



## Detekcja światła

Sebastian Maćkowski

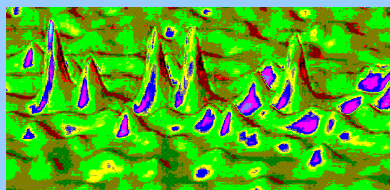
Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

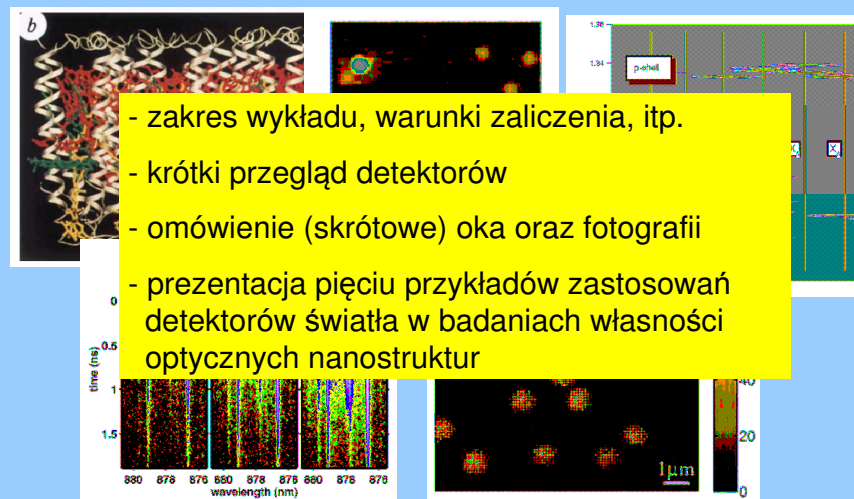
Konsultacje: **czwartek 13-16**



WS 2008/2009



## Repeta z wykładu nr 1



- zakres wykładu, warunki zaliczenia, itp.
- krótki przegląd detektorów
- omówienie (skrótowe) oka oraz fotografii
- prezentacja pięciu przykładów zastosowań detektorów światła w badaniach własności optycznych nanostruktur

WS 2008/2009



## Radiometria

dziedzina nauki zajmująca się pomiarem wielkości promieniowania elektromagnetycznego

$$v = c/\lambda$$

$v$  - częstość promieniowania  
 $c = 8 \cdot 10^8$  m/s – prędkość światła w próżni

$$E = hv$$

$E$  - energia fotonu  
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js – stała Plancka

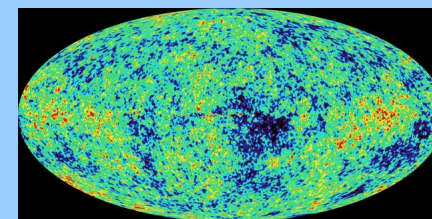
dla promieniowania o długości fali  $1 \mu\text{m}$  (podczerwień) częstość promieniowania wynosi  $3 \cdot 10^{14}$  Hz, a energia fotonu to  $2 \cdot 10^{-19}$  J

WS 2008/2009



## Promieniowanie termiczne

promieniowanie termiczne to najbardziej powszechna forma emisji promieniowania,  $T > 0\text{K}$



WS 2008/2009



## Promieniowanie termiczne

promieniowanie termiczne jest promieniowaniem równowagowym  $\Rightarrow$  po upływie dostatecznie długiego czasu ustala się stan równowagi pomiędzy pochłanianiem a emisją

zaburzenie równowagi pomiędzy absorpcją a emisją prowadzi do wzrostu lub obniżenia temperatury

WS 2008/2009



## Promieniowanie termiczne

widmowa zdolność emisyjna - moc promieniowania jednostki powierzchni w jednostkowym przedziale częstotliwości

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+\Delta\nu}^{\text{prom}}}{d\nu}$$

← moc promieniowania z jednostki powierzchni w przedziale częstotliwości  $\nu, \nu + \Delta\nu$

w języku długości fali  $\lambda$ :

$$\frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c}$$

$$dW_{\nu,\nu+\Delta\nu}^{\text{prom}} = R_{\nu,T} d\nu = R_{\lambda,T} d\lambda$$

$$R_{\nu,T} = R_{\lambda,T} \frac{\lambda^2}{c}$$

WS 2008/2009



## Promieniowanie termiczne

całkowita zdolność emisyjna (emisyjność)

$$R_T = \int R_{\nu,T} d\nu$$

analogicznie:

widmowa zdolność absorpcyjna – charakteryzuje zdolność ciał do pochłaniania padającego na nie promieniowania

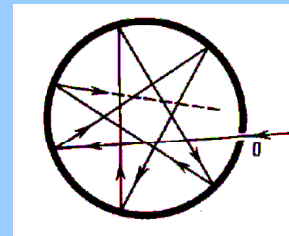
$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{\text{poch}}}{dW_{\nu,\nu+d\nu}}$$

WS 2008/2009



## Ciało doskonale czarne

**ciało doskonale czarne** – pochłania całkowicie padające promieniowanie, niezależnie od długości fali; rozkład widmowy promieniowania zależy jedynie od temperatury – termin wprowadzony przez Gustava Kirchhoffa w 1860r.



$$A_{\nu,T}^{\text{cz}} \equiv 1$$

na skutek wielokrotnych odbić światło nie wydostaje się na zewnątrz sfery – efekt ciemnego pokoju

WS 2008/2009



## Model Rayleigha-Jeansa



Rayleigh-Jeans - opis promieniowania ciała doskonale czarnego w oparciu o elektrodynamikę klasyczną – promieniowanie związane jest z drganiem atomów:

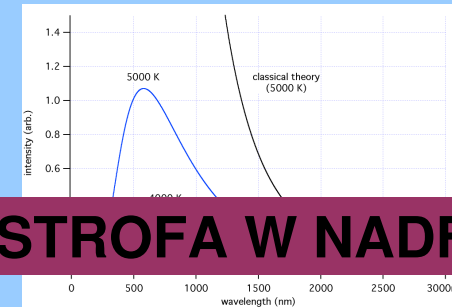


$$R(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

WS 2008/2009



## Model Rayleigha-Jeansa



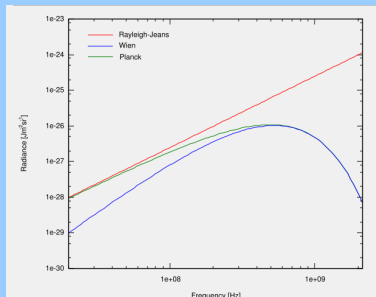
## KATASTROFA W NADFIOLECIE

opis Rayleigha-Jeans'a – zgodny z eksperymentem dla małych częstotliwości, dla dużych częstotliwości strumień promieniowania dąży do nieskończoności ( $R \sim \nu^2$ )

WS 2008/2009



## Model Wiena



Wien zaproponował model empiryczny, w którym dwie stałe otrzymywane były doświadczalnie:



$$R(\nu, T) = \alpha \nu^3 \exp\left(-\frac{\beta \nu}{T}\right)$$

opis Wiena zgadzał się dla krótkich długości fali, rozbieżności pojawiały się natomiast dla fal długich, poza tym nie został wyprowadzony z pierwszych zasad...

WS 2008/2009



## Prawo Plancka

...i to drażniło Maxa Karla Ernsta Ludwiga Plancka



Historia rozwoju fizyki kwantowej (prawdziwa): „Max Planck: the reluctant revolutionary”, <http://physicsworld.com/cws/article/print/373>

Planck w 1931 roku napisał: the introduction of energy quanta in 1900 was "a purely formal assumption and I really did not give it much thought except that no matter what the cost, I must bring about a positive result".

WS 2008/2009

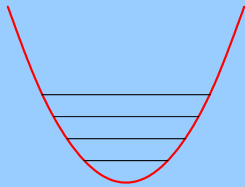


## Prawo Plancka

hipoteza: elementarne źródło promieniowania w procesie emisji może tracić energię w określonych porcjach  $\Delta E$  równych wielokrotności drgań własnych

$$\Delta E = h\nu$$

czyli: energie oscylatorów harmoniczných nie tworzą widma ciągłego, a mogą przyjmować jedynie dyskretne wartości



$$E_n = n h \nu, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$h$  - stała Plancka

WS 2008/2009



## Prawo Plancka

zakładając rozkład Boltzmana:

$$p_n = A \exp\left(-\frac{n h \nu}{k T}\right)$$

prawdopodobieństwo oscylatora o energii  $n h \nu$  w temperaturze  $T$

średnia energia oscylatora:

$$\langle E \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} p_n n h \nu = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n h \nu \exp\left(-\frac{n h \nu}{k T}\right)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{n h \nu}{k T}\right)}$$

lub:

$$\langle E \rangle = \frac{h \nu x (1 + 2x + 3x^2 + \dots)}{1 + x + x^2 + x^3 + \dots}$$

WS 2008/2009



## Prawo Plancka

wykorzystując własności szeregów:

$$1 + 2x + 3x^2 + \dots = \frac{1}{(1-x)^2}$$

$$1 + x + x^2 + x^3 + \dots = \frac{1}{1-x}$$

$$\langle E \rangle = h \nu \frac{\exp\left(-\frac{h \nu}{k T}\right) \frac{1}{(1-x)^2}}{\frac{1}{1-x}} = \frac{h \nu}{\exp\left(\frac{h \nu}{k T}\right) - 1}$$

WS 2008/2009



## Prawo Plancka

w warunkach równowagi termodynamicznej strata energii związana z promieniowaniem jest skompensowana energią zaabsorbowaną

$$R(\nu, T) = \frac{2 \pi \nu^2}{c^2} \langle E \rangle$$

rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego

$$R(\nu, T) = \frac{2 \pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h \nu}{k T}\right) - 1} \quad R(\lambda, T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{h c}{\lambda k T}\right) - 1}$$

WS 2008/2009



## Prawo Plancka

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

$h\nu \gg kT$  – asymptotyczny wykładniczy zanik intensywności granica Wiena, czyli światło żarówki (~2700 K) nie powoduje opalenizny

$h\nu \ll kT$  – relacja Rayleigha-Jeansa, ponieważ  $\exp(h\nu/kT) - 1 \cong h\nu/kT$ , czyli:

$$R(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

WS 2008/2009



## Prawo Stefana-Boltzmann



całkowita moc promieniowania wyemitowanego przez ciało doskonale czarne

$$R(T) = \int_0^\infty R_\lambda(\lambda, T) d\lambda = \int_0^\infty \frac{2\pi hc^2 d\lambda}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

$$R(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$

$\sigma$  - stała Stefana-Boltzmann  
 $\sigma \cong 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$

WS 2008/2009

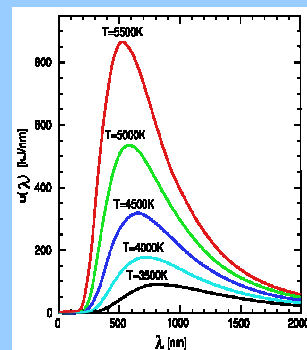


## Prawo przesunięć Wiena

długość fali odpowiadająca maksymalnej intensywności promieniowania zależy odwrotnie proporcjonalnie od temperatury

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}$$

Object	T (K)	$\lambda_{\text{peak}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_{\text{peak}}$ ( $\text{\AA}$ )
Sun	5800	0.5	5000
People	310	9	90000
Neutron Star	$10^8$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	0.3



WS 2008/2009

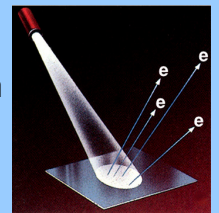


## Efekt fotoelektryczny

emisja elektronów z powierzchni ciała oświetlanego promieniowaniem elektromagnetycznym



pierwsza obserwacja – 1887 r. Heinrich Rudolf Hertz stwierdził zwiększenie procesu rozładowywania elektrycznego przy oświetleniu światłem nadfioletowym poszukując potwierdzenia dla teorii Maxwella, według której musiała istnieć fala elektromagnetyczna



brak wyjaśnienia, ale zdaniem Hertza: „a phenomenon so remarkable called for closer investigation”

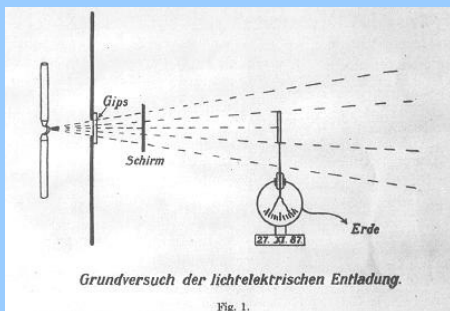
WS 2008/2009



## Efekt fotoelektryczny



prostsze podejście:  
Wilhelm Franz Ludwig Hallwachs w 1888 r.  
uczeń Hertza



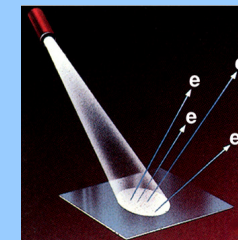
WS 2008/2009



## Efekt fotoelektryczny

płytkę cynkową mocowaną na izolującym stojaku połączoną z okładką elektroskopu

- ujemnie naładowana – powolne rozładowanie, jednak pod wpływem oświetlenia lampą łukową czy palącym się magnezem rozładowanie następowało natychmiast
- dodatnio naładowana – brak wpływu oświetlenia na szybkość rozładowania



WS 2008/2009



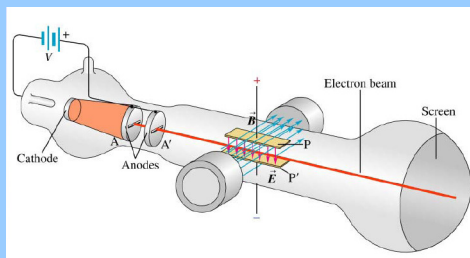
## Efekt fotoelektryczny

na wyjaśnienie trzeba było czekać prawie dekadę



1897 r. – Sir Joseph John Thomson wyznacza stosunek ładunku do masy elektronu i dwa lata później stwierdza, że z katody wybijane są elektrony

$$e/m = 1.7 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$$



WS 2008/2009

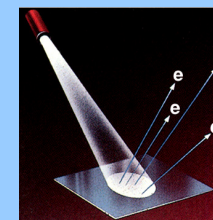


## Efekt fotoelektryczny

interpretacja efektu fotoelektrycznego AD 1900

- oscylujące pole elektryczne światła padającego na metal pobudza do drgań elektrony w atomach
- w końcu niektóre z elektronów się uwolnią i opuszczą warstwę metaliczną

takie myślenie miało jednak swoje konsekwencje...



WS 2008/2009



## Efekt fotoelektryczny

**Konsekwencja numer 1:** światło o większej intensywności powinno silniej „rozbujać” elektrony wobec czego powinno się zaobserwować większą liczbę elektronów o średnio większej energii

**Konsekwencja numer 2:** oświetlanie światłem o większej częstotliwości musiało spowodować szybsze „rozbujaanie” elektronów, wobec czego elektrony powinny być wybijane szybciej – podobnie słabe oświetlenie powinno prowadzić do wydłużenia czasu potrzebnego na rozbujaanie elektronu

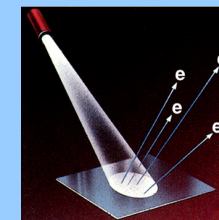


## Efekt fotoelektryczny

weryfikacja eksperymentalna ???

Philipp Eduard Anton von Lénárd w 1902 r. przeprowadził eksperyment, w którym zmieniał natężenie padającego światła mierząc energię wybijanych elektronów (negatywnie naładowany kolektor stanowił barierę potencjału)

wynik:  
liczba wybijanych elektronów zależy wprost proporcjonalnie od natężenia światła, ale ich energia **NIE**



## Efekt fotoelektryczny

jeszcze jeden krok naprzód:

Lénárd zauważył także, że maksymalna energia wybijanych elektronów zależy od długości fali padającego światła: dla światła o większej częstotliwości wartość ta była większa

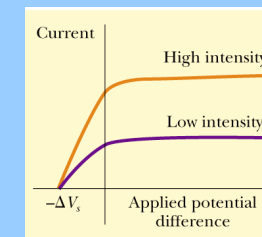
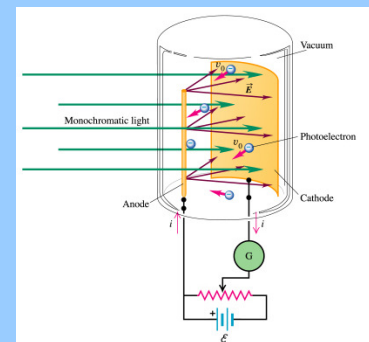
~~interpretacja efektu fotoelektrycznego AD 1900~~

obalone AD 1902



## Efekt fotoelektryczny

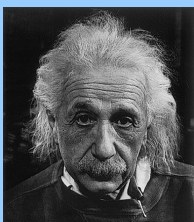
typowa konfiguracja eksperymentu



elektrony wylatują z różnymi co do wartości prędkościami



## Hipoteza Einsteina



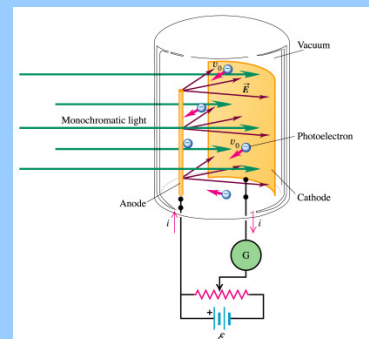
fala elektromagnetyczna o częstotliwości  $\nu$  jest strumieniem cząstek (fotonów) o energii  $E=h\nu$

- elektron uzyskuje energię  $E=h\nu$ , jeżeli energia ta jest większa od pracy wyjścia  $A$ , to elektron może opuścić katodę i w układzie płynie prąd
- wzrost oświetlenia powierzchni katody powoduje wzrost liczby elektronów, a tym samym rośnie wartość prądu nasycenia
- różnicę energii elektron unosi w postaci energii kinetycznej

WS 2008/2009



## Hipoteza Einsteina



$$h\nu = A + E_{k,max}$$

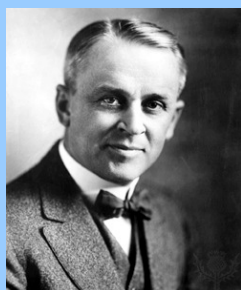
$$E_{k,max} = eV_{stop}$$

pomiar fotoprądu w funkcji energii padającego światła – metoda wyznaczenia stałej Plancka

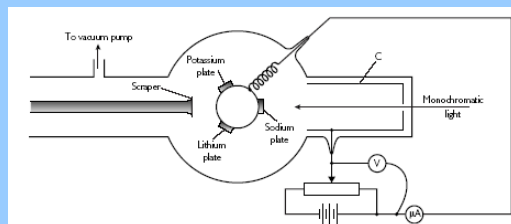
WS 2008/2009



## Millikan kontratakuje



Robert Andrews Millikan przez 10 lat prowadził eksperymenty mające obalić model Einsteina



wynik: liniowa zależność napięcia hamującego od energii światła

WS 2008/2009



## Galeria sław

- 1904 - Lord Rayleigh
- 1905 - Philipp Lénárd
- 1906 - J.J. Thomson
- 1911 - Wilhelm Wien
- 1918 - Max Planck
- 1921 - Albert Einstein
- 1923 - Robert A. Millikan

WS 2008/2009