

# Elementy optyki geometrycznej i optyki falowej

## Wykład 10

*„A światłość w ciemności świeci...”  
(J 1, 5)*

**Czym jest światło?**

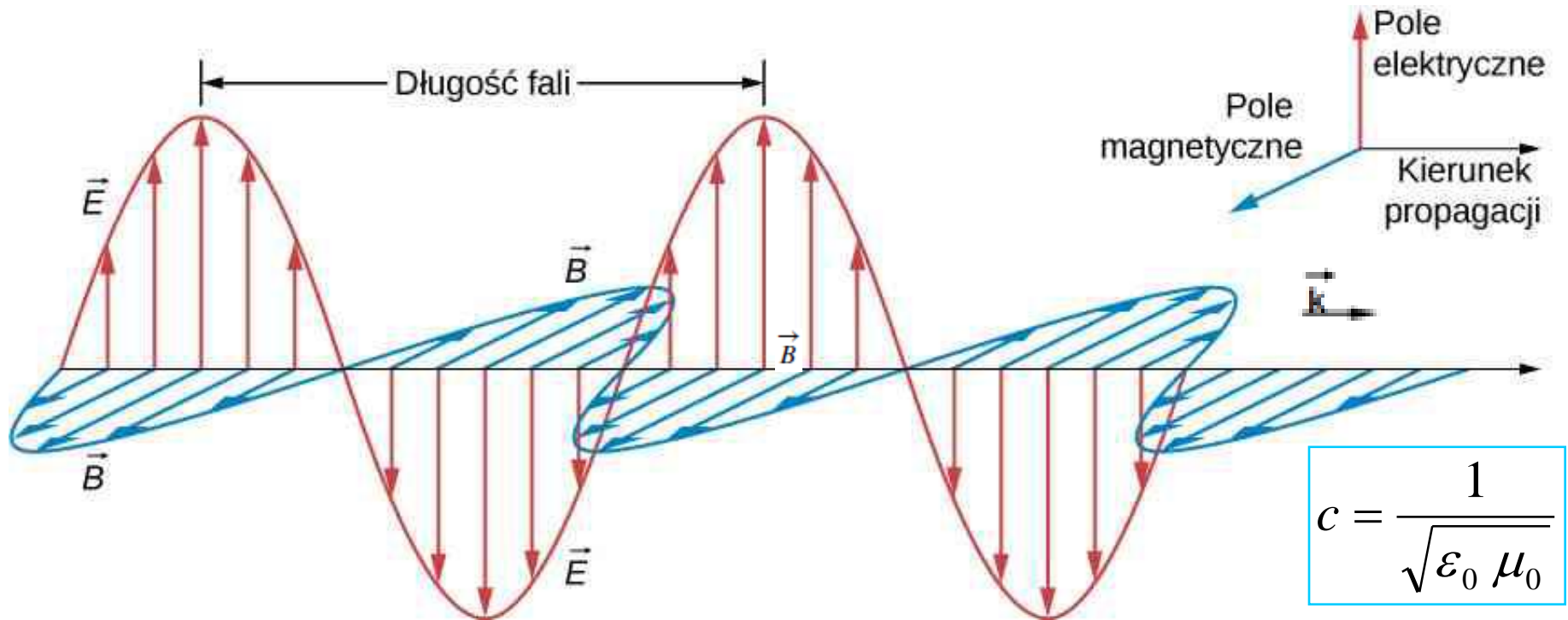
**Elementy optyki geometrycznej** – odbicie, załamanie światła

**Elementy optyki falowej**- dyfrakcja, interferencja światła



# Czym jest światło?

**Światło** jest **falą elektromagnetyczną** związaną z rozchodzeniem się w przestrzeni zmiennego pola elektrycznego ( $\vec{E}$ ) i magnetycznego ( $\vec{B}$ ).

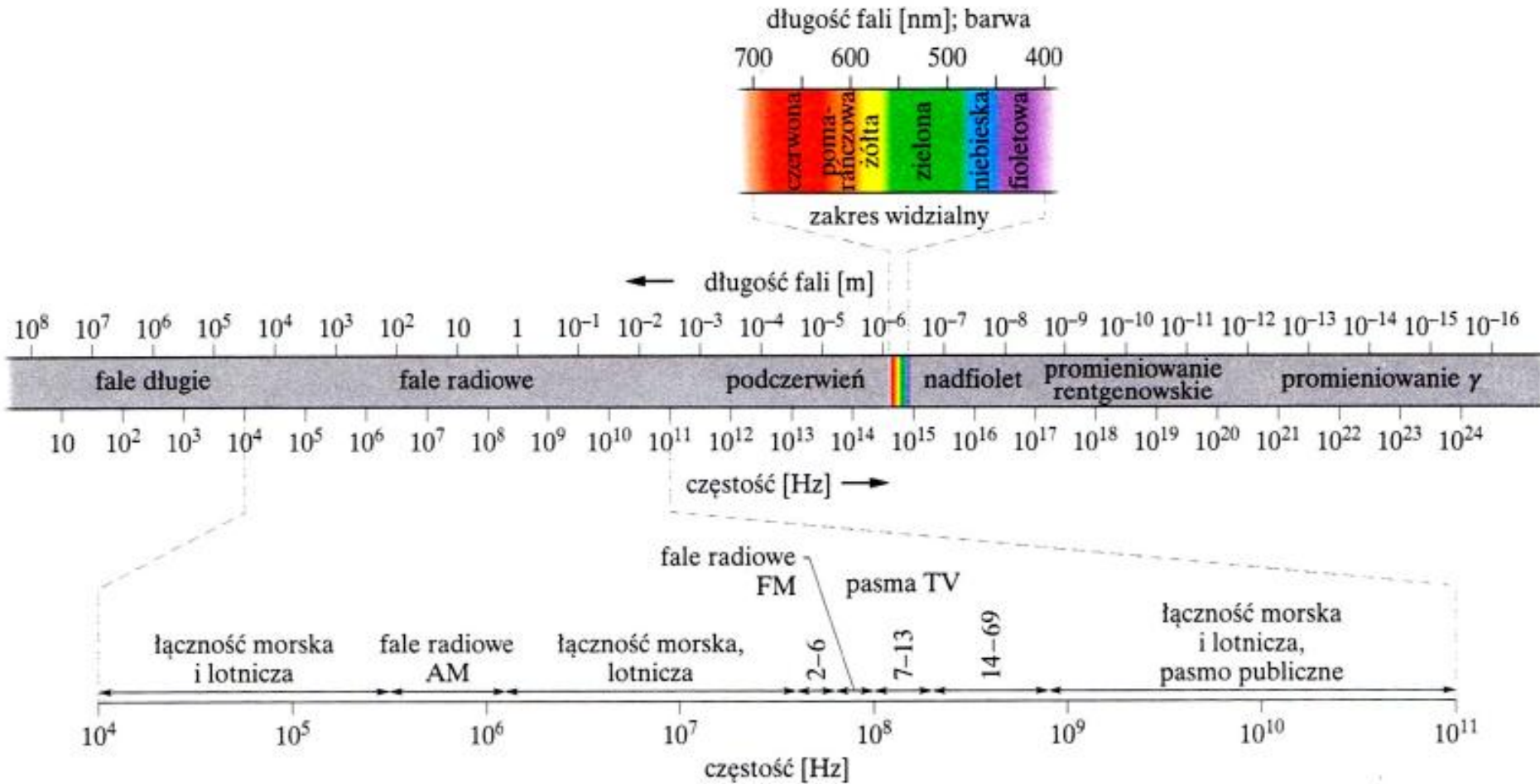


Rys.2. Obraz fali elektromagnetycznej rozchodzącej się wzdłuż osi X.  
Źródło: Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”.

**Optyka** jest nauką o świetle i jego oddziaływaniu z materią; zajmuje się m. in. rozchodzeniem się światła w różnych ośrodkach, prawami emisji i absorpcji światła. **Wszystkie fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z tą samą prędkością  $c$**  natomiast różnią się częstotliwością i długością.

# Widmo fal elektromagnetycznych

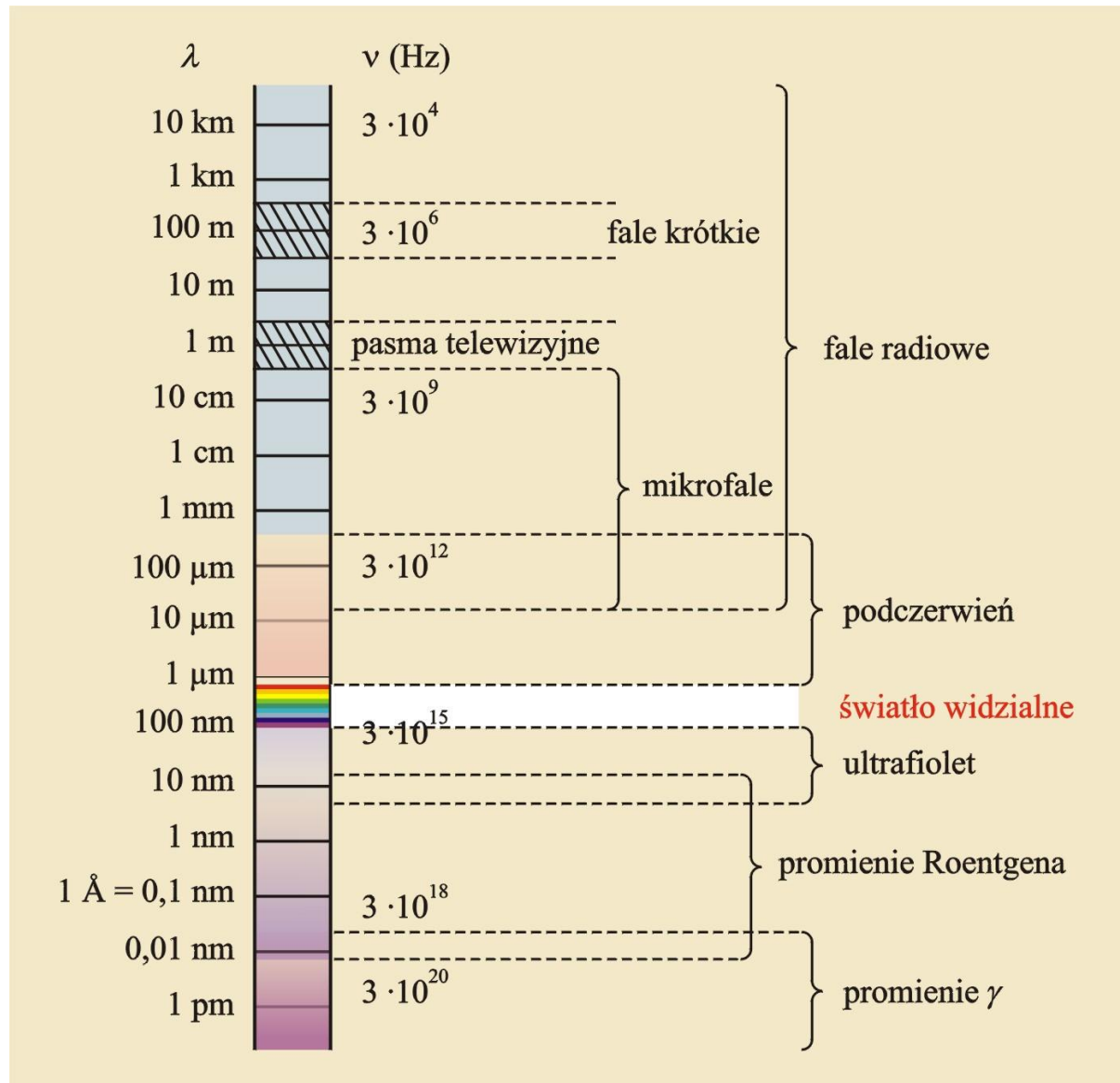
Wszystkie fale można uszeregować według ich częstotliwości (lub długości fali).  
Taką klasyfikację fal elektromagnetycznych nazywamy widmem fal elektromagnetycznych



Rys.2. Widmo fal elektromagnetycznych . Źródło: Halliday,Resnick,Walker „Fundamentals of Physics”.

Optyka koncentruje się więc przede wszystkim na badaniu widzialnej części widma fal e-m ,  
ale w kręgu jej zainteresowań są także fale elektromagnetyczne graniczące z częścią widzialną,

# Widmo fal elektromagnetycznych



Rys.3 Widmo fal elektromagnetycznych . Źródło: <http://ilf.fizyka.pw.edu.pl>

# Widmo fal elektromagnetycznych



Film. Źródło: <http://ilf.fizyka.pw.edu.pl/podrecznik/3/7/1>

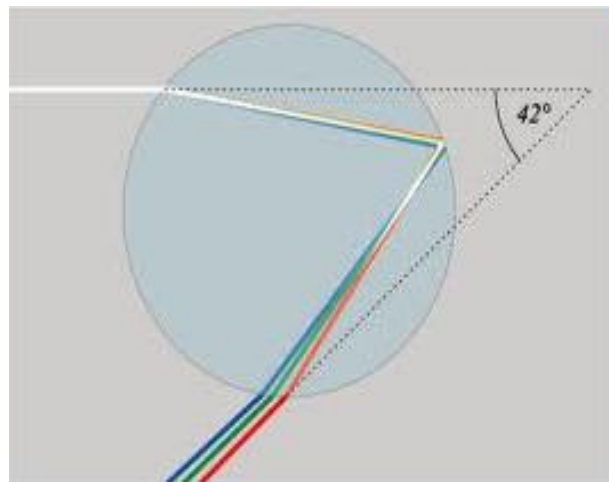
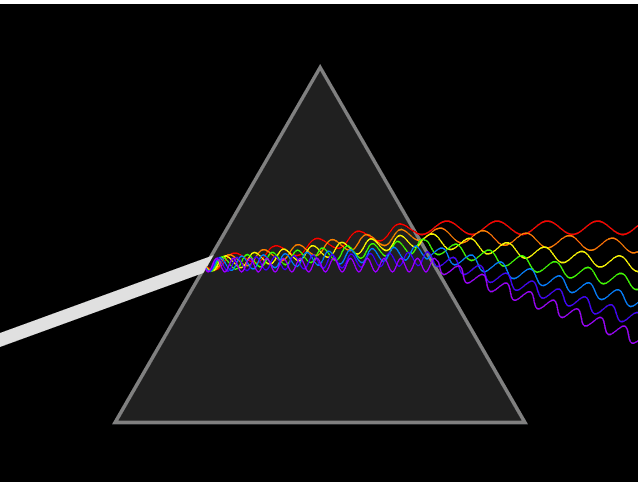




# Elementy optyki geometrycznej

**Optyka geometryczna** – jest najprostszym przybliżonym opisem światła, w którym zakłada się, że **światło rozchodzi się wzdłuż linii prostych, zwanych promieniami świetlnymi**. Promienie świetlne nie oddziałują ze sobą. **Opis zjawisk optycznych** (prawa odbicia i załamania, rozszczepienie światła), **bez odwoływania się do falowej natury światła (przypadek graniczny optyki falowej dla  $\lambda \rightarrow 0$  )**.

**Optyka falowa** - **zajmuje się opisem zjawisk wynikających z falowej natury światła**. W ramach optyki falowej badane są takie zjawiska jak: dyfrakcja, interferencja, polaryzacja.



Rys.3. Przykłady. źródło: <http://Fizyka.MSOS.21>

# Światło jako promień



(a)



(b)



(c)

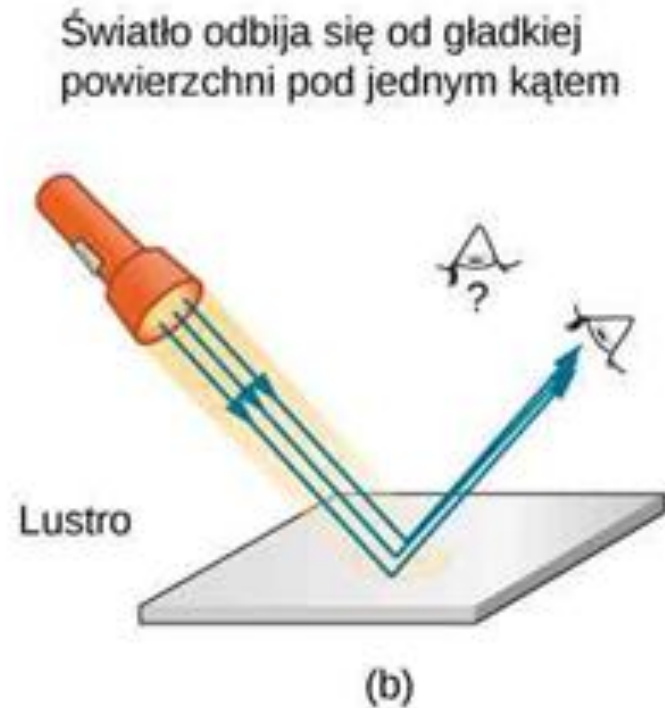
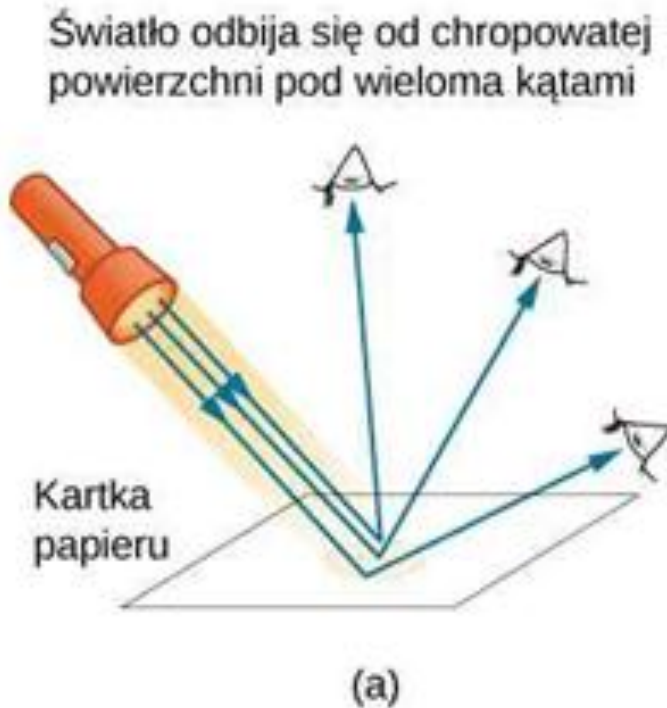
Rys. źródło: "Fizyka dla szkół wyższych": <http://cnx.org/content/col25571/1.3>

Trzy przypadki poruszania się światła ze źródła do innego miejsca:

- (a) światło dociera do górnej części atmosfery Ziemi, poruszając się w próżni po linii prostej bezpośrednio ze źródła;
- (b) światło dociera do osoby, poruszając się w powietrzu i szkłe;
- (c) światło może także odbijać się od różnych przedmiotów np. lustro (zwierciadła).

We wszystkich przypadkach możemy odwzorować drogę światła jako linię prostą, zwaną promieniem.

# ŚWIATŁO – bieg promieni- przykłady



Rys. źródło: "Fizyka dla szkół wyższych":<http://cnx.org/content/col25571/1.3>

Dzięki rozpraszaniu światła możemy zobaczyć kartkę papieru pod różnymi kątami i z każdej strony (a); Zwierciadło natomiast ma gładką powierzchnię (nierówności porównywalne z długością fali światła) i odbija światło pod określonym kątem (b).



## Podstawowe prawa optyki geometrycznej



Rys. Łyżeczka zanurzona w wodzie wydaje się złamana.

Zdjęcie źródło: <https://www.quora.com>

Skutkiem załamania światła jest pozorne zakrzywianie się prostych przedmiotów częściowo zanurzonych w wodzie. Te i inne proste obserwacje świadczą, że przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego światło ulega załamaniu.

# Podstawowe prawa optyki geometrycznej

1. W ośrodku jednorodnym światło rozchodzi się prostoliniowo.
2. Przecinające się promienie świetlne nie zaburzają się wzajemnie.
3. **I zasada Fermata** ( Pierre de Fermat, 1601-1665)

Promień świetlny biegnie od jednego punktu do drugiego taką drogą, by czas potrzebny na jej przebycie był ekstremalny.

Dla promienia mierzymy długość **drogi optycznej** :

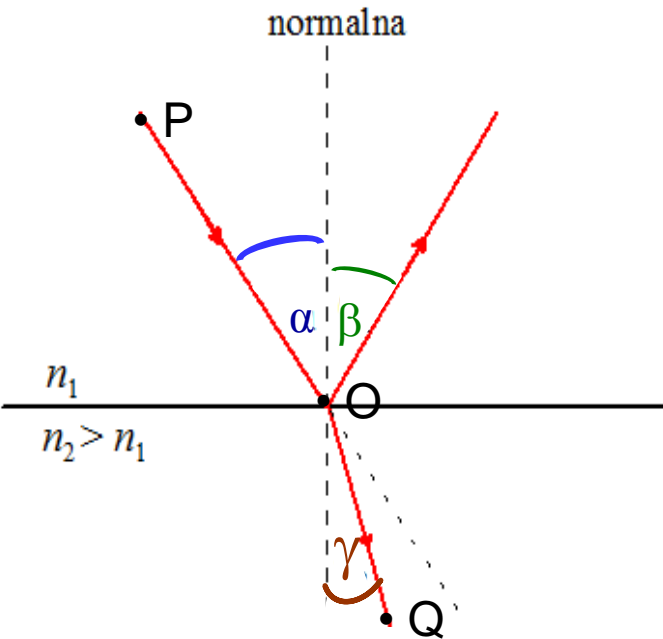
$$L_{POQ}^{optical} = |PO| \cdot n_1 + |OQ| \cdot n_2$$

gdzie  $n_i$  - bezwzględny współczynnik załamania światła i-tego ośrodka.

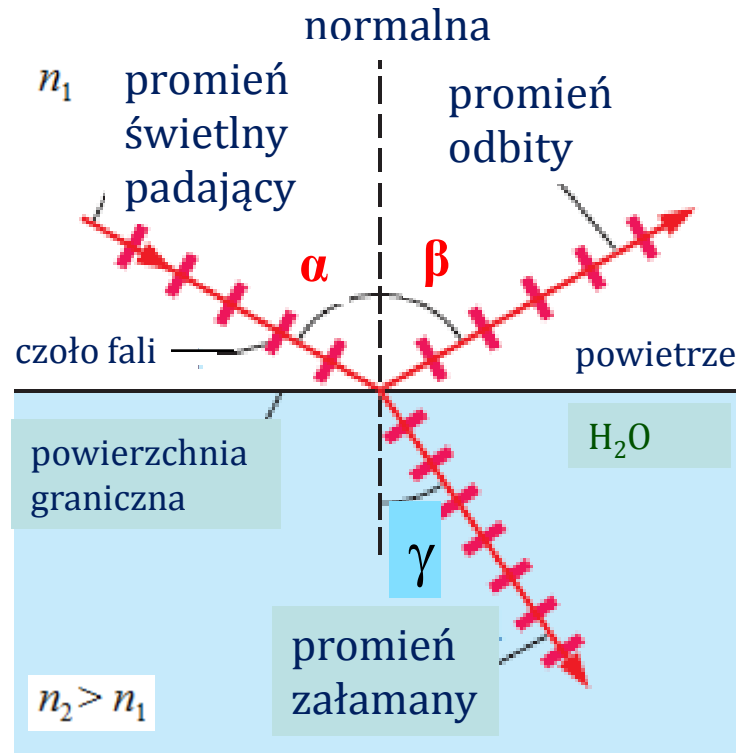
$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

**II zasada Fermata** (ZASADA ODWRACALNOŚCI BIEGU PROMIENIA ŚWIETLNEGO):

Promień biegnący z punktu P do punktu Q, w odwrotnym kierunku będzie biegł po tej samej drodze.



## 4. Prawo odbicia światła – prawo Snella \*



Kąt padania  $\alpha$  jest równy kątowi odbicia  $\beta$

$$\alpha = \beta$$

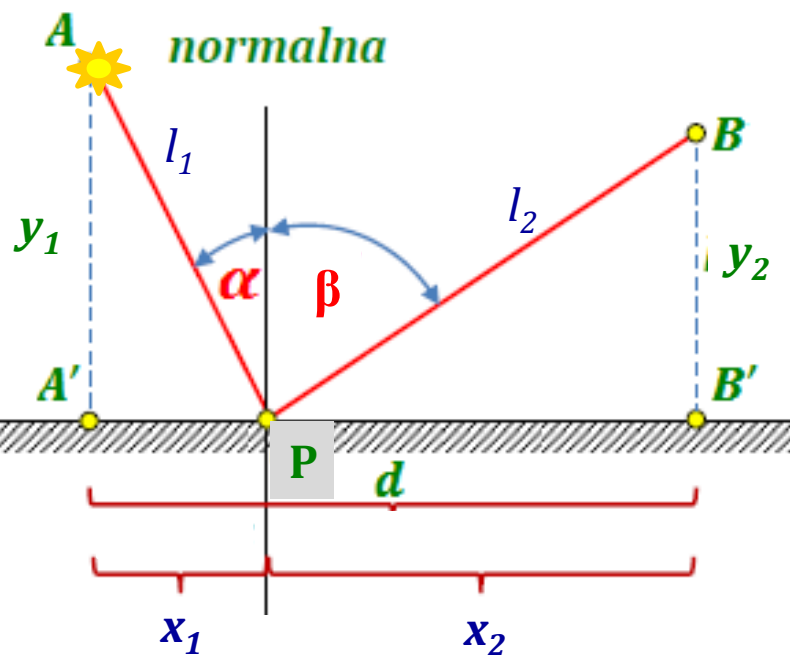
przy czym promień padający, promień odbity i normalna do powierzchni granicznej dwu ośrodków, wystawiona w punkcie padania promienia, leżą w tej samej płaszczyźnie.

Rys.. źródło : Halliday,Resnick,Walker „Fundamentals of Physics”

\***Snell van Royen** Willebrord, Snell (1580-1626), niderlandzki matematyk, astronom, fizyk i geodeta. Profesor uniwersytetu w Lejdzie (od 1613), opracował zasadę pomiarów triangulacyjnych i na ich podstawie wyznaczył długość południka (1615-1617). Sformułował prawa optyki geometrycznej (1618 r.).

# Wyprowadzenie prawa odbicia

(Korzystając z zasady Fermata)



Szukamy takiego punktu odbicia , przy którym droga optyczna ( $L_{AB}$ ) będzie minimalna.

Droga optyczna światła ( $L_{AB}$ ):

$$L_{AB} = nl_1 + nl_2$$

rys.:  $l_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ,  $l_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$

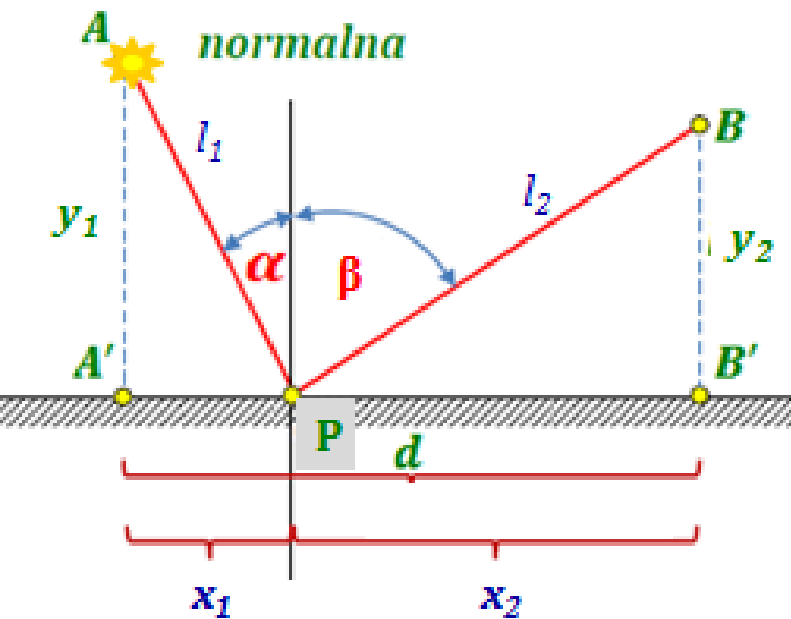
więc:  $L_{AB} = n \left( \sqrt{x_1^2 + y_1^2} + \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right)$  (\*)

? Jaki warunek musi zachodzić pomiędzy **kątem padania a kątem odbicia**, aby czas przejścia światła z punktu **A do B** był najkrótszy?

**Kiedy  $L_{AB} = f(x)$  osiągnie minimum ?**

# Wyprowadzenie prawa odbicia c.d.

Korzystając z warunku na min. funkcji:  $\frac{dL}{dx} = 0$



$$\frac{\partial L}{\partial x_1} + \frac{\partial L}{\partial x_2} = 0 \quad (**)$$

Po uwzględnieniu zależności (\*, s.7):

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = n \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}, \quad a \quad \frac{\partial L}{\partial x_2} = n \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}$$

$$\text{czyli} \quad \partial L = n \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \partial x_1 + n \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \partial x_2 = 0 \quad (***)$$

Uwzględniając fakt (rys.):  $x_1 + x_2 = d$

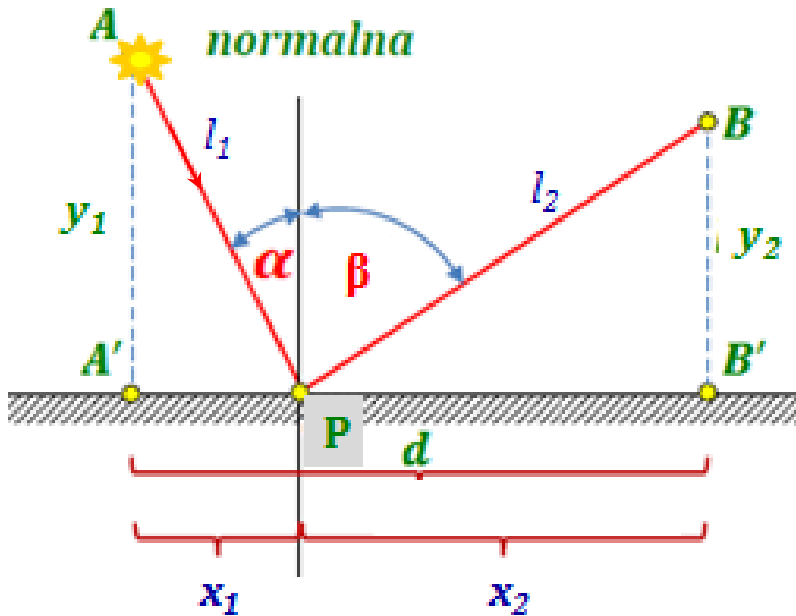
Po zróżniczkowaniu:  $\partial x_2 = -\partial x_1$

Podstawiając powyższą zależność do r-nia (\*\*\*)  
(i dzieląc przez  $\delta x_1$  oraz n), otrzymamy:

$$\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} = \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}$$



# Wyprowadzenie prawa odbicia



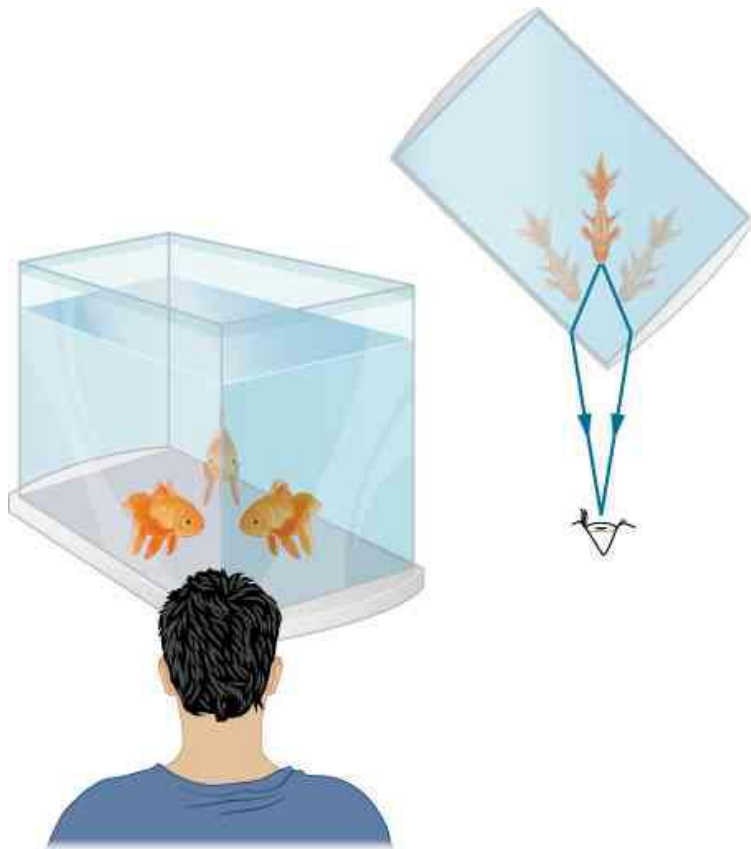
czyli: 
$$\frac{x_1}{l_1} = \frac{x_2}{l_2}$$

stąd  $\sin \alpha = \sin \beta \Rightarrow \alpha = \beta$

**Czas przejścia światła będzie najkrótszy, jeżeli kąt odbicia będzie miał taką samą miarę, jak kąt padania!**

**Kąt odbicia ma taką samą miarę, jak kąt padania i oba kąty leżą w jednej płaszczyźnie.**

# Załamanie światła- przykład



(a)



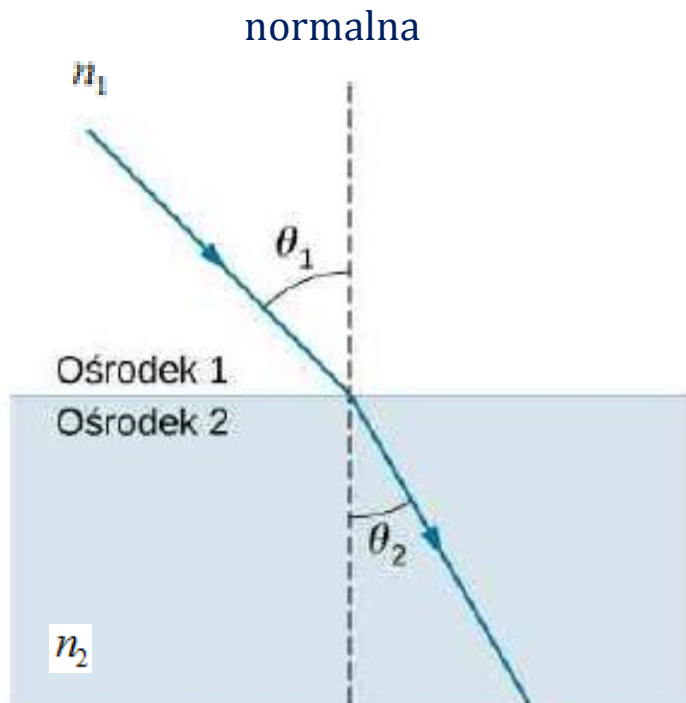
(b)

(a) Patrząc na akwarium, widzimy tę samą rybę w dwóch różnych położeniach, ponieważ kierunek wiązki światła zmienia się, gdy przechodzi z wody do powietrza. W tym przypadku światło może dotrzeć do obserwatora dwoma różnymi drogami, więc ryba zdaje się znajdować w dwóch różnych miejscach. Takie ugięcie wiązki światła jest nazywane załamaniem.

(b) Zdjęcie przedstawia załamanie światła dla ryby w pobliżu górnej części akwarium.

## 5. Prawo załamania światła ( II prawo Snella)

Promień załamany leży w jednej płaszczyźnie z promieniem padającym i normalną .



Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielością stałą i równą względnemu współczynnikowi załamania ośrodka drugiego względem pierwszego :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_{2,1}$$

względny współczynnik załamania

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

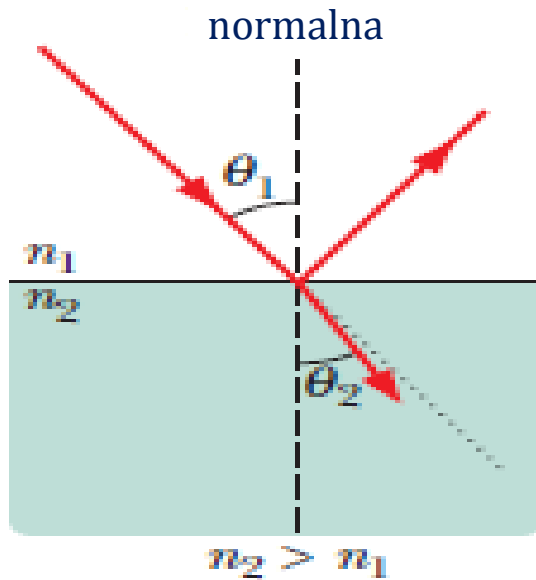
$v_1, v_2$  - szybkości światła w ośrodku 1 i 2, odpowiednio

▪ Bezwzględny współczynnik załamania światła i-tego ośrodka:

$$n_i = \frac{c}{v_i}, \text{ gdzie } v_i = \lambda_i f$$

# Elementy optyki geometrycznej

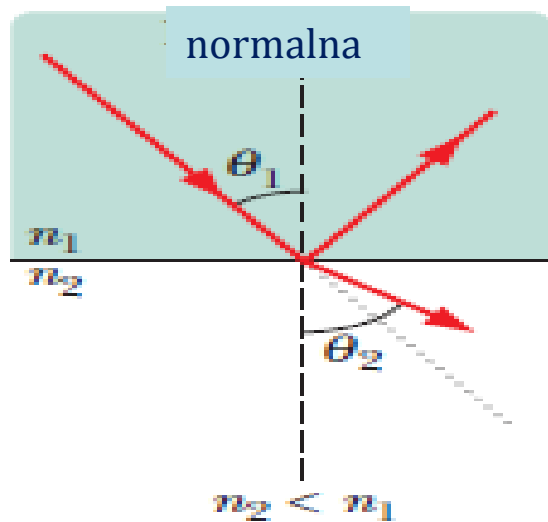
a)



Przypadki:

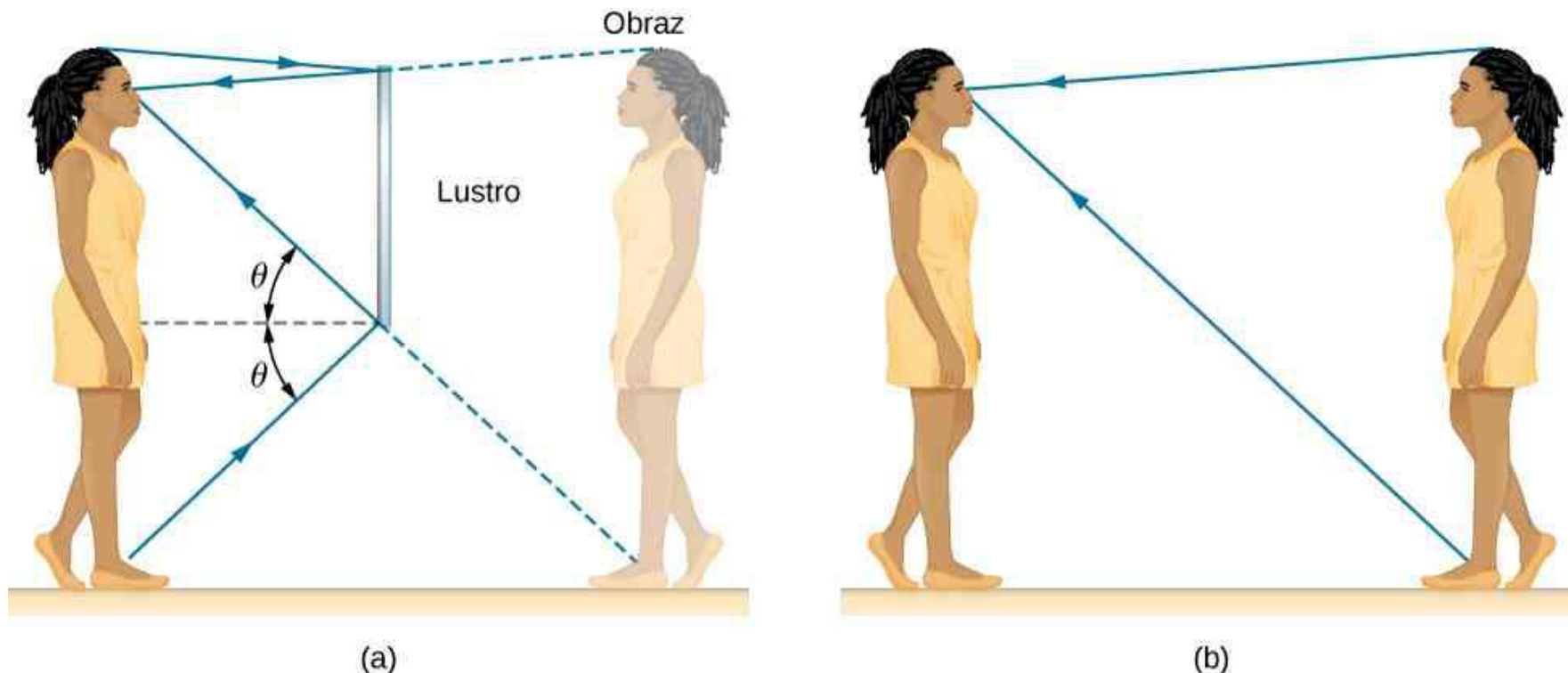
- 1)  $n_2 = n_1$  – załamanie nie następuje
- 2)  $n_2 > n_1$  – kąt załamania jest mniejszy od kąta padania (a)

b)



- 3)  $n_2 < n_1$  – kąt załamania jest większy od kąta padania, po załamaniu promień jest odchylony od pierwotnego kierunku w stronę od normalnej ( b)

# Przykład. Optyka geometryczna i tworzenie obrazu



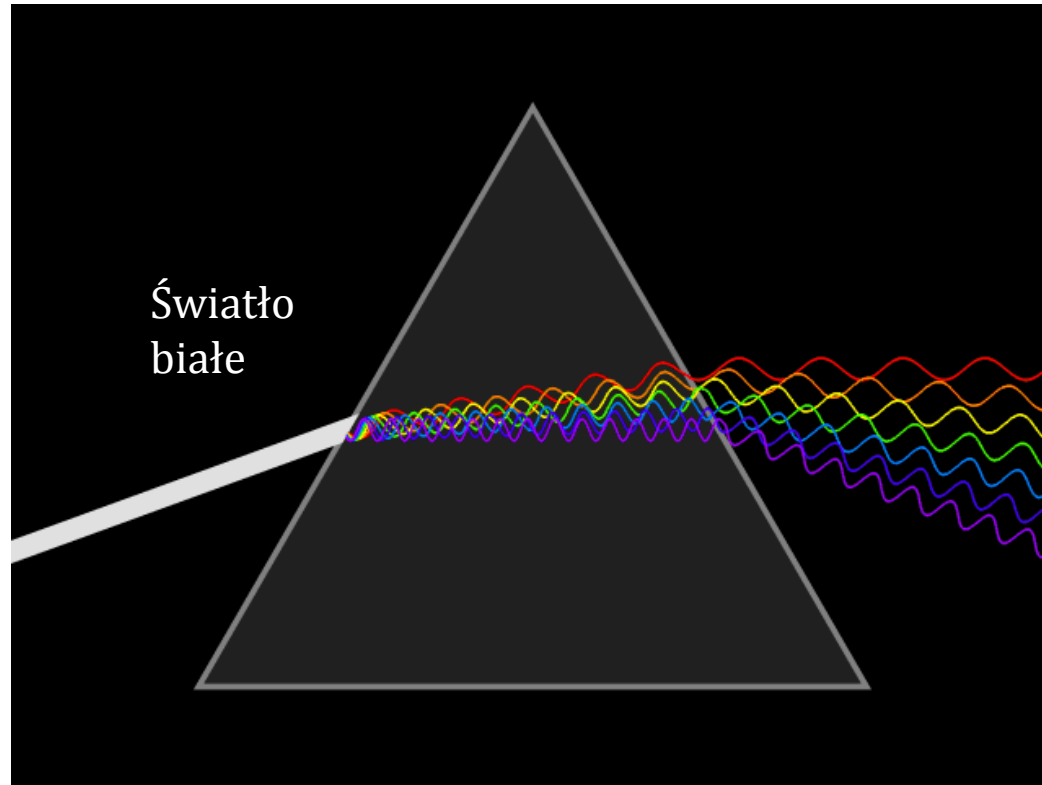
Rys. Obraz osoby stojącej przed zwierciadłem powstaje za nim; źródło: <http://cnx.org/content/col25571/1.3>

(a) Dwa promienie padające na zwierciadło pod odpowiednimi kątami są przez nie odbijane i docierają do oczu osoby. Powstały obraz znajduje się za zwierciadłem w takiej samej odległości od nas, z jakiej patrzylibyśmy bezpośrednio na swoją siostrę bliźniaczkę bez zwierciadła (b).



# Dyspersja - rozszczepienie światła

Wiązka światła "białego" składająca się ze wszystkich długości fal promieniowania widzialnego ulega, na granicy dwóch ośrodków, rozkładowi na poszczególne długości fal. Zostaje **rozszczepiona** (*dyspersja chromatyczna*).



Rys. . Pryzmat rozdziela światło białe na barwy składowe. Rozszczepienie zachodzi na pierwszej powierzchni załamującej i jest zwiększane na drugiej powierzchni.

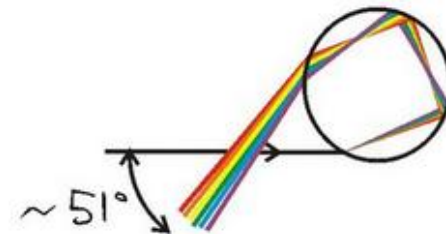
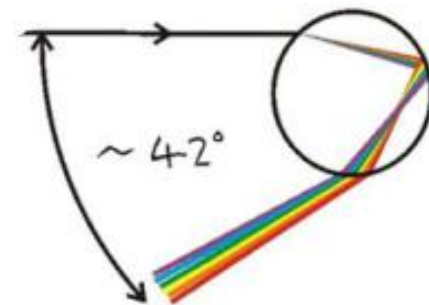
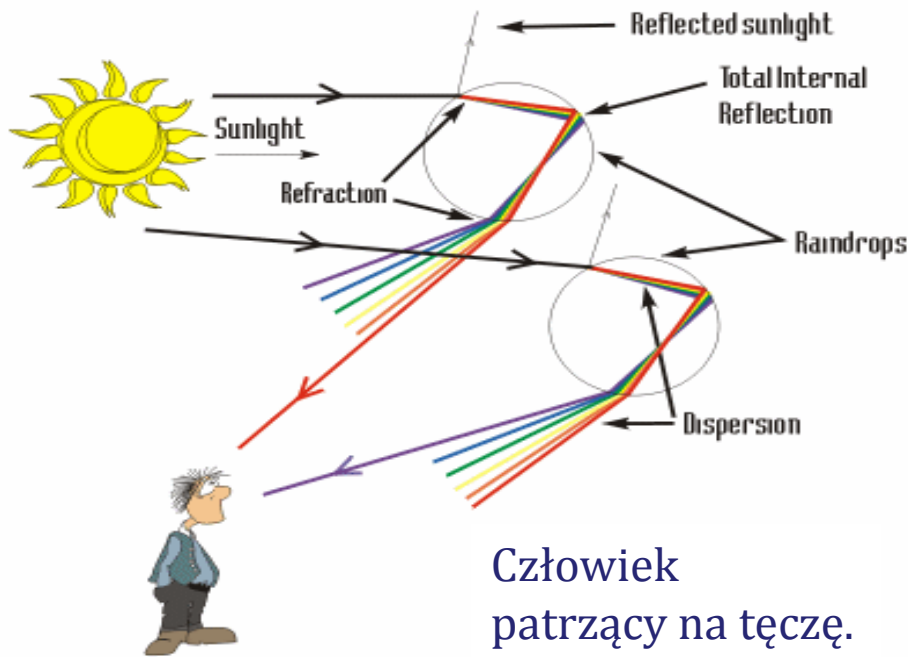
Rys.Źródło: <http://Fizyka.MSOS.21>

○ UWAGA

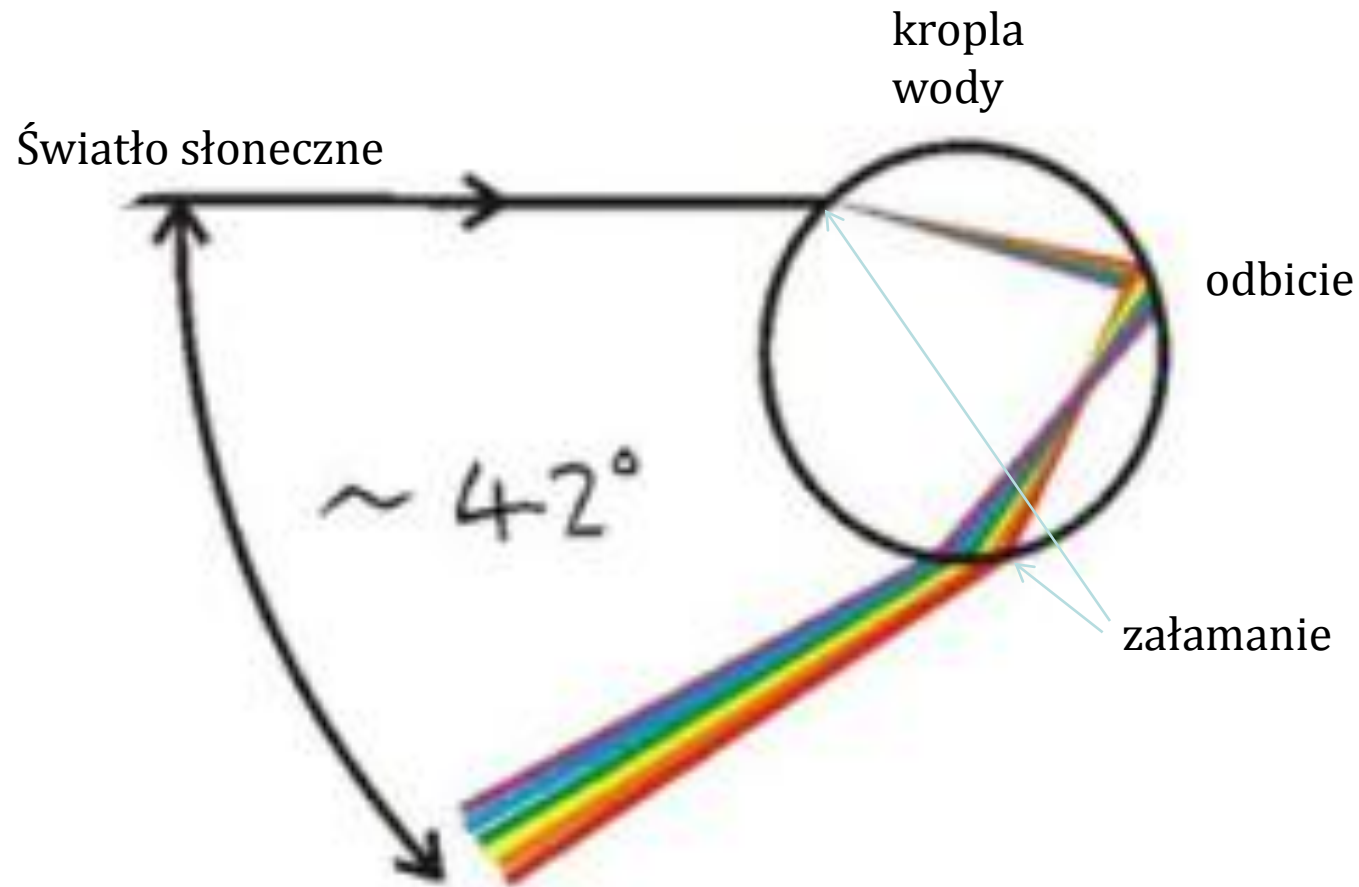
**Rozszczepienie nie występuje dla światła monochromatycznego .**

# Dyspersja -przykłady

Najpiękniejszym i najbardziej zachwycającym zjawiskiem będącym skutkiem rozszczepienia światła słonecznego w kroplach deszczu jest **tęcza**.

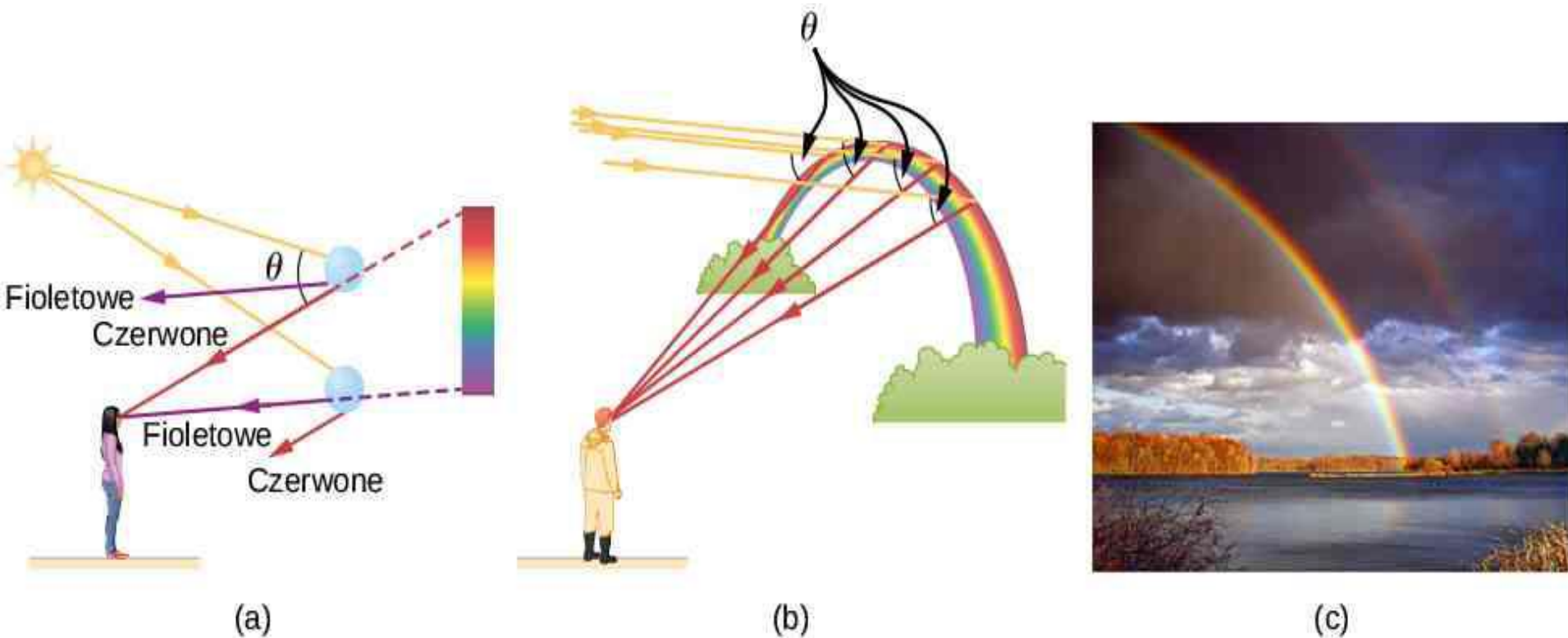


# Tęcza



Rys. Tęcza jest efektem dwóch zjawisk: załamania i odbicia.

# Tęcza



Rys. (a) Aby zobaczyć różne barwy tęczy, trzeba patrzeć w różnych kierunkach, ponieważ promienie poszczególnych barw poruszają się w różnych kierunkach.

(b) Kształt łuku tęczy wynika z faktu, że linia pomiędzy obserwatorem i dowolnym punktem tęczy musi tworzyć odpowiedni kąt z padającymi równoległe promieniami słonecznymi, aby obserwator mógł zobaczyć załamane promienie światła. (c) Podwójna tęcza – pierwotna i wtórna.

Źródło : "Fizyka dla szkół wyższych " :<http://cnx.org/content/col25571/1.3>

# Kąt graniczny i całkowite wewnętrzne odbicie

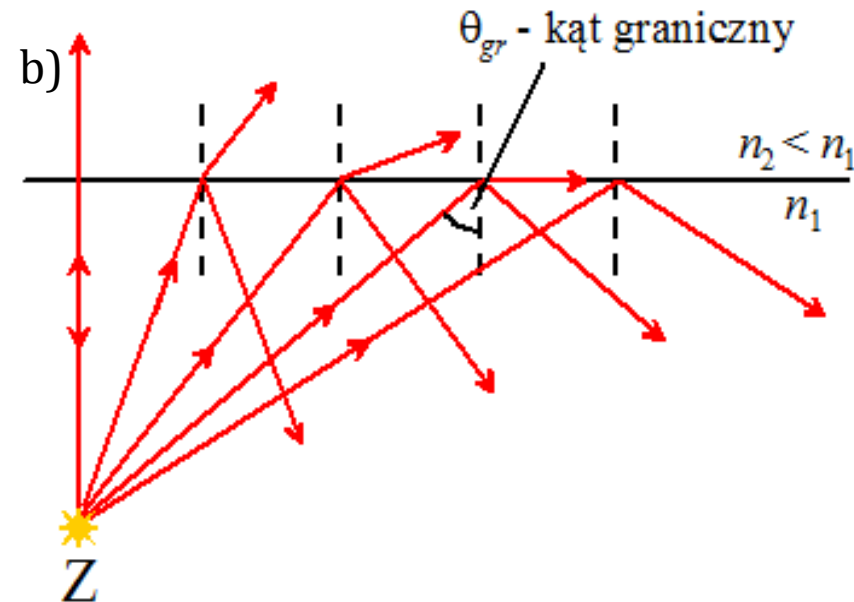
a)



- Istnieje pewien kąt padania, tzw. **kąt graniczny**  $\theta_{gr}$ , dla którego kąt załamania  $\theta_2=90^\circ$  :

$$\sin \theta_{gr} = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}$$

b)



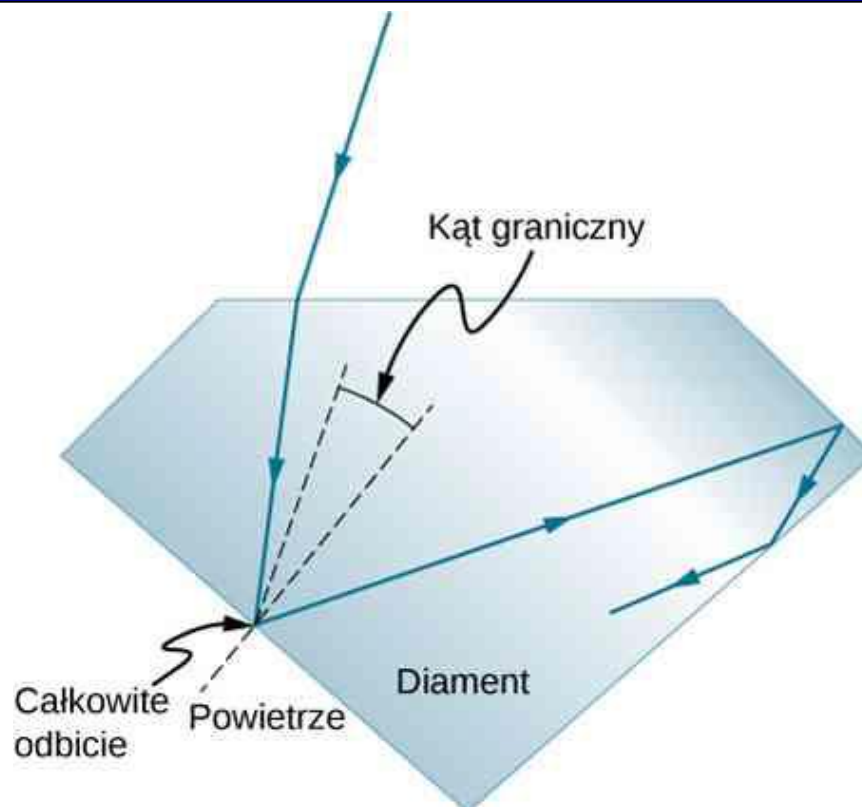
- Dla kątów padania  $\theta > \theta_{gr}$  nie ma już promienia załamane, światło ulega odbiciu. Zjawisko to nazywamy **całkowitym wewnętrznym odbiciem**.

Rys. Całkowite wewnętrzne odbicie światła

wysyłanego ze źródła światła Z umieszczonego w wodzie. Źródło: Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”



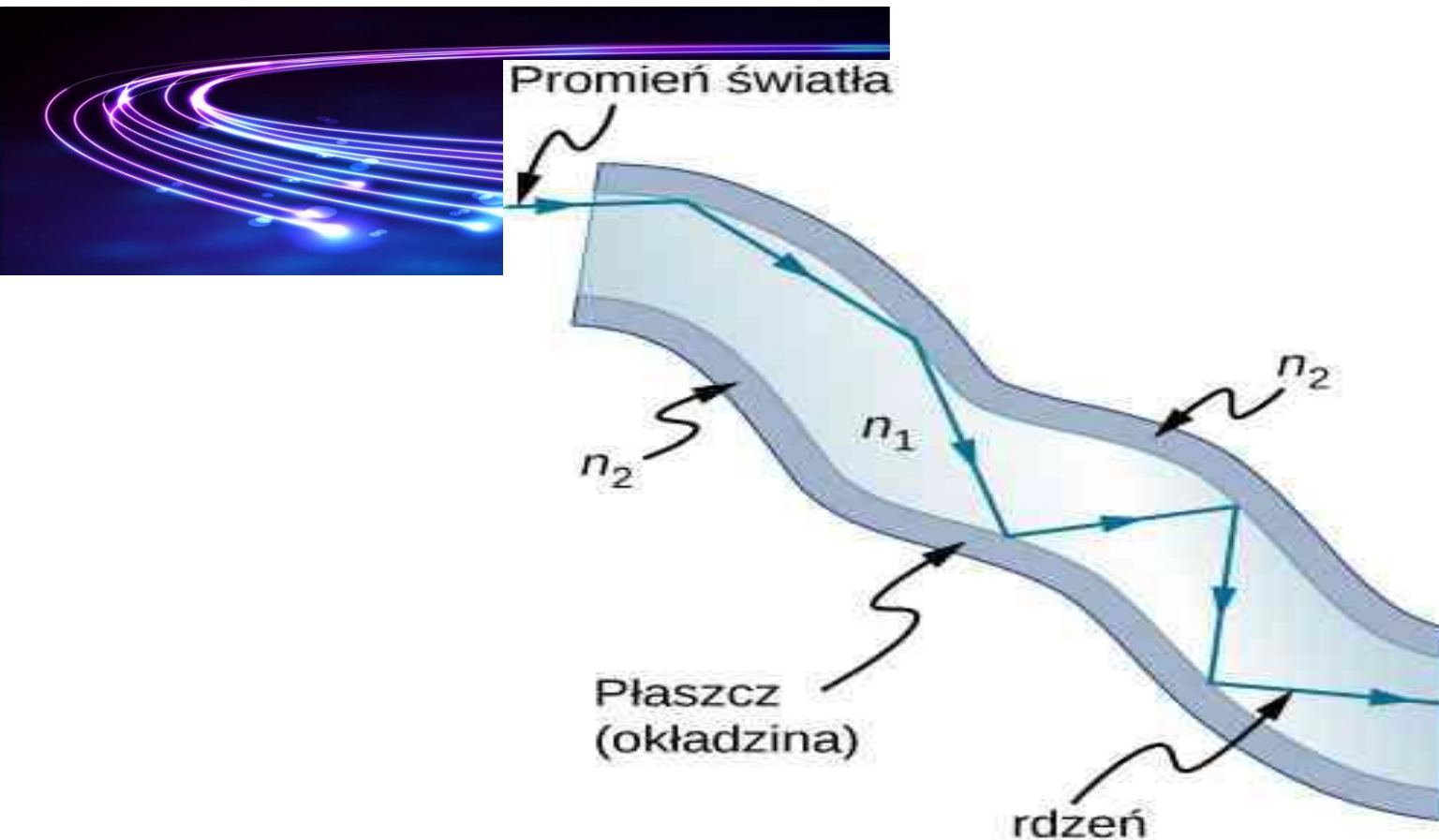
# Dlaczego diament jasno rozbłyskuje światło ?



Rys. źródło: <http://cnx.org/content/col25571/1.3>

Światło nie może łatwo wydostać się z diamentu, ponieważ kąt graniczny dla układu diament-powietrze jest bardzo mały  $24,4^\circ$ . A zatem światło może wyjść z niego tylko wtedy, gdy padnie na powierzchnię pod kątem mniejszym od  $24,4^\circ$ . Większość odbić to całkowite wewnętrzne odbicia, a powierzchnie (fasetki) w brylancie są ustawione w taki sposób, że światło może wydostać się tylko w określonych miejscach – skupiając światło i sprawiając, że diament jasno rozbłyskuje.

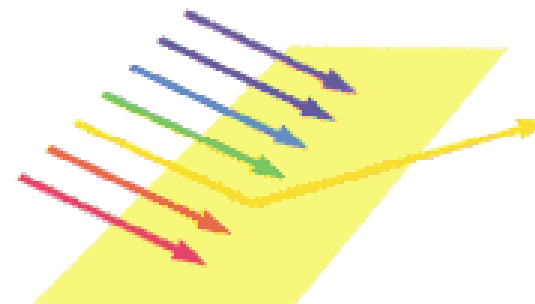
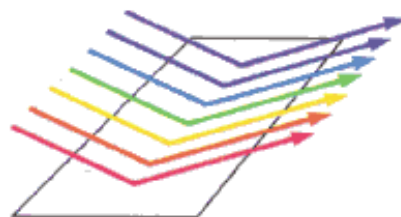
# Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia – światłowód.



**Światłowód** – zastosowanie w technikach medycznych , w sieciach komputerowych oraz technologiach internetowych. Włókna światłowodu są otulane materiałem o mniejszym współczynniku załamania od rdzenia, by zapewnić całkowite wewnętrzne odbicie, nawet gdy włókna stykają się ze sobą.

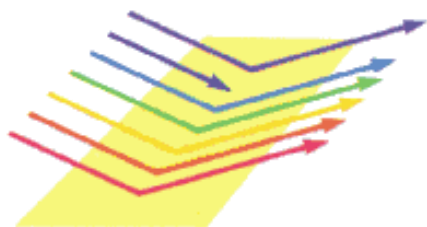
Rys. Źródło: <http://cnx.org/content/col25571/1.3>

# Co powoduje, że postrzegamy kolory?



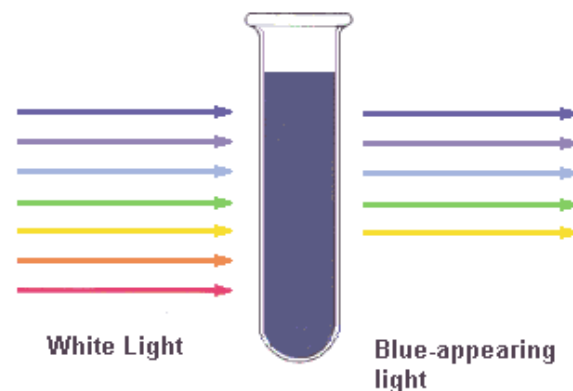
- ❑ Obiekt **czarny absorbuje** jednakowo wszystkie kolory światła widzialnego. Obiekt **biały odbija** równo wszystkie kolory światła widzialnego.

- ❑ Gdy obiekt absorbuje wszystkie kolory oprócz jednego, **widzimy kolor który nie jest absorbowany**. Żółty pasek odbija światło żółte i dlatego widzimy, że jest żółty.



Complementary

- ❑ Gdy **obiekt absorbuje jeden kolor, widzimy kolor komplementarny**. Żółty pasek absorbuje kolor fioletowy i dlatego widzimy kolor żółty, który jest kolorem komplementarnym.



- ❑ Roztwór, który absorbuje kolor czerwony i pomarańczowy, ma kolor komplementarny – niebieski i zielono – niebieski.

Dziękuję za uwagę !

