

# **Valovi** nastavak

polarizacija

□ *Zajedničke značajke valova:*

- dobro definiran uvjet ravnoteže (npr. opruga ispružena u ravnoj liniji ili plin u cijevi ima konstantnu gustoću)
- Medij kao cjelina se ne miče: poremećaj putuje s dobro definiranom brzinom  $v$ , brzina vala
- na sustav se primjenjuje energija da bi se generirao poremećaj
- Poremećaj prenosi energiju iz jedne pozicije na drugu.

Periodički valovi se generiraju ako se sila koja djeluje mijenja u vremenu na periodičan način. Oni imaju dobro definiranu:

□ a) Frekvenciju  $f$

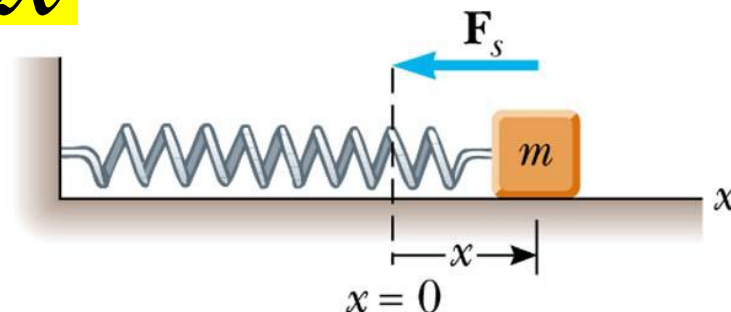
□ b) kružnu frekvenciju:  $\omega = 2\pi f$  (rad / s)

□ c) Period:  $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$  (s)

# Ponavljanje Hookeovog zakona

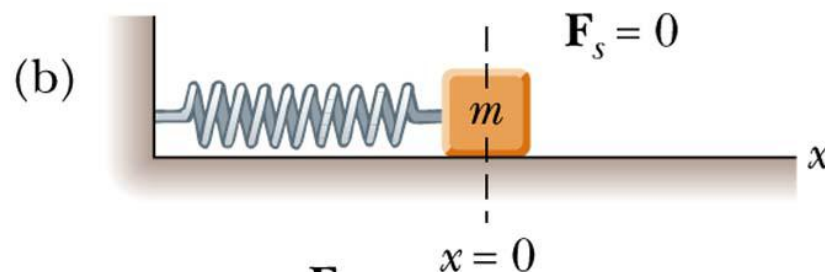
$$F = -kx$$

- Kada je udaljenost  $x$  pozitivna → (a)  
sila  $F$  je negativna ←



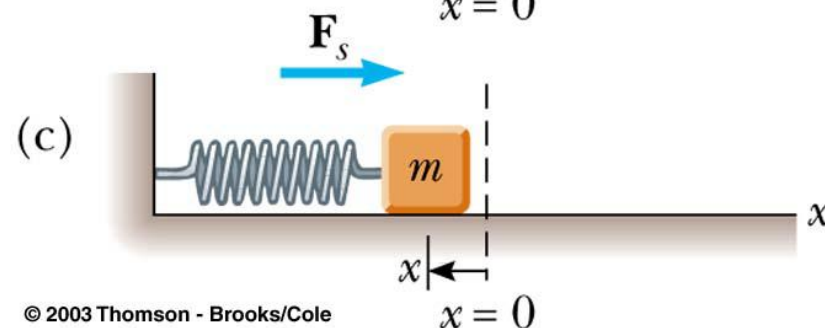
Kada je tijelo u ravnoteži ( $x = 0$ )

$$F = 0;$$



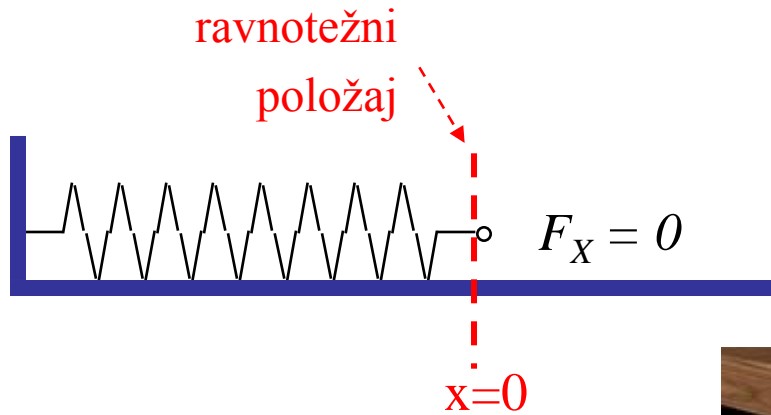
Kada je udaljenost od položaja  
ravnoteže  $x$  negativna, ←

sila  $F$  je pozitivna →



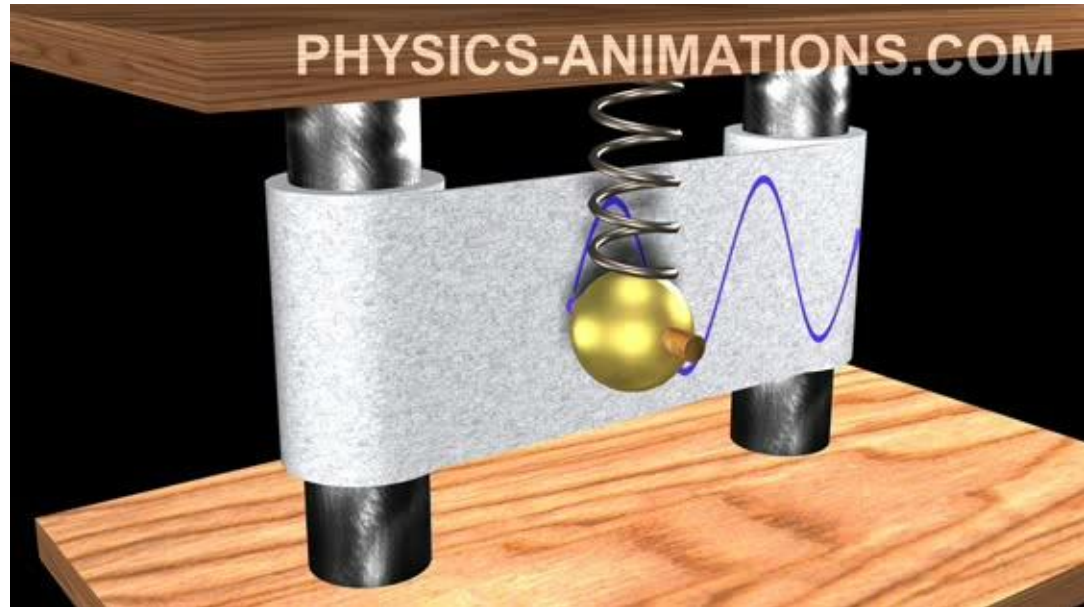
# Jednostavno harmoničko gibanje

- **Hooke-ov zakon:** Sila opruge je proporcionalna produljenju ili kompresiji opruge od ravnotežnog položaja (za male  $x$ ).



$$F_x = -kx$$

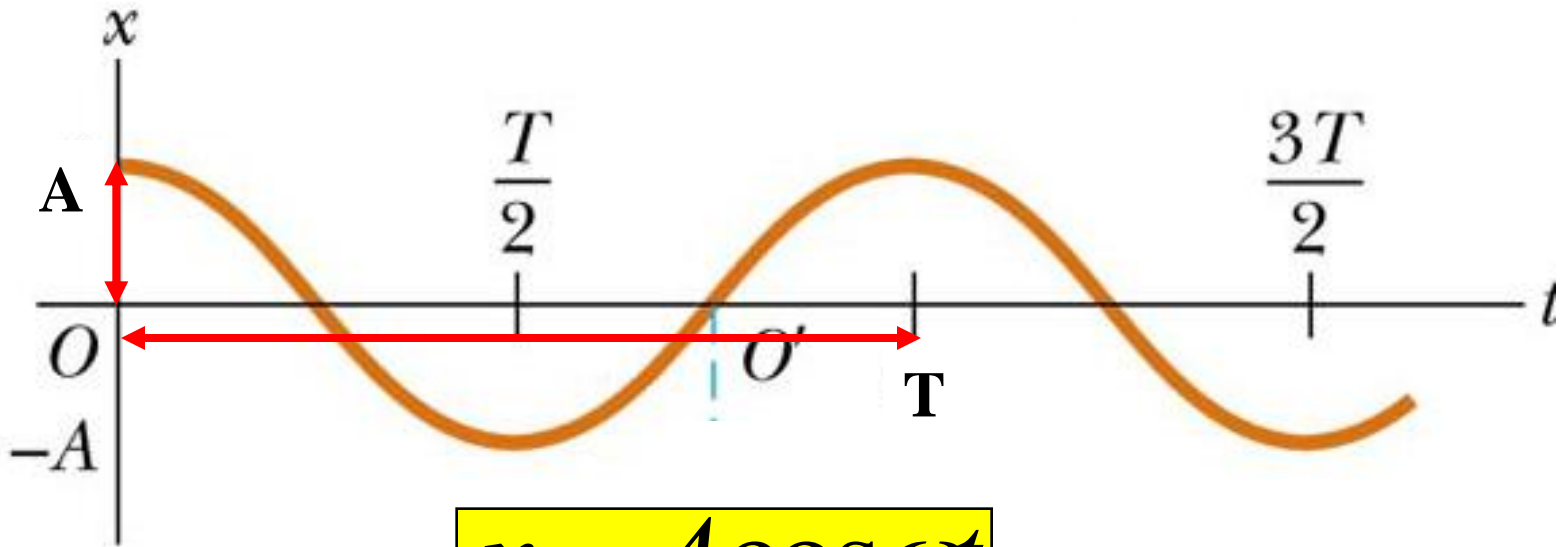
gdje je  $x$  pomak iz položaja ravnoteže i  $k$  konstanta proporcionalnosti. (*konstanta opruge*)



# Jednostavno harmoničko gibanje

- zamislite gibanje objekta (bez trenja) obješenog na idealnu oprugu (ona koja se ponaša u skladu sa Hookeovim zakonom).
- Kako se pomak, brzina i ubrzanje objekta mijenjaju s vremenom?
- Analogija:  
jednostavno harmoničko gibanje duž  $x$   
 $\leftrightarrow$   $x$  komponenta jednolikog kružnog gibanja

# Period i frekvencija



$$x = A \cos \omega t$$

$$\omega T = 2\pi$$



**Amplituda:  $A$**

**Period:  $T$**

**Frekvencija:  $f = 1/T$**

**Kružna frekvencija:  $\omega$**

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

# Matematički opis valova

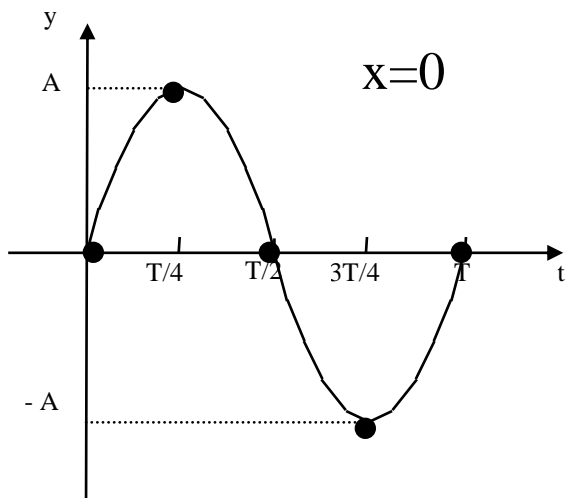
## □ Transverzalni valovi:

□ Vertikalni pomak vala varira s vremenom.

□ U određenom vremenu, val ima dobro definiran profil (zanemarujemo trenje)

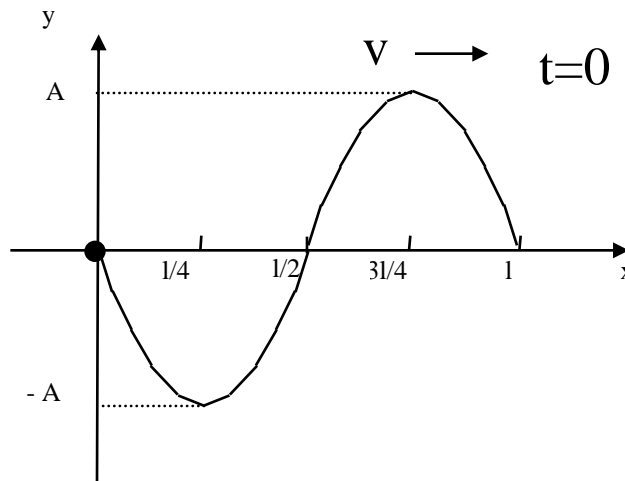
Amplituda  $A$  je maksimalni pomak u smjeru  $y$

## □ Valni dijagram (val s lijeva na desno):



Vertikalni pomak s vremenom.

$$y(x=0, t) = A \sin \frac{2\pi}{T} t = A \sin \omega t$$



Profil vala u  $t=0$ .

$$y(x, t=0) = A \sin(-kx)$$

Sinusoidalni val je najjednostavniji primjer periodičnog kontinuiranog vala i može se koristiti za konstrukciju složenijih valova

□ **Valna funkcija** (val putuje s lijeva na desno):

□ Općenito valna funkcija ovisi o  $x$  i  $t$ :

$$y = y(x, t)$$

U trenutku  $t$ , čestica je pomaknuta od  $x = 0$  za  $t - x/v$

$$y(x = 0, t) = A \sin \omega t \Rightarrow y(x, t) = A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

□ **Definiramo** valni broj  $k$ :  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  (radian/m)

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

□ **Valna funkcija** (val putuje s desna na lijevo):

Vremenski pomak je  $t + x/v$ .

Dakle, valna funkcija je:

$$y(x, t) = A \sin \omega \left( t + \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin(\omega t + kx)$$

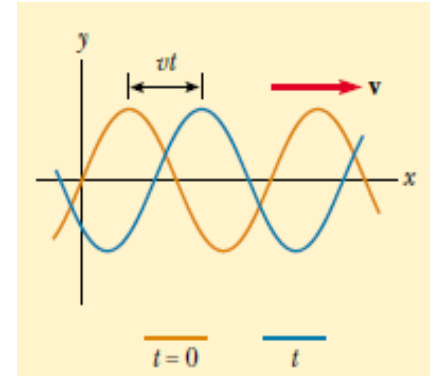
□ **Faza** vala je:  $\omega t \pm kx$  (u radijanima)



# Fazna razlika

Valna funkcija

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$



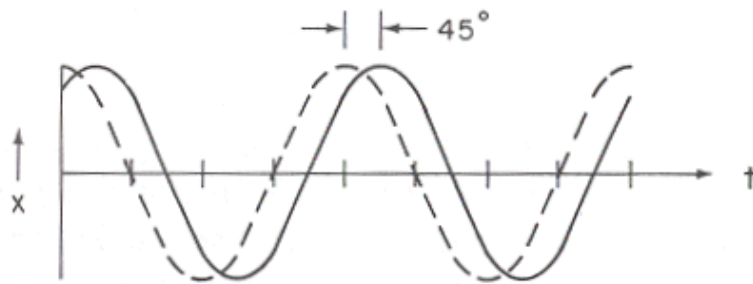
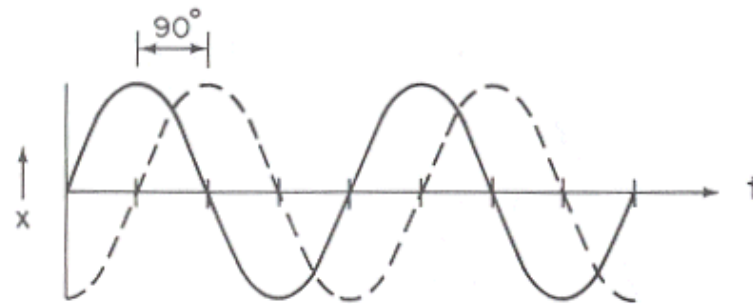
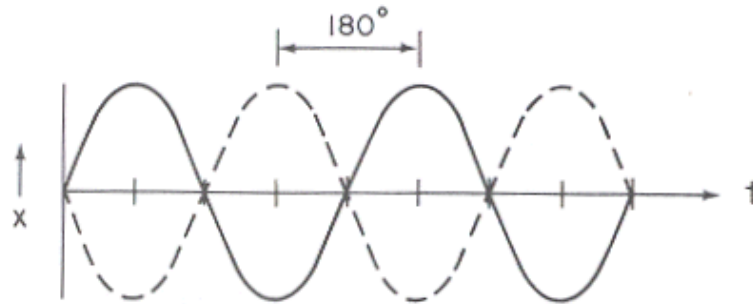
pretpostavlja da je vertikalni pomak  $y$  nula u  $x = 0$  i  $t = 0$ , a to ne mora biti slučaj. Ako nije, izražavamo općenitu valnu funkciju u obliku

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

Faza od 90-stupnjeva mijenja sinus u kosinus

$$\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin(\omega t)$$

# Fazna razlika



- Kad je ubrzanje objekta proporcionalno njegovom pomaku iz ravnotežnog položaja i usmjereno je u smjeru suprotnom od pomaka, objekt se giba jednostavnim harmoničkim gibanjem.
- Položaj  $x$  jednostavnog harmonijskog oscilatora mijenja periodično u vremenu prema izrazu

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

- Brzina i ubrzanje jednostavnog harmoničkog oscilatora su:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi)$$

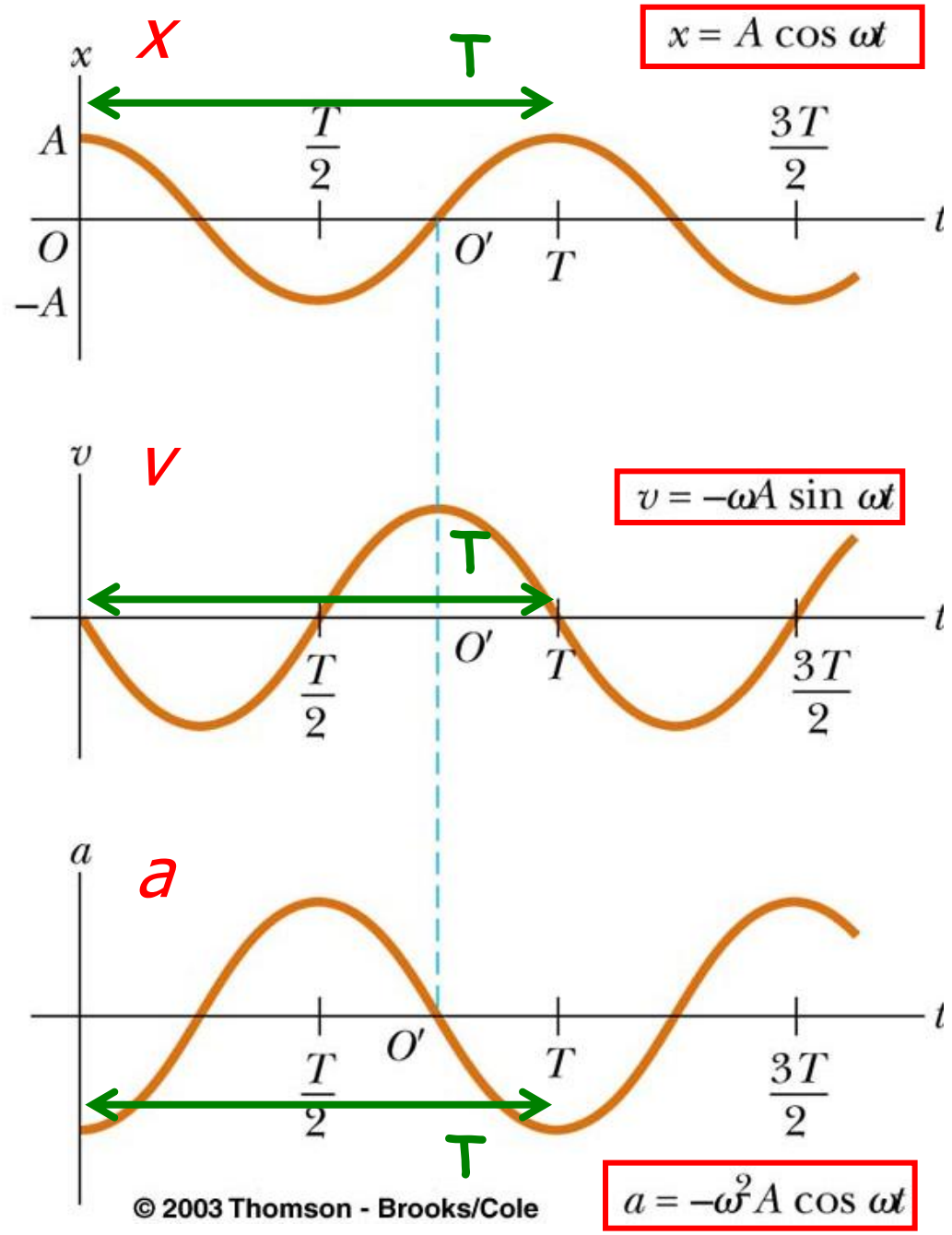
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi)$$

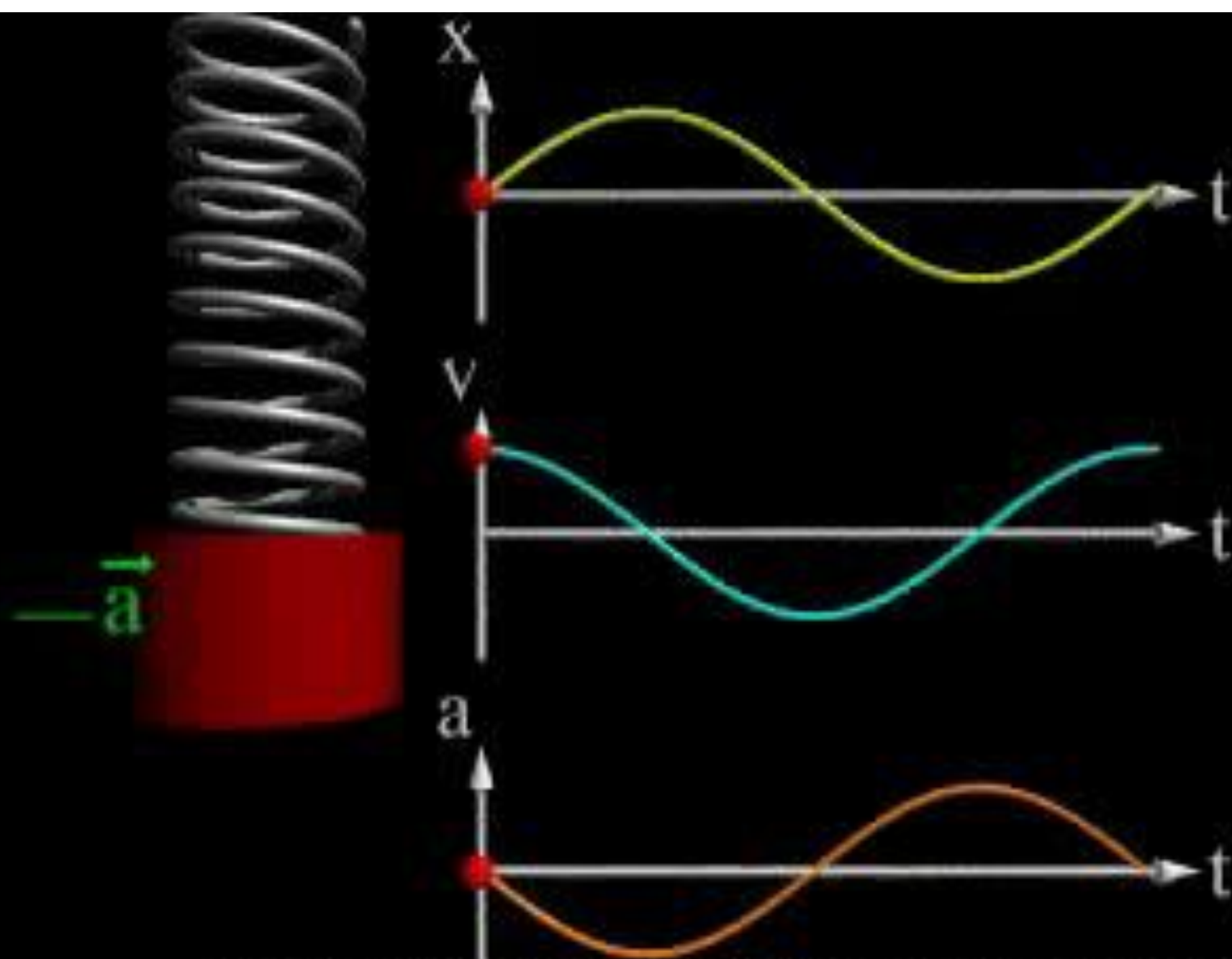
$$v = \pm \omega \sqrt{A^2 - x^2}$$

# Brzine i ubrzanja vs vrijeme

- Brzina je  $90^\circ$  “izvan faze” s  $x$ : Kad je  $x$  u maksimumu,  $v$  je u minimumu ....
- Ubrzanje je  $180^\circ$  “izvan faze” s  $x$

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m} x$$





# Brzine i ubrzanja vs vrijeme

$$x = A \cos \omega t$$

$$v = -v_{\max} \sin \omega t$$

$$a = -a_{\max} \cos \omega t$$

Nadite  $v_{\max}$  pomoću zakona očuvanja  $E$

$$\frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m v_{\max}^2$$

$$v_{\max} = A \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Nadite  $a_{\max}$  koristeći II Newtonov zakon  $F = ma$

$$-kx = ma$$

$$-kA \cos \omega t = -ma_{\max} \cos \omega t$$

$$a_{\max} = A \frac{k}{m}$$

# Sažetak formula

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$x = A \cos(\omega t - \phi)$$

$$v = -\omega A \sin(\omega t - \phi)$$

$$a = -\omega^2 A (\cos \omega t - \phi)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

# Svjetlost

- Što je svjetlost?
- OTKUDA DOLAZI?



# Što je svjetlost?

- Svjetlost je val, odnosno ponaša se kao val.
- Kako to znamo?
  - Refleksija
  - Lom
  - Disperzija
  - Difrakcija
  - Interferencija
  - Polarizacija

# Što je svjetlost?

- Svjetlo je posebna vrsta vala
- Ono što poznajemo kao svjetlo ili *vidljiva svjetlost* je zapravo nešto što se zove *elektromagnetsko zračenje*.
- Dakle, što je elektromagnetsko zračenje i što su elektromagnetski valovi?

# Elektromagnetski valovi

- Svi mehanički valovi se prostiru kroz neki medij.
- Kroz koji medij se prenosi svjetlo prenosi?
- **Svjetlo ne trebata medij za svoje prostiranje!**
- Elektromagnetski valovi su posebni po tome što ne trebaju medij za širenje.
- Što emitira energiju koju prenosi elmag val?  
→ **ELEKTRONI**
-

# Elektromagnetski valovi

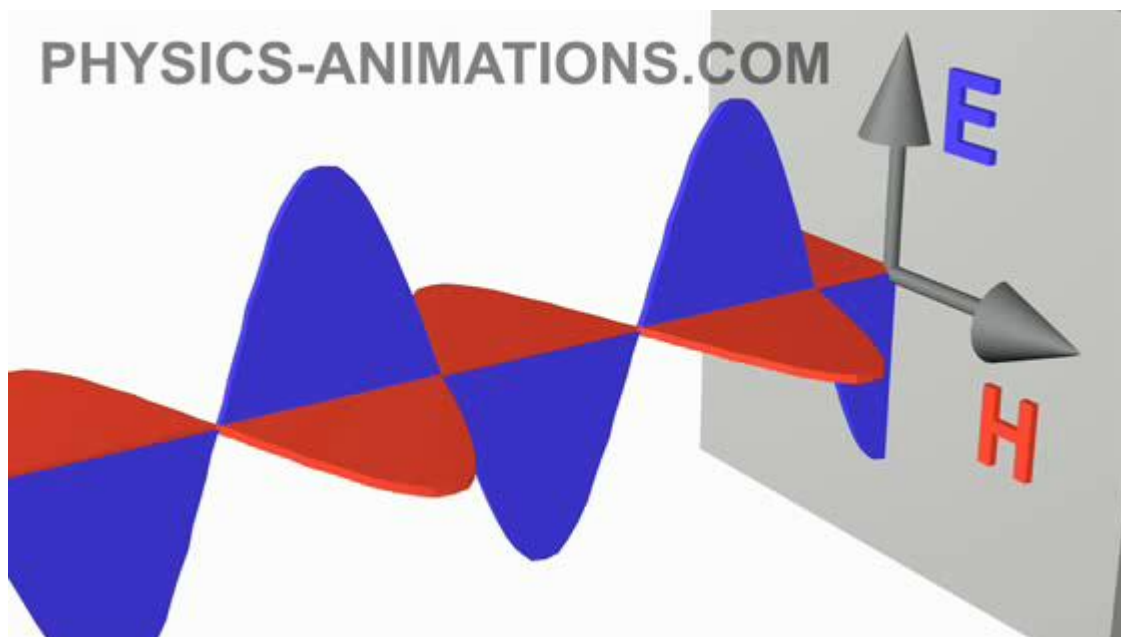
- Elektroni u materijalu titraju oko ravnotežnih položaja i emitiraju energiju u obliku **fotona**, koji se šire prostorom.
- Fotoni nemaju masu mirovanja, već su čista energija.
- Elektromagnetski valovi su valovi koji se sastoje od "**fotona**".



# Svojstva elektromagnetskih valova

- Elektromagnetski val-transverzalni val koji se sastoji od oscilirajućih električnih i magnetskih polja koja su međusobno orijentirana pod pravim kutem
- Nisu svi elektromagnetski valovi vidljivi ljudskom oku
- Svjetlo je i val i čestica (dualna priroda svjetlosti)

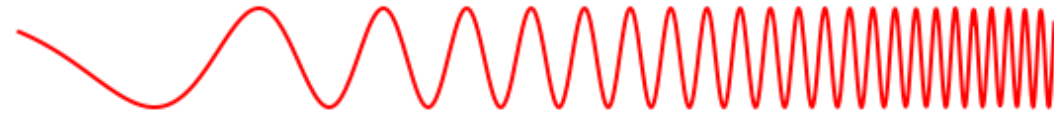
Elektromagnetski val sastoji se od kombinacije električnog polja i magnetskog polja koji su međusobno okomiti.



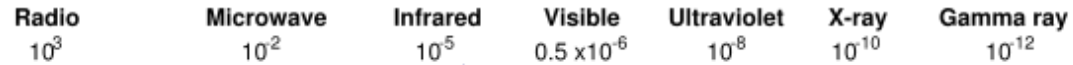
# Electromagnetski spektar

- Elektromagnetski valovi se razlikuju po frekvenciji i valnoj duljini

Probija Zemljinu atmosferu?



Tip zračenja  
Valna duljina (m)



Aproksimativna skala  
valnih duljina

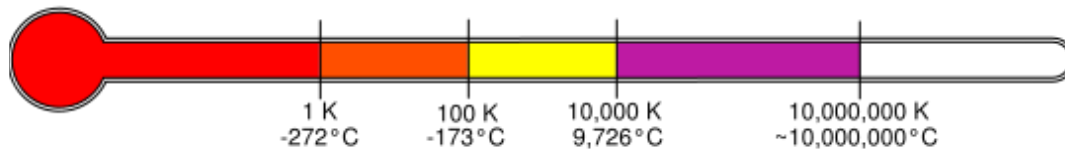


Buildings Humans Butterflies Needle Point Protozoans Molecules Atoms Atomic Nuclei

Frekvencija (Hz)



Temperatura objekta na  
kojoj zračenje ima  
maksimalnu vrijednost



# Svojstva elektromagnetskog spektra

- Valovi u elektromagnetskom spektru variraju u veličini od jako dugih radio valova (veličine zgrada) do vrlo kratkih gama-zraka manjih od veličine jezgre atoma.
- Jeste li znali da se elektromagnetski valovi ne opisuju samo njihovim valnim duljinama, već i njihovom energijom i frekvencijom? Sve tri ove veličine su međusobno matematički vezane. To znači da je ispravno govoriti o energiji X-zraka ili valnoj duljini mikrovalova ili frekvenciji radio-valova. Elektromagnetski spektar uključuje, od najduže valne duljine do najkraće: radio valovi, mikrovalovi, infracrvene, optičke, ultraljubičaste, X-zrake i gama-zrake.



# Različita frekvencija i valna duljina

- Kod vidljive svjetlosti, razlike u frekvenciji i valnoj duljini opažamo kao različite boje. Kao što je crveno svjetlo ima svoju frekvenciju i valnu duljinu, tako i sve ostale boje imaju svoju frekvenciju i valnu duljinu. Narančasta, žuta, zelena i plava - svaka ima svoju jedinstvenu frekvenciju, a time i valnu duljinu. Iako možemo percipirati ove elektromagnetske valove i njihove odgovarajuće boje, mi ne možemo vidjeti ostatak elektromagnetskog spektra.

# Brzina elektromagnetskih valova

- Svi elektromagnetski valovi kreću se brzinom svjetlosti
- Ne zaboravite ...
- Brzina svjetlosti  $c = \text{valna duljina} \times \text{frekvencija}$
- Promjena valne duljine, odnosno frekvencije definira vrstu elektromagnetskog vala (radio, gama i sl.)
- **Brzina svjetlosti u vakuumu**  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Brzina svjetlosti u zraku  $= 2.99709 \times 10^8 \text{ m/s}$   
Koristimo iznos  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  što odgovara 300 milijuna metara u sekundi!

# Polarizacija

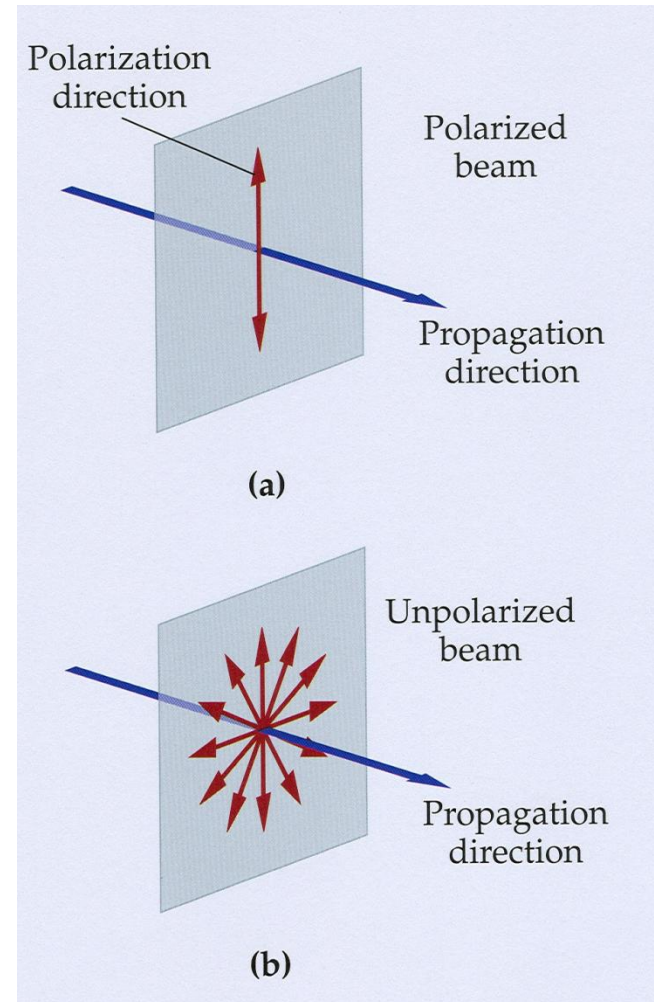
- Huygens: pretpostavljao je da su svjetlosni valovi longitudinalni.
- Fresnel (početkom XIX vijeka): proučavajući pojavu polarizacije svjetlosti zaključio da su valovi svjetlosti transverzalni.

Polarizacija svjetlosti dokazuje da su svjetlosne oscilacije transverzalne. Kada bi svjetlosne oscilacije bile longitudinalne, one se ne bi mogle polarizirati, jer su longitudinalne oscilacije samo u jednom pravcu - u pravcu širenja elektromagnetskog vala.

Polarizaciju svjetlosti pri refleksiji na staklu (dvolomac) otkrio je Malus 1808. godine.

# Polarizacija

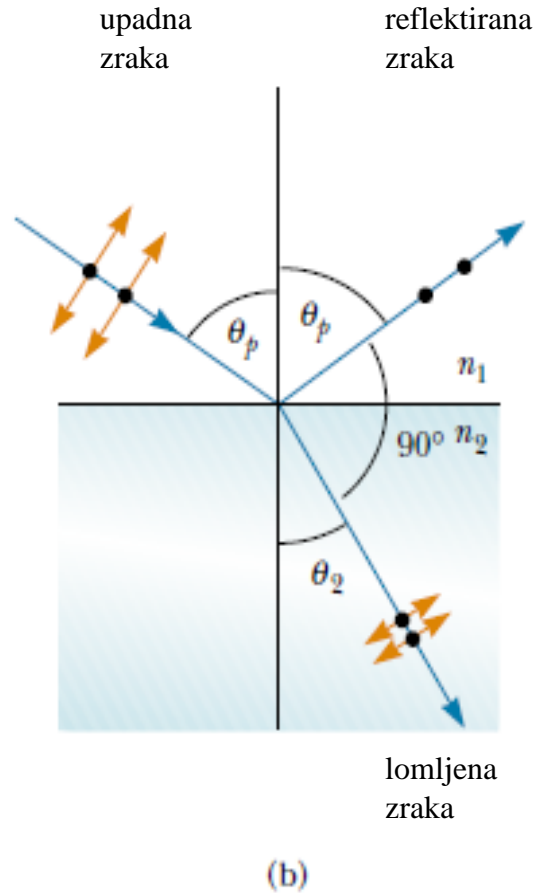
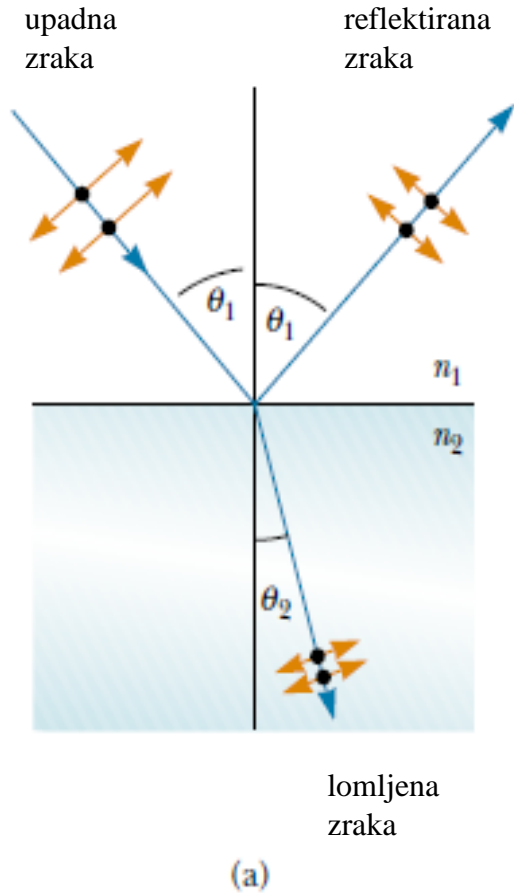
- Procesi nastajanja polarizirane svjetlosti:
- a) refleksija
- b) raspršenje
- c) dvolom
- d) dikroizam



# Polarizacija refleksijom

- Kada nepolarizirana svjetlost padne na granicu prozirnog sredstva dio svjetlosti se reflektira, a dio se lomi.
- Pri određenom upadnom kutu, koji je takav da lomljena i reflektirana zraka zatvaraju kut od  $90^\circ$ , reflektirana svjetlost je potpuno polarizirana i to okomito na ravninu refleksije.
- Tu pojavu je prvi eksperimentalno ustanovio David Brewster, britanski fizičar (1781. –1868.).
-

# Brewsterov kut



- (a) Kad nepolarizirano svjetlo pada na reflektirajuću površinu, reflektirana i lomljena zraka su djelomično polarizirane.
- (b) reflektirana zraka je potpuno polarizirana kada je upadni kut jednak kutu polarizacije  $\theta_p$ , koji zadovoljava jednadžbu
- $$n = \operatorname{tg} \theta_p$$

Za potpunu polarizaciju reflektirane zrake:

$$\theta_P + \theta_2 = 90^0$$

to je:

$$n_1 \cdot \sin \theta_P = n_2 \cdot \sin (90^0 - \theta_P)$$

odnosno:

$$\tan \theta_P = \frac{n_2}{n_1}$$

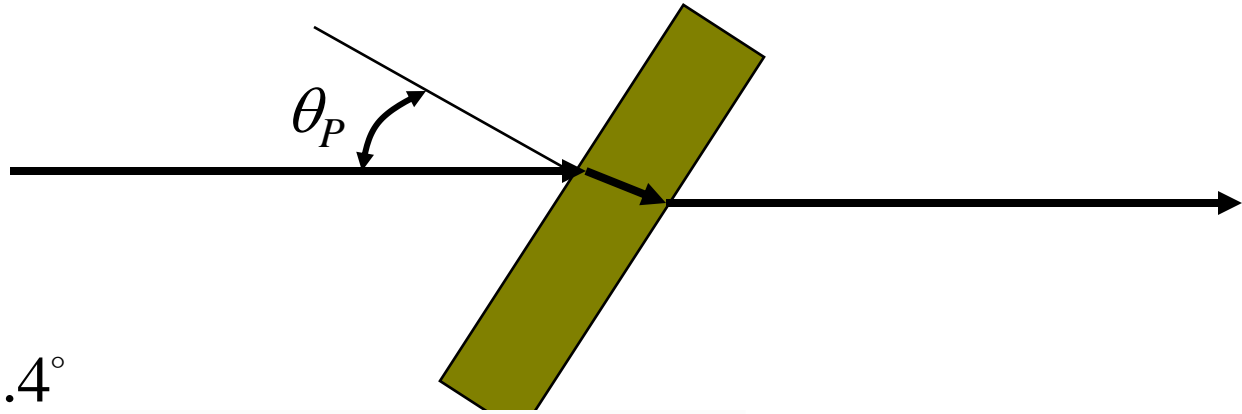
Upadni kut pod kojim dolazi do potpune polarizacije reflektirane zrake naziva se Brewsterov kut  $\theta_p$

Tu jednadžbu nazivamo **Brewsterovim zakonom**. Reflektirana svjetlost je tada potpuno polarizirana, a lomljena svjetlost je djelomično polarizirana pri čemu su njihove ravnine polarizacije međusobno okomite.

# Brewsterov kut

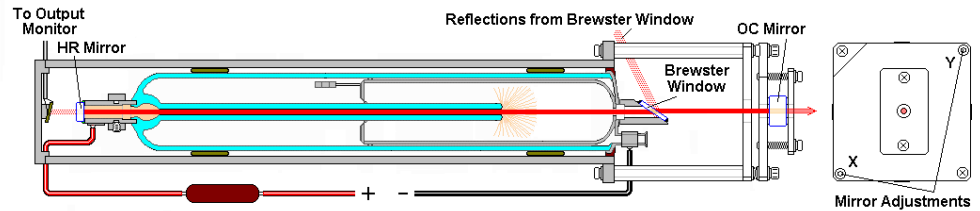
$$\theta_P = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 = 1; n_2 = 1.45; \theta_B = 55.4^\circ$$

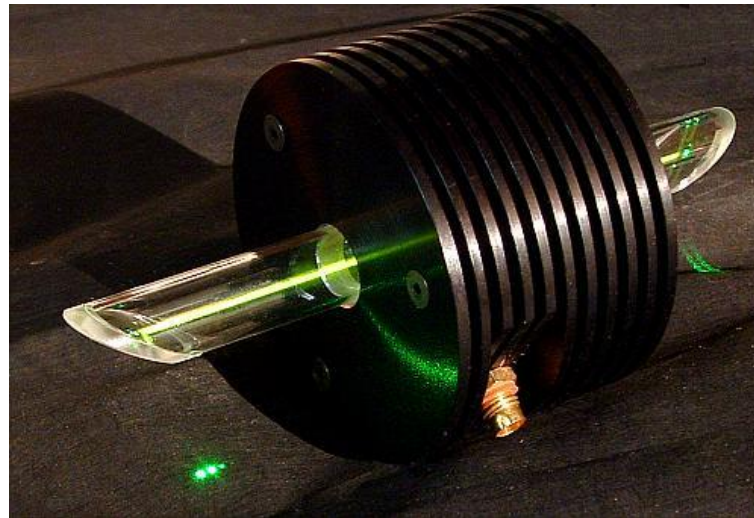


1781-1868

Brewster Windows in Lasers



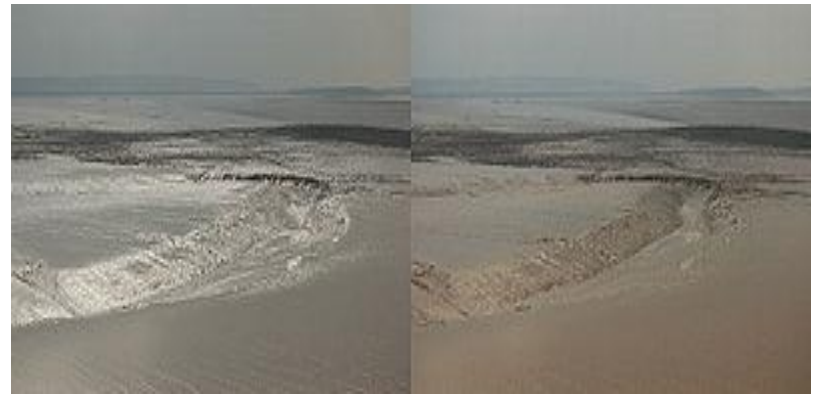
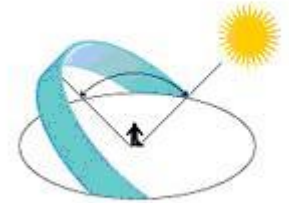
HeNe Laser Tube with Internal HR and Brewster Window with External OC





# Polarizacija raspršenjem

- Raspršenje svjetla nastaje u atmosferi, zato je nebo plavo, a to raspršenje polarizira svjetlost.  
Polarizacija svjetla nebeskog svoda: svjetlost se najjače polarizira pod kutem od  $90^\circ$  u odnosu na smjer u kojem se nalazi Sunce.



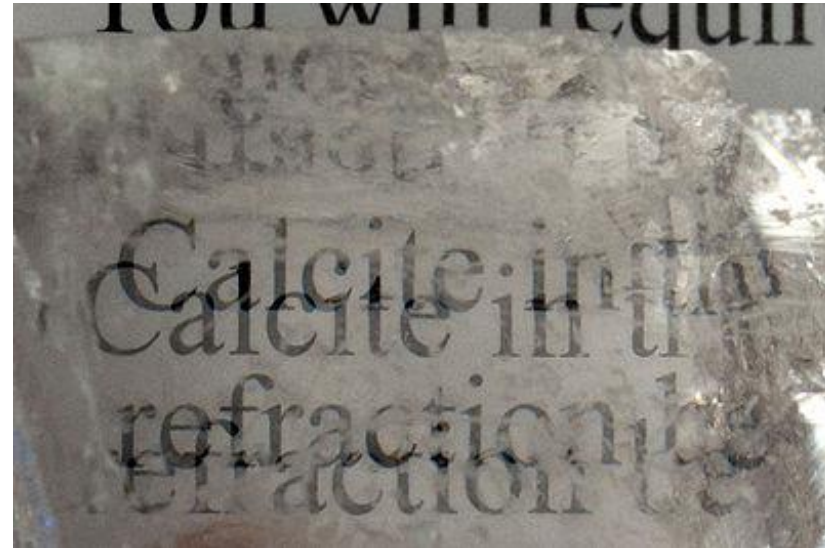


with polarizer

without polarizer

# Dvolom

- Dvolom je pojava kada nepolarizirana svjetlost pada na granicu nekih kristala (kalcit, kvarc, led...) i lomi se tako da od jedne upadne zrake nastaju dvije: REDOVNA i IZVANREDNA.
- Za redovnu zraku vrijedi Snellov zakon loma.
- Pojava dvoloma je posljedica neizotropnosti kristala – u različitim smjerovima kristal ima razlicit indeks loma.
- - kalcit:  $n_r = 1,66$ ,  $n_i = 1,49$
- - kvarc:  $n_r = 1,54$ ,  $n_i = 1,55$
- Redovna i izvanredna zraka su polarizirane tako da su im ravnine polarizacije medusobno okomite



# DIKROIZAM (ILI SELEKTIVNA APSORPCIJA)

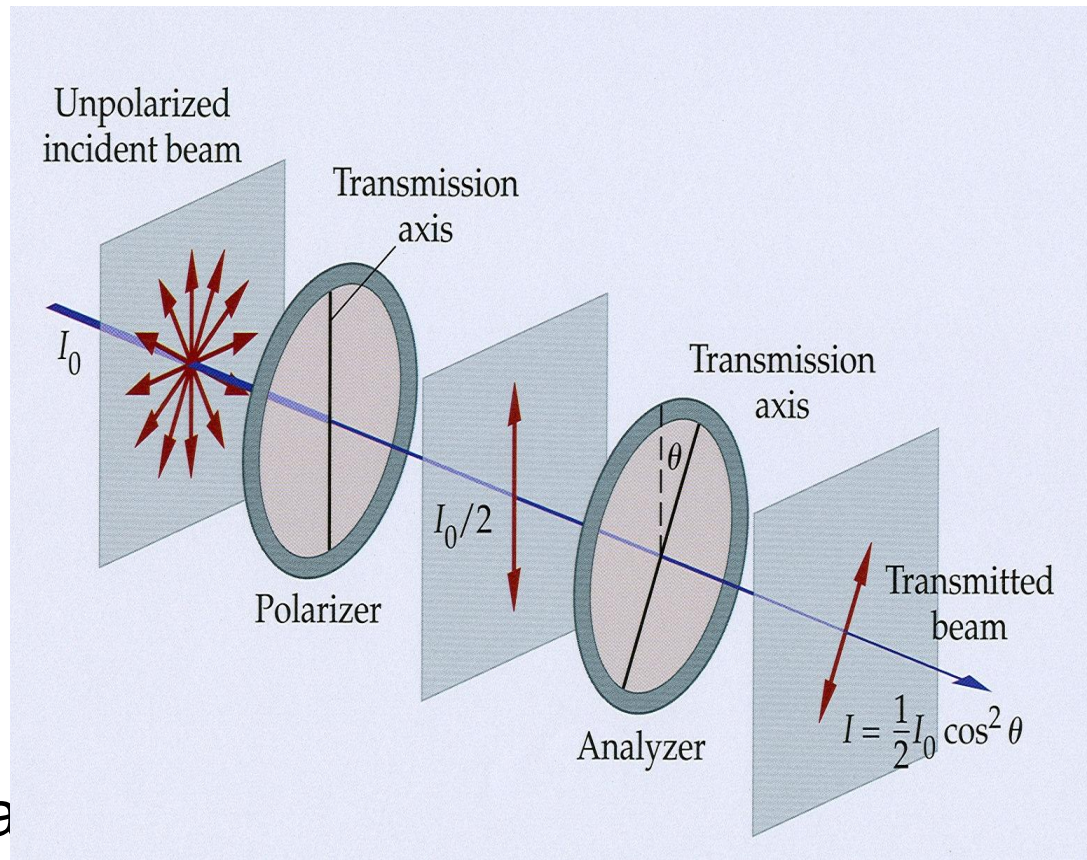
- Kad prirodna svjetlost padne na neke dvolomne kristale, onda oni mogu jednu zraku nastalu dvolomom apsorbirati, a drugu propustiti (ona je polarizirana) i to svojstvo
- kristala zovemo DIKROIZAM
- Turmalin je najpoznatiji dikroični kristal s indeksima loma  $n_r = 1,64$  i  $n_i = 1,62$
- POLAROID – komercijalni naziv za materijal s dikroičnim svojstvima, a koji je u obliku lista ili folije s kristalićima herapatita.

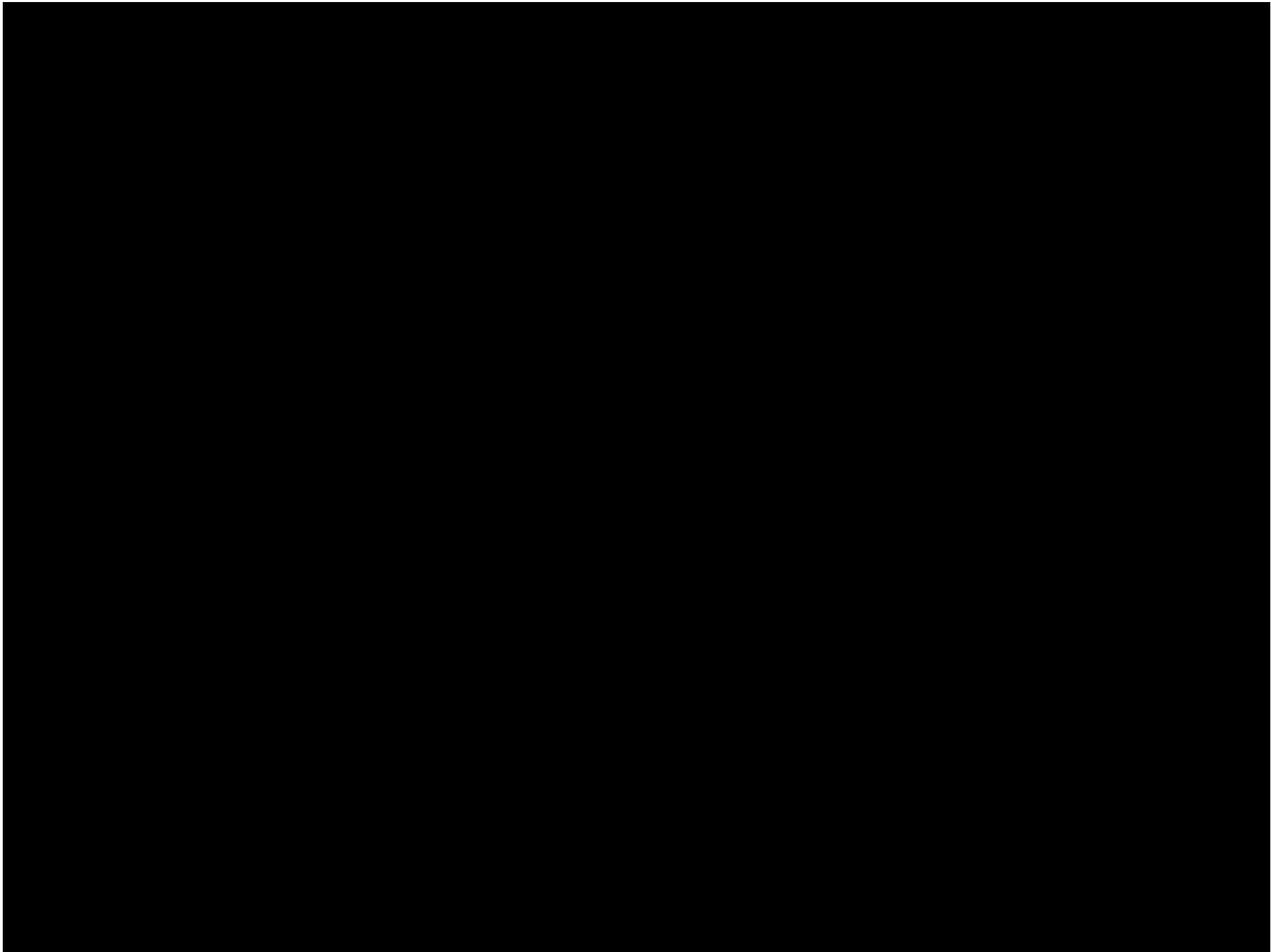
- Polarizatori od prirodne (nepolarizirane) svjetlosti propuste samo komponente koje titraju u jednom smjeru –dobije se linearno polarizirana svjetlost.
- Kad prirodna svjetlost padne na polaroid (dikroit), ona se jednim dijelom apsorbira i smanji joj se intenzitet.
- Svjetlost je polarizirana u smjeru određenom polarizatorom.
- Ako tu svjetlost propustimo kroz drugi polarizator (analizator), čiji se pravac polarizacije ne poklapa s pravcem polarizacije prvog polarizatora, intenzitet izlazne svjetlosti iz drugog polarizatora (analizatora) će ovisiti o kutu između pravaca polarizacije 1. i 2. polarizatora.

- Malusov zakon daje ovisnost intenziteta svjetlosti o kutu:

$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$

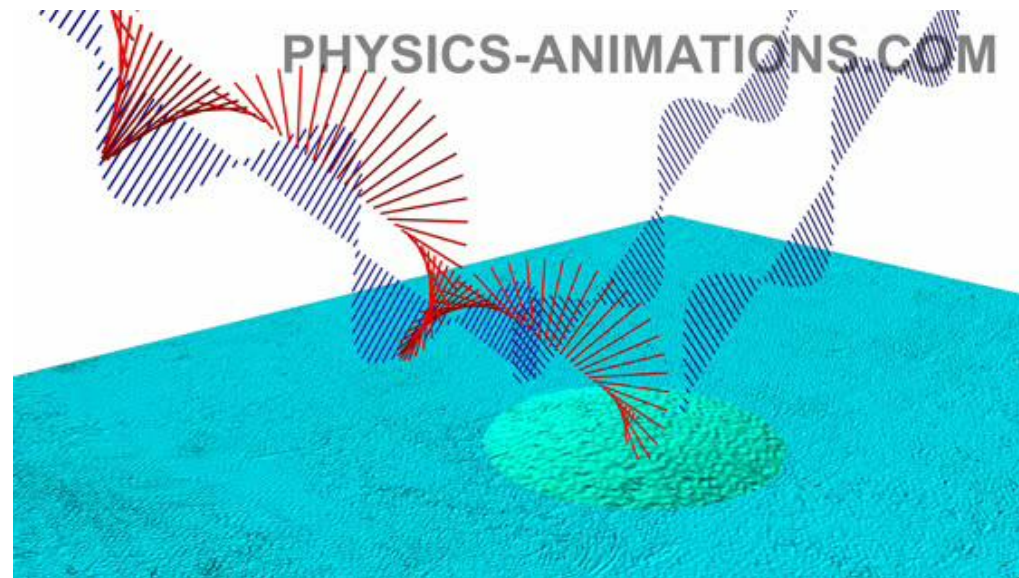
- $I(0)$  je intenzitet polarizirane svjetlosti koja pada na analizator (polarizator koji analizira svjetlost koja pada na njega).
- Za kut između polarizatora i analizatora od 90, nema prolazne svjetlosti





# Polarizacija

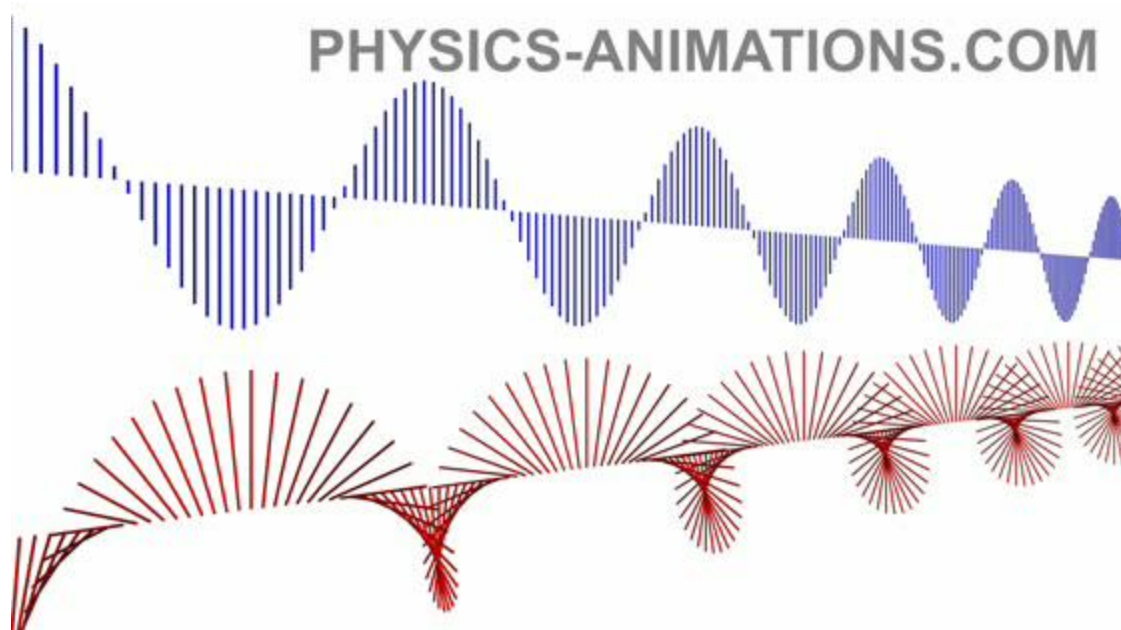
- Vektor električnog polja u linearno polariziranom elektromagnetskom valu (označeno plavom bojom) oscilira samo u jednom smjeru.
- U kružno polariziranom valu kraj vektora električnog polja (označen crveno) kreće se spiralnom krivuljom.





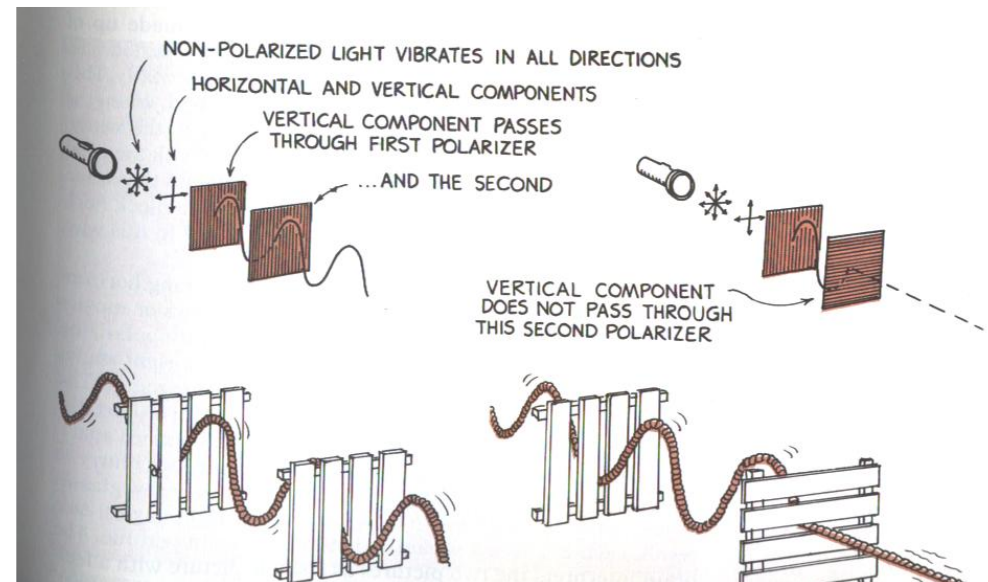
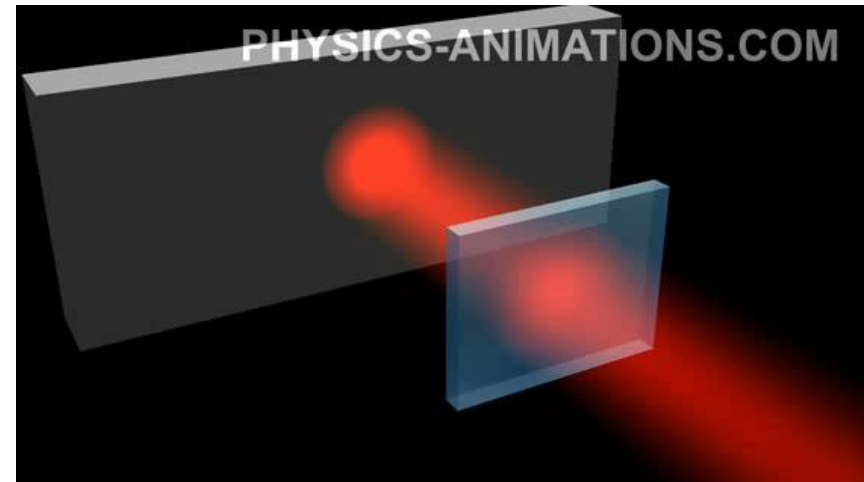
# Polarizacija

- Znamo da su EM valovi transverzalni.
- Zamislite val koji se prostire u z-smjeru.  
E (električno polje) može biti u x **ili** y smjeru
- Govorimo o dvije moguće **polarizacije** vala
- Normalna sunčeva svjetlost je mješavina jednake količine x i y linearno polariziranog svjetla
- Oči ne mogu otkriti razlike
- B (magnetsko polje) je uvijek okomito na E (električno polje) i na smjer širenja valova



# Polarizatori

- Demo - koristiti polarizirajući filter da propustimo samo polarizirane valove
- Dva ukrštena polarizatora - nema svjetla!



# Cirkularna polarizacija

- Svjetlost reflektirana od površine uzorka može promijeniti stanje polarizacije.
- Ovaj fenomen je temelj načela ellipsometrije.

