

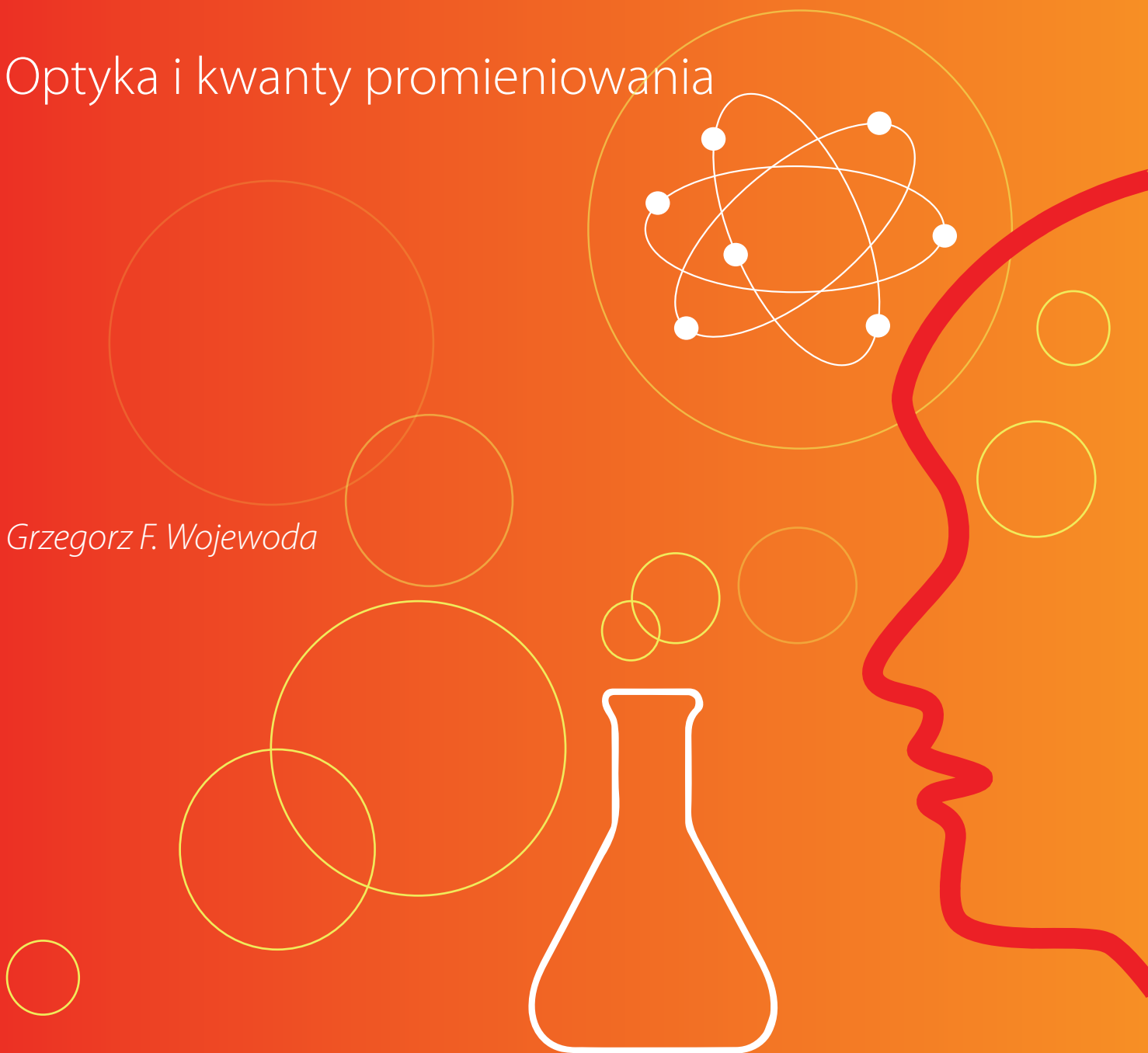
# WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA

INNOWACYJNY PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI  
W SZKOŁACH PONADGIMNAZJALNYCH

Moduł dydaktyczny: fizyka - informatyka

## Optyka i kwanty promieniowania

*Grzegorz F. Wojewoda*



*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tytuł: *Optyka i kwanty promieniowania*

Autor: *mgr Grzegorz F. Wojewoda*

Redaktor merytoryczny: *dr hab. inż. prof. WWSI Zenon Gniazdowski*

Materiał dydaktyczny opracowany w ramach projektu edukacyjnego  
**WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.**  
**PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI**  
**Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH**

www.wlf.wysi.edu.pl

wlf@wysi.edu.pl

Wydawca: Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki  
ul. Lewartowskiego 17, 00-169 Warszawa  
www.wysi.edu.pl  
rektorat@wysi.edu.pl

Projekt graficzny: *Maciej Koczanowicz*

Warszawa 2013

Copyright © Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki 2013  
Publikacja nie jest przeznaczona do sprzedaży

Człowiek - najlepsza inwestycja



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

MODUŁ 12

## OPTYKA I KWANTY PROMIENIOWANIA

→ FIZYKA – ZAKRES ROZSZERZONY

**OPRACOWANE W RAMACH PROJEKTU:**  
**WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.**  
**PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI**  
**Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH**

### Temat 1

#### Widmo fal elektromagnetycznych

##### Wstęp

**W drugiej połowie XIX wieku okazało się, że światło jest przykładem fali elektromagnetycznej. Fala elektromagnetyczna to wzajemnie indukujące się i rozchodzące się w przestrzeni zmienne pola elektryczne oraz magnetyczne. Temat ten poświęcimy opisaniu podstawowych własności fal elektromagnetycznych.**

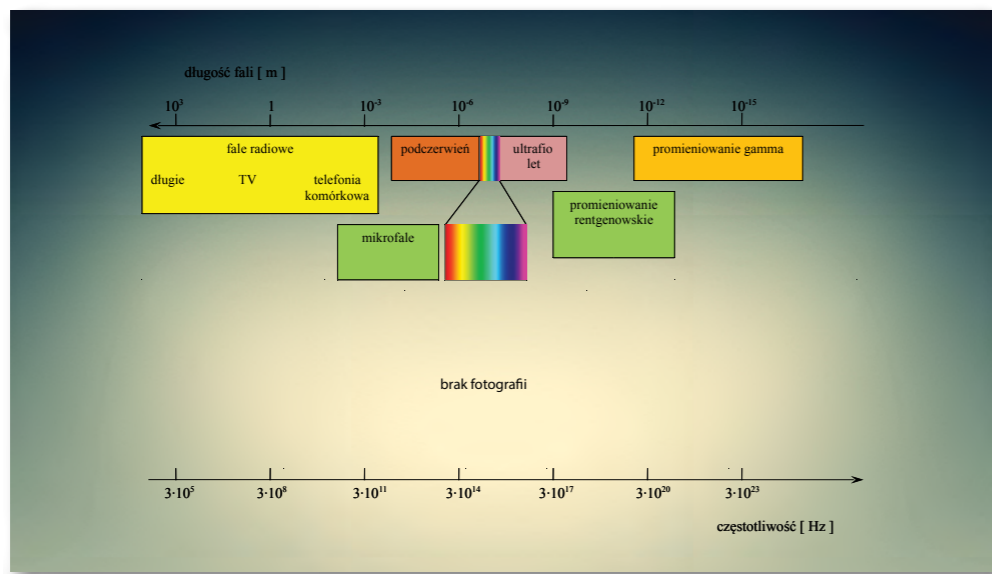
James Clerk Maxwell opublikował teorię, w myśl której zjawiska związane z elektryzowaniem ciał, przepływem prądu, powstawaniem pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem elektrycznym, czy też zjawiska indukcji elektromagnetycznej można opisać za pomocą spójnego modelu matematycznego. Konsekwencją tego modelu było przewidzenie istnienia fal elektromagnetycznych. Maxwell nie dożył doświadczalnego potwierdzenia swojej teorii. W roku 1886 niemiecki uczyony Heinrich Hertz uzyskał pierwsze eksperymentalne potwierdzenie istnienia fal elektromagnetycznych. A w roku 1897 włoski uczyony Guglielmo Marconi przesłał sygnał elektromagnetyczny na odległość kilkunastu kilometrów. Dzisiaj nie potrafimy wyobrazić sobie naszej cywilizacji bez możliwości posługiwania się falami elektromagnetycznymi. Telefon komórkowa, sieci wi-fi, kuchenki mikrofalowe, radary, radio, telewizja, tomografia komputerowa to są niektóre przykłady praktycznego zastosowania fal elektromagnetycznych. Własności fal elektromagnetycznych zależą od ich długości. Ale mają też cechy wspólne. Wszystkie rodzaje fal elektromagnetycznych w próżni rozchodzą się z prędkością o takiej samej wartości. Jest to największa znana nam prędkość rozchodzenia się energii w przyrodzie. Można przyjąć, że jej wartość wynosi  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Związek między długością  $\lambda$  fali elektromagnetycznej a jej częstotliwością  $f$  jest następujący:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Na rysunku 12.1. przedstawiono widmo fal elektromagnetycznych.

##### Pomiar wartości prędkości światła

Przez wiele wieków sądzono, że światło rozchodzi się nieskończenie szybko. Pierwszym uczonym, który próbował zmierzyć wartość prędkości światła był Galileusz. Ale dopiero duński astronom Olaf Roemer



Rys. 12.1. Widmo fal elektromagnetycznych

obserwując księżycę Jowisza udowodnił, że światło rozchodzi się z ograniczoną prędkością. W roku 1926 amerykański fizyk Albert Abraham Michelson, urodzony w Strzelnie na Kujawach, dokonał bardzo dokładnego pomiaru wartości prędkości światła. Metoda pomiaru użyta przez Michelsona została przedstawiona w animacji:

**Patrz animacja: Metoda pomiaru prędkości światła.**

**Podsumowanie**

Własności i zastosowanie fal elektromagnetycznych zależą od długości fali. Wartość prędkości fali elektromagnetycznej w próżni jest stała dla wszystkich jej rodzajów. Przyjmuje się, że wartość prędkości fali elektromagnetycznej w próżni wynosi  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ .

**W Internecie**

Pomiar wartości prędkości fali elektromagnetycznej w domu:  
<http://www.pl.eu-hou.net/index.php/wiczenia-mainmenu-13/mierzmy-otaczajcy-nas-wiat-mainmenu-139/197-jak-qdomowq-metod-wyznaczy-prdko-wiata>

**Temat 2**  
**Odbliscie i załamanie światła**

**Wstęp**

Stojąc nad brzegiem czystego jeziora można zauważyć, że patrząc wzdłuż linii brzegowej na dno, jest widoczne ono tylko do pewnej odległości. Potem już widać wyłącznie powierzchnię wody. Opisując zjawiska odbicia i załamania światła postaramy się wyjaśnić dlaczego tak się dzieje. Wykażemy, że opisane powyżej zjawisko jest podstawą działania światłowodów.

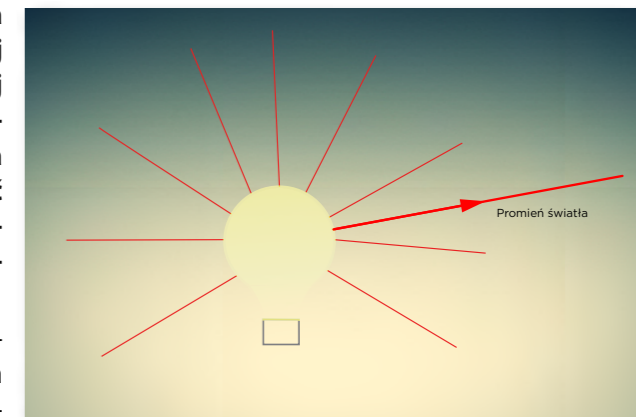
Światło wychodzące ze źródła rozchodzi się w bardzo wielu kierunkach, ale dla potrzeb wyjaśniania zjawisk optycznych rozchodzące się światło będzie reprezentował promień światła (rys. 12.2.). W ośrodku jednorodnym i przezroczystym promień światła rozchodzi się po liniach prostych. Bieg promienia świetlnego jest odwracalny, to znaczy, gdyby w miejscu, do którego dotarł promień ustawić źródło, to światło biegłoby w odwrotnym kierunku po tej samej drodze. Powyższe założenia stanowią podstawę optyki geometrycznej.

**Odbliscie światła**

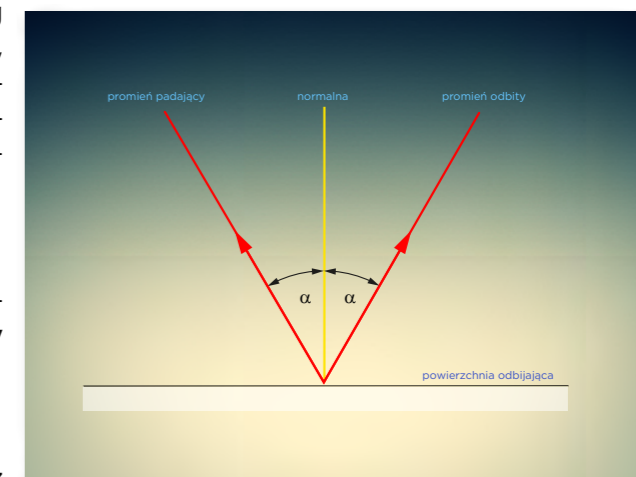
Gdy światło pada na powierzchnię odbijającą, to zachodzi zjawisko odbicia (rys. 12.3.). Kąty mierzymy od prostej normalnej. Prawa zjawiska odbicia:

- Kąt padania jest równy kątowi odbicia.
- Promień padający, promień odbity oraz normalna leżą w jednej płaszczyźnie.

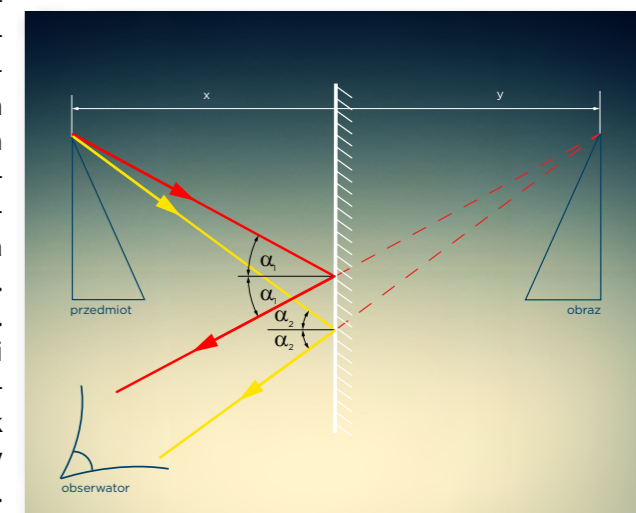
Zwierciadło płaskie to przykład przyrządu wykorzystującego zjawisko odbicia. Mechanizm powstawania obrazu w zwierciadle płaskim przedstawiono na rysunku 12.4. Świecący trójkąt wysyła promienie świetlne w różnych kierunkach, ale nam do konstrukcji obrazu wystarczą dwa. Oba te promienie po odbiciu od lustra tworzą wiązkę rozbieżną. Czyli promienie odbite od zwierciadła płaskiego w tym przypadku nie przetną się. Ale przecinają się przedłużenia tych promieni. Obraz powstający na przedłużeniu promieni jest obrazem pozornym. Z rysunku widać, że odległość obrazu od zwierciadła jest taka sama jak odległość przedmiotu od zwierciadła. Powstający obraz jest takiej samej wielkości jak przedmiot. Jak widać obraz jest też nieodwrócony. Podsumujmy cechy obrazu: pozorny, tej samej wielkości co przedmiot, prosty (nieodwrócony).



Rys. 12.02. Promień światła wychodzący ze źródła.



Rys. 12.03. Zjawisko odbicia światła.



Rys. 12.04. Powstawanie obrazu w zwierciadle płaskim.

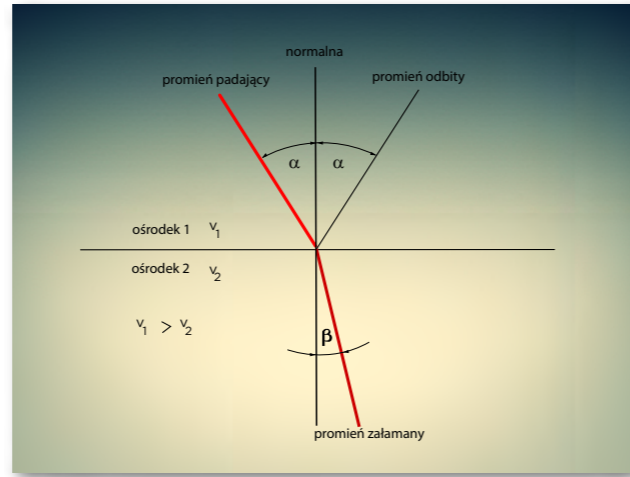
**Załamanie światła**

W otaczającym nas świecie można spotkać ośrodki przezroczyste, w których światło ma różne prędkości rozchodzenia się. Pamiętajmy o tym, że

$$c = \lambda \cdot f$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali,  $f$  – częstotliwość światła,  $c$  – wartość prędkości światła w próżni.

Gdy światło przechodzi do ośrodka, w którym ma inną wartość prędkości rozchodzenia się, to zmienia się również długość fali światła. Stała pozostaje jego częstotliwość. Gdy światło pada na granicę dwóch ośrodków przezroczystych o różnych wartościach prędkości rozchodzenia się, to zmienia się również kierunek jego rozchodzenia się. Zjawisko to nosi nazwę załamania światła. Na rysunku 12.5. przedstawiono załamanie światła na granicy dwóch ośrodków. Najczęściej zjawisku załamania towarzyszy również częściowe odbicie światła na granicy ośrodków.



Rys. 12.5. Zjawisko załamania światła

Prawa zjawiska załamania:

- Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest dla danych dwóch ośrodków wielością stałą i równą stosunkowi prędkości rozchodzenia się światła w tych ośrodkach:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

- Promień padający, promień załamany oraz normalna leżą w jednej płaszczyźnie.

Stały stosunek wartości prędkości rozchodzenia się światła w danych ośrodkach nazywany względnym współczynnikiem załamania ośrodka drugiego względem pierwszego:

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Gdy światło przechodzi z próżni do danego ośrodka, to mówimy o bezwzględnym współczynniku załamania danego ośrodka:

$$n_{osr} = \frac{c}{v}$$

**Doświadczenie 1**

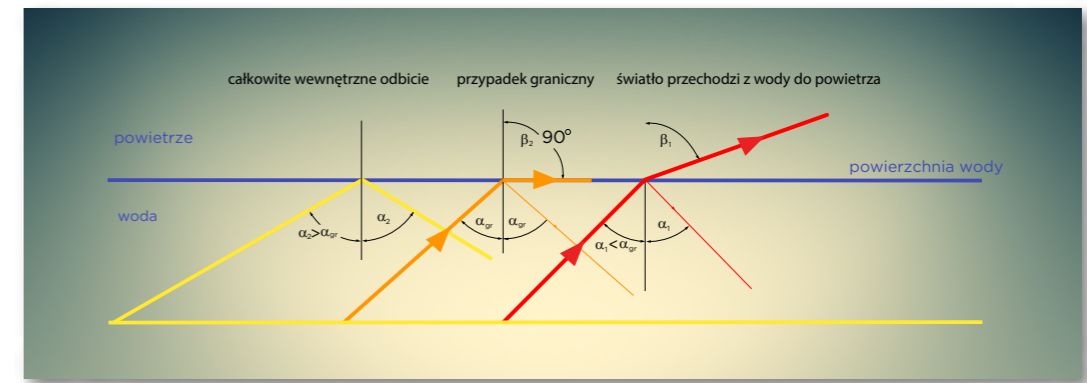
Wyznaczanie współczynnika załamania ośrodka przezroczystego

**Patrz: Doświadczenie 1.**

Światło załamuje się również gdy przechodzi z ośrodka, w którym ma mniejszą wartość prędkości rozchodzenia się do ośrodka, w którym ma mniejszą wartość prędkości rozchodzenia się. Na przykład podczas przejścia z wody do powietrza. Na rysunku 12.6. przedstawiono przejście promieni światła z wody do powietrza. Gdy światło pada pod kątem mniejszym niż graniczny, to część światła przechodzi do powietrza, a część odbija się od granicy ośrodków i pozostaje w wodzie. W przypadku granicznego kąta załamania światła wynosi  $90^\circ$ . Kąt graniczny można wyznaczyć korzystając z prawa załamania:

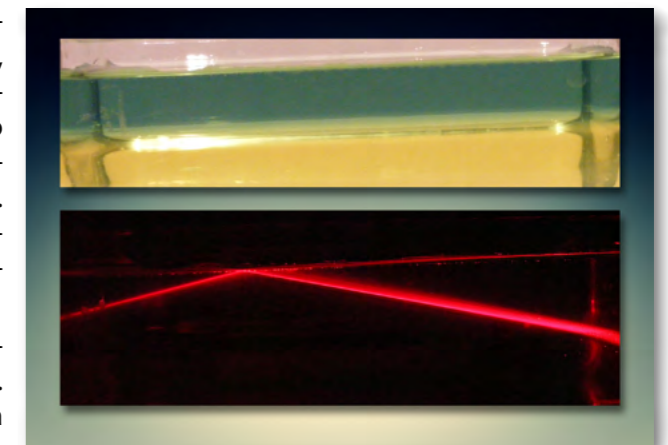
$$\frac{\sin \alpha_{gr}}{\sin 90^\circ} = \frac{v_w}{c}$$

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{v_w}{c} = \frac{1}{n_w}$$



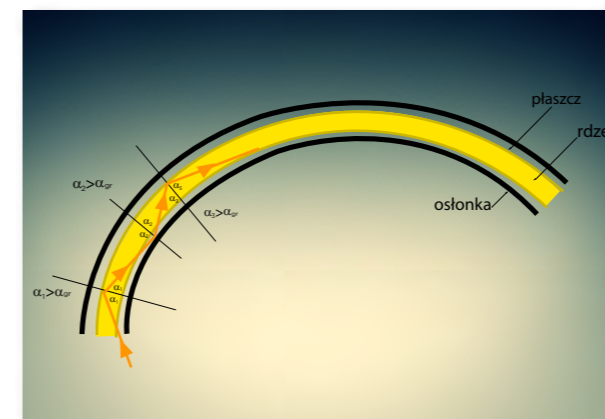
Rys. 12.6. Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia przy przejściu światła z wody do powietrza.

Gdy światło pada pod większym kątem niż graniczny następuje całkowite wewnętrzne odbicie, czyli światło w tej sytuacji nie przechodzi do powietrza. Opisane zjawiska wyjaśniają dlaczego nie można dostrzec dna czystego jeziora w pewnej odległości od obserwatora. Na rysunku 12.7. przedstawiono fotografię całkowitego wewnętrznego odbicia na granicy dwóch ośrodków przezroczystych.

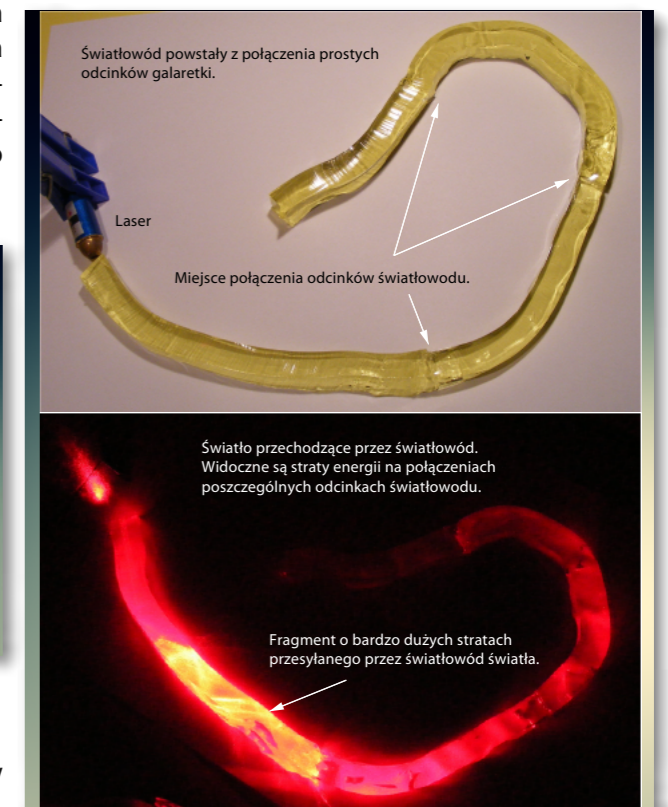


Rys. 12.7. Fotografia zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia zostało wykorzystane do budowy światłowodów. Światłowod zbudowany jest z rdzenia, płaszczki oraz osłonki. Wartość prędkości rozchodzenia się światła w płaszczku jest większa niż w rdzeniu. Dzięki temu światło nie wychodzi z rdzenia w wyniku zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia (rys. 12.8.). Osłonka pełni rolę ochronną włókna światłowodowego. Ale światłowod można wykonać również samodzielnie. Na rysunku 12.9. przedstawiono światłowod wykonany z odpowiednio wyciętej galaretki.



Rys. 12.8. Zasada działania światłowodu.



Rys. 12.9. Model światłowodu wykonany z odcinków galaretki.

**Podsumowanie**

Zjawisko odbicia zachodzi gdy światło pada na powierzchnię odbijającą. Kąt padania jest równy kątowi odbicia.

Gdy światło przechodzi do ośrodka, w którym ma inną wartość prędkości rozchodzenia się, to zmienia się również długość fali światła, zmienia się również kierunek jego rozchodzenia się. Zjawisko to nosi nazwę załamania światła. Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest dla danych dwóch ośrodków wielością stałą i równą stosunkowi prędkości rozchodzenia się światła w tych ośrodkach:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Warunek zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{n}$$

**Temat 3**

**Optyka geometryczna**

**Wstęp**

**Wykorzystamy poznane podczas analizy poprzedniego tematu prawa do opisu zwierciadeł oraz soczewek. Zastanowimy się jaki obraz powstaje na siatkówce ludzkiego oka.**

**Zwierciadła sferyczne**

Zwierciadło sferyczne to powierzchnia odbijająca w kształcie sfery. Zwierciadła sferyczne mogą być wklęsłe (wewnętrzna powierzchnia sfery) oraz wypukłe (zewnętrzna powierzchnia sfery). Na rysunku 12.10. przedstawiono układ optyczny zwierciadła sferycznego wklęsłego. Punkt O jest to środek krzywizny tego zwierciadła, punkt A jest jego wierzchołkiem, natomiast punkt F jest to ognisko zwierciadła. Ognisko zwierciadła jest to punkt, w którym przecinają się promienie rozchodzące się równoległe do osi optycznej po odbiciu od zwierciadła. Odległość ogniska od wierzchołka zwierciadła nazywamy ogniskową. Ogniskową można obliczyć ze wzoru:

$$f = \frac{1}{2}R$$

Sposób wykreślenia promieni konstrukcyjnych prowadzący do uzyskania obrazu świecącego przedmiotu przedstawiono za pomocą animacji:

**Patrz animacja: Przebieg promieni konstrukcyjnych w zwierciadle wklęsłym.**

Uzyskany w zwierciadle sferycznym wklęsłym przedstawiono na rysunku 12.11. Równanie zwierciadła zapisujemy w sposób następujący:

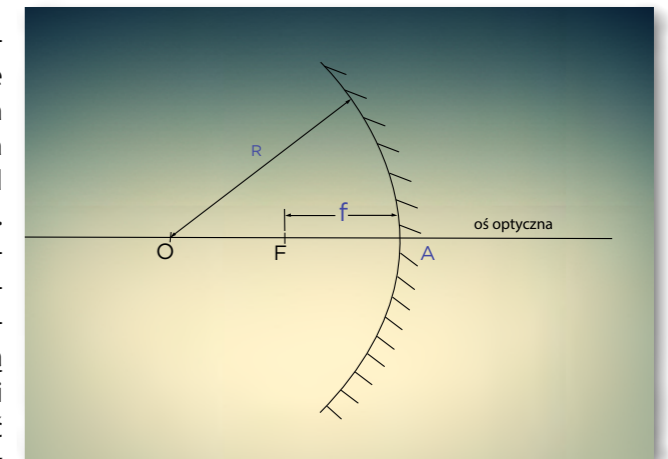
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

gdzie:  $f$  – ogniskowa zwierciadła,

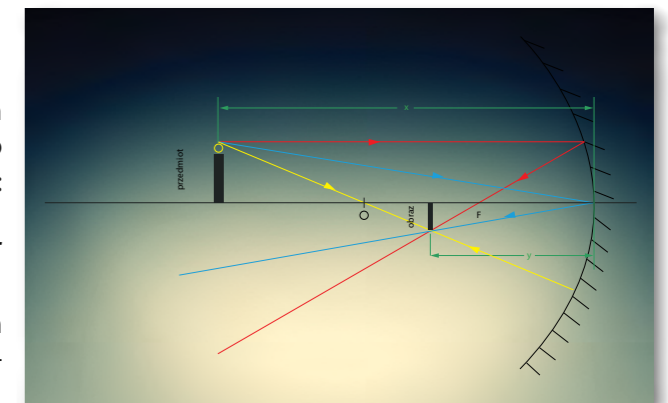
$x$  – odległość przedmiotu od zwierciadła,

$y$  – odległość obrazu od zwierciadła.

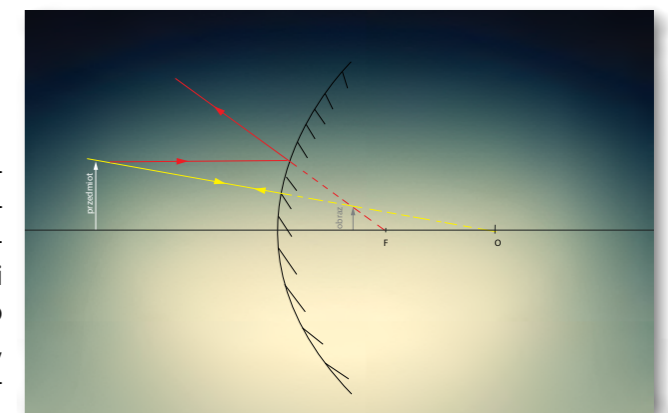
Na rysunku 12.12. przedstawiono schemat powstawania obrazu w zwierciadle sferycznym wypukłym. Promień, który rozchodzi się równoległe do osi optycznej po odbiciu na powierzchni zwierciadła rozchodzi się w taki sposób, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko. Promień, który rozchodzi się w taki sposób, że jego przedłużenie przechodzi przez środek krzywizny zwierciadła po odbiciu rozchodzi się wzdłuż tego sa-



Rys. 12.10. Zwierciadło sferyczne wklęsłe



Rys. 12.11. Konstrukcja powstawania obrazu w zwierciadle wklęsłym

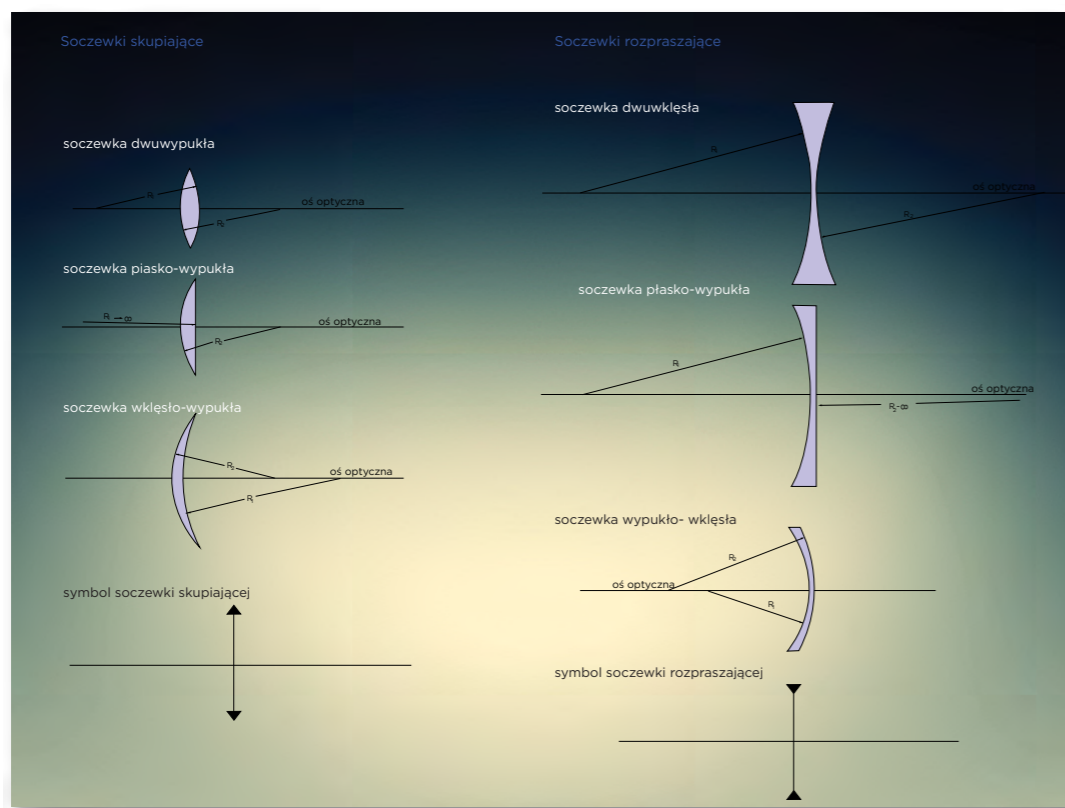


Rys. 12.12. Mechanizm powstawania obrazu w zwierciadle wypukłym

mego kierunku. Na przecięciu przedłużeń obu promieni powstaje obraz. Obraz ten jest pozorny, prosty (nieodwrócony) i pomniejszony. Z zwierciadeł sferycznych używa się jako lusterek wstecznych w samochodach. Uzyskany obraz jest pomniejszony, co oznacza, że obiekt widziany w takim zwierciadle znajduje się nieco bliżej, niż się wydaje patrząc na jego odbicie w lusterku wstecznym. Pamiętajmy o tym prowadząc pojazdy mechaniczne.

**Soczewki sferyczne**

Soczewka sferyczna to ciało przezroczyste ograniczone z dwóch stron powierzchniami załamującymi światło w kształcie części sfery. Środki obu sfer leżą na wspólnej prostej, którą nazywamy osią optyczną soczewki. W dalszych rozważaniach ograniczymy się do soczewek cienkich. Soczewkę można traktować jako cienką gdy odległości przedmiotu oraz obrazu są duże w porównaniu z najgrubszą częścią soczewki. Soczewki można podzielić na skupiające oraz rozpraszające. Na rysunku 12.13. przedstawiono prosty schemat klasyfikacji soczewek gdy ośrodkiem otaczającym materiał soczewki jest powietrze. Soczewki skupiające powodują, że padające na soczewkę promienie równoległe, po przejściu przez soczewkę, tworzą wiązkę skupiającą. Soczewki rozpraszające powodują, że padające na soczewkę promienie równoległe, po przejściu przez nią, tworzą wiązkę rozbieżną.



Rys. 12.13. Klasyfikacja soczewek sferycznych

Bardzo ważnym parametrem opisującym soczewki jest ogniskowa. Ogniskowa to odległość ogniska od soczewki. Ognisko soczewki to punkt. W którym skupiają się po przejściu przez soczewkę promienie, które rozchodziły się równoległe do osi optycznej. Ogniskową cienkiej soczewki można obliczyć ze wzoru:

$$\frac{1}{f} = \left( \frac{n_{\text{socz}}}{n_{\text{otocz}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

gdzie:  $n_{\text{socz}}$  – współczynnik załamania materiału soczewki,  
 $n_{\text{otocz}}$  – współczynnik załamania ośrodka otaczającego soczewkę,  
 $R_1, R_2$  – promienie krzywizn soczewki.

$R_1, R_2$  są dodatnie, gdy krzywizna soczewki oraz środek tej krzywizny leżą po przeciwnych stronach soczewki.  $R_1, R_2$  są ujemne, gdy krzywizna soczewki oraz środek tej krzywizny leżą po tej samej stronie soczewki.

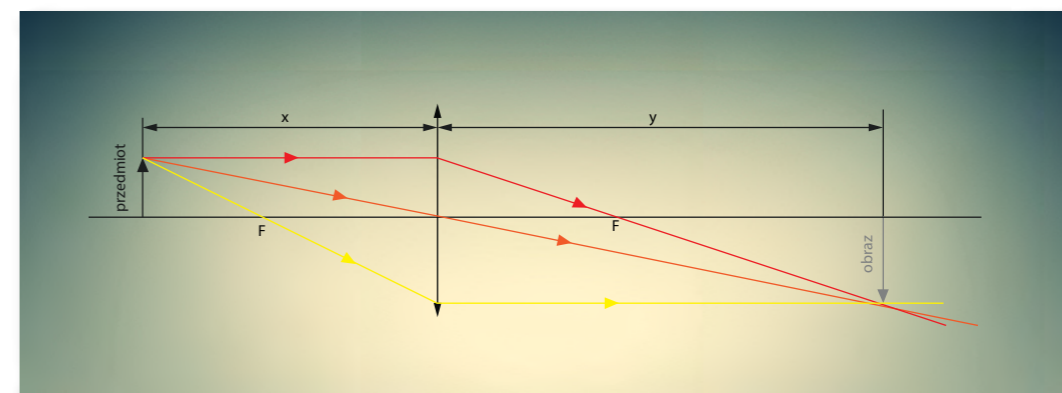
Sposób wykreślenia promieni konstrukcyjnych prowadzący do uzyskania obrazu świecącego przedmiotu przedstawiono za pomocą animacji:

**Patrz animacja: Przebieg promieni konstrukcyjnych w soczewce skupiającej.**

Obraz uzyskany w soczewce skupiającej przedstawiono na rysunku 12.14. Równanie soczewki zapisujemy w sposób następujący:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

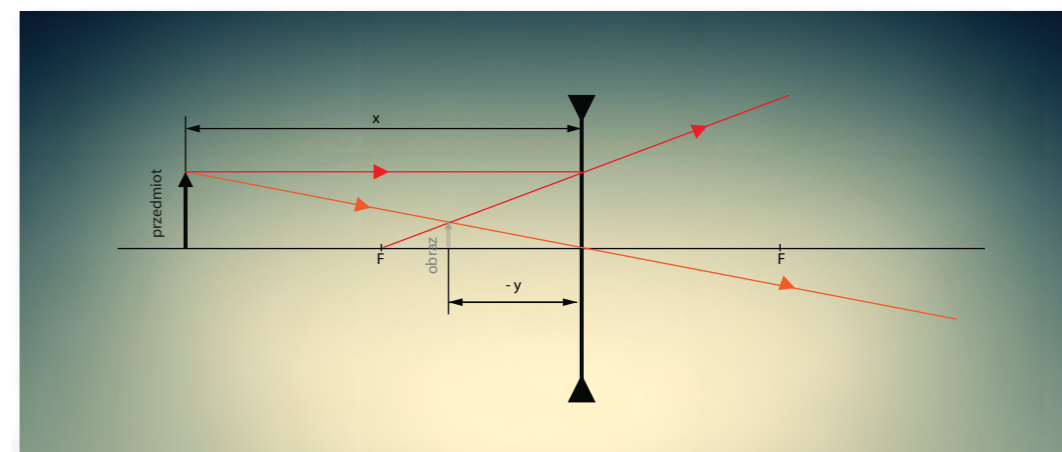
gdzie:  $f$  – ogniskowa soczewki,  
 $x$  – odległość przedmiotu od soczewki,  
 $y$  – odległość obrazu od soczewki.



Rys. 12.14. Konstrukcja otrzymywania obrazu w soczewce skupiającej

**Patrz: Doświadczenie 1.**

Na rysunku 12.15. przedstawiono schemat powstawania obrazu w soczewce rozpraszającej. Promień, który rozchodzi się równoległe do osi optycznej po załamaniu w soczewce rozchodzi się w taki sposób, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko. Promień, który pada na środek soczewki rozchodzi się dalej wzdłuż tego samego kierunku. Na przecięciu promieni powstaje obraz. Obraz ten jest pozorny, prosty (nieodwrócony) i pomniejszony.



Rys. 12.15. Konstrukcja otrzymywania obrazu w soczewce rozpraszającej

**Podsumowanie**

Obrazy rzeczywiste otrzymane za pomocą pojedynczego zwierciadła lub za pomocą pojedynczej soczewki są zawsze odwrócone. Obrazy proste są pozorne. Obrazy rzeczywiste powstają po tej samej stronie zwierciadła, po której znajduje się przedmiot. Obrazy rzeczywiste powstają po przeciwnej stronie soczewki niż znajduje się przedmiot.

Równanie zwierciadła oraz soczewki zapisujemy w sposób następujący:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

**Temat 4**

**Optyka falowa**

**Wstęp**

Pewnego dnia autor tego opracowania spojrzął przez firanki zawieszane na oknie w kuchni na świecąca gdzieś na zewnątrz lampę. Zauważył bardzo ciekawy efekt. Wyniki jego obserwacji przedstawiono na rysunku 12.16. Na fotografii widać różnokolorowe paski wokół świecącej lampy. W trakcie omawiania tego tematu postaramy się wytłumaczyć to zjawisko. Opiszemy kilka doświadczeń potwierdzających falową naturę światła. Zapoznamy z zasadą działania siatki dyfrakcyjnej. Wyjaśnimy również dlaczego kierowcy powinni używać okularów przeciwsłonecznych z filtrem polaryzacyjnym.



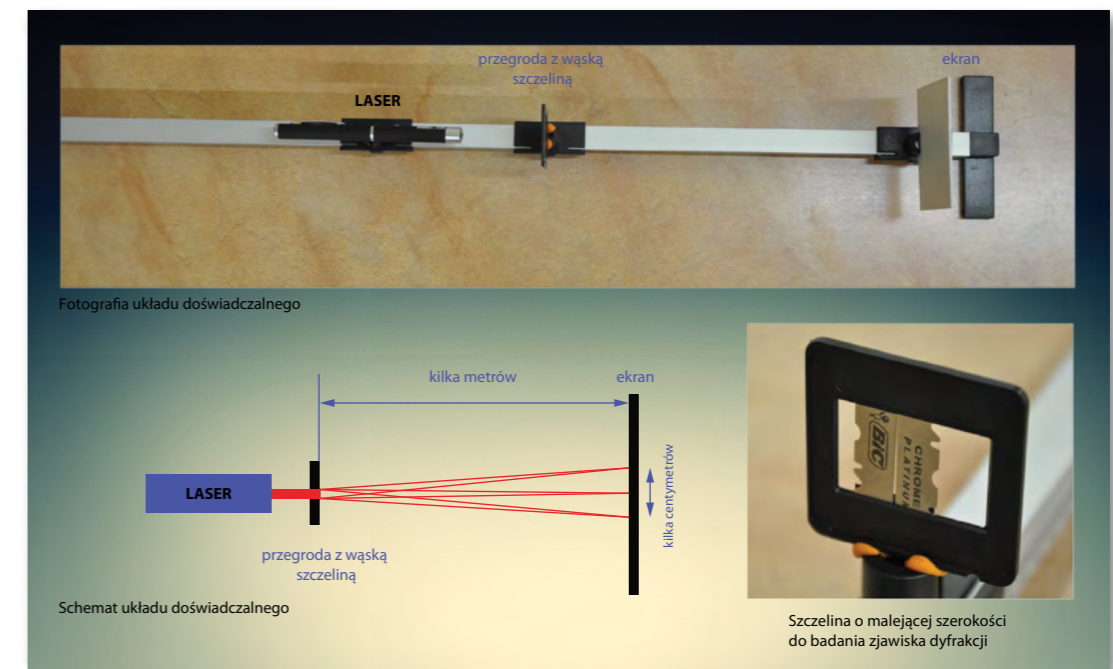
Rys. 12.16. Dyfrakcja światła białego na firance.

**Dyfrakcja światła**

Dyfrakcja światła, lub inaczej ugięcie światła, polega na zmianie kierunku rozchodzenia się światła na krawędziach przeszkód oraz w ich pobliżu. Gdy rozmiary przeszkód są porównywalne z długością fali światła, zjawisko dyfrakcji można lepiej obserwować. Przeprowadźmy doświadczenie ilustrujące to zjawisko.

**Doświadczenie 1**

Do przeprowadzenia doświadczenia potrzebne będą: lasery (czerwony i zielony), wąska szczelina o ostrych krawędziach (można wykonać ją z żyłetek) oraz ekran (biała kartka papieru). Światło z lasera kierujemy na szczelinę. Szerokość szczeliny można zmieniać a jej szerokość można ustalić za pomocą szczylnomierza. Światło po przejściu przez szczelinę pada na ekran. Układ doświadczenia przedstawiony jest na rysunku 12.17.



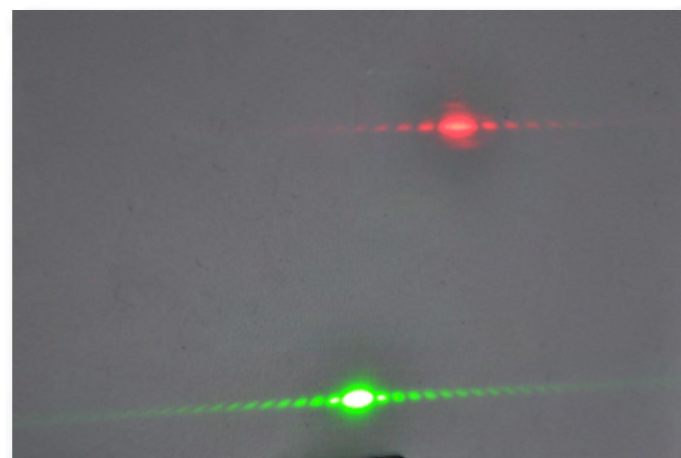
Rys. 12.17. Układ doświadczenia do badania zjawiska dyfrakcji.

**Wyniki doświadczenia**

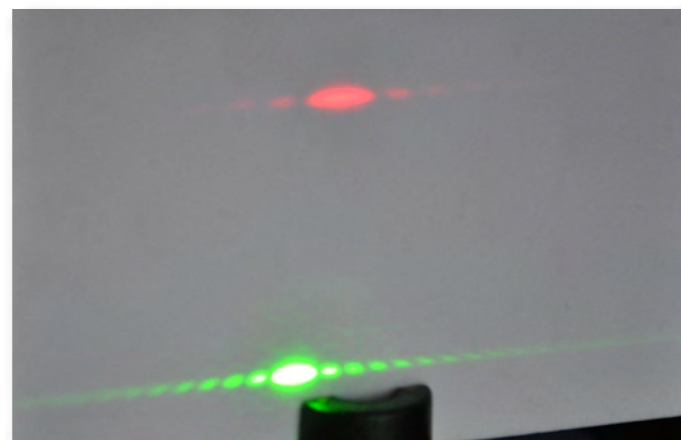
Na rysunku 12.18 przedstawiono obrazy dyfrakcyjne szczelin obserwowane na ekranie. Można zauważyć, że w każdym przypadku środkowy prążek jest otoczony obszarami oświetlonymi oddzielnymi miejscami nieoświetlonymi. Jasne prążki będziemy nazywać maksimami interferencyjnymi, zaś miejsca nieoświetlone minimami interferencyjnymi. Gdy światło przechodzi przez najszerszą z użytych szczelin, to jasny prążek w centrum obrazu ma rozmiary porównywalne z rozmiarami szczeliny. Gdy szerokość szczeliny się zmniejsza, to szerokość środkowego prążka jest większa. Jednocześnie widać, że światło czerwone po przejściu przez szczeliny ulega silniejszym efektom dyfrakcyjnym niż światło emitowane przez laser zielony.

Analizując wyniki doświadczenia można stwierdzić, że im rozmiary szczeliny są mniejsze, tym silniejszy jest efekt rozmycia dyfrakcyjnego. Na skutek zjawiska dyfrakcji obraz oświetlonej wąskiej szczeliny jest rozmytą plamą. Jednocześnie można zauważyć, że dla światła o mniejszej długości fali efekt rozmycia dla tej samej szczeliny jest mniejszy. Przyjmuje się, że światło widzialne ma długość fali w zakresie od 400nm (światło fioletowe) do 750nm (światło czerwone). Efekty dyfrakcyjne powodują, że używając światła czerwonego nie można dostrzec szczegółów obiektów o rozmiarach rzędu 750nm. Dwie małe kropki umieszczone w odległości 700nm od siebie, po oświetleniu światłem o długości fali 750nm dają obraz w postaci jednej plamki. Aby uzyskać obraz tych kropek w postaci dwóch punktów należy użyć światła o mniejszej długości fali. Właśnie efekty rozmycia dyfrakcyjnego są powodem ograniczonej zdolności rozdzielczej mikroskopów. Za pomocą mikroskopów optycznych nie można rozdzielić od siebie punktów leżących bliżej niż 500nm. Nie można zatem zobaczyć za pomocą mikroskopów optycznych wnętrza jąder komórek.

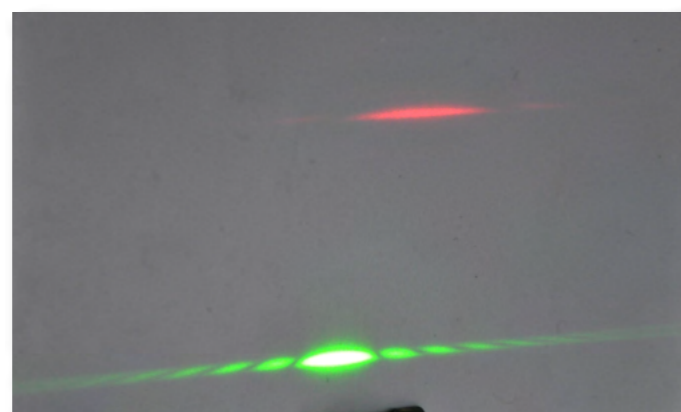
Efekty dyfrakcyjne są również przyczyną ograniczonej pojemności w zapisie danych na dyskach pamięci optycznych takich jak CD-ROM, DVD oraz Blu-ray Disc. Informacja na takich płytach zapisana jest na spiralnej ścieżce biegnącej od środka do brzegu płyty za pomocą tak zwanych pitów i landów. Pit jest to wgłębienie na powierzchni, zaś land jest to przerwa między wgłębieniami. Informacja zapisana cyfrowo ma postać zer i jedynek. Wgłębienie, czyli pit odpowiada zeru a brak wgłębienia, czyli land odpowiada jedynce. Szerokość wgłębień na płycie CD-ROM oraz standardowej płycie kompaktowej (audio



Szczelina o szerokości około 0,3 mm



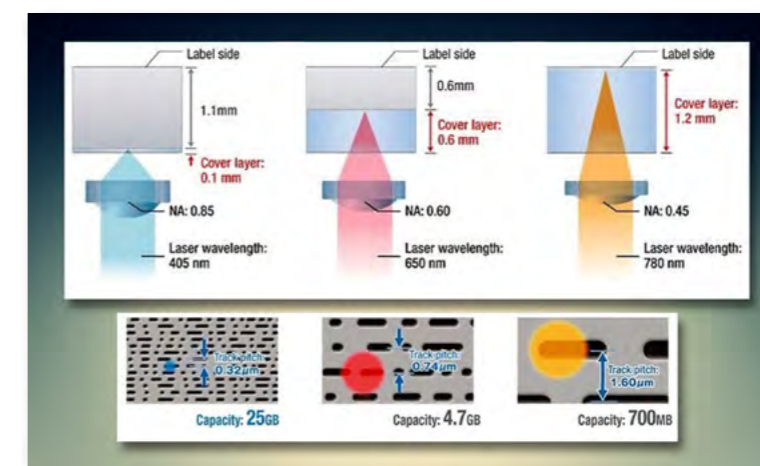
Szczelina o szerokości około 0,2 mm



Szczelina o szerokości około 0,1 mm

Rys. 12.18. Obrazy dyfrakcyjne obserwowane na ekranie po przejściu światła przez wąską szczelinę.

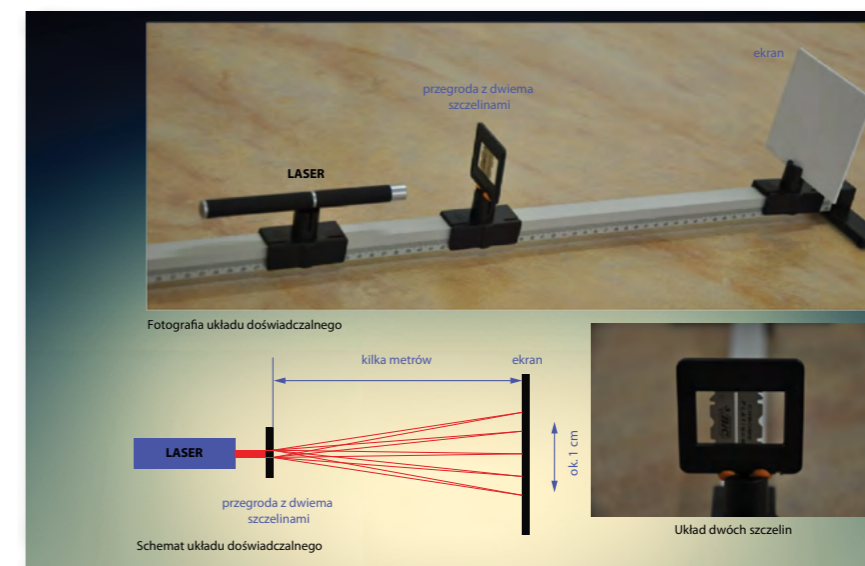
CD) wynosi 500nm, zaś jego długość waha się od 800nm do 3500nm. Odległości między równoległymi pitami wynoszą 1600nm. Informacje zapisane na płycie CD-ROM odczytywane są za pomocą lasera półprzewodnikowego o długości fali około 780nm. Rozmiary ścieżek są więc porównywalne z długością fali światła służącego do odczytu informacji. Chcąc zwiększyć pojemność płyty należy użyć lasera o mniejszej długości fali. Informacja zapisana na płycie DVD odczytywana jest za pomocą lasera o długości fali 640nm. Powoduje to, że można zmniejszyć rozmiary pitów oraz zmniejszyć odległości między ścieżkami zapisu. Konsekwencją tego jest kilkukrotne zwiększenie pojemności płyty DVD w porównaniu z pojemnością płyty CD-ROM. Dalsze zwiększenie pojemności pamięci optycznych było możliwe dzięki opanowaniu technologii laserów półprzewodnikowych pracujących na długościach fal rzędu 400nm. Do odczytu danych z płyty Blu-ray używa się lasera dającego światło fioletowe o długości fali 405nm. Przerwy między ścieżkami w przypadku tych płyt wynoszą tylko 320nm. Na rysunku 12.19. przedstawiono porównanie między wielkościami ścieżek w poszczególnych rodzajach płyt z pamięcią optyczną. Wyjaśnimy teraz dlaczego w pewnych warunkach na ekranie powstają miejsca jasno oświetlone rozdzielone miejscami nie oświetlonymi. Wykonajmy w tym celu doświadczenie.



Rys. 12.19. Porównanie wielkości ścieżek różnych płyt z pamięcią optyczną.

**Doświadczenie 2**

Do przeprowadzenia tego eksperymentu będziemy potrzebować: laser, przegrodę z dwiema wąskimi szczelinami umieszczonymi blisko siebie oraz ekran. Przegrodę wykonamy z żyłtek, pomiędzy którymi umieścimy cienką igłę. Schemat układu doświadczonego przedstawiony jest na rysunku 12.20. Światło z lasera pada prostopadle na układ dwóch szczelin. Po przejściu przez szczeliny światło pada na ekran. Obserwujemy obraz powstający na ekranie.

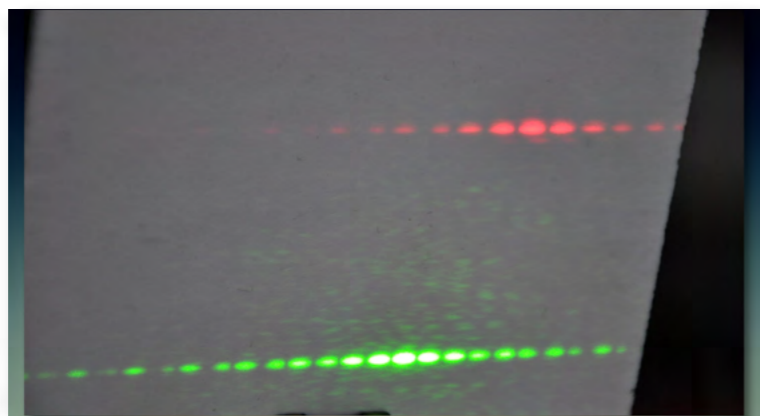


Rys. 12.20. Układ doświadczonego do obserwacji zjawiska interferencji światła.



**Wyniki doświadczenia**

Na rysunku 12.21. przedstawiono obrazy uzyskane w wyniku oświetlenia układu dwóch szczelin światłem pochodzącym z dwóch laserów – czerwonego i zielonego. Różnica pomiędzy obrazem uzyskanym w poprzednim doświadczeniu polega na tym, że środkowe maksimum jest teraz w postaci układu równoległych, równo od siebie odległych jasnych prążków. Odległości między prążkami uzyskanymi w wyniku oświetlenia szczelin światłem zielonym są mniejsze niż przypadku użycia światła czerwonego.



Rys. 12.21. Obrazy interferencyjne uzyskane w wyniku przejścia światła laserowego przez układ dwóch szczelin.

**Symulacje zjawisk fizycznych: Doświadczenia Younga**

Obserwowane w tym doświadczeniu zjawisko nazywamy interferencją. Zjawisko interferencji światła polega na takim nakładaniu się wiązek światła, że na ekranie powstają obszary wygaszenia światła (ciemne prążki) oraz obszary wzmocnienia światła (jasne prążki). Prążki interferencyjne powstające na ekranie w naszym doświadczeniu powstały wyniku przebywania różnych dróg przez promienie świetlne wychodzące z dwóch szczelin

Można wykazać, że położenie jasnych prążków interferencyjnych dane jest przybliżonym wzorem:

$$y_n = n \frac{\lambda \cdot l}{d}$$

gdzie:  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – numer kolejny prążka, licząc od środkowego prążka zerowego rzędu, leżącego na środku ekranu

$\lambda$  – długość fali światła,

$l$  – odległość szczelin od ekranu,

$d$  – odległość między szczelinami.

Wzór ten jest prawdziwy przy założeniu, że odległość ekranu od szczelin jest wiele razy większa od szerokości otrzymanego obrazu interferencyjnego. W naszym przypadku odległość szczelin od ekranu była rzędu kilku metrów, a szerokość otrzymanego obrazu interferencyjnego była rzędu kilku milimetrów.

Zjawisko interferencji występuje również wówczas, gdy światło przechodzi przez układ wielu szczelin. Układ równoległych i równoodległych od siebie szczelin przepuszczających światło nazywamy siatką dyfrakcyjną. Siatką dyfrakcyjną jest również układ niewielkich, równoległych płaszczyzn odbijających światło, na przykład powierzchnia płyty CD. Parametrem charakteryzującym siatkę dyfrakcyjną jest odległość między szczelinami siatki, czyli stała siatki dyfrakcyjnej.

Gdy światło przechodzi przez siatkę dyfrakcyjną to następuje interferencja światła pochodzącego z bardzo wielu szczelin. Powstający obraz interferencyjny jest o wiele wyraźniejszy niż w przypadku interferencji światła pochodzącego z dwóch szczelin. Podobnie jak w przypadku interferencji światła pochodzącego z dwóch szczelin w miejscach na ekranie, do których docierają promienie przebywające drogi różniące się całkowitą wielokrotnością długości fali powstają obszary oświetlone. Natomiast punkty ekranu, do których docierają promienie przebywające drogi różniące się nieparzystą wielokrotnością długości fali powstają obszary nieoświetlone. Przeprowadźmy doświadczenie ilustrujące przejście światła jednoobarwnego (monochromatycznego) przez siatkę dyfrakcyjną.

**Doświadczenie 3**

Do przeprowadzenia tego eksperymentu będziemy potrzebować: laser, siatkę dyfrakcyjną oraz ekran. Siatkę dyfrakcyjną można uzyskać z płyty CD pozbawiając ją lakieru lub kupić w sklepach z pomocami szkolnymi. Schemat doświadczenia przedstawiono na rysunku 12.22. Światło z lasera pada prostopadłe na siatkę dyfrakcyjną. Po przejściu światła przez siatkę na ekranie obserwujemy obraz interferencyjny.

**Wyniki doświadczenia**

Obserwujemy centralny prążek na środku ekranu oraz symetrycznie położone wokół niego prążki wyższych rzędów. Można zauważyć, że odległości między prążkami interferencyjnymi uzyskanymi w wyniku oświetlenia siatki światłem czerwonym są większe niż w przypadku oświetlenia siatki światłem zielonym. Kąty, pod którymi obserwujemy poszczególne prążki są o wiele większe niż było to w przypadku poprzedniego doświadczenia. Odległość siatki od ekranu wynosiła 7cm, a odległości między sąsiednimi prążkami wynoszą około 0,8cm (rys. 12.23.)

Można wykazać, że kąty, pod którymi można obserwować jasne prążki 0-wego, 1-go, 2-go, 3-go, ... rzędu spełniają zależność:

$$n \cdot \lambda = a \cdot \sin \alpha_n$$

gdzie:  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – numer rzędu prążka

$\lambda$  – długość fali,

$\alpha_n$  – kąt, pod jakim obserwujemy prążek  $n$ -tego rzędu,

$a$  – stała siatki (odległość między środkami szczelin)

Zgodnie z powyższym warunkiem oraz z wynikiem doświadczenia, im większa jest długość fali światła padającego na siatkę dyfrakcyjną, tym kąt pod jakim widzimy prążek danego rzędu jest większy.

**Patrz: Doświadczenie 3.**

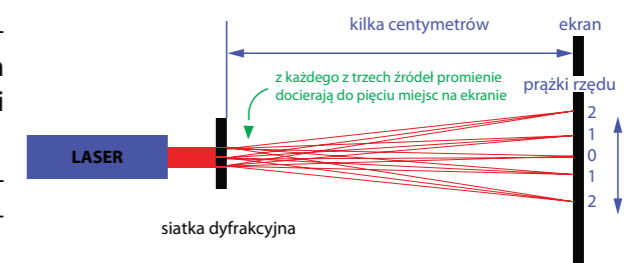
Sprawdźmy co się stanie, gdy siatkę dyfrakcyjną oświetlimy światłem białym.

**Doświadczenie 4**

Do przeprowadzenia tego eksperymentu będziemy potrzebować: źródło światła białego (może być silna latarka z konwencjonalną żarówką), szczelina o szerokości około 1mm (może być wykonana z dwóch żyłek), siatka dyfrakcyjna oraz ekran. Schemat doświadczenia przedstawiono na rysunku 12.24. Światło ze źródła pada prostopadłe na siatkę dyfrakcyjną. Po przejściu światła przez siatkę na ekranie obserwujemy obraz.



Fotografia układu doświadczenia

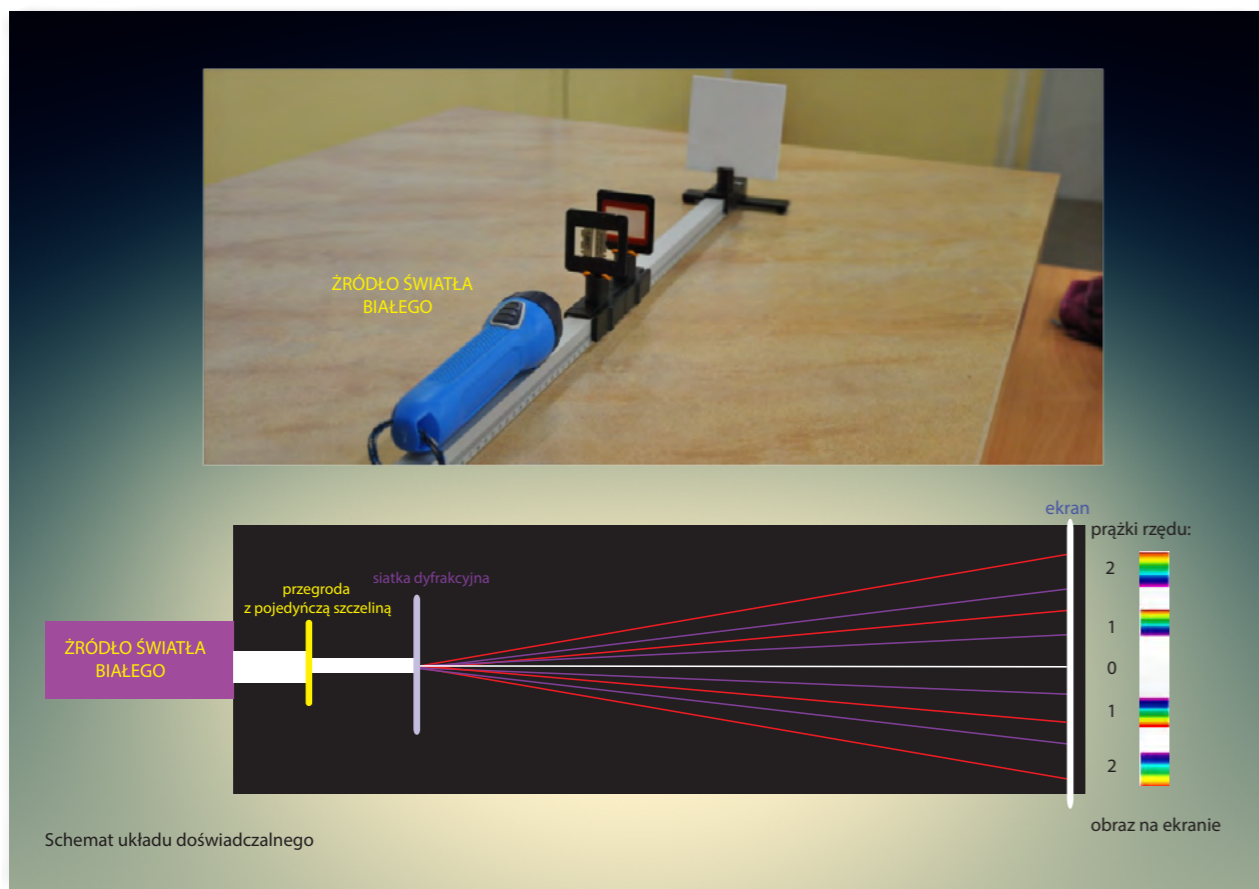


Schemat układu doświadczenia

Rys. 12.22. Układ doświadczenia do badania obrazu powstającego po przejściu światła monochromatycznego przez siatkę dyfrakcyjną.



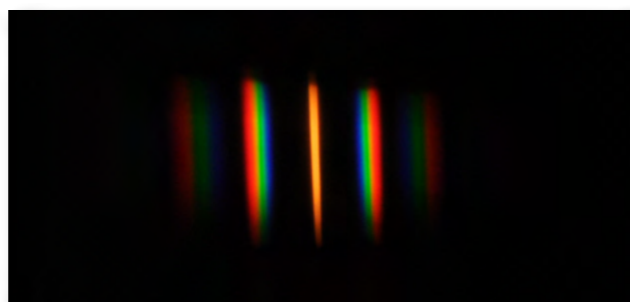
Rys. 12.23. Obraz światła laserowego po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną.



Rys. 12.24. Układ doświadczalny do badania przejścia światła białego przez siatkę dyfrakcyjną.

**Wyniki doświadczenia**

Na ekranie (rys. 12.25.) widzimy biały prążek zerowego rzędu oraz symetrycznie ustawione barwne prążki wyższych rzędów. Okazuje się, że siatka dyfrakcyjna rozszczepia światło białe na poszczególne barwy. Kolejność barw w każdym prążku jest następująca: fioletowy, niebieski, zielony, żółty, pomarańczowy, czerwony.



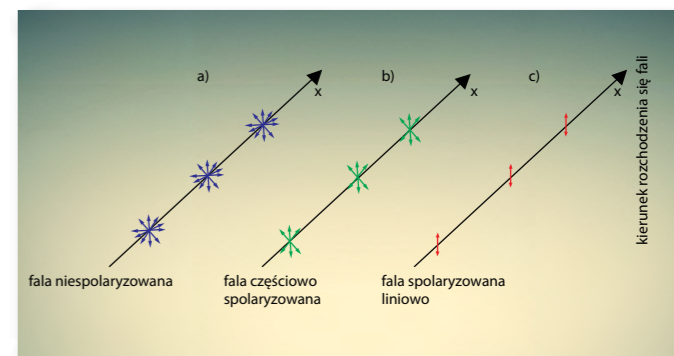
Rys. 12.25. Układ barwnych prążków po przejściu światła białego przez siatkę dyfrakcyjną.

Największą długość fali w widmie światła widzialnego ma światło czerwone (około 700nm, a następnie coraz mniejsze długości fal mają pomarańczowe (około 600nm), żółte (około 580nm), zielone (około 540nm), niebieskie (450nm) oraz fioletowe (około 400nm). W doświadczeniu 3 odkryliśmy, że im większa jest długość fali światła, tym większy jest kąt pod którym widoczny jest dany prążek interferencyjny. Siatka dyfrakcyjna może służyć do rozszczepiania światła białego na poszczególne barwy.

Możemy teraz już bez trudu wyjaśnić dlaczego powstał obraz pokazany we wstępie do tego tematu. Światło przechodząc przez wąskie szczeliny ulega ugięciu i odchyła się od prostoliniowego biegu. W wyniku nakładania się światła pochodzącego z różnych szczelin następuje nakładanie się wiązek światła na siebie. W wyniku nakładania się światła następuje częściowe wygaszenie niektórych barw, a wzmocnienie innych. Uzyskany efekt jest konsekwencją dyfrakcji oraz interferencji światła. Zjawiska te świadczą o falowej naturze światła, a każdy z was może bez trudu wskazać wiele podobnych przykładów.

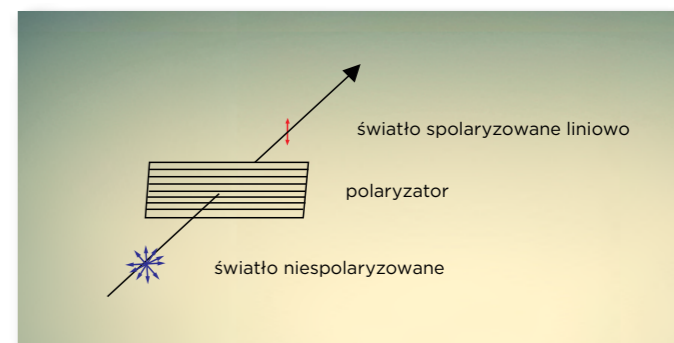
**Polaryzacja światła**

Fala elektromagnetyczna, a więc również światło jest falą poprzeczną. Oznacza to, że zmiany pól elektrycznych oraz magnetycznych tworzących fale elektromagnetyczne zachodzą w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Dla uproszczenia dalszych rozważań opis fali elektromagnetycznej ograniczymy do pola elektrycznego. Fala elektromagnetyczna nie jest spolaryzowana, gdy w fali istnieje wiele kierunków, wzdłuż których zmieniają się pola elektryczne (rys. 12.26a). Zjawisko polaryzacji fali elektromagnetycznej polega na ograniczeniu kierunków zmian natężenia pola elektrycznego.



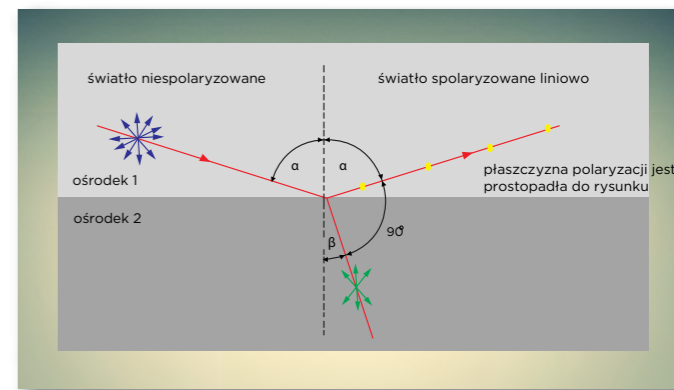
Rys. 12.26. Schemat polaryzacji fali.

Na rysunku 12.26b przedstawiono schemat fali częściowo spolaryzowanej, a na rys. 12.26c schemat fali spolaryzowanej liniowo. Fala jest spolaryzowana liniowo, gdy zmiany natężenia pola elektrycznego zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie. W praktyce polaryzację światła można osiągnąć albo w wyniku odbicia od powierzchni dielektryka, albo w wyniku przejścia przez specjalny kryształ lub polaryzator.



Rys. 12.27. Polaryzacja światła w wyniku przejścia przez polaryzator.

Najprostszym polaryzatorem może być folia polimerowa, która zawiera szereg równoległych szczelin przepuszczających jedynie światło, w którym wartości natężenia pól elektrycznych zmieniają się w kierunku prostopadłym do tych szczelin. Na rysunku 12.27. przedstawiono mechanizm polaryzacji światła w wyniku przejścia przez polaryzator. Mechanizm polaryzacji przez odbicie jest następujący. Na powierzchnię graniczącą dwa ośrodki dielektryczne pada światło niespolaryzowane (rys. 12.28.). Następuje zjawisko załamania oraz odbicia. Gdy pomiędzy promieniem odbitym a załamanym jest kąt 90° to promień odbity jest spolaryzowany liniowo. Płaszczyzna polaryzacji fali świetlnej jest prostopadła do płaszczyzny rysunku. Kąt padania, przy którym następuje polaryzacja liniowa promienia odbitego nazywamy kątem Brewstera. Z prawa zjawiska załamania wynika następujący warunek, z którego można obliczyć kąt Brewstera:



Rys. 12.28. Mechanizm polaryzacji światła przez odbicie.

$$\text{tg} \alpha_B = n$$

gdzie:  $n$  – współczynnik załamania ośrodka, w którym rozchodzi się promień załamany.

A jaki ma to związek z kierowcami i okularami przeciwsłonecznymi? Są okulary przeciwsłoneczne, których szkła są pokryte filtrem polaryzacyjnym. Gdy na takie szkła padać będzie światło odbite od powierzchni mokrej szosy, to znaczna część tego światła nie będzie przez ten filtr przepuszczana. Światło słoneczne odbite od powierzchni wody ulega częściowej polaryzacji, a filtr polaryzacyjny nie przepuszcza światła spolaryzowanego. Oczywiście takich okularów mogą używać wszyscy, którzy pragną ograniczyć dostęp do swoich oczu światła odbitego od powierzchni wody.

**Podsumowanie**

Własności falowe światła potwierdzają zjawiska dyfrakcji oraz interferencji. Prążki interferencyjne powstają na skutek wzmacniania oraz wygaszania światła. Maksimum interferencyjne powstaje w miejscach, w których spotykają się grzbiety fal pochodzących z różnych źródeł.

Kąty  $\alpha_n$ , pod którymi można obserwować jasne prążki interferencyjne spełniają zależność:

$$n \cdot \lambda = a \cdot \sin \alpha_n$$

Im większa jest długość fali światła padającego na siatkę dyfrakcyjną, tym kąt pod jakim widzimy prążek danego rzędu jest większy.

Zjawisko polaryzacji światła polega na ograniczaniu możliwych kierunków zmian pól magnetycznych oraz elektrycznym w fali elektromagnetycznej. Warunek polaryzacji liniowej przy odbiciu od powierzchni dielektryka:

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n$$

**W Internecie**

Doświadczenia z optyką falową:

<http://www.pl.eu-hou.net/index.php/wiczenia-mainmenu-13/mierzymy-otaczajcy-nas-wiat-main-menu-139/164-eureka-wiata-jest-fal-domowe-laboratorium-optyki-laserowej>

**Temat 5**

**Kwantowy model światła**

**Wstęp**

**Aby wyjaśnić zjawiska dyfrakcji i interferencji musieliśmy przyjąć, że światło jest falą elektromagnetyczną. Aby wyjaśnić zjawisko fotoelektryczne przyjęliśmy, że światło jest strumieniem fotonów. Te modele światła wzajemnie się wykluczają. Czym jest światło? W tym temacie postaramy się odpowiedzieć na to pytanie.**

Według kwantowego modelu światła rozchodzenie się światła polega na przemieszczaniu się fotonów. Foton jest cząstką, która nie posiada masy spoczynkowej oraz ładunku elektrycznego. Foton to cząstka niosąca energię o wartości  $E_f = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ . Oprócz energii foton posiada również pęd. Opisując zderzenie fotonu z innymi cząstkami możemy stosować model podobny do modelu używanego podczas opisu zderzenia kul bilardowych. W modelu tym spełniona jest zasada zachowania pędu.

Pomiędzy energią niesioną przez foton a jego pędem istnieje zależność:

$$E_f = c \cdot p_f$$

gdzie:  $p_f$  – wartość pędu fotonu,  $c$  – wartość prędkości światła.

**Wartość pędu**  $p_f$  fotonu promieniowania o długości fali  $\lambda$  można obliczyć ze wzoru

$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

gdzie:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  – stała Plancka,

$\lambda$  – długość fali promieniowania,

Pojęcie fotonu do fizyki wprowadził niemiecki fizyk Max Planck. Uczynił to aby wyjaśnić mechanizm emisji promieniowania przez rozgrzane ciała. Promieniowanie cieplne jest to promieniowanie elektromagnetyczne emitowane przez wszystkie ciała, wywołane ruchami cieplnymi atomów wewnątrz ciała.

Wróćmy do postawionego na początku rozdziału pytania o naturę światła. Czym jest światło? Zjawiska interferencji oraz polaryzacji świadczą o tym, że światło jest falą, ale zjawisko fotoelektryczne można wyjaśnić tylko przyjmując, że światło to strumień fotonów – cząstek niosących energię. Na początku XX wieku duński fizyk Niels Bohr sformułował zasadę komplementarności, w myśl której oba modele światła uzupełniają się wzajemnie. Bowiem światło nie jest wyłącznie falą bądź wyłącznie strumieniem cząstek. Istnieją doświadczenia potwierdzające falową naturę światła, ale w tych samych doświadczeniach nie można wykryć fotonów. I odwrotnie – istnieją doświadczenia potwierdzające to, że światło to strumień fotonów, ale w tych samych doświadczeniach nie można potwierdzić falowej natury światła.

**Podsumowanie**

Foton to cząstka niosąca energię o wartości  $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ .

Wartość pędu  $p_f$  fotonu promieniowania o długości fali  $\lambda$  można obliczyć ze wzoru

$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

## Temat 6

### Zjawisko fotoelektryczne

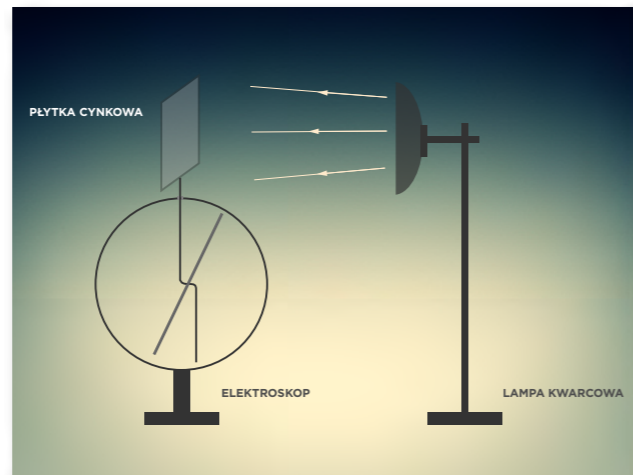
#### Wstęp

**Intuicja oraz wiedza nabyta do tej pory podpowiada nam, że światło jest falą. Podczas realizacji bieżącego tematu przekonacie się, że falowy opis światła jest niekompletny. Opiszemy doświadczenia, których wyników nie można wyjaśnić dzięki teorii falowej światła. W przyrodzie istnieją zjawiska, które można zrozumieć tylko przy założeniu, że światło jest strumieniem kwantów promieniowania – fotonów. Omówimy również praktyczne zastosowanie zjawiska fotoelektrycznego. Nawet tak prozaiczna czynność, jak zmiana kanału w telewizorze za pomocą pilota odbywa się bowiem z wykorzystaniem kwantowej natury światła.**

Pod koniec XIX wieku fizycy znali teorię Jamesa Clerka Maxwella fal elektromagnetycznych, w myśl której światło jest falą. Poznano i opisano matematyczne modele zjawisk dyfrakcji i interferencji. W roku 1887 Heinrich Hertz, przy okazji badań nad falami elektromagnetycznymi, odkrył zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne. Zjawisko to polega na emisji elektronów z powierzchni metalowej płytki w wyniku jej oświetlenia. Spróbujmy wykonać proste doświadczenia związane z tym zjawiskiem.

#### Doświadczenie 1

Do przeprowadzenia tego doświadczenia potrzebne będą: lampa kwarcowa (źródło światła widzialnego oraz ultrafioletowego), elektroskop z płytą cynkową oraz pałeczki szklana i ebonitowa do elektryzowania elektroskopu. Na rysunku 2.29 przedstawiono schemat układu doświadczalnego. Na elektroskopie mocujemy płytę cynkową. Przygotowujemy lampę kwarcową, za pomocą której oświetlimy płytę.



Rys. 2.29. Schemat układu doświadczalnego do badania zjawiska fotoelektrycznego.

#### Przebieg doświadczenia:

1. Wskazówki elektroskopu oraz cynkową płytkę elektryzujemy ładunkiem ujemnym, następnie oświetlamy płytę.

Wynik: Po oświetleniu płytki wskazówki elektroskopu opadają. Oznacza to, że w wyniku oświetlenia elektrony opuszczają cynkową płytę.

2. Wskazówki elektroskopu oraz cynkową płytkę elektryzujemy ładunkiem dodatnim, następnie oświetlamy płytę.

Wynik: Po oświetleniu płytki wskazówki elektroskopu nie opadają. Za pomocą światła nie można zubożyć dodatnio naładowanego elektroskopu.

#### Wnioski z doświadczenia:

Skoro naładowany dodatnio elektroskop pod wpływem oświetlenia płytki nie rozładowuje się, a naładowany ujemnie elektroskop pod wpływem oświetlenia płytki rozładowuje się to oznacza, że światło wybija z powierzchni metalowej płytki elektrony.

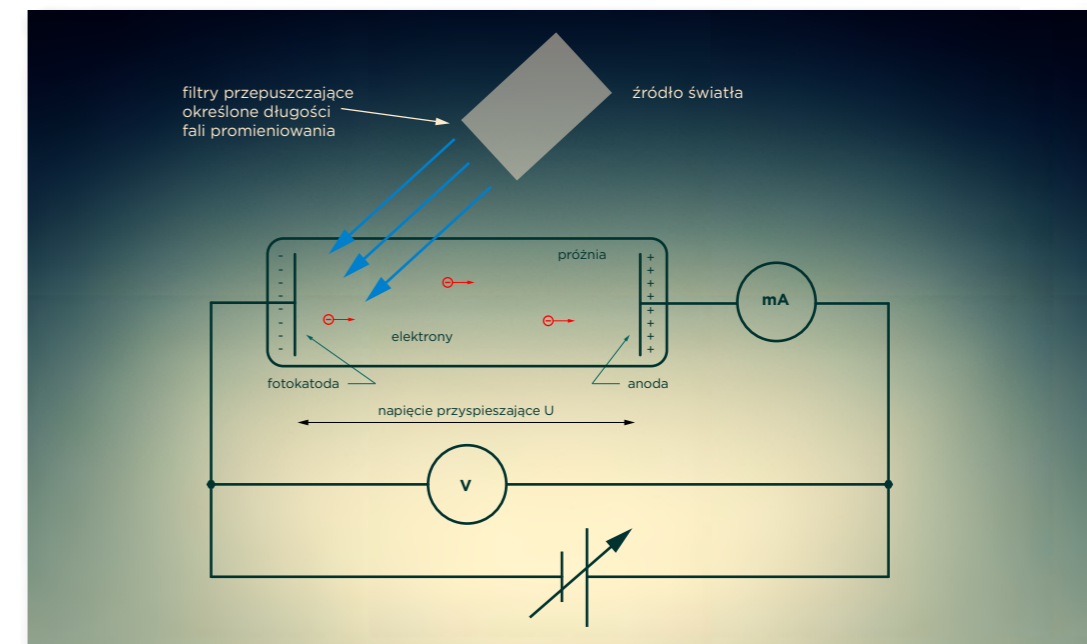
#### Definicja:

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalowej płytki.

#### Prawa zjawiska fotoelektrycznego

Nasze doświadczenie było tylko próbą jakościowego dotarcia do sedna tego zjawiska. Na początku XX wieku dokonano pierwszego dokładnego zbadania praw zjawiska fotoelektrycznego. W doświadczeniu użyto bańki, z której wypompowano powietrze (rys. 2.30). Została ona wykonana z materiału przepuszczającego te długości fal promieniowania, które emitowało źródło. We wnętrzu bańki umieszczono dwie elektrody. Do elektrod podłączono źródło prądu stałego. Wartość napięcia między elektrodami można regulować. Można również zmieniać znaki ładunków na poszczególnych elektrodach w taki sposób, że najpierw między elektrodami panowało napięcie przyspieszające, a następnie hamujące. Za pomocą mikroamperomierza mierzono natężenie prądu płynącego między elektrodami w bańce. Jest ono proporcjonalne do ilości elektronów wybitych z fotokatody. Za pomocą woltomierza mierzono wartość napięcia między elektrodami.

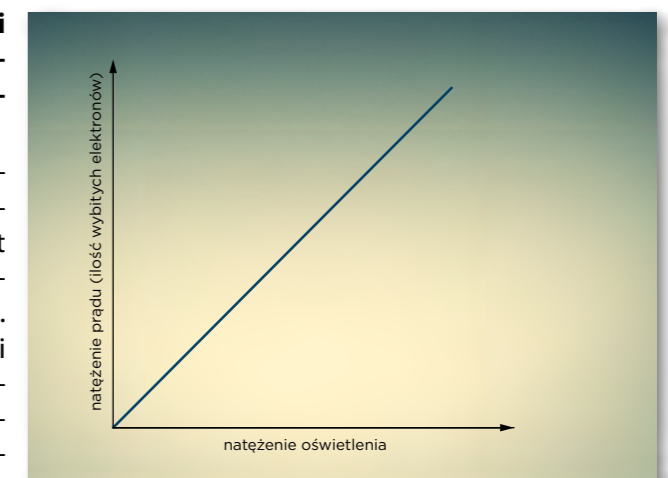
Na podstawie wyników wielu doświadczeń możliwe było sformułowanie następujących wniosków.



Rys. 2.30. Schemat układu doświadczalnego do badania zjawiska fotoelektrycznego.

#### 1. Liczba wybitych elektronów z powierzchni metalowej płytki jest proporcjonalna do natężenia padającego na tę płytkę promieniowania.

Nie zmieniało się napięcie panujące między elektrodami. Na płytkę padało promieniowanie o niezmienniej częstotliwości. Zmieniano natomiast natężenie tego promieniowania. Mierzono natężenie prądu płynącego między elektrodami. Natężenie prądu płynącego między elektrodami wewnątrz bańki jest proporcjonalne do ilości wybitych z powierzchni płytki elektronów. Zależność między natężeniem promieniowania a natężeniem prądu przedstawia wykres (rys. 2.31).



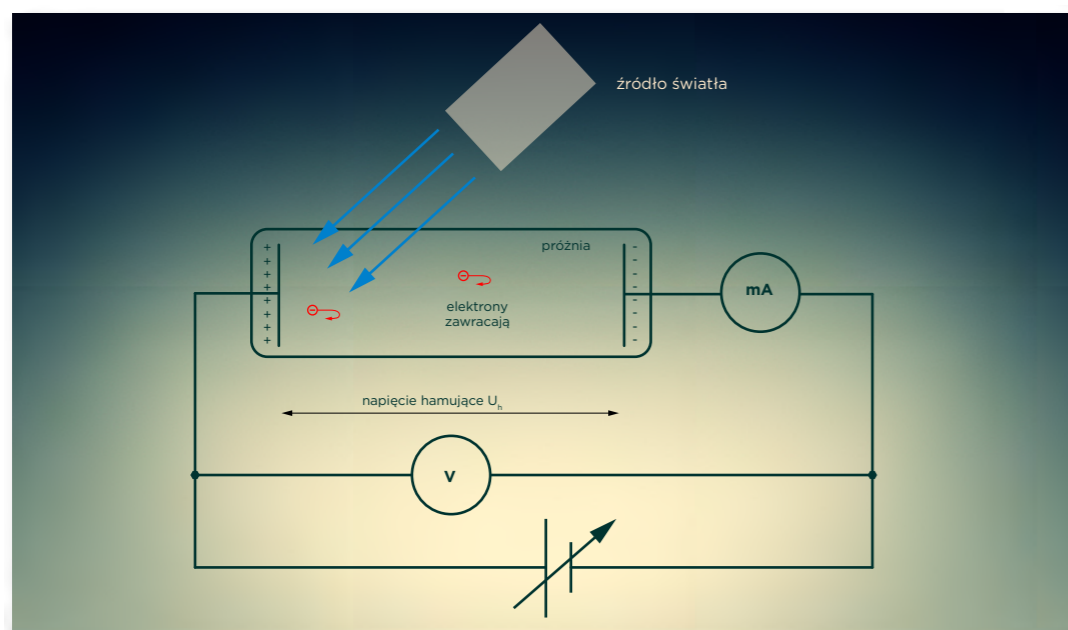
Rys. 2.31. Ilość elektronów wybitych z powierzchni metalu jest proporcjonalna do natężenia oświetlenia.

#### 2. Nie występuje opóźnienie w czasie między rozpoczęciem naświetlania a emisją elektronów.

Fizycy badający zjawisko fotoelektryczne spodziewali się, że elektrony będą potrzebowały pewnego czasu na zgromadzenie energii potrzebnej do wyrwania się z powierzchni metalowej płytki. Tymczasem okazało się, że elektrony są z niej wybijane bezpośrednio po oświetleniu płytki promieniowaniem o odpowiedniej długości fali.

**3. Energia kinetyczna wybitego z powierzchni metalu elektronu zależy od częstotliwości padającego promieniowania, a nie zależy od natężenia oświetlenia.**

Na metalową płytkę padało promieniowanie, które powodowało wybijanie z niej elektronów. Najpierw stwierdzono, że gdy napięcie źródła jest równe zero, to zjawisko też zachodzi. Oznacza to, że wybite elektrony mają pewną energię kinetyczną pozwalającą na poruszanie się między elektrodami. Gdy przykładano napięcie przyspieszające, to w pewnym momencie wszystkie elektrony wybite z powierzchni płytki docierały do anody. Następnie przykładano coraz większe napięcie hamujące (rys. 2.32.). Elektrony wybite z powierzchni płytki były coraz bardziej spowalniane. Przypomina to trochę sytuację, w której na drodze toczącej się piłki stawiamy coraz wyższe równie pochyłe. Przy pewnej wysokości tej górki piłka nie może wtoczyć się na jej szczyt. Również dla elektronów istnieje pewne napięcie hamowania



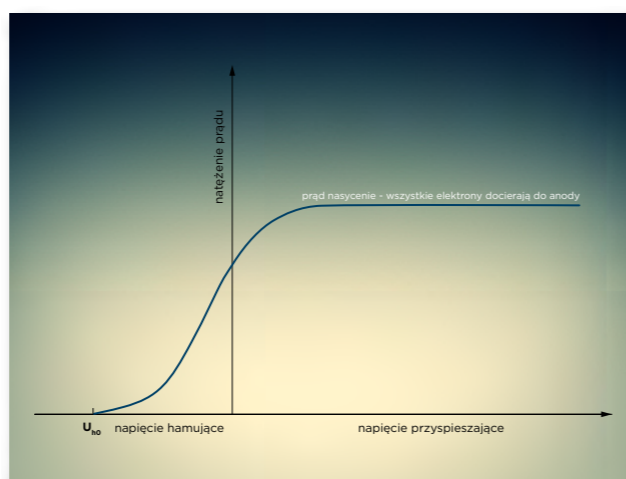
Rys. 2.32. Przy wystarczająco wysokim napięciu hamującym elektrony wybite z powierzchni metalu wracają do fotokatody.

$U_{h0}$ , przy którym wszystkie elektrony zostają cofnięte do płytki (rys. 2.33.). Maksymalna energia kinetyczna wybitego z płytki elektronu ma wówczas wartość:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = e \cdot U_{h0}$$

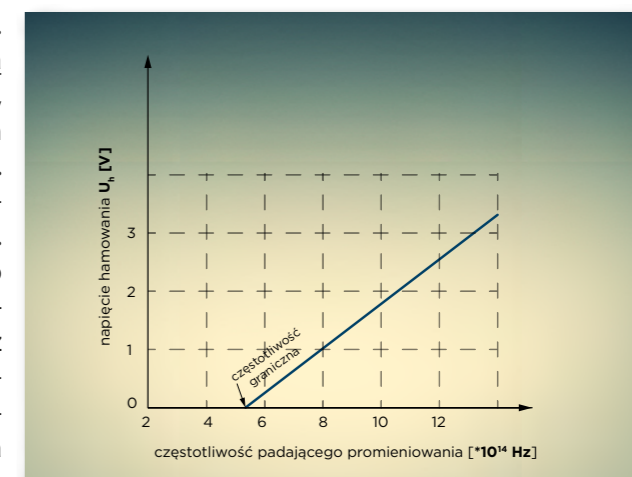
gdzie:  $e$  – ładunek elektronu

Jeśli wartość napięcia hamowania  $U_{h0}$  jest znana, można wyznaczyć maksymalną wartość energii kinetycznej elektronów opuszczających powierzchnię metalu. W wyniku dokładnych pomiarów okazało się, że wartość tej energii nie zależy od natężenia oświetlenia, ale od częstotliwości padającego promieniowania. Wynik ten jest trudny



Rys. 2.33. Zależność natężenia prądu płynącego między elektrodami od przyłożonego napięcia.

do wyjaśnienia na podstawie falowej teorii światła. Powinno bowiem być tak, że gdy na metalową płytkę będzie padać fala elektromagnetyczna, to elektron powinien przejmować od tej fali tym większą energię, im większa jest amplituda tej fali. Czyli energia wybitego elektronu powinna zależeć od natężenia padającego promieniowania. Ale nic takiego nie zaobserwowano. Zauważono natomiast, że dla danej częstotliwości promieniowania bardzo intensywna wiązka oświetlenia oraz bardzo słaba wiązka oświetlenia przekazują poszczególnym elektronom taką samą energię kinetyczną. Zauważono również, że gdy zwiększa się częstotliwość (maleje długość fali) padającego promieniowania, do całkowitego zatrzymania elektronów potrzebne jest coraz większe napięcie hamujące. Oznacza to, że energia kinetyczna wybitych elektronów zależy od częstotliwości promieniowania padającego na powierzchnię metalu (rys. 2.34.).



Rys. 2.34. Zależność napięcia hamowania od częstotliwości promieniowania padającego na powierzchnię płytki sodowej.

**4. Dla każdego metalu istnieje pewna graniczna częstotliwość promieniowania, poniżej której zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi.**

W toku dalszych badań zmieniano częstotliwość padającego promieniowania oraz wartość napięcia hamującego. Na rysunku 2.6. przedstawiono wyniki uzyskane przez Roberta Millikana w 1916 roku. Bez względu na intensywność padającego promieniowania, gdy częstotliwość tego promieniowania będzie zbyt mała, to zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi. Stwierdzono również, że każdy metal ma charakterystyczną częstotliwość graniczną (maksymalną długość fali). W tabeli 1 przedstawiono wartości długofalowej granicy zjawiska fotoelektrycznego dla poszczególnych metali.

Tab. 1. Długofalowe granice zjawiska fotoelektrycznego dla poszczególnych metali

metal	cez (Cs)	potas (K)	wapń (Ca)	cynk (Zn)	magnez (Mg)	wolfram (W)	srebro (Ag)
częstotliwość graniczna promieniowania $\nu [ \cdot 10^{14} \text{ Hz} ]$	4,53	5,45	7,79	8,11	8,96	11,1	11,5
długość fali $\lambda_{gr} [ \text{nm} ]$	662	550	385	370	335	270	261
	światło widzialne			ultrafiolet			

Na początku XX wieku uczeni mieli poważne problemy z wyjaśnieniem istoty zjawiska fotoelektrycznego. Nie można było wyjaśnić tego zjawiska korzystając z teorii falowej światła. Bo jeżeli światło jest wyłącznie falą, to energia niesiona przez falę świetlną powinna zależeć od natężenia światła. Czyli powinno rejestrować się wzrost energii kinetycznej wybitych z powierzchni metalowej płytki elektronów gdy zwiększa się natężenie światła padającego na płytkę. A doświadczalnie stwierdzono, że energia wybitych elektronów zależy od częstotliwości padającego promieniowania a nie od jego natężenia.

Naukowcem, który wyjaśnił mechanizm zjawiska fotoelektrycznego był Albert Einstein. Wykorzystał przy tym ideę Maxa Plancka. Max Planck w pracy na temat promieniowania ciał przedstawił hipotezę, w myśl której ciała emitują promieniowanie w postaci kwantów o energii proporcjonalnej do częstotliwości tego promieniowania. Kwanty promieniowania (nazywane fotonami) przenoszą energię, której wartość można obliczyć ze wzorów:

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

gdzie:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  – stała Plancka,

$\nu$  – częstotliwość promieniowania,

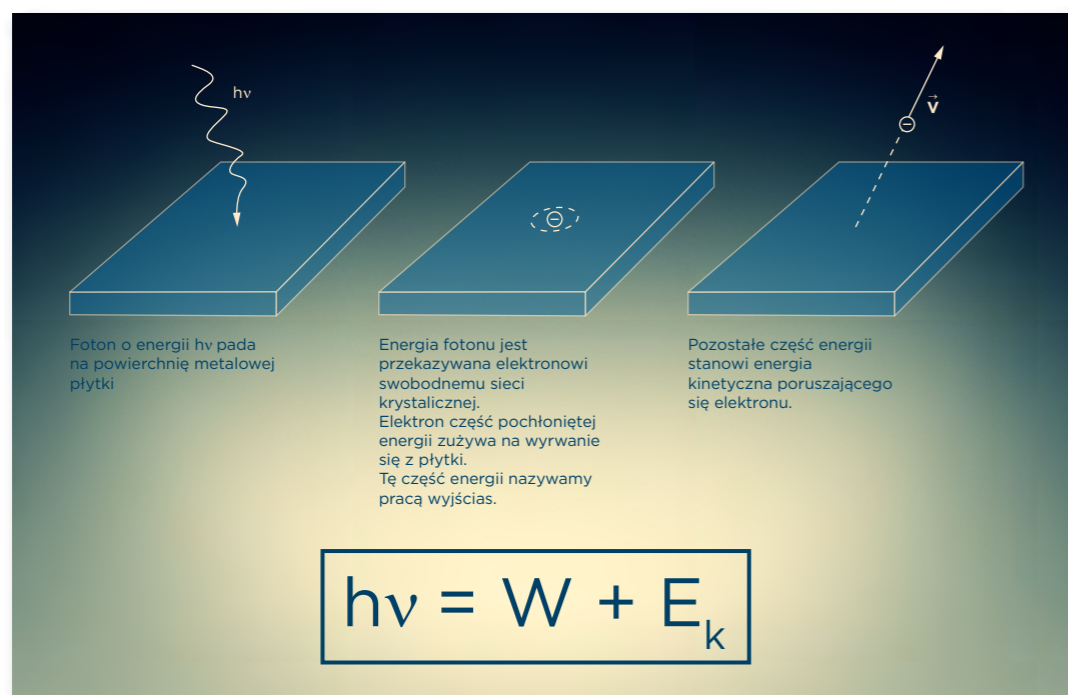
$\lambda$  – długość fali,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  – prędkość światła.

Albert Einstein zaproponował następujący model zjawiska fotoelektrycznego: fotony o energii  $E_f = h \cdot \nu$  padają na powierzchnię metalowej płytki. Niektóre z nich trafiają na swobodne elektrony znajdujące się w sieci krystalicznej metalu. Elektrony przejmują energię fotonów. Część z tej energii elektrony zużywają na wyrwanie się z płytki. Energia ta jest nazywana **pracą wyjścia W**. Pozostała część energii przekazana elektronowi przez foton stanowi energię kinetyczną elektronu wybitego z płytki. Rozumowanie to można zapisać za pomocą równania:

$$h \cdot \nu = W + E_k$$

Wyrażenie to nosi nazwę równania Einsteina-Millikana. Równanie to można przedstawić za pomocą następującej grafiki (rys. 2.35).



Rys. 2.035. Schemat przebiegu zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego.

Sprawdźmy, czy model zjawiska fotoelektrycznego zaproponowany przez A. Einsteina radzi sobie z empirycznymi (tzn. wynikającymi bezpośrednio z doświadczenia) prawami tego zjawiska.

Pierwsze prawo: Im większe jest natężenie oświetlenia, tym więcej fotonów pada na płytkę, tym częściej trafiają one w elektrony, tym więcej elektronów zostaje wybitych z powierzchni metalu.

Drugie prawo: Bezpośrednio po trafieniu fotonu w elektron, przejmuje on całą energię fotonu i może wyrwać się z powierzchni metalu.

Trzecie prawo: Energia kinetyczna wybitego z powierzchni płytki elektronu jest tym większa im większa jest energia padającego fotonu (czyli częstotliwość promieniowania). Co można zapisać za pomocą równania:  $E_k = h \cdot \nu - W$ . Dla danego metalu praca wyjścia  $W$  jest stała.

Czwarte prawo: Jeżeli energia padającego na powierzchnię metalu fotonu jest mniejsza od pracy wyjścia, to elektron, który otrzymał energię od fotonu, nie może wydostać się z powierzchni metalu.

W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości pracy wyjścia elektronów z danego metalu.

Tab. 2. Wartości pracy wyjścia elektronów z powierzchni metalu

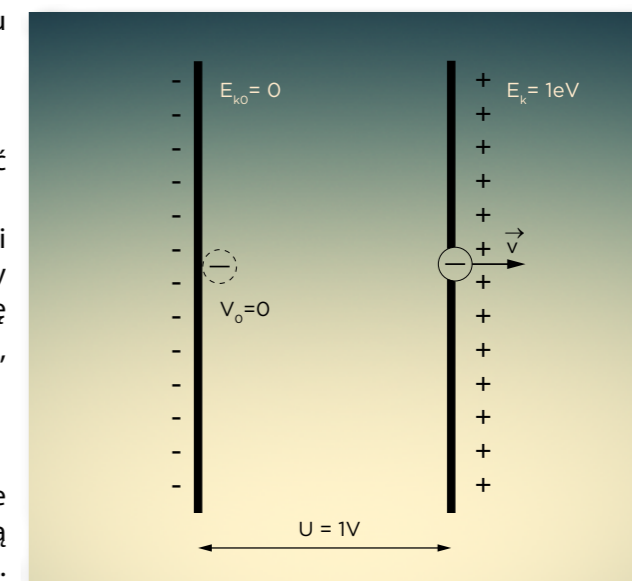
metal	cez (Cs)	potas (K)	wapń (Ca)	cynk (Zn)	magnez (Mg)	wolfram (W)	srebro (Ag)
W [eV]	1,88	2,26	3,22	3,36	3,71	4,60	4,76

Pracę wyjścia elektronów z powierzchni metalu podano w elektronowoltach.

$$1eV = 1V \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} C = 1,6 \cdot 10^{-19} J$$

Jest to jednostka energii, którą będziemy używać do opisu własności atomów i jąder atomowych.

Pole elektryczne przyspiesza naładowane cząstki (rys. 2.36.). Gdy pole elektryczne, w którym między końcami panuje napięcie 1 V, przyspieszy cząstkę o ładunku elementarnym ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ ), to energia cząstki będzie miała wartość 1 eV.



Rys. 2.36. Schemat ilustrujący definicję elektronowolta (1 eV).

**Przykład 1**

Na powierzchnię wolframu pada promieniowanie o długości fali 200 nm. Oblicz energię kinetyczną elektronu wybitego z powierzchni wolframu. Praca wyjścia elektronu z wolframu wynosi 4,6 eV.

**Rozwiązanie:**

Zgodnie z równaniem opisującym bilans energetyczny zjawiska fotoelektrycznego, mamy:

$$E_f = W + E_k$$

Obliczymy najpierw wartość energii niesionej przez foton ze wzoru:  $E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Podstawiając dane do tego wzoru, otrzymujemy:

$$E_f = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{200 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 9,95 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 6,22 \text{ eV}$$

Szukaną wartość energii kinetycznej elektronu obliczymy ze wzoru:

$$E_k = E_f - W = 6,22 \text{ eV} - 4,6 \text{ eV} = 1,62 \text{ eV}$$

Odpowiedź: Elektron wybity z powierzchni wolframu ma energię kinetyczną 1,62 eV, czyli  $2,59 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne**

W życiu codziennym zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne ma ograniczone zastosowanie. Urządzenia fotoczułe wykorzystują efekt fotoelektryczny zachodzący w materiałach półprzewodnikowych. Ze względu na własności elektryczne ciała stałe można podzielić na trzy grupy – przewodniki, półprzewodniki oraz izolatory. Wewnątrz struktury krystalicznej **przewodników** znajdują się swobodne elektrony. Pod wpływem napięcia przyłożonego na jego końcach, elektrony te przemieszczają się wzdłuż przewodnika, tworząc prąd

elektryczny. **Izolatory** nie mają swobodnych elektronów, a do wyrwania elektronów z atomów potrzebna jest stosunkowo duża energia. Półprzewodniki to grupa materiałów, w których w wyniku naświetlenia mogą pojawić się nośniki ładunku. Tę właśnie cechę półprzewodników wykorzystuje się do konstruowania urządzeń światłoczułych. Dzięki zjawisku fotoelektrycznemu wewnętrznemu po skierowaniu strumienia fotonów na płytkę odpowiednio przygotowanego półprzewodnika, elektrony wewnątrz jego struktury stają się nośnikami prądu. Wymaga to dostarczenia do elektronu dużo mniejszej energii niż w przypadku zjawiska fotoelektrycznego zewnętrznego. Zmiana własności elektrycznych półprzewodników odbywa się pod wpływem fotonów o dużo mniejszej energii (nawet dla fotonów z pasma podczerwieni).



Rys. 2.37.

Na przykład piloty do telewizorów wysyłają strumień fotonów podczerwonych do czujnika w telewizorze. Padające na czujnik fotony powodują, że elektrony uwalniają się ze swoich atomów i mogą przenosić prąd elektryczny. Opis ten jest bardzo uproszczony i ma ukazać tylko podstawową ideę działania tego typu urządzeń. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne jest również podstawą działania ogniw słonecznych oraz matrycy cyfrowych aparatów fotograficznych i kamer wideo. Na rysunku 2.37. przedstawiono przykład wykorzystania ogniwa słonecznego do zasilania oświetlenia ulicznego.

**Podsumowanie:**

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu.

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że:

1. Liczba wybitych elektronów z powierzchni metalowej płytki jest proporcjonalna do natężenia promieniowania padającego na tę płytkę.
2. Nie występuje opóźnienie w czasie między rozpoczęciem naświetlania a emisją elektronów.
3. Energia kinetyczna wybitego z powierzchni metalu elektronu zależy od częstotliwości padającego promieniowania, a nie zależy od natężenia oświetlenia.
4. Dla każdego metalu istnieje pewna graniczna częstotliwość promieniowania, poniżej której zjawisko fotoelektryczne dla tego metalu nie zachodzi.

Światło można traktować jako strumień fotonów o energii:  $E_f = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

Bilans energetyczny zjawiska fotoelektrycznego przedstawia równanie Einsteina-Millikana:

$$h \cdot \nu = W + E_k$$

**W Internecie**

<http://phet.colorado.edu> – strona, na której można znaleźć wiele symulacji zjawisk fizycznych w tym symulacja zjawiska fotoelektrycznego.

<http://rcl.physik.uni-kl.de> – portal zdalnie sterowanych eksperymentów, w którym można samodzielnie przeprowadzić badanie zjawiska fotoelektrycznego.

**Temat 7**

**Promieniowanie rentgenowskie**

**Wstęp**

Pod koniec XIX wieku odkryto promieniowanie, którego własności były niezwykle: między innymi przechodziło przez różne substancje nieprzezroczyste dla światła w tym cienkie metalowe blaszki, wywoływało świecenie różnych substancji, zaczerniało kliszę fotograficzną. Dzisiaj używamy promieniowania rentgenowskiego na przykład w diagnostyce medycznej oraz w nieniszczących badaniach różnych materiałów, w tym połączeń spawanych.

Znamy dokładną datę odkrycia promieniowania rentgenowskiego. Wilhelm Conrad Roentgen zapisał, że w piątek 8 listopada 1895 roku odkrył nowe, bardzo przenikliwe promieniowanie. Za to odkrycie Roentgen został uhonorowany w roku 1901 pierwszą w historii nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki. Obecnie promieniowanie rentgenowskie (nazywane czasem promieniowaniem x) powstaje na przykład w wyniku bombardowania tarczy wykonanej z wolframu lub miedzi przez elektrony rozpędzone do olbrzymich prędkości. Energie kinetyczne tych elektronów są rzędu tysięcy elektronowoltów. Na rysunku 12.38. przedstawiono schemat lampy służącej do wytwarzania promieniowania rentgenowskiego. Pomiędzy katodę a anodę przyłożone jest wysokie napięcie. W zależności od rodzaju lampy napięcie to może wynosić od 50 tysięcy woltów do 100 tys. woltów. Pod wpływem tego napięcia elektrony przyspieszają do bardzo dużych prędkości. Początkowa energia potencjalna elektronów jest równa  $E_p = e \cdot U$ . Podczas poruszania się między elektrodami lampy energia potencjalna zamieniana jest w energię kinetyczną elektronów. Gdy elektrony dotrą do anody zostają gwałtownie hamowane. Energia kinetyczna rozpędzonych elektronów zostaje w tym momencie na energię promieniowania rentgenowskiego. Gdy cała energia kinetyczna zamienia się w energię promieniowania, to spełniona jest zależność:

$$e \cdot U = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

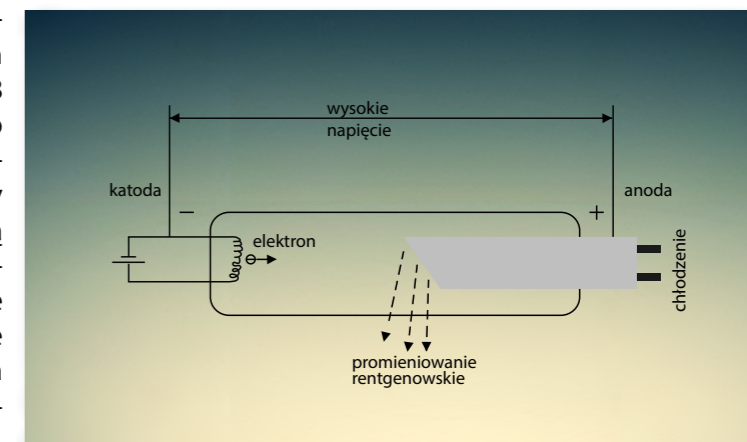
Stąd minimalna długość fali promieniowania rentgenowskiego:

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U}$$

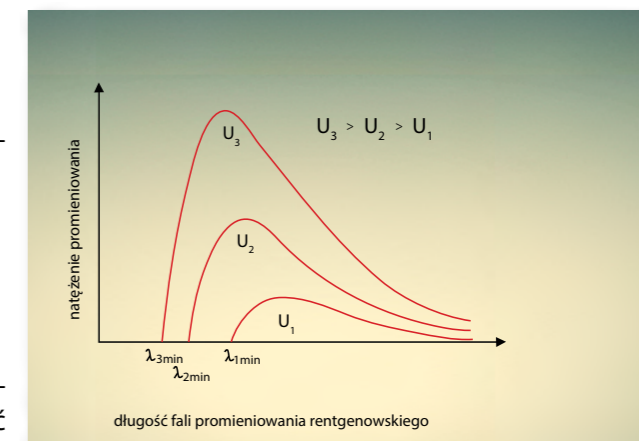
gdzie:  $e$  – ładunek elektronu,  
 $U$  – napięcie między katodą a anodą,

Gdy napięcie między elektrodami w lampie rentgenowskiej wynosi  $50 \cdot 10^3$  V, to minimalna długość fali promieniowania wynosi 24,9 pm, dla napięcia  $100 \cdot 10^3$  V długość ta wynosi 12,4 pm. Im napięcie między anodą a katodą jest większe, tym mniejsza jest długość fali emitowanego przez lampę promieniowania.

Na rysunku 12.30. przedstawiono zależność natężenia promieniowania rentgenowskiego w zależności od jego długości fali dla różnych napięć przyspieszających elektrony w lampie. To jest widmo ciągłe

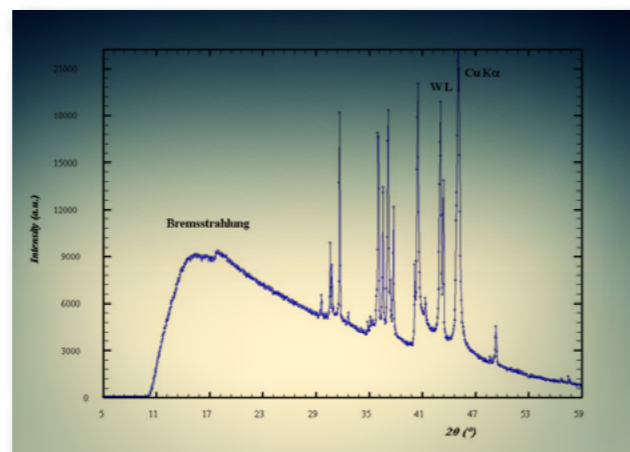


Rys. 12.38. Schemat lampy rentgenowskiej



Rys. 12.39. Widmo ciągłe promieniowania rentgenowskiego

tego promieniowania. Oprócz widma ciągłego można obserwować widma charakterystyczne dla danego pierwiastka. Widma charakterystyczne powstają gdy elektron z wewnętrznych powłok w danym atomie zostanie wybity przez elektron padający na materiał anody. Zapełniając powłokę wewnętrzną w atomie elektrony emitują wówczas promieniowanie, którego długość fali jest dana dla danego pierwiastka. Na rysunku 12.40. pokazano widmo ciągłe oraz widmo charakterystyczne dla anody zawierającej miedź.



Rys. 12.40. Widmo promieniowania rentgenowskiego dla anody zawierającej miedź.

Ale niecała energia, którą przenoszą elektrony między elektrodami lampy jest zamieniana na promieniowanie rentgenowskie. Część z tej energii powoduje mocne nagrzewanie się anody. Z tego powodu anody lamp rentgenowskich wymagają one intensywnego chłodzenia.

Promieniowanie rentgenowskie to fale elektromagnetyczne o długościach fal leżących w zakresie od kilku pikometrów do kilku nanometrów. Promieniowanie to rozchodząc się w powietrzu jonizuje je, zacinia kliszę fotograficzną. Przechodząc przez materię jest pochłaniane oraz rozpraszane. Stopień pochłaniania promieniowania rentgenowskiego przez materię zależy od liczby atomowej pierwiastka, na który ono pada. Im liczba atomowa pierwiastka jest większa, tym pochłanianie promieniowania rentgenowskiego jest silniejsze. Ten fakt został wykorzystany w diagnostyce medycznej. Różne tkanki ludzkiego ciała zbudowane są z różnych pierwiastków. Kości zawierają większą ilość pierwiastków o większej liczbie atomowej niż mięśnie. Będą zatem silniej pochłaniać promieniowanie rentgenowskie niż tkanki miękkie. Gdy ustawimy człowieka pomiędzy lampą rentgenowską a kliszą fotograficzną (obecnie klisza fotograficzna jest często zastąpiona detektorami elektronicznymi spełniającymi te same zadania co klisza) to na fotografii można zauważyć obszary o różnym stopniu szarości (rys. 12.41.). Jaśniejsze miejsca to kości, a ciemniejsze to mięśnie. Doświadczony lekarz potrafi z takiej fotografii wyczytać zmiany chorobowe. Również tomografia komputerowa nie mogłaby istnieć bez lamp rentgenowskich. Różnica między zwykłą fotografią rentgenowską a tomografią komputerową polega na tym, że w trakcie jednego badania wykonuje się szereg fotografii pacjenta z różnych stron, na podstawie których powstaje przestrzenny obraz wnętrza jego organizmu. Promieniowanie rentgenowskie wykorzystywane jest również w nieniszczących badaniach materiałów w przemyśle, do prześwietlania bagaży na przejściach granicznych, wykrywania obcych ciał w paczkowanych produktach spożywczych, itp.



Rys. 12.41. Fotografia ludzkiej dłoni wykonana za pomocą lampy rentgenowskiej.

**Podsumowanie**

Promieniowanie rentgenowskie to fale elektromagnetyczne o długościach fal leżących w zakresie od kilku pikometrów do kilku nanometrów. Jest stosowane w diagnostyce medycznej, przemyśle, do prześwietlania towarów podczas transportu.

**Temat 8**

**Fale materii**

**Wstęp**

**Jeśli do opisu światła możemy stosować dwa różne modele, to może podobnie jest z cząstkami. Może elektron to nie wyłącznie cząstka posiadająca masę i ładunek. Może elektron, jako cząstka materii, też wykazuje cechy fali. Postaramy się wyjaśnić tę zagadkę.**

Jeśli okazało się, że światło to również strumień cząstek, to może cząstkom, z których zbudowana jest materia można przypisać własności falowe. Hipotezę, że cząstki mają również naturę falową wysunął w roku 1924 francuski fizyk Louis de Broglie. Jak pamiętamy, istnieją doświadczenia, które można wyjaśnić stosując teorię falową światła, a inne doświadczenia można wyjaśnić stosując kwantową teorię światła. Podobnie jest z cząstkami materii jakimi są elektrony. Istnieją doświadczenia, w których musimy traktować elektrony jako cząstki materii (posiadającymi masę spoczynkową oraz ładunek elektryczny), ale są również doświadczenia, w których elektrony zachowują się w taki sam sposób jak fale. Według hipotezy de Broglie'a, z każdą poruszającą się cząstką związana jest fala. Falę tę nazywamy falą materii i nie jest to fala elektromagnetyczna. Pomiędzy pędem a długością fali materii związanej z poruszającą się cząstką istnieje zależność:

$$p_{cz} = \frac{h}{\lambda_m}$$

stąd:

$$\lambda_m = \frac{h}{p_{cz}}$$

gdzie  $\lambda_m$  – długość fali związanej z poruszającą się cząstką.

Z powyższego wzoru można obliczyć długości fal materii związanych z poruszającymi się rzeczywistymi obiektami. Na przykład z elektronem o energii kinetycznej 1000 eV związana jest fala materii o długości 0,04 nm (około 1000 razy krótsza od długości fali światła fioletowego). Natomiast z piłką tenisową o masie 58 g poruszającą się z prędkością o wartości  $50 \frac{m}{s}$  związana jest fala materii o długości około  $2.3 \cdot 10^{-34}$  m. Rozmiary jądra atomowego są rzędu  $10^{-14}$  m. Oczywiście jest, że nie można wykryć własności falowych piłek tenisowych, a można spróbować wykryć własności falowe elektronów.

Hipotezę de Broglie'a potwierdziło doświadczalnie w roku 1927 dwóch amerykańskich fizyków: Clinton Davisson i Lester Germer. Odkryli oni doświadczalnie dyfrakcję elektronów na kryształie glinu. Podobny eksperyment można przeprowadzić samodzielnie dzięki portalowi zdalnie sterowanych eksperymentów. Adres internetowy tego portalu: <http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de>

Na rysunku 12.42. przedstawiono zrzut ekranu z doświadczeniem nad dyfrakcją elektronów. Jak widać na fotografii elektrony przechodząc przez warstwę grafitu na ekranie powstaje obraz podobny do obrazu



Rys. 12.42. Zrzut ekranu portalu z doświadczalnym badaniem dyfrakcji elektronów.



uzyskanego w przypadku przejścia światła przez wąską szczelinę. Obraz ten świadczy o falowych własnościach elektronów.

W praktyce falowe własności elektronów zastosowano do budowy mikroskopów elektronowych. Bardzo ważnym parametrem każdego mikroskopu jest jego zdolność rozdzielcza. Czyli możliwość odróżnienia dwóch punktów jako oddzielnych obiektów. W przypadku mikroskopów optycznych jest ona rzędu 400 nm, natomiast w przypadku mikroskopów elektronowych wykorzystujących elektrony rozpędzone napięciem 50 kV jest ona rzędu 0,2 nm. Czyli za pomocą mikroskopów elektronowych możemy dostrzec obiekty ponad 2000 razy mniejsze.

### Podsumowanie

Z poruszającą się cząstką materialną związana jest fala materii, zwana falą de Broglie'a.

**Długość fali materii** stowarzyszonej z ruchem cząstki materialnej o pędzie  $p_{cz}$  obliczyć można ze wzoru:

$$\lambda_m = \frac{h}{p_{cz}}$$

Falowe własności cząstek wykorzystuje się między innymi do budowy mikroskopów elektronowych.

### W Internecie

Adres internetowy portalu z doświadczeniem z dyfrakcją elektronów:

<http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/>

## Temat 9

### Model budowy atomu

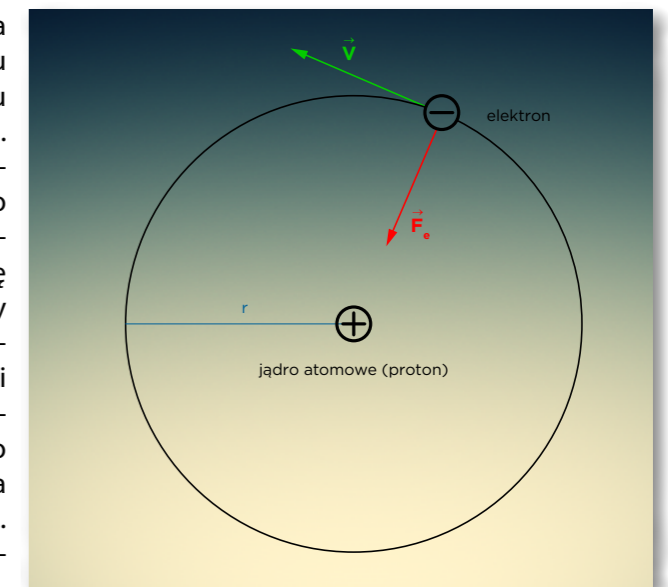
#### Wstęp

**Dlaczego atomy emitują promieniowanie tylko o określonej długości fali? Dlaczego długości fal emitowanych przez poszczególne atomy różnią się od siebie? Postaramy się odpowiedzieć na te pytania i wyjaśnimy, jaki jest związek emisji promieniowania przez atomy z zasadą zachowania energii.**

Autorem pomysłu wyjaśnienia mechanizmu emisji promieniowania przez atomy wodoru był duński fizyk Niels Bohr. Do budowy modelu atomu wodoru wykorzystał następujące fakty:

- emisja promieniowania następuje na określonych długościach fal – wzory spektroskopowe,
- energia promieniowania przenoszona jest za pomocą fotonów – teoria Maxa Plancka,
- w środku atomu jest masywne, dodatnie jądro – doświadczenie Rutherforda (o tym doświadczeniu więcej w następnym temacie).

Według teorii Bohra ruch elektronu wokół jądra odbywa się w sposób nieco podobny do ruchu planet wokół Słońca. Podobnie jak w przypadku ruchu planet na elektron działa siła dośrodkowa. W atomie rolę siły dośrodkowej pełni siła przyciągania elektrycznego (rys. 2.43.). Korzystając z tego modelu można wyznaczyć energię elektronu krążącego wokół jądra. Jednak problem pojawia się wtedy, gdy za pomocą takiego modelu chcemy wyjaśnić zjawiska absorpcji oraz emisji promieniowania przez atomy. Zgodnie z prawami fizyki klasycznej powinny być możliwe orbity o dowolnych promieniach, a więc również ciągłe widmo promieniowania atomu. A obserwuje się widma składające się z pojedynczych linii widmowych. Elektron krążący wokół jądra to cząstka naładowana poruszająca się z pewnym przyspieszeniem. Zgodnie z prawami klasycznej elektrodynamiki elektron ten powinien w sposób ciągły emitować promieniowanie, tracić energię i spadać na jądro. A nic takiego nie obserwujemy. Aby uniknąć kolizji zachowania się elektronów z prawami fizyki klasycznej Niels Bohr sformułował pewne założenia, które opisują odstępstwa od klasycznego zachowania się elektronów w atomie. To był ważny krok w zrozumieniu otaczającego nas świata. Okazało się bowiem, że prawa przyrody, które świetnie opisują zjawiska w makroświecie nie są wystarczające do opisu mikroświata. Należy stworzyć nową teorię, która będzie w stanie opisać zjawiska mikroświata.



Rys. 2.43. Schemat ruchu elektronu wokół jądra.

Postulaty Bohra budowy atomu wodoru:

#### Postulaty Bohra budowy atomu wodoru:

**1. Elektron w atomie wodoru krąży po orbitach kołowych pod wpływem sił przyciągania elektrycznego między jądrem a elektronem. Jednak dozwolone są tylko pewne orbity o dyskretnych (skwantowanych) wartościach energii  $E_n$ .**

Tak jak pokazano na rysunku 2.43. siła oddziaływania elektrycznego działająca na elektron jest siłą dośrodkową. Ruch elektronu jest zgodny z prawami fizyki klasycznej. Elektron krążący wokół jądra na orbicie stacjonarnej nie emituje ani nie pochłania energii.

**2. Atom emituje promieniowanie wtedy, gdy elektron przechodzi z orbity o wyższej energii na orbitę o energii niższej. Absorpcja (pochłanianie) promieniowania przez atom następuje wówczas, gdy elektron przechodzi z orbity o niższej energii na orbitę o energii wyższej.**

Potwierdzeniem słuszności tego postulatu są widma emisyjne oraz absorpcyjne atomów. Obserwujemy, że atomy emitują promieniowanie na poszczególnych długościach fal, czyli emitują porcje energii o określonych wartościach. Oznacza to, że struktura wewnętrzna atomu jest dyskretna, istnieją poziomy energetyczne o określonych wartościach.

Z modelu Bohra atomu wodoru wynika, że promień orbity stacjonarnej wynosi:

$$r_n = r_1 n^2$$

gdzie:  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

$r_1 = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$  – promień atomu wodoru w stanie podstawowym.

Najmniejsza wartości energii elektronu w atomie wodoru wynosi:

$$E_1 = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$$

Jest to energia stanu podstawowego. Aby zjonizować atom, czyli aby oderwać elektron od jądra, należy przekazać elektronowi energię o wartości co najmniej 13,6 eV. W atomie wodoru elektron może przyjmować tylko skwantowane wartości energii.

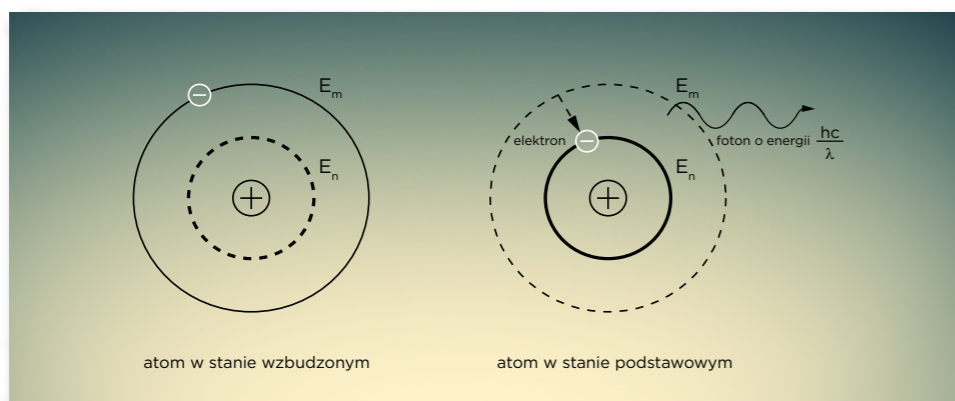
Wartości energii poziomów energetycznych opisuje wyrażenie:

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

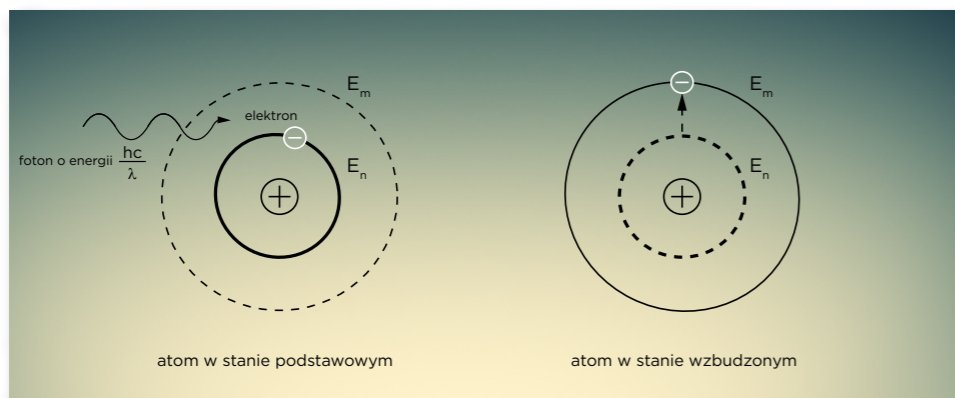
gdzie:  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  – główna liczba kwantowa.

Atom emituje promieniowanie, gdy elektron przeskakuje z wyższego poziomu energetycznego  $E_m$  na niższy  $E_n$  (rys. 2.44.). Na schemacie nie zachowano proporcji między wielkościami orbit oraz jądra atomowego.

Gdy elektron przechodzi z niższego poziomu energetycznego  $E_n$  na wyższy  $E_m$  to atom pochłania promieniowanie (rys. 2.45.).



Rys. 2.44. Schemat emisji promieniowania przez atom.



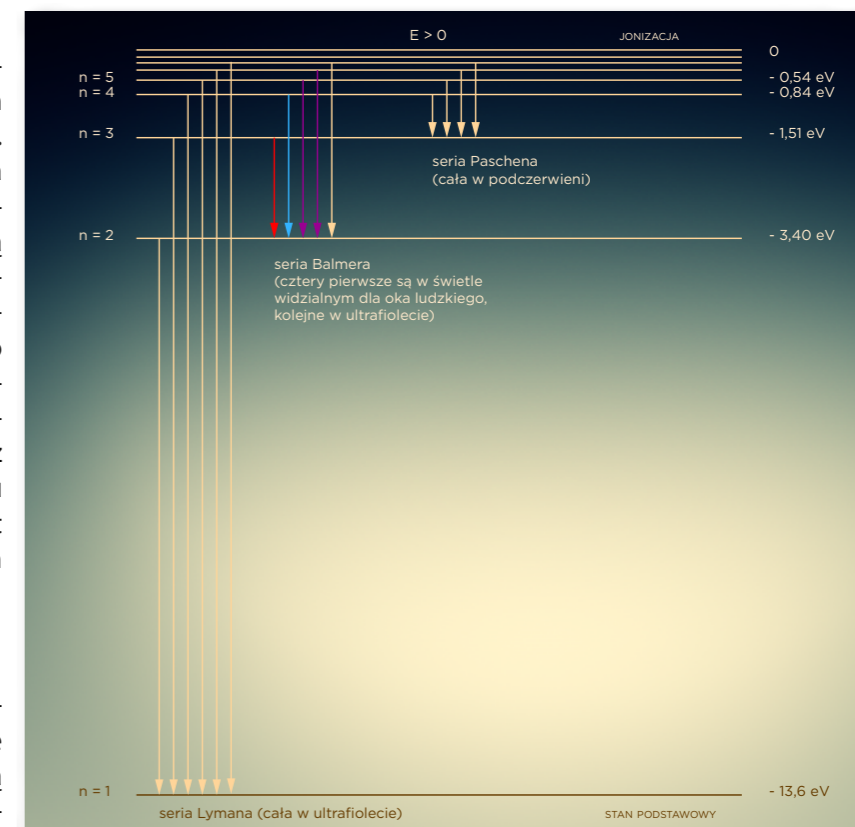
Rys. 2.42. Schemat absorpcji promieniowania przez atom.

Energję kwantu wyemitowanego promieniowania zapisujemy za pomocą wyrażenia:

$$\frac{hc}{\lambda} = E_m - E_n = 13,6 \text{ eV} \left( \frac{1}{n_n^2} - \frac{1}{n_m^2} \right)$$

gdzie:  $E_m > E_n$  i  $n_m > n_n$

W poprzednim temacie mówiliśmy o seriach widmowych odkrytych już w XIX wieku. Okazało się, że model Bohra doskonale opisuje linie widmowe otrzymane za pomocą doświadczeń. Wyrażenie opisujące energie kwantów promieniowania emitowanego przez atomy wodoru są podobne do wzorów spektroskopowych podanych przez Balmera i innych. Na rysunku 2.46. przedstawiono schemat poziomów energetycznych w atomie wodoru.



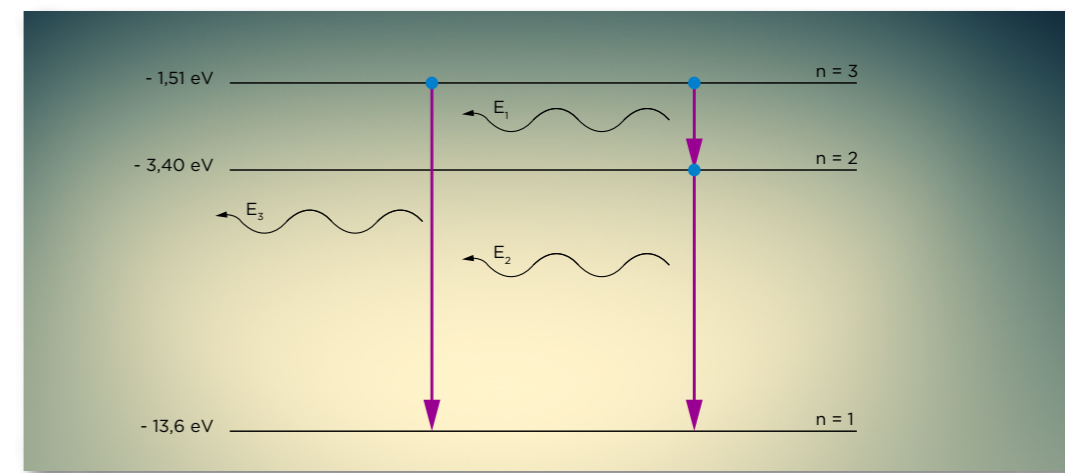
Rys. 2.46. Schemat poziomów energetycznych atomu wodoru.

**Przykład 2**

Atomy wodoru zostały wzbudzone tak, że znajdują się w stanie opisanym główną liczbą kwantową  $n = 3$ . Wyznacz, ile linii widmowych będzie można obserwować. Oblicz wartości energii wyemitowanych fotonów.

**Rozwiązanie:**

Na rysunku 2.47. przedstawiono schemat poziomów energetycznych w tym przypadku. Możliwe są następujące przejścia: z trzeciego poziomu energetycznego na drugi, z drugiego na pierwszy oraz z trzeciego na pierwszy.



Rys. 2.47. Schemat poziomów energetycznych.

Energia fotonu, który zostaje wyemitowany podczas przejścia z poziomu  $n = 3$  na poziom  $n = 2$ :

$$E_1 = -1,51eV - (-3,40eV) = 1,89eV$$

Energia fotonu, który zostaje wyemitowany podczas przejścia z poziomu  $n = 2$  na poziom  $n = 1$ :

$$E_2 = -3,4eV - (-13,6eV) = 10,2eV$$

Energia fotonu, który zostaje wyemitowany podczas przejścia z poziomu  $n = 3$  na poziom  $n = 1$ :

$$E_3 = -1,51eV - (-13,6eV) = 12,09eV$$

**Odpowiedź:** Będzie można obserwować trzy linie widmowe. Energie wyemitowanych fotonów wynoszą 1,89 eV, 10,2 eV, 12,09 eV.

Model Bohra nie jest doskonały, ale i tak jego twórca otrzymał za swoje prace Nagrodę Nobla. Między innymi za wskazanie, że należy szukać innego niż fizyka klasyczna modelu opisu zjawisk przebiegających na poziomie atomowym. Od czasów pierwszych prób zrozumienia struktury wewnętrznej atomów, w fizyce dokonał się znaczny postęp. Obecnie lepiej rozumiemy, w jaki sposób zbudowane są atomy. Ale wyjaśnienie zawichości mechaniki kwantowej przekracza poziom nauczania fizyki w zakresie podstawowym.

### **Podsumowanie:**

Emisja promieniowania przez atomy jest ściśle związana z ich wewnętrzną budową. Energie elektronów w atomach są skwantowane.

Emisja promieniowana następuje, gdy elektron przeskakuje z wyższego poziomu energetycznego  $E_m$  na niższy  $E_n$  ( $m > n$ ).

Najniższa wartość energii w atomie wodoru wynosi:  $E_n = -13,6eV$ .

Wartości pozostałych poziomów energetycznych obliczymy ze wzoru:

$$E_n = -13,6eV \cdot \frac{1}{n^2}$$

*Człowiek - najlepsza inwestycja*



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA  
WYŻSZA SZKOŁA  
INFORMATYKI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego