Początki fizyki współczesnej

Plan

1.1. Promieniowanie ciała doskonale czarnego

1.2. Foton

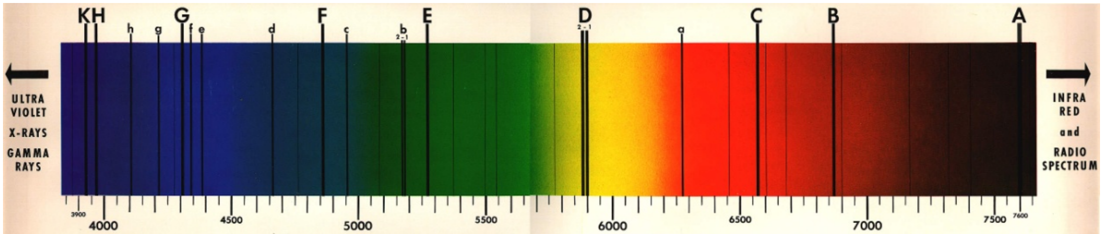
1.3. Efekt fotoelektryczny

1.4. Efekt Comptona

Trochę historii

Gustav Kirchhoff (1824-1887)

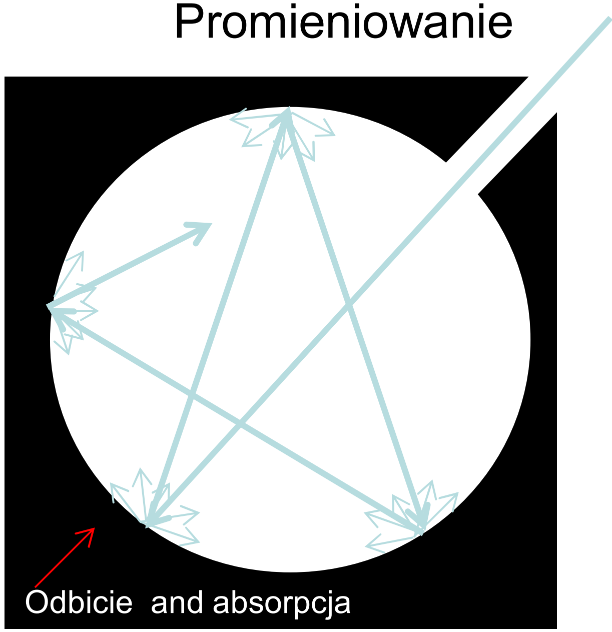
W 1859 rozpoczyna się droga do mechaniki kwantowej od odkrycia linii D w widmie słonecznym

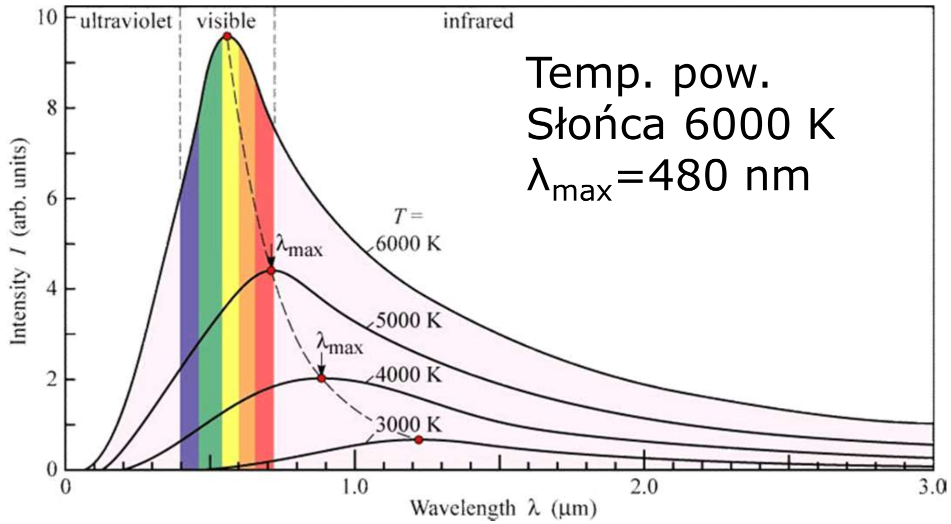


Elektron odkryty przez J.J.Thomsona w 1897 (neutron w 1932). Nowe idee były przyjmowane niechętnie

„I was told long afterwards by a distinguished physicist who had been present at my lecture that he thought I had been pulling their leg".

Promieniowanie ciała doskonale czarnego





Prawo przesunięć **Wien'a**

Idealny absorber

$$a_\lambda = 1$$

$$e_\lambda = K(\lambda, T)$$

$$\boxed{\lambda_{max} T = 2.9 \cdot 10^{-3}\, m \cdot K}$$

Gęstość energii emitowanej przez ciało doskonale czarne jest funkcją tylko długości fali i temperatury

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Rok	Autor	Wzór
1887	Władimir Aleksandrowicz Michelson	$e(\lambda,T) = aT^{3/2}\lambda^{-6}\exp(-b/\lambda^2 T)$
1888	Heinrich Weber	$e(\lambda,T) = a\lambda^{-2}\exp(cT - b/\lambda^2 T^2)$
1896	Wilhelm Wien	$e(\lambda,T) = a\lambda^{-5}\exp(-b/\lambda T)$
1896	Friedrich Paschen	$e(\lambda,T) = a\lambda^{-5,6}\exp(-b/\lambda T)$
1900	Lord Rayleigh	$e(\lambda,T) = aT\lambda^{-4}\exp(-b/\lambda T)$
1900	Otto Lummer i Ernst Pringsheim	$e(\lambda,T) = aT\lambda^{-4}\exp(-b/(\lambda T)^{1,25})$
1900	Otto Lummer i Eugen Jahnke	$e(\lambda,T) = a\lambda^{-5}\exp(-b/(\lambda T)^{0,9})$
1900	Max Thiesen	$e(\lambda,T) = aT^{0,5}\lambda^{-4,5}\exp(-b/\lambda T)$
1900	Max Planck (19 X)	$e(\lambda,T) = a\lambda^{-5}\left(\frac{1}{\exp(b/k\lambda T)-1}\right)$
1900	Max Planck (14 XII)	$e(\lambda,T) = 8\pi hc\lambda^{-5}\left(\frac{1}{\exp(hc/k\lambda T)-1}\right)$

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Wilhelm Wien
(1864-1928)

Ludwig Boltzmann
(1835-1893)

W 1896 Wien zaproponował:

$$\boxed{e_{Wien}(\lambda,T) = b\lambda^{-5}\exp(-a/\lambda T)}$$

a, b stałe

Posłużył się analogią do rozkładu Boltzmanna, który dotyczy rozkładu energii klasycznego gazu w równowadze

Prawdopodobieństwo, że cząsteczka w temperaturze ma energię E jest proporcjonalne do exp(-E/kT), gdzie k jest stałą Boltzmanna równą $1.38\cdot10^{-23}$ J/K. Większe energie są mniej prawdopodobne, średnia energia rośnie z temperaturą.

Całkowita intensywność promieniowania u_{tot}

$$\boxed{u_{tot} = \sigma T^4}$$

σ- stała Stefana-Boltzmanna $5.68\cdot10^{-8}$ W/(m^2 ·K^4)

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Max Planck

(1858-1947)

Max Planck zaproponował model ciała doskonale czarnego (ang. *blackbody*), wprowadzając „rezonatory", które są ładunkami drgającymi harmonicznie. Zastosował fizykę statystyczną Boltzmanna ale zrobił drastyczne założenie:

Oscylatory mogą emitować lub absorbować promieniowanie o częstotliwości *f* jedynie porcjami energii o wartości *hf,* gdzie *h* jest stałą uniwersalną o wymiarze Js. Planck wprowadził pojęcie kwantu.

$$\boxed{e_\lambda(\lambda,T)=\frac{b}{\lambda^5}\frac{1}{\exp(a/\lambda T)-1}}$$

Dla krótkich fal czyli małych λ $a/\lambda T >> 1$ otrzymujemy wzór Wiena

Dla długich fal czyli podczerwieni, wzór Plancka pasuje lepiej do danych eksperymentalnych niż model Wiena

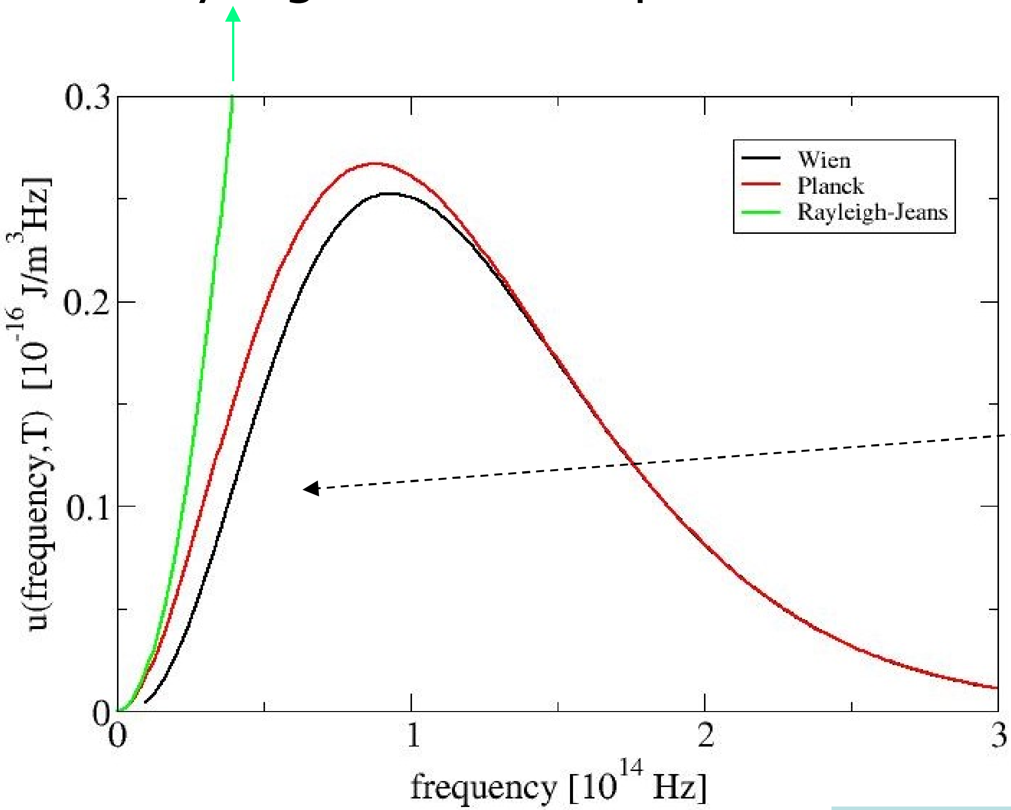
Promieniowanie ciała doskonale czarnego

John Strutt, znany jako **Lord Rayleigh** opublikował artykuł na temat funkcji Kirchhoffa kilka miesięcy wcześniej niż Planck (1900). Rayleigh skoncentrował się na promieniowaniu a nie na oscylatorach Plancka

Przyjęto, że promieniowanie składa się z fal elektromagnetycznych. Gęstość energii tych fal jest równoważna gęstości energii zbioru oscylatorów harmonicznych. Średnia energia przypadająca na jeden oscylator wynosi kT

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

Prawo Rayleigh'a-Jeans'a prowadzi do katastrofy w ultrafiolecie



Wzór Wien'a nie pasuje w zakresie małych częstości

Wzór Plancka

$$u(f,T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \frac{1}{\exp(hf/kT) - 1}$$

Przypadki graniczne wzoru Planck'a:

$$u(f,T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3}\frac{1}{\exp(hf/kT)-1}$$

Zakres dużych częstości: $hf/kT >> 1$

$$u(f,T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3}\exp(-hf/kT)$$

prawo Wien'a

Przypadki graniczne wzoru Planck'a:

$$u(f,T) = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \frac{1}{\exp(hf/kT) - 1}$$

Zakres małych częstości: $hf/kT << 1$

Kiedy *f* jest małe lub *T* duże, lub żyjemy w świecie gdzie *h* zmierza do 0 (klasycznie)

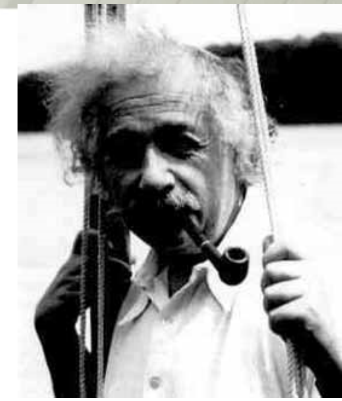
Dla małych *x*: $\exp(x) \approx 1 + x$

$$u(f,T) \approx \frac{8\pi h f^3}{c^3} \frac{1}{1 + (hf/kT) - 1} = \frac{8\pi f^2 kT}{c^3}$$

To jest wyniki klasycznego modelu Rayleigh'a

Promieniowanie ciała doskonale czarnego

W 1905, **Albert Einstein** doszedł do wniosku, że nie można wyprowadzić wzoru Planck'a z praw klasycznej fizyki. Słuszność wzoru Plancka'a oznacza koniec fizyki klasycznej.



Albert Einstein

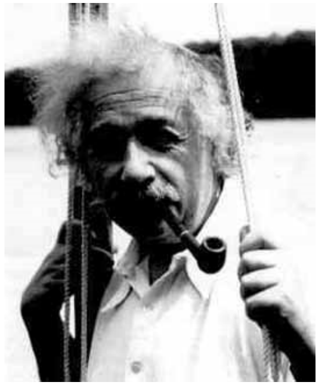
(1879-1955)

Radykalna propozycja kwantyzacji energii:

• w limicie małych częstości (Rayleigh-Jeans) obraz falowy (Maxwell),

•w limicie dużych częstości (Wien) o promieniowaniu należy myśleć jak o „gazie" kwantów

Promieniowanie ciała doskonale czarnego



(1879-1955)

$$E = hf$$

energia cząstki

częstotliwość fali

Promieniowanie należy w pewnych przypadkach traktować jak fale a w innych eksperymentach jak cząstki

To jest dualizm korpuskularno-falowy

Korpuskularna natura promieniowania

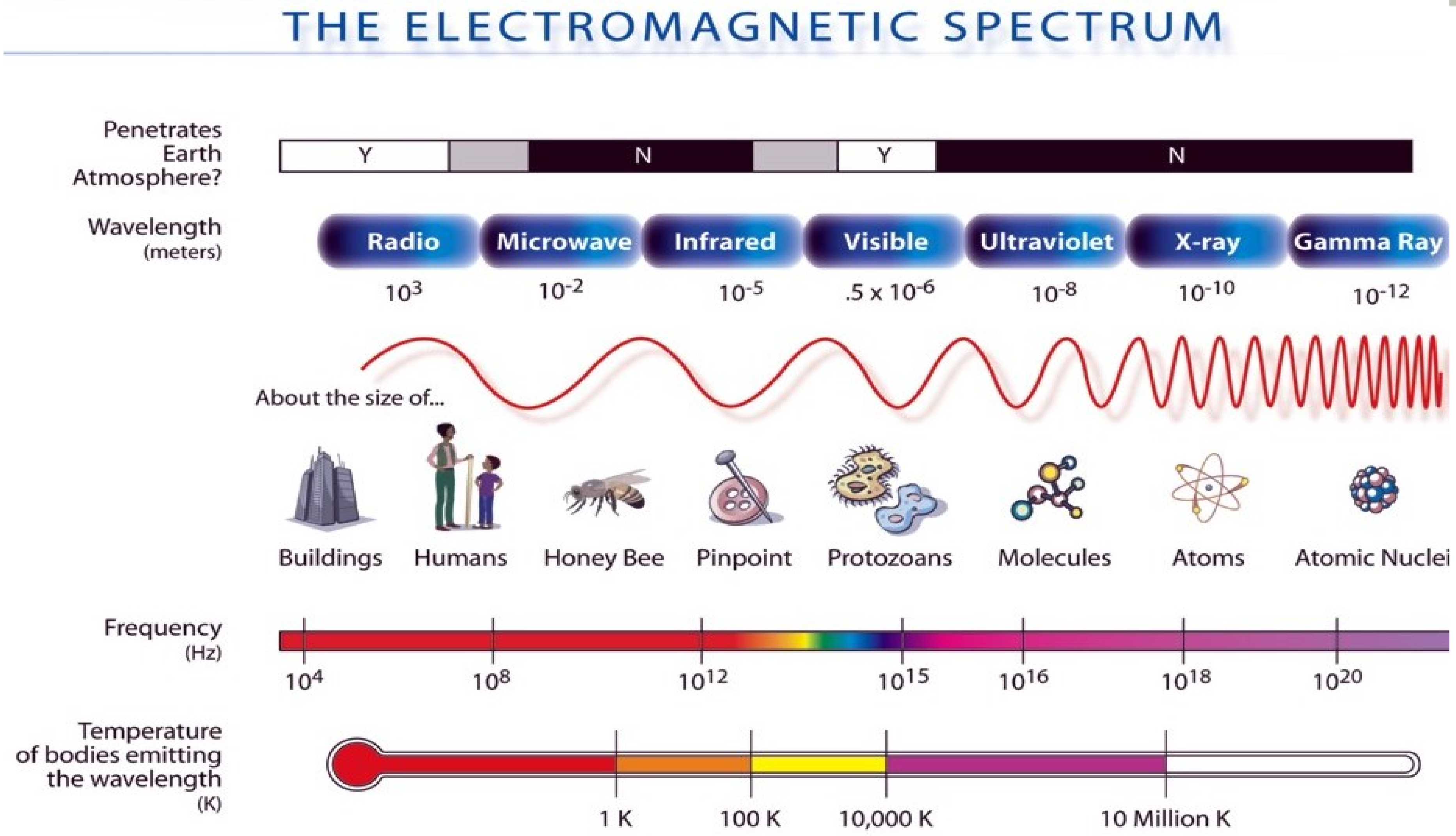
Doświadczalnie :

• Efekt fotoelektryczny (uwalnianie elektronów z metalicznej powierzchni pod wpływem promieniowania o określonej częstości)

•Efekt Comptona (rozpraszanie promieniowania X i zmiana częstotliwości)

Te zjawiska, podobnie jak promieniowanie ciała doskonale czarnego, nie mogą być wyjaśnione przy użyciu modelu falowego.

Foton


THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM
Penetrates Earth Atmosphere?
Y
N
Y
N
Wavelength (meters)
Radio
Microwave
Infrared
Visible
Ultraviolet
X-ray
Gamma Ray
10^3
10^-2
10^-5
.5 x 10^-6
10^-8
10^-10
10^-12
About the size of...
Buildings
Humans
Honey Bee
Pinpoint
Protozoans
Molecules
Atoms
Atomic Nuclei
Frequency (Hz)
10^4
10^8
10^12
10^15
10^16
10^18
10^20
Temperature of bodies emitting the wavelength (K)
1 K
100 K
10,000 K
10 Million K

Foton

Promieniowanie elektromagnetyczne jest traktowane jako fale elektromagnetyczne, których istnienie wynika z równań Maxwella. Zjawisk interferencji, dyfrakcji i polaryzacji nie można wytłumaczyć inaczej.

Istnieją jednak inne zjawiska, w których należy wprowadzić pojęcie **kwantu** promieniowania, **fotonu**.

Foton

Foton jest cząstką pozbawioną masy, która porusza się z prędkością światła $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s.

Jego energia E i $\vec{p}$ są powiązane relacją:

$$\boxed{E = |\vec{p}|c}$$

Prace Plancka i Einsteina pokazały, że energia jest liniową funkcją częstotliwości f:

$$\boxed{E = hf}$$

stała wprowadzona przez Plancka

$h = 6.63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$

Foton

Stosując relację: $$\lambda f = c$$

gdzie λ jest długością fali związanej z fotonem

można stwierdzić, że pędu p pojedynczego fotonu jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali

$$\boxed{p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}}$$

Foton

Energia fotonu $E=hf$ może być przedstawiona poprzez częstość ω*:*

$$\omega = 2\pi f$$

jako:

$$\boxed{E = \hbar\omega}$$

gdzie:

$$\hbar = h/2\pi \approx 1.05 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

stała Planck'a

Foton

Ten obraz sugeruje, że natężenie promieniowania o danej częstotliwości, tj. szybkość z jaką promieniowanie dostarcza energię na jednostkę powierzchni jest związane z **liczbą fotonów N**. Im większe natężenie tym większa liczba fotonów.

Foton

Przykład: Żarówka 60 W promieniuje głównie $\lambda \approx 1000$ nm. Oblicz liczbę fotonów emitowanych w ciągu jednej sekundy.

Rozwiązanie: Jeżeli podzielimy całkowitą energię przez energię fotonu, otrzymany liczbę fotonów. Całkowita energia emitowana w ciągu jednej sekundy wynosi 60 W. Częstotliwość f wynosi:

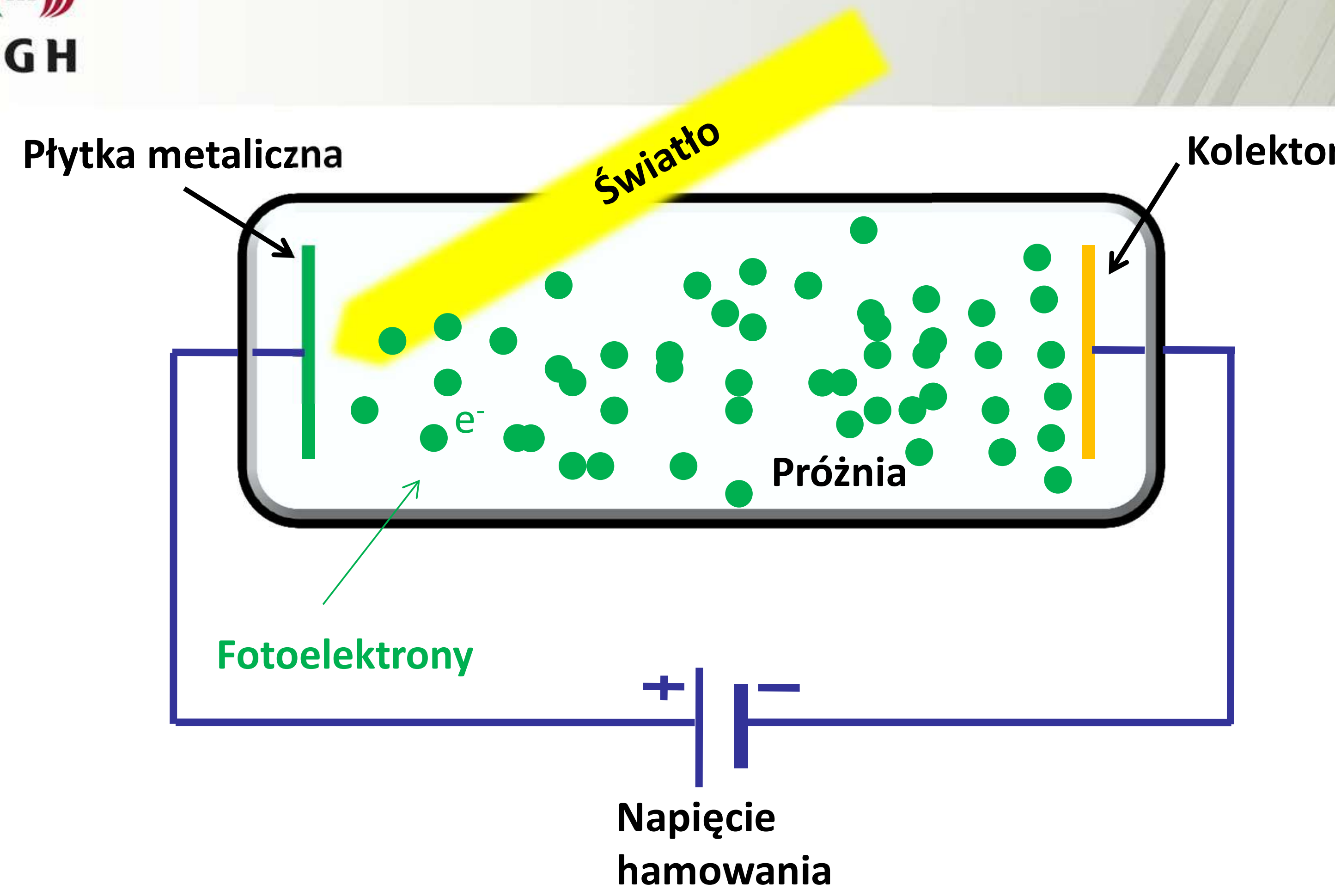
$$f = c/\lambda \approx 3 \cdot 10^{14}\, Hz$$

energia fotonu $E=hf$

Liczba fotonów emitowanych w ciągu 1s:

$$n = \frac{60W}{hf} = \frac{60W}{(6.63 \cdot 10^{-34}\, J \cdot s)(3 \cdot 10^{14}\, s^{-1})} = 3 \cdot 10^{20}\, fotonów/s$$

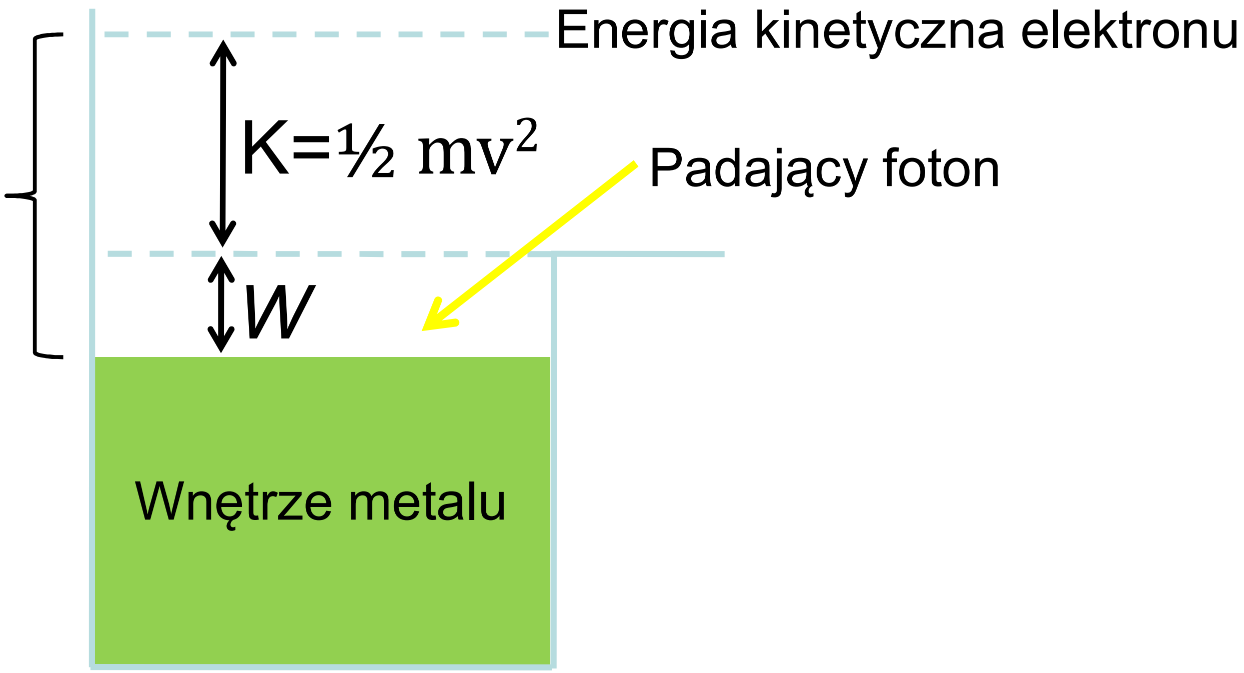
Efekt fotoelektryczny



Światło wywołuje prąd elektronowy, mierzony przez kolektor. Energia kinetyczna może być obliczona na podstawie napięcia hamowania

Efekt fotoelektryczny

Minimalna energia fotonu *hf* dla wybicia elektronu o energii kinetycznej $K=\frac{1}{2}mv^2$



$$hf = K + W$$

Efekt fotoelektryczny

Metal zawiera dużą ilość swobodnych elektronów (m_e – masa elektronu, $-e$ - ładunek elektronu), około 1 lub 2 na atom. Te elektrony są quasi-swobodne czyli nie są związane z atomami lecz mogą, po dostarczeniu pewnej energii, opuścić metal. Energia ta nosi nazwę pracy wyjścia W z metalu. Praca wyjścia jest różna dla różnych metali i zależy od stanu powierzchni. Typowe wartości W zmieniają się od 2 do 8 eV.

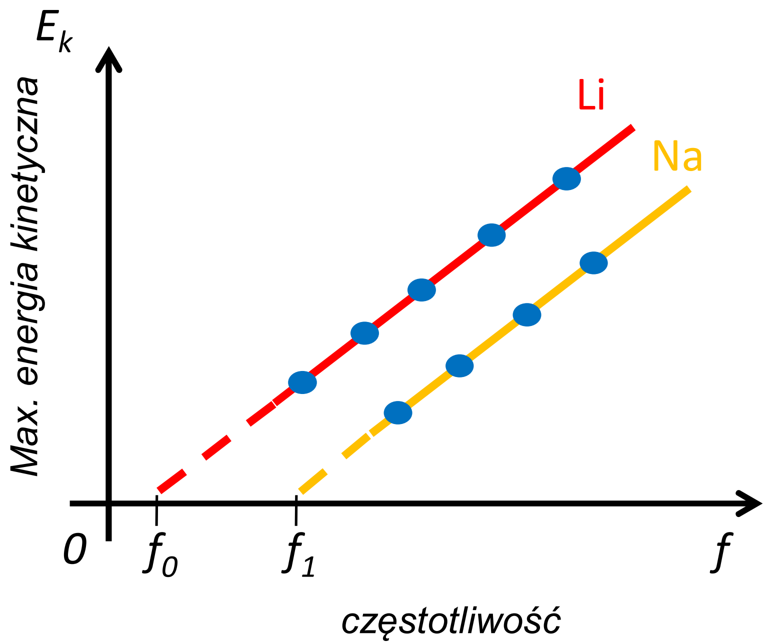
Efekt fotoelektryczny

Einstein zaproponował mechanizm efektu fotoelektrycznego. Założył, że foton może zostać zaabsorbowany przez elektron jeżeli energia fotonu przekracza konkretną wartość:

$$\boxed{hf > W}$$

Enegia, którą otrzymuje elektron pozwala mu opuścić metal. Elektrony emitowane z metalu pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego noszą nazwę **fotoelektronów.** Jest to zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne.

Efekt fotoelektryczny



Dla pewnych metali, słaba wiązka światła niebieskiego wytwarza fotoprąd, podczas gdy bardzo silne światło czerwone nie powoduje efektu elektrycznego. Jeżeli energia fotonu jest większa od pracy wyjścia elektronu z metalu, prędkość *v* jaką osiąga elektron można obliczyć z:

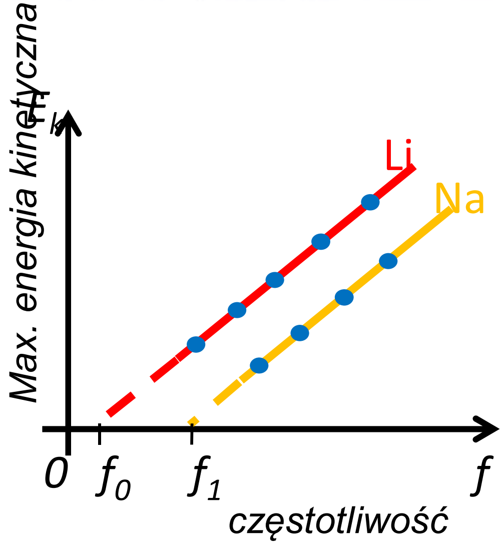
$$\boxed{\frac{1}{2}m_e v^2 = hf - W}$$

zasada zachowania energii

Efekt fotoelektryczny

1. Energia fotoelektronów emitowanych z metalu zależy tylko od częstotliwości promieniowania i gdy częstotliwość graniczna zostaje przekroczona, zależność energii kinetycznej elektronu od częstotliwości jest liniowa.

   Energia kinetyczna fotoelektronu jest **niezależna** od natężenia padającego promieniowania, tj. od liczby fotonów. Pojedynczy foton jest absorbowany przez pojedynczy elektron.



W podejściu klasycznym, energia związana z falą EB zależy od kwadratu amplitudy pola elektrycznego. Bez względu na to, jak mała jest częstotliwość promieniowania, w dłuższym czasie zostanie zdeponowana wystarczająca energia, aby pokonać pracę wyjścia.

Efekt fotoelektryczny

2. **Liczba** fotoelektronów emitowanych jest wprost proporcjonalna do natężenia promieniowania, tj. do liczby fotonów padających na powierzchnię metalu.

3. Nie obserwuje się żadnego upływu czasu pomiędzy oświetleniem metalu i emisją fotoelektronu. Klasycznie, energia jest gromadzona i dostarczana w sposób ciągły.

Efekt nie zachodzi na swobodnych elektronach.

Efekt fotoelektryczny

Przykład: Eksperyment wykazał, że gdy promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali 270 nm pada na powierzchnię Al, są emitowane fotoelektrony. Elektrony o największej energii kinetycznej są zatrzymywane przez przyłożenie odpowiedniego pola elektrycznego o różnicy potencjałów 0.406V. Oblicz pracę wyjścia z metalu.

Rozwiązanie:

$$K = eV = (1.6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C})(0.405\ \ \mathrm{V}) = 0.65 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s})(3.00 \cdot 10^{8}\ \mathrm{m/s})}{270 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{m}} = 7.37 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$$

$$W = E - K = 6.72 \cdot 10^{-19} J = \frac{6.72 \cdot 10^{-19} J}{1.6 \cdot 10^{-19} J/eV} = 4.2\ eV$$

Efekt Comptona

Jeżeli światło można traktować jak zbiór fotonów, należy spodziewać się zderzeń pomiędzy fotonami i cząstkami materii (np. elektronami).

Efekt Comptona jest wynikiem rozpraszania fotonu γ na quasi-swobodnym elektronie *e* w metalicznej próbce (folii):

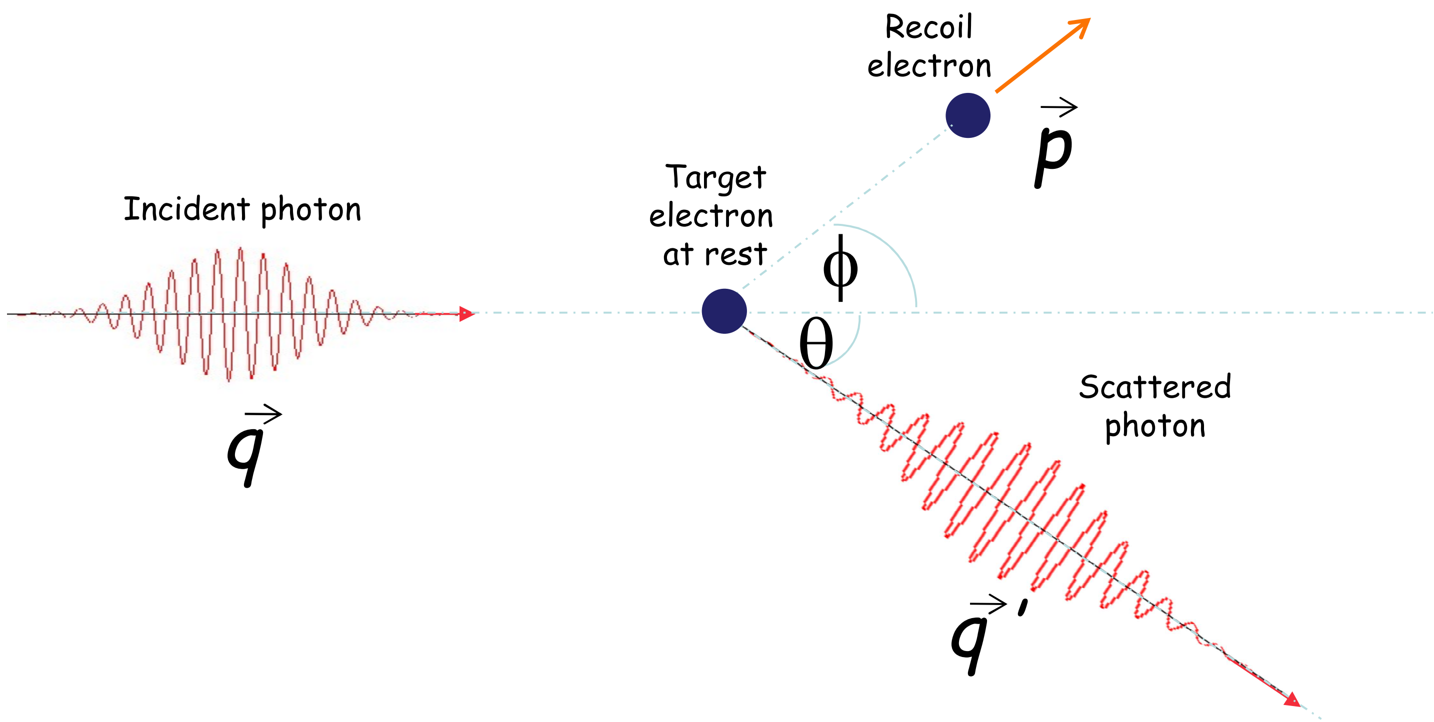
$$\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$$

Załóżmy, że początkowo :

•elektron jest w spoczynku, pęd wynosi 0, ale energia spoczynkowa $m_e c^2$

•foton ma energię *hf* i pęd $\vec{\mathbf{q}}$ o wartości *hf/c*

Efekt Comptona

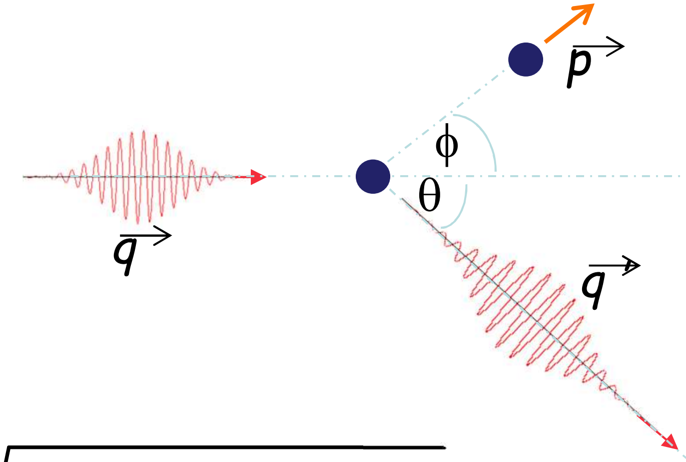


Efekt Comptona

Po zderzeniu:

- foton ma energię *hf′* i pęd $\vec{\mathbf{p}}$ o wartości *hf′/c*
- pęd elektronu is $\vec{\mathbf{q}}'$
- końcowa energia elektronu (relatywistycznie):

$$\sqrt{p^2c^2 + m_e^2c^4}$$



Zas. zach. pędu $\vec{\mathbf{q}} = \vec{\mathbf{q}}' + \vec{\mathbf{p}}$

zas. zach. energii $hf + m_ec^2 = hf' + \sqrt{p^2c^2 + m_e^2c^4}$

Efekt Comptona

Przesunięcie Comptona (długości) $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ czyli różnica pomiędzy długością fali przed (λ') i po (λ) rozproszeniu:

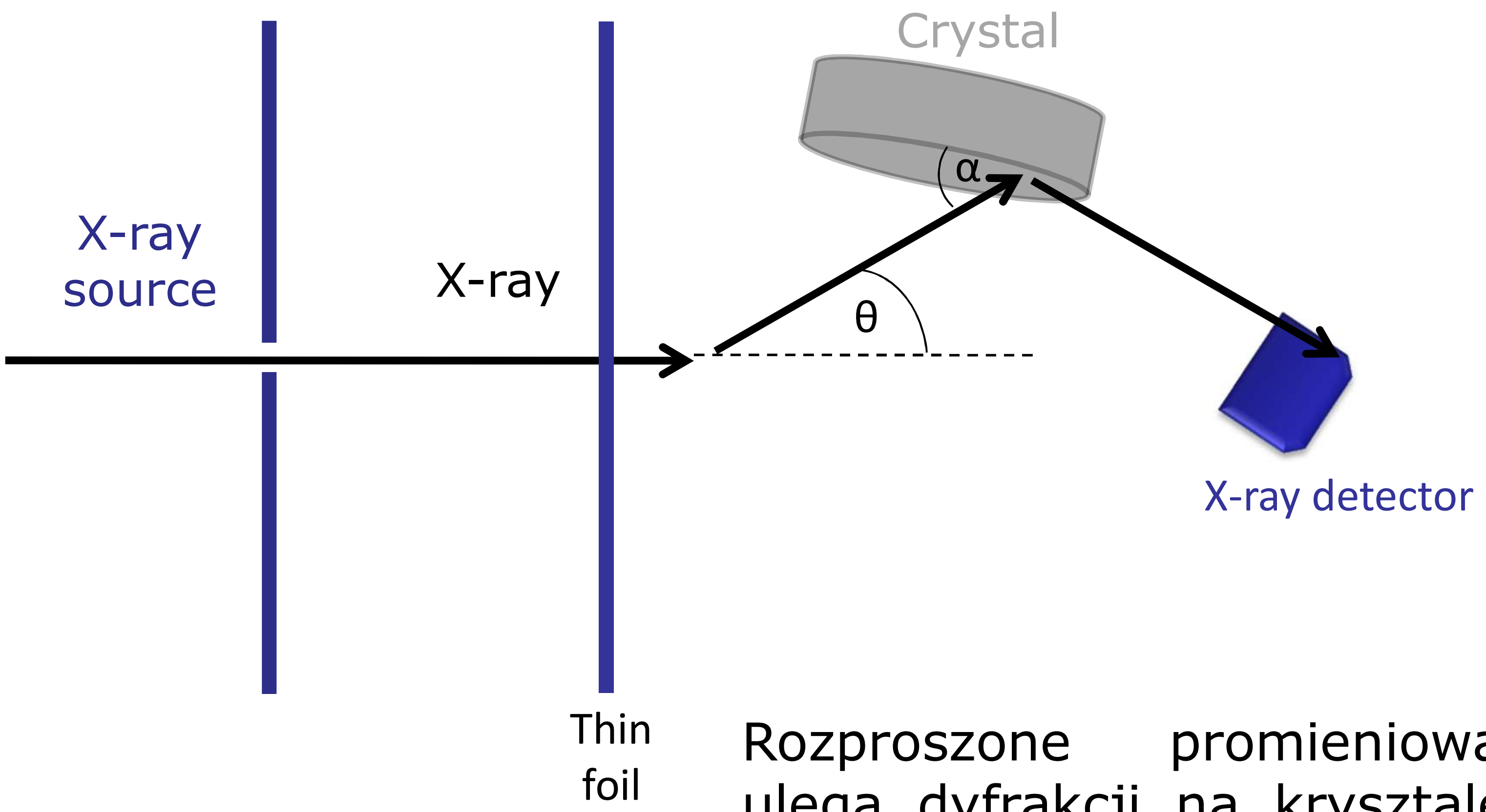
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

stała $2.4 \cdot 10^{-12}$m

Kąt rozproszenia

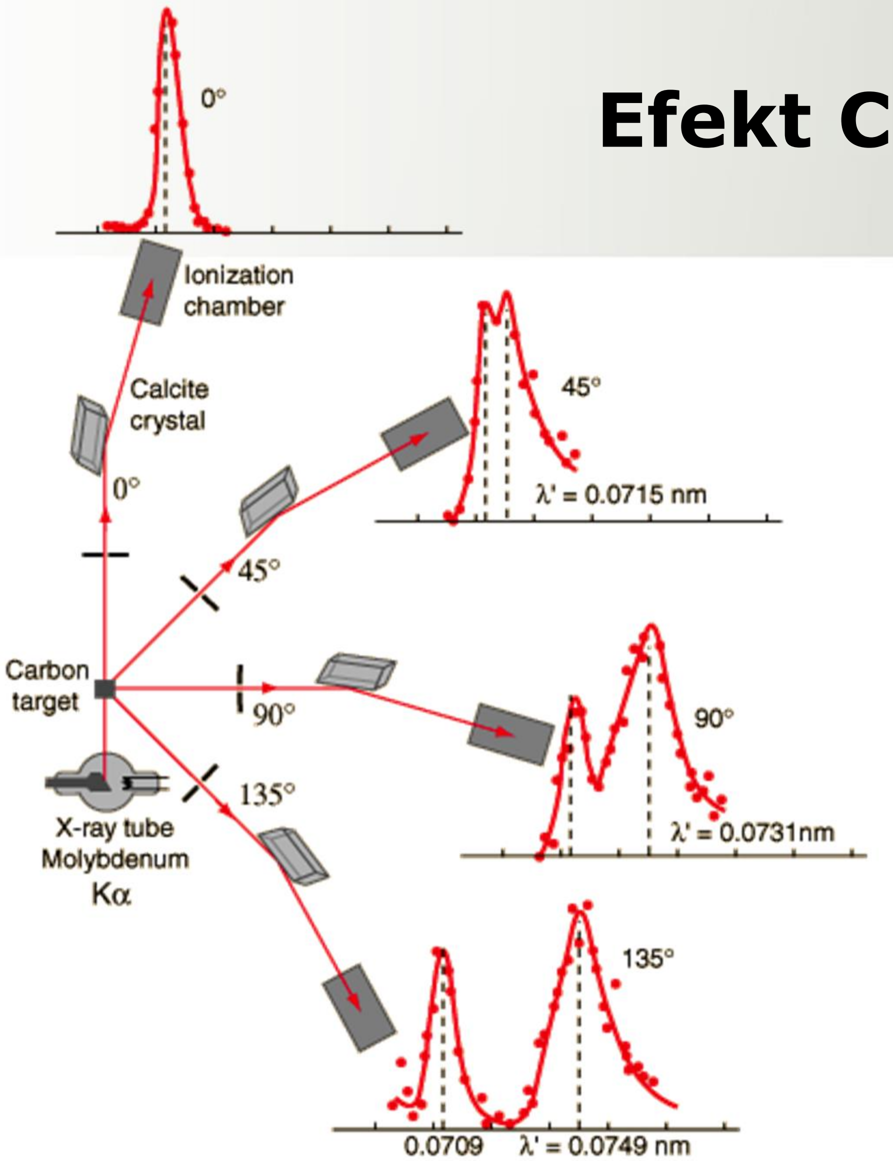
Ma istotne znaczenie dla fal krótkich np. promieniowania X lub gamma.

Efekt Comptona



Rozproszone promieniowanie X ulega dyfrakcji na krysztale. Kąt α pozwala określić długość fali promieniowania rozproszonego

Efekt Comptona



hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/

Obserwujemy dwa piki:

jeden dla elektronów,

drugi dla jonów dodatnich

Ze wzrostem kąta rozpraszania, intensywność piku od elektronów rośnie

Efekt Comptona

Przykład: W eksperymencie rozproszeniowym, wiązka padającego promieniowania X o długości fali $\lambda=5.53\cdot10^{-2}$ nm jest rozpraszana pod kątem 35^o. Oblicz wartość przesunięcia Comptona.

Rozwiązanie: Względna zmiana długości fali:

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

$$=\frac{(6.63\cdot10^{-34}J\cdot s)\,(1-\cos(35^o))}{(0.91\cdot10^{-30}kg)\,(3.00\cdot10^{8}\,m/s)\,(5.53\cdot10^{-11}m)}=7.9\cdot10^{-3}$$

około 1%

Podsumowanie

- Od połowy XIX wieku i na początku XX w. badano zjawiska związane z energią i zachowaniem materii (zagadki)
- Przyniosło to nowe spojrzenie na fizykę i wiele nagród (Nobel)
- Narodziła się mechanika kwantowa