

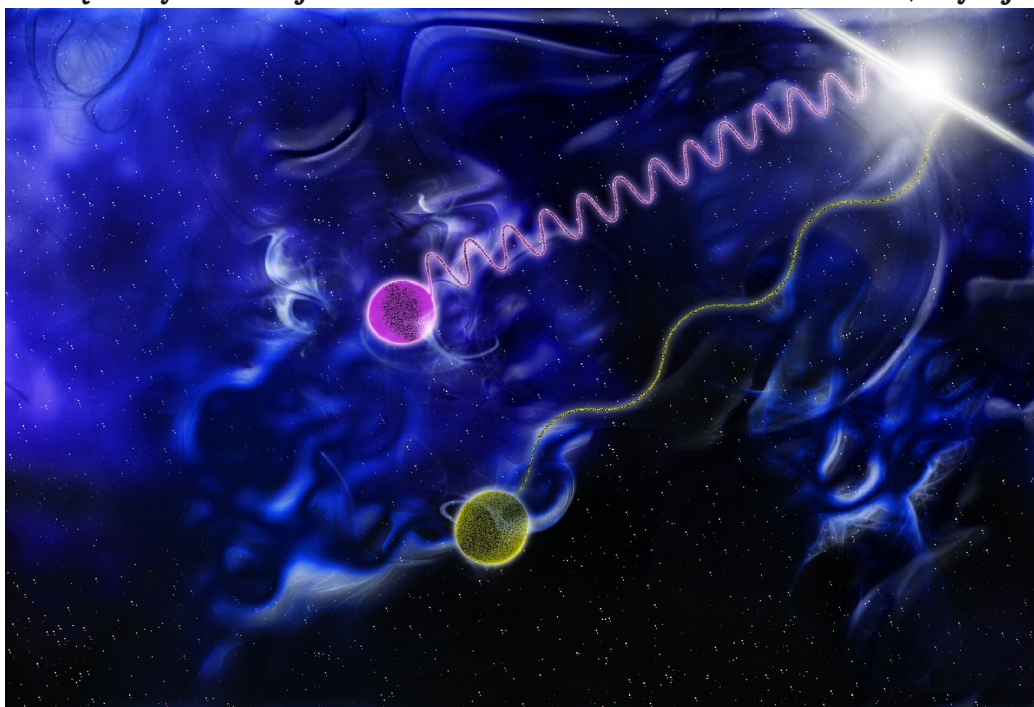
Foton – najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej

Zasób zawiera:

1. Starter: ogólny wstęp do tematu, rysunek będący artystyczną wizją cząstek światła, odwołanie do wcześniejszej wiedzy ucznia oraz cele lekcji sformułowane w języku ucznia.
2. Zawartość tekstowa: informacja o ograniczeniach zastosowania opisu zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego w stałej temperaturze za pomocą dwóch wzorów – Wiena i Reyleigha-Jeansa; wykres przedstawiający zależność natężenia promieniowania od długości fali z zaznaczeniem stosowności obydwu wzorów; historyczne wprowadzenie dotyczące ogłoszenia przez Plancka teorii opisującej emisję i absorpcję promieniowania elektromagnetycznego przez ciało doskonale czarne, która była zgodna z danymi doświadczalnymi i opierała się na istnieniu fotonów; wzór na energię fotonu w zależności od częstotliwości i długości promieniowania; przykład rozwiązania zadania rachunkowego dotyczącego obliczenia energii fotonu o odpowiedniej długości fali; nawiązanie do zjawiska fotoelektrycznego i równań Maxwella; wyjaśnienie pojęcia foton; polecenie dla ucznia (zadanie obliczeniowe).
3. Podsumowanie: trzy sformułowania podsumowujące oraz polecenie dla ucznia (zadanie obliczeniowe).
4. Słowniczek: wyjaśnienia pojęć: foton, kwant energii, równania Maxwella, zjawisko fotoelektryczne.
5. Biogramy: Arthur Holly Compton; Gustav Kirchhoff, Gilbert Lewis, Max Planck.
6. Zadanie interaktywne typu prawda/fałsz podsumowujące rozdział składające się z trzech sformułowań.

Foton – najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej

Koniec XIX wieku był okresem, w którym wielu fizyków próbowało wyjaśnić zależność natężenia promieniowania ciał od długości fali. Próby dopasowania ówczesnej wiedzy fizycznej do wyników obserwacji nie dawały rezultatów. Przełom nastąpił w grudniu 1900 r. Jak to się odbywało i z jakim rezultatem? Jeśli chcesz wiedzieć, czytaj dalej.



Fotony często dzielimy na dwa rodzaje: wysoko- i niskoenergetyczne. Energia fotonu zależy od częstotliwości jego fali.

Źródło: NASA Goddard Space Flight Center, dostępny w internecie: flickr.com, licencja: CC BY 2.0.

Przed przystąpieniem do zapoznania się z tematem, należy znać poniższe zagadnienia

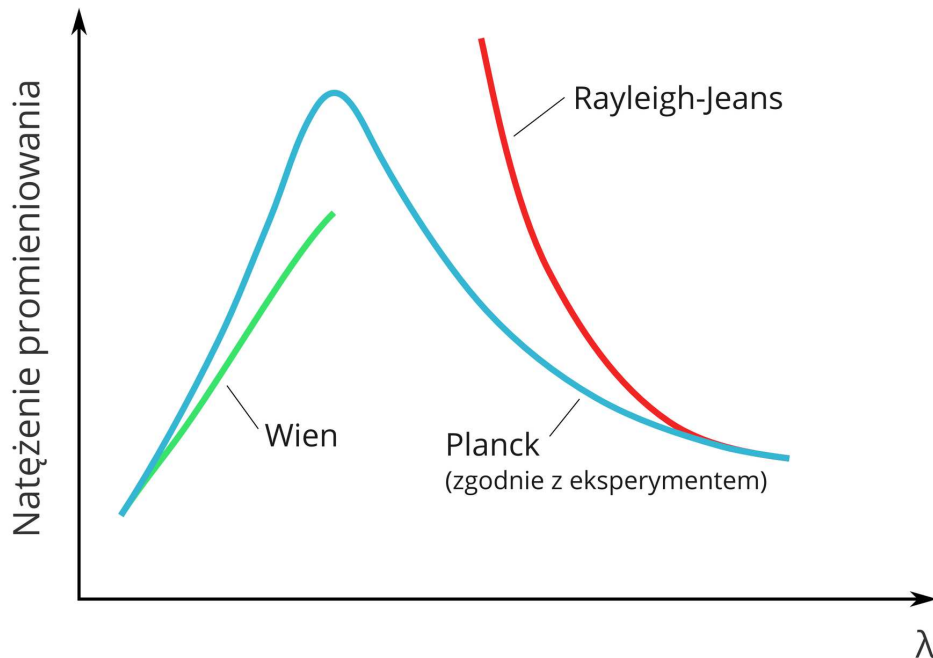
- zakresy długości fal charakterystyczne dla światła widzialnego;
- definicję promieniowania termicznego (cieplnego);
- definicję ciała doskonale czarnego;
- że widmo promieniowania ciała doskonale czarnego ma charakter ciągły.

Nauczysz się

- że kwant jest ściśle określoną porcją energii, którą ciało może wyemitować lub pochłoniąć;
- że najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej nazywana jest kwantem lub fotonem;
- obliczać energię, którą niesie ze sobą foton.

Próba teoretycznego opisu wyników doświadczeń, których celem było zrozumienie praw rządzących promieniowaniem cieplnym **ciała doskonale czarnego** się nie powiodła.

Zdolność emisyjną ciała doskonale czarnego w stałej temperaturze opisywano za pomocą dwóch wzorów – Wiena [wina] i Rayleigha-Jeansa [rejlja-dżinsa]. Niestety, oba zawiodły. Wzór Wiena sprawdzał się dobrze w przypadku fal krótkich, ale bardzo wyraźne odstępstwa pojawiały się w zakresie fal długich. Z kolei wzór Rayleigha-Jeansa sprawdzał się bardzo dobrze w odniesieniu do fal długich, ale źle w przypadku fal krótkich.



Zdolność emisyjna ciała doskonale czarnego. Wyniki eksperymentalne oznaczono kolorem niebieskim, natomiast zielonym i czerwonym oznaczono kolejno przybliżenia Wiena oraz Rayleigha-Jeansa.

Źródło: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, licencja: CC BY 3.0.

W 1900 r. ogłoszono co najmniej pięć zależności między natężeniem promieniowania a długością emitowanej fali elektromagnetycznej.

Dopiero 14 grudnia 1900 r. [Max Planck](#) podczas wystąpienia na posiedzeniu Towarzystwa Fizycznego w Berlinie przedstawił teorię opisującą emisję i absorpcję promieniowania elektromagnetycznego przez ciało doskonale czarne. Fizykowi udało się uzyskać zgodność wyników pomiarów z obliczeniami. Planck założył, że energia wypromieniowywana jest z ciała doskonale czarnego i przez nie pochłaniana w postaci ściśle określonych porcji energii, czyli kwantów (fotonów). Ta energia ma zatem charakter nieciągły, a nie – jak dotychczas sądzono – ciągły.

Według Plancka najmniejsza porcja energii fali elektromagnetycznej, czyli fotonu, wyraża się wzorem:

$$E = h \cdot \nu,$$

gdzie:

h – uniwersalna stała, nazwana stałą Plancka; $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

ν [Hz] (grecka litera „ni”) – częstotliwość promieniowania emitowanego lub pochłanianego przez ciało doskonale czarne.

Jak widać, energia takiej „porcji” jest zależna od częstotliwości promieniowania, a tym samym od długości fali:

$$\lambda = c \cdot T,$$

$$T = \frac{1}{\nu},$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni. Podstawmy odwrotność częstotliwości pod okres:

$$\lambda = c \cdot T = c \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{c}{\nu},$$

po przekształceniu wzoru otrzymujemy:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

Na tej podstawie możemy wyprowadzić wzór:

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Przykład 1

Oblicz energię kwantów promieniowania świetlnego o długości fali $\lambda_1 = 656 \text{ nm}$ (czerwona linia w widmie wodoru) i $\lambda_2 = 486 \text{ nm}$ (niebieska linia w widmie wodoru).

Rozwiązanie:

Analiza zadania:

Zadanie wymaga obliczenia energii kwantów promieniowania elektromagnetycznego dla długości fali $\lambda_1 = 656 \text{ nm}$ i $\lambda_2 = 486 \text{ nm}$.

Dane:

$$\lambda_1 = 656 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 486 \text{ nm}$$

$$c = 300000000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Szukane:

$$E_1, E_2$$

Wzór:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Obliczenia:

$$E_1 = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{656 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3 \cdot \frac{6,63}{656} \cdot 10^8 \cdot 10^{-34} \cdot 10^9 \text{ J} = 3,03 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_2 = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{486 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3 \cdot \frac{6,63}{486} \cdot 10^8 \cdot 10^{-34} \cdot 10^9 \text{ J} = 4,09 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Odpowiedź:

Energia kwantu światła odpowiadająca długości fali 486 nm wynosi $4,09 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, a energia kwantu światła odpowiadająca długości fali 656 nm – $3,03 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Do tej pory przyjmowano jako pewnik, że energia emitowana przez ciało ma rozkład ciągły. Swoim wystąpieniem Planck zapoczątkował ciąg wydarzeń, który zrewolucjonizował postrzeganie przez nas świata.

W 1905 r. Albert Einstein studiował przyczyny występowania [zjawiska fotoelektrycznego](#). Natrafił jednak, tak samo jak jego poprzednicy, na trudności związane z jego wytłumaczeniem. Za pomocą teorii kwantów Einsteinowi udało się nie tylko wyjaśnić to zjawisko, lecz także skorygować teorię. Na czym polegała jej modyfikacja? Planck twierdził, że emisja i absorpcja promieniowania elektromagnetycznego przez ciało stałe mogą odbywać się wyłącznie w sposób nieciągły, tj. określonymi porcjami. Właściwość tę wiązał jednak z reakcją materii na padające promieniowanie i nie sądził, że ta cecha ma coś wspólnego z naturą promieniowania elektromagnetycznego. Zupełnie inaczej to zjawisko potraktował Einstein, który opisał falę elektromagnetyczną jako cząsteczki (kwanty) o energii zależnej od częstotliwości. Tym samym stanął w jawnej opozycji do klasycznej fizyki, która opisywała zachowanie fal elektromagnetycznych za pomocą [równań Maxwella](#) (czyli z wykorzystaniem wielkości takich jak długość fali, okres, amplituda drgań).

Do opisu zjawiska fotoelektrycznego Einstein korzystał jedynie ze sformułowania „kwant energii promieniowania”. Dopiero w 1926 r. [Gilbert Lewis](#), który poszukiwał nośnika energii promienistej, wprowadził pojęcie [fotonu](#). Najpierw jednak odkryto, że taka „porcja energii” – kwant – przypomina poruszającą się cząsteczkę (nieistniejącą w spoczynku) obdarzoną masą i mogącą zderzać się z elektronem. Za odkrycie i wyjaśnienie tego zjawiska [A.H. Compton](#) otrzymał w 1927 r. Nagrodę Nobla.

Zapamiętaj!

Foton jest kwantem promieniowania elektromagnetycznego – poruszającą się cząstką, która nie ma masy spoczynkowej (istnieje tylko w ruchu) ani ładunku i odgrywa istotną rolę w każdym procesie elektromagnetycznym. W próżni foton ma prędkość $c = 300000000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ćwiczenie 1

Oblicz, w jakim przedziale energii mieści się promieniowanie widzialne, któremu odpowiada przedział długości fali między 380 a 780 nm. Uzupełnij luki w odpowiedzi, wpisując odpowiednie liczby. Wynik zaokrąglij do części setnych.

Odpowiedź: Przedział energii promieniowania widzialnego zawiera się między

· 10⁻¹⁹ J, a · 10⁻¹⁹ J.

Odkrycia Maxa Plancka i Alberta Einsteina dały początek całkiem nowej gałęzi fizyki, odmiennej pojęciowo od tej, którą znano dotychczas. Ta nowa gałąź wiedzy okazała się fundamentalna dla zrozumienia praw rządzących mikroświatem – mechaniki kwantowej.

Podsumowanie

- Emisja i absorpcja promieniowania elektromagnetycznego przez ciało polega na wysyłaniu lub pochłanianiu energii w określonych porcjach (kwantach), zależnych od częstości promieniowania. Porcje te nazywamy fotonami.
- Foton jest kwantem promieniowania elektromagnetycznego. Możemy traktować go jako cząstkę, która nie ma masy spoczynkowej (istnieje tylko w ruchu) ani ładunku. Odgrywa istotną rolę w każdym procesie promienistym i w oddziaływaniach elektromagnetycznych.
- Według Plancka najmniejsza porcja energii elektromagnetycznej, czyli kwantu energii, wyraża się wzorem:

$$E = h \cdot \nu \text{ lub } E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

gdzie: h – uniwersalna stała, nazwana stałą Plancka; $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ [Hz] (grecka litera „ni”) – częstotliwość promieniowania emitowanego lub pochłanianego przez ciało czarne; c – wartość prędkości światła w próżni; λ – długość fali promieniowania.

Ćwiczenie 2

Oblicz, ile razy energia kwantu (fotonu) promieniowania widzialnego o długości fali $\lambda = 500 \text{ nm}$ jest większa od energii kwantu fal radiowych o częstotliwości $\nu = 225 \text{ kHz}$ (fale długie, stacja Warszawa I).

Zadanie podsumowujące moduł

Ćwiczenie 3



Przeczytaj poniższe zdania, a następnie oceń ich prawdziwość. Przy każdym zdaniu w tabeli zaznacz „Prawda” albo „Fałsz”.

Zdanie	Prawda	Fałsz
Gdy podwoimy długość fali promieniowania, energia każdego z jego kwantów zwiększy się czterokrotnie.	☐	☐
Foton możemy traktować jako cząsteczkę, która nie ma masy spoczynkowej.	☐	☐
Kwanty światła czerwonego mają większą energię niż kwanty światła niebieskiego.	☐	☐

Słownik

ciało doskonale czarne

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

foton

kwant promieniowania elektromagnetycznego o ściśle określonej energii zależnej od częstotliwości (długości fali) promieniowania.

kwant energii

najmniejsza, ściśle określona porcja energii, jaką może mieć lub o jaką może się zmienić energia ciała.

równania Maxwella

równania klasycznej teorii pola elektromagnetycznego, opublikowane w 1862 roku przez J.C. Maxwella. Łączą wszystkie znane prawa opisujące oddziaływania ładunków elektrycznych i zjawiska z nimi związane. Równania Maxwella to kompletny zbiór zasad rządzących własnościami pól elektrycznych i magnetycznych.

zjawisko fotoelektryczne

zjawisko polegające na pochłanianiu promieniowania optycznego przez ciało stałe, ciecz lub gaz; procesowi temu towarzyszą zjawiska elektryczne, np. emisja elektronów z metalu (fotoefekt zewnętrzny).

Biogramy



Arthur Holly Compton, laureat Nagrody Nobla w dziedzinie fizyki (1927 r.).

Źródło: Nobel foundation, edycja: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, dostępny w internecie:

<http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

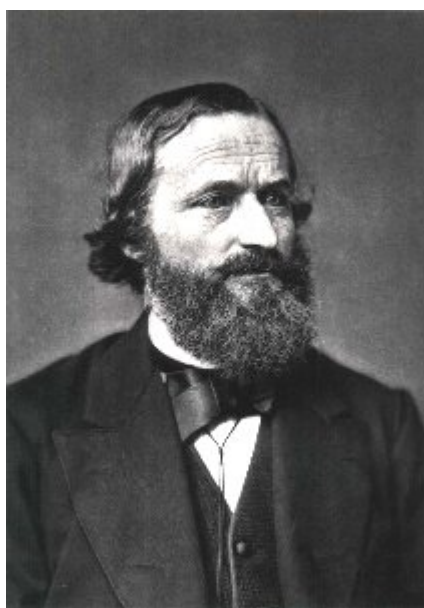
Arthur Holly Compton

1892.09.10 Wooster – 1962.03.15 Berkley

[Artur Holi Kompton]

Odkrywca rozpraszania Comptona – nazwa zjawiska pochodzi od nazwiska uczonego.

Zauważył, że kiedy fotony z zakresu fal rentgenowskich padają na elektrony słabo związane z jądrem atomu, powodują ich przemieszczenie ze swoich orbit i tracą przy tym energię; temu procesowi towarzyszy zmiana długości fali padającego promieniowania (przesunięcie comptonowskie). Za to odkrycie w 1927 r. został uhonorowany Nagrodą Nobla. Brał także udział w pracach nad bombą atomową, a jego badania pomogły Enrico Fermiemu w konstrukcji pierwszego reaktora (1942 r.).



Gustav Kirchhoff zauważył, że stosunek zdolności absorpcji i emisji ciała doskonale czarnego jest stały i zależy tylko od długości fali oraz temperatury ciała.

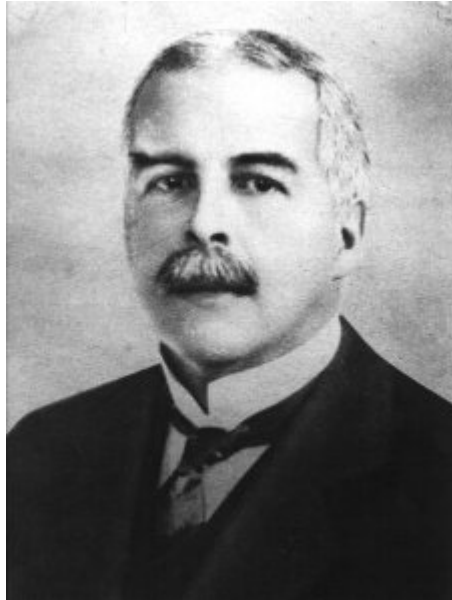
Źródło: QWerk, edycja: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Gustav Kirchhoff

1824.03.12 Królewiec – 1887.10.17 Berlin

[Gustaw Kirśhof]

Wynalazca spektroskopu i metody analizy spektralnej. Odkrył pierwiastki takie jak cez i rubid. Twórca praw dotyczących elektryczności.



Gilbert Lewis, który jako pierwszy posłużył się pojęciem fotonu.

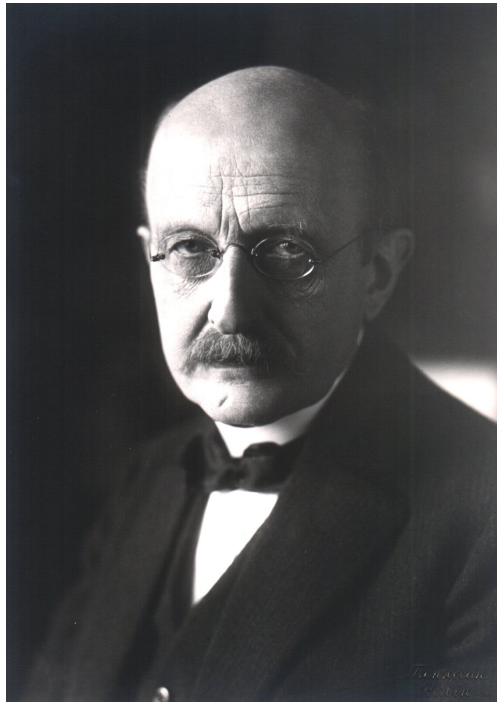
Źródło: MR.Emule, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, licencja: CC BY-SA 4.0.

Gilbert Lewis

1875.10.23 Weymouth (Stany Zjednoczone) – 1946.03.23 Weymouth (Stany Zjednoczone)

[Gilbert Luśis]

Amerykański fizykochemik, twórca teorii tworzenia się wiązań kowalencyjnych. Jako pierwszy otrzymał ciężką wodę. (D_2O).



Max Planck, twórca teorii kwantów.

Źródło: N.N., dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

Max Planck

1858.04.23 Kilonia – 1947.10.4 Getynga

[Maks Plank]

Niemiecki fizyk, jeden z twórców fizyki kwantowej. Zajmował się termodynamiką, optyką oraz teorią względności.