

第五章 量子物理之誕生 UGEB2341 朱明中

問世間光是何物?

實驗上光速的絕對性,以及愛因斯坦對於光與時空的思考促成了相對論的誕生.同樣地,光的另一些「奇異」性質亦催生了量子力學.無獨有偶,愛因斯坦在這場「量子革命」亦扮演了舉足輕重的角色.我們在本章以歷史角度回顧量子力學誕生之前後。

5-1 黑體輻射(blackbody radiation)及量子(quanta)

光是電磁波!

牛頓認為光是由一串粒子(particles)組成,而這些粒子皆遵從牛頓力學(Newtonian Mechanics).這個學說與惠更斯(Christian Huygens,圖5.1)提出光的波動理論(wave theory)競爭多年,至一八零一年以楊格(Thomas Young,圖5.2)的雙縫實驗(double-slit experiment)判定勝負.這個著名的實驗證實一束光穿個兩個鄰近的小孔後出現干涉現象(interference).由於干涉現象是波動的特性(圖5.3),這實驗結果強力地支持光的波動學說。

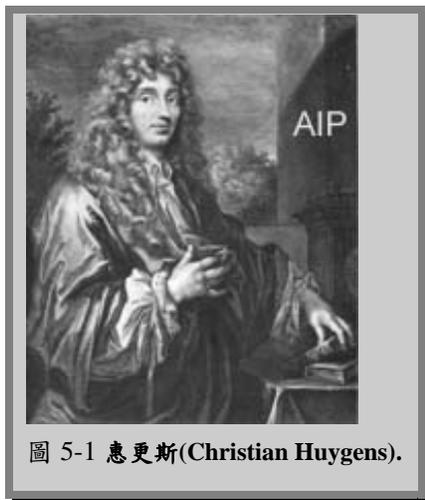


圖 5-1 惠更斯(Christian Huygens).



圖 5-2 楊格(Thomas Young).

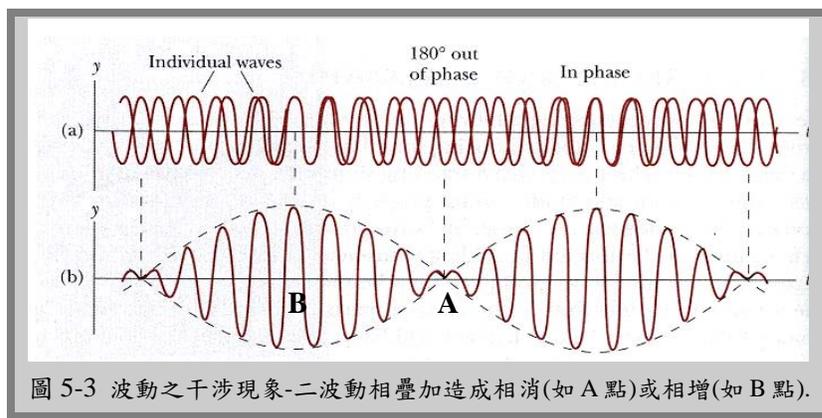
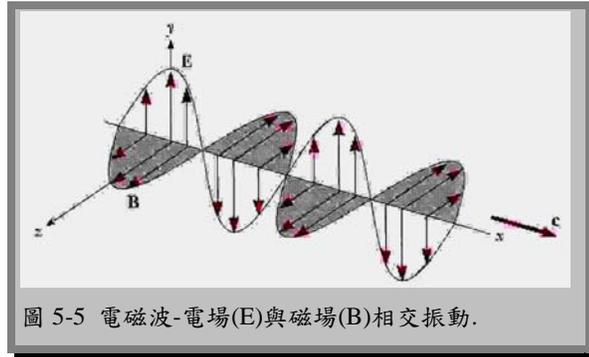
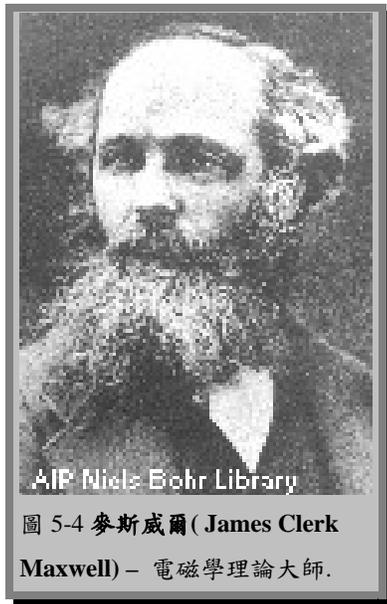


圖 5-3 波動之干涉現象-二波動相疊加造成相消(如 A 點)或相增(如 B 點).

提出**電磁理論**(theory of electromagnetism),從而把電力及磁力統一的**麥斯威爾**(James Clerk Maxwell,圖5.4)於一八六二年發現理論上電磁場受擾動時必然出現以一定速度傳播的波動(圖5.5),而這些**電磁波**(electromagnetic waves)的很多性質,如速度、折射、反射等,都與光相符.於是,麥斯威爾推斷光其實是電磁場的振動.這項漂亮的理論工作配合上楊格及後來**赫斯**(Heinrich Hertz,圖5.6)的一連串實驗鐵證,使到光的波動性被普遍接受。光的波動學說似乎得到了徹底的勝利。



黑體輻射之謎

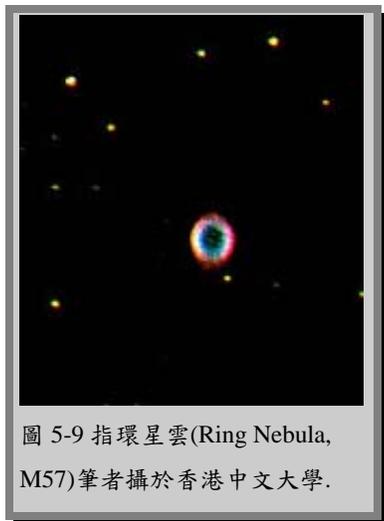
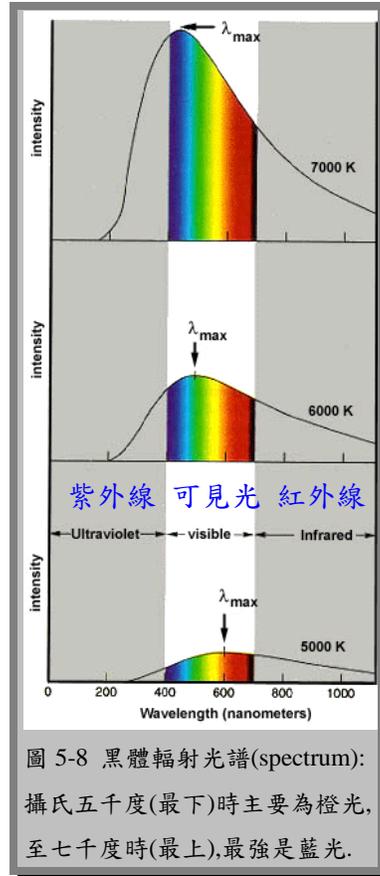
正當經典力學、電磁理論、及光的波動學說似乎「征服」了自然界眾多現象之際,實驗室又傳來令人不安的消息.這次是與**黑體輻射**(blackbody radiation)有關,所以容我首先簡介黑體輻射吧。

我們都從日常生活得到這樣的經驗:物質加熱了都發光!比方說,燒烤時見到燃著的炭都發出暗紅色的光,若你曾參觀過煉鋼廠,應難忘高溫的鐵漿閃爍著刺眼的光芒.物體受熱而放射的光稱為**熱輻射**(thermal radiation).在實驗室很容易可以觀測不同物質隨著溫度升高其熱輻射的變化(圖 5-7,8): 當溫度升高至約攝氏幾千度時,物體放出暗紅色的光;溫度愈高,光度愈強並且逐漸趨向藍白色(所謂白熱化).當然這會隨物體的性質及材料而有所變化,不過大



部份物質的熱輻射都大概如圖 5-8 所示.物理學家比較有興趣的是普遍的(universal)性質,為減去因個別物體構造及材料的差異而造成熱輻射的偏差,便提出**黑體(blackbody)**的概念-只要物體對所有波長的輻射公平地吸收¹及放射,不因構造、形狀、大小及材料等而影響其輻射光譜,便是黑體了.黑體是理論化的概念,現實化活中甚少完美的黑體,但大部份物質的熱輻射和黑體輻射相去不遠.圖中的曲線是理論上的黑體熱輻射強度與輻射波長的關係.例如太陽便是一個頗接近完美的黑體,它的輻射光譜很接近一個溫度為五千八百度的黑體輻射光譜.

利用電磁理論不難明白物體受熱發光的原理.物體受熱時,構成它的各種粒子動能增加,並因此不停高速振動,或甚至相互碰撞.若粒子帶有電荷,如電子、質子等,它的電磁場便不停地受擾動,放出電磁波了.情況就如小朋友嬉水不住拍擊水面,造成大大小小的波瀾.由於物體內粒子有**各種振動頻率**,所以物體放射各種頻率之輻射;不同頻率輻射的相對強度就取決於粒子不同振頻的比例.例如說,兩個黑體一個(甲)主要放紅光另一(乙)放藍光,那就可知甲的粒子大部份進行比較(相對乙的粒子)低頻的振動,亦從而得知甲比乙低溫.這便是天文學中極其重要的光譜學的基礎.有經驗的觀測者,只要看到一個星譜的顏色,便可猜知其表面溫度.例如圖5-9所示的指環星雲,清楚顯示不同部份放射

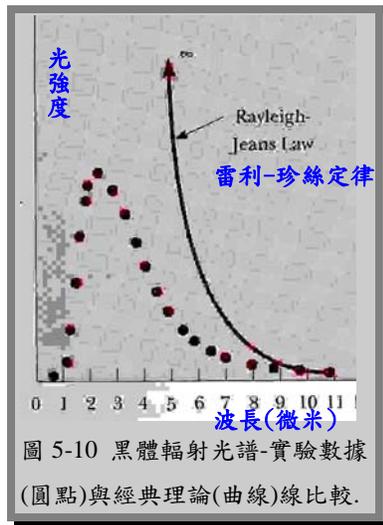


不同顏色的光,這告訴我們這星雲的溫度分佈.我們甚至可以想象從中心星球爆發出來的熾熱氣體向外膨脹時撞上的在外層比較冷的氣體,造成這彩虹似的指環.

¹ 所以稱為黑體.室溫下物體的顏色由其吸收/反射光的波段決定,例如紅色的物件主要反射紅光,吸收其他波段.若物體吸收所有波長的光,它的顏色必為黑色.

這些輻射當然帶有能量.麥斯威爾的電磁理論告訴我們所有不同波長的電磁波都以相同的速度(光速 c)傳播.既然波動的速度等於它的波長(λ)乘以頻率(f),那麼電磁波的波長就必然是反比於頻率($\lambda=c/f$);紅光的波長比藍光長,所以頻率亦比較低.電磁波的另一特性是能量(E)正比於頻率($E \propto f$),因此藍光比紅光有較高能量.黑體愈熱,它的粒子振動(平均)愈快,放射的電磁波頻率亦愈高,光譜偏向藍色光,帶走多些能量.這一切似乎是既自然又合理.

不過若我們細心比較黑體內粒子的高低頻振動使發現問題了.問題是,經典力學的簡振運動(simple harmonic motion)²能量正比於頻率與振幅的乘積平方,無論能量(溫度)幾低,粒子的振動亦可達無限高頻,只要振幅較小即可.這些微振幅、高頻的粒子振動同樣放射高頻的電磁波,並且帶走大部份的輻射能量.因此,經典力學預言黑體輻射的光應集中於高頻、短波長部份;黑體輻射波長愈短光度愈強!這顯然和事實不乎,若經典力學正確,那麼即使在室溫下,週圍的物體都應不停地放射X光及伽瑪射線(gamma rays)³,讀者未看完這篇文章之前,應已被這幾頁紙的高能而強大的輻射殺死了⁴!換言之,基於經典力學及電磁理論發展出的黑體輻射理論,即雷利-珍絲理論(Rayleigh-Jeans theory),不能解釋黑體輻射光譜於短波長(高頻)部份受壓抑的原因(圖5-10).



量子!

黑體輻射之謎困擾著物理學界一段日子,終於由普朗克(Max Planck,圖 5-11)於一九零零年十二月十四日⁵以提出量子(quanta)概念而解決.普朗克認為粒子振動能

² 基本上所有振幅小的振動都可視為簡振運動.

³ 電磁波譜上最短波長最高能量波段.

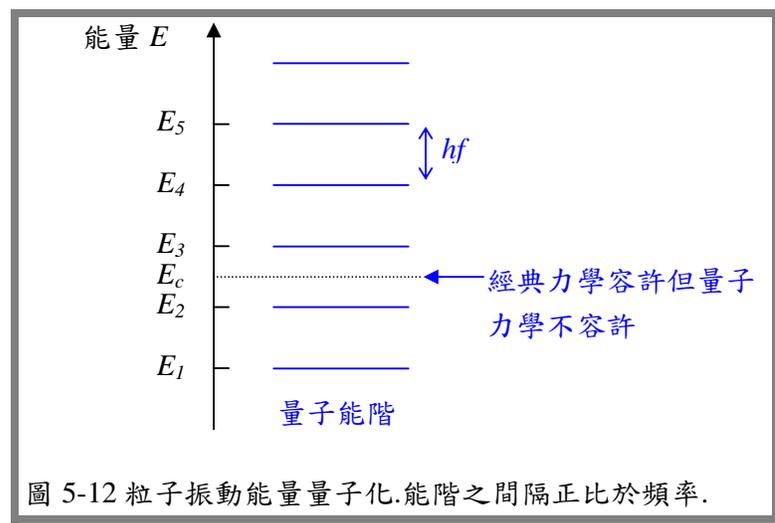
⁴ 當然更大可能是先悶到睡著了.

⁵ 很多物理史家便以這天為量子物理的誕生日期.

量不是連續分佈的，而是**量子化(quantized)**的。就是說一個粒子的振動能量只有特定的、分立的數值，如圖 5-12 所示。量子粒子的振動能量，只可以是 E_1, E_2, \dots 等之一，而不可以取這些**能階(energy levels)**以外的其他數值(如 E_c)。而且，普朗克假定這些能階與粒子振動頻率成正比：

$$E_n = nhf$$

公式中的 n 是 1, 2, 3 等整數(integers)而 $h = 4.136 \times 10^{-15}$ eVs 則是一個常數，稱為**普朗克常數(Planck's constant)**。兩個能階之間的能量差是普朗克常數乘以振動頻率。例如一個粒子每秒振動一億萬次($f = 10^6$ Hz)，它的最低振動能量為 $hf = 4.136 \times 10^{-9}$ 電子伏特⁶(eV)。這能量遠小於我們宏觀世界習慣的數值，如室溫下的空氣粒子，平均動能就有約四十份之一電子伏特。正因為普朗克常數的數值是那麼小，我們日常生活



中很難覺察，便很自然地以為振動能量是連續分佈、可取任意數值的。只有在高頻振動(f 數值很大)時，量子化才會比較明顯。也因此，黑體輻射光譜和經典理論在高頻部份出現偏離。

量子振動和經典力學中的簡振，最大分別在於高頻振動所需能量。根據普朗克的公式，量子高頻振動所需能量亦很高，若果物體的溫度很低，就很難激發這些高頻運動。粒子進行頻率為 f 的振動最起碼的能量是 hf ，能量不夠的話，是絕對不容許有 f 或任何更高頻的振動，無論振幅是幾細小。因此，普朗克的理論自然地把黑體輻射光譜的高頻部份完全地消除。基於量子化的猜想，普朗克推導出著名的**普朗克定律(Planck's law)**，準確地描述黑體輻射的光譜。這也標誌著量子物理的誕生。不過，當時的物理學家，包括普朗克自己，大概都未察覺到量子這概念意義的重大，影響之深遠。普朗克把量子大門推開了，首先帶領人們走進這奇異的量子世界卻是愛因斯坦-又是愛因斯坦！

⁶ 電子伏特(electron volts, 簡稱 eV)是能量單位，代表一粒電子在一伏特電壓下所得的能量。

5-2 光電效應(photoelectric effect)及光子(photons)

光是粒子!

愛因斯坦於一九零五年提出電磁波(光)的量子猜想.他認為電磁波動和粒子振動一樣,能量是量子化的.他認為普朗克的粒子量子公式亦適用於電磁波,即只有特定、分立的數值 $E=nhf$.頻率為 f 的電磁波最低能量為 hf .我們可以想像電磁波由光子(photons)組成(圖5-13).每一光子負載的能量為 hf .一個電磁波的能量就是光子數目 n 乘以每一光子的能量,而電磁波的強度(intensity)則正比於光子數目.於是,光又被看成是由粒子組成的了.

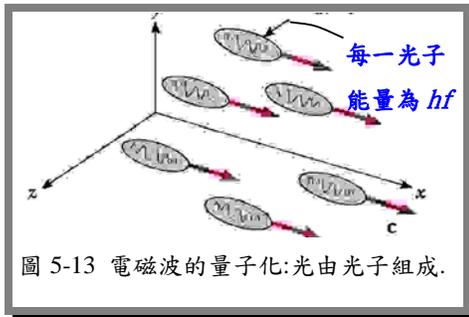


圖 5-13 電磁波的量子化:光由光子組成。

注意:愛因斯坦的光子猜想把普朗克的振動能量量子化在概念上推前一大步.愛因斯坦把量子化推至物理學的基本層面,把波動這常見的物理現象粒子化.他的工作揭示了波動和粒子這兩種在經典物理中互不相關的概念之間的深層連繫,直指量子力學的中心思想-波粒二象性

(particle-wave duality)⁷.讀者們,不要小看了這表面上極之簡單的猜想.這是劃時代、創世紀的觀點!即使今天回顧,仍令人不得不佩服愛因斯坦的驚人洞察力.

正如絕大部份的物理理論一樣,愛因斯坦的光子猜想並不是閉門造車的異想,而是根據實驗結果而得出的結論.這些實驗主要是研究光電效應(photoelectric effect),即把光照射於金屬時金屬表面釋放出電子⁸(圖5-14)這物理現象.

光電效應本身不難理解.金屬表面的電子吸收了光的能量,有足夠動能便可以逃離金屬.利用適當的實驗裝置(如圖5-14),物理學家可以量度在不同光頻率(f)、強度(I)照射之下金屬表面釋放出的電子數量(N)及動能(K).經典的電磁波理論對這幾個物理量之間的關係有如下的預測.根據波動理論,光波的能量只與強度成正比,而

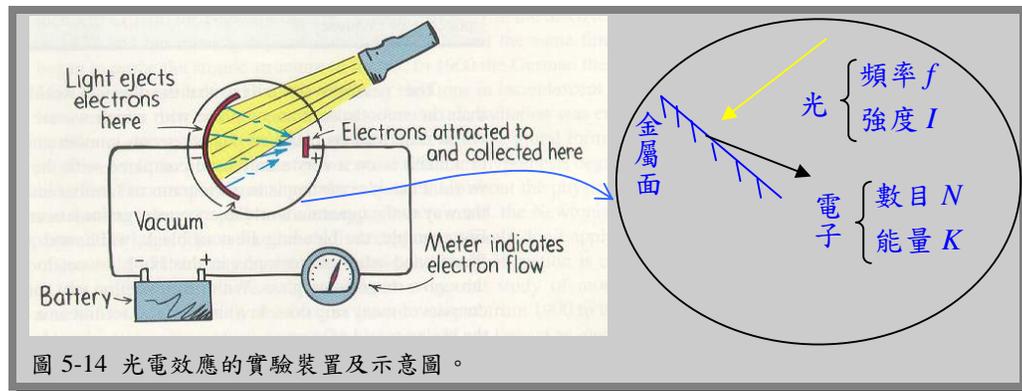


圖 5-14 光電效應的實驗裝置及示意圖。

⁷ 在下一章討論.

與頻率無關,所以預期電子數目及最高動能⁹(K_{\max})均與光強度成正比,而光頻率則沒有影響。

波動理論預測: $N \propto I$, $K_{\max} \propto I$

實驗結果又如何?首先電子數量的確隨光源加強而增加,符合波動理論預期.不過,這有先決條件,就是光頻率必需高於某一特定值 f_0 .若光頻低於此數值,則無論光度幾強,都沒有光電子產生.更令人詫異的,是光電子最大動能 K_{\max} 竟與光度無關,卻正比於光頻率(若 $f > f_0$,圖5-15). 這些都是波動理論不能解釋的。

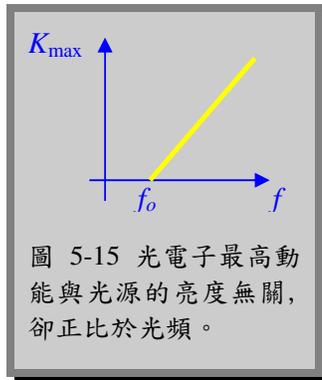


圖 5-15 光電子最高動能與光源的亮度無關,卻正比於光頻。

實驗結果: $\begin{cases} f < f_0: N = 0, K_{\max} = 0 \\ f > f_0: N \propto I, K_{\max} \propto f \end{cases}$
紅色部份與經典理論不相符。

愛因斯坦從這些實驗結果看見光量子!電子逃離金屬需要一定起碼能量,稱為逸出功¹⁰(Work Function) W .金屬內的電子吸收一粒頻率為 f 的光子(能量 hf),若能量大於 W 便可逃離,剩餘能量則成為光電子的動能: $K = hf - W$.這就簡單地解釋了圖5-15光電子動能與光頻的線性關係及為甚麼有最低頻率 $f_0 = W/h$ ($K=0$):即使光強度很高¹¹,若頻率低於 f_0 ,則電子不夠能量逃離而成光電子.從圖5-15可直接量度量子光電效應理論的兩個重要參數:線的斜度(slope)為普朗克常數 h ,與橫軸交點(乘以 h)則是逸出功 W .此外,光度愈強則光子數目愈多,若 $f > f_0$,也有愈多電子逃逸成為光電子.所以亦解釋了 $N \propto I$ 的關係。

愛因斯坦的光量子理論差不多二十年後才在物理學界被普遍接受.遲至一九一四年,普朗克仍認為光量子是「錯誤的猜想」¹²,而實驗上貢獻至巨的梅力根(Robert Millikan)則說光量子理論是「全然不能自圓其說」“wholly untenable”¹³ (1915),及「大膽而冒失,若不說是輕率的話」“bold, not to say ... reckless”¹⁴ (1916).一九二二年愛因斯坦終以光電效應之量子理論而贏得諾貝爾物理學獎¹⁵.不過,大概愛因斯坦本人亦未能預見量子概念對物理學的深遠影響,以及之後百年所帶來翻天覆地的巨變。

⁸稱為光電子(photoelectrons).

⁹固定光源釋出的光電子動能 K 有大有小,最大值為 K_{\max} .

¹⁰不同金屬有不同的逸出功,但只是材料的屬性,與照射光無關.

¹¹絕少有電子同時吸收兩粒或更多的光子.

¹² M. Planck, 1914.

¹³ R. Millikan, 1915.

¹⁴ R. Millikan, 1916.

¹⁵ 愛因斯坦沒有因相對論而得諾貝爾獎.

量子的蹤跡不但在黑體輻射及光電效應中顯現,卻原來充斥著物質世界.德布裡(Louis de Broglie, 圖 5-16)繼承了愛因斯坦的光量子精神,再向前跨一大步,提出物質波的概念.從此,量子支配著所有物質;它從每一顆原子向我們微笑,訴說著原子結構的秘密!第一個解讀原子光譜,從而建構第一個量子原子模型的人,就是玻爾(Niels Bohr, 圖 5-17).雖然他的原子理論並不完全正確,卻是量子物理歷史上重要的一步.我們以下簡介物質波以及波爾的原子模型.



圖 5-16 德布裡-提出物質波.

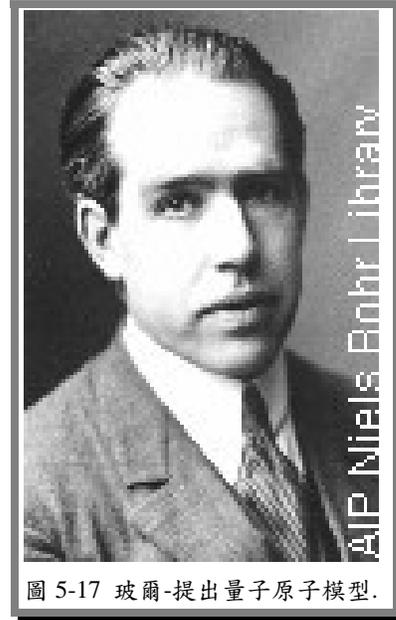


圖 5-17 玻爾-提出量子原子模型.

5-3 物質波(Matter waves)

愛因斯坦的光量子理論雖然漂亮地解釋了光電效應,卻沒有面對為甚麼光在眾多其他實驗裏(如雙縫實驗)卻表現為波動(如干涉現象)的問題.究竟光是粒子還是波動?這實在教人摸不著頭腦.要完整地描述光的物理性質,我們似乎需要接受光既是波動亦是粒子這奇怪的事實.

把這波粒二象性(wave-particle duality)提昇至普遍定理的是法國物理學家德布裡.他在一九二三年發表的博士論文中指出,既然我們嚮來以為是波動的光可有粒子性質,那麼其他所謂的粒子亦應有波動性質,即**物質波(matter waves)**.我們通常用**動量(momentum) p** 及**能量(energy) E** 去描述粒子,而以**波長(wavelength) λ** 及**頻率(frequency) f** 去形容波動.經典物理中他們是兩碼子事.德布裡卻參照普朗克及愛因斯坦的精神,把能量和頻率、動量和波長拉在一起:

$$E = hf,$$

$$p = h/\lambda.$$

這裏 h 當然是普朗克常數.讀者應會留意到第一式和普朗克的量子化公式($n=1$)或愛因斯坦的光量子公式並無分別.不過請注意這三條公式含義並不一樣!普朗克的量子化公式只應用於簡振運動上,而愛因斯坦的光量子公式亦只適用於光子.德布

里卻把這公式普遍化,推廣至所有粒子.每一個能量為 E ,動量為 p 的粒子亦同時是一個頻率為 $f=E/h$,波長¹⁶為 $\lambda=h/p$ 的波動.注意這裏粒子未必在進行簡振運動,它即使只以均速前行亦有物質波的特性(圖 5-18).

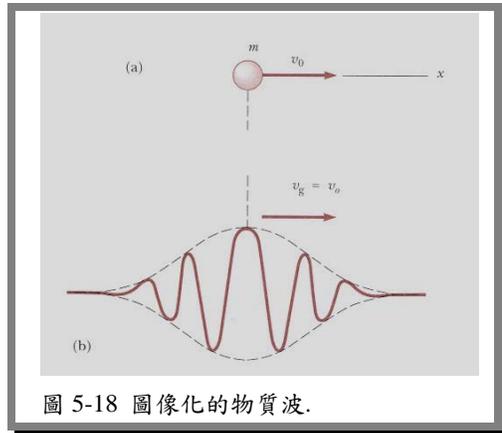


圖 5-18 圖像化的物質波.

德布里的猜想不可謂不大膽.他告訴我們,人們以前被蒙騙了.所有的「粒子」都有波動性質,只因普朗克常數數值太小,很難察覺「粒子」的波長而已.例如,時速一百公里的網球波長約 10^{-34} m,而即使以五十伏特電壓加速的電子波長亦只有約 1.7×10^{-10} m.因此經典物理忽略物質的波動特性大部份時候仍是極佳的近似.只有當我們研究微觀世界-如原子結構-的問題時,系統的典型長度與物質波長相若或更小,經典物理的粒子觀才不再適用.

粒子既有波動性質,自應有如干涉(interference)、繞射(diffraction)等現象¹⁷.電子的干涉現象由戴維遜及居瑪(C. Davisson, L. Germer 圖5-19)於一九二七年實驗證實(圖5-20).德布里、戴維遜及居瑪相繼以物質波的發現而贏得諾貝爾物理學獎.



圖 5-19 戴維遜及居瑪-驗證電子物質波.

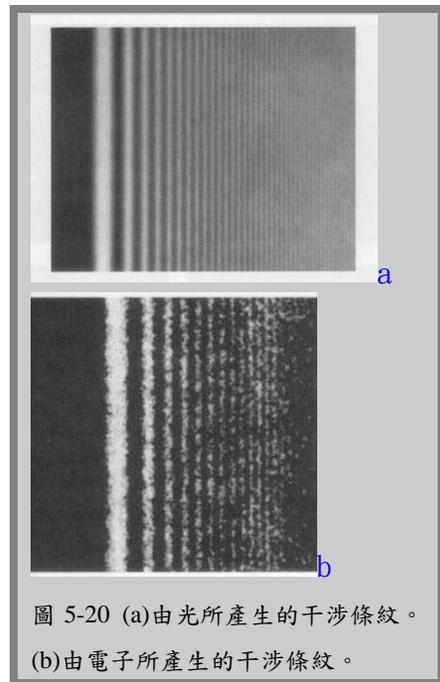


圖 5-20 (a)由光所產生的干涉條紋。
(b)由電子所產生的干涉條紋。

5-2 玻爾原子模型 (Bohr's

¹⁶ 稱為德布羅波長(de Broglie wavelength).

¹⁷ 我們在下一章詳細討論粒子雙縫實驗.

atomic model)

電子的波動性質既已確立,建構原子結構的理論就必需加入物質波為考慮.其實物理學家很早便已知道原子理論必需為量子化.在經典力學裏,帶電荷粒子作加減速運動時必會擾動電磁場,激發電磁波.這些電磁輻射把粒子的部份能量帶走,從而減弱粒子的加減速.因此經典力學中的原子模型-電子圍繞原子核飛行-是破綻百出的.電子在帶正電的原子核附近不能停頓,但要留在原子裏就必然常有加減速的運動.例如說,若電子以圓週運動圍繞原子核,那麼它就不斷在改變運動的方向(加速),必然放出輻射,帶走能量,後果是電子的軌道逐漸縮小,在很短時間內掉進原子核(圖 5-21)¹⁸.換句話說,若經典物理正確,則世上根本不會有穩定的原子,自然也沒有你和我!

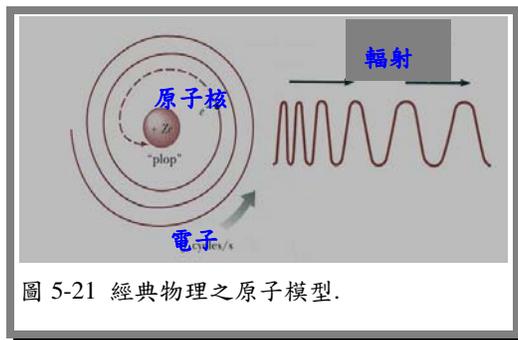


圖 5-21 經典物理之原子模型.

原子的穩定性應是量子物理最重要的體現了.關鍵在於電子的波動特性.一個氫原子的大小約 10^{-10}m ,和原子內的電子德布利波長相若.所以再不能像圖 5-21 般以粒子軌跡描述原子內的電子¹⁹.玻爾最重要貢獻之一就是建構出第一個以電子波動為主的原子模型.

在介紹玻爾模型之前,讓我們首先看看一個關於原子結構的重要線索-**原子光譜**.正如上一章描述,物體受熱會放射電磁波,若把輻射強度依照不同頻率(或波長)的分佈展示出來,便是一個**光譜(spectrum)**.各種單一元素的放射光譜都有各自的特性,只在在在某些特定波長出現強光,形成**光譜線(spectral lines)**(圖 5-22).這些光譜線就像指紋一樣,是每一種元素的獨特記號,互不混淆²⁰.它們就像是「原子密碼」,隱藏著原子結構的秘密.

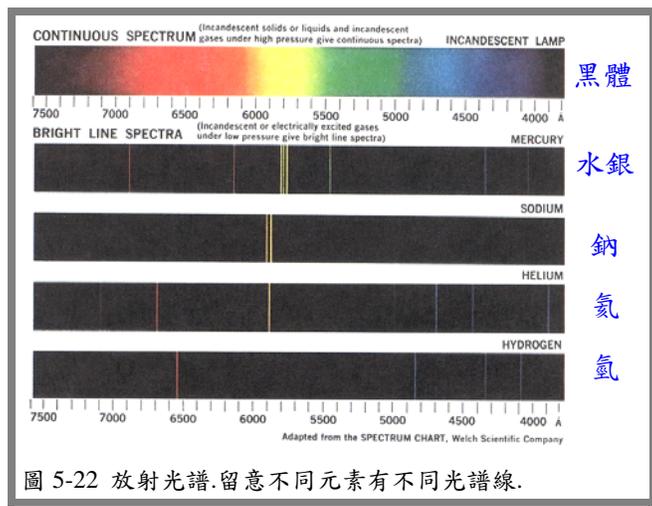


圖 5-22 放射光譜.留意不同元素有不同光譜線.

¹⁸ 這就像一些舊的人造衛星,因與大氣磨擦而損耗能量,結果跌回地面一樣.

¹⁹ 原子核質量比電子大很多,所以把它看成不動是很好的近似.因此不需考慮它的波動性質.

²⁰ 這個特性,使光譜學在天文、物理、化學、生物、以致工業界等都有廣泛應用.

向破解原子密碼踏出第一步的是一位瑞士中學老師**巴爾瑪(Johann Balmer)**.他於一八八五年發現氫原子的其中四條光譜線波長(λ ,圖 5-23)可以準確地用以下的簡單公式描述:

$$\lambda(\text{cm}) = C_2 n^2 / (n^2 - 2^2) \quad n=3,4,5,\dots; C_2=3645.6 \times 10^{-8} \text{ cm.}$$

巴爾瑪當時是全然不知道他的公式背後的意義.物理學家之後量出愈來愈多氫光譜線,並發現巴爾瑪公式非常準確,於是把上式描述之光譜線稱為**巴爾瑪系列(Balmer Series)**.巴爾瑪本人亦提出猜想,估計有其他類似巴爾瑪系列的光譜線系列(圖 5-24),但上式中的 2 改為其他整數 m :

$$\lambda = C_n n^2 / (n^2 - m^2), n > m.$$

例如 $m=1$ 稱為**萊曼系列(Lyman Series)**,
 $m=3$ 為**柏純系列(Paschen Series)**等.

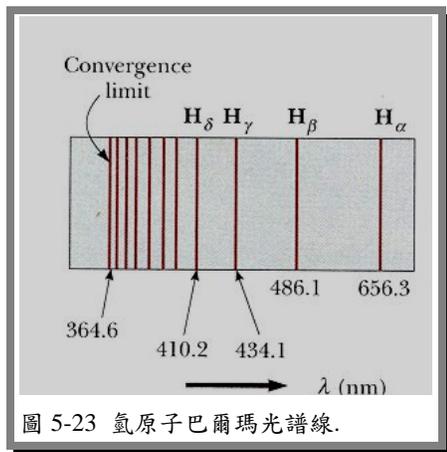


圖 5-23 氫原子巴爾瑪光譜線.

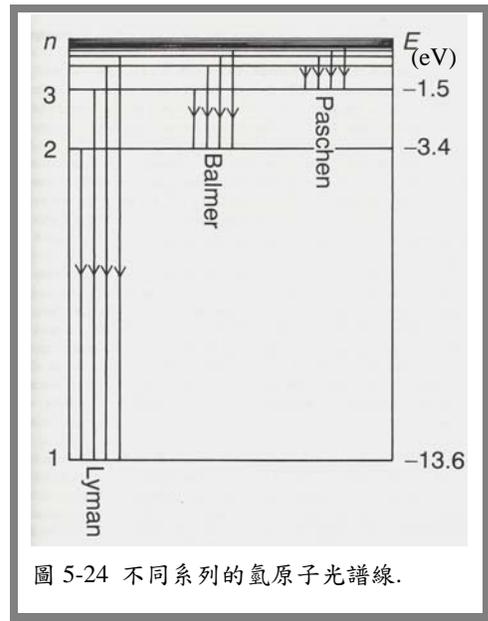


圖 5-24 不同系列的氫原子光譜線.

玻爾提出的原子模型,是第一個物理上解釋這些光譜線的理論.他提出電子物質波只有以**駐波(standing waves)**形式圍繞原子核才能穩定.所謂駐波,是指波形保持週期性的波動(圖5-25).最容易想像的是一根繩兩端不動,其中一個週期性的波動模式,是如圖5-25般上下擺動.電子波要形成駐波,軌道圓周需要剛好是波長的整數倍數 n .圖5-26便是 $n=3$ 的例子.這個電子波以特定頻率穩定地擺動於實線與虛線之間.玻爾認為這代表原子的一個穩定態.

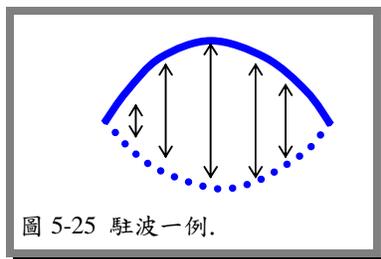


圖 5-25 駐波一例.

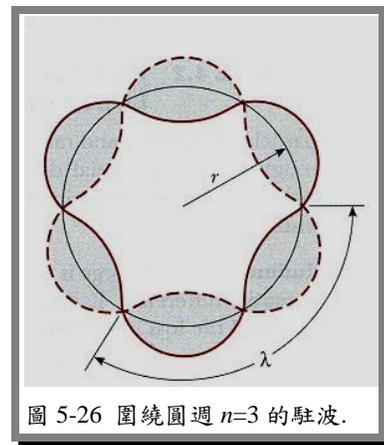


圖 5-26 圍繞圓週 $n=3$ 的駐波.

明顯地,電子波只能以特定的波長圍繞某些特定半徑的軌道才能形成駐波.由於電子波的動量反比於波長,所以電子駐波對應特定、分立的能量,稱為**能階(energy level)**.當電子由一個較高能階轉化至一個較低能階,原子便放射帶有二能階能量差之電磁波,形成光譜線(圖5-27).利用這圖像,玻爾推導出光譜線系列的確符合巴爾瑪方程.

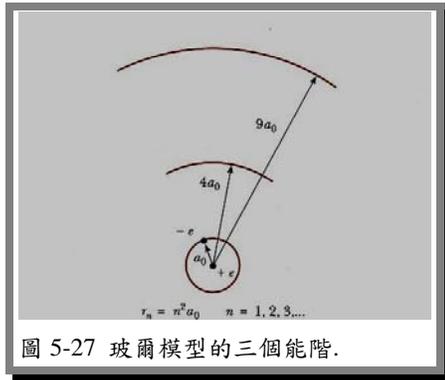


圖 5-27 玻爾模型的三個能階.

玻爾模型是第一個量子的原子結構理論,它引入電子的波動性質,再加上只有駐波才穩定的假設,成功地解釋了原子光譜線,可說是量子物理的一個重要里程碑.玻爾亦因為這個偉大的貢獻贏得一九二二年的諾貝爾物理學獎.玻爾在物理學的成就遠不止於此.他在量子理論、原子及核子物理都有奠基性的貢獻,絕對是二十世紀最偉大的物理學家之一.不過,玻爾模型並不完全正確.物理學家還要等待薛汀格方程及泡利不相容定

理的發現才能確立現代的原子結構理論.