

# Optyka

12/15

Andrzej Kapanowski  
*<http://users.uj.edu.pl/~ufkapano/>*

WFAIS, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

2020

# Fale świetlne

- Promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fali zawierających się w zakresie czułości oka ludzkiego ( $400 - 700\text{nm}$ ) nazywa się **światłem**. Właściwościami fal świetlnych zajmuje się dziedzina fizyki nazywana **optyką**.
- Promieniowanie **podczerwone** ( $800 - 10^5\text{nm}$ ): noktowizja (obrazy ludzi i przedmiotów w nocy), promienniki podczerwone (ogrzewanie i suszenie ciał).
- Promieniowanie **nadfioletowe** ( $5 - 400\text{nm}$ ): luminescencja, opalanie skóry, uszkodzenia oka.

# Optyka geometryczna

- Fale elektromagnetyczne wykazują szereg skomplikowanych właściwości. W opisie tych właściwości fizyka posługuje się różnymi przybliżeniami.
- **Optyka geometryczna** to przybliżenie stosowane w przypadku, gdy długość fali elektromagnetycznej jest bardzo mała w porównaniu z rozmiarami urządzeń służących do badania tych fal, a ponadto, gdy promieniowanie nie wywołuje podczas oddziaływania z substancją zjawisk kwantowych (np. zjawisko fotoelektryczne). Przybliżenie to jest szczególnie użyteczne przy opisie właściwości światła.
- Podstawowe zjawiska, którymi zajmuje się optyka geometryczna, to odbicie i załamanie światła. W opisie tych zjawisk posługujemy się pojęciem **promienia świetlnego** (smukła wiązka światła).

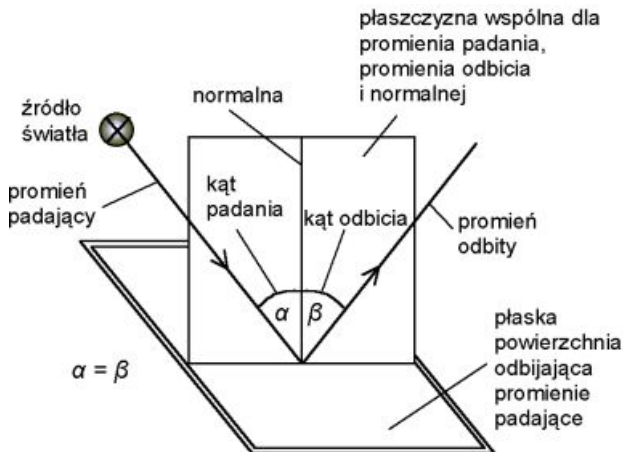
# Założenia optyki geometrycznej

- **Założenie 1:** Światło rozchodzi się po liniach prostych w ośrodkach jednorodnych, nie rozpraszających i przezroczystych (eliminacja dyfrakcji). Obserwacja: w przypadku źródła światła o małych wymiarach, nieprzezroczyste przedmioty wywołują ostre cienie.
- **Założenie 2:** Przecinające się wiązki światła przenikają się wzajemnie, nie oddziałując ze sobą (eliminacja interferencji). Obserwacja: obserwator wyraźnie widzi różne przedmioty znajdujące się przed nim, choć wiązki światła biegnące od tych przedmiotów przecinają się wielokrotnie.

# Zjawisko odbicia światła

- Gdy światło pada na bardzo gładką powierzchnię graniczną między dwoma ośrodkami, wtedy każdy z promieni padających na tę powierzchnię zostaje odbity w ściśle określonym kierunku.
- **Prawo odbicia** głosi, że promień odbity leży w płaszczyźnie utworzonej przez promień padający i prostopadłą do powierzchni odbijającej w punkcie odbicia. Kąt między promieniem odbitym a prostopadłą do powierzchni odbijającej (**kąt odbicia**) jest równy kątowi między prostopadłą a promieniem padającym (**kąt padania**).
- Powierzchnia odbijająca jest gładka (zwierciadło), jeżeli wymiary nierówności powierzchni są małe w porównaniu z długością fali światła padającego. W skali wymiarów atomowych każda powierzchnia jest niegładka, chropowata.

# Prawo odbicia



# Zjawisko odbicia światła

- Zależnie od kształtu powierzchni odbijającej rozróżnia się zwierciadła płaskie, kuliste wklęsłe i kuliste wypukłe, paraboliczne itd.
- Z analizy biegu wybranych promieni świetlnych (i ich przedłużeń) od źródła punktowego i od źródła rozciągłego można znaleźć sposób powstawania obrazu tych źródeł w oku obserwatora.

# Zjawisko załamania światła

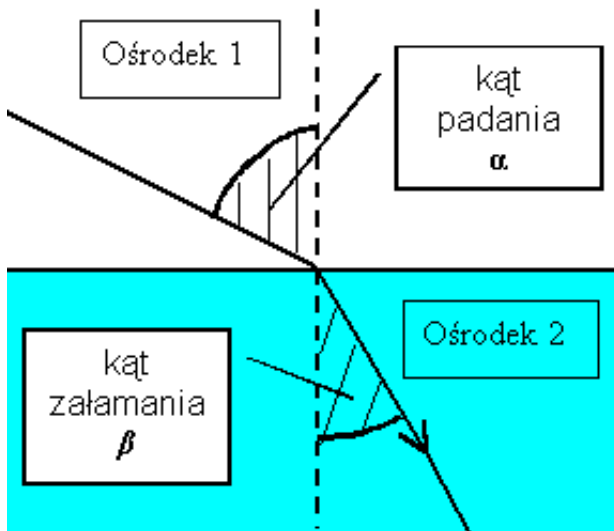
- Zjawisko załamania światła jest to zmiana kierunku rozchodzenia się światła przy przechodzeniu wiązki światła przez granicę rozdziału między dwoma ośrodkami jednorodnymi.
- Prawo załamania (refrakcji, Snella, Snelliusa) głosi, że promień padający, promień załamany i prostopadła do granicy rozdziału ośrodków leżą w jednej płaszczyźnie. Kąt padania  $\theta_1$  i kąt załamania  $\theta_2$  związane są zależnością

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{prawo Snella}), \quad (1)$$

gdzie  $n = c/v$  jest bezwymiarowym współczynnikiem załamania światła,  $v$  jest prędkością światła w ośrodku, a  $c$  jest prędkością światła w próżni.



# Prawo załamania



# Całkowite wewnętrzne odbicie

- Z prawa Snella wynika, że jeżeli  $n_2 < n_1$ , to  $\theta_2 > \theta_1$ . Dla **kąta granicznego**  $\theta_1 = \theta_{gr}$  kąt załamania wynosi  $\theta_2 = 90^\circ$ , czyli promień załamany ślizga się po powierzchni granicznej między ośrodkami.

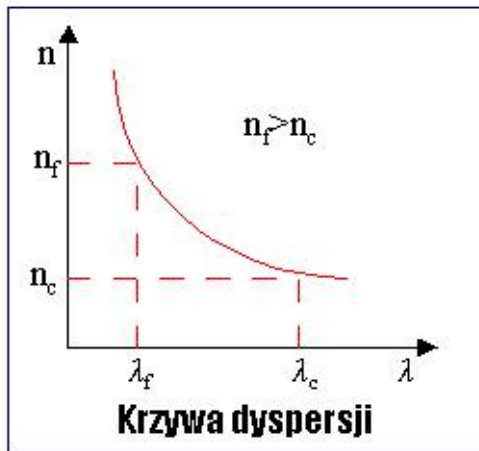
$$n_1 \sin \theta_{gr} = n_2 \sin 90^\circ, \sin \theta_{gr} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

- Dla  $\theta_1 > \theta_{gr}$  nie ma już promienia załamane i całe światło ulega odbiciu. Jest to zjawisko **całkowitego wewnętrznego odbicia**.
- Zastosowanie: światłowody (medycyna, sieci komputerowe).

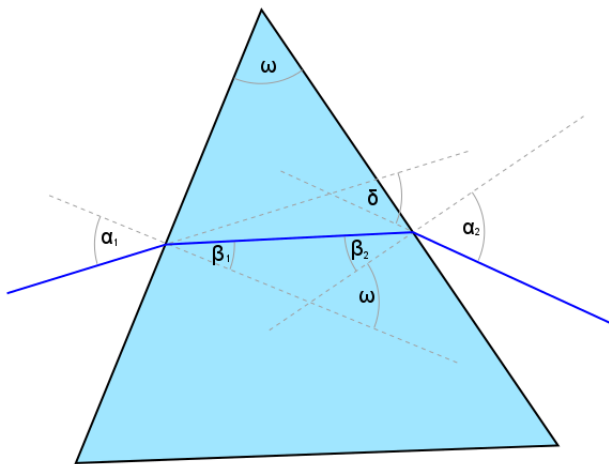
# Rozszczepienie światła

- Współczynnik załamania światła  $n$  w każdym ośrodku, z wyjątkiem próżni, zależy od długości fali światła. Oznacza to, że promienie świetlne o różnych długościach fali będą załamywane pod różnymi kątami na tej samej powierzchni granicznej dwóch ośrodków.
- Jeżeli wiązka światła zawiera promienie o różnych długościach fali, to w wyniku załamania zostanie ona **rozszczepiona** (dyspersja chromatyczna).
- Na ogół współczynnik załamania światła dla danego ośrodka jest **większy** dla fal krótszych niż dla fal dłuższych (światło niebieskie załamywane jest bardziej niż czerwone).
- Na wiązkę **światła białego** składają się wszystkie barwy z zakresu widzialnego widma, z jednakowym w przybliżeniu natężeniem.

# Krzywa dyspersji



# Bieg promienia świetlnego przez pryzmat



# Pryzmat

- **Pryzmat** to bryła z materiału przezroczystego o co najmniej dwóch ścianach płaskich nachylonych do siebie pod kątem (tzn. kątem łamiącym pryzmatu).
- Kąt odchylenia promienia i dyspersji przez pryzmat można określić za pomocą prawa Snelliusa na powierzchniach pryzmatu.

$$\sin \alpha_1 = n \sin \beta_1, \quad \sin \alpha_2 = n \sin \beta_2, \quad (3)$$

$$\beta_1 + \beta_2 = \omega. \quad (4)$$

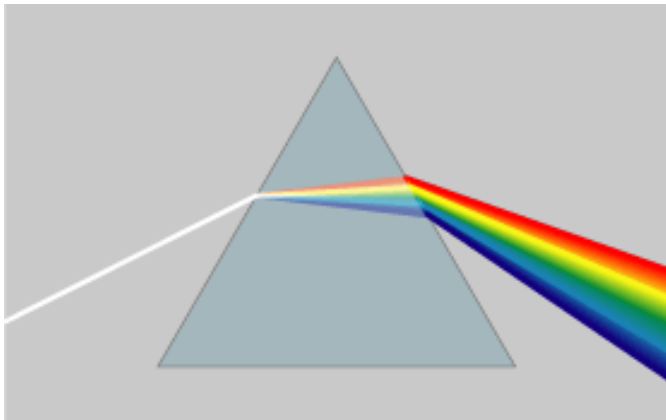
- Kąt załamania promienia

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \omega \approx (n - 1)\omega. \quad (5)$$

- Minimalny kąt załamania pryzmatu ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ,  $\beta_1 = \beta_2$ )

$$n \sin \frac{\omega}{2} = \sin \frac{\omega + \delta_m}{2}. \quad (6)$$

# Rozszczepienie światła białego w pryzmacie

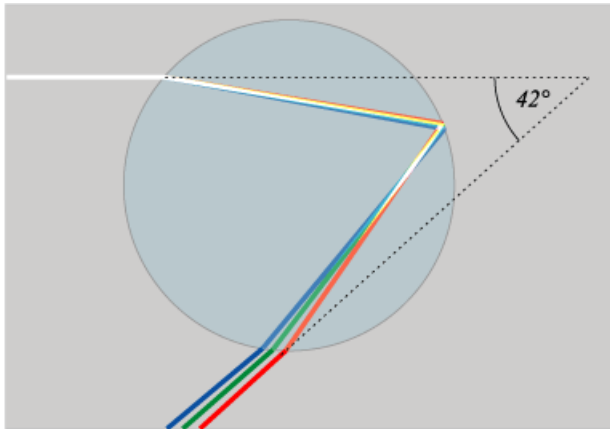


# Tęcza

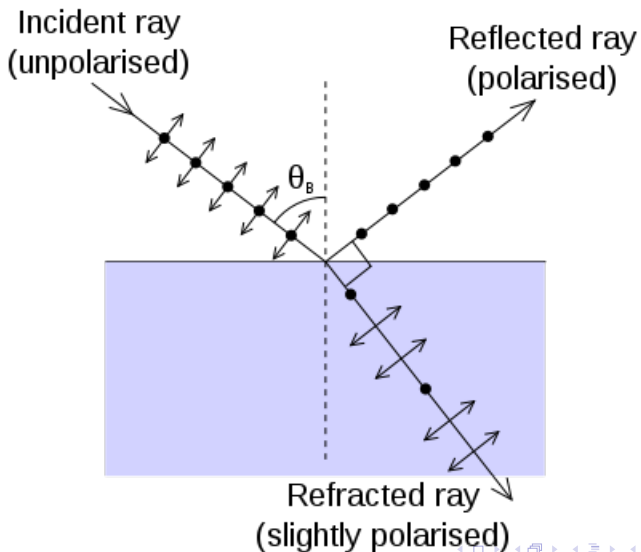




# Tęcza



# Polaryzacja przy odbiciu



# Polaryzacja przy odbiciu

- Rozważmy wiązkę światła niespolaryzowanego padającą na powierzchnię szkła. Część tej wiązki ulega odbiciu od powierzchni szkła. Pozostała część światła z wiązki załamuje się przy przejściu przez powierzchnię graniczną i rozchodzi się dalej w szkło.
- Światło odbite jest częściowo spolaryzowane, składowa równoległa do **płaszczyzny padania** (płaszczyzna utworzona przez promień padający i prostopadłą do granicy ośrodków) jest osłabiona.
- Jeżeli światło pada pod **kątem Brewstera**  $\theta_B$ , to światło odbite jest całkowicie spolaryzowane, występuje w nim tylko składowa prostopadła do płaszczyzny padania.

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin(90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{kąt Brewstera}). \quad (8)$$

# Obrazy

- Obrazów przedmiotów można poszukiwać dla różnych zwierciadeł, powierzchni załamujących lub soczewek.
- **Soczewką** nazywamy ciało przezroczyste, ograniczone dwoma powierzchniami wypukłymi lub wklęsłymi.
- Podział obrazów:
  - (a) rzeczywisty (niepotrzebny obserwator) lub pozorny,
  - (b) prosty lub odwrócony,
  - (c) powiększony lub pomniejszony,
  - (d) po tej samej stronie co przedmiot lub po stronie przeciwnej.
- Soczewki są stosowane do budowy **przyrządów optycznych**, takich jak lupa (szkło powiększające), mikroskop, teleskop (luneta astronomiczna), rzutnik, aparat fotograficzny, lornetka, itp.

# Falowo-korpuskularne właściwości światła

- Istnieje cała grupa zjawisk świetlnych, których opis metodami optyki geometrycznej zawodzi. Do tych zjawisk należą: interferencja, dyfrakcja i polaryzacja światła oraz efekty kwantowe.
- Zjawiska falowe to interferencja, dyfrakcja i polaryzacja światła
- Zjawiskiem korpuskularnym jest efekt fotoelektryczny.

# Interferencja

- **Interferencją** nazywamy nakładanie się (superpozycję) dwóch lub więcej fal o tych samych częstotliwościach powodujące odpowiednie wzmacnianie lub osłabianie natężenia powstającej fali wypadkowej. Osłabienie to lub wzmocnienie zależy od różnicy faz fal w danej chwili i w określonym punkcie przestrzeni, w której rozchodzą się fale interferujące.
- Interferencja światła nie może być wyjaśniona inaczej niż przez odwołanie się do jego falowej natury.

# Zasada Huygensa

- Pierwszą przekonującą falową teorię światła podał Christian Huygens (1678). Teoria tłumaczy prawa odbicia i załamania, oraz wyjaśnia sens fizyczny współczynnika załamania światła. Teoria Huygensa jest dalej użyteczna, choć zastąpiła ją ogólna teoria elektromagnetyzmu Maxwella.
- **Zasada Huygensa** mówi, że wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych. Po czasie  $\Delta t$  nowe położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych.
- Przykład: fala płaska w próżni.

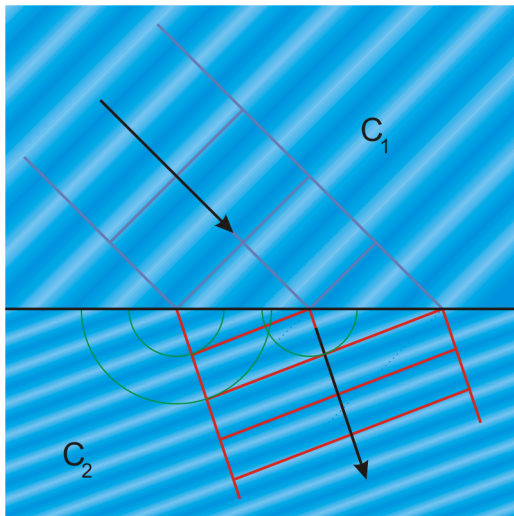
# Zasada Huygensa

## Zasada Huygensa - rozchodzenie się fali





# Prawo załamania a zasada Huygensa



# Prawo załamania a zasada Huygensa

- Rozważmy falę biegnącą w powietrzu i padającą na szkło. Czoła fali padającej odległe są o  $\lambda_1$ , a prędkość fali wynosi  $v_1$ . W szkłe mamy odpowiednio  $\lambda_2$  i  $v_2$ .
- Kąt pomiędzy czołem fali padającej a powierzchnią graniczną wynosi  $\theta_1$  i jest on równy kątowi padania promienia świetlnego. Podobnie kąt między czołem fali załamanej i powierzchnią graniczną  $\theta_2$  jest równy kątowi załamania.
- Czasy przejścia fali padającej i fali wtórnej o  $x$  wzdłuż powierzchni granicznej są równe,  $\lambda_1/v_1 = \lambda_2/v_2$ .
- Z odpowiednich trójkątów dostajemy

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{x}, \quad \sin \theta_2 = \frac{\lambda_2}{x}. \quad (9)$$

# Prawo załamania a zasada Huygensa

- Dzieliąc stronami oba równania wyprowadzamy prawo Snella

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (10)$$

- Zbadajmy relację między częstotliwościami fali w obu ośrodkach

$$f_1 = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} = f_2. \quad (11)$$

Częstotliwość w każdym ośrodku jest taka sama, jak w próżni.

- Dla długości fali możemy zapisać zależność

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_2 n_2}{n_1} = \frac{\lambda}{n_1}, \quad (12)$$

gdzie  $\lambda$  to długość fali w próżni.

# Prawo załamania a zasada Huygensa

- Z zależności długości fali od współczynnika załamania wynika, że jeżeli dwie fale mają na początku długość  $\lambda$ , a następnie przechodzą przez dwa ośrodki o długości  $L$ , ale różnych współczynnikach załamania  $n_1$  i  $n_2$ , to nie będą one już w zgodnej fazie.
- Obliczamy różnicę faz

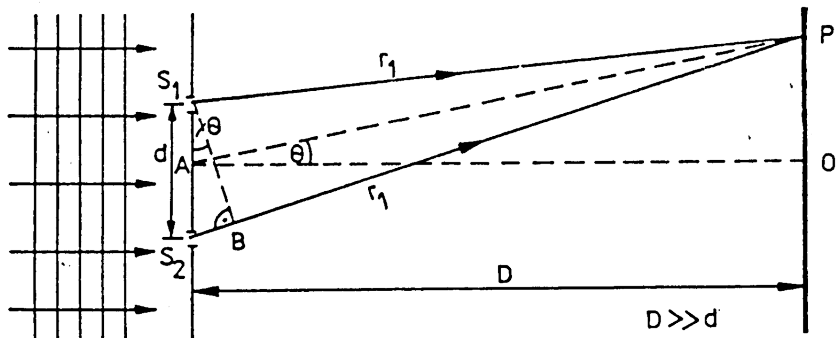
$$\phi = k_2 L - k_1 L = \frac{2\pi L}{\lambda_2} - \frac{2\pi L}{\lambda_1} = \frac{2\pi L(n_2 - n_1)}{\lambda}. \quad (13)$$

**Efektywna różnica faz** to reszta z dzielenia różnicy faz przez  $2\pi$ .

# Dyfrakcja

- **Dyfrakcja (uginanie się)** światła polega na tym, że gdy światło przechodzi przez przeszkody (otwory, szczeliny), wtedy pojawia się wyraźne odchylenie od prostoliniowości rozchodzenia się światła. Występuje charakterystyczne rozmycie granicy cienia i światła. Takie rozprzestrzenianie się fali jest zgodne z rozchodzeniem się elementarnych fal w teorii Huygensa.
- Dyfrakcja stanowi ograniczenie optyki geometrycznej, w której falę świetlną reprezentujemy jako promień świetlny. Jeżeli rzeczywiście próbujemy wytworzyć promień świetlny, przepuszczając światło przez wąską szczelinę, to nasze wysiłki zawsze niweczy dyfrakcja. Im węższa jest szczelina, tym większy jest obszar ugięcia.

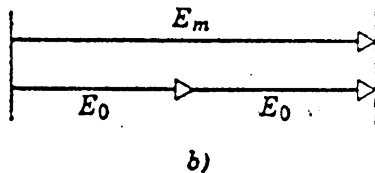
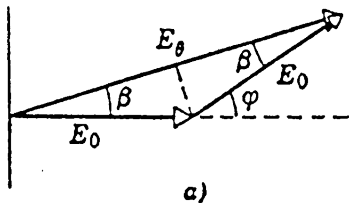
# Doświadczenie Younga



# Doświadczenie Younga

- Doświadczenie interferencyjne Younga z dwiema szczelinami,  $d$  odległość między szczelinami,  $D$  odległość szczelin od ekranu ( $D \gg d$ ).
- Obraz jasnych i ciemnych prążków na ekranie nazywa się **obrazem interferencyjnym**.
- Różnica dróg promieni  $\Delta L = d \sin \theta$ .
- Maksima (jasne prążki)  $\Delta L = m\lambda$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$
- Minima (ciemne prążki)  $\Delta L = (m + 1/2)\lambda$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$
- Centralne maksimum dla  $m = 0$ ,  $\theta = 0$ .
- Prążki pierwszego rzędu (maksimum boczne pierwszego rzędu)  $m = 1$ ,  $d \sin \theta = \lambda$ .

# Natężenie światła w obrazie interferencyjnym

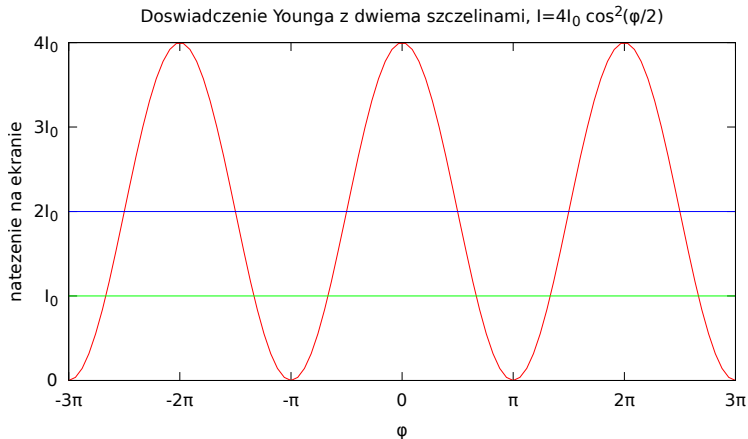




# Natężenie światła w obrazie interferencyjnym

- Różnica faz  $\phi = k\Delta L = 2\pi\Delta L/\lambda = 2\pi d \sin \theta/\lambda$ .
- Mamy dwie składowe pola elektrycznego  
 $E_1 = E_0 \sin \omega t$ ,  $E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi)$ .
- Amplituda wypadkowa  $E = 2E_0 \cos(\phi/2)$ .
- Natężenie światła  $I = 4I_0 \cos^2(\phi/2)$ .
- Maksimum  $\phi/2 = m\pi$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$
- Położenie jasnych prążków na ekranie ( $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ )  
 $\theta = y_m/D = m\lambda/d$ ,  $y_m = m\lambda D/d$ .

# Natężenie światła w obrazie interferencyjnym



# Spójność światła

- Warunkiem pojawienia się na ekranie stabilnego, niezmiennego w czasie obrazu interferencyjnego, jest stała w czasie różnica faz fal świetlnych docierających do każdego punktu na ekranie. Takie wiązki światła nazywamy **spójnymi**.
- Wyróżnia się spójność czasową i spójność przestrzenną źródła światła.
- Zwykłe źródło światła sztucznego, np. światło żarówki, jest niespójne. Światło słoneczne jest częściowo spójne.
- Dla wiązek niespójnych  $I = I_1 + I_2$ .
- **Laser** jest źródłem silniej, spójnej i prawie monochromatycznej wiązki światła. Wiązka ma znikomą rozbieżność i może być ogniskowana w obszarze niemal porównywalnym z długością fali świetlnej.

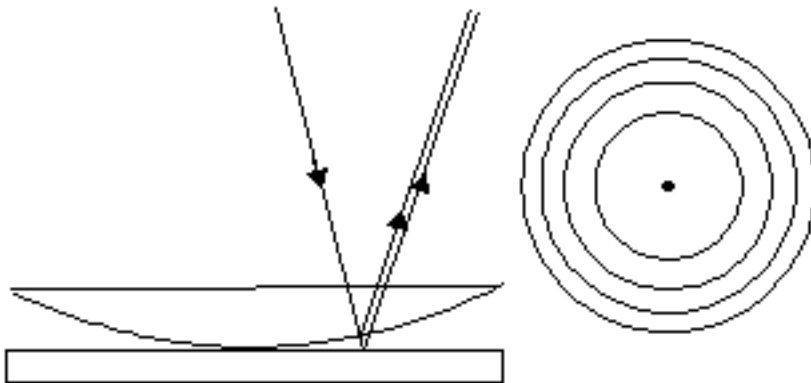
# Interferencja w cienkich warstwach

- Rozważmy cienką warstwę ośrodka 2 o grubości  $L$  i współczynniku załamania  $n_2$ , otoczoną z obu stron ośrodkiem 1 o współczynniku załamania  $n_1 < n_2$ . Załóżmy, na ośrodek 2 pada prawie prostopadle wiązka światła.
- Przy analizie faz fal należy wziąć pod uwagę zmianę fazy fali o  $\pi$  przy odbiciu od ośrodka gęstszego optycznie (o większym współczynniku załamania).
- Efektywna różnica faz  $\phi = k_2 2L + \pi$ .
- Maksima (jasna warstwa w powietrzu)  
 $\phi = 2\pi m, m = 0, 1, 2 \dots$
- Minima (ciemna warstwa w powietrzu)  
 $\phi = (2m + 1)\pi, m = 0, 1, 2 \dots$

# Interferencja w cienkich warstwach

- **Optyka cienkich warstw** jest działem optyki, która dotyczy zjawisk zachodzących w strukturach złożonych z bardzo cienkich warstw różnych materiałów. Aby badana struktura spełniała ten warunek, grubość pojedynczej warstwy musi być rzędu długości fali światła (kilkaset nanometrów).
- Optyka cienkich warstw tłumaczy zjawisko iryzacji (tęczowania) i opalizacji występujące m. in. na bańkach mydlanych, plamach benzyny, opalach, skrzydłach niektórych gatunków motyli.
- Przykład: Pierścienie Newtona (1717, charakterystyczny ciemny punkt w punkcie styku dwóch powierzchni).

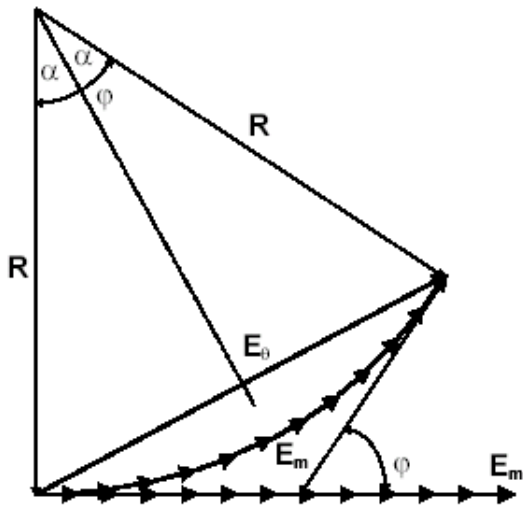
# Pierścienie Newtona



# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

- Zbadajmy obraz dyfrakcyjny wytwarzany przez płaskie fale świetlne o długości  $\lambda$ , które ulegają dyfrakcji na pojedynczej, długiej szczelinie o szerokości  $a$ , wykonanej w nieprzezroczystym ekranie.
- Szukamy położenia ciemnych prążków poprzez rozpatrywanie par promieni znoszących się wzajemnie.
- Pierwsze minimum  $(a/2) \sin \theta = \lambda/2$ ,  $a \sin \theta = \lambda$ .
- Drugie minimum  $(a/4) \sin \theta = \lambda/2$ ,  $a \sin \theta = 2\lambda$ .
- Minima (ciemne prążki)  $a \sin \theta = m\lambda$ ,  $m = 1, 2, \dots$

# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie





# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

- Niech  $E_m$  będzie amplitudą fali w środku obrazu dyfrakcyjnego,  $I_m$  to największa wartość natężenia światła w obrazie dyfrakcyjnym, odpowiadająca centralnemu maksimum. Różnica faz między promieniami wychodzącymi z różnych końców szczeliny wynosi

$$\phi = ka \sin \theta = (2\pi a / \lambda) \sin \theta. \quad (14)$$

- Z rysunku  $\phi = E_m / R$ ,  $\sin(\phi/2) = E_\theta / (2R)$ ,

$$E_\theta = E_m \frac{\sin(\phi/2)}{\phi/2}, \quad \frac{I(\theta)}{I_m} = \frac{E_\theta^2}{E_m^2}. \quad (15)$$

- Rozkład natężenia światła

$$I(\theta) = I_m \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2, \quad \alpha = \frac{\phi}{2} = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta. \quad (16)$$

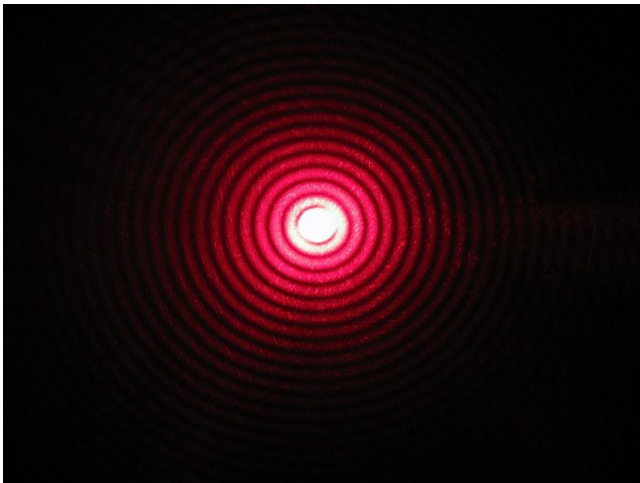
# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie (natężenie)



# Dyfrakcja na otworze kołowym

- Rozważmy dyfrakcję światła na okrągłym otworze o średnicy  $d$ . Powstały obraz jest krążkiem otoczonym przez kilka pierścieni o zmniejszającym się natężeniu.
- Pierwsze minimum  $\sin \theta = 1.22\lambda/d$ .
- **Kryterium Rayleigha** to orientacyjne kryterium pozwalające ocenić, czy dwie linie widmowe światła (czy też obrazy dyfrakcyjne dwóch odległych punktowych przedmiotów) są rozdzielone. Warunek rozróżnialności: **Maksimum jednego obrazu dyfrakcyjnego leży w miejscu minimum drugiego obrazu.**

# Dyfrakcja na otworze kołowym



# Dyfrakcja na dwóch szczelinach

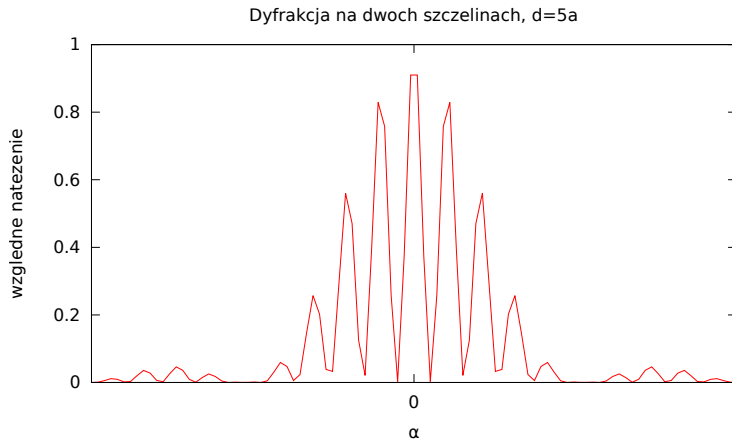
- Oznaczenia:  $a$  szerokość każdej szczeliny,  $d$  odległość między środkami szczelin
- Natężenie obrazu interferencyjnego z dwóch szczelin

$$I(\theta) = I_m \cos^2 \beta \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2, \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (\text{do czynnika interferencyjnego}), \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \quad (\text{do czynnika dyfrakcyjnego}). \quad (19)$$

# Dyfrakcja na dwóch szczelinach

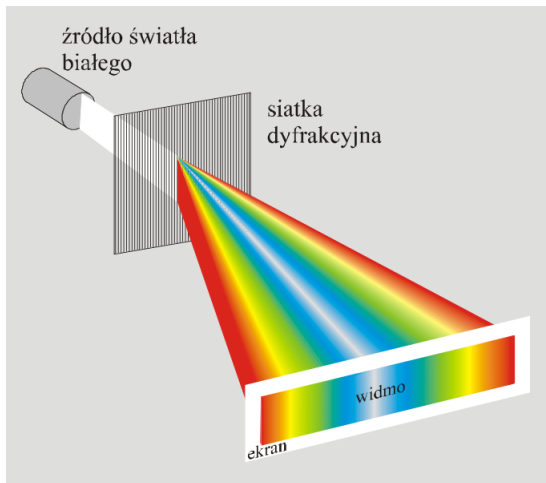


# Siatka dyfrakcyjna

- **Siatką dyfrakcyjną** nazywamy układ równoległych szczelin rozmieszczonych w równych odstępach. **Stałą siatki** nazywamy odległość środków sąsiednich szczelin  $d$ . Liczba szczelin  $N$  siatki może być bardzo duża, nawet rzędu tysięcy na milimetr.
- Położenia jasnych prążków  $d \sin \theta = m\lambda$ ,  $m = 0, 1, \dots$ . Dla dużych  $N$  otrzymujemy wąskie maksima, **linie widmowe**.
- **Szerokość połówkowa linii** to różnica położenia kąowego  $\Delta\theta_{1/2}$  mierzona od środka linii do sąsiedniego minimum.

$$\Delta\theta_{1/2} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta} \quad (\text{dla linii pod kątem } \theta). \quad (20)$$

# Siatka dyfrakcyjna





# Dyspersja i zdolność rozdzielcza siatki

- **Dyspersja kątowna**  $D$  jest miarą zdolności siatki do rozszczepiania światła polichromatycznego na wiązki monochromatyczne.

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}. \quad (21)$$

- **Zdolność rozdzielcza**  $R$  mówi o możliwości rozdzielenia bliskich sobie długości fali.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \quad (\text{z kryterium Rayleigha}), \quad (22)$$

gdzie  $\lambda$  jest średnią długością fali dwóch ledwo rozróżnialnych linii widmowych, a  $\Delta\lambda$  jest różnicą ich długości fali.