

Podstawy fizyki kwantowej i budowy materii

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wykład 4
23 października 2017

- 1 Falowa natura światła
- 2 Dualizm korpuskularno-falowy
- 3 Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Równania Maxwella (1865) “udowodniły”, że jest **falą elektromagnetyczną**

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Równania Maxwella (1865) “udowodniły”, że jest **falą elektromagnetyczną**

Albert Einstein pokazał (1905), że do wyjaśnienia **zjawiska fotoelektrycznego** potrzebna jest “**kwantyzacja**” światła \Rightarrow **fotony**

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Równania Maxwella (1865) “udowodniły”, że jest **falą elektromagnetyczną**

Albert Einstein pokazał (1905), że do wyjaśnienia **zjawiska fotoelektrycznego** potrzebna jest “**kwantyzacja**” światła \Rightarrow **fotony**

Doświadczenie Comptona (1923) udowodniło, że fotony można traktować jako **fizyczne cząstki**.

Przypomnienie

Teoria emisyjna światła, której zwolennikiem był m.in. Newton, zakładała że światło jest **strumieniem** “nadzwyczaj subtelných” **cząstek materii**. Teoria ta pozwalała wyjaśnić przewidywania optyki geometrycznej.

W XIX wieku przyjęto jednak powszechnie teorię Younga (1801), zgodnie z którą światło jest **falą**. Dowodem była obserwacja zjawisk **dyfrakcji i interferencji** światła.

Równania Maxwella (1865) “udowodniły”, że jest **falą elektromagnetyczną**

Albert Einstein pokazał (1905), że do wyjaśnienia **zjawiska fotoelektrycznego** potrzebna jest “**kwantyzacja**” światła \Rightarrow **fotony**

Doświadczenie Comptona (1923) udowodniło, że fotony można traktować jako **fizyczne cząstki**.

Jak pogodzić te koncepcje (i wyniki pomiarów !) ?

- 1 Falowa natura światła
- 2 Dualizm korpuskularno-falowy
- 3 Widmo promieniowania elektromagnetycznego

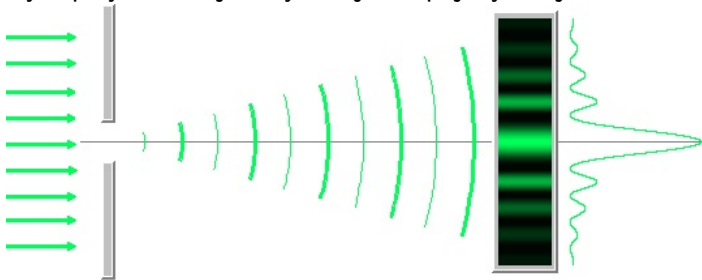
Falowa natura światła

Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (dźwięk, fale na wodzie) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (radiowe, mikrofałe, światło, promienie rentgena)

Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie



Fala płaska ugina się na szczelinie i rozchodzi się w różnych kierunkach.

Falowa natura światła

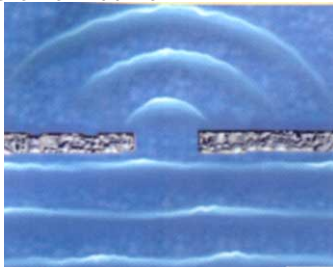
Dyfrakcja

Zjawiska dyfrakcji i interferencji możemy obserwować **wyłącznie dla fal!**

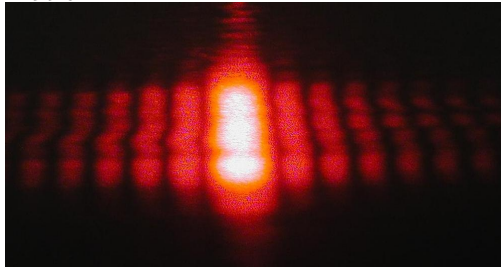
Obserwujemy je zarówno dla fal mechanicznych (dźwięk, fale na wodzie) jak i w szerokim spektrum fal elektromagnetycznych (radiowe, mikrofałe, światło, promienie rentgena)

Najprostrzym przykładem jest dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Fale na wodzie

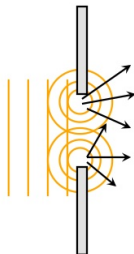


Światło



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Dyfrakcję na szczelinie tłumaczymy wykorzystując tzw. **Zasadę Huygensa**.
Każdy punkt szczeliny można uważać za **źródło wtórnej fali kulistej**.

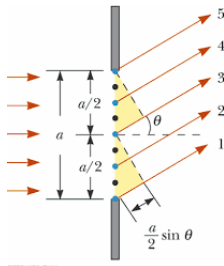
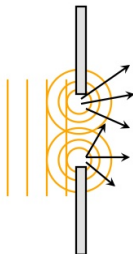


Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Dyfrakcję na szczelinie tłumaczymy wykorzystując tzw. **Zasadę Huygensa**.

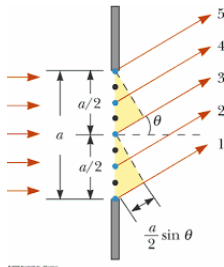
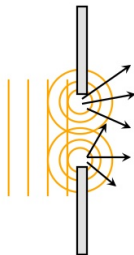
Każdy punkt szczeliny można uważać za **źródło wtórnej fali kulistej**.

Fale te **interferują** tworząc ostateczny obraz na ekranie.



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Dyfrakcję na szczelinie tłumaczymy wykorzystując tzw. **Zasadę Huygensa**.
 Każdy punkt szczeliny można uważać za **źródło wtórnej fali kulistej**.
 Fale te **interferują** tworząc ostateczny obraz na ekranie.

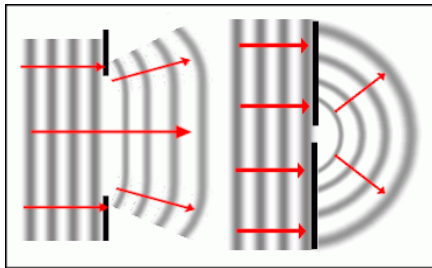


Dla kąta spełniającego $a \sin \theta = \lambda$ nastąpi całkowite wygaszenie fali
 Każdemu punktowi z górnej połowy szczeliny odpowiada punkt z dolnej
 połowy o przeciwnej fazie fali (różnica dróg optycznych równa $\lambda/2$).

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Im szczelina jest węższa tym szersze staje się centralne maksimum

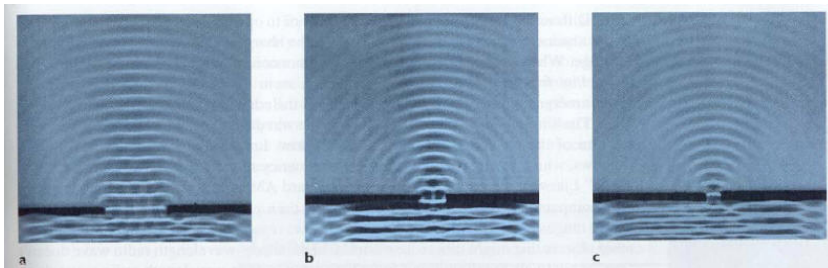
Schemat



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Im szczelina jest węższa tym szersze staje się centralne maksimum

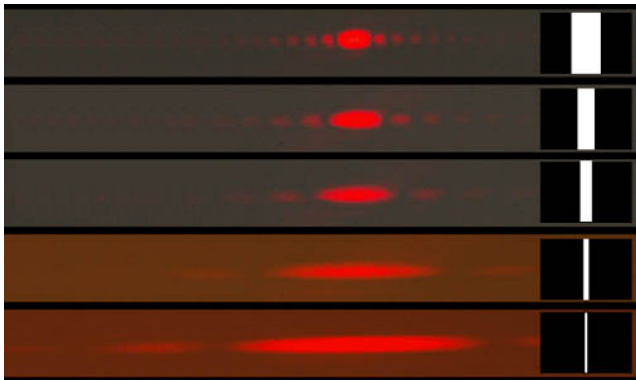
Fale na wodzie



Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Im szczelina jest węższa tym szersze staje się centralne maksimum

Światło

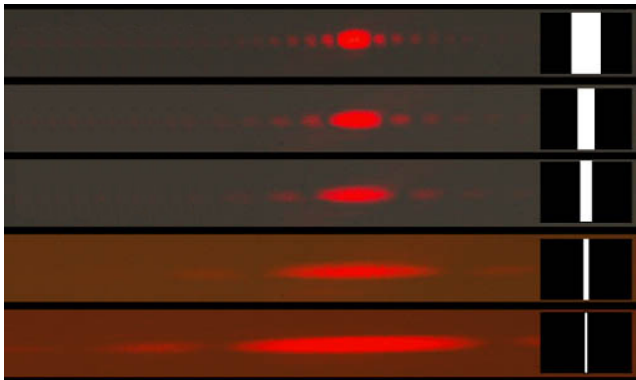


Gdy szczelina jest bardzo szeroka ($\gg \lambda$) ugięcie jest zaniedbywalne, optyka geometryczna daje zadowalający opis obserwacji

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Im szczelina jest węższa tym szersze staje się centralne maksimum

Światło



Gdy szczelina staje się węższa niż długość fali,
fala za szczeliną rozchodzi się we wszystkich kierunkach.

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

Im dłuższa fala dłuższa tym szersze jest centralne maksimum



Colour

Purple



Green

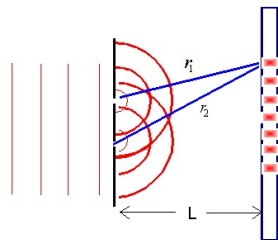
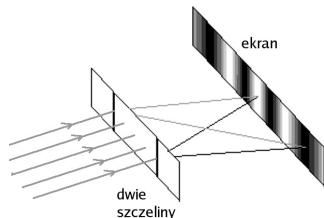


Red

Istotny jest stosunek szerokości szczeliny do długości fali!

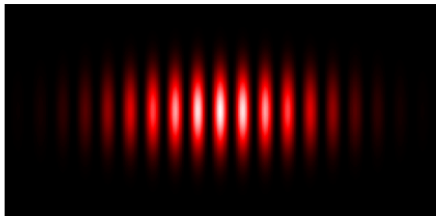
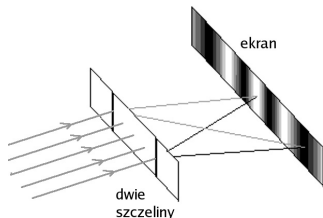
Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Doświadczenie Younga (1803)



Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Doświadczenie Younga (1803)



W wyniku interferencji fal z dwóch źródeł (szczelin) otrzymujemy charakterystyczne prążki interferencyjne

Odległość (kątowna) między prążkami zależy od stosunku odległości między szczelinami do $\lambda \Rightarrow$ im szczeliny bliżej tym prążki bardziej się rozsuwają

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

W praktyce szczeliny mają niezaniechaną szerokość.

To co obserwujemy jest złożeniem dyfrakcji na pojedynczej szczelinie:



z oczekiwanym obrazem dla nieskończenie cienkich szczelin:



Dyfrakcja na dwóch szczelinach

W praktyce szczeliny mają niezaniechaną szerokość.

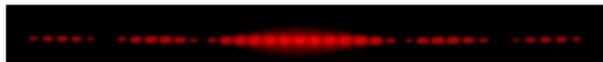
To co obserwujemy jest złożeniem dyfrakcji na pojedynczej szczelinie:



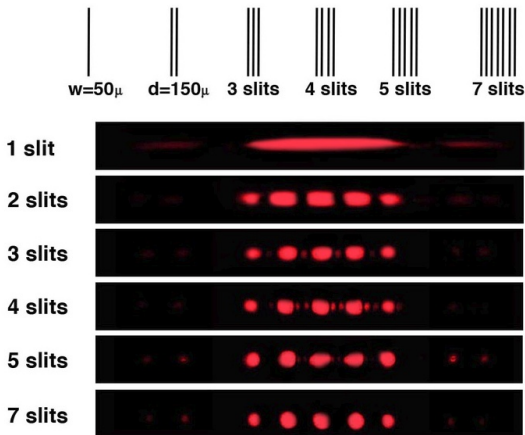
z oczekiwanym obrazem dla nieskończenie cienkich szczelin:



⇒ obraz jaki uzyskujemy w rzeczywistym eksperymencie:



Dyfrakcja na wielu szczelinach



Wraz ze wzrostem liczby szczelin maksima stają się coraz węższe.

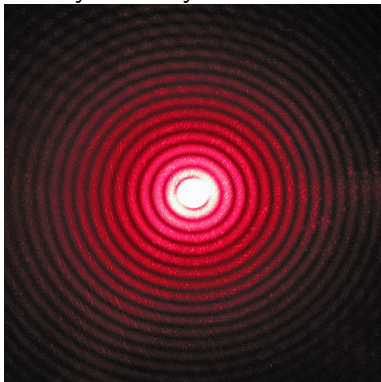
Granica bardzo dużej liczby szczelin \Rightarrow siatka dyfrakcyjna

Dyfrakcja

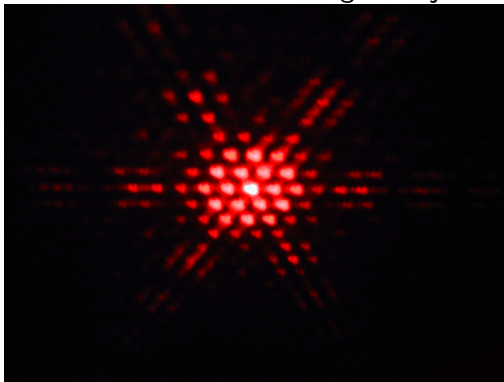
Dyfrakcja zachodzi nie tylko na strukturach jednowymiarowych.

Zachodzi zawsze na małych obiektach lub strukturach o wymiarach porównywalnych z długością fali światła

Na małym kolistym otworze



Na siatce o strukturze hexagonalnej

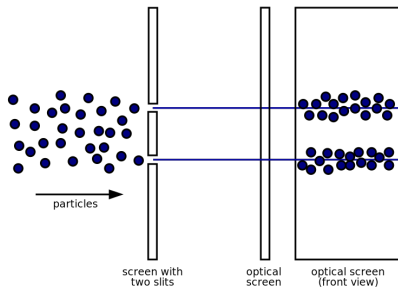


- 1 Falowa natura światła
- 2 Dualizm korpuskularno-falowy
- 3 Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Porównanie opisów

Jak wyobrażano sobie eksperyment z dwoma szczelinami

Teoria emisyjna

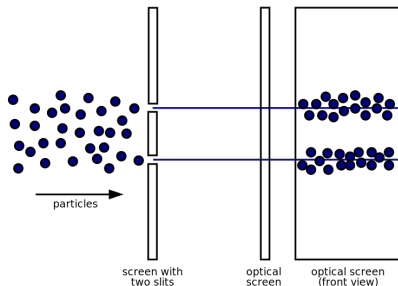


Teoria emisyjna (cząstkowa) światła **nie tłumaczy** powstawania prążków.

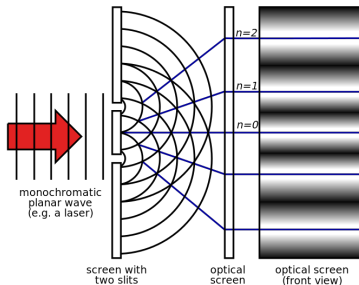
Porównanie opisów

Jak wyobrażano sobie eksperyment z dwoma szczelinami

Teoria emisyjna



Teoria falowa



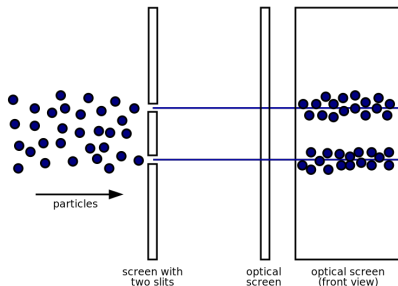
Teoria emisyjna (cząstkowa) światła **nie tłumaczy** powstawania prążków.

Teoria falowa **bardzo dobrze** je opisuje

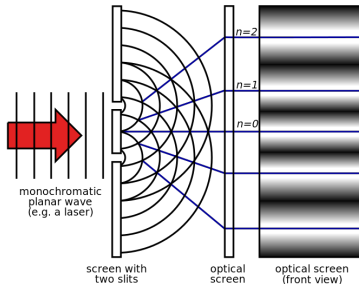
Porównanie opisów

Jak wyobrażano sobie eksperyment z dwoma szczelinami

Teoria emisyjna



Teoria falowa



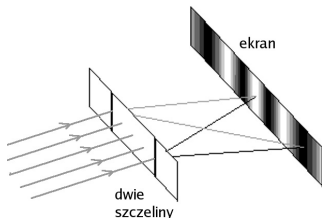
Teoria emisyjna (cząstkowa) światła **nie tłumaczy** powstawania prążków.
Zakładając klasyczne równania ruchu dla cząstek!

Teoria falowa **bardzo dobrze** je opisuje

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Ale przecież wiemy, że światło to strumień fotonów!

Jak wygląda doświadczenie Younga dla bardzo małych natężeń światła

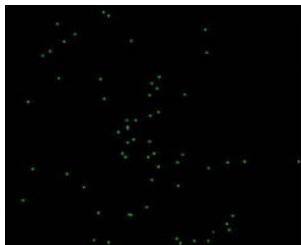
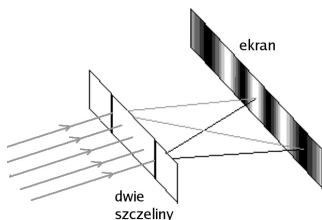


Dysponujemy detektorami, które pozwalają rejestrować pojedyncze fotony.

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Ale przecież wiemy, że światło to strumień fotonów!

Jak wygląda doświadczenie Younga dla bardzo małych natężeń światła

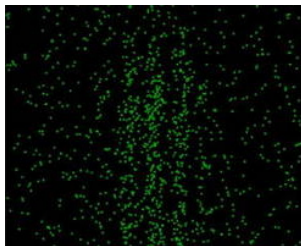
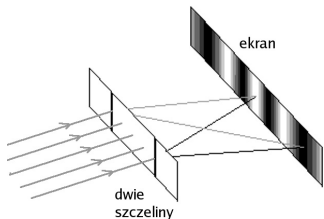


Dysponujemy detektorami, które pozwalają rejestrować pojedyncze fotony. Pojedynczy foton może paść w dowolnym miejscu ekranu!

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Ale przecież wiemy, że światło to strumień fotonów!

Jak wygląda doświadczenie Younga dla bardzo małych natężeń światła

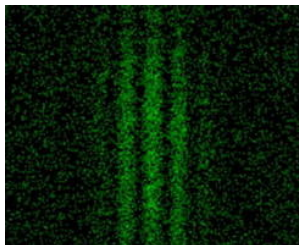
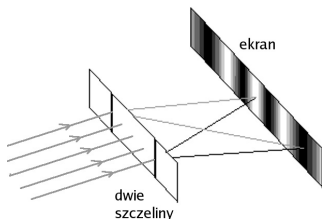


Dysponujemy detektorami, które pozwalają rejestrować pojedyncze fotony. Pojedynczy foton może paść w dowolnym miejscu ekranu!

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Ale przecież wiemy, że światło to strumień fotonów!

Jak wygląda doświadczenie Younga dla bardzo małych natężeń światła



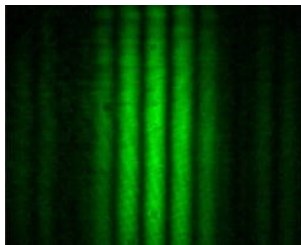
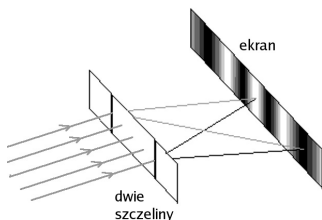
Dysponujemy detektorami, które pozwalają rejestrować pojedyncze fotony. Pojedynczy foton może paść w dowolnym miejscu ekranu!

Dopiero przy dużej liczbie fotonów widzimy, że prawdopodobieństwo detekcji jest w niektórych miejscach dużo wyższe niż w innych.

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Ale przecież wiemy, że światło to strumień fotonów!

Jak wygląda doświadczenie Younga dla bardzo małych natężeń światła



Dysponujemy detektorami, które pozwalają rejestrować pojedyncze fotony. Pojedynczy foton może paść w dowolnym miejscu ekranu!

Dopiero przy dużej liczbie fotonów widzimy, że prawdopodobieństwo detekcji jest w niektórych miejscach dużo wyższe niż w innych.

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- rozchodzenie się fali (propagację fotonów) opisują **równania Maxwella** to nie są “klasyczne” kulki opisane dynamiką Newtona !!!

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- rozchodzenie się fali (propagację fotonów) opisują **równania Maxwella** to nie są “klasyczne” kulki opisane dynamiką Newtona !!!
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu (obserwowane natężenie światła) jest proporcjonalne do **kwadratu amplitudy fali** elektromagnetycznej

$$p(t, x) \sim I(t, x) \sim E^2(t, x)$$

Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- rozchodzenie się fali (propagację fotonów) opisują **równania Maxwella**
to nie są “klasyczne” kulki opisane dynamiką Newtona !!!
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu (obserwowane natężenie światła) jest proporcjonalne do **kwadratu amplitudy fali** elektromagnetycznej

$$p(t, x) \sim I(t, x) \sim E^2(t, x)$$

⇒ foton jest cząstką, ale jego ruch opisany jest równaniem falowym...

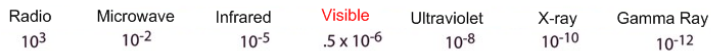
- 1 Falowa natura światła
- 2 Dualizm korpuskularno-falowy
- 3 Widmo promieniowania elektromagnetycznego

The Electromagnetic Spectrum

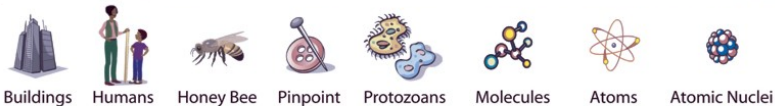
Penetrates Earth Atmosphere?



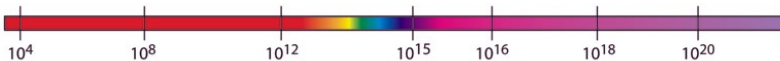
Wavelength (meters)



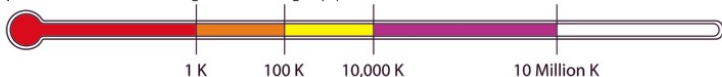
About the size of...



Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)



Widmo

Promieniowanie elektromagnetyczne dzielimy w zależności od długości fali (a jednocześnie jego źródeł i właściwości) na:

- fale radiowe
- mikrofałe
- podczerwień
- światło widzialne
- ultrafiolet
- promieniowanie rentgenowskie
- promieniowanie gamma

Ogólnie można powiedzieć (zgodnie z równaniami Maxwella), że źródłem promieniowania elektromagnetycznego jest zawsze jakiś **ruch ładunków** a ściślej rzecz biorąc ich przyspieszenie;
jednostajny ruch ładunku nie powoduje powstawania fali

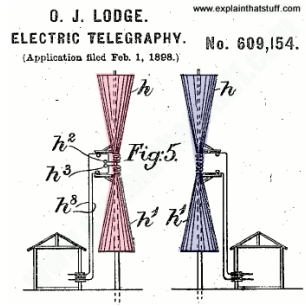
Promieniowanie elektromagnetyczne

Fale radiowe

Długości fali: od największych (w praktyce rzędu kilometra) do decymetrów
 Częstotliwość: od najmniejszych do około 1 GHz

Mogą być emitowane przez anteny: przewodniki, w których wywołujemy **oscylacje ładunków** (przepływ prądu przemiennego) o określonej częstotliwości

Nie są pochłaniane w atmosferze
 ⇒ możemy ich używać w telekomunikacji



Radio FM: zakres częstości 88 - 108 MHz, długości fali ok. 3 m
 (anteny odbiorników mają długość $\lambda/4$)

Telefonia komórkowa: pasma 900 MHz - 2.4 GHz, długość fali 12 do 33 cm

Promieniowanie elektromagnetyczne

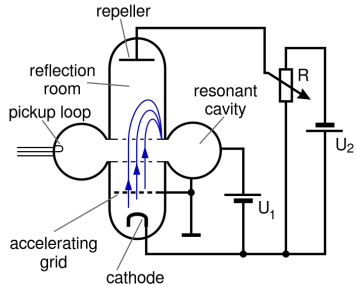
Mikrofale

Długości fali: od kilku decymetrów do około 1 mm

Częstotliwość: rzędu 1 do 300 GHz

są to przedziały orientacyjne, czasami mikrofale zaliczane są do fal radiowych

Wytwarzane są w tzw. klistrzach:
elektrony generują/wzmacniają
promieniowanie we wnęce rezonansowej



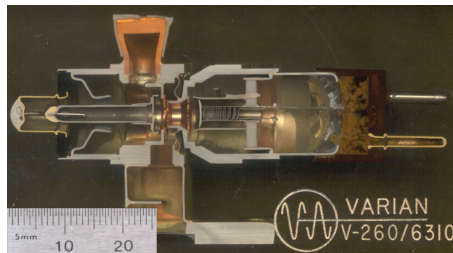
Mikrofałe

Długości fali: od kilku decymetrów do około 1 mm

Częstotliwość: rzędu 1 do 300 GHz

są to przedziały orientacyjne, czasami mikrofałe zaliczane są do fal radiowych

Wytwarzane są w tzw. klistronach:
elektrony generują/wzmacniają
promieniowanie we wnęce rezonansowej



Mikrofałe

Długości fali: od kilku decymetrów do około 1 mm

Częstotliwość: rzędu 1 do 300 GHz

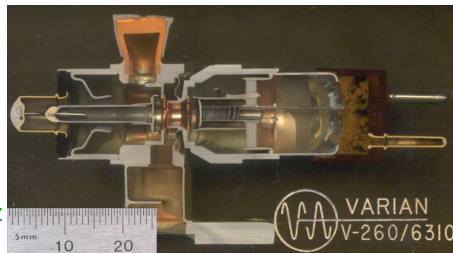
są to przedziały orientacyjne, czasami mikrofałe zaliczane są do fal radiowych

Wytwarzane są w tzw. klistronach:
elektrony generują/wzmacniają
promieniowanie we wnęce rezonansowej

WiFi (802.11/b/g) wykorzystuje 2.4 GHz
nowsze standardy 5–60 GHz

Kuchenki mikrofalowe: 2.45 GHz

Radary: 1–100 GHz



Promieniowanie elektromagnetyczne

Mikrofale

Długości fali: od kilku decymetrów do około 1 mm

Częstotliwość: rzędu 1 do 300 GHz

są to przedziały orientacyjne, czasami mikrofale zaliczane są do fal radiowych

Wytwarzane są w tzw. klistronach:
elektrony generują/wzmacniają
promieniowanie we wnęce rezonansowej

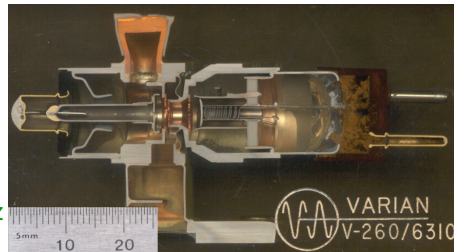
WiFi (802.11/b/g) wykorzystuje 2.4 GHz
nowsze standardy 5–60 GHz

Kuchenki mikrofalowe: 2.45 GHz

Radary: 1–100 GHz

Mikrofalowe Promieniowanie Tła:

$$\lambda_{max} \approx 1 \text{ mm}, \nu(\lambda_{max}) \approx 300 \text{ GHz}, E_{\gamma} \sim 1 \text{ meV}$$



Podczerwień

Długości fali: od około 1 mm do granicy światła czerwonego (ok. 700 nm)

Częstotliwość: od około 300 GHz do około 420 THz

Energie fotonów: od około 1 meV do 1.8 eV

Zakres od 0.3 do 10 THz nazywany jest też promieniowaniem terahertzowym

Podczerwień

Długości fali: od około 1 mm do granicy światła czerwonego (ok. 700 nm)

Częstotliwość: od około 300 GHz do około 420 THz

Energie fotonów: od około 1 meV do 1.8 eV

Zakres od 0.3 do 10 THz nazywany jest też promieniowaniem terahertzowym

Źródła:

- promieniowanie termiczne ciał

Podczerwień

Długości fali: od około 1 mm do granicy światła czerwonego (ok. 700 nm)

Częstotliwość: od około 300 GHz do około 420 THz

Energie fotonów: od około 1 meV do 1.8 eV

Zakres od 0.3 do 10 THz nazywany jest też promieniowaniem terahertzowym

Źródła:

- promieniowanie termiczne ciał
- promieniowanie wzbudzonych atomów przejścia pomiędzy poziomami o małej różnicy energii

Podczerwień

Długości fali: od około 1 mm do granicy światła czerwonego (ok. 700 nm)

Częstotliwość: od około 300 GHz do około 420 THz

Energie fotonów: od około 1 meV do 1.8 eV

Zakres od 0.3 do 10 THz nazywany jest też promieniowaniem terahertzowym

Źródła:

- promieniowanie termiczne ciał
- promieniowanie wzbudzonych atomów
przejścia pomiędzy poziomami o małej różnicy energii
- elementy półprzewodnikowe
szerokie pole do rozwoju nowych technologii
jeśli możliwa emisja to także absorpcja/detekcja promieniowania!

Podczerwień

Długości fali: od około 1 mm do granicy światła czerwonego (ok. 700 nm)

Częstotliwość: od około 300 GHz do około 420 THz

Energie fotonów: od około 1 meV do 1.8 eV

Zakres od 0.3 do 10 THz nazywany jest też promieniowaniem terahertzowym

Źródła:

- promieniowanie termiczne ciał
- promieniowanie wzbudzonych atomów
przejścia pomiędzy poziomami o małej różnicy energii
- elementy półprzewodnikowe
szerokie pole do rozwoju nowych technologii
jeśli możliwa emisja to także absorpcja/detekcja promieniowania!

Łączna światłowodowa: $0.7 - 1.4 \mu\text{m}$ (0.8 – 1.8 eV)

Piloty na podczerwień: 850 nm (1.5 eV)

Ultrafiolet

Długości fali: od granicy światła widzialnego (ok. 400 nm) do około 10 nm

Częstotliwość: od około 750 THz do około 30 PHz

Energie fotonów: od około 3 eV do 120 eV

Ultrafiolet

Długości fali: od granicy światła widzialnego (ok. 400 nm) do około 10 nm

Częstotliwość: od około 750 THz do około 30 PHz

Energie fotonów: od około 3 eV do 120 eV

- promieniowanie termiczne ciał
widmo termiczne jest bardzo szerokie, formalnie sięga $\lambda \rightarrow 0$
głównym źródłem promieniowania UV na Ziemi jest Słońce
- promieniowanie wzbudzonych atomów
przykład: kwarcówka, także lampy jarzeniowe
- elementy półprzewodnikowe
rozwój technologii pozwala wykorzystywać zakres od 10 μm do 10 nm
- wyładowania elektryczne (np. lampy łukowe)

Ultrafiolet

Długości fali: od granicy światła widzialnego (ok. 400 nm) do około 10 nm

Częstotliwość: od około 750 THz do około 30 PHz

Energie fotonów: od około 3 eV do 120 eV

- promieniowanie termiczne ciał
widmo termiczne jest bardzo szerokie, formalnie sięga $\lambda \rightarrow 0$
głównym źródłem promieniowania UV na Ziemi jest Słońce
- promieniowanie wzbudzonych atomów
przykład: kwarcówka, także lampy jarzeniowe
- elementy półprzewodnikowe
rozwój technologii pozwala wykorzystywać zakres od 10 μm do 10 nm
- wyładowania elektryczne (np. lampy łukowe)

Utwardzanie plomb dentystycznych: 200–350 nm (ok. 3.5–6 eV)

Lampy UV do sterylizacji: 250 nm (5 eV)

Fotolitografia (np. produkcja układów scalonych): 190 nm (6.5 eV)

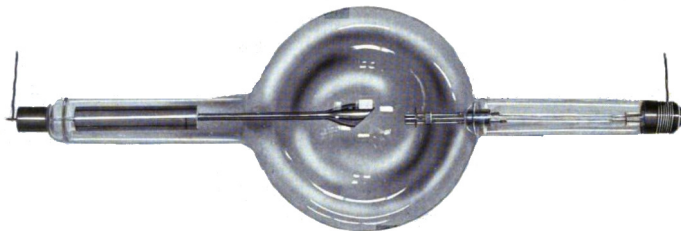
Promieniowanie rentgenowskie

Odkryte przez Röntgena w 1895 roku (nagroda Nobla 1901)

Długości fali: rzędu 1 nm do 0.01 nm (10 \AA do 0.1 \AA)

Energie fotonów: rzędu 1 keV do 100 keV

Widok lampy rentgenowskiej z początku XX w.



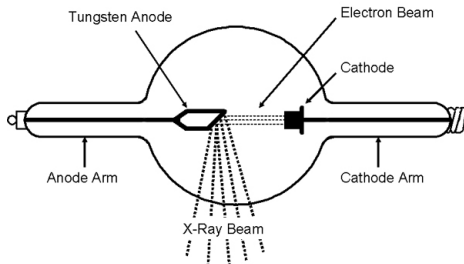
Promieniowanie rentgenowskie

Odkryte przez Röntgena w 1895 roku (nagroda Nobla 1901)

Długości fali: rzędu 1 nm do 0.01 nm (10 \AA do 0.1 \AA)

Energie fotonów: rzędu 1 keV do 100 keV

Schemat lampy rentgenowskiej (najprostsza konstrukcja)



Źródłem promieniowania są (głównie) rozpędzone elektrony hamujące w gęstym materiale anody \Rightarrow promieniowanie hamowania

Dodatkową składową stanowi promieniowanie wzbudzonych atomów anody.

Promieniowanie rentgenowskie

Widmo

Napięcie przyłożone między anodą i katodą rozpędza elektrony do energii:

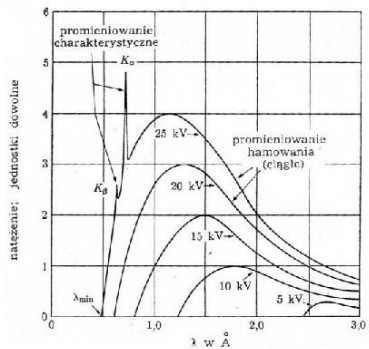
$$E_e = e \cdot U$$

Elektrony hamowane w zderzeniach z jądrami anody tracą energię emitując fotony promieniowania hamowania.

Pojedynczy foton może uzyskać energie nie większą niż energia elektronu:

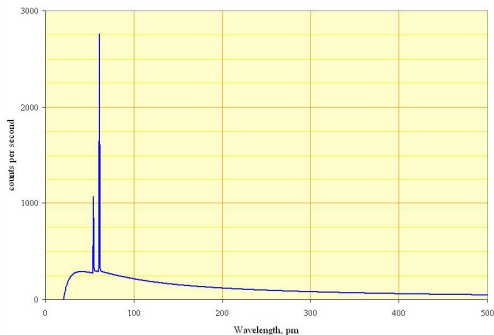
$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} < E_e = e \cdot U = \frac{hc}{\lambda_{min}} = E_\gamma^{max}$$

⇒ napięcie U przyłożone do lampy decyduje o tym jaka jest największa możliwa energia fotonu E_γ^{max} ⇒ najmniejsza osiągalna długość fali λ_{min}



Widmo

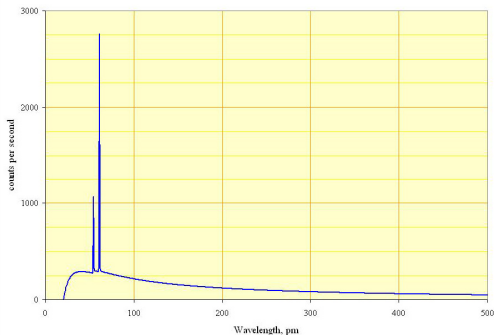
Widmo promieniowania lampy z anodą rodową przy napięciu 60 kV



Minimalna długość fali: $\lambda_{min} = \frac{h c}{e U} \approx \frac{1.24 \mu m eV}{60000 eV} \approx 21 \mu m$

Widmo

Widmo promieniowania lampy z anodą rodową przy napięciu 60 kV



Minimalna długość fali: $\lambda_{min} = \frac{h c}{e U} \approx \frac{1.24 \mu\text{m eV}}{60000 \text{eV}} \approx 21 \text{pm}$

Wąskie linie widmowe przy 50 i 60 pm odpowiadają promieniowaniu charakterystycznemu rodu. Emitowane ono jest gdy padający elektron wzbudzi elektron na wewnętrznej powłóce atomu anody.

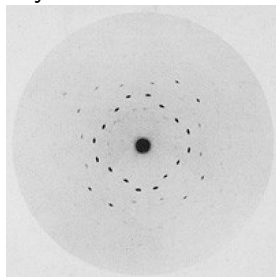
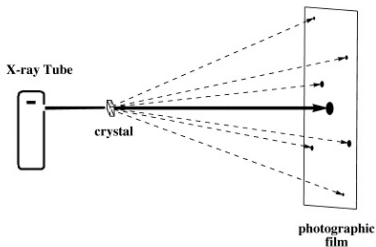
Własności

Absorbowane w materii tym silniej im wyższe Z (patrz wykład 3)
Może wywoływać różne reakcje chemiczne (np. zaciemnienie kliszy) i procesy fizyczne (fluorescencja: świecenie określonych substancji, efekt fotoelektryczny, zjawisko Comptona) \Rightarrow własności korpuskularne

Własności

Absorbowane w materii tym silniej im wyższe Z (patrz wykład 3)
Może wywoływać różne reakcje chemiczne (np. zaciemnienie kliszy) i procesy fizyczne (fluorescencja: świecenie określonych substancji, efekt fotoelektryczny, zjawisko Comptona) \Rightarrow własności korpuskularne

Przejawia też własności falowe: dyfrakcja na kryształach



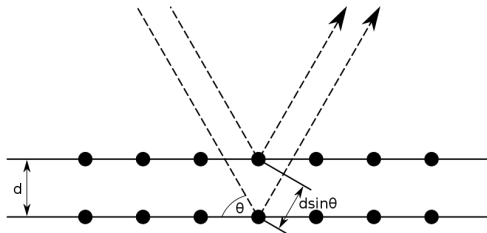
(Max von Laue, 1912; nagroda Nobla 1914)

Dyfrakcja na kryształach

Dyfrakcja światła zachodzi na strukturach 1- lub 2-wymiarowych

Promieniowanie rentgenowskie przenika przez całą próbkę

⇒ dyfrakcja na kryształach wynika z rozpraszania na atomach w całej jego objętości, w kolejnych płaszczyznach atomowych



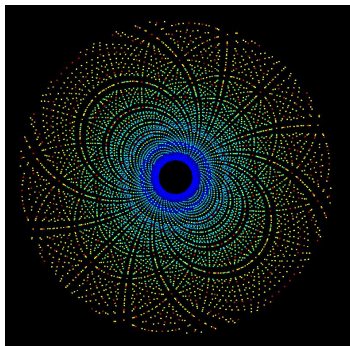
⇒ możemy zrekonstruować dokładną strukturę sieci krystalicznej
krystalografia rentgenowska

Dyfrakcja na kryształach

Dyfrakcja światła zachodzi na strukturach 1- lub 2-wymiarowych

Promieniowanie rentgenowskie przenika przez całą próbkę

⇒ dyfrakcja na kryształach wynika z rozpraszania na atomach w całej jego objętości, w kolejnych płaszczyznach atomowych



Przykładowy obraz dyfrakcyjny uzyskany na monokryształach

Promieniowanie gamma

Długości fali: poniżej około 0.01 nm (0.1 Å)

Energie fotonów: powyżej około 100 keV (naogół rzędu MeV)

Granica między promieniowaniem rentgenowskim i gamma jest umowna.

Fizyka jest ciągła: "twarde" promieniowanie rentgenowskie zachowuje się tak samo jak "miękkie" promieniowanie gamma

Źródła:

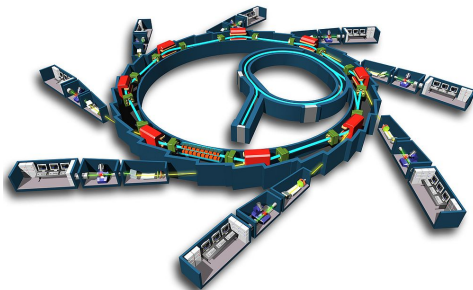
- rozpad promieniotwórczy (deekscytacja jąder wzbudzonych)
- promieniowanie kosmiczne (także energie rzędu TeV)
- promieniowanie hamowania
- promieniowanie synchrotronowe

Promieniowanie synchrotronowe

Powstaje gdy wysokoenergetyczne elektrony są zakrzywane w polu magnetycznym (doznają przyspieszenia).

Schemat synchrotronu SOLEIL
(Francja)

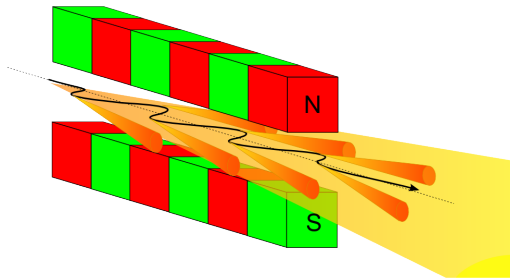
Wiązka elektronów o energii
2.75 GeV w pierścieniu o
obwodzie 350 m.



W magnesach zakrzywiających wiązkę (zaznaczone na czerwono) elektrony emitują promieniowanie kierowane następnie do stanowisk badawczych. Promieniowanie synchrotronowe jest silnie skolimowane w kierunku wiązki (patrz ćwiczenia 2).

Promieniowanie synchrotronowe

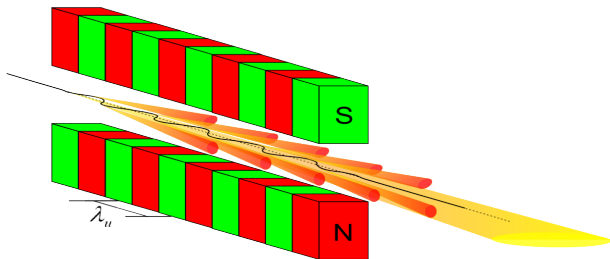
Intensywność promieniowania synchrotronowego wiązki elektronów możemy “wzmocnić” stosując zamiast “zwykłych” magnesów zakrzywiających specjalne układy magnesów, tzw. **wiggler**



Generowana jest silnie skolimowana wiązka promieniowania.

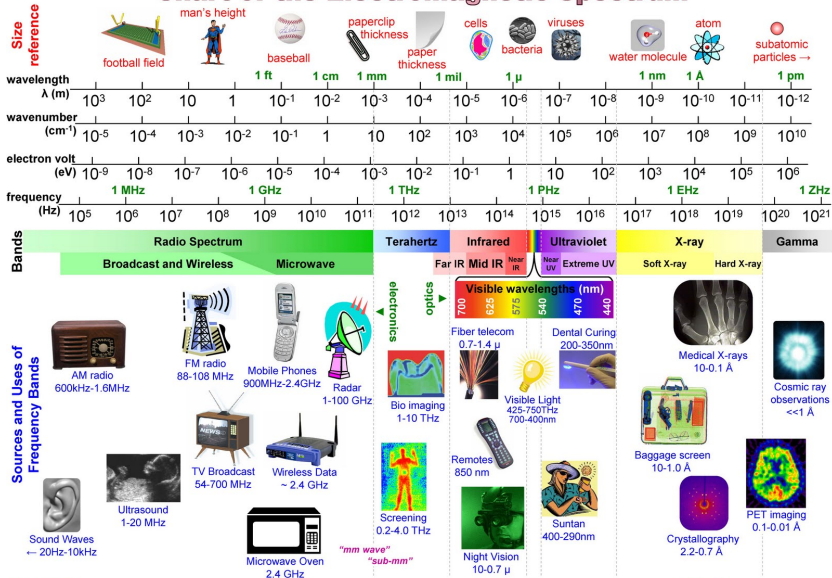
Promieniowanie synchrotronowe

Intensywność promieniowania synchrotronowego wiązki elektronów możemy “wzmocnić” stosując zamiast “zwykłych” magnesów zakrzywiających specjalne układy magnesów, tzw. **wiggler** lub **undulatory**



Generowana jest silnie skolimowana wiązka promieniowania.
W przypadku undulatorów lepszą kolimację uzyskujemy wykorzystując interferencje promieniowania z kolejnych “zakrętów”

Chart of the Electromagnetic Spectrum



© 2005 SURA www.sura.org
Copyrighted images used with permission, Rev2C 6-June-2005

$$\lambda = 3 \times 10^8 / \text{freq} = 1 / (\text{wn} \times 100) = 1.24 \times 10^{-6} / \text{eV}$$

SURA Southeastern Universities Research Association