

萬 有 文 庫

第二集七百種

王 雲 五 主 編

光 的 世 界

(四)

布 拉 格 著

陳 嶽 生 譯

武 漢 大 學

圖 書 館 藏

商 務 印 書 館 發 行

大 館

萬有文庫

第二集七百種

總編纂者

王雲五

商務印書館發行

光 的 世 界

(四)

著 格 拉 布

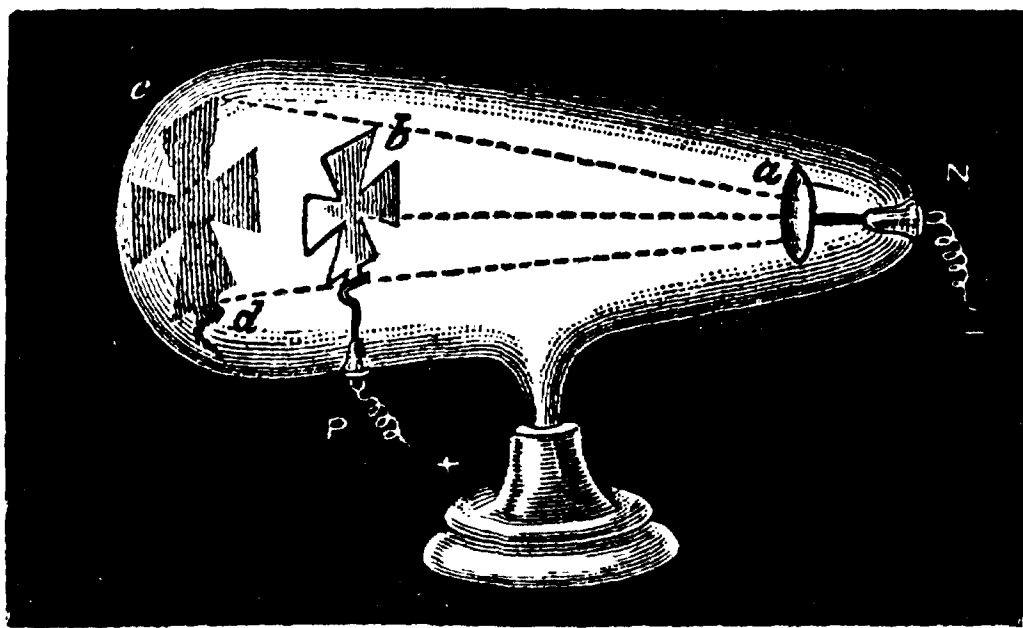
譯 生 嶽 陳

自 然 科 學 小 叢 書

第八章 倫琴射線

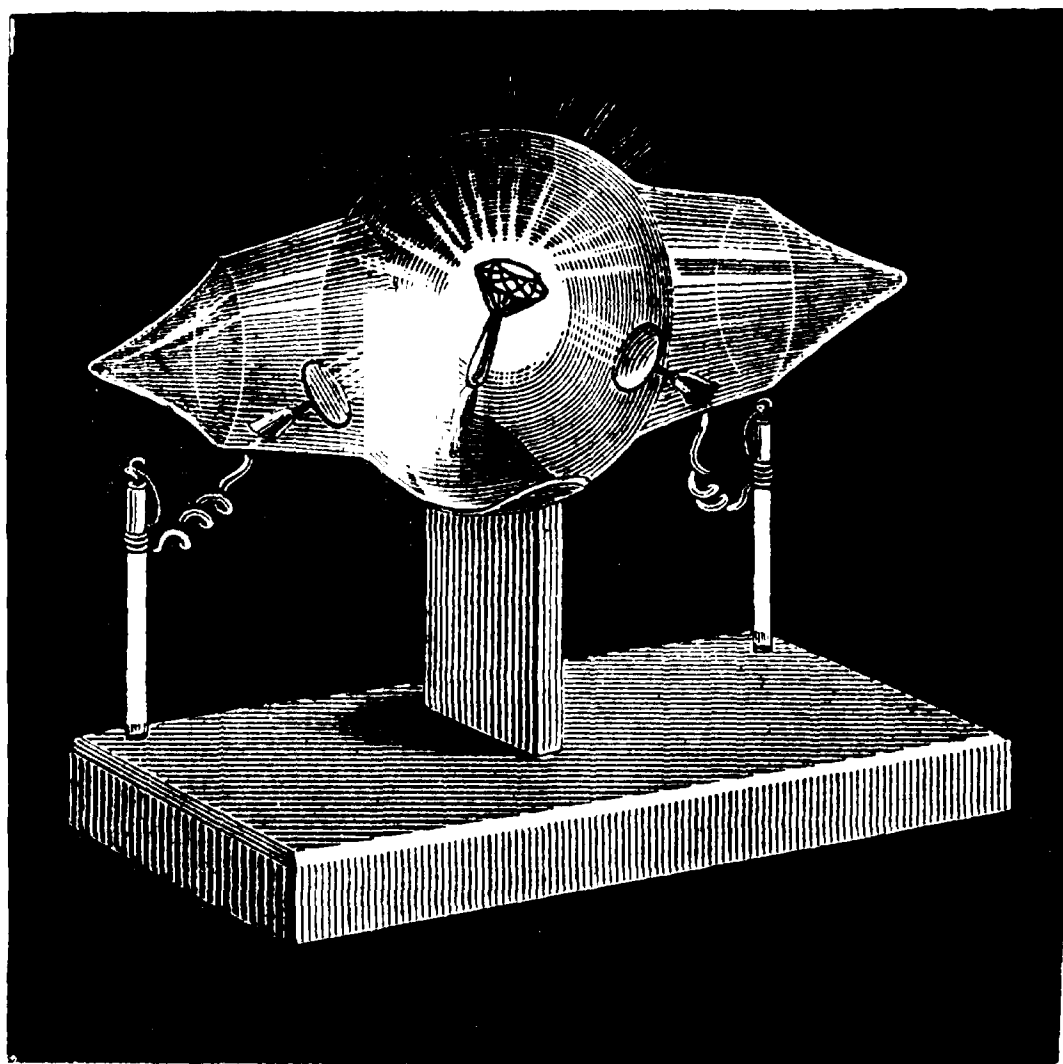
倫琴發見一種新輻射，時在一八九五年，當時因爲它的本性，很難斷定，所以倫琴就叫它做X射線。它與已知各種輻射間的關係，立刻變成了研究得最熱心的題目。倫琴在發見X射線之後，隔了不多幾個星期，他就定出這種射線的特性來，至於它的本性，他卻並不知道。直到一九一二年，當勞厄證明了X射線與平常的光一樣，也能夠被繞射之後，纔經人認定，確係一種波長極短的以太波。勞厄的繞射光柵，是用晶體做的，他的實驗方法，我們不久就要加以考察。所以X射線在本性方面，與光完全相同，但是在品性方面，卻與光大相懸殊：這一種事態，對於我們擴充這種輻射的一般知識，非常有利。它還有特殊的趣味，因爲研究這種短波，可以顯示我們的波動說，雖然在我們所已應用的各方面，證實不虛，卻還沒有完全：舊時的波動說不能夠把爲數極多的新事實，一齊吸收進去。去有一個範圍更廣大的系統，正在自行漸漸形成，這樣一來，所發生的情況，就有最大的興趣了。

X射線的發生，通常總是含有壓力極低的空氣或其他氣體的空間之內，有電花通過或起放電作用的結果，電花成爲有趣味研究的目標，已歷數百年，但是一向沒有什麼大進步，直等到使放電一事，發生於玻璃管或玻璃球內，而管與球中的空氣，多少是完全抽去了的，纔發見種種新奇現象。當管中壓力減低的時候，電花愈變愈長，愈變愈闊，而且顏色更爲明顯。當克魯克斯（Crookes）把空氣唧筒加以改良，使玻璃管中的氣壓，可以減低到大氣壓力的百萬分之幾的時候，就有一種現象發生，此現象以前顯然未曾察見過。陰極於此時變成一種輻射之源，此輻射依直線進行，穿過玻管，而且有力學的效應。當此輻射達於對面的管壁，或任何障礙其進行的物體時，就可發出熱來：它可以激發玻璃與許多礦物的螢光：假使它打在風車的葉子板上，就可使該風車轉動。



(圖九十六) 陰極在 a 的右側。射線在管中直進，而激起對面壁上的螢光。金屬十字形 b，在壁上投一界限分明的影子。

而且它還有一種最重要性質，即此輻射流，可用磁鐵移近它而使它偏向。這是異常重要的觀察，因為由此可以領悟，這種輻射流是疾飛的帶電質點所構成。此種輻射流，同於電流，所以容易受磁石的感動。克魯克斯的實驗，可用圖九十六、九十七、九十八、九十九來說明。這些圖的版子，都是克魯克斯於一八七九年四月在皇家學院的演講稿，印刷時所用的原圖。克魯克斯相信這輻射流，是某種分子而構成的。他爭着說，他的空氣唧筒已到很完備的地步，所以祇有比較少數的分子，留在管內，這些分子可以在管內移動，其所移的距離，可與管的長度相比擬，而彼此並不會碰撞。他又說，這種情形與氣

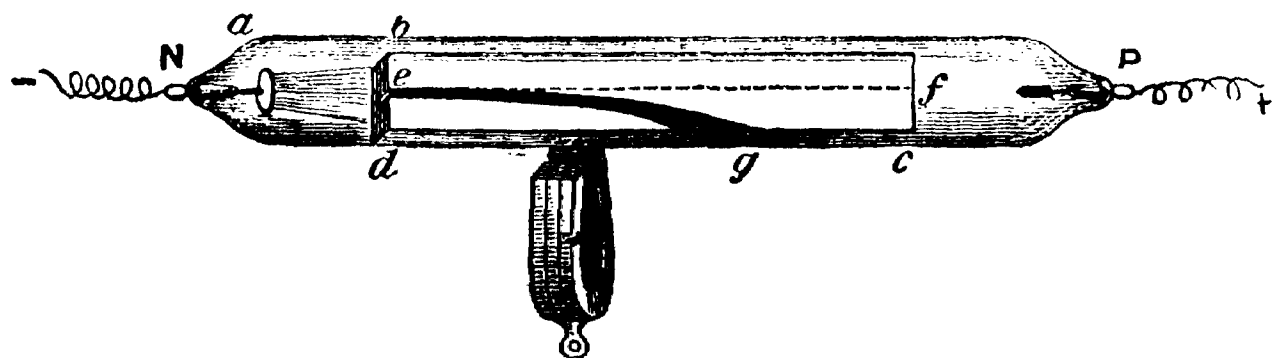


(圖九十七) 真空管中央，裝有金鋼石一枚，受射線的激勵，而發活躍的螢光。

體的差別，猶如氣體與液體之不同，他就在這一年（一八七九），又替皇家學院做了一篇論文，在這論文的末尾，預測這陰極射線的前途，爲文雖然暗昧，措辭卻頗有趣味，而且他的預測，後來有一部分可以應驗。現在把他所說的話，摘錄於下：

「這些真空管裏面的現象，對於物理學顯露了一片新境界，在這新境界中，物質呈其第四狀態而存在，此處可以適用光的微塵說，此處的光，並不常依直線進行；但是這境界裏面，我們卻永遠走不進去，我們祇能够在它的外面觀察，在它的外面做實驗，而自以爲滿足。」

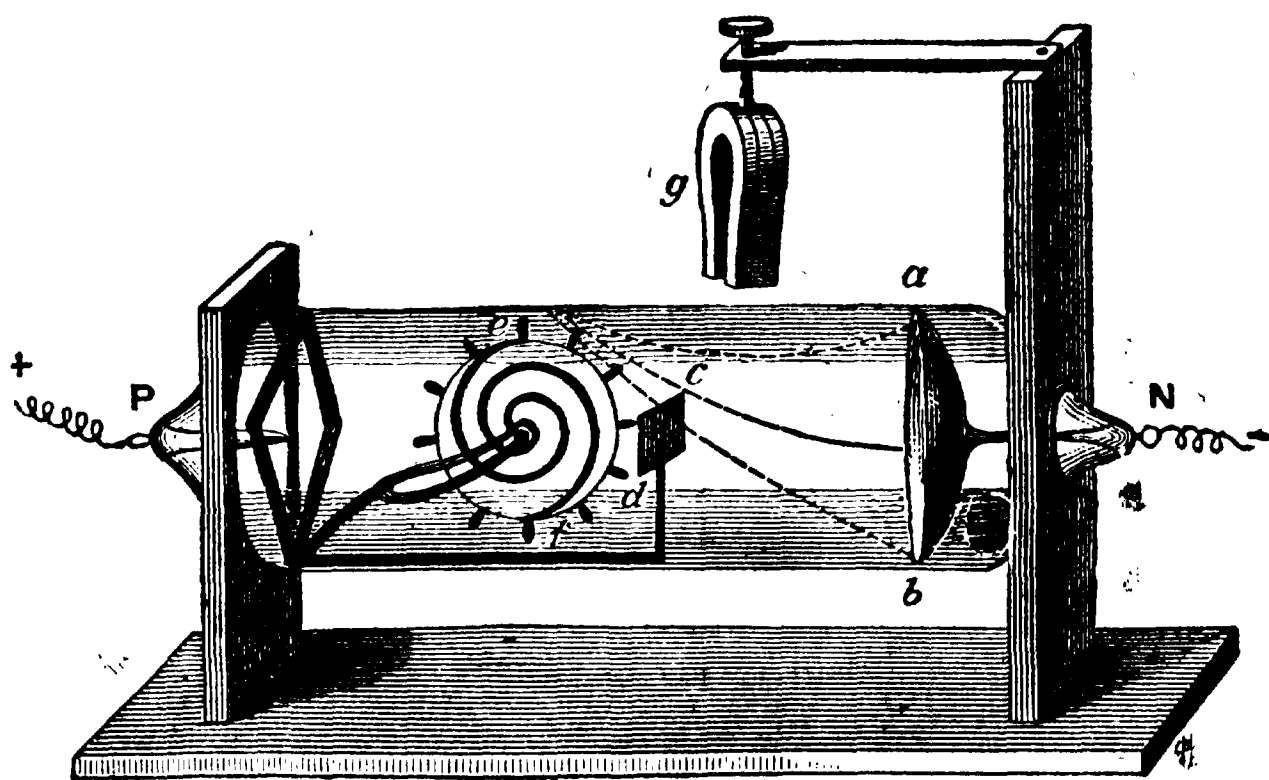
湯姆遜 (J. J. Thomson)、魏孝脫 (Wiechert)，以及其他諸人，都曾表示過，這種輻射流是帶有陰電的質點所組成，而且又表示過，這些質點，比氫原子更小得多。「電子」的名詞，就給與它們。那時他們似乎覺得，假使用感應圈或其他電機，生出必需的功率，而把充分的電力加



(圖九十八) 在 a 處的陰極前方，置一隙縫，使陰極射線通過此隙縫，成爲一狹小的射線束。於是用蹄形磁鐵使此射線偏向，就容易觀察了。

於任何種原子之上，就可以硬使電子脫離該原子；他們還覺得，從一切原子出來的電子，都是完全相同。於是電子這樣東西，顯然變了物質的基本成分了。這種電子流，就叫它做陰極射線，因為它是從陰極發射出來的。

倫琴就是在正當研究陰極射線各現象的時候，發見了近處的照相乾片，雖然決沒有被光照射，而竟變得模糊了。他把這變端的原因，探索一下，就發見有一種輻射，從他實驗用的玻璃球發出，而且特從陰極射線打在玻璃壁上的地方發出；於是他就對



(圖九十九) 陰極 a ，做成一隻茶托的形狀：這樣的陰極，覺得它有把各射線集中於一點的效應。有一塊 c 板，遮住了這些射線，但是磁鐵 g ，使它們偏向，恰能從 c 板的上方過去，而擊在小風車 $e f$ 的葉子板上，這風車於是就很快的轉動起來。假使把磁石的地位顛倒一下，這射線就在 c 板的下方經過，而風車也依反對方向旋轉。

於這種偶然發見的射線，着手考察它的特性。

在許多地方，這射線與光相似。它們依直線進行，而投射界限分明的影子，它們在空間內遊歷，並沒有明顯的物質的遷移，它們對於照相乾片發生作用，它們激勵若干物質，發生螢光，而且它們與紫外光一樣，也夠使導電放電。在另外幾方面。這射線卻似乎與光不同。鏡子、稜鏡以及透鏡，都可使光偏向，但是對於X射線；用平常的方法製成的光柵，不能使它們繞射；晶體的作用，既不發生雙折射現象，也不產生偏極化的現象。此外，它們還具有一種透射物質的非常本領。雖然各種東西，多少總有一些吸收本領，卻似乎沒有一種東西，能夠把它們完全擋住：就吸收本領而論，重的原子，效應大於輕的原子。因此，立刻使我們多了一種本領，凡是不透光的東西，其內部的組織情形，就可以藉這X射線的功用，直接窺見：例如骨頭所投射的影子，比四旁肉所投射的影子，來得深一些。

假使可以證明，X射線的速度，同於光速而一無問題，那麼它們的彼此完全相同，就早已確定：但是此種實驗雖有人試過，卻是太難了。巴克拉 (Barth) 表示X射線束，可以使它發生偏極化，祇要把它們發源的環境，適當地布置一下，但是X射線的偏極化，卻在有些地方，與光的偏極化不

同。等到勞厄的實驗成功，證明了X射線，也可以使它繞射，而且這繞射作用，與光的繞射作用處處相同之後，此疑始釋：假使我們可以倚靠這繞射現象，以證明光的波動說，那麼這同一證據，剛剛又可以維持X射線的波動說了。

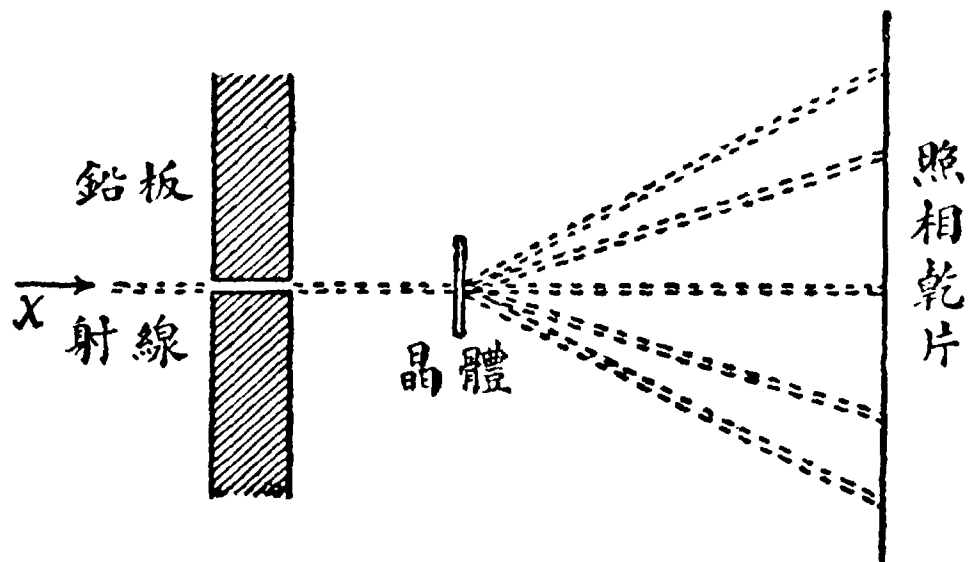
勞厄的實驗

現在讓我們把勞厄的著名實驗，細細考究一下，這實驗的結果，使人十分驚異。一道細小的X射線束，通過一塊晶體，而照在一塊照相乾片上，如圖一百所示。勞厄曾推測照相乾片上所發現的，除因射線束的入射而生的主要之像以外，或許還有其他副像。他的預測，是根據用光試驗時所得的同類效應，這種效應，我們在前面已經說過了。一列以太波，若落在一塊劃有平行槽的板上，或通過一塊板，或通過一層大氣，大氣之中懸浮着大小一致的細質點，那麼「能」的傳布，就起有規則的偏向，所偏方向各各不同，而成爲「繞射」波束。這種效應的例子，我們已經遇到幾個，並且已把它們考究過。就這一類的所有各種情形而論，波的長度與槽的間隔或質點的直徑，彼此間的相差，

決不能十分大。勞厄以爲從前就X射線找尋繞射現象，其所以屢次失敗，或許因爲沒有注意到這一個條件之故。他有若干理由，相信X射線的波長，比光的波長要小幾千倍，如果所料不錯，那麼用尋常的光柵，照尋常的方法，來觀察X射線的繞射效應，當然是無用了。所以若有人要做這種實驗，他就應當採用一種光柵，其條紋的間隔，比平常的光柵，緊密幾千倍。這在實際上是辦不到的事情：決沒有一個人，能够在一英寸之中，畫上好幾百萬條的平行線。

然而大自然卻已替我們預備了一種工具，這種工具，我們人類的工場裏面，萬不能製造，這本是可能的事情。晶體或許是適用於X射線的光柵，因爲我們會假定它的原子，都依一定的規則而排列，其彼此相隔的距離，就可以計算的而論，

與X射線的波長，屬於同級。不問這些預料，其根據是否可靠，當勞厄的同事們，弗律特理煦(Fried-



(圖一百) X射線穿過鉛板上的小孔，衝擊圖中所示的晶體。勞厄的繞射圖案，就在照相乾片上出現。

rich) 與聶彬 (Knipping), 在一九一二年做這實驗, 完全成功的時候, 這些預料就都變成無足重輕了。照相乾片上所現的, 是許多點子的複雜圖案, 但是成功對稱, 這圖案雖然與光的繞射作用所產生的, 有些不同, 其本性顯然無二。其時立刻又發見, 凡是晶體, 各有其自己的圖案, 並且發見這種實驗, 非但啓示了一個新的方法, 可藉以研究 X 射線的本性, 而且還使我們獲得一種新的工具, 可用以分析晶體的結構。銅版圖二十二 A 與 B, 就是這些圖案的例子。它們可與銅版圖二十三 C 互相比擬。

爲了使這幾個主要之點, 可以明瞭起見, 必須把這實驗的詳細情形, 以及它所牽涉的各事, 拿來考察一番, 而所說的話, 當然不可過於冗長。關於晶體結構的現象, 就冰洲石的例子而論, 我們早已考察過幾種了; 不過我們在此處卻宜把這個題目, 重新再考究一下, 並且討論得更普遍一些。

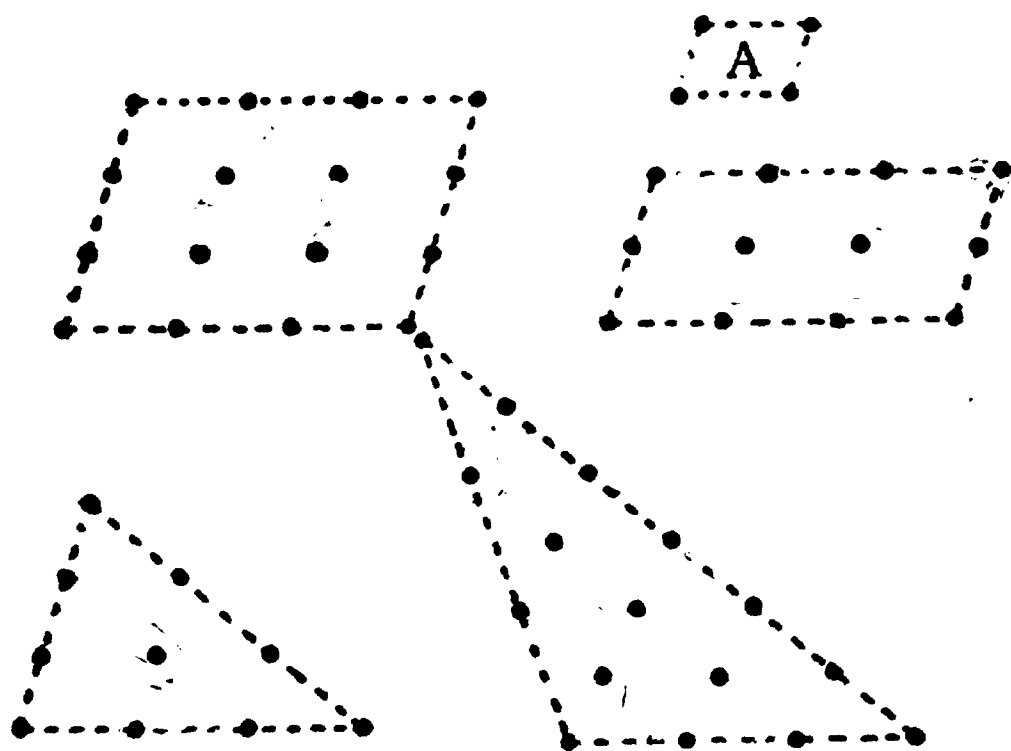
晶體所具最使人驚異的特徵, 便是它的形式整齊, 合乎規律, 表面平滑光潔, 稜角鋒銳分明。假使我們把成分相同的晶體, 拿來比較一下, 我們就覺得各面間所夾的角, 從這一個晶體到那一個晶體, 總是恰恰相同, 絲毫無二; 然而各表面的面積, 其相對值的變化, 卻可以有很大的範圍。用專門

的術語來說，種類相異的晶體，其表面可以有不相等的展開。我們當然要推測到下面這種情形，即晶體的結構，整齊不亂，總有基本的規則，以爲根據，其中包括空間內某單位的重複出現，而這種單位是太小了，無法可見。我們可取一塊織物，來做簡單的比喻；照通常的習慣，織物總是經緯交錯，互相垂直。我們若把這織物撕碎，不問如何撕法，所撕成的各片，它們的四角總歸都是直角；但是各片的形狀，卻未必一定是正方。經緯的排列，有兩個主要的方向，彼此交成直角；把織物撕開，一切撕痕，不是與這一個主方向垂直，便是與那一個主要方向垂直。假使這兩個方向，就其可加以考察的各項特性而論，完全相似，例如撕起來假使一樣容易，又如撕散的邊緣，各面若都相同，那麼經線與緯線，必定完全一樣；它們必由同數的維纖構成，而且有相等的間隔。我們可以很合理的說，這種織物是依據「正方」圖案織成的。即使經線與緯線，都不是簡單的線，而是複雜的線，例如各線若按一定的間隔，攙雜有色的線，情形仍舊是如此。祇要經與緯的重複組織相同，我們仍可以說這圖案是正方形：例如格子花呢，棋盤式花布等等都是。

晶體的結構，其種種複雜情況，要用織物的比喻來代表，當然不足以代表其一切；因爲織物的

經與緯彼此相交，除直角以外，決不能互相傾斜，交成任何角度的：但是這一個比喻，卻說明了下述的重要之點，即在任何結構之中，若此結構是空間內的重複作用所造成，那麼全體的角，必然是常常相同，而各表面的面積，其大小就沒有這種限制。角的形式，則視各方向內所重複的單位如何而定。例如在同一平面內的成分，假使有圖一百零一所示的小單位形式，那麼全體就可以有同圖內所示的種種形狀。其兩邊所夾的角，固然不必常與A的兩邊所夾者相同，但是每一種樣子，各有其不變的交角，這卻是必定如此的。

照樣，在晶狀的固體裏面，也可以把它的表面，展開為種種不同的形狀，這些表面，就其彼此所交成的角而論，都顯得具有同一固定的互相傾斜之



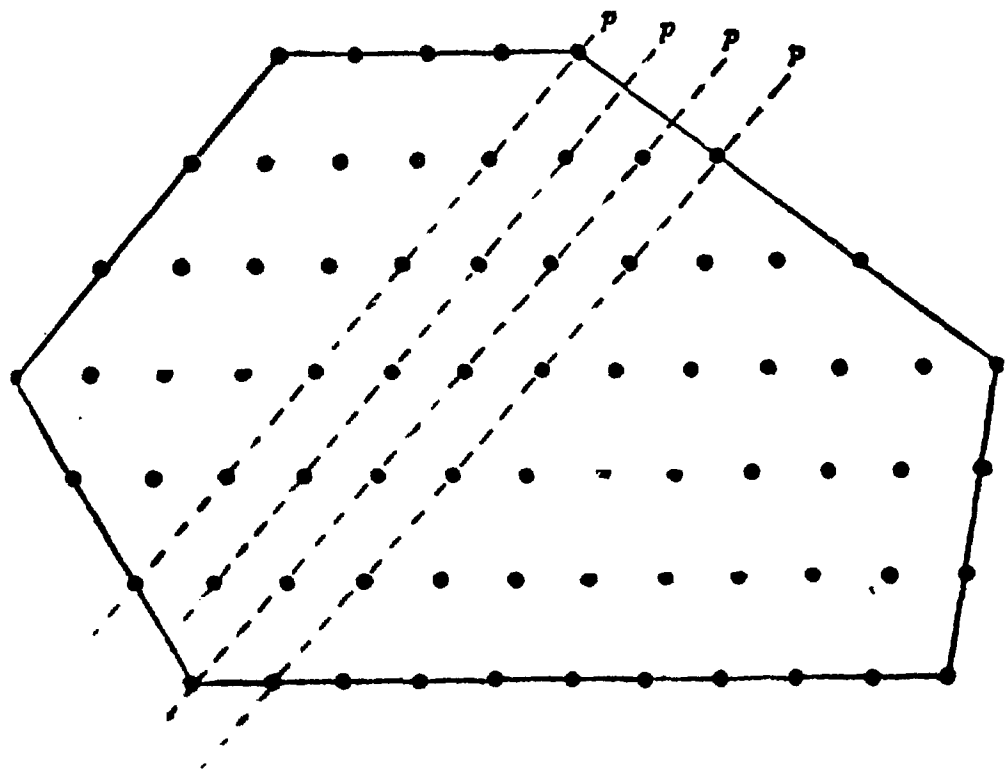
(圖一百零一) 平面圖案の單位，包括在大綱 A 之內。單位的集合，可以集成種種不同的形狀，圖中略舉數例以示。邊緣的互相傾斜，限於交成若干一定的角度。

度。假使晶體是由各單位所組成，而各單位在各方向內的重複，整齊一致，那麼一種情形應當在我們的意料之中；現在既然不出我們所料，事實竟與推想符合，那麼我們以前對於晶體結構所假定的概念，是不錯的了。

我們要問，當以太波列遇到這一種晶狀排列的時候，有什麼事情發生呢？

一個晶體，可以想像它是許多層的組織，接連堆積而成，各層の間隔都相等，好比在二次次的平面裏邊，一組有規則的點的集團，可

以想像它是幾行點子所組成，各行間的距離相等，又如圖一百零二所示，各行可依種種不同的方法排列，與前所舉簡單的例子一樣，所以任何一塊晶體，可以按無限多的方法，分成平行的各層。



(圖一百零二) 此圖中的各點，可依種種不同的方法，排列成行。

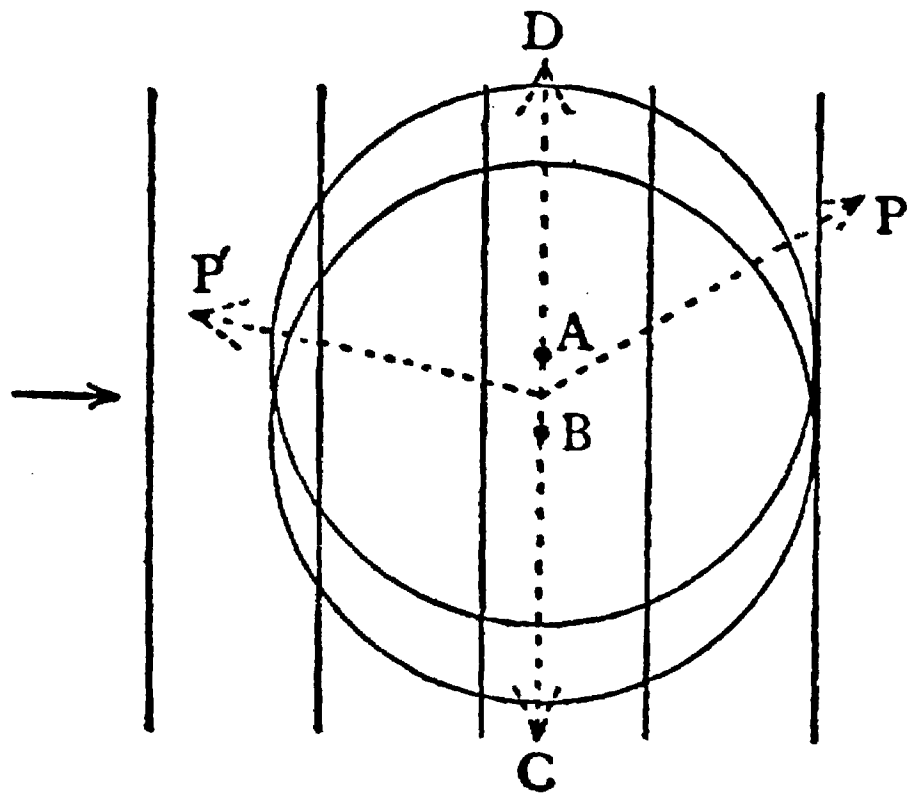
X射線繞射作用的問題，以逐步考究爲便：先考究一個單位的散射作用，然後考究一片單位的散射作用，於是再考究幾片單位層疊而成的整個晶體的散射作用。

晶體裏面的單位，是若干原子依一定的方法排列而成：其成分與排列，此晶體與彼晶體各不相同。當波列遇到了這單位的時候，其中的每個原子，都把波散射出來，而且可以看做一串向外傳布的球形波的中心。經過很短的距離之後，這些球形波互相融合起來，到末了祇有一個球形波，其中心在此單位以內的某一點。然而此等球形波，卻有一個奇特之處，即各方向內的強弱不等。取一個簡單的例子來說，設想此單位是兩個原子A與B所構成，彼此相隔的距離，等於波長的一半，如圖一百零三所示。外來的波，同時到達這兩個原子。由A與B所散射的波，一齊向外出發。在 ABC 方向之內，這兩個波系常常相反：這一波系的峯，恰巧嵌入那一波系的谷。所以在這一個方向之內，它們把彼此的效應都消滅掉。在反對方向 BAD 內，也有同樣的情形發生。但是在其他方向之內，就沒有如此完全的干涉作用：例如在標有字母P的箭頭所指方向之內，它們卻彼此多少互助一些，方向P與方向C或C的偏差愈大，互助愈甚。在此種情形之下，被散射的波連合起來，就有一個球的形式，

但是它的強弱，各方向並不相等。如圖所示，就有C與D兩點，在這地方的波消滅無存。

原子的排列情形與此不同，在這球面上強度的分配狀況，也因此而不同：原子的排列愈複雜，分配的狀況也愈複雜。

然而這種複雜性，對於我們發展現在的辯論，並沒有影響，我們所以要說一說的緣故，不過是爲了使我們的描寫，更來得真實罷了。有一個主要之點，便是無論

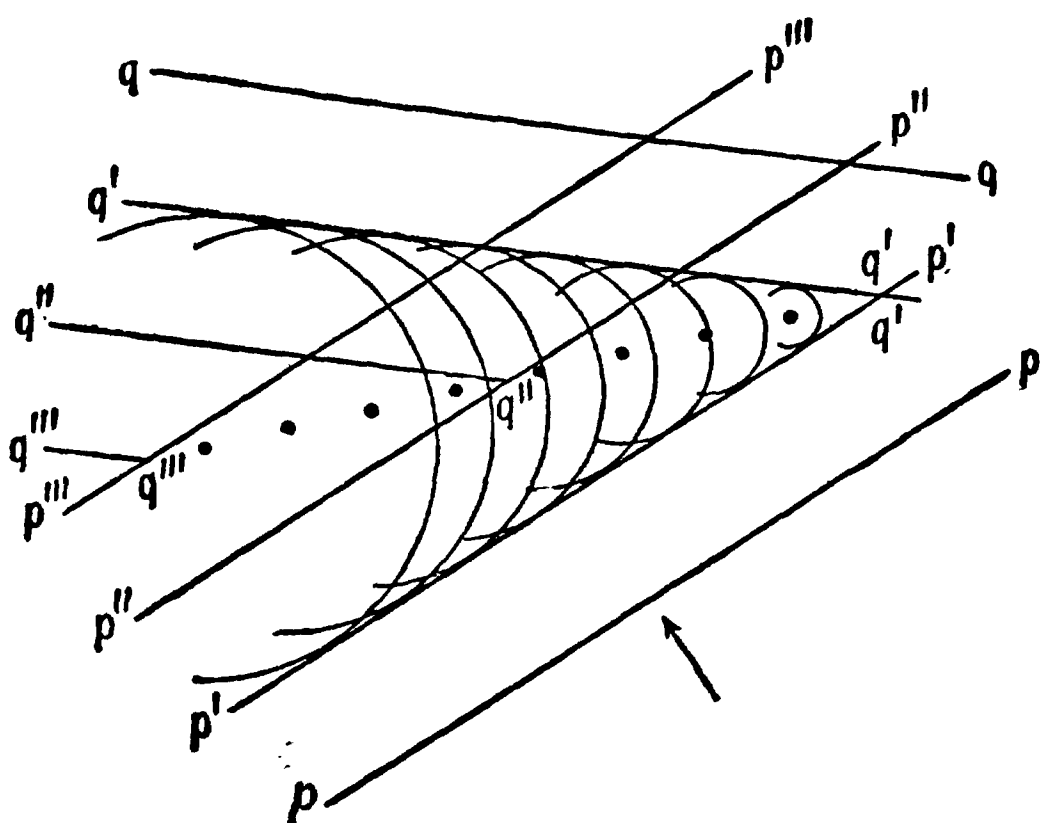


(圖一百零三) 由縱線代表的波，正向 A 與 B 兩原子前進，到達的時候，它們的能，就給 A 與 B 散射掉一部分。這兩個原子的距離，等於波長的一半。向外傳布的球形波，在 A B C 或 B A D 兩方向內，互相消除，因爲一波的峯，適與他波的谷相合。但是在其餘各方向之內，例如圖中標有字母 P 的，卻有一部分的能量被散射出去。這實在是圖七十三的特例。

晶體單位的成分如何，排列如何，所有各單位的行爲，都相同。就目下與我們暫時有關的而論，被散射的球形波表面上，能量分布的處處不等，我們可以不去管它，我們祇要牢牢記住，各波到末了都

成功球形，而且可以看做發源於排列整齊的各點，這些點子就代表各單位的位置。

現在我們繼續把一層內的各單位的聯合效應，拿來考究。假定圖一百零四中的點子，代表一層裏面的圖案，其中若干單位，這一層與紙交成直角。圖中表示有一組波正向各點前進，其截面由直線 pp' 、 $p'p'$ 等等代表。因為每一個波，掃過各點，所以有若干球形波從該點繼續向外傳布，而且這些波聯合成一個反射波。在實際上說來，這是惠更司原理應用的又一例。這是一種簡單的反射，其與鏡子的反射不同之點，祇在下面這件事實，即原來的能量，祇有一部分被反射波帶去。我們由實驗知道，就單獨一層而論，這一部分真是微乎其微：X射線往



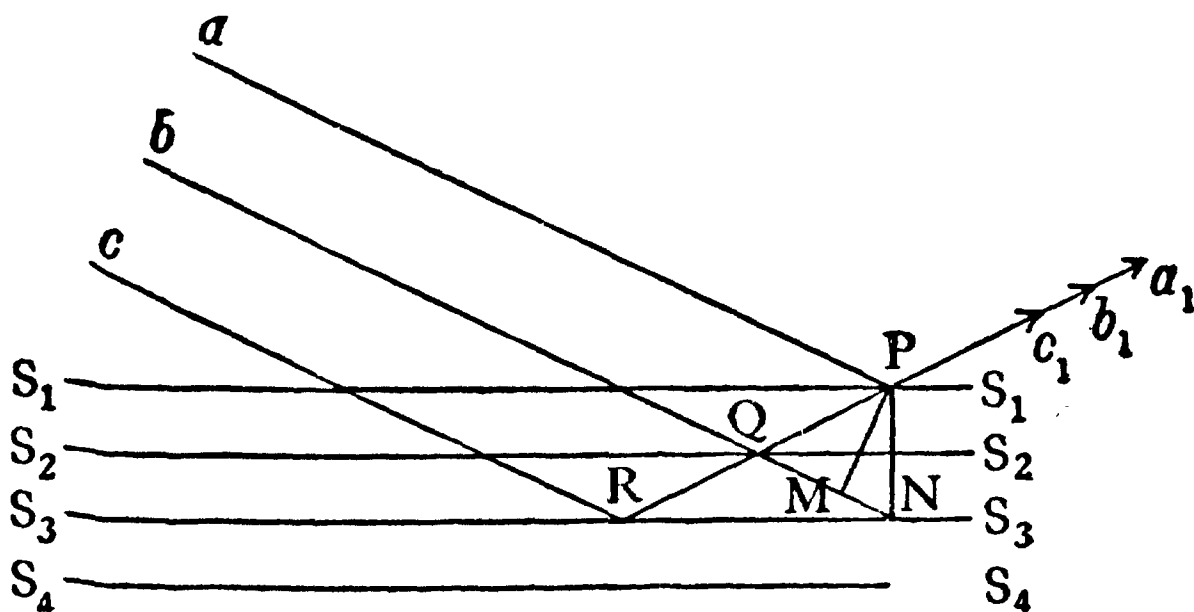
(圖一百零四) p, p', p'', \dots 各波，掃過一排點子，在這地方就有散射作用發生。能的大部分，繼續前進，但是有一小部分，卻被反射，成 q, q', q'', \dots 各波。

往要先掃過幾百萬層，纔能够最後給我們耗費。

就聲音而論，有一種相類的效應，我們時常可以觀察到。在一排鐵欄杆的面前，可以發生整齊的反射作用，而大部分的能，卻通過鐵欄杆，繼續前進。當我們乘着汽車，經過這些鐵欄杆的時候，我們就可以聽見這被反射的聲音。

有一件事情須加以注意，即晶體的各單位，以及圖一百零四中代表這些單位的點子，就單層的效應而論，其間隔無需均勻一致。鐵欄杆的排列，雖不整齊，也可以發出回聲來：即使是籬笆，也可以聽見它所反射的聲音。非等到晶體內不同的許多組平面，其所具反射的可能性，由我們加以考究的時候，各單位的排列整齊與否，是無關緊要的。

在圖一百零五中，我們作直線 S_1 、 S_2 、 S_3 等等，代表這些



(圖一百零五) 本圖表示間隔相等的各層，把波列反射出來，每一層能够反射這波列所有能量的一小部分。

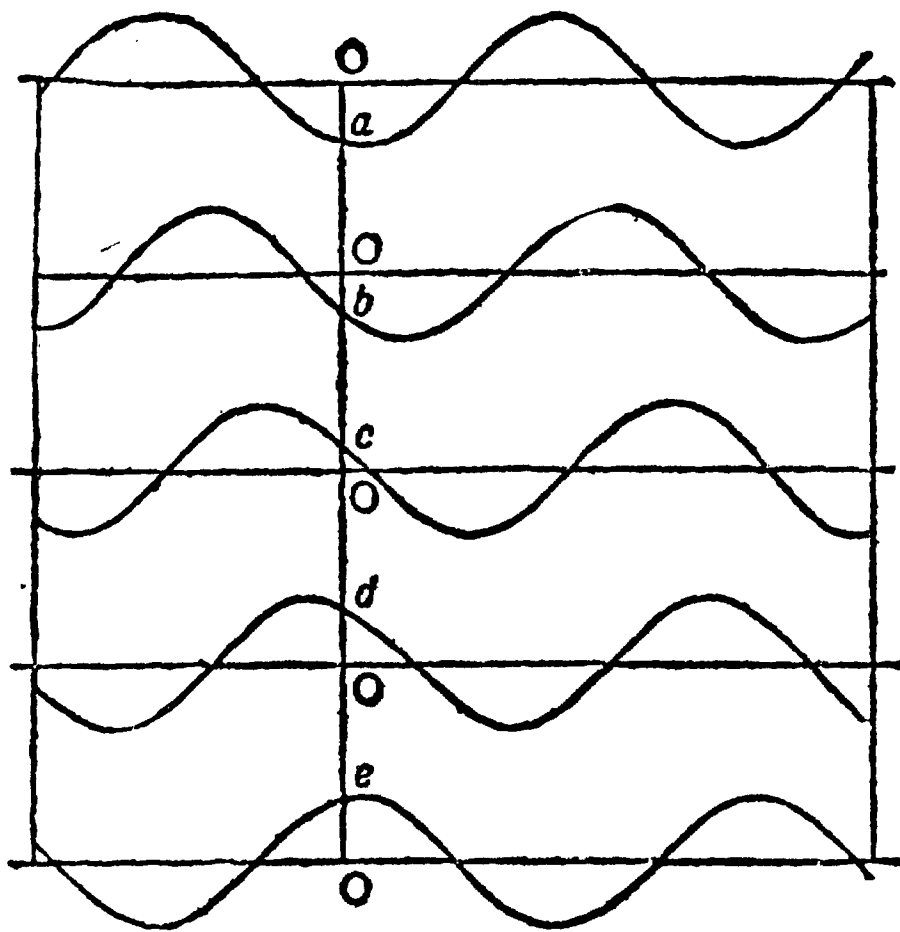
單層的各接口；我們所以把它們畫成完全直線，而不把它們畫成若干排點子，其故是因為單位或代表單位的點子，其在各層中的位置，不論在什麼地方，是無關緊要的。又為便利起見，波動進行的方向，我們也用直線表示，不再把波的本身畫出來。例如 aPa_1 所代表的，便是我們適纔所討論過的，在單層內的反射情形。除 aPa_1 所代表的一組以外，另外還有一種反射情形，由 bQb_1 折線代表，又有一種由 cRc_1 代表，諸如此類，該圖的大小，在有幾個方向內故意放寬，以便將根據此圖的論證，表示得更明白一些。各層間的距離，在實際上與光束的寬度比較起來，是很微很微的。每一條射線，例如 bQb_1 其所代表向前進行的波列，波前很闊，所以各反射波列的左右翼互相重疊。

由 bQb_1 所代表的波組，必須比 aPa_1 所代表的波組，多行若干路，纔能夠再出現而與後者聯合起來。假使我們作垂直線 PM 與 PN ，那麼 MN 就是多行的距離。

波組 cRc_1 落後於 bQb_1 的距離，與 bQb_1 落後於 aPa_1 的距離，剛剛相等，因為各層的間隔，距離相等。在這次反射的後面，其他各次反射，也按一定的間隔跟上來。晶體所反射的波，便是所有這些波的總和。我們可以用圖一百零六，表示這些波相加的情形，在這圖裏面，代表各組反射波的正弦曲線，上下分

列：在下的各波，比在上的各波落後距離MN。這些波可以加起來；例如沿着圖一百零六所示的縱線，我們可以把Oa、Ob、Oc等等，加在一起，水平線上方的各量，給它們正號，水平線下方的各量，給它們負號。這些量的總和，通常總

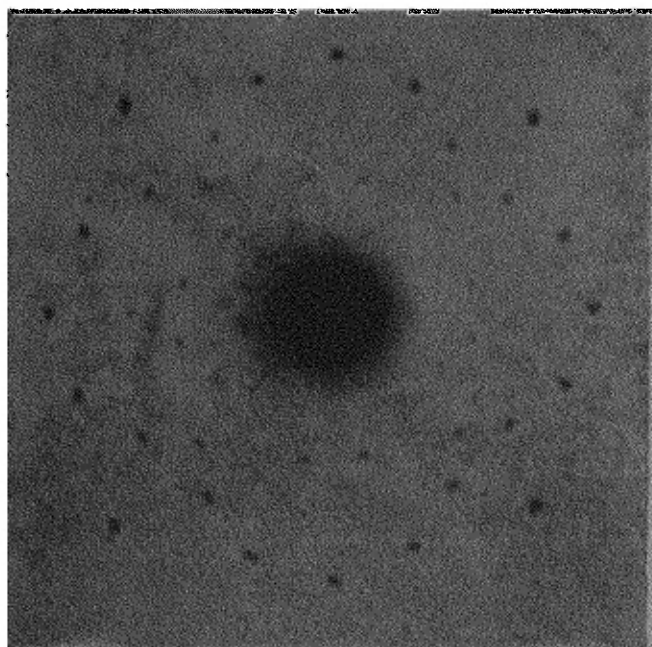
是零，因為它們在水平線以上的機會，正與在水平線以下的機會一樣多，而且它們全體的總數，共計好幾百萬個，所以可在其中求得一切可能的大小，一直到極大的量為止。這句話的意思是說，沒有被



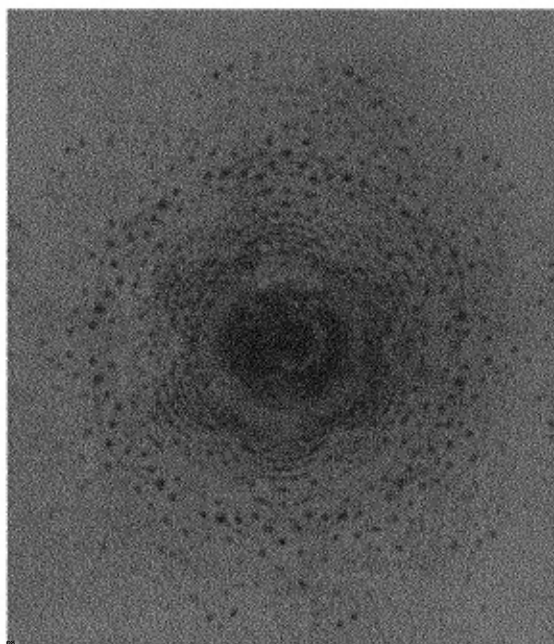
(圖一百零六) 此圖表示圖一百零五中的各反射波，假使全體不完全同位相，那麼各波加起來就等於零。 $oa+ob+oc+\dots$ 這一個數量是零，因為在必須加起來的幾百萬項之中，正項與負項的項數是相等的。除非各反射波的位相都同，即一組波的波峯，恰在其餘各組波的波峯之上或下（就本圖而論），在這時候，方纔沒有這種等於零的情形。

反射的光束：它的各成分，都已互相毀滅了。對於這一條定則，祇有一個例外。假使落後的距離，恰等

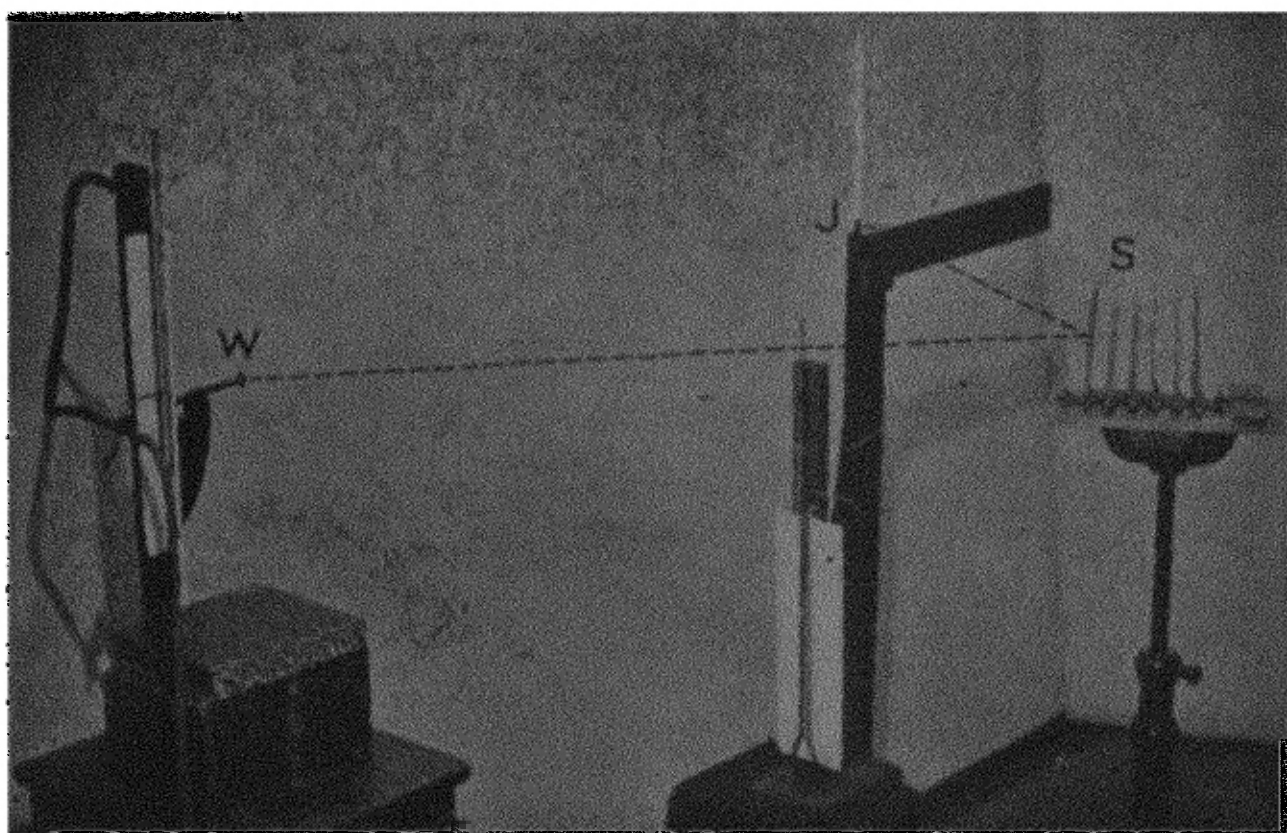
銅版圖二十二



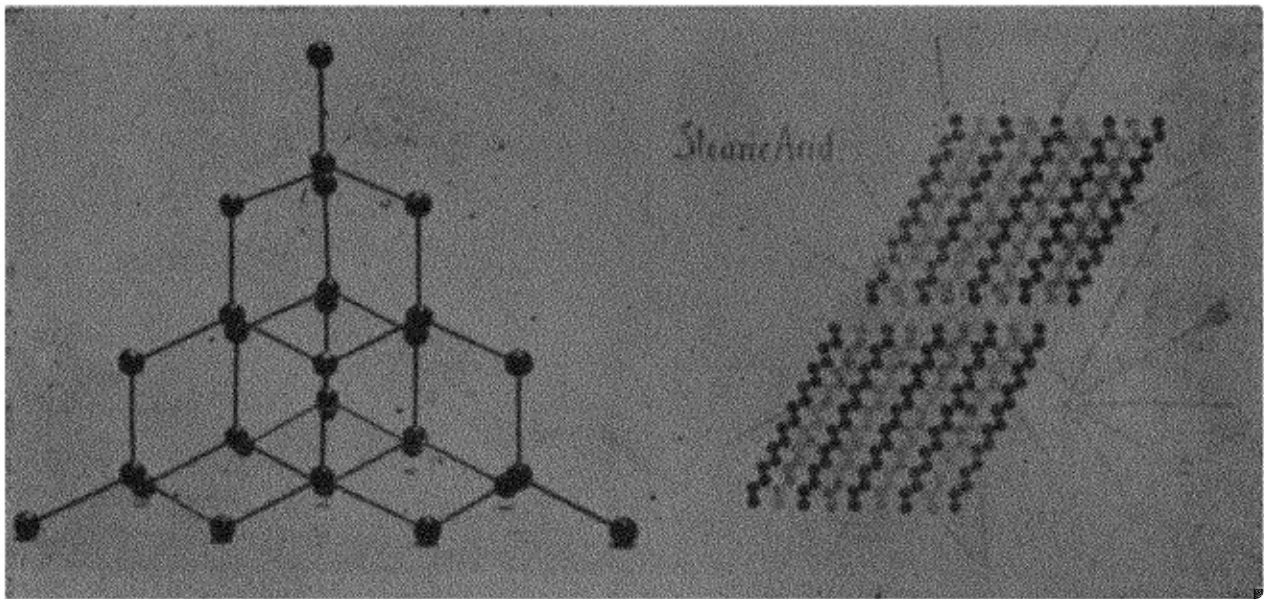
A. 岩鹽的 X 射線繞射光譜
(參閱第二八五頁)。



B K-flophillite 的 X 射線繞射光譜 (參閱第二八五頁)。班尼斯德(Bannister) 所攝]。

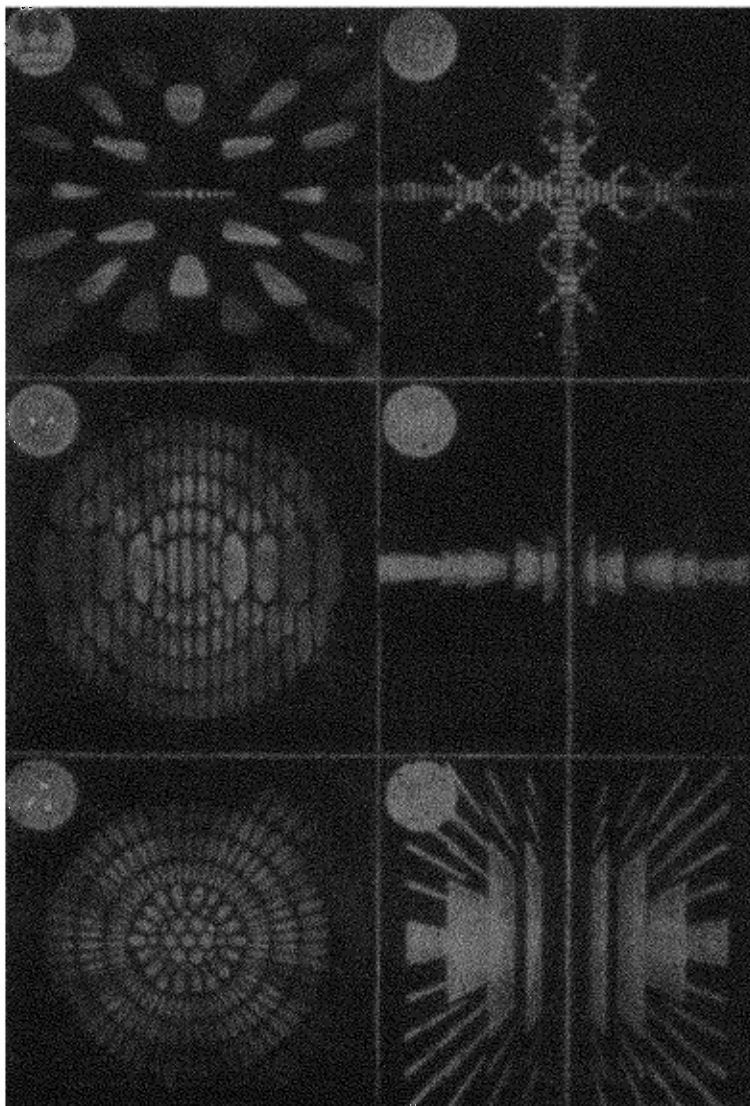


C. 此照相所示者，是雷理爵士實驗所用的器具，見本書第二九六至七頁。叫子在 W 地方，一組紗屏在 S 處，而發光氣體在 J。虛線約略表示聲波影響到氣注的路徑。從這照相看來，知道這時候沒有聲音，或屏(見圖中右側)的地位不適當，以致它們所反射的聲波，不能夠互相加強。J 處的噴口，因為形式奇特，所以從 W 直接傳到 J 的聲波，不會使靈燄受到影響。當紗屏的間隔，長短適宜的時候，火燄就會伸縮搖擺起來。



A. 表示金剛石結構的模型。每一個黑球，代表一個碳原子，不過所表示者是各原子相對的位置，並不是形式和大小。相鄰兩原子中心的距離，等於 1.54 埃（一埃等於一釐米的一萬萬分之一）（參閱第二九九頁）。

B. 硬脂酸晶體分子的排列狀況。每一排鋸齒狀的圓點羣，代表單獨一個分子裏的碳原子。相鄰兩個碳原子的中心，距離等於 1.54 埃，與金剛石相同。A 與 B 這兩個模型，其製造所據的比例尺不同。氫原子圖中未示（參閱第二九九頁）。



C. 夫牢因和斐 (Fraunhofer) 所攝的一組光學繞射光譜，採自古禮銘所著自然之力一書。就每一光譜而論，光的繞射，都是含有羽毛一部分的屏所致。原圖是有彩色的，但是在這複製的照相裏面，顏色的差別卻沒有表示出來。這些光學光譜。可與銅版圖二十二 A、B 的 X 射線光譜，互相比較（參閱第二八五頁）。

於一波長，或二波長，或三波長，或波長的任何整倍量，以至於圖一百零六中所示的各正弦曲線，彼此上下恰恰相對，那麼它們全體的總和，就剛剛等於其中一量的倍量，而且因為乘數很大之故，所以反射作用也很大。被反射的能量，當然決不能比入射的能量來得大，但是由計算，卻知道在反射角兩側的極小範圍之內，反射是完全的。

落後的多少，看兩種數量而定，一種是入射光線射在晶體表面上的角度，還有一種是各層的間隔。假使入射光線差不多與晶體表面垂直，那麼落後就等於相鄰二層間距離的兩倍；這是落後的極大值。入射的光線愈偏斜，落後愈小；斜到差不多掠入表面，落後就變得很小很小了。所以祇要波長不十分大，必然常有某特別入射角，光線依此角入射時，其落後恰等於一波長，或竟等於幾波長；而反射光線也依此角跳出來，很強烈的跳出來。

假使原來的射線，祇有一種波長，那麼我們必須把晶體旋轉，直到入射角度等於適當的數值而止。假使入射角有固定之值，那麼我們可把混合的射線柱，投射於晶體之上，以得反射作用，因為波長既不止一種，自有適合的射線，被選作反射之用，而其餘不合格的，仍舊通過。已故雷理爵士，

有一次在皇家學院演講，曾表示過聲學方面的一種相類的實驗。因為實驗中各數量的大小，遠比X射線來得大，所以對於體會X射線的情形，頗有裨益。雷理實驗時，用音調極高的叫子一隻（所謂鳥笛的便是），發出很短的聲波來。這些波的長度，祇不過一英寸左右，比尋常說話的聲波短得多，然而比起X射線的以太波來，卻還要大上這麼好幾萬萬倍。所發純音之高，有許多人的耳朵不能夠聽得見，尤其是老年人的耳朵，更聽不見。另製紗屏多少座，每屏大約一英尺見方，把它們平行排成一串，插在一個菱形網眼活動架上，此架可以拉長，可以縮短，因而各紗屏的間隔，長程也可以變化。就我們現在的目的而論，這些紗屏，可以把它們看做相當於圖一百零五的各層：每一紗屏，可以以把入射的聲波，反射其一小部分，但是卻讓大部分透過去。

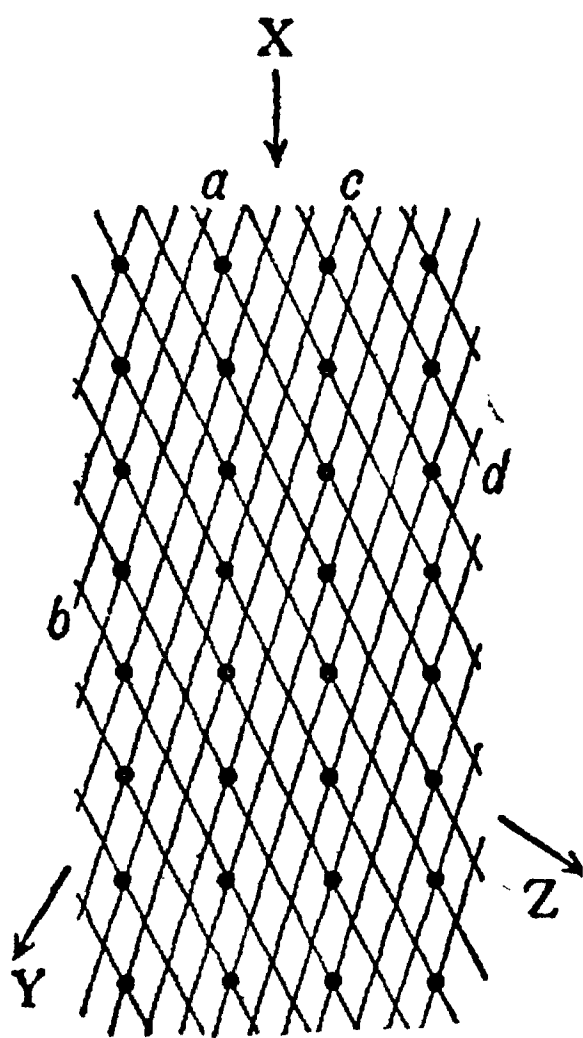
現在假使照銅版圖二十二C所示的樣子，把叫子與紗屏布置好，那麼叫子所發的聲波，就可以被紗屏反射。反射的聲音，如果是有的話，很容易查察出來，祇要借用「靈燄」好了。這靈燄是受到了巨大壓力，從細長的管子，經過窄小的噴口，噴出管外的發光氣注。壓力可加以調節，使火燄恰到發閃光的地步，在這種環境之下，高音調的聲波，可以使這火燄伸縮閃動，俯仰生姿，煞是奇觀之

至。這效應的直接的原因，便是聲波裏面的壓力，高低變化得很快之故。靈燄的地位，務須適宜合度，要使它恰能把或有的反射聲波，查察出來，又要用屏遮住它，使它不受烏笛的任何直接作用。

假使借菱形網眼活動架的進退自如，而把各紗屏間的距離，漸漸繼續改變，那麼靈燄就有時閃動，有時寧靜，相間相繼。這種效應，與我們剛纔所說的X射線效應，理由相同。假使靈燄閃動不安，就表示從各屏陸續而來的反射，共同協助；此項現象的發生，就因為各屏的間隔，恰恰調節到適當地步，使這一次反射落後於那一次反射，恰是波長的整倍量。

雷理做這類似的實驗，其目的在於解釋氯酸鉀晶體何以呈現光明燦爛的顏色。這些晶體，具有奇特的構造，其所由組成的各層，錯綜相間，而此項結晶的材料，其不同之處，祇在於它們結晶軸的取向有異罷了。各層的厚度，比了紗屏的間隔，要小好幾千倍，但是比晶體單位所排成的各層的間隔，還大好幾千倍。它的大小，與可見之光的波長同級。這三種情形，都可以用同一的理論來說明。我們還有一點，須得考究一下，纔能夠知道勞厄實驗的可貴。我們必須牢記，晶體的可以被分成平行各層，其方法不止一種，而有無限之多。假定圖一百零七所代表的，是立方晶體內（譬如這

樣說)各單位的排列情況。用這種圖表示晶體結構，所可容易表示的，不過是平行於本圖紙張的截面。我們可以把所分成的各層，當做都與 ab 平行，而就這一組平行層而論，對於 X 射線將有部分反射作用。原來的射線束，必定含有種種波長，其中有那適當的，將經精選而依 Y 方向被反射，反射的各波，其彼此的落後，等於波長：落後的多少，視各層的間隔與入射角而定，這是我們早已說過的了。



(圖一百零七) 各黑點代表立方晶體的單位。本圖與真正大小的比，約為一億與一之比。用 X 表示的方向，是 X 射線的入射方向。在 Y 方向內的反射，由平行於 ab 的平面所致；在 Z 方向內的反射，由平行於 cd 的平面所致。此外還有別的方向內，也起反射作用，圖中未能一一指示。

這晶體又可以分成另外一組單層，與本圖平面的交線，平行於 cd 。就這一種情形而論，反射的發生，其角度與前並不相同，而且被反射的波長，也與前一種相異。這一道被反射的射線，依 Z 的方向出去，而在照相乾片上又留下了一個黑點。

所以有許多被反射的射線，同時射出，而在照相乾片上各自留下它的印象。假使晶體是一個立方，而入射線與其一稜平行，那麼所造成的圖案，將依互相垂直的二直線成功對稱，一如銅版圖二十二A所示。在另外一方面說來，假使這晶體是正六角形，那麼我們就得一個六邊的圖案，如銅版圖二十二B所示。我們由觀察而得的結果，以及由計算而有的預料，其間凡是符合之處，都完全無缺，所以基本的假說，顯然沒有錯誤。要說X射線也是以太波，其理由與說光的本身是以太波，正復相同。

銅版圖二十二所示勞厄照相的二例，彼此相差很大：由這種差別，可見這一類的照相，是五花八門，各各不同。每一種晶體，都有它自己所簽的花押。就有些情形而論，從晶體所特繪的圖畫，很容易推知它的結構。但是再就別的情形而說，做成功這件事情，卻很困難：以現在的工具與技術，所不能勝任的，例子正還多得。因為凡是固體物質，都含有一部分晶體，又因為其中有許許多多，全體由無數晶體聚集而成，所以我們立可領悟，對於晶體結構所具的知識，往往可藉以解釋該物質的各項特性。銅版圖二十三A與B，是本書所略舉的二例；不過這一個問題，要在這裏詳細討論，為

篇幅所不許，其實是不可能，因為目下這問題的進展，一日千里，以至於須用盈篇累牘的文章，纔能够說明它的合理的原因。我們知道了X射線可以看做以太波，業經證明無誤，也就非滿足不可了。

放射質所發的幾種射線，要把它們同歸於以太波這一類，也很容易。這些射線，叫做 γ 射線。有人繼勞厄的實驗，而對於這問題作初次的發展之後，馬上又有人證明， γ 射線也可以被岩鹽的晶體所反射，情形正與X射線完全相同。假使X射線是以太波，那麼 γ 射線必定也是以太波。後者的透射本領，更比X射線來得大，它們可以透過幾英寸厚的鉛板，而且還可以保持原來強度的一大部分。

在這些階級的另一端，便是廣播所用的以太波。這些波是用電機產生的。當馬士威計算此種波的速度，而發見與光的速度相等之時，即已證明它們的本性，與光的本性相同。自從那個時候起，就假定光是一種電磁擾動，由此假定，引起了許多計算，這些計算，都已經有實驗證明無誤。

所以總而言之，我們覺得我們已能觀察的以太波，其波長的相差，很大很大。我們開始從無線電工作所用的長波說起：這些波是用電力產生的，長的好幾百米。把發電機的尺寸縮小，我們可

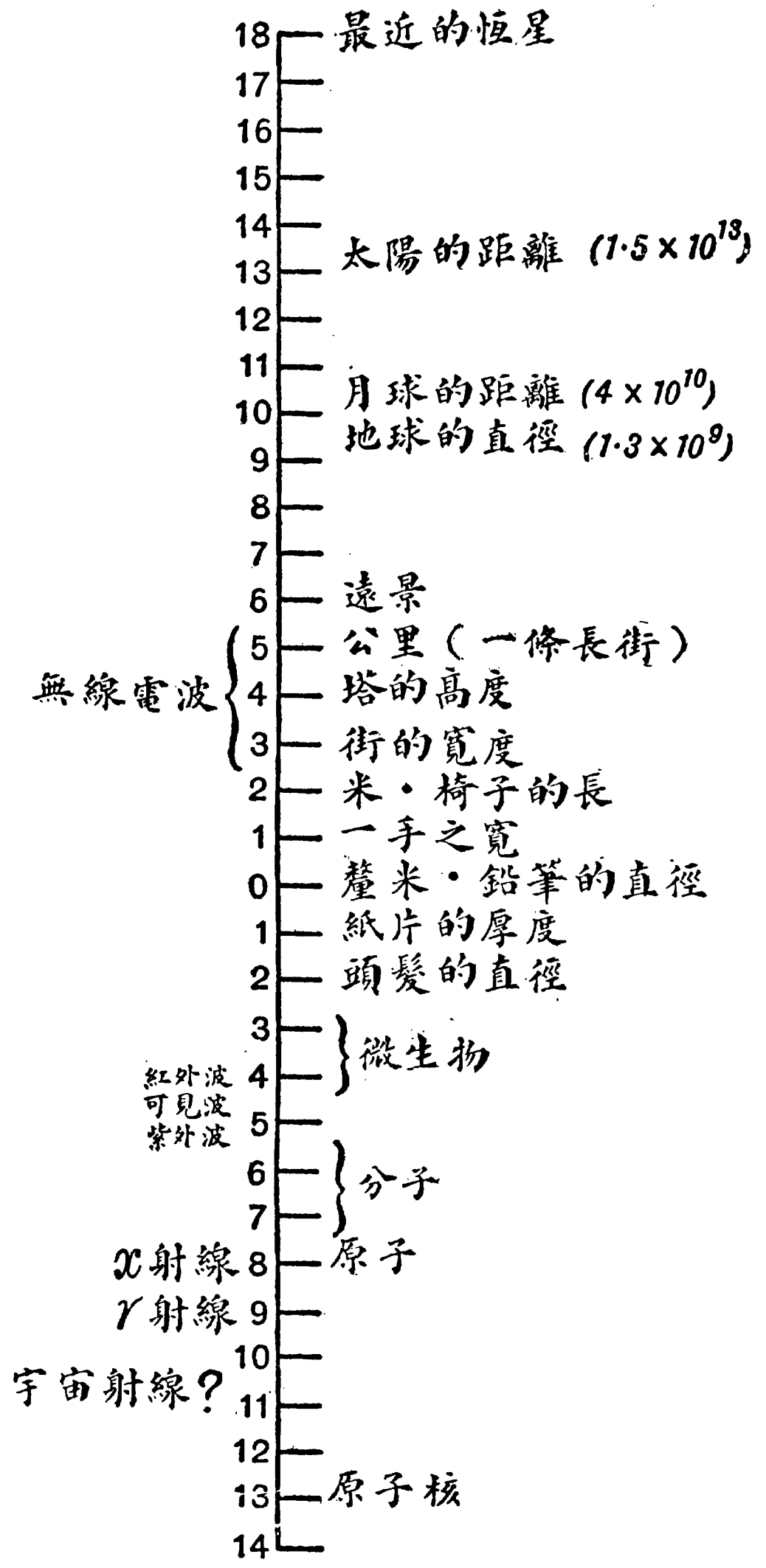
以把波長也相當地縮小，而且我們已經知道，在此種情形之下，可以運用二釐米或三釐米長的無線電波，由此以下，有一段缺口，爲了學術上的理由，要把此缺口填補，殊感棘手，但是我們再把斷線檢起，與前遙相啣接，仍循此線一貫而下，就到了所謂紅外線的振動的地界，在這裏的波長，祇有一釐米的萬分之幾。於是往下就入於可見的範圍，我們對於這個範圍所有的知識，當然比其餘多一些：這一個範圍，十分狹小，因爲極端的紅色，其波長比一釐米的一萬分之一還小一些，而極端的青色，波長約等於此數的一半。我們可以說，全部範圍，成功一個倍頻程。其次就是紫外線，這一個名詞的意義，通常指恰在可見範圍以外的波長，一直到尙未確定的數值，讓我們姑且說，到一釐米的十萬分之幾。再下去的區域，又很難探悉，在這區域裏面的射線，被大氣大量吸收，因而一切研究工作，必須在真空裏面實行。要渡過這個缺口，以達彼岸的X射線，一向認爲非常困難；然而在近來這幾年之中，此項任務，卻已大功告成。在X射線區域內，工作又變得容易了：再下去就到 γ 射線，其透射力漸漸增加，最後或許就是所謂「宇宙射線」，據說此種射線，來自空間，透射力異常強大，而且與 γ 射線似乎同宗。爲便於說明起見，我們可把這幾種射線的大小，排列成一張表，同時再添入幾種

別的數量，以作比較。

以太波的範圍，我們已綜覽其全部，而得其概況。現在我們可把測定波長的方法，稍稍說一說，以作此章的結束。這些方法之中，多半靠着繞射光柵的利用，我們在第四章的末了，已經提過了。假使一道光線，垂直射在繞射光柵上，如圖六十九所示，那麼繞射光束就向左右兩側散開：這些光束與原光線的方向所成之角，要看波長與光柵條紋間的距離之比而定，當光柵在劃線機中劃線的時候，每一釐米中可劃多少線，全視該機動作部分的排列而定，因而這是一個知道的數目。所以當這角度一經測定之後，波長的計算，就很容易了。

此表所示者，是我們觀察與測量的各種物體，其大小的比較。這表好像一只書架，架上放着各種大小物體的樣品，由極大以至極小。在中央的一格上，我們用零做標記，我們用一釐米的長度單位，以及鉛筆的直徑，來代這一級物體的大小。在零以上的一格上，我們放一個大小約十釐米的物體；一手的寬度，差不多可以代表。再上去一格的物體，長約一百釐米，例如小的傢具。街道的寬，可以代表一千釐米；塔的高，可以代表一萬釐米，或一百米；再上去的各種長度，見左表不贅。在零下的一格上，可放一毫米的物體，例如一張紙片；於是再下來到一莖頭髮的粗細，其餘見左表不贅。微生物在零下第三格與第四格，其大小不等；分子在第六格與第七格；原子差不多在第八格上。縱線的左側，用同一排列大小的方法，表示種種的波長。距離也有用數目表示的。例如太陽的距離，是十五兆釐米，或者用記號寫成 1.5×10^{13} 。所以把它寫在第十三格以上。

長，不過這件事情，最近纔得成功。第一次測量X射線的波長，利用晶體做繞射光柵，而以此為測量紅外線與紫外線的波長，也可以應用光柵法來測定。連X射線，也可以用這方法測定它的波



的根據。簡單的晶體，像岩鹽或方解石之類，其結構一經知曉之後，晶體圖案重複的距離，馬上就可以計算出來。原子的重量，從化學與物理學兩方面加以考究，是測得非常精確的了。現在又知道了晶體中原子的排列狀況，各原子的間隔，當然也可以測定。例如就岩鹽而論，它的原子是依直行排列的：一立方釐米的岩鹽，它的重量可以衡定，鈉原子與氯原子的重量，也都是已知數：從這幾個數字，晶體各層的間隔，就可以照式推算。X射線束由晶體的反射，若加以觀察（如圖一百零五所示），其反射角若加以測定，那麼X射線的波長，就變成已知數了，至於這些測量的詳細說明，另見專書，此處不能盡述。

更近的時候，X射線的繞射作用，已能用平常的光柵，加以觀察。行此實驗，入射角必須很大，即入射線必須極偏斜，因為人造光柵的間隔，與波長的相差很大之故。我們總還記得，這種實驗，以前似乎覺得太難，因而未曾嘗試，勞厄的提議利用晶體，就爲了這個緣故。然而X射線完全與光同宗的證明，以及測量波長的重要，卻自然而然的鼓勵我們再加嘗試，終究得告成功。這種新的方法，比利用晶體的方法，有更爲準確的可能性。新法比舊法當然更直接一些。不過用晶體的方法，有一點

值得加以注意，即X射線的各種波長彼此相比，以及晶體間隔的彼此相比，其準確的程度，遠勝於二者與標準長度相比較。

γ 射線的波長，也可以借晶體的幫助而求得。現在祇剩下無線電長波的測定方法，尙未說及。這些波的長度，可從觀察頻率而求得，即可從其每秒振動數推算。以太波的一般速度，是已經知道的，所以從頻率即可推算它的波長。

第九章 波與微粒

在前一章裏面，我們已經知道，有範圍很廣的各種以太波，可供我們實驗時任意取用。其中有幾種在很狹窄的範圍之內，我們的眼睛可以看見它們；除此以外，可由它們對於照相乾片的作用，而把它們查察出來。極長的無線電波，可藉幾種電器的組合，所謂無線電收音機的幫助，而給我們感覺到。現在我們急須把其他檢查以太波的方法，加以考究如下：

我們把光當做以太內的一種波動，是由光所特有的現象，惹起我們作如是想的，這種現象，在輻射的全部範圍之內，到處呈露；尤其是繞射現象，更爲普及，這種現象，我們已經大大的利用過了。我們可以預期，任何別的現象，我們若可以發見有一種品性的輻射，使此項現象呈露，那麼其餘的一切輻射，也必顯示此種現象。

有一種很特殊的現象，由波長最短的輻射，表現得非常顯著；長波也表現這種現象，不過可觀

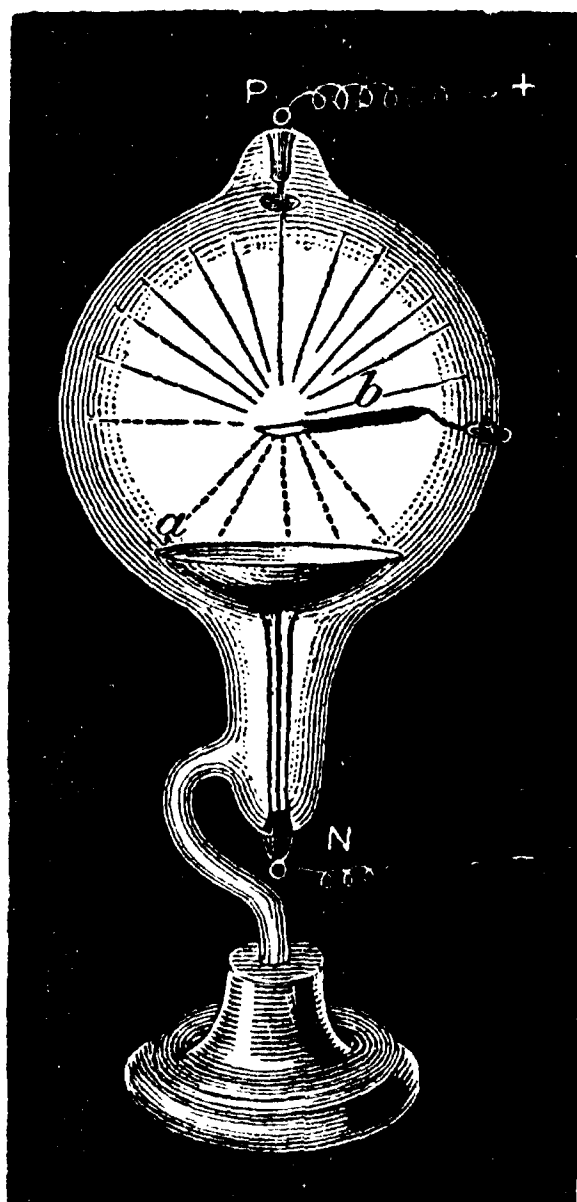
察的程度差一些：這便是所謂光電效應。就這一點而論，幫助了我們很久的波動說，竟不能提議任何解釋而告失敗。表示我們的波動假說，並不完全，而且使我們的物理學，目下處於奇特之境者，就是這件事實，以及與這有連帶關係的其他事實。在一九〇五年，愛因斯坦就提議，以爲光的微粒說，棄置得太急了。

光電效應

描寫光電效應，是很容易的事情。光射在任何實質的物體上，它就使該物體的原子發射電子，因此有「光電效應」這一個名詞：因爲X射線與 γ 射線，也可以歸入光的一類，所以這一個名詞，也包括這些射線所引起的這種效應。又因爲就這兩種射線而論，電子的發射是極顯著的事情，既容易觀察，又容易測定，所以借這些短波的幫助，來研究這一種效應，手續比較簡單一些。有一點我們可加以注意，卽此種效應，從這一波長到另一波長，仍繼續表現：在X射線尙未發見以前，曾用可見光線研究過這種效應，現在不用可見光線，而用短波，其故不過是爲了研究起來容易得多罷了。

對於這一種現象，要綜觀其全局概況，最容易的方法，或許是先從X射線泡中產生X射線開始，然後再研究它透泡外的情況。

X射線管或泡的要素有兩種：（一）真空容器本身，此器至少有一部分是用玻璃做的；（二）兩個金屬導體，一是陰極，一是陽極，或對陰極、或靶、或陽端。在這種管子裏面，當管中的空氣，已經大部抽去之後，所發生的放電現象，我們早已觀察過幾種了。有一股電子流，從陰極拋射出來，好像水從噴口裏面注射出來一般。這



（圖一百零八）這一個圖與九十六、九十七、九十八、九十九各圖一樣，也是一八七九年克魯克斯在皇家學院演講時，用以說明的木刻原圖。此圖中所示者，是玻璃吹成的一個泡；陰極在這玻璃球的底部；頂上有一個陽極，但是它的位置不論在何處；無關緊要。靶是鉑線 *b* 做成的：這靶也可以當作陽極用。杯狀的陰極，使電流集中，打在靶上。照克魯克斯說：「鉑線非但到白熱的地步，你們還可以看見電花從鉑線向各方迸出去，足以表示它實際上正在熔化」。這一個實驗，是用以說明熱的發揚的。在彼時尚未知道鉑線正在輻射 X 射線，此後歷二十年，倫琴始發見了它。圖中所示的玻璃球，約高二英寸。

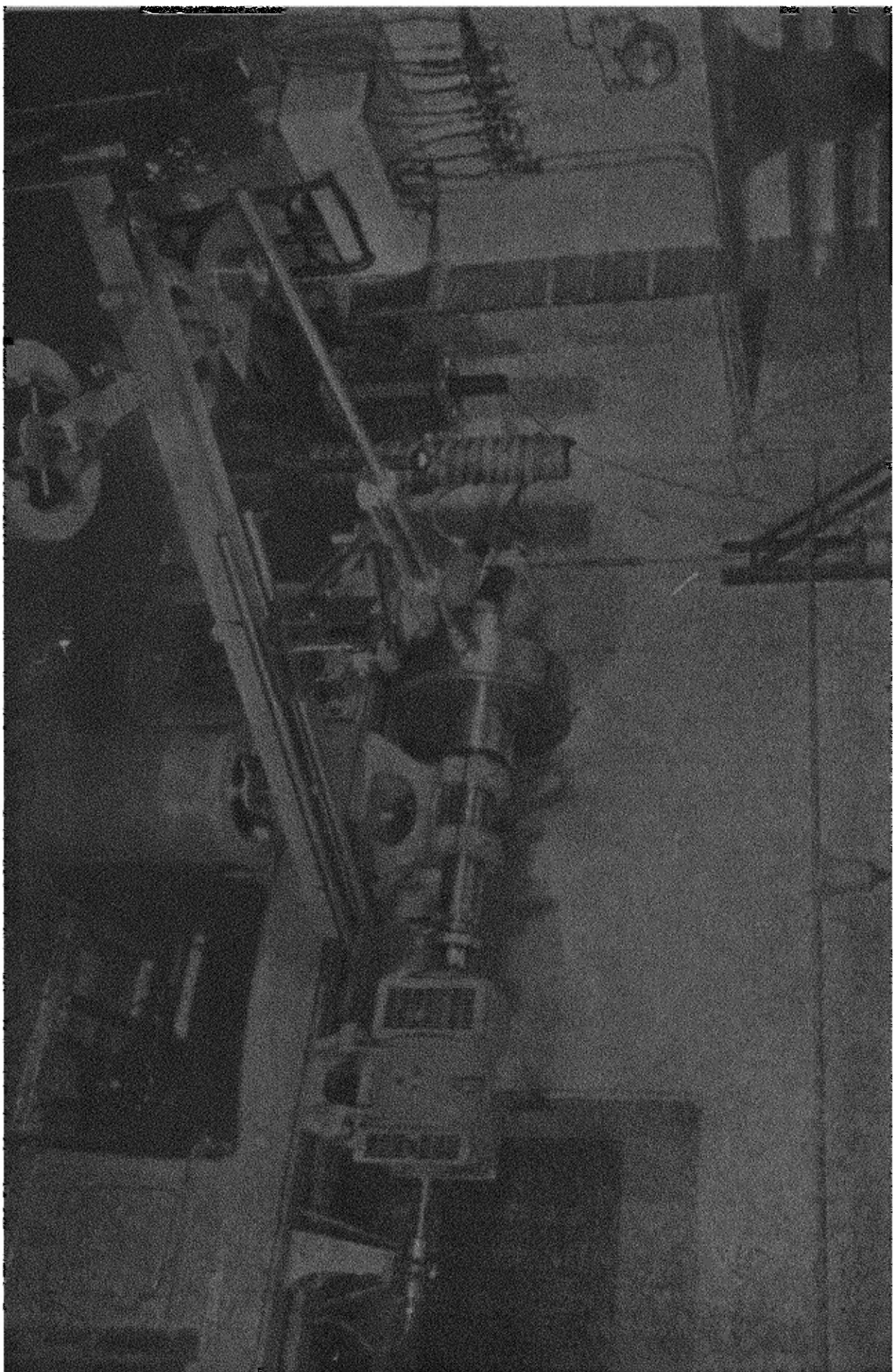
股電子流依直線而運動，但是可用磁石使它偏向：它具有機械的效應，而且加熱於它所打擊的不論什麼東西。此外它所撞擊的地方，不論在何處，總有X射線輻射出來。陰極線流，對於陽極的地位在何處，它並不加以注意；假使用靶做陽極，那麼正在製造管子的時候，就必須將靶放在適當的地方，俾可使電子流打在靶上。管中的陽極，看起來似乎在那兒作壁上觀，但是實際上它決不能如此，因為電路的完成，必須有賴於它的。它必須把陽電分給那可以聯絡電路的原子與分子；不過這些原子與分子，因為比較的粗笨得多，所以陰極射線流裏面電子自己表現的速度，它們並沒有得到。這電子流受一定的制限，以及一直離開陰極，一直透過玻璃管，都是最堪注意的事情。當管內有少許氣體的時候，此電子流可以看見，因為飛行的電子，與氣體分子碰撞之故。這時候電子流的徑跡，是一股極細的發光線束。由實驗，可知管子與陰極的形狀，對於它的形式，大有影響；而積聚於管壁上的電荷，其作用對於它的形式，更有直接的影響。

克魯克斯假定這射線流，是陰極發出來的輻射物質所構成的。

他在那個時候，必須為保持他的觀念而與人爭辯，因為發見了下面的現象，即此陰極射線，若

打擊在管壁上薄的地方，它能夠透過玻璃，冒出管外，射到空氣裏邊，這現象在暗室裏面，隱約可見。把極薄的屏，放在管內射線的路徑之中，也可以察見同一的透射作用。因此之故，有人爭以爲這種射線不能夠由帶有負電荷的質點所在，一如克魯克斯的想像，必定是某種波動。在那個時候，大家並不以爲任何種質點，可依直線透過物質的薄層，不論薄到什麼地步，都不可能。然而當湯姆遜證明這射線流由帶有負電的「微粒」組成之時，克魯克斯的觀念完全得到了辯護，完全正確無誤；我們此處用「微粒」一語，是湯姆遜最初的說法，後來纔叫它們做電子。湯姆遜還能夠測定這電子的電荷，以及它的質量，並且證明在一切環境之下，就各種X射線管而論，電荷與質量都相同。它的質量非常微小：以前大家一向相信氫原子是世界上最小的質點，但是到了那個時候，纔知道它比電子還大一千八百四十五倍。由電子的一致性，可知它是一切原子的基本成分：現在大家都已知道，正常的原子，可以說它是一個原子核，與若干電子所組成，電子的個數，適足以與原子核的陽電荷，彼此相均衡。

電子從陰極射出來的速率，以前曾用電磁的方法，加以決定，而且察見加於管上的電力愈大，



這是一架機器，可以大量產生波長較大的 X 射線，以供晶體分析之用。它的靶是一塊鋼，重二百二十四磅，每分鐘旋轉二千次。由於此種運動，並由水冷的裝置，可使陰極射線向靶撞擊而生的熱，完全消散。車牀左端有圓筒一個，靶即在此圓筒之內。旋轉靶的電動機，在車牀的右端。X 射線通過左邊的細長管子，射到左下角的晶體架上。被反射的 X 射線，由一架照相機接收過來；這照相機裝於滑子上面，適在圖的中央稍下的地方（參閱第三一一頁）。

電子的飛行愈快，這原是意料中的事情。要說得更正確一些，必須用專門名詞：十伏特的電勢，產生光速度百分之一的速率；一千伏特的電勢，產生差不多光速度十分之一的速率；而在十萬伏特的時候，速率與光速度就相差不遠了。然而從十萬伏特起，電勢往上再增高，不問增高到如何地步，速率永不能超過光速度：它依電勢的增加，緩緩達於最後的數值。

現代的X射線管，是設計極細密的一種儀器，如銅版圖二十四所表示的便是。主要的部分，依然未變，但是由經驗已經知道，若欲獲得美滿的結果，設計是十分重要。這些細微精妙的地方，我們在此處無庸加以深究了。

其次我們必須考究的，是X射線的如何發源。我們早已說過，首先發見有X射線存在的，是倫琴，而首先表示它們從陰極射線撞擊管壁的一點，或從放在管中以承受這陰極射線的靶發出來的，也是倫琴。陰極射線的能，有一部分是換成X射線的能了。這電子流的能，頗有一大部分在射線撞擊的地方，變成了熱；而且除極弱的管子以外，在任何X射線管中，假使讓電流通過不停，那麼所發的熱量，足以把管子很快的穿一個洞。通常所用的靶，總是做得很堅實、很笨重，用原子量較高的

金屬，例如鉑或鎢製成。即使用如此堅固的靶，也可以變成紅熱，除非在設計製造管子的時候，把冰冷的裝置包括進去。

不問X射線是什麼東西，我們現在可以自己想像，當電子打在靶上，它就從被打的地方射出來。欲求它們的方向與強度，可用照相乾片。我們早已說過，它們循直線運動，而且有透射的本領，不問何種材料，它們遇到了就透過去，在透射的時候，仍依直線進行，這兩種性質，很快的就被人發見。它們的透射本領，還顯得與它們的產生環境，有連帶關係，環境變動，透射本領隨着大大變動。陰極線流中電子的速度愈大，電子所產生的X射線，其透射本領也愈強。這種品性，還多少有賴於電子所擊的靶的本性。製靶的金屬，其原子量愈高，則在一般射線團裏面具有透射力的X線射，其所占部分也愈大；不過欲從任何靶產生X射線，原子的飛行必須充分迅速。醫藥上所用的X射線管，通常總是用鎢製成的：就晶體分析的特殊情形而論，用銅或鐵，更爲普通，因爲所需要的是「軟」輻射，即透射力較弱的輻射。

在實用方面利用X射線管的人，包括藥劑師與外科醫生在內，他們所注意的，便是這種透射

的性質。取一個簡單的例來說，太「軟」的射線，即透射本領太小的射線，就不能够替外科醫生，攝得一幅有用的斷足折臂的照相。軟的X射線，不能夠深深透過肌肉，若把照相乾片放在手足的下面，以備承受這X射線，肉所投射的影子，與骨所投射的差不多一樣深淡。若把較高的電勢，即伏特數較多的電壓，加在X射線管上，那麼電子的速度就增加，而射線的透射本領也大了起來：此時肉已不能投射很深的影子，祇有骨的影子，非常明顯，在較淡的肉影裏面，極可辨認，因為骨中含有鈣質，以及其他重的原子，仍舊把X射線吸收得很多之故。假使電壓太高了，那麼即使是骨頭，也不能充分遮斷X射線，它們的影子，也要變得很淡了。

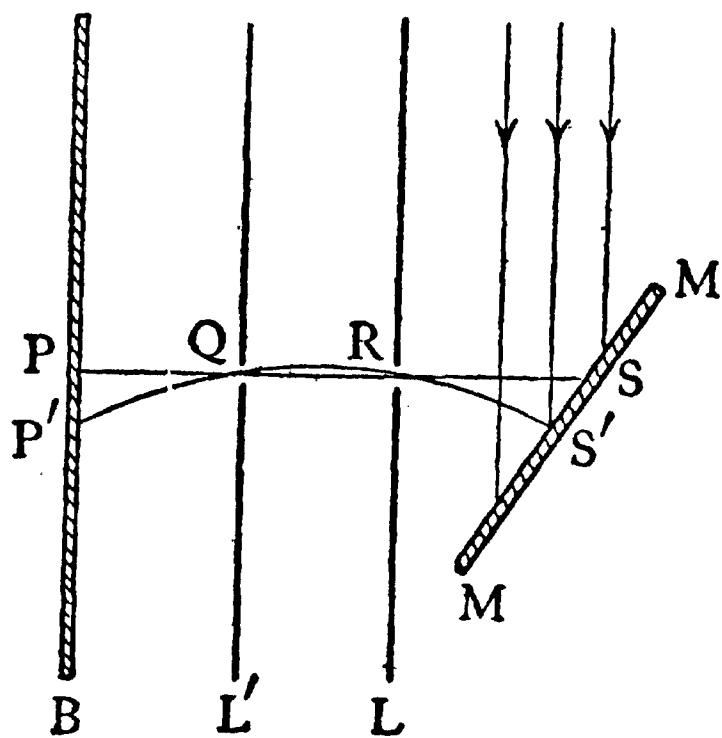
由晶體分析法，可以立即證明X射線的透射作用，直接倚賴其波長。產生X射線的電子，增加其速度所得的效果，就是把它們所生的X射線的波長縮短。假使陰極線流的強度增加，即每秒中打在靶上的電子數，假使加多，那麼X射線的強度也增加。露在這射線裏面的照相乾片，變黑變得很快。X射線的品性，換一句話說，X射線的波長，完全不倚靠陰極線流裏面的電子數，只靠它們的速度。電子數所決定的是強度，速率所決定的是波長。

現在我們要講到光電效應了。凡是X射線所射到的物體，都因此把電子排斥出來，它們消耗它們的能，就在這上面。這種效應，並不是對於該物體的全部一總發生的，卻是對於組成該物體各原子分別發生的。這些射線，祇把原子一個一個的處理（竟可以說處理），卻不管各原子如何集成分子，各分子如何集成固體。一道X射線流，經過一個現成的電子時，就有機會對該原子發生作用，而使它排斥一個電子。在任何情形之下，這是一個異常小的機會；假使各射線竟能夠對於所經過的各原子，都是如此的話。那麼它們的能，就要很快的用盡了。然而失敗的有好幾千萬回，成功的卻祇有一次。不過這機會無論其大小如何，並不因一個原子旁邊附有別個原子，而有所更變。當然就一切波長而論，不都是這樣的；我們的確熟知下面這件事實，即光波的吸收，實與化學的成分，有很大的關係。但是就X射線而論，這效應至少可以不計。關於化學成分的效應，已經找到幾個例子，但是這些效應既很稀少，又很微小，以致它們的觀察，頗感困難。

假使我們把下面的情形，即X射線對於原子的作用，使電子從其所在原子內本來的地位，遷移到同一原子內別的地位，以致排斥作用未能完全的情形，也包括在「排斥」一語之中，那麼我們

所描寫的X射線的作用，實際上是完全了。X射線對於實質物體，是沒有其他的效應了，而且它自己表現自己存在，也沒有別的方法了，X射線管內的運動電子，產生X射線，現在這X射線又使電子運動，彼此的情形正相同。當X射線落於銀鹽製成的照相乾片上時，它們就使電子活動起來，而使化學作用發生，成爲照相乾片變化的主要過程者，就是這些活動的電子。當它們透入人體之中時，人體組織所受的作用，就是被它們激動的電子所致。此時人體所受的作用，宛然與小鎗彈的爆炸無二。

原子在X射線的勢力之下，排斥出來的電子，其速度的大小如何，這一個問題，也是一件極有趣味的事情。很久的時候以前，曾有過種種企圖，要回答這個問題。殷納司 (Innes) 於一九〇七年，首先發表了一個答案。他所用的方法很簡單，敘述起來很容易。如圖一百零九所示，他使X射線打在一塊板MM上，板用某



(圖一百零九) 本圖所表示者，是殷納司實驗的主要原理。

種材料製成，電子即從此板被排斥而向四方發射。有屏兩座，L與L'，屏上各穿有小孔，孔在Q與R。穿過這兩孔的電子，打在P處的照相乾片上，而RQ^P是一條直線。此圖所表示的，是各部分的布置概況，但是平常用感光片時所需的一應器具，圖中並未畫出。

須知在飛行中的電子流，可用磁石使它彎曲，這是我們早已講過的了，在實際上，這路徑變成圓形，而電子流有自己循環的趨勢。彎曲的程度，一方面靠磁石的強度，他方面還有賴於電的載運者所負的電荷，以及它的速度與質量。當般納司實行他的實驗之時，電子的電荷與質量，已由湯姆遜加以測定；而就現在這情形說，假定電子是載運者，這是不錯的。般納司把磁石移近他的器具，移到一個決定的位置。現在使照相乾片受到效應而現黑斑的電子流，已非循直線前進的電子流，卻是曲線流S'RQP了，這曲線成功一段圓弧。般納司由於觀察Q、R及P'的相對位置，能夠找到圓的半徑。他所用磁石的強度，他是知道的，所以它就能夠計算餘下來的一個未知量，就是電子的速度。

由這些觀察，得到了第一等重要的結果。據發見，電子運動的速度很高，可與產生X射線的真

空泡中電子的速度，互相比擬。這速度與X射線的強度，並無關係：這一件事實，很容易證明，祇要把這實驗再做一次，而使MM板到X射線管的距離變動好了。即使真空泡到MM板的距離，增加到八倍，以至於落在板上的X射線，依照平方反比律，降低到六十四分之一的時候，斑點P'的地位，也沒有變動。欲在照相乾片上得可見的斑點，露光當然必須長久一些：不過這與射線流中的電子數，當然有關係，電子愈少，露光就愈須長久。不過電子的數目雖然減少，它們的速度卻是不變的。

在另外一方面說來，X射線泡裏面的電子，使它飛行得更快一些，因而使X射線更有透射力量的時候，即見此實驗中的電子流，其速度也變得更快。

MM板的本性變更，也發生一些差異，但是並不大。提高原子量，例如用金換銀，則在一般的射線團中，就有更快的電子，因此發現。在實際上說來，這種速率在某一範圍之內，最快的速率超過最慢的，約在百分之二十左右：它的最低限度，雖然固定不變，但是最高限度有時卻會提高一些。這種觀察，若與那時候所臆測，而我們現在所知道的其他觀察相比較，不過是一種副效應罷了。

般納司的觀察，後來又經旁人證實，並加以擴充。

這樣看來，整個的聯合現象，呈現了比較簡單的局面。起初是電子在X射線管內，按確定的速度射在靶上；讓我們姑且說確定的速度，其實要把這速度限制於狹小的範圍之內，是很困難的。第二步，由X射線的居間，使能穿過管壁，遷移到管外的空間之中。最後一步，電子又發現，其運動的速度，與原來管中電子的速度同級——在事實上說來，決不會那麼大。這好像是一股水流，穿入地中不見之後，又在別的地方重行出現：不過我們當然不能夠假定，在兩種情形之下的明明是同一電子。我們對於水，可以放一些顏料下去，以資識別；對於電子，決不能這樣幹。射線管與MM板的材料，實驗時各樣用具的排列，都絕鮮關係，或竟沒有關係。我們起初有的是電子，在一處地方依確定的速度而運動，而我們最後有的也是電子，差不多按同一速度，在又一處地方運動。

最便莫如想像全部過程，放得很大很大，因為這樣一來，我們對於電子與原子，以及此實驗的範圍，三者的相對大小，就可得到一些觀念。假定X射線管的靶，放大了萬萬倍（即一億倍），而與月球可以比擬。此時打在靶上的電子，仍舊太小，肉眼仍看不見。月球到地球的距離，現在約略相當於平常狀況下，X射線泡到觀察者的距離。這時候一個原子的大小，約等於一粒櫻桃。代表電子的

微粒，極細極細，細到不能看見，此時正撒和胡椒末般的，灑在月球上。地球的各處，立刻也有相似的微粒跳出來：譬如說，一粒從南美洲的安第斯（Andes）山頂一塊石頭裏面跳出來，其次一粒從印度洋的一滴水中躍出，又其次一粒從英國樹林中一片葉子上跳出去，諸如此類。這連續發生的事變，顯然是各不相關，彼此獨立。然而射向月球的微粒，不論其速率如何，這些第二次發出的微粒，卻具有相似的速率，這速率的大小，隨第一次微粒而變化。

這一件事情，明明超出了我們所已描寫過的波動說範圍；這些奇怪現象，不能夠當做波動的平常特性，而把它們包括在內。主要的困難，在於說明能從一處遷移到別處。因為我們不得不假定有這種遷移。在初見的時候，我們或許假定，當X射線打擊某原子時，從該原子跳出來的電子，其所具之能，得自原子的本身，並假定X射線所做的事情，不過激起該原子發生作用，好像我們把鎗機扳動一般。但是此說如果屬實，我們應當預期每一個原子所射出來電子，各有其特有的速度，然而我們卻發見，這二次發射電子的速度，與其所從躍出的原子本性，並無關係。它與激勵原子的X射線，倒有關係，但是我們決不能夠設想，開鎗放彈時，彈的速率與扳鎗機者的品性有關係。

另外有一種實驗，可用放射質所發的射線來試做，我們若把這一個實驗考究一下，就覺得鎗機假說的本性，更不能令人滿意。放射質所發的輻射，共有三種，叫做 α 射線、 β 射線、以及 γ 射線。這三種射線裏面的第一種，由氦原子流所組成，在這裏與我們無涉；第二種也由運動的電子組成，其速度極高極高，通常比X射線管中的電子還高。組成第三種的輻射。其本性與光及X射線相同，這是我們早已知道的了；它們比X射線更有透射力，而且與 β 射線的關係，猶如X射線與其所由生的電子的關係。當 γ 射線通過原子時，原子的極小部分，就射出電子來，其速度幾同於放射質所發的 β 射線，放射質放射時， β 射線與 γ 射線是同時發出的。就這種情形而論，全部的過程，顯然與電子X射線間的交互作用，有類似之點：在實際上說來，這是規模不同的同一過程。適合於這一種情形的，不問是什麼，必定也有幾分適合於那一種情形。

須知有幾種實驗（此處無庸詳述），表示當 γ 射線激起 β 射線的時候，後者離開原子的方向，並不是任何偶然的方向，卻與 γ 射線的原方向，多少相同。像這種結果，依據任何鎗機理論來解釋，殊難了解：試問一個人假使奔到一支架好的鎗的旁邊，用手扳機，不用別的力，那鎗彈出去的方向，

向，如何能與此人奔來的方向，發生什麼關係呢？

所以鎗機假說，非廢棄不可。X射線必定在某種情形之下，把能帶到原子裏來，再分給發射出去的電子。此事我們如何可以假定呢？

X射線既然當做一種波，從其原點向外成球形傳布出去，球面愈展愈大，那麼它的能量分布於球面之上，當然愈遠愈薄，然而我們已經知道，電子被發射的速率，與X射線的強度並沒有關係。我們是否將假定，每個原子必然把能儲積起來，一直積到一定的分量，纔有一種爆炸發生，是否將有此假定呢？但是從計算很容易知道，要把能積聚起來，須經過很長久的時間。一個原子，與波動能分布其上，漸漲漸大的球面比較起來，真是微乎其微：它祇能够把能慢慢地吸收，慢到經過了比X射線泡的壽命更長的時間，纔能積聚充分的能量。然而X射線的效應，當X射線一發的時候，立刻就表現出來了。況且還有一件事情難於了解，爲什麼被排斥的電子，其速度與其所從射出的原子沒有關係，反而與原來電子流中的電子速度有關係呢？假使我們再想像一個大規模的例子，那麼此種困難，愈可明顯。假定我們在高的地方，譬如說一百英尺，把一塊板丟下去，丟入海中：海水受

激四濺，而且有波浪從海面傳布出去。這些波浪經過大小船隻，都沒有效應發生，在行了幾千英里的路之後，遇到了一隻船，它們的效應不幸突發：於是也有一塊板從船的一邊破壁而出竄入空中，高達九十英尺、或五十尺、或二十尺，這事情會不會發生呢？假定這些數目，還不是荒談可笑麼？然而根據簡單的波動說，要解釋光電效應，這卻是一個很好的比喻。

要走出這重難關，祇有一個方法；這方法又簡單、又直接；而且我們剛纔所討論的一切實驗方面的事實，都可以適用此法來解釋。爲團結各種事實起見，我們必須把X射線當作有些像微粒，而用這概念做我們的學說根據；這種微粒在X射線管內，當電子打着靶內某原子的時候，即於其時其地，吸取了電子的能。它向外出發，是成功實體的。它具有一種本領，可以穿透玻璃泡的壁，以及其他物質，但是到末了的時候，與它相遇的無數原子中，有一個把產生它的過程倒過頭來，它的能遷移於一個電子，這電子就向外行動，其情形一如實驗時所見。什麼原子產生第一次變化或第二次變化，決不能有重大關係；而第二次發射的電子，大可以等於第一次發射電子的速率，或與這速率相近，差不了多少。X射線或 γ 射線的運動方向，與這些射線所從發生或所發生的電子運動方向，

其間頗可以有某種關係存在。

這是一種微粒說：所以我們已得這個問題的要領，即我們所發見的現象，與其說它可使我們想到波，想到以前很替我們效過勞的波，毋寧說它可使我們想到微粒的利用。

但是我們建議起來，將謂能够實行這些任務的，是何種微粒呢？許多年以前（在一九〇七年十月號及以後數期的《哲學雜誌》上），我曾有過一個建議，以爲這種微粒，或許是一種「中性耦」，即一個電子與某種陽性質量的組合，而此陽性的質量，帶有與電子相抵消的電荷。這種中性耦，既然沒有電荷，就可以預料它的穿透物質如此容易，是它的兩種成分都辦不到的事情，因爲它的電力與磁力，將被限制於極狹窄的限度以內之故，我於是假定這中性耦，可以由放射質的兩種微粒性輻射所造成；它可以含有一個電子，與一個帶陽電荷的氦原子。在那個時候，還沒有明白表示，X射線的特性與光相同，所以我的這一個建議，其靠不住的程度，似乎低一些。但是後來知道了X射線也有波的本性，與光完全一樣，而光也具有微粒的本性，與X射線的似乎具有此種本性，完全一樣，到這時候，就不能够再把光與X射線，再當做中性耦假說所暗指的兩種不同現象了。

代替牛頓微粒的能包，現在叫做光子。一切波長的光，X射線，紅外線等等，可以看做成功光子的形式。然而中子的觀念，卻也沒有完全棄去，因為近來已提出了證據；證明它們帶下述的形態，即由一個電子，與一個帶陽電的質子，密切組合而成。

韋爾生 (C. T. R. Wilson) 於一九一一年，用一種最巧妙的裝置，很新奇的式樣，竟能證實了實驗方面的結果，以及由此等結果推出的結論，這些結論，便是我們方纔所敘述過的。他的方法，使我們得到一個目擊的證據，這證據可使人深信不疑。這方法有賴於幾種物理效應，我們可以略為說明一下。

第一點必須要察及的，便是一個電子在氣體中穿過時，能夠從它所穿過的若干原子，或它所經過的近傍若干原子裏面，把電子趕走。假使它要有這趕走電子的本領，那麼它的速度，非超過一定的限度不可，大約在每秒一萬萬釐米左右，確使它的速度低於這個數目，那麼它就的確不能夠穿過氣體，顯然祇能夠被它所遇的原子拉住了吸收進去，差不多第一次遇見的原子的原子都穿不過。由X射線所激動的電子，其速度有十倍大，乃至百倍大；由 γ 射線所激動的電子，具有更大的速度。前

一種運動電子，其穿過空氣或任何氣體的路徑，在平常溫度與壓力之下，可用毫米或釐米計算，而後者的路徑，則須用米計算。兩者的路徑，或長或短，都因已有電子被逐的各原子，以及被逐電子暫時依附的其他各原子而顯。所以電子所經過的路線，其兩旁沿路各處，既有帶陽電的原子，又有帶陰電的原子，復合作用，立即開始發動，帶有過剩電子的各原子，都在恢復其未奪去電子以前的原狀：但是在幾秒鐘或幾分鐘之內，這兩種原子卻都暫維現狀。

韋爾生所做的這一個精美實驗，它的第二特色，便是利用物理學上一種著名的效應。當一種氣體讓它膨脹的時候，它就變得冷一些：它在膨脹的過程中，必須耗費一些能，所以非把它自己所儲藏的能，用掉一些不可。假使這氣體裏面，含有溼氣，那麼後者就有凝結的傾向。大氣壓力驟然降低之後，往往跟着油然作雲，沛然下雨，這種現象，氣象學家即以上述的效應來解釋。

溼氣在此種情形下凝結的時候，格外容易向四面收聚帶電的原子或質點。

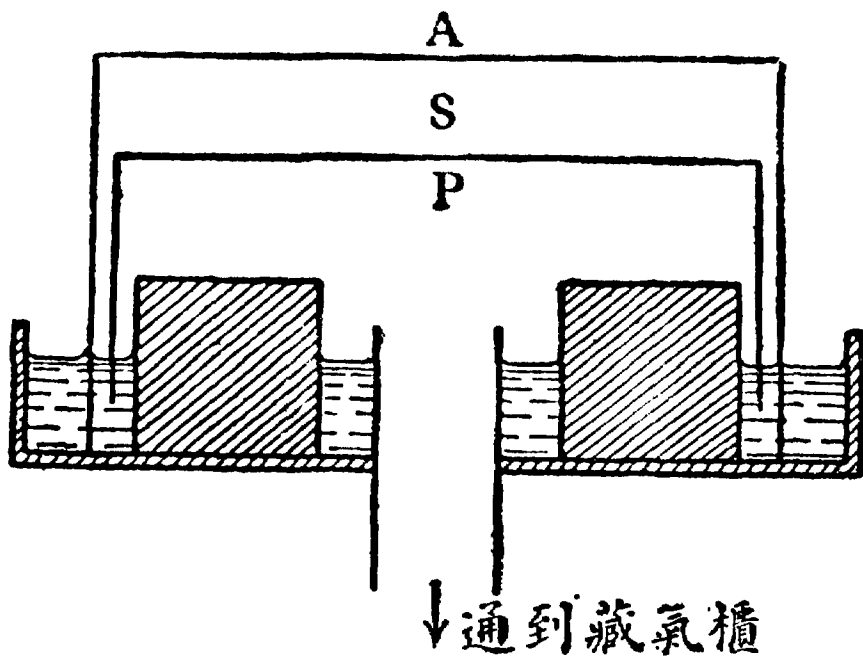
這一個實驗的方法，現在總可明瞭了。假使潮溼的氣體，讓它突然膨脹，而在這氣體中，有電子及其帶電的被毀原子的徑跡，那麼溼氣就先沿路凝結，而這些徑跡為適當的光所照，就顯出白色

的條紋來，襯托在暗黑的背景上面。在這種情形之下，電子的路徑，就可以看見了。

韋爾生實驗所用的器具，異常簡單，這也是此實驗所獨擅的佳處。圖一百十所示的，便是氣室的底，是一枚活塞：這

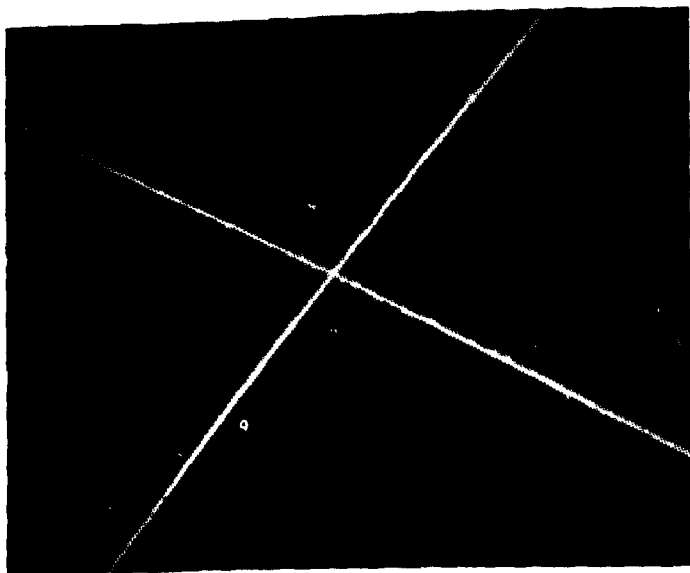
活塞可以降到所需降低的地位，以使室內的空氣膨脹，因而使這氣體發冷。空氣可以常保潮溼，因有少許之水在場。待研究的射線，可以穿過壁上適當的小孔，射

入室內，或由預置室內的放射質，即在室內產生。

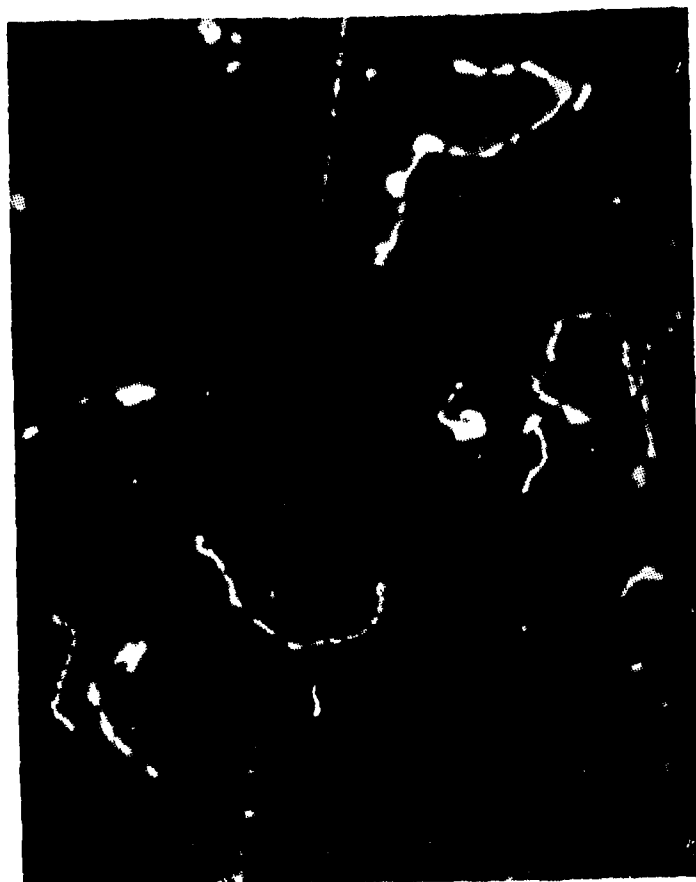


(圖一百十) 此圖所表示的，是韋爾生膨脹器具的原理。氣室的蓋 A，是用玻璃做成的，室內有活塞 P，可以上下滑動。P 下面的空間，與藏氣櫃通連，藏氣櫃中空氣的壓力，可以變化。所觀察的電子徑跡，在空間 S 之中。這空間由水封口，與 P 下面的空間，以及外面的空氣隔絕，好像氣量計也用水封口一般。假使在 P 下面的空氣，教它稍稍升高一些，那麼 P 就昇上去，到如圖所示的位置。假使再教 P 下面的氣壓突然降低，那麼 P 就砰然落下，而 S 裏面的空氣，就膨脹發冷。假使其中有電子或 α 質點行動的徑跡，那麼沿路就有霧生出來。此時即可在很亮的光照耀之下，攝取這些徑跡的照相了。

銅版圖二十五



A. α 質點 (即氦原子) 的徑跡, 差不多從頭到尾, 成功直線。霧滴又多又密, 以致這些徑跡看起來好像是連續的白線。這些質點, 是放射質射出來的 (參閱第三二七頁)。



(C 圖)



B. 由 X 射線而生的電子徑跡。X 射線本身, 圖中並未顯出。它們成功一條很細的直線束, 橫穿過這照相的中央, 但是像 C 圖那樣的直線, 卻一條也看不見。圖中所可看見的, 是 X 射線使其所遇的若干原子, 把電子排斥出去的徑跡。這些徑跡的彎曲不直, 是它們的特性: 電子是太輕了, 不能像 α 射線一樣, 維持它們的直路, 因為它們所遇見原子, 可把它們拋來擲去之故。由此可以證明, X 射線進行時, 沿路引起電子的運動, 這一點我們已經提過。圖中 X 射線的進行方向, 從左到右 (參閱第三二七頁)。

銅版圖二十六



A. 在這張照相裏面，有一道很細的射線束，從右向左而進，遇見了一塊銅的屏。此射線束激起銅裏面的一陣電子雲來；而且可以察見，此射線束有攜帶電子同行的傾向。X 射線透過銅屏穿出來的一側，電子的數目多於它射入銅屏的一側（參閱第三二七頁）。



B. 這是電子繞射的照相（由奇·披·湯姆遜所攝）。一道電子流，使它射在晶體的表面，然後用照相機來接收繞射光柱（參閱第三三一頁）。

銅版圖二十五、二十六，就是此實驗結果的幾個例子。從這幾個圖，我們立刻可以察見，由X射線所引起的效應，其徑跡從頭至尾，完全在氣室之內。這些徑跡的中斷，以及曲折不齊，是因為電子穿過氣體而前進時，繼續經過偏向作用之故。有時候轉折極峻；在這種情形之下，電子已經多少透入原子裏面，它剛剛打在原子的中央。所以它比尋常電子離開原子核要近一些，而且已在原子核四周疾轉，猶如一顆彗星，已經行近了太陽一般。徑跡上面的點子，足以表示下述的特徵，即射線所打擊、所穿過的各原子，其所受的作用並不平均。有時候所排除的，是一個電子，有時候是一點近傍的一小羣電子；有時候被第一次發射的電子所排斥的電子，其勢很猛烈，以致藉其所獲得的運動能，竟可從它所遇見的各原子裏面，再拉出少數電子來。電子將近走到它路徑的終點時，它的作用更激烈。它的速度是逐漸減低的，所以每衝進原子一次，就在該原子中多停留一會，而結果也就愈弄愈厲害了。在開始的時候，它的速度較高，所以它可很快的穿過所遇見的原子，而原子所受到的損壞也小。銅版圖二十五C的 β 射線，表示此點很明顯；它們的速度很大，大至在有些情形之下，霧滴沿路散布，祇有薄薄的一層，於是這路徑比較直一些，然而也難於辨認了。我們還可以注意到一

件事，即X射線的透射本領愈大，它們所產生的電子，其徑跡也愈長。

在前面一章中，我們已知道紫外光有一種作用，能使帶陰電的導體放電。這一種作用，與X射線激動電子時所起的作用相同。紫外光照在導體的原子上面，也把該原子中的電子排斥出去。就這一種情形而論，速度是小得多，而且祇有在順利的環境之下，纔可察見此種效應。如此被斥的電子，其運動很慢，以致紫外光所照的物質，其本性也有重要的關係。不同的物質，所出微小的電力，大小也不同，這不同的電力，對於電子的排斥，就發生多少障礙。就X射線而論，這些電力太微小了，殊不足以干涉其作用，但是就光而論，卻可以使所攝的照相，模糊不清。是以表面清潔的鋅，放電很容易，而久露在空氣中以致變得很污穢的鋅，這放電效應差不多沒有。

較長的光波，決然與那較短的光波一樣，也具有同一本領無疑。它們對於原子裏面的單獨電子，也可以發生作用，但是就兩種情形而論，它們所分給電子的能，都不足以幫助電子，使它脫離其所屬的原子。因此之故，我們人類的所以不能看見紅外線，或許是因為眼睛的靈敏度，似乎有賴於電的效應，這種效應必定是電子的位移所組成。於是我們還可以假定，波長極短的射線，例如紫

外線，X射線等等，都是有害的射線，因為它們所激動電子，動得太快了，作用太激烈了的緣故。波長短的射線，對於照相乾片有很強的作用，而紅外線欲使照相片起感光作用，必須把乾片用很困難的方法加以處理之後，纔行，這理由與前正相仿。

如此呈現於我們之前的這幅畫，把電子與各種輻射間的交互作用，約略描了一個輪廓，既很簡單，又易索解。在X射線管中，電子被激而運動。它飛出來打在靶的一個原子上：在這地方，在這時候，能就被遷移到某種實體上面去，此實體近來得到了光子的名稱。光子循直線而運動，透射各種物質，其透射程度，視其能量的多少而定。遲早之間，這種透射原子與穿越原子的作用，終歸停止，因為原子裏面有一個給它破壞了：光子於是不再成為光子，而電子再負能而逸。電子當飛行的時候，因在其所穿過的各原子中，把別的電子拉出來，而把它的能失掉，這一種效應，光子卻可免去。它有時候遇到了原子，或許把它所餘的能量，分一部分出去，以致再產生一個新的光子，這光子也照樣繼續它的工作。到最後，全部之能，都成為熱作用與化學作用而耗盡。有時候發射電子或光子所遇見的，似乎並不簡單：光子或電子的能，可因遇見一個原子，而分給兩個這種實體，不過這些補助現

象，雖然對於整個的研究，極有趣味，極爲重要，卻不是三言兩語，所可說完的。主要的一點是如此，即有兩種實體，一種帶電，一種不帶電，大家都有本事帶着能穿過空間，逐段把能送出去，各有各的式樣，而且還有本事把它們的負擔，互相交換。

光的這一種概念，無論其作何形式，當然與從前很有用處，現在仍有用處的的波動說，彼此不合，至少在外表上是如此。但是在尙未打算考究到它們的互相矛盾以前，我們必須沿着同一的路，向前更進若干步，走到了那個地方，我們即將發見，待解釋的事情，正還多着呢？

種種不同形式的光，其行動有時候像波，有時候又像微粒：我們慣於認爲微粒的那種實體，會不會在某種環境之下，其行動可以像波一般呢？

這一種實驗，也曾有人試過，其結果的確也現出這雙關的性質來。其實這種效應，在布置適當的時候，很容易證明：不過此事的成功，雖有可能性，卻祇在近來這幾年之內，經過精細的探求以後，纔能使此事實現，而由此得到適當的設計，以作此種實驗。當極細的電子束，被射在晶體上面的時候，就有繞射圖案發現，此圖案雖爲電子射線所特有，但是與X射線所產生的繞射圖案，具有同一

的特性。銅版圖二十六B所示的例子，是奇·披·湯姆遜(G. P. Thomson)所攝的。電子的透射作用，異常微小，所以必須用極薄極薄的晶體膜。纔能夠有好的結果：此外從晶體表面的反射，也可以發生關於反射的效應。無論如何，祇要技術上的困難，一旦除去，效應即可大白。於此可見電子的行動，與波無二。

最後還有原子的本身，以前的人除了把它看做物質的質點之外，從未有人再作別想。須知對於原子的實驗，現在是格外困難了，不過就這原子而論，似乎一道原子流衝擊在晶體上面，也可以現出繞射的圖案。這樣看來，我們所熟悉的基本實體，其全部範圍內都有這雙關的行動：大家都能夠有微粒般的行動，又能夠有波一般的行動，隨環境而定。我們對於輻射與物質間的區別，變成了程度上的區別，並不是種類上的區別了。

這一段短短的關於物質的概論，當然省去許多實驗方面的結果，許多理論方面的關係與類似之點，凡此種種，如果可以包括在本書中的話，必須說得更詳細一些，而且也祇能說一個極略的大概情形。但是本書篇幅有限，這種文字又枯燥乏味，所以不能再說了。

我們對於事物的本性，有如此廣闊的見解，的確是現代研究最可注意的推論之一。這種基本的一致性，從來沒有人能夠預料。雲霧一開，已使我們獲睹前途有的是聯合與相似，以前我們曾想像過，那地方是分離與差別。可見的與不可見的光，X射線、放射質的射氣、電子、物質本身，現在知道它們都有公共的性質，而且可以聯合起來，其聯合的情形，我們還沒有完全了解。我們的鑑別力，有一個最顯明的缺點，就是一會兒可以看做波，一會兒又可以看做微粒的那種東西，其本性如何，我們很難明白。這種似乎有些矛盾的說法，我們自己怎樣想像呢？

或許我們現在已到了結束之點，在這一點，個人的傾向，引起了他所欲選擇的一種表示。論到事實，有若干自然現象，可以根據波動說聯合在一處，且以根據波動說為最相宜，另外又有同樣驚人的一組現象，可以用微粒說表示，表示得十分清楚。須知琪安司早已說過，我們沒有理由，希望我們應當常常能夠用早已通用的名詞，來表示新的現象與新的觀念。我們用波與微粒，就它們自己的地位而論，都是對的：假使我們在用它們的時候，要說得更妥善一些，我們最好要能夠免除互相矛盾。即以現在來說，波動力學這一門新科學，它的發展，也使我們知道，我們的路，可以漸漸通到較

佳的地方。當局部的風，在有限的海面上，吹起一陣波浪的時候，這些波浪是成羣結隊的前進，這波羣是一個特殊的實體。整個波羣的速度，並非波羣裏面各波的速度，各波是繼續從後方移至前方，而在前方消滅。此處即有各不相同的兩個特點，一是整個波羣，一是其中的波。波羣向前進行，其中含有能：它的波，假使所經的路相交，就現出一切干涉的現象來。企圖用這種新奇的方法，來解釋輻射的性質，已經有驚人的成就了。

我們的確不能把任何現象，以及它的發展，永遠約束於我們現在所選擇的理論，這是很顯明的事情。當徽韋爾 (Whewell) 在他所著歸納科學史中，敘述光的波動說逐漸發展的經過時，他曾指明一切新的發見，完全可以配入波動說所預備的組織裏面，並且大聲疾呼，說這是真學說打倒偽學說的明證：牛頓的微粒說，已經丟在一旁，波動說已經代替了微粒說，永遠可以代替下去。他這種光明的心理，何嘗預料到波動說的繼續成功，日後會遇到挫折。這兩種舊的學說，以及新的波動力學（無疑也在其內），還有尙未成功的新概念，都祇好用做繩子，把各羣已發見的現象，束於一處，而且使我們能够想得更清楚一些，能够決定研究的新方針罷了。就我們目下的情形而論，假使

有互相抵觸的地方，令我等迷惑，那麼我們的學說與例證方面，一定有了缺點，纔至於此：我們無庸強求解決的方法。水到渠成，瓜熟蒂落，當我們的知識，已因研究而增加，我們的見解，已因研究而提高的時候，解決的辦法，自會應時而出的。其時我們已獲有一條神祕的原理。此原理可把各式輻射，各種物質，聯合起來。預料那個時候，我們已知光的完全意義，在這時候說宇宙是光所組成的，或許可以不錯了。

人 名 表

5

Thomson, Prof. G. P.	湯 姆 遜 教 授	(原 276)
Thomson, Sir J. J.	湯 姆 遜 爵 士	(原 221, 257)
Tyndall	丁 達 爾	(原 74, 149, 165)
Whewell	徹 韋 爾	(原 278)
Wilson, Prof. C. T. R.	韋 爾 生 授 教	(原 270)
Young, Thomas	托 馬 司 楊	(原 138, 162, 179)

人 名 表

Appleton, Prof. E. V.	亞 普 勒 登	(原 78)
Babinet	巴 平 納 脫	(原 158)
Barnard, J. E.	巴 那 特	(銅版圖 14 B)
Bidwell, Shelford	希爾福特別特威爾	(原 61)
Clerk Maxwell	馬 士 威	(原 249)
Crookes	克 魯 克 斯	(原 229)
Dalton	道 爾 頓	(原 99)
Dollond	道 隆 特	(原 107)
Fresnel	夫 累 涅 爾	(原 180)
Galileo	伽 利 略	(原 206)
Huygens	惠 更 司	(原 7, 166, 174)
Jeans, Sir James	琪 安 司 爵 士	(原 205, 277)
Laue, Von	勞 厄	(原 228)
Lockyer	洛 克 葉 爾	(原 213)
Malus	馬 呂 斯	(原 178)
Newton	牛 頓	(原 7, 166)
Raman, Sir C. V.	拉 曼 爵 士	(原 152)
Rayleigh, the late Lord.	故 爵 士 雷 理	(原 148, 245)
Rayleigh, Lord.	雷 理 爵 士	(原 150)
Römer, Olaf.	奧 萊 夫 盧 穆	(原 206)
Röntgen	倫 琴	(原 228)
Senarmont		(原 185)
Thompson, Silvanus P.	湯 姆 潑 孫	(原 166)

望遠鏡	(原 54)	晶體內波的形式	(原 173)
光的橫振動	(原 180)	光的波動說	(原 3)
X 射線的鎗機假說	(原 266)	「白」	(原 95)
由紫外光而放電	(原 225)	X 射線分析	(原 117)
紫外線	(原 222)	X 射線管	(原 258)
紫外光照相術	(原 109)	X 射線	(原 228)
晶體的單位	(原 238)	X 射線與晶體	(原 234)
原子與分子的振動	(原 117)	風信子玉	(原 84)
水的貌似深度	(原 70)	旭日與落日	(原 150)
水彩畫	(原 92)	海的顏色	(原 152)
波動與微粒	(原 254)		

光學幻視	(原 60)	晶體結構所致的偏極化	(原 183)
像	(原 20)	光的偏極化	(原 164)
紅外線照相術	(原 221)	從天空來的光偏極化	(原 193)
藍靛	(原 124)	光的品性	(原 193)
干涉	(原 137)	波長的範圍	(原 89)
不可見的輻射	(原 220)	反射	(原 11)
<u>懇涅勒·赫維賽德層</u>	(原 78)	在曲面上的反射	(原 22)
<u>勞厄的實驗</u>	(原 234)	在平面上的反射	(原 13)
<u>勞厄的照相</u>	(原 248)	X 射線由晶體的反射	(原 243)
透鏡的作用	(原 41)	內全反射	(原 72)
光澤	(原 33)	折射	(原 39, 67)
魔鏡	(原 35)	由大氣的折射	(原 71)
放大	(原 52)	共振原理	(原 111)
顯微鏡	(原 54)	網膜	(原 38)
海市蜃樓	(原 75)	網膜上的倒像	(原 49)
分子的散射	(原 148)	光譜線的自蝕	(原 215)
月暈	(原 161)	波紋水櫃	(原 5)
水平線上的月	(原 62)	光的散射	(原 15)
恆星的運動	(原 217)	視而得見	(原 26)
<u>牛頓與光譜</u>	(原 85)	在濁水上的影子	(原 153)
<u>牛頓的望遠鏡</u>	(原 107)	肥皂膜	(原 139)
泥科爾稜晶	(原 190)	恆星光譜分析	(原 208)
油畫	(原 93)	太陽光譜分析	(原 212)
半影	(原 31)	恆星的閃爍	(原 219)
視覺暫留	(原 66)	硬脂酸的晶體模型 (銅版圖 23 b)	
光電效應	(原 255)	實體視覺	(原 28)
顏料的作用	(原 91)	<u>史德林的幻視</u>	(原 61)
針孔像	(原 29)	物體大小比較表	(原 251)

索引

- | | | | |
|-----------|---------|---------------------|--------------|
| 消色差性 | (原 105) | 繞射圖解 | (原 131) |
| a 質點 | (原 213) | 繞射光柵 | (原 134) |
| 花青素 | (原 120) | X 射線由晶體而繞射 | (原 234) |
| 花黃素 | (原 122) | 月與太陽到地的距離 | (原 203) |
| 像散性(俗稱散光) | (原 57) | 恆星到地的距離 | (原 200) |
| 微菌照相 | (原 109) | 都卜勒效應 | (原 218) |
| 雙眼視覺 | (原 28) | 塵埃示暈圖 | (原 160) |
| 天空的青色 | (原 148) | 無塵箱實驗 | (原 16) |
| 陰極射線 | (原 229) | 染料 | (原 123) |
| 葉綠素 | (原 118) | 電子的繞射 | (原 276) |
| 色盲 | (原 99) | 電子 | (原 231) |
| 色幻視 | (原 102) | 測毛器 | (原 162) |
| 天空的顏色 | (原 146) | 以太 | (原 18) |
| 色視覺 | (原 96) | 眼 | (原 46) |
| 花的顏色 | (原 119) | 眼的光學缺點 | (原 47) |
| 互補色 | (原 100) | 螢光 | (原 222) |
| 凹鏡 | (原 25) | 焦距 | (原 44) |
| 凸鏡 | (原 23) | 夫牢因和斐繞射圖 (銅版圖 23 c) | |
| 光的微粒說 | (原 7) | γ 射線 | (原 253) |
| X 射線的微粒說 | (原 268) | 暈的成因 | (原 154) |
| 晶體與 X 射線 | (原 234) | 氦的發見 | (原 213) |
| 金剛石的反射 | (原 80) | 冰洲石 | (原 167, 184) |
| 繞射 | (原 126) | 運動的幻視 | (原 64) |

編主五雲王
庫文有萬
種百七集二第

光 的 世 界
四 冊

The Universe of Light

究必印翻有所權版

中華民國二十五年九月初版

*D六六五

嚴

原 著 者

W. H. Bragg

譯 述 者

陳 嶽 生

發 行 人

王 雲 五
上海河南路

印 刷 所

商 務 印 書 館
上海河南路

發 行 所

商 務 印 書 館
上海及各埠

(本書校對者陳敬衡)

