

## Dwie bańki i już lato... – czyli o rozszerzalności cieplnej

Grzegorz Karwasz

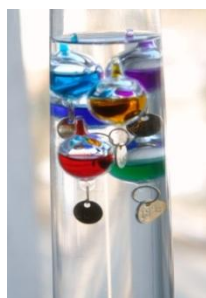
Zakład Dydaktyki Fizyki,

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Termometr Galileusza to szklana kolumnienka wypełniona bezbarwną cieczą, w której pływają bańki częściowo wypełnione zabarwioną cieczą. W niskiej temperaturze wszystkie bańki pływają, w wysokiej – wszystkie toną. Termometr jest najbardziej przydatny na wiosnę, kiedy temperatura jest już dodatnia, ale nie przekracza  $34^{\circ}\text{C}$ . Za początek prawdziwej wiosny można by więc przyjąć moment, kiedy w samo południe jedna z baniek – ta wskazująca  $17^{\circ}\text{C}$  – zatonie, jak na fot. 1a. Dlaczego na wiosnę jedna bańka tonie, a latem toną prawie wszystkie?



Fot. 1a. Termometr zwany „termometrem Galileusza”



Fot. 1b. Szczegóły baniek z aluminiowymi etykietami-obciążnikami



Fot. 2. Rekonstrukcja oryginalnego termometru Galileusza w Muzeum Nauki w Londynie

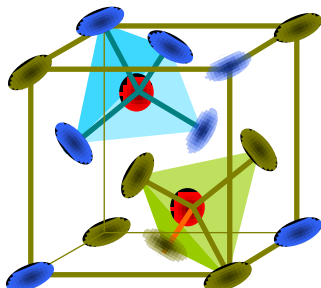
Wyjaśniając najprościej: „ze wzrostem temperatury ciecz w kolumnie się rozszerza, jej gęstość maleje i pojemniczki toną”.

Ktoś może zadać pytanie: „Czy wewnątrz pojemniczków ciecz się nie rozszerza?” Oczywiście, że tak, ale nie wpływa to na objętość całej bańki. Objętość bańki jest określona jedynie przez rozszerzalność szkła. Współczynnik rozszerzalności szkła jest rzędu  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , a cieczy w kolumnie termometru jest rzędu  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ . Ciecz w kolumnie wraz ze wzrostem temperatury rozszerza się bardziej niż bańka i przy praktycznie tej samej objętości bańki siła wyporu maleje – bańka tonie.

Czy wiadomo z góry, że bańka zatonie w określonej temperaturze? Jej objętość jest dobrana nieco na *chybil-trafil*, bo dmuchanie szkła nie jest takie proste. Oczywiście, tego nie wiadomo, zanim pojemniczków nie dociąży się dodatkowo za pomocą aluminiowych ciężarków (zob. fot. 1b). Gotowe pojemniczki wrzuca się do cieczy i określa, w jakiej temperaturze toną. Wówczas dopiero dostają etykietę-ciężarek.

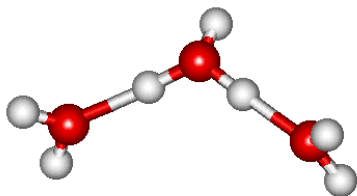
Jaką cieczą napełnia się kolumnienkę? Czy wszystkie ciecze mają stosunkowo duże współczynniki rozszerzalności termicznej, a ciała stałe stosunkowo małe?

1. Szkło nawet wśród ciał stałych wyróżnia się niskim współczynnikiem rozszerzalności. Wynosi on  $8-10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  dla „zwykłego” szkła sodowego, czyli okiennego lub butelkowego, a  $3,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  dla szkła borowego, tzw. pyrexu, z którego produkuje się „nietłukące” szklanki [1].
2. W zasadzie im niższa temperatura topnienia substancji, tym większy współczynnik rozszerzalności: ołów, o temperaturze topnienia  $t_p = 327^{\circ}\text{C}$  ma współczynnik rozszerzalności (mierzony w temperaturze pokojowej)  $30 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , aluminium ( $t_p = 660^{\circ}\text{C}$ )  $23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , żelazo  $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ( $t_p = 1535^{\circ}\text{C}$ ), wolfram  $4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  ( $t_p = 3350^{\circ}\text{C}$ ).
3. Współczynnik rozszerzalności dla danego ciała zmienia się wraz z temperaturą – im bliżej temperatury topnienia tym jest większy, np. dla wolframu w temperaturze  $500^{\circ}\text{C}$  wynosi  $4,15 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , w temperaturze  $2000^{\circ}\text{C}$  –  $5,29 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , zaś w pobliżu temperatury topnienia, czyli  $3000^{\circ}\text{C}$ , współczynnik rozszerzalności wynosi  $6,06 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ . Wzór na rozszerzalność objętościową jest jedynie przybliżeniem:  $\Delta V = V_0 \alpha (t - t_0)$
4. Ciecz w termometrze Galileusza musi być dobrana tak, aby miała współczynnik rozszerzalności termicznej dość duży, np. alkohol etylowy ma współczynnik  $11 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  (w  $20^{\circ}\text{C}$ ), ponad 5 razy większy niż woda w tej temperaturze. Jeszcze większy współczynnik rozszerzalności, przy niskiej gęstości, mają lekkie węglowodory. W termometrach Galileusza (np. fot. 1), używa się zazwyczaj nafty, składającej się głównie z heptanu (o współczynniku rozszerzalności  $12 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  w  $20^{\circ}\text{C}$  i gęstości zaledwie  $0,68 \text{ g/cm}^3$  [2]) lub jej pochodnych – eterów.
5. Zagadnienie wartości współczynnika rozszerzalności jest dużo bardziej subtelne. Istnieją stopy, jak np. inwar (stal o dużej zawartości niklu i małej zawartości węgla, używana na wykonanie sprężyn w wahadełkach zegarków kieszonkowych), które mają ten współczynnik bardzo mały, prawie zerowy ( $0,3 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  „super-inwar”). Dopiero ostatnio odkryto, jaki jest mechanizm fizyczny tego praktycznie zerowego współczynnika rozszerzalności. Wydaje się, że istotne jest uporządkowanie magnetyczne atomów żelaza i atomów niklu, ale wynik ten wymaga dalszych prac [3].
6. Niektóre ciała stałe mają współczynnik rozszerzalności nawet ujemny, np. półprzewodnik german w zakresie temperatur  $20-40 \text{ K}$ . Oznacza to, że w miarę wzrostu temperatury ciała zmniejsza się ich objętość. Wynika to z tego, że nie zawsze większa amplituda drgania atomów (wyższa temperatura) prowadzi do zwiększenia średnich odległości atomowych. Czasem prowadzi do lepszego „upakowania” kryształu. Tak zachowuje się tlenek srebrowo-miedziowy o skomplikowanej strukturze kryształu [4] pokazanej na rys. 3.



Rys. 3. Struktura tlenku srebra (I) i tlenku miedzi (I)  $\text{Ag}_2\text{O}\cdot\text{Cu}_2\text{O}$  – podstruktury dwóch tlenków, w formie czworościanów foremnych są umieszczone w przeciwległych wierzchołkach sześciennej struktury kryształu. Ujemny współczynnik rozszerzalności temperaturowej jest związany z obracaniem się czworościanów wraz ze wzrostem temperatury, co prowadzi do lepszego upakowania kryształu [4]

7. Jak wszyscy wiemy pospolita woda też ma współczynnik rozszerzalności ujemny poniżej  $4^\circ\text{C}$ . Wynika to z większego upakowania cząsteczek wody w fazie ciekłej niż w lodzie. Chemicy wyjaśniają, że poniżej  $4^\circ\text{C}$  woda w fazie ciekłej tworzy łańcuchy tak jak polimery i w temperaturze  $4^\circ\text{C}$  te łańcuchy są najbardziej „upakowane”.
8. Struktura wody w fazie ciekłej może być jednak bardziej skomplikowana. Prace doświadczalne i obliczenia [5] wskazują, że cząsteczki wody mogą tworzyć „zlepki” – klastery. Czy większe klastery są naprawdę stabilne? Tego nie wiemy, badania są ciągle w toku (rys. 4), więc młody czytelnik zdąży odebrać „Nobla”, jeśli się poświęci tej dziedzinie.



Rys. 4. Piramidalna struktura jonu  $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_3$  – proton przynależy do jednej z cząsteczek wody (obliczenia własne [6]). Struktura zaproponowana po raz pierwszy przez M. Eigena, laureata Nagrody Nobla [5]. Być może również większe struktury występują w wodzie w stanie ciekłym, chociaż obecne dane nie dają jednoznacznych odpowiedzi [6]. Stabilność tych struktur zależy od temperatury, co mogłoby wyjaśniać anomalną rozszerzalność termiczną wody

9. Pozostaje faktem, że woda dopiero powyżej  $18^\circ\text{C}$  nadaje się do letnich kąpie-li. Nie pozostaje nic innego jak życzyć upalnego lata, z *Fotonem* w plecaku!

P.S. Nie wiemy, czy kolorowy termometr jest naprawdę pomysłem Galileusza. W Muzeum Nauki w Londynie jest inny termometr Galileusza, pierwowzór termometrów współczesnych, z dużym zbiornikiem cieczy i wąską rurką do odczytu, fot. 2.

#### Literatura

- [1] CRC Handbook of Chemistry and Physics, R. C. Weast, Boca Raton, 1987
- [2] C.L. Yaws, W. Braker, Matheson Gas Data Book, McGraw-Hill (2001)
- [3] M. van Schilfgaarde, I. A. Abrikosov, B. Johansson, Origin of the Invar effect in iron–nickel alloys, *Nature* **400** (1999) 46
- [4] [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics\\_is\\_fun/posters/invar5.ppt](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Physics_is_fun/posters/invar5.ppt)
- [5] [http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/publikacje/2001\\_Swarm\\_experiment\\_on\\_ionized.pdf](http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/publikacje/2001_Swarm_experiment_on_ionized.pdf)
- [6] <http://www.fizyka.umk.pl/~karwasz/VITERBO2.PPT>