

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

AGH

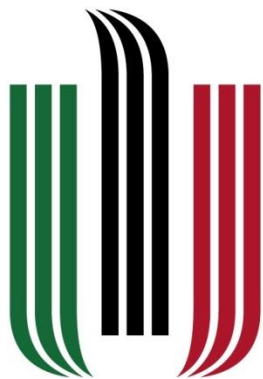
Inżynieria Chemiczna

Transport masy i ciepła

dr hab. inż. Agnieszka Gubernat, prof. AGH

gubernat@agh.edu.pl

p.1.14; budynek B8



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

AGH



Temperatura, PRZYRZĄDY DO POMIARU TEMPERATURY

PLAN WYKŁADÓW

1. Wprowadzenie, podstawowe zasady , podstawowe zasady technologii chemicznej, schemat procesowy
2. Termodynamika procesów, energia, ciepło
3. Źródła energii, spalanie i właściwości paliw, niekonwencjonalne źródła energii
4. Temperatura, zerowa i trzecia zasada termodynamiki, entropia, termodynamiczna definicja temperatury,
5. Termometria, pomiary temperatury
6. Obiegi i cykle
7. Suszenie i suszarnie
8. Przepływ ciepła, mechanizmy wymiany ciepła, stałe materiałowe
9. Płyny, statyka, dynamika, równanie ciągłości strugi, prawo Bernoulliego
10. Opory przepływu, filtracja, opadanie cząstek w płynach, sedymentacja,
11. Pomiary prędkości i natężenia przepływu,
12. Homogenizacja zawiesin, ocena jednorodności,
13. Segregacja hydrauliczna, odpylanie i oczyszczanie gazów.
14. Reologia, modele reologiczne, zawiesiny i pasty,
15. Rozdrabnianie ciał stałych, klasyfikacja ziarnowa, metodyka pomiaru rozkładu i wielkości ziaren,

Pojęcie temperatury jako miary stanu cieplnego kojarzy się z odczuciami fizjologicznymi

- ✓ Jeden ze parametrów stanu termodynamicznego układu charakteryzujący stopień jego ogrzania
- ✓ Skalarna wielkość fizyczna charakteryzująca stan równowagi termodynamicznej układu makroskopowego
- ✓ Stan cieplny ciała
- ✓ Miara energii kinetycznej ruchu cząsteczek w gazach doskonałych

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_k}{mR} = \frac{1}{3} \cdot \frac{u_{\text{śr}}^2}{R}$$



EKSTREMALNE TEMPERATURY NA KULI ZIEMSKIEJ

AFRYKA

+57.7 °C (Libia, 13.09.1922)

-23.9 °C (Maroko, 11.02.1935)

AZJA

+53.9 °C (Izrael, 21.06.1942)

-72.2 °C (Tomtor, 14.01.2004)

EUROPA

+50.0 °C (Hiszpania, 04.08.1881)

-58.1 °C (Rosja, 31.12.1978)

AMERYKA PŁN.

+56.7 °C (Arizona, USA, 10.07.1913)

-63.0 °C (Kanada, 03.02.1947)

ANTARKTYDA

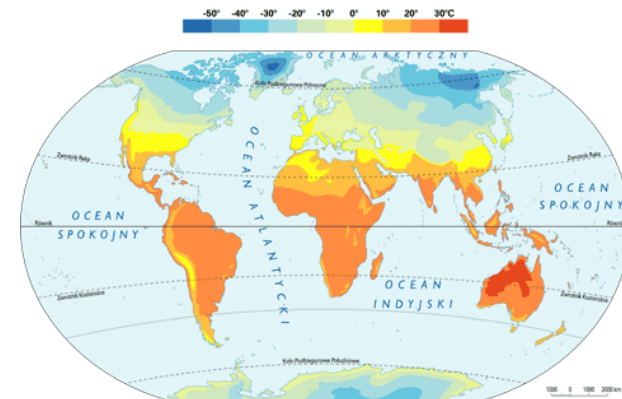
+17.5 °C (Esperanza, 24.03.2015)

-89.2 °C (Vostock II, 21.07.1983)

AUSTRALIA

+50.7 °C (Płd. Australia, 02.01.1960)

-23.0 °C (Nowa Płd. Walia, 29.06.1994)



AMERYKA PŁD.

+48.9 °C (Argentyna, 11.12.1905)

-33.0 °C (Argentyna, 01.07.1907)

Najwyższa temperatura:

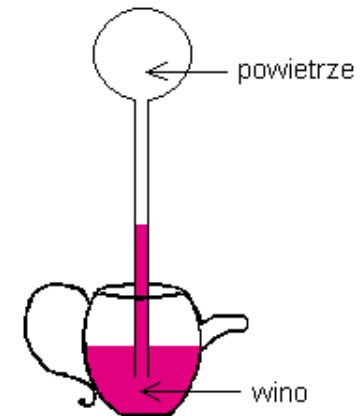
10 lutego 2000r. europejskie laboratorium cząstek elementarnych CERN pod Genewą wydało komunikat, że udało się zaobserwować plazmę kwarkowo-gluonową, która była 100tys. razy gorętsza niż wewnątrz Słońca, co odpowiada temperaturze **10^{12} K i 20 razy bardziej gęsta niż jądro atomu**. Powstała na skutek eksperymentów z jądrami ołowiu rozpędzonymi do bardzo dużych prędkości i doprowadzanych do zderzeń. Taka sytuacja prawdopodobnie miała miejsce w dziejach Wszechświata 12-15 miliardów lat temu, około 10 ms po Wielkim Wybuchu.

Najniższa temperatura:

Najniższa temperatura osiągnięta została w 1995r. na Uniwersytecie w Boulder, Colorado (USA), kiedy fizycy Eric Cornell i Carl Wieman wytworzyli nowy stan materii, przewidziany przez Einsteina i Bosego. W swym eksperymencie schłodzili atomy rubidu **do temperatury około 10^{-8} K** i uzyskali kondensację Bosego-Einsteina (maksymalne możliwe wygaszenie ruchów atomów). W celu schłodzenia atomów rubidu użyli pułapki laserowej (światło lasera podczerwonego oddziaływało tylko z poruszającymi się cząsteczkami i spowalniało je, a następnie pułapkowało - schłodzenie do 10^{-5} K) i pułapki magnetycznej. Dalsze schłodzenie uzyskali dzięki wyrzucaniu najbardziej energetycznych, a więc "najcieplejszych" atomów poprzez proces podobny do odparowania.

HISTORIA

- ✓ II wiek p.n.e. C. Galen - lekarz rzymski wprowadził pojęcie 4 stopni ciepła i 4 stopni zimna. Galen zaproponował 4 stopnie ciepła dla wrzącej wody, 4 stopnie zimna dla lodu oraz temperaturę "neutralną" dla mieszaniny równych ilości lodu i wrzącej wody.
- ✓ Pierwszy termometr, a właściwie termoskop, opisał w 210 roku p.n.e. grecki pisarz i inżynier - Filon z Bizancjum, a nieco później Heron z Aleksandrii.
- ✓ 1590-1610r. G. Galileusz -
zbudował termoskop z podziatką, była to rurka z zasklepioną bańką zanurzoną w zbiorniku z cieczą.
- ✓ Modyfikacja budowy termoskopu przez Sanctoriusa (lekarz z Padwy, 1561-1636)
- ✓ 1650r. - powstał termometr Florenckiej Akademii Nauk
- ✓ 1664r. - Robert Hook wprowadził termometr, pracujący w oparciu o rozszerzalność objętościową barwionego alkoholu.



Jako punkt standardowy skali temperatury wybrał on punkt zamarzania wody, natomiast jeden stopień na wprowadzonej przez niego skali odpowiadał zwiększeniu objętości wody o 1/500.

SKALE TERMOMETRYCZNE

Do określenia skali temperatur potrzebne są stałe punkty termometryczne, odpowiadające odtwarzalnym stanom równowagi międzyfazowej np. temperatura topnienia lodu 0°C ($p=1\text{atm.}$) czy temperatura wrzenia wody 100°C ($p=1\text{atm.}$).

W roku 1664 angielski fizyk Robert Boyle określił jako podstawowy punkt skali temperatury topnienie lodu. Z kolei holenderski fizyk Chrystian Huygens stwierdził, że przy stałym ciśnieniu atmosferycznym temperatura wrzenia wody jest stała.

SKALE

Celsjusza 1°C ,
Farenheita 1°F

$$t_{\text{F}} = 9/5 t_{\text{C}} + 32$$

PROPOZYCJE STAŁYCH PUNKTÓW TERMOMETRYCZNYCH

- ✓ **1669** - H. Fabrii z Lejdy. Temperatura lodu i śniegu oraz temperatura najwyższego upału w lecie
- ✓ **1693** - C. Rinaldi z Padwy. Propozycja przyjęcia punktów termometrycznych topnienia lodu i wrzenia wody. Podzielił zakres na 12 działek
- ✓ **1693** - E. Halley zaproponował rtęć jako ciecz termometryczną
- ✓ **1715 lub 1724** - D.G. Fahrenheit. Zbudował termometr alkoholowy (1709) i rtęciowy (1714) oparte na trzech punktach termometrycznych.
 - 1 - *mieszanina lodu, wody i chlorku amonu (salmiaku) 0°F,*
 - 2 - *mieszanina lodu i wody 32°F*
 - 3 - *temperatura ciała ludzkiego (osoba chora) 100°F*

Źródła podają, że skala Fahrenheita jest ulepszeniem skali Romera (1701r.).

Daniel Gabriel Fahrenheit
(ur. 24 maja 1686 w Gdańsku, zm. 16 września 1736 w Hadze)





AGH

PROPOZYCJE STAŁYCH PUNKTÓW TERMOMETRYCZNYCH

- ✓ **1730 lub 1731** - skala R.A.F. Reaumura
0° - topnienie lodu, zaś 80° - wrzenie wody,
- ✓ **1742** - A. Celsjusz. Stworzył skalę 100 stopniową.
0°C - wrzenie wody, zaś 100°C - topnienie lodu

Anders Celsjusz
(27 listopada 1701 - 25 kwietnia 1744)



- ✓ **1850** - M. Strömer odwrócił wartości na 100 stopniowej skali Celsjusza.

Inne źródła podają, że:

„Odwrócenia” skali dokonał przyrodnik Karol Linneusz lub producent termometrów Daniel Ekström w 1850 r.

TERMODYNAMICZNA SKALA TEMPERATURY

W cyklu Carnota z pobranej ilości ciepła Q , część Q_A może wykonywać pracę, jest ona zależna od temperatur T_1 i T_2 . Przyjmując dowolnie temperaturę wyższą T_2 , temperaturę T_1 można określić z zależności

$$T_1 = T_2 \left(1 - \frac{Q_A}{Q} \right) \text{ lub inaczej } T_1 = T_2 (1 - \eta)$$

gdzie: η - sprawność obiegu

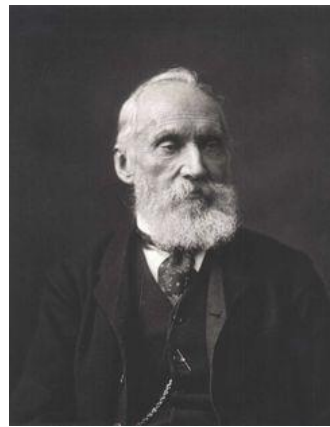
$$\eta = \frac{(T_2 - T_1)}{T_2}$$

gdzie $\eta=1$ to $T = 0$

Określenie punktu „0” umożliwia skonstruowanie termodynamicznej skali temperatur:

1. Przyjęcie jednostki Celsjusza [$^{\circ}\text{C}$] stwarza skalę w której zero jest zerem absolutnym a jednostką jest Kelvin - [K].
2. Przyjęcie jednostki Farenheita [$^{\circ}\text{F}$] i zera termodynamicznego stwarza skalę zaproponowaną przez Rankina [$^{\circ}\text{R}$].

William Thomson (Baron Kelvin)
 (ur. 26 czerwca 1824 w Belfaście,
 zm. 17 grudnia 1907 w Largs w
 Szkocji)

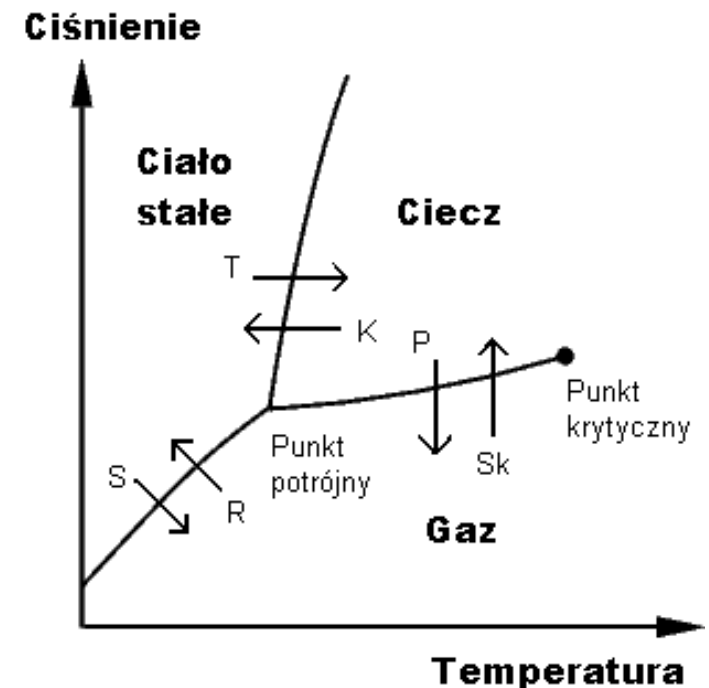


TERMODYNAMICZNA (BEZWZGLĘDNA) SKALA TEMPERATUR

Temperatura zera bezwzględnego:

- ✓ zanika ruch cieplny cząstek,
- ✓ sprawność silnika w cyklu Carnota równa się jeden,
- ✓ najniższy stan kwantowy cząstek $\Delta S=0$, $\Delta Q=0 \Rightarrow T=0$

Przyjęto, za podstawę
 termodynamicznej skali temperatur
 punkt potrójny wody równy **273,16**
K (Kelvin) $p=1\text{atm.}(101325\text{ Pa})$.



ZEROWA ZASADA TERMODYNAMIKI

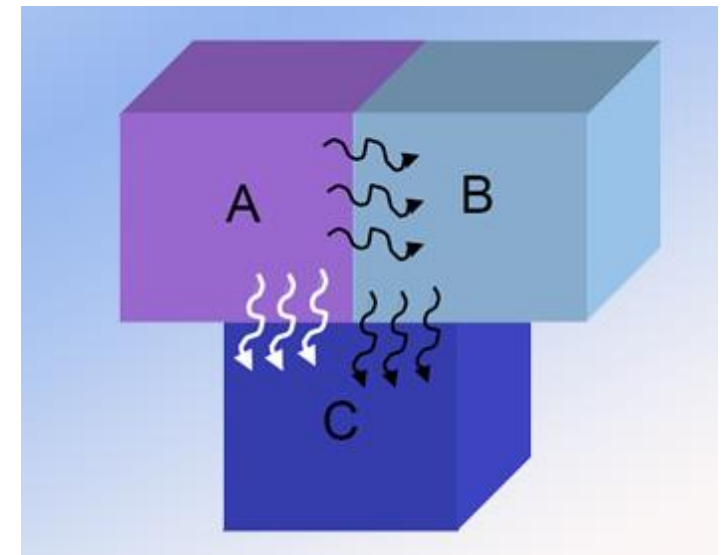
DWA CIAŁA ZNAJDUJĄCE SIĘ W RÓWNOWADZE TERMICZNEJ Z TRZECIM CIAŁEM SĄ TAKŻE W RÓWNOWADZE ZE SOBĄ.

(R. H. Fowler, 1931r.)

lub

JEŚLI SPOŚROD TRZECH UKŁADÓW A, B i C ZNAJDUJĄCYCH SIĘ W STANIE RÓWNOWAGI TERMODYNAMICZNEJ KAŻDY Z UKŁADÓW A i B JEST W RÓWNOWADZE TERMICZNEJ Z UKŁADEM C, TO UKŁADY A i B SĄ ZE SOBĄ W RÓWNOWADZE TERMICZNEJ (MAJĄ TĘ SAMĄ TEMPERATURĘ).

J. C. Maxwell



ZEROWA ZASADA TERMODYNAMIKI

WARUNKIEM KONIECZNYM I WYSTARCZAJĄCYM RÓWNOWAGI TERMICZNEJ CIAŁ JEST RÓWNOŚĆ ICH TEMPERATUR.

Zerowa zasada termodynamiki stanowi podstawę budowy **TERMOMETRU.**

Jeżeli stan termometru doprowadzonego do równowagi termodynamicznej z układem A jest taki sam jak stan termometru, odpowiadający równowadze termicznej z układem B, to układy A i B mają taką samą temperaturę.



MIĘDZYNARODOWA PRAKTYCZNA SKALA TEMPERATURY

(przyjęta przez XIII Generalną Konferencję Miar 1967/1968)
Jest najlepszym jak na dzień dzisiejszy przybliżeniem skali bezwzględnej.
Jednostką temperatury w tej skali jest **kelwin (1K) - T** lub stopień Celsjusza (**1°C) - t**.

$$t = T - 273,16K$$

MPST-68 jest wyznaczona przez wiele punktów stałych i określa przyrządy wzorcowe umożliwiające interpolację temperatury między punktami stałymi. Międzynarodowa Praktyczna Skala Temperatury (MPTS-68) opiera się na 14 podstawowych odtwarzalnych punktach termometrycznych i urządzeniach wzorcowych.

W MPTS-68 oprócz podstawowych 14 punktów termometrycznych, istnieje 31 wtórnych punktów stałych.

Najniższym punktem jest punkt potrójny wodoru 13,956 K, a najwyższym punkt topnienia wolframu 3695 K.

MIĘDZYNARODOWA PRAKTYCZNA SKALA TEMPERATURY

Punkty stałe definicyjne	T [K]	T [°C]
1. potrójny wodoru	13,81	-259,34
2. wrzenia wodoru	20,28	-252,87
3. potrójny tlenu	54,361	-218,789
4. potrójny wody	273,15	+0,01
5. wrzenia wody	373,15	100
6. krzepnięcia złota	1337,58	1064,43

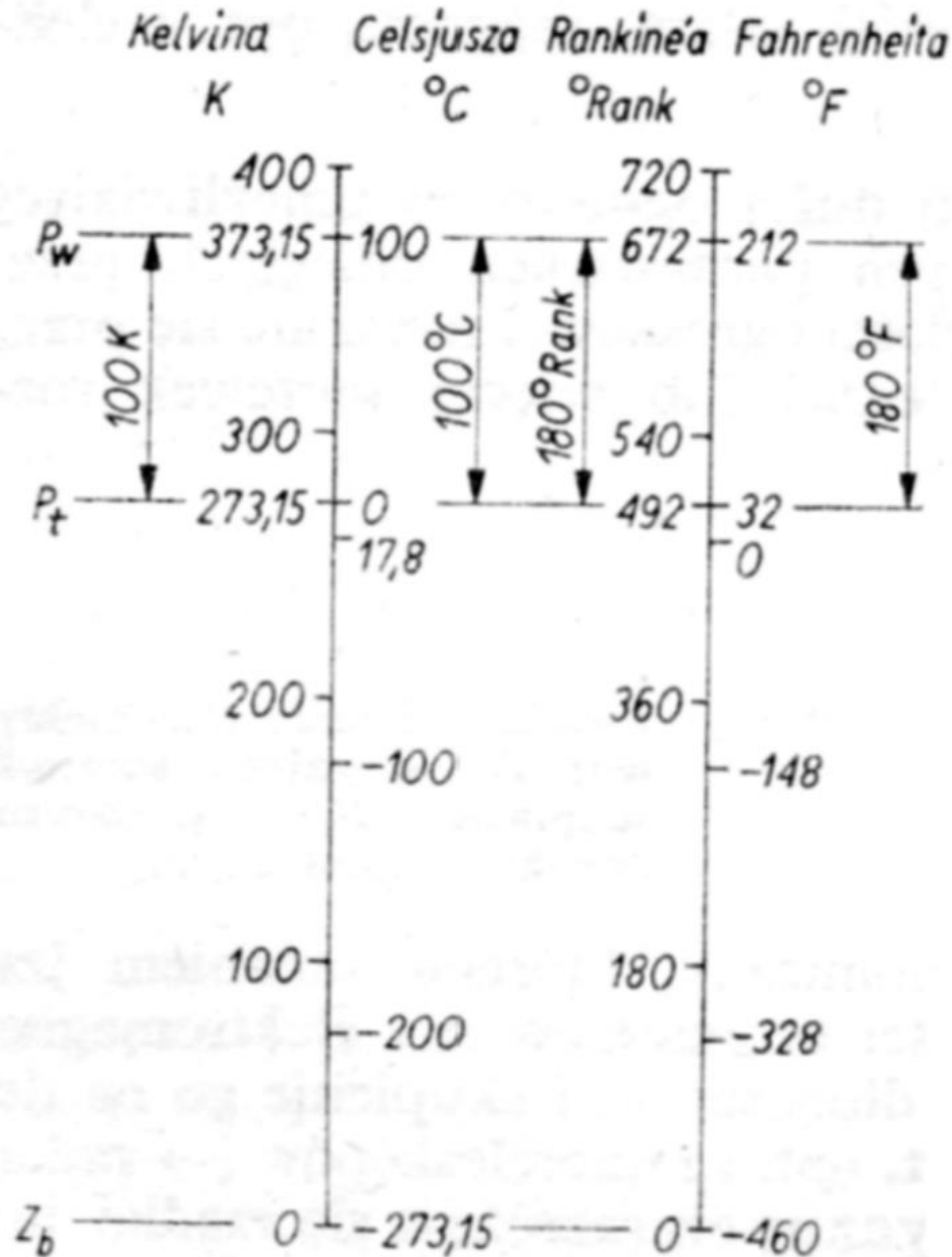
Przyrządy wzorcowe:

13,81K-630,74°C - platynowy termometr rezystancyjny

630,74°C-1064,43°C - termometr termoelektryczny PtRh10-Pt

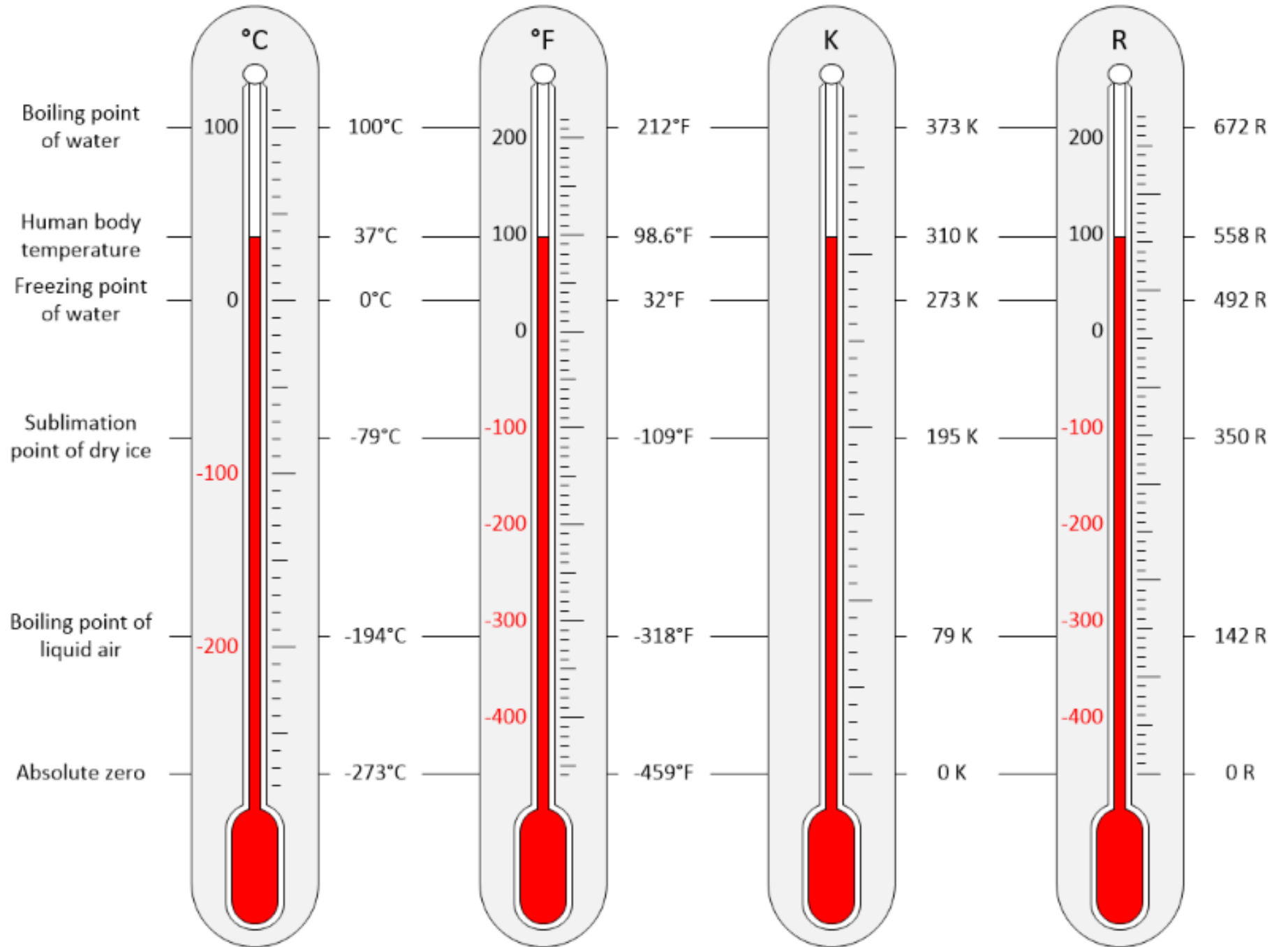
>1064,43°C - temperaturę określa się na podstawie promieniowania ciała doskonale czarnego

PORÓWNANIE SKAL TEMPERATUR



Opis:

P_w - punkt wrzenia wody przy ciśnieniu normalnym ($p=1 \text{ atm}=1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$),
 P_t - punkt topnienia lodu przy ciśnieniu normalnym,
 Z_b - zero bezwzględne



PONIEWAŻ PRAWIE WSZYSTKIE
WŁAŚCIWOŚCI CIAŁ
ZALEŻĄ OD TEMPERATURY
(OBJĘTOŚĆ, GĘSTOŚĆ,
REZYSTANCJA, DŁUGOŚĆ)
ISTNIEJE OGROMNA RÓŻNORODNOŚĆ
PRZYRZĄDÓW DO POMIARU TEMPERATURY.

PODZIAŁ PRZYRZĄDÓW DO POMIARU TEMPERATURY

I. STYKOWE - TERMOMETRY

Nieelektryczne

- Cieczowe,
- Dylatacyjne,
- Manometryczne cieczowe,
- Manometryczne gazowe i parowe,

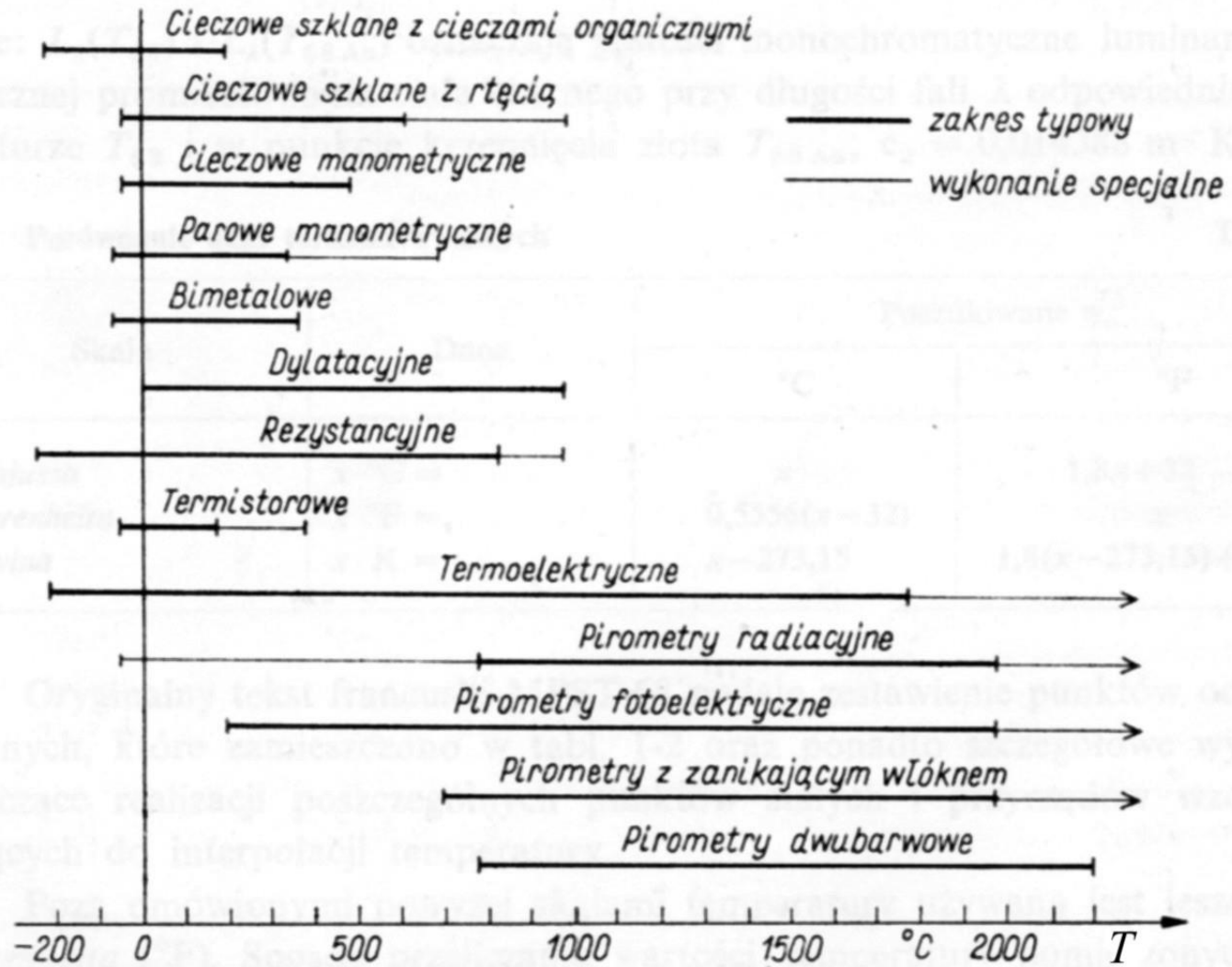
Elektryczne

- Termoelektryczne (termopary),
- Rezystancyjne (metalowe i półprzewodnikowe),

II. BEZSTYKOWE (PIROMETRY) - podział w zależności od długości fal wykorzystywanego promieniowania temperaturowego,

- Radiacyjne (całkowitego promieniowania),
- Pasmowe,
- Monochromatyczne (z zanikającym włóknem),
- Dwubarwowe (stosunkowe),

ZAKRES STOSOWANIA PRZYRZĄDÓW DO POMIARU TEMPERATUR

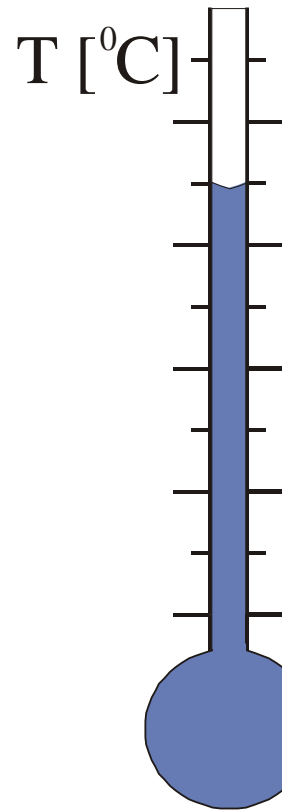
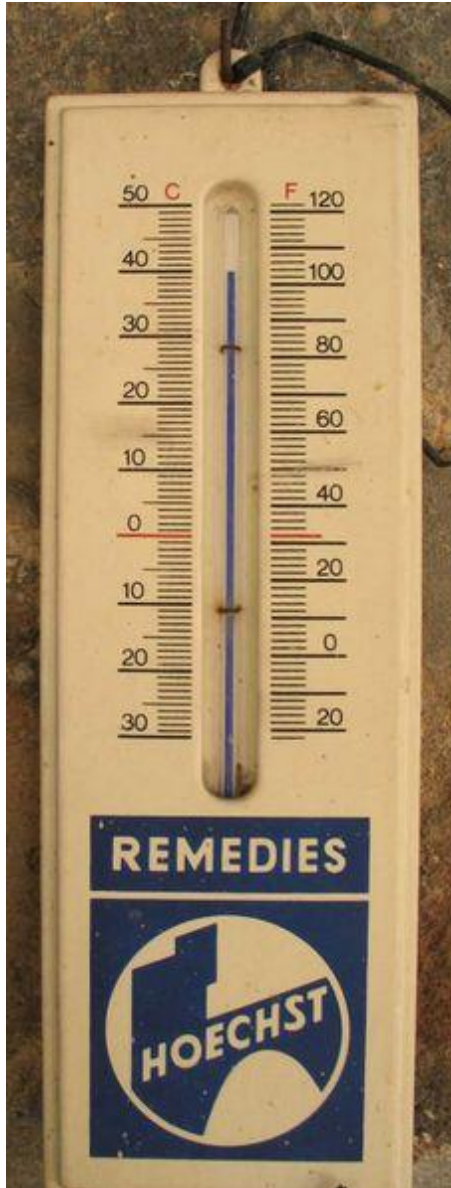


Termometry cieczowe (-200-750°C)

Budowa: zbiornik cieczy o objętości V_b

ciecz termometryczna

kapilara o średnicy d , $V_b \gg V_{\text{kapilary}}$



$V_{\text{kapilary}} \ll V_{\text{zbiorniku}}$

$$\Delta V = V_b \cdot \alpha_p \cdot \Delta T$$

Czułość termometru:

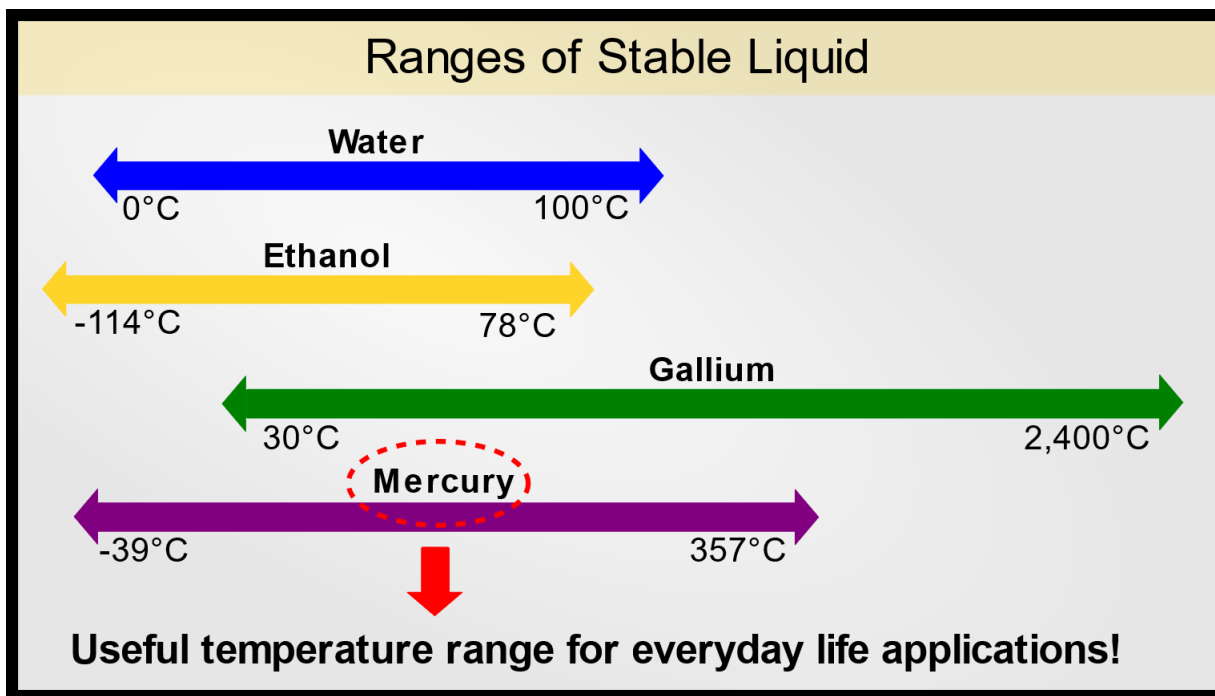
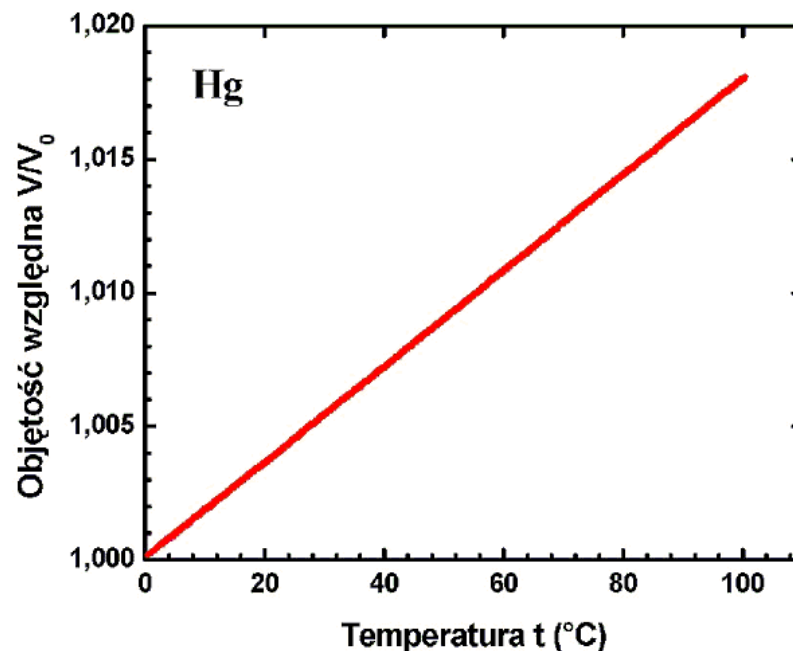
$$\frac{\Delta l}{\Delta T} = \frac{\Delta V}{\frac{\pi d^4}{4}} = \frac{4V_b \alpha_p \Delta T}{\pi d^2 \Delta T} = \frac{4V_b \alpha_p}{\pi d^2}$$

Termometry cieczowe (-200-750°C)

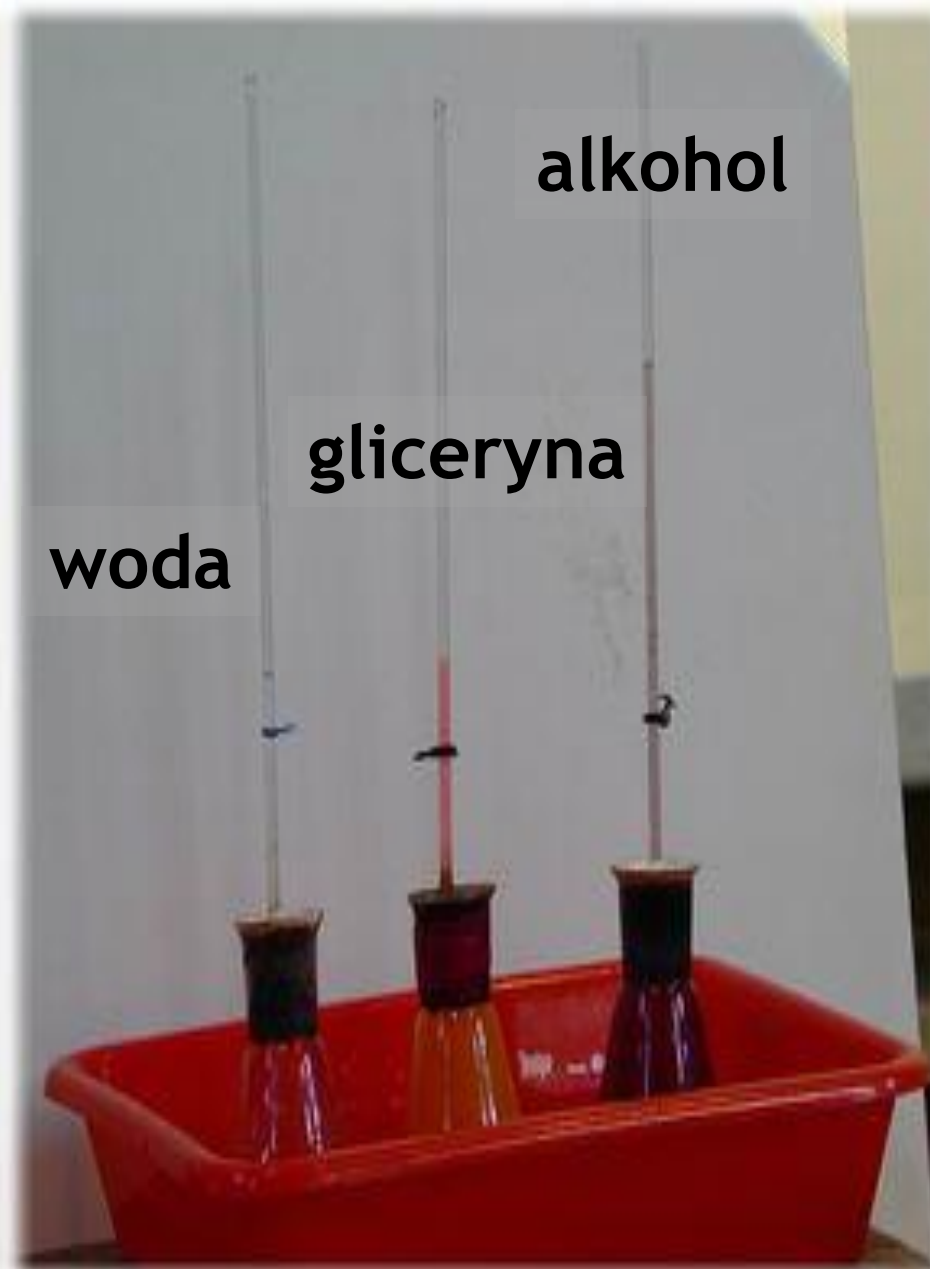
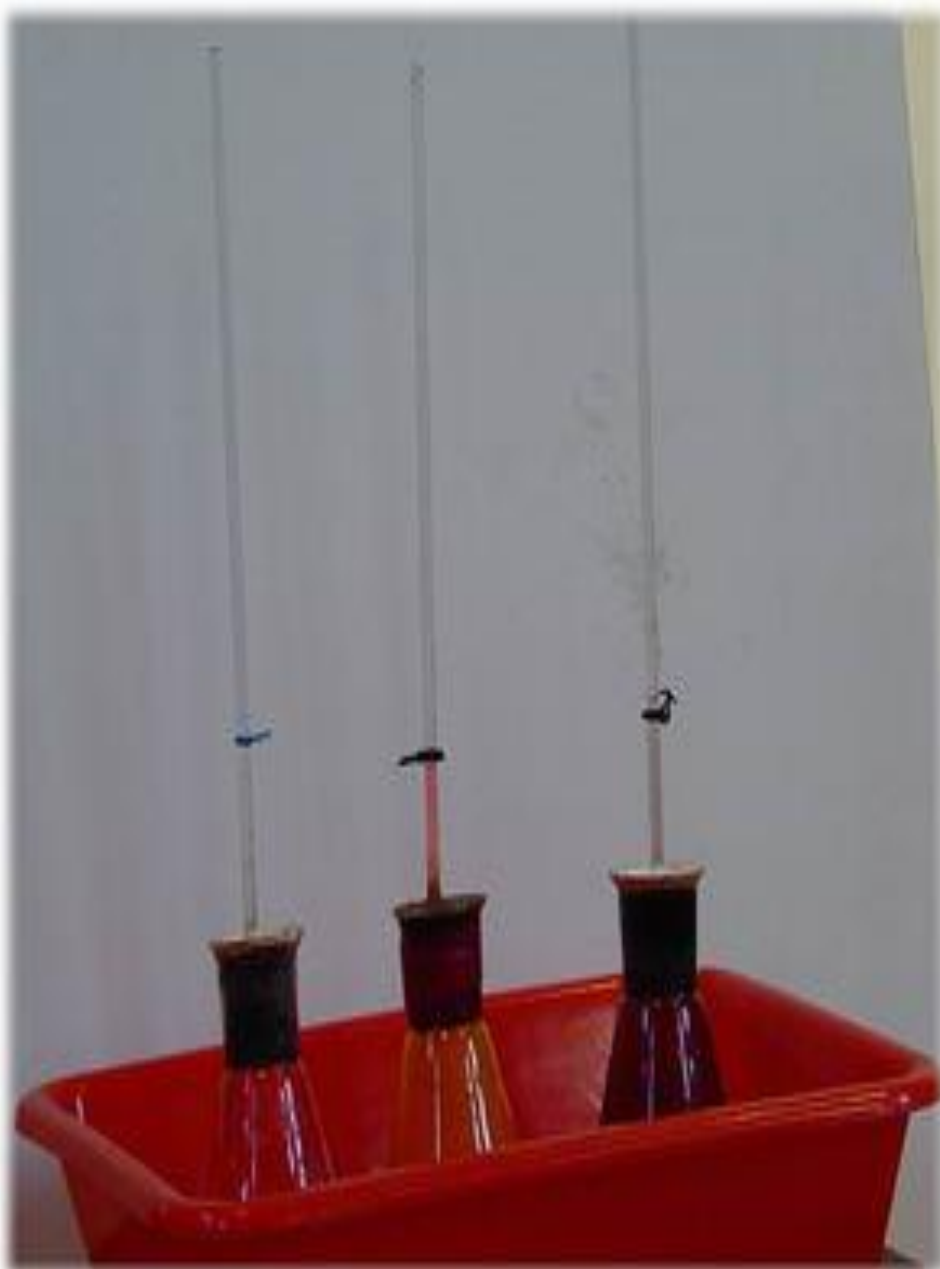


Ciecze termometryczne:

pentan	-200+30°C
etanol	-100+50°C
toluol (toluen)	-70+100°C
rtęć	-38+750°C



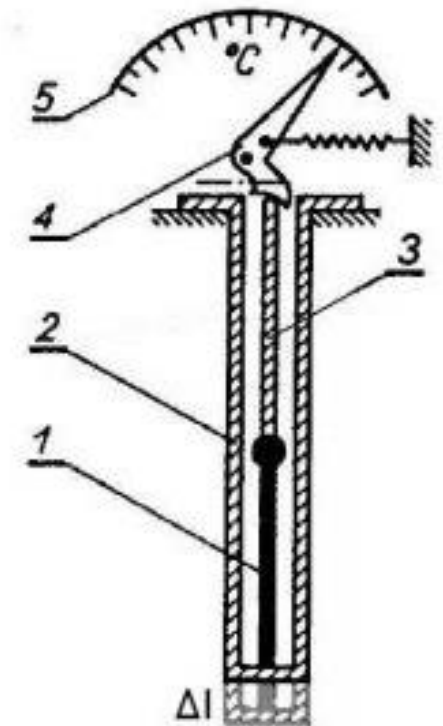
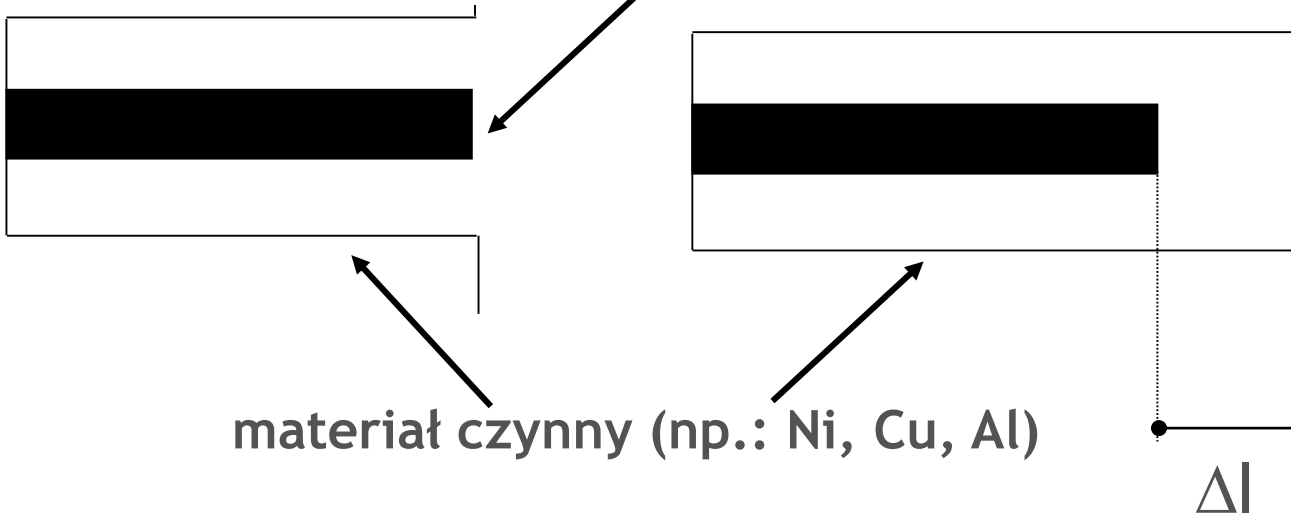
Termometry cieczowe (-200-750°C)



Termometry dylatacyjne (0-1000°C)

Termometr rurkowy

materiał bierny (np.: porcelana, inwar, kwarc)



$$\text{Wydłużenie pręta (mat. bierny)} = l_0 \cdot (1 + \alpha_p \Delta T)$$

$$\text{Wydłużenie rurki (mat. czynny)} = l_0 \cdot (1 + \alpha_r \Delta T)$$

$$\Delta l = l_0 \cdot (1 + \alpha_p \Delta T) - l_0 \cdot (1 + \alpha_r \Delta T) = l_0 \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$$

Termometry bimetalowe (-40-400°C)

Termometry bimetalowe:

taśmowe płaskie, spiralne, kształtowe

Taśmy metalowe wykonane z metali o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej zgrzane i uformowane w żądany kształt.

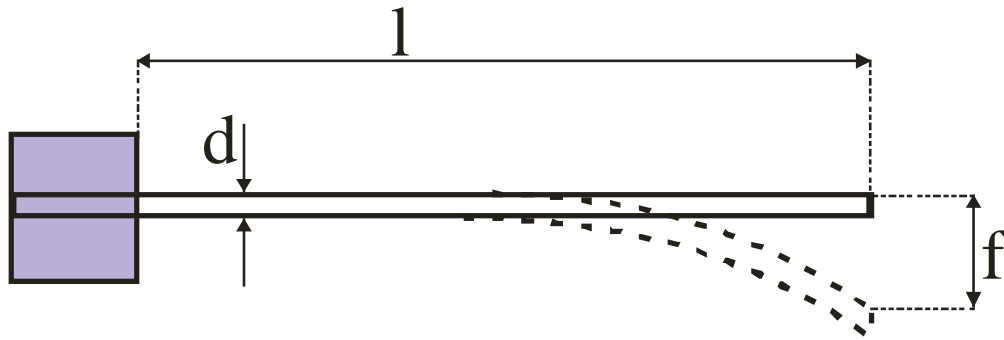
metal o dużym α - metal czynny (np. Cu, Ni, Fe, mosiądz, konstantan-55%Cu+45%Ni) zaś metal o małym α - metal bierny (np. inwar - 64%Fe+36%Ni; stop-58%Fe+42%Ni)

Kształt termometru w temperaturze pokojowej - kształt spoczynkowy.

Ogrzanie powoduje różne wydłużenia taśm i odkształcenie elementu pomiarowego w kierunku materiału o mniejszej rozszerzalności cieplnej.

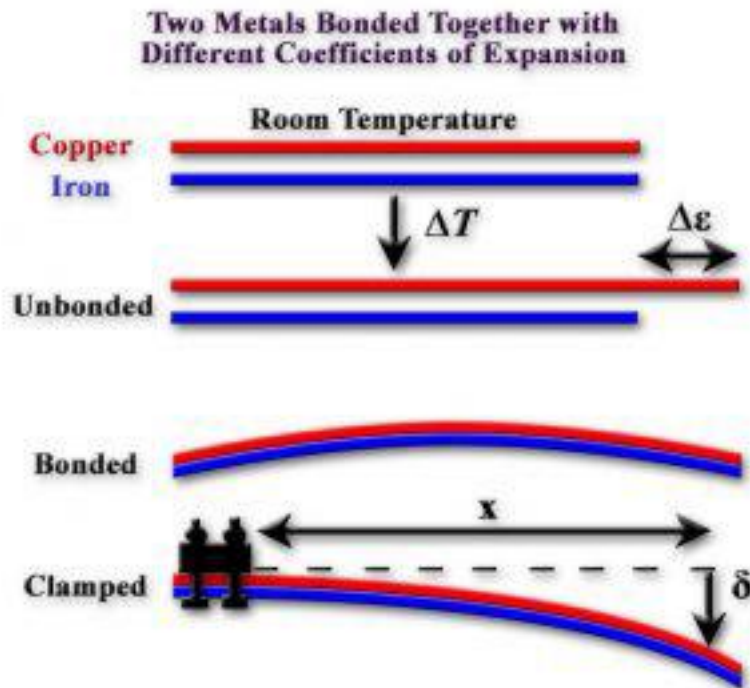
Termometry bimetalowe (-40-400°C)

Taśmowy płaski



$$f = K \cdot \frac{\Delta T \cdot l^2}{10^4 \cdot d}$$

gdzie: K - odkształcenie właściwe bimetalu [$1/K$], ΔT - przyrost temperatury ponad temperaturę spoczynkową [K], l - długość taśmy [mm]



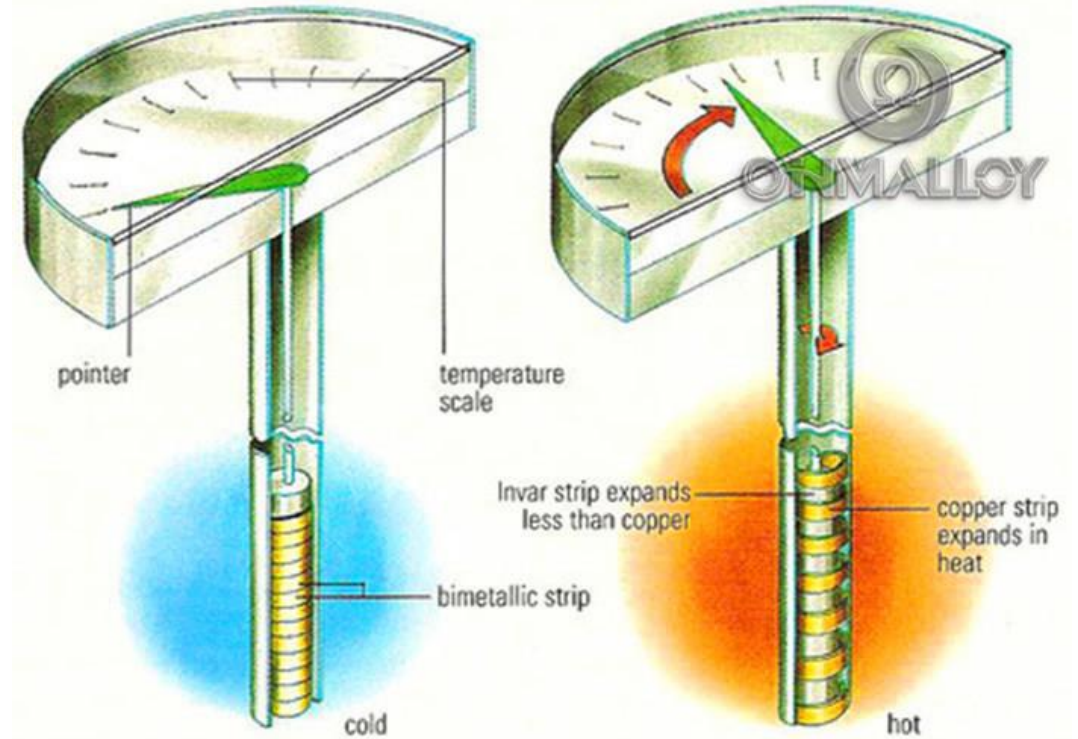
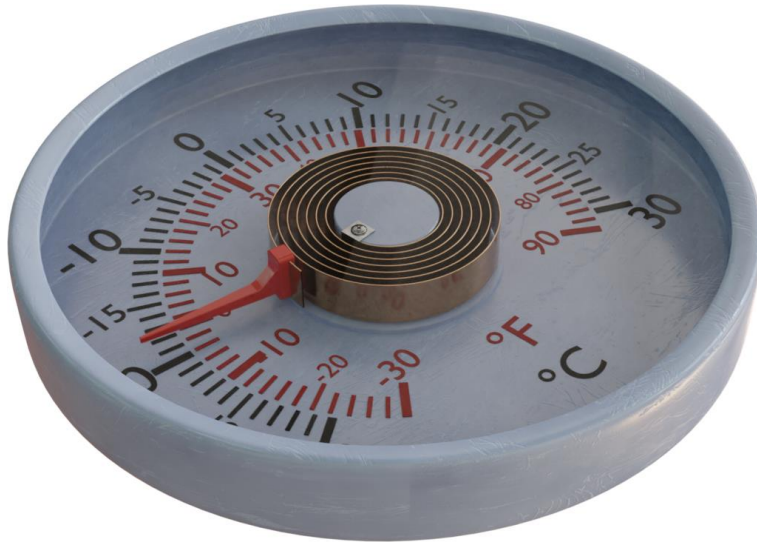
Termometry bimetalowe (-40-400°C)

Taśmowy spiralny

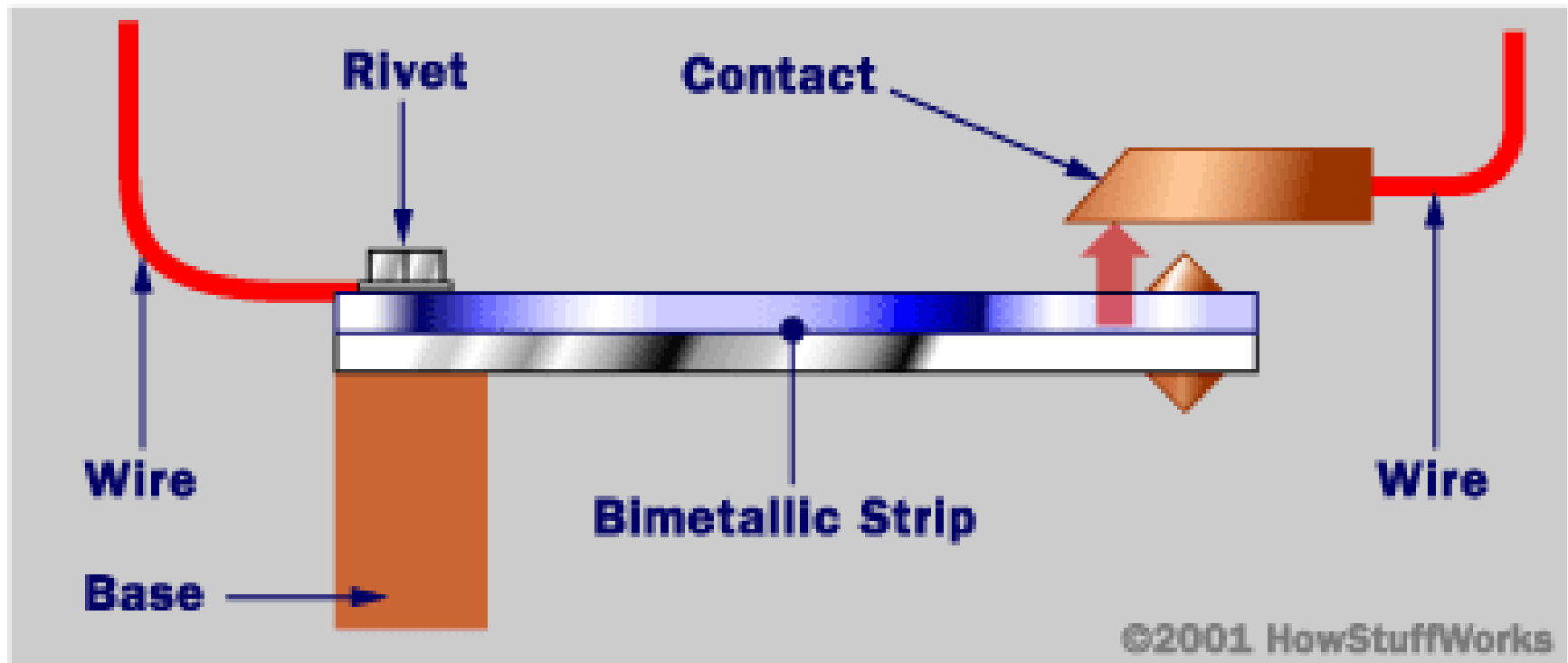


$$\beta = K \cdot \frac{2\Delta T \cdot l}{10^4 \cdot d}$$

gdzie: β - kąt skręcenia,



Termometry bimetalowe (-40-400°C)



Zastosowanie: czajniki bezprzewodowe, lodówki, piekarniki, żelazka, sprzęt AGD

Termometry dylatacyjne



**TERMOMETRY BARDZO TRWAŁE
O PROSTEJ KONSTRUKCJI,
ALE MAŁO DOKŁADNE !**

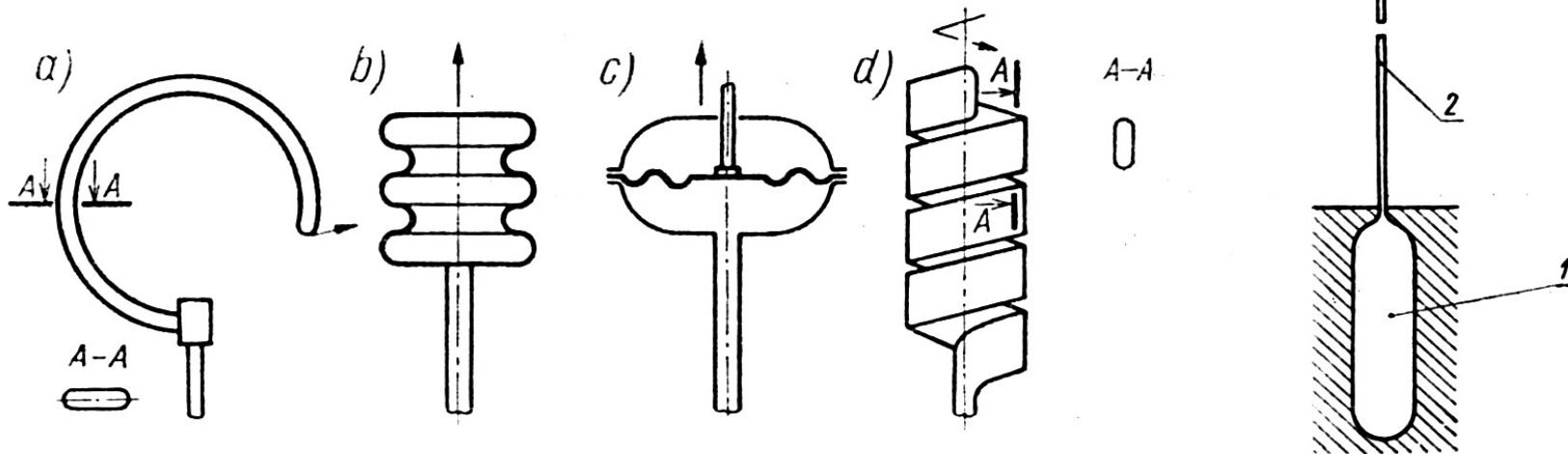
Termometry manometryczne (-30-600°C)

1 - termometry cieczowe

$$\Delta V = V_c \cdot (\beta - 3\alpha) \cdot \Delta T$$

2 - termometry gazowe

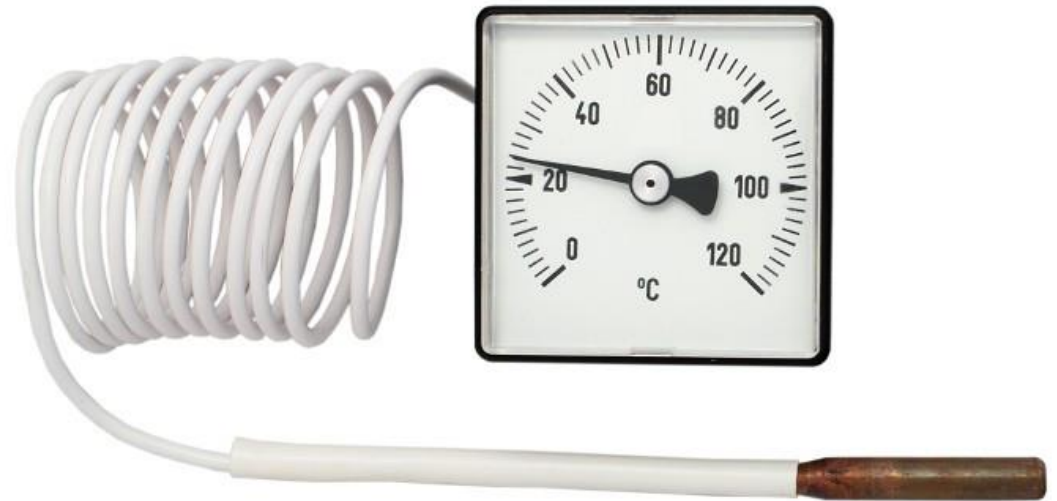
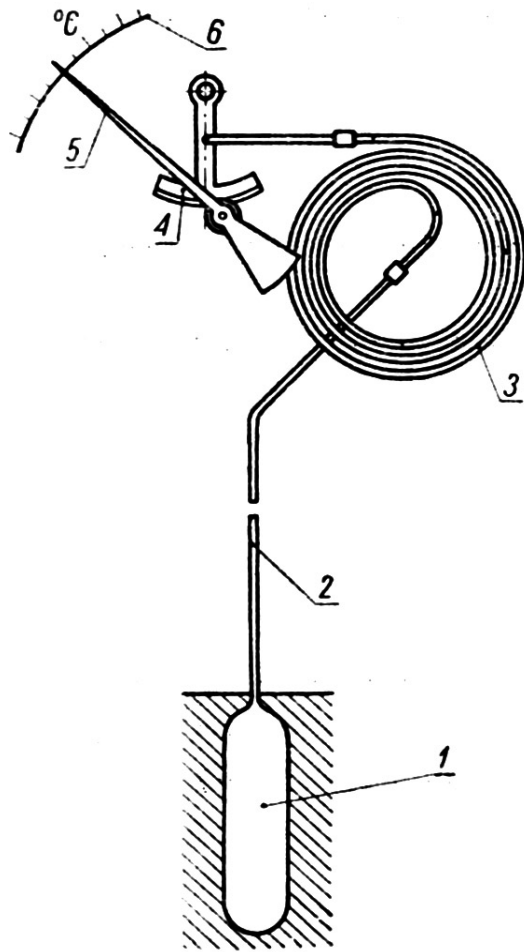
3 - termometry parowe



Odształcenie obudowy wywołane wzrostem objętości lub ciśnienia czynnika termometrycznego zamkniętego w obudowie sprężystej. Pomiar temperatury poprzez pomiar odkształcenia.

Termometry manometryczne (-30-600°C)

Stosowane z uwagi na niezawodność i odporność na szoki mechaniczne głównie w kotłach i urządzeniach pracujących w warunkach podwyższonych ciśnień.



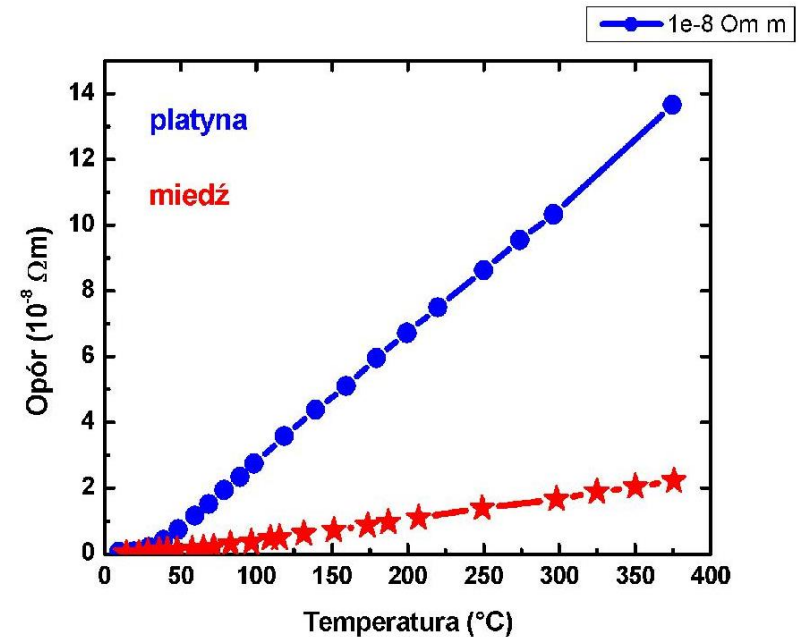
TERMOMETRY ELEKTRYCZNE

Termometry rezystancyjne metalowe (-60-1000°C)

$$\alpha = \frac{1}{R_{0^{\circ}C}} \cdot \frac{R_{100^{\circ}C} - R_{0^{\circ}C}}{100}$$

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

Wzrost temperatury powoduje wzrost rezystancji.



Metale:

- Cu - -50÷150°C w atmosferze otoczenia i obojętnej,
- Pt - -200÷1000°C w atmosferze obojętnej (czujnik wzorcowy),
- Ni - -60÷150°C w atmosferze utleniającej (ma największy cieplny współczynnik zmiany rezystancji),

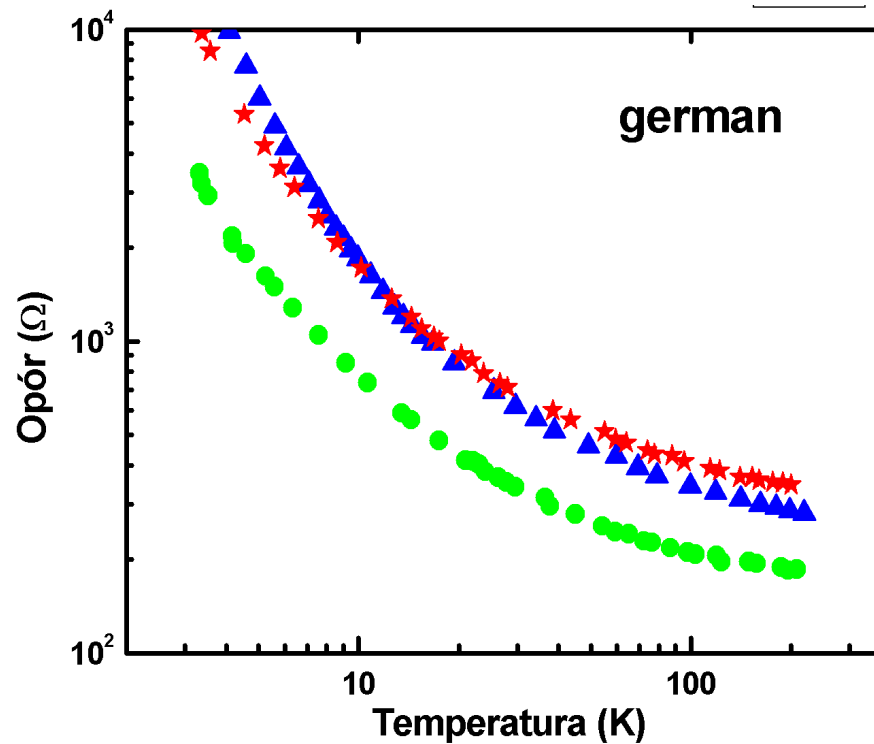
Termometry o największej czułości $\sim 10^{-4}K$ w zakresie temperatury pokojowej.

TERMOMETRY ELEKTRYCZNE

Termometry rezystancyjne półprzewodnikowe - TERMISTORY (-80-300(1200)°C)

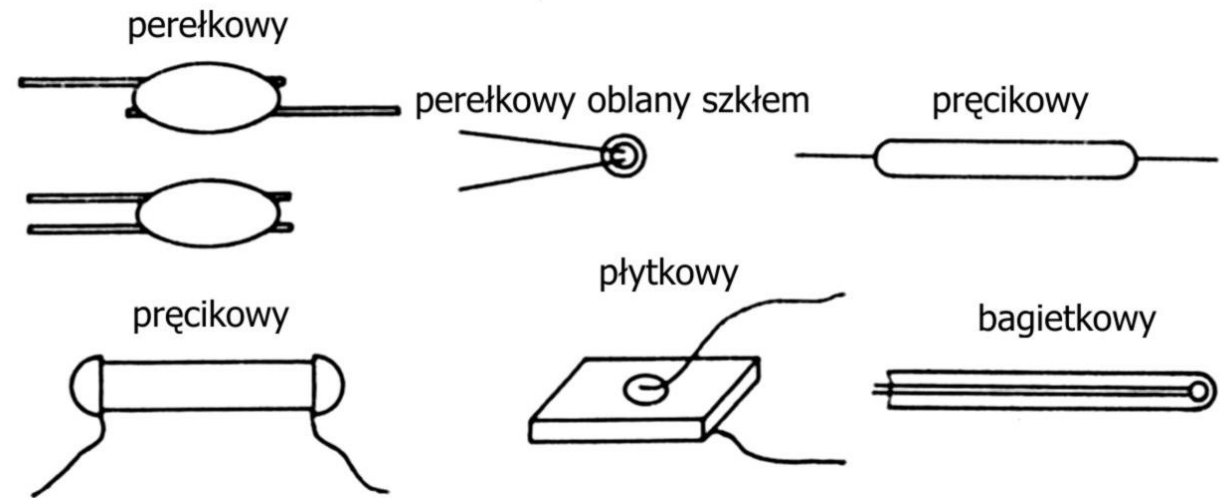
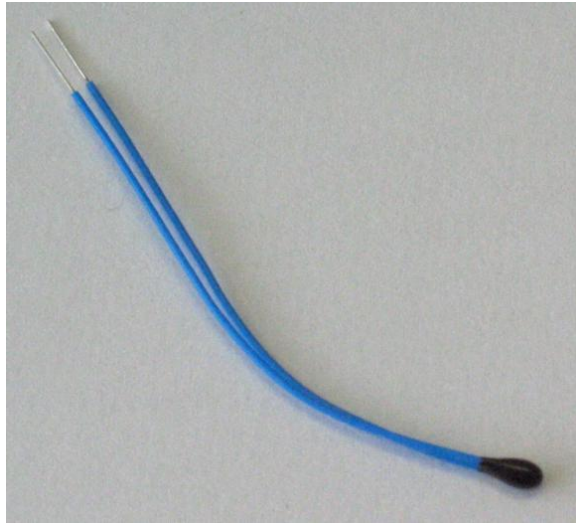
$$R_T = R_{T_0} \cdot e^{\alpha_{T_0} \cdot \Delta T \cdot \frac{T}{T_0}}$$

Wzrost temperatury powoduje spadek rezystancji.



TERMOMETRY ELEKTRYCZNE

Termometry rezystancyjne półprzewodnikowe - TERMISTORY (-80-300(1200)°C)



Do pomiarów temperatury zwykle są stosowane termistory z ujemnym cieplnym współczynnikiem zmian rezystancji NTC.

Materiały to, tlenki, siarczki, krzemiany metali takich jak:
Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ti, Co

*Małe wymiary, ale nieliniowa zależność
rezystancji od temperatury.*

TERMOMETRY ELEKTRYCZNE

Termometry termoelektryczne (termopary)

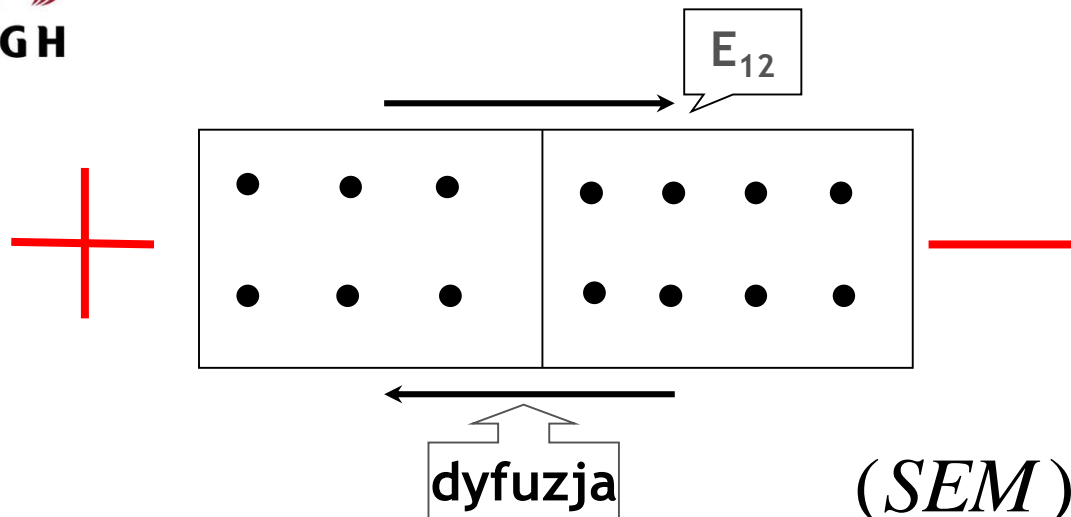
- **1821 - T. Sebeck** stwierdził, że w zamkniętym obwodzie składającym się z dwu różnych metali, których miejsca styku są w różnej temperaturze obserwuje się przepływ prądu
- **1834 - I.C.A. Peltier** zauważył, że jeżeli przez złącze dwu różnych metali przepływa prąd to zależnie od kierunku przepływu złącze to się ogrzewa lub oziębia
- **1854 - W. Thomson** stwierdził, że prąd płynący przez jednorodny przewodnik, w którym występuje gradient temperatury to w zależności od kierunku przepływu prądu występuje pochłanianie lub wydzielanie ciepła

Termometry termoelektryczne (termopary)

Zjawisko ***Sebecka (Peltiera)*** (1821-34r.) to występowanie siły termoelektrycznej w miejscu styku dwóch różnych metali, zaś zjawisko ***Thomsona*** (1854 r.) to występowanie siły termoelektrycznej na długości poszczególnych przewodów obwodu zamkniętego.

Ogniwo termoelektryczne - termoelement- jest zrobione z przewodników wykonanych z dwóch różnych metali. Jeśli miejsce ich połączenia jest ogrzewane to na rozwartych ramionach pojawia się różnica potencjałów zwana siłą termoelektryczną (SEM). Powstaje ona w miejscu styku obu metali.

Termopary - ZJAWSKO PELTIERA czy **SEBECKA**



$$(SEM)E_{AB} = -\frac{A_A - A_B}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

część dyfuzyjna

prace wyjścia

gdzie: $e - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $k - 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

A_A i A_B - prace wyjścia elektronów z metalu A i B,

N_A i N_B - koncentracja elektronów w przewodniku A i B

Na styku metali utrzymywanym w stałej temperaturze powstaje kontaktowa różnica potencjałów wskutek tego, iż metale różnią się koncentracją nośników prądu (elektronów) oraz różnią się pracą wyjścia elektronów.

Termopary - ZJAWSKO PELTIERA

Metal o mniejszej pracy wyjścia wysyła do drugiego metalu więcej elektronów niż wpływa do niego z metalu o większej pracy wyjścia, tym samym ładuje się dodatnio. Prace wyjścia i różnice prac wyjścia są rzędu kilku eV.

$$N_A \approx N_B \rightarrow \ln \frac{n_A}{n_B} \approx 1$$

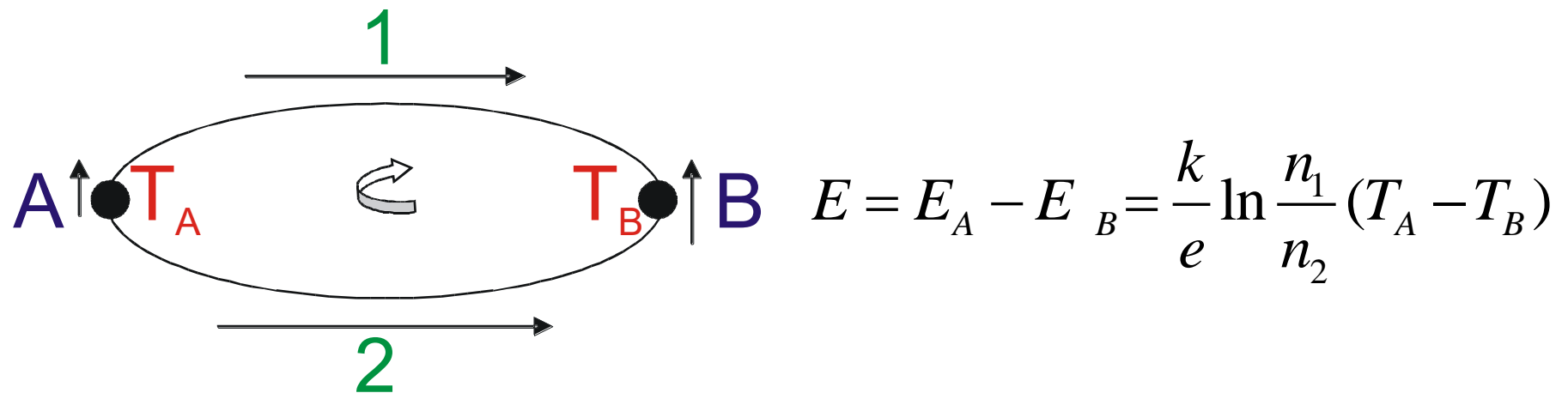
Również niewielką wartość w temperaturze 300K stanowi drugi składnik

$$\frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 0,026V$$

Zależność prac wyjścia oraz zależność koncentracji elektronów od temperatury jest słaba, dlatego zmiana kontaktowej różnicy **potencjałów jest proporcjonalna od temperatury.**

Termometry termoelektryczne (termopary)

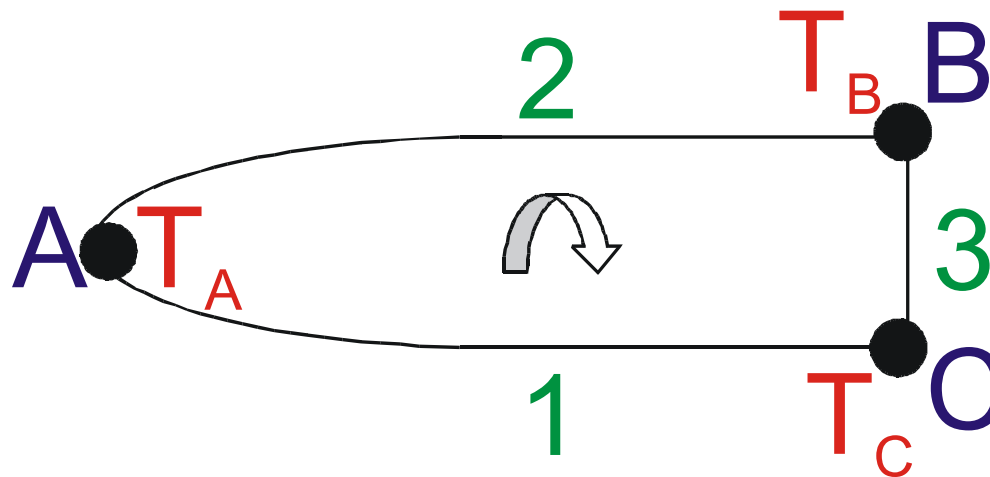
Dla zamkniętego obwodu zbudowanego z dwu metali A i B o stężeniu nośników N_A i N_B , a których spoiny będą w temperaturach T_A i T_B możemy określić siłę termoelektryczną E .



Pomijamy zjawisko Thomsona. Zakładamy temperaturę jednej ze spoin np. T_B za stałą, jest to **spoina odniesienia**. **Spoina pomiarowa** to spoina T_A .

PRAWO TRZECIEGO METALU

Jeżeli wprowadzimy w obwód metal, którego końce będą miały tą samą temperaturę, co spoiny to nie będzie to miało wpływu na siłę termoelektryczną.



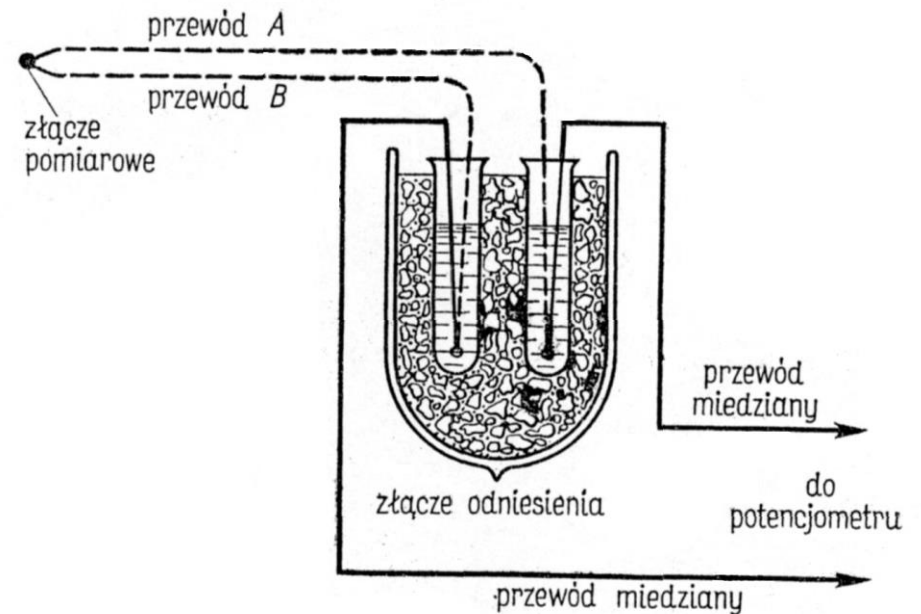
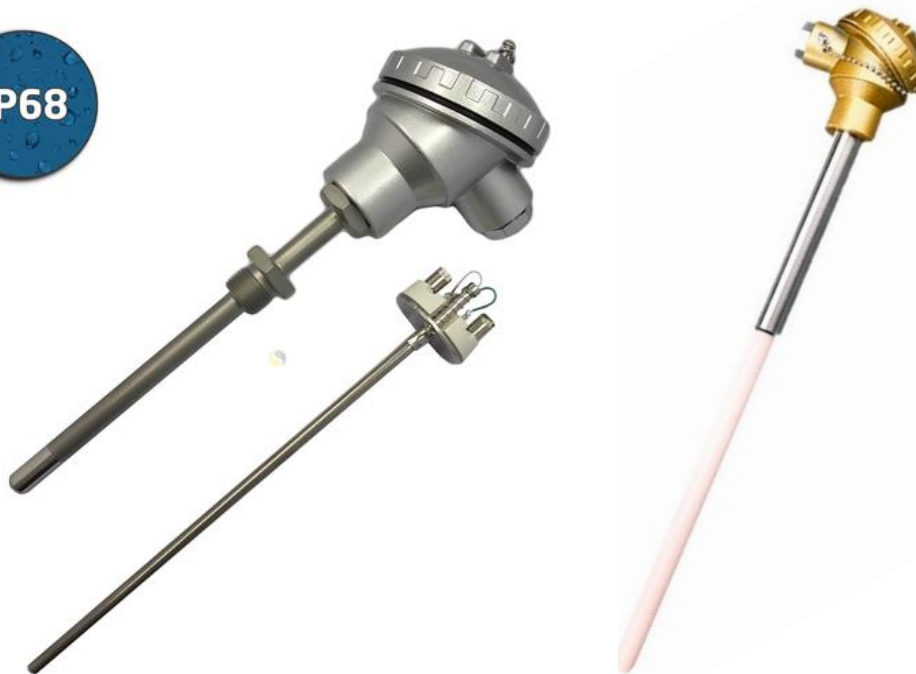
$$T_C = T_B$$

Prawo trzeciego metalu pozwala włączyć w obwód przyrząd pomiarowy (np. miliwoltomierz).

Budowa termopary

- spoina pomiarowa umieszczona w osłonie (metalowej, ceramicznej, łączonej),
- termoelektrody (przewody termoelementu),
- wolne końce (spoina odniesienia) do których przytwierdzone są przewody kompensacyjne służące do utrzymania stałej temperatury spoiny odniesienia,
- urządzenie pomiarowe (miliwoltomierz wyskalowany stopniach $^{\circ}\text{C}$ lub K),

IP68



α - CZUŁOŚĆ TERMEOELEMENTU

$$E(SEM) = \frac{k}{e} (T_A - T_B) \ln \frac{n_1}{n_2} = \alpha \cdot \Delta T \rightarrow \alpha = \frac{E}{\Delta T} \left[\frac{\mu V}{deg} \right]$$

gdzie:

α - czułość termoelementu, jest stała dla par metali, sięga kilkudziesięciu mV/K

Szereg termoelektryczny wzgl. Platyny:

Ni, K, Na, Pt, Au, Pb, Ag, W, Fe, Ge, Si

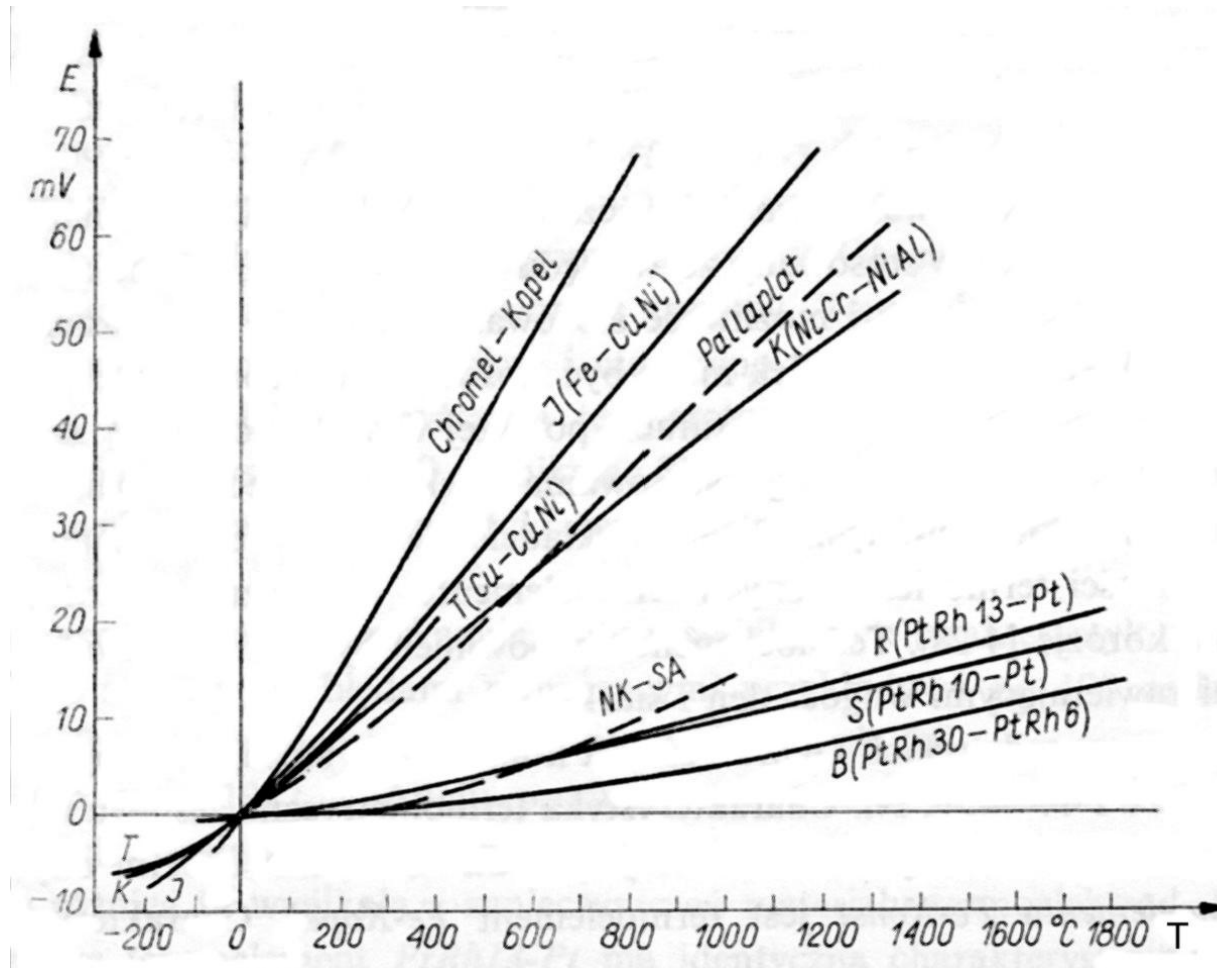


Np. termoelement Pt-Pt $\alpha=0$ [mV/K],
natomiast Pt-Tellur $\alpha=210$ [mV/K]

Zatem wzrost temp. o 1K powoduje wzrost SEM
tego termoelementu o 210mV

Termometry termoelektryczne (termopary)

$$E = \frac{k}{e} (T_A - T_B) \ln \frac{N_A}{N_B} = \alpha \Delta T$$



Termometry termoelektryczne (termopary)

Właściwości materiałów stosowanych na termoelementy

- wysoka temperatura topnienia
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej
- duża odporność korozyjna
- stabilne właściwości
- powtarzalność w produkcji
- niska rezystywność
- możliwie mały TWR
- liniowa zależność SEM od temperatury

Przykładowe materiały używane do wykonania termopar

Materiał	α	skład	Temp. pracy
Konstantan	-35	55%Cu, 45%Ni	600 °C
Nikiel	-14,8	100%Ni	1200 °C
Alumel	-12,9	94%Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	1200 °C
Pallad	-5,7	100%Pd	1600 °C
Platyna	0	100%Pt	1600 °C
Platynorod	+6,43	90%Pt, 10%Rh	1800 °C
Rod	+7,0	100%Rh	1800 °C
Wolfram	+12,0	100%W	2000 °C
Molibden	+14,5	100%Mo	1800 °C
Nichrom	+22,0	85%Ni, 15%Cr	1200 °C
chromel	+28,1	89%Ni, 9,8%Cr, 1%Fe, 0,2%Mn	1200 °C

Oznaczenia termopar - stosowane w automatyce pomiarowej



Termoelement	Typ	Zakres temperatur użytkowania	Atmosfera użytkowania
Cu-CuNi miedź - konstantan	T	-200÷500°C	obojętna
NiCr-CuNi chromel - kopel	E	-270÷800°C	redukcyjna, bez siarki
Fe-CuNi żelazo - konstantan	J	do 600°C	redukcyjna bez S, H ₂ O _(g) , N ₂
NiCr-NiAl(Mn) chromel - alumel	K	do 1100(1300)°C	utleniająca, redukcyjna
PtRh10-Pt platynarod - platyna	S	do 1300°C	utleniająca, redukcyjna, obojętna bez Si, Fe, S, C b.kruchy
PtRh30-PtRh6	B	do 1800°C	utleniająca
WRh5-WRh6	C	do 1600°C	próżnia, obojętna b. kruchy

Termopary wysokotemperaturowe

TERMOELEMENTY WYSOKOTEMPERATUROWE		
<i>W-Mo; W-MoW</i>	do 2400°C	redukcyjna
<i>W-WRe</i>	do 2300°C	redukcyjna, obojętna, próżnia
<i>Ir-IrRh</i>	do 2000°C	utleniająca
<i>Grafit-SiC</i>	do 1800°C	redukcyjna
<i>Grafit-W</i>	do 2400°C	nawęglająca
<i>C-C(0,1-0,2%Be)</i>	do 2600°C	redukcyjna, obojętna, próżnia

Termometry termoelektryczne (termopary)

Przewody kompensacyjne:

charakterystyka, cel stosowania, sposób łączenia

Przewody kompensacyjne to przewody, których charakterystyka termometryczna jest identyczna z charakterystyką termometryczną termoelementu , z którym mają współpracować.

Korzystając z prawa kolejnych temperatur przedłuża się termoelement przewodami kompensacyjnymi od głowicy do miejsca, w którym można utrzymać stałą temperaturę.

Przewody wykonuje się zwykle z materiałów innych niż termopary np. do termoelementu typu S przewody wykonuje się miedzi i stopu niklu z miedzią (99,4%Cu i 0,6%Ni).

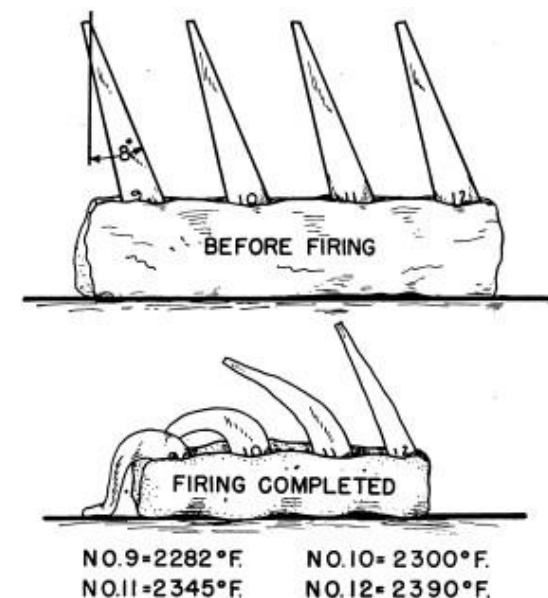
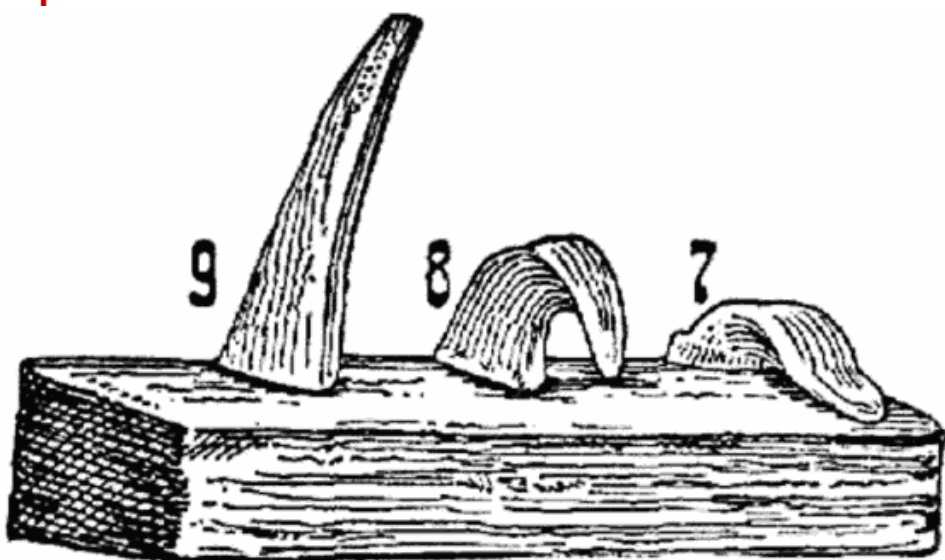
Termometry termoelektryczne (termopary) błędy pomiarowe

- Uchyb powodowany niedokładnym wzorcowaniem ogniwa termoelektrycznego.
- Uchyb powodowany zmianą rezystancji obwodu pomiarowego.
- Uchyb powodowany różnicą temperatur między obiektem badanym a złączem ogniwa termoelektrycznego.
- Uchyb powodowany niejednorodnością strukturalną złącza i elektrod.
- Uchyb dynamiczny.

INNE WSKAŹNIKI TEMPERATURY

1. STOŻKI PIROMETRYCZNE (Stożki Segera) 600÷2000°C

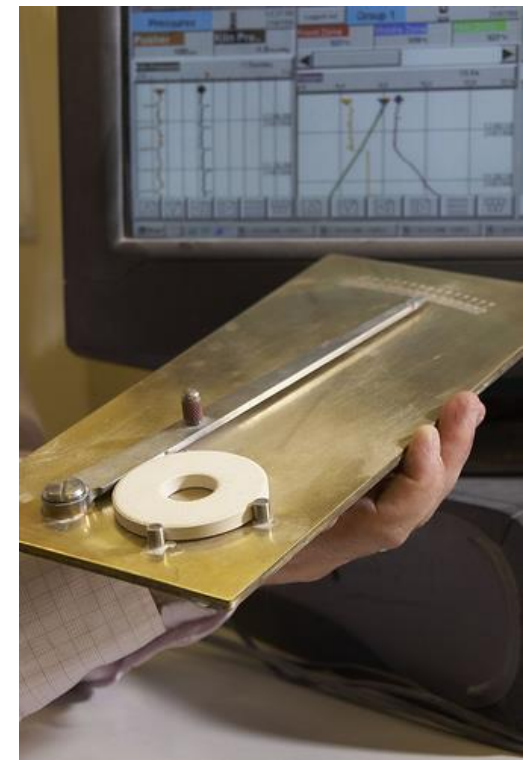
Są to trójścienne ostrosłupy ścięte o określonych wymiarach wykonane z tak dobranego materiału, że przy ogrzaniu do określonej temperatury ulegają ugięciu. Stopniowane są, co 15 do 40°C. Błąd pomiaru wynosi $\pm 10-15K$.



INNE WSKAŹNIKI TEMPERATURY

2. KRAŻKI PIROMETRYCZNE 970 - 1750°C

Określenie temperatury przy pomocy krążków pirometrycznych polega na pomiarze średnicy krążka i przeliczeniu jej na temperaturę przy pomocy tabel wzorcowych. Pomiaru średnicy krążka dokonuje się mikrometrami cyfrowymi lub numerycznymi. Zakres ich stosowania waha się od 970 do 1750°C.



INNE WSKAŹNIKI TEMPERATURY c.d.



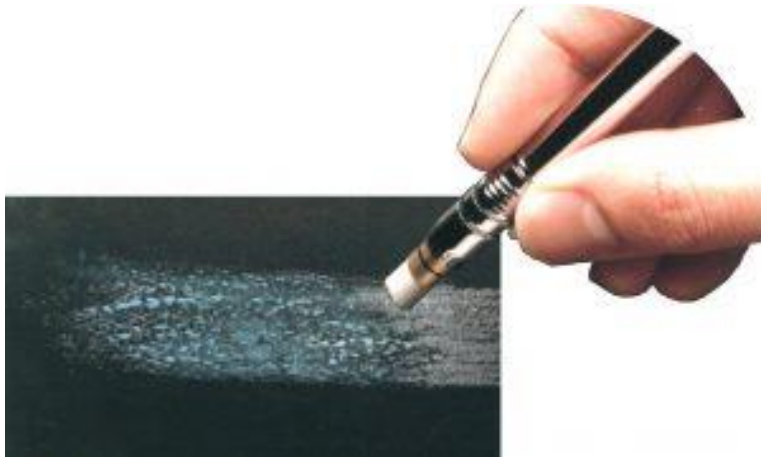
AGH

3. FARBY TERMOMETRYCZNE 120÷400(1350)°C

Pod wpływem temperatury następuje zmiana barwy farby. Farby mogą zmieniać barwę jednokrotnie lub kilkakrotnie, w kilku temperaturach. Ponadto istnieją farby odwracalne lub nieodwracalne. Czas konieczny do ustalenia się barwy w temperaturze przemiany wynosi 30minut. Błąd pomiaru wynosi $\pm 5K$.

4. KREDKI TERMOMETRYCZNE 65÷670°C

Zasada pomiaru temperatury w przypadku kredek jest taka sama jak w przypadku farb termometrycznych. Przy czym zmiana barwy kredki w temperaturze przemiany następuje po czasie 1-2 sekund. Kredki stopniowane są co 10 do 100°C.

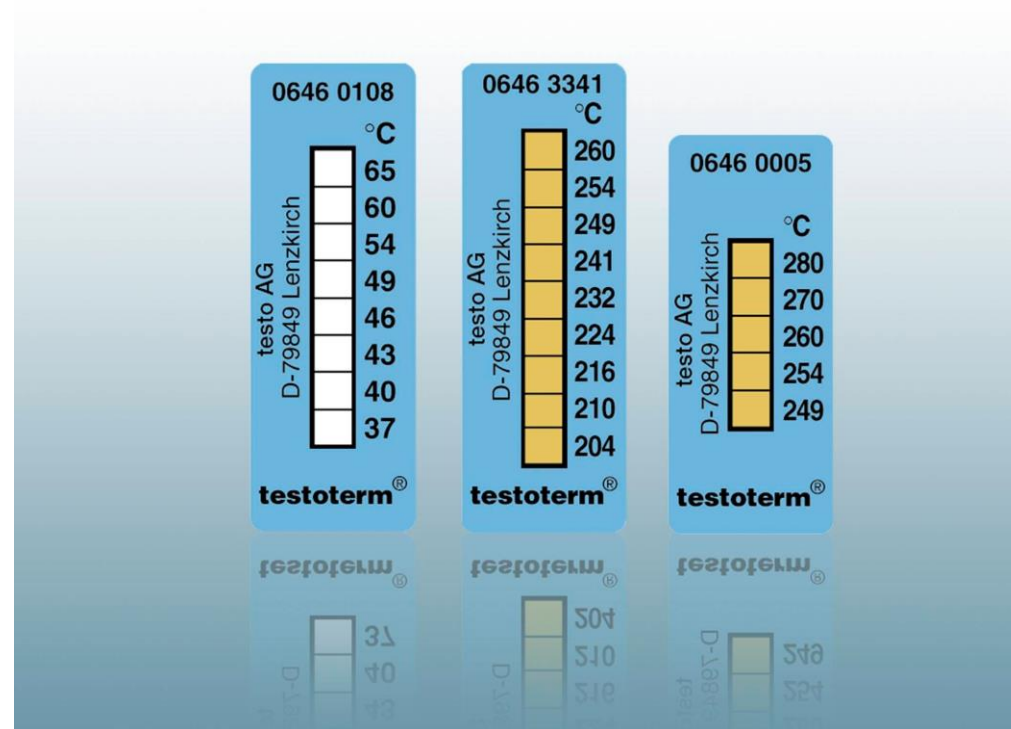


#	Initial Colour	Colour Change	Colour Change	Colour Change
120	Light Grey	Violet Blue at 120C		
245	Orange Brown	Black at 245	Light Grey at 335	White Buff at 505
600	Apple Green	White at 600		

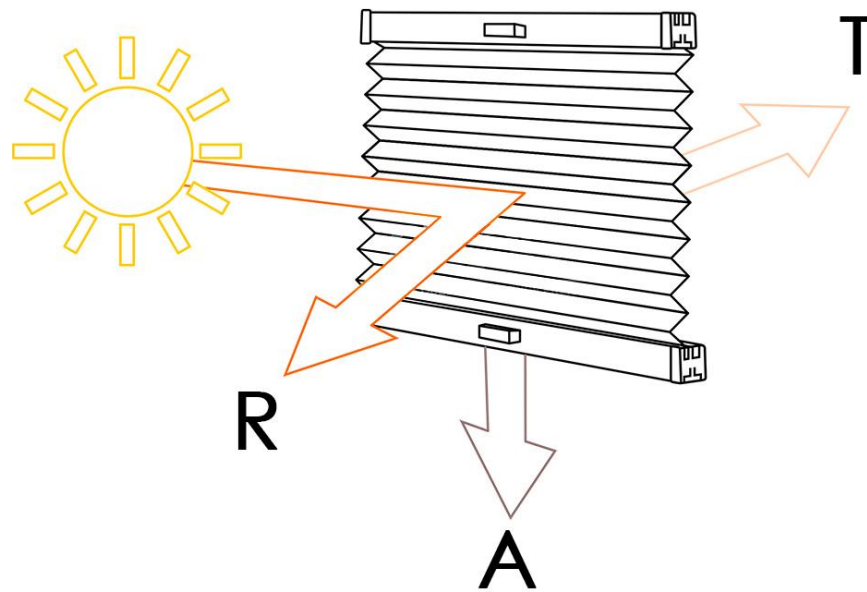
INNE WSKAŹNIKI TEMPERATURY c.d.

5. WSKAŹNIKI NAKLEJANE

W przypadku wskaźników naklejanych następuje zmiana ich barwy na barwę czarną. Zakres ich stosowania wynosi od 30 do 260°C stopniowane są co 3 do 10°C. Błąd pomiaru wynosi $\pm 1\%$.



PIROMETRY



$$Q = Q_A + Q_R + Q_T \quad /: Q$$

$$1 = Q_A/Q + Q_R/Q + Q_T/Q$$

czyli

$$1 = a + r + t$$

CIAŁO SZARE

najczęściej

$$a + r = 1$$

CIAŁO DOSKONAŁE CZARNE - $a=1$; $r=0$ i $t=0$

CIAŁO DOSKONAŁE PRZEZROCZYSTE - $t=1$; $a=0$ i $r=0$

CIAŁO DOSKONAŁE BIAŁE - $r=1$; $t=0$ i $a=0$

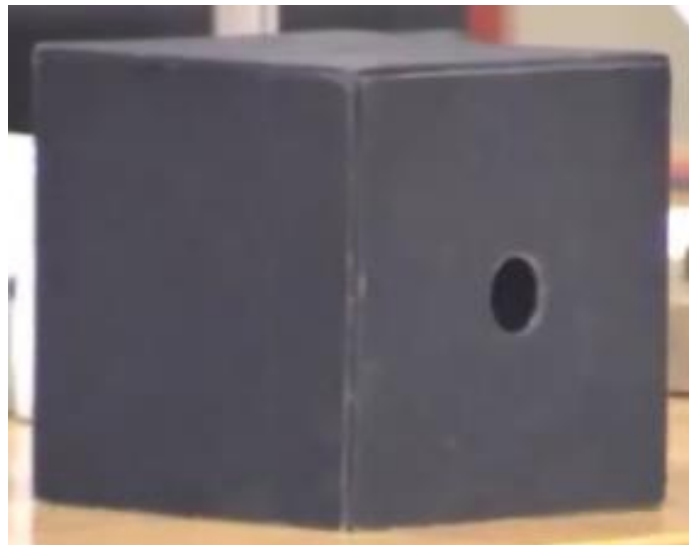
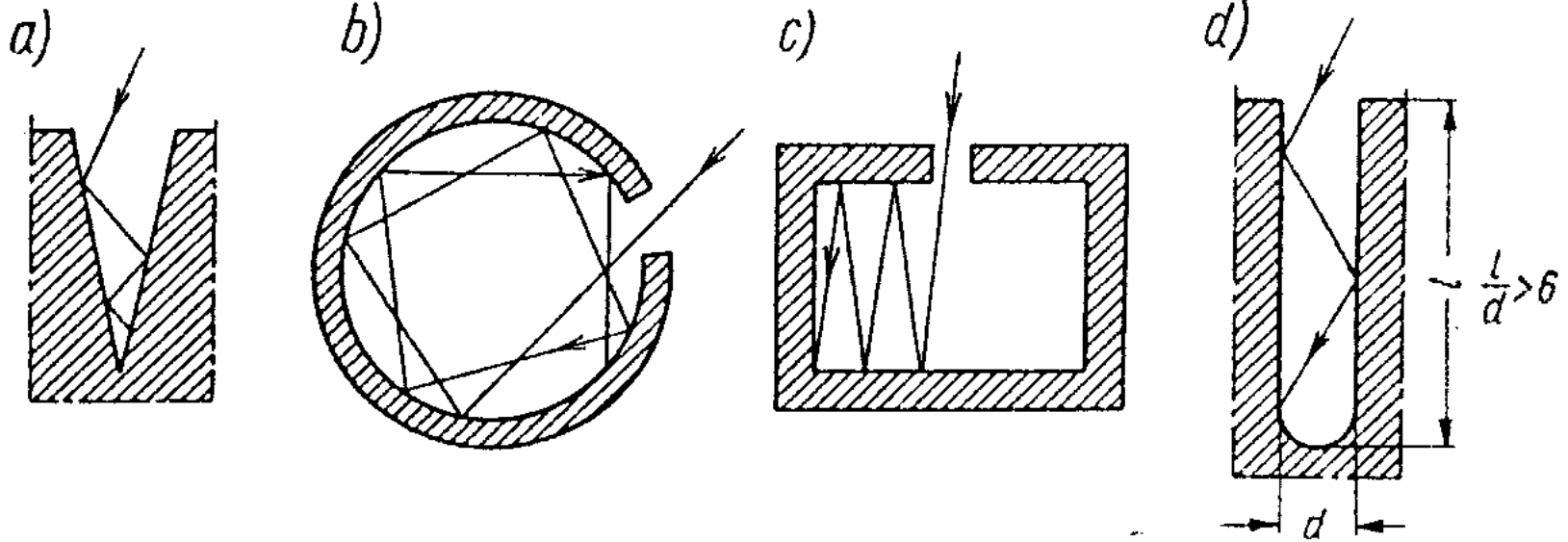
a = współczynnik absorpcji (pochłaniania) = Q_A/Q

r = współczynnik refleksji (odbicia) = Q_R/Q

t = współczynnik transmisji (przepuszczenia) = Q_T/Q

PIROMETRY

CIAŁO DOSKONALE CZARNE - $a=1$; $r=0$ i $t=0$



Nagrzane ciało zaczyna świecić już od 550°C. Barwa zmienia się od ciemnoczerwonej do niebieskiej (>1500°C). Zakres promieniowania temperaturowego zawiera się w granicach od 0,4 do 20 μm (**zakres promieniowania widzialnego 0,4-0,8 μm i podczerwonego 0,8-40 μm**).

Gęstość strumienia ciepła promieniowania cieplnego:

$$E = \frac{Q}{A \cdot \tau} = \frac{\phi}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

gdzie: ϕ - strumień promieniowania cieplnego $\phi = Q/\tau$,

Monochromatyczne natężenie promieniowania cieplnego:

$$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$$

PRAWO PLANCKA

Mówi o energii promieniowania emitowanej przez jednostkową powierzchnię ciała doskonale czarnego, w jednostce czasu, w temperaturze T dla całego zakresu długości fal lub jednej długości fali.



Max Planck
1858-1947

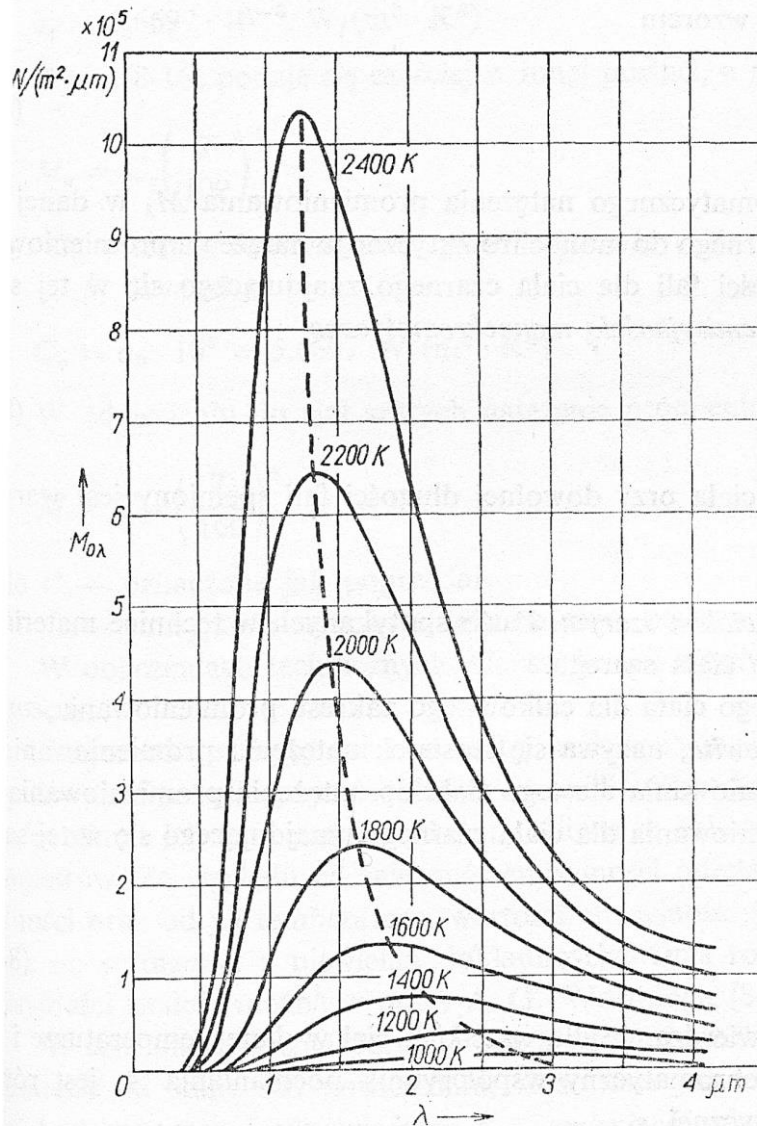
$$E_0 = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{(c_2/\lambda T)} - 1} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$$

gdzie:

c_1, c_2 - stałe odpowiednio wynoszące: $3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$, $14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Dla zakresu fal od λ_1 do λ_2 otrzymujemy:

$$E_{0,\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{(c_2/\lambda T)} - 1} d\lambda$$



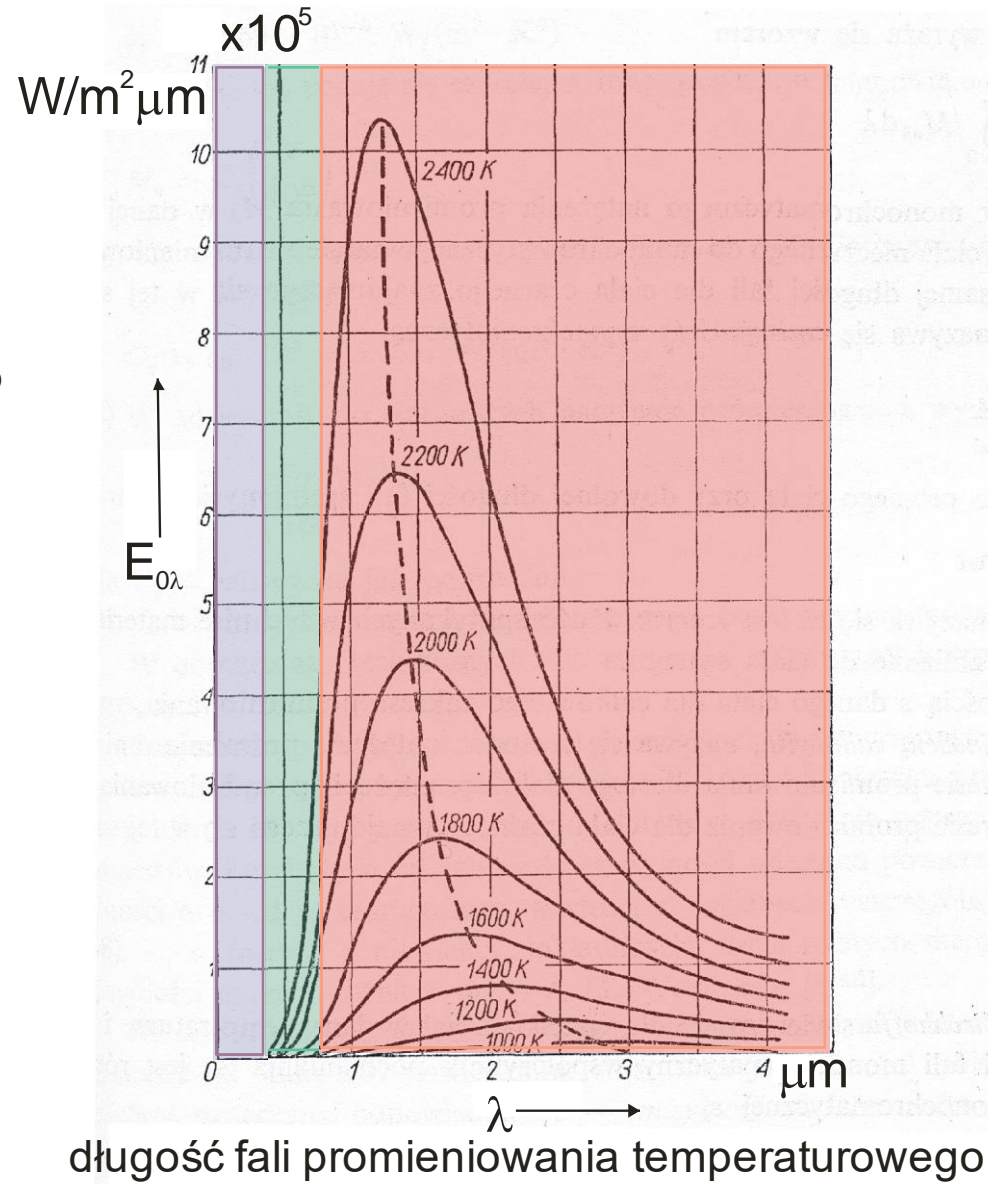
Zależność monochromatycznego natężenia promieniowania w funkcji długości fali przedstawia rysunek. Pole pod krzywą odpowiada całkowitej energii promieniowania dla $A=1\text{m}^2$ i $t=1\text{s}$ dla całego widma. Maksima wskazują, dla jakiej długości fali przypada w widmie maksymalne natężenie energii.

Gdy temperatura wzrasta E_{10} przesuwa się w kierunku krótszych fal.

GRAFICZNA INTERPRETACJA PRAWA PLANCKA



monochromatyczne natężenie promieniowania
ciała doskonale czarnego



zakres podczerwieni

zakres światła widzialnego

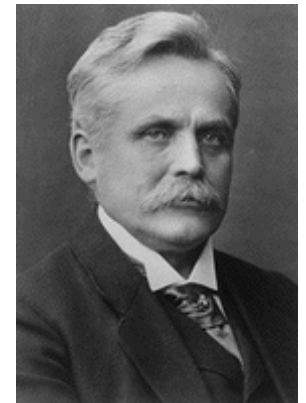
zakres nadfioletu

Dla małego iloczynu λT otrzymujemy **PRAWO WIENA**

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{(c_2/\lambda T)}}$$

λ_{\max} w danej temperaturze T możemy wyznaczyć z **PRAWA PRZESUNIĘĆ WIENA:**

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \mu m \cdot K$$



Wilhelm Wien
1864-1928



Jožef Stefan
1835-1893

PRAWO STEFANA-BOLTZMANA

Rozwiązanie prawa Plancka daje prawo Stefana-Boltzmana, które głosi, że natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej tego ciała.

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \longrightarrow E_0 = C_0 \cdot (T/100)^4$$

gdzie:

σ_0 - stała promieniowania $5,6697 \cdot 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$



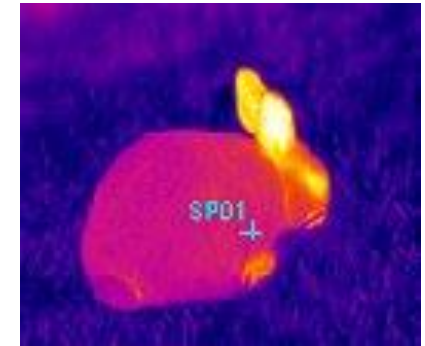
Ludwig Boltzmann
1844-1906

dla ciał szarych

$$E = C_0 \cdot \varepsilon \cdot (T/100)^4 = C \cdot (T/100)^4$$

$$C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right]$$

gdzie: ε - stopień czarności ciała czyli emisyjność,



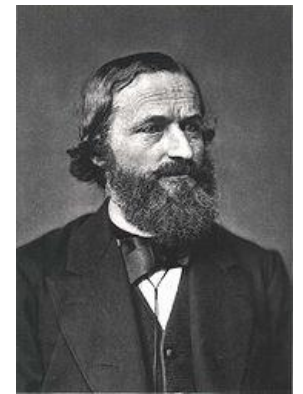
EMISYJNOŚĆ CAŁKOWITA - stosunek natężenia promieniowania ciała szarego do natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T

$$\varepsilon = E/E_0 = \frac{C(T/100)^4}{C_0(T/100)^4}$$



PRAWO KIRCHHOFFA

Ustala związek pomiędzy natężeniem promieniowania (emisyjności) i pochłaniania (absorpcji).



Gustav Kirchhoff
1824-1887

$$a_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \text{ lub } a = \varepsilon$$

W stanie równowagi termicznej natężenie promieniowania (emisji) absorpcji są jednakowe dla danego ciała (szarego lub czarnego). Inaczej ciało szare emituje tyle energii promienistej ile zaabsorbowałoby ciało doskonale czarne w tej samej temperaturze $E_1 = a \cdot E_0$ lub $E_1 = \varepsilon \cdot E_0$.

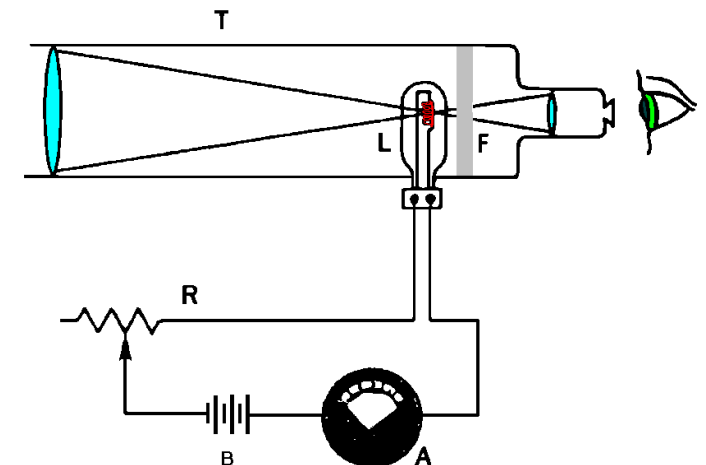
MONOCHROMATYCZNY WSPÓŁCZYNNIK ABSORPCJI (EMISJI) CIAŁA SZAREGO

$$a_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} = E_{\lambda} / E_{\lambda 0}$$

Ciało doskonale czarne jest doskonałym źródłem promieniowania ($\varepsilon=1$). Ciało doskonale białe nie absorbuje energii i jej nie emituje.

Każdy PIROMETR składa się z:

- układ optyczny skupiający promieniowanie na detektorze (soczewki, zwierciadła, światłowody),
- detektor promieniowania (termiczny, fotoelektryczny, oko ludzkie),
- układ przetwarzania sygnału,
- wskaźnik wielkości mierzonej,



PIROMETRY

Zależnie od wykorzystywanego zakresu długości fal promieniowania temperaturowego, pirometry dzieli się na:

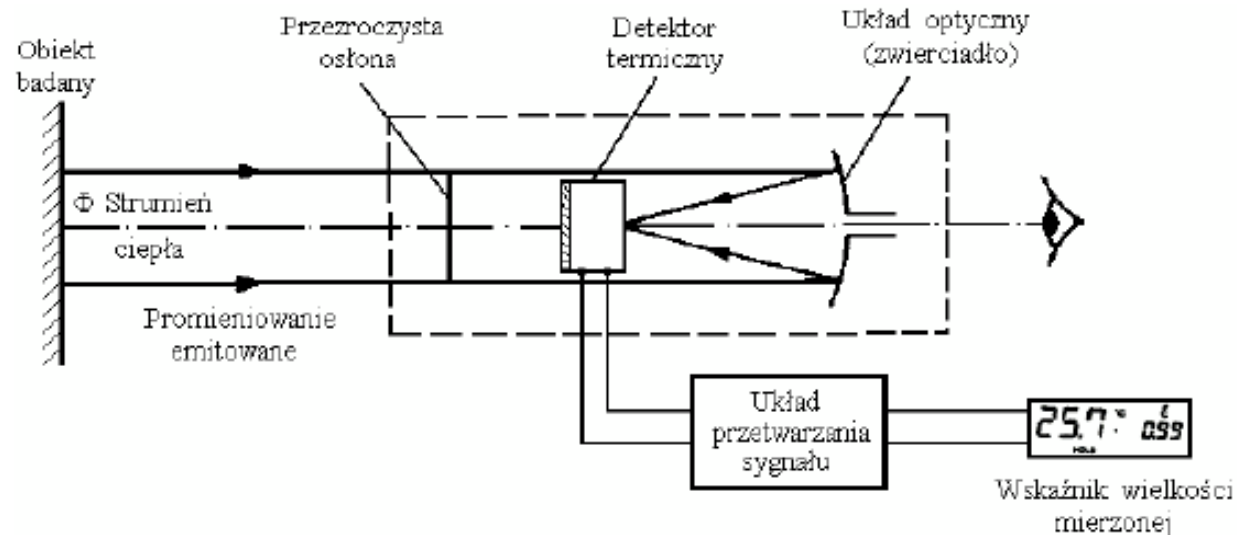
- **pirometry całkowitego promieniowania**, zwane pirometrami radiacyjnymi,
- **pirometry pasmowe**, wykorzystujące pewne pasmo wysyłanego promieniowania, będące najczęściej pirometrami fotoelektrycznymi,
- **pirometry monochromatyczne**, pracujące przy jednej długości fali, z detektorem fotoelektrycznym lub z okiem ludzkim jako detektorem w układzie porównawczym (pirometry luminancyjne lub z zanikającym włóknem),
- **pirometry dwubarwowe (stosunkowe)**, w których natężenie promieniowania wysyłanego w dwóch różnych długościach fal jest porównywane detektorami fotoelektrycznymi lub okiem ludzkim.



AGH

Pirometry radiacyjne (całkowitego promieniowania) ARDOMETRY 400-2000°C

Pierwszy pirometr radiacyjny skonstruował Fery w 1902r. Zasada ich działania opiera się na prawie Stefana-Boltzmana. Istnieje zależność pomiędzy temperaturą ciała badanego i temperaturą absorbera pirometru. Mierzona różnica temperatur pomiędzy ciałem badanym a absorberem pirometru przy założeniu, że temperatura obudowy jest stała, odzwierciedla całkowite natężenie promieniowania emitowane przez badane ciało. Temperatura obiektu badanego jest określana na podstawie mocy promieniowania w całym paśmie od podczerwieni po nadfiolet. Jako układy skupiające promieniowanie stosuje się: soczewki (szkło, kwarc, sztuczny szafir, fluoryt), zwierciadła i światłowody.



Pirometry radiacyjne (całkowitego promieniowania) ARDOMETRY 400-2000°C

Natomiast jako detektory promieniowania, w których następuje zamiana energii promieniowania na energię cieplną stosuje się:

- ✓ termoelementy połączone w **termostosy** - termoelementy w bańkach próżniowych lub wypełnionych gazem szlachetnym (wzrost czułości),
- ✓ **bolometry termistorowe i metalowe** - cienkowarstwowe, $R=1-5 \text{ M}\Omega$, $R=f(T)$).

W tych przetwornikach energia promieniowania jest odbierana przez płytkę absorpcyjną, powodując jej ogrzewanie. Przyrost temperatury płytki jest mierzony termorezystorami. Dla zwiększenia czułości termoelementy łączone są szeregowo po kilka sztuk tworząc tzw. termostosy. Termiczne przetworniki promieniowania z termorezystorami (metalicznymi lub półprzewodnikowymi) znane są pod nazwą bolometrów.

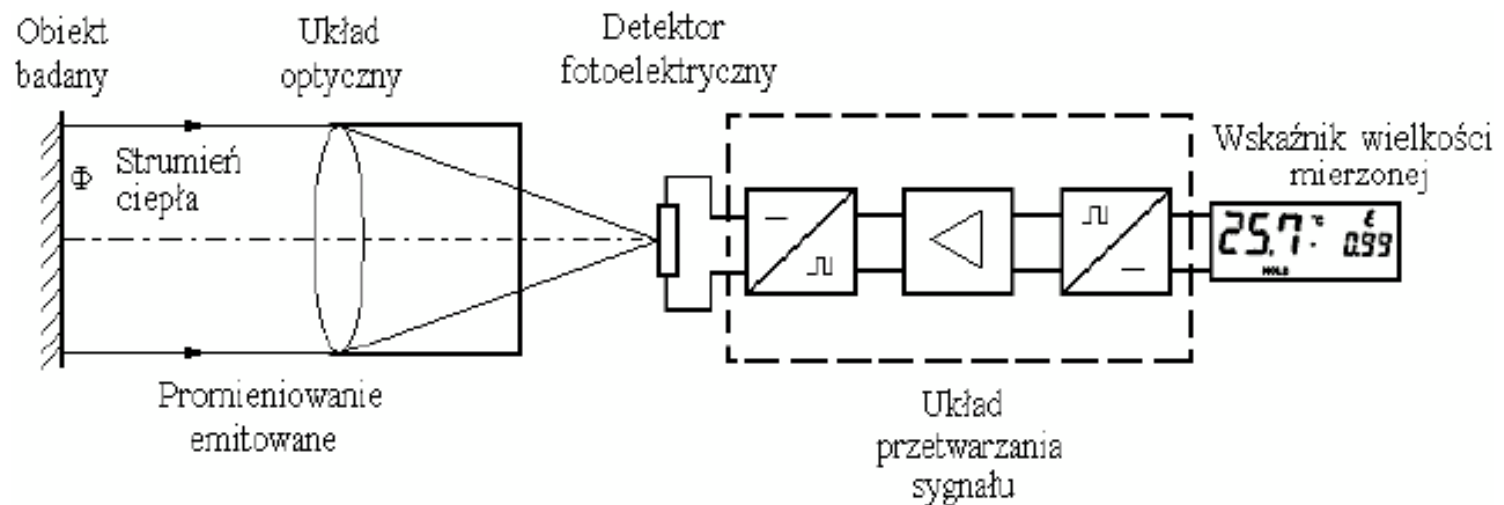
Błędy pomiaru:

- sygnał musi mieć odpowiednią moc ($>800^\circ\text{C}$)
- inne ciała na drodze pomiaru,

PIROMETRY FOTOELEKTRYCZNE (H. E. Ives, 1923r)

Stosowane w pirometrach radiacyjnych detektory termoelektryczne i bolometry uniemożliwiają pomiar temperatur szybkozmiennych. Do takich celów stosowane są pirometry fotoelektryczne.

Wykorzystują prawo Plancka. Układy skupiające promieniowanie są identyczne jak w przypadku pirometrów radiacyjnych.



PIROMETRY FOTOELEKTRYCZNE (H. E. Ives, 1923r)

Natomiast detektorami promieniowania są fotoelementy,

- ✓ *detektory fotoprzewodzące* (fotorezystory wykonane z cienkich warstw siarczku ołowiu, selenku ołowiu, tellurku ołowiu, siarczku kadmu umieszczane na podłożu szklanym lub fotodiody)
- ✓ *detektory fotowoltaiczne* (fotoogniwa pod wpływem naświetlania pomiędzy dwiema warstwami metalowymi powstaje różnica potencjałów proporcjonalna do natężenia padającego promieniowania: selen, krzem, antymonek indu i selenek indu)
- ✓ *detektory fotoemisyjne* (fotopowielacze, wykorzystywane jest tu zjawisko emisji elektronów z powierzchni metalicznej fotokatody, na którą pada promieniowanie podczerwone),
które ów sygnał przetwarzają na sygnał elektryczny.

Zależność zakresu promieniowania wykorzystywanego w danym pirometrze zależy od czułości **fotoelementu**, przepuszczalności widmowej fotoelementu lub filtra.

PIROMETRY FOTOELEKTRYCZNE

Pirometry pasmowe

W tym przypadku do określenia temperatury wykorzystywany jest zakres długości fal od λ_1 do λ_2 (pasmo). Głównie skupiane jest promieniowanie podczerwone (0,7 do 40 μm) dzięki czemu istnieje możliwość pomiaru temperatury od wartości ujemnych do ok. 3000°C.

Wszystkie ciała występujące na drodze pomiaru zaburzają pomiar. Jednakże można dostosować wybór pasma do warunków pomiaru.



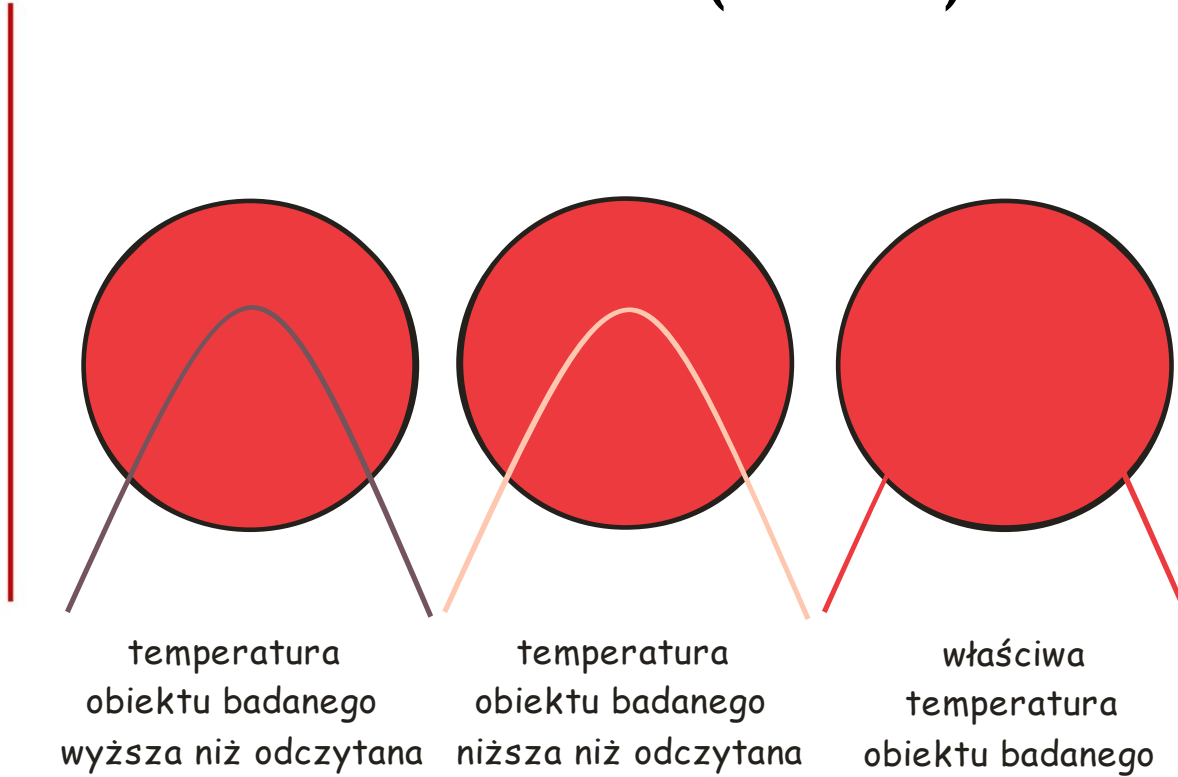
Pirometry monochromatyczne (z zanikającym włóknem) 600-1400°C (5000°C)

Zgodnie z prawem Plancka można stwierdzić, że istnieje zależność temperatury ciała i natężenia promieniowania w funkcji długości fali.

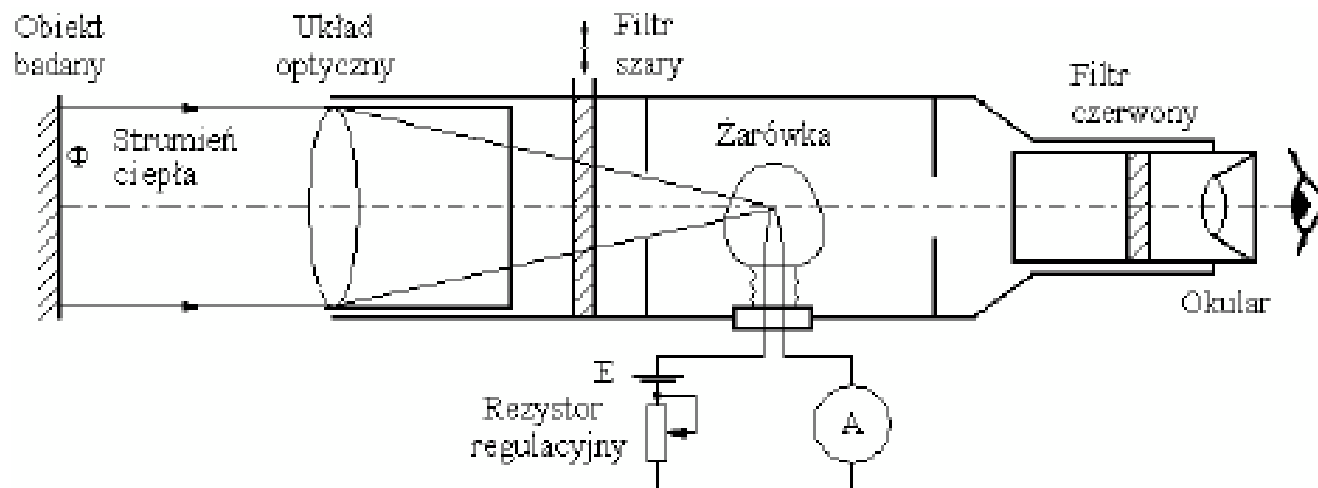
Dlatego w w/w pirometrach porównuje się luminancję włókna żarówki i badanego obiektu przy jednej długości fali, czyli w jednej barwie, bez wpływu oceny barwy na wyniki pomiaru. Obserwacja przy jednej długości fali eliminuje błędy ludzkiego oka. Do selekcji długości fali stosuje się filtr czerwony, przepuszczający światło czerwone o długości fali 0,65 μm , umożliwia to pomiar możliwie niskich temperatur.

Luminacje obiektu badanego i żarówki zgrywa się za pomocą rezystora lub stopniowanego filtru szarego. Filtr szary stosowany jest w każdym rozwiązaniu konstrukcyjnym gdyż w temperaturach wyższych osłabia luminancję obiektu badanego, dzięki czemu chronione jest włókno żarówki i rozszerzany zakres pomiarowy.

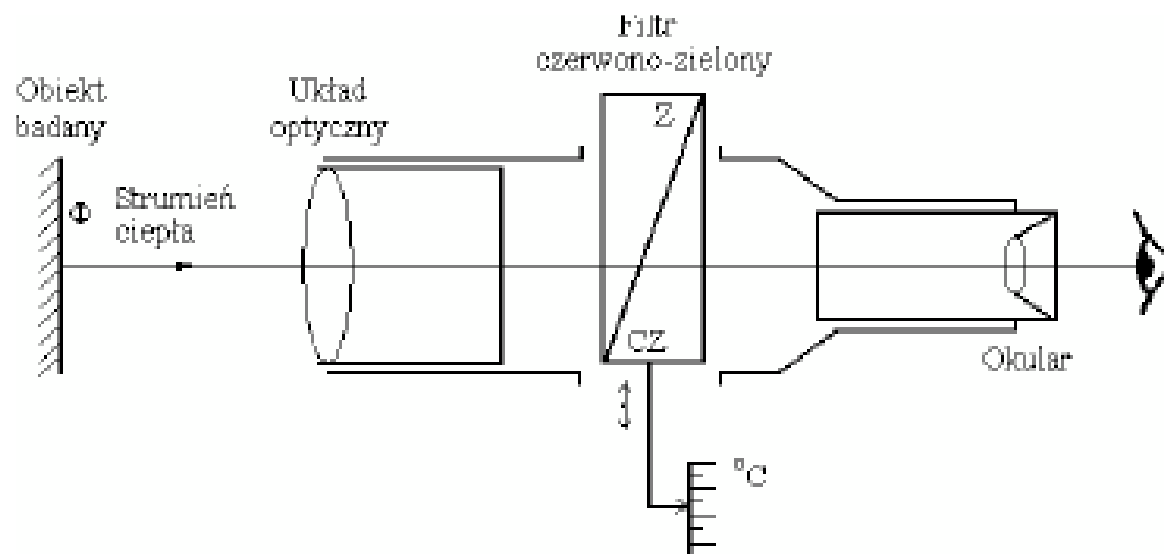
Pirometry monochromatyczne (z zanikającym włóknem) 600-1400°C (5000°C)



Pirometry monochromatyczne (z zanikającym włóknem 600-1400°C(5000°C))



Pirometry dwubarwowe (stosunkowe) (500-3500°C)

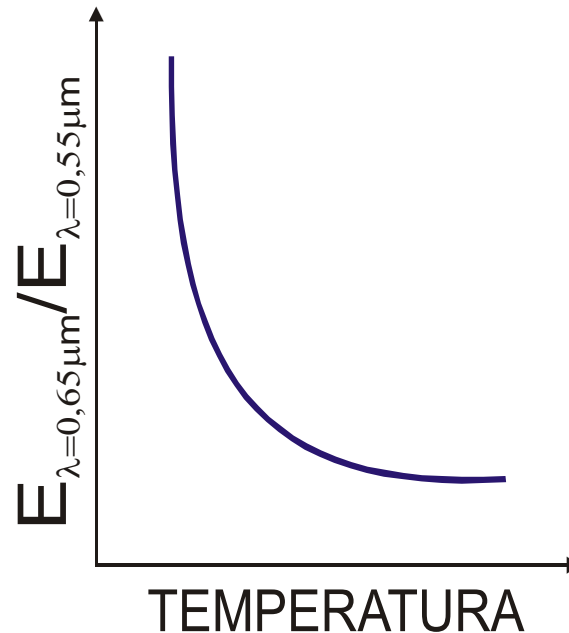


Pirometry dwubarwowe (stosunkowe) (500-3500°C)

Pracują w oparciu o prawo Plancka. Pomiar polega na pomiarze stosunku natężenia promieniowania dwóch barw (lub dwóch długości fali promieniowania temperaturowego) wysyłanych przez badane ciało.

Najczęściej detektorami promieniowania są fotoelementy.

Zwykle wybieramy stosunek natężenia promieniowania barwy czerwonej do zielonej. W miarę wzrostu temperatury ten stosunek maleje.

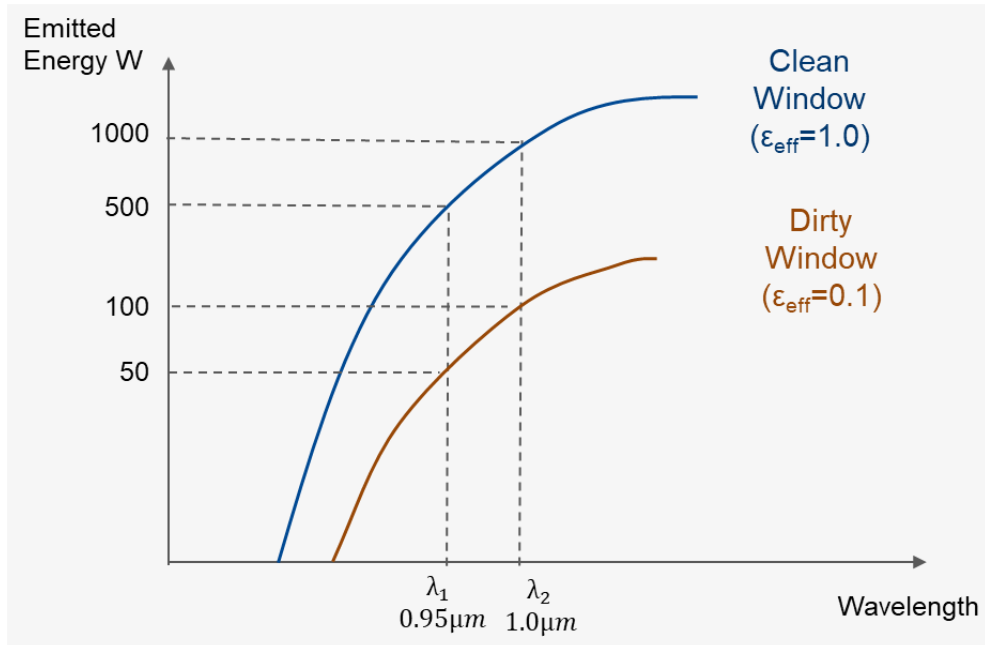


$\lambda_{\text{czerwonej}} - 0,65 \mu\text{m}$
 $\lambda_{\text{zielonej}} - 0,55 \mu\text{m}$

Pirometry dwubarwowe (stosunkowe) (500-3500°C)

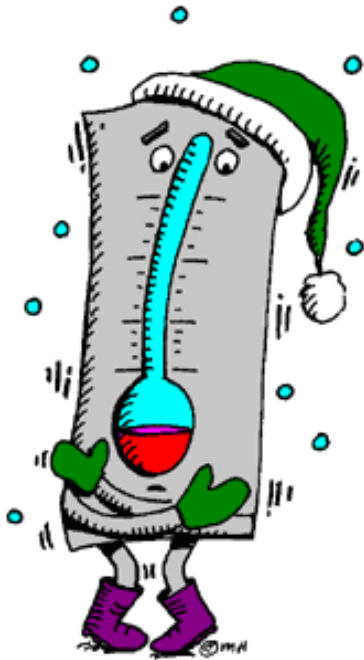
Pomiar temperatury polega na skierowaniu pirometru na ciało badane i ustawieniu w taki sposób filtru szarego aby obserwator widział barwę szarą, utworzoną z dwóch dopełniających się barw przy równości natężeń.

Jest to jedyny pirometr nieczuły na ciała obce (kurz, dym, para wodna) występujące na drodze pomiaru.



$$\frac{W_2(\lambda_2)}{W_1(\lambda_1)} = \frac{1000 \text{ energy units}}{500 \text{ energy units}} = 2 \rightarrow 1500^\circ\text{C}$$

$$\frac{W_2(\lambda_2)}{W_1(\lambda_1)} = \frac{100 \text{ energy units}}{50 \text{ energy units}} = 2 \rightarrow 1500^\circ\text{C}$$



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!