POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI

Politechnika Lubelska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EMST

Semestr letni

Wykład nr 6, 7

Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał te udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nieelektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nieelektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium.

Na kolokwium obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Tematyka wykładu

Promieniowanie temperaturowe

Prawa fizyczne opisujące zjawiska promieniowania termicznego

Zasada pomiarów pirometrycznych

Konstrukcje pirometrów

Termografia i kamery termowizyjne

Promieniowanie termiczne

Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, zwane promieniowaniem cieplnym.

Promieniowanie cieplne ma ciągły zakres długości fali, jednak dla spotykanych w praktyce temperatur, maksimum energii tego promieniowania przypada na przedział długości fali zwany promieniowaniem podczerwonym.

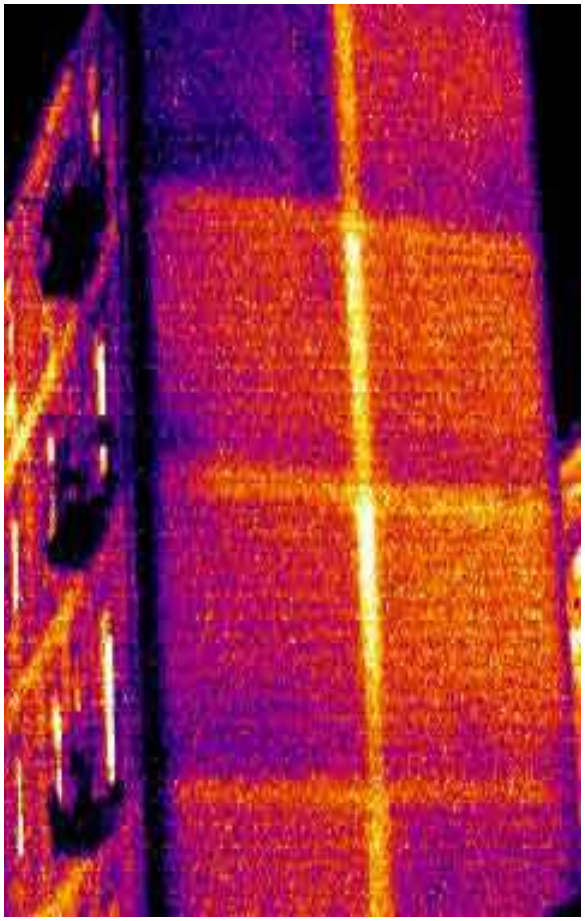
Wykorzystując znane prawa rządzące zjawiskami promieniowania cieplnego budowane są urządzenia umożliwiające bezstykowy (na odległość) pomiar temperatury, zwane pirometrami.

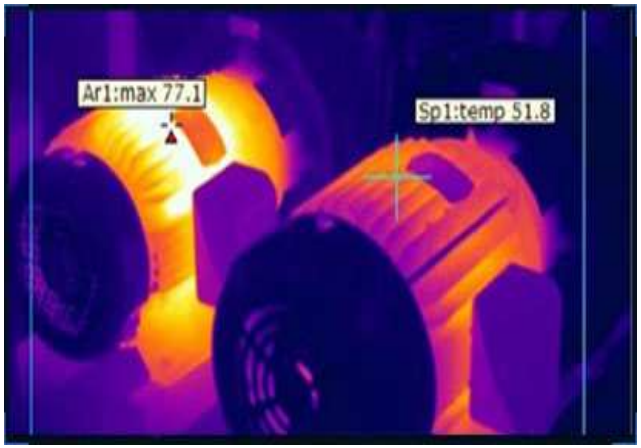
Pirometr

Pirometr - przyrząd pomiarowy służący do bezdotykowego pomiaru temperatury powierzchni ciała. Działa w oparciu o analizę promieniowania cieplnego emitowanego przez badane ciało. Charakterystyczną cechą pirometru i jego podstawową zaletą jest brak zakłócającego wpływu na temperaturę badanego obiektu.

Termografia (termowizja)

Termografia - proces obrazowania pola temperatury na powierzchni ciała w paśmie podczerwieni (od ok. 0,9 do 14 μm).





Promieniowanie elektromagnetyczne – podział na zakresy

$\lambda < 10^{-5}$ μm - promieniowanie kosmiczne (gamma)

10^{-5} μm $< \lambda < 10^{-2}$ μm - promieniowanie X (Roentgena)

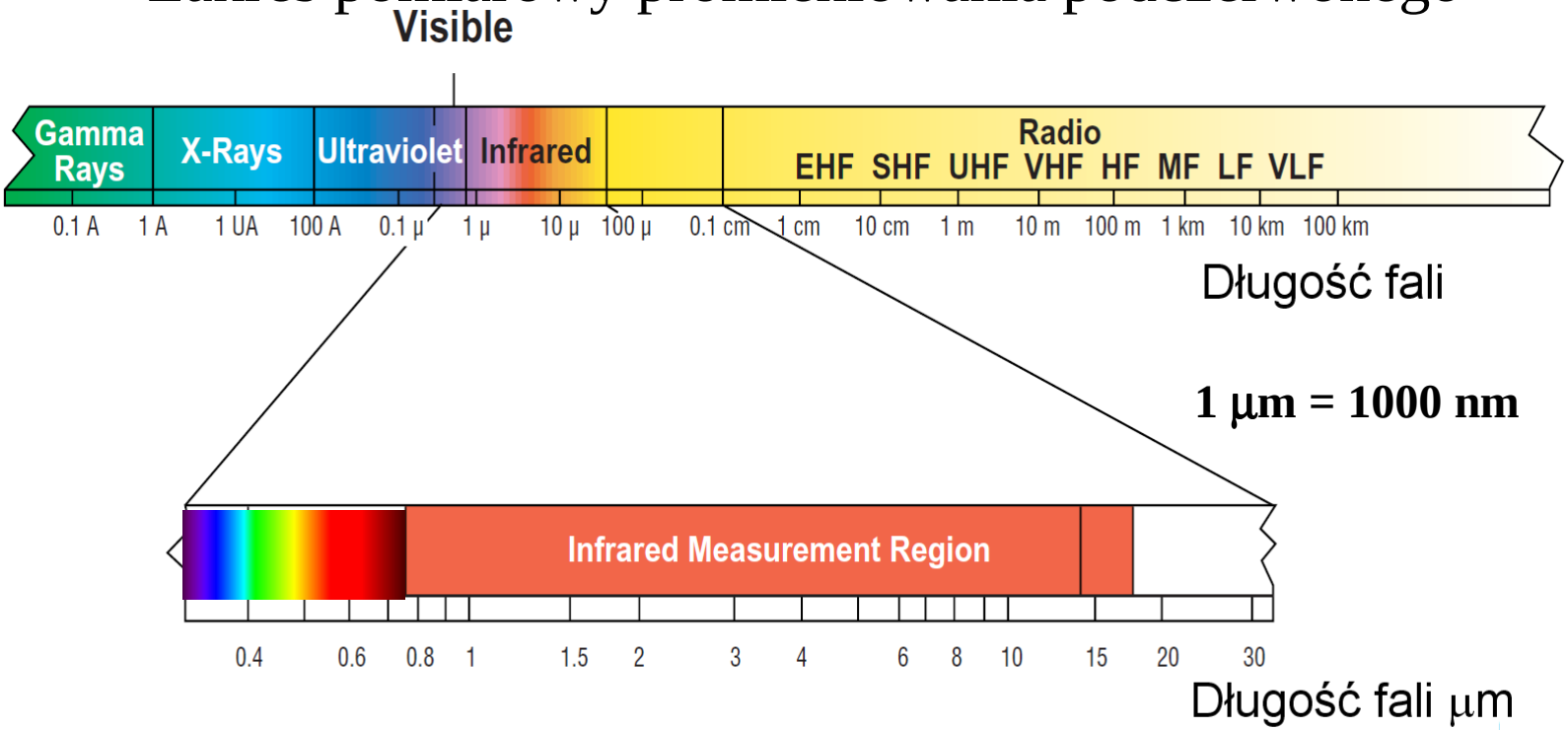
10^{-2} μm $< \lambda < 0{,}75$ μm - promieniowanie ultrafioletowe (UV)

0,35 μm $< \lambda <$ 0,75 μm - promieniowanie widzialne

0,75 μm $< \lambda < 10^{3}$ μm - promieniowanie podczerwone (IR)

10^{3} μm $< \lambda$ - promieniowanie radiowe

Zakres pomiarowy promieniowania podczerwonego



1 µm = 1000 nm

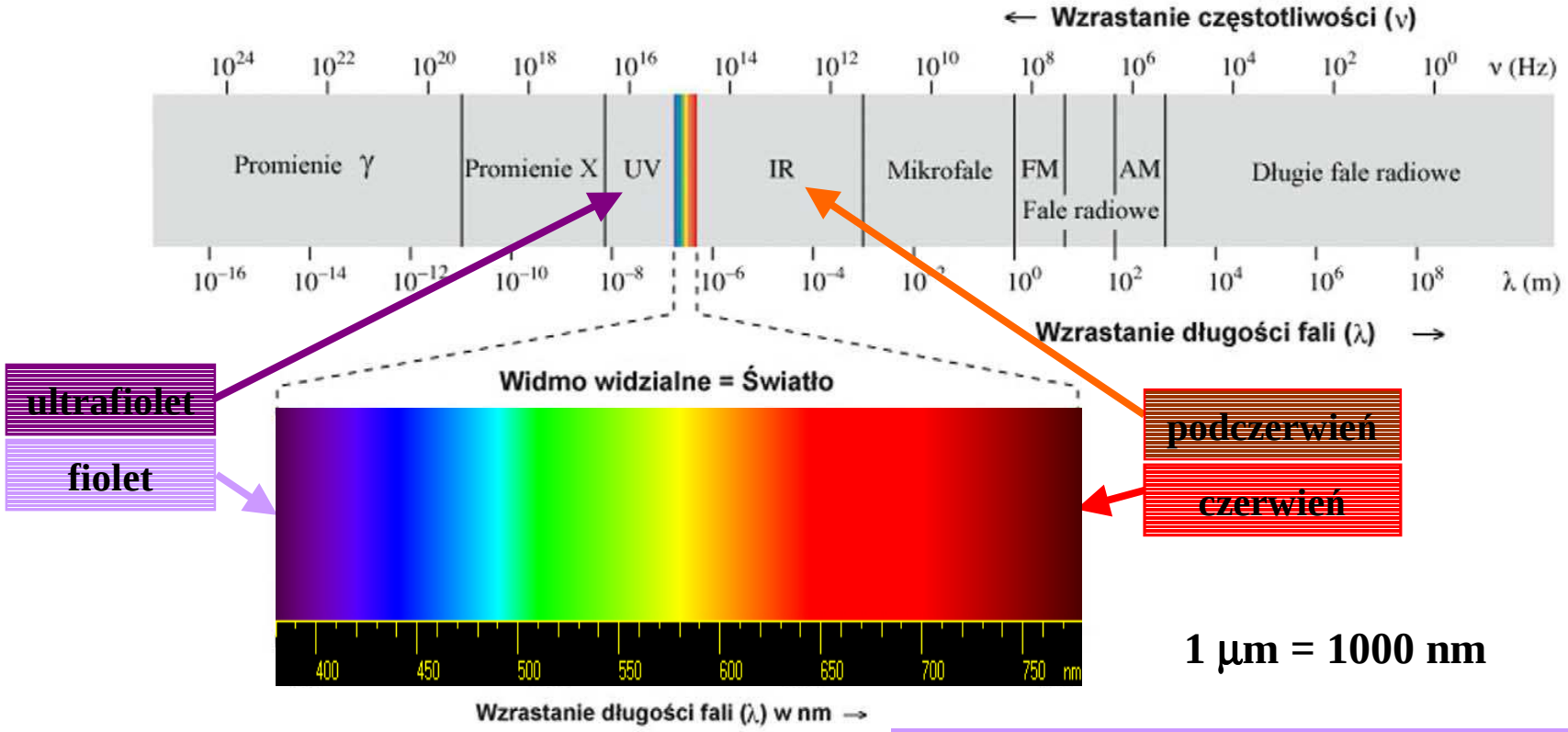
Zakres pomiarowy podczerwieni obejmuje tylko mały zakres długości fal λ od 0,75 µm do 15 µm, w którym wyróżnia się trzy podzakresy:

0,75 µm < λ < 3 µm - bliska podczerwień

3 µm < λ < 6 µm - średnia podczerwień

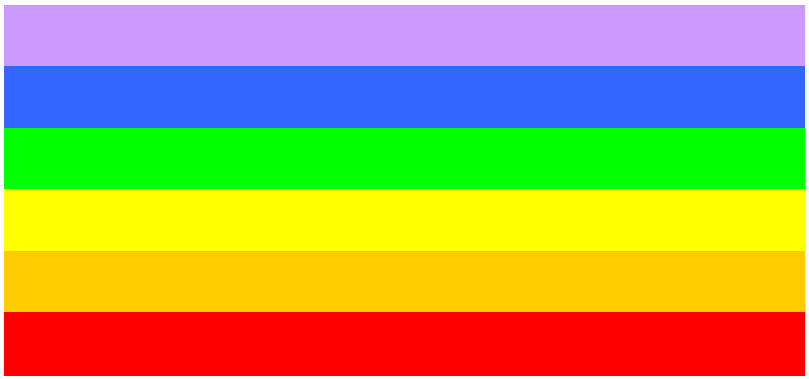
6 µm < λ < 15 µm - daleka podczerwień

Promieniowanie widzialne - światło



1 μm = 1000 nm

380 - 436 nm fiolet,
436 - 495 nm niebieski,
495 - 566 nm zielony,
566 - 589 nm żółty (żółty),
589 - 627 nm pomarańczowy,
627 - 780 nm czerwony.

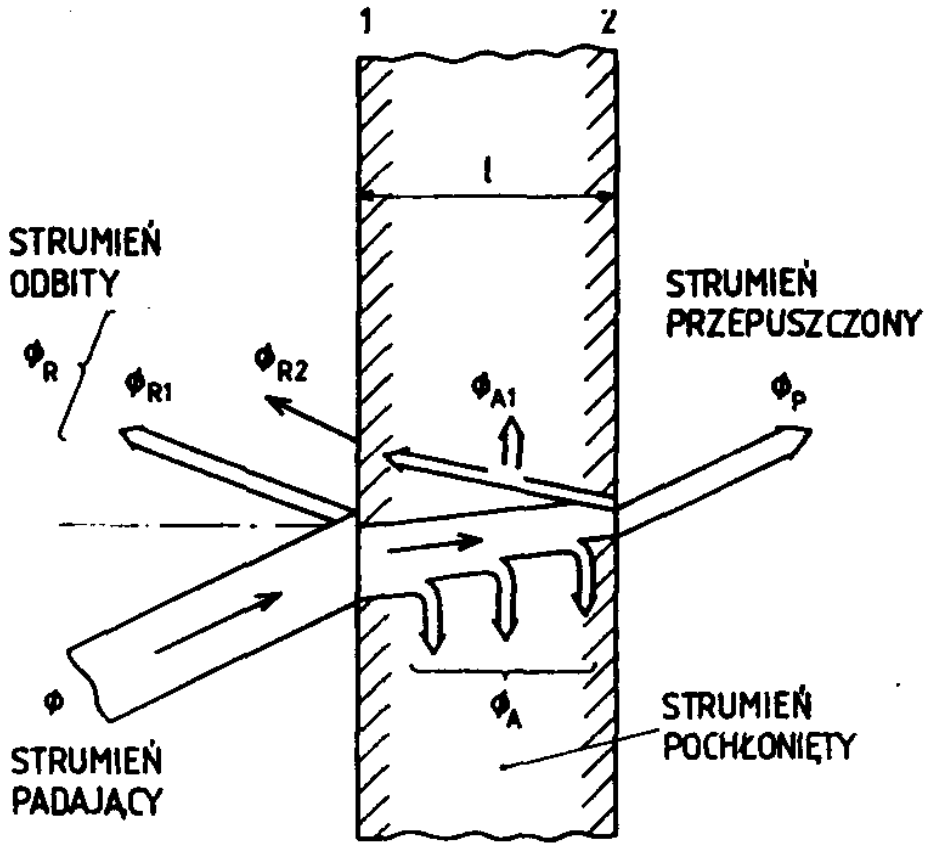


Absorpcja, refleksja i przenikanie promieniowania

W każdym ciele fizycznym, do którego dociera promieniowanie, zachodzą trzy zjawiska:

1. Absorpcja – pochłanianie energii i zamiana go na ciepło, które powyższa temperaturę ciała,
2. Refleksja – odbicie promieniowania od powierzchni i struktur wewnętrznych ciała w taki sposób, że promieniowanie zmienia kierunek i rozprasza się w otoczeniu,
3. Przenikanie – przejście promieniowania przez ciało bez zmiany kierunku.

Strumień pochłonięty, odbity i przepuszczony



Φ_{R2} , Φ_{A1} – SKŁADOWE WTÓRNE

Współczynnik absorpcji, refleksji i przenikania

Współczynnik absorpcji ***a***:

$$a = \frac{\Phi_A}{\Phi}, \; a \leq 1$$

Współczynnik refleksji ***r***:

$$r = \frac{\Phi_R}{\Phi}, \; r \leq 1$$

Współczynnik przepuszczania ***p***:

$$p = \frac{\Phi_P}{\Phi}, \; p \leq 1$$

Wszystkie mniejsze od jedności !

Ciała doskonale czarne, białe i przeźroczyste

Zależnie od wartości współczynników ***a***, ***r*** i ***p*** rozróżniamy następujące, szczególne przypadki:

$\boldsymbol{a} = 1, \boldsymbol{r} = \boldsymbol{p} = 0$ – ciało jest ciałem doskonale czarnym,

$\boldsymbol{r} = 1, \boldsymbol{a} = \boldsymbol{p} = 0$ – ciało jest ciałem doskonale białym,

$\boldsymbol{p} = 1, \boldsymbol{a} = \boldsymbol{r} = 0$ – ciało jest ciałem doskonale przeźroczystym.

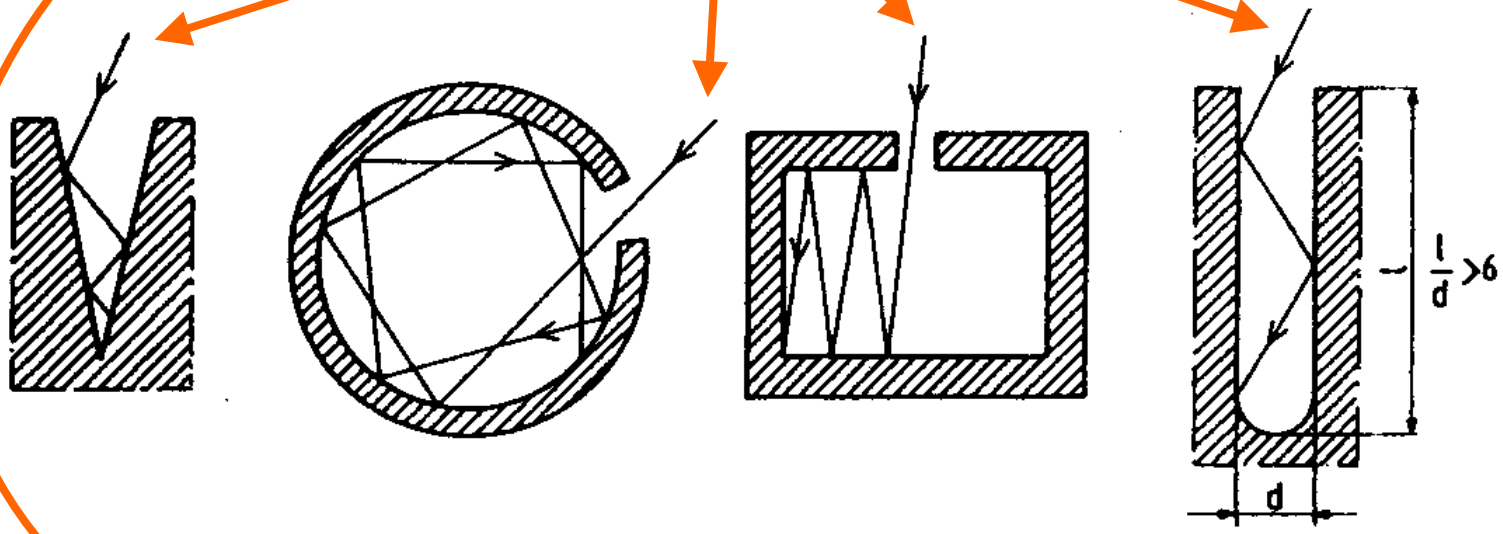
W każdym przypadku, zawsze suma wszystkich trzech współczynników jest równa jedności:

$$\boldsymbol{a} + \boldsymbol{r} + \boldsymbol{p} = 1$$

W opisie zjawisk fizycznych szczególne znaczenie ma **ciało doskonale czarne**, które w całości pochłania padające na nie promieniowanie.

Model ciała doskonale czarnego

padający strumień w całości zostaje pochłonięty



$\boldsymbol{a} = 1, \boldsymbol{r} = \boldsymbol{p} = 0$ – ciało doskonale czarne

Promieniowanie własne ciała – ogólne właściwości

1. **Każde ciało** posiadające temperaturę powyżej zera bezwzględnego jest źródłem promieniowania cieplnego.
2. **Moc** promieniowania cieplnego **zależy od temperatury** ciała, im wyższa temperatura ciała tym promieniuje ono z większą mocą.
2. Promieniowanie cieplne obejmuje **wszystkie** zakresy długości fal, od fal radiowych aż do promieniowania kosmicznego.
4. Moc promieniowania cieplnego jest jednak **różna** dla różnych długości fal.
5. W zakresie długości fal bardzo **długich** i bardzo **krótkich** moc promieniowania jest **niewielka**.
6. Dla temperatur poniżej kilku tysięcy K **najwięcej mocy** wypromieniowywanej jest **w zakresie podczerwieni**.

Natężenie promieniowania - emitancja

Miarą ilości wypromieniowanej przez ciało energii w jednostce czasu (mocy) jest **emitancja,** czyli **natężenie promieniowania *M***:

$$M = \frac{dP}{dA} \qquad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$$

P–moc promieniowania, w watach **W**,

A–powierzchnia emitująca promieniowanie, w **m²**

Natężenie promieniowania jest zależne od długości fali λ, definiuje się więc **monochromatyczne natężenie promieniowania** M_λ :

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \qquad \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mu m}$$

Prawo (równanie) Plancka

Rozkład monochromatycznego natężenia promieniowania M_λ dla **ciała doskonale czarnego** opisuje prawo (równanie) **Plancka**:

$$M_\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1}$$

λ–długość fali promieniowania, w **m**,

T–temperatura bezwzględna, w **K**

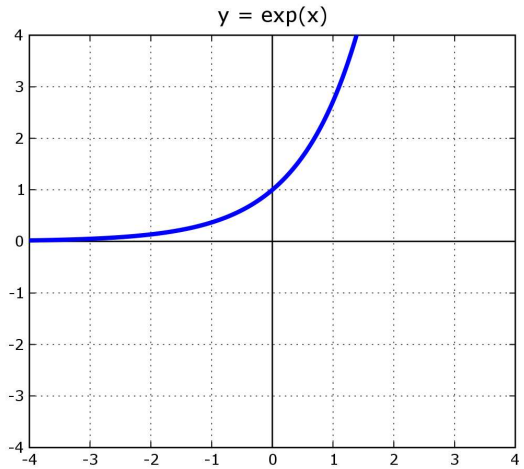
$c_1 = 2\pi hc^2 = 3{,}7415 \cdot 10^{-16}$ **W/m²**

$c_2 = hc^2/k = 1{,}438 \cdot 10^{-2}$ **m·K**

c-prędkość światła w próżni

h-stała Plancka

k-stała Boltzmana

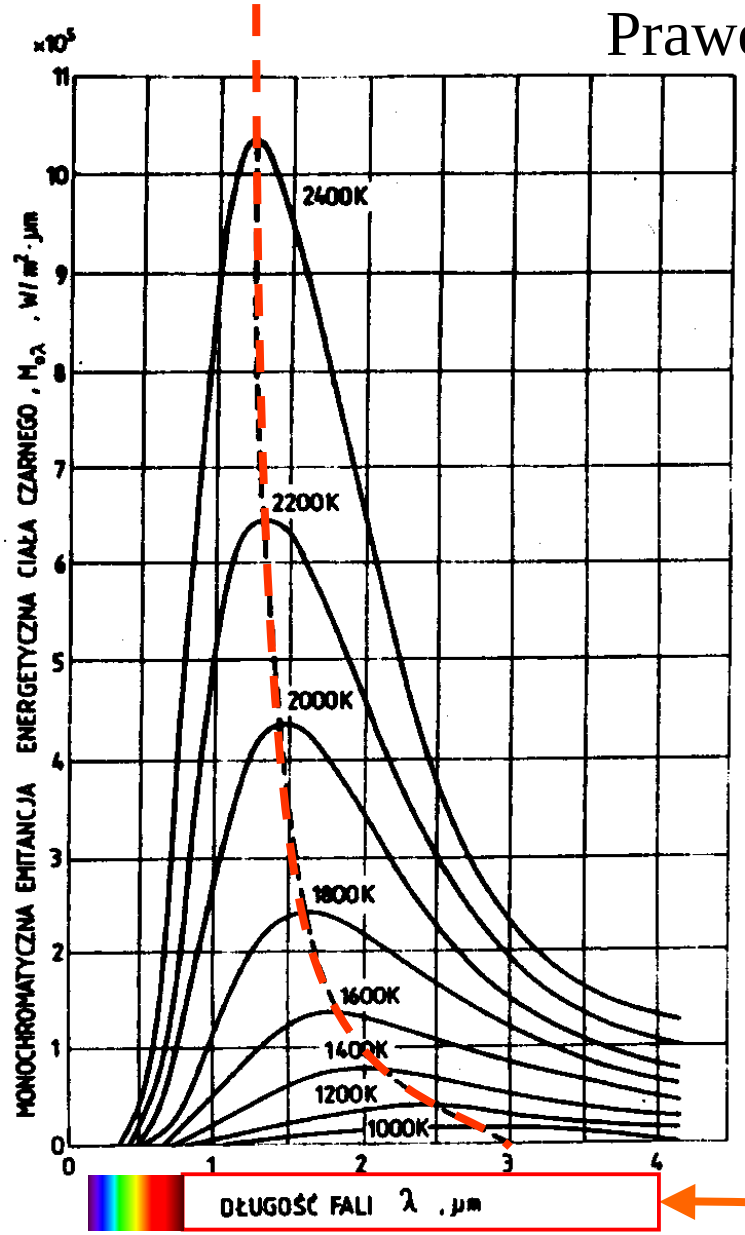


Prawo promieniowania Wiena

Dla małych wartości iloczynu $\lambda \cdot T$ równanie Plancka upraszcza się do postaci zwanej prawem promieniowania Wiena:

$$M_\lambda \cong \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{c_2}{\lambda T}}$$

Prawo Plancka - wykres



Wzrost temperatury ciała powoduje:

1.przesunięcie maksimum mocy promieniowania w kierunku krótszych fal (prawo przesunięć Wiena).

2.powiększenie pola pod krzywą- zwiększenie całkowitej mocy promieniowania (prawo Stefana-Boltzmana).

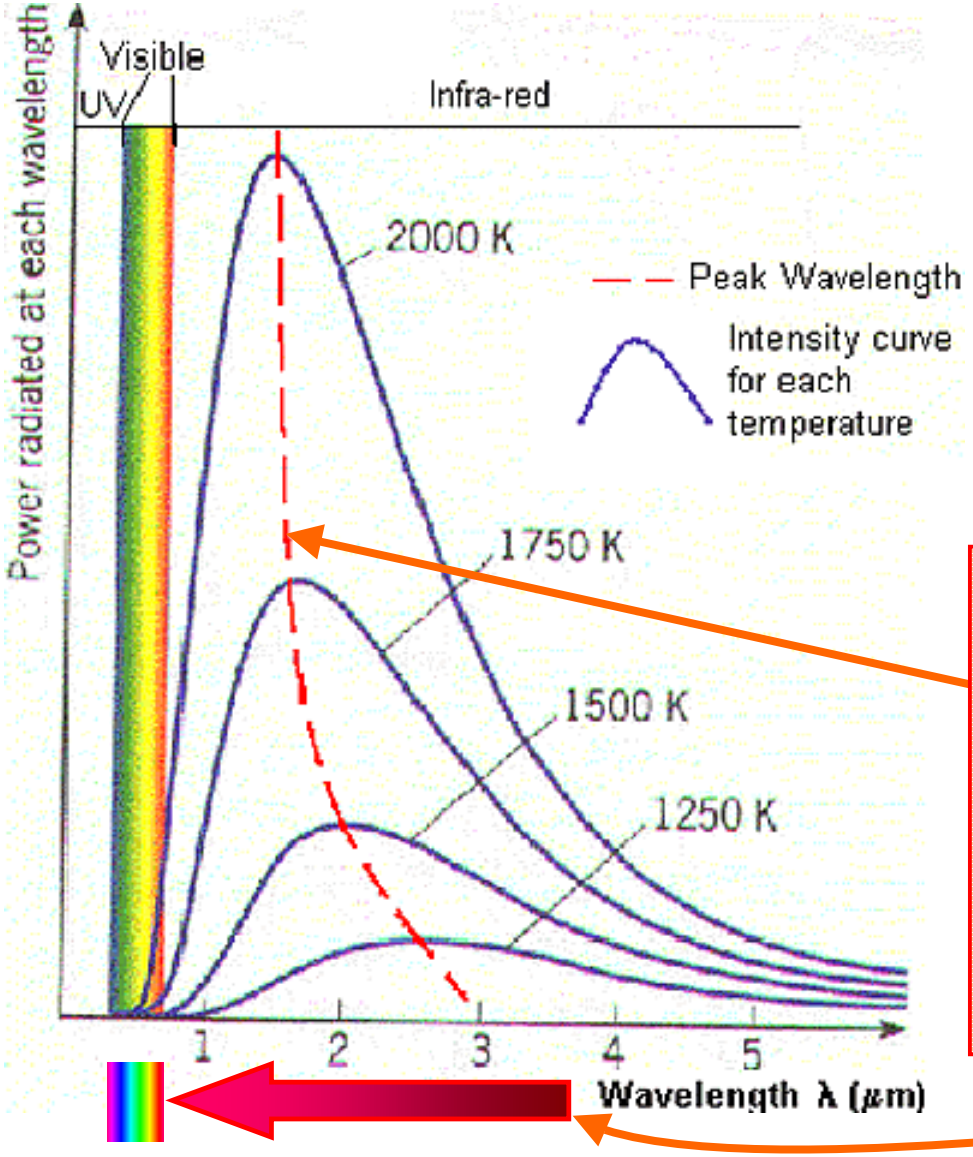
Większość mocy promieniowania przypada na zakres podczerwieni o długości fali kilku mikrometrów.

Prawo przesunięć Wiena

Wyznaczając pochodną funkcji opisanej prawem Wiena względem długości fali λ można wyznaczyć położenie maksimum wykresu natężenia promieniowania. Prawo przesunięć Wiena mówi, że iloczyn temperatury ciała $\boldsymbol{T}$ i długości fali λ_{max} dla której występuje maksimum charakterystyki promieniowania jest wartością stałą:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2896 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{K}$$

Prawo przesunięć Wiena - wykres



Wierzchołki charakterystyki promieniowania przy wzroście temperatury ciała przesuwają się w stronę krótszych fal, tzn. z podczerwieni do światła widzialnego

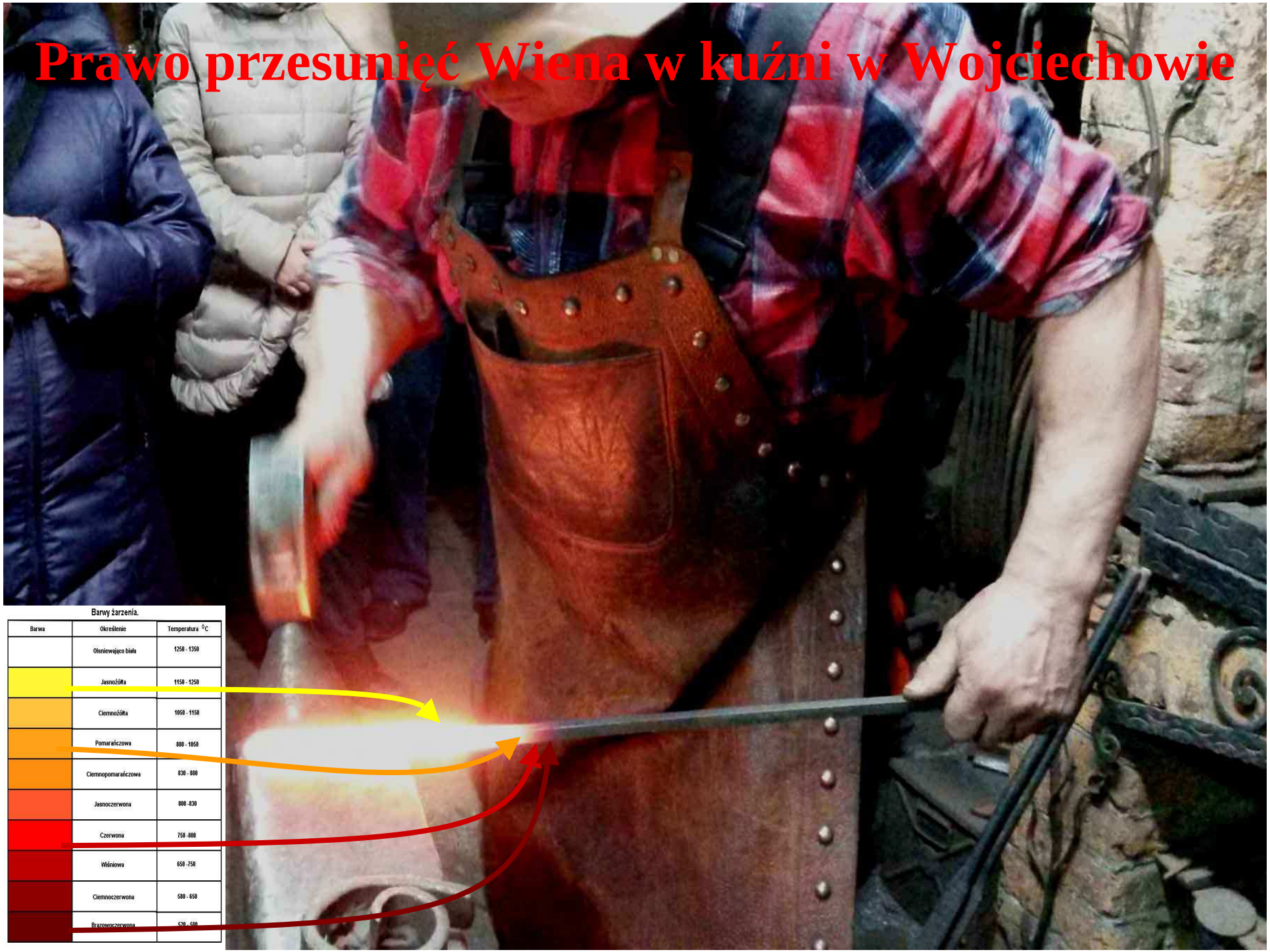
Subiektywny pomiar w zakresie widzialnym – barwy żarzenia

Barwy żarzenia.

Barwa	Określenie	Temperatura ^{0}C
	Olsniewająco biała	1250 - 1350
	Jasnożółta	1150 - 1250
	Ciemnożółta	1050 - 1150
	Pomarańczowa	880 - 1050
	Ciemnopomarańczowa	830 - 880
	Jasnoczerwona	800 -830
	Czerwona	750 -800
	Wiśniowa	650 -750
	Ciemnoczerwona	580 - 650
	Brązowoczerwona	520 - 580

Barwy żarzenia u kowala w Wojciechowie

Prawo przesunięć Wiena w kuźni w Wojciechowie



Barwy żarzenia.

Barwa	Określenie	Temperatura °C
	Olsniewająco biała	1250 - 1350
	Jasnożółta	1150 - 1250
	Ciemnożółta	1050 - 1150
	Pomarańczowa	880 - 1050
	Ciemnopomarańczowa	830 - 880
	Jasnoczerwona	800 -830
	Czerwona	750 -800
	Wiśniowa	650 -750
	Ciemnoczerwona	580 - 650
	Brązowoczerwona	520 - 580

Prawo Stefana-Boltzmana

Całkowita moc promieniowania $\boldsymbol{P_C}$ ciała doskonale czarnego jest równa polu powierzchni pod krzywą opisaną prawem Wiena.

Może być więc obliczana na podstawie całki dla wszystkich długości fali λ od 0 do ∞:

$$P_C = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = \sigma_0 T^4$$

$\boldsymbol{\sigma_0}$ – stała Stefana-Boltzmana:

$$\sigma_0 = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} = 5{,}6697 \cdot 10^{-8} \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 K^4}}$$

Prawo Stefana-Boltzmana mówi, że całkowita moc promieniowania $\boldsymbol{P_C}$ ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej $\boldsymbol{T}$.

Prawo Stefana-Boltzmana – uproszczona postać

Prawo Stefana-Boltzmana dla celów praktycznych zazwyczaj przedstawia się w postaci:

$$P_C = \sigma_0' \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$\sigma`_0$ – techniczna stała promieniowania ciała czarnego:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5{,}6697 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4}$$

Trzy prawa fizyczne przydatne w pirometrii – podsumowanie

1. **Prawo Plancka** opisujące rozkład monochromatycznego natężenia promieniowania $\boldsymbol{M_\lambda}$ dla ciała doskonale czarnego (po uproszczeniu przekształca się w **prawo promieniowania Wiena**).

2. **Prawo przesunięć Wiena** mówiące o stałej wartości iloczynu temperatury ciała $\boldsymbol{T}$ i długości fali $\boldsymbol{\lambda_{max}}$ dla której występuje maksimum charakterystyki promieniowania, otrzymujemy je z prawa Plancka poprzez obliczenie pochodnej względem długości fali $\boldsymbol{\lambda}$ i przyrównanie jej do zera (wyznaczanie maksimum funkcji).

3. **Prawo Stefana-Boltzmana** mówiące że całkowita moc promieniowania $\boldsymbol{P_C}$ ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej $\boldsymbol{T}$, otrzymujemy je po scałkowaniu równania Plancka (powierzchnia pod wykresem).

Problemy w pomiarach pirometrycznych

Są dwa problemy:

1. Ciała rzeczywiste **nie są ciałami doskonale czarnymi**, zazwyczaj mogą być uznane za ciała szare,

2. Podczas wykonywania pomiarów z pewnej odległości **promieniowanie jest tłumione przez atmosferą ziemską.**

Promieniowanie ciała rzeczywistego

Ciało rzeczywiste wypromieniuje mniej energii w stosunku do ciała doskonale czarnego, zależnie od długości fali λ. Właściwość tę opisuje **współczynnik emisyjności monochromatycznej ε_λ** :

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_{S\lambda}}{M_\lambda}$$

Współczynnik emisyjności monochromatycznej (lub krócej **emisyjność monochromatyczna)** ε_λ jest to stosunek natężenia promieniowania ciała rzeczywistego $\boldsymbol{M_{S\lambda}}$ przy długości fali λ do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego $\boldsymbol{M_\lambda}$, przy tej samej długości fali.

Ciało szare

Jeśli w całym zakresie widma (czyli dla wszystkich długości fali λ od 0 do ∞) współczynnik emisyjności monochromatycznej ε_λ ma wartość stałą :

$$\varepsilon_\lambda = \text{const},$$

to takie ciało nazywamy **ciałem szarym**.

Stosunek całkowitej mocy wypromieniowanej przez ciało szare $\boldsymbol{P_S}$ do całkowitej mocy wypromieniowanej przez ciało doskonale czarne $\boldsymbol{P_C}$ w tej samej temperaturze nazywamy **współczynnikiem emisyjności** (lub krócej **emisyjnością)** ciała szarego $\boldsymbol{\varepsilon}$:

$$\varepsilon = \frac{P_S}{P_C} = \frac{\int_0^\infty M_{S\lambda} d\lambda}{P_C}$$

Emisyjność ciał szarych spotykanych w praktyce

Material	Emissivity*
Aluminum, polished	0.05
Aluminum, rough surface	0.07
Aluminum, strongly oxidized	0.25
Asbestos board	0.96
Asbestos fabric	0.78
Asbestos paper	0.94
Asbestos slate	0.96
Brass, dull, tarnished	0.22
Brass, polished	0.03
Brick, common	0.85
Brick, glazed, rough	0.85
Brick, refractory, rough	0.94
Bronze, porous, rough	0.55
Bronze, polished	0.10
Carbon, purified	0.80
Cast iron, rough casting	0.81
Cast iron, polished	0.21
Charcoal, powdered	0.96
Chromium, polished	0.10
Clay, fired	0.91
Concrete	0.92
Copper, polished,	0.01
Copper, commercial burnished	0.07
Copper, oxidized	0.65
Copper, oxidized to black	0.88
Electrical tape, black plastic	0.95
Enamel **	0.90
Formica	0.93
Frozen soil	0.93
Glass	0.92
Glass, frosted	0.96
Gold, polished	0.02
Ice	0.97
Iron, hot rolled	0.77
Iron, oxidized	0.74
Iron, sheet galvanized, burnished	0.23
Iron, sheet, galvanized, oxidized	0.28
Iron, shiny, etched	0.16

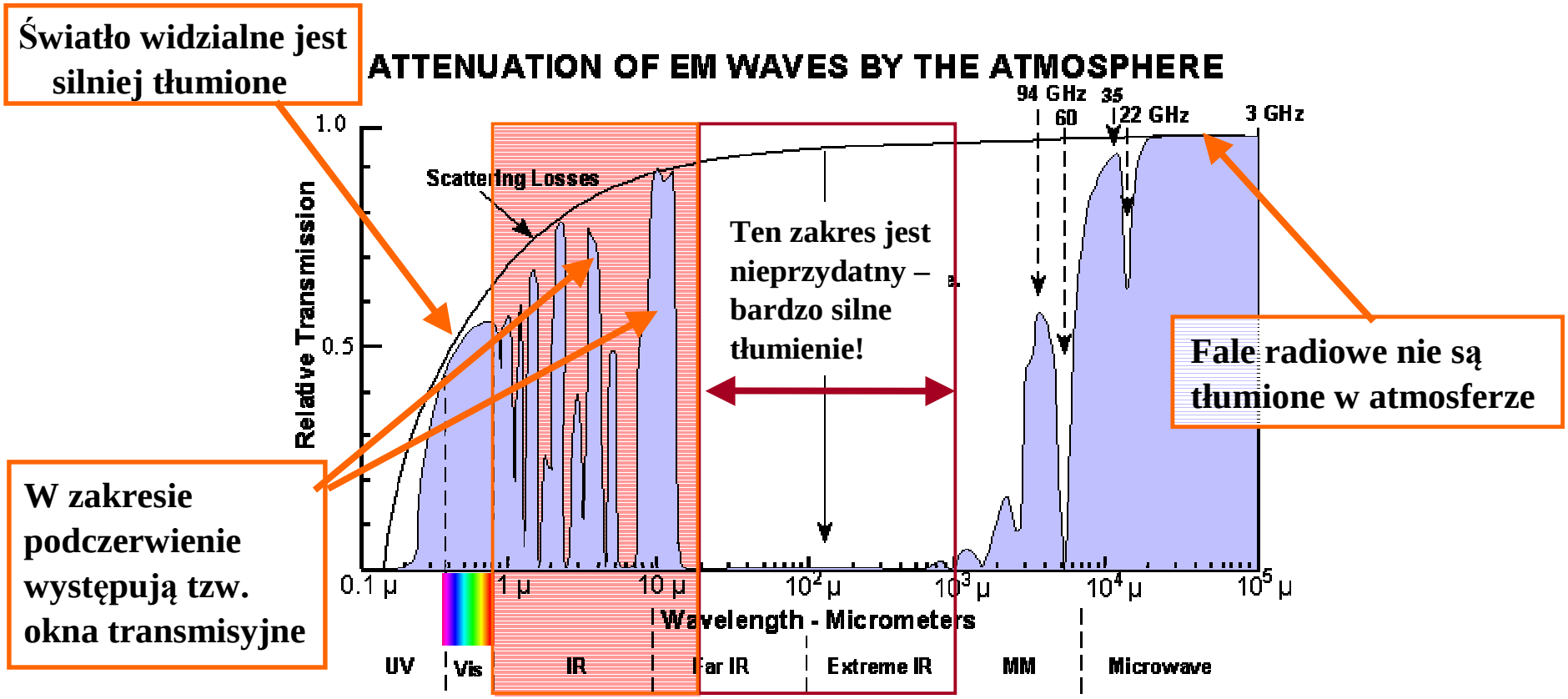
Material	Emissivity*
Iron, wrought, polished	0.28
Lacquer, Bakelite	0.93
Lacquer, black, dull	0.97
Lacquer, black, shiny	0.87
Lacquer, white	0.87
Lampblack	0.96
Lead, gray	0.28
Lead, oxidized	0.63
Lead, red, powdered	0.93
Lead, shiny	0.08
Mercury, pure	0.10
Nickel, on cast iron	0.05
Nickel, pure polished	0.05
Paint, silver finish**	0.31
Paint, oil, average	0.94
Paper, black, shiny	0.90
Paper, black, dull	0.94
Paper, white	0.90
Platinum, pure, polished	0.08
Porcelain, glazed	0.92
Quartz	0.93
Rubber	0.93
Shellac, black, dull	0.91
Shellac, black, shiny	0.82
Snow	0.80
Steel, galvanized	0.28
Steel, oxidized strongly	0.88
Steel, rolled freshly	0.24
Steel, rough surface	0.96
Steel, rusty red	0.69
Steel, sheet, nickelplated	0.11
Steel, sheet, rolled	0.56
Tar paper	0.92
Tin, burnished	0.05
Tungsten	0.05
Water	0.98
Zinc, sheet	0.20

Ważne jest wykończenie powierzchni, a nie tylko rodzaj materiału

Czarna taśma izolacyjna PCV

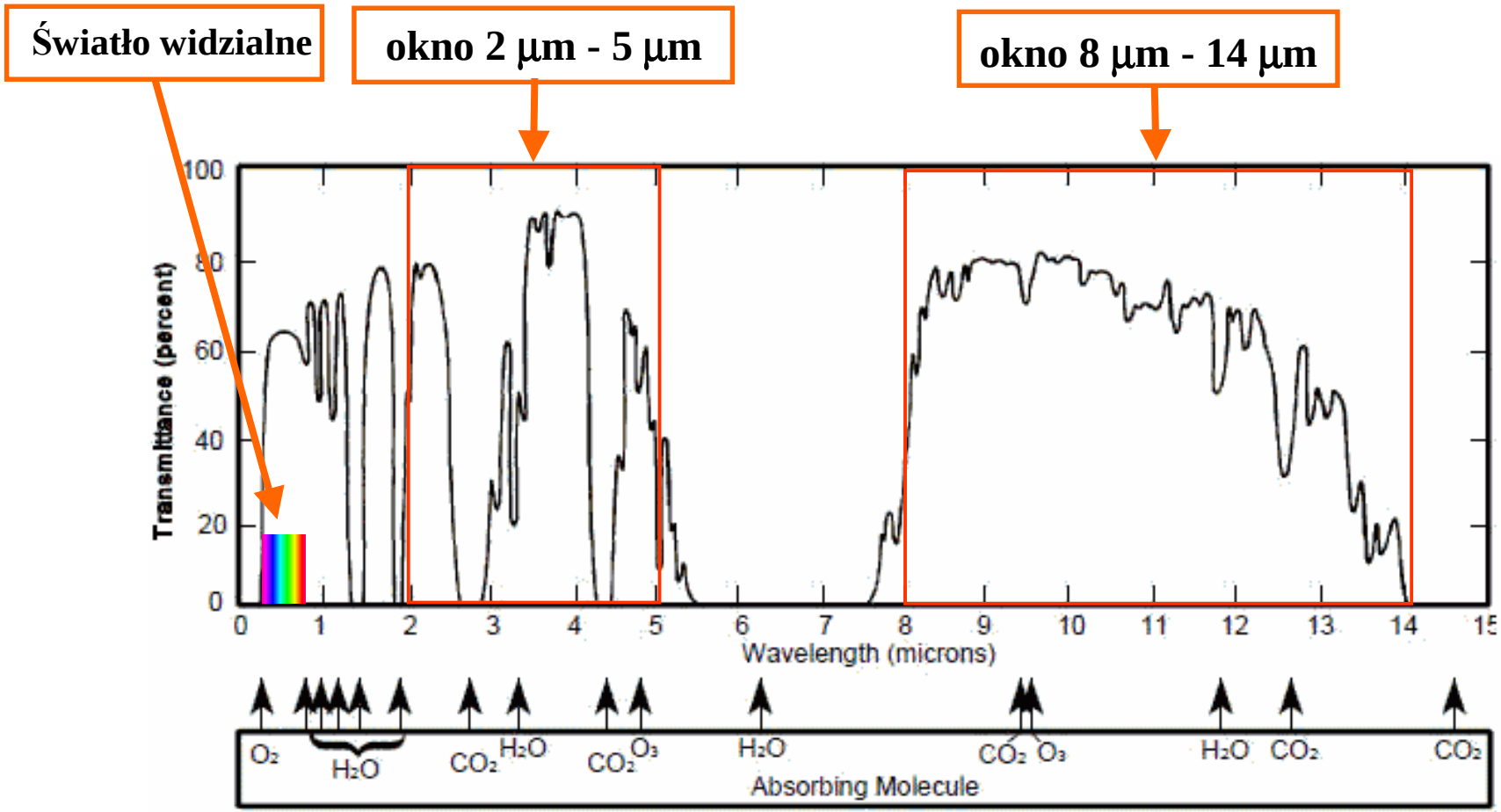
Ciało szare nie koniecznie musi być koloru szarego !

Właściwości transmisyjne atmosfery ziemskiej



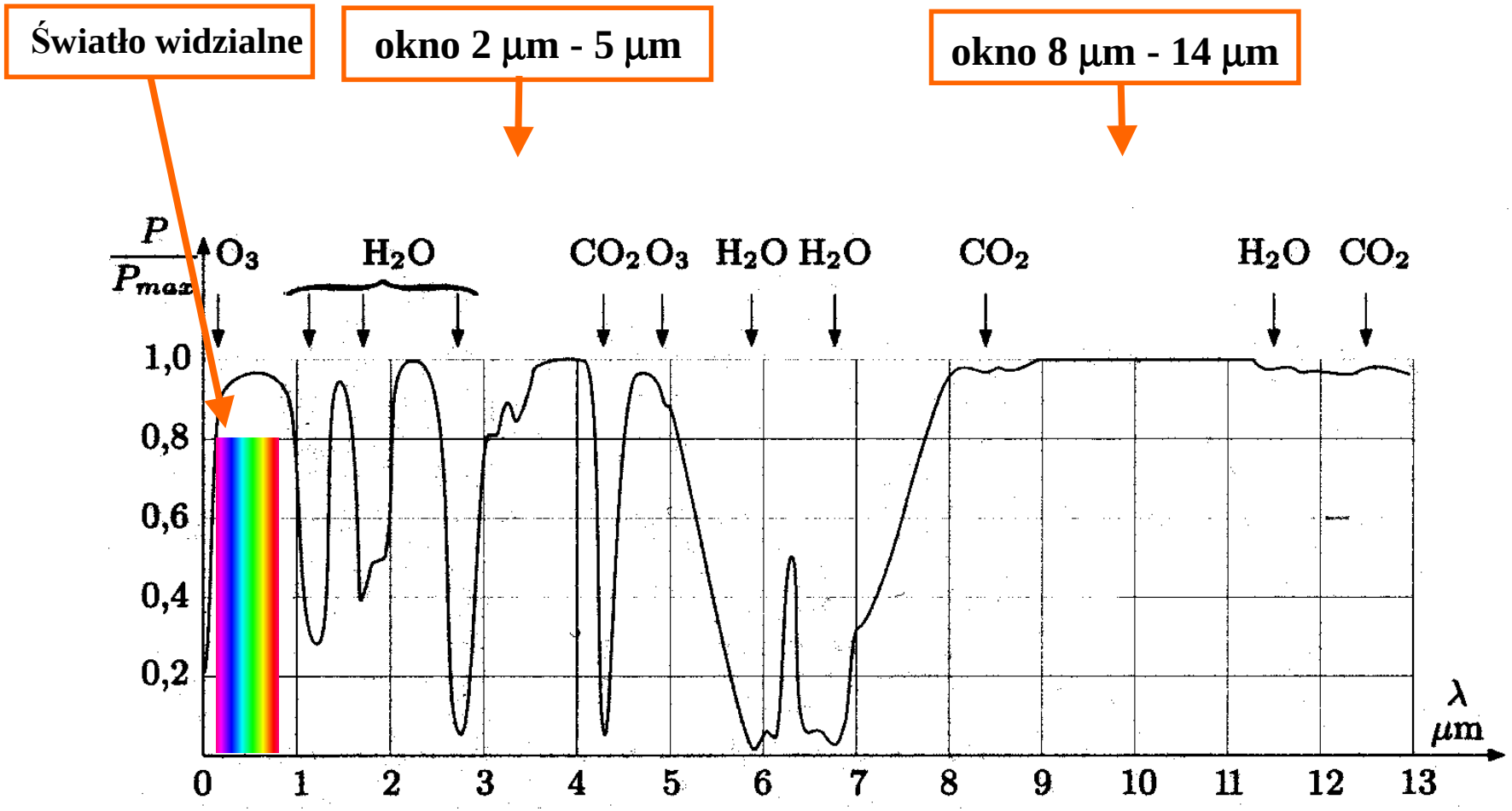
Względna transmisyjność atmosfery ziemskiej na dystansie 1 mili morskiej (1852m) na poziomie morza.

Właściwości toru optycznego w zakresie IR



Okna pomiarowe w zakresie podczerwieni do celów pirometrii, (transmisyjność na dystansie **1 mili morskiej** na poziomie morza).

Właściwości toru optycznego w zakresie IR



Charakterystyka widmowa toru optycznego dla światłą widzialnego podczerwieni w atmosferze ziemskiej na krótkim dystansie **10m**

Rodzaje pirometrów

1. Pirometry całkowitego promieniowania (pirometry radiacyjne), działające w oparciu o prawo Stefana-Boltzmana – całkowita moc wypromieniowana przez ciało jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury.
2. Pirometry monochromatyczne, działające w oparciu o prawo Plancka (Wiena) – monochromatyczna emitancja $\boldsymbol{M_\lambda}$ jest jednoznaczną funkcją temperatury.
3. Pirometry dwubarwowe, działające w oparciu o prawo przesunięć Wiena – wraz ze wzrostem temperatury maksimum energii promieniowania przesuwa się w kierunku krótszych fal, barwa promieniowania zmienia się z czerwieni w kierunku zieleni.
4. Pirometry pasmowe – podobne w działaniu do radiacyjnych, ale pracujące w ograniczonym paśmie długości fali (w jednym oknie).

Pomiar pirometryczny, wymiana energii

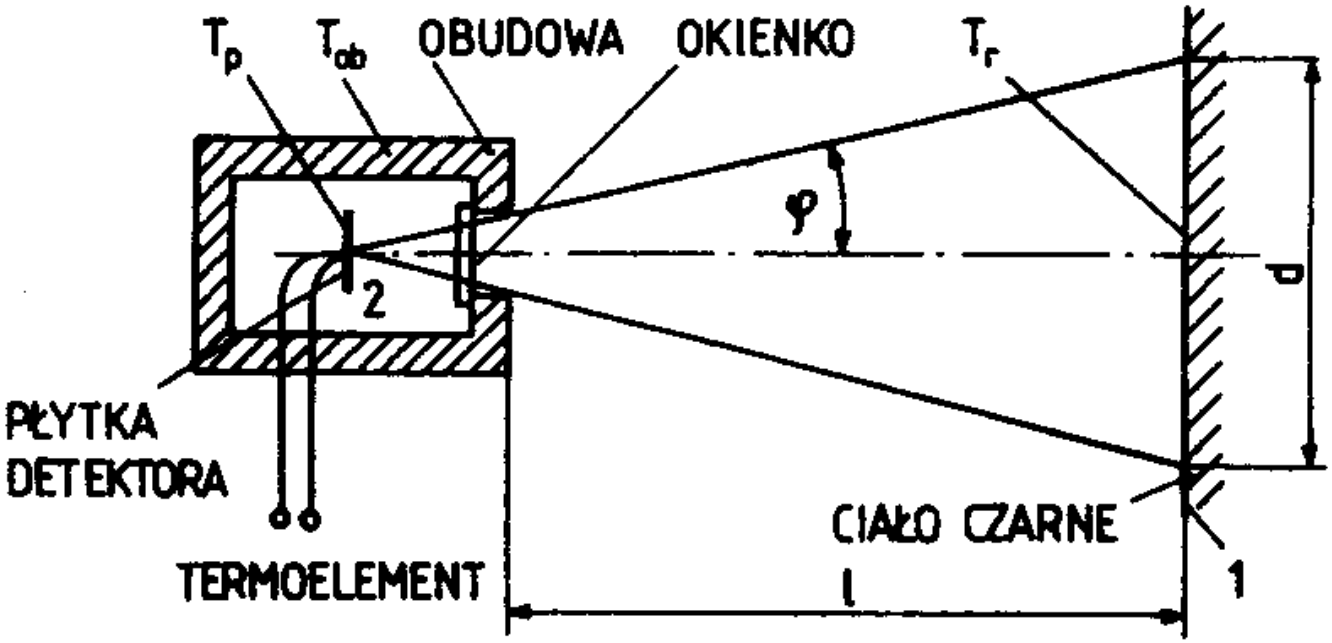
Wymiana energii promieniowania termicznego pomiędzy dwoma płytkami o powierzchni A opisana jest wzorem:

$$Q = \varepsilon_{1-2} \sigma'_O A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1-2}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

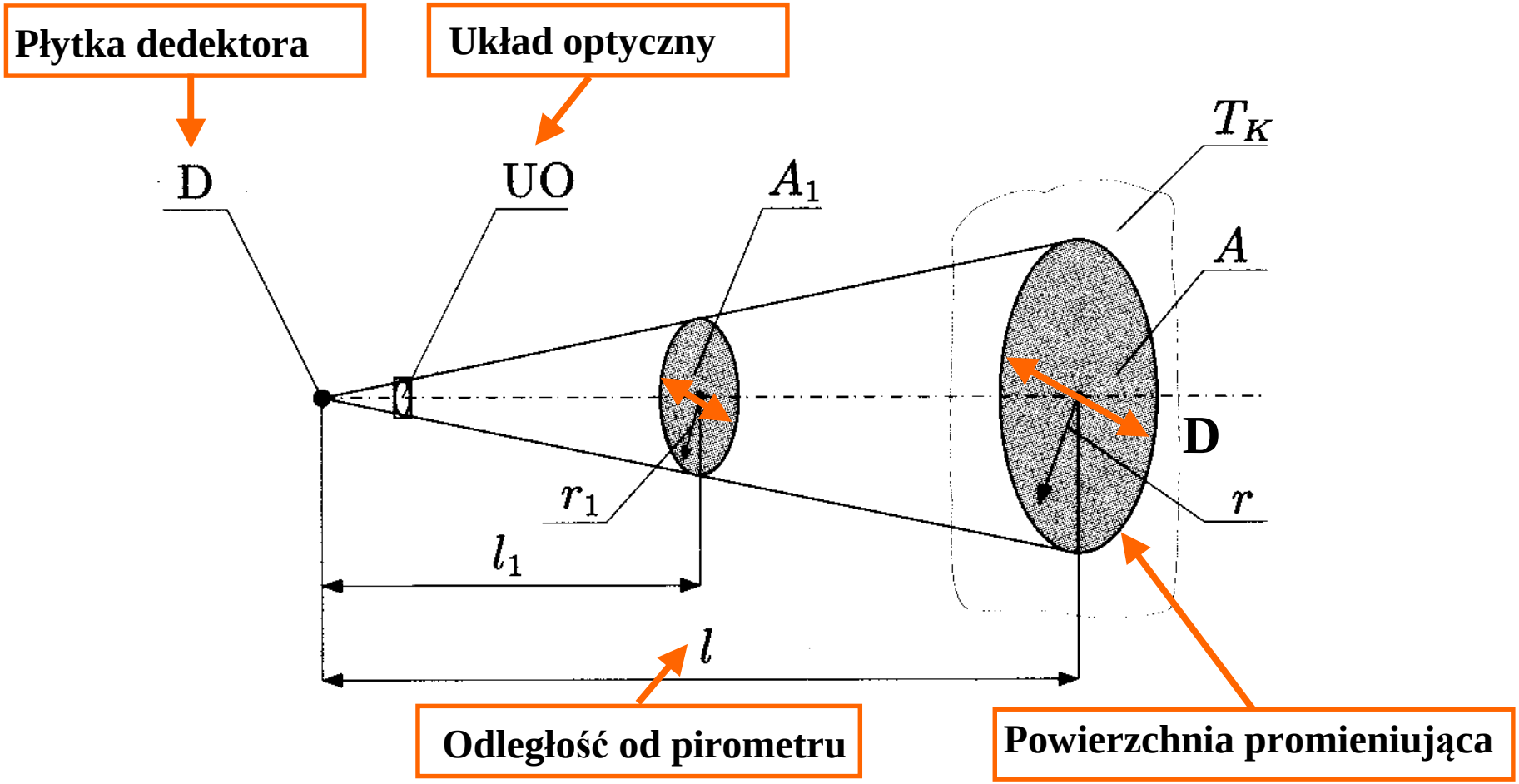
Zależność powyższa stanowi podstawę do budowy pirometrów radiacyjnych (całkowitego promieniowania)

Pirometr radiacyjny, uproszczona konstrukcja



Pirometr radiacyjny — uproszczone przedstawienie konstrukcji

Pirometr radiacyjny, pole widzenia



Pirometr radiacyjny, moc dochodząca do detektora

Moc promieniowana

$$P = M \cdot A = M\pi\, r^2$$

Natężenie promieniowana dochodzące do detektora

$$M_D = \frac{M}{l^2}$$

Moc wydzielona w detektorze

$$P_D = M\,\pi\left(\frac{r}{l}\right)^2 \cdot w$$

Dla innej odległości detektora otrzymamy

$$P_{D1} = M\,\pi\left(\frac{r_1}{l_1}\right)^2 \cdot w$$

Na podstawie twierdzenia Talesa mamy

$$\frac{r}{l} = \frac{r_1}{l_1} = \text{const.}$$

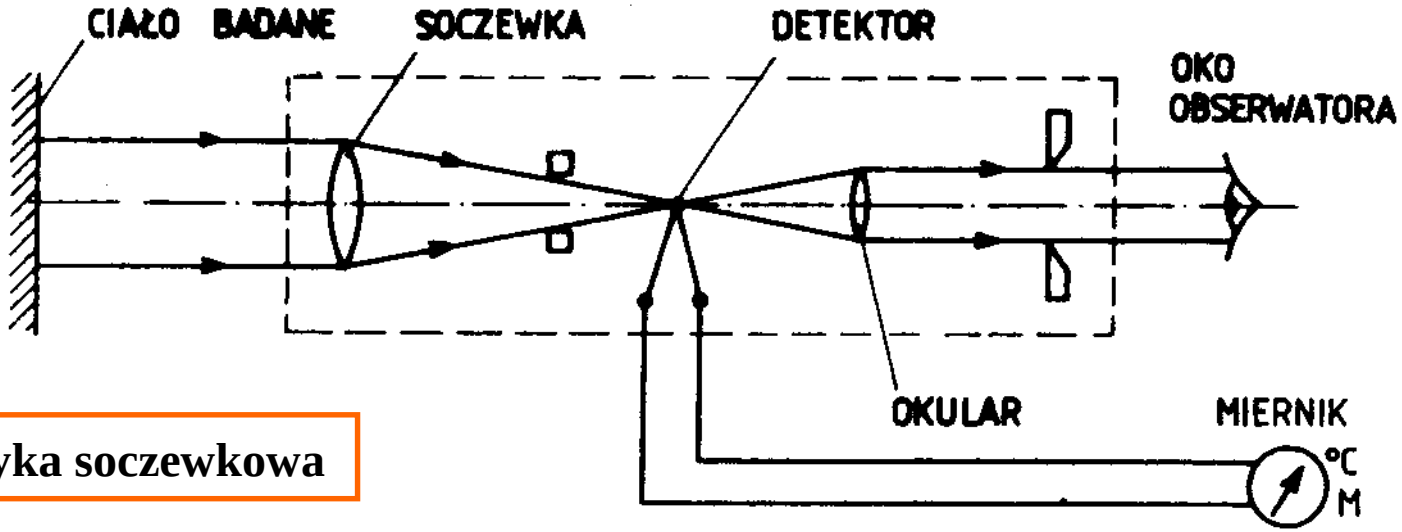
Pirometr radiacyjny, moc dochodząca do detektora c.d.

Ostatecznie → $P_D = P_{D1}$

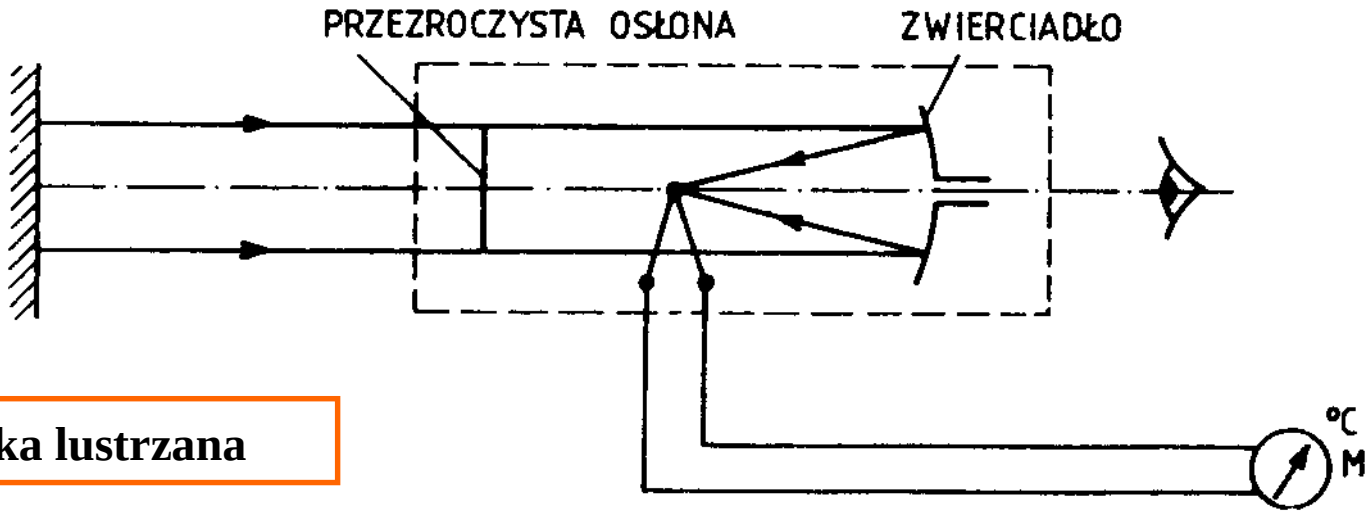
Wniosek:

Moc wydzielona w detektorze **nie zależy od odległości *l*** detektora od ciała promieniującego, pod warunkiem, że pole o powierzchni A w całości leży na promieniującym ciele. Stosunek *l*/*r* (lub *l*/*D*) dla danego typu pirometru nazywany jest **współczynnikiem odległościowym**.

Pirometr radiacyjny, budowa



Optyka soczewkowa



Optyka lustrzana

Pirometr radiacyjny, problemy konstrukcyjne

Występują dwa główne problemy konstrukcyjne pirometrów radiacyjnych:

1. Jaki zastosować detektor reagujący na całe pasmo promieniowania ?

2. Z jakich materiałów wykonać optykę (soczewki), aby było przepuszczane bez tłumienia całe pasmo promieniowania ?

Pirometr radiacyjny, detektory

Detektory termiczne:

-termostosy,

-bolometry.

Detektory fotoelektryczne:

-fotorezystory (PbS, CdS),

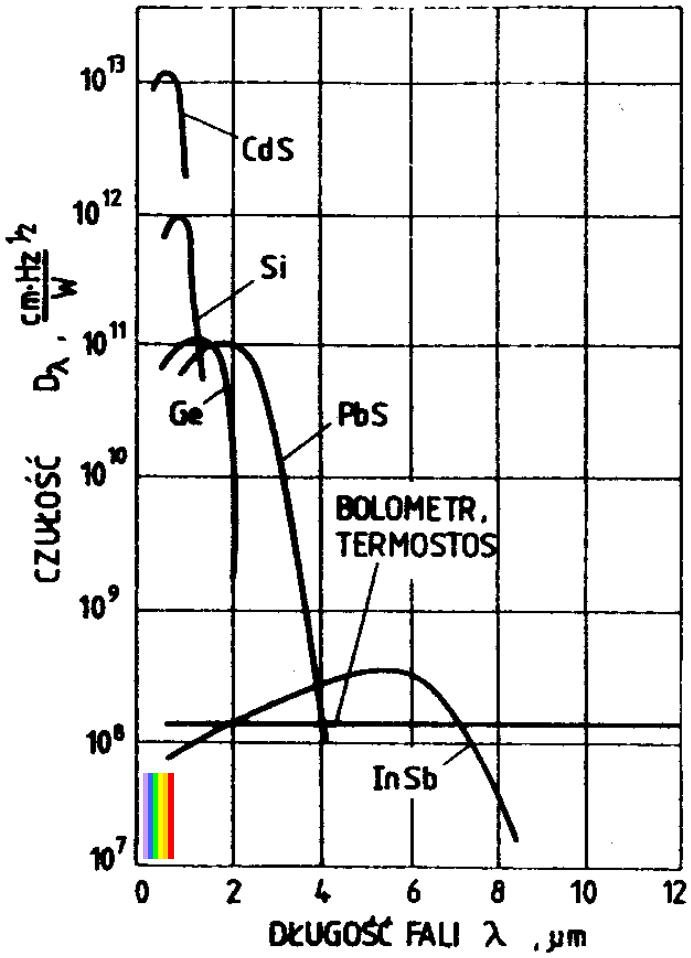
-fotoogniwa (InSb, InAs),

-fotodiody (Ge, Si).

Detektory fotoemisyjne:

-próżniowe,

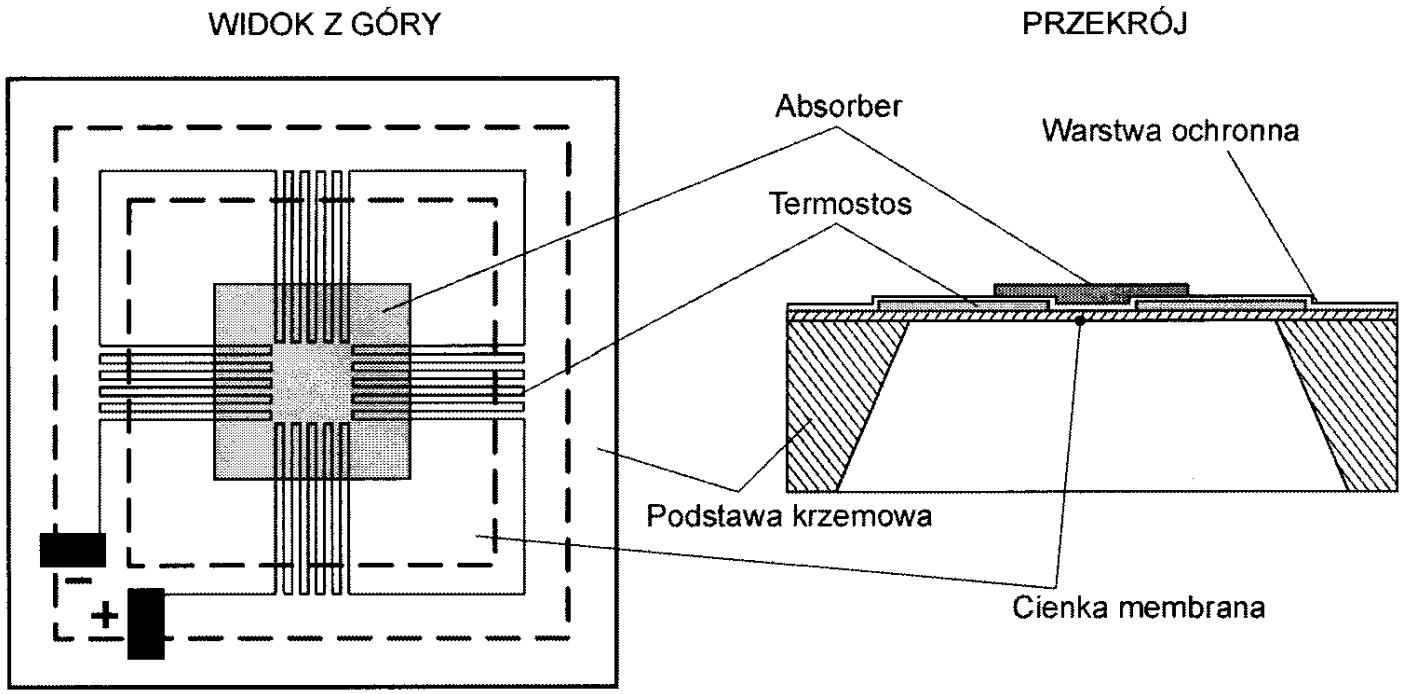
-gazowane.



Czułość widmowa D_λ detektorów

Pirometr radiacyjny, termostos

1. Jaki zastosować detektor reagujący na całe pasmo promieniowania ?



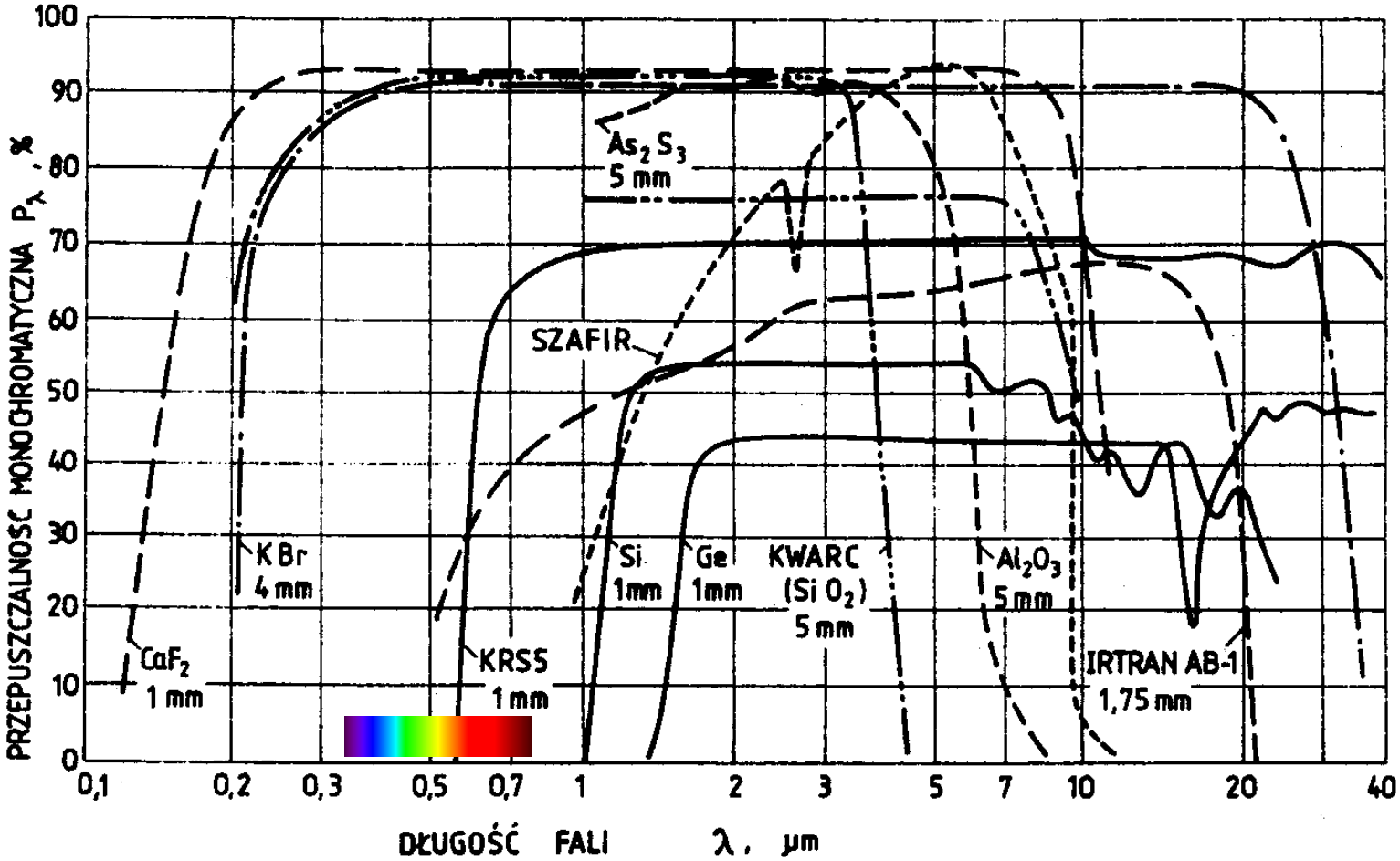
Uproszczona budowa termostosu wykonanego w technologii krzemowej

Pirometry, najczęściej stosowane materiały optyczne

2. Z jakich materiałów wykonać optykę (soczewki), aby było przepuszczane bez tłumienia całe pasmo promieniowania ?

1. Specjalne gatunki szkieł (Pyrex)
2. Szkło fluorytowe (CaF_2)
3. Szafir sztuczny (Al_2O_3)
4. Kwarc (SiO_2)
5. German
6. Krzem

Pirometr radiacyjny, materiały optyczne



Pirometr radiacyjny, kolejne problemy

Wskazania pirometru radiacyjnego silnie zależą od emisyjności ε rzeczywistej ciała, niewłaściwa wartość ε powoduje błędy.

Moc promieniowania ciała czarnego

$$P_C = \sigma_0 T^4$$

Moc promieniowania ciała rzeczywistego jest mniejsza

$$P_{RZ} = \varepsilon\, P_C = \sigma_0 T_P^4$$

$$\varepsilon\, \sigma_0 T^4 = \sigma_0 T_P^4$$

$$\varepsilon = \frac{T_P^4}{T^4}$$

$$\sqrt[4]{\varepsilon} = \frac{T_P}{T}$$

Temperatura T_p wskazana przez pirometr będzie niższa

$$T_P = T\,\sqrt[4]{\varepsilon}$$

Dla ciała **szarego** (innego niż doskonale czarne) wskazania pirometru radiacyjnego będą **zaniżone** ($\varepsilon < 1$) !!!

Pirometr radiacyjny, problemy c.d.

Wskazania pirometru radiacyjnego **należy skorygować** odpowiednio do rzeczywistego współczynnika emisyjności ε rzeczywistej ciała

Rzeczywista temperatura →

$$T = k_{popr}\, T_P = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}\, T$$

Współczynnik poprawkowy →

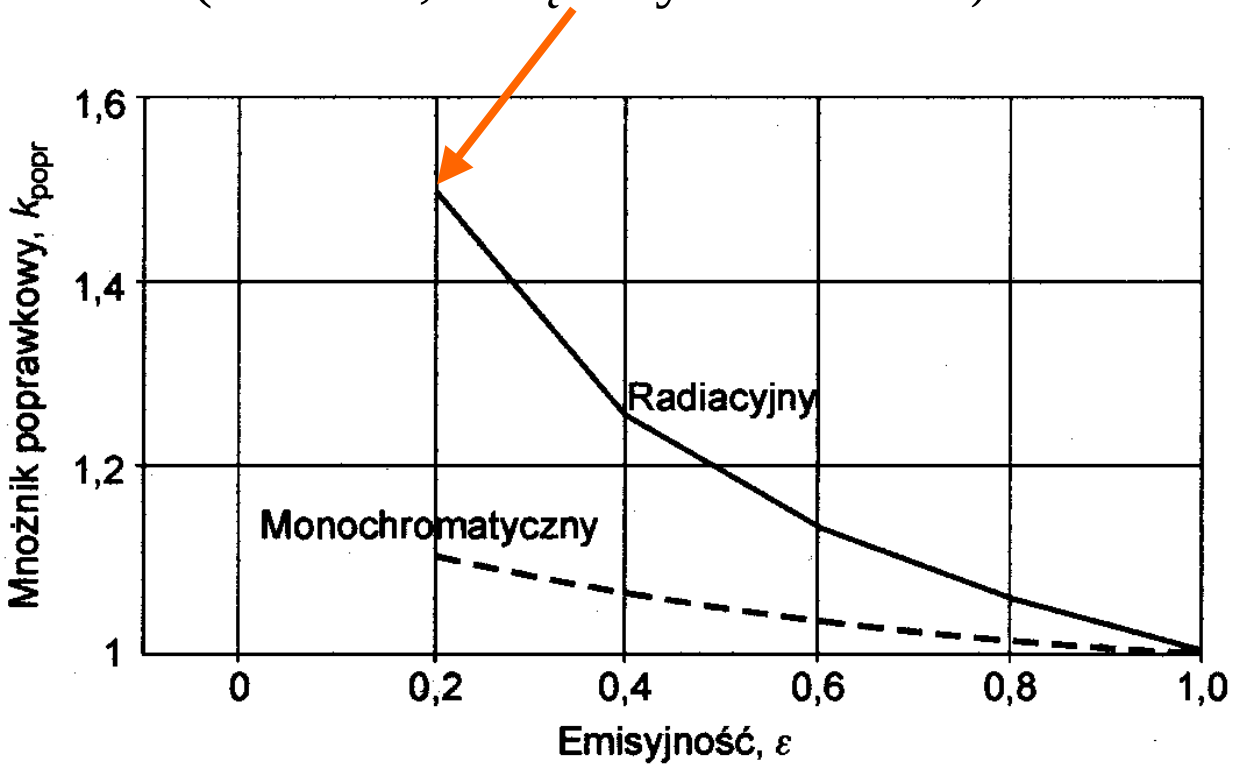
$$k_{popr} = \frac{1}{\sqrt[4]{\varepsilon}}$$

na przykład dla ε=0,2 : $\frac{1}{\sqrt[4]{0{,}2}} \approx \frac{1}{0{,}6687} \approx 1{,}496$

Nie uwzględnienie współczynnika poprawkowego spowoduje duże błędy pomiaru (dla ε=0,2 błąd wyniesie 50%) !!!

Pirometr radiacyjny, mnożnik poprawkowy

Nie uwzględnienie współczynnika poprawkowego spowoduje duże błędy pomiaru (dla ε =0,2 błąd wyniesie 50%) !!!



Zależność mnożnika poprawkowego od emisyjności pirometrów: całkowitego promieniowania i mono-chromatycznego, dla temperatury 1500 K, $\lambda = 0{,}65$ µm

Pomiar pirometrem przy nieznanej emisyjności ε

Sposoby wykonania pomiaru temperatury pirometrem przy nieznanej emisyjności ε obiektu:

1.Oklejenie obiektu czarną taśmą samoprzylepną PCV (ε=0,95),

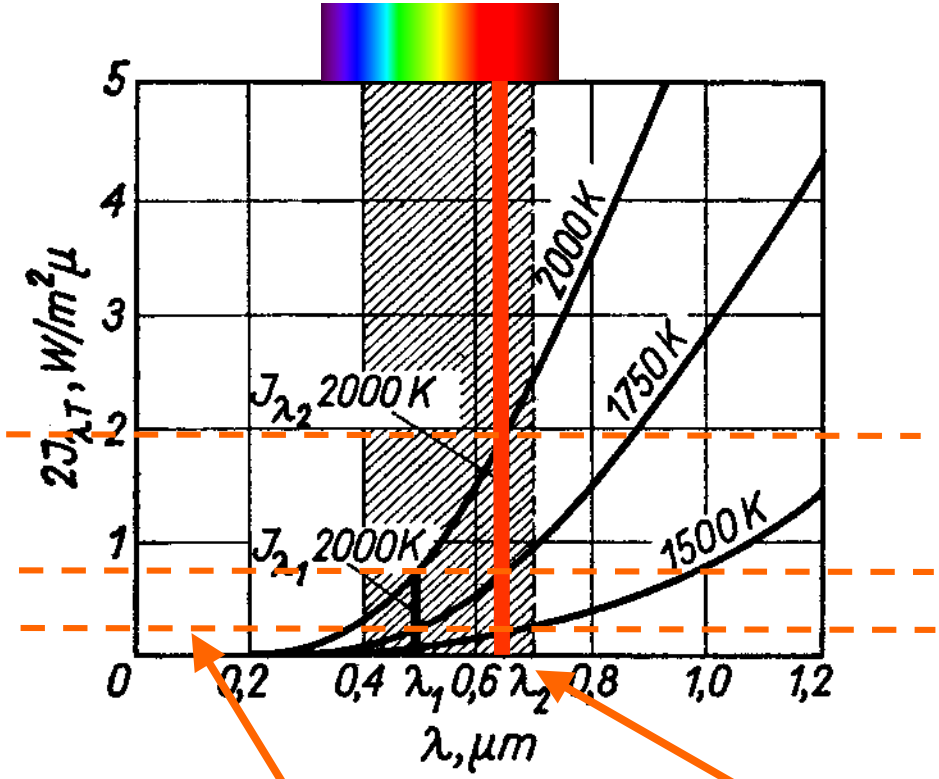
2.Pomalowanie obiektu czarną matową farbą (ε=0,95),

3.Pomiar kontrolny temperatury termoparą i dobranie doświadczalnie ustawienia emisyjności ε.

Mnożnik poprawkowy dla promieniowania monochromatycznego jest **kilkakrotnie mniejszy**, niż dla promieniowania całkowitego.

Pirometr monochromatyczny, zasada działania

Emitancja rośnie dla większych temperatur



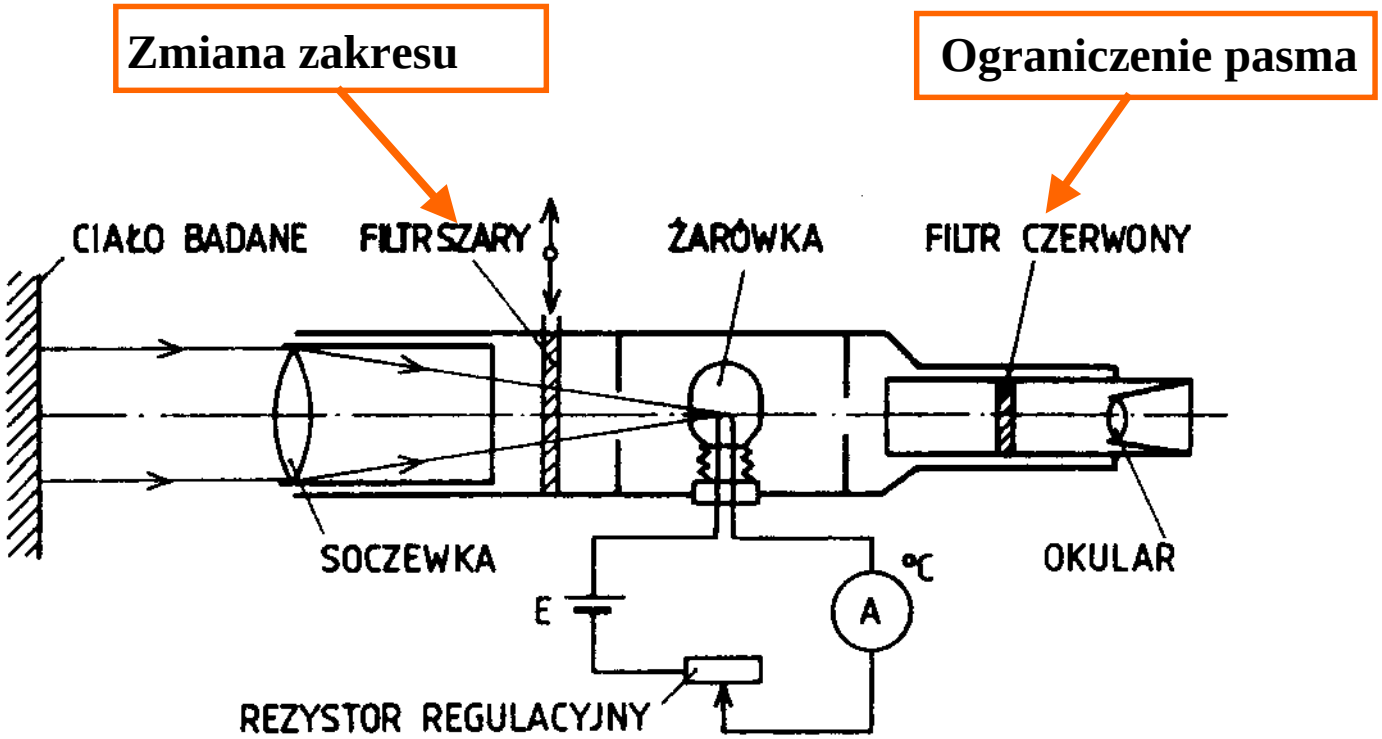
Prawo Wiena:

$$M_\lambda \cong \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp \frac{c_2}{\lambda T}}$$

Funkcja temperatury

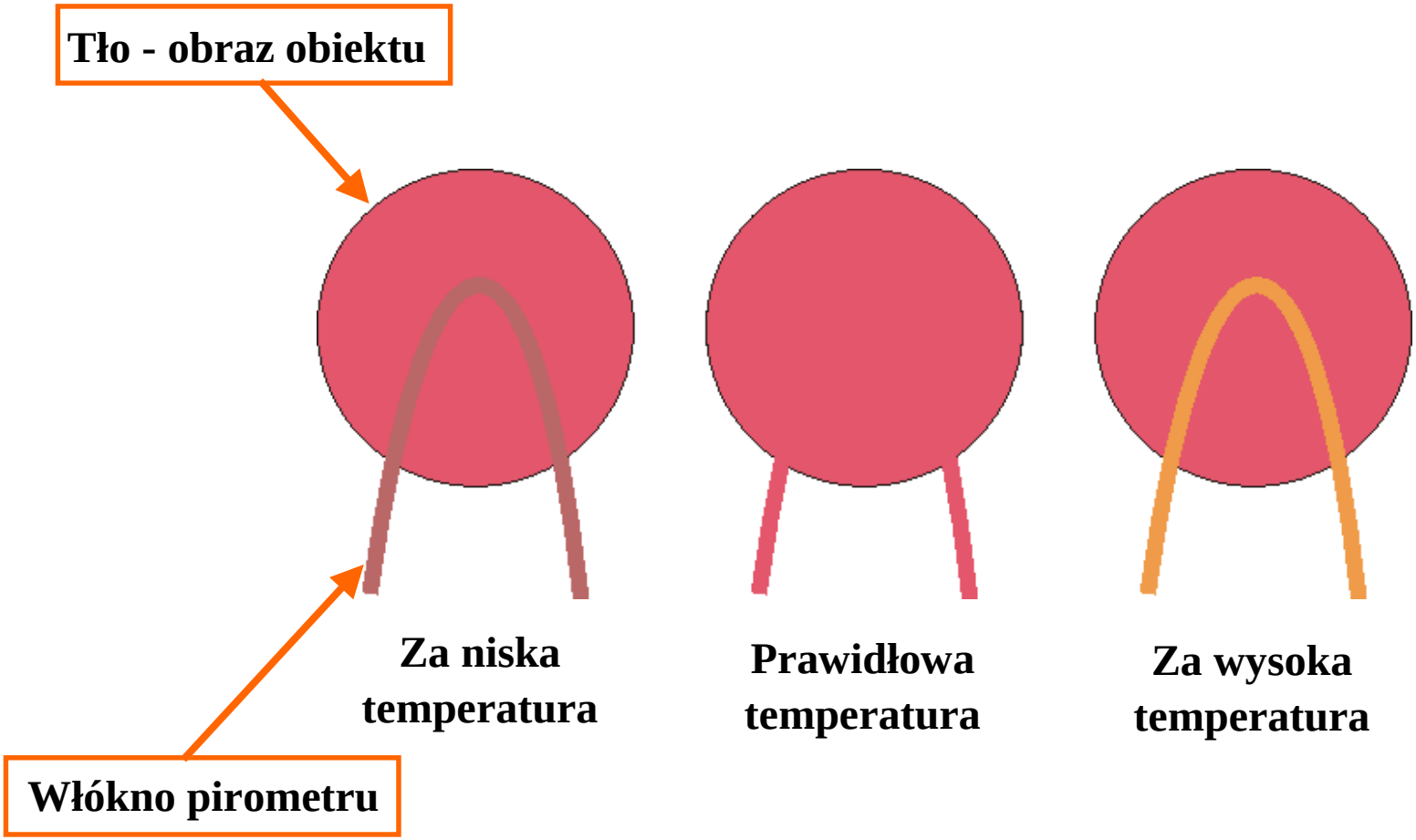
Barwa czerwona 650nm

Pirometr monochromatyczny z zanikającym włóknem



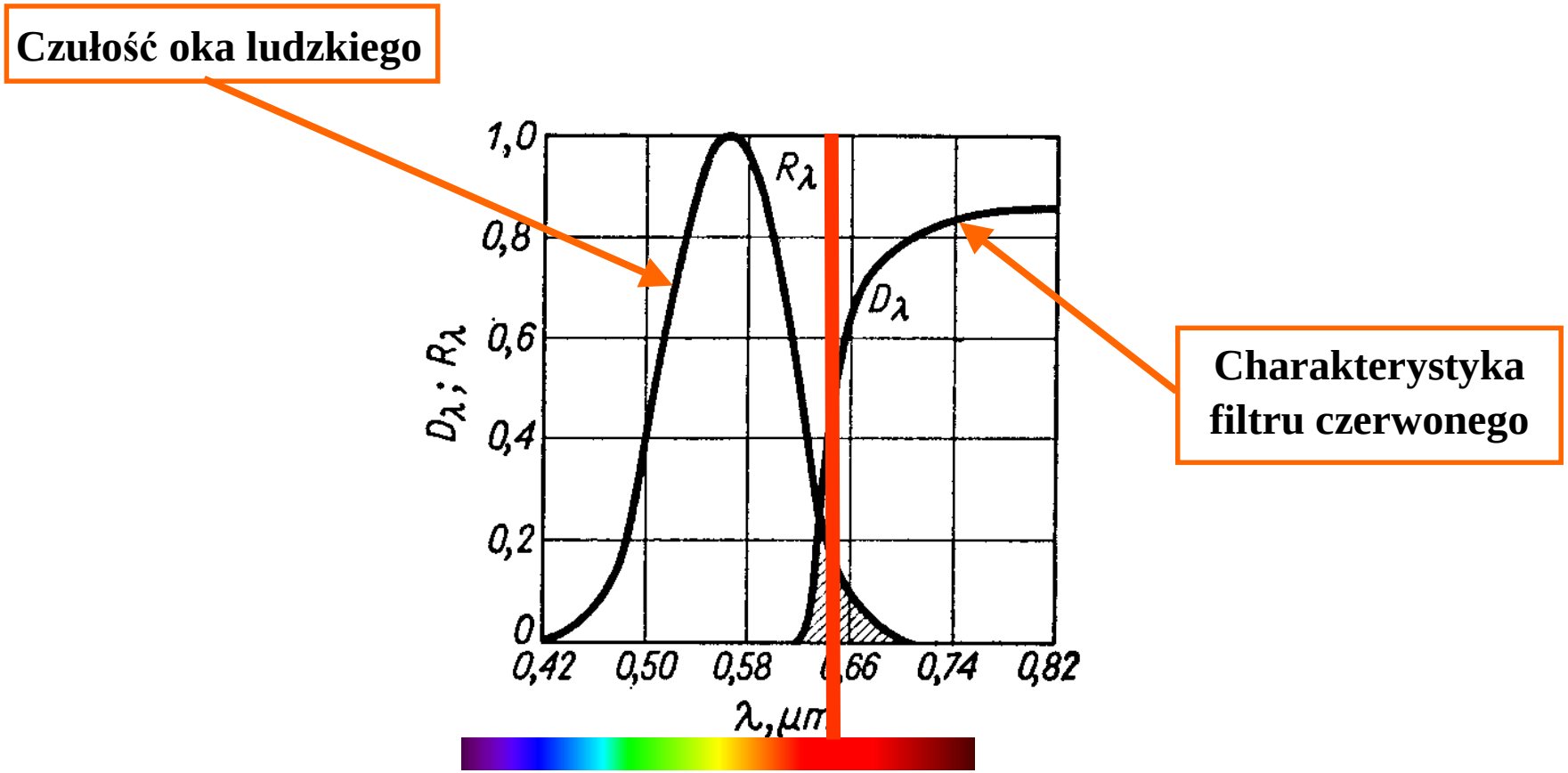
Amperomierz jest wyskalowany w jednostkach temperatury

Pirometr z zanikającym włóknem - pomiar



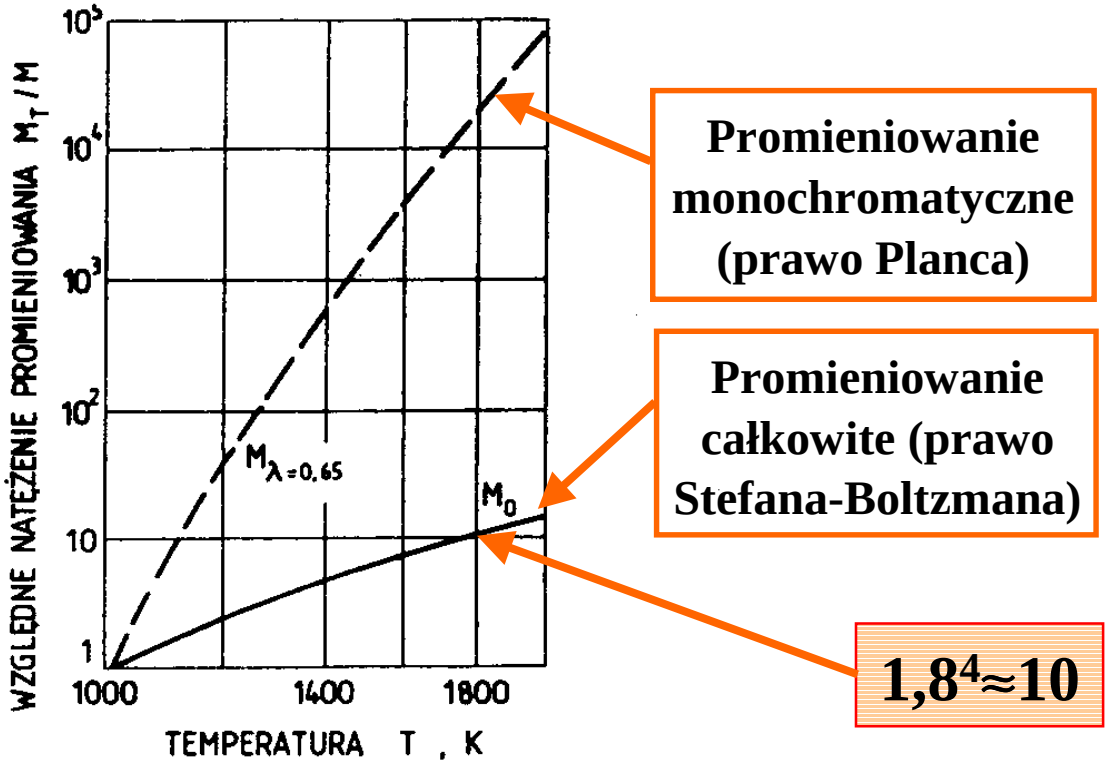
Efekt zanikającego włókna podczas pomiaru pirometrem

Pirometr monochromatyczny, filtr czerwony



Środek ciężkości wspólnego obszaru obu charakterystyk wyznacza **efektywną długość fali** pirometru (wykorzystuje się 650 nm).

Pirometr monochromatyczny, korzyści z filtru czerwonego

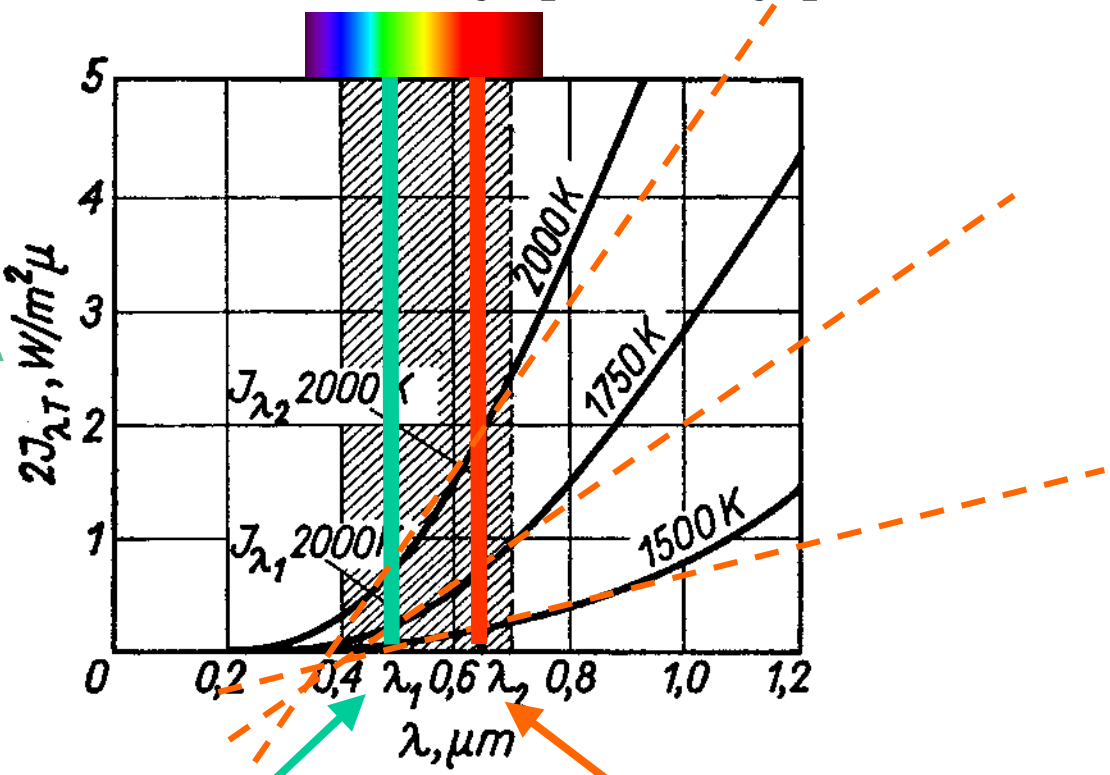


Względne natężenie promieniowania monochromatycznego $M_{\lambda=0,65}$ i całkowitego M_o odniesione do wartości przy 1000 K w funkcji temperatury dla ciała czarnego

Względne natężenie promieniowania monochromatycznego zmienia się **silniej** w funkcji temperatury, niż promieniowanie całkowite

Pirometr dwubarwowy, podstawy pomiaru

Barwa światła zmienia się przy wzroście temperatury od czerwonej do zielonej

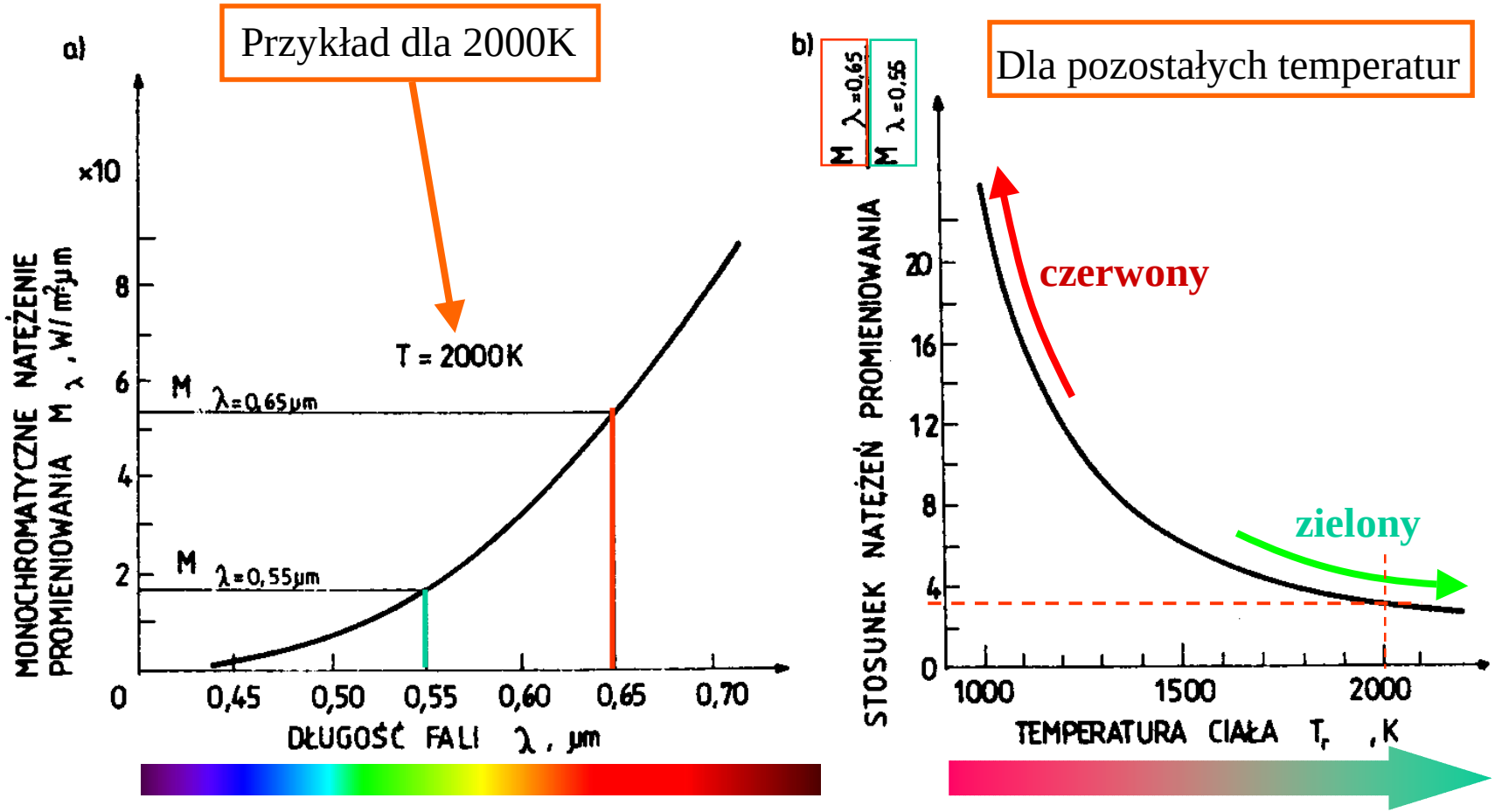


Barwa zielona 550nm

Barwa czerwona 650nm

Stosunek mocy promieniowania dla dwóch długości fali zależy od temperatury ciała, co wynika z prawa przesunięć Wiena.

Pirometr dwubarwowy



Zależność ilorazu natężeń promieniowania dla λ=0,65µm (barwa czerwona) i λ=0,55 µm (barwa zielona) od temperatury

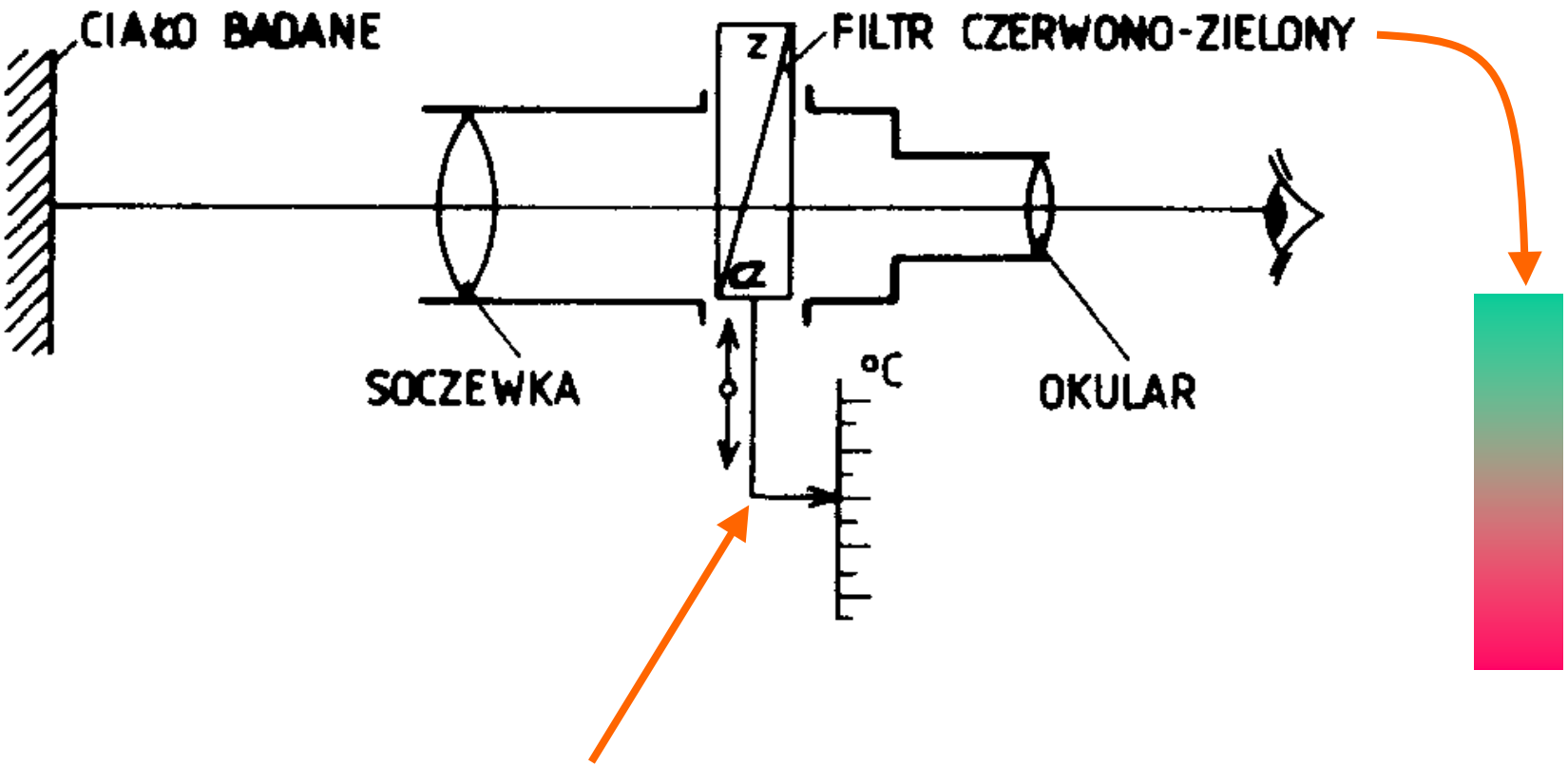
Pirometr dwubarwowy

Iloraz natężeń promieniowania dla λ=0,65μm (**barwa czerwona**) i λ=0,55 μm (**barwa zielona**) zależy od temperatury, ale nie zależy od emisyjności ε dla ciała szarego ($\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2}$).

Dla większości ciał warunek ten jest spełniony z wystarczającą dokładnością.

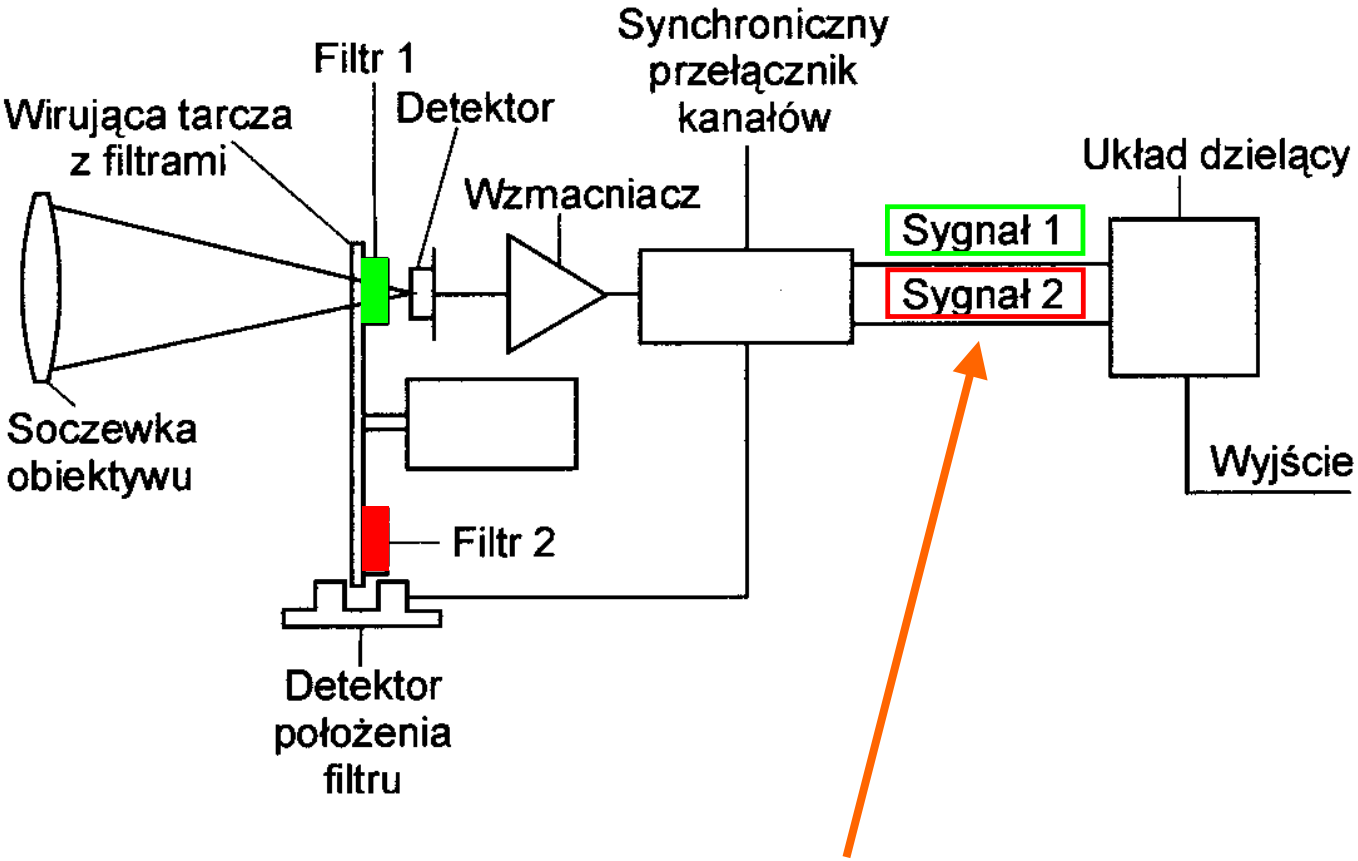
Dzięki temu wskazania pirometru dwubarwowego **nie zależą od emisyjności ε ciała badanego**.

Pirometr dwubarwowy ręcznie równoważony



Odpowiednie położenie filtru powinno zapewnić uzyskanie szarej barwy badanego ciała

Pirometr dwubarwowy automatyczny

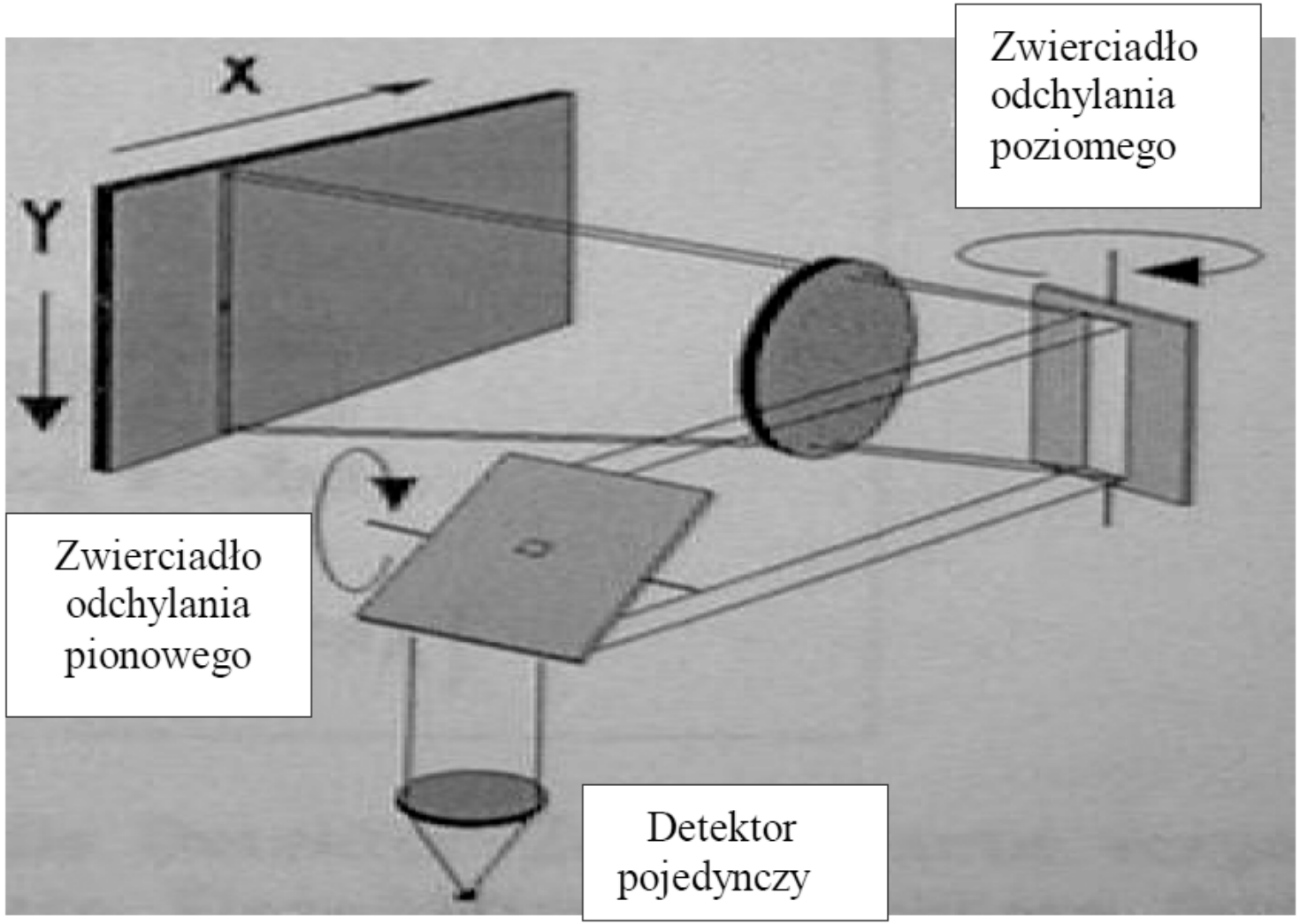


Stosunek sygnałów uzyskanych za pomocą dwóch kolorowych filtrów jest miarą temperatury badanego ciała

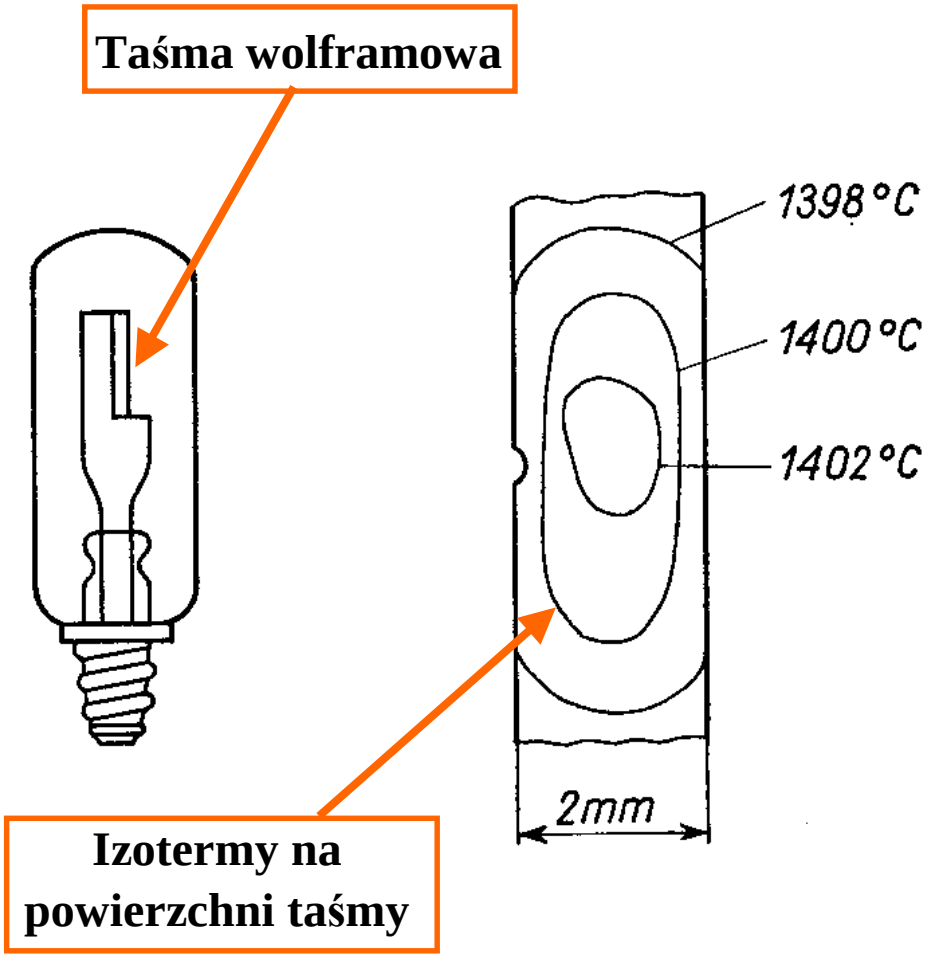
Rozwiązania układów termograficznych

1. Z punktowym detektorem i skanowaniem mechanicznym w dwóch kierunkach za pomocą zepołu ruchomych luster lub pryzmatów.
2. Z detektorem liniowym do skanowania przedmiotów w ruchu: taśmy blachy walcowanej na gorąco, odkówki itp.
3. Z detektorem matrycowym i optycznym układem skupiającym soczewkowym lub lustrzanym.

Kamera termowizyjna ze skanowaniem mechanicznym



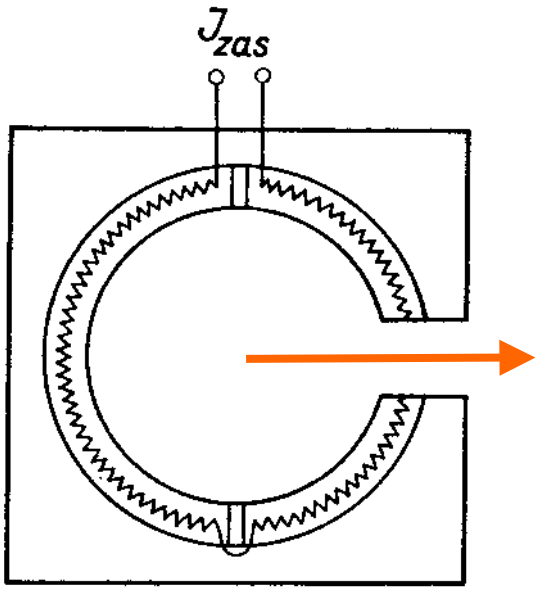
Wzorcowanie pirometrów, lampa wolframowa



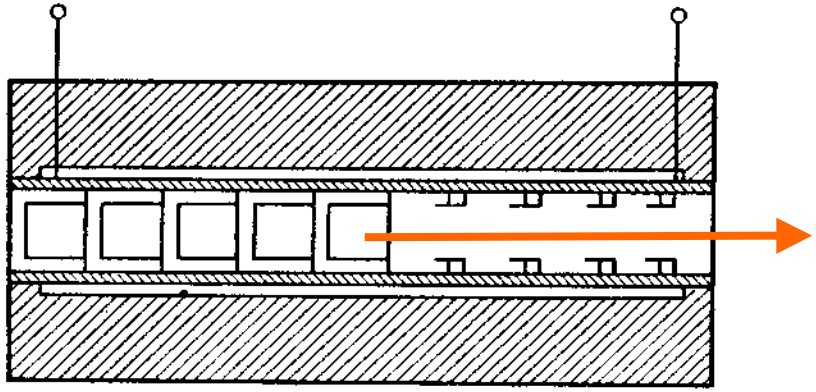
Wygląd rzeczywisty

Wzorcowa lampa wolframowa taśmowa

Wzorcowanie pirometrów, piece wzorcowe



Piec kulisty



Piec cylindryczny

Piece do wzorcowania pirometrów realizujące model ciała doskonale czarnego

Przykład – pirometr 561 Fluke

Przykład – pirometr 561 Fluke – Dane techniczne

Pirometr pasmowy

Dane techniczne

Podczerwień

Zakres pomiarowy	od -40 °C do 550 °C (od -40 °F do 1022 °F)
Zakres spektralny	od 8 do 14 mikronów
Dokładność	± 1% lub ± 1 °C (2 °F); <0 °C (32 °F), ± 1 °C (2 °F) ± 0,1°/1° (przy temperaturze otoczenia od 23 do 25 °C (od 73 do 77 °F))
Powtarzalność	± 0,5 % wartości lub ± 1 °C (2 °F)
Rozdzielczość	0,1 °C (0,1 °F)
Informacje na wyświetlaczu pomocniczym	temperatura maksymalna, temperatura minimalna, różnica, podłączenie termopary typu K
Czas odpowiedzi (95%)	500 ms
Stosunek odległości do powierzchni pomiaru (D:S)	12:1
Dostosowywanie emisyjności	trzy ustawienia: niska (0,3), średnia (0,7) i wysoka (0,95)

Dane wejściowe sondy kontaktowej

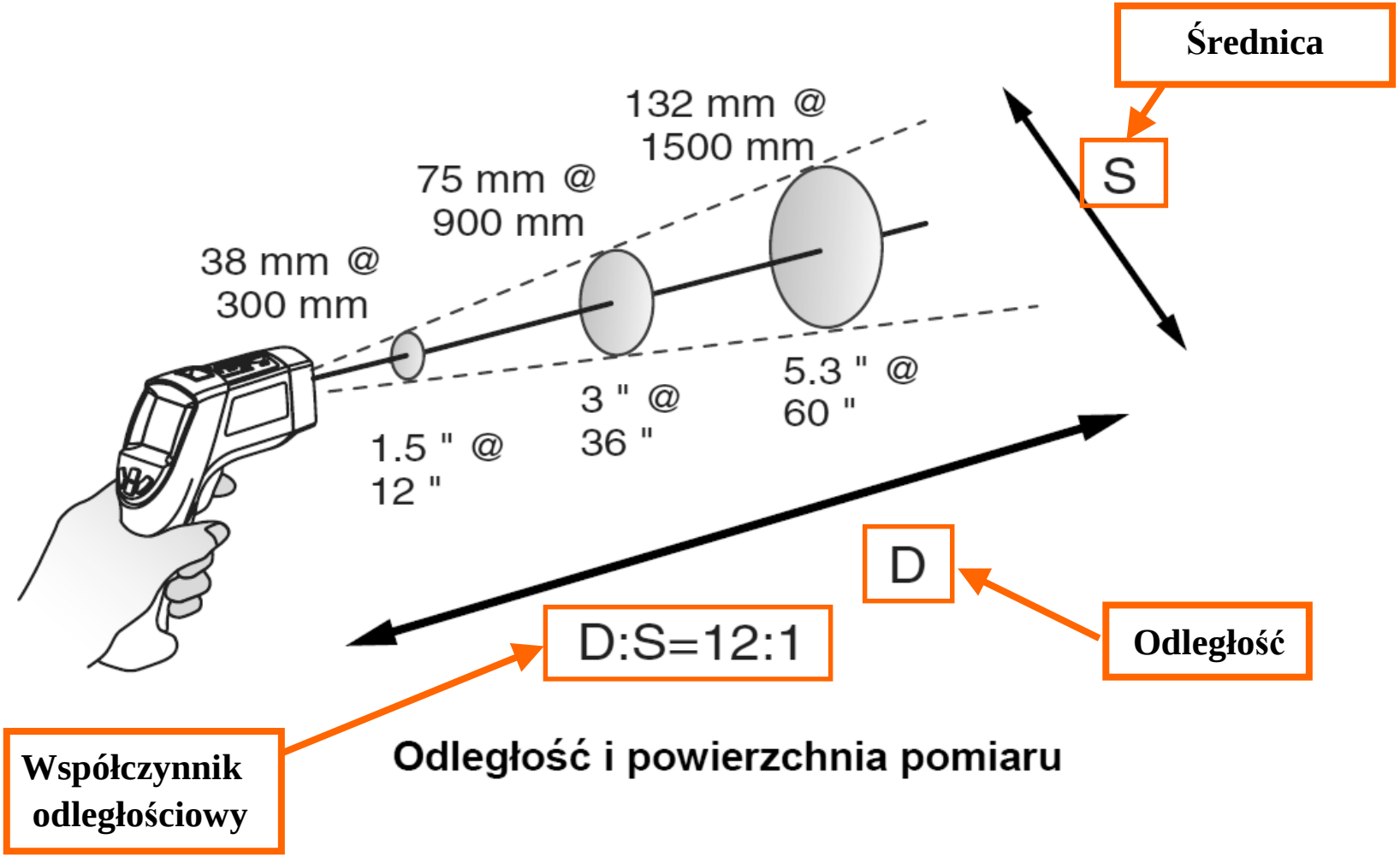
Zakres temperatury wejściowej	od -40 °C do 550 °C (od -40 °F do 1022 °F)
Dokładność danych wejściowych	Dokładność danych wejściowych ± 1,1 °C (± 2 °F)
Rozdzielczość	1 °C (1 °F)

Daleka podczerwień

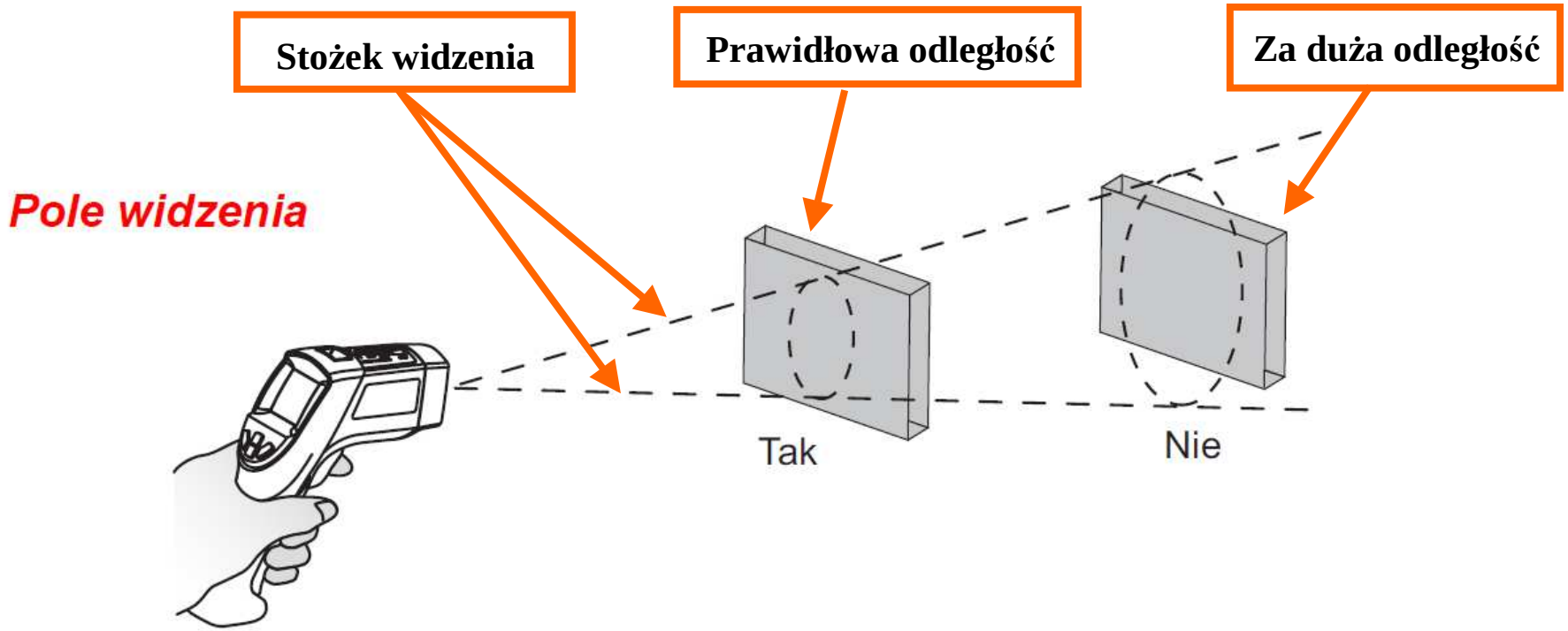
Współczynnik odległościowy

Emisyjność

Przykład – pirometr 561 Fluke – współczynnik odległościowy



Przykład – pirometr 561 Fluke – pole widzenia



Obiekt musi być większy niż powierzchnia pomiaru. Im mniejszy jest obiekt, tym mniejsza powinna być odległość między nim a termometrem.

Przykład – pirometr 561 Fluke – emisyjność

Emisyjność powierzchni

Mierzona powierzchnia	Ustawienie przełącznika	Mierzona powierzchnia	Ustawienie przełącznika
Aluminium		**Żeliwo**	
Oksydowane	Low (Niska)	Oksydowane	High (Wysoka), Medium (Średnia)
Stop A3003		Nieoksydowane	Low (Niska)
Oksydowany	Low (Niska)	Ciekłe	Low (Niska)
Szorstkowany	Low (Niska)	**Żelazo zgrzewne**	
Mosiądz		Matowe	High (Wysoka)
Polerowany	Low (Niska)	**Ołów**	
Oksydowany	Low (Niska)	Nieobrobiony	Low (Niska)
Miedź		Oksydowany	Low (Niska), Medium (Średnia)
Oksydowana	Medium (Średnia)	**Molibden**	
Kostki elektryczne	Medium (Średnia)	Oksydowany	Low (Niska), Medium (Średnia)
Haynes		Nikiel	
Stop	Medium (Średnia)	Oksydowany	Low (Niska)
Inconel		**Platyna**	
Oksydowany	High (Wysoka), Medium (Średnia)	Czarna	High (Wysoka)
Piaskowany	Medium (Średnia)	**Stal**	
Elektropolerowany	Low (Niska)	Walcowana na zimno	High (Wysoka)
Żelazo		Blacha matowa	Medium (Średnia)
Oksydowane	High (Wysoka), Medium (Średnia)	**Blacha polerowana**	Low (Niska)
Zardzewiałe	Medium (Średnia)	Cynk	
		Oksydowany	Low (Niska)

Wysoka (0,95)

Średnia (0,7)

Niska (0,3)

Przykład – Thermal Imager Ti20 Fluke

Przykład – Thermal Imager Ti20 Fluke – Dane techniczne

Thermal

Temperature Range	-10 to 350 °C (14 to 662 °F)
Detector Type	80 x 60 thermal element focal plane array (FPA)
Accuracy	± 2 °C or 2 % (whichever is greater)
Repeatability	± 1 % or ± 1 °C (± 2 °F) whichever is greater
NETD (Thermal Sensitivity)	200 mK
Temperature Indication	0.1 °C or 0.2 °F

Optical

Field of View (FOV)	Rectangular. 20° Horizontal x 15° Vertical
Minimum Diameter	8.1 mm (0.32 in) at 61 cm (24 in)
Optical Resolution (D:S)	75:1 or better
Spectral Range	7.5 to 14 microns
Target Sighting	Single Laser (IEC 825/93 Class II, FDA LFR 1040.10 Class II
Instantaneous Field of View	4.4 mrad

Controls

Focus	61 cm (24 in) to infinity
Temperature Scale	°C or °F selectable
Palettes	Original, Gray, Rainbow (default), Ironbow, Gray Reverse
Measurement Modes	Automatic or Manual
LCD Backlight	Bright/Dim selectable

Operational

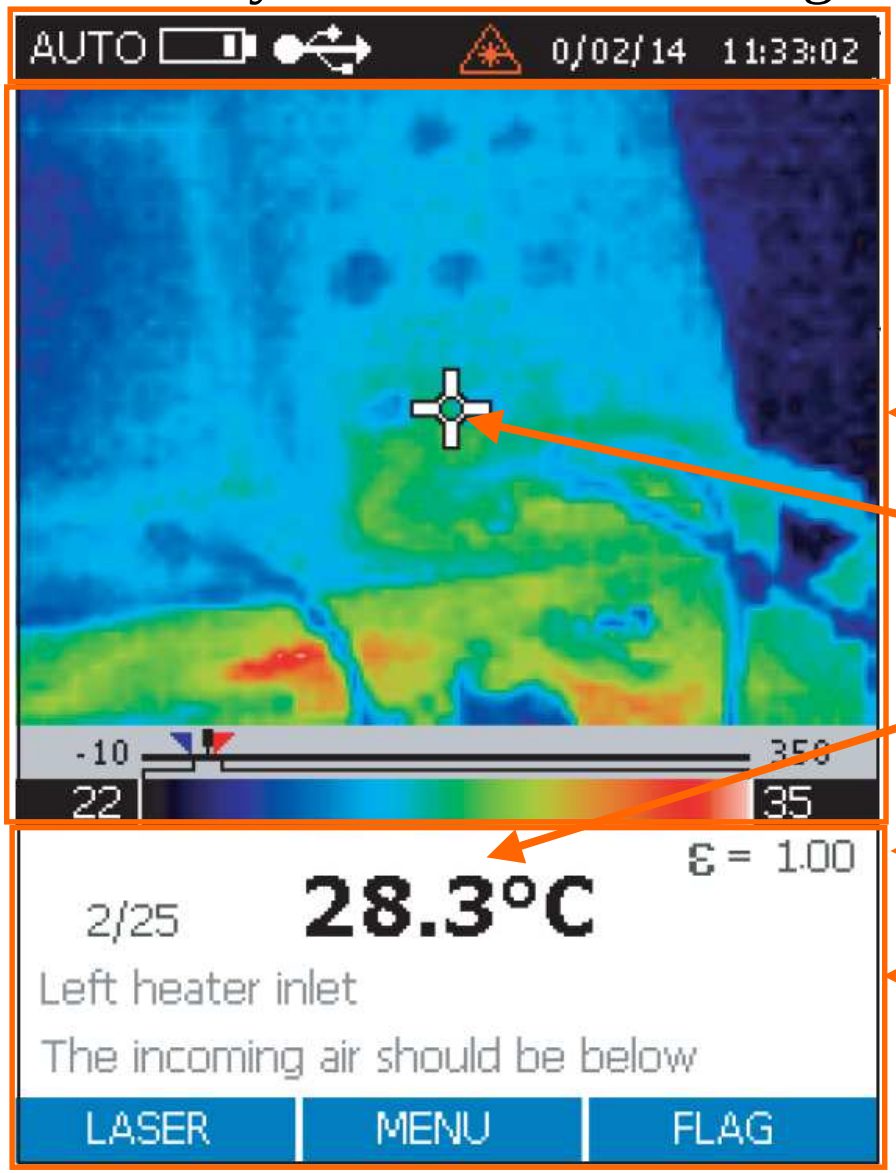
Adjustable Emissivity	.10 to 1.00 by 0.01

Współczynnik odległościowy

Daleka podczerwień

Emisyjność

Przykład – Thermal Imager Ti20 Fluke – ekran LCD



Nagłówek ekranu

Obszar obrazu termicznego

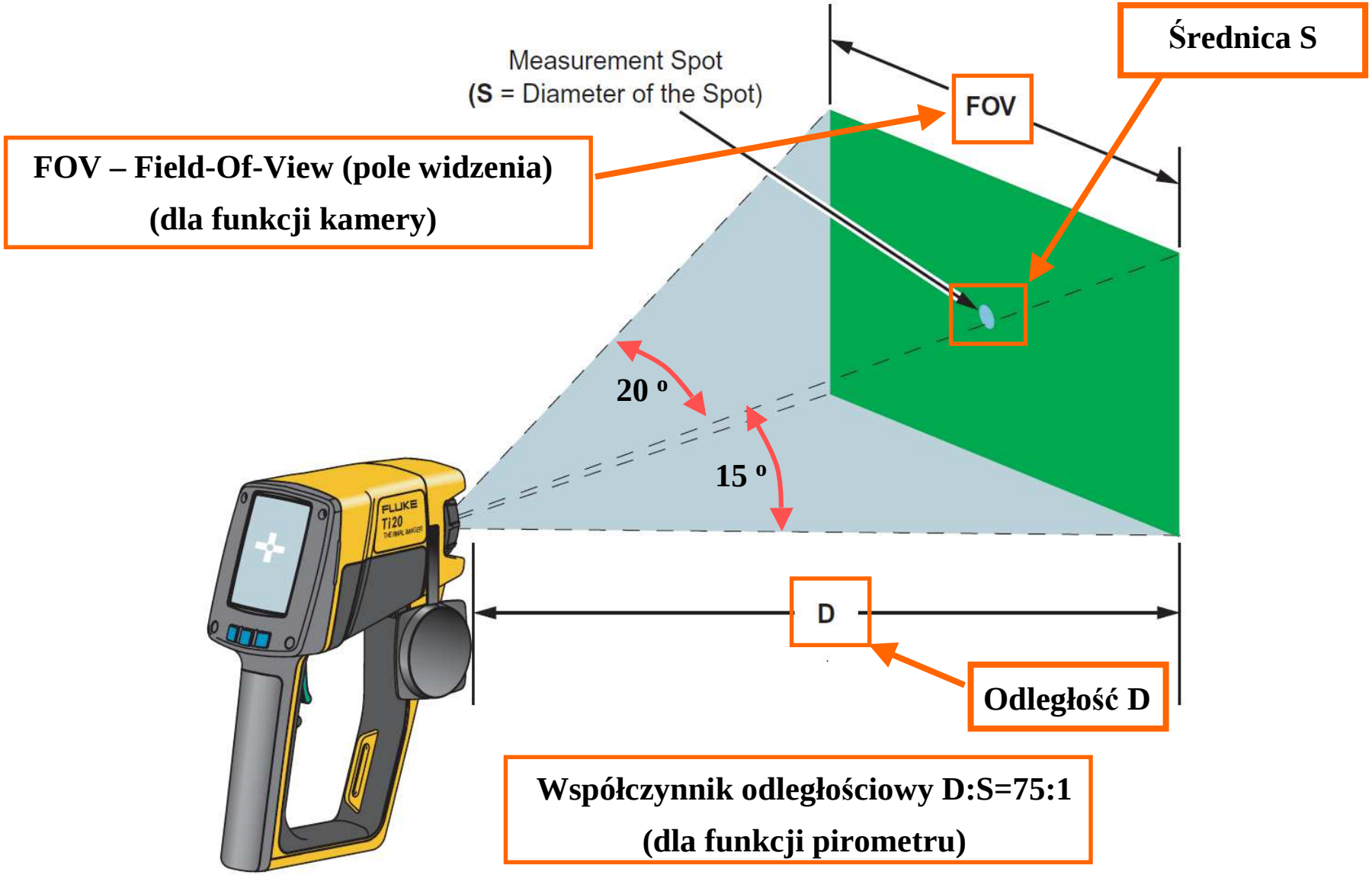
Punkt pomiaru temperatury

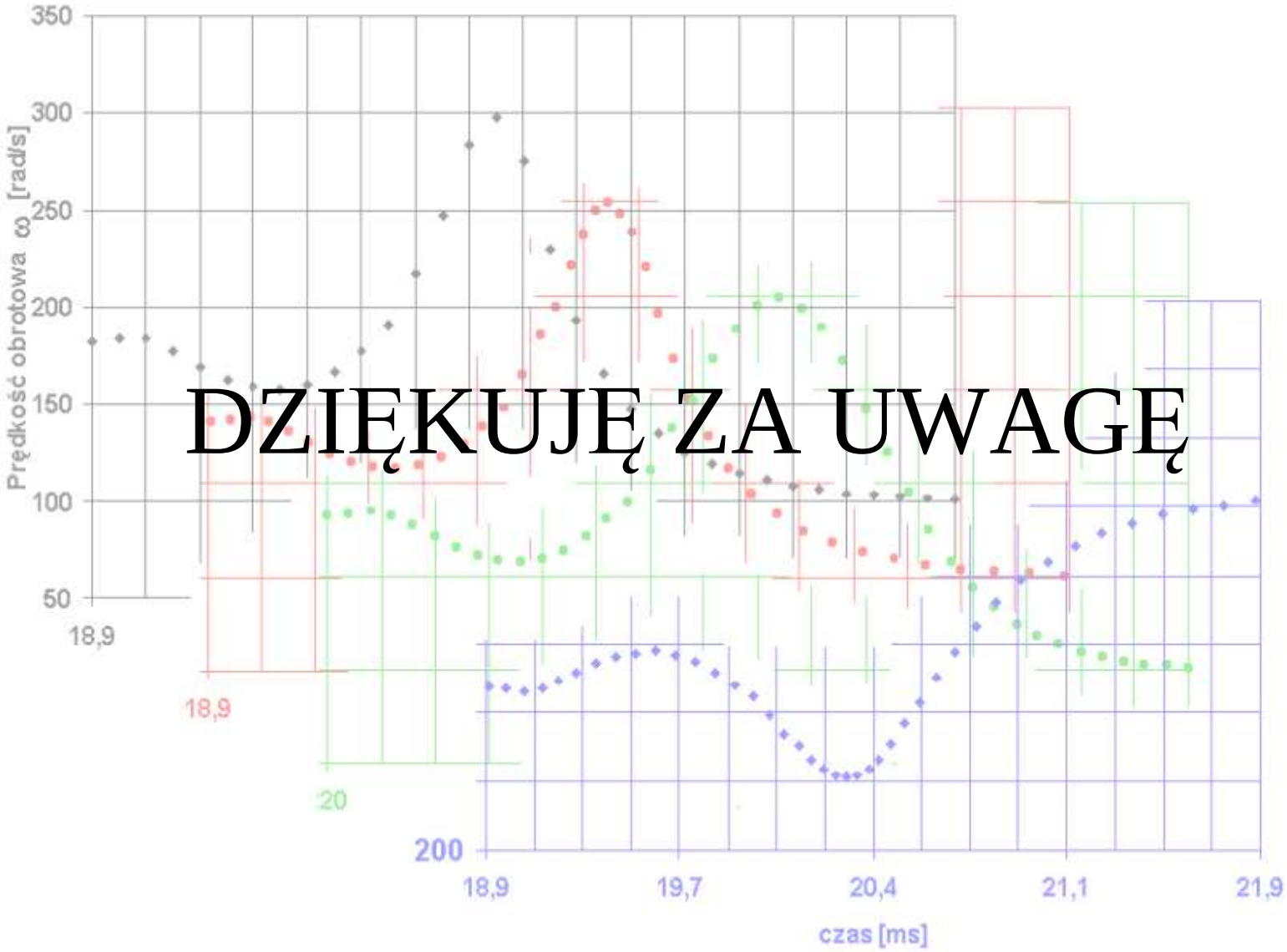
Wynik pomiaru temperatury

Emisyjność

Obszar informacyjny

Przykład – Thermal Imager Ti20 Fluke – współczynnik odległościowy





DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ