



大氣輻射

曾忠一·著

大·學·科·學·叢·書 ⑤

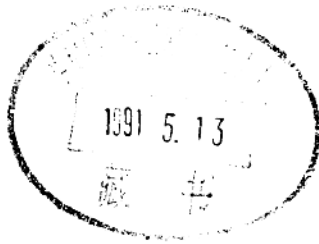
P351.3
227

曾忠一著

大氣輻射

大學科學叢書⑤

TW55/18



大學科學叢書編審委員會

劉廣定(召集人)

王 鑫 王亢沛 呂助增 李國偉
游復熙 黃仲嘉 黃良平 黃啓穎
蔡清彥 蔡義本

106827

大學科學叢書⑤

大氣輻射

77.10.0897

中華民國七十七年十月初版
保有版權·翻印必究

定價：新臺幣四五〇元

著者 曾 忠 一
發行人 王 必 成

出版者 聯經出版事業公司
臺北市忠孝東路四段561號
電話：7631000-706
郵政劃撥帳戶第0100559-3號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第0130號

· 33015-5 ·

叢書弁言

數學、物理學、化學、生物學、地球科學及天文學等純粹科學是應用科技的基礎。但在我國，多年來這些基礎科學一直不如應用科技那樣受到政府及民間的重視。由於一些有識之士不斷地呼籲和鼓吹，從民國七十一年起，政府才漸漸認識基礎科學的重要，開始增加有關的研究發展及教育方面的經費，也訂定了一些鼓勵學者積極從事研究及優秀青年攻讀基礎科學的辦法。然而，其他方面的配合卻仍顯著不足，尤其是科學參考書之出版，幾付闕如。

國立臺灣大學前校長虞兆中先生，為著名之工程學家，一向對基礎科學十分重視，於推動科學中文化也極為熱心。自公職退休後，於民國七十四年擔任聯經出版事業公司董事長期間，鑑於坊間缺乏適當的大學程度之中文科學參考書，對初學、進修及自習者均有所不便，實有碍我國科學之發展，乃倡議出版「大學科學叢書」，邀請國內從事科學教學與研究、且對科學教育素具熱誠之學人，就教學研究心得，配合我國學生程度及需要，撰寫涵蓋基礎科學各個領域的中文書籍，提供最新素材，以供大學在校學生及社會人士參考利用。七十四年初囑請中央研究院李國偉、蔡義本，臺灣大學王鑫、王允沛、游復熙、黃仲嘉、黃良平、黃啟穎、蔡清彥及清華大學呂助增各位先生組成本叢書編審委員會，與聯經出版事業公司編輯委員會共同規劃出版事宜。於是年

九月邀定作者，開始撰著工作。

本叢書計有數學三種、物理學四種、化學三種、生物學八種、地球科學七種、及天文學一種，分由三十餘位學有專精之有關學人撰寫。兩年來，承虞先生多方鼓勵，聯經出版事業公司充分支援，廣定謹代表本叢書編審委員會各同仁，致由衷的謝意。現各書即將開始陸續出版，謹誌始末，並祈科學界先進及海內外讀者，對本叢書的內容不吝指教是幸。

劉廣定 謹識

中華民國七十六年九月十六日
於臺灣大學化學系

自序

人類的活動已經擾亂了氣候系統的平衡，並且無意中改變了氣候。近年來科學家對氣候問題的興趣和關切，已經擴大了大氣科學原有的研究範圍，使得一些受到氣象學家忽視的分支學科重新獲得應有的重視，大氣輻射學就是其中最重要的一個。另外，過去三十年來太空技術的長足進步，給大氣、天體及地球資源的遙測提供絕佳的條件。由於遙測就是藉地表或大氣與輻射間的相互作用來推定其物理性質的方法，在目前遙測技術蓬勃發展的同時，大氣輻射學的重要性也隨着增加。不但這樣，輻射過程對種種尺度的大氣現象都有深遠而又廣泛的影響。現在大氣輻射學已經成為科學界熱烈研究的領域，因此現代的大氣科學學生必須具備有關大氣輻射學的基本知識。

本書有系統地為下一代的氣象學家介紹大氣輻射原理，希望能吸引更多的人加入這方面的科研工作。本書共分為五章。第一章闡述輻射的基本觀念和原理，包括輻射傳遞方程及表面的輻射特性。太陽輻射是影響地球氣候的唯一外在因子，也是驅動大氣環流的主要能源，大氣層外的太陽輻射是第二章的內容。第三章簡介分子光譜學的基本知識。第四章和第五章討論大氣和輻射之間的相互作用，也就是大氣中太陽輻射和長波輻射傳遞的特徵，重點放在參數化方面。除了這五章以外，書後還附有參考文獻和索引，以供讀者參考。至於輻射和氣候間的關係及大氣的衛星遙測，另有兩本專書做詳細的介紹。

著者最早接觸到的輻射專書，除了鄭平教授的博士論文外，

就是廖國男教授的〔大氣輻射導論〕。因此本書受到後者的影響很大，尤其是在內容、結構以及數學符號方面。

本書是根據過去六年來的教學和研究資料編寫而成的。在這段期間中，著者曾在臺大大氣科學系講授大氣物理和大氣遙測，在文化大學講授大氣輻射、大氣遙測以及氣象衛星應用，在中央氣象局講授輻射參數化，此外也執行國家科學委員會和農業委員會的輻射與遙測研究計畫。這些工作都和本書的編寫有直接的關係。

在本書的編寫和出版過程中，著者獲得許多學生和同事的協助。廖宇慶和黃柏銘提出的問題及隨後的討論，使我獲益不淺。黃婉玲、謝章和、陳俊達、王祥瑞等人進行校對工作，提出寶貴的意見，改正不少的錯誤。最後要感謝蔡清彥教授的推薦和聯經的協助，本書才得以早日問世。

過去幾個月來，著者費盡心力從事編輯與校對工作，檢查每個句子和公式，希望完全沒有錯誤存在。雖然這樣，本書一定會有寫得不夠清楚的地方，甚至還有不少缺點和錯誤，希望讀者發現以後能毫不保留地提出來，以便將來有機會再改進。

曾忠一 1988年3月3日
於臺大大氣科學系

目次

叢書弁言

自序

第一章 輻射基本原理

1.1 輻射的基本觀念	1
1.2 輻射過程	18
1.3 黑體輻射定律	24
1.4 輻射傳遞方程	32
1.5 平行平面大氣中的輻射傳遞方程	42
1.6 表面的輻射特性	55
參考讀物	62

第二章 大氣層外的太陽輻射

2.1 太陽	63
2.2 地球	68
2.3 大氣層外的太陽光譜	78
2.4 大氣層外的日射量	90
2.5 斜面上的日射量	99
參考讀物	104

第三章 氣體吸收帶與透射率

3.1 吸收線的形成	105
3.2 分子的吸收帶	108

3.3	吸收線的形狀	121
3.4	平均透射率的觀念	127
3.5	均勻大氣的透射率	132
3.6	非均勻大氣的平均透射率	150
	參考讀物	161
第四章 大氣中的太陽輻射傳遞		
4.1	高層大氣中紫外輻射的吸收	163
4.2	平行平面大氣中的太陽輻射傳遞	177
4.3	太陽輻射的吸收	182
4.4	大氣中的散射	198
4.5	雲對太陽輻射的效應	214
4.6	太陽輻射傳遞的參數化	222
	參考讀物	237
第五章 大氣中的長波輻射傳遞		
5.1	紅外輻射的吸收	239
5.2	平行平面大氣中的長波輻射傳遞	248
5.3	輻射圖	262
5.4	雲對長波輻射的效應	274
5.5	長波輻射傳遞的參數化	281
	參考讀物	298
	主要符號表	299
	物理常數與單位換算	303
	略語表及特別名詞漢英對照表	305
	習題	307
	參考文獻	335
	索引	349

第一章

輻射基本原理

1.1 輻射的基本觀念

1.1.1 輻射的本質

大氣中能量傳遞有三種方式，即傳導、對流和輻射。傳導就是分子運動時所引起的動能交換。換句話說，傳導是物質互相接觸時因溫差而產生的熱傳遞現象。對流則藉物質本身的流動而達成熱傳遞。輻射和上面兩種傳遞方式不同，其過程並不需要任何介質，它以電磁波的形式進行能量交換。在大氣能量交換過程中，傳導可以忽略不計。因此，對流和輻射是大氣中能量傳遞的最主要過程。實際上地球與宇宙間的能量交換卻只以輻射方式來進行。太陽輻射能是影響大氣運動及大氣和地表許多過程的唯一能量來源。同時地球及其大氣也放出輻射到太空。因此，輻射過程在大氣中能量收支方面扮演重要的角色。

輻射過程以電磁波的形式進行能量的傳遞與交換。電磁輻射以波的形式運動，所有的電磁波以同樣的速度傳播，這就是光速。在真空中光速為

$$c = 2.997925 \times 10^{10} \text{cm/sec}$$

在空氣中光速也接近這個數值。可見光以及伽瑪射線、X射線、紫外線、紅外輻射、微波和無線電波（射頻波）等構成了電磁波譜。這些電磁波的頻率及波長範圍如表 1-1 所示。必須注意，由

表 1-1 電磁波譜。

波 譜 區 域	頻 率 範 圍 (Hz)	波 長 範 圍 (m)
伽 瑪 射 線	$3 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{22}$	$10^{-14} \sim 10^{-10}$
X 射 線	$3 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{19}$	$6 \times 10^{-12} \sim 10^{-9}$
紫 外 線	$8 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{17}$	$10^{-9} \sim 3.8 \times 10^{-7}$
可 見 光	$4 \times 10^{14} \sim 8 \times 10^{14}$	$3.8 \times 10^{-7} \sim 7.8 \times 10^{-7}$
紅 外 輻 射	$3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{14}$	$7.8 \times 10^{-7} \sim 10^{-3}$
微 波	$10^9 \sim 3 \times 10^{11}$	$10^{-3} \sim 0.3$
無 線 電 波	$10^2 \sim 10^9$	$0.3 \sim 3 \times 10^6$

於電磁波譜是連續的，故表 1-1 只是大致的分類而已。

人類肉眼的視網膜只對頻率從 4.3×10^{14} Hz 到 7.5×10^{14} Hz (波長 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 的電磁波有反應，這個頻率區間的電磁波稱為可見光。可見光在眼睛上引起不同的感覺叫做顏色，這和電磁波的頻率有關。由於顏色和頻率有一定的關係 (表 1-2)，因此單頻波也叫單色波。

表 1-2 顏色的頻率和波長範圍。

顏 色	頻 率 (Hz)	波 長 (m)
紫	$7.69 \sim 6.59 \times 10^{14}$	$3.90 \sim 4.55 \times 10^{-7}$
藍	$6.59 \sim 6.10$	$4.55 \sim 4.92$
綠	$6.10 \sim 5.20$	$4.92 \sim 5.77$
黃	$5.20 \sim 5.03$	$5.77 \sim 5.97$
橙	$5.03 \sim 4.82$	$5.97 \sim 6.22$
紅	$4.82 \sim 3.84$	$6.22 \sim 7.80$

頻率從 8×10^{14} Hz 到 3×10^{17} Hz 的電磁波叫紫外線。太陽是紫外線的一個重要來源。太陽的紫外線和高層大氣的原子相互作用而產生許多離子，因此高度大於90公里的大氣層稱為電離層。

頻率從 3×10^{11} Hz 到 4×10^{14} Hz 的電磁波叫紅外輻射。紅外輻射在工業、醫學以及科學上有許多用途。紅外輻射是由分子及熱物體所產生的。

微波的頻率從 10^9 Hz 到 3×10^{11} Hz，波長從 0.3 m 到 10^{-3} m 之間。微波被用在雷達及別的通信系統中。微波主要是由電子儀器，也有極小部分是由熱物體產生的。

射頻波的波長由數千公里到 0.3 公尺左右，頻率大致從幾百 Hz 到 10^9 Hz 之間。射頻波被用在電視及收音機的廣播系統中，它們是由電子儀器，最主要是由振盪電路所產生的。

大氣裏的輻射傳遞過程中最重要的電磁波譜包括紫外線、可見光以及紅外輻射。例如太陽輻射的能量中，大約50%為紅外輻射，大約40%為可見光，而只有10%在小於可見光波長的區域。至於地球及其大氣所放出的電磁能量絕大部分為紅外輻射。

電磁波也被用來探測地球資源、大氣以及天體。在遙測中所使用的最重要的電磁波譜包括紫外線、可見光、紅外輻射以及微波。一般氣象雷達使用的電磁波波長大致從3cm到10cm，這個區域屬於微波的範圍。

電磁波的頻率 ν 和波長 λ 之間有下面的關係：

$$c = \lambda \nu$$

頻率 ν 是指單位時間內的振動次數，其因次為時間的倒數，通用單位為赫 (Hz)。波長 λ 具有長度的因次，通常用微米 (μm) 為單位，

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$$

在紫外區，波長有時也以埃 (\AA) 為單位，

$$1 \text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$$

紅外輻射通常用波數 ν 來表示，其定義為波長的倒數，即單位長度內波的個數：

$$\nu = 1/\lambda = \bar{\nu}/c$$

波數的通用單位為 cm^{-1} 。微波通常用頻率表示，通用單位為 GHz，
 $1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$

必須記得，由於在大氣輻射問題中光速都可視為常數，故波長、頻率和波數有一對一的關係，這三個量中的任何一個都可用來表徵電磁波。

1.1.2 立體角

輻射場的分析常常需要考慮單位立體角的輻射能。立體角是包含在一錐體表面內的空間。如圖 1-1 所示，以頂點 O 為球心畫一半徑 r 的球面，那麼立體角 Ω 可用下式表示：

$$\Omega = \sigma/r^2$$

其中 σ 是錐體所截的球表面積。因為一個球的表面積為 $4\pi r^2$ ，所以整個球或空間所張開的立體角是 4π 。半球的立體角是 2π 。立體角的單位為球面度 (steradian, 簡寫為 sr)。

當立體角很小時，球表面的面積元素為 $d\sigma$ ，這時由球心到 $d\sigma$ 是一個特別的方向，我們用 $\hat{\Omega}$ 表示這個方向的單位向量。立

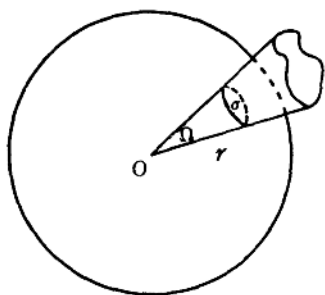


圖 1-1 立體角。

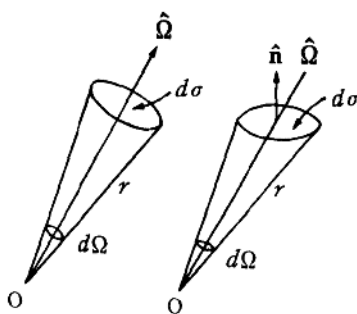


圖 1-2 立體角元素。

體角元素 $d\Omega$ 的定義為（圖1-2）

$$d\Omega = d\sigma / r^2 \quad (1)$$

其中 $d\sigma$ 的單位法線向量必須是 $\hat{\Omega}$ 。若 $d\sigma$ 的單位法線向量為 \hat{n} （圖1-2），則(1)式的定義必須改為

$$d\Omega = \frac{d\sigma}{r^2} \hat{\Omega} \cdot \hat{n} \quad (2)$$

(1)和(2)式中 r 是錐體的頂點（即觀測點）到面積元素 $d\sigma$ 的距離。若用球坐標表示，則球面上的面積元素為 $r d\theta \cdot r \sin\theta d\phi$ ，因此立體角元素為（圖1-3）

$$d\Omega = \frac{r d\theta \cdot r \sin\theta d\phi}{r^2} = \sin\theta d\theta d\phi \quad (3)$$

其中 θ 和 ϕ 分別為天頂角和方位角。由(3)式可知，立體角可按下式計算：

$$\Omega = \iint \sin\theta d\theta d\phi \quad (4)$$

另外，設 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3$ 為沿直角坐標 x, y, z 方向的單位向量，那麼

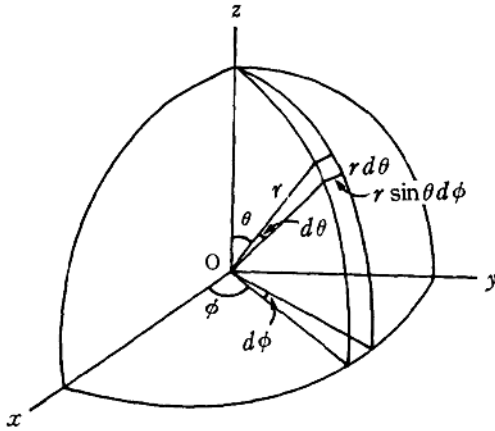


圖 1-3 球面上的面積元素。

$$\hat{\Omega} = \sin\theta \cos\phi \hat{\mathbf{a}}_1 + \sin\theta \sin\phi \hat{\mathbf{a}}_2 + \cos\theta \hat{\mathbf{a}}_3$$

太陽截面在地表上所張開的立體角很小，要計算這個立體角用(1)式較方便。設太陽半徑為 a_s ，那麼太陽截面的面積約為 πa_s^2 ，因此太陽截面在地面上所張開的立體角為

$$\Omega_{\odot} = \pi a_s^2 / d^2$$

其中 d 是日地距離。日地距離的變動不大，只有3%左右，從1月3日（近日點）的 1.47×10^{13} cm變動到7月4日（遠日點）的 1.52×10^{13} cm。其平均值為

$$d_m = 1.49598 \times 10^{13} \text{cm}$$

日地平均距離 d_m 通常稱為1天文單位。太陽半徑為

$$a_s = 6.96000 \times 10^{10} \text{cm}$$

故太陽截面所張開的立體角為

$$\Omega_{\odot} = 6.80012 \times 10^{-5} \text{sr}$$

這個立體角和 4π 比起來相當小，在許多應用中太陽所張開的立體角可視為零，也就是說把太陽當做一點看待。

1.1.3 光子

1901年Planck提出了電磁波的量子理論。他認為輻射場上能量的變動是不連續的。換句話說，由於放射和吸收所產生的能量變動是某一單位能量的整數倍。這個單位能量叫光子，其能量 E 為

$$E = h\nu = h\nu c$$

其中 ν 和 ν 分別為頻率和波數， h 為Planck常數，

$$h = 6.626196 \times 10^{-27} \text{erg-sec}$$

光子也具有動量 \mathbf{p} ，可用下式表示：

$$\mathbf{p} = \frac{E}{c} \hat{\Omega} = h\nu \hat{\Omega}$$

其中 $\hat{\Omega}$ 為光子的進行方向。愛因斯坦在1950年更進一步指出，不但輻射能的放射和吸收以光子的形式進行，而且輻射能以光速傳

播。現在一般都認為，光子兼具波動和粒子的特性。在傳播時，光子具有波動的特性；當它和物質進行交互作用時，卻又具有粒子的特性。

總結的說，光子是輻射能的基本單位，它的質量為零，以光速傳播，此外它也有一定的頻率。當一物質吸收或放出輻射時，我們說該物質吸收或放出某一定數目的光子。

1.1.4 光子分布函數和輻射強度

因為光子具有粒子的特性，故像氣體運動論一樣，可以用光子分布函數來表徵輻射場。光子分布函數 f_ν 定義為在時間 t 時單位體積內屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子個數。所謂屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子就是波數在 ν 到 $\nu + d\nu$ 範圍之間，並在以單位向量 $\hat{\Omega}$ 為中心的立體角元素 $d\Omega$ 內運動的光子。因此 f_ν 的因次為個數/體積-波數-立體角。大氣物理學家和天體物理學家覺得用單色輻射強度 I_ν 來表徵輻射場比較方便。單色輻射強度的定義是單位時間內通過垂直於運動方向的單位面積屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子所攜帶的輻射能。考慮任一面積元素 dA ，其單位法線向量為 \hat{n} 。在時間 t 時通過面積元素 dA 的屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子，在時間 $t + dt$ 時已經移動了 $c dt$ 的距離，所以在時間間距 dt 內通過 dA 的光子都在一個斜柱體內（圖1-4）。這個斜柱體的底面積為 dA ，高度為 $\hat{\Omega} \cdot \hat{n} c dt$ ，故其體積為

$$\hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA c dt \quad (1)$$

因此在時間間距 dt 內通過 dA 的這種光子個數為

$$f_\nu \hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA c dt d\nu d\Omega \quad (2)$$

因為一個光子具有的能量為 $h c \nu$ ，故在時間間距 dt 內通過 dA 的屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子所攜帶的輻射能為

$$h \nu f_\nu \hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA c^2 dt d\nu d\Omega \quad (3)$$

因為垂直於 $\hat{\Omega}$ 的面積元素為 $\hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA$ ，故單色輻射強度就是

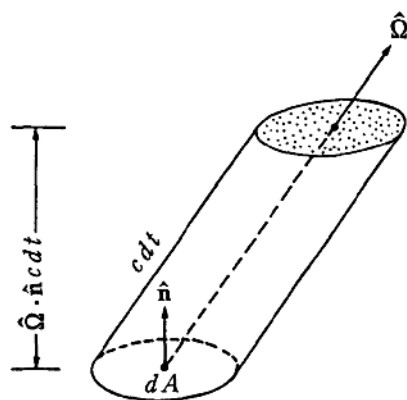


圖 1-4 在時間間距 dt 內通過面積元素 dA 的光子所佔有的體積元素為一斜柱體。

$$I_\nu = \frac{h\nu f_\nu \hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA c^2 dt d\nu d\Omega}{\hat{\Omega} \cdot \hat{n} dA dt d\nu d\Omega} = h\nu c^2 f_\nu \quad (4)$$

光子分布函數和單色輻射強度通常是波數 ν 、位置 \mathbf{r} 、方向 $\hat{\Omega}$ 以及時間 t 的函數，即

$$f_\nu = f_\nu(\mathbf{r}, \hat{\Omega}, t)$$

$$I_\nu = I_\nu(\mathbf{r}, \hat{\Omega}, t)$$

但為簡便計我們不明顯寫出 \mathbf{r} ， t ，有時只寫為

$$f_\nu = f_\nu(\hat{\Omega}) \quad I_\nu = I_\nu(\hat{\Omega})$$

假如輻射場如 f_ν 和 I_ν 等不隨時間變化，則稱為定常的；假如輻射場不依賴於 \mathbf{r} ，則稱為均勻的；假如 f_ν 或 I_ν 和方向無關，則稱為各向同性的。

必須注意， I_ν 的因次是能量/面積-時間-波數-立體角。單位面積單位時間的物理量這個觀念，在其他學科中經常用到，已早為人所熟知。至於為何說屬於 $d\nu d\Omega$ 的光子，這是因為光子（即輻射能）可能具有各種不同的波數或頻率，而且入射於一面積元