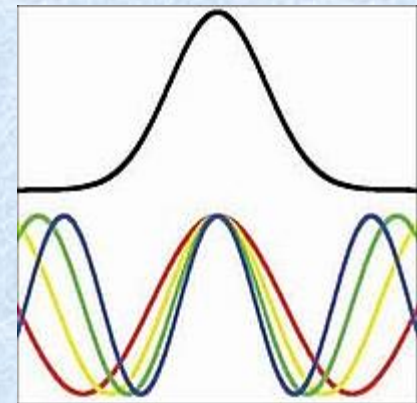
Закон дисперсии: зависимость  $\omega(k)$

$$v = \frac{\omega}{k}$$

$$U = \frac{d\omega}{dk}$$



Волновой пакет

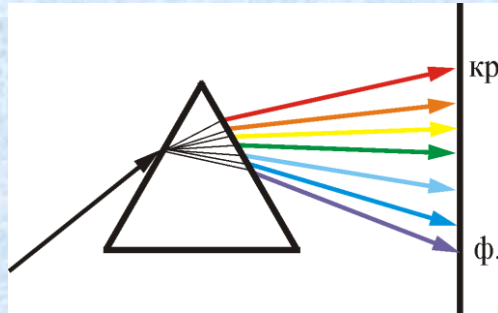


$$v = 2U$$

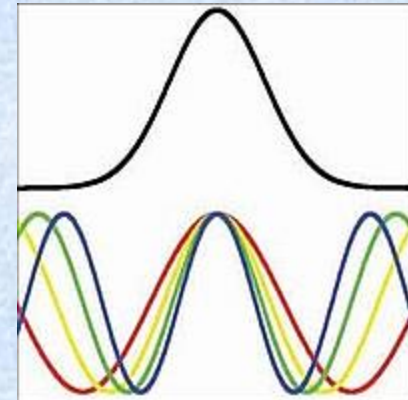
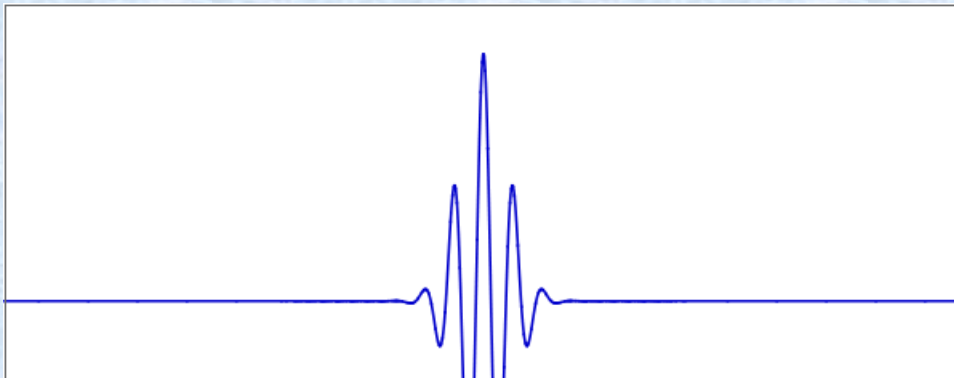


# Проявления дисперсии

Разложение света в спектр



Расплывание волнового пакета



Вопрос: Проявляется ли дисперсия при распространении звуковых волн в воздухе?

# Эффект Доплера

Изменение частоты и длины волны излучения, воспринимаемой наблюдателем при движении источника или наблюдателя

© 2011 Сергей Фил

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega_0} v \pm V$$

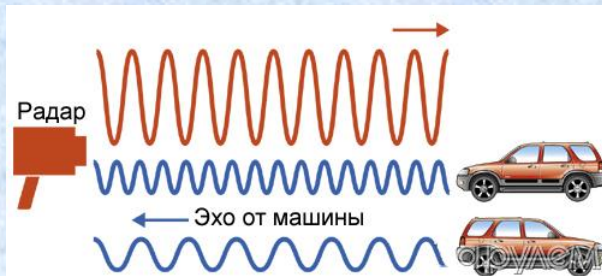
$v$  – скорость волны

$V$  – проекция скорости источника / приемника на направление наблюдения

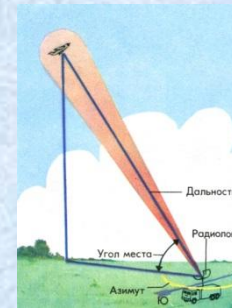
Для света:  $v = c$

$$\omega = \omega_0 \left( 1 \pm \frac{V}{c} \right)$$

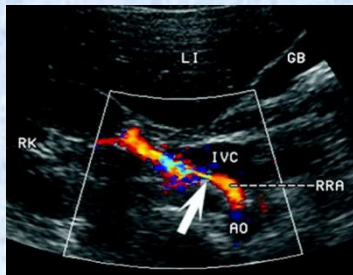
# Применение эффекта Доплера



ГАИ



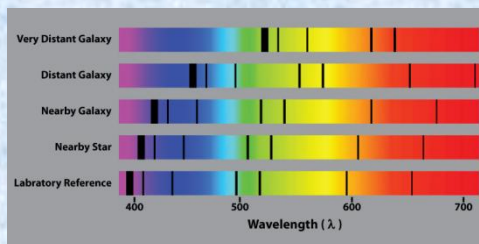
Радиолокация



Медицина



Метеорология



Астрономия  
Закон Хаббла  $v = HR$