

科學在今日

秦仲實譯



日今在學科

著 爾 非 茵
譯 實 仲 秦

店 書 明 開

開
明
日
今
在
學
科

吉
星
集
錦

★ 恆志

日 今 在 學 科

版 初 月 二 年 四 十 二 國 民

版 四 月 三 年 八 十 三 國 民

五 八 〇 價 定 冊 每

著 者
翻 譯 者
發 行 者
印 刷 者

L. Infeld
秦 仲 實
上 海 福 州 路
開 明 書 店
代 表 人 范 洗 人
開 明 書 店

印 翻 准 不 權 作 著 有

內 政 部 著 作 權 註 冊 執 照 警 字 第 四 九 一 四 號

付印題記

本書的價值在愛因斯坦和英譯者的序文中已說得夠明白了。我在這裡不想說什麼。我只說幾句關於譯文方面的話。

本書原名 *The World in Modern Science: Matter and Quanta*，直譯該是現代科學中的世界觀：物質和量子。尤恐讀者見到了「物質和量子」就望而生畏，以為其中一定是滿紙數學公式，就叫人頭昏腦脹。這不但對不起原作者的苦心，而且也使讀者少讀一部有價值書的機會。再三斟酌，就改了科學在今日這個名稱。

本書譯名完全根據教育部頒布的物理學名詞，其中有幾個名詞為物理學名詞所不載的，都根據最通行的譯法。又“energy level”這一個詞，我取了兩種譯法，一是直譯為能水準的，一是意譯為能位的。因為，就意義說能位果然勝於能水準，但是有的地方原文中只說 level，你就不能把牠譯為位，只能譯為水準。所以我在必要的地方，把能位和能水準並舉了。

我譯這書自信已盡了最大的努力，如果還有錯誤的地方，敬請讀者指教。

英譯者序

這本書既不是論文，也不是教科書；牠是想贈給一般對於現代科學進步感興趣的人，並不要求讀者具有什麼準備的知識。牠不列數學上的公式或實驗上的詳細報告。牠卻有條理地論述有範圍中的事實，使讀者認識和了解現代科學的美麗及其無限的遠景。

本書原來是用波蘭文寫成的，發行還不到一年。現在英文版內容擴充了許多，對於最近的發現，敘述得比較詳盡，並且有幾處是重新寫過的。著者增加正子 (positrons) 一節，這是一九三三年原版發行後才發現的東西；又增加一段正子發現與狄拉克 (Dirac) 理論的關係。此外還有許多比擬的地方，爲適合英國讀者起見，也不得不加以修改。所有增補和修改處都已取得原著者的同意。

本版有愛因斯坦教授的序，這也與原版不同。那篇序是用德文寫的，亦已由譯者譯成英文。

著者與譯者承 Lwów 大學的 Szezeniowski 教授，劍橋三一學院的 Schomberg，牛津 Balliol 學院的 Frank Friedeberg-Seeley 及 H. Infield 諸先生校閱，並提出許多有價值的意見，實深心感。卷首插圖，蒙 Messrs, Bell & Son 及 劍橋大學印書館 允許複製，特此一併致謝。

愛因斯坦序

因為科學進步，科學的內容就愈加精密和複雜，於是用一種避免術語而容易了解的形式來介紹科學的綱要，就成為更迫切的需要了。不過，我們若是把物理學上的數學部分忽略了，還會有什麼剩下來呢？這是一個合乎情理的問題；現在茵菲爾（Infeld）博士在解釋物理學的現狀中就貢獻了一個令人折服的答案。

作者是一位具有獨立精神的青年科學家，他熱心地盡他自己一分責任，和這一部分科學上的問題奮鬥。普通人能夠從這本書上獲得對於現代物理學問題的深切了解。並且凡是熱心求知的任何人，都會覺得這本書的刺激和吸引不亞於一部興奮的小說。

但是，這本書也有獻給科學家的價值，科學家從這裏面，必會欣然看見他所欲解決的問題已被映在一個銳敏的思想家的心頭上。本書的範圍是有限制的；著者並不以繁重的形容詞語自累；然而他的敘述卻仍不失絲毫的明晰。這些問題，變化多端，關係複雜，而介紹得這樣簡潔生動，如人在活潑的夢中見着牠們一樣，實在可喜，有益。

目 錄

第一章 物理學的思想方法	一
理論在科學上的任務	二
定命論	八
統計	二二
第二章 輻射	二六
光的兩種理論	一六
光譜的範圍	二〇
量子論的創生	二六
間斷性觀念	二九
光量子	三五
輻射二元論	四〇
第三章 物質	四三

物質動力論	112
引力定律與庫隆定律	112
元電量子	112
能與質量	112
氫光譜	112
氫原子的模型	112
舊物理學與波耳理論	112
再談氫原子的模型	112
氫原子與相對論	112
電子的衝突	112
氫原子	112
其他元素的原子構造	112
第四章 原子核	112
氦核與物質的毀滅	112
同位素	112

放射性的.....	一一九
由 α 線而生核之蛻變.....	一二七
由質子而生核之蛻變.....	一三一
中子.....	一三五
正子.....	一三九
第五章 物質與輻射.....	一四二
X線.....	一四二
γ 線.....	一五七
康登效應.....	一六〇
拉曼效應.....	一六六
第六章 現代量子力學.....	一七二
現代量子力學的起原.....	一七二
布魯氏推理.....	一七七
徐丁格氏推理.....	一八三
海森堡氏推理.....	一八〇

狄拉克氏推理·····	一九四
非定命論·····	一九六

第一章 物理學的思想方法

理論在科學上的任務

一六四七年十一月十五日，巴斯噶 (Pascal) 給柏里耶 (Perier) 這樣一封信：

「我來妨礙你的日常工作，用物理學上的問題來麻煩你，實在冒昧，不過我知道這些問題也許可供你暇時的消遣……這問題關涉到一個有名的實驗：管中盛水銀，先在山麓實驗，後在山頂實驗，同日重複實驗幾次，看在這兩種情形中水銀柱的高度是相同還是相異……因為山麓的空氣確係比山頂的空氣濃厚些。」

差不多三百年前，巴斯噶就預言了這樣簡單而普遍的事實——山頂的氣壓會比深谷的氣壓為低。但是他的預言確實與否，只有用實驗才能證實牠或竟至推翻牠。實驗的判決是怎樣？我們在一六四八年九月二十二日柏里耶給巴斯噶的信上就瞧得見：

「你盼望已久的實驗，我終於實地去做了……在多密山 (Puy-de-Dome) 頂……我們發現管中水銀柱高 23.2 吋，在修道院花園裏，水銀柱高 26.35 吋。兩種情形中，管中水銀柱高度之差為 3.15 吋。這使我們大為驚異，歎賞不置。」

這兩封信不單是告訴一件科學事實的簡單發現史。牠們還表明科學上創造工作的兩種特徵，即某種事實或定律的預言以及用實驗方法證明那種事實或定律。

三百年來，我們的實驗方法確已進步，遠駕乎這種簡陋的方法之上。現在，我們在實驗室內，可以製造無數弗 (volts) 的勢 (potentials)，分裂原子，研究平流層 (stratosphere) 的宇宙線 (cosmic rays)，產生電波的繞射，創製巧妙而複雜的儀器，并想出種種新奇的計劃，建立簡單或複雜的定律，支配物質和輻射；但是我們在巴斯噶與柏里耶信上所發覺的兩種創造工作的要素仍未改變。因為每一科學理論都是說明既定事實而加以種種預言；然後用實驗來證明或推翻那些預言的。

假定物理學家從事一新穎而單純的實驗室中的問題。例如決定冰的潛熱小數的問題。為求提高他測量的確度起見，他不得不考慮他的儀器要怎樣修改或變得更才更靈敏。這種工作是不可輕視的。物理學家記錄個別物體的光譜帶 (spectrum bands)，提高測量物質彈性或密度的精確度，都是一種有益的工作。他這工作產生種種證據，將來研究者或將據以為有利的說明；并且這種工作增加知識的積累，將來或許形成一新理論概念或物理學上新希望的基礎。不過我們不是說我們應專注於這一類研究，而是要我們知道這種重大而深入的工作在一定的物理學概念中有牠的根源。

一九一九年中，英國二科學遠征者分道出發，到不同的地方去。他們都備有最好的器具，便於攝取天空的景象。一位走到布拉尼爾的索不拉，其餘一位走到近非洲海岸，幾內亞灣的普林斯羣島。據

天文學的推算，在某一時間，這兩處都可以看見全日蝕。所謂日蝕，便是當白晝間月球遮着太陽，以致有數分鐘的完全黑暗一如星夜的現象。雖說歷時不久，卻是一幅優美奇妙的景緻。得再過多少年，我們才可以再看見這樣一次日蝕，打破太陽西沒東升的常態，時而照着我們日常的憂樂，時而將我們的憂樂隱匿了。這兩位遠征者的目的何在？他們是要將接近已蝕太陽的可見星體攝照下來。根據他們的測量和攝照的影片，希望能解答下一問題：由一般相對論（the general theory of relativity）而預料的結果是否正確。星體發出來的光線果否恰如相對論所預言的，在太陽的引力場內有一定的彎曲嗎？那一次日蝕時攝取的影片果然清清楚楚地現出彎曲的效果。

就這兩件事實看來，牠們彼此相差那麼遠——一個是用簡陋的氣壓管而作的實驗，一個是極複雜極精密的天文學的觀察和測量——卻有十個相似點存乎其間。這兩種情形中我們對現象界都有一種理想，這種理想是引起我們陳述問題的。管中水銀柱在山頂上是否會比較低些？天空上同一部位在日蝕時攝照下來的影片，是否一致？抑或如相對論引導我們所希望的，那些影片有一定的差異，差異雖微，卻可由測量決定呢？

創造的實驗工作，動機差不多都是一種理論的觀念；想要解答理論所陳述的問題。有時因自然的幻想，偶然發生之事也可以幫助我們，可是，這只是這條規律例外的證明。

理論是什麼？

科學的理論是一種企圖，企圖將我們四圍的實在造成一幅心理圖畫。這幅圖畫可以容納多多的事實，也容納實驗的定律，並且將事實和定律列成適當的次序。科學不只是定律的集合體和事實胡亂的雜湊物。理論在起初，便使事實和定律與一共同的觀念相連，且用邏輯推理法創造一種實在的圖畫。不過從上面所引的例子看來，我們覺得理論的意義尙不止此；牠是一創造的動機，新現象或未知現象的指南；牠表明怎樣推進新體系，怎樣發現新定律。牠的結論經實驗證實了，牠於是得了生氣。與牠的演繹衝突的實驗，卻可以推翻牠毀滅牠。實驗是判決一理論命運的最後法庭，而且永遠是判決一理論命運的最後法庭。

理論是怎樣發生的？我們對四圍的世界所生的心理圖畫是怎樣構成的，怎樣發展的是我們起初得着一個概略，一個模糊的輪廓，然後逐漸清晰和確定，然後烘托新鮮的色彩，同時又保持原輪廓的形式和特徵麼？[？]理論的發展只是一種進化的過程嗎？[？]還是發生劇變或大革命，在短時期中就轉換了我們全部物理學的景色呢？

在科學發展史上，我們認識了兩種過程——進化過程與革命過程。進化是歷代努力的結果，著名人物成功的結晶，也是次要而有功的勞作者盡力擴充我們的理想的結果；進化是將科學的構造在已經奠定好了的基礎上漸漸地建立起來的。大理想生長而成熟，理論脫離假設的羈絆（因為假設的簡單性牽制理論），理論所籠罩的事實逐漸增多，而理論原來的簡單數學形式同時也就變為

比較複雜而精深的形式，這就是所謂進化的過程。

我們四圍的實在，我們一定不會充分了解的。現在我們就覺得我們把握自然律的種種努力和嘗試，十分薄弱而拙劣，常為我們這世界現象的繁複性所勝過。當一種理論發展時，或許就發現其中有多少缺點，或許當時尚不為人所注意，但是到後來那些缺點終歸要自己明白的表露出來。這種困難，——理論的推演與實驗的結果不一致，前後不符，乃至不能為理論所解釋的重大矛盾，——往往含有新發展的種子，使發表新原則而放棄科學的舊基礎成為必要。理論既受了這樣的挫折，基礎上便發生科學革命的傾向。這差不多都是絕頂聰明的人所作的工作。於是問題轉移到新的研究領域裏去了，使我們另用一種見解去考慮科學的現象。科學革命既安排下一新基礎，我們就在這新基礎上開始另建設一個新的物理學世界。

就這種意義說，科學上的革命人物為數不多，足以當此的僅哥白尼(Copernicus)、牛頓(Newton)、法拉第(Faraday)、愛因斯坦(Einstein)和波耳(Bohr)幾個人，他們都是新觀念的創造者，他們的新觀念都是(為歷代勞作者所實行的)科學進步的基礎。

這些觀察(關於理論在科學上所負的任務)差不多是普通的而又武斷的。希望看到本書後面各頁，這些觀察就會比較清楚更易明白。本書後面各頁中，是要將二十世紀現代科學的主要方面，即物質和輻射的理論方面，科學思想進步的圖畫呈現出來。

這裏再簡略地舉幾個例，來說明科學上進化過程與革命過程的任務。

牛頓新提出一科學的原則，即舊力學的原則。拉格蘭（Lagrange）、赫米爾頓（Hamilton）和賈可比（Jacobi）諸人極力擴充牛頓的原則。在他們，舊力學逐漸獲得比較優美比較廣博的數學形式，牠所籠罩的事實也逐漸增多。

拉格蘭會讚美牛頓創造的天才，他說他不但是科學家中之最偉大的一個，而且是最幸福的一個，因為創造自然科學只能一次。可是，真是這樣嗎？創造自然科學真的只能一次嗎？現在，我們儘管驚嘆牛頓的天才，我們卻知道拉格蘭的說法是不對的。與有創造自然科學的榮幸的，并不止牛頓一人。拉格蘭生長在牛頓理論的進化時期，那時正是物理學原理開始發展的時期。他不猜疑自然現象或有別的局面，也不猜疑自然科學會經重複的改造。

哥白尼，是第一人，覺得地球不是宇宙中心，也是與其他行星一樣繞日而行的。為爭這一「真理」，伽利略（Galileo）竟受異教徒裁判所的迫害，而死於火刑柱上。請注意下面兩種說法：

1. 地球是靜止的，太陽是移動的（多祿某）。
2. 地球是移動的，太陽是靜止的（哥白尼）。

這兩種說法，那一種是對的？照舊力學說，那顯然贊成第二種說法。但是我們可否想像這兩種說法都錯誤？現代物理學家聽了多祿某理論擁護者與哥白尼理論擁護者雙方的辯論，不免發出懷疑

的微笑。相對論已介紹一新要素到科學上來，另露出一個新局面了。現在大家知道，解決多祿某與哥白尼所爭的問題，是毫無意味的，並且實際上他們的命題已失去意義了。無論我們說「地球動而太陽靜止」，或者說「地球靜止而太陽動」，我們所說的是什麼，確是什麼也沒有說。哥白尼的偉大發現到了今日，適當的敘述出來，可改變如下：在某種情形中，與其使天體運動與地球系相關，不如使他與太陽系相關，比較便當些。

根據上面簡略的論述，可以得着什麼結論？結論是說，物理學上一切理論，如人類生命一般，有他們的起點也有他們的終點。二十世紀中，科學上有非常強烈的進步，他們享受生命的快樂和豐滿，盛極一時，可是他們的生命極其短暫。我們對於四圍宇宙的心理圖畫常常在修改，常常在變更。科學時常給牠一個新形式。科學結構中不僅次要的地方才在改變。所以這樣一幅圖畫，不但是愁慘淒涼的，而且是十分錯誤的。創造工作的快樂，科學知識及欣賞科學原理和定律的快樂，都在於他們永遠的幼年和改變中。改變即是進步，即是經過錯誤而往上進的道路。我們變更或修改理論，爲的就是使理論取得更多的事實，更能與觀察相符合。

有人或許要問：「如果科學不呈露我們四圍的實在，那末科學的價值又在那裏呢？理論既是常變不居的，人又怎樣去辨識這世界的真輪廓呢？世界是什麼，生命又是什麼？」物理學不能答覆這些問題。可是確有一物質印象世界，根據這個世界，科學才得創造和建設一常變不居的宇宙圖畫。科學

與其常變的宇宙圖畫能否使我們接近於實在之了解？物理學家很多都相信能夠。然而，這樣說，問題便侵入不合理的範圍及信仰的領域裏去了。這種問題在物理學上沒有地位。在我們纔起頭認識宇宙現象貌似簡單而實繁複的地方，我們介紹這些玄學上的大問題，有什麼用處？

定命論

大創造家巧妙的發現，以及科學家歷代的勞作，使科學能建設一種宇宙圖畫，逐漸改變的宇宙圖畫。

物理學上一切推理有許多極普遍的共通性質。且讓我們來看這些性質。舊物理學上所用的推理法是嚴格的定命推理法。(deterministic method of reasoning)。直到十九世紀和二十世紀，我們才發現——這是馬克士威 (Maxwell)、波爾茲滿 (Boltzmann)、司摩魯柯斯基 (Smoluchowski) 數人的功勞——物理學上的新方法，即統計的 (statistical) 方法。新方法原因物質的構造問題而生，後來竟征服了物理學上其他廣大的領域。但是這些方法在二十世紀間也經過許多細微的變化。量子論 (quantum theory) 以及後起的量子力學 (quantum mechanics) 使我們又碰到一些新問題，為解決這些新問題，於是又發生許多新方法。

物理學上的定命法是怎麼一回事？

請看下文：

1. 如果一塊石頭從 256 呎高處落下，則伽利略的落體定律使我們預言那個石頭經過四秒鐘即接觸地面，降落停止。

2. 一定強度的電流通過一定抵抗的銅絲。我們能夠將一定時間內該電流在銅絲上所生的熱量計算出來。

上述兩段文字都包含一定的預言。我們預言四秒鐘後石頭落到那裏，經過一分鐘（假定這樣說）的時間可以產生多少卡路里熱。但單是預言什麼東西將要發生，并不足以表示物理學的主要特性。氣象預測確實也是預言——所說并非如巫術、談命和占星一類的東西。所以我們必須更精密地詳查物理學預言的特徵，指明牠特異於別種預言的地方。

我們且抽出一特殊的物理系統——即是，宇宙間與我們當時有關的那一特殊部分。我們之所以這樣做，為的是要將我們面前的問題弄單純一點。我們假定這個系統是孤立的，并且假定這系統之外的物體對系統內發生的現象沒有影響，這個假定自然不能嚴格實行的。我寫這篇文章時我的手所生的運動，我們任何人一霎眼，都會影響到極遠的星球。可是我們如果不虛構種種孤立的物理系統，我們就不能解決任何問題。為求比較具體清晰起見，我們仍引上面所舉的例子來說。第一例的系統係由石與地球組成；第二例的系統可說是由電源、電流所經過的導體及電流計（測量電流強度的器其）組成。因為石塊降落，因為電流通過後銅絲的溫度上昇，所以這些系統內會發生一定的變

化。我們要表明這點，於是就說「系統狀態」(the state of systems) 改變了。我們在物理學上，便是去研究這種「系統狀態」為確定一系統狀態，我們必須實行測量 (measurement)。因此，我們就有了兩個主要的物理學概念，即系統狀態和測量。系統狀態是指一系統全部特徵而言，我們必須知道那些特徵，才能預言牠將來的命運。例如，我們如果希望發現降落石塊一例中的系統狀態，那不用知道拋石塊的人，石塊從何處得來，甚至無須乎知道石塊的重量。我們須決定石塊離地的高度，及其在任何既定時間內的速度。這些材料方是決定該系統狀態的。假設我們由測量知道在一既定時間的系統狀態。那末，經過一定的時間後，牠的狀態如何？如果我們想決定牠那時的狀態，我們是否必須在既定的時間經過後再作測量？解答這個問題，卻牽涉物理學的定律。如果我們知道任何既定時間的系統狀態和支配該系統的定律，我們用推理法便能預言在以後任何時間測量所得的結果。每一宇宙現象都有定律支配！如果我們知道他的狀態和支配牠的定律，我們就能預言那個系統的將來命運了。最大的謎——如潘加列 (Poincaré) 所說——是這樣的：宇宙間沒有謎；支配自然的不是偶然之事，而是定律。

於是物理學中「定命」推理的原理可陳述如下：如果我們知道一系統的最初狀態及支配牠的定律，我們就能預言牠在任何時間內的狀態，并能用測量證實我們的預言。從這樣的關於定命原理的應用的陳述，可知物理學的預言顯然與其他非物理學的預言不同。定律和最初狀態的知識即

洩露系統的將來狀態。但我們也能根據同樣的材料，同樣精確地發現一系統的「過去」歷史。所以知道任何特殊時間的系統狀態以及支配牠的定律，我們就能知道他的將來和過去的全部。假設物理學已經使定命推理法十分完全，以致科學照這一方方向發生非常的進展，實際就是假設支配我們四圍現象的一切定律，我們都知道了。那末，如果我們知道某一剎那宇宙的狀態，我們便能預言牠的將來一切詳細情形了。我們每人的將來，國家的前途，地球的命運，以及全宇宙的命運，我們都會知道了。同樣，我們也能決定過去的狀態，並能知遠年地球的歷史了。現代科學所已達到的程度自然離此種美滿程度甚遠。這不過表示由極端定命論推演而得的界限罷了。

前一世紀物理學，在舊力學上現出牠典型的定命性質。舊力學創於牛頓，發展於拉格蘭、赫米爾頓諸人，牠確是一定命推理的範例。牠的根本問題是要找出任何既定時間內質點的系統狀態（即質點的位置和速度），當該點的起初位置和速度已經確定的時候。

物理學上帶有定命性質的其他部分，尤其是熱力學及電力學，會相當地將舊力學當作牠們的模範。

十九世紀中葉，曾想把定命推理法應用於全部物理學中，又以爲用這種推理法我們對於比較複雜的系統的命運可以得着更深更廣闊的把握。但是物理學已解除了嚴格地定命推理法的束縛了。牠違反了一班物理學家哲學家的希望，已向着新而非夢幻的路上發展去了。

馬克士威是介紹統計推理法的第一人，這種推理法與定命推理法相反。他將統計推理法應用在他的物質運動論上。繼後經波爾茲滿、司摩魯柯斯基、計博 (Chapman) 等努力，這種方法才逐漸透入物理學的其他部分裏去。牠們不但是物質動力論及統計力學的基礎，而且形成輻射論及現代量子力學的基礎。

統計法是怎樣應用到物理學上去的？在答覆這個問題之前，我們且簡略地舉一個物理學以外的事例來說。

關於近十年來英國的人口，為求得最正確的材料起見，我們可以記錄該國中每個居民的家庭史和生活概況。結果或將成一巨冊，可是一點用處也沒有，因為根據牠很難得着任何聰明的推論。因此，不得不另想方法。第一件須得詳記關於人口上所欲知道的事項。第二件便是選擇方法要最適合於產生所希望的東西。例如，假定所欲探查的人口問題是英國人口的生長，所欲知道的不是任何家庭中發生的事，不是那一家庭生兒生女的事，只是英國人口「平均」的增加，這種平均增加在各地方分配的情形怎樣，以及男女小孩的生產比率是怎樣。這裏統計表就來了。統計表中，我們依照每個一定的特徵排列許多個件 (individual items)，這些個件在其他方面也許彼此不同，但在這方面卻可不必記錄那些不同點。個件累積多了，第一件應做的便是機敏地編制所要解答的問題。如果編

制的問題不合理，有用的材料就會變爲無用。例如從人口調查中可以知道某一時期五金工業上所僱用的工人數目，但是，我們不能從那上面找着完全被剝削的總人數。

現在讓我們回到物理學上來。假定在器中儲有一種氣體。實驗物理學供給許多支配氣體的實驗定律。這些定律能由理論推演而得，照理論說，氣體係由無數質點組合而成，這些質點移動得異常之快，方向沒有一定，彼此互相衝突、飛躍、追逐。這樣大概的情形是前世紀馬克士威與波爾茲滿在他們的氣體動力論中所說的。如果有人想把定命法應用到這種氣體質點的運動上去，他必得先找出牠最初的狀態……即是說一切質點的最初位置和速度。即使這是可能的，即使能測量出牠們最初的状态，那單是將所欲討論的無數質點記下來，恐怕也不止費一生的時間精力。其次如果應用舊力學上已知的方法，想計算那些質點的最後位置，那碰到的困難會更不能克服。事實上，定命法既完全不能用於氣體動力論上，自不能不讓位於統計法。統計法不求知道任何正確的最初狀態；我們也不能正確地預言最後的狀態，所以也用不着知道牠。我們既少知道任何一定時間內這種系統的狀態，所以我們少能說該系統的過去或將來是怎樣。我們現在事實上已離開以前引起我們注意的問題了。我們完全不管任何氣體質點所發生的是什麼。我們現在所要解決的問題完全另是一種。我們不問任何質點的位置或速度如何；也不問各個質點的命運怎樣。採用統計法，我們編制的問題大約如下：多少質點有每秒一千至千零五十呎（譬如這樣說）的速度？第一次衝突（collision）與第二次衝

突之間，質點通常走的是什麼路徑？我們不知道各個質點的位置，也不注意牠們的位置。我們所要決定的是代表全體的平均值；并且很明顯，只有在既定系統包含多量個件時才有用這種方法陳出的問題以及用統計法解決的地方。

統計法不指示過去或將來的系統狀態，但是牠使我們——雖較定命法為不正確或為不精密——推論系統的將來。在任何既定時間內系統狀態是怎樣，我們不能說；但是我們能說在某一特殊時間發生某一特殊狀態的「或然率」(probability)是怎樣。我們對於某一「特殊」現象不能說什麼；我們的結論和預言乃關聯於現象的「全部」。下面所舉的例可使這種觀念更清楚。

這時，蒙台卡羅俱樂部的寶官正擲一種輪盤球，短時間內，球可以決定那些賭角贏那些賭角輸。如果賭角確知那個球的最初位置和速度及支配該球運動的物理定律，他便能精確地預言那個球將在什麼地方停止。他眼睛用不着盯住那個球轉；他一定操勝算，他高興贏多少就會贏多少。不過，沒有人十分正確地知道球的最初位置，或支配該球運動的定律。應用統計法。我們如果擲一全日，卻能預言全日所擲紅黑的次數會相等。擲的次數愈多，愈易證明這個預言的正確。但是也許一日碰着紅的一連二十七次。這表明了統計定律只能實用於極大的數量。我們或許整個月都遇不着紅的一連若干次；這種事並不是不可能的；只是未必然的程度極其高罷了。

書歸正傳。一百餘年前——一八二七年中——布朗(Robert Brown)發現一種新奇的現象。司

摩魯柯斯基用這種現象爲題寫了幾篇很有價值的文章，即所謂「布朗運動」。這些文章是統計推理的先例。「布朗運動」是一種浮在液體中的微小質點的運動。微小質點爲液體的質點所衝撞和激動而繼續地振動。這種運動決不停止或衰弱。

假定我們知道這種微小質點的最初狀態。三十秒鐘後，牠的位移 (displacement) 如何？我們說不出來；不過我們可以說「平均位移」是怎樣的。司摩魯柯斯基在理論上確言：在一定溫度下，一定液體中浮着的一定質點，平均位移是一常數。三十秒後，一大批質點（設爲二千個）位移的觀察，其值每個質點各不相同，但是大量的「平均」結果與理論上所得的十分相符，理論與實驗完全一致。

統計不是使人預言某一全體中個件所發生的情形。統計法能演出定律以支配系統的全部。被測量的系統愈多，則定律愈覺應用得當。

上面我們已把物理學上統計法與定命法的區別解釋過了。當代物理學差不多專用統計法，且陳述多數系統定律。但是這種方法將我們對於各系統將來的可能知識加以限制，前述通曉過去未來的理想已變成純粹的虛構。我們的科學知識增加了，覺得我們的愚昧也擴大了範圍；我們愈進步，我們科學的直接目標便越發退讓。

第二章 輻射

光的兩種理論

我寫字的這間屋子的陳設、房子、地球、行星、太陽以及所有構成這物質世界的一切，都是由電子 (electrons) 和質子 (protons) 組合而成的。由星體和星雲，由燈和燭發出來的光構成輻射 (radiation)。物質和輻射是宇宙中兩個主要而實單一的要素。輻射以每秒 300,000 仟米的高速通過廣漠的空間。在這時太陽送出的能 (energy) 八分鐘即可到達地球。太陽這樣放射出來的能，大部分不着地球而繼續牠長遠而無目的的途程。

太陽是一實體，發出輻射；地球吸收這種輻射。物質與輻射之間有一種相互的反應。牠的定律是什麼？這問題說來很簡易，不過牠確包含着物理學的根本問題。現代科學自己已創一物質與輻射的概念，極力用自己的方法解釋牠們是怎樣的相互反應。

什麼是輻射？早在十七世紀——首先奠定物理學基礎的世紀——就想解答這個問題。惠更斯 (Huygens) 的波動說 (wave theory) 及牛頓的微粒說 (corpuscular theory) 就是在那個時候陳述出來的，頗極一時的威權。波動說的創造者惠更斯在他的光學論文中有下列一段話：

「再者，如果光的經過需要時間——這是我們現在所要考查的——則這種運動傳到中介物質上必是繼續不斷的；結果像聲音一樣，依球面和波浪而傳播，好像石子投入水中，水面呈現一圈一圈的繼續傳播的波紋，雖說起因不同，且僅屬一平面，然而情形卻相類似，所以我稱之爲波。」

故照惠更斯說，光是一種波動；換句話說，光是一種情態的傳播，是「能」的運動，不是物質的運動。東方市場中的閒談，即或打從那裏經過的人沒有走上十步；卻可傳播很遠。風從稻田掠過，就生起一種波，雖說每一稻穗只是稍爲振動一下，而波紋卻可傳遍全田。音波在空氣中的傳播亦復相同。空氣質點振動時，將牠們的運動傳給鄰近的質點，由是而生音波。惠更斯曾感到輻射概念所發生的困難。因爲波浪的傳遞必經過一種物質的介質——例如水波之在海面，音波之在空氣中。光波的物質介質是什麼呢？輻射經過無數星體間廣大的真空而達到我們這裏來。真空輸送光線，不起任何變化；物質介質卻又阻擾牠改變牠。所以惠更斯介紹以太 (ether) 概念——一種瀰漫全宇宙的無重量而透明的介質。以太必有種種特性，我們才會知道牠存在，這些特性是什麼？確是這樣的：牠是輻射的介質，——光波藉以傳遞的介質。科學上以太的任務——以太概念的變遷史——是物理學上最有趣味最關重要的一部分歷史。現在，我們表明惠更斯的以太觀念或許稍有不同：我們必得說空間不但有幾何性質，而且有一種傳遞輻射的物理性質。

牛頓對於輻射的想像就完全不同。照他說，光是一種「彈丸」或「微粒」的運動，除「彈丸」是以每秒 300,000 千米的高速從發光體射出來外，這種運動還係依直線進行的。因此，他想輻射不是一種情態的運動，而是一種物質運動。他的光學 (Optics) 包含很多關於光理論的根本事實，他反對波動說如下：

「靜水面上的波紋達到障礙物的邊緣後，一部分停止，其餘則轉變方向並逐漸擴張至障礙物後方的靜水中。空氣的振動或聲波雖不及水波那樣明顯，卻也有轉向現象。因為鈴或鎗炮被山擋住看不見發音體，卻聽得見聲音，並且聲音在曲管中傳佈與在直管中傳佈有一樣的快。可是決未聽說光走彎曲路，也沒有聽說光會彎曲到陰影 (shadow) 中去。」

牛頓明白，界限分明的陰影這種現象利於說明光的直線傳播說而不利於說明波動說，他便小心地陳述他的微粒說如下：

「光線豈不是由發光物質放射出來的微體麼？因為這種微體係依直線經過均勻的介質，並未變到陰影中去，這是光線的本性。光線也有幾種特性，且能經過幾種介質而保持牠們的特性不變，這是光線的另一情形。」

這兩種光的理論（惠更斯的波動說與牛頓的微粒說），我們將如何決定呢？假設雙方理論的擁護者辯論如下：

擁護微粒說者已經實驗證明了的事實和波動說相抵觸，卻完全符合微粒說。有例在這裏：一張紙放在燭前面，牆上便生一異常清晰而輪廓分明的陰影。如果波動說是正確的，這種陰影現象就不能發生，因為光波會沿着紙的邊緣彎曲，而使陰影不明了。

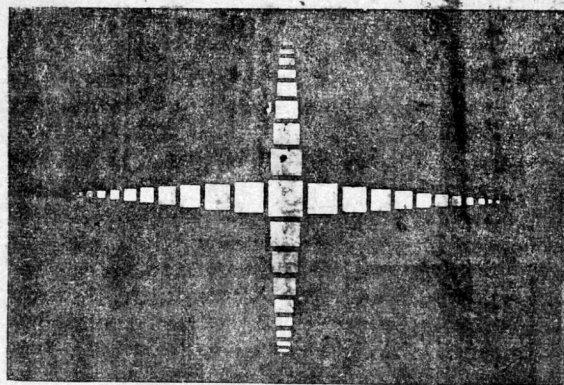
擁護波動說者我卻以為不然。我們且想像江上微波撞擊一隻大船的邊。在大船之一邊發生的微波不會透過他一邊去，他一邊無波即若陰影。燭前的這張紙情形同此。因為從燭發出來的光波異常微小，所以我們得着清晰的陰影——正如江上微波之於大船的情形。

擁護微粒說者很對。可是你如果用一小船或一塊木頭代替你所假設的大船，那便怎樣？在牠的一邊發生的波紋就會透過他一邊去。陰影現象就瞧不見了。至於光的情形，即或空隙和障礙物非常之小，我們卻恆得着陰影。

擁護波動說者我仍然不服。我常想，我們如果有個十分微小的障礙物，陰影現象也不會發現。自然，實驗上我們或許要碰得極度的困難，因為假若波極其微，則障礙物也不得不非常之小，才能決定光之能否彎曲。

擁護微粒說者我同意波動說引到新的結論上去，不過這些結論很不易得到實驗的證明；並且非到繞射(diffraction)現象(即光之彎曲)之存在經實驗完全證明了，我將仍然擁護微粒說，因為我覺得牠比較波動說簡單些，所以也好些。

辯論到這裏，我們不得不看實驗如何來判決了。這兩種理論爭辯了百餘年後，實驗才宣告判決。十九世紀前半期，楊（Young）與夫累涅爾（Fresnel）證明繞射（即光之彎曲）之存在，夫累涅爾專



圖一 光線經過一小方孔的繞射圖

對這個問題和這問題的解釋還有許多重要的論文。

試想像光源前設一小方孔。圖一表示光線經過小方孔後現在幕上的繞射花樣。圖的中央是一正方形，輪廓顯然。這正方形融入黑暗的背景中，顯成一組階級，明暗相間。明暗相間而非一輪廓分明的陰影，是波動說的特性。這種現象可以解決二說的爭辯；波動說能解釋牠，根據微粒說就難解釋了。因此，十九世紀物理學家的實驗便決定擁護波動說而反對微粒說。

光譜的範圍

其次，我們將要用到一個重要的概念，就是波長（Wavelength）概念。今以水面上的波為例。波的長度乃一波谷至隣一波谷或一波峯至次一波峯的距離。江河的波長比較海洋的波長為短。短音波（即具有小波長的音波）相當於高音尖音；長音波產生低音深沉的音。光也是這樣麼？一波長的光與他一波長的光

不相同麼？光學也有類似於聲學上音調之高低的東西麼？要解答這種問題，須得先簡略地敘述牛頓關於光之分析與綜合的實驗。

當一線日光經過三稜鏡時，可以看見一極美麗的彩帶，這叫做太陽光譜 (the sun's spectrum)。太陽光譜包含存於可見的宇宙間的一切色彩。宇宙有時呈現美麗的虹霓，便是牠本身作的實驗！

光譜的兩端恆爲紅紫二色。太陽發出來的光線中，一切顏色都有。牠們融和了經過繁星的空間和大氣，結果成爲白光，但是各種顏色經過三稜鏡時，速度各不相同，所以就被三稜鏡分析成各個成分——即是將白光分成各種單純的顏色。單取光譜的一狹條，可得一種單純的顏色。藉此，我們可以得着單光 (homogeneous light)，——即是再用三稜鏡也不能分成任何成分的光。光譜中每一條顏色構成一種單光——白光中最單純而不能再分的成分。

請再看圖一，假設小方孔前的光源發出單光（譬如鈉，白熱時便發出黃色單光）。那末可以得着那些明暗相間的情形，強度很快地減弱。（白色非單光，呈現的顏色比較複雜。）這種結果恰如波動說的預言，因爲波動說假定光是空間一種波的傳播。波動說更說明波長與明暗間距離的關係。這確是一種可以測量任何單光波長的實驗方法。由這一測量以及後來所作更精密的測量，可得結論如下：每一單純的顏色相當於一定的波長。波動說應用於聲學上，則各種波長相當於各種純音調；波動說應用於輻射上，則各種波長相當於各種單光的純色。

例如考慮可見輻射的波長的極限值，（換言之，相當於光譜的紅紫兩端的波長）人們或許希望這些波長必很短，而實際也是這樣希望。陰影現象——光的直線傳播現象——在宇宙中可以觀察，祇因通常碰到的一切孔隙和障礙物都是極其大的，與光波之長度比較，不知大若干倍！欲得繞射現象，必須用極小的孔隙或障礙物才行。惟有這樣，光才能顯出牠波狀的性質。因為這個緣故，波動說的勝利竟遷延了百年之久。

為便於我們表示波長起見，特介紹一種長度新單位，比毫米小得很多，即「埃」(Ångström) 1 毫米等於一千萬倍這個單位。

$$10,000,000 \text{ 埃} = 1 \text{ 毫米}$$

可見光譜 (visible spectrum) 的範圍，大約是從 8000 至 4000 埃。光譜的紅端有最大的波長，約 8000 埃；紫端波長約 4000 埃。現在知道可見光譜只占放射線的極小一部分。空間還充滿着許多線 (rays)，牠們的性質初看起來似乎與可見線不同。但是就物理學的觀點說，這種差異只因這些線的波長不在 4000-8000 埃範圍之內的緣故。宇宙閃爍着多少顏色，我們的眼力不能辨識牠們。另一方面，照像片感應極靈，不但可以感應可見線，且可感應光譜的紫端以外的線——即比 4000 埃更短的線。現代物理學上的儀器，補助我們的感官，更能使我們發現不可見色的新宇宙，測量和辨別許多紫外線，其波長由 4000 埃短至幾十埃，尚不止此。現在還知道紫外線逐漸融入 X 線 (X 線有時依發

明者之名而稱爲倫琴線 (Röntgen rays) 那種光線與X線唯一不同之點，僅在於波長相異而已。X線比較紫外線「硬些」所謂「硬些」即指其波長「較短」之意。最硬的X線波長約僅十分之一埃。但即此亦未能盡吾人現在的知識。在X線列之前尚有一列更硬之線——所謂γ線 (gamma rays)。這些線是由放射質 (例如鐳) 自然發出來的，我們的力量不能支配牠制止牠，甚或不能減弱牠或加強牠。這些線使我們達到千分之一埃的波長範圍裏去。此地還得簡略敘述的便是另有一種線，牠的起原和本性尚不會充分的解釋出來。這種線即所謂宇宙線 (cosmic rays)。牠們的存在已經證實，我們對於牠們也多少知道一點。隨時隨地——海面、山上、十千米至二十千米高的平流層、海中和深湖中，一切緯度上以及在晝夜任何時間內——都找得到牠們。但是我們還不知道這種線是否比γ線更硬，是否微粒，——換言之，是否高速的電子。牠們的根源是什麼？牠們是從遼遠的星雲來的嗎？這些問題，物理學將來必定找得出一個答案來。

現在我們再簡略地論述光譜的他端——即大於8000埃波長的線。這些線可以分爲二列：紅外線列，從8000埃至十分之一毫米的熱線和電磁波。後一種我們已經知道。使我們(用無綫電接收機)聽到地球上很遠處發來的文字和音樂的，便是這種電磁波。最短的電磁波長爲十分之一毫米，牠們融入最長的紅外波去。從這種電磁短波上，我們能得到幾仟米長的電磁波，甚至還有更長的。我們已經知道的一部分光譜，其中各種波長可列表如下：

1. 電磁波……………幾千米—0.1 毫米
2. 紅外光譜……………0.1 毫米—8000 埃
3. 可見光譜……………8000 埃—4000 埃
4. 紫外光譜……………4000 埃—100 埃
5. X 線 } ………………
6. γ 線 } ………………幾十分之一埃—0.004 埃

從發現光之繞射的時候起，到上表所示的結果爲人所利用時止，中間經過百多年的時間。至於光譜中各部的界限如上表所示，不過是近幾年才由實驗得着的。人們或許覺得奇怪，電磁波會與光波並列。有沒有充分的材料，能使人確定的說，這些波之相異，僅其波長不同？有人或許以爲電與光的現象是完全不同的。不過我們追溯光學理論的發展時，我們就會看到牠與電學理論的發展是密切相連的。

1931 年全世界同時慶祝兩個百年紀念。那一年是科學界泰斗法拉第（曾做過裝訂書籍的學徒）發現電誘導現象的百週年，同時也是馬克士威降生的百年紀念。法拉第和馬克士威是奠定現代電學基礎的科學家。在早年，電學採用舊力學上的概念和方法，那時舊力學已經完成。到了法拉第，

才將精密的觀念和新穎的方法介紹到電學上去，並且發現新的實驗定律，引起近代工業上極大的進步。

假設兩個帶電體，彼此相離有若干遠，試考查他們相互的反應。法拉第作這個實驗，不考查帶電體的本身，卻假定帶電體之間有一電場 (electrical field)，且假定電場具有特殊的性質。更假定其電荷 (charge) 振動。其周圍之空間遂亦起變化。這種變化傳播出去，好像繼續擴大的波浪，速度非常高，但有一定。馬克士威給法拉第的理論一個清醒悅目的數學式，這種精密的數學式使得理論更推進一步。

讓我們再回到振動的電荷 (electrical charge) 上來。馬克士威得到的結論是說這種變化的電場便是電磁波的根源，電磁波的速度恰等於光速。照馬克士威的意思說，光波不是別的，實際就是電磁波。他因此在這兩門科學之間建設一種密切的關係，光學變成只是電學的一部分。馬克士威預言電磁波的存在且預言電磁波的速度與光速相等，這些都是新的實驗事實。光波實際就是不大長的電磁波。(由此可知物體的光學性質與其電學性質是密切相關的，例如折射率 (refractive index) 之與介質常數 (dielectric constant) 是)。

這些結論已經實驗證明了沒有？1887年，青年物理學家赫芝 (Heinrich Hertz)，不幸早亡，享年僅三十七歲) 才由實驗上證明電磁波之存在，測量電磁波之長度，而且發現牠們的速度果然與光

速相同。這裏我們又看到了科學進步史上兩個主要特性——某種事實的預料以及該項事實經實驗證明而確立。欲覺察這些發現之重要以及科學成功之偉大，只須想想電磁波或無線電話無線電報在現代生活中所負的責任就明白了。

量子論的創生

大理想和新理論乃由於劇烈的衝突而生，在矛盾互見，聚訟紛紜，而不能發現滿意的結果時，大理想新理論就會出現。二十世紀兩個極大的理論就是在這種情形之下產生的。這兩個理論即相對論 (theory of relativity) 和量子論 (quantum theory)。現代物理學的用語是數學的用語。物理學利用數學上隨時獲得的結果，同時牠又供給新問題以待解決而促進數學。現代物理學理論上精深的知識，沒有高級數學的知識便不可得。所以我們在這裏不能企圖介紹怎樣深奧的，只好把理論的一般概略介紹一下就是了。我們本此宗旨試來追溯量子論的發展。

物理學上什麼問題激發量子論出來的呢？讓我們再回到太陽光譜上去，注意太陽光譜上可見的一部分。在紅色紫色兩端之間，我們找着可見界的一切顏色。太陽是輻射能 (radiant energy) 的一種根源，這種「能」是以各種長度的波而分配的散佈的，光譜的每一部分——每種顏色——運送這種「能」，各有一定分量。設我們把光譜分成十部分，那末每一部分含有多少「能」呢？第三部分負擔多少，第七部又負擔多少呢？換句話說，太陽的輻射能在其光譜的各部分上，是怎樣分配的？欲

比較精密地解答這個問題，那必得把光譜分成很多部分，譬如說分成一百個甚或一千個狹條。問題照這樣提出，遂變成便於實驗研究的問題，實驗的結果可用圖二表示出來。橫軸表示波長，軸上曲線表示光譜中「能」的分配。曲線的最高處，即表示相當於光譜中該部分的「能」值最大。曲線表示在藍色（波長 4000 埃）附近，「能」是比較最多的。光譜的紅色一端，「能」就貧弱。

太陽表面上的溫度很高——約合攝氏六千度。這樣高的溫度在地球上任何處都達不到。可是

我們能夠得到攝氏幾千度的溫度。問題於

是發生了：如果發出輻射的物體溫度降低了，

光譜中「能」的分配會生怎樣的變化？這個

問題也是由實驗來回答。我們可以製造許多

小形的太陽，雖說溫度不及太陽本身那樣高，

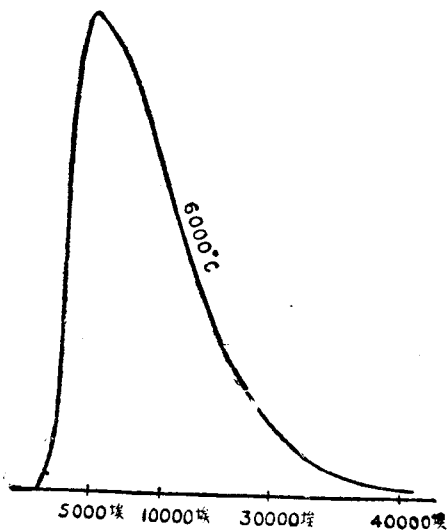
卻能發出各種輻射來，並且我們能夠考查牠

們的光譜在低溫度時「能」的分配情形。圖

三即表示各種溫度下「能」的分配，溫度降

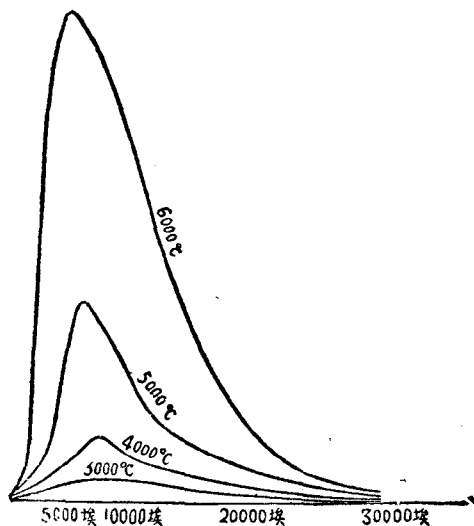
低時，物體放出的「能」也會縮小（每一曲

線上皆已註明牠的溫度）。此外還表示更有



圖二 太陽光譜中「能」的分配

價值的知識。牠表示光譜中「能」量最大的部分，當溫度降低時，就向光譜中紅色部分傾斜。在 6000°C 溫度下，最高的「能」是在藍色附近；然而在 3000°C 溫度下，最高的「能」卻在近紅色一端的顏色上。光譜中任何部分的「能」都依兩種要素而定。第一種要素是波長——光譜中各部分各有不同的「能」——第二種要素是放射體的溫度。射出的「能」是波長和溫度的函數。這些結論以及表示這些結論的圖解都不是理論考慮的結果，而是實驗和測量的結果。理論不會將支配光譜中「能」的分配定律教給我們；但是理論可以解釋這已經實驗證明了的事實麼？光的電磁說可以解釋光譜中「能」的分配麼？這些定律能否由支持過這個領域的（十九世紀末）電子論（electron theory）來說明？不然，可否用統計法來解釋？這些問題的答案都只是個否定的。根據已往已經採納了的理論來研究，結果卻總與實驗的結果相衝突。可見那些理論并不能解釋圖二圖三的曲線。



圖三 各種溫度下物體光譜中「能」的分配

這樣，理論與實驗間嚴重的矛盾引起不少爭論和摸索，最後才產生量子論。量子論的生日是一千九百年十二月十四日。因為在那一天蒲朗克 (Max Planck) 才在柏林德國物理學會誦讀一篇關於這個題目的論文。量子論是二十世紀的產物。牠已在當代科學上確定了牠的特徵，而且是現代物理學革命進程上最重要的階段。

間斷性觀念

我們先舉一個完全與物理學無關的事例來說。有一炭坑，僱四百工人開採，每天產額有三百噸煤。為限制生產起見，僱用的礦工人數必須於二月內減裁成二百名。工作中的礦工數量自然是隨時而變的，但是這種變量是否連續的 (continuous) 能否說在某一個時期僱用的礦工總數為 337.865 名顯然不能；總數必然是整數；小數觀念不能應用於礦工人數上。工作中的礦工總數只能依全數的跳距而變更，——換句話說，是間斷的 (discontinuous) 變更。代表產額的圖表就不是這樣；那些圖表具有的性質又不同，我們可以說在某一刹那產額是 216.7698 噸。換句話說，煤的產量變化是一種連續的狀態。

在物理學上也是這樣。這裏我們也可以碰到有些量是依連續狀態而變更，有些量卻是依跳躍狀態而變更的。例如時間和距離是連續變化的，但是，如果我們問：「某種氣體每公升包含多少原子？」答案必然是一個整數，牠不能是依連續狀態而變化的。舊物理學上運算的量是連續的量。「時間」

「距離」、「質量」、「力」、「能」等量，照舊力學說，都是連續變化的量。人不能設想舊力學用任何其他方法運算；人不能用任何不具連續性質的量來表明牛頓力學的主要方程式。

十九世紀原子論 (atomic theory) 的發展便給予第一次打擊；牠說物質的構成是一種間斷的性質。封閉在器皿中的輕氣 (hydrogen) 的原子，數量雖大，卻係整數。依原子論所提出的物質概念說，我們竟能計算單個氫原子的質量 (mass)。一氫原子的質量非常之小，若用克 (grams) 計算，只是一個小數，小數點後二十三個零，再次一位為一——即

$$\text{一氫原子的質量} = 0.000,000,000,000,000,000,000,001,7 \text{ 克}$$

我們能從定量的輕氣的質量中減少一氫原子質量的一半麼？顯然質量上的變化只是一級一級的。最小的一級是一氫原子的質量。我們能加十億個原子氣體到輕氣管裏去，但是不能加十億又半個原子到那裏面去。所以舊力學上假設質量的連續性首先就被打破了。然而我們仍能依舊力學而繼續將質量當作一連續量看待，因為我們覺得用最靈敏的天秤也難達到十分精密的程度，所以我們不能稱量原子及察覺牠質量變化的間斷性。

後來電學理論上也給予同樣的打擊。照十九世紀的概念說，電荷如舊力學上的質量，變化是連續的。但是如電解 (electrolysis) 陰極線 (cathode rays) 等現象也使我们不能不根本修正我們的見解。電是由粒子構成的——恰如海岸之成於沙粒和房屋之成於磚塊。電子 (electrons) 是陰電的

最小粒子，質子 (protons) 是陽電的最小粒子。所以每一電荷是用電子和質子來代表的許多元電荷 (elementary charges) 的總和。電荷如質量，只能間斷地變化。不過元電荷非常之小，在許多研究中，爲便利起見，就把牠當作一種連續的小量看待，恰如我們在舊力學中看待質量一樣。因此，原子論電子論介紹到科學上來的是間斷的物理量，只能依跳躍狀態而變化。

量子論又進到那一步呢？量子論介紹一個大膽的觀念到現代物理學上來，牠十分新穎而且出入意表地擴大了間斷性觀念的用途。不但物質和電是粒狀物所造成，而且「能」也是粒狀物造成的一——即由整數的單位或量子 (quanta) 造成的物質量子 (quanta of matter) 和電量子 (quanta of electricity) 之外，還有能量子 (quanta of energy) 存在。將間斷性觀念搬到出人意外的範圍裏去（即「能」的範圍裏去）的，便是蒲朗克。

發光體依輻射形式放出「能」來。物質使光線歪曲、變化、反射、分散或吸收牠。蒲朗克有一根本的假定：發射 (emission) 與吸收 (absorption) 一樣，只能發現於量子中。機體所發射或吸收的，只是一定整數的能量子。這些元能量子有多大——或者說有多少？小解答這個問題之前，我們得先給「能」的單位下個定義。我們有一個大概的定義就夠了。如果舉一仟克重物至一米突高，則作了一定量的「工」(work)，而且結果費去一定量的「能」。設想有一定量的「能」比這個少一萬萬倍，我們就用牠爲「能」的單位，這在物理學上稱爲一厄 (erg)。這個「能」單位非常之小，可用來計算一隻

螞蟻建築牠的土堆時所作的「工」以這個小單位為標準，可以表明各種物體所吸收或發射的「能」粒子之大小，但必然是整數。用這個單位計算，「能」雖小到極點，也可用小到極點的數來表示；我們用不着驚異。設若原子的重量比較牠們實在的重量大許多倍，則人們還能假定舊力學中質量的連續性麼？「能」也是這樣；牠的量子特徵隱藏了這樣久，也就是因為「能」粒子過於小了的緣故。

已經說過，電的原子的特徵告訴我們，有某種極微的電荷存在，且可精密的規定出來。這些極微的電荷是電子和質子。採用適當的單位，我們就能簡單地用一數來表示這種電荷的量。這使我們想到，我們在量子論中可以用一個類比的方法。我們的單位已經選擇好了；單位是厄。第二步或就可以得到「元能量量子」的大小了；但是問題並不像那樣簡單。讓我們再在物理學範圍以外舉個例來說。假定英國的預算表編造得異常精細，不但計入鎊，先令和辨士，乃至最小的國幣（法星）也計在裏面。請看預算表中最小的一部分（即法星）那一部分大概是沒有人注意的。這法星是我們最小的單位，最小的貨幣量子；誰也不能加減預算表半個法星；換言之，誰也不能連續地變更牠。

現在渡過海峽來看法國的預算表，表上不但計入法郎，且有生了。這個預算表的小量子便不是法星而是生了。這個小量子比英國預算表的小量子差不多小八倍。同樣，各國各有牠的小量子作牠的貨幣單位。

現在回到物理學上來，我們試考查一吸收體，設從可見光譜的紅紫兩端放出兩種單線(homo-

continuous rays)照在這個吸收體上。吸收作用便發生於量子中——即一定的小部分中。但是紅線的元量子與紫線的元量子不同。我們又記起紅線波長二倍於紫線波長。該體吸收紫線的部分大於紅線部分二倍。輻射愈硬 (harder)，牠的元量子愈大。X線的元量子比紅外線的元量子更大。因此，上面所發的問題——即「元量子」是什麼？——我們可改變如下：一定波長的特殊單線，牠的元量子是什麼？這個問題的答案包含一個基本數，這個數是量子論上一切公式中都有的，牠叫做「蒲朗克常數」(Planck's constants)，用 h 來代表。

h 是蒲朗克常數。

這個常數不是虛構的；是由精密的實驗決定出來的（這些實驗我們在後面還要簡略的介紹。）這個數極其小；是一小數，小數點後有二十六個零，其次第一個數字是六，即

$$h = 0.000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,006,55$$

（我們省略了 h 的次數問題，有意違犯精密規則，不能不告罪。）常數 h 既定，則特殊單線的元量子的大小就能決定了。欲決定牠，我們必須知道線的波長（波長觀念已經熟悉，前面已經說過）與另一常數，即——真空中輻射速度的常數。這一速度在各種線是相同的，每秒約 300,000 千米。特殊線的元量子公式可列如下：

蒲朗克常數乘以光速除以特殊的波長。

即：

$$\text{能量子} = \frac{h \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

於是我們看到特殊線的波長愈小，則相當的元量子也愈大。換言之，量子的值愈大，則輻射愈硬。

這個公式的真實性顯然隨單位之選擇而異，當測量「能」量子的單位用厄時，表示波長就不能用埃，而只用厘米。依此，表示波長的數（即我們用以除蒲朗克常數的數）必會比前面說的小一萬萬倍。表示光速亦必用每秒厘米，而不用每秒仟米。茲將光速的較確值（more exact value）列在下面：

$$\text{光速} = \text{每秒 } 2,997,900,000 \text{ 厘米}$$

這個式子是一定單線的「元量子」（elementary quanta of heat）的大小公式，且解釋了這些量子怎樣能夠得着。現在利用這個公式，我們便能夠簡單的計算，而且答覆一厄中包含多少紅光量子的問題了。計算的結果是 400,000 百萬個。所以紅色輻射的「能」粒子渺小得非常奇怪。紫色輻射的元量子二倍於牠；每厄有 200,000 百萬個。這些也就是極小的，不可見的紫線「能」原子。至於 X 線，吸收或發射的輻射更可以分離成一萬倍大，因為牠的波長比較更短那樣多倍。

上面，我們已將量子論上最重要的原理介紹了。看起來，那些原理彷彿是幻想的，人爲的，可是牠可以解釋已知的事實，便是牠的無上的試驗了。在前面，關於激發量子論的創生的問題，已經論述過了；這問題即光譜中「能」的分配問題。理論上怎樣又能得到牠須視波長和溫度而定的結論呢？

物理學家所作的一切試驗和企圖，得到的都只是些錯誤的結論。蒲朗克是第一人，拋棄能的連續性觀念，才與舊物理學斷絕關係。後來他又以精細而錯綜的理論，建立光譜中「能」的分配定律。實驗完全證明了他的理論。量子論終於解決了理論與實驗衝突所引起的爭論。量子論是否也預言新現象？將來量子論更發展了，那他會在物理學全部領域內都奏着凱旋。量子論的根本觀念所包含的事實有時較少，有時又較多，所以牠已多少侵入物理學各個範圍裏去了。

建立蒲朗克的公式——即輻射「能」的分配公式——手續異常複雜而且困難。這裏不能介紹他的推理，便是他推理的綱要也不能寫出；因為他的推理比較古典派的推理還要錯綜些，奧妙些。「宇宙是簡單的」這種見解極其膚淺而且錯誤；我們研究宇宙，覺得是在繼續地無結果地與那繁複的現象奮鬥；時常放棄我們難於達到的目標和見地；時常發展更複雜的理論，在那上面設立實在底更複雜的上層建築。舊定律只變成初步的近似（First approximations）。研究大規模的物理現象——例如考查彈丸運動律，流質流動律，或一工廠產額的變化律——我們不採用量子論；因為在這些現象中，我們可假定「能」的連續性。但當我們研究關於輻射與物質間相互反應的法則時，「能」的複雜粒狀結構就自己顯露出來了。

光量子

的青年科學家——愛因斯坦 (Albert Einstein) 其中一篇建立了相對論的基礎；另一篇便是論述量子論的，使量子論有顯明的進展。牠的根本觀念能化繁為簡，能將牠們最重要的意義作成簡單的素描。

波動說論輻射；量子論則論發射與吸收。試看單輻射（我們已經知道牠具有一定長度的波）從空間射來照及吸收體。這種吸收只發現於各小部分中，即量子中。愛因斯坦改變輻射本身概念且根本加以修正，使牠適合量子論所創造的發射和吸收概念。因此，讓我們放棄光的波動說，跟着愛因斯坦假定：光本身是粒狀結構，并且是由「能」量子依光的速度很快的經過空間而形成的。如果沒有說錯，則愛因斯坦恢復了牛頓的微粒說，不過改變牠的形式，擴大牠的範圍罷了。光「能」的顆粒代替了牛頓的微粒，特稱之為光子 (photon)。因此，光即是一羣光子，光子即是光「能」的元量子。但是，波動說如果被拋棄了，波長概念也就隨而消滅了。又用什麼新概念來替代牠？我們只須將前面量子論的基本公式用光子來表示就成了：

$$\text{光子能} = \frac{h \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

并且用波動說的術語來表示的敘述，可以譯成用輻射量子論的術語來敘述。茲舉數例如下：

波動說的術語

1. 可見光譜有種種長度的波。

量子論的術語

1. 可見光譜有種種「能」的光子。

2. 光譜中紅端波長二倍於紫端波長。
3. 單線有一定而精密的波長。
2. 光譜中紅端光子能為紫端光子能之半。
3. 單線有一定而精密的「能」的光子。

從輻射的波動說到量子論的轉變不僅是術語上的轉變。輻射概念本身也發生根本的變化。試再看光譜的全部範圍，從遠的紅外輻射起，包括這種輻射的光子具有比較小的「能」。(依波動說的術語，可以說這些線的波長比較大。)牠們好似棉絨小球。向前移到可見光譜，我們見到的光子，牠們的「能」顯然較大，牠們好似手鎗子彈。紫外線可比來福鎗彈， α 線就可比重砲彈。

用什麼理由來打倒波動說呢？有實驗的事實為量子論所能解釋，而為波動說所不能解釋的麼？有；如光電效應 (photo electric effect) 這一簡單的實驗現象中，就可以看出來。

如果單線(例如紫外線)在某種條件下(條件從略)射擊在一金屬面上，即有一羣電子現出。這些電子是從該金屬板上以一定速度逃出來的，像彈丸一樣。依照「能」的變化觀點說，這種現象可以簡單的解釋如下：該線一部分「能」轉變成逸出之電子的運動能去了。現代實驗室中能夠使我們記下這些電子彈丸來，能夠決定牠們的速度，因而能夠決定牠們的「能」。

射擊在金屬板上的線的顏色與金屬板上射出來的電子的「能」有什麼關係？要解答這個問題，本來只要靠實驗就行，不必求諸理論，但是，我們也不妨先從理論方面來談談。讓我們看看根據波動說可得什麼推論，根據輻射量子論又可得什麼推論。

擁護波動說的人也許這樣說：我們有連續的波狀結構的輻射，射擊在金屬板上，並且我們是在研究逸出之電子的運動能。這種「能」是舊物理學上的概念，是有連續性的概念，所以量子論是不適用的，因為這問題完全是舊物理學範圍內的問題。輻射的「能」一部分轉變成了電子的運動「能」。現在我們可作下列的推論，自然，這些推論必須經實驗證明：

1. 如果我們用由較強的光源發出的紫外線射擊在金屬板上，逸出之電子的「能」應該比較大，因為那種能夠轉變成逸出電子的運動能的輻射能的總量比較豐富。

2. 如果射擊在金屬板上的線是紅色或紅外色，——如果我們用極長的波，——仍會發生光電效應麼？顯然，仍會發生的。在那種情形中，我們用較強的光源，也能增加射在金屬板上的輻射能，因而也能增加逸出之電子的運動能。

擁護輻射量子論的人也達到同樣的結論麼？如果他達到同樣的結論，我們就不會用光電效應來審判這兩個理論了。所以我們得轉身過來看這一方面的推論又是如何。

擁護輻射量子論的人也許說：紫外輻射是一羣彈丸，即一羣光子。線是單線，所以每個彈丸連送的「能」相同。舉個具體的例子來講：礮彈（喻電子）從口徑相同種類相同的許多礮發出，轟擊一要塞（喻金屬板）。這些礮彈有的擊中目的地。於是發生雙重效應：每個彈丸起初從牠所轟擊的金屬板上奪取一電子，其次，復使該電子以某種「能」脫離金屬面。光子能是用來打破電子與金屬板

的聯絡，且使電子以某種速度放出空間的，因為一切光子具有同樣的「能」，所以被牠們逼出的電子也必有同樣的速度——即同樣的「能」——也就因為一切電子都被同樣的強度約束在這金屬板中的緣故。如果光的強度增加了，如果我們繼續以同樣的礮彈轟擊，只是射擊的次數增加，逸出之電子的「能」并不生若何變化。擊中目的物的次數比較多了，逸出之電子也就比較多，可是這種電子每個具有的「能」并不加大。現在說到紅外線——即由重礮彈到棉絨小球——人們或能預料這全部效應必會消滅，因為那些光子所具有的「能」不足以從金屬板上奪取電子出來；雖說射擊的次數增加，卻無效果發生。所以根據輻射的量子論可作下列的推論：

1. 如果我們用由較強的光源發出的紫外線照及金屬板，則每個逸出之電子的「能」不會發生變化，唯一的結果是逸出之電子數量增加。

2. 光電效應只有在光子的能足以從金屬板上奪取電子時才會發生。結果，這種效應只能在某種顏色的輻射下才會發生；例如在紅外輻射下就不會有效應。不過，光的波長如果夠短，足以發生效應時，則波長再往下短（即光向紫色一端移動）那末逸出之電子的「能」必隨而增加。這些推論比較由波動說而得的推論怎樣？牠們顯然是完全不同的。但是，果否恰如光的量子論所引人希望的，逸出之電子有一定的「能」相當於各個單輻射？實驗證明了所有這些由量子論得的到推論——這些推論反對波動說，根據波動說就不能了解這些推論。

輻射二元論

我們已經看到光的理論發展上重大的事蹟是這樣的：

1. 光的波動說與微粒說。
2. 繞射現象發現後波動說勝利。
3. 光的電磁說。
4. 輻射量子論。

現代物理學能將波動說一概拋棄，而完全建築在輻射量子論上麼？如果這樣做，光電效應倒得着解釋，新的大困難卻又發生了。因為這樣一來，我們就不能解釋繞射現象。光經過小孔或細微障礙物時，即生明暗相間的現象，這種現象不是量子論所能解釋的。至此，兩種理論各能解釋一定事實。繞射現象與量子論矛盾；光電效應卻與波動說矛盾。在這進退兩難之際，應走那一條路？光究竟是什麼？是一種光子運動嗎，還是一種以太中的波動呢？

因為我們的科學概念進步，就常常發現我們的假定不正確或不適當，錯誤的思想也常常偷偷跑進來，擾亂我們的推理。例如愛因斯坦第一篇關於相對論的文章，出發點是分析「現在」一物理概念。原子論量子論相當地打破連續性概念。還有其他專供神用的種種觀念也必須改變、校訂和修正。我們曾經想過，我們能畫一個輻射作用的統一圖。牛頓與惠更斯的衝突是光現象上兩個觀點相

反的衝突。但是現在我們覺得宇宙現象的複雜性質；且覺得這些現象之複雜，不能用一個理論來範圍牠們。光的性質是什麼？尋找這個問題的答案並不是物理學上的難題。科學的發展屢屢強迫我們縮小研究的範圍。我們正開始估量我們無知的範圍究竟有多大。我們只好說某種現象之發生。若光具有波動的性質，同時別種現象之發生。若光是由一流高速的光子組合而成。現代物理學對這光的兩方面都接受了。某種現象使我們見到光的波動方面；而別種現象又使我們見到光的微粒方面。同時，我們又知道有些現象，如都卜勒效應(Doppler effect)可以用波動說解釋，也可以用光的微粒說解釋。以後我們就可以看到吾人所知的宇宙現象二元論是思想上一種新穎而有效的方法，可以應用於物理學的其他領域裏去。

假設某一電影院向兩個人映演一有聲影片，這兩個人生理上都有缺點——一個是聾子，一個是瞎子。聾子只看見影片，且不知道有有聲的裝置；他決不猜想有聲音發生。他環視一周，看不見樂隊；於是推斷那一定是搬走了，因為那於他沒有用處。同樣，瞎子只接受聲音的刺激。他的感官不能幫助他；面前的影幕是一平面，十分平滑；即使他觸着影幕，也一定相信他面前演放的只是聲音。這二人接受一事的印象各不相同；他們各用各人的說法去敘述牠。設我們更進一步想像用一種方法使這二人的缺點互相交換一下，——聾子變成瞎子，只恢復他的聽力，瞎子變成聾子，只恢復他的視力。那末，他們每人所給的報告便會起初是現象之一面，其次是現象之另一面了。但是他們仍然不知道兩面

現象是同樣發生的，——這在他們看來仍然是一個祕密。我們觀察輻射現象，看見牠們不是由牠們波動方面而來，即是由牠們微粒方面而來，在這時候我們覺得我們自己就彷彿是那個瞎子和聾子了。實在內容之複雜錯綜超過我們的知識範圍。

現在我們要進一步說明，輻射上這兩種理論並列起來能使我們決定蒲朗克常數，這個常數的代表字是 h ，是量子論中的主角。

爲了這樣，我們再回想光電效應。射擊在金屬板上的是紫外線。照波動說的見解說：輻射是單的，所以我們能決定牠的波長。由實驗，我們同樣能證實光子的「能」。我們還記得我們的有效射擊把光子能變成逸出之電子的運動能。實驗室的方法可以測量電子的運動能，因而也可以測量光子能。於是再引光的量子論的基本公式如下：

$$\text{光子能} = \frac{h \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

在這些物理量中，那一種可由實驗決定？我們知道真空中的光速，繞射現象可以決定波長；光電效應可以供給光子「能」的量。唯一的未知量是 h 。但是上述公式可使我們計算這個量。這一簡單數的數學方程式中只有一個未知數——即蒲朗克常數。所以我們實驗上有方法決定常數 h 的值。

第三章 物質

我們心中關於物質世界的圖畫永遠是受制於進化和變遷的。科學思想常常忙着改造這個圖畫。最近二十年間這圖畫上的重要變化係由於量子論以及間斷性概念侵入了現象新領域——即物質構造問題的領域——而生的。

科學理論中在達到新結果的道路上，往往滿佈着艱深而錯綜的數學推論。決定理論的種種實驗，一般都需要極正確的測量和極複雜的儀器。沒有當代實驗物理學的知識，就不能了解這些。因此，我們就有嚴格限制本書目標的必要，我們不能企圖描寫那引我們達到新定律新理論的道路。這樣一來，我們就無從見到經長期努力而後得着的美麗景色。就是單單暴露出牠的結果，也必需數學物理學上精密專門的語法。所以這裏所呈現的圖畫只好是普遍的，暗淡的；所能嘗試的也只好是新理論的綱要和大概的輪廓罷了。不過，這樣的辦法也能使我們認識現代科學所成就的大革命，並且知道問題之多可能性之大尚有待於將來物理學的進步。

物質動力論

前世紀末，科學家還以為原子是物質的最小而不可分的粒子。地球、行星、太陽、星體以及物質世

界中一切東西，被視作由九十二種元素 (elements) 的原子集合而成。

元素最輕的是氫。設一管中充滿氫或別種氣體。氣體動力論即貢獻一統計圖，代表這種氣體的進行狀態。牠的分子 (molecules) —— 即這種氣體所由構成的質點 —— 紛亂地橫衝直撞着與其他分子碰撞，因碰撞而脫離原路，於是再衝開去以至發生第二次的碰撞。分子是什麼？有種氣體，牠們的分子只包含一原子；對於這種氣體，原子概念與分子概念就完全合一。這種氣體如氦、汞蒸氣、鈉蒸氣等。然而，就一般而論，分子係許多原子組合而成的。氫、氧、氮等氣體的分子就是由二原子合成的。

氣體動力論能估量每種元素的原子質量。氫的原子質量如下：

$$0.000,000,000,000,000,000,000,001,7 \text{ 克}$$

這個數是從理論上得來的；不能由直接測量而得，因為牠是過於小了，比較極靈敏的天秤所能秤的最小量還要小些。這個小量也可用另一形式表示出來：一克氫在正常情形下 —— 即在一氣壓和攝氏零度的情形下 —— 包含多少氫原子？

正常情形下一克氫所含的原子數 = $6.36,000,000,000,000,000,000,000$

小量氣體中也聚集着那樣多的原子。一萬萬分之一克氫所包含的原子數目比六千萬萬還多！如果這些虛測的數不能用實驗來證明，我們又怎麼會相信？能解釋多數實驗觀察的推論，都是由氣體動力論所昭示給我們的圖畫繡釋而來的。因為這些理論與實驗相符，所以牠們更加強了分子

動力論的真實。

在進一步追溯物質構造的理論發展史之前，我們必先述幾件電學上獲得的結果。因為物質構造的理論發展，也和輻射的理論發展一樣，是與電的理論發展密切相關的。

引力定律與庫隆定律

牛頓首先覺得物體之墜落、月繞地球的運動以及行星對太陽的運動都受普遍的引力定律的支配。牛頓陳述這條定律是在一六八七年，這在科學思想史上開一新紀元。我們且來概括的檢察這條定律。

一切物體都是互相吸引的。今以二同質球體為例。引力定律告訴我們二球吸引的方向，且告訴我們決定那個吸引力的物理要素。吸引的方向即是連結二球心的直線的方向；吸引力只依球體質量和二球心的距離而定。假定我們變動球體質量而不變二球心的距離。比如說二倍一球的質量，三倍另一球的質量。則吸引力必增加 $\infty \times \infty$ 倍，即六倍。說得更簡單更概括一點，即：二物體的吸引力隨牠們質量的相乘積而正變。其次，假定球體的質量不變，只三倍牠們的距離。則吸引力縮少了 $\infty \times \infty$ 倍，即九倍。換句話說，吸引力隨距離之平方而反變。

但是，這種吸力不呈現於我們附近的物體，又是怎麼一回事呢？為什麼椅子、桌子、房屋不見彼此相向地移動呢？這答案很簡單：吸引力是太小了；我們附近的物體不足以克服反抗運動的力——即

摩擦力——這種力是常有的。如果吸引體很笨重，吸引力就可以察覺了。地球吸引牠近處的物體，行星繞日而行，以及月繞地球而行，都是由於這種吸引力而生的。

於是問題又發生了。如果物體依連結牠們的直線方向而彼此吸引，爲什麼地球不落在地球上，月球不落在地球上呢？牛頓力學的原理對於這個問題也有答案。運動的方向不是吸力的方向。當一石塊從高處自由的降落時，牠垂直地向地心而降落。一彈丸從重砲射出，雖說吸引力也使牠向着地心，牠的經程卻是一拋物線。如果我們給與這個彈丸一充分的高速，牠就會像月球繞着地球而旋轉。牛頓力學的原理告訴我們，一運動體的路徑不但依賴引力，還須看牠起初的位置和速度如何纔能決定。各行星繞日而轉，路徑是橢圓形，這些形式即係依我們這個太陽系發生時各行星的位置和速度而決定的。

力 (force) 一名辭，我們已經用過多次了。我們用以測量力的單位是什麼？這個單位雖然我們不用十分精密的規定，但也得規定一下。如果我們手掌上放一重物，牠的質量爲一克，我們便覺得有很輕的壓力壓在掌上。他異常之輕，我們差不多不大注意牠。不過，設想有一重物比這個更輕——比如說輕一千倍。那末我們應完全不覺得有什麼壓力，並且必須用十分精密的儀器才能確定牠的存在了。我們的身體完全不感覺這樣小的力。這樣大小的力——比一克重的東西壓在我掌上的力小一千倍的力——差不多就是我們採爲單位的力，特名之爲達因 (dyne)。

電學尚在幼稚期的時候，機械學已很進步，所以電學在早年採用舊力學上現成的觀念，並不是怪。

電學上發生的第一個概念是二流體說 (theory of two electrical fluids)。以為有二種電流，一陰一陽，都無重量。在那時，這確是科學上最時髦的理論，具有重量的各種物質之外，又添入這種不可稱量的東西，可稱為無重流體 (weightless fluid)。熱、電、磁及以太都算是無重流體。到了現在，這一族中只有以太一種了，可算碩果僅存，可是許多物理學家對於以太的存在，也有些懷疑。

最簡單的電學命題（卻也能解釋許多基本的實驗事實）可列如下：同荷號的二帶電體互相排斥；異荷號的二帶電體互相吸引。設二小球體都帶有電，則有三種可能性，可表明如下：

↑++↓ 二球都帶陽電，則相斥。
 ↑-↓ 二球都帶陰電，亦相斥。

↓↑++ 二球所帶之電性質相反，則相吸。

這些力有多大？舊物理學家或許這樣說：二球都是實體，牠們相互吸引的力是合乎牛頓定律的。但是我們知道這種吸力是很小的。所以我們爲了我們的目標，儘可把這種吸力略而不計。於是剩下的只是二電荷的作用——物質球上無重流體的作用。這種作用的性質是什麼？牠所服從的定律是否類似於引力定律？庫隆 (Coulomb) 從事實驗，確實發現這樣一個類似於建立定律如下：二電

荷彼此相吸或相斥之力隨二電荷之相乘積而正變，隨距離之平方而反變。這定律顯然與牛頓引力定律相類似；但其間也有不同。在電一方面，不單有吸引，抑且吸引與排斥兼而有之，只看二電荷是同荷號還是異荷號。舊力學中質量概念所佔的地位在這裏被電荷概念取得了。這些電荷怎樣測量呢？這裏我們也得把單位規定一下，——即電量的靜電單位 (electrostatic unit)；這單位也是很小的。設想二球體帶電的方法相同，因而電荷相等。使牠們相離一厘米遠。更假定牠們彼此相斥的力等於一達因。那末我們就說各球上所帶的電量等於電量的靜電單位。換句話說，一單位靜電荷即指一電荷，以一達因力排斥電量相等離牠一厘米遠的電荷。

元 電 量 子

在早年，電被視作一種連續的量。連續性觀念乃因電被當作無重流體看而生。我們可以設想電荷之小隨吾人之意，正如我們可以設想質量之小隨吾人之意一樣，如果我們不採取原子說的時候。電學進步了，電為流體這概念已失掉牠根本的特徵。電流既不能當作連續性的，也不能當作無重量的。現代物理學中，電的構造是粒狀的，頂小的電粒子不但有一小荷，且有一小質量。

這個理論的轉變是怎樣產生的？就大體說，在前世紀末，牠確是物理學上的一大進步。詳敘牠的過程，那會使我們超出本書的範圍，所以我們只略述許多電現象（特別是電解現象與陰極線現象），只須知道電的構造是原子的——即粒狀的——就該滿意了。有最小量的陽電荷的存在，也有最小

景的陰電荷的存在，這些是存在着的元電荷，每一電荷包含的電粒子是一整數。早已發展了的物質的原子論，給予電理論基礎以同樣變化的根據。顯然地，這些小粒子必定極其小。所以爲了種種目的，我們仍得把電當作是連續的，恰如舊力學中我們不拋棄連續的「能」與物質觀念一樣。只有在細微物理學 (Micro-physics)，這一部分物理學研究不能直接觀察的現象裏面，電才露出牠的粒狀構造。

我們已經知道這種電的最小粒子是陰電荷時，叫做電子，是陽電荷時便叫做質子。前世紀與現世紀起初十年的物理學，展開在吾人眼前的電子與質子圖畫是屬於那一種的？電子的電荷是什麼？電子與質子的質量又是什麼？有些引人注目的實驗已建立起電子與其相連的磁電場之間的關係了。這裏不能詳述那些實驗；也不能詳述密爾根 (Millikan) 的巧妙的實驗（密爾根是一位直接測定電子電荷的人）；這裏只能說說牠們的結果。

1. 電子與質子的電荷是什麼？如果二電子的距離與二質子的距離同，則二電子互相排拒之力恰與二質子互相排拒之力同。一電子與一質子所有之電荷，性質相反，而絕對值相同。這些元電荷是十分小的。牠們比靜電單位小若干萬萬倍。

2. 電子與質子的質量是什麼？這個問題的答案出乎意外。電子的質量與質子的質量是不相等的。先看質子。牠的質量差不多即是一氫原子的質量。這個最小量在前面已經介紹過了，牠代表氫原

子的質量，同時也代表質子的質量。至於電子的質量卻比這個最小量還小；實際上，牠差不多要小二千倍。質子質量與電子質量的比率差不多是 1850 比 1。

電子與質子的電荷與質量可表列如下：

電 子

$$\text{最小質量} = 0.000000000099 \text{ 克}$$

二十八個零

$$\text{質子質量} = \text{氫原子質量} = 0.00000000017 \text{ 克}$$

質 子

二十五個零

$$\text{元電荷} = 0.000,000,000,477 \text{ 靜電單位}$$

$$\frac{\text{質子質量}}{\text{電子質量}} = 1850$$

現在，又有很多問題了。理論怎樣解釋這個玄妙的數 1850？這個數是不變的，並且是離電子與質子質量單位而獨立的；牠實際是一自然的常數，但到如今，還不會知道為什麼應用這個數來代表電子與質子兩種質量的比率。

還有一個疑問。如果同符號電荷互相排斥，則電子（質子亦然）如何能成一同號電荷的組合呢？人或以為當部分電子互相排斥時，或許登時就會引起電子的爆裂，電子完全給毀壞了。防止這種爆裂的結合力或約束力又是什麼？這個問題也是電子論所不會解答的。因為理論發展，經過一種勝利又到另一種勝利，所以新矛盾出現，新問題又擺在面前，每一進步都會產生新紛糾新疑難。

照上述情形看來，理論推度的結果是這樣：世界上存在九十二種元素的原子，原子是不可分的，電也是原子的構造，由質子電子組合而成。因此好像有 $92 + 2 \parallel 94$ 種基本物質，物質宇宙就是這九十四種基本物質構成的。

二十世紀已完全成一大規模的新綜合。放射性的發現，以及其他現象的發現，展開了種種出人意外的問題。我們開始覺得原子不真是物質的最小而不可分的微粒。鐳是一放射性元素，繼續地自發地放射帶電的質點，人們稱之為 α 質點 (alpha particles)，每一 α 質點自成一系統，包含四質子及二電子。我們因而看到原子精巧的構造。我們且來分析牠精巧的構造，找出支配牠的定律，作成一幅合乎實驗事實的物質圖畫吧。請先解決下列的問題：

1. 如果原子是一複雜的構造，那末物質世界所由構成的基本要素是什麼？
2. 原子是怎樣構成的？什麼定律支配牠的構造呢？
3. 我們用科學上的原子概念，可否解釋那種現象？

第一問題的答案異常簡單。世界所由構成的元粒子是電子與質子。一切元素的原子都是電子的聚集。所以，可以說有基本物質存在——甚或可以說有兩種基本物質存在——我們的物質宇宙便由那種基本物質組成。上面所說宇宙間有基本物質 $92 + 2 \parallel 94$ 種，至此不能不減縮下來，只有二種了。每一原子（不管是那一種元素的）不呈電性。例如一羣氫原子在通常狀態下，不給以任

何電荷的符號。那末，又怎麼能說原子的成分應爲多少電子和多少質子（表示一定的電荷）呢？十分簡單：一原子的電子數目必等於其所含質子的數目。一電子與一質子，電荷之絕對值相同而符號相反。如果說一原子含有二十電子及二十質子，則合成電荷（resultant charge）爲零；該原子因而不呈電性。

關於第二問題——即原子怎樣構成的問題——最早尋求解答的試驗，是在現世紀初葉作的。這種試驗見於湯姆遜（J. J. Thomson）及刺德福（Rutherford）在1913年前的研究中。在刺德福1913年前的研究中，我們已經發現電子如行星繞質子而旋轉這一概念了。然而，種種疑難也隨之而生。建設一物質構造的理論，不能不訴諸實驗，實驗的結果常常又引起新的發現。刺德福的模型似乎構造得過於簡單了，不能解釋這些層出不窮的實驗事實。嶄新的偉大的理想往往就是從這種疑難和衝突中激發出來的。在1913年的物理學上，丹麥科學家波耳（Niels Bohr）就被激出這樣一個偉大嶄新的理想來。不過，在概述波耳理論之前，我必得先看看因相對論而發生的某種簡單問題。

能 與 質 量

物理學上有些定律是絕對普遍適用的，宇宙間一切現象都遵守着。下列二普遍定律是舊物理上早經製定的：

質 量 常 住 定 律 (the law of conservatism of mass)

能·常·任·定·律 (The law of conservation of energy)

試取一系統，其中正有化學變化發生，且不管牠發生的是何種化學變化。假定這一系統是孤立的——沒有東西能從外面參加進去，也沒有東西能從裏面潰漏出來。在這些條件之下，本系統的質量是沒有變動的。在起化學作用的時候，或前或後都是相同的。

舊力學上與質量概念同時並進的又有「能」概念。水滾熱的時候，石塊波舉起的時候，車輪轉動的時候，或蓄電池蓄電的時候，各系統裏面都富有「能」。當我們加工於一系統上，該系的「能」就增加；如果該系統自己工作，便會失去「能」。

熱是什麼？我們只須敘述蒸汽機、火車頭和由摩擦而生熱等現象，就可以明白熱是一種「能」。因為熱可以作「工」，也可以由工作而生熱。舊物理學上，「能」沒有質量；「能」是沒有重量的東西，工作可給以各種形式。設有一系統，與「能」絕緣，——該系統本身沒有作「工」，也沒有工作加諸牠。這樣一個系統具有豐富的「工作」，一定的「能」。根據「能」常住原理，則這一系統不能生任何變動。牠可以變種種形式——譬如輻射能可以轉變成熱能或化學能——但是該系統中「能」的總量依然如故。「能」我們怎樣測量呢？我們用測量工作的單位來測量「能」，因為只有用工作我們才可使一系統富有「能」，也只有用工作才可使「能」由一種形式轉變為他種形式。我們再簡單地引用前面已經介紹過的工作單位定義於此：舉一仟克重物至一米高所作的「工」為一仟

克米（相當於七呎磅）一厄差不多比這個小一萬萬倍。

質量常住原理與「能」常住原理雖然可用同樣的語法表示，可是牠們的實質各不相同。前一原理是關係可以權量可以用克表示的質量；後一原理卻是關係沒有重量只用工作來測量的「能」。在二十世紀初葉，這二個原理也發生了根本的變化。相對論使我們對這方面的理想有大加修正的必要。到現在，我們承認只有一條常住原理，不像從前那樣有二條了！

假設有糖於此，重為一仟克，運至赤道。牠的溫度升高了，因而牠的「能」也起了變化。但是糖的質量變不變呢？舊物理學的答覆很明白。牠說，「能」沒有重，所以糖的質量必依然如故。同樣，水在密封的管中加熱時，牠的質量不生變化，運動中的物體，其質量恰與牠靜止時的質量相同。然而相對論的答覆卻極不相同。「能」不是沒有重量的，因為牠有一定的質量。人或以為舊物理學與相對論的這一衝突可以用實驗來解決；但是直接的實驗卻非我們的力量所能及；我們仍遇着前面已說過多次的困難。相對論所預言的質量變化是不可量的小，即用極其靈敏的天秤來直接稱量，也不能覺察出來。不過，我們可以看出從相對論繙釋而得的推論能用間接的方法來證實，而實驗的結果確是擁護相對論的。

「能」的質量大小如何相對論解答如下：

$$\text{能的質量} = \frac{\text{能}}{\text{光速} \times \text{光速}}$$

讓我們來檢查這個基本公式。「能」的質量（以克計算）是由以巨數除「能」（以厄計算）而得。光速（以每秒厘米計算）是一很大的數，那末光速乘光速（即光速之平方）所得之積就更大不可言了。所以，結果必是一極小的質量。將一千噸水完全化為蒸汽所需之熱量，量起來還不足三十分之一克。因為「能」所代表的質量過於小，所以這樣久都被當作無重流體看。

太陽的輻射能也代表一定的質量。每秒鐘散播無數噸「能」經過宇宙。太陽是地球上生命之源，牠不但失掉「能」，同時還發生質量的減少。星球的生命，與我們自己的生命一樣，必然經過一定的狀態。在星雲和大星球中，我們看見最初狀態；在我們寒冷的地球以及更冷的月球中，我們看見天體發展的最後狀態。

我們再來看上列質量與「能」的關係公式。如果「能」定了，由這個公式就可以求出「能」的質量。因此，「能」（以厄計算）必除以光速（以每秒厘米計算）的平方。我們記得：

$$\text{光速} = \text{每秒 } 29,979,000,000 \text{ 厘米}$$

如果「能」被光速的平方除，結果便得以克計算的「能」的質量了。

我們可將這一基本公式寫成另一形式：

$$\text{能} = \text{質量} \times \text{光速} \times \text{光速}$$

或更簡明地寫成：

能 = 質量 × (光速)²

這樣一來，「能」與質量的關係又是一個局面了。每一質量是「能」的場所！不但「能」有質量，而且掉過來，每一質量都有「能」。物質世界所顯示的「能」，積蓄非常豐富。欲尋找相當於任何物體的一克的能，我們必須以驚人的數目（等於光速之平方）乘牠的質量。那末一克就代表九萬萬萬仟克米的「能」。如果真的這樣，如果這種「能」在我們四周處處都有，我們為什麼還要辛辛苦苦去挖地球內部的煤炭，為什麼還要建築防堤，為什麼還要勞動耗費無數心血？一小塊鐵裏面所蘊藏的「能」就足以推動大郵船飄洋過海了，也可以使工廠裏面最大的機器活動起來了。我們四周的物質世界中藏儲着這樣取用不竭的「能」，留存到現在，我們還不能企及。我們不知道要怎樣纔可解放這樣大量力，開發宇宙中「能」的寶藏。假使我們能夠開發或解放牠們，我們全部生活必將隨而改變。人不會再用他的汗血來換取他日用的麵包了！那末我們可以把質量變成「工作」嗎？我們以後就會知道科學上這一領域中主要的新發現已於最近幾年得着了。我們更會看到在我們這宇宙大實驗室中，或在星體的高溫度下，或在星球間空虛處，全部物質都失去質量，質量變成「能」或變成很硬的輻射，可為宇宙輻射（*microradiation*）的根源！

總而言之：「能」與質量的區別已打破了。每一質量代表無數的「能」，每一「能」也具有質量，雖說極小。兩條常住原理——質量常住原理及「能」常住原理——遂合而為一。稱為質量常住

原理也可，稱為能常住原理也可，那毫無關係，因為「能」有質量，質量也有「能」。現在科學只一條：
 質·量·能·常·住·共·通·原·理。

我們這樣介紹「能」與質量的根本關係，仍然是在純理論中說話嗎？有沒有實驗的事實來證明（即使是間接的）「能」與質量的這種關係？在解答這個問題之前，我們必須先在相對論引起舊物理學上的觀念不得不修正的另一方面，予以簡略的說明。

光速是大不可言的。但是我們如果始終站在舊物理學的立場上，就很可能以設想物體的速度會比光速更大。因為舊力學上，能夠隨意假定速度為多麼大。可是這一方面，也被現代物理學侵入進來，結果使我們不能不修正我們的理想。依照相對論說，速度有一最高限，任何速度決不能超過牠。人不能設想一負數質量，或低於絕對零的溫度；所以依相對論說，人不能設想一大於光速的速度。光速便是速度的最高限，一切物質體的速度決不能超過牠。

設有一靜止的物體。牠有一定的質量。這個質量叫做物體的靜止質量 (rest mass)。現在，假定這一個物體運動得異常之快，以至牠的速度與光速差不了多少，——即是說牠盡量地接近光速。牠的質量會改變麼？舊物理學的答覆是否定的。但照現代物理學去看「能」與質量的關係。一物體運動時所具有的質量比其靜止時所具有的質量大些。相當牠靜止質量的「能」必須加上運動能。這複合的「能」是變動不居的，這複合的質量也是變動不居的。因此可以說物體的質量是一變量，且隨物

體的速度而增加。所以相對論不僅預言質量隨速度而增加，而且預言質量怎樣地依賴速度。地球繞日而運動，較之光速，極其緩慢，因為牠每秒差不多才走三十仟米。最快的飛機、彈丸和流星的速度，那比較更小了。在這樣比較小的速度一方面，實際應用起來，舊物理學與相對論沒有差別。因為在這種情形中，最精細的測量也不能覺察質量與速度的關係。但是我們若能察覺僅比光速稍小的速度或與光速相等的速度，這問題可就完全不同了。理論上希望凡物體速度接近光速時，牠的質量就非常增加；速度達到最高限時（等於光速時），牠的質量就變成無窮大。舊力學承認一切速度，無論多大，牠都承認，但牠把物體的質量當作永遠不變的。反之，相對論對於速度有一嚴格的最高限度，而於質量則可無限的增加。這一會的工夫，我們就看到相對論使我們不能不修正光速的觀念，同時不能不修正質量的觀念了。欲增加很大質量的速度，不能不應用很大的力（Force）。速度愈近光速和質量愈大，則再增加速度愈更困難，因為必需應用更大的力。當質量的速度等於光速，質量因而成無窮大時，就不能再往上增加了。所以這個速度必然是速度的最大值。這又足以看出速度最高限的觀念是怎樣發生的，最高限的速度即是質量成無窮大時的速度。

我們斷定，為求可用實驗來裁判相對論與舊物理學起見，我們必須製造一種可以放出具高速度的一——近於光速的一——彈丸的儀器。只有這樣，我們才能證實質量與速度的關係，也只有這樣，我們才能間接地證實質量與「能」的根本關係。宇宙實驗室實際已給與某種彈丸以近乎光速

的速度了。電子便是這種彈丸，放射性物質的原子便是放射這種高速彈丸的礫台。由放射質 (radio-active substances) 發出的 β 線實際也就是速度非常大的一羣電子。研究強烈電磁場中電子的彎曲，便可決定電子的質量。而且真的，不但證實了電子的質量依賴電子的速度，而且證明了果如相對論所預言的怎樣依賴法。陰極線也能產生同樣的實驗——陰極線也是由強電場而生極大速度的電子羣。所有這些情形中，理論與實驗完全相符，在這裏我們又看到創造工作的兩個要素——即由理論而預言某種事實及由實驗而證實那些事實。

星光譜

好了，轉回原子的構造問題上來——換句話說，轉回物質怎樣由元電量子（即電子與質子）構成的問題上來——我們就來敘述波耳所介紹的觀念。波耳理論的基礎是由實驗所提供的許多問題而製成的。欲解決那些問題，不得不要有高超的新觀念。茲將波耳理論所由產生的實驗問題解釋如下：

當暮色降臨的時候，大都市的街面照耀着五顏六色十分光亮的廣告。這種光多半是從氖管 (neon tubes) 發出來的。管中放電便生出發光氣體的美麗效應。設將這種發光管放在分光計前面 (spectroscope)。分光計是一種儀器，作用如三稜鏡，不過比三稜鏡更精密，更易感受，牠將光分成若干成分——即是說分光計是分析光的。太陽發來的光，經過分光計，成一連續的光譜；光譜中呈現各

種波長。但光源如果是一種通過高勢電流的氣體（如氙管的情形），那末光譜中所呈現的圖，性質就不同。在這種光譜中我們看到許多明線條。不像太陽光譜那樣是一連續的多色圖，而是在黑暗的背景上現出許多極薄弱的明線條。每條明線（異常狹窄，可以當作線看）相當於一定的波長。例如在光譜中如果發現二十條線，則相當於牠們的波長亦有二十種，每條線可各用其相當波長來表示。各種元素的蒸氣各具不同的明線系統，因而也各具有不同的數目組合（這裏數目自然是指示放射光的各個成份的波長的）。光譜中同一明線系統沒有二種元素，正如同一面貌或指紋全同的人沒有二個。這種特性引起物理學上以及化學上作光譜的分析，我們由尋找光譜中相當各種元素的線條，而察出各種元素最細微的痕跡來。這些明線系統不僅發生於光譜的可見部分，且發生於光譜的紅外部、紫外部，甚至X線部。物理學家已經研究出來的明線目錄中（即表示各種波長的似非連續的數目中），漸覺其間有一定的法則，且能用一簡單的數學式代替全部數目。在系統的研究各種氣體及金屬蒸氣的光譜以後，我們已經知道辨別光譜的各系列，各具有一定的特性。下面我們就可以看到幾個這種系列。

讓我們稍為再嚴密一點，檢查這些明線，從最簡單的例說起。取一管，盛以最輕而構造最簡單的元素，——即氫。檢查牠經過分光計後的線光譜。牠是一原子的光譜，不是一分子的光譜，因為高勢電流將氫分子分離成原子，且使原子放射一定波長的輻射，或（用微粒說的術語）放射由一定「能」

的光子所組成的輻射。

巴爾馬 (Balmer) 是一位教員，他是第一個人在 1885 年發現氫線波長的數目遵守一比較簡單的定律。

在氫光譜的可見部分中，有五條明線，如下：

紅	綠	藍	紫	紫
6563 埃	4861 埃	4340 埃	4102 埃	3970 埃

上表下一排是各線的波長，依埃計算。所有這些明線屬於一個系列，叫做巴爾馬系列 (Balmer's series)，意思是紀念這條定律的發現者。這裏我們省略巴爾馬計算各種波長的簡單公式，且先略述這一系列中明線的性質。

每一系列有首有尾。系列的最初明線叫做首線 (first line)，普通最為顯著，且波最長。其餘明線則逐漸弱且逐漸近於較短的波——即光譜中紫色一端。明線的距離也逐漸小，小到本系列的尾端，明線愈密，簡直不能分。圖四即表示這樣一個系列。

巴爾馬公式能計算系列中幾條明線的波長，且能計算本系列極限波長。極限波長的簡單公式如下：

$$\text{巴爾馬系列的極限波長} = \frac{4}{\text{勒德堡常數}}$$

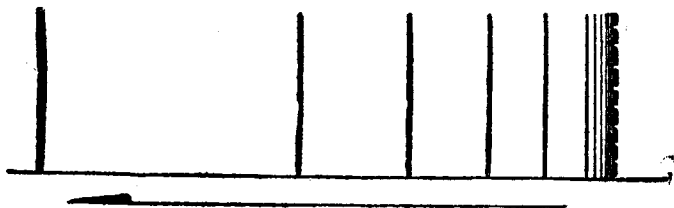
上列的公式表明怎樣計算本系列的限度。以勒德堡常數 (Rydberg's constant) 去除四即得。這個常數是：

$$\text{勒德堡常數} = 109677$$

這種計算可得依厘米計算的波長，並表明巴爾馬系列的限度在光譜的紫外部，約 3647 埃處。

巴爾馬的研究實是關於光譜的複雜構造的知識上一大進步。這一問題的發展史的特徵，在其他科學問題上也常常發現。第一步是事實的乾燥記載。如就現在所討論的問題說，即是波長的目錄。第二步便是簡明的公式代替那一班無意義的數目。但是這並非最後一步。我們問：為什麼支配明線構造的是這樣一個公式，而不是別樣公式？勒德堡常數有什麼物質的意義？為什麼牠的值偏是這樣，不是別樣？

我們怎樣找這些問題的答案呢？我們已經知道構成這個物質世界的磚瓦了；牠們是電子和質子；但是物質是怎樣由這種磚瓦構成的呢？欲得一定律的觀念以支配線光譜的構造，我們必得製造



波長逐漸增加

圖 四 光 譜 系 列 圖

一個模型。原子放射出來的波隨帶來細微宇宙（指不能直接觀察的物理現象界）的知識，代表波長的一列一列的乾燥數字，卻隱藏着電子質子怎樣構成原子的祕密。第二步便是發現牠們的祕密。牠們的祕密終於被波耳發現了。

我們轉回到氫光譜問題上來，再多舉出一些實驗的詳細情形。來曼（Lyman）發現氫光譜中另一系明線。遠在紫外部分。牠也有一個首線及一個極限。極限的公式如下：

$$\text{來曼系列末端的波長} = \frac{1}{\text{勒德堡常數}}$$

這個公式與巴爾馬系列的極限公式形式相同；不同處只在分子，以一代四。因此來曼系列的極限波長比巴爾馬系列的極限波長小四倍。所以說來曼系列遠在光譜的紫外部分。

我們在此還得介紹帕申（Paschen），帕申發現氫的另一系明線，但在氫光譜的紅外部分。這一系的極限公式與上述兩個形式相同。即：

$$\text{帕申系列末端的波長} = \frac{9}{\text{勒德堡常數}}$$

這些公式有一共通的性質：牠們含有同一常數——勒德堡常數。這個常數不僅見於氫光譜的波長公式，也見於其他元素的線光譜公式中。牠的值是由直接實驗測量波長而決定的。我們以後就

可知道，理論可以解釋這個常數爲什麼是這樣一個值（如實驗所示），而不是別樣。

從上述系列具有同樣形式一點上，可得到一定的結論。我們且把這些公式換一個形式列出來：

$$\text{萊曼系列末端的波長} = \frac{1 \times 1}{\text{勒德堡常數}}$$

$$\text{巴爾馬系列末端的波長} = \frac{2 \times 2}{\text{勒德堡常數}}$$

$$\text{帕申系列末端的波長} = \frac{3 \times 3}{\text{勒德堡常數}}$$

我們一眼看到紅外光譜還有別種系列，其末端波長應爲

$$\frac{4 \times 4}{\text{勒德堡常數}} \quad \text{及} \quad \frac{5 \times 5}{\text{勒德堡常數}}$$

即是說，公式的分子是連續自然數的平方。屬於這些系列的明線確已發現了。從這些結果上所得的推論，覺得紫外光譜中不會再有什麼明線系列在萊曼系列之前，因爲這公式的分子恆爲整數自乘，而1（相當於萊曼系列）是最小的整數。

氫原子的模型

波耳理論的第一件是要解釋支配氫光譜的定律。我們只敘述這理論的概要。牠的數學式異常

簡單，但我們要避免數學，所以此地也只介紹牠最普通的輪廓。

氫原子是怎樣構成的？與其他物質一樣，也是由電子質子構成的。氫原子不呈電性。所以電子數必與質子數相同。因為氫是一切元素中之最輕的，所以最簡單的是假定：

氫·原·子·是·由·一·電·子·與·一·質·子·構·成·的。

我們於是來到主要的問題了，即：氫原子是怎樣由電子與質子構成的？依波耳想像，電子繞質子而旋轉，猶如月球之繞地球，或地球之繞太陽。質子是太陽——換句話說，是吸引體——電子則為輕的行星，繞太陽而行。質子有一陽電荷 (positive charge)，電子有一陰電荷 (negative charge)，其絕對值相同。地球繞日而行，乃由於萬有引力。至於氫原子，萬有引力無大作用。因為電子與質子的質量太小的緣故。在另一方面，卻有一電力，其大不可比擬；所謂電力即符號相反的二電荷間的吸力。支配這種吸力的定律是庫隆定律，前面已經說過，形式上與引力定律相似。結果，電子繞質子而旋轉，符合庫隆定律——正如太陽系中行星繞日而旋轉符合牛頓引力定律。

這樣構成的氫原子，牠的質量差不多完全集中於質子上。我們已經知道氫原子的質量差不多等於質子質量。電子質量比較小 1850 倍。確定了氫原子質量的值，隨而確定其他元素質量的值，那末最輕的電子質量就可略而不計。質子吸引電子，但電子也同樣吸引質子。不過，重質子的加速度會比輕電子的加速度小 1850 倍。所以我們可以假定電子繞一靜 (stationary) 質子而旋轉，恰如天文

學上，想像行星繞重的太陽而旋轉時假定太陽是靜止的一樣。

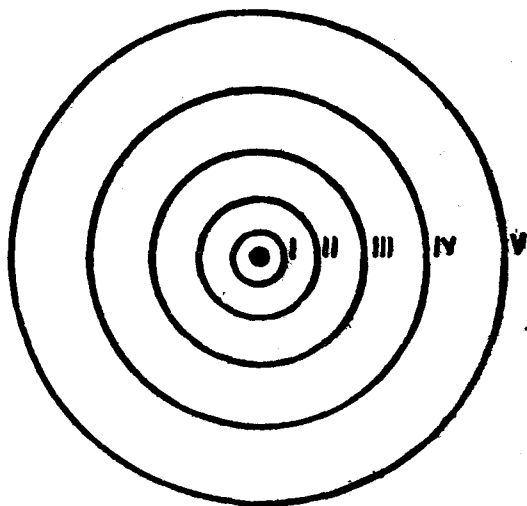
太陽系與原子的類似處，我們已經指明了。在科學家的想像中，還以為偉大的行星宇宙與一原子內部渺小的物質宇宙，構造的輪廓也相似。其實，這種類似不能推到那樣遠。波耳當時就明白我們不能把粗大物理學 (macrophysical) 的理想轉移到細微物理學的範圍裏去。真真的關係倒不在乎支配行星宇宙定律與支配原子內部的定律之間的類似，卻在乎牠們之間的差異。我們現在就來介紹牠們的差異。

設想一城市係依下列理想的計劃而佈置的：這城市的地基完全是水平的；一切房屋都有同樣高的樓，每層樓設有五米突高；房屋所有的樓，層數可以不同，但任何二層間的距離必恰為五米突，不可多也不可少；且每層樓均可藉升降機達到。關於這樣一個城市的居民，我們可以作如下的說話。除在升降機裏面的居民外，所有居民都在 0, 5, 10, 15 等米突的水準上。我們可以說這個城市有許多嚴格限定的平面，居民就住在這些平面上，不過我們能藉升降機改變他們所居住的平面。

回到原子的模型上來，我們且跟着波耳假定一電子依圓形繞質子而旋轉，且假定質子是這圓形的中心。電子圓形軌道的半徑如何？圖五是幾個同心圓，有 I, II, III 等標記。假設電子的軌道為第一圓。人或以為這種選擇純粹是偶然的，又或以為電子可以在任何軌道上運動——比如說軌道在第一圓與第二圓之間。在太陽系中，各種行星有各種軌道。固定這些特殊的行星軌道，那時純屬

偶然，且關係太陽系的創生。如果軌道的半徑隨意假定為任何值——恰如在沒有一定建築法的城市中，居民可隨意住在任何平面上——則這種假定就完全符合舊力學定律了。波耳理論打破舊力學觀念，就在這一點。不是一切軌道都可以的。如果 I, II, III 等圓所代表的軌道是波耳理論所許可的，則在其他軌道——比如說軌道在 I 與 II 或 II 與 III 之間——上的運動就被排斥。限制可能的或可許的 (permissible) 軌道差不多又與舊物理學的觀點相矛盾，間斷性概念又侵入物理學上另一範圍裏來了。軌道半徑的改變不是連續的。上例城市中嚴格的建築法只准居民住在一定的平面上，不准住在其他任何平面上，軌道的半徑就彷彿這城市居民所住的平面。

波耳用什麼方法找出這些軌道的半徑呢？他怎樣確定第一第二等圓半徑的值呢？重來一遍吧，我們不必徹底的解答問題，只要普通的討論一下也就滿足了。波耳曾經獻出簡單的規則，計算這些



圖五 電子繞質子而旋轉的圖形

可許的軌道，——即量子軌道 (quantum orbits)。第一軌道的半徑決不只依賴確定原子所由構成的物質的量——即不僅依賴電子的電荷與質量。牠還依賴

$$h = \text{普朗克常數} = 0.000,000,000,000,000,000,000,006,55$$

這個量是由量子論介紹到科學上來的。因此由輻射問題而生的量子論又征服了物理學的另一領域。

根據波耳理論而計算結果

第一量子軌道(1)的半徑 = 0.5埃

即二萬萬分之一厘米。其他圓的半徑都比較大——第二圓的半徑大四倍，第三圓的半徑大九倍，第四圓的半徑就大十六倍，餘依此類推。所以半徑是依自然數的平方而增加的！

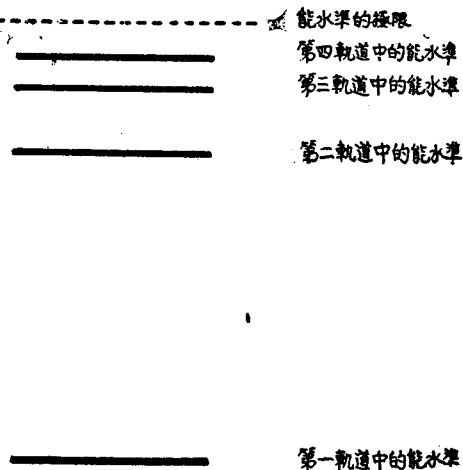
假定電子沿一可許的軌道而運動。牠必具有一定的「能」，因牠是在一電場中，且因牠是在運動。這種「運動能」會不會發生變化？波耳理論對此問題有一確定的答案。牠說，電子沿一可許的軌道而運動，牠的「運動能」是不變的。不過，我們隨後就會看到這個答案既不像表面看來那樣簡單，也不像那樣自然，因為這裏我們又碰着與舊物理學的根本衝突。

在著名的物理學家羅倫子 (Lorentz) 領導之下，電子論在前世紀末便成立了。電子論的結論有一條是這樣說：依直線作等速運動的電子繼續運動下去，牠的速度永遠不變，反之，運動若非等速，

或路徑若為曲線而非直線，則電子發出輻射。牠的一部分「能」轉變成「輻射能」，電子的速度經常的減小，且最後必歸於靜止狀態。波耳的答案，如上所述，顯與電子論的說法完全相反。據電子論說，電子在圓運動中則發出輻射，速度因而減小。但照波耳說，這種「能」決不改變，速度也不變，電子也不發生輻射。我們說波耳軌道中電子運動的狀態是不變的 (stationary)。因此，波耳的原子模型在兩個主要方面——即量子軌道之選擇及「能」之不變性二方面——確然離開舊物理學定律。

波耳的理論使我們可以計算電子在各軌道中所具有的「能」。在第一軌道中，這種「能」最小。恰如引力場中各個水準一樣，所以電子從第一軌道遷移到第二軌道上需要一定的「 W 」(work) 電子的

「能」在第二軌道中比較在第一軌道中為大，在第三軌道中則更大。圖六即表明相當於各軌道中電子運動的能水準 (energy levels)。第一軌道的能水準最低。相隣二能水準間的距離，由下而上，繼續地縮小。虛線表示原子中電子所有的「能」的最高限度。能水準愈接近這個限度，則量子軌道愈



圖六 相當於波耳原子模型中各軌道的能水準圖

高，即電子在那些軌道中離質子愈遠。當電子達到能水準的限度時，牠便不受質子的影響而脫離原子，那時原子中就只剩質子了。

我們現在又轉到主要的問題上來了。氫光譜的明線是怎樣產生的？在氫光譜線的常態中，氫原子具有最低的「能」，在這樣的原子裏面，電子是在最低的能水準上，——即是說，這時牠們沿第一軌道繞質子而旋轉。但當電流通過氫時，電子便被迫而趨出牠們的軌道。原子已有工作加於牠們，牠們的「能」也就因而增加。有些電子被運到第二軌道，有的被運得更遠，甚至有些原子的電子被迫而脫離牠們質子的勢力範圍，——脫離所有量子軌道。氫原子中因而只剩下質子了。這電流就彷彿負有理想城市中升降機的任務，將居民運送到較高的一層去。我們說這些原子是在興奮的狀態中 (excited state)，即是說各原子中較高的水準都已充滿了。在這過程的第二階段中，電子經過一定次數的不變的旋轉後，——所謂「不變的」乃指旋轉中並不失掉「能」，——隨意跳回較低的或最低的軌道上去，過一會，又為經過氫氣的電流所逼而脫離這些軌道。輻射的機械作用是什麼？波耳說，輻射在「不變的」旋轉時不會發生，只有在電子由較高的軌道跳到較低的軌道時才發生。在這種跳躍的過程中，原子就失掉「能」。這樣失掉的「能」放射出去，便成氫光譜中已經實驗證明了的那些明線。試再周密的看看這種作用。能水準已經嚴格地確定了，而相當於各個「不變的」軌道的「能」也可由理論計算出來。當電子由一定的高級軌道跳到一定的低級軌道時，我們確可精密

的算出牠失掉多少「能」。照波耳假定：電子跳躍時失掉的「能」變成光子 (photon) 的輻射。跳躍的作用中，一光彈丸 (即光子) 射出，牠的「能」恰等於原子所失掉的「能」。用微粒說的術語，我們就可以說：

——跳躍過程中原子所失之能 = 射出之光子的能

電子一跳躍 (比如說由第三軌道至第一軌道) 使光子以一定的「能」射出去。但是須得記起，討論光的現象時，我們可以把微粒說的術語換成波動說的術語。一定「能」的光子相當於一定長度的光波。前面第二章中，我們解釋過這根本關係牽涉着蒲朗克常數：

$$\text{射出之光子的能} = \frac{h \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

設將此式與前式合併，則得

$$\text{——跳躍過程中原子所失之能} = \frac{h \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

上式中，所有的量都是已知的，只有波長才不知道。我們理論上可以計算各電子軌道的能水準，因之跳躍過程中原子所失之「能」也可算出，同時蒲朗克常數和光速是已知的，所以這個簡單的數學方程式中只有一個未知量——即波長。我們由這個方程式可以決定相當於電子各種跳躍的波長，因之，由這個方程式可以測驗波耳理論所產生的結果是否合乎實驗，能否解釋實驗得來的支配原

子光譜的定律。

爲了這樣，我們須得把放射圖再稍爲引申一下。先從來曼系列說起。

來曼系列：興奮原子中電子跳到最低的軌道（即第一軌道）時，便發生本系列的各種明線。圖七（甲）表示相當於各種軌道的能水準（本圖用樓層表示比較簡明。我們以後就用「一樓」「二樓」等辭表示相當於第一軌道第二軌道……的能水準）。從二樓跳到一樓便發出一定波長的輻射。這即是來曼系列的首線。其次一明線相當於從三樓跳到一樓，餘可類推。從極限處跳到一樓便成本系列中的極限線。「能」的失散愈大——圖中矢示愈長——則波愈短。從上面公式看來，（波長爲分母）的確是這樣。從較高的水準跳下，所失的「能」也較大，愈高失「能」愈大，因之在本系列上所生之明線也愈向紫色一端移近。本圖所示尚不止此。我們向上看去，樓層愈來愈接近，到了頂上，更緊密了，我們如果在那近頂上任取相連兩層來看，牠們矢示（代表放射的「能」）長度之差是異常細微的。樓愈往上愈擠，明線愈遠（即愈近紫端）愈密，直至極限線爲止。這相當於最初狀態（跳躍前）那時電子已經溢出質子勢力範圍以外了。當質子再擒住電子，電子跳到第一軌道時，馬上就發出輻射來，即相當於來曼系列的極限明線。所有這些推論完全與實驗相符。現在我們再來說巴爾馬系列。

巴爾馬系列：電子跳到第二軌道時，便發生巴爾馬系列。圖七（乙）即表示這個系列。這個系列的首線是由電子從三樓跳到二樓而生的。能水準的差異比較來曼系列的首線中能水準之差爲小，結

果波長又比較大。因為來曼系列是在光譜的紫外部分，故在可見光譜中可以找到巴爾馬系列的明線。

他如帕申系列及其他見於紅外光譜中的光譜線都可用這同樣的方法推演出來。

所有推論已完全經實驗證明了。這種推論與實驗的

符合不僅是性質的符合。波耳理論所包含的假定卻可得到定律，與巴爾馬所發現的定律恰恰相同——支配氫光

譜各系列的定律。由實驗引起陳述問題，問題繼續經這個

理論解決了，而這個理論卻可說是著名的波耳研究的結

論。所以，懷疑家或許要問，波耳理論真有這樣偉大的成功

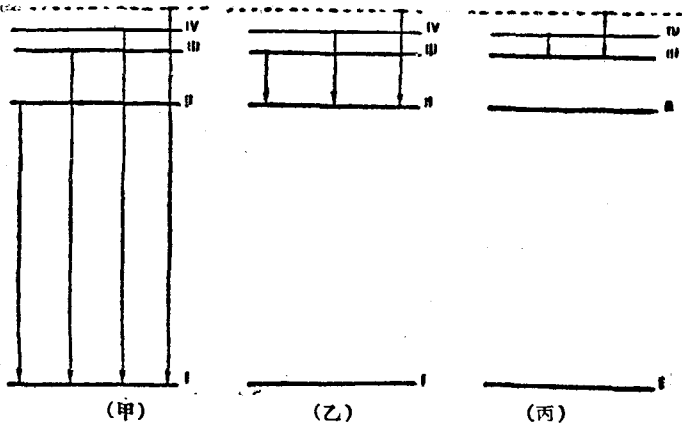
嗎？在這種有幾分可疑的理論概略中，有沒有什麼東西可

以顛倒過來演出巴爾馬公式？若然，是否需要打倒舊物理

學而提出新假設呢？能不能由別種比較簡單的方法而達

到這同樣的結論？在波耳理論方面，那確可以說波耳理論

所達到的定律比巴爾馬的經驗定律為多。即在牠最低級的形式中，牠所貢獻的已比較多了。即在牠



圖七 來曼系列，巴爾馬系列及帕申系列的明線放射略圖

最初的階段中，牠便獲得一顯著的成功，遠勝於僅僅解釋經驗定律萬倍。

圖七中，頂上有一虛線；是一個極限，能水準不能超過牠。實際上，我們看到能水準愈接近牠愈密，卻決不超過牠，所以牠是一個最高極限。從這一層樓跳到最低的一層去，便相當於發出最大的能，相當於最短波的明線，且相當於來曼系列的極限線。巴爾馬的經驗公式算出這種極限線的波長之值。前面已經介紹過，這裏再舉出來：

$$\text{來曼系列末端的波長} = \frac{1 \times 1}{\text{勒德堡常數}}$$

須記着，勒德堡常數是由實驗計算出來：

$$\text{勒德堡常數} = 109677$$

因知波耳的推理可引起實驗的公式，則牠不應該能夠得着完全與這相同的來曼系列末端的波長公式？似乎應該能夠得着；但是牠不能直接得着的，因為波耳理論上沒有勒德堡常數的地位。該理論所包含的量只是根據那規定他原子模型的材料而計算的。那末，我們如果由理論上得出來曼系列末端波長的公式，則公式的分母不是勒德堡常數而是依賴其他常數的量。我們將這些常數再列在下面：

$$\text{電荷} = 0.000,000,000,477 \text{ 靜電單位}$$

電子質量 = 0.00...09克 (28 個零)

光速 = 每秒 29,979, 000, 000 厘米

蒲朗克常數 = 每秒 0.00...00655 厄 (27 個零)

(我們不解釋各量所有的次數。) 這些常數都是已知的，牠們的值，本書前面也已介紹過了。知道我們的圖畫是一電子繞一質子而旋轉的圖畫，所以公式中之量須依賴那規定電子的常數——即電子的電荷與質量——毫不足怪。且因上述模型中量子論侵入了二次——一次是在計算量子軌道時，又一次是在電子的跳躍與發出一定波長的輻射關係中——所以公式中引入蒲朗克常數也不足怪。再者，光子「能」與波長的關係中，也加入光速。所以來曼系列末端波長所依賴的量中也有光速。現在我們根據波耳理論所得的這種關係寫在下面：

在來曼系列末端的波長式中，我們以下列的量代替勒德堡常數：

$$\frac{2 \times \pi^2 \times \text{電子質量} \times (\text{電荷})^4}{\text{光速} \times (\text{蒲朗克常數})^3}$$

即是 2 乘以 π^2 —— 即 (3.14...)² —— 再乘以電子質量，又乘以電荷的四方，然後除以光速乘蒲朗克常數的三方之積。讀者如果自己耐心算算這個簡單而拖沓的數，一定會得着一可驚的結果。所得的結果恰恰等於勒德堡常數。這件事實引起全科學界都注意波耳的理論。馬上承認我們對於四

園現象的知識已有明確的進步了。勒德堡常數起初似乎是由實驗發現的一個自然常數；波耳理論卻表明牠不是自然常數，而是隨其他已知常數而定的。實驗與理論的恰合並不僅屬偶然的。牠展開了一幅科學發展的新遠景，使我們走上種種新鮮的和意外的發現之路。人們只須把這一件事——指勒德堡常數投進「表示一切元素的光譜各系列」的一切公式中——記在心上，就可以認識波耳發現之偉大和重要了。

下面我們再把波耳的假定與舊物理學參差之點列舉出來：

1. 量子軌道之存在。
2. 量子軌道中電子的不變狀態。
3. 電子跳至其他量子軌道時，「能」量子的放射。

舊物理學與波耳理論

舊物理學的一切推理都是定命的，定命法怎樣應用在物理學上來，我們已經介紹過了。知道了某一系統的最初狀態，和支配該系統的法律，我們就推論關於牠最後狀態的事實，然後訴諸實驗，看定律與觀察是否一致。波耳的原子模型也找得出這種推理麼？

假定電子正沿第四軌道而旋轉。我們能不能預言牠什麼時候跳到另一軌道去？能否預言牠將跳到那一個軌道去？換句話說，如果知道了第一狀態，應用波耳理論能不能預言最後狀態？波耳理論

不能這樣預言。假定電子已由第四軌道跳到第一軌道。在此情形中，起初狀態與最後狀態都已知道了，我們才據此而推論來曼系列某一特殊明線的放射。這種推理法可見與舊物理學所用的完全兩樣。我們不能從這種系統的起初狀態而推知牠的最後狀態，但是知道了牠起初狀態與最後的狀態，我們卻可推論關於某一特殊現象的過程。

波耳理論給舊物理學一根本的大打擊。牠不但影響舊力學的基礎，且影響牠推理的方法。牠首先介紹非定命法 (non-deterministic method)。細微系統——組成原子的——的最初狀態既不決定最終狀態，也不決定全部現象的過程。同樣，知道了最後狀態並不足以推論該系統的過去情形。惟有最初及最後的狀態都知道了，我們才可知道該特殊現象的過程——就現在所舉的例說，卽一定波長的放射。

波耳理論所貢獻的定律是關於個別原子的。氫是無數原子的集合。這樣的集合爲統計法則所支配。假定某一剎那原子在興奮狀態中，各成一太陽系，其中電子在各種可許的軌道中旋轉，恰如我們的理想城市中，某一剎那居民在各種一定的水準上一樣。從某一樓跳到低樓去的電子是一幅射起因。如果從第三軌道跳至第二軌道的電子比較多，則巴爾馬系列的首線比較強烈。某一類跳躍的電子數目愈大，則相當於那種跳躍的明線就愈強。波耳定律使我們可以確定明線的波長，但各明的強度須受統計法則的支配。

欲得一完全的圖畫，就必須尋求一理論的解釋，解釋爲什麼氫光譜線所表示的是某種波長，而是別種波長，爲什麼各明線的相對強度恰如觀察所得的那樣。關於前者，只要知道支配該項細微統——即氫原子的構造——的定律就夠了。這些定律已經波耳提供出來了。不過欲決定各明線的強度，那就無須找支配各原子的定律，不得不求助於統計法以計算一羣原子了。

尋求支配光譜的定律實費周折。第一步是要找出支配原子的定律，在這一步就會碰到無數障礙了。打破舊力學的定律，甚至駁倒定命推理法（此法已經過科學發展的若干時代，且被一般人認爲基礎的，神聖不可侵犯的方法），我們可得許多支配各細微系統的定律，但不能用任何直接的方法證實牠們。因爲使一系統孤立及檢查只包含一原子的系統，不是我們的力量所能及的；討論無數原子的集合，也只有求助於統計法則。

讓我們再轉回到理想城市一例去，城市中一切房屋建築在一定的平面上，於是可得一簡單的定律如下：某一剎那凡不在升降機上的居民必然是在0.5, 10, 15米突等水準上。但如有人進一步問：在正午時各水準上各有多少居民呢，那便怎麼辦？自然他可以考察各個居民怎樣度過這一天，於是發現正午時各個居民在什麼地方，但如這城市的居民過多了，比如說有一百萬人，那就不能這樣辦了；不得不從有效的統計材料上找答案了。原子的集合，亦復如是。只知各個定律是不夠用的；欲決定細微的物理量，欲尋求光譜中各明線的強度，還是必需統計學。

懷疑的人或許爲波耳理論所激動，起而作種種反抗。他或許這樣說：科學中我們必須採用一定的推理法；打破定命法，你就傷害了科學的基礎。波耳理論是要解釋一組特殊而極細微的現象的一種推理。贊成牠的假定，你就直接與舊物理學發生衝突。那末，舊物理學所解釋的大批事實又將如何？能放棄舊物理學而展開一新原子物理學麼？波耳理論本身就阻礙着這種辦法；因爲波耳自己也根據舊物理學上的定律，他承認電子與質子的相互反應是合乎庫隆定律的。利用舊物理上一部分定律而排斥他一部分定律，那未免剝奪了物理學上的邏輯特性。

現在且聽波耳理論的擁護者對此如何答辯吧。他或許是這樣答辯：現在這個時代，物理學遇着細微宇宙——原子內部的宇宙——的構造問題。在最早簡單的方法是要假定這個宇宙與微細宇宙受同樣的定律支配。波耳首先起來打破這個觀念，於是展開一幅新科學的遠景。科學上大創造思想家如法拉第、愛因斯坦和波耳，常常是在尋找他們自己的新方法。創造的科學想像打破傳統觀念，於是擴大我們的知識範圍。如果堅持地主張，我們只有根據定命觀念和粗大物理學上的定律才能構造細微宇宙，是僅縮小我們的眼界阻礙科學的進步罷了。我們認識這一點，所以不能不感謝波耳。誠然，舊物理學對於一部分事實解釋得很簡單明瞭，但是牠的可能性不是沒有限制的。在細微宇宙中，牠的方法確是不行。波耳理論誠然不免要遭反對；牠將舊物理學與量子論相混確是一種糾紛。我們似乎把我們所坐的樹砍倒了。其實就是量子論的創造者蒲朗克，他也已經想到這種情形的矛盾。

性了——因拋棄舊力學同時又隨便利用舊力學的結論而生的矛盾性。但是這種反對就能駁倒波耳理論而推翻牠的結論嗎？不能，確實不能；拋棄波耳理論就是錯誤，是怯懦，因為這個理論顯然是創造新原子物理學的開台鑼鼓。也如一切最初嘗試一樣，看來似乎不適當，不精巧，可是牠決不能開倒車，再走回到舊物理學上去。從今以後，進步必然是沿着這條道路，沿着這些觀念的發展線上前進的。

上述懷疑派與擁護派雙方見解的衝突，在一九一三年中就已發生。但至今日，已覺毫無意味。近二十年來科學上的進步顯然證明波耳理論擁護派是不錯的。

再談氫原子的模型

現在我們仍以氫為例，進而概述這些觀念更遠的發展，以及波耳理論後來的歷史。波耳理論會向兩方面發展。因為他往前進，我們實驗事實的積累也就增厚了，測量的技術也加速的改進了，更精確的實驗儀器也時常產生新鮮的材料。從前覺得理論與實驗一致的地方，隨後測量比較精確，於是暴露出那些地方的矛盾。實驗貢獻新問題給理論，理論不僅圖與實驗並行，而且極力想超過實驗，領導實驗。理論脫離牠初期種種簡單的假定，於是採取一複雜錯綜的數學形式。

記得波耳理論最初的成功，在於牠建立勒德堡常數與規定原子的種種數量間的關係。牠貢獻的公式如下：

$$\text{勒德堡常數} = \frac{2 \times \pi^2 \times \text{電子質量} \times (\text{電荷})^4}{3 \times \text{光速}^3 \times (\text{普朗克常數})}$$

但是這個公式裏面爲什麼沒有異於電子質量的質子質量呢？答案是這樣：我們的理論假定質子是靜止的，電子繞不動的質子而旋轉，一如行星之繞太陽而旋轉。不過這個假定僅一部分經質子質量之大（與電子質量比較，質子質量就大不可言）而得證明。即在太陽和地球的比較中，說地球繞着靜止的太陽而旋轉，也不過是近於真，而所以真，只因地球質量較太陽質量小得不可比較的緣故。事實上，如果你想根據舊力學原理比較精確地敘述太陽與地球的相對運動，你就不得不將太陽與地球二者的運動關涉牠們的公共重心而非關涉某一靜止的太陽了。

設取二物質球體，一球體的質量三倍於他一球體；牠們的公共重心距大球比距小球近三倍。圖八即表示這樣的二球體，C是牠們的公共重心。

太陽與地球的公共重心是在太陽的內部。那末，我們如果假定地球繞靜止的太陽而旋轉，錯誤就比較不大。但是天文學上，也有許多系統都是包含同樣質量的二個太陽的。我們敘述這樣二個太陽的相對運動時，就必得將牠們關聯着牠們的公共重心。

原子也是這樣。如果你求敘述比較精確，你就必得拋棄簡單的假定。電子必不再關涉着靜止的質子，而關涉着電子與質子的公共中心了。因此，我們發現波耳的



圖八 二球體的公共重心

推理引起一新結果；代替勒德堡常數的式子多少有些改變了，這新結果也多少比較正確，前面所列勒德堡常數的值可以稱為勒德堡常數的近似值；由假定質子與電子的質量繞其公共重心旋轉而得的值就可稱為勒德堡常數的較確值。於是波耳理論獻出下列的結果：

$$\text{勒德堡常數的較確值} = \frac{\text{勒德堡常數的近似值}}{1 + \frac{1}{1850}}$$

實驗方法之精密是否隨這些比較複雜的理論假定同時併行的呢？換句話問，今日的測量比較精密，是否表明勒德堡常數的較確值比其近似值更合乎實驗呢？勒德堡常數的兩種值，顯然不同，但差異極微，因為較確值式子的分母比1大不了多少。現在勒德堡常數較確值不僅是一關於電子數量的函數，而且有代表質子質量與電子質量比率的數1850。以後就可以看到，實驗上確已證明勒德堡常數的較確值（拋棄簡單假定而由理論計算出來的）比其近似值更合乎實驗。這是一個典型的例子，足以代表一理論發展時所遭遇的事實；我們犧牲理論的原來簡單的形式，而獲得理論與實驗更相符合的報酬。

氫原子與相對論

原子構造類似於太陽系的構造，我們已說過多回了。我們會跟着波耳假定電子運動軌道是圓形。這個簡單的假定，我們現在也必須拋棄。

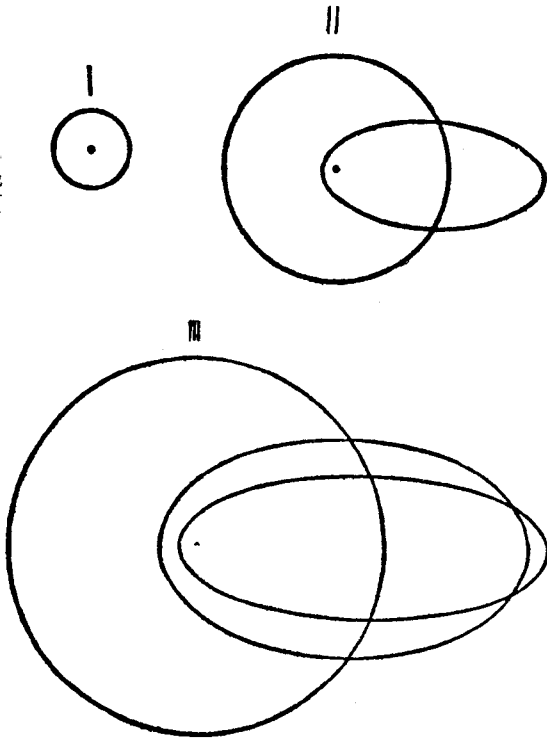
開普萊 (Kepler) 關於行星繞日運動的三定律在牛頓之前就已經知道了。數學的分析表明這些普遍定律都遵守簡單的引力定律。再者，引力定律說開普萊定律之所以近於真，只因太陽質量較之行星質量大得多的緣故。我們只引開普萊的第一定律來看。牠說：「行星運動爲一橢圓形，橢圓形有二焦點，太陽即在其一焦點上。」

波耳理論奠基於庫隆定律，形式上庫隆定律與引力定律相似。因此，電子（如行星）運動爲一橢圓形，質子（如太陽）在橢圓形之一焦點上。圓形也可當作特殊的橢圓形看，因爲橢圓形的所有軸變爲相等且二焦點合而爲一點——即圓心——時，便成圓形。那末，讓我們拋棄圓形軌道的簡單假定，將波耳的推理應用到比較普遍的情形上去。但是，如果這樣一來，我們獲得的結果會與從前所得的結果不同嗎？理論與實驗相符的程度會更高還是更低呢？這些問題已經桑麥菲爾 (Sommerfeld) 解答過了。介紹橢圓軌道更使波耳理論的數學形式錯綜複雜，計算更困難，更拖沓；但是桑麥菲爾計算出來了，並且發現他所獲得的能水準完全與波耳所獲得的相符。拋棄了圓形軌道的簡單假定，物理結果並不發生差別。以後我們就看到，桑麥菲爾的研究（雖說似乎沒有結果）顯有科學的價值。

桑麥菲爾的研究將什麼新性質介紹到我們原子構造圖上來呢？波耳理論中第一圓相當於最低的水準。這合乎桑麥菲爾的結果；但到第二圓——即第二層能水準——桑麥菲爾卻發現電子既

可依圓形旋轉，也可依橢圓形旋轉。這一點與波耳不同。波耳在第二能水準上只提出一個可能的圓軌道，桑麥菲爾卻提出二個可能的軌道，一圓形和一橢圓形。無論電子係依圓形或橢圓形旋轉，牠所有的「能」卻相同——波耳理論中第二軌道的能。所以，以桑麥菲爾二軌道代替波耳一軌道的結果實驗上顯不出來。因為發出的輻射的波長只依能水準而定，而能水準並未改變。同樣，波耳的第三軌道也被分割——分成

三個軌道，一橢圓和一圓形，但是三個都相當於同一能水準。圖九即表示這種情形。相當波耳的第一軌道的依然未變；相當於第二軌道的則有一橢圓一圓；質子在橢圓的焦點上，同時這焦點也是圓心；橢圓的長軸等於圓的直徑。同樣，相當於波耳第三



圖九 桑麥菲爾量子軌道圖

軌道的則有一圓及二橢圓——牠們的長軸相等。第四軌道可分成一圓和三橢圓，餘類推。

懷疑家或許又要這樣質問：如果桑麥菲爾的推概 (Generalisation) 只不過一種數學的精密，無論如何引不起新的實驗事實，那我們又何必用牠來徒惹煩惱呢？這個問題的答案可從下文看出來。

對於波耳理論發生異議的可有兩種——一為實驗的，一為理論的。請先看實驗的異議。

測量各種氫光譜線的波長的方法愈精密了，已引起一新事實的發現。分光計現在異常靈敏，可以顯出極明晰的氫光譜線構造，每種明線不只一條線，而是由極其緊密而明度不同的許多線合成。光譜的明晰構造既已顯出。為觀察這種氫光譜線的明晰構造起見，必須應用極靈敏的分光計——能分出彼此只相差十分之一埃的光譜線。如果用不大靈敏的分光計，那些光譜線就互相合併，而成一條濃厚的氫線。設若這些研究波浪的極精密的方法在巴爾馬時代就知道了，他必不會發現他那簡單的定律了。他那簡陋的實驗方法將實在的複雜性隱藏起來，只能完成他那簡單的公式。同時，這個例子也表明實驗怎樣能引起新問題——此例的問題即怎樣解釋光譜線的明晰構造。

反對波耳理論的第二種是理論的。以我們一切推論為基礎的假定，我們已經曉得是太簡單了。必須拋棄電子現在必須當作依圓形或橢圓形繞質子而旋轉。牠們旋轉的速度雖覺得比光速小，可是也極其大。不過，我們的計算已假定電子質量是一常數，運動時不會變動。這一假定是從舊力學上引用下來的。但已經證明了沒有記得本章最初說過：相對論說一物體的質量須視其速度而定。物體

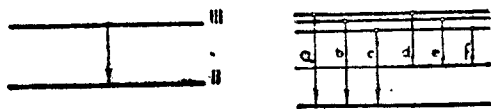
在等速度圓形運動中，速度的絕對值保持不變，牠的質量也保持不變，（雖說比較靜止時的質量爲大）相對論於是修改（雖不顯然）波耳理論中的圓形運動問題。另一方面，電子運動若爲橢圓形，情形就比較複雜，一行星依橢圓而旋轉，牠軌道上各點的速度各不相同，電子若依橢圓運動，理亦相同。在距日最近之點——即距質子最近之點——吸力和速度都最大，反之，橢圓上離質子最遠之處，吸力和速度就最小。我們進而根據相對論，不得不說電子質量在運動中是經常在改變。軌道上最近於質子（其一焦點）之處，電子質量最大，離該焦點最遠之處，則最小。

欲將波耳理論的正確度推進一步，那就必須將電子質量的變化性記入。桑麥菲爾所作種種計算與波耳所作相同，只不過拋棄質量不變這一簡單的假定罷了。因此，不但量子論被引入原子構造問題裏去，而且相對論也被介紹進去了。計算比較更複雜。這些計算曾引起新分量的物理結果？結果是很可注意的。實驗上與理論上的異議同時都已失去力量。爲介紹相對論的修正起見，我們得先解釋光譜的明晰構造。茲將是項結果可注意的幾點列在下面。

到了這裏，我們對於氫原子構造觀念的發展已論述了三種局面：（1）波耳的圓形軌道；（2）桑麥菲爾的圓與橢圓軌道；及（3）桑麥菲爾的相對論計算。請記起從圓軌道至橢圓軌道，雖然軌道的數目增加，卻不會引起新的能水準。例如，第二能水準上有兩種軌道，一圓一橢圓，但二者有同樣的「能」值。可是「質量可變」概念一經介紹進來，這第二能水準就被分割成互相接近的兩個。如果

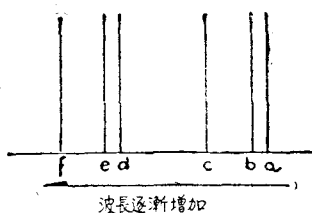
將相對論的計算記入，那末圓軌道及橢圓軌道都得修改，從前合而為一的能水準現在卻被分為二個明顯的能水準。第三能水準也是這樣。起初這一水準有三個軌道，一圓及二橢圓；牠們同屬一個能水準；但是現在牠們也分成互相密接的三個能水準。至於最低的水準（即第一軌道），沒有分割，因為相當於牠的只是一個圓軌道。圖一〇即解釋桑麥菲爾的計算結果。下圖表示前面所說的能水準這裏，波耳計算與桑麥菲爾計算相同，因為他們都沒有考慮到質量變化。下圖表示應用相對論的修正要素而計算出的結果。第二水準分析為二，第三水準分析為三，餘類推。（圖一〇所示非實在的比列；牠只在於表示性質上的結果，——分析愈不顯著則能水準愈高。）

我們原來的說法，巴爾馬系列的首線係因電子從三樓跳到二樓而生，現在不得不加以修改了，因為第三能水準既有三個密接的水準，巴爾馬的首線所相當的水準就不止一個而有三個了。當電子跳到第二水準時，不是一個目標而是兩個目標。



圖一〇 依相對論修正的能水準分析圖

圖一〇左方只有一個矢示相當於巴爾馬系列的單一條首線，但右圖則有六個矢示，相當於互相密接的六條線，代表巴爾馬首線的明晰構造。各線分記以 a, b, c, d, e, f 。最短的波長相當於最高的跳躍——即 a 線——最長的波長相當於 f 線。所以，單一條明線，我們有一組明線來代替，如圖一〇所示。這些線各相當於一定的跳躍，所記文字各與圖一〇的矢示相同。六條線分成兩羣，各含三條。靈敏的分光計可分巴爾馬系列的首線為二線，相當於 a, b, c 及 d, e, f 兩羣。因而可稱為雙線。原來認為一條，現在經靈敏的分光計分析為二條了，倘若用更靈敏的分光計分析，或許這二條更可各分為若干成分。所以桑麥菲爾的理論解釋光譜的明晰構造，不僅是性質上的解釋，而且是數量上的解釋；他的理論表明理論與實驗之間有一數量的符合。



圖一〇 巴爾馬系列首線的明晰構造

但是將這個理論與實驗相對照，卻又發生一種疑難，可述如下：光譜的明晰構造中已被觀察出來的明線經桑麥菲爾的理論解釋得完善了。但是該理論引起人們又希望那些未經實驗顯露出來的明線；牠所預言的可能明線太多，實際又只能從這些可能明線中選擇若干條出來。新理論工作於是發生。怎樣選擇呢？選擇的方法便是區別可准的與不可准的明線。一位波蘭科學家魯濱勞伊 (Ruhnowicz) 貢獻一條法則，這條法則彷彿一個細篩能將可准的與「被禁止的」明線分開。例如

細籬篩表明來曼系列的種種明線或在極靈敏的分光計下，仍然是單一的。如應用這條法則在巴爾馬系列的首線上，得到的沒有六條，只有三條，即 f , d 及 b ；這條法則不允許 a , c 及 e 三條矢示，即是說這三條矢示不能代表可能的跳躍。

明線的明晰構造還發生另一問題。各種明線的強度如何？換句話問，那些跳躍最常發生，那些跳躍最少發生？前面已經說過引起這一類問題的推理方法必然是統計的性質；從細微宇宙至粗大宇宙必須經過統計學。

以上所述只是理論概念發展的一個輪廓罷了。當新實驗發現一個比較更複雜的現象界時，理論就失掉牠原來的簡單構造；科學所顯示的實在圖畫愈形複雜；保衛物理學以防外侮之侵入的萬里長城——數學——愈難計算。似此，宇宙圖畫豈不愈見混雜了嗎？這個問題的答案不很簡單。我們現在知道構成這個物質的元素十分簡單；我們現在承認科學上只有兩種物質要素——即電子與質子——代替了九十二種元素。構造這物質世界的建築材料現在十分簡單，不過建築的方法卻不簡單；從這些基本元素到構造物質世界都是比較複雜的。從波耳的氫原子模型至桑麥菲爾的相對論模型都是由同樣觀念而生的，可是牠們過程上，數學計算乃逐漸複雜，結果剝奪了理論上原來的簡單性質。這不是一個孤立的事例。說科學理論愈變愈簡單，說我們能把全部實在納入簡單的定律中，不但是膚淺，而且根本就錯誤。

理論與實驗聯合起來，創造一幅宇宙圖畫，但是牠們同力合作時，輒互相競爭，彼此要求認可。創造力似乎是沒有止境的，實驗儀器益求精，我們藉牠們來常常發現新事實，我們以前所認為十分清新的定律，現在因儀器的進步也發現有漏洞了。測量愈精密，愈能圓滿地解釋現存的矛盾，但是矛盾一經解釋，甚或更清新的理論一經成立，無疑地歷史又將複演，新紛擾又將因更精密的測量而發生了。理論不僅圖與實驗相併而行，且圖預言新事實，領導實驗。理論的進步視牠本身脫離簡單假定的程度如何而定，也視牠所包括的事實多少而定。一般言之，理論假定一比較複雜的形式。不過意外事件時時發生。新觀念產生，我們使得從另一角上觀察現象；全部問題被轉移到另一平面上；舊的複雜理論被拆毀了，新的架構也就豎立起來。進步上第二局面使新理論架構更加複雜，繼續發展下去，直到新觀念供給新架構以別種基礎時為止。

電子的衝突

讓我們再轉身來談波耳理論最簡單的形式，牠假定相當於各種能水準的軌道只是圓形。我們起初且看常態中的氫原子，氫原子在常態時電子沿最低軌道（第一軌道）繞質子而旋轉。電流通過，——即電子通過一盛有稀薄氫氣管——原子中的電子便昇高到較高的水準去，預備放射。請注意這後一種現象。氫原子由什麼方法產生興奮狀態？一九一三年至一四年中，佛蘭克、赫芝（Frank and Hertz）爲了顯露這種興奮作用，曾作出許多精巧的實驗。

設將一赤熱細金屬絲插入稀薄氫氣管中，金屬絲便會向各方射出電子。將這些電子放在另一電場作用下，即可賦與電子一定的速度。一石塊落在引力場中即增加速度，同樣，電子在電場中即增加「運動能」。用這種方法，我們可得着一組電子係依一定方向一定速度衝出的。現在有許多便當的實驗法，使我們將電子放在極強的電場作用下，給電子以很大的速度，可與光速相比。那末，當一組定速的電子落在稀薄的氫原子上時，會發生什麼狀態？假定這些電子的速度很小，好像一串小彈丸投射在氫原子上。如果這些電子的速度很小——即這些彈丸表現很小的「能」——牠們就不會改變這氫原子；牠們會像橡皮球從牆上反跳一樣跳回來。保持相同的「運動能」。其次假定電子的速度逐漸增加，好像彈丸增加破壞力一樣。當牠們獲得充分的「能」時，有些便找到目標，向着目標攻擊，以改變那個原子。一經擊中，一電子（繞核而轉的）就從第一軌道提昇到第二軌道去。要怎樣纔可擊中呢？電子沿第二軌道繞行的氫原子所有的「能」比較電子沿第一軌道繞行的氫原子所具有的「能」更爲豐富。電子彈丸失掉「能」，同時原子獲得「能」。這種轉移——電子彈丸的「運動能」轉移成原子的「能」——只有在電子彈丸本身具有的「能」足以使電子行星昇到較高的水準時才會完成。因之，氫原子的興奮作用只有在彈丸的能超過一定最小值時才會發生。這叫做共振能（resonance energy）。電子彈丸的速度逐漸增加，即逐漸接近「共振能」。一經達到「共振能」，原子便送出一個信號。信號是什麼？這信號存於電子從第二軌道至一軌道的跳躍中。跳躍一見，

輻射即隨之而生，這種放射相當於來曼系列的首線。來曼系列首線光譜的表現即是表示「共振能」已經達到的一個信號。如果彈丸的速度繼續增加，原子的變動就更大。彈丸的「能」繼續增加下去，最後可將電子行星提昇到最高一層樓去，外貌上遂現出氫光譜中最遠的明線。

假定一羣電子所具有的「能」恰等於「共振能」，這在理論上和實驗上都可以決定。在這種情形中電子彈丸的「能」完全轉變成輻射光子的「能」，相當於來曼系列的首線。於是得下一關係如下：

電子彈丸的共振能 = 來曼系列首線的「光子能」

上列方程式之每邊皆由實驗材料而來，因為電子彈丸的共振能及來曼系列首線的波長都是已知的。所以我們確信這個方程式之真實，且證明「氫原子的興奮作用」一概念得到合乎實驗的推論。

當電子彈丸具有共振能時，來曼首線便發現。欲所有氫光譜系列的一切明線都發現，這彈丸必具什麼速度呢？電子的衝撞必須十分激烈，致使電子（行星）射出於質子勢力範圍之外去，——即是說，必須將電子提昇到極限能水準去。當電子脫離氫原子時，氫原子中只剩下質子。（我們知道一切原子都由電子與質子組成。電子脫離原子後，該原子即稱為離化原子（ionised atom），所以這剩下來的質子可稱為氫的離化原子。）電子彈丸欲將電子（行星）提昇到極限能水準去，且使牠脫

離原子，顯然必須具有大於共振能的「能」才行。這種「能」叫做離化能 (energy of ionization)。具有離化能的彈丸可使電子離開質子，而使氫原子離化。隨後，這孤獨的質子再遇着一個流浪的電子，牠便拉進牠的吸引範圍內去。強迫牠沿牠所准許的軌道而旋轉。於是新輻射線隨之而生。一切氫明線一經全見於光譜中，那即是電子彈丸已經達到離化能，或已超過了離化的程度。具有離化能的彈丸可使在第一軌道中旋轉的電子脫離原子，牠因為這種工作也就失掉牠的全部運動能。當電子從最高的極限水準跳到最低的軌道時，離化能便以光子形式放射出來。所以，我們又可把公式寫成下一形式：

電子彈丸的離化能 = 萊曼系列極限線的光子能

在這裏，理論與觀察也是相符的。

不過，我們的資料還須擴充。上面所述，係假定電子彈丸落在氫原子上，但事實上彈丸所攻擊的卻是氫分子 (molecules)。電子彈丸所作的工作不僅使電子昇到較高的軌道去，且將氫分子裂成二個原子。

我們且將實驗上和理論上所得的數舉幾個在此地：電子速度為每秒 1,000 千米時恰夠將一分子氫裂成二原子。當牠的速度達到每秒 2,400 千米時，不僅發生分裂現象，而且發生離化現象。至於共振能則在這兩個限度之間。

在第二章，我們會說「光電效應中」光子能「轉變成電子能，但是這裏所述的效果恰恰相反——電子的「運動能」轉變成輻射能，轉變成光子能。

氫原子

上面所述定律是關於已知元素中最輕元素的原子的——即關於氫原子的。構造物質宇宙的有九十二種元素，這只是其中之一。其他元素的原子又是怎樣構成的？能想出其他元素的原子模型來與氫原子模型一樣精密麼？我們能預言和計算牠們光譜線的波長麼？這些問題已出乎波耳的簡單理論範圍之外。我們對於氫原子的知識比較清晰，對於其他元素原子的知識則比較模糊，但是物理學上的發展確是向着這個方向前進的。

設一切元素依原子量 (atomic weights) 的昇序 (ascending order) 而排列。第一元素為氫，第二為氦 (helium)，第三為鋰 (lithium)，以至最後的元素——即第九十二或最重的元素——為鈾 (uranium)。波耳理論怎樣構造這些三元素的原子？我們解答這個問題，可用這樣推論法：先提出這個理論的一般輪廓，然後進而表明牠所得到的合乎實驗事實的結果。這一科的實際歷史卻不像這樣簡單；理論與實驗常常是混雜而難分開的；不過我們現在所提供的圖畫並不是一種科學的幻想，卻是建築在實驗事實上的。

一切元素都照上述排列後，我們便可給各元素一原子序數 (atomic number)：氫為 1，氦為 2。

鎳爲3，依次推至鈾爲82。原子構造的理論係根據下一假定而來：一切元素皆依太陽系的模型而構成，所以每一元素的原子有一重核（太陽）電子行星繞之而行。上述最簡單的情形中（氫的情形）原子的核爲質子。其他元素中，核的構造就比較複雜。氫核具有一（正）元電荷，氦核則有二正元電荷，鎳核則有三正元電荷，依次推至鈾則有九十二正元電荷。（電子或質子的電荷稱爲元電荷——負或正，一視其情形而定。）所以可以說：

元素的原子序數決定其核的電荷。

這個電荷顯然必爲正 (positive)。當元素的原子不呈電性時，我們就應假定繞重核而旋轉的輕電子中和 (Neutralize) 了核的正電荷。所以氫有一個電子行星繞核而轉，氦有二電子，鎳有三電子，推至鈾（這個太陽系就最複雜了）有一個核及九十二個電子行星。

我們現在所要說的元素，原子序數爲2——即氦。氦的原子量爲4（意思是說氦原子比氫原子重四倍）。然而氦核的電荷等於二元電荷（正）。於是碰到第一道難關了：氦核不能有二質子，因爲設有二質子，則其原子量必爲2，即氦原子之重於氫原子必爲二倍，而非四倍。（電子質量太輕，我們略而不計。）這道難關之解除，全靠另作下列重要的假定：電子不但如行星繞核而轉，且能跑進核的構造裏面去。如果氦核裏面有四質子及二電子，那末即是說牠有四正元電荷及二負元電荷，結果核有二正元電荷，同時原子量仍然是四倍於氫的原子量，因爲該原子量乃爲四質子所決定，二電子

於牠看不見有什麼影響。因此可以說：

氦核係四質子及二電子所組成。

我們既經知道二電子繞氦核而旋轉。我們能繪出這兩個行星繞核旋轉的路徑麼？波耳理論繪不出來；事實上關於這一元素的很多現象，波耳理論都不能解釋，只有說到新量子力學（quantum mechanics）時，我們纔開始了解。這裏只提一提：這兩個行星繞核旋轉形成一種密接的環，稱爲K環（K shell）。現在不必詳述這種K環的構造，也不必考查這兩個電子繞核旋轉的運動。

氦爲一原子的元素（monatomic element），換句話說，氦的分子和原子是二而一的。假設電流通過稀薄氦氣管。一羣電子彈丸射擊氦原子，如果這些彈丸夠大，則直接擊中的射擊會使繞核旋轉的電子分裂，脫離核的勢力範圍。這樣，我們便得着離化氦——即是被剝去一電子的氦原子。彈丸的「能」若再增加，就可將剩餘的電子從牠們定常軌道提昇到最高的軌道上去。這樣放出輻射，光譜中發生離化氦的明線。離化氦的光譜線問題就比較原始氦的光譜線問題簡單得多了，因爲這與我們前面所說的氫光譜線問題——僅一行星繞太陽而旋轉的問題——十分相同。換言之，這個問題實際是關於二物體的問題，不像常態氦的情形中，是關於三物體的問題。讓我們更精密地檢查這個離化氦的問題。爲了這樣，我們須得簡略地說說論述氦原子時所有的根據，我們不但可以發現牠們十分相似，也可以發現牠們一定的差異來。

1. 波耳理論。波耳理論應用於氫原子上，得着一定的圓量子軌道，這裏離化氫的原子同樣根據波耳的假設，也一樣得着一定的圓量子軌道，未射出的電子便在這些軌道裏面旋轉。這些軌道即是所謂不變的軌道。但是有一種差異。如果我們依照波耳計算，我們就發現這些圓的半徑只有氫原子軌道的圓半徑一半長，相當於各軌道的能水準也沒有改變。可是第一第二第三等軌道所有的能水準都各比氫原子的各該水準大四倍。從高水準跳到低水準時也發出輻射，射出之光子的「能」等於其相當二水準的「能」之差。因為這些能水準大四倍，則光子「能」也必大四倍，波長也必比氫光譜線的波長各小四倍。現在我們依照前面關於氫光譜各系列的公式，寫出氫光譜各系列的極限線波長公式如下：

$$\text{第一系列的極限線波長} = \frac{1 \times 1}{4 \times \text{勒德堡常數}}$$

$$\text{第二系列的極限線波長} = \frac{2 \times 2}{4 \times \text{勒德堡常數}}$$

$$\text{第三系列的極限線波長} = \frac{3 \times 3}{4 \times \text{勒德堡常數}}$$

$$\text{第四系列的極限線波長} = \frac{4 \times 4}{4 \times \text{勒德堡常數}}$$

這些式子與氫光譜系方面相當的式子不同處，只在於分母上各多一因數4罷了。所以極限線波長

各比氫光譜系的各該波長短四倍，所以越發偏向於紫端。請再仔細的觀察第四系列。該項公式可以略改如下：

$$\text{第四系列的極限線波長} = \frac{2 \times 2}{\text{勒德堡常數}}$$

這個公式簡直與前述巴爾馬系列的極限線波長公式完全相同。我們應發現牠們全部相同，不僅牠們的極限線波長公式才相同。不但離化氫第四系列的末端公式符合於巴爾馬系列的極限公式，即巴爾馬系列的一切明線也莫不符合於離化氫第四系列的各該明線。

2. 繞公共重心而旋轉。我們採取討論氫時所採取的步驟，現在放棄簡單的假定，進而研究電子與核同繞牠們的公共重心而運動的情形。研究的結果可得離化氫方面勒德堡常數的較確值如下。

$$\text{勒德堡常數較確值} = \frac{\text{勒德堡常數近似值}}{1 + \frac{1}{4 \times 1850}}$$

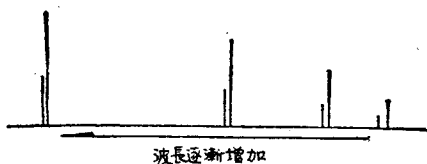
將此式與氫原子方面勒德堡常數較確值式比較，可見此式分母為：

$$1 + \frac{1}{4 \times 1850} \quad \text{而非} \quad 1 + \frac{1}{1850}$$

所以就離化氫光譜看來，勒德堡常數的較確值與氫光譜中的微有不同。這也就是我們所希望發現的。氫核（太陽）之重四倍於氫核（太陽）之重，所以假定太陽不動所引起的錯誤在氫一方面比

較小，結果所要求糾正的也比較微。離化氦第四系列的極限故不恰與巴爾馬系列的極限相符。同樣，巴爾馬系列的其他明線與離化氦第四系列的各該明線的關係也略有遷移。這是由理論推演而得的結果，且已經實驗完全證明了的。如果取一試管，盛以氦氣的混合氣體，通以電流，則可看見這兩種系列——氦的巴爾馬系列及離化氦第四系列的明線，二者的關係略有遷移（圖一二）。從理論上可算出這種遷移的範圍，且知計算已完全證實了觀察。所以我們說細微的太陽系是繞公共重心而旋轉，可更進一步求支配原子內部的定律了。採用太陽不動的簡單假定，只是近於真，由此我們就不能解釋氦光譜線對於氦光譜線的遷移。

3. 相對論的修正。我們再拋棄簡單的假定，像前面論述氦原子的時候一樣。我們現在說離化氦原子中的電子不但在圓軌道內旋轉，且能依橢圓軌道而旋轉。能水準不改變。第一水準有一圓軌道，第二水準有二軌道，一圓及一橢圓；第三水準則有三軌道，一圓及二橢圓，餘類推。如果我們現在計算質量上的變化，且依相對論而修正，我們就覺得桑麥菲爾的發明之重要。相當於第一第二第三等軌道的能水準變成可分的，靈敏的分光計可以精確地顯出離化氦各明線的明晰構造。再者，氦線供人實驗研究有時較氦線尤佳。根據桑麥菲爾理論而推出的結論，帕申給以精巧的實驗而



圖一二 長的為氦線，短的為氦線

得證明，這是理論與實驗合作的範例。這兩位科學家研究這個問題時，常相交接，一個研究理論，一個實地實驗，彼此得收合作互助之效。

4. 電子衝突。共振能與離化能二概念也可應用在這個問題上。具有特殊速度的一羣電子彈丸射擊離化氦，離化氦的電子行星在正常軌道（即第一軌道）中旋轉。這些彈丸的「能」如果足以將該電子行星提昇到第二軌道上去，我們便稱牠為共振能。第一列系首線表現即是共振能的信號。如果直接射擊使電子行星射出原子範圍之外，則光譜中其他明線也就表現出來。當時，只剩氦核了，換言之，變成雙離化（doubly ionised）氦原子了。電子彈丸需要多大的「能」纔可使電子行星脫離原子呢？因為離化氦的能水準各比氫的能水準高四倍，所以這裏電子彈丸的「離化能」不得不比前述氫原子例中的「離化能」大四倍。

還有幾點可以解說的，述之如下：只有在氦已有必需的預備時——即氦中兩個電子已經逃去一個的時候——我們才可以說離化氦的共振能及離化能。使氦離化需要多大的能呢？波耳理論不能明白答覆這個問題；牠不能構造未曾被離化的氦的模型；牠不能構造一個模型來可以解答上述問題，合乎觀察的事實。就實驗說，電子彈丸的速度為每秒 $3,000$ 千米時，便可使氦中第一電子逃出而使氦離化，速度達每秒 $9,000$ 千米時，便可使氦中兩個電子都脫離原子，而使氦雙離化，只剩下氦核。

其他元素的原子構造

氫以下最輕的元素是鋰 (Lithium)。我們現在先論述鋰的構造，然後連續論述其他元素，最後及於鈾。論述這個問題，最好將各元素依照門得雷業夫 (Mendeleeff) 的表 (附於本書之末) 所發現的順序排列，就比較簡單。該表創始於前世紀，但直至較近牠只與化學家發生關係，物理學家實際沒有大注意牠。可是，現代物理學對於該表構造已意外地另給以解釋，且露出並解釋牠那有順序而難解的排列。我們且來詳細地檢查一番。表中每格有兩個數及一組文字；例如第一列中，我們看見有 $1\text{H } 1.0072$ 及 $2\text{He } 4.0000$ 。第一個數是什麼意思？牠是元素的原子序數 (atomic number)。原子序數是連續地從 1 到 92，元素的原子序數後面一組文字是代表個別元素的：H 是氫的符號，He 是氦的符號，Li 是鋰的符號，餘類推。書末另有一表記載所有比較重要的元素以及相當於各該元素的符號和原子序數，從那上面，我們容易查出元素的名稱以及各該元素的符號和序數。

其次，第二個數是什麼意思？牠表示各元素的原子量。氫的原子量為 1.0072，已被當作基礎。氫的原子量為 1.0072，氫原子比氦原子約輕四倍。依此，從表上可以決定任何二元素的原子量間交互的關係。檢查這些原子量，可以看出牠們是逐漸增加的，該表的原則是依原子量的昇序而排列元素，但是再仔細查一查，則覺處處有破綻。例如 27Co (鈷) 58.92 卻在 28Ni (鎳) 58.66 之前。不過表中只有四對元素是這種情形，各記有星號，可查。

一切元素依表排列——依原子量的昇序排列，且排至一定地方又另起一列——我們得許多縱行，各成一羣，各記以羅馬數字。如第一羣(I)爲氫、鋰、鈉(sodium)等；第二羣(II)爲鈹(Beryllium)、鎂(magnesium)、鈣(calcium)等；第三羣爲惰性氣體如氦、氖、氬(argon)等。(這些元素稱爲惰性因爲當牠們是無化學效驗的元素——即不能與其他元素化合的元素。)照這樣排列，則門得雷業夫表中同一縱行的元素，化學性相同，物理性也有些相同。同羣元素的光譜各部分——即可見部、紅外部及紫外部——都有一定的相同性質。至於稀土族(rare earths)另成一羣元素，牠們不能劃入門得雷業夫系統的排列中；在第66元素後一格中有「稀土族」字樣；以下十五個元素不適用於這個週期表，特另列在表下面。

這可難解了！爲什麼元素這樣排列就分成同物理性同化學性的種種羣呢？爲什麼要將一切元素依原子量的昇序排列呢？爲什麼又有幾處與這個原則不符呢？爲什麼稀土族不能適於門得雷業夫表？這些問題，現代原子構造的理論卻貢獻一個簡單的令人折服的解答，請看本章之末及以後各章，就會曉得現代物理學是怎樣解答這些難題了。

我們從原子序數說起。這些數目，就我們所知道的說，只是表明周期表中一切元素的系統罷了。其實牠們自己還具有一顯明的物質意義。一切元素都是一核(太陽)及一個或一個以上的電子(行星)所組成。元素的原子序數也代表核的電荷，核的電荷恆爲正。例如氦核的電荷二倍於質子。

的電荷，鋰核的電荷為三倍，鈾核的電荷等於 92 個質子的電荷。決定各元素連續順序的因素不是如門得雷業夫當日所想的原子量，而是核的電荷（下簡稱核荷）。表示核荷的數目並不與質子數目相合。這已在前面論述氦時說過了。今再以鈾元素為例。鈾核的電荷為 92，元素的重量差不多完全集中在核上，因為重質子是在那裏面的。門得雷業夫表上鈾核的重量為 238，所以鈾核有 238 個質子。可是因為鈾核的電荷等於 92 個質子的電荷，那末鈾核就有 $238 - 92 = 146$ 個電子。鈾核既有 146 個電子及 238 個質子，則繞核而旋轉的必為 92 個電子行星了。可見原子量差不多是個偶然的性質，並不決定元素的化學性質。設想鈾核內格外多一電子及一質子，核荷依然未變，元素的化學性乃隨其核荷而定，所以也不會受影響；所不同的只是原子量比較重些罷了。故原子構造表明門得雷業夫的原子序數是依核荷的昇序排列的。核荷增加，原子量也就增加。這兩種性質的關係差不多也是偶然的，因為我們知道還有多少例外。

其次，請看表中最先的其他元素。氫與氦已經討論了，我們知道繞氦核旋轉的電子在常態中形成一密接的 K 環。這完成了原子構造的一級；好像我們完成了原子建築物的第一層樓。現在說到鎂（原子序數為 3）。核荷等於三個質子的電荷。三電子行星繞着牠旋轉。牠們的軌道是什麼？常態中這三個電子有二個形成 K 環。第三電子在 K 環範圍內沒有地位，但自己在較遠的軌道中旋轉，於是形成第二層樓——即 L 環——的首段。電子衝突的第一效應或最先效應是要將這個孤獨的電子

提昇到較高的能水準去。就這個在較遠的軌道中旋轉着的電子言，原子內部是核及K環所組成。在鋰原子的郊外，有一電子繞原子內部而旋轉，恰與氫原子的情形一樣。氫與鋰的外部構造於是相似。但是決定元素的化學性物理性以及牠的可見光譜、紅外光譜和紫外光譜的就是這個外部構造。所以在門得雷業夫表上同一縱行內的元素，牠們原子的外部構造是相似的。鋰的內部，孤獨電子既經從原子提昇到較高的能水準去，這時原子似乎只剩下核了，核的周圍是二電子（即組成K環的二電子）所形成一層雲霧。這時原子內部的電荷總量等於 $3 - 1 - 1 = 1$ ，換言之，即等於一質子的電荷。故氫光譜與鋰光譜之間應有一定的相似，且已經實驗說明了。當電子彈丸驅逐孤獨的電子行星脫離核的勢力範圍時，我們便得着離化鋰，其中只有核與K環。當鋰被離化（或在興奮狀態）時——即發出輻射時——牠的光譜是不同的；這時就類乎氫，而非類乎氫了；經高速電子的衝突，可以得着雙離化的鋰——即被奪去二電子後的鋰；這時只有一電子行星繞核而行；問題遂又與氫的情形相似了。光譜系會又是氫的光譜系，惟不同處則在氫與鋰的公式上：氫的公式上有勒德堡常數，離化氫的公式上則有勒德堡常數乘以 $2 \times 2^2 = 8$ ，雙離化鋰的公式上則有勒德堡常數乘以 $3 \times 3^2 = 27$ （因為鋰核荷等於三質子的電荷）。鋰的各系列更向紫色一端推移，比氫的各系列移得更遠一點。所以未曾離化的鋰以及雙離化的鋰，牠們的光譜都與氫光譜相似，但離化鋰的光譜卻類乎氫光譜。

次一元素為鈹（原子序數為4）。牠的核荷是四，所以有四個電子繞核旋轉。其中二電子形成

K環，其餘二電子仍在原子的郊外，牠們決定本元素的化學性及可見光譜或接近可見光譜的性質。其次幾個元素暫且從略，我們且看第二列末尾第二個元素，即第九元素氟（Fluorine）。牠有九個電子行星繞着轉，其中二電子形成K環，其餘七電子構成原子的外部。外部人煙比較內部稠密得多。第二列最末的元素為氦（此為惰性氣體，原子序數為2）。牠的十個電子中，二個形成K環，其餘八個形成L環。這完成了第二層樓的建築。在這個複雜的原子構造中，K環包含二電子，L環則包含八電子。這種惰性氣體在構造各層樓或各種環的過程中卻有全部的或部分的成就。第十一個元素為鈉（原子序數為11，第一縱行）。牠的十一個電子中，十個在原子的內部形成K環及L環，其餘一個電子則在郊外踽踽獨行。因此，我們得着的性質又類似於鋰及氫的性質。從鈉起，便開始第三層樓的建築——即M環——這一層的完全構造是由三十二個電子組成。我們現在不再往下說了；越往下，原子構造愈趨複雜，其中細情也越不清晰。

上面略述原子構造問題，純全是一種推論的方法，現在我們應該舉幾個簡單的例子，表明上面的推論也有實驗證明。

離化原子比較常態原子少一個電子行星。不過離化原子的光譜與不呈電性的原子的光譜，性質完全兩樣。例如離化鋰的光譜卻與氦光譜相似。所以原子之離化使原子的光譜類似於前一元素的光譜。（依門得雷業夫周期表順序言）例如鈹（原子序數為4）之離化使牠郊外二電子只留

下一個牠的光譜就彷彿往後移一步；於是與鋰（原子序數為3）光譜相似，不同處只在於牠移近紫色方面罷了。雙離化則使光譜往後移二步。例如雙離化鈹光譜類似於氫光譜，雙離化鋰光譜則類似於氫光譜。再舉一例：第八元素為氧（原子序數為8）。牠的二電子形成K環，其餘六個則在牠的郊外。這六個電子行星或全體離開郊外，或部分離開。如果我們繼續使這個氣體按步離化下去，以至六離化，則照上述法則說，應為：

離化氧光譜類似於氮（原子序數為7）光譜。

雙離化氧光譜類似於碳（原子序數為6）光譜。

三離化氧光譜類似於硼（原子序數為5）光譜。

餘依此類推。

如果波耳關於各種元素原子構造的見解是正確的，則桑麥菲爾和柯賽 (Kossel) 的這條法則（關於離化原子光譜線的推移）應能由實驗證明，事實上，實驗也確已證明了。

波耳所披露的原子圖畫幫助我們了解各種元素的某種化學性。物理學於是侵入化學的保護界裏去了，但這種侵犯是於化學有利的。以後介紹到量子力學及光放射化學現象時，這一點就會越發明顯。

波耳模型可以解釋化學上親和力的現象。今舉一範例以明之：氣（原子序數為11）是與鈉

(原子序數爲11) 化合。氯所佔的位置在惰性氣體氫(原子序數爲18)的前一格,在完成M環的前一步。欲完成M環,在氯原子裏面必需再多一個電子才行。鈉原子的郊外(在表中第一縱行)有一孤獨的電子在那裏流浪;這時氯原子急欲得一電子以完成M環,於是馬上將鈉原子中流浪的電子吸收進去。鈉的外部既失去電子,則核的四周只有K環及L環了,與惰性氣體氖相同。鈉原子與氯原子裏面的太陽系都被修改而成惰性氣體。方法是在氯原子中加一電子,鈉原子中撤去一電子;換言之,氯變成陰離子(negative ion),鈉變成陽離子(positive ion)。因陰離子與陽離子之間的吸引,還產生一種穩固的化合物,即日常所用的食鹽(NaCl)。

第一縱行內所有元素都是一電子在牠們的郊外,故稱爲一價(monovalent);第二縱行的元素稱爲二價(divalent),餘類推。如上面所舉的例子,將中性原子變成離子(ions),且完結各原子內流浪的形勢而形成電子環的比較穩固的形勢,遂發生化合現象。這便是前面所說的,物理學給與化學現象以新解釋了。不過,在這一步,原子圖畫仍然是暗淡不明的。

原子怎樣由電子與質子構成,這個問題已可從上文看出,一個概略來了。現代物理學所繪成的原子圖畫,有如全宇宙的太陽和星體圖畫一樣的莊嚴華麗。

第四章 原子核

在現世紀，我們關於原子構造的知識已經進步了，不再把原子當作不可分的質點看了。核是原子的主要部分；原子的質量差不多完全集中在核上，電子行星依一定的圓軌道或橢圓軌道繞着核旋轉。原子核裏不但含有質子，且含有電子，這種電子雖可大改原子的電荷，因而改變整個原子的性質，可是於原子的質量上改變極微。

核的構造是怎樣的？這個問題是現代物理學上的主要問題。牠所關涉的東西，我們知道得很不完善，其中有許多疑問到現在還沒有得着解決。不過現在我們所知道的究竟比從前所知道的更多一點，因為在這方面，無一年沒有顯明的進步，而且無疑地，最近的將來核之構造問題是物理學上的主要問題，恰如幾年前原子構造問題為物理學上的主要問題一樣。光的光譜線顯出原子的外部構造，同樣，這裏也發現與原子的最內部構造（即核的構造）十分相關的全部現象；現代物理學想製造一幅核之構造圖便是根據那些現象。許多著名科學家都已專心研究這個問題，而最特出的怕要算世界聞名的劍橋卡汶德實驗室（Cavendish Laboratory）的導師刺德福君（Rutherford）了。

氦核與物質的毀滅

門得雷葉夫的表上，有各元素的相對原子量，氫原子具有的質量為 1.0072 單位（單位雖小，但很確定）。根據這個數目，可以算出氫原子的質量。氫核有四質子及二電子，因為電子質量太小，可以略而不計，故氫核質量應比氫原子質量大四倍，即：

$$\text{氫原子質量應為 } 4 \times 1.0072 = 4.03$$

試將這個結果與表中由測量得來的數比較。事實上，我們測得的卻是：

$$\text{氫原子質量} = 4.00$$

這便是個大疑問：為什麼不相合呢？因為最後一言須取決於測量，所以我們不能不解釋為什麼氫核是 4.00 單位，而不是 4.03 單位。欲解答這個問題，不得不回到相對論所說的「能」與質量之關係上來。我們已經知道「能」表現極小的質量，所以質量是極大「能」的場所。牠們的關係重列於下：

$$\text{能} = \text{質量} \times \text{光速} \times \text{光速}$$

在使四質子二電子化合成氫核的過程中，失掉了 0.03 單位質量。最簡單的假定便是：由小的物質要素（指質子和電子）化合而產生氫，隨着這種作用而生光子彈丸的放射，且假定 0.03 單位質量便這樣依輻射能的形式送出去，在空間流浪。相當於這個小質量（0.03 單位）的「能」必很大——換言之，在產生氫核時放出的輻射必很硬，——必有一極短的波長。大概還記得具有大「能」的彈丸——富有「能」的光子，或大光子（large quanta of light）——相當於很短的波。但在產生氫

核的時候，如果相當於所失之質量的光子放射出來，牠的波長必在較 γ 線更短的波長範圍內——即宇宙線範圍內。愛丁頓 (Eddington) 推測，在宇宙實驗室中，在廣漠的空間中，（其中流浪着無數的物質殘片，）或者在許多星體的內部，（其中的溫度比地球上所能實現的任何溫度高得不可比擬，）——在那些遙遠的區域中，發生地球上所不能觀察的種種過程，或許也就有由小的物質要素（指質子和電子）化合而產生氦的過程發生。依愛丁頓說，宇宙輻射 (cosmic radiation) 產生於物質毀滅中的。一部分質量轉變為很硬的輻射去了。這種見解對嗎？我們對於宇宙輻射，知道得極有限，不能解答這個問題。我們還不知道牠是否如 γ 線為一種很短的電磁波，或是否（現在這似乎更可信）為微粒輻射，如一羣電子以近於光速的速度射出去。最近的種種發現似乎更贊成微粒說。最近的將來，無疑地會使宇宙輻射問題以及物質毀滅問題更為明顯。

但讓我們追求這種思想，且跟着瓊斯 (Jones) 想像一更澈底的過程，——即電子與質子結合 (union) 過程。據瓊斯的意思說，電子與質子結合相當於電荷的毀滅。質量消失了，電子與質子的「能」也全部消失，而以很硬的輻射形式投射在天空中。這種輻射的波長比產生氦時放出的輻射波長還要短些；射出之光子具有的「能」也比較多。如果宇宙線真為電磁輻射所組成，則牠們所包含的光子其「能」恰相當於物質的全部毀滅而非相當於物質部分毀滅。如果瓊斯的假設是對的，那末物質與輻射之間的劃界線并不是不能通行的。物質的部分毀滅或全部毀滅過程就許我們通

過這條劃界線，因為那時物質變成輻射去了。但是，有了這種過程卻又引起另一疑難。太陽是一個能源，——實際也是地球上一切生命的根源。牠每秒鐘放出無數輻射來供天空消耗，牠應該很快地冷卻下去。因為假定太陽放出輻射「能」，即犧牲牠自己的「熱能」(heat energy)。照此看來，太陽的年齡就不會很大；計算一下，差不多只有二千萬年；可是據地質學家計算，即地殼之構成至少也需要十萬萬年。所以不能假定輻射之放出只消耗熱能。然則，怎樣才能打破這個疑難呢？這裏我們不能討論這個問題，也不能介紹為解釋這個問題而作的各種研究；我們只說一說牠影響於物質構造問題之點就夠了。愛丁頓曾提出一個奇特的假設。他想，只要氫核的百分之幾與氦原子化合，則由這種物質的部分毀滅所放出之「能」即足以保持太陽的溫度不變。至若干萬年。若依瓊斯假定，當電子與質子化合時，太陽放出之「能」的根源不是物質的部分毀滅，而是牠的全部毀滅，則我們算來太陽的壽命更長了。

這個問題，從牠的出發點起就佈滿了疑難，且顯然我們研究原子，應得了解支配宇宙各個太陽的定律。

轉回氦核問題上來，我們已經知道氦核的產生放射許多「能」出來。不過，也可以反過來說。氦核的分解(disintegration, 分成電子和質子時)則增加大量的「能」進去。結果氦核成一極穩定的組織，氦核的強烈穩定性，以及牠抵抗其他電子和質子之衝突的力，確係由於氦核質量上顯然不

足而生的。我們將來討論到其他過程時，這一點就愈加明顯。

氦核的構造頗能支持永久。以後我們就會看到牠在一切元素核的構造中也是一「高級的組織」。氦核也叫做 α 粒子(alpha particle)。比較複雜的原子核，其中電子與質子也結成 α 粒子的形式，結合緊密，可抵抗外界的勢力。

於是我們假定原子核是由許多電子與質子構成的，且都結合而為 α 粒子（至少有一部分是 α 粒子）。

α 粒子或氦核原子量為4，電荷為2。

今以氧（原子序數為8）的原子核為例，氧原子核包含着四個 α 粒子，因為牠的原子量為16， $16 \div 4 = 4$ 單位，並且牠的電荷是 $2 \times 4 = 8$ 元正荷。同樣碳（原子序數為6，原子量為12）核包含三個 α 粒子。那末，看到元素的原子量數目上應與整數微有差別。這種極小的差數可照前面解釋氦原子量的方法解釋出來——即這些元素產生過程中，小部分質量轉變為輻射去了，隨而生原子核的穩定性。可是查查門得雷業夫的表，卻又發現極大的疑難。有些元素的原子量與整數差得很遠。例如氦元素（原子序數為10）的原子量為20.17。我們怎樣解釋這樣顯明的差異呢？如果氦核含有五個 α 粒子，則原子量應為 $4 \times 5 = 20$ ，氦核若欲形成一穩定的系統，則尚須放射一部分質量出去，故原

子量應比 20 還要小些才合式。至於氯(原子序數為 17)的原子量為 35.44 ，那差得更遠了。我們怎樣使這些顯明的差異與上述的假定(即假定核由電子質子構成一部分結成 α 粒子)調和一致呢？在解答這個問題之前，我們須先考慮另一問題。

我們知道決定元素性質的因素是元素的「核荷」。元素的化學性，牠光譜的特性，以及原子的全部太陽系構造，都隨「核荷」而定。就上面所引證的例來說，設想氦原子(原子序數為 10)的核只有五個 α 粒子。那末原子量必為 $5 \times 4 = 20$ ，電荷應為 $2 \times 5 = 10$ 倍於元電荷。但我們也可以想像與此微有不同的氦的構造。用一種方法繼續加多一電子與一質子到氦核裏面去——使氦核有五個 α 粒子，同時又有一電子及一質子。「核荷」自然沒有改變，依然只十倍於質子的電荷；元素的化學性質也依然如故；只是牠的原子量不同了；不是 20 ，而是 21 (核裏面加多一個重質子進去了)！同樣，我們也可以想像增加二電子及二質子到原來的氦核裏面去。元素的性質依然未變，只是原子量不同，變成 22 了。一般言之，可以想像同樣元素(原子)具有同樣「核荷」同一原子序數，而原子量不同。於此，我們又看到現代物理學已降低了原子量的身分，因為我們可以想像不同的原子量相當於同一元素。可是宇宙間是否真有同一元素只原子量不同的變種呢？這個問題已經亞斯頓(Aston)巧妙的實驗給與「肯定」的答案了。

欲知亞斯頓實驗的根本原理，請設想離化原子，如離化氯原子(ionised chlorine atoms)——

氯原子經與其他電子或原子衝突後，一電子脫離牠的太陽系，遂成離化氯原子。氯原子原先不呈電性，現在卻多一質子的電荷。離化氯原子在電磁場作用下，係依一定的路徑運動。路徑的形式不僅依賴氯原子的速度，且依賴牠們的質量。亞斯頓依照這個原理，創造一極精密的儀器，他特稱之為質譜圖 (mass spectrograph)。在光一方面，分光計將光析為若干成分，亞斯頓的質譜圖則在另一方面有與分光計同樣的作用。

試看一羣運動的氯離子 (moving chlorine ions)。如果這些離子的質量有種種不同，則離化原子在電磁場的作用下，亞斯頓的質譜圖便將這一羣分析為顯然分離的若干羣；羣的數目等於原羣中原子量的種數。如離化氯的所有原子同是一種質量，那便只有一羣，決不會被分析為若干羣。這顯然類似於光一方面的單光。不過，羣中若有種種質量的原子，那便將原羣分成相當於質量種數的若干羣。因此，亞斯頓的實驗可以解答氦或氯或其他任何元素是由同一原子量的原子組成，還是由種種不同原子量的原子混合組成這一問題了。他的解答如下：氦是由種種不同原子量的原子混合組成的。氦氣 (原子序數為 10) 中的原子有原子量為 20 的 (5α 粒子) 有為 21 的 (5α 粒子 + 1 電子 + 1 質子)，也有為 22 的 (5α 粒子 + 2 質子 + 2 電子)。氯元素 (原子序數為 17) 中有二種原子。牠們的原子量都是整數，——即 35 及 37。換句話說，氦或氯是由同位素 (isotopes) 混合組成的。凡同一元素的變種只原子量不同的，都稱為同位素。氦是由三個同位素所組成，氯是由二個同位素

所組成的。現在便可以明白門得雷業夫表中原子量的數目爲什麼發現有不是整數的理由了。由化學方法所決定的原子量乃許多同位素的平均原子量 (mean atomic weight)。表中氯的原子量爲 35.44，即因牠的兩個同位素 (原子量一爲 35，一爲 37) 差不多成 3:1 的比率。同樣，氦有三個同位素，其中原子量爲 20 的原子占百分之八十八，所以牠的平均原子量離 20 不遠。

實驗其他元素，知道同位素異常普遍。沒有同位素的元素比較少。例如氫是沒有同位素的元素。在另一方面，卻有些元素含有很多的同位素。例如錫 (原子序數爲 50) 有十一個同位素，其中有些原子量彼此相差竟達百分之十。下列之表即表示許多元素的同位素。依次數的降序 (descending order) 排列各原子量——換言之，即將發現次數最多的放在前面，少的放在後面 (參看下頁同位素表)。

於是發生下一疑問：爲什麼元素常是同一原子量呢？換句話說，任何元素中的同位素恆爲同一比例呢？例如氦、氯、鋰、錫等元素，不拘在什麼情形中，牠們的原子量爲什麼總是那樣呢？這個疑問，到現在還沒有找着滿意的答案。於是發生第二個疑問：我們能否使各同位素彼此分離呢？譬如，我們能不能將氦裏二個不同原子量的成分分離開呢？使極端懷疑的人相信同位素的存在，本來是可能的。不過，實驗起來，異常困難，因爲一元素的同位素，化學性質并非不同。但是，許多正結果 (Positive result) 雖所得極有限，卻已得着了。例如繼續分離氦的二部分——一比平均原子量小，一比平均原子量大，

同 位 素 表

元素	原子序數	同位素數	同位素的原子量
鋰	3	2	7-6
硼	5	2	11-10
氖	10	3	20-22-21
鎂	12	3	24-25-26
硅	14	3	28-29-30
硫	16	3	32-34-33
氯	17	2	35-37
氬	18	2	40-36
鉀	19	2	39-41
鈣	20	2	40-44
鐵	26	2	54-56
鎳	28	2	58-60
銅	29	2	63-65
鋅	30	6	64-66-68-67-65-70
鈷	31	2	69-71
鎳	32	8	74-72-70-73-75-76-71-77
硒	34	6	80-78-76-82-77-74
溴	35	2	75-81
氬	36	6	84-86-82-83-80-78
鉀	37	2	85-87
銣	38	2	88-86
銻	40	3	90-92-94
銀	47	2	107-109
錳	48	6	114-112-110-113-111-116
錫	50	11	120-118-116-124-119-117 122-121-112-114-115
銻	51	2	121-123
碲	52	3	128-130-126
碘	54	9	129-132-131-134-136-128 130-126-124
銻	58	2	140-142
銻	60	3	142-144-146
鐳	80	7	202-200-199-198-201 204-196
鉛	82	3	208-206-207

——已經證明其可能了。雖說數目上的結果微有不同，然而兩種不同原子量的氦既經證明存在，則同位素原理當然滿可以確立。至此，又有一疑問：同一元素的同位素，因其混合的比例不同，可以構成種種元素，這樣的元素是否存在？這問題留待以後再談。現在我們只須提一提，已經發現鉛因其原子量有種種配合，各相當於其同位素的各種比例，於是具有許多種數。但就大體言，一元素的同位素組合是不變的。

氫的同位素發現史極有趣味。這個重要的發現為時很近（1932年），所用的方法與用以發現其他元素同位素的方法不同。不是用亞斯頓的質譜圖作的，而是借助於平常的分光計作的。

請記起氫放出輻射，有許多明線，各成系列。各系列的波長公式，有勒德堡常數。我們計算這一常數的值有兩步：第一步假定核（太陽）不動，第二步拋棄這個簡單的假定而假定電子與質子同繞一公共重心而行，遂得常數的較確值。即

$$\text{勒德堡常數較確值} = \frac{\text{勒德堡常數近似值}}{1 + \frac{1}{1836}}$$

今假定氫也有一同位素，且假定那個同位素的核包含二質子及一電子。那末「核荷」與原子序數都未改變，所不同的只是核的重量加了一倍，波耳的原子模型以及其中行星的軌道差不多也依然未變。只是計算勒德堡常數較確值時，才顯出極微的差異來。氫同位素的核既比較重兩倍，所以

假定牠的核不動，就比原有氫（核只有一質子）的情形，錯誤小些。（這種推理并非新見；我們在前比較巴爾馬系列與離化氫的第四系列時，就已採用過了。）所以也得一式如下：

$$\text{氫同位素的勒德堡常數較確值} = \frac{\text{勒德堡常數近似值}}{1 + \frac{1}{2 \times 1850}}$$

式中分母不是 $1 + \frac{1}{1850}$ ，而是 $1 + \frac{1}{2 \times 1850}$ 。

氫同位素的巴爾馬系列極限與原有氫的巴爾馬系列極限稍微不同。同樣，二個巴爾馬系列的一切明線均略有改變。這種改變可從理論上計算出來。只有很少數氫原子才具有比較重的核，所以改變的明線應極薄弱，這種線確已經實驗證明了，不過常態下萬個氫原子中只有一個是原子量為2的罷了。用此法已經發現這個氫的同位素了，有趣的是最近已可使這種「重氫」(heavy hydrogen)獨立。因水中有氫，於是想取得比平常水還重的水。果然已經取得了。這一發現異常重要，將來化學生物學的進化都一定要受很大的影響。

由此看來，有些情形不但是比較直接的質譜圖的方法可以引起新同位素的發現，便是用分光計的方法也可以引起。如上面所述的氯，分光計法及質譜圖法都可採用，二法原理上相差很遠，所得結果則完全相同。

遇同位素極微弱的情形，質譜圖法不大適用。有些情形，用比較精密而直接的質譜圖法不能得着結果，用分光計法研究已知明線鄰近的薄弱光譜線，卻可確定同位素的存在。氧和碳中薄弱的同位素便是從此發現的。

試再看門得雷業夫的表。可見牠並不與目前的知識相合；表中原子量是混合同位素的平均量。可設想一法將這個表改成三元的，例如氮方格內，上端置三數如氮的三種同位素；所有這些數相當於同一名稱及同一原子序數的同一元素；每一數代表一種同位素；在最低一數（相當於混合中表現最強的）上，記原子量 14.00 ，第二數上記原子量 15.00 ，在最高一數（相當於混合中表現次數最少的）上，記 13.00 。在第五十方格內——即錫方格內，有十一個同位素——置二個數。如果所有元素都照這樣做好，便可得一門得雷業夫表的三元圖合乎現在的知識。相當於各原子量的數目於是極近於整數，而因「非整數的原子量」而生的困難，也就迎刃而解。

放射性

在前一世紀，鍊金術家的幼稚思想被視作確為過去的東西；科學不大需用他們了；那時以為元素真是不變的，不可分的。可是，到了這一世紀，鍊金術家所提出的問題，雖另是一種形式，卻已再經修正了。我們現在不找點金石；現在已經修正的方法不像從前那樣的老方法，由鉛或銻一類的賤金屬中取得黃金；我們目前對這個問題卻提得比較更普遍一點：我們能否改變原子核的電荷，因而改變

元素的性質？我們知道這種鍊金術在刺德福指導之下，已在卡汶德實驗室中着手進行了，我們更可以知道已經獲得的結果若與自然本身所有的比較，那簡直異常之微。放射（radioactivity）現象中，可以看到種種元素在自動地互相轉變。放射是一種自發的過程，人不能加以任何影響；不能延緩牠或催急牠，也不能減弱牠或加強牠。放射性學及關於支配放射性過程的定律的知識，在最近幾年發達很快。此地我們只介紹已經確立了的結果。至於結果是怎樣得來的，我們卻不敘述。

請再看看門得雷業夫的表，爲什麼恰恰只有九十二種元素？爲什麼表上終點爲鈾？表中最後幾種元素，組織不大穩定，易於崩潰或改變。鉛（原子序數爲82）是放射性元素系（占表中最末幾格）的第一個。除去85及87二空格（相當於此二格原子序數的元素是否尙待發現，還是個問題），從鉛起至表末爲止，共有十格，其中都是放射性元素，牠們各有若干同位素，所以放射性元素共計總在四十種以上。（但這種說法顯然不十分正確，因爲只有十種元素的地位，故元素數目不能說是四十。雖可隨意將放射性元素的同位素說作單獨元素，可是我們知道同位素究竟不應當作單獨元素看。）

試看世界上人口最多的國度——有四萬萬人的中國——的死亡率問題。我們泛泛的檢查這一個問題：中國人裏面我們沒有親戚，也沒有朋友，完全不管死的是張三或是李四，但只注意死亡百分率的問題。問題可以這樣說：現在活着的中國人，要過多少時候才只留存一半？欲求這一類問題的答案，那就必須採用統計法。我們不能精確地調查每個中國人的健康情形，以估計他可活上多少年數。

但從統計的材料上，便可以算出死亡率，并且假定這個死亡率不變（不大正確的假定），便可求出這個問題的答案了。

對於放射性現象，手續差不多也是這樣。我們不知道爲什麼一特殊原子經受了襲擊而生蛻變（disintegration）。所用方法純全是統計法。放射性現象的顯著特徵就是蛻變，即一種放射性元素次第變化成另一種元素。科學便研究這些變化的次序，以及支配這些變化的定律。

門得雷業夫的表的最後三格是下列三種元素：

90—釷(Th); 91—釷(Pa); 92—鈾(U)。

這三個元素各爲一放射系的始祖，各是一系的起點，形式上三系十分相似。如下頁系統所示。我們且來檢查比較密切的一系——即鈾系。

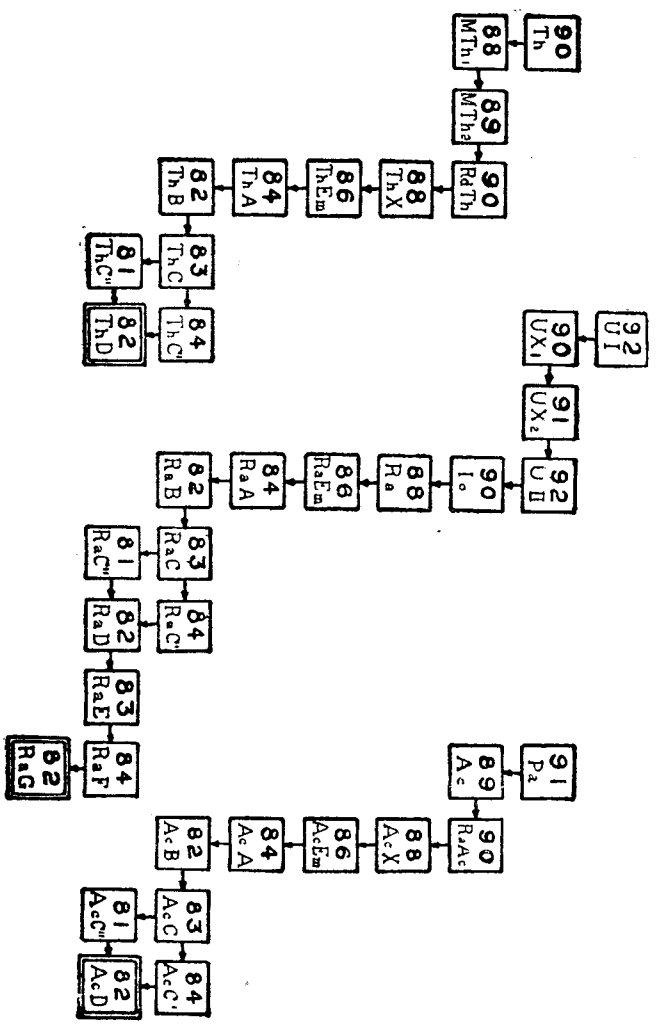
鈾是鈾系的開山老祖，是周期表中最後的一個元素。牠的蛻變很慢，但總不免。正和上述死亡率例相同，在某一時間內，有些鈾原子也一定壽命告終。爲表示放射性元素的蛻變率起見，我們須引用半周期(half-period)。半周期是個別元素原子數減縮一半所需的時間，——一半質量轉變成他種物質所需的時間。鈾的半周期值最大，約 4.5×10^9 年。比如說二克重的鈾，須經過這樣長久的周期，才減成一克。再經過 4.5×10^9 年，剩餘的一克鈾又減去一半，——只有半克了。放射性的蛻變影響到原子的最深部分——原子核。核是發生蛻變的場所。鈾原子怎樣死法？因鈾原子核的蛻變，遂以高速度

放射性元素的三大系統

釷系

錒系

錒系

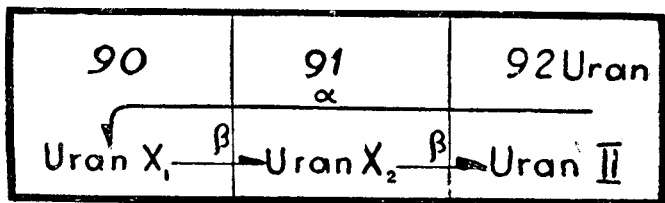


射出 α 粒子。我們已知道原子核裏面的 α 粒子是由質子及電子化合而成的。正在崩潰中的鈾原子射出 α 粒子，速度比光速只少二十倍。請記起， α 粒子差不多比電子重 $4 \times 1850 \parallel 7400$ 倍，可見這種放射射運走了很大的運動能。因此，從鈾核放出 α 粒子——即是說，放出氦核。鈾原子數目逐漸減少。在鈾鄰近，即產生氦，可用分光計直接觀察出來。氦核一經放出後，剩下的不再是鈾原子了。前面已經反覆說過，決定元素特性的東西是核荷。損失了 α 粒子，不但原子量改變，最重要的是元素的原子序數也改變了。原子量是怎樣改變法呢？答案很簡單：牠減少了被放射出去的氦的原子量，——即減少了四單位。原子序數是怎樣改變法呢？這個問題也可以馬上回答出來，牠減少了氦的原子序數——即2。鈾的這個兒子特名為 DX_1 ，牠在門得雷業夫表中的地位是在倒數第三位，即原子序數為80的方格內；所以 DX_1 是鈾的同位素。鈾的壽命很長，可是 DX_1 并不像牠父親那樣長壽；牠的半周期很短，算來差不多只有二十四日；二十四日內 DX_1 就消失一半，又產生一新元素。什麼原因引起這樣迅速的蛻變呢？放射（牠的場所即 DX_1 的原子核）又另是一種方法。這時從原子放射出去的，不是 α 粒子，而是電子。不過須得注意，這個電子不是原子裏太陽系的電子，而是核本身的成分。我們知道核裏不但含有質子，還含有電子。電子從核裏放射出來，速度異常之快，差不多近於光速，於是發生所謂 β 線（beta rays）。核裏電子這樣放出後，原子量及核荷會改變麼？原子量實際沒有改變，因為電子的質量極其小。不過，原子的原子序數改變了。電子損失了（即負荷損失了），核的正荷就增

加，新元素的原子序數也就加多一個。新元素的地位比牠的父親高一級，卻比牠的祖父低一級。這一代是怎樣？新元素是 UX_1 的兒子，特名為 UX_2 。牠是鐳的同位素，牠壽命的半周期比牠的父親更短，差不多只有一分鐘。這半周期的減縮何其大！從 4.5×10^9 年降到一分鐘！ UX_2 的遺贈，情形和牠的父親的情形相似——即放射 β 線（放出高速的電子）。結果原子量未改變，原子序數卻更升高一級。故我們又回到我們的出發點去——即鈾 II，這是鈾的同位素，因為當中放出氦，原子量減少四單位。上述蛻變經過可表列如圖一三。

所有這些變化可從鈾系中查出來。縱箭頭表示由放射 α 線而生的蛻變，同時橫箭頭表示由放射 β 線而生的蛻變。各元素符號上面是原子序數，縱箭頭（ α 線放射）相當於減縮原子序數 2 和原子量四單位；橫箭頭（ β 線放射）相當於增加原子序數 1，原子量依然未變。由此可見鈾系起首是由放射 α 線而生的變化；其次二受是放射 β 線（達到鈾 II）；再其次是一

連幾段由放射 α 線而生的蛻變。有一段是鐳（Ra 原子序數為 88），鐳元素是波蘭科學家居利夫人（Madame Curie）發現的。這是一個放射性最強的元素，牠壽命的半周期約為一千六百年。牠的



圖一三 鈾系之一部

兒子是鐳放射物（原子序數為 88 ）與門得雷業夫表比較可得一結論，這個兒子是一惰性氣體，其原子構造形成一外部電子環的最後階段。在此鐳放射物的短壽後（牠的半周期約為四日），接連二次是由放射 α 線而生的蛻變，再後又是放射 β 線，即在門得雷業夫表中是進前一步。鐳C元素卻顯然分二枝；有些原子射出 α 線，其餘則射出 β 線。一父親傳一個以上的兒子，這是第一次。現在說到本系最末的一代。最末是鐳G。至今尚未發現這個元素的放射性質，所以認定牠是鈾系最末的永遠不變的一代。鐳G的原子序數為 82 。在門得雷業夫表中，相當於鉛的地位。故鐳G是鉛的同位素。

鈷、釷二系構造與鈾系相似。牠們最後的子孫也是鉛的同位素，原子序數為 82 。鉛遂成為一切放射變化的終點。但這些鉛的同位素，原子量卻各各不同。即

鐳G—206；鈷D—208；釷D—207。

原鉛是由這三種同位素混合而成的，牠的平均原子量為207.11。

地殼中有富於鈾的岩石，也有富於鈷的岩石。這些岩石在繼續的放射蛻變，未嘗停止，除鈾、鈷之外必還有這種蛻變的產物。鈾岩石中發現的鉛（鈾系蛻變的最後產物）真比鈷岩石中發現的鉛原子量小些麼？地質學上研究各種鉛（由各種岩石層得來的）的原子量，發現鈾岩石得來的鉛真個比鈷岩石得來的鉛原子量為小。

今將上述結果再撮要敘述一下：放射性蛻變附有氦核（ α 線）放射或電子（ β 線）放射。這

是刺德福發現的。 α 粒子及 β 粒子具有很大的「能」，近幾年來，實驗室中的技術十分進步，製造極複雜的儀器，使我們能藉人爲的方法給與氦核及電子以同樣大的速度。利用極複雜的儀器（增加氦核及電子的速度），我們所企圖獲得的結果與放射性原子小核內的自然作用相同。

從放射性原子放射出來的氦核，只要引兩個自由電子到牠的勢力範圍內去，且強迫牠們在量子軌道中旋轉，就容易完成一氦原子的構造。所以放射性元素常附帶產生氦。

α 線放射後，元素的原子量就減少，在門得雷業夫表中即向左移兩步。 β 線放射後，元素的原子量不改變，但在表中向右移一步。這些有名的定律差不多是在 1913 年法塞 (Fajans) 核第 (Soldy) 二人同時陳述的。

波耳理論披露過後，上述種種觀念差不多是自明的。這些觀念大部分在 1913 年就知道了，那時對於原子構造圖不過纔正正開始繪製。原子及原子核構造的雛形，我們不能不歸功於卡汶德實驗室中研究的開拓者。

我們已經說過放射性蛻變的最後物質是鉛，這種鉛在鈾岩石層裏面有，經放射性蛻變後才形成的。從這些岩石中的鉛的量上，可以推想這些岩石的年齡；一切放射性蛻變的半周期是已經知道的，由此可計算造成某定量鈾系鉛所需要的時間。更由此估計鈾岩石層的年齡。結果估計得十四億年。地球以往的年齡所以常在十四億年以上。由此可見物理學的成功已侵入別種科學範圍內去。

了，牠替地質學、生物學和醫學展開了思想及活動的新路線。

由 α 線而生核之蛻變

原子是一很小的實體。前面已經說過原子的半徑等於一億分之一厘米，原子的中心點（即核）我們設想牠極其小，比較原子的大小更小得多。照現代物理學所創造的物質概念說，核的半徑比原子的半徑小十萬倍。核（太陽）與電子（行星）之間，有廣闊的空間，正和太陽系一樣。真的，這種物質概念與我們感官印象所形成的概念相差是何等的遠！我寫字的這張桌子，照現代物理學的概念說，是一廣闊的空間，其中稀疏地散佈着物質——電子與質子。如果能想像比質子還小的東西，則由此而構成的物質的心理圖畫必與我們所構造天體的心理圖畫相彷彿——即在廣闊空間的背景上有許多質點。

看來似乎現代物理學容易實現鍊金術家的迷夢。只要剝奪核一質子，便可得一新元素的原子。但是怎樣剝奪法？我們有法改變元素的核麼？使一元素變為他元素（打破元素不變性的舊觀念）的魔術棒在那裏？我們能否由門得雷業夫表的最後空格，從自然蛻變的元素，走到其他空格裏去，因而影響其他元素的核發生變化？一九一九年，刺德福首先解答這個疑問。

一羣電子彈丸射擊原子，遂生離化作用。「能」大的彈丸有力量趕出在內環——及K環及L環——上旋轉的電子。彈丸欲得改變核的力量，則必須具有更大的質量和「能」。刺德福研究的基

本觀念便是用重而且速的彈丸射擊原子。如果彈丸很多，至少總有些擊中目標——擊中原子核。但是這些重而且速的彈丸從那裏取得呢？宇宙本身就幫助我們。例如，從鐳放射出來的 α 粒子便具有很大的「能」及很大的質量，這便是我們所尋求的彈丸。牠們的質量比電子質量大七千倍。刺德福的觀念是要用鐳放射出來的 α 粒子射擊氮（nitrogen）原子。擊中的次數自然很少。這樣射擊實是偶然的：只有很小一部分彈丸才十分接近氮核引起蛻變。蛻變的性質是什麼？用 α 彈丸擊核，核被逼出一小粒子——即是質子，也就是氫核。我們用 α 粒子射擊氮，射得適當，則可使氮原子從牠核裏放出質子。所以我們從氮裏面得着氫！從氮原子逃出來的氫彈丸，向各方亂迸。這現象好比炸藥的爆炸， α 粒子就好比燃點着的火柴，正投到炸藥的中心。

這種實驗曾反覆在許多別種元素上舉行過，多半都引起同樣的結果——用 α 線射擊元素的核，發生質子的放射。實驗鋁（aluminium）原子尤其顯著。從鋁原子逃出來的氫核，具有的「能」大過 α 粒子的「能」——這結果初看來似與能常住原理相反。 α 粒子的「運動能」似乎較小，轉變成逃出之質子的「能」後似乎較大。但實際不是這樣。我們曾經作個譬喻，這種現象好像燃着的火柴所引起的爆炸， α 粒子解放元素內部的「能」，鋁原子內部的「能」便是「能」所以增大的根源。因鋁一小部分原子質量也變成質子的「運動能」。

這些實驗異常著名，如不懷疑，也得小心注意牠們。這確有核的蛻變麼？氫原子的本原不是混合

的氦而是這樣射擊出來的氣體麼？對於這個問題已經有了很詳細很驚人的研究，毫無疑義地我們確能用人為產生放射性蛻變。

許多元素都能產生質子的放射，但我們可以不用一一陳述出來，比較有趣味的卻是那些抗拒用 α 粒子而使牠們的核蛻變的元素。這一類元素，原子序數都大於20，也有最輕的元素，如鋰與鈹。最後，氮、碳、氧也是抗拒 α 粒子射擊的元素。讓我們再舉出這三元素的原子序數和原子量：

元 素	氮	碳	氧
原子序數	2	$6 = 2 \times 3$	$8 = 2 \times 4$
原子量	4	$12 = 4 \times 3$	$16 = 4 \times 4$

上列數目明白告訴我們三元素的核是怎樣構成的：碳核是由三 α 粒子構成，氧核是由四 α 粒子構成。牠們的 α 粒子構造極強固，鎘的 α 粒子所運送的「能」不足以使這些元素的核蛻變。由此可以證明質子（構造原子核的質子）在這些情形中係合併成氦核。欲使牠們蛻變，我們必須有很大的「能」，比宇宙所給與 α 粒子的「能」更大才行。

同樣，我們檢查一不抗拒 α 粒子射擊的元素——即用 α 線射擊時，該元素便放出质子，即

氮——原子序數為7；原子量為14。

氮核的構造是：

3 氮核 + 2 質子 + 1 電子

所以原子量是 $3 \times 4 + 2 = 14$ ，故與測量所得的值相等。同樣，我們發現牠的原子序數是 $2 \times 3 + 2 - 1 = 7$ 。因此，氮原子中必有未曾結為 α 粒子的質子。由原子核及射擊的 α 粒子之間的衝突而生蛻變，此種蛻變即是從氮原子裏逃出一質子來。至此，不能不問，引起蛻變的彈丸以後情形怎樣？衝突後， α 粒子結果如何？這個問題，在數年前，也已由實驗解答了。這彈丸留存在牠所投入的核內。從氮原子上，我們得着氫，同時也得着另一元素。那時氮原子轉變成什麼元素？我們必設想一質子從氮核逃出來，一 α 粒子加進氮核裏去。結果原子的組織是：

4 氮核 + 1 質子 + 1 電子

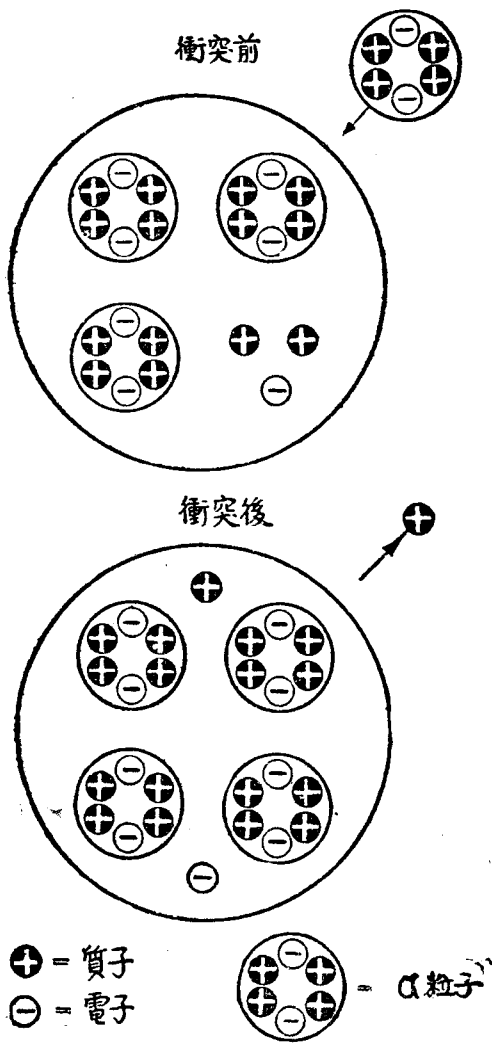
因此，所得元素的原子序數為 $4 \times 2 + 1 - 1 = 8$ 。但原子序數為 8 的元素是氧。可見目標適當的 α 彈丸將氮轉變成氫及氧。我們再檢查原子量。從此原子的組織上，我們知道牠的原子量是 $4 \times 4 + 1 = 17$ 。在門得雷業夫表中卻為 16，可是，我們用不着慌。記得在光譜的分析中，發現有氧的同位素。這個同位素發生次數比較多，牠的原子量算來是 17.1250。氧原子中有一同位素原子重為 17。這個同位素便是氮核蛻變時所產生的。下面圖一四即表示上述情形。

為分裂原子核及由物質中提取最內部的秘密起見，我們必須創造高速的彈丸，比宇宙所供給的彈丸還要迅速才行。氫、氧和碳的核以及所有比較重的元素的核，都抗拒氮彈丸實驗室裏若能給

α彈丸一更接近於光速的速度，則我們對於原子構造的知識必有長足的進步。近幾年來，依這個方向做去，已有幾種著名的結果。最近的將來必可大大的增加我們對於原子核構造的知識積累。

由質子而生核之蛻變

如果徵詢百個科學家的意見，看近二年內實驗上的發現那一種是最大的，所得答案必不一致。但若將問題變更一下，問近二年內實驗上的三大發現是什麼，則必異口同聲地說是這樣三種：(1)



圖一四 氦核及α粒子

柯克馮羅 (Cockroft) 和華爾頓 (Walton) 發現由質子而生核之蛻變。(2) 卡威克 (Chadwick) 發現中子 (neutron) 及 (e) 布拉開 (Blackett) 和俄其亞里 (Oecialini) 發現正子 (positron)。

所有這些發現都是在劍橋卡汝德實驗室中獲得的，都先見於自然雜誌的短評中。全科學界被他們震驚了。我們現在依照上述次序考查這三大發現，先說柯克馮羅和華爾頓的發現。這與人工放射性問題關係極為密切。上述刺德福實驗可用一公式表示出來：

原子核 + α 粒子彈丸 = 另一種原子的核 + 逃去的質子

刺德福實驗有二特點：(1) α 粒子是彈丸，和 (2) 從原子核逃出去的是質子。這種核的人工蛻變與自然放射性蛻變有一根本的差異。由於前者，我們只獲得質子；由於後者，只獲得 α 粒子，即氦核（不管 β 線）。柯克馮羅和華爾頓的實驗可視作刺德福實驗的補充和正面。牠的基本觀念可概括為一句：被質子射擊的原子放出氦核。因之，將上列方程式變為下式：

原子核 + 質子彈丸 = 另一種原子的核 + 逃去的 α 粒子

比較上方程式，可見牠左右兩節只是互易一下罷了。現在我們將卡汝德實驗室中這些實驗再詳細說說。

鋰，我們知道是第三個最輕的元素。牠的平均原子量是 6.94，且係由二同位素（原子量各為 6 與 7）混合而成的。其中唯一可敘述的現象只是原子量 7 的同位素。所以我們說似乎只有這一

同位素才發生問題（事實上，鋰中含同位素7比較多，含同位素6比較很少）記得鋰也是一個較輕的原素，能抗拒 α 彈丸的。用氦彈丸射擊鋰不能產生任何質子放射。似乎是 α 彈丸具有的「能」太小了，鋰核不能由牠們而生蛻變。其實完全不是這樣。如果用比較輕的彈丸，具「能」比較小，且種類不同（質子彈丸實沒有具多少能），射擊鋰，卻得着意外的新效果。

質子彈丸可由簡單的實驗室方法得來，例如藉電子衝突法剝奪氫原子裏的電子（行星），剩餘的質子在電場作用下速度增加。因此由強烈電場可以產生能較大的彈丸。這種實驗中，彈丸（質子）的「能」（雖在極強的電場下）與宇宙所供給 α 線的能比較，那就小得多。若用這些質子彈丸射擊鋰，便可以看見目標適當的射擊引起原子的蛻變。一經投中，遂生核的爆炸——二 α 粒子以高速度從鋰核逃出來。我們怎樣解釋這一蛻變呢？我們有：

鋰的同位素——原子序數3，原子量7。

於是推論鋰的同位素具有的核構造如下：

鋰核 = α 粒子 + 3 質子 + 2 電子

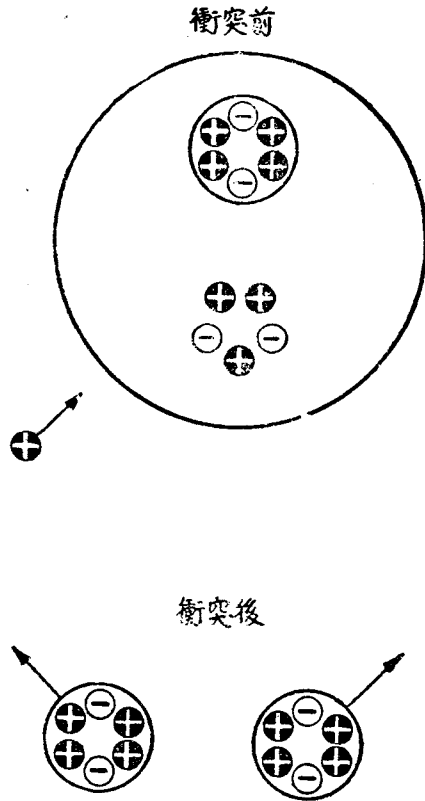
我們知道牠原子序數確是 $2 + 3 - 2 = 3$ ，原子量是 $4 + 3 = 7$ 。用質子射擊鋰，射中了的仍留存在核裏面；遂得一新原子核。新原子核的組織是什麼？一如前式，惟加多一質子——即

α 粒子 + 4 質子 + 2 電子

四質子加二電子又合成一 α 粒子。所以結果如下：

鋰核 + 1 質子 = 2 α 粒子

這便是柯克湯樂及華爾頓光榮的實驗的解釋。從一原子鋰及一氫核，我們得着二原子氦！
五即表明這個過程。



圖一五 鋰核及 α 粒子

這個現象的「能」一方面，尤其令人迷惑。二 α 粒子形成後，都具有很大的速度。人或以爲一質子彈丸的運動能應等於二逃出之氦彈丸的「能」。實際結果卻不然——結果的「能」比投入的能大了很多！我們得到氦彈丸的「能」比引起爆炸的質子所具有的「能」差不多大百倍。前面我

們論述過鋁核的蛻變，在那種情形中，逃出之質子的「能」也是比射擊之彈丸的「能」大。但所大之數很小。至於鋰的情形，牠所解放的能（原藏於物質中）卻異常之大。不過，我們知道氦核之產生伴隨着質量的縮小，因而伴隨着該系統中「能」的放射。鋰的實驗就證明了這一點。鋰的小部分質量轉變成氦核的運動能。質量縮小，所得的組織可保愈更穩固，若欲將此新組織再轉變回去成鋰，則所需的「能」必比質子彈丸所具有的「能」更大才行。而相當於此小部分質量的能卻異常之大。這一發現所展開的希望是多麼豐富！我們何須乎煤炭、石油、尼亞夏拉瀑布？每一碎片鐵、鋰或其他物質中都蘊藏着異常豐富的「能」。最近的將來，我們可以開闢路徑解放這些「能」庫麼？科學的進步可以推進我們到多末遠，我們不知道；但這時我們仍遠不能利用技術的方法解放物質中所蘊藏的「能」的寶庫。我們可以這樣說：直接擊中確如賭博大獲勝利。勝利品都付與鋰原子的「能」流中，但多少萬萬次中只勝利一次；萬萬次中一次擊中正鵠，擊中原子核，其餘彈藥都是白花了。所以，在今日，「能」的勝利品仍然是虛造的，純全是理論上的東西。

最後，得聲明一句，這種實驗也會在其他元素上舉行過。多數元素在質子彈丸的勢力下，都發生 α 線的放射。

中 子

第二個重要的發現即一九三二年内中子的發現。在論述刺德福著名的實驗——由 α 線而生

原子核的蛻變——時，我們發現鈹元素也與氦及鋰一樣，用氦核射擊時不見牠有質子的放射。但是實驗這一種元素卻發生一種有趣的新現象。如果鈹被放射質所放出之 α 彈丸射擊時，牠本身竟變成一新奇的輻射。現在我們姑且稱之為「鈹輻射」(beryllium radiation)。我們不能給以任何已知的記號；牠不是已知的微粒輻射，——牠既不是一羣質子，也不是一羣 β 或 α 粒子。牠不能算是物質的平常輻射，因為牠有非常銳利的力量。厚金屬板不能阻礙牠。另一方面，牠也不是 γ 線一類短波的電磁輻射。卡威克在刺德福實驗室中，研究這種鈹線，大膽地倡言這裏有一種新線，牠稱之為中子線。這一概念十分新穎，為時不過一年，卻已到了成熟的地步，於原子核構造問題上給與一線新曙光。

中子是什麼？氫原子中，一電子繞質子旋轉。這個太陽系的範圍是一億分之一厘米。設想電子環繞的軌道，半徑比波耳原子半徑小若干倍。這時太陽系具有的範圍即核的範圍，不呈電性。這便是中子的模型。質子與電子的關係這時比較強若干倍；欲使中子分裂（即使電子與質子分開）必比分裂氫原子費力得多。中子的質量差不多等於質子的質量。嚴格地說，牠比質子的質量差不了多少，因為中子是一穩固的組織，牠有一部分質量在牠的出現過程，已經放射出去了（這與氦的情形相同）。因此，我們就會明白為什麼物質對於中子是透明的，為什麼中子集團能透過厚金屬板了。我們認為物質是由電子與質子構成，電子與質子之間有廣闊的間隙。中子既比核與電子（行星）的平均距離小若干倍，當然不會遇什麼障礙了，金屬板在中子輻射看來，完全是多孔的。再者，核與電子的電場不

能使中子的路徑偏向，因為中子是不呈電性的。

設我們先不知道，我們且計算附帶中子放射的蛻變。

鈹——原子序數 4，原子量 9。

若假設下式，則所得之數與上列之數相合：

$$\text{鈹核} = 2\alpha\text{粒子} + 1\text{質子} + 1\text{電子}$$

$$\text{且實際也是，} 2 \times 2 + 1 - 1 = 4 \text{ 及 } 2 \times 4 + 1 = 9$$

卡威克更假定這個電子和這個質子存在於鈹核裏面，組合成一中子。則上式可改如下列的形式：

$$\text{鈹核} = 2\alpha\text{粒子} + 1\text{中子}$$

設以 α 粒子射擊鈹核（如前面所舉數例），也設想 α 彈丸留存在核裏面。中子卻從核裏跑出來。那末，我們鍊金術的方程式便如下述：

$$\text{鈹核} + 1\alpha\text{彈丸} = 3\alpha\text{粒子} + 1\text{逃去的中子}$$

由三 α 粒子構成的元素——即原子量為 12 原子序數為 6 的元素——是碳。如果我們的思想是正確的，則鈹被 α 粒子射擊時，必產生中子線及碳原子。圖一六即表明這個過程。

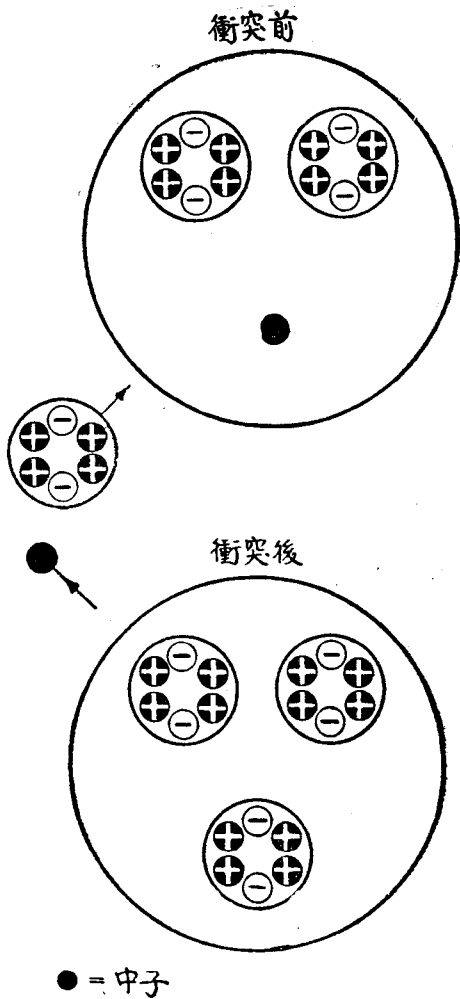
中子極近似核的一個實在成分。或者核裏面的電子常是與質子組合成中子的形式。加一中子到核裏面去，決不使元素改變。因為核荷並未發生變化。不過元素的原子量是改變了。所以我們說：如

果各元素的核只是牠們所含的中子數目不同，則這些元素都是同位素。

中子的鈹輻射在別種元素中也有。這些關係核之構造的問題預示着最近將來的實驗和新理論概念。

正 子

現在說到第三個偉大發現——即一九三三年布拉開及俄其亞里的正子 (Positron) 的發現。我們知道電子與質子是物質的實在成分，又知道牠們的電荷值相等而符號相反，並且知道質



圖一六 鈹核與 α 粒子

子質量約比電子質量大 1830 倍。但科學上最近的發展已表明了情形比這樣簡單的敘述所表示的複雜得多。

第一，我們已發現了中子，那是核的新成分，在早我們未曾知道；中子的質量差不多等於質子的質量，可是沒有電荷；牠們確為核的組成之一部，無論是加入或減去，牠們並不影響「核荷」（因為牠們是中性的），且不改變原來元素，只改成新同位素。

現在又發現物質的另一成分了！另一成分是正子。

蒸汽機在軌道上駛過，一路留下蒸汽和塵沙的痕跡。同樣，電子或質子沿威爾遜霧室 (Wilson cloud-chamber) 急行時，也留下牠所經過的痕跡。這種儀器的原理，我們從略，只說實驗物理學利用這種儀器可以攝取電子質子所經過的痕跡，可以考查這些痕跡是怎麼變化，以及在外電場勢力下是怎樣轉變的，並且從這些變化的範圍上，可以推論這些小粒子的質量和速度。

我們知道放射質是電子放射 (β 線) 及氦核放射 (α 線) 的根源。如果將威爾遜霧室放在放射物質的附近，這些粒子的痕跡便顯然可見，電子的痕跡與 α 粒子的痕跡不同。不過，放射物質的附近不必使我們「看見」這些電子或質子痕跡；這儀器可以放在任何地方，因為這些痕跡隨時隨地都有，不過在放射質附近痕跡的數量特別增多罷了。

產生這些痕跡的是什麼「能」？源能的來源是宇宙線——這種輻射透入於地球各縫隙和角

落裏，牠常常和物質衝突，便產生現象，現象的痕跡即是威爾遜霧室裏面所見到的痕跡。

這引起美安特生 (Anderson) 劍橋布拉開和俄其亞里得到一新發現，這種發現可以根本改變我們關於物質宇宙的概念。他們所發現的是：有些軌跡既不是電子的，又不是質子的，也不是 α 粒子的軌跡。牠們在一磁場中的動作，似乎牠們具有元正電荷，但質量遠不及質子的質量。換句話說，牠們的動作好像是質量等於電子質量的元正電荷。這些為以往所不知道的新物質成分，特稱為陽電子 (positive electron) 或正子。(以後還要說到正子的發現不完全是意外的，因為正子的存在，以往在理論上已預言過。)

所以，我們物質世界中存在着：

元負電荷

電子

元正電荷，質量同上

正子

元正電荷，大 1850 倍

質子

無電荷，物質小粒子，質量與質子相若

中子

這個物質世界的圖畫能不能稍為簡約一下呢？可不可以假定質子只是由中子與正子合成的呢？是否還有一種負電荷，其質量等於質子的質量呢？這些都是科學上目前的新問題。

懷疑家現在又要非難我們了，我們在前面說電子與質子是我們「物質宇宙」僅有的二元素，

現在電子與質子之外又有正子與中子了。那末，在前根據「只有電子與質子存在」的假定，所論述的一切還對不對呢？

人們突然碰着一個辣手的問題時，往往是改換題目以圖規避牠。我們現在也想這樣辦，所以下章討論別種問題。

第五章 物質與輻射

支配物質與輻射間交互作用的根本定律是什麼？本章的目的便是要解答這個問題，且藉以補充前述圖畫所遺留的主要空白部分。

X 總

我們再回到原子的模型上去，模型的組織係一重核，及輕電子繞之而轉。例如鈉原子（原子序數為11），牠有十一個行星繞着牠的核旋轉。其中二個形成最內的環，即K環；八個組成原子構造的第二層，即L環；第十一個電子則單獨在原子的郊外繞行，形成M環的第一段構造。圖一七即表示鈉原子的構造。但須記住，圖很簡單，實際構造卻很複雜，並且該圖也未計尺寸。鈉元素中，K層和L層的構造是完全的；周期表中比較更重的元素，原子構造更複雜，層數更多，有的M層及N層都完成了，還有更外層的初段構造。這些環形成一系列，各標以字母：

K, L, M, N, O, P, Q,

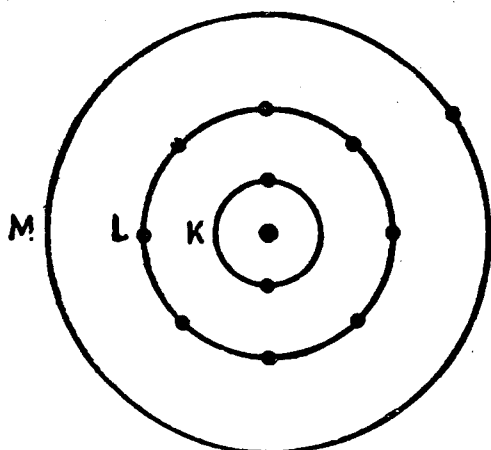
這些環組成原子的各部分構造。氦只有K，鈉有K和L還有M的初段構造；更重的元素，層數更多。

關於原子構造，我們曾注意到流浪於郊外而創始更外部分構造的電子。流浪於郊外的電子，從

牠們的正常軌道升到較高的能水準或能位，隨後再降到較低的軌道上去，遂成光譜中可見部分、紅外部和紫外部各種輻射的泉源。前面說過，光譜是由原子的最外層來決定，元素的物理性、化學性大部分也是由原子的最外層來決定；我們又說過，門得雷業夫表中同一縱行的元素構造之相似，是由於牠們原子的外部構造相似的緣故。這種原子外形決定元素這樣多共通的物理性質，實在覺得奇怪。

我們又知道原子最內部分——即核本身——所發生的現象。這些現象即是由自然或人工使元素脫變所產生的放射現象。

現在我們說到第一個主要空白部分。我們知道有些現象是依賴原子的外部構造的，有些現象是依賴原子核的構造的；但什麼現象是關於原子構造中已經完成的部分的呢——即內部電子環，如鈉的K環和L環？有沒有現象是依賴這些環的麼？待一會我們會知道，X線報告關於最後完成的原子環的消息，正如光波帶來原子外部的消息一樣。



圖一七 鈉原子分立模型

在介紹關於X線如何發生如何放射的理論之前，我們先敘述是項理論所解釋的現象。X線的存在是大家所深知的。知道牠們能影響照相片，牠們能透過輕物體及薄金屬板。我們看見手掌骨骼的照像時，再也不會詫異，因為我們已知道這種線在醫學中所負的任務。所以關於X線的存在，這兒用不着深說，我們也不用敘述X線管的詳細情形，或關於研究X線的種種實驗；我們專門論述這些現象的重要方面，——支配這些現象的定律方面。

在一X線管中，一羣高速的電子射到一金屬板上（例如銅板）。金屬板——通常稱為對陰極（anticathode）受了這種猛烈的攻擊，遂成為新輻射（即X線）的泉源。這就是X線儀器的簡單原理（儀器的詳細構造是很複雜的）。從對陰極射出的X線，本性如何是物質（電子或質子）的運動嗎，還是表現繞射效果的波動（以一定的速度傳播，且有一定的波長）。在前世紀末，維琴發現這種線之後，馬上就發生這些疑問。這裏不用詳細解釋這些疑問的答案是怎樣得到的。只說已得的答案又明白又確定就夠了！X線本性上是電磁波（好似光波），牠們與可見光線的不同處只在於牠們的波長比較短，以致透過力比較大罷了。這些波的速度恰與光速相同。

對陰極被一羣高速電子攻擊時，就成為X線之源——波動輻射之源。可不可以像檢查光波一樣，檢查X線，用分光計使各種波長的輻射彼此分離，將輻射分為許多單一的成分，因而得着X線光譜，如得白光的光譜或氫光譜一樣呢？以後就可看到分析很短的波如X線的光譜不如分析（用三

稜鏡)可見光線的波那樣容易。現在只須說構造上的疑難已經克服了，X線光譜分析為最簡單的成分也辦到了。這種光譜的波比可見光線的波短得很多，故不能用眼睛直接看見，但可由牠們加於照相片上的作用證明出來。

這樣得來的光譜是連續光譜(continuous spectrum)還是明線光譜(line spectrum)呢？我們研究可見光譜時，已經知道光譜有二種，一為連續光譜，一為明線光譜。太陽光譜我們知道是連續的，因為牠包含一切顏色，反之，稀淡的氫、氦或其他氣體的原子的光譜卻是明線光譜，因為牠是由相當於各種波長的狹條明線組成的。至於X線，則兼有兩種光譜——連續的及明線的。試看X線的明線光譜；牠們的構造非常簡單而且清楚。

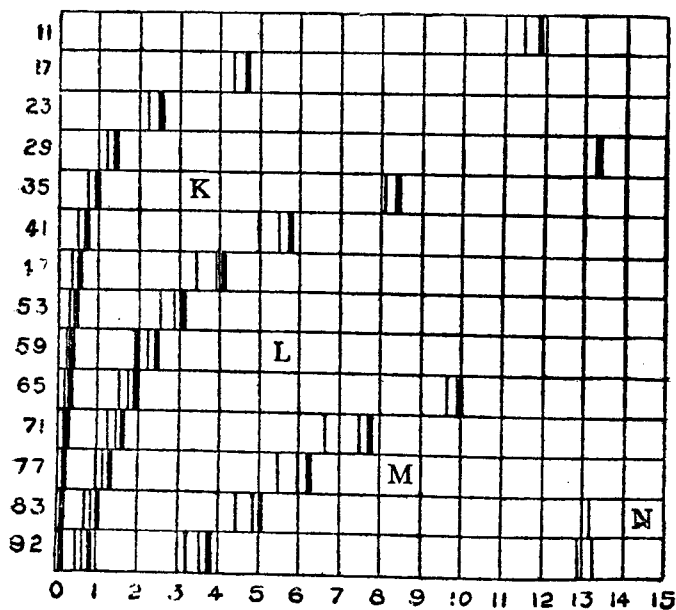
由對陰極射出的輻射，可以看出有幾羣，可標以K, L, M, N……等字。每羣各由一系列密切相連的明線組成。(我們以後就會知道，這些光譜羣所用文字與原子環所用文字相同不是偶然的。)

其次，假設對陰極所用的物質改換了。例如對陰極上用銀板而不用銅板，則見X線光譜的示性(characteristic)各羣完全與前相同，只是所有明線都向較短的波一方面移動。

可見光譜的性質根本隨元素而不同。明線的構造一般都很複雜，牠們的系列分類費了許多科學家的勞力。只有門得雷業夫表中同一縱行的元素，光譜才相似。但各元素的線光譜問題卻比較簡單得多。所有元素的X線光譜都相似，唯一不同之點則在愈重的元素光譜愈向短波方面移動。X線

光譜的研究僅始於一九一三年，而我們關於X線光譜方面的知識卻比較關於研究較久的可見光方面為多。X線光譜的知識進步這樣快，差不多全都知道了，這不僅由於牠們構造的簡單，也由於波耳理論是新事實（由實驗上得到的）的指路碑。

請看看圖一八。縱軸上記着各種元素的原子序數。最先的和最輕的一個是鈉（原子序數為11），最末的和最重的一個是鈾（原子序數為88）；當間是鈉與鈾之間的一部分元素的原子序數。試查原子序數28的元素（銅）。這元素的橫行中有二羣線，K及L。從圖上，可以大概計算相當於這些線的波長的值，因為橫軸上記各線的波長，以埃計算。例如原子序數28的K羣波長差不多是1.5埃，L羣的線在1.5埃及1.4埃之間。L羣



圖一八 各種元素的X線光譜

相當的波長比K羣相當的爲長，所以比較弱。圖中次於銅的元素是溴（原子序數爲81），也有K，L二羣線，但都向左移，向較短的波一方面移動了；即向較硬的輻射方面移動了。逐漸檢查下去，則見這些線都取同一方向。最重的元素K羣L羣之外，更有M羣N羣，牠們相當的波更長，且見元素愈重，M羣的線也愈向較短的波方面推移。

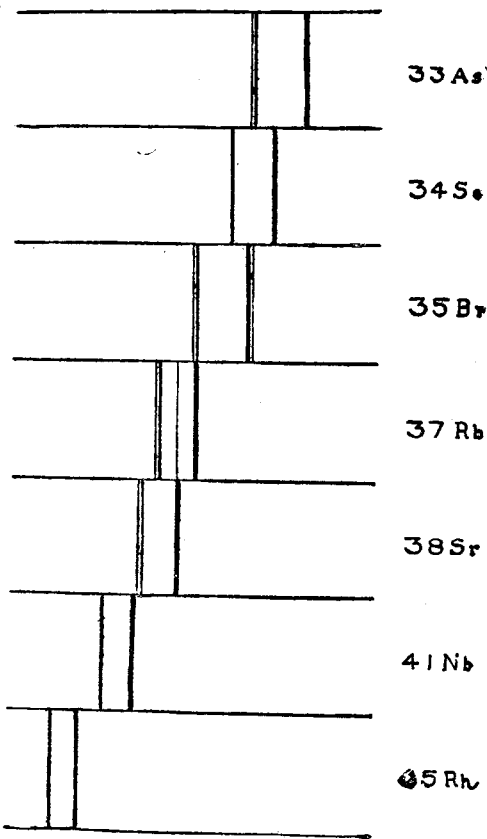
試分出K羣來看，差不多所有元素都有K羣。這一羣可以說明摩茲力（Moseley，死於大戰的英國青年科學家）實驗所得的結果。圖一九是幾種元素的X系列的放大圖。

圖右有元素的原子序數及其符號。從原子量較小的元素看到較大的元素，牠們的線顯然是向較短的波方面推移的。摩茲力研究幾種元素的X線光譜，發現由任何元素到其次一元素，K羣彷彿向較短的波方面推移一步，他更推算這一步的長度。如圖一九，從元素82到84爲一步，82到81又爲一步。從85到87是雙步，推移比較大。但若不知道這裏遺漏了一個元素（86），一見X線光譜即知推移比較大，似乎是兩步合成的。

據此，可以得着什麼結論呢？

設我們復行想到門得雷業夫表中元素的排列。這種排列分爲二個階段：（1）依照原子量而排列元素（有四個例外）；（2）再將排好了的元素寫成適當的行列。先看第一階段。這種排列的標準是什麼？不能以原子量爲標準，因爲表中有四處不合乎原子量昇序的規律。前面第三章說排列的標

準是「核荷」。但是，這個答案也不能十分認為滿意。怎樣決定「核荷」該章未曾敘述出來，因為所提問題不同。元素已經排列好了，在早給每種核一種荷相當於牠的原子序數。一直到摩茲力定律，才發現排列元素的根本標準。如果元素排列以其K羣線向較短波推移的長短為標準，則所得排列恰是門得雷業夫表中所見的排列。這種元素排列法是絕對正確的，且沒有一個不合這條規律的。再者，我們知道原子量是一種偶然的性質，顯露元素的原子序數的，卻是X線光譜。更由這種排列法，我們可以精密確定那一種元素當為現在所不知道的。例如，原子序數 ∞ 緊後面一個元素，牠的光譜向較



圖一九 各種元素的X線光譜K系列

短的波方面推移了兩步，那末牠的序數應爲 ∞_2 ，而非 ∞_1 。序數 ∞_2 應留給現在尚未發現的那個元素。所以分析 X 線光譜後不但精密地建立了元素的適當序數，沒有例外，且表明了門得雷業夫表中那裏應空起來，留待未經發現的元素去補充。後來科學進步，確已填補許多元素進去了。於是我們說：

X 線光譜供給元素一種次序，方法精密，應用起來沒有例外。

門得雷業夫表構成的第二階段，便是將依序寫好的元素排成適當的行列。我們已經見到同一縱行內的元素，光譜的可見部分有一定的相似。這種光譜與光譜的相似可不可以爲門得雷業夫表中排列元素的標準？例如氫（原子序數 1）、鋰（原子序數 3）及鈉（原子序數 11）有相似的可見光譜，因爲這三種元素中原子的外部構造是相似的——都只有一個電子行星。事實上原子的外部構造已經發現是決定可見光譜性質的因子。X 線光譜是否也可爲決定該周期表中元素線羣的因子呢？顯然，這個問題的答案必是否定的。因爲 X 線光譜中找不出門得雷業夫表中那種周期性的痕跡。從一元素到次一元素不過將 K 羣或 L 羣或 M 羣向較短波方面推移一步。元素的縱行上，在這方面沒有任何類似處，因此可以推想 X 線光譜的構成關係於原子的內部構造，不關係於原子的外部構造。原子外部的相似與原子 X 線光譜的相似無關。真的，X 線光譜將一切元素排成一完整的次序，同時卻消滅了周期性的特徵。如果只知道元素的 X 線光譜，即使能十分精密地決定適當的原子序數，也不會製出門得雷業夫的表來。

關於X線光譜線的根本事實現在已經確立了。這些事實是K, L, M和N羣的發現,以及從較低原子序數至較高原子序數的過程中,這些線羣向較短波方面推移。

X線光譜的解釋是什麼,牠們是怎樣發生的呢?

以下所用的推理法與第三章中所採用的相同。

X線的構成,第一步是要預備對陰極的原子放射出去。在論述可見部分時,這種預備是將流浪於原子郊外的電子從正常軌道提升到較高的軌道去,或使牠完全脫離原子。在目前的情形,預備原子放出X線的電子彈丸,必須有一更高的速度,換句話說,必須有一更大的「能」可以說原子有一堡壘——即核,核的周圍是電子環,彷彿是牠的城牆。外牆——原子的外部——是不完善的。低速的彈丸不能接近內牆,但可將電子從未完成的環送到較高的樓去,於是只激起放出可見部分的輻射。但若對陰極被很快的彈丸射擊,則有些目標適當的射擊會透入內牆裏面去。設取一種較重的元素,牠原子中K, L, M環都已完全, N環也已開始構造。N環上的電子,有一個升到較高的軌道時,原子便放出可見線,比較快的電子彈丸射擊對陰極,結果也是使電子脫離K或L或M環。假定彈丸的速度異常之高,能透入最內的K環裏去。那末, K環上的電子行星就會被驅逐一個出來。以後情形怎樣? L環或M環中電子足數,構造完全,沒有餘地。但是N環中有空地。

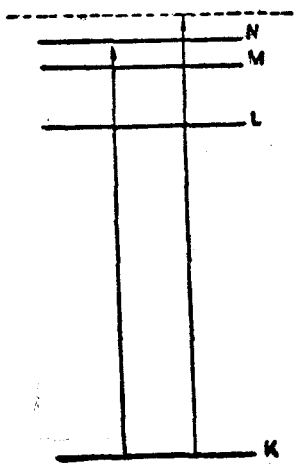
所以目標適當速度足夠的電子彈丸會將K環中的電子行星趕出來,趕到N環中去,甚或趕出

原子外面去。因此，內環原來是完全的，現在卻有空地了。圖二〇中各能位（能水準）相當於各種環。欲使電子從K環投入N環，甚或投出原子勢力範圍以外去，不能不費許多「工」(work)。這種「工」的量即各能位之差，如圖二〇中箭矢所示。將電子從K位提升到N位所費之「工」，比較提升到極限位所費之「工」小些。作這種工作的電子彈丸失掉牠自己的「能」，同時增加了原子的「能」。故原子預備放出X線。

設想一城市住宅供給不敷。最難找最昂貴的房屋是在城市的中心區。為應需要起見，在郊外也建築房屋。每一郊外的房屋騰出一比較近中心的房子，馬上就有人爭着佔那所房子。

原子的情形也是這樣。K環中一有空地立刻

又被佔據了。電子從較高的位跳回K環，填補頭先發生的空隙。對陰極聚着無數原子。這些原子的K環中的空地常被填充，但有種種方法；有些原子，其中空地是從最近的環（L環）上跳一電子下來填充，有些原子，又是由較遠的環跳來的電子填充。這是過程第二階段——放射階段。當電子從較遠的環上跳到K環中來時，原子便失掉「能」。跳躍前最初狀態的「能」，與跳躍後最後狀態的「能」，二者之差依光子形式放射出來。光子具有的「能」比較富豐，相當於一種短波——實即相當於X



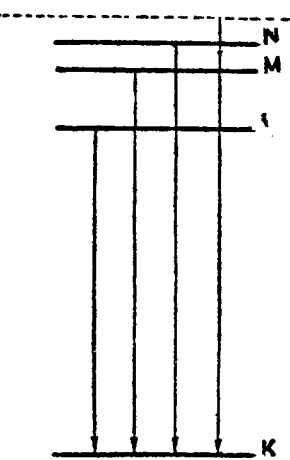
圖二〇
原子動發 X 線 K 系列的放射圖

線波。這種放射的過程如圖二一所示。矢示的長短相當於放出的光子所具有的「能」。注意，這裏情形與氫原子的來曼系列之構成相似。顯然地，K羣不止一條線，是許多條線，相當於各種可能的出發點，但直射着唯一的目標——K環。

L系列的表現可用同樣方法解釋。假定電子彈丸速度比較小，可達到L環，但不能衝破K環。我們可以繪出此電子彈丸對於原子所作的「工」與前圖相似，並且立刻可以看出這「工作」比較小，電子彈丸的「能」將電子從L位趕到較高的位去。原子就預備放射L羣線（見下頁圖二二）。這種羣線的放射相當於電子到L位的跳躍。（注意，這時與巴爾馬系列相似。）顯然電子彈丸的速度足以勵發

K羣線的放射，同時也會產生L羣線的放射，因為電子既由L樓跳到K樓，則自己原有的地方就空下了，M環或N環上的電子常企圖接近核，這時馬上就跳下來補缺。所以產生L羣線。因之，L羣的放射沒有K羣的放射（即電子彈丸太慢時）也可產生，但K羣的放射性則常附有L羣或更遠羣的放射。

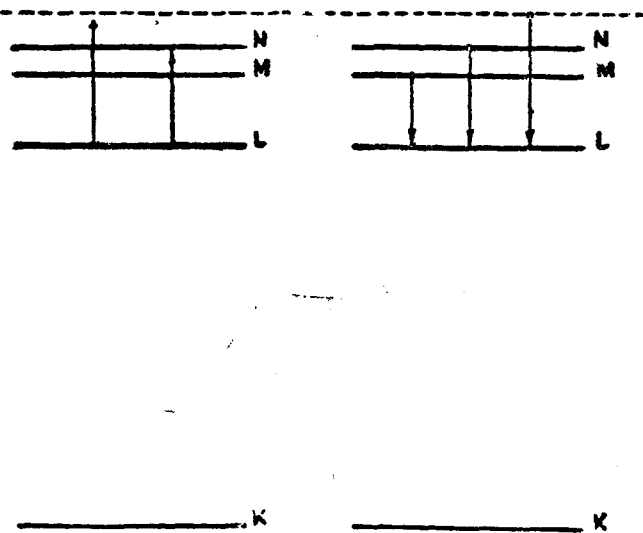
上面所述X線放射的概略，也可以解釋明線的推移，從較輕的原子到較重的原子，明線是向較



圖二一 K 系列的放射

短的波方面推移的。元素的原子序數愈高，原子核的電荷愈大，行星式的電子與原子核聯絡也愈強，結果各該能位間之差愈大——放射出來的光子所具有的「能」故愈大。再者，我們知道光子的「能」一提高則波縮短。

我們說的只是X線放射作用的大概情形。實際上，L羣的組織比較複雜，牠的明線數目比概略中所能說的還要多。我們研究波耳底簡單的原子模型，在論述第一、第二、第三等位（此地，重元素的原子中，也恰有K, L, M等環的能位）時，曾發生同樣情形。經相對論的修改，且計算質量的變化後，我們使原有簡單的氫原子模型繁複起來，同時發現氫光譜線明晰構造的解釋。第二位分析為緊密相連的二能位，第三位分析為三、餘類推。這裏也是一



圖二二 原子勵發X線L系列的放射圖

樣。在早假定每環相當一個能位，問題就異常簡單。比較合乎實驗結果的實際圖畫卻比圖二一及圖

二二所示複雜得多；L, M, N位各可分成許多位。結果，X線的明線構造顯然比較複雜。起初的位加多了，最後的位也加多了，所以相當於各種跳躍的明線也就相當加多。

上述梗概具有平常理論發展過程中的要素。我們常在使理論變為複雜，以圖使理論適合宇宙間繁複的現象，比較精密的理論於是涉及研究的新領域，保持科學的利益。

前面已經說過X線輻射中有明線光譜，也有連續光譜。我們所論述的只是牠的明線光譜。這種光譜視對陰極的元素而定。每種元素各有一示性線光譜，各各不同，線光譜的一般性質在一切元素卻是相同的。但是連續光譜不是這樣，這提出的問題又是一種；牠不依賴對陰極的本性，只依賴電子彈丸的「能」。我們怎樣解釋這種光譜，這種光譜又是怎樣發生的呢？牠們之發生不是因為擊中目標的射擊將電子從內環驅逐出來；牠們卻發生於為對陰極的物質所阻滯的電子彈丸本身中。這些電子彈丸的「能」一部分變成熱，一部分即變成X線輻射。如果這種大概的敘述是正確的，我們根據牠可以得着一定的結論。試思電子彈丸的運動能全部變為射出的光子；當時光子具有最大的（可能的）「能」，相當的波長也就最短。於是可以說連續的X線光譜中輻射光子的「能」不克大過電子彈丸的「能」。也就是說連續的X線光譜在短波方面應有一定的極限。這個波長極限即是「光子能」等於電子彈丸的「能」時的波長。連續光譜從這個極限起向較長的波方面擴張，也只可向那方面擴張。光子的「能」等於或小於電子彈丸的「能」（電子彈丸剩餘的「能」變成熱）。

這種現象似乎是光電效應的「反面」。因為光電效應是光子彈丸的「能」轉變成電子彈丸的「能」，這裏現象恰恰顛倒過來。

光譜中明顯的極限之存在，已經實驗證明了。理論與實驗之間量的符合，也已證明了連續光譜中極限波長的「光子能」等於電子彈丸的「能」。這些已得實驗完全證明了的結論，也和光電效應的情形一樣，根據波動說，是不能了解的。在這些現象中，X線輻射顯露牠微粒的特徵。

我們既將X線的連續光譜及明線光譜問題簡略的介紹了。剩下的問題便是如何決定X線光譜的波長，我們現在就來討論這個問題。

可見光譜的波長是怎樣決定的呢？記得繞射現象能決定波長。當光所經過的小孔或障礙物異常小時，便發生繞射現象（由光波不走直路而生）。前面圖一即表示光波經過很小的長方孔後的繞射現象；原有方向中的光線（顯出小孔的輪廓）之後，有許多繞射的光線，明暗相間的細條，逐漸歸於黑暗。從這些明暗相間的距離上，便可以大概地計算波長。這種測量和計算是不大正確的，多半是屬於性質的研究。不過現代實驗的技術對於測量光波的長度上，已有極精確的方法了。假定我們不如圖一所示只有一個小孔，我們有無數個長而很狹的小長方孔，牠們彼此靠得很近，比如說彼此只距離百分之一毫米遠；牠們會獻出一個很清楚的繞射樣本，且可藉以正確地測量波長。從一個小孔到緊密相連的一組小孔，繞射樣本是依次變化的。中央有一狹條光，相當於直射線（non-diffracted

rays) 恰如圖一，但無明暗相間的細條，只見黑暗背景上有一條一條的光，（這種光假定爲單光。）圖二三是繞射樣本的略圖。中央是直射線，兩邊是繞射線，每邊只舉出二條。當波長較大的單光繞射時，繞射也增大；繞射線比較張開，牠們相互間的距離也加大了。從這種繞射的結果上——換句話說，從光條間的距離上——可以計算波長。但如照及這一系列小孔的光是白光不是單光，則繞射線中相當於各種顏色的波長便是分開的。遂得一具有一切顏色的光譜，開始是紫色，繞射最小，最末是紅色，繞射最大。由此，我們不但能計算波長，且能分析光的成分，和利用三稜鏡一樣。

實驗室中的技術已能十分精密地將許多小孔互相緊接的排成一列，這種排列特名繞射格子 (diffraction grating)。這種繞射格子也能在 X 線方面產生繞射現象麼？

X 線的波長比較可見線的波長小得無可比擬。欲得牠的繞射現象，不得不製造比較可見線方面所需要的還小而且密的小孔。現在實驗室中，還未曾發現能產生這種繞射格子，孔小而且密，適於 X 線。那末，又怎樣測量 X 線的波長呢？德科學家勞厄 (M. von Laue) 在一九一二年提出一美妙的意見，解決了這個難題。實驗室中失敗了，自然本身卻幫助了我們。自然已有一種精美的繞射格子，其精密正確是實驗室中所未能辦到的。結晶體中

圖 二 三 經過繞射格子的單光之繞射

原子的排列，非常整齊，彼此距離很小。圖二四表示一結晶體構造很簡單的模型。這裏不是極小的孔，卻是元素的原子所形成的很小的障礙物，那些障礙物排列很有秩序，而且互相緊接，恰如繞射格子的小孔。牠們彼此間的距離非常之小，可望能顯出很短的波——X線——的繞射效果。實驗上已表示利用結晶體中排列整齊的障礙物，確能繞射X線波。德國勞厄、英國布刺格 (Braggs) 及他們以後的人促進這種結晶格子的理論和應用，且根據他們所得的繞射樣子，終於達到關於X線波長的結論。

假定X線照一結晶體，透過後，現在照相片上。照相片上遂顯出繞射樣本。關於研究X線光譜，曾經用過許多方法，但我們不想介紹牠們，只在卷首印出由各方法而得的幾種繞射樣本的像。牠們的中央是一直射線，周圍是繞射線，即圖中所示的斑點或圓圈。根據這種像，可以計算X線光譜的波長。

自從勞厄發現測量X線波長的方法以來，X線光譜的分析進步很快，並且不但關於X線光譜的知識已獲得不少，反之，結晶體的構造問題也因此而分外清楚。

γ
線

我們現在說到比X線更硬的輻射問題——γ線 (gamma rays)。這種線在本書第二章已經

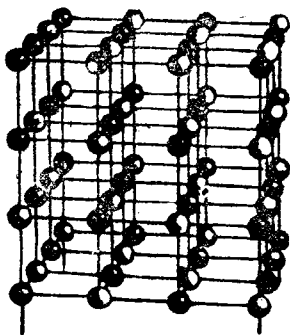


圖 二 四
普通鹽類結晶體的模型

介紹過，當時檢查光譜中各段，起初是最短的波即 γ 線，最末是最長的電磁波。 γ 輻射見於放射現象中。放射現象中，元素的蛻變不但放射 β 線（即很快的電子從原子核裏面逃出來）及 α 線（即氦核的放射），並且有很短的波的輻射—— γ 輻射。

這種輻射至今尚不如 X 線知道得那樣完全。用於 X 線的觀察法不能用以觀察 γ 線。就 γ 線言，結晶格子裏面的障礙物還太大了，牠們彼此的距離也太遠了，所以結晶格子不適用，正如平常實驗室裏製造的繞射格子不適用於 X 線一樣。波長比較大的 γ 線，結晶格子雖確可顯出可量的繞射效果，但就一般說， γ 線的波長只能用間接的方法測量，這種間接測量法我們不想敘述。

放射性元素在蛻變的過程中，是 γ 輻射的泉源。假定放射性元素 A 放出 β 線，又放出 γ 線，假定 A 元素因此而變成 B 元素（在門得雷業夫表中，向 A 元素右邊推移一步）。這些線是怎樣產生的呢？牠們不能由原子郊外的電子產出，因為郊外的電子是產生可見輻射的；牠們也不能由原子環上的電子產出，因為環上的電子是 X 線的泉源。因為 γ 線是伴放射性蛻變而生的，於是推斷牠的泉源是原子核。

γ 線沒有連續光譜，只有明線光譜，比較 X 線輻射更向短波方面推移，而且比較 X 線更銳利。

那末問題發生了： γ 線之放射是由於 A 元素，還是由於 B 元素呢？換句話說， β 和 γ 的放射是依什麼次序？電子放射在先， γ 輻射在後嗎，還是 γ 輻射在先，電子放射在後呢？一切困難和複雜的實驗，

結果都是表明 γ 線之放射是由於已經放射性蛻變的 B 元素本身。 γ 線光譜相當於 A 元素到 B 元素的蛻變，且牠的泉源是 B 元素。

我們怎樣想像這些發生於核中的 γ 線放射呢？核的構造是極複雜的；包含許多電子和質子，一部分集中成 α 粒子 (${}^4_2\text{He}$ 或 ${}^4_2\text{He}^{2+}$)，一部分又構成中子 (${}^1_0\text{n}$ 或 ${}^1_0\text{n}^0$)。我們至今還未完全談到原子核是怎樣由這些成分構成的。 γ 線和一定波長的明線之存在，以及實驗上決定這些波長的種種測量，都表現出原子核是一複雜的構造，科學至今正求了解牠。

我們且將用以解釋原子太陽系構造的概念應用在核的本身。假設核中有各種可能的能位；其次，看前面所舉 A, B 二元素的例子，假定 β 線放射（由於 A 元素）時，B 元素的核也發生興奮狀態，於是升到較高的能位去。從較高位降到較低位甚或降到正常位去，光子放射與 γ 線放射隨之而生。 β 線或 α 線之放射，在這裏相當於原子太陽系情形中電子彈丸的衝突。B 元素的原子核發生興奮狀態，降到較低的能位去， γ 線放射隨之而生。

這裏又發現了我們曾經再三注意的特徵。理論逐漸發展，也就逐漸複雜。簡單地假定一重原子核含有一定的電子和質子，是不大適用了。我們得進而注意物質的根本問題：原子核是怎樣組成的？我們對此發生的第一種理想，便是想把物理學上關於原子本身的理想應用在原子的最內部分上——即原子核。對於原子核，我們不也可以構造一種系統，也有種種量子軌道，確定的能位，從某一量

子軌道到其他軌道的跳躍，以及在跳躍時隨光子放射而生的 γ 輻射麼？現在已經知道前述關於電子行星的軌道和運動的種種概念，不能適當地應用在原子核上。支配原子核構造的定律現在方開始認識和了解。似乎有種新理論概念在最近的將來可以闡明原子核的構造問題。

其次，我們應論述比較 γ 線更硬的輻射——宇宙輻射 (cosmic radiation)。宇宙線在前面也已提過多次。這種線確是目前物理學上一個重大問題。這裏不想敘述關於宇宙輻射的現象；因為目前正在熱烈討論牠們。宇宙線的波長是很短的麼，比較 γ 線更短更銳利麼，這種輻射是微粒麼——一羣很快的粒子（是電子，依最近的見解說或許是中子或質子）具有的速度差不多與光速一樣大麼？我們必須等候這些問題討論的結果和科學的判決，無疑地不久就會明白的。

康登效應

設有一支光射在一種物質上。一部分光被吸收了，一部分光透過該物質，剩餘的光一部分反射回來，一部分分散了。完全透明的或完全反光的物體並不存在；牠們不過是虛構的東西罷了。當光波經過極其透明的一層氣體時，總有多少是分散了。光波經過氣體，亂反射（波之四向分散）常伴之而生。所謂物體是「透明的」意思是說這種分散的「能」只是投射波 (incident wave) 的「能」之較小部分。

舊物理學怎樣想像光之分散效應？單波 (homogeneous wave) 射在氣體或液體粒子羣上，有一

定的律動 (rhythm) 牠的律動影響粒子羣，粒子羣遂照樣振動起來，且單波所透過的粒子，各個本身也變成同樣律動的根源。原有的波惹起微弱的波四向傳播，而這些微弱波的根源即是該氣體或液體的各個粒子。但是投射波的律動是無論如何不變的，並且（照舊物理學說）散光的波長是和投射光的波長相同的。

蔚藍色的天空不知感動了多少詩人！從來，天空的碧色令人充滿了驚奇，都想用文字或顏色來表示牠的美麗。人若見到雷勒 (Lord Rayleigh) 的工作以及雷勒對於天空之所以為碧色的理解，一定會充滿了同樣驚奇的情緒。

極稀薄氣體的粒子也能分散可見的光，不過波長愈短，分散愈亂。從太陽發來的光波不得不經過濃厚的大氣層。牠們的「能」一小部分是分散了。但這種分散是不相等的。紅光很難分散。波愈短，分散愈大，所以極大的分散（指可見波的分散）是紫線的分散。天空不是白色，就因為大氣分散各種顏色各不相等；牠的碧色近於光譜的紫色一端。

這樣解釋天空的碧色，早見於量子論產生以前。分散現象波長不變，是由舊物理學推演出來的，合乎輻射波動說。但也可用微粒說的術語來表示這個結論，我們說：一羣光子彈丸與物質衝突時，一部分四向分散了，但分散後，仍然是同樣的光子，牠們的「能」（也就是牠們的波長）絲毫沒有改變。再回轉去看一看光電效應，根據波動說不能理解這種現象，但微粒說能解釋牠。據微粒說解釋：

一光子彈丸射在金屬板上，使一電子從板上脫離出來，光子的「能」轉變成逃出來的電子的「運動能」。

於是我們有了兩種現象：

(1) 分散現象

(2) 光電效應

似乎第一種現象顯出光的波動性質，第二種卻顯出光的微粒性質。

現在先舉一個例子來說，我們以下的理論才會比較更明顯一點。設想英國有一種價值 $1\frac{1}{2}$ 便士的錢幣，且如將這種錢幣投入郵票自動機裏面去；我們遂得一種 $1\frac{1}{2}$ 便士的郵票。那便是我們的光電效應。光子彈丸（ $\frac{1}{2}$ 便士的錢幣）逐出同樣「運動能」的電子（郵票）來。如果自動機裏面是空的，那就還出錢幣來。那便是我們的分散效應。光子彈丸（ $1\frac{1}{2}$ 便士的錢幣）改變牠的方向且保留牠自己原有的「能」。

我們也可以想像種種自動機，比如投入這種錢幣，得着 1 便士的郵票及 $\frac{1}{2}$ 便士的餘數。物理學上也有類似於此的麼？如果有，必然是介於分散效應與光電效應之間的效應。牠必視「光子能」如何變法而定，因為「光子能」有一部分變成電子的運動能，剩餘的則合併於其能較小的光子中去了。這種效應是一九二三年美物理學家康登（A. H. Compton）發現的，依他的名，特稱之為康登效

應 (Compton effect)

假定一強硬的單支 X 線——例如，由一較重物質（如鉬）的對陰極發出來 K 羣輻射——分離出來射在較輕的物質（如碳、石蠟或紙）上。隨而發生的便是分散現象；原有一定方向射來的單線，現在卻四向分散了。我們要檢查這種分散輻射的波長，但在用實驗證明之前，我們想先介紹波動說和微粒說雙方對於這種效應的辯論。

擁護波動說者會覺得 X 線的分散現象與光線的分散現象沒有差別。兩種情形中，他只覺得由投射線所影響的一種律動。物質的粒子依次將同樣的律動分給分散線。所以散光的波長恰等於投射線的波長。

擁護微粒說者說法卻不相同。物質與輻射間的作用與反作用全視光子及電子間的衝突如何而定。假定分散的物質是碳。這種比較輕的物質（原子序數小）在牠的郊外的電子與原子核的聯絡十分鬆懈。所以欲使郊外的電子脫離原子核（使原子離化）所需工作比較小。即使不計電子的束縛，假定郊外流浪的電子是自由的，也沒有多大錯誤，不過這樣的假定只有在硬 X 線中纔得證明，因為這些光子具「能」頗富，我們可以不必計算碳的郊外電子的（鬆懈的）束縛。投射線愈硬，錯誤愈少；故在 γ 線方面，這個假定更易證明。由此，假定一光子彈丸（具有既定的「能」與一自由電子衝突，且以舊力學的觀點考查這種衝突。這彷彿是二球的衝突，一球（光子）具有很高的速度，另

一球（電子）是靜止的。衝突作用發生二球間「能」的交換；具有高速的球失掉一部分「能」，卻是被原來靜止的球獲得了；二球的「能」總計起來依然不變。衝突後光子具有的「能」比較薄弱；在另一方面，電子的速度卻增加了。如果這種想像是真的，則分散輻射是由「能」比較薄弱的光子組成的，或（用波動說的術語說）是由較大的波長組成的。分散的物質因而變更為修改輻射，使輻射向較長的波方面推移；使 λ 線變為軟弱。這類似於上述郵票自動機，原來是1½便士的錢幣（投射光子）退出1便士的郵票（電子的「能」）及½便士餘數（代表散光）。

實驗上判決這個問題是贊成微粒說，還是反對微粒說呢？在進行解答之前，我們不僅在性質方面考查這個問題。量子論的假設使我們可以預測光子與電子間衝突的結果。例如假定一支 λ 線依一定方向射來，且四向分散出去，同時牠的波長增加，我們對此可以預測牠近似的結果。波長的改變視分散線而定。如果分散線的方向看來與投射線成垂直，則波長怎樣改變呢？如果分散線與投射線所夾之角是 90° ，則波長增大多少呢？理論上提出的答案如下：

$$\text{波長的增加} = \frac{\text{蒲朗克常數}}{\text{電子質量} \times \text{光速}}$$

上列公式包含表示電子特徵（電子質量）的量及表示光子特徵的量，不足奇怪。同樣，式中蒲朗克常數也不足怪，因為那是「光子能」與波長間的根本關係。這個公式的各個數值在前面都已

介紹過了。計算起來可得下列結果：

波長的增加 = 0.0243 埃

實驗證實這個結論。分散波比較不硬，與投射線方向成垂直的波長，改變完全與理論的預言相符。故在康登效應中，輻射似乎顯出微粒性質。根據波動說，卻不能了解或說明這種效應。

但是下列幾點必須注意：我們已經知道波長的增加不視投射線之較軟或較硬而定。與投射線方向成垂直時，波長的增加恆為 0.0243 埃。在可見光譜中也應發生這樣的變動。這種說法雖似與實驗不合，顯然的矛盾卻容易解釋。我們理論所根據的假定並不適用於具能極小的光子上——即可見光譜範圍內的光子上。於是此項衝突問題可用另一形式表示。設想一橡皮球從固定的牆上反跳回來。皮球運動的方向改變了，可是牠原有的能保持未變，可見光譜的情形與此相似：具能極小的光子與比較緊結的電子衝突後，也反跳回來，雖說改變牠運動的方向，卻保留了牠原有的能和波長，正和舊物理學所引人希望的結果相合。

上述理由又可以解釋另一種實驗效應。此效應與康登線並行，向較長的波方面推移，相當於原有的波長，正與前同。這是由於光子與重核（重核相當於上述比喻中固定的牆）衝突而生的。這種衝突並不改變光子的「能」。

康登效應擴大了實驗事實的範圍，輻射愈顯出牠微粒的構造。隨後，又發現一種效應，與康登效

應相似，即下節所述的拉曼效應 (Raman effect)。

拉曼效應

拉曼效應發現於可見光譜的範圍內。試取單原子氣體，例如汞蒸氣，正常狀態時，原子是在最低的能位上的。我們已經知道用什麼方法使這種原子具有極豐富的「能」。例如電子彈丸將電子行星提升到較高的能位上去便是。彈丸在原子上所作的「工」在軌道中的電子返回牠原來的位時便解放了。能不能用別種方法（不用電子彈丸）產生原子中的興奮狀態呢？實驗告訴我們，有許多情形，也可用光子彈丸產生這種狀態。設想一支單光射在一羣汞原子上——汞蒸氣——這支光可視作由一羣具有特殊「能」的光子所組成。更假定投射光的波長是這樣的：光子的「能」恰夠激發原子從正常狀態升到最近較高的能位上去。當光子與原子衝突時，光子失掉牠的「能」，卻被原子獲得了。升到較高能位上去的汞原子於是富有光子彈丸所損失的「能」。稱這種波長——光子恰能使原子升到較高的能位上去——為共振波長 (resonance wave-length)，試與第三章中所用術語比較一下。原子發生興奮狀態，且回復原有正常狀態又與光子的放射相關。汞原子回復正常狀態時，則放出光子，恰相當於從前被吸收的能。

射出線的波長於是等於投射線的波長。再回想前述郵票自動機的譬喻，這裏似乎是自動機內沒有存郵票錢幣（一定「能」的光子）投進去，牠仍將錢幣還出來，角度不同。這裏有無一種效應

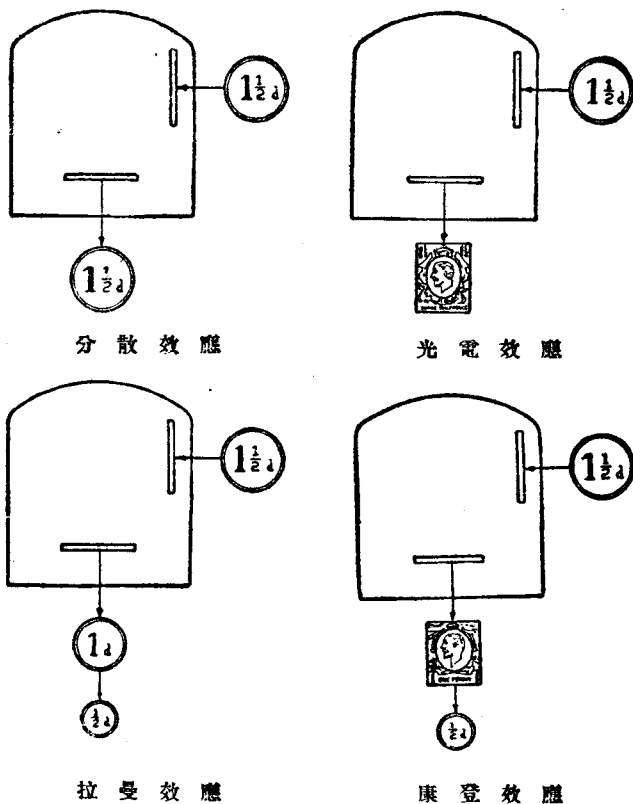
類似於自動機找補餘數的情形呢？欲得一十分精密的類似起見，必須將自動機的動作稍為改變一下（見下頁圖二五）。現在投入 $1\frac{1}{2}$ 便士的錢幣（光子）進去，自動機不是落下 1 便士郵票（電子的「能」）及 $\frac{1}{2}$ 便士餘數（具「能」較小的光子）；卻是只將錢幣（投射光子）變成 1 便士及 $\frac{1}{2}$ 便士兩個錢幣——即變成具「能」較小的兩個光子。這便是拉曼效應的模型。

設光子彈丸射在一種物質的粒子上。光子一部分費在粒子上，其餘一部分以具「能」較小的光子形式放射出去。一九二三年司麥開（Smekal）預言這種效應應該是存在的。理論已引起新實驗事實的發現。一九二八年，印人拉曼及俄人曼德斯丹（Mandelstam）與蘭茲堡（Landsberg）差不多同時發現這種效應。拉曼發現在先，故採用他的名字。

拉曼效應起初在流體和固體方面得着證明。在流體固體方面，原子化合而成分子（molecules）。原子怎樣化合而成分子，這裏不用深說。我們也不敘述由分子上得來的輻射光譜的特性，或分子光譜與原子光譜的差別。我們只簡略地說分子中也有能位或能水準，其中放射也是由較高水準到較低水準的跳躍而決定的。

假定一種流體（例如悶藥）照以單光。這種光有些依一特殊方向——比如說垂直於投射波——分散折回；在這裏我們也發現與投射光同樣波長的分散輻射。這與舊物理學的理论相符，因為照舊物理學說，分散現象並不改變波長。不過，在這裏，我們同時又發現一新效應，即上面所說的拉曼

線)相當於舊物理學所說效果——分散現象不改變波長的效果。除此之外,還有許多新明線,



圖二五 自動機的模型



圖二六 閔樂的拉曼線

效應。在散光的光譜中,不但有原來的波長,且有別種明線。請看圖二六,主要明線(圖中最長的一條

爲波動說所不能解釋的。牠們出現於主要明線的兩邊。這時，我們只注意主要線左邊的明線——即向較長的波方面推移的明線（例如，主要線若爲紫色，左邊的線即爲青色或綠色）。牠們就相當於我們的量子「餘數」。一部分「能」已經用在激發原子上去了，剩餘的部分就被分子以波長較大的輻射形式放出來。故拉曼效應的基本關係式可寫如下：

光子彈丸的「能」= 分子增加的「能」+ 以光子形式放射剩餘的「能」

這種剩餘的「能」即表現爲拉曼線（這個名辭常用來表示圖二六中的明線）。上列方程式的左邊是已知的，因爲我們知道投射光的波長，所以我們知道光子的「能」。測量拉曼線的波長，則射出剩餘的「能」也得決定。由此可得分子增加的「能」因爲：

分子增加的「能」= 光子彈丸的「能」- 以光子形式射出剩餘的「能」

分子與此增加的能有什麼關係呢？衝突後，這增加的能使分子發生與奮狀態，且分子恢復原狀時，分子放出光子（原有分子光譜的特徵）。光子的波長通常由下式求出：

$$\text{分子增加的能} = \frac{\text{普朗克常數} \times \text{光速}}{\text{分子光譜線的波長}}$$

由上列二方程式，可以見到怎樣由測量各個拉曼線而間接求得分子光譜線的波長。（事實上，分子與光子彈丸衝突後所增加各種「能」，即各個拉曼線，相當於分子的各種與奮狀態。）

有一點應該注意，分子的能位一般都靠得很緊密，分子各種狀態間的跳躍而放出光子，能比較貧弱，因之，分子光譜通常都是很長的波長，換句話說，都見於紅外範圍中。同樣，由上列方程式也可以看出，因分子所增加的能很小（對光子彈丸的能而言），拉曼線似乎很接近於主要線（射出剩餘的「能」差不多等於光子彈丸原有的「能」）事實上，分子光譜在紅外部中愈遠，拉曼線離主要線愈近。

上述方法，由研究拉曼線（見於可見範圍中）以尋求分子光譜的特殊波長（一般都在紅外範圍中），用處很大，因為這種光譜見於紅外部，而紅外部不是平常直接觀察所容易達到的。當光譜線可以直接觀察的時候，更可以利用這種方法來核對本理論之是否合乎實驗。在這裏，我們發現理論與實驗完全相符。

主要線左邊的拉曼線既如上述，現在我們要問問右邊的拉曼線有什麼意義了。右邊的線比較左邊的線弱而且少，但就理論的觀點說，牠們的意義卻極有味。

我們最好仍用郵票自動機為譬喻，說明牠們的存在。設想這時我們先投入 $\frac{1}{2}$ 便士的錢幣，其次又投入1便士的錢幣。如果自動機落下單個 $\frac{1}{2}$ 的錢幣來，則這個過程就好比右邊拉曼線的產生過程。實際上，試思一光子彈丸（1便士的錢幣）射擊一分子，這分子已先被一種能（ $\frac{1}{2}$ 便士的錢幣）激起興奮狀態了，衝突後情形怎樣。分子會恢復牠的原狀，但光子彈丸（相當於分子光譜線）

常在射出常與射入的光子彈丸合併，增加極微的「能」。所以，衝突後，光子射出（二便士的錢幣）牠的「能」比射入的光子彈丸（一便士的錢幣）的「能」稍為大一點。故：

射出光子的「能」= 射入光子彈丸的「能」+ 相當於分子光譜線的光子「能」

換句話說，散光的波長比原有的波長短些，所以這種拉曼線是在主要線的右邊，向紫色一端推移。

所以拉曼效應之發生，有兩種不同的方法。平常的方法（產生左邊比較強的明線）是將一光子分而為二，另一種方法（產生右邊比較弱的明線）是將二光子合而為一。

康登效應與拉曼效應有些相似。兩種效應都顯出輻射的微粒性質。都視光子與物質衝突中所生之「能」的變化而定；物質狀態都經修改，且都改變光子的「能」，因而改變射入線的波長。在他方面，兩種效應各見於波長不同的範圍中——康登效應見於 α 線和 γ 線，拉曼效應卻見於可見輻射中。

第六章 現代量子力學

現代量子力學的起原

科學上的理論發生、進展、而死亡。牠們有牠們的壽命，有成功有勝利，但到後來不得不讓路於新觀念新景色。本書前面曾敘述波耳理論偉大勝利的故事。他將間斷性觀念——量子論——引入原子構造的範圍裏去，遂產生他的理論。在向波耳理論告別之前，我們再將牠的結果回想一下。

氫原子中，電子在一量子軌道上旋轉。每一軌道有一極確定的相當能位（能水準）。使電子從正常軌道（第一軌道）升到較高的軌道去，原子便發生與奮狀態。但原子並不停留在與奮狀態中，電子馬上跳回正常軌道去。跳躍一生，輻射亦即隨之而放出。逃出之光子彈丸的「能」等於二位——最初及最後——的「能」之差。波耳理論解釋巴爾馬觀察所得的氫明線十分的清楚便當。他解釋經驗的勒德堡常數，且使之和物理學的根本常數發生關係，那是牠第一偉大的成功。因為理論的計算與測量的結果恰恰一致，我們於是更加相信牠貢獻於細微宇宙的定律表現出長足的進步。可是，這不是波耳理論唯一的成功。我們只須想想離化氮問題，離化氮線對氫線的推移，光譜的明晰構造，X線的理論，元素的排列及其構造的模型，核的問題，以及康登效應和拉曼效應等，我們便可以認識

波耳理論之豐富和偉大。

我們既將波耳理論的成功和勝利史略舉如上；現在得再說牠的失敗，以及新的偉大觀念產生後牠落日般的景況。波耳的「軌道」理論漸歸暗淡，現代量子力學（modern quantum mechanics）正如日之初升。

理論怎樣死亡？有些事物使理論衰落和凋謝，近於善終。由前面所述種種情形，我們得以充分地發展這個理想。

波耳原先的簡單模型并未描出光譜的明晰構造。分光術進步了，觀察所得的新材料才得出現。巴爾馬發明的定律變為一種僅屬初步的近似。各種明線構造是複合的。為解釋這複合的構造起見，遂拋棄圓形電子軌道的舊觀念，本理論的數學更加複雜了，原先的簡單假定被拋在一邊，以求理論與觀察的新事實相符。圓形軌道之外，加上橢圓軌道；其次拋棄質量不變的概念；最後用相對論的結果來解決原子構造的問題。波耳理論克服這個困難，牠的成功就在這裏面；但新困難又馬上發生了。波耳理論曾預言氫線的複合構造，但牠的推論不完全合乎觀察。理論所預言的明線中只有一部分被觀察出來，這是怎麼一回事呢？這問題為另一理論觀念——選擇法則——所解決。選擇法則彷彿是一個籬籬，各種理論（的可能性）得經過牠，才會把自然所不容許的除去。

在第三章氫原子與相對論一節中，可以看到理論愈進步，則愈複雜。理論與實驗競爭，彼此爭奪。

優先權，而實驗始終占勝利。理論愈趨複雜，牠原有的美麗特徵消失了，牠失迷於累積的種種假定中，變成十分粗笨的工具，利用牠以求得新的收穫，那是異常困難的。牠漸趨於無效，牠的生氣逐漸減少，難與新事實併進，到時便失掉牠預言事實的雄心。時間前進，所有這些衰落的徵象愈加顯然，改造舊理論愈成爲迫切的需要。這基礎於是準備我們理想上的新革命。

這是每個理論每個新觀念所不能避免的結果。就科學現狀言，所謂一種理論是最後的、完全的和不可變的，能描寫和解釋一切現象，這只是意識上一種虛構，不曉得實在的豐富。

理論的死亡不是自然逐漸地發生，便是由於突變而出現的。當理論與實驗驟然發生極大的衝突，一切調和的企圖都歸失敗的時候，則理論的死亡屬於後一種情形——暴亡；否則當我們覺得需要作種種互相矛盾的假定才能解釋各種不同的現象時，則理論的死亡屬於前一種情形——漸亡。

波耳理論獲得種種偉大的勝利後，開始現出牠壯年以後的徵象（如上文所述的徵象）——

不過這種表現已爲牠早期的成功所蒙蔽罷了。波耳理論出現於一九一三年。繼後經過很大的進步，完成很大的創造工作，獲得許多新發現，對於理論與實驗貢獻一更深切的見解。足足過了十年，牠才開始現出衰落的徵象，當時的物理學家想將科學從衰落的狀態中拯救出來，於是認爲有另求偉大新觀念的必要。波耳理論變爲太複雜，太強硬，太不自然了，不能用於新而有效的研究中。在早實已存在的種種困難，現在都已呈現出來，迷目五色。理論與實驗的矛盾更加顯然了。在這裏，我們不能考查

所有困難；不過，我們要注意其中的幾件——即與本書所述事實有關的幾件困難。

須記起氮原子是一核及二電子行星所組成，電子行星繞核而轉，形成 γ 環。這種電子繞核而轉，是在什麼軌道上呢？我們當時有意不提出氮原子的比較正確的模型。只說二電子形成一密切的環就完了。當時我們也不能構造一氮原子的模型，十分正確地解釋氮光譜。氮問題是關係三件物體（一質子及二電子）的問題，且非波耳理論所能及的問題。我們也說過，電子彈丸加於氮原子的離化工作，使一電子行星逃出原子勢力範圍之外去。氮原子模型遂不得不這樣構造：我們根據這模型，理論上應能算出離化時的工作量，且應與實驗上所決定的值相符。但是作了許多試驗，都歸於失敗；牠們所引起的結果都不合乎實驗所得的結果。

對於波耳理論的另一批評，性質十分普遍；關係第三章舊物理學與波耳理論一節中所論述的問題。我們知道波耳理論上的種種假設異常混亂，有些是從舊力學上引來的，有些卻是量子的假設，兩方面的假設是不一致的，波耳卻兼收並蓄。原子核依庫倫定律所決定的力吸引電子，且強迫電子在一橢圓軌道中運動。這種想像完全是根據舊力學上支配太陽系的定律而成的。不足，又用各種量子假設來補充——如可許的軌道和「禁用的」軌道，不變狀態，以及電子行星跳躍時發生光子的放射等是。我們計算光譜線強度時——關於原子的集合問題，以及牠們的統計問題——我們又利用舊物理學。量子論在細微物理學中應用的範圍與舊力學所據有範圍，其間劃界線竟消滅無形了。

舊物理學上的原理爲什麼有些被採用，有些又被拒絕，這很難完全明白。

這些疑問和異議已引起新量子力學出現。不過，說現代科學拒絕波耳理論，卻是不對的，騙人的。新量子力學已貢獻許多精微奧妙的新觀念，但牠確只是波耳理論發展中一更高的階段罷了。現在還難確定的說，這是觀念上的一種進化 (evolution) 還是一種革命，因爲由波耳理論到新量子力學的轉變中，這兩種情態都有。從波耳引入科學裏面去的觀念上，沒有返回到舊物理學上去。新量子力學是使量子論的原理更精密更深奧的科學。

自從量子力學上第一次研究結果出現以來，差不多已有九年了。這九年中，科學上偉大有力的進步實爲以往人類所未曾經驗的。在這九年中所獲得的結果，已使我們改變我們全部物理學和哲學的觀點，爲時雖不久，我們卻已耐心地等候着偉大新觀念之到來。在過去，有些缺點和瑕疵預示着舊理論之崩潰及新理論之產生，現在這樣的缺點和瑕疵也已開始出現了。

如果有人想用幾個字來總括近九年來所得的成績，那他可以說，我們現在更充分的了解我們無知的範圍。我們把具體的圖畫和模型擱在旁邊，給與我們的理論一種永遠抽象的性質。我們知道，將普通物理學上的概念應用在原子內部的小宇宙上，是徒然無益的，所以我們用數學模型來代替圖表模型。這樣一來，我們的知識就更精深了，但同時我們覺得實在令人迷惑不解的現象仍然更多。因爲新量子力學的抽象性質，以及數學器具之極端精細，所以我們概述牠的主要觀念，差不多

是膚淺的、模糊的和普通的。

新量子力學的發展史中，領袖是那幾個？我們只介紹四個人——即法人布魯 (L. de Broglie)、二德人海森堡 (W. Heisenberg) 和徐丁格 (E. Schrödinger)；還有一位英人狄拉克 (P. A. M. Dirac)。他們曾獲得一九三二年及一九三三年間諾貝爾的科學獎金。

布魯氏推理

光之繞射現象在前面已經論述過了。一支光線經過小孔，或圍繞很小的障礙物，沒有明顯的陰影；光線彎曲結果成明暗相間的細條現在幕上。這種現象顯出光的波動性質，而引出的結論是這樣：光是一種波，依一定速度而傳播。

不過，另外有些現象，根據波動說不能解釋牠們，牠們卻顯出光的微粒構造，如光電效應、康登效應以及拉曼效應都擁護這樣的假設：光可當作一羣彈丸看，牠們具有一定的「能」。

承認光的兩面——承認光有時顯出牠波動的性質，有時又顯出牠微粒的性質——是科學上偉大的成功。利用以前所述的譬喻，我們好像是瞎子和聾子在影戲院看有聲片一樣，他們每種人只承認現象的一方面，都不知道確有兩方面，也不知道兩面是彼此補足而同時發生的。

繞射現象只有在極小的孔或障礙物的條件下，才會發現。這只因光波異常小，日常所碰見的物體都發生明顯的陰影。可是欲得 λ 線的繞射效應，仍然困難，因為在 λ 線方面，即使繞射格子是一列

異常之小的孔，結果還是產生一明顯的陰影，無論如何不生繞射現象。只有用結晶格子，其中原子間的距離，是一億分之一厘米，才能顯出X線的波動性質。至於更硬的 γ 線，即或用這種格子也不成功。波愈短，則輻射的波動性質愈難確定；於是愈難產生繞射效應，輻射的波動性質愈難顯出。波愈長，牠的波動性質愈明顯。電磁波最長，無論如何不生陰影，牠的繞射現象最明顯。

輻射的微粒性質的問題與此正相反對。我們將紅外輻射的光子比着棉絨球，X線比着從大礮射出來的重彈。光子的「能」之大小與波長之大小恰成反比。光子彈丸具有的「能」愈大，則光子表現其存在愈更清楚。很長的波，如電磁波，微粒具有的能就極其微弱，差不多歸於消滅。所以，人會了解，爲什麼只有硬輻射，才有顯出輻射的微粒構造的種種效應。紅外波沒有光電效應，因弱而且輕的光子彈丸不能從金屬板中奪取牠的電子。同樣理由，康登效應及拉曼效應不見於紅外波中。我們依短波方向進行，愈遠則輻射愈失其波動性質，而牠的微粒方面愈明顯；若向較長的波方面進行，愈遠則愈失其微粒性質，而波動方面卻愈明顯。彷彿像我們看有聲電影，雖說全片中聲與色都是同時有影響的，可是有時聲音方面佔優勢，有時又是顏色方面佔優勢。

承認輻射有不同的兩面，這確是決定輻射定律的過程中一顯然的進步——創造一種新的推理，使我們不囿於物理學的一部分現象中。布魯氏首先承認輻射概念中的二元論可以應用在別種現象領域上去——即物質定律上去。

假定一羣電子或質子依直線作等速運動（且假定我們用實驗方法，可以隨便產生這樣的電子或質子），這些粒子好像單輻射的光子一樣，也顯出可以觀察的微粒效應：即具有特殊一定「能」的一羣彈丸；且這種能隨電子的速度而增加。

起初看來，似乎物質只具有這一面——微粒。但是，有沒有一種現象，其中電子動作也像具有特殊波長的波呢？可不可以說，物質的波動方面平常之所以觀察不出來，只是因為牠太不明顯好像很短的波（如X線）不大明顯一樣呢？

猜想物質現象中也有微粒·波動二元論的存在，布魯氏是第一人。他就二元論上建立一座推論的大廈，已得着實驗的證明。

布魯的論文是在一九二四年發表的。文中理論非常簡明，觀念非常新鮮，牠說即在今日，物理學上用以推理的數學工具極其精密的時候，仍可以有種種簡明卓絕的觀念，不需要任何無謂的淵博，但需要創造的科學想像。布魯的論文當時沒有激起科學界的反響；牠似乎是好玩的，膚淺的，愛因斯坦才首先注意到牠，並且預言科學將來的進步一定會發展布魯氏所提出的觀念。

布魯氏推理的根本原理，以及從而得着物理學上的種種推論，大略如下：

前面已經說過，布魯氏將輻射現象中的二元論應用到物質定律上去。讓我們再把「光子能」及波長的根本關係式寫在這裏：

$$\text{光子的能} = \frac{\text{普朗克常數} \times \text{光速}}{\text{波長}}$$

運動的電子（或質子）表現一定的「能」。照波動的見解，說這運動不是電子（或質子）的運動，只是傳播的物質波，上面的方程式中換成物質波時，可寫如下：

$$\text{物質（電子或質子）的能} = \frac{\text{普朗克常數} \times \text{物質波的速度}}{\text{物質波長}}$$

試查方程式中各個名辭：物質粒子的能（即式中左節）是一微粒概念，當一物體的質量和速度是已知的時候，牠們可與一代表物體「能」的量並列起來，在最簡單的例中——即當電子是靜止的時候——這種能（依厄計算）是：

$$\text{電子的能} = \text{電子質量} \times (\text{光速})^2$$

（請參看五十六頁）運動的電子具有的能比較這個大。相對論告訴我們「能」與靜止質量和速度是怎樣的關係，我們可用簡單的形式表示出來。因此，布魯方程式的左節是已知的，至於方程式的右節，有一個量——即普朗克常數——用不着解釋，及二未知量——即粒子波的速度和粒子波長。根據這個方程式，不能計算這兩個量。但如有種材料計算粒子波的速度，則由此方程式可以求得粒子波長。在這裏我們不談布魯決定物質波傳播的速度，所根據的推論，只提一下，物質波的傳播速度不等於光的傳播速度，也不等於粒子的速度，牠卻依賴這兩種速度——即光速和物質的速度。粒子

的速度愈大，則波的傳播速度愈小。物質波的速度並不依賴粒子的質量，卻與粒子的速度成反比。這與輻射情形不相類似。真空中光波的傳播速度，在各種顏色（即各種「能」的光子）上都是相同的。而在物質波方面，速度卻隨彈丸的「能」而異，——換句話說，隨彈丸的速度而異。

據布魯的推論，可以計算物質波的速度。我們只介紹他最後的結果在下面；他最後的結果表明波長與質量和粒子（電子或質子）速度的關係，——使波長與微粒觀點上表示粒子特徵的量發生關係：

$$\text{波長} = \frac{\text{普朗克常數}}{\text{質量} \times \text{粒子速度}}$$

因此，在物質方面，微粒概念與波動概念也可以並列了。現在，我們依照前面辦法（見三六頁）將微粒說的術語譯為波動說的術語。茲舉數例如下：

微粒說的術語

1. 一羣電子依等速運動。
2. 電子的速度加倍。

波動說的術語

1. 一電子波有特殊的長度（構成一支單光）。
 2. 電子波長減半。
3. 運動的質子質量比同速度的電子質量大 1850 倍。
 3. 質子波比同速度的電子波小 1850 倍。

布魯氏的推理有什麼物理的意義？根據牠而推演出的結論，也可以證諸實驗麼？有沒有現象與微粒概念相衝突，但可用物質波動說去解釋的呢？

試舉一簡單的計算爲例：假定一羣電子運動，速度比光速小十倍，即每秒行 30,000 千米。但欲決定牠的波長，則必以電子質量與既定速度（依每秒厘米計算）之積除普朗克常數。依照上列公式，及七五頁所列常數值演算，可得該電子（速度比光速小十倍）的波長值爲 0.2 埃。電子波長一般，都與 X 線波長同級。所以一定波長的一羣電子可與同樣波長的某種單支 X 線相比較了。不過就以往推論，我們知道光波與物質波究有根本不同之點。

一羣電子依每秒 30,000 千米的的速度運動，則有一相當的波，比電子的約小 25,000（恰爲 1,850）倍——即 0.0001 埃。

由此可見，由實驗決定物質的波動性質，是可能的。設想一羣電子依既定等速而運動，或（就波動術語說）依電子單波（homogeneous electronic wave）而運動，且假定牠射在一極薄的結晶體上，結晶體是一種繞射格子。結晶體中各障礙物間的距離異常小，可以產生 X 線的繞射效應，故可以希望得着同級波長的電子波的繞射效應。照相片或可顯出電子波通過薄層晶體後的繞射現象，事實上，實驗果然與此相符，這是近來理論與實驗室合作成功的一幕。首先由實驗證實物質的波動性質的人是兩位美國科學家，達偉生（Davisson）及厄爾麥（Germer）。他們實驗之後，還繼續實驗各

種電子速度，即各種波長。各個實驗所得電子的繞射樣子與理論上所預言的完全一致。本書卷首有幾幅像片，其中有電子波的繞射現象。可見電波的繞射與X線的繞射，相似處特別明顯。我們已經知道根據那些圖可以決定X線的波長。因此可以同樣決定電子波長。繞射樣子供給物質波長，所以實驗上也證實下列根本的關係：

$$\text{波長} = \frac{\text{蒲朗克常數}}{\text{質量} \times \text{電子速度}}$$

方程式的左節由繞射樣子決定。蒲朗克常數及電子質量都是已知的。使電子在適當強度的電場作用下，便可賦與電子以小於光速的任何速度。所以波長方程式中一切量都是已知量，我們確能決定實驗所得的材料是否合乎這個方程式的。實際上，確是相合的，實驗與理論又是一致。一羣質子的繞射效應也已發現合乎理論上的預言。

我們既已觀察到顯露物質波動構造的現象，我們的知識範圍也因而擴大了。我們已發現輻射現象與物質現象都具有二方面——一為粒狀，一為波狀。

徐丁格氏推理

布魯理論的根本假設固極簡單，但牠所包括的事實，範圍很窄，不能伸出電子的等速運動以外去。就所能見到的說，布魯理論涉及物質構造問題并不深。電子波的存在似乎不能影響波耳理論的

結果。徐丁格的觀念在這一方面卻顯出很大的進步。牠們提煉布魯的理想改變我們的物質觀。波動力學 (Wave Mechanics) 如徐丁格所引出的，包括的範圍很廣，比布魯理論所包括的範圍寬廣得多。牠拋棄限制的假定，——自由電子依等速運動進行，——使能研究在外電場或磁場中的電子運動。牠是波耳理論的真正繼承者，牠不僅解釋波耳理論所包括的事實前後相符，而且擴大我們的知識範圍。我們不能以波耳理論同樣的理由去批評牠。再者，牠又包括布魯的推論。電子波的繞射，以及電子的速度與波長的關係，在極端的情形中——即加諸該電子的外電場或磁場都消失了——也如牠所說。

徐丁格理論的根本原理是什麼？

欲解答這個問題，我們必須折回到光學上去。試看十九世紀的光學。那時還不知道光顯出牠微粒性質的種種效應。輻射現象只顯出牠的波動性質。繞射現象和其他現象一樣，被這樣的光學理論解釋：將輻射當作傳播的電磁波看。一般光學書籍差不多一定有一章講「幾何光學」(Geometrical Optics)。很多光學的事實，解釋無須乎採用物理光學 (physical optics)——光的波動說——的精密儀器。陰影現象，以及光線經過不同的媒質後的路徑，很可以用幾何光學上已知的定律去研究解釋。幾何光學一章的主要定律，有一條是費麥脫 (Fermat) 原理，牠說光線經過 A, B 兩點，如果兩點間是一種媒質，則光線路徑是一直線；但就一般情形而論，A, B 兩點間有許多種媒質，或媒質依連續的

狀態而變化，結果光的傳播速度隨媒質的各點而有不同，光線所經過路徑即如在 A, B 兩點間於最短可能時間內所完成的路程。在光線一切可能的路徑中選擇一個恰能滿足這個條件的路徑出來。光線好像一位賽跑員，想於最短時間內達到指定的地點；如果有一曲折的路徑可以縮短牠所需的時間，那牠必定走那條路徑。

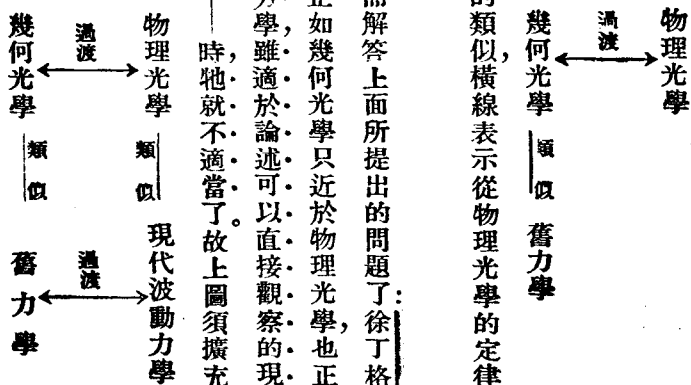
幾何光學定律比較物理光學定律簡單些，但這兩組定律都不是彼此獨立的；物理光學的假設比較普遍，幾何光學的方程式只是物理光學方程式的極端情形。波長愈短——輻射愈硬——則幾何光學與物理光學的差異範圍愈小。幾何光學是物理光學的極端情形，波長愈短，牠的原理也愈近乎真。若假定我們所研究的輻射波長連續地縮短，我們也就逐漸由物理光學的定律達到幾何光學的定律。幾何光學可視作輻射現象的初步近似定律。輻射波長愈短，則牠愈近乎實在。

現在，我們說到舊力學 (classical mechanics)。舊力學所關聯的效應與光學上的現象十分不同。但赫米爾頓 (Hamilton) 在十九世紀已經發現幾何光學與舊力學形式上的類似了。物理學中，常常於許多不同的範圍上發現相似的推理方式，(除此以外牠們別無共通的地方) 這裏便是一例，兩個不同的現象範圍中，形式上卻有一種相似存在。

設一物體在一外力場中——例如一行星在太陽的引力場中——經過 A, B 兩點。這物體所取的路徑是什麼形式呢？根據舊力學的原理，牠於所有可能的路徑中選擇一條，這一條路徑的一定函

數（這裏用不着說）必有牠的最小值，由此可見舊力學上這條原理與費麥脫的類似處了。

幾何光學、物理光學和舊力學的相互關係可圖示如下：



縱線表示形式上的類似，橫線表示從物理光學的定律到幾何光學的定律可能的變化（當波長無限縮小時）。

我們可以進而解答上面所提出的問題了：徐丁格理論的根本原理是什麼？

徐丁格認為正如幾何光學只近於物理光學，也正如牠不能研究繞射現象，所以舊力學也只初步近於現代波動力學，雖適於論述可以直接觀察的現象，可是在論述不可直接觀察的現象——原子構造的宇宙——時，牠就不適當了。故上圖須擴充如下：

粒子及原子的構造宇宙由現代波動力學去探查。徐丁格根據從幾何光學的定律過渡到物理光學的定律的類似，也發現從舊力學到現代波動力學的變化。

已經說過，波動力學包括波耳理論所論述的事實範圍。可用氫原子的簡單問題爲例，說明這一命題。現代波動力學論述氫光譜線問題採取什麼步驟呢？

氫核（即質子）範圍內有一電子。核與電子依庫倫定律互相吸引，庫倫定律形式上與引力定律相同。我們遂依舊物理學的格式，配合命題。這是第一步。第二步是從這個舊問題過渡到波動力學中相當於牠的問題上去。這樣的手續有條不紊，十分連貫而且免去波耳理論上所有的含糊和武斷。在早曾依舊物理學的格式陳述出來的命題，徐丁格提出一連貫的方法，陳述波動力學中的命題。量子軌道所遇的疑難以及電子行星從其軌道到其他軌道的跳躍所遭遇的疑難，現在都消失不見了。量子論也闖入徐丁格的波動力學裏面去，但和牠闖入波耳理論裏去的情形完全不同；牠現在見於由舊力學過渡到波動力學的法則中。這種過渡須仰賴蒲朗克常數。量子論藉這法則——使舊方程式過渡到波動方程式的法則——闖入波動力學裏面去。由此，我們便能依波動力學的格式，配合命題了。第三步也就是最後一步，便是解決目前所提出的波動問題，例如氫的波動問題。所謂解決波動問題，究竟是什麼意思？關於這問題的種種討論都寬泛而且含糊。如果有人說問題是要「解既定邊界條件的二次偏微分方程」，則這種說法在不懂數學的人看來，完全莫名其妙。但是，這種說法又不

能換成別的容易了解的形式，所以我們只得提出下述事實就夠了：波動力學的問題是根據牠的方程式（類似於物理光學的方程式）決定某種函數，這種函數叫做徐丁格函數（Schrodinger's function）。這使我們斷言波動問題（例如氫方面的）須依賴尋求徐丁格函數，則不能一定得着解決。只有在電子的「能」假定為某種特殊值（specific value），而這些值結局竟與波耳用一完全不同的方法所得到的能值相同，只有在這時候，解決波動問題所依賴的徐丁格函數才會存在。徐丁格假定他的波動方程有解法，於是得着能位（能水準）與波耳所想像的能位相同。波耳理論中，不是任何能位都可容許的（舊方學則否，牠容許一切能位），所以這裏也是一樣；可許的能位只有幾個，如前面圖六所示。在氫方面，波動力學達到的結論與波耳理論所達到的相同；推理過程上所用數學比較繁雜，但是很順理，很有味，且免除了波耳的軌道理論上所特有的武斷。所以徐丁格理論之解釋排列整齊的氫光譜線，正和波耳理論的解釋一樣。

波動力學中推理步驟既如上述，這種步驟自然不僅用於氫一方面，別的方面也可採用牠。徐丁格的理論不但比波耳理論更為精深，而且牠所包括的事實範圍也更廣大。

或許還記得，波耳理論曾製造一氫原子的模型，根據那個模型曾演得支配氫光譜線的定律。但是，我們已經注意到另一問題：這些明線中，有些比較弱，有些又比較強，換言之，牠們的強度有差別。如果採用波耳理論的術語，那就會說，原子中發生相當於某種明線的跳躍，設這一類原子的數量最多，

則這種明線的強度也最大。支配各明線強度的定律是由統計得來的。氣體是無數原子的集合體，波耳發現支配其中各個小宇宙的定律。第二步引我們到可以直接觀察的現象上——各明線的強度問題上——便需要另外一種推理，即根據統計的推理。各明線強度的說明會借助於其他新假定；那與原子本身構造問題不會發生密切的關係；這種理論步驟具有統計的性質，與我們當時據以研究原子內部構造的理論是不相同的。

氫線的強度問題，在波動力學上採取的形式，完全兩樣。能位問題與氫線強度問題關係十分密切。我們知道在氫方面，波耳的能位只容許可以解決問題的幾條存在；我們所尋求的徐丁格函數也只因那些相同的特殊能值才存在。那末，徐丁格函數（與可許的能位密切相連的）的物理意義是什麼？牠們的物理意義是這樣：牠們使人實行「決定各光譜線強度」所必需的統計研究。徐丁格的函數包括原子集團的定律式子。所以顯然地徐丁格的理論解釋各光譜的強度定律更為寬大、直率 and 顯明。以徐丁格函數為根據，從而推演得的結論并不關係各個原子，卻是關係原子集團的。徐氏理論不告訴我們關於各原子的什麼事；我們也不注意各原子的狀態；知道了徐丁格函數，我們便可尋找答案，以解答關於整個原子集團的一切已經配合適當的問題。現代波動力學性質是統計的。這已經鮑爾（M. Born）解釋過了。

讓我們再略舉比較氫原子情形更為簡單的例，即自由電子（free electron）依照徐丁格的理

論，我們必須先依舊力學的格式陳述問題，然後利用一種橋梁（蒲朗克常數於此出現）過渡到依波動力學的格式陳述問題。在自由電子方面，徐丁格函數所表示的波長如下。

$$\text{波長} = \frac{\text{蒲朗克常數}}{\text{電子質量} \times \text{電子速度}}$$

這個公式我們很熟悉；牠與布魯氏用別種方法求得的公式相同。布魯氏所研究的問題似乎是徐丁格理論中一很簡單的特殊情形。

再看上列物質波長的公式。分子是一極小的量，即蒲朗克常數 h 。舊力學說「能」是連續的，因而假定 h 等於 0。若上列公式中 h 逐漸小以至於零，則波長也隨之減少以至於零。於是我們又走進舊力學的範圍中去，物質的波動性質又看不見了，正如波長趨於零，我們逐漸由物理光學來到幾何光學一樣。

海森堡氏推理

徐丁格關於波動力學的第一篇論文，是一九二六年發表的。在那一年前不久，有一位青年科學家海森堡氏曾發表一篇文章，貢獻新量子力學（new quantum mechanics）的綱領。海森堡所根據的見解，在早馬哈（E. Mach）也曾略略談過。

波耳理論假定電子在軌道中旋轉。牠談及電子在某一時間上的位置以及電子在軌道中的速

度，彷彿是在研究彈丸在地球引力場中的運動一樣。可是，研究可以直接觀察的現象所用的概念可應用在原子構造問題上來麼？可以想出一種測量來顯示電子的軌道、速度和位置麼？不能與測量所決定的數目並列的量，宜不宜於介紹到科學上來？我們不得不仍然以事實為根據，凡與觀察和測量無關的一切概念只好擱在一邊，因為原子的新物理學並不包含關於電子的軌道、速度和位置。氫線中所得觀察的是波長和強度；於是波長和強度是我們的根本概念。現代量子力學起初便想排去與測量和觀察不大相關的概念（如電子的速度和位置），而代以具有很特殊的物理意義的量——即光譜線的強度和波長。量子力學性質上是抽象的；牠很審慎，不作任何圖畫；牠不構造原子模型；在另一方面，牠卻貢獻許多規則，人們利用這些規則可以將各舊問題依新量子力學的格式陳述出來。至於建立理論結果和觀察的關係，那不過是牠抽象理論鏈上最後的一環罷了。

舊力學運用各種物理量——如力、能、質量等——在各個特殊情形中，一定數目可由測量與這種物理量並列。

舉例來說，設以 a, b 代表二量，我們知道

$$a \times b \text{ 與 } b \times a$$

舊物理學中，沒有任何種的量；一切計算中，可以任意顛倒因數的次序。但是有沒有不適合於這種條件的量，

$$a \times b \text{ 不等於 } b \times a?$$

$a \times b$ 不等於 $b \times a$ 的量，數學家早已知道了，但未見應用到物理學上來。

我們若將下列名辭介紹進來，我們的推論或更簡便：

設 c 代表的量 $a \times b$ 等於 $b \times a$ 。

設 d 代表的量 $a \times b$ 不等於 $b \times a$ 。

舊物理學所用的量只屬 c 種量；新量子力學卻採用 d 種量。

量子力學的方法大概如下所述，不過不恰如所述：

新量子力學依舊物理學方程式的原則陳述牠的方程式。例如一衝突電子（不可以直接觀察的現象）的方程式類似於一衝突質點（可以直接觀察的現象）的方程式。可是，兩種彼此相當的方程式實際並不相同，恰像這樣：舊物理學上，方程式裏面的符號只代表 c 種量，新量子力學上，同樣方程式裏面的符號卻屬於 d 種量。

量子論加入量子力學裏面去沒有現在我們就來說蒲朗克常數在這裏是怎樣發生的。如果 $a \times b$ 不等於 $b \times a$ 則

$$a \times b - b \times a \text{ 不等於 } 0$$

這個差數合計有多少？這個差數與蒲朗克常數 h 成比例。因此，常數 h 在這裏卻成一計算規則了。如

果 $\alpha \times \beta - \beta \times \alpha$ 所得之差，不確定，則由量子力學的方程式所陳述出來的問題，也不精確，且不易解決。

所以，我們知道舊力學是新量子力學的最後情形。我們使 $\hbar \rightarrow 0$ ，則由新量子力學達到舊力學，因 $\alpha \times \beta - \beta \times \alpha$ 的差數是與 \hbar 成比例的，至此也看不見了！ $\alpha \times \beta$ 和 $\beta \times \alpha$ 二量變為相等，於是 q 具有 c 量的性質，量子力學的方程式也就變為舊力學的方程式了。這恰如波動力學中，舊力學是牠的最後情形一樣。

現在說到下述問題：

1. 海森堡的新量子力學與徐丁格的波動力學有什麼關係？

2. 新量子力學與舊波耳理論有什麼關係？

第一問題的答案非常簡單：兩種理論的結果完全相等。不過兩種理論的出發點各不相同。徐丁格氏將幾何光學與物理光學的類似轉移，到現象的新範圍上去；海森堡創一精密的理論計劃，免除現象敘述中不必要的和昏亂的客觀關係。雙方所用的數學方法也各不相同。徐丁格提出微分方程——他的函數；另一方面，海森堡的量子力學卻有一系統，係由無數代數方程式組成的。兩種理論形或上差異這樣大，但所得結果恰恰相同。徐丁格是第一人，證明這兩種理論所取路徑不同，結果卻完全一致。至於第二問題的答案也是這樣。新量子力學不但包括波耳原來理論所包括的全部事實，而

且能夠接近那些反抗波耳理論的問題（例如氫光譜及其他元素的光譜）原來對波耳理論所提出的根本異議這裏完全不適用了；而方法之精密，構造之謹嚴，形式之美麗，新量子力學決不亞於舊力學。

由此可見，「現代波動力學」與「新量子力學」是同義的名辭，因為牠們的理論，包含的事實範圍相同，引起的結果也同。

狄拉克氏推理

英國青年科學家狄拉克已完成種種創造的科學工作。他所解決的問題很多，可是我們在這裏只提出一件來說。

一九二三年至一九二五年是波耳理論的危急時期。常常發現新事實，突破波耳理論的界限；牠的結論與觀察光譜的構造所得的很多現象不相符合；爲什麼K環是由二電子行星組成，L環是由八個電子行星組成，M環是由三十二個電子行星組成，波耳理論就難解釋；這樣的事實日漸增多。可是波耳理論讓位於新量子力學之先，在一九二五年牠還獲得最後一次的大勝利：不適合於波耳理論而且和牠十分衝突的大批事實，在該理論上補充一個簡單的新假設——即烏冷柏和高茲米的旋轉電子的假設（Uhlenbeck and Goudsmit's hypothesis of the spinning electron）——竟得解釋了。這個假設補足原子構造的圖畫。我們利用研究「可以直接觀察的現象」所用的觀念和闡釋來

說明牠於是我們說電子不僅依牠的量子軌道繞核而行，同時又繞牠自己的軸而旋轉，恰如地球有公轉同時又有自轉一樣。電子旋轉的假設出現的一年恰遇着量子力學最初原理的發表，所以說牠是波耳理論發出來的最後回光。波耳理論經牠補充，所能說明的事實範圍就擴大了。可是新量子力學出世，漸漸明白這不是正當的道路，無疑地須得擴大「研究可直接觀察的現象的」概念的範圍以改造原子的模型。

我們已經說過新量子力學（或波動力學）包括波耳理論所原來包括的事實。但是，這種說法須得補充一下。有些現象波耳理論（在旋轉電子的假設還未出現以前）原來不能括入牠範圍之內去，新量子力學並不解釋那些現象。所以仍有許多事實，在量子力學範圍之外，且反對量子力學和波動力學。

還有一種批評也是針對着量子力學的：舊力學是量子力學與波動力學的構造基礎。由波動力學過渡到舊力學類似於由物理光學過渡到幾何光學。海森堡的量子力學中，設 $\gamma \parallel 0$ 。我們便得以 c 量（即 $\alpha \times \beta$ 等於 $\gamma \times \delta$ 各量）代 g 量（即 $\alpha \times \gamma$ 不等於 $\gamma \times \alpha$ 各量）而回到舊力學的方程式上去，舊力學是海森堡及徐丁格兩種理論的最後情形。

徐丁格及海森堡的建設完全不依賴相對論所引起的物理概念上的變化。那末，怎樣調和新量子力學與相對論所獲得的結果呢？記得在前也有一次碰着這樣的問題。關於氫原子構造的理論在

牠原來簡單的形式中，不能說明相對論所得的結果。桑麥菲爾才首倡將相對論的原理介紹進原子構造問題裏面去，假定質量隨速度而變。引起他分析能水準，解釋新實驗事實——光譜的明晰構造。因此，在這一方面，波耳理論比量子力學更高；但在最初，牠簡直還不能與新量子力學和相對論並列。那時，對於新量子力學有兩種異議：（1）牠不解釋電子旋轉的假設已經解釋的事實，（2）牠的基礎是舊力學，不是相對論的力學，而相對論的結論不能與量子力學的結果一致。

至一九二八年，狄拉克說這兩種異議可以同時推翻，波耳理論之優於量子力學的地方也就喪失了。狄拉克修改徐丁格的方程式，使牠們的形式合乎相對論的假定，他因而證明量子力學能解釋電子旋轉的假設原來所包括的事實。因為狄拉克，我們又得向前大踏一步；他使我們對於周遭的現象更知道深一層，並且使新量子力學進步，比舊波耳理論更為優越。

因此，徐丁格的方程式恰如波耳理論的原來模型，只是初步近似罷了。由狄拉克的相對論方程式而產生更密切更好的近似，正和以前由桑麥菲爾的模型及旋轉電子的假設而產生更密切更好的近似一樣。

這裏我們又認識了，每一問題的發展過程中相伴而生的變化。理論的數學結構愈演愈複雜。狄拉克的方程式比徐丁格的方程式更複雜；且借助於相對論的波動方程式以解特殊的問題，常常是極其困難的。科學的發展給與我們的推理工具愈來愈複雜，一直到新的大革命觀念給現象以另一

局面爲止。新疑難隨理論之發展而生，新缺點也隨之出現。

狄拉克的方程式引起許多自相矛盾和不能了解的東西；牠們引起具有負質量的電子。說「某物體的質量是負的 (negative)」很奇怪，不能了解，好像說：「今天我吸了負五支香煙」一樣。狄拉克提出一個偉大的觀念，設想負質量的電子之存在，且加以解釋。我們用下列例子來說明牠。

試想戲劇將要開演的時候戲園正廳的情形。所有的票都賣出去了，所有觀客差不多都有了座位。間或有一二位遲到的人在穿來穿去找空座。一會兒，全廳滿了，每個座位都有人佔住。

照狄拉克說，宇宙間有空地方——「座位」——是指定給電子的，恰如戲園裏有空座位，是指定給觀客的一樣。有少數未被佔據的「座位」，但多數已被佔據了。電子恰如那些觀客，差不多已經佔據了所有的空地方，其餘的電子將來也找着空位。到了這個時候，那會是物質宇宙的末日了。因爲已經有座的觀客與正在找座的觀客之間，有一根本的差別。已經安置在「座位」中的電子便是負質量的電子；牠無論如何不會顯露牠的存在；我們用任何方法也不能證實牠的存在。易於觀察的電子世界卻是那些尚未找着「座位」的電子（如戲園中遲到的人）所有的世界。我們的世界中，有負質量或正質量的電子。狄拉克說這些「座位」這些空地方，周圍都是負質量的電子，因爲牠們吸引電子（具有正「能」的），像是些元正電荷佔據一空地方，或填充一未經佔據的「座位」這種

動作同時也就是物質的毀滅過程。電子將牠的正質量改變為負質量，一元正電荷和一元負電荷消滅無形，物質的毀滅隨之而生，很硬的輻射（或宇宙線）之放射也就隨之而生。只有很少數的電子才具正質量。我們的宇宙中，只剩些物質的殘片；這些也將消滅，將牠們的物質「能」轉變成輻射，流浪於無限的宇宙中。

依狄拉克的意思，那末有：(1) 正能的電子（遲到的觀客）；(2) 負質量的電子（有座的觀客）；(3) 元正電荷或「座位」，周圍是負質量的電子（空地地方，周圍是座好了的觀客）。

元正電荷——周圍是負能電子的「空地地方」——不是質子。這些「座位」好像元正電荷但質量等於電子，這可由計算證明。在先這一點反對狄拉克的理論。後來，負能狀態的假定使我們假定一種以往不會知道的新物質成分——即正電子。所以在早這一點反對狄拉克的理論，現在反而有利於牠，助牠偉大的成功。我們知道正電子之存在最近已得證明了（見一三九頁）。布拉開和俄其亞里的實驗意外地美妙地證明了狄拉克的理想。

由上述事例，可見現代物理學上的概念是怎樣的奇特，怎樣的充滿了美麗創造的想像。

非 定 命 論

我們的講述要告結束了。還得要說的卻是由量子力學而生的幾個普通哲學問題。海森堡所得的許多結果，影響到物理學上主要的思想方法和問題；牠們改變從前的見解，對於科學的根本問

題更加以新的說明。

我們現在回到本書開始時討論的問題上去——即定命論問題上去。

在這方面，量子力學獲得的結果會引起很多辯論，發表很多著作，見解常是互相衝突的。在這裏，我們不能敘述這問題的詳細情形，也不想解釋各方面對牠所抱的不同的見解。只說這裏所敘述的是一種主觀的見解就夠了。

在第一章「定命論」一節裏我們論述舊物理學上所用的定命法。物理學在早頗自信，相信物理學知道了種種自然律，結果就會顯露各系統的將來。定命推理法 (deterministic reasoning) 說只要知道某一系統的最初狀態以及支配牠的定律，就可預言該系統將來任何時間內的狀態，預言之正確可由觀察和測量該系統將來那個時間內的狀態去證明。最簡單的例可舉外力場中已知質量的質點來說。如果我們知道這個系統的最初狀態——質點的位置（或質點的座標）和速度——由力學原理知道牠所受的力，將來任何時間內的位置（即座標）和速度便可從而決定。但是，讓我們將這個推論引伸一下。我們欲知該系統的最初狀態，不得不利用測量，所以不得不多少侵犯那個系統，因之，不免要改變所欲測量的那些量。例如欲知某一液體的温度，遂將温度計浸入該液體中，浸入後，液體温度因而改變，改變雖微，卻已非牠原有的温度。但因我們維持舊物理學，故可想像這種改變很小，設測量的方法愈精密，那便會更小的。舊物理學容許我們想，測量改變既定系統的狀態愈來愈

愈微，也就有愈來愈正確的可能。

每一測量中，常有錯誤的要素。例如測量質點的最初位置和速度，常遇測量器具不精確所生的錯誤。但是我們決不違反舊物理學，因為錯誤發生時，我們常常自慰，以為將來必有更精確的測量方法可以利用的。這樣測量愈來愈正確的理想鏈子似乎是沒有止境的。如果在一百年前，有人向當時的物理學家不確定地說，測量的精確度有一定的限度，即用極精密的方法測量，也不能超過那個限度，並且說這個限度不是由於技術的困難，而是由於自然本身的法則，那他們必定會大喫一驚。

簡略言之：舊物理學上定命原理應用的可能性，係定根在這樣的假定上：假定測量對系統所生的改變異常細微，且假定我們可以想像比較精密的測量（可減少困難而增加精確度），利用這種測量便能決定系統的最初狀態。

現在要說到第一章「統計」一節裏所論述的統計法。我們根據氣體運動說，假設每一分子是受定命法則支配的。如果知道每一分子的最初狀態，如果決定了每一分子的最初位置和速度，便可預言該系統的將來，因為每一分子的運動及任何二分子間的衝突都是受舊力學定律支配——受定命的定律支配。但是我們論述包含無數單位的系統時，就無力解除當前的困難，不得不放棄定命法而採用統計法；我們的預言於是不關係各個單位的命運，卻關係特殊狀態的概算。我們既不正確地知道最初狀態，則系統的將來仍隱藏着牠的祕密且，不無意外。不過「非可直接觀察的現象」系

統那時仍被當作與「可直接觀察的現象」系統相似，同受定命法則的支配。

及到波耳理論出現，才給予一個大打擊。我們覺得我們不能建設「非可直接觀察的現象」系統，類似於「可直接觀察的現象」系統。由於原子構造的模型（具有明顯的非定命論的性質），我們才達到支配光譜線系列的定律，了解波耳理論所包括的現象。故射出之光子的「能」和射出之輻射的波長不但依賴最初狀態，且依賴兩條軌道，即二能位——電子的最初軌道和最後軌道。這掃除了我們觀念上根本的錯誤，褊狹的見解——支配「非可直接觀察的現象」系統的定律類似於「可直接觀察的現象」界已知的定律。波耳理論使我們解除了舊物理學的桎梏。所以我們認識實在有許多問題，牠們的解決可以顛覆已經確立了的學說。

新量子力學攻擊舊物理學的定命方法比波耳理論來得更加厲害。我們的根本概念因而更深刻透澈。

試取一自由電子（不受任何外力的影響），且極力應用定命法；如對待質點一樣，極力確定牠的最初狀態，即該電子在既定時間內的位置和速度。先說位置。電子是一很小的體，欲確定牠的位置，我們必須「看見」牠——我們必須以牠放射出來的輻射照着牠。很小的物體，我們用顯微鏡看；沒有一種十分完全的顯微鏡，可用來觀察電子。這個問題的答案見於光學中，光學上說，放大力有一最高的限度，最完全的顯微鏡也決不能超過牠。這個限度不是由於顯微鏡構造上技術的困難，乃由

於物理學上根本的定律。最好的顯微鏡也不顯出小於光波的物體。眼睛不能辨識波長小於4000埃的顏色。4000埃是紫色的波長，紫波是可見光譜中最短的波。即使用最好的顯微鏡，也不能看見小於4000埃的物體——即十萬分之一厘米。這個限度也就夠小了，但在微物學中看來卻是異常之大的；牠比波耳原子的體積就大過好幾千倍了，何況電子只是原子太陽系中一個小行星。故所謂「看見」電子，實在是一種幻想。可是，讓我們依照那條危險的幻想之路走去罷。設想存在(Oscillations)物反應各種射線(Rays)，也如眼睛反應可見輻射一樣；牠們或許看見X線、Y線，甚至看見隨物質之毀滅而生的更硬輻射。這些存在物用適當的小波輻射照着，可以「看見」任何小的物體；所以牠們利用很硬的輻射，可以（確度隨意）決定電子的位置。不過，這裏又說到第二個大困難了。我們設想的存在物，目標是要決定電子的最初狀態，即電子的位置和速度。假設照上述方法已求出電子的位置了。第二件又怎麼辦？我們已經知道硬輻射的衝突發生康登效應（見第五章「康登效應」一節）；效應中光子的能一部分失去，卻被自由電子獲得了；其中發生能的交換，和二皮球衝突中發生的情形相似；放出之光子的「能」比較貧弱；牠比較「軟」，所以顯出的波比較長。另一方面，電子具「能」比較豐富；牠的速度於是增加。輻射愈硬，則康登效應愈顯著，電子的速度增加也愈大。所以，測量位置的過程中也改變電子的速度；波愈硬，則測量最初狀態愈正確，速度變化也愈大。速度改變後，系統的最初狀態也就紛亂，我們想像的存在物欲決定電子的座標愈切，而紛亂亦愈甚。

這樣的研究發生所謂不確知原理 (uncertainty principle)。這是海森堡首創的，也就是現代量子力學上的主要原則。可述如下：

電子質量 \times 電子位置測量上的錯誤 \times 電子速度測量上的錯誤

— 近於蒲朗克常數 h

對於這個不確知原理的意義，讓我們知道更清楚一點。我們作種種測量，意在決定電子的最初狀態；速度和位置的測量都有錯誤；但這些錯誤不是彼此獨立的；牠們的乘積是經常不變的。位置測量上的錯誤愈小，則速度測量上的錯誤愈大。所用的輻射愈硬，則電子速度的變動愈大。當位置測量達到很高的確度時，速度測量上的錯誤變為非常之大。若不想改變電子所具有的速度，則不得不採用長波輻射——如紅外輻射。康登效應變為不顯，電子速度的改變所以很微。可是，我們知道用長波輻射又不能正確地決定電子的位置。

這些結論可用下列說明：一戲園舞臺上有兩個演員——一近台邊，一離台邊較遠。我們藉小望遠鏡看他們的臉。如果二玻璃配光，可以看清較近一位演員的臉，就不能看清較遠的一位演員的臉。欲配合望遠鏡的玻璃，使二位演員的臉都看得清楚，那是不可能的事。如果我取折衷辦法，則二演員的臉都不十分模糊，可也不清楚。一位演員就好比扮演電子的位置那一角，其他一位就好比扮演電子的速度那一角。

照舊物理學說，質點的位置和速度都可決定，達到意想的確度——好比上例中，若二位都近台邊，則我們能看清他們二個。不過，新量子力學上，我們知道測量的確度有一定的限制，位置的正確限度與速度的正確限度關係十分密切，而且在表示牠們關係的不確知原理中發現蒲朗克常數 h 。假設不確知原理中發現的不是 h 而是零。那末，我們就回到舊物理學上去了；速度和位置測量上的錯誤於是同時等於零。

這些研究的結果可如下述：量子力學的原則不許我們決定「非可直接觀察的現象」——系統的最初狀態，達到意想的確度，且測量上的錯誤必適合海森堡重要的不確知原理。決定最初狀態的可能，是物理學上定命原理的根基。所以，我們不能將定命推理法應用到不可直接觀察的現象界上去，因為我們決不決定那種系統的最初狀態達到意想的確度。簡言之：不可直接觀察的現象界是非定命的。

這種困難也可用稍為不同的形式表示出來：在舊力學上，假定測量器具插入系統而生的變動很可略而不計，且假定可以任意使這種變動很小。可是在原子內部，這種假定就不適用。那末，量子力學上的推理，目標又何在？如果牠的物理定律不顯露「可直接觀察的現象」——系統的將來，那又有什麼意義呢？牠真搖動了科學的基礎嗎？能不能有不預言將來狀態的物理學，和不知道最初狀態的預言人或以爲海森堡的結論，完結了我們獲知微物現象的任何可能性了。這個兩難論法怎樣解答？

我們必須再記起來，舊物理學應用統計法於系統集團上時，我們假定集團中每個系統是受定命法則支配的。那末，舊物理學中推論的過程如何過程是這樣的？

1. 每個系統的定命法則。
2. 統計應用。

3. 預言系統集團某種狀態的概算。

量子力學中，這個過程的第一步就被推翻了。微物系統是非定命的。那末，怎樣將量子力學的結果證諸實驗呢？

波動力學中，每個問題都由給與徐丁格函數而得解決。如果波動力學完全不告訴我們關於系統將來狀態的值，這些函數又有什麼用處？徐丁格的函數是一個目錄，將量子力學關於一系統所承認的所有知識一概記入；但是這些知識只是關係系統集團的。非定命推理法不使我們知道每個系統的將來狀態；由量子力學而推得的結論只是關係系統集團的。當舊物理學論述大批個件的集團時，牠便由定命法則過渡到統計性的法則，過渡的橋梁是統計的推論。量子力學供給顯明的統計結果，不是因為我們不知道最初狀態（如舊力學中），而是因為不能知道那些狀態——這是由於量子力學的根本概念使然。

這個概念可概括敘述如下：

1. 量子力學的結論有一顯明的統計性質；牠不關係各個原子或粒子，但關係大量的集團。
2. 我們不能將「可直接觀察的現象」的概念搬到原子內部的宇宙上去；這個細微宇宙受牠自己的定律支配。

我們再看懷疑家怎樣說法。他或許這樣說：「關於近幾年來科學上的進步，我覺得沒有抱熱心的理由。牠不過是暫時的改革，捨鞏固的事實根據而作迷人的（可是很危險的）幻想罷了。牠與永垂不朽固定不移的理論衝突。如果我們不假定自然科學受定命法則支配，那末自然科學也會遭排斥。現在的科學呈出衰落空虛之象，就因為牠拋棄了定命法。科學一定不免回到定命法上來；將來對現象更深刻的了解後，就會露出真正的宇宙，受定命法則支配的宇宙。」

現在我們又來看醉心於現代物理學的人怎樣解說。他知道懷疑家的說法淡而無味，並且毫無意義。所謂細微宇宙受吾人尙未知道的某種定命法則支配，是什麼意義？這樣的說法只是信仰的表現，既不能證實牠，又不能否認牠——意見（科學上沒有牠的地位）的表白。科學必然回到定命法上來，這一信仰從何而來？前世紀最偉大的科學家能預知現世紀現代科學界的景況嗎？將來定律是否採取定命的形式，這問題太不適當。我們所知道的一切卻是：我們應遠避舊物理學的方法，應掃除我們思想上的習慣和根深蒂固的成見，應取得推理的新工具，且在現在。我們的世界概念是照世界的實際情形設想，不是照別的設想。因為理論與實驗之間常常發生認可競爭（struggle for recognition）。

(son) 我們不得不時常藉拋棄我們的現成概念，提煉理論，並藉勇敢的革命的創造工作，去調和牠們的衝突。

由此，我們獲得對於世界更深刻的認識，同時更明白我們無知的範圍是何等的廣大。由於科學的勝利，由於偉大的理論，由於現代科學的進步，我們愈覺四周實在之衆多和豐富與我們理解力之貧弱和有限，差異太大。