



Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Fizyka

## semestr letni

### 2020/2021

**Grupa B: Piątek, 15:00 - 16:30**

**Grupa A: Piątek, 16:40 - 18:10**

**sala wirtualna**

**– zajęcia online**

**Sylwia Majchrowska**

**[sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl](mailto:sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl)**

**<https://majsylw.netlify.app/teaching/>**

**pokój 213, budynek L-1**

Na podstawie podręcznika Fizyka dla szkół wyższych. Tom 3

<http://www.e-fizyka.info>

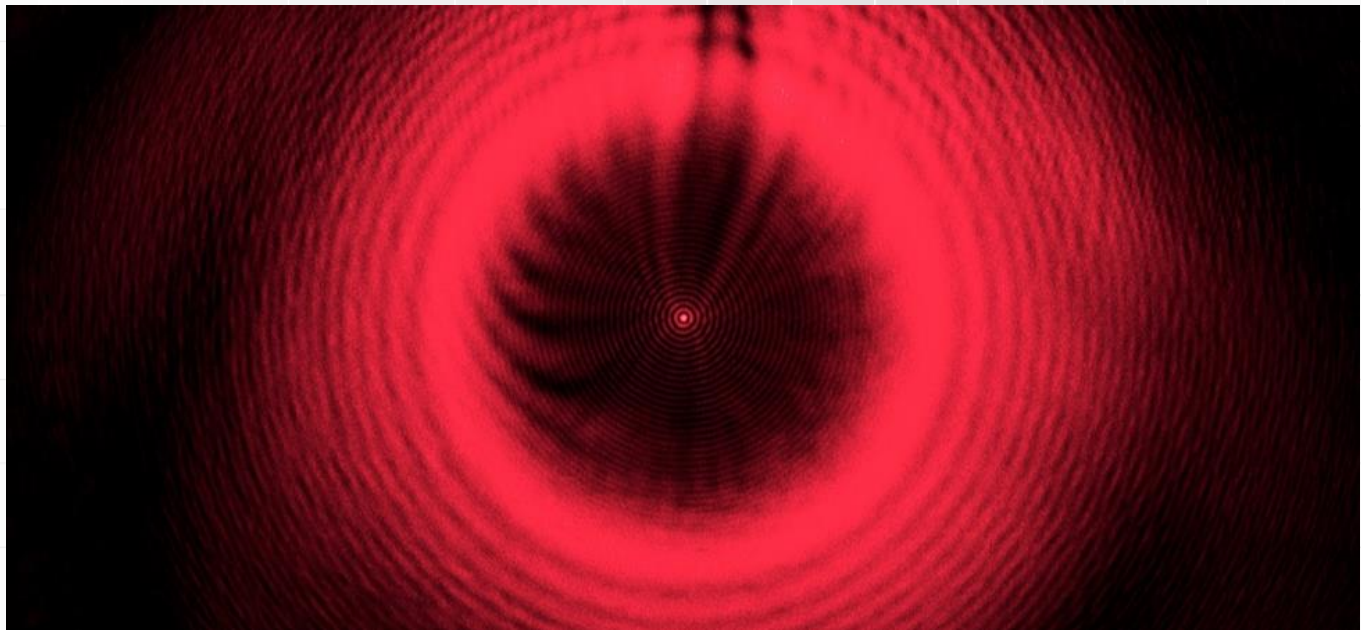


Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

<https://www.youtube.com/watch?v=x8tJGv8sNQA>

# Optyka falowa

Omawiając dyfrakcję i interferencję fal wielokrotnie podkreślaliśmy, że zjawiska te zachodzą również dla światła. Świadczą one o falowym charakterze promieniowania elektromagnetycznego. Aby je obserwować trzeba subtelnych doświadczeń. Część optyki zajmującą się tymi zagadnieniami nazywamy optyką falową. A więc optyka falowa to dział optyki, w którym uwzględniona jest falowa natura światła. W ramach optyki falowej badane są takie zjawiska jak: interferencja, dyfrakcja i polaryzacja.





# Teoria korpuskularno - falowa

Pierwszy pogląd na charakter światła jest przypisywany Newtonowi. Uważa się go za twórcę teorii korpuskularnej, według której światło rozchodzi się w postaci małych cząstek wyrzucanych ze źródła. Cząstki, wpadając do oka wywołują wrażenia wzrokowe; odbijają się jak piłeczki od powierzchni przedmiotów i przechodząc do innego ośrodka zmieniają kierunek ruchu. Ten pogląd panował do czasu, kiedy zaobserwowano dyfrakcję i interferencję światła (Young, Fresnel - początek XIX wieku), czyli zjawiska falowe i została ogłoszona przez Maxwella (1867 rok) teoria fal elektromagnetycznych. Uznano, że światło ma charakter falowy. Światło stanowi falę elektromagnetyczną o długości od 380nm do 780nm. Za twórcę falowej teorii światła uważa się Huygensa, mimo, iż doświadczalne jej potwierdzenie nastąpiło później (teoria falowa światła została ogłoszona w 1690 roku) i do końca XIX wieku uważano, że światło ma charakter falowy. Odkrycie w XX wieku nowych zjawisk związanych ze światłem, spowodowało korektę tych poglądów i powstanie teorii korpuskularno - falowej.

W fizyce foton jest kwantem pola elektromagnetycznego, np. światła widzialnego.

Pęd fotonu: 
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Energia fotonu: 
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$



# Zasada Huygensa

Zasada Huygensa mówi, że wszystkie punkty czoła fali można uważać za źródła nowych fal kulistych. Położenie czoła fali po czasie  $t$  będzie dane przez powierzchnię styczną do tych fal kulistych.

Rozpatrzmy czoło fali dochodzącej do szczeliny. Każdy jej punkt możemy potraktować jako źródło fal kulistych Huygensa. Jednak przez szczelinę przechodzi tylko część fal. Fale leżące poza brzegami szczeliny zostają wyeliminowane i nie dają fali płaskiej razem z falami przechodzącymi. Z tym właśnie związane jest zaginanie wiązki.



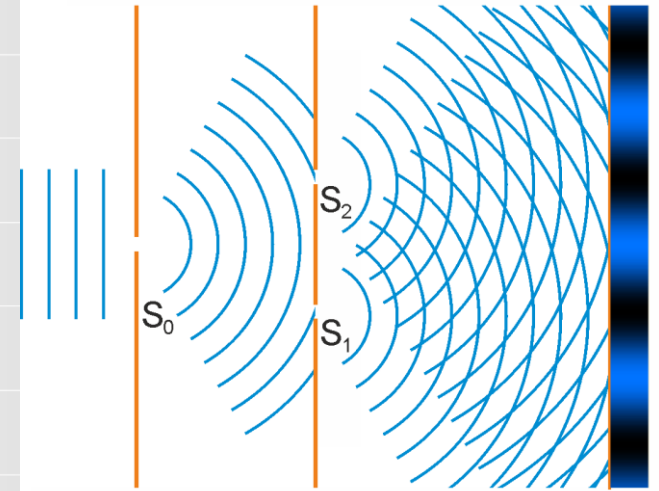
Zwróćmy uwagę na to, że gdy szerokość szczeliny staje się duża w stosunku do długości fali  $a \gg \lambda$  to ugięcie można zaniedbać. Możemy przyjąć wówczas, że światło rozchodzi się po liniach prostych (zwanymi promieniami) podlegających prawom odbicia i załamania. Mówimy, że stosujemy optykę geometryczną. Warunkiem stosowalności optyki geometrycznej jest więc aby wymiary liniowe wszystkich obiektów (soczewek, pryzmatów, szczelin itp.) były o wiele większe od długości fali.

Jeżeli tak nie jest to nie możemy przy opisie światła posługiwać się promieniami, lecz trzeba wziąć pod uwagę falowy charakter światła. Widać jak znaczące jest ugięcie fali gdy szczelina ma rozmiar porównywalny z długością fali. Mówimy wtedy, że stosujemy optykę falową. Optyka geometryczna jest szczególnym (granicznym) przypadkiem optyki falowej. W kolejnych rozdziałach zajmiemy się właśnie optyką falową.



# Doświadczenie Younga

W swoim doświadczeniu, Young oświecił światłem słonecznym ekran, w którym był zrobiony mały otwór  $S_0$ . Przechodzące światło padało następnie na drugi ekran z dwoma szczelinami  $S_1$  i  $S_2$  i dalej rozchodziły się dwie, nakładające się na siebie fale kuliste. Warunki stosowności optyki geometrycznej nie są spełnione i na szczelinach następuje *ugięcie fal*. Mamy do czynienia z optyką falową.



Jeżeli umieścimy ekran w jakimkolwiek miejscu, tak aby przecinał on nakładające się na siebie fale to możemy oczekiwać pojawienia się na nim miejsc ciemnych i jasnych następujących po sobie kolejno w zależności od wyniku nakładania się fal. Miejsca ciemne powstają w wyniku wygaszania się interferujących fal, a jasne w wyniku ich wzajemnego wzmocnienia. Obserwujemy tak zwane *prążki interferencyjne*.

$$d \sin \theta = m \lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2, \dots (\text{maxima})$$

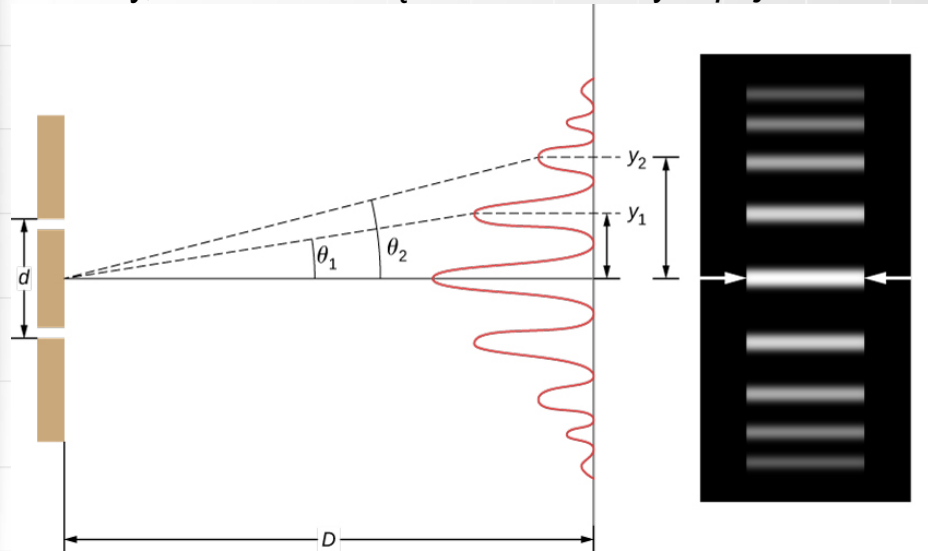
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2, \dots (\text{minima})$$



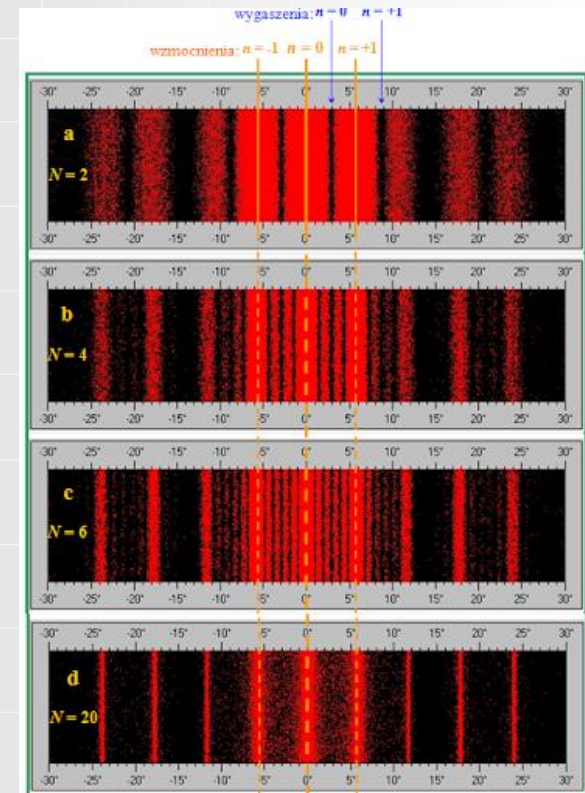


# Spójność (koherencja) fal świetlnych

Podstawowym warunkiem powstania dobrze określonego obrazu interferencyjnego jest, aby interferujące fale świetlne miały dokładnie określoną różnicę faz  $\varphi$  stałą w czasie. Przypomnijmy, że faza określa stan fali w danym miejscu i czasie. Widzimy, że warunkiem stabilności obrazu jest *stałość w czasie różnicy faz* fal wychodzących ze źródeł  $S_1$  i  $S_2$ . Mówimy, że te źródła są *koherentne* czyli *spójne*.



Nieobserwowanie **interferencji** przy oświetleniu powierzchni za pomocą **dwóch** lub kilku lamp ma przyczynę w tym, że fale świetlne pochodzące z tych źródeł **nie** są zgodne ze sobą – mówimy, że **nie** są spójne lub koherentne. W celu otrzymania stabilnego obrazu interferencyjnego, fale muszą być spójne.





# Przykład 1.1

## Prążki interferencyjne

Rozpatrzmy dwie szczeliny odległe od siebie o 1 mm oświetlono żółtym światłem sodu o długości  $\lambda = 589 \text{ nm}$ . Obliczymy odległość między sąsiednimi prążkami interferencyjnymi obserwowanymi na ekranie umieszczonym w odległości 1 m od szczelin.

$$d \sin \theta = \lambda \rightarrow \sin \theta = \frac{\lambda}{d} = \frac{589 * 10^{-9} \text{ m}}{10^{-3} \text{ m}} = 0.000589 \rightarrow \theta = 0.03^\circ$$

$$\sin \theta = \text{tg} \theta = \theta \text{ (dla małych kątów)}$$

$$y_m = \frac{m \lambda D}{d}, y_{m+1} = \frac{(m+1) \lambda D}{d}$$

$$\Delta y = y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda D}{d} = \frac{589 * 10^{-9} \text{ m} * 1 \text{ m}}{10^{-3} \text{ m}} = 0.000589 \text{ m}$$

Tak właśnie Young wyznaczył długości fal światła widzialnego.



# Interferencja w cienkich warstwach

Dobrze nam znane tęczowe zabarwienie cienkich warstewek, np. baniek mydlanych czy plam oleju na wodzie jest wynikiem interferencji. Na rysunku pokazana jest warstwa o grubości  $d$  i współczynniku załamania  $n$ .

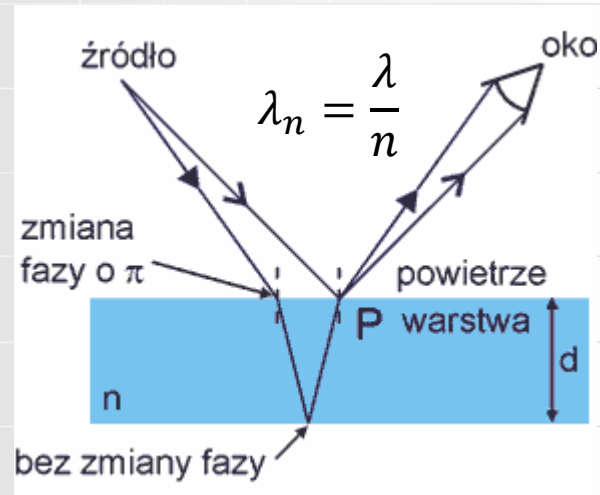
Warstwa jest oświetlona przez rozciągłe źródło światła monochromatycznego. Dwa promienie wychodzące z punktu  $S$  źródła docierają do oka po przejściu przez punkt  $P$ . Promienie te przebiegają różne drogi gdyż jeden odbija się od górnej, a drugi od dolnej powierzchni błonki. To czy punkt  $P$  widzimy jako jasny czy ciemny zależy od wyniku interferencji fal w tym punkcie.

Fale te są spójne, bo pochodzą z tego samego punktu źródła światła. Jeżeli światło pada prawie prostopadłe to geometryczna różnica dróg pomiędzy obu promieniami wynosi z dobrym przybliżeniem  $2d$ . Można by więc oczekiwać, że maksimum interferencyjne (punkt  $P$  jasny) wystąpi gdy odległość  $2d$  będzie całkowitą wielokrotnością długości fali. Tymczasem wynik doświadczenia jest inny. Dzieje się tak z dwóch powodów:

- Długość fali w warstwie  $\lambda_n$  jest różna od jej długości w powietrzu  $\lambda$

Oznacza to, że musimy rozważać drogi optyczne a nie geometryczne.

- Ponadto, że fala odbijając się od ośrodka optycznie gęstszego (o większym współczynniku załamania  $n$ ) zmienia swoją fazę o  $\pi$ . Natomiast gdy odbicie zachodzi od powierzchni ośrodka rzadszego optycznie fala odbija się bez zmiany fazy. Oznacza to, że promień odbity od górnej powierzchni błonki zmienia fazę, a promień odbity od dolnej granicy nie.



$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2, \dots (\text{maxima})$$

$$2dn = m\lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2, \dots (\text{minima})$$





# Przykład 1.2

## Interferencja w cienkich warstwach

Rozpatrzmy teraz bańkę mydlaną ( $n = 1.33$ ) o grubości 320 nm znajdująca się w powietrzu. Powiedz, jaki kolor ma światło odbite, gdy bańka jest oświetlona światłem białym padającym prostopadle do jej powierzchni? W tym celu sprawdź dla jakiej długości fali z zakresu widzialnego (400 - 700 nm) spełniony jest warunek maksimum interferencyjnego.

Z warunku na maksimum interferencyjne obliczamy  $\lambda$ :

$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \rightarrow \lambda = \frac{2dn}{m + \frac{1}{2}} = \frac{2 * 320nm * 1.33}{m + \frac{1}{2}}$$

Dla kolejnych  $m$ :

$m = 0$ ,  $\lambda = 1700$  nm, poza zakresem widzialnym

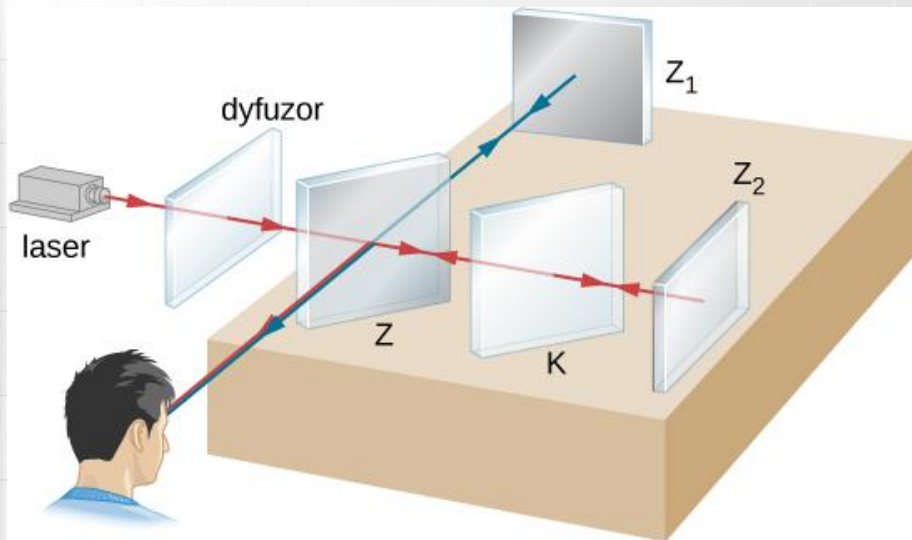
$m = 1$ ,  $\lambda = 567$  nm, w zakresie widzialnym (żółtozielona)

$m = 2$ ,  $\lambda = 340$  nm, poza zakresem widzialnym

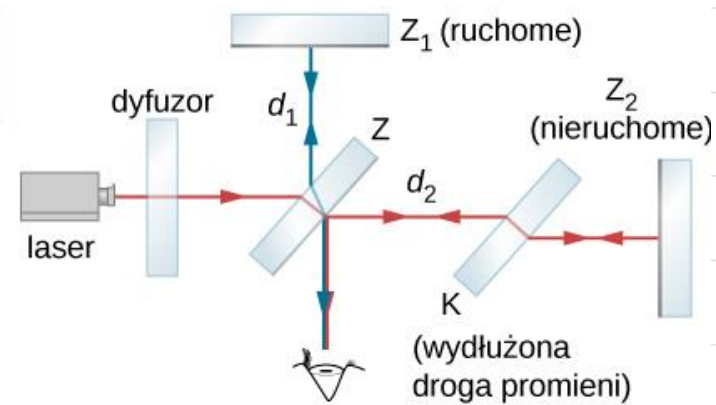
$m = 3, 4, \dots$ , poza zakresem widzialnym.



# Interferometr Michelsona



(a)



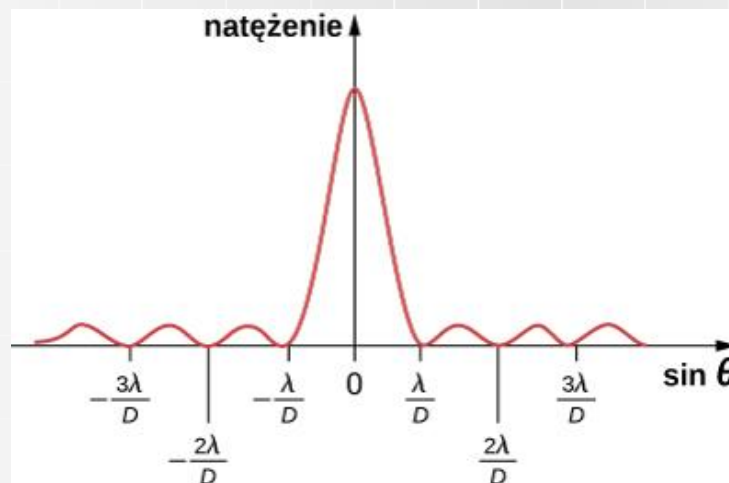
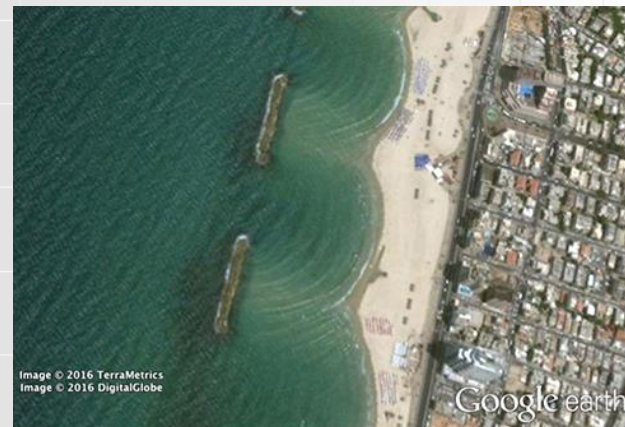
(b)

Interferometr Michelsona. (a) Rozciągniętym źródłem światła jest szklana płytka, która odgrywa rolę dyfuzora dla światła laserowego. (b) Widok z góry.



# Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Po przejściu przez wąską szczelinę (otwór) fala biegnąca w określonym kierunku ma tendencję do rozprzestrzeniania się. Przykładowo – fale dźwiękowe przedostające się do pokoju przez otwarte drzwi mogą być słyszane, nawet jeśli słuchacz znajduje się w części pomieszczenia, gdzie według geometrycznego obrazu rozchodzenia się promieni powinna być tylko cisza. Podobnie fale oceaniczne przechodzące przez otwór w falochronie mogą rozprzestrzeniać się po wnętrzu całej zatoki. Uginanie się fal dźwiękowych i oceanicznych wokół krawędzi otworu lub przeszkody i dalsze ich rozprzestrzenianie się w różnych kierunkach to dwa przykłady dyfrakcji (ang. diffraction). Zjawisko to dotyczy wszystkich typów fal.

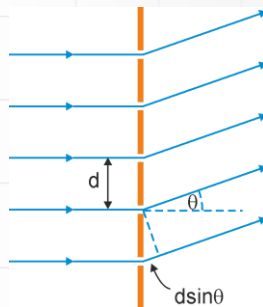


Warunek uzyskania destruktywnej interferencji dla pojedynczej szczeliny (ang. destructive interference for a single slit) jest następujący  $D \sin \theta = m \lambda$ , gdzie  $D$  jest szerokością szczeliny,  $\lambda$  długością fali światła,  $\theta$  kątem mierzonym względem pierwotnego kierunku padania światła, a  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  jest rzędem kolejnego minimum.



# Interferencja fal z wielu źródeł

## - siatka dyfrakcyjna



Możemy przewidzieć, że przy nieskończonej liczbie szczelin będzie nieskończona liczba wtórnych maksimów i ciemnych prążków między nimi. To sprawia, że odstęp między prążkami, a zatem szerokości maksimów, stają się nieskończenie małe. Ponadto, ponieważ natężenie wtórnych maksimów jest proporcjonalne do  $1/N^2$ , to dąży ono do zera, tak że maksima wtórne stają się niewidoczne. Pozostają tylko maksima główne, teraz bardzo jasne i bardzo wąskie. Na rysunku obok pokazany jest układ  $N$  szczelin oddległych od siebie o  $d$ . Odległość  $d$  nazywamy *stałą siatki dyfrakcyjnej*.

Siatki dyfrakcyjne działają zarówno w konfiguracji transmisyjnej – przepuszczając światło, jak i w konfiguracji odbiciowej – odbijając światło jak na skrzydłach motyla czy opalu australijskim.

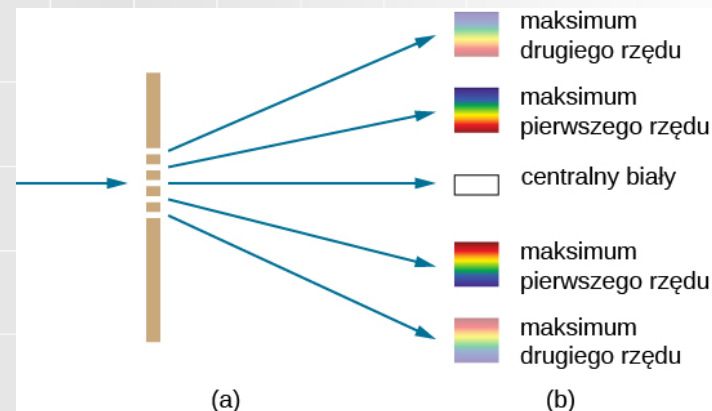


(a)



(b)

(a) Ten australijski opal i (b) skrzydła motyla posiadają rzędy struktur odbijających, które działają jak siatki odbiciowe, odbijając rozmaite długości fal pod różnymi kątami.



(a) Światło przechodzące przez siatkę dyfrakcyjną daje obraz podobny do obrazu dyfrakcyjnego na podwójnej szczelinie, o jasnych obszarach obserwowanych pod różnymi kątami. (b) Obraz otrzymany dla światła białego padającego na siatkę. Centralne maksimum jest białe, a w maksimach wyższych rzędów światło białe jest rozszczepione na składowe monochromatyczne.



# Przykład 1.3

## Siatka dyfrakcyjna

Rozpatrzmy siatkę dyfrakcyjną, która ma 4000 nacięć na 1 cm. Pada na nią prostopadle światło żółte z lampy sodowej (stosowanej w oświetleniu ulic). W świetle tym występują dwie fale o długościach 589.00 nm i 589.59 nm. Obliczmy odległość kątową pomiędzy maksimami pierwszego rzędu dla tych linii.

Położenie kątowe maksimum pierwszego rzędu otrzymujemy z warunku dla  $m = 1$

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{d} \text{ dla } m = 1$$

gdzie stała siatki dyfrakcyjnej  $d = 1\text{cm}/4000 = 2.5\ \mu\text{m}$ . Wykonujemy teraz obliczenia kąta  $\theta$  kolejno dla obu długości fal, a następnie obliczamy ich różnicę. Otrzymujemy kolejno dla  $\lambda = 589.00\ \text{nm}$ ;  $\theta = 13.6270^\circ$ , a dla  $\lambda = 589.59\ \text{nm}$ ;  $\theta = 13.6409^\circ$ , skąd  $\Delta\theta = 0.0139^\circ$

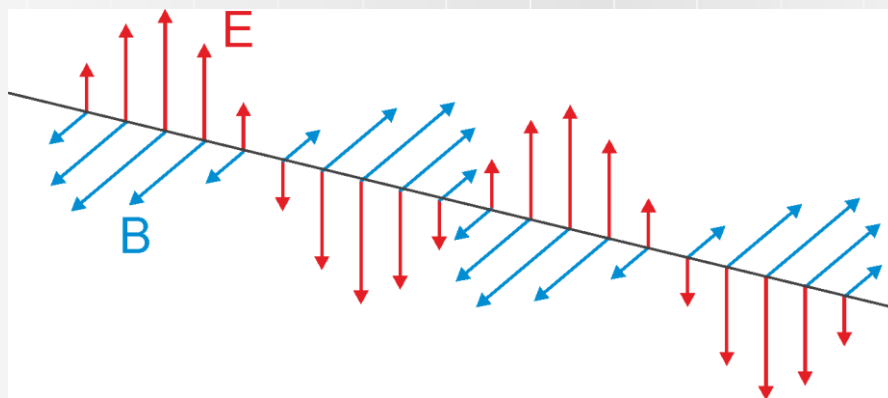




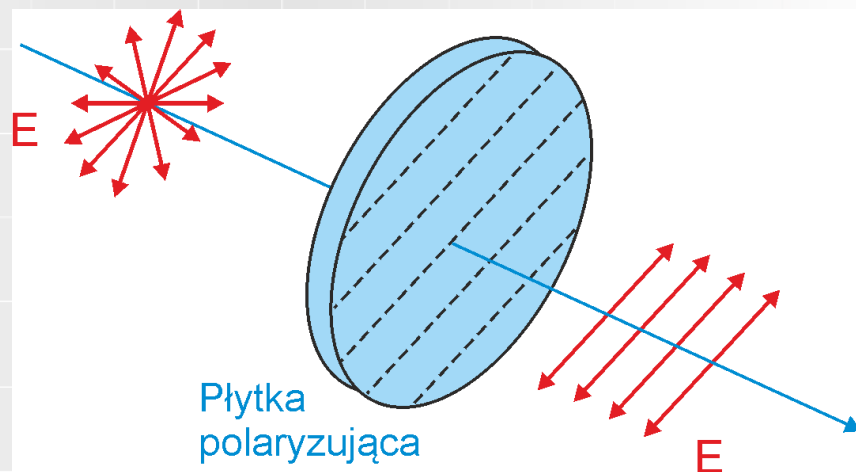
# Polaryzacja światła

Teoria Maxwella przewiduje, że światło jest falą poprzeczną tzn. kierunki drgań wektorów  $E$  i  $B$  są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali.

Na rysunku poniżej przedstawiono falę elektromagnetyczną, która wyróżnia się tym, że wektory  $E$  są do siebie równoległe we wszystkich punktach fali. Dotyczy to również wektorów  $B$ . O takiej fali mówimy, że jest płasko spolaryzowana lub spolaryzowana liniowo. Wektory  $E$  tworzą z kierunkiem ruchu fali płaszczyznę zwaną płaszczyzną drgań.

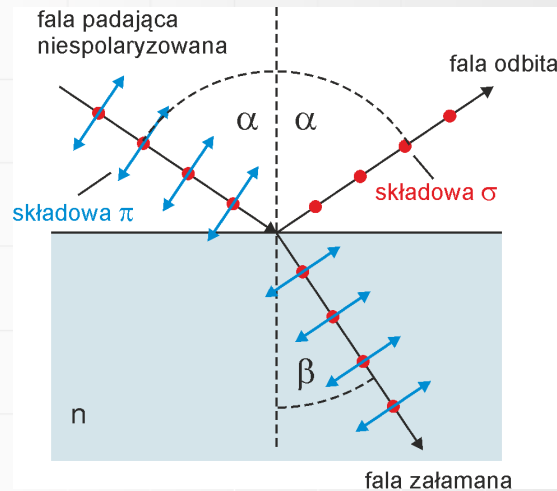


Kierunek polaryzacji polaroidu ustala się w procesie produkcji. Częsteczki o strukturze łańcuchowej osadza się na elastycznej warstwie plastycznej, a następnie warstwę rozciąga się co powoduje równoległe ułożenie cząsteczek.





# Polaryzacja przez odbicie



odbicie od powierzchni dielektryka  
(np. szkła)

Doświadczalnie stwierdzono, że istnieje pewien kąt padania, nazywany kątem całkowitej polaryzacji  $\alpha_p$ , dla którego wiązka odbita jest całkowicie spolaryzowana liniowo w kierunku prostopadłym do płaszczyzny padania. Oznacza to, że odbiciu ulega tylko składowa  $\sigma$  prostopadła do płaszczyzny padania (płaszczyzny rysunku) natomiast współczynnik odbicia składowej  $\pi$  leżącej w płaszczyźnie padania jest równy zero.

Natomiast wiązka przechodząca jest tylko częściowo spolaryzowana (składowa  $\pi$  jest całkowicie załamana, a składowa  $\sigma$  tylko częściowo).

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

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin(90^\circ - \alpha) = n_2 \cos \alpha$$

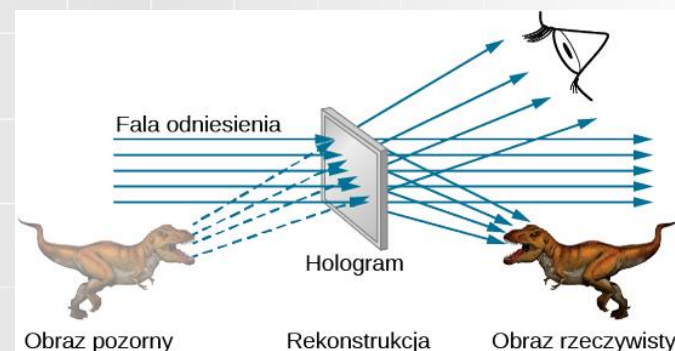
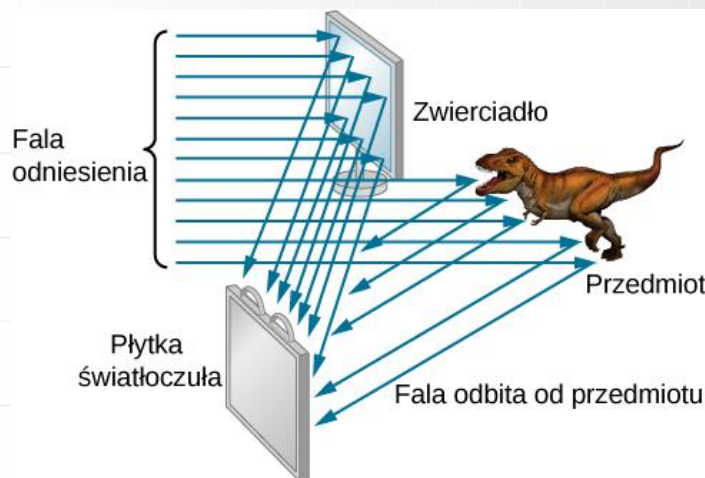
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

prawo Brewstera



# Hologramy

Nazwa hologram oznacza „cały obraz” (z gr. holo, tak jak w słowie „holistyczny”), co ma związek z trójwymiarowością obrazu. Holografia (ang. holography) to proces wytwarzania hologramów i chociaż mogą one być zapisane na kliszy fotograficznej, proces ten różni się od zwykłej fotografii. Holografia wykorzystuje interferencję lub, ogólniej, zjawiska optyki falowej, podczas gdy normalna fotografia bazuje na optyce geometrycznej.





# Słowniczek

**fala spolaryzowana (ang. polarized wave)**

– dotyczy fal, których wektory natężenia pola elektrycznego drgają w jednym kierunku

**fala niespolaryzowana (ang. unpolarized wave)**

– dotyczy fal, których wektory natężenia pola elektrycznego drgają w przypadkowych kierunkach

**kąt Brewstera (ang. Brewster's angle)**

– kąt padania, dla którego światło odbite jest całkowicie spolaryzowane

**kierunek polaryzacji (ang. direction of polarization)**

– kierunek równoległy do kierunku wektora natężenia pola elektrycznego fali EM

**polaryzacja (ang. polarization)**

– nadanie wektorowi natężenia pola elektrycznego fali EM określonego kierunku drgań

**optyka falowa (ang. wave optics)**

– część optyki zajmująca się falową naturą światła

**zasada Huygensa (ang. Huygens' principle)**

– każdy punkt czoła fali jest źródłem nowej fali kulistej/kulistej (wtórnej) rozchodzącej się w tym samym kierunku i z tą samą prędkością co fala pierwotna; czoło nowej fali jest płaszczyzną styczną do wszystkich fal wtórnych

**fale koherentne (spójne) (ang. coherent waves)**

– fale o tej samej częstotliwości, które mają określone i stałe w czasie przesunięcie fazowe, w szczególnym przypadku zerowe (są w fazie)

**fale niekoherentne (niespójne) (ang. incoherent waves)**

– fale o różnych częstotliwościach lub takie, których przesunięcia fazowe są przypadkowe lub zmieniają się w czasie

**interferencja w cienkich warstwach (ang. thin-film interference)**

– interferencja światła odbitego od dwóch różnych powierzchni cienkiej warstwy

**interferometr (ang. interferometer)**

– przyrząd optyczny, który wykorzystuje zjawisko interferencji do bardzo precyzyjnych pomiarów zmian odległości, a także długości fali lub jej zmian

**maksimum podstawowe (ang. principal maximum)**

– jasny prążek interferencyjny (o większym natężeniu niż maksima poboczne), obserwowany w obrazie interferencyjnym po przejściu fal przez układ wielu szczelin



# Słownik

**maksimum poboczne (ang. secondary maximum)**

– jasny prążek interferencyjny o mniejszym natężeniu, pojawiający się pomiędzy maksimami podstawowymi w obrazie interferencyjnym po przejściu fal przez układ wielu szczelin

**prążki interferencyjne (ang. interference fringes)**

– jasne lub ciemne obszary w obrazie interferencyjnym

**pierścienie Newtona (ang. Newton's rings)**

– obraz interferencyjny złożony z kolistych prążków interferencyjnych, powstały wskutek interferencji światła odbitego od dwóch nieznacznie odległych od siebie powierzchni

**rząd prążka (ang. order of interference fringe)**

– wartość bezwzględna (moduł) liczby całkowitej  $m$  występującej w równaniach opisujących interferencję konstruktywną i destruktywną

**światło monochromatyczne (ang. monochromatic light)**

– światło złożone z fal mających jednakową długość fali dyfrakcyjnym

**dyfrakcja (ang. diffraction)**

– uginanie się fal wokół krawędzi otworu lub przeszkody (zespół zjawisk związanych z uginaniem się fal wokół krawędzi otworu lub przeszkody i interferencją fal wtórnych)

**dyfrakcyjna granica rozdzielczości (ang. diffraction limit)**

– ograniczenie rozdzielczości z powodu dyfrakcji

**dyfrakcja rentgenowska (ang. X-ray diffraction)**

– technika, która daje szczegółowe informacje o strukturze krystalograficznej materiałów naturalnie występujących w przyrodzie i wytworzonych sztucznie

**hologram (ang. hologram)**

– trójwymiarowy obraz zarejestrowany na kliszy za pomocą wiązki laserowej; dosłownie słowo to oznacza cały obraz (z gr. holo, podobnie jak w słowie „holistyczny”)

**holografia (ang. holography)**

– proces wytwarzania hologramów za pomocą laserów





# Praca domowa

## - wytyczne

1. Format: plik pdf lub skan/zdjęcie (upewnij się, że Twoje pismo jest czytelne!)
2. Czytaj uważnie polecenia i wykonuj zawarte w nich zadania.
3. Pamiętaj aby **podpisać** swoją pracę.
4. Do rozwiązania dołącz:
  1. Rysunek – szkic sytuacji przedstawionej w zadaniu lub wykres wraz z danymi z zadania.
  2. Obliczenia – razem z przekształceniami wzorów, jeśli jest to konieczne.
  3. Wnioski sformułowane na podstawie dokonanej analizy.
5. Pamiętaj aby przysłać rozwiązania w terminie na swoją przestrzeń na dysku gogle (lub na adres email prowadzącej).



Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Terminy

	LUTY	MARZEC					KWIECIEŃ					MAJ					CZERWIEC				LIPIEC	
PN	22	1	8	15	22	29	5	12 Pn N	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5		
WT	23	2	9	16	23	30 Pt P	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6		
ŚR	24	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2 Cz P	9	16	23	30	7		
CZ	25	4	11	18 H1	25 H2	1	8 H3	15 H4	22 H5	29 H6	6 H7	13 H8	20 H9	27 H10	3	10	17	24	1	8		
PT	26	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9		
SO	27	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10		
N	28	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11		
P - PARZYSTY N - NIEPARZYSTY	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P		

H6: 7.05.21 godz. 12:00

Email: [sylvia.majchrowska@pwr.edu.pl](mailto:sylvia.majchrowska@pwr.edu.pl)