

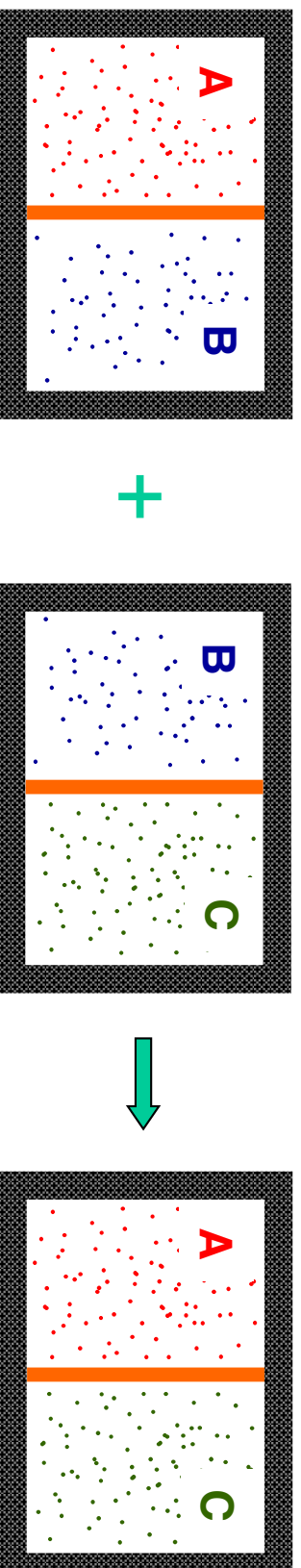
Rys historyczny

- 1612 – Santorio Santori (Rep. Wenecka): pierwszy opis termometru.
- 1630 – Giovanni Batista Baliani (Genua): pierwsza wzmianka o ciśnieniu atm.
- 1644 – Evangelista Torricelli (Florencja): pierwszy barometr rtęciowy.
- 1647 – Blaise Pascal (Clermont-Ferrand): zależność ciśnienia atm. od wysokości.
- 1660 – Robert Boyle (Oksford): sprężystość powietrza, $p(V)$.
- 1701 – Isaac Newton (Londyn): termometr cieczowy, prawo ostygania.
- 1724 – Daniel Gabriel Fahrenheit (Amsterdam): termometr rtęciowy.
- 1738 – Daniel I Bernoulli (Bazylea): kinetyczny model gazu.
- ~1780 – Antoine Lavoisier (Paryż): teoria ciepłika.
- 1798 – Benjamin Thompson (hr. Rumford): związek pracy i ciepła.
- 1802 – Joseph-Louis Gay-Lussac (Paryż): prawa gazowe, $V(T)$.
- 1811 – Jean-Baptiste Joseph Fourier (Grenoble): analityczna teoria ciepła.
- 1824 – Sadi Carnot (Paryż): wgląd w istotę II zasady.

- 1834 – [Emile Clapeyron](#) (Paryż): rozpowszechnienie odkryć Carnota.
- 1842 – [Robert Mayer](#) (Heilbronn): zasada zachowania energii.
- 1843 – [James Prescott Joule](#) (Manchester): mechaniczny równoważnik ciepła.
- 1848 – [William Thomson](#) (lord Kelvin): bezwzględna skala temperatury.
- 1850 – [Rudolf Clausius](#) (Berlin): I i II zasada termodynamiki.
- 1860 – [James Clerk Maxwell](#) (Londyn): kinetyczna teoria gazów.
- 1865 – [Rudolf Clausius](#) (Berlin): pojęcie entropii.
- 1872 – [Ludwig Boltzmann](#) (Wiedeń): statystyczna interpretacja II zasady.
- 1873 – [Johannes Diderik van der Waals](#) (Amsterdam): r-nie stanu gazu rzeczywistego.
- 1878 – [Josiah Willard Gibbs](#) (Yale): zasady mechaniki statystycznej.
- 1900 – [Max Planck](#) (Berlin): promieniowanie ciała czarnego, hipoteza kwantów.
- 1905 – [Marian Smoluchowski](#) (Kraków) i [Albert Einstein](#) (Bern): teoria ruchów Browna.
- 1924 – [Satyendra Nath Bose](#) (Kalkuta): kwantowa statystyka bozonów ([Bosego-Einsteina](#)).
- 1926 – [Enrico Fermi](#) (Rzym): kwantowa statystyka fermionów ([Fermiego-Diraca](#)).

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**.

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.

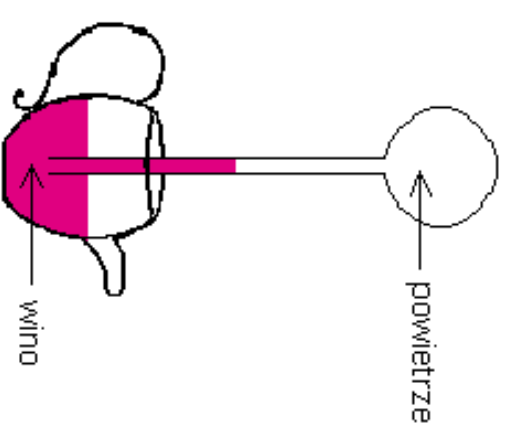
Pomiary temperatury i jej skale

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

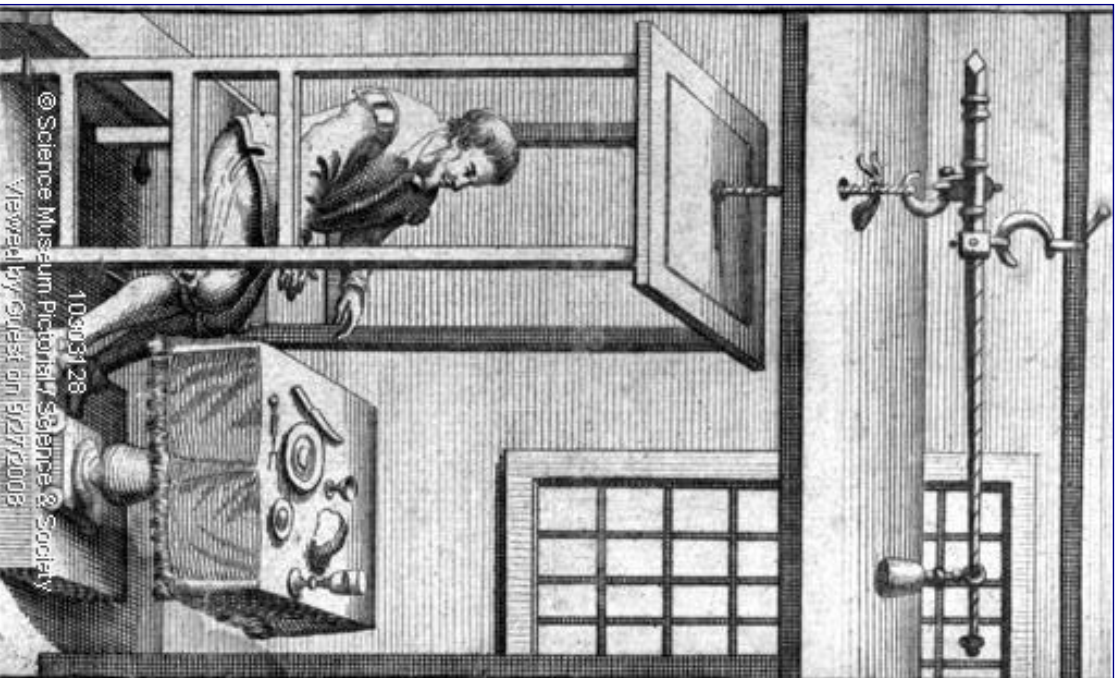
Własność tę nazywamy **parametrem termometrycznym**.

Przykłady:

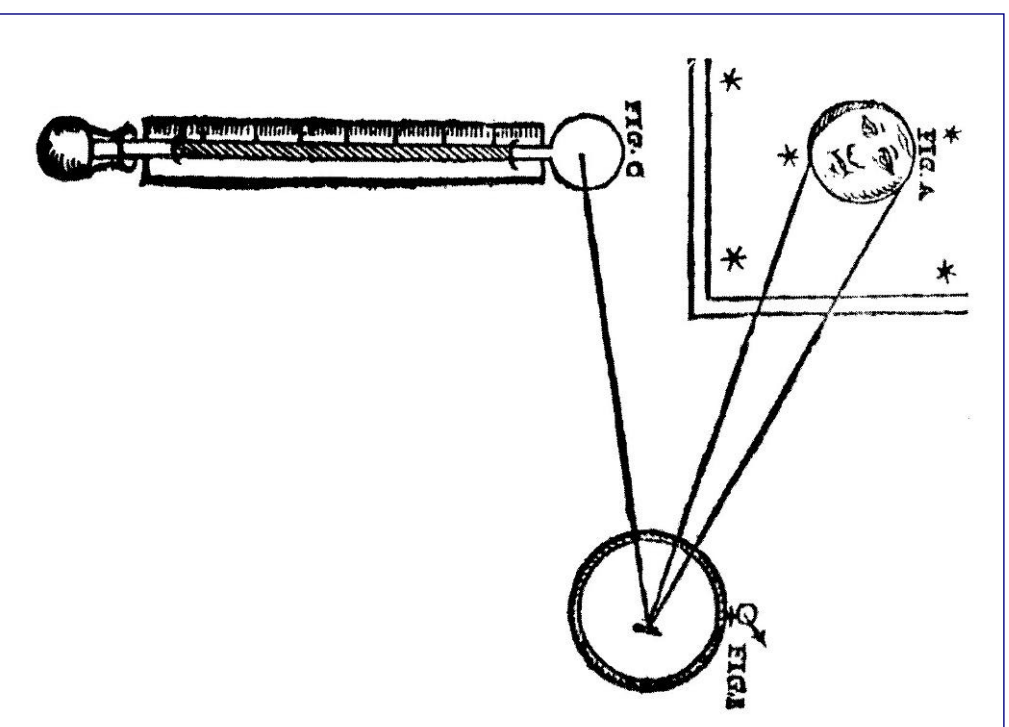
- jeden z najstarszych **termoskopów**, skonstruowanych przez Santoriego w 1612 r., opiera się na zjawisku rozszerzalności (zmiany objętości) powietrza;
- Robert Hook wprowadził w 1664 r. termometr w oparciu o rozszerzalność barwionego alkoholu;
- Daniel Gabriel Fahrenheit (na początku XVIII w.) jako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

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

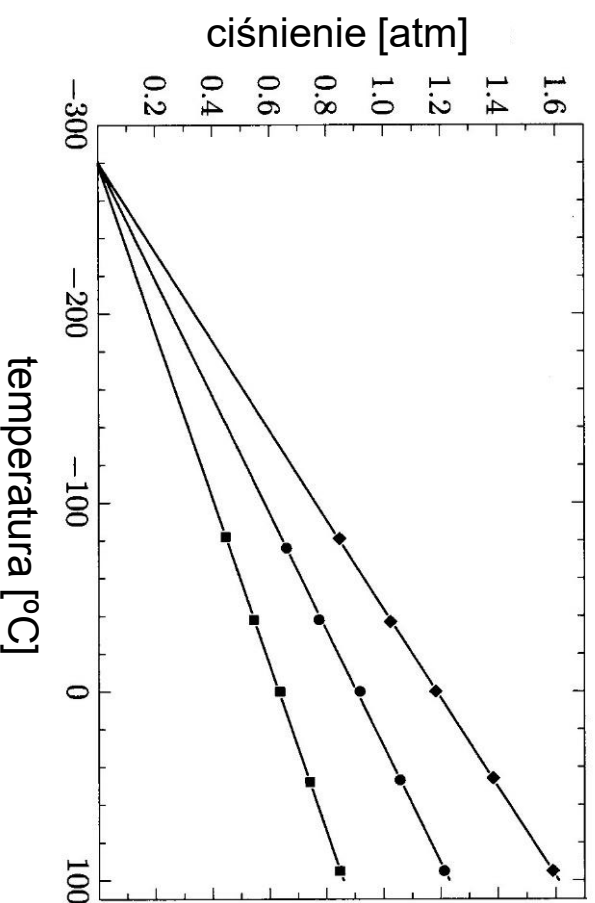
Później odwrócono skalę zamieniając te wartości
(Linneusz, 1745)

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

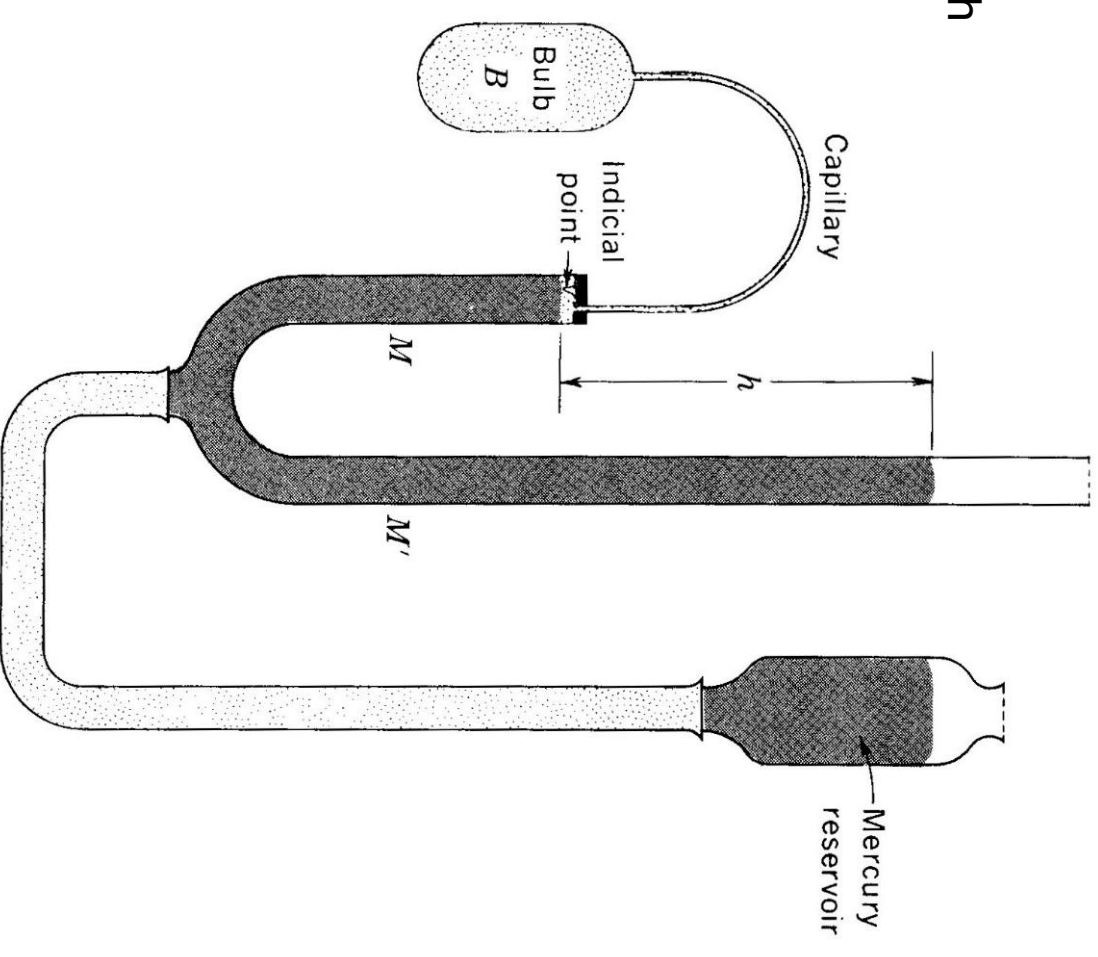
Termometr gazowy

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

 model termometru gazowego

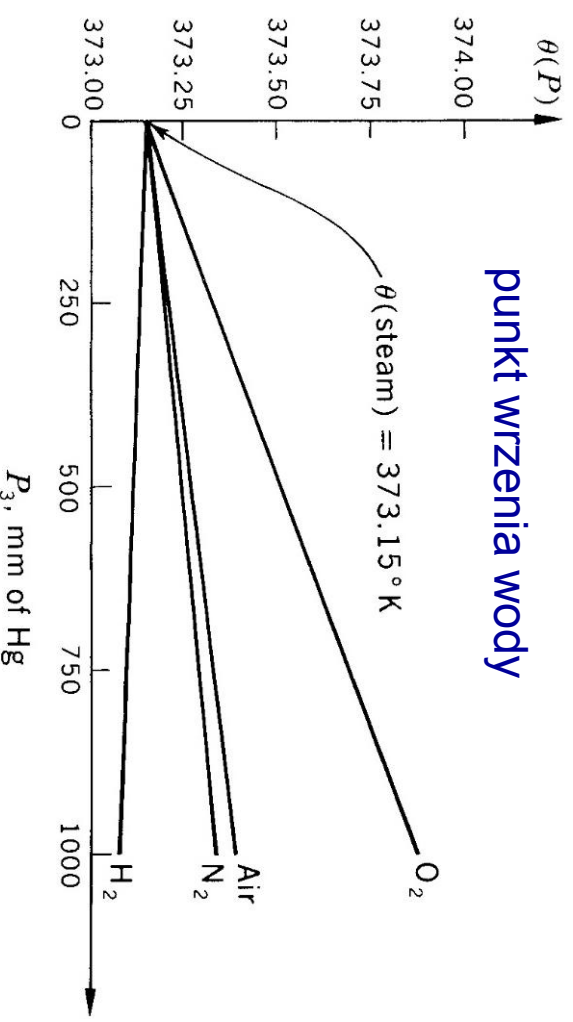
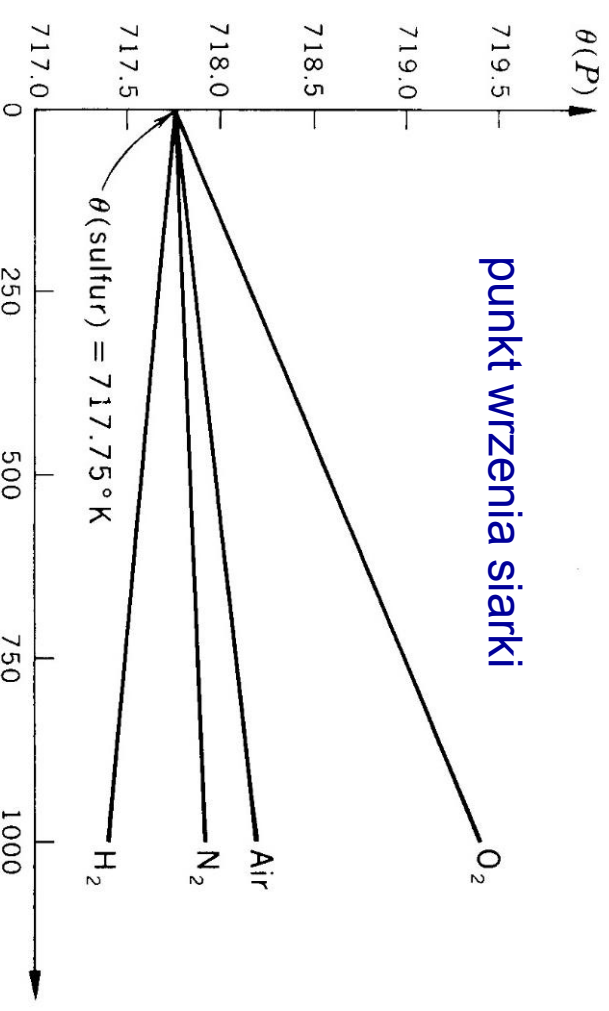
Tak zdefiniowane termometry pokazują różne wartości w stałych punktach !

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:

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



Współczesna definicja empirycznej temperatury bezwzględnej

- Temperatura jest proporcjonalna do parametru termometrycznego X :

$$T(X) = aX.$$

- Przyjmujemy **jeden punkt stały: punkt potrójny wody**, dla którego

$$T(X_3) \equiv 273.16\text{ K}.$$

Film:

Woda, lód i para współistnieją w punkcie potrójnym

https://www.youtube.com/watch?v=Juz9pVsmQQ&ab_channel=UCSCPhysics

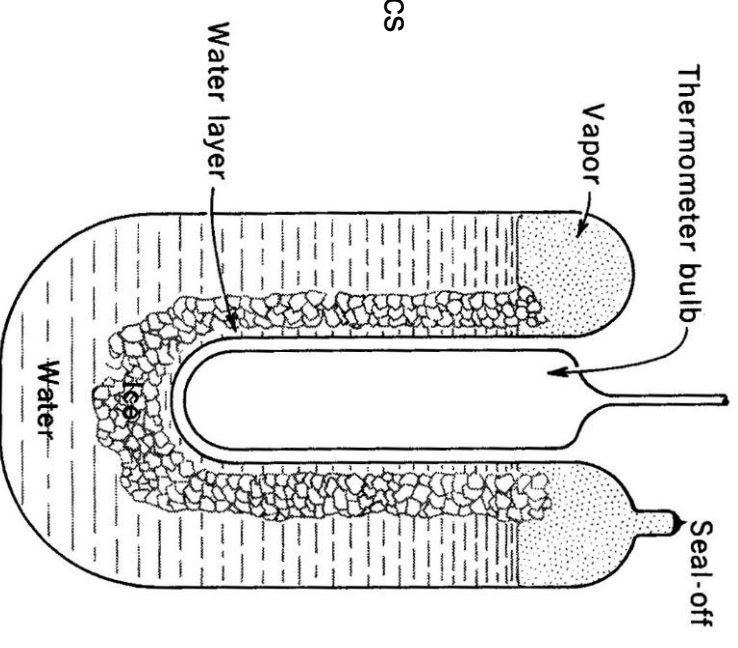
Punkty potrójne (przykłady)

H₂O 273.16 K 0.611 kPa

N₂ 63.18 K 12.6 kPa

O₂ 54.36 K 0.146 kPa

CO₂ 216.55 K 517.0 kPa (5.17 atm)



realizacja punktu potrójnego
wody (schematycznie)

Współczesna definicja empirycznej temperatury bezwzględnej

- Temperatura jest proporcjonalna do parametru termometrycznego X :

$$T(X) = aX.$$

Definicja Kelwina w obecnym nowym układzie SI (po 2019)

kelwin, symbol K, jest to jednostka SI temperatury termodynamicznej.

Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej stałej Boltzmann'a k , wynoszącej $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, wyrażonej w jednostce J K^{-1} , która jest równa $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, gdzie kilogram, metr i sekunda zdefiniowane są za pomocą h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$,

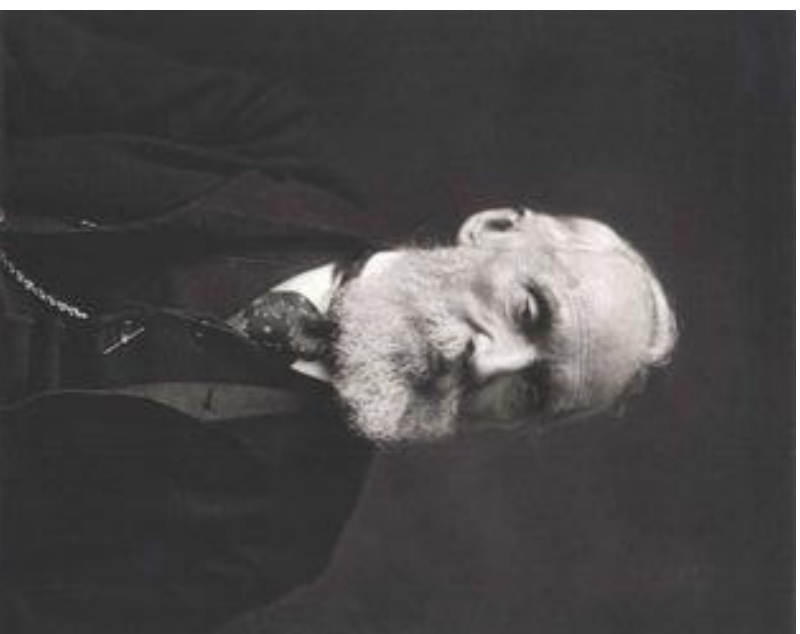
- Przykłady parametrów termometrycznych:
 - ciśnienie gazu (przy stałej objętości),
 - opór elektryczny,
 - siła elektromotoryczna termopary,
 - natężenie promieniowania cieplnego.

Punkty stałe ITS-90

Temperature		Temperature			
Number	T_{90}/K	$t_{90}/\text{°C}$	Substance ^a	State ^b	
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	V	
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	T	
3	~17	~256.15	e-H ₂ (or He)	V (or G)	
4	~20.3	~252.85	e-H ₂ (or He)	V (or G)	
5	24.5561	-248.5939	Ne	T	
6	54.3584	-218.7916	O ₂	T	
7	83.8058	-189.3442	Ar	T	
8	234.3156	-38.8344	Hg	T	
9	273.16	0.01	H ₂ O	T	
10	302.9146	29.7646	Ga	M	
11	429.7485	156.5985	In	F	
12	505.078	231.928	Sn	F	
13	692.677	419.527	Zn	F	
14	933.473	660.323	Al	F	
15	1234.93	961.78	Ag	F	
16	1337.33	1064.18	Au	F	
17	1357.77	1084.62	Cu	F	



Anders Celsius (1701 – 1744)



William Thomson (1824 – 1907)

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

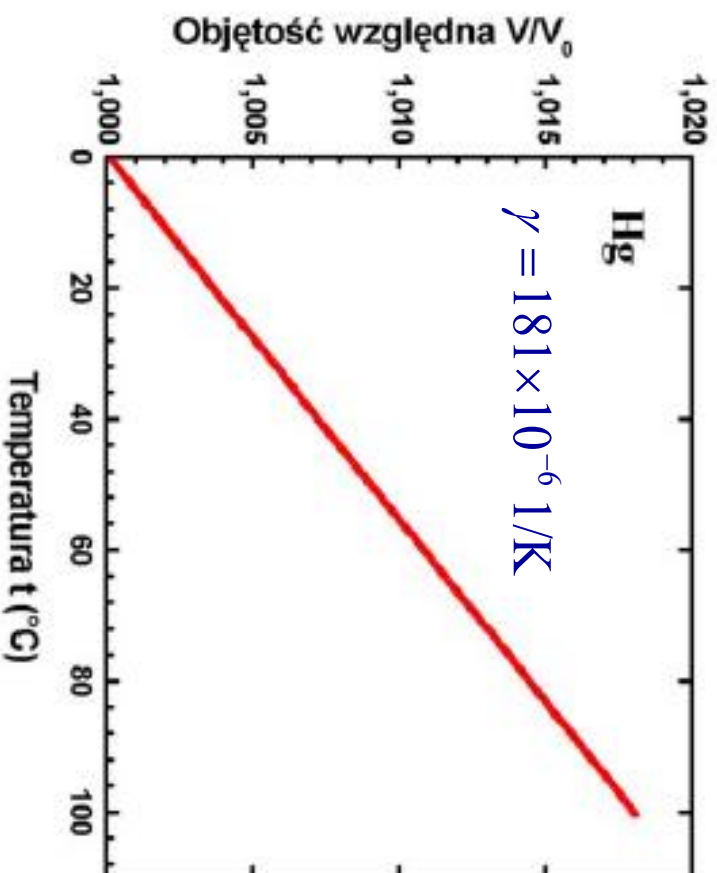
$$\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V(p, T)}{\partial T} \right)_p .$$

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:

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



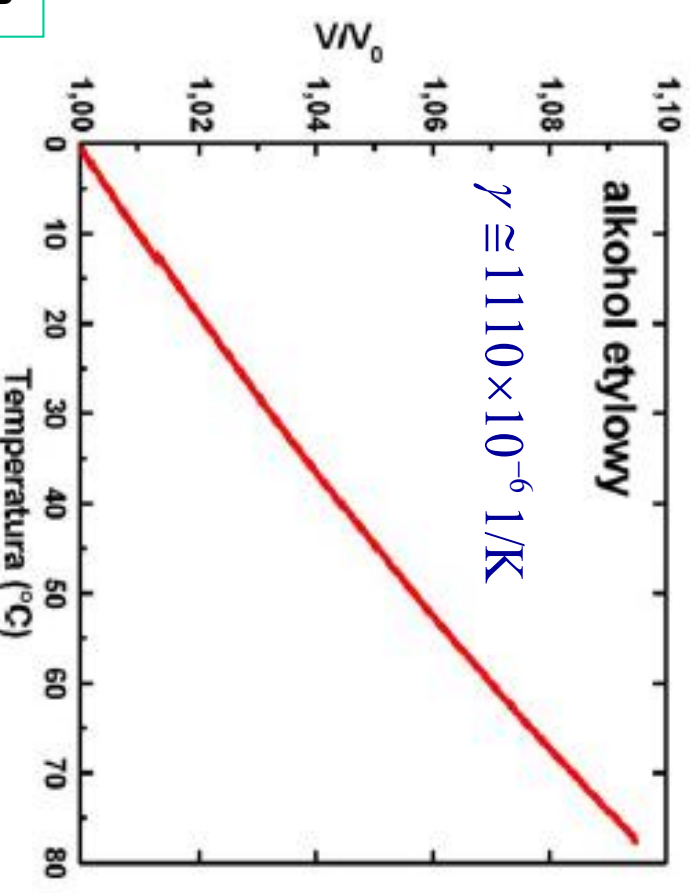
rozszerzalność cieczy

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

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

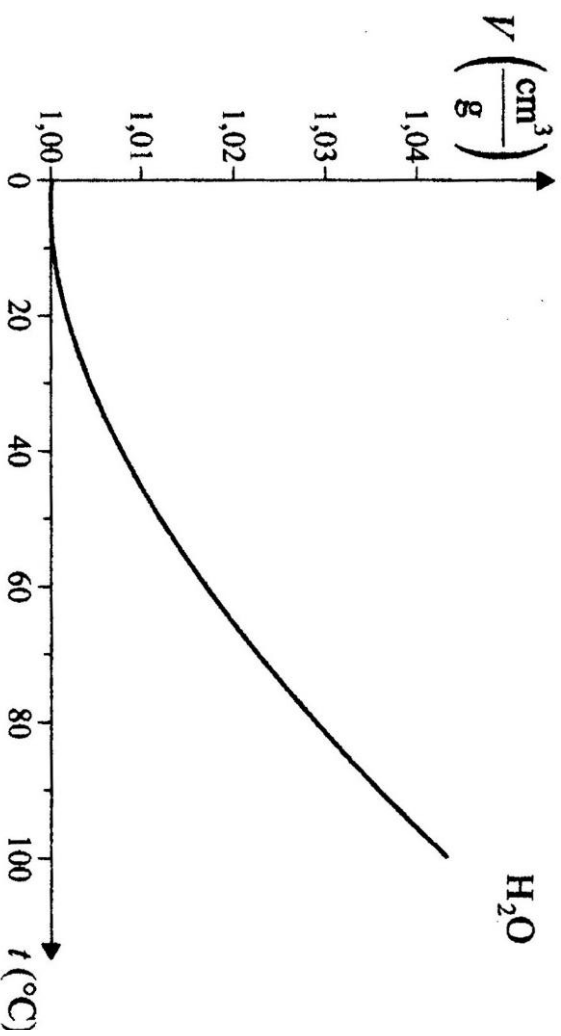
Objętość rtęci rośnie **liniowo** z temperaturą. Właśnie dlatego powszechnie używa się jej w termometrach.

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

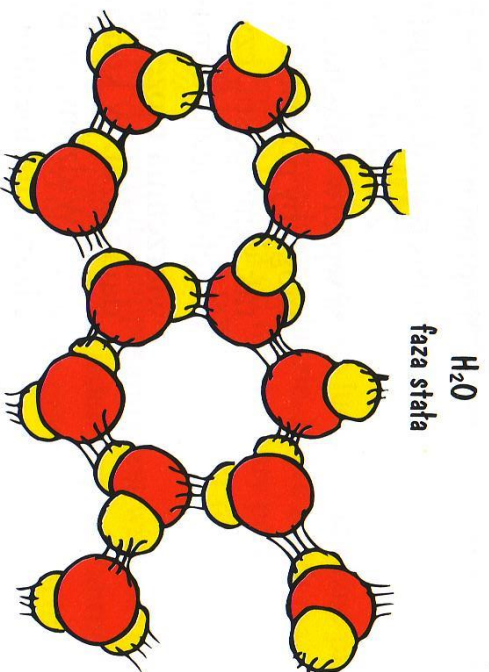
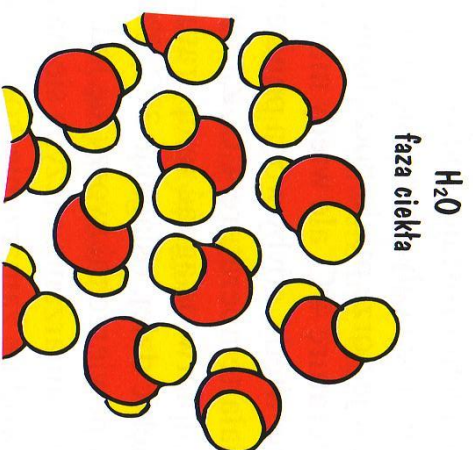
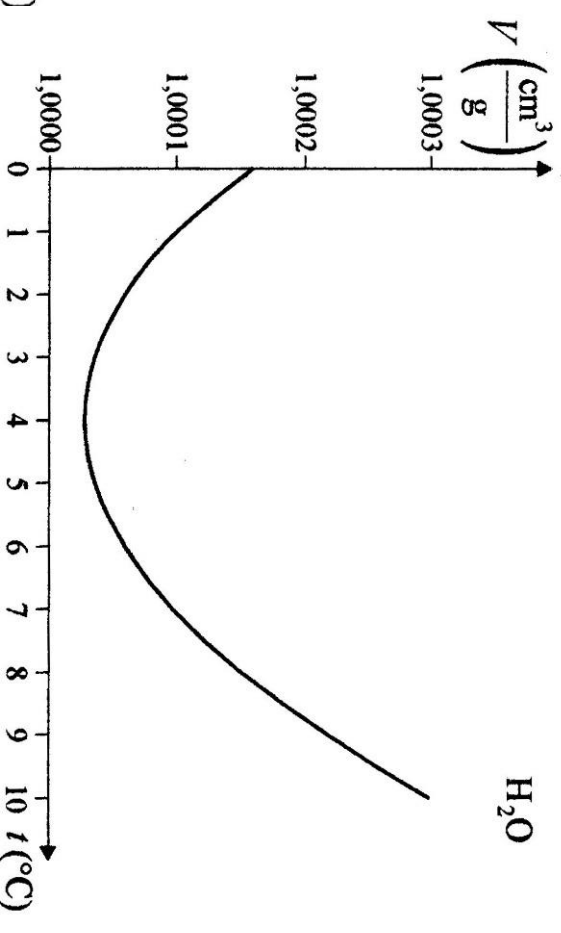


Woda wykazuje anomalną rozszerzalność:

jest **nie liniowa**...



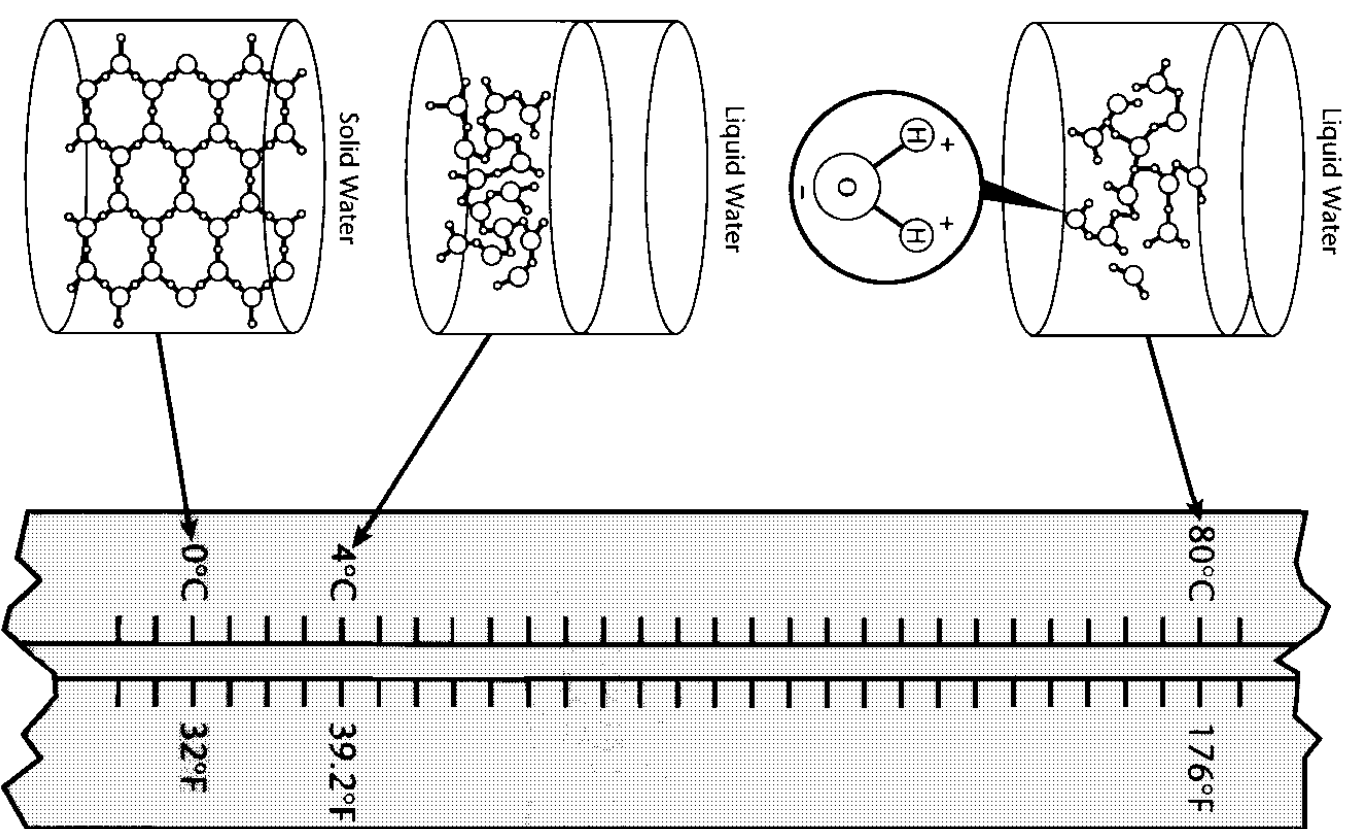
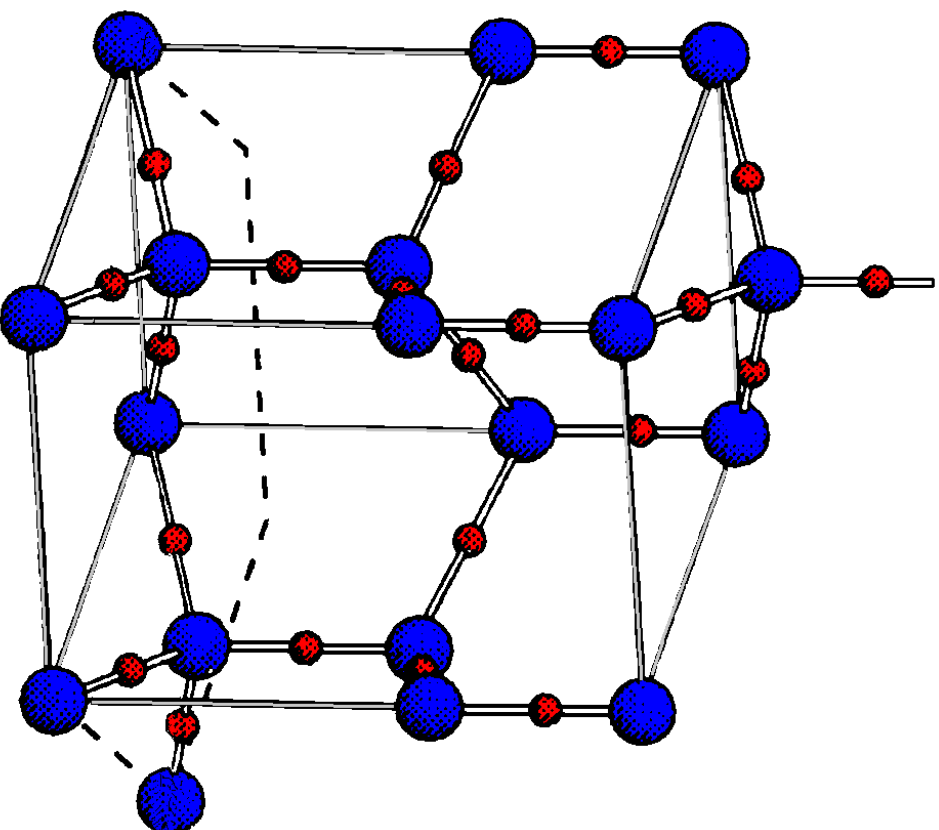
...ale też **nier monotoniczna**



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

model jeziora w zimie

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:

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

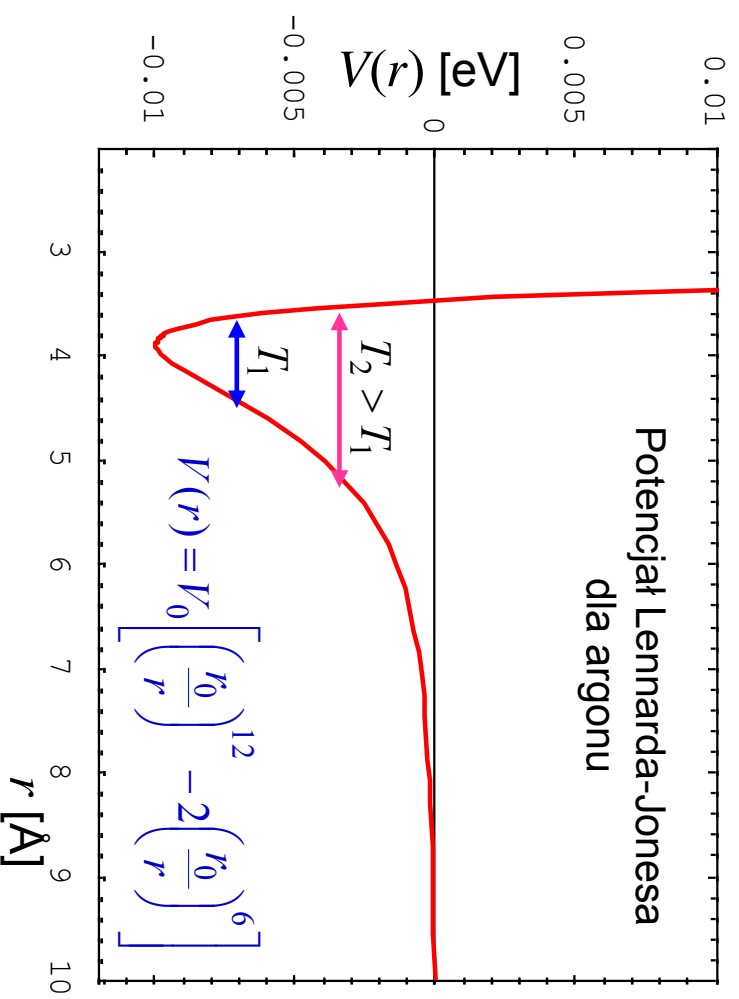
Można łatwo wykazać że: $\gamma = 3\alpha$.

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: $\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$.



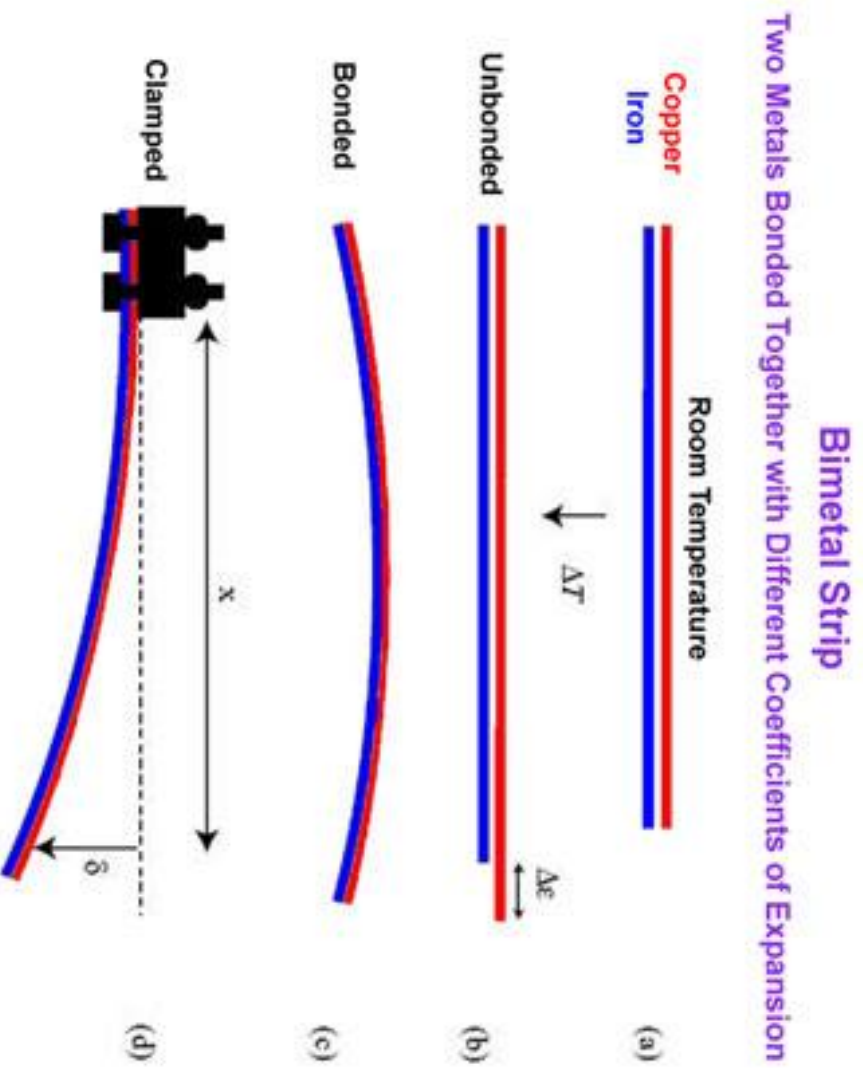
dylatometr

Mechanizm rozszerzalności termicznej



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

🌟 bimetal



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

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

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



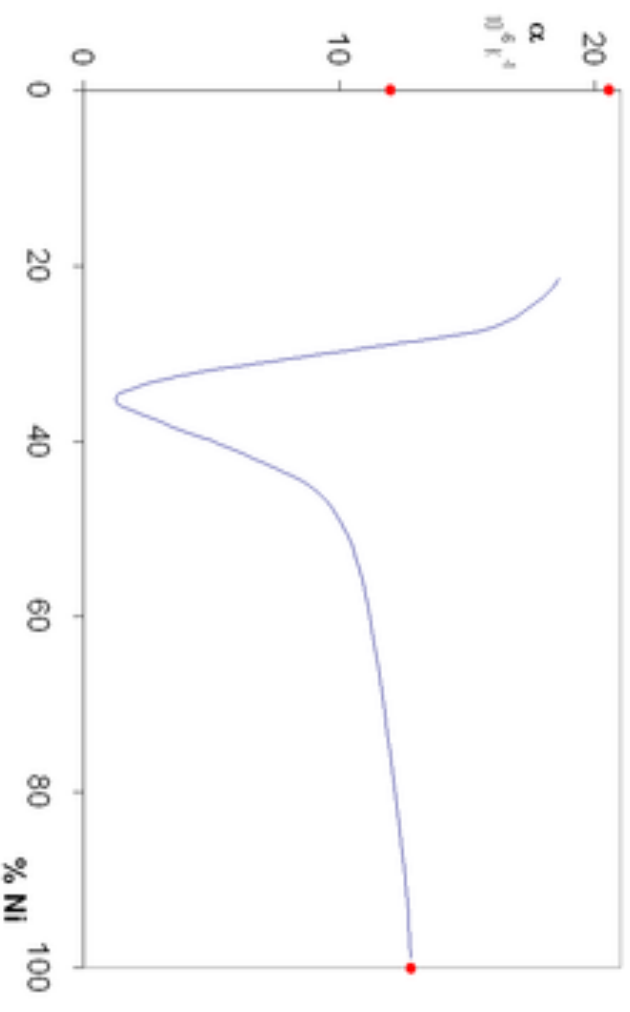
Charles Edouard Guillaume

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.

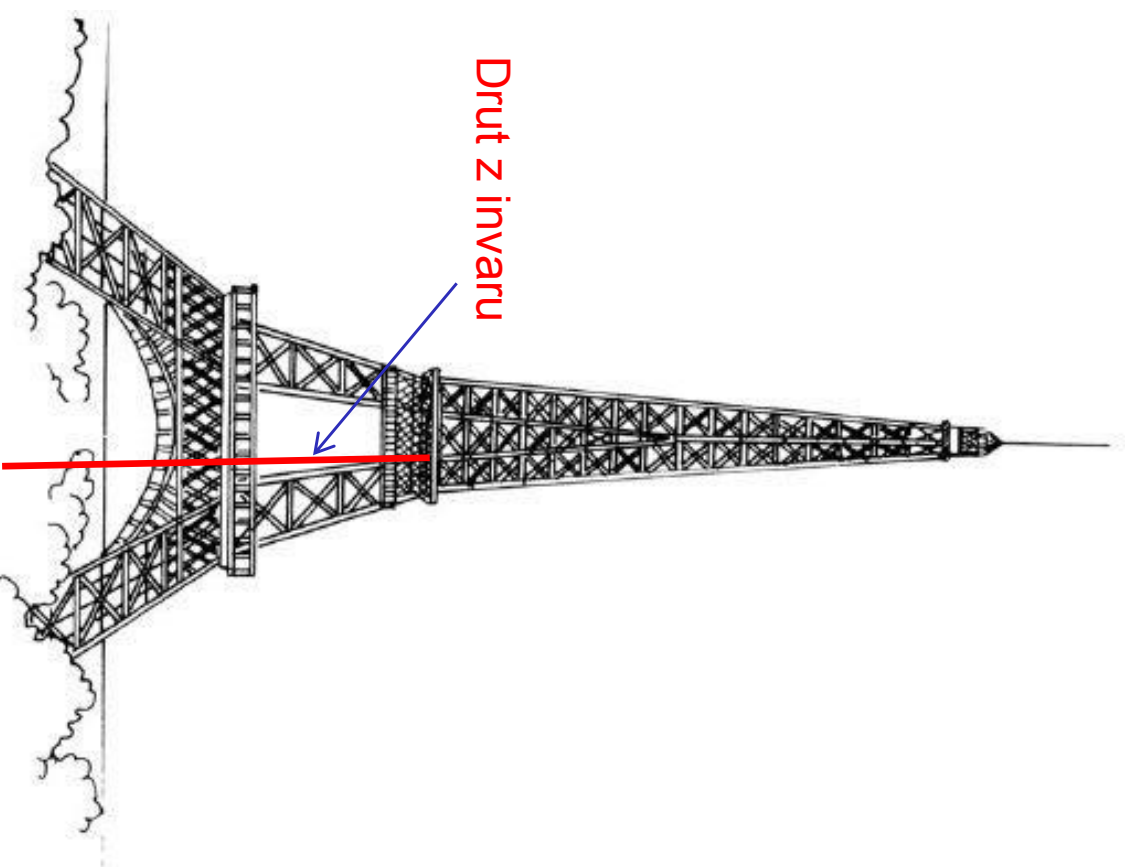
C.E. Guillaume, Nobel Lecture, 1920



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

Wniosek:

Invar and elinvar

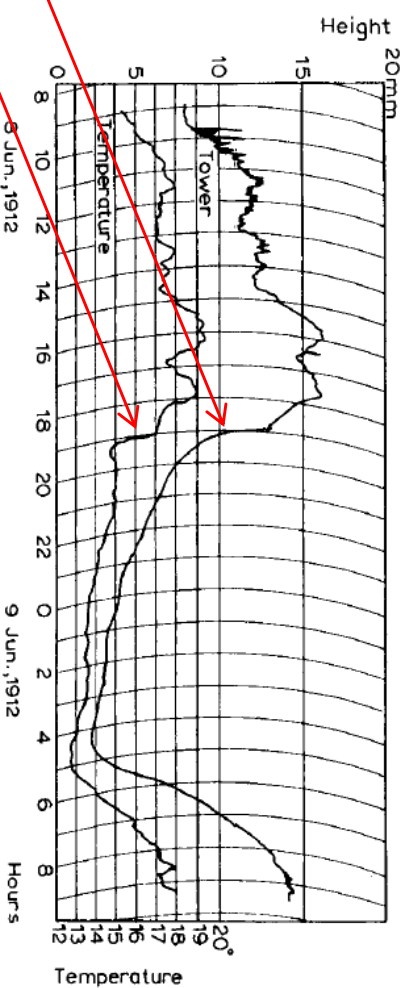
Wieża Eiffla może służyć

Jako bardzo czuły termometr !

Nobel Lecture, December 11, 1920

Gwałtowna burza
08.06.1912 około 19:00

Zmniejszenie długości wieży



Spadek temperatury

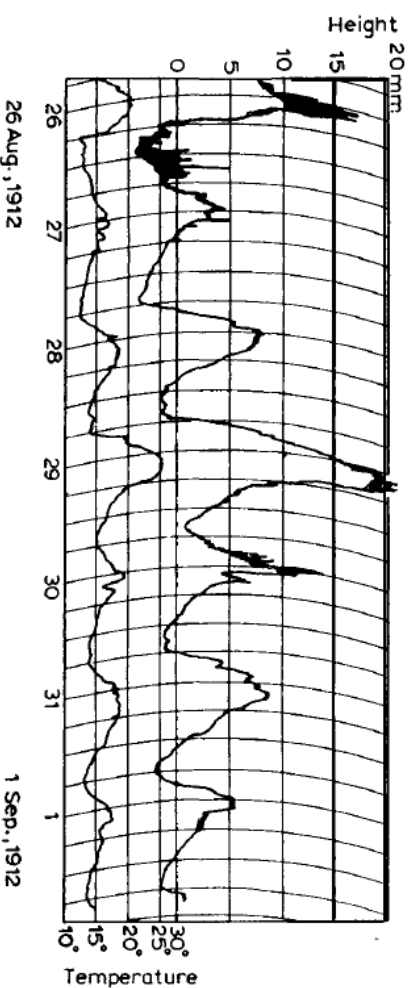


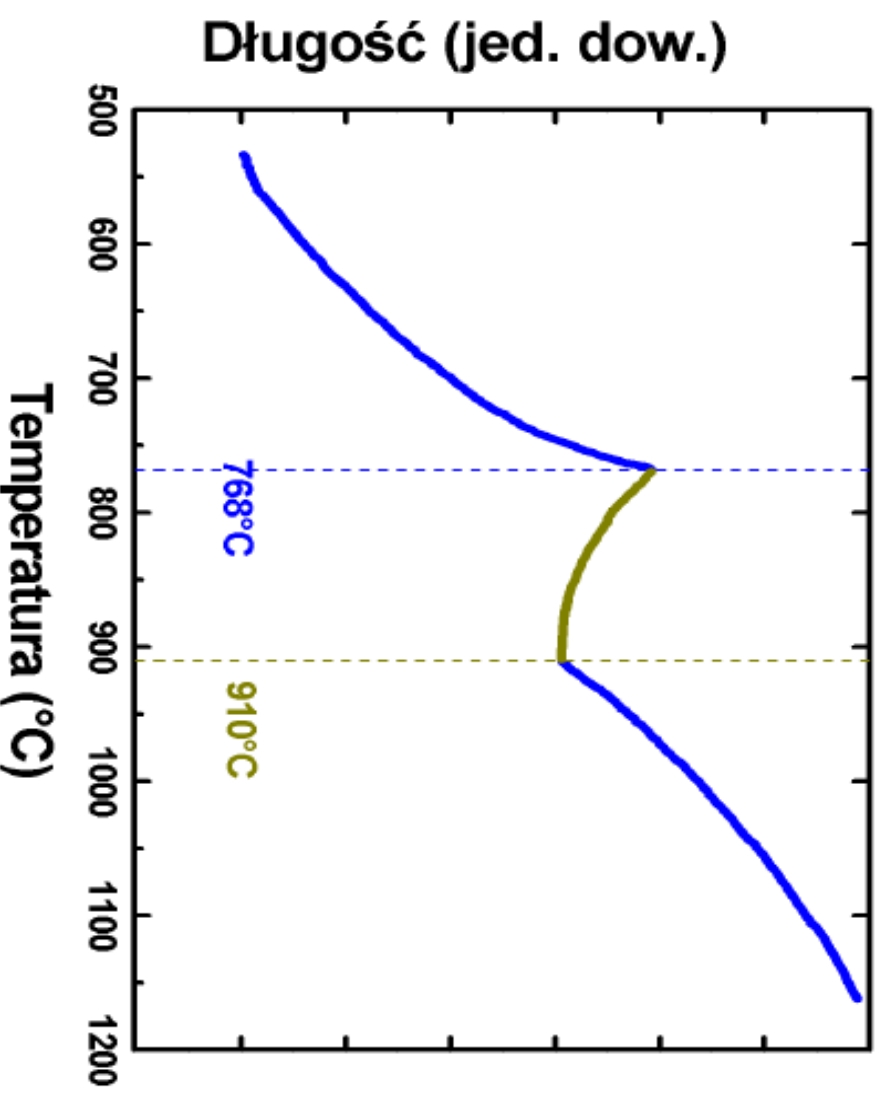
Fig. 8. Daily movements of the Eiffel Tower (a downpour at 19 hours caused a sudden temperature drop).

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

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



wydłużenie drutu żelaznego

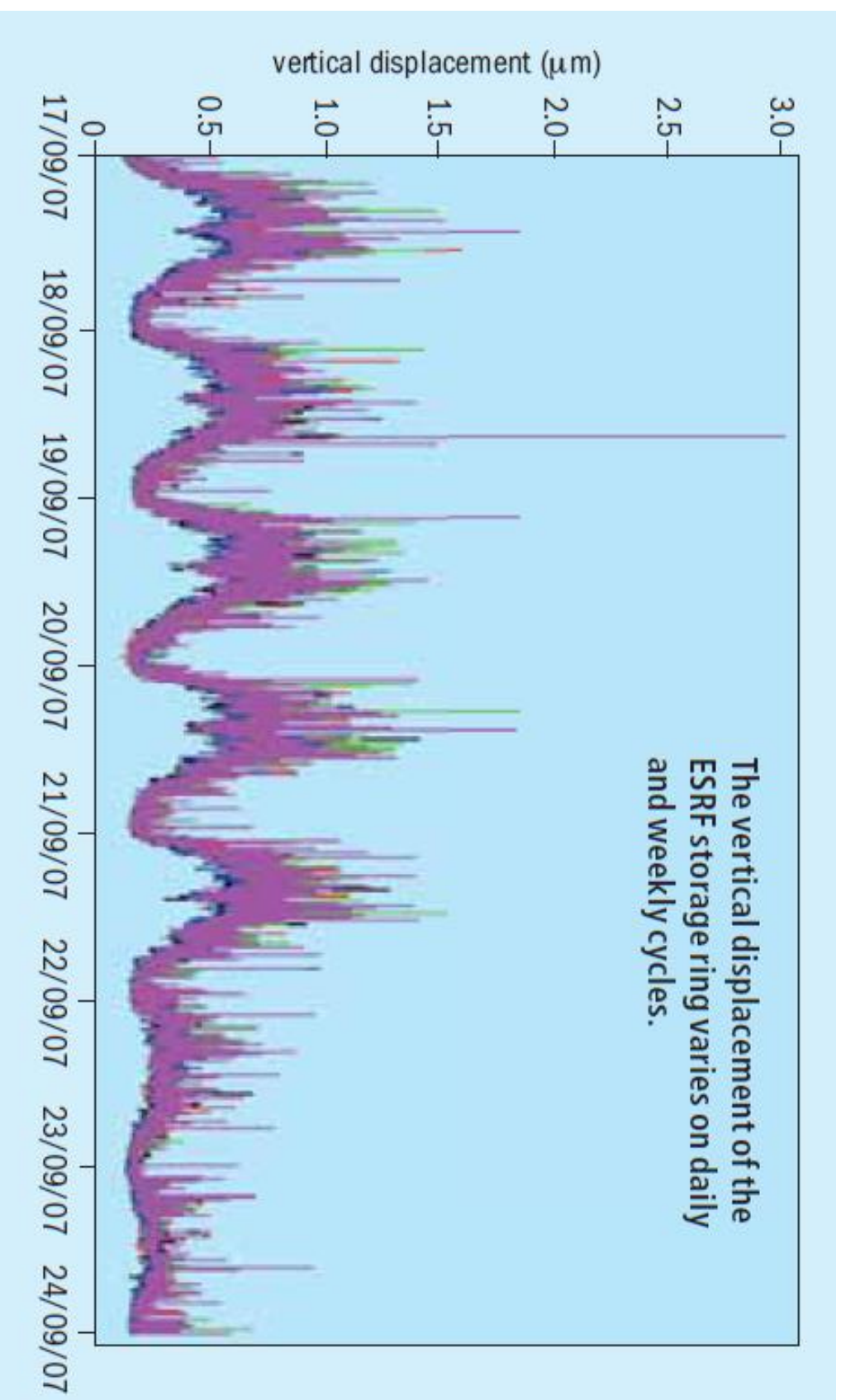


Synchrotron ESRF w Grenoble (Francja)



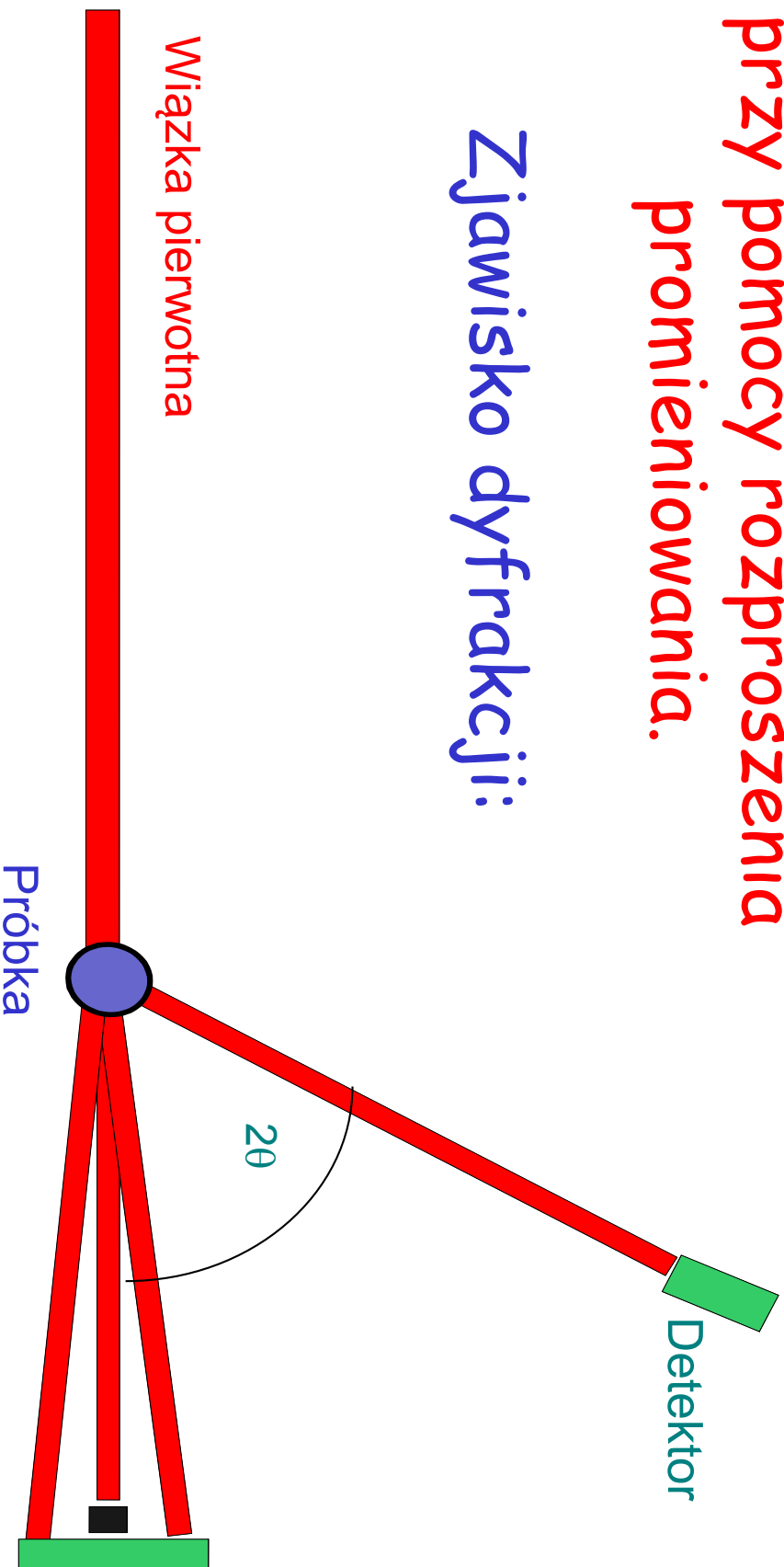
www.esrf.fr

„Good vibes” ESRF news, July 2012



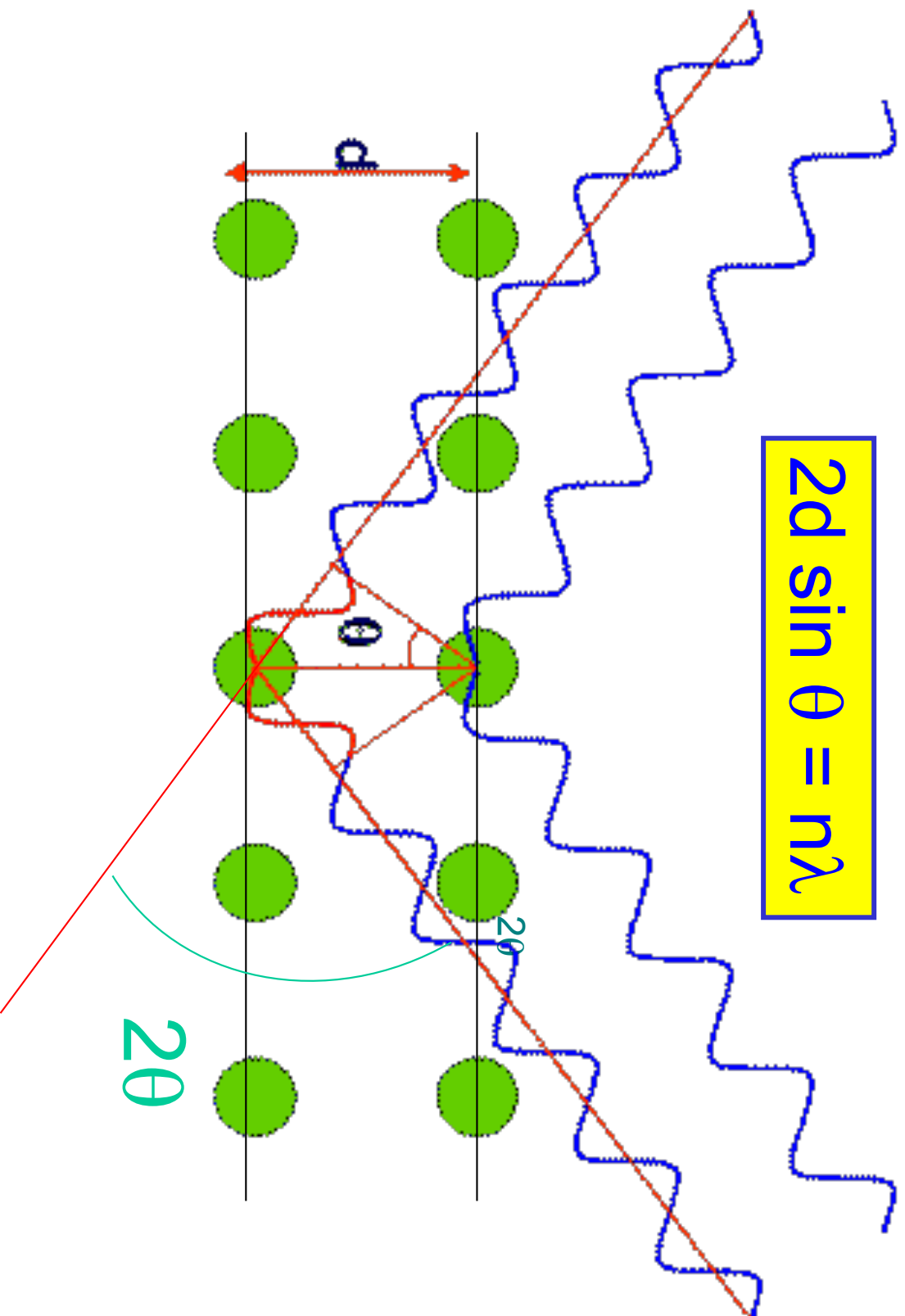
Idea doświadczenia:
Poznać strukturę materiału
przy pomocy rozproszenia
promieniowania.

Zjawisko dyfrakcji:



Warunek dyfrakcji: Prawo Braggów

$$2d \sin \theta = n\lambda$$



Ujemny współczynnik rozszerzalności termicznej dla Cu_2O

Neutron powder diffraction study of the thermal expansion of cuprite

W. Schäfer*, A. Kirlfel

Mineralogisch-Petrologisches Institut, Universität Bonn, 53115 Bonn, Germany

Received: 6 July 2001/Accepted: 13 November 2001 – © Springer-Verlag 2002

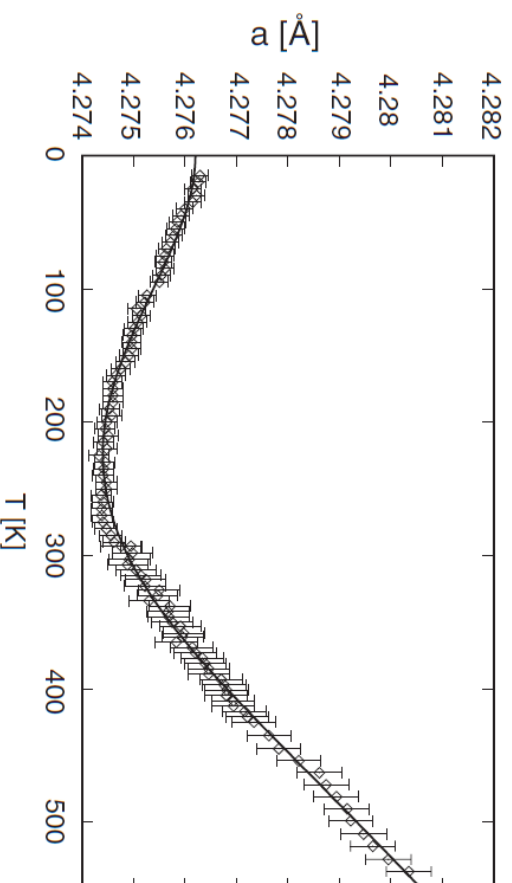
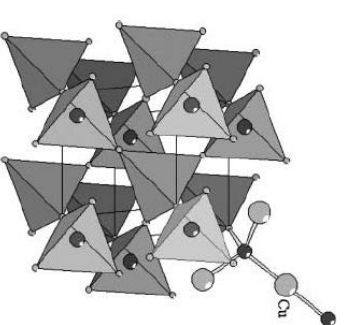


Fig. 2. Lattice parameter a_0 vs. temperature T ; polynomial fit indicated by line

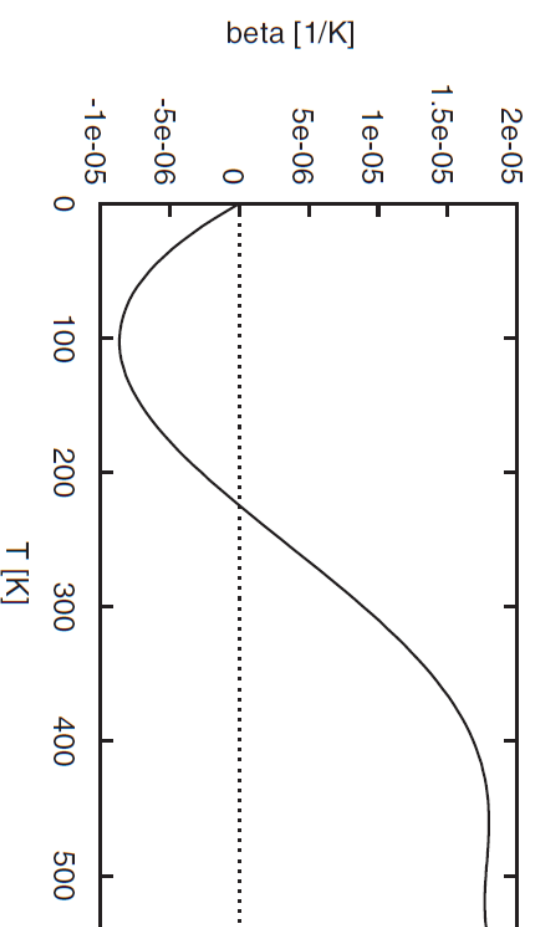
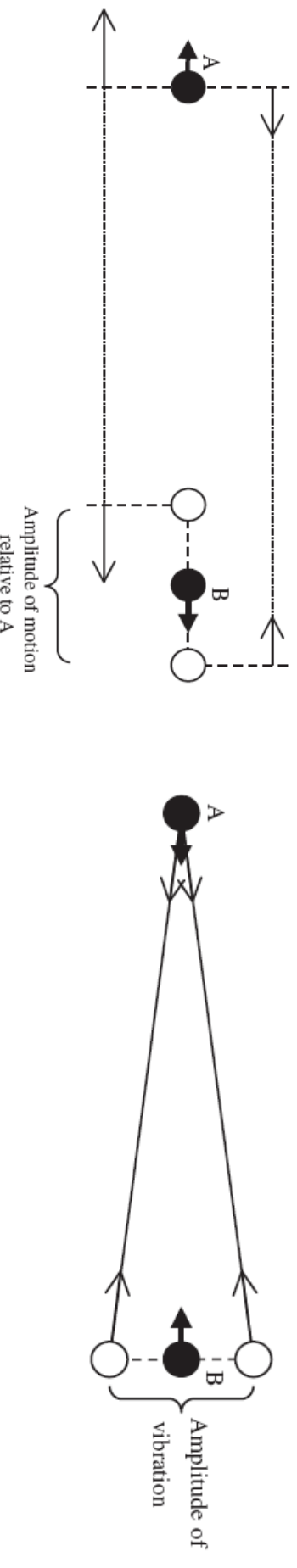
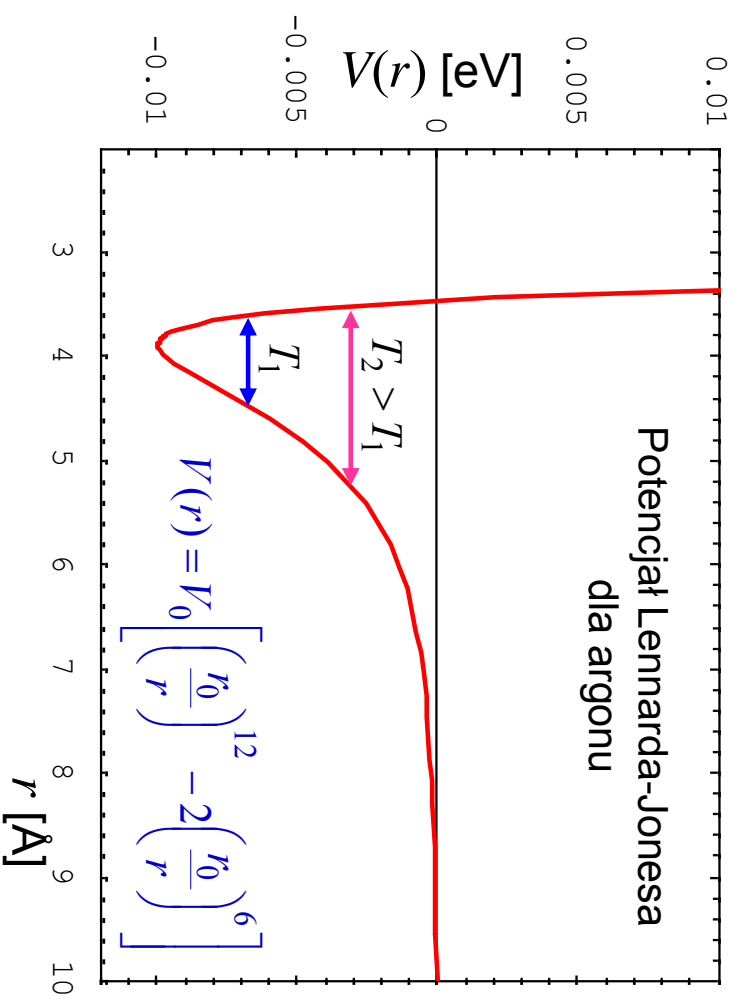


Fig. 3. Volume expansion coefficient β vs. temperature

Appl. Phys. A 74 [Suppl.], S1010–S1012 (2002) (DOI) 10.1007/s003390201601

Mechanizm rozszerzalności



United States Patent [19]
Sleight et al.

[11] Patent Number: **5,514,360**
[45] Date of Patent: **May 7, 1996**



[54] NEGATIVE THERMAL EXPANSION MATERIALS

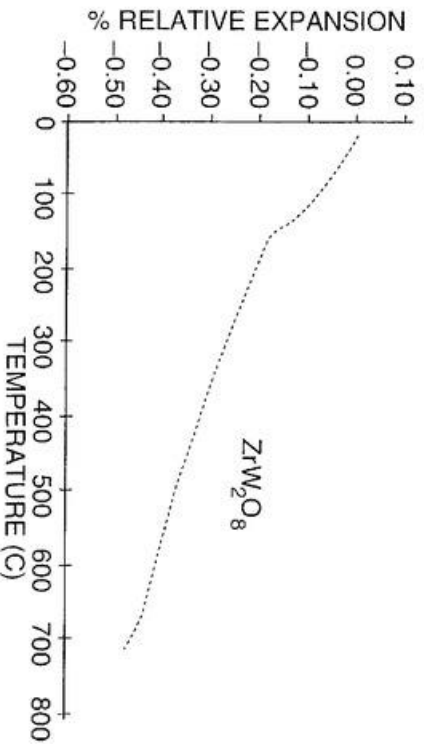
[75] Inventors: Arthur W. Sleight, Philonah Mary A. Thundathil, John S. O. Evans, both of Corvallis, all of Oreg.
[73] Assignee: The State of Oregon Acting by and Through the Oregon State Board of Higher Education on Behalf of Oregon State University, Corvallis, Oreg.

[21] Appl. No.: **397,695**
[22] Filed: **Mar. 1, 1995**
[31] Int. Cl.⁶: **C01G 25/02; C01G 27/02**
[32] U.S. Cl.: **423/593**
[38] Field of Search: **423/593**
[56] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS
1,399,705 12/1921 Ebeley et al. 423/593
4,269,898 5/1981 Roemer et al. 423/593
5,572,559 6/1994 Sleight 423/593

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-VO₂ and HfO₂-WO₃-VO₂," *J. Am. Ceram. Soc.*, 50:211-215 (1967), Chung, et al.



"Suboxide 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 Al₂O₃," *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, vol. 12, No. 11, (Nov. 1967), Trunov, et al.
Priority Examiner—Wynne Langel
Attorney, Agent, or Firm—Kluquist Sparkman Campbell Leigh & Whitson

157] 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 W⁶⁺ compound and a second metal compound wherein the metal is selected from the group consisting of Zr⁴⁺, Hf⁴⁺ 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 1300° 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[®]

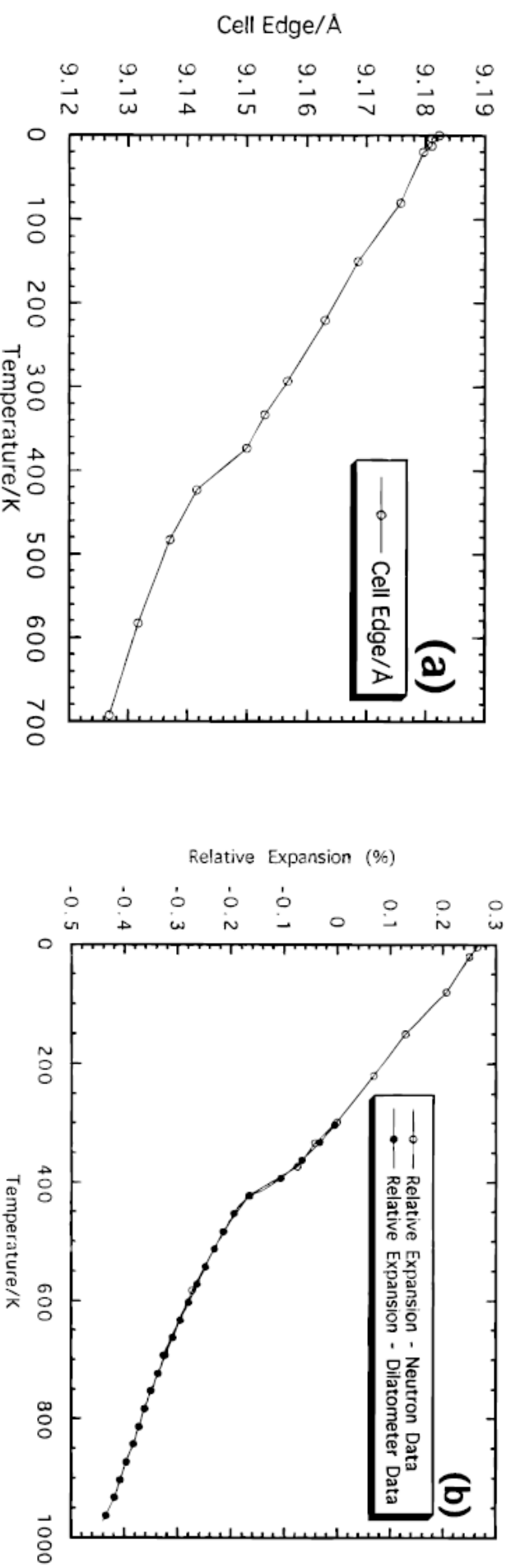


Figure 1. (a) Cubic cell dimension as a function of temperature. (b) Relative expansion from both diffraction and dilatometer data.

Termometry elektryczne oporowe

Opór elektryczny przewodników i półprzewodników zależy od temperatury.



opór metalu i półprzewodnika

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

$$1/\rho \equiv \sigma = en\mu,$$

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.



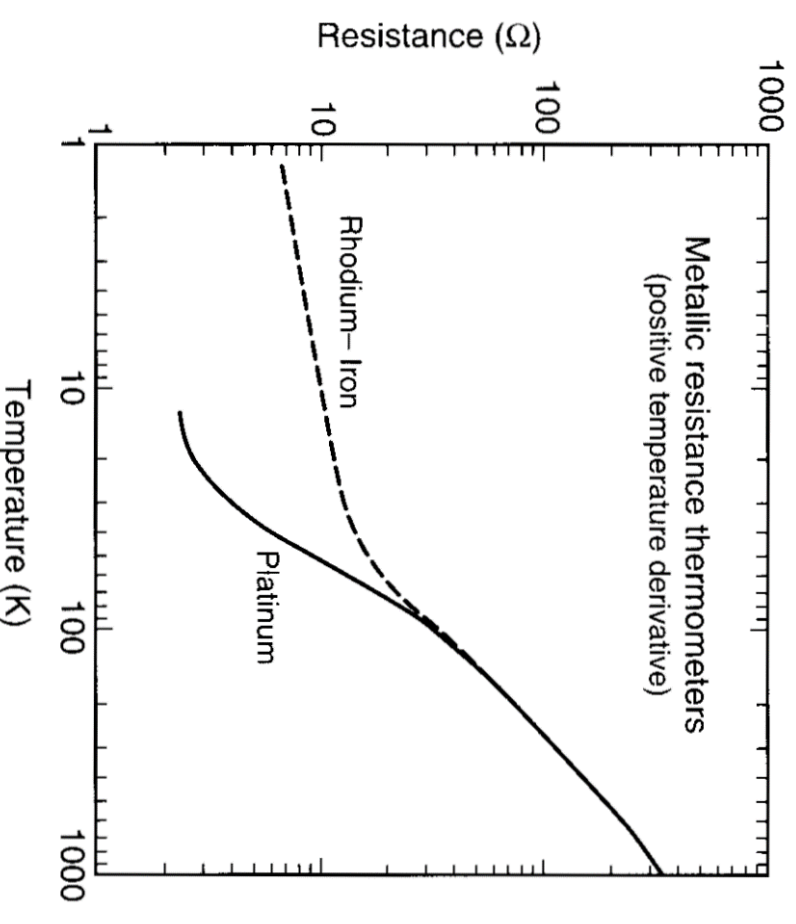
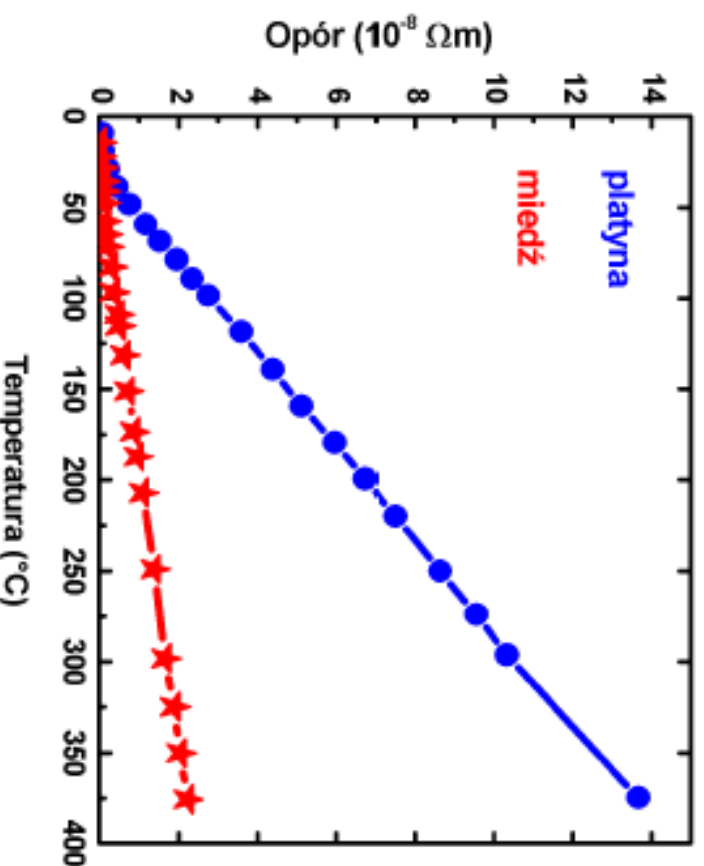
Opór przewodnika **rośnie** wraz ze **wzrostem** temperatury.

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:

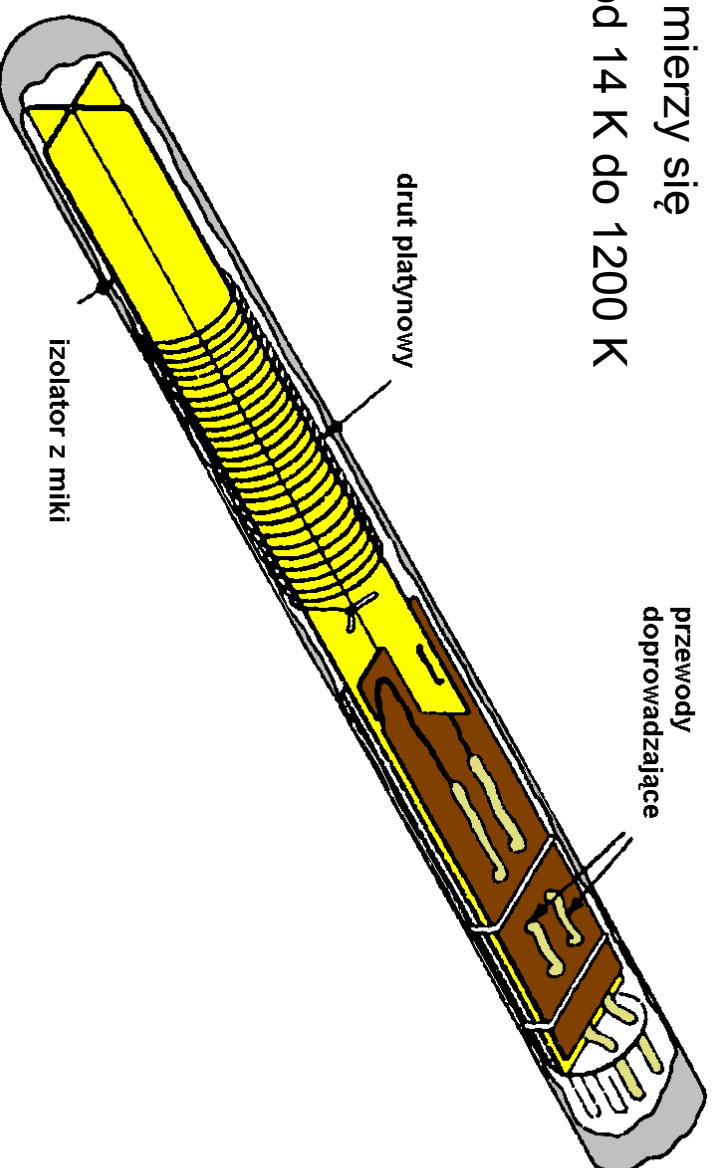
$$\rho [\mu\Omega\text{cm}] = -1.310 + 42.257 \cdot 10^{-3} T - 5.755 \cdot 10^{-6} T^2 .$$



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

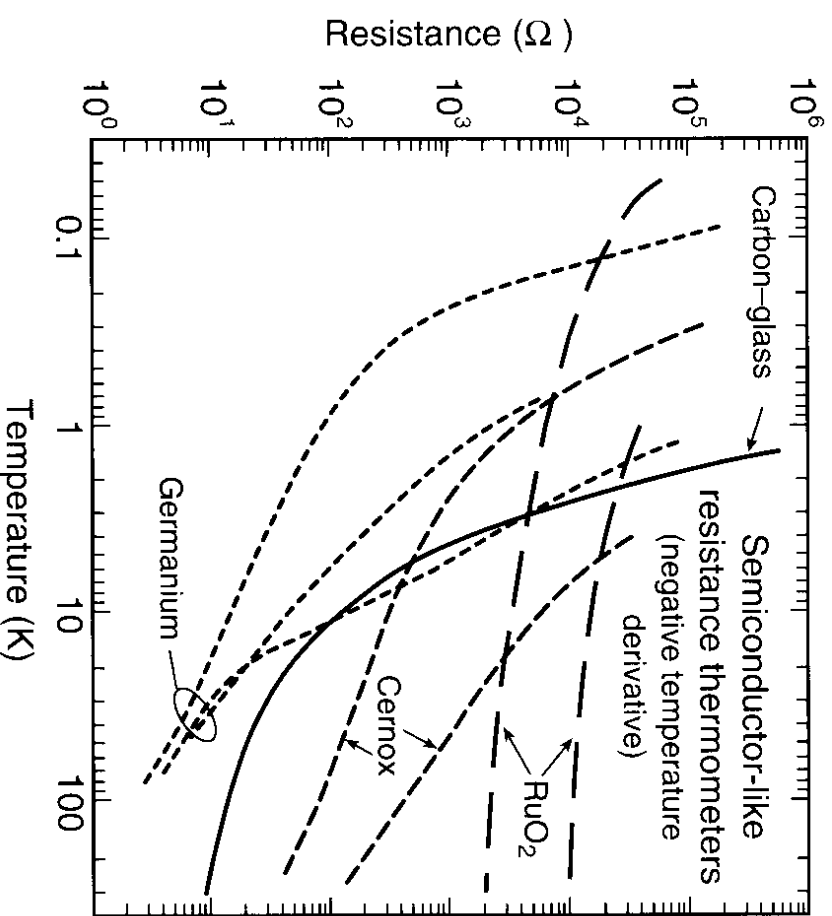
W przypadku półprzewodników zasadniczą rolę odgrywa silny wzrost **koncentracji** nośników przy rosnącej temperaturze.

W przybliżeniu zachodzi:

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

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

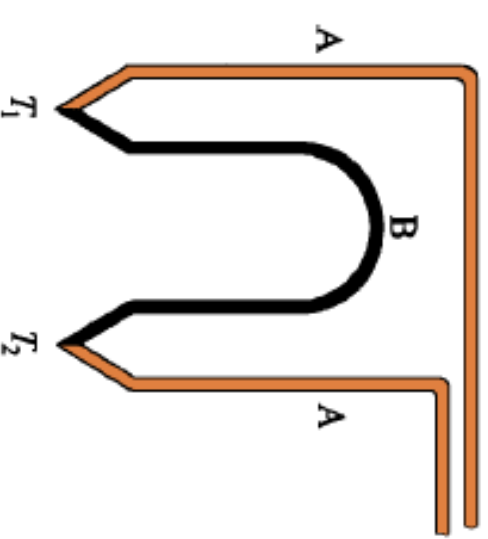
Zaletą półprzewodników jest ich duża czułość, zwłaszcza w niskich temperaturach, oraz możliwość wytworzenia czujników o bardzo małych rozmiarach.



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 $\Delta T = T_2 - T_1$:

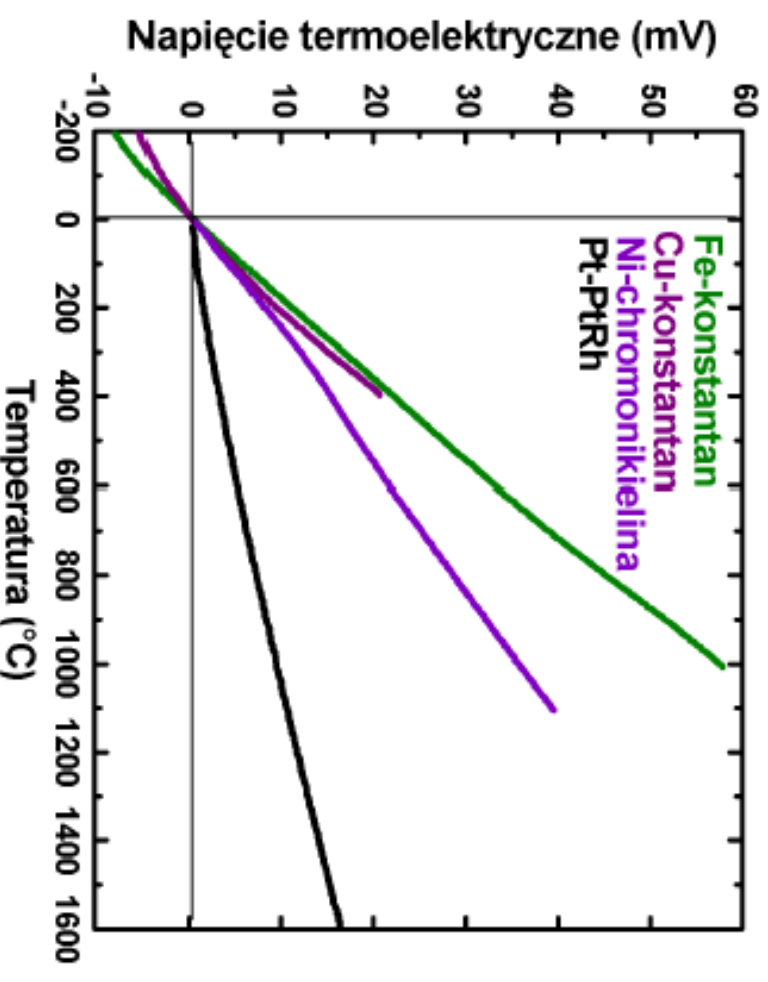
$$U(T_2 - T_1) = \alpha(T_2 - T_1),$$

gdzie α jest współczynnikiem termoelektrycznym termopary.

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



termopara wagi ciężkiej



Wybrane temperatury: ciekawostki i ekstrema

- Najniższa temp. w laboratorium: $5 \times 10^{-10} \text{ K}$ – kondensacja Bosego-Einsteina atomów sodu w pułapce magneto-grawitacyjnej (2003).
- Skraplanie azotu: $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ (77 K).
- Najniższa temp. na Ziemi: $-89.2 \text{ }^\circ\text{C}$ – Antarktyda, stacja Wostok 21.07.1983.
- Najniższa temp. w Polsce: $-40.6 \text{ }^\circ\text{C}$ – Żywiec, 10.02.1929.
- Chomik w śnie zimowym: $6 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Średnia roczna temp. w W-wie: $8.1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Najwyższa temp. w Polsce: $40.2 \text{ }^\circ\text{C}$ – Prószków k. Opola, 29.07.1921.
- Zdrowa kaczką: $42.8 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Najwyższa temp. na Ziemi: $57.8 \text{ }^\circ\text{C}$ – Libia, 13.09.1922.
- Wrzenie wody (1 atm) : $99.974 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Gorąca sauna : $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Mięknięcie szkła: 700 °C.
- Palnik Bunsena: 1800 °C.
- Włókno żarówki halogenowej: 2900 °C.
- Jądro Ziemi: (5000 °C).
- Powierzchnia Słońca: 5530 °C.
- W piorunie: 30 000 °C.
- Wnętrze Słońca: 1.6×10^7 °C.
- Wybuch bomby atomowej: 1×10^8 °C.
- Najwyższa temp. w laboratorium: 2×10^9 K – Z-machine w Sandia NL, USA.
- Zderzenia jąder ołowiu w CERN : $\approx 10^{12}$ K (?)

W 1775 r. w Londynie, sekretarz Royal Society z kilkoma przyjaciółmi wytrzymał przez 45 min. w pokoju, w którym temperatura powietrza wynosiła 127 °C. Surowy stek, który wzięli ze sobą, upiekł się w tym czasie na „well done”.

Osiągalna temperatura a rozwój cywilizacji

- Epoka brązu – 3500 p.n.e. – 1100 K
- Epoka żelaza – 1000 p.n.e. – 1800 K
- Wiek elektryczności – od ok.1880 – 3000 K
- Era atomowa – od ok.1944 – $>10^6$ K
- Epoka fuzji termojądrowej ?
- Epoka kwantowa – od ok.1908 – 4 K

Międzynarodowa Skala Temperatur 1990 (ITS-90)

Definicje i wzorce przyjęte przez Międzynarodowy Komitet Miar i Wag w 1989 r.

- Jednostką temperatury termodynamicznej jest kelwin (K) zdefiniowany jako 1/273.16 temperatury punktu potrójnego wody.

- Jednostką w skali Celsjusza jest stopień ($^{\circ}\text{C}$) równy z definicji kelwinowi. Temperaturę w skali Celsjusza definiuje się jako:

$$t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273.15$$

- Skala ITS-90 rozciąga się od 0.65 K do najwyższych temperatur możliwych do zmierzenia z rozkładu promieniowania Plancka.

- W następujących przedziałach określa się metodę pomiaru i interpolacji:

0.65 K – 5 K : zależność ciśnienia pary nasyconej ^3He i ^4He od temp.

3 K – 24.5561 K : gazowy termometr helowy.

13.8033 K – 961.78 $^{\circ}\text{C}$: oporowy termometr platynowy.

Powyżej 961.78 $^{\circ}\text{C}$: prawo promieniowania Plancka

Punkty stałe ITS-90

Punkty stałe ITS-90		Temperature		Substance ^a	State ^b
Number	T ₉₀ /K	t ₉₀ /°C			
1	3 to 5	-270.15 to -268.15		He	V
2	13.8033	-259.3467		e-H ₂	T
3	~17	~256.15		e-H ₂ (or He)	V (or G)
4	~20.3	~252.85		e-H ₂ (or He)	V (or G)
5	24.5561	-248.5939		Ne	T
6	54.3584	-218.7916		O ₂	T
7	83.8058	-189.3442		Ar	T
8	234.3156	-38.8344		Hg	T
9	273.16	0.01		H ₂ O	T
10	302.9146	29.7646		Ga	M
11	429.7485	156.5985		In	F
12	505.078	231.928		Sn	F
13	692.677	419.527		Zn	F
14	933.473	660.323		Al	F
15	1234.93	961.78		Ag	F
16	1337.33	1064.18		Au	F
17	1357.77	1084.62		Cu	F

Ciśnienie pary He

Gazowy termometr helowy

Oporowy termometr platynowy

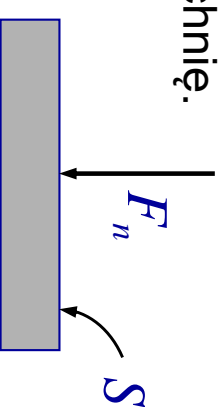
Pirometr monochromatyczny i prawo Plancka

Ciśnienie

Ciśnienie, to wielkość skalarna charakteryzująca składową normalną siły (prostopadłą do powierzchni) działającej na pewną powierzchnię.

Dla płaskiego elementu o powierzchni S :

$$p = \frac{F_n}{S}$$

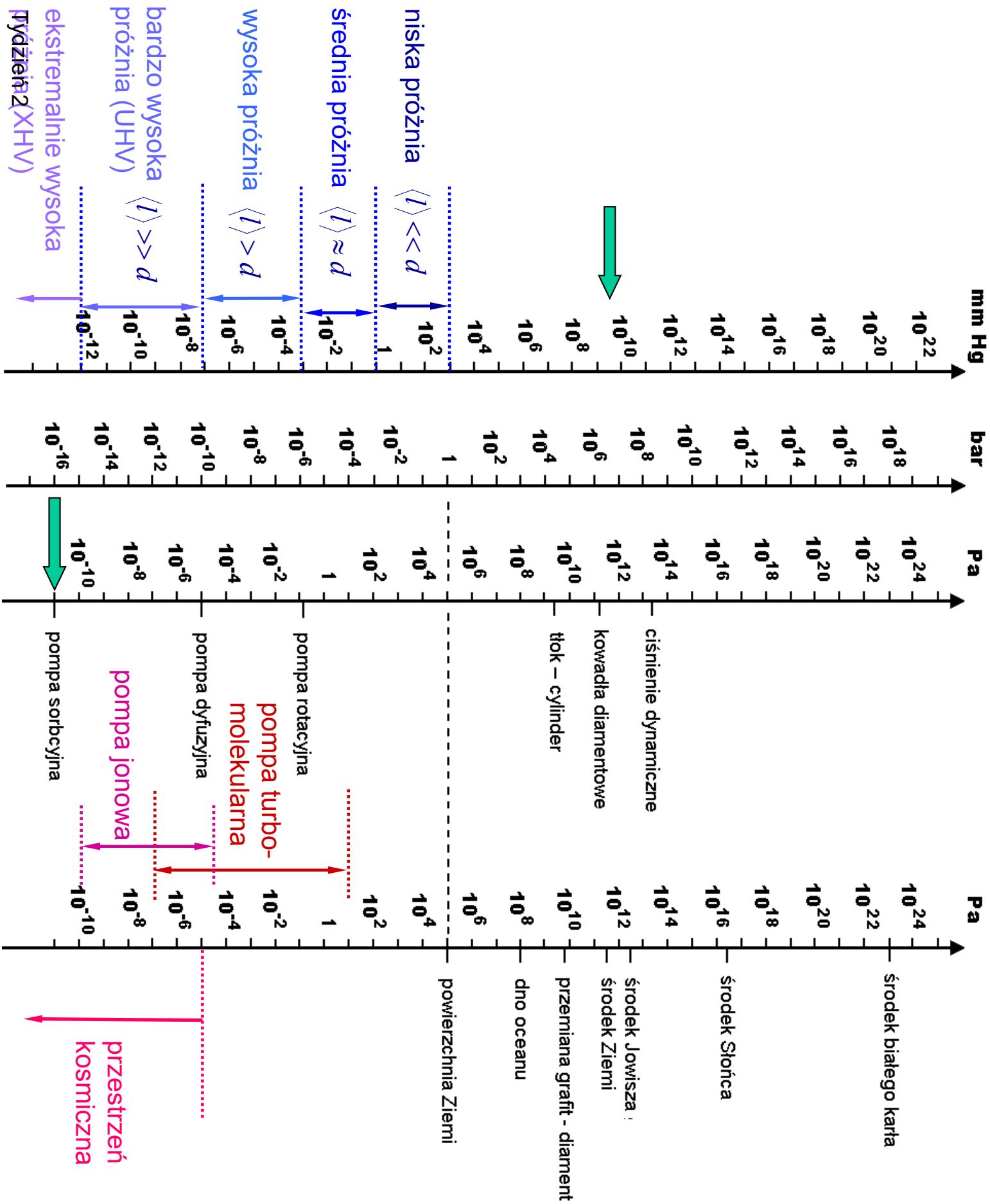


Jednostką ciśnienia w układzie SI jest **paskal** : 1 Pa = 1N/m²

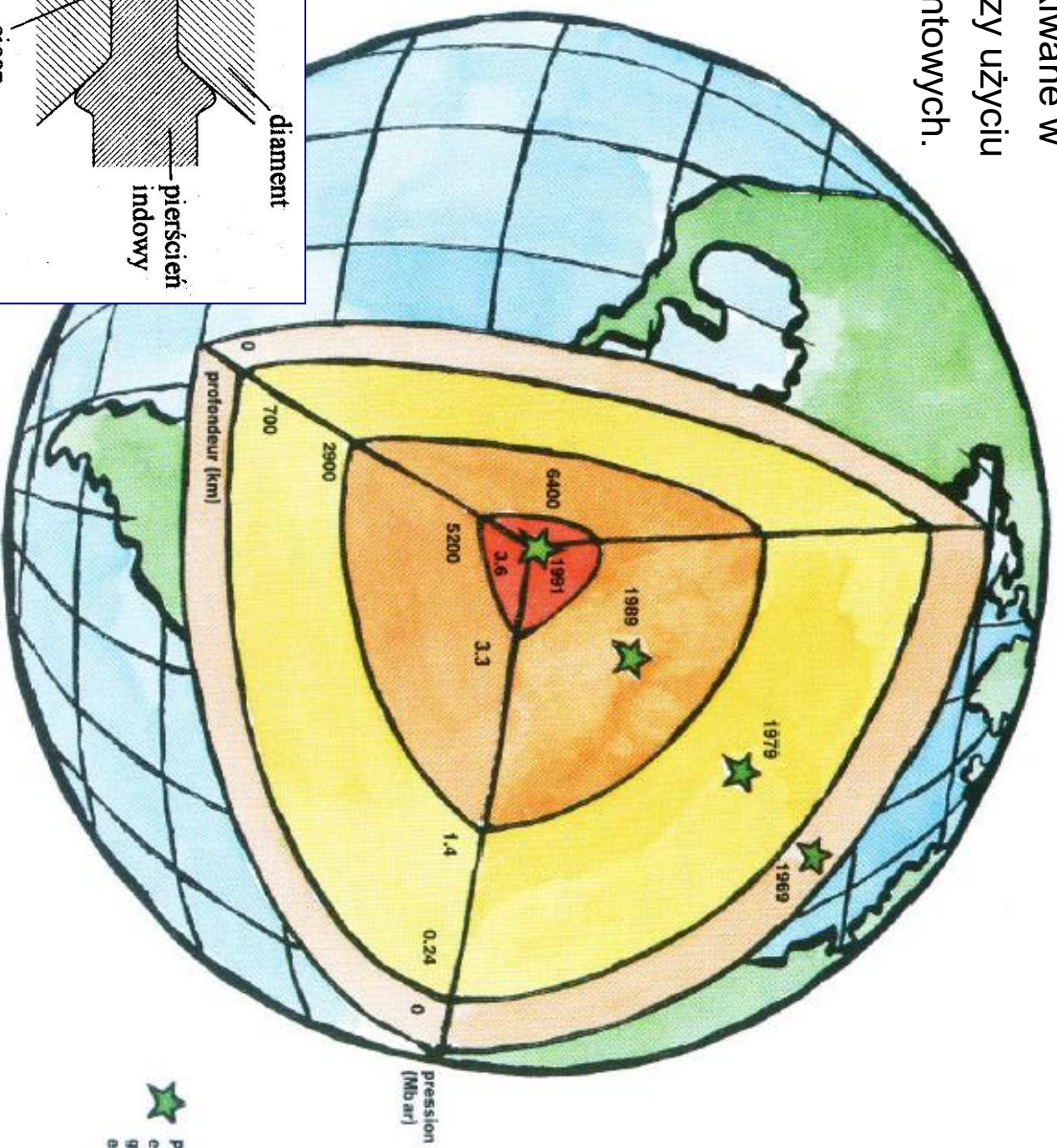
Inne używane jednostki :

Nazwa	Skrót	Pa	Uwagi
Bar	bar	10 ⁵	
Atmosfera fizyczna	atm	101325	760 mm Hg
Atmosfera techniczna	at	98066.5	10 m wody
Mm słupa rtęci (tor)	mm Hg, Tr	133.322	

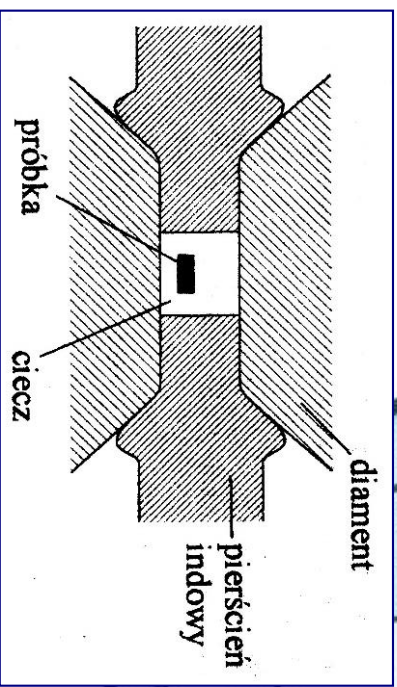
Tzw. **warunki normalne**, to $p = 101325 \text{ Pa}$ i $T = 273.15 \text{ K}$ (0°C)



Ciśnienia uzyskiwane w laboratorium przy użyciu kowadeł diamentowych.



★ Pressions atteintes en laboratoire grâce aux enclumes en diamant.



Wybrane ciśnienia [Pa] : ciekawostki i ekstrema

- Przestrzeń międzyplanetarna: (10^{-14}) .
- Najniższa próżnia w laboratorium: $1.3 \cdot 10^{-11}$.
- Tzw. bardzo wysoka próżnia (UHV): 10^{-10} .
- Atmosfera 1000 km nad Ziemią: (10^{-8}) .
- Ciśnienie światła słonecznego: $4.6 \cdot 10^{-6}$.
- Para w kotłach parowozu: $2 \cdot 10^6$.
- Pod obcasem damskich „szpilek”: $2.5 \cdot 10^6$.
- Instalacja hamulcowa samochodu: do 10^7 .
- Igła w maszynie do szycia: $5 \cdot 10^8$.
- Jądro Ziemi: $3.7 \cdot 10^{11}$.
- Najwyższe ciśnienie w laboratorium (statyczne): $5.6 \cdot 10^{11}$.
- Najwyższe ciśnienie w laboratorium (chwilowe): $8.3 \cdot 10^{12}$.
- Jądro Słońca: $2 \cdot 10^{16}$.
- Wnętrze gwiazdy neutronowej: 10^{33} .

Prawo Pascala

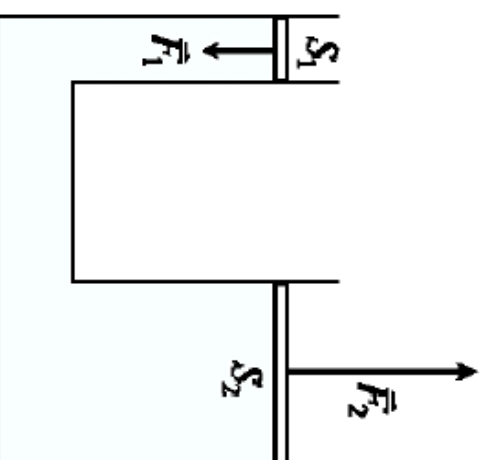
Rozważamy **płyn** (ciecz, gaz) w spoczynku, nie znajdujący się w polu sił zewnętrznych. Siła działająca na dowolny element powierzchni dS , stykający się z płynem, lub w nim zanurzony wynosi:

$$d\vec{F} = p \vec{n} dS,$$

gdzie \vec{n} jest wektorem jednostkowym, normalnym do elementu dS .

Ciśnienie p nie zależy ani od położenia, ani od orientacji powierzchni dS .

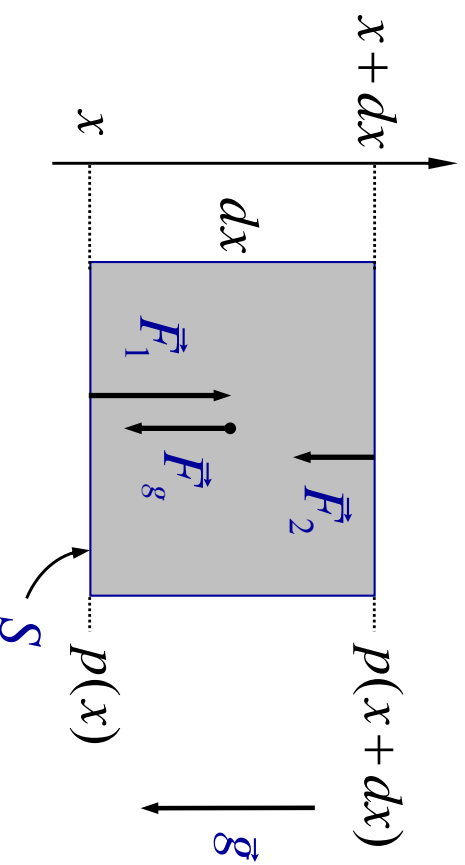
🌟 prawo Pascala: wybijanie korka, kolba z dziurkami, model prasy, „sonda” .



$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

Płyn w polu grawitacyjnym

Rozważamy słup płynu w polu grawitacyjnym będący w równowadze (hydrostatycznej). Wybieramy mały element tego płynu. Warunkiem równowagi jest równoważenie się działających nań sił.



Siły działające w kierunku wektora \vec{g} :

$$|\vec{F}_g| = dm g = \rho g dx S ,$$

$$|\vec{F}_1| = p(x)S ,$$

$$|\vec{F}_2| = p(x + dx)S .$$

Warunek równowagi:

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| + |\vec{F}_g| \quad \Longleftrightarrow \quad p(x)S = p(x + dx)S + \rho g dx S ,$$

$$p(x + dx) - p(x) = -\rho g dx ,$$

$$\frac{p(x + dx) - p(x)}{dx} = -\rho g ,$$

$$\Longleftrightarrow \quad \boxed{\frac{dp(x)}{dx} = -\rho(x) g(x)} .$$

Równanie równowagi hydrostatycznej

Rozwiążemy to równanie dla przypadku nieściśliwej cieczy w jednorodnym polu grawitacyjnym (np. woda w pobliżu ziemi).

Mamy wówczas: $\rho(x) = \text{const.}$ (nieściśliwość),
 $g(x) = \text{const.}$ (jednorodność),

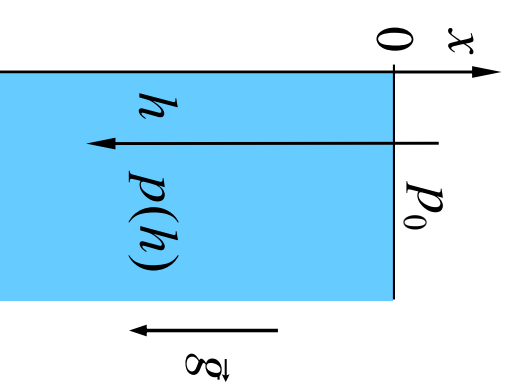
$$\frac{dp(x)}{dx} = -\rho g, \quad \iff \quad p(x) = p_0 - \rho g x, \quad p(x=0) = p_0.$$

Jeśli głębokość (h) w cieczy będziemy liczyć od powierzchni ($x = 0$) w kierunku zgodnym z siłą ciężkości, to:

$$p(h) = p_0 + \rho g h.$$

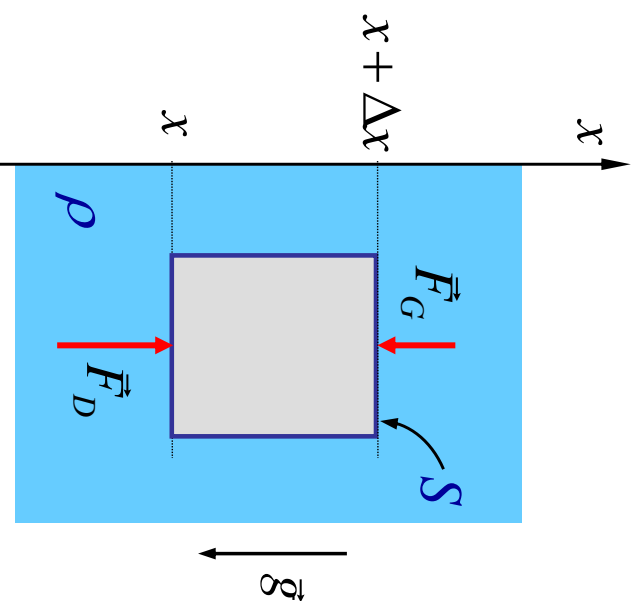
Ciśnienie hydrostatyczne rośnie liniowo z głębokością.

- 🌟 zmiana ciśnienie hydrostatycznego z głębokością
- 🌟 zgniatanie puszki
- 🌟 rura Bahna



Pływanie ciał, prawo Archimedesesa

Rozważmy małą sześcienną kostkę zanurzoną w płynie, w którym występuje gradient ciśnienia.



Siła działająca na dolne denko:

$$F_D = p(x) \cdot S$$

Siła działająca na górne denko:

$$F_G = p(x + \Delta x) \cdot S$$

W przypadku ciśnienia hydrostatycznego mamy:

$$p(x + \Delta x) = p(x) - \rho g \Delta x$$

Siła F_D jest większa! Wypadkowa siła działająca do góry:

$$F_w = F_D - F_G = \rho g \Delta x \cdot S = \rho g V$$

Ale ρV jest masą płynu wypartego przez kostkę, a $\rho V g$ jego ciężarem.

Siła wyporu jest zatem równa ciężarowi wypartego płynu (**prawo Archimedesesa**).

Źródłem siły wyporu jest **gradient ciśnienia**

termometr Galileusza

nurek Kartezjusza

balon z worka na śmieci