

Układ mechaniczny

Z mechaniki klasycznej wiadomo, że gdy:

$\mathbf{a}=0$ oraz $\mathbf{V}=0$ to układ jest w stanie równowagi

Obowiązuje zasada zachowania energii mechanicznej

Układ mechaniczny:

Układ nad którym możemy wykonywać pracę, a jego stan zależy tylko od ‘współrzędnych położeniowych’

Np. energia kinetyczna może być zamieniona w energię potencjalną sprężystości i naprężenia zależą tylko i wyłącznie od przyłożonych sił (np. wahadło sprężynowe bez tłumienia !)

Nasze doświadczenie pokazuje, że istnieje wiele układów których zachowanie nie jest zgodne z powyższą definicją ‘układu mechanicznego’

Układ termodynamiczny

Rozważmy płyn w naczyniu z mieszadłem.

1. Stan początkowy płynu jest nieruchomy,
2. Energicznie go mieszamy
3. Czekamy aż jego prędkość się ustali
4. Stan końcowy płynu jest też nieruchomy

Czy stan końcowy jest dokładnie taki sam jak stan początkowy ?
Gdyby obserwator nie widział przebiegu (2-3)
to czy stan 1 i 4 są różne czy takie same ?

Układ termodynamiczny

to układ w którego stan opisuje się przy pomocy skończonego zbioru makroskopowych wielkości, x_1, x_2, \dots, x_n .

Równowaga

Układ termodynamiczny A jest w równowadze,
gdy wartości opisujących go zmiennych x_1, x_2, \dots, x_n , nie zmieniają się w czasie

Gdy nie ma równowagi, termodynamika klasyczna nie mówi nic o stanie układu !

Np. podczas gwałtownego rozprężania gazu nie można podać wartości ciśnienia dla całego układu - nie mówimy wtedy o stanie układu !

Stany równowagi

dla układów termodynamicznych są opisane przez podanie energii wewnętrznej U , objętości V oraz liczby moli składników N_1, N_2, \dots, N_r .

Przemiana pseudostatyczna

Przemiana pseudostatyczna:

Układ termodynamiczny przechodzi przez sekwencje stanów równowagowych i każda ze zmiennych x_k jest opisana ciągłą funkcją $x_k = f_k(t)$. Przemiana pseudostatyczna przebiega w infinytezymalnych krokach.

Układ przechodzi od stanu A' do stanu A'' , gdzie dla

$$t' < t < t'' \quad f_k(t') = x_k' \quad \text{oraz} \quad f_k(t'') = x_k''$$

Kryterium praktyczne : $dx_k/dt \ll \Delta x_k/\tau$, (τ – czas relaksacji).

Przemiana odwracalna

Rozważymy układ termodynamiczny, oznaczony jako K, oraz jego otoczenie.

Przemiana od stanu A do stanu B jest odwracalna

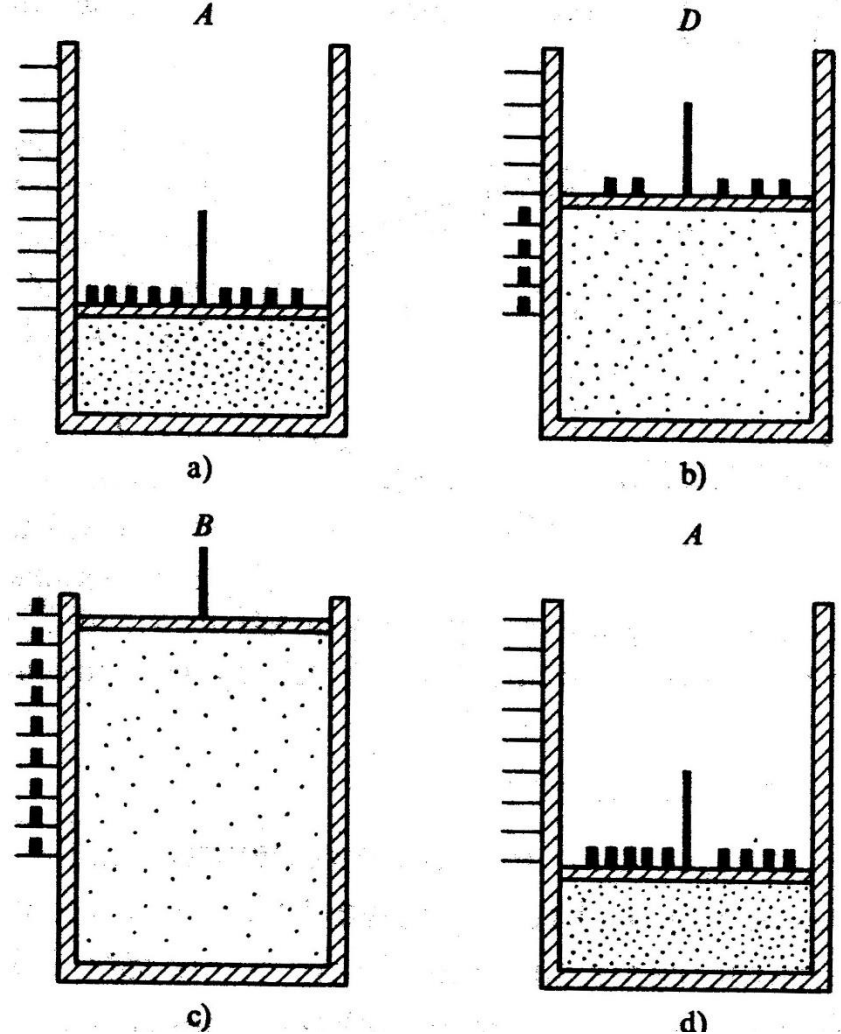
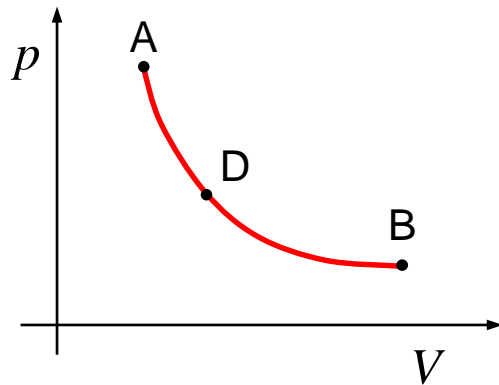
jeżeli istnieje przemiana od stanu B do stanu A która nie zmienia stanu układu K ani stanu jego otoczenia.

Przemiana od stanu A do stanu B jest odwracalna

jeżeli istnieje przemiana od stanu B do stanu A która nie zmienia stanu układu K ani stanu jego otoczenia.

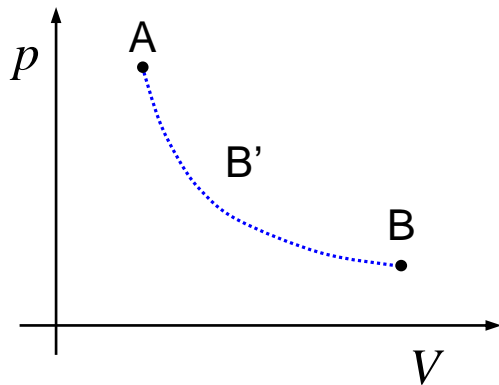
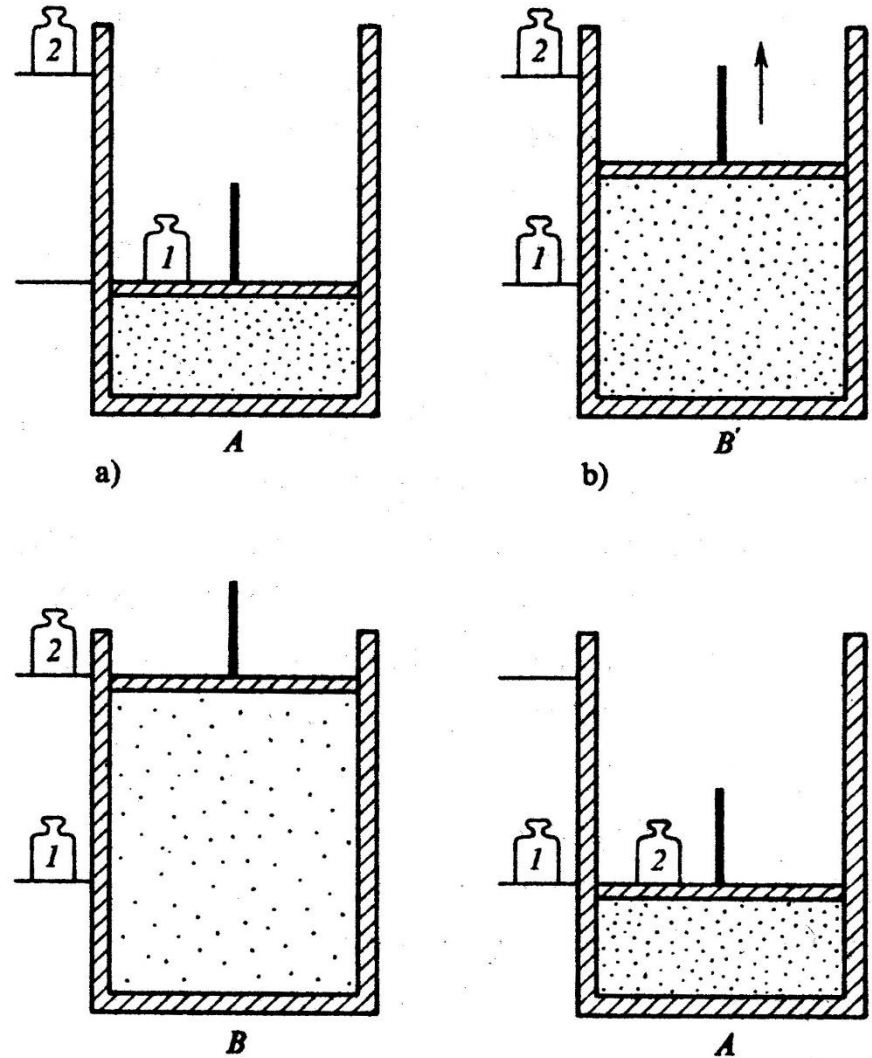
Przykład : przybliżenie odwracalnego rozprężania gazu.

Jeśli masa ciężarków będzie dążyć do zera, a ich ilość do nieskończoności, to proces $A \rightarrow B$ można odwrócić tak, że *gaz i otoczenie* powrócą do stanu początkowego.



Przemiana od stanu A do stanu B nie jest odwracalna

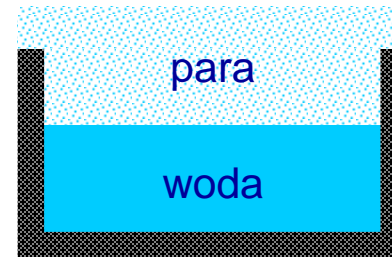
Jeśli masa ciężarków jest duża (skończona), to można wprowadzić stan początkowy gazu, ale stan otoczenia ulega zmianie!



Kilka podstawowych pojęć

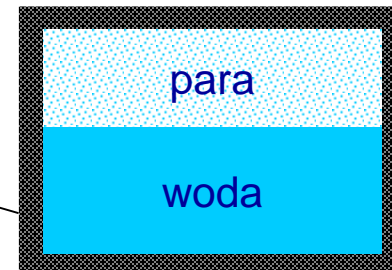
Układ termodynamiczny – makroskopowy układ fizyczny, którego zachowanie badamy, wyodrębniony z otoczenia.

Układ otwarty – wymienia materię z otoczeniem, w przeciwieństwie do **układu zamkniętego**.



Układ izolowany – nie wymienia z otoczeniem ani materii, ani energii; jakkolwiek zmiana w otoczeniu nie wpływa na jego stan.

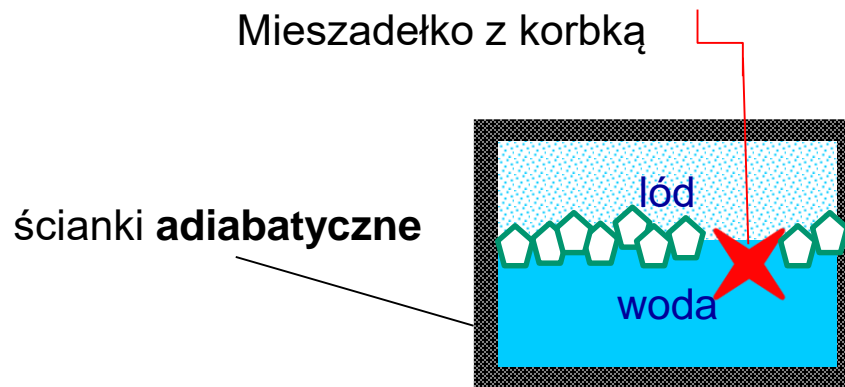
ścianki **adiabatyczne**



Ośłona adiabatyczna

Rozważmy płyn w naczyniu z mieszadłem w osłonie adiabatycznej.

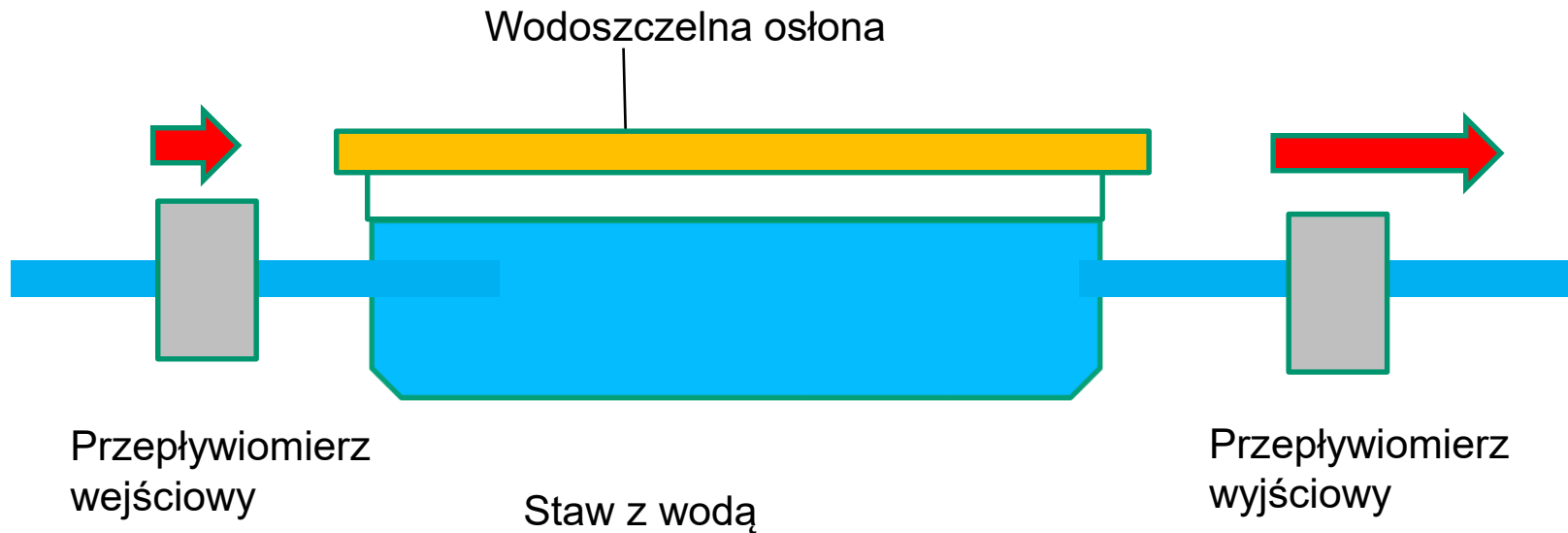
1. Stan początkowy płynu jest nieruchomy,
2. Energicznie go mieszamy
3. Czekamy aż jego prędkość się ustali
4. Stan końcowy płynu jest też nieruchomy



Praca mechaniczna wykonana nad układem w osłonie adiabatycznej określa całkowicie różnicę między stanem początkowym i końcowym układu.

Zmiana energii wewnętrznej układu jest dokładnie równa wykonanej pracy.

Staw przykryty osłoną – analogia osłony adiabatycznej



Ilość wody -- Energia wewnętrzna

Przepływ wejściowy – praca wykonana nad układem

Przepływ wyjściowy – praca wykonana przez układ

Handel lodem



Frederic Tudor (1783-1864)
The "Ice King" of the World

"No JOKE," a February 1806 Boston newspaper assured its readers. "A vessel has cleared at the Custom House for Martinique with a cargo of ice. We hope this will not prove a **slippery speculation.** "

iceharvestingusa.com

To nie żart, pisano w 1806 roku Boston Gazette.

"Statek przewożący ładunek w postaci osiemdziesięciu ton lodu wypłynął dzisiaj z portu w kierunku Martyniki. Mamy nadzieję, że ta sprawa nie okaże się **cokolwiek śliska**"

S. Johnson, „Małe Wielkie odkrycia”

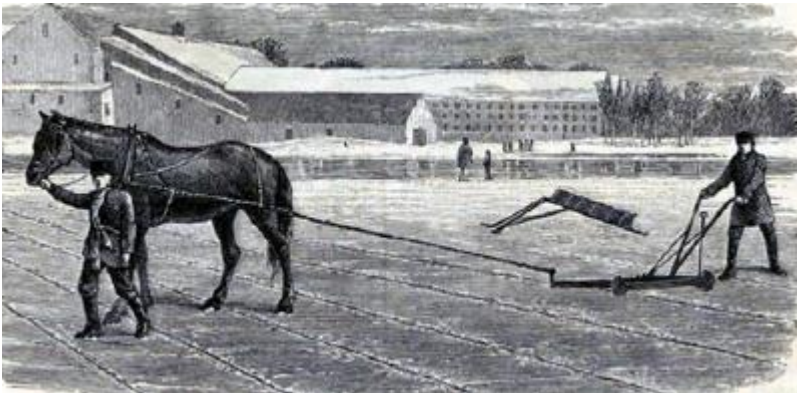
Techniki przygotowywania bloków lodu



Scraping off the snow



Planing Off the "Snow Ice"



Marking the Ice for Plowing



Sawing and "Barring Off" the Floats

Trudne początki handlu lodem

The following year, in 1807, Tudor shipped a cargo of ice to Cuba in the brig *Trident*. Tudor attempted to get from the government at Havana an exclusive privilege for the enterprise, but he got little sympathy from those with whom he dealt. Even the Governor's interpreter at first refused to translate Tudor's request to the Governor, the interpreter thinking the whole matter was too absurd to waste the Governor's time with.¹² Again, Tudor lost a great deal of money on the venture, disregarding the fact that one-half of the cargo had melted en route.¹³

iceharvestingusa.com

Osłona adiabatyczna

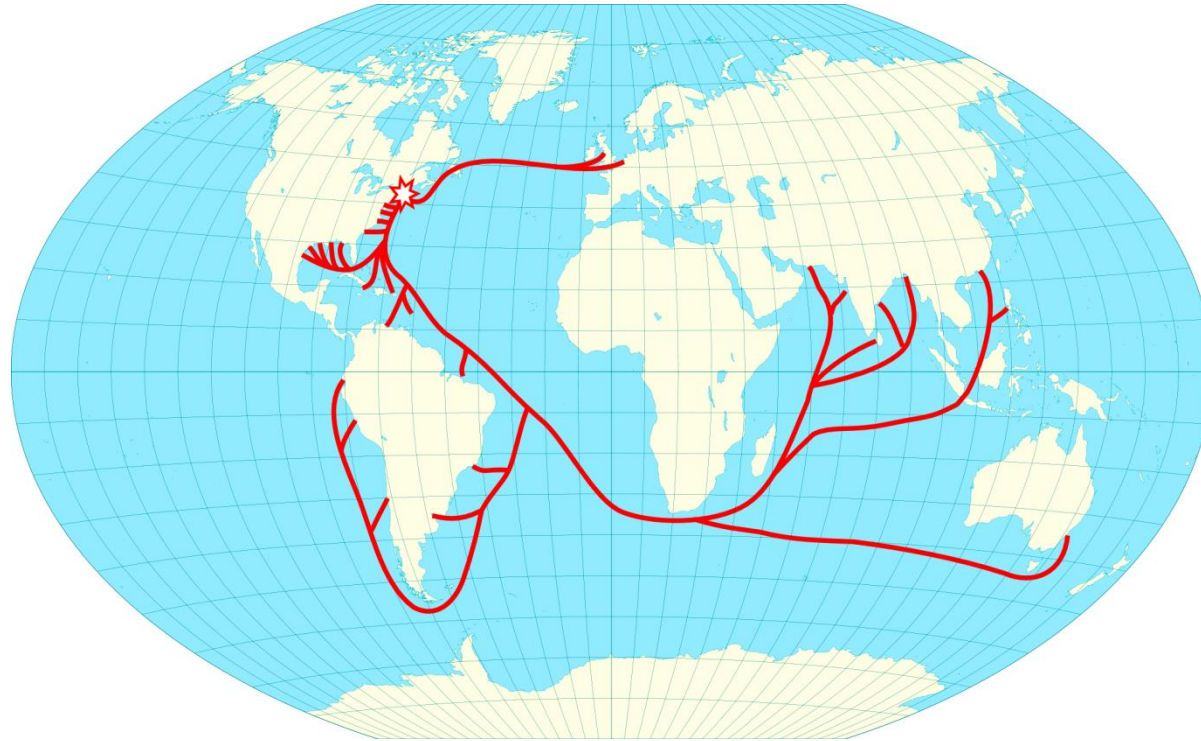
Ice was packed aboard ship with wood shavings, sawdust, or rice chaff on its outside surfaces to insulate it against heat. The blocks were also stacked together like well-fitted masonry. The greater volume of the cakes, therefore, could be considered as being the interior of one huge block, leaving relatively small amounts of the ice on the outside to melt by whatever heat penetrated the sawdust covering.

iceharvestingusa.com



When all the ice blocks are stored, the top is covered with lots of sawdust. We will have ice all summer.

Globalny zasięg dostaw lodu firmy Fredericka Tudora około 1856 roku.



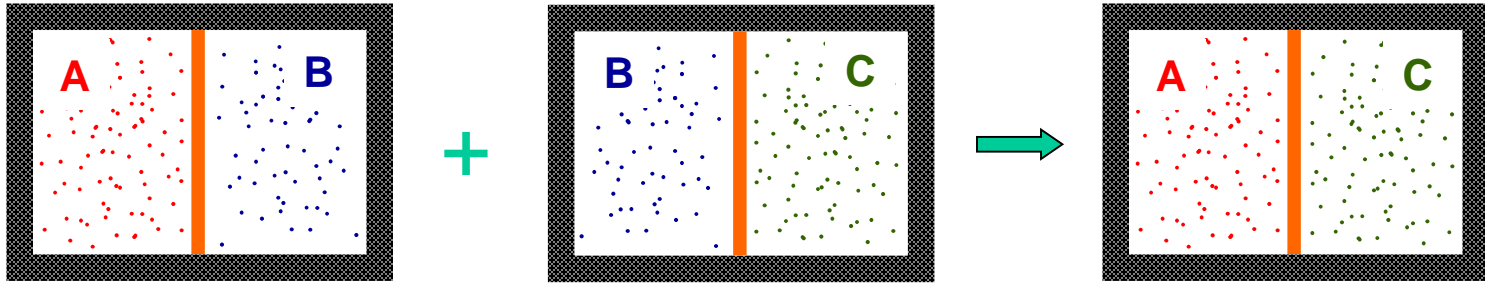
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_map_Winkel_Tripel_proj0deg_centered.svg

W roku 1860 dwa na trzy gospodarstwa domowe w Nowym Jorku przyjmowały dostawy lodu...

S. Johnson „Małe Wielkie Odkrycia”

Zerowa Zasada Termodynamiki

Równowaga termiczna jest przechodnia



Zerowa zasada termodynamiki : jeśli układy A i B są w równowadze termicznej i układy B i C są w równowadze termicznej, to także układy A i C są w równowadze termicznej. Każdy z tych układów ma wtedy tę samą **temperaturę**.

Temperatura empiryczna

Dwa układy są w równowadze termicznej gdy mają taką samą wartość temperatury empirycznej. Definicja temperatury empirycznej nie jest jednoznaczna, ponieważ wystarczy wziąć dowolną monotoniczną funkcję $F(x)$ i wówczas

$F(t) = F(\eta(y)) = F(\xi(x))$ jest także dobrą temperaturą empiryczną

Stąd możliwe jest stosowanie różnych skal temperatury empirycznej !

Teraz wygodnie będzie charakteryzować stan układu poprzez zmienne x_1, \dots, x_{n-1}, t

Równanie stanu to : $\phi(x_1, \dots, x_{n-1}, t) = 0$

Termometr

Weźmy układ standardowy K^* , który można opisać przy pomocy jednej zmiennej 'położeniowej': x_1 oraz temperatury.

Jeżeli możemy wyznaczyć x_1 przez bezpośredni pomiar, to temperaturę wyliczamy z relacji :

$$t = F(f^*(x_1))$$

Układ K^* nazywamy termometrem, a wielkość x_1 to zmienna termometryczna.

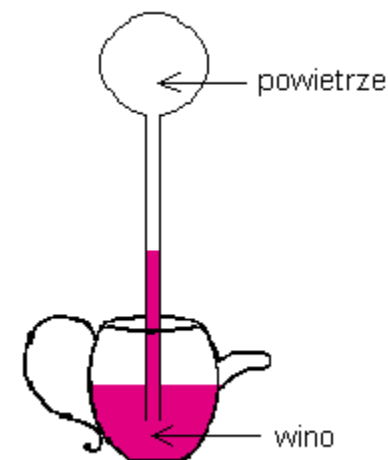
Pomiary temperatury i jej skale

Do pomiaru temperatury można wykorzystać dowolny układ fizyczny, którego jakaś własność silnie zmienia się przy zmianie temperatury.

Własność tę nazywamy **parametrem termometrycznym**.

Przykłady:

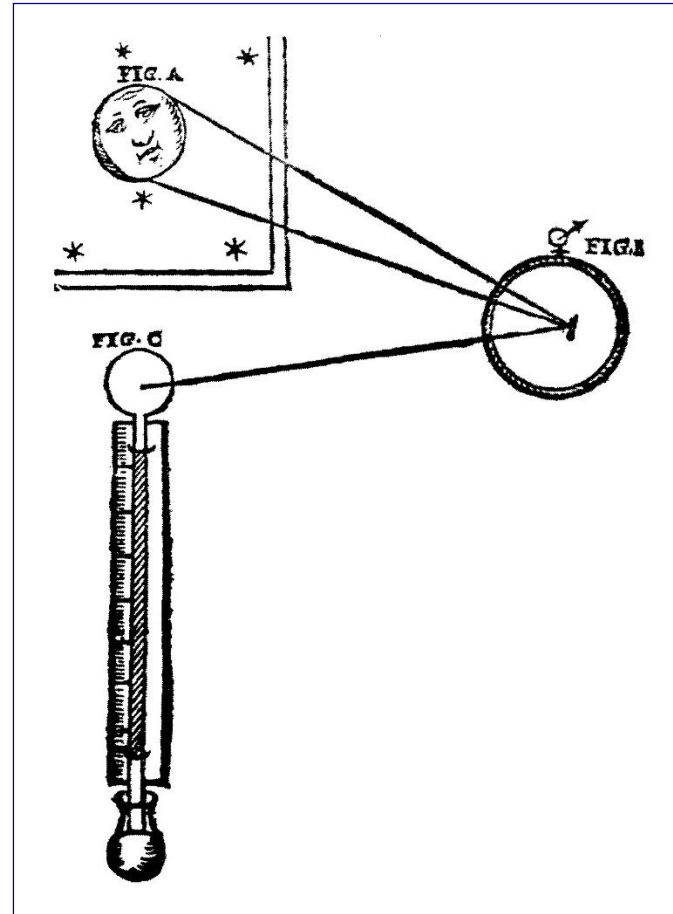
- jeden z najstarszych **termoskopów**, skonstruowanych przez Santoriego w 1612 r., opiera się na zjawisku rozszerzalności (zmiany objętości) powietrza;
- Robert Hook wprowadził w 1664 r. termometr w oparciu o rozszerzalność barwionego alkoholu;
- Daniel Gabriel Fahrenheit (na początku XVIII w.) jako pierwszy zastosował rtęć jako ciało termometryczne.



 termoskop „Galileusza”



Santorio Santori (1561 – 1636)



Skale temperatury

Skalę temperatury tworzy się przyjmując pewne punkty stałe i przypisuje się im określone wartości temperatury.

- Fahrenheit (1715, pierwsza skala)
punkty stałe: 0 °F – mieszanina wody, lodu i soli,
100 °F – temperatura ciała człowieka.
- **Fahrenheit** (1724, poprawiona skala, stosowana do dziś)
punkty stałe: 0 °F – mieszanina wody, lodu i soli,
32 °F – mieszanina wody i lodu.

Wówczas temperatura zdrowego człowieka \cong 96 °F,
a temperatura wrzącej wody = 212 °F

- **Celsjusz** (1742)
punkty stałe: 100 °C – topniejący śnieg,
0 °C – wrząca woda.

Później odwrócono skalę zamieniając te wartości
(Linneusz, 1745)

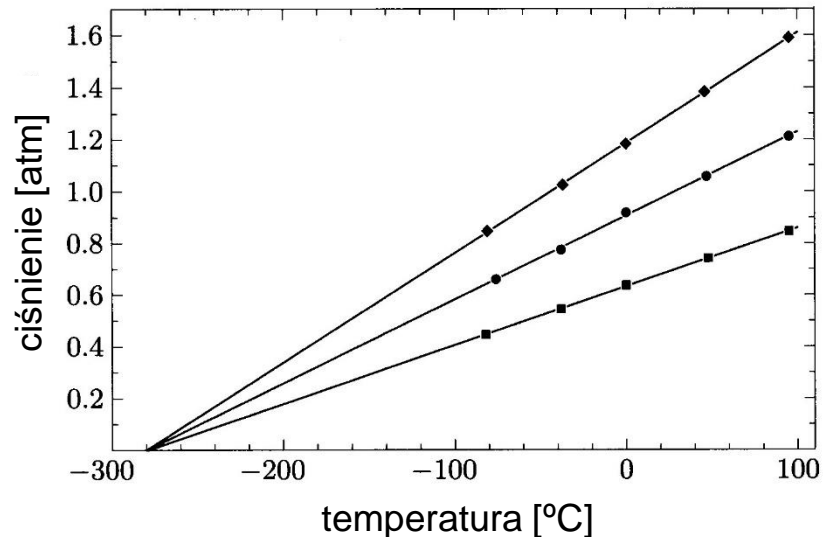
$$\begin{aligned} T [^{\circ}\text{C}] &= (T [^{\circ}\text{F}] - 32)/1.8 \\ &= 5/9 T [^{\circ}\text{F}] - 17.78 \end{aligned}$$

$$T [^{\circ}\text{F}] = 9/5 T [^{\circ}\text{C}] + 32$$

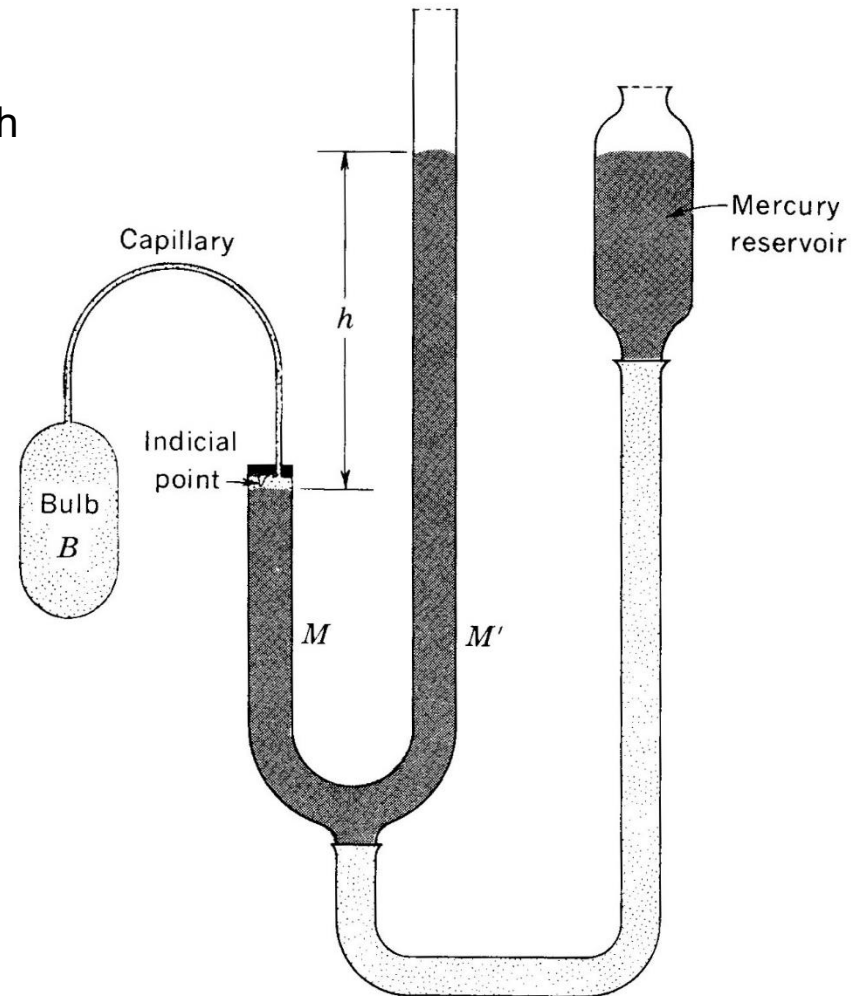
Termometr gazowy

Współczesna wersja termoskopu „Galileusza” – bardzo ważna dla precyzyjnych pomiarów temperatury.

- ▶ Miarą temperatury jest ciśnienie gazu w kolbie (o stałej objętości).



Ciśnienie gazu zbiega do zera, gdy $T \rightarrow -273 \text{ }^\circ\text{C}$



Schemat termometru gazowego o stałej objętości

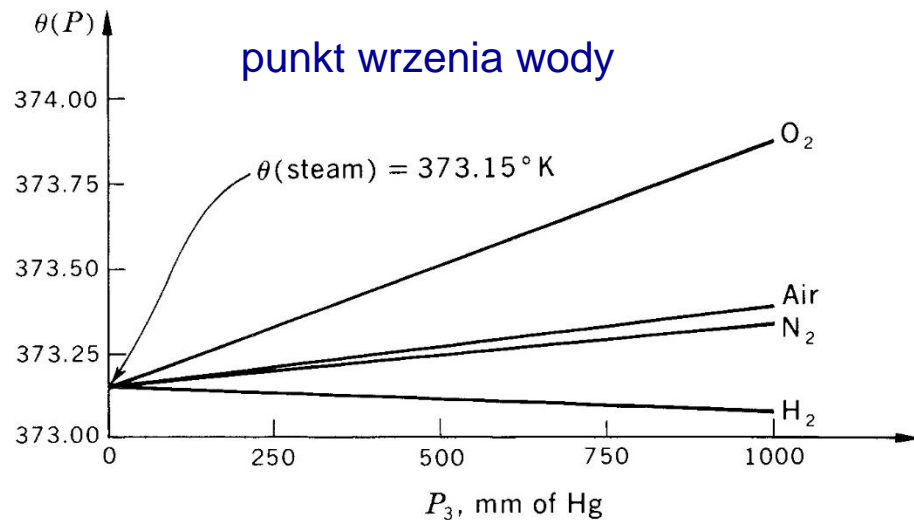
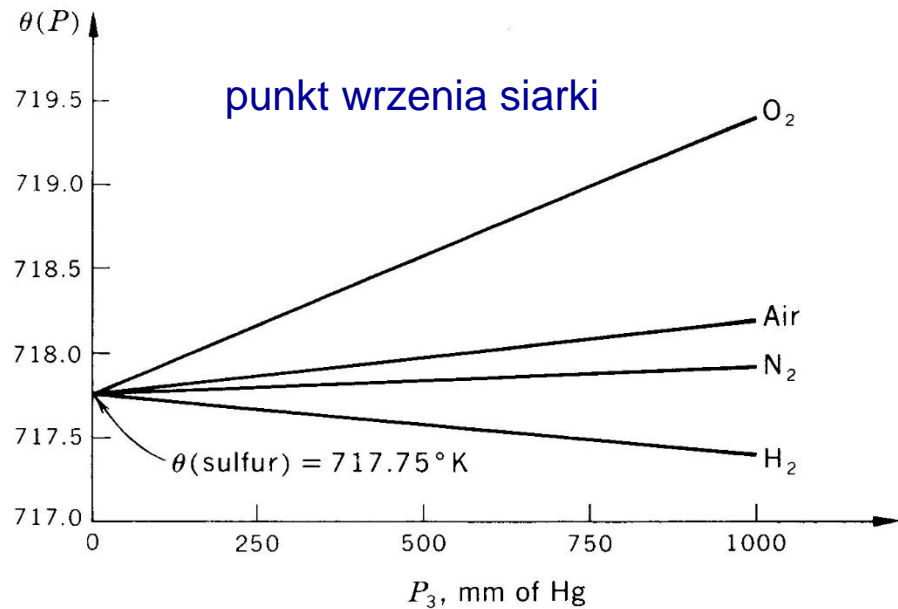
Tak zdefiniowane termometry pokazują różne wartości w stałych punktach !

Najmniej różnią się termometry gazowe, a zwłaszcza wtedy, gdy gaz roboczy ma małe ciśnienie.

Termometr gazowy posłużył jako punkt wyjścia (**standard**) do definicji skali **empirycznej temperatury bezwzględnej**.

Pomiary dla danego punktu wykonuje się wielokrotnie przy coraz mniejszym ciśnieniu gazu roboczego. Następnie wyznacza się granicę:

$$T[\text{K}] = 273.16 \lim_{P_3 \rightarrow 0} \left(\frac{P}{P_3} \right)$$



Rozszerzalność cieplna cieczy i ciał stałych

Przy stałym ciśnieniu ciecze i ciała stałe zmieniają objętość przy zmianie temperatury. Względne zmiany objętości są małe: mieszczą się w zakresie od ułamka procenta do kilkunastu procent przy zmianie temperatury od 0 °C do 100 °C

Zjawisko to opisuje **temperaturowy współczynnik rozszerzalności objętościowej γ**

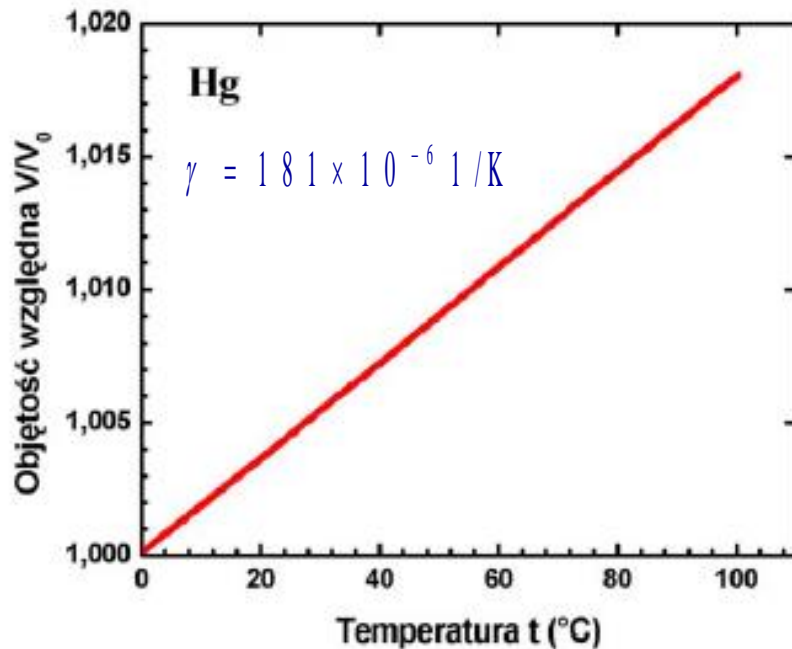
$$\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V(p, T)}{\partial T} \right)_p .$$

Jeśli zmiany temperatury są małe, to możemy zastosować przybliżenie liniowe:

$$\Delta V = \gamma V \Delta T$$

Przy początkowej objętości V_0 i zmianie temperatury o ΔT , objętość końcowa wynosi wtedy:

$$V = V_0 (1 + \gamma \Delta T) .$$



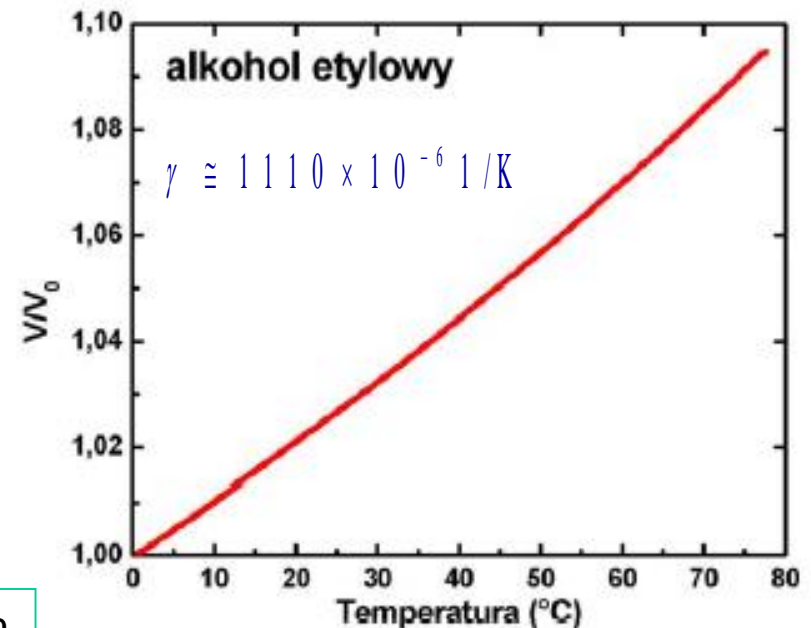
Objętość rtęci rośnie **liniowo** z temperaturą. Właśnie dlatego powszechnie używa się jej w termometrach.

Rozszerzalność alkoholu jest monotoniczna, ale **nieliniowa!**
Termometry alkoholowe działają w przedziale od -110 °C do 70 °C

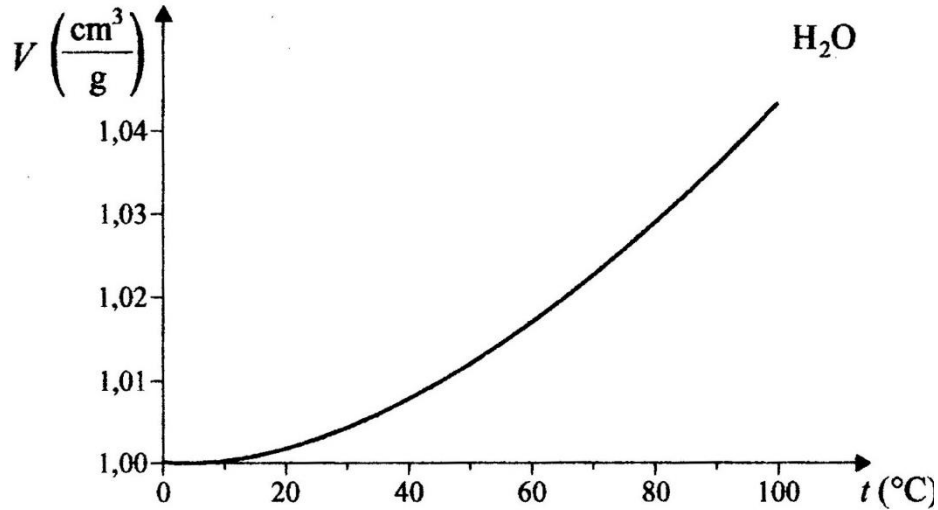
☀ rozszerzalność cieczy

Termometry rtęciowe działają w przedziale od -38 °C aż do 750 °C.

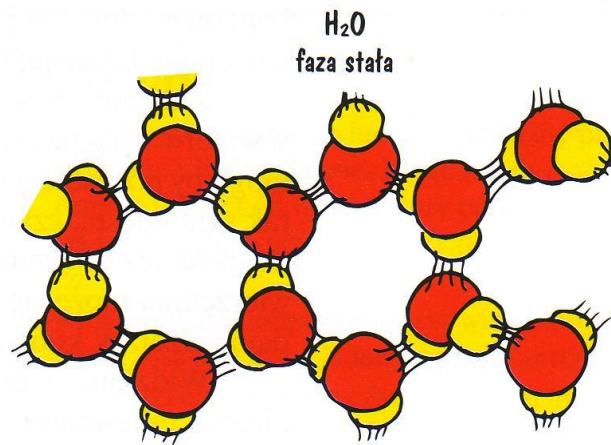
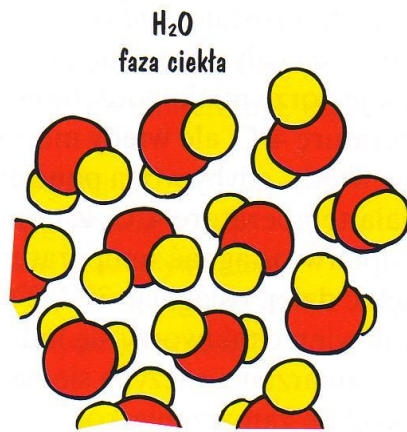
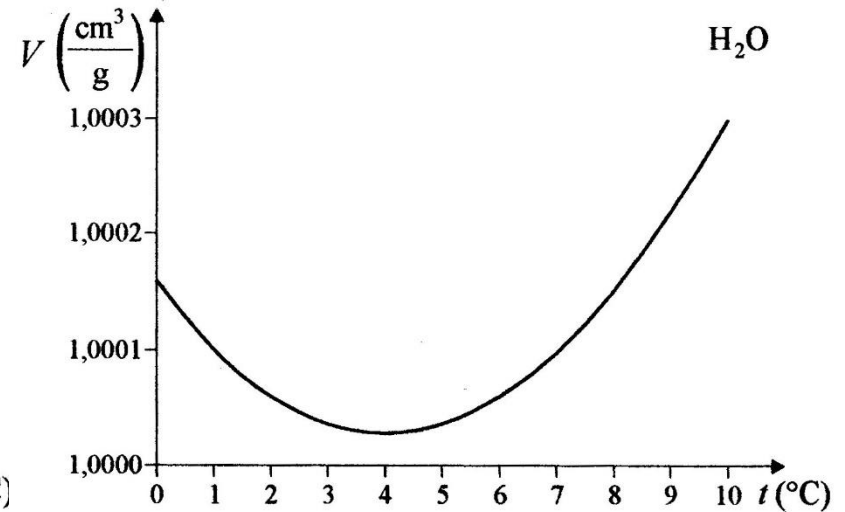
Zagadka: jak to możliwe, skoro temperatura wrzenia rtęci wynosi 356 °C ?



Woda wykazuje anomalną rozszerzalność:
jest nieliniowa...

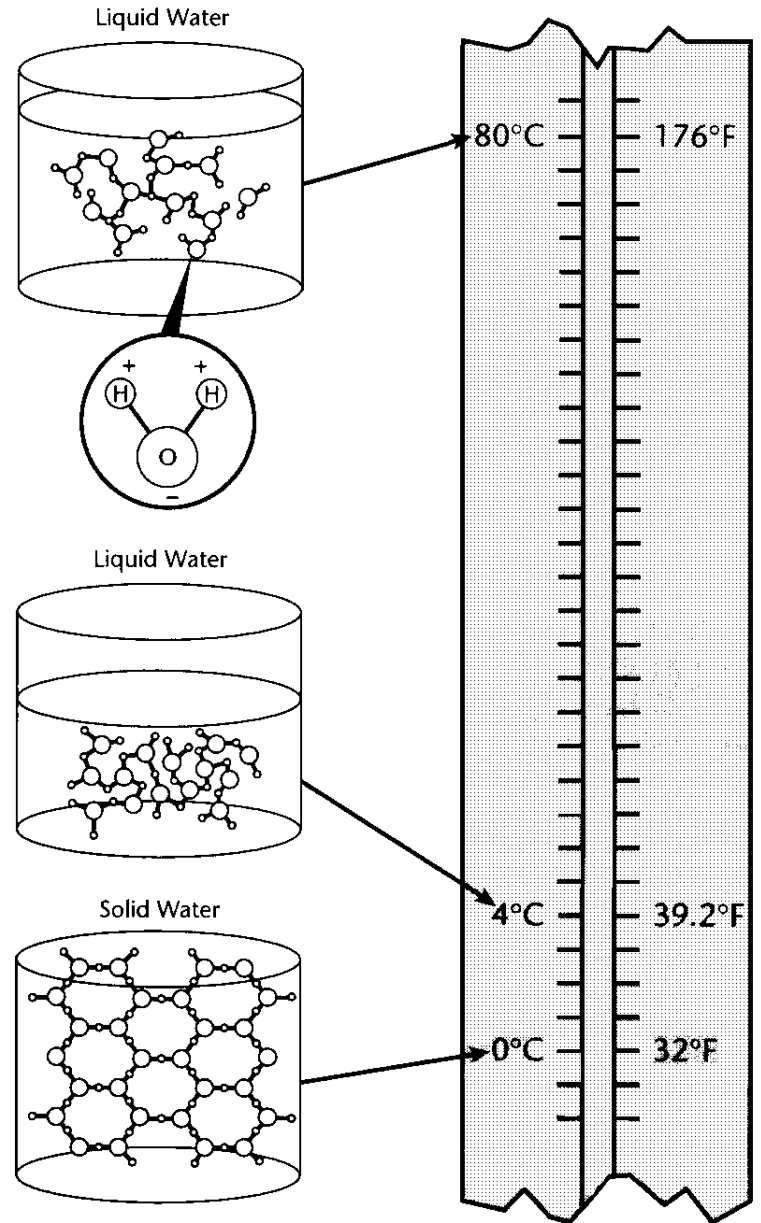
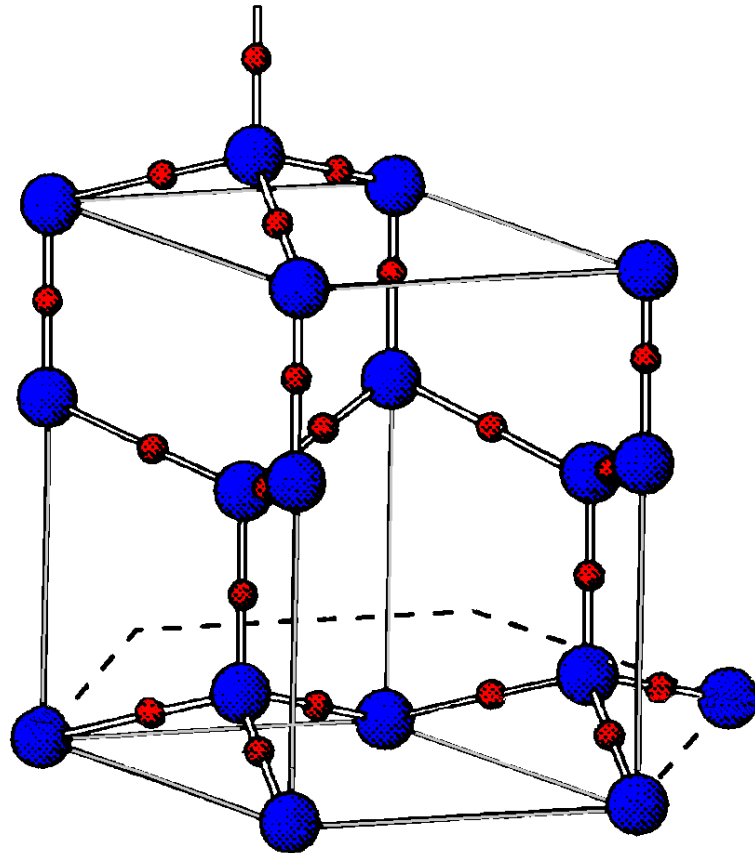


...ale też niemonotoniczna



T [°C]	γ [10^{-6} /K]
0	-69,0
3.98	0,00
10	88.0
20	207
30	303
40	385
50	448

Struktura krystaliczna lodu I



W przypadku ciał stałych często bardziej nas interesuje zmiana nie objętości lecz **długości** przy zmianie temperatury. Przez analogię wprowadza się tu **temperaturowy współczynnik rozszerzalności liniowej** α .

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l(p, T)}{\partial T} \right)_p .$$

Dla małych zmian temperatury stosujemy przybliżenie liniowe:

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T) .$$

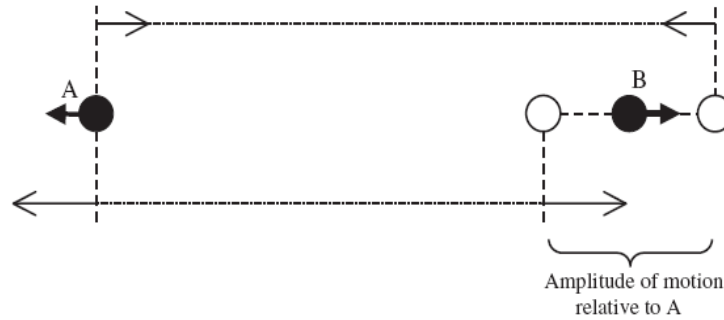
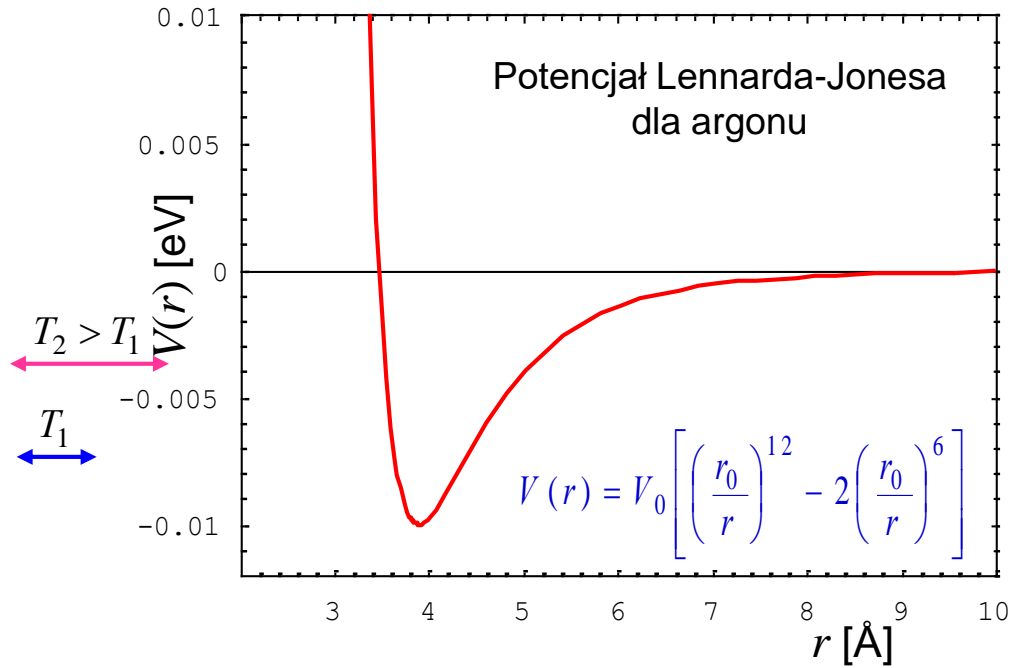
Można łatwo wykazać (\Rightarrow **Ćwiczenia**), że: $\gamma = 3\alpha$.

Uwaga! Wiele kryształów wykazuje własności anizotropowe. Wówczas podaje się wartości współczynnika rozszerzalności liniowej dla tzw. trzech osi głównych kryształu:

α_1 , α_2 i α_3 . Wtedy: $\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$.



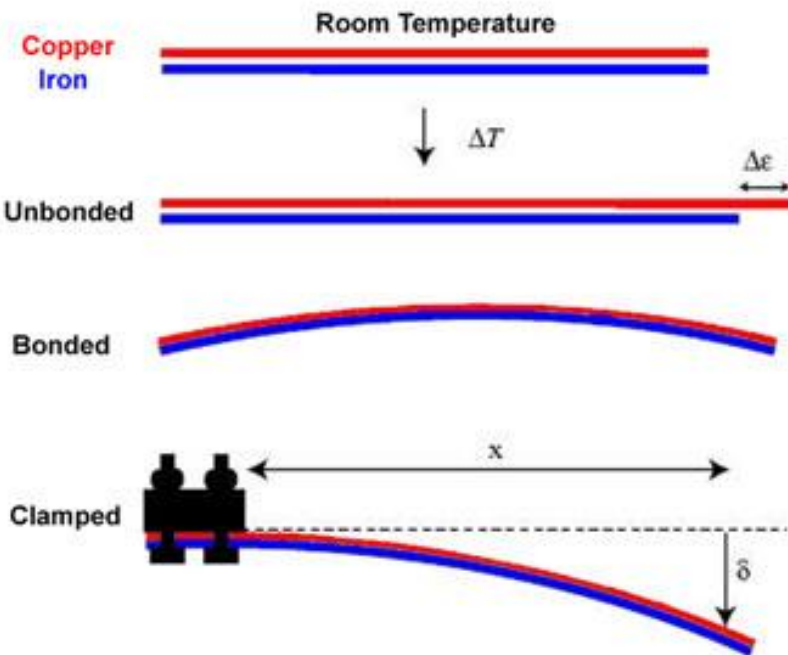
Mechanizm rozszerzalności termicznej



Rozszerzalność liniowa ma zastosowanie w termometrach **bimetalicznych**, wykorzystywanych w automatycznych wyłącznikach i termoregulatorach.

 bimetall


Bimetal Strip
Two Metals Bonded Together with Different Coefficients of Expansion

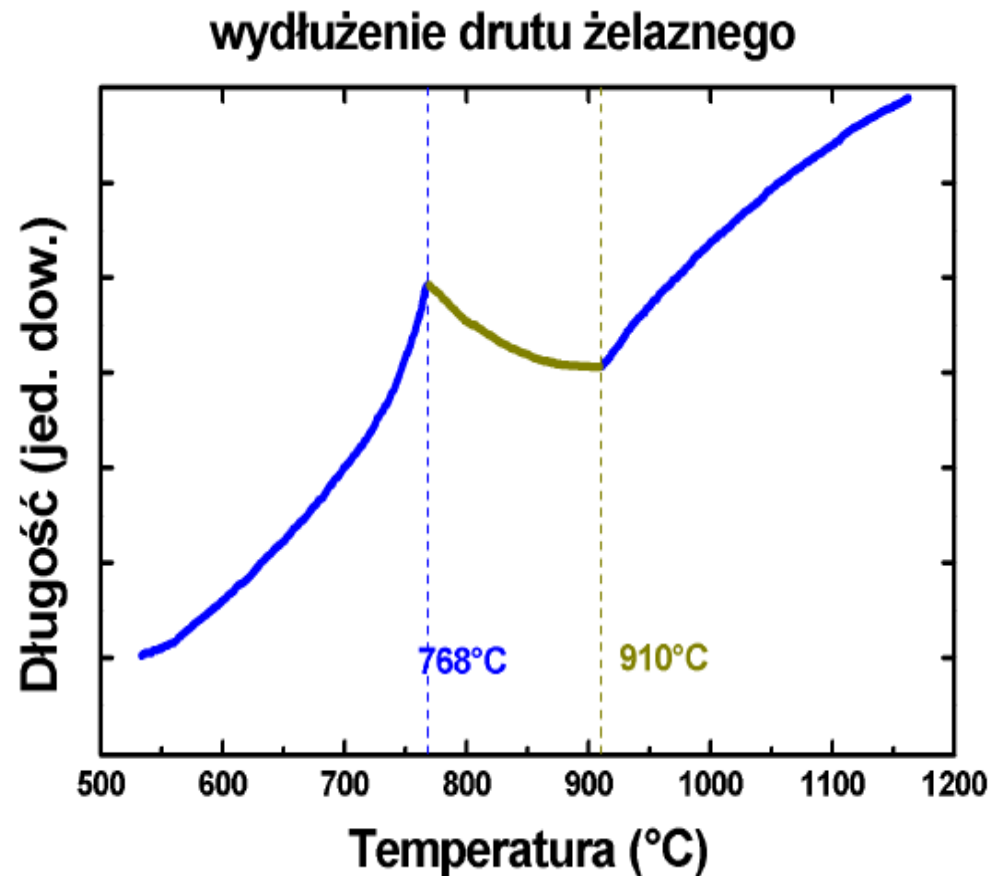


(a) $Cu(\alpha) = 16.5 \times 10^{-6} K^{-1}$
 (b) $Fe(\alpha) = 11.8 \times 10^{-6} K^{-1}$

<http://www.electrical-forensics.com/BiMetal/Bimetal.html>

Wśród ciał stałych także zdarzają się przypadki anomalnej rozszerzalności. Przykładem jest żelazo, które przy ogrzewaniu między 768 °C a 910 °C kurczy się.

 drut żelazny





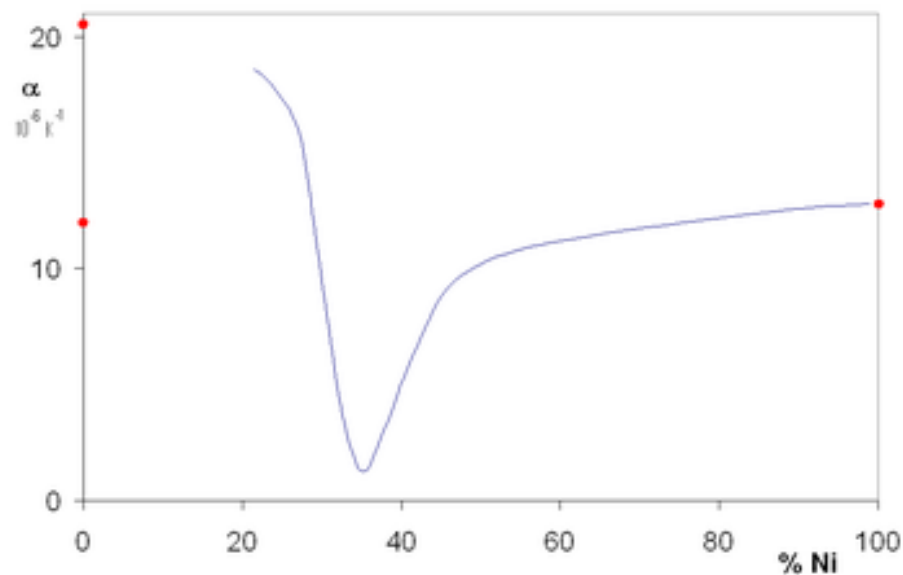
Charles Edouard Guillaume

The Nobel Prize in Physics 1920 was awarded to Charles Edouard Guillaume

"in recognition of the service he has rendered to precision measurements in Physics by his discovery of anomalies in nickel steel alloys".

Affiliation at the time of the award:

Bureau International des Poids et Mesures
(International Bureau of Weights and Measures)
Sèvres, France



Invar: Stop złożony 35% Ni i 65% Fe posiada wyjątkowo niewielki współczynnik rozszerzalności termicznej.

*Let us now glance back to the origins of the studies of which the results have just been reported. The point at issue was essentially to look for a metal having qualities which would enable it to be used to make standards of length that are inexpensive while satisfying metrological requirements.... Then the problem broadened: from the measurement of length, which was the only aim of the original programme, the measurement of time arose of its own accord as a direct and to some extent obvious consequence, **so true is it that in metrology everything is related and that a carefully executed measurement invariably entails generalizations.***

C.E. Guillaume, Nobel Lecture, 1920

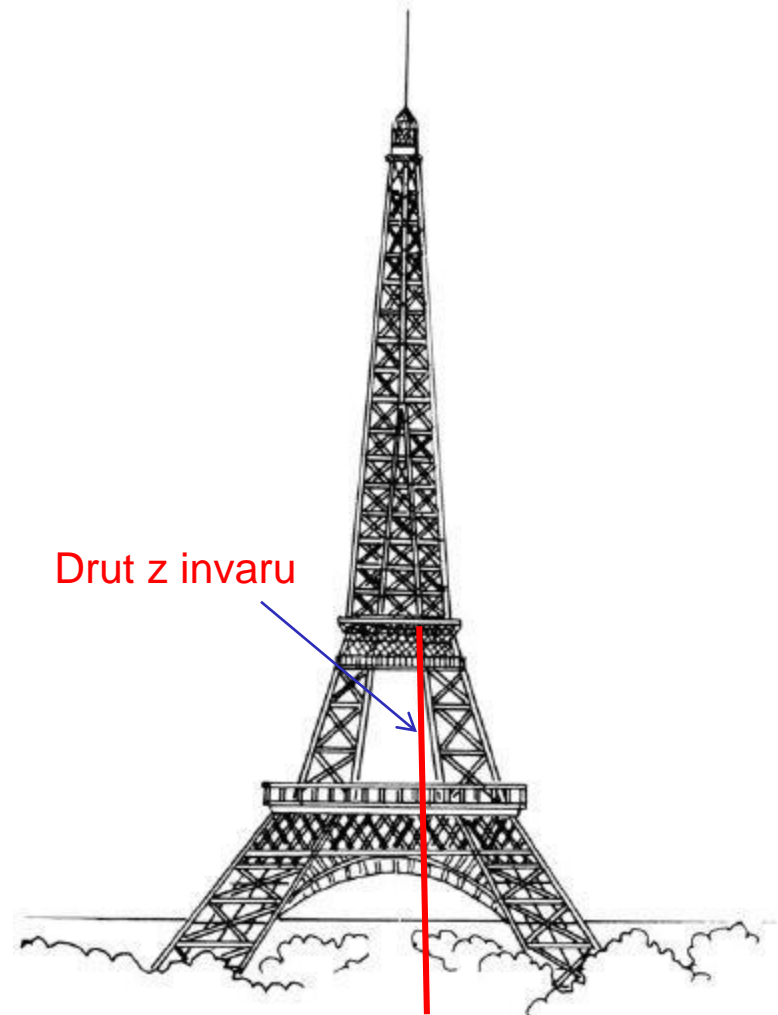


Charles Edouard Guillaume

The Nobel Prize in Physics 1920

Pomiar długości Wieży Eiffla (1912 rok)

Opis: Nobel Prize Lecture



[https://www.trussvillecityschools.com/Teachers/Rebekah.Richards/Art Gallery/Forms/](https://www.trussvillecityschools.com/Teachers/Rebekah.Richards/Art%20Gallery/Forms/)

CHARLES-É. GUILLAUME

Invar and elinvar

Nobel Lecture, December 11, 1920

Wniosek:

Wieża Eiffla może służyć
Jako bardzo czuły termometr !

Gwałtowna burza
08.06.1912 około 19:00

Zmniejszenie długości wieży

Spadek temperatury

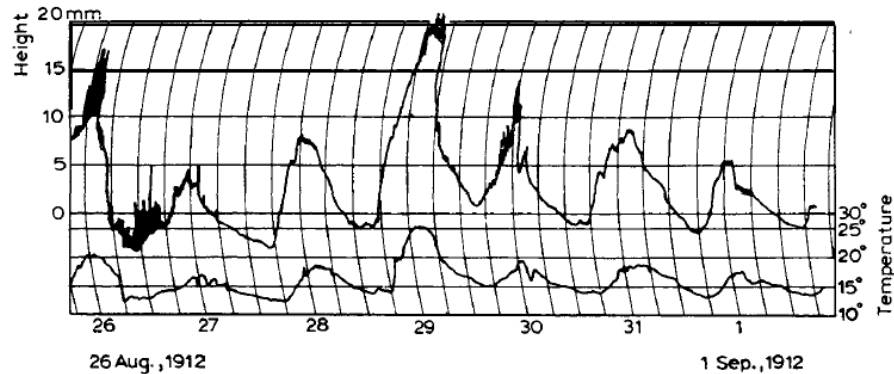
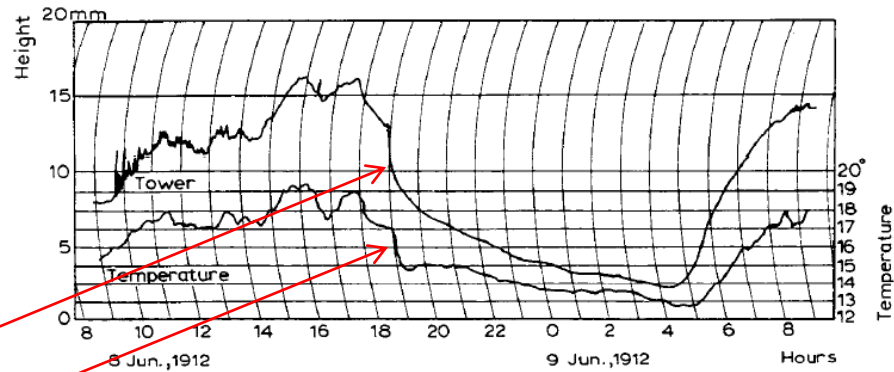


Fig. 8. Daily movements of the Eiffel Tower (a downpour at 19 hours caused a sudden temperature drop).

Fig. 9. Movements of the Tower under variable summer conditions (stormy week).



US005514360A

United States Patent [19]

[11] **Patent Number:** 5,514,360

Sleight et al.

[45] **Date of Patent:** May 7, 1996

- [54] **NEGATIVE THERMAL EXPANSION MATERIALS**
- [75] Inventors: **Arthur W. Sleight, Philomath; Mary A. Thundathil; John S. O. Evans**, both of Corvallis, all of Oreg.
- [73] Assignee: **The State of Oregon Acting by and Through the Oregon State Board of Higher Education on Behalf of Oregon State University, Corvallis, Oreg.**
- [21] Appl. No.: **397,695**
- [22] Filed: **Mar. 1, 1995**
- [51] Int. Cl.⁵ **C01G 25/02; C01G 27/02**
- [52] U.S. Cl. **423/593**
- [58] Field of Search 423/593

- [56] **References Cited**
- U.S. PATENT DOCUMENTS**
- 1,399,705 12/1921 Ekeley et al. 423/593
- 4,269,898 5/1981 Boonstr et al. 423/593
- 5,322,559 6/1994 Sleight .

- OTHER PUBLICATIONS**
- "Linear Thermal Expansion of Three Tungstates," *J. Am. Ceram. Soc.—Discussions and Notes*, 51:227–228 (1968), Martinek, et al.
- "A New Ternary Oxide, ZrW₂O₈," *J. Am. Ceram. Soc. Discussions and Notes*, 42:570 (1959), Graham, et al.
- "Condensed Phase Relations in the Systems ZrO₂-WO₃-WO₃ and HfO₂-WO₂-WO₃," *J. Am. Ceram. Soc.*, 50:211–215 (1967), Chang, et al.

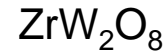
"Subsolidus Equilibria in the System ZrO₂-WO₃-P₂O₅," *J. Am. Ceram. Soc.*, 53:159–161 (1970), Martinek, et al.
 "X-Ray Diffraction Investigation of the Compounds AB₂O₆," *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 12, No. 11, (Nov. 1967), Trunov, et al.

Primary Examiner—Waync Langel
Attorney, Agent, or Firm—Klarquist Sparkman Campbell Leigh & Whinston

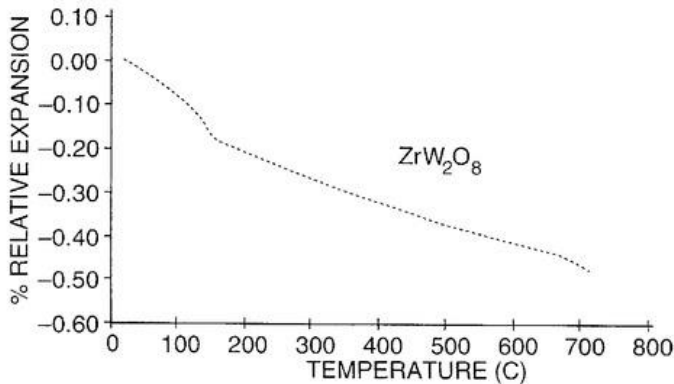
[57] **ABSTRACT**

A method for making tungstate compounds according to the formula XW₂O₈, wherein X is selected from the group consisting of zirconium, hafnium, and combinations thereof, is described. Also described are compositions that include the tungstate compounds, and a method for reducing the positive thermal expansion of a material using such tungstate compounds. Substantially single phase compounds can be made by practicing the method, which method also reduces the synthesis time relative to known methods, and expands the reactants that can be used for the synthesis over the methods reported previously. The tungstate compounds generally can be made by forming a solution, particularly an aqueous solution, comprising a W^{VI} compound and a second metal compound wherein the metal is selected from the group consisting of Zr^{IV}, Hf^{IV} and combinations thereof. The solvent is removed from the solution by any known method to leave the solutes as a solid product. The solid product is then heated to a temperature of greater than about 600° C., preferably at least about 1165° C., more preferably from about 1165° C. to about 1250° C., and even more preferably to about 1200° C. The heated product is then cooled to ambient temperature, generally relatively rapidly, to produce substantially single phase tungstate compounds.

23 Claims, 4 Drawing Sheets



Ujemna rozszerzalność termiczna w zakresie temperatur: 0.3 K – 1050 K



Negative Thermal Expansion in ZrW_2O_8 and HfW_2O_8

J. S. O. Evans,[†] T. A. Mary,[†] T. Vogt,[‡] M. A. Subramanian,[§] and A. W. Sleight^{*,†}

*Department of Chemistry and Center for Advanced Materials Research,
Oregon State University, Corvallis, Oregon 97331-4003; Physics Department,
Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973-5000; Experimental Station,
The DuPont Company, Wilmington, Delaware 19880-0328*

Received May 23, 1996. Revised Manuscript Received July 29, 1996[⊗]

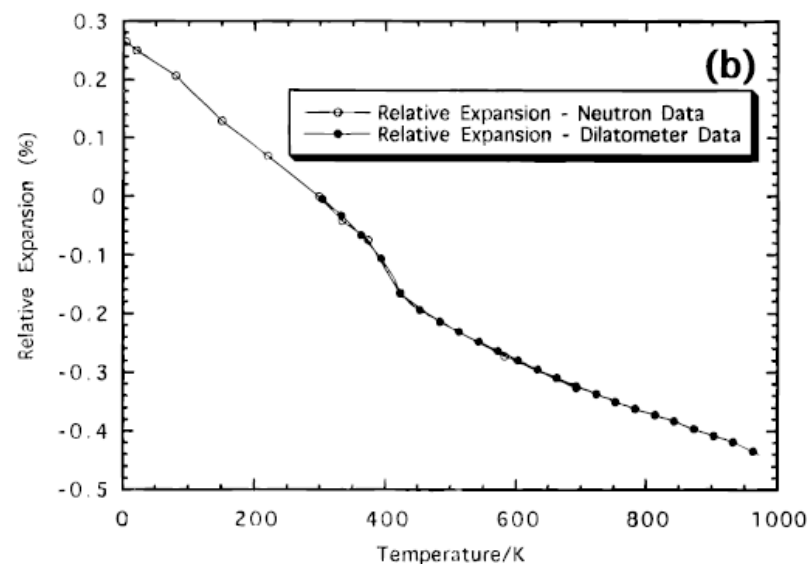
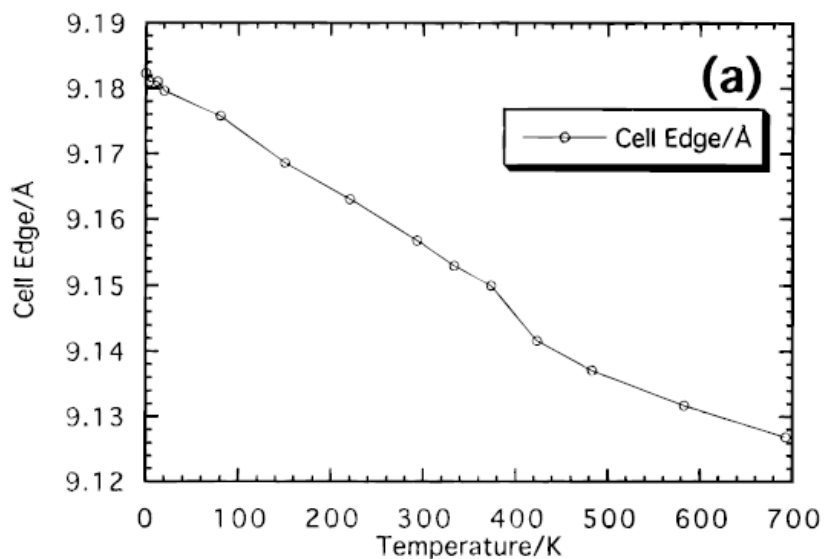


Figure 1. (a) Cubic cell dimension as a function of temperature. (b) Relative expansion from both diffraction and dilatometer data.

Termopary

Termopara to połączenie dwóch różnych metali, tak że tworzą się dwa złącza między nimi (rys.) Jeśli oba złącza znajdują się w różnych temperaturach, to na końcach przewodów pojawia się różnica potencjałów.

Różnica ta, dla danej pary metali, zależy tylko od **różnicy temperatur** między złączami.

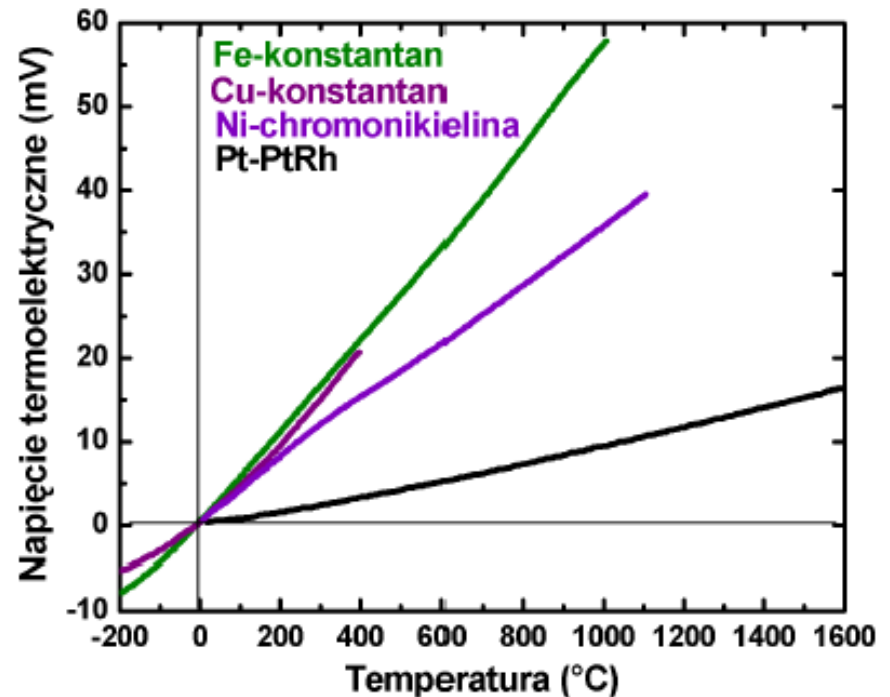
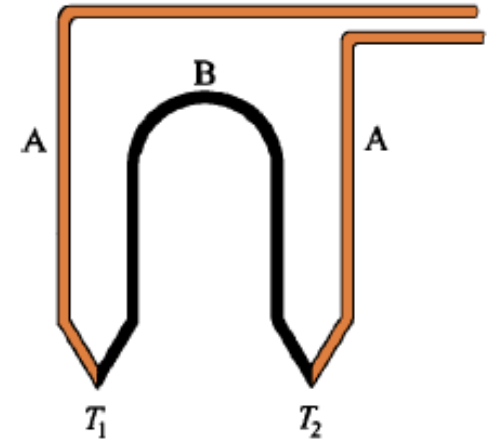
Dla małych $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$U (T_2 - T_1) = \alpha (T_2 - T_1),$$

gdzie α jest współczynnikiem (Seebecka) termoelektrycznym termopary.

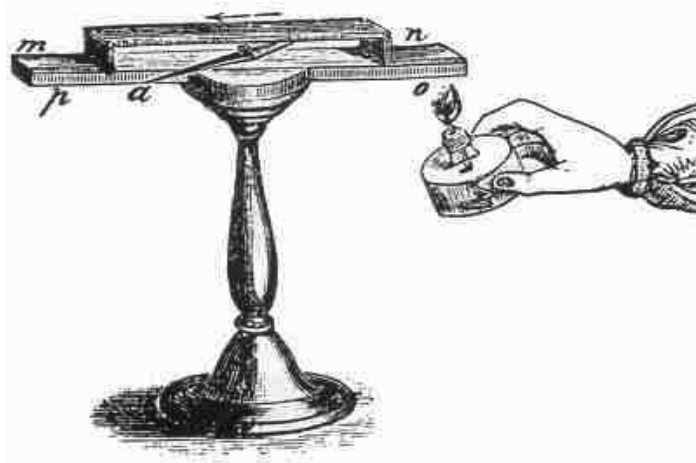
Termopary mają bardzo szeroki zakres stosowalności: od 10 K do 1900 K.

 termopara wagi ciężkiej



Efekt Seebecka - termopara

W roku 1821 T.J. Seebeck odkrył efekt termoelektryczny (choć wydawało mu się że to efekt magnetyczny !!!)



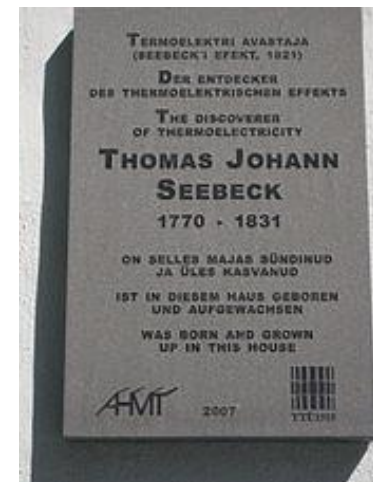
Instrument used by Seebeck to observe the deflection of a compass needle (a) due to a thermoelectric induced current from heating the junction of two different metals (n and o).

From:

<http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>




Thomas Johann Seebeck
(1770-1831)



Termometry elektryczne oporowe

Opór elektryczny przewodników i półprzewodników zależy od temperatury.

 opór metalu i półprzewodnika

Opór właściwy ciała ρ , lub ich przewodnictwo właściwe σ , można wyrazić jako:

$$1/\rho \equiv \sigma = e n \mu ,$$

gdzie n oznacza koncentrację nośników prądu, a μ ich ruchliwość.

Ruchliwość to średnia prędkość dryfu nośnika prądu pod wpływem jednostkowego pola elektrycznego.

Przewodniki

Zasadniczy wpływ na zmianę oporu przewodnika z temperaturą ma **ruchliwość** nośników, która maleje wraz ze wzrostem temperatury wskutek rozpraszania elektronów na drganiach sieci krystalicznej.

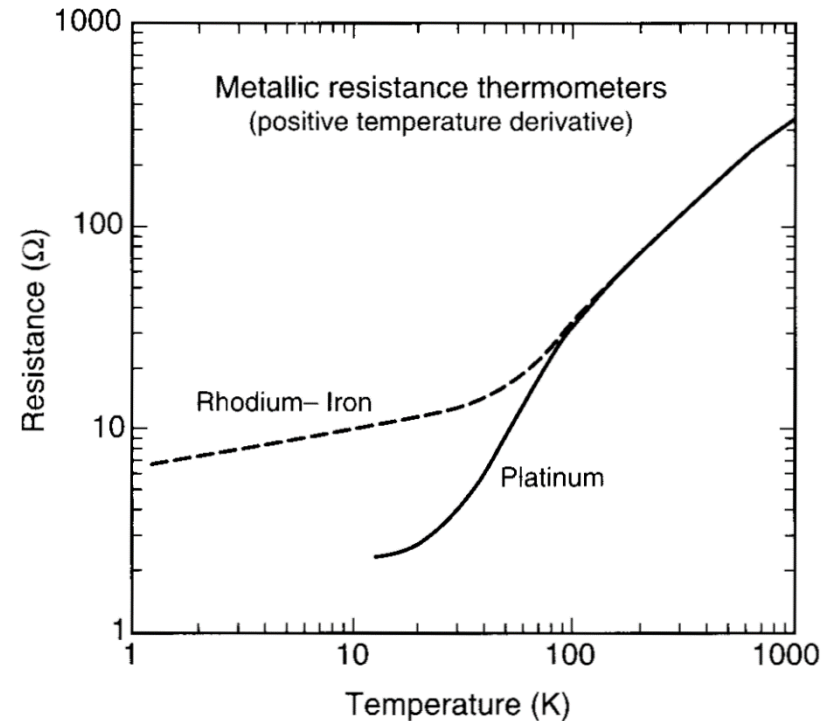
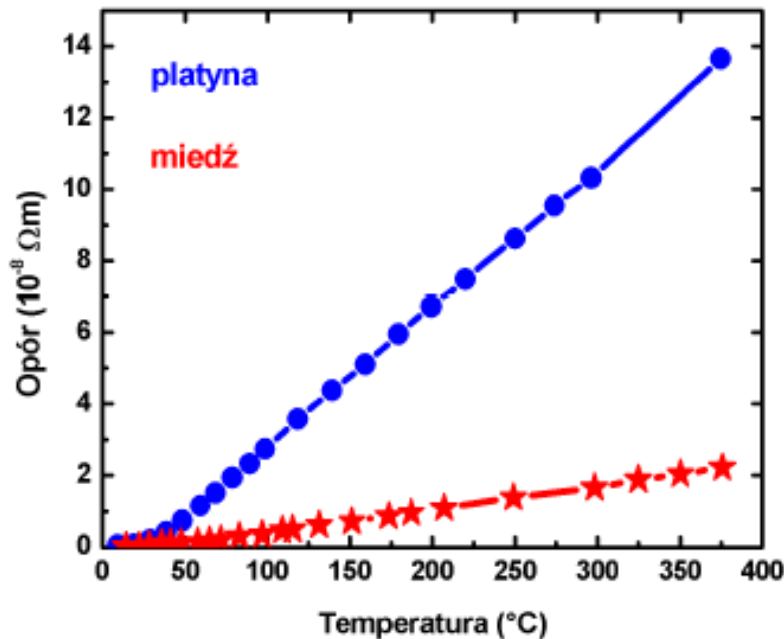
→ Opór przewodnika **rośnie** wraz ze **wzrostem** temperatury.

W wysokich temperaturach zależność oporu właściwego od temperatury jest bliska liniowej. Dla celów praktycznych przybliża się ją wielomianem:

$$\rho = A + BT + CT^2 + \dots$$

Na przykład dla platyny w zakresie od 300 K do 1000 K:

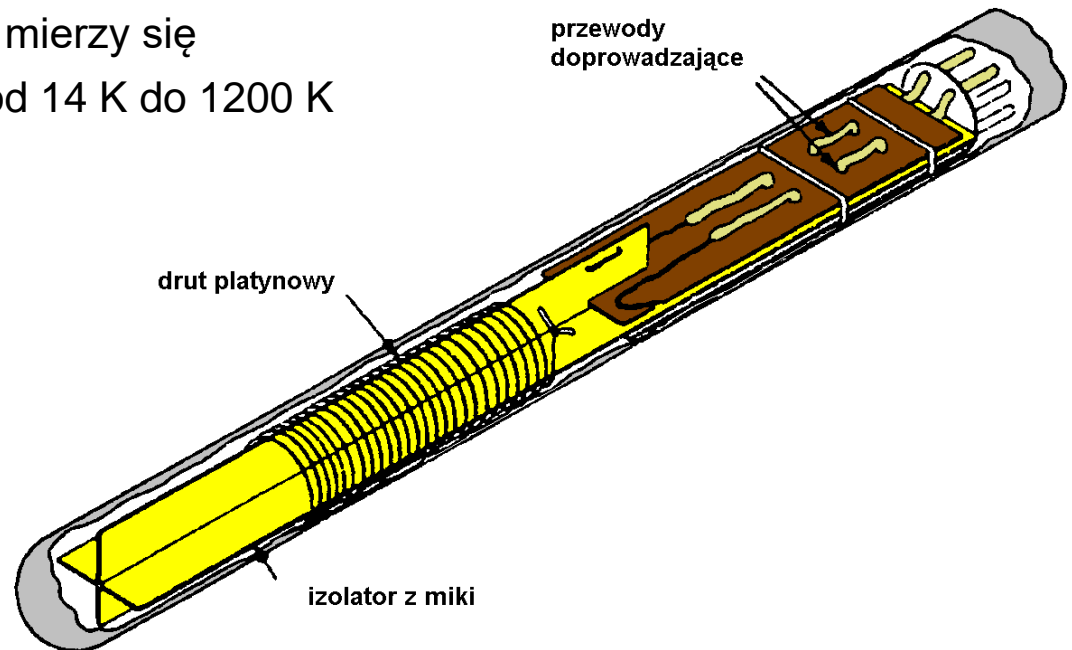
$$\rho [\mu \Omega \text{ cm}] = -1.310 + 42.257 \cdot 10^{-3} T - 5.755 \cdot 10^{-6} T^2 .$$



Ważną rolę w określaniu standardów temperatury odgrywa **oporowy termometr platynowy**.

Cienki drut platynowy owinięty jest na krzyżaku z izolatora. Pomiaru temperatury dokonuje się przez pomiar spadku napięcia na oporze platynowym przy precyzyjnie ustalonym prądzie.

Termometrem platynowym mierzy się temperatury w przedziale od 14 K do 1200 K



Półprzewodniki

W przypadku półprzewodników zasadniczą rolę odgrywa silny wzrost **koncentracji** nośników przy rosnącej temperaturze.

W przybliżeniu zachodzi:

$$\rho(T) = A \exp(a/T).$$

→ Opór półprzewodnika **maleje** wraz ze **wzrostem** temperatury.

Zaletą półprzewodników jest ich duża czułość, zwłaszcza w niskich temperaturach, oraz możliwość wytworzenia czujników o bardzo małych rozmiarach.

