

# Elementy fizyki – Optyka i termodynamika

## Odbicie i załamanie światła

Elwira Wachowicz

elwira.wachowicz@uwr.edu.pl

11 października 2017

## Literatura

- Sears and Zemansky, *University Physics with Modern Physics*
- R. Resnick, D. Halliday, J. Walker, *Podstawy fizyki*
- Materiały do Matlaba

## O czym to będzie

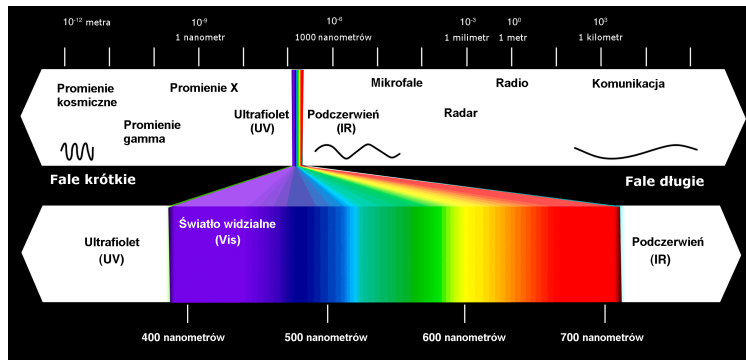
- Optyka – optyka geometryczna i falowa, własności optyczne materiałów.
- Termodynamika i elementy fizyki statystycznej.

## Plan

- Fale elektromagnetyczne.
- Przybliżenie promieni świetlnych.
- Odbicie światła.
- Załamanie światła.
- Współczynnik załamania.
- Całkowite wewnętrzne odbicie.
- Dyspersja.
- Pryzmat.

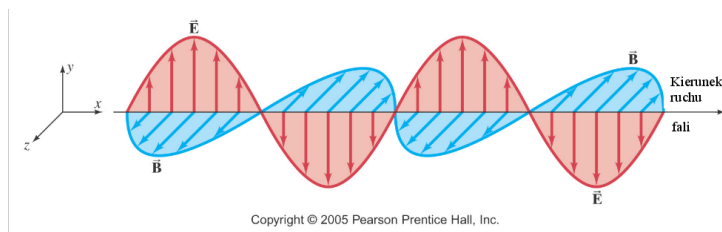
## Widmo fal elektromagnetycznych

- Światło widzialne, to też fala elektromagnetyczna.



## Fale elektromagnetyczne

- Tworzone są przez pola elektryczne i magnetyczne prostopadłe do siebie i rozchodzące się z prędkością światła  $c$  (w próżni).
- Fale elektromagnetyczne: światło, promieniowanie X, promieniowanie podczerwone, fale radiowe...



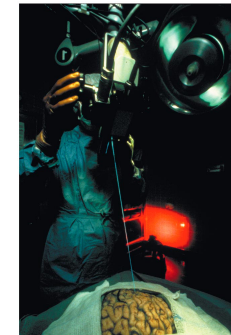
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

## Światło przejawia różne cechy

- Światło żarówki ma szerokie spektrum.
- Laser chirurgiczny emituje spójne światło o bardzo wąskim spektrum.



Copyright © 2007 Pearson Education, Inc. publishing as Addison Wesley



Copyright © 2007 Pearson Education, Inc. publishing as Addison Wesley

## Równania Maxwella

- 1 Prawo Gaussa wiąże pole elektryczne z ładunkami

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} d\vec{A} = q$$

- 2 Prawo mówiące, że nie ma „ładunków” magnetycznych

$$\oint \vec{B} d\vec{A} = 0$$

- 3 Zmienne pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne

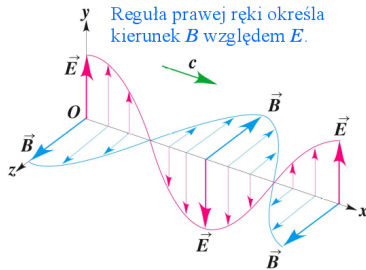
$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

- 4 Zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne – prawo Faradaya

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

## Powstawanie fal elektromagnetycznych

- Ponieważ zmienne pole elektryczne wytwarza zmienne pole magnetyczne, a zmienne pole magnetyczne, po wytworzeniu takich sinusoidalnych pól, będą się już rozprzestrzeniały same.
- Rozchodzące się w przestrzeni zmienne pola elektryczne i magnetyczne to fale elektromagnetyczne.
- Kierunek rozchodzenia się fali to  $\vec{E} \times \vec{B}$ .



## Prędkość fal elektromagnetycznych

Maxwell obliczył prędkość fal elektromagnetycznych z warunku, że muszą być spełnione zarazem prawo Faradaya i Ampère'a:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8.85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2)}} = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$$

- To prędkość światła w próżni. Dokładnie  $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{m/s}$ . Wykorzystana do definicji metra.
- Prędkość jest taka sama niezależnie od długości rozprzestrzeniającej się fali.

## Prędkość fal elektromagnetycznych

- Częstotliwość i długość fal elektromagnetycznych są związane zależnością:

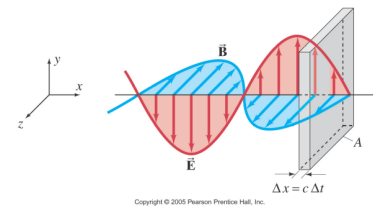
$$c = \lambda f$$

**Przykład:** Jeśli fala elektromagnetyczna ma częstotliwość  $f = 10^8 \text{ Hz}$  (100 MHz) – typowa częstotliwość komercyjnego radia FM, to jest to fala o długości:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ Hz}} = 3 \text{ m}$$

## Energia fal elektromagnetycznych

- Energia transportowana przez fale elektromagnetyczne – ilość energii przenoszonej w jednostce czasu na jednostkę powierzchni.



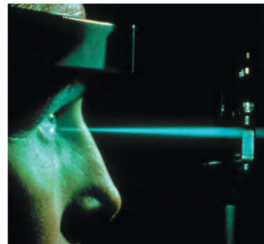
- Ilość energii przetransportowanej przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu to natężenie fali elektromagnetycznej.

$$I = \frac{\Delta u}{A \Delta t} = \epsilon_0 c E^2$$

- Jednostką natężenia fali jest  $[\text{J/s} \cdot \text{m}^2]$  lub  $[\text{W/m}^2]$ .
- Natężenie promieniowania słonecznego ponad atmosferą ziemską to ok.  $1400 \text{ W/m}^2$ , natomiast na powierzchni to ok.  $1000 \text{ W/m}^2$ .

## Źródła światła

- Ruch naładowanych elektrycznie molekuł – emisja termiczna. Mieszanina fal różnej długości. Gorące ciała źródłem światła.
- Wyładowanie elektryczne w zjonizowanym gazie.
- Lasery – atomy emitują wspólnie spójne światło. Dostajemy bardzo wąską, monochromatyczną wiązkę światła o bardzo dużej intensywności.



## Korpuskularna natura światła

- Cząstki tworzące światło nazywają się **fotonami**.
- Każdy **foton** charakteryzuje się ściśle określoną energią:
  - $E = hf$
  - Stała Plancka:  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Js
- Zawierają obie natury światła:
  - oddziałują jak cząstki
  - mają określoną częstotliwość jak fale

## Krótką historia światła

1000 r Światło to strumień malutkich cząsteczek

Newton Wykorzystał model cząsteczkowy do wyjaśnienia zjawisk odbicia i załamania światła.

Huyghens (1678) Wyjaśnił wiele własności światła zakładając falową naturę światła.

Young (1801) Wsparcie teorii falowej: pokazał interferencję światła.

Maxwell (1865) Fale elektromagnetyczne poruszają się z prędkością światła.

- Planck
- Promieniowanie elektromagnetyczne jest skwantowane – cząsteczki
  - Wyjaśnił spektrum światła emitowanego przez gorące obiekty

Einstein Światło to cząstki – efekt fotoelektryczny

## Dwoista natura światła

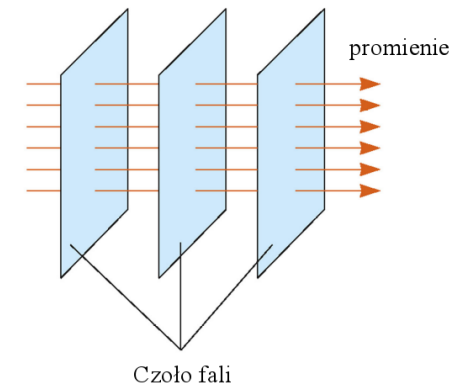
- Można zaprojektować takie doświadczenia, które pokazują albo falową albo korpuskularną naturę światła
  - W niektórych doświadczeniach światło zachowuje się jak strumień cząsteczek a w innych jak fala
- Nie można w tym samym eksperymencie obserwować na raz obu natur światła.

## Optyka geometryczna – przybliżenie promieni świetlnych

- Światło porusza po linii prostej w jednorodnym ośrodku, dopóki nie spotka granicy pomiędzy dwoma ośrodkami.
- Mówimy o promieniach lub wiązkach światła.
- Promień świetlny, to umowna linia, wzdłuż której rozchodzi się światło.

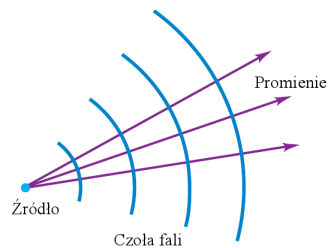
## Przybliżenie promieni świetlnych

- **Czoło fali**, to powierzchnia przechodząca przez punkty, w których fala ma taką samą fazę i amplitudę.
- Promienie świetlne odpowiadające poruszającej się fali są prostopadłe do czoła fali.



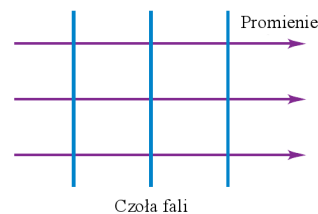
## Przybliżenie promieni świetlnych

Fala kulista



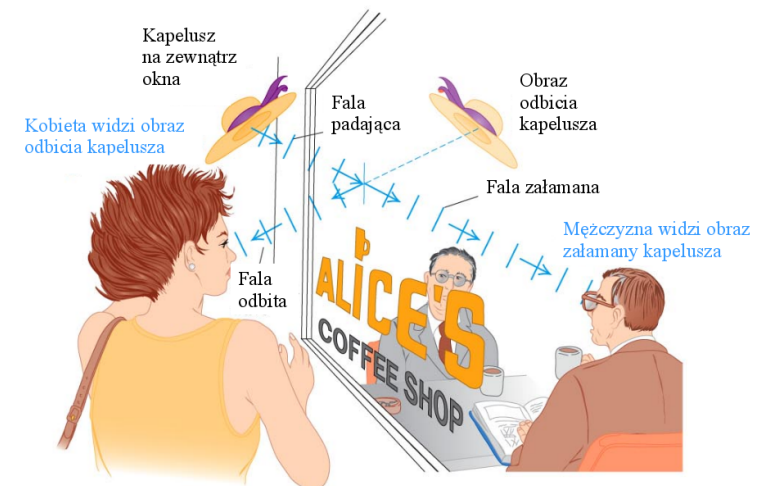
- Czoła fali są sferyczne – promienie wychodzą z punktu w centrum sfer.

Fala płaska



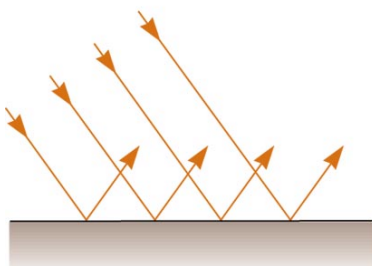
- Promienie prostopadłe do płaszczyzny czoła fali i równoległe do siebie.

## Odbicie i załamanie światła



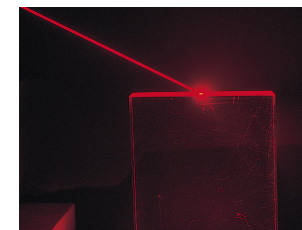
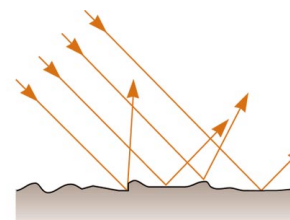
## Odbicie zwierciadlane

- Odbicie zwierciadlane następuje na gładkiej powierzchni.
- Odbite promienie są równoległe do siebie.
- Kąt padania i kąt odbicia promieni świetlnych mierzy się względem prostej prostopadłej (normalnej) do tej powierzchni.
- Będziemy mówić tylko o odbiciach zwierciadlanych, chyba że zostanie powiedziane inaczej.



## Odbicie rozproszone

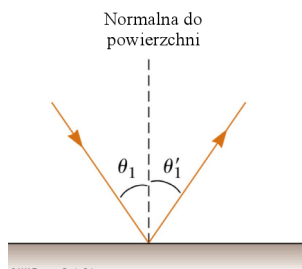
- Odbicie rozproszone następuje na powierzchni szorstkiej.
- Odbite promienie świetlne poruszają się w różnych kierunkach.
- Dzięki odbiciu rozproszonemu możemy w nocy zobaczyć suchą szosę.



## Prawo odbicia światła

- **Normalna do powierzchni**, to linia prostopadła do powierzchni umieszczona w punkcie, w którym promień pada na powierzchnię.
- Promień padający tworzy kąt  $\theta_1$  z normalną do powierzchni.
- Kąt odbity tworzy kąt  $\theta'_1$  z normalną do powierzchni.
- Kąt padania równa się kątowi odbicia:

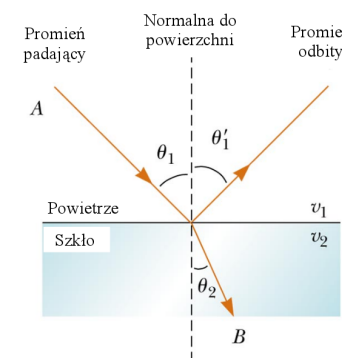
$$\theta_1 = \theta'_1$$



## Załamanie światła

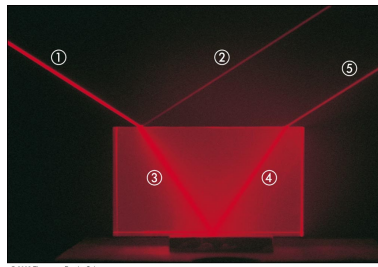
- Gdy światło biegnące w przezroczystym ośrodku napotka granicę z innym przezroczystym ośrodkiem, jego część zostanie odbita, a część biegnie dalej.
- Światło biegnące w drugim ośrodku zostaje zagięte na granicy ośrodków – to **załamanie światła**.

- Promienie: padający, odbity i załamany leżą w tej samej płaszczyźnie.
- Wartość kąta załamania  $\theta_2$  zależy od rodzaju ośrodka.



## Jak biegną promienie odbite i załamane

- 1 Promień padający.
- 2 Promień odbity.
- 3 Promień załamany w plexiglasie.
- 4 Promień odbity wewnętrznie w plexiglasie.
- 5 Promień załamany przy przekraczaniu granicy z plexiglasu do powietrza.



## Coś więcej o załamaniu światła

- Kąt załamania zależy od materiału i kąta padania światła:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

- Droga światła w danym ośrodku jest odwracalna.
- Światło załamuje się, ponieważ ma różne prędkości w różnych ośrodkach.
- Współczynnik załamania  $n$ :

$$n = \frac{c}{v}$$

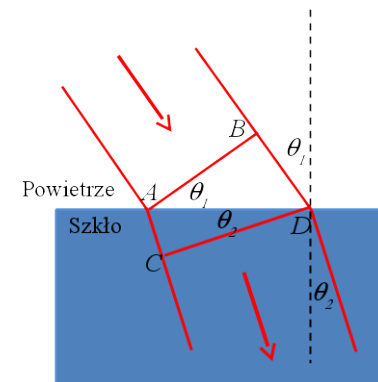
- **Prawo Snella** dla światła przechodzącego z materiału o współczynniku załamania  $n_1$  do materiału z współczynnikiem  $n_2$ :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

## Załamanie światła

- Światło porusza się przez powietrze – w pewnej chwili czoło fali to  $AB$ .
- Prędkość światła w powietrzu to  $c$  a w szkłe  $v < c$ . W tym samym czasie  $B \rightarrow D$ , a  $A \rightarrow C$ :  $AC/v = BD/c$ .
- Z  $\triangle ABD$ :  $BD = AD \sin \theta_1$ .
- Z  $\triangle ACD$ :  $AC = AD \sin \theta_2$ .
- Czyli:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{BD}{AC} = \frac{c}{v} = n$$



Czoło fali  $AB$  jest prostopadłe do fali padającej, a  $CD$  do załamanej.

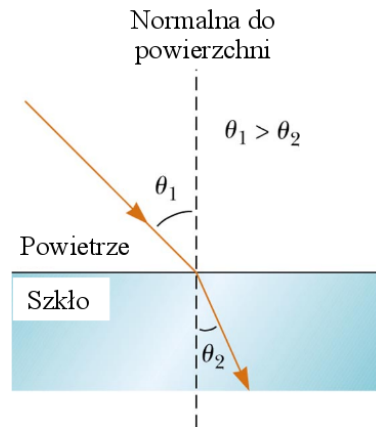
## Współczynnik załamania

- W próżni:  $n = 1$ .
- Dla innych ośrodków  $n > 1$ .
- $n = c/v$  jest wielkością bezwymiarową.

Ośrodek	bezwzględny współczynnik załamania $n$	prędkość światła w ośrodku $v$ [m/s]
diamant	2.42	ok. 125000000
lód	1.31	ok. 229000000
sól kamienna	1.54	ok. 194000000
szkło (różne rodzaje)	od 1.4 do 1.9 (średnio 1,5)	od $1.53 \cdot 10^8$ do $2.15 \cdot 10^8$
woda	1.33	225000000
etanol	1.36	220000000
powietrze	1.0003	299706000
próżnia	1	$c = 299792458$

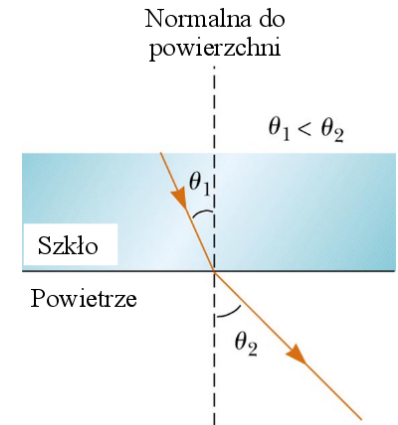
## Załamanie szczegółowo

- Światło może załamać się na granicy z ośrodkiem, w którym ma mniejszą prędkość.
- Kąt załamania jest mniejszy od kąta padania.
- Promień ugiął się w kierunku normalnej.



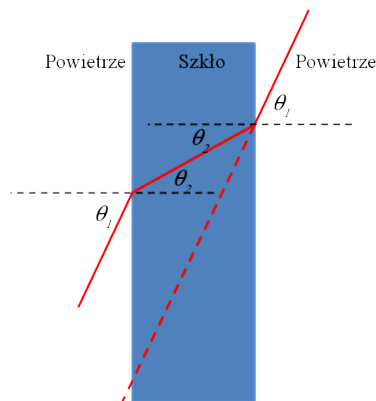
## Załamanie szczegółowo

- Światło może załamać się na granicy z ośrodkiem, w którym ma większą prędkość.
- Kąt załamania jest większy od kąta padania.
- Promień ugiął się w kierunku od normalnej.

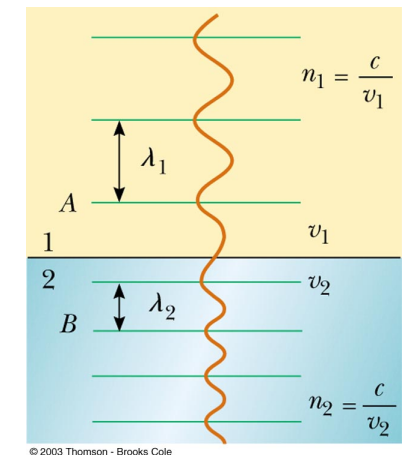


## Załamanie światła – płytka równoległościenna

- Patrząc na przedmiot pod kątem przez grubą szybkę zobaczymy go, jakby był przesunięty.
- Obiekt umieszczony w wodzie będzie wydawał się umieszczony na mniejszej głębokości.



- Gdy światło biegnie z jednego ośrodka do drugiego, to jego **częstość nie ulega zmianie**.
- Zarówno prędkość światła jak i długość fali zmieniają się.
- Czoła fali nie mogą zostać niszczone lub stworzone na granicy  $\Rightarrow f$  się nie zmienia.





## Częstość światła w różnych ośrodkach

- Częstość  $f$  nie zmienia się dla światła biegnącego z jednego ośrodka do drugiego.
- $v = f\lambda$
- $f$  się nie zmienia i w ośrodku prędkość mniejsza od  $c \Rightarrow \lambda$  mniejsze od  $\lambda_0$ .
- Z definicji  $n$ :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

- Stosunek współczynników załamania można wyrazić różnymi zależnościami:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

## Przykład: współczynnik załamania w oku

Długość światła czerwonego z lasera helowo-neonowego to 633 nm w powietrzu a 474 nm w płynie w soczewce oka. Oblicz współczynnik załamania tego płynu, a także prędkość i częstość światła w płynie.

## Strategia rozwiązywania problemów – odbicie i załamanie

- 1 W optyce geometrycznej, gdzie występują promienie, kąty padania itp. zacznij od narysowania porządnego schematu z oznaczeniem wszystkich kątów i współczynników załamania.
- 2 Pamiętaj, by mierzyć kąty padania, odbicia i załamania od *normalnej* do powierzchni.
- 3 Często trzeba będzie skorzystać z prostej geometrii czy trygonometrii w rozwiązywaniu problemów. Zadać sobie pytanie:
  - Jakie mam informacje?
  - Co muszę wiedzieć, by obliczyć wartość tego kąta?
  - Jakie inne wartości kątów lub innych wielkości mogę obliczyć mając takie dane?
- 4 Pamiętaj, że częstość fali elektromagnetycznej nie zmienia się na granicy ośrodków. Długość fali zmienia się  $\lambda = \lambda_0/n$ .

## Przykład – podwójnie odbity promień

Dwa lustra są prostopadłe do siebie. Promień światła porusza się w płaszczyźnie prostopadłej do obu luster (jak na rys.). Jaki jest końcowy kierunek promienia względem początkowego kierunku?

## Test zrozumienia

Stoisz na brzegu jeziora. Zauważasz rybę płynącą pod wodą.

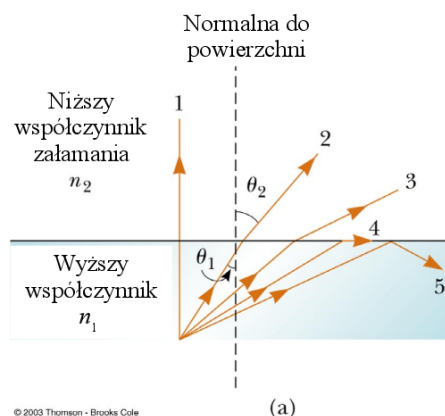
- 1 Jeśli chcesz trafić włócznią w rybę, to należy celować:
  - (a) powyżej
  - (b) poniżej
  - (c) dokładnie w obraz ryby?
- 2 Jeśli masz laser wysokiej mocy, którym możesz zabić i, zarazem, ugotować rybę, to należy celować:
  - (a) powyżej
  - (b) poniżej
  - (c) dokładnie w obraz ryby?

## Całkowite wewnętrzne odbicie



## Całkowite wewnętrzne odbicie

- Całkowite wewnętrzne odbicie może wystąpić, gdy światło porusza się z ośrodka o wyższym współczynniku załamania do ośrodka o niższym współczynniku załamania.
- Promień 5 przedstawia całkowite wewnętrzne odbicie.

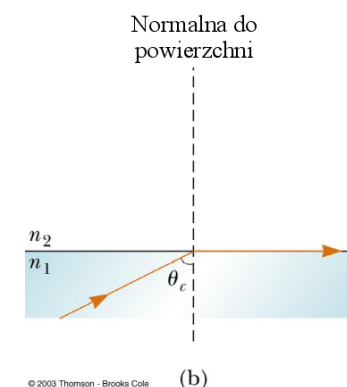


## Kąt krytyczny

- Istnieje taki kąt padania, dla którego kąt odbicia to  $90^\circ$  – to **kąt krytyczny**.

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}, \text{ dla } n_1 > n_2$$

- Dla kątów padania *większych* od kąta krytycznego, promień zostaje całkowicie odbity na granicy ośrodków – zgodnie z prawem odbicia.



- Całkowite wewnętrzne odbicie występuje tylko wtedy, gdy światło biegnie z ośrodka o wyższym do ośrodka o niższym współczynniku załamania.

## Światłowody

- Światłowody wykorzystują zjawisko całkowitego odbicia światła.
- Światło, którym oświetli się przezroczysty cylinder zostanie w nim uwięzione, pod warunkiem, że pada pod kątem większym od krytycznego.
- Plastikowe lub szklane włókna działają jak „rury” do transportu światła.
- Przykładowe zastosowania: medycyna (diagnoza wewnątrz ciała), telekomunikacja.



## Podsumowanie

- Prawo odbicia: kąt padania równa się kątowi odbicia.
- Prawo Snella dla światła załamane na granicy ośrodków o współczynnikach załamania  $n_1$  i  $n_2$ :

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- Kąt krytyczny, powyżej którego następuje całkowite wewnętrzne odbicie:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}, \text{ dla } n_1 > n_2$$

- Częstość światła  $f$  nie zmienia się dla światła biegnącego z jednego ośrodka do drugiego.