

Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego

wykładowcy:

prof. dr hab. Maria Kamińska, tel. 55 32 366,
email: Maria.Kaminska@fuw.edu.pl.

dr Aneta Drabińska, tel. 55 32 147,
email: Aneta.Drabinska@fuw.edu.pl

ćwiczenia:

dr Aneta Drabińska,
grupa I wtorek godz. 9.15-11.00, P113
grupa II środa godz. 8.45-10.30, P108

Zasady zaliczania:

W czasie semestru będzie jedno kolokwium. Kolokwium jest z zadań (1 zadanie z zadań domowych). Zalicza uzyskanie co najmniej połowy punktów.

Ćwiczenia kończą się zaliczeniem i listą osób wyróżnionych.

W normalnym trybie zaliczone ćwiczenia mają osoby, które zaliczą kolokwium oraz wykażą się obecnością na ćwiczeniach (<3 nieusprawiedliwione nieobecności).

Osoby, które nie zaliczą kolokwium, mogą zaliczyć ćwiczenia zdając egzamin pisemny, czyli uzyskując co najmniej połowę punktów z każdej jego części. Warunkiem zaliczania ćwiczeń takim trybem jest ponadto obecność na ćwiczeniach (<3 nieusprawiedliwione nieobecności).

Egzamin:

Wykład kończy się egzaminem pisemnym i ustnym.

Egzamin pisemny składa się z dwóch części: testu i zadań.

Warunkiem przystąpienia do egzaminu ustnego jest zaliczenie ćwiczeń.

Prosimy o przynoszenie indeksu na kolokwia i egzaminy.

Literatura

1. A. Twardowski "Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego"
2. J. Ginter "Podstawowe pojęcia fizyki kwantowej", Studium Podyplomowe Fizyki z Astronomią
3. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, "Podstawy Fizyki" t.5
4. J. Orear "Fizyka" t.2
5. H. Haken, H. Ch. Wolf, "Atomy i kwanty. Wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej"

Treść wykładu

- 1. Dualizm korpuskularno-falowy**
- 2. Opis mikroświata mechaniki kwantowej**
- 3. Atom wodoru**
- 4. Promieniowanie i oddziaływanie atomu z promieniowaniem**
- 5. Atomy metali alkalicznych**
- 6. Efekt Starka i efekt Zeemana**
- 7. Spin**
- 8. Cząsteczki**
- 9. Kryształy**
- 10. Rozpraszanie fal na kryształach**
- 11. Drgania sieci krystalicznej**
- 12. Nośniki prądu w kryształach i strukturach niskowymiarowych**
- 13. Magnetyki**
- 14. Nadprzewodnictwo**

Klasyczne równanie falowe przypadek jednowymiarowy

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial t^2}$$

Impuls biegnący z dodatnim zwrotem osi x

$$U_{\rightarrow}(x,t) = f(x - vt)$$

Impuls biegnący z ujemnym zwrotem osi x

$$U_{\leftarrow}(x,t) = f(x + vt)$$

Jednowymiarowe fale sinusoidalne

$$U_{\rightarrow}(x, t) = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

Ustalony czas, np. $t=0$

$$U_{\rightarrow}(x, 0) = A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda}$$

Ustalone położenie, np. $x=0$

$$U_{\rightarrow}(0, t) = A \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

liczba falowa $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

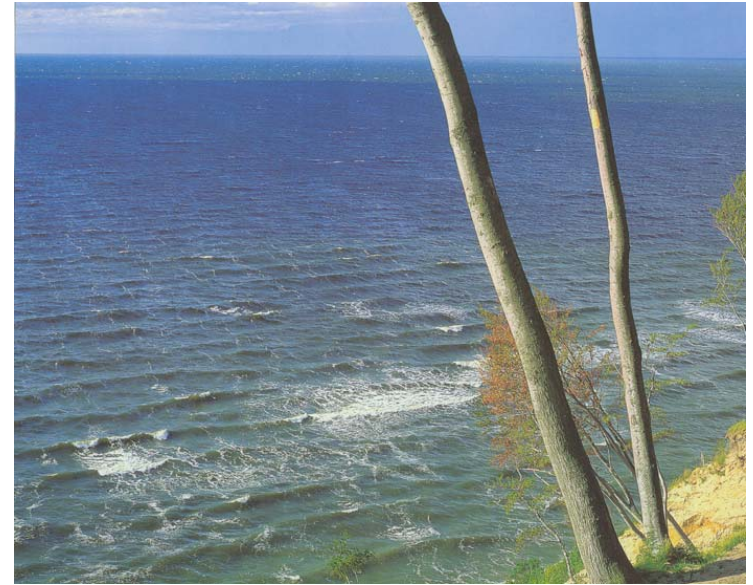
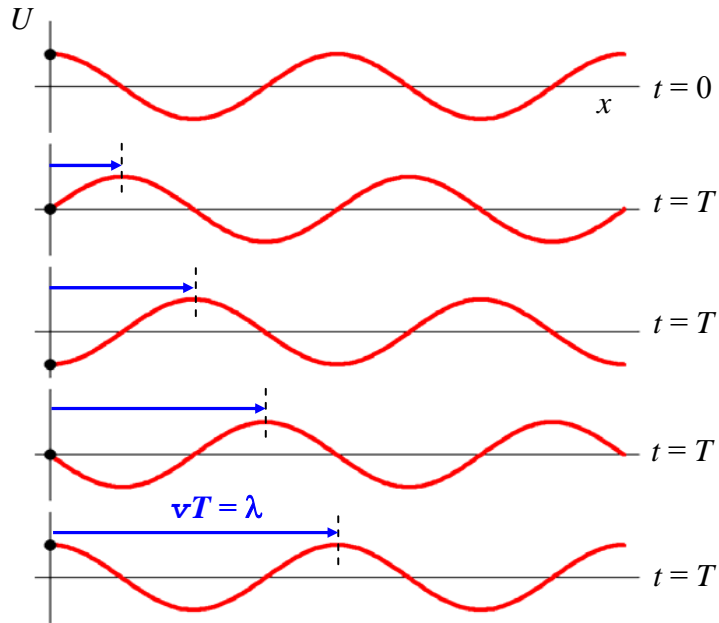
częstość kołowa $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$

$$\nu = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{k}}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega}{k}$$

$$\omega = \nu k$$

klasyczna zależność dyspersyjna

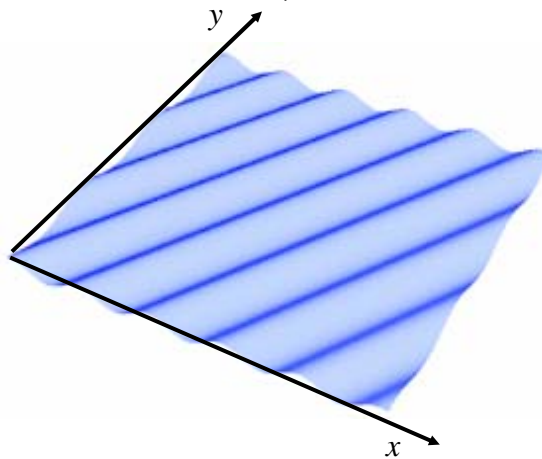
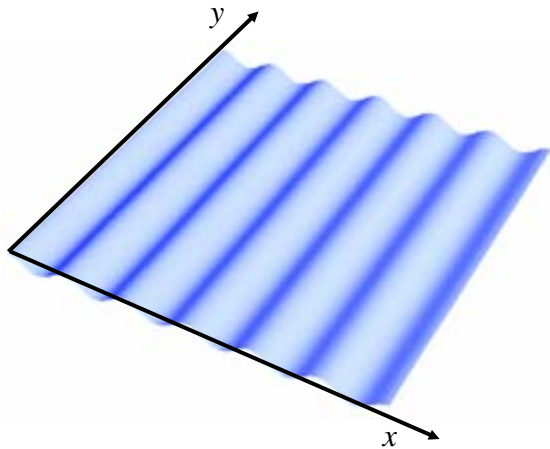
$$U_{\rightarrow}(x, t) = A \cos(kx - \omega t) = A \cos\left[k\left(x - \frac{\omega}{k} t\right)\right] = A \cos[k(x - \nu t)]$$



$$U_{\rightarrow}(x, t) = A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

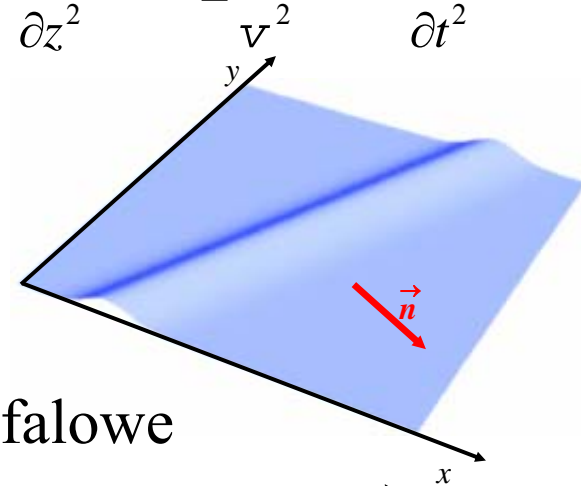
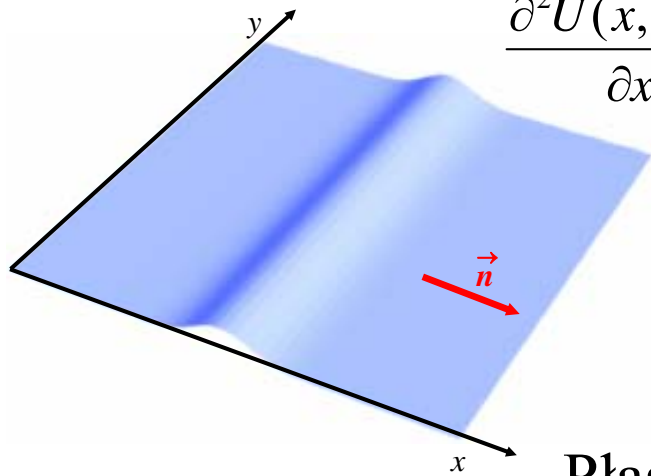
Fale sinusoidalne w zapisie zespolonym

$$\tilde{U}_{\rightarrow}(x, t) = \tilde{A} e^{i(kx - \omega t)} \equiv A e^{i(kx - \omega t)}$$



klasyczne równanie falowe w trzech wymiarach

$$\frac{\partial^2 U(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

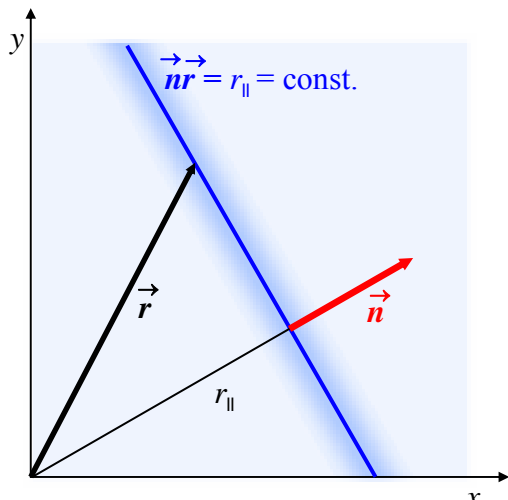


Płaskie biegnące impulsy falowe

$$U(x, y, t) = f(r_{\parallel} - vt) = f(\vec{n}\vec{r} - vt) = f(n_x x + n_y y - vt)$$

Płaskie fale sinusoidalne

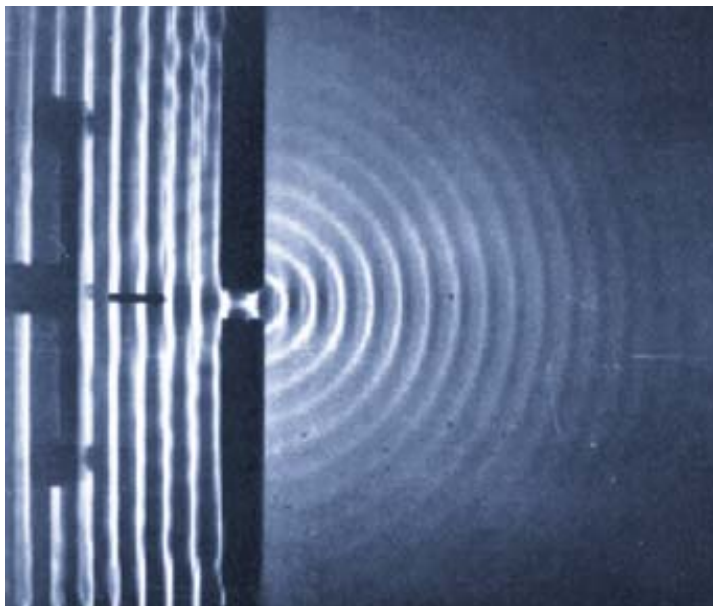
$$U(x, y, t) = A \cos[k(\vec{n}\vec{r} - vt)] = A \cos(\vec{k}\vec{r} - kvt) = A \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t) = A \cos(k_x x + k_y y - \omega t).$$



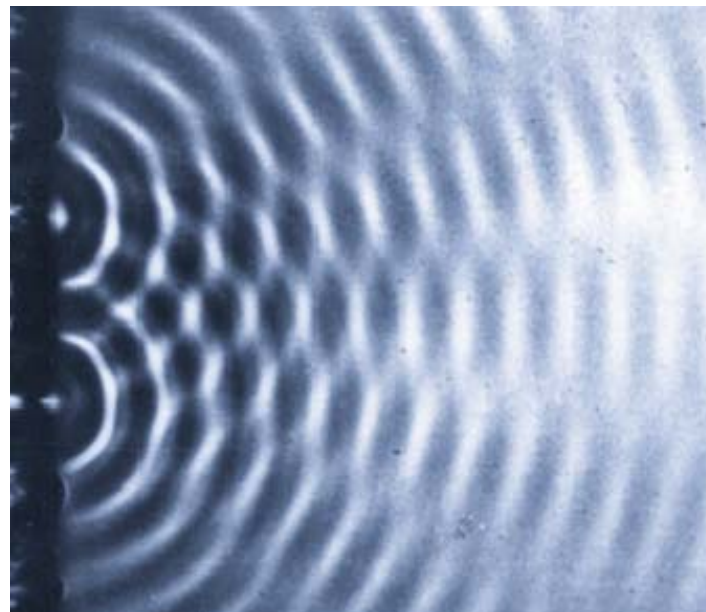
$$\vec{k} = k\vec{n} = [k n_x, k n_y] \equiv [k_x, k_y] \quad \text{wektor falowy}$$

zapis zespolony $\tilde{U}(x, y, t) = \tilde{A} e^{i(\vec{k}\vec{r} - \omega t)}$

Dyfrakcja



Interferencja



Warunek **maksymalnych wzmoceń**:

$$d \sin \alpha = n \lambda ;$$

co odpowiada warunkowi dla kata α :

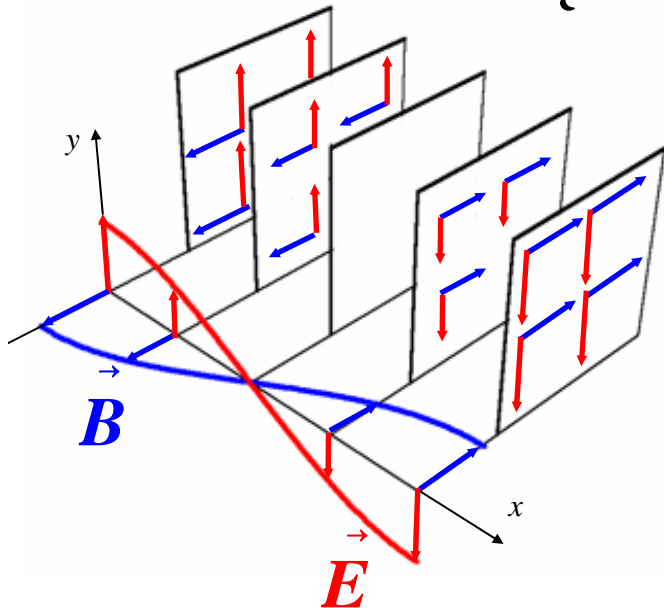
$$\sin \alpha = n \frac{\lambda}{d}$$

Światło – jako fale (elektromagnetyczne)

Równanie falowe dla „fal pola elektrycznego” $\Delta \vec{E}(\vec{r}, t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2}$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \left(8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{s}^4 \text{A}^2}{\text{m}^3 \text{kg}} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m} \cdot \text{kg}}{\text{s}^2 \text{A}^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \approx$$
$$\approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Gęstość energii pól elektrycznego i magnetycznego



$$\rho_E(\vec{r}, t) = \frac{\varepsilon_0 E^2(\vec{r}, t)}{2} + \frac{B^2(\vec{r}, t)}{2\mu_0}$$

Gęstość energii dla fal płaskich

$$B^2(\vec{r}, t) = \frac{1}{c^2} E^2(\vec{r}, t) = \varepsilon_0 \mu_0 E^2(\vec{r}, t)$$

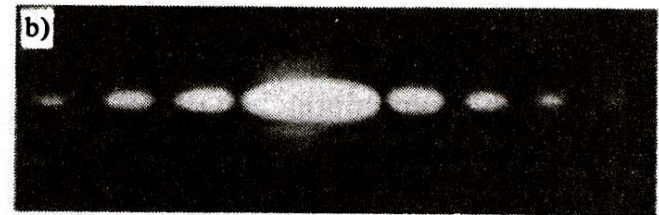
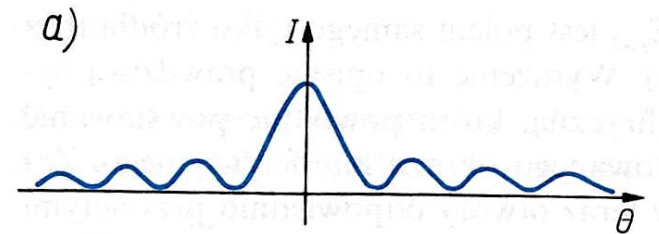
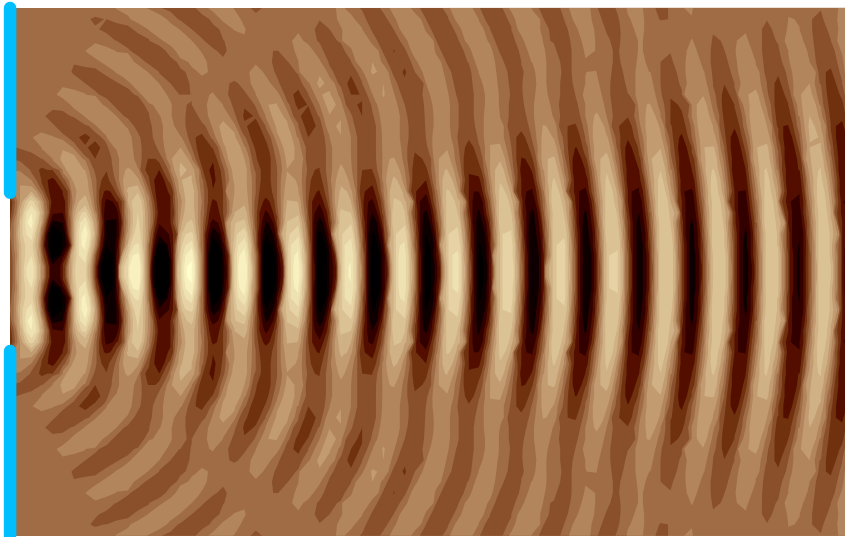
$$\rho_E(\vec{r}, t) = \frac{\varepsilon_0 E^2(\vec{r}, t)}{2} + \frac{\varepsilon_0 \mu_0 E^2(\vec{r}, t)}{2\mu_0} = \varepsilon_0 E^2(\vec{r}, t)$$

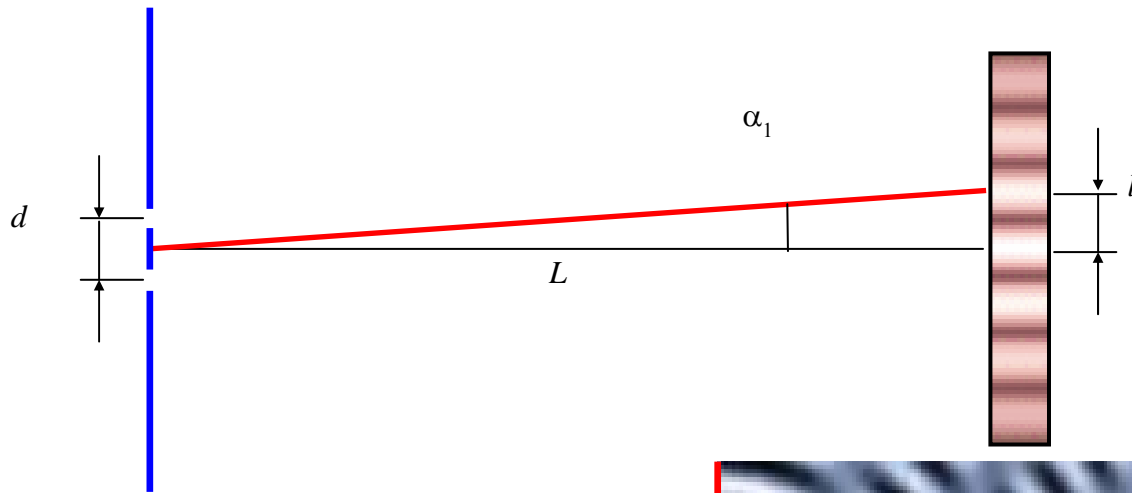
$$E_x(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

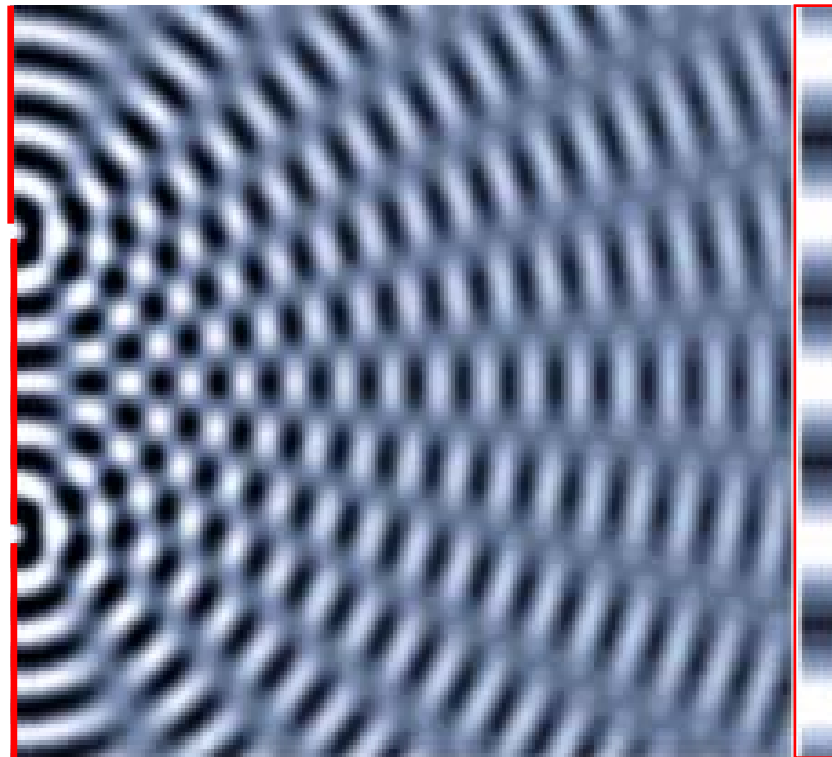
$$\omega = ck$$

Dyfrakcja światła



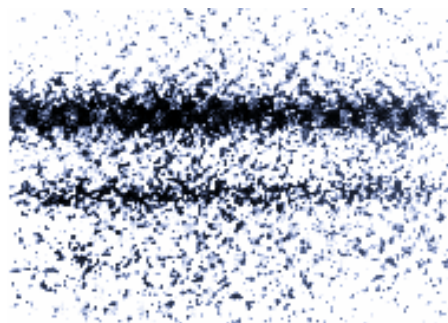


Interferencja światła

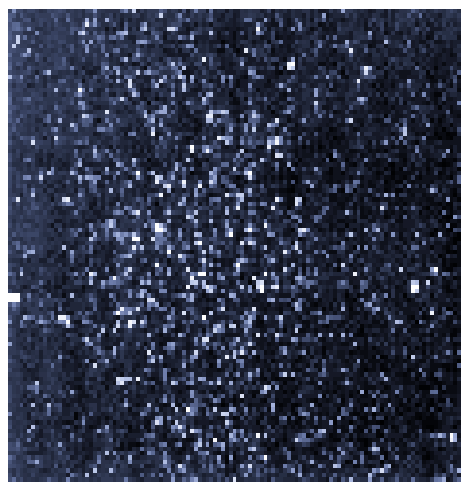


- Podział fizyki na działy takie jak mechanika, termodynamika, elektryczność i magnetyzm, optyka, zaczął okazywać się niewystarczający, kiedy w końcu XIX i na początku XX wieku zaczęło przybywać faktów eksperymentalnych, których zrozumienie w ramach tzw. fizyki klasycznej nie było możliwe. Fakty te związane były z poznawaniem struktury materii na poziomie atomowym oraz ze zjawiskami oddziaływania tej materii z promieniowaniem – emisją, absorpcją i rozpraszaniem energii elektromagnetycznej. Zostały stworzone podwaliny mechaniki kwantowej, którą można uznać za najbardziej istotną teorię fizyczną wieku XX. Jej głównym przesłaniem jest możliwość istnienia obiektów materialnych tylko w pewnych wyróżnionych stanach. Kwant oznacza najmniejszą porcję, o jaką może się zmieniać dana wielkość fizyczna (np. energia, pęd) określonego układu.
- **Mechanika kwantowa** opisuje procesy, w których biorą udział mikroobiekty (atomy, cząsteczki), uwzględniając nieciągłość (skokowość zmian) wielkości fizycznych charakteryzujących stany tych mikroobiektów.

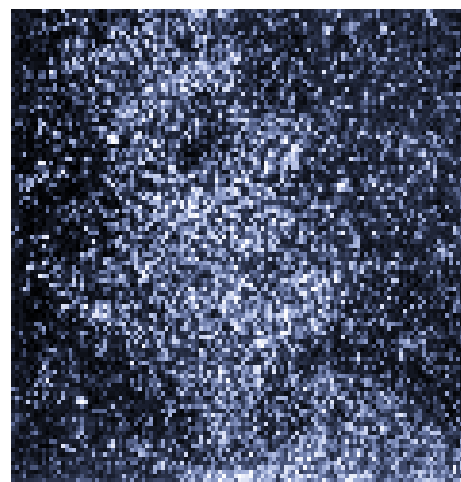
1851r. wynalazek kliszy fotograficznej,
mikrometrowe ziarenka emulsji



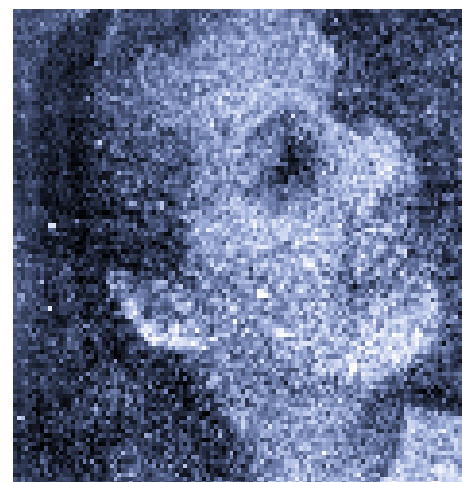
Klisza fotograficzna widziana pod mikroskopem



$3 \cdot 10^3$



$1,2 \cdot 10^4$



$0,93 \cdot 10^5$



$0,76 \cdot 10^6$

Tworzenie obrazu fotograficznego.

Pod zdjęciem podana przybliżona liczba fotonów

- Teoria, że sama materia ma budowę złożoną z najmniejszych cegiełek – atomów pojawił się już 4-5 wieków przed naszą erą (Demokryt, Platon, Arystoteles). Badania chemiczne Prouta, Daltona i Gay Loussaca prowadzące do praw stosunków w reakcjach chemicznych można było bardzo prosto wyjaśnić posługując się hipotezą atomową.
- Z kolei doświadczenia Faraday’a dotyczące elektrolizy cieczy wskazywały na istnienie „cegiełki” elektryczności – elektronu
- Fakt, że światło można traktować jako falę został zademonstrowany w XVII i XVIII wieku przez Huygensa i Younga w doświadczeniach dyfrakcji i interferencji. W XIX wieku ujawniono naturę tych fal – są to fale elektromagnetyczne, opisywane przez równanie Maxwella. Charakteryzują je wektory pola elektrycznego E i magnetycznego B i wykazują one okresowości o częstości kołowej ω .
- Postulat istnienia „cegiełki” energii, kwantu energii, wysunął Planck 14.12.1900r. podczas wykładu w Towarzystwie Naukowym w Berlinie, kiedy to przedstawił wyprowadzone przez siebie prawa promieniowania ciała doskonale czarnego. Do wyprowadzenia tych praw założył, że ciało doskonale czarne zachowuje się jak zbiór oscylatorów harmoniczných, z których każdy może się znajdować jedynie w pewnych wyróżnionych stanach energetycznych, określonych wzorem

$$E = n \cdot h\omega \quad *$$

Ciało doskonale czarne mogło więc pochłaniać i emitować energię tylko pewnymi porcjami (kwantami).

*Dziś wiemy, że to kwantowanie jest ściślej opisane równaniem $E = (n+1/2) \cdot h\omega$

Zgodnie z prawem Kirchhoffa, zdolność absorpcyjna ciała $A(\nu, T)$ i zdolność emisyjna tego ciała $E(\nu, T)$ związane są zależnością:

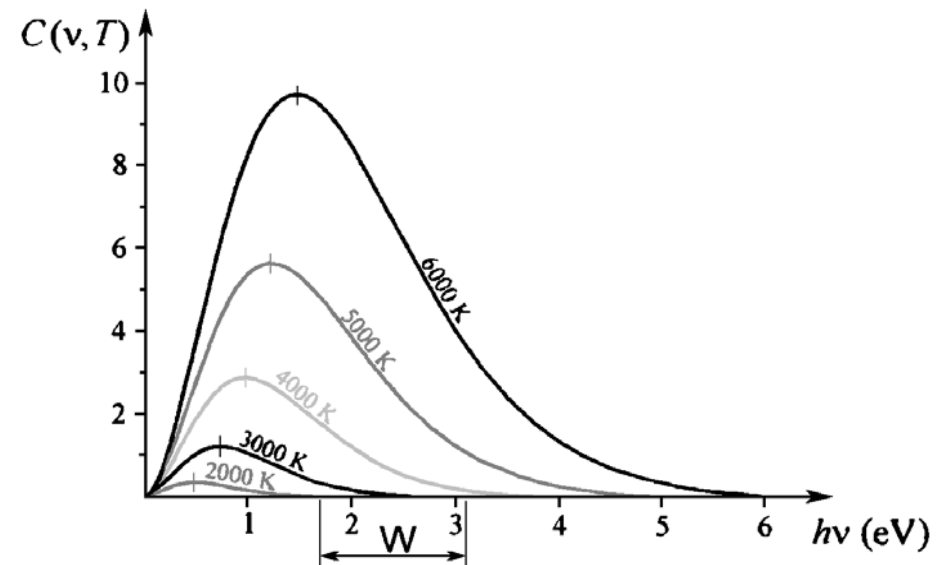
$$E(\nu, T) = C(\nu, T) A(\nu, T),$$

przy czym

$$E(\nu, T) = \frac{dP}{dS}$$

oznacza ilość energii wyemitowaną przez jednostkową powierzchnię w ciągu jednostki czasu, $A(\nu, T) = P_1/P_0$ jest stosunkiem mocy promieniowania P_1 , które zostało pochłonięte, do mocy promieniowania P_0 , które padło na ciało, $C(\nu, T)$ zaś opisuje funkcja zwana rozkładem Plancka:

$$C(\nu, T) = A \frac{(h\nu)^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

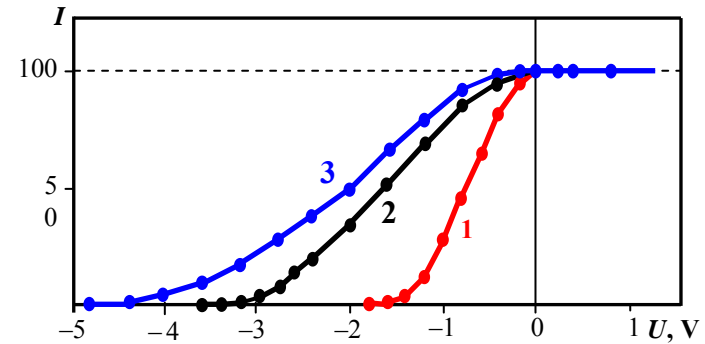
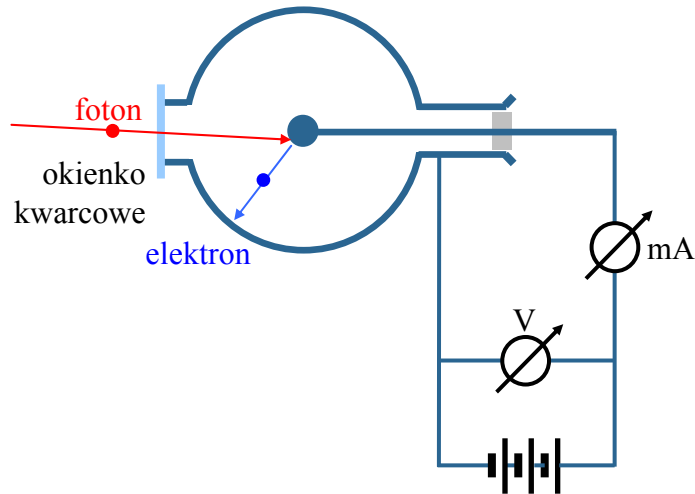


Dla ciała doskonale czarnego obowiązuje:

- Prawo Stefana-Boltzmana: całkowite promieniowanie S przy temperaturze T $S = \sigma T^4$
- Prawo przesunięć Wiena: długość fali λ_{\max} , przy której występuje maksimum natężenia w widmie emitowanym spełnia warunek $\lambda_{\max} \cdot T = \text{const} = 0,29 \text{ cmK}$

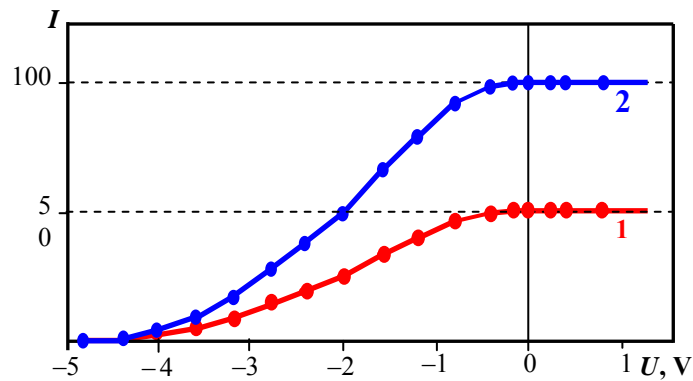
Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne (fotoemisja)

- emisja elektronów z powierzchni metalu pod wpływem światła



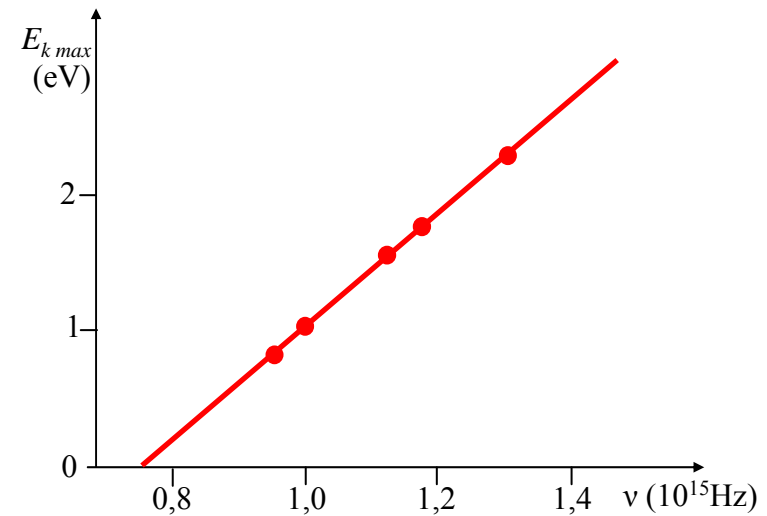
Fotoemisja cynku.

1. $\lambda=0,313\mu\text{m}$, 2. $\lambda=0,254\mu\text{m}$, 3. $\lambda=0,230\mu\text{m}$.



Zależność fotoemisji od natężenia światła.

1. małe natężenie, 2. duże natężenie.



Pojęcie **fotonu** pojawiło się w 1905r. w opisie przez Alberta Einsteina zjawiska fotoelektrycznego. (100 lat fotonu!!!!)

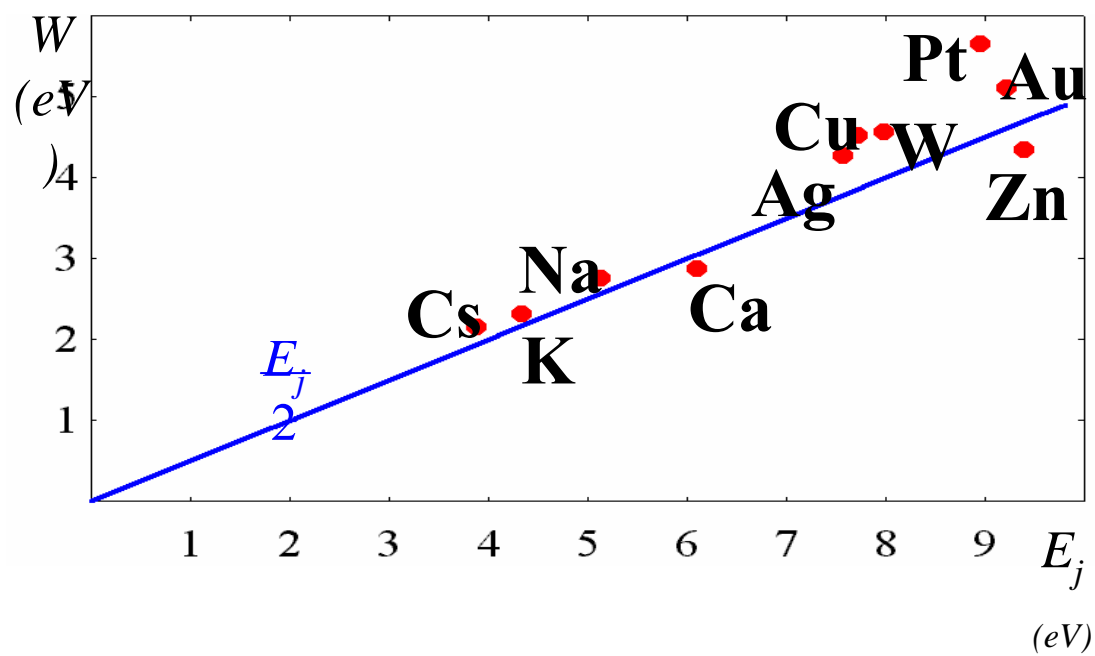
Einstein założył, że światło jest emitowane i absorbowane w postaci cząstek światła, fotonów. Energia kwantu fali świetlnej o częstości kołowej ω wynosi;

$$E = \hbar\omega$$

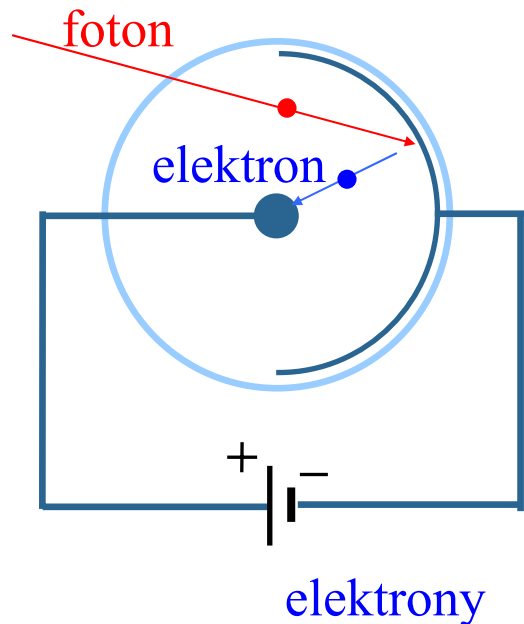
Najmniejsza energia, jaką może mieć światło o częstości kołowej ω jest równa energii pojedynczego fotonu. Jeśli fala niesie więcej energii, to energia ta musi być całkowitą wielokrotnością **$\hbar\omega$, czyli $E = n \cdot \hbar\omega$.**

Aby wyrwać elektron z metalu, trzeba dostarczyć mu określonej energii, zwanej pracą wyjścia W (wielkość charakterystyczna dla danego metalu).

$$E_k = E_f - W = \hbar\omega - W$$

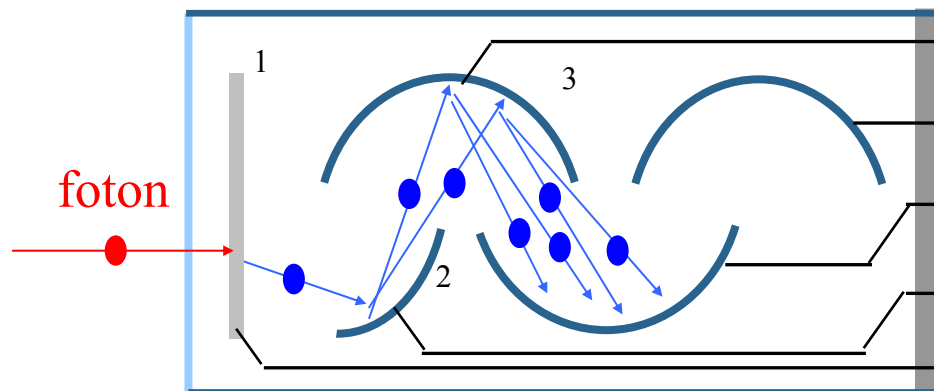


Metal	W (eV)	E_f (eV)
Cez	1,8	3,9
Sód	2,3	5,1
Wapń	3,0	6,1
Srebro	4,0	7,5
Złoto	4,3	9,2
Wolfram	4,5	7,8
Platyna	5,3	9,0



Zjawisko fotoemisji zostało wykorzystane do budowy **fotokomórek** (fotoelementów). W urządzeniu takim oświetlenie wywołuje przepływ prądu elektrycznego (fotoelektrycznego). Najprostsza fotokomórka była bańką próżniową z dwiema elektrodami. Jedną stanowiła warstwa metalu, napylna bezpośrednio od wewnątrz na szkło. Drugą był drucik metalowy, znajdujący się wewnątrz bańki. W czasie pracy do warstwy przykładane było napięcie ujemne, a do drucika – dodatnie. Elektrony, wybite przez fotony z warstwy metalowej, wychwytywane były przez elektrodę dodatnią. W ten sposób oświetlenie fotokomórki wywoływało przepływ – przez próżnię – prądu elektrycznego. Natężenie tego prądu było proporcjonalne do oświetlenia.

elektrony



W **fotopowielaczu** elektrony wybijane są przez promieniowanie elektromagnetyczne z metalicznej lub półprzewodnikowej elektrody. Oprócz niej w układzie znajduje się wiele elektrod metalowych, z których każda następna ma dodatni potencjał w stosunku do poprzedniej, zwykle rzędu kilkuset woltów. Elektron wybity z elektrody 1 jest przyspieszany w kierunku elektrody 2. Uzyskuje przy tym energię kinetyczną rzędu kilkuset elektronowoltów. Jest to energia wystarczająca do tego, aby wybił z elektrody 2 kilka dodatkowych elektronów (zjawisko emisji wtórnej).

Elektrony te biegną w kierunku elektrody 3, uzyskując w polu elektrycznym energie rzędu kilkuset elektronowoltów. Rozwijają się więc w układzie „lawina”. W typowych używanych fotopowielaczach jeden elektron wybity z elektrody 1 może spowodować powstanie do 10⁹ dodatkowych. Przy pomiarach rejestrujemy impuls prądu pomiędzy ostatnią parą elektrod.