

Piotr Durniat
I rok, Fizyka
Wtorek, 8:00-10:15

Data wykonania pomiarów:
06.05.2025

Prowadząca:
dr Iwona Mróz

Ćwiczenie nr 29

Anomalia rozszerzalności cieplnej wody

Spis treści

1	Wstęp teoretyczny	2
2	Opis doświadczenia	2
3	Opracowanie wyników pomiarów	3
3.1	Tabele pomiarowe	3
3.2	Zmiana objętości wody	4
3.3	Względna zmiana gęstości	5
4	Ocena niepewności pomiarowych	5
4.1	Niepewność pomiaru temperatury	5
4.2	Niepewność pomiaru wysokości słupa cieczy	5
5	Wnioski	5
6	Wykresy	6

1 Wstęp teoretyczny

Większość ciał zmienia swoją objętość liniowo wraz z temperaturą zgodnie z równaniem:

$$V = V_0(1 + \beta T) \quad (1)$$

gdzie V to objętość w temperaturze T (w $^{\circ}\text{C}$), V_0 to objętość w 0°C , a β to współczynnik rozszerzalności objętościowej, który zależy od rodzaju substancji i stanu skupienia.

W cząsteczkach występują różne rodzaje wiązań atomowych:

- wiązania kowalencyjne - powstają przez nakładanie się orbitali atomowych
- wiązania jonowe - między jonami dodatnimi i ujemnymi
- wiązania wodorowe - szczególnie istotne w przypadku wody

Cząsteczka wody (H_2O) jest dipolem, gdzie atomy wodoru mają ładunek dodatni, a atom tlenu ujemny. Wiązania OH tworzą kąt $104,5^{\circ}$, co jest spowodowane polarnością wiązań. W stanie ciekłym cząsteczki wody łączą się wiązaniami wodorowymi, tworząc strukturę przypominającą kryształ z bliskim porządkiem.

Woda zachowuje się nietypowo w zakresie temperatur $0-4^{\circ}\text{C}$. Powyżej 4°C jej objętość maleje wraz z obniżaniem temperatury, jak u większości ciał. Jednak w zakresie $0-4^{\circ}\text{C}$ objętość wody rośnie przy ochładzaniu, osiągając minimum (a więc maksymalną gęstość) w temperaturze 4°C . To zjawisko nazywamy anomalną rozszerzalnością cieplną wody.

Poniżej 4°C cząsteczki wody intensywnie asocjują, tworząc heksagonalną strukturę podobną do lodu. Ta struktura ma duże, otwarte przestrzenie, co prowadzi do zmniejszenia gęstości (około $0,9 \text{ g/cm}^3$ dla lodu). Podczas topnienia wiązania wodorowe pękają, pozwalając cząsteczkom na ciaśniejsze ułożenie, co powoduje zmniejszenie objętości o około 10% względem fazy ciekłej.

Ta anomalia ma istotne znaczenie ekologiczne - zimą woda o temperaturze 4°C opada na dno zbiornika, podczas gdy zimniejsza unosi się do góry i zamarza na powierzchni. Lód izoluje zbiornik, a woda przy dnie pozostaje w okolicach 4°C , umożliwiając przetrwanie organizmów wodnych.

Wstęp teoretyczny opracowano na podstawie następujących źródeł: podręcznika [1], który zawiera podstawowe informacje o rozszerzalności cieplnej ciał, oraz wstępu do ćwiczenia [2].

2 Opis doświadczenia

Doświadczenie polegało na badaniu zmiany objętości wody w funkcji temperatury. Wykonano je w następujących etapach:

- Przygotowano aparaturę pomiarową składającą się z:
 - kolby z wodą destylowaną ($V_{\text{kolby}} = 300 \text{ cm}^3$)
 - kapilary o średnicy wewnętrznej $d = 1,7 \text{ mm}$
 - termometru elektronicznego o dokładności $0,1^{\circ}\text{C}$
 - mieszadła magnetycznego
- Przeprowadzono pomiary w dwóch seriach:
 - ochładzanie: od 11°C do $0,3^{\circ}\text{C}$ (co $0,2^{\circ}\text{C}$)
 - ogrzewanie: od $0,3^{\circ}\text{C}$ do 11°C (co $0,2^{\circ}\text{C}$)
- Dla każdej temperatury zmierzono wysokość słupa wody w kapilarze
- Na podstawie pomiarów obliczono:
 - objętość wody w kapilarze
 - całkowitą objętość wody

- zmianę objętości względem minimalnej
- względną zmianę gęstości

3 Opracowanie wyników pomiarów

3.1 Tabele pomiarowe

T [°C]	h [mm]	
	Seria 1	Seria 2
11.0	80	71
10.8	77	70
10.6	75	68
10.4	74	66
10.2	72	64
10.0	69	62
9.8	68	60
9.6	66	58
9.4	64	56
9.2	63	55
9.0	61	54
8.8	61	51
8.6	60	51
8.4	56	49
8.2	55	48
8.0	53	46
7.8	52	44
7.6	51	44
7.4	50	43
7.2	49	41
7.0	47	40
6.8	46	39
6.6	45	37
6.4	44	37
6.2	43	36
6.0	42	40
5.8	42	36
5.6	42	34
5.4	40	32
5.2	40	32
5.0	39	< 30
4.8	38	< 30
4.6	38	< 30
4.4	38	< 30
4.2	37	< 30
4.0	37	< 30
3.8	37	< 30
3.6	37	< 30
3.4	37	< 30
3.2	37	< 30

T [°C]	h [mm]	
	Seria 1	Seria 2
3.0	37	< 30
2.8	37	30
2.6	37	30
2.4	38	30
2.2	38	32
2.0	38	33
1.8	39	34
1.6	39	34
1.4	40	35
1.2	40	36
1.0	41	37
0.8	41	38
0.6	42	39
0.4	43	40
0.2	43	41

Tabela 1: Wyniki pomiarów wysokości słupa wody w zależności od temperatury

Średnica wewnętrzna kapilary wynosi $d = 1,7$ mm.

3.2 Zmiana objętości wody

Na podstawie zmierzonej wysokości słupa wody obliczono objętość wody w kapilarze według wzoru:

$$V = V_{\text{kolby}} + \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot h \quad (2)$$

gdzie $d = 1,7$ mm jest średnicą wewnętrzną kapilary, a h jest wysokością słupa wody, $V_{\text{kolby}} = 300 \cdot 10^{-6}$ m³ jest objętością kolby.

Obliczono również zmianę objętości ΔV względem objętości minimalnej (dla temperatury 4°C):

$$\Delta V = V - V_{4^\circ C} \quad (3)$$

Tabela 2: Wartości objętości wody oraz zmiany objętości (wybrane temperatury)

T [°C]	V_1 [m ³]	V_2 [m ³]	ΔV_1 [m ³]	ΔV_2 [m ³]
11,0	$3,0018 \cdot 10^{-4}$	$3,0016 \cdot 10^{-4}$	$9,76 \cdot 10^{-8}$	$9,31 \cdot 10^{-8}$
10,0	$3,0016 \cdot 10^{-4}$	$3,0014 \cdot 10^{-4}$	$7,26 \cdot 10^{-8}$	$7,26 \cdot 10^{-8}$
9,0	$3,0014 \cdot 10^{-4}$	$3,0012 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$5,45 \cdot 10^{-8}$
8,0	$3,0012 \cdot 10^{-4}$	$3,0010 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-8}$	$3,63 \cdot 10^{-8}$
7,0	$3,0011 \cdot 10^{-4}$	$3,0009 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-8}$	$2,27 \cdot 10^{-8}$
6,0	$3,0010 \cdot 10^{-4}$	$3,0008 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$
5,0	$3,0009 \cdot 10^{-4}$	$3,0007 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-9}$	$4,54 \cdot 10^{-9}$
4,0	$3,0008 \cdot 10^{-4}$	$3,0007 \cdot 10^{-4}$	$0,00 \cdot 10^{-8}$	$0,00 \cdot 10^{-8}$
3,0	$3,0008 \cdot 10^{-4}$	$3,0007 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-9}$	$4,54 \cdot 10^{-9}$
2,0	$3,0009 \cdot 10^{-4}$	$3,0007 \cdot 10^{-4}$	$4,54 \cdot 10^{-9}$	$9,08 \cdot 10^{-9}$
1,0	$3,0009 \cdot 10^{-4}$	$3,0008 \cdot 10^{-4}$	$6,81 \cdot 10^{-9}$	$1,13 \cdot 10^{-8}$
0,2	$3,0010 \cdot 10^{-4}$	$3,0009 \cdot 10^{-4}$	$9,08 \cdot 10^{-9}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$

Pełne dane objętości dla wszystkich pomiarów przedstawiono na wykresie (Rys. 1). Można zauważyć, że woda osiąga najmniejszą objętość (największą gęstość) w okolicy temperatury 4°C, co potwierdza zjawisko anomalii rozszerzalności cieplnej wody.

3.3 Względna zmiana gęstości

Względna zmiana gęstości wody w temperaturze 10°C względem maksymalnej gęstości. Na podstawie wykresu (Rys. 1) woda osiąga największą gęstość w temperaturze 4°C.

$$\begin{aligned}
 V_{10^{\circ}C} &= 300 \cdot 10^{-6} + \frac{\pi \cdot 0,0017^2 \cdot 0,037}{4} = 0.00030008 \text{ m}^3 \\
 V_{4^{\circ}C} &= 300 \cdot 10^{-6} + \frac{\pi \cdot 0,0017^2 \cdot 0,069}{4} = 0.0003001 \text{ m}^3 \\
 \frac{\rho(T=4^{\circ}C) - \rho(T=10^{\circ}C)}{\rho_{T=4^{\circ}C}} &= \frac{\frac{m}{V(4^{\circ}C)} - \frac{m}{V(10^{\circ}C)}}{\frac{m}{V(4^{\circ}C)}} \\
 &= \frac{V_{10^{\circ}C} - V_{4^{\circ}C}}{V_{10^{\circ}C}} = \frac{0.0003001 - 0.00030008}{0.0003001} = 0.00024 = 2,4 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

4 Ocena niepewności pomiarowych

4.1 Niepewność pomiaru temperatury

Do pomiaru temperatury użyto termometru elektronicznego o niepewności maksymalnej $\Delta_d T = 0,1^{\circ}C$. Niepewność standardową oszacowano za pomocą metody typu B:

$$u(t) = \frac{\Delta_d T}{\sqrt{3}} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} \approx 0,0577^{\circ}C \quad (4)$$

4.2 Niepewność pomiaru wysokości słupa cieczy

Wysokość słupa wody w kapilarze była odczytywana z niepewnością maksymalną $\Delta_d h = 0,001 \text{ m}$. Niepewność standardową oszacowano za pomocą metody typu B:

$$u(h) = \frac{\Delta_d h}{\sqrt{3}} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} \approx 0,00058 \text{ m} \quad (5)$$

Wykres razem z niepewnościami przedstawiono na Rys. 2.

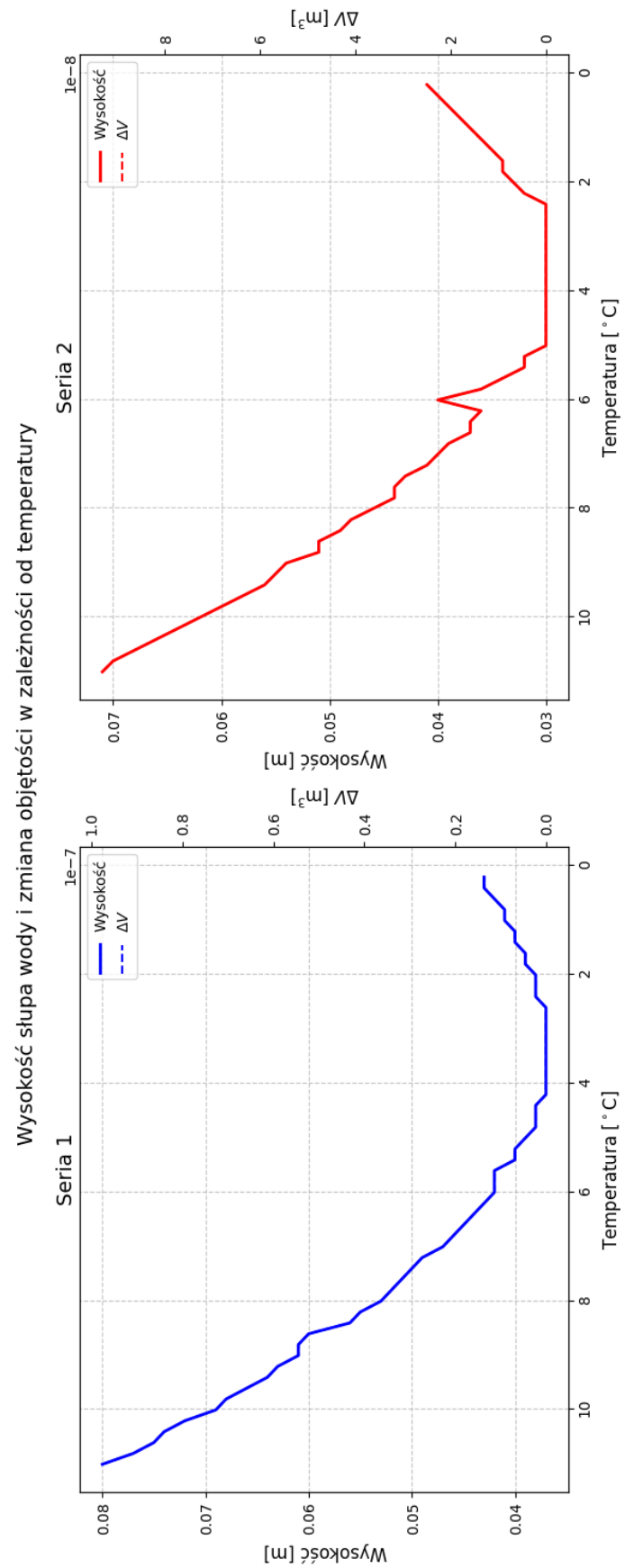
5 Wnioski

- Woda osiąga maksymalną gęstość w temperaturze 4°C, co potwierdza zjawisko anomalii rozszerzalności cieplnej wody [1].
- Względna zmiana gęstości wody między temperaturą 10°C a 4°C wynosi:

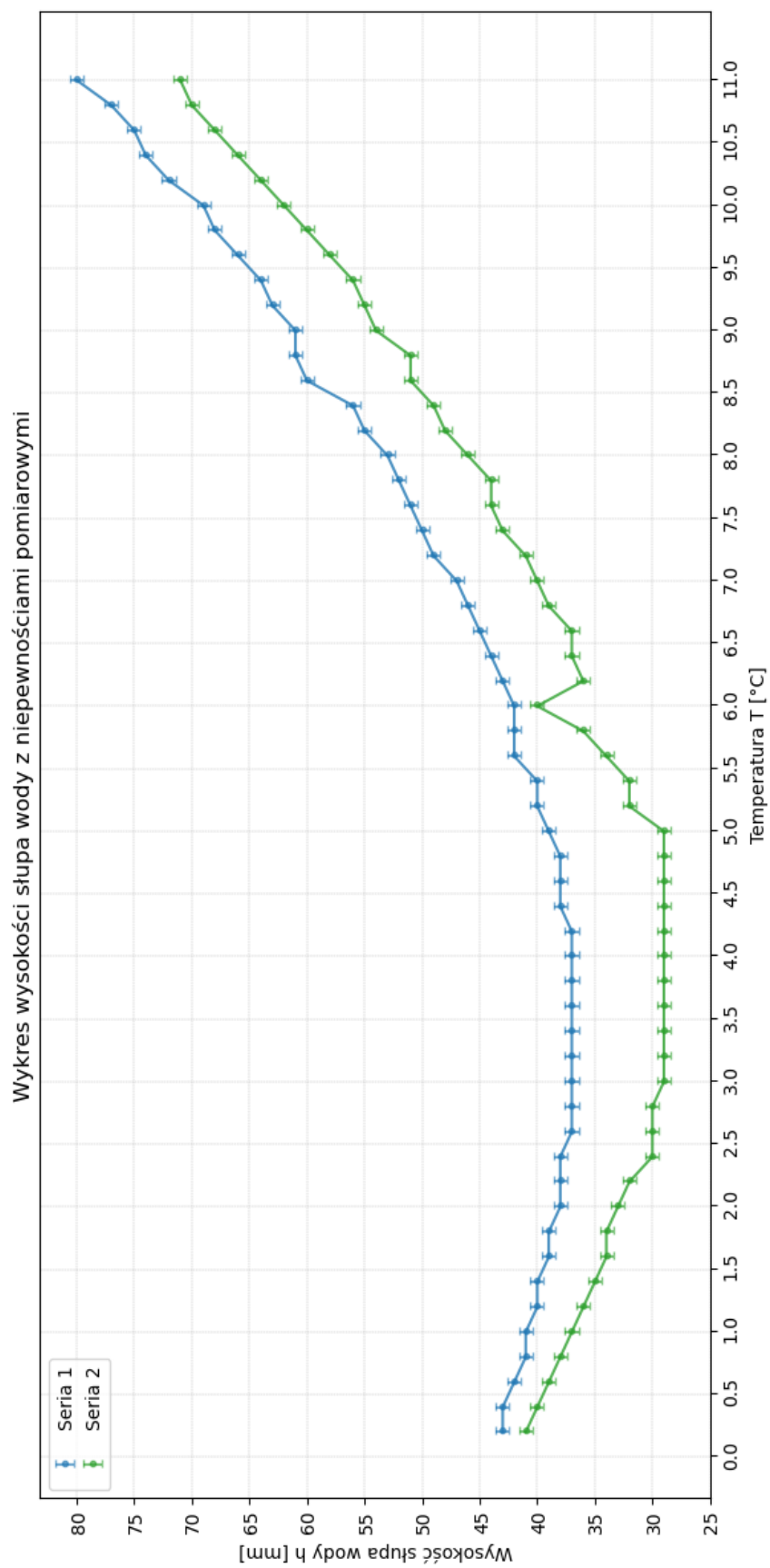
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = (2,43 \pm 0,07) \cdot 10^{-4}$$

- Niepewność pomiaru wysokości słupa wody wynosi $u(h) = 0,00058 \text{ m}$, a niepewność pomiaru temperatury wynosi $u(t) = 0,0577^{\circ}C$.
- Wyniki pomiarów potwierdzają, że woda zachowuje się nietypowo w zakresie temperatur 0 – 4°C, zwiększając swoją objętość wraz ze spadkiem temperatury.

6 Wykresy



Rysunek 1: Wysokość słupa wody oraz zmiana objętości wody w zależności od temperatury.



Rysunek 2: Wysokość słupa wody oraz zmiana objętości wody w zależności od temperatury z uwzględnieniem niepewności.

Literatura

- [1] William Moebs, Samuel J. Ling, and Jeff Sanny. *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2*. OpenStax, 2018. Dostęp: 14.04.2024.
- [2] Instytut Fizyki Doświadczalnej UW. Anomalia rozszerzalności cieplnej wody, 2023.