

Podstawy fizyki – sezon 2

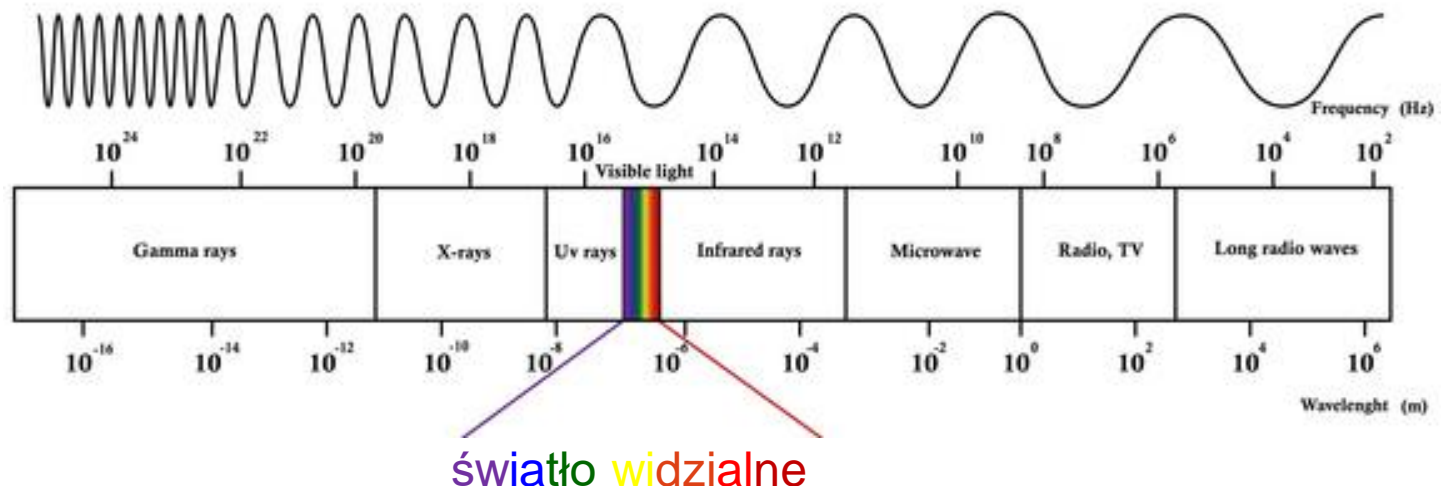
9. Światło i inne fale

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFliS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 111
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):

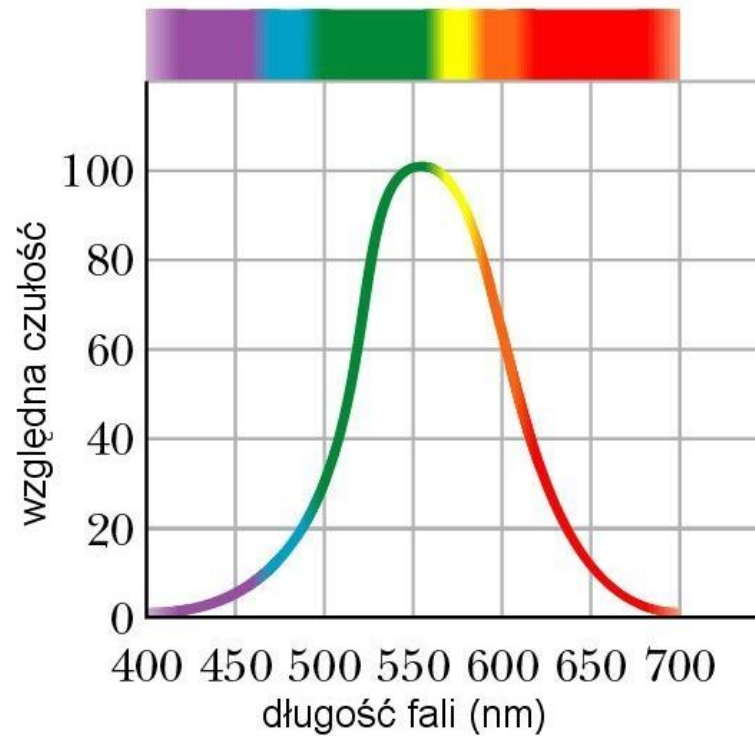
- zbiór cząstek, bezmasowych, ale o skwantowanym pędzie i energii:
- zjawisko fotoelektryczne (zewewnętrzne i wewnętrzne),
- efekt Comptona

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

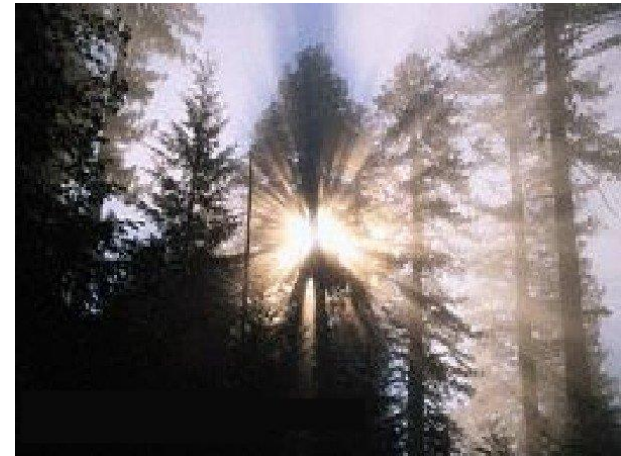
Światło rozchodzi się w próżni z prędkością c .
W ośrodkach materialnych prędkość światła jest mniejsza.

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**

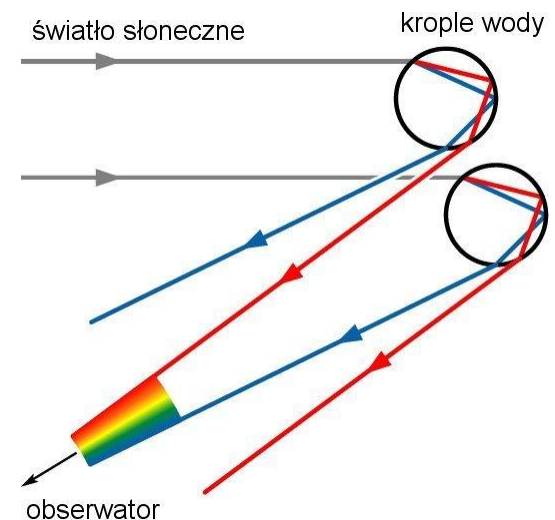
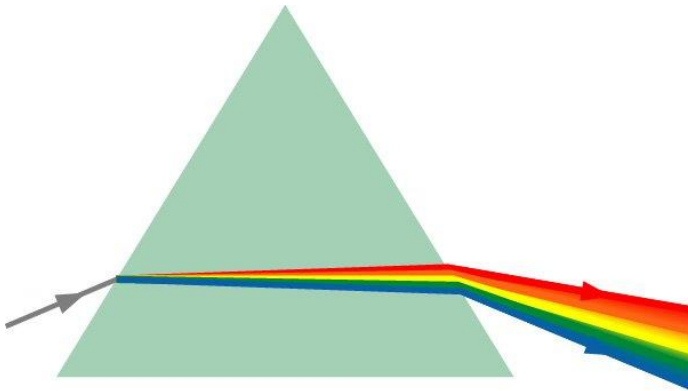


Bezwzględne współczynniki załamania
(dla $\lambda = 589 \text{ nm}$ - żółte światło sodu)

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

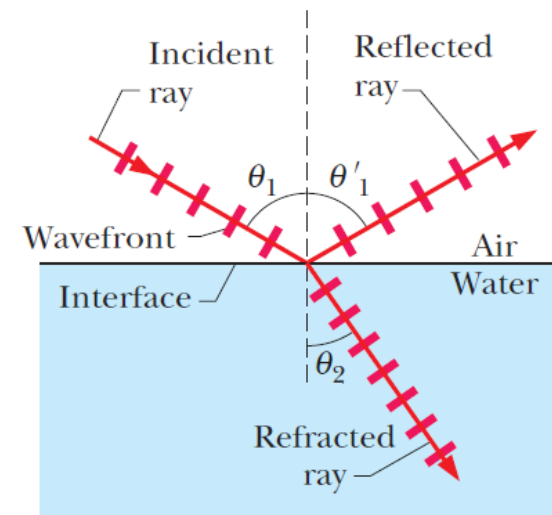
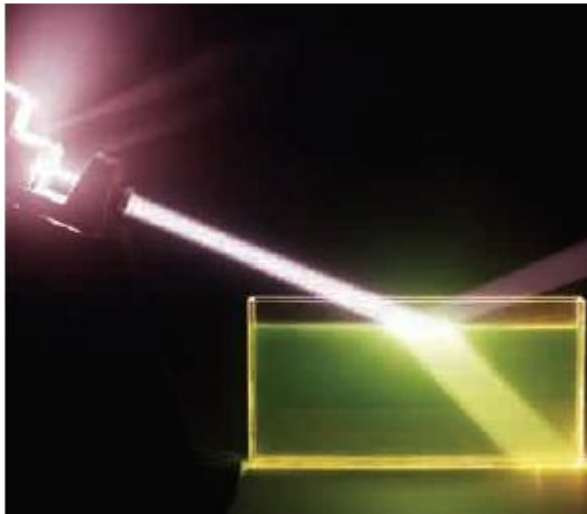
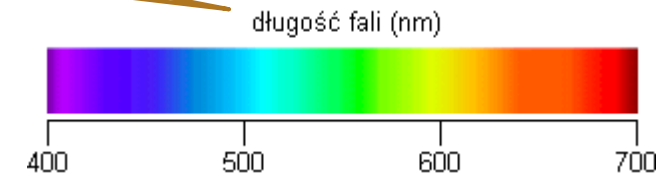


Światło białe, złożone z fal o wszystkich długościach z zakresu widzialnego, ulega **rozszczepieniu**

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

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

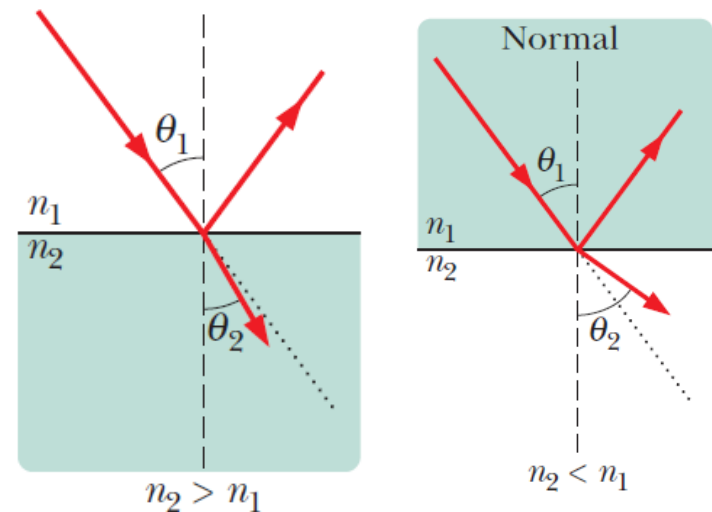
► Prawo odbicia i załamania:

- 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

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

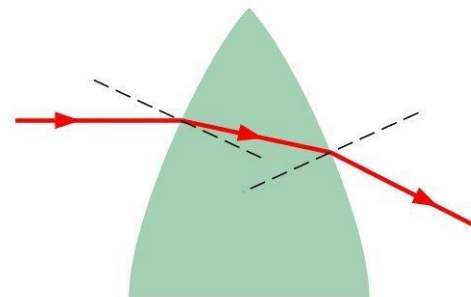
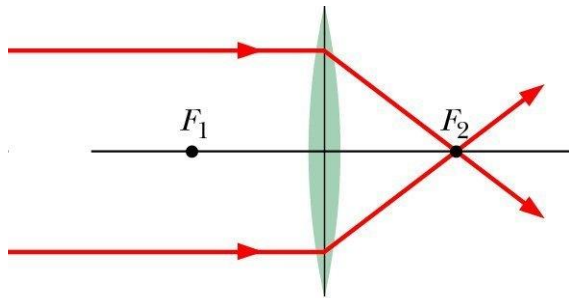
Zasada Fermata:

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)

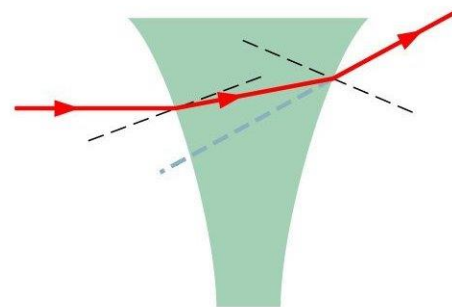
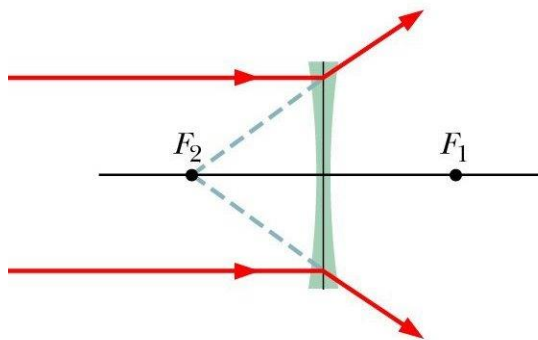


Optyka geometryczna – soczewki

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

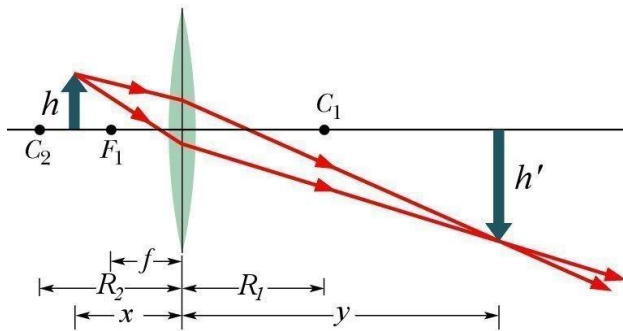


soczewka skupiająca

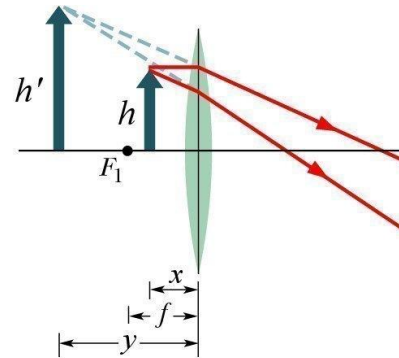


soczewka rozpraszająca

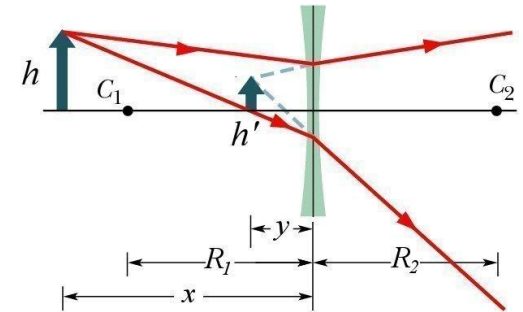
Optyka geometryczna – soczewki



(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 którego wykonano soczewkę
 n_o - współczynnik załamania ośrodka

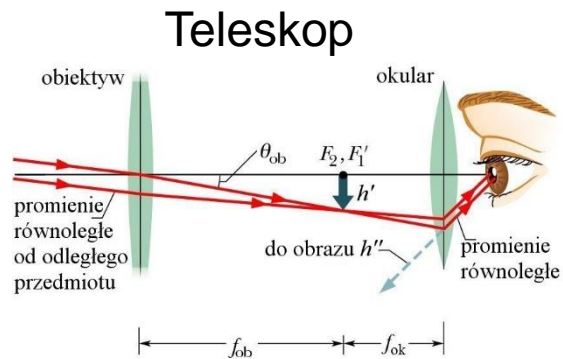
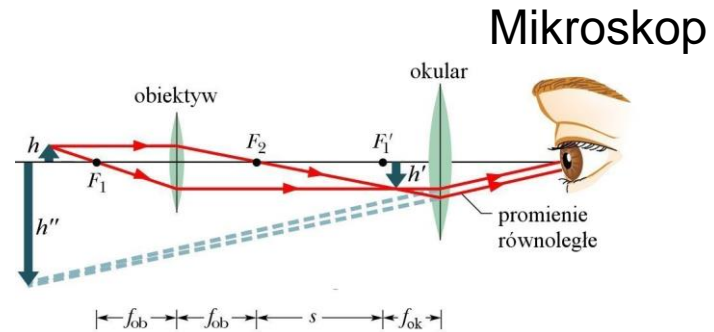
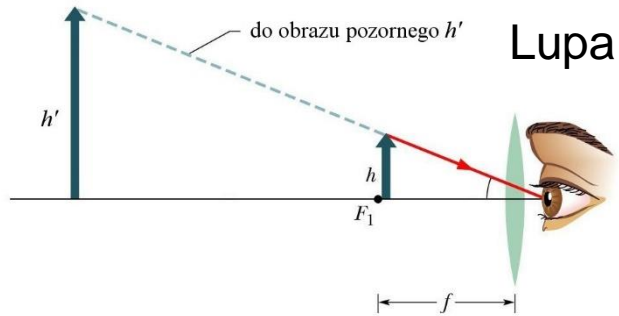
$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

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

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

powiększenie

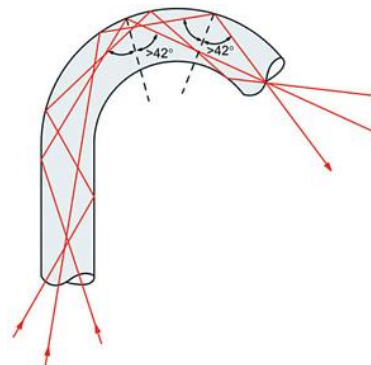
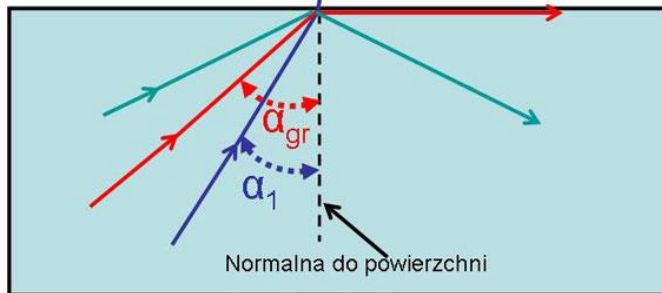
Optyka geometryczna – przyrządy optyczne



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.

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

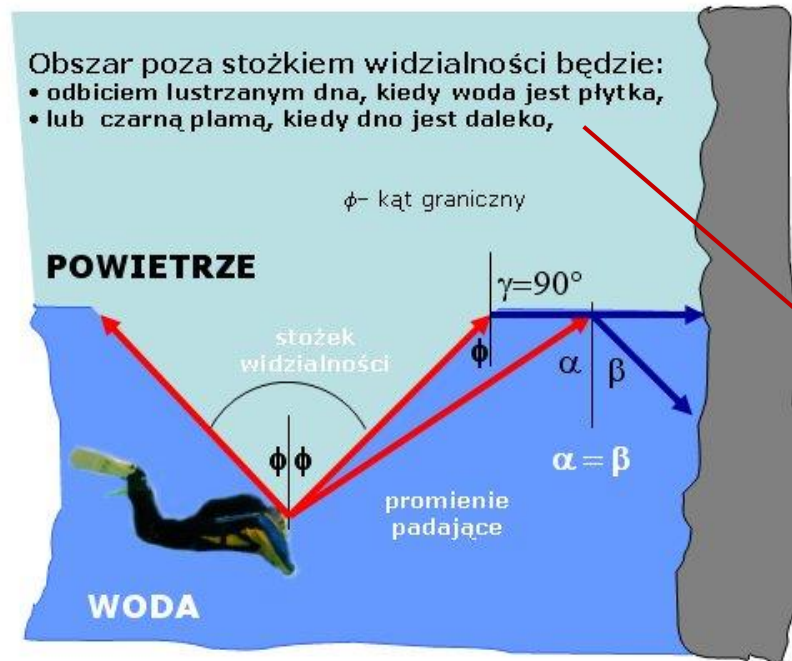


światłowody



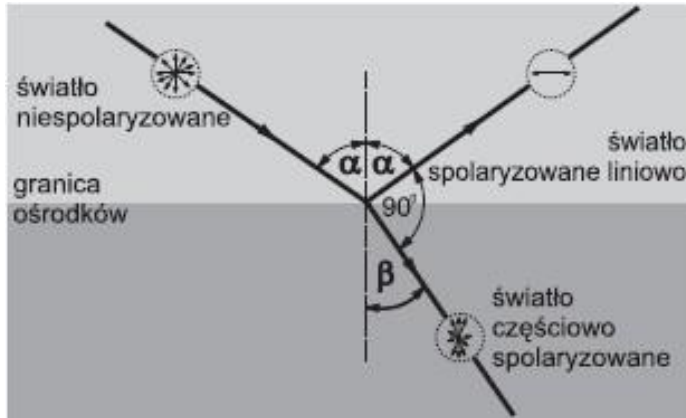
Kurs nurkowy

- ▶ 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.



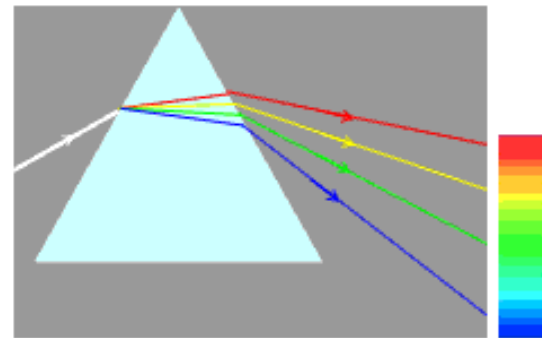
Rozszczepienie światła

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



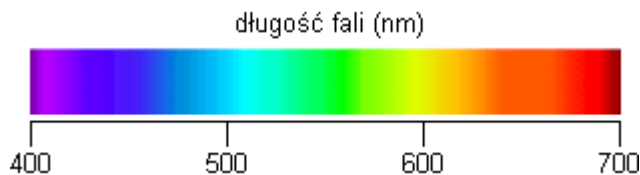
W okularach - filtry polaryzacyjne, nie przepuszczają odbłasków – większy kontrast.

- ▶ Światło o widmie składającym się z różnych długości fali, przechodząc do drugiego (gęstrzego) 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 $I \sim \lambda^{-4}$



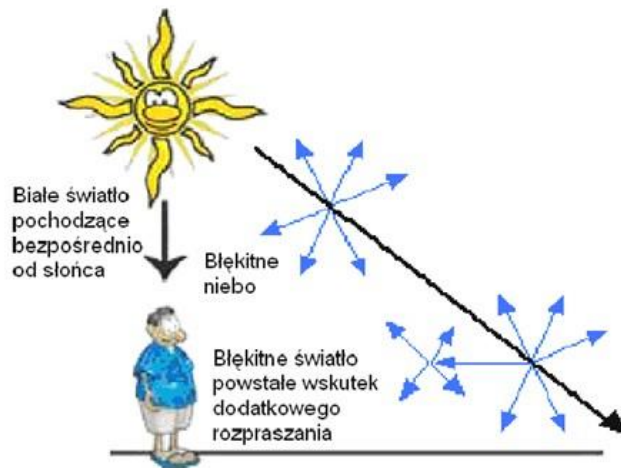
oznacza to, że przy rozproszeniu światła widzialnego, najkrótsze fale, czyli niebieskie i fioletowe, mają największe natężenia...

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

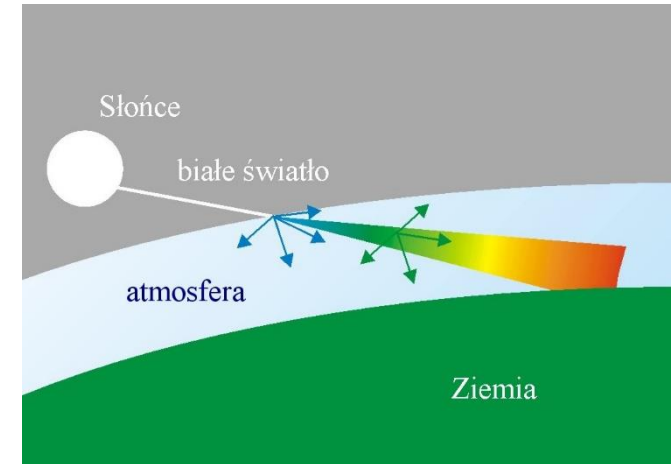


Rozpraszanie światła

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

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,

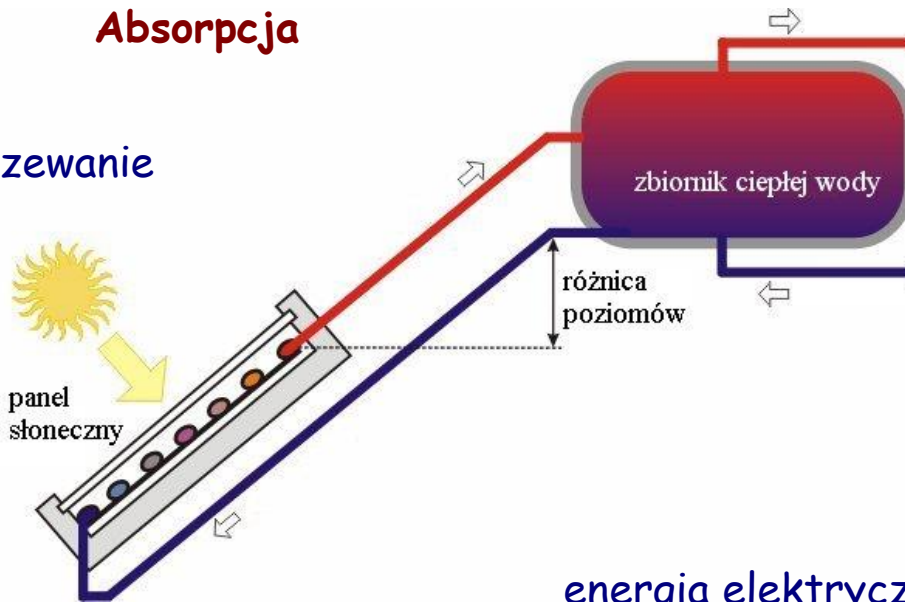


- gdy powietrze jest zanieczyszczone drobnymi cząsteczkami, widmo jest przesunięte w kierunku czerwieni. Im więcej zanieczyszczeń, tym barwa ciemniejsza.



Absorpcja

ogrzewanie



fotosynteza

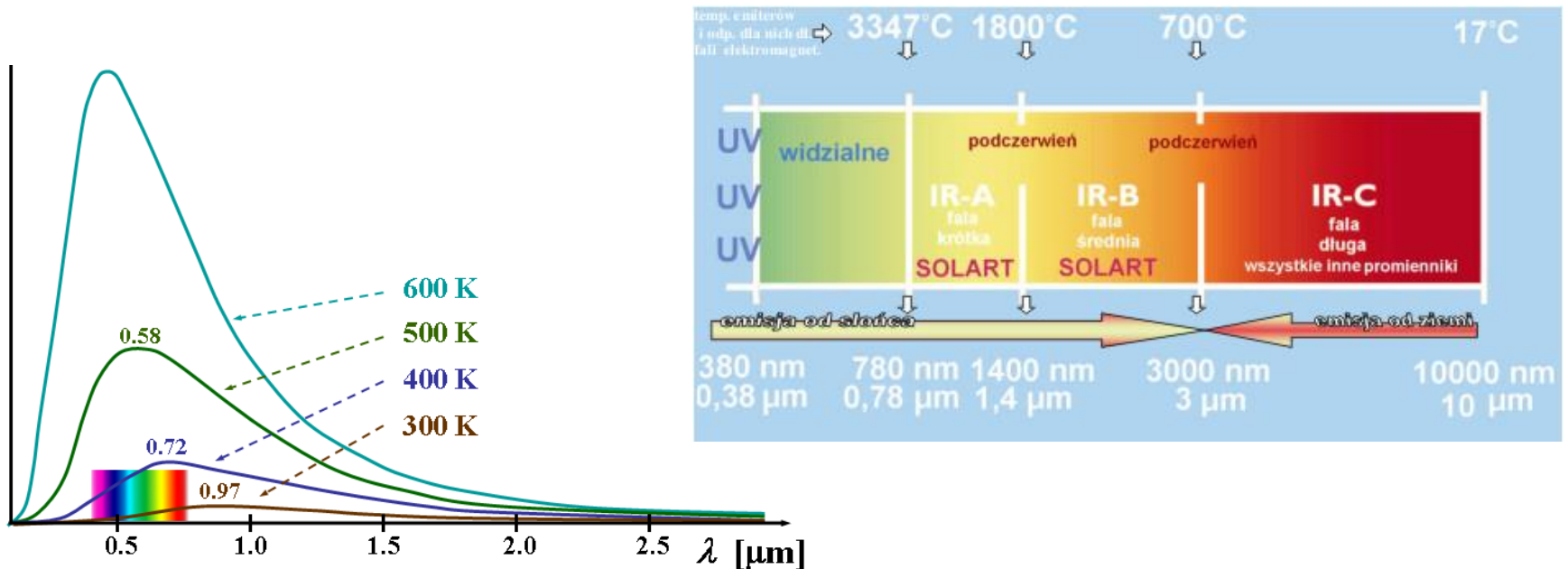


energia elektryczna



Promieniowanie cieplne

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

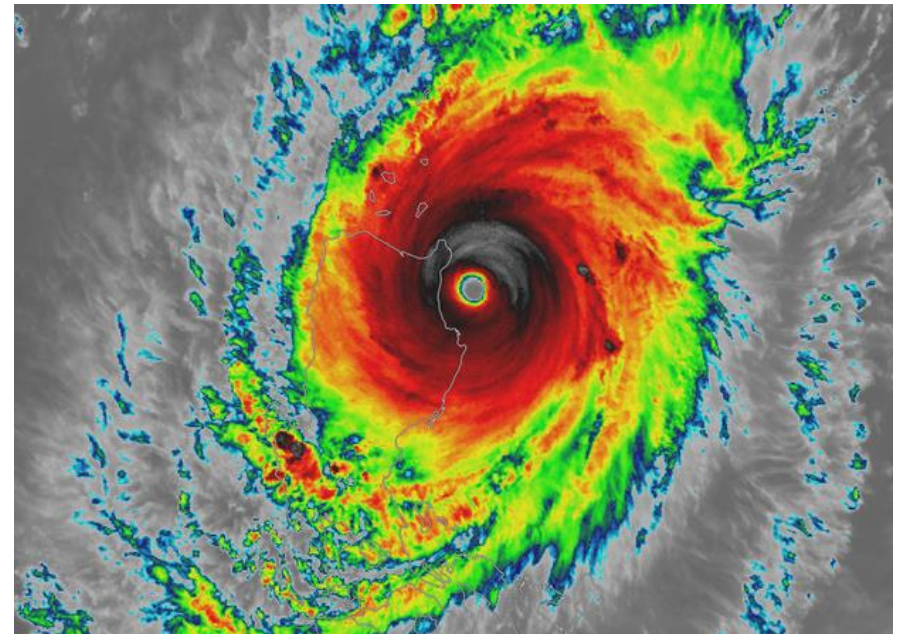
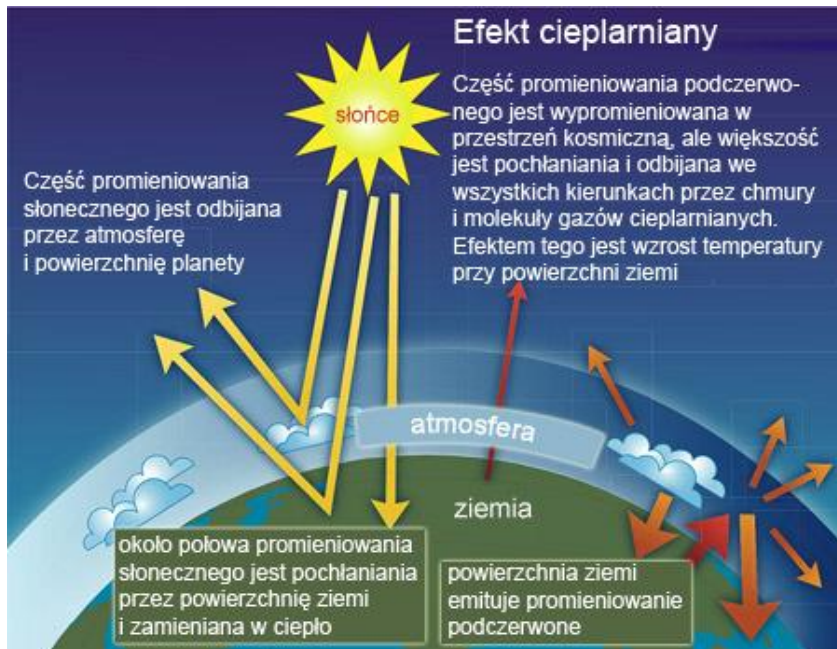


Promieniowanie ciepłe

- ▶ **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.

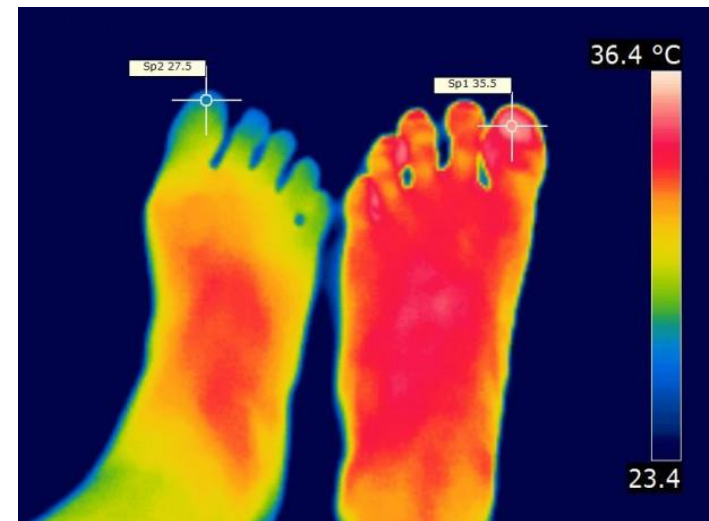
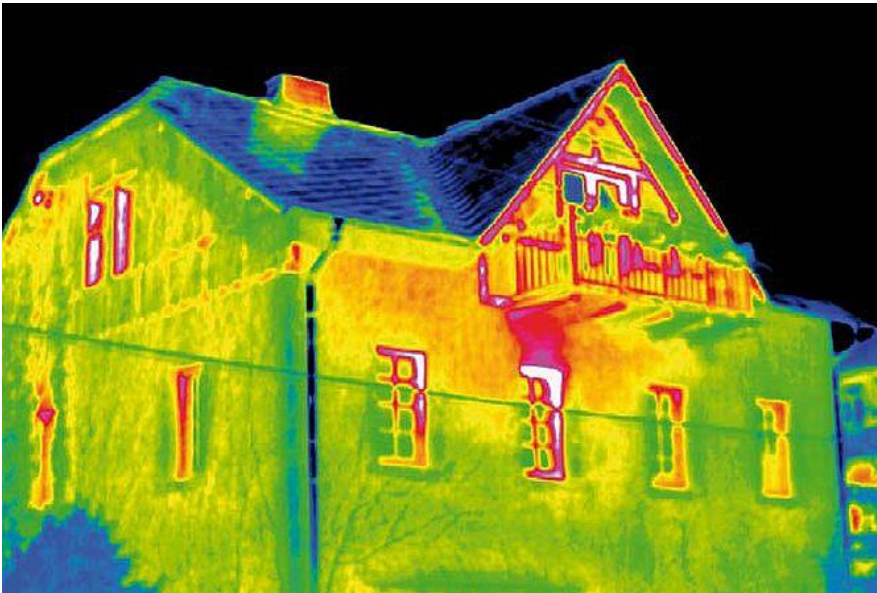
Promieniowanie ciepłe

- ▶ 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.



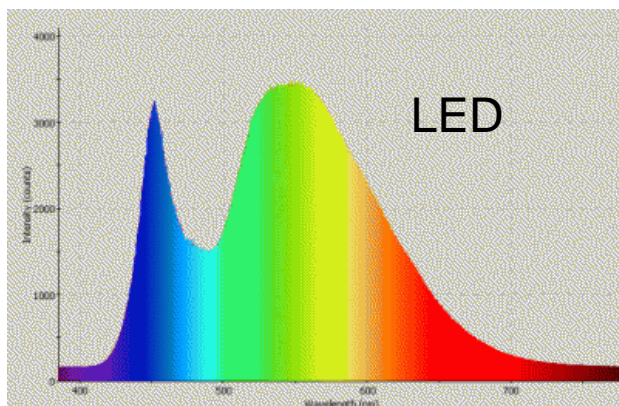
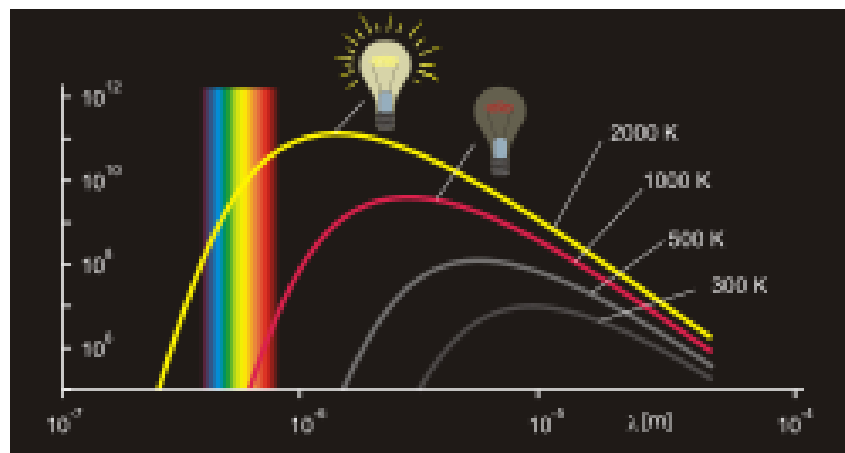
Termowizja

- ▶ 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

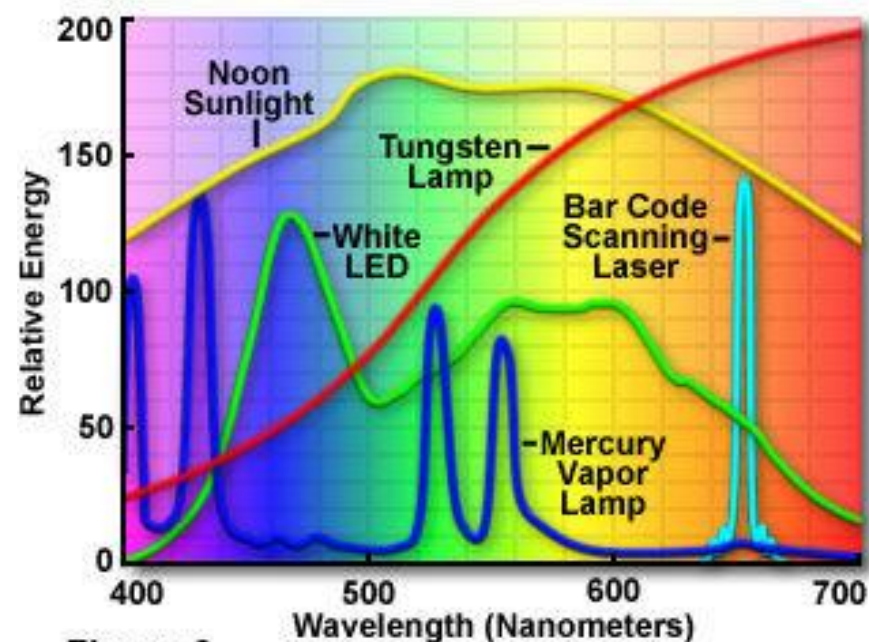


Figure 3

Sztuczne źródła światła

► Parametry żarówek

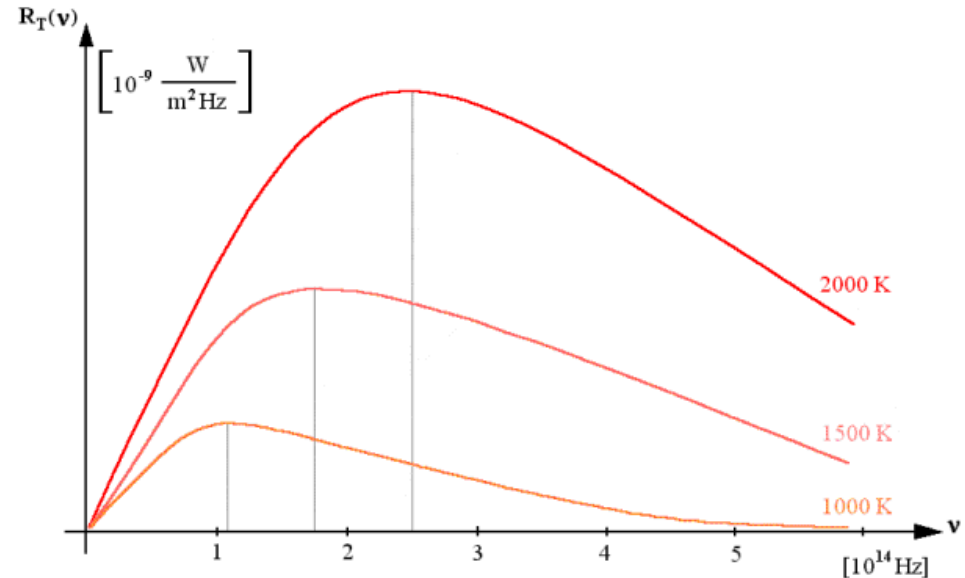
Parametr	żarówka	żarówka halogenowa	zintegrowana świetlówka kompaktowa	LED
trwałość	1000h	2000-5000h	6000-15000h	30000-50000h
temperatura barwowa	2856K	3000-4000K	2800-4000K	różne temperatury i barwy światła
wskaźnik oddawana barw	100	100	zazwyczaj większy niż 80	różne wartości; są wersje o wskaźniku 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%



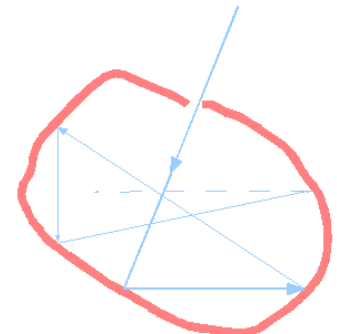
Własności promieniowania cieplnego (podczerwonego)

- ▶ 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.:

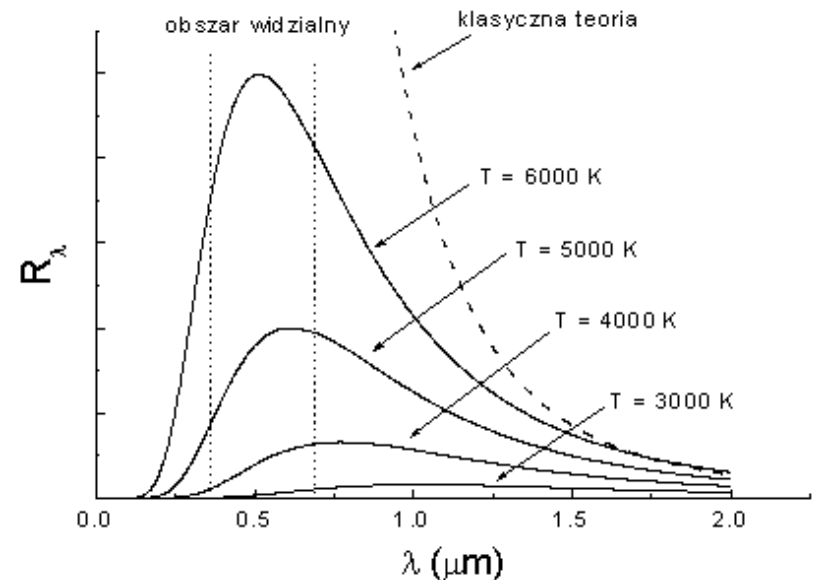
$$R = \sigma T^4, \quad \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

- 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



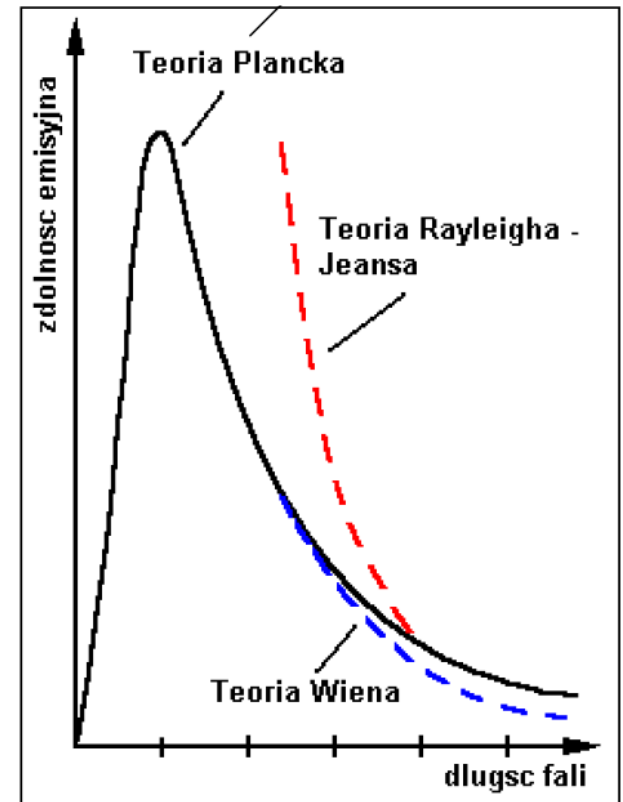
Teoria Plancka (1900)

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

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

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

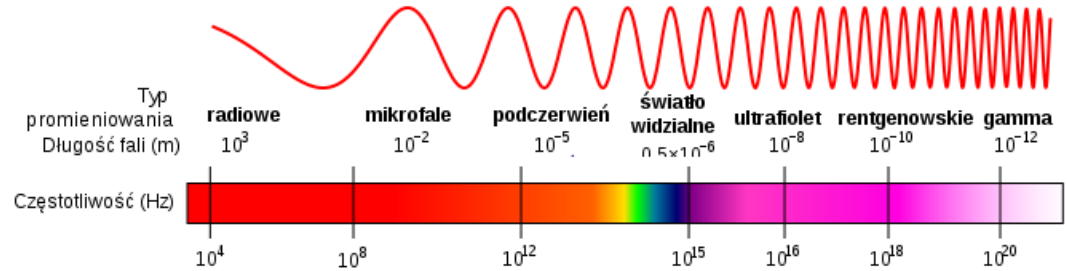
Wzór Plancka – rozkład widmowy promieniowania ciała doskonale czarnego, zgodny z doświadczeniem



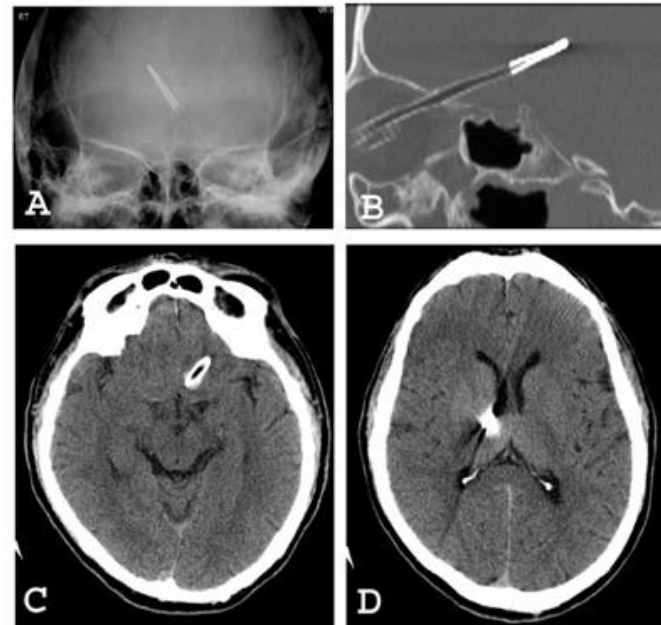
Promieniowanie X

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

1896

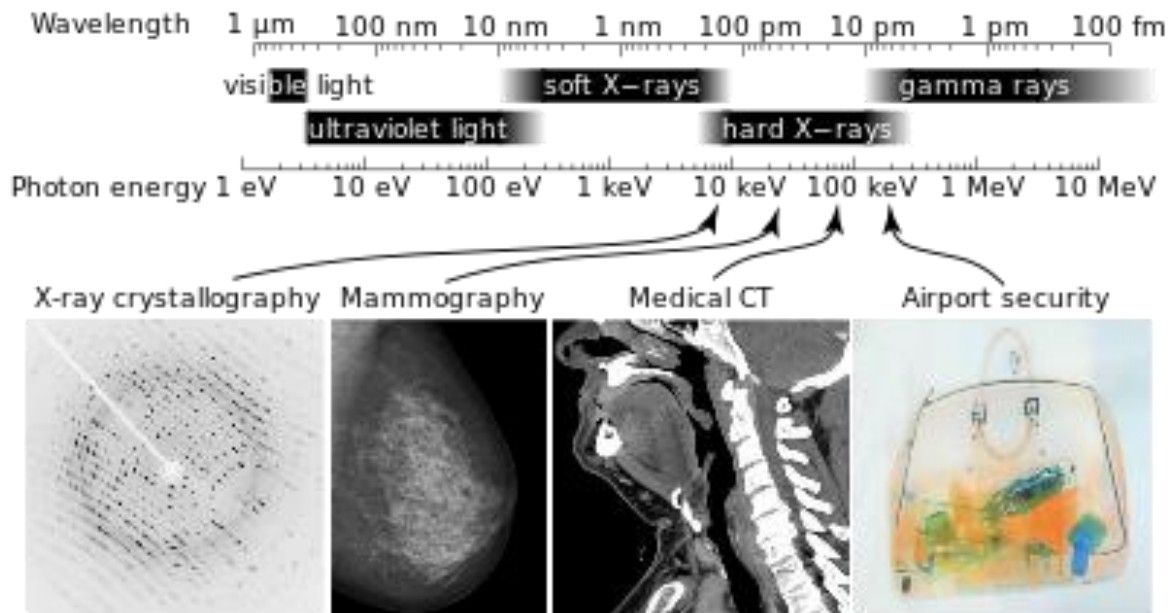


tomografia komputerowa > 2000 rok



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

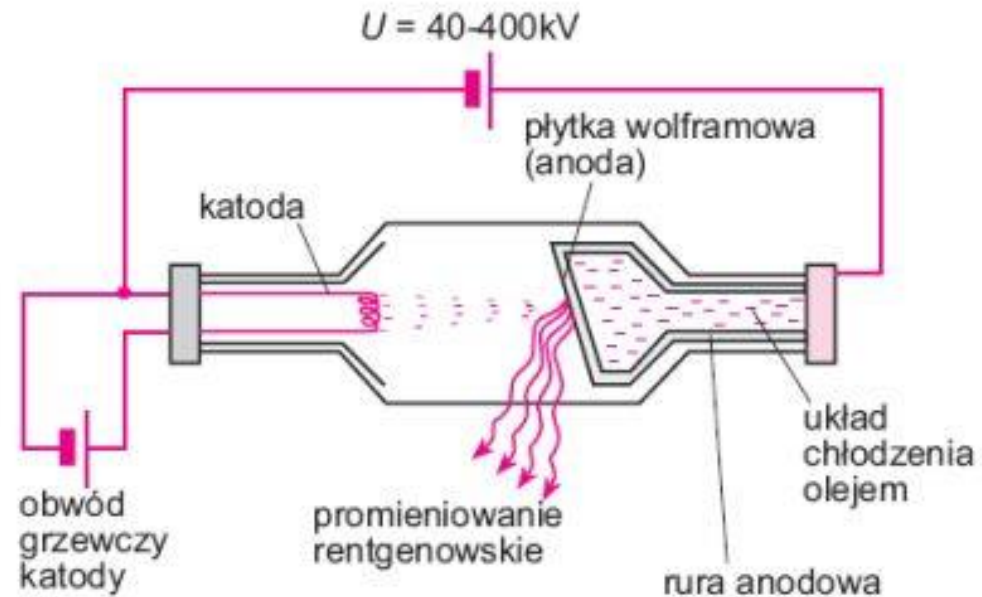
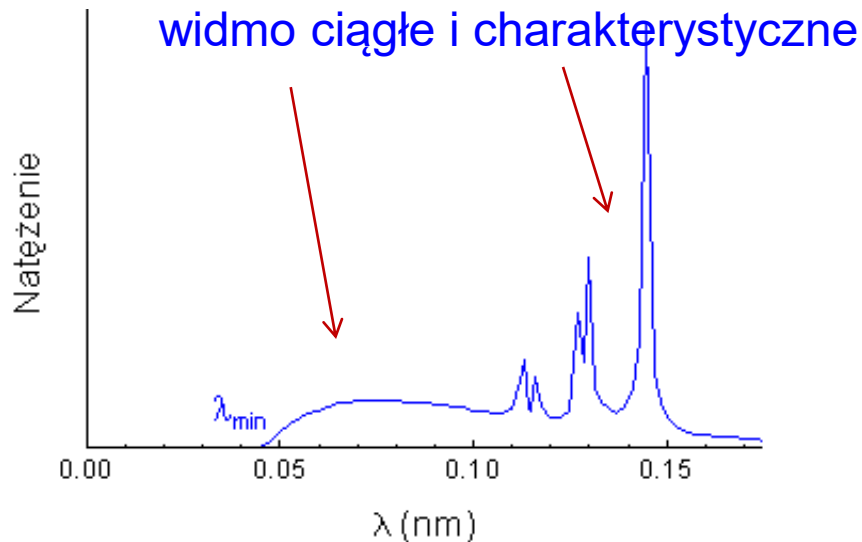
► Promieniowanie X:

- 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).

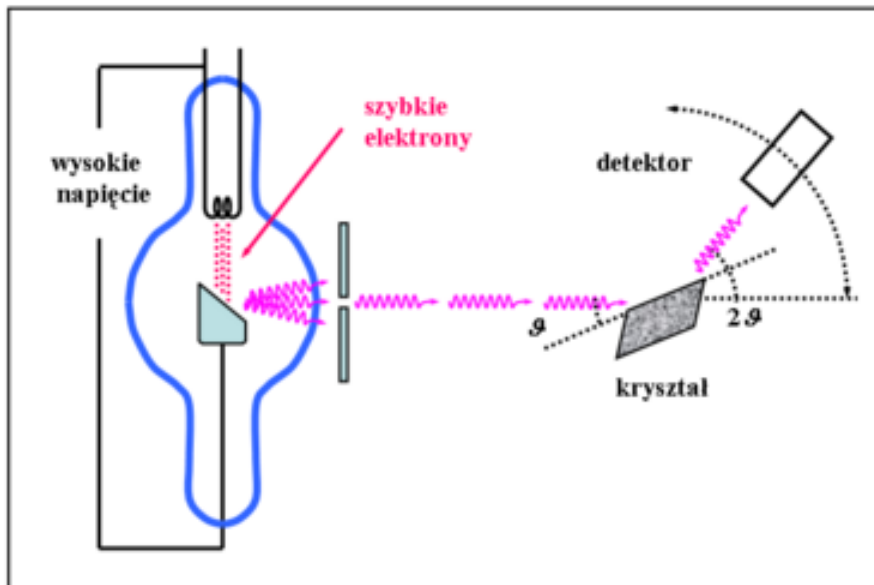
$$eU = h\nu_{max} = h \frac{c}{\lambda_{min}}$$

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



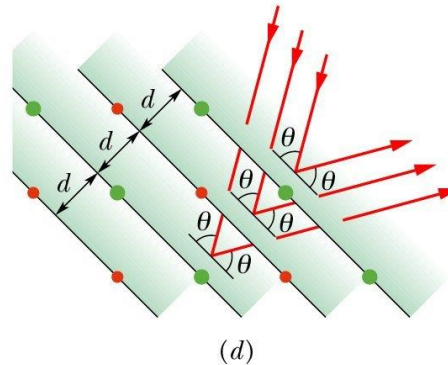
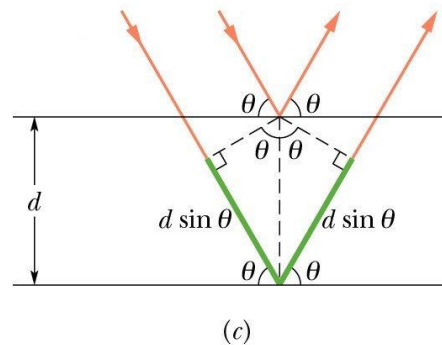
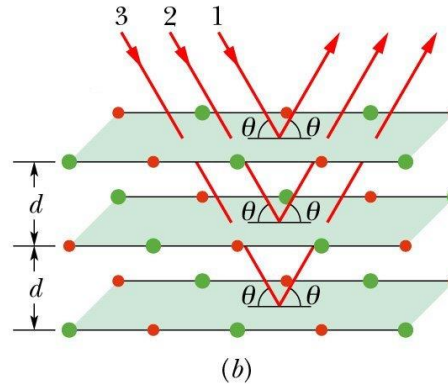
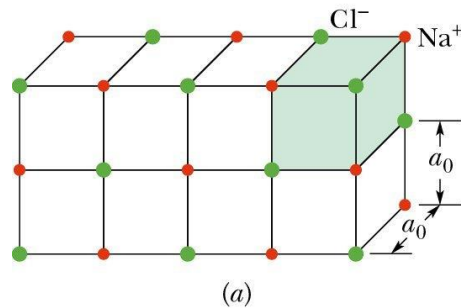
Promieniowanie X - badania kryształów

- ▶ 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



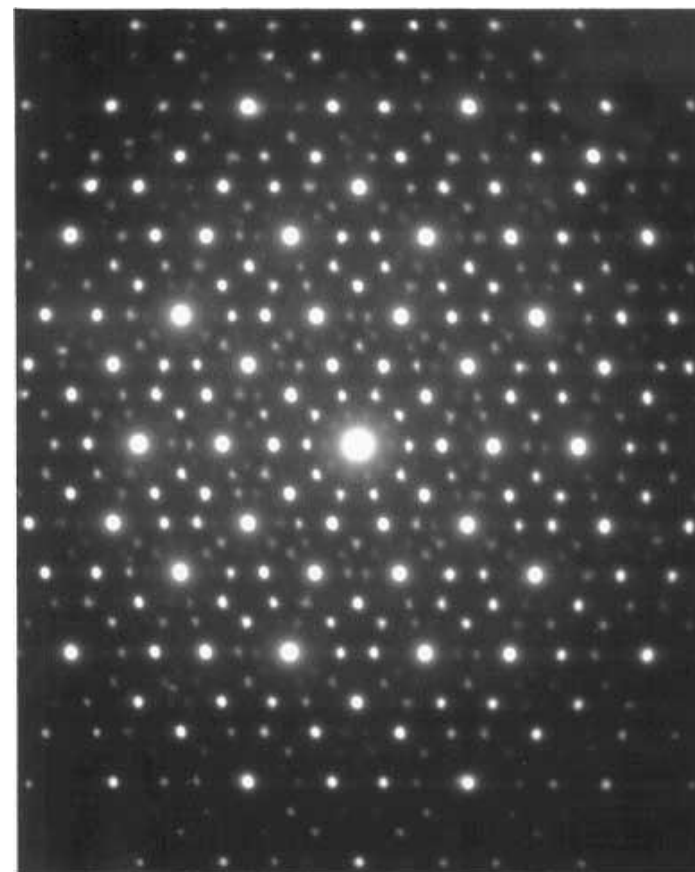
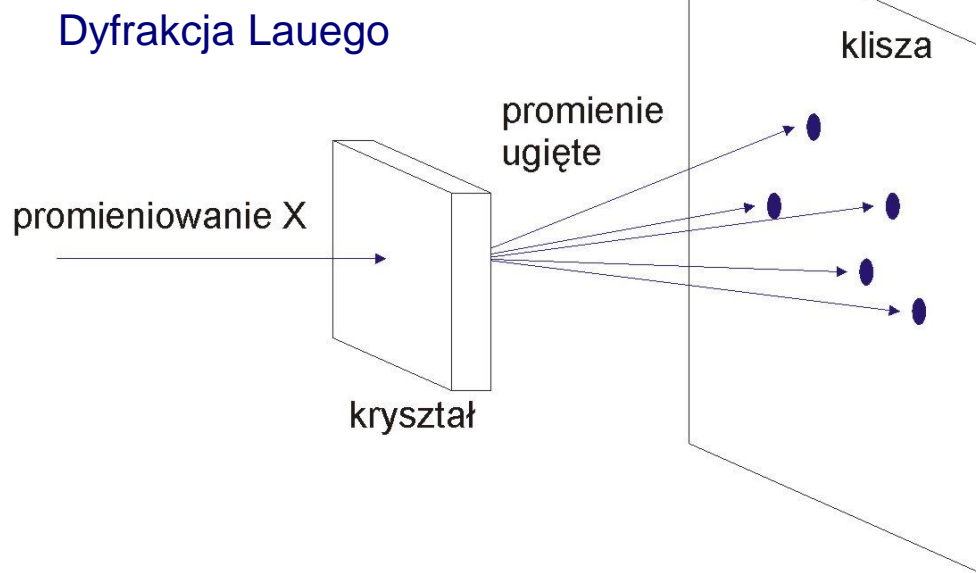
$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 1, 2, 3, \dots (\text{maksima})$$

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.