

Fizyka dla Informatyków
Wykład 11

Optyka

Romuald Kotowski

Katedra Informatyki Stosowanej

P J W S T K

2 0 0 9

Dzisiaj będziemy opowiadać?

o zjawiskach optycznych, a w szczególności o optyce geometrycznej!

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Wstęp

Jaka jest prawdziwa natura światła? Korpuskularna czy falowa?

	Fale	Kwanty
1	Interferencja	Fotoelektryczność
2	Dyfrakcja	Kolor
3	Refrakcja	

Czy to pytanie dotyczy fizyki?

Wstęp



Rys. 1: Christian Huygens (1629 - 1695)

Christian Huygens (1629 - 1695) – holenderski astronom i matematyk. Został zmuszony do opuszczenia Paryża na podstawie Edyktu Nantejskiego. Został zaproszony do Francji przez Colberta, a podczas swego pobytu we Francji odwiedzał Anglię i uzyskał tytuł Fellow of the Royal Society. Huygens dał podstawy falowej teorii światła i skonstruował zegar wahadłowy. Udoskonalił teleskop i odkrył prawdziwy kształt pierścieni Saturna. Prowadzone przez niego obserwacje astronomiczne zachęciły go do udoskonalenia pomiaru czasu.

http://www.maths.tcd.ie/pub/HistMath/People/Huygens/RouseBall/RB_Huygens.html

Wstęp

Edykt Nantejski, wydany w 1598 r. przez króla Francji Henryka IV Burbona, wprowadzał wolność wyznania i równouprawnienie protestantów wobec katolików. Mogli odtąd budować swe kościoły oraz szkoły, zamki, urzędy, szpitale czy uniwersytety. Hugonoci (francuscy kalwiniści) mieli swobodę kultu z wyłączeniem Paryża. Edykt zakończył wojny religijne na terenie Francji oraz uregulował sytuację hugonotów.

Edykt ten dawał hugonotom prawo do wolności politycznej oraz szereg twierdz (odebranych w roku 1528).

Ludwik XIV odwołał edykt w 1685 roku, co spowodowało załamanie protestantyzmu we Francji jako organizacji kościelnej i siły politycznej. Pełnię praw hugonotom przyznała dopiero rewolucja francuska w 1789 i Kodeks Napoleona.

Definicje

Jednostki wielkości optycznych

Kandela (cd): światłość, jaka ma w określonym kierunku źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości $540 \cdot 10^{12}$ Hz, i którego natężenie w tym kierunku jest równe $1/683$ W/sr

Steradian (sr): kąt bryłowy o wierzchołku w kuli wycinający z jej powierzchni część równą powierzchni kwadratu o boku równym promieniowi tej kuli

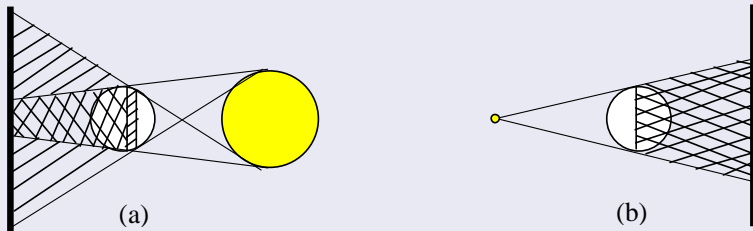
Wielkość	Oznaczenie	Opis
Światłość	[cd]	kandela
Elementarny ładunek elektryczny	[e]	$1.602 \cdot 10^{-19}$ [A·s]
Strumień świetlny	[lm]	lumen: $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$
Ilość światła	[lm·s]	lumenosekunda: $\text{lm} \cdot \text{s}$

Optyka geometryczna

Podstawowe założenia optyki geometrycznej:

- 1 światło rozchodzi się po liniach prostych: w teorii korpuskularnej tory kwantów światła, w teorii falowej kierunek prostopadły do powierzchni falowej;
- 2 rozmiary przeszkód i otworów są duże w porównaniu z długością fali;
- 3 zasada Fermata: światło biegnąc od punktu A do punktu B wybiera taką drogę, by czas potrzebny na jej przebycie był ekstremalny, tzn. najkrótszy lub najdłuższy, przy czym najczęściej jest to czas najkrótszy;
- 4 prawo odwracalności biegu promieni: jeśli światło biegło od punktu A do punktu B po pewnej drodze, to od punktu B do punktu A będzie biegło po tej samej drodze, ale w przeciwnym kierunku.

Cienie od źródeł światła

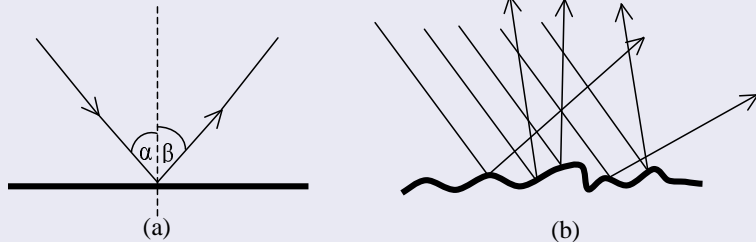


Rys. 2: Cienie rzucane przez źródła światła: (a) wielkość źródła światła większa od rozmiaru przeszkody, widać półcień; (b) wielkość źródła światła mniejsza od rozmiaru przeszkody

Spis treści

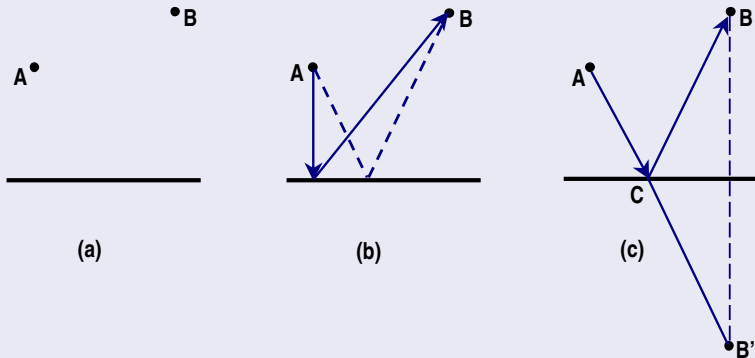
- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Odbicie i rozpraszanie światła



Rys. 3: Padanie światła na powierzchnię: (a) gładką ; (b) pofałdowaną

Odbicie światła



Rys. 4: Padanie światła na powierzchnię: (a) dwa punkty A i B nad powierzchnią odbijającą; (b) możliwe toru promieni światła pomiędzy punktami A i B po odbiciu; (c) zastosowanie zasady Fermata

Odbicie światła

Pytanie 1: w jaki sposób światło może przebyć drogę od punktu A do punktu B ?
(patrz rys. 4(a))

Odpowiedź 1: po linii prostej łączącej te punkty.

Pytanie 2: a co będzie, gdy światło po drodze musi się jeszcze odbić od zwierciadła?
(patrz rys. 4(b))

Odpowiedź 2: odpowiedź jest nieco bardziej skomplikowana. Jeden z możliwych torów pokazany jest linią ciągłą. Po tym torze światło najszybciej dociera do zwierciadła, a potem biegnie po linii prostej do punktu B . Jeśli przesuniemy punkt odbicia nieco w prawo (linia przerywana), to pierwszy odcinek ulegnie wydłużeniu, natomiast drugi skróci się. Całkowita droga też ulegnie skróceniu, a więc i czas potrzebny na przebycie tej drogi będzie krótszy.

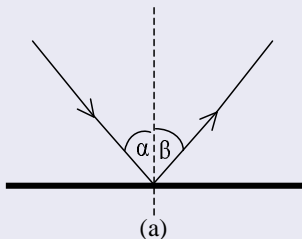
Pytanie 3: gdzie leży prawdziwy punkt odbicia od zwierciadła? (patrz rys. 4(c))

Odpowiedź 3: po drugiej stronie zwierciadła zaznaczamy punkt B' , leżący w takiej samej odległości od zwierciadła jak punkt B . Odcinek AB' przecina zwierciadło w punkcie C . To jest właśnie szukany prawdziwy punkt odbicia, gdyż droga z A do B przez C jest najkrótsza, a więc i najszybsza.

Odbicie światła

Analiza rys. 4(c) prowadzi do jeszcze jednego wniosku:

kąt padania jest równy kątowi odbicia



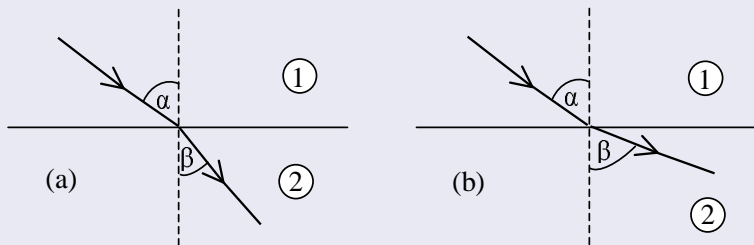
Rys. 5: (a) Padanie światła na gładką powierzchnię

a więc na rys. 5(a) kąt α jest równy kątowi β .

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Załamanie światła



Rys. 6: Załamanie światła: (a) ku prostopadłej ($\alpha > \beta$) ; (b) od prostopadłej ($\alpha < \beta$)

Załamanie światła

Promień świetlny przemieszczający się w ośrodku materialnym 1 z prędkością v_1 i padający na granicę z innym ośrodkiem materialnym 2, w którym ma prędkość v_2 (np. z powietrza do wody), ulega częściowemu odbiciu, a reszta ulega załamaniu (następuje zmiana kierunku propagacji, patrz rys. 6). Kąt β , zawarty pomiędzy kierunkiem promienia a normalną do powierzchni załamania, nazywamy *kątem załamania*, a promień w ośrodku 2 – promieniem załamanym.

Ważne: promień padający, normalna do powierzchni i promień załamany leżą w jednej płaszczyźnie.

Prawo załamania (Snellius, 1621)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1}, \quad (1)$$

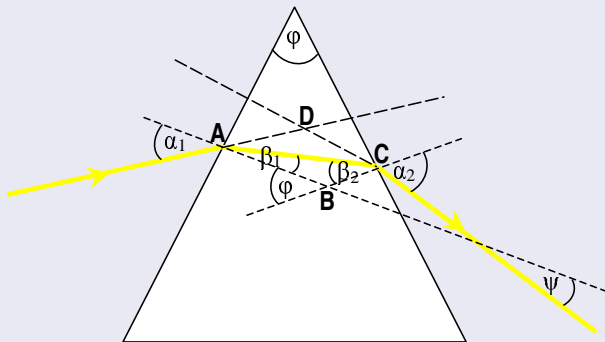
$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}, \quad (2)$$

n_i – współczynnik załamania światła w ośrodku i , c – prędkość światła w próżni. W próżni współczynnik załamania $n_0 = 1$, więc przy przejściu światła z próżni do ośrodka o współczynniku załamania n , mamy

$$\sin \alpha = n \sin \beta, \quad (3)$$

n – bezwzględny współczynnik załamania.

Załamanie światła w pryzmacie



Rys. 7: Załamanie promienia światła w pryzmacie

Załamanie światła w pryzmacie

Pryzmat – ciało przezroczyste, w przekroju trójkąt równoramienny (wycięty z równoległoscianu)

φ – kąt łamiący pryzmatu (kąt rozwarcia trójkąta)

ψ – kąt odchylenia

n_1 – współczynnik załamania pryzmatu

n_2 – współczynnik załamania otaczającego środowiska
(na ogół $n_2 < n_1$)

$$n_2 \sin \alpha_1 = n_1 \sin \beta_2, \quad n_1 \sin \beta_2 = n_2 \sin \alpha_2. \quad (4)$$

Z $\triangle ABC$ i $\triangle ACD \rightsquigarrow$

$$\varphi = \beta_1 + \beta_2, \quad \psi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = (\alpha_1 + \alpha_2) - (\beta_1 + \beta_2), \quad (5)$$

$$\psi = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi. \quad (6)$$

Załamanie światła w pryzmacie

Dla małych α_i i β_i (w radianach)

$$\alpha_1 = \frac{n_1}{n_2} \beta_1, \quad \alpha_2 = \frac{n_1}{n_2} \beta_2, \quad (7)$$

i wtedy

$$\psi = \frac{n_1}{n_2} \varphi - \varphi = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \varphi. \quad (8)$$

Dla powietrza $n_2 \approx 1$, więc

$$\psi = (n_1 - 1) \varphi. \quad (9)$$

Załamanie światła w pryzmacie

Wyznaczanie współczynnika załamania pryzmatu

Minimalne odchylenie promienia zachodzi dla $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ i oczywiście $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, czyli $2\beta = \varphi$ (symetryczny bieg promieni)

$$\psi_{min} = 2\alpha - 2\beta = 2\alpha - \varphi. \quad (10)$$

Znamy: ψ_{min} i φ , skąd \rightsquigarrow

$$\alpha = \frac{\psi_{min} + \varphi}{2}, \quad \beta = \frac{\varphi}{2}, \quad (11)$$

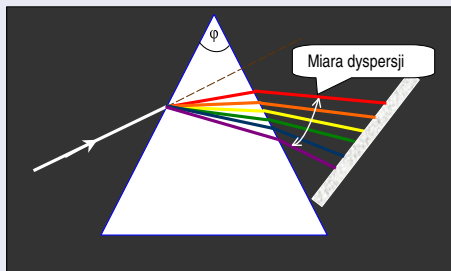
$$n_1 = n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \frac{\psi_{min} + \varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (12)$$

Dla małych φ mamy $\psi = (n - 1)\varphi$,

$$n_{pryzmat} = \frac{\psi_{min}}{\varphi} + 1. \quad (13)$$

Rozszczepienie światła w pryzmacie

Newton (1666): światło białe (słoneczne) jest mieszaniną różnokolorowych promieni. Promień światła przechodząc przez pryzmat ulega rozszczepieniu.



Rys. 8: Rozszczepienie światła

Barwa światła zależy od długości fali \rightsquigarrow każdej długości fali odpowiada inny współczynnik załamania.

Rozszczepienie światła w pryzmacie

Miara zdolności rozszczepiających materiałów: różnica współczynników załamania promieni czerwonych i fioletowych (średnia dyspersja pryzmatu)

Miara zdolności łamiących pryzmatu: wartość współczynnika załamania promienia żółtego

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

Całkowite odbicie

Gdy promień świetlny przechodzi z ośrodka optycznie gęstszego (woda, szkło) o współczynniku załamania n_1 do ośrodka rzadszego optycznie (powietrze) o współczynniku załamania n_2 , to zgodnie z prawem Snelliusa

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (14)$$

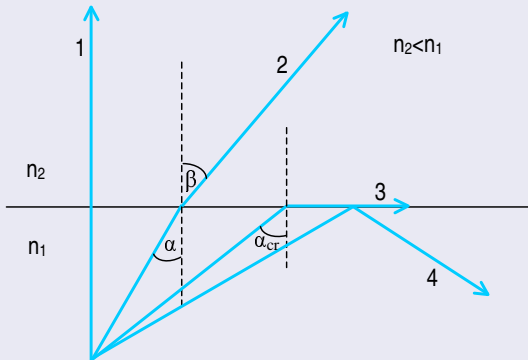
$n_2 < n_1$, więc $\sin \alpha < \sin \beta$, czyli $\alpha < \beta$. Coraz większym kątom α odpowiadają coraz większe β , ale zawsze $\alpha < \beta$. Kąt α , dla którego kąt załamania $\beta = 90^\circ$ nazywamy **kątem granicznym**. Dla kątów większych od kąta granicznego zachodzi **całkowite wewnętrzne odbicie**.

Przy przejściu światła z wody ($n_1 = 1,33$) do powietrza ($n_2 \approx 1$)

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{n_1} = 0,748, \quad (15)$$

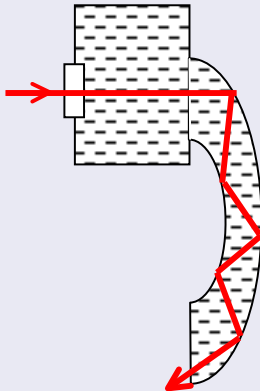
czyli dla wody $\alpha_{gr} \sim 48^\circ 30'$.

Całkowite odbicie



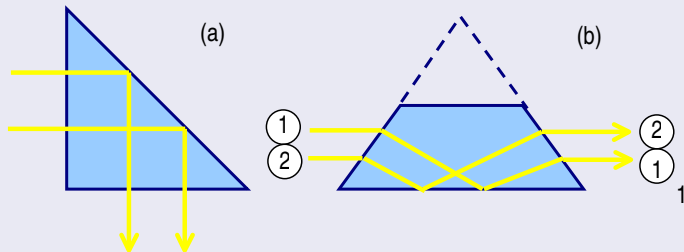
Rys. 9: Wewnetrzne odbicie

Całkowite odbicie



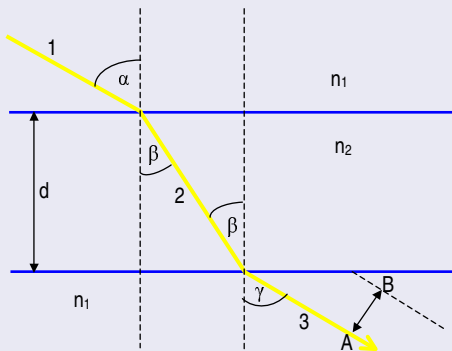
Rys. 10: Światłowód

Całkowite odbicie



Rys. 11: Zjawisko całkowitego odbicia w pryzmacie: (a) zmiana kierunku biegu promieni o 90° ; (b) zmiana kolejności biegu promieni (pryzmat Amici)

Płytko płasko-równoległa



Rys. 12: Załamanie promienia światła w płytce płasko-równoległej

Płytko płasko-równoległa

Z prawa Snelliusa

$$\begin{aligned}n_1 \sin \alpha &= n_2 \sin \beta, \\n_2 \sin \beta &= n_1 \sin \gamma.\end{aligned}\tag{16}$$

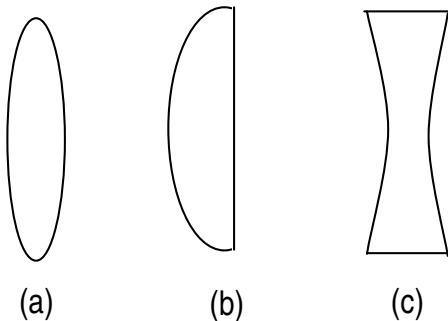
Widać, że $\alpha = \gamma$. Przesunięcie promienia AB zależy od grubości płytki d , od kąta padania α i od współczynników załamania n_1 i n_2

$$AB = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}.\tag{17}$$

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

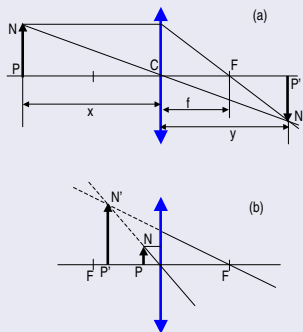
Soczewki



Rys. 13: Przykłady soczewek: (a) i (b) soczewki skupiające; (c) soczewka rozpraszająca

Lupa

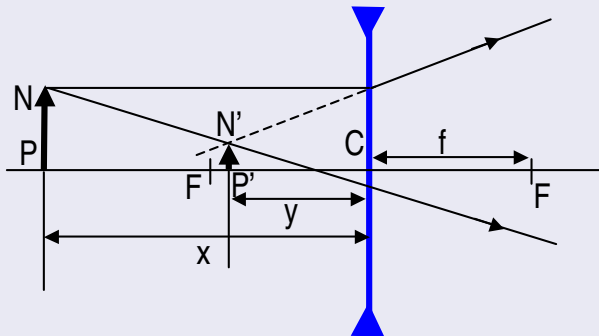
Soczewka skupiająca



Rys. 14: Przykłady użycia soczewki skupiającej: (a) przedmiot w odległości większej od ogniskowej soczewki; (b) przedmiot w odległości mniejszej od ogniskowej soczewki

Lupa

Soczewka rozpraszająca



Rys. 15: Bieg promieni w soczewce rozpraszającej

Soczewka - zdolność skupiająca

Dioptria (D, dpt., δ) – pozaukładowa jednostka miary zdolności zbierającej układu optycznego, legalna, nienależąca do układu SI.

Równa jest odwrotności ogniskowej wyrażonej w metrach.

$$1D = \frac{1}{m}$$

Dodatnie liczby określają soczewki skupiające, a ujemne – soczewki rozpraszające.

Stosowana w optyce, np. do określenia zdolności zbierającej (skupiającej) soczewek w okularach.

Soczewka - zdolność skupiająca

Mamy więc

$$D = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_s}{n_0} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (18)$$

f – ogniskowa soczewki (odległość między ogniskiem a środkiem soczewki)

n_s – bezwzględny współczynnik załamania soczewki

n_0 – bezwzględny współczynnik załamania otoczenia

r_1, r_2 – promienie krzywizn soczewki (dla soczewki płaskowklęstej lub płaskowypukłej jeden z promieni = ∞)

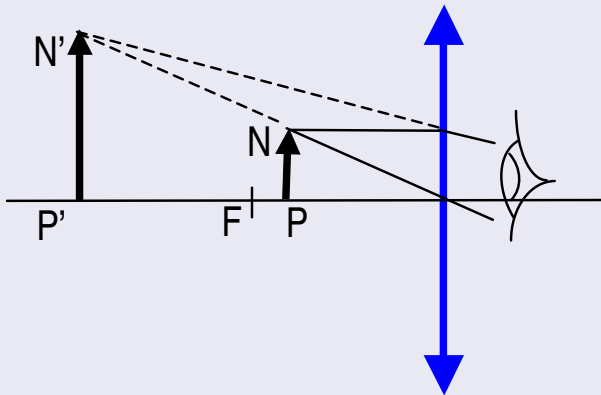
gdzie $n = \frac{c}{v}$ – bezwzględny współczynnik załamania

c – prędkość światła w próżni

v – prędkość światła w danym ośrodku

Lupa

Lupa



Rys. 16: Bieg promieni w lupie

Lupa

Lupa

Lupa: soczewka skupiająca o małej ogniskowej f (dużej zdolności skupiającej $(1/f)$). Przedmiot PN ustawia się między ogniskiem a soczewką tak, aby obraz P'N' (urojony, powiększony, prosty) powstał w odległości dobrego widzenia oka d , znajdującego się po drugiej stronie soczewki i blisko niej (Rys. 16).

Powiększenie wynosi

$$w = \frac{P'N'}{PN} = \frac{d}{x}. \quad (19)$$

Ze wzoru soczewkowego

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}, \quad (20)$$

$$x = \frac{fd}{d-f}. \quad (21)$$

$$w = \frac{d}{x} = \frac{d-f}{f} = \frac{d}{f} - 1 \approx \frac{d}{f}. \quad (22)$$

Lupa

Lupa

Obraz powstaje po tej samej stronie soczewki co przedmiot, więc $x > 0$, $f > 0$, ale $d < 0$. W związku z tym $w < 0$, czyli obraz jest urojony, nie odwrócony, ponieważ $|w| > 1$. Obraz jest tym bardziej powiększony im mniejsza jest ogniskowa. Np., lupa o ogniskowej $f = 5$ cm daje sześciokrotne powiększenie

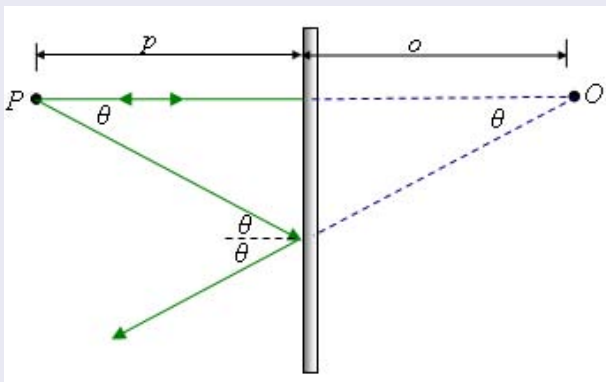
$$|w| = \left| \frac{-25}{5} - 1 \right| = 6.$$

Aby uzyskać powiększenie 11-krotne, należy użyć lupy o ogniskowej $f = 2,5$ cm.

Spis treści

- 1 Wstęp
- 2 Optyka geometryczna
 - Odbicie i rozpraszanie światła
 - Załamanie światła
 - Pryzmat: załamanie światła
 - Pryzmat: rozszczepienie światła
 - Całkowite odbicie
- 3 Przyrządy optyczne
 - Lupa
 - Zwierciadła

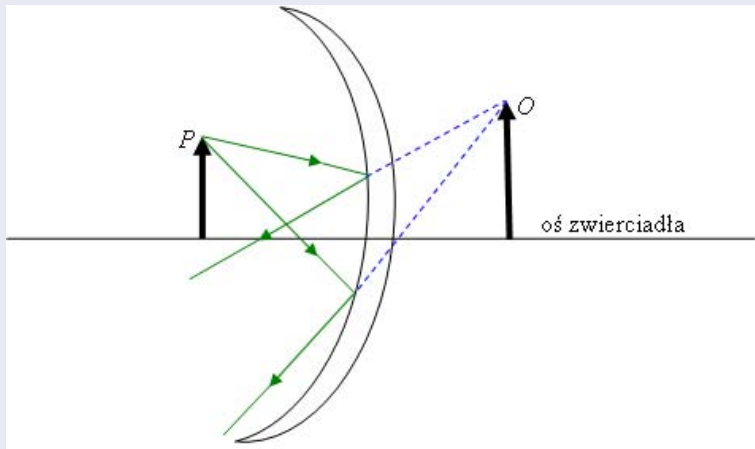
Zwierciadło płaskie



Rys. 17: Zwierciadło płaskie

Zwierciadła zakrzywione

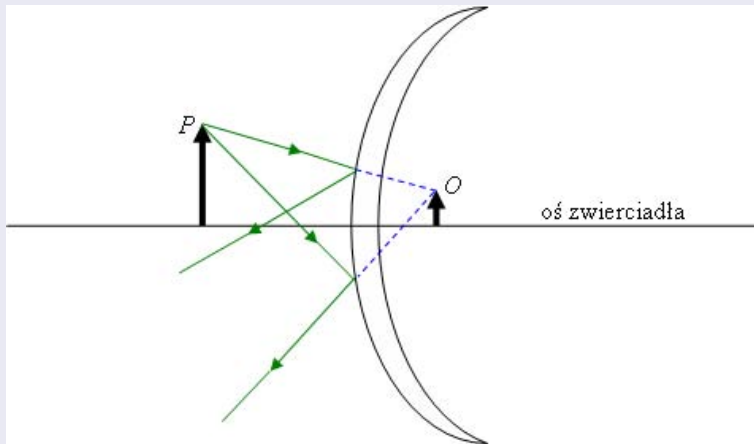
Zwierciadło wklęsłe



Rys. 18: Zwierciadło wklęsłe

Zwierciadła zakrzywione

Zwierciadło wypukłe



Rys. 19: Zwierciadło wypukłe

Koniec? :-)

Koniec wykładu 11