

Wykład I

Światło – dwa w jednym?

Prof. dr hab. Ewa Popko

ewa.popko@pwr.edu.pl

p.231a A-1

Zawartość wykładu

TREŚCI PROGRAMOWE		
Forma zajęć – wykład		Liczba godzin
Wy1	Dualizm korpuskularno-falowy światła i materii. Prawo Plancka. Postulat de Broglie'a.	2
Wy2	Postulaty i elementy formalizmu mechaniki kwantowej. Funkcja falowa. Zasada nieoznaczoności Heisenberga.	2
Wy3	Równanie Schroedingera i jego zastosowanie (studnia potencjału, układy studni, efekt tunelowy). Skaningowy mikroskop tunelowy.	2
Wy4	Atom wodoru. Liczby kwantowe. Spin. Atom wieloelektronowy. Widmo absorpcji i emisji.	2
Wy5	Układy wieloatomowe, typy wiązań międzyatomowych. Struktura krystaliczna ciał stałych. Model pasmowy ciał stałych.	2
Wy6	Właściwości elektro-optyczne metali, izolatorów i półprzewodników w obrazie struktury pasmowej.	2
Wy7	Wybrane nowoczesne przyrządy półprzewodnikowe (ogniwo słoneczne, fotodioda, laser półprzewodnikowy).	2
Wy8	Kolokwium zaliczeniowe.	1
	Suma godzin	15

Literatura

1. Fizyka dla Szkół Wyższych t. 3, wyd. Openstax

<https://cnx.org/contents/u2KTPvIK@8.12:tyRWITJ7@2/Wst%C4%99p>

2. Materiały do wykładu, dostępne poprzez internet:

<https://popko.wppt.pwr.edu.pl/>

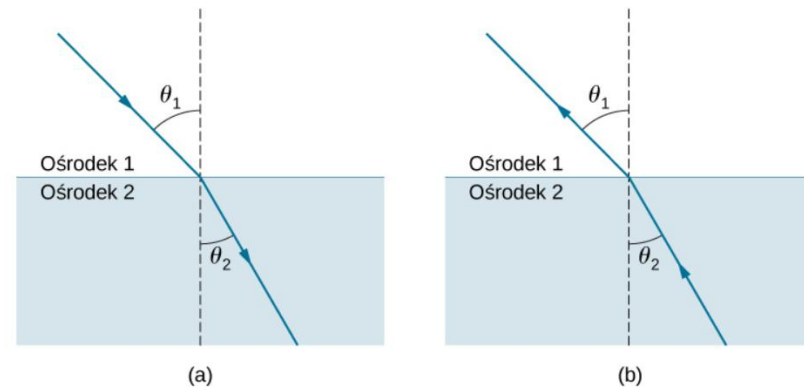
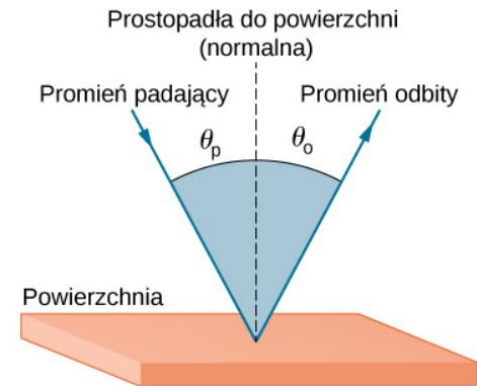
3. J.Orear Fizyka t. 2, WNT (2008)

Literatura uzupełniająca

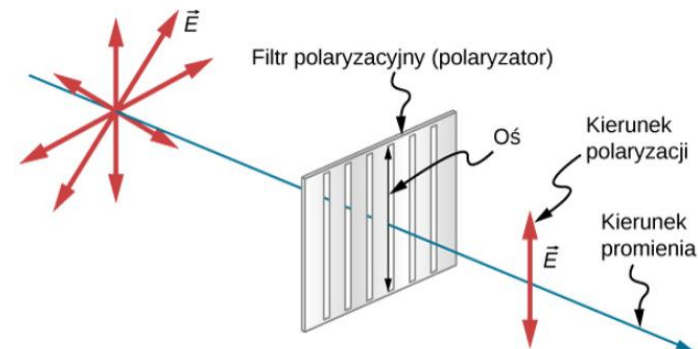
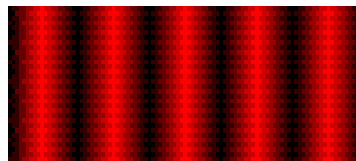
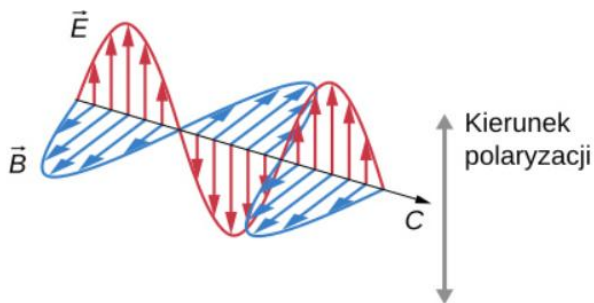
1. D.A.Neamen „Semiconductor Physics and Devices”, ed. McGraw-Hill, 2012

Światło – co to jest?

- **Właściwości**
 - **Odbicie, załamanie**
 - **Właściwości typowe dla fal i cząstek**

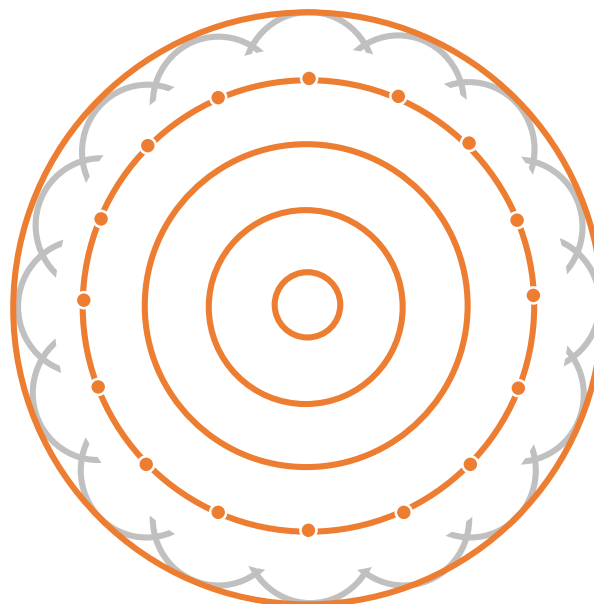
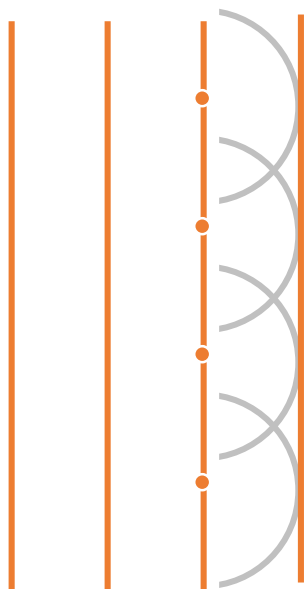


- **Interferencja, dyfrakcja, polaryzacja**
 - **Właściwości typowe dla fal**

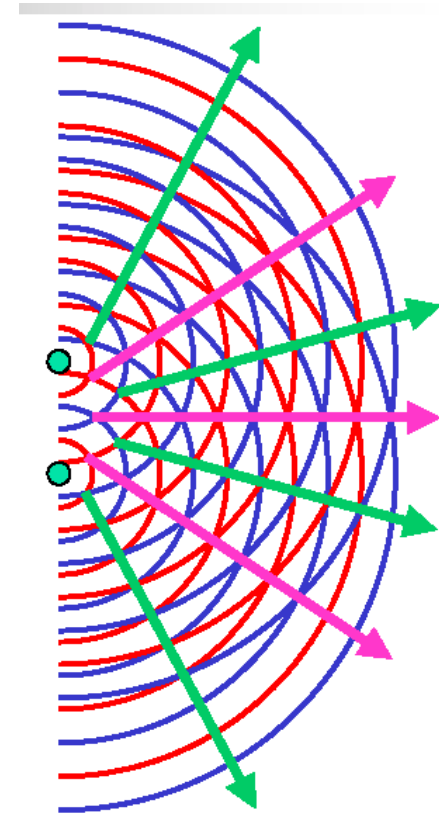


Zasada Huygens'a

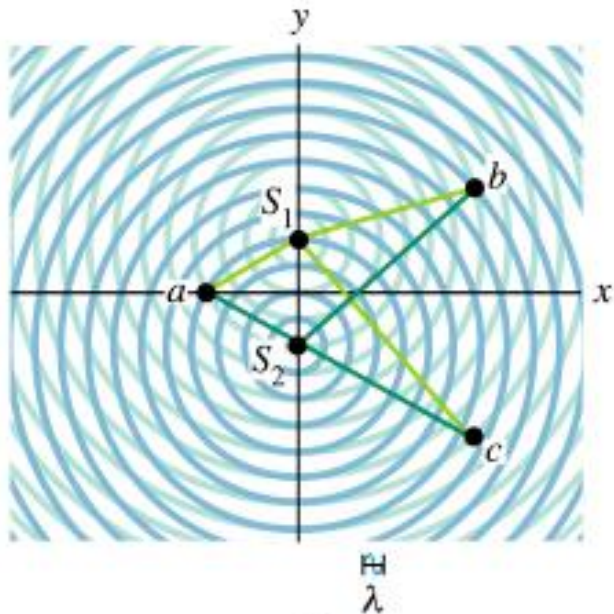
Wszystkie punkty do których dociera czoło fali, stają się wtórnymi źródłami fali, rozchodzącej się we wszystkich kierunkach z prędkością taką samą jak fala pierwotna. Czoło nowej fali jest płaszczyzną styczną do wszystkich fal wtórnych



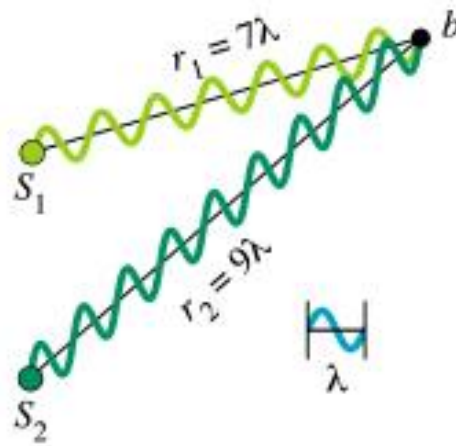
Interferencja



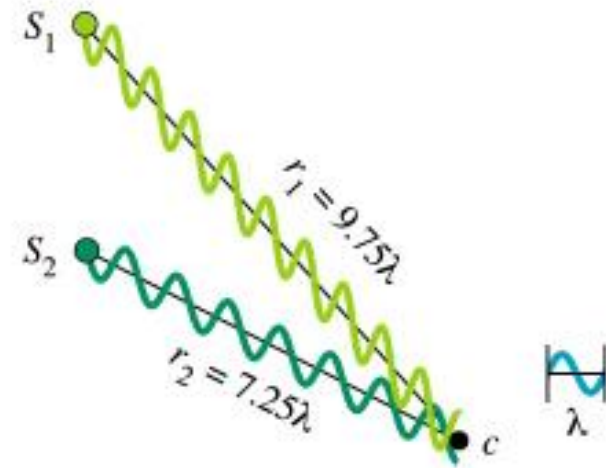
Interferencja



(a)



(b)



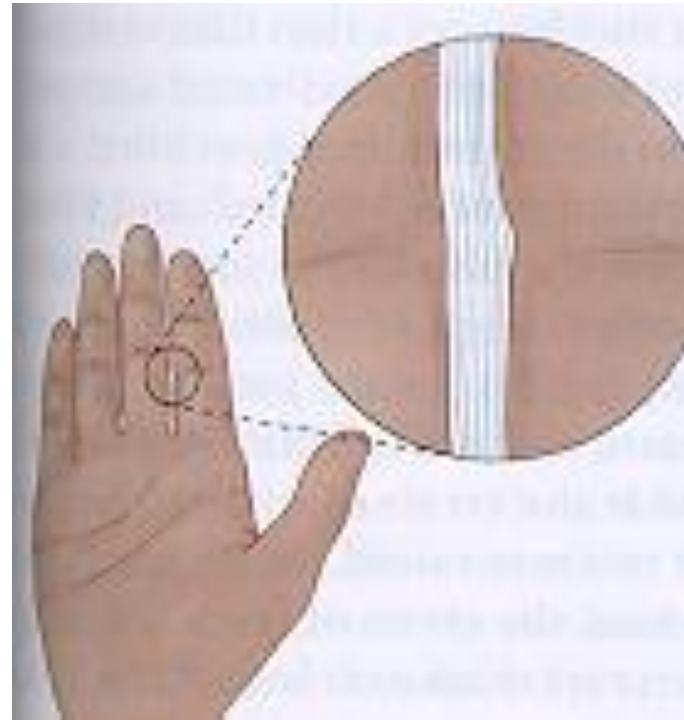
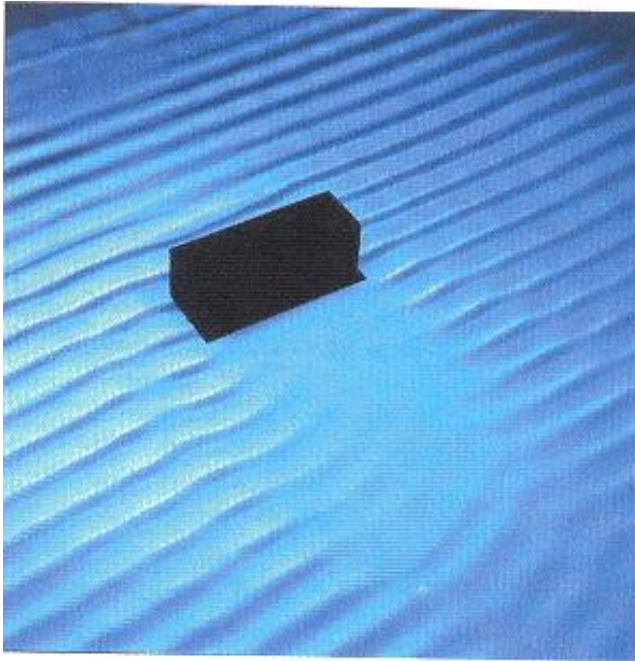
(c)

a) interferencja konstruktywna:

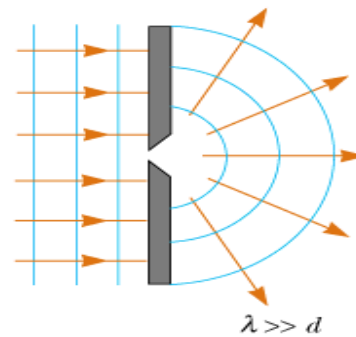
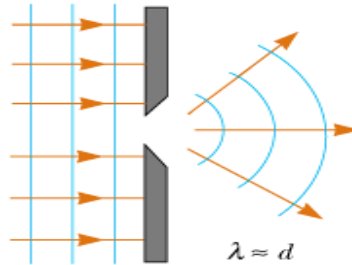
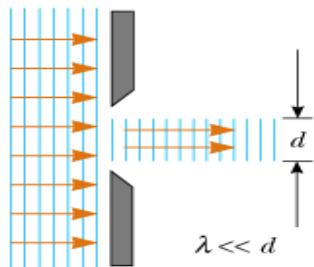
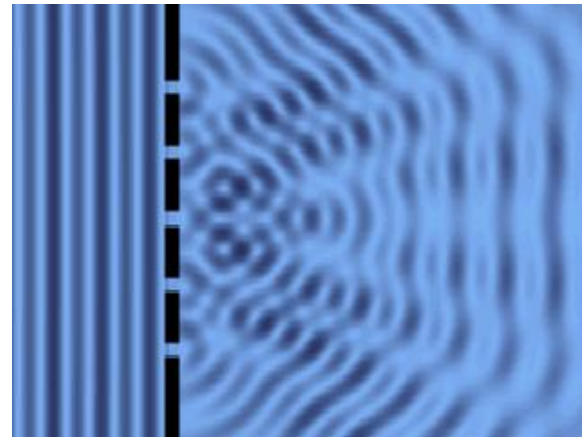
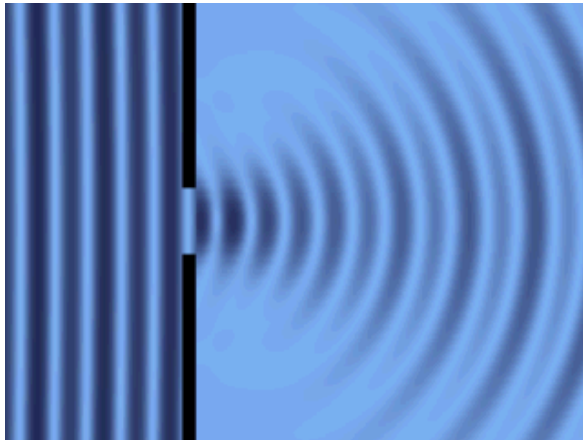
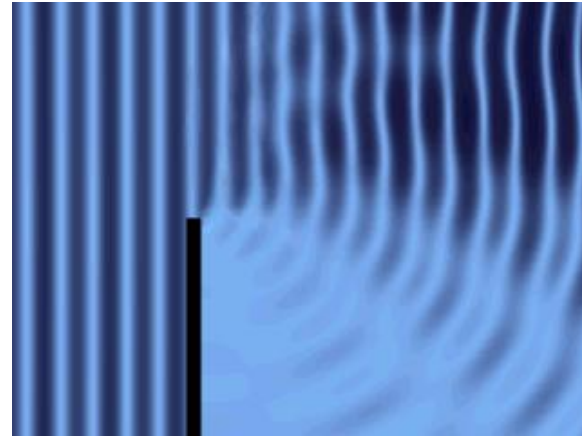
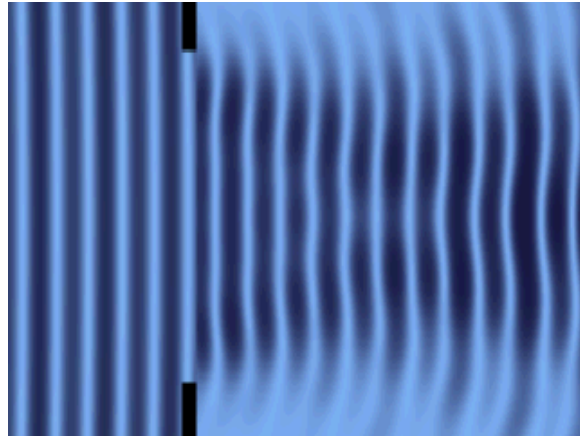
$$r_2 - r_1 = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

b) interferencja destruktywna: $r_2 - r_1 = (2m + 1)\lambda/2$

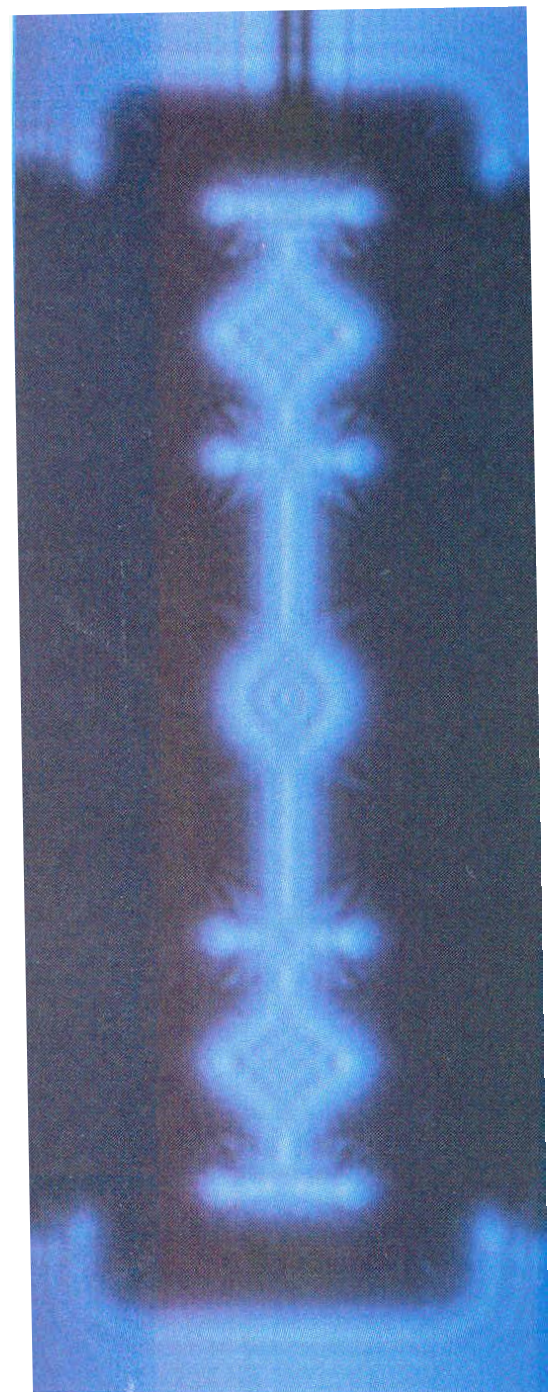
Dyfrakcja



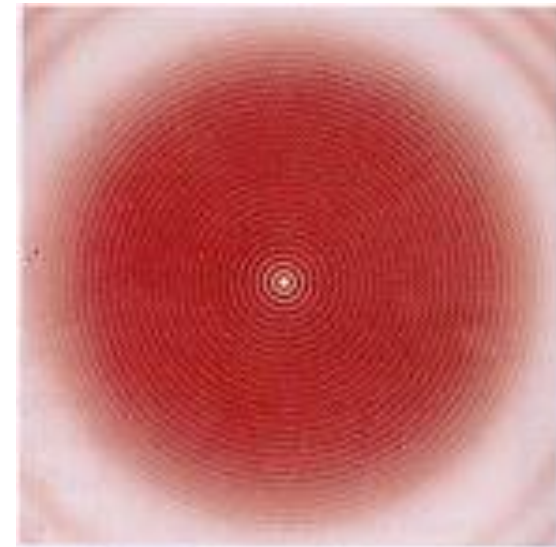
Dyfrakcja



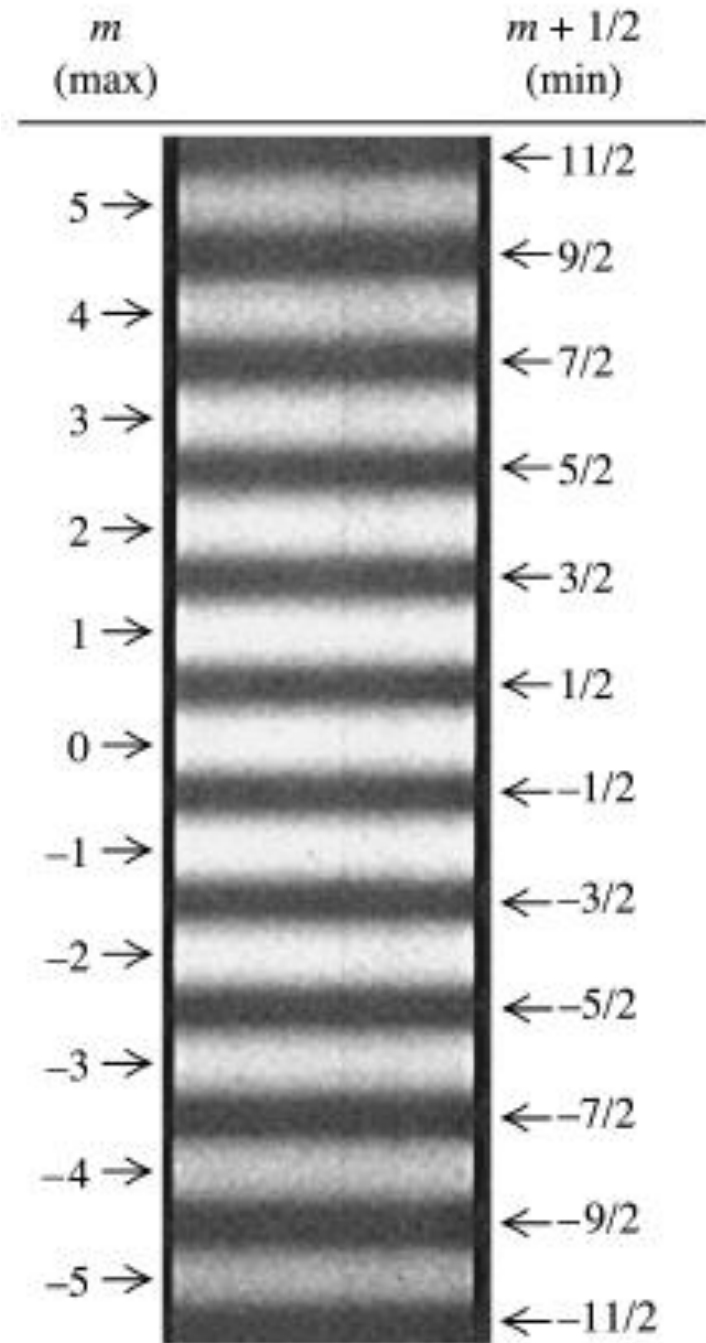
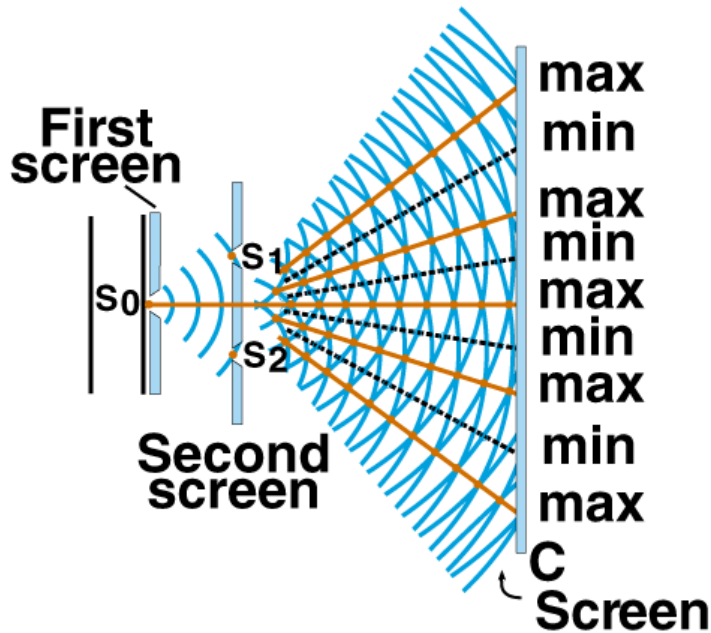
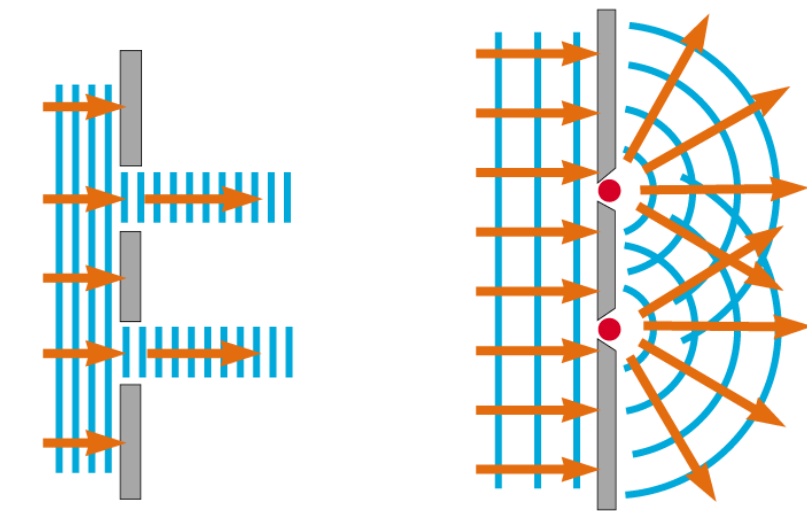
Dyfrakcja na żyłtce



Dyfrakcja –przeszkoda kołowa



Experiment Younga (1801)

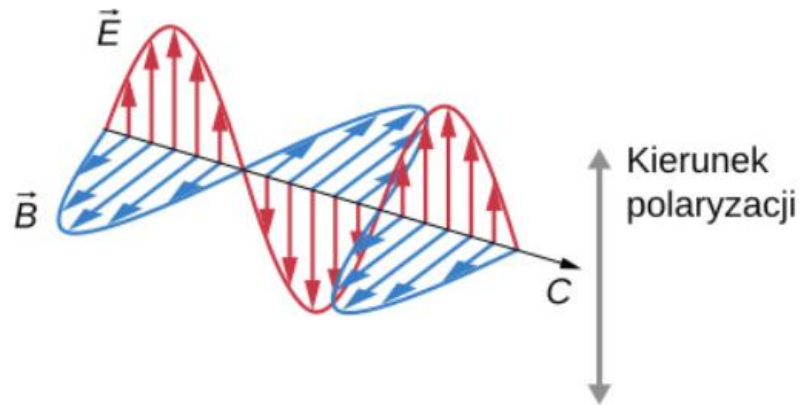


Właściwości materii

- **Składa się z cząstek**
 - **Atomy, Molekuły etc.**
- **Cząstki posiadają pęd (masa)...**
- **Dobrze określony tor...**
- **Nie wykazuje dyfrakcji i interferencji**
 - **1 cząstka + 1 cząstka = 2 cząstki**

Fizyka klasyczna

- **Koniec XIX wieku:**
 - **Zasady termodynamiki są ustanowione**
 - **Światło jest falą**
 - **Doświadczenia Faradaya**
 - **Równania Maxwella**



Równania Maxwella

... i Bóg powiedział:

Niech się stanie światłość...

$$\int \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

*Powierzchnia
Gaussa*

$$\int \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

*powierzchnia
Gaussa*

$$\int \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

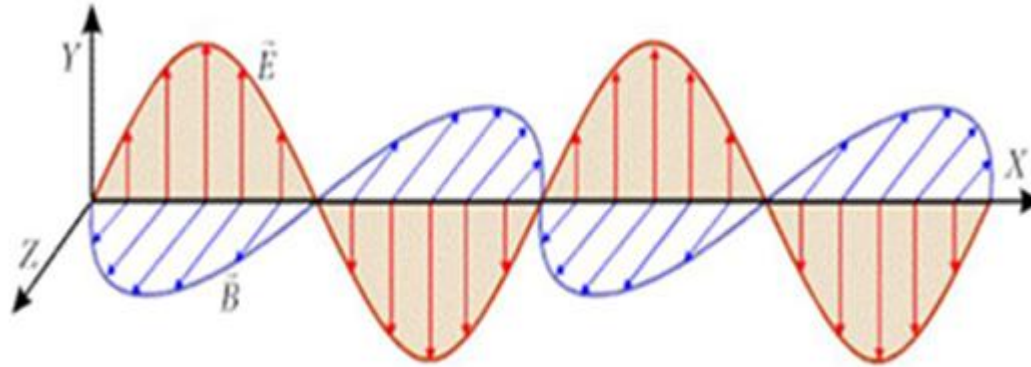
*kontur
zamknięty*

$$\int \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 \cdot \left(I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

*kontur
zamkn.*

... I nastąpiła światłość.

Prędkość fazowa fali em.



W próżni

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

W ośrodku

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}$$

Historia światła

1676 Römer mierzy prędkość światła badając różnice czasu z jaką występuje zaćmienie księżycy Io Jowisza. Gdy Jowisz jest najdalej od Ziemi, zaćmienie występuje 22minuty później niż wówczas, gdy jest najbliżej Ziemi. Wynik: ok. 220000km/s


1728 – Bradley – pomiar prędkości światła wykorzystując zjawisko aberracji światła. Bradley zauważył, że teleskop musi być nieco pochylony w kierunku ruchu Ziemi, aby uchwycić światło z gwiazdy. Jest to związane pozornym ruchem gwiazd, wynikającym z ruchu orbitalnego Ziemi wokół Słońca.

Wynik 301000km/s

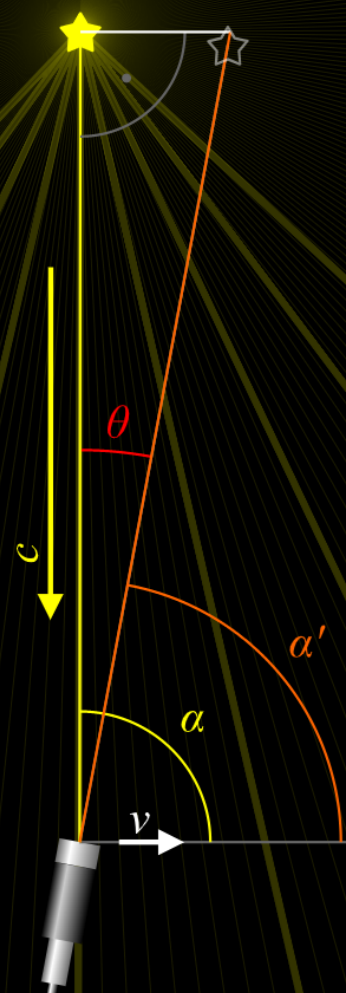
1801 – eksperyment Younga – interferencja światła; światło to fala. Co drga, skoro światło rozchodzi się w próżni ??

1887 – doświadczenie Michelsona – Morley’a – eter nie istnieje.

1728 – Bradley

 **Aberracja**


James Bradley



$v \ll c$

$$\theta = \alpha' - \alpha$$
$$\tan \theta = -\frac{v}{c} \Rightarrow$$
$$c = -\frac{v}{\tan \theta}$$
$$\theta = -20.5''$$
$$v = 30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$
$$c \doteq 301\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

www.vascak.cz
vascak.vladimir@gmail.com



Równanie fali

W punkcie $x=0$ znajduje się źródło fali powodujące zaburzenia ośrodka wg równania

$$y(0, t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T$$

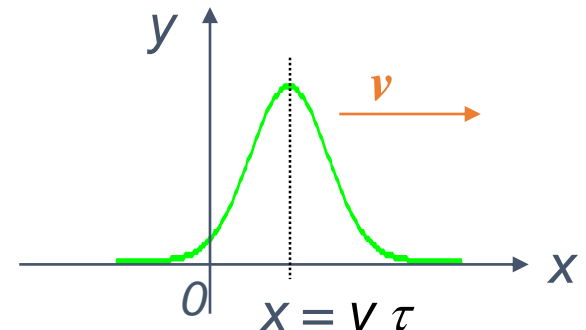
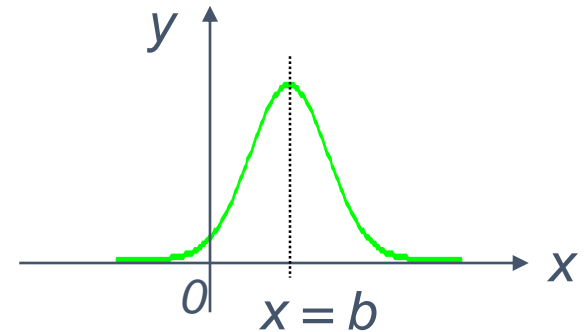
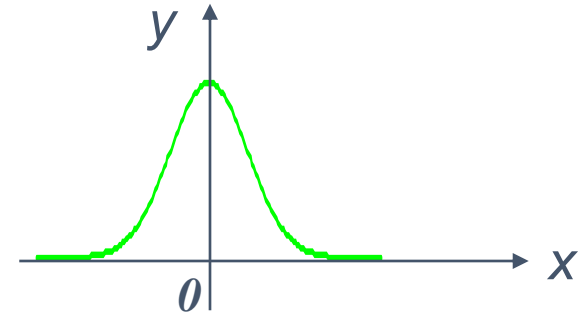
Zaburzenie to dociera do punktu $x = b$ po czasie

$$\tau = \frac{x}{v} = \frac{k}{\omega} x \quad k = 2\pi/\lambda$$

Zmiany w punkcie $x = b$ są opóźnione o t względem zmian w punkcie $x = 0$

$$y(x, t) = A \cos(\omega(t - \tau) + \varphi)$$

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



Fala płaska rozchodząca się w kierunku osi $+x$

Równanie falowe

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

$$\frac{\partial y}{\partial x} = Ak \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -Ak^2 \cos(\omega t - kx + \varphi) = -k^2 y$$

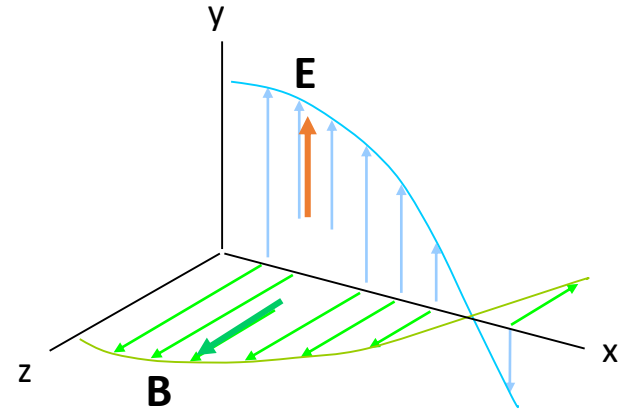
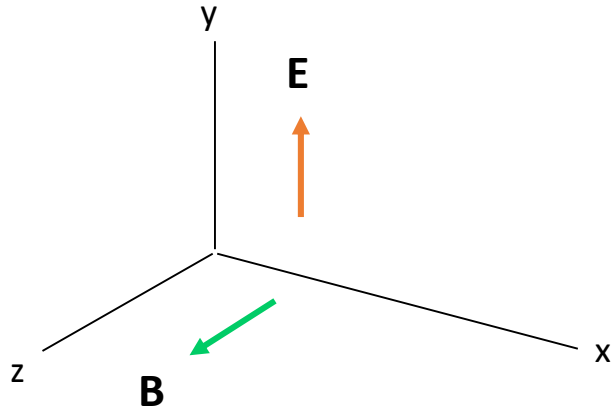
Analogicznie:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -A\omega \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t - kx + \varphi) = -\omega^2 y$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Równanie falowe



Wychodząc z równań Maxwella można pokazać, że pole elektryczne i magnetyczne spełniają równania falowe:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

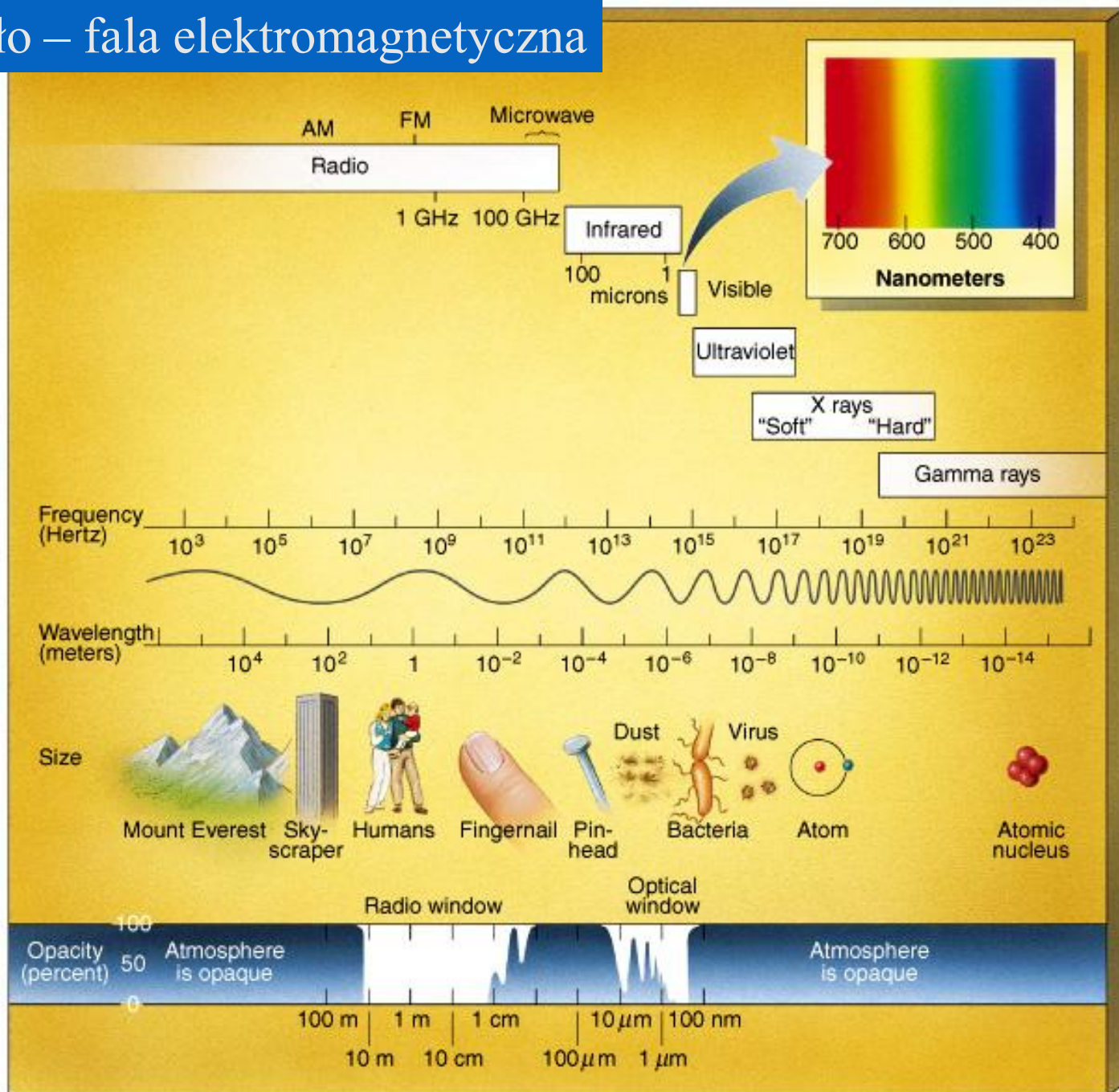
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

**Prędkość fazowa fali elektromagnetycznej
równa jest prędkości światła!!
Zatem światło to fala elektromagnetyczna.**

Światło – fala elektromagnetyczna

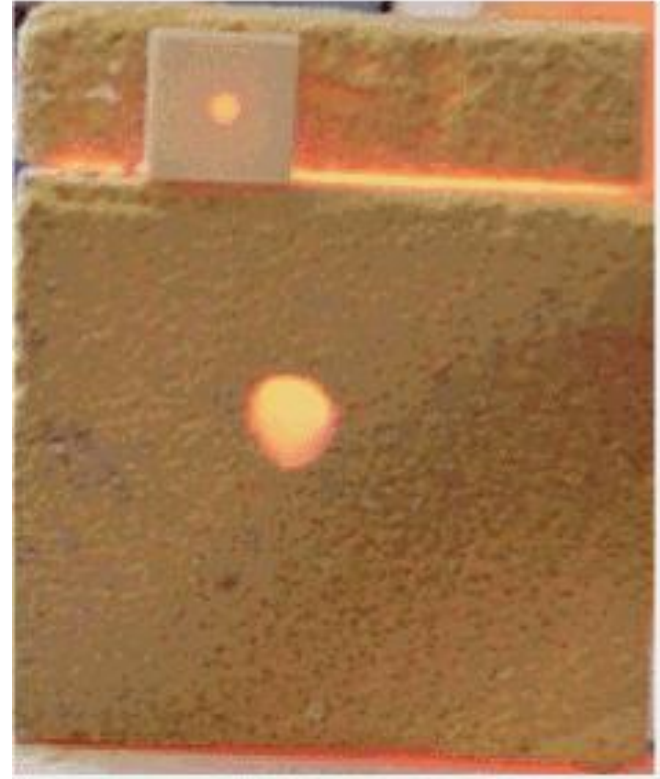
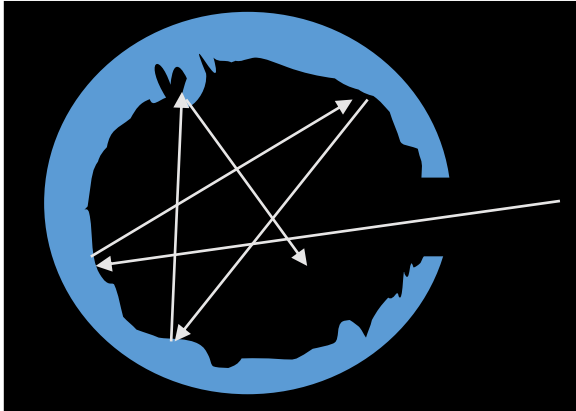
$$\lambda = c/f$$



Tymczasem – problem z pogrzebaczem?

- **Każde ciało emituje promieniowanie**
 - **Długość fali tego promieniowania maleje ze wzrostem temperatury ciała**
- **Ciało doskonale czarne (CDC) jest doskonałym absorberem**
 - **Nie odbija promieniowania pochodzącego z otoczenia**
 - **Jedynе promieniowanie emitowane przez to ciało pochodzi od tego ciała**
 - **Promieniowanie pochodzące z CDC pozostaje w równowadze termodynamicznej z tym ciałem**
- **Promieniowanie CDC ma dwie cechy:**
 - **Długość fali odpowiadająca maksimum zdolności emisyjnej maleje ze wzrostem jego temperatury**
 - **Moc promieniowania rośnie ze wzrostem temperatury**

Model CDC



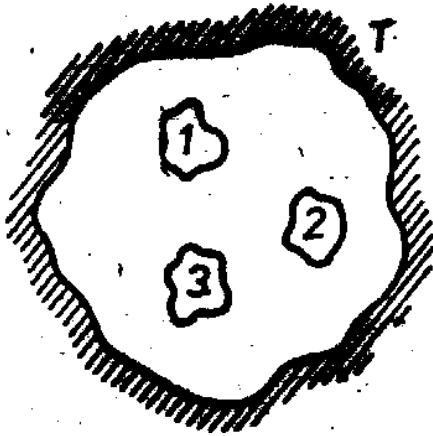
Całkowita zdolność emisyjna [W/m²]

- Strumień promieniowania emitowany przez jednostkę powierzchni źródła.

Spektralna zdolność emisyjna $e(\lambda, T)$ [W/m²nm]

- Strumień promieniowania o długości fali λ , emitowany przez jednostkę powierzchni źródła

Prawo Kirchhoffa



Stosunek spektralnej zdolności emisyjnej $e_\lambda(\lambda, T)$ do spektralnej zdolności absorpcyjnej $a_\lambda(\lambda, T)$ ciał jest taką samą funkcją długości fali i temperatury, niezależną od rodzaju ciała:

$$\frac{e_\lambda(\lambda, T)}{a_\lambda(\lambda, T)} = f(\lambda, T)$$

Jak wyznaczyć postać tej funkcji, skoro i zdolność emisyjna i zdolność absorpcyjna są funkcją długości fali i temperatury ?

Dla CDC, $a_{c\lambda}(\lambda, T) = 1$ i zgodnie z prawem Kirchhoffa zdolność emisyjna CDC jest poszukiwaną funkcją $f(\lambda, T)$.

Prawa promieniowania CDC

- Prawo Wiena:

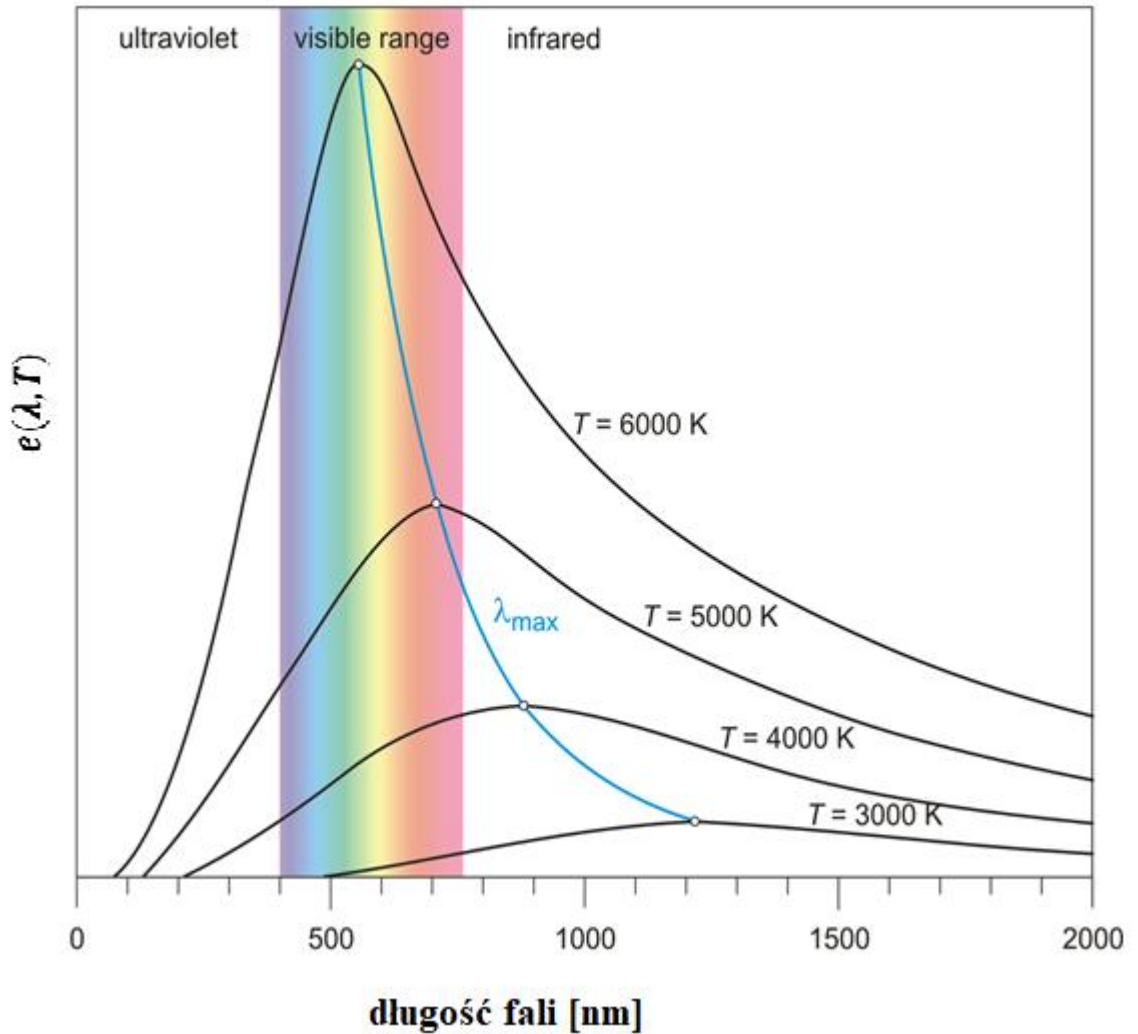
$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu\text{m K}$$

- Prawo Stefana-Boltzmannna:

$$M(T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda = \sigma(T^4 - T_0^4)$$

T_0 - temperatura otoczenia

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ – stała Stefana-Boltzmannna



Prawo Wiena

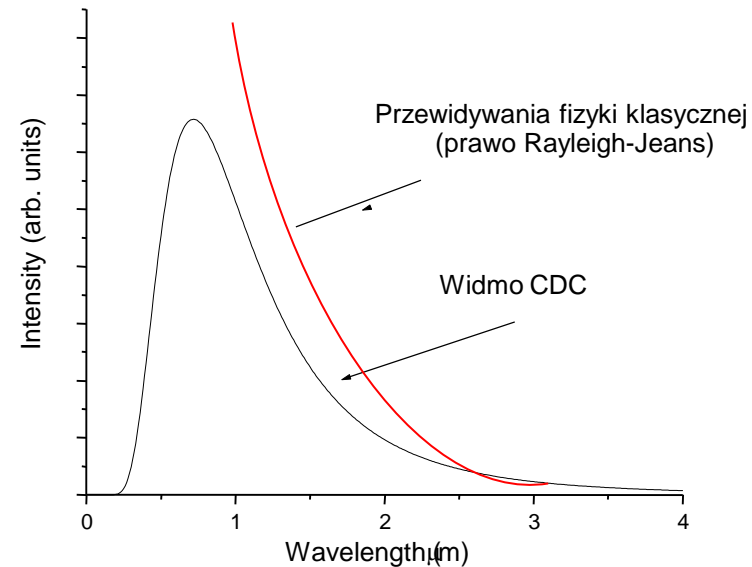
$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K} = 2898 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Temperatura		Długość fali [μm]	Emiter
$^{\circ}\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$		
273	0	11	lód
373	100	8	wrząca woda
473	200	6,3	kolba do lutowania
573	300	5,2	żelazko do prasowania
773	500	3,9	gorące żelazo
1 273	1 000	2,3	grzejnik Ni-Cr
2 848	2 575	1,0	włókno wolframowe
3 000	2 727	0,97	żarówka samochodowa

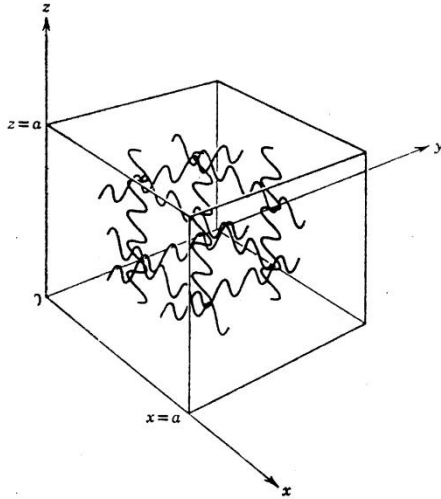
Promieniowanie CDC

Problemy z interpretacją

- **Przewidywania fizyki klasycznej:** przy założeniu, że molekuly ścian CDC mają ciągłe spektrum energii, intensywność promieniowania CDC w zakresie fal krótkich powinna rosnąć do nieskończoności !! Czyli pogrzebacz nie powinien zmieniać barwy ze zmianą temperatury.
- Tzw. „Katastrofa w ultrafiolecie”



Prawo Plancka CDC



Molekuły wneki CDC mogą absorbować i emitować energię w postaci dyskretnych pakietów energii $E = hf$

$$e(\lambda, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

$$e(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

Stała Boltzmannna $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$

Stała Plancka $h = 6,63 \cdot 10^{-34} Js$

Stała, którą Planck wyznaczył z dopasowania do danych eksperymentalnych.

Narodziny teorii kwantów

- **Założenia Maxa Plancka**
 - **Energia promieniowania jest związana z częstością promieniowania f wzorem:**

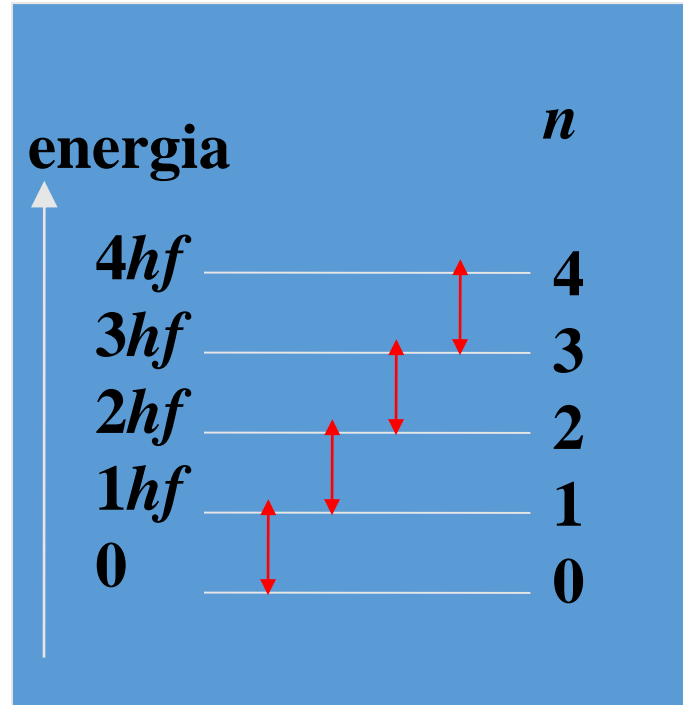
$$E = nhf$$

n jest liczbą naturalną, zwaną liczbą kwantową

- **Molekuły wnętrza CDC mogą absorbować i emitować energię w postaci dyskretnych pakietów energii, nazwanych potem „fotonami”: zatem molekuły ścian CDC mają skwantowane energie**

$$E = hf$$

Konsekwencje założeń Plancka



- poziomy energetyczne molekuł muszą być dyskretne (skwantowane)
- dozwolone są jedynie przejścia ze zmianą energii równą wielokrotności hf
- promieniowanie elektromagnetyczne jest dyskretne (skwantowane)

Podsumowanie

- Właściwości fal
- Właściwości cząstek
- Klasycznie, opis falowy lepiej opisuje światło
- Promieniowanie CDC

- Prawo Wiena

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} m \cdot K$$

- Molekuły ścian CDC mają skwantowane energie
- Prawo Plancka promieniowania CDC

$$I = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda k_B T} - 1 \right)}$$

- Energia fotonu

$$E = hf$$