

The background of the image is a spiral-bound notebook with a light beige, textured cover. The metal spiral binding is visible on the left side. The text is written in a bold, green, serif font with a slight drop shadow.

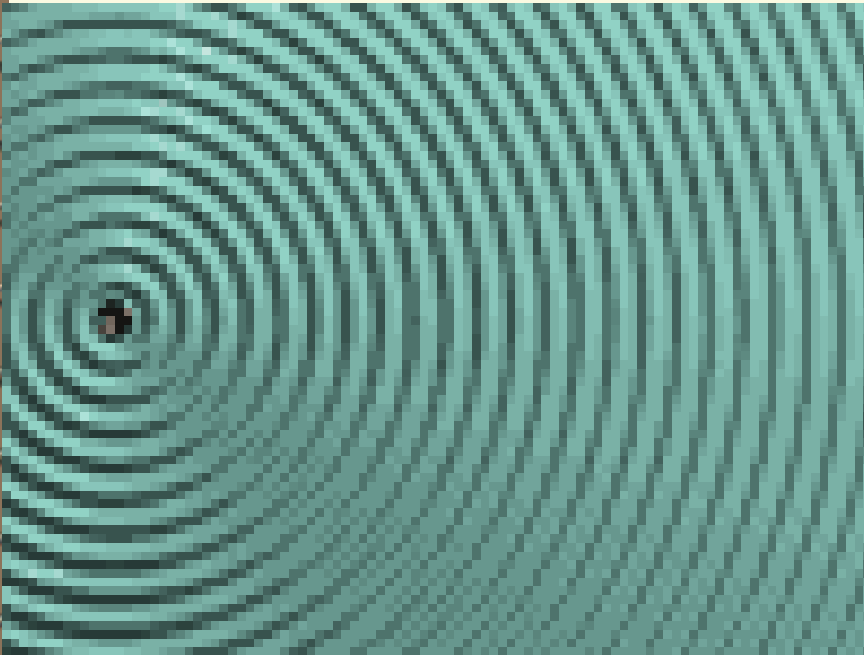
Физика колебаний и волн. Квантовая физика.

Лекция № 2

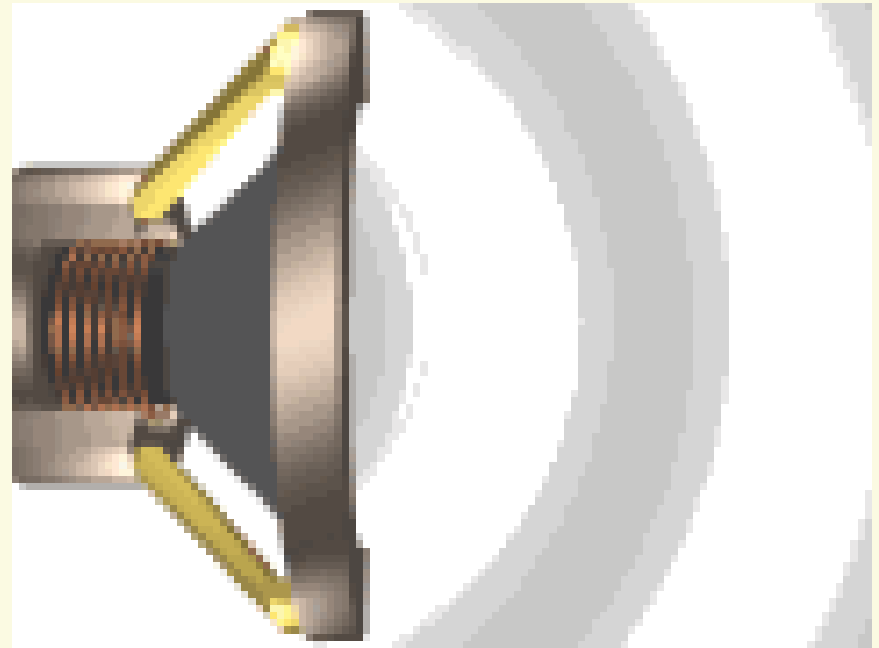
- 1. Упругие или акустические волны и их характеристики.*
- 2. Энергия, поток энергии в упругой волне.*

Распространение волн в упругой среде

Колеблющееся тело, помещенное в упругую среду, является **источником колебаний**, распространяющихся от него во все стороны.



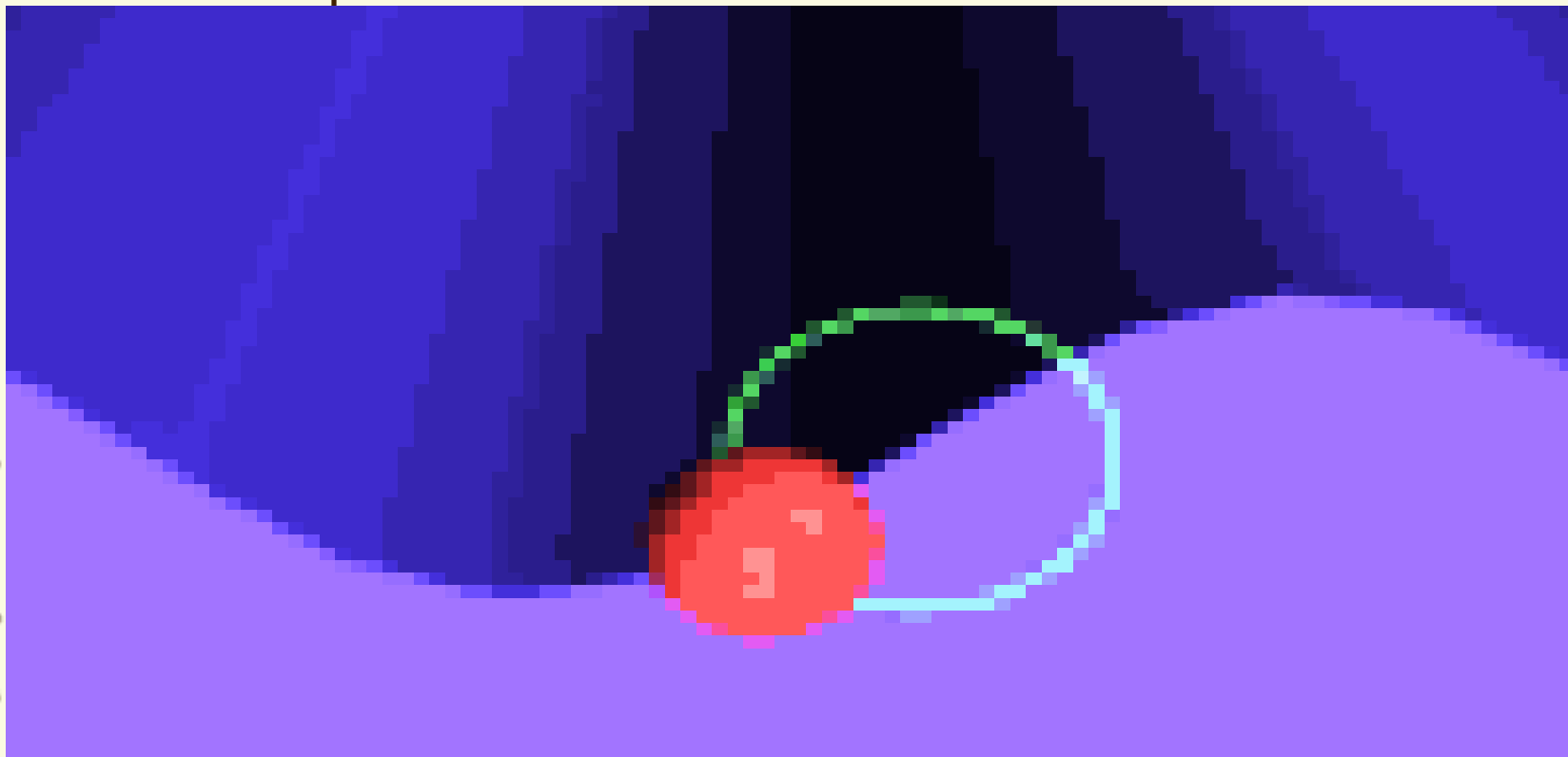
Круговая волна на поверхности жидкости, возбуждаемая точечным источником



Генерация акустической волны
громкоговорителем.

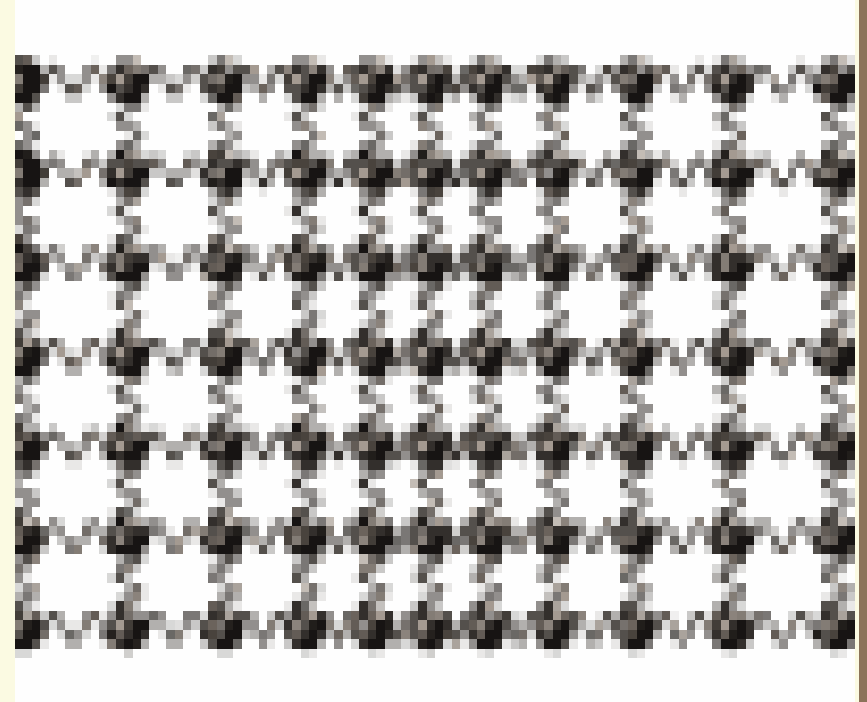
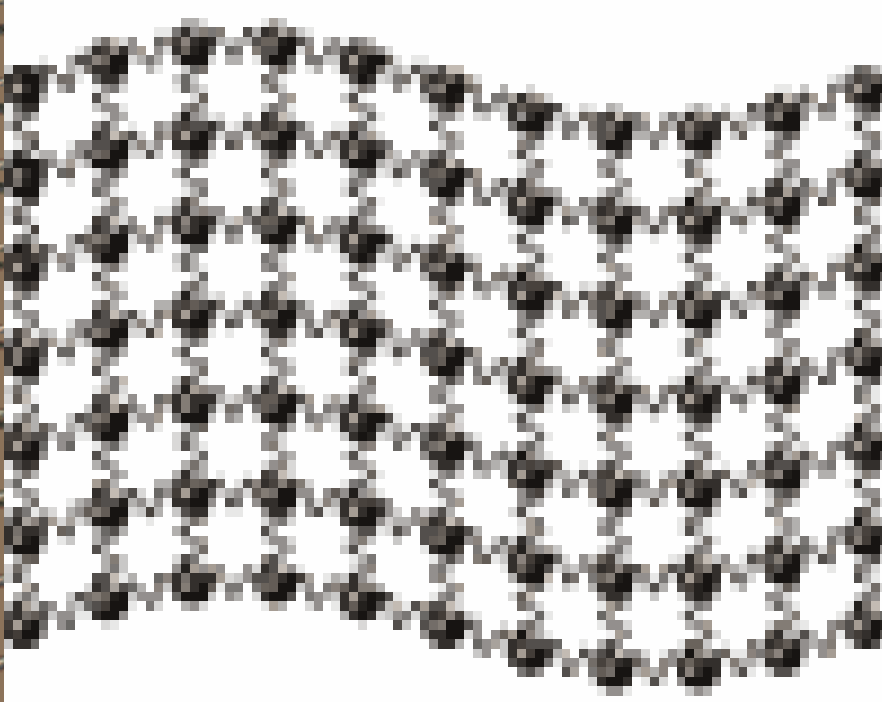
Процесс распространения колебаний в пространстве называется волной.

При распространении волны, частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.



Вместе с волной от частицы к частице, передается лишь состояние колебательного движения и его энергия. Поэтому *основным свойством всех волн независимо от их природы является перенос энергии без переноса вещества.*

Волны бывают *поперечными* (колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения), и *продольными* (сгущение и разрежение частиц среды происходят в направлении распространения).



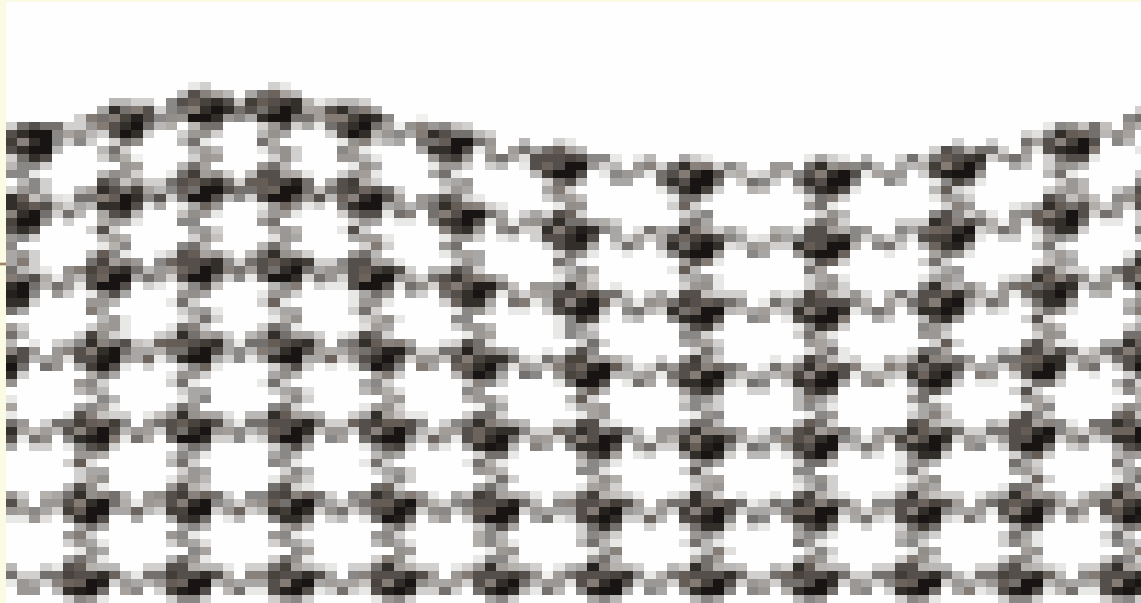
В поперечной волне колебания происходят в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны

Процесс распространения продольной упругой волны

Если взаимосвязь между частицами среды осуществляется **силами упругости**, возникающими вследствие **деформации среды** при передаче колебаний от одних частиц к другим, то волны называются **упругими** (звуковые, ультразвуковые, сейсмические и др. волны). Упругие поперечные волны возникают в среде, обладающей сопротивлением сдвигу (в твёрдом теле), вследствие этого:

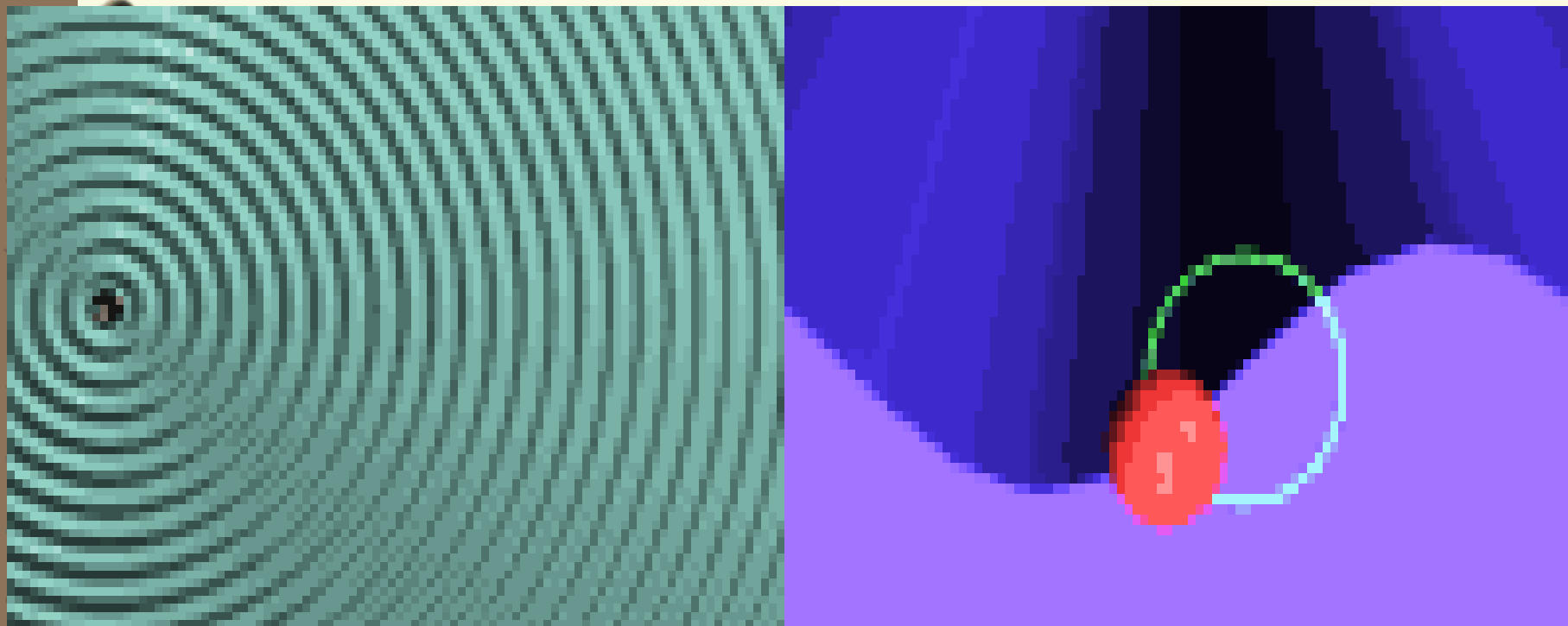
в жидкой и газообразной средах возможно возникновение только **продольных** волн;

в твердой среде возможно возникновение **как продольных, так и поперечных волн.**

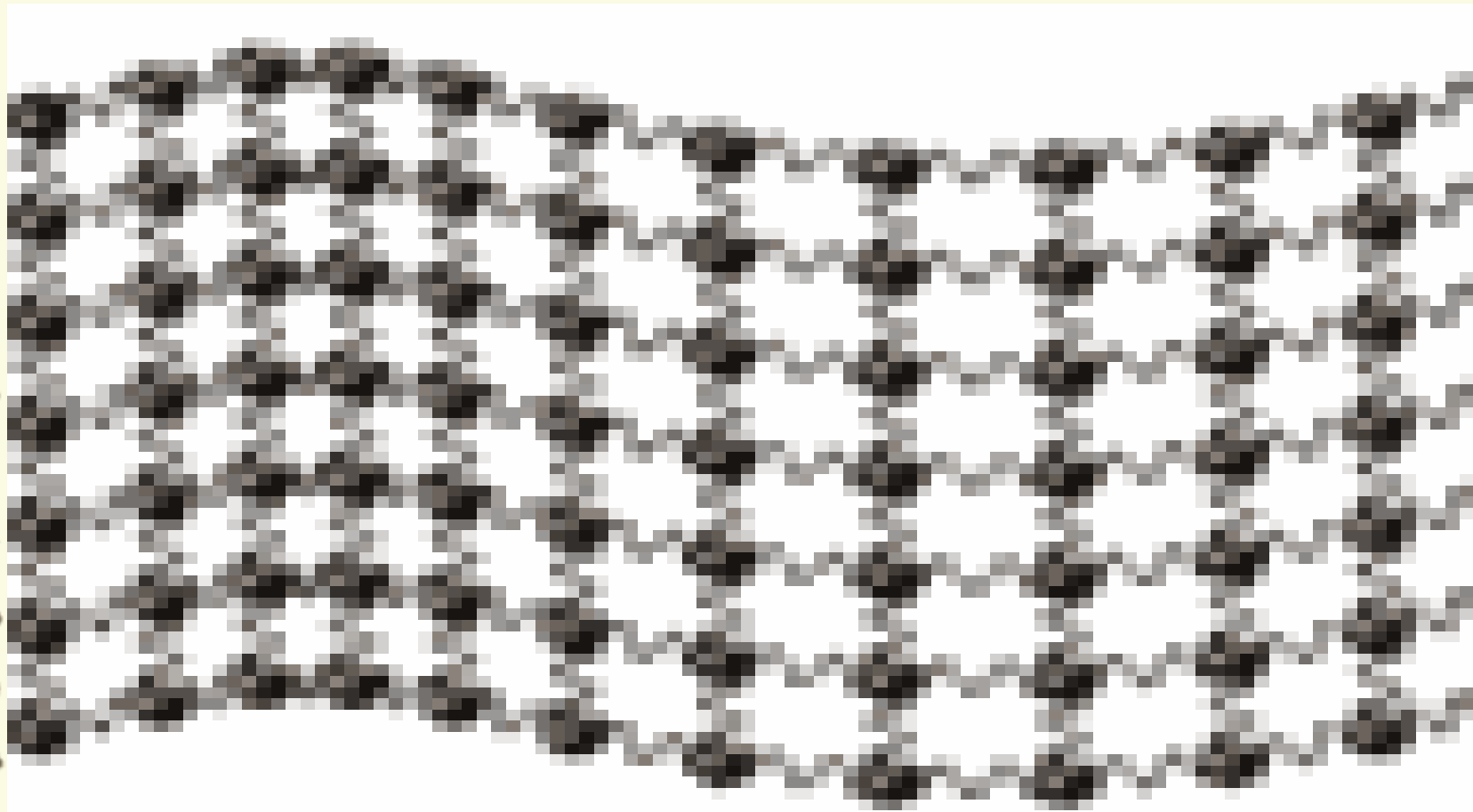


Движение молекул в волне на поверхности жидкости

У **поверхностных волн** взаимосвязь между соседними молекулами при передаче колебаний осуществляется **не силами упругости, а силами поверхностного натяжения и тяжести**. В случае малой амплитуды волны каждая **молекула движется по окружности, радиус которой убывает с расстоянием от поверхности**. Нижние молекулы находятся в покое.



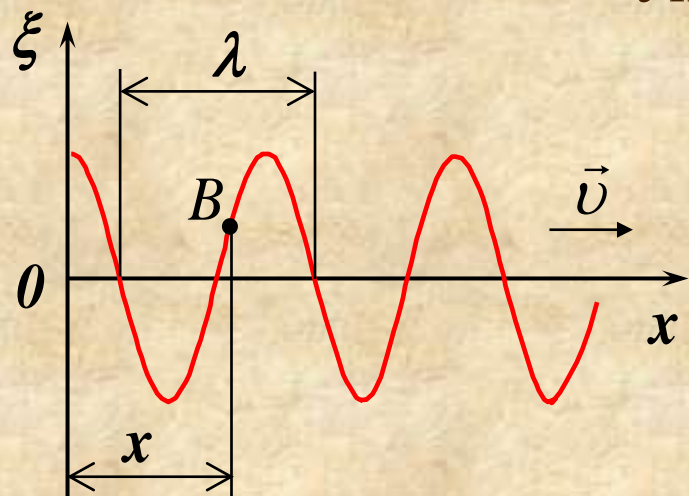
*Волна на поверхности жидкости –
суперпозиция продольного и поперечного
движения молекул*



Наложение продольной и поперечной волн равной амплитуды, сдвинутых по фазе на $\pi/2$.

В результате каждая масса совершает круговые движения.

Упругие волны



Функция $\xi(x, t)$ представляет собой зависимость смещения точек с различными значениями x от положения равновесия.

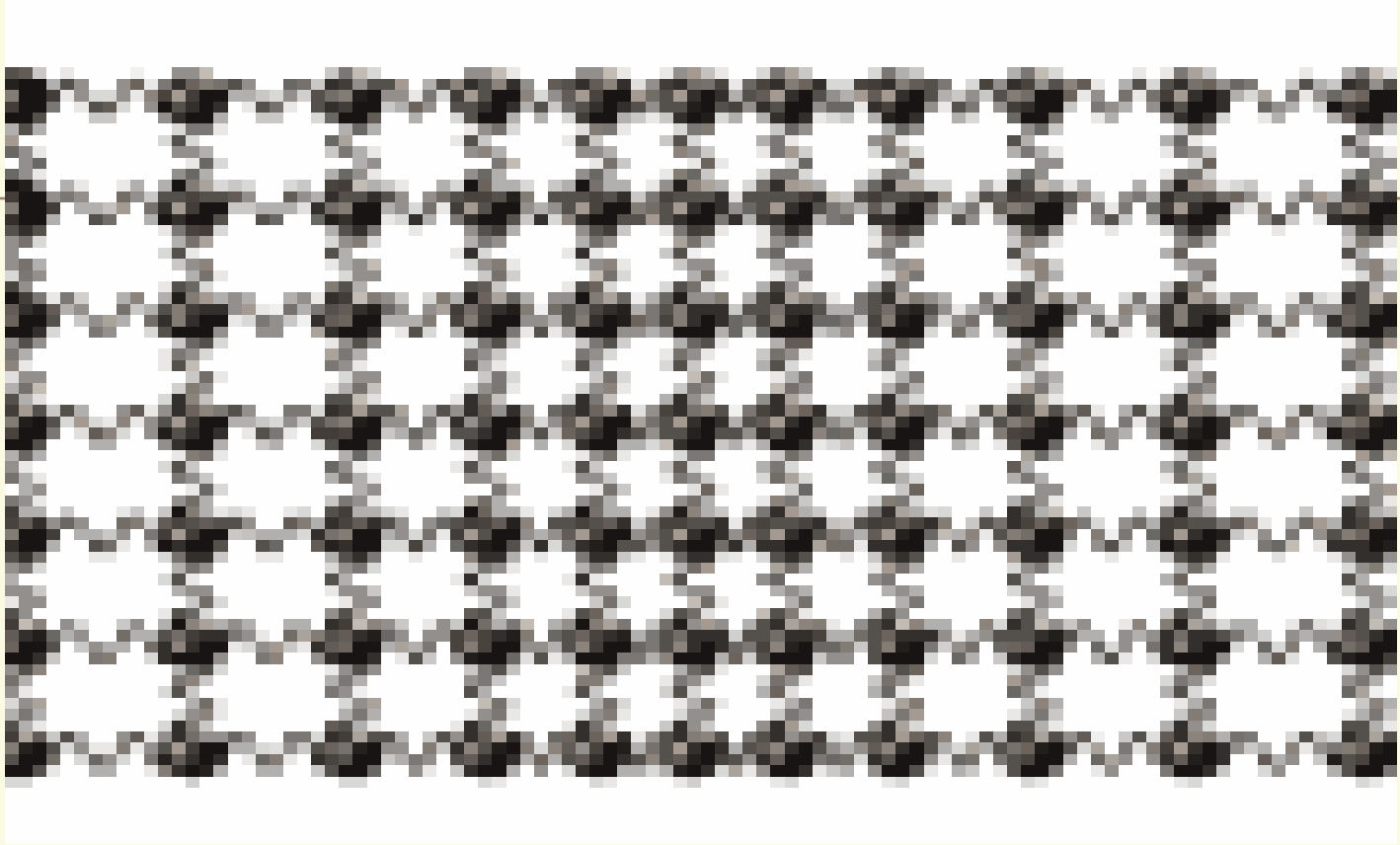
x - это расстояние от источника колебаний т. O , в которой находится частица.

Рисунок дает мгновенную картину распределения возмущений вдоль направления распространения волны.

Расстояние λ , на которое распространяется волна за время, равное периоду T колебаний частиц среды, называется длиной волны:

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{\nu}$$

где v - скорость распространения волны, ν - частота.



Процесс распространения продольной
упругой волны

Упругие волны

Рассмотрим продольную плоскую волну в твердой среде:

Деформация среды в плоскости x :

(взят символ частной производной,
т.к. $\xi = s = s(x, t)$)

$$\varepsilon = \frac{\partial s}{\partial x}$$

Нормальное напряжение

пропорционально деформации
(для малых деформаций):

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial s}{\partial x}$$

где E – **модуль Юнга** среды.

- В положениях максимального отклонения частиц от положения равновесия ($\partial s / \partial x = 0$) $\varepsilon = 0$, $\sigma = 0$
- В местах прохождения частиц через положения равновесия ε , σ - **максимальны** (с чередованием $\pm\varepsilon$, т.е. растяжений и сжатий)

Скорость продольной упругой волны связана с характеристиками среды следующим образом:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где ρ – плотность среды,
 E – модуль Юнга.

Скорость поперечной волны

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где G – модуль сдвига.

Плотность энергии упругой волны (как поперечной, так и продольной) в каждый момент времени в разных точках пространства различна:

$$w = \rho A^2 \omega^2 \sin^2(\omega t - kx + \varphi)$$

Интенсивностью I акустической (звуковой) волны (**силой звука**) называется среднее количество энергии переносимой волной за единицу времени сквозь ед. площади, нормальной к направлению распростр. волны:

$$I = \varpi \cdot v \quad - \text{ для плоской волны,}$$

где v — скорость звуковой волны,

ϖ - средняя объёмная плотность энергии

$$\varpi = \rho \cdot u_{cp}^2$$

$$\varpi = \rho \cdot \frac{1}{2} A^2 \omega^2$$

$$I = \varpi \cdot v = \frac{1}{2} \rho \cdot A^2 \omega^2 \cdot v$$

Сила звука - средняя плотность потока энергии в плоской волне.

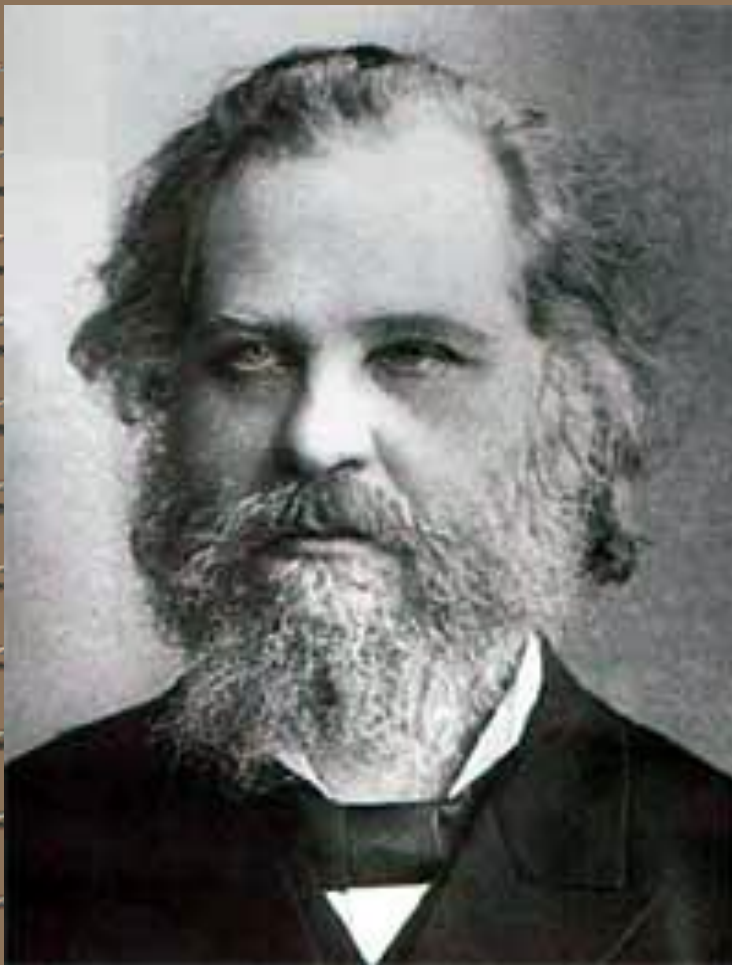
Величина I представляющая собой **плотность потока энергии** акустических волн, имеет определённое направление, совпадающее с направлением движения волны, и называется **вектором Умова**:

$$\vec{U} = \omega \cdot \vec{v}$$

где \vec{v} - вектор скорости распространения волны.

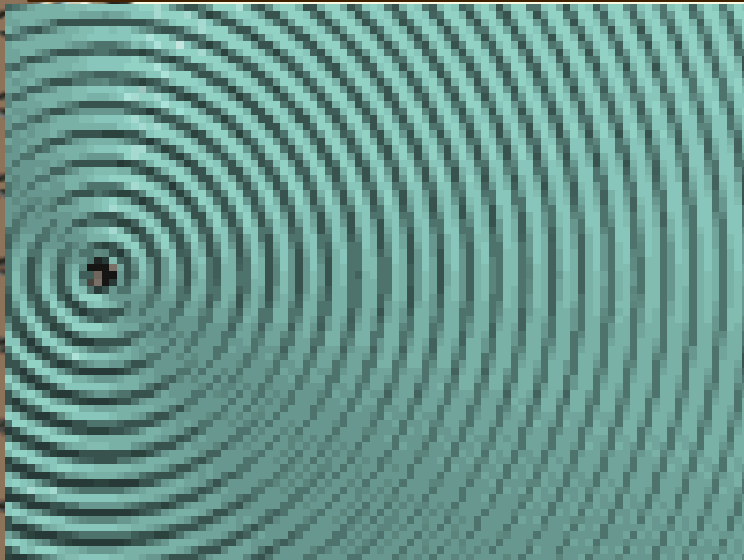
Связь **вектора Умова** с интенсивностью I :

$$I = |\overline{U}|$$

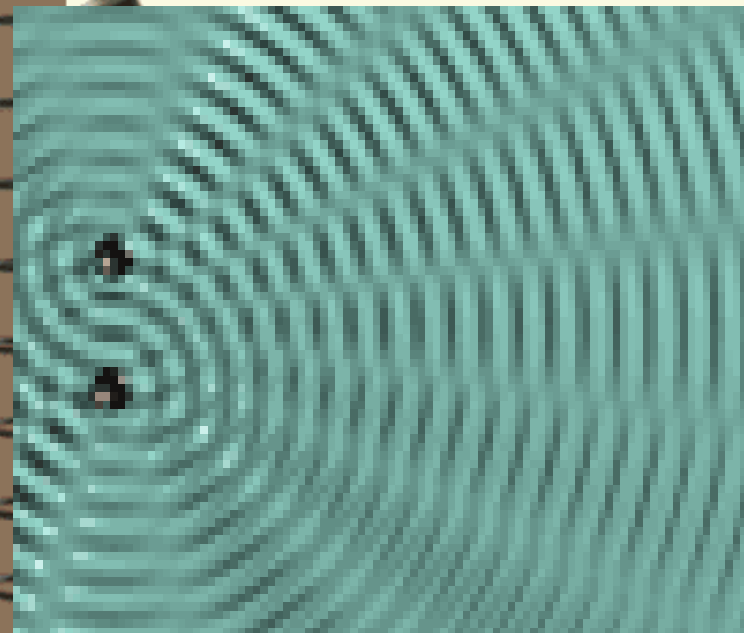


Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым **Н.А Умовым** были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** *описал* процесс переноса энергии с *помощью вектора плотности потока энергии.*

Сложение гармонических колебаний.



Круговая волна на поверхности жидкости, возбуждаемая гармонически колеблющимся шариком.

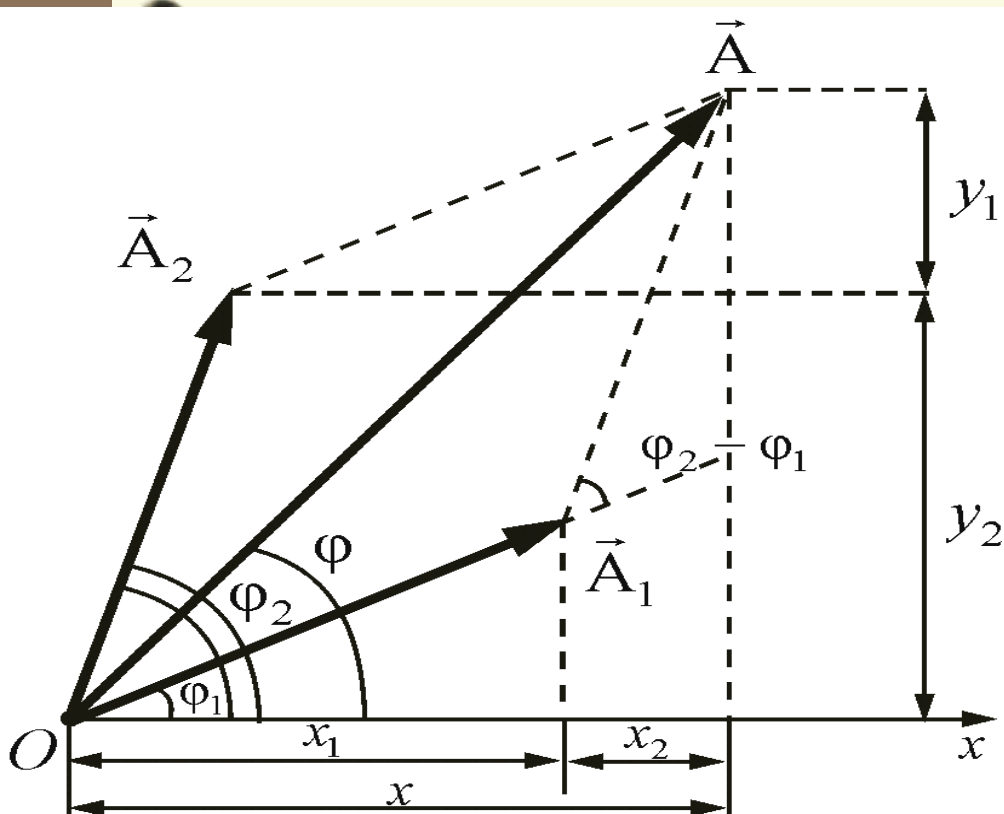


Интерференция между двумя круговыми волнами от точечных источников, колеблющихся в фазе друг с другом. На поверхности жидкости образуются узловые линии, в которых колебание \max или \min (отсутствует).

Пусть *точка* одновременно участвует *в двух гармонических колебаниях одинакового периода, направленных вдоль одной прямой.*

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2)$$



Такие два колебания называются когерентными, их разность фаз не зависит от времени:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$$

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2)$$

Ox – опорная прямая

A_1 и A_2 – амплитуды 1-го и 2-го колебания

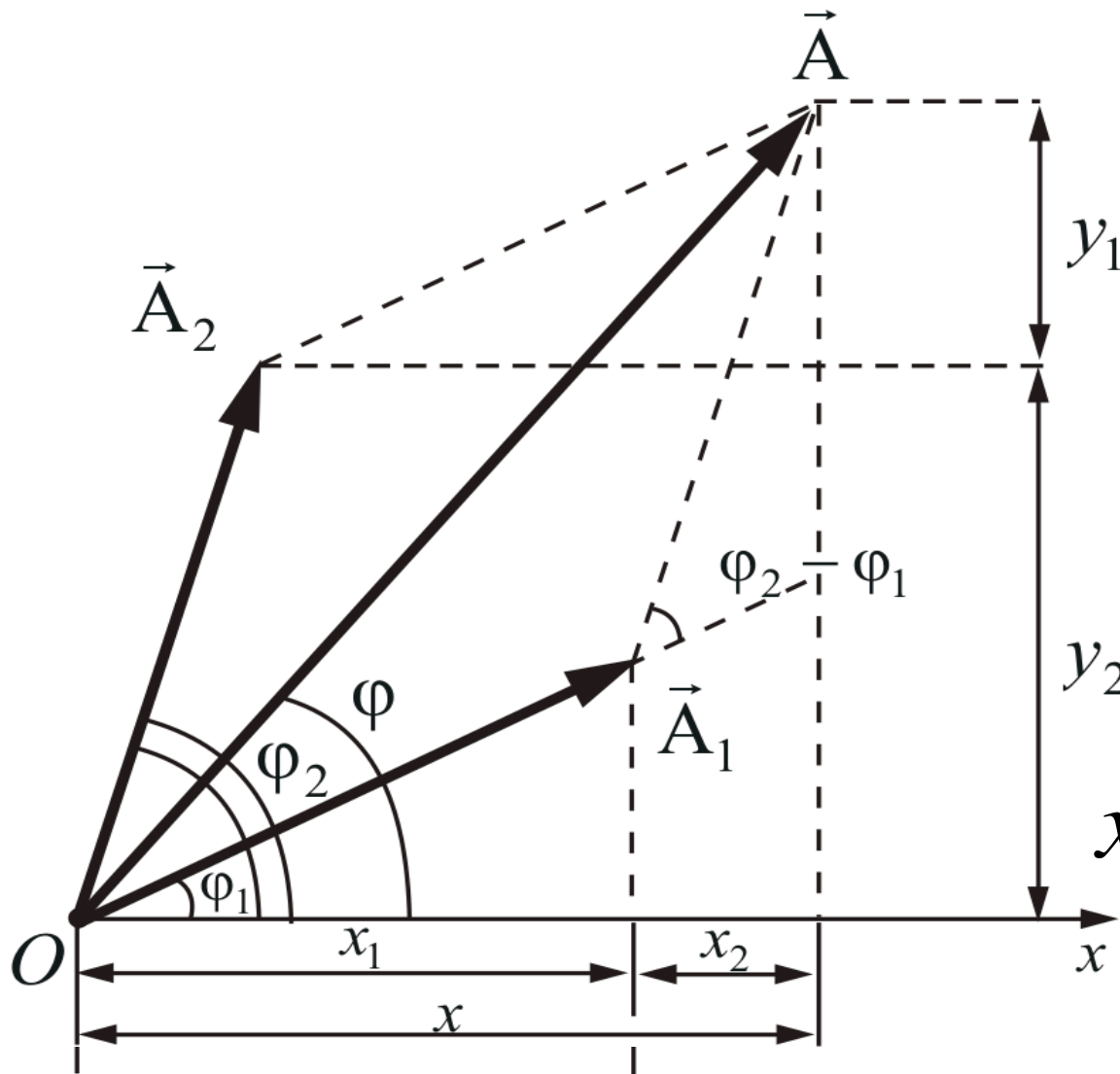
φ_1 и φ_2 – фаза 1-го и 2-го колебания.

$$\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2$$

- *результатирующее колебание,* тоже

гармоническое, с частотой ω :

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$



По правилу сложения векторов найдем суммарную амплитуду, результирующего колебания:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Начальная фаза определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$$

Амплитуда **A** результирующего колебания
зависит от разности начальных фаз:

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

Рассмотрим несколько простых случаев.

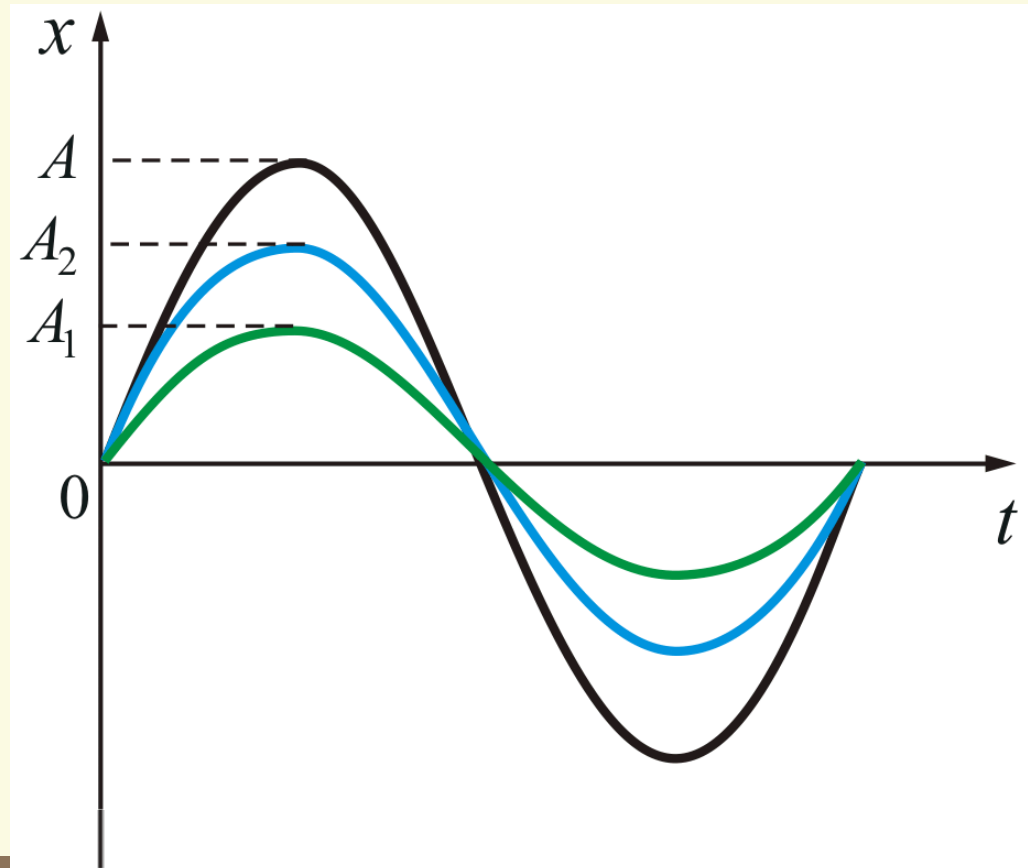
1. Разность фаз равна нулю или четному числу π , то есть

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n, \text{ где } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$$

$$A = A_1 + A_2$$

*Колебания
синфазны*



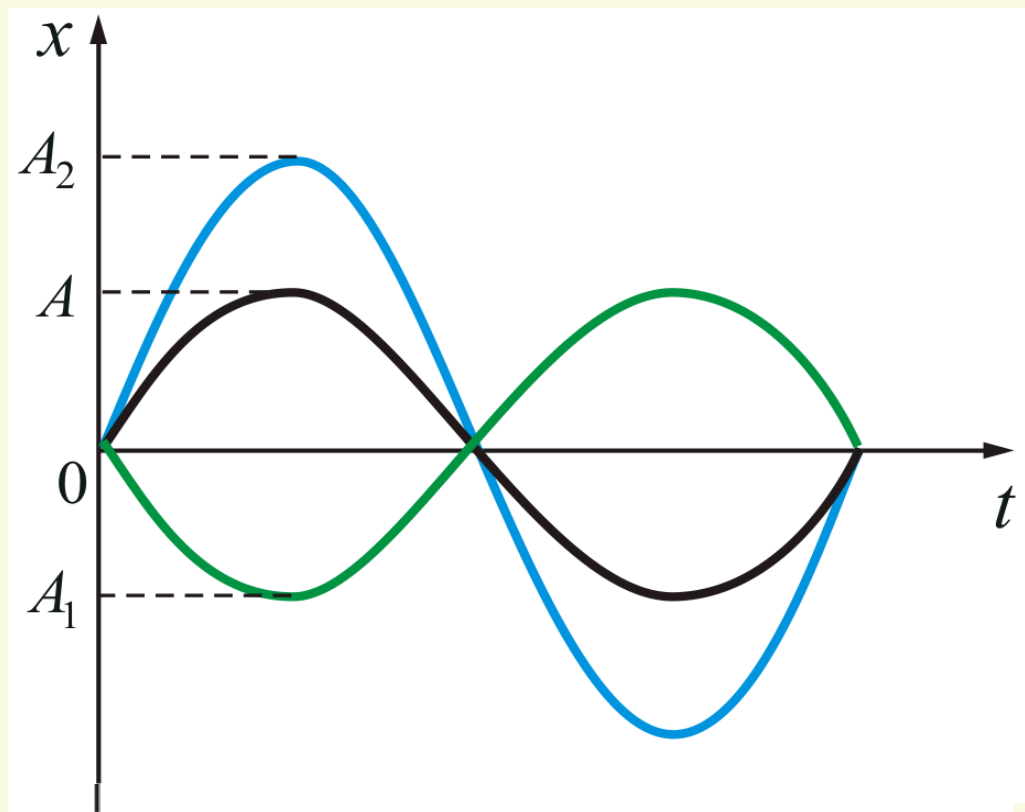
2. Разность фаз равна нечетному числу π , то есть

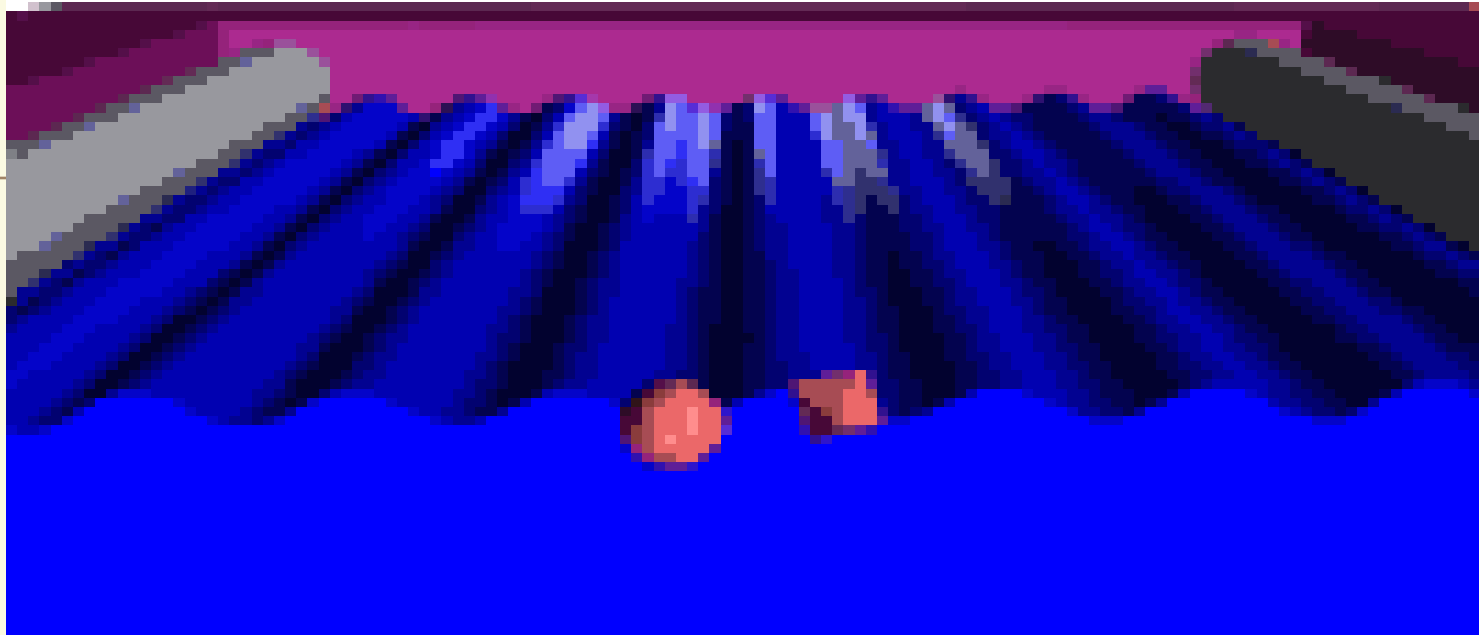
$$\varphi_2 - \varphi_1 = \pi(2n + 1) \text{ где } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1 . \text{ Отсюда}$$

$$A = |A_2 - A_1|$$

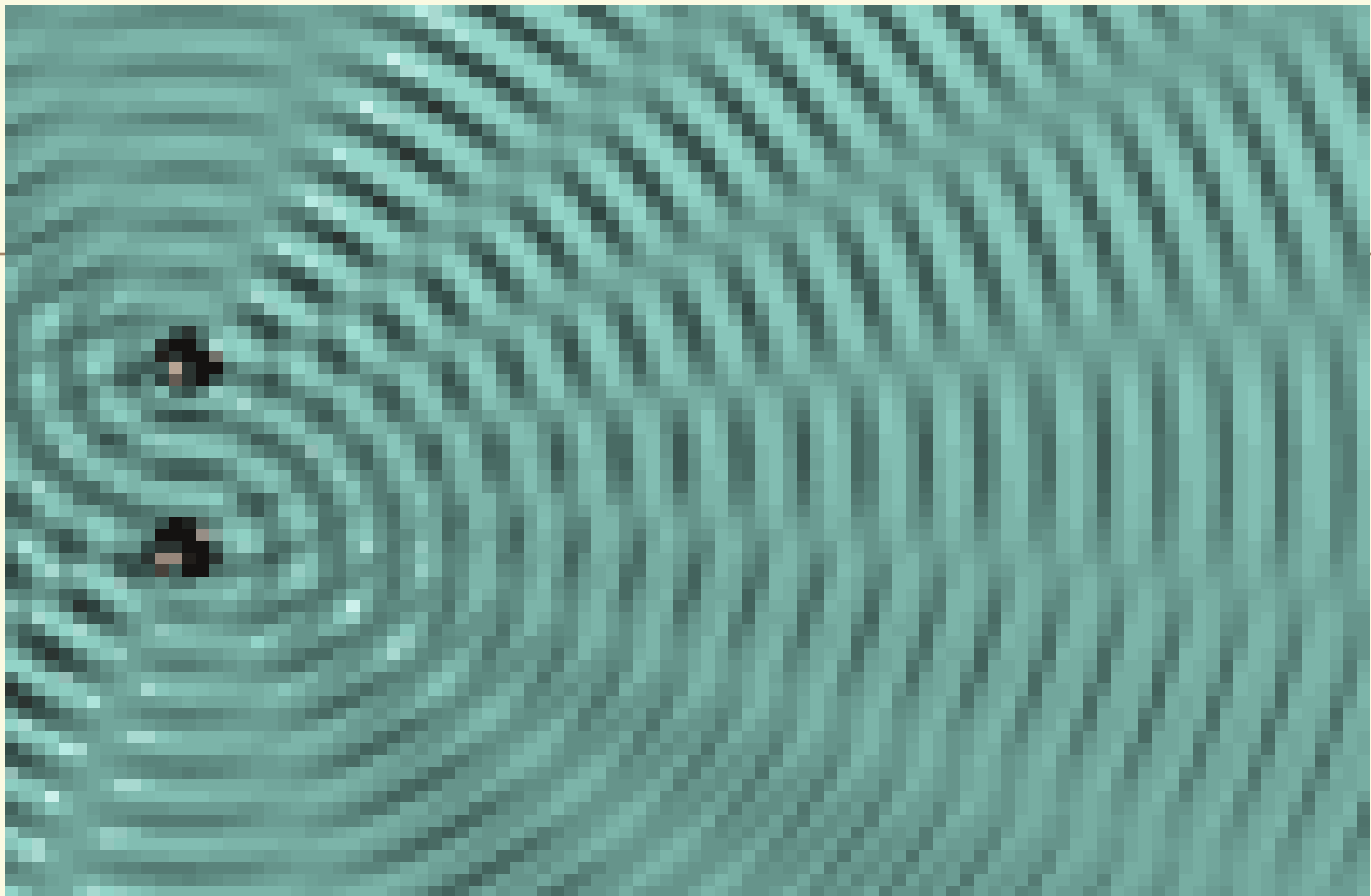
колебания **в противофазе**





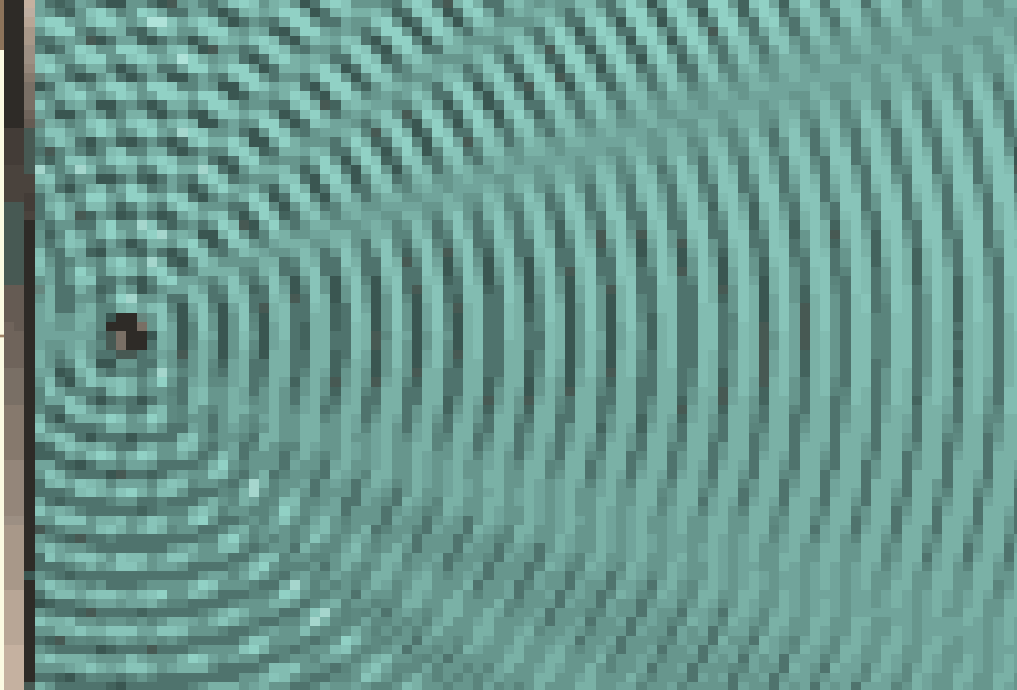
Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями

Волны распространяются в противоположных направлениях и интерферируют с образованием стоячей волны. Красный шарик расположен в пучности стоячей волны и колеблется с максимальной амплитудой. Параллелепипед расположен в узле интерференционной картины и амплитуда его колебаний равна нулю (он совершает лишь вращательные движения, следуя наклону волны)



Интерференция поверхностных волн от двух точечных источников

В точках, для которых $r_2 - r_1 = \lambda (1/2 + n)$, поверхность жидкости не колеблется там \min (узловые точки (линии))



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки . Расстояние от источника до стенки l кратно целому числу полуволн, исходная круговая волна интерферирует с волной, отражённой от стенки. Согласно пр. Гюйгенса, **отражённая волна совпадает с той, которая бы возбуждалась фиктивным точечным источником, расположенным по другую сторону стенки симметрично реальному источнику.** Т.к. l кратно целому числу полуволн, то справа от источника на оси соединяющей фиктивный и реальный источник разность фаз будет кратна целому числу волн, и круговая волна накладывается **в фазе с волной**, отражённой от стенки, увеличивая высоту гребней в интерференционной картине



ЛЕКЦІЯ ЗАКОНЧЕНА!