

Wykład I

Światło – dwa w jednym?

Prof. dr hab. Ewa Popko

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

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 Schrödingera 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	Statystyki kwantowe: Fermiego-Diraca i Bose-Einsteina.	2
Wy7	Właściwości elektro-optyczne metali, izolatorów i półprzewodników w obrazie struktury pasmowej	2
Wy8	Wybrane nowoczesne przyrządy półprzewodnikowe (ogniwo słoneczne, fotodioda, laser półprzewodnikowy).	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)

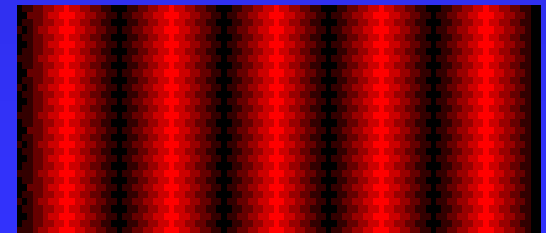
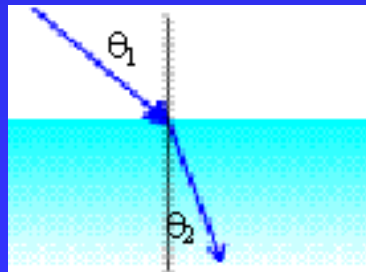
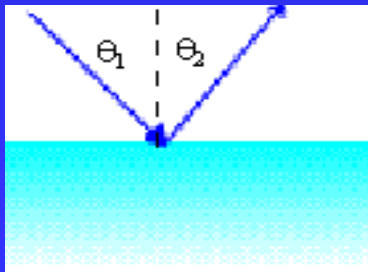
Literatura uzupełniająca

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

Światło – co to jest?

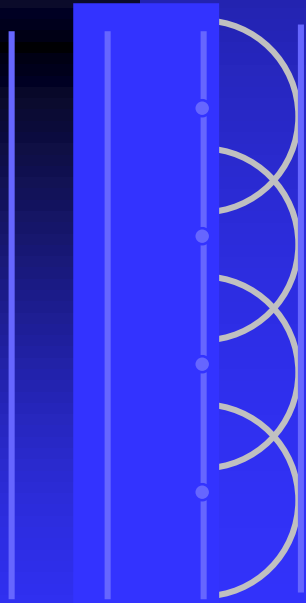
■ Właściwości

- ◆ Odbicie, załamanie
 - ◆ Właściwości typowe dla fal i cząstek
- ◆ Interferencja, dyfrakcja, polaryzacja
 - ◆ Właściwości typowe dla fal

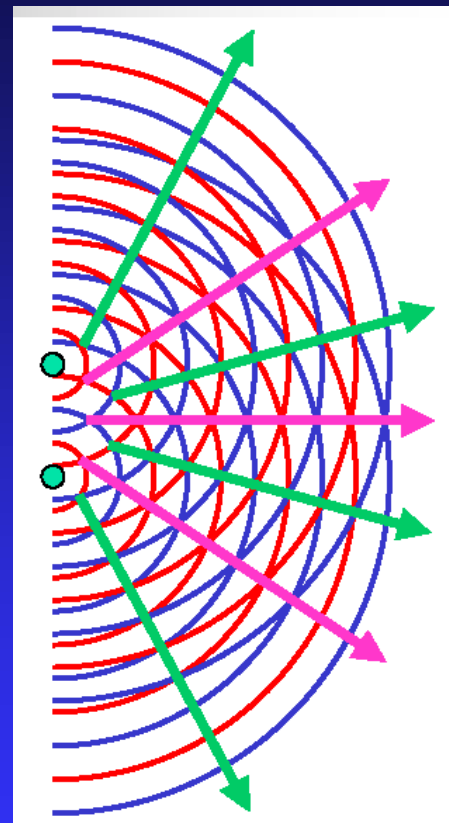


Zasada Huygens'a

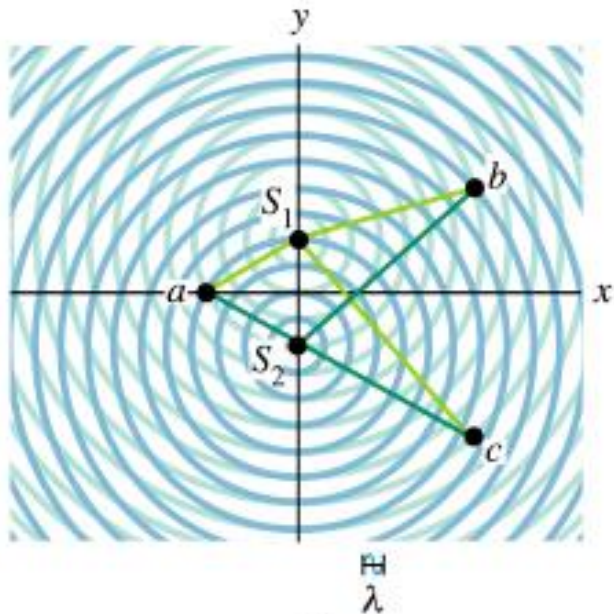
Wszystkie punkty do których dociera czoło fali, stają się wtórnymi źródłami fali, rozchodzącej się we wszystkich kierunkach z prędkością taką samą jak fala pierwotna.



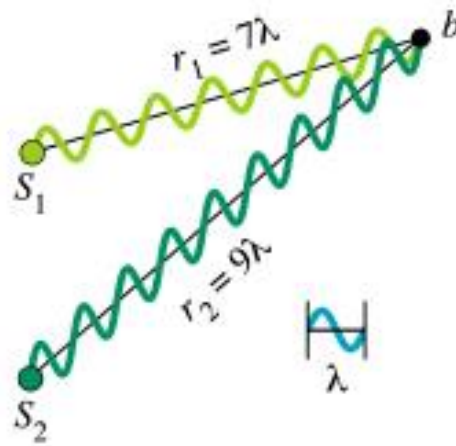
Interferencja



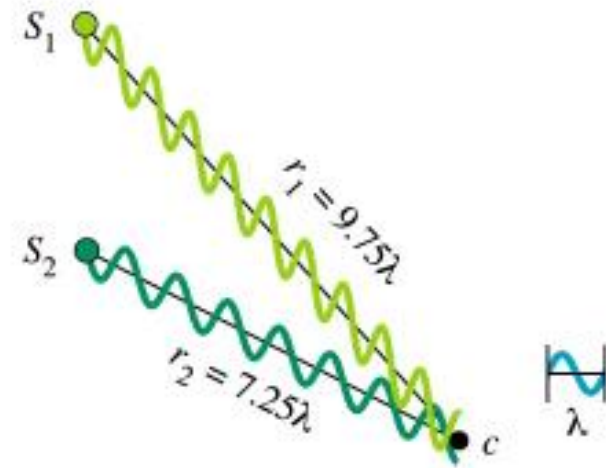
Interferencja



(a)



(b)



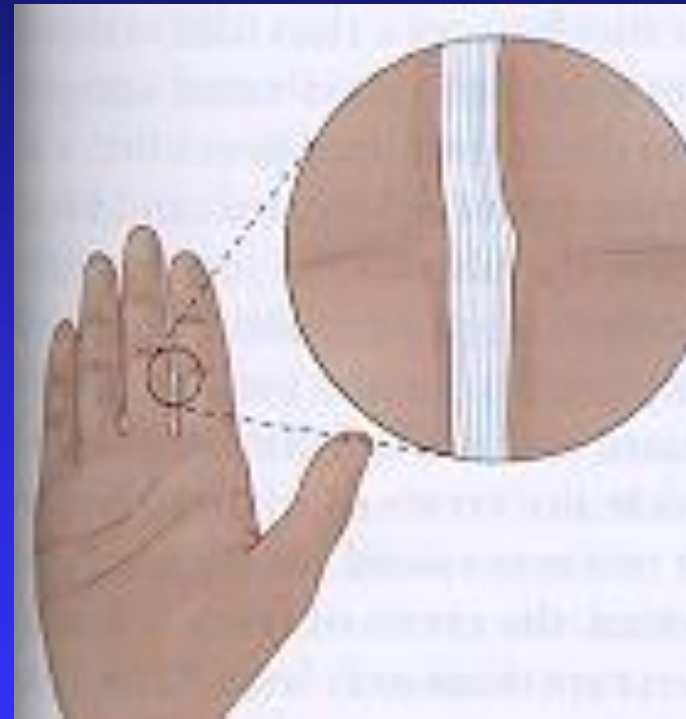
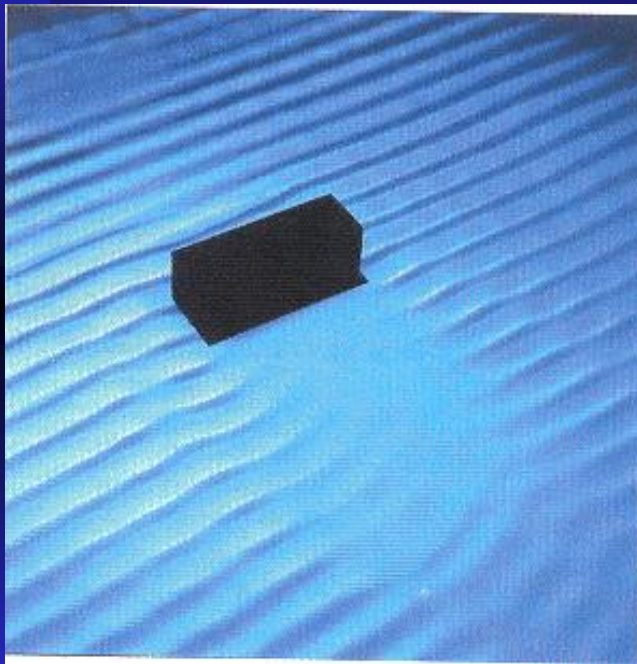
(c)

b) interferencja konstruktywna: $r_2 - r_1 = m\lambda$

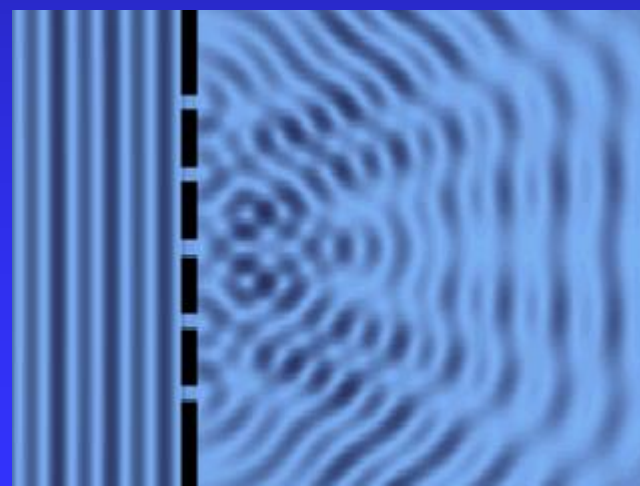
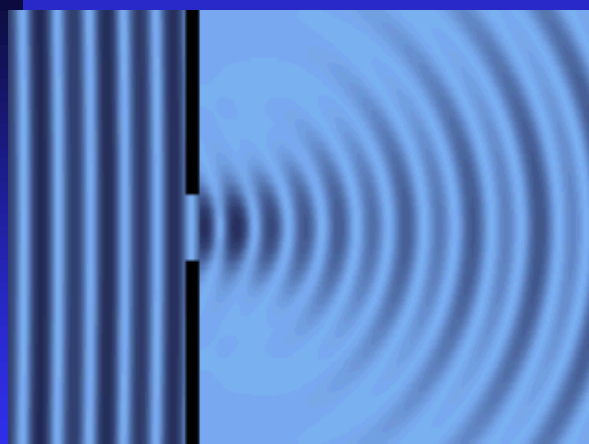
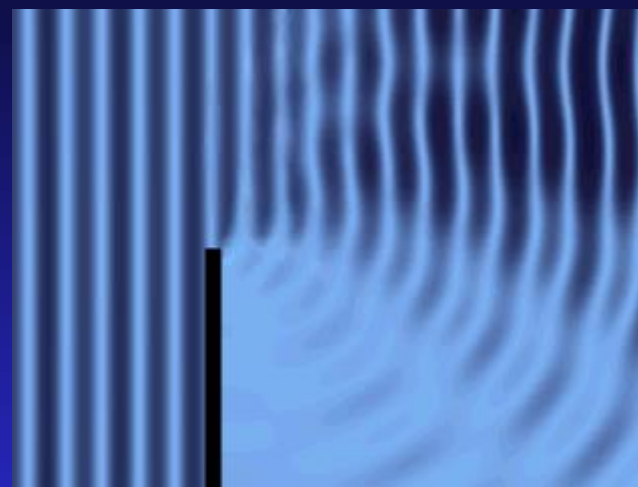
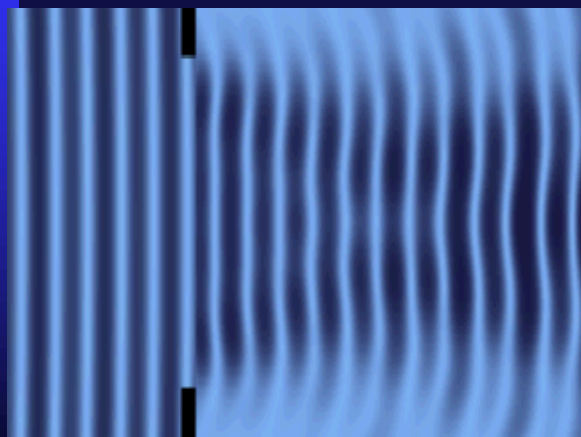
$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

c) interferencja destruktywna: $r_2 - r_1 = (m + \frac{1}{2})\lambda$

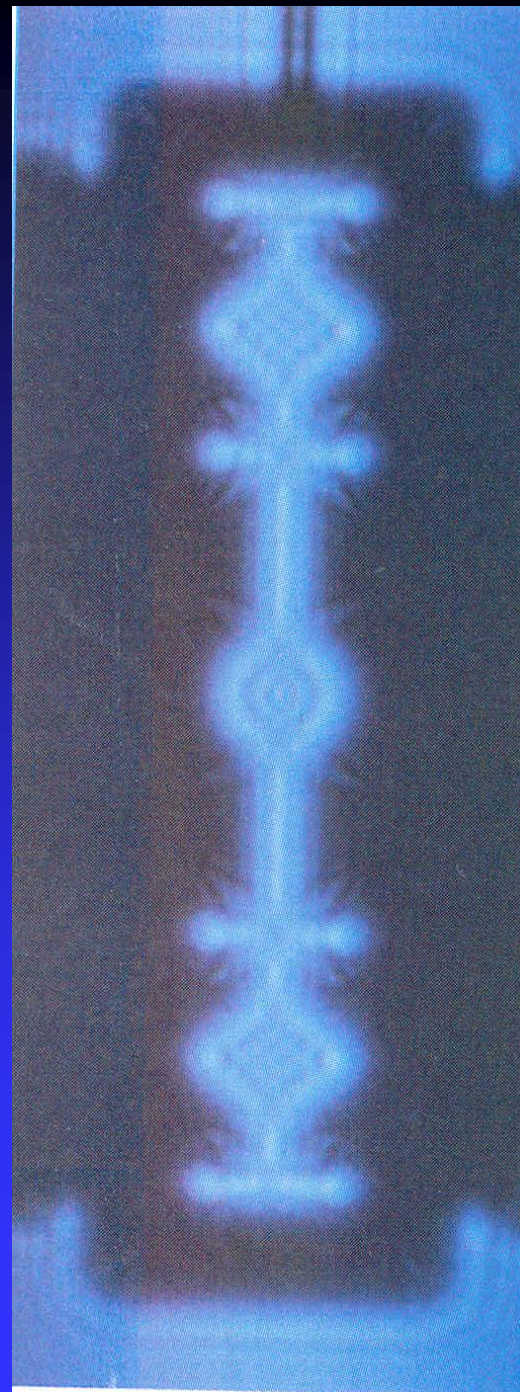
Dyfrakcja



Dyfrakcja



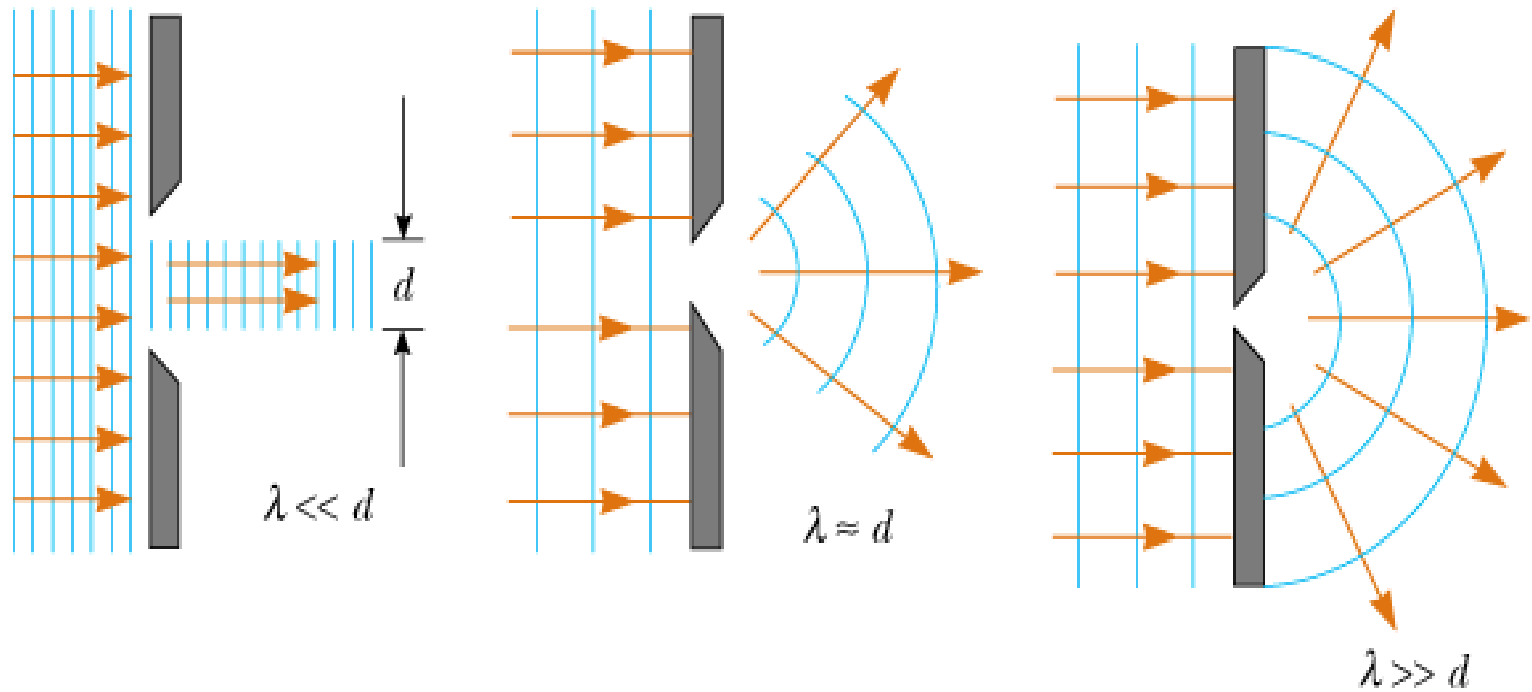
Dyfrakcja na żyłce



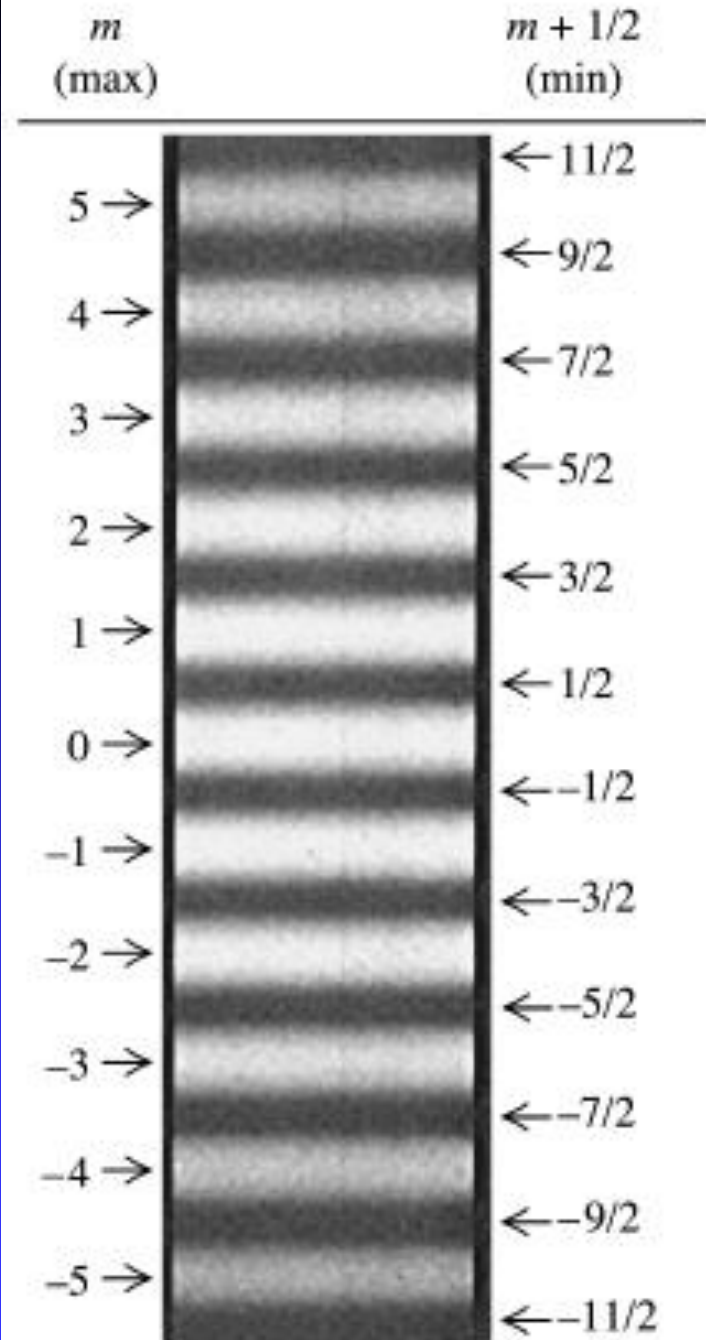
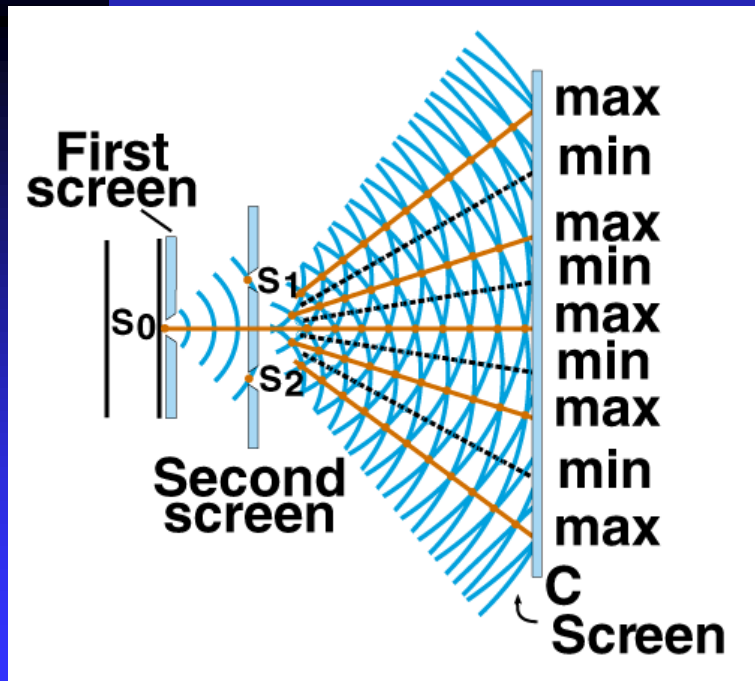
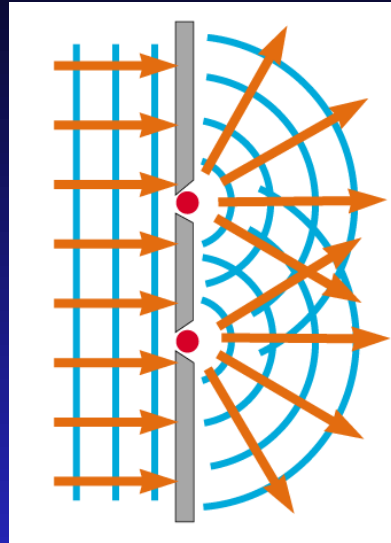
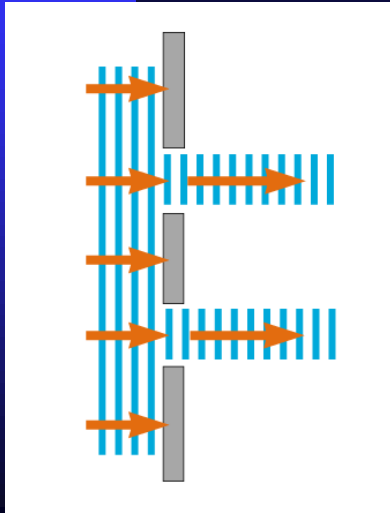
Dyfrakcja –przeszkoda kołowa



Dyfrakcja



Experiment Younga



Właściwości materii

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

Fizyka klasyczna

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

Równania Maxwella

... i Bóg powiedział:

Niech ...

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

*Powierzchnia
Gaussa*

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

*powierzchnia
Gaussa*

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

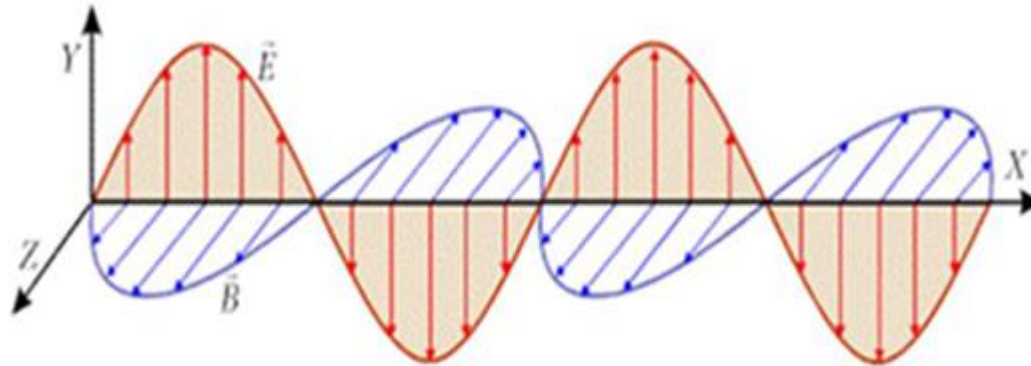
*kontur
zamknięty*

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

*kontur
zamkn.*

... *I nastąpiła światłość.*

Prędkość fazowa fali em.



W próżni

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

W ośrodku

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

Równanie fali

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

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

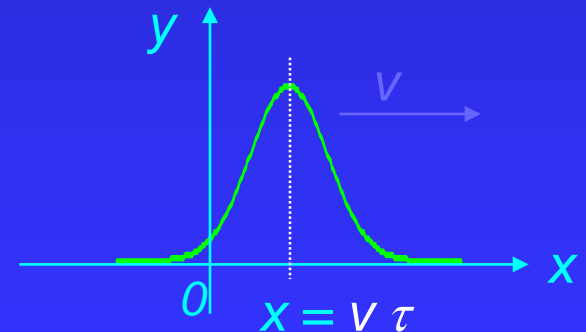
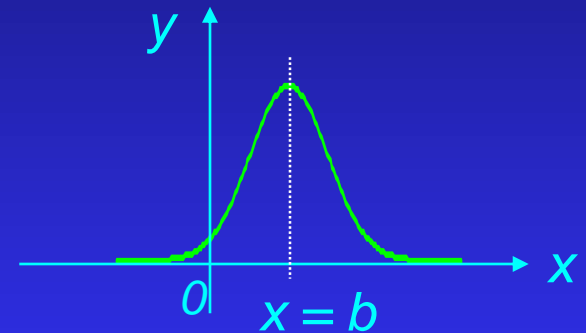
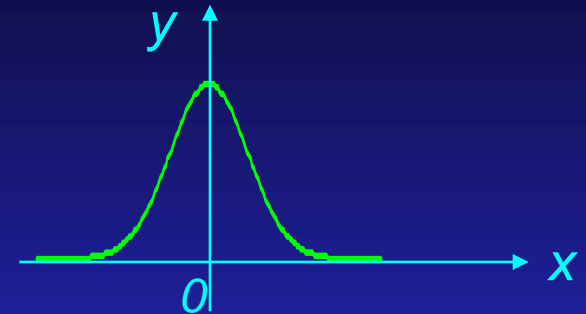
Zaburzenie to dociera do punktu $x=b$ po czasie

$$\tau = \frac{x}{v} = \frac{k}{\omega} x$$

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

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

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



Równanie falowe

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

$$\frac{dy}{dx} = Ak \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

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

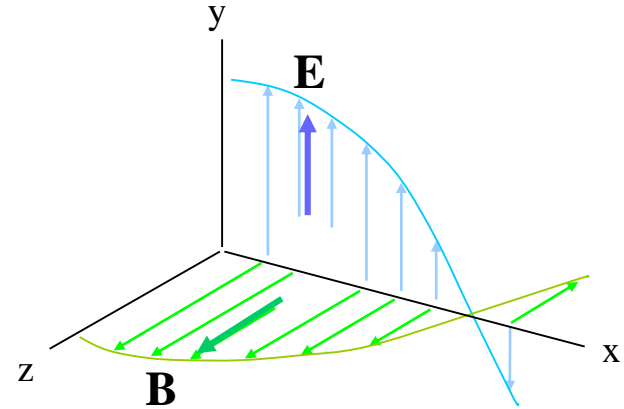
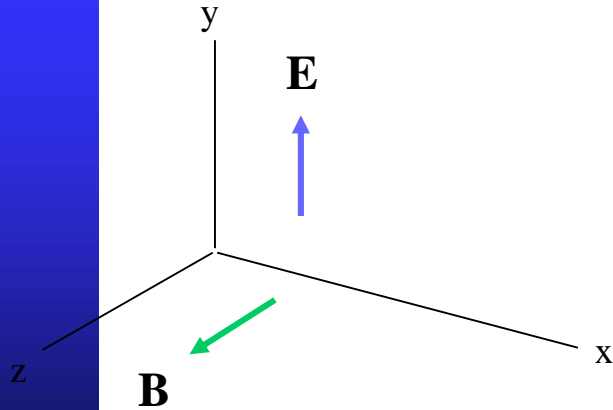
Analogicznie:

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

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

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 y}{dt^2}$$

Równanie falowe



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

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

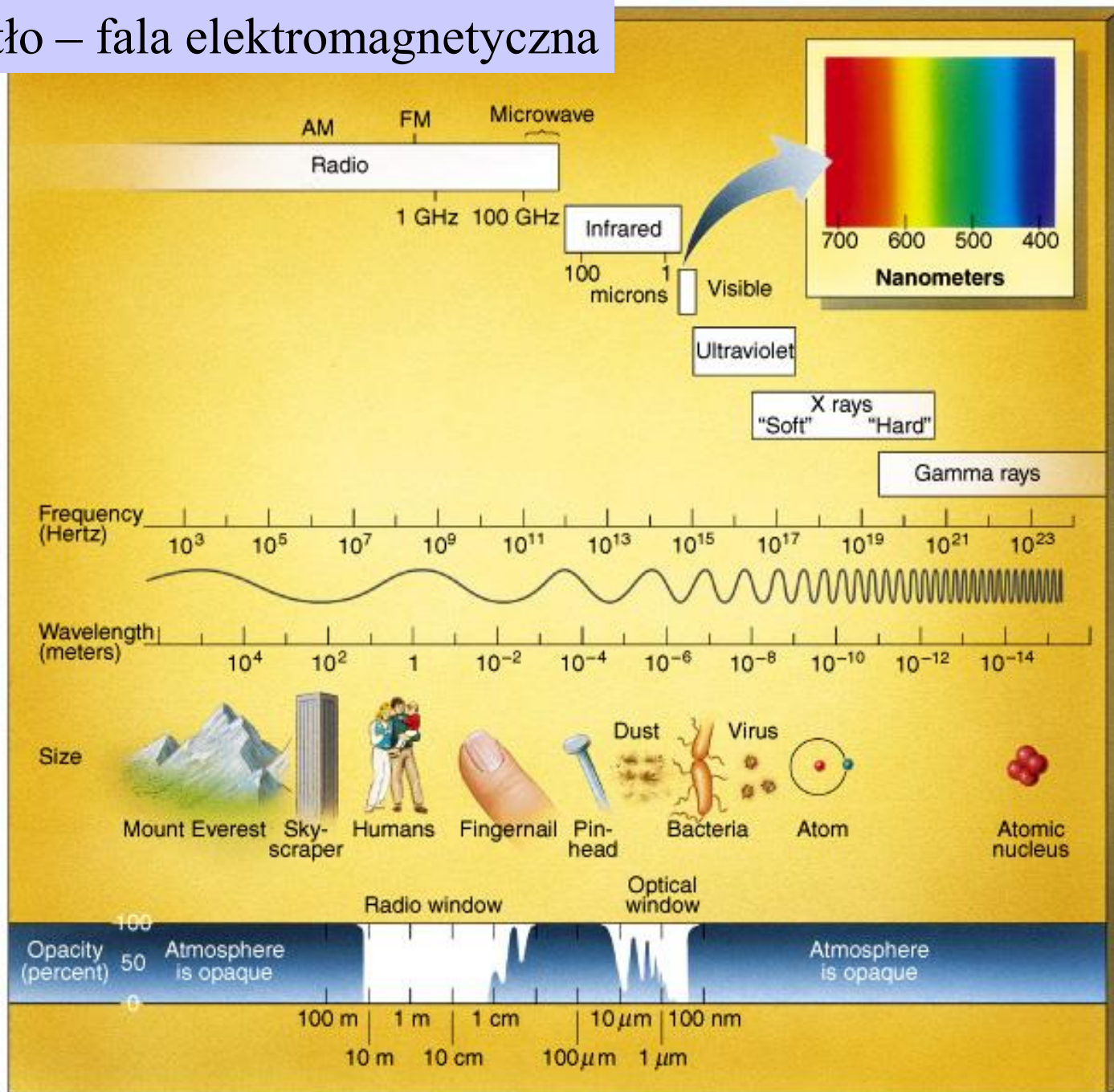
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 y}{dt^2}$$

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

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

**Prędkość fazowa fali elektromagnetycznej
równa jest prędkości światła!!**

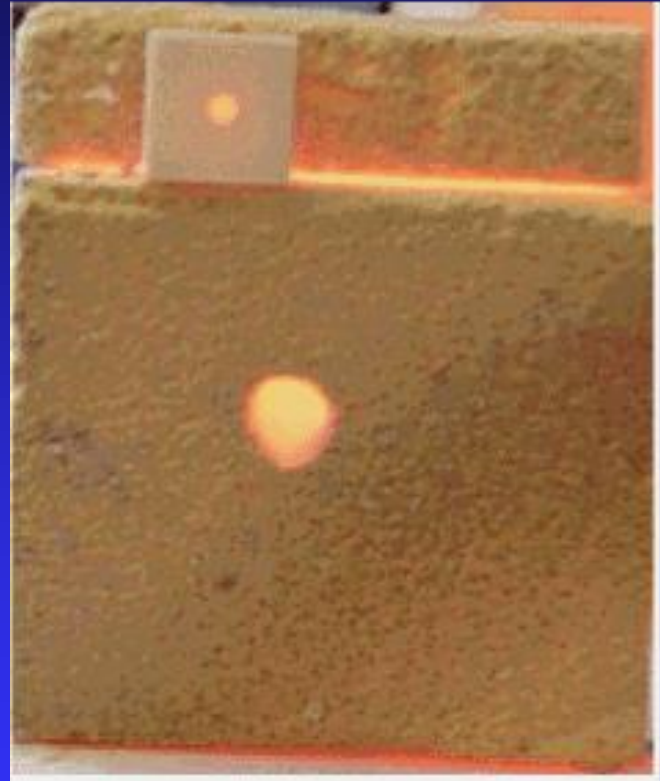
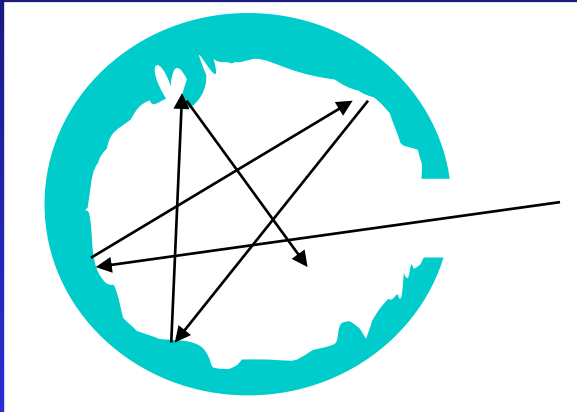
Światło – fala elektromagnetyczna



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
 - ◆ Jedyne 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



Prawa promieniowania CDC

- Prawo Wiena:

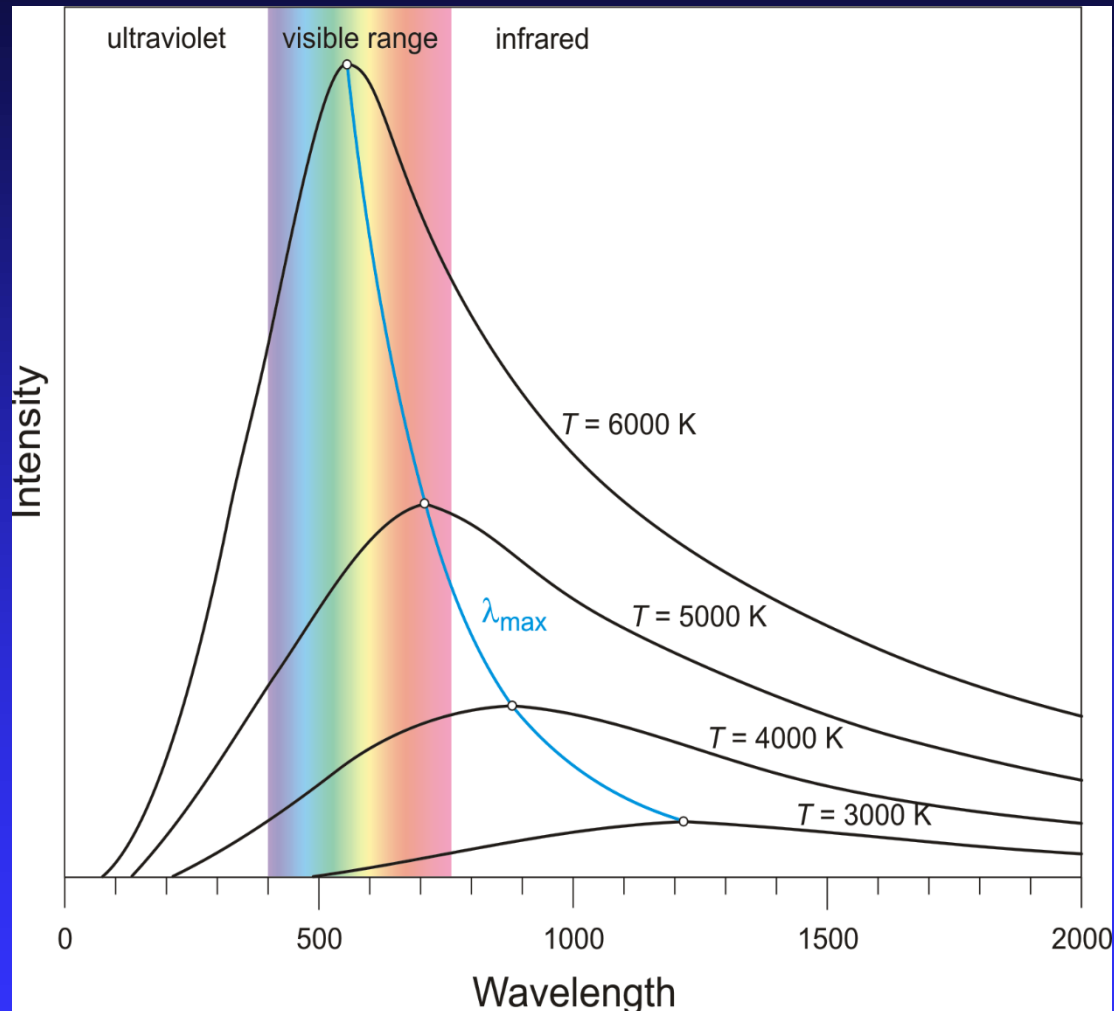
$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \mu\text{m K}$$

- 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

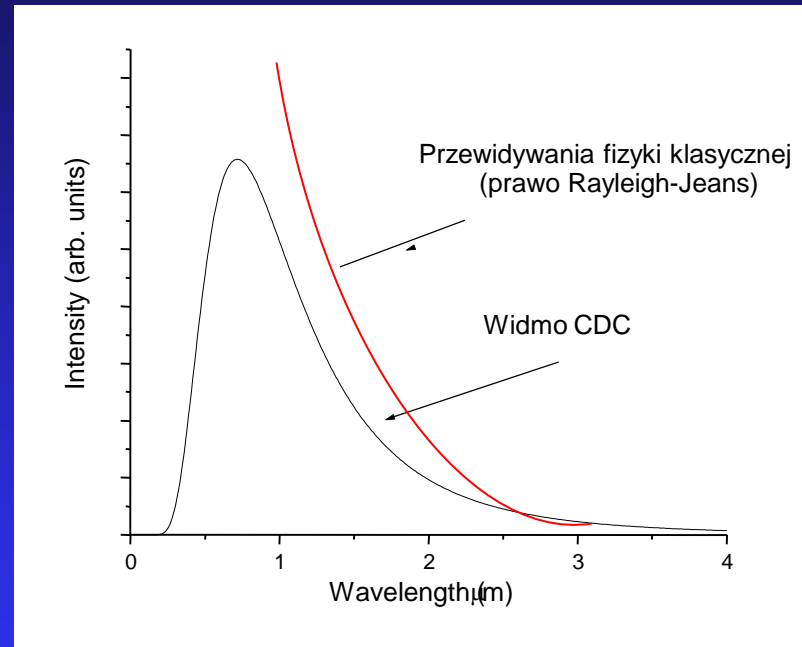
$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K} = 2898 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

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

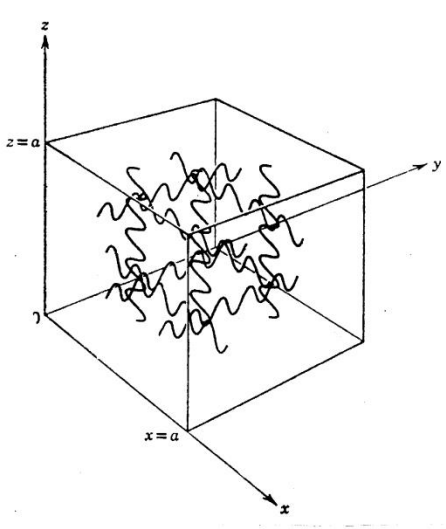
Promieniowanie CDC

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



$$e_{\nu} = \frac{2h\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \frac{1}{c^2}$$

Prawo Plancka

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

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

Stała Plancka $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

stała, którą Planck wyznaczył z dopasowania do danych eksperymentalnych; obecnie znana jako stała Plancka

Narodziny teorii kwantów

■ Założenia Maxa Plancka

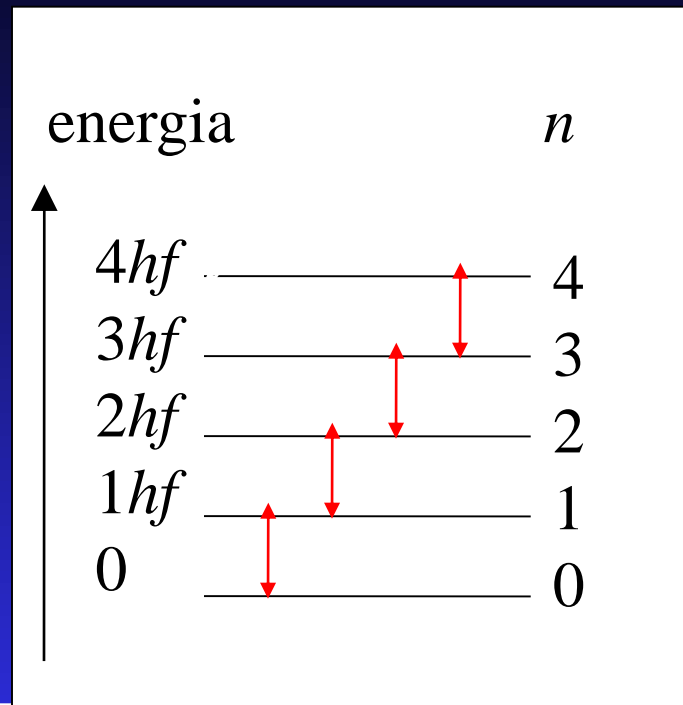
- ◆ Energia promieniowania jest związana z częstością promieniowania f wzorem:

$$E = nhf$$

- ◆ 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

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

- ◆ 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

$$E = hf$$