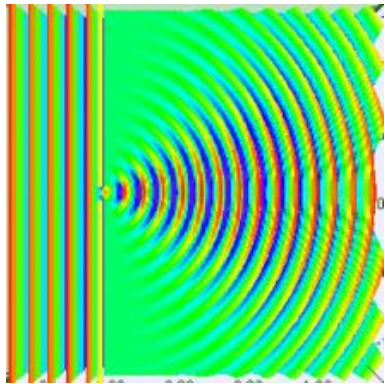




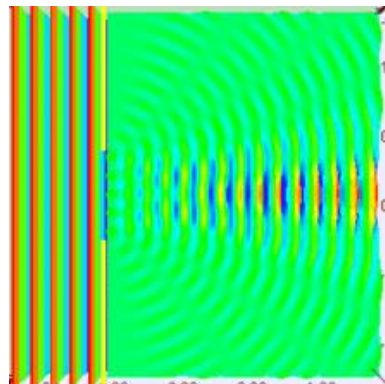
ZAKŁAD OPTYKI
INFORMACYJNEJ
WYDZIAŁ FIZYKI
UNIWERSYTET WARSZAWSKI

Falowa natura światła: spójność światła

Dyfrakcja zjawisko fizyczne polegające na zmianie kierunku rozchodzenia się fali na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu. Zjawisko zachodzi niezależnie od wielkości przeszkody, ale wyraźnie jest obserwowane dla przeszkód o rozmiarach **porównywalnych z długością fali**.



Dyfrakcja fali na szczelinie o szerokości równej długości fali.



Dyfrakcja fali na szczelinie o szerokości 5x długości fali.

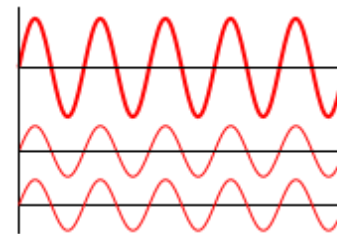


Interferencja zjawisko powstawania nowego, przestrzennego rozkładu amplitudy fali (wzmocnienia i wygaszenia) w wyniku nakładania się (superpozycji fali) dwóch lub więcej fali.

➤ Warunkiem trwałej interferencji fali jest ich spójność, czyli korelacja faz i równość częstotliwości.

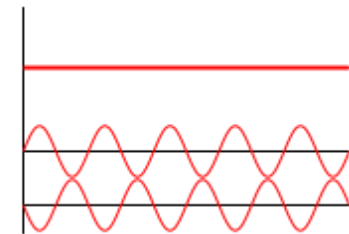
Interferencja

konstruktywna



Fale w fazie (różnica dróg optycznych 2π , lub $n\lambda$)

destruktywna



Fale w przeciwfazie (różnica dróg optycznych π lub $m\lambda/2$, gdzie m - nieparzyste)

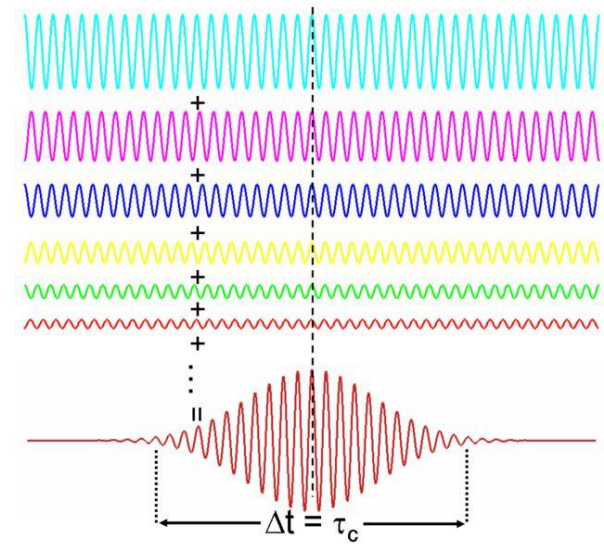
Spójność światła

Spójność fal –w uproszczeniu jest to zdolność fal do interferencji (generacji stałego w czasie wzoru interferencyjnego).

Dwie fale nazywamy spójne (koherentne) gdy mają tę samą amplitudę, częstotliwość (długość fali) oraz fazę lub różnica faz jest stała.

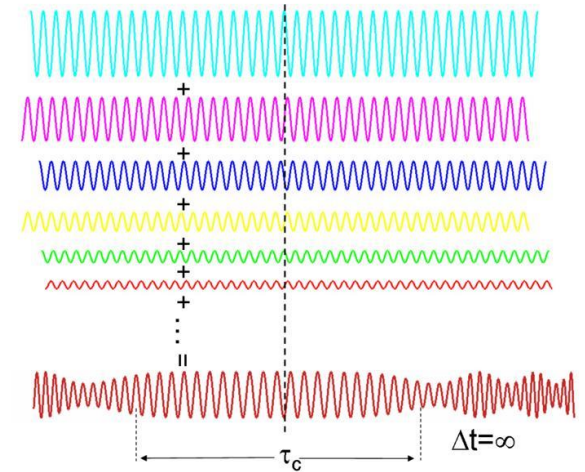
Interferencja spójnych fal

Fale o różnych częstotliwościach interferując tworzą impuls gdy są spójne



Interferencja niespójnych fal

Fale niespójne widmowo interferują tworzą ciągły rozkład pola z losowo zmienną amplitudą oraz fazą

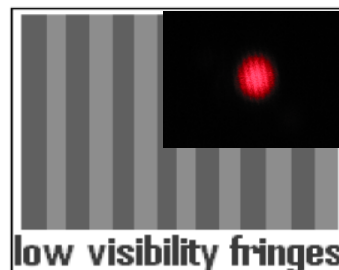
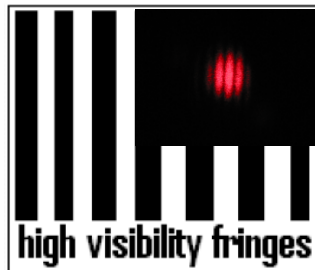


Widoczność prążków/ kontrast

$$V \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$$I_{\min} = 0, V=1$$

$$I_{\min} = I_{\max}, V=0$$



Spójność czasowa i przestrzenna

Spójność przestrzenna

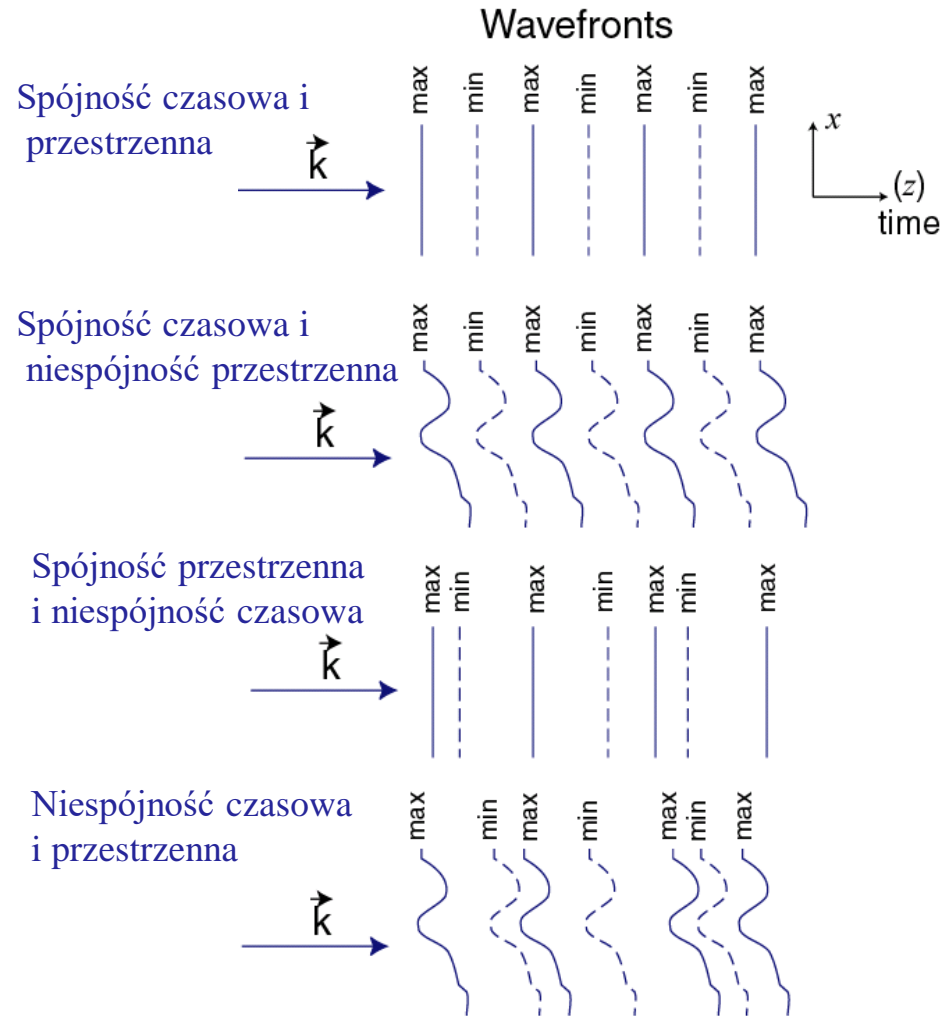
Stopień korelacji między różnymi punktami frontu falowego w tym samym czasie.

➤ spójność przestrzenna związana jest z rozciągłością przestrzenną źródła. Im źródło bardziej rozciągle wówczas spójność przestrzenna gorsza

Spójność czasowa

Stopień korelacji między polem elektrycznym fali w tym samym punkcie przestrzeni, ale w różnych chwilach czasu.

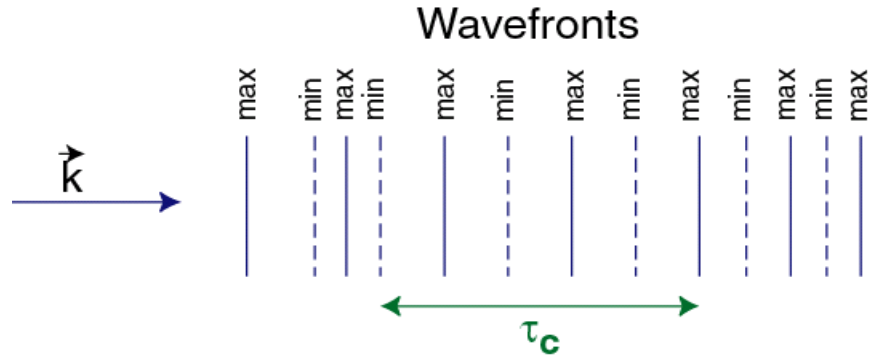
➤ spójność czasowa związana jest z rozciągłością widmową źródła. Im źródło jest szersze widmowo (zawiera fale o długościach z szerszego zakresu widma) wówczas spójność czasowa jest gorsza



Droga i czas spójności

Czas spójności

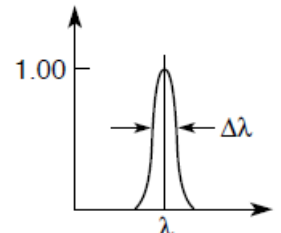
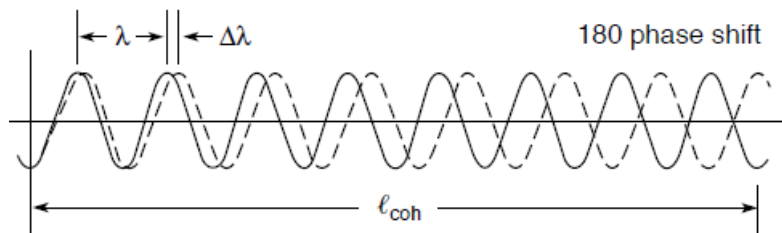
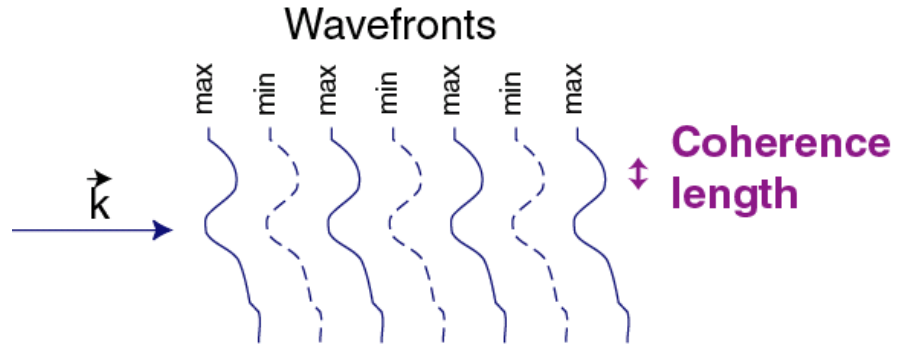
Czas spójności jest to czas w którym fronty falowe pozostają równo rozłożone, tzn. pole pozostaje sinusoidalne dla jednej długości fali.



Droga spójności

Droga spójności jest to odległość dla której fala zachowuje swój stopień spójności (amplitudę oraz fazę).

Dla wiązki polichromatycznej o szerokości widmowej $\Delta\lambda$ jest to odległość dla której promieniowanie o długości $\lambda + \Delta\lambda$ jest w przeciwfazie względem długości centralnej λ .

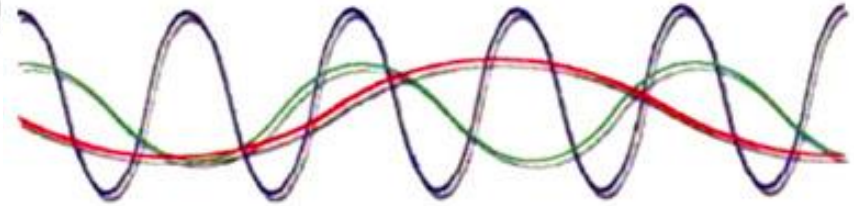
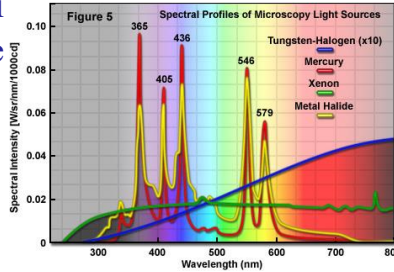
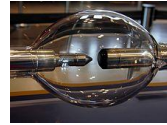


$$l_{koh} = N\lambda \quad l_{koh} = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda}$$

Źródła światła

Źródła niemonochromatyczne

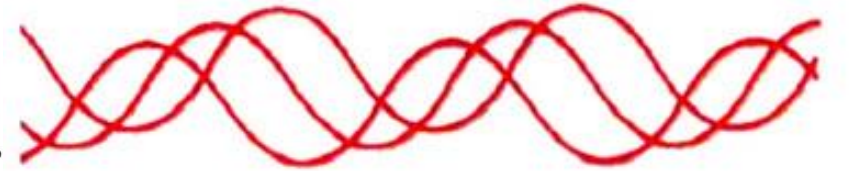
Źródła termiczne takie jak słońce, klasyczne żarówki, czy niektóre lampy łukowe (np. ksenonowa) są źródłami rozciągłymi generującymi światło polichromacyjne niespójne czasowo i przestrzennie



Sunlight (many different colors)

Źródła monochromatyczne

Źródła monochromatyczne takiej jak niektóre lampy wyładowcze (np. sodowa) generujące pojedyncze linie spektralne lub diody LED generują światło monochromatyczne niespójne lub częściowo spójne.



LED: one color (monochromatic) and waves not in phase (non-coherent)

Lasery

Ze względu na sposób generacji światła jako jedyne stanowią źródło światła spójnego.



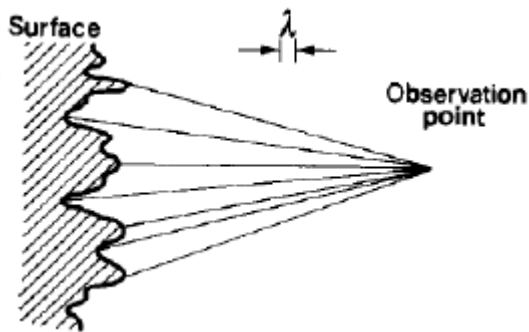
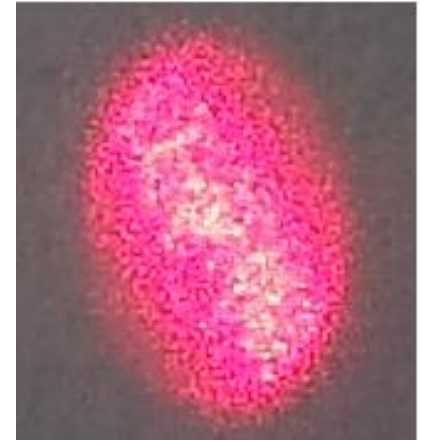
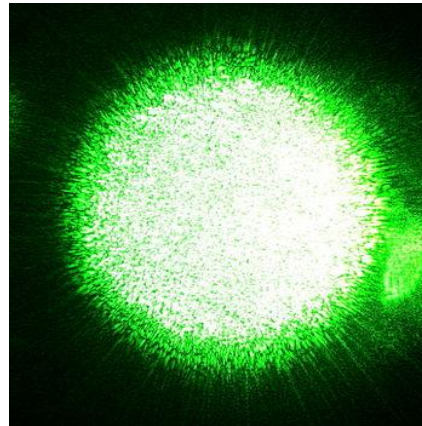
LASER: One color (monochromatic) and waves in phase (coherent)

Niepożądane skutki spójności światła

Spekle (ang. speckle pattern)

Wzór spekli jest rozkładem natężenia wytworzonym przez wspólną interferencję zbioru fal o tej samej częstotliwości, ale różnych fazach i amplitudach.

Powstaje najczęściej w efekcie rozproszonego odbicia światła monochromatycznego (laser) na powierzchniach takich jak papier, kurz, powierzchnie chropowate, biała farba itp.



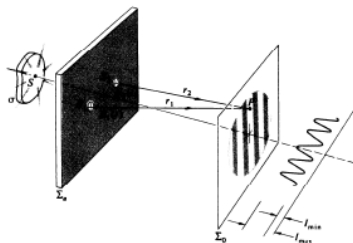
Czy białe światło może interferować

Metody wytwarzania światła spójnego

Podział frontu falowego

Front falowy podzielony jest na dwie lub więcej części z wykorzystaniem zwierciadeł, soczewek i pryzmatów

Typowa metoda: **doświadczenie Younga** (dwie szczeliny)

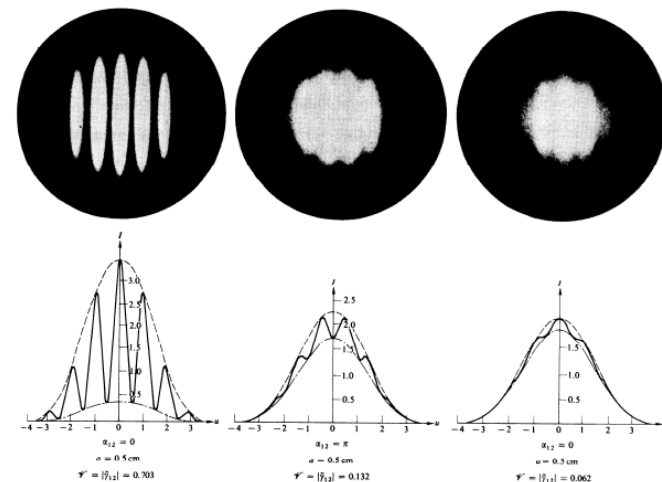


Podział amplitudy

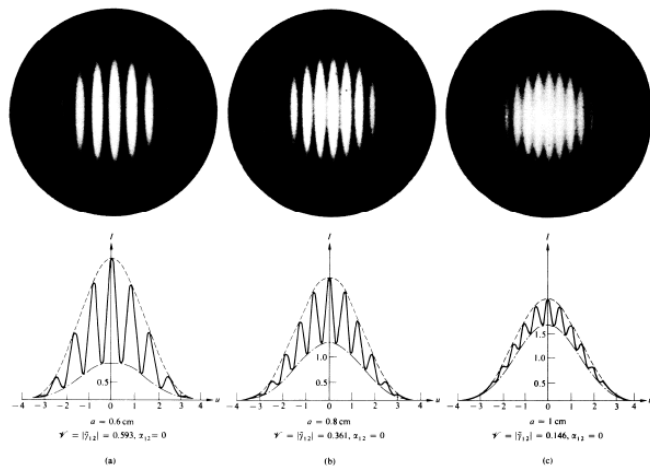
Padająca wiązka dzielona jest na dwie lub więcej części przez częściowe odbicie na półprzepuszczalnym zwierciadle. Podzielone części przebywają różne drogi i w końcu połączone tworzą wzór interferencyjny.

Typowa metoda: **interferometr Michelsona**

Interferencja dwuwieżkowa światła niespójnego.
Zmiana kontrastu wywołana zmianą rozmiaru źródła.



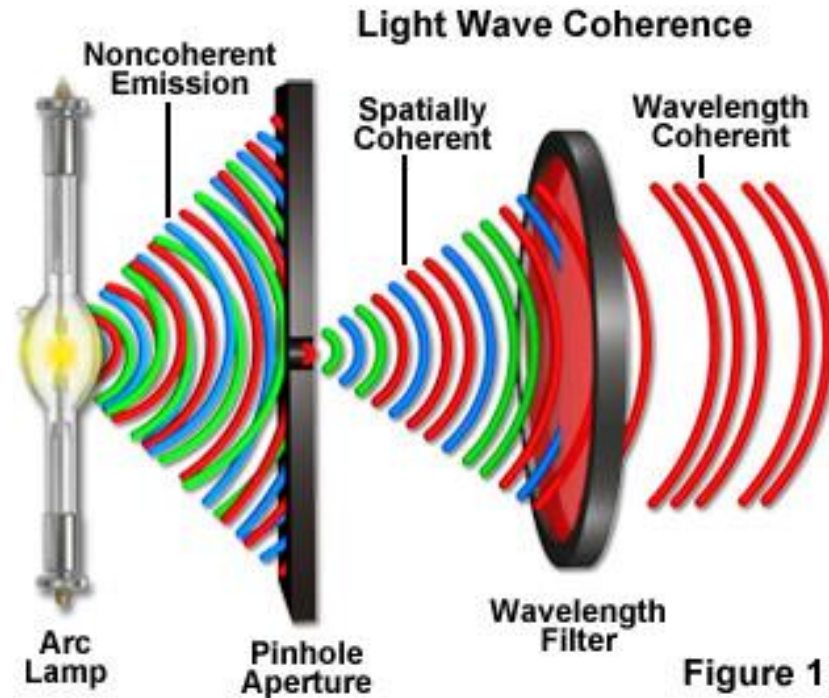
Interferencja dwuwieżkowa światła częściowo spójnego.
Zmiana kontrastu wywołana zmianą odległości apertur.



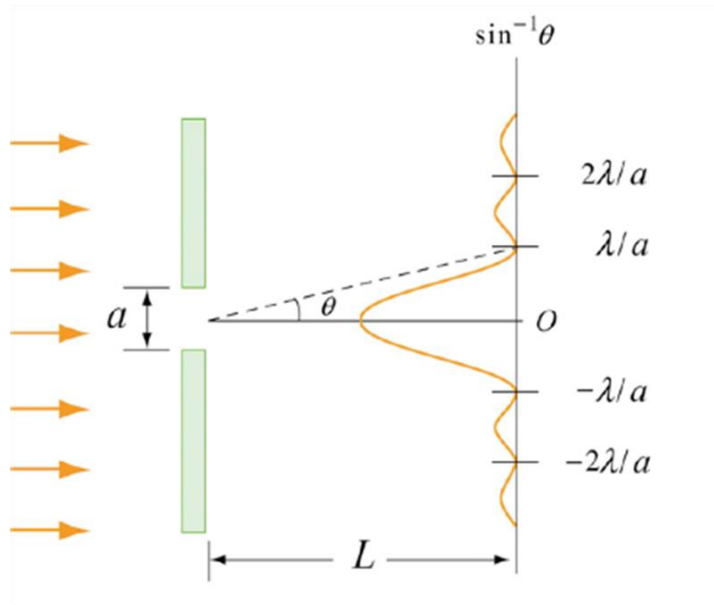
Czy białe światło może interferować

Łącząc powyższe fakty, źródło spójne przestrzennie i czasowo możemy uzyskać zawężając jego rozmiar za pomocą apertury o małej średnicy (filtracja przestrzenna) oraz filtru przepuszczającego wąski zakres fal (filtracja widmowa)

Widmowa i przestrzenna filtracja źródła



Ugięcie fali na pojedynczej szczelinie:

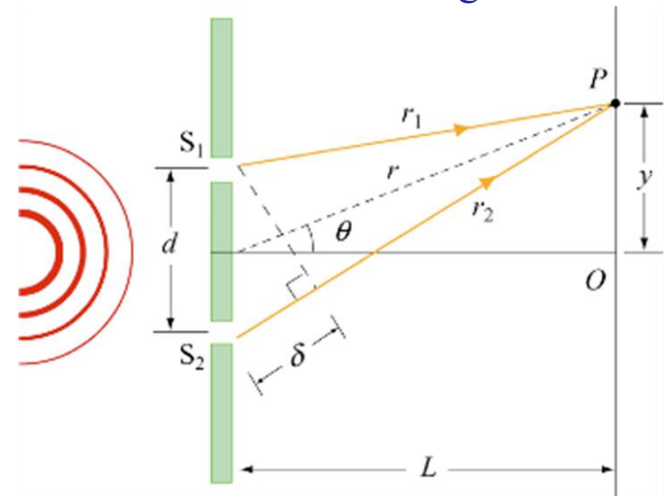


$$I(\theta) = I_m \left(\frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right)^2 \quad \alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin(\theta)$$

minima $a \sin \theta = m\lambda \quad m=1, 2, 3..$

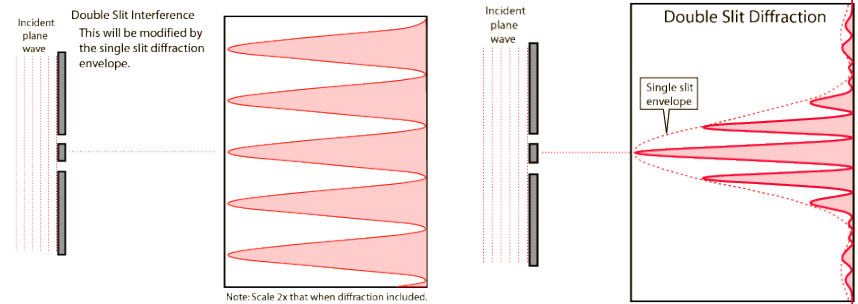
maxima $a \sin \theta \approx (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m=1, 2, 3..$

Ugięcie fali na dwóch szczelinach Doświadczenia Younga



Interferencja dla $a \ll \lambda$

Interferencja dla $a \sim \lambda$



Interferencja na jednej i dwóch szczelinach

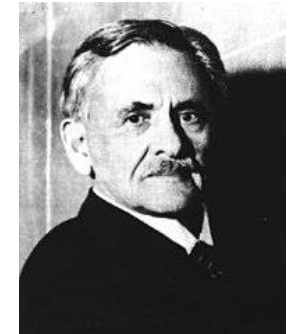
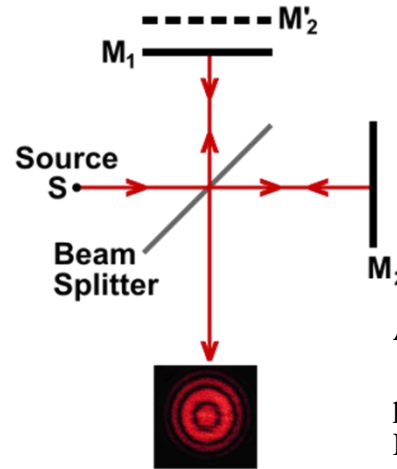


Interferometr Michelsona

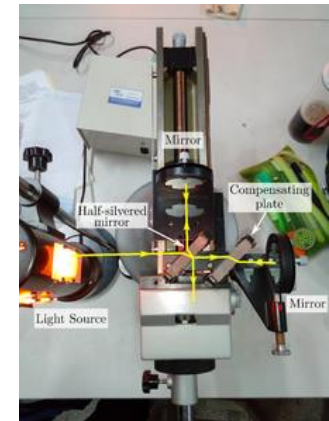
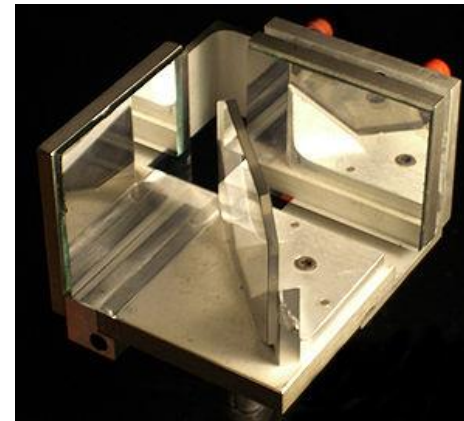
Interferometr – przyrząd pomiarowy oparty na zjawisku interferencji fal. Obserwacja powstających wzorów interferencyjnych umożliwia po odpowiednich obliczeniach uzyskanie bardzo dokładnych pomiarów.

Interferometr Michelsona

- Wiązka monochromatycznego światła rozdzielana jest na dwie wiązki na półprzepuszczalnym zwierciadle.
- Na końcu obu ramion znajdują się zwierciadła M_1, M_2 , które zwracają bieg promieni.
- Jedno ze zwierciadeł (M_1) dodatkowo jest ruchome i za jego pomocą zmienia się drogę optyczną jednej z wiązek w celu ustawienia interferometru.
- Po odbiciu obie wiązki padają ponownie na półprzepuszczalne zwierciadło, gdzie biegną już w jednym kierunku (do obserwatora/ detektora) i interferują ze sobą.



Albert Abraham Michelson (1852-1931) amerykański fizyk pochodzenia polsko-żydowskiego, laureat Nagrody Nobla z dziedziny fizyki w 1907 za konstrukcję interferometru

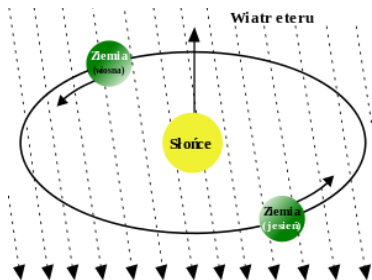


Interferometr Michelsona

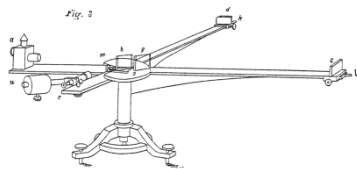
Zastosowania interferometru Michelsona

Doświadczenie Michelsona-Morleya

- porównanie prędkości światła w dwóch prostopadłych kierunkach wyznaczyłoby prędkość „wiatru eteru” – **wynik negatywny**



Hipotetyczny „wiatr eteru” wywołany ruchem Słońca i Ziemi wokół Słońca



Schemat interferometru Michelsona (1881 r.)



Stanowisko eksperymentu

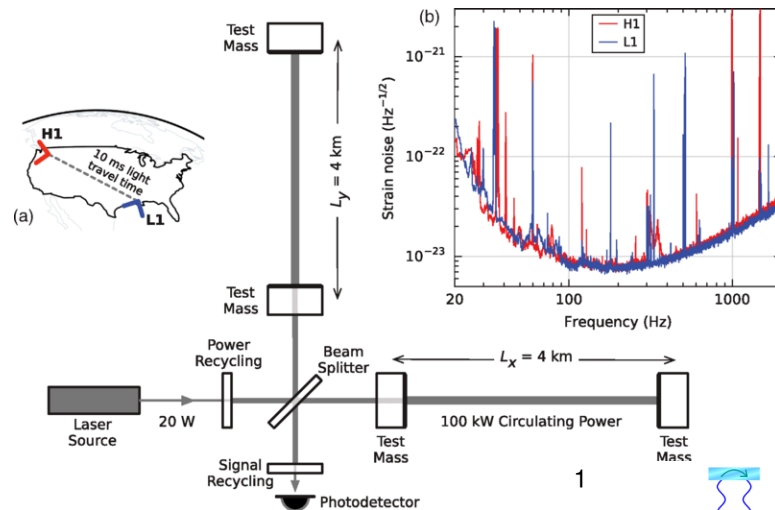


Spodziewane przesunięcie fazowe pomiędzy światłem biegnącym w podłużnym i poprzecznym ramieniu urządzenia Michelsona-Morleya

Detekcja fal grawitacyjnych

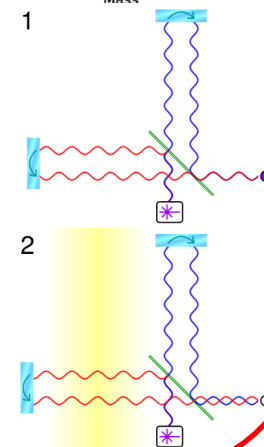
LIGO

Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory



- Długość ramion 2-4 km
- czułość $h \sim 5 \cdot 10^{-22}$ m

Uproszczony schemat działania LIGO
Fala grawitacyjna przechodząc przez ramię interferometru zmienia jego długość i jednocześnie wzór interferencyjny.



Interferometr Macha-Zehndera

Interferometr Macha-Zehndera

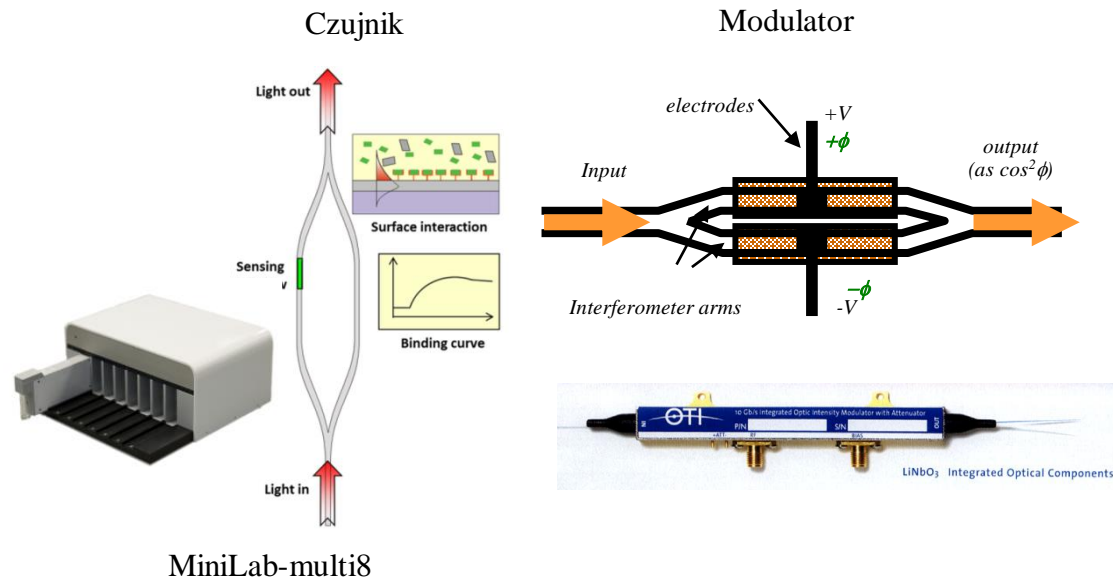
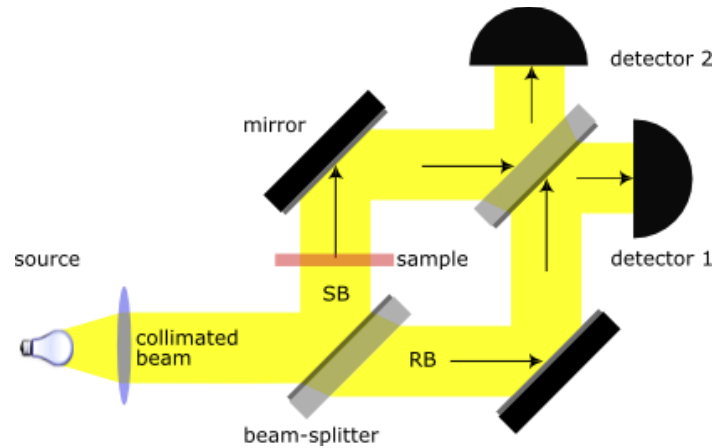
Instrument zaproponowany przez dwóch fizyków Ludwiga Macha i Ludwiga Zehndera (1891-92)

- Promień świetlny rozdzielany jest na dwa promienie przechodzące przez interferometr inną drogą.
- W układzie lusterek promienie ponownie spotykają się na wyjściu układu. Obraz interferencyjny zależy od różnicy faz obu promieni; a zatem jest on czuły na najdrobniejsze detale, które mogą wpływać na różnicę dróg optycznych pomiędzy ramionami interferometru.

➤ Zastosowania

- optyczne sensory
- holografia
- telekomunikacja – modulatory światła
- badania podstawowe:

Mechanika kwantowa (splątanie kwantowe, kryptografia itp.)

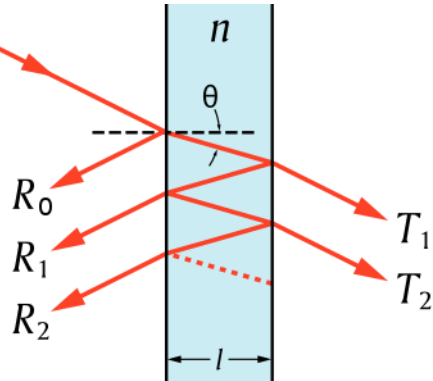


Inne typy interferometrów

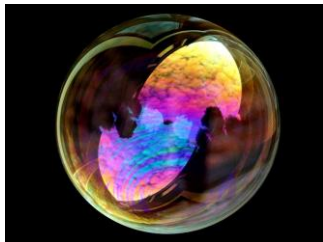
Interferometr Fabry–Pérot

➤ Typowy układ złożony z przezroczystej warstwy z dwoma odbijającymi powierzchniami lub dwa równoległe lustra.

➤ Transmisja przez taki układ wykazuje maksima o wysokiej transmisji wynikające z rezonansu struktury.

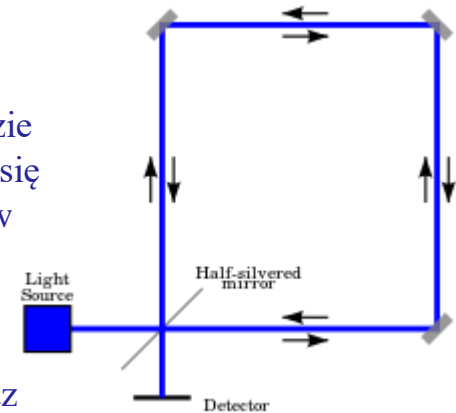


$$l = \frac{m\lambda}{2n}$$



Interferometr Sagnaca

Światło padając na płytkę półprzepuszczalną P rozdziela się na dwa promienie, które w układzie interferometru propagują się po tej samej drodze lecz w przeciwnych kierunkach. Promienie łączą się ponownie na płytce P i interferują za płytką, obraz interferencyjny można obserwować na ekranie/detektorze. Różnica faz obu wiązek ulega zmianie, gdy interferometr obraca się.



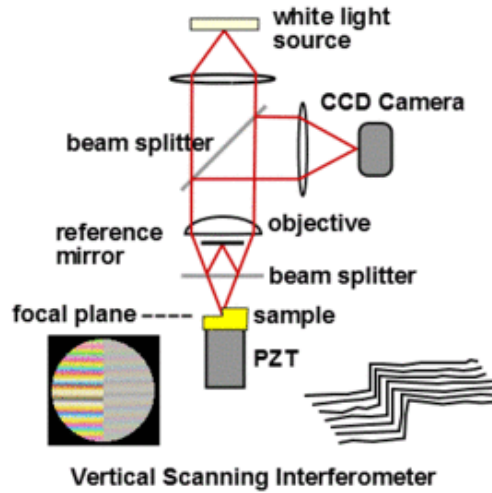
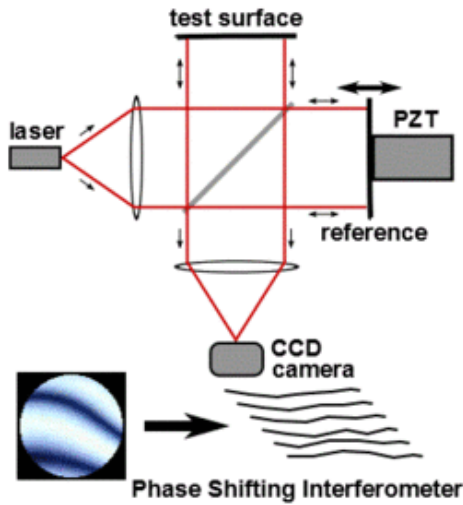
$$\Delta\phi \approx \frac{8\pi}{\lambda c} \omega A$$

Powszechnie wykorzystywane jako żyroskopy do oceny poziomu w samolotach

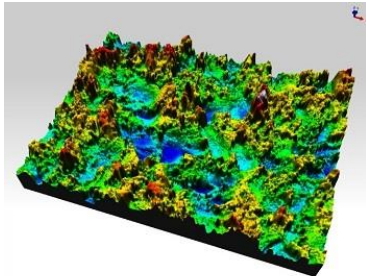
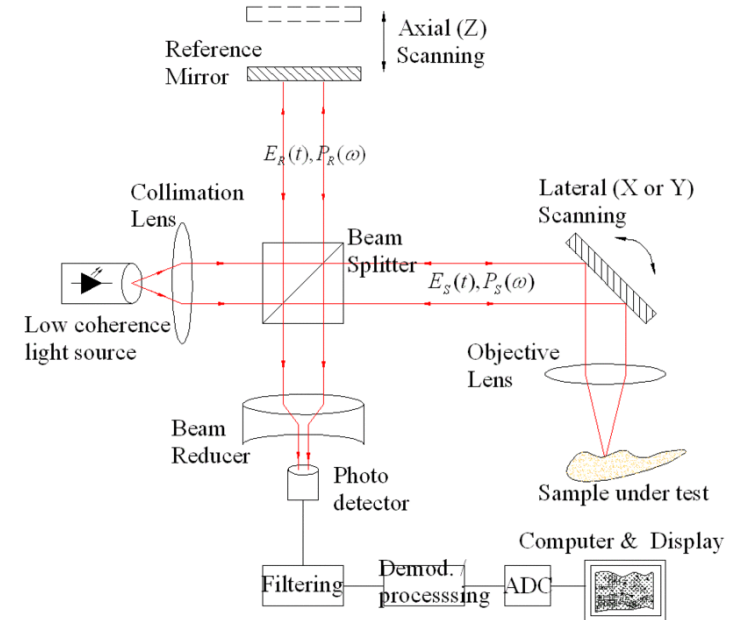
Przesunięcie prążków interferencyjnych jest proporcjonalne do kołowej prędkości układu ω oraz pola pętli A

Inne zastosowania

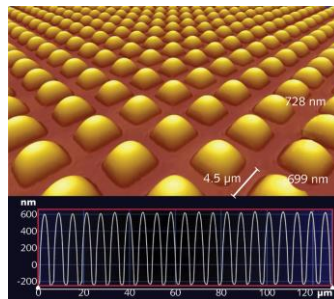
Profilometr optyczny



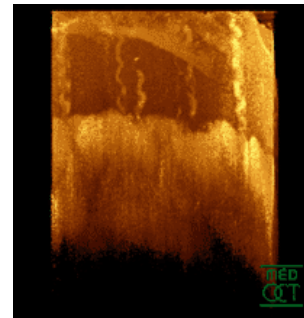
Optyczna tomografia koherencyjna



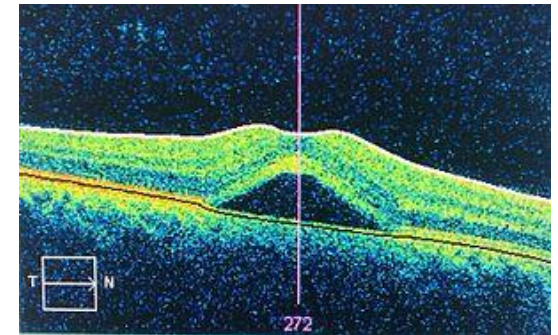
Morfologia powierzchni (PSI)



Morfologia powierzchni VSC



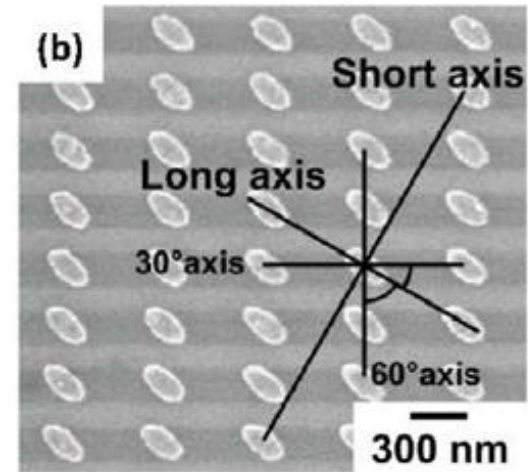
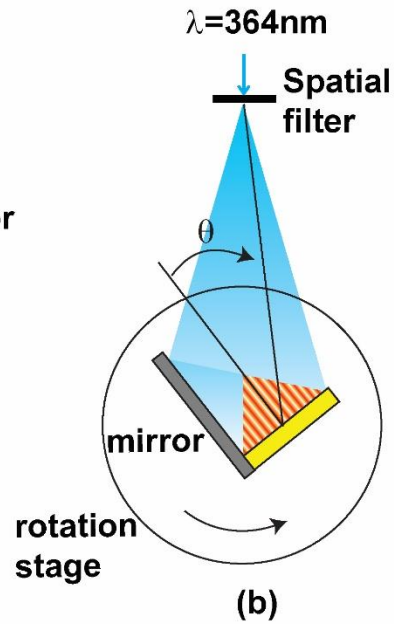
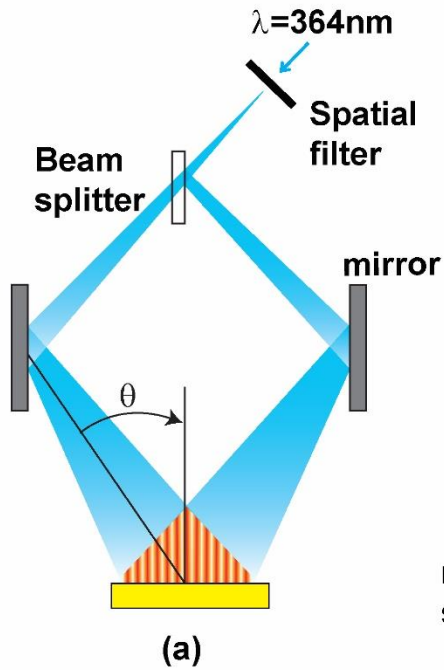
Tomogram skóry palca przedstawiający warstwę naskórka



Przekrój przez centralną część siatkówki zdrowego oka.

Inne zastosowania

Litografia interferencyjna



$$\Lambda = \lambda / 2 \sin \theta$$