

11. Elementy optyki falowej

Co sprawia, że nie możemy oderwać wzroku od motyla?



Zdj. Rusalka admirał (Vanessa Atalanta), zdjęcie: D.P.

Interferencja i dyfrakcja - potwierdzeniem falowej natury światła

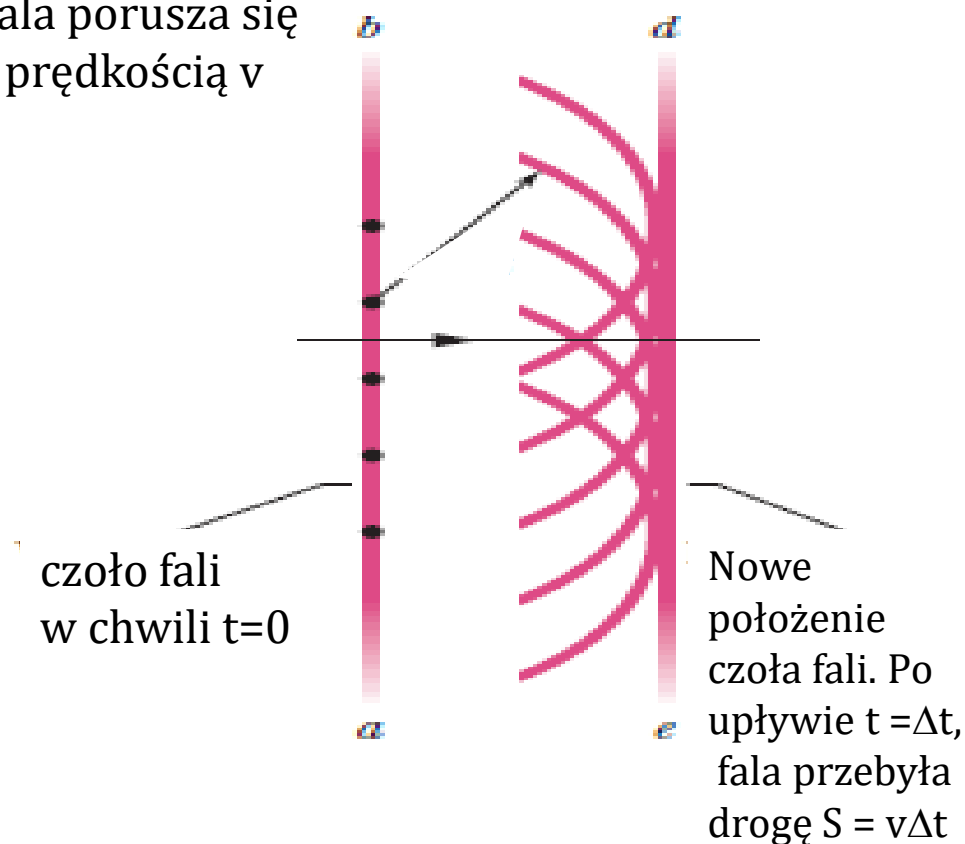


Zdjęcie: źródło: <https://pl.wikipedia.org>

Efektowne barwy motyla lub baniek mydlanych , nie są tylko wynikiem załamania światła, ani zabarwienia cieczy, ale wynikiem **interferencji światła**, podczas której wzmacniane są fale o długościach zależnych od grubości błonki .

Zasada Huygensa*- Pierwsza falowa teoria światła (1678r.)

Fala porusza się
z prędkością v



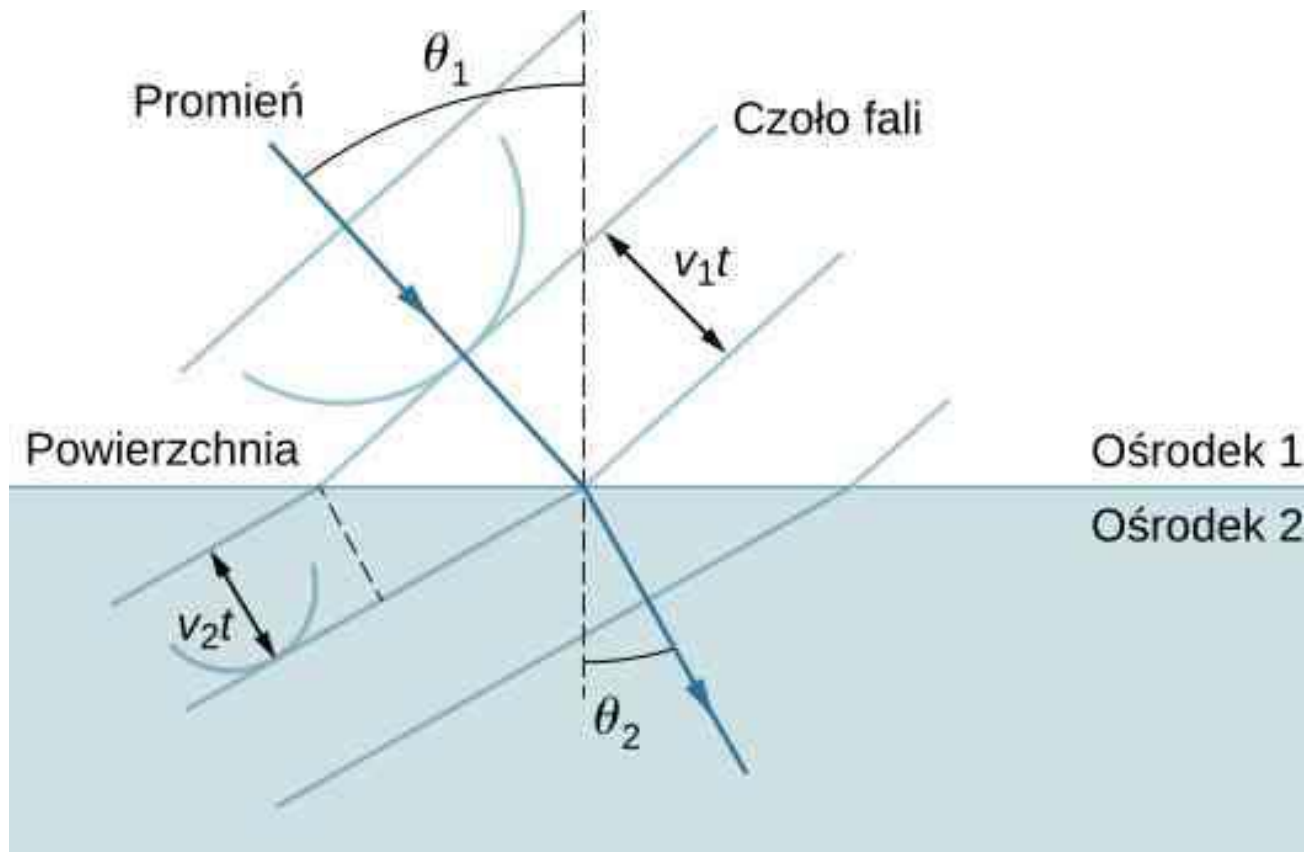
Wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych.

Po czasie t nowe położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych.

Rys. Zasada Huygensa została zastosowana do konstrukcji czoła fali płaskiej. Kierunek rozchodzenia się fali jest prostopadły do czoła fali. Źródło : Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”.

*Holenderski fizyk **Christiaan Huygens** (1629–1695), w przeciwieństwie do Isaaca Newtona, pojmował światło jako falę.

Zasada Huygensa wyjaśnia prawo załamania światła



Rys. Zasada Huygensa zastosowana dla fali płaskiej przemieszczającej się z jednego ośrodka do drugiego ($v_2 < v_1$).

Fala kolista (rys.) była wytworzona w momencie, gdy czoło fali przekraczało granicę między ośrodkami. Ponieważ prędkość światła w drugim ośrodku jest mniejsza, fale przebywają w tym samym czasie krótszą drogę, w konsekwencji nowe czoło fali zmienia kierunek.

DYFRAKCJA

Co się wydarzy, gdy fala świetlna przejdzie przez otwarte drzwi do ciemnego pomieszczenia?



Rys. źródło: <https://www.shutterstock.com/image-vector>

Z czego wynika różnica w zachowaniu fal dźwiękowych i fal świetlnych w tym przypadku?

DYFRAKCJA

Co się wydarzy, gdy fala świetlna przejdzie przez otwarte drzwi do ciemnego pomieszczenia?



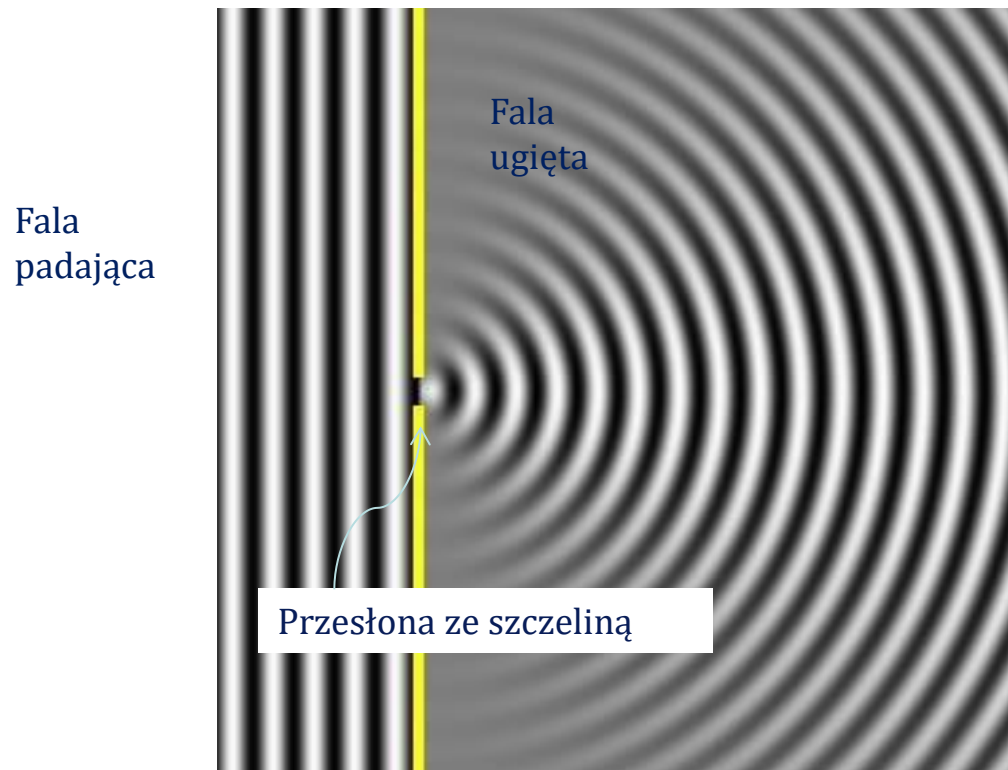
Rys. źródło: <https://www.shutterstock.com/image-vector>

Obserwujemy jasny obszar o szerokości wejścia na podłodze pokoju, światło nie dociera do innych miejsc pokoju. Dlaczego?

Światło ma bardzo małą długość fali (λ) i z tego względu -w tym przypadku- zachowuje się jak promień, dlatego na krawędziach drzwi nie występuje ugięcie fali.

DYFRAKCJA – ugięcie

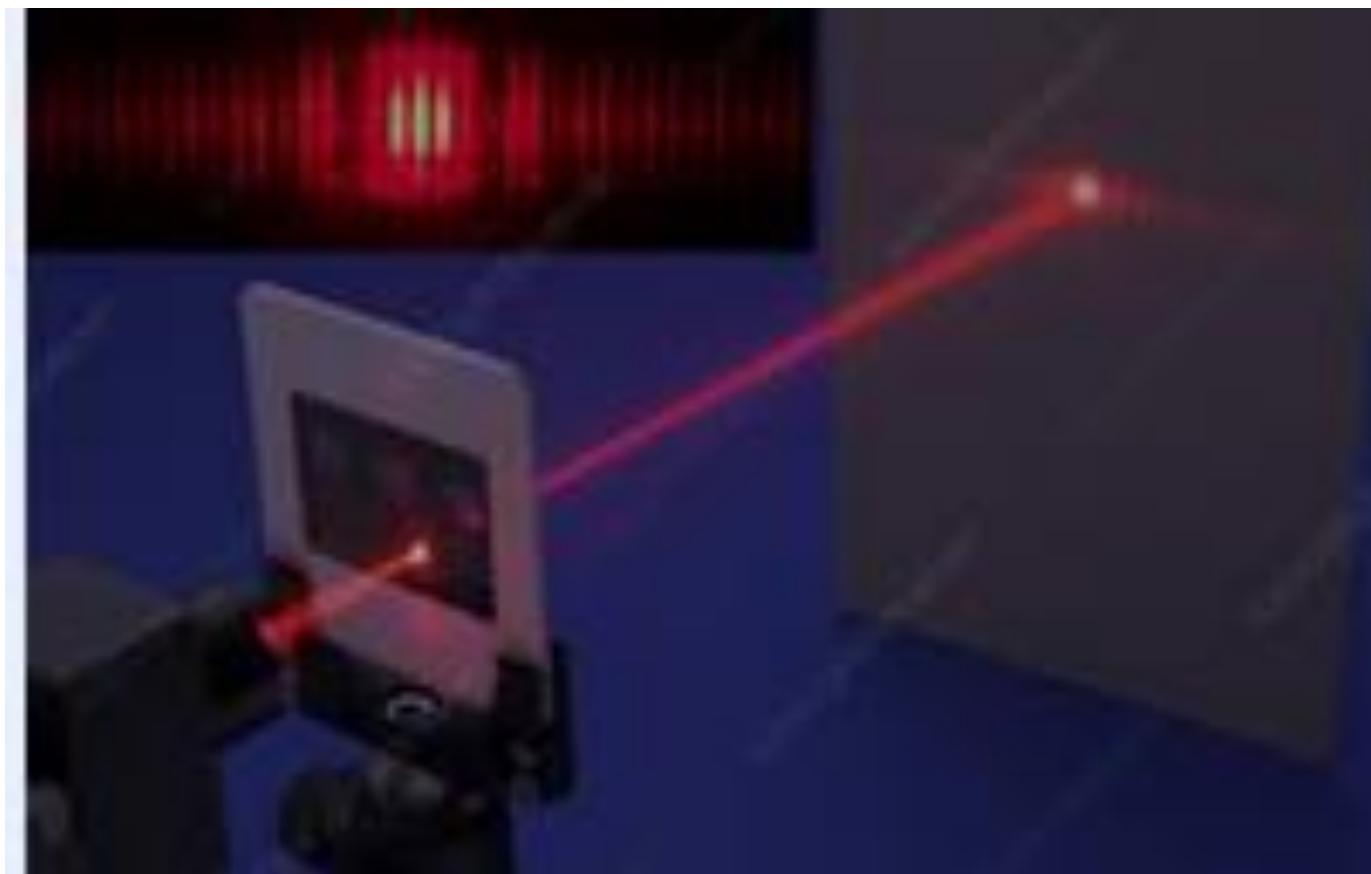
Dyfrakcja fali zachodzi, gdy światło przechodzi przez szczelinę o szerokości $\Delta x \sim \lambda$ fali; polega na **zmianie kierunku rozchodzenia się fali w wyniku natknięcia się na szczelinę/otwór.**



Rys.12. Schemat zobrazowania zjawiska dyfrakcji .

- Dyfrakcja jest zjawiskiem falowym zachodzi dla wszystkich rodzajów fal.
- Zjawisko dyfrakcji pozwoliło na rozwój krystalografii rentgenowskiej, dzięki której odkryto strukturę spirali DNA.

Interferencja światła

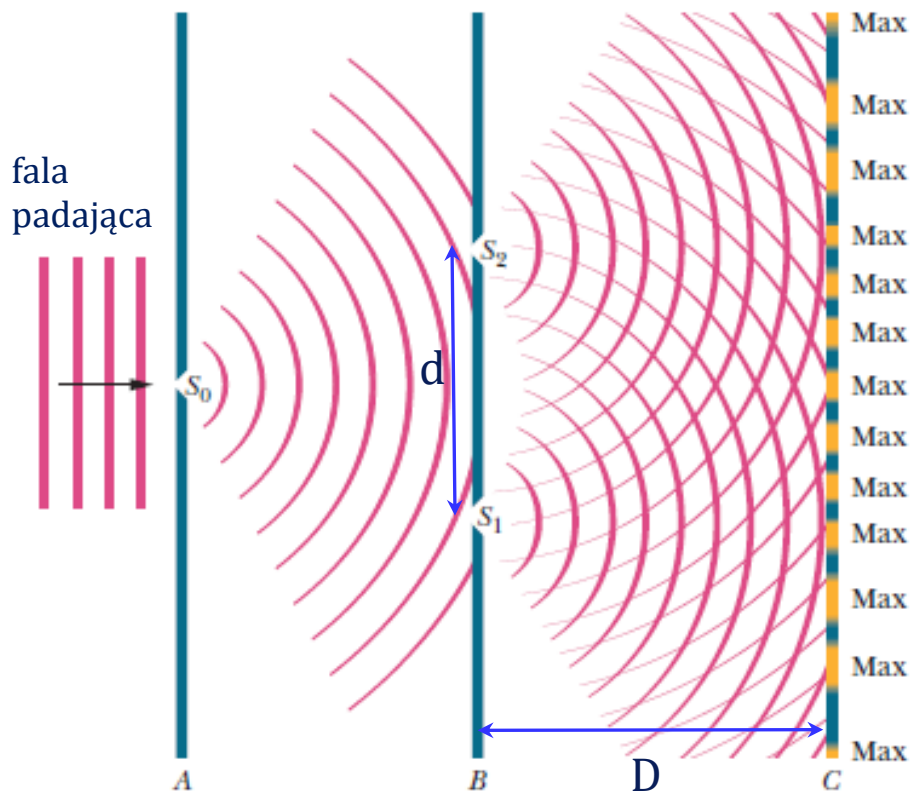


Zdjęcie. źródło <https://www.sciencephoto.com/keyword/interference-fringes>

Zjawisko interferencji światła polega na takim nakładaniu się wiązek światła, że na ekranie powstają obszary wygaszenia światła (ciemne prążki) oraz obszary wzmocnienia światła (jasne prążki).

Doświadczenie Younga (1803 r.)

Thomas Young udowodnił falową naturę światła i zapoczątkował falową teorię światła.



• Warunki interferencji:

1) ciągi falowe muszą się przecinać;

2) ciągi falowe muszą być spójne/koherentne
tzn. fale mają jednakową częstotliwość

oraz są w fazie (tzn. wykazują zerowe przesunięcie w fazie; lub ich przesunięcie w fazie jest niezmiennie w czasie- tzn. $\Delta\varphi$ zależy tylko od współrzędnej przestrzennej; nie zależy od czasu.

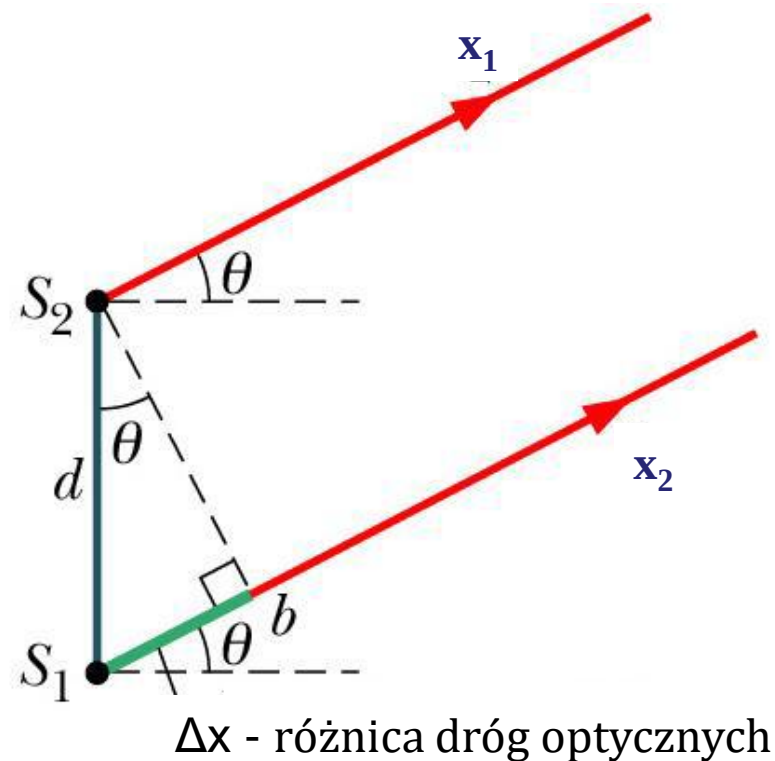
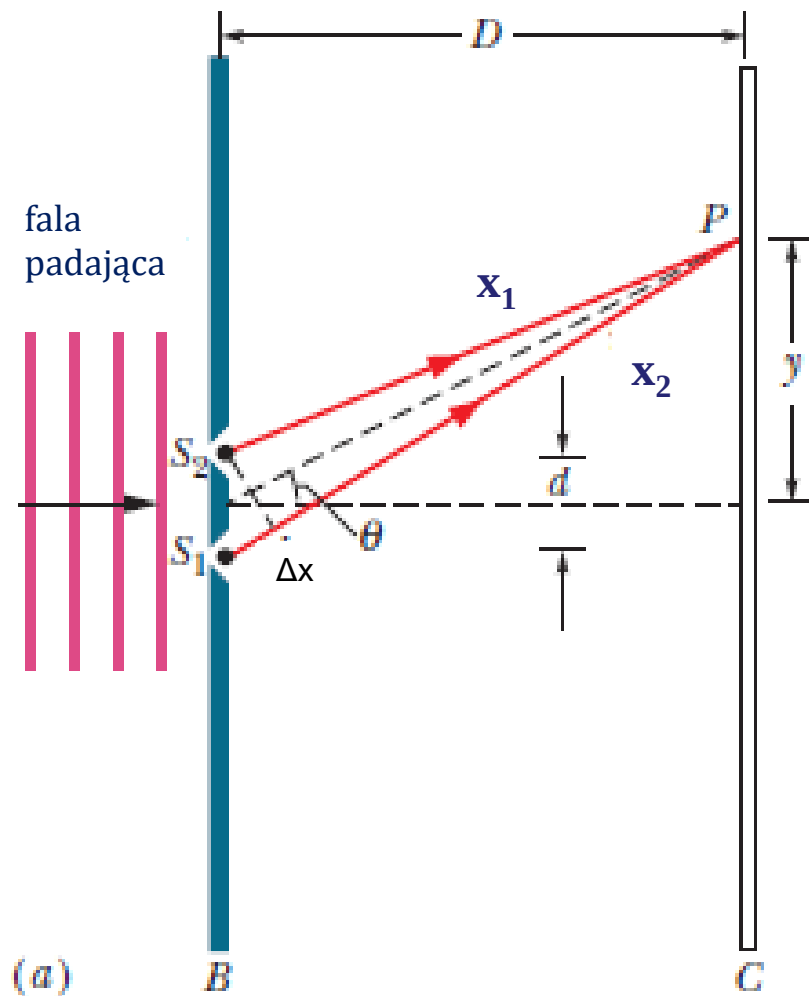
Rys. Schemat doświadczenia Younga.

Rys.. źródło : Halliday,Resnick,Walker

„Fundamentals of Physics”

O wyniku interferencji fal na ekranie decyduje różnica faz $\Delta\varphi$ fal składowych.

Doświadczenie Younga



$$\Delta x = d \sin \theta$$

Rys. Powstawanie obrazu interferencyjnego

źródło : Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”

Dla światła rozchodzącego się w przestrzeni 3D (w próżni lub ośrodku materialnym) główną przyczyną powstawania różnicy faz $\Delta\varphi$ jest różnica dróg optycznych Δx .

❖ Warunki interferencji- źródła światła muszą być spójne (koherentne)

Zatem, dla jakich kątów θ spełniony jest warunek: $\Delta x = d \sin \theta$?

Zał. 1. ($D \gg d$). Wówczas możemy traktować promienie x_1 i x_2 jako wzajemnie równoległe, tworzące kąt θ z osią układu (rys); 2. $\Delta \varphi(t) = 0$

W wyniku interferencji fal : $E = E_0 \sin \omega t + E_0 \sin(\omega t + \varphi) = 2E_0 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi}{2} \right)$

$$E = \left(2E_0 \cos \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) \right) \sin(\omega t - kx)$$

Gdy nakładające się fale mają jednakową częstość (monochromatyczne) i stałą różnicę faz :

$$\Delta \varphi = k \Delta x$$

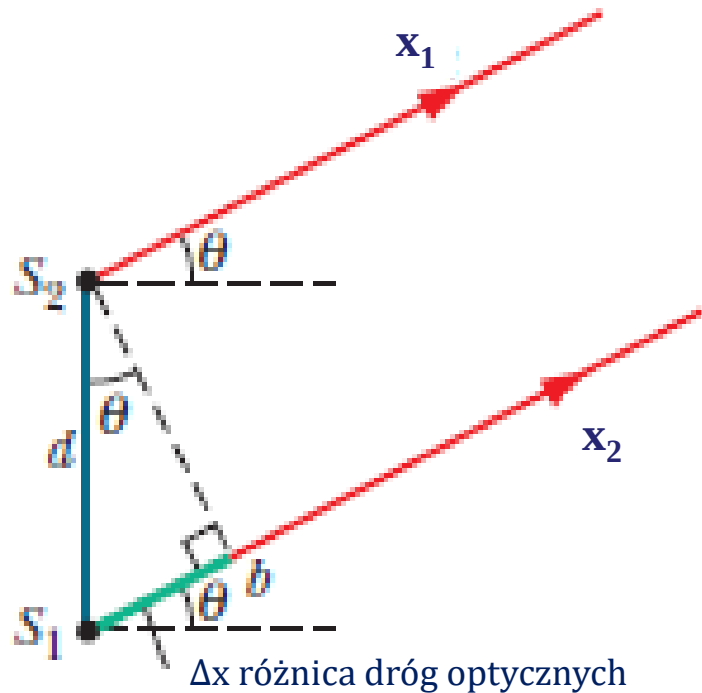
$$\frac{\text{różnica faz}}{2\pi} = \frac{\text{różnica dróg}}{\lambda}$$

gdzie $\Delta x = x_2 - x_1$

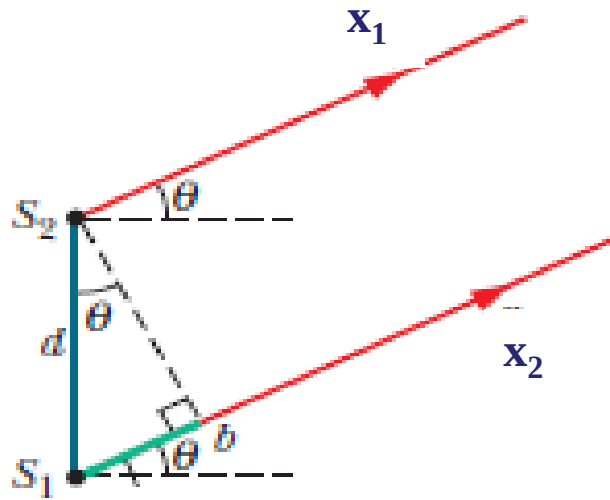
Amplituda fali wypadkowej:

$$E_{\theta} = 2E_0 \cos \left(\frac{1}{2} k \Delta x \right)$$

Zależy od różnicy faz wywołanej przez różnicę dróg optycznych (Δx).



❖ Matematyczny opis interferencji



Δx różnica dróg optycznych

(b)

$$E_{\theta} = 2.E_0 \cos\left(\frac{1}{2}k\Delta x\right)$$

$$\Delta\varphi = k\Delta x, \text{ a } \Delta x = d \sin \theta$$

$$\Delta\varphi = k\Delta x = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

Skąd otrzymujemy amplitudę fali wypadkowej:

$$E_{\theta} = 2.E_0 \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)$$

Wiedząc, że natężenie fali (I) jest: $I \sim E_{\theta}^2$

możemy zapisać: $I_{\theta} \sim 4 E_0^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)$

Maksima natężeń fali otrzymamy, gdy

$$\cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) = 1$$

Czyli różnica faz równa całkowitej wielokrotności π :

$$\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta = m\pi$$

gdzie $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ rząd maksimum interferencyjnego.

Zatem różnica dróg optycznych: $\Delta x = d \sin \theta$

**Warunek powstawania
interferencji konstruktywnej
(prążków widzianych)**

$$d \sin \theta = m\lambda$$

(*)

Dla kątów θ spełniających ten warunek otrzymujemy tzw. **interferencję konstruktywną** (maksima interferencyjne).

❖ Minimum interferencyjne

Minima interferencyjne otrzymamy, gdy

$$\cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) = 0$$

czyli gdy różnica faz jest nieparzystą wielokrotnością $\pi/2$:

$$\frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi$$

**Warunek powstania
minimum interferencyjnego**

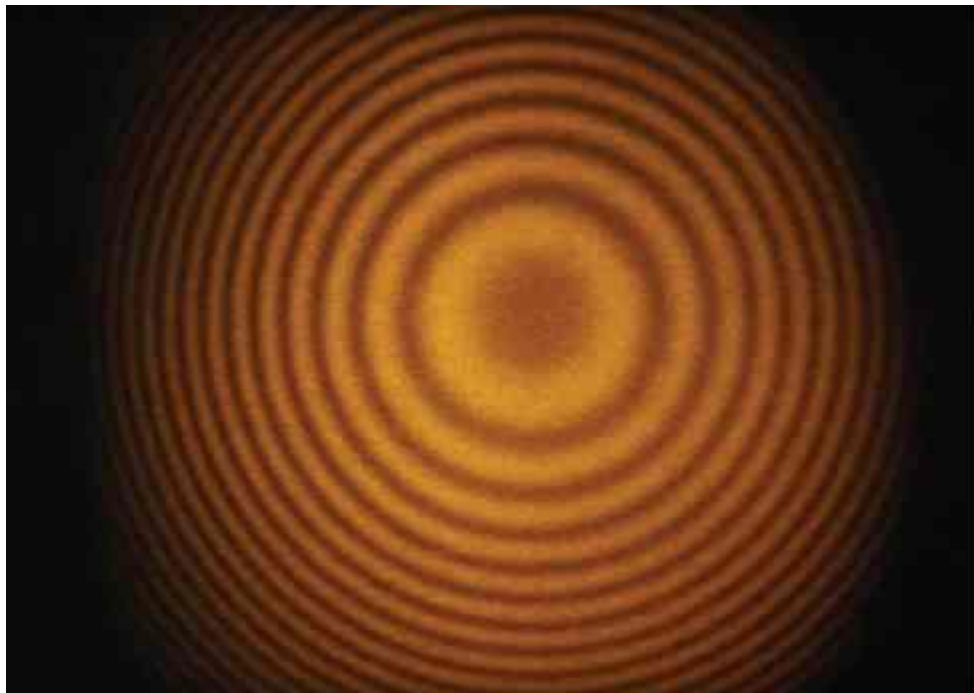
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

(**)

gdzie $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (minima-ciemne prążki)

Fazy fal składowych są przeciwne i natężenie światła jest minimalne.

Przykład- pierścienie Newtona



Zdjęcie jasnych i ciemnych pierścieni interferencyjnych .

Przykład 1 - obliczanie długości fali

Światło monochromatyczne, przechodzi przez dwie szczeliny oddalone od siebie o 0,005 mm, tworzące obraz interferencyjny, w którym pierwszy jasny prążek jest oddalony o 14 cm od zerowego prążka. Odległość szczelin od ekranu 1,057 m. Jaka jest długość fali światła laserowego?

Dane:

$$d = 0,005 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

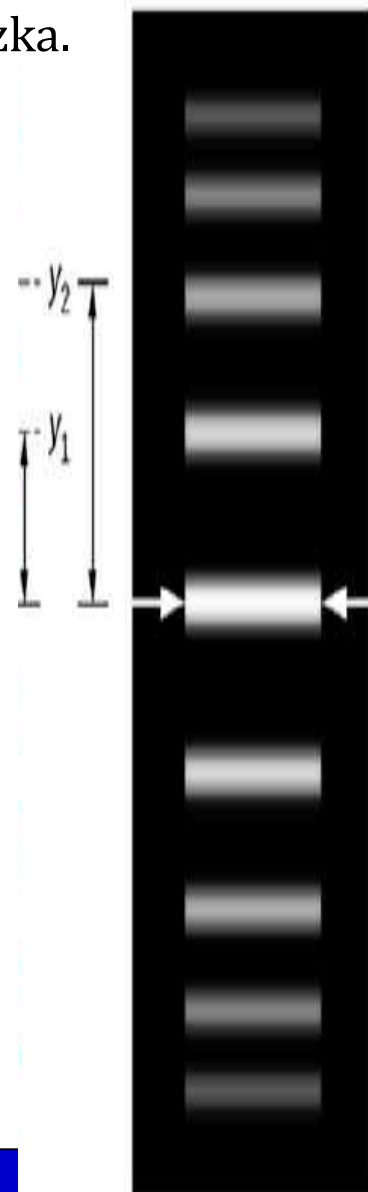
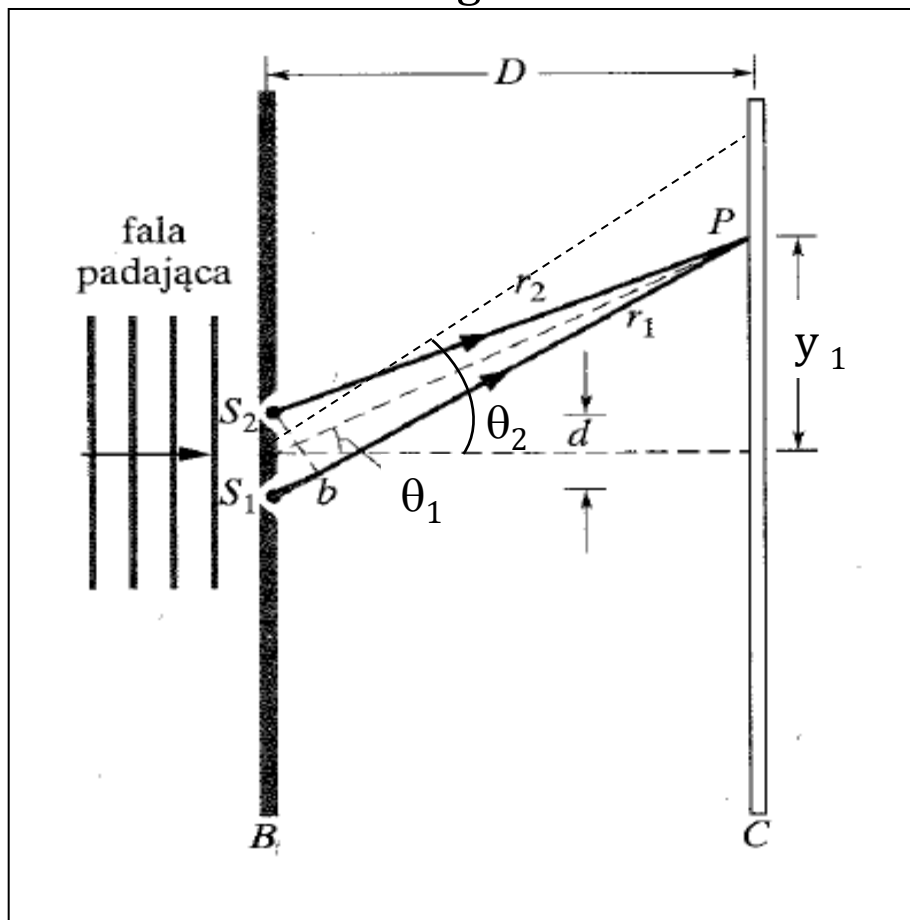
$$m = 1$$

$$y_1 = 0,14 \text{ m}$$

$$D = 1,057 \text{ m}$$

Szukane:

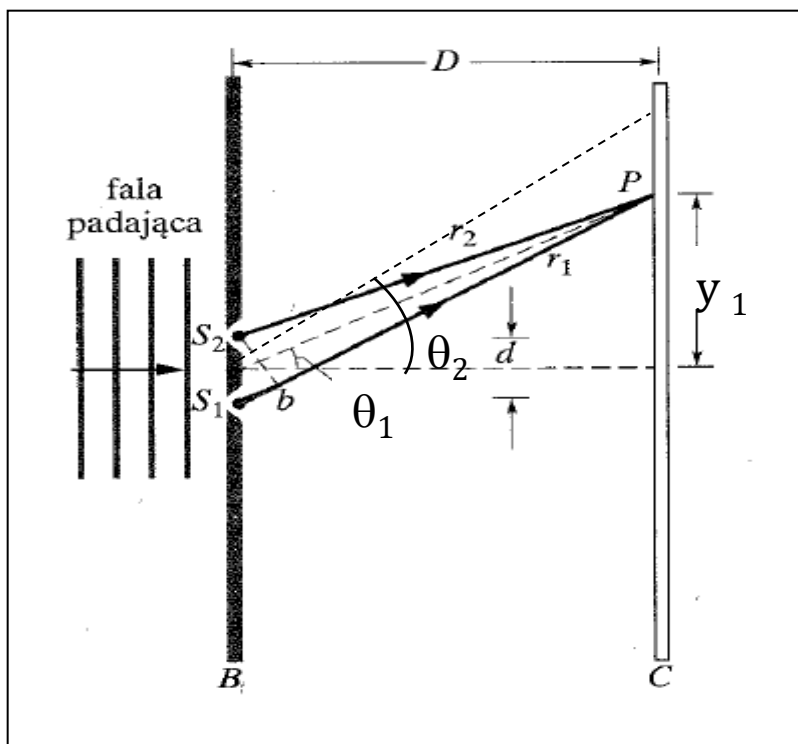
$$\lambda = ?$$



Przykład 1.

Z warunku na maksimum interferencyjne (*): $d \sin \theta = m\lambda$

otrzymujemy:
$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} \quad (*)$$



Uwzględniając zależność (rys.):

$$\sin \theta_1 = \frac{y_1}{\sqrt{D^2 + y_1^2}}$$

Po podstawieniu do (*), otrzymujemy:

$$\lambda = \frac{d \cdot y_1}{m \sqrt{D^2 + y_1^2}}$$

Gdy uwzględnimy dane, poszukiwana długość : $\lambda = 6,56518 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 656,5 \text{ nm}$

Przykład 2. - Określanie interferencji najwyższego rzędu

Jaki jest najwyższy rząd interferencji konstruktywnej w układzie przedstawionym w poprzednim przykładzie?

Obrazy interferencyjne nie posiadają nieskończonej liczby prążków, gdyż istnieje pewne ograniczenie maksymalnego rzędu prążka, który określony jest przez największą wartość modułu (wartości bezwzględnej) liczby m .

Z warunku na maksimum interferencyjne : $d \sin \theta = m\lambda$

otrzymujemy
$$m = \frac{d \sin \theta}{\lambda}$$

Dla stałych wartości d i λ , im większe m , tym większe $\sin \theta$, ale tylko do $\sin \theta = 1$ ($\theta = 90^\circ$)*

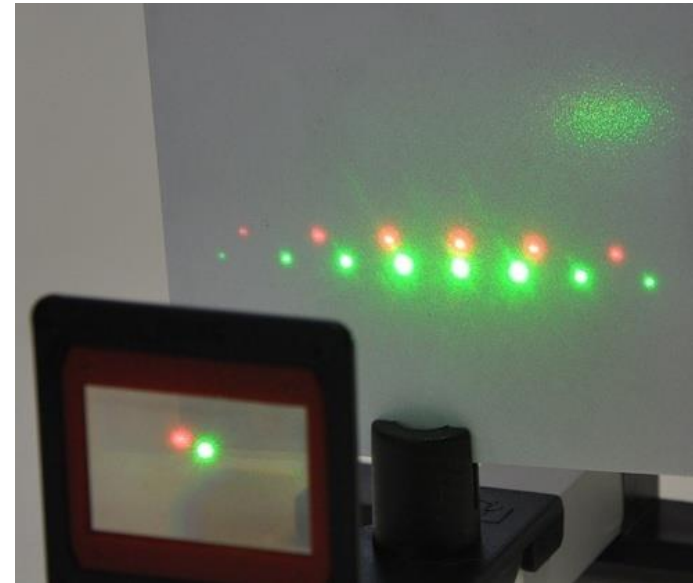
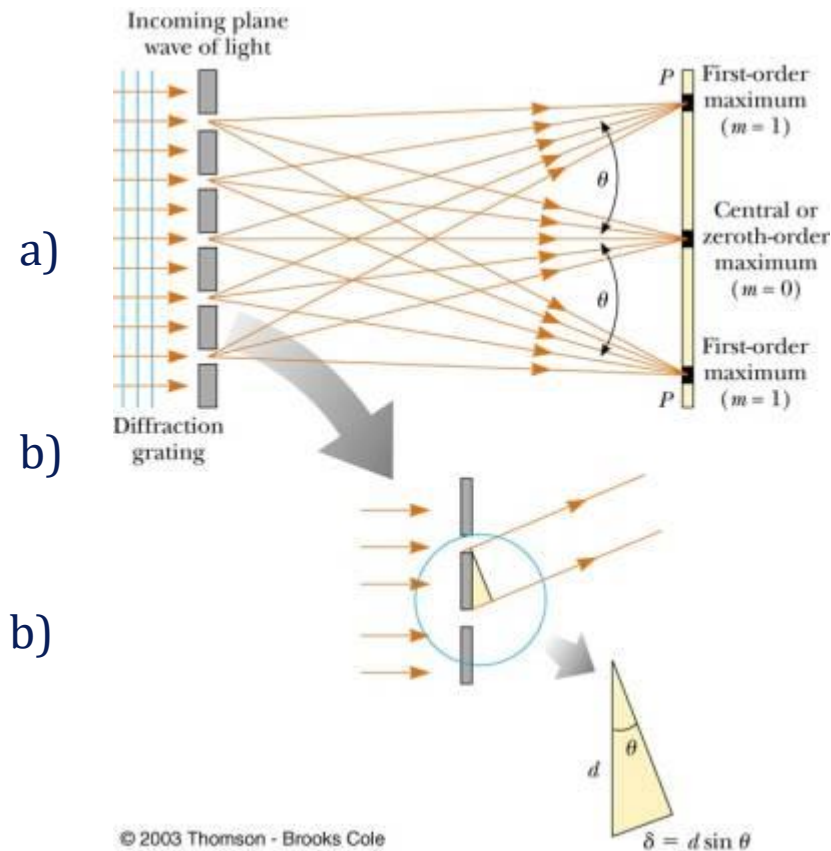
{*Dla wartości $\theta > 90^\circ$ ozn., że światło rozprzestrzenia się do tyłu i nie może tym samym dotrzeć do ekranu.}

Uwzględniając $\sin \theta = 1$ oraz dane z poprzedniego przykładu, ostatecznie :

$$m = \frac{0,005 \cdot 10^{-3} m \cdot 1}{656,5 \cdot 10^{-9} m} = 7,616 \approx 8$$

Interferencja na wielu szczelinach

Siatka dyfrakcyjna – optyczny element **układu wielu szczelin** równoległych i równoodległych przepuszczających światło (siatka transmisyjna) lub na zwierciadle metalicznym (siatka odbiciowa).



Warunek powstawania prążków widzianych za pomocą siatki dyfrakcyjnej

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha_n$$

d- stała siatki , to odległość między sąsiednimi szczelinami.

Rys. Siatka dyfrakcyjna i prążki interferencyjne . (a) źr. <https://sites.ualberta.ca> (b) źr. <https://pl.wikipedia.org>

Interferencja w cienkich warstwach

W jaki sposób możemy wyjaśnić zjawisko interferencji występujące w cienkich warstwach?

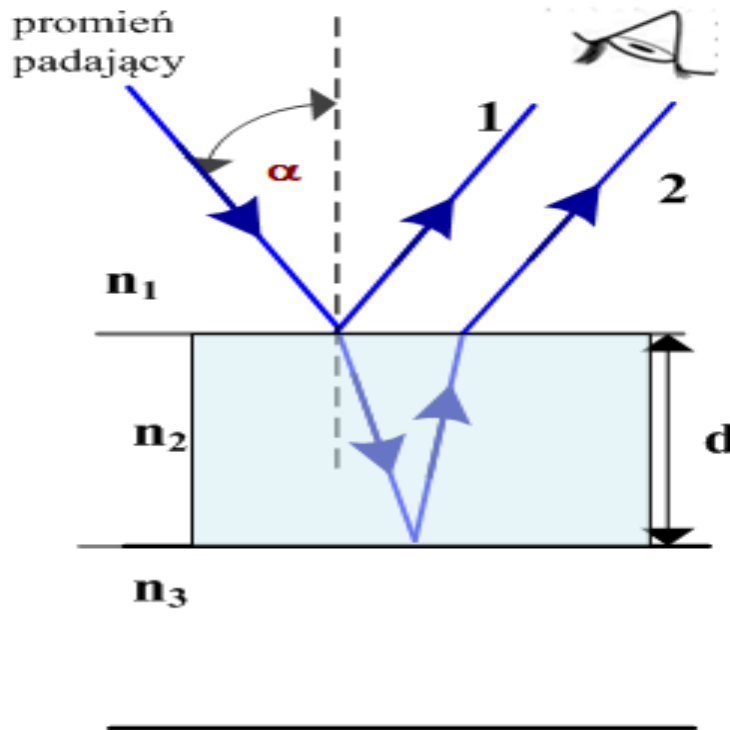


Zdjęcie: źródło: <https://pl.wikipedia.org>

Cienkie warstwy to takie, których grubość d jest mniejsza niż kilka długości fali świetlnej λ ($d < \lambda$).

Zmiana fazy fali świetlnej przy odbiciu

- Zmiana fazy fali świetlnej o 180° następuje przy odbiciu od ośrodka o większym współczynniku załamania .



Przy spotkaniu obydwu odbitych promieni (spójnych), zachodzi interferencja.

d - grubość warstwy

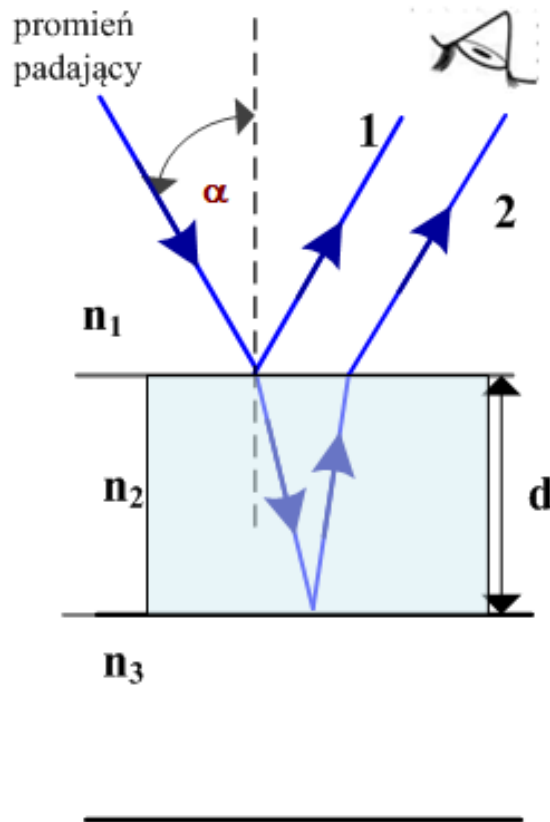
- Fala odbija się bez zmiany fazy w sytuacji, gdy odbicie następuje od ośrodka o mniejszym współczynniku załamania.

Parametrem, który ma największy wpływ na zmianę fazy, jest różnica współczynników załamania dla tej fali dla dwóch ośrodków, na granicy których następuje odbicie.

Interferencja światła w cienkich warstwach

Obserwowane tęcze zabarwienie cienkich warstw, powstaje w wyniku interferencji światła odbitego od dwóch powierzchni warstwy. Zakładamy, że $n_1 = n_3 < n_2$

Promień świetny pada na cieką płasko-równoległą warstwę z przezroczystego materiału (rys.)



- Promienie odbite 1 i 2, od górnej i dolnej powierzchni warstwy, powinny być spójne między sobą.

- Gdy grubość cienkiej warstwy jest dużo mniejsza od długości fali, czyli $d \ll \lambda$,

wówczas możemy zaobserwować

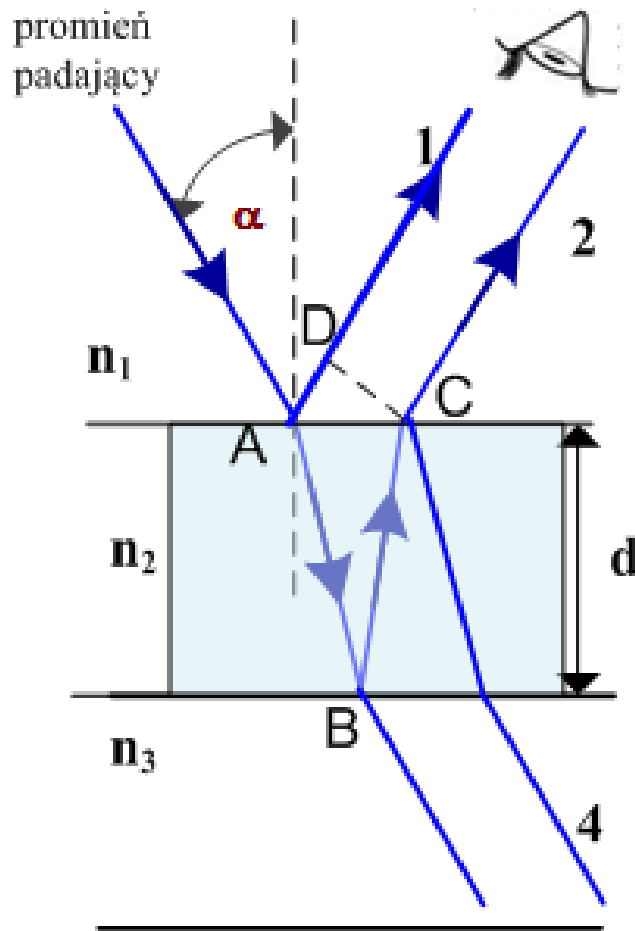
efekty interferencyjne

(interferencję destruktywną lub interferencję konstruktywną).

Rys. Ilustracja zjawiska interferencji światła na cienkich warstwach.

Rozważamy przypadek promieni odbitych (1,2)

- Przy odbiciu fali świetlnej od ośrodka o większym współczynniku załamania (prom. 1), następuje zmiana jej fazy o 180° .



Gdy przyjmujemy: $n_1=n_3=1$, a $n_2=n$.

W punkcie A nastąpi zmiana fazy o 180°

Różnica dróg optycznych (Δs) między promieniami 1 i 2 wynosi:

$$\Delta s = (AB + BC)n - \left(AD - \frac{\lambda}{2} \right)$$

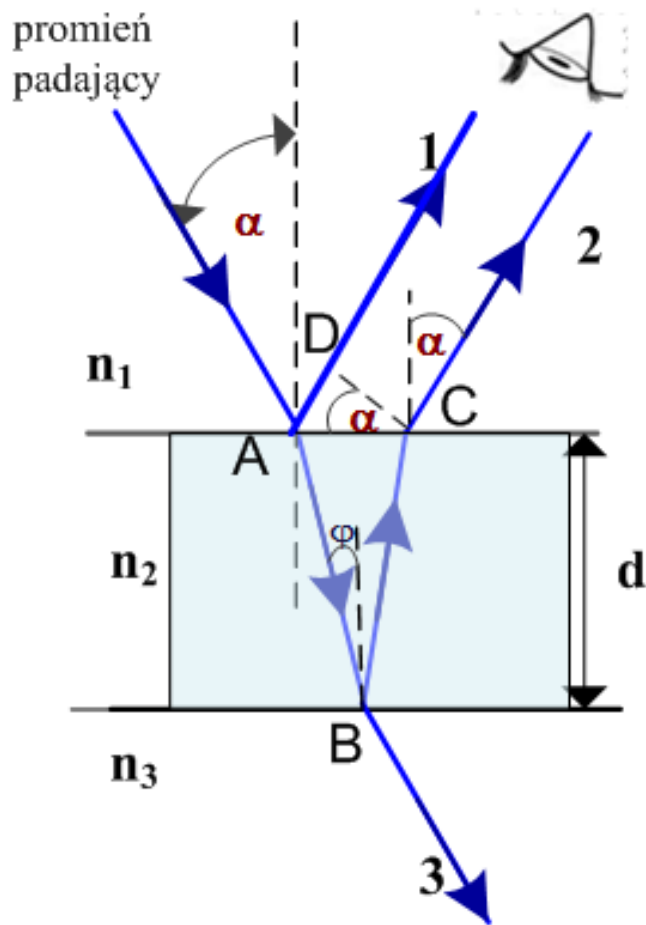
, człon $\lambda/2$ wiąże się z (strata połowy fali).

Te dwa promienie wzmocnią się w wyniku interferencji, gdy zajdzie warunek:

$$\Delta s = k \cdot \lambda$$

$$k=0, 1, 2, 3, \dots$$

Rys. Światło pada na cienką warstwę i częściowo się od niej odbija (prom.1), a częściowo wchodzi do środka, ulegając przy tym załamaniu. Promień załamany odbija się od dolnej powierzchni cienkiej warstwy, a następnie wychodzi z niej, również ulegając załamaniu (prom. 2). Promienie 1 i 2, interferują ze sobą, a **wynik** tej **interferencji** zależy od **grubości cienkiej warstwy d** oraz od **współczynników załamania** (n_1, n_2 i n_3).



Zgodnie z rys. : $|AB| = |BC| = \frac{d}{\cos \varphi}$

$$|AD| = |AC| \cdot \sin \alpha = 2|AB| \tan \varphi \sin \alpha$$

Uwzględniając oba te równania oraz stosując prawo załamania:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha = n \sin \varphi$$

i dokonując odpowiednich przekształceń otrzymamy:

$$\Delta s = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}$$

Uwzględniając straty związane ze zmianą fazy, otrzymamy:

$$\Delta s = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2}$$

Rys. Ilustracja zjawiska interferencji światła na cienkich warstwach.

Interferencja światła w cienkich warstwach

Warunek interferencyjnego wzmocnienia promieni odbitych, jeżeli :

$$\Delta s = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

, $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Warunek interferencyjnego osłabienia, gdy

$$\Delta s = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$$

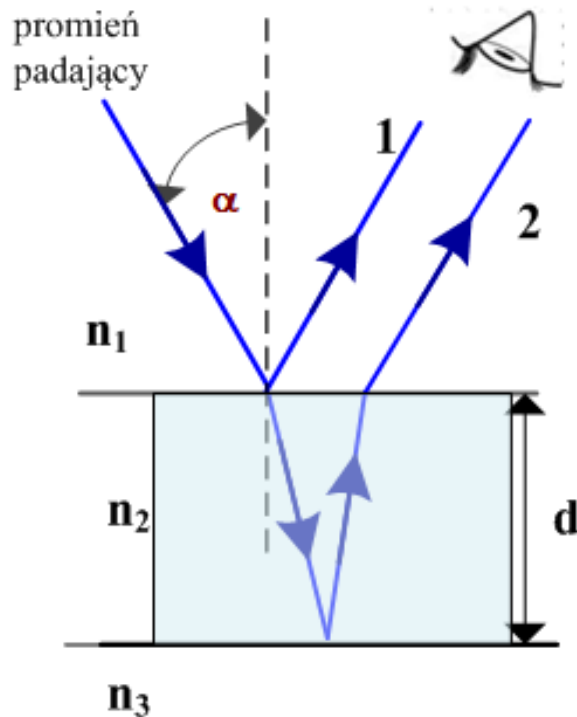
, $k=0, 1, 2, 3, \dots$

Wnioski:

Wynik interferencji w płasko-równoległych warstwach (błonkach) zależy zarówno od grubości cienkiej warstwy d , *współczynników załamania* $(n_1, n_2 \text{ i } n_3)$ oraz od λ .

Barwy cienkich warstw- przypadek szczególny

Założenie: Promień pada prostopadłe do powierzchni cienkiej warstwy; $n_1=n_3<n_2$



Rys. Ilustracja zjawiska interferencji światła na cienkich warstwach.

Jeśli wprowadzimy oznaczenia:

Δs - różnica dróg optycznych w przypadku gdy promień załamany pada prostopadłe na dolną powierzchnię warstwy;

d - grubość cienkiej warstwy;

n – współczynnik załamania warstwy;

λ - długość fali padającego światła, $\lambda_n = \lambda/n$

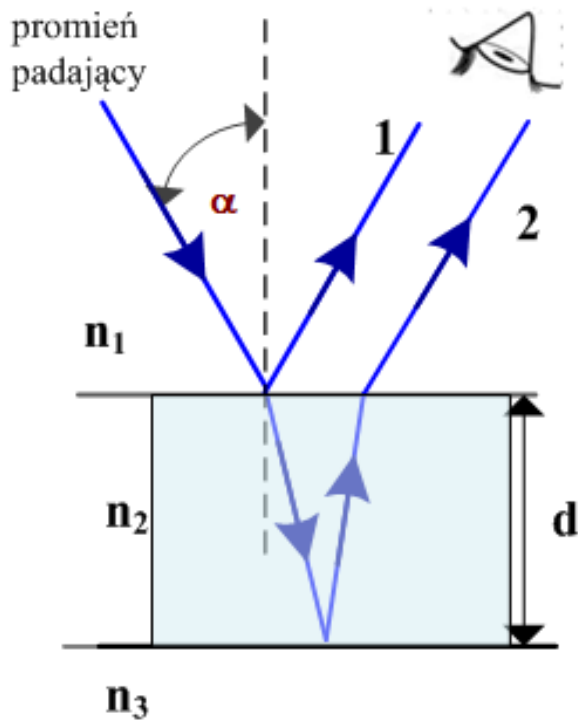
Wówczas różnica dróg optycznych wyrazi się wzorem:

$$\Delta s = 2dn - \frac{\lambda}{2}$$

, gdzie $\Delta s = \Delta(dn)$

- Zmiana fazy fali świetlnej o 180° następuje przy odbiciu od ośrodka o większym współczynniku załamania .**

Barwy cienkich warstw- przypadek szczególny



Rys. Ilustracja zjawiska interferencji światła na cienkich warstwach.

Grubość cienkiej warstwy (antyrefleksyjnej) dla interferencji konstruktywnej:

$$\Delta s = 2dn - \frac{\lambda}{2}, \text{ gdzie } \Delta s = \Delta(dn)$$

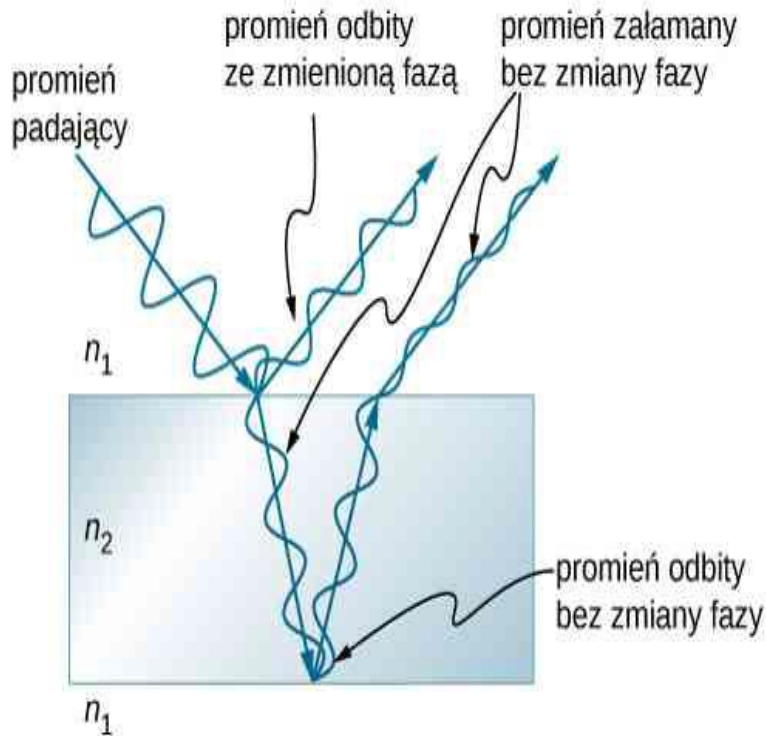
Gdy $\Delta s = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$

Wówczas następuje wzmocnienie fal (interferencja konstruktywna) o długości

$$\lambda = 4dn, \frac{4}{3}dn, \frac{4}{5}dn, \frac{4}{7}dn$$

$$d_k = \frac{\lambda}{4n}, \frac{3\lambda}{4n}, \frac{5\lambda}{4n}, \dots$$

Barwy cienkich warstw - przypadek szczególny



$$\Delta s = 2dn - \frac{\lambda}{2}, \text{ gdzie } \Delta s = \Delta(dn)$$

Gdy $\Delta s = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$

Wówczas następuje wygaszenie fal
(interferencja destruktywna) o długości:

$$\lambda = 2dn, \frac{1}{2} \cdot 2dn, \frac{1}{3} \cdot 2dn, \frac{1}{4} \cdot 2dn$$

Rys. Ilustracja zjawiska interferencji światła
na cienkich warstwach.

**Dla interferencji destruktywnej
grubość cienkiej warstwy :**

$$d_d = \frac{\lambda}{2n}, \frac{2\lambda}{2n}, \frac{3\lambda}{2n}, \dots$$

Przykład 3. –cienkie warstwy

- a. Jakie będą trzy najmniejsze grubości ścianek baniek mydlanych, dla których zaobserwujemy wzmocnioną barwę czerwoną o długości fali 650 nm? Przyjmijmy, że współczynnik załamania dla roztworu mydła jest taki sam jak dla wody.
- b. Dla jakich trzech najmniejszych grubości ścianek baniek mydlanych otrzymamy interferencję destruktywną?

Zał.: Cienka warstwa bańki mydlanej, czyli cienka warstwa roztworu mydła pomiędzy dwoma warstwami powietrza.

Dane:

$$n_1 = n_3 = 1$$

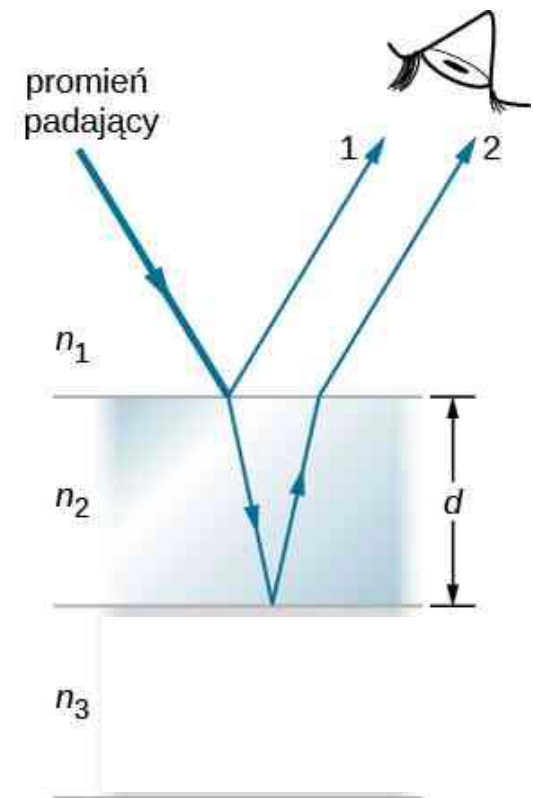
$$n_2 = 1,333 - \text{współczynnik zał. dla wody}$$

$d_k = ?$ - grubość warstwy
interf. konstruktywnej

$d_d = ?$ - dla destruktywnej

Dla prom. 1 będzie przesunięcie w fazie o $\lambda/2$

Prom.2, brak przesunięcia w fazie.



Przykład 3. – cienkie warstwy

Ad. a) W tym przypadku, interferencja konstruktywna zachodzi, gdy różnica dróg optycznych będzie równa nieparzystej wielokrotności połowy długości fali:

$$2d_k = \frac{\lambda}{2n}, \frac{3\lambda}{2n}, \frac{5\lambda}{2n}, \text{ czasami } \lambda/n = \lambda_n$$

Dla interferencji konstruktywnej grubość najcieńszej warstwy wynosi :

$$d_k = \frac{\lambda}{4n} \Rightarrow d_k = \frac{650 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{4 \cdot 1,333} = 122 \text{ nm}$$

Kolejne najmniejsza grubość, to

$$d_{k2} = \frac{3\lambda}{4n} \Rightarrow d_{k2} = \frac{3 \cdot 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{4 \cdot 1.333} = 366 \text{ nm}$$

$$d_{k3} = \frac{5\lambda}{4n} \Rightarrow d_{k3} = 610 \text{ nm}$$

Przykład 3. – cienkie warstwy

Ad. b) W przypadku interferencji destruktywnej, różnica dróg optycznych musi być równa całkowitej wielokrotności długości fali; trzy najmniejsze różnice, odpowiednio:

$$2d_d = 0 \cdot \lambda_n, 1 \cdot \lambda_n, 2 \cdot \lambda_n \quad \lambda_n = \lambda/n$$

Dla interferencji destruktywnej grubość najcieńszej warstwy : $d_{d1} = 0 \text{ nm}$

Kolejne grubość, to
$$d_{d2} = \frac{\lambda}{2 \cdot n} \Rightarrow d_{d2} = \frac{650 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{2 \cdot 1,333} = 244 \text{ nm}$$

$$d_{d3} = \frac{2\lambda}{2n} \Rightarrow d_{d3} = 488 \text{ nm}$$

Interferencja i dyfrakcja



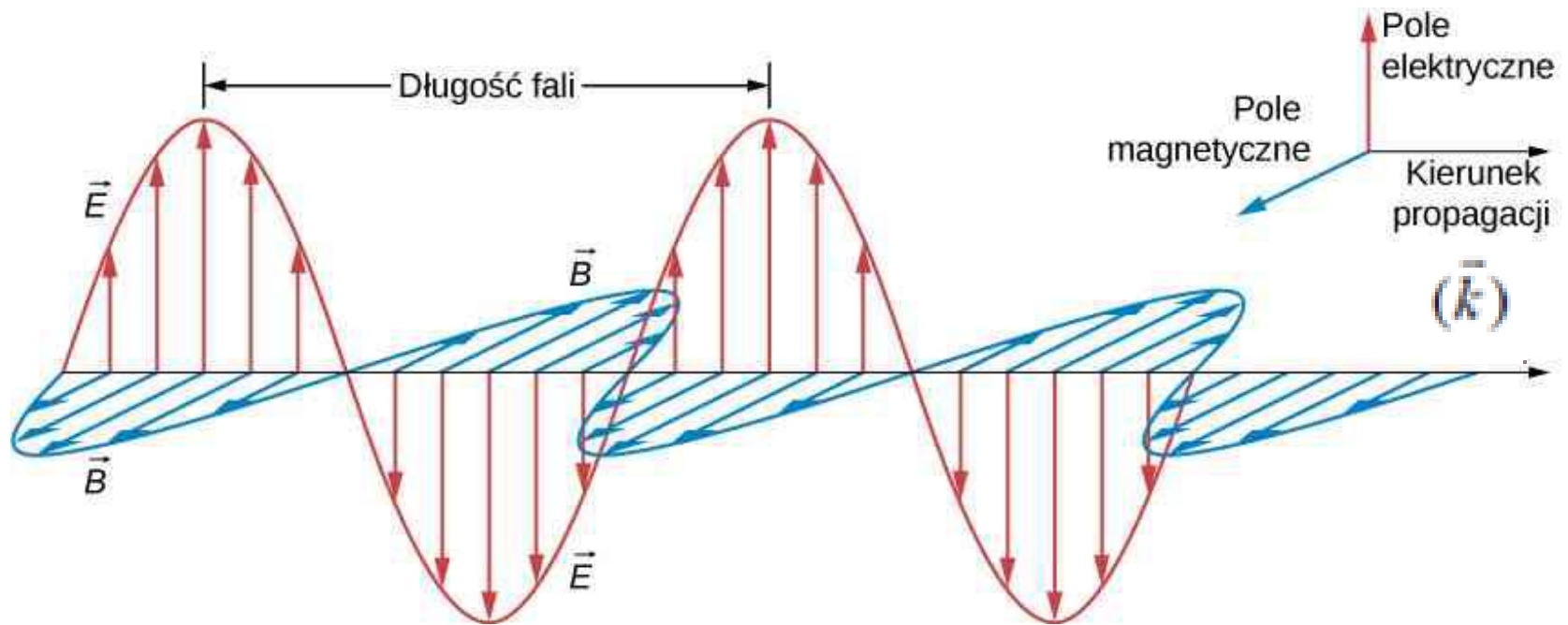
Skrzydła motyla posiadają rzędy cienkich warstw ; struktur odbijających, które działają jak siatki odbiciowe, odbijając rozmaite długości fal pod różnymi kątami. Zmienność barw wierzchniej powierzchni skrzydeł motyla ; efekt optyczny charakteryzujący się grą barw w postaci kolorowych wzorów, zmieniających się w zależności od kąta obserwacji



Barwy jakie widzimy, gdy światło słoneczne oświetla bańki mydlane czy cienkie warstewki, są wynikiem interferencji fal świetlnych odbijanych od przednich (górných) i tylnych (dolnych) powierzchni tych cienkich przezroczystych warstw (błonek). Grubość warstwy (błonki) mydlanej jest porównywalna z długością fali światła (widzialnego). Przy większych grubościach warstw zostaje zniszczona spójność światła konieczna do wytworzenia obrazu barwnego.

Opis fali elektromagnetycznej

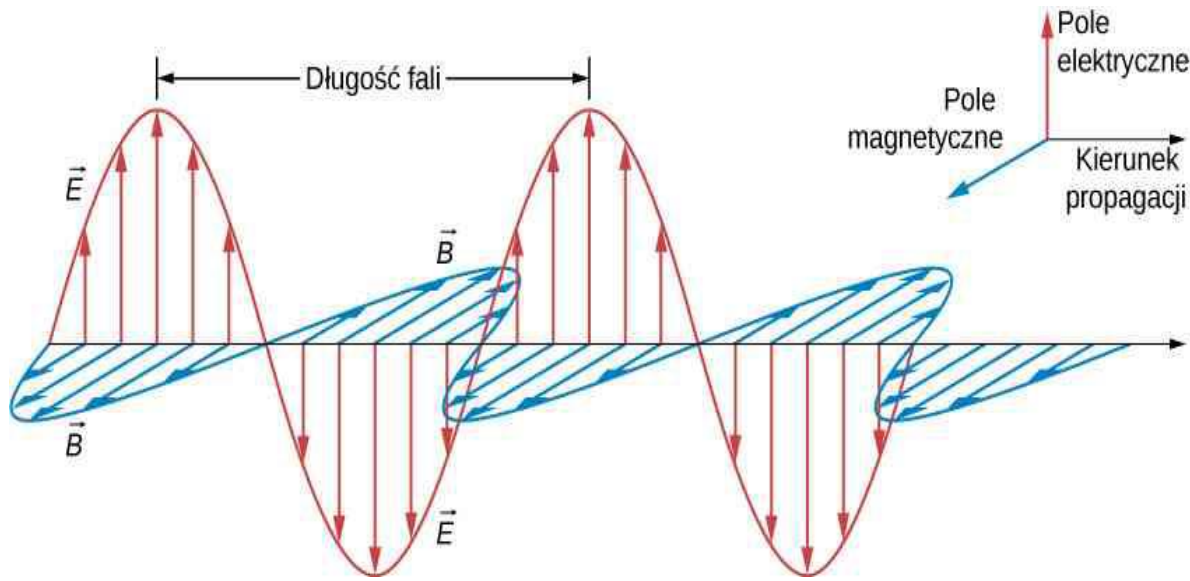
Fala elektromagnetyczna opisana jest przez wektor natężenia pola elektrycznego ($\vec{E}$), wektor indukcji pola magnetycznego ($\vec{B}$) oraz wektor falowy ($\vec{k}$) określający kierunek rozchodzenia się fali, $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$



Rys.16.

Wektory $\vec{E}$, $\vec{B}$ i $\vec{k}$ są do siebie wzajemnie prostopadłe i drgają w zgodnej fazie, a zatem fala e-m jest falą poprzeczną.

Opis fali elektromagnetycznej c.d.



Falę elektromagnetyczną rozchodzącą się w kierunku osi x , i w czasie t , można opisać:

(8.26)

$$E(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$B(x,t) = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

gdzie: E_0 , B_0 – amplitudy,

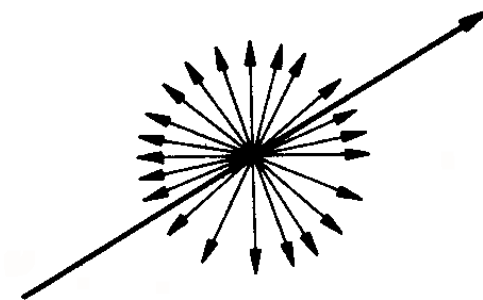
k – liczba falowa,

ω – częstość kołowa.

Za wszystkie zjawiska optyczne odpowiedzialny jest wektor natężenia pola elektrycznego, przyjęto opisywać fale elektromagnetyczne wektorem natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ i nazwano go **wektorem świetlnym**.

$$\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}_f \quad (8.27)$$

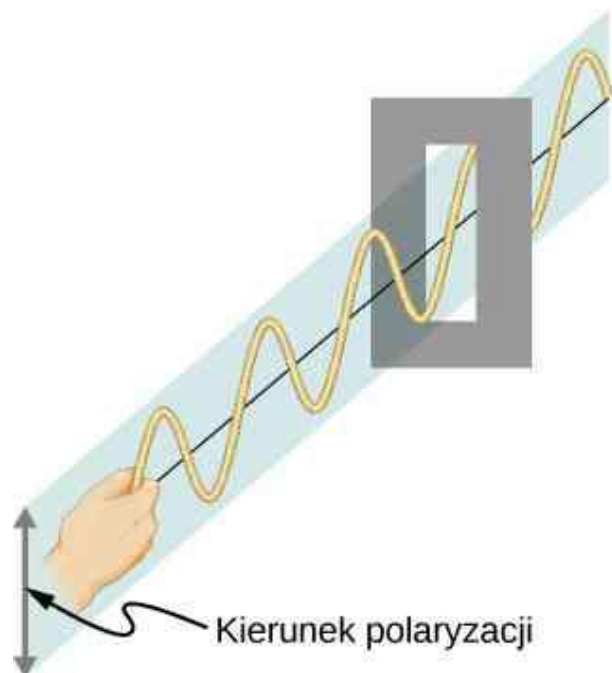
$\vec{E}$ – wektor świetlny.



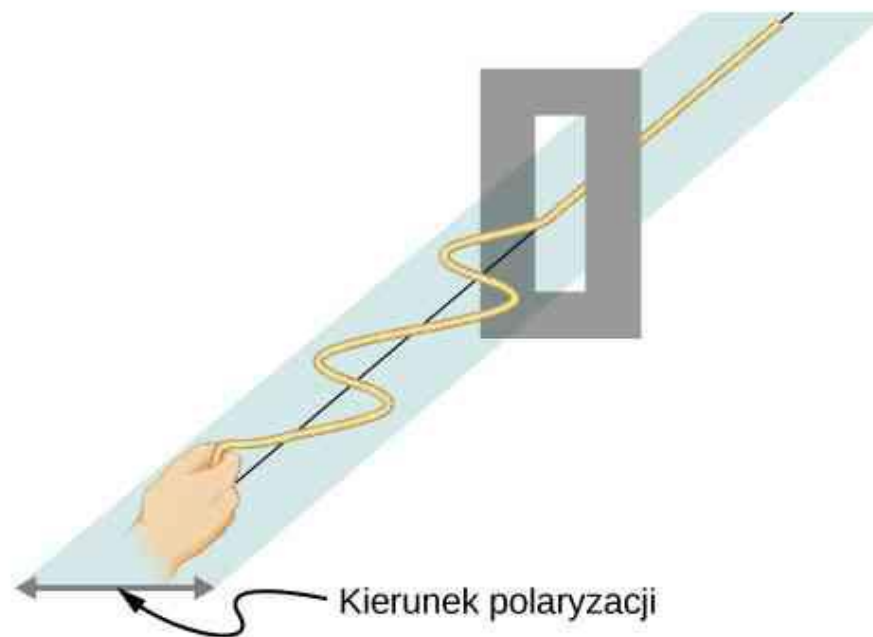
Światło niespolaryzowane – składa się z fal, których wektory natężenia pola elektrycznego mają przypadkowe kierunki drgań, tzn. mogą drgać we wszystkich płaszczyznach.

Przykład - polaryzacja

Rozważmy poprzeczne fale wytwarzane za pomocą liny.



(a)



(b)

Rys. Źródło: <http://cnx.org/content/col25571/1.3>

Drgania poprzeczne w pierwszej linii (a), nazwiemy **spolaryzowanymi pionowo**; a utworzone w drugiej linii (b), **spolaryzowanymi poziomo**. Szczelina jest **przykładem polaryzatora**, przepuszcza fale spolaryzowane pionowo; nie przepuszcza fal spolaryzowanych poziomo.

Rozkład drgania wektora świetlnego

Wektor **nateżenia pola elektrycznego** $\vec{E}$ może drgać w dowolnym kierunku - światło niespolaryzowane (Słońce, żarówka).

Światło naturalne, można traktować jako wiązkę w której występują drgania w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach.

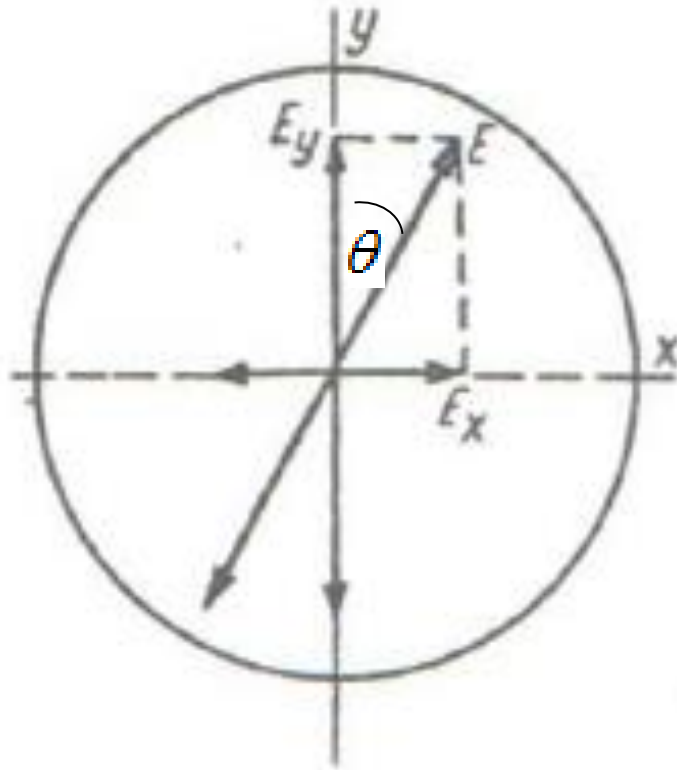
Metody polaryzacji światła polegają na:

- podziale wiązki światła niespolaryzowanego na dwie wiązki spolaryzowane w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych,

$$E_y = E \cos \theta$$

$$E_x = E \sin \theta$$

- wyeliminowaniu jednej z wiązek.



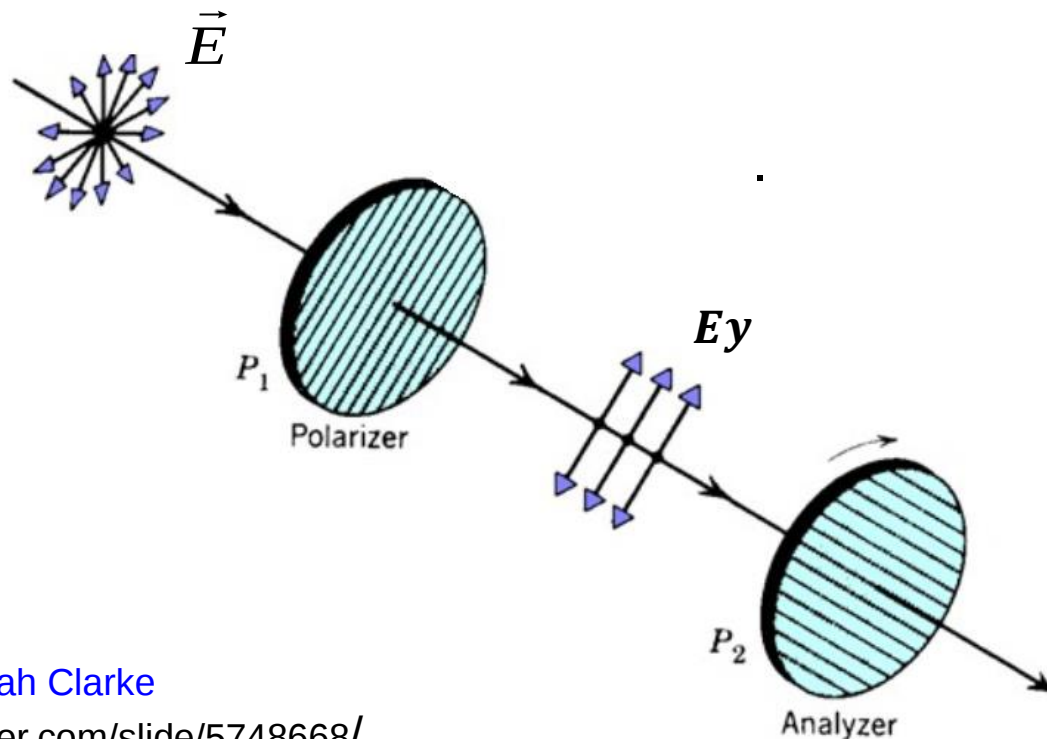
Rys. Rozkład drgań wektora świetlnego $\vec{E}$;

θ - kąt pomiędzy płaszczyzną drgań a kierunkiem polaryzacji płytki.

Przepuszczona jest tylko składowa E_y ; E_x – jest pochłaniana (absorpcja).

Polaryzacja

Światło **spolaryzowane** cechuje uporządkowane drganie wektora świetlnego.



Rys. źródło: Elijah Clarke

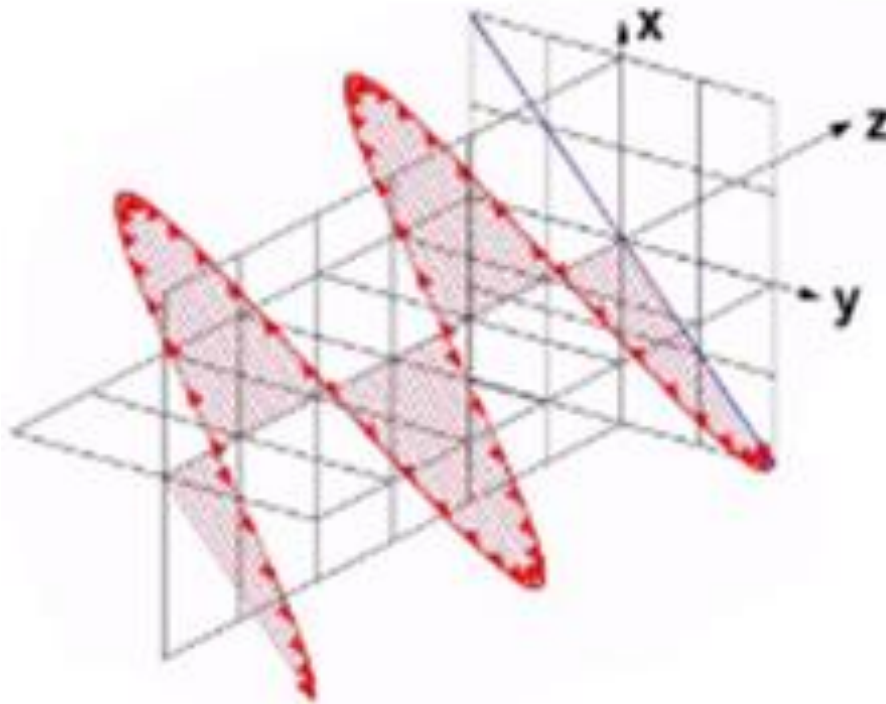
<https://slideplayer.com/slide/5748668/>

W zależności od tego, jakie krzywe regularne zakreśla w czasie koniec wektora świetlnego $\vec{E}$, mówimy o polaryzacji liniowej, eliptycznej lub kołowej.

Fale elektromagnetyczne są **spolaryzowane** wtedy, gdy wszystkie wektory natężeń ich pól elektrycznych drgają w tej samej płaszczyźnie, zwanej **płaszczyzną drgań**.

Rodzaje polaryzacji

Polaryzacja liniowa

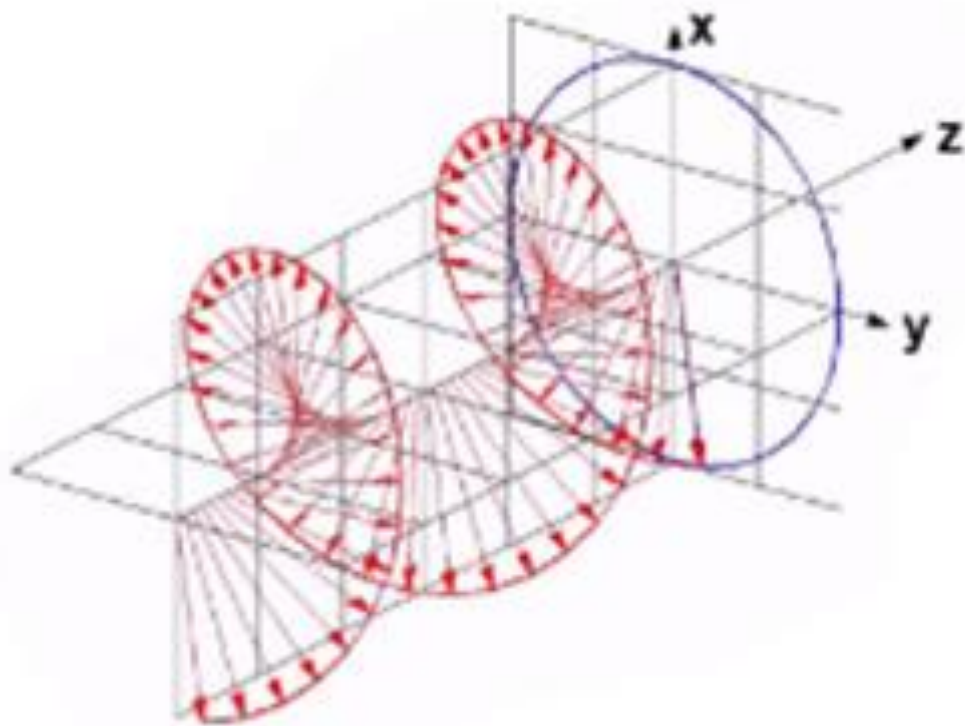


Światło jest spolaryzowane liniowo, jeżeli drgania wektora świetlnego $\vec{E}$ odbywają się w jednej płaszczyźnie, a położenie tej płaszczyzny w czasie i przestrzeni nie ulega zmianie. Koniec wektora $\vec{E}$ w tym przypadku zakreśla prostą (polaryzacja liniowo-poziomo; liniowo- pionowo).

Rys. źródło: <https://www.emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/>

Rodzaje polaryzacji

Polaryzacja **kołowa** (prawoskrętna)

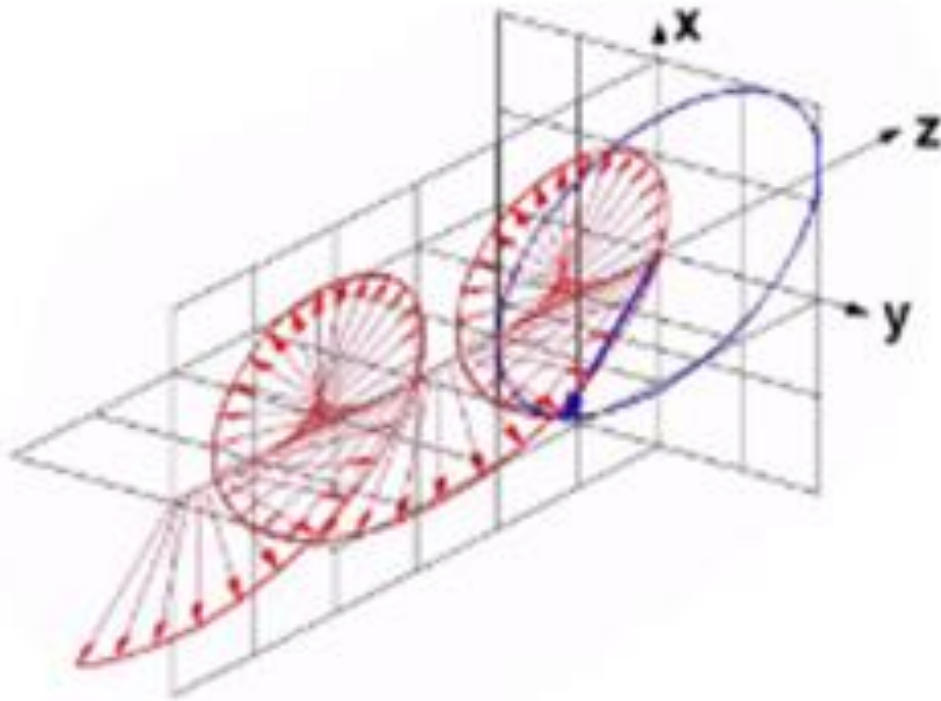


Jeżeli płaszczyzna drgań wektora świetlnego zmienia swoje położenie w przestrzeni w taki sposób, że koniec wektora świetlnego obserwowany w kierunku rozchodzenia się fali zakreśla okrąg, to mamy do czynienia z polaryzacją kołową (rys.).

Rys. źródło: <https://www.emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/>

Rodzaje polaryzacji

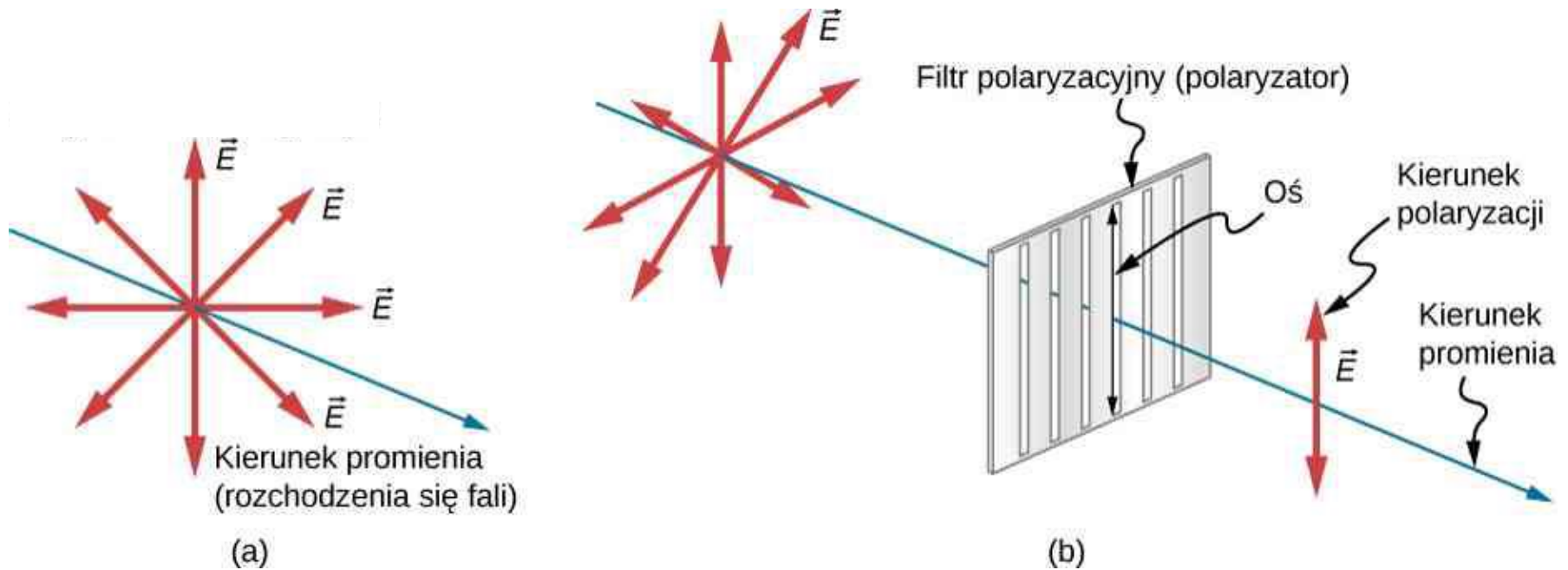
Polaryzacja **eliptyczna** (prawoskrętna)



Jeżeli krzywa zakreśla przez koniec wektora świetlnego jest elipsą, to mamy do czynienia z polaryzacją eliptyczną.

Rys. źródło: <https://www.emedicalprep.com/study-material/physics/wave-optics/polarization/>

Porównanie

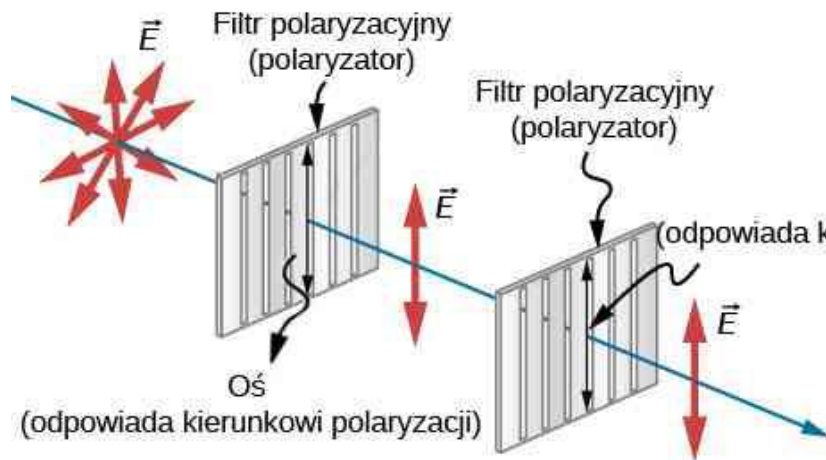


Rys. (a) Światło niespolaryzowane-płaszczyzna drań wektora świetlnego $\vec{E}$ zmienia wciąż swoje położenie w przestrzeni i w czasie ;(b) Polaryzator o określonym kierunku polaryzacji. Otrzymujemy wiązkę spolaryzowaną o pożądanym kierunku drgań wektora świetlnego, a wyeliminowane zostają pozostałe wiązki.

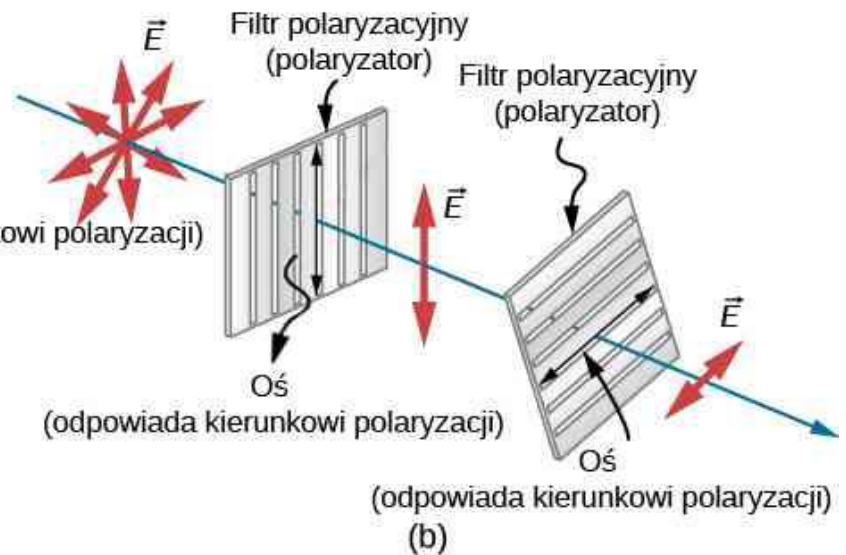
Zatem:

- polaryzacja światła, to uporządkowanie wektora świetlnego $\vec{E}$ w wiązce,
- polaryzacja występuje tylko dla fal poprzecznych,
- fale świetlne wysyłane przez zwykłe źródła nie są spolaryzowane (wyjątek laser),
- np. fale radiowe są zawsze spolaryzowane- antena .

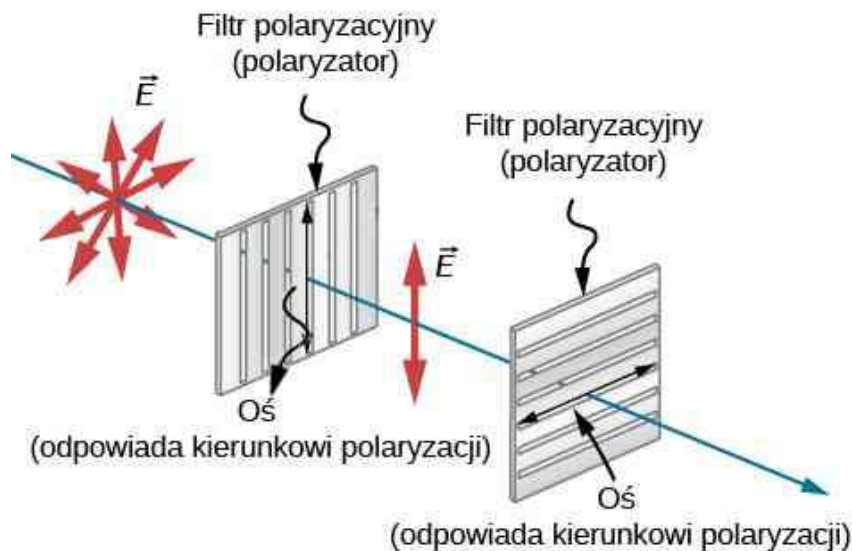
Przykład. Efekt przejścia światła niespolaryzowanego przez układ dwóch polaryzatorów.



(a)



(b)



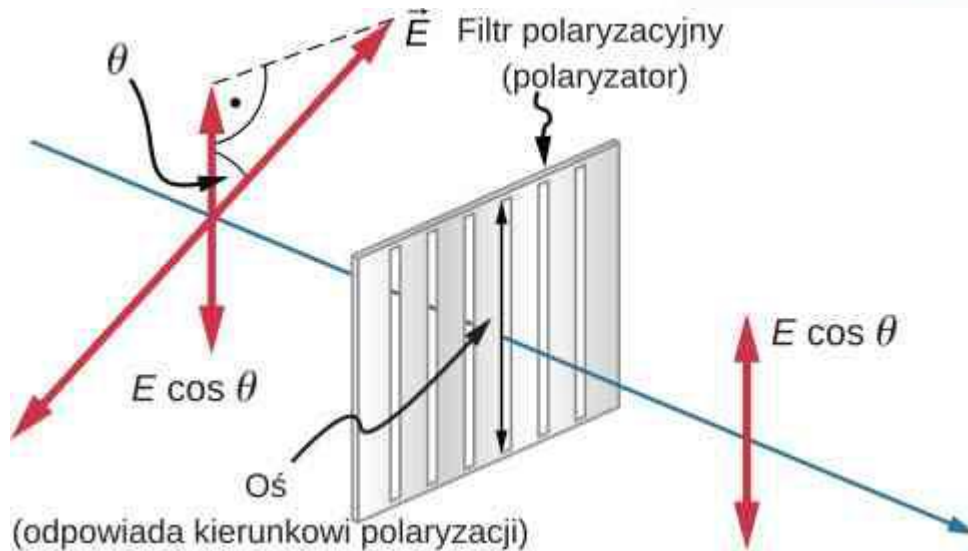
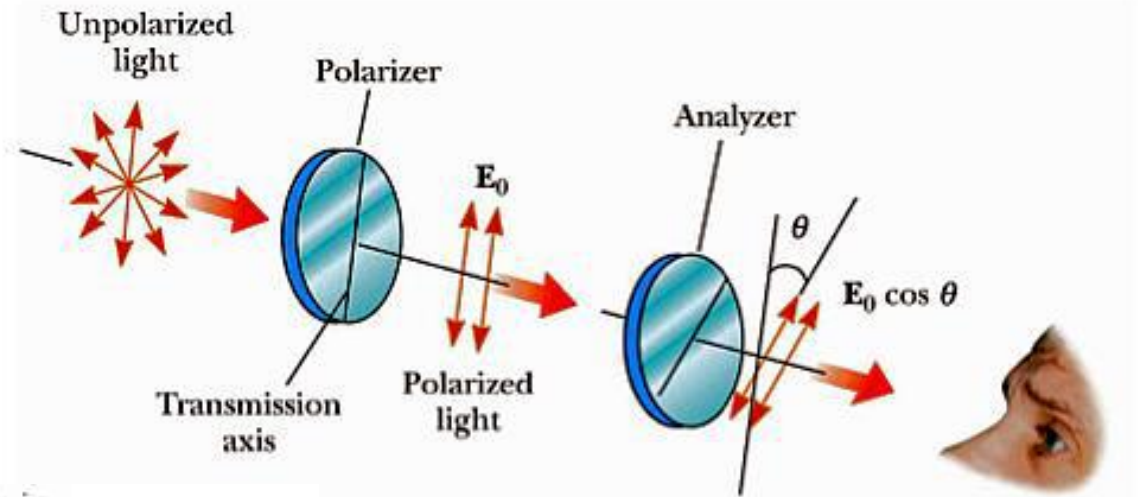
(c)



(d)

Prawo Malusa

Dla fali spolaryzowanej liniowo oscylacje zaburzenia odbywają się w jednej płaszczyźnie, w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali.



Prawo Malusa

$$E_y = E \cos \theta$$

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$$

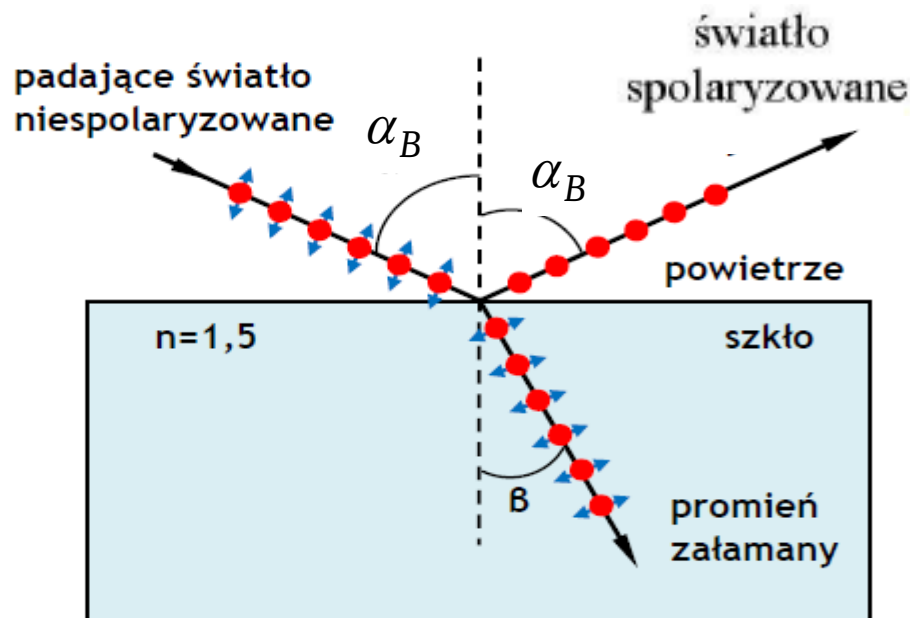
I – natężenie światła przepuszczonego
 I_0 – strumień świetlny padający na polaroid

SPOSOBY POLARYZACJI

1. Polaryzacja przez odbicie

Polaryzatorem odbiciowym jest np. płasko-równoległa płytki szklana, ustawiona pod pewnym kątem do padającego światła niespolaryzowanego.
(*)

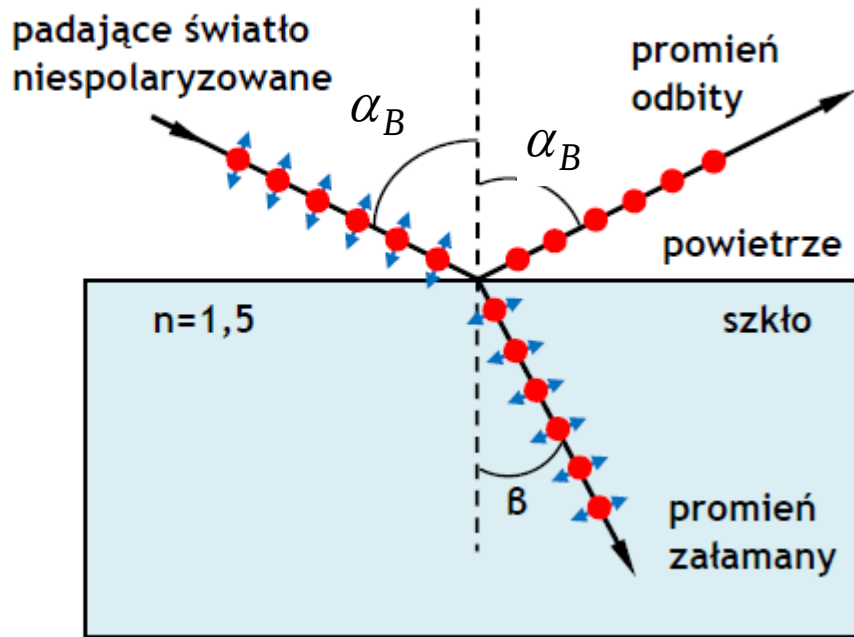
$$\alpha_B + \beta = 90^\circ$$



Rys. Prawo Brewstera i polaryzacja światła przez odbicie od szklanej płytki

Istnieje pewien kąt padania α_B , dla którego wiązka odbita tworzy z promieniem załamanym kąt 90° (*), wtedy światło odbite zostaje **całkowicie spolaryzowane**. Kąt α_B spełniający ten warunek nosi nazwę **kąta Brewstera** (kąt całkowitej polaryzacji światła)

$$\alpha_B + \beta = 90^\circ \quad (*)$$



Rys. Polaryzacja światła przez odbicie. Składową pola E prostopadłą do płaszczyzny ekranu oznaczono czerwoną kropką, a równoległą niebieską strzałką.

Zgodnie z prawem załamania i po uwzględnieniu zależności (*) mamy:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

Stąd, **prawo Brewstera:**

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n$$

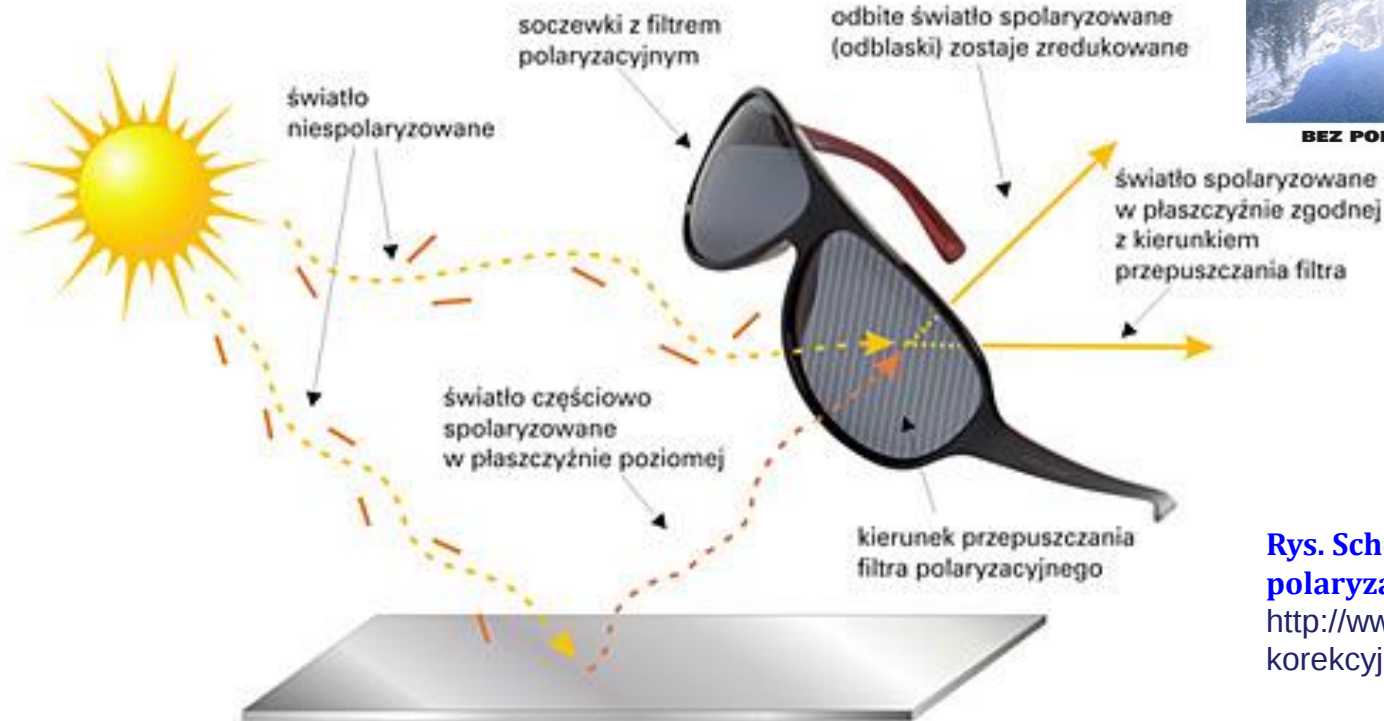
lub

$$\alpha_B = \operatorname{arctg} n$$

dla $n = 1.5$ otrzymujemy $\alpha_B = 56^\circ$

(kąt Brewstera)

2. Polaryzatory (polaroidy)



Rys. Schemat działania soczewek polaryzacyjnych

http://www.kwasniak.net/optyk/oprawy_korekcyjne_i_inne.php

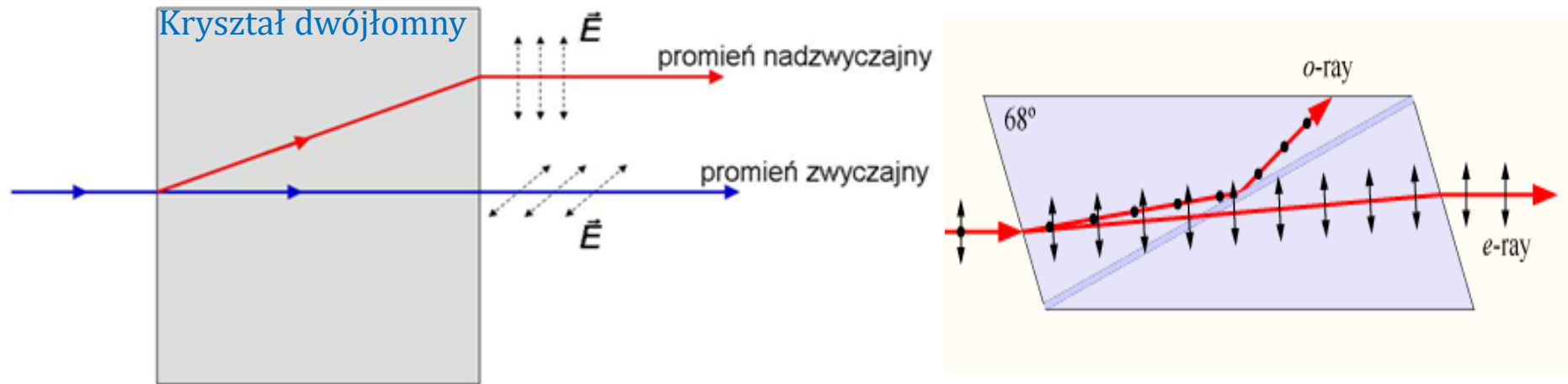
Pierwszym filtrem polaryzacyjnym (USA w 1929 r.), była płytka wykonana z nitrocelulozy, w której zatopiono kryształy siarczanu jodochininy.

Składowe poziome pola elektrycznego są absorbowane, składowe pionowe są transmitowane

Dichroizm (właściwość materiałów polegająca na różnym pochłanianiu światła, w zależności od jego polaryzacji: *polaroid*) - **selektywna absorpcja**.

3. Polaryzatory dwójłomne

Kryształy dwójłomne (układ nieregularny; podwójne załamanie światła np. kalcyt), czyli **kryształy anizotropowe**. Mają różne własności fizyczne w różnych kierunkach, a zatem padająca wiązka światła po załamaniu jest rozdzielana na dwie wiązki (rys.). Różna prędkość światła w różnych kierunkach, a więc i współczynnik załamania zależy od kierunku.

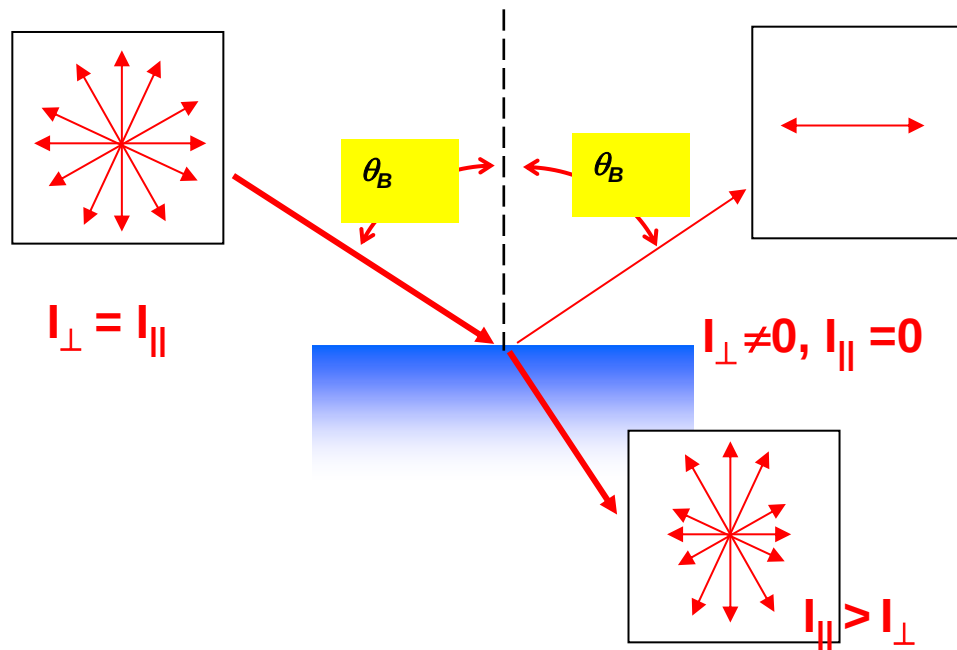


Rys. Promień wchodzący (niespolaryzowany) rozdziela się na dwa promienie spolaryzowane liniowo (o- zwyczajny oraz e- nadzwyczajny), przy czym ich płaszczyzny drgań są wzajemnie prostopadłe.

$$\Delta n = n_e - n_o$$

Dwójłomność (zdolność ośrodków optycznych do podwójnego załamania światła). Ilościowo dwójłomność def. jako różnicę współczynników załamania - Δn

Stopień polaryzacji

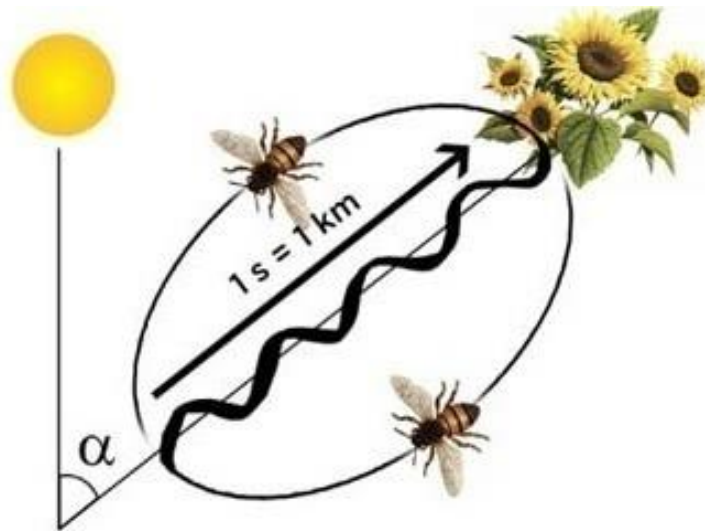


Stopień polaryzacji P określa się zgodnie z wzorem:

$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

gdzie: $I_{\max}$ i $I_{\min}$ to maksymalne i minimalne natężenia światła o wzajemnie prostopadłych kierunkach polaryzacji.

Polaryzacja w przyrodzie - wybrane przykłady



Pszczoły i mrówki wykorzystują polaryzację światła słonecznego do nawigacji.

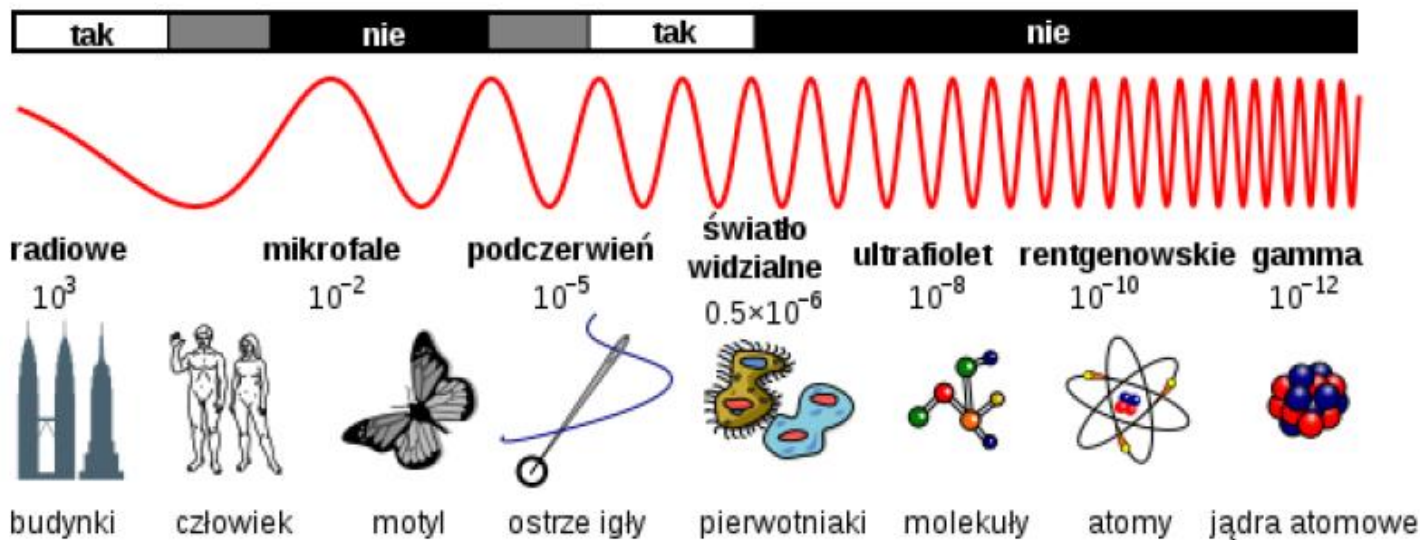
Ludzkie oko również posiada zdolność widzenia polaryzacji światła. Efektem tego jest tzw. Figura Haidingera (Haidinger's brush).



Wnioski:

- Poruszające się ładunki są źródłem pól: elektrycznego i magnetycznego.
- Pola te propagują się w przestrzeni w postaci **fali elektromagnetycznej**
- Fala elektromagnetyczna jest **falą płaską**, **poprzeczną**, rozchodzącą się prostopadłe do drgań pól elektrycznego i magnetycznego
- Falę elektromagnetyczną można **spolaryzować**
- Fala ulega zjawisku **dyfrakcji i interferencji**
- Fala elektromagnetyczna obejmuje zakres od 10^8 do 10^{-16} m.
- Tylko niewielki fragment widma fali e-m jest widzialny dla oka ludzkiego nazywając "światło widzialne"

Przenika atmosferę ziemską?



Rys. źródło:

<https://majsterkowo.pl/prosty-noktowizor/>

Dziękuję za uwagę !

