

# Podstawy fizyki – sezon 2

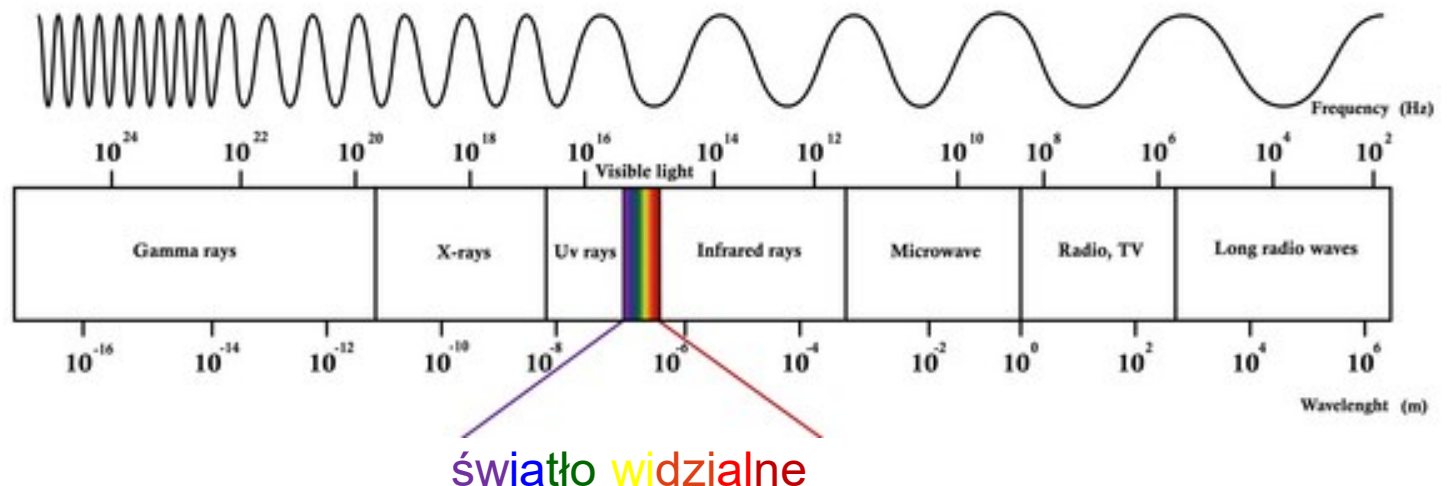
## **Światło i inne fale**

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,  
D11, pok. 106  
amucha@agh.edu.pl  
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

## Podsumowanie poprzedniego wykładu

- ▶ Poruszające się ładunki są źródłem pól: elektrycznego i magnetycznego.
- ▶ Pola te propagują się w przestrzeni w postaci **fali elektromagnetycznej**.
- ▶ Fala elektromagnetyczna jest falą **płaską**, poprzeczną, rozchodzącą się **prostopadle** do drgań pól elektrycznego i magnetycznego
- ▶ Falę elektromagnetyczną można **spolaryzować**.
- ▶ Fala ulega zjawisku **dyfrakcji i interferencji**.
- ▶ Fala elm obejmuje zakres od  $10^{-16}$  do  $10^6$  m, ale tylko niewielki fragment tego widma jest widzialny dla oka ludzkiego – o takiej fali elm mówimy „**światło**”



# OPTYKA

dział fizyki zajmujący się **ŚWIATŁEM**

**Światło** – fala elektromagnetyczna z zakresu widzialnego

## ŚWIATŁO



```
graph TD; A[ŚWIATŁO] --> B[Teoria falowa:]; A --> C[Teoria cząsteczkowa (korpuskularna):];
```

Teoria falowa:

- dyfrakcja
- interferencja
- polaryzacja

Teoria cząsteczkowa  
(korpuskularna):

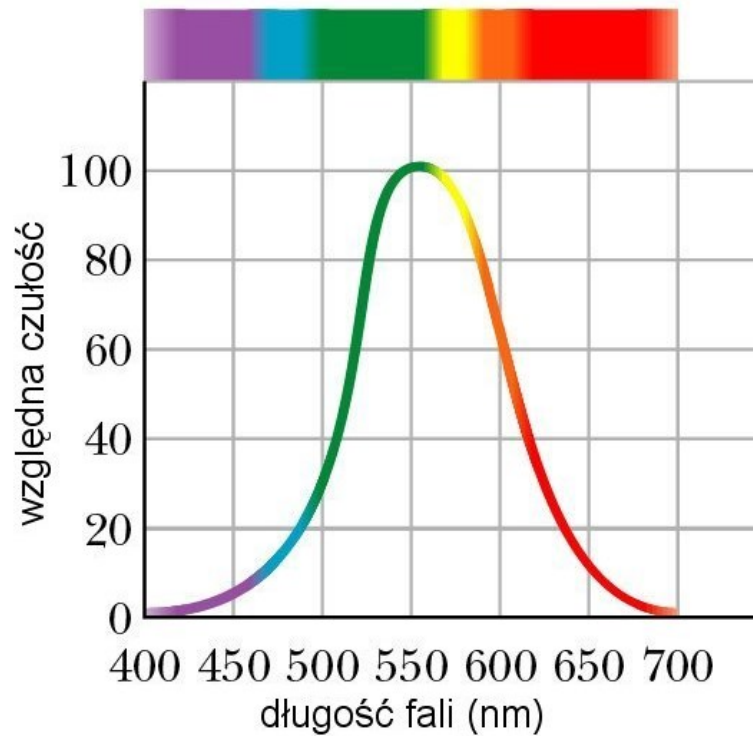
- zbiór cząstek, bezmasowych, ale o skwantowanym pędzie i energii:
- zjawisko fotoelektryczne (zewewnętrzne i wewnętrzne),
- efekt Comptona

Za czasów Maxwella znano fale elm:

- światło widzialne,
- promieniowanie podczerwone i nadfioletowe
- radiowe

## Widzenie barwne

Względna czułość oka ludzkiego



Obraz w oku powstaje na siatkówce oka → fotoreceptory: pręciki i czopki.

Pręciki rejestrują zmiany jasności, a dzięki czopkom możemy rozróżnić kolory.

Pręcik są bardziej czułe na światło niż czopki.

W oku znajdują się trzy rodzaje czopków, które są wrażliwe na trzy podstawowe barwy widmowe: **czerną**, **zieloną** i **niebieską**.

Naturalny sposób widzenia kolorowego **RGB** został wykorzystany w konstrukcji monitorów.

## Współczynnik załamania, droga optyczna

### Rozchodzenie się światła

Światło rozchodzi się w próżni z prędkością  $c$ .  
W ośrodkach materialnych prędkość światła jest mniejsza.

### bezwzględny współczynnik załamania

$$l = ct = c \frac{l_1}{v} = nl_1$$

$$n = \frac{c}{v}$$

iloczyn drogi geometrycznej  $l_1$  i współczynnika załamania  $n \rightarrow$  **droga optyczna**

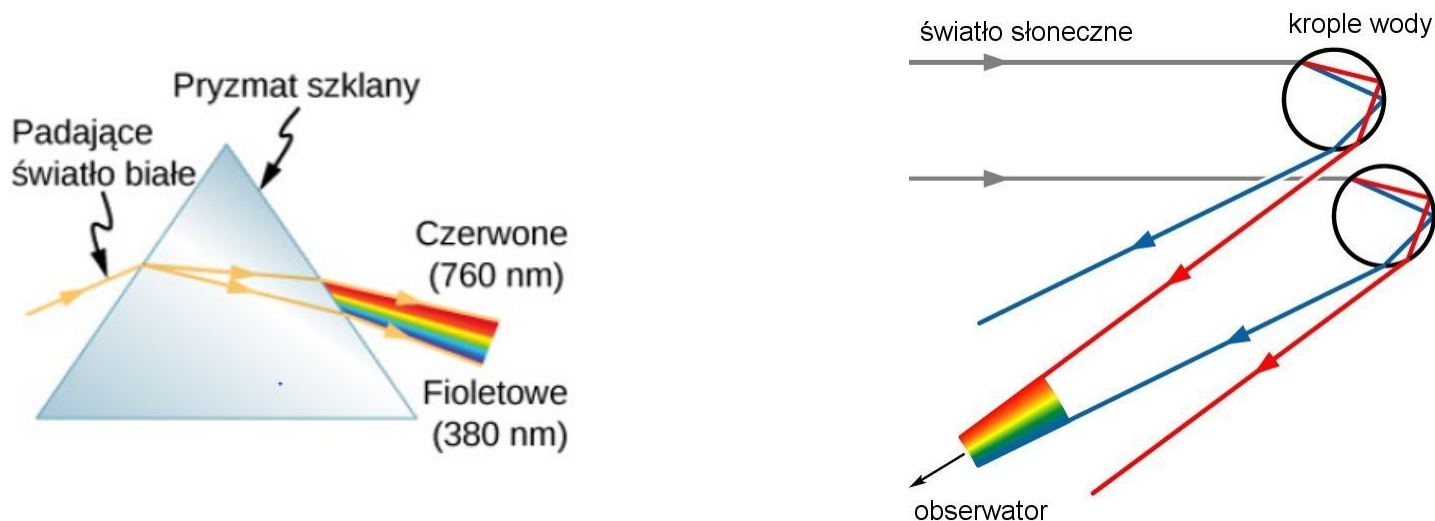


Bezwzględne współczynniki załamania  
(dla  $\lambda = 589 \text{ nm}$  - żółte światło sodu)

Ośrodek	Współczynnik załamania
powietrze	1.003
woda	1.33
alkohol etylowy	1.36
kwarc, topiony	1.46
szkło zwykłe	1.52
polietylen	1.52
szafir	1.77
diamant	2.42

## Dyspersja

- Jest to właściwość materiału: zależność prędkości fazowej fal (a zatem również współczynnika załamania) od częstotliwości lub długości fali -
- prędkość fali przechodzącej przez ośrodek zależy od częstotliwości światła.
- **Dyspersją światła** nazywamy zjawisko rozszczepienia światła złożonego na światło monochromatyczne.
- Dyspersja jest to również parametr określający liczbowo dyspersję materiału



Światło białe, złożone z fal o wszystkich długościach z zakresu widzialnego, ulega **rozszczepieniu**

Dla większości materiałów obserwujemy, że wraz ze wzrostem częstotliwości fali świetlnej maleje jej prędkość czyli rośnie współczynnik załamania

# Optyka geometryczna

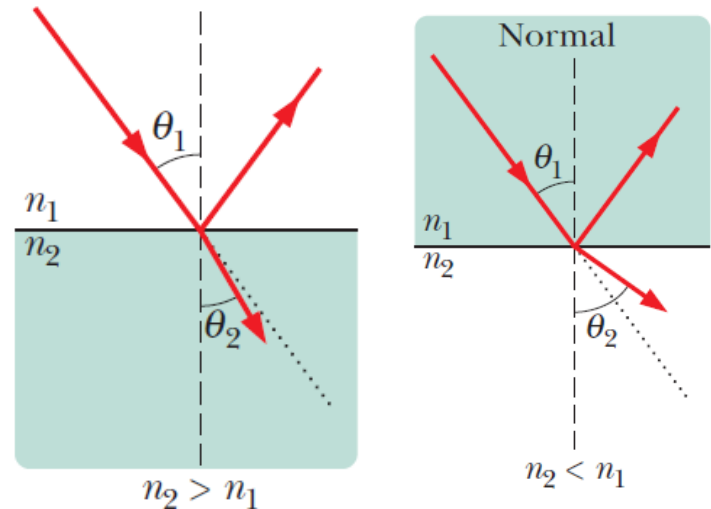
## ► Prawo odbicia i załamania:

- Promień padający, promień odbity i normalna do powierzchni granicznej wystawiona w punkcie padania promienia leżą w jednej płaszczyźnie i kąt padania równa się kątowi odbicia  $\theta_1 = \theta_2$ .
- Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest równy stosunkowi bezwzględnego współczynnika załamania ośrodka drugiego  $n_2$  do bezwzględnego współczynnika załamania ośrodka pierwszego  $n_1$ , czyli współczynnikowi względnemu załamania światła ośrodka drugiego względem pierwszego

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

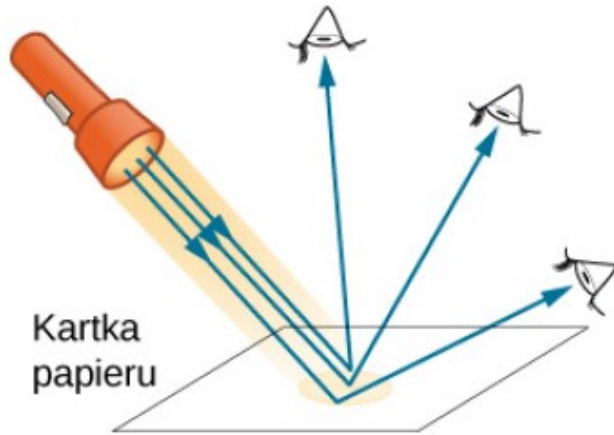
### Zasada Fermata:

Promień świetlny biegnący z jednego punktu do drugiego przebywa drogę, na której przebycie trzeba zużyć w porównaniu z innymi, sąsiednimi drogami, minimum albo maksimum czasu (kurs ratowników wodnych)

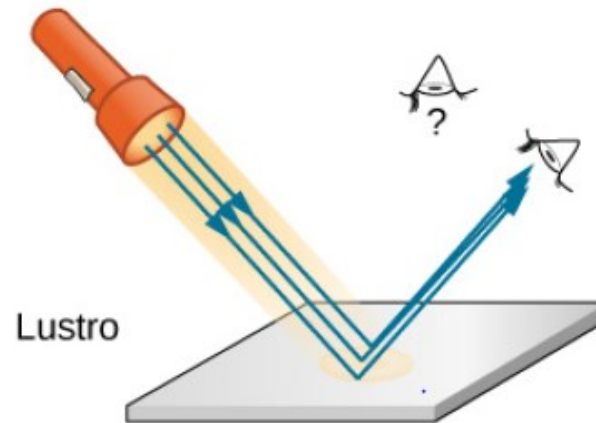


# Optyka geometryczna - odbicie

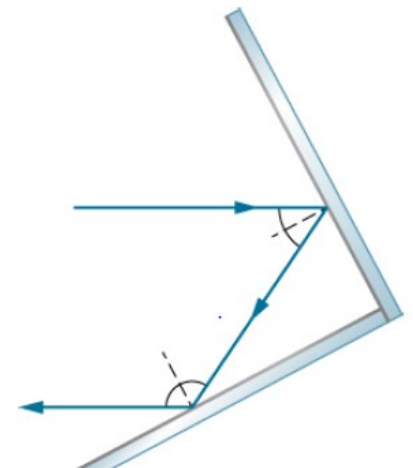
Światło odbija się od chropowatej powierzchni pod wieloma kątami



Światło odbija się od gładkiej powierzchni pod jednym kątem



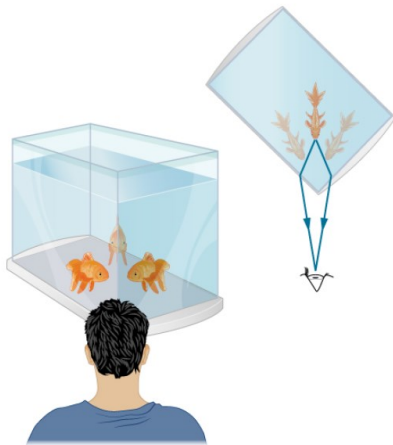
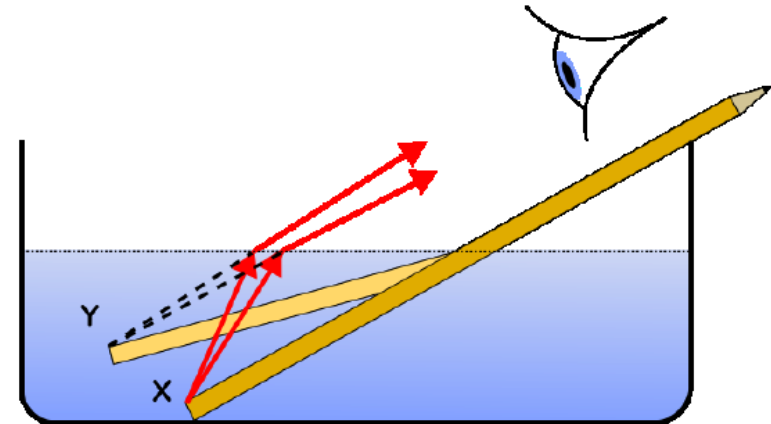
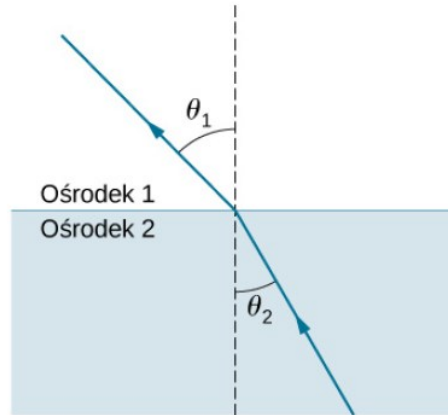
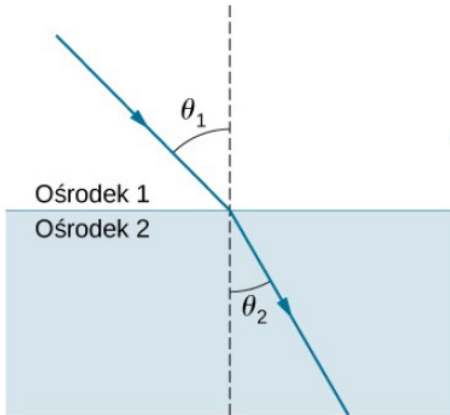
W światłach odblaskowych promień odbijany jest wstecznie, tzn pod takim kątem, żeby promień odbity był równoległy do padającego:





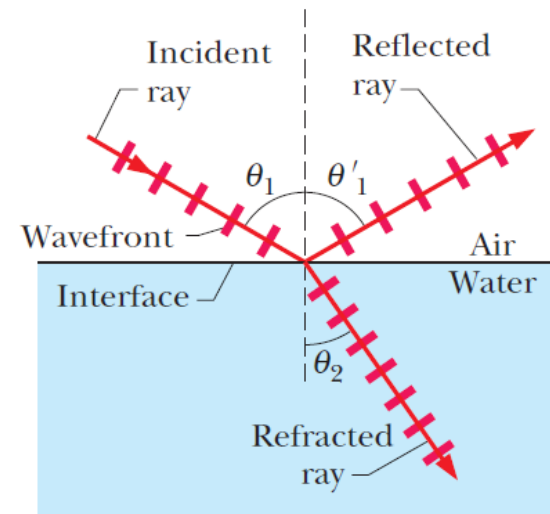
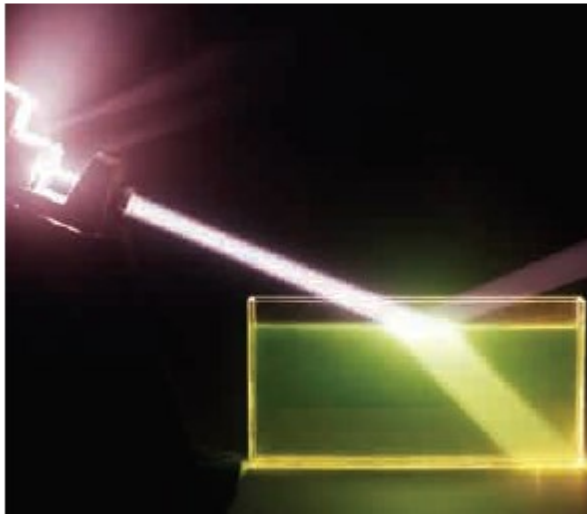
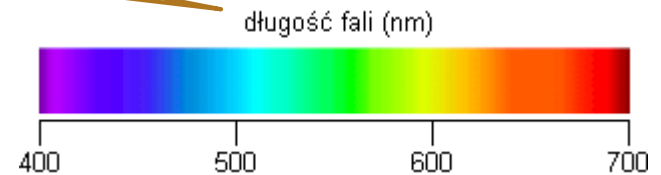
# Optyka geometryczna - załamanie

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$



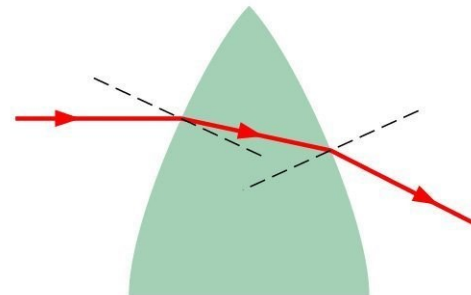
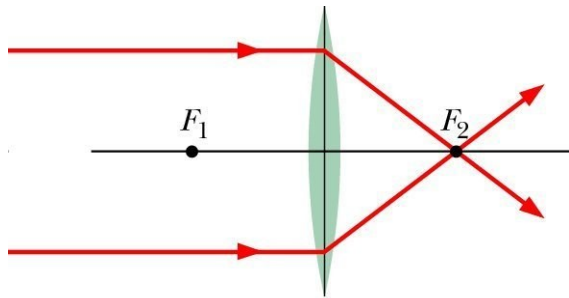
# Odbicie fali

- ▶ Falę elektromagnetyczną opisujemy za pomocą promieni – prostych odcinków w kierunku rozchodzenia się fali – w ten sposób opisujemy zjawiska **optyki geometrycznej**.
- ▶ Światło (mówimy tu o zakresie **widzialnym fali elm**) natrafiając na granicę ośrodków może ulec odbiciu lub załamaniu

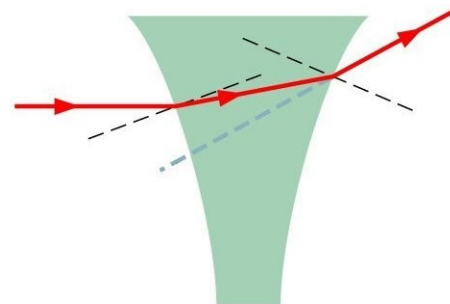
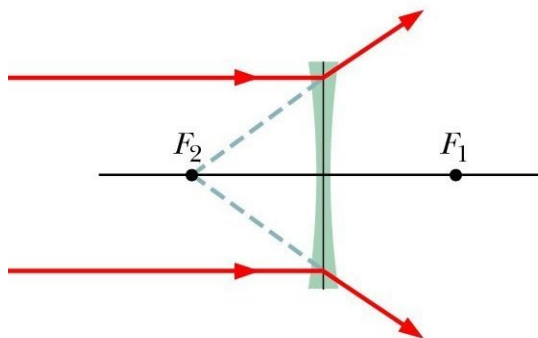


# Optyka geometryczna – soczewki

- Prawa odbicia i załamania stosują się również do kulistych powierzchni odbijających (z zwierciadeł kulistych) i kulistych powierzchni załamujących (soczewek).
- Soczewkami nazywamy ciała przezroczyste ograniczone dwoma powierzchniami o promieniach krzywizn  $R_1$  i  $R_2$ .

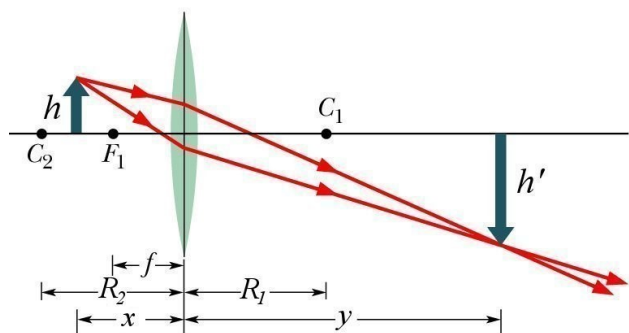


soczewka skupiająca

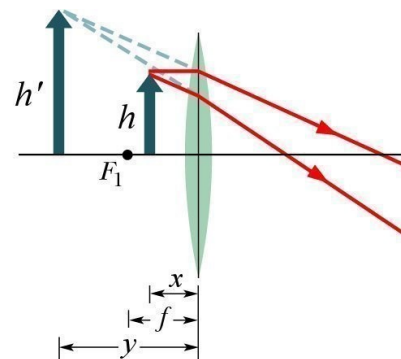


soczewka rozpraszająca

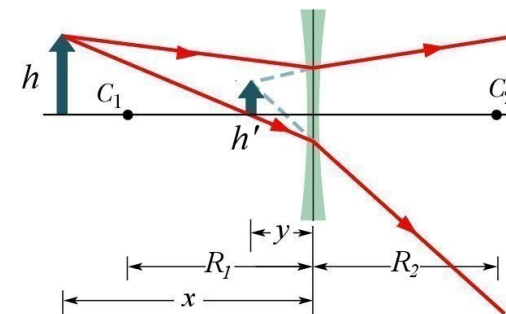
# Optyka geometryczna – soczewki



(a)



(b)



(c)

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n}{n_o} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$n$  - współczynnik załamania materiału z jakiego wykonano soczewkę  
 $n_o$  - współczynnik załamania ośrodka

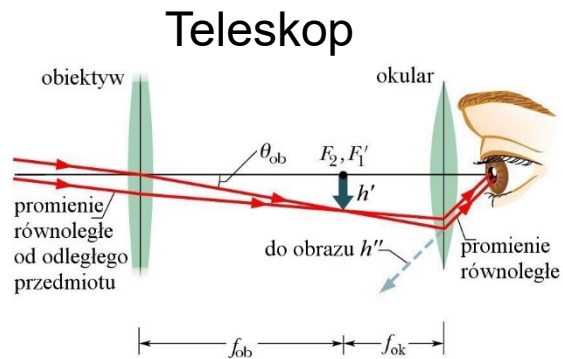
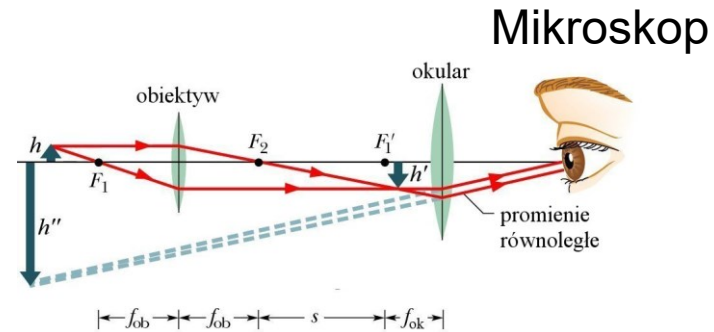
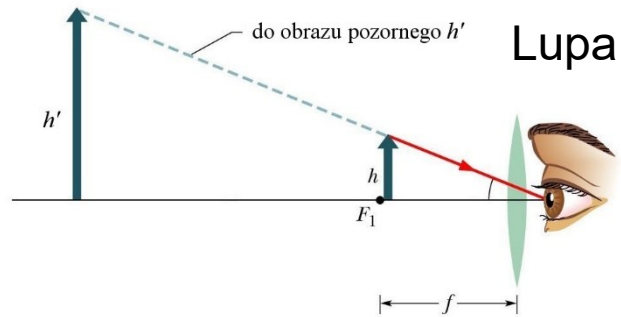
$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

$f > 0 \rightarrow$  soczewka skupiająca,  $f < 0 \rightarrow$  soczewka rozpraszająca

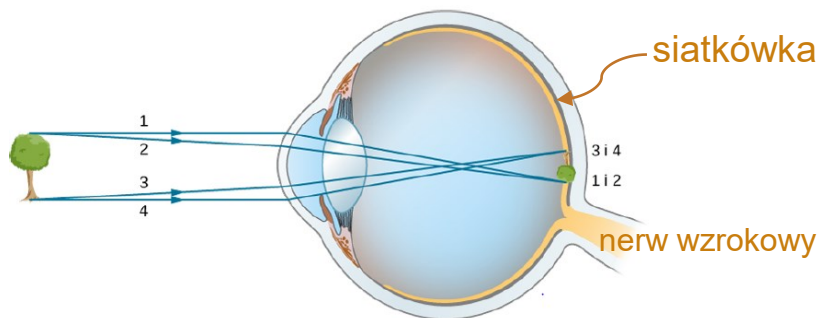
$$P = \frac{h'}{h} = \left| \frac{y}{x} \right|$$

powiększenie

# Optyka geometryczna – przyrządy optyczne

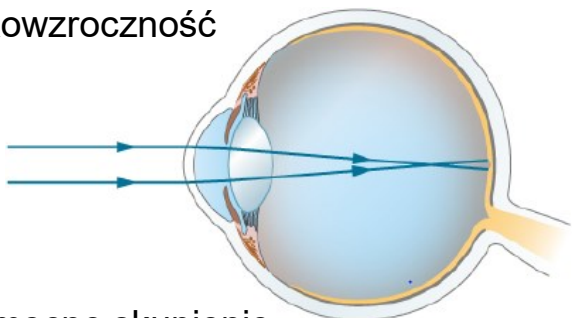


# Optyka geometryczna – fizyka oka

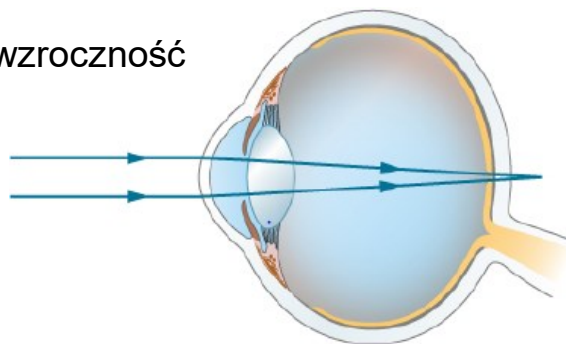


Obraz musi padać na siatkówkę, ale skoro widzimy wyraźnie przedmioty w różnej odległości (a odległość przedmiotu od siatkówki nie zmienia się), tzn, że zmienia się ogniskowa soczewki (**akomodacja oka**)

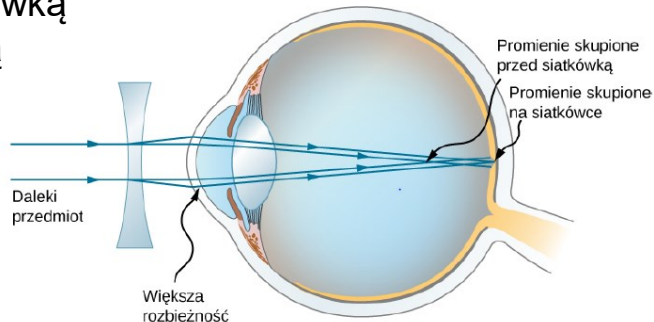
Krótkowzroczność



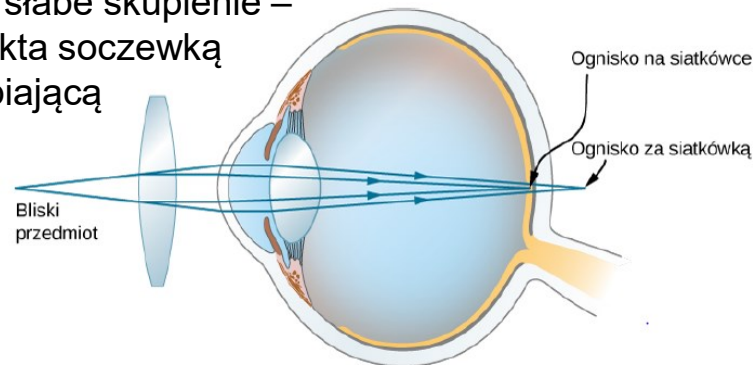
Dalekowzroczność



zbyt mocne skupienie –  
korekta soczewką  
rozpraszającą



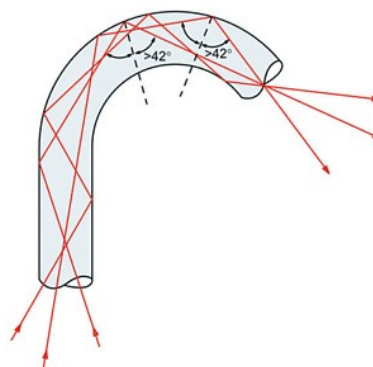
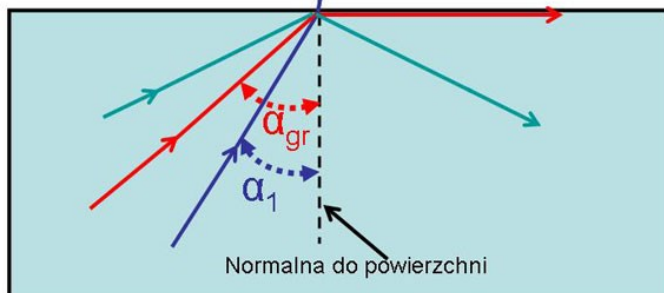
zbyt słabe skupienie –  
korekta soczewką  
skupiającą



# Całkowite wewnętrzne odbicie

- ▶ Całkowite wewnętrzne odbicie - światło padające na granicę od strony ośrodka o wyższym współczynniku załamania pod kątem większym niż kąt graniczny, nie przechodzi do drugiego ośrodka, lecz ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

$$n_2 \sin \alpha_{gr} = n_1 \sin \frac{\pi}{2}$$

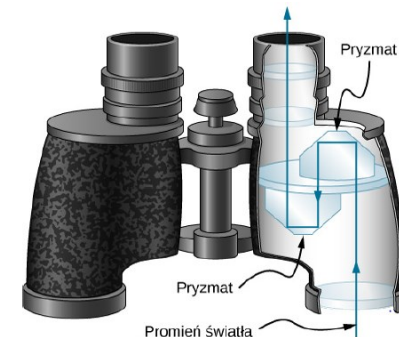


światłowody



# Kurs nurkowy

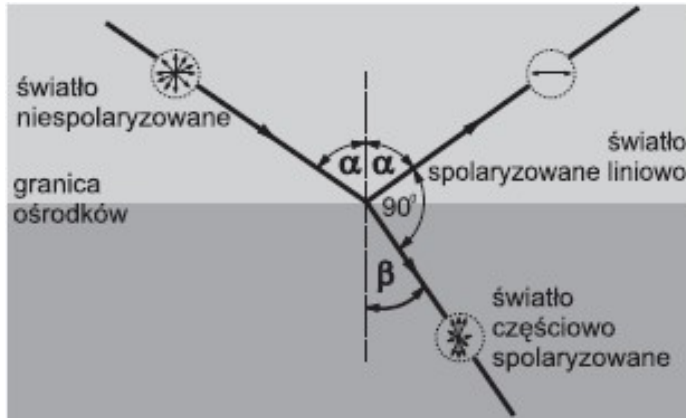
- ▶ Obszar o kącie mniejszym niż kąt graniczny nazywany jest stożkiem widzialności, (bo wycina w wodzie bryłę w kształcie stożka), w tym obszarze możemy widzieć, co znajduje się nad wodą.





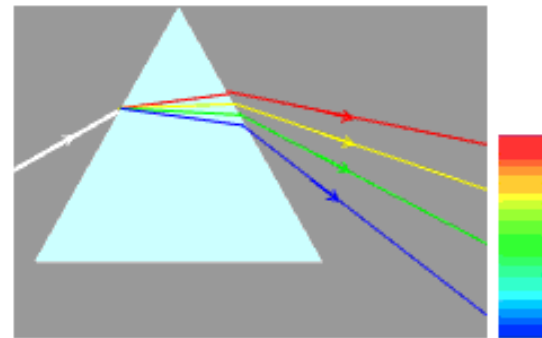
# Rozszczepienie światła

- ▶ Światło **odbite** jest częściowo **spolaryzowane**:



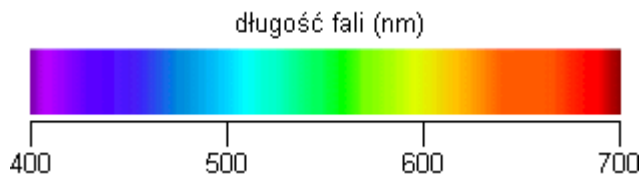
W okularach - filtry polaryzacyjne, nie przepuszczają odbłasków – większy kontrast.

- ▶ Światło o widmie składającym się z różnych długości fali, przechodząc do drugiego (gęstszego) ośrodka ulega **rozszczepieniu**:



# Rozpraszanie światła

- ▶ Światło **przechodząc przez materię** oddziałuje z cząstkami ośrodka, np. poprzez proces **rozpraszania**:
  - oświetlony ośrodek materialny staje się **wtórny źródłem światła emitowanego we wszystkich możliwych kierunkach**,
  - fala elm oddziałując z materią powoduje jej drgania i wypromieniowanie wtórnych fal elm. – promieniowanie rozproszone
  - może występować w ośrodkach z niejednorodnościami o rozmiarach porównywalnych z długością fali (jest to oddziaływanie elektromagnetyczne pola z elektronami w atomach i cząsteczkach – wymuszenie drgań i wtórna emisja fali),
  - **rozpraszanie Rayleigha** – natężenie światła rozproszonego  $I \sim \lambda^{-4}$



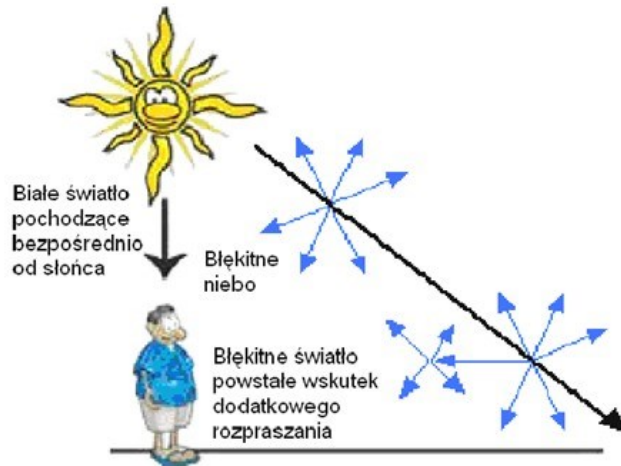
oznacza to, że przy rozproszeniu światła widzialnego, najkrótsze fale, czyli niebieskie i fioletowe, mają największe natężenia...

# Rozpraszanie światła

Niebo jest niebieskie, niebieska poświata odległych obiektów:

$$I \sim \lambda^{-4}$$

- w świetle słonecznym przechodzącym przez atmosferę najsilniej rozpraszana jest składowa fioletowa i niebieska (najkrótsza długość),
- ale natężenie promieniowanie fioletowego jest względnie małe, a oko jest na niego słabo czułe – pozostaje część widma o barwie niebieskiej.
- barwa niebieska jest rozproszona we wszystkich kierunkach – dlatego, gdziekolwiek nie popatrzymy na niebo, widać niebieskie światło

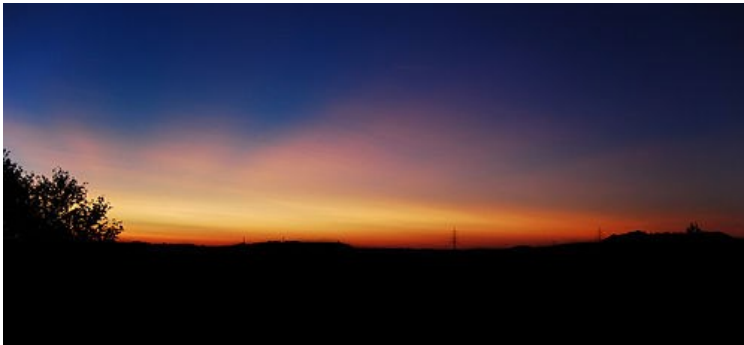


# Rozpraszanie światła

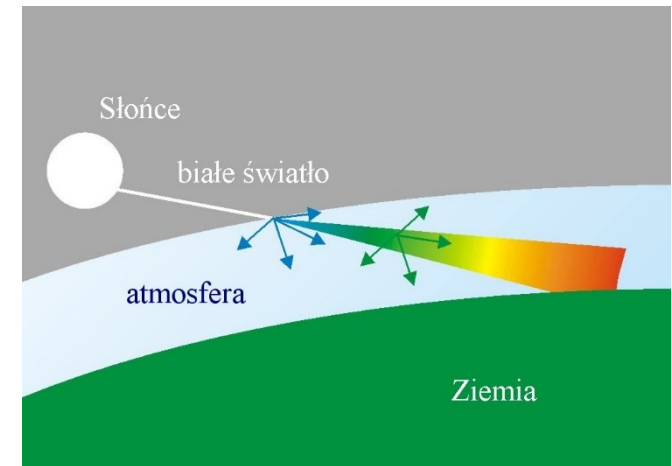
$$I \sim \lambda^{-4}$$

Słońce zachodzi i wschodzi na czerwono –

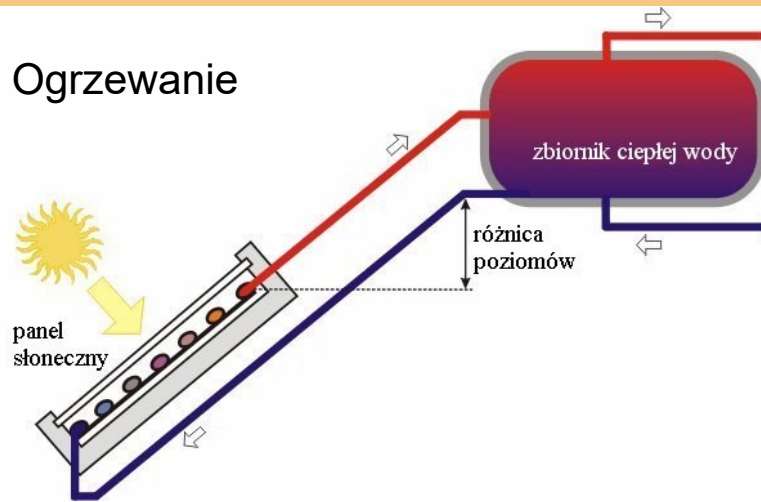
- najdłuższa droga promienia, największe osłabienie wiązki, ale najmniej czerwone (bo fala najdłuższa),
- światło zielone, niebieskie i fioletowe rozprasza się bardziej na zanieczyszczeniach niż żółte i czerwone,



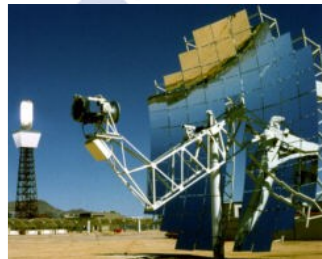
- gdy powietrze jest zanieczyszczone drobnymi cząsteczkami, widmo jest przesunięte w kierunku czerwieni. Im więcej zanieczyszczeń, tym barwa ciemniejsza.



# Absorpcja światła



## Produkcja energii elektrycznej

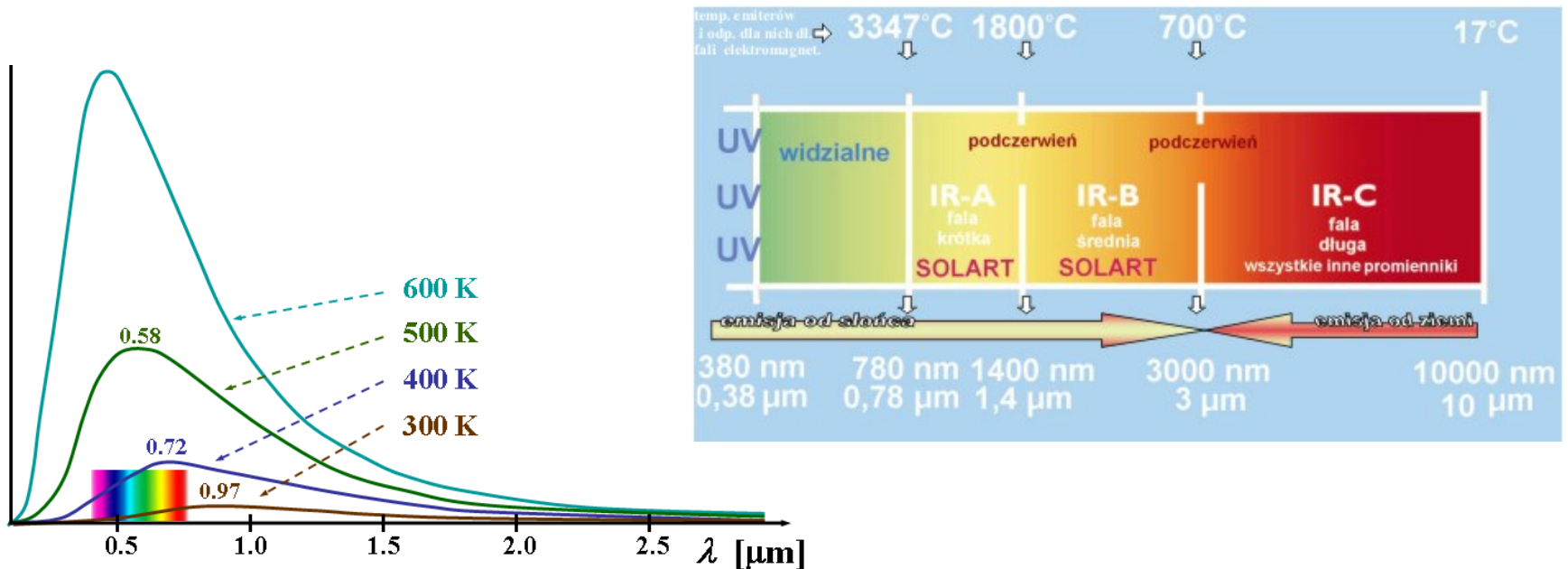


## fotosynteza



# Promieniowanie ciepłe

- ▶ Powierzchnia ciała o dowolnej temperaturze wysyła promieniowanie (podczerwone, termiczne) o szerokim widmie długości fal.
- ▶ Niewielki fragment tego widma jest widzialny dla oka.

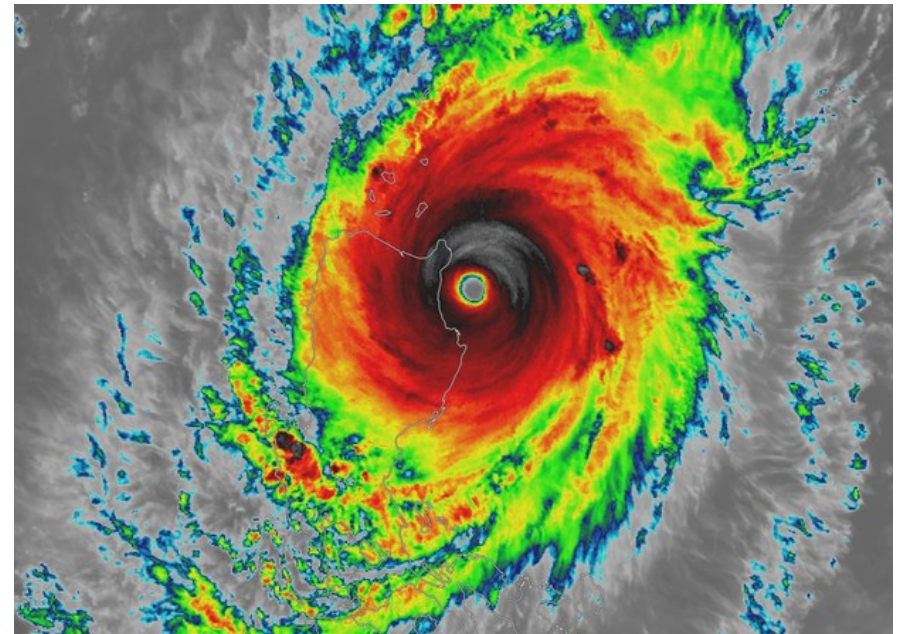
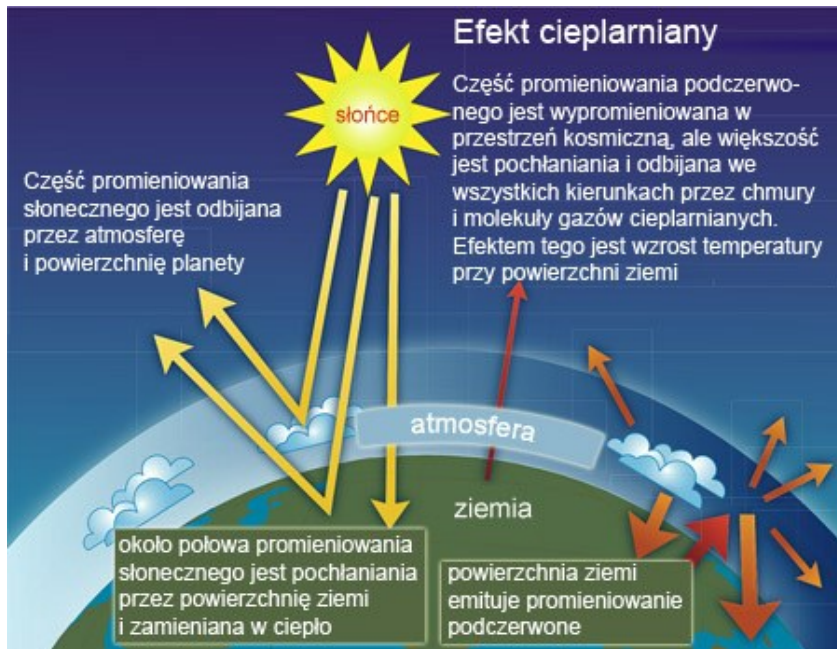


# Promieniowanie ciepłe

- ▶ **Promieniowanie ciepłe (podczerwone**, temperaturowe, termiczne) – jest to promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez cząstki (naładowane elektrycznie – przypominam antenę!) w wyniku ich ruchu termicznego w materii. Prom. ciepłe emitują ciała w temp powyżej zera bezwzględnego.
- ▶ W zależności od temperatury ciała w promieniowaniu cieplnym dominować może promieniowanie o różnej długości fal (od kwantów gamma w przypadku wczesnego wszechświata do mikrofal w przypadku ciał o temperaturze kilku K, najczęściej jest to jednak promieniowanie podczerwone lub światło).
- ▶ Promieniowanie podczerwone jest silnie pochłaniane przez niektóre składniki atmosfery np. parę wodną i dwutlenek węgla. Długości od 14 mm do 1500 mm atmosfera w ogóle nie przepuszcza i dzięki temu stanowi swojego rodzaju płaszcz ochronny Ziemi, zabezpieczający planetę przed zbytnim ochłodzeniem.

# Promieniowanie ciepłe

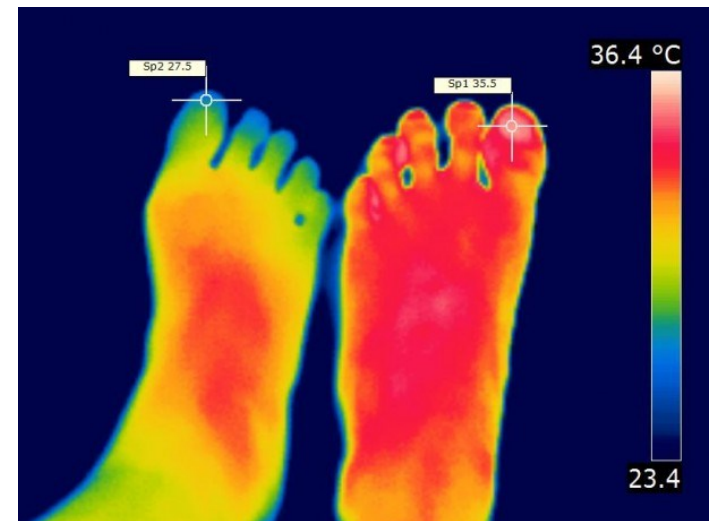
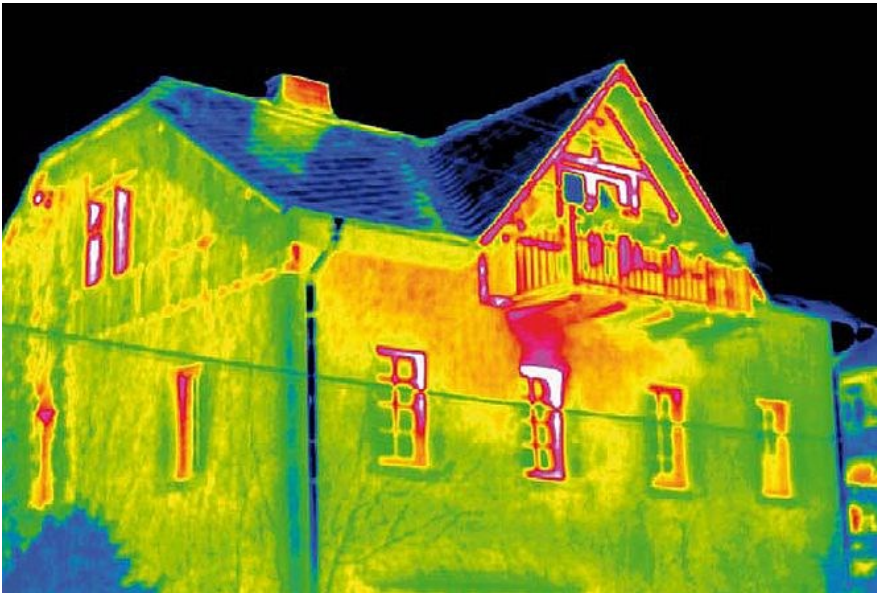
- ▶ Wykorzystuje się je w badaniach strukturalnych (spektroskopia widma cząsteczek organicznych), w lecznictwie (diatermia), biologii (badania mikroskopowe w podczerwieni) także do obserwacji w ciemności (noktowizor, czujniki alarmowe).
- ▶ Znacznie słabsze rozpraszanie promieniowania podczerwonego w porównaniu ze światłem widzialnym ułatwia dokładne fotografowanie obiektów przez mgłę i dym. Zdjęcia satelitarne również są na ogół wykonywane w podczerwieni.





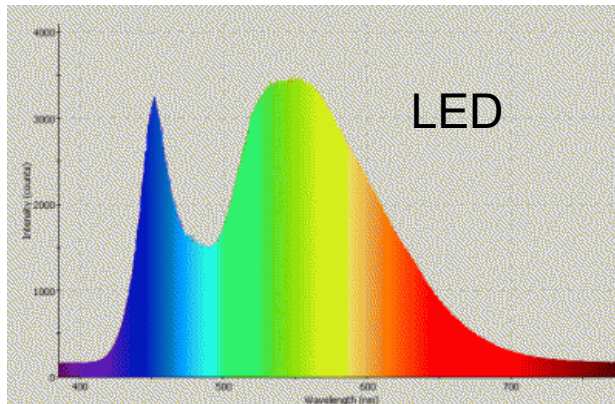
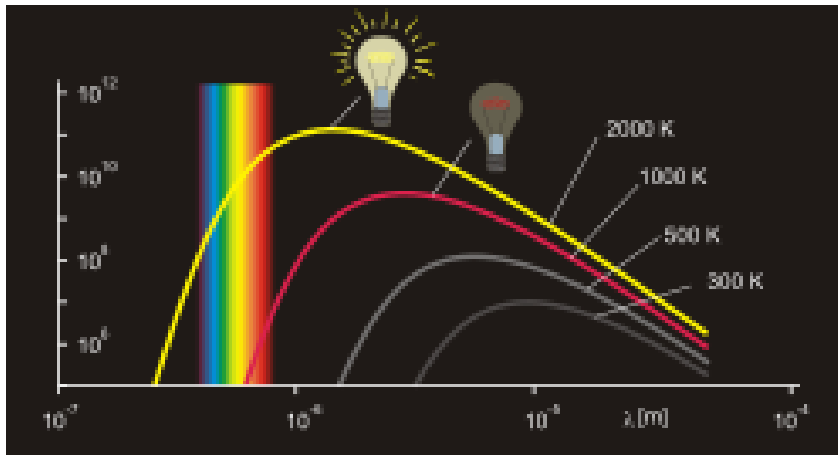
# Termowizja

- ▶ Obrazy kamerą termowizyjną – inżynieria budowlana i medycyna



# Sztuczne źródła światła

- ▶ Tradycyjna żarnikowa żarówka wytwarza głównie promieniowanie w paśmie podczerwieni (bardziej grzeje niż świeci)



Spectra From Common Sources of Visible Light

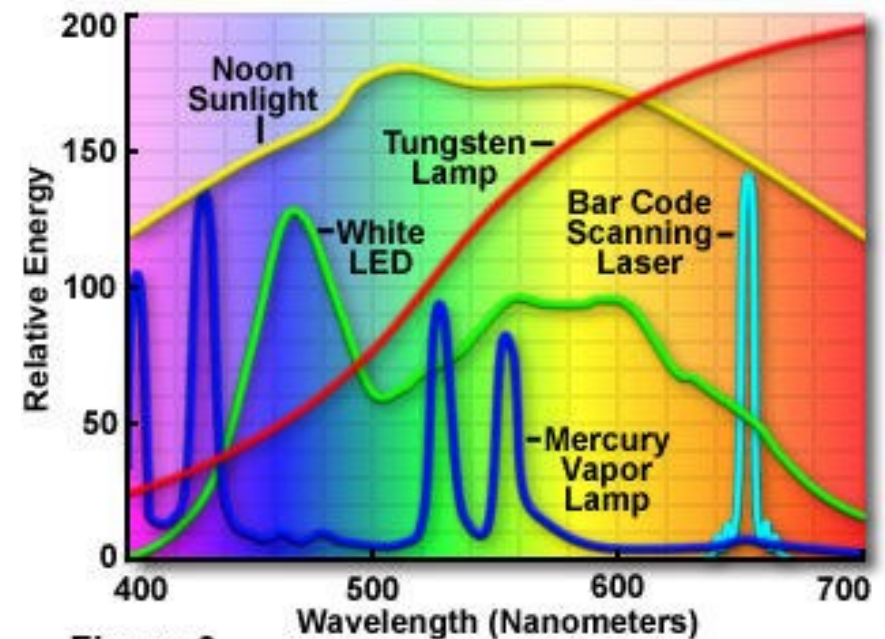
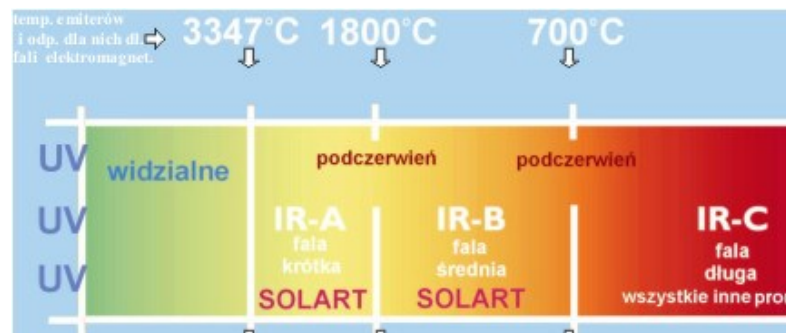


Figure 3

# Sztuczne źródła światła

## ► Parametry żarówek

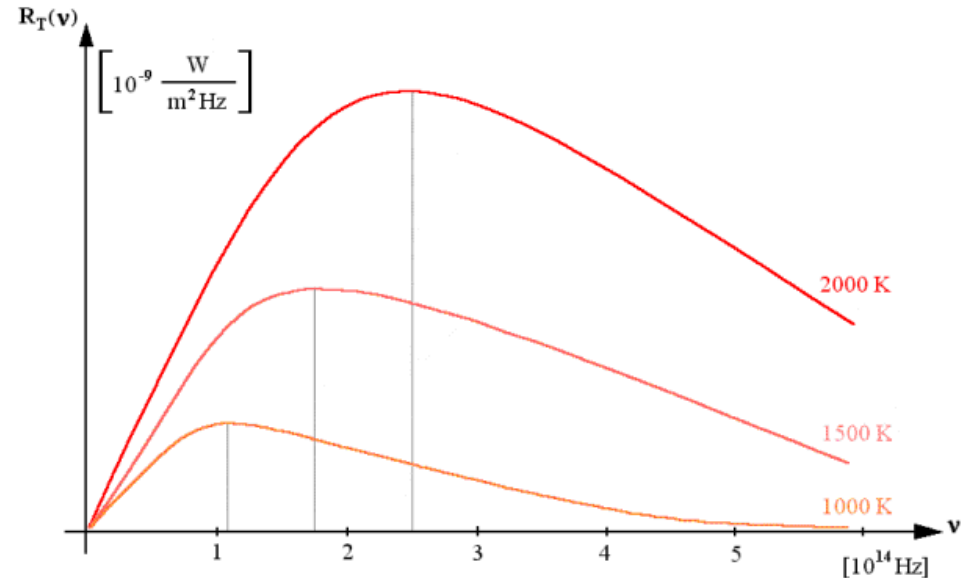
Parametr	żarówka	żarówka halogenowa	zintegrowana świetlówka kompaktowa	LED
trwałość	1000h	2000-5000h	6000-15000h	30000-50000h
temperatura barwowa	2856K	3000-4000K	2800-4000K	różne temperatury i barwy światła
wskaźnik oddawana barw	100	100	zazwyczaj większy niż 80	różne wartości; są wersje o wskaźniku większym niż 80
dostępne moce	od kilku do kilkuset wat	od kilku do kilkuset wat	od kilku do kilkudziesięciu wat	od mniej niż 1 wat do kilkunastu watów
oszczędność w porównaniu z żarówką	-	około 50% dla nowoczesnych konstrukcji	około 80%	około 80%



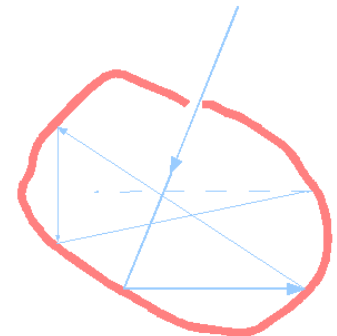
# Własności promieniowania cieplnego (podczerwonego)

- ▶ Wykres zdolności emisyjnej ciała  $R_T(\nu)$  :

- maksimum, które przesuwa się ze wzrostem temperatury, położenie tego maksimum prawie nie zależy od rodzaju powierzchni
- zarówno dla długich, jak i dla krótkich fal dąży do zera.



- ▶ Do opisu emisji termicznej wprowadza się wzorcowy model – **ciało doskonale czarne** (takie, które pochłania całe padające na niego promieniowanie)



# Promieniowanie ciała doskonale czarnego

- ▶ Krzywa  $R_T(\nu)$  została bardzo dokładnie zbadana doświadczalnie:
  - prawo Stefana- Boltzmana – całkowita zdolność emisyjna c.d.cz.:

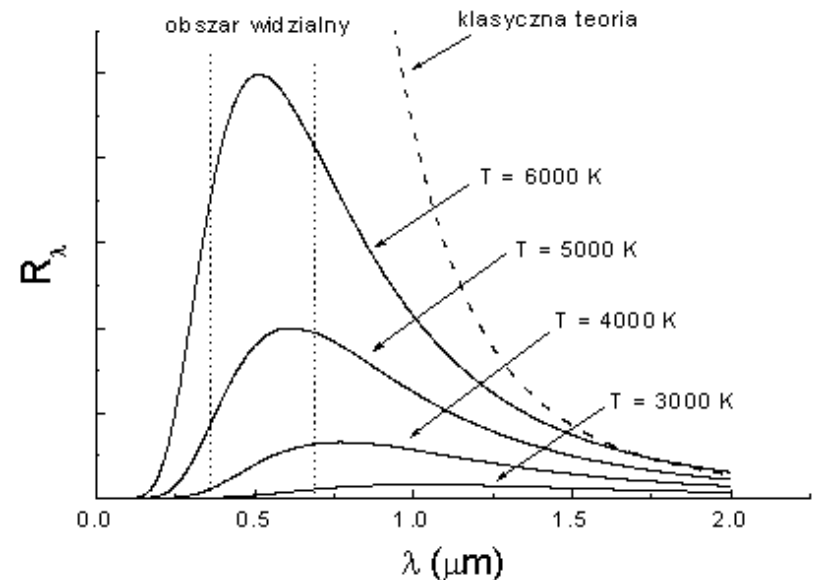
$$R = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- Prawo przesunięć Wienna:

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

I okazało się, że wyniki nie pasują do klasycznej teorii falowej (katastrofa w podczerwieni, nadfiolecie) –

- w granicy wyższych długości (niskich częstotliwości) - wyniki zgodne
- dla wysokich częstotliwości teoria przewiduje wzrost zdolności emisyjnej do nieskończoności



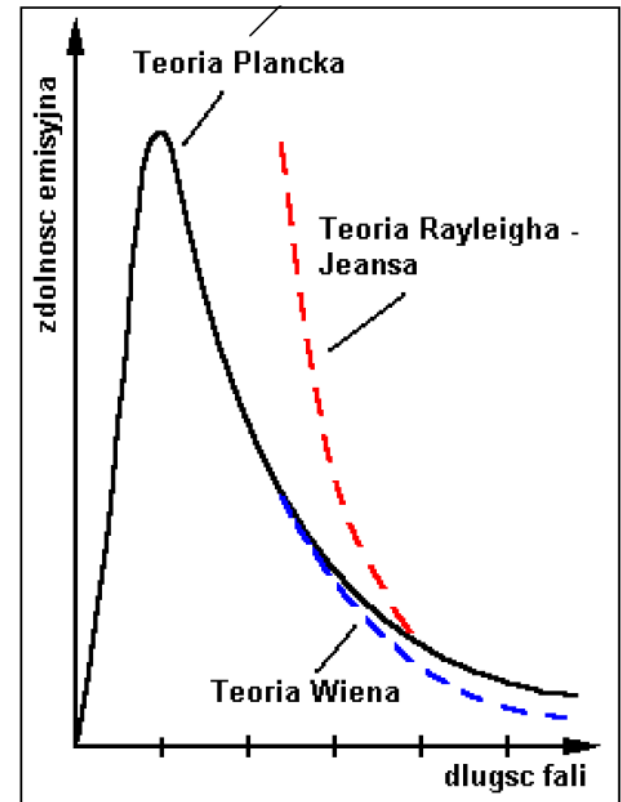
# Teoria Plancka (1900)

- ▶ Musimy przyjąć założenie, że promieniowanie elektromagnetyczne emitowane i absorbowane jest w postaci osobnych porcji energii (kwantów) o wartości:

$$E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

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

**Wzór Plancka** – rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego, zgodny z doświadczeniem

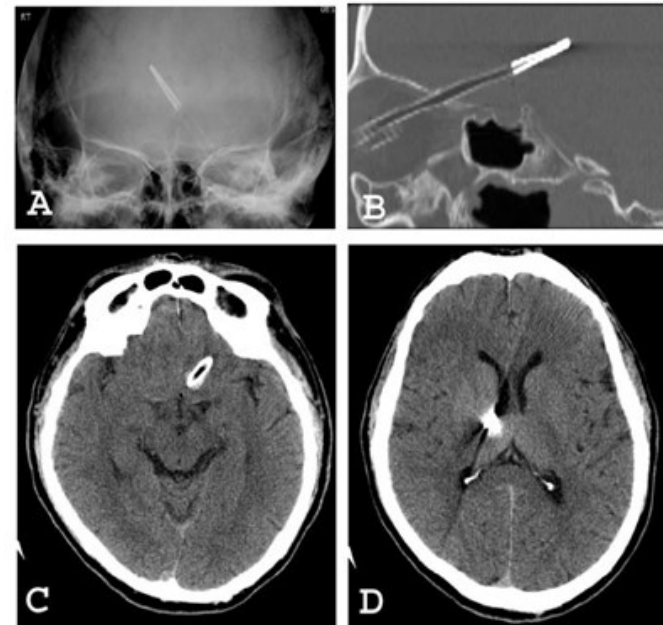
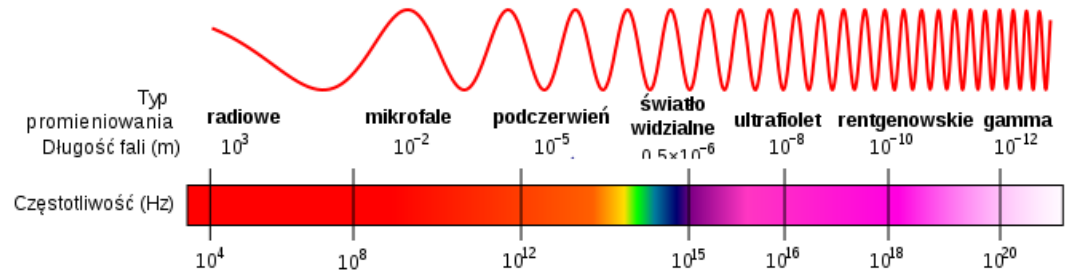


# Promieniowanie X

- ▶ Promieniowanie X (Roentgena, hamowania, bremstrahlung, synchrotronowe)

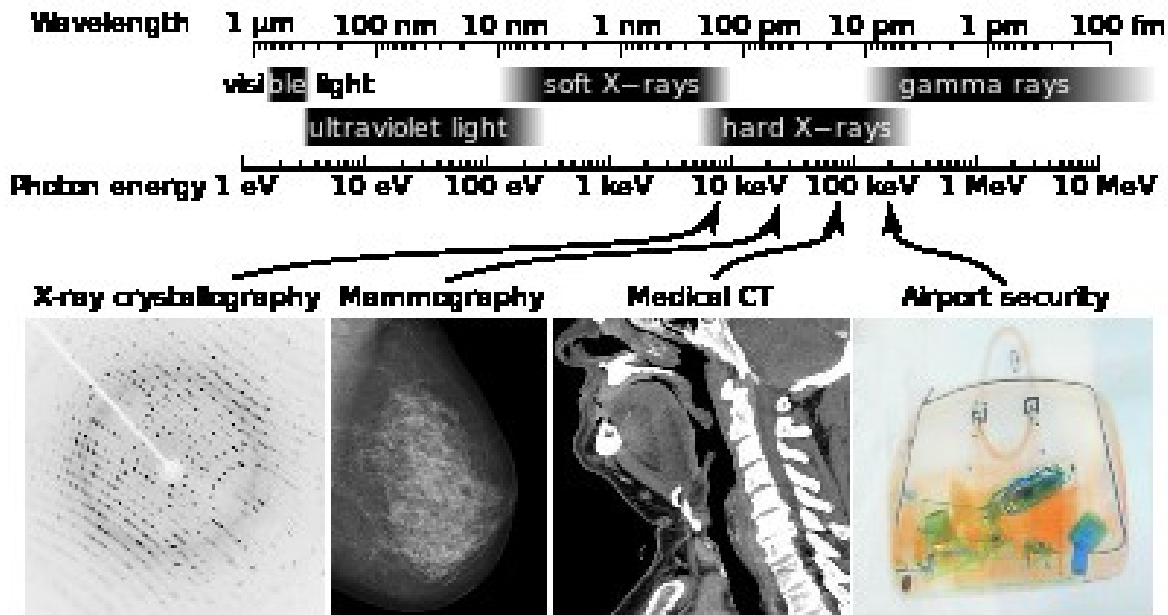
1896

tomografia komputerowa > 2000 rok



# Promieniowanie X

1. Promieniowanie X (rentgenowskie) jest to promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez elektrony, które zmieniają energię.
2. Zmiana energii może być spowodowana wyhamowaniem w ciężkim materiale lub przy zmianie poziomu energetycznego w atomie.



Zakres: długość fali od 10pm (twarde, energia rzędu GeV) do 10nm (miękkie promieniowanie, energia keV)



# Promieniowanie X

## ► Promieniowanie X:

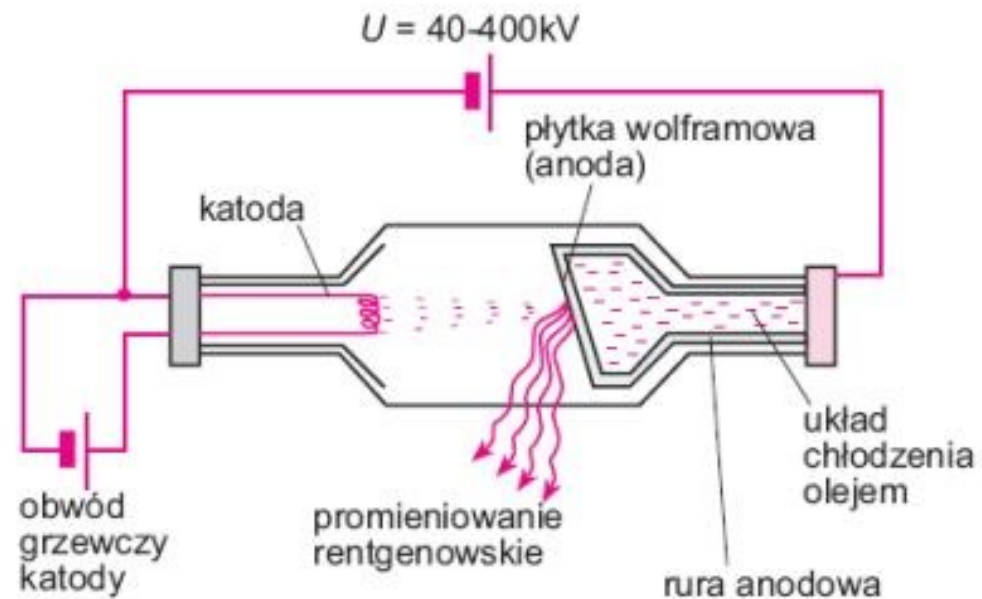
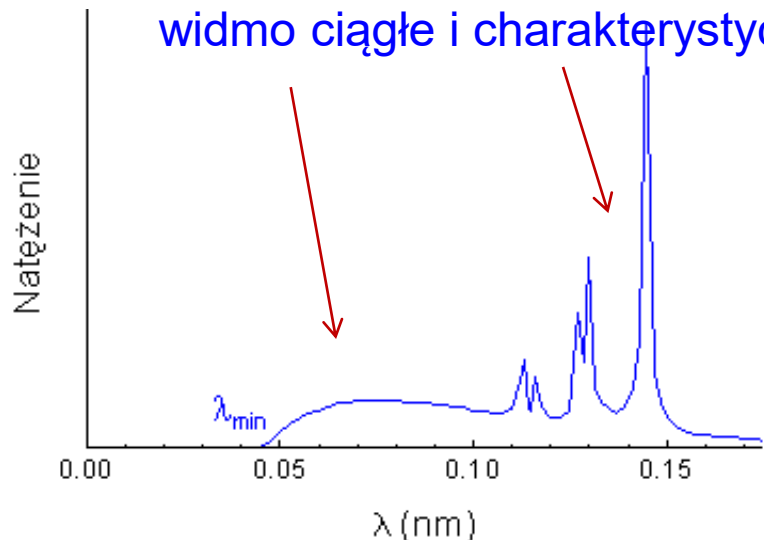
- elektrony wytwarzane są na katodzie,
- przyspieszane w polu elektrycznym do energii kilkuset keV,
- hamowane na ciężkiej tarczy

- Energia hamowania wypromieniowana zostaje w postaci promieniowania o energii keV (długości fali nm).

$$eU = h\nu_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}}$$

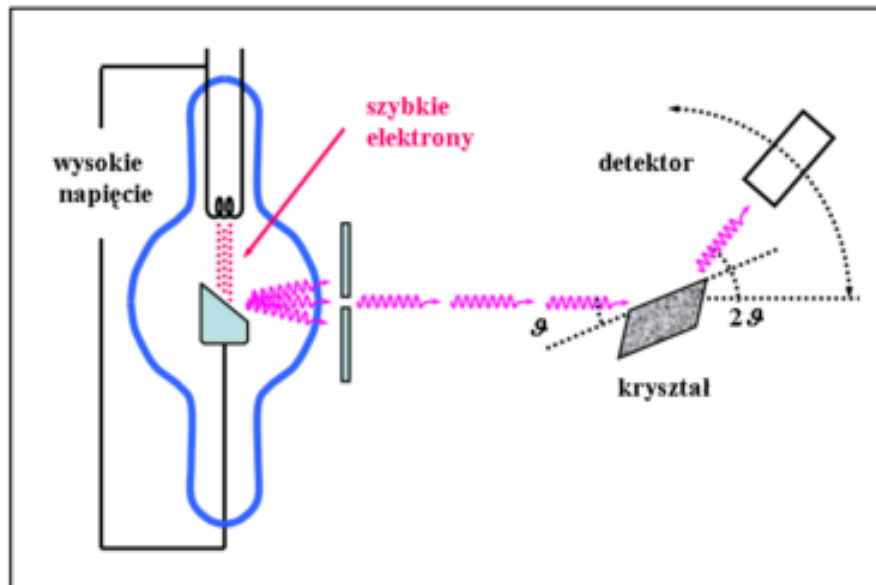
$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU}$$

widmo ciągłe i charakterystyczne



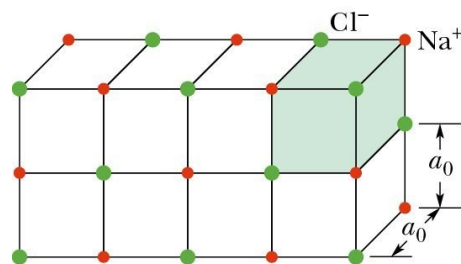
# Promieniowanie X - badania kryształów

- ▶ Promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali nm bardzo dobrze nadaje się do badania struktury ciała stałego.

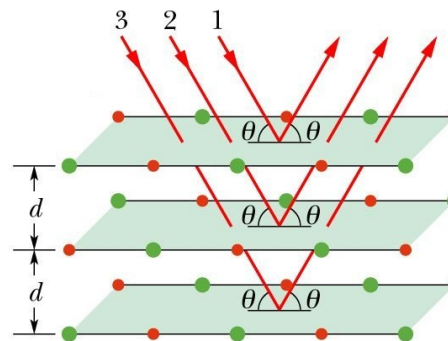


- ▶ promieniowanie X jest falą elektromagnetyczną, podlega zatem wszystkim opisanym zjawiskom, np. dyfrakcji.

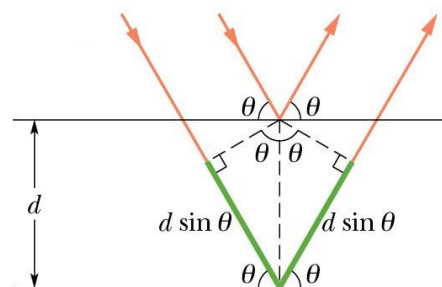
# Dyfrakcja promieni X



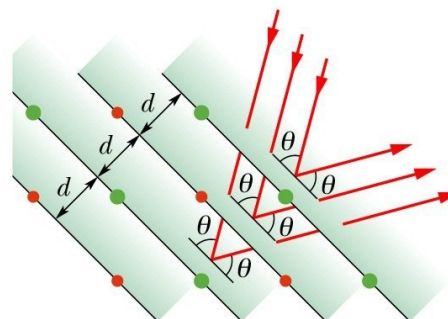
(a)



(b)



(c)



(d)

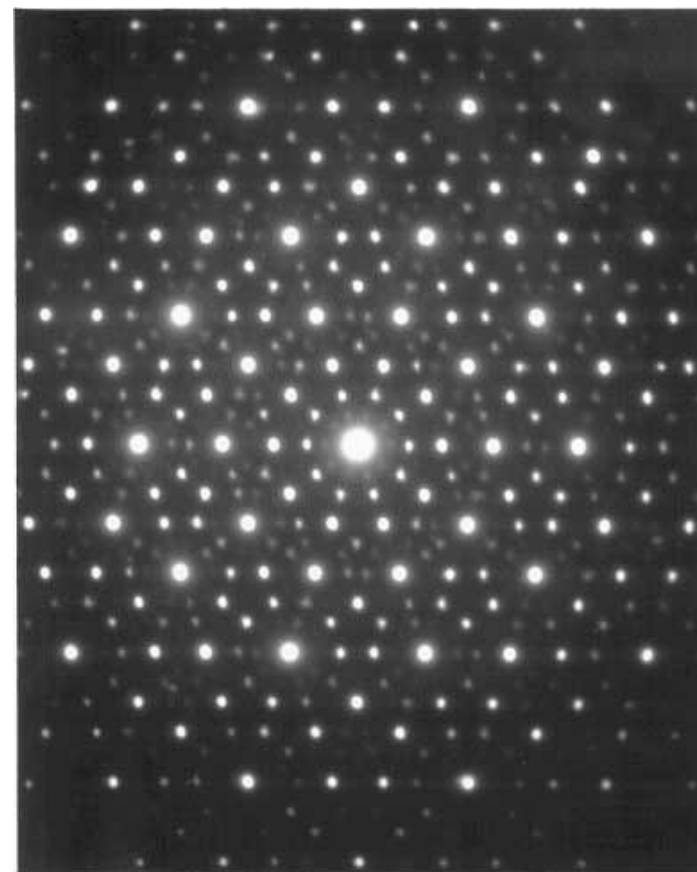
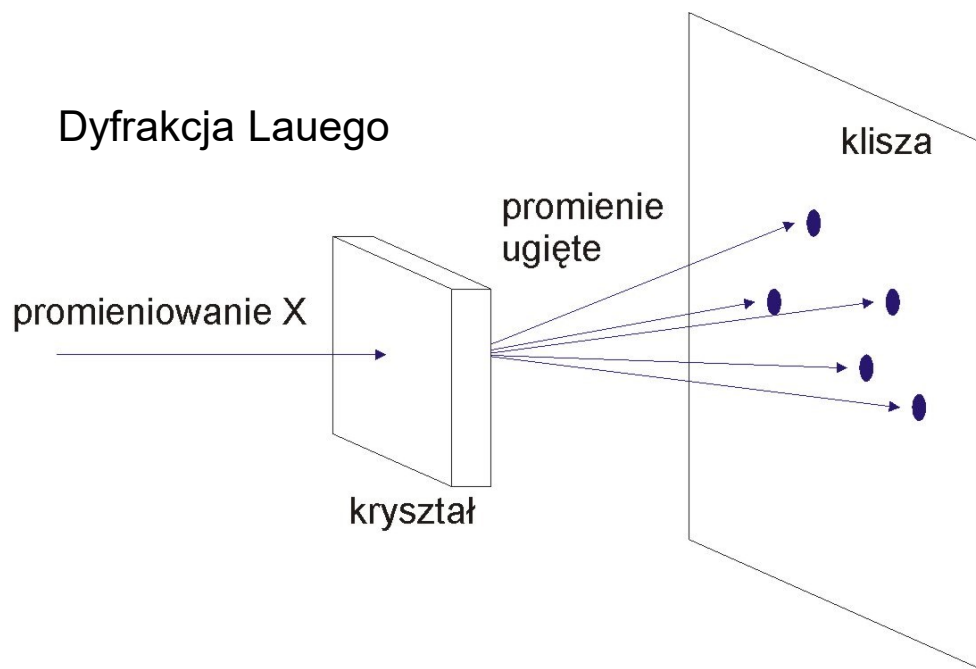
$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{maksima})$$

prawo Bragga

- Pomiar dyfrakcji promieni X jest doświadczalną metodą badania rozmieszczenia atomów w kryształach

# Dyfrakcja promieni X

Kryształ – „naturalna siatka dyfrakcyjna”, rozmiar kryształu jest tego samego rzędu, co długość promieniowania X ( $\sim 10^{-10}$  m) magnetyt



Analiza położenia i natężeń punktów pozwala na określenie struktury kryształu.

# Podsumowanie

---

- ▶ Światło jako fala:
  - optyka geometryczna – odbicie, załamanie, rozproszenie,
  - optyka falowa – polaryzacja, interferencja, dyfrakcja – światło jest falą elektromagnetyczną. Dlaczego?
- ▶ Promieniowanie termiczne
- ▶ Promieniowanie X.
- ▶ Dyfrakcja promieniowania X na kryształach.