

# Podstawy fizyki kwantowej i budowy materii

prof. dr hab. Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wykład 3  
16 października 2017

- 1 Promieniowanie termiczne
- 2 Efekt fotoelektryczny

1 Promieniowanie termiczne

2 Efekt fotoelektryczny

## Promieniowanie

Zdolność przekazywania energii przez ciało promieniujące, bez konieczności kontaktu z innym ciałem lub ośrodkiem.

Gdy mówimy o promieniowaniu mamy zazwyczaj na myśli promieniowanie elektromagnetyczne. Choć istnieją też inne rodzaje promieniowania ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\nu$  - neutrina,  $G$  - grawitacyjne...)

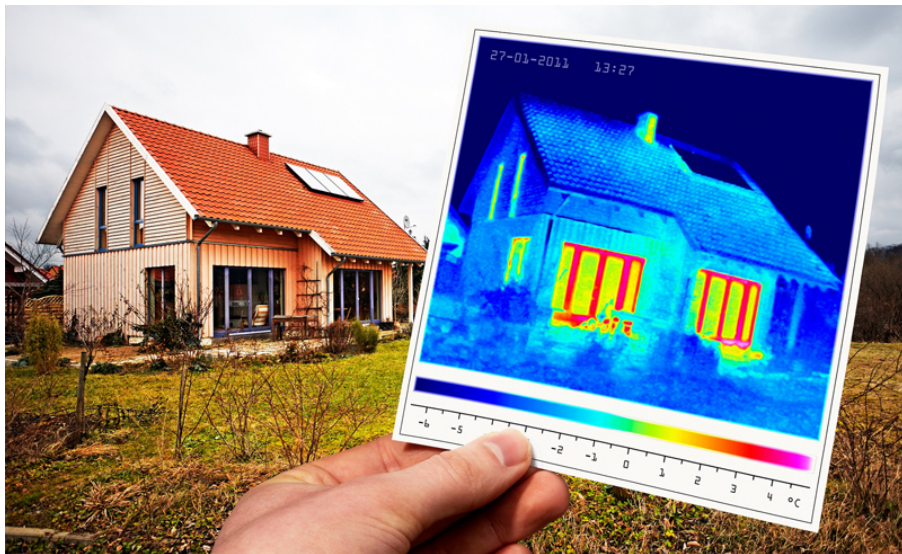
Wytwarzanie promieniowania przez źródło nazywamy **emisją**.

Pochłanianie promieniowania przez inne ciało nazywamy **absorpcją**.

Promieniowanie wypełnia przestrzeń powodując, że istnieje w niej niezerowa gęstość energii.

Jeśli energia nie jest w inny sposób dostarczana do układu, każde ciało w **stanie równowagi** termodynamicznej musi **emitować i pochłaniać** tyle samo energii na jednostkę czasu

⇒ promieniowanie termiczne



**Każde ciało** (o temperaturze powyżej 0 K) jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego, które nazywamy **promieniowaniem termicznym!**

Promieniowanie **zależy bardzo silnie od temperatury:**

im niższa temperatura ciała tym słabsze promieniowanie.

Zależy też od **materiału i struktury powierzchni danego ciała.**

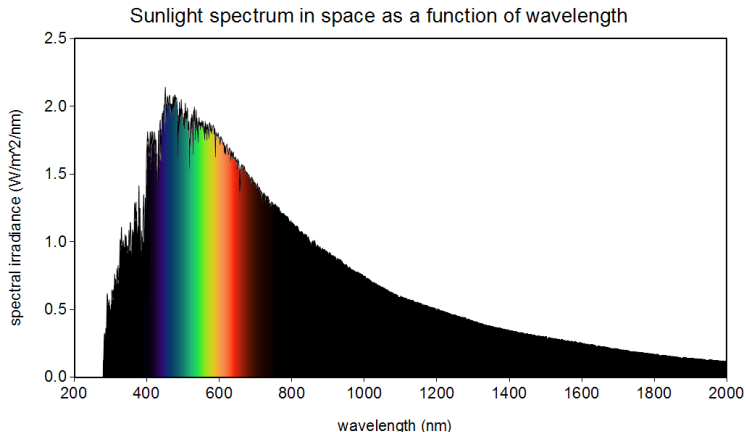
**Każde ciało** absorbuje też otaczające je (emitowane przez inne ciała) promieniowanie, w szczególności promieniowanie termiczne.

Absorpcja także zależy od **materiału i struktury powierzchni danego ciała.**

Ciało może odbijać i/lub rozpraszać padające nań promieniowanie, ale **nigdy** nie odbije dokładnie **100%**. Zawsze jakiś ułamek padającego promieniowania jest pochłaniany...

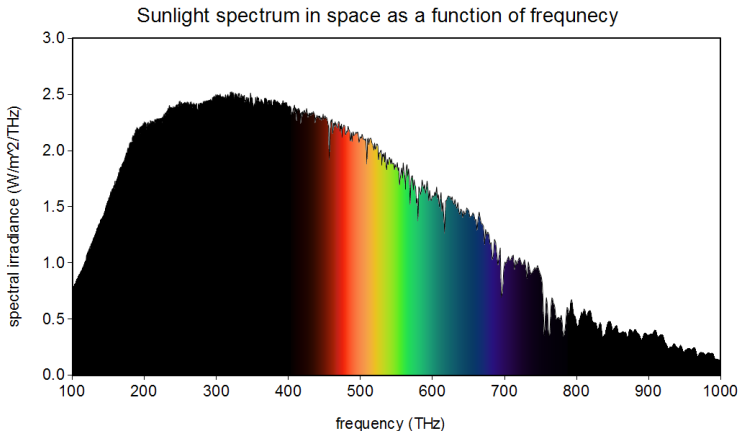
## Widmo

Promieniowanie bardzo rzadko jest monochromatyczne. Promieniowanie termiczne ma zawsze ciągły rozkład w długości fali



## Widmo

Promieniowanie bardzo rzadko jest monochromatyczne. Promieniowanie termiczne ma zawsze ciągły rozkład w długości fali i częstotliwości.



Rozkłady w długości fali i częstotliwości mają inny kształt, ale są równoważne



# Zdolność emisyjna i absorpcyjna

Rozkład długości fali (lub częstości) emitowanego promieniowania jest kluczowy. Dlatego opisując emisję i absorpcję musimy go uwzględnić.

## Zdolność emisyjna

Mówi nam o ilości energii wypromieniowanej w jednostce czasu przez jednostkowy fragment powierzchni ciała o zadanej temperaturze  $T$ , w przedziale długości fali od  $\lambda$  do  $\lambda + d\lambda$ :

$$e_\lambda \equiv e(\lambda, T) = \frac{dE}{dt S d\lambda} \quad [e] = \frac{W}{m^2 \mu m}$$

## Zdolność absorpcyjna

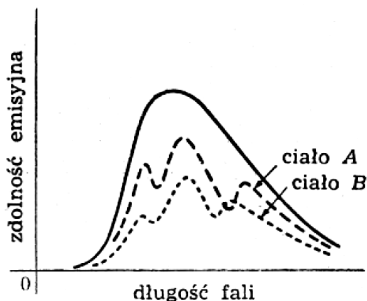
Opisuje stosunek mocy pochłoniętej przez powierzchnię ciała do mocy padającej, w przedziale długości fali od  $\lambda$  do  $\lambda + d\lambda$ :

$$a_\lambda \equiv a(\lambda, T) = \frac{dE^{abs}}{dE^{pad}} \quad 0 < a_\lambda < 1$$

Zależność  $a_\lambda$  od temperatury jest zazwyczaj pomijalna

# Zdolność emisyjna i absorpcyjna

Zdolność emisyjna, w zadanej temperaturze, zależy od materiału i struktury powierzchni badanego ciała



W 1859 roku G.Kirchhoff odkrył, że jest to ściśle powiązane ze zdolnością absorpcyjną. Dla dowolnego ciała ich stosunek jest **uniwersalną funkcją**:

$$\frac{e^A(\lambda, T)}{a^A(\lambda, T)} = \frac{e^B(\lambda, T)}{a^B(\lambda, T)} = f(\lambda, T)$$

Z obserwacji Kirchhoffa wynika, że **im lepiej ciało absorbuje** promieniowanie (wyższa wartość  $a_\lambda$ ) **tym lepiej promieniuje**. Najsilniej promieniować będzie ciało całkowicie pochłaniające wszystkie padające na nie promieniowanie.

Takie ciało nazywamy **ciałem doskonale czarnym**:  $a_\lambda^{BB} \equiv 1$ .

Uniwersalna funkcja Kirchhoffa odpowiada zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego (**black body**)

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = f(\lambda, T) = e^{BB}(\lambda, T)$$

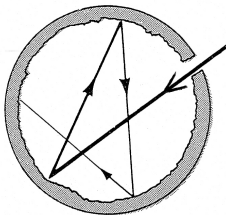
Gdyby zdolności emisyjna i absorpcyjna ciał nie były do siebie proporcjonalne, moglibyśmy doprowadzić do sytuacji przekazu energii od ciała o niższej temperaturze do ciała o wyższej temperaturze...

Ciała doskonale czarne nie istnieją w przyrodzie.

**Każdy** rodzaj powierzchni odbija **przynajmniej częściowo** promieniowanie.

Ciała, które wydają nam się “idealnie czarne” w świetle widzialnym często odbijają dużo lepiej promieniowanie w innych zakresach widma.

Najlepszym “modelem” ciała doskonale czarnego jest mały otwór w chropowatej wnęce:



Wpadający promień musi odbić się bardzo wiele razy zanim ma szansę wydostać się na zewnątrz (otwór musi być mały)

Wprowadzenie koncepcji ciała doskonale czarnego umożliwiło dokładniejsze badania ilościowe nad emisją promieniowania termicznego

W 1879 Josef Stefan zauważył, że całkowita ilość promieniowania  $R$  [ $\frac{W}{m^2}$ ] wysyłana przez **ciało doskonale czarne** zależy od jego temperatury  $T$  jak:

$$R^{BB} = \int_0^{\infty} e^{BB}(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad \sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

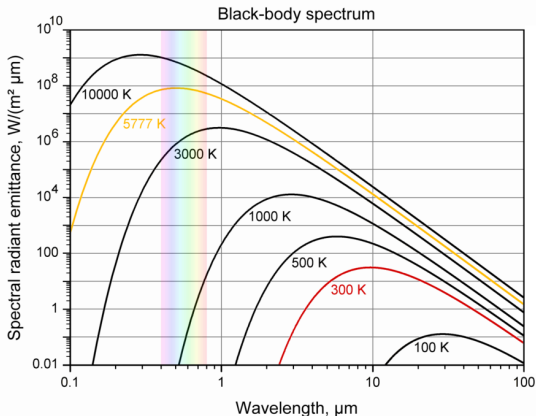
Zależność teoretycznie wyprowadzona przez Ludwiga Boltzmana w 1884  
⇒ Prawo Stefana-Boltzmanna

Dla ciała rzeczywistego ( $0 < a_\lambda < 1$ )

$$0 < R = a \sigma T^4 < R^{BB} \quad 0 < a < 1$$

Całkowita emitowana energia rośnie szybko z temperaturą  $\sim T^4$

Dla dowolnej długości fali  $\lambda$  zdolność emisyjna wzrasta z temperaturą!



Ale zmienia się również kształt widma!

Pozycja maksimum rozkładu widmowego przesuwają się do niższych  $\lambda$

Ze **wzrostem temperatury** widmo promieniowania ciała doskonale czarnego przesuwa się w stronę **krótszych długości fal**. W 1893 Wilhelm Wien, na podstawie wyników pomiarów, sformułował zależność opisującą pozycję **maksimum rozkładu**:

$$\lambda_{max} = \frac{C}{T} \quad C \approx 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

$$\lambda_{max} \cdot T = C = \text{const}$$

Przykładowo:

$T(\text{K})$	$\lambda_{max}(\text{nm})$	$R(\text{W/m}^2)$
100	29 000	5.67
300	9 700	459
1 000	2 900	$5.67 \cdot 10^4$
6 000	480	$7.35 \cdot 10^7$
10 000	290	$5.67 \cdot 10^8$

Promieniujemy ( $\langle S \rangle = 1.6 - 1.9 \text{ m}^2$ ) rzędu 1 kW !!!

Ale podobną ilość absorbujemy...

Pod koniec XIX wieku doskonalone metody pomiarowe pozwoliły na bardzo dokładny pomiar widma promieniowania ciała doskonale czarnego.

Istniało wiele modeli fenomenologicznych, ale żaden nie dawał zadowalającego opisu danych.



Pod koniec XIX wieku doskonalone metody pomiarowe pozwoliły na bardzo dokładny pomiar widma promieniowania ciała doskonale czarnego.

Istniało wiele modeli fenomenologicznych, ale żaden nie dawał zadowalającego opisu danych.

Próbowano też teoretycznie wyprowadzić postać widma:

- model ciała doskonale czarnego: równowaga między promieniowaniem we wnęce i drganiami atomów na powierzchni wnęki
- średnia energia dla każdego modu drgań atomowych  $kT$
- liczbę modów na jednostkę długości fali wynika z liczby możliwych konfiguracji fali stojącej we wnęce

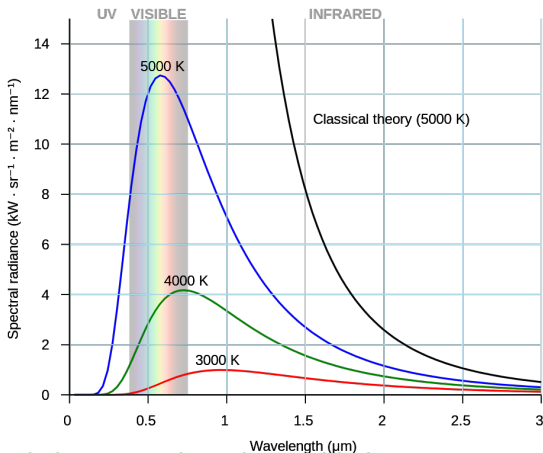
⇒ otrzymujemy klasyczny rozkład Rayleigha – Jeansa:

$$e(\lambda, T) = \frac{2\pi c kT}{\lambda^4}$$

$$k \approx 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad \text{stała Boltzmana}$$

Rozkład Rayleigha – Jeansa poprawnie opisywał jedynie zachowanie rozkładu dla **bardzo dużych wartości  $\lambda$** .

Dla małych wartości  $\lambda$  był rozbieżny  $\Rightarrow$  “katastrofa w ultrafiolecie”



Całkowicie zawodził w opisie kształtu rozkładu

Max Planck zainteresował się rozbieżnościami między danymi doświadczalnymi, a różnymi modelami fenomenologicznymi.

W październiku 1900 roku udało mu się “zgadnąć” poprawną funkcję opisującą wszystkie pomiary promieniowania ciała doskonale czarnego.

$$e^{BB}(\lambda, T) = \lambda^{-5} \frac{A}{\exp(B/\lambda kT) - 1}$$

Max Planck zainteresował się rozbieżnościami między danymi doświadczalnymi, a różnymi modelami fenomenologicznymi.

W październiku 1900 roku udało mu się “zgadnąć” poprawną funkcję opisującą wszystkie pomiary promieniowania ciała doskonale czarnego.

14 grudnia 1900 przedstawił teoretyczne uzasadnienie wzoru

$$e^{BB}(\lambda, T) = \lambda^{-5} \frac{8\pi hc}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

Max Planck zainteresował się rozbieżnościami między danymi doświadczalnymi, a różnymi modelami fenomenologicznymi.

W październiku 1900 roku udało mu się “zgadnąć” poprawną funkcję opisującą wszystkie pomiary promieniowania ciała doskonale czarnego.

14 grudnia 1900 przedstawił teoretyczne uzasadnienie wzoru

$$e^{BB}(\lambda, T) = \lambda^{-5} \frac{8\pi hc}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}$$

Wzór ten można wyprowadzić z założeń przyjętych przez Rayleigha i Jeansa dodając jedno dodatkowe:

- energia może być przez atomy emitowana i absorbowana wyłącznie w porcjach (kwantach)  $E = h\nu$

Wzór Plancka bardzo dobrze opisywał wszystkie dane doświadczalne.  
Wynikały z niego także Prawo Stefana-Boltzmana i Prawo Wiena.

Wzór Plancka bardzo dobrze opisywał wszystkie dane doświadczalne.  
Wynikały z niego także Prawo Stefana-Boltzmana i Prawo Wiena.

Planck wprowadził do fizyki **pojęcie kwantu**, ale inaczej go rozumiał.

Uważał, że nieciągły charakter promieniowania, nie wynika z własności samego promieniowania, a wyłącznie ze sposobu jego oddziaływania z materią. **Kwantyzacja dotyczyła mechanizmów absorpcji i emisji.**

Wzór Plancka bardzo dobrze opisywał wszystkie dane doświadczalne. Wynikały z niego także Prawo Stefana-Boltzmana i Prawo Wiena.

Planck wprowadził do fizyki **pojęcie kwantu**, ale inaczej go rozumiał.

Uważał, że nieciągły charakter promieniowania, nie wynika z własności samego promieniowania, a wyłącznie ze sposobu jego oddziaływania z materią. **Kwantyzacja dotyczyła mechanizmów absorpcji i emisji.**

Jego przekonanie o słuszności równań Maxwella i falowej naturze światła było tak silne, że **nie zaakceptował hipotezy fotonów** Einsteina (1905).

Jeszcze w 1913 roku pisał:

*Nie powinno się poczytywać przeciw niemu tego, że niekiedy w swych spekulacjach posuwał się być może zbyt daleko, jak np. w swej hipotezie kwantów światła, ponieważ nawet w najbardziej ścisłej nauce nie może być przełomu bez zgadzania się czasem na ryzykowny krok.*



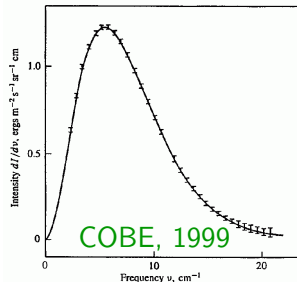
## Kosmiczne promieniowanie tła (Cosmic Microwave Background - CMB)

- powstało ok. **300 000 lat po Wielkim Wybuchu**, gdy elektrony połączyły się z jądrami atomowymi tworząc atomy
- **przewidziane w 1948** przez G.Gamowa, R.Alphera i R.Hermana
- odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona  
(**Nagroda Nobla 1978**)

- widmo odpowiada promieniowaniu ciała doskonale czarnego

$$T = 2.725 \pm 0.001 \text{ K}$$

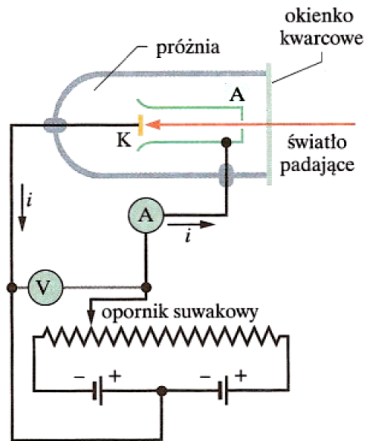
- bardzo intensywnie badane w ostatnich latach - jego fluktuacje są "kopalnią wiedzy" o ewolucji Wszechświata



1 Promieniowanie termiczne

2 Efekt fotoelektryczny

## Układ doświadczalny



Przebieg pomiaru:

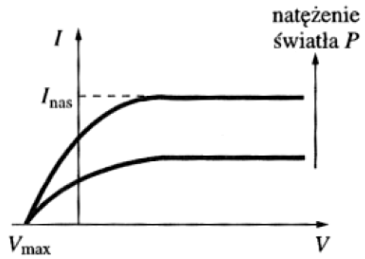
- oświetlamy katodę (K) światłem o częstotliwości  $\nu$  i natężeniu  $P$  (długości fali  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ )
- mierzymy zależność prądu płynącego w obwodzie  $I$  od napięcia  $V$  przyłożonego między anodą (A) i katodą (K)

napięcie może być dodatnie lub ujemne

# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasycia się dla dużych wartości napięcia  $V$

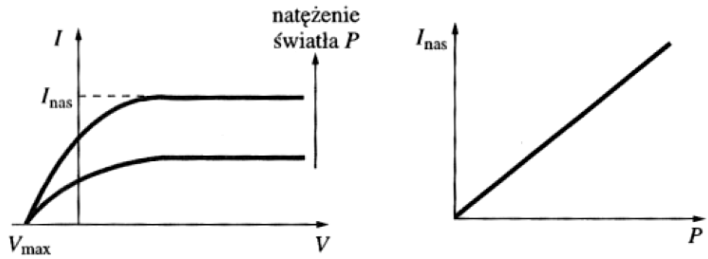


# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasyca się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.

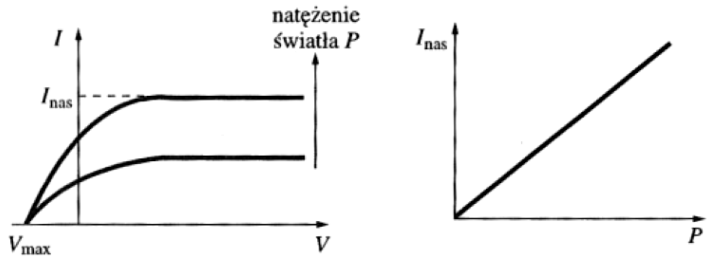


# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasycy się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.



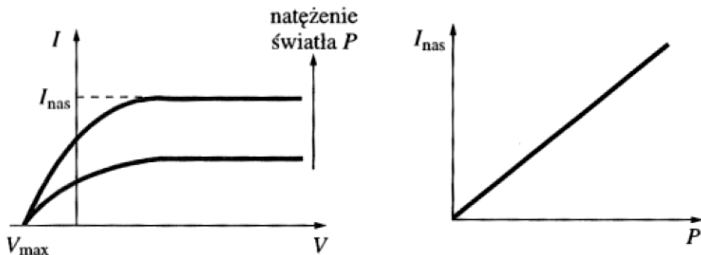
⇒ liczba wybitych elektronów nie zależy od napięcia  $V$   
 napięcie to ma tylko wpływ na wydajność ich rejestracji

# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasycy się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.



⇒ liczba wybitych elektronów nie zależy od napięcia  $V$

napięcie to ma tylko wpływ na wydajność ich rejestracji

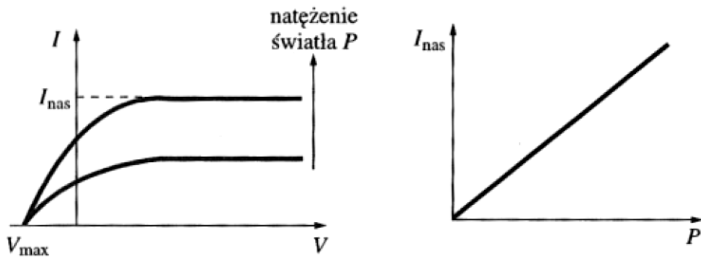
⇒ liczba wybitych elektronów jest proporcjonalna do dostarczonej energii

# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasyci się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.



- ⇒ liczba wybitych elektronów nie zależy od napięcia  $V$   
napięcie to ma tylko wpływ na wydajność ich rejestracji
- ⇒ liczba wybitych elektronów jest proporcjonalna do dostarczonej energii  
daje się to wyjaśnić na gruncie falowej teorii światła!...

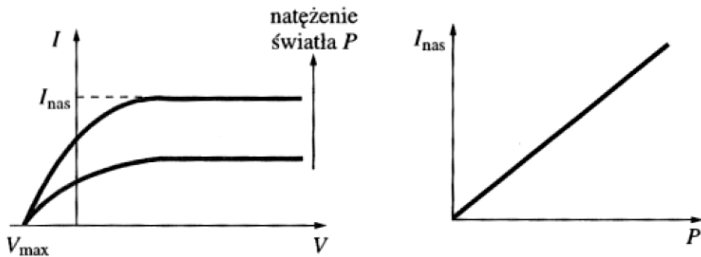


# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasycy się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.



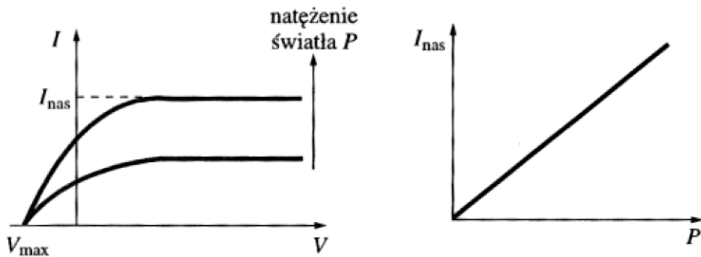
Obserwujemy przepływ prądu także przy braku przyłożonego napięcia

# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Przy danym natężeniu padającego światła  $P$ , natężenie płynącego prądu nasycy się dla dużych wartości napięcia  $V$

Prąd nasycenia  $I_{nas}$  jest proporcjonalny do natężenia światła.



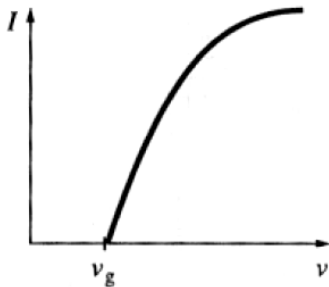
Obserwujemy przepływ prądu także przy braku przyłożonego napięcia

Napięcie hamujące  $V_{max}$ , które należy przyłożyć, żeby zatrzymać przepływ prądu nie zależy od natężenia światła ?!...

## Obserwacje

Opis klasyczny zawodzi jednak gdy zaczynamy badać zależność od częstości

Dla każdego układu (zależy to od materiału katody!) istnieje graniczna częstość  $\nu_g$  poniżej której efekt nie zachodzi!

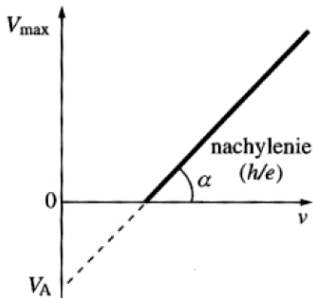


⇒ nie da się tego zrozumieć na gruncie fizyki klasycznej...

## Obserwacje

Opis klasyczny zawodzi jednak gdy zaczynamy badać zależność od częstości

Powyżej częstości granicznej, napięcie hamujące  $V_{max}$  zależy liniowo od częstości promieniowania!

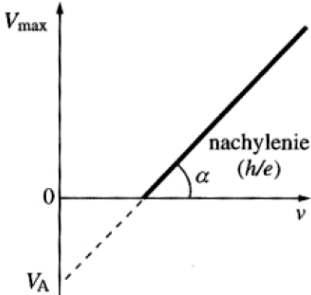


# Efekt fotoelektryczny

## Obserwacje

Opis klasyczny zawodzi jednak gdy zaczynamy badać zależność od częstości

Powyżej częstości granicznej, napięcie hamujące  $V_{max}$  zależy liniowo od częstości promieniowania!



Wyniki pomiarów wskazywały na zależność:  $V_{max} = \frac{h}{e} (\nu - \nu_g)$

## Hipoteza Einsteina

Einstein zauważył, że mierzona wartość napięcia hamującego odpowiada energii elektronów wybijanych z katody:

$$E_e = eV_{max} = h(\nu - \nu_g) = h\nu - W$$

gdzie  $W$  - tzw. praca wyjścia  
energia potrzebna na wyrwanie elektronu z metalu

## Hipoteza Einsteina

Einstein zauważył, że mierzona wartość napięcia hamującego odpowiada energii elektronów wybijanych z katody:

$$E_e = eV_{max} = h(\nu - \nu_g) = h\nu - W$$

gdzie  $W$  - tzw. praca wyjścia

energia potrzebna na wyrwanie elektronu z metalu

Wyniki obserwacji można zrozumieć jeśli przyjąć, że elektron może przyjmować energię wyłącznie w kwantach  $h\nu$  (jak u Plancka)

# Efekt fotoelektryczny

## Hipoteza Einsteina

Einstein zauważył, że mierzona wartość napięcia hamującego odpowiada energii elektronów wybijanych z katody:

$$E_e = eV_{max} = h(\nu - \nu_g) = h\nu - W$$

gdzie  $W$  - tzw. praca wyjścia

energia potrzebna na wyrwanie elektronu z metalu

Wyniki obserwacji można zrozumieć jeśli przyjąć, że elektron może przyjmować energię wyłącznie w kwantach  $h\nu$  (jak u Plancka)

Ale nie ma żadnych powodów, żeby kwasi-swobodny elektron nie mógł przyjąć dowolnej porcji energii.

⇒ trzeba przyjąć, że to światło rozchodzi się nie w sposób ciągły, ale jako strumień niepodzielnych kwantów, fotonów,  $E_\gamma = h\nu$



# Efekt fotoelektryczny

## Fotopowielacz

Efekt fotoelektryczny wykorzystywany jest do rejestracji pojedynczych fotonów w urządzeniu zwanym fotopowielaczem.

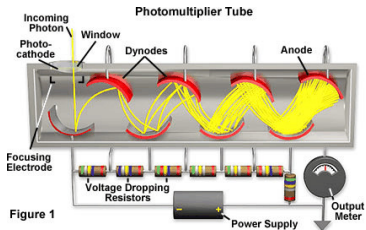


Odpowiednio dobrany materiał katody pozwala na pomiar fotonów w bardzo szerokim zakresie długości fali (115-1100 nm)

# Efekt fotoelektryczny

## Fotopowielacz

Efekt fotoelektryczny wykorzystywany jest do rejestracji pojedynczych fotonów w urządzeniu zwanym fotopowielaczem.



Odpowiednio dobrany materiał katody pozwala na pomiar fotonów w bardzo szerokim zakresie długości fali (115-1100 nm)

Wybity z katody elektron jest przyspieszany wysokim napięciem, co prowadzi do wybijania wtórnych elektronów na dynodach i powielenia ładunku do mierzalnych wartości ( $10^3$ - $10^7 e$ )

## Efekt fotoelektryczny wewnętrzny

Efekt fotoelektryczny zachodzi nie tylko na powierzchni metali.

Jest to główny proces odpowiedzialny za pochłanianie fotonów w materii aż do energii rzędu  $m_e c^2$



## Efekt fotoelektryczny wewnętrzny

Efekt fotoelektryczny zachodzi nie tylko na powierzchni metali.

Jest to główny proces odpowiedzialny za pochłanianie fotonów w materii aż do energii rzędu  $m_e c^2$



Dla wysokoenergetycznych fotonów (ale przyjmując  $E_\gamma \ll m_e c^2$ )  
przekrój czynny

$$\sigma_{p.e.} \sim \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}}$$

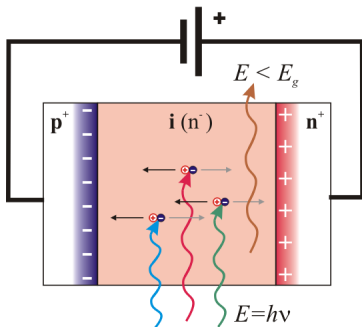
- ⇒ zasięg fotonów w materii rośnie z energią
  - ⇒ pochłanianie fotonów jest dużo silniejsze dla ciężkich pierwiastków
- Dlatego osłony przed promieniowaniem  $\gamma$  budujemy z ołowiu...

# Efekt fotoelektryczny

## Fotodioda

W wyniku efektu fotoelektrycznego wewnętrzne światło padające na fotodiode wytwarza nośniki prądu, pary elektron-dziura

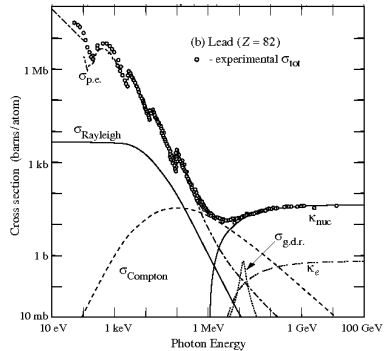
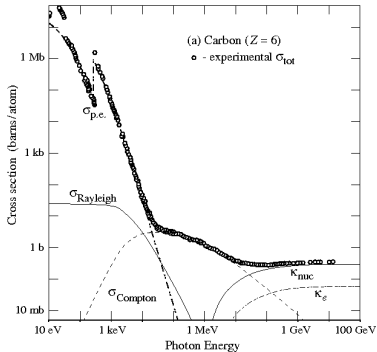
⇒ mierzymy przepływ ładunku



Podobnie powstają ładunki mierzone na matrycach CCD lub CMOS w aparatach fotograficznych (różny jest tylko sposób odczytu)

# Oddziaływanie fotonów z materią

Przekrój czynny na oddziaływanie z ośrodkiem w funkcji energii fotonu  
 (miara prawdopodobieństwo oddziaływania na pojedynczym atomie)



W obszarze  $E_\gamma < m_e c^2$  dominuje efekt fotoelektryczny ( $\sigma_{p.e.}$ )

Dla energii rzędu 1 MeV istotny wkład od efektu Comptona ( $\sigma_{\text{Compton}}$ )

Dla energii powyżej 10 MeV dominuje kreacja par  $e^+e^-$  w polu jąder ( $\kappa_{\text{nuc}}$ )