



Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Fizyka

## semestr letni

### 2020/2021

**Grupa B: Piątek, 15:00 - 16:30**

**Grupa A: Piątek, 16:40 - 18:10**

**sala wirtualna**

**– zajęcia online**

**Sylwia Majchrowska**

**[sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl](mailto:sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl)**

**<https://majsylw.netlify.app/teaching/>**

**pokój 213, budynek L-1**

Na podstawie podręcznika Fizyka dla szkół wyższych. Tom 3

<http://www.e-fizyka.info>



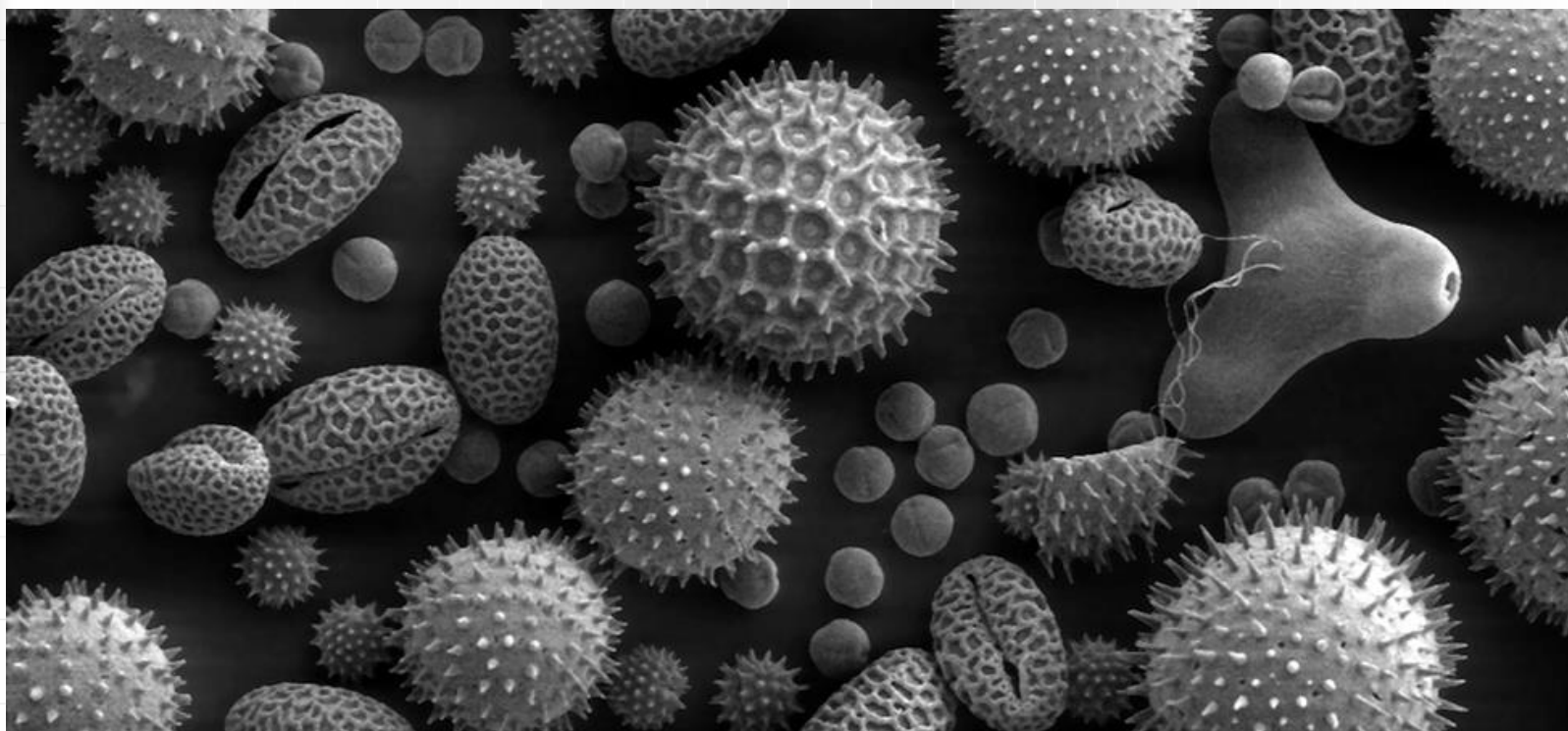
Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

[https://www.youtube.com/watch?v=dijU6qSa2ik&ab\\_channel=TelewizjaNaukowaPIONIERTV](https://www.youtube.com/watch?v=dijU6qSa2ik&ab_channel=TelewizjaNaukowaPIONIERTV)

[https://www.youtube.com/watch?v=-HTyznCHf48&ab\\_channel=Wyja%C5%9Bni%C4%87Niewyja%C5%9Bnione](https://www.youtube.com/watch?v=-HTyznCHf48&ab_channel=Wyja%C5%9Bni%C4%87Niewyja%C5%9Bnione)

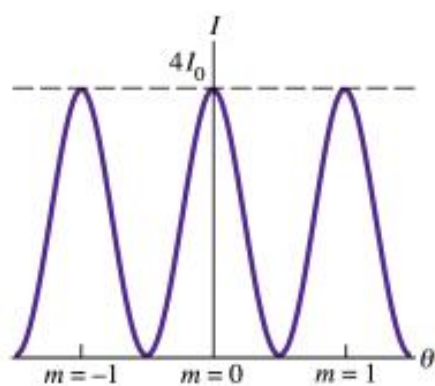
# Fotony i fale materii

Dwie z najbardziej rewolucyjnych idei dwudziestowiecznej nauki polegały na opisie światła jako zbioru cząstek oraz na przypisaniu cząstkom właściwości falowych. Falowy opis materii pozwolił na wynalezienie technologii takich jak mikroskopia elektronowa, pozwalająca nam badać obiekty o rozmiarach dużo mniejszych niż w przypadku tradycyjnych mikroskopów, na przykład pokazane na zdjęciu powyżej ziarna pyłku roślin.

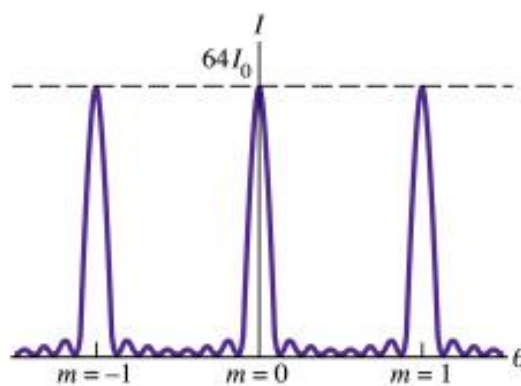




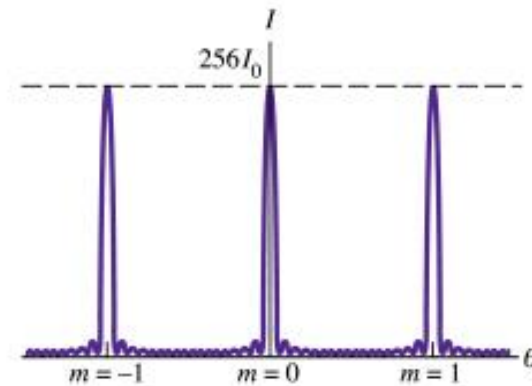
# Siatka dyfrakcyjna



(a)  $N = 2$



(b)  $N = 8$



(c)  $N = 16$

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

$$d \sin \theta = n \lambda$$

Maksima

$$0.38 \mu. < \lambda_{\text{widzialne}} < 0.76 \mu m$$

$$\lambda_f < \lambda_{cz} \Rightarrow \theta_f < \theta_{cz}$$

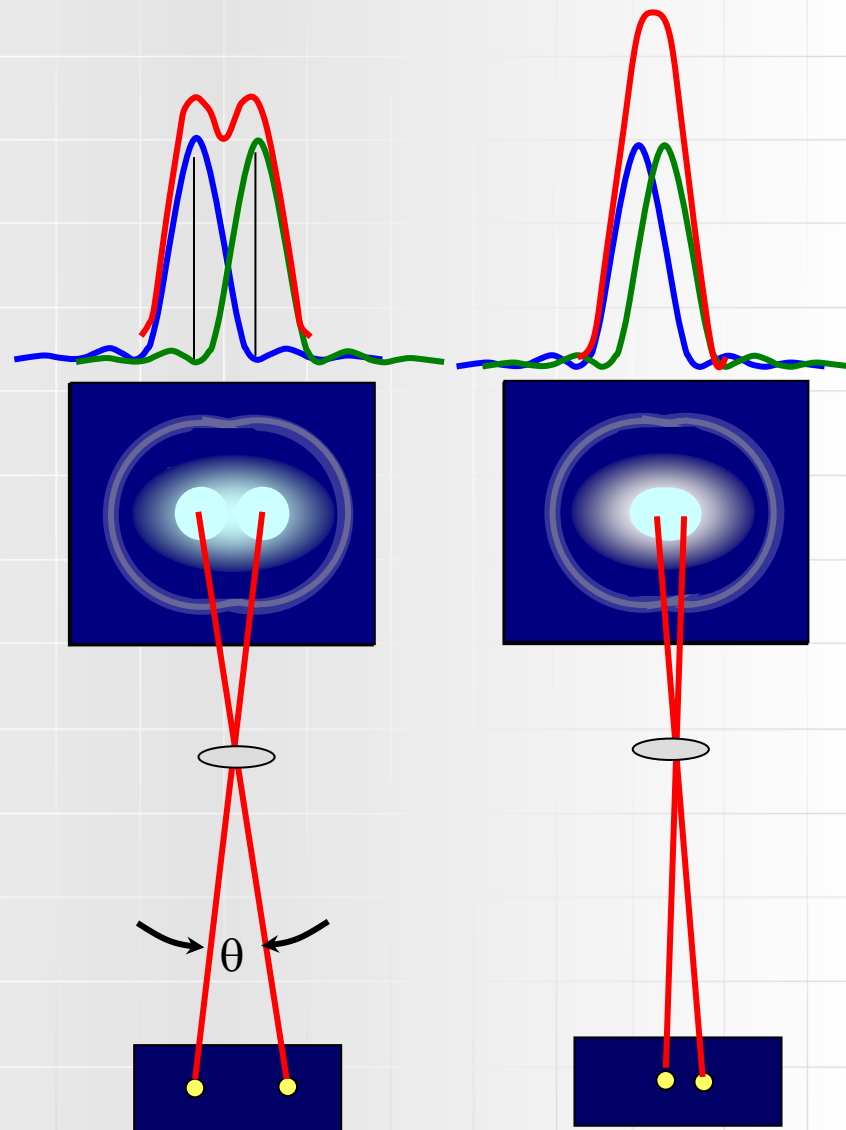


# Kryterium Rayleigh'a

*Jeśli położenie centralnego maksimum jednego obrazu dyfrakcyjnego przypada na położenie pierwszego minimum drugiego obrazu, to obrazy te są rozróżnialne.*

Dla apertury kołowej:

$$\theta_{\min} = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

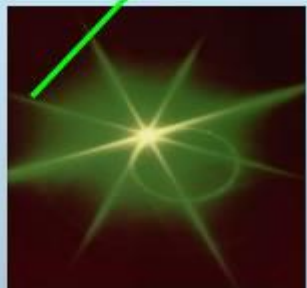




# Teoria korpuskularno - falowa

## Światło

promień, fala czy cząstka?



- **cząstka** - Isaac Newton (1642-1727)
- **fala** - Christian Huygens (1629-1695)
- **dualizm** - korpuskularno-falowy De Broglie (1924)



W fizyce foton jest kwantem pola elektromagnetycznego, np. światła widzialnego.

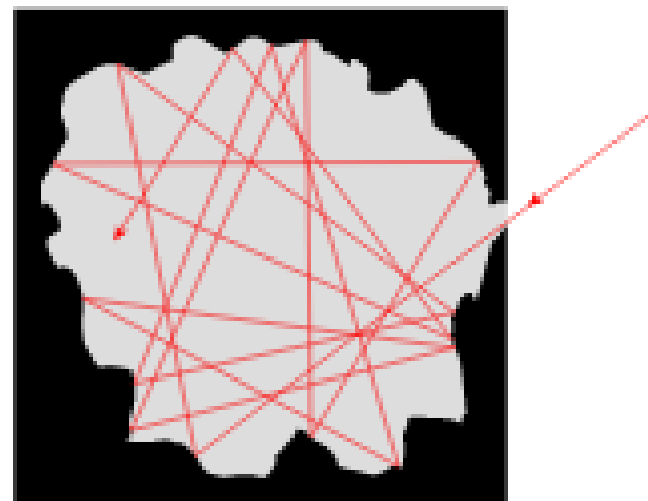
Pęd fotonu:  $p = \frac{h}{\lambda}$

Energia fotonu:  $E = \frac{hc}{\lambda}$



# Ciało doskonale czarne

Zgodnie z definicją, ciałem doskonale czarnym jest obiekt, który pochłania całe padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od temperatury tego ciała, czy widma padającego promieniowania. Ponadto ciało doskonale czarne emituje pochłoniętą energię w postaci promieniowania elektromagnetycznego o widmie charakterystycznym dla temperatury ciała.



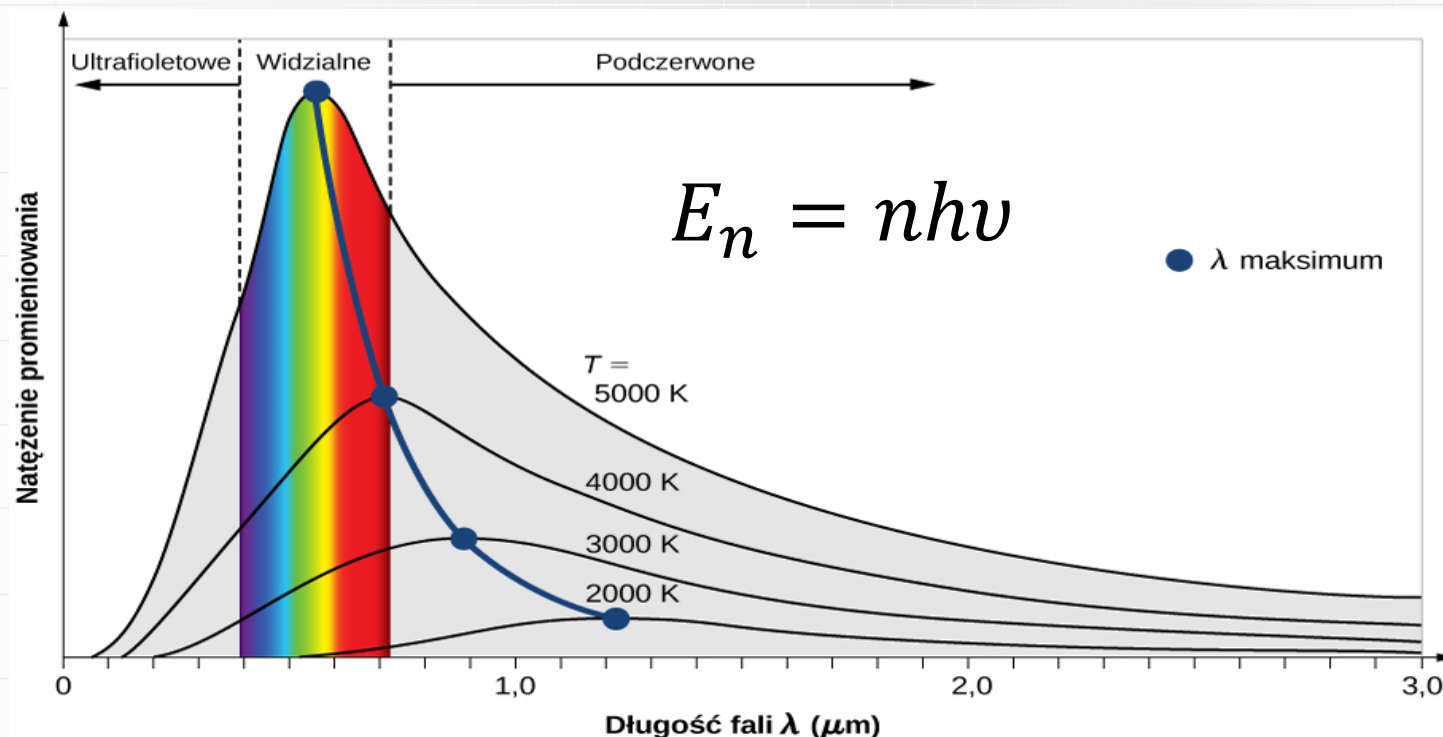
Najpopularniejszym modelem ciała doskonale czarnego jest wnęka z niewielkim otworem. Promieniowanie wpadające przez otwór do wnęki ulega w niej wielokrotnym odbiciom, czyli jest niemal w 100% pochłaniane. Powierzchnia otworu zachowuje się więc zgodnie z definicją ciała doskonale czarnego.





# Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Jak wygląda promieniowanie emitowane przez wnękę? Jego rozkład zależy od temperatury wewnątrz niej. Poniżej przykładowe rozkłady promieniowania ciała doskonale czarnego dla różnych temperatur.



Hipoteza Plancka kwantów energii (ang. Planck's hypothesis of energy quanta) zakłada, że ilość energii emitowanej przez oscylator unoszona jest przez kwant promieniowania,  $\Delta E$

$$\Delta E = h\nu \text{ oraz } c = \lambda\nu.$$



# Prawa rządzące promieniowaniem

Zgodnie z prawem Stefana -Boltzmanna ilość wysyłanego światła czyli natężenie światła jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury w skali Kelwina. Czyli im jest wyższa temperatura to tym więcej, światło wysyła promieniowania. Prawo Wiena natomiast stwierdza, że długość światła odpowiadającego maksimum promieniowania jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali. Czyli im wyższa jest temperatura tym fale są krótsze.

*Prawo Wiena*

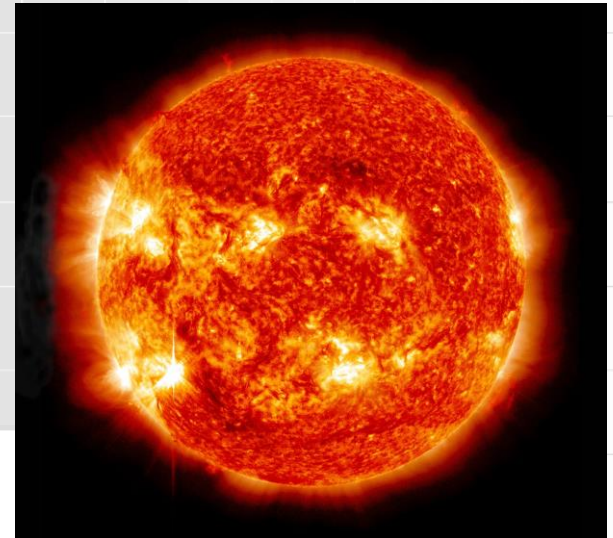
$$\lambda = b/T$$

b - stała Wiena ok.  $2.9 \cdot 10^{-3}$  mK

*Prawo Stefana – Boltzmann*

$$S = \sigma T^4$$

$\sigma$  - stała Stefana-Boltzmana ok.  $5.67 \cdot 10^{-8}$  J/(sm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)







# Przykład 1.1

## Promieniowanie gorących ciał

Wyznacz długość fali, dla której promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez wrzącą wodę osiąga maksimum.

$$\lambda_{max} = b/T,$$

gdzie  $b$  jest tzw. stałą Wiena, wynoszącą ok.  $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ , a  $T$  – temperaturą ciała.

$$\lambda_{max} = \frac{2.9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}}{100 + 273 \text{ K}} = 7,77 \mu\text{m}$$

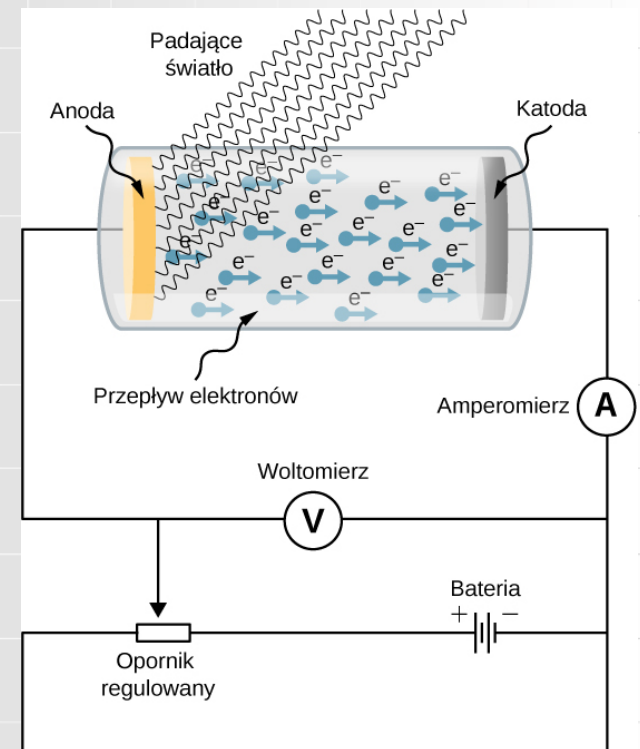




# Efekt fotoelektryczny zewnętrzny

Efekt fotoelektryczny ma trzy istotne cechy, których nie da się wytłumaczyć w ramach fizyki klasycznej: (1) brak opóźnienia, (2) niezależność energii kinetycznej fotoelektronów od natężenia padającego promieniowania oraz (3) występowanie częstotliwości granicznej.

$$\begin{aligned}E_{k_{max}} &= e\Delta V_h \\ E_f &= h\nu \\ E_f &= E_{k_{max}} + W \\ \nu_g &= \frac{W}{h}\end{aligned}$$





# Przykład 1.2

## Praca wyjścia i częstotliwość progowa

W eksperymencie użyto światła o długości fali 180nm, padającego na nieznany metal. Zmierzony fotoprąd przestawał płynąć po przyłożeniu napięcia  $-0,8V$ . Wyznamy pracę wyjścia dla tego metalu oraz jego częstotliwość progową w zjawisku fotoelektrycznym.

$$E_{k_{max}} = e\Delta V_h = e * 0.8V = 0.8eV$$

$$W = hv - E_{k_{max}} = \frac{hc}{\lambda} - E_{k_{max}} = \frac{1240eVnm}{180nm} - 0.8eV = 6.09eV$$

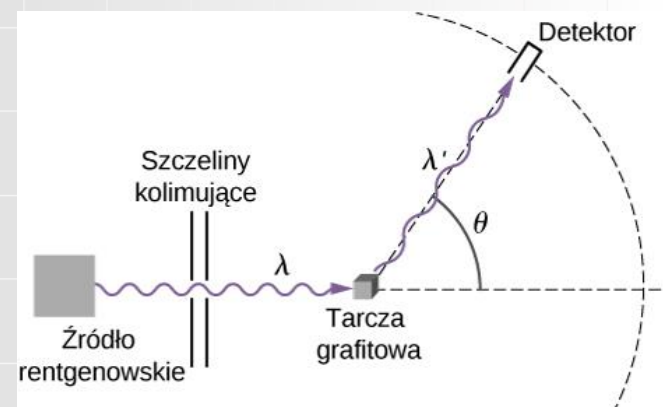
$$\nu_g = \frac{W}{h} = \frac{6.09eV}{4.136 * 10^{-15}eVs} = 1.47 * 10^{15}Hz$$

W tego typu obliczeniach wygodnie jest korzystać ze stałej Plancka wyrażonej w jednostkach eVs i wyrażać wszystkie energie w elektronowoltach zamiast w dżulach.



# Efekt Comptona

Efektom Comptona (ang. Compton effect) nazywa się niezwykle ciekawy rezultat eksperymentu, w którym obserwuje się rozpraszanie promieni rentgenowskich na niektórych materiałach. Teoria klasyczna przewidywała, że rozproszona fala elektromagnetyczna powinna mieć tę samą długość co fala padająca. Jednak przeprowadzone doświadczenia nie potwierdzają tego przewidywania. Promieniowanie rentgenowskie rozproszone na przykład na powierzchni grafitowej miało inną długość fali niż promieniowanie padające. To zjawisko, niedające się wytłumaczyć na gruncie fizyki klasycznej, badał eksperymentalnie wraz ze współpracownikami Artur H. Compton (1892–1962) i on też podał jego wytłumaczenie w roku 1923.



$$\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2.43 \text{ pm}$$
$$\Delta\lambda = \lambda_c (-\cos \theta)$$



# Hipoteza de Broglie'a

De Broglie'a stwierdził, że każdej cząstce o różnym od zera pędzie można przypisać falę, o określonej długości i częstotliwości. Zaproponował więc odwrócenie zależności między pędem a długością fali, znanej dla fotonu, tak aby długość fali była wyrażona przez pęd cząstki. Hipoteza ta nie miała żadnych podstaw doświadczalnych i była czysto logiczną spekulacją

$$E = h * \nu$$
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_B = \frac{h}{p}$$

gdzie:

$\lambda$  - długość fali  
cząstki,

$h$  - stała Plancka ,

$p$  - pęd cząstki.



**Louis de Broglie**

*La théorie des quanta , 1924r.*



# Przykład

Calculate the de Broglie wavelength of the electrons.

de Broglie wavelength = ..... m [1]

- (c) Bobby, after learning about de Broglie's hypothesis, is worried that he may get diffracted when he passes through a 70.0 cm wide doorway.
- (i) Given that Bobby has a mass of 78.0 kg, estimate the speed at which Bobby have to walk in order to be significantly diffracted as he passes through the doorway.





# Przykład 1.3

## Przykłady dla obiektu mikro- i makroskopowego

Oblicz:

- a) długość fali de Broglie'a piłki futbolowej ( $m=1\text{kg}$ ) poruszającej się z prędkością  $10\text{m/s}$ ,
- b) oraz fali elektronu o energii kinetycznej  $100\text{eV}$ .

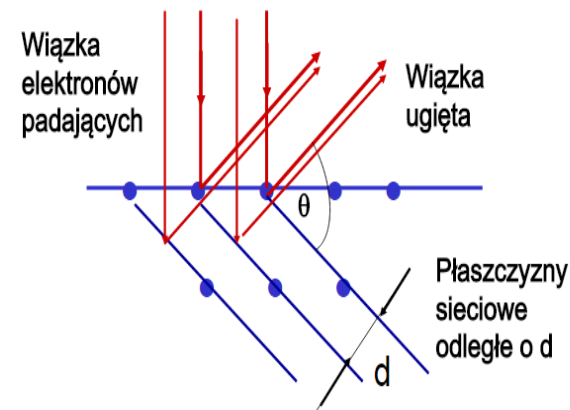
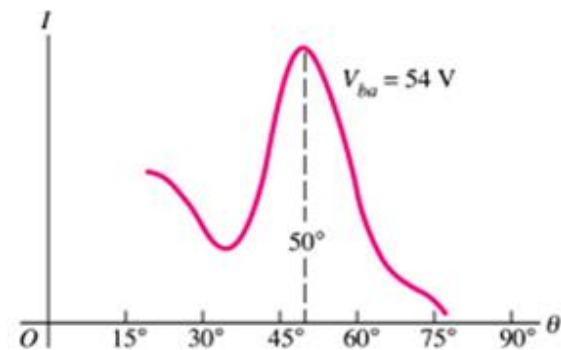
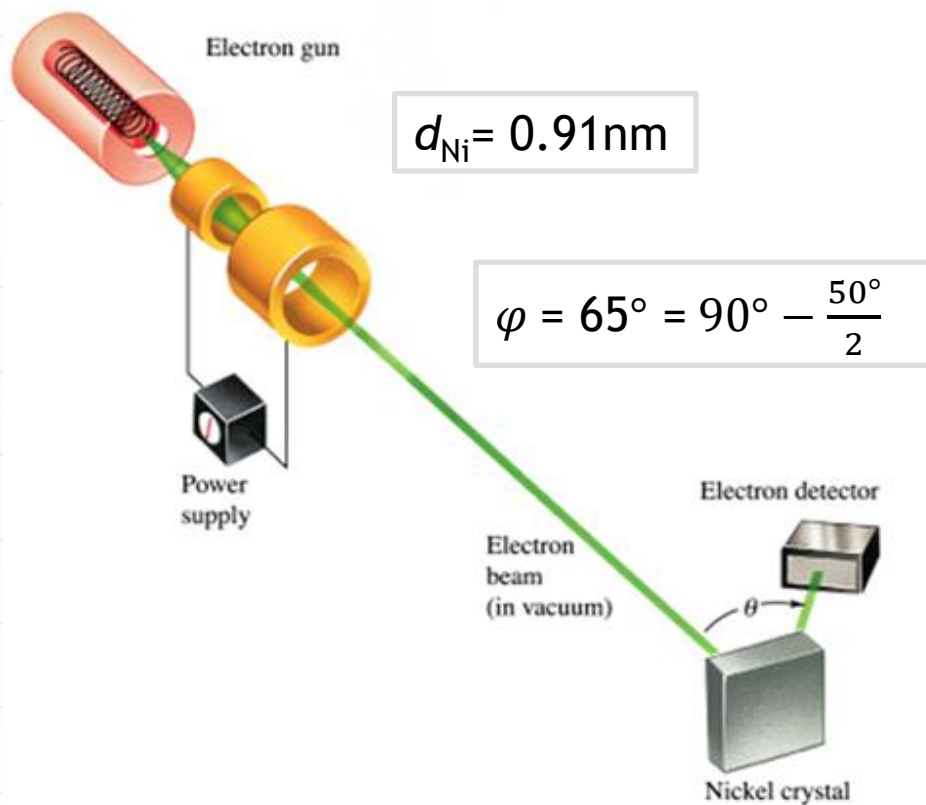


$$\text{a) } \lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{1 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6,6 \cdot 10^{-35} \text{ m} = 6,6 \cdot 10^{-25} \text{ \AA}$$

$$\text{b) } \lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{mE_k}} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{5,4 \cdot 10^{-24} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 1,2 \text{ \AA}$$



# Doświadczenie C.J. Davissona i L.G. Germera



Z dyfrakcji

$$\lambda = 2d \sin \varphi = 0.165 \text{ nm}$$

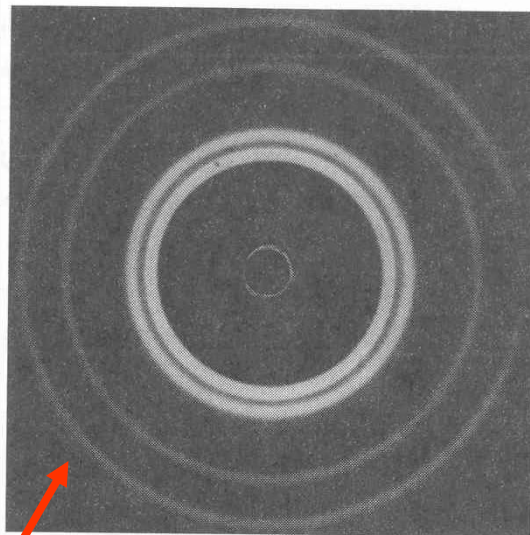
Wzór de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meV_{ba}}} = 0.165 \text{ nm}$$

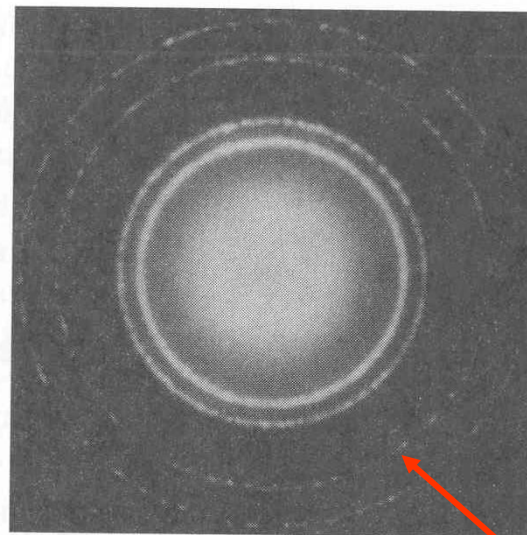


Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Dyfrakcja na polikrystalicznej folii aluminiowej (G.P. Thomson)



Dyfrakcja promieniowania X



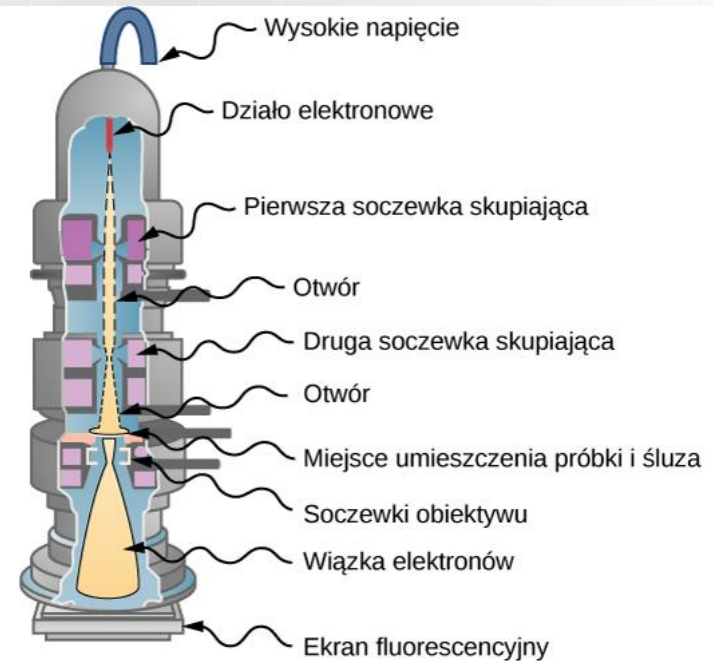
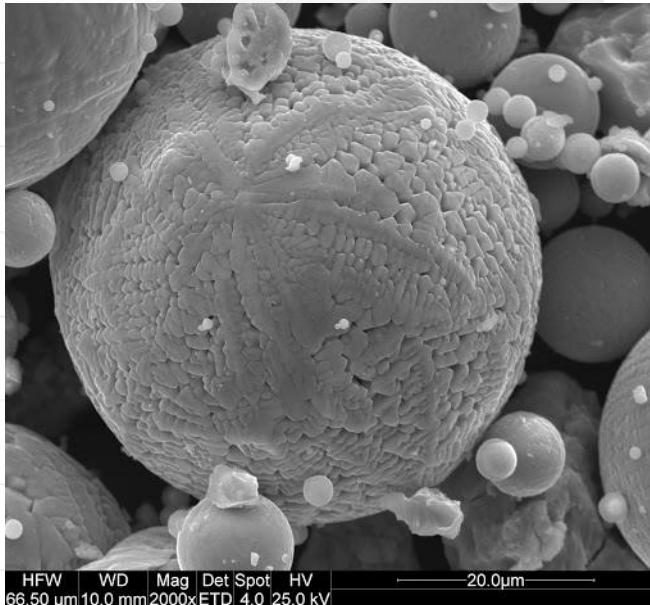
Dyfrakcja elektronów





Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Mikroskop elektronowy





# Przykład 1.4

## Zdolność rozdzielcza mikroskopu elektronowego

W mikroskopie TEM wiązka elektronów o długości fali 1pm wychodzi przez otwór o promieniu 2μm. Jaki jest najmniejszy kąt pomiędzy rozróżnialnymi punktowymi źródłami?

$$\begin{aligned}\theta &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \frac{1pm}{2\mu m} = 6.1 * 10^{-7} rad \\ &= 3.5 * 10^{-5} o\end{aligned}$$

Gdybyśmy użyli zwykłego mikroskopu i światła o długości fali 400nm, zdolność rozdzielcza wynosiłaby tylko 14° i wszystkie szczegóły obrazu byłyby rozmyte.



# Słownik

**ciało doskonale czarne, promieniowanie c.d.cz. (ang. black body, black body radiation)**

- wyidealizowany model ciała, które niezależnie od swojej temperatury absorbuje całe padające na nie promieniowanie elektromagnetyczne oraz emituje promieniowanie o widmie zależnym od jego temperatury.

**widmo emisyjne (ang. emission spectrum)**

- zależność natężenia emitowanego przez ciało promieniowania elektromagnetycznego od długości jego fali.

**I prawo Wiena (ang. Wien's displacement law)**

- zależność długości fali, dla której widmo promieniowania ciała doskonale czarnego osiąga maksimum od temperatury tego ciała. Prawo można opisać wzorem  $\lambda_{max} = b/T$ , gdzie  $b$  jest tzw. stałą Wiena, wynoszącą ok.  $2.9 \cdot 10^{-3}$  mK, a  $T$  – temperaturą ciała doskonale czarnego.

**prawo Stefana-Boltzmanna (ang. Stefan-Boltzmann law)**

- prawo opisujące strumień mocy promieniowania ciała doskonale czarnego w danej temperaturze  $T$

$$S = \sigma T^4$$

gdzie  $\sigma$  to stała Stefana-Boltzmanna wynosząca ok.  $5.67 \cdot 10^{-8}$  J/(sm<sup>2</sup>K<sup>4</sup>).

**częstotliwość progowa (ang. cut-off frequency)**

- częstotliwość padającego promieniowania, poniżej której efekt fotoelektryczny nie zachodzi

**comptonowska długość fali (ang. Compton wavelength)**

- stała fizyczna o wartości  $\lambda_C = 2,43$  pm

**doświadczenie Davissona-Germera (ang. Davisson-Germer experiment)**

- doświadczenie z dyfrakcją elektronów na powierzchni kryształów

**dualizm korpuskularno-falowy (ang. wave-particle duality)**

- każdy obiekt w pewnych warunkach wykazuje własności falowe, a w innych cząstkowe

**emiter (ang. emitter)**

- każde ciało emitujące promieniowanie

**energia fotonu (ang. energy of a photon)**

- kwant energii promieniowania, zależy tylko od częstotliwości

**efekt fotoelektryczny (ang. photoelectric effect)**

- emisja elektronów z metalowej powierzchni pod wpływem padającego na nią promieniowania o odpowiedniej częstotliwości

**efekt Comptona (ang. Compton effect)**

- zmiana długości rozproszonej fali elektromagnetycznej





# Słowniczek

**energia jonizacji (ang. ionization energy)**

– energia potrzebna do uwolnienia elektronu z atomu

**fotoprąd (ang. photocurrent)**

prąd płynący w obwodzie, gdy na fotoelektrodę pada światło

**fotoelektroda (ang. photoelectrode)**

– elektroda emitująca elektrony pod wpływem padającego na nią światła

**fotoelektron (ang. photoelectron)**

– elektron wyemitowany z powierzchni metalu pod wpływem padającego na niego światła

**foton (ang. photon)**

– cząstka promieniowania elektromagnetycznego

**fala de Broglie’a (ang. de Broglie wave)**

– fala stowarzyszona z każdym obiektem fizycznym

**hipoteza Plancka o kwantach energii (ang. Planck’s hypothesis of energy quanta)**

– wymiana energii pomiędzy ściankami i promieniowaniem zachodzi tylko w postaci dyskretnych kwantów energii

**hipoteza de Broglie’a o falach materii (ang. de Broglie’s hypothesis of matter waves)**

– obiekty materialne wykazują własności falowe

**mikroskopia elektronowa (ang. electron microscopy)**

– mikroskopia korzystająca z właściwości falowych elektronu; pozwala dojrzeć szczegóły obiektów o nanometrowych rozmiarach

**natężenie promieniowania (ang. power intensity)**

– energia niesiona przez promieniowanie przechodzące przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu

**napięcie hamowania (ang. stopping potential)**

– różnica potencjałów, po przyłożeniu której przestaje płynąć fotoprąd



# Słowniczek

**promieniowanie ciała doskonale czarnego (ang. blackbody radiation)**

– promieniowanie wysyłane przez ciało doskonale czarne

**progowa długość fali (ang. cut-off wavelength)**

– długość fali odpowiadająca częstotliwości progowej

**praca wyjścia (ang. work function)**

– energia, którą trzeba przekazać elektronowi, aby wybić go z powierzchni metalu

**przesunięcie Comptona (ang. Compton shift)**

– różnica długości fali promieniowania rozproszonego i padającego

**rozpraszanie nieelastyczne (ang. inelastic scattering)**

– rozpraszanie, w którym energia kinetyczna padającej cząstki nie jest zachowana

**skwantowane wartości energii (ang. quantized energies)**

– dyskretne (nieciągłe) porcje energii

**stan kwantowy oscylatora Plancka (ang. quantum state of a Planck's oscillator)**

– mod drgania oscylatora kwantowego numerowany liczbą kwantową

**stała Stefana-Boltzmanna (ang. Stefan-Boltzmann constant)**

– stała fizyczna w prawie Stefana-Boltzmanna

**wektor falowy (ang. propagation vector)**

– wektor o długości  $2\pi/\lambda$  wskazujący kierunek rozchodzenia się fali (lub, inaczej mówiąc, kierunek pędu fotonu)

**widmo absorpcyjne (ang. absorption spectrum)**

– długości fal promieniowania zaabsorbowanego przez atomy i cząsteczki

**widmo emisyjne (ang. emission spectrum)**

– długości fal promieniowania emitowanego przez atomy i cząsteczki



# Praca domowa

## - wytyczne

1. Format: plik pdf lub skan/zdjęcie (upewnij się, że Twoje pismo jest czytelne!)
2. Czytaj uważnie polecenia i wykonuj zawarte w nich zadania.
3. Pamiętaj aby **podpisać** swoją pracę.
4. Do rozwiązania dołącz:
  1. Rysunek – szkic sytuacji przedstawionej w zadaniu lub wykres wraz z danymi z zadania.
  2. Obliczenia – razem z przekształceniami wzorów, jeśli jest to konieczne.
  3. Wnioski sformułowane na podstawie dokonanej analizy.
5. Pamiętaj aby przesłać rozwiązania w terminie na swoją przestrzeń na dysku gogle (lub na adres email prowadzącej).



Wrocław  
University  
of Science  
and Technology

# Terminy

	LUTY	MARZEC					KWIECIEŃ					MAJ					CZERWIEC				LIPIEC	
PN	22	1	8	15	22	29	5	12 Pn N	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5		
WT	23	2	9	16	23	30 Pt P	6	13	20	27	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6		
ŚR	24	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2 Cz P	9	16	23	30	7		
CZ	25	4	11	18 H1	25 H2	1	8 H3	15 H4	22 H5	29 H6	6 H7	13 H8	20 H9	27 H10	3	10	17	24	1	8		
PT	26	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9		
SO	27	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10		
N	28	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11		
P - PARZYSTY N - NIEPARZYSTY	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P		

H6: 14.05.21 godz. 12:00

Email: [sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl](mailto:sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl)