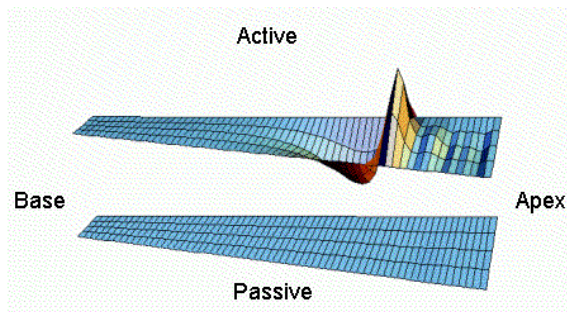
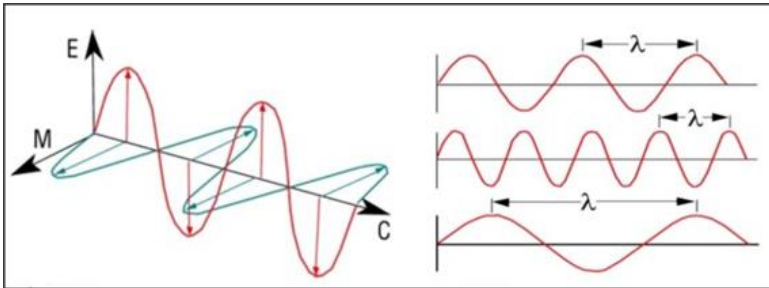
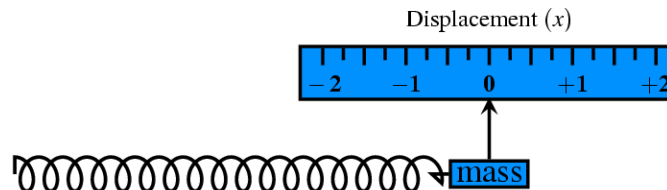


# A biofizika fizikai alapjai

6. előadás 2023. 09. 21.

Orosz Ádám

Rezgések és hullámok



## A rezgéstan alapfogalmai

1. Rezgések fajtái
2. Harmonikus rezgés
3. Visszatérítő erő
4. Sajátrezgés és sajátfrekvencia
5. Kényszerrezgés
6. Rezonancia

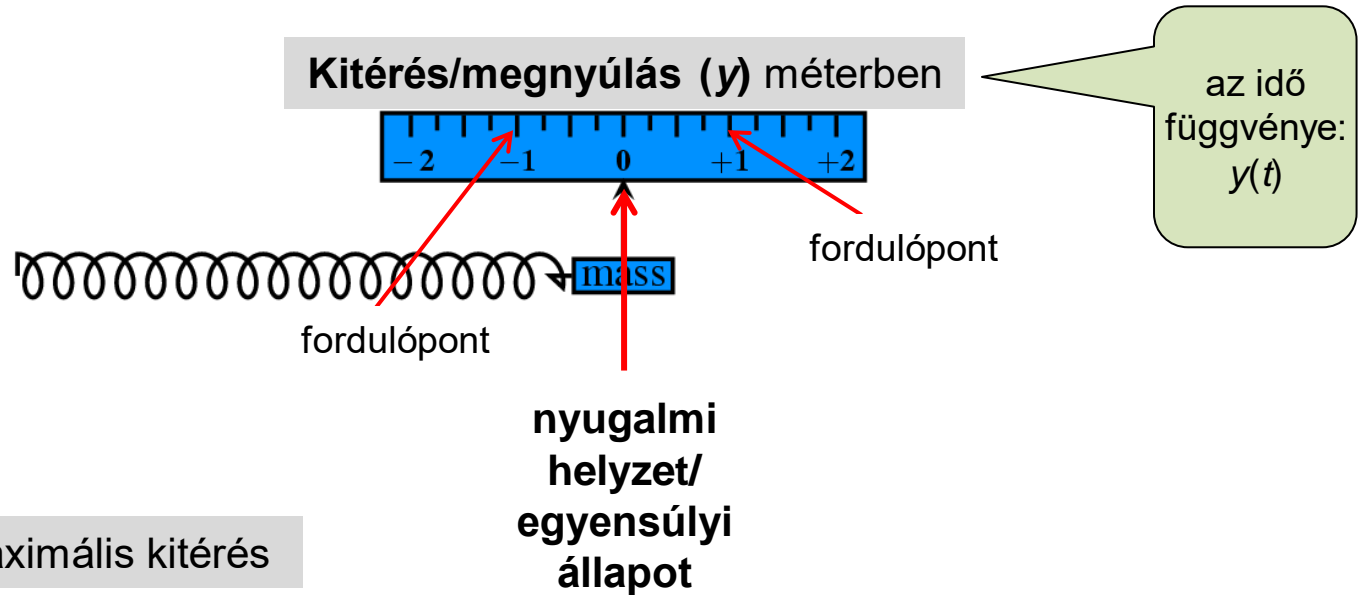
## A hullámtan alapfogalmai

1. Hullámhossz
2. Transzverzális és longitudinális hullámok
3. Hullámjelenségek - Interferencia
4. Huygens-Fresnel-elv
5. Diffrakció
6. Állóhullámok
7. (lineáris) polarizáció
8. Mechanikai hullámok – a hang
9. Elektromágneses hullámok – a fény

# A rezgés tan alapfogalmai

**Oszcillátor:** **rezgésre képes fizikai rendszer** (pl. egy rugó a ráfüggesztett testtel).

**Rezgés** (mechanikai): egy test egyensúlyi állapot körüli **periodikus** (ismétlődő) **mozgása**.



**Amplitúdó (A):** a maximális kitérés

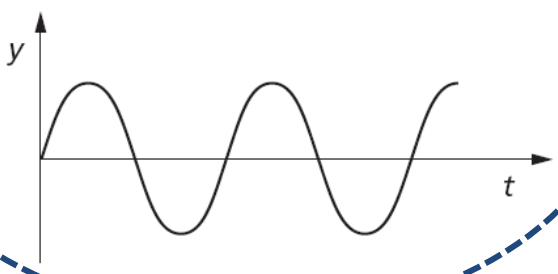
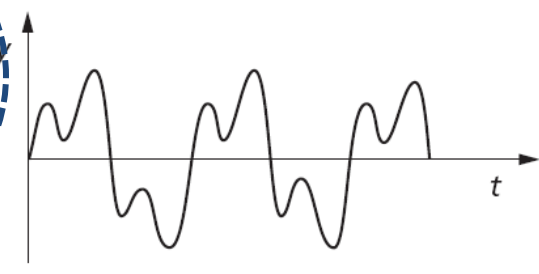
Emlékeztető:

- **Periódusidő/rezgésidő** ( $T$ ): egy rezgési periódus időtartama.
- **Frekvencia/rezgésszám** ( $f$ ): időegység alatti periódusok száma. A periódusidő reciproka:


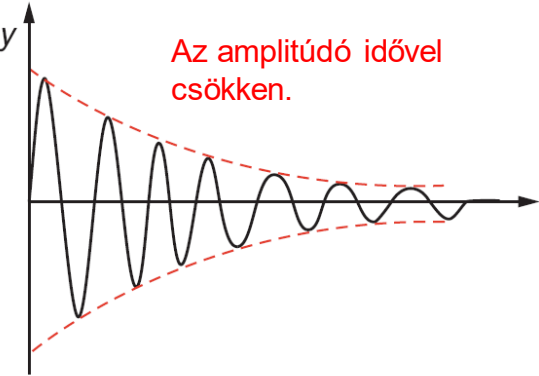
$$f = \frac{1}{T} \quad \left( \frac{1}{s} = \text{Hz} \right)$$

- **Körfrekvencia** ( $\omega$ ):  $2\pi$ -kénti rezgések száma. A frekvencia  $2\pi$ -szerese:  $\omega = 2\pi f$

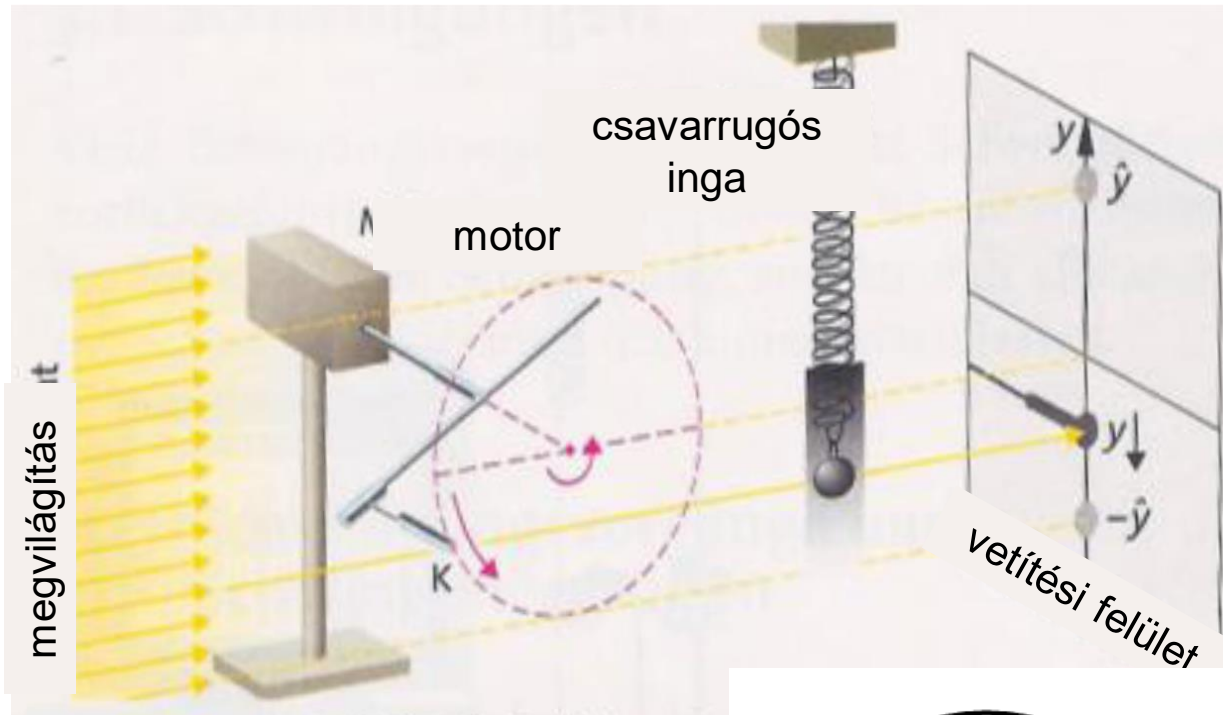
# A rezgések fajtái

<b>Harmonikus rezgés (szinuszos rezgés)</b>	<b>Nem harmonikus rezgés (nem szinuszos rezgés)</b>
	
ingaóra, rugós inga = rugós oszillátor	az emberi hangszál rezgései lengéscsillapítók az autókban

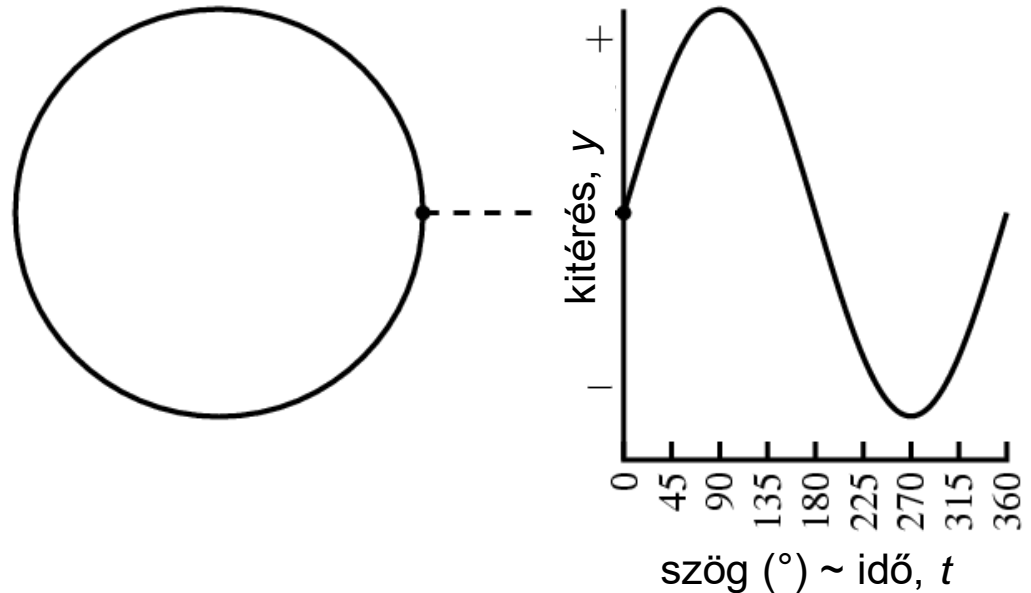
<b>Csillapítatlan rezgés</b>	<b>Csillapított rezgés</b>
 <p>Az amplitúdó állandó marad.</p>	 <p>Az amplitúdó idővel csökken.</p>
hangszóró membránja adott hangosságú hang esetén	magára hagyott inga, rezgéscsillapító

# Egyenletes körmozgás – harmonikus rezgőmozgás



A kitérés-idő függvény  
általános alakja:

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$



# **Kitérés, sebesség, gyorsulás, erő**

# Sajátrezgés (szabad rezgés)

Előfeltétel:

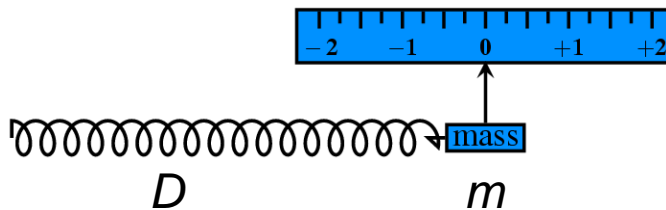
Egyszeri behatás által rezgésbe hozzuk az oszcillátort.

**Sajátrezgés:** további behatás nélkül lejátszódó rezgés.

**Sajátfrekvencia:** egy **sajátrezgés frekvenciája**.

Az **oszcillátor tulajdonságai** határozzák meg (tömeg, geometriai adottságok, anyagi tulajdonságok stb.).

## Rugós oszcillátor



$$f_{\text{saját}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}}$$

Megjegyzés:

Az egyenlet csak ideális esetben érvényes, vagyis a rezgés harmonikus (és nem csillapított). Valójában mindig van energiaveszteség (súrlódás, légellenállás, ...), így a rezgés csillapításra kerül.

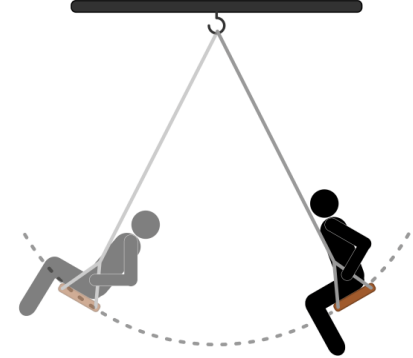


# Feladat

A testtömeg meghatározása a világűrben egy rugós oszcillátor segítségével történik. A méréshez használt oszcillátor tömege  $6,5 \text{ kg}$ , periódusideje  $0,75 \text{ s}$ . Az űrhajóssal együtt a periódusidő  $2,7 \text{ s}$ -ra emelkedett. Számítsa ki az űrhajós tömegét!

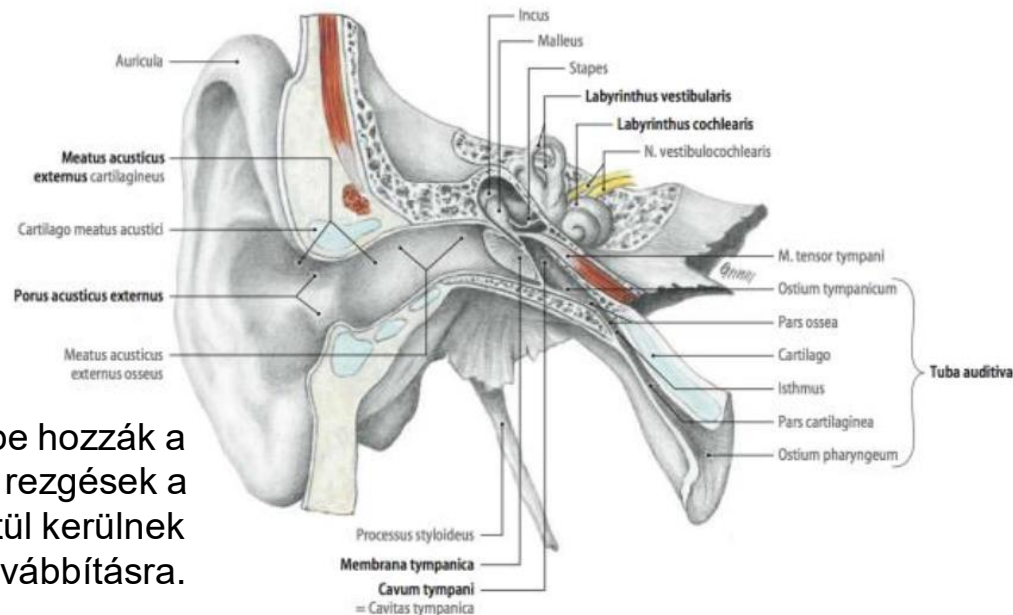
# Kényszerrezgés

Egy periodikus külső erő **hatására** létrejövő rezgés.



Ha megütjük az egyik hangvillát, a létrejövő légnyomás-ingadozások a másik hangvillát is rezgésbe hozzák (feltéve, hogy mindkét hangvilla azonos hangmagasságra van hangolva).

A légnyomásingadozások rezgésbe hozzák a dobhártyát, majd ezek a rezgések a hallócsontocskákon keresztül kerülnek továbbításra.

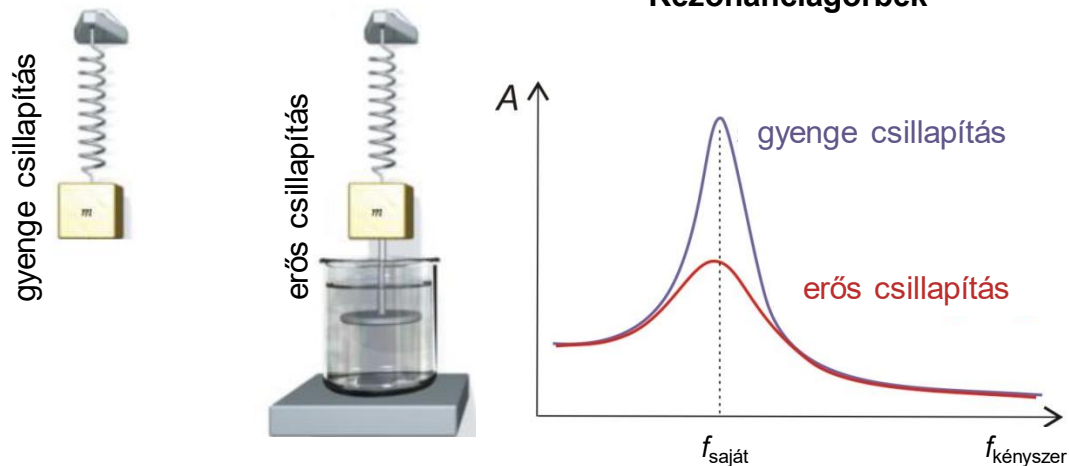
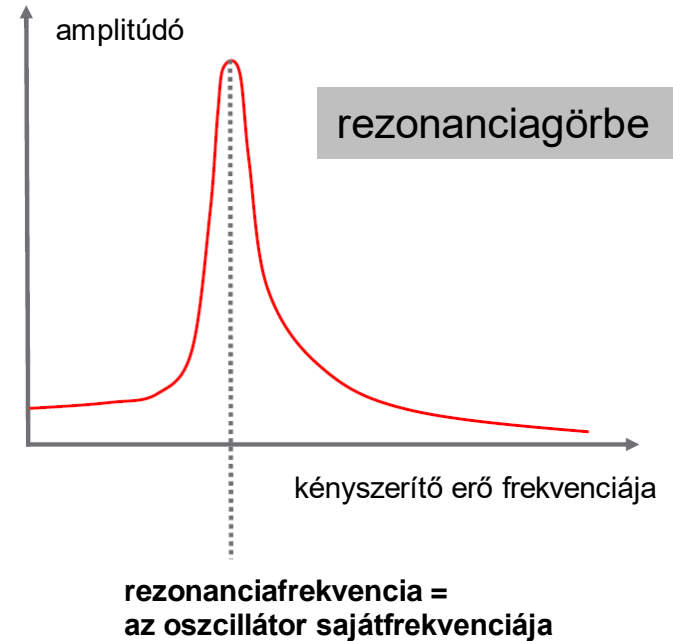


- Kényszerrezgés során a **kényszerítő erővel fenntarthatjuk** a harmonikus rezgést állandó amplitúdóval, az energiaveszteségek ellenére is.
- A **rezgő** rendszer **átveszi** a **rezgető** rendszer frekvenciáját.



# Rezonancia

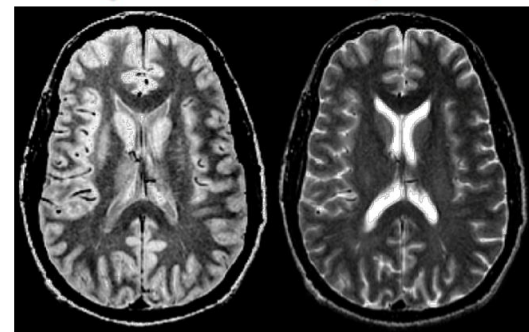
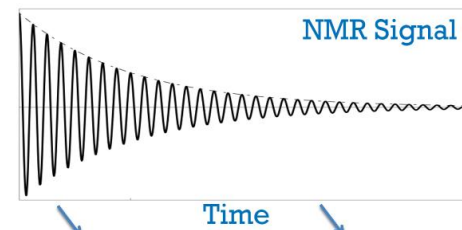
- Ha egy rezgésre képes rendszerrel egy külső gerjesztő rezgéssel periodikusan energiát közlünk, akkor egy bizonyos beállási időt követően **kényszerrezgés** fog kialakulni.
- A kényszerrezgés **frekvenciájától függően** különböző **amplitúdójú** rezgések alakulnak ki.
- Ha a **kényszerrezgés frekvenciája** és a **rendszer sajátfrekvenciája egybeesik**, akkor különösen erős, **nagy amplitúdójú** kényszerrezgés alakul ki.
- Az egy adott frekvencián fellépő különösen nagy amplitúdójú rezgést **rezonanciának** hívjuk, a jelenségre jellemző frekvenciát pedig **rezonanciafrekvenciának**.



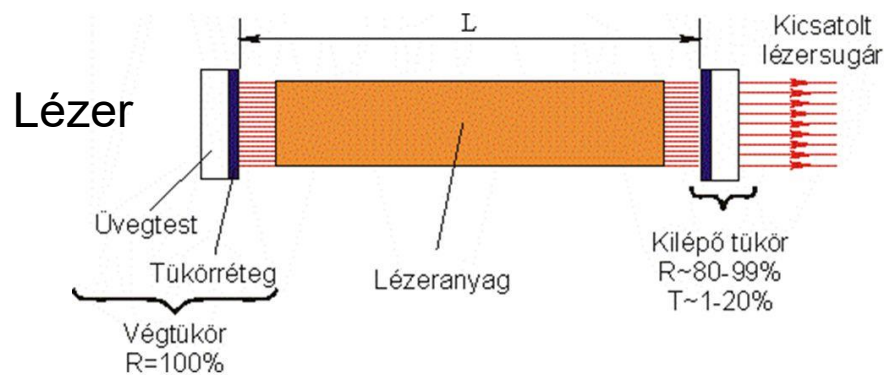
## Megjegyzés:

A rezonancia jelenségét több technikai eszközben felhasználjuk (pl. mágneses magrezonancia spektroszkópia és képalkotás, lézer, ...)

## Mágneses magrezonanciás képalkotás (MRI)

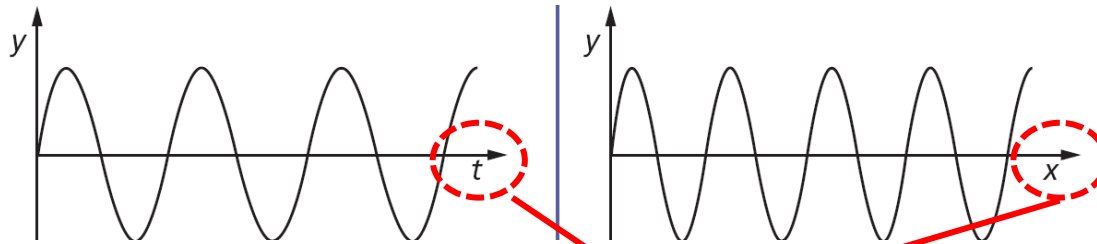


## Optikai rezonátor



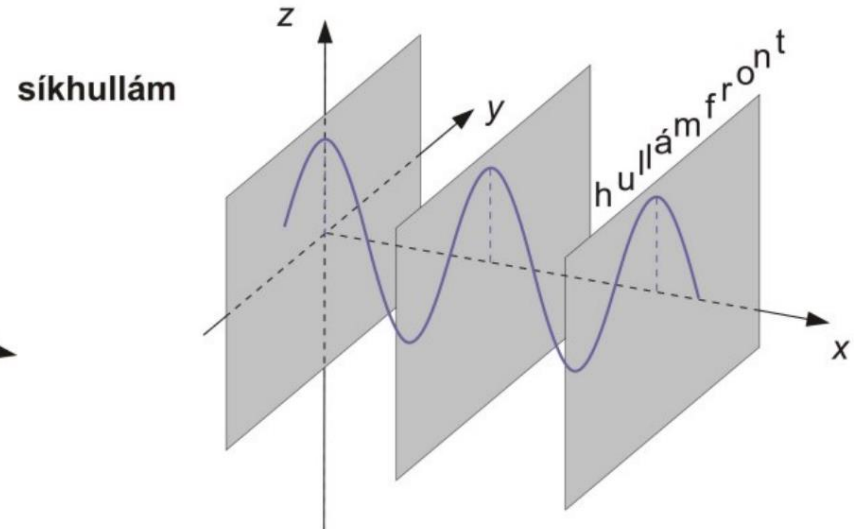
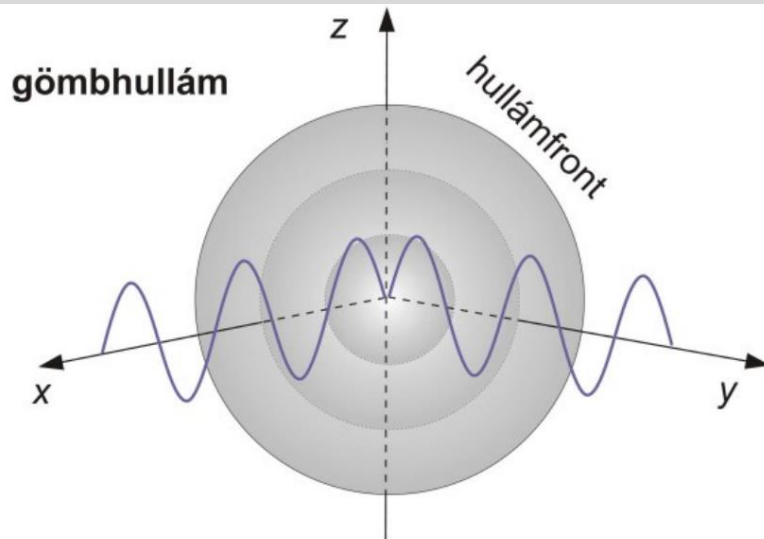
# A hullámtan alapfogalmai

- Egy **rezgési állapot terjedése** egy rezgésre képes közegben.
- Egy fizikai mennyiség **időbeli** és **térbeli** periodikus (ismétlődő) változása.



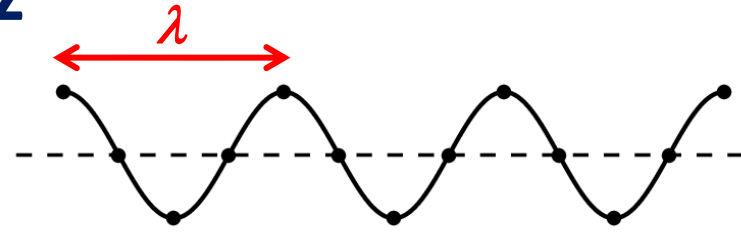
$$y = A \sin(\omega t + kx)$$

Hullámfelület vagy **Hullámfront**: Ugyanabban a rezgési fázisban – azaz ugyanabban a rezgési állapotban - lévő pontok által meghatározott felület.

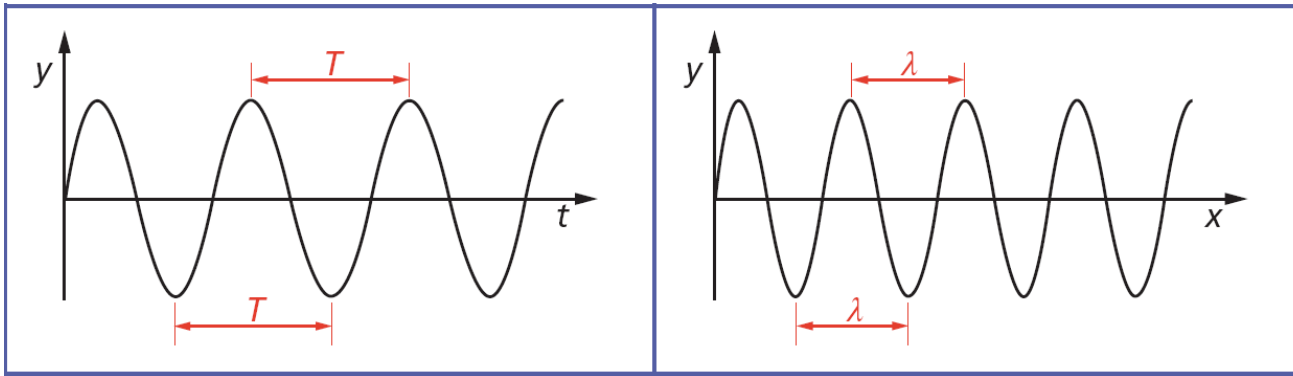


# Hullámhossz

**Hullámhossz** ( $\lambda$ ): két egymást követő azonos fázisú pont közötti távolság.



- A **hullámhossz** a periódusidővel analóg mennyiség. A **térbeli periodicitást** jellemzi, míg a **periódusidő** az **időbelit**.



A hullámhossz és a periódusidő  
(ill. frekvencia) közti összefüggés:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

*celeritas* (lat.) - gyorsaság

A hullám terjedési sebessége

Megjegyzés:

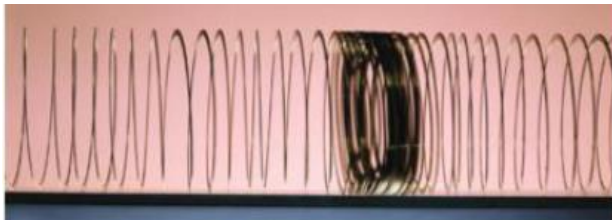
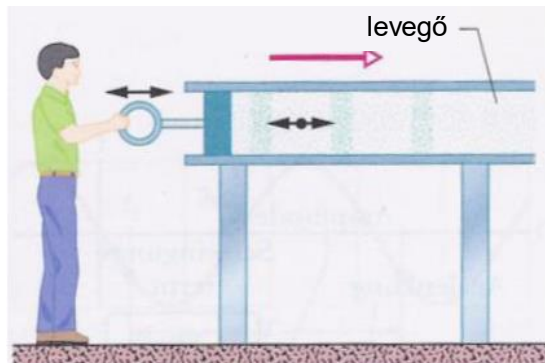
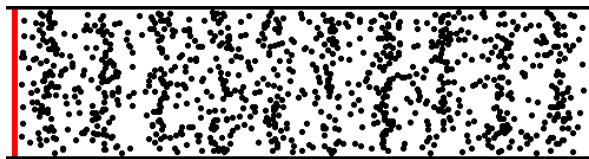
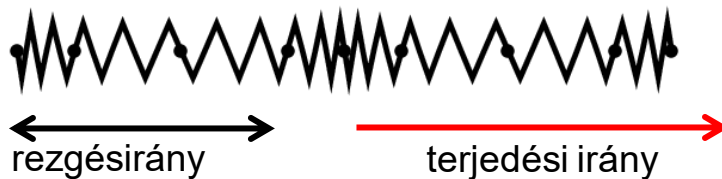
Az összefüggés általánosan érvényes minden hullámfajtára (legyenek ezek mechanikai, elektromágnesen vagy akár anyaghullámok).

# Longitudinális és transzverzális hullámok

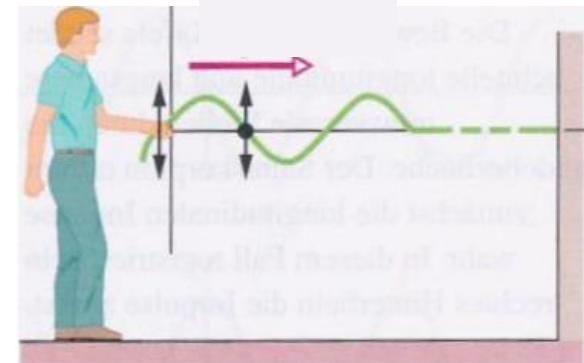
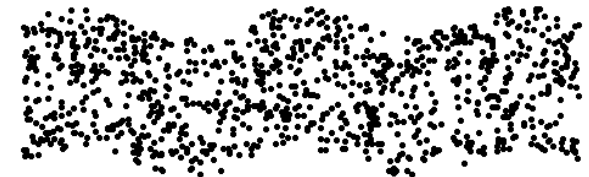
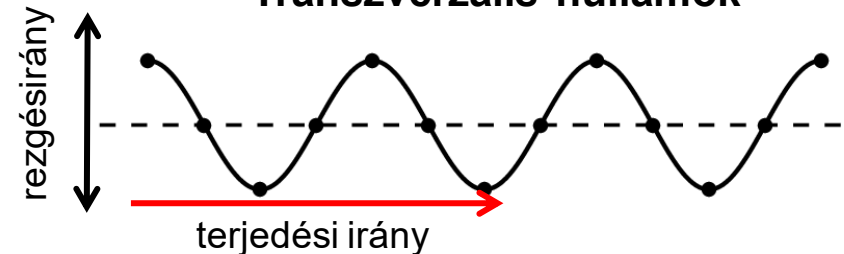
Annak függvényében, hogy a **kitérés (rezgés) iránya** a hullám **terjedési iránya** között milyen viszony áll fenn, elkülöníthetünk longitudinális és transzverzális hullámokat:

- **Longitudinális hullámok:** A rezgés iránya **párhuzamos** a terjedés irányával.
- **transzverzális hullámok:** A rezgés iránya **merőleges** a terjedési irányra.

## Longitudinális hullámok



## Transzverzális hullámok



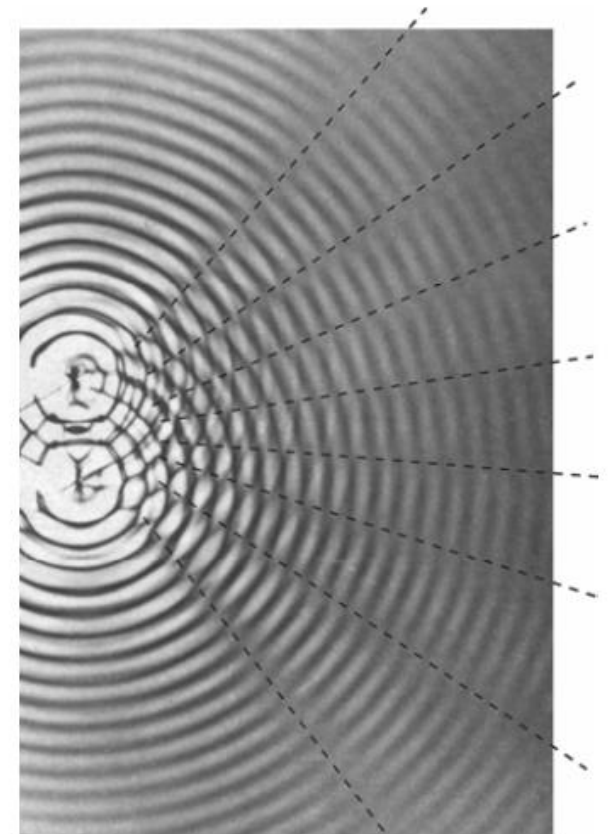


# Hullámjelenségek

A „vízhullám”: direkt módon megfigyelhető.  
Mert elég lassan változik (kis  $f$  ) és elég nagy méretű (nagy  $\lambda$ ).

De pl. a „fényhullám” nem ilyen.

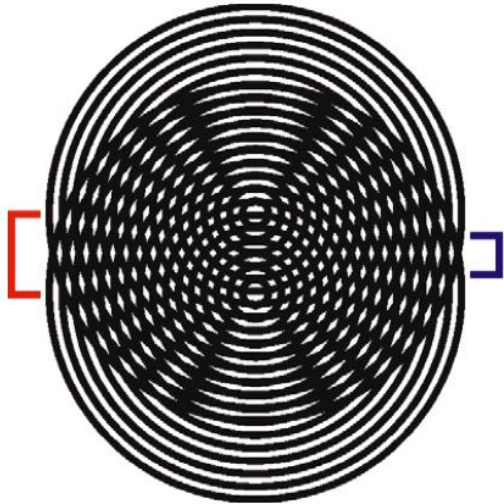
Azonban bizonyos feltételek mellett **mintázatok** jöhetnek létre, **amelyek időben nem**, vagy csak lassan **változnak**, méretük pedig lényegesen nagyobb lehet, mint  $\lambda$ .



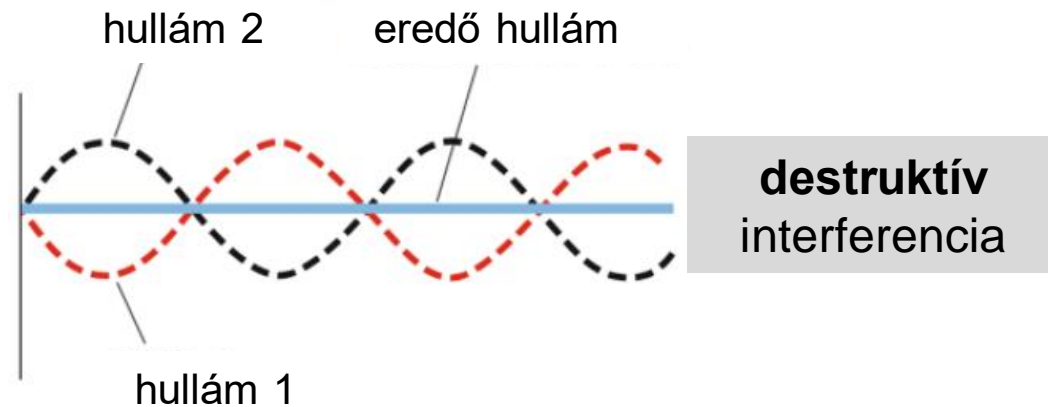
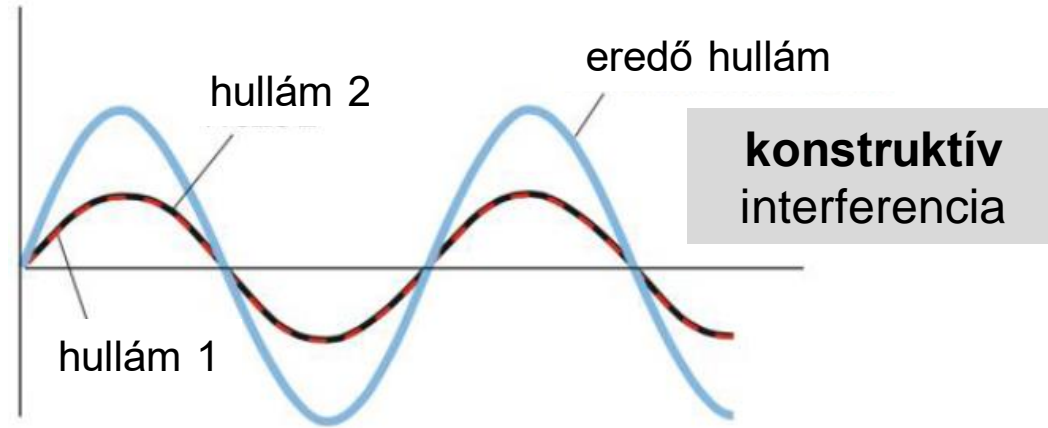
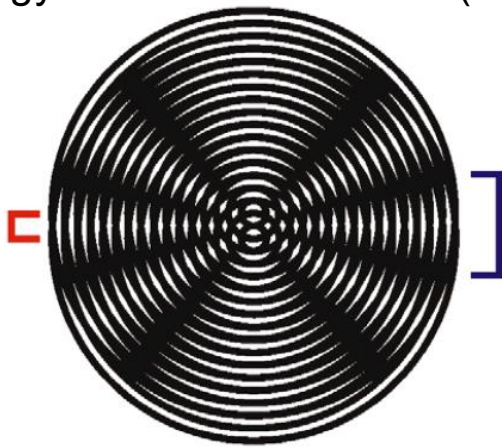
# Interferencia

A hullámokkal kapcsolatos **legfontosabb jelenség** az **interferencia**. Két vagy több hullám találkozásakor jön létre. A mintázatok láthatóságának feltételei:

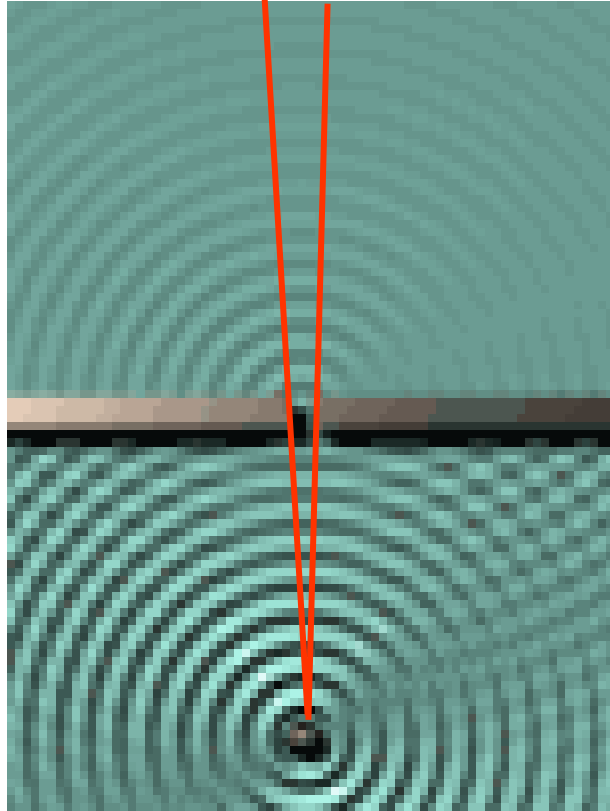
- Koherens hullámok (pl. állandó fáziskülönbség,  $\Delta\phi = \text{áll.}$ )
- Források távolsága összemérhető a hullámhosszal



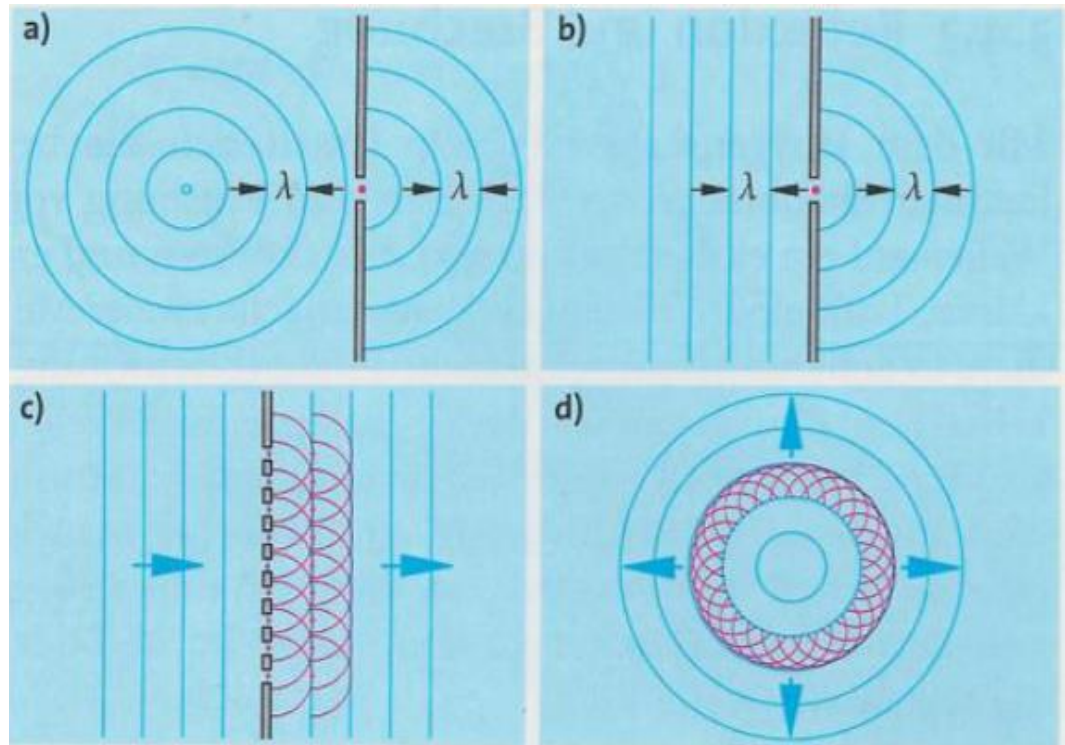
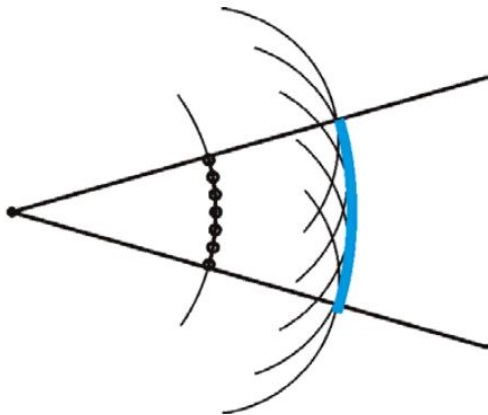
Kisebb forrástávolság (piros jel),  
nagyobb méretű mintázat (kék jel).



# Huygens–Fresnel-elv – a hullámoptika alapelve



- Egy **modell** a hullám terjedésének leírására
- **Huygens**: A hullámfront minden pontja egy új gömbhullám, az **elemi hullám** kiindulópontjának tekinthető
- Az elemi hullám ugyanolyan sebességgel és frekvenciával terjed, mint az eredeti hullám
- Az elemi hullámok **közös burkolófelülete** eredményezi az új hullámfrontot
- **Fresnel**: új burkolófelület létrejöttkor érvényesül a **szuperpozíció elve**, áthaladnak egymáson - **interferálnak**

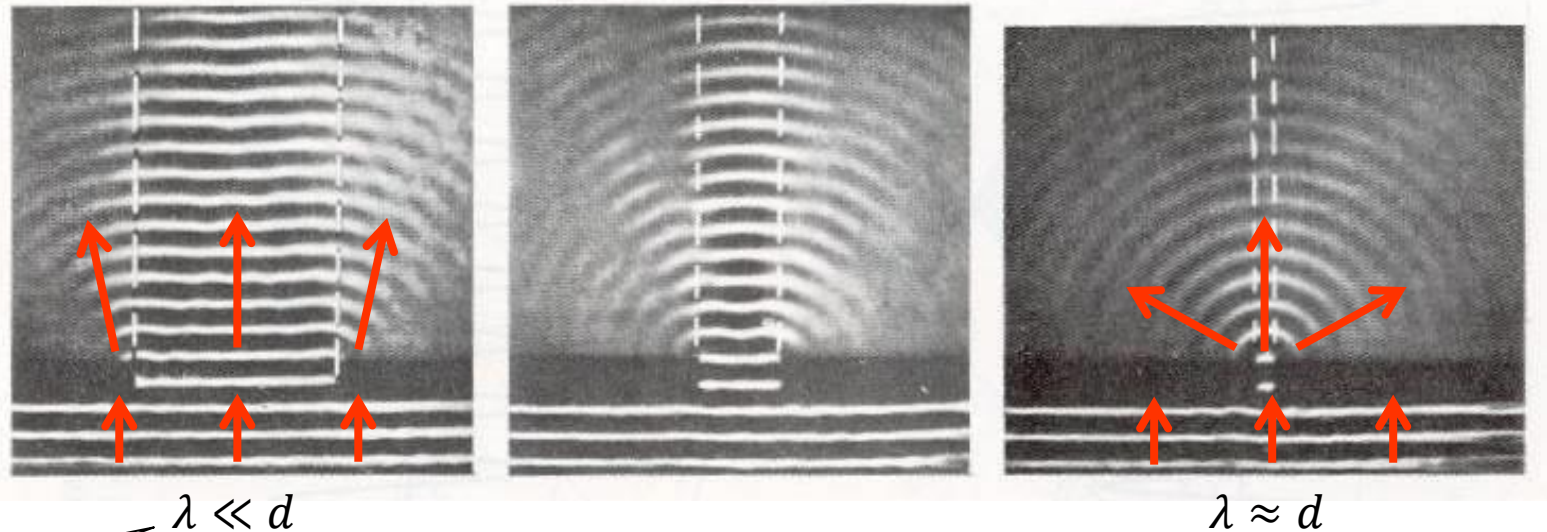




# Elhajlás (diffrakció)

A hullám **terjedési irányának megváltozása** a hullám útjában álló **akadályokon, nyílásokon** (nem két közeg határfelületén!).

**Példa:** elhajlás egy résen:



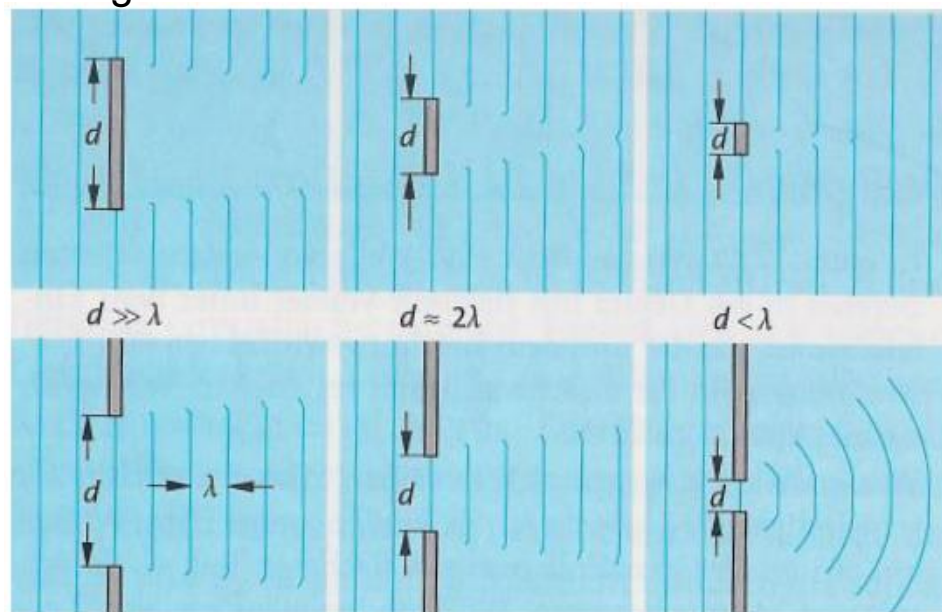
hullámhossz

a rés  
szélessége

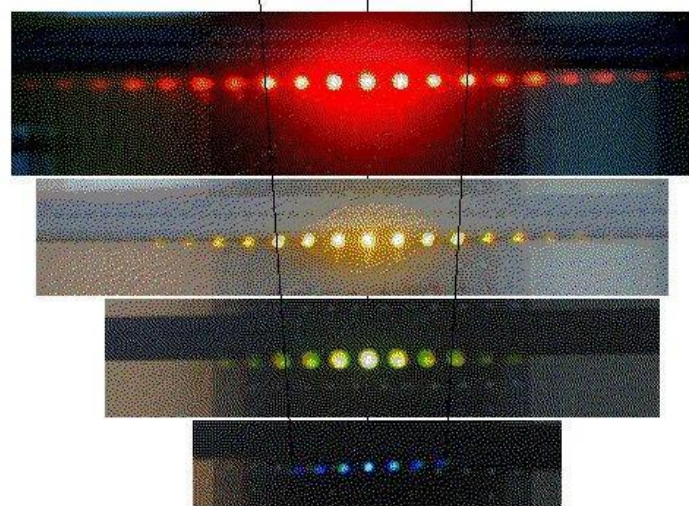
A hullámok egy **nyílás mögött** olyan **tartományba is behatolnak**, amely az egyszerű **geometriai** várakozás alapján „**árnyéktérnek**” minősül.

- Az **akadály** vagy a **nyílás méretének** és a **hullámhossz** arányának függvényében a **diffrakció többé vagy kevésbé hangsúlyos**
- A diffrakció annál hangsúlyosabban jelenik meg:

- minél **kisebb az akadály vagy a rés** (adott hullámhossz esetén)



- Minél **nagyobb a hullámhossz** (adott résszélesség esetén)



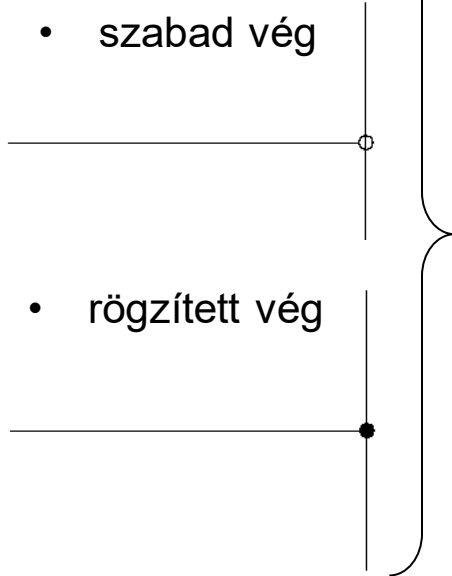
### Alkalmazások:

- Diffrakciós módszerek
- A fényelhajlás az oka minden optikai készülék véges felbontóképességének, pl. mikroszkóp, szem.

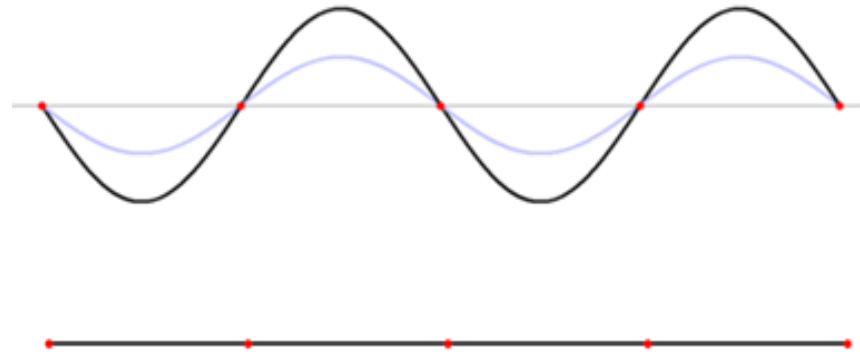
# Állóhullámok

Egy hullám visszaverődése

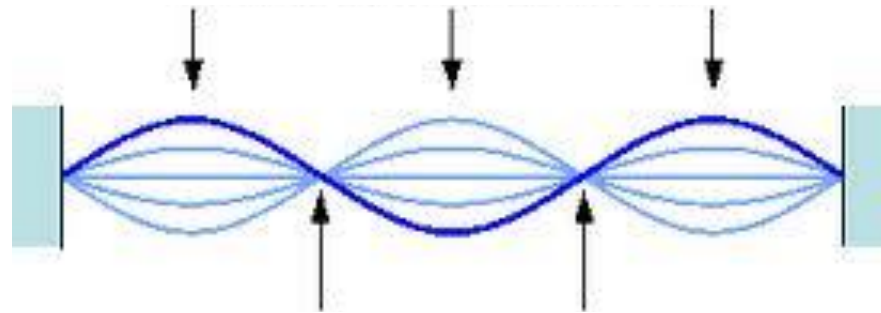
- szabad vég



- rögzített vég



duzzadóhelyek

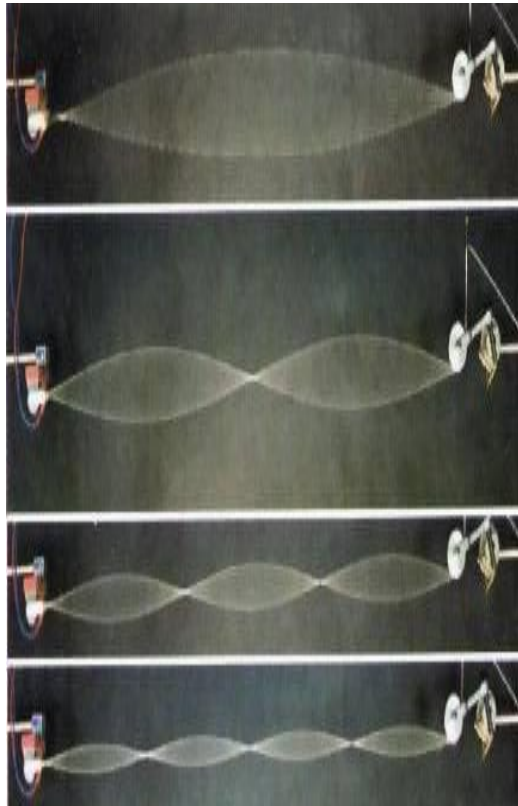


csomópontok

- Két azonos frekvenciájú és amplitúdójú de **ellentétes terjedési irányú síkhullám interferenciájának** eredményeként jön létre (pl. Visszaverődő és beeső hullámok egymásra helyezése) – az eredő hullám állni látszik
- Az egyes pontok eltérő amplitúdóval rezegnek (csomópontokban nulla, duzzadóhelyeken max.)
- Két csomópont között azonos fázis, szomszédos tartományokban ellentétes
- A szabad végen duzzadóhely, a rögzített vég csomópont

# Állóhullámok

**Példa:** Egy rendszer két rögzített véggel (mindkettő csomópont). Így a húr hossza meghatározza a lehetséges hullámhosszakat.



alapharmonikus

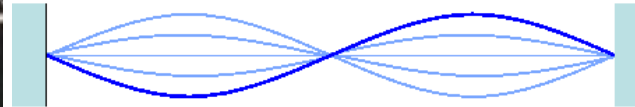


$$\lambda_0 = 2 \cdot l \Rightarrow f_0 = \frac{c}{2l}$$

A húr sajátfrekvenciái

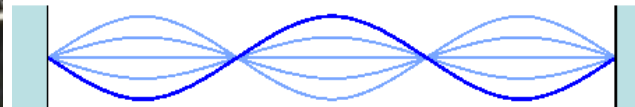
$f_0$  - alapfrekvencia

1. felharmonikus

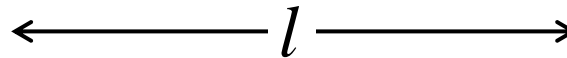


$$\lambda_1 = l \Rightarrow f_1 = \frac{c}{l} = 2 \cdot f_0$$

2. felharmonikus



$$\lambda_2 = \frac{2}{3} \cdot l \Rightarrow f_2 = \frac{3c}{2l} = 3 \cdot f_0$$



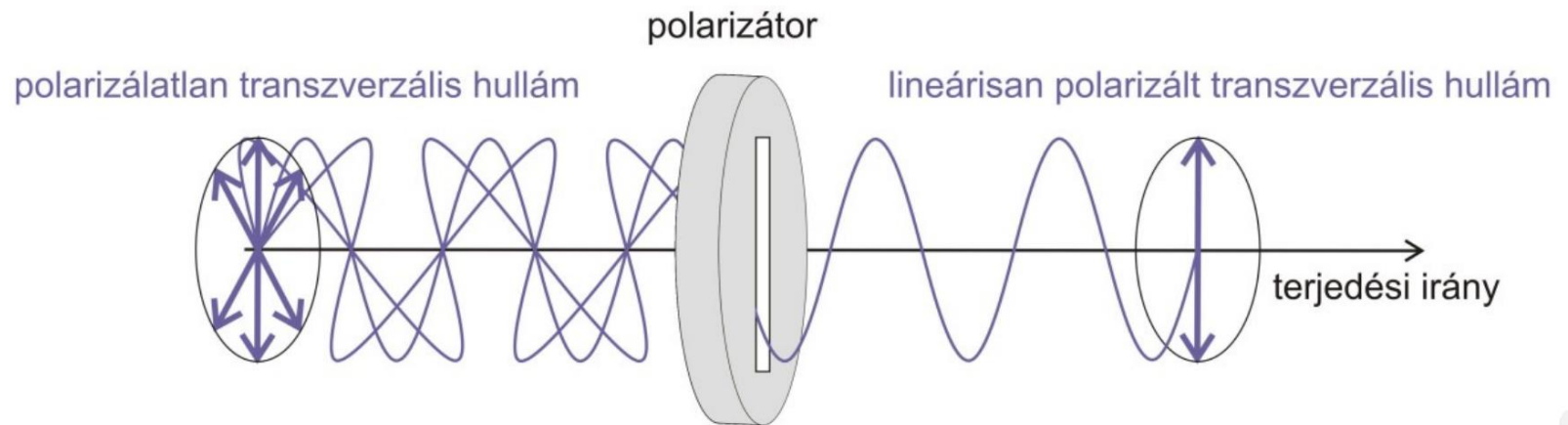
Megjegyzés:

Egy hegedű húrjának alapfrekvenciáját beállíthatjuk pl.:

- a húr hosszának változtatásával (ha  $l$  kisebb,  $\lambda$  is kisebb,  $f$  nagyobb, mert  $c$  változatlan)
- Az alap és felharmonikusok összessége határozza meg a hangszínt

# (Lineáris) polarizáció

- **Transzverzális hullámok** esetén a rezgés iránya és a terjedési irány merőleges egymásra
- A **rezgés iránya ezzel még nincs pontosan meghatározva**, bár mindig merőleges a terjedési irányra (= polarizálatlan hullám)
- **Egy rezgésirány (rezgéssík) "kiválasztását"** egy polarizátor segítségével lineáris polarizációnak nevezzük. **Csak transzverzális hullám polarizálható.**

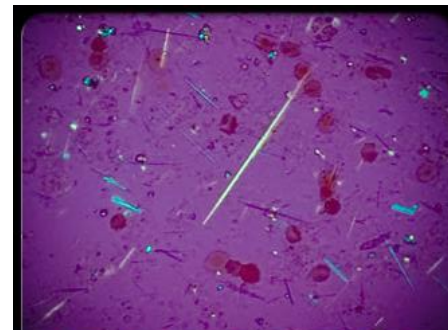


A polarizált fény használata:

Polarizációs mikroszkóp



köszvény

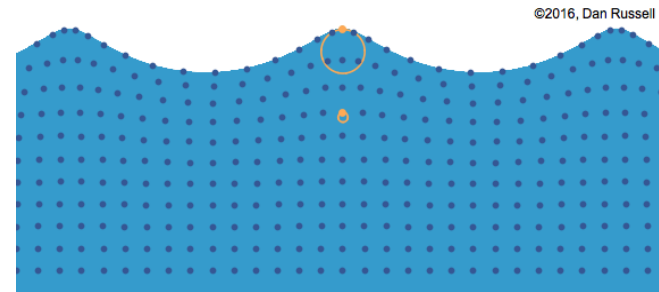


húgysavkristályok polarizációs mikroszkópban

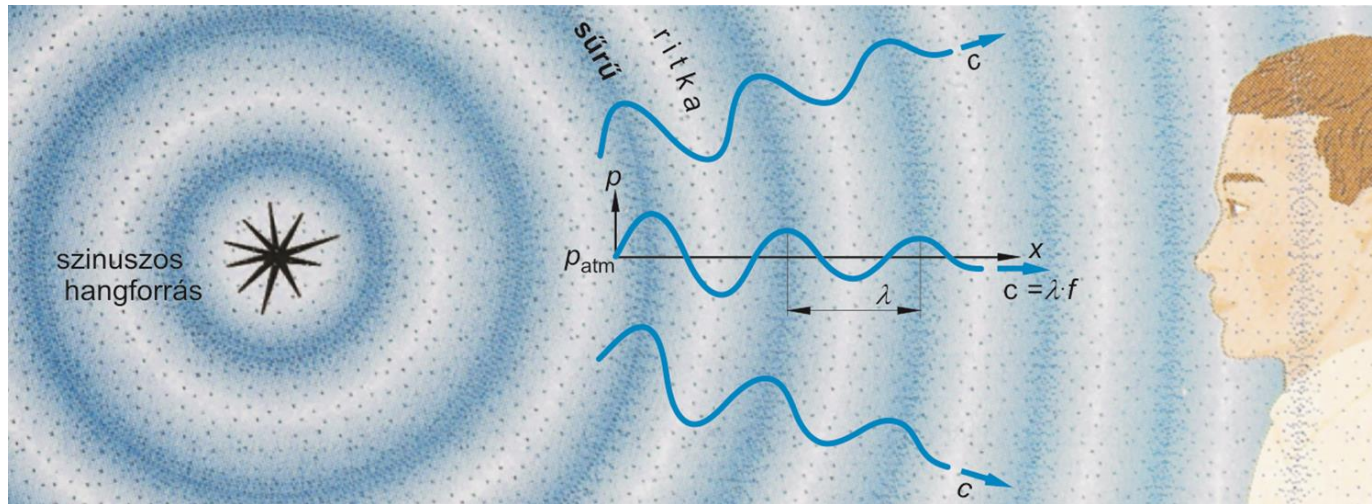


# Mechanikai hullámok

- **Anyagi mozgásokhoz kötöttek** (közegre van szükségük a terjedéshez)
- A közeg alkotóelemeinek mozgása pl.:
  - a víz hullámai (víz)
  - hanghullámok (pl. levegő)
- Lehetnek longitudinális és transzverzális hullámok is.
- A mechanikai **longitudinális** hullámok **minden közegben** képesek a terjedésre, a mechanikai **transzverzális** hullámok csak **szilárd anyagokban**. (A víz felületi hullámai azonban részben transzverzálisak).
- A hullámok terjedésével **energiatranszport** jár együtt, de **anyagtranszport nem**.



# Hang



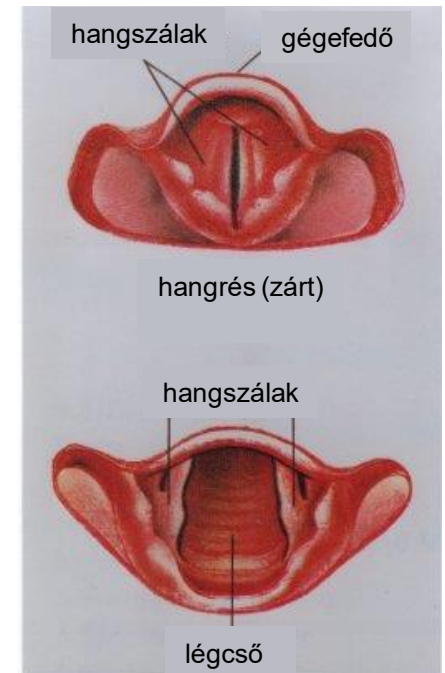
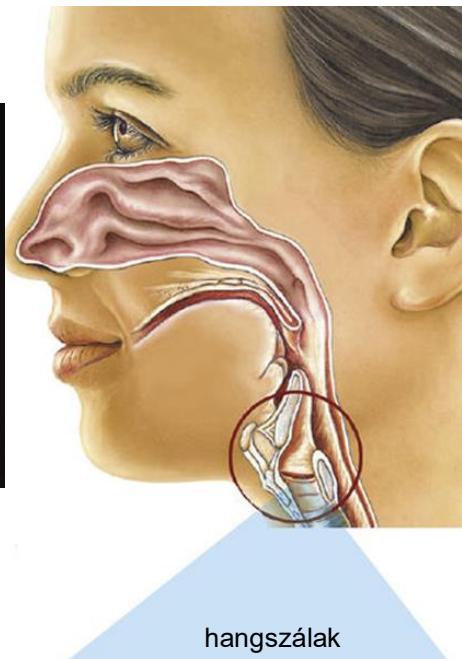
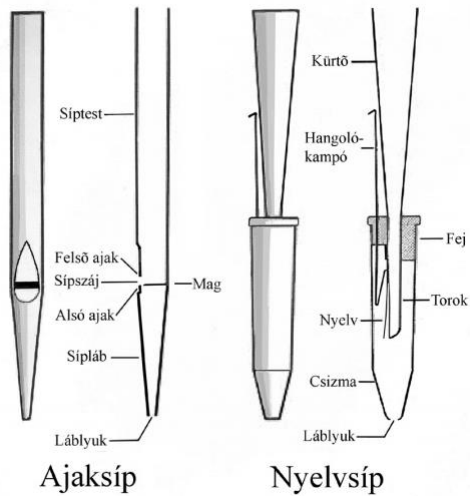
- A hanghullámok **mechanikai hullám**ok, az **emberi hallás alapján négy tartományba** oszthatók:

Hangtartományok	infrahang	hallható hang	ultrahang	hiperhang
frekvenciaértékek (Hz)	< 20	20–20 000	20 000– $10^9$	$10^9 <$

- A **hangsebesség** általában alacsonyabb gázokban, mint folyadékokban, és alacsonyabb folyadékokban, mint szilárd anyagokban.

közeg	$c_{\text{hang}}$ (m/s)
levegő (0°C, 101 kPa)	330
hélium gáz (0°C, 101 kPa)	965
víz (20°C)	1483
zsírszövet	1470
izomszövet	1568
csontszövet (kompakt)	3600
vas	5950

# Hanghullámok keltése





# Feladat

A delfin 7 mm hullámhosszúságú hangot bocsát ki.

a) Számítsa ki a frekvenciát vízben!

b) Melyik frekvencia tartományba tartozik ez a hang?

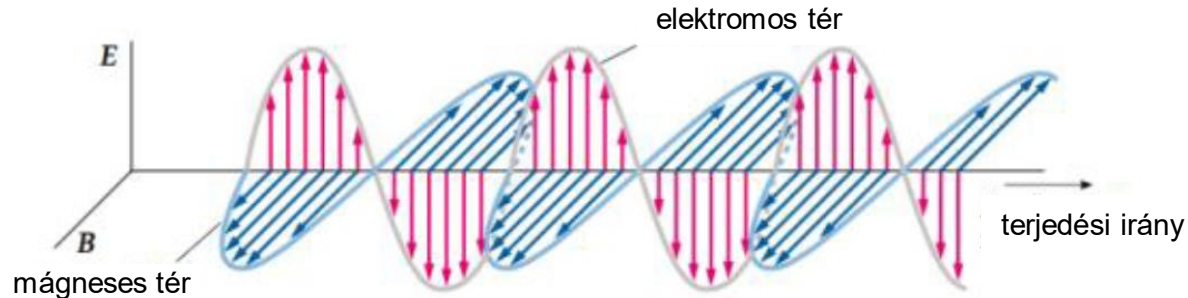
c) A hanghullámok a vízből a levegőbe jutnak. Számítsa ki a frekvenciát a levegőben!

d) Számítsa ki a hullámhosszat levegőben!



# Elektromágneses hullámok

- Elektromos és mágneses mezők hullámai



- Az elektromágneses tér a rezgésre képes közeg, így ezek a hullámok **vákuumban is terjedni tudnak**
- **Transzverzális hullámok** (amelyek ezáltal **polarizálhatók** is)
- Minden elektromágneses hullám **vákuumban azonos sebességgel**, a fénysebességgel terjed:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

## A fény - a legismertebb elektromágneses hullám

- A látható fény spektruma kb. 380 nm–780 nm közé esik (VIS-tartomány) → **400 nm–800 nm**

