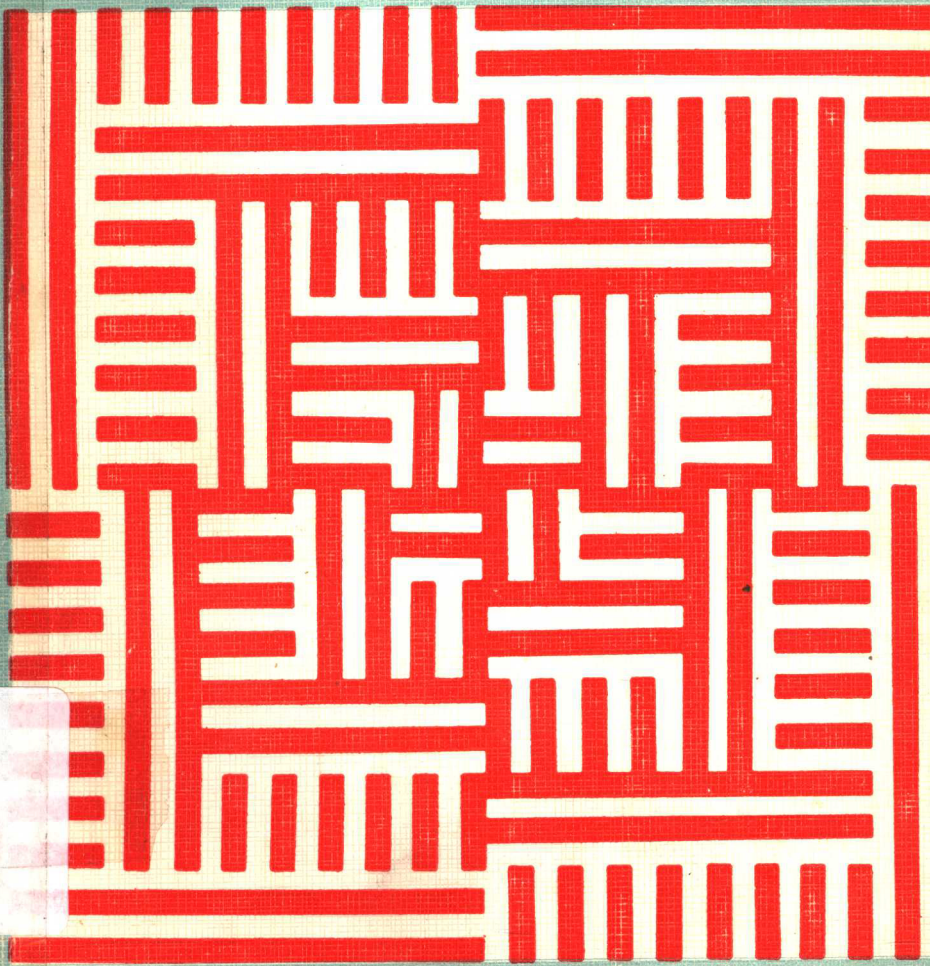


PHYSICS
ALONSO-FINN

物理學

第四冊

謝芳生譯



43
1

東華書局印行

物理學

第 四 冊

著 者

艾 隆 索 斐 恩

(MARCELO ALONSO) (EDWARD J. FINN)

譯 者

謝 芳 生 博 士

東 華 書 局 印 行

前 言

物理學是一門基本科學，它對其他一切科學都有深遠的影響，所以不只是以物理為主科和工程方面的學生必須對它的基本觀念有澈底的瞭解，而是任何一個準備以科學為職業的人(包括主修生物，化學，以及兼學的學生們)都必須具有同樣的瞭解。

對理學院和工學院的學生而言，普通物理這門課的主要目的(同時也許是它之所以被列在課程中的唯一原因)是給學生們一個統一的物理觀念。這一點應當由分析各個基本原理和它們的涵意，以及它們的限度來辦到，所以這本書設計為理學院和工學院學生的一門二學期用的普通物理課——所介紹的是我們認為構成今日物理學核心的基本觀念。

直到最近為止，物理學被教得彷彿是由幾門科學聚積而成的，它們之間多少有些關係却又沒有一個真正統一的觀點。傳統式的分為力學、熱學、聲學、光學、電磁學，以及近代物理學(…“學”)不再合用。我們脫離了這種傳統的方法。採用一個較更合邏輯而統一的介紹法，強調各項不滅定律，場和波的觀念，以及物質的原子觀。特殊相對論的基本原則在全書中均被用來作為輔導原理之一，任何物理理論必須符合這點。

主要題材可分為三部份：(1)質點，(2)相互作用及場，(3)波。在第一篇中我們由力學開始以便建立一些基本原理，這些原理在敘述我們所觀察到的在我們周圍的運動時是必須的。在這一篇中我們由統計力學的觀點，來討論熱力學；我們相信這種方法比較簡單而合理。然後，因為自然界的一切現象都是相互作用的結果，而這些作用又是以場的觀念來分析的，所以我們在第二篇內考慮現在所認出的各種作用和它們相關的場，重心吸引作用和電磁作用被討論得非常詳細，因為它們是

2 物理學 四

大多數所見的巨觀現象 (Macroscopic phenomena) 的起因; 和核子現象以及涉及基本質點的過程有關的各種強、弱作用則討論得很簡明。在第三篇中我們將波當作場的觀念的結果來討論。一般包括在聲學和光學內的材料我們都列在這部份內。但是重點則在電磁波方面。最後一章是量子力學的簡短介紹。在全書內我們一再地談到物質的構造, 即是原子, 分子, 原子核, 以及基本質點。

這本書很新穎, 不只是它的介紹方法不同, 它的觀念也特出, 因為我們加入了一些基本題材是一般普通物理教本中所沒有的; 同時也略去了一些傳統上所談到的問題。所用數學限於微積分內的非常基本的觀念。許多基本原理的應用以及一些特殊題材均以做好的例題形式出現。這樣, 教師可以趁方便的時候說明, 或者選擇地來討論, 是以在課程的編組方面伸縮性較大。證明以及限於物理涵義內的數學計算均和教本的主體分開(*用灰色的底) 以免讀者在閱讀時失去物理推理的主源。這樣安排同時又使教師在要略去某些證明時可以較為自由。

我們採用 IUPAP 的符號, 單位及名稱委員會的推薦。我們一直用的是 SI 單位, 以米, 千克, 秒, 以及庫侖為基本單位 (即 MKSC 制)。然而我們同時也介紹了一些 CGS 制和英制中常用的單位。

所有物理常數, 到小數第四位為止, 都是用 1964 年的值。自從本書付印之後又有一些常數被發表出來 (B. N. Taylor, W. H. Parker, 及 D. N. Langenberg, Rev. Mod. Phys. 41, 375, 1969), 它影響書中所列的幾項數值。

所有各項科學的課程都受到很大的壓力要將新近變得有關的各門課包括進去, 我們期望這本初級物理的書能減少一些這種壓力, 因為它在不需要不適當的努力下在學生們大學教育的早期提高了學生對物理觀念的瞭解以及運用它們的能力。

我們要對某些人, 由於他們的鼓勵和協助才使此書得以完成的人,

譯註: * 在本書中用小號字體以示區分。

表示謝意。我們特別要感謝我們傑出的同事 D. Lazarus 教授，他是這本書的顧問編輯，他的批評和指教幫助我們修正並改進這書的許多地方。我們對 Addison-Wesley 工作人員的才能和努力也十分感激。末了，我們至少應該感謝我們的妻子們，她們一直非常耐心地陪着我們。

艾 隆 索 M. A.
斐 恩 E. J. F.

華 盛 頓
1969 十月

第四冊 目 錄

15. 電磁輻射和物質間的相互作用935~983

- | | | | |
|-------|-----------------------------|-------|------------------|
| 25-1 | 引論 | 25-2 | 原子、分子、和原子核對輻射的放射 |
| 25-3 | 原子、分子、和原子核對電磁輻射的吸收 | 25-4 | 束縛電子對電磁波的散射 |
| 25-5 | 自由電子對電磁輻射的散射、 <u>康普頓</u> 效應 | 25-6 | 光子 |
| 25-7 | 再談光子：光電效應 | 25-8 | 定態 |
| 25-9 | 定態的實驗證據 | 25-10 | 輻射和物質間的相互作用 |
| 25-11 | 原子光譜 | 25-12 | 分子光譜 |
| 25-13 | 核子光譜 | 25-14 | 黑體輻射 |

26. 反射、折射、及極化 984~1029

- | | | | |
|-------|--------------------|-------|---------------|
| 26-1 | 引論 | 26-2 | <u>馬呂斯</u> 定理 |
| 26-3 | 平面波的反射與折射 | 26-4 | 球面波的反射與折射 |
| 26-5 | 橫波在二不同材料繩交接處的反射和傳輸 | 26-6 | 電磁波的反射與折射 |
| 26-7 | 電磁波在各向異性介質中的傳播 | 26-8 | 雙色性質 |
| 26-9 | 雙折射 | 26-10 | 光學活動性 |
| 26-11 | 金屬表面的反射與折射 | | |

27. 波動幾何 1030~1067

- | | |
|------------|------------|
| 27-1 引論 | 27-2 球面的反射 |
| 27-3 球面的折射 | 27-4 透鏡 |
| 27-5 光學儀器 | 27-6 稜鏡 |
| 27-7 色散 | 27-8 色差 |

28. 干擾 1068~1109

- | | |
|----------------|------------------------|
| 28-1 引論 | 28-2 二個同步源所產生的
波的干擾 |
| 28-3 幾個同步源的干擾 | 28-4 一維的駐波 |
| 28-5 電磁駐波 | 28-6 二維的駐波 |
| 28-7 三維的駐波；共振穴 | 28-8 波導 |

29. 繞射 1110~1144

- | | |
|---|--|
| 29-1 引論 | 29-2 <u>惠更斯原理</u> |
| 29-3 一個矩形狹縫的 <u>夫牢因</u>
和 <u>斐繞射</u> | 29-4 一個圓形孔的 <u>夫牢因</u>
和 <u>斐繞射</u> |
| 29-5 二相等且平行狹縫的 <u>夫</u>
<u>牢因</u> 和 <u>斐繞射</u> | 29-6 繞射柵 |
| 29-7 <u>夫累涅爾</u> 繞射 | 29-8 散射 |
| 29-9 晶體對 x 射線的散射 | |

30. 量子力學 1145~1174

- | | |
|----------------------------------|-----------------------|
| 30-1 引論 | 30-2 質點和場 |
| 30-3 質點對晶體的散射 | 30-4 質點和波捆 |
| 30-5 <u>海森堡</u> 的位置與動量的
測不準原理 | 30-6 <u>海森堡原理</u> 的示例 |

30-7 時間和能量的測不準關係

30-9 波動函數和或然率的密度

30-8 穩定狀態和物質場

30-10 薛丁格方程式

25

電磁輻射和物質間的 相互作用

(Interaction of Electromagnetic
Radiation with Matter)

引論

原子、分子、和原子核對輻射的放射

原子、分子、和原子核對電磁輻射的吸收

束縛電子對電磁波的散射

自由電子對電磁輻射的散射 • 康普頓效應

光子

再談光子：光電效應

定態

定態的實驗證據

輻射和物質間的相互作用

原子光譜

分子光譜

核子光譜

黑體輻射

25-1 引論 (Introduction)

在前一章中我們討論了能產生電磁波的最重要的輻射方法。現在我們必須分析原子、分子、和原子核放出輻射的方法以及它的逆過程；即是電磁波如何與一個原子或一個電荷系統相互作用以致於由波上來的能量會被系統所吸收。電磁波的吸收和放出是一個複雜的問題，需要很複雜的數學計算，還要用到量子力學，但是基本觀念則很容易明白。

25-2 原子、分子、和原子核對輻射的放射

(Emission of radiation by atoms, molecules, and nuclei)

一個原子、分子、或原子核可以被激動到能量高於地態的狀態去。激動可以由幾種方法來產生。一種方法是利用非彈性的碰撞，其中一個快速的質點(譬如一個電子)和一個原子或一個原子核相撞。在任一情形下這快速的拋體將它的一部份動能傳給目標物(原子或原子核)。(當這過程是由於二個相撞系統間的電性作用所引發的時候就被稱為庫侖激動(coulomb excitation)。)將一個固體或氣體的溫度提高，原子或分子的動能就可以充分地增加，結果會引起原子或分子間的非彈性碰撞。

最重要的實驗結果是受激的原子、分子、或原子核以電磁波的方式放出它們的過多的能量。舉例而言，如果一個管子中裝有低壓的氫氣，我們可以將一個很大的電位差加到放在恰當位置的二個電極上(圖 25-1) 而產生放電，我們可以看到這管子發光，我們將這結果解釋為被電場加速的電子非彈性地和一些氫分子(或原子)相撞而將後者留在受激狀態下，觀察到的輻射是受激的原子回到它們的地態時放出來的。

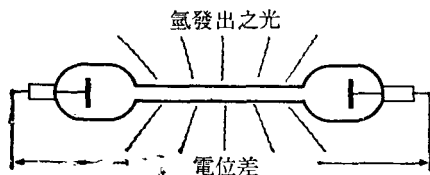


圖 25-1 當一個很大的位差被加在管上而在管內的氣體中維持一個電流時，管中低壓下的氣體會放出光。

一項有趣的特性是：

各種物質所放出的輻射是由規定好的頻率 $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots$ 所組成的，而這是各種物質的特性。

所有特性頻率的這一組被稱為物質的**放射光譜**(emission spectrum)。

各原子、各分子、和各原子核的放射光譜有顯著的區別。原子的光譜大部份在可見光和紫外線的區域內，而且它們的各組成頻率之間的時間隔大到足以在光譜儀上形成分開的線條(見第 27-7 節)；因此原子光譜也被稱為**線光譜** (line spectra)。圖 25-2 所示是氫光譜的可見光部份。它們之所以被分成一系一系的理由將在第 25-11 節中指出。

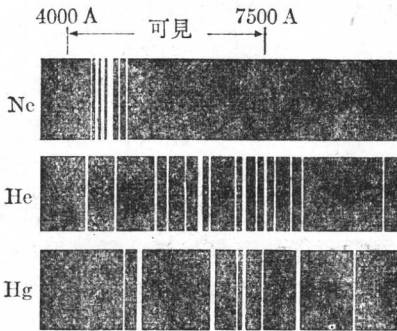


圖 25-2 水銀蒸汽的，氫的，以及氖的線放射光譜的一部份。(由照片紀錄上重畫的)。〔借自 A.B. Avons, Development of Concepts of Physics Addison-Wesley, 1965〕

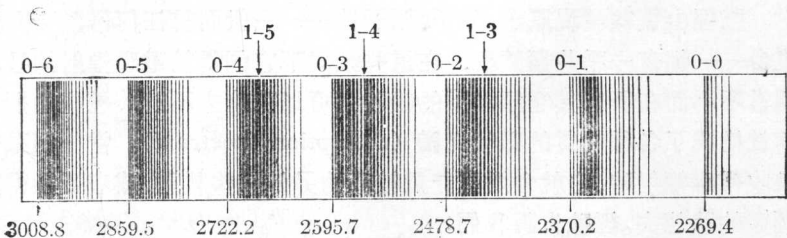


圖 25-3 簡化了的二氧化氮(NO)的分子光譜，自 3100 埃到 2100 埃。下面的數目是每一個帶頭上的波長，上面的數目是產生遷徙的振動階的被指定值。〔自由地從 Spectra of Diatomic molecules, G. Herzberg New York D. van Nostrand Co. 1950. 這書中採用的〕。

分子的光譜自遠的紅外線處一直到紫外線的部份，而且是由數值十分相近的頻率組所構成的，因此在鑑別率略低的光譜儀上它們就以明亮的帶的形式出現。由於這一原因，分子光譜也被稱為帶光譜 (band spectra)。圖 25-3 所示是 NO 光譜中的帶組。

最後，原子核光譜屬於 x -和 γ -區內。頻率的排列則相當複雜，我們將在第 25-13 節中再討論它。

一個重要的問題是如何解釋這些不同的光譜。這一章裏將要談到已經形成的解釋它們用的基本觀念。

25-3 原子、分子、和原子核對於電磁輻射的吸收 (Absorption of electromagnetic radiation by atoms, molecules and nuclei)

當一個電磁波和一個電荷系統——例如一個原子、一個分子、或一個原子核——作用時，波的電場和磁場對於電荷的運動會有影響。用古典物理學上的說法，我們可以說這波在電荷的自然運動上加了一項被迫的振盪上去。結果使得這電荷系統吸收能量。當被迫振盪的頻率和它的自然頻率相同時古典式振盪器響應得最容易，這一種情形被稱為共振 (resonance)，在共振時振盪器吸收能量的時率為極大 (參考第 9-12 節)。

已經由實驗發現原子、分子、原子核——一般而言任何帶電質點的集合——都有一系共振頻率，在這些頻率下它們對於電磁輻射的吸收相當不小而在所有其它頻率下的吸收都可以被略去不計，這些共振頻率就構成了各種物質的吸收光譜 (absorption spectrum)。當一個系統吸收電磁輻射時，它就會變到能量較高的另外一些狀態，或者受激得更厲害的狀態去。經驗告訴我們：

在一個電荷系統的吸收光譜中所觀察到的頻率同時也會在這系統的放射光譜中見到。

舉例而言，在圖 25-4 中我們比較了鈉的吸收和放射光譜。我們可以看到所有在吸收光譜中出現的線條也都出現在放射光譜中（雖然反過來說是不對的；見第 25-11 節）。

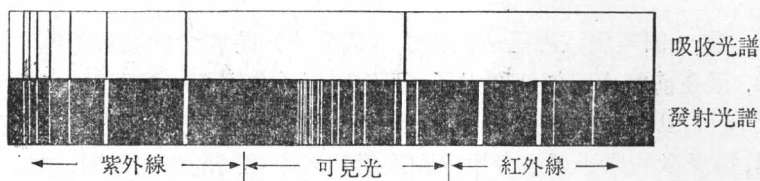


圖 25-4 鈉蒸汽的吸收光譜線和放射光譜線的比較。〔借自 A.B. Avons, Development of Concepts of Physics, Addison-Wesley, 1965〕。

從歷史方面說來，吸收光譜是在 1802 年由英國科學家烏拉斯頓 (William Wollaston) 在用光譜儀分析由太陽上來的光的時發現的，烏拉斯頓對着一個連續的有色背景觀察到七條暗線。幾年以後夫牢因和斐 (Fraunhofer) 用更好的儀器又鑑定出更多的暗線，他將它們稱爲 A, B, C, ……今天已經有 15,000 條以上的暗線，被稱爲夫牢因和斐線 (Fraunhofer lines) 的，在太陽來的輻射光譜中自紅外線到紫外線的區域內被認明了，在可見光區域內的一些線被畫在圖 25-5 中。

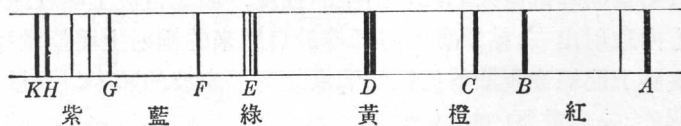


圖 25-5 太陽光譜的可見光部份中的夫牢因和斐暗線，這兒只畫了最顯然的線中的幾條。

一如克希荷夫最初所建議的，夫牢因和斐線是由於輻射所必須經過的太陽和地球的大氣層中的原子和分子對相當的頻率的吸收所引起的。自別的星球來的輻射中也已經觀察到了類似的吸收線條，因而得到它們的大氣層的組成方面的一些線索。有趣的是在地球上發現氦以前它的存在就已經從相當的夫牢因和斐線上推出來了，因為這線不可能是由地球上任何已知的元素所引起的。

25-4 束縛電子對電磁波的散射

(Scattering of electromagnetic waves by bound electrons)

當一個電磁波經過一個原子(或分子)時它會擾亂束縛電子的運動,這在前節中已經解釋過了,而這原子(或分子)就可能被留在受激狀態下。但是利用相反的過程,因為電子的作用像是一個被迫振盪的電偶,這受激的原子可能會放出和入射波頻率相同的電磁輻射。這原子所放出的能量是它的束縛電子從入射波上吸收來的。這種過程被稱為**散射(scattering)**,放出的輻射則被稱為**散射波(scattered wave)**,圖 25-6)。

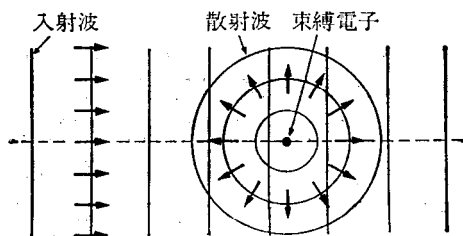


圖 25-6 束縛電子對輻射的散射。

散射幫助降低原來的或入射波的強度,因為自波上吸收來的能量在各方向被射出去,結果實效方面等於自原來的輻射上將能量移去。

實驗上已經發現散射的波的強度是與原來波的頻率以及散射的角度有關的。一項重要的特徵是:

當進入的輻射的頻率等於原子(或分子)光譜的頻率時散射的波就比較強。

這一結果被稱為**共振螢光(resonant fluorescence)***。這種物理性能是

* 在電磁光譜的可見光區內,由於輻射吸收以及接着的放射而在物質中引起的照明,如果吸收和放射之間在時間上的延遲是少於 10^{-8} 秒的話就被稱為**螢光(fluorescence)**。如果所隔時間較長的話這現象就被稱為**磷光(phosphorescence)**,螢光輻射和磷光輻射的頻率並不一

應當被預期到的，因為顯然地在那些自波上吸收的能量較大時的頻率下散射輻射的強度必然較高，而這些頻率和原子的放射光譜上的頻率是一樣的。但是在不同於放射光譜上的頻率下散射仍可以是不小的。

另外一項有趣的性質是對於某些氣體而言，它們的分子在紫外線區內有一個放射光譜的話，在可見光區內的電磁波的散射是隨着它們的頻率而增加的。這是很容易明白的，因為在可見光區內頻率愈高，它和分子的紫外線共振頻率就愈接近，所以被迫振盪的幅度也就愈大。結果散射得更多。作為一個例子而言，天空的明亮和藍顏色是由於空氣分子對於日光的散射所引起的。藍顏色是因為頻率較高(或波長較短)的被散射得厲害的緣故，同一過程造成在太陽升起及日落時所見到的明亮的紅顏色，這時候太陽光在達到地面以前要經過很厚的一層空氣，結果由於散射的緣故高頻率(或短波長)的就受到很強的衰減。

散射也可以由浮在空氣中的很小的質點(例如煙或灰)或水滴(例如雲)產生。含有懸着的質點的液體，例如在膠體中，顯出很強的散射性；這被稱為廷得耳效應(Tyndall effect)。

如果原輻射是線型地極化了的，原子的電偶振盪，例如 S 的(圖 25-7a)，是在波的電場的固定方向上的，同時散射輻射，例如 SA, SB, SC ，等，具有電偶輻射的極化特性(圖 25-7a)。然而，即使進來的輻射

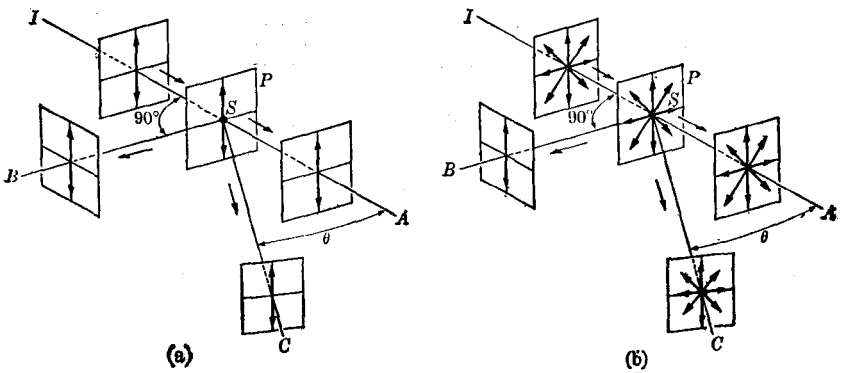


圖 25-7 散射的輻射的極化。(a) 線型極化的及 (b) 未極化的入射波。

不是極化了的，散射的輻射總是部份地極化了的。其次讓我們來考慮一個未極化的入射波（圖 25-7b），感應在原子 S 中的電偶振盪是和波的電場平行的，所以都是在平面 P 內垂直於入射波傳播方向 IA 的。在各方向的散射輻射的極化依偶極振盪的方向而定的，所以當入射波是未極化的時候它就不是一定的。但是對於任何垂直於 IS 方向的 SB 而言，散射的輻射是平行於平面 P 而垂直於 IS 地線型極化的，因為對於這些方向而言偶極總是在這樣的一個平面內振盪的。在別的方向上，散射的輻射極化的程度要依散射與 IS 所成角度而定。沿着 IA ，如果進來的輻射是未極化的，散射的輻射就是完全未極化的。

25-5 自由電子對電磁輻射的散射·康普頓效應

(Scattering of electromagnetic radiation by a free electron. The Compton effect)

自由電子對電磁輻射的散射具有一些特殊之處而需要將它和束縛電子所作的散射分開來討論。我們已經知道散射是一項雙重過程，其中電子從電磁波吸收能量然後再作為散射的輻射將它重新放出來。我們必須記住一個電磁波帶有能量和動量，如果一些能量 E 自這波上移去的話，相當量的動量 $p=E/c$ 也必須自這波上被移去。

然而一個自由電子不可能吸收能量 E 而又同時獲得一項動量 $p=E/c$ ，因為對於一個電子而言，動能和動量之間的關係是：

$$E_k = c \sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2 \approx p_e^2 / 2m_e$$

如(25-9)

如果依照能量不滅關係而令 $E = E_k$ 則這關係和 $p = E/c$ 就無法並列。於是我們應當得到結論：一個自由電子不可能吸收電磁能而不違反動量不滅原理。這時候讀者可能就會懷疑為什麼當我們在前節中討論束縛電子對電磁波的散射和吸收時我們完全沒有提到動量這問題。理由如下：動量和能量的不滅在這二種情形下都應當成立的；但是在束縛電子的情形下吸收來的能量和動量是由這電子和構成原子的其餘部份的

離子所分享的,是以總可以依正確的比例來分配能量和動量。然而質量大得多的離子(在一些動量之外)只帶走現成的能量中很小的一部份,所以通常我們都不考慮。它在自由電子的情形下沒有別的質點可以和電子來分享這些能量和動量,所以吸收和散射就應當不可能了。

然而實驗却告訴我們另一則故事。當我們分析經過了一個有自由電子存在的區域後的電磁輻射時,我們觀察到在進來的輻射之外還有一種頻率不同的輻射存在。這種新的輻射被解釋為自由電子所散射的輻射。散射的輻射的頻率小於入射頻率,因此散射出來的輻射的波長就大於入射的波長(圖25-8)。在各散射方向上的散射輻射的波長也各不相同。這項有趣的現象被稱為康普頓效應(Compton effect),為紀念美國物理學家康普頓(A.H. Compton 1892-1962)而取的名,他在1920年代的早期首先觀察到並分析它。

已知 λ 是進來的輻射的波長, λ' 是散射出來的輻射的波長,康普頓發現 λ' 完全是由散射的方向來決定的。也就是說,如果 θ 角是入射波和散射波被觀察到的方向(圖25-9)之間的夾角的話,散射出來的輻射的波長 λ' 就完全是由 θ 角來決定的,實驗求得的關係是:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) \quad (25-1)$$

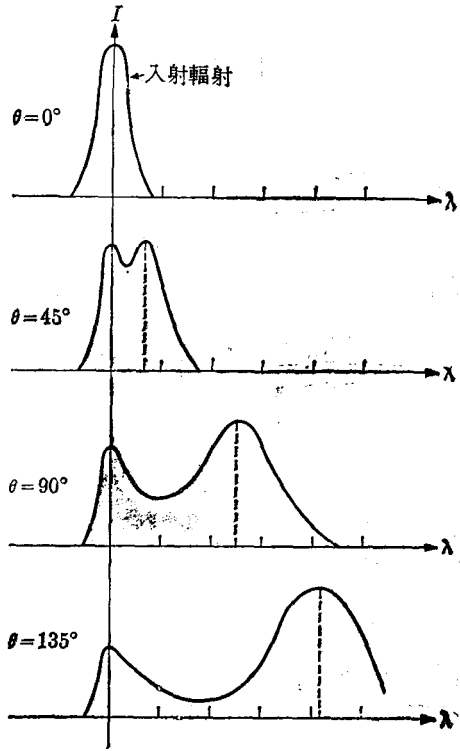


圖 25-8 在不同散射角下自由電子散射出來的輻射強度的分佈。