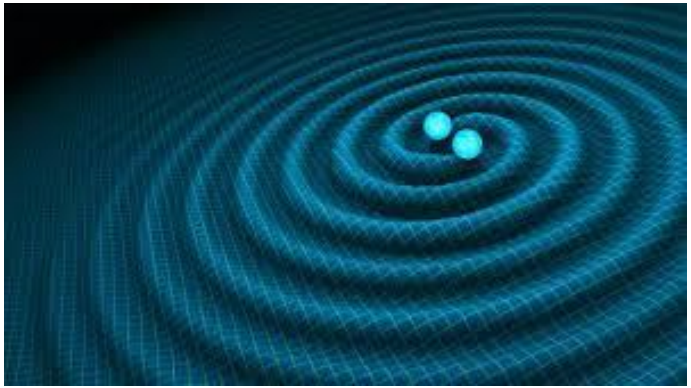
FAKULTA
PŘÍRODOVĚDNĚ-HUMANITNÍ
A PEDAGOGICKÁ TUL

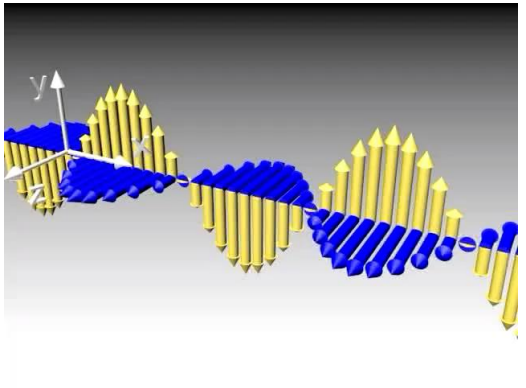
Vlnění 1 – FYZ2 2023 FS

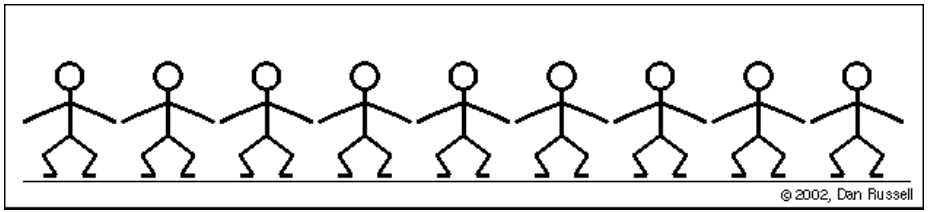
Ing. Štěpán Kunc, Ph.D.

stepan.kunc@tul.cz

Vlny







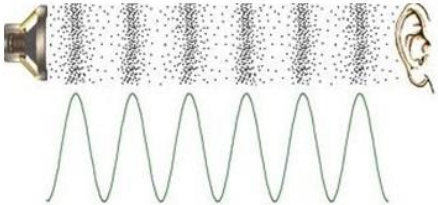
https://youtu.be/kZF7QC3tsJY

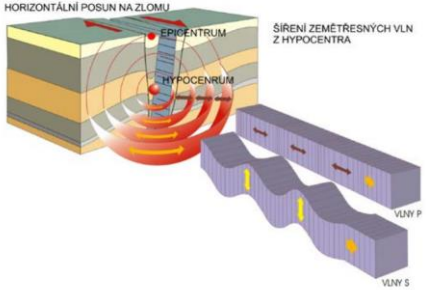
https://www.ligo.caltech.edu/LA/video/ligo20200623v1

http://www.acs.psu.edu/drussell/demos.html

Typy vln

Mechanické - vlny na hladině, seismické vlny, zvuk – Podléhají Newtonovým zákonům, existují pouze v hmotném prostředí (vzduch, voda, skála,…)

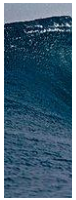




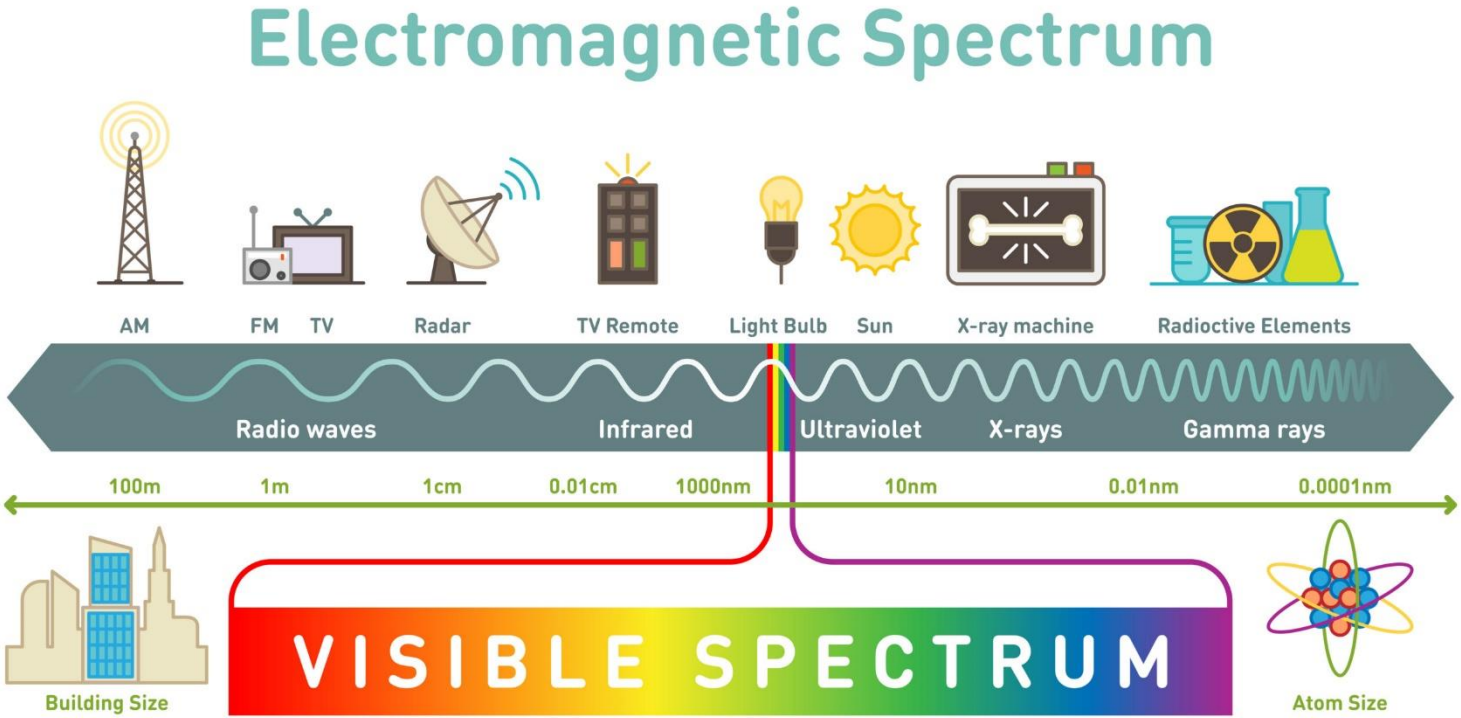
Elektromagnetické - světlo, mikrovlny, radiové vlny,……..
nepotřebují hmotné medium, ve vakuu se šíří rychlostí
c = 299 792 458 m/s.

Typy vln

Mec …nům,
exis



Elek

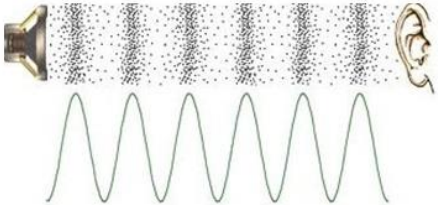


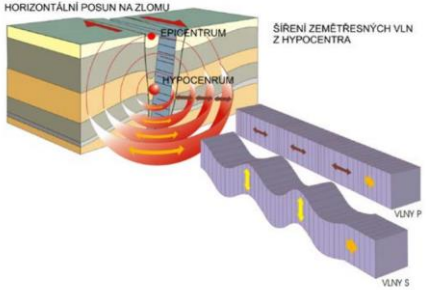
Čás

Gra

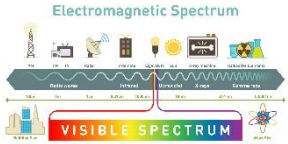
Typy vln

Mechanické - vlny na hladině, seismické vlny, zvuk – Podléhají Newtonovým zákonům, existují pouze v hmotném prostředí (vzduch, voda, skála,…)



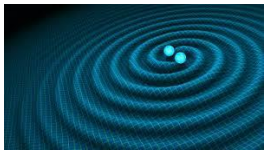


Elektromagnetické - světlo, mikrovlny, radiové vlny,……..
nepotřebují hmotné medium, ve vakuu se šíří rychlostí
c = 299 792 458 m/s.



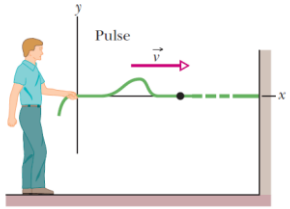
Částicové vln - elektrony, protony, částice,…. – částicově vlnový dualismus

Gravitační vlny - prostoročasové vlny -

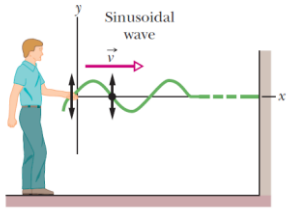


Typy vln

Transverzální (příčné) vlny
Kolmé na šíření energie

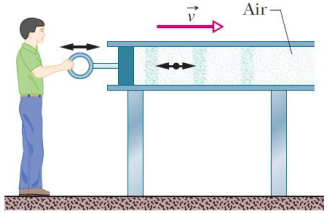


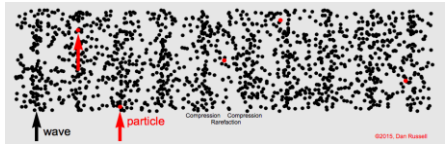
(a)



(b)

Longitudinální (podélné) vlny
Ve směru šíření energie vlny





Šíření rozruchu prostorem: deformace, teplota, tlak hustota, pole,

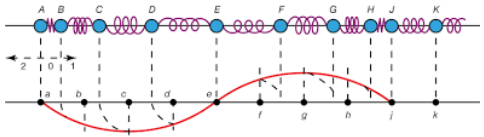
Veličiny se v daném místě prostoru mění s čase (kmitají)

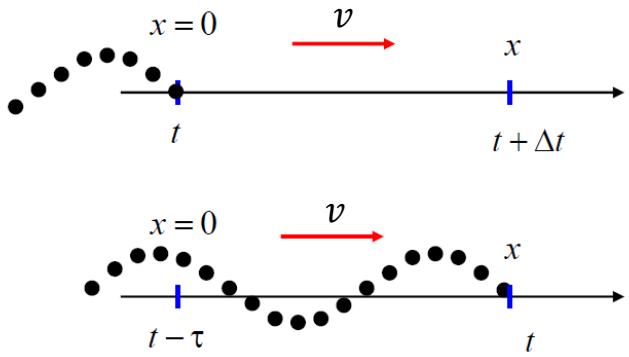
Vlnění přenáší energii prostorem

Vlny se šíří konečnou rychlostí v (c)

Vznik a popis vlnění

Zdrojem vlnění je kmitající objekt – mechanický oscilátor, elektrický dipól,……
Okolí objektu reaguje na kmity zdroje s určitým časovým zpožděním
Existuje vazba mezi sousedními místy v prostoru, mechanická, elektromagnetická i jiná
Soustavu souřadnic zvolím tak, že zdroj kmitů dám do počátku, stav kmitajícího zdroje je popsán funkcí





Funkce f(x,t) popisuje veličinu, která se šíří ve směru osy x (např. výchylku částic prostředí)

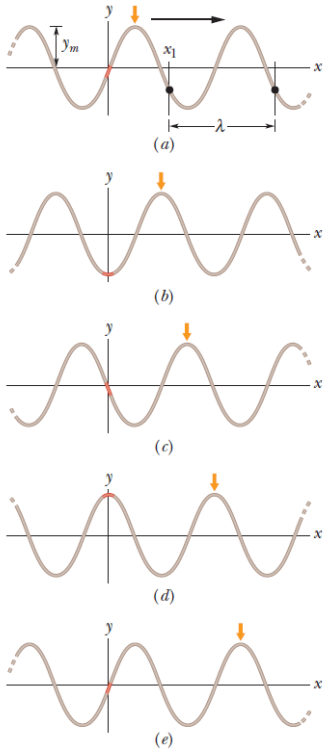
$f_{(x,t)} = f_{(0,t-\tau)}$ 1D $\tau = \frac{x}{v}$

3D $\tau = \frac{r}{v}$

$$f_{(x,t)} = f_{(0,t-\tau)} = f_{\left(0,t-\frac{r}{v}\right)}$$

Ve směru osy x !
Zdroj v počátku x = 0

Harmonická vlna

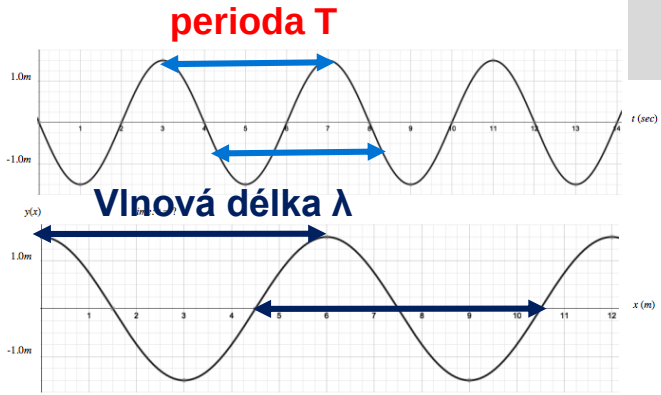


Pokud je zdrojem vlnění harmonický signál (sinus, kosinus,….)

$$\vec{u}(0,t) = \vec{u}_m sin(\omega t + \varphi_0) \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

V místech ve vzdálenosti x od zdroje jsou vidět kmity se zpožděním τ

$$\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin(\omega(t-\tau) + \varphi_0) = \vec{u}_m sin\left(\omega(t - \frac{x}{v}) + \varphi_0\right)$$



$$\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin\left(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0\right)$$

Fáze vlnění: $\omega(t - \frac{x}{v}) + \varphi_0$

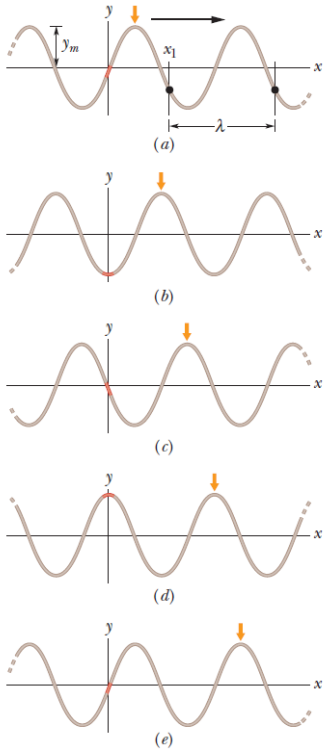
$$\varphi = konst \qquad d\varphi = 0$$

$$\mathrm{v} = \frac{dx}{dt}$$

Fázová rychlost v: $v = \frac{\lambda}{T}$

$$\omega\frac{x}{v} = \frac{2\pi}{T}\frac{x}{v} = 2\pi\frac{x}{T}\frac{T}{\lambda}$$

Harmonická vlna



Pokud je zdrojem vlnění harmonický signál (sinus, kosinus,….)

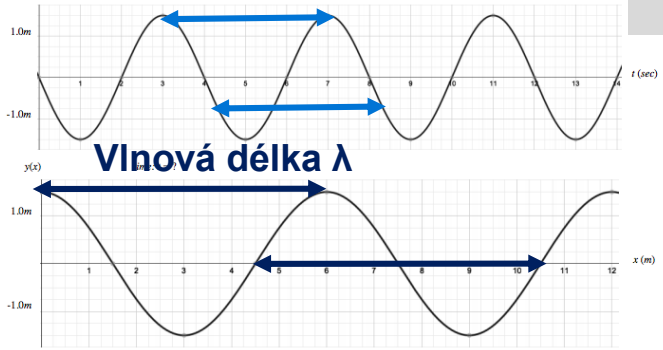
$$\vec{u}(0,t) = \vec{u}_m sin(\omega t + \varphi_0) \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

V místech ve vzdálenosti x od zdroje jsou vidět kmity se zpožděním τ

$$\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin(\omega(t-\tau) + \varphi_0) = \vec{u}_m sin\left(\omega(t - \frac{x}{v}) + \varphi_0\right)$$

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

perioda T



$$\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin\left(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0\right)$$

Fáze vlnění: $\omega(t - \frac{x}{v}) + \varphi_0$

$\varphi = konst$

$d\varphi = 0$

$\mathrm{v} = \frac{dx}{dt}$

Fázová rychlost v: $v = \frac{\lambda}{T}$

$\omega\frac{x}{v} = \frac{2\pi}{T}\frac{x}{v} = 2\pi\frac{x}{T}\frac{T}{\lambda}$

Harmonická vlna

$$\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin\left(2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}) + \varphi_0\right)$$

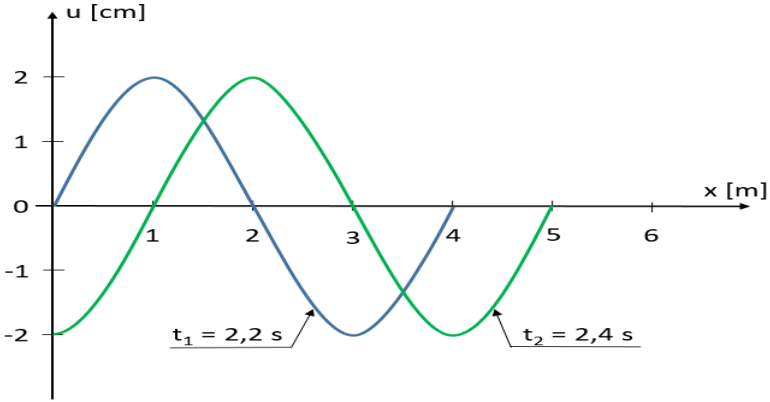
Zavedeme (úhlové) vlnové číslo ***k*** vlnočet $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v}$

Rovnice v 1D a čas $\vec{u}(x,t) = \vec{u}_m sin(\omega t - kx + \varphi_0)$

Harmonická vlna

Jeden z grafů ukazuje závislost výchylky na souřadnici x při postupném vlnění v ose x v okamžiku t_1 = 2,2 s. Druhý graf ukazuje totéž v okamžiku t_2 = 2,4 s. Přiřaďte následujícím parametrům vlnění správné číselné hodnoty v uvedených jednotkách:

Parametr:	Nabídka číselné hodnoty:	Kód:
vlnová délka [m]	4	1
fázová rychlost [m/s]	2	2
frekvence [Hz]	5	3
velikost vlnového vektoru [rad/m]	1,57	4
amplituda [cm]	1,25	5



Vlnoplocha

Vlnoplocha – myšlená plocha, spojující místa stejné fáze

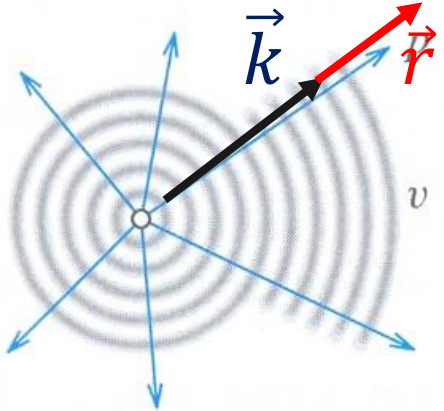
Zavedeme (úhlový) vlnový vektor $\vec{k}$ ⇒ $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{n}$ ⇒ $\vec{u}(\vec{r}, t) = \vec{u}_m sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)$

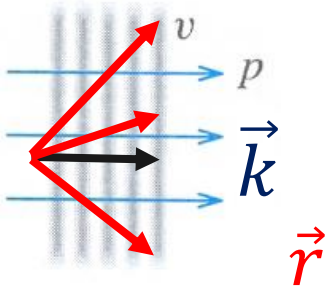
$\vec{n}$ je jednotkový vektor ve směru šíření vlny

$\vec{k}\vec{r} = konstanta$ pro danou vlnoplochu

Kolmice k vlnoploše má směr vlnového vektoru k.

$\vec{k}\vec{r} = k \cdot r \cdot cos\alpha$

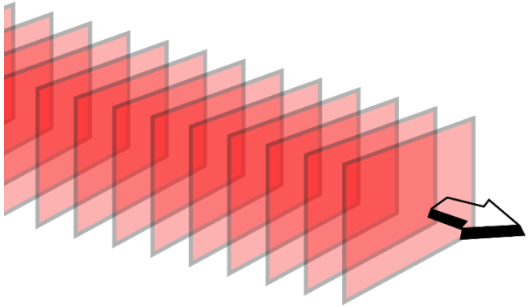




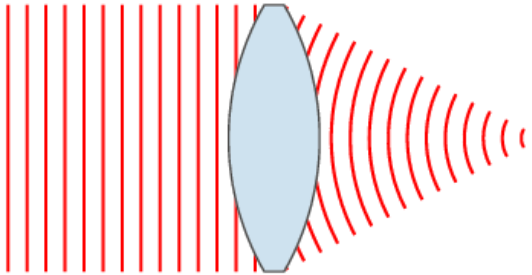
Kulová vlnoplocha – má v čase *t* poloměr ***r = vt*** , kde *v* je fázová rychlost.
Ve velké vzdálenosti od zdroje můžeme část kulové vlnoplochy nahradit vlnoplochou rovinnou.

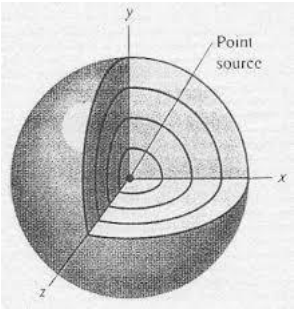
Vlnoplochy

Rovinná vlnoplocha

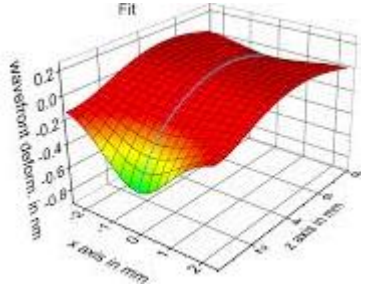


Kulová vlnoplocha

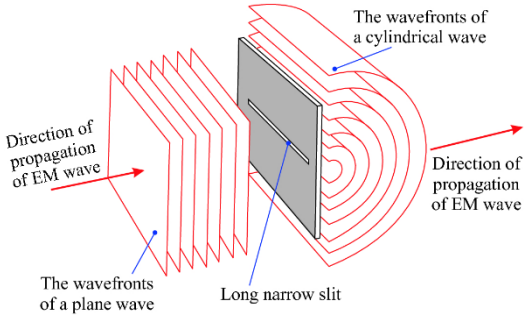




Deformovaná vlnoplocha



Válcová vlnoplocha



Polarizace vlnění

Mechanická výchylka (nebo intenzita elektrického pole …) má 3 stupně volnosti

$$\vec{u}(\vec{r},t) = \vec{u}_m sin\left(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0\right)$$

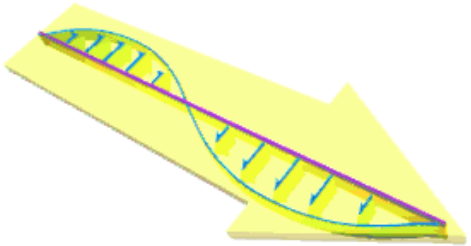
1) Kolmá na směr šíření vlny $\vec{k}$, 2SV - příčné vlnění (elektromagnetické vlny - světlo)
2) Podélné vlnění, 1SV , kmity ve směru $\vec{k}$– akustické vlny- zvuk

https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html

Polarizace příčného vlnění 2SV

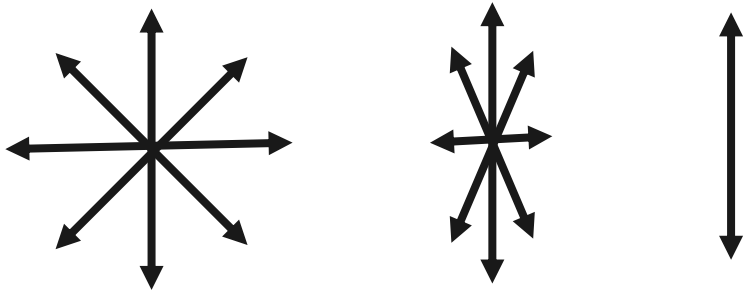
Není preferovaný směr kmitů – nepolarizované vlnění (např. světlo, emise z různě orientovaných dipólů)

Preferovaný typ kmitů v rovině - Lissajousovy obrazce pro $\omega_x = \omega_y = \omega$

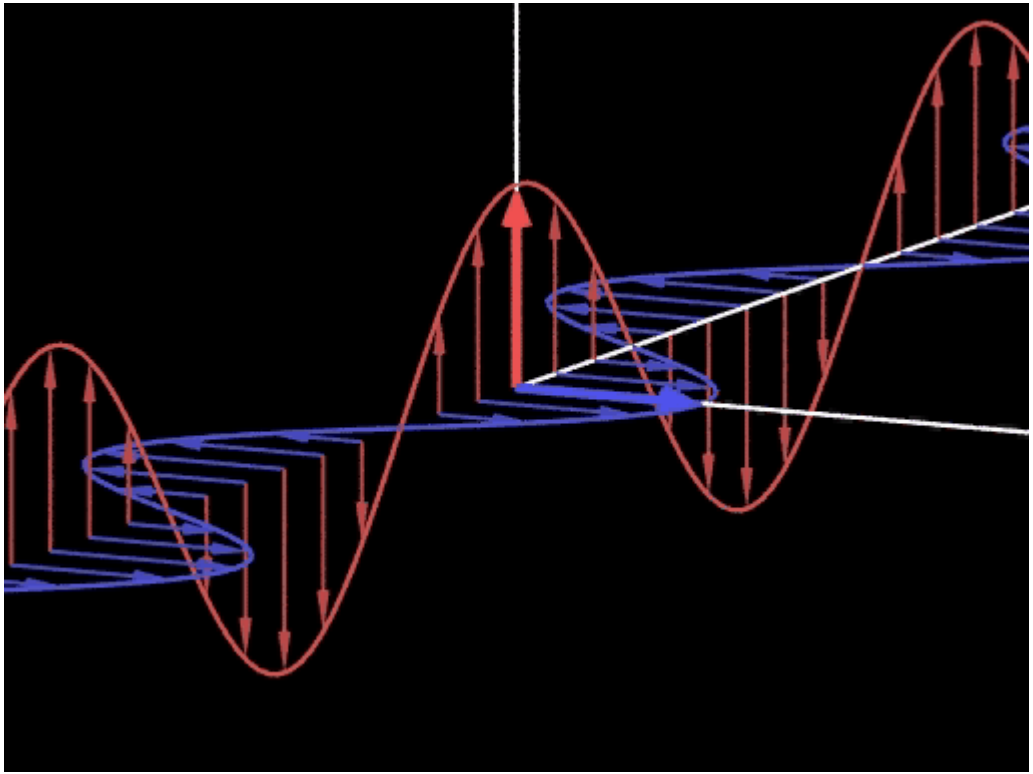


Elipsa
Kružnice
Úsečka

Částečně polarizované

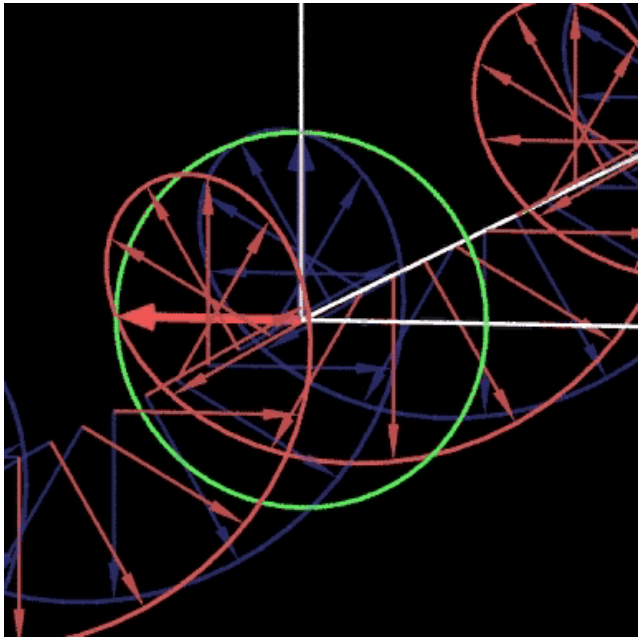


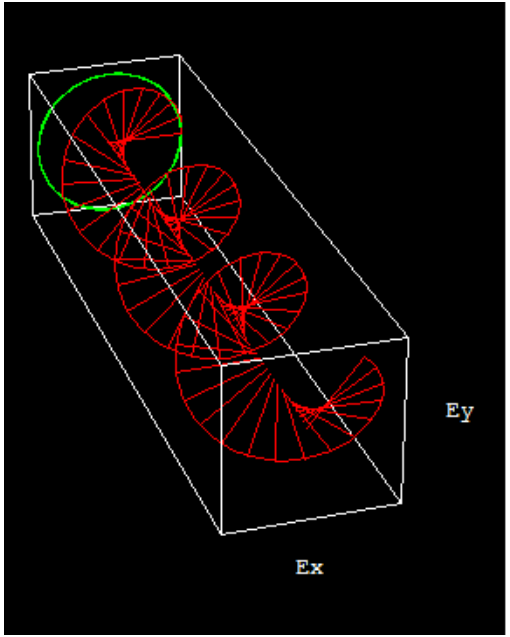
Lineární polarizace



http://www.aldebaran.cz/animace/em_plane.gif

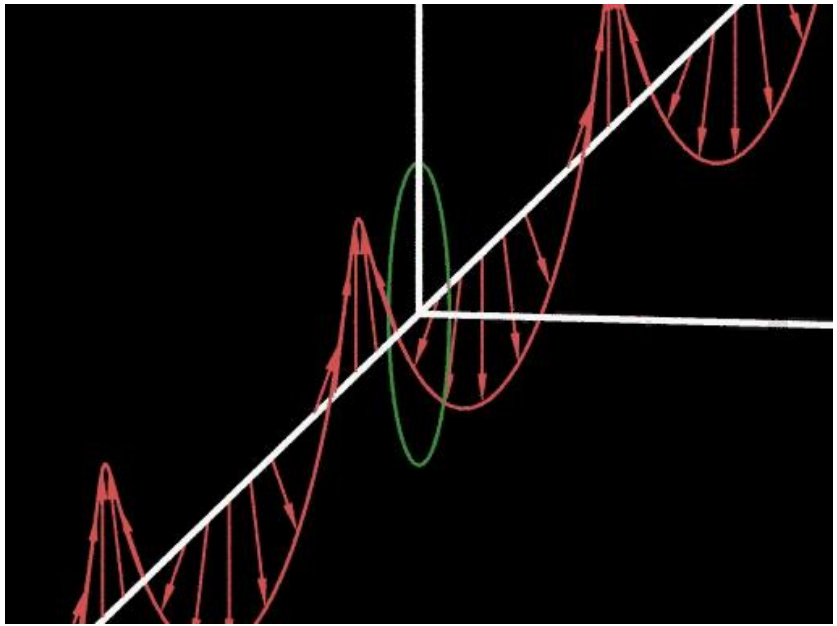
Kruhová polarizace





http://www.aldebaran.cz/animace/em_circular.gif

Eliptická polarizace



http://www.aldebaran.cz/animace/em_elliptical.gif

Interference

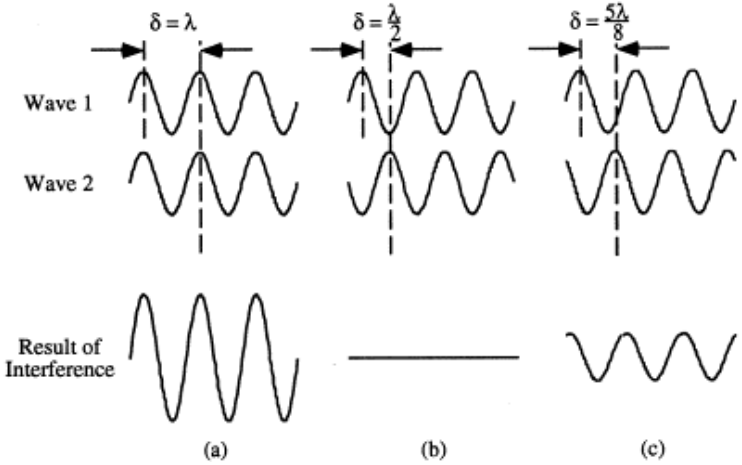
Pro skládání vln platí princip superpozice

$$\vec{u}(\vec{r},t) = \vec{u}_1(\vec{r},t) + \vec{u}_2(\vec{r},t)$$

$$\vec{u}_1(\vec{r},t) = \vec{u}_{m1} sin\left(\omega_1 t - \vec{k}_1\vec{r} + \varphi_0\right) = \vec{u}_{m1} sin\Phi_1$$

$$\vec{u}_2(\vec{r},t) = \vec{u}_{m2} sin\left(\omega_2 t - \vec{k}_2\vec{r} + \varphi_0\right) = \vec{u}_{m2} sin\Phi_2$$

$$\boldsymbol{\vec{u}^2(\vec{r},t) = u_{m1}^2 + u_{m2}^2 + 2\vec{u}_{m1}\vec{u}_{m2}\ \cos(\Phi_1 - \Phi_2)}$$



Objeví se interferenční člen, který vlnu zesílí, zeslabí, nebo dokonce vyruší.
Tento člen je nenulový, pouze pokud vlny nemají ortogonální polarizace a fázový rozdíl je konstantní, jako je to v případě dvou monochromatických harmonických vln, stejné frekvence
Pro konstantní fázový rozdíl – **koherentní vlnění**,
Částečně koherentní, nekoherentní

Interference

$$\vec{u}^2(\vec{r},t) = u_{m1}^2 + u_{m2}^2 + 2\vec{u}_{m1}\vec{u}_{m2}\ \cos(\Phi_1 - \Phi_2)$$

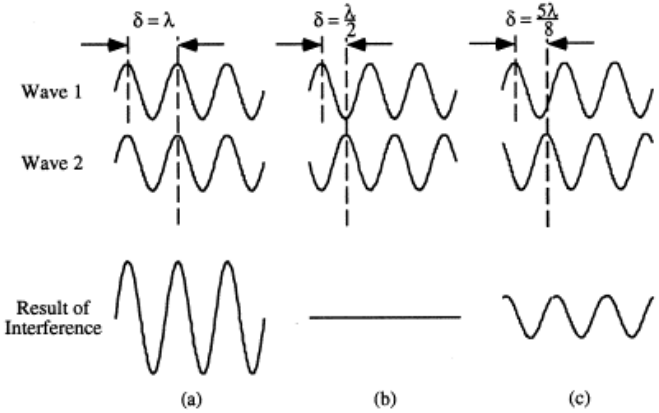
Je-li interferenční člen sudým násobkem π , vlny se zesílí - vlny jsou ve fázi

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 2n\,\pi$$

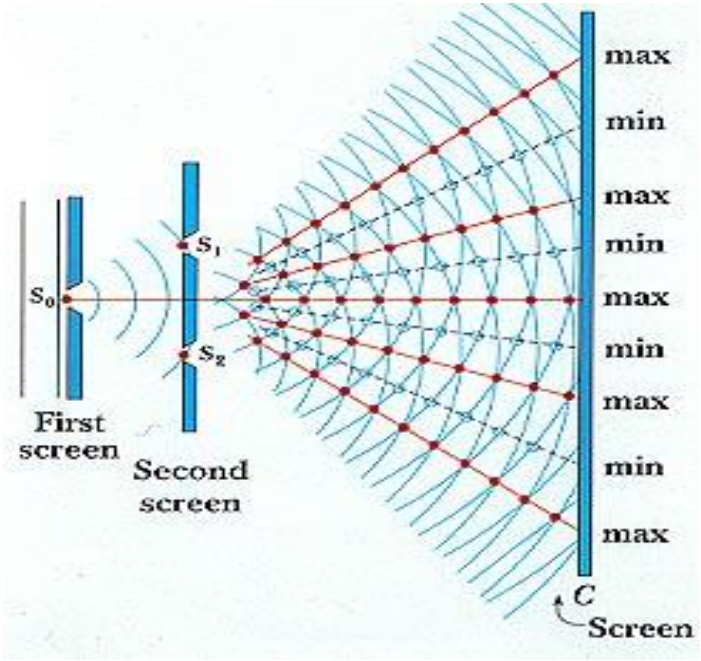
Je-li interferenční člen lichým násobkem π , vlny se zeslabí - vlny jsou ve protifázi

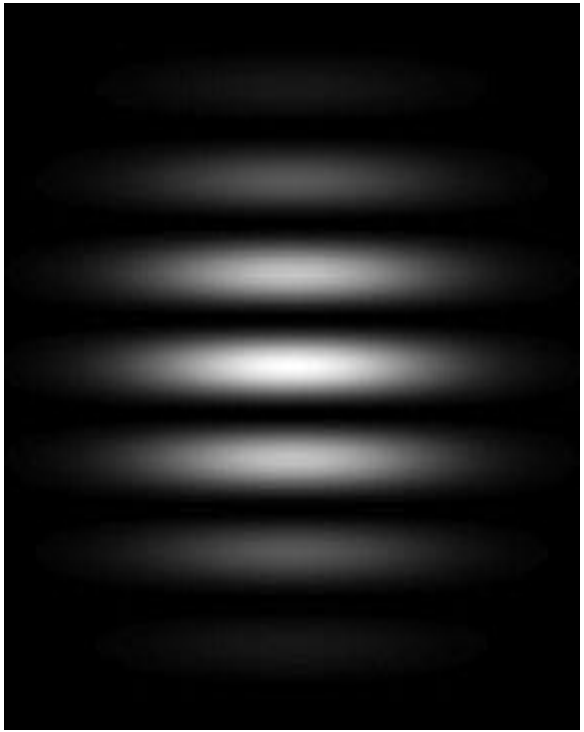
$$\Phi_1 - \Phi_2 = (2n+1)\pi$$

Při rovnosti amplitud u_m se mohou dokonce vyrušit



Youngův pokus

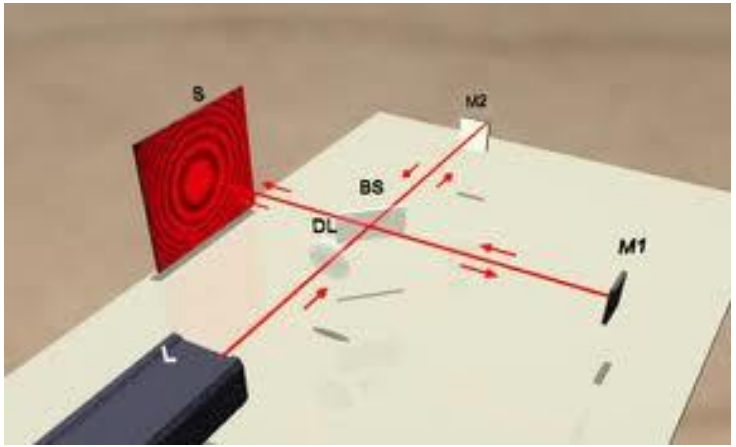


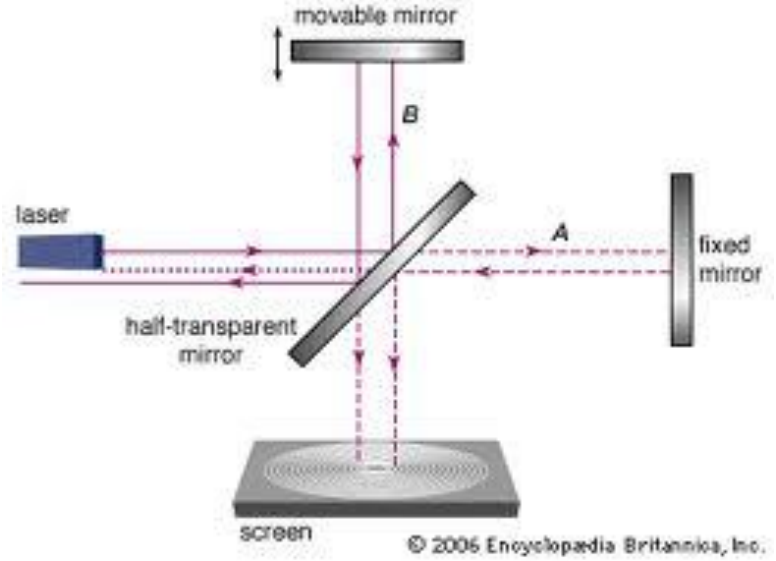


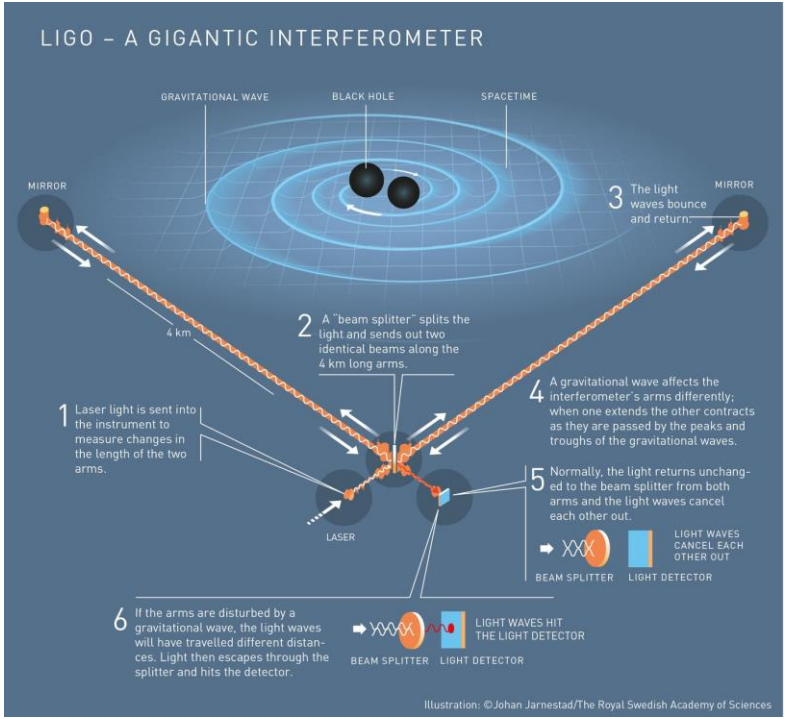
https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_en.html

Michelsonův interferometr

Velmi citlivá metoda k měření posunutí, otočení, dalších mechanických veličin, změny indexu lomu
Jevů, mající vliv na změnu indexu lomu (teplota, elektrické a magnetické pole, tlak, koncentrace látek..)





Michelsonův interferometr - Ligo

Velmi citlivá metoda k měření posunutí, otočení, dalších mechanických veličin, změny indexu lomu
Jevů, mající vliv na změnu indexu lomu (teplota, elektrické a magnetické pole, tlak, koncentrace látek..)