



## Turniej Młodych Fizyków 2010

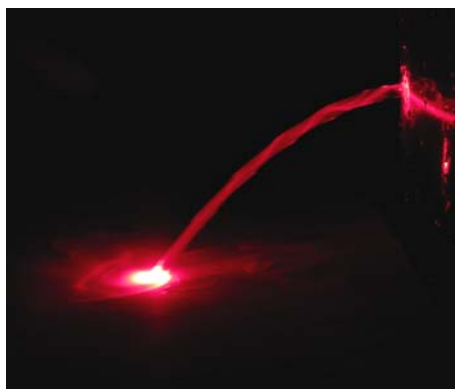
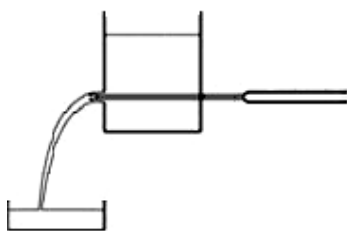
**Autorzy rozwiązania – drużyna III LO im. Unii Lubelskiej w Lublinie:**

*Aleksandra Tchórzewska, Radosław Bartnik, Paweł Karpiński, Łukasz Wawrzyszko, Adam Rosłowicz, Radosław Józwik, Mateusz Padarewski, Emilia Węgrzyn, Krzysztof Wiertel, Magdalena Pisarczyk, Joanna Lipnicka, Michał Kufel, Jarosław Żółkiewski.*

**Opieka naukowa:** *dr Regina Zawisza-Winiarczyk.*

### Zadanie Ciekły światłowód

Strumień wypływający z przezroczystego naczynia wypełnionego cieczą (np. wodą) jest oświetlony od wnętrza naczynia (patrz rysunek). W jakich warunkach strumień działa jak światłowód?



Zdj. 1. Uzyskany światłowód

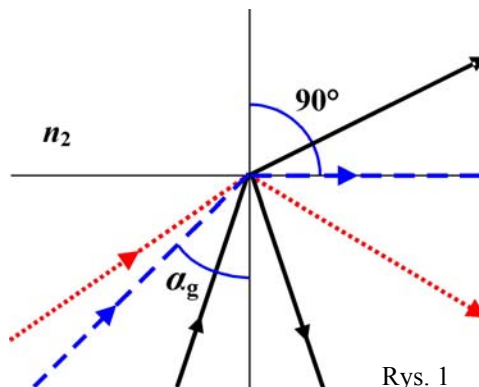
### 1. Teoria

Aby strumień wyciekającej z naczynia wody zachował się jak światłowód, wiązka promieni musi zostać „uwięziona” w wodzie – tak jak jest to przedstawione na zdjęciu obok.

Zjawisko, dzięki któremu obserwujemy światłowody powstałe w wodzie, to **całkowite odbicie wewnętrzne**. Występuje ono wtedy, gdy światło biegnie z ośrodka optycznie gęstszego (czyli o większym współczynniku załamania) do optycznie rzadszego (np. z wody do powietrza) (rys. 1). W tym przypadku, zgodnie z prawem załamania, kąt załamania  $\beta$  jest większy od kąta padania  $\alpha$ , gdyż prędkość światła w wodzie  $V_1$  jest mniejsza od jego prędkości w powietrzu  $V_2$ .

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$

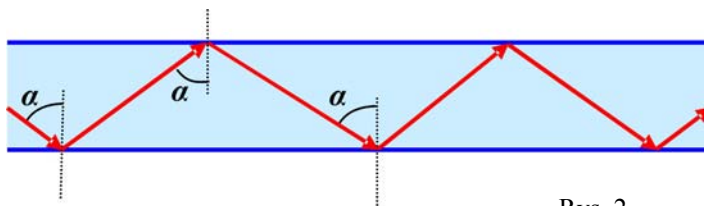
Oprócz promienia załamanego obserwujemy też promień odbity. Zwiększając kąt padania dochodzimy w pewnym momencie do stanu, gdy kąt załamania staje się kątem prostym:  $\beta = 90^\circ$ . Wówczas promień załamany „ślizga się” po powierzchni granicznej (rys. 1, promień narysowany linią przerywaną). Kąt padania  $\alpha_g$ , dla którego kąt załamania jest prosty, nazywa się **kątem granicznym**. Dalsze zwiększanie kąta padania powoduje pełne odbicie od powierzchni granicznej, zgodnie z prawami odbicia (rys. 1, promień narysowany linią kropkowaną). Mówimy, że promień ulega *całkowitemu odbiciu wewnętrznemu*.



Rys. 1

**Kąt graniczny** można bardzo łatwo obliczyć z prawa załamania:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{gdzie } n_1 > n_2$$



Rys. 2

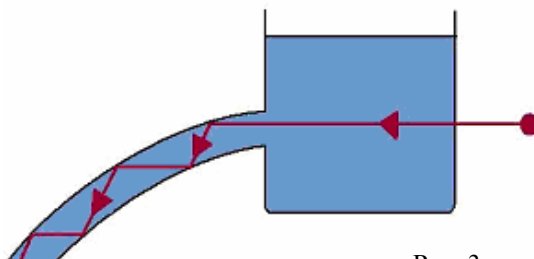
Wiedząc, że:

- $n_1$  to współczynnik załamania wody, wynoszący 1,33,
- $n_2$  to współczynnik załamania powietrza, wynoszący 1,0003,
- $\alpha_g$  to kąt graniczny,
- $\beta$  to kąt, pod jakim promień pada na granicę ośrodków

i przyjmując kąt  $\beta = 90^\circ$  otrzymujemy równanie, z którego wyliczamy  $\alpha_g$  – kąt graniczny:

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \alpha_g = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

Po podstawieniu wartości do równania otrzymujemy wynik  $\alpha_g = 48,8^\circ$ .



Rys. 3

Zatem aby uzyskać światłowód, kąt padania promienia lasera na granicę ośrodków woda–powietrze musi być za każdym razem większy od kąta granicznego. W prostym strumieniu wody (w kształcie walca) wystarczy skierować promień lasera na granicę ośrodków pod kątem większym od kąta  $48,8^\circ$ . Ulegnie on kolejnym odbiciom, pozostając uwięzionym w wodzie (rys. 2). Dzieje się tak, gdyż kąt padania promienia na równoległe płaszczyzny granicy ośrodków jest jednakowy i równy początkowemu kątowi padania.

Jednak w przypadku strumienia wypływającego z boku naczynia, sytuacja wygląda nieco inaczej, gdyż strumień wody na kształt paraboli. Udowodnijmy więc, że promień, który raz wszedł w wypływający strumień pod kątem większym od kąta granicznego, już z niego nie wyjdzie na całym obszarze ciągłego strumienia (rys. 3). Strumień wypływającej z naczynia wody można rozpatrywać przez analogię do rzutu poziomego ciała, którego torem jest parabola.

Na rysunku 4 widać, że w trójkącie ABC

$$\beta > 90^\circ$$

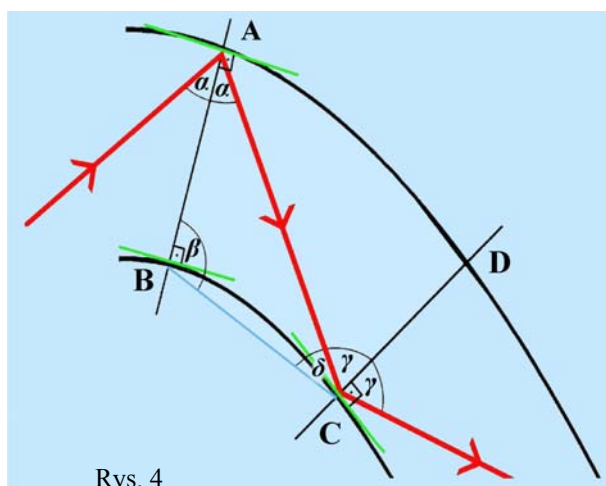
oraz w trójkącie ACD

$$\delta > 90^\circ - \alpha$$

zatem, kąt padania promienia na przeciwną granicę ośrodków

$$\gamma > \alpha$$

co znaczy, że za każdym razem kąt padania promienia lasera na granicę ośrodków jest większy od początkowego, tak więc promień zostanie uwięziony w strumieniu wody.



Rys. 4

## 2. Przebieg doświadczenia i wyniki

W celu sprawdzenia warunków, w jakich powstaje omawiany światłowód, przeprowadziliśmy szereg doświadczeń.

Do doświadczeń użyliśmy:

- butelek o wysokości 32 cm i pojemności 2 litrów,
- lasera o maksymalnej mocy 3 mW.

### **Opis doświadczenia:**

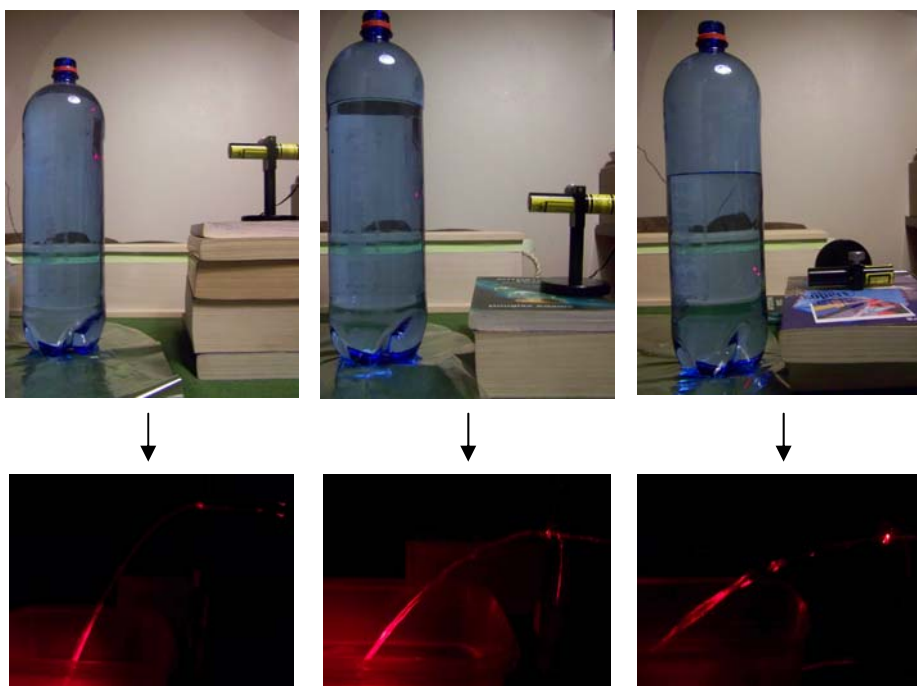
*a) Badamy, czy powstanie światłowodu zależy od wysokości, na jakiej znajduje się otwór, przez który wypływa woda*

W tym celu posłużyliśmy się butelką o jednakowych otworach na trzech różnych wysokościach: 8 cm, 16 cm i 24 cm mierzonych od podstawy – tak jak jest to przedstawione na zdjęciu nr 2. Kształt strumienia wody zależał od wysokości otworu, gdyż w każdym z przypadków woda wypływała z otworów z inną prędkością, co wpływało na parametry paraboli.



Zdj. 2. Butelka z otworami na różnych wysokościach

Okazuje się jednak, że jeżeli poprowadzimy promień lasera całkowicie poziomo w stosunku do butelki, to w każdym przypadku otrzymamy światłowód, niezależnie od kształtu strumienia. Jest to przedstawione na poniższych zdjęciach.



Zdj. 3. Poziomo,  $h = 24\text{cm}$

Zdj. 4. Poziomo,  $h = 16\text{cm}$

Zdj. 5. Poziomo,  $h = 8\text{cm}$

**b) Badamy, czy powstawanie światłowodu zależy od kąta wpadania wiązki światła do otworu w butelce**

W tym celu zmienialiśmy sposób oświetlenia strumienia w trzech przypadkach, pozostawiając laser na jednakowej wysokości, zmieniając jedynie kąt jego nachylenia.



Zdj. 6. Wysokość 24 cm

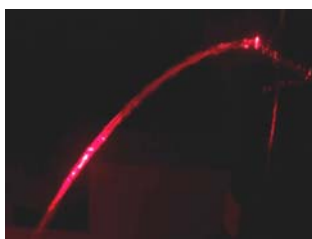


Zdj. 7. Wysokość 16 cm



Zdj. 8. Wysokość 8 cm

Na zdjęciach nr 6, 7 i 8 przedstawiono kąty, pod jakimi należy oświetlić butelkę, aby powstał światłowód. Na wysokości 24 cm kąt ustawienia lasera wynosi  $29^\circ$ . Gdy otwór znajduje się w odległości 16 cm od podłoża, kąt ten będzie wynosić  $16^\circ$ , a na wysokości 8 cm –  $3^\circ$ .



Zdj. 9. Wysokość 24 cm



Zdj. 10. Wysokość 16 cm



Zdj. 11. Wysokość 8 cm

Wysokość, na jakiej umieszczono otwory, wpływa na kształt zakrzywienia strumienia, a co za tym idzie na kąt, pod jakim powinien padać promień.

**c) Badamy, jak wielkość otworu wpływa na powstawanie światłowodu**

Do zbadania tej zależności użyliśmy butelek z otworami o różnej wielkości średnicy (jedno-, trzy- i pięciomilimetrowej).



Zdj. 12. Średnica 3 mm



Zdj. 13. Średnica 1 mm



Zdj. 14. Średnica 5 mm

Kąt padania promieni lasera na zdjęciu 12 wynosi  $16,5^\circ$ , na zdjęciu 13 –  $17^\circ$ , a na zdjęciu 14 –  $16,8^\circ$ .



Zdj. 15. Średnica 3 mm



Zdj. 16. Średnica 1 mm



Zdj. 17. Średnica 5 mm

Jak wynika ze zdjęć światłowód można otrzymać w każdym z przypadków. Kąty, pod jakimi ustawiony jest laser na zdjęciach, różnią się bardzo niewiele i może to wynikać z niedokładności pomiaru. Jednak pewne jest, że im większa średnica, tym bardziej widoczny jest powstający światłowód.

***d) Badamy, czy istnieje taki kąt padania wiązki światła, dla którego światłowód nie powstaje***

Do tej pory badaliśmy sytuacje, kiedy światłowód powstaje. Teraz zajmiemy się takim ustawieniem lasera, aby tworzył z podłożem najmniejszy kąt, pod którym światłowód nie powstanie w strumieniu.



Zdj. 18.



Zdj. 19.

Dla kąta ustawienia lasera równego  $45^\circ$  nie zauważyliśmy całkowitego odbicia wewnętrznego (rys. 18), a zatem nie utworzył się światłowód.

### **3. Analiza**

Opierając się na przeprowadzonych doświadczeniach, możemy stwierdzić, iż powstanie światłowodu w strumieniu wypływającej wody zależy przede wszystkim od kąta, pod jakim ustawimy laser. Jeśli początkowy kąt padania promienia lasera na granicę ośrodków woda–powietrze jest większy od kąta granicznego, to w strumieniu wody powstanie światłowód. Natomiast wysokość otworu, od którego zależy kształt światłowodu, oraz jego wielkość nie ma znaczenia, jeśli dobrze dobierzemy kąt ustawienia lasera.

### **4. Źródła**

- [1] [http://supermozg.gazeta.pl/supermozg/1,91629,5988989,Dlaczego\\_domek\\_topika\\_jest\\_srebrny\\_.html](http://supermozg.gazeta.pl/supermozg/1,91629,5988989,Dlaczego_domek_topika_jest_srebrny_.html)
- [2] [http://supermozg.gazeta.pl/supermozg/1,91629,6016349,Wlokna\\_optyczne\\_w\\_co\\_dziennym\\_zyciu.html](http://supermozg.gazeta.pl/supermozg/1,91629,6016349,Wlokna_optyczne_w_co_dziennym_zyciu.html)
- [3] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Współczynnik\\_załamania](http://pl.wikipedia.org/wiki/Współczynnik_załamania)
- [4] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Kąt\\_graniczny](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kąt_graniczny)

### **Od Redakcji:**

Artykuł z kolorowymi ilustracjami znajduje się na stronie internetowej *Fotonu*.