

Travaux Pratiques de Transferts Thermiques

TD-TP de rayonnement : pyrométrie.

Le but de ce TP est de vous familiariser avec le rayonnement à travers la pyrométrie et les grandeurs (émissivité, réflectivité, etc...) caractérisant le rayonnement des corps réels. Ce TP est divisé en deux parties ; on va s'intéresser en premier lieu au rayonnement d'une ampoule domestique à incandescence, puis on cherchera dans la seconde partie à ~~comparer les méthodes de~~ ~~détermination de~~ l'émissivité d'un corps porté à haute température.

déterminer

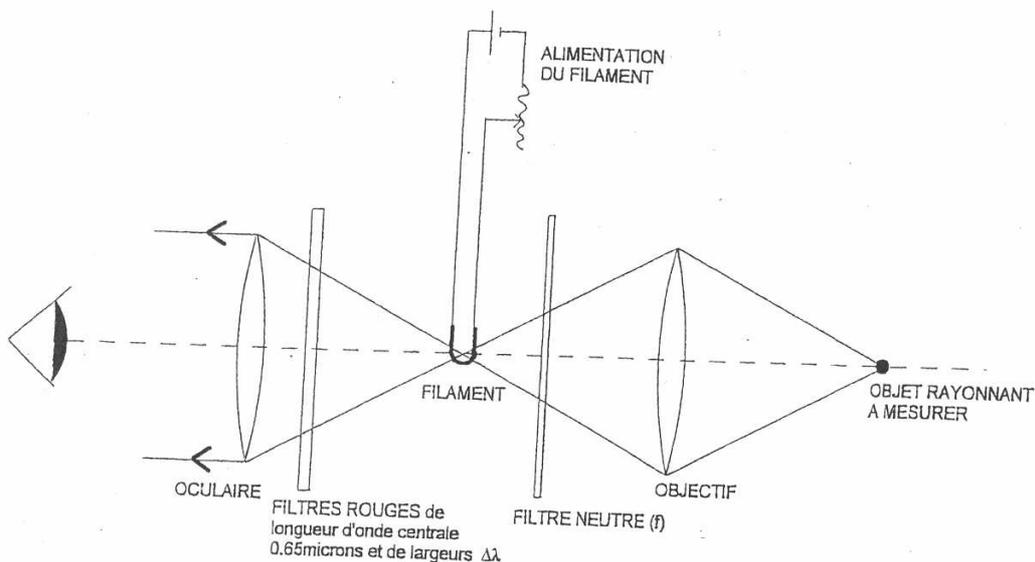
Instrumentation

La pyrométrie (du grec *pyros*, feu)

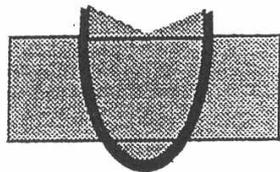
La pyrométrie est l'utilisation du rayonnement thermique (dans l'UV, le visible ou l'infrarouge) des corps pour déterminer leur température. C'est une méthode utilisée lorsqu'elle est très élevée ou lorsqu'il n'est pas possible d'établir un contact matériel entre le point de mesure et l'instrument. C'est donc une méthode non-intrusive de mesure de température.

Principe du pyromètre monochromatique à disparition de filament

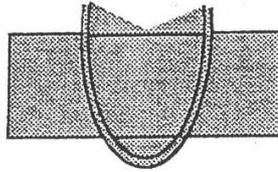
Au moyen d'un objectif, on forme l'image réelle S' de la source S dont on veut déterminer la température, sur le filament incandescent d'une lampe calibrée (voir figure). L'observateur réalise l'égalité des luminances du filament et de S' . A travers l'oculaire, l'oeil observe à la fois l'image de la source et le filament de la lampe, rendus sensiblement monochromatiques par l'adjonction d'un verre rouge (passe-bande de largeur spectrale $\Delta\lambda$ autour de $\lambda_p = 0.65\mu m$).



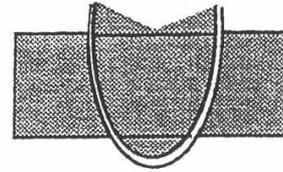
La mesure consiste à rendre identiques les éclairagements sur la rétine pour les images du filament et de la source, c'est à dire à faire disparaître le filament sur l'image de la source. Pour cela, on agit sur la température du filament en réglant l'intensité i du courant qui le traverse.



Filament trop froid



Réglage correct



Filament trop chaud

Ces pyromètres étant étalonnés en usine sur des corps noirs, la visée sur un corps non noir fournit donc la température de luminance (dans l'intervalle spectral délimité par le verre rouge). En effet, à l'égalité des deux luminances (i.e pyromètre réglé), on a :

$$L_{\lambda_p}^0(T_L) = L_{\lambda_p}(T)$$

La température lue sur le pyromètre par visée sur un corps est donc toujours la température de luminance T_L de ce corps, c'est à dire la température du corps noir ayant même luminance pour la longueur d'onde considérée.

- Supposons qu'on vise un corps noir à la température T et que le filament de tungstène (W) soit d'émissivité monochromatique $\varepsilon_{\lambda,W}(T_W)$. Exprimez la température du filament T_W en fonction de la fraction f transmise par le filtre neutre, de $\varepsilon_{\lambda,W}(T_W)$ et de T . Montrer que le rôle de ce filtre neutre est de limiter le chauffage du filament pour les fortes températures des échantillons à mesurer.

- La loi de rayonnement de Planck d'un corps noir est :

$$M_{\lambda}^0(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}$$

avec $c_1 = 3.7e8 W.\mu m^4.m^{-2}$ et $c_2 = 14400 \mu m.K$. Montrez que dans le domaine de température de ce TP ($T \leq 3000K$) et dans le visible ($0.4 \leq \lambda \leq 0.8 \mu m$),

émissivité

la luminance monochromatique du corps noir peut être approximée par : $M_{\lambda}^0(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)}$ avec une incertitude relative inférieure à 5/1000.

Four haute température

Vous disposez d'un four à creuset en céramique permettant des températures relativement stables jusqu'à 1150°C . Ce four est équipé d'un thermocouple permettant de mesurer la température au coeur du four. Le couvercle du four est percé d'un petit trou permettant la visée au pyromètre d'un échantillon placé à l'intérieur ainsi que le passage du faisceau laser (2ème partie du TP)

Laser

Le montage comprend aussi un laser He-Ne de 10mW de puissance et de longueur d'onde $0.65\mu\text{m}$. Celui-ci est aligné pour impacter l'échantillon placé au coeur du four tout en mesurant la température de luminance de l'échantillon au pyromètre.

Remarques

Pour tout le TP, les grandeurs dont nous parlerons seront toujours directionnelles, c'est-à-dire qu'on ne mesurera que des quantités dans la direction du pyromètre. C'est pourquoi j'ai volontairement omis le symbole $\bar{\Omega}$ dans toutes les quantités mais il faut se souvenir qu'elles sont directionnelles et non pas hémisphériques...

Etudes expérimentales

1 Détermination du rendement lumineux d'une ampoule domestique à incandescence

On dispose d'une lampe commerciale de 100 Watts à filament de Tungstène. Par définition, le rendement de cette lampe est :

$$\eta_{\text{total}} = \frac{P_{\text{rayonnee}}}{P_{\text{electrique fournie}}}$$

avec $P_{\text{rayonnee}} = \text{Emission de la source } S$

On suppose que l'ampoule émet un rayonnement parfaitement diffus et isotrope et qu'elle suit donc la loi de Lambert

1.1 Mesure de l'émittance de la lampe

• Proposez une méthode utilisant le pyromètre pour connaître l'émittance ^{totale} de la source (utilisez le tableau en annexe). Que pensez-vous du verre qui entoure l'ampoule? Peut-il gêner nos mesures et pourquoi?

Relevez pour 6 ou 7 puissances de la lampe, l'émittance de celle-ci.

1.2 Evaluation de la surface de la source

En traçant U en fonction de I pour les différentes températures du filament, qu'obtenez-vous? Êtes-vous surpris? A partir de cette observation, évaluez la longueur du fil de Tungstène qui se trouve dans l'ampoule sachant que son diamètre est estimé à 45 microns (mesure effectuée au microscope). Connaissant les dimensions du fil de Tungstène composant l'ampoule, en déduire la surface S grâce à un modèle simplifié. Calculez alors le rendement de l'ampoule pour au moins 2 températures "extrêmes". Ces valeurs sont-elles conformes à la hiérarchie que vous attendiez? (Pensez à la loi de Wien)

• Quelle signification physique donnez-vous à ce rendement? Compte-tenu que la lumière d'une telle lampe ne nous intéresse que dans le visible¹, proposez une autre définition du rendement optique.

Calculez-le pour les mêmes températures à l'aide de la fonction universelle z en annexe. On supposera que le tungstène se comporte comme un corps gris de rayonnement isotrope. Commentez vos résultats.

2 Détermination de l'émissivité monochromatique directionnelle d'un métal

Le but des ~~deux~~ expériences qui suivent est l'utilisation de la pyrométrie pour trouver le facteur d'émission monochromatique d'un échantillon de métal. Ce facteur est le rapport de la luminance propre au corps, à la température T et dans la direction $\vec{\Omega}$ avec la luminance d'un corps noir à la même température T et longueur d'onde λ . ~~En fait, on va utiliser le four (dont on dispose) en supposant que son rayonnement est très proche d'un corps noir, absorbeur idéal. Tout d'abord, vérifiez expérimentalement si ce four vous semble proche d'un corps noir. On dispose d'un échantillon de métal (Tungstène ou Molybdène ou Nickel) pour nos mesures.~~

¹0,4 - 0,8 μm

2.1 Méthode directe

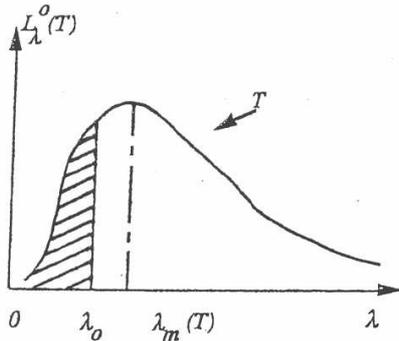
Cette méthode va consister à comparer le flux monochromatique émis par la pièce métallique portée à haute température d'une part avec le flux monochromatique émis par un corps noir dans les mêmes conditions.

- En appelant T_L la température de luminance lue sur le pyromètre par visée sur le métal et en supposant ce métal à une température vraie T_{vraie} , donner la relation entre T_L et T_{vraie} .

Placez l'échantillon de métal dans le four fermé et mesurez la température T_0 à l'aide du pyromètre. Quelle température mesurez-vous ? En vous réparant les tâches, ouvrez le four tout en mesurant la température de l'échantillon en l'absence d'éclairement significatif provenant du four. Comme vous le remarquerez, la température du four aura beaucoup baissé le temps de régler le pyromètre. La température de luminance T_L que vous avez ne correspond donc pas exactement au four à T_0 . Pour corriger cet effet, effectuez le plus vite possible une troisième mesure T_1 dès que vous aurez refermé le four. Vérifiez l'ordre des températures, et s'il vous convient, calculez l'émissivité de la plaque $\varepsilon_{\lambda, T}$ en spécifiant à quelle température T de la plaque elle correspond.

Annexe

Fonction $z(0, \lambda_0/\lambda_m(T))$ pour le rayonnement d'équilibre



$$x = \frac{\lambda_0}{\lambda_m(T)}$$

$$z\left(0, \frac{\lambda_0}{\lambda_m(T)}\right) = \frac{\int_0^{\lambda_0} \pi L_\lambda^o(T) d\lambda}{\sigma T^4}$$

On rappelle que

- 1) $T \cdot \lambda_m(T) = 2898 \mu m K$
- 2) 98 % de la puissance est répartie entre $\frac{\lambda_0}{3}$ et $7 \lambda_m$

x	Z	x	Z	x	Z	x	Z
0,10	$5,5 \cdot 10^{-18}$						
0,20	$4,0 \cdot 10^{-8}$						
0,22	$3,1 \cdot 10^{-7}$	0,92	$19,78 \cdot 10^{-2}$	1,62	$59,29 \cdot 10^{-2}$	3,6	$92,24 \cdot 10^{-2}$
0,24	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,94	$21,08 \cdot 10^{-2}$	1,64	$60,10 \cdot 10^{-2}$	3,7	$92,74 \cdot 10^{-2}$
0,26	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0,96	$22,39 \cdot 10^{-2}$	1,66	$60,90 \cdot 10^{-2}$	3,8	$93,20 \cdot 10^{-2}$
0,28	$2,03 \cdot 10^{-5}$	0,98	$23,69 \cdot 10^{-2}$	1,68	$61,68 \cdot 10^{-2}$	3,9	$93,62 \cdot 10^{-2}$
0,30	$5,47 \cdot 10^{-5}$	1,00	$25,00 \cdot 10^{-2}$	1,70	$62,43 \cdot 10^{-2}$	4,0	$94,01 \cdot 10^{-2}$
0,32	$1,28 \cdot 10^{-4}$	1,02	$26,32 \cdot 10^{-2}$	1,72	$63,17 \cdot 10^{-2}$	5,0	$96,61 \cdot 10^{-2}$
0,34	$2,69 \cdot 10^{-4}$	1,04	$27,63 \cdot 10^{-2}$	1,74	$63,90 \cdot 10^{-2}$	6,0	$97,89 \cdot 10^{-2}$
0,36	$5,17 \cdot 10^{-4}$	1,06	$28,94 \cdot 10^{-2}$	1,76	$64,61 \cdot 10^{-2}$	7,0	$98,61 \cdot 10^{-2}$
0,38	$9,21 \cdot 10^{-4}$	1,08	$30,25 \cdot 10^{-2}$	1,78	$65,30 \cdot 10^{-2}$	8,0	$99,03 \cdot 10^{-2}$
0,40	$1,54 \cdot 10^{-3}$	1,10	$31,55 \cdot 10^{-2}$	1,80	$65,98 \cdot 10^{-2}$	9,0	$99,30 \cdot 10^{-2}$
						10,0	$99,48 \cdot 10^{-2}$
0,42	$2,43 \cdot 10^{-3}$	1,12	$32,83 \cdot 10^{-2}$	1,82	$66,65 \cdot 10^{-2}$	15,0	$99,84 \cdot 10^{-2}$
0,44	$3,66 \cdot 10^{-3}$	1,14	$34,09 \cdot 10^{-2}$	1,84	$67,29 \cdot 10^{-2}$	20,0	$99,927 \cdot 10^{-2}$
0,46	$5,30 \cdot 10^{-3}$	1,16	$35,34 \cdot 10^{-2}$	1,86	$67,92 \cdot 10^{-2}$	30,0	$99,978 \cdot 10^{-2}$
0,48	$7,41 \cdot 10^{-3}$	1,18	$36,58 \cdot 10^{-2}$	1,88	$68,54 \cdot 10^{-2}$	40,0	$99,991 \cdot 10^{-2}$
0,50	$10,05 \cdot 10^{-3}$	1,20	$37,81 \cdot 10^{-2}$	1,90	$69,15 \cdot 10^{-2}$	50,0	$99,995 \cdot 10^{-2}$
						∞	$100,0 \cdot 10^{-2}$
0,52	$1,33 \cdot 10^{-2}$	1,22	$39,02 \cdot 10^{-2}$	1,92	$69,75 \cdot 10^{-2}$		
0,54	$1,71 \cdot 10^{-2}$	1,24	$40,22 \cdot 10^{-2}$	1,94	$70,33 \cdot 10^{-2}$		
0,56	$2,16 \cdot 10^{-2}$	1,26	$41,40 \cdot 10^{-2}$	1,96	$70,89 \cdot 10^{-2}$		
0,58	$2,67 \cdot 10^{-2}$	1,28	$42,56 \cdot 10^{-2}$	1,98	$71,43 \cdot 10^{-2}$		
0,60	$3,25 \cdot 10^{-2}$	1,30	$43,71 \cdot 10^{-2}$	2,00	$71,96 \cdot 10^{-2}$		
0,62	$3,90 \cdot 10^{-2}$	1,32	$44,83 \cdot 10^{-2}$	2,1	$74,48 \cdot 10^{-2}$		
0,64	$4,61 \cdot 10^{-2}$	1,34	$45,93 \cdot 10^{-2}$	2,2	$76,72 \cdot 10^{-2}$		
0,66	$5,39 \cdot 10^{-2}$	1,36	$47,01 \cdot 10^{-2}$	2,3	$78,73 \cdot 10^{-2}$		
0,68	$6,22 \cdot 10^{-2}$	1,38	$48,07 \cdot 10^{-2}$	2,4	$80,53 \cdot 10^{-2}$		
0,70	$7,12 \cdot 10^{-2}$	1,40	$49,11 \cdot 10^{-2}$	2,5	$82,14 \cdot 10^{-2}$		
0,72	$8,07 \cdot 10^{-2}$	1,42	$50,13 \cdot 10^{-2}$	2,6	$83,58 \cdot 10^{-2}$		
0,74	$9,08 \cdot 10^{-2}$	1,44	$51,14 \cdot 10^{-2}$	2,7	$84,88 \cdot 10^{-2}$		
0,76	$10,14 \cdot 10^{-2}$	1,46	$52,12 \cdot 10^{-2}$	2,8	$86,05 \cdot 10^{-2}$		
0,78	$11,23 \cdot 10^{-2}$	1,48	$53,08 \cdot 10^{-2}$	2,9	$87,11 \cdot 10^{-2}$		
0,80	$12,37 \cdot 10^{-2}$	1,50	$54,03 \cdot 10^{-2}$	3,0	$88,07 \cdot 10^{-2}$		
0,82	$13,55 \cdot 10^{-2}$	1,52	$54,95 \cdot 10^{-2}$	3,1	$88,93 \cdot 10^{-2}$		
0,84	$14,75 \cdot 10^{-2}$	1,54	$55,86 \cdot 10^{-2}$	3,2	$89,72 \cdot 10^{-2}$		
0,86	$15,98 \cdot 10^{-2}$	1,56	$56,75 \cdot 10^{-2}$	3,3	$90,44 \cdot 10^{-2}$		
0,88	$17,23 \cdot 10^{-2}$	1,58	$57,61 \cdot 10^{-2}$	3,4	$91,10 \cdot 10^{-2}$		
0,90	$18,50 \cdot 10^{-2}$	1,60	$58,46 \cdot 10^{-2}$	3,5	$91,70 \cdot 10^{-2}$		

SPECTRAL EMISSIVITY

Prepared by Roeser and Wensel, National Bureau of Standards
Spectral Emissivity of Materials, Surface Unoxidized for 0.65μ

Element	Solid	Liquid	Element	Solid	Liquid
Beryllium	0.61	0.61	Thorium	0.36	0.40
Carbon	0.80-0.93	...	Titanium	0.63	0.65
Chromium	0.34	0.39	Tungsten	0.43	...
Cobalt	0.38	0.37	Uranium	0.54	0.34
Columbium	0.37	0.40	Vanadium	0.35	0.32
Copper	0.10	0.15	Yttrium	0.35	0.35
Erbium	0.55	0.38	Zirconium	0.32	0.30
Gold	0.14	0.22	Steel	0.37	0.37
Iridium	0.30	...	Cast Iron	0.35	0.40
Iron	0.35	0.37	Constantan	0.35	...
Manganese	0.59	0.59	Monel	0.37	...
Molybdenum	0.37	0.40	Chromel P (90Ni-10Cr)	0.35	...
Nickel	0.36	0.37	80Ni-20Cr	0.35	...
Palladium	0.33	0.37	60Ni-24Fe-16Cr	0.36	...
Platinum	0.30	0.38	Alumel (95Ni; Bal. Al, Mn, Si)	0.37	...
Rhodium	0.34	0.30	90Pt-10Rh	0.27	...
Silver	0.07	0.07	...	...	...
Tantalum	0.49	...	...	...	...

Spectral Emissivity of Oxides

The emissivity of oxides and oxidized metals depends to a large extent upon the roughness of the surface. In general, higher values of emissivity are obtained on the rougher surfaces.

Material	Range of observed values	Probable value for oxide formed on smooth metal	Material	Range of observed values	Probable value for oxide formed on smooth metal
Aluminum oxide	0.22-0.40	0.30	Alumel (oxidized)	...	0.87
Beryllium oxide	0.07-0.37	0.35	Cast Iron (oxidized)	...	0.70
Cerium oxide	0.58-0.80	...	Chromel P (90Ni-10Cr) (oxidized)	...	0.87
Chromium oxide	0.60-0.80	0.70	80Ni-20Cr (oxidized)	...	0.90
Cobalt oxide	0.55-0.71	0.75	60Ni-24Fe-16Cr (oxidized)	...	0.83
Columbium oxide	0.60-0.80	0.70	55Fe-37.5Cr-7.5 Al (oxidized)	...	0.78
Copper oxide	0.63-0.93	0.70	70Fe-23Cr-5Al-2Co (oxidized)	...	0.75
Iron oxide	0.10-0.43	0.20	Constantan (55Cu-45Ni) (oxidized)	...	0.84
Magnesium oxide	0.85-0.96	0.90	Carbon Steel (oxidized)	...	0.50
Nickel oxide	0.20-0.57	0.50	Stainless Steel (18-3) (oxidized)	...	0.85
Thorium oxide	0.32-0.60	...	Porcelain	0.25-0.50	...
Titanium oxide	0.50	...	...	...	...
Zirconium oxide	0.18-0.33	0.40	...	...	...

PROPERTIES OF TUNGSTEN

JONES AND LANGMUIR, GENERAL ELECTRIC REVIEW

Temp. °K	Resistivity microhm cm	Electron emission amp./cm²	Evaporation g/cm² sec	Vapor pressure dynes/cm²	Thermal expansion per cent 1/° at 293°	Atomic heat cal./g. atom./°C.
300	5.55	...	...	...	0.003	6.0
400	8.06	...	...	...	0.044	6.0
500	10.56	...	...	...	0.086	6.1
600	13.23	...	...	...	0.130	6.1
700	16.09	...	...	...	0.175	6.2
800	19.00	...	...	...	0.222	6.2
900	21.94	...	...	...	0.270	6.3
1000	24.93	1.07 × 10 ⁻¹³	5.32 × 10 ⁻¹⁴	1.98 × 10 ⁻¹³	0.320	6.4

PROPERTIES OF TUNGSTEN

JONES AND LANGMUIR, GENERAL ELECTRIC REVIEW

Temp. °K	Resistivity microhm cm	Electron emission amp./cm²	Evaporation g/cm² sec	Vapor pressure dynes/cm²	Thermal expansion per cent 1/° at 293°	Atomic heat cal./g. atom./°C.
1100	27.94	1.52 × 10 ⁻¹³	2.17 × 10 ⁻¹³	1.22 × 10 ⁻¹³	0.371	6.4
1200	30.98	9.73 × 10 ⁻¹³	3.21 × 10 ⁻¹³	1.87 × 10 ⁻¹³	0.424	6.3
1300	34.08	3.21 × 10 ⁻¹²	1.35 × 10 ⁻¹²	8.18 × 10 ⁻¹⁴	0.479	6.7
1400	37.19	6.62 × 10 ⁻¹²	2.51 × 10 ⁻¹²	1.62 × 10 ⁻¹³	0.535	6.3
1500	40.36	9.14 × 10 ⁻¹²	2.37 × 10 ⁻¹²	1.54 × 10 ⁻¹³	0.593	7.0
1600	43.55	9.27 × 10 ⁻¹²	1.25 × 10 ⁻¹¹	8.43 × 10 ⁻¹⁴	0.652	7.1
1700	46.78	7.08 × 10 ⁻¹²	4.17 × 10 ⁻¹¹	2.82 × 10 ⁻¹³	0.713	7.2
1800	50.05	4.47 × 10 ⁻¹¹	8.31 × 10 ⁻¹¹	6.31 × 10 ⁻¹³	0.775	7.4
1900	53.35	2.28 × 10 ⁻¹¹	1.41 × 10 ⁻¹⁰	1.01 × 10 ⁻¹²	0.839	7.6
2000	56.67	1.00 × 10 ⁻¹¹	1.76 × 10 ⁻¹⁰	1.33 × 10 ⁻¹²	0.904	7.7
2100	60.06	3.93 × 10 ⁻¹¹	1.66 × 10 ⁻¹⁰	1.23 × 10 ⁻¹²	0.971	7.8
2200	63.48	1.33 × 10 ⁻¹⁰	1.25 × 10 ⁻¹⁰	9.88 × 10 ⁻¹³	1.039	8.0
2300	66.91	4.07 × 10 ⁻¹⁰	8.00 × 10 ⁻¹¹	6.47 × 10 ⁻¹³	1.109	8.2
2400	70.39	1.16 × 10 ⁻¹⁰	4.26 × 10 ⁻¹¹	3.52 × 10 ⁻¹³	1.180	8.3
2500	73.91	2.98 × 10 ⁻¹⁰	2.03 × 10 ⁻¹⁰	1.71 × 10 ⁻¹²	1.253	8.4
2600	77.49	7.16 × 10 ⁻¹⁰	8.41 × 10 ⁻¹¹	7.24 × 10 ⁻¹³	1.328	8.6
2700	81.04	1.63 × 10 ⁻⁹	3.19 × 10 ⁻¹⁰	2.86 × 10 ⁻¹²	1.404	8.7
2800	84.70	3.54	1.10 × 10 ⁻⁹	9.84 × 10 ⁻¹³	1.479	8.9
2900	88.33	7.31	3.30 × 10 ⁻⁹	3.00 × 10 ⁻¹²	1.561	9.0
3000	92.04	1.42 × 10	9.95 × 10 ⁻⁹	9.20 × 10 ⁻¹²	1.642	9.2
3100	95.76	2.64 × 10	2.60 × 10 ⁻⁸	2.50 × 10 ⁻¹¹	1.724	9.4
3200	99.54	4.78 × 10	6.38 × 10 ⁻⁸	6.13 × 10 ⁻¹¹	1.808	9.5
3300	103.3	8.44 × 10	1.56 × 10 ⁻⁷	1.51	1.893	9.6
3400	107.2	1.42 × 10 ²	3.47 × 10 ⁻⁷	3.41	1.980	9.8
3500	111.1	2.33 × 10 ²	7.54 × 10 ⁻⁷	7.52	2.068	9.9
3600	115.0	3.73 × 10 ²	1.51 × 10 ⁻⁶	1.53 × 10	2.158	10.1
3655	117.1	4.79 × 10 ²	2.28 × 10 ⁻⁶	2.33 × 10	2.209	10.2

ROESER AND WENSEL, NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

Temp. °K	Normal brightness new candles per cm²	Spectral emissivity 0.65μ	0.467μ	Color emissivity	Total emissivity	Brightness comp. 0.65μ	Color temp.
300	...	0.472	0.505	...	0.032	...	...
400	...	...	...	...	0.042	...	...
500	...	...	...	...	0.053	...	...
600	...	...	...	...	0.064	...	...
700	...	...	...	...	0.076	...	...
800	...	...	...	...	0.088	...	...
900	...	...	...	...	0.101	...	...
1000	0.0001	0.458	0.486	0.395	0.114	966	1007
1100	0.001	0.456	0.484	0.392	0.128	1059	1108
1200	0.006	0.454	0.482	0.390	0.143	1151	1210
1300	0.029	0.452	0.480	0.387	0.158	1242	1312
1400	0.11	0.450	0.478	0.385	0.175	1332	1414
1500	0.33	0.448	0.476	0.382	0.192	1422	1516
1600	0.92	0.446	0.475	0.380	0.207	1511	1619
1700	2.3	0.444	0.473	0.377	0.222	1599	1722
1800	5.1	0.442	0.472	0.374	0.236	1687	1825
1900	10.4	0.440	0.470	0.371	0.249	1774	1928
2000	20.0	0.438	0.469	0.368	0.260	1861	2032
2100	36	0.436	0.467	0.365	0.270	1946	2136
2200	61	0.434	0.466	0.362	0.279	2031	2241
2300	101	0.432	0.464	0.359	0.288	2115	2345
2400	157	0.430	0.463	0.356	0.296	2198	2451
2500	240	0.428	0.463	0.353	0.303	2280	2556
2600	350	0.428	0.460	0.349	0.311	2362	2662
2700	500	0.424	0.459	0.346	0.318	2443	2769
2800	690	0.422	0.458	0.343	0.323	2523	2876
2900	950	0.420	0.456	0.340	0.329	2602	2984
3000	1260	0.418	0.455	0.336	0.334	2681	3092
3100	1650	0.416	0.454	0.333	0.337	2759	3200
3200	2100	0.414	0.452	0.330	0.341	2837	3310
3300	2700	0.412	0.451	0.326	0.344	2913	3420
3400	3400	0.410	0.450	0.323	0.348	2989	3530
3500	4200	0.408	0.449	0.320	0.351	3063	3642
3600	5200	0.406	0.447	0.317	0.354	3137	3754