Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

Część I: Optyka, wykład 1

wykład: Piotr Fita
pokazy: Jacek Szczytko
ćwiczenia: Aneta Drabińska, Paweł Kowalczyk, Barbara Piętka

Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

2018/19

Plan

O czym będzie ten wykład?

O oddziaływaniu światła z materią:

- Absorbcja i emisja światła
- Rozpraszanie
- Wzmocnienie światła (laser)
- Przekaz pędu (chłodzenie atomów)
- Optyczne badania materii (spektroskopia)
- Wpływ zewnętrznych pól na energie poziomów atomowych

Formuła wykładu:
Tablica (wyprowadzenia wybranych praw) + rzutnik (rysunki i wnioski) + pokazy

O czym nie będzie ten wykład?

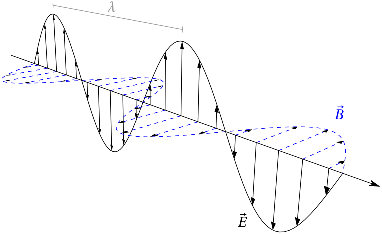
O własnościach samego światła:

- Dyfrakcja
- Interferencja
- Spójność
- Statystyka światła
- Stany kwantowe światła

Co trzeba wiedzieć?

- Niewiele z zakresu optyki
  (tyle, ile na kilku kolejnych slajdach)
- Nieco z zakresu budowy materii:
  - Podstawy mechaniki kwantowej
  - Struktura atomu
- Podstawy termodynamiki
- Adres strony wykładu:
  http://www.fuw.edu.pl/wiki/WdOiFMS
  - zasady zaliczenia
  - polecana literatura
  - terminy
  - materiały z wykładów i ćwiczeń

Pole elektryczne i wektor Poyntinga



Fala płaska w kierunku z:

$$\overrightarrow{E}(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)\widehat{x}$$

$$\overrightarrow{B}(z,t) = \frac{1}{c} E_0 \cos(kz - \omega t)\widehat{y}$$

Gęstość energii:

$$u = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2\right)$$

$$u = \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kz - \omega t)$$

Strumień energii
(wektor Poyntinga):

$$\overrightarrow{S} = \frac{1}{\mu_0}(\overrightarrow{E} \times \overrightarrow{B})$$

$$\overrightarrow{S} = cu\widehat{z}$$

Natężenie światła

Interesuje nas uśredniona po okresie wartość wektora Poyntinga:

$$\langle u \rangle = \epsilon_0 E_0^2 \langle \cos^2(kz - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_0^2$$

$$\langle \overrightarrow{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \widehat{z}$$

Natężenie światła I:

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

(uśredniona po okresie moc fali na jednostkę powierzchni)

Notacja zespolona

Korzystamy ze wzoru Eulera:

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi} = \cos\phi + \mathrm{i}\sin\phi$$

Dla fali o wektorze falowym $\vec{k}$:
(Część urojoną pomijamy "w pamięci")

$$\vec{E} = E_0 \mathrm{e}^{-i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}\hat{n}$$

Tu E_0 może być zespolone, wtedy zawiera informację o fazie:
$E_0 = |E_0|\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}$

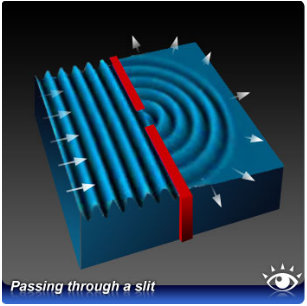
$$\vec{B} = \frac{1}{c} E_0 \mathrm{e}^{-i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}(\hat{k}\times\hat{n})$$

Natężenie światła:

$$I = \frac{1}{2} c\epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} c\epsilon_0 |\vec{E}|^2 \sim |\vec{E}|^2$$

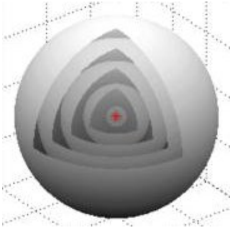
Fale płaskie a sferyczne

Fale ze źródła punktowego:



[media.learn.udi.edu]

W trzech wymiarach:



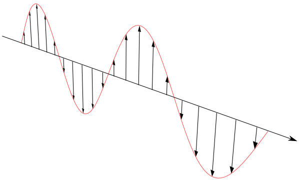
[ipodphysics.com]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{E}_0}{r} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}(kr \pm \omega t)}$$

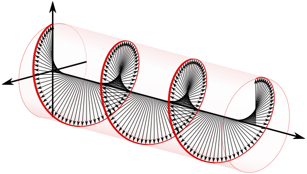
$$I(\vec{r}) \sim \frac{1}{r^2}$$

Polaryzacja światła

polaryzacja liniowa



polaryzacja kołowa

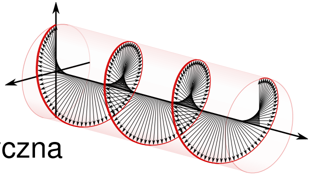


Dowolny stan polaryzacji światła może być uzyskany jako kombinacja liniowa (z odpowiednimi amplitudami i fazami):

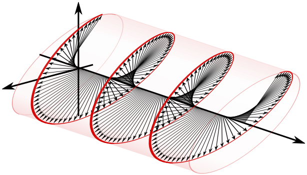
- Dwóch prostopadłych polaryzacji liniowych
- Dwóch przeciwnych polaryzacji kołowych

Polaryzacja światła

- polaryzacja kołowa



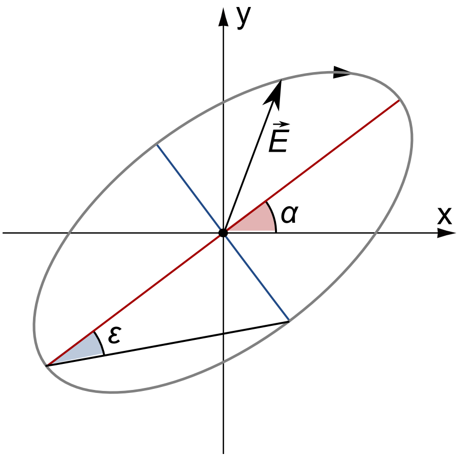
- polaryzacja eliptyczna



Kierunek wektora $\vec{E}$ nie zależy od położenia w kierunku poprzecznym do kierunku propagacji

Polaryzacja eliptyczna

Opis polaryzacji eliptycznej



Prawo promieniowania ciała doskonale czarnego

Gestość energii promieniowana będącego w równowadze termicznej z otoczeniem:

- Klasycznie (prawo Rayleigha-Jeansa):

$$\rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \mathrm{d}\nu$$

  (Działa w podczerwieni, ale "katastrofa w nadfiolecie")

- Kwantowo (prawo Plancka)

$$\rho(\nu)\mathrm{d}\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\mathrm{e}^{h\nu/kT} - 1} \mathrm{d}\nu$$

To są wyrażenia na **Gęstość energii** w przedziale częstości $\mathrm{d}\nu$, nie na natężenie światła, czy moc wypromieniowaną

Prawo Stefana-Boltzmanna

Gęstość energii w całym zakresie częstości (u):

$$u = \int_0^\infty \rho(\nu)\mathrm{d}\nu$$

Gęstość energii $\rightarrow$ zdolność emisyjna ($\rho(\nu) \cdot \frac{c}{4}$) $\rightarrow$ całkowanie $\rightarrow$ moc promieniowania ciała doskonale czarnego na jednostkę powierzchni **(prawo Stefana-Boltzmanna)**

$$P = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4}$$

(*Wyprowadzenie na ćwiczeniach*)

Prawo Wiena

Długość fali, przy której gęstość energii osiąga maksimum w temp. T **(prawo Wiena)**:

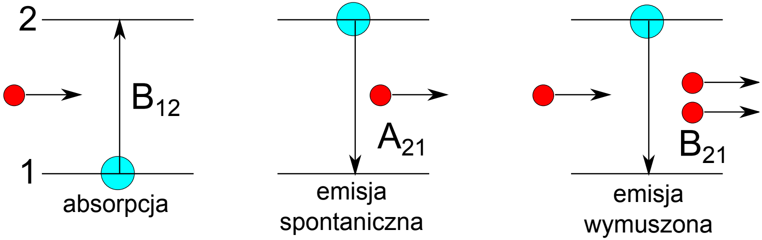
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

$$b \approx 2.9 \cdot 10^{-3}\mathrm{mK}$$

Dla Słońca $T \approx 5800$ K $\rightarrow \lambda_{max} \approx 500$ nm (zielony)

(*Wyprowadzenie na ćwiczeniach*)

Absorpcja i emisja światła



- Liczba aktów absorpcji w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N_{12} = B_{12}\rho(\nu)N_1\mathrm{d}t$$

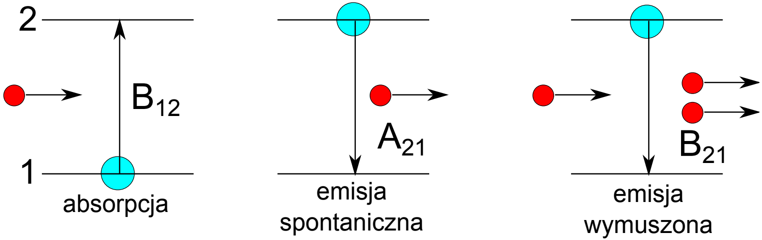
- Liczba aktów emisji spontanicznej w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N'_{21} = A_{21}N_2\mathrm{d}t$$

- Liczba aktów emisji wymuszonej w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N''_{21} = B_{21}\rho(\nu)N_2\mathrm{d}t$$

Absorpcja i emisja światła



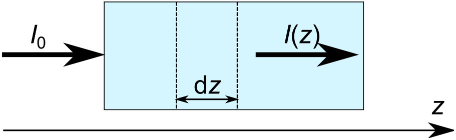
Relacje między współczynnikami Einsteina:

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

(Wyprowadzenie - na ćwiczeniach)

Prawo Lamberta - Beera



Liczba fotonów pochłoniętych w czasie $\mathrm{d}t$:

$$\mathrm{d}N_{12} = B_{12}(\nu)\rho(\nu)N_1\mathrm{d}t$$

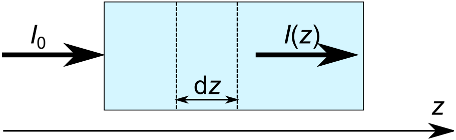
N_1 – liczba atomów w objętości, przez którą przechodzi światło:

$$N_1 = c_0 \cdot V = c_0 \cdot A \cdot \mathrm{d}z$$

Wstawiamy:

$$\frac{\mathrm{d}N_{12}}{A \cdot \mathrm{d}t} = B_{12}(\nu)\rho(\nu)c_0\mathrm{d}z$$

Prawo Lamberta - Beera



$$\frac{\mathrm{d}N_{12}}{A \cdot \mathrm{d}t} = B_{12}(\nu)\rho(\nu)c_0\mathrm{d}z$$

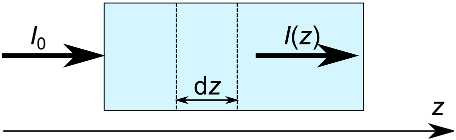
Lewa strona jest proporcjonalna do spadku natężenia światła:

$$\frac{\mathrm{d}N_{12}}{A \cdot \mathrm{d}t} \sim -\mathrm{d}I$$

Oraz $\rho(\nu) \sim I(\nu)$
Zbieramy wszystkie stałe do $\epsilon(\nu)$:

$$\mathrm{d}I = -\epsilon(\nu)I(\nu)c_0\mathrm{d}z$$

Prawo Lamberta - Beera



$$\frac{\mathrm{d}I(\nu)}{\mathrm{d}z} = -\epsilon(\nu) c_0 I(\nu)$$

$$I(\nu, z) = I_0(\nu) \mathrm{e}^{-\epsilon(\nu) c_0 z} = I_0(\nu) \mathrm{e}^{-\alpha(\nu) z}$$