

新 中 學 文 庫

光 的 世 界

上 冊

布 拉 格 著

陳 嶽 生 譯

臺灣省立臺中圖書館



31120003411187

商 務 印 書 館 發 行

國立公共資訊圖書館典藏
由國家圖書館數位化

83.7
1124
63

特藏

自然科學小叢書

光 的 世 界

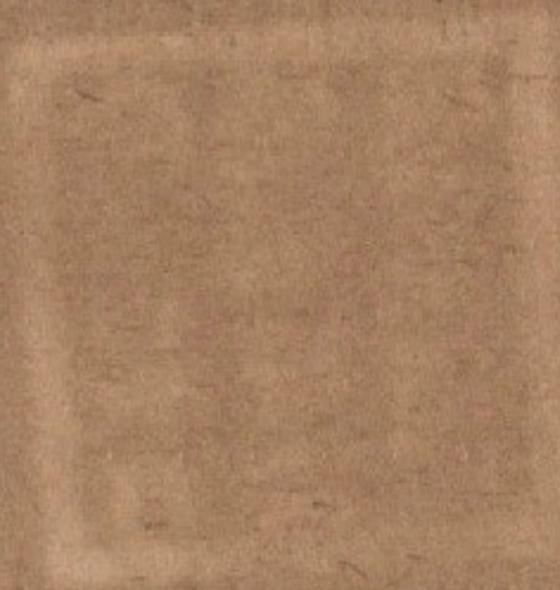
上 册

W. H. Bragg 著

陳 嶽 生 譯

王雲五 周昌壽 主編

商 務 印 書 館 發 行



原序

物理科學近來的各項進步，已引起了普及的注意，而且因為由是所生的各種令人迷惑的問題，已有才能出衆的著作家，加以描寫，其事益發傳遍遐邇。我曾這樣想過，假使我把目今各項發展所從出的往昔研究，用簡短的文字敘述一番，或許對於此項新的知識，更可增高其價值。要曉得我們現在所處的地位，是靠着牛頓、惠更司、楊夫累涅爾、克魯克斯、湯姆遜，以及古往今來，其他的許多勞心勞力之輩，築好了可通的路，方纔達到的。前人所已經過的境界，我們如果一些都不知道，那麼此等地位的重大，我們就不能夠完全領會了。

對於科學的發展，最有幫助力量的，其中之一，便是光的兩種學說間，舊時所有的爭競；我就把它取來，作為線索，以連綴我所寫的故事。常與牛頓、惠更司這兩個名字，分別連在一處的微粒與波，似乎已經輪流着占了最後的勝利。彼此間的爭鬪，正相持不下，其結局的勝負，究屬於誰，顯然未可

逆料。我們前此以爲互相排斥的兩種假說，頗有融洽的可能；而且事實警告我們，不要大膽讓我們心裏的想像，變成一定不移的信仰。這兩種假說，如何能够兼真並確，我們固仍難於了解；然而彼此都有許多靠得住的證據，可以提出來做護身符，這卻是事實，我們就實逼處此了。在某一時期超出於我們理解能力之外的，到後來非但因為我們獲得了嶄新的知識，而且因為我們的意志，經過了新思想方法的訓練之故，或許可以變得瞭然易解，這便是我們的論斷。

將來的研究，把這兩種舊學說連合起來做根據，一定會有良好的結果。像過去時候，雖然彼此互相爲敵，仍各滋長繁盛一般。

正正當當的所謂光，不過是範圍遠較光爲廣大的現象，其中所屬界限很狹的一部分罷了，此廣大現象，便是一般的輻射。但是光學的定律，卻適用於比較大的範圍，而首倡者的立言，其所含意義，卻比他們所知者爲廣。光波的長度，其所屬範圍，限界甚近；但是波動的定則，卻在一方面適合於倫琴射線的無限小波，在他方面又適合於長的無線電波。根據了光的用途而作的各項探究，也有驚人的廣大範圍。其所涉及者，有天文學上的廣大空間，又有渺小的結構，這些結構的複雜有條，錯

綜有序，也同樣是我們目力之所不能及；其所發見者，在此大小兩種研究範圍之內，都簇聚着不少趣味最濃厚的事件。

此外，顯然屬於微粒的輻射，例如在我們的實驗室中，現在很容易產生的電子陣雨，質子陣雨，以及原子陣雨等等，今日已覺其有幾分遵守光的定律。波與微粒，與其說是不同的實體，寧可說是不同的狀況。「一言以蔽之」，物理科學，是在光的統治之下，其實一切科學，莫不在光的統治之下。物理學的發育，就靠着研究光的種種形式與性質，而令人迷惑難解的各項新發展，仍都是光的推論。這是一個很長的故事；本書的宗旨，便是要把往昔關於光的事情，簡簡單單的敘述幾件，使光之爲物，可以更受人的重視。

一九三一年的聖誕節，我曾在皇家學院演講，演講的題目，就是本書的書名。在聖誕節舉行的這種演講，是每年一回。已經講過一百多年了，聽講的人，大都是青年。法拉第本人，也曾講過，不下十九次。他的說明，簡單而清楚，他的實驗舉例，合宜而適用，尤可使「稚子能解」；這是一句古僻的成語，在每年的廣告裏面，仍舊出現，我在此處，也拿來用一用。法拉第以後的演講者，都努力效法於他。

所以我的一九三一年聖誕節演辭，完全用實驗做例來說明，有些是舊的，有些是稍為新一點。在本書之中，我已利用了這些實驗，不過在描寫方面，以及根據這些實驗的辯證方面，當然已經遠較演講時宜說或可說的，更進了一步。

幫助我繪製本書插圖的朋友很多，我是非常的感謝他們。桑·培格耳 (Thorne Baker) 君，代我攝製的彩色照相最多，講光的書籍，沒有彩色照相，就要變成極不能感動人的書了。鋼筆及毛筆並用的畫，是我的女兒，亞爾盤·卡羅夫人 (Mrs. Alban Caroe) 所作。韋爾生教授 (Professor C. T. R. Wilson) 允許我把他的膨脹照片，翻印了許多。有一張紅外線風景照片，是伊爾福特有限公司 (Messrs. Ilford Ltd.) 送給我的。福勒教授 (Professor A. Fowler) 與史馬脫博士 (Dr. W. M. Smart) 都厚意殷殷，把光譜的照片供給給我，還有安特雷特教授 (Professor Andrade) 把繞射的例證供給給我。圖六十六的畫法，是亞司脫勃雷教授 (Professor W. T. Astbury) 的建議。關於實驗布置的照片，大部分都是格里因君 (W. J. Green) 與其助手勃律及耳 (K. Bridger) 在皇家學院內攝取的。以上所述各項照片插圖，在講到的時候，我還要再提一提它們的來源，以表謝意。

目錄

第一章 光的本性……………一

光的波動說 波紋實驗 反射 光的散射 光線的旁向漫布 像 曲面上
的反射 視見 雙眼視覺 針孔像 光澤 魔鏡

第二章 眼與視覺……………四六

網膜上的混雜如何得免 透鏡所造的像 眼睛的光學構造 眼的光學缺點
及其補救 放大 顯微鏡與望遠鏡 像散現象 猜詳的錯誤 視覺暫留
折射的通例 內全反射

第二章 色……………一〇三

彩色光譜 光的品質 波長的範圍 顏料的作用 眼對於色之反應 互補

色 色幻視 透鏡的色效應

第四章 色之本原……………一三五

共振的原理 原子與分子的振動 葉綠素 花之色 染料 繞射 干涉

第五章 天空之色……………一七七

光的選擇散射 分子散射 海的顏色 日暈與月暈

第六章 光的偏極化……………一九九

光的品質 惠更司的驚人現象 馬呂斯的實驗 楊氏與夫累涅爾的橫振動
由晶體結構所致的偏極化 來自天空之光的偏極化

第七章 日光與星光……………二四一

恆星的距離 光的速度 星光的分析 光譜分析 應用於眾星 太陽光譜
恆星向地球與離地球的運動 不可見的輻射 螢光 由紫外光的放電

第八章 倫琴射線……………二七七

勞厄的實驗

第九章 波與微粒……………三〇六

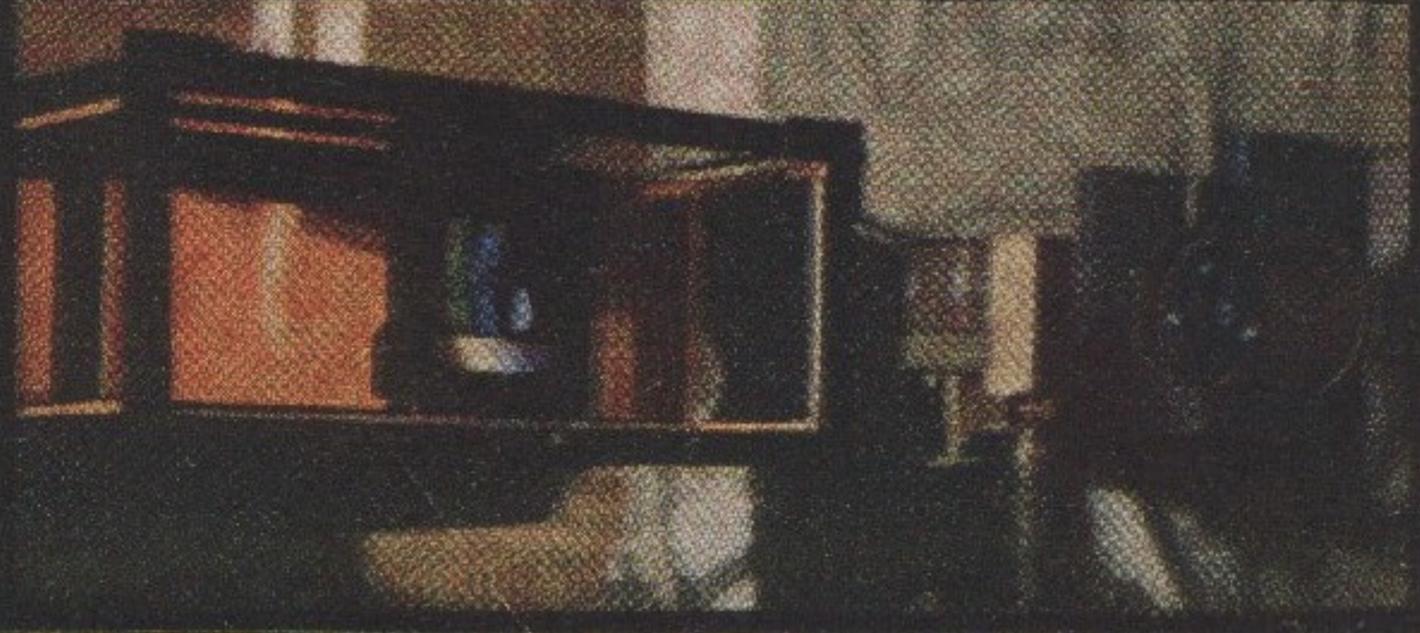
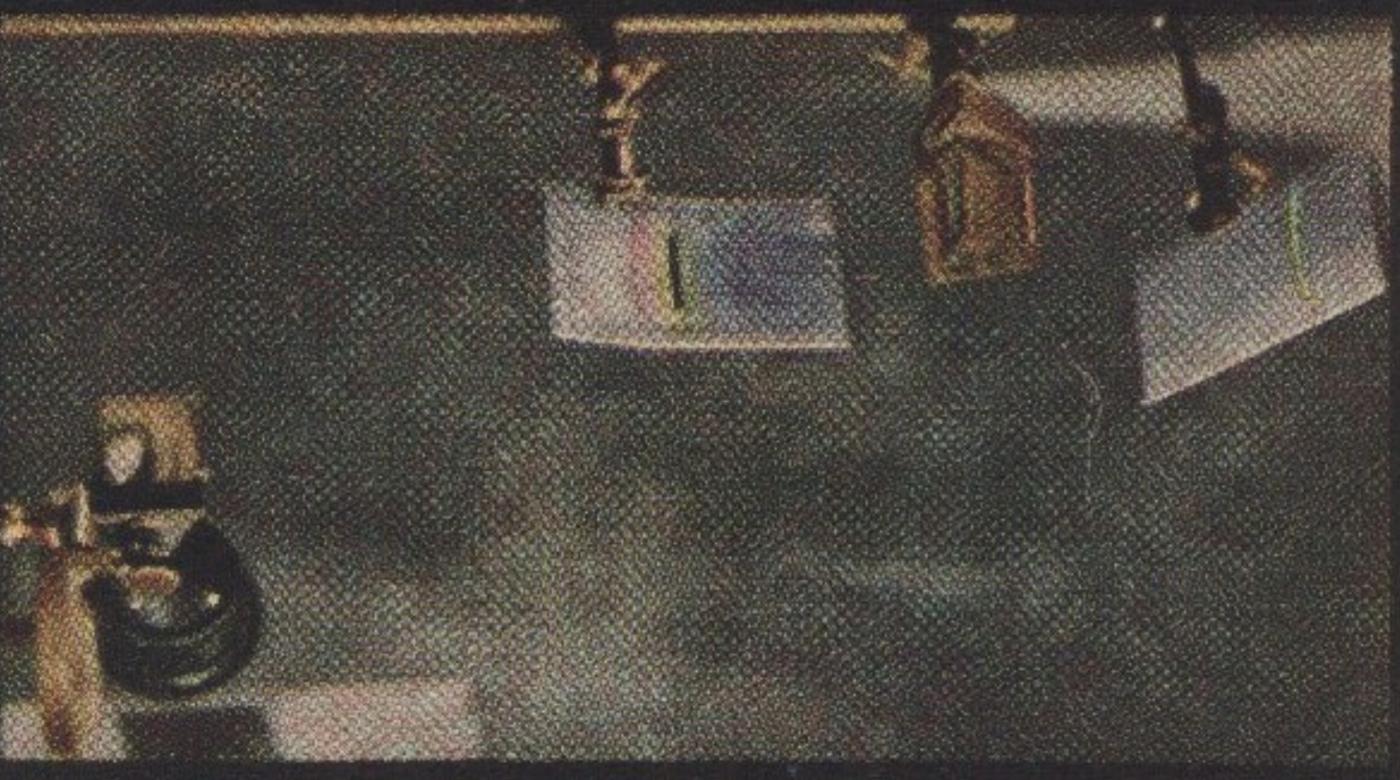
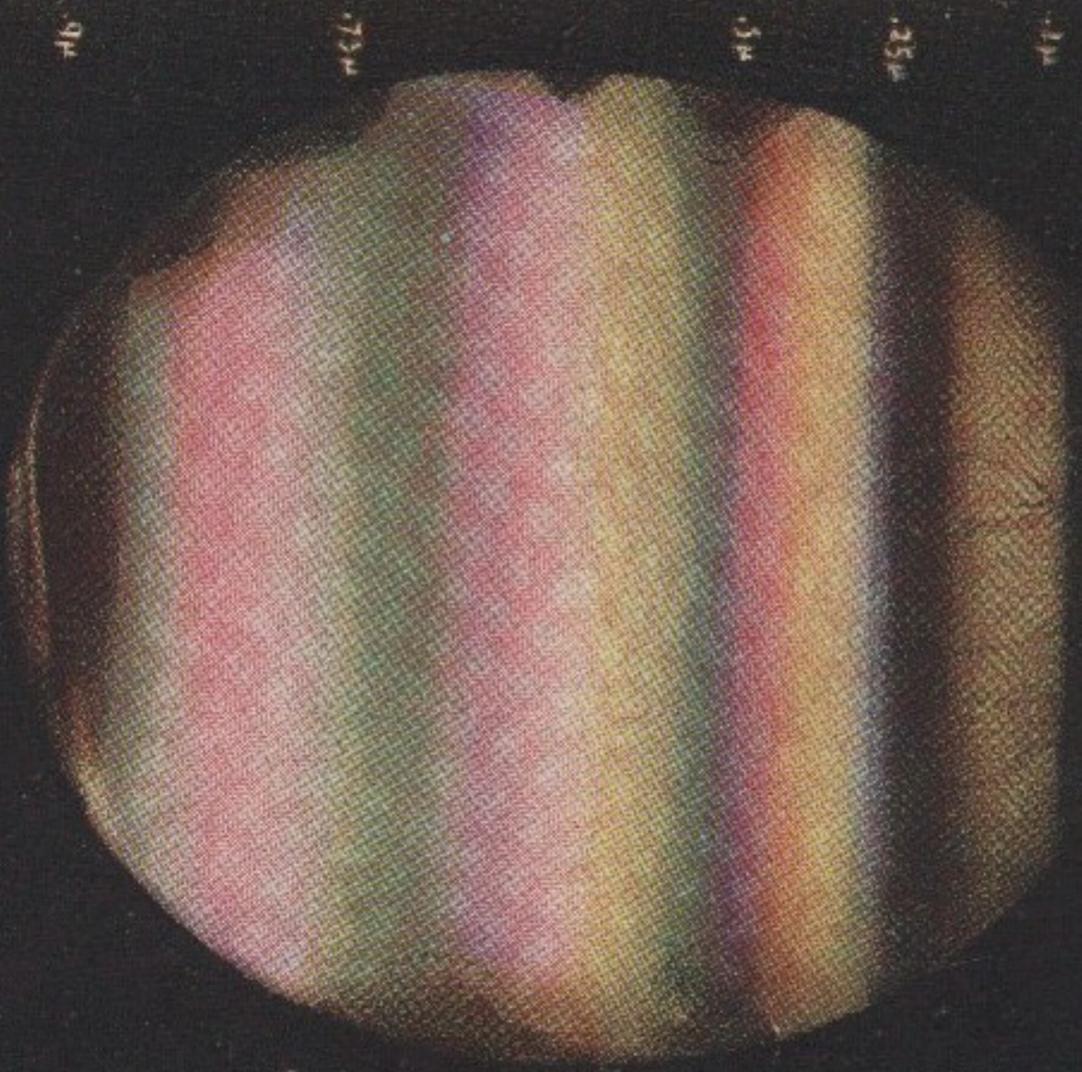
光電效應

A. 這一幅肥皂泡的畫，是巴故爵士詹姆司·棟華 (James Dewar) 所攝的：圖旁的標度，指示在不同水平面的厚度。一個「 μ 」，是一釐米的一萬分之一（參閱第一七四頁）。

B. 此幅彩色照相，表示在實驗室中重做牛頓的分光實驗。右下角幻燈裏發出來的光，穿過一條水平的窄縫，以定其界限，然後透過稜鏡，而在左側的半透明屏上，造成光譜一道；屏共有二，夾於蒸溜架上，現光譜的屏，是在下方。此屏上也有窄縫一道，讓一部分的綠色光穿過，再照在第二塊稜鏡上面。這綠色光線偏向一邊，照在上方的屏上；並無分光作用，再行發生，綠色光線仍是綠色（參閱第一〇四、一〇六頁）。

C. 這幅彩色照相，是由上向下攝取的。長方水櫃中，盛有已溶 eosin 的水，透過圖的頂面，射入櫃中，被稜鏡折向下方，此稜鏡又把右側各種顏色，分開。水面有光，現於一種顏色屏，一部分光，落於其表，較短波的光，都為水所吸收，由發出青色的螢光，eosin 發出黃綠色的螢光；這兩條螢光帶，現於櫃的一處，另左有青的斑，較高的，這是由水的櫃壁反射所生，通入櫃中，而在櫃底照出黃紅色的斑（參閱第二七二頁）。

D. 這一幅圖，從楊氏所著的自然哲學一書摘取下來，是用彩色繪成的，並非照相。下面一部分的縱條，化表肥皂膜的干涉色，這肥皂膜由左到右，厚度逐漸增加（實在是從頂上到底下逐漸增加）。此圖的上半部分，表示用稜鏡把下半部分拉成光譜的時候，所見的情況，稜鏡的邊，在水平位置。例如左端青色的斑（意思是說很青的斑），被拉成的光譜，缺少紅色。與青色相鄰的，是黃色，黃色被拉成光譜，各色俱全，獨缺紫色，其餘類推。各黑斑自集為連續曲帶羣（參閱一七二頁）。



94

734

34

254

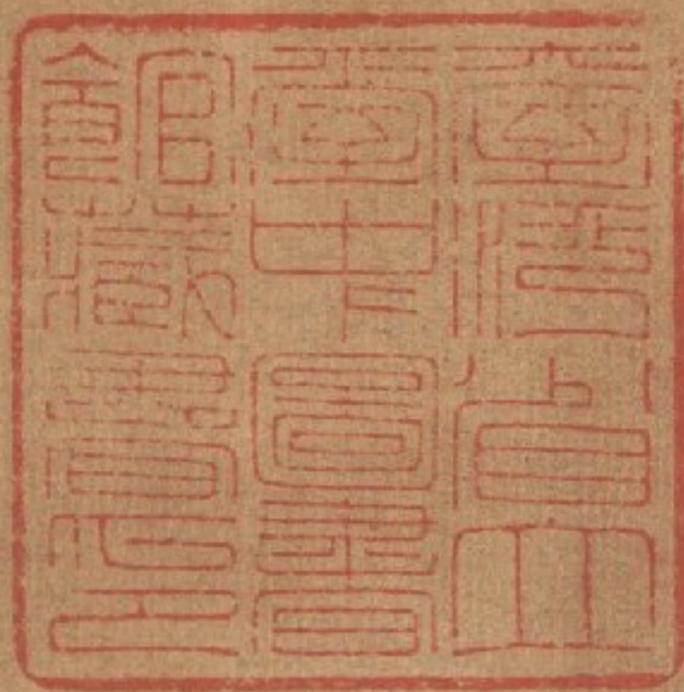
14

9

光的世界

第一章 光的本性

宇宙間的各種珍聞奇事，都是由光給我們報信的。光從太陽與諸星，到我們的面前來，就把它們的存在，它們的位置，它們的運動，它們的組織，以及其他許多有趣味的事情，都告訴了我們。光從我們四周圍較近的物體，到我們的面前來，就使我們能夠知道，我們在世界上有何舉止行動：我們享受了光所顯示於我們的形形色色，我們又用光以交換知識與思想。光這一個字的意義，極有正當的理由，可加以推廣，把那與光同宗，而又爲人目所不可見的輻射，其範圍甚廣者，也包括進去，假使如此，那麼光又是能的搬運大家，在世界之中，宇宙之間，把能從這一處搬運到那一處，而以遷移我們所謂「熱」者爲主。現代無線電的傳遞，也被包括在這個名詞之下，而倫琴射線，放射質裏面



出來的射線，也在其列，還有宇宙射線，或許也可以包括進去；這宇宙射線，近來曾引起了很大的興趣。這幾種大不相同的現象，通通都是一個原理的表現，其包含之廣闊，已因我們研究了光的本性，而日趨明顯。

我們還可以更進一步來講。在最近這幾年裏面，已經很清楚的知道，單個的電子，即電的微小元素，其所具各種性質，也與以光為表率，以光為最著名的那些輻射，彼此同宗。即使是原子本身，在某幾方面看來，似乎也屬於此同一大範疇。

所以光這一件東西，若照光字完全的意義來說，那麼它所發送的能，是生命的主要營養品，而它所給與生物的，便是觀察的本領；而且它又與一切有生無生的東西所由成之物質，彼此同宗。光的作用，其勢力遍於宇宙。當我們說光的宇宙這句話時，我們也並沒有說錯。

我們要考究光，起初必須在狹義方面加以考究，即把我們的眼睛所察覺的，認以為光。太陽光的射線，離開了它的發源之處，及時來到了我們的面前。它在路上，已經有了種種不同的遭遇。它會穿透了太陽表面上被熱的氣層，又穿透了圍繞地球的大氣。它或許已被反射了許多次數，最後從

我們所正注視的物體，來到了我們的面前。這最後一次的反射，在它的路程之中，是對於我們最爲重要的一部分，因爲我們靠了它的幫助，可以認明該物體是什麼，它具有何種特徵。我們的眼睛所能推斷者，還不止於此：眼睛已從經驗受到了訓練，使我們能夠辨認光之來自何源。就某種人造光而論，我們是不會弄錯的。當我們用了儀器，把太陽光加以分析的時候，我們的能爲，更要大得多。光在路上所已遇到的經驗，我們能夠推測其本性：光所穿過的大氣，我們能夠發見它的成分與狀態，而反射此光的各物體，我們也能够發見一些概況。

航海巨舶，行程已畢，卽入船塢而徐徐移動，至適當地位停泊，此時若有人在旁，注視此海舶，那麼他看了海舶的外貌，立刻會知道船從何埠開來，經過那一條航線；又若有人走上船去，那麼他看了船上乘客手中所攜的物件，或看了四處散放的行李等等，他就可以知道，此船到過那幾處埠頭。此船的航行故事，卽寓於這些瑣碎小節之中。

光線到達我們的眼睛時，正與海舶到埠無異，也把所經歷的故事，帶信給我們，有些很容易了解，有些很難理會。大半由眼睛記下來的那一節消息，其所報告的，便是光線在其行程猶未完畢以

前，最後一次的散射；使我們的眼睛，能够「看見」這一次散射發生處的物體者，便是這一節消息。

光的波動說

所以我們當然要遇到下面的問題，即這一個送信使者，其本性如何，以及它從此處行至彼處，所用的方法如何。在目今的時候，大家所承認的這兩個問題的解釋，是比以前容易懂得多了，即使在不多幾年以前，也沒有如此容易。由無線電的傳遞，即在我們國內通稱的廣播，已使我們熟悉了一種觀念，以為有一種擾動或情形，成功波的形式，從中央電臺出去，向四方進行，而由遠近各「接收機」把它翻譯出來。太陽的發送光波，正與中央電臺的發送無線電波相同；撞到我們眼睛裏的波動，由眼睛接收而加以翻譯，正與「播音室」中出來的電波，由我們的無線電收音機，接收了加以翻譯一般。這兩組的波，其間並無任何種的差異；所不同者，只是它們的大小罷了。它們進行的速率，完全相同；不問何種介質，能够承載這一種波的，也能够承載那一種波。這其間有一個不同之點，在於下面的事實，即光波前後相隨，彼此的間隔，要比無線電波的間隔小得多。有此區別為因，當然

有它的結果，所以光與無線電的傳遞，在有幾處地方，動作並不相像。我們所注意的要點，卻是這兩種波在根本上具有同一的本性。

這種相似性的存在，既有興趣，又有用處。光的波動說，一向很難理解，因為它的中心觀念，一向是很生疏的。但是現在的報紙上，卻天天登着播音的消息，把各電臺所發電波的長度，告訴我們，所以波的概念，已變得很熟悉了。這一句話的意思，當然不是說我們現在大家都知道，承載這些波的是何種介質，以及此種介質在世界之中，空間之內，如何分布。我們也不見得一定知悉，來來往往，或上上下下運動的，是什麼東西；其實連海面上的水，所生大家都知道，有何種運動與它相當，我們也未必知曉。在實際上說來，大多數的人們所知道的，左右不過是無線電裏面有一種波，這種波可以量度，頗有幾分準確，還知道無線電收音機，可對於任何特殊電臺所發的波長，把它配準罷了。但是，當我們力圖領悟光的波動說有何意義的時候，這一些知識是很有益處的。我們看見無線電工程師；天天利用波的概念，而且用這概念，來規定他的業務。這一種觀念，似已去掉了它的翳障，而且當我們把這件事情，查究得更精細一些的時候，縱使我們覺得，我們現在所知道的，實在並不

比從前多，它也變成實用上的觀念了。我們又因為這兩種波在動作方面的重要區別，都可以增益知識，而有所得。我們要借重這些區別，時機正多，我們就要見到了。

達文脫雷 (Davenport) 電臺所發的無線電，其波長是一五五四·四米，即一五五四四〇釐米。紅光的波長，卻比一釐米的一萬分之一，還要短一些。我們想做幾個實驗，把波的幾種性質，顯而易見地證明一下。無線電波顯然是太長了，而光波又太短了，都不合用。我們必須用大小較為適宜的波動，因而我們就找到了水的波紋運動。所以讓我們就來講一講水的波紋；我們要用波紋來做臂助，此舉十分正當，因為波紋會把波動的主要特性，告訴我們，正與其他任何例子一樣；凡是波，不論長短，它們的動作是大率相同的。

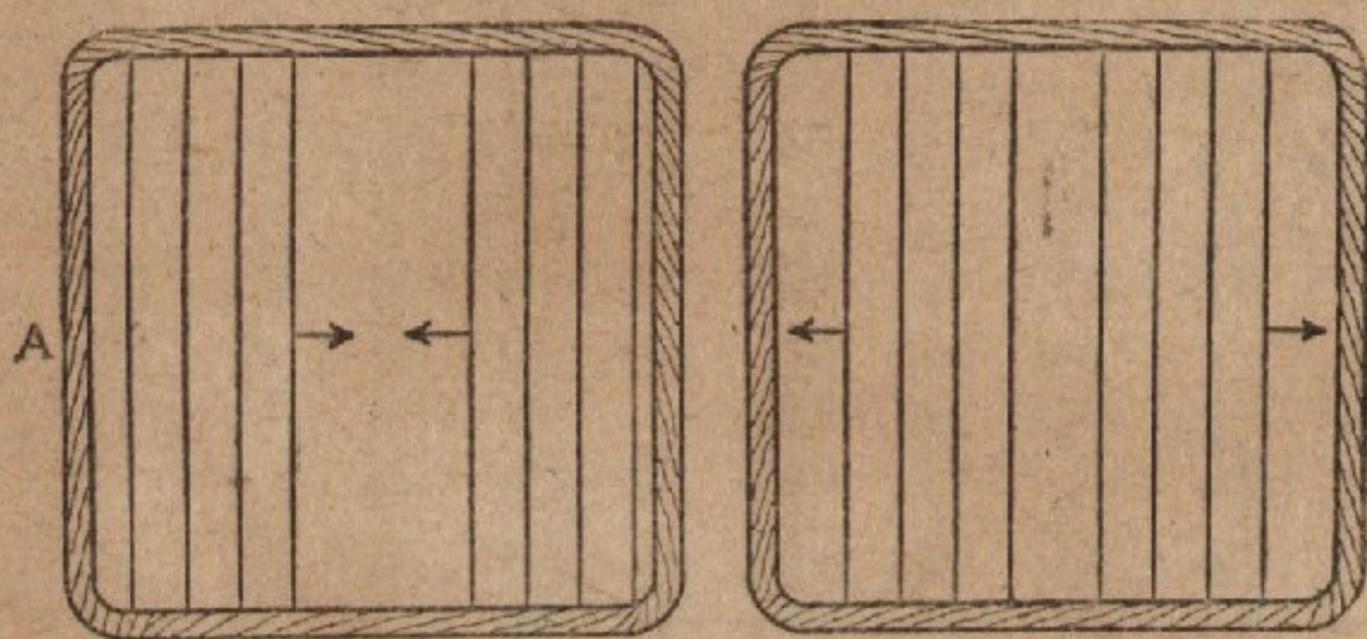
波紋實驗

我們用一隻淺的水櫃，櫃底是玻璃做的，如圖一所示。此櫃中盛水的深度，約為四分之一英寸。把水攪動的時候，在水面上疾行的波紋，若直接加以觀察，是不容易使目光隨着波紋流轉的，但是

我們若用一道肉眼可見的光，把波紋的影，由鏡投射於屏上，我們就能夠細細注視它們了。

我們把這水櫃搖盪一下，以激起波紋，與水櫃的一邊平行。這些波由水櫃兩邊相向而行，兩組波在中央相交。彼此互相穿過，最後各達出發處的對面一邊。它們在這兩邊又反挫了一下，仍循來時的路回去。我們所行的這兩種觀察，可把波動的兩種最基本的特性，很容易的加以說明。

由第一種觀察，我們知道兩組波互相穿過時，如何彼此都沒有改變。這一件事實，即或我們未曾實在感覺到，也是我們大家所習見的。如果不是這樣的話，恐怕要有希奇古怪的事情發現了。假定有一個人，正在望着之支蠟燭；此燭正把它的光線，發送出來，射到此人的眼中。假定有第二個人，正在望着另外一支蠟燭，並假定這兩條視線，彼此相交。各人都看見



(圖一) 把這波紋櫃搖動一下，就可激發水波，橫過水櫃。在左面一圖中，發源於水櫃兩邊的兩組水波，正相向而行，愈行愈近，在右面一圖中，兩組水波已互相穿過了。

他所望着的蠟燭，宛如並沒有第二支蠟燭在旁一般；假使不是這樣的話，那麼結果如何，不言可喻。我們想一想看，從室內種種物體所散射的一切光線，彼此縱橫相交，交點是非常之多的，假使在每一個交點，各光線於某種情形之下，互相破壞，那麼將有何等驚人的現象發生呢？在這混亂的陣圖中，恐怕什麼東西都不能辨認；全室除一片模糊之外，恐怕沒有別的東西可見。再講到各處廣播電臺發出來的射線，可知它們在相遇的地方，也不互相破壞。有一種專門術語上通稱爲「干涉」的效應，其本性與此並不相同，而且很奇特，我們要到後面再加以考察；現在暫且不去管它，先談無線電的例。譬如說有一個觀察者，正在倫敦地方，傾聽卡迪夫（Cardiff）無線電臺的播音，同時又有一人，正在南愛普登（Southampton）地方，傾聽達文脫雷電臺的播音，這兩組電波，雖然事實上確在牛津（Oxford）的附近，交叉了一下，但是那兩位聽的人，卻大家都不覺得，它們相交以後有何不良的影響。各組射線，在相交而過的時候，其運動誠然很複雜，不過彼此既交之後，仍各自取道前進，宛如從未受到對方的牽涉一般。列波互相穿過而無任何相互的效應，這一件事實，對於我們的具有視覺本領，顯然是一大要因。

在過去的時候，要說光線相交，彼此都不受任何影響，當然是難以使人了解，現在或許也還有人不明白。尤其是從前信了牛頓爵士所維持的學說，以爲光是流動微粒的那些人，更不會明白。也有人舉過一例，反對牛頓的假說，他所舉的例是，兩個人四目相視，將彼此都不能見對方之目，因爲來往的微粒，中途相遇，恐將彼此互撞，都掉在地上。這一個反駁的議論，並不十分堅強，因爲可以假定微粒很小，小至足使彼此互撞的機會很少。哲學家借了某種實驗的幫助，開始考究光可以有何種本性之時，大家會各據一詞，你來我往的辯個不休，這些辯證，我們拿來考察一下，看看內容是些什麼，無論如何，這是一件有趣味的事情。

在牛頓的時代，有兩種敵對的學說：一種是牛頓本人所建議的波動說，一種是惠更司所建議的脈搏說，脈搏說便是今日波動說的前驅。牛頓與惠更司二人，都假定有極小的微粒存在。然而牛頓所假定的，是此等微粒飛行而成光；惠更司所想像的，則爲此等微粒團聚於一處，靜止不動，並且充塞於一切空間之內，而光的進行，即係微粒的震動，由此及彼的傳遞。現在把惠更司所著光論上的一節話，引在下面：

「假使有人把大小相等，而由某種極硬物質製成的球若干個，排成一條直線，使諸球互相接觸，又用一個相仿的球，去敲擊排首第一個球，那麼此人必將發見，此項運動在一剎那間，就傳到排尾最後一球，使它自行脫離此排，而不能察見其他各球，曾被移動。而且他還要發見，起先用以敲擊的那個球，也與這些球同時靜止。所以此人由是察知，各球傳遞運動的速度，非常之大，球的物質愈硬，傳遞速度愈大。

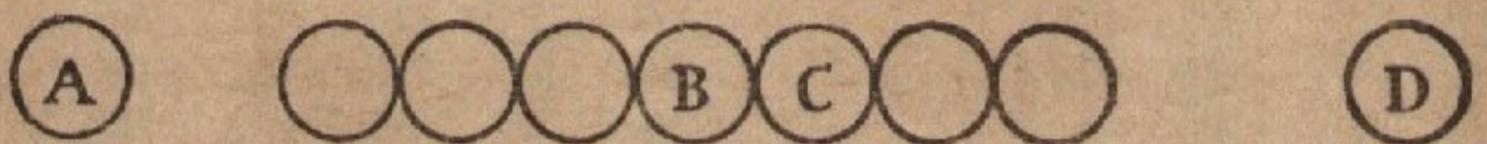
「雖然如此，這種運動的前進，的確仍非瞬時即達，而為漸次來臨，所以不得不費一些時間。因若此項運動（假使你們要說，這是對於運動的傾向，那麼也可以如此說法），並未漸次經過所有各球，那麼各球必將同時都得到這運動，因而便要一齊向前；但是這種情形，並不發現。」

惠更司曾細細指明，他所想像的脈搏，彼此相繼的間隔，並不相等，是以他否認有合律性存在，而合律性卻是波動的主要性質。楊氏與夫累涅爾氏，在十九世紀初期，建立現代光學說的基礎時，就利用了這一種性質，獲得很大的成效。楊氏的發展干涉原理，夫累涅爾的發展橫波原理，我們往後都要討論到的。然而惠更司卻也能够用他所想像的脈搏，解釋光的較簡單的現象，包括光的反

射，以及射線的交叉，沒有相互的損傷。後面這一種現象，他曾借了圖的幫助，加以解釋，現在特把該圖臨摹於此，如圖二便是。他所觀察的是，假使把A與D這兩個硬球，從對面推過去，使兩球同時撞擊這球陣，那麼兩球就要回跳，宛如它們會撞在固定的物體上面一般。這些脈搏，必已相向通過此球陣：所以A球的運動，被傳到D，而D球的運動，也被傳到A球（仍請閱圖二）。

這一個實驗，可以用另外一種方法來布置。把各球排列在板上，如圖三所示的形狀：板上挖幾道淺槽，把各球嵌在槽中，使它們常守陣線。現在假使把A球向B滾過去，把D球向E滾過去，使它們同時出擊此球陣，那麼A與D就彼此貼緊了B與E，停住了不動，而C與F兩球，卻滾出去了。這兩陣脈搏，已在圖的中央相交而過，並無相互的效應。

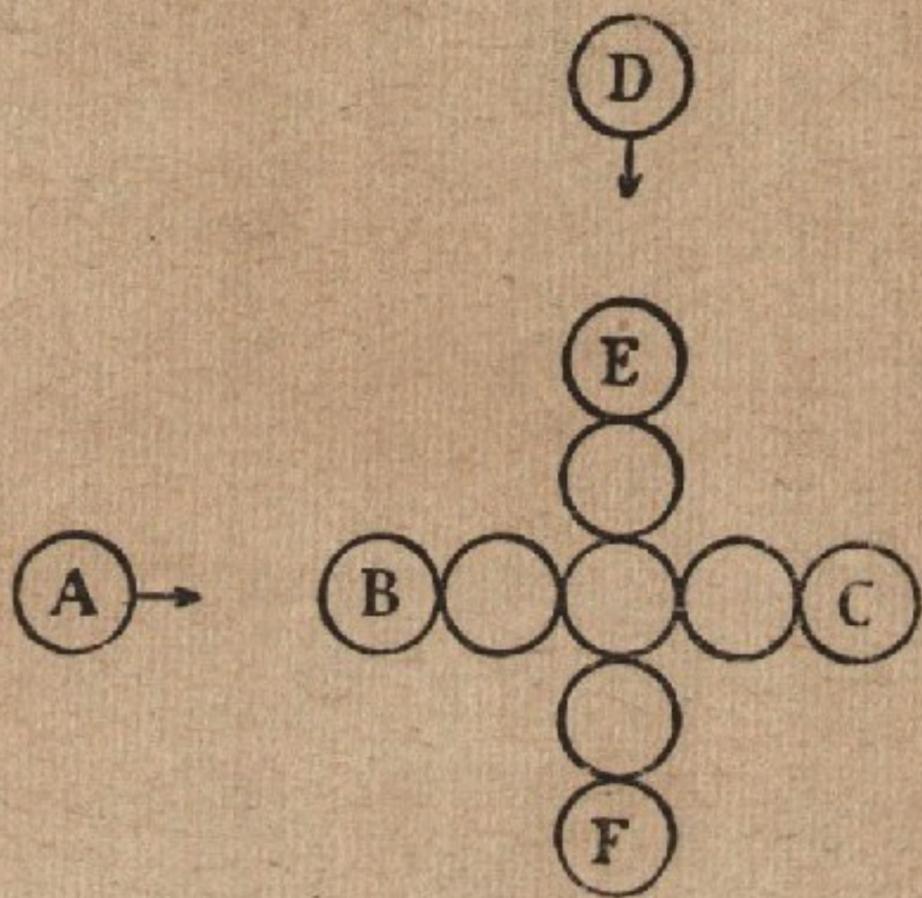
在牛頓以後，微粒說失去了根據，而波動說終究得到了勝利，因為此說經由楊氏與夫累涅爾，加以修改與擴充的時候，覺得它所能解釋的，非但有牛頓



（圖二）此圖是從惠更司所著光論上面摹下來的。左端的A球，把一排同樣的球的左端，敲擊一下之後，自行停止，但是右端的一球，卻走出去了。

與惠更司時代所知的一切現象，而且還有後來所發見的其他光的性質。我們講下去的時候，我們就要察覺光的波動說，仍舊有它的勢力；我們的確要把它大大的利用一下，而且要從波紋的行動，引出許多的說明來，這是我們早已開過端的了。然而近來這幾年中，有幾件更新的事實，業已共見共聞，此等事實，波動說不能夠加以明白的解釋，這卻是極奇怪，極有趣味的事情；此等新事實，似乎要求我們，重提牛頓所倡的那種微粒說。有些觀察，似乎彼此絕對相反的，必須找到一種方法，把它們融合起來纔行；而且在科學史上說起來，如此騷動的時期，向來未曾有過，在此時期中，大家都努力於求知索解，我們的心力，似乎因此而用到了極點。

這一個特殊的問題，我們在目前切不可再行深究。我們必須安心先把光的特性，擇其不甚錯



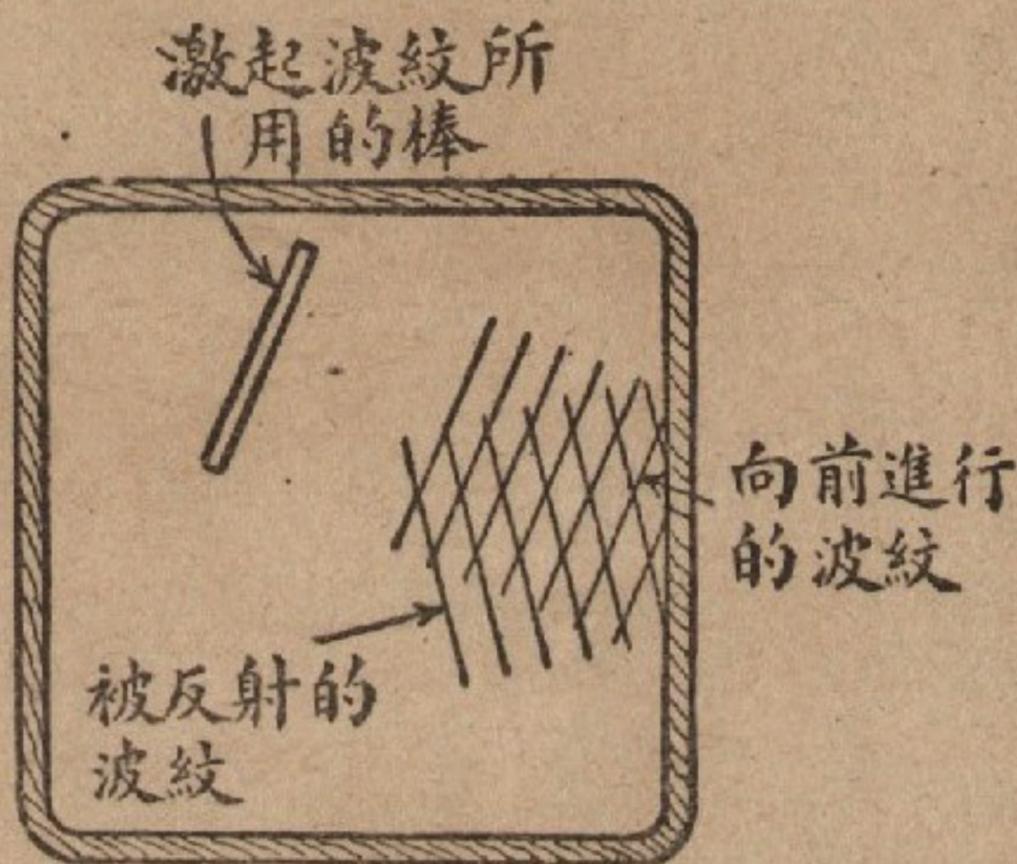
(圖三) 上一實驗的變化。A 與 D 兩球，同時彼此敲擊 B 與 E，而入靜止狀態。C 與 F 兩球，卻移開原位了。

雜的加以研究，且喜在研究的時候，已有佳妙的學說，足供我們的應用。我們或許自始至終，知道我們正要把較難的事情，留待後來的考究，不過這也沒有什麼害處。我們一路講下去的時候，若先注意簡單的事實，並且力圖用那至少在某範圍內準確的學說，來表明這些事實，保證不空費我們的時間，那麼我們也可以自慰了。

反射

上面不是說過，當我們注視水櫃中的波紋，在水面上移動的時候，立即觀察到兩種事實麼？第一種既已講過，現在就接講第二種，這第二種就是反射現象。我們已經知道，一列波紋正對着水櫃一邊，橫行過來，遇到了這一邊，就要被它反拋出去，直回原路。現在，我們假使再激起一列波紋，教它斜着碰在水櫃邊上，那麼我們將見有一列被反射的波紋，也與水櫃的邊斜交，其所成的角，彼此相等。這種現象，相當於光的一種著名的性質；許久以前，就有人斷言，入射線與反射線，對鏡子的反射表面，交成相等的角（請閱圖四）。

在這一點上面，我們最好要把正在應用中的兩個名詞，就是「射線」與「列波」加以考究，明其關係。我們用「射線」一名詞，來描寫下面這一類的光線，例如從百葉窗的小孔中，漏入暗室的太陽光，成功亮晶晶一條軸槎形狀的便是。這一道光，也可以想像它是一串列波：不過要在簡圖裏面，準確地表現此項觀念，是一件不可能的事情。若要表示這些前後相繼的波，勢必在圖裏面畫許多平行線，假使所表示的，要教它真確無誤，那麼這些平行線，應當畫得可以指明每英寸內有波四千。雖然，在考究此種圖畫的時候，卻使我們觀察到另一要點。要劃分波的界限，在實際上並不能畫一條相當於「射線」界限的直線，通過各波，把它們分得如此清楚的。我們應當預料它們要向兩側漫布，以致邊緣模糊不清。讀者須知，此事就光線而論，確然發現，而且這種效應，在理論方面極為重要，我們往後就會知道。在實際上說來，這種效應很小，大概可以不

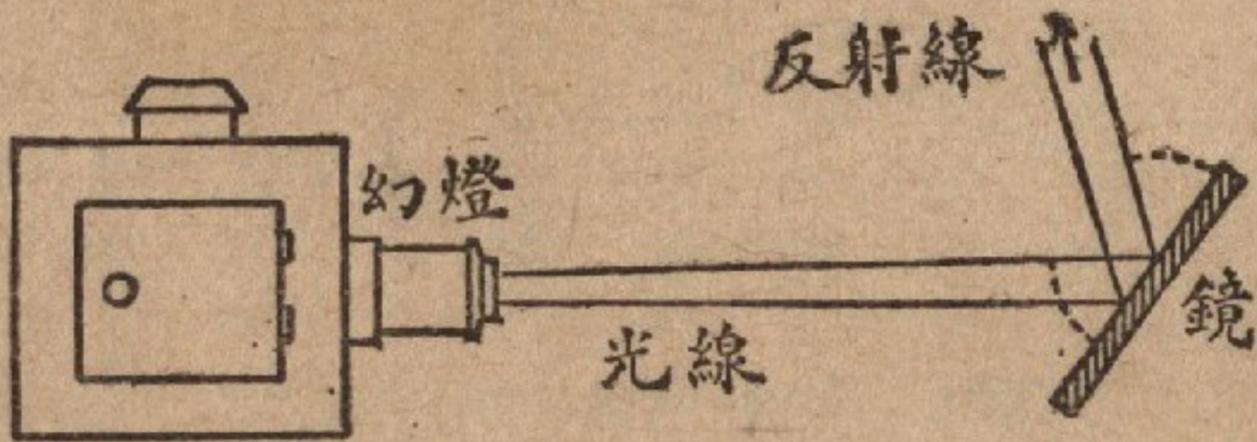


(圖四) 此圖表示波紋在水櫃一邊的反射。

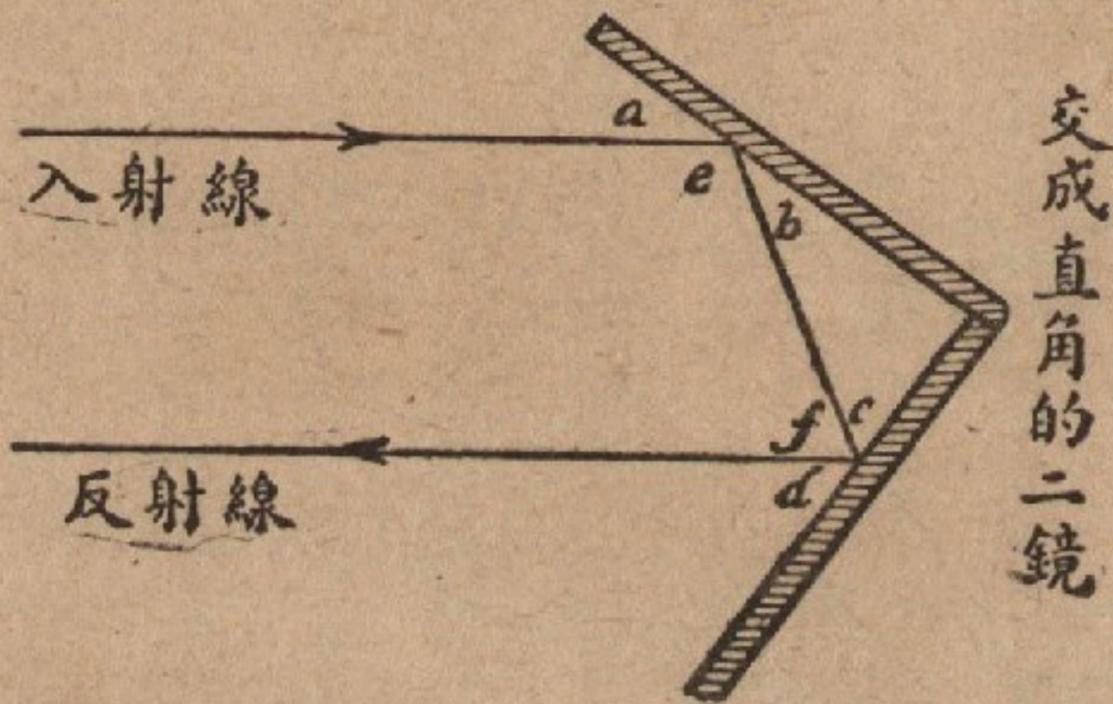
必顧它，所以在大多數情形之下，我們畫起「光線」來，把光看做好像有峻直而分明的界限一般，也非不正當之舉。光線的方向，當然與各波垂直。

讓我們來做這麼一種或兩種實驗，把光線在平面上的反射，說明一下。如圖五所示的幻燈，它所發出來的是一條細光柱。有一面鏡子，把這光柱反射出去。雖然我們並非不能作正確的量度，但是我們也很容易的察知，反射定律，殆已遵守了；而且我們可

以承認，最最正確的實驗，都找不到其中的錯誤。我們若要推廣此實驗，並把它變化一下，那麼可取

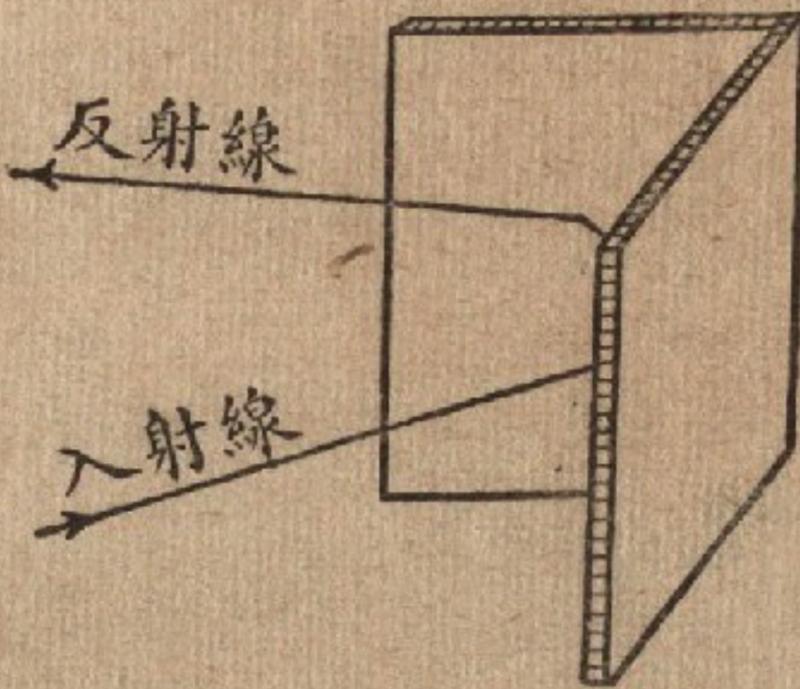


(圖五) 入射線與反射線，對鏡面成相等的角。

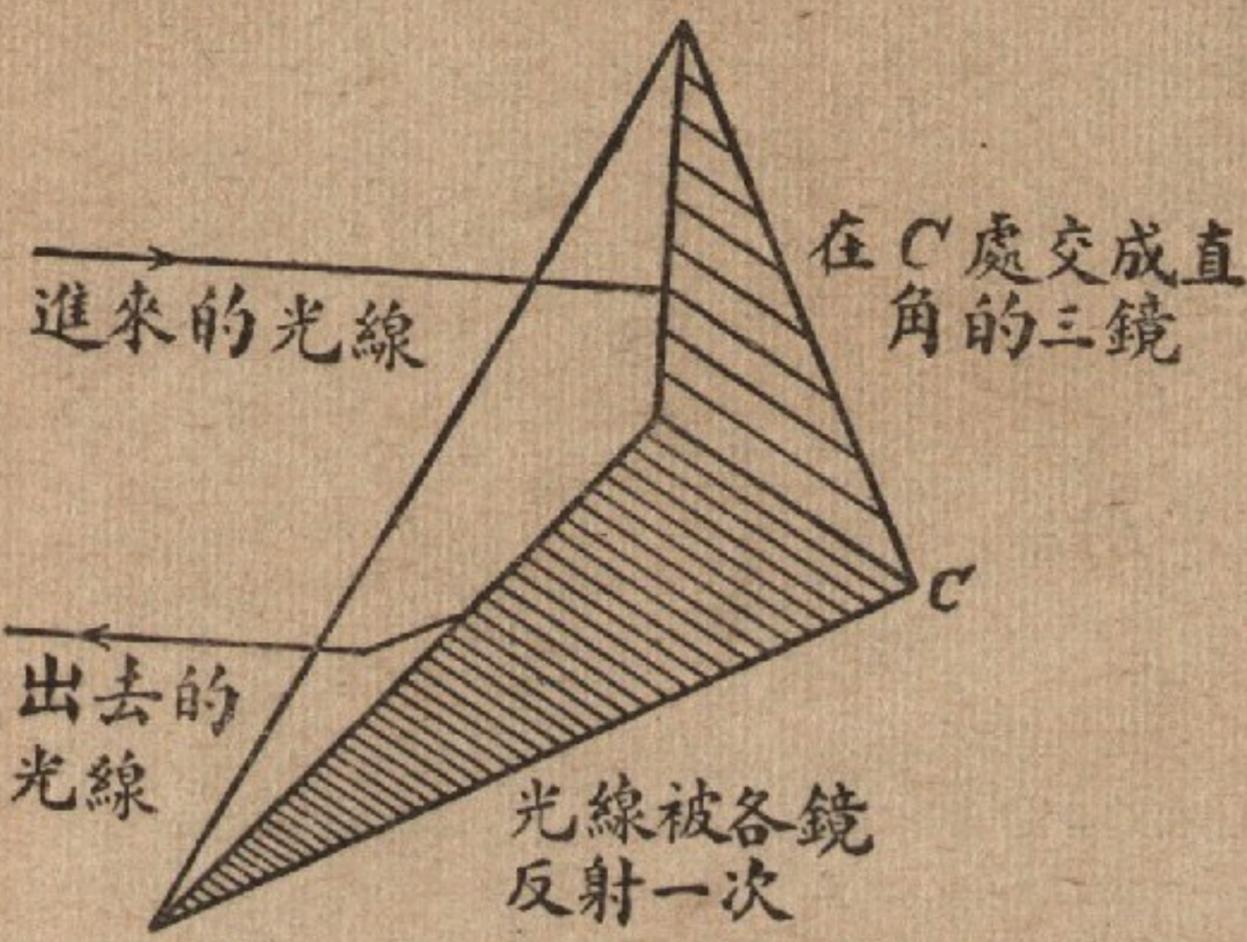


(圖六) 在互相垂直的二鏡上，所起的雙反射。假使二鏡的接合線，與入射線垂直，那麼入射線與反射線，互相平行；因為 $a+d=b+c=90^\circ$ ； $\therefore e+f=360^\circ-(a+b+c+d)=180^\circ$ 。

鏡子兩面，教它們交成直角，安放起來，交線須成鉛直；於是使水平的光線，射於一鏡，在此鏡被反射之後，再射到第二鏡上。此光線經過兩次反射後，仍舊回去，其回去的方向，與來時的方向平行：無論此二鏡立在什麼地位，總是如麼地位，總是如此，圖六所示的便是。然而這兩面鏡子，假使安放的時，候，交線不成鉛直，那麼兩次被反射的光線，就不與原來的光線平行



(圖七) 若前一實驗的條件未合，那麼入射線與反射線，即不平行。



(圖八) 從垂直三鏡的反射。不問此三鏡的地位如何，進來的光線與回去的光線，總是互相平行。

了（如圖七所示的便是）。

假使我們再取三面鏡子，裝配起來，使三鏡互相垂直，如圖八所示，那麼我們對於這反射定律，更可得一特饒興趣的例證。光線射在此三鏡上，順次被這三鏡反射之後，常循原來的方向回去，而與此項裝置的地位，全無關係。這一種裝置，已經發明了不止一次，其用途也不止一端，而且最近有一種用處，極爲靈巧。近來頒布了一條法律，規定機器腳踏車上必須裝一具反射器，把本車的頭燈所發之光，反射一些回來，使駕車的人可以看見。律文一公布，馬上有種種不同的反射器，製造出來，但是不能夠都把頭燈所發的光，充分地集中了，一直向駕車的人送回。這些反射器，當然都要經過國立物理試驗所的考查，以便選擇何者最合於規定。其中有一種最好的，即係根據圖八所示三鏡相交的計劃造成。這反射器是一塊紅玻璃，前部平坦，後部有許多三角稜錐體，突起如刺，各稜錐體的面，都是互相垂直的三個平面。車燈所發的光，射入此器前部，其一部分在各稜錐體的三平面上，連被反射三次，所以有一束的光線，循原路回來，這就是說，在機器腳踏車的進行方向內，適與所規定者相合。

光的散射

我們有時候說光的反射，有時候說光的散射。我們切不可忘了，這兩個名詞所指的，並非相異的過程，卻是不同的情形，在此兩種情形之下，所發生的是同一過程。光假使遇到了障礙，就要改道而行。這障礙物若有光滑的表面，那麼光的新運動，就整齊有方，而且根據某種簡單的計劃，此計劃即由表面的形式決定。這種效應，我們通常叫它做反射。但是障礙物的表面，假使參差不齊，那麼光遇到了它，就要向四方亂射，這就是我們所說的反射。當海中的波浪，滔滔滾滾沖向平整的堤岸時，就有整齊而簡單的反射作用發生；但是海岸旁邊，若都是嶙峋頑石，突出於外，那麼就要發生凌亂無序的運動，而我們也不會看見反挫的波列了。

當光線穿入室中的時候，它的徑跡所以可見，是因爲室內的空氣，含有許多種的塵粒，懸浮於各處，使一部分的光，改道射入了我們的眼睛之故。但是空氣中假使沒有塵埃，就不能從側面看見光的徑跡。爲證明這一種特徵起見，我們可以利用圖九所示的箱子，此箱兩端，各有玻璃窗一扇，光

可以從此窗射入，通過此箱，再從彼窗出來。箱子的前面，是一塊大玻璃，可以由此望見箱子內部。箱壁的裏面，完全塗黑，而且在未曾實驗的前數天，敷一層甘油，使箱內的灰塵，都積聚在壁上，黏牢了不再飛下來，如此，箱內的空氣，就差不多清淨無塵了。於是穿過此箱的光線，其在未入箱以前，與既離箱以後的兩節，都可以看見，而在箱子裏的一節，卻不可見。這當然與我們的假說相符合。因為光線若由列波組織而成，又若我們的眼睛這一種器官，在有光進去的時候，纔發生作用，那麼箱內的光線，既沒有灰塵使它的波改道，我們當然一些也看不見它了。我們或許可以布置一道光線，強度隨我們的意，放它從一孔射入室內，由別一孔出去，並且使室內完全黑暗，第一祇要不用其他任何方法，在室內放光照耀，第二祇要室內的空氣，絕無塵埃。在實際上，我們殊可想像上面所說的那隻箱子，差不多是這樣的一個房間。但是若把一片白紙，放在光

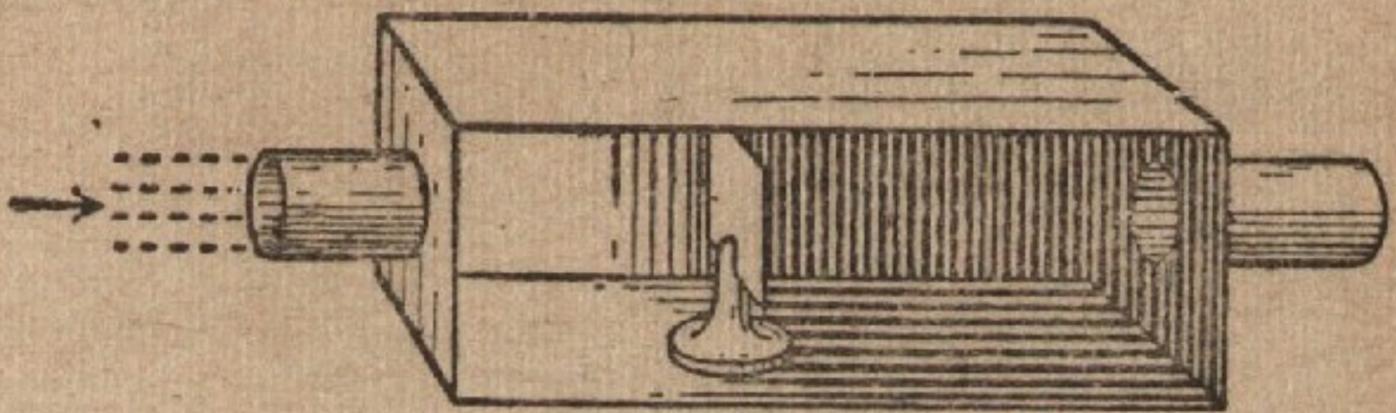
絕無塵埃的箱子：內部完全塗黑



(圖九) 在無塵空氣中通過，絕無可見的散射現象。

線的路徑中，那麼這箱子與這房間，就都通體明亮了（請看圖十）。在有些時候，不忘記用此方法可使光線改道，而且改道的很多，這倒是很有益處的。例如有人乘汽車出郊，晚間歸來，車輪忽壞，必須將車胎換過，但是荒野之地，沒有電燈，電筒又忘記攜帶，而車頭之燈，也決不能旋轉自如，普照各方，那麼此人祇要把一張白紙，放在頭燈前面，他就可獲得很亮的光，照着他作事了。要是光線由列波組成的話，此事立可了解無遺。

到此處為止，我們已在這些波紋運動裏面，發見有兩種特性，相當於光的性質，這性質是我們所熟悉的。這些波紋能夠互相穿過，彼此無犯，而且能夠在表面上被反射，正如光一般。所以讓我們承認「光係波動」這一個假說，有成立的可能性。但是我們立刻就要問，這波在什麼東西裏面動呢？我們又須姑且承認，我們並不知道有何介質，這些波能夠在其中運動。空氣決不負



白紙屏把光散射

（圖十）一片白紙，把光截斷，而向四方散射，成為明亮的第二光源。

此任務，因為太陽光可以穿過太陽與地球之間的空間，而這地方卻完全沒有空氣。不過這一種介質，我們以前對於其存在與否，雖然味無所得，我們卻也未受禁止，不準假定有此介質存在。無論如何，就我們現在的目的而論，假定這介質的存在，我們覺得甚為便利。

我們倒可以問一問，這些波是否常由同一介質所載。當它們經過空氣的時候，是否由空氣承載，當它們經過玻璃的時候，是否由玻璃承載，當它們經過似屬虛無的空間時，是否由地球上不知道的東西承載？這一個疑問，可以如此答復，即若假定載光波的介質，充塞於一切空間，不問是有玻璃，有空氣，或有這一類東西的地方，都包括在內，換句話說，凡是空間，不論有無質體，一概都有此項介質，那麼在此種種情形之下所發生的現象，我們就可以描出它的像真畫圖來。我們必須想像一切物體，凡是我們所能看見的，或是能夠感覺到的，都浸在廣及全宇宙的一片大洋之中。這一片大洋，我們給它一個名稱，叫做以太。當光在有物質的空間內經過時，光波即由以太承載；然而該物質也有它的效應，它可以使波行的速率減低下來，或者教它們完全停止。這些事件，我們不久便將詳加論述。

但是這種希奇的介質，是否真正存在呢？這是一個我們立刻就要問到的問題。然而當我們一想到我們將如何作答的時候，我們就要疑惑起來，這一個問題，究竟有無任何真實的意義，究竟在實際上，是否完全正當。我們假使自己竭力思索，欲得「真正存在」的意義，那是立刻就要墮入深淵的。幸虧我們無庸竭力思索，而且也不應當竭力思索：因為我們假使如此的話，就要離開了正題，走入歧途了。我們的正題，是要把我們對於光所行的各項觀察，彙集於一處，以求它們彼此間有何關係。我們發見其中有許許多多，都可使我們想起波在介質中疾馳而過，所以就採取了這種有用的方法，來考究它們。也許光的一切效應，都不可以用此方法來表示：在實際上我們的確找到幾種效應，不能與這種擬想符合。但是就目前而論，此事卻並無關係。等到我們起初所設的各概念，已屬顯然不够用的時候，我們就可以修改它們或者完全把它們換過。未到那個時候之前，我們始終覺得這些概念，最爲便利，最有用處。

光線的旁向漫布

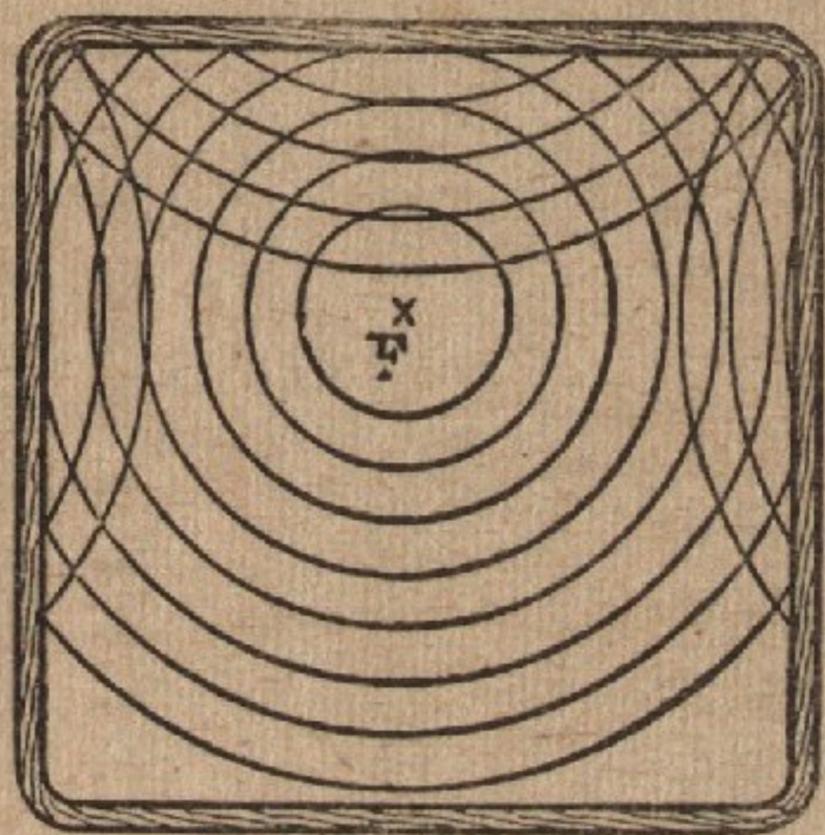
或許有人極力反對，以爲經過室內的光線，假使是一長條的列波所成，而這些波都在以太中翻騰前進，那麼這光線應當漸漸自向四側漫布：換句話說，光線的輪廓，不應當像我們所懸擬的那樣分明。這反對的議論，是很自然的，而且的確有這種漫布的情形，不過效應非常之小，小到就光而論，不可觀察。然而這種現象，也不是常常不可觀察的：在有些環境之下，漫布是一件極重要的事情，自然界中有幾種最奇異甚至最美麗的景色，都由漫布的效應所致。光線漫布的重要性，須看波長與光線寬度間的關係而定。我們所看見的光，其波長約在三萬分之一英寸左右，或一釐米的一萬分之一左右，與我們的光線寬度相比，真是微乎其微。假使光線的寬度，不過是一釐米的極小部分，那麼由波動向四側漫布的趨勢，必將生出可以察見的結果來，此事我們到後面就會知道。假定有局部的暴風，在洋面的一部分激起波浪來驅使前進。若暴風的寬度有好幾百英里，那麼波浪的漸向兩側張開，比較起來就很小了。你們還可以在小得多的範圍內，注視這種效應。設在靜的池水表面，有一陣微風拂過，吹起了一串微小的波紋，向前進行，那兩邊的水面，仍舊平如明鏡，不見有何擾動。何況就這些情形而論，水波長度與水波寬度間的比，還遠較光波長度對於光線寬度的比爲大，

無怪我們在平時，不會察覺這效應了。

像

現在讓我們再來考究另外一件事情，此事也可以用波紋水櫃來說明。假使把一隻手指，插入水中，就有水波傳布出去，成功許多同心圓，此種情況，是大家都熟悉的。這些水波傳到水櫃的一邊，就被水櫃邊反射回來，而且我們察見這些反射波紋，仍保持其圓形：不過這一組新的同心圓，其中心卻是櫃外的一點。假使我們設想有一條直線，連結此點與手指觸水之處，那麼水櫃的邊，必平分此線，而且與它交成直角。被反射的波紋，似乎從這新中心點發散出來，如圖十一所示的便是。

同樣，像蠟燭這一類光源所發的光波，成功圓形



(圖十一) 圓形波紋在水櫃邊上的反射：這些波紋本來是從 F 點發散出來的，經過反射之後，就好像從 F' 點發散出來了。

傳布出去，並且落在平滑磨光的鏡面上的時候，就被鏡面反射，反射之後，從蠟燭各點出來的波，就似乎都從鏡後相當的一點，向外傳布。假使這些光波，有一部分傳入我們的眼睛，我們就以爲它們確然來自鏡後的一點，並因此光是蠟燭所發的一種光，而蠟燭的各點，都在此同一情形之下表現出來，所以我們想像那蠟燭是安放在鏡子背後：因此之故，我們說鏡中有燭「像」，其在鏡後的距離，等於燭在鏡前的距離。

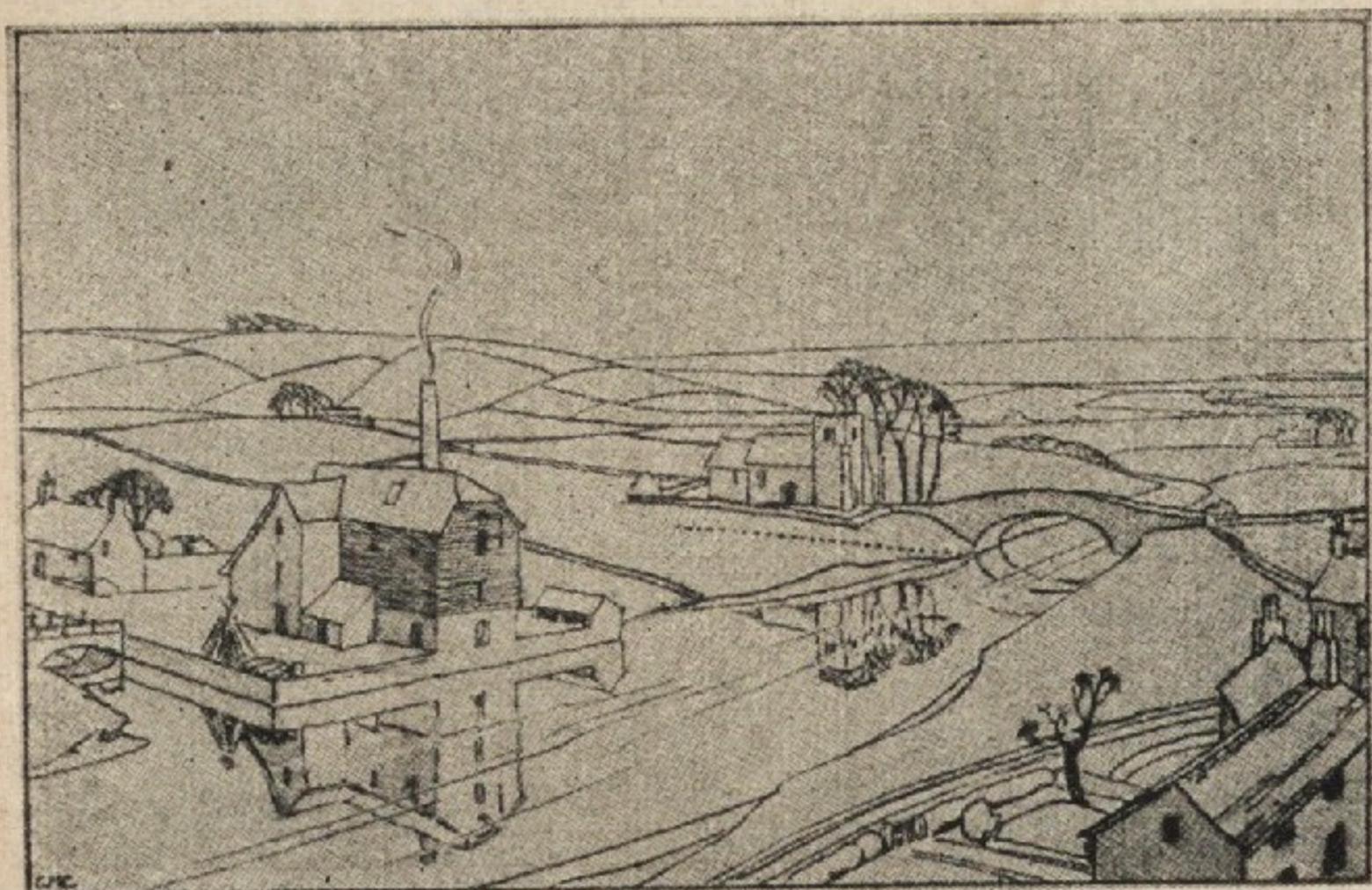
當我們接收這些反射波的時候，不問我們站在何處，總看見它們似乎從同一之點射來，因爲它們成功球的形狀——在波紋水櫃的面上，波的運動屬於平面，而波紋則成圓形——又因爲它們宛如以像爲中心，由此向外傳布。所以當我們把我們的眼睛，在平的鏡子面前，動來動去的時候，或當我們瀏覽靜水表面反射的時候，覺得我們的位置，雖然遷移無定，被反射的物體之像，卻似乎各守其固有的地位而不變。像的各點，在反射表面或其延伸面背後的距離，正與原來物體各相當點在前面的距離相等。本書所附各種照片，可藉以說明此項現象（請閱銅版圖二A及三。）

曲面上的反射

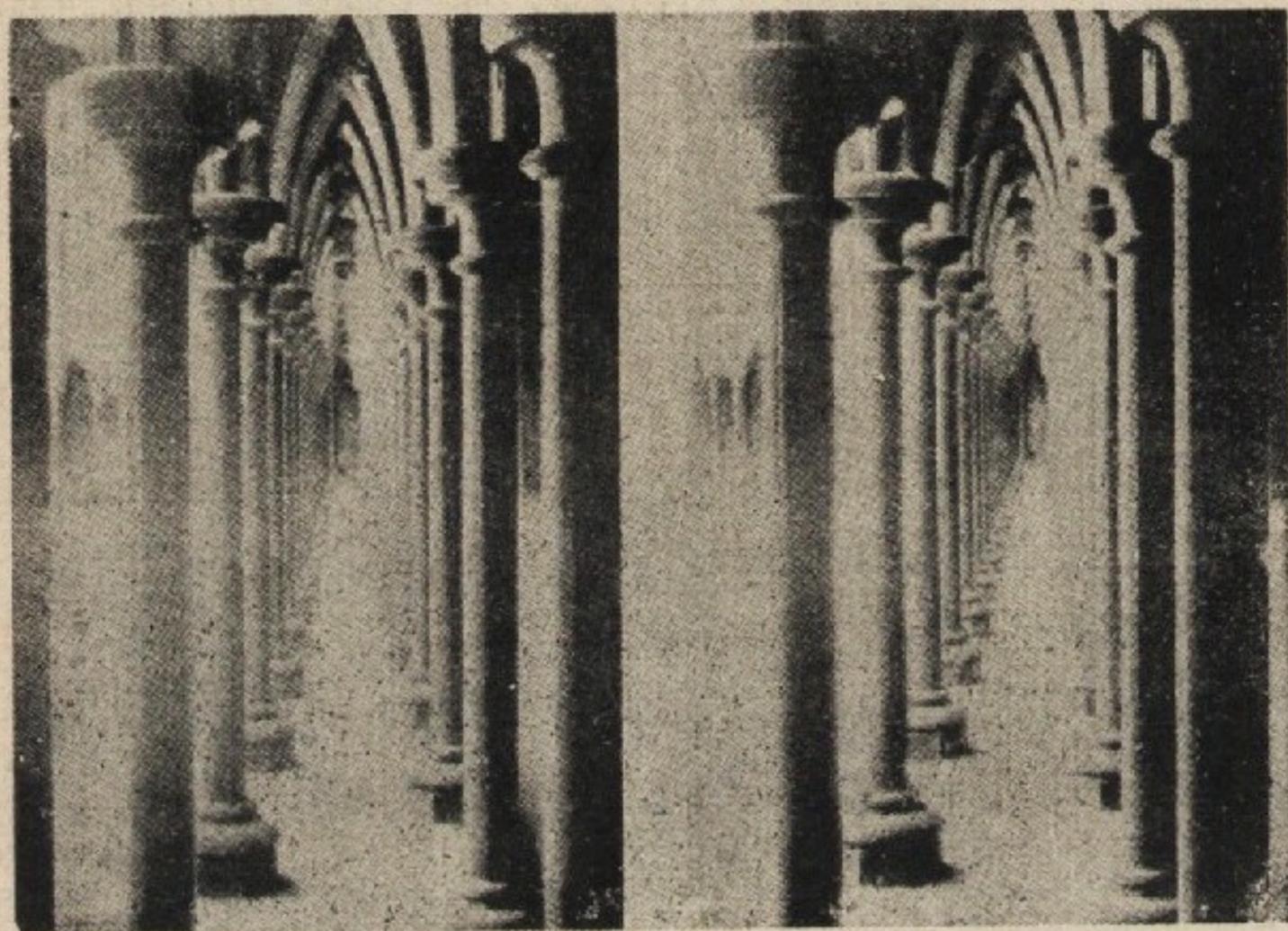
當反射發生於曲面上時，我們知道情形就沒有如此簡單。常常用爲裝飾品的凸鏡，假使我們望到它的裏面，我們就會看見鏡中收攝的室內各物，都縮小了；而且還帶幾分歪曲，當我們把頭搖動的時候，它們也跟着微微移動。此項現象，也可以用波紋水櫃來說明。

我們在水櫃中放一個曲面的障礙物，以反射水波：障礙物的凸面，向着手指浸入水中的地方。現在我們可以看見，假使仍與以前一樣，激起一組圓形的波紋，令它們向前進行，那麼被反射後的一組水波，就要比原來的更爲彎曲。它們似乎仍從障礙物背後的一點傳來，不過此點在障礙物後的距離，卻不及浸入手指的一點，在障礙物前面那樣遠；如圖十二所示的便是。就光的情形而論，也有同一的效應發生：如圖十三所示的便是。從這一個實驗，我們可以知道，當我們望見凸鏡中的物像時，我們所以覺得它遠比原物體（即實在物體）爲小之故，就因爲鏡中所映各點，相當於原物體各點者，都擠緊在一處。銅版圖四A，表示壁上所掛的凸鏡，其中所映全室的圖畫，看起來縮得很

銅版圖二

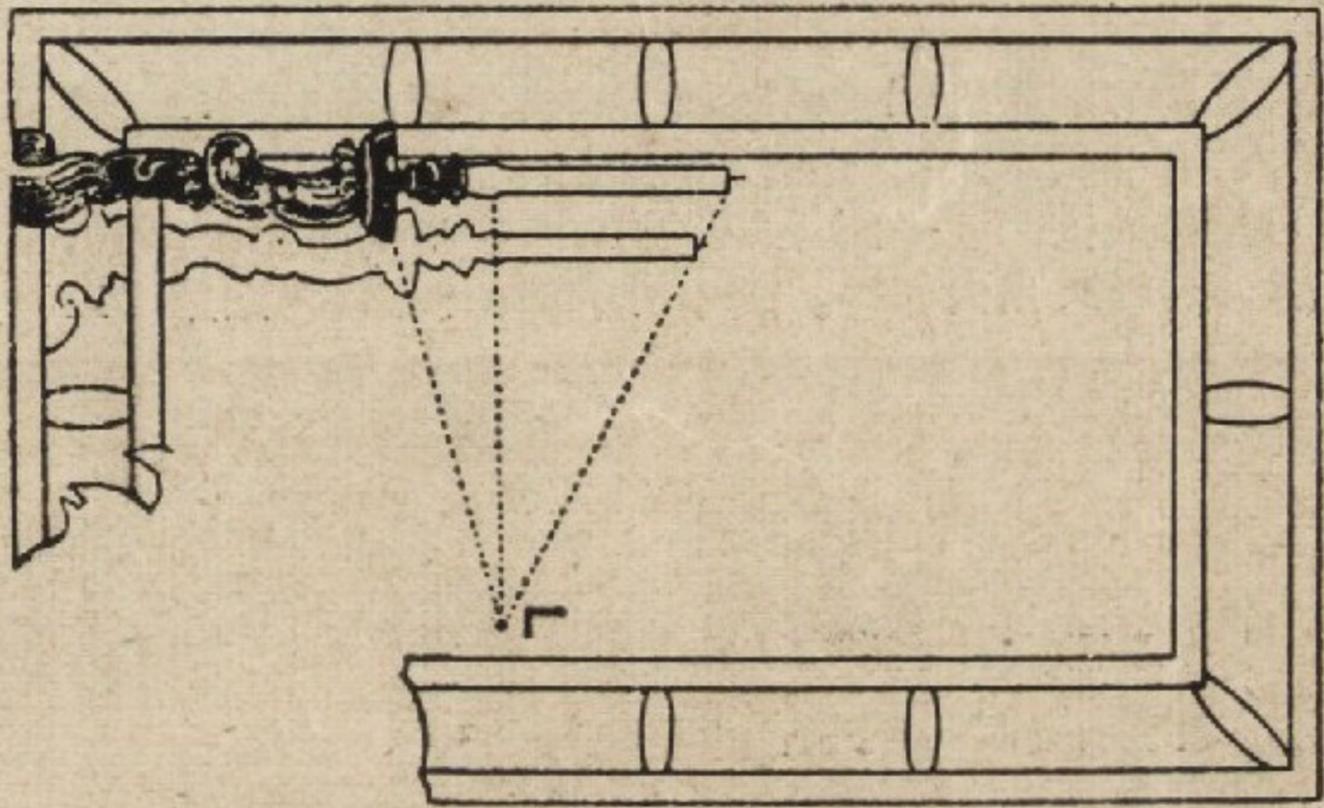
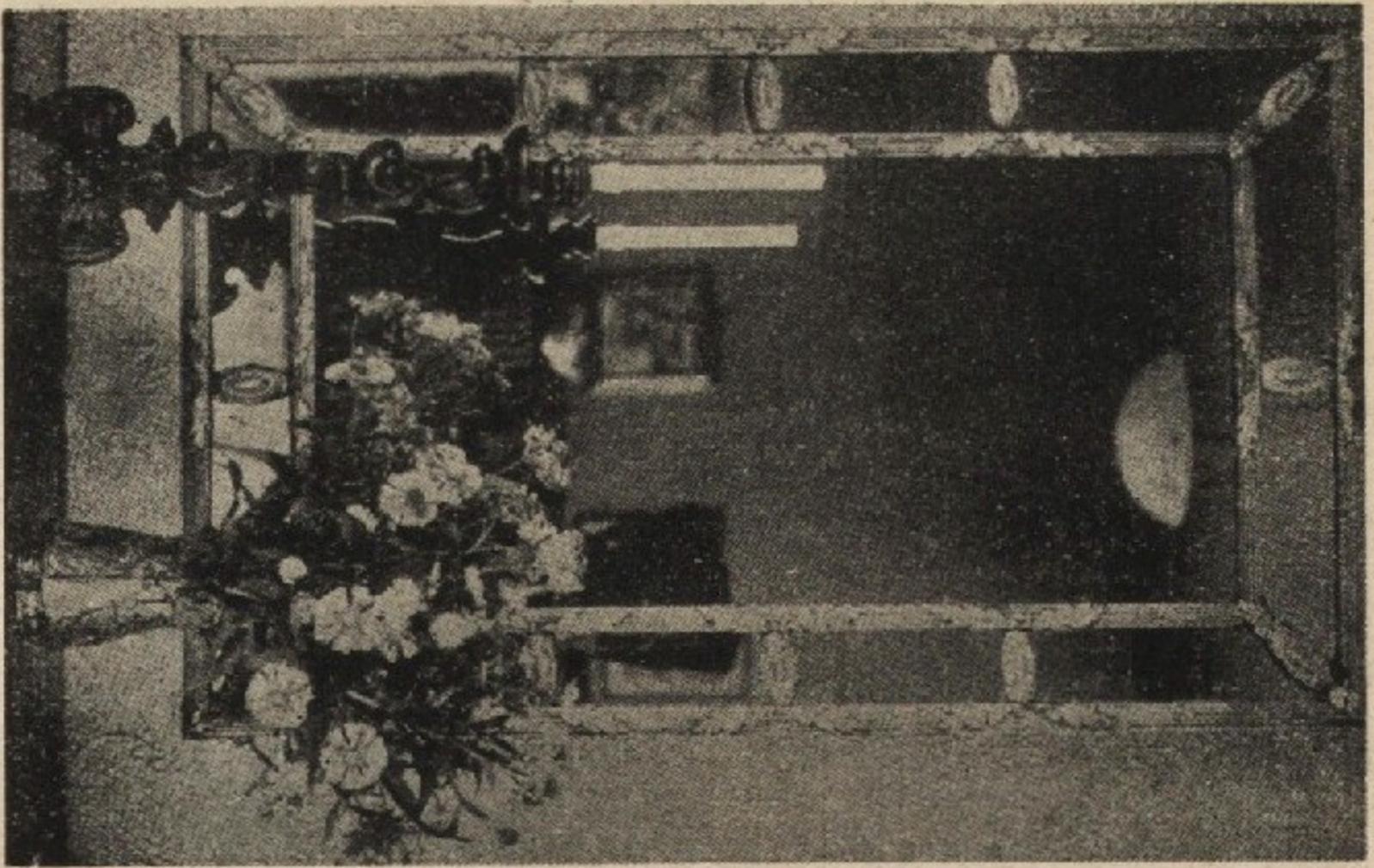


A. 假使把這幅畫裏面的任何一點，與它在水中的像，作垂直線聯結起來，那麼這線就被該點下的水平面，平分爲二。畫這幅畫的人，有意使水平面容易找尋。例如在教堂背後路底下的水平面，可把橋的拱門這一面，浸入水中，而在河的兩岸的兩點，作線聯結起來，延長出去即得。圖中所示虛線便是（參閱第二五頁）。



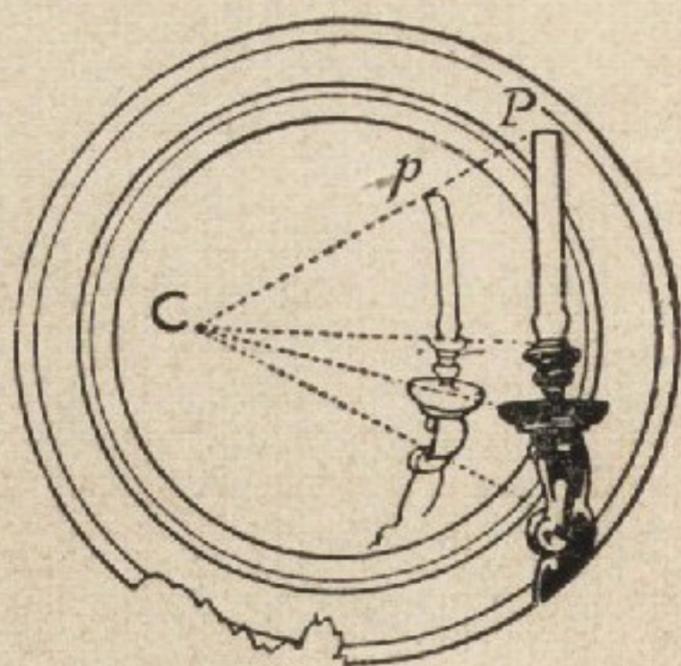
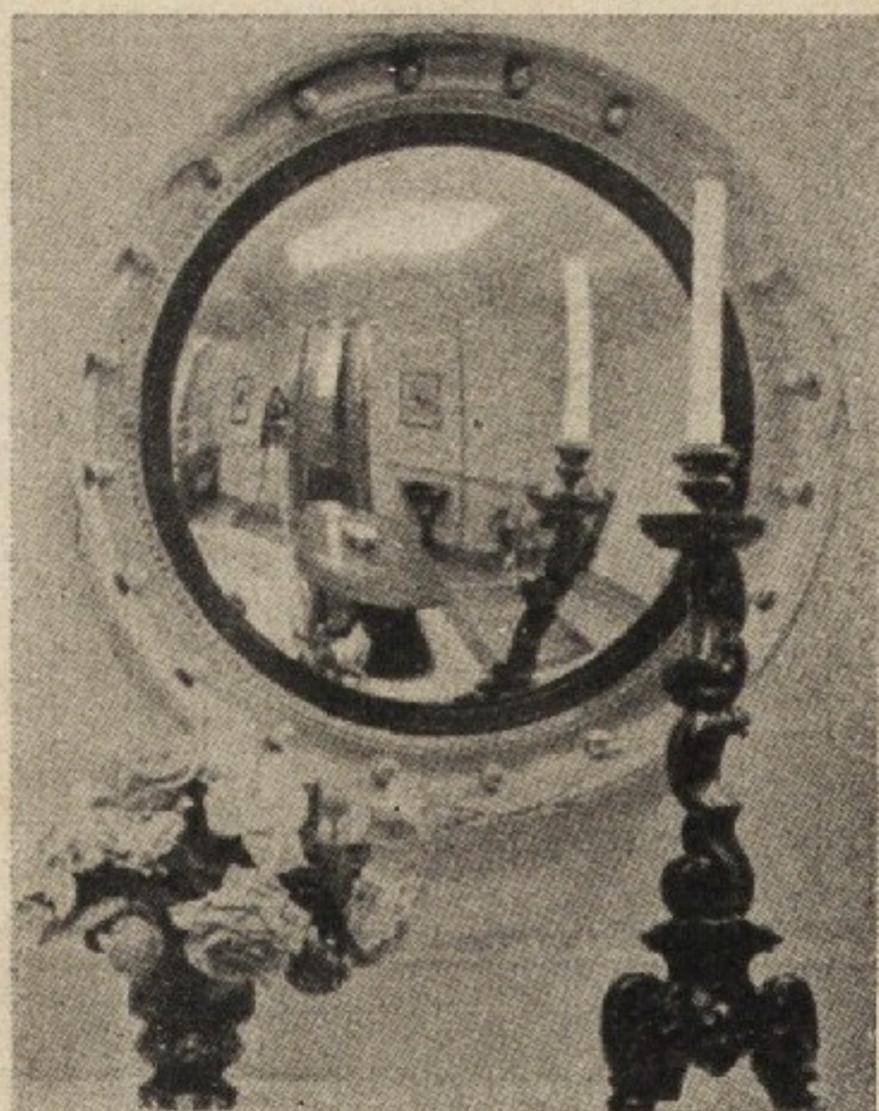
B. 聖密歇爾峯的修道院的實體內景。擷取兩畫的取景點，微有不同。

銅版圖三



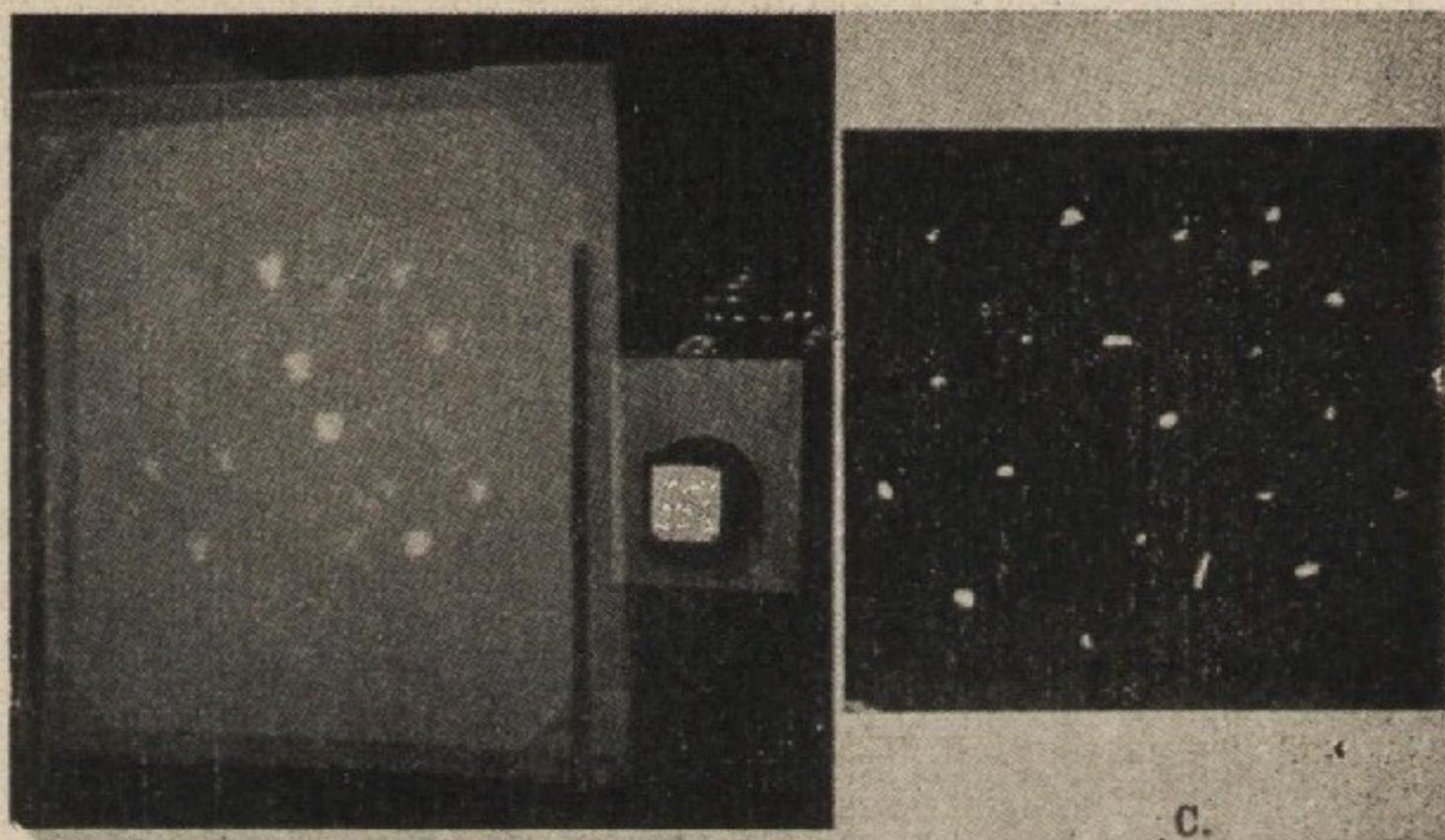
平面鏡內的反射。照相器的像，模糊可見，恰在右側花的上方。聯照相器透鏡與其像的直線，垂直於鏡面。所以其餘一切聯結實物與像的線，都是如此，例如連結燭端與其像的直線便是。凡是這一類的直線，依照透視原理，都交於同一「滅點」。右側所繪的圖，表示這一點在什麼地位（參閱第二五頁）。

銅 版 圖 四

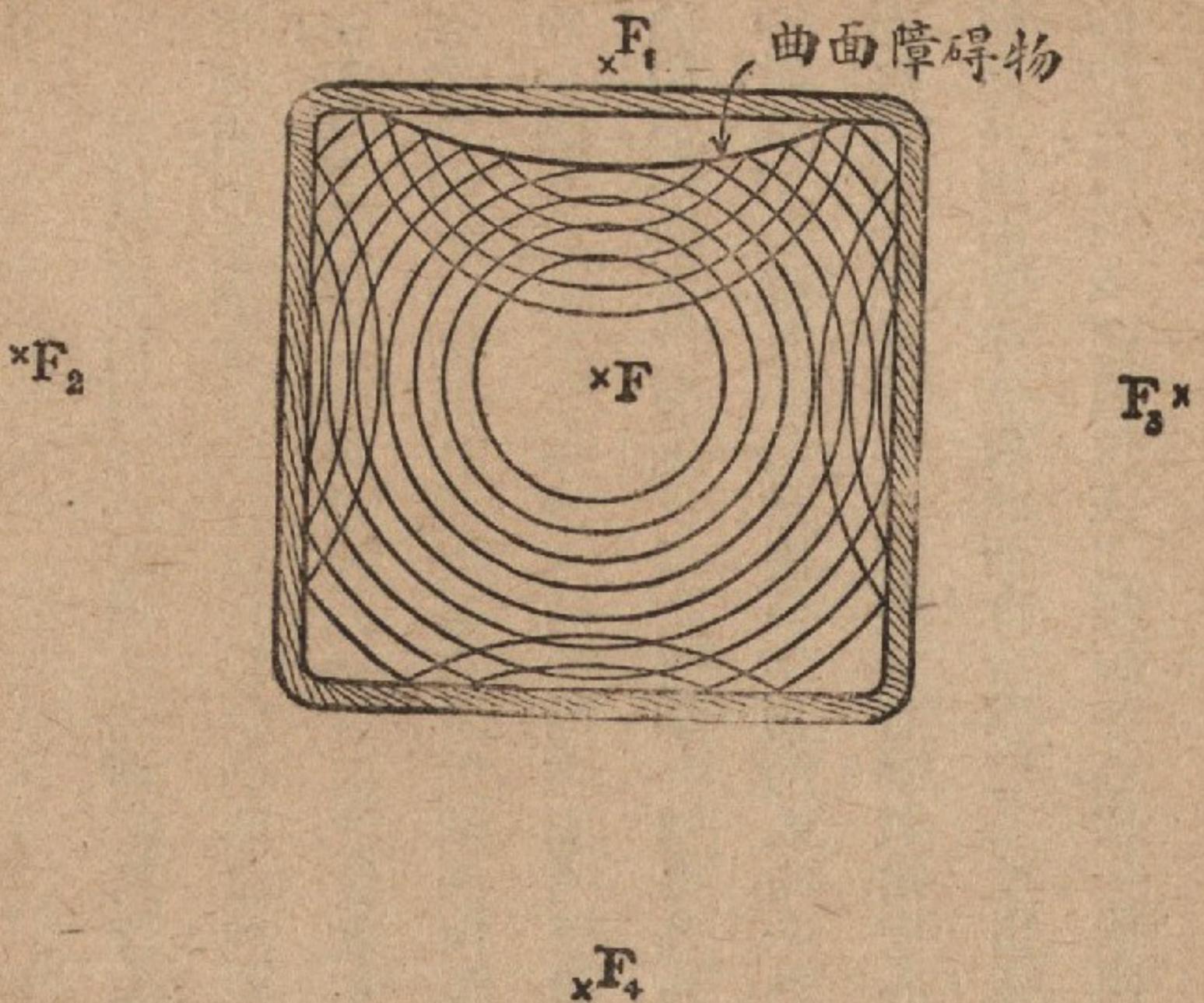


A. 凸面鏡內的反射。攝取此照相的室內各物體，它們的像都顯得在右面的上方，縮小了不少，而且彎曲了。照相器的像，可在圖中的左側見到。

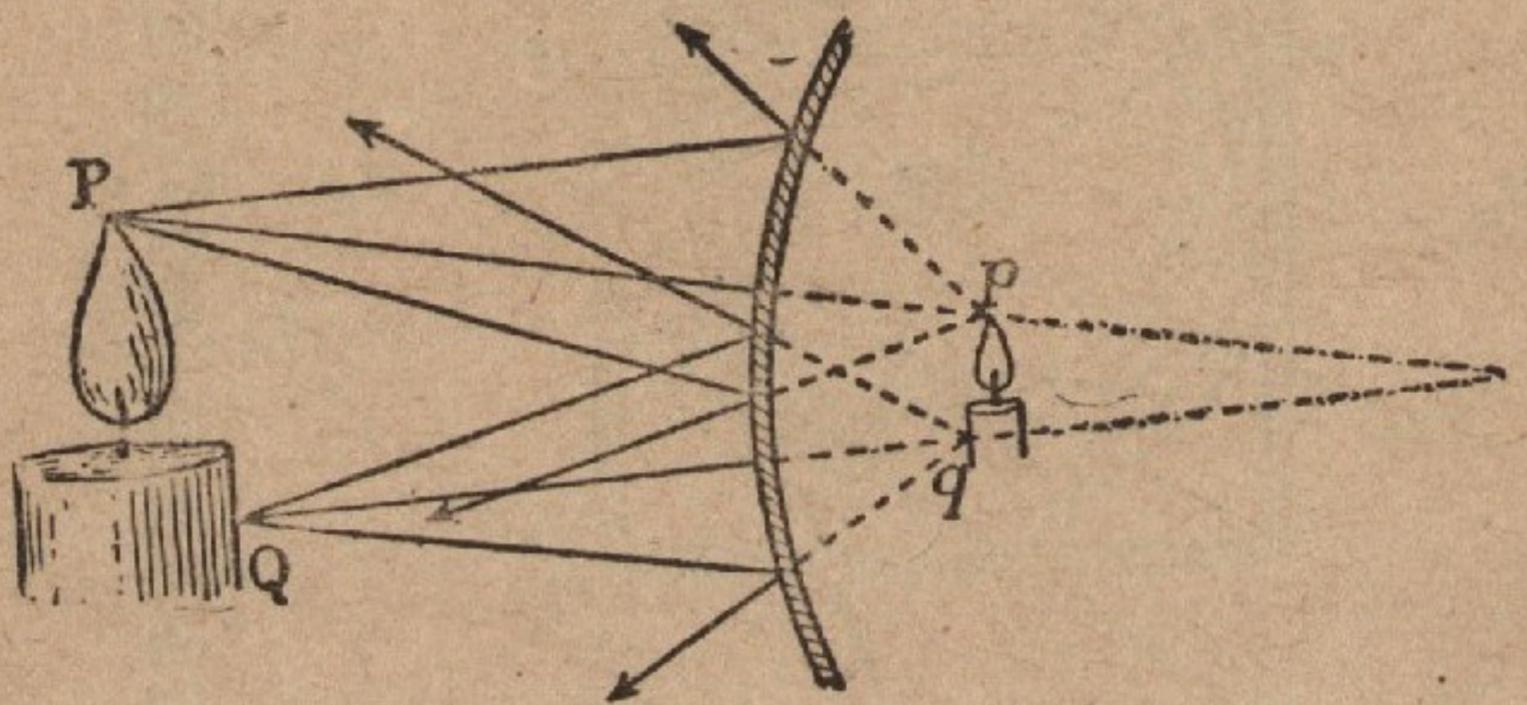
此鏡是球面的一部分，它有一個中心在 C 。通過照相器透鏡的中點，並通過該點的像的直線，必定通過 C 點，因為從透鏡射出，射向凸鏡中心 C 的光線，被反射之後，必定依原路，循直線回來之故。是以在這照相裏面， C 必位於透鏡中點之像的背後。在所繪的圖裏面，可以見這 C 點的地位，有標記指明，此圖還表現這照相的幾種主要特點。虛線表示畫中各點與其像的聯線，例如 P 與 p 的聯線，都經過 C 點不誤，這是因為任何一點與其像的聯線，必須通過透鏡中心之故（參閱第二六頁）。



B. 此照相所表示的，是爲了證明針孔照相器原理而做的一種實驗。解釋見本書正文（參閱第三八頁）。



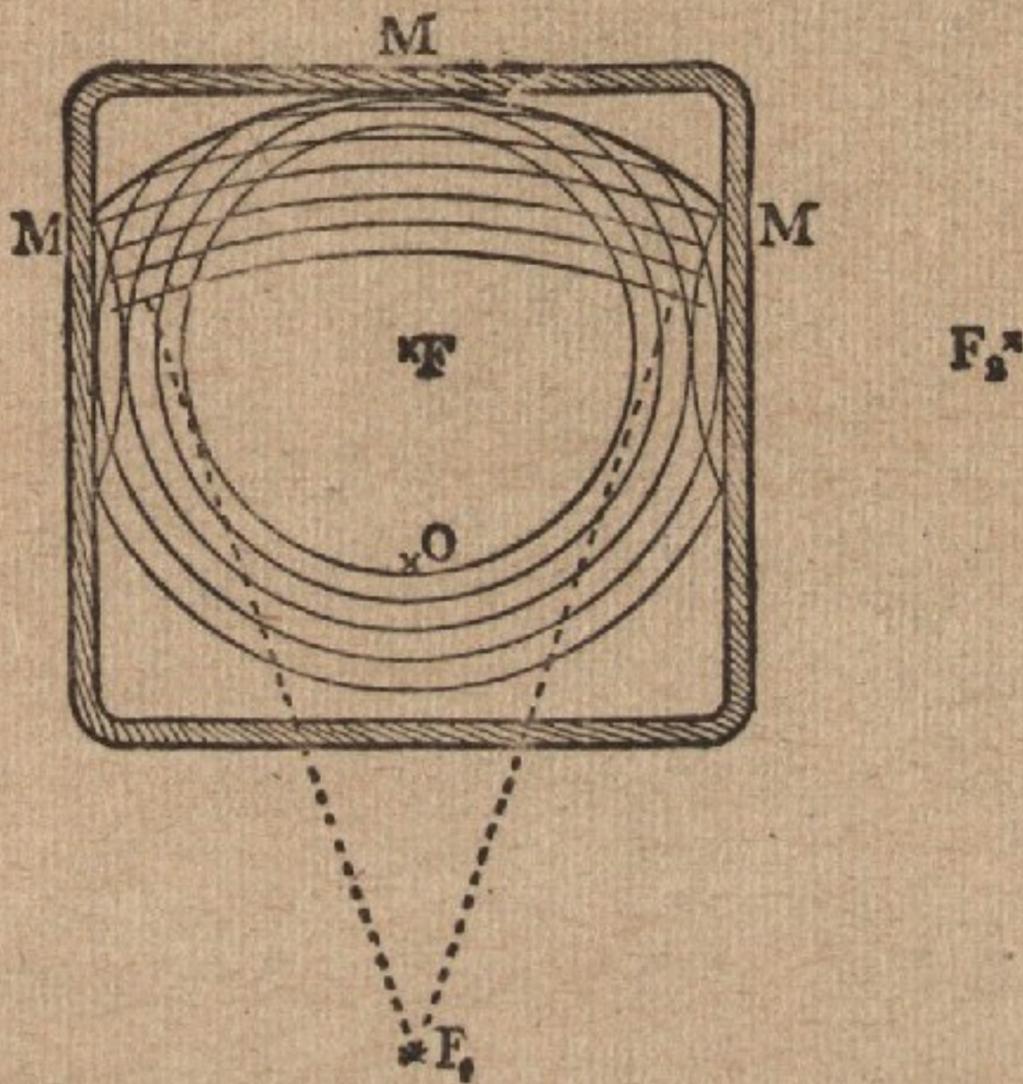
(圖十二) 波紋在凸面上的反射：反射波紋的中心 F_1 ，現在是比原來的波源 F ，離開反射表面近得多了。反射波紋的形狀，現在也不過近似於圓：但是彼此間的區別，卻祇在討論到大弧的時候，方始明顯。



(圖十三) 在凸鏡面上的光學反射。從 P 與 Q 發出的光線，經過反射之後，宛如彼此各從 p 與 q 射來。任何人的眼睛，接收了這反射光線的一部分，就要以為在 $p q$ 地方，有一枝縮小的蠟燭。

小。

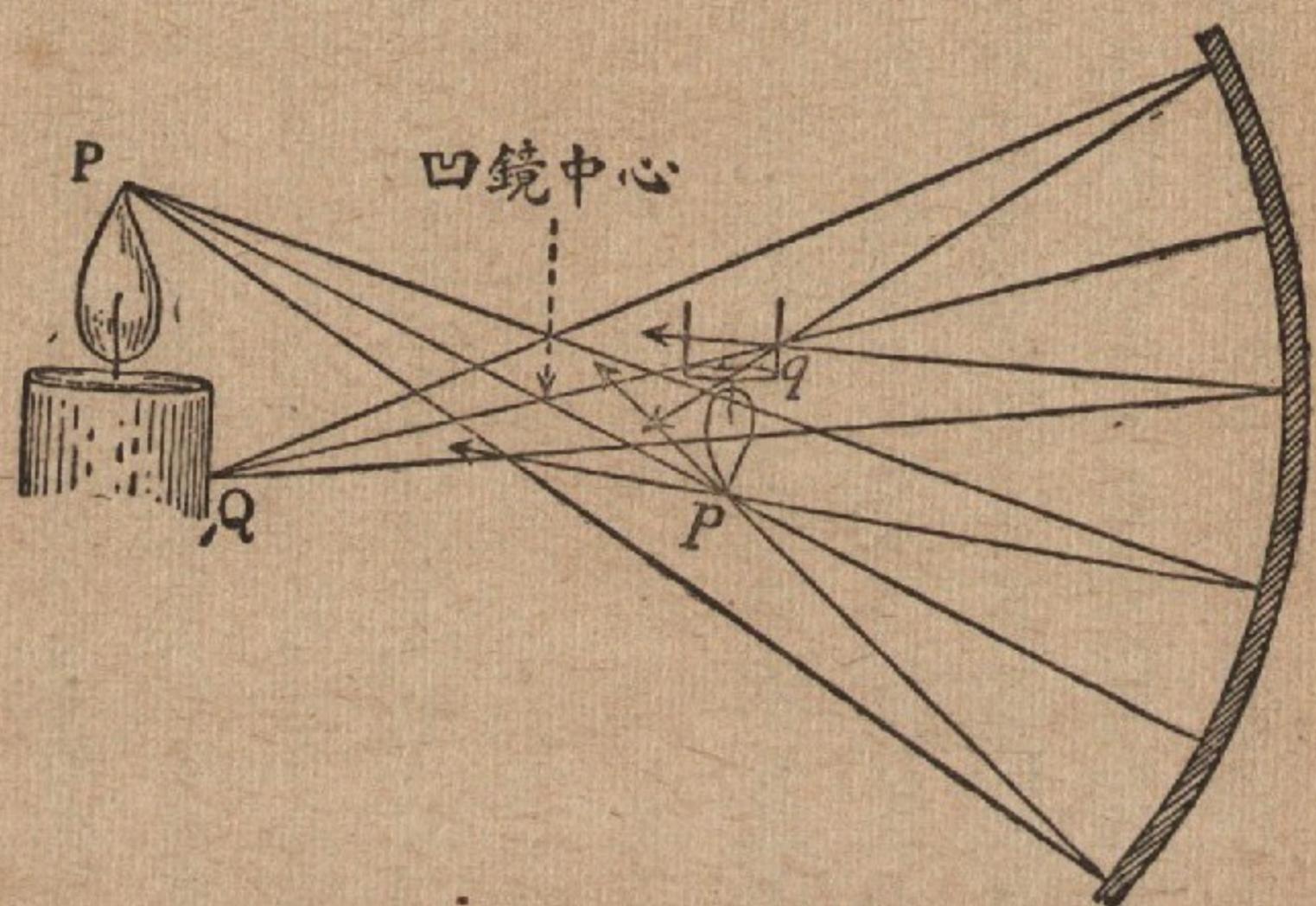
若反射面向另外一側彎曲，那麼結果當然與適纜所說的相反，如圖十四所示的便是。成功圓形傳布出去的波紋，被反射之後，仍舊略呈圓形如前：但是表面假使充分地彎曲，反射的波紋就不復有來自鏡後一點的外貌。反過來說，它們卻向鏡前的一點會聚。假使手指浸入的一點，在圓形反射器的中心，那麼各波經過反射之後，都回轉去經過這一點，然後再從此點發散。假使手指浸入的一點，離開反射面比它的中心近，那麼會合點就比中心遠，彼此易地而居，亦然如此，而會合點就是生出像來的地方。所以我們假使在凹鏡的中心，放一個明亮的光點，那麼這光點的像，也在中心，所謂中心，就是



(圖十四) 波紋在凹面上的反射。

以此凹鏡為其一部分的球心：假使我們把此點向內移動，它的像就向外移動，把此點向外移動，像就向內移動，如圖十五所示的，便是凹鏡的反射情況。又若把這光點向上移動，像就向下移動，換過來也是如此。假使我們把一枝蠟燭，放在凹鏡的面前，那麼燭頂的像反而居下，燭底的像反而居上，其理由與前相同；所以鏡中之燭，似乎上下倒置；而且它的左右也彼此相反。

假使水櫃中浸入手指的一點，適在凹面與其中心的中間一半地方，那麼經過反射後的各波，差不多完全失去了它們的彎曲之形，幾乎成功平行的直線，向外前進。它們還可以保持它們的形狀與強度，久久不衰。當反射波宛如從鏡後一點發散的時候，它們因



(圖十五) 凹鏡面上的光學反射。

爲向外散布而衰弱；假使它們是會聚不散的話，那麼它們最後經過一點，即由此點發散，再衰弱下來。假使一道光線，要把它射到很遠的地方，那麼最好須在剛射出去的時候，設法使它既不會聚，也不發散。就球形曲面鏡而論，當光源適在中間一半地位的時候，這件事情大致可以實現。但是球形的曲面鏡，其效用究不十分大，除非鏡的面積非常之小：用球形鏡要獲得壁直的反射波，是不可能的。若欲完全達此目的，必須用拋物線體形的反射器，而且光源必須放在拋物線體的焦點。

視見

現在讓我們對於視見的手續，再稍爲想一想。我們的眼睛，怎樣能把物體的像收攝進去，鉅細不遺，怎樣能判斷其外貌與位置，大致無誤呢？有一件主要的事實，便是光波落在任何物質上的時候，它們都被該物體散射出來。假使這些被散射的光線，穿入我們的眼睛，那麼我們就能夠判定，它們最後從什麼方向射來。這便是幫助我們「看見」的一項消息。此外，我們還能夠決定所見物體的距離，多少有些把握，所根據的，便是我們對於看清該物體時所用目力的估計。我們這些人，假使

要看很近的物體，大多數必須「張大了銅鈴眼；」若要看很遠的物體，必須把眼筋放鬆。所以然之故，我們往後就會知道。不過判斷距離的方法，卻不止這一種；而且大概說起來，我以為這是一種比較無效的方法。此外至少還有兩種，我們可以大大利用。其第一種便是估計所見物體與其他物體的相關地位。例如我們看見一個小物體，譬如說是一隻錶，放在離開數碼遠的桌子上。我們覺得可以判斷此錶的位置，頗為準確：我們或許能夠約略估計該錶離我們的眼睛多少遠，以及該錶在地板以上有多少高。我們估計時以何為根據呢？一部分的根據，是我們對於此物體及其四周各物，差不多在不知不覺之間所已行的測量，以及根據此次測量所行的計算。最初的時候，我們先把我們的「眼光，」在這物體上面「打一轉。」眼睛是可以移動的，所以從物體各點所散射的波，順次清楚地印在網膜上最靈敏的一點。我們收到了來自物體各點的不同印象，即由通至腦部的神經，打電報傳達於腦。腦部彙齊了這些電報，就加以審查，憑着多時的經驗，我們就能夠把它們翻譯出來，譯成錶所散射的光引起的感覺。也許我們並沒有把每一點細細看過；在實際上說來，我們或許離錶太遠，以致不能夠細細的看。但是我們都知道錶的普通外貌，我們或許已經知道錶從何

處移來，而在正放到桌上去的時候，錶已在望了；像這一類的各種事實，我們常常不假思索，把它們合而爲一。到了這一步，我們就半知半覺的自肚裏商量起來：我們與桌子，在地板上相隔多少多少碼，桌子離地，是平常的高度，而錶在桌子的中央。從此等觀察與議論，我們就構成了對於錶的地位所持的觀念。在這過程之中，我們當然利用多年的經驗。

這種測量與估計的十分重要，不難使我們自己深信。我們假使不能用這種測量本領，那麼物體的位置，斷定起來就要覺得困難得多。例如用線掛一黑球，此線近球的一段，是可以看見的，但是漸上漸不可辨，而懸點則完全不能看見。此球的大小，我們並不知道；以前，我們因爲知道了物體的普通大小與特徵，所以有所憑藉，但是現在卻毫無幫助。我們試把一眼掩住，因爲兩眼的連合作用，我們還沒有討論過，這種作用，也很重要。假使掩住了一眼去看這球，我們覺得仍不容易決定，此球離目多少遠。我們恐怕要把頭左右傾側，俾可獲得一些標準，據以估計此球離其背景，如牆壁天花板之類，有多少遠；假使我們能够認清，背景裏面有何小部分，並知道它們離開多少遠，那麼球的地位，就可以略知其概況了。但是這也並非純粹的新方法，因爲我們已在認清背景的時候，把測量與

半知半覺的計算方法，改頭換面用過了。

當我們祇用一隻眼睛，而且沒有測量方法的時候，距離的難於估計，已如前述，此項困難的情形，還有其他的例，可以毫不費事地一找就得。例如我們若在枝葉繁密的樹下躺着，祇用一隻眼睛，向上望那枝葉的罅隙，又若我們的視線方向，使我們不能夠搜求樹枝的交叉點，以定其位置，那麼這一堆樹葉，在那一堆樹葉的後面有多少遠，我們就覺得極難說定了。

雙眼視覺

最後我們要講到兩眼的聯合效用，而在此處發見有一種極有效的方法，可用以判斷所見物體的距離，此法所根據的原理，與我們前此所已討論過的種種原理，完全各異。兩隻眼睛所看見的，並不是完全相同的畫景：我們的腦，因為有長久的練習，已知如何審察這一點區別，以判斷各物的相關距離。兩眼的地位，相距甚近，而兩畫景的區別，十分微小：然而發生的效應竟如此之大，所以令人驚異不置了。假使我們把一對實體照相，例如本書銅版圖二B所示者，拿來比較一下，那麼我們

就會發見處處有此小小的差異。圖中所攝取的，是聖密歇爾峯（Mount St. Michel）上禮拜堂內的迴廊。讀者試察此二圖，看那遠景裏面的柱子，與那近景裏面的柱子，彼此有何關係。在左邊的一圖裏面，前者對於後者的地位，比在右邊一圖裏面，更偏左一些：這兩個圖，是在不同的取景點攝取的，正與人的左右兩目所看見的相同。有一種光學器具，叫做實體照相機，用此器具，可使兩目各睹其本來所見的畫景，因此而得空間的幻覺。由這一種設計的成功，顯然可知我們的兩隻眼睛，能使我們判斷各物體的距離，及其相互的地位。這種本領，祇限於極少數的生物纔有：人類是賦有這種本領的，此外或許有少數的脊椎動物，也有這本領。大多數的動物，都不能夠利用這種雙眼視覺，我們祇要一看這些動物的兩眼都生得地位不稱，就可知道了。

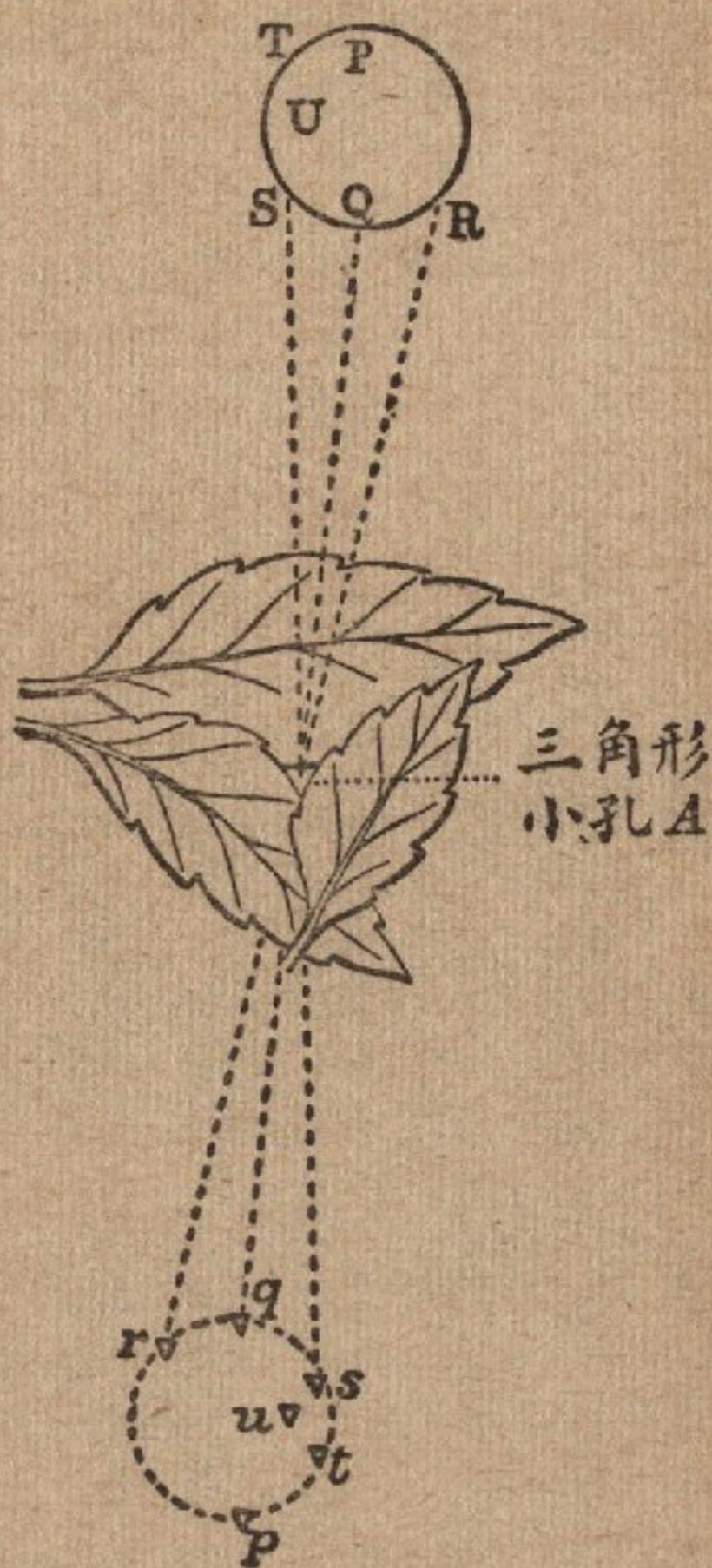
針孔像

光波所落的表面上，都有光反射或散射出來，約束這種反射與散射的主要原理，我們已經討論過了。現在讓我們另外再舉一兩個例證，來說明這些原理的應用。當太陽光線一直穿過樹葉罅

隙，而在地上照出明亮的小小光斑的時候，我們察見這些光斑，都不是多角形，而爲圓形：這些樹影的斑紋點點，深淺不一，參差重疊，倒也有些畫意。光線所經過的樹枝間各小孔，四圍都以樹葉的邊緣爲界，而這些小孔的本身，都是多角形：因此可知，地上光斑的形狀，顯然不是這些小孔所能限定的。就事實而論，這些光斑的形狀，都由太陽得來。現在我們就可以知道，此事的如何不得不然。

設在圖十六裏面，上方的小圓代表太陽，且設A是密集的一簇樹葉間的小孔；或者說它是簾幕上的小孔也可以。從太陽裏面上的一點，例如圖中記S的地方，光線直射下來，穿過A孔，落在地上s的地方：這些光線就在s處被散射出來。其中有一部分，被散射到我們的眼睛裏面；因爲這是太陽上出來的一種光線，所以我們心目中以爲在s處有一樣東西，發出像太陽所發的光線：這便是太陽上S點在地上所成的像。從Q點射下來的光線，也在地上q處現出它的像來，而太陽視面上其餘各點，也照樣各有一像，現於地上。這麼一來，地上就顯出整個太陽的像，A處的孔愈小，這個像的形狀愈完好。假使我們先知道了像S的這種單點，其所發光線在地上所成的光斑，實與隙口的形狀大小相同，那麼這件事情就可明白了。在地上所現光斑的全體，可以看做太陽視面上一切

諸點，照出來的這些各別的小光斑，積聚而成。在圖裏面，隙口的形狀，或許有些像字母 A：於是地上所現的大光斑，就是這些像字母 A 的三角形，集合於一處的形狀。要把這些三角形，一個一個都畫出來，這是不可能的事情，不過在圖裏面我們卻畫了這麼四五個，用以幫助我們來說明這一回事。當樹葉叢中的小孔，與全光斑比較起來，是很小很小的時候，雖然太陽視面上的各點，在地上所成的像，仍非一個點子，而是一塊光斑，其大小形狀，仍與該小孔相同，但是這一件事實，卻沒有可使人



(圖十六) 上方的圓，代表太陽，下方的圓，代表太陽在地上的像。此像之成，係由太陽光穿過樹葉間的三角形隙口所致。太陽上每一輝點，各自在地上，照出一個輝明的三角斑來：所有這些三角斑的總和，就是地上的圓形，以及它的半影。

注意的效應。因為這個緣故，小孔雖然不能放很多的光通過，它所造成的像，卻是圓圓的一個圖形，正與太陽相同。較大的罅隙，放過去的光固然較多，但是罅隙愈大，地上所現的光斑，愈失去圓如金輪的太陽形狀，而愈與罅隙的形狀相近，終至全同。圖十六中所畫的，就可以幫助我們了解這一層道理。祇有比較不甚亮的光斑，看起來纔是圓的，銅版圖五A的照片，所表示的就是這種效應。攝影處所是在花園裏面，陽光底下。在日蝕的時候，各光斑就要變成月牙形了。

這些圖形，顯然沒有稜角分明的界線，因為隙口的圖形，互相重疊，其合成的效果，在邊上沒有在中央那麼齊整。這種半和映的效應，就叫做半影；把畫景中的明亮部分，與全蔭部分隔開的半蔭部分，就是這半影。

由前所述，我們要說明所謂針孔現象，就容易了。今試在裸弧燈的面前，放一塊薰滿煤烟的烟玻璃，離開燈有這麼幾吋遠近。若用小針在烟層裏撥開一個小孔，那麼立刻就有一個光斑，出現於離燈幾呎的屏上，此斑我們一認即知，是發光電弧的肖像。假使再在烟玻璃上，多撥幾個小孔，形式各不相同，大小彼此略異，那麼屏上添出來的光斑，仍舊是電弧的同一肖像。祇有在所撥的孔確然

很大的時候，我們纔覺得它的式樣，對於屏上所現光斑的形狀，發生影響。

銅版插圖四B所表示的，就是這個實驗的一幅照相。弧光幻燈是在圖中右側的後方，被蔽而不可見，那塊小而亮的正方，就是遮斷此燈所發光柱的烟玻璃。這塊玻璃上面，雖然塗着一層烟灰，看起來還是很白，因為弧光燈的光很強，烟玻璃受其照耀，就變得這樣明亮。在烟層上所撥的小孔，照相片中縮得更小了，不容易辨認得清清楚楚：所以另外再把這烟玻璃，攝一張放大的照相，附在右方，就是銅版圖四C。弧光燈像所在的屏，圖中所見是它的背面。我們可以察見，這些像的地位，都與烟玻璃上的小孔，彼此對應。各像看起來都是成雙的，這成雙的像，就代表弧光燈中兩炭棒上發光的兩端。雖然各小孔的式樣，變化萬狀，但是屏上的像，卻一般無二。

針孔照相機的作用，就以此原理為根據；用此照相機所攝取的像片，也很準確，不過露光的時間，卻須很長。前人對於針孔效應，有一幅很古怪的說明畫，現在附載於此，銅版圖五C便是。

若把一物體放在裸弧燈的光裏面，離燈頗遠而接近於一屏，那麼屏上的半影，差不多不可見，而影子的輪廓，十分清晰。

我們試取一張人像卡片，在卡片上鏤出人面的主要輪廓來，鏤得清清楚楚。若把這鏤空的像片，放在裸弧燈的面前，那麼在屏上或壁上所現的影子，看起來就覺得瘦骨嶙峋。但若用蠟燭的火燄，來代替弧光，那麼這黑白分明的輪廓，就因半影而模糊起來，其柔軟調和之處，可使壁上的人像，看起來更自然一些（請閱銅版圖五B）。

光澤

有些織品，都帶光澤，有的是天然光澤，有的是人工加上去的光澤。這種光澤效應，又是一個有趣味的例子，可用以說明反射效應。我們的所謂光澤，其確切的意思，究何所指，實在不容易說，但是此語的主要意義，似乎指我們以為不會有光線被反射的時候，也有光線被反射出來。有光澤的物體，不僅是良好的反射體。如果是這樣的話，那麼背面塗水銀的鏡子，豈非是世間最有光澤的物體麼？然而我們卻大家都贊同這一句話，說鏡子毫無光澤。對於光澤的本性，我們具有何種觀念，可用下面所述簡單的實驗，來試驗一下。取洋緞（俗又稱色丁布）一塊，鋪於桌上，而使幻燈的光，斜照

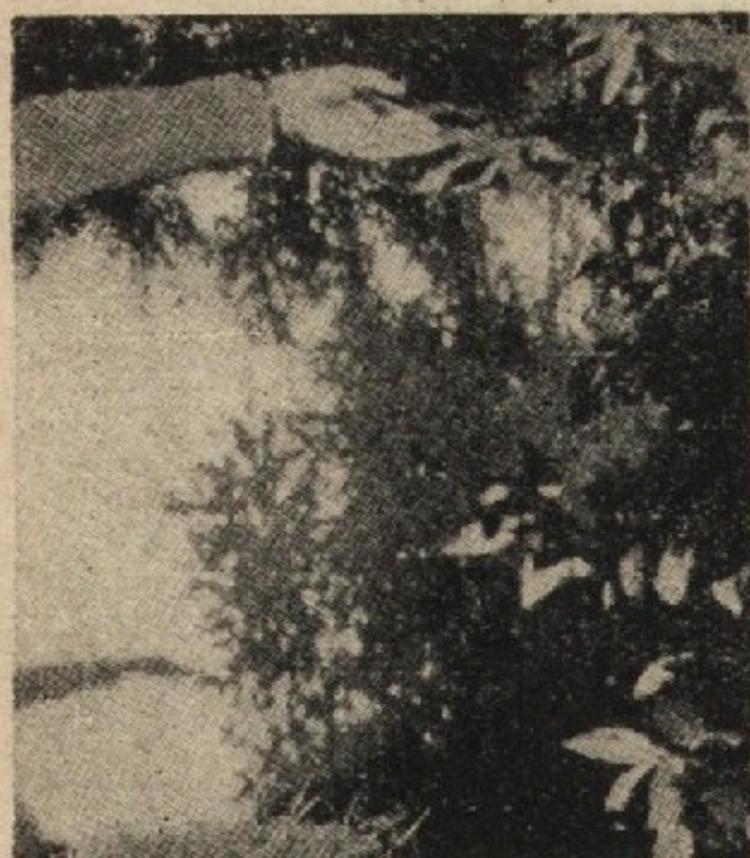
於洋緞上。就我們的目的而論，最好用彩色洋緞。光源須在我們的背後，而且用鏡子放在洋緞的地位時，須使鏡子所反射的光，完全不會到我們的眼睛裏來。但是我們若教洋緞在它自己的平面內旋轉，那麼我們大家，都會看見它發出瞬時的閃光來，每旋畢一週，發閃光一次——實際上說起來，有二次。這瞬時的閃光，要看得清清楚楚，須把房間內其餘所有的電燈，悉行關熄。現在我們要問，這閃光從什麼地方發出來的呢？（請讀者參閱銅版圖六A。）

假使把這一塊洋緞，放在放大鏡下面，加以考驗，我們就可察見，那經線是互相平行的。織這洋緞的時候，在正面的經線，即在發光一面的經線，越過幾條緯線的上方，再穿向下方，兜過一條緯線，又穿起來；你們一看圖十七就可以了解這經緯線的情形了。所以在洋緞的這一面，經線顯露的部分極大，而且各線都是互相平行，排列齊整。讀者須知，在前述實驗裏面，當那閃光發出來的時候，光源到洋緞的連結線，與眼睛到洋緞的連結線，其所成之角的平分線，恰與這些經線的方向，



（圖十七）一種織法，可使織品帶有光澤。許多織線並列於一排，彼此互相平行，使表面成波的形狀。

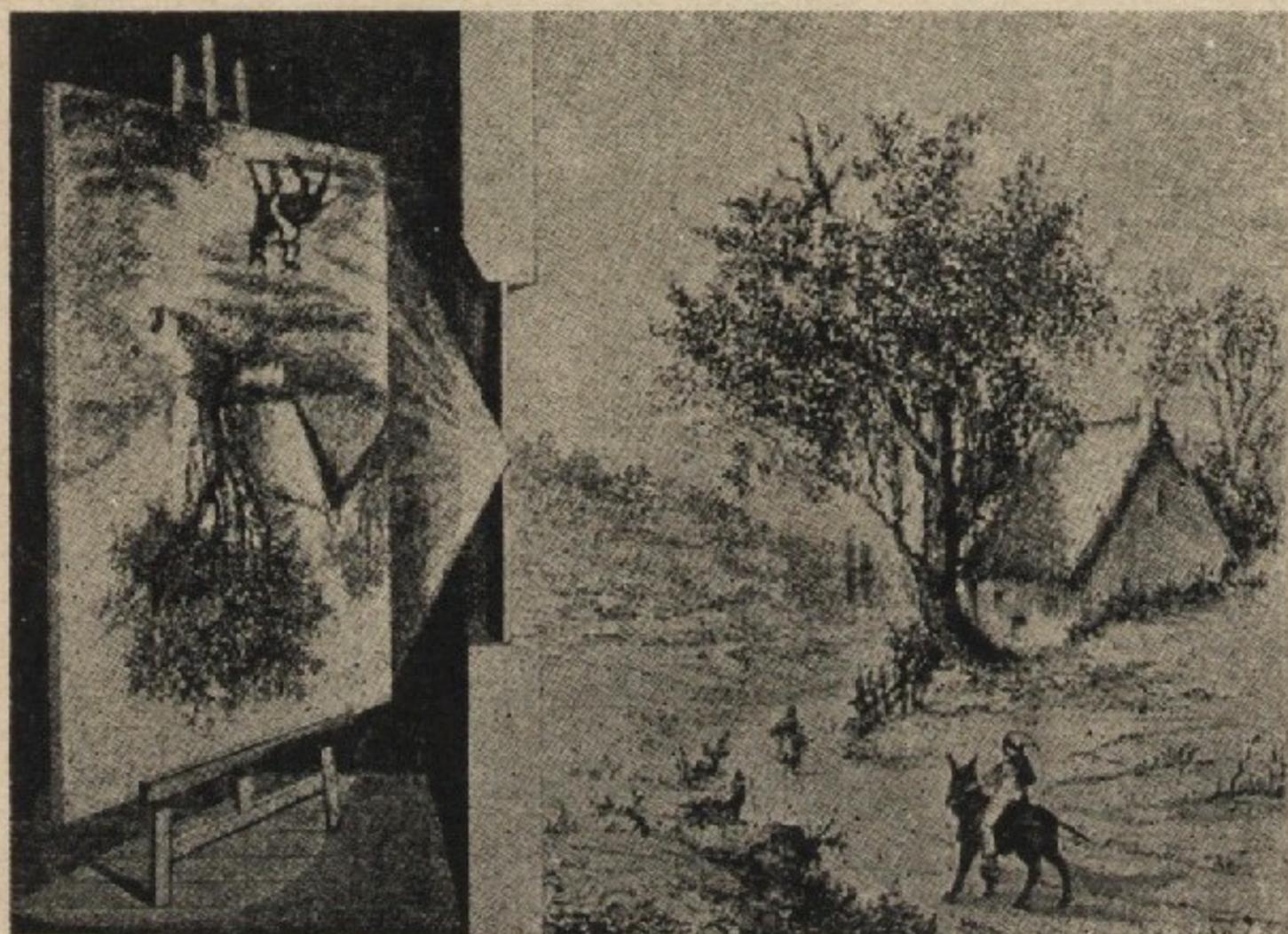
銅版圖五



A. 在花園裏面，日光照耀之下，所攝的照相，表示牆上所映花草的影子，手與手影，表示普通的排列。許多亮的小圓斑，都是太陽的「針孔像」（參閱第三七頁）。

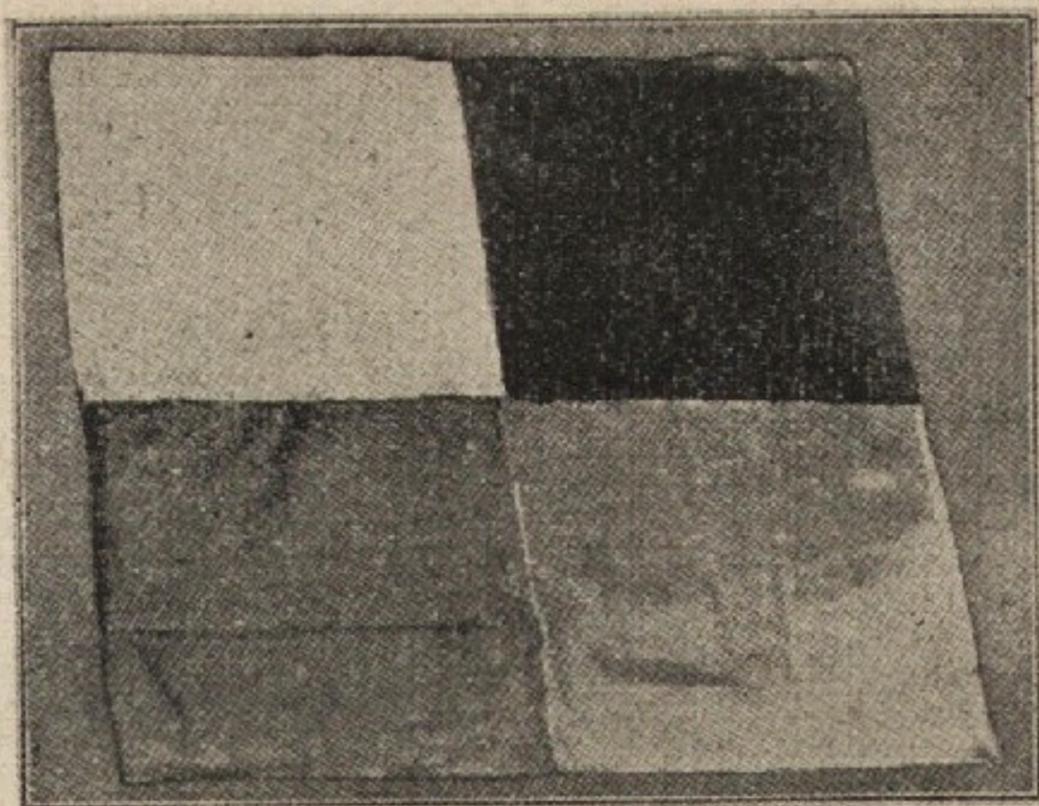


B. 此圖是從古禮銘(Guillemin)所著自然之力摘取下來的。鑿得很鋒銳的人面，它的影子的輪廓，因「半影」效應而變得柔和了（參閱第三九頁）。

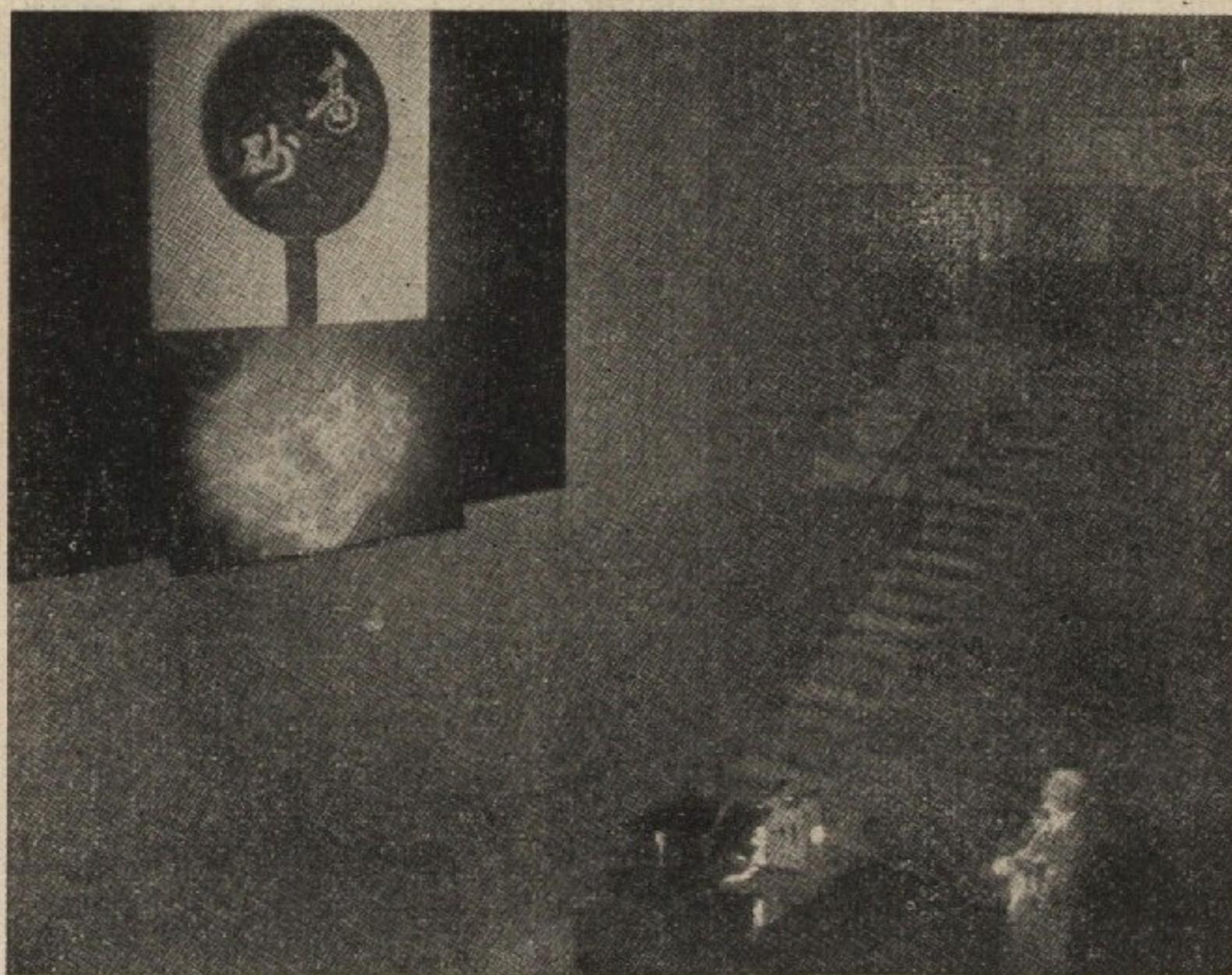


C. 從古禮銘所著自然之力一書採下，說明針孔照相器的作用（參閱第三八頁）。

銅版圖六



A. 四塊方的洋緞，從一匹料子剪下來，排在一塊板上，使它們的經緯方向，各不相同。觀察者將這板放在他的面前，燈光放在他的背後。這四塊緞子，看起來明暗不一（參閱第四〇頁）。

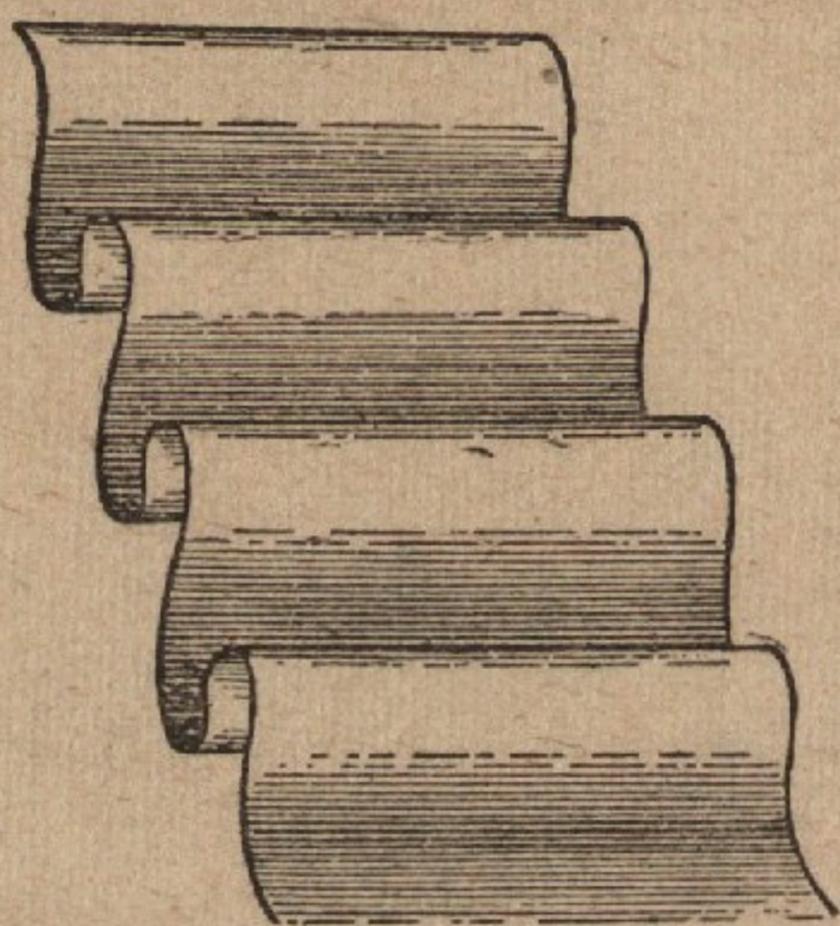


B. 從日本「魔鏡」出來的反射光，照於屏的下半部分。在屏的上半部分，是此鏡背面的照相，由戲院後面的幻燈，投射到屏上。兩畫雖然一清楚，一模糊，但是彼此互相符合，卻是很顯明的。

這是一幅合成照相。如此配合，目的在於表示實驗的方法，兼及實驗的結果；因此之故，色調的深淡不勻，顯然是錯誤了。在這照相裏面，戲院看起來實比屏更亮，但是真在戲院裏面，當然不是如此的（參閱第四二頁）。

互相垂直（參閱圖十八）。在實際上說來，這洋緞的表面，是有皺紋的，而光的反射作用，就發生於這些皺紋的邊緣上面。每一條經線，當然也得有良好的反射表面纔行；除此以外，各經線還得互相平行，方有這種效應發生。在這織品的反面，經線與緯線，都沒有如此明顯的平行排列，所以它的光澤，就遠遜於正面了。皺紋依一定的秩序排列，顯然是此種效應的根本條件。新耕的田地，也有這種效應，因為犁鋤所挖成的畦，其兩側初經摩擦，尙能反光之故。起波紋的水面，一經太陽光的照耀，也顯出這種效應來。

因為這個緣故，織品的皺紋，有時用機器壓得深而且密。壓的手續，大概是使織品經過兩個熱的滾筒，滾筒上面刻着密而細的平行槽；織品受兩筒的滾壓之後，就能發生此項效應了。這種手續，通稱為「許倫納耳軋光法」（Schreinerling），是紀念此法的發明者而定的名稱。



（圖十八）此圖表示起皺紋的織品，可以在許多方向內，反射光線的情形。

魔鏡

日本有一種銅鏡，叫做「魔鏡」。讓我把這魔鏡的祕密，揭穿一下，作為我最後說明反射作用的例證。這種魔鏡，有一種極奇特的性質。鏡的前面，極近於平面，而且外表看起來，並無任何異乎尋常的特徵。在鏡的背後，有凸起的花紋或字，這花紋或字，是在鑄鏡的時候，用模型軋出來的。銅版圖六B所示的，就是這種魔鏡的花紋。假使把這魔鏡，放在幻燈所發的光線當中，讓鏡子的正面，把光線反射到屏上，那麼鏡背的花紋，就隱隱的在此反射光中，現於屏上。驟然看起來，好像鏡背的花紋給光透過了，映在屏上一般，但是細細一察，顯然知道這是萬萬不能的事情，因為鏡子用金屬做成，而且頗有一些厚度。看見過的人，以為此鏡所以有此奇特的效應，大概由於一種魔性所致。然而在五十年之前，阿爾登（AYRTON）教授曾在皇家學院的劇場裏，用極簡單的說明，揭穿了此中的祕密。此項奇特的效應，所依賴的就是我們早已說過的各條原理；而且在實際上說來，倒是曲面反射定律的一個例證。

阿爾登教授與其友人潘雷教授，從前曾在日本的教育界任事，地位很高。在日本國內，像這種魔鏡一類的銅鏡，是極普通的東西：每一個婦女的梳妝室中，大概總有這麼一面，好說是標準化裝用具之一。阿爾登與潘雷兩人，發見這許多鏡子裏面，祇有少數會呈露此種「魔」性。這種魔性，就其本身而論，已很奇怪；豈知還有更奇怪的事情，即每一百面銅鏡之中，祇有一面或二面，具此魔性，何以如此，竟沒有人知道。他們兩人，到處訪問，訪問了許多次數，也得不到其中真相。他們查明在中國國內，曾有人對於這種魔鏡，大大的注意過，而且也曾提出過許多希奇的解釋，但是這些解釋之中，沒有一種解釋，他們認為可用。最後，他們自己得到了一個滿意的答案：這答案是一次偶然的觀察，提醒了他們而得到的。有一面這種魔鏡，它的背面有一條很深的劃痕，是一隻鈍的釘劃出來的。他們看見此鏡正面所映的花紋中，也有這一道釘痕在內。他們就把這一件事實，與製造鏡子的情形，連合起來，獲得了這祕密的內幕。原來日本的製鏡工人，已用模型把鏡子鑄好，在背面壓上花紋之後，就把鏡子放在一塊板上，開始用一種磨刮器，把正面高低不平之處，磨成光滑的表面。圖十九所示，即係磨鏡工人，正在用力磨刮鏡面的情形。他在磨鏡的時候，用力壓在鏡子上，那受壓的地方，

就微向下凹。他把磨刮器在鏡面上磨來刮去，順着一個方向，磨畢全鏡而止。當他正在一來一往地磨括的時候，鏡子較薄的部分，比了背後凸起的較厚部分，向下凹得多一些，因而對於磨括器，就退讓得後一些。這樣一來，較薄的部分，多少避免了磨括器的作用，而且在壓力已經過去的時候，它們又恢復原狀，但是比了鏡面的平均地位，卻微微高起一些。當這磨鏡工人，已在一方向內，把鏡面磨好之後，就轉過鏡子來，順着與前垂直的方向，再磨一遍，於是接着在別的方向內，把鏡子連磨幾遍。最後一次磨畢，鏡面上就有微凸的花紋，與鏡背的花紋一模一樣：這鏡子已成了小凸鏡的集團了。當光波從鏡面被反射的時候，聚散並不均勻，而反射光的聚散情形，

悉與鏡背的花紋有關係。表面上的高低不同，相差如是微細，竟會生出如此明顯的效應來，似乎極



(圖十九) 一個日本的磨鏡工人，正在琢磨這種具有「魔」性的鏡子。這是英國博物院所藏，日本印籍的插圖。西爾范納斯·湯姆潑孫(Silvanus Thompson)所著「可見之光與不可見之光」一書內，也載有此圖，本書就從該書轉載的。

爲奇怪。但是我們若把此處所見，與我們以前的各種觀察，彼此比較一下，就覺得不足異了。我們用波紋水櫃做實驗的時候，投在屏上的水光波影，看起來十分明顯：這些波影的所以呈現，是波紋使光曲射所致，然而當我們注視水面，以觀察這些波紋時，其本來面目，並不容易看見。窗前碧水，船外清流，一經微風拂動，皺起千道細紋，把那太陽光反射到天花板或船篷頂上，顯出那波影如流，水光搖曳，此情此景，想我們都會見過的罷。

第二章 眼與視覺

網膜上的混雜如何得免

我們已經知道，光可以看做一種波動，這種波動從光源出發，向外傳布開來，在路上被歷次所遇的各種物體，或散射，或反射，也許被它們改變。光射進了我們眼睛的時候，其所從出發的光源，以及在路上種種經歷的情況，都由它通知了我們。它尤能告訴我們，在未入我們的眼睛以前，最後一次所遇到的實質物體是什麼，因而可使眼睛的主人，「看見」那個物體。

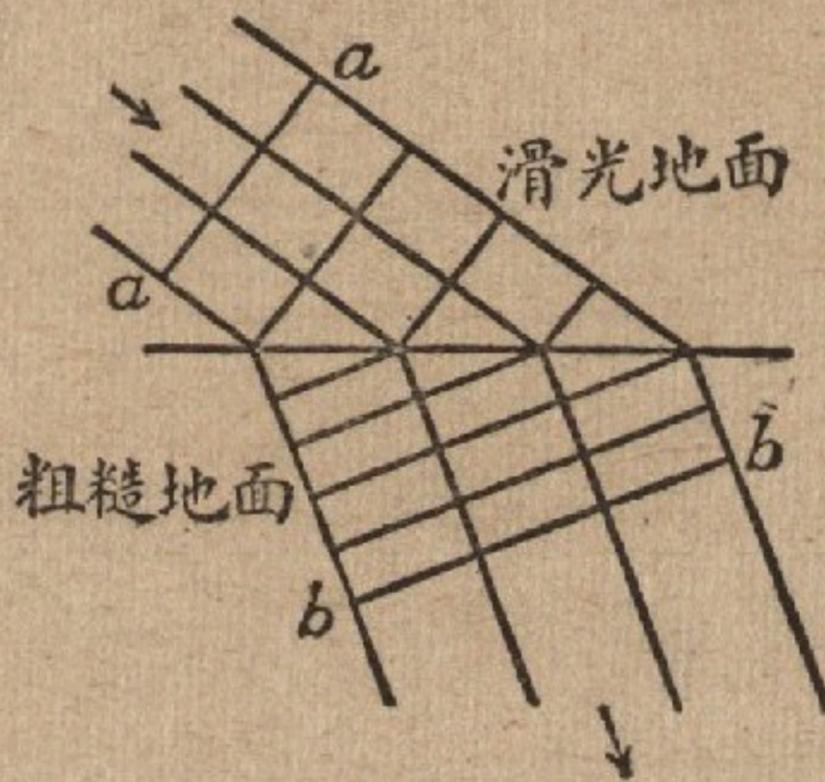
當一羣複雜混亂的輻射，來自許多光源，曾為許多物體所散射者，穿進了眼睛的時候，不得不把它們分別挑選一下，纔能夠看得清清楚楚。在眼睛的背後，有一塊敏於感光的表面，叫做網膜。如果傳入眼睛的各組光波，組組廣布於網膜的全部，那麼這一把亂絲，要把它理清，決然是非常困難

無疑。所以眼睛裏面，一定有一種組織，可把外界一切諸點發來的光波，分別收集在一處，而且使它們一一會聚在網膜上相當的各點。這樣一來，眼睛所見的全景，就鉅細不遺的都印在網膜上面，而景中各點，都占有適當的相對地位，保留其適當的特性。於是這印象的全體，都由極複雜的神經系統，傳遞於腦，在腦裏面，再經翻譯出來。我們固然可以說，有一幅畫景，在網膜上構成，但是我們切不可太在字面上解釋這句話的意思。視覺的作用，無須在眼睛裏面的背景上，構成一幅小小的畫景，不論鉅細，色不論深淡，都正確無誤，好像畫在一張白紙上面，或映在照相機的毛玻璃上面一樣。有時候卻也要想像到，這種畫的確在網膜上構成，然後由感覺器官加以鑑別，猶如我們注視牆壁上的畫一般。

爲實行清理這些複雜的輻射起見，我們的眼睛就利用下面這件事實，即光波在不同的介質中進行，其速度也不相同。例如光在玻璃中進行，其速度約等於在空氣中速度的三分之二；在水中的速度，約爲空氣中速度的四分之三。現在假使有一排正在前進的波，由第一介質行入第二介質，其在第二介質中的進行速度，比在第一介質中慢一些，又若波行方向，與兩介質的劃分面斜交，那

因此波就要迴轉過來，因為一部分的波，受阻礙在先，他一部分受阻礙在後。這種變更波行方向的情形，有一個極熟悉的例子，可以在海灘上見到。當那滔滔海浪，捲上海灘的時候，不問那遠入海中的部分，其進行方向如何，這海灘上的部分，總是折成與海岸平行的波陣。這些海波一入灘上的淺水，速率就逐漸慢下來，所以先上海灘的那些波浪，都滯留下來，緩緩而行，要等那其餘的各部分，一齊到了海灘上面，方始再依同一的速率前進。

一隊正在進行的兵士，假使走上了一塊步履較為困難的地面，而且這塊地面的界線，又與他們的隊伍的陣線斜交，那麼他們的進行方向，就很容易偏過一邊來。如圖二十所代表的，便是這種陣線偏向的概況。

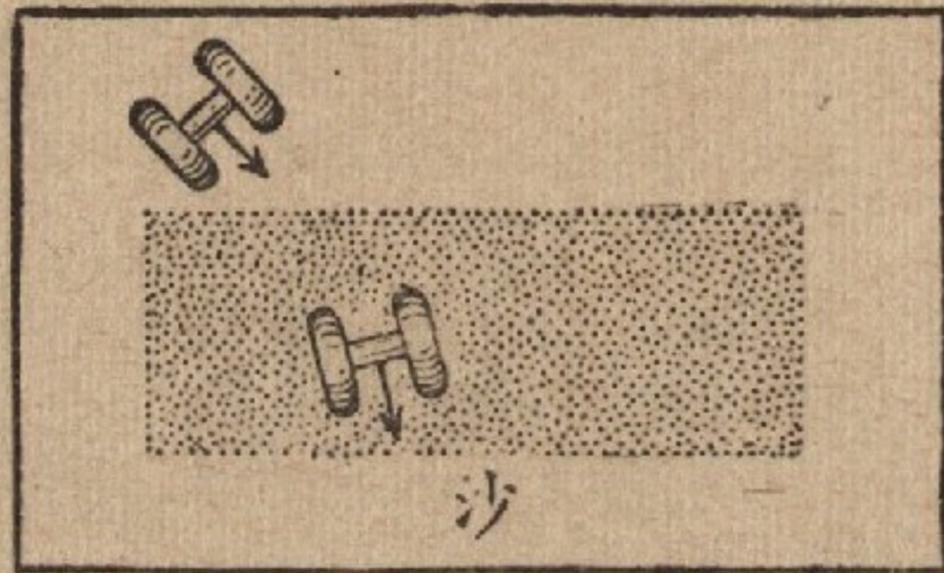


(圖二十) a a 線以及平行於它的其餘各線，代表在光滑地面上進行的各隊伍；這些隊伍走進了粗糙的地面，就迴轉過來，而與 b b 線互相平行。各隊伍的距離，也縮短了。

對於這一個主要之點，我們還可以用真正的實驗，來證明一下。先在桌上鋪沙一片，再取輪子

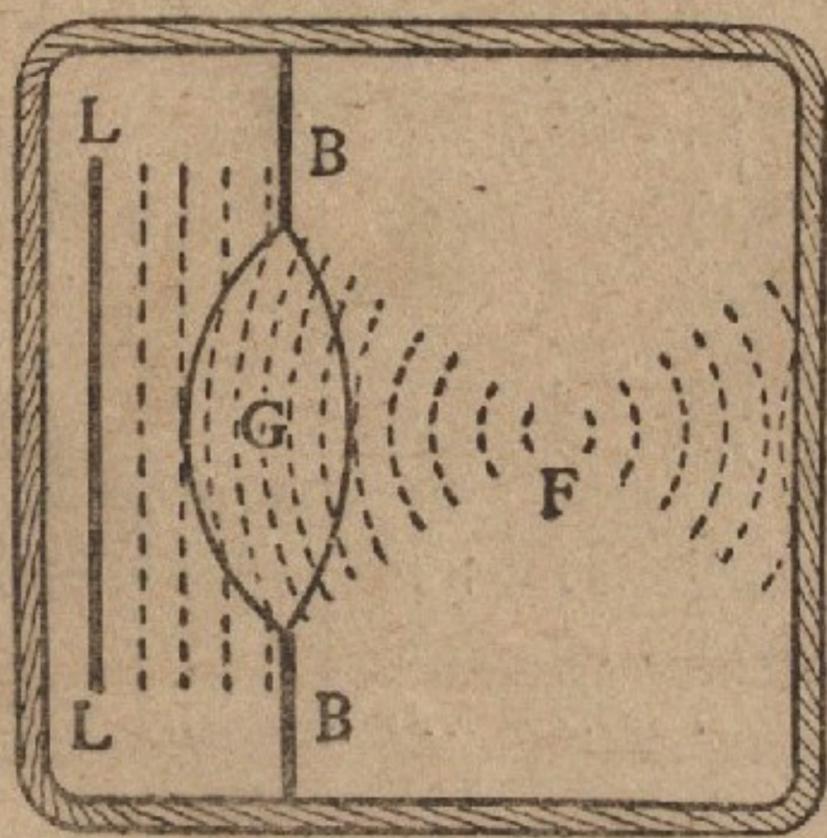
一對，貫於公共軸上，使它們可以自由滾轉。於是把這對輪子，放在桌上，推向沙面，教它們斜行入沙。它們在沙裏面滾轉，較爲困難，所以先入沙界的一輪，其行動先滯緩下來，因而運動的方向改變，與沙區的界線所成的角，較近於直角。圖二十一所示的，就是此項實驗。

一組正在前進的波，如何可以使它們會聚到一點上面去，我們現在就不難察知了。我們祇要佈置好，使前進波的中央部分，不得不經過某空間，以致減低它的進行速度，而讓左右的兩翼，向前疾進。假使這空間的輪廓，勾勒得不錯，那麼各波向前進行時，就會成功新月的形狀，且因一波的各部分，其向前移動的方向，常與其自己專有的波前截面，互相垂直，所以它們的運動，漸漸會聚到一點去，而在該點把能量積儲起來。這樣的一點，叫做焦點。各波都經過這一點，再從此點向外發散，成許多同心圓，永遠放大出去。



(圖二十一) 此圖中有無數部細點的分，表示撒布在桌面上的沙。一對自由旋轉的輪子。滾向此鋪沙的區域，一入沙界，就迴轉過來。

這一種效應，也可以借用波紋水櫃來證明。取玻璃一塊，割成橄欖形，即使它的輪廓，成功一枚透鏡的截面，於是把它放在水櫃的底上。在這塊玻璃以上的水，比其餘各處淺一些，而水波經過該處時，運動就要慢一些。波的發生，由木質板條在水中昇沈不息所致。此板條連

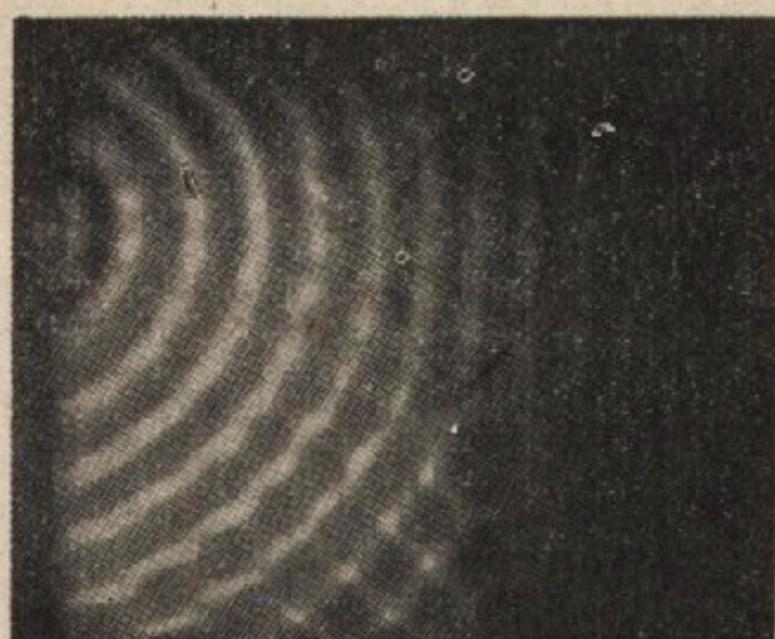


(圖二十二) 本圖所示，是從上向下，俯瞰波紋水櫃的情狀。一塊玻璃 G ，割成透鏡截面的形式，放在水櫃的底上。水櫃裏的水，平常大約是四分之一吋深，現在填進一塊玻璃，這地方就沒有這樣深了。波紋在淺水中進行，要比在深水中慢一些。這麼一來，就可使波紋會聚於一點 F ；各波紋經過 F 點之後，就向外發散。欲使波紋發生，祇要把板條 L ，在水中浸幾浸，提幾提好了：障壁 B 的作用，在於阻止水波，不讓它們從玻璃的外側經過。

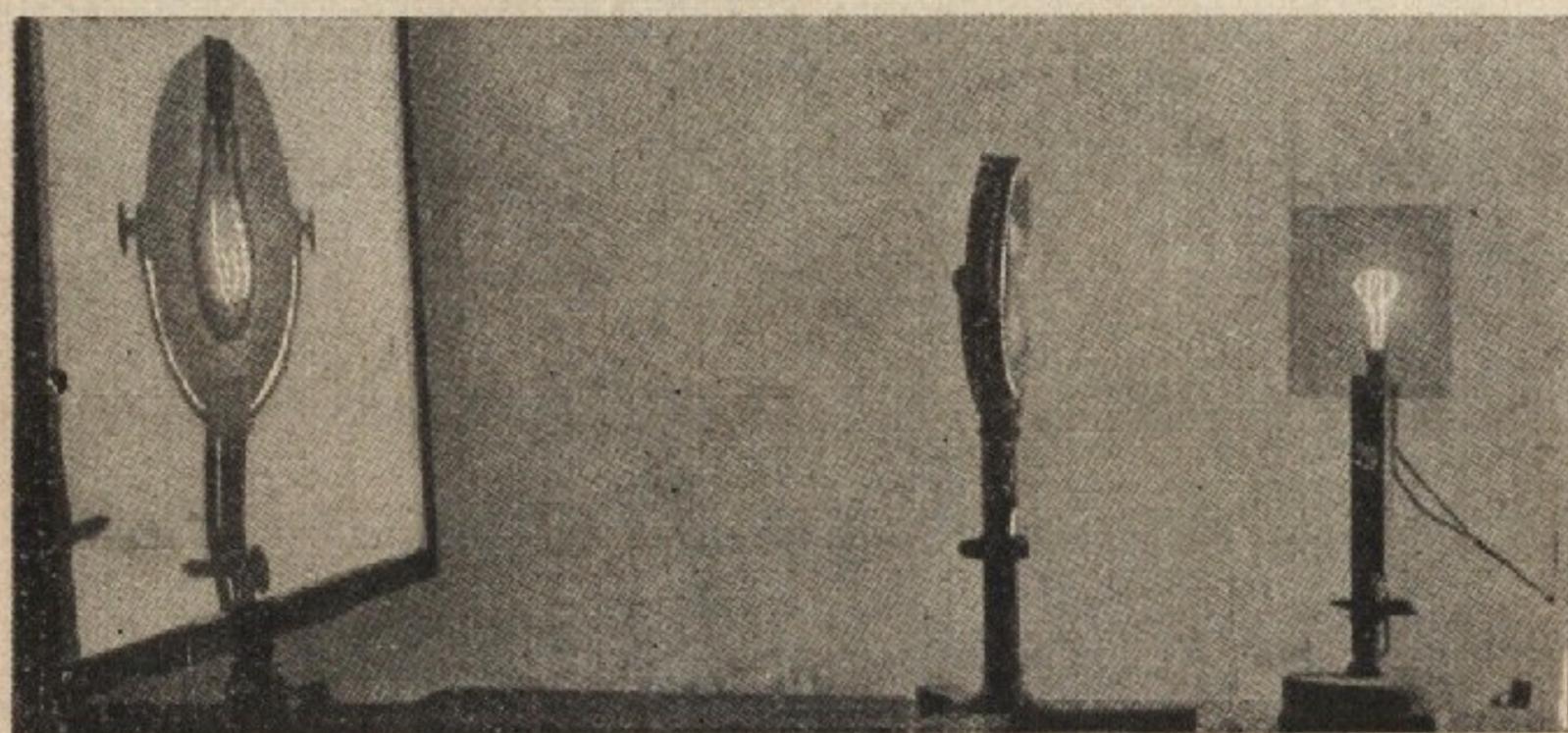
於彈簧的一端，隨彈簧而振動，且與水櫃的一邊及水面平行。各波會聚的過程，顯而易見：不過要同光的會聚相比，其明確的程度，差得還遠。圖二十二所示的，是此項實驗的概略，銅版圖七A所示的，是實在的情形。

所以正在進行的一系列光波，其路徑之中，若安放了一枚透鏡，那麼這透鏡的中央較厚部分，對

銅版圖七



A. 這幅照相，所表示的效應，與圖二十二所說明的效應相反。從左側一點激起波紋，越過一塊玻璃，玻璃割成透鏡形狀。波紋從該點發散，但是透鏡不致它們會聚；在這照片的右側，可見波紋已成平行線。左側的一點，是在透鏡的主焦點。這照相是用慢鏡攝成的，在攝取的當兒，發閃光以照耀波紋，與波紋激動器的運動相應（參看第五〇頁）。

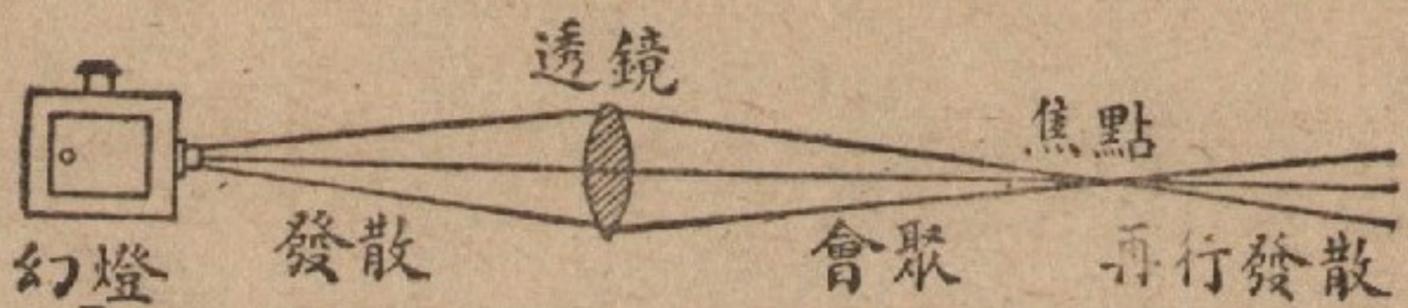


B. 此照相表示左側的屏上，現有電燈的倒像，此電燈直立於右側；像的造成，由於中間的透鏡。電燈前面的正方屏，是在攝取照相的當兒，暫時放在那裏遮遮光的，因為電燈絲的光很強，若不遮斷，照相乾片就要被它弄壞了。屏上燈絲的倒像，是原來燈絲的本身所生；但是燈泡的倒影，卻由電燈右側另有一光所投，此光不在本照相的範圍以內。這另外的光，還把透鏡與架子的影子投在屏上，但是此影卻直立不倒，因為光未通過透鏡之故（參閱第五五頁）。



C. 黑斑的兩邊，看起來好像深淡微有不同，其實全斑的濃淡是均勻的。接近深斑的一邊，似乎比接近淡斑的一邊明亮一些。因此三斑相連，乃呈褶欄的形狀（參閱第七五頁）。

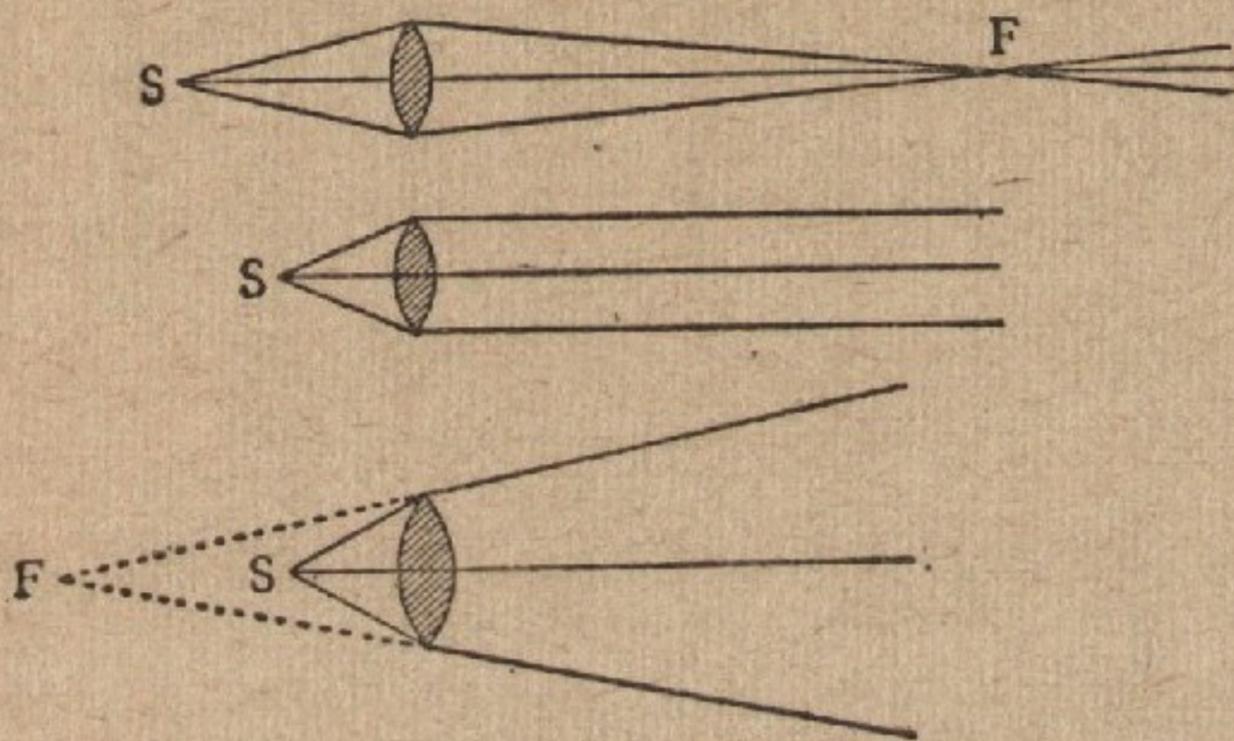
於光波的進行，比外圍較薄的部分，就要抑制較力，因而光都聚到焦點上，過了焦點，又向外散布出去。這種效應，可用圖二十三所示的實驗來表示。這一種簡單的實驗，其實是我們大家都很熟悉的。水櫃的比喻，固然可使我們對於這種過程的本性，略知其梗概，但是若不多講幾句話，或許要留下一種使人誤會的印象，以為透鏡對於光線的作用，缺乏精密的程度。就實情而論，適得其反。假使透鏡的形式合宜，製造適當，那麼從光源射出來的光線，就可以使它們會聚在極銳的焦點上面。這是因為光波的長度，與透鏡的大小比較起來，是極短極短之故。每英寸列波之內，光波的數目，多至好幾萬；在如此情形之下，列波向前移動的時候，是散漫得很少很少的。使列波向特殊的一點進行，其有離開規定的路徑，越軌遊行者，極少極少。這一件事實，是一條最重要的普遍定律之一例，這條定律，還有其他的例若干，我們隨時可以見到。光波的微小，小至使製造玻璃的工人，以及琢磨透鏡的工人，必須有極高極高



(圖二十三) 此圖所表示的，就是透鏡的作用。從幻燈射出來的光線，使它們會聚於焦點之上，由此焦點，它們再行發散。

的技術，方始可以收完全的效用，不會生出一「參差模糊，歪曲不整」的弊病來。其實在技術上所能做到的，也有一個限度，不過這一個限度，非等到玻璃的質地，做得精細透頂，以致不得不把玻璃分子的本身，看做離開的物體時，是不會達到的。上等透鏡的玻璃，必須通體均勻；假使透鏡的大小不論，這也是一件極困難的事情：計算透鏡的形式，又是極複雜的事件，而在磨琢的時候，必須磨得與算定的形式密合，其間不能容一髮之差。有許多平常用的透鏡，當然也不必請眼鏡師費了這麼多的能力，來精工製造的。

倘若我們使光源移近於透鏡，那麼焦點就向外遠移。這是一種情形，與我們對於光的會聚原因所已想到的見解，完全相合。經過透鏡中心的光波，其前進運動所受透鏡的挫折，多少是一定的，這一定的挫折，影響於波而使其形式有一定的改變，以致本來發散的波，變成了會聚



(圖二十四) 這幾個簡圖，表示透鏡的會聚作用。各圖中光源與透鏡的相對位置，均不相同。

的波。如是看來，顯然可知本來的散度愈大，代替這散度的聚度就愈小，讀者看了圖二十三與二十四，就不難領悟此理。在實際上，光源移向透鏡，與透鏡十分接近的時候，穿過透鏡的光波，就完全不

會再行發散。透鏡於此時所具的能為，左右不過是把光波以前的發散性，盡行毀壞，所以現在的光波，都成了平面波，而且此後再向前進，永不再行發散，也不會聚於焦點。當這種情形發生的時候，光源到透鏡的距離，通稱為透鏡的「焦距」，而光源所在的一點，叫做透鏡的主焦點。對於此一效應，有一個明顯的逆效應。這明顯的逆效應，就是平面波通過透鏡後，都會聚於主焦點上。從極遠極遠的一點射來的波，也可以當作平面波看，所以太陽光通過透鏡後，就會聚於主焦點上。

假使把光源再向透鏡移去，移得比主焦點更近一些，那麼所減去的散度，祇及原散度的一部分：通過透鏡的光，依然發散，不過宛如從較遠的光源發來。

就以上所述一切情形而論，發光的光源，透鏡的中心，以及透鏡的焦點，都在一條直線上面。其所以如此者，因為透鏡的中心點，與平玻璃板的作用無異之故：通過透鏡中心的光線，是不會曲折的。

我們所擬的這幾種實驗工作，用以說明透鏡與光源位置關係者，固然不難在教室內的講臺上，一一實行，但是所得的結果，卻祇能近似於理論。設計製造透鏡的時候，固然可使造成的透鏡，把發源於某一點的光線，都集中到任何處的焦點上，非常正確，絲毫無誤；但是要造這一枚透鏡非專為這兩點而設計不可。假使把這兩點間的距離，照我們以前所說的那樣，變更一下，那麼光線的聚焦，休望其到處一樣正確。一枚透鏡，要使它的作用，在很大的範圍內發生效力，那麼這枚透鏡，對於全範圍內的各點，就不會十分準確。大概說起來，能够如此，已可算是好透的了。上面所述各項實驗，即用比較不完美一些的透鏡，也可以做的。至於顯微鏡，望遠鏡，或照相機，必須有精密的設計，以合界限明確的特種艱難任務之用，這是另外一件事。平常的照相機，與最高等的照相機，其所裝透鏡，大相懸殊，這是一切攝影者都知道的。

透鏡所造的像

在透鏡一側的光源，其所發的光線，通過透鏡後如何得會聚於另一側的焦點，這種情形，我們

既然知道，那麼透鏡如何能在屏上造像，這件事情，我們也可以明白了。

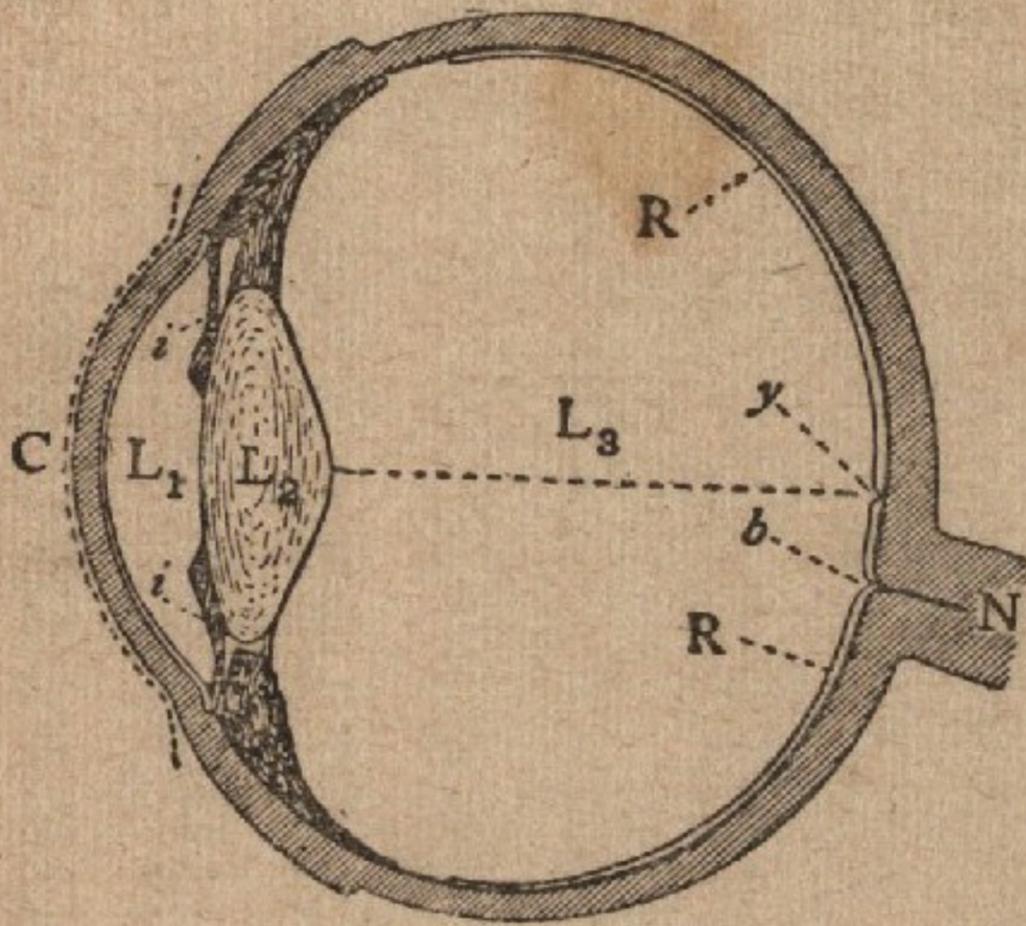
銅版圖七B這一張照片，所表示的就是一盞電燈的像。現在以此爲例，我們來考究一下。圖的中央，是一枚透鏡的側面，這透鏡把右側電燈所發的光線，送到左側屏上的焦點。凡從發光燈絲各點，分別射出來的光線，都通過透鏡，而透鏡即使它們各各會聚於屏上相當之點。透鏡與屏的位置，須加以調節，始可達此目的。燈絲每點與屏上的相當點，都與透鏡中心在一直線上。本來從燈絲上P點發出的光線，射於屏上P點之後，就再被屏所散射，其一部分若被眼睛收得，那麼這眼睛就要受到影響，以爲在P的地方，宛如也有一個與P相同的光源一般。因爲原物體的各點，都有一個相當的像，所以這些像的全體，就在屏上合成原物體的像而出現。這個像是倒立的：它的大小，要看燈絲與透鏡到屏的相對距離而定。

這一條原理，在許多光學裝置裏面，都要用着它，例如照相機，就利用這原理造成。就這照相機而論，感光片代替了銅版圖七B裏面的屏；這感光片當然被照相機的本身遮住，不會有非必要的光漏進來，照在它上面。照相機外面物體的像，造在感光片上，也是倒的，而且縮得很小很小。

眼睛的光學構造

眼睛的光學構造，在原理方面，與照相機相仿，如圖二十五所示，便是眼的剖面。那形如透鏡的睛珠 L_2 ，以及充滿於睛珠前後的液質，都要把通過它們的光，減低其速率，比其餘兩種液

體要多一些，而在眼睛中央的部分，其所減的速率，又比邊上多一些。這麼一來，遇見眼睛的光波，也與前面所說的一樣，由眼睛的作用，使它們會聚於網膜上面，這網膜與照相機上的毛玻璃相當。在此處，外界物體的像，成於網膜上者，也比原物



(圖二十五)

- | | |
|-------|---------|
| C | 角 膜 |
| R | 網 膜 |
| N | 視 神 經 |
| L_1 | 前 房 液 |
| L_2 | 睛 珠 |
| L_3 | 玻 璃 狀 液 |
| i | 彩 簾 |
| b | 盲 點 |
| y | 黃 斑 |

體小得很多很多，而且也是顛倒的。

照相機裏面的毛玻璃，其地位可加以調節。這是必須的手續，因為遠處物體所發光線的焦點，比了近處物體所發光線的焦點，離開透鏡較近之故。攝影者於攝影時，常調節其照相機上毛玻璃的地位，以適合於所欲攝取的物體距離，這是我們大家都看見過，都很熟悉的事情。

我們都知道，我們具有一種本領，能把遠近不同的各種物體，觀察得詳詳細細，一無遺漏，可見我們的眼睛，必定也有調節的組織，好像照相機一樣。這調節的組織，是幾條筋，這些筋可以變更眼睛與其透鏡系統的形狀。例如我們要閱讀小字的印刷品時，我們自覺在那兒努力收縮眼睛周圍的筋：有時候我們覺得在收縮眼筋的當兒，連自己的眉頭也皺了起來。我們把眼筋這樣一收縮，就可使眼睛的全部，尤其是睛珠，變成前密而後疎，中央更較厚而兩旁更較薄。這麼一來，就增加了會聚的能力。我們這班人裏面，大都能够收縮我們的眼睛，收縮到可以看見不到六英寸或八英寸遠的物體為止，但是我們若把物體更向眼睛移近，我們的視覺就要模糊了。我們把物體愈向眼睛移近，祇要不到眼花撩亂的地步，網膜上所成的像就愈大，而我們對於所注視的物體，也愈能把它仔

仔細細的辨認。

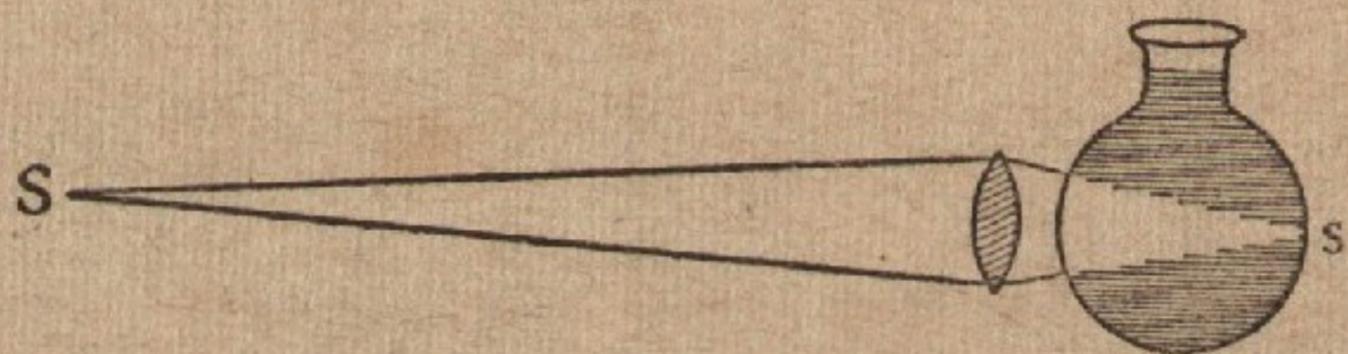
眼的光學缺點及其補救

正常的眼睛，往往能夠把遠離五十碼的樹，其背景除天空外一無所有者，辨出它的一根根細小的極枝來，又能受眼筋的調節，以詳察離開不多幾吋的物體。這種本能，足以表示眼睛構造的精巧，可使極微小的物體，被睛珠分別攝入其像，印於網膜上的某焦點。然而我們都知道，一切眼睛，其效率並不均等：有的宜於看近距離的物體，有的宜於遠視。有的眼睛，對於無論遠近的物體，都不能夠清清楚楚的看見。這些失乎常度的缺點，其所以然之故，不難用幾種實驗來說明。

我們布置好一套器具，用以表明視覺的過程。在圖二十六裏面，那隻大燒瓶中所盛滿的液體裏面，含有若干懸浮物質，光線射入瓶內時，就可憑這些懸浮物質，看出它的徑跡來，在S處有一道裸電弧，放出十足密集的光來。剛剛在燒瓶的前面，有一枚透鏡，這透鏡的厚薄，必須選擇得宜，使它可把弧光燈發來的光，送到燒瓶背面的焦點上去。

這一瓶液體與一枚透鏡，可以假定它們粗可代表球形的眼球，以及睛珠（參閱圖二十五）：網膜由燒瓶的背面代表。圖二十五所表示的，是我們所行實驗中的第一次布置情形，此時聚焦於燒瓶背面的光線，相當於射入正常眼睛，而在網膜上聚焦的光。從一點發出來的光，仍被送到一點上去。我們早已知曉，這是一件重要的事情，因為在這條件之下，光線所傳的消息，猜詳起來，方始不為發自其他各點，而落於同一地方的光線所混淆。

假使把光源 S 移動，向上或向下，向右或向左，那麼它的像 s 也移動，不過方向相反，即向下或向上，向左或右。其實這就是我們早已知曉的倒轉作用，是透鏡所必需的副作用。在網膜上所成的「畫」，的確是上下顛倒，左右易位的。然則或許有人要問，為什麼我們並不看見物體的顛倒？因為我們對於眼睛裏面的感覺，第一次開始加以猜詳的時候，我們已知道如何區別高與

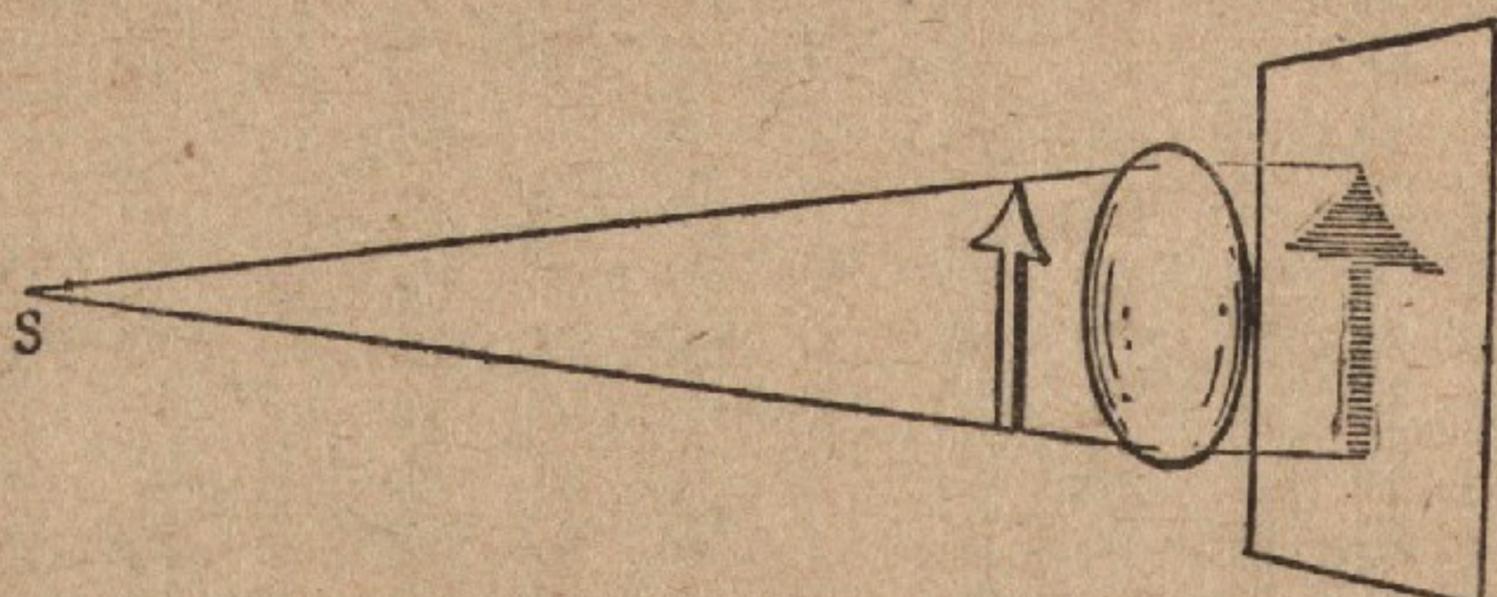


(圖二十六) 在 S 處的弧光燈，其所發光線，被透鏡與燒瓶中的液體，送到一個焦點上面。透鏡與液體，彷彿是眼睛的光學系統；而燒瓶的背面，彷彿是網膜。

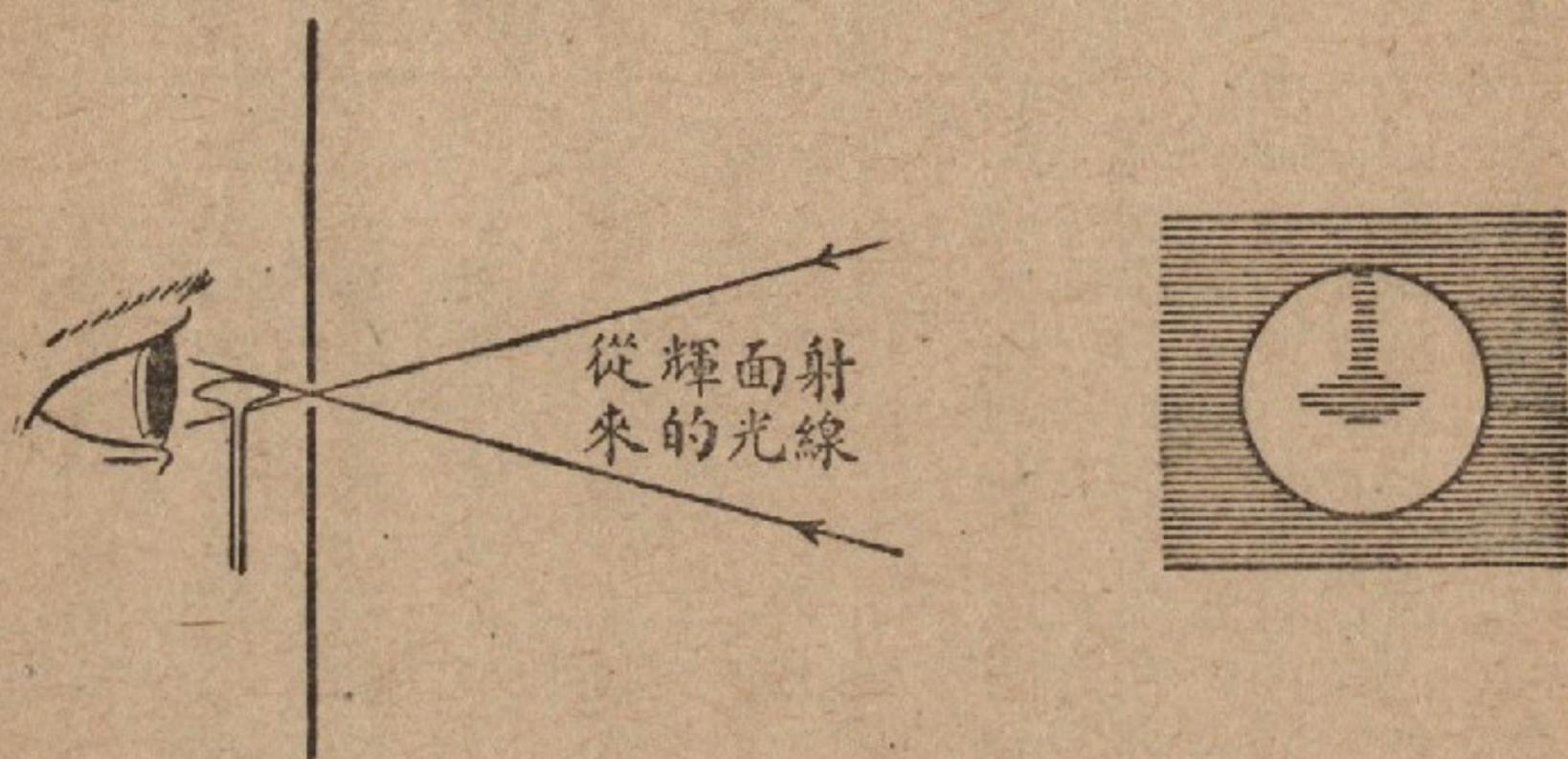
低，如何區別物體的頂與底了。不過這一種區別，以何爲據，我們卻從來沒有知道；我們由經驗學會了，就已滿足。大多數的人，都不曉得網膜上的畫是顛倒的：實際上的憑據，可以證明此事不虛的，他們從未遇見過。除非他們已經觀察過透鏡的作用，並且實地認識了眼睛中透鏡系統的功用，這真實界決不會現於他們之前。

這種效應，可以用兩次簡單的實驗，加以證明（這些實驗，載於西爾范納斯·湯姆撥孫所著「可見之光與不可見之光」一書中）。第一次實驗，我們在屏前距離很近的地方，置透鏡一枚，如圖二十七所示；然後再取一件單簡的物體，放在靠近透鏡的地方。在這時候，我們察得這一枚透鏡，對於此物體被投在屏上的影子，除略加以放大，略使其模糊一些外，並無別的影響；這影子仍舊正立而未曾顛倒。

第二種實驗，讓觀察者取卡片一張，上鑿小孔一個，而把卡片靠近眼睛，從小孔向外望一輝面，例如天空或明燈所照耀的表面（請閱圖二十八）。這個觀察者眼中所見的，必是一個很大的圓圈，因爲網膜上有很大的面積，都被光照到了。實際上的情形是如此。穿過小孔後的光線，發散得太



(圖二十七) 光源 S, 把一物體的影子, 投在接近該物體的屏上, 取透鏡一枚, 其焦距不甚短者, 插入物體與屏之間, 並不使影子有何不同的改變, 不過使它稍行放大, 稍覺模糊一些罷了。



六一 (圖二十八與二十九) 眼睛靠近卡片上的小孔。光從輝面而來, 例如從天空射來, 穿過小孔, 瀰漫於網膜之上, 所以此孔看起來頗大。假使取有頭之釘一枚, 照圖中的樣子, 嵌入此孔與眼睛的中間, 那麼網膜上的像, 據前一次的實驗而論, 必定是釘頭朝上, 並未顛倒。但是我們所看見的, 卻是此二圖中右面一圖所示的樣子: 即釘頭似乎向下而倒立。

開，以致睛珠不能使它們會聚於一點。現在把釘拿在手中，釘頭向上，插入小孔與眼睛的中間。把這釘放在適當的地位，或許要費掉一些時間。在網膜上的影子，必定是正的，當如圖二十七所示，但是腦部的猜詳，卻以為它是倒的。眼睛所「看見」的，是圖二十九所示的樣子。

網膜上的像，與原物體不同的地方，不但是上下顛倒而且還大大的縮小，這也是可以指示的一件事。我們沒有理由，可以假定我們應當看見，物體是上下顛倒，正同與我們也沒有理由，假定我們應當看見，物體比其實在的大小要小得多。

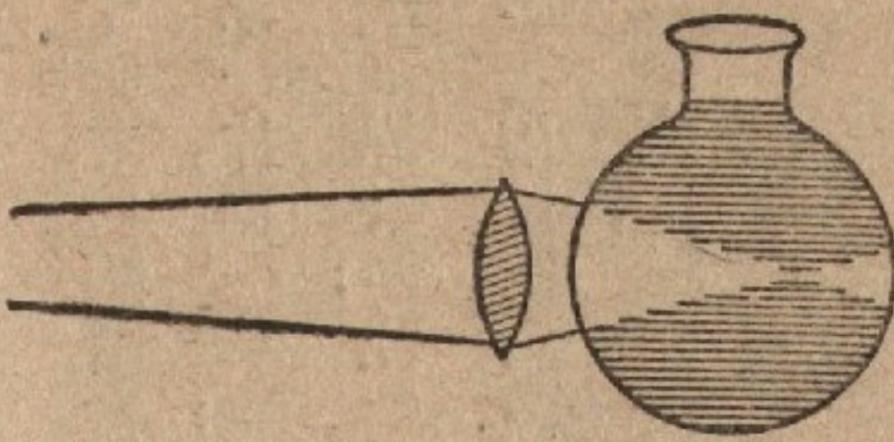
假使在圖二十六所示的實驗裏面，我們移動光源 S ，使它離開那隻眼睛模型，更遠一些，那麼光線在尚未到達網膜以前，已被送至焦點，而在到達網膜的時候，已開始重行發散。假使把光源 S ，向眼睛移近，那麼光線到達網膜的時候，還沒有在焦點相會過。不問在那一種情形之下，所成的像，都是模糊不可辨認。用眼睛觀看遠近的物體，必定也有同一效應發生，除非有某種組織，輔助眼睛，以免此弊。睛珠及其各項光學附件，可由各條不同的眼筋，加以更改，因而在一定限度的環境之下，要把視覺調節，以適應此環境。這種自節的本領，隨眼睛的不同而大有差別。正常的眼睛，加以調節，

一方面可以遠眺湖山，瞭然在望，鉅細入目，歷歷無爽，誠如前面所說過的一般，而在他方面又可於十吋之內，閱讀書報，怡然泰然。不過有些人的眼睛，生得失了常度，以致遠處的物體，看起來但見模糊一片，絲毫莫辨；祇有極近的東西，纔能够看得清清楚楚。這種近視眼，可用中央薄而邊緣厚的透鏡，加以幫助；此種透鏡，通稱爲凹透鏡。因爲近視眼使光波會聚得太急了，所以要去改正它的弊病，必須用可使光線張開的透鏡；這凹透鏡就有此項作用，其邊緣使光波所受的挫折，比中央來得大。反過來說，使光波會聚得太緩的眼睛，必須用凸透鏡去幫助它，這就是說，要用中央較厚的透鏡。

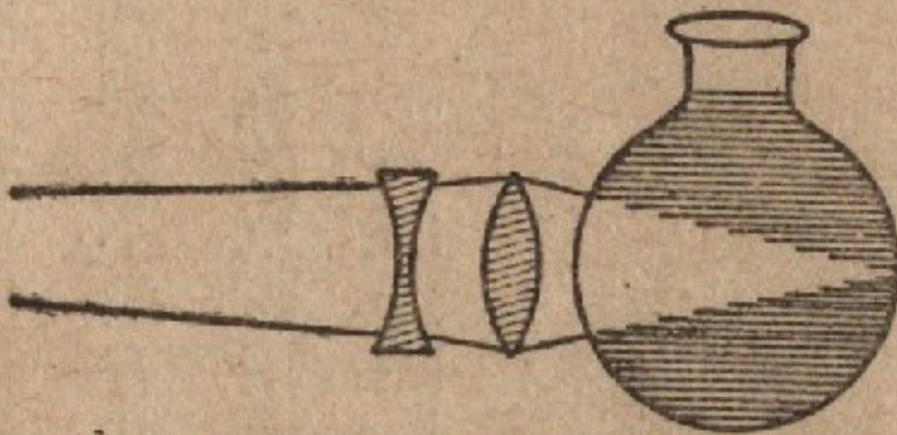
放大

在網膜上所印的畫愈大，那麼原物體的外表與內容，愈容易細細辨認出來，愈少遺漏，祇要原物體的每一點，都是清清楚楚的，恰恰印在網膜上面。要儘量使網膜上的畫放大，必須把原物體儘量移近眼睛，但是這也有一個限度；眼睛的組織，具有一種能力，可以變更光線的散度，並且使它們恰恰聚焦於網膜之上；這種能力，就規定了這放大的限度。假使我們對於某一物體，要加以精細的

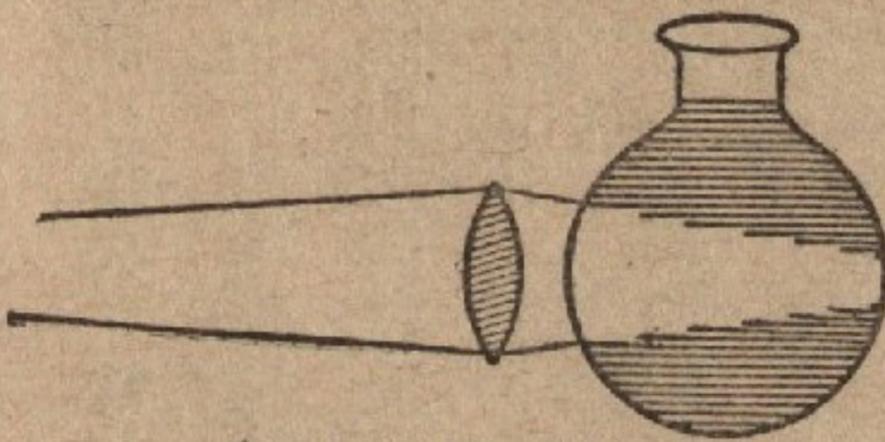
審察，我們都知道要把該物體，儘量移近我們的眼睛；但是我們也都知道，物體移近到某一點，再往內移，我們的眼睛，就看不清楚該物體了：我們必須在這一點突然中止，而這一點的地位，非常確定。這便是眼睛組織的能力，開始衰落的一點。把物體更從此點移近眼睛，是沒有用處的；網膜上的畫固然更大起來，但是畫的細微之處，卻都變成模糊難辨了。爲除去這一重困難起見，慣常利用一枚



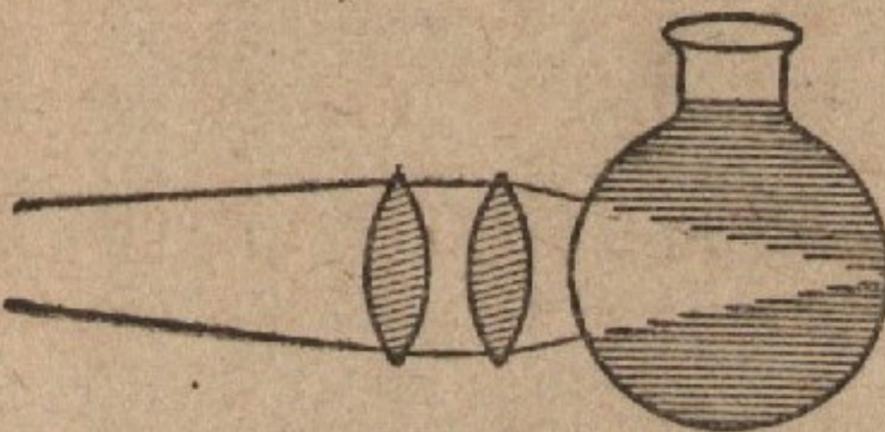
近視眼的模型



近視眼可用凹透鏡補救



遠視眼的模型



遠視眼可用凸透鏡補救

(圖三十與三十一) 這兩個圖，表示遠視眼與近視眼，其光學上的缺點，如何補救的情形。

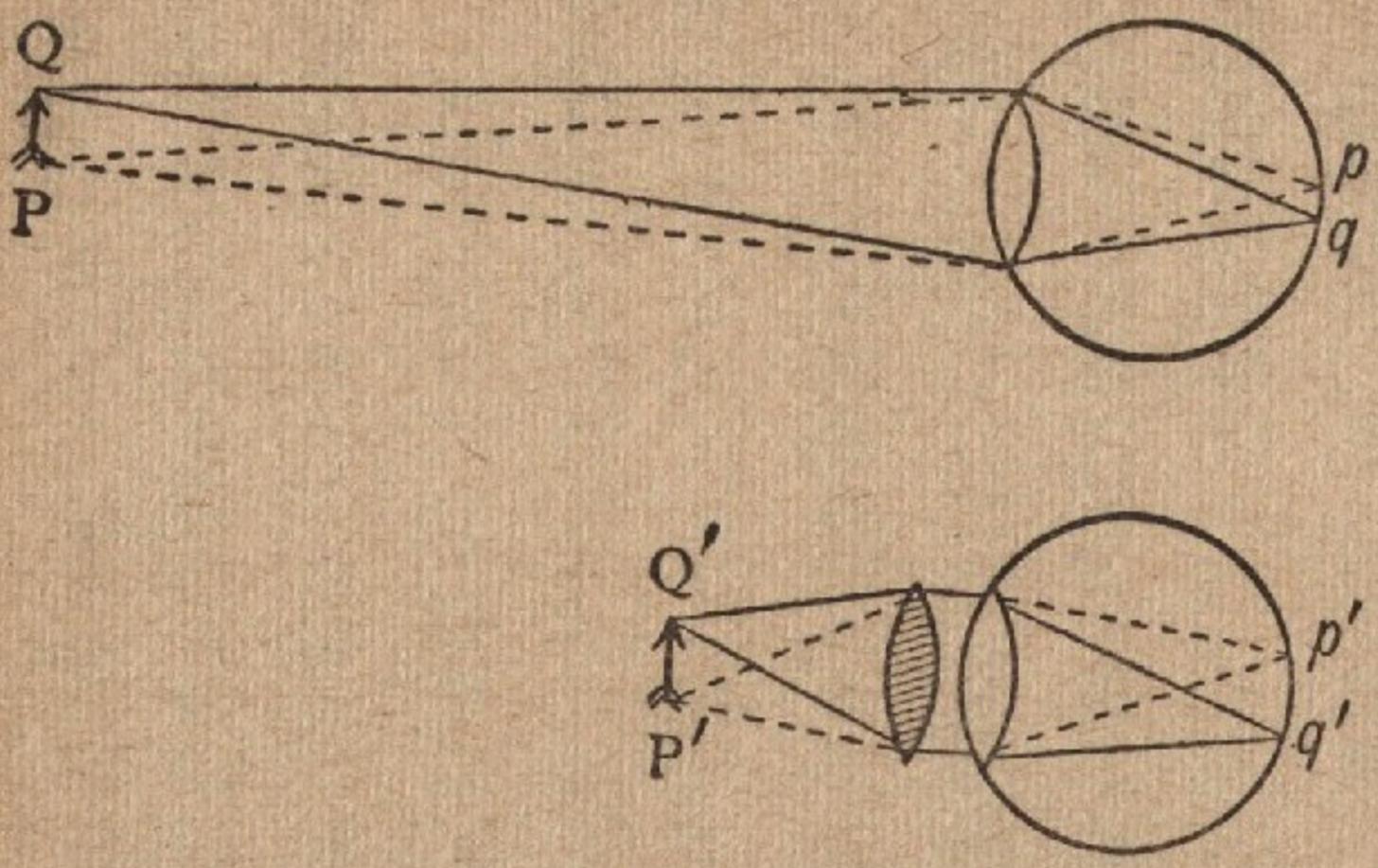
透鏡，以增加眼睛的聚光能力。普通所用各種形式的放大鏡，便是補救眼睛這一個缺點的器具。有了這樣一枚透鏡（看圖三十二），就可以把物體更向眼睛移近，比不用此透鏡時，要移近得多。然而並不因像的放大，犧牲掉像的清晰。尋常的閱讀鏡，我們把它舉起來放在眼邊，便可察看字跡細小的印件，或辨認畫中細微之處。這種放大鏡，並不能把原物體的像，放得十分大，而且它的構造，也無須加以非常的注意。所需要的放大率愈高，製造透鏡的工人，愈須有上等的技能。生物學家或地質學家，或鐘表製造師，他們所用的放大鏡，必須精工製成，方可合用。然而這一個方法的本身，就有限度，饒你製造透鏡者有通天本事，也莫想越此限度。欲加審察的物體，並不是在一切情形之下，都可以充分移近眼睛，俾可得到急需的放大率的。所以我們還要用一個與此極不相同的方法。

顯微鏡與望遠鏡

我們對於這些事情的講述，可以暫時中止一下，而自行回思，它們對於我們人類，究有多少意義。我們的眼睛，不靠器械的幫助，可以看得見而加以審察的物體，其大小是有一定限度的，在此限

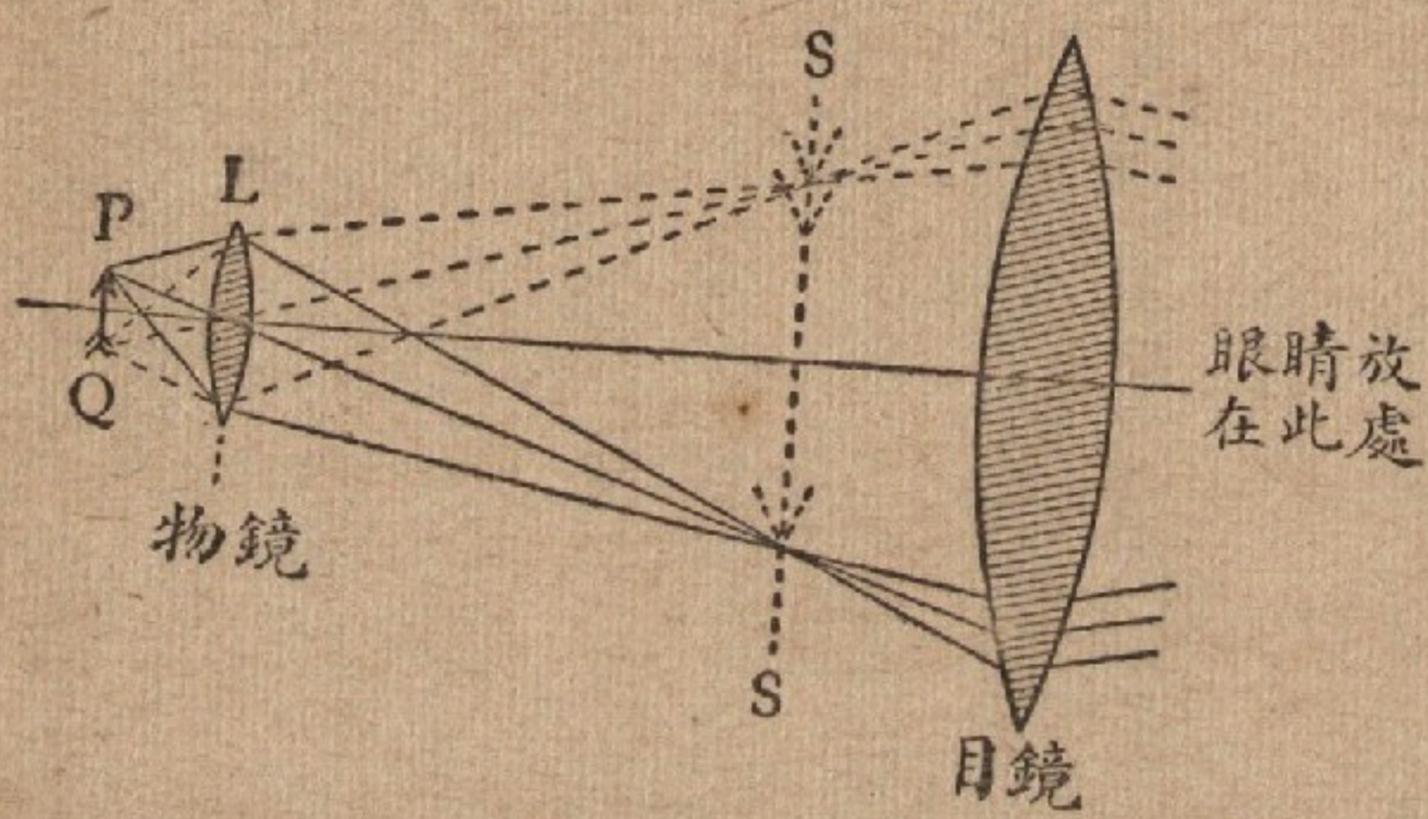
度以外，更大與更小這兩方面，都有許多物體，其大小範圍很廣很廣的，爲平常的視覺所不能察。一個人沒有眼鏡，沒有放大鏡，或顯微鏡，望遠鏡，也可以過他的一生，這句話當然不錯。但是沒有了這些器具，那些有益於生命，或有害於生命，積聚在渺小的區域內，而對於我們人類有密切影響的微生物，我們將一無所知；這也是千真萬確的話。我們對於天上的星，除了看見光輝點點，或疎或密之外，休想有其他的知識。在實際上說來，我們的世界，及其所在的宇宙，它們有無數的條理，我們休想知曉。

現在我們再接講新的放大方法。在這新方法中，我們先把所欲審察的物體，造成一個像，然後應用我們的放大鏡，來觀察這個像，如此辦法，我們有兩種好處：第一種好處，我們可使所造的像，比原物體大得多；第二種好處，我們可以更容易看清楚這個放大的像。例如圖三十三裏面，假定有一個很小的物體PQ，放在靠近透鏡L的地方，被照得很亮。有一個放大的像，造成於SS屏上，光的照度，必須很強，強至足以使屏上的像，雖然被放得這麼大，仍可以發出十足的光輝來。現在我們可以應用我們的放大鏡，來觀察此像。我們也可用一座白色的屏，放在SS地方，承受這放大的像，而在屏的



(圖三十二) 沒有幫助的眼睛，不能夠清清楚楚看見更近於 P Q 的任何物體。P Q 在網膜上的像，便是 p q。

但是有器具幫助的眼睛，卻可以使物體更移近一些，仍能在網膜上面，造成一清楚的像 p' q'。這個像比起 p q 來，是大得多了。



(圖三十三) 顯微鏡的平面圖。被很亮的光所照的物體 P Q，把光線散射出來；這些光線經過透鏡 L (叫做物鏡)，由 L 造成一像，造在 S S 處，比實物要大得多。這一個放大的像，再用第二枚透鏡(叫做目鏡)，照前面所畫三十二圖的樣子，加以審察。

前面去看它。但是我們若照三十二圖所示的樣子，用一枚透鏡，從屏的背後注視此像，卻有說不盡

的益處：在這時候，屏是不需要的了，因為來自原物體上任何點的各光線，都要被透鏡L送至焦點，這焦點就在本來由屏所占的地位，於是這些光線就從該點再行發散，射入眼睛，一如圖三十三所示。此外更有一層佳處，即在如此情形之下，全部的光都射入眼睛，而白色屏卻要把光散射開來。

這便是顯微鏡的原理。圖三十三所示的光學系統，其中有兩個主要部分：第一部分是物鏡，司造像放大之職；第二部分是目鏡，供審察此像之用。顯微鏡的放大率，就兼憑這兩部分的構造情形而定。還有一句話，我們不得不說一說，即若欲得最佳的結果，必須有極優等的技巧。

若欲幫助眼睛，使它能夠看清楚遠處物體的細微各點，那麼也可用一種相仿的裝置。然而在如此情形之下，卻不能把物鏡放得靠近物體了，所以物鏡所造的像，決不能是一個放大的像。雖然如此，造成了一個像之後，就可以用目鏡（即放大鏡）幫助眼睛，來審察這個像，無論如何，總是遠勝於沒有幫助的眼睛。

物鏡的焦距愈長，第一個像也愈大：因為這個緣故，強力天文望遠鏡，都造得很長很長。不過這時候的照度問題，卻變得很重要了：因為遠處射來，透過目鏡的光，必須遍布於像的全部之故。所以

欲使放大率很高，物鏡必須造得很大，我們就在這地方爲製造的費用所限，而不能盡量發展我們可以做的事業。

在論述顯微鏡時，我們已說過一種方法，似乎可解決這照度問題，此法頗可重提一下。假定有一具照相機，已經配準了，預備攝取一張照片。假使我們在尙未插入感光片以前，用一塊黑布遮斷了一切不必要的光，注視那機後的毛玻璃，我們就看見有一幅畫景，倒映在這玻璃上面。我們對於這幅畫景，就可以應用放大鏡，加以仔細的審察。但是已把放大鏡放在適當的地位之後，若將毛玻璃抽去，我們所見的放大畫景，顯然還要清楚得多。以前毛玻璃上某一點所收到的光線，是向各方被散射的，現在這些光線，一逕通到眼睛裏面，絲毫不因分散作用而衰弱。

如此看來，總括一句話，視覺本領的進展，有三個階段。在第一個階段裏面，我們祇能用我們天生而沒有幫助的眼睛；在第二個階段裏面，我們可用透鏡或放大鏡，幫助我們的眼睛，不過這一個階段，也祇能適用於我們所能接近的微小物體；在第三個階段裏面，我們先用一枚物鏡，造成物體的像，然後再應用目鏡（即放大鏡），來觀察這像。一切顯微鏡與望遠鏡，不論其式樣如何不同，構

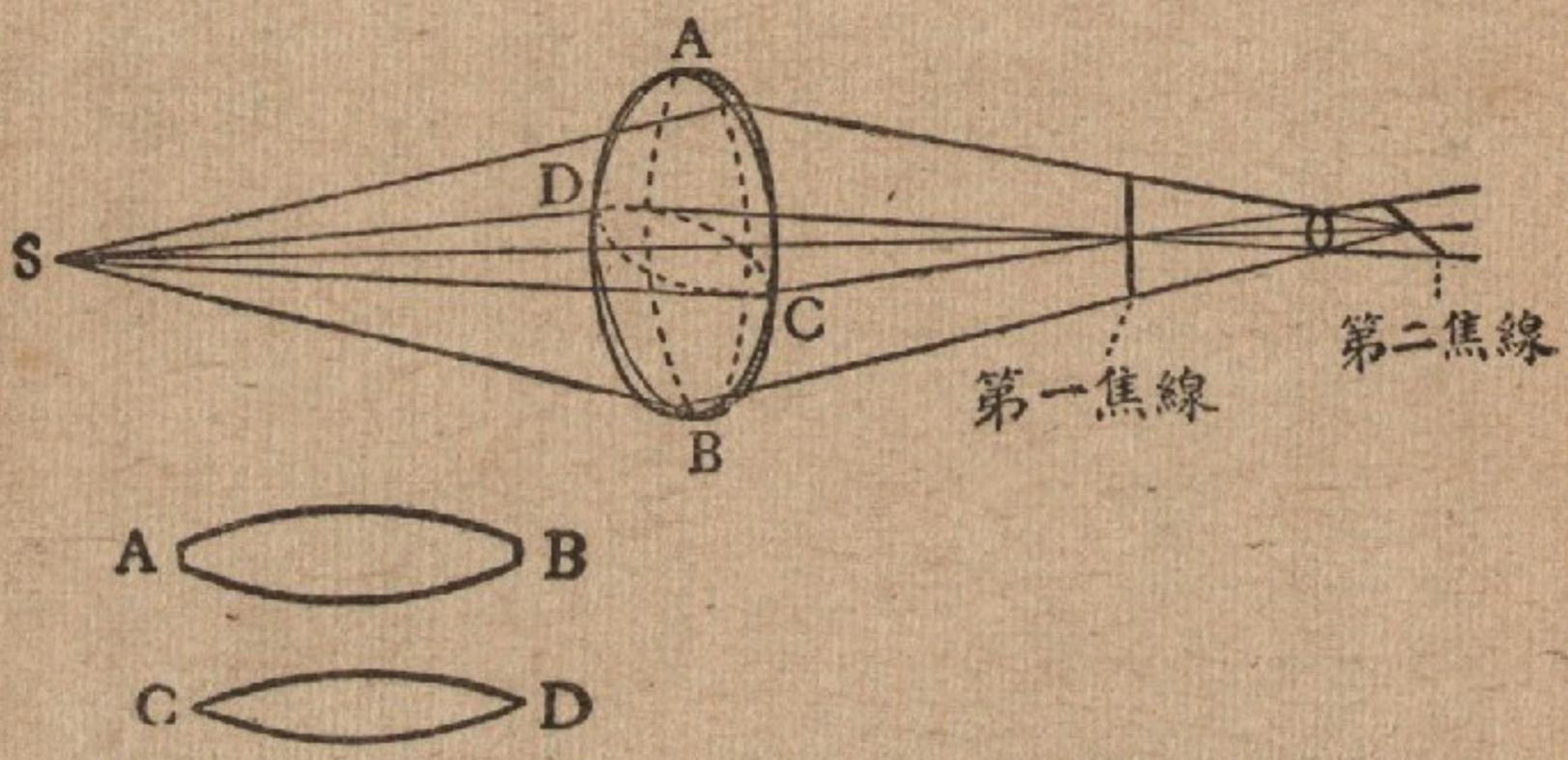
造如何精巧，都是根據了這一個原理而製成的。有專門用途的望遠鏡與顯微鏡，例如現代雙筒望遠鏡，製造起來，在設計方面會化了絕大的巧思。對於這一類儀器的考究，不在本書的範圍之內。

像散現象

各人的眼睛，其明視能力大不相同，這是一件大家都知道的事實。我們這些人裏面，有的不能分辨遠處物體的細微曲折，有的覺得難於閱讀書報。我們就用配準了光的眼鏡，來補救我們的這些缺點。對於普通一班人的需要，適合無間的標準眼睛，是沒有的。就這一點而論，眼力的高低，既然相差如是之大，大至往往要靠人工的幫助，來調節我們的眼睛，以視有效距離內的物體，那麼就其他各點說起來，眼睛有時候不能合於常度，尤其是不能合於認爲正常的對稱形式，這也不足爲異了。讀者須知，從透鏡軸上的點源，發出來的光線，假使要把它們都聚到另外一點上去，這枚透鏡非對於它的軸成功對稱形不可。要不是如此的話，就有別種情形發生，這種情形，不難知曉。我們試取透鏡一枚，其表面在AB上下向內，磨得曲率小一些，在CD水平向內，磨得曲率大一些的，放在點源旁

邊。我們發見從這點源射出去的光線，不能夠使它們聚焦於透鏡對側的一點。透鏡的水平截面，曲率較大，就使光線會聚得快一些，其鉛直面的曲率較小，就使光線會聚得也慢。結果如圖三十四所示。

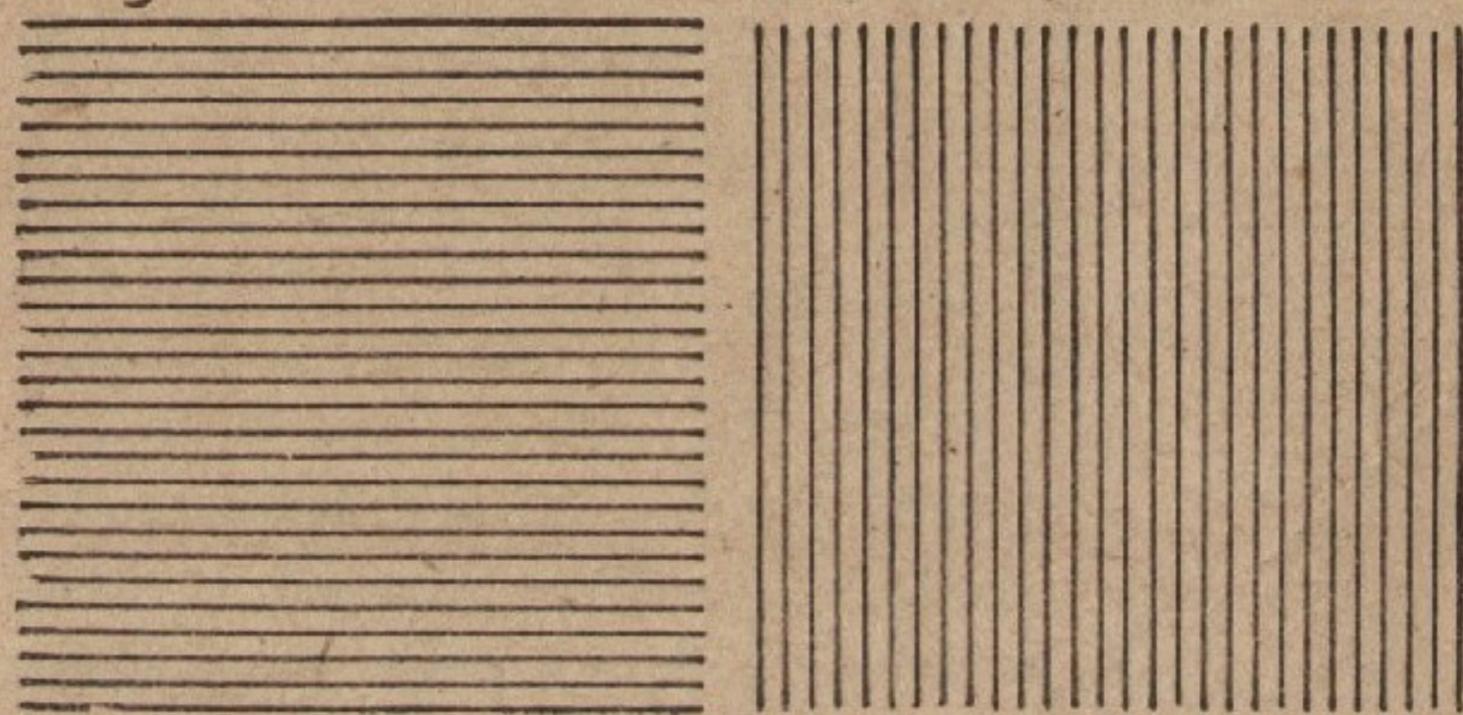
各光線行至一點，都通過一條短短的鉛直線：再往前稍進，又都通過一條短短的水平線。在這兩條線之間，它們都被一個小圓所套住。但是它們始終不經過同一之點。這種效應所以通稱為像散現象，就是這個緣故。凡是有此缺點的眼睛，無論遠近各物體，都不能夠清清楚楚的看見。幸虧有一種透鏡，可以抵消這像散作用，而這種透鏡的發明與製造，也並非難事。像散的眼睛（俗稱散光眼），必定



(圖三十四) 散像透鏡是如此造成的，經過透鏡中心的各截面，例如圖中用虛線鉤出來者，不完全相同。例如截面 D C 的曲線，比截面 A B 的曲線，就來得彎曲一些。從 S 發出的光線，通過透鏡之後，並不會聚於一點，卻會聚於兩條短短的焦線上。第一焦線，是在圖三十四的平面內，第二焦線，則與此平面垂直。

在一個方向內有較大的曲率，而在另一方向內有較小的曲率，不過這兩個方向，當然不一定如圖三十四所示，一為鉛直而一係水平。曲率的差別適與此相反的透鏡，就可用以糾正這錯誤。若在紙上畫許多線，令生有散光眼睛的人來看，那麼這些線裏面，必有在某幾個方向內的，他看得最清楚。像這一類的眼睛，注視圖三十五的兩組平行線時，或許覺得鉛直線看起來，比水平線清楚明顯一些，或許覺得水平線比較明顯一些；或許把此圖在其自己的平面內，緩緩旋轉，轉到某一地位，始覺兩組平行線有所不同。何以如此，說明於下：

讓我們假定睛珠（即眼的透鏡）的形狀，如圖三十四所示，並且假定從點源發出來的光線，通過睛珠之後，先



（圖三十五） 此圖可測驗眼睛的像散現象。

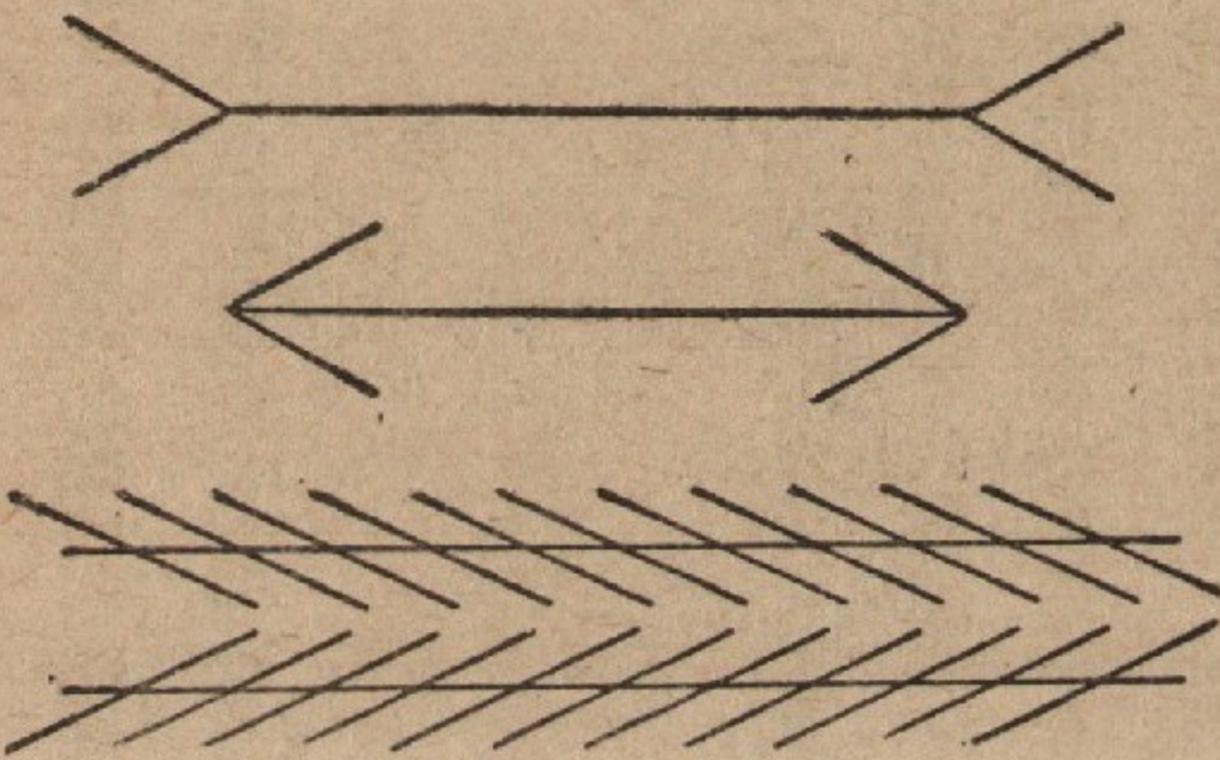
在網膜上會聚於短短的鉛直線內。當這種眼睛凝視一條鉛直線的時候，鉛直線上每一點的像，都在網膜上拉長了，成io功短短的鉛直線，這些短鉛直線，重疊在一起，積成一條線的全體，看起來自然清楚明白。但若所凝視的是水平線，那麼線上的各點，都拉成鉛直線之後，結果所見的當然是一條模糊的水平線了。

猜詳的錯誤

在以前各頁裏面，我們已把眼睛當作光學儀器，藉這儀器的作用，可把外界的物體，造一個像在網膜的背面；我們還審查過這種儀器，有種種的弊病，以致失其功用。我們又已知道，腦部的認識眼中景象，能辨其細微之處，是潛在意識方面的一種過程所致，而這種過程的完成，端賴於眼中所印圖畫的猜詳。這猜詳的手續，也可以發生錯誤，正與眼的光學系統中，有各種弊病一樣。此項錯誤的發生，其原因不止一端，或由於經驗的缺乏，或由於觀察的忽略，或由於生理過程的本性；所謂生理過程，就是使光先變成神經衝動，再變成感覺的過程，所以這第三種錯誤，較難避免，如圖三十六

所示，便是著名的一種幻視，那兩條水平線的長度，看起來似乎不等，而在實際上卻是相等的。就這一例而論，我以為並不是一件困人的事情。下面的一條線，看起來所以會比上面一條短，其故因為眼睛祇望着箭頭上的某處地方，好像線的兩端在箭頭上一般，而線的真正尖端，卻沒有瀏覽到。有實地經驗的繪圖員，就不會生出這樣的誤會來，而且對於圖三十七的兩條長線，也不會誤以為它們彼此互相斜傾，不過這一個圖若忽忽投以一瞥，確可以引起這樣的幻覺。

在又一方面說來，當一塊黑暗區域與一塊光明的區域，彼此毗連的時候，我們就起一種幻視，以為緊靠着黑暗區域的部分，格外亮一些，而緊靠着光明區域的部分，格外暗一些。用一句普通的成語來說，雙方的特性，都因對方的在場而「烘托出來」了。因為有這種幻視，所



(圖三十六與三十七) 兩種著名的幻視。在上面一圖中，這兩條水平線相等麼？在下面一圖中，兩條長線是不是互相平行。

以銅版圖七C所示的一組方塊，看起來似呈褶襞的形狀。此處的幻視，其原因或許不止一端；而且我並不深信它們的相對影響，已有人加以滿意的決定。其中最有效力的一種，就是所謂無意識的標準變更，曾由希爾福特·別特威爾（Shelford Bidwell）在「光的奇觀」一書中，加以討論。他以為眼睛在看過黑暗區域之後，再受光的感動，所得印象較應得的要深一些；它的明暗標準，是暫時降低了。這種由比較而增加明暗度的感覺，或許有一部分的原因，是在某種生理的效應方面；這就是說，我們在檢查光的強弱時，射入眼睛的光，或使網膜感到實際的疲勞。

當我們凝視着這一張畫的時候，我們的眼睛常從這一點瀏覽到那一點。假使我們在剛剛看過較亮的一塊之後，就去看較暗的一塊，那麼我們的眼睛是先覺微勞而後逸；假使在看過較暗的一塊之後，接着看較亮的，那麼我們的眼睛是先逸後勞。在前一種情形之下，或許覺得所看的第二塊要暗一些；在後一種情形之下，或許覺得所看的第二塊要明一些。雖然，不問眼睛的疲勞對於此種效應，是否有何關係，標準的變更總是一定的原因，因為依照別特威爾的話，「當該圖被電火花倏然一照的時候，仍舊顯出「褶襞」的外貌來。

好多年以前，威廉·史德林（William Stirling）教授在皇家學院內演講，曾表示過同一類的奇特效應：他所畫的圖，就是本書銅版圖八A。圖中的白帶，在相交的地方，似乎黑暗一些。我們或許可以假定，在白帶裏面，遠離十字交叉口的一點，其周圍的黑暗部分較多，所以看起來比十字路口的一點，要格外亮些。

最最著名的各種幻視，其中有一種便是月亮在接近水平線時，看起來似乎大一些。當它初昇的時候，我們看見一個很清楚的紅色大盤，襯托着遠處的樹木或房屋，這些樹木與房屋，便顯得輪廓格外分明。其實在這時候的月亮，並不比當頂時大，可是很難使人相信。然而這一件事實，也很容易證明。取半便士銅幣一枚，放在離目九英尺的地方，剛剛可以遮住月亮，不問它是在水平線上方，或高高在天頂。月亮在眼中所張的角，必定常常相同，因為它的距離始終不變；這當然是顯而易見的事情。大氣的折射（我們往後就要講到），對於這隻角僅有極微的影響，而且在實際上說起來，它還使水平線上紅盤所張的角，稍稍縮小了一些。所以這種幻視，其原因並非網膜上像的大小，有何變更；而且的確也不是眼睛有何錯誤。這原因一定是猜詳的不準確。我們又要提到標準的變更

了：此處的幻視，其原因便是標準變更的又一例子。這種解釋，我們往往要提出來，似乎並無可疑的任何理由。我們常在不知不覺間，採用不同的比較標準，來測度天空中各物體的大小，此項標準，即隨該物體離開天頂的遠近而異。我們看見浮雲飄向水平線的時候，似乎一路在那兒縮小下去。一架飛機由近而遠，看起來似乎愈遠愈小，它在眼中所張的角，祇管縮小，等到它在遠處的山背後不見了的時候，看起來不過是一個小黑點。但是月亮並不像浮雲與飛機，如此這般的變更它所張的角。當我們看見月亮接近水平線的時候，我們所用測度大小的標準，便是用以測度鄰近天空中各物體大小的標準：所以月亮看起來就要大一些了。假使我們看見一架飛機，在遠處的村莊背後，從水平線昇上來，其大小與當頂時候的相同，那麼飛機就似乎比村莊的本身都大一些；這當然是一幅可怖的遠景。然而月亮的情形就是如此：所以我們對於月亮的行動，雖然都有經驗，對於月亮的大小，雖然都知道它在水平線上，實在並不比當頂時候更大，但是水平線上的月亮，看起來仍覺得大一些，這一件事實，也就沒有什麼奇怪可言了。銅版圖九A，便是說明此事的一幅畫。

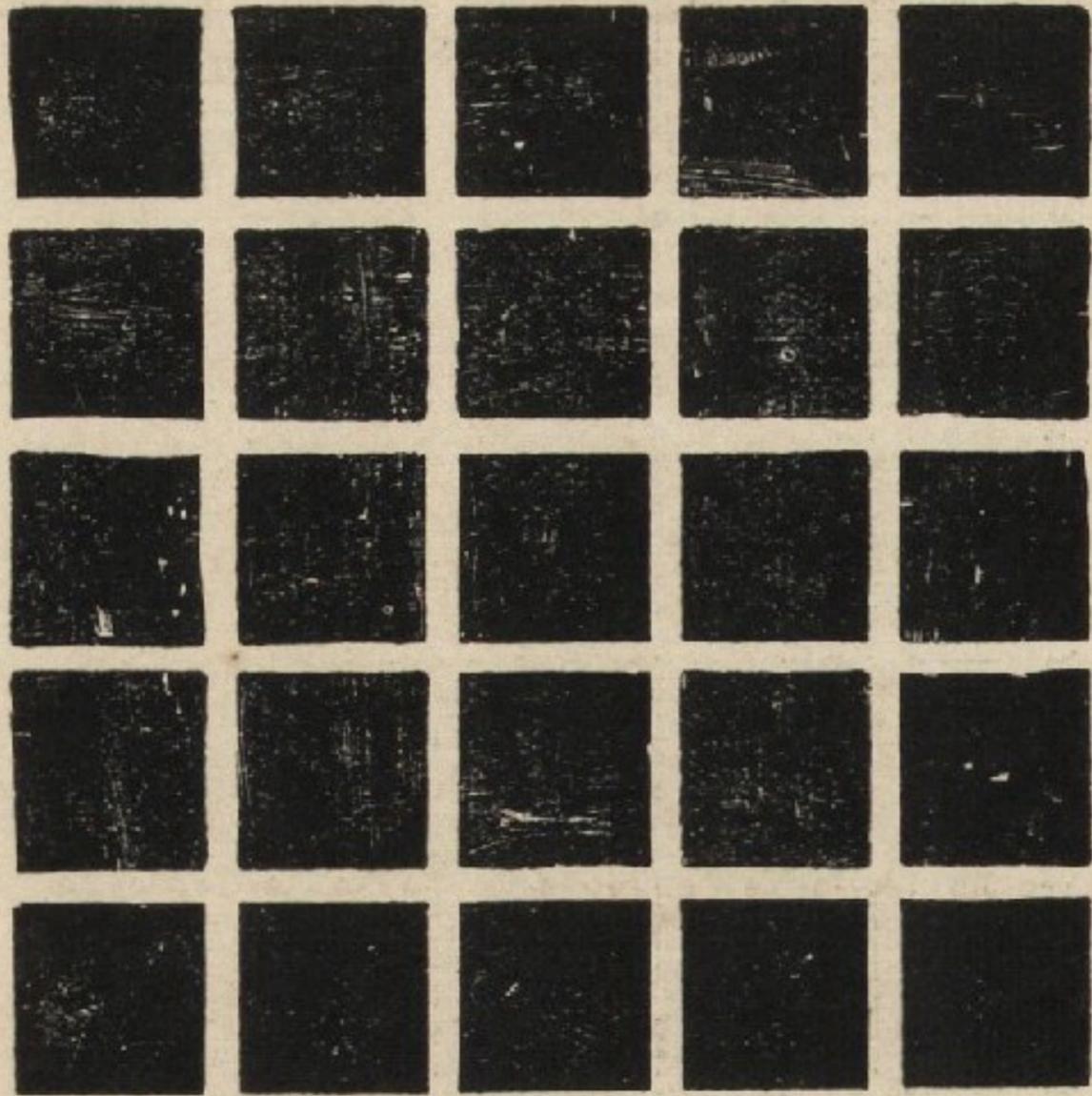
在風景畫中所繪的月亮，通常總是很大，大得遠出於根據幾何原理，應當有的大小範圍之外。

這理由或許是如此，即因沒有一種顏料，可以表現月亮的光華，與其在畫中的重要，所以畫師祇好增加它的大小，以惹起對於它的注意。不問他如此用筆，是否合理，這是關於藝術意向的問題，與我們並無關係。我們現在所要說的，是幾何學上的問題。假定有一幅畫，放在距離適當的地方，例如離目一臂之長的地方，這時候畫上的各物體，都代表其真正的相對大小，那麼月亮的直徑，祇應當畫到一英寸的五分之一左右，方纔沒有錯誤：假使此畫擬放在其他任何地方，教人觀看，其離目的遠近，並不是一臂之長，那麼所畫月亮的大小，必須視畫的或遠或近而略增略減。

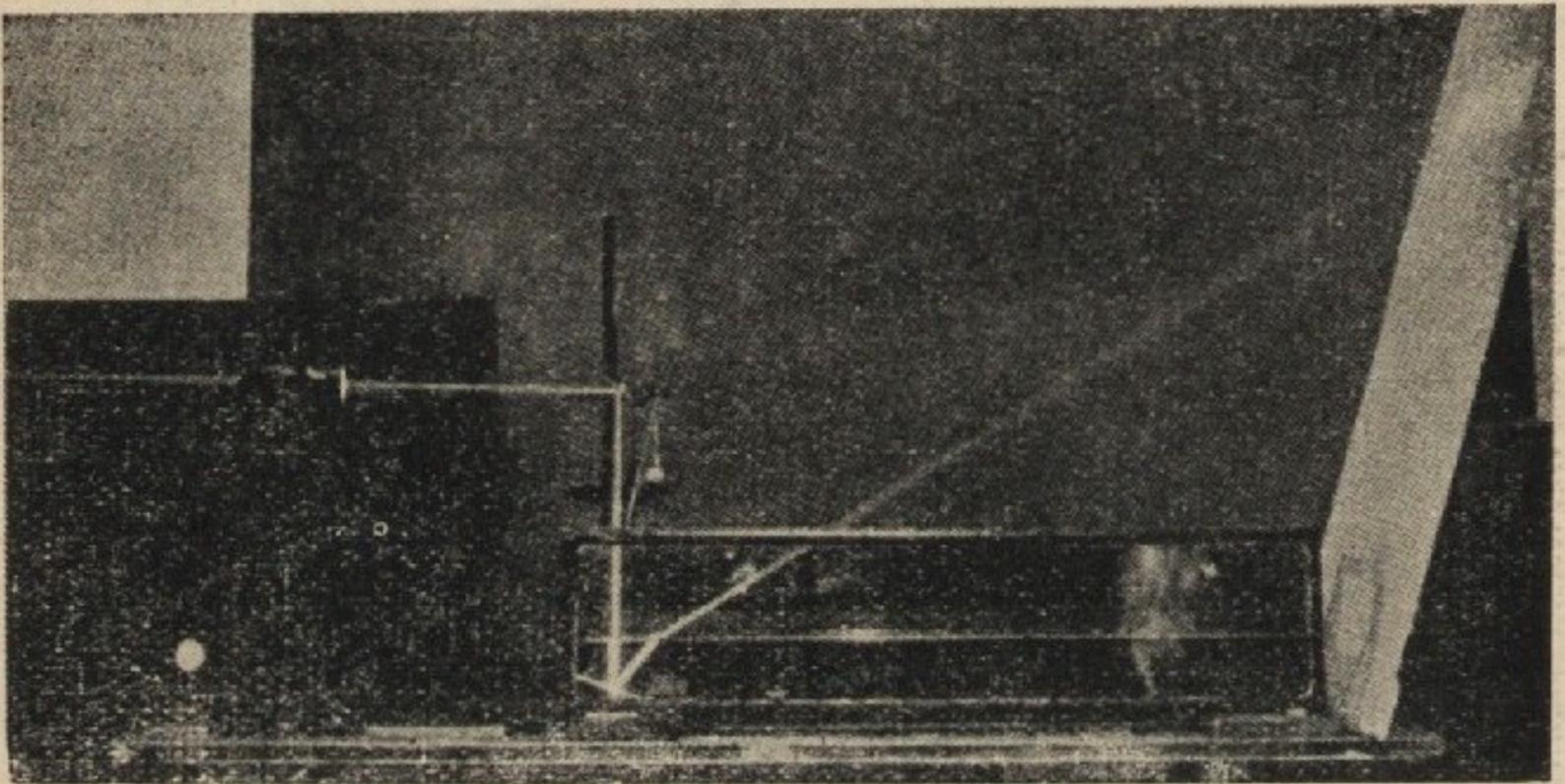
讀者不可忘了，不問觀察者立在什麼地方，月亮在他眼睛裏面所張的角，始終不變，然而畫中此外的一切物體，卻隨觀察者的移動地位，而變更其貌似的大小。在另一方面說來，若從幾何學的立場，觀察此畫，那麼畫中月亮的大小，須視此畫離目的遠近而定。在照相裏面，月亮的大小，須視透鏡離感光片的長短而定。銅版圖九B所示的例，頗有幾分令人驚異之處。

還有一種幻視，我們必然大家都知道，這便是照相裏面的距離，看起來似乎要大一些。當我們看見一張房間的照相時，若這房間是我們所知道的，那麼我們就會立吃一驚，因為在照相上看來，

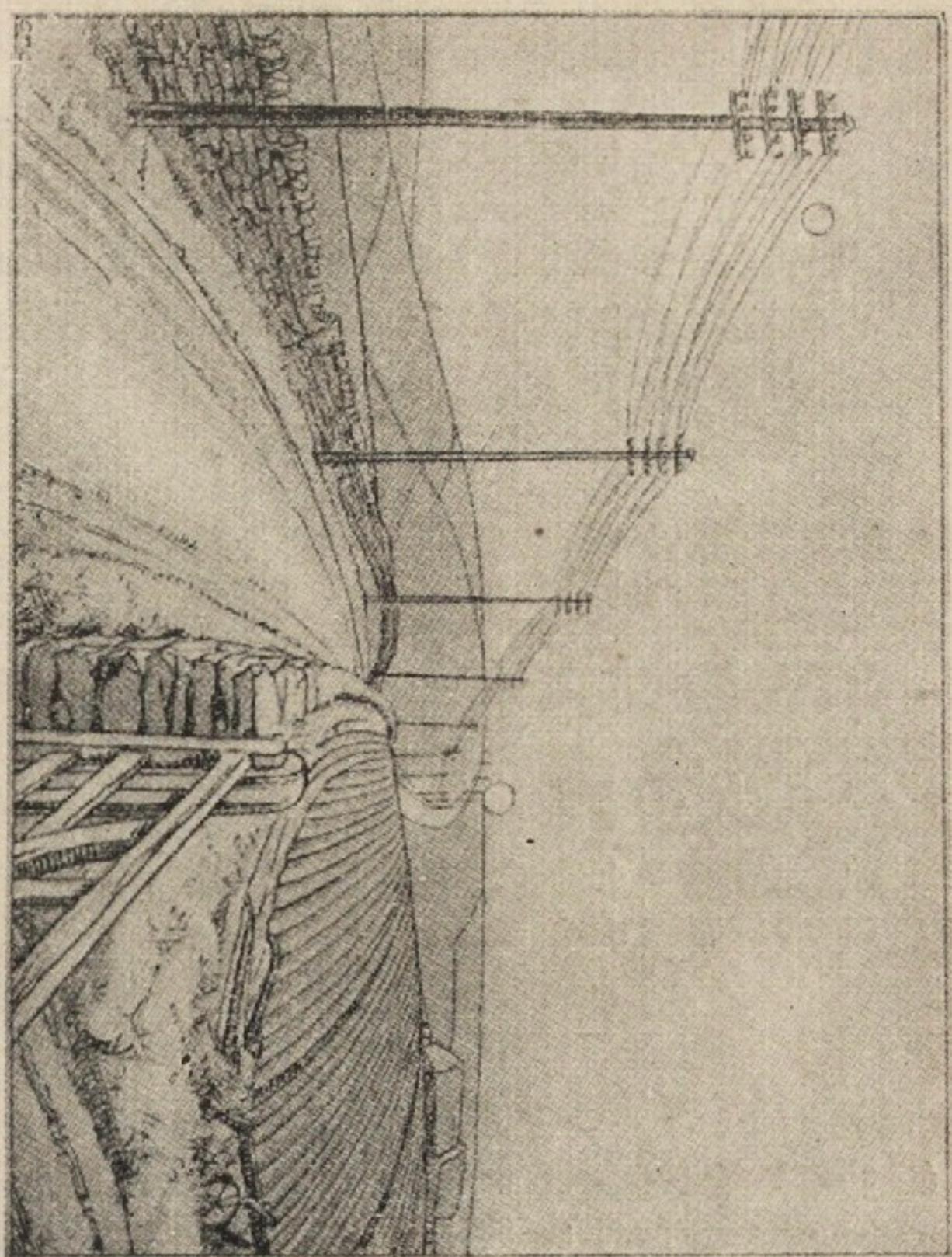
銅版圖八



A 圖中白條紋相遇的地方，似有黑點若隱若現，這是幻視所致（參閱第七六頁）。



B. 這幅照相中的實驗布置，表示光柱穿過水與空氣間的表面時，所發生的折射情形（參閱第八四頁）。



A (在左側)在水平線上的月球;比起那地方的電桿來,顯得

很大;但是比起近景的電桿來,卻又顯得很小。我們切不可預期幻視的發現,正與此圖相同,不過我們若用手先遮住圖中一月,然後放手再遮住他月,也有引起同一幻視的可能性罷了。就心理學的效應而論,必須有真正的環境纔行(參閱七七頁)。



B. (在右側)這幅照相裏面的月亮,不容

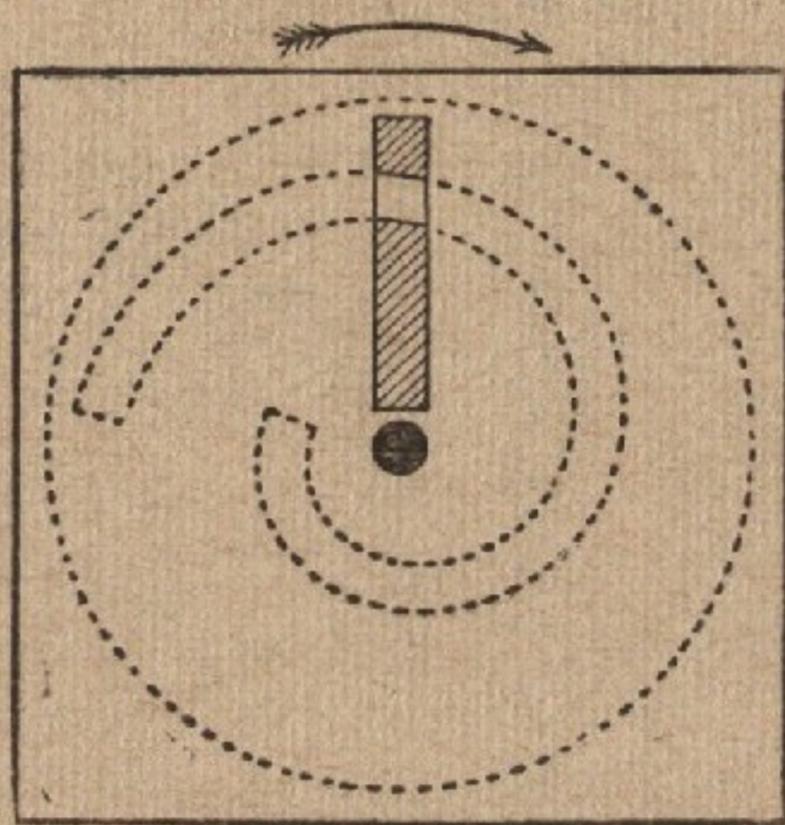
易找到。這是一彎新月,地位在照相的頂上,與左右兩邊距離相等。因為月亮在我們眼睛裏所張的角是半度,它的大小,在這照片之中,應當約等於照相機透鏡焦距的一百二十分之一,這一個數目,原是物體張此角時,其大小與距離的比(參閱第七八頁)。

這一間房間，似乎深得多了，在我們的想像之中，這房間不應當有這麼深。

在幾何學方面說來，這張照相決不能誑騙我們：這種效應，不能夠歸咎於用了透鏡而生的畸變。這一定又是猜詳的錯誤所致，尤其是因為在不知不覺間，用了錯誤的標準之故。我們都知道，遠處的物體，看起來雖然小，實際上很大，這是習以為常的了，所以我們在觀看遠處物體的時候，或在想像它們的時候，常常採用不同的比較標準。初學繪事的人，畫一幅風景，總把遠處的山，畫得比了它們的適當高度，有十倍那麼大。所以反過來說，當房間裏面的鉅細各部分，在照相上現出準確的幾何形式時，我們對於房間那一端的各部分，就要過度估量它們的距離了，其實這張照相所示的形式，恰就是網膜上所印的像。

還有一種運動的幻視，也由於採用錯誤的標準所致。假使我們坐在火車裏面，憑窗遙望那山川林野，在窗外向後過去，注視片刻之後，我們的眼睛對於這運動就習以為常，認定它是正常的情形。假使火車突然停止，就有暫時的幻視發現，即覺山川林野，正在向前移動，而火車則在向後倒退。希爾福特·別特威爾，曾發明一種簡單的實驗，來表明這種效應，甚好甚好（看圖三十八）。取正

方形的金屬板一塊，在板上鏤出一條鉛直的狹口來，用它做幻燈上的遮光滑子。另取圖形板一塊，在板上鏤出一道螺旋形的狹口，板的中央貫於一軸，使板可繞此軸旋轉，軸與第一板互相垂直。把這兩塊板重疊起來，遮在幻燈前面的時候，燈光就從兩狹口相交的地方，射出來照在屏上，屏上就現出一個輝斑來，其餘各部分，都黑暗無光，現在使第二塊板旋轉；這板一轉動，屏上的光斑就向上移動，移到屏頂而不見；同時另外又有一個輝斑，立刻在屏底出現，開始向上而行。所以有許多光斑，在屏上陸續向上移動不絕。如此過了十五秒左右之後，若令旋轉的圓板馬上停止，那向屏注視的眼睛，就似乎見有光斑在屏上向下移動，而且這種幻視，可以維持到數秒鐘之久。像這一類的效應，都不能夠歸咎於眼的光學機構，有什麼缺陷；它們都與腦部的猜詳有關係。此外無疑還有種種幻視，看見過的人自己知



(圖三十八) 鏤有螺旋形狹口的板，在幻燈面前旋轉；鏤有鉛直狹口的板，固定在幻燈前面不動。這兩塊板如此配置，目的何在，可於本書正文中見到。此圖係從別特威爾所著「光的奇觀」一書中摘下。

道。例如有一種幻視，凡是駕駛汽車的人，有時候就要遇到。當他正在駕車疾行，越過原野的時候，倘若有一道斜坡，通向遠處的山岡，地面漸漸升高，其勢甚緩，那麼也就很容易看錯道路的水平面。他在這首上山的當兒，估計山的斜度，沒有估足；而在那首下山的時候，估計山的斜度，卻又嫌過分。在另一方面說來，當他依反對方向駕車疾行的時候，即先上高岡，後下斜坡的時候，他就很容易自誇駕車能手，不去留心他所乘汽車的行動了。此處的錯誤，其原因不過是觀察的不仔細，猜詳的不正確；祇要把前後左右的環境，細細審察一下，就可以改正這種錯誤。

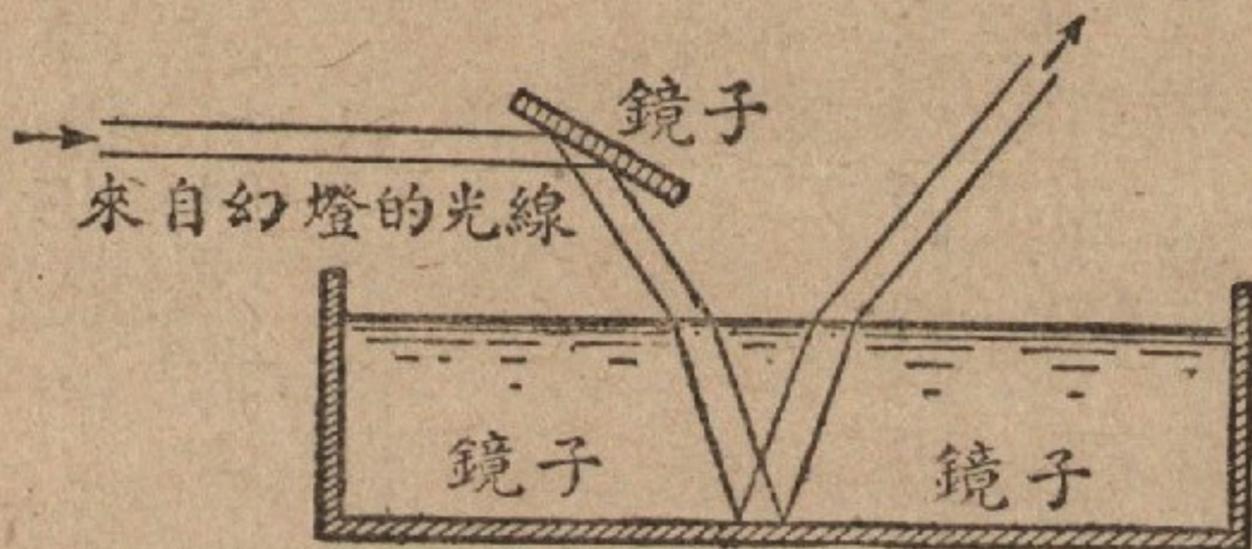
視覺暫留

有一種幻視，叫做視覺暫留，與前面所說各種，完全不同，因為這是由於眼睛結構的特徵所致，萬不能更改的。網膜上所感受的印象，在發生此印象的原因，已經停止作用以後，還要暫留片刻，始行消滅；暫留的時間甚短，祇有一秒鐘的一小部分。丁達爾(Tyndall)曾用極簡單的方法，證明過這種效應。先使幻燈射出一道圓錐形的光來；於是疾揮白色的手杖，使它在這道光中很快很快的

經過，宛如拿一把利劍，猛砍這光錐一般。這時向光錐注視的眼睛，並沒有看見白手杖在光中經過；它所看見的，只是一個白色圓盤，宛如有一座白屏，放在手杖所經的地方，將光遮斷之後，屏上所現的光斑一般，但是還要亮一些。圓盤的全部，眼睛可在一瞬間同時看到。假使取錶鏈一條，放在用交流電的電燈所發的光裏面，而使它盤旋疾轉，那麼鏈上各環所反射的耀目的光華，顯得此鏈化成數十百鏈，鋪成一片。影片中的物舉動，看起來很流利自然，就靠着這種視覺暫留的作用；每一張畫片的印象，總要在網膜上留存片刻纔滅，這片刻的時間，適足以使所見的動作，前後相連。

折射的通例

光的折射現象，有關於眼睛的天然光學系統，以及人造光學系統例如顯微鏡與望遠鏡者，我

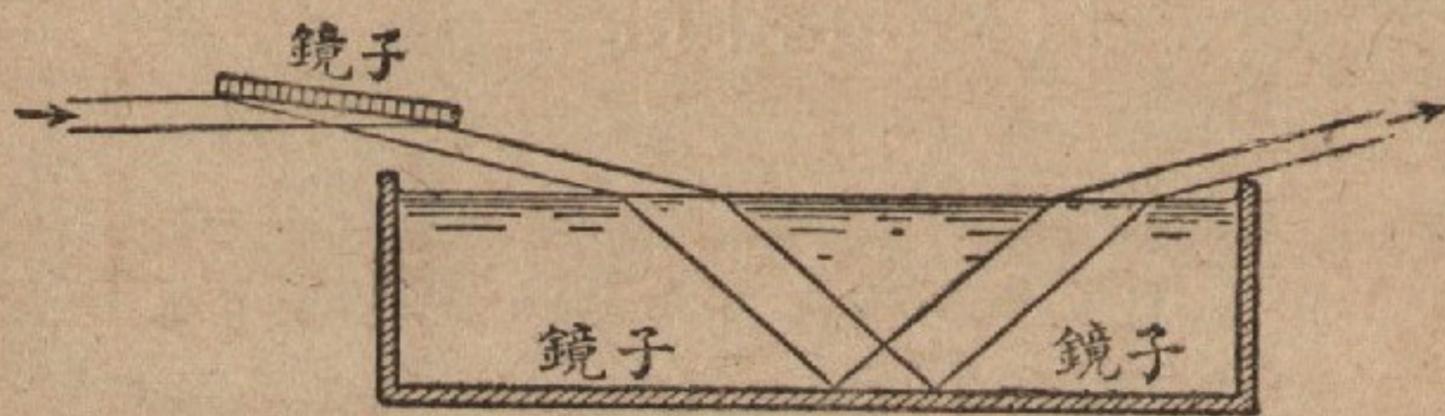


(圖三十九) 圖中的水櫃，滿盛微帶顏色的液體：水櫃的前壁，是用玻璃做的，所以光線的路徑，可以在櫃外望見。水櫃的底，是一面鏡子。

們適纔已經討論過了。此外還有許多大家所深知的相似效應，也靠着折射的作用，而且都有用處，都有趣味，可以提出來做例，說明折射的結果。

我們都記得，當光波從一介質通入別一介質的時候，假使波動的速度，在這兩種介質裏面，彼此各異，那麼就有折射現象發生了。讓我們先用幾種簡單的實驗來幫助我們審察這折射的現象。

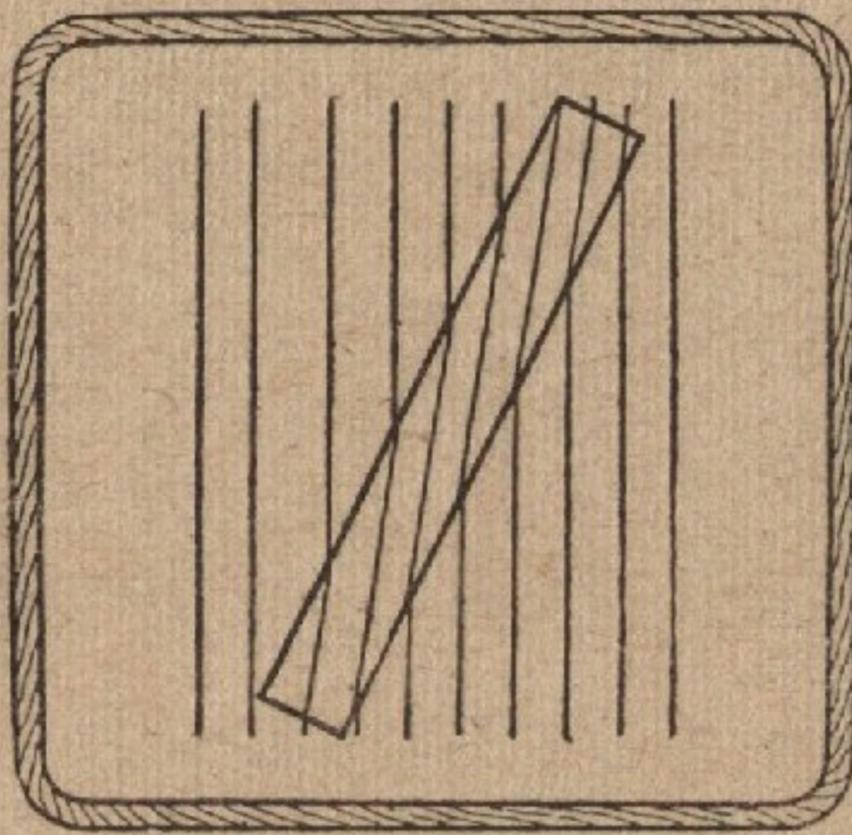
在圖三十九與四十所示的實驗裏面，有一道光束射在一塊鏡子上，此鏡使光束偏向下方，射入水櫃中所儲的水裏邊。這水用顏料着過色，光在水中的路徑，因此可給我們看見。水櫃的一壁，是用玻璃做的，所以我們可從水櫃外面，望見水櫃內部的種種情形。水櫃底的上面，平放着鏡子一塊，所以入水的光線，又被此鏡反射，再通過櫃中的水，冒出來射向空中而去。光線入水與出水的曲折情形，很容易觀察；而且我們還可以察知，假使光線入水時傾斜愈甚，那曲折的角度也愈大。我們又可以察知，光線被水



(圖四十) 此圖表示光線入水的路徑，比圖三十九所示的，更爲傾斜。

櫃底上臥着的鏡子反射後，其出水所循的路徑，與入水所循的路徑，是在對稱的地位。尤其是未入水以前，幾掠水面而過的光線，在出水的時候，也一樣靠近了水面而掠過。

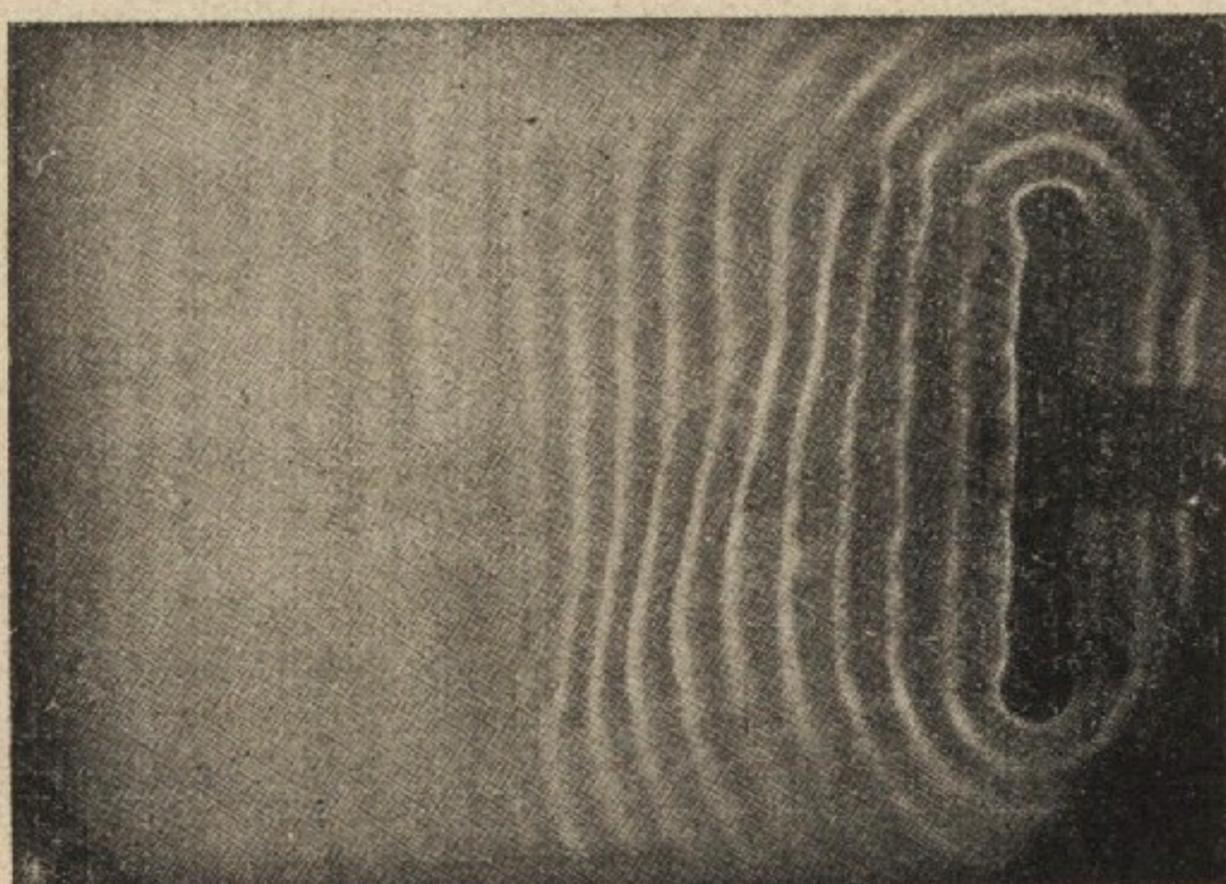
這一個實驗，證明了一個重要的特點，就是光線的路徑，可以逆行。假使我們取一面鏡子，放在光線的路徑中，正對着來時的方向，那麼這光線就循原路回去，所經各次的反射與折射，都按相反的次序，重行出現。此實驗又使我們對於光線入水時的曲折度，知道一些概況，並且使我們知道，光線入水的斜度愈增，曲折度也大大的增加。銅版圖八B所示的，便是證明這種折射效應的實驗。



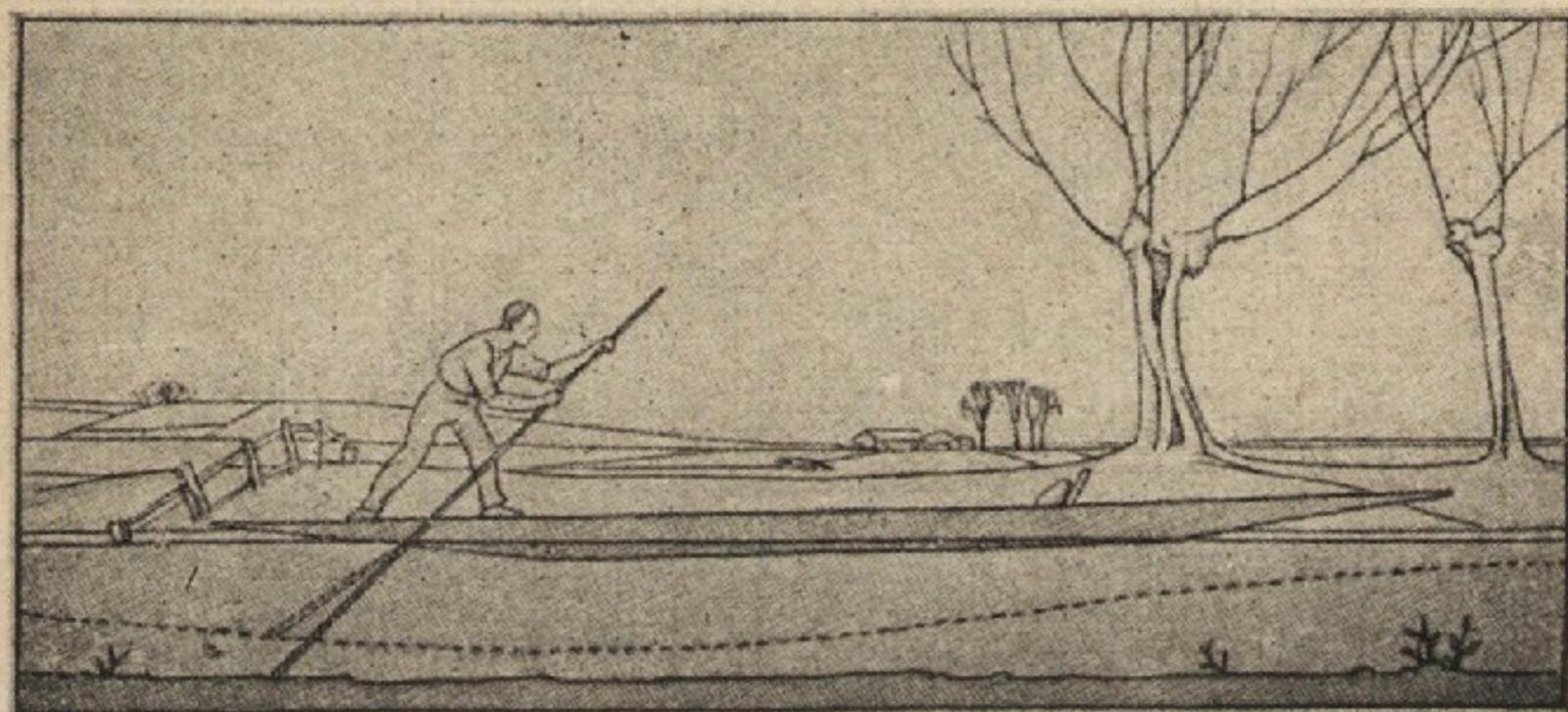
(圖四十一) 一塊長方形的玻璃板，臥於水櫃底上，激起水波，使波紋通過此板。整列的暫時變更，當波紋一過此波後，立刻恢復。光線穿過兩面平行的玻璃，其方向所以不變的緣故，由此可知。

透過玻璃窗而射入室內的光線，當其在玻璃內的時候，固然已從原道轉入新路，但是一出玻璃之後，卻仍恢復其原來的方向。所以玻璃外面的物體，看起來差不多並未受到影響。用波紋水櫃

銅版圖十



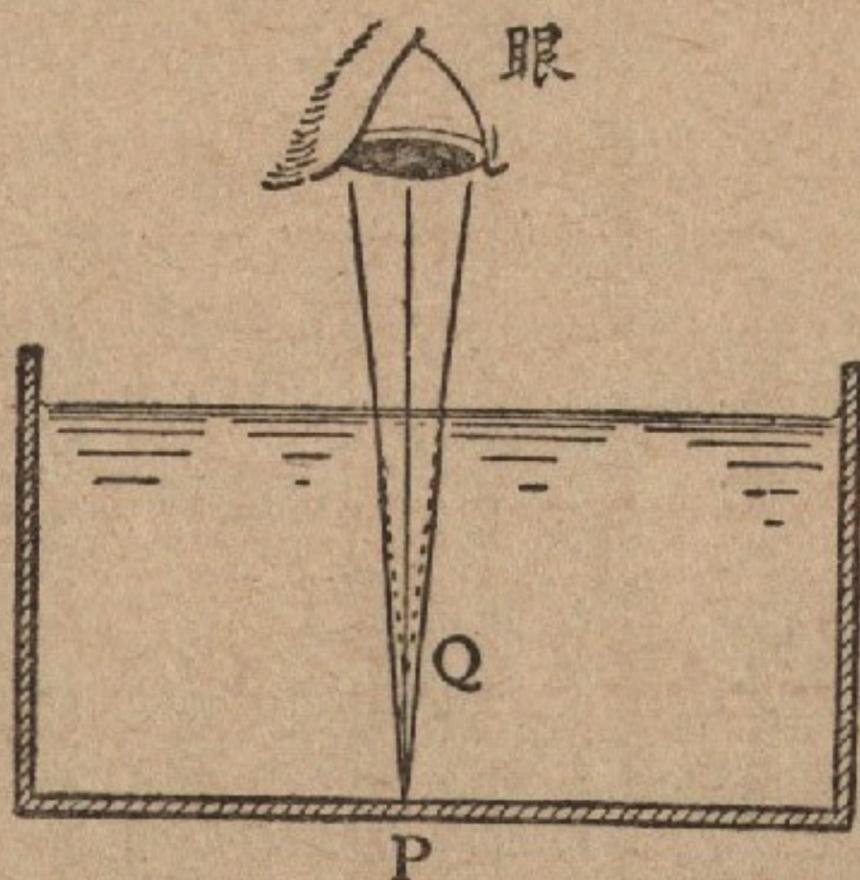
A. 波紋越過一塊長方形玻璃，玻璃置於水櫃底上；此圖表示波紋的行列，暫有變化(參閱第八五頁)。



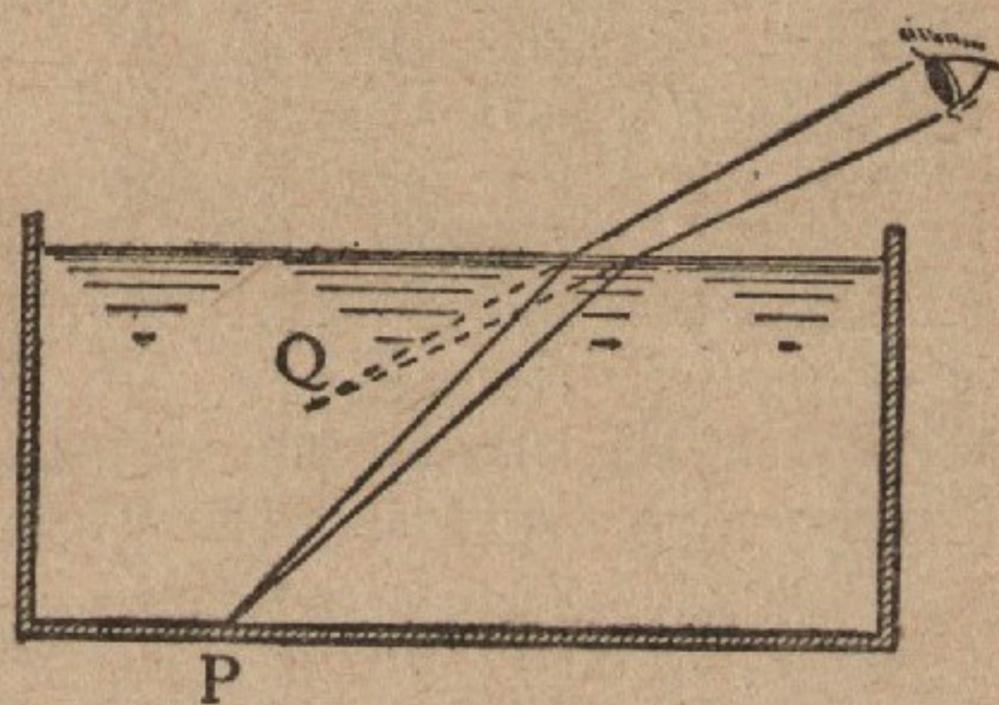
B. 船底下的虛線，表示撐船的人，在船上若俯視河中，河底似乎浮起的情形(參閱第八六頁)。

來做一項實驗，就可把此中的經過情形，表示得明明白白。取玻璃板一條，其兩邊互相平行者，放在水櫃的底上；仍照向例生出水波來。當水波正在經過淺水的時候，波前的形式，雖然暫時變更原狀，但是一過了淺水，立刻恢復從前的整列。銅版圖十A與圖四十一，所表示的就是這個效應。所以品質優良的玻璃窗，僅把窗外進來的光線，稍稍移過一邊，並不改變它們的方向；這是可以瞞過人的眼睛，不會給人察知的。然而玻璃的兩面，若不互相平行，那麼由此玻璃外望，所見的各物體，就似乎都變成畸形了；這是很普通的效應，用劣等的玻璃裝在窗上，就常常發生這種現象。

現在我們可以來解釋一種著名的效應了。當我們俯首下望水中，水清可以見底的時候，我們覺得水的深度，似乎比真正的深度淺一些。眼睛對於物體的距離，看着光線似乎從那一點發散，再估計這一點的地位，然後加以判斷的。現在水底的光線射出水面，既然發生曲折，眼睛當然要受欺騙了，如圖四十二與四十三所示的，都是眼睛受欺的實驗。當眼睛依鉛直的方向，下望水底時，所見的深度，是真正深度的四分之三。入目的光線愈斜，水的深度看起來就愈淺。是以我們望到蓄魚池的裏面時，看見池壁總好像是彎曲的，而池中的魚游來游去，也都現出奇形怪狀來。假使有人在淺



(圖四十二) 這長方形的輪廓，是水櫃的截面，水櫃底上有物體 P，眼睛正對着這物體，向下直望。因為折射的緣故。從 P 出來的光束，在離水時候就向外開張，射入眼中，眼睛以為它們好像從 Q 點射來。圖中的眼睛，不得不畫出了比例，以便表示光束的開張。Q 的深度，是水深的四分之三。

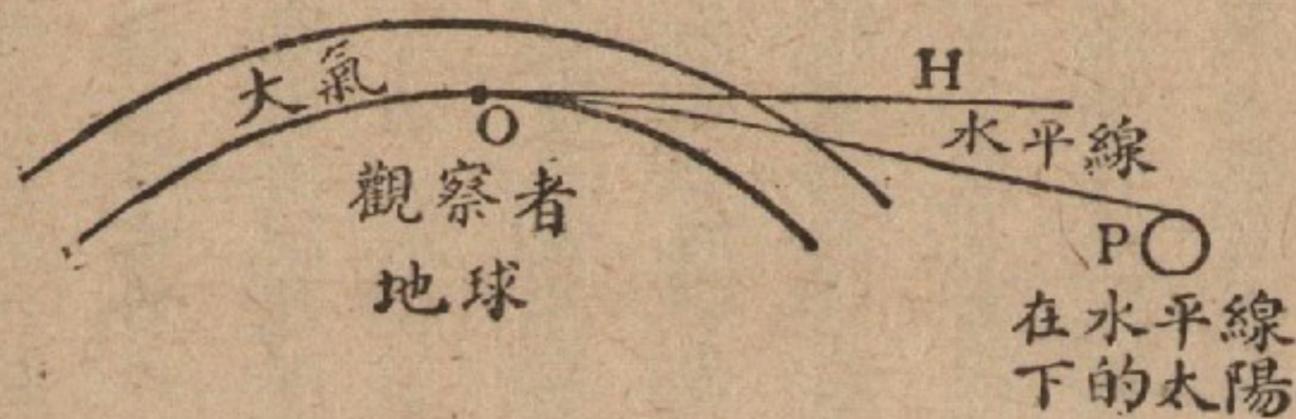


(圖四十三) 斜看水櫃的底，Q 更近於水面，而且不是一直在 P 的上方。

水中用篙撐船而行，船在水中，恰恰可以浮起，那麼此人總覺得船頭下面的水，似乎很淺很淺，淺得祇好把船在河底上擦過去。然而他的船撐到那地方，水又深起來了，船仍可以暢行無阻。又如取手杖一根，半插入水，那水底下的一段，似乎齊水面曲了起來，這也是因為浸在水中的每一點，看起來都好像昇高了的緣故，銅版圖十 B，可以說明這種效應。

太陽光線經大氣而被折射，對於貌似日落的時間，頗有影響。因為光在空氣裏面進行，比在毫無實質之物的空間裏面，要慢一些，所以太陽光線在尚未行抵地球以前，已被空氣彎轉，離開了它們的原來路徑。光線射於大氣表面，傾斜度最大的時候，方向的變化，達於極點；太陽到了水平線上，就有這極大的方向變化，發生出來。如圖四十四所示，在O處的觀察者，他的水平線雖然在OH的方向之內（OH是O處靜水表面的方向），但是由太陽視面上P點發來的光線，卻仍舊射到他的眼睛裏邊。是以P點雖然在水平線之下，仍舊可以看見。在幾何學上說來，太陽還沒有靠着大氣折光作用，而使我們看見之前，早已西落；依照幾何學，太陽視面的底部，一接觸水平線，這時候就算是日沒時間，由此可見折光的方向變化之大了。

在下一章裏面，我們要講到白光被折射的時候，分出它的各色成分來。無論如何，我們卻可以先聲明一句，即在觀察白光分成色光



(圖四十四) 觀察者向水平線遙望，收到了水平線下的太陽所發的光線，因為光線在通過大氣時，被大氣彎轉之故。

的時候，將見青光與綠光，受折射後的方向變化比黃光與紅光更大。因此，從西落的夕陽發來的最後光線，應當屬於前一種，除非受到其他情形的干涉，然而這種干涉，差不多常常受到。當空氣很清明，很安靜，而且很勻淨的時候，我們在朝日初昇之後，或夕陽方落之前，有時或能獲觀所謂「綠射線」，不過此光祇閃射數秒鐘，就沒有了。

光從此一氣體通入彼一氣體時，倘若兩氣體的密度不同，也要被它們彎過去：就是在同一氣體裏面進行，從這一部分到那一部分，倘若兩部分的密度，因為溫度或壓力等等的變化，而彼此互異時，亦然如此。在空地舉火，由火燄上方的空間，向外望出去，就看見各物體都在那兒顫動，這是因為熱空氣與冷空氣相混，成功不調勻的混合氣體，使光線向兩邊彎來彎去之故。又如蠟燭或燈的上方，是熱空氣流，假使有人隔着這熱氣流，望對方的物體，他也可以看見同一的效應。在熱帶地方，離地很近的空氣，因與熱的地面接觸而受熱，所以遠處風景的細微之處，永遠顫動不停。

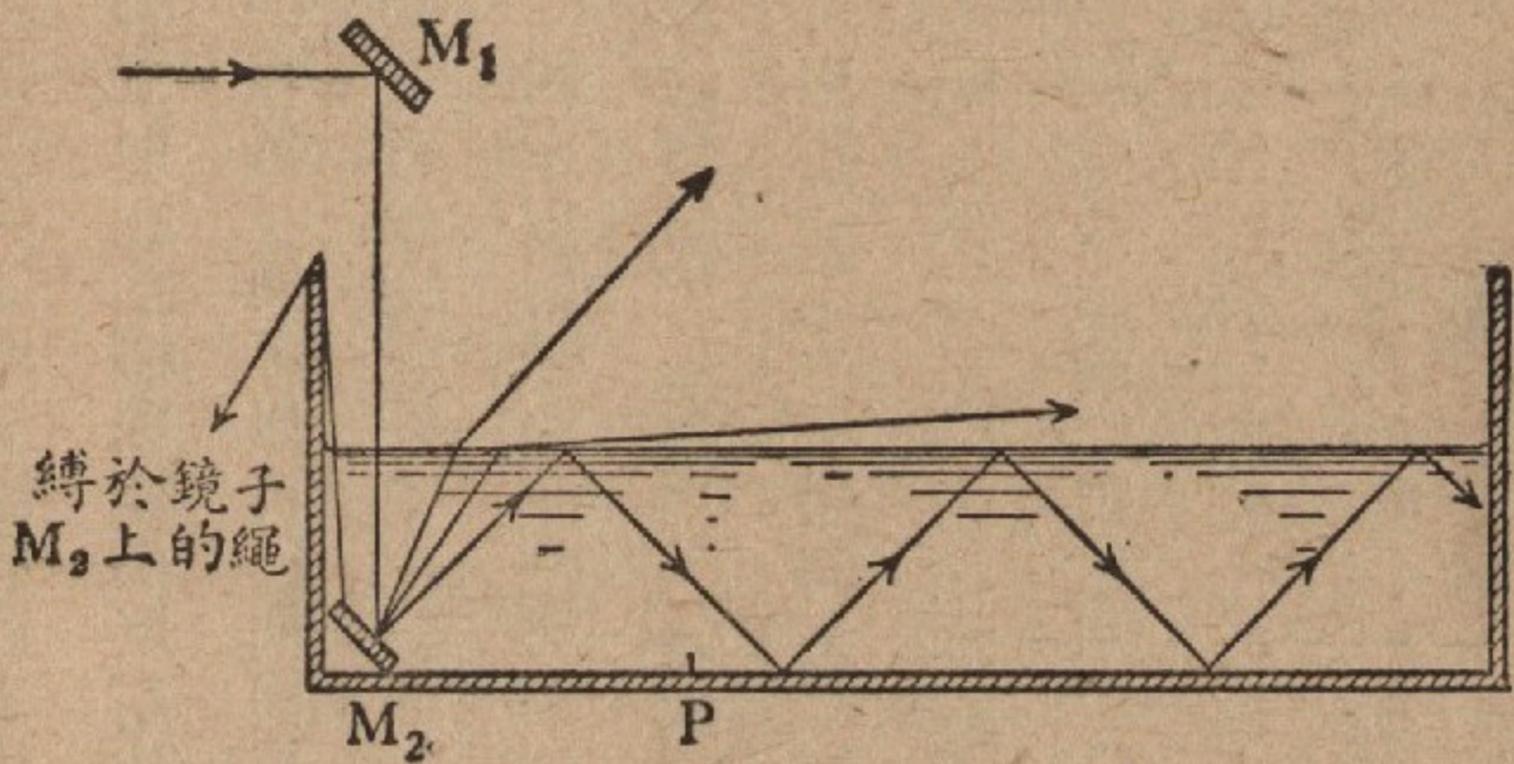
內全反射

有一種著名的現象，叫做「內全反射」，是許多奇特效應的原因。我們假使把前面圖四十所示的實驗，拿來再參考一下，就可以察得下面這件事實，即在水櫃底經過反射之後，恰能從水面冒出來的光線，其在水中傾斜於水面的角，是很大的一隻角。我們可以自己問問自己，一道光線從水底下照射到水面，其與水面斜交的角，假使再小一些，可有什麼現象發生。答復這句話的實驗，做起來並不費事，祇要把鏡子的布置，更改一下好了。如圖四十五所示的，便是這一種實驗。鏡子 M_1 使光束向下直射入水櫃中，照在第二面鏡子 M_2 上。鏡子 M_2 的傾斜度，是可以隨意改變的。我們使這第二面鏡子，從平放在水櫃底地位，逐漸向上傾斜，就可以使此鏡所反射的光線，從水底仰照於水面，逐漸向旁側偏斜。偏斜到一定角度，被反射的光線，剛剛能夠冒出水來，在水面上掠過，像我們已經看見過的一樣：過了這一個角度之後，被反射的光線就完全不能夠冒出水去，都被水面再反射下來。這次的反射，全無遺漏：如果這水面換上塗銀的鏡子，決沒有如此完全的反射作用，可以發生因此之故，就給這種現象，取了這樣的一個名稱。假使水櫃的長度，比水的深度長得多，那麼光線在水面與水櫃底鏡面的反射，可以連續往返數次。銅版圖十一A，就是證實這一種效應的照相。

要觀察內全反射的現象，有一個極簡單的方法。取羹匙一隻，插入盛滿清水的玻璃杯中，而從杯底仰望水面；若所選的角度適當，就可以看見羹匙的一部分，在水面底下被反射出來，光明燦爛，直使人大吃一驚。

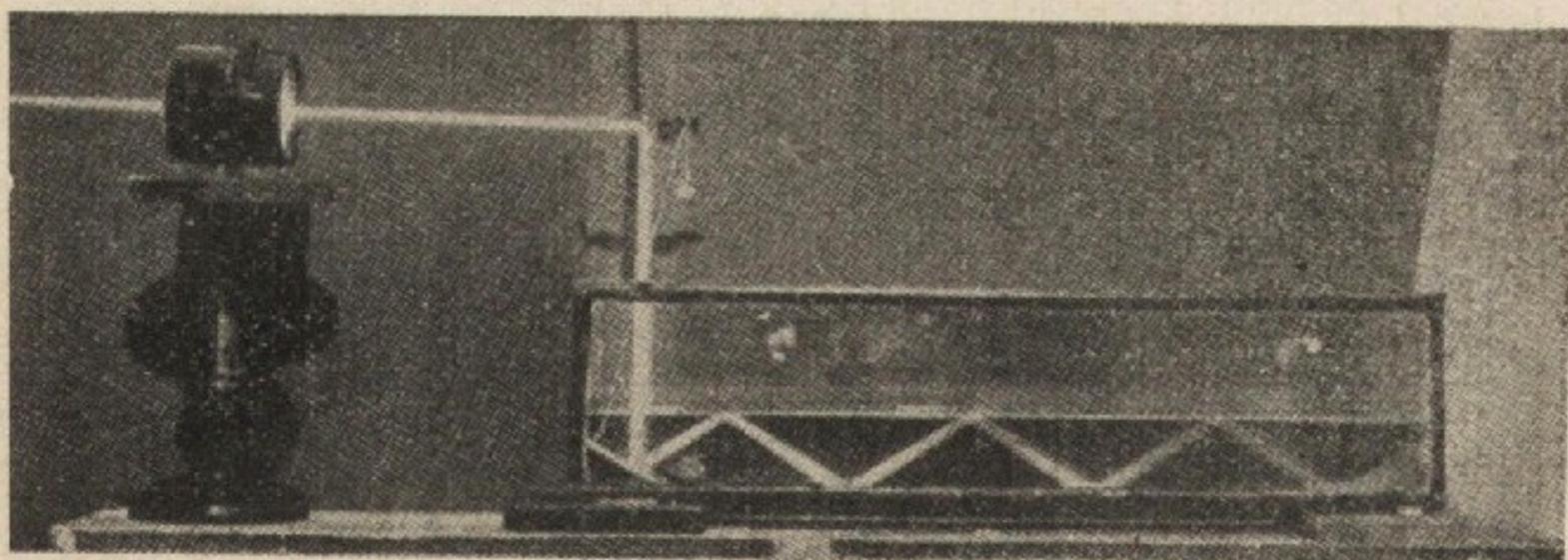
虹的生成，就包含內全反射的作用。從太陽發出來的光，照射到雨滴的頂上，在該處透入雨滴，而在雨滴內部的背面被反射。這被反射的光，又從雨滴的底部冒出來，在冒出來的時候，就分成各種顏色。（參閱第三章）

丁達爾曾發明一種實驗，以表示內全反射現象，甚為美觀。多年以前，他在皇家學院演講，就

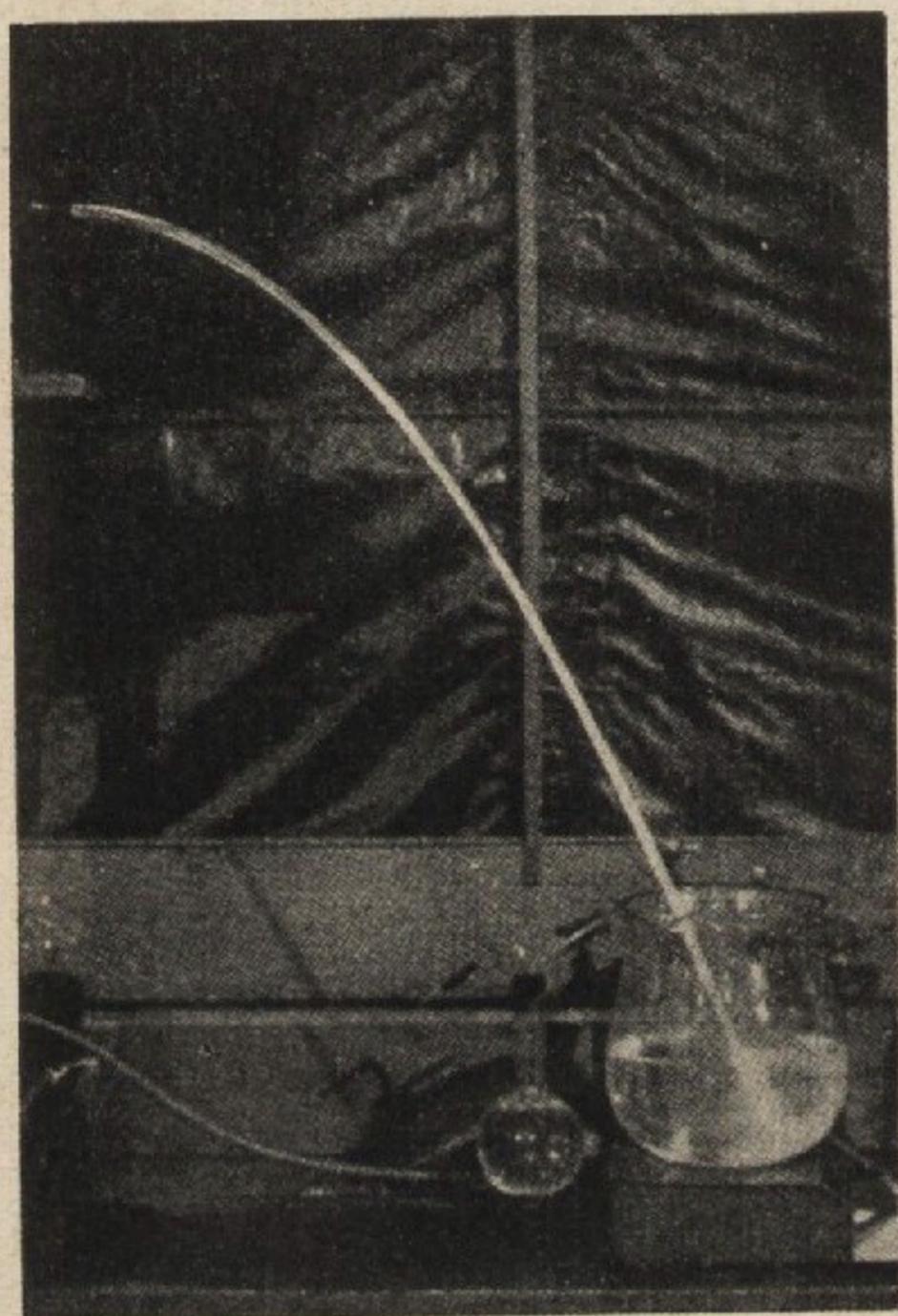


（圖四十五） 裝置好了，預備表示內全反射的水櫃剖面圖。從幻燈發出來的光線，射向鏡子 M_1 ，再被 M_1 反射入水，照在水底的鏡子 M_2 上。 M_2 縛有繩索一條，曳索可使 M_2 斜傾。 M_2 在第一位置，其所反射的光線，很容易冒出水面； M_2 在第二位置，反射光線恰能冒出水來，在水面上掠過； M_2 在第三位置，反射光線即在水的內部，被水面再反射下來。有一塊長的鏡子，臥於水櫃底壁。

銅版圖十一



A. 這一幅真正實驗的照相，表示在水面以下的幾次全反射。我們可以察見，最後透出外面的光線，是被折過的（圖四十五中的）。鏡子 M_2 ，比在銅版圖八 B 的照相裏面，更來得直一些（參閱第八九頁）。



B. 丁達爾表示內全反射的實驗。水注從水櫃落下來，光從水的出口處射入其中，被水帶了下來。光的來源，是水櫃外的電弧，而由櫃壁上正對出水口的透鏡，把光焦聚於水注之上。電弧與透鏡，本中圖並未攝入（參閱第九一頁）。

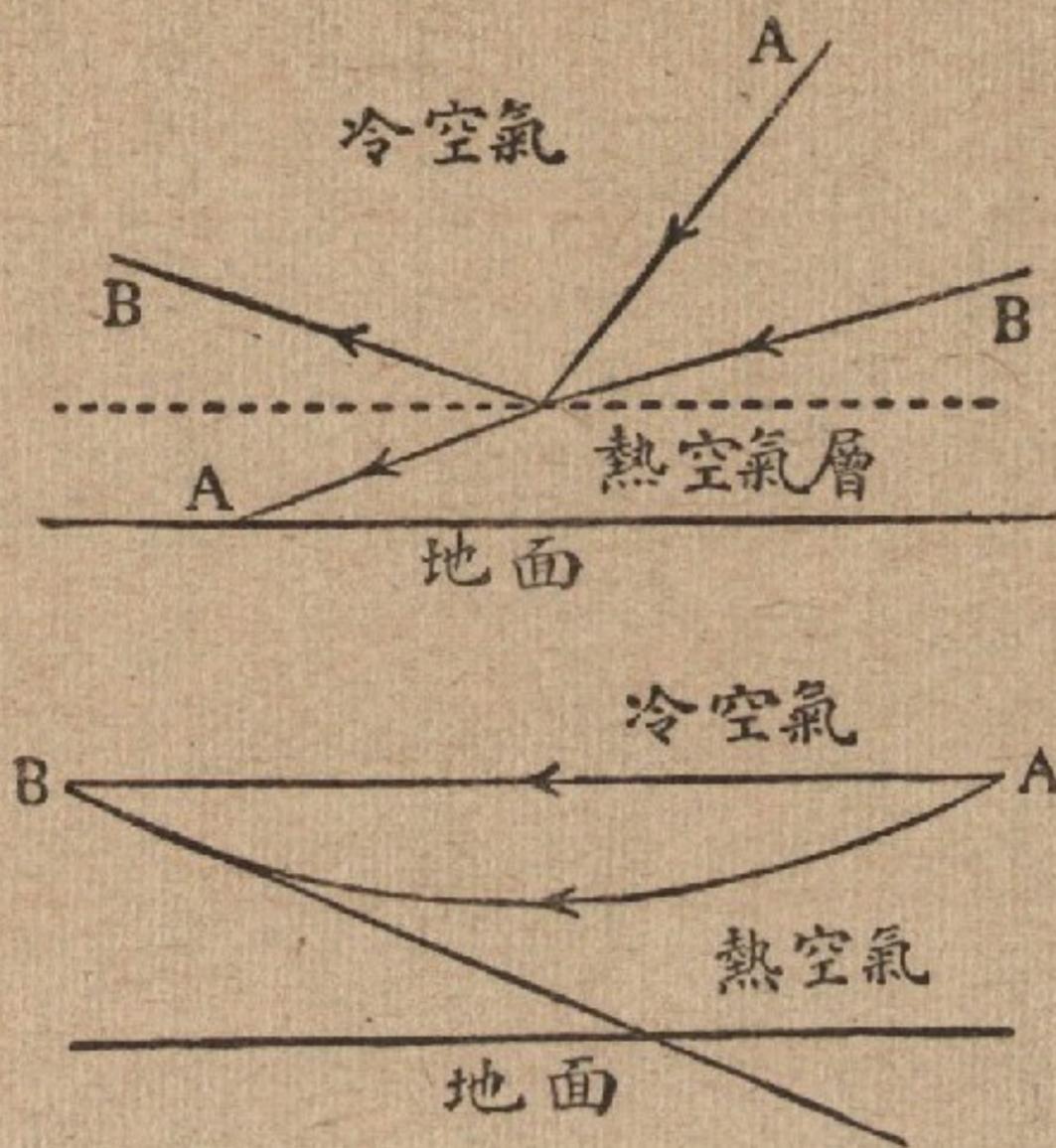
用這實驗來說明內全反射。銅版圖十一B，就是丁達爾的內全反射實驗。他用水櫃一隻，盛滿了水，在櫃底近旁的橫壁上，開一個噴口，水從這噴口注射出來，成功一條連續的水流。這水流始終不斷，彎彎的倒掛下來，注入一隻玻璃缸中，差不多絲毫沒有聲息。水櫃內部正對噴口的壁上，裝有透鏡一枚，從櫃外發來光柱一道，由透鏡集中於水流出口處的內部。這一道光在水流的外表面，接連被反射許多次，所以看起來宛如被這道水流帶到了下邊來。從水壺注水入盆的時候，往往可以看到同一的效應，不過不及這種特殊實驗所表示的那樣清楚罷了。在顯微鏡上，有一種相仿的裝置，可以用以把光送入鏡底，照耀所檢查的物體。這裝置是一條彎曲的玻璃棒，正與此處所講的水注，有同一功用。

當大地為太陽光線所照射，而受到強熱的時候，與地面接觸的空氣層，或許變得比稍高一些，的空氣，要熱一些。在此種情形之下，光在大氣裏面，就有遇到內全反射的機會。所謂海市蜃樓，其通常的原因，就是大氣中的內全反射。

為使說明簡單起見，我們先想像接近地面的熱空氣層，與上方的冷空氣層，其間有一道很清

楚的界限，如圖四十六所示。在這圖裏面，標明字母A的光線，經過界限之後，其進行的方向，較近於水平，因為在熱空氣內的光速度，較大於冷空氣內的光速度。標明字母B的光線，與冷空氣表面斜交的角度很小，所以完全在冷空氣內被反射回去，好像照在鏡子上一般。其實冷空氣層與熱空氣層的界限，並沒有圖中所示的那樣清楚：從熱空氣到冷空氣，其間有一重逐漸變冷的過渡階級。然而這一點對於結果，並無實際上的影響。光線的路徑，不過漸漸彎曲，如圖四十七所示，而不像圖四十六所示的那樣急折回去

罷了。這麼一來，從遠處物體射出的光線，非但可以沿着平常的直路，射入我們的眼睛，而且還可以沿着圖四十七所示的彎路，射入眼睛。眼睛所受遠處樹木或樹後天空射來的光線，宛如從地面發



(圖四十六與四十七) 當下方的空氣層，比上方空氣層熱一些的時候，光線即受反射，或內反射的作用，其情狀一如此二圖所示。

出的一般：此時當然引起一種感覺，以為在觀察者與樹木之間，有一片水在那裏，因為我們對於水，常憑它的反射能力，以查察其有無之故。炎暑之天，即使在我們所處的溫帶地方，往往可以看見這種效應。例如水門汀的行人道，被太陽光灼得很熱的時候，尤其是遠處的行人道，適與我們站立處所的地面，在同一水平面上的時候，眼睛往往看見遠遠的有一片青天，或顏色鮮明的衣服，倒映在那人行道上。

在無線電播音的時候，我們已經發見有一種奇特的現象，要解釋這種現象，所用的方法，與說明海市蜃樓，甚為相像。大氣的上方區域中，有若干空氣層，會把無線電波反射下來，使它們再回到地球上。不是如此的話，長途無線電通信，在實際上就不可能了，尤其是採用短波，譬如五十米短波的時候，更沒有可能性，因為電波循着地球的曲線前進，決不會有充分強度的。我們早已知道，這些電波與光波，其本性完全相同，所以用光波比喻電波，極為切合。我們所說的上方空氣層，含有許多帶電的分子與自由電子，這些分子與電子的在場，是太陽的輻射所致，尤其是波長短於光波的輻射所致。這些輻射把它們的能，費在分子的偏裂上面，奪去了其中若干分子的電子，這些電子最後

又自附於其他的分子，所以在這地方的大氣裏面，就兼有正負兩種電荷，還有電子。在分子偏裂的過程中，也有復合作用，連續發生不絕，所以這地方的大氣狀態，是這兩種過程的互相平衡。當太陽輻射很強的時候，它們所經過的大氣，其帶電程度即因此而被提高，在這提高帶電程度的過程中，輻射能即被大氣分子吸收，所以接近地面的空氣，永遠不會受到多大的影響。是以在較高的區域中，大氣的帶電，就足以對於廣播電波的進行，發生可以察見的效應了。此事的理由如下：電波從下層的空气，射入上層帶電的空氣時，就要受到反射或屈折的作用，此處的所謂屈折，其情形及意義，與圖三十九的實驗中，出水而入空氣的光線所受屈折的作用，彼此相同。這種效應，已在實驗方面加以觀察，而且可以根據光的電磁說，把它推算出來。就現在的目的而論，讀者承認這是事實，就够了。

圖四十五裏面的光線，當其在水底下仰射表面，而對於水面偏斜至充分程度的時候，就受到內反射的作用；無線電波亦然如此，在相仿的條件之下，即為高空大氣的帶電層所反射。假使帶電的程度，充分高強，那麼電波縱然依垂直的方向，仰射帶電層，也要被它反射下來。不過上層空氣的

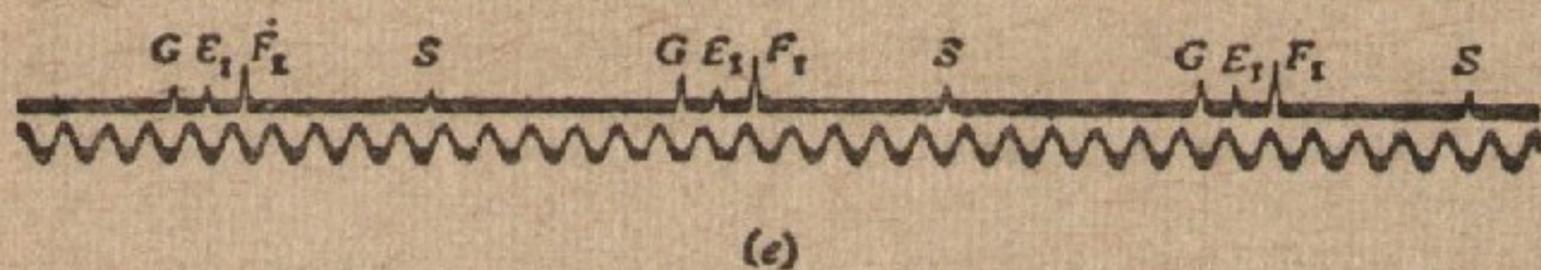
帶電，其程度若較低弱，那麼反射的發生，祇在偏斜的角度充分大的時候，這也是屢屢發現的事情，在晚間尤多。被反射的電波，都回到地面上來，而且可以在十分遙遠的地方，檢查到這些反射電波，然而在中間各處，卻收不到信號。同樣，在圖四十五的實驗裏面，被反射的光線，其初次與水櫃底接觸之點，到鏡子 M_2 的距離，也不能比圖中註有字母P的地方更近。

從不帶電的大氣，到含有分離電量的空氣層，其間並無彼此劃斷的界限；也無庸有這種界限。這一條通路，改變得愈緩，反射電波在被反射時所循的路徑，也愈近於曲線的形式，一如圖四十七所示。

在大氣裏面，對於無線電波發生這種反射作用的空氣層，至少有兩層：其中一層的高度，大概在一百公里以上，介於六十到七十英里之間。這一層大氣，叫做懇涅勒·赫維賽德（Kennelly-Heaviside）層，是久已聞名的了。此外的一層，其高度變化不等，而且極易變動，比了懇涅勒·赫維賽德層，高出地面好幾倍：這一層是亞普勒登（Appleton）教授在一九二七年所發見的。從倫敦東部的倫敦學院，發出來的信號，可在海濱皇仁學院收到，好像從天花板下來的回聲一般；而且每

發一次信號，所收到的回聲還不止一次。如圖四十八的記錄，就表示所收到的一組回聲，很有趣。圖中的波形線，是一個時間的標度，一千一百十五個完全的波，積起來是一秒鐘。標有字母G的隆起部分，表示在這時候，差不多在信號剛剛發出之後，收到取道於地的第一次信號。在E處的隆起部分，表示在這時候，收到來自最低大氣層的第一次回聲，在F處，表示信號又從較高的大氣層回來，S處的小回聲，從很遠的地方來，以致它的原因，還沒有知道。

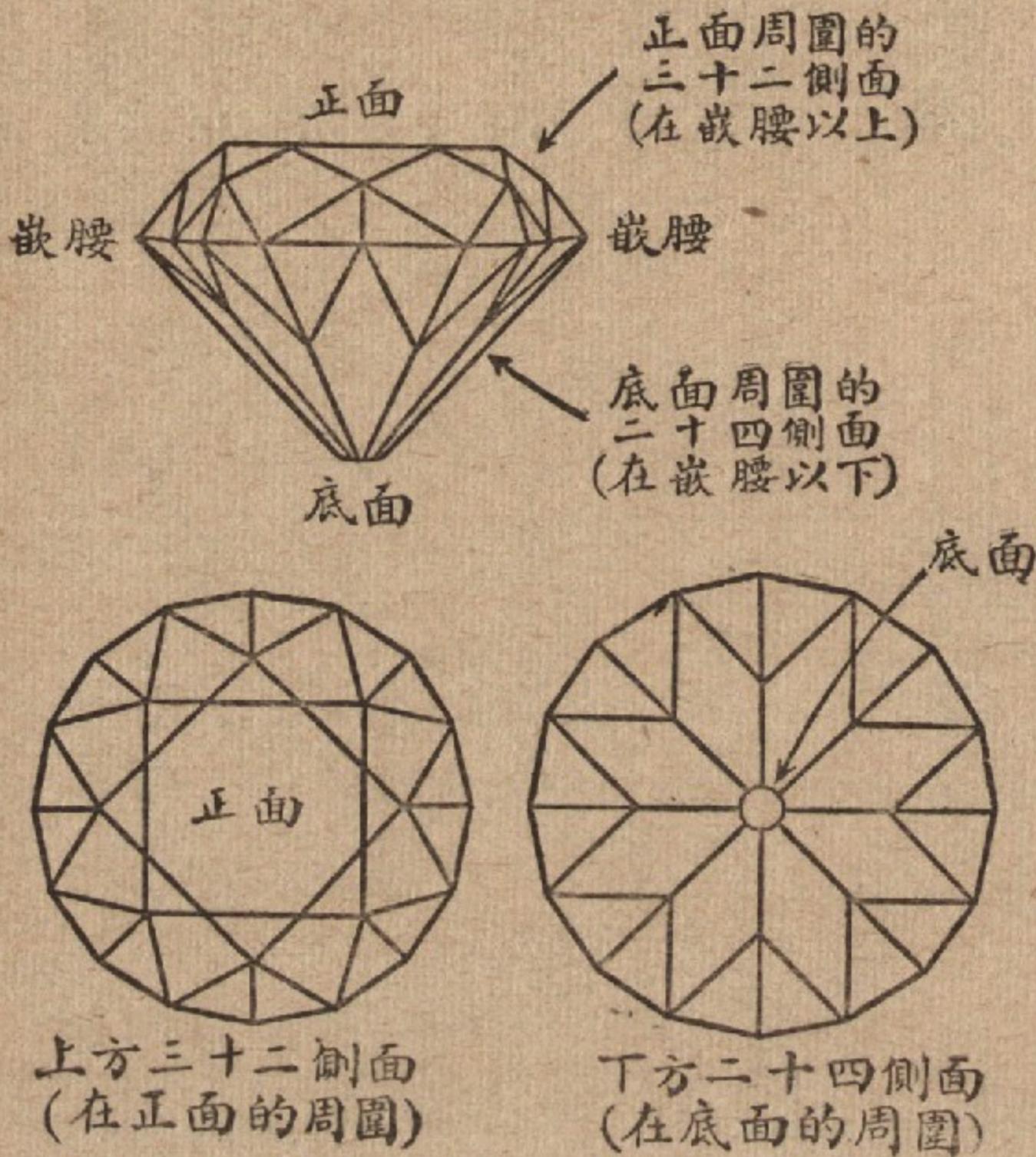
聲音也會在上方的大氣裏面，遇到那些可以反射它的氣層，假使聲波在進行時，其射入這些氣層的方向，有充分的偏斜度，那麼就要被它們反射回來了。這些氣層，或許與我們方纔正在討論的氣層，多少有些關係。大氣的帶電，是吸收了太陽的輻射所致，在吸收的時候，必定也要生出熱來，最近已有人推算到，上方的大氣裏面，必有溫度極高的氣層。在熱空氣裏面，聲的進行比在尋常空氣中快一些，這麼一來，聲音的射線，就要發生屈折，其情形與我們適纔正在



(圖四十八) 表示無線電波在不同的大氣層內，受到反射作用的記錄（亞普勒登教授製）。

討論的光效應，十分相類。強大的聲音，它的回聲非但可在聲源的近傍聽見，而且可在很遠的地方聽見，但是介於其間的地方卻又聽不見，就因為有這種效應的緣故。

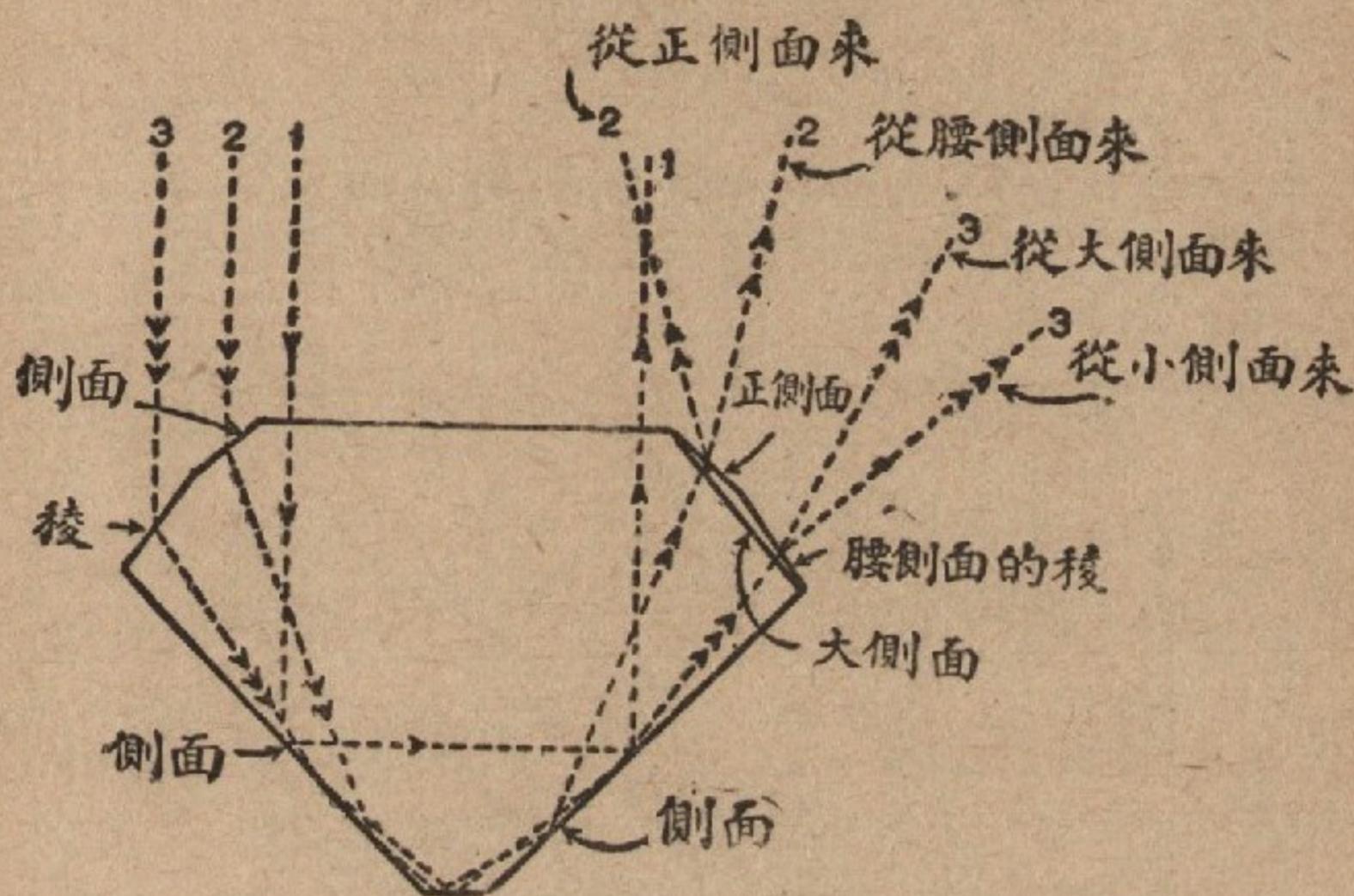
珠玉匠的琢磨寶石，尤其是琢磨金剛石，其所琢成的形式，可以提出來做一個很有趣味的例子，表示反射與折射的應用。據說一塊金剛石，要教它顯出寶石的特色來，差不多要截去全部質量的一半纔行，這一句話，聽見了總覺得有些奇



(圖四十九) 上面的一圖，表示琢成多面生光式的金剛石豎面；下面的二圖，表示嵌腰上下各側面的排列狀況。

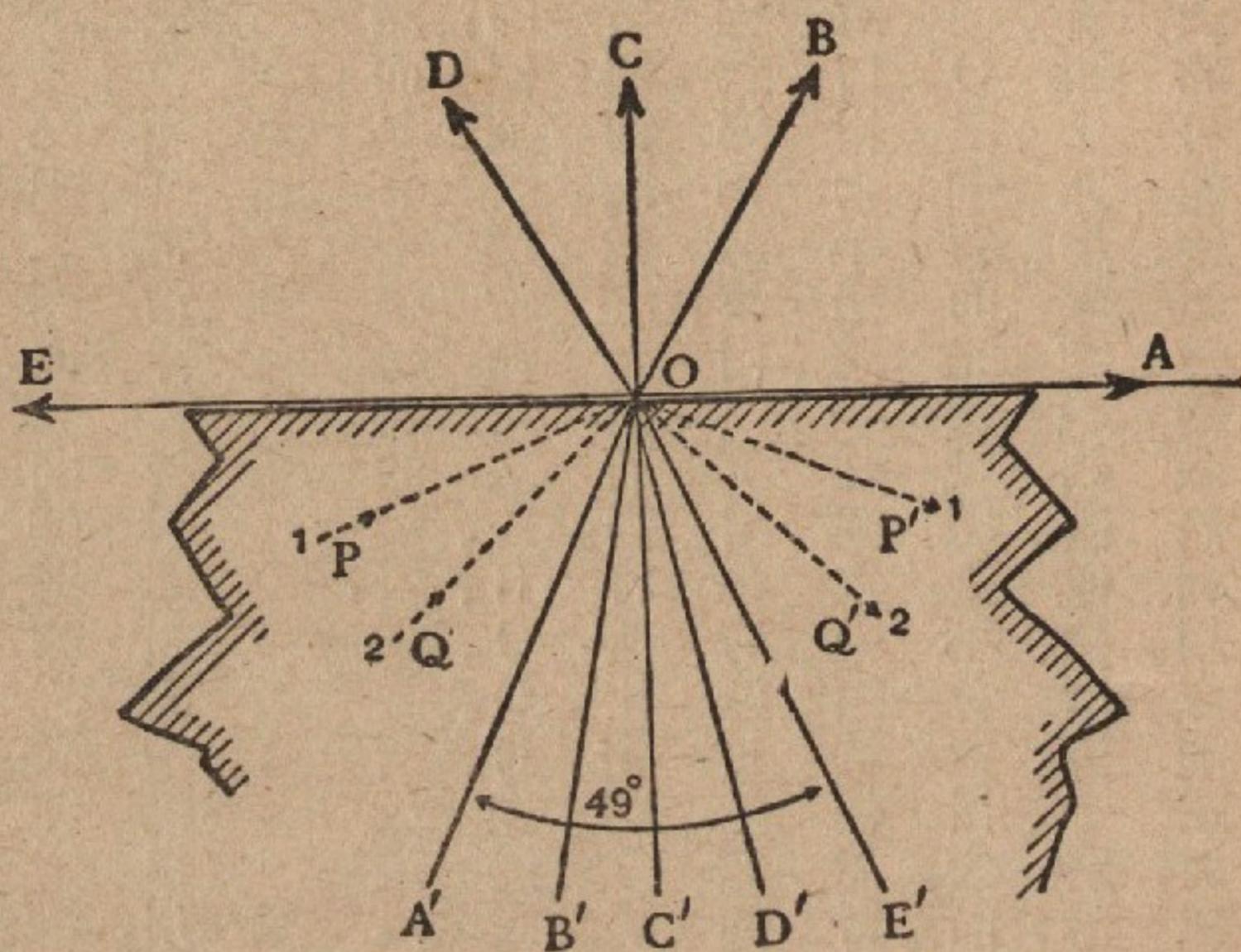
怪。不過一讀下文的解釋，也就可以恍然了。金剛石必須磨成一定的標準形狀，纔會放出最多的光彩來，這標準形狀，不止一種。最最優美的一種，叫做「多面生光式」，據說是卡迪南爾·馬柴林（Cardinal Mazarin）所發明的。圖四十九中所示的，便是琢成此式的金剛石豎面圖與橫面圖。該圖中下方兩簡圖，表示嵌腰上下各側面的分布狀況。

金剛石琢成這種形式的時候，不容任何光線從前面透過而到後面去。假使手執此金剛石，使正面向着光，使底面對



(圖五十) 此圖表示數條不同的路徑，光線遵循這些路徑，從多面生光式的金剛石前方，射入金剛石後，再受到折射，與「內全反射」的作用，直到仍由前方射出金剛石為止，永不能透過金剛石而到後方去。

着眼睛，那麼這塊金剛石看起來就是黑的。凡是射在這金剛石前面的光線，都被反射回去，再在前面出現。大概說起來，這些光線的回轉去，不會依完全相同的方向：從這邊的側面進去的光線，常從那一邊的側面出現，每一條光線都是如此。圖五十裏面，畫有數條路線，在金剛石前方的光，即依此路線進而復出。在這種情形之下，金剛石就顯出了它的閃光耀彩的本領，極爲人所珍視。不問這金剛石放在什麼地方，不問它對於眼睛處何位置，成何方向，差不多總有光線，從這寶石面上反射到眼睛裏去，這些光線，或來自室內各光源之一，或來

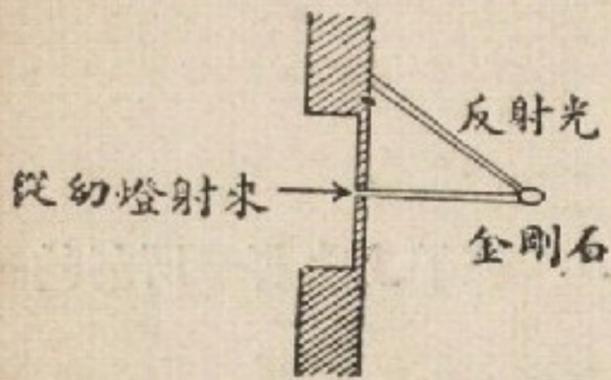


(圖五十一) 金剛石的折射率，很大很大。光線 $A' O A$ ，剛剛能够冒出去。像 $Q O Q'$ 這些光線，就在內部被反射了。這些路徑，都可從對方逆行。

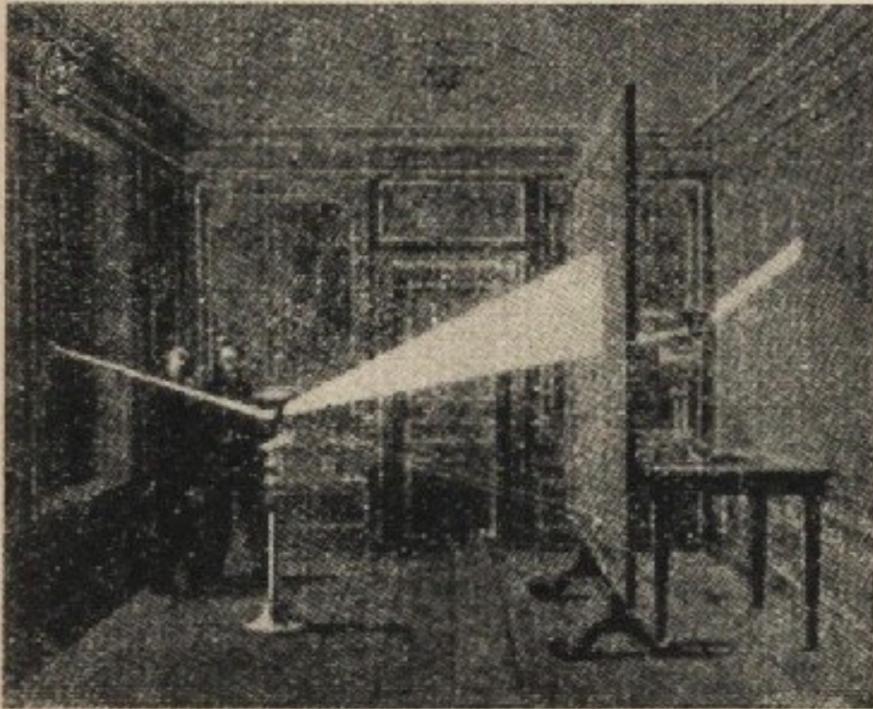
自窗外的天空。我們還可以說，它在那兒把意外的光源所發的光，時時反射不絕。它所能反射的光，當然不會超過它所接到的光，但是這些反射光又多又亮，而且閃爍變動，以致非常悅目。而且白光還要分成色光，看起來更添光彩。白光的分成色光，是常常伴着折射同起的一種作用，我們不久就可見到了。

金剛石的質地，不過是結晶形的碳，然而具有一種奇特的性質，就是對於透入它內部的光線，有極大的折射作用。圖五十一中所說明的，便是這種特性。光線A、B、C、D、E、在透入金剛石的時，就被金剛石屈折，而依A'、B'、C'、D'、與E'的方向前進。光在金剛石內行動，比在空氣裏面慢得多：兩處的光速度比，平均約為2.5，隨波長而變動。因為這個緣故，內全反射也有極可注意的特徵。沿A'O, B'O, ……E'O等線進行的光線，必沿OA, OB, ……等線冒出去。不過第一線與末一線，卻僅能冒出去而已，既出之後，就在表面外掠過。從1與2兩點出發，向O點進行的光線，就完全不會冒出去，而且必在內部沿OP'與OQ'二線被反射回來。A'O, E'O這一隻角，祇有四十九度。現在我們假使把圖五十所示的金剛石剖面，拿來考究一下，就知道這種內反射的很大的可能性，如何給我們利用。直透正面，與正面成直角，

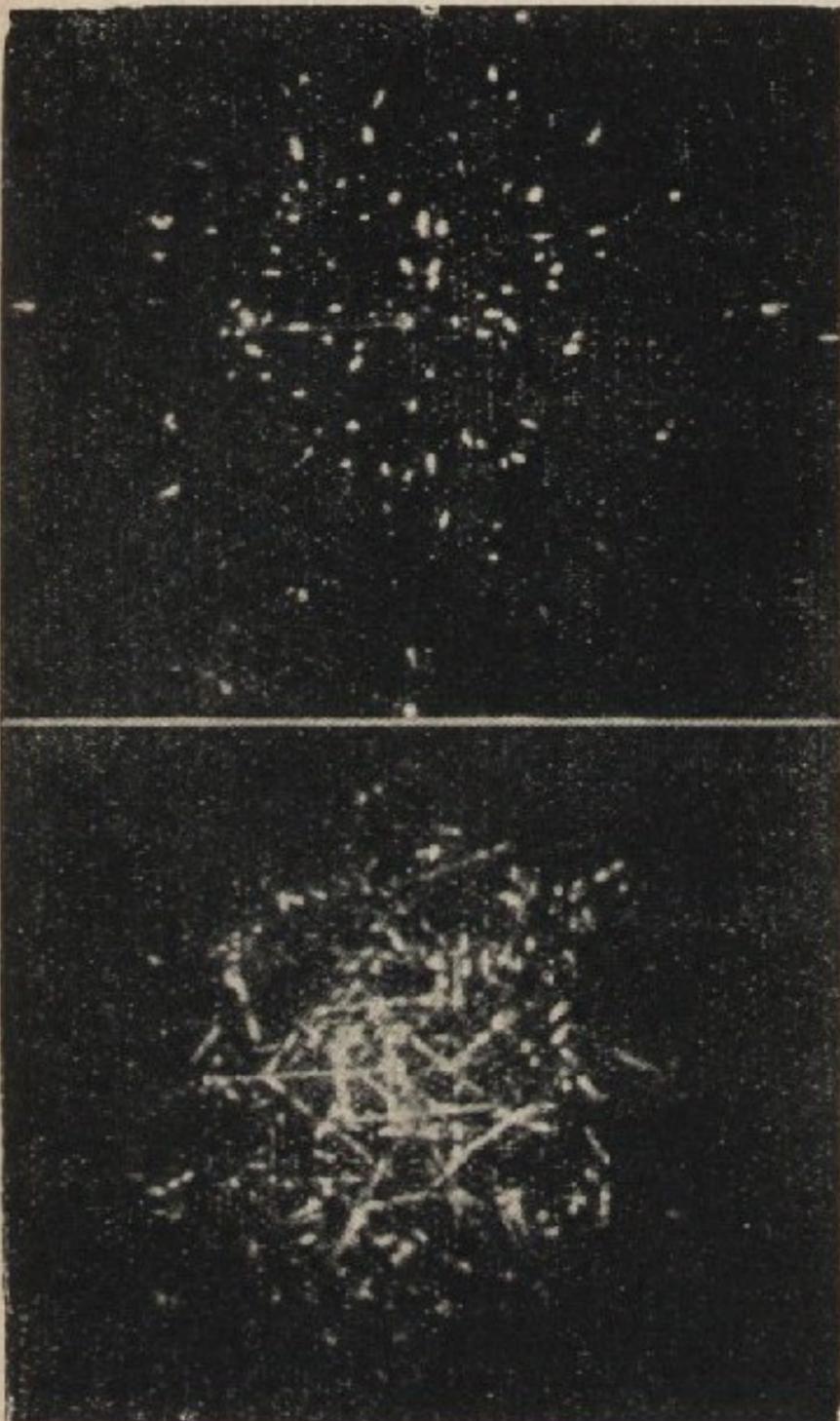
銅版圖十二



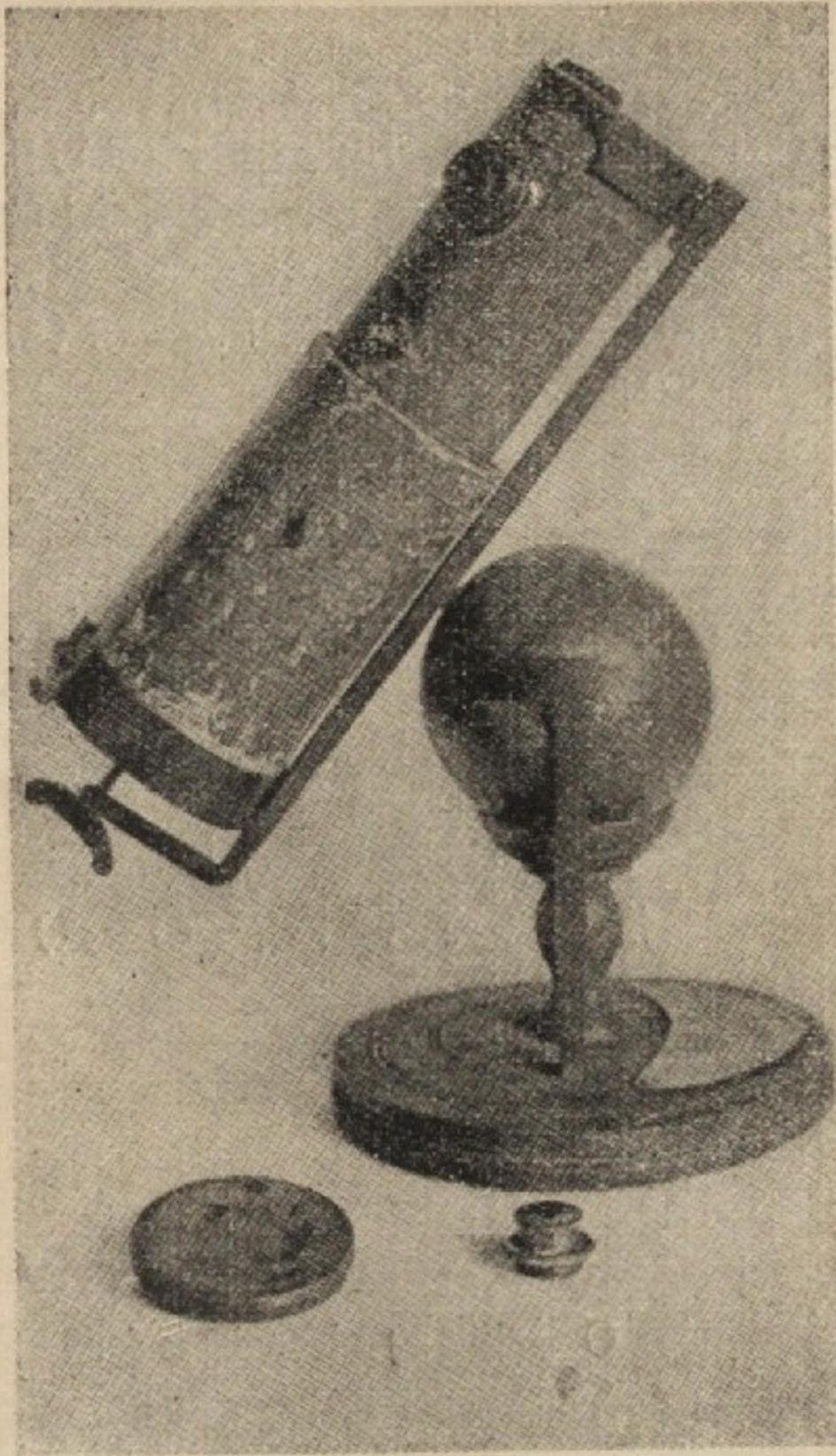
A. 從獨塊金剛石來反射。光由壁間小孔通入室內，如附圖所示。在照相的中央，也可以看見這小孔。細小的光束，它的可見部分，祇有從小孔起，到它射在金剛石上的一點為止，而且這光束就在這一點分成許多反射光束，各在壁上映出一個斑點來(參閱第一〇一頁)。



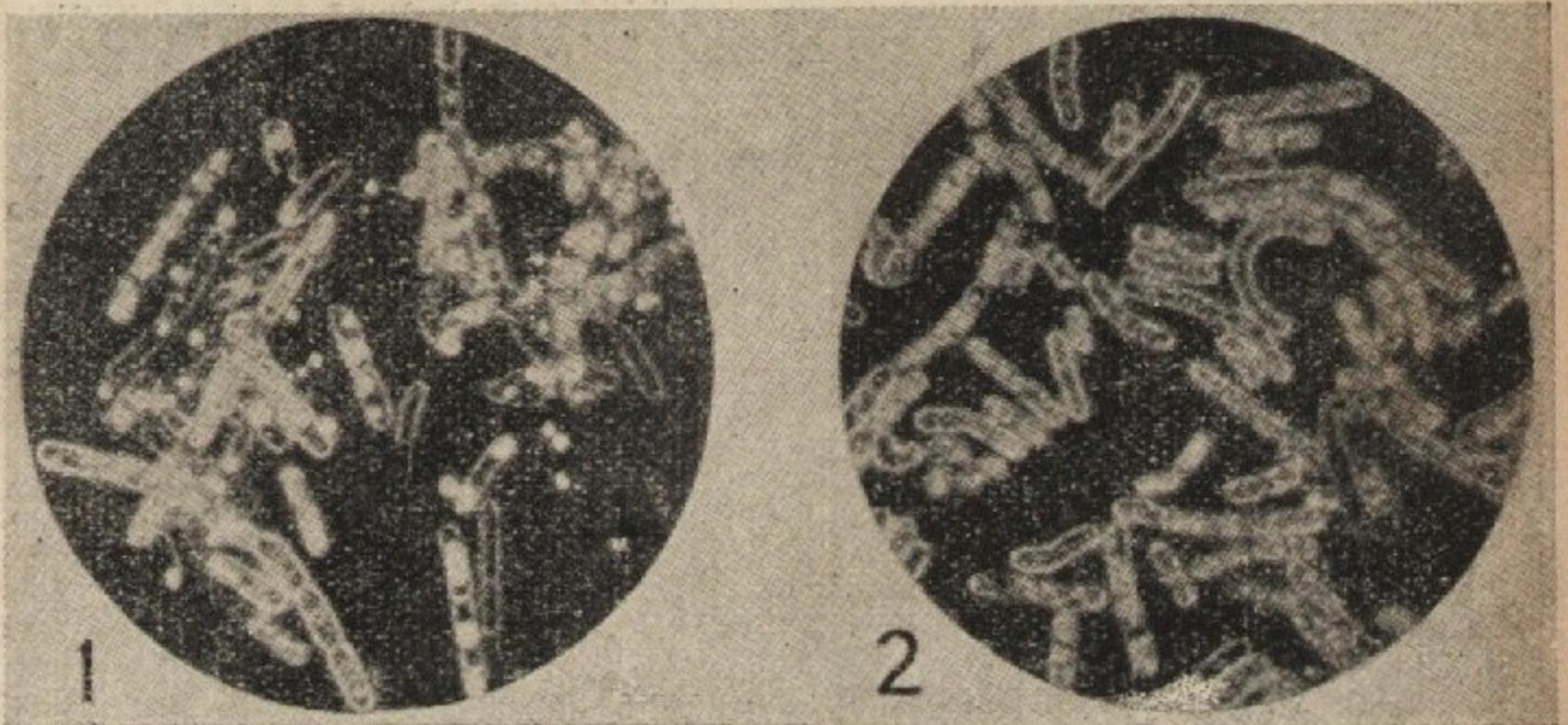
B. 這幅照相的攝取，其布置情形與前相同，不過金剛石換成風信子玉罷了(參閱第一〇一頁)。



C. 牛頓的實驗，採自古禮銘所著自然之力。太陽的光線，被第一稜鏡分成光譜：光譜的一部分，放它穿過屏上的隙縫，照在第二稜鏡上，但是沒有分光作用再發生(參閱第一四〇頁)。



A. 座子上有舊時所刻的一行文字如下：——牛頓爵士於一六七一年發明，並親自手製的第一座反射望遠鏡。蒙皇家學會主持人允許採用，高約十八英寸(參閱第一三一頁)。



B 皇家學會會員，巴那特(J. E. Barnard)君所攝，微菌的顯微照相(B Megatherium $\times 2000$)。

(一)在最好的環境下，可見之光中所攝。

(二)在紫外光中所攝(2743A)。

注(一)裏面現作白圓斑的物體，到(二)裏面即被分成更詳細的形狀(參閱第一三四頁)。

而射入此晶體的光線，在晶體內部遇到了嵌腰以下各側面之一時，就全被反射出去；這反射光線橫過內部，又遭同樣的反射，所以它從正面冒出來的方向，簡直就是進去時候的反對方向，假使光線透過嵌腰以上的一側面，仍依平行於此晶體軸線的方向，射入晶體內部，那麼經過內反射後，就從其他的上側面冒出來：即使原來的光線，與軸線斜交，仍舊可以在金剛石的前方出現。圖中表示出來的路徑，可以有一條或兩條：它們又可以代表光在每一條路徑上，或來或去的運動。

有一個教室內可做的實驗，表示此項效應，甚為美觀。在室外點一盞弧光燈，放一道很細的光束，射入室內來。取金剛石一枚，置於離光束入口處數呎的地方，使它的正面正對着這道光束。於是暗室內的壁上，全部灑滿了數百點光斑，都是從金剛石反射出來的，當金剛石轉動時候，這些光斑也隨着移動，其移動的路徑，錯綜複雜，光怪陸離，幻出心搖目奪的花樣來。（參閱銅版圖十二A。）其他的寶石，如楔石（sphenes）或風信子玉（zircon），也表示美麗的效應：但是它們比金剛石軟得多，所以沒有金剛石那樣珍貴，不能列入上等寶石類中。從風信子玉出來的反射，其照相如銅版圖十二B所示。

銅版圖十四

A. 這幅照相所示的光譜，與銅版圖十二 C，或一 B 所示的，其不同之點，在於隙縫換成小圓孔。重疊的像，現在是圓的，而且在中央一小部分，顏色差不多是白的，因為差不多所有的像，都在那裏重疊起來（參閱第一〇七頁）。

B. 這兩個重疊的圓斑，是從兩具幻燈分別映成的。從一具幻燈出來的光線，曾通過一塊紅玻璃，從另一幻燈出來的光線，曾通過一塊綠玻璃。紅斑與綠斑相疊的地方，現作黃色。這是實驗時所攝的彩色照相（參閱第一一八頁）。

D. 光譜的彩色照相。幻燈所發的光線，曾穿過一條細隙：這一個圖，實在是波長不同的各種色光，所映細隙的像連接而成（參閱第一一一頁）。

F. 一塊黃玻璃，祇把紫色光遮斷（參閱第一一二頁）。

C. 水瓶中投有各種螢光質的粉末，光從上面照下來。這些粉末正在水中緩緩下降，隨降隨溶解（參閱第二七二頁）。

E. 一塊紅玻璃，放在白光的通路之中，差不多把一切色光，全都遮斷，祇有接近光譜紅色一端的顏色除外，所以光譜的長度大大減少（參閱第一四五頁）。

G. 葉綠素的溶液，把光譜的一部分吸收去，尤其是紅色極端的一部分，吸收殆盡。這是交替光譜的彩色照相（參閱第一四五頁）。

H. 瓶中液體內，含有懸浮細質點，從幻燈發出來的光，通過此液體，它的青色即被奪去一部分。餘下來的色光，合成紅色圓斑，現於屏上，好像落日一般（參閱第一八三頁）。

J. 中央的一塊紫斑，在我們的眼睛看起來，似乎色彩並不均勻。在靠近紅斑的一邊，看起來好像是青紫色，在靠近青斑的一邊，看起來好像是紅紫色（參閱第一二五頁）。

四十圖說

迴圖與，帶光由示視時類圖影 .A
之同不其，由示視 B 一短，C 二十圖
，繪由疊重。凡圓小如繪繪刻於亦，據
隨，長將小一央中亦且而，由圓景亦與
由有視之不差為因，由白景之不差由
小○一兼閱參)來其疊重裏亦亦精，繪
(頁

辭答亦對中聯水 .D
土發光，末微由質光變
五末微些畫。來不烈面
判圖，判不懸懸中水亦
二十二兼閱參) 報審圖
(頁

具兩發景，斑圓由疊重圖兩畫 .B
由來出畫以具一發。由如如以長發以
畫以一長發，繪如珠與一畫畫會，繪光
斑珠。繪如珠與一畫畫會，繪光由來出
景畫。由黃中與，式由由疊時斑絲與
一一兼閱參) 時類由深由深視和繪實
(頁八

由光白亦對，繪如珠與一 .E
全，光由由一併之不差，中之視圖
繪一由珠帶光亦對亦辨，繪畫精
大與景由帶光以視，長刻由隨由
(頁正四一兼閱參) 少越大

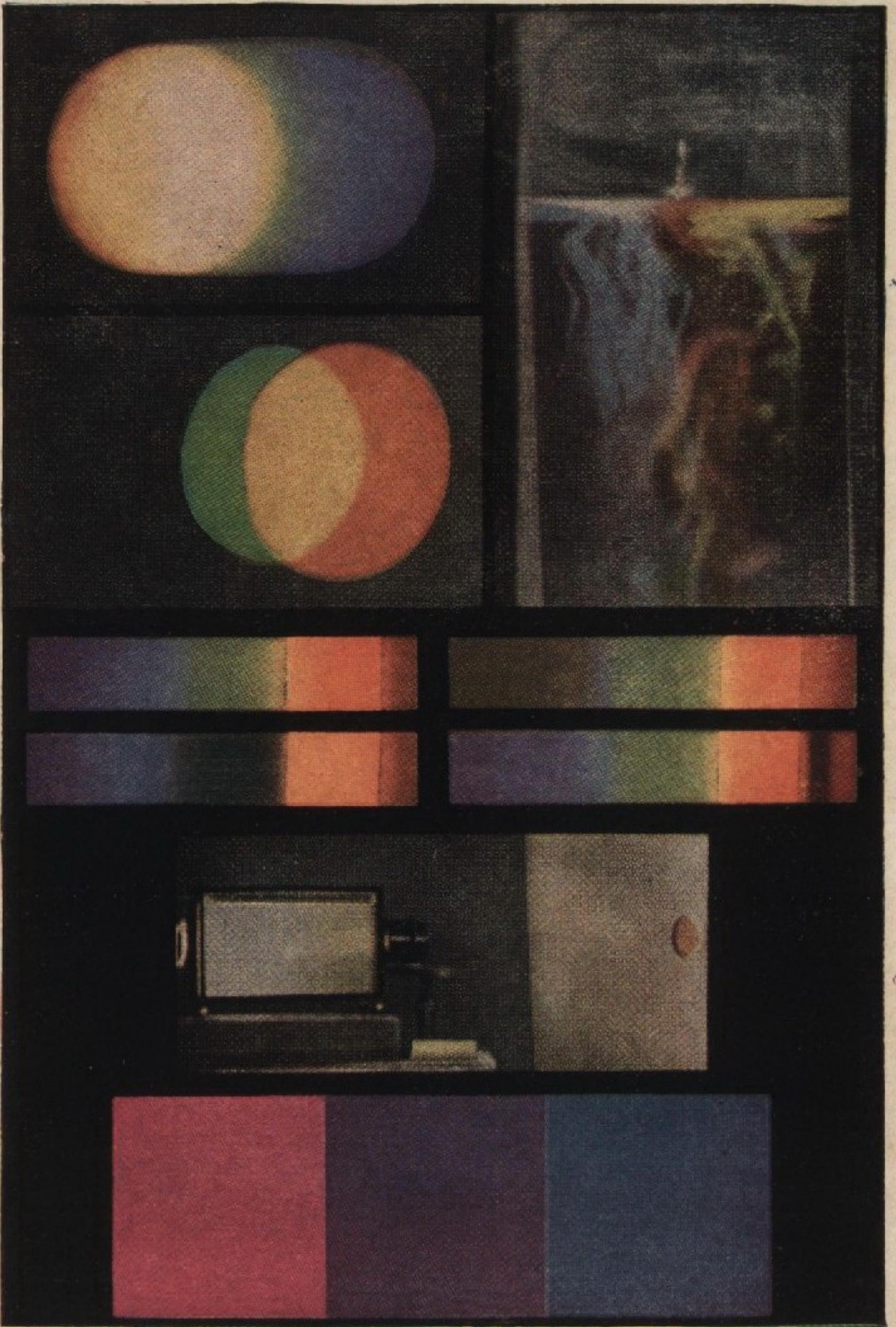
視畫以。時類由深由帶光 .D
一畫：刻繪繪一畫畫會，繪光由發
由辭答由同不長此景亦實，圖繪
閱參) 如而對畫繪由刻繪與視，光
(頁一一一兼

由帶光時，繪如珠與一 .G
繪由由珠景其次，去由由長帶一
光替交景畫。繪如珠與，長帶一由
(頁正四一兼閱參) 時類由深由帶

光由紫時辨，繪如黃與一 .F
(頁二一一兼閱參) 繪畫

畫以發，據質時管懸亦含，內帶新中聯 .H
一去筆時鳴由青由守，繪新由畫畫，光由來出畫
，土氣於與，斑圓由珠與合，光由由來不繪。長將
(頁三八一兼閱參) 繪一日幕繪預

由平則，來其香翻則由則拜亦，斑紫與一由央中 .I
紫青景繪預來其香，畫一由斑珠與畫亦。已之不並深
兼閱參) 由紫珠景繪預來其香，畫一由斑青與畫亦，由
(頁正二一



第二章 色

彩色光譜

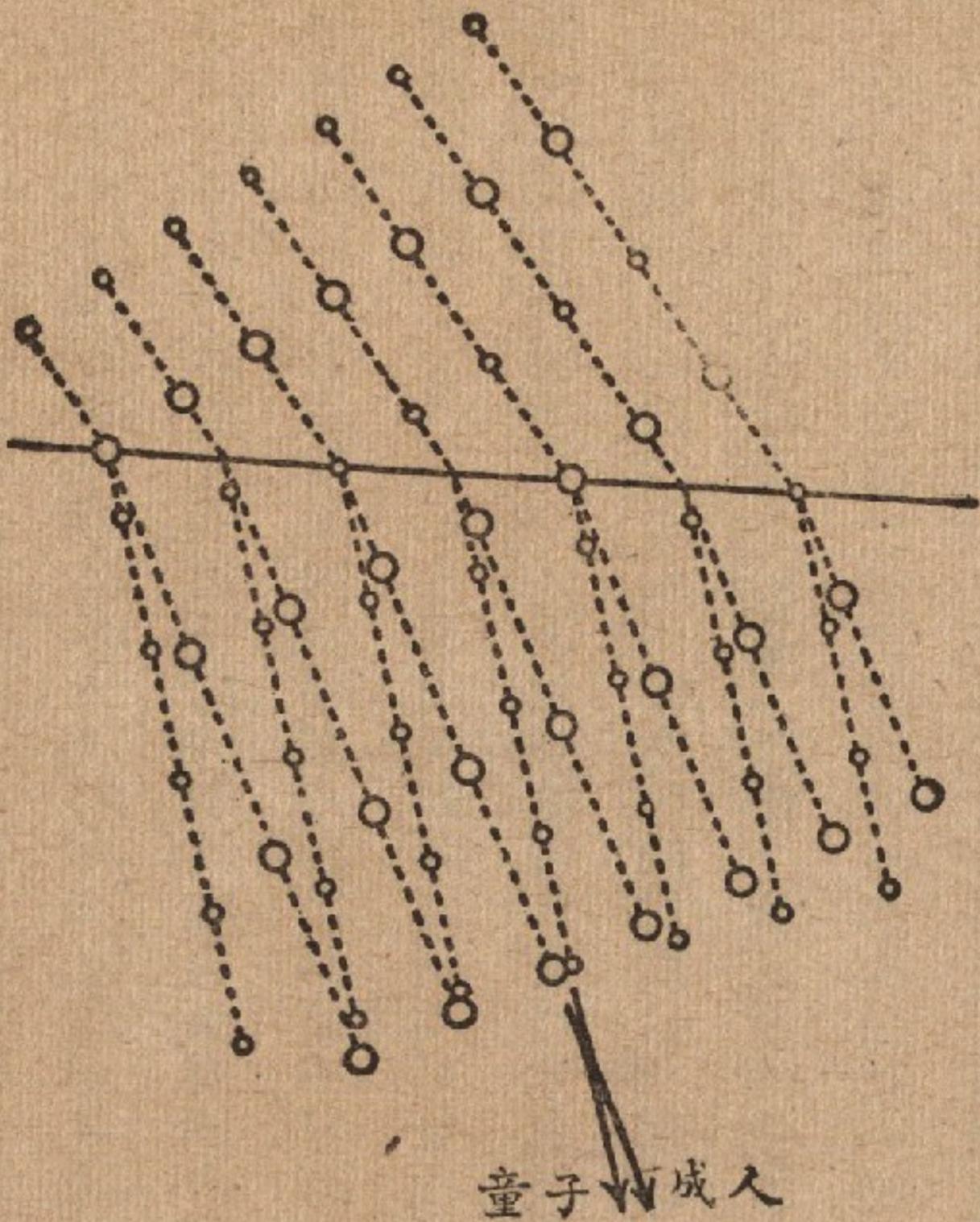
光有一種品質，我們叫它做色，我們常自己發問——色所倚靠的，是光的機構所具何種特徵？假使把光看做一系列之波，在我們叫它做以太的介質內進行，那麼這個問題的答案，馬上可以寫出來。色所倚靠的，是光的波長，這就是說，倚靠任何一波的峯，與其鄰波的峯相隔的距離。這一句很簡單的話，它的證明，現在最好先擱一擱，不過這一件事實記在心裏面，不要忘掉，卻是很便利很有益處的。

從任何光源出來的光，大概都可以分析為一串的成分，這些成分，就各自引起色的感覺。各成分彼此不能顯然劃分，只是深淡漸漸變化，幾乎融成一片。最簡單的分析方法，有賴於稜鏡的利用。

牛頓就會用這方法，研究到一大串的實驗，這些實驗立下了物理光學的基礎，成就了他對於科學的最大貢獻之一。他的布置，如銅版圖十二C與一B所示。在此圖中，見有太陽光束一道，穿過光開關上的小孔，射入一間暗室之內，照在一枚稜鏡上面。太陽光從稜鏡冒出來的時候，已完全被分析了：這道光束拉成了一條色帶，叫做光譜。光譜的紅色一端，是透過稜鏡，屈折最小的光線所造成，其紫色一端，是透過稜鏡，屈折最大的光線所造成。其他各色，都排列在這兩個界限之間；雖然依照色的天然定義，可在這一條光譜帶裏面，找出紅、橙、黃、綠諸色，以及濃淡各級不同的青色與紫色來，但是彼此間都沒有清清楚楚的界線。銅版圖十四D所示的，便是光譜的彩色照相。

我們又要預先說一句話了。我們所見光譜裏面的各色光波，以紅波為最長；在光譜那一端的，波長最短。我們早已用正在進行的隊伍，比喻過光的折射。這一隊人從容易行走的地面，步入崎嶇不平的地面，其陣線若與後者斜交，那麼各隊伍就有偏轉的傾向，其陣線與兩地的交界，更近於平行。正在進行的光波，由一介質斜行而入另一介質，也要改變它們的方向，其情形正與這隊伍相同，而且所偏的方向也相同。現在我們可以把這比喻，推廣一下。假使這正在進行的隊伍，是由童子組

織成功的，並不是成人所排列的，那麼陣線的偏轉更大，因為他們的腳較短，當他們走進這塊高低



(圖五十二) 在這簡圖的上半截，童子與成人相間排列，正在光滑的地面上，向前進行，各守隊伍不亂，彼此的距離也不變。圖中大圈代表成人，小圈代表童子。下半截代表粗糙的地面，童子與成人走到此處，都向左偏轉，而各排童子比各排成人，偏得更左一些。這個圖因為要做比喻的緣故，所以假定各排都竭力保持其隊伍不亂；並且假定各排不會互相衝入別排的陣線。各排間的距離，並「不」代表波長。

不平的地面時，所受的阻礙較大之故。假使這隊伍中既有成人，又有童子，相間排列，如圖五十二所

示一般，那麼成人必將與童子分離：童子的陣線，比成人的陣線更爲偏轉，非但落後，而且在實際上依照不同的方向進行。稜鏡使長短各異的光波，互相分開，情形正與這童子成人的隊伍相同：而且這一個比喻，還可使我們記得，短波的偏向，大於長波。

一切長短不同的光波，或顏色不同的光波，在自由空間內，都依同一速率進行。如果不是這樣的話，一粒星隱在別的天體後面，例如隱在月亮後面而不見時，就會顯出顏色來。假使青光行得最慢，這粒隱藏的星就呈青色：因而在再出現的時候，就要呈紅色了。光在透明的介質內，比在空間裏面行得慢一些，而且大概說起來，短波比長波慢，即青波比紅波慢。

彩色銅版圖一B的照相，表示牛頓實驗的推廣。這推廣的實驗，是讓光譜的一小部分，通過屏上的小孔，再照在第二枚稜鏡上。於是可見第一枚稜鏡的分析工作，是已經做完了：挑選出來一部分的光束，並不被稜鏡展成第二組光譜，好像原來的光束一樣，而且也沒有新的顏色出現。屏上兩次所現的光痕，的確稍微放大了一些，因爲光所經過的兩條狹縫，多少必有一定的寬度，這寬度就引起各色光的互相重疊。所以從第二條隙縫中通過，而由光譜中選出來的波長或顏色，就給第二

枚稜鏡展開了一些。隙縫愈狹，其選擇性愈高，那麼這種效應就愈微弱。反過來說，假使把第一條隙縫張開，那麼屏上所現各色光斑，互相重疊的很多，以至於在中央部分，一切顏色都疊合在一起，又變成白色，如銅版圖十四所示了。

由這幾個實驗，可知由稜鏡的折射作用，以實行分析，立即可以達到完全的地步。其實不獨稜鏡如此，凡是利用光速度隨波長而異的性質，對於白光行分析之術，所得的結果，莫不如此。在眼睛看來，這是顏色的分離；然而可以說它是長短光波的分離；我們不久就要知道，第二種說法，較爲妥善。

光的品質

現在要講到極重要的一點了。當稜鏡的分析工作，已見成效的時候，我們就覺得眼睛可以查察的分離作用，是不能夠再使之發生了。光的可見品質，已被我們窮究到極點。光是有速度的；在自由空間內，一切波長的速度均相同；不在自由空間內，光速度隨波長而變，又隨它所通過的介質所

具的本性而變；折射作用與光譜分析，就從速度的變化而來。光顯然還有強度；又有波長。僅就視覺而論，光的品質已盡在於此了。其他還有一種特性，通稱爲偏極度，這種特性，有賴於各波單獨運動的方向，其間的關係，卻甚簡單。我們知道海裏的波，是上下起伏的；但是就光而論，卻沒有這種獨一無二的方向，波的運動，既可以或左或右，也可以一上一下，更可以在上下左右之間，依任何方向忽來忽去。這種效應，到後來適當的地方，再提出來講，現在不過先列一席，使光的品質表中，沒有虛位罷了：我們的眼睛，是看不見它的。

所以僅就眼睛所能見及者而論，光的強度與波長，一有定義之後，光線的本性即已臚列無餘。假使光線的組織很複雜，是波長不同的光線混合而成，那麼更須說出各成分的強度來；但是舍此以外，也沒有別的事情了。我們對於顏色的感覺，的確是千變萬化，層出不窮，但是這許多的感覺，並非光的本身變化其品質所致，卻由眼睛與腦筋變化其反應而來。前者與後者，是不可不加以區別的。

我們自己要想像光，就想像它是一種波動，這種方法，我們覺得有很大的益處，至少在以前是如此。光的主要品質，恰恰是波動所宜表示的特性。既有這種情形，我們天然要自己問問自己，我們對於其他各波的行動，例如水波的行動，所具的各種經驗，是否暗示有幾種效應，應當在光這方面，找得到同等的效應，不出我們的意料之外。

須知海面上的波，其極顯明的特性，就是波長的變化甚大，這就是說，相連各波之峯，其間的距離，或遠或近，相差甚大。在極遠的一方面說，有大洋中的巨浪如山，在極近的一方面說，有微風所拂起的漣漪若繡。當我們從這一個觀點來考究光的時候，我們立刻就要遇到一件有趣非凡的事實，而爲之大吃一驚。這便是可見的光波，其波長祇限於極狹小的範圍之內。

紅光的波長，竟比一釐米的萬分之一還要小，而在光譜他端的短波，其波長不及紅光的一半。其他一切可見的波長，都限於這兩個極端之間。

既然如此，是否有其他波長的可能呢？光裏面是否有何隱匿，一向沒有給我們知道，以致光的波動說，因爲並不暗示我們的視覺，須受到這兩種限制，就此失敗呢？

由實驗知道，波動說未嘗使我們失望，又知道這種制限的原因，要在我們的視覺能力方面去找尋，不可在我們所能看見的這方面來搜求，如果我們的眼睛，換過了構造，所見的就一定不同了。就我們現在的經驗而論，知道波長的範圍，廣大異常，從廣播無線電所用，以幾百公尺計算的長波起，直到某種放射質所發，比我們所能看見的無論什麼東西，都要短小好幾萬倍的短波爲止。我們的眼睛，其有效範圍，不過是波長全範圍的極小極小一部分，無論我們的估計，是根據何種比較的標準。

這一個狹小的範圍，當然對於我們非常重要，因爲視覺的一切現象，都包括在內。所以就目下而論，我們自己限定，專在這個範圍裏面討論。須知一切關於色的事件，都要看這個區域裏的波，如何生成，如何在物體表面從該物體受到反射的影響，或如何透過該物體，以及最後如何爲眼睛與腦所接收而加以猜詳，然後可定。

顏料的作用

我們先配好一套裝置，使弧光幻燈所發的光，可從一條狹縫中穿出來，射到一枚透鏡上去，而由這枚透鏡，把這狹縫的像，映在屏上。現在我們若把一枚稜鏡，放在這條隙縫的前方，那麼屏上本來有的狹長而呈白色的像，就被這稜鏡展成彩色光譜，如銅版圖十四D所示一般。這光譜可以看做一串隙縫的像，彼此疊接而成；稜鏡把入射的光，分解為不同的波長，所以生出這些像來。我們若再取紅玻璃一片，放在隙縫的前方，那麼光譜中除紅色以外，其餘一切諸色，都被滅盡（參閱銅版圖十四E）。我們察得這並不是此色轉變到那色的作用，只是破壞的作用罷了。一塊紅的玻璃，其特性並非把其他各色都變成紅色，卻是除紅色以外，把別的颜色都毀掉。這的確是一切着色作用的主要特點。物體所以有各種顏色，其故就因為本身好比一張篩子，把不是自己的顏色都篩掉，而把自己的顏色留下來。

我們已經說過，用紅玻璃遮在隙縫前方，屏上就留下紅的像。假使我們向這紅色的像，細細察看一下，我們即見像的頂部與底部，界限很分明，而像的左側與右側，卻模糊莫辨。前者是隙縫頂部與底部的像，各種波長的光都把它們排成一線。但是兩側的模糊，卻使我們知道，組成這像的，並不

是恰恰祇有一種波長的光，卻是紅光附近的各波長，在其狹小的範圍內被抽出來的光。因為如此，所以兩側有與他色稍稍重疊的地方。

假使我們用一片黃色的玻璃，來遮蔽那隙縫，那麼兩端的重疊部分，甚為顯著（參閱銅版圖十四F。）在事實上說來，我們初看這光譜的時候，見它似乎未嘗受到什麼影響，但是仔細一看，即見青色的極端，已經沒有了。黃色的玻璃，竟會容許這麼複雜的一組波長通過，實令人驚異得很。我們不禁要這樣想，以為黃色是純粹色。因為我們由實驗發見，透過黃玻璃的光，含有很多的波長，其分別對於眼睛所生的影響，各各不同，所以我們必定得一結論，說稜鏡與眼睛，使我們對於「純粹」一詞，不能下同一的定義。這是視覺過程中非凡有趣的一個特點。然而在我們尚未詳論此事以前，且讓我們對於着色的現象，再作稍進一步的討論。

有色的液體，其色之產生，即由色之破壞而來，有色的氣體也是如此。這一種過程，又是固體着色作用的原因。當我們把水彩畫的色料，塗在一張白紙上的時候，我們並未產生具有新品質的光，不過把早已存在的光，毀掉其一部分罷了。我們把色料塗在上面的那張白紙，凡是照上去的各種

色光，它都要反射出來。現在我們是把一薄層透明的液體，鋪在這紙上了，光從這液體經過兩次之後，再到我們眼睛裏來；第一次是射入液體而到液體下方的紙上，第二次是被紙反射後，再鑽出液體來。假使這液體把紅色以外的一切波長，都吸收進去，那麼就祇有紅光，回到我們的眼睛裏來；而我們所着在這白紙上的，便是紅的水彩色。假使這液體祇吸收紫光，那麼白紙就把黃光反射到我們的面前；假使這液體祇吸收紅光，結果顯出綠青色，諸如此類。我們把各種水彩色，一層一層的罩上去，紙面上的破壞主動者，其數即漸漸增多；若不是丹青妙手，那殘留下來，送入目中者，當然是黝黑而不鮮明的顏色。

油畫的着色作用，卻與此不同。油畫所用的顏料，是含有「實體」的，這就是說，含有一種固體，可以把入射光反射與散射出來，而且與水彩畫的白紙，具有同一功用。是以射在油畫上的光，並不達到帆布；而且後塗上去的一層顏料，其厚度已足以把先塗上去的一層，完全遮蔽起來。水彩色料中和上鉛粉，也有同一的效應。

顏料的產生顏色，是由破壞顏色而來，這是事實，而我們對於色的觀念，卻很容易料想到一色

變成他色；這一件事實與這一種觀念，當然是直接矛盾的。我們在此處，又見波動說予我們以合理的解釋。我們都知道，一組波決不能直接變成波長不同的另外一組波。海洋中的巨浪，在沖入港口的時候，或從塘岸被反射之後，並不會變成一組微波。所以當紅光通過有色透明體，或從一物體被反射出來的時候，不可預期它會變成青光，青光也不會變成紅光的。光源便是光中一切諸色的來源。我們不可不假定，在某種情形之下，從太陽發出來的白光，在未被稜鏡分析之前，含有整個光譜裏面的一切諸色。

假使我們用同樣的方法，把其他任何光源所發的光，加以分析，那麼我們覺得光譜的顏色，大都不相同。例如石蠟燈的黃燄，它的光譜就不含波長短的各色。就是太陽的光譜，也時時變動。一塊青布，其所以有此青色，與因此而得青布之名者，就因為在完全日光裏面，布上的顏料把照在布上的光，吸收去大部分，祇把深青色的光，放回到眼睛裏來的緣故。把這青布放在石蠟燈光之中，看起來就是黑的，因為石蠟燈光中，並不包含青布所能反射的唯一色光，所以沒有什麼光給它反射出來。

假使我們取一束名爲「純黃」色的櫻草花，而命光譜的各色，陸續照在花上，這一束櫻草花的顏色，就隨着所處的地位而變化。這櫻草花在紅光裏面，看起來是紅的；在黃光裏面，顯出它的天然色；在綠光裏面，看起來是綠的；但是在深青光中，就顯得是黑的了。這最後的一種，便是櫻草花不反射的唯一「波長」。同樣，其他任何物體的顏色，在我們看來，非但有賴乎它自己所染的顏料，而且還靠着使它可見的光。日光流入房內，或許先照及白壁，或彩色牆、或地毯，而全房間的陳設，其顏色因此受到了影響。

我們的一切顏色，似乎都可由分析法得之於「白光」，然則「白光」是什麼東西呢？我們當然很容易說，白光便是平常白晝的光。但是我們都知道，這白晝的光是品質不一的：攝影家知道得很清楚。當黃昏將近，太陽快要沈沒的時候，日光就變得比較富於橙色及紅色。在高山頂上所見的日光，比在地面所見的富於青色。所以白的日光，不容易立它的定義。我們所謂「白光」實在是各種波長的某種平均組織：這一個定義，平常用起來也够了。假使要說得更精密一些，那麼各成分的相對強度，應當用某種光標準，直接或間接逐一加以規定，這些光標準，其本身都可以詳細敘述，正

確無誤。須知絕對白色的光這一種東西，是沒有的；白，是我們自己所下定義的品質。我們倒有較佳的理由，可以說一張紙或其他物體的表面是白的，因為這一個名詞的天然意義，當指該表面能把一切品質不同的光，完全反射或散射出來。這是一個被動的品質，而屬於光的卻是主動的性質。白的表面，在紅光中看起來是紅的，在青光中就是青的，其餘依此類推。然而即使是如此，這一個名稱的獲得，也是因為有一種本領，可以把眼睛所能察覺的狹小範圍，其中一切可見的光線，不分多寡的一樣反射出來之故：假使我們越出了這一個範圍，那麼我們所用的詞句，其意義或許必須加以修改了。像苯這一類的無色透明液體，是容許一切可見的光線通過的。但是我們的視覺範圍，假使把恰短於紫光的波長，也包括進去，那麼我們應當稱苯為有色液體，因為它吸收這些紫外線。

眼對於色之反應

光的品質，對於色覺的產生，其關係如此重大，我們已知道了。我們現在必須把眼睛對於所接收者的反應，拿來考究一下。

此事以實驗開始爲便。我們取弧光幻燈兩具，把它們配好，使它們可借圓形孔與透鏡的幫助，在屏上映出兩個白圓斑來：我們還可以移動一幻燈或一透鏡，使這兩圓斑重疊。假使我們把一塊青玻璃，放在這一具幻燈前方，把一塊黃玻璃，放在那一具幻燈的前方，那麼兩光斑重疊的部分，既從第一幻燈接到青光，又從第二幻燈接到黃光。眼睛裏看見的，這一部分呈白色。我們都知道，黃的顏料與青的顏料混和在一處，就變成青的顏料：這兩件事情，顯然互相矛盾。不過這種矛盾，立刻可以解除。假使我們把青玻璃與黃玻璃，疊起來放在一幻燈的前方，那麼這一具幻燈所映出來的圓斑，的確呈綠色。此結果是我們所應預期的，因爲我們已經知曉，黃玻璃把光譜的青色一端遮斷，而我們也可以容易表示，青玻璃把光譜的紅色一端截去。假使有一道光，本來是白的，使它通過青與黃兩塊玻璃，那麼所剩者就祇有光譜中間一部分，這一部分是綠色的勢力最大。但是當我們把青光與黃光同時分別照在屏上，而發見兩圓斑重疊的地方呈白色的時候，我們並未使連續的吸收作用發生。我們所做的事情，與此完全不同：我們是使青光與黃光，可以在眼睛裏面同時收到。重疊部分的混合光，含有光譜的一切顏色，雖然中央部分的顏色或許過分多些，然而眼睛卻承認，就全

體看起來，真好算是白的了。

假使我們用紅色的玻璃，與綠色的玻璃，來做這同一的實驗，那麼我們也可得到同類的結果。屏上光斑重疊的地方，所顯的是黃色：當這兩塊玻璃放在同一幻燈前面的時候，各色的光都被它們遮斷，所以屏上是黑暗無所見。借稜鏡的幫助，把這兩塊玻璃考察一下，即知紅玻璃將紅色以外的光，一概滅掉，而綠玻璃所滅掉的，除紅光外，還有青光的一部分。這麼一來，兩塊玻璃疊在一起，就沒有了一種色光，能夠透過它們，而屏上所映重疊的光斑，卻可生出青以外的一切顏色：我們早已知道，這種混合色光，眼睛看起來就是黃的。銅版圖十四B所示，即係此實驗中的光斑。

在這一類的實驗裏面，我們偶然遇見了一件非凡的事實，即對於眼睛似屬純粹的顏色，或許由許多種品質的光，混合而成，其混合的情形，固然極複雜，但是每一種品質的光，仍可以自行產生它本有的顏色。在光譜中某一定點，有一種黃色，是波長範圍極狹的光所生：然而能夠通過黃玻璃的黃光，卻差不多含有一切可見的波長。我們再作進一步的探討，即知組成黃光的方法，其數並無限制，而呈現於眼睛之前的黃色，其外觀是唯一無二。這是極可注意的一件事，因為就聽覺而論，耳

朵的作用，在它自己的勢力範圍內，與眼睛完全不同，其不同之點，十分奇怪。聲音的世界裏面，由波動以授受智慧的情況，與我們所假定爲光世界的特徵者，彼此正相類，至少可以暫時說它們相類。不過就前者而論，傳音的介質，確係有質地的東西無疑；例如空氣或別種氣體，液體或固體，都是就聲音而論，波的長度，對於感覺也有影響，正與光相同。波長愈短，純音的調子愈高，換過來說，亦然如此。以鋼琴上最低的純音來講，波長許多英尺；以最高的純音來說，波長只有一英寸或二英寸。僅就以上各點而論，光與聲音，完全可以互相比擬；但是若把混合的效應一比較，這種類似性就要毀掉了。我們已經知曉。當波長各異的兩條光柱，一齊射入我們眼睛內的時候，我們就察得有一種純色的感覺發生：混合的光，眼睛既不能辨認，又不能把它的成分加以分析。但是就聲音而論，像這種頻率各異的混合音，耳朵總能够加以辨別：和諧的聲音，一經耳朵分析之後，也許令人樂意，也許教人不快，都要聽它所混的各音而定。這是對於音樂的主要輔助：我們假使想到，凡是和諧的聲音，換成了我們認爲「純」音的某種平均單音之後，有何使人驚惶的結果，隨之而生，那麼就可以實知耳朵的具此能力，是何等的偉大了。

有許多人曾經企圖製造一種器具，用此器具，可以按鍵而發特殊的色光，映在屏上，變出種種花樣來，藉以引起人的情感。然而此種企圖，總是得到惡劣的成績而失敗，以致除音樂以外，迄不能造成感化力相同的藝術。失敗的原因，或許完全是眼睛沒有能力，把調和的顏色分析開來。一班提議製造「色器」的人，以為眼與耳可以彼此比擬，其實是相差遠甚。把幾種各異的色光，同時射在屏上不同的各部分，或許可與幾種不同的聲音，同時傳入空氣裏面，互相比擬；不過比喻並非穩固的辨論根基，這是大家都知道的。

通常以為耳的機構，包含一組接收器，而各接收器祇能對於頻率範圍極狹的聲音，發生感應。耳朵好比一個房間，其中裝滿了許多無線電收音機，各機都調諧得很尖銳。眼睛就不能與耳朵相比了，它的感光性決沒有如此繁複，它的選擇性決沒有如此精細；換句話說，眼睛的接收器，為數必定少得很，其接收範圍必定大得很。要想了解眼睛的接收機構，當然已有人費了許多心思去研究它。不過如此錯綜複雜的一個問題，其解答至今還沒有完全到手，也是不足為異的事情。然而有幾種主要的結論，卻已獲得，其中之一，便是大家公認眼睛有三具接收機（為描寫便利起見，故用無

線電來做比喻，各機的感應範圍極廣，好像一具不能銳調的無線電機一般。其中的二機最宜於接收可見光譜兩端的光，還有一機最宜於接收中段的波長；各機對於光譜的大部分，多少總可以起一些感應。我們對於色的感覺，就要看這三機對於射入眼內的光，所起相關的感應而定。假使三者之中，缺少了一機，或是一機失去了一部分的效用，譬如說最易感應紅光的接收機，犯了這個毛病，那麼眼睛對於紅色的呈現，差不多不能感覺到：紅色的花，與綠色的葉，要加以區別，就很困難的。確有不少的人，因為有了這種缺點，而成爲色盲的人：所缺少的，或是殘廢不全的，大抵以紅光接收器爲最多。具有色盲眼的本人，或許絲毫不覺得自己賦有這種天然的缺陷。開創化學的老前輩，名化學家約翰·道爾頓(John Dalton)，就是有色盲病的人，但是他直到四十歲的那一年，經托馬司·楊(Thomas Young)發見此項事實以後，他纔知道自己有色盲的缺陷。這些接收器的正確接收範圍，其各種學說，都根據正常眼與色盲眼的視覺比較而來。

不同的波長，如何能够連合在一處，組成種種的混合光，而使眼睛看起來，似乎是同一的顏色，我們對於這一種情形，現在總可以察知的了。特殊的色覺，是三接收器按適當比例所受的刺激所

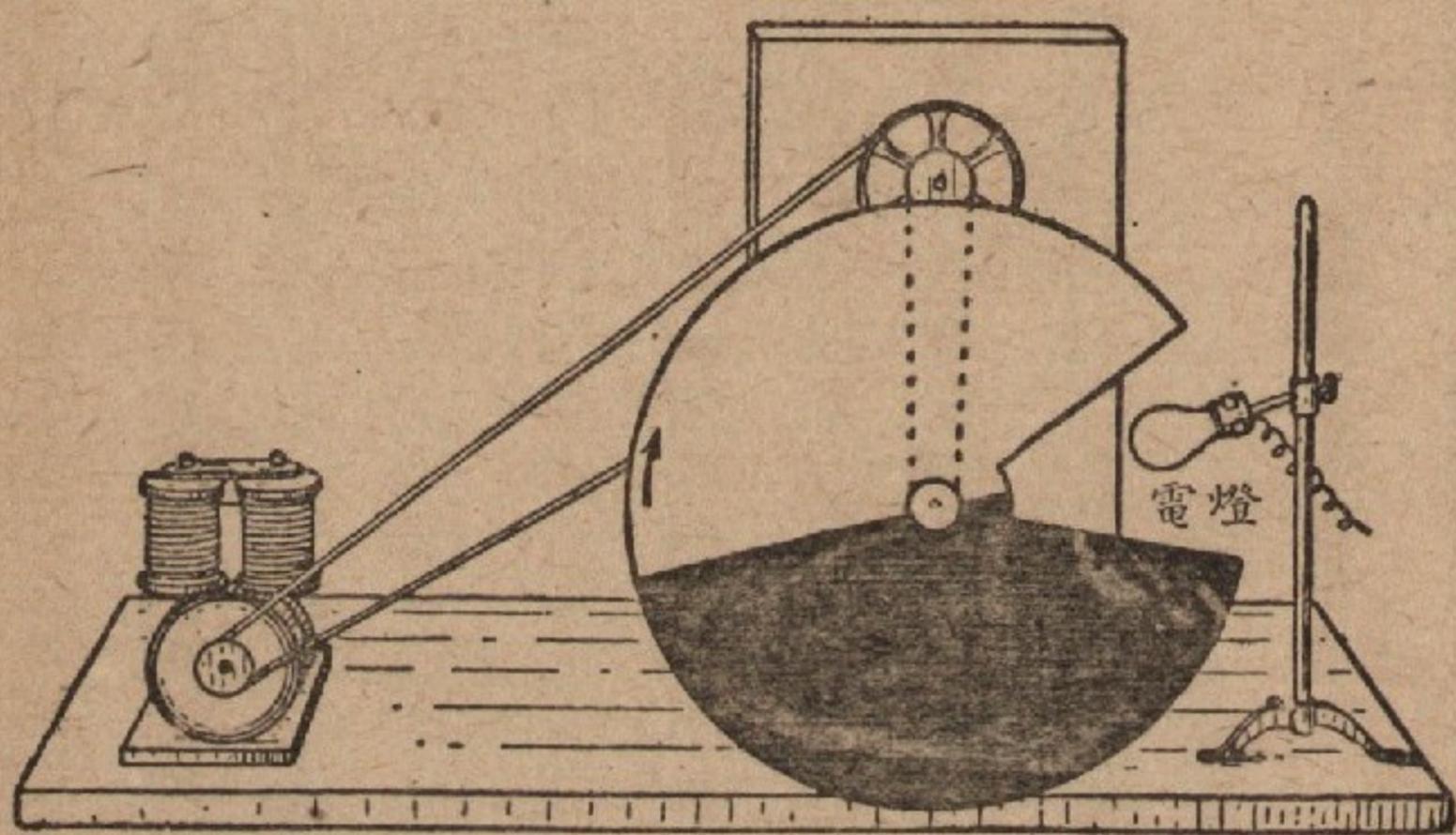
致。因爲一切波長，至少可以刺激兩接收器，而且往往可以刺激三接收器，但是刺激的強弱比例，卻彼此不同，所以在某某明顯的限度之內，可以用任何三種波長，得到所需的色覺，祇要它們的相對強度，有適宜的調節。

互補色

我們若假定這些接收器官，可以把它們用得疲乏勞困，使其效力減低，那麼所謂互補色這一種屢見的現象，我們立刻能夠求到它的解釋，假使我們注視顏色鮮明的某物體，一眼不霎，連看幾秒鐘，然後轉目他視，看另一被照的表面，最好是白色的表面，那麼我們就會看見一塊不同的色斑，飄浮於我們的眼睛面前，而且隨着我們的眼睛，動來動去。此種現象的解釋，便是各接收器的疲勞，並不相同。假使我們對於紅色，已經注視了好久，那麼紅光接收器的疲勞，就比其他二接收器來得厲害，所以當白光射入眼內的時候，其他二接收器所受的刺激，較爲完全，因而引起青綠色的感覺。由弧光燈射於白色屏上的整個光譜，我們可以利用它獲得互補色的效應；這一個實驗所示

的例子，頗使人驚異。我們先向光譜中的某固定點，凝視不瞬，這一點我們可以設法加上一個標記，把它指明出來，以免目光的遊移不定。我們這樣的凝視了十五秒左右之後，就把弧光燈關熄，開亮室內的電燈。白屏的上面，就發現一條色斑，好像顛倒亂排的光譜，以前本來是紅的地方，現在變成青色與綠色，而紅色代替了青色的地位：在中央部分，有幾種鮮明的顏色，都換成紫的了。

你們或許有人要預料，以為如此所得的補色，比原色淡得多。但是有一個極奇特的實驗，卻表示的確可以獲得相反的結果，我們預備好一塊圓形硬紙板，直徑大約十八英寸，開出一個扇形的缺口，



(圖五十三) 圖中的圓盤，依箭頭所示的方向而旋轉。電燈是紅的，可以從扇形的缺口，隔一定的時間內望見它一次。眼睛所見的電燈，顏色卻是綠的，並不是紅的。圓盤必須照得很亮。

並把其餘的部分，均分爲兩半，塗上黑白二色，如圖五十三所示一般。我們把這圓盤，裝在一架旋轉機上，使它可以繞軸而轉，速率每秒鐘二次或三次。我們把一盞電燈，放在L處，如圖所示：我們用很強的光照在盤面上，於是使盤轉動。當圓盤旋轉的時候，我們先看見似呈紅色的電燈絲，片時之後，就看見盤面白色的一半，然後看見黑色的一半，然後再看見燈絲，如此輪流不絕。當圓盤的白色部分，把燈遮在背後的時候，我們必然會看見綠色的反應，這是我們都知道的；然而有趣味的，卻是下面這件事實。這反應的綠色，比紅色強得多，以至於在圓盤旋轉的時候，我們全然不見有紅色呈現。反作用所生的效應，遠勝於原來的作用。還有最最奇怪的事情，便是看見紅的燈絲，換成了綠的。假使我們把圓盤的旋轉方向，更改一下，燈的顏色就不起變化，依然是紅的；因爲在這一種情形之下，恰在我們看見電燈以後，把電燈遮蔽的是黑色扇形，所以就沒有白光激起這二次反作用了。

色幻視

上面所說這一類的效應，由於我們眼睛的天然特徵所致，我們對於它不能加以控制。其他的

效應，無疑是一部分由於採用了錯誤的標準所致：這一類的例子，我們早已見過了，如今又發見在色的幻視方面，這也是主動的原因。例如我們若把三塊有色的紙片或布片，一紅一紫與一青，並列在一處，我們就覺得難於自信，那塊紫色的紙片，其所染的顏色是濃淡均勻的（參閱銅版圖十四 J。）它與青色接觸的地方，似乎略帶紅色，而與紅色接觸的地方，又似略帶青色。我們可以假定，先向紅色注視片刻之後，再把眼睛轉望紫色，因此我們的紅光接收器官，稍覺疲勞，而紫色裏面的紅光，就不能夠完全看見了。我們也可以假定，眼睛對於靠近紅色的一端，採用了錯誤的標準，以為我們的所謂紫色，應當還要紅一些，因為我們對於過度的紅色，暫時看慣了的緣故。這兩種解釋，並不是同一的解釋，然而要加以區別，或許是一件難事。

各種繪畫方法與裝飾技術，其有用到彩色的，當然要多多利用這種效應。畫師與藝匠，常在某種顏色的旁邊，添上適當的別種顏色做陪襯，以使該種顏色「豁然呈露」或改變其色彩。

假使我們掛一幅在壁上，畫的外貌，或許受到我們方纔所考究的種種影響。第一是射入室內的光，或我們所預備的光，它的品質就使該畫受到影響：光在未達畫片以前，先從室內各種物體被

反射出來，已經有了改變，而最後再加以我們的視覺，因為畫的四旁，有各項襯托，又因為我們的眼睛，在剛剛看畫的以前片刻，曾望見其他物體的顏色，更因為我們的眼睛，時時可以瀏覽到別種物體的顏色，所以也有了變動，這樣一來，我們所見的畫，當然不是原來的顏色了。我們推測起來，理想中表示一幅畫的方法，大約是要使照在這幅畫上的光，與繪畫時的光，有同一強度，同一品質，而且要使此畫四旁的陪襯，悉依繪畫者的意向。是以在室外空曠之地所繪的一幅畫，放在明亮的日光之中，其對於眼睛所呈現的，是一副外貌，到了晚間，為平常的人造光源所照，而且看畫的眼睛，因為日光換成燈光，已經改變了它們的標準，在這時候，畫所呈現的，又是一副外貌。假使石蠟燈所發的光，照在一張白紙上，而這張白紙的旁邊，並放着同樣的白紙，為日光所照（這一個實驗，不難在實驗室中布置，）那麼兩紙相比，前者就現出橙褐色來。然而在晚間，前者卻可以做我們的白色標準；有其他顏色的各物體，當然顯出相仿的變化。方今之世，晚上的燈光又亮又多，白晝與晚間的差別，已沒有這樣大，不過即使是最高最白的「半電池」燈光，也不能與日光相當。假使要獲得與日光十分相近的人造光，必須用青色的燈泡，把人造光中長波的強度，大大減削纔行。電燈光裏面，也含有

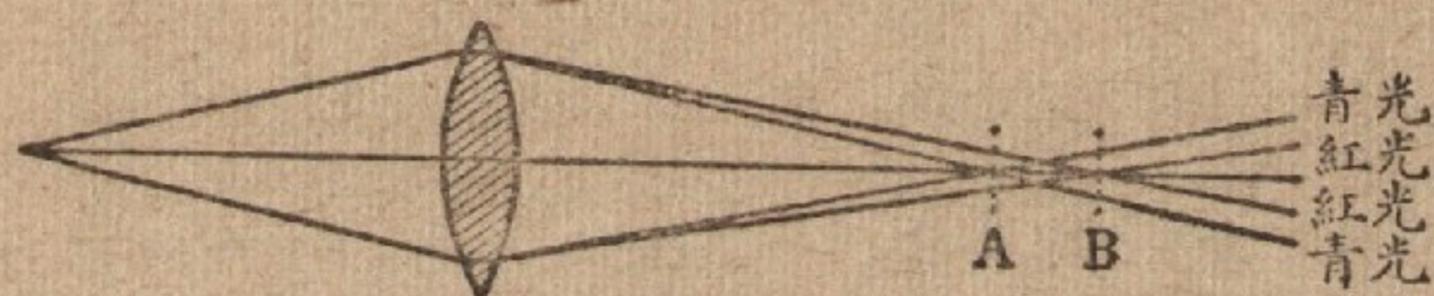
青色光線，但是數量並不充足。日光燈的用途，最近是大大的推廣了，其理由不止一種；在店鋪裏面，若欲陳列貨物，而又祇有人造光可用，就需要日光燈：有時候藝術家或裝飾師，也歡喜借日光燈的幫助。顏色因所照之光有不同的本性，而易其相對的外貌，這一件事情，看見了真令人十分驚異。兩塊布，在日光之下，看起來或許都是綠的；若爲人造光所照，其中的一塊就變成褐色，諸如此類，正多着呢。

透鏡的色效應

從很亮的光源發出來的一切光線，透鏡實不能使它們都聚焦於一點，除非採用了特殊而十分細密的預防方法，因爲不論在什麼時候，白光一屈折而離開了本來的路線，青光就比紅光更爲屈折之故。圖五十四所示，就是青紅二種光線聚焦的情形：青色光線會聚的一點，比紅色光線的會聚點，離開透鏡較近。假使我們把一片白紙，放在A的地方，紙上就現出一圈紅色，假使把紙移到B的地方，這一圈就變成綠色。沒有一處地方，一切色光都會聚於同一焦點。

眼睛就有這樣效應表現出來。有時候從窗口外望明亮的天空，往往可以看見窗框的四周，加上了一道紅色或青色的邊緣，此項特殊顏色的呈現，與影響眼睛聚焦作用的環境，大有關係。眼睛有這種缺點，不能夠在同時聚焦一切波長，對於我們，極少妨礙。就光學儀器而論，當需要放大的時候，此種缺點，就最有害處了：幸虧可以設法製成一種「消色差」透鏡，這一重障礙，纔被打破。關於消色差透鏡，不久就要講到。

眼睛的缺乏消色差性，產生幾種奇特的結果。因為紅色光線，比青色光線屈折較少，所以要使眼睛適於看紅色物體，就不得不把眼睛的透鏡系統，多多壓縮一下。須知我們使眼筋所受的勞苦，其輕重的程度，是表示物體遠近的一部分標準：勞苦愈重，我們以為該物體愈近。所以我們很容易誤斷有色物體的距離，總估量紅的物體，比綠的物體近一些，而以為其他各色的物體，距離相等。紅色牆壁的房間，看起來比青色牆壁的房間小一些，或許就是



(圖五十四) 青色光線通過透鏡後，其所聚的焦點 A，比紅色光線通過透鏡所聚的焦點 B，離開透鏡近一些。

因爲這個緣故。也許因爲我們有戶外眺望遠景的經驗，以爲遠的物體總呈青色之故；不過前面一種理由，似乎來得堅實可靠。彩色鮮明的廣告紙，上面所印的紅字，似乎凸起於青色的前方。又若有一青一紅的兩物體，大小相同，離開我們的遠近也相等，那麼我們很容易看錯，以爲青色物體比紅色物體大一些，因爲我們料想青色物體比紅色物體遠。

這一種奇特的幻視，有一個極有趣味的例證，可以得之於法國的三色國旗。旗上的紅白青三條色帶，它們的闊狹是不同的。原來制定的式樣，三條帶的闊狹本相等，但是看起來總覺得青的一條，比紅的一條闊。於是法政府請了幾個人，組織了一個國徽顧問委員會，來研究這一個問題；委員會就建議，青白紅三條色帶的寬度，應當成功三十、三十三與三十七的比例：這三個數目，是委員會實驗的結果。旗上的三色，照這三個數目分配之後，眼睛看起來，就似乎是多寡相等了。依據以前所述，我們可以假定，眼睛當然要猜想青的色帶，比紅的色帶遠，既然如此，那麼青帶與紅帶所張的角度，確係相等，這一件事實，當然要引起更進一步的猜詳，以爲青帶比紅帶闊了。事實是真的，說明是至少似可取信。

在青光裏面，比在紅光裏面，較近的物件，看得清楚一些。較短的波長，使其會聚的焦點，是在網膜上面，但是較長的光波，卻聚會在網膜的後面，即使把眼睛的全副聚光本領，一齊施展出來，也沒有補救辦法。我們近旁的各物，在青光裏面看起來，比在紅光裏面要清晰一些；這一件事實的原因，便在於此，至少其一部分的原因在此。

大凡白色的光線，每使其屈折一次，必有分離顏色的作用，相伴而來，在用光學儀器以加強眼力的時候，這是一件很重大的事情，因為放大率的獲得，須經過一種手續，此項手續所包含的折光作用，遠過於眼睛所能引起者，而隨折光作用俱來的離色作用，當然也大得多。劣等的雙筒望遠鏡，其所示景象之中，那些被照得很亮的部分，常常圍有彩色的邊，看了真覺得有些討厭。力量較充的光學儀器，其放大率都很高，假使容許此種效應發生，那是更令人難以忍受了。

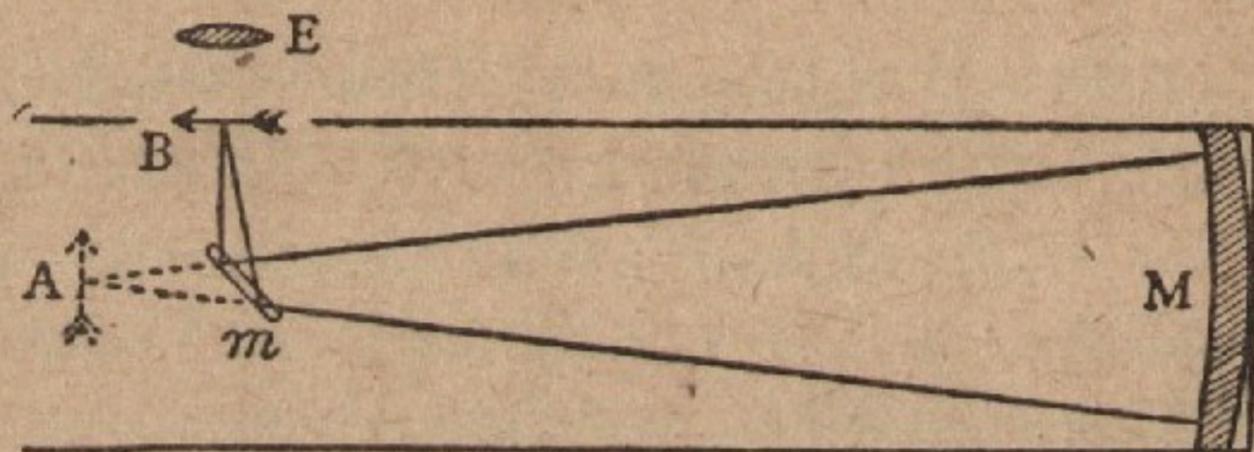
說也奇怪，牛頓相信這一重困難，是不能打破的：因此之故，他就廢棄了透鏡；他的望遠鏡上的物鏡，不用透鏡來做，而用球面反射器來代替。這球面鏡所能造成的像，可以放在離目鏡很近的地方，加以察看，與透鏡所能造成的無二；而且不會有顏色分離的作用。在圖五十五中，M是大凹鏡，其

所造成的像，本來應當在A的地方，但是另外有一面小的平面鏡，使M所反射的光線，轉向上方，所以像就結在B處。目鏡就在B處，把此像送入我們的眼睛。如果像在A處，那麼觀察者就要把頭放在路上，纔會看得見它。咧。銅版圖十三A所示的，就是牛頓自製的這種反射望遠鏡。

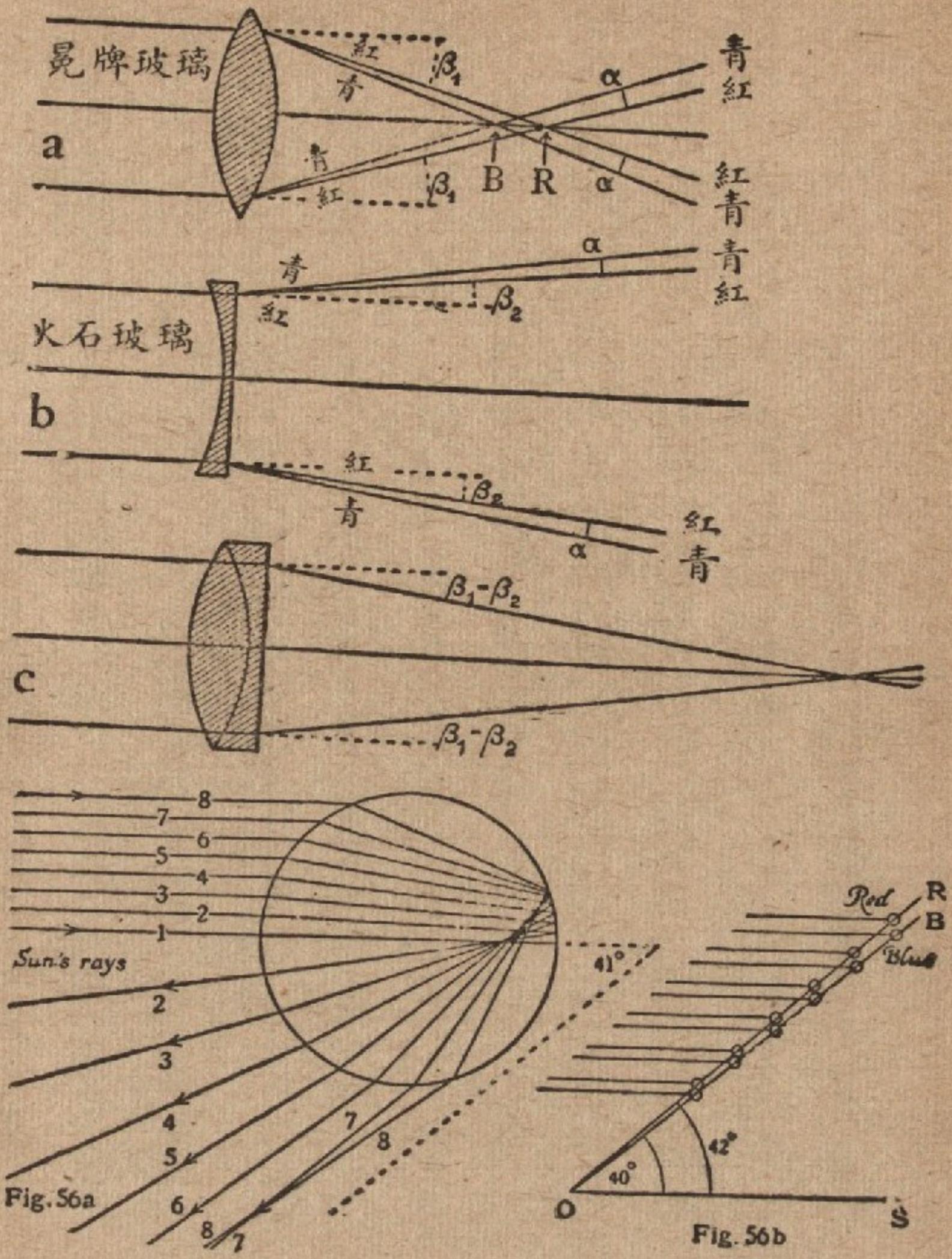
然而透鏡的着色作用，實有方法可以避免，第一個實地應用此法的，是約翰·道隆特 (John Dollond)，他在一七五八那一年，把第一具消

色差望遠鏡，呈給皇家學會。此種望遠鏡的構造，根據下面的事實，即伴同屈折俱來的離色作用，就品質不同的玻璃而論，並不與屈折作用成比例。我們可以用冕牌玻璃與火石玻璃，製成兩枚透鏡，其對於光譜中各色的分離作用，彼此相同，然而其折射光線的角度，就全體而論，卻彼此各異。光

柱通過冕牌玻璃製成的凸透鏡，其屈折的路徑，或許具有圖五十六a所示的特況。青色光線聚焦於B點，紅色光線聚焦於R點。



(圖五十五) 牛頓望遠鏡構造簡圖。



(圖五十六) 頂上的一圖,表示冕牌玻璃所製的透鏡。它的聚光本領,用 β_1 角的大小來表示。它使青與紅二色分離的程度,用 α 角來表示。中央的一圖,表示火石玻璃製成的透鏡,其散光本領,用 β_2 角的大小表示; β_2 比 β_1 小。但是它使紅與青二色分離的程度,卻與冕牌玻璃所製的透鏡相同。在第三圖中,兩透鏡合在一起,就不會使紅與青分離,只有聚光本領 $\beta_1 - \beta_2$ 了。

其次，用火石玻璃製成的透鏡，對於這同一光柱，所起的折光作用，或許如圖五十六b所示。光的屈折，就全體而論，比通過冕牌玻璃時來得少，但是顏色的分離角度 α ，卻二者相同。

現在假使把這兩枚透鏡，疊合於一處，顏色的分離作用，就互相抵消，但是光的屈折，就全體而論，卻不能夠扯平。冕牌玻璃透鏡的聚光本領，比火石玻璃透鏡的散光本領，要大一些。兩種透鏡合於一處，其作用當如圖五十六c所示。

在此種情形之下，使光柱會聚於一點，就不致生出顏色來：這聯合透鏡，就具有消色差性。然而這句話還得修改一下纔行，應該說近乎有消色差性，比較妥善一些。任何兩種波長，像我們已用青色中一點B，及紅色中一點R來表示的，都可以用剛纔所記的方法，使它們再合於同一焦點。但是含有種種波長的光譜，卻並不經此兩枚透鏡，在同一情況下展開：B與R兩點，固然可以使它們密切相合，光譜中其他各點，卻祇能使它們近乎相合。病是大大的醫好了，不過還沒有完全除掉。

就顯微鏡而論，若欲再進一步，使視覺更清楚一些，可把所用的波長，限制於狹小的範圍之內。如此當然對於顏色要發生影響：不過顏色的需要，可以遜於分明的界限。顯微鏡下的工作，有幾種

最最佳妙的，近來已因採用了紫外光中的單色射線，得告成功。這些射線，雖然眼睛看不見它們，卻對於照相乾片有很大的影響。例如銅版圖十三B所示的，便是用這種射線攝取的微菌照相。

製造光學儀器，本是一件不容易的事情，而這些顏色問題，使製造者更是大覺困難。所希望的放大率愈高，愈需要技精藝優的人，來設計製造透鏡。我們對於廣漠無限的世界，以及渺小微細的世界，所兼具的種種知識，多半從利用望遠鏡與顯微鏡而來。所以那班專心研究透鏡，求其精美完善的人，我們受他們的恩惠，實在不淺。

第四章 色之本原

共振的原理

我們已經知道，顏色的產生，由於顏色的破壞，這是極通常的事情。從太陽發出來的光，是一個複雜的集團，可以用稜鏡把它分開，析成一串品質不同的光。這些光由眼睛加以區別，就是各各不同的顏色，由物理學家在實驗室中加以區別，就是彼此相異的波長。這些原色與混合色，因為眼睛有奇特的機構，所以可使眼睛起一種色感，而由眼傳遞於腦，由腦加以猜詳，這種情形，我們也已經知道一些大概了。

這種破壞顏色的作用，究屬如何而得實行，現在讓我們加以更仔細的考究。從太陽發出來的光，射在我們四周圍的物體上，舉凡一葉一花，一草一木，樹稍禽鳥，枝上昆蟲，以及遠山近水，郊野市

井，莫不受日光的照耀，而又無處無色。可見毀壞顏色的作用，必定是到處都有。但是這種作用，怎樣實行的呢？各種顏料，能夠現出各種顏色，此中的過程，又是如何呢？

在這一點上面，最好要觀察到如下的一件事實，即我們四周圍的各物，雖然大多數的着色作用，是顏料所致，但是產生顏色的方法，還有其他幾種，這些方法，都是極有趣味，極爲重要，而且還不止如此，一切顏色效應中最最美麗的，有幾種的原因，便是這幾種方法。通常討論起來，把它們歸入繞射與干涉兩大類。我們在後面就要把這兩種作用，輪流講述；但是就目前而論，讓我們自限於用顏料的方法，這一個方法，至少在量的方面，是顏色的主要原因。

此中的祕密，在於一條叫做共振的原理，此原理的效應，的確是極普通，而且很容易觀察到。讓我們先來考察一個極簡單的例子，就是一隻音叉，對於同音調的另一音叉的作用。我們把兩音叉裝牢在適當的共振箱上，並列於桌面。用弓弦擦過其中一叉的兩股，須重重的擦一下，激起它的高大的鳴聲。待它鳴過數秒鐘以後，然後用手指去按使它，使它的鳴聲停止。此時即可聽得第二音叉，也在那兒發聲，但是我們卻並未觸及它；它的運動，全是第一音叉激起來的。第二音叉鳴過片刻之

後，也可以用手指把它的聲音按停，此時第一音叉又可以把送出去的能，收回一小部分，因而發出微弱的鳴聲來。

這裏有一件主要的事情，即兩音叉應當互成調諧。假使兩音叉之中，不問那一隻，其一股上面塗了一些蠟，那麼這種能的授受作用，立時停止，而共振的效應，也不再發現了。

其他的例子很多，不可勝舉。假使有一個人，坐在一架鋼琴的面前，輕輕按下一鍵，使阻尼器 (damper) 離開了琴弦，然後高聲唱這按下的純音，那麼當他停止高唱的時候，就可聽見琴弦再發出同一的音來。除所按的純音外，並無其他的音同起感應：人聲與弦聲，必須同調，不過因為每一個音源，並不十分簡單，既含基音，又含泛音，所以或有其他的相當機會，引起別的純音輕微的反響。

嗓音洪大的歌唱家，有時自己誇張，能夠使一隻玻璃杯粉碎，不用手去觸它，祇要向此杯高唱，唱出敲擊玻璃杯時，玻璃杯自己所能發出的純音來。

不過當今之世，一切共振效應中，最最普通的，卻是無線電傳遞作用的基礎。當我們調諧收音機的時候，我們正在自己直接利用共振原理：我們把收音機上的旋柄，轉來轉去，轉到機中容電器

與線圈裏面的電振動頻率（或週期）恰恰同於來自發送電臺的電波系統爲止。各處的電臺，發出頻率不同的電波，其彼此的相異，恰與顏色的彼此相異，一般無二。每一座電臺，都有它自己專有的頻率，好比它自己專有的顏色一般。我們的無線電收音機，猶如一種「顏料」正在吸收一種特殊的顏色；而且我們有這種本領，改變這顏料，使它能夠吸收我們所要的顏色爲止。最最完美的收音機，調諧起來最最準確，最能感應所欲收聽的無線電臺，而且對於其他一切不需要的電臺，最能絲毫不理。

我們假使自己發問，爲什麼調諧竟然如此的必要，如此的有效，那麼祇須想像某種特殊情形，其運動之慢，可加以注視者，就能夠回答這問題了。設想有一個小孩，正在那兒蕩鞦韆，又有一個小孩，正在推動這鞦韆。鞦韆的來往運動，是有固有週期的：所謂頻率，意思便是一分鐘之內，或規定時間內的週期數，即來往蕩動的次數。假使第二小孩對鞦韆所發的衝動，常在適當的一瞬間，那麼鞦韆的振幅，就繼續增加，增加到每次衝動的能，全部用以抵抗空氣的阻力，與其他反對諸力爲止。但是各次的衝動，假使凌亂無序，前後的衝動，就要互殺其勢，即使很有規則，如果前後兩次衝動相隔

的時間，不等於鞦韆的週期，也要互相消滅的。當鞦韆遠去的時候，加以一推，這是對的，但是第二次再推，或許適逢鞦韆擺過來，這一推當然有停止其運動的趨勢。所以一大串連續的衝動，儘管依規定的時間，倘若所規定的時間不合，就沒有效應，因為各次的衝動，每隔一定的時間，對於鞦韆的運動，或順或反，不能一致。

當一音叉使他音叉發生運動的時候，每次的衝動，極為微弱，因為祇由空氣傳送過去一小部分；但是時間既然準確，各次的效應積聚起來，其勢就很大了。一隊人在橋上經過時，步伐若很整齊，就許有危險發生，因為橋的某種振動週期，或許與這隊人的步伐相合，而橋身或許脆弱，以致不能支持，向下崩潰。有時候行軍過橋，兵士常接到亂步的口令，就因為這個緣故。其他的共振情形，也是如此，微弱的振動，祇要守時不爽，就有很大的效力。

顏料吸收有特殊波長的光，也是一種共振效應，與我們所已提及的正相同；而且尤與無線電的接收相像，因為光波的本性，原屬於電，而且對於以太波發生作用，這種波與無線電波，所不同者僅波長而已。無線電接收機能夠吸收長以太波，顏料裏邊有一種東西，能夠吸收短以太波。

無線電接收機裏面，含有容電器、線圈等等裝置，這些裝置，可加以調節，使它們互相適合。原子與分子，便是光的接收器：我們要把它們與較大的接收機，一項一項的比較，雖然覺得是一件又困難又複雜的事情，但是我們卻知道它們是光的接收機。然而原子與分子，把它們當做共振器，卻有幾種通常的特點，這些特點都極有趣味，我們現在可以把它們考究一下。讓我們把世界上關於顏色的廣大現象，拿幾件來想一想看。

在我們尚未談到原子與分子的共振以前，剛正還有一點，不得不先加以考究，這就是接收與吸收之間的關係，必須先弄明白了纔行。我們知道一音叉激發了他音叉，使它也起振動；但是第一音叉所發射的能，非有一部分費在這過程上面不可。照式照樣，凡是無線電收音機，都要從以太裏面，吸收一定量的能。無線電收音機，或許可用一種方法，用那無線電專家所知道的一定裝置，把它刺激一下，使它可從附在機內的倉庫，挪移若干的能量；不過這是另外一件事情了。

今試想像有一隻音叉，正在向各方把能發射出去。在其中一個方向之內，音波傳到了一處空間裏面，此處有許多的音叉，它們的音調，都與第一音叉相同。這些音叉都受到了這音波的激勵，全

體發生振動，到某種程度，結果是這些音波的能，被各音叉從這波動系統裏面吸收而去。在原來方向裏面，即我們所已限定了加以注意的方向裏面，能的繼續傳布，顯然就要減少這許多。這一組收波音叉的，確都在那兒發出同一的純音來，但是它們一共發射的總能量，決不能比它們所收取的更多，而況這些能量，還是散向四方的，那麼依原來方向進行的能，當然要減少了。換一句話說，這一組音叉已有了吸收器的作用。如果第一個音源，不止一個音叉，除開與音叉組有同一音調者外，還含有音調不同的其他音叉兩隻或三隻，那麼音叉組決不會從額外各音叉所發的音波，汲取少許之能；這音叉組的作用，必是有選擇性的，它祇吸收一種波長，而把其他的波長，一概放過去。

以此譬喻顏料的作用，頗為明顯。顏料是相似原子與分子的集團，各原子與各分子，對於含有幾種確定波長的光，都能夠把它們發射出來，或吸收進去。我們在這裏所以要說幾種波長，其故因為把音叉做樂音之源，是過於簡單了，不足以代表原子與分子所具許多的振動可能性。含有這些複雜振動的空間，白光在其中通過後，它的光譜裏面，一定會顯出若干缺口來。

原子與分子的振動

原子與分子，都是極小極小的東西。爲便於表示它們的大小起見。我們可以引用一種計算微量的長度單位，叫做埃斯特稜單位（簡稱埃，西文爲 *Angstrom*），每單位等於一釐米的一億分之一，約等於一英寸的二億五千萬分之一。現在所知道的不同原子，共有九十二種。分子大抵由少數原子所組成，通常總是兩、三、四個左右；若有二十個，或三十個，或三十個以上的原子，組成一個分子，這便是龐大絕倫的分子了。原子的直徑，不外乎一、二、三埃這三級。

對於這些微小的數量，已由種種不同的研究方法，測定了好算十分準確的結果。X射線解析法，的確可以決定它們的大小，得數甚爲精密，至少在原子與分子被造成晶體結構時如此。就極多極多的情形而論，化學家已能對於分子的構造狀況，想像出一種觀念來：他能够告訴我們，各原子如何相互排列，如何與其鄰原子彼此維繫。這是費了千辛萬苦，把許多化學反應，加以考察之後，方纔獲得的。種類不同的分子，放在一起的時候，彼此互換其原子而成爲新的組合，凡屬這種過程，都

包括在化學反應這一個名詞之下。這件事情，其範圍十分的過於廣大，此處實無法討論：我們祇須注意到這種研究，非常重要，尤其是在有機化學方面，最最重要，這就夠了，有機化學是化學的一門，其所論及者，都是生物機體的結構所特有的分子。我們頗可以意料，分子的性質，有賴於原子的布置情況：正好比房屋的式樣種類，有賴於其各種建築材料，如磚瓦、柱子、板壁等等的配搭一般。X射線近來已經幫助了化學家，在這一方面幹過不少的工作了：我們往後去就要見到，在化學方法所能揭露的祕密以外，如何可由X射線，更獲得新的定義與新的知識。

須知分子振動的狀態，我們要加以描寫，雖然不能夠像描寫音叉的運動那樣容易，然而我們卻覺得在有些情形之下，我們能夠察知分子的「單純振動」與分子的結構之間，有某種關聯。而且因為發見這些關聯，甚有趣味，在工業方面，往往又很重要，所以最能引起色效應的分子，已有人極仔細的研究過了。考察得最詳細的一點，便是分子的單純振動、組織以及形式，這裏的所謂單純振動，就是固有頻率。

葉綠素

讓我們開始先來研究葉綠素的分子。這是一切分子中最最有興味的一種，而且從生命過程的觀點來說，是最最重要的一種。葉綠素分子的組織，非常複雜，到現在還沒有研究得十分深遠。不過把它拿來先講，卻並非不自然的事情，因為它替我們把一切植物都着上了顏色，而且還不止如此，它替我們收取了太陽射線的能，並把這些能轉授與我們來用。在一方面，當我們走出門外的時候，不問走到什麼地方，它可使我們的眼睛，充滿了美麗的顏色；在另外一方面，它幫助了世界，踏進生命過程的第一個階段。此外，我們倚賴甚深的煤與石油，都是能的倉庫，這些能也是葉綠素在古代時候，從太陽射線中攝取了積儲起來的。

假使我們依平常的方法，用一枚稜鏡，把太陽或電弧所發的光線，展放開來，照在屏上，映出一條光譜，然後再取含有葉綠素的細胞（製造蕁麻葉標本的時候，立可獲得葉綠素，甚為便利，）放在被分析的光線路徑內，我們就要發見長的各波長，都給葉綠色吸收殆盡，祇剩下深紅色內的一

條狹帶（參閱銅版圖十四G。）其他較暗淡的各帶，可於光譜的其他各部分見到，而極端的青色，已經消滅。但是葉綠素最最重要的性質，就是能夠吸收長的波長。葉綠素分子對於太陽光中這一個特殊範圍內的各波長，最易起感應，因而它可以把能攝取進去。化學家已經說明，葉綠素分子得到了這樣多的體力（假定這體力一語，有一種廣義的用法，）就能夠與同時遍布各處的二氧化碳（即碳酸）分子，化合起來。如此一化合，就造成了所謂「碳水化合物」如澱粉與糖之類，這碳水化合物，便是植物活動力的基礎。當我們吃了植物，或是吃了吃植物的動物之後，我們也從葉綠素的吸收紅射線，而獲得我們的活動力。

我們由觀察知道，這一種特殊的分子，對於我們有如此重大的關係。在一切觀察之中的，確要算這是最可注意的了。凡是植物之內，都有葉綠素，而且都相同；我們雖知道葉綠素確實有兩種形式，不過除此以外，又知道一切植物，不問屬何科目，都利用此同一分子，以達同一目的。在動物生命方面，有重要功用的血球素，其組織與葉綠素同類。假使我們兼顧到這一點，我們的趣味還要加濃。這一種特殊形式的分子，有此普通一律的用途，究含有何種巨大秘密，現在還沒有知道。它的組織

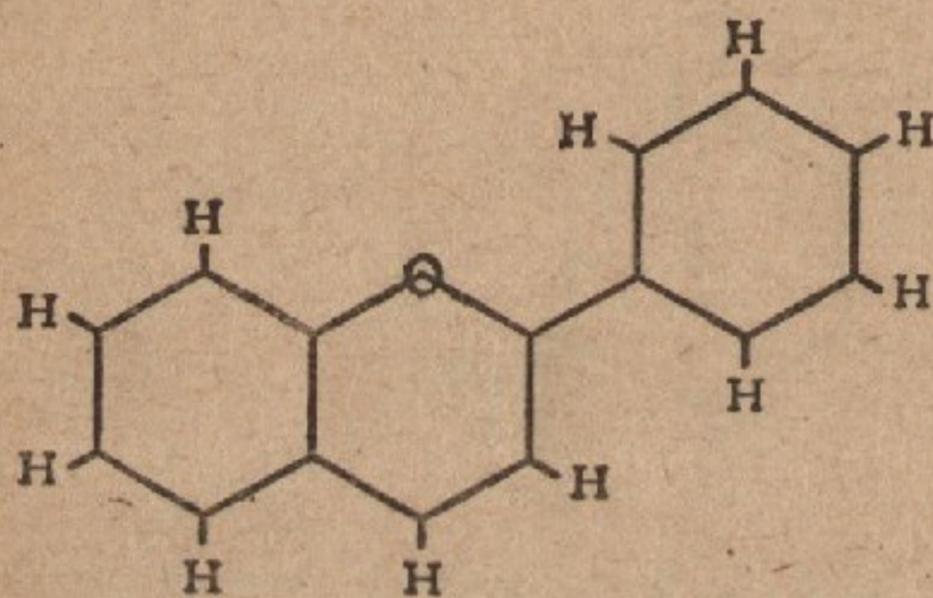
是已經知道了：它含有碳原子五十五個，氫原子七十二個，氧原子五個，氮原子四個，以及鎂原子一個；的確是一個極複雜的東西。不過對於這些原子的排列情況，卻祇發見了萬分之一，仍舊是一個未解決的有趣問題。

花之色

其次吸引我們加以注意的，必然是花的顏色，這裏的全部總綱，又依賴少數的基本形式，不過就花的情形而論，當然有許多導出的形式，因為花的顏色是五彩繽紛，千變萬化，沒有窮盡的。這些形式裏面最最重要的，有一種叫做胡蘿蔔精（CAROTIN），是一百年以前，從胡蘿蔔裏面提出來的着色物質，其種類很多，不過這是主要的一種罷了。它的分子，是由四十個碳原子，與五十六個氫原子化合成功的，不過這些原子如何結連在一處，卻一些也不知道。另外還有一種植物顏料，叫做葉黃素；它與胡蘿蔔精的不同之點，僅就組織成分而論，祇在於除掉前面所舉各原子外，又多了兩個氧原子。胡蘿蔔精與葉黃素，以及它們的變體，便是各種花的黃色與紅色的主要來源。例如水仙花、

櫻草花以及蒲公英，它們都含有胡蘿蔔精；又如金盞花、毛茛花以及向日葵，它們都含有葉黃素。植物的葉與花裏面，都含有這些着色物質，所以當那葉綠素與春夏俱逝的時候，這些物質就殘留在花與葉內，而把一片秋色，呈現於我們的眼前。最近又有人發見，由紫外光的作用，可從胡蘿蔔精製出維他命A來。

其次要講到一樣有趣味的物質，所謂花青素的便是。這花青素也把各種顏色，給與許多的花。就這一種着色物質而論，它的結構與成分，都已知，而且還可以觀察到，它的形式怎樣變更一下，就要生出顏色方面的變化。如圖五十七所示，便是花青素的標準結構。圖中碳與氧聯成六角環，形狀頗為希奇；這就是花青素組織的特色。各直線接合的三叉點，都有一個碳原子；但是標有字母O的地方，卻須除外；這裏是一個氧原子。碳原子在圖裏面都沒有註出來。標有H的各點，都是

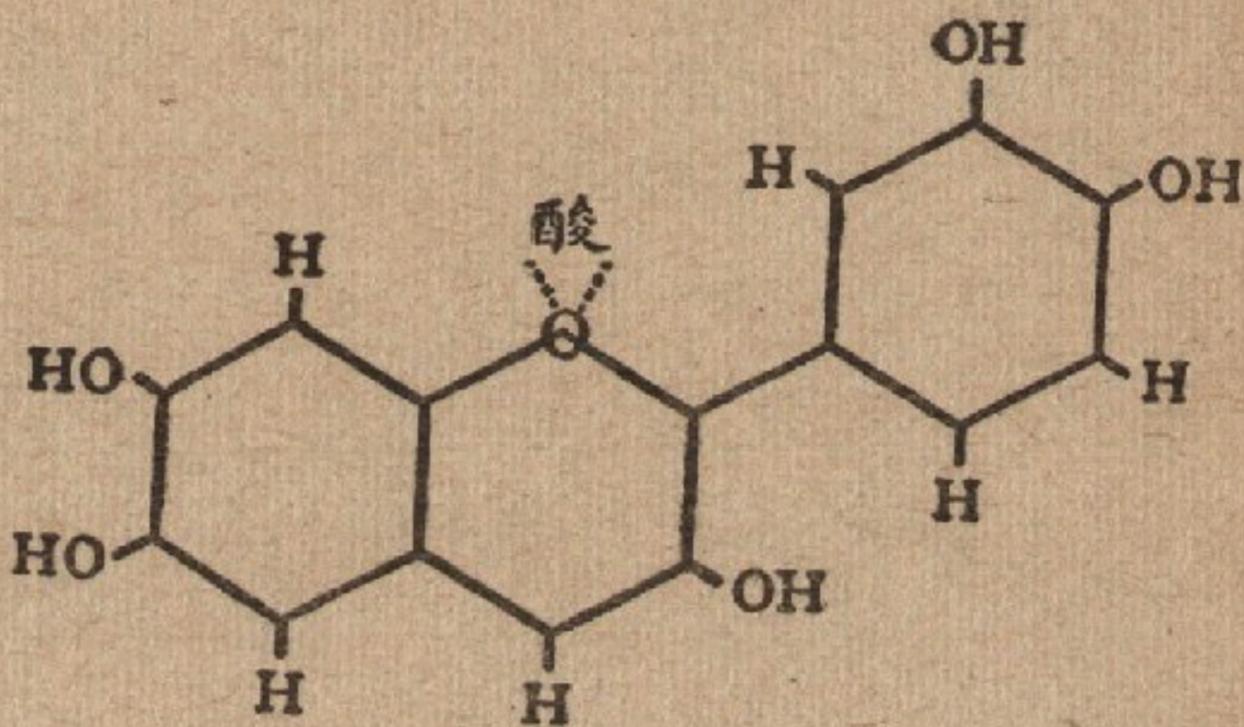


(圖五十七) 此圖所表示的，是花青素分子原始形式的各原子排列情狀。使花朵現出美麗顏色的，就是這種花青素。

氫原子的附着處所。這些原子的連結次序，已用化學方法決定。

花青素分子中各原子的排列，或許成功平面形，不過現在對於這件事情，還沒有確定的知識。有幾種其他的分子，含有六角形碳環者——例如苯環，已由X射線法，證明其成功平面形，而且就這些分子而論，又證明了各環都是正六角形，其每邊的長度，是一·四二埃（一埃等於一億分之一釐米。）

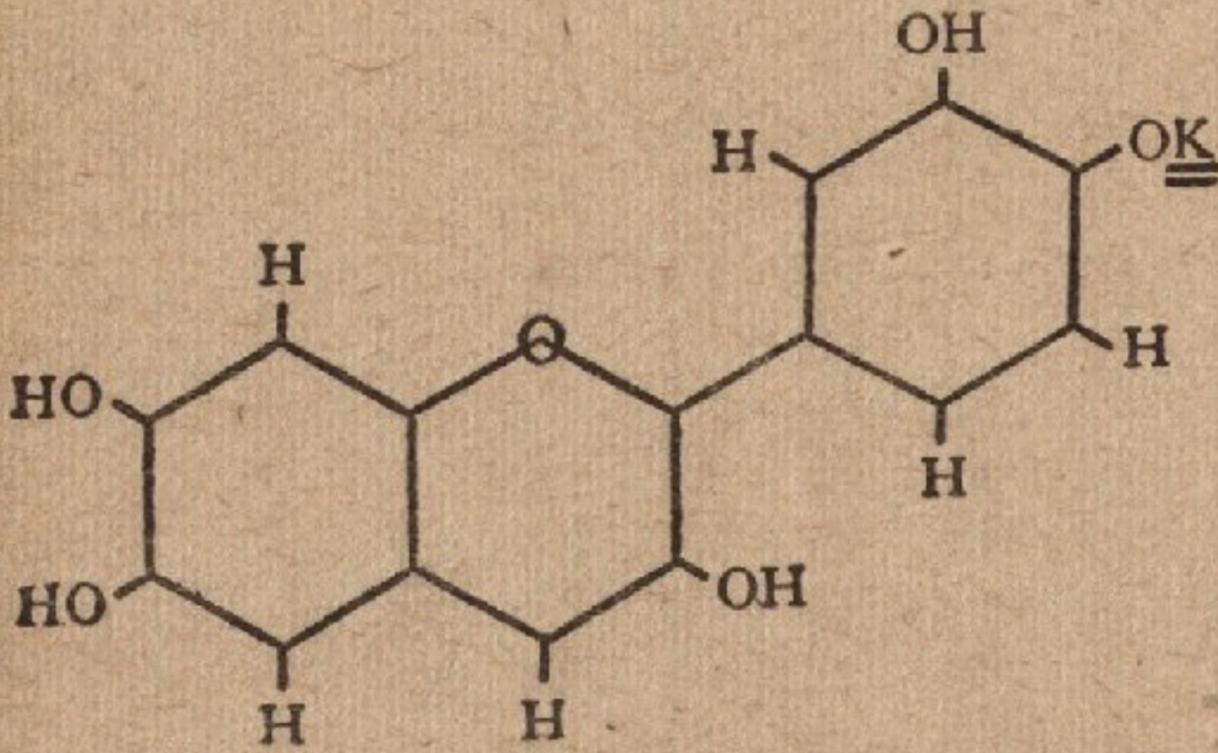
有許多紅色、醬色、紫色、以及青色，都是花青素生出來的。例如圖五十八所示的，便是使玫瑰花現出紅色的花青素變體：圖五十七所示的基本形式，其中所加的主要原子羣，是一種酸羣，此酸羣附着於氧原子上。假使把這酸羣拿掉，而把一個鉀原子加入此分子中，代去分子一端的一個氫原子，那麼



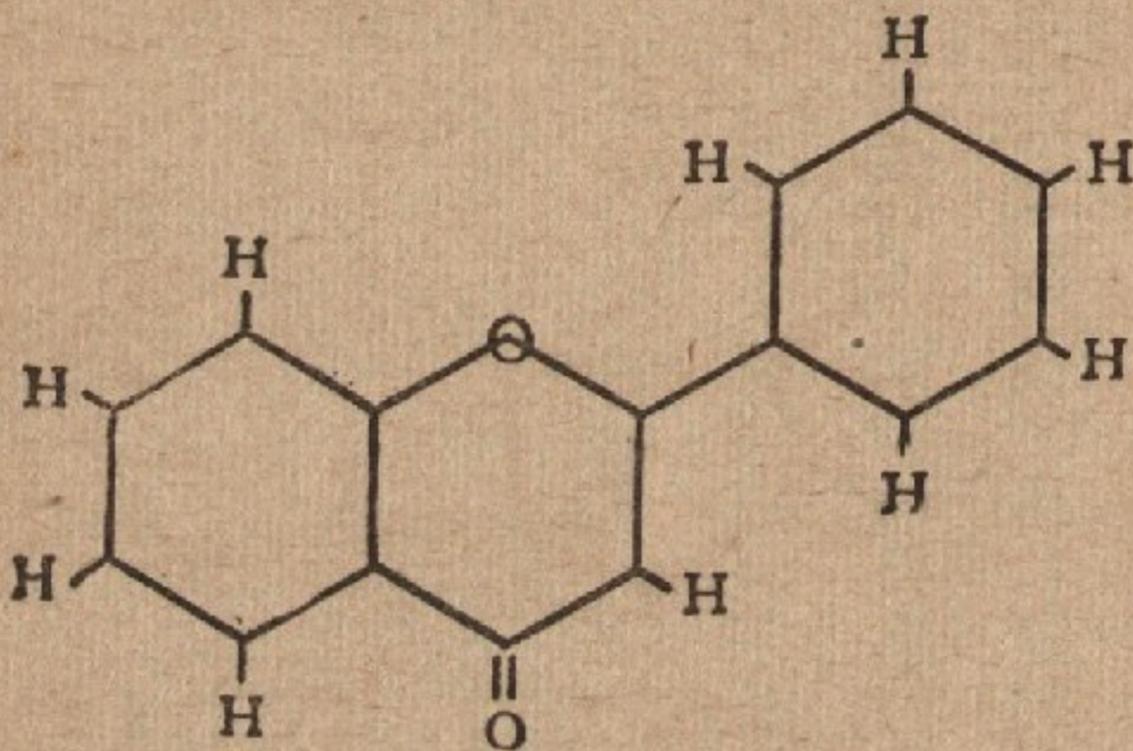
(圖五十八) 圖五十七所示的花青素，若以酸羣鬆鬆的附於它的氧原子上，並在某某幾點，把氫原子換成氫氧羣(氫+氧)，那麼就可把它改變為另外一種花青素，即使玫瑰花獲得紅色的花青素。這分子現在是帶酸性了。

我們又得到一種花青素變體，此種花青素變體，可使矢車菊現在青色來，如圖五十九所示的，就是它的結構。在我們英國，有幾處地方的小孩子，把青色的野水仙花，種在蟻穴附近，這花因受蟻酸的作用，就由青色而變成紅色。

把花青素的分子結構，稍稍變動一下，變成圖六十所示的形式，就成功一種花黃素，花黃素比花青素多一個氧原子，少一個氫原子。這花



(圖五十九) 前圖中的酸羣，是拿掉了；氫氧羣中有一羣的氫，換成了鉀原子，此圖中標明字母 K 的便是。這分子現在是帶鹼性了。它使矢車菊現出青色來。



(圖六十) 花黃素的原始形式，可由花青素變來，祇須把一個氧原子，加在中央一環上，與一個碳原子緊緊連結，代去那一點的氫原子好了。

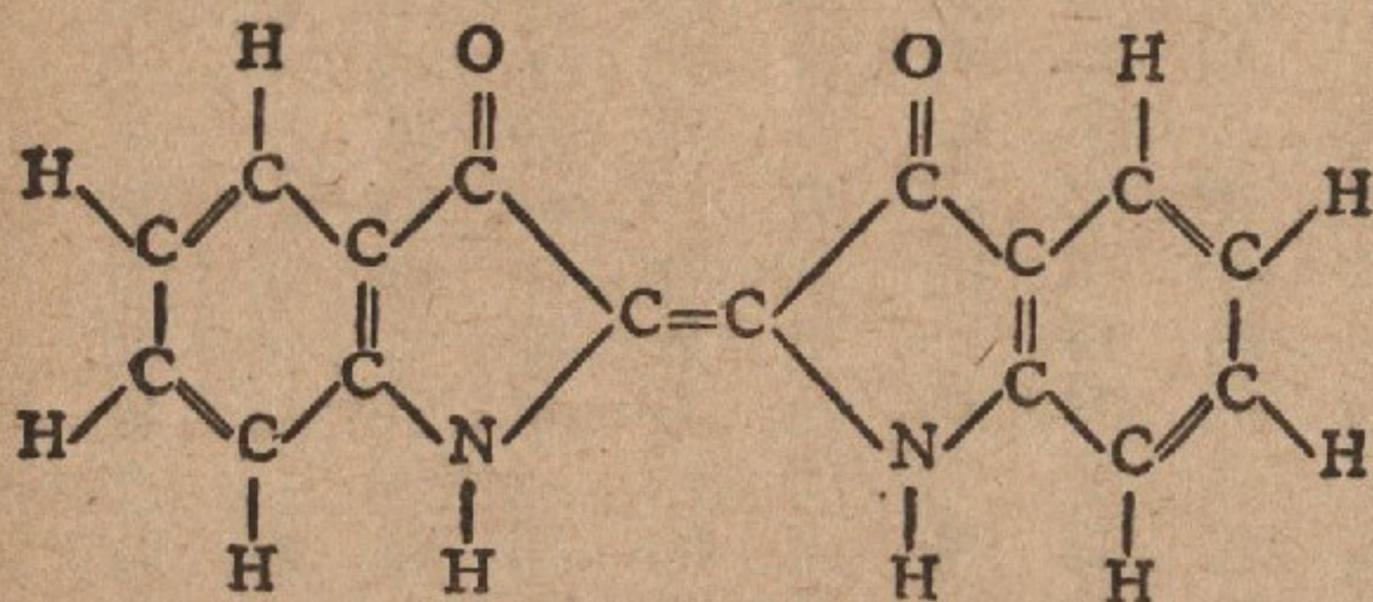
黃素的分子，可以溶解於水。櫻草花的顏色，是從這種花黃素得來的，所以櫻草花在溼的時候，顏色都褪掉，大概因為這個緣故。

染料

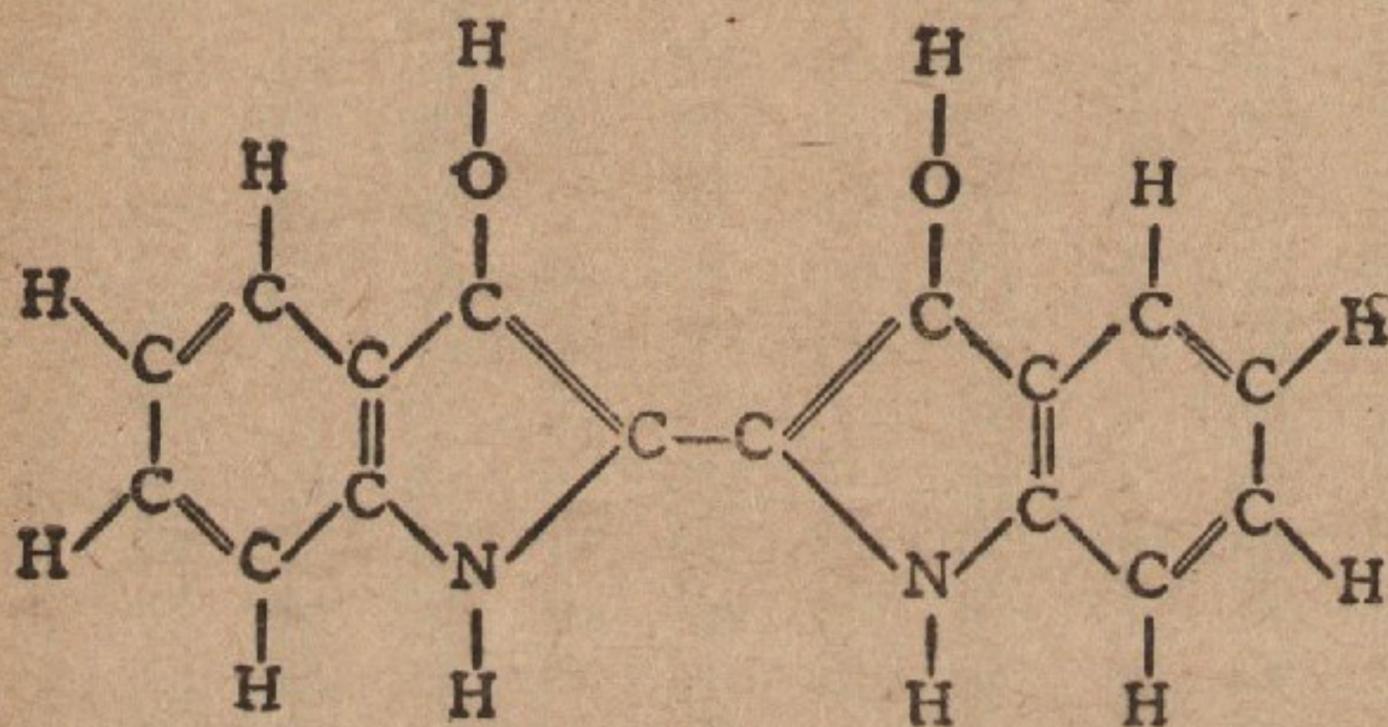
不記得從什麼時候起，人類已從植物裏面提出染料來，不過說也奇怪透了，葉與花的天然着色物質，他們卻難得用到，他們所利用的植物組織成分，與植物本身的着色作用，並無關係。花草的色澤，隨季節而變化，這本是天造地設，妙合自然的事情，但是人類着手裝飾他的器具，他的房屋，或他自己的時候，卻希望可以多多耐久。因此，舉一個例來說，他就從某種植物的根裏面，提出一種所謂藍靛，以及它的近宗大青來，這種植物，他也知道如何去培植它們。染色者由此藍靛與大青，以及它們的副產物，已經製出了許多著名的顏色。

藍靛分子的結構，在化學上是很著名的：如圖六十一所示的便是。因為這結構在一八八三年，已由阿·逢·拜義爾（A von Baeyer）加以最後的決定，所以製造藍靛，現在已改用合成

法，以前從植物提取的舊法，比較艱難，已完全廢除不用了。應用藍靛染料，有一個希奇而有趣味的特點。藍靛本身，是不能夠溶解於水中的：我們大家相信用藍靛，只此的確就是有力的保證，因為用藍靛染色的物體，放在空氣裏面，不會受潮氣的影響。但是染色的手續，卻需要一種溶液，可以把織物原料浸在其中。為除去這重困難起見，染色者就用化學方法來處理這藍靛，其結果是在藍靛分子內，再加兩個氫原子，成功圖六十二所示的形式。如此一變化之



(圖六十一) 藍靛的分子，此圖所表示者，是用化學方法決定其原子排列的結果。



(圖六十二) 藍靛的分子，加以改變，使其可以溶解於水。

法，以前從植物提取的舊法，比較艱難，已完全廢除不用了。應用藍靛染料，有一個希奇而有趣味的特點。藍靛本身，是不能夠溶解於水中的：我們大家相信用藍靛，只此的確就是有力的保證，因為用藍靛染色的物體，放在空氣裏面，不會受潮氣的影響。但是染色的手續，卻需要一種溶液，可以把織物原料浸在其中。為除去這重困難起見，染色者就用化學方法來處理這藍靛，其結果是在藍靛分子內，再加兩個氫原子，成功圖六十二所示的形式。如此一變化之

後，這分子就有本領自附於水分子上：這就是說，藍靛變成可以溶解於水。

同時它又變成無色；以此爲例，極合於說明我們時常力謀說明的一點，即分子的吸收光，具有共振的本性。我們在前面已經知道，音叉的一股或兩股上，塗了一些蠟之後，音叉的音調就要改變。我們是使音叉擔負了重物，所以它的振動，就因此遲慢下來。照式照樣，要是分子與音叉，有相類之處的話，那麼我們應當預先料到，分子的「一種單純振動」或「幾種單純振動」可由加重量於分子而使其改變，所謂加重量，就是把原子加入分子的適當地方。在實際上，染料化學家所做的是，就是這種加入原子的實驗：他努力探究，要發見他所應當加進去的，是什麼原子，以及這原子應當加在什麼地方。同時他還得保證，這種改變的染料，「不會褪色」他對於所欲染色的材料，平常所得的經驗，便是他所加進去的任何原子，必不可鬆泛易脫。

波長的可見範圍，很小很小：所以要把染料的「單純振動」在光譜上移過一節，移到極不同的部分，並非難事，即使完全把它推出光譜以外，也很容易。藍靛的分子受到改變，可以溶解於水的時候，所發生的就是這件事情。此時它不再吸收長的光波，不單單留下青色波來：它要把各色光波，

一齊放過，因而它的溶液就沒有顏色了。

雖然如此，在染色的當兒，這種溶液的無色，並不是一重障礙。我們祇管把要染色的質料，浸在藍靛的溶液中，染料自會附着在纖維上面。須知已經加在藍靛分子內的氫原子，極容易再除去，祇要把藍靛露在空氣裏面好了。所以當被染的質料，一出染缸之後，藍靛分子立即開始恢復其正常的形式，此形式就發出藍靛本來的顏色。於是染有此色的物體，儘受潮氣，不會褪色，而染匠的目的，就此達到。

我們的祖先，在二千年前用以裝飾身體的大青，以及羅馬的宮中紫，都出於同一的分子結構，像藍靛一樣；宮中紫是從海螺裏面提出來的。

我們在這世界之中，所見的四週景色，其花樣最繁，陳列最廣的，當然要推花與葉的顏色；除此以外，還有蒼天碧海，其浩大善變，也不亞於花與葉，不久我們也要拿來考究一下。這天色與海色，例如夕陽的紅色，與天涯海角的青色，其來源並不是顏料，須用完全不同的方法，來解釋其發生顏色的原因。還有泥土與岩石，也有各種顏色，其中有幾種甚為鮮明，我們常用以製繪畫的色料。這些物

質的顏色，也從吸收的過程得來，所以可把它們歸入方纔所討論的顏料一類。

繞射

產生顏色的方法，除我們剛纔正在考察的以外，還有不止一種，性質完全各異，所以我們不得不另闢新境界，重建根據地，對此等方法加以觀察。

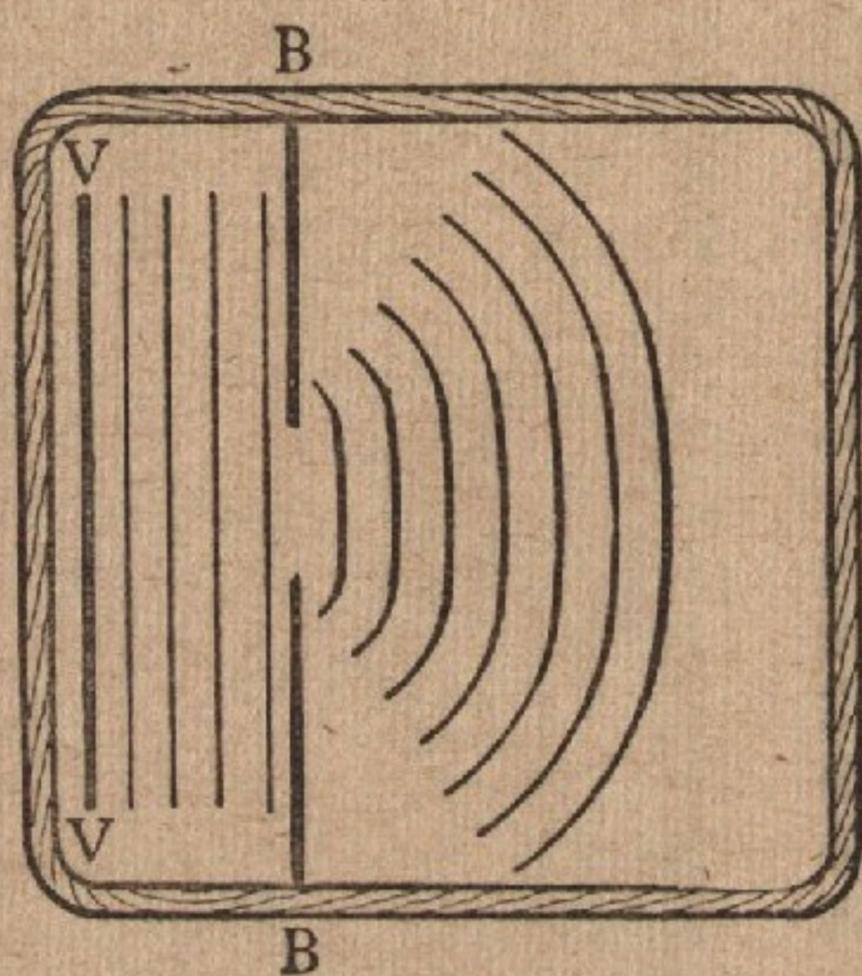
有一件大可注意的事實，我們以前也曾提起過，想讀者不致於忘記。這就是光線在路上向前直進，看不出它會向兩旁散漫。我們又曾察知，假使把光看作一種波動，那麼就應當有此現象，現在何以竟看不出，實令人不十分容易了解。牛頓確曾據此以爲反對波動說的主要理由。對於水波的實驗，例如我們可用波紋水櫃來實行的實驗，常常表現多少的旁漫：牛頓或許想到，這種效應就光而論，也應當如此明顯，現在既然不能辨認，所以波動說應當放棄。不過在事實上說來，這一種異議雖似對於波動說擊中了要害，卻反而變成了扶持波動說的最顯著的明證。由比較精細的考察，已知波的長度，若比射線的寬度小得多，那麼波的旁漫可以變得非常之小，很難檢查出來。就光而論，

這兩種量裏面，前者對於後者之比，的確是往往很小很小，因此，光的旁漫是極難觀察；為視覺的目的打算，這倒是一件傲倖的事情。

這一點對於我們所立光的各種學說，最為重要。所以讓我們把它仔仔細細的考察一下，並用實驗來指導我們自己。

如圖六十三所示，假使我們把兩座障壁，左右分開的插在波紋水櫃中，其間空出一段隙地，然後激起波紋，使它滾滾捲向此缺口穿過障壁而到這一邊來，那

麼我們立刻就會看見，這穿過來的波，總帶着幾分旁漫。穿過障壁的各波，祇有一部分保留着未穿過各波動的原形，而與它們互相平行。在這新波系的兩側，另添了兩串波列，我們可以稱之為兩翼，這左右兩翼所表示的現象，便是我們正在說起的旁漫。缺口愈闊，中央的一部分愈見其大，兩翼愈



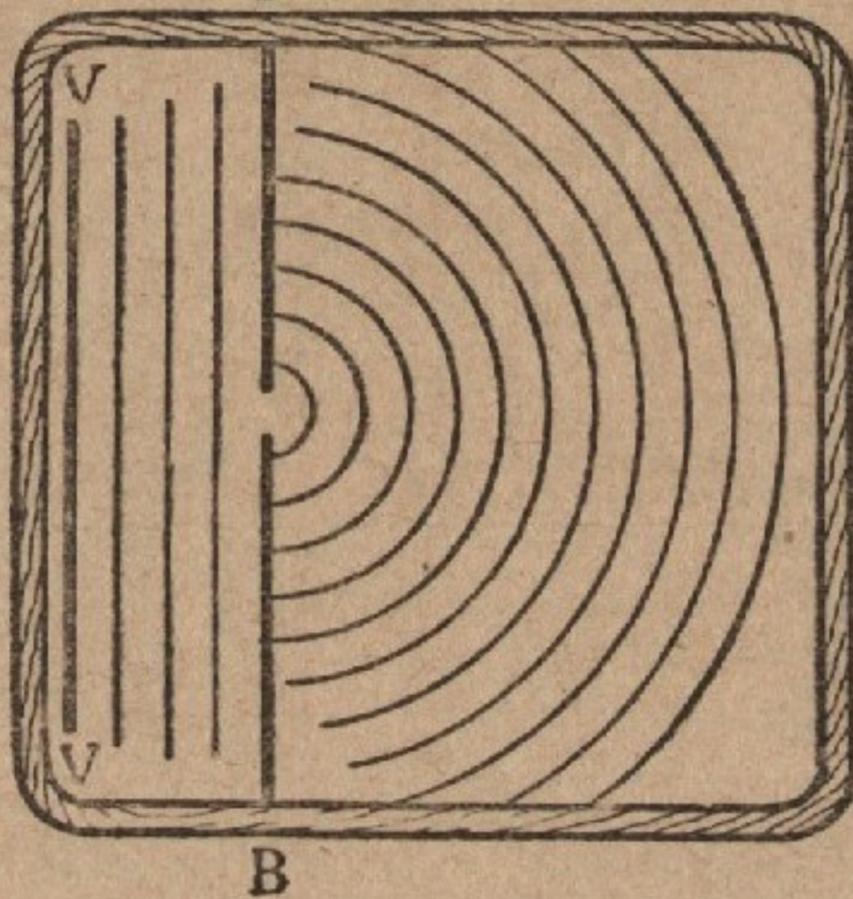
(圖六十三) 波紋水櫃中的振動棒 V，激起了一串波紋，向障壁 B 前進。B 上有一個相當闊的缺口，波紋行至障壁，就從這缺口穿過去。穿過後繼續進行的波，有一部分保留原缺口的形式。

見其小，而我們也得到一種暗示，以為原來波系的運動，正在有規則地繼續下去。然而我們若把這罅隙弄得很狹很狹，那麼兩翼與中央，簡直都成功了半圓形，如圖六十四所示一般，而且各波通過此孔後的擾動，也向各方平均發展。

我們說到這一個罅隙的大小，我們必須指明，這是相對於波長的。同一罅隙，就很短的波而論，我們可以說它是一個大孔，就很長的波而論，或許成爲很狹的空隙，可以引起圖六十四所示的旁漫現象。

就光線的情形而說，波長與空隙的比例，決不

能在水櫃中摹造出來。我們所激起的波紋，與我們所開的罅隙相比，總是太大了。就光的情形而論，一英寸寬的口子，要比波長大到三萬倍左右；穿過缺口的光波，兩翼與中央部分相較，是多麼微小而無足輕重，殊可不難想見。我們必須把所用的水櫃，放大好幾千倍，而在障壁上面，按同一比率開



(圖六十四) 就此圖所表示者而論，障壁的缺口是比較小得多了。此時波紋繼續前進，都成功半圓形。

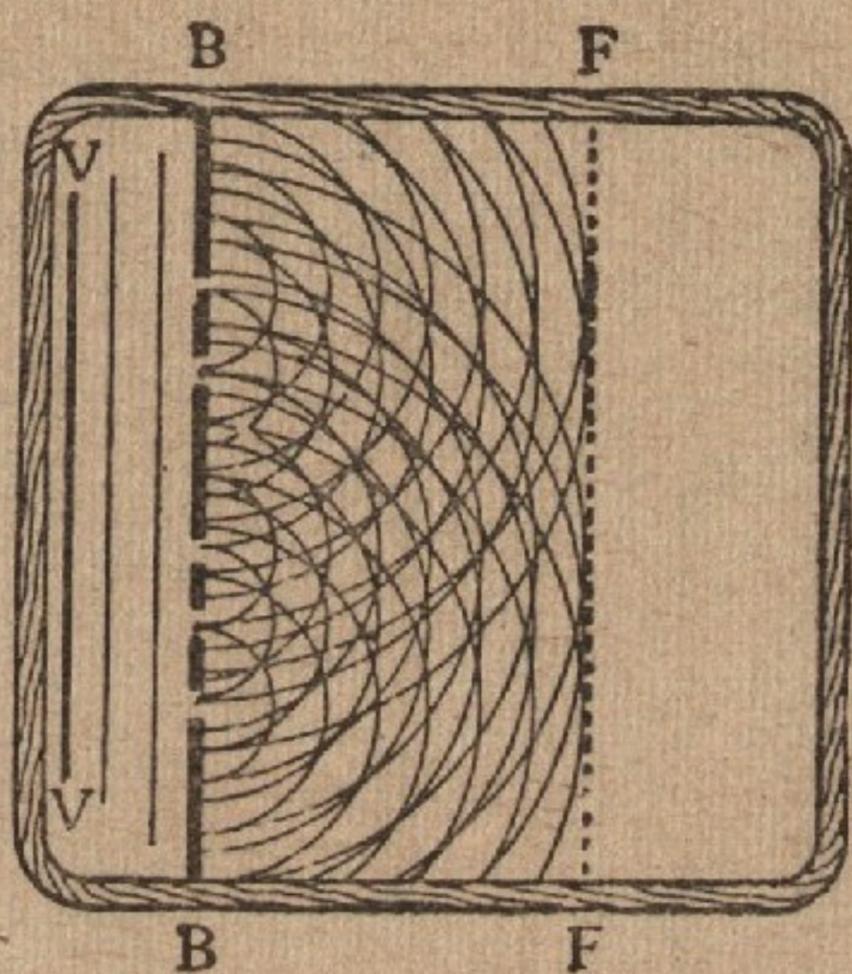
出隙縫來，方始可以觀察到各種效應，其模仿光的地方，絲毫無二。然而我們雖未嘗如此做法，這水櫃實驗卻已使我們知曉，波的旁漫，必然發生到某種程度；而且我們確實覺得，在尋常的環境之下，就光線的情形而論，這種旁漫現象，我們是一些不會看見的。在非常的環境之下，例如在實驗室中我們所能佈置的環境之下，我們就可以觀察到這種現象；換句話說，我們能夠證明光在適當的情形之下，也會轉灣。此外，波紋水櫃的實驗，還幫助我們明白了下面一件事，即在這一種效應方面，波長既然大有關係，那麼長波與短波，其轉灣就可以有難易的分別，或許因此生出種種顏色來。就實在的情形講，的確是如此，不過在尋常的環境之下，全部效應既然難於看見，顏色的分離作用，比較起來也就依然不甚明顯。

但是我們現在假使把特別的裝置，加於水櫃之中，再進行我們的實驗，我們就有方法得到一種解釋，說明就光的情形而論，為什麼着色作用可以變得很強很強。我們把一重障壁放在波紋水櫃中，壁上開有若干小孔。我們先做一次預備實驗，在這實驗裏面，障壁上的小孔，可照任何方法排列，而且大小也不必一律相同。當波紋向此障壁前進，其一部分從各小孔穿過的時候，我們察見出

現於障壁右方的波系，在短時間內就重行聯合起來，其波前依舊恢復原狀。從每一小孔湧出來的各組波系，都向四方散布，成功半圓形的系統，如圖六十五所示，但是各組的作用，都與其他各組的作用，互相併合，因此在末了顯出直的波前，而依原方向前進。這一個實驗，其目的在於表示許多半圓形波系，聯合而成直線波前系。

現在再設想前一實驗中的障壁，另外換過一座，這座障壁上的小孔，其距離都相等。它們的大小，仍無庸一律，不過為便利起見，假定它們的大小相同。在此時所發現的波紋狀況，

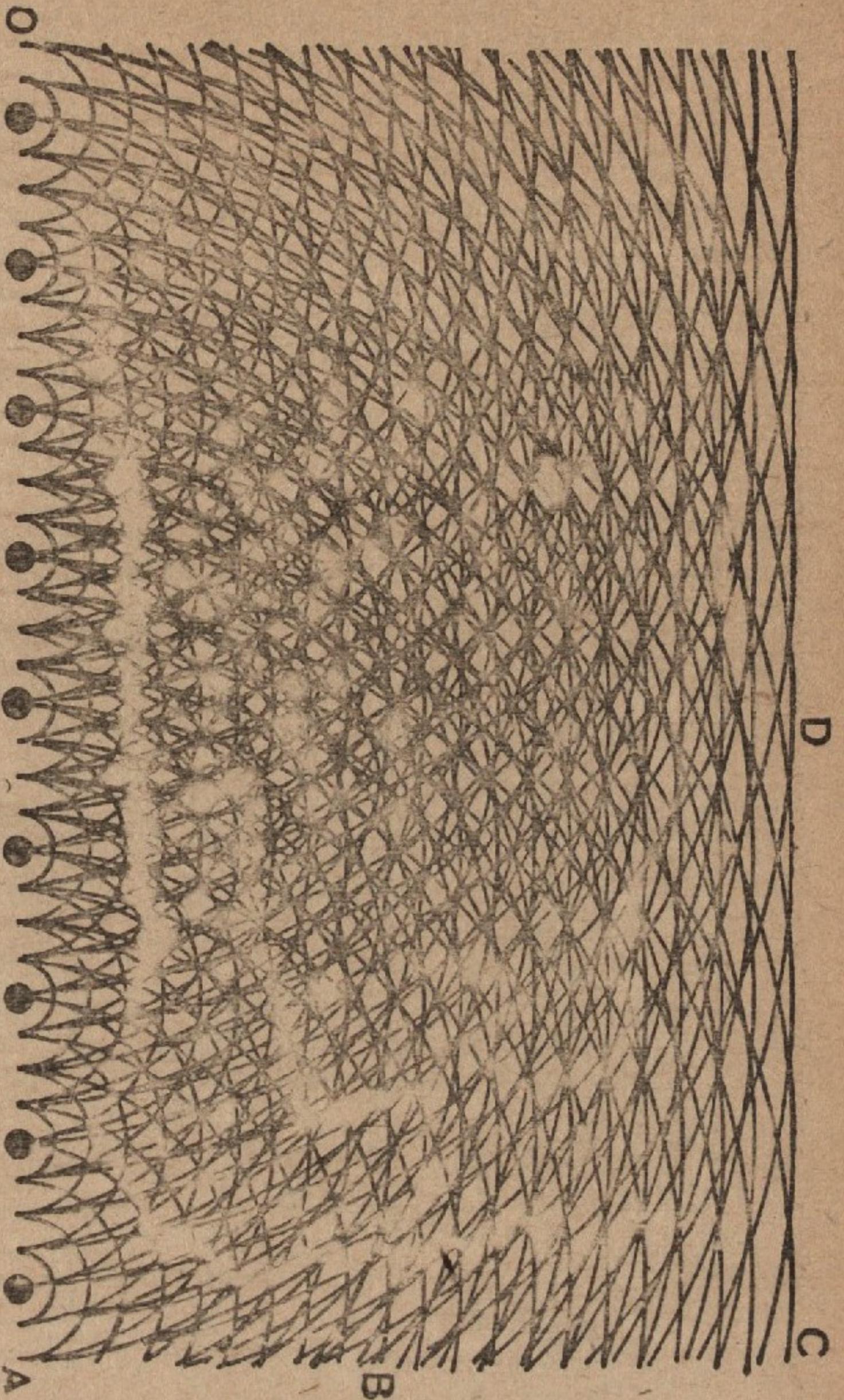
我們祇要畫一個簡圖，就可以把它表示出來；其實真正做這實驗，還沒有如此容易觀察，因為水櫃的大小，差不多總是不夠。圖六十六，就是摹仿這種波紋而繪成的。這一張圖看起來雖然很複雜，實際上不過是幾組半圓所構成，其圓心就在各小孔。各組半圓波所表示的，都是好像障壁上祇有該



(圖六十五) 當(六十四圖的)波紋穿過若干小孔，而由這些小孔散布出去的時候，終必合成一道波前，如虛線所示。此線與原波前平行。

一孔的時候，各半圓波如何傳布的狀況。就實際的情形而論，這幾組水波，都混合成功一個系統，而且與前一個實驗相同，也成功一串列波，此列波可以看做原列波的續波，不過能量較少一些。這一系列的波前，與原來的波前平行，而且可以推想它是由障壁發出去的。以此而論，本實驗與圖六十五所示的實驗，完全相同，不過各小孔間的距離，現在卻是一律了。

然而現在又有一種新的效應發現，這種效應祇在各小孔相隔等遠的時候，纔能夠發生。除保留原來進行陣線的波前外，還有斜向自行合成的波前，其進行陣線與圖中的OB平行。這一道波前，是分別屬於各組半圓系統的波，聯合而成的；然而這些波並不是同時通過各小孔的波，卻是前後相隔一定時間的波。例如屬於第一孔的第一波，屬於第二孔的第二波，諸如此類，都與波前相觸。假使以本書的紙面，放在差不多與眼睛同高的水平面上，閉一目而看此圖，使該圖呈現極強的透視形狀，且使視線與OB的方向平行，那麼這些波前就最容易察見了。圖六十七的簡圖，是節取六十八詳圖的一部分，可以幫助我們看清楚這道改向的波前。因為新的波前是如此形成的，所以能的傳布，也有了新的方向。這就是我們通常所謂繞射光柱。這種效應，在光學實驗室裏面，常常見到，有幾

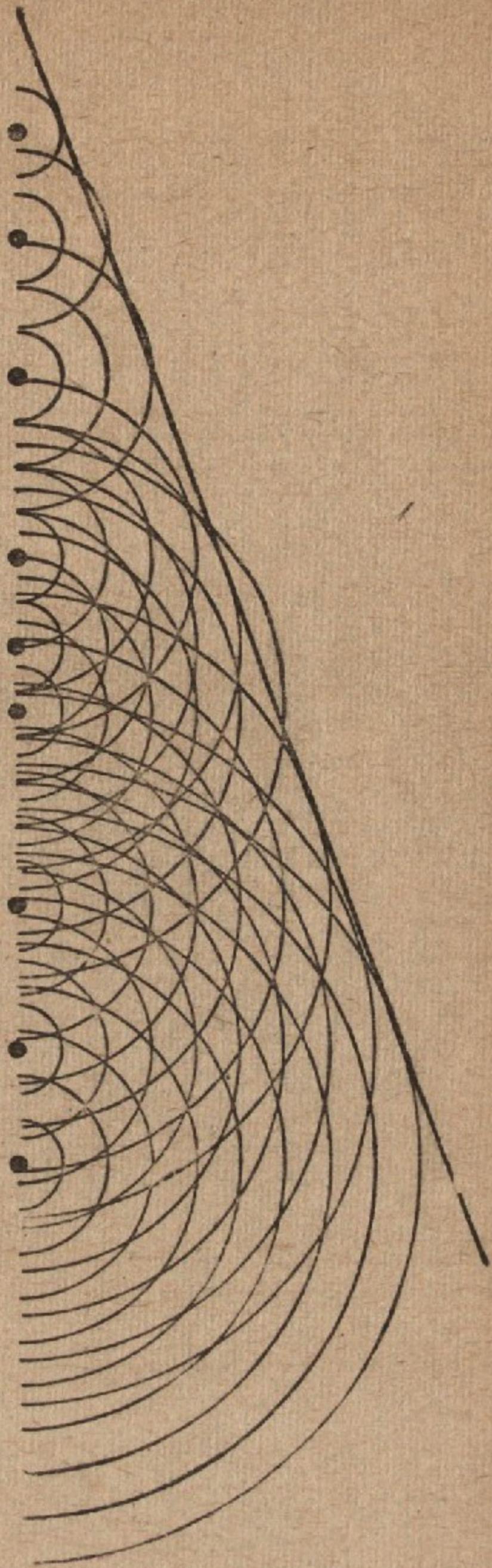


(圖六十六) 本圖中的黑點，可以代表波紋水櫃中障壁上，一組距離相等的小孔，也可以代表一組排列齊整的質點，這些質點把入射的散射出去，都成功半圓波紋的形狀（假使我們把這種講法，推廣到三因次

室間，那麼就成功球狀)。這些波正在從下面向上面前進，它們的波前平行於 OA。波前 DC 的合成，已在圖六十五中解釋過了。在本圖裏面，還有其他的波前，也由這些半圓波合成。我們若欲看見這些波前，祇要順次依 OA, OB, OC, 以及 OD 的方向，斜望此圖即得。除此以外，就沒有其他的波前了（本圖執筆繪製者，是亞司脫勃雷）。



(圖六十七) 這是節取前一圖而繪成的，表示第一級繞射波的形成。此圖又表示繞射的方向，須視波長而定。圖中短波與長波的比率，約略相同於青波對紅波的比。



(圖六十八) 此圖表示各波的中心(即黑點)若相隔不等遠,繞射波組就不能夠形成。假使如圖所示,畫一條直線,與代表波峯的圓,一部分接觸,此直線就穿過其他的圓。這樣一來,有些波紋在波前生出峯來,有些波紋在波前住下凹陷,兩者相合,互相毀滅。各組波紋間的「干涉」,到下文還有更爲詳細的討論。

種極準確的光的分析法,的確以此爲基礎,我們不久就要講到了。

若把此圖在其自己的平面內轉動,而繼續沿OC線與OD線望此圖,就可以看見擾動穿過各小

孔後，所成的波前除OA與OB兩方向外，還有其他的方向，能的傳布，也有其他方向。這些方向的光束，我們稱之為第一級、第二級、第三級繞射光束，諸如此類。在此圖中，波長是各孔距離的四分之一；照圖上看來，在原方向以外的繞射光束，兩側各有三道，就是這個緣故。

假使各小孔沿障壁排列，彼此的距離不相等，就沒有這種現象發生。祇在各孔的間隔一定的時候，直波前纔能接觸所選擇的一切半圓波，因而成為諸波結合的結果。圖六十八就可以證明此事。

還有一件事情可以觀察到，即波長愈短，各孔的間隔愈遠，繞射光線的偏向就愈小。在圖六十七裏面，所示者便是兩種不同波長的第一級繞射效應。銅版圖十五A所示的一對照相，更可證明此一點。這兩幅照相表示了許多級的繞射效應。

光學方面的這種實驗，也很容易說明。在一塊玻璃板上，畫一組平行直線，每釐米中須畫這麼幾千條，畫滿全板，板係長方形，長寬不過幾釐米。這種玻璃叫做繞射光柵。要劃成一片真正優美的光柵，是一件極困難的事情。最好的光柵，都由世界上著名的劃線機製成，這種劃線機全世界也

祇有幾架。已故巴爾的摩亞 (Baltimore) 大學教授魯蘭特 (Rowland) 曾製有光柵多片，甚負盛名。英國國立物理試驗所，備有精良的劃線機一架。

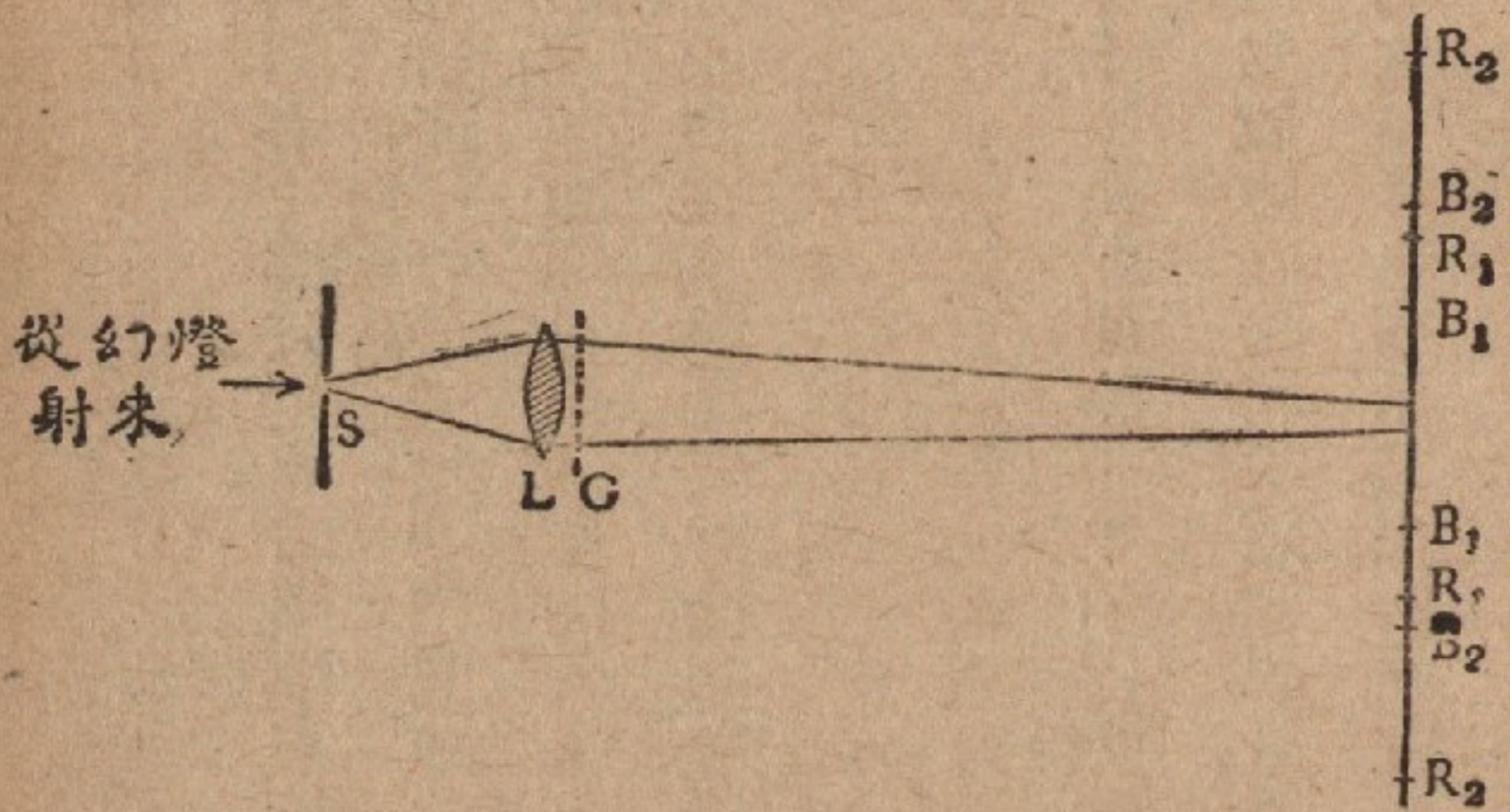
從電弧發射的光，穿出幻燈上的狹縫，由透鏡聚焦於屏上。在前面所說的理論方面，雖然並未提起這透鏡與狹縫，但是屏上所映的像，若欲使它清楚明亮，那麼這些都是必需的東西。假定這狹縫是在鉛直向內，而光柵所處的地位，恰使其上的各直線與狹縫平行，那麼圖六十九所代表的，便是此項佈置的水平截面，不過各波的波長，以及光柵的各線，當然不能應有盡有的細細畫出來。玻璃上清明的部分，相當於圖六十六的障壁上各小孔，而所畫各線既不透明，就相當於障壁上各小孔間的部分了。種種不同的波長，於是被繞射於種種不同的方向，紅的偏向最多，青的偏向最少，因而屏上現出光譜來，其顏色排列的順序，與前面所說稜鏡分析給我們看的，完全相同。此外，屏上所現的光譜不止一道，尚有第二級、第三級等，重複出現，級次愈高，光譜愈放長，顏色愈分得開。

用這種方法以得光譜，對於我們有一件大功勞，即由此可以推算每種被繞射色光的波長。從圖六十七，可見波的長度，光柵的間隔，以及繞射光線與原方向所成的角，其間有一定的關係，最後

的一種量，我們可由觀察測得，第二種量在劃線的時候就決定了，所以第一種量可以推算出來。用此法以決定波長，準確度非常之高。

光柵也可以劃在良好的反射金屬面上，例如製造反射望遠鏡中的鏡子，所用的鏡金就可以刻劃光柵。這時候須使光從光柵表面反射出來，所得的結果，與光從玻璃光柵透過時完全相同。

有幾種甲蟲的背，蝴蝶的翅膀，以及鳥的羽毛，例如孔雀尾巴，都呈現美麗的彩色，這些彩色就是繞射效應。把孔雀羽毛拆散了，仔細觀察起來，並不見有明亮的顏色；它們不過顯



(圖六十九) 從幻燈射出來的光線，通過隙縫 S，由透鏡 L 把 S 的像，造在右側的屏上。光柵 G 放在透鏡的前方。於是一部分的光，即被繞射。隙縫的像，現於 B_1 , B_2 等處者，呈青色；現於 R_1 , R_2 等處者，呈紅色。這樣一來，就造成了數級光譜。第一級光譜位於 B_1 與 R_1 之間，第二級光譜位於 B_2 R_2 之間，以下各級類推。

出一些褐色罷了。

有時候把一種材料加以特殊的處理，也可得到這同一的繞射彩色。螺鈿（又名珍珠母）所以呈現各種顏色，就因為那磨光的表面上，有無數細密的槽紋之故。這螺鈿本是無數薄層堆積而成的，製造飾品時候，把它們橫切開來，因而留下了許多平行的脊紋。若把螺鈿的痕跡印在蠟上，那麼這蠟模也會現出彩色：這着色作用的原因是形式，並非顏料。天空與海的顏色，大部分也由繞射所致，不過它們的生成情況，必須加以專門的考究。我們在後面就要討論到這些事情。

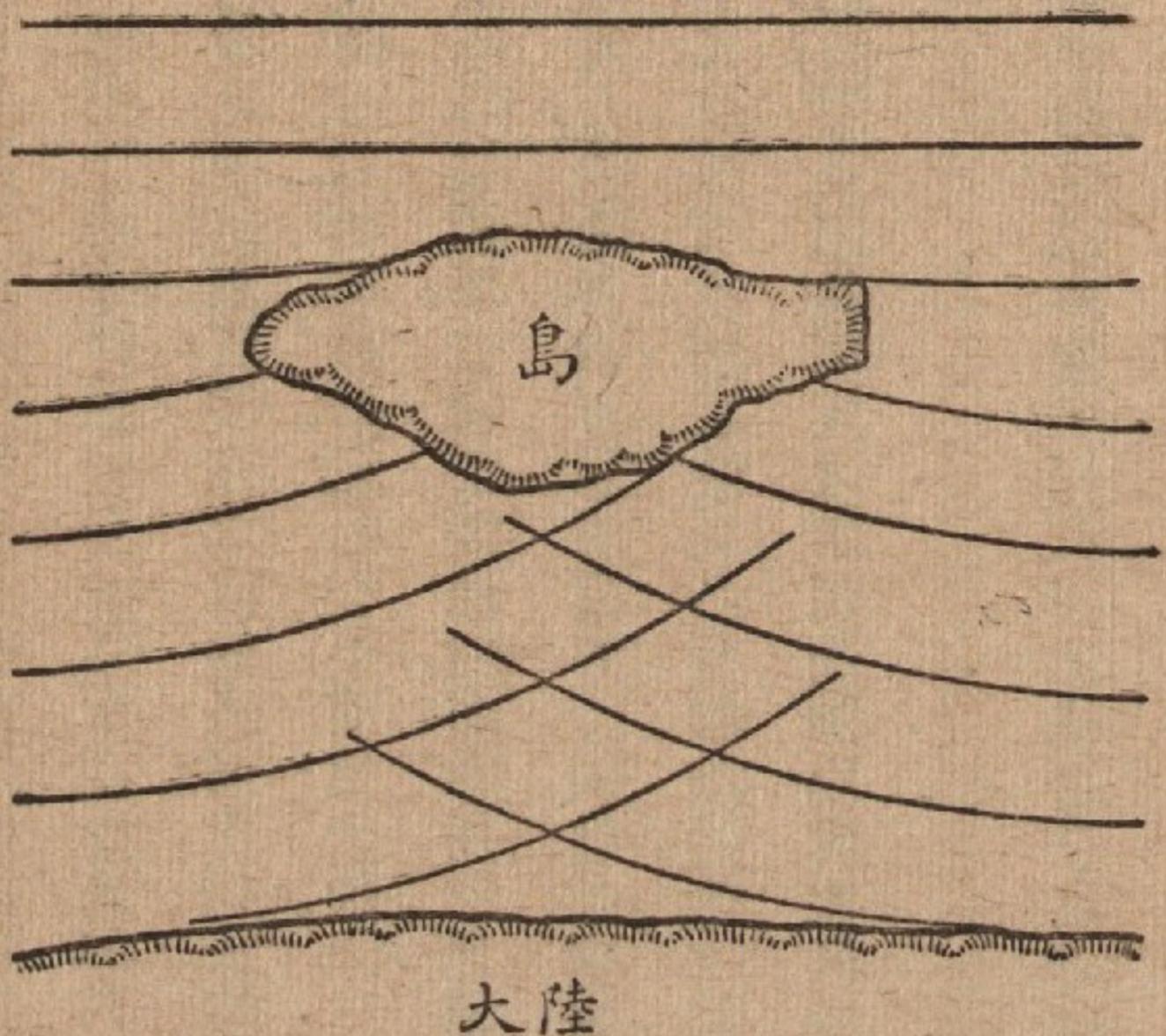
干涉

現在可以再來考察另外一種發生顏色的原因，所謂干涉原理便是：干涉與繞射，雖然彼此相異，卻也有些類似，因為干涉現象也可以解釋為波動說的直接結果。這種現象，實在是波動的特性效應，當海面上有兩組波浪，互相掃過的時候，我們往往可以察見它。在澳洲南海岸外，有一個小島（看圖七十）；這個島把南冰洋沖來的波浪，分成兩組，使這兩組波系，沿島的兩側掃過，互相斜交

而達海岸。注視此兩波斜交的結果，覺得它甚為奇特。當波峯與波峯相遇時，水就直往上竄，浪花四濺；當波谷與波谷相遇時，水就儘向下陷，深度加倍。若一組波的波峯，在某一點要使水上昇，而其他一組的波谷，同時在這點要使水凹下去，那麼這地方的水就靜止不動，既不上湧，又不下落。此原理的得名，就因為波峯與波谷如此互相干涉之故：但是這一個名稱的涵義，也有未全之處，因為它祇說着了這一般作用的一方面，這一種作用，叫它做

波的疊加，或波的聯合，恐怕更為適當。這兩組波祇在若干特別之點，纔互相干涉而毀滅，在其餘各

海洋中的巨波大浪



(圖七十) 海洋中的波浪，從島的兩側掃過來，聯合在一起，如圖所示。

點，彼此適足以聯合起來，生出雙倍的效應。

在較小的範圍內，我們已見波紋水櫃中的同一效應：任何片刻間的水面形狀，不過是各個波系的形式總和。所以我們向下注視動水表面，不問在什麼時候，總可以盡見干涉現象的內容，不會有不可以觀察的隱秘。例如在海面上，我們可以看見一組微波，浮在大波的表面上，這大波又乘着一陣巨浪而前進。任何一組波，在較大一組波的曲面上，向前移動，宛如在平面上一般。

所以當托馬司·楊於十九世紀初年在皇家學院講學，發表干涉原理，而應用之以解釋幾種顯著的光學效應時，他的天才使他抓住了無論何人，無論何時可以看見的一種效應，來做比喻。

在實際上，干涉原理與繞射原理是大同小異，兩種現象，都是波動具有疊加特性之結果，不過通常總要把它們區別為二，其所以區別它們之故，還是因為列入這兩類而加以考察的效應。其本性有些異樣。

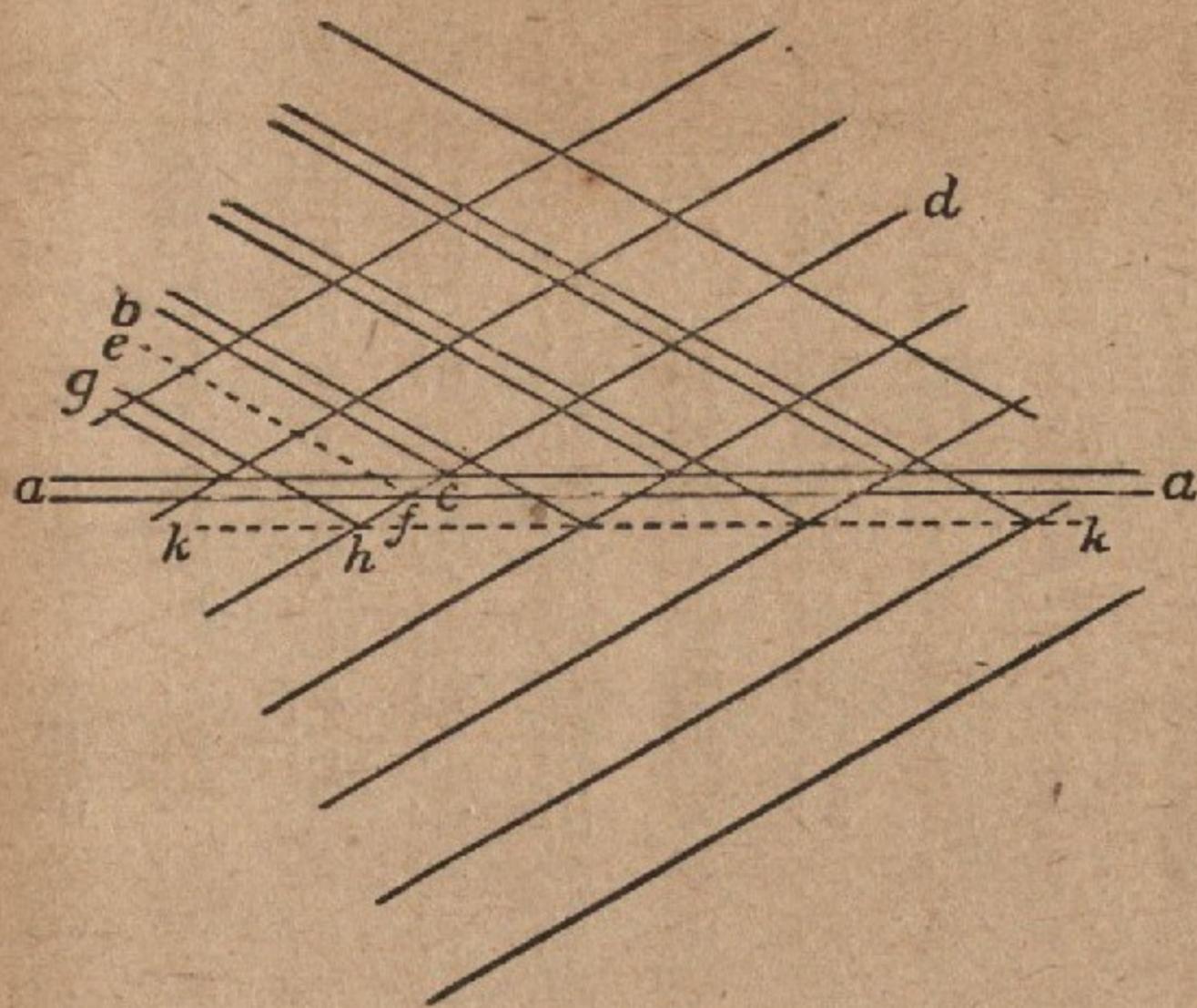
讓我們把肥皂泡的顏色，拿來講一講，作為干涉效應的例子。托馬司·楊自己所選擇的，也是這一個例，而且在他所著的「自然哲學」一書中，載入此例的說明。

肥皂泡是一薄層的水，由組成肥皂的分子，互相吸引而連爲一片。它是透明體。當光線射於肥皂泡上的時候，有一部分在其所遇的第一表面被反射，又一部分則在第二表面被反射。這兩道反射光線，以後就同路前行，互相干涉，所謂干涉的意義，正與上文所述掃過小島的兩組波系，彼此相同。然而在肥皂泡的反射這一方面，卻有一種奇特的整齊性。從第一表面被反射的各組波，被加在第二組反射波上，這第二組反射波，曾進出肥皂膜二次，所以已經落後了一些。這麼一來，兩組波當然互相重疊：而在波峯與波峯相遇的地方，就發生雙倍的效應，其餘各處，依此類推。

須知一組反射波系，落在別組之後的距離，要看該波系進出肥皂膜兩次，退步了多少路而定：這所退的遠近，當然又要看肥皂膜的厚度，以及穿入穿出的方向而定。波系的落後，可以用特殊品質之光的波長做單位，來計算其多寡。假定這落後的距離等於波長的整倍數，即一倍、二倍、三倍或多倍波長。於是這兩組波就絕對合在一起而前馳，峯與峯併，谷與谷齊。它們互相疊加於一處，而使波的上下運動，各加了一倍：所以合成的波，其能量四倍於兩組反射波的任一組，這是可以證明的。

然而我們不可不知，第二表面上的反射，對於由幾何方法計算的落後距離，必須再加上半波

長。這多出來的半波長，由於一定的物理效應。第一次反射發生於空氣中，而在水的表面上；第二次反射發生於水中，而在空氣的表面上。這先後兩次的反射，有不同的特性：後者在反射作用之中，要



(圖七十一) 一串波列，遇見了薄膜 aa 。這薄膜是任何透明材料。這些波打在上部表面上，被反射出來，如圖所示。例如 bcd 即係前進波與反射波，其 bc 一部分是反射波， cd 一部分是尚未遇到薄膜的前進波。若 cd 是入射波一部分的波峯。那麼 bc 就是反射波一部分的波峯。入射波繼續前進，雖在第一表面受到反射作用，卻祇失去了一部分的能，通入薄膜後，又遇到第二表面。在此處，這些波因受反射作用而落後半波長，其所以然之故，本書正文中自有解釋。如果在第二表面的反射，其特性與在第一表面相同，則反射波的波峯，將在虛線 ef 所示的地位。半波長的退卻，把反射波向後拉到了 gh 。反射的發生，好像發生於虛線 kk 所示的表面：這額外的稽延，就有一種效應，使這薄膜的厚度，看起來似乎加增了一些。

少去半波長，如圖七十一所示。此項效應，與風琴管中發生類似結果者相同：在風琴管裏面，從開管與閉管反射出來的音波，也表示同樣的差別。我們也可以很容易的察知，這兩次的反射，非有這一些差別不可，因為假使沒有這一些額外的差別，那麼肥皂膜薄到快要消滅的時候，這兩組反射波就應當完全取一致的步調，然而薄膜假使不在那裏，卻連反射也沒有了。當肥皂膜極薄極薄的時候，就不見有任何反射，其原因完全是這半波長的損失，因為它使這兩組反射波的步調，恰恰不能夠一致：一組反射波的波峯，投入別組波的波谷裏面，其結果是互相干涉而彼此俱滅。極薄的肥皂泡，不反射任何顏色，這是常常可以察見的事情：肥皂膜的這一部分，通常叫做黑斑，不過用了十二分的小心，卻可把肥皂泡吹得又大又薄，此時這「斑」字就要不適用了。

所以由種種原因而落後的距離，若總共等於波長的整倍數，那麼就發生強烈的反射。不過這同一的落後，就其他的幾種波長而論，或許等於波長的整倍數再加一半。在此時兩組反射光束，就完全互相毀滅，因而該特殊波長的光，就沒有反射；這光所含的全部能量，都通過了肥皂膜。是以肥皂泡先把各種顏色分析出來，反射幾種，而讓其餘的透過：從任一側看這肥皂泡，都可見它發出燦

爛的色彩。

依特殊反射角的方向，反射出來的顏色，須視肥皂泡的厚薄而定，這是我們已經知道了。假使把金屬製的圓形環，浸入肥皂液後，再拿出來放在豎直的地位，那麼環上所張的薄膜，因為皂液要漸漸流向下面，所以厚薄不均，愈下愈厚。因此之故，膜上所現的彩色，成功水平的帶紋。若以極細的空氣流，輕輕斜射於這薄膜上，使膜面發生旋渦，我們就可獲得一切光學實驗中最最美麗現象之一。正如平常水上的旋渦一樣，膜面上所起繞中心而旋轉的運動，也使液體向外流到圓周上去。於是各種彩色，自成卵形，重重圍繞着中央。用這方法，可以很快的得到極多的顏色，因為空氣的吹動，膜面的渦流，都有減薄肥皂膜的傾向，而我們卻從經驗知道，肥皂泡的顏色，愈薄愈美麗，而在黑斑恰未出現以前，即在皂泡將破而未破之前，尤為美麗燦爛。

薄膜所以富於各種色彩，其解釋不難找尋，而且有特別的趣味，因為托馬司·楊在自己的書中，曾經敘述過，而且畫過彩色的圖。本書銅版圖一D，就是他所畫的。

假定一組反射波對於它組反射波的落後是一毫米的千分之二。在這樣的反射光柱裏面，就

不會有紅色發生；因為紅光的波長是一毫米的萬分之八，而 $0.8 \times 25 = 20$ ；所以這落後的距離，若就紅光而論，就是兩倍半紅光的波長，彼此當然要互相干涉而消滅了。此外在可見光譜裏面，還有兩種色光，也不會存在，這就是黃光與青光，因為黃光的波長，是一毫米的千分之〇·五七，青光的波長約是千分之〇·四四，而 $0.57 \times 3.5 = 0.44 \times 4.5 = 2$ 。這就是說，它們的落後，彼此各等於三倍半波長與四倍半波長。總而言之，所缺的是深紅色（波長一毫米的千分之〇·八），黃色（波長〇·五七），以及青色（波長〇·四四）；此外所缺掉的，都不在可見光譜之內。於是被反射的光束，其顏色就是剩下來的複色。

假定落後更大，譬如說一毫米的千分之四。於是反射光的光譜裏面，就要有許多殘缺之處，而且所缺的相隔也沒有這麼開。我們可得四等於 0.73×5.5 ，等於 0.62×6.5 ， 0.53×7.5 ， 0.47×8.5 ，以及 0.42×9.5 ；而這些波長如〇·七三（紅色），〇·六二（橙色），〇·五三（綠色），等等，都在光譜的範圍之內。須知當光譜缺掉了幾部分，而各部分又相隔等遠的時候，由實驗發見餘下來的複色，甚為淡弱。所以在實際上祇有肥皂膜極薄的時候，薄至落後不過半波長，或一波長又半，

其數甚小的時候，着色作用方纔很強。

托馬司·楊曾用稜鏡以考察肥皂膜所反射的光，而說明此事。他先用鉛直狹縫一條，把反射光縮小下來，再使這通過狹縫的光，透過一枚稜鏡，而得光譜一道，正如我們從電弧所得的一般。他的結果如銅版圖一D所示；這是他所畫彩色原圖的照相，不過在此處已把它旋過了一個直角。我們由此圖可以察見，就全體而論，如缺口都呈漫射帶的形狀，而向右斜行。這裏邊的緣故，是因為肥皂泡頂端（在圖中是左端）的光譜之中，缺口較少，相離較遠，愈向底部（即圖中右端）皂膜愈厚，缺口就愈多愈近了。

托馬司·楊就用這薄膜顏色的簡單解釋，來扶持波動說。牛頓自己曾預示過這解釋，不過他祇以為這是完成他的微粒說，所需複雜的補助假說罷了。楊氏卻因此設立了干涉原理，在波動說方面有了一大進步，可以表示就當時所知的現象而論，波動足以說明其事。銅版圖一A所示的，又是薄膜彩色的一例。

薄膜的簡單色彩效應，我們在大規模方面並未見過，但是在小的地方，卻數見不鮮。例如鍛鋼

面上蒙有一薄層氧化鐵時，就呈各種顏色，其原因卽在於此。又如以石油或別種油類，薄布於水面，也因為這種薄膜效應，而現鮮明的色彩。玻璃或其他透明物質的隙縫間，我們也可以看見這種效應：有一種叫做牛頓環的現象，其所表示者也是這效應，色彩很美麗。以透鏡平放於玻璃上，使其間夾一層薄空氣膜，就得牛頓環；因為這薄膜的厚度，從中心向外增加，所以現出來的彩色，成同心圓，其圓心在接觸點。

在本書所涉範圍的另外一部分裏面，講到用X射線決定晶體的結構時，還要用干涉原理來解釋這種效應。干涉原理對於電機工程師，也極重要，因為他必須討論到交流電的總和，這與沿導線前進的波，殊為相像。

這一個原理，對於聲學更有極大的應用，例如拍音以及樂音的其他諸現象，它們的原因都是干涉作用。當無線電收音機正在發聲的當兒，室內就有幾處地方，音波的波峯常與波谷相遇，這些地方的聲音就比較低些，還有幾處地方，波峯與波峯相合，聲音就比較響亮一些。這是因為機內發出來的聲音，與壁上的反射音波，以及室內各物體的反射音波，彼此間發生了干涉之故。我們若把

頭向四側移動，就可以聽見這種強弱高低的變化。

民國	53年	5月
登錄號	3752	
分類	083.7 1424	
編號	63	

贈

31120003411187
S 083.7 1424 v.63

光的世界

PTL 國中圖

