

基本近代物理

(修訂版)

原著者：D Halliday

R Resnick

譯述者：江 進 福

科技圖書股份有限公司

基本近代物理

(修訂版)

原著者：D Halliday

R Resnick

譯述者：江 進 福

科技圖書股份有限公司

本書係根據暢銷全球的 Halliday 與 Resnick 教授所著 Fundamental of Physics 第二版新增訂版中的最後第42至48章中文全譯本。這是該書中的最新增訂部份，而為一般中譯本或原文第二版修正本所未錄者。也是這書新版中的最精彩部份，而為目前大專物理課程必需補充的部份。

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：基本近代物理
原著者：Halliday and Resnick
譯述者：江 禱 進
發行人：趙 國 華
發行者：科技圖書股份有限公司
台北市復興南路一段360號7樓之三
電話：7056781·7073230
郵政劃撥帳號 15697

七十一年三月初版
七十三年六月二版

特價新台幣110元

編輯者言

本書是根據 D·Halliday 與 R Resnick 兩教授合著的 "Fundamentals of physics 第二版擴大本中有關近代物理部分全部譯成中文而成。


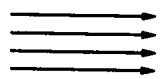



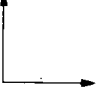




依原作者在其第二版擴大本中的序言所述，從各方面的反應意見認為目前大學理工科教育上，近代物理的基本概念是十分重要而不可或缺的，因而在最近（1981）出版的擴大本中，一下加上五章全新的教材，而致該書頁數較未擴大版增加幾達五分之一。的確，在大一研讀第二版物理學時，要一下讀完厚達一千頁的原文書實有困難，而所能獲得的僅是高中物理的複習與延伸，對近代物理的基本概念仍感缺乏。到二年級以後，要接受接二連三的新課程，如資訊、電算器、材料科學等基本學科時，又需將有關近代物理部分分別從頭講起，不但浪費精力，亦且不切實際。故此次新發行擴大本，的確有其需要而且切合實際。

在這十多年來，Halliday 教授所著的“物理學”尤其是這本“基本物理學”在台灣幾成獨步。由於其取材豐富，允稱大作。若使用原文講授學生負擔甚重，幾有目不暇給之苦。故本省早有譯成中文之舉，使學生能免去閱讀文字的困擾，實有其必要，在事實上已有七八種中譯本之多。本公司為避免重覆，僅將擴大版中屬於近代物理部分全部譯成中文，並予改編成書，以補目前已有中文版譯本的不足。

本書改編的方式，是將原書（1981年版）的第四十二章開始作為第一章，依次編排至第四十八章，共計七章，再加上原書的補充篇“特殊相對論”作為第八章。將重要的近代物理概要彙集一起，故顏其書名為“基本近代物理。除將這一部分完整譯出並將所有偶數習題的答案補齊，同時將該書已公開的解答部分，全部譯出作為附錄，以供讀者參改之用。

本書將適合大一理工科學生所需學習的部分，若老師們覺得有此必要，寧可放棄原書中，已在高中讀過的古典物理重覆部分、以及二年級以後將會重覆學習的部分，如電工學生對電磁部分，機工學生對力學與熱學部分等放棄不講，逕用本書來補充，必能符合實際應用與意外的利益，減少學生學習的痛苦與浪費；這是本公司冒着改編名著的不諱的苦衷，希讀者予以見宥。

科技圖書公司編輯部誌

本書使用箭頭圖說明			
<p>向量</p> 	<p>光線</p> 	<p>場線與流線</p> 	<p>運動或流動</p> 
<p>尺寸線</p> 	<p>座標軸</p> 	<p>場線在平面內</p>  <p>場線在平面外</p> 	<p>運動或流動在平面內</p>  <p>運動或流動在平面外</p> 

目 錄

編輯者言

第一章 光與量子物理

1-1	簡介	1
1-2	空腔輻射	2
1-3	Planck 輻射定律與量子的起源	5
1-4	光電效應	8
1-5	Einstein 的光子理論	11
1-6	Compton 效應	13
1-7	線光譜	18
1-8	Bohr 的氫原子理論	20
1-9	對應原則	25
1-10	複習指引與摘要	26
1-11	問題	27
1-12	習題	29

第二章 波與粒子

2-1	物質波	37
2-2	波動力學	41
2-3	波函數的物理意義	47
2-4	測不準原則 (Uncertainty principle)	50
2-5	波動 - 粒子雙重性 - 互補性原則	54
2-6	複習性指引與摘要	56
2-7	問題	57
2-8	習題	59

2 基本近代物理

第三章 單電子原子

3-1	簡介	64
3-2	氫原子量子數	65
3-3	氫原子波函數	69
3-4	角動量與磁性	72
3-5	Stern, Gerlach 實驗	75
3-6	自旋電子	79
3-7	總角動量 J	82
3-8	磁場中的原子	85
3-9	複習指引與摘要	90
3-10	問題	91
3-11	習題	92

第四章 原子物理：挑選的三個主題

4-1	簡介	100
4-2	X - 射線與元素計數	100
4-3	週期表的建立	106
4-4	雷射	112
4-5	複習指引與摘要	119
4-6	問題	120
4-7	習題	121

第五章 固體的導電性

5-1	簡介	126
5-2	傳導電子 - 允許的狀態	126
5-3	允許狀態的填充	128
5-4	導體、絕緣體與半導體	132
5-5	半導體	135
5-6	半導體裝置	139

5-7	複習指引與摘要	144
5-8	問題	145
5-9	習題	147

第六章 核子物理簡介

6-1	原子核	151
6-2	若干核子性質	152
6-3	放射性蛻變	160
6-4	能障穿透與 α - 蛻變	163
6-5	β - 蛻變	166
6-6	核反應	169
6-7	核模型	173
6-8	複習指引與摘要	178
6-9	問題	180
6-10	習題	181

第七章 由核而來的能量

7-1	簡介	195
7-2	核分裂：基本程序	196
7-3	核反應器的基本原理	201
7-4	熱核融合的基本過程	207
7-5	太陽與其他星球內的熱核融合	209
7-6	控制的熱核融合	213
7-7	複習指引與摘要	219
7-8	問題	220
7-9	習題	221

第八章 狹義相對論—結論摘要

8-1	簡介	229
8-2	公設	229

4 · 基本近代物理

8-3	狹義相對論與Newton力學	230
8-4	轉換方程式	231
8-5	時間延長與長度縮短	232
8-6	相對論性的速相加	236
8-7	質量、動量與動能	238
8-8	質量與能量的等效	240
8-9	問題	242
8-10	習題	243
附錄 1	各種基本物理常數	249
附錄 2	原子週期表	250
附錄 3	主要習題解答	251

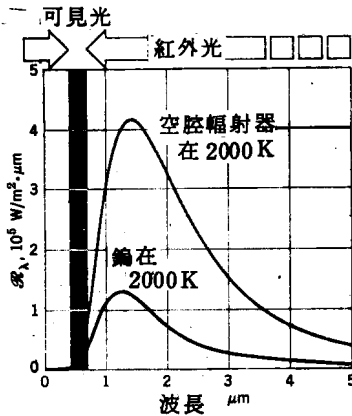
第一章 光與量子物理

1-1 簡 介

在學習基本物理中的光行爲，——所指的光，係指整個電磁波頻譜 (electromagnetic spectrum)，——其標題爲傳遞、反射、折射、干涉、繞射與偏極化等。並已知道，若將光視成波動，則對這些現象均可得以瞭解。接着我們將考慮一些新的實驗，包括光及其與物質間的作用。結果將會發現，只有將光視成一粒子束 (stream of particles)，才能瞭解。

對光性質的兩種觀點——波動與粒子——兩者似乎是互不相容的。我們將在第 2-5 節的方塊中，再面對這個表面的矛盾，屆時再謀求解釋。目前，我們先討論光的粒子觀的實驗證據。茲先從熱物體放射出的光開始。

圖 1-1 的下側曲線，代表一 2000 K 的熾熱鎢絲所發出的輻射對波



■ 1-1 深線為鎢在 2000 K 的輻射頻譜，淡線為同溫度的空腔輻射譜。

2 基本近代物理

長的分佈圖。圖中的縱座標 \mathcal{R}_λ ，稱爲單位波長輻射率(spectral radiancy)。被定義爲，使 $\mathcal{R}_\lambda d\lambda$ 代表波長 λ 至 $\lambda + d\lambda$ 間，物體表面每單位面積輻射出的功率。若用標準 SI 單位，則 \mathcal{R}_λ 單位爲 $W/m^2 \cdot \mu m$ ，而 $\mathcal{R}_\lambda d\lambda$ 的單位爲 W/m^2 。在量度 \mathcal{R}_λ 時，發射方向的整個半球均需計入。

有時我們不計波長，只要總輻射能。此時定義這輻射率(radiancy) \mathcal{R} 爲代表沿前半球，每單位面積發出的輻射功率。其 SI 單位爲 W/m^2 ，將所有波長區間的輻射積分即得

$$\mathcal{R} = \int_0^\infty \mathcal{R}_\lambda d\lambda \quad (1-1)$$

輻射率 \mathcal{R} ，可視成 \mathcal{R}_λ 對 λ 作圖的曲線下側的面積。圖 1-1 中，對 2000 K 的鎢，其面積（即 \mathcal{R} ）爲 $2.4 \times 10^5 W/m^2$ 。注意，這曲線與 Maxwell 速率分佈曲線相似（見哈 - 物 21-9 節的 21-9 圖）。

對每種材料，均存有一族，如 1-1 圖下側的曲線，每個溫度有一條。將一族中各曲線作比較，並無特殊的規律性。想用基本理論對此作一定量的了解，顯得非常困難。幸而我們可採一種理想的熱固體，稱爲空腔輻射器 (cavity radiator) 來進行，其發光性質與材料種類無關，且隨溫度依簡單方式變化；有如處理理想氣體，以代替分析無窮多種不同實際氣體一樣。只要牽涉到發光性質，空腔輻射器便可視爲理想固體。以下兩節，將敘述德國物理學家，Max Planck 在 1900 年對空腔輻射的理論研究，由此奠立近代量子物理的基礎。

1-2 空腔輻射

在一塊材料內部挖一空穴，再用小洞與材料表面連接，即構成一空腔輻射器，將材料升高到一均一溫度（例如 2000 K），從小洞發出的輻射，(cavity radiation) 即爲空腔輻射*；其性質僅與器壁溫度

* 一個空腔，除可當作光發射器外，也可當作吸收器來討論。如將空腔材料維持室溫，從小洞周圍透光進入，則其內部看起來是黑的。光線從小洞進去，便陷住在空腔內。這對入射光便如一完全吸收體。基於此點，空腔輻射，通常亦稱爲黑體輻射 (black body radiation)。

有關，而與空腔形狀及材料均無關聯。

圖 1-2 為一實際的空腔輻射器，係由鎢製的中空圓柱所組成，經通電流加熱，圓柱放在一真空玻璃罩內，圓柱壁上挖一小洞，再取鈹與鉬製的兩種同形空腔，將三者一齊加熱達同一溫度，然後分別量度其輻射率 \mathcal{R} ，以及單位波長輻射率 \mathcal{R}_λ ，可得結論如下。

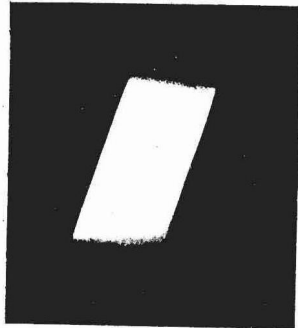


圖 1-2 鎢的白熾燈管壁上挖一小洞，從小孔發出即為空腔輻射。

(1)在某溫度下，三個空腔由小洞量得的輻射率相同；而由三個外表面來的輻射率互不相同，且比空腔輻射率為小，後者在2000 K時的值為 $9.00 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 。

(2)空腔輻射的單位波長輻射率，隨溫度而變，如圖 1-3。這些曲

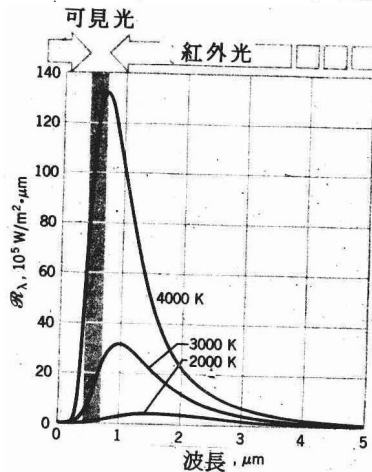


圖 1-3 三個不同溫度的空腔輻射頻譜。當溫度升高，則曲線的最大值向短波長偏移。

4 基本近代物理

線僅與溫度相關，而與空腔材料、大小及形狀無關。

(3) 空腔輻射率與溫度間的關係為

$$\mathcal{R} = \sigma T^4 \quad (\text{空腔輻射}) \quad (1-2)$$

其中 σ 為一常數，稱為 Stefan-Boltzmann 常數，其值為 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。稱為四次方定律 (fourth-power law)。

(4) 外表面的輻射率與溫度間的關係較為複雜，隨材料而異。一般可寫成

$$\mathcal{R} = e\sigma T^4 \quad (1-3)$$

其中 e 為放射率 (emissivity)，為溫度與材料的函數，通常小於 1。空腔材料在 2000 K 之下的放射率，分別為 0.259 (鎢)，0.232 (鉭)，與 0.212 (鉍)。

我們可用圖 1-4 的安排，以作空腔輻射一般性質的驗證。圖中兩個空腔為不同材料、不同形狀，但溫度相同為 T 。由空腔 A 至 B 的輻射為 \mathcal{R}_A ，反之則為 \mathcal{R}_B 。假如兩個能量轉移速率不相等，則合成物體的一端的熱會漸熱，另一端為漸冷。這樣便違反了熱力學第二定律，因此必需有

$$\mathcal{R}_A = \mathcal{R}_B = \mathcal{R}_C \quad (1-4)$$

其中 \mathcal{R}_C 代表所有空腔的總輻射。

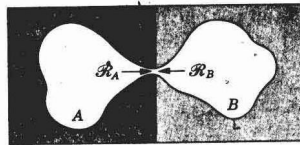


圖 1-4 起始溫度相同的兩個輻射空腔放在一起。

圖 1-4 中的兩個空腔，不僅總輻射相同，即其單位波長輻射率亦為相同。我們可在兩個空腔開口處放置一濾波器，使其只能讓一狹窄範圍的波長通過，同樣的理由，證明必需有

$$\mathcal{R}_{\lambda A} = \mathcal{R}_{\lambda B} = \mathcal{R}_{\lambda C} \quad (1-5)$$

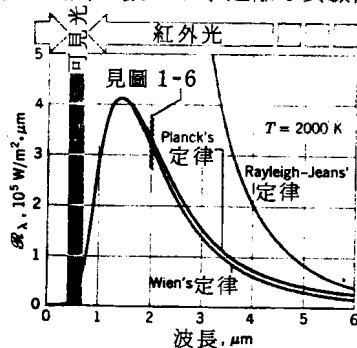
其中 $\mathcal{R}_{\lambda C}$ 為所有空腔的單位波長輻射率。

1-3 Planck 輻射定律與量子的起源

空腔輻射的理論闡釋，是本世紀初期物理學上最著名的未解問題。許多能幹的物理學家，用古典物理學建立一些理論，但均限於片面的成功。

Wilhelm Wien 曾將熱力學定律應用於空腔輻射，導出一個輻射率公式（見習題 8），如圖 1-5 所示。Wien 定律在短波長時相當良好，但波長愈長，就愈與實驗不符。參見圖 1-6，當波長大到 $60\ \mu\text{m}$ 以上，圖中顯示出單位波長輻射率（或其對數值），遠離了實驗曲線。

圖 1-5 與實驗異常符合的深線，是 2000K 空腔輻射的 Planck 公式，Wien 與 Rayleigh-Jeans 預測的曲線亦畫出。



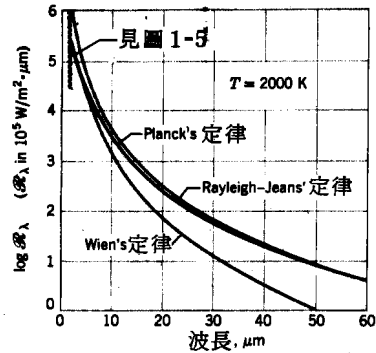
Rayleigh 爵士也曾導得一條輻射公式，後經 James Jeans 爵士詳細推導出這條 Rayleigh-Jeans 公式（見習題 9）。這是將能量均分 (equipartition of energy) 觀念（見哈物 21-7 節）*應用到空腔輻射而得。從圖 1-5 可見，在所示的波長之內，這條公式不幸均不能符合。事實上這條公式也沒有極大值。當波長趨近於 0 時，它變成無窮大，但從圖 1-6 來看，在較長波時，Rayleigh-Jeans 公式相當理想，而 Wien 公式却是失效的。

Wien 與 Rayleigh-Jeans 公式，是古典物理對空腔輻射問題所能提供的最佳解說。我們見到，當公式之一能符合實驗資料時，另一公式恰好失效。每條都無法適用在整個波長範圍。在本世紀交替之際，物理學家所面對的，便是這樣一個問題，顯然需要新的觀念來突破。

* 哈物，係指 Halliday, Resnick 合着 "Fundamentals of Physics 2e. ex. version. 1981. 的簡稱。以下準此。

6 基本近代物理

■ 1-6 在較長波長下，上圖三曲線的型式。從圖中垂直波紋 ($\lambda = 2.0 \mu\text{m}$) 開始畫起。Planck 定律在短波長與 Wien 公式相符。在長波長則符合 Rayleigh-Jeans 公式。由於範圍太大縱軸用 $\log \mathcal{R}_\lambda$ 。



Planck 爲了調和 Wien 與 Rayleigh-Jeans 公式，在兩個極限間作了一個聰明的插入值，結果在整個波長範圍內，變成與資料非常符合。Planck 在 1900 年的 10 月 19 日，對柏林物理學會宣佈他的公式爲

$$\mathcal{R}_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1-6)$$

其中； c_1 ， c_2 爲實驗常數，其選擇爲使 1-6 式與實驗資料能最吻合者。這條公式雖然有趣而又重要，但仍在經驗階段，尚未構成一個理論。

Planck 所追尋的理論，是用發生於空腔器壁的原子過程構成的模型。他假定構成器壁的原子，其行爲均如同小電磁振子 (electromagnetic oscillators)，每個具有振盪特性頻率。電磁振子發射電磁能進入空腔中，也從其中吸收電磁能。當這些振子在平衡狀態下，空腔輻射的特性可由此導出。

最後 Planck 對原子振子，不得不作了兩個根本的假設。其解釋如下：

(1) 振子能量不可爲任意值，而需按公式

$$E = nh\nu \quad (1-7)$$

其中 ν 爲振子頻率， h 稱爲 Planck 常數， n 稱爲量子數 (quantum number)，只有正整數值可用。1-7 式代表振子能量爲量子化 (quantized) 者。

(2) 振子並不輻射連續的能量，而是跳躍 (jumps) 式或“量子式”的。當振子從一量子態變化到另一態，即發射出這種能的量子 (quanta of energy)。假如 n 變化為 1，則由 1-7 式可知輻射出的能量為

$$\Delta E = \Delta nh\nu \quad (1-8)$$

只要振子停留在一固定的量子態，即行不起輻射或吸收能量。

事實上這兩個基本假定，Planck 本人也有多年去避免接受。他曾說“我企圖將作用量子（即 h ）納入古典物理學持續多年，徒然化費了許多的努力。”

若將 Planck 假設應用於大尺度振子 (large-scale oscillator) 諸如質量附於彈簧系統或 LC 電路。極少人會相信能量只能有若干離散值 (discrete values)，尤其當振盪衰減時（彈簧系統由於摩擦，LC 電路由於輻射或電阻）。我們知道，機械能或電磁能量的減小，是完全連續而非跳躍式的。不過日常的經驗，並不足以否定 Planck 的假設。因為 Planck 常數是一極小的常數為

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

下述例題，也許更可澄清此事。

例題 1：某質量 - 彈簧系統的質量為 $m = 1.0 \text{ kg}$ ，彈簧常數 $k = 20 \text{ N/m}$ ，振幅為 10 mm 。(a) 假如能量按 1-7 式量子化，則其量子數 n 為何？

答：從頻率式（哈物式 14-11）

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{20 \text{ N/m}}{1.0 \text{ kg}}} = 0.71 \text{ Hz}$$

其機械能為（哈物式 7-8）

$$E = \frac{1}{2} k x_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} (20 \text{ N/m}) (1.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ J}$$

由式 1-7 的量子數

$$n = \frac{E}{h\nu} = \frac{1.0 \times 10^{-3} \text{ J}}{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(0.71 \text{ Hz})} = 2.1 \times 10^{30}$$

(b) 若 n 變化 1 個單位，能量變化率為何？
將 1-8 式除以 1-7 式得

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{h\nu}{nh\nu} = \frac{1}{n} \approx 5 \times 10^{-31}$$

因此，大尺度振子的量子數非常大時，能的量子化性質就不明顯了。同理，在大尺度實驗中，我們也無法分辨出由於原子、電子的存在引起質量、電荷的量子性。

基於上述兩項假設，Planck 能純由理論導出其輻射定律 (1-6) 式。由理論求出的經驗常數 c_1 與 c_2 為

$$c_1 = 2\pi^2 h \quad \text{與} \quad c_2 = \frac{hc}{k}$$

其中， k 為 Boltzmann 常數（見哈物 21-5 節）， c 為光速。代入 c_1 與 c_2 值，Planck 可導出 h 與 k 值。在 1900 年，12 月 14 日，星期五，Planck 向柏林物理學會宣述他的理論，物理學的一個新紀元於焉開始。

1-4 光電效應

考慮空腔輻射器內壁光與物質間的交互作用，我們會得到能量量子化 (quantization of energy) 的概念。光電效應 (photoelectric effect)，為光與物質作用的第二例，將 Planck 常數納為主要重點，並將量子化觀念推廣到光本身的性質。

圖 1-7，為實驗室中，典型的光電裝置，適當高頻的單色光 (monochromatic light) 照射在金屬表面（射極 E ），由此發射出的電子，稱為光電子 (photoelectrons)，集極 C 與 E 間的電位差 V ，會吸引電子至 C ，形成光電流 i^* 。

圖 1-7 的光電流對電位差 V 間的關係，如圖 1-8（曲線 a ）所示，當 V 為正且足夠大，則光電流將達一飽和常數值，光電子係由 E 發

* 假如圖 1-7 中的射極與集極由不同材料所做成，則電錶讀數 V' ，並不等於實際 E 、 C 間的電位差。 V' 必需加上一“隱藏的”(hidden) emf。即不同材料 E 與 C 間的接觸電位差 V_{EC} （為一電池效應），因此符號“ V ”代表 V' 與 V_{EC} 的代數和。