

# Fale i cząstki

Dr hab. Maciej Czapkiewicz  
Instytut Elektroniki, paw. C-1, pok.321  
[czapkiew@agh.edu.pl](mailto:czapkiew@agh.edu.pl)  
<http://layer.uci.agh.edu.pl/Fizyka>

# Czym jest światło?



- Fala elektromagnetyczna, np. generowana przez rozgrzane ciała (black body radiation) – czyli przez chaotycznie drgające atomy
- 1893, W. Wien: przesunięcie barwy światła zależne od temperatury
- 1900, J. Rayleigh, J. James: teoretyczny rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego. Katastrofalna niezgodność z doświadczeniem.
- 1900, M. Planck: teoretyczny rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego zgodny z doświadczeniem musi zakładać skwantowanie energii (Nobel w 1918)
- Fala elektromagnetyczna może też być generowana w zjonizowanej gazie – wzbudzone atomy oddają energię w postaci widma liniowego, a nie ciągłego
- 1814, J. Fraunhofer – wynalazek spektroskopu
- 1913, N. Bohr: model budowy atomu, zakładający skwantowanie energii elektronów powiązane stałą Plancka, Nobel w 1922

# Czym jest światło?



- Fala elektromagnetyczna. Iloczyn pola magnetycznego i elektrycznego to gęstość mocy.
- Fale elektromagnetyczne podlegają zjawiskom falowym takim jak dyfrakcja, interferencja...
- 1887, H. Hertz, 1888, A. Stoletow: efekt fotoelektryczny
- 1902, P.v.Lenard: zależność efektu fotoelektrycznego od barwy światła
- 1905, A. Einstein: efekt fotoelektryczny może być wytłumaczony przez kwanty światła (Nobel w 1921)
- 1922, A. Compton: rozpraszanie promieni X na elektronach (Nobel w 1927)

# Początki fizyki kwantowej



- Max Planck, Albert Einstein, Arthur Compton, Niels Bohr



SOLVAY CONFERENCE 1927

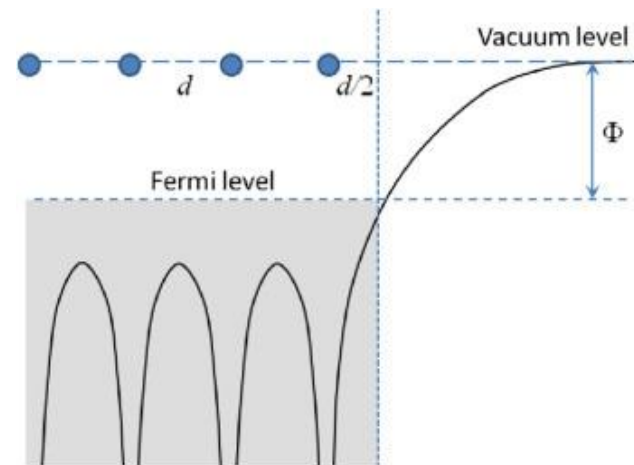
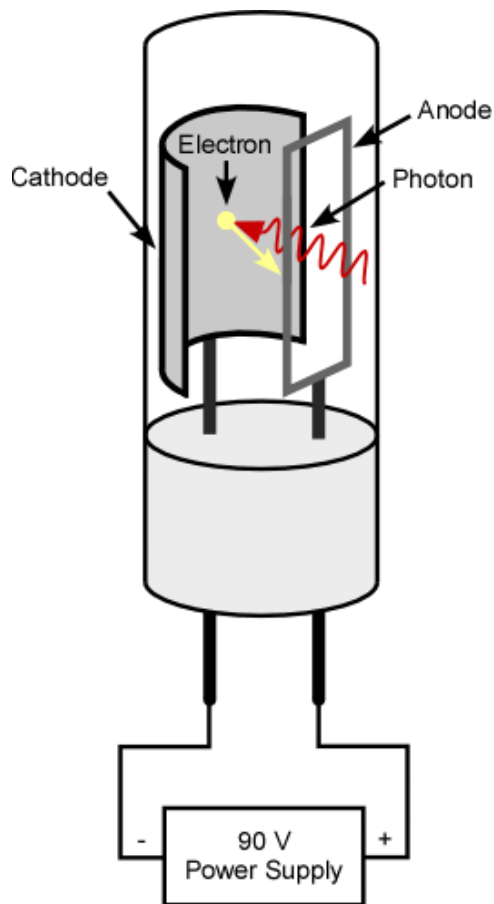
colourized by pastincolour.com

A. PICARD    E. HENRIOT    P. EHRENFEST    Ed. HERSEN    Th. DE DONDER    E. SCHRÖDINGER    E. VERSCHAFFELT    W. PAULI    W. HEISENBERG    R.H FOWLER    L. BRILLOUIN  
P. DEBYE    M. KNUDSEN    W.L. BRAGG    H.A. KRAMERS    P.A.M. DIRAC    A.H. COMPTON    L. de BROGLIE    M. BORN    N. BOHR  
I. LANGMUIR    M. PLANCK    Mme CURIE    H.A. LORENTZ    A. EINSTEIN    P. LANGEVIN    Ch.E. GUYE    C.T.R. WILSON    O.W. RICHARDSON  
Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

# Efekt fotoelektryczny (zewnątrzny)

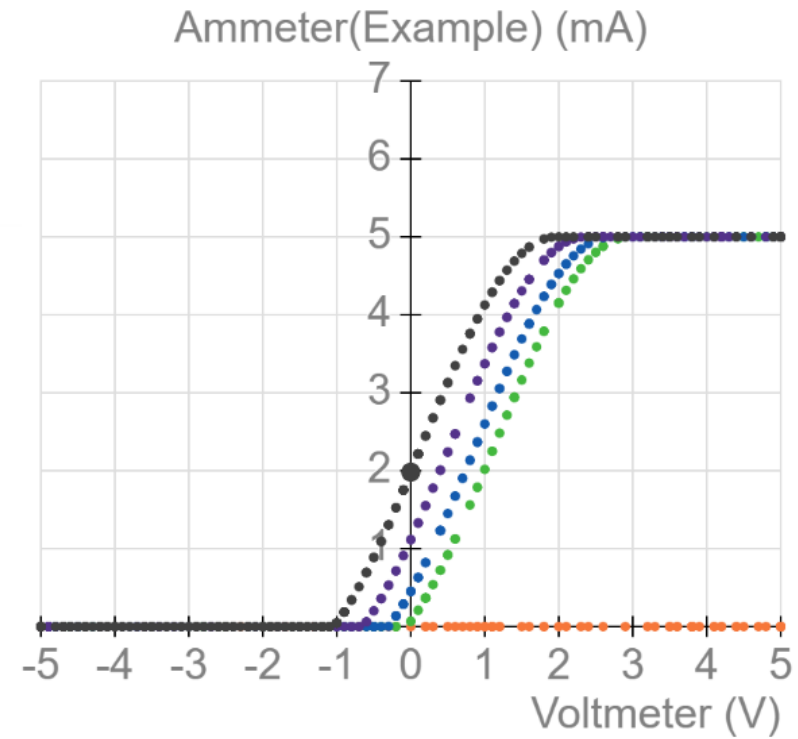
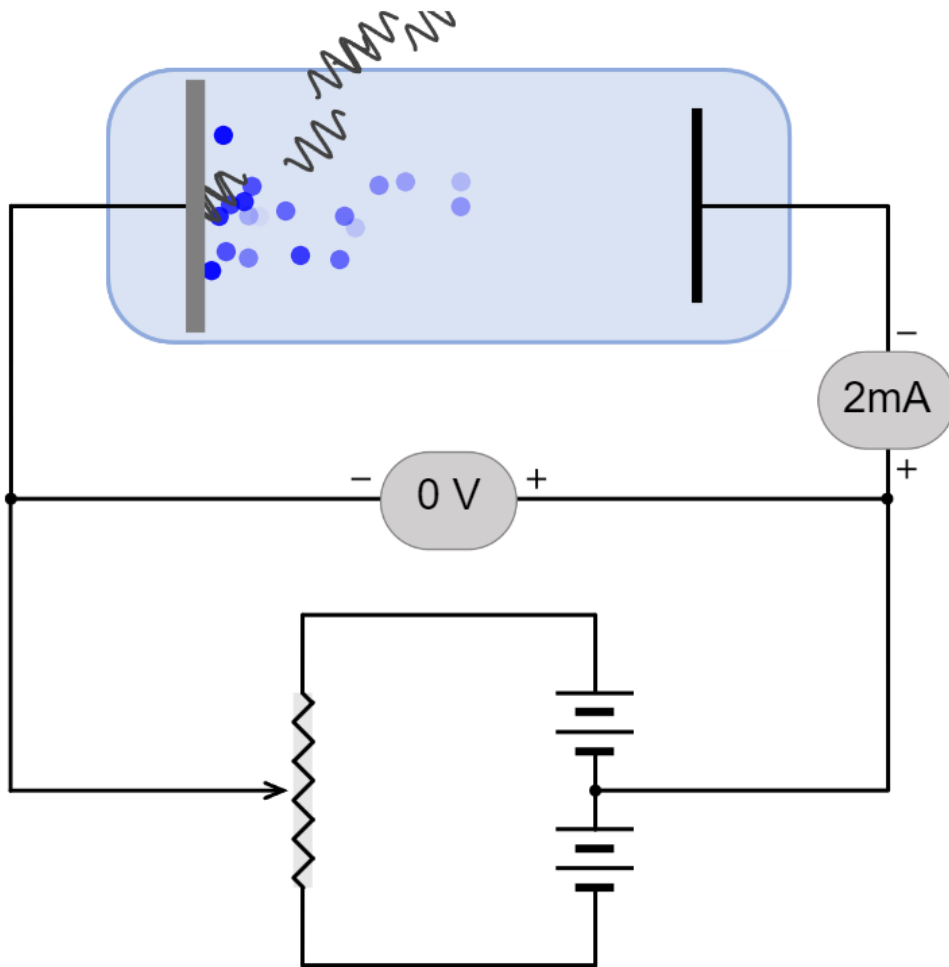


- Lampa próżniowa, światło padające na katodę wybija z niej elektrony



$\Phi$  - praca wyjścia

# Doświadczenie Philipa von Lenarda

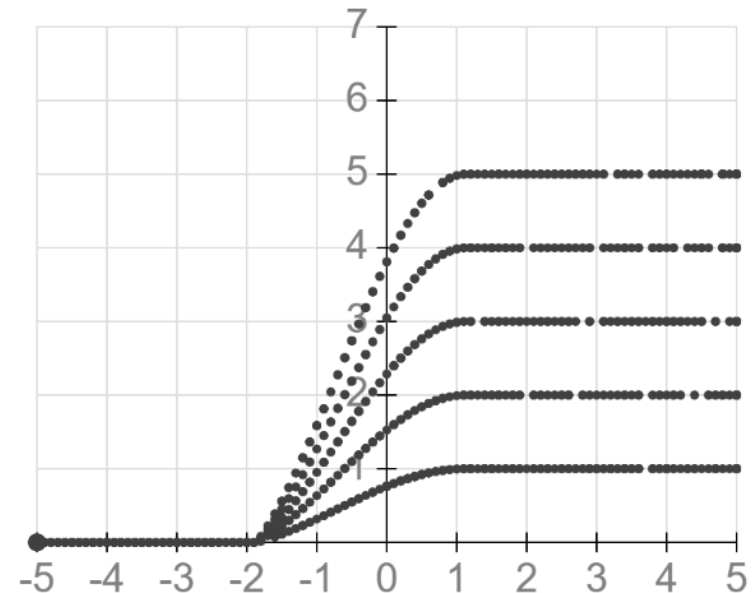
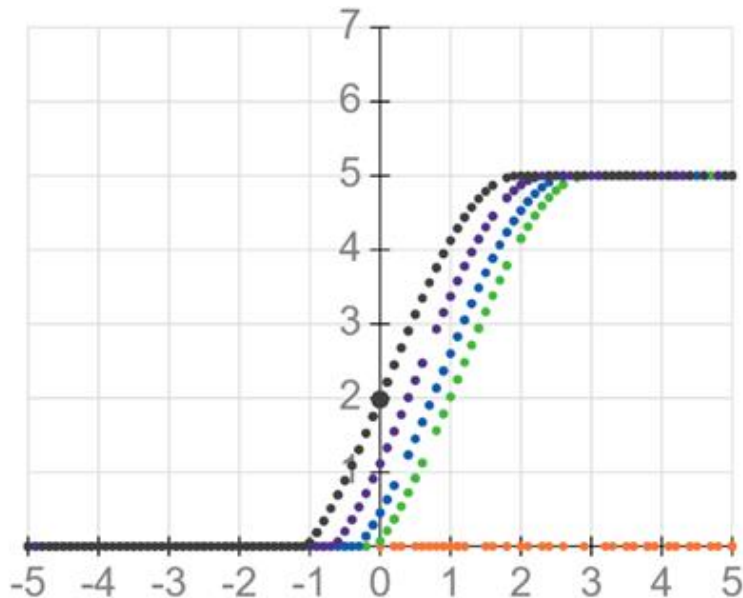


[https://javalab.org/en/photoelectric\\_effect\\_2\\_en/](https://javalab.org/en/photoelectric_effect_2_en/)



# Doświadczenie Philipa von Lenarda

- Stałe natężenie, różne barwy światła:  
stałe natężenie nasycenia, różne ujemne napięcia hamowania
- Stała barwa światła, różne natężenia światła:  
różne natężenia nasycenia, to samo napięcie hamowania

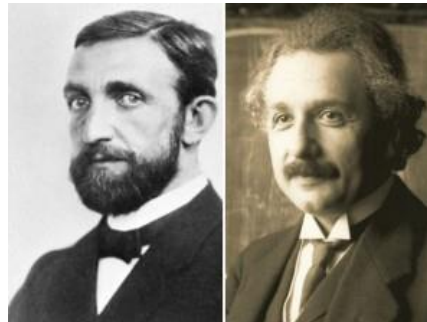


[https://javalab.org/en/photoelectric\\_effect\\_2\\_en/](https://javalab.org/en/photoelectric_effect_2_en/)

# Efekt fotoelektryczny vs fale E-M



- Efektu fotoelektrycznego nie da się wyjaśnić za pomocą fal elektromagnetycznych
- Natężenie światła: amplituda pola elektromagnetycznego  $E, H$
- Wektor Poyntinga:  $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 = \text{J}/\text{s}/\text{m}^2$ ] to gęstość mocy
- Dlaczego napięcie hamowania nie zależy od natężenia światła?
- Energia to całka z mocy po czasie – odpowiednio długie naświetlanie lub odpowiednio duże natężenie światła powinno być wystarczające, aby przekazać elektronowi energię większą niż praca wyjścia – ale tak się nie dzieje – dlaczego?
- Dlaczego efekt fotoelektryczny zależy od długości fali (czyli od jej częstotliwości)? Dlaczego dla długich fal (małych częstotliwości) efekt w ogóle nie wystąpi, nawet dla bardzo jasnego światła?







# Efekt fotoelektryczny

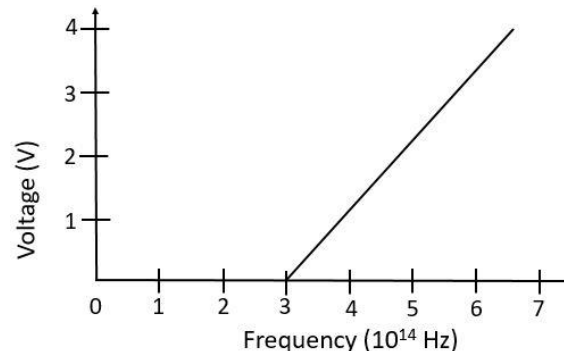
- Postulat Einsteina: światło to strumień cząstek, fotonów
- Energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości
- Jeden foton wybija jeden elektron, o ile ma odpowiednio dużą energię, wyższą niż praca wyjścia  $\Phi$ . Energia kinetyczna wybitego elektronu:

$$E_K = E_f - \Phi$$

- Ponieważ energia ładunku w polu elektrycznym to iloczyn jego ładunku przez różnicę potencjału:

$$eU = E_f - \Phi$$

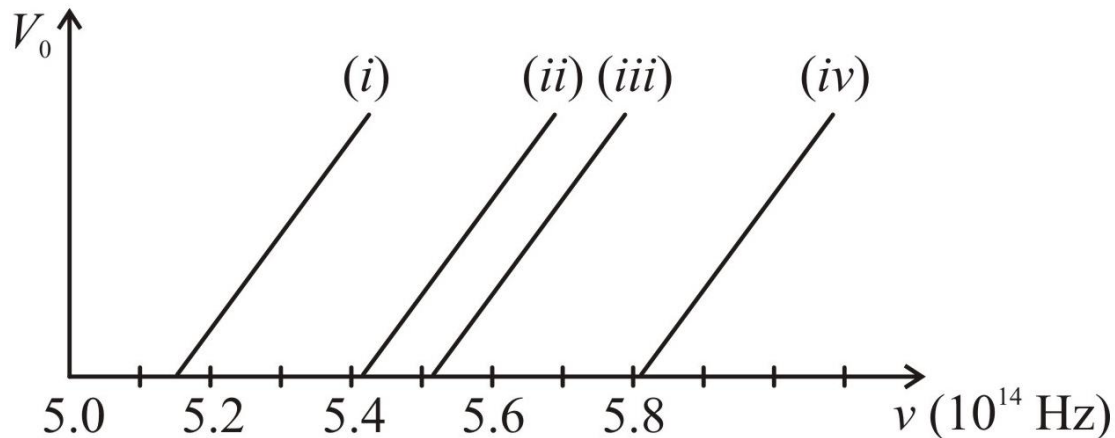
- to wykres napięcia hamowania od częstotliwości powinien być liniowy. I jest!





# Efekt fotoelektryczny

- Nachylenie wykresu napięcia (energii) od częstotliwości światła jest zawsze takie samo
- Częstotliwość odcięcia (lub napięcie hamowania) zależą od rodzaju metalu (od pracy wyjścia)



(i) Cesium

(ii) Potassium

(iii) Sodium

(iv) Lithium

- Oś napięcia łatwo przeskalać jako energię  $eU$

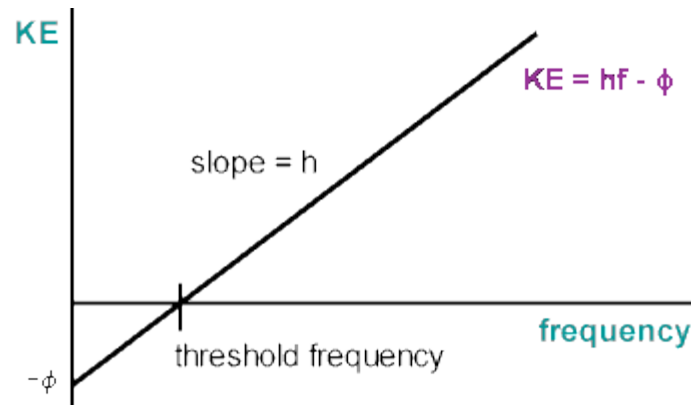
$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$$

# Efekt fotoelektryczny



- Nachylenie wykresu energii kinetycznej od częstotliwości światła jest równe stałej Plancka (o niej później)

$$eU = hf - \Phi$$



$$h = 6.67 \cdot 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{s}} = 4.14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{eV}}{\text{s}}$$

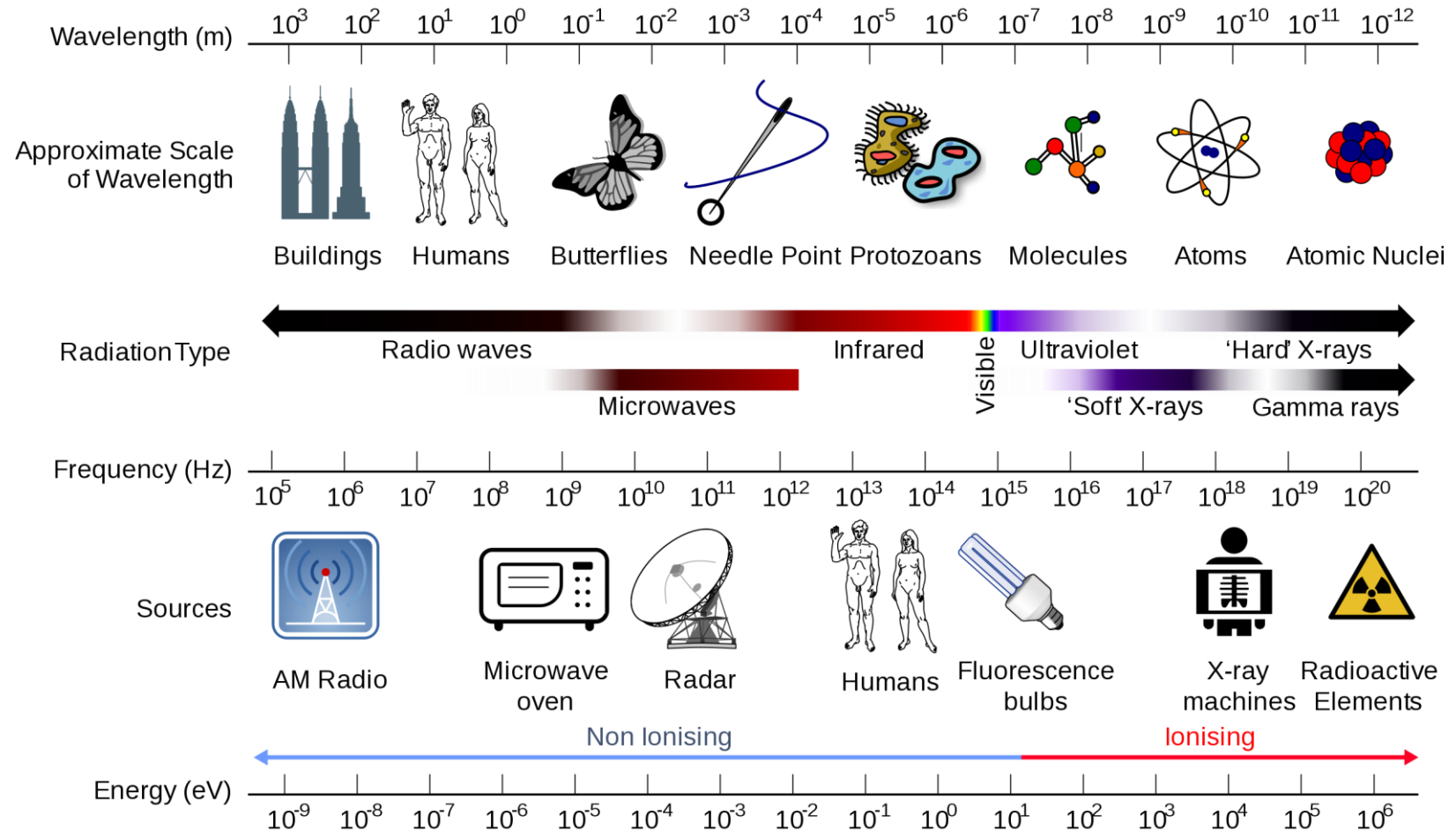
- Energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej (odwrotnie proporcjonalna do długości fali)

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

# Widmo fal elektromagnetycznych



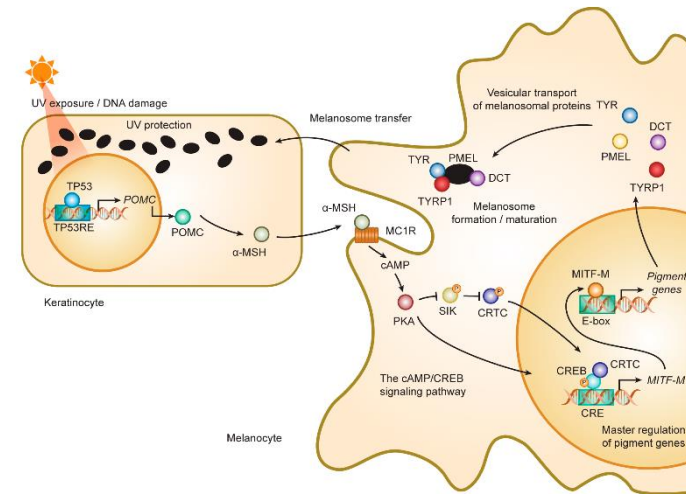
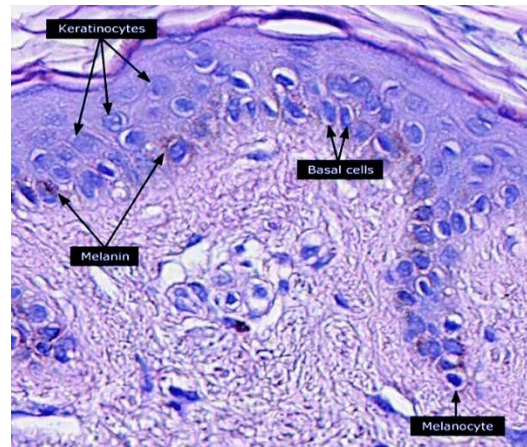
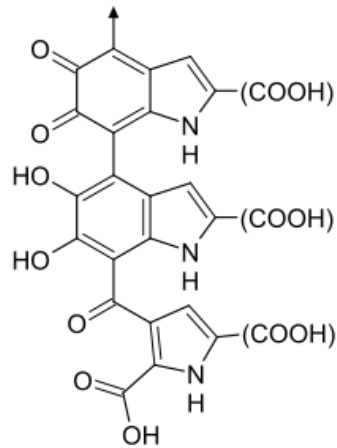
- Energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej (odwrotnie proporcjonalna do długości fali)



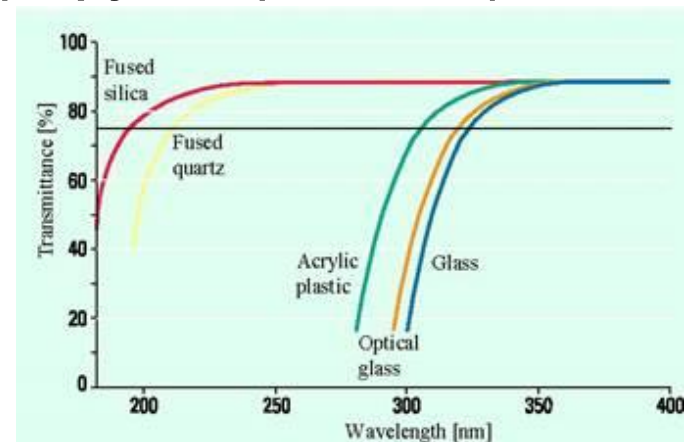
# Skóra i korpuskularna natura światła



- Melaniny są odpowiedzialne za pigmentację skóry



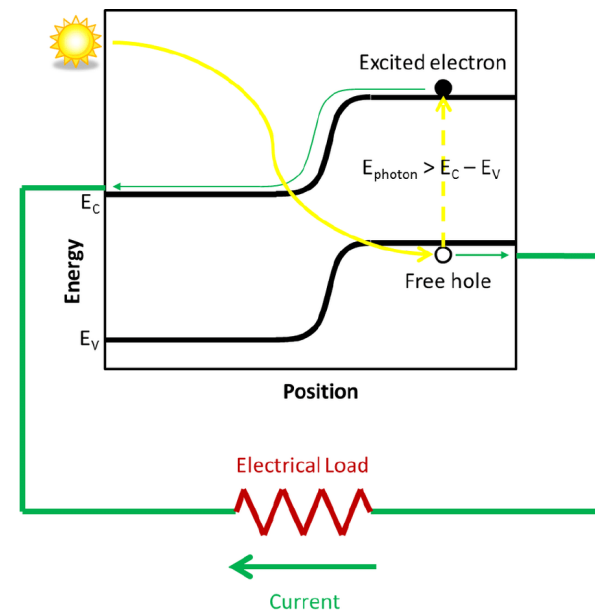
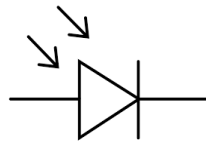
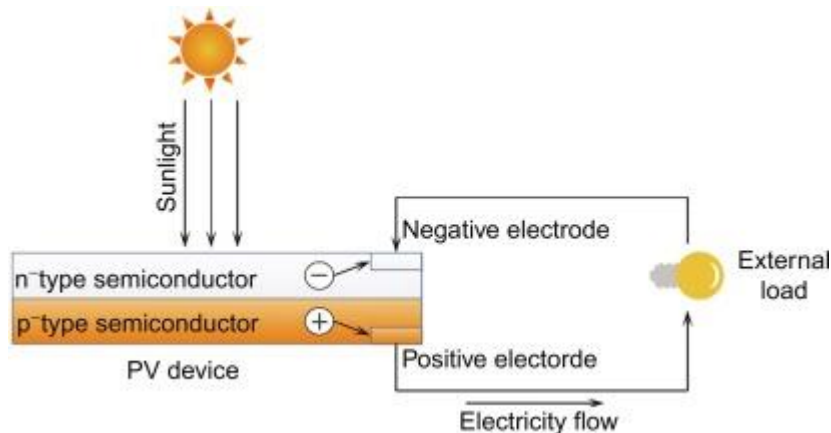
- Tworzenie melanin (a także witaminy D) jest wyzwalane przez promieniowanie UVB
- Nie da się opalić przez szycbę





# Efekt fotoelektryczny wewnętrzny

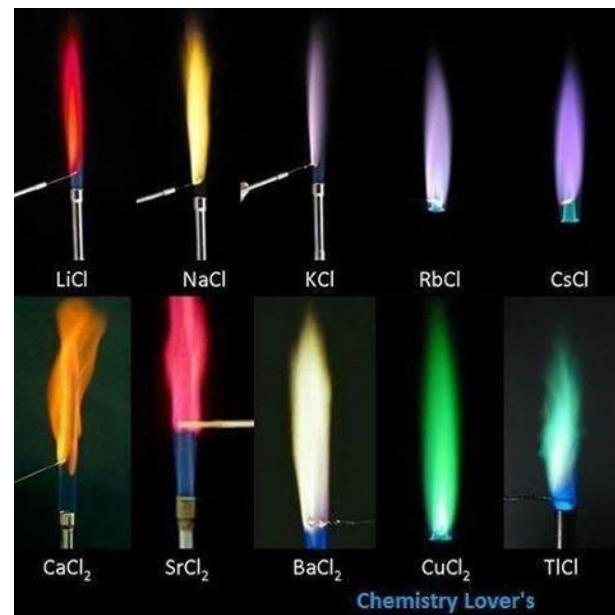
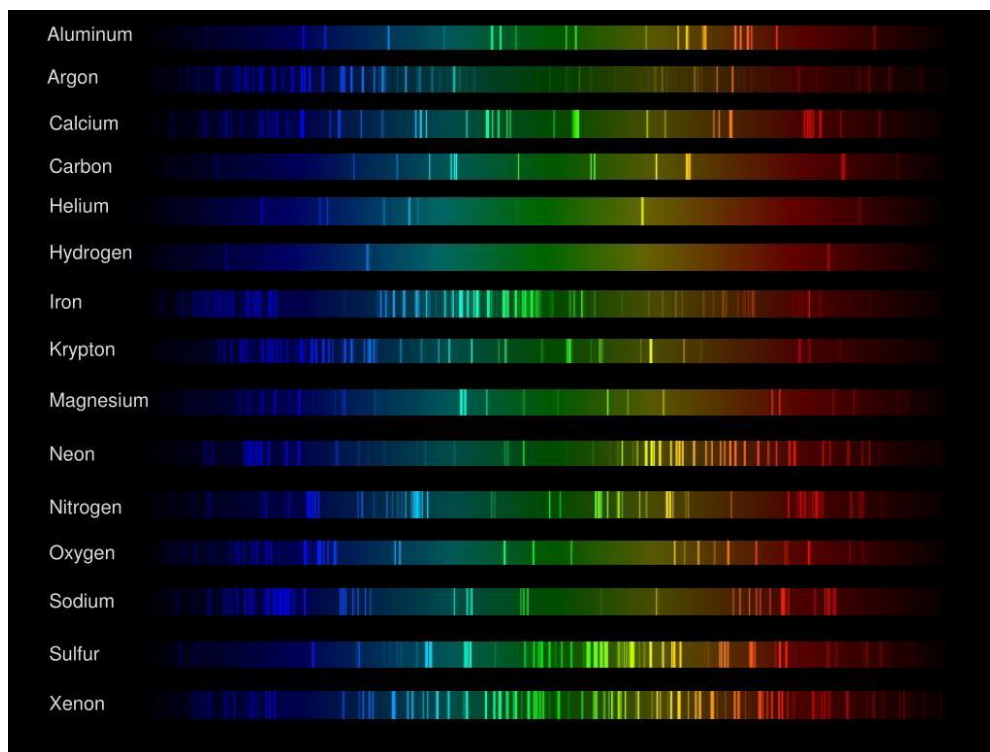
- Dioda ze złączem p-n
- Foton o energii większej niż szerokość pasma wzbronionego wybija elektron do pasma przewodnictwa, tworząc jednocześnie dziurę
- Zarówno prąd jak i dziura są nośnikami swobodnymi





# Widma emisyjne

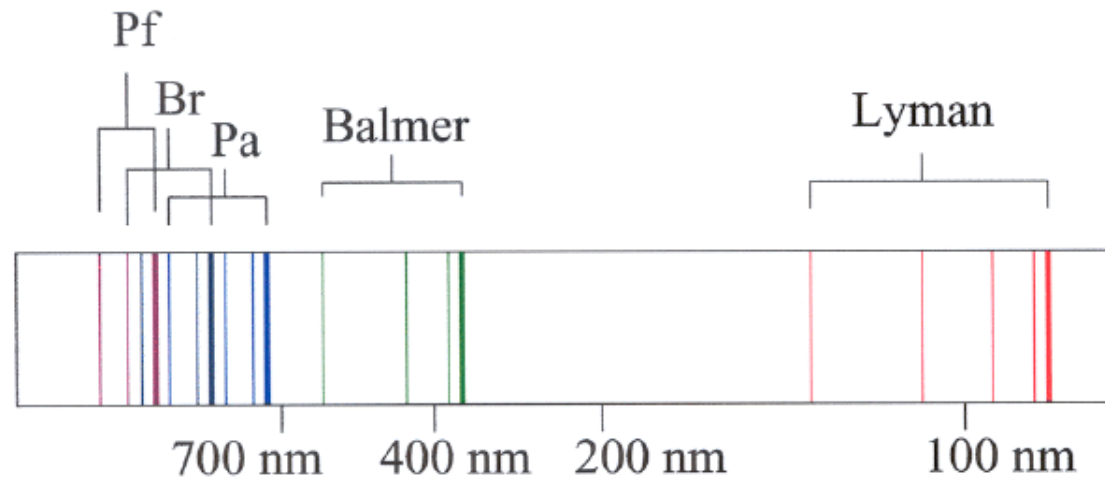
- J. Fraunhofer - spektroskop
- R. Bunsen: analiza widmowa
- Każdy pierwiastek ma unikalne widmo emisyjne lub absorpcyjne
- Hel, odkryty na Słońcu w 1868, na Ziemi w 1895





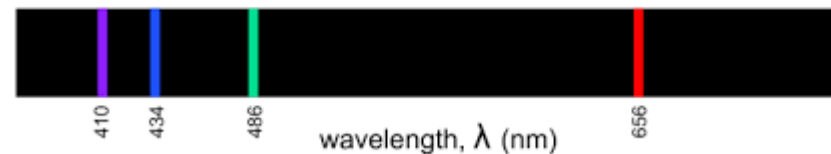
# Widmo emisyjne wodoru

- Widmo wodoru, badane również w IR i UV, ujawnia serie prążków, które odkryli Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, Pfund



- Seria Balmera jest w świetle widzialnym

Hydrogen Emission Spectrum







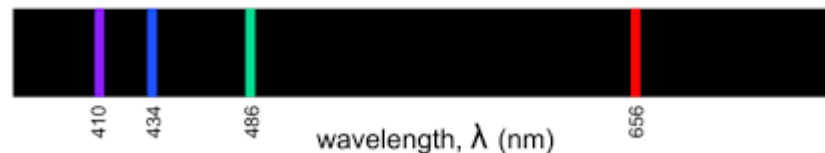
# Wzór Rydberga

- J. Rydberg: związek długości fal z liczbami naturalnymi:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad n_1 < n_2$$

- Przykładowo, dla serii Lymana,  $n_1=1$ ,  $n_2=2,3,4,5,\dots$ ,
- dla serii Balmera  $n_1=2$ ,  $n_2=3,4,5,\dots$ ,

Hydrogen Emission Spectrum



- Po odkryciu związku długości fali z energią fotonu:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = hcR_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



# Model atomu Bohra

- E. Rutherford, 1911: rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na złotej folii dowodzi, że atomy składają się z jądra i elektronów wokół
- Elektrony krążą po orbitach, utrzymywane dośrodkową siłą przyciągania elektrycznego:

$$\frac{m_e v^2}{r} = Z \frac{ke^2}{r^2}$$

- N. Bohr, 1913: elektrony krążą po skwantowanych orbitach, emitują światło tylko gdy zmieniają numer orbity
- Moment pędu elektronu krążącego po orbicie o promieniu  $r$  jest skwantowany:

$$L = m_e v r = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

- Skwantowane są też promienie orbit i energie kinetyczne:

$$r = \frac{\hbar^2 n^2}{Zke^2 m_e} \quad E = -\frac{Zke^2}{2r} = -\frac{Z^2 k^2 e^4 m_e}{2\hbar^2 n^2}$$



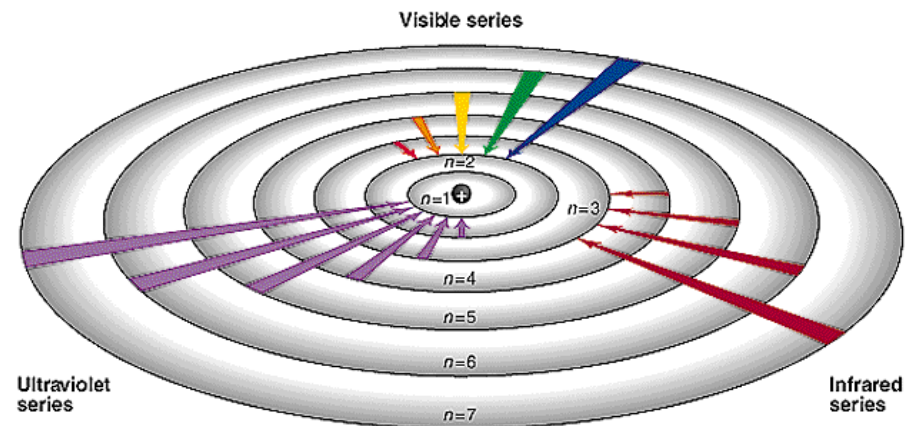
# Model atomu Bohra

- Model Bohra tłumaczy zasadność wzoru Rydberga oraz serie widmowe wodoru i jonów wodoropodobnych (z jednym elektronem)

$$E = -\frac{Z^2 k^2 e^4 m_e}{2\hbar^2 n^2} = -Z^2 hcR_H \frac{1}{n^2}$$

- Gdy wzbudzony elektron spada z wyższej orbity  $n_2$  na niższą  $n_1$ , emituje kwant promieniowania:

$$hf = -Z^2 hcR_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



# Model atomu Bohra



- Dla  $n=1$ , energia stanu podstawowego (energia jonizacji):

$$E_1 = -\frac{Z^2 k^2 e^4 m_e}{2\hbar^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{kgm}^3}{\text{A}^2\text{s}^4}$$

- Dla atomu wodoru  $Z=1$ , więc:

$$e \approx 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$E_1 = -\frac{e^4 m_e}{8h^2 \epsilon_0^2} \approx 13.6 \text{ eV}$$

$$m_e \approx 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

- Najmniejszy promień orbity:

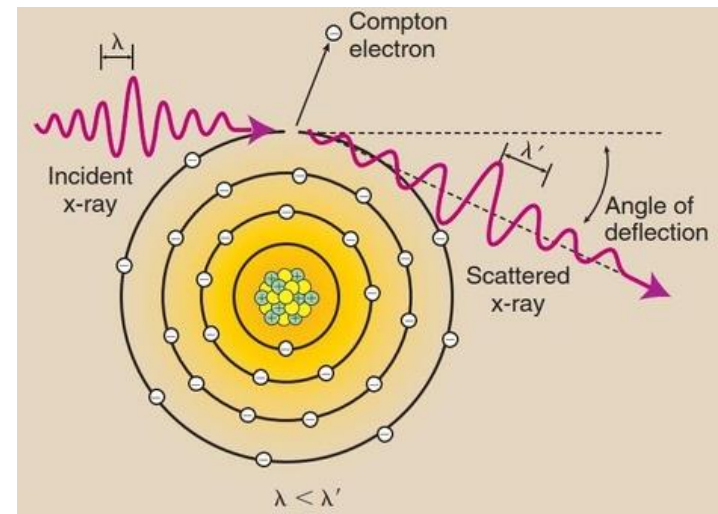
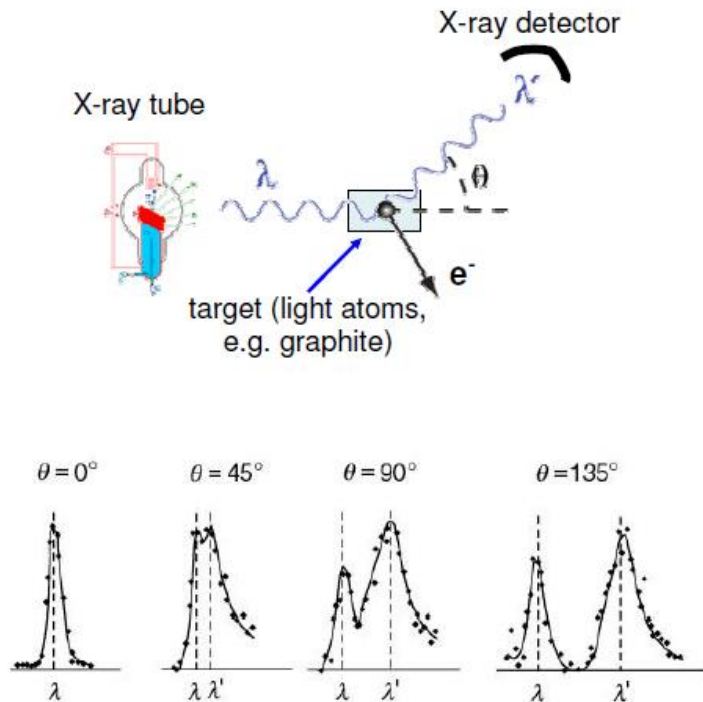
$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} \approx 0.053 \text{ nm}$$

- Nobel w 1922, ale nadal nie wiadomo, dlaczego skwantowane, również brak wyjaśnienia atomów wieloelektronowych



# Efekt Comptona

- Mechanika kwantowa i relatywistyka w jednym: elastyczne oddziaływanie kwantów  $\gamma$  z elektronami atomów
- Pomiary kątowe pokazują przesunięcie długości fali zależne od kąta rozproszenia



$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$



# Efekt Comptona

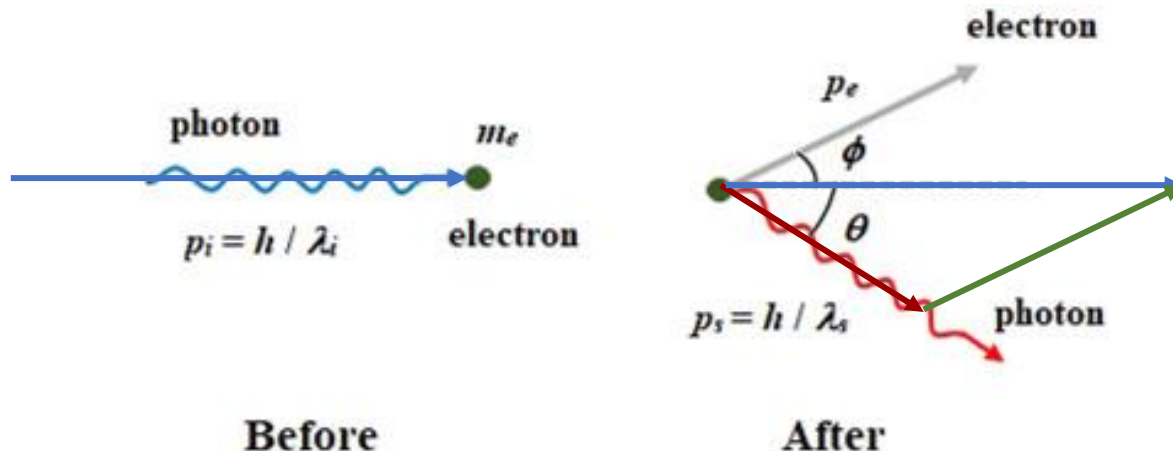
- Relatywistyczny związek energii i pędu, dla elektronu:

$$E_e^2 = (p_e c)^2 + (m c^2)^2$$

- Dla bezmasowego fotonu, energia i pęd:

$$E_f = hf = \frac{hc}{\lambda} = pc \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

- Zderzenie elastyczne: zasada zachowania energii i pędu





# Efekt Comptona

- Twierdzenie:

$$p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta$$

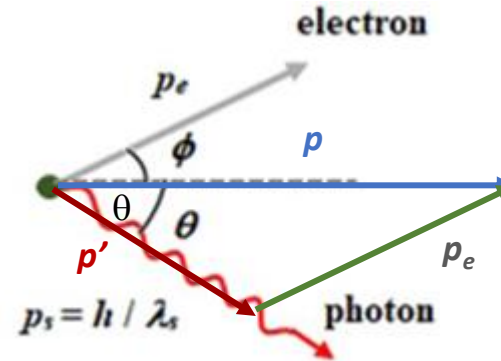
- Zasada zachowania energii:

$$E_f + mc^2 = E'_f + E'_e = E'_f + \sqrt{(p_e c)^2 + (mc^2)^2}$$

- stąd energia związana z pędem fotonu:

$$(p_e c)^2 = (E_f - E'_f + mc^2)^2 - (mc^2)^2$$

- Zadanie: dokończyć dowód





# Podsumowanie

- Światło to fala elektromagnetyczna, ale też strumień cząstek – fotonów, które niosą pęd i energię
- Foton to pewna porcja, kwant energii
- Energia w skali atomowej też jest skwantowana

