

# Jaśnie pan bąbelek

Jan SOŁEK\*

\* Student, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Ponieważ temperatura wrzenia wody maleje wraz z malejącym ciśnieniem, w wysokich górach woda wrze w temperaturze niższej niż na poziomie morza. Na Kasprowym Wierchu (1987 m n.p.m.) zagotujemy wodę w temperaturze ok. 93°C. W Himalajach, na szczycie Mount Everest (8848 m n.p.m.) wystarczy 71°C.

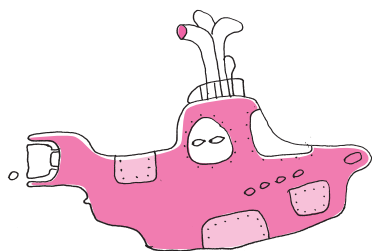
Każdy z nas widział na filmie, jak łódź podwodna sunie, przedzierając się przez masy wody. I zapewne widział też, że łódź pozostawia za sobą szlaczek bąbelków. A skąd właściwie biorą się te bąbelki? Czy mogą mieć one w sobie coś interesującego?

Okazuje się, że za powstawanie bąbelków wydobywających się spod płynącej łodzi odpowiada ten sam efekt, co za gotowanie się wody w górach w temperaturze niższej niż 100°C. Na ostrzu łopaty łodzi podwodnej powstaje wysokie ciśnienie rekompensowane niskim ciśnieniem w innym obszarze łopaty – do tego stopnia, że punkt wrzenia wody obniża się do wartości niższej niż temperatura wody otaczającej łódź. Powstaje więc bąbelek wypełniony parą wodną, który jest otoczony przez wodę w fazie ciekłej. Taki bąbelek zwą *kawitacyjnym*. Mimo że zwykle nie jest on zbyt duży, to bywa dość niebezpieczny dla urządzeń. Tworzenie się bąbelków kawitacyjnych jest efektem niepożądanym. Dlaczego? Mają one tendencję do bycia „kamikadze”. Jeśli bąbelek wyląduje w obszarze o zewnętrznym ciśnieniu większym niż ciśnienie gazu wewnętrznego, to gwałtownie się zapada i często wyrzuca część swoich „wnętrzości” w kierunku materiału, obok którego się znajdował. Wystrzelone wnętrzości uderzają w powierzchnię materiału, powodując mikrouszkodzenia. To zjawisko, zwane *kawitacją*, było wielce niepożądane w gospodarce oraz w zastosowaniach militarnych, ponieważ niszczyło śruby. Co więcej, podczas zapadania się takiego bąbelka powstaje dźwięk, więc łodzie podwodne, korzystające ze śrub generujących dużą kawitację, były łatwe do wykrycia przez sonar.

Na szczęście bąbelki nie tylko szkodzą. Powiedzmy, że w jakiś sposób wytworzymy bąbelek w laboratorium i będziemy go utrzymywali przy „życiu”. Czy odkryjemy w nim coś ciekawego? Odpowiedź nie jest oczywista. Cofnijmy się więc w czasie o 100 lat do deszczowej Anglii. W 1916 roku w celu zwalczania efektu kawitacji wojsko skontaktowało się z Lordem Rayleighem z prośbą, by pomógł zrozumieć to zjawisko. W efekcie Rayleigh sformułował równanie różniczkowe, które opisuje zmianę promienia bąbelka w zależności od czasu. Same równania są dosyć ciekawe i prawie na pewno nie dają się rozwiązać analitycznie. Pozwalają jednak zrozumieć relację między ciśnieniem a promieniem bąbelka. Lord Rayleigh dał więc początek ścisłemu podejściu do tego problemu. Wkrótce zorientowano się, że bąbelki mogą przyspieszać reakcje chemiczne. Zaczęto więc eksperymentować z nimi na różne sposoby.

Okolo 17 lat po wyprowadzeniu równania przez Lorda Rayleigha dwaj panowie, Neda Marinesco i Jean-Jacques Trillat, wykonywali (oczywiście znów na zlecenie wojska) eksperymenty z użyciem ultradźwięków, wody oraz kliszy fotograficznej. Jak się okazało w międzyczasie, ultradźwięki mogą wytworzyć takie same bąbelki jak w przypadku ostrza łopaty, a nawet lepsze! Te bąbelki mogą żyć dłużej, ponieważ są zamknięte niejako w zadanym polu ciśnien. Podczas takiego eksperymentowania, całkowicie przypadkiem, Marinesco i Trillat odkryli, że na kliszy fotograficznej używanej w doświadczeniu powstały małe zaciemnienia. Skądś musiało więc dochodzić światło. Na początku wydało im się to bardzo dziwne, nie wiedzieli, co jest źródłem światła. Jednakże po czasie stało się jasne, że światło wydobywa się z bąbelka. Marinesco i Trillat zauważyli bardzo egzotyczny proces, który teraz zwiemy *sonoluminescencją*. Świecenie pojawia się w chwili zapadnięcia się bąbelka. Jak dochodzi do takiego świecenia? To jest bardzo dobre pytanie, na które nie mamy jak dotąd dobrej odpowiedzi. Do dziś powstają teorie (niektóre wydają się nawet trochę absurdalne) opisujące jakiś aspekt zjawiska, ale niestety najczęściej nie opisują go w pełni i nie do końca zgadzają się z niektórymi doświadczeniami.

Pozwolę sobie teraz przywołać parę moich ulubionych teorii. Jedna z nich przewidywała, że bardzo mały obszar jądra bąbelka może się ogrzać nawet do 10<sup>5</sup> kelwinów i promieniować jak ciało doskonale czarne. Inna mówiła o tym, że za świecenie jest odpowiedzialny efekt Casimira (zjawisko kwantowe). Jeszcze





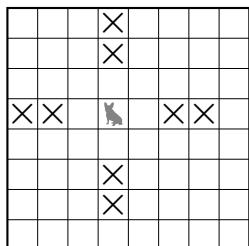
inna, w przeciwieństwie do tej pierwszej, że środek bąbelka schładza się do 10 kelwinów, a potem nagle podgrzewa do 600 K. Jednym słowem, co fizyk, to teoria. Każda z tych teorii tłumaczyła jakiś efekt występujący w tym świeceniu, jednak każda była daleka od pełnej zgody z doświadczeniami. Pomimo to wydaje się, że w ostatnich latach dokonał się pewien postęp i aktualnie jesteśmy na dobrej drodze do stworzenia teorii sonoluminescencji. Wiele wniosków spektroskopowe badania światła, dzięki którym okazało się, że pojęcie temperatury w powszechnym tego słowa znaczeniu traci sens w odniesieniu do bąbelka kawitacyjnego. Przypomnijmy sobie, co to znaczy, że obiekt ma jakąś temperaturę. Oznacza to, że molekuly mają pewien rozkład energii (związany z ruchem postępowym), który jest najczęściej rozkładem Boltzmanna. W wyniku ostatnich doświadczeń ustalono, że wewnątrz bąbelka powstaje egzotyczna plazma, gdzie rozkład energii jest wysoce nieoczywisty. Skoro jest plazma, to muszą też być wybite elektrony. Jak jednak dochodzi do wybicia elektronów z atomów? Przeprowadzone obliczenia pokazały jednoznacznie, że w środku bąbelka powstaje tak wysokie ciśnienie, że zachodzi pewien efekt kwantowy. Odpowiada on za obniżenie energii jonizacji elektronów. Podobny efekt występuje w gwiazdach. W tym kontekście można powiedzieć, że naukowcy bez dużej trudności mogą tworzyć gwiazdy w probówce.

Chociaż jesteśmy na dobrej drodze do sformułowania teorii sonoluminescencji, to nadal nie znamy pełnego modelu teoretycznego, który porządkowałby ten bałagan, i trudno powiedzieć, co się zmieni w tej kwestii w najbliższym czasie. Wydaje się dość nieprawdopodobne i jednocześnie fascynujące, że tak niepozorny bąbelek, który nietrudno stworzyć (choćby kręcąc śrubą statku podwodnego), jest tak skomplikowanym zjawiskiem, że do dzisiaj budzi wiele kontrowersji. Te wielkie kontrowersje dotyczą małego bąbelka (często mierzącego kilka mikrometrów), którego wielkość objawia się w jego złożoności.

Przygotował Dominik BUREK



## Zadania



Rys. 1

**M 1660.** Dana jest liczba całkowita  $k > 1$ . Suma pewnego dzielnika liczby  $k$  oraz dzielnika liczby  $k - 1$  jest równa  $\ell$ , przy czym  $\ell > k$ . Udowodnij, że co najmniej jedna z liczb  $\ell - 1$ ,  $\ell + 1$  jest złożona.

Rozwiązanie na str. 24

**M 1661.** Na polach dużej szachownicy  $8 \times 8$  umieszczamy pieski. Dwa pieski szczekają na siebie, jeśli znajdują się w tym samym wierszu lub kolumnie w odległości dwóch lub trzech pól (rys. 1). Ile najwięcej piesków można ustawić na szachownicy tak, aby żaden nie szczekał?

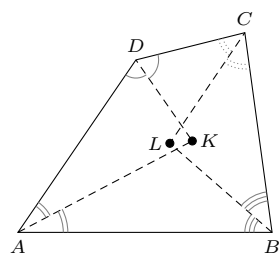
Rozwiązanie na str. 14

**M 1662.** W czworokącie wypukłym  $ABCD$  dwusieczne kątów wewnętrznych przy wierzchołkach  $A$  i  $D$  przecinają się w punkcie  $K$ , natomiast dwusieczne kątów wewnętrznych przy wierzchołkach  $B$  i  $C$  przecinają się w punkcie  $L$  (rys. 2) Udowodnij, że

$$2KL \geq |AB + CD - BC - DA|.$$

Rozwiązanie na str. 19

Przygotował Andrzej MAJHOFER



Rys. 2

**F 1015.** W poziomej rurze znajduje się woda pod ciśnieniem  $p = 4 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  (4 atmosfery). Na jaką wysokość wystrzeli strumień wody, gdy w górnej ścianie rury powstanie mały otwór? Przyjmij, że gęstość wody wynosi  $\rho \approx 1 \text{ g/cm}^3$ , a przyspieszenie ziemskie  $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ .

Rozwiązanie na str. 18

**F 1016.** Oszacuj, jak szybko idziemy podczas spaceru, gdy poruszamy się tak, żeby zużywać jak najmniej energii. Przyjmij, że podczas spaceru długość kroku wynosi  $s \approx 70 \text{ cm}$ , a długość nogi dorosłego człowieka to  $l \approx 90 \text{ cm}$ . Przyspieszenie ziemskie  $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ .

Rozwiązanie na str. 13