

輻射定律

目的

檢視熱輻射的能量和發熱體溫度的關係，並熟悉熱輻射功率的測量方法，與發熱體溫度的測量。

原理介紹

黑體輻射現象在近代物理中扮演很重要的角色，特別是在量子力學以及統計物理的發展。1911 和 1918 的諾貝爾物理獎都和這個現象有關。

The 1911 Nobel prize in Physics was awarded to Wilhelm Wien, Germany
For his discoveries regarding the laws governing the radiation of heat.
 The 1918 Nobel prize in Physics was awarded to Max Plank, Germany
In recognition of the services he rendered to the advancement of Physics by his discovery of energy quanta.

根據 Plank 的分析，一個絕對溫度在 T 的空腔，會輻射出波長分佈很寬的連續光譜，在波長為 λ ，範圍 $d\lambda$ 內的輻射功率為

$$I_{BB}(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{eq. 1})$$

其中 h 是 Plank constant, c 是光速, k_B 是 Boltzmann constant。圖 1 是幾個不同溫度的 $I_{BB}(\lambda, T)$ 對 λ 的分佈圖。

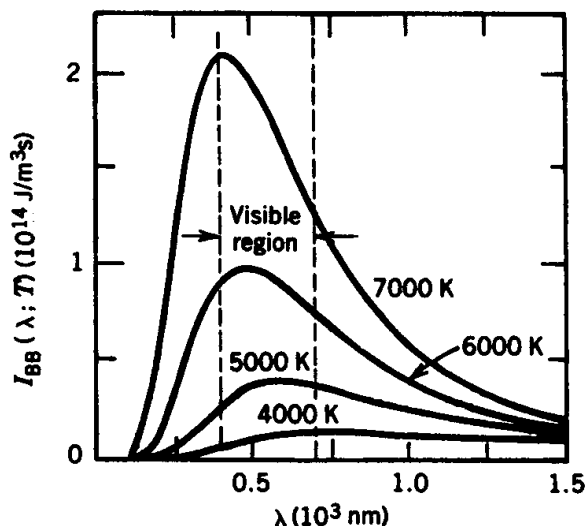


圖 1 $I_{BB}(\lambda, T)$ 對 λ 的分佈圖。

輻射的總功率只要將 eq. 1 對 λ 由 0 到 ∞ 積分即可得

$$P = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{eq. 2})$$

其中 $\sigma = 2\pi^5 k_B^4 / 15c^2 h^3 = 5.6703 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ 稱為 Stefan-Boltzmann constant。

圖 1 中還可發現，當溫度 T 升高時，最大輻射功率的波長 λ_{max} 會變小，他們符合

$$\lambda_{\text{max}} T = 0.2014 \frac{hc}{k_B} \quad (\text{m} \cdot \text{K}) \quad (\text{eq. 3})$$

這個關係稱做 Wien displacement law。

在應用 eq. 1 或 2 的結果時要注意，一般的發熱體和可當作完全吸收體黑體的空腔是不同的，一般物質並不會完全吸收，稱做灰體(gray body)，其熱輻射的頻譜強度應修正為

$$I(\lambda, T) d\lambda = \varepsilon(\lambda, T) I_{\text{BB}}(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{eq. 4})$$

$\varepsilon(\lambda, T)$ 稱做 emissivity，值小於 1，通常是波長和溫度的函數。圖 2 是本實驗所使用的發熱體鎢(tungsten, W)的 $\varepsilon(\lambda, T)$ 實驗數據。

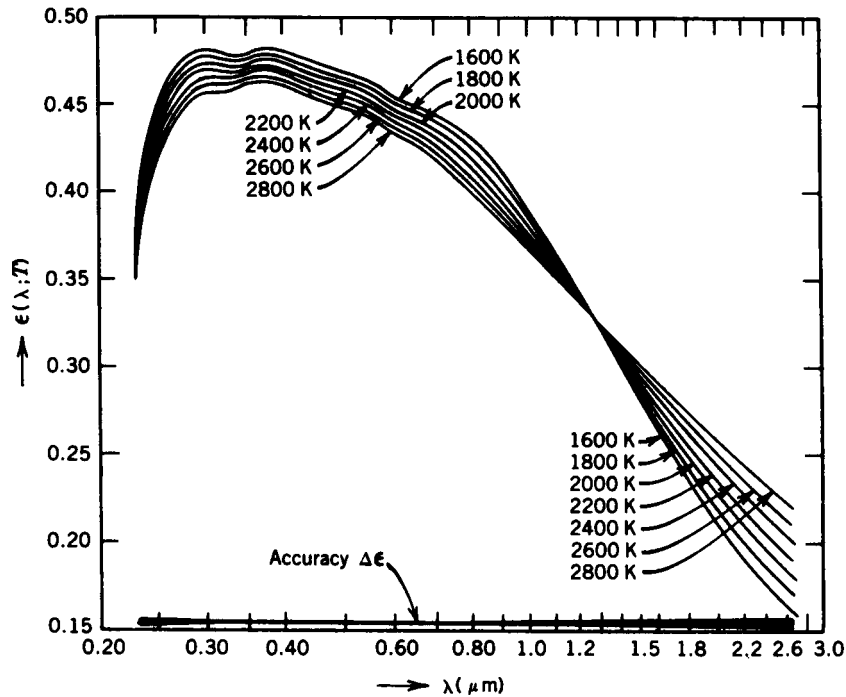


圖 2 鎢(tungsten, W)的 $\varepsilon(\lambda, T)$ 實驗數據。

Eq. 2 應修正為

$$P = \varepsilon_T \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{eq. 5})$$

ε_T 是平均的 emissivity。

這個實驗是要通電流至一鎢絲燈泡，鎢燈絲的溫度可由其電阻值 R 隨溫度的變化測得。表一 是鎢燈絲在溫度 T 的電阻與 300K 時的電阻 $R_{300\text{K}}$ 之間的比值 $r (=R/R_{300\text{K}})$ 與溫度的關係，圖 3 是他們關係的圖形表示。

R/R_{300K}	T (K)	R/R_{300K}	T (K)	R/R_{300K}	T (K)	R/R_{300K}	T (K)
1.0	300	5.48	1200	10.63	2100	16.29	3000
1.43	400	6.03	1300	11.24	2200	16.95	3100
1.87	500	6.58	1400	11.84	2300	17.62	3200
2.34	600	7.14	1500	12.46	2400	18.28	3300
2.85	700	7.71	1600	13.08	2500	18.97	3400
3.36	800	8.28	1700	13.72	2600	19.66	3500
3.88	900	8.86	1800	14.34	2700	26.35	3600
4.41	1000	9.44	1900	14.99	2800		
4.95	1100	10.03	2000	15.63	2900		

表一 鎢絲燈相關電阻係數(R/R_{300K})和溫度對照表

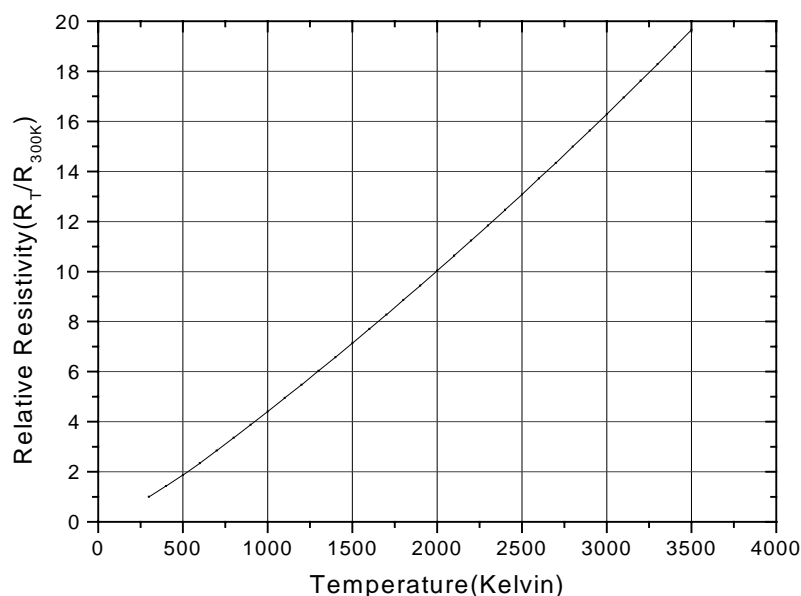


圖 3 鎢絲燈相關電阻係數(R/R_{ref})和溫度對照圖

被加熱鎢絲所發出來的熱輻射可經由兩個方法來測量。第一種是直接用輻射偵測器來測量，另一種是利用能量守恆方式間接測得。分述如下。

第一種方法是用一種非常寬頻的輻射偵測器，稱做熱堆(thermopile)，來偵測輻射的功率。熱堆的原理見參考資料。

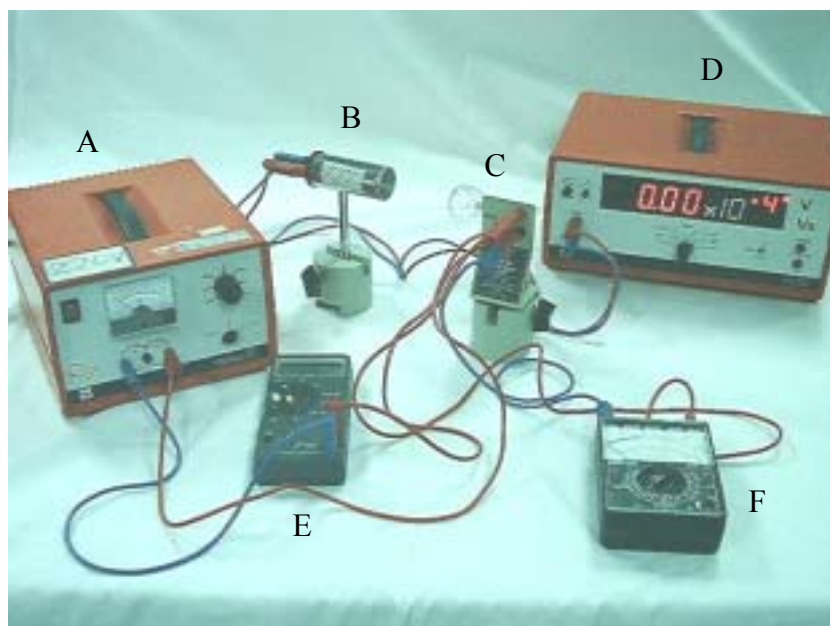
第二種方法則是考慮在固定的鎢燈絲溫度，電源所提供的功率 I^2R ，應該和鎢燈絲以熱方式將能量散失在環境的功率相同，這個能量散失的方式包括熱傳導或熱對流（大小和溫差 $T-T_0$ 成正比，是環境的溫度），以及熱輻射。我們可以得到下面方程式：

$$I^2 R = K(T - T_0) + \varepsilon_T \sigma A(T^4 - T_0^4) \quad (\text{eq. 6})$$

當溫度 T 很高時，例如在 1000K，eq. 6 右方除 T^4 項外，其他均可忽略，可得

$$I^2 R \approx \varepsilon_T \sigma A T^4 \quad (\text{eq. 7})$$

儀器裝置



A. 電源供應器 B. 熱堆輻射偵測器 C. 鎢絲燈泡
D. 微伏計 E. 安培計 F. 伏特計

圖 4 黑體輻射實驗裝置

實驗步驟

1. 首先測量 T_{ref} ，即室溫(以絕對溫標)表示和 R_{ref} (史特凡-波茲曼燈泡的電阻)。
2. 裝置儀器如圖 4。伏特計直接連接在燈泡的兩端點上量電壓，熱堆輻射偵測器，應該調整和燈泡同高度，但相距 6 公分的距離。
注意:燈泡的電壓絕不可超過 15V，會燒壞燈絲。
3. 打開電源供應器，於 1V~15V 的範圍，以 0.5V 為區間增加電壓大小，記錄對應每個電壓值的電流 I 及微伏計上所測得的訊號大小 U 。
注意:在讀值與讀值之間，請放一片熱絕緣板於燈泡和熱堆輻射偵測器中間。

預習問題

1. 由 eq. 3 計算黑體在 300K 及 310K 輻射功率最強的波長各為多少？在 500K、

1000K 及 1500K 呢？都在哪些輻射的波段？可見光、紅外線或遠紅外線？

2. 參閱相關資料，描述熱堆的工作原理。
3. 在實驗步驟三，為何要在讀值與讀值之間，請放一片熱絕緣板於燈泡和熱電偶感應器中間？
4. 利用 Origin、Excel 或其他類似軟體，將表一（或圖 3）之溫度 T 對電阻比值 r 關係，找一個簡單的數學式（例如多項式）做近似，得到 $T(r)$ 。這個關係在分析數據時很有用。

數據分析與思考問題

1. 以實驗步驟 3 所得的電流 I 和電壓差 V ，計算其電阻 $R=V/I$ ，然後計算其相關電阻比值 $r(=R/R_{300K})$ ，並利用電阻係數對照表(表一)或對照圖(圖 3)可得燈絲的溫度 T ，最好用你在預習問題 4 所得到的 $T(r)$ 關係，利用電腦，將 r 代入，即可求 T 。
2. 以輻射偵測器的輸出 U 對 T 在全對數座標做圖，檢視在那個溫度範圍，實驗結果合乎(eq. 5)？為什麼？由你的結果估算一下 ε_T 。
3. 以 I^2R 對 T 在全對數座標做圖，檢視在那個溫度範圍，實驗結果合乎(eq. 7)？為什麼？由你的結果估算一下 ε_T 。
4. 討論這個實驗的誤差來源。
5. 想一想，軍隊中常用的夜視鏡為何必須對紅外線這個區段的頻譜特別靈敏。除了這個實驗所用的熱堆外，請你找一下資料，舉出其他兩個能夠偵測紅外線的技術。