

§519. 反射之應用. 音在寬敞之處傳播開去時,音波漸次擴大,故所行愈遠,則音愈弱。但若使音波經由長管中傳播而去,則向管壁進行之波,均經反射而回,除沿管進行外,別無可去之處,故雖傳至遠方,音仍不弱。此現象可利用以作隔室之談話。

又若將管造成一喇叭形狀,將其細端貼於耳上,使其喇叭口正向發來之音,則進入喇叭口內之音波,受喇叭管壁反射之後,均沿細管進行,漸次集於狹處,故能聞見強音。人之外耳,亦有同樣之作用。又發來之音,如太弱小不能明瞭聽見時,以掌心貼近耳旁,即可較為明晰,亦即此理。

又若用極長之喇叭管,將其細端貼近口旁,以其喇叭口正向目的處,由口發出之音,即可傳至遠處,雖發音不強,亦能明瞭。此因由口發出之音波,不能立即向空處逸散,與在管內所取之方向相近似,故其向同一方向之音比較甚強。

第三章 樂音

§520. 噪音及樂音.

音分兩種,曰噪音(*noise; Geräusch*)與樂音(*musical sound; musikalischer Klang*)。樂音如各種樂器所發之音,有一定之

高低，通稱之曰調子，爲發音體作極有規律之振動時，所生之極有規律之音波。噪音如車行之音，風吹樹林之音，毫無一定之調子，由於發音體之振動並無一定之規律，故其音波，亦不整齊。

§521. 樂音之三要素。

比較或區別兩種樂音時，其要點有三，曰音強 (intensity; *Stärke*)，音調 (pitch; *Tonhöhe*)，及音色 (timber; *Klangfarbe*)。除最後之音色，須於後 §531 再爲詳述外，茲先就音強及音調分別論之如下：

§522. 音強。

唱歌時對於同一之音，例如 *do*，有時發大聲，有時亦可發小聲，其不同處即音強有差。又如用一定張力張緊之琴弦，彈奏時將其撥向橫面，撥多與撥少時所發之音，各不相同，亦由於音強有差所致。音強不同之原因，由於發音體振動時振幅有異，故媒質各部分之振動之振幅亦不相同。就振幅大小可以明見之發音體觀察之，如音叉，琴弦等，振幅小者其音弱，振幅大者其音強。

§523. 音調。

唱歌中有 *do*, *re*, *mi* 等音之差別；琴弦因緊張程度不同；

所生之音，亦有差別；或同一張力，因振動之部分長短不同，則所生之音，亦有差別。此類差別，均由於音調不同而來。欲知音調不同，由何而來，可作圖 263 之實驗。用強力鐵鉗將有彈性之細窄薄板如竹片等夾住，將板之上端移向一方，然後任其自由，則作左右之振動。如振動部分過長，即在鐵鉗以上之部分過長，則其振動極為遲緩，肉眼亦能得見。其周期之長短，則由 §328 知其有一定之值，與振幅之大小無涉。如漸次將細板移下，則振動部分即漸次

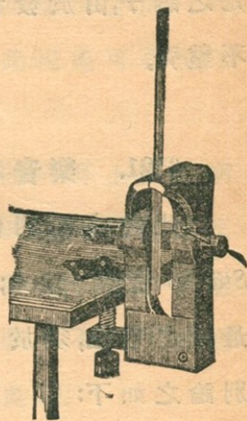


圖 263.

減短，同時振動即逐漸加速，周期隨之逐漸減短。迨至鐵鉗上僅餘少許之細板時，振動過速，肉眼斷難望見，但可聞知其音。如以後不再變動鐵鉗夾板之點，則與琴弦一樣，無論如何變動其振幅，音調亦決不變。但如更行將細板移下，使其振動部分再減短，則音調亦隨之加高。將此事實，由振動物體之一般性質，即等時性，及振動部分愈小則周期愈短，合併想之，則得一定律如下：

有一定振動周期之發音體，不問其振幅大小如何，恆發一定音調之音，周期愈短（即振動愈速）之振動物體所發之音波愈高。

又習慣上，多不用周期之大小，以表振動之遲速，而用其在每

一秒中所起之振動次數，即所謂振數 (number of vibration; *Schwingungszahl*) 者，以表之，故上述定律如下：

[定律] 音調之高低，由於發音體每秒之振數而定，振數愈多，則其音愈高。

注意：通常談話時，對於強大之音，多謂之為高音，弱小之音，多謂之為低音。但高低與強弱迥不相同，不可混用。

§52. 音階.

唱歌時所謂之 *do, re, mi*, 等音，並無一定之高低，任何一音皆可呼之為 *do*，而唱出與此相當之 *re, mi*, 等音。然則此等各音之間，應有若何之關係，即彼此之振數間，各有一定之比例，如以 *do* 之音之振數為 1，則其他各音之振數當如下：

音階名	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>do'</i>
振數比	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

在 *do'* 以上之音如 *do', re', mi'* 等其關係與 *do, re, mi*, 等相同，對於上列之數之比，為 $2, 2 \times \frac{9}{8}, 2 \times \frac{5}{4} \dots$ ，故 *re* 與 *re'* 之比，*mi* 與 *mi'* 之比，均同為 1:2，與 *do* 與 *do'* 之比正同。又在 *do* 以下之音，其關係亦同。

§525. 音程. 兩音調之差，在音樂學上通稱之曰音程 (interval; *Intervall*)。音階中之各音間之關係，由其振數而定，故得

音程由兩音之振數比而定。

茲將數種比較重要之音程略舉如下：

音程名	振數比	實例			
第八音	2 : 1	do, 與 do'	re 與 re'	mi 與 mi'	
第五音	3 : 2	do 與 sol	mi 與 si [♭]	fa 與 do'	
第四音	4 : 3	do 與 fa	re 與 sol [♭]	mi 與 la	sol 與 do'

又音階中相鄰兩音之振數比如下：

音階名	do	re	mi	fa	sol	la	si	do
振數比	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

由此可知一音階中相鄰兩音間之音程，僅有三種之振數比，即 $\frac{9}{8}$ ， $\frac{10}{9}$ ， $\frac{16}{15}$ 。但在音樂上，通常將 $\frac{9}{8}$ 與 $\frac{10}{9}$ 之兩音，看作同一之音程，稱之為一音，其餘一種即 $\frac{16}{15}$ 之音程，則看成一音之半，而稱之為半音。

§526. 原音及倍音。凡對於某一音，振數為其二倍三倍等之整數倍時，通稱為其倍音 (harmonics; *harmonische Töne*)，對於倍音之原有之音，則稱為原音 (fundamental tone; *Grundton*)。故若原音為 *do*，則倍音為 *do'*，*sol'*，*do''*，*mi''*，*sol''* 名。

[問] *mi* 與 *si*，*re* 與 *la*，*mi* 與 *sol* 之振數比為何？

(答) *mi* 與 *si* 之振數比為 $\frac{15}{8} \div \frac{5}{4}$ 即 $\frac{3}{2}$ ，其音程為第五音。又 *re* 與 *la* 之振數比為 $\frac{5}{3} \div \frac{9}{8}$ ，即 $\frac{40}{27}$ ，與 $\frac{3}{2}$ 極相近似。*mi* 與 *sol* 之振數比為 $\frac{3}{2} \div \frac{5}{4}$ ，即 $\frac{6}{5}$ 。

§527. 音之振數。

上述各項，均就各音之相對的音調而言，至音樂中用 *A, B, C, D, E, F, G* 七字所表之音，則不然，各有一定之音調，在譜上各占有一定之位置。此等各音之音調間之關係，如將其排為 *C, D, E, F, G, A, B*，則與前節所述由 *do* 至 *si* 之關係相同。其中之 *A* 音即 *C* 調之 *la*，為每秒間振動 435 回之音，此 *A* 音之振數既為一定，則由前節所述，其他各音之振數亦自然一定。

下列之譜內並排有由 *C* 至

C' 之音之振數，其最下之音

即中央之 *C*，為風琴，鋼琴等

中央一鍵之音，又唱歌時如

云 *G* 調之 *sol*，乃以 *G* 之音（其振數為 391.5）作為 *do* 而成之音階中之 *sol* 之意。



欲配合多數樂器之調子時，須備有能發一定之音如上表所列之 *A* 音之器械，然後照此配準，如 §543 之音叉，即其一例。

§528. 最低之人聲，其振數為每秒九十左右，最高者則為一千附近。又人耳所能聽見之音，最低者之振數為每秒十六，最高者為四萬附近。振數在十四以下，四萬以上之音，大多數之人對之均不能發生音之感覺。

注意：計算音之振數，有用其半振動計為一者，如上所

示之 *A* 音，照此應為 870 之振數。但本書則須完全一振動，始算為一。

[問] *G* 調之 *re*，與 *C* 調之 *la*，相差若干，

(答) 命 n 為 *C* 調之 *do* 之振數，則 *C* 調之 *la* 之振數當為 $\frac{5}{8}n$ ，又 *G* 調之 *do* 與 *C* 調之 *sol* 相同，其振數應為 $\frac{3}{2}n$ ，故 *G* 調之 *re* 之振數應為 $\frac{9}{8} \times \frac{3}{2}n$ ，即 $\frac{27}{16}n$ 。使兩方之分母相等，則 *C* 調之 *la* 應為 $\frac{80}{48}n$ ，*G* 調之 *re* 應為 $\frac{81}{48}n$ 。故 *G* 調之 *re* 較 *C* 調之 *la* 所高極有限，兩音之振數比等於 $\frac{81}{80}$ ，此極小之音程，稱曰小音程，通常之音樂中多捨去不計，故 *G* 調之 *re* 與 *C* 調之 *la* 可以看成一樣。

§529. 測音器。

測音器為測音之振數之器械，其最簡單者如圖 264。其主要部分為一圓盤，如圖中之 *A*，有一轉動軸 *C*，盤上穿有數個乃至數十個小孔，排列在以轉軸為中心之同心圓周上，且在同一圓周上之各孔間之距離，均互相等。盤之下面，密接一固定圓板，如乙圖中之 *B*，*B* 上亦穿有與 *A* 同樣之小孔。乙圖前面破壞處，可望見 *A*，*B* 之孔互相對合時之狀況。各孔並不垂直於盤面，*A* 上之孔，則傾向左斜，*B* 下之孔，則傾向右斜，兩者恰相反對。*B* 之下面四周密閉，不與

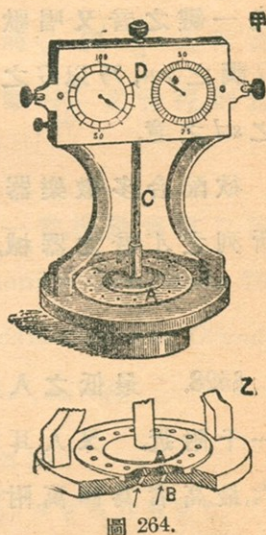


圖 264.

外氣相通，另用一管，送風入內，因孔道傾斜，故風由管 B 噴出時，即推孔 A 向右方，於是盤 A 全體自起逆時針之轉動。孔數上下相等，轉動時一切之孔必同時相重，或同時離開，全體同時離開時，內外之氣不能相通，只有全體相重時，B 內之氣可以通出 A 之上方，引起外部空氣之動搖。A 轉動一周時，孔與孔重合之次數，與各板上之孔數相等，固不待言。故若板上之孔數為 15，轉動之速度為每秒 20 周，則 1 秒中在空氣內引起之動搖，當為 20×15 即 300 回，故可聞見振數 300 之樂音。故盤面之轉動愈速，則其所發之音亦愈高。如照上述方法，由下面送入空氣，以空氣之壓力，推上面之盤，使其轉動，則送入空氣之壓力愈強，轉動亦愈速。但若另用裝置使盤轉動，由下面送入之空氣，只供引起外面空氣動搖之用，亦可。

今若有一音，欲測其振數時，先使測音器轉動，調節其速度，使測音器發出之音調，恰與所欲測之音調相等。此時即可由盤每秒間轉動之次數，乘盤面所有之孔數，結果即為音之振數。如盤之轉動稍速，其每秒間轉動之次數，即不能由肉眼數出，但軸 C 固定於盤 A 上，隨 A 而轉，D 內裝有齒輪，與 C 軸相啣聯，故 AC 之轉動次數，可由 D 之指針讀出。

D 內之裝置亦極簡單，C 軸之上端，刻成陽螺旋，其條紋適嵌入齒輪之齒縫間，成一無窮螺旋（參照 §§190, 194）。軸在同一位置上（即無上下方向之移動）轉動時，與一齒紋相接之螺旋上之條紋，或徐徐向上，或徐徐向下，軸轉動一周，恰移一

旋距之距離，故齒輪上恰有一齒轉過。例如齒輪上之齒數爲 50，則 A 或其軸 C 須轉動 50 周，齒輪方轉一周，故在圖上 D 之右方，裝一指針，此指針之轉動，即足表出轉動數。又若於上述齒輪之外，再加一齒輪與之啣聯，此新添之齒輪轉動更遲，軸上亦裝一指針，以示轉動次數。例如右輪每轉 20 次時，左輪僅轉 1 次，則左方指針轉動 1 周時，即與盤 A 轉動 50×20 ，即 1000 次相當。故於相當時間內，盤 A 轉動之次數，可由兩指針讀出，其音之振數亦可由此計算而得。

§530. 都卜拉原理。

發音體所發之音，雖有一定之振數，然與聽者之間若有相對運動，則其音調即生變化，關於此種變化，則有都卜拉原理 (Doppler's principle; *Dopplersches Prinzip*)

發一定音調之發音體與聽者接近時，其音調較其真正之音調爲高；與聽者遠離時，其音調較其真正之音調爲低。

例如遠來之火車，愈近身傍，則其所鳴汽笛愈高，但既通過以後，所行愈遠，音調亦愈低。

今假定聽者立於圖 265 之右方，音源漸次向聽者接近而來。傳音之速度爲 v ，音源之速度爲 v' ，且假定 v' 小於 v 。當發音體在 S 之位置時，發出第一之波，經過周期 T 之時間後，當如甲圖所示，第一之波已由 S 進行 vT 之距離而至於 l，

正於此時發出第二之波，此一瞬間，發音體已移至 S' 處，距原位置 S ，已相隔 $v'T$ 之距離，故第二之波當由 S' 發出。故第一之波與第二之

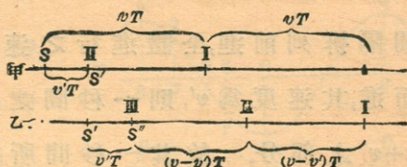


圖 265.

波兩者間之距離，不能如靜止時之 vT ，當等於 $vT - v'T$ 。以後其他之波，莫不如是。由甲圖之位置之一瞬時，經過 T 之時間後，甲圖中在 I, II 等處之第一，第二之波，各進行 vT 之距離，而至於乙圖中之 I, II 之位置，同時發音體亦移至 S'' 之一點，故第三之波，應由 S'' 發出。故 I 與 II 之間，II 與 III 之間之波長，均為 $(v-v')T$ 。以下準此。即在發音體進行之方向中，各波之間隔，均縮成 $(v-v')T$ 進行。對於聽者之耳，此種音波則以 v 之速度到達，故一秒中耳所能受之波數為 $\frac{v}{(v-v')T}$ ，但 $\frac{1}{T}$ 為發音體一秒間之振數，如命之為 N ，則一秒間，耳所受到之波數即為 $\frac{v}{v-v'} N$ 。即耳中所受之音，與聽 N 之 $\frac{v}{v-v'}$ 倍之振數之音時，作同一之感。而 $\frac{v}{v-v'}$ 為大於 1 之數，故聽者所生之音感，當較靜止時為高。又發音體離開聽者遠去時，亦可由同樣之計算，但此時所聞之音之振數，則為 $\frac{v}{v+v'} N$ ，即等於原音振數之 $\frac{v}{v+v'}$ 倍，因 $\frac{v}{v+v'}$ 較 1 為小，故其音調亦低。

以上係就聽者靜止，僅發音體運動時之關係而言。反之，若發音體靜止，而聽者以一定之速度向之而進，或由此退

去時，亦易推知其結果。此時之音波仍與通常一樣，作 vT 之間隔排列前進，全體進行之速度為 v 。聽者若向此發音體而進，其速度為 v' ，則一秒間之內，耳所接受之波之排列，當為 $v+v'$ 之部分。故其一秒間所受之波數為 $\frac{v+v'}{vT}$ ，即 $\frac{v+v'}{v}N$ ，故其發生之音感，調子當較靜止時為高。又若人背發音體而去，即其進行方向與音之傳播方向相同時，假定其速度 v' 較音之速度 v 為小，則音波之排列於一秒間，通過此人部分，當為 $v-v'$ ，故此人在此一秒間，所受到之波數為 $\frac{v-v'}{vT}$ ，即 $\frac{v-v'}{v}N$ 。故其所生之音，當較靜止時之音調為低。

§531. 音色。

除音強與音調二種而外，尚有音色，亦為區別兩音之要件。笛音與琴音，無論如何調配其音高及音強，亦決不能使其完全相同，兩者之差，是即音色。

媒質之各部分因音波而起周期性之變化時，音調雖一定即其變化之周期雖為一定，其變化亦有種種之不同。如用曲線表出此種變化時，則為圖 266。直線 AB 上之各點，表各時刻。即假定一點 A 表某一時刻，由此經過若干時間，即在 AB 線上取一部分，使其長與所經過之時間成一定之比例。例如假定以 AC 表 $\frac{1}{500}$ 秒，則點 C 為由點 A 經過 $\frac{1}{500}$ 秒後之一瞬間，點 B 又為其後之 $\frac{1}{500}$ 秒，其他倣此。於各時刻處各立一直線，如 AP, DS, ET, CR 等。於此等線分上，取一部分，使

其與在各瞬間之密度相應，各瞬間之密度，如較平均密度為大時，則所取之線分即與此超過平均密度之部分為比例，而取於AB之上方；如各瞬間之密度較平均密度為小時，則所取之線分即與此不足平均密度之部分為比例，而

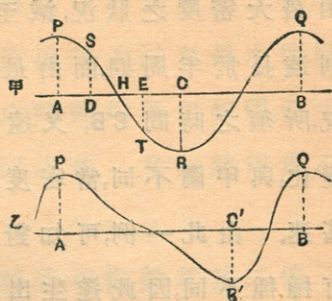


圖 266.

取於AB之下方。如是於各時刻，各得一點，即 P, S, T, R 等，用連續曲線將此各點連接，即得 PSTRQ 之曲線，此曲線即表示密度變化之狀況。反之，如有此曲線，亦可由之推得各瞬間媒質密度及其變化之狀況。

例如甲圖之 A 為密度最大之一瞬間，由此經過 $\frac{1}{1000}$ 秒即達於 H 而成平均之密度，由此再經過 $\frac{1}{1000}$ 秒即達於 C 而成最小之密度，即最疎之狀態。再經過 $\frac{2}{1000}$ 秒，即由 A 共經過 $\frac{4}{1000} = \frac{1}{250}$ 秒，而達於 B，又成最大之密度。以後照此周而復始，重複不已。故此種變化以 $\frac{1}{250}$ 秒為其周期，其所發之音之振數，為每秒 250。由最大密度減至最小密度須半周期，由最小密度增至最大密度亦須半周期，即密度之增減，均要同一之時間。

其次再就乙圖觀之，密度由最大之一瞬間 A，至其次最大之一瞬間 B，所須之時間 AB，與甲圖同為 $\frac{1}{250}$ 秒。故此曲線所表之音，其振數或其音調，均與甲圖所表之音相同，但

由最大密度之狀況，減至最小密度之狀況，所須之時間 AC' ，則遠長於半周期，而由最小密度之狀況，增至最大密度之狀況，所須之時間 $C'B$ ，又遠短於半周期。即乙圖所示之密度變化，與甲圖不同，當密度減小時進行甚緩，當其增大時進行甚速。由此一例，可知對於一定之周期，密度變化之方法，亦有種種不同，因此遂生出音色之差別。

[定律] 音色之差別，由於媒質密度變化不同而生。

§532. 試就使人感覺其為純粹之音之各音，一檢查其音色，即知其密度之變化，與單振動相同，即密度對於其平均值之差，與 $\sin \frac{2\pi t}{T}$ 為比例，其中之 t 表時間， T 表周期，亦即圖 260 之甲所示之狀況。

§533. 上述音色不同之原因，又可以不同之語表出之。如圖 267 之甲，表一純粹音之變化狀況，乙圖亦表一純粹音，但其周期則等於甲之半，即其振數等於甲之振數之倍。此兩純粹音相合，即成丙圖所表之密度變化狀況，恰如圖 266 之乙所表者，當密度減小時進行甚緩，當密度增大時，進行甚

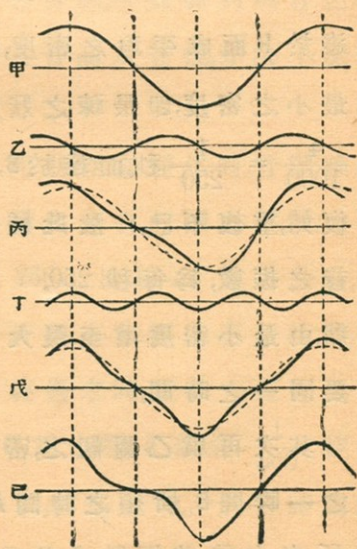


圖 267.

速。又丁圖所表之純粹音，其振數等於甲之振數之三倍，甲與丁相合，則成戊圖所示之狀況，密度由最大減至最小所歷之時間，以及由最小增至最大所歷之時間，均與甲相同，而中途之變化狀況，則大相懸殊，故成不同之音。又如將甲與乙及丙合併，則成己圖所示之變化。

由此可知，若有一定振數之純粹音，與振數爲其二倍，三倍，四倍等純粹音，即其倍音（參照 §526）混合存在時，即生出振數與原本之音相同，密度變化全異之各種之音，音色亦因之有種種不同。此種關係，又可從反面言之，即以一定周期而起之任意之密度變化，可以看作由於以同周期， $\frac{1}{2}$ 周期， $\frac{1}{3}$ 周期，及 $\frac{1}{4}$ 周期等，多數之單振動的變化，集合而成。故得

[定律] 某種振數之音，由於同一振數之純粹音，與振數爲其二倍，三倍，四倍等之若干純粹音，即其倍音，互相混合而成，音色之差別，由於混合存在之倍音之強度之比例不同而生。

此種混合之音之強度之比例，由於發音體之種類，形狀，裝置方法及鳴奏方法不同，而有差別。各種樂器，各有其特殊之音色，即由於此。

第四章 發音體

§534. 發音體。

裝置成爲一定狀況之普通之發音體(即無測音器中之轉動部分之發音體,如管,絃,棒,板等類)不問彈奏方法之強弱如何,例如鳴琴時,不問用指撥或用胡弓拉奏,所發之音調恒爲一定,即有一定之振數。但所謂一定之音,非僅限於單一之音已耳,通常均必有若干之音同時存在。通常聽見之主要部分,爲其中最低之一音,而稱之曰原音(fundamental tone; Grundton),其餘之音,則曰上音(overtone; Obertöne)。

上音在管絃(參照 §§537, 541)等類之發音體,則成爲倍音(參照 §526),但亦有不能成爲倍音者。

§535. 弦。

弦(string; Saite)爲鋼琴胡琴等發音體之音源,在物理學上則有圖 268 所示之一絃琴,以供實驗之用。

於木箱之上,架絃兩條,左端固定,右端架於金屬製槓桿上之突起處,槓桿之形則如別圖之 T,以 F 爲其支點,懸一重錘 P,由槓桿定理,知絃所受之張力爲 P 之 $\frac{p}{s}$ 倍, p 爲由 F 引至 P 之垂直距離, s 爲由 F 引至絃之垂直距離。故 P 所懸

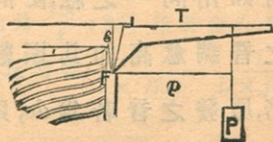
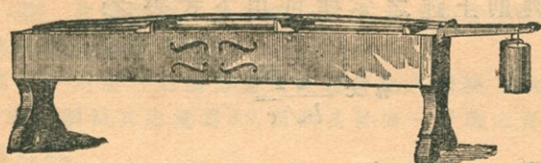


圖 268.

之處若有變動，則絃所受之張力，亦與之比例而變。或不變 P 之位置而變而重量時，亦同。兩條之絃，如各有此種裝置，則即可比較其受不同張力時所發之音，有何差別。又函之中央，有『琴柱』二個，可以任意移動，絃中與此琴柱相觸之點，不能移動，故只有在柱間之一部分，方能自由振動。即移動琴柱，可以實驗絃之振動部分之長短若有變化時，將生若何之差異。

用此器可將張力，振動部分之長短，絃之物質種類，及其粗細，一一加以變化而比較其所發之音，結果得一定律如下：

[定律] 絃之振數，

- (1) 與張力之平方根為比例；
- (2) 與絃之振動部分之長，為反比例；
- (3) 與絃之一定之長之質量之平方根為反比例。

故同一物質之絃，與其直徑為反比例。

如命絃之單位長之質量為 c ，張力為 P ，振動部分之長為 l ，

以 ∞ 表示比例，則上述之定律，可用下式表之：

$$n \propto \frac{\sqrt{P}}{l\sqrt{c}}$$

例如用同一之絃，使同一長短之部分振動，則張力愈強，所發之音調愈高，即其振數愈大。張力增至四倍時，振數即增至二倍，原發之音若為 do ，則此時之音即為 do' 。又如以同一之重錘，懸於同一絃上，使其所受之張力，一定不變，然後移動琴柱，變化其振動部分之長短，則振動部分愈短，所發之音調愈高，即其振數愈大，振動部分減至一半時，振數即增至二倍，原有之音若為 do ，則此時即昇高成為 do' 。又用同一之力，張不同之絃，使其振動部分之長相等，則長 1 呎重 1 克之絃所發之音，當為長 1 呎重 4 克之絃所發者之二倍，即後者若為 do ，則前者當為 do' 。細鐵線與粗絲線，若 1 呎長之重量相同，則所發之音，即無高低之差別。

鋼琴之發音部，為若干條之鋼絲，用強力張緊於箱之內部。奏琴者以指按鍵，則由槓桿作用，牽動絃上之槌，擊絃使其振動。發高音之鋼絲甚短，發低音之鋼絲甚長，並於其上繞細銅線以增大其質量。

〔問 1〕 配調琴弦時，每移動其琴柱，試言其故？

〔答〕 移動琴柱，在使弦之振動部分加長或減短，由上述之定律，可知音若過低，則須將琴柱移向內方，過高則須移向外方，實際配調琴時，即用此法。

〔問 2〕 調合提琴或胡琴時，則捲動其上端之繫弦之棒，其故安在？

(答) 捲動繫弦之棒,在變化其張力。音若過高,當鬆退繫弦之棒,過低則須旋緊。

[問 3] 用同一之張力,張緊直徑半耗之鋼絲,其比重為 7.8,與直徑 1 耗之銅絲,其比重為 8.9,而欲其發同一音調之音,求兩振動部分之長之比。

(答) 同一長之兩絲之質量之比為 $\frac{7.8}{4} : 8.9$, 故若命 L 為鋼絲之長, L' 為銅絲之長, 則其振數之比當為 $\frac{1}{L \times \sqrt{\frac{7.8}{4}}} : \frac{1}{L' \times \sqrt{8.9}}$, 兩音相同, 則此比應等於 1, 故得

$$L : L' = \frac{2 \times \sqrt{8.9}}{\sqrt{7.8}} = \frac{2 \times 8.93}{7.8} = 2.14.$$

§536. 由理論上及實驗上研究之結果, 知長 1 厘重 c 克之絃, 受 P 達之張力作用時, 振動之部分若長 l 厘, 每秒之振數為 n , 則有下列之關係:

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{P}{c}}.$$

若再用實際上能測出之數表出, 如命絃之物質之比重為 s , 直徑為 d 耗, 所懸之錘之重為 W 尅, 振動部分之長為 L 呎, 則每秒之振數 n 為

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{2 \times 100L} \sqrt{\frac{1000W \cdot g}{8\pi \left(\frac{d}{20}\right)^2}} = \sqrt{\frac{9800}{\pi}} \frac{1}{Ld} \sqrt{\frac{W}{s}} \\ &= \frac{55.9}{Ld} \sqrt{\frac{W}{s}}. \end{aligned}$$

例 鐵之比重為 7.8, 以此製成之絃, 其直徑為半耗, 架於相隔半呎之兩點上, 欲使其發出 C 調中之 do , 須用若干之

張力? C調之 do, 其振數為 261, 故由上式

$$261 = \frac{55.9}{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}} \cdot \frac{W}{7.8},$$

$$W = 7.8 \left(\frac{261}{55.9 \times 4} \right)^2 = 7.8 \times 1.36 = 10.6.$$

即所求之張力應為 10.6 呎。

§537. 絃之上音. 絃除全體作整個之振動外, 有時尚可分作兩部分, 或三部分, 四部分等振動。分作兩部分時, 其中央之一點靜止不動, 振動者僅其左右之兩部分, 其狀況如圖 269 之甲, 右半段在下方時, 左半段正在上方; 右半段在上方時, 左半段又在下方, 交互上下, 以作振動。若僅着眼其任何一半段, 則中央之一點, 恰與有琴柱支持時相同, 所發之音, 亦與實際只有半段長之絃振動時所發出者, 同一音調, 即其振數為全體作整個振動時之音之二倍。分作三段振動時, 則如乙圖, 由兩端測至全長之三分之一之兩點, 靜止不動, 三段交互上下以作

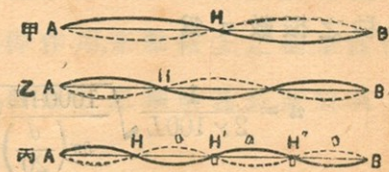


圖 269.

振動。此時所發之音, 與實際只有全長三分之一之絃振動時所發者, 同一音調, 即其振數為全體作整個振動時之音之三倍。其餘分作四段或五段振動時, 均倣此。

不僅絃爲然，即其他之發音體，亦常有靜止不動之點存在，此點稱曰節 (node; *Knoten*)。反之，振動最盛之點，則曰腹 (loop; *Bauch*)。

欲實驗一絃分作數段振動時，可於一端 A 之近傍，擇其應爲節之一點 H，(AH 爲全長分爲若干段時其一段之長)，用適當之物，輕微觸着於其上，然後彈動 AH 之間，即可。如是，則不特此一部分，即在輕微觸着之點以外之部分，亦同時振動，而於等距離之各點 H', H'' 等，自然成爲節，各節間之部分，均如上述，作上下交錯之振動。若絃甚長，則節點與振動部分，均可用眼直接看見。如絃之振動太速，非目力所能得見，則用小紙條，折成人字形，跨在應成爲節或腹之處實驗，亦極有趣。跨在 H', H'' 等處之紙片雖靜止不動，跨在其中間者，則立被拋擲於遠處，不容片刻存留。

要之絃可分作若干段振動，此時所發之音，即爲絃之上音 (參照 §534)。此類上音，即全體作整個振動時所發之原音之各種倍音 (參照 §526)。

通常奏絃時，不過撥動自由絃中之一點，並未輕微觸着其他之點，但除全體所作之整個振動外，同時並有上述之種種上音，混入原音之內，受過音樂訓練之人，卻能加以區別。

§538. 管。

簫、笛或其他管狀之發音體，振動者爲管內之空氣。物

理學上則用其代表者，即通常所稱之風琴管 (organ-pipe; *Orgelpfeife*) 以作實驗。有所謂開管 (open pipe; *offene Pfeife*) 者，形如圖 270，上端開放，下端則如乙圖，具有特殊之裝置。最下爲送入空氣之口，由此吹入之空氣，由所謂唇 (lip; *Lippe*) 之部分，即圖中之 L，之下面狹窄處通過，以與 L 相衝，管壁因此 L，一方愈下愈薄，空氣衝至其下邊，遂引起管內空氣發生振動。振動時，管之中央部分恆靜止不動，上下兩部，同時均向中央運動，然後又同時背中央點而去。圖 271 中之點線，表靜止不動之空氣部分，即所謂節，兩端左右各有箭頭，表示在左者恆與在左者，在右者恆與在右者同時運動之方向，此部分即爲腹。所發之音之調，由於管長，即自 L 之邊至上端之距離，而定。

[定律] 管愈長則音愈低，即振數與管長爲反比例。

例如管長二倍，則所發之音與 do' 對於 do 之關係相同。

§539. 風琴管尚有一種，如圖 272 所



圖 270.



圖 271.



圖 272.

示之形狀，其上端閉塞者，曰閉管 (closed pipe; *gedachte Pfeife*)。

[定律] 閉管所發之音與管長二倍之開管之音相同。

在此器械中之空氣，閉塞之一端靜止不動，故其處為節，空氣之振動當如圖 373 之狀況。觀其振動狀況，即知閉管所發之音與開管所發之音之關係。試想有管長二倍之開管如乙，其中央之空氣為靜止不動之部分，假定於此處，放有一固定之境界面，則原有之空氣既不運動，今所放之境界面，亦不運動，當然毫無妨礙，一切振動，依然可以照舊進行。不過既有此固定之物，則在其上面之部分，與在其下面之部分，即斷絕關係，不能互相作用。所以即令將境界面以上之部分取去，對於境界面以下之部分亦無影響。如是餘下之部分，即成為甲所示之狀況，與半長之閉管，毫無不同之處。故甲之閉管所發之音，當與乙之開管所發之音相同。



圖 273.

§540. 由理論上及實驗上檢查風琴管之振數 n ，如命管長為 l ，音在空氣內傳播之速度為 v ，則此三者之間，實有一簡單之關係存在，即

$$\text{開管: } n = \frac{v}{2l};$$

$$\text{閉管: } n = \frac{v}{4l}.$$

但此僅就大體而言。

注意：風琴管亦有作圓筒狀者，其所以有風琴管之名稱，則由於最初本用之為風琴中之發音部，歐洲大禮拜堂中，所設備之風琴，多用此種風琴管，管長有達數丈以上，管數亦有多至數百以上者。現今我國通稱之風琴，則為一種『簧風琴』，或稱之為 harmonium，非真正之風琴也。

簫笛等類之發音體，大抵與上述之開管或閉管性質相同，參照下列之問題。

【問】小孩玩具中之短笛，能發甚高之音，其故何在？

【答】小孩玩具之短笛為一閉管，其切面如圖274，管短，故其音高。

【問】吹笛時，開閉指孔，則音調即隨之而變，其故安在？

【答】如各孔皆閉，則全體成為一開管，由口吹處至出口為其管長，如放開任何一孔，則開放之孔，即成為空氣之出口，故由吹處至此孔之距離，為此開管之長，較之皆閉時，管長已減短，故其音較高。



圖 274.

§541. 管之上音. 絃振動時可生上音，管振動時亦然。在開管，則其兩端應為腹，為一定不移之條件。通常之振動，在此兩腹之間，有一節，但如圖 275 之甲，於兩端之腹之間，含有兩節之振動，亦時有之。此時之振數，與自中央之腹，將管截為兩段，各段成一開管獨立振動時之振數相同，即等於原音之振數之二倍。又如乙圖，於兩端

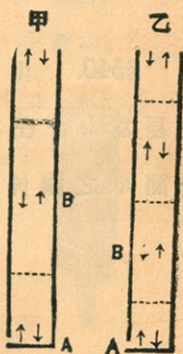


圖 275.

之腹之間，排列有三節兩腹之振動，亦甚常見。此種上音之振數與全長之三分之一之長（即 AB）之開管相同，即等於原音振動之三倍。其他均準此，可得四倍，五倍，……等之倍音。

吹笛或簫時，不必變動指孔之開閉，而調節吹入之氣，亦可使其變音，如吹入之氣強，則音高（即生振數二倍之音），因此時管內空氣，振動時如圖 275 之甲，分爲三段，故發此上音。又通常所聽見者，雖以原音爲其主要部分，然同時亦有若干之上音混入其內。

對於閉管，亦大約與此相同。即唇端爲腹，閉端爲節，應爲一定不移之條件，最簡單者即發生原音時，如圖 276 之甲，其次則爲乙，中夾一節一腹，此時之振動，與將下一節 B 處閉塞而成之閉管，即與原長三分之一之閉管之振動相同，故其振數爲原音之三倍。再次簡單

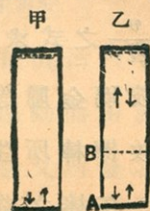


圖 276.

者，即於兩端之間，排列兩腹兩節而成之振動，與全長五分之一之閉管之振動相同，故其振數爲原音之五倍。

此類上音，與在開管時相同，通常均有少許混在原音之內，尤以第一之上音，即振數爲三倍之音，只須吹時用氣略強，即易聽出。

閉管之上音中，未含有二倍，四倍，六倍等偶數倍之振數之音在內，須當特爲注意。

§542. 棒之縱振動。

取玻璃或金屬之直棒，將其中點支住，用酒精潤溼之布（如用金屬棒，則用松香擦過之軟皮），沿其一端向棒之方向縱向摩擦，則棒即發甚高之音。

此乃棒之實質，左右兩部同時向外，或同時向內振動時，所發之音，如圖 277，恰與風琴管內之空氣振動時，同一狀況。

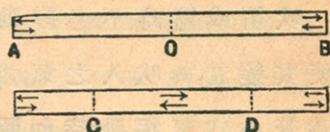


圖 277.

就理論上而言此時音之振數，應與風琴管相同，其值可由 $\frac{v}{2l}$ 之式求出， v 為音在棒之實質內傳達之速度。但音在玻璃金屬等類物質內傳播之速度，較在空氣內更速若干倍，故擦棒所生之音，較同長之風琴管所發之音，其音調甚高。

在棒之縱振動中，較在風琴管時，尤易發生上音。即以距棒端四分之一之點固定，如圖中之乙，而擦 CA 之部分，則 D 處亦成一節，振數為前此之二倍，故得二倍之上音。若將距一端六分之一之一點固定，則得振數三倍之上音，餘準此。

又如將金屬絲之兩端夾在兩鐵鉗之間，而以松香擦過之軟皮，擦金屬絲之中點，亦生上述之上音，但此時所成之腹或節，適與上述之金屬棒相反。

§543. 音叉。

音叉 (tuning fork; *Stimmgabel*) 為配合各樂器時用作標

準之器械，形如一U字，下附一柄，由鋼製成，通常則裝在一木箱上，如圖 278。用棒敲叉之一端，或用胡弓擦之，其兩端即同時或向內或向外開始振動，並發而為音。同時其下端之柄，如乙圖所示，作上下方向之振動，傳至下端之木箱，箱內空氣亦起而與之共同振動，亦可發音。由箱上將音叉取去，使其獨立振動，則雖發音，但極細微，幾不可聞見，若

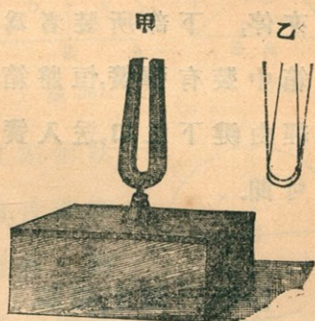


圖 278.

在箱上，則其音即異常明晰，故知大部分之音，實由箱內空氣而來。但箱內空氣之振動，並不由於自身之振動，而由於受音叉之振動，故其所發之音之振數，完全由於音叉所發之音之振數而定。

§544. 簧。

我國通行之風琴，其發音部為一細而且長之彈性金屬薄片，通稱曰簧 (reed; Zunge)，圖



圖 279.

279 為一簧附於金屬板上，僅簧之一端，即圖上之右端，固定於板，其餘全部均自由，在此自由部分之正下，有一長方形之條孔，開在支持簧之金屬板上，故簧可以自由作上下方向之振動，簧與孔邊，留有極小極窄之縫穴，由一方送入空氣，簧即

振動，使空氣或通或不通，而成音波。風琴內裝有此類簧笛甚多，用手指按鍵，則空氣即可送入簧笛之內，鍵閉則空氣之入亦停，下部所裝者為風箱，足動則空氣即入於風箱之內，風箱中裝有彈簧，恒將箱內空氣壓出外面，故被壓出之空氣，即經由鍵下之口，送入簧處，使簧振動發音。故不按鍵，即無音可聞。

§545. 板之振動。

用金屬製成正方形之板(圖280)，用強力鐵鉗將中點C夾緊，以指略觸角上一點B，以胡弓於邊上中點A，沿與板面成直角之方向擦之，板即發出一種樂音，此時所起之振動，如圖280。如板面為水平，其上散有細沙，則振動狀況，即可一目了然。因在振動極盛之部分上之砂，均被彈開，次第向橫移動，至於靜止不動之位置，方始停



圖 280.

止，故細砂均集於此等處所，而成圖中所示之形狀。正方形之對角線，為靜止不動之部分，即所謂節線。節線近傍之板之各部，均以節線為軸，右側向上，則左側向下，左側向上，則右側又復向下，其傾斜隨時而變，周而復始，往復振動不已。故圖中畫有○之部分為一類，畫有×之部分又為一類，○與○恆作同樣之運動，×與×亦然，但○與×則恆作互相反對之運動，交互上下。

同一之四方板，因胡弓擦處及手指所按處不同，其振動狀況亦有種種差別。圖 281, 282 所示，均為最易發生之振動，B 表手指所觸之處，A 表胡

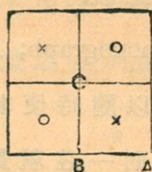
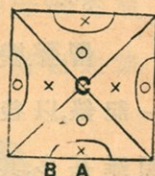
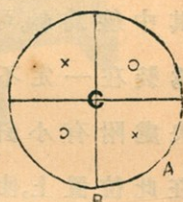


圖 281.



282.

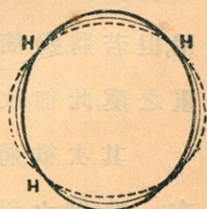
弓所擦之處，同一之板發出之音，其振動狀況大約如下：節線配置愈簡單者，音調亦愈低；節線配佈愈複雜者，其音調愈高。例如就圖中所舉之三例而言，最後之一種，即圖 282 所示者，其音最高。



283.

對於圓形之板，亦可作上述同樣之實驗。圓板最簡單之振動，如圖 283 所示，圓心 C 被鐵鉗夾緊不動。除此種外，亦有分為若干部分作複雜之振動者。

§546. 鐘之振動法可由圓板之振動，推想而得。如圖 284 所示，為鐘之最簡單之振動，自其支點沿鐘面引至鐘底之 H 點之四條線，為其節線，全鐘面由此四線分為四部分振動，相鄰兩部分，同時作方向正相反對之運動。



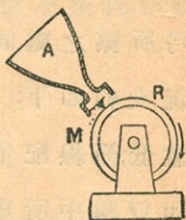
284.

鐘振動時所發之音，時強時弱，若斷若續者，因鐘之組織，全體不能一致，故同時可以發生振數略異之兩音，其結果遂生如是之現象，當於 §554 再詳述之。

§547. 留聲機。

留聲機 (phonograph; *Phonograph*) 爲將發出一次之音,作一記錄,以後可以隨時使其再行發出同一之音之器械,其種類雖甚多,其理則一,茲就最初發明之蠟筒式之留聲機說明之。

如圖 285 之 R, 爲性質略硬之蠟圓筒, 其中線爲軸, 可在軸之周圍, 自由轉動。 M 爲裝在一定不動位置上之振動薄膜, 其中中央處附有小針一枚, 針尖略觸及蠟筒之面。在此位置上, 使蠟筒轉動, 針尖即在蠟筒表面橫擦而過, 故筒面即留下一道擦過痕跡,



285.

如一細溝。以喇叭口 A 正向發音體, 則由 A 收集之音波, 達於膜 M 上, 膜亦與之起同樣之振動, 故針尖入蠟, 即隨之有深有淺, 並不一律。結果蠟筒上之溝紋, 或深或淺, 每一秒間所劃成之溝紋中, 深淺之變化, 竟至數十數百次之多。若蠟筒只能在同一位置上轉動, 則一周之後, 溝紋必又相重, 不能適用, 但若將蠟筒之軸, 製爲螺旋形, 蠟筒隨轉隨進, 溝紋即無相重之虞, 此即收音時所用之裝置。

其次欲將如是收得之音, 由留音機再行發出時, 則取附有一略鈍之針之別一膜, 放在 M 處, 令其針尖嵌入蠟筒上之溝紋中, 使蠟筒以前所收音時之速度轉動。則針即隨溝紋之深淺, 或起或伏, 引起膜之振動, 此種振動恰與收音時膜之振動相同, 故發出之音與最初所收之音完全一樣。

圖 286 爲近代所用之留聲機，不用蠟筒而用硬橡皮製成之平面圓盤，上刻之溝紋，不作深淺之差別，而作橫面之波形，即稱常所謂之

唱片，或唱盤。振動膜之方向爲鉛直，且與溝紋平行，其上固定之針尖，則放在溝中。如是盤面轉動時，針即隨溝紋之波折，

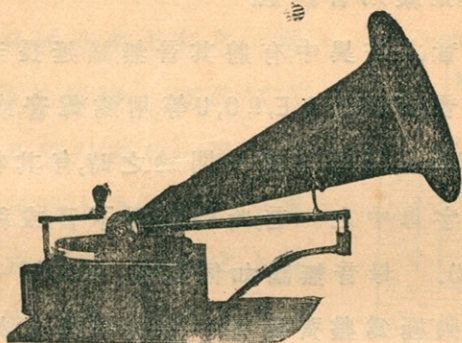


圖 286.

作左右方向之振動，因之引起膜之振動。至圓盤上所作之波線，係由最初原唱之音引起膜之運動，由膜上所附之針，在盤面刻下者。但硬橡皮性質堅硬，不如蠟之易於刻劃，故最初仍用蠟盤收音，既刻成溝紋後，再於蠟盤上塗石墨一薄層，然後用電鑄法製成銅模，再用硬橡皮熔化成爲極軟之狀況，印入銅模內，俟其冷固取出，即成通常之唱片。

§548. 人聲。

人聲有種類之差別，如 A, B, C, D, E, 或 ㄅ, ㄆ, ㄇ, ㄏ, ㄏ 等，及高低之差別（參照 §523）。高低之差，即前述之音調不同，由其振數而定，在人聲則由於受聲帶（vocal cord; *Stimmband*）之支配。聲帶爲兩片薄膜，張於喉頭內，正當空氣出入之處，分左

右兩半，中留一極狹之縫隙，以備空氣由此通過。空氣通過時，激動此薄膜之聲帶，使其振動，發而為音。聲帶張緊則音調高，弛緩則音調低。

音之差異中，有將其音無論延長至許久仍為其最初所發之音者，例如 A, E, I, O, U 等，稱為**母音**，或稱**韻母** (vowel; *Vokal*)，B, C, D, F, G 等，則只能於開始之時，有其特殊之音，若引長，則即變為字母中之一音，此種稱為**子音**，或稱**聲母** (consonant; *Konsonant*)。母音無論如何延長，均為同一之音，故在物理學上，其振動極為整齊而有一定之規律，彼此相差，僅為音色。例如用 *do* 之音讀 A 及 E，則不僅含有與 *do* 同振動之音，並於 A 之中，同時含有其他一定之高音之 A，於 E 之中，亦含有其他一定之高音之 E 在內，因此兩音，雖用同一之 *do* 發出，然亦不免生出音色之別。此等各音，各依口中之形狀不同，附近空氣之振動狀況亦異。至於子音最初所起之音，則為口之各部分所起之噪音 (參照 §520)。關於人聲之振數之範圍，已詳 §528，茲不贅。

第五章 共振及同時傳播之數音

§549. 共振.

用振數完全相等之兩音叉，隔相當之距離，鳴其一叉，若

千秒後，停止其振動，即可聽見其餘之一叉，有音發出。若兩者之振數不相等，即無如是現象發生。此種現象，通稱曰共振 (resonance; *Resonanz*)。與此相類之現象頗多，固不僅限於

音叉，即其他一切發音體，亦莫不有之。圖 287 所示，亦一極簡單之實驗。高深容器 A 內盛水，中插一管 B，管口處放一發音中之音叉 C，持管及叉，同時上下於器內，至適當之處，即可聽見最強之音。因管之上端開放，下端為水閉塞，成一閉管，管在水中上下，即變化管長，至管長與音叉之振數相應

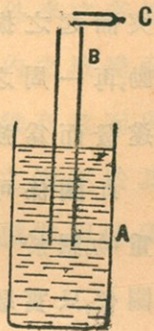


圖 287.

時，管內空氣即發生振動，加入音叉之振動，故其音甚強。即

[定律] 靜止發音體受與其自身之振數相等之音波，即自行振動發音，而成共振。

又如發音體所受之音波之振數，與發音體所生之倍音之振數相等時，亦發生共振。

§550. 關於共振之作用，可作簡單之說明如下：由空氣傳來之音波，行至發音體之近傍，則近傍之一部分空氣，即隨之振動，發音體之振動部分，受此項空氣振動之衝突，遂生共振。但若傳來之音，與發音體之振數不符，雖亦須受衝突作用，但因彼此之固有振動絕不相同，所以衝突結果，有時發音體雖不免開始振動，然當第二次之衝突到來時，發音體之

運動方向，已不能與之一致，不特不能助長其振動，反足以妨礙之。故無論繼續至於許久，亦無共振之現象發生。反之，若物體之振數恰與傳來音波之振數相等，則最初因受音波衝突而起之振動，一周之後，適遇第二之波到來，助之加增其運動，再一周之後，又遇第三之波，如是繼續以去，愈振愈烈，最後遂發而為強大之音。

此關係可就振動較遲之物體，如鐘，由實驗說明之。鐘為重物，懸於一點，用手推之，使作擺之振動，與發音之振動並無關係，只實驗其遲緩之擺之振動，如此，若僅用手推一二次，因其過重，肉眼頗難觀察，無從斷定其運動與否，但若按與振動周期相等之時間推之，數次以後，每次均足以助長其運動，振動因之遂逐漸加大，雖目力亦不難辨出矣。發音體之振動，誠較此種擺之振動甚速，而其理則一。

與此同理之實驗，尚有一種，即將板之兩端支住，使成水平，人乘於其上，按此板之彎曲振動之周期，用足踏之，以助長其振動，則在未振動以前，人乘於上雖可支持，一旦既經振動以後，有時竟至折為兩段者。同樣，若有多數之人，用整齊步調，行於橋上時，如偶逢橋之振數與人之步調相同，橋即大受損害，故行軍中每遇渡橋之時，特改用散步以避之。

§551. 耳之作用。

以耳聞音，及辨別各種不同之音，其作用亦為共振。耳

底骨中有一蝸牛殼形狀之孔，其內充滿液體，通稱為蝸牛殼。在此彎曲管形之孔內，有數千條之纖維，橫排於孔內，各條相接，由管之一端而達於他端，宛如一膜。此類纖維，長短不一，張力各異，各具有一特殊之固有振動之周期。外來之音波振動，經由耳內之鼓膜，小骨等，最後達於蝸牛殼內之液體，而傳至此數千條纖維之上。因音之振數不同，纖維有起而與之共振者，有不起者。各條纖維各有一聽神經之端在於其上，由此聽神經，可以感知振動極盛者，究為某條纖維，因此傳來之音調究為若干，亦不難辨出。

§552. 共振箱。

將音叉由其下端之空箱取下，音即減低，再立於空箱上，又復轉強。不特空箱如此，即通常桌面，亦有同樣性質，可使其加強。因音叉振動時，其下面之支柱，作上下方向之振動（參照 §543），由此引起箱面及箱內空氣或桌面與之共振，即前節所述之傳音媒質，在前節為空氣，在此則為音叉之支柱。其他各種絃樂，亦與此同樣，如僅張一單純之絃，其音甚低，幾不可聞見。但若張於空箱之上，而以一琴柱支持之，琴柱則立於箱面有彈性之部分，則絃之振動，即由琴柱傳至箱面及箱內之空氣，引起共振，故發甚強之音。凡如此類

附於振動物體之上而使其音加強之箱，稱曰共振箱

(resonance box; *Resonanzkasten*)。

用共振箱發音時，所應注意者，其共振之音之振數並不一定，在較廣之範圍內之音，無論何音，皆可引起共振。振數雖可隨意，但傳振動之媒介物，則有固定於其上之必要，若只依賴空氣，即不能得極強之共振。

注意：用兩個同樣音叉行實驗時，音之傳達作用，實由於被擊之音叉下面空箱中之空氣開始振動，經由周圍之空氣，傳至他一音叉近傍，引起其箱內空氣之共振，然後箱面開始振動，更由箱面傳至叉柄，最後始至音叉本身。

§553. 干涉。

空氣中如同時有兩音波傳至同一地點，則

此點之空氣密度之變化，等於由兩音波所生之密度變化之總和。

在通常時，此兩音傳至耳中，固可分別聽出，但若兩音間有特種之相互關係，當呈特殊之現象。

特殊現象中之一種，為兩音之音調及音強均相等，僅傳來時間不能一致，一音較他一音先到半周期，即波長振幅均全相等之兩波，彼此相隔恰等於半波長之時。甲波之密部，與乙波之疎部，同時傳到，甲波之疎部，與乙波之密部，亦同時傳到，且一波所生之疎薄程度，無論何時，均與他一波所生之密集程度，恰相等，故彼此之作用，恰足相抵，結果傳至耳內之空氣，其密度完全不生變化，故無音可聞。凡如是有兩音同

時傳來而其結果，轉令兩音同歸消滅不可得聞之現象，稱曰干涉(interference; *Interferenz*)。

干涉之實驗，如圖 288。取一音叉 F，先測知其所生之音波之波長應為若干，再取較其半波長更長之橡皮管 G 一條，如音叉之振數為 n ，則所

取之橡皮管，須較 $\frac{340}{2n}$ 呎

更長若干，始足敷用。以

此管之兩端，套在丁字管

T 之兩口上，其餘之一口

另套一橡皮管，此管之他端放入耳內。然後擊動音叉，將其支柱立於 G 上，聽之，即知因其支柱着管之點不同，耳內所聞之音，有強有弱。若由着管之一點，沿左右兩路測至 T 處之管長，相差適等於半波長，或一波長又半，或二波長半，總之，若其相差適為半波長之奇數倍時，耳內即幾無音可聞。

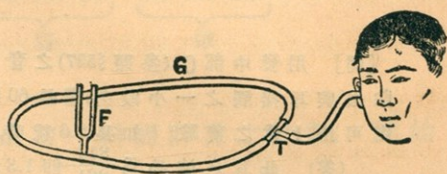


圖 288.

由支柱振動所生之音波，在橡皮管 G 內，分左右兩路傳來，至 T 復合而為一，以入於耳內，若左右兩路之差為半波長，則在某一瞬時，由短路傳來之波，當較由長路傳來者，先到半周期之時間，以後無論何時，傳到耳中之波，由長路傳來者，總較由短路傳來者，遲到半周期。故同時傳到耳中之兩波，彼此恰差半周期，即一方傳到者為疎部，而同時由他方傳來者，正為密部，故相抵消，不起音之感覺。又左右兩路相差為一波長半，或為二長波半時，其理亦同。

注意：干涉一語，不僅限於上述兩波傳來不發生音感之特殊之例而已，舉凡有周期相等之兩音，傳至同一地點而起之一切現象，均用此一語表之。例如兩波相差，不等於半波長時，或雖相差恰等於半波長，但兩波之振幅並不相等，在此等時候，音當然不能消滅，但在廣義上，仍稱之為干涉。

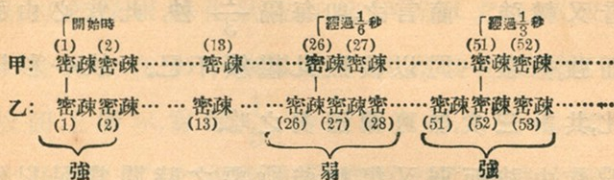
[問] 用發中部 C (參照 §527) 之音叉，作上述之實驗，所用之橡皮管，除去與耳接觸之一小段外，僅長 60 釐，是否足用？如長 1 呎，則有幾處可作上述之實驗？如長 2.6 呎時，又何如？

(答) 此音之波長為 $\frac{340}{261}$ 即 1.3 呎，故其半波長為 65 釐，一波長半為 1.95 呎，二波長半為 3.25 呎。所用之橡皮管如長 60 釐，則無論將音叉放在任何一點，由此分為左右兩路，以至於耳，其相差亦不能等於半波長，故音不能消滅。如用 1 呎長之管，則由一端測去，等於 $(100-65)\frac{1}{2}$ 釐之點，共有兩處，故有兩點可使音消滅，但此時兩路相差不能達於一波長半，故除此兩點外，無其他之點可使音完全消滅。若用 2.6 呎之管，則左右兩路相差，可以超過一波長半，故由一端測去，在 $\frac{260-65}{2}$ 釐之點有二，又 $\frac{260-65}{2}$ 之點亦有二，共有四點，可使音完全消滅，但兩路之差不及二波長半，故除此四點而外，別無可使音消滅之點。

§554. 唸。

兩音同時傳至一點所生之特殊現象，尚有一種，即振動相差甚少之兩音，同時傳到時，音強每隔一定之時間加強，又隔同一時間減弱，再隔同一時間又復增強，如是周而後始，循環不已，此種現象，通稱曰唸 (beat; *Schwebung*)。在若干時間中所聽見之強弱變化之度數，稱曰此時間內之唸數。試舉一例言之。如有振數為 150 及 153 之兩音，於某一瞬間，其密部

同時傳到耳內，自此一瞬以後，到着於耳內之疎密狀況排列如下，表中之甲表振數為 150 之音，乙表振數為 153 之音：



表中括弧內之數字，表示由最初一瞬間計算之波數。開始時兩音之密部同時傳來，以後暫時之內，疎與疎，密與密，均大致相重，同時傳來，故所聞之音之疎密變化，即此兩方之和，故甚強。但甲之周期為 $\frac{1}{150}$ 秒，乙之周期為 $\frac{1}{153}$ 秒，即乙較甲之周期略短，故如表中所示，至第 (13) 之波，乙之密部已較甲之密部到着略早若干時間矣。由開始經過 $\frac{1}{6}$ 秒時，甲共作過 $\frac{150}{6}$ ，即 25 回之振動，故正開始其第 26 次之振動，而呈第 (26) 之密集狀態，乙則已作到 $\frac{153}{6}$ ，即 25.5 次之振動，故乙之第二十六次之振動，已得其半，此一瞬間，正當其呈第 (26) 之疎薄狀態。故在此前後暫時之內，甲之密與乙之疎，甲之疎與乙之密，恰相重複，同時達於耳內，故實際所生之疎密變化，僅與其差相當，故音甚弱，假使甲乙兩音原有之強恰相對，則在此暫時之內，因干涉結果，完全消滅，直無音可聞。自此以後，乙仍較甲為快，自開始之一瞬間計算至經過 $\frac{1}{3}$ 秒之一瞬間，甲適完成 $\frac{150}{3}$ ，即 50 回之振動，而生第 (51) 次之密部。乙則已

完成 $\frac{153}{3}$, 即 51, 回之振動, 而生其第 (52) 次之密部。故在此前後暫時之內, 兩波之疎與疎, 密與密, 又復相重, 同時傳到耳內, 故其音又轉強。簡言之, 即每隔 $\frac{1}{3}$ 秒, 此音必由強而弱, 又由弱而強, 循環一周, 以後照此繼續不已。故一秒間內強弱之變化, 共計三次, 即可聞三次之唸。

一般音由強而弱又復轉強, 所要之時間, 當足以使兩音之振數, 生出 1 之差, 如前例之 50 與 51。又由弱而強復轉為弱所須之時間亦同。此時間即生 1 唸之時間, 故

[定律] 振動極相近似之兩音, 同時傳來時, 在一定時間內所聽得之唸數, 等於兩音在此時間內之振數之差。

如命 n 及 n' 為極相近似之兩音之振數, 則 1 秒間內所生之唸數當為 $n' - n$ 。如兩音之每秒之振數差過大, 則其所生之唸數亦多, 在一秒間不能聞見此多數之唸, 其結果與無唸同。圖 289 表兩音疎密之時間一致與否之狀況, 照 §531 之曲線法繪成。即 00 表某一定時刻, 在其右方引若干與之平行之鉛直線, 與 00 之距離, 表經過之時間, 假定圖上之一格, 表

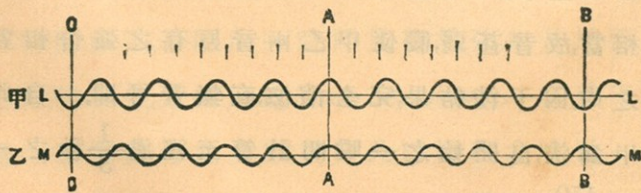


圖 289.

$\frac{1}{100}$ 秒，則 AA 所表者，爲自 00 起計算經過 $\frac{10}{100}$ ，即 $\frac{1}{10}$ 秒之一瞬間，同樣 BB 表 00 後 $\frac{20}{100}$ ，即 $\frac{1}{5}$ 秒之時刻，甲之曲線表由甲之音波生出之疎密變化狀況，在水平線 LL 之上者，表其密度較平均密度爲大，在水平線 LL 之下者，表其密度較平均密度爲小。故圖上所示，爲每 $\frac{1}{5}$ 秒循環九周之變化，即每秒振動 45 次之音波。乙之曲線，亦同樣爲表乙音波之密度變化狀況，MM 線表平均之密度，在其上方者，爲密集時之狀況，在其下方者爲疎薄之狀況，圖中所示者爲 $\frac{1}{5}$ 秒內循環 10 周，即每秒振動 50 次之音波。

於同一時刻，觀察此甲乙兩波之狀況，當在 00 之一瞬間，兩方之疎密正相反對，在此一瞬間之前後，均爲同一狀況，此時兩方面合成之作用，互相抵消，所發之音最弱。由此右進，即經過時間之後，由正相反對之狀況，漸次變爲交錯之狀況，音亦隨之加強。至於 AA，兩方之密與密，疎與疎，完全一致，故在此一瞬間之前後，其音最強。由此以後，一致之狀態又逐漸交錯，音亦漸弱。至 BB，兩方之疎密狀況，又正相反對，音轉復成最弱。即由 00 至 BB，共歷 $\frac{1}{5}$ 秒，音必由弱而強再轉爲弱，即生一唸，與上述之定律一致。每秒振數爲 45 及 50 之兩音，同時合成之結果，於一秒間內共生五唸。

§555. 音之調和。

兩音同時傳到，如振數相差過大，不成爲唸時，則或成爲

清澄愉耳之音，或成爲混濁不快之音，一視兩者之振數比如何而定。三種以上之音，同時傳入耳內時，亦復如是。

凡同時傳入耳內使人覺其清澄愉耳之數音，曰調和音 (harmony; *Harmonie*)，使人覺其混濁不快之數音，曰不調和音。

最好之調和音，其振數比爲 $1:2$ ，其次則爲 $1:3$ ， $1:4$ 等，再次則爲 $2:3$ ，更次則爲 $3:4$ 。概括言之，即振數之比若爲小整數之比者，音最調和。又兩音以上時，則以 $4:5:6:8$ 之比，即 *do, mi, sol, dó* 之四音，爲最調和。又兩音如有半音之差，或比第八音少半音程之兩音，如 *do* 與 *si*，爲最不調和。

第七篇 光學

第一章 光

§556. 光。

光(Light; *Licht*)爲眼所感覺者,凡眼所見之物體,均由此物體發出之光,送至眼內,使眼發生光之感覺,方能認識其存在。若專着眼於光之進行狀況時,有時稱之曰光線(light ray; *Lichtstrahl*)。

注意: 關於光之本體究爲何物之問題,詳見 §§670, 863。

§557. 光源。

光之源爲太陽,電燈之發光部分,蠟燭,洋燈之火焰等,通稱之曰發光體(luminous body; *leuchtender Körper*)。此種發光體之各點,例如洋燈之焰,則爲焰中各點,各成爲一光源,由此發出之光,向各方向一律進行。

眼中若受此種之光,即發生光之感覺,同時即認出其源之發光部分之各點。有多數物體,並非發光體,在暗處所以不能認出其存在,當然由其本身不能發光所致,至其在明處

時，本身依然無光可發，不過由太陽或其他如洋燈等類之物體發來之光，傳至其上各點，即由各點轉折，即所謂反射（詳見§573），以入目中，故能發生光之感覺而認知其存在。故若不問由發光體發出之光，如何能達於其上，僅着眼於由此等物體發至吾人眼中之光而言，則無異於將此種物體與自能發光者，看成一様。此種自發之光與由他發來反射而出之光，並無差別之最顯著之一例，為星體之光。行星係將受於太陽之光反射而出，恒星則為自發之光，由地球上觀察，可云一樣有光送來。一般由發光體直接送來之光皆極強烈，若此光經物體一度反射，然後送至眼內時，只不過一小部分，故遠在直接由發光體送出者之下，自不待言。

要之，無論其為太陽、洋燈等之發光體，或為受外來之光始能現出之物體，其發出之光，雖有強弱之差，然能送光外出則一，故此後統括此兩種而稱之曰光源。

注意：不能直接受日光之房內，亦能望見物體，則由於太陽發出之光，經種種物體反射若干次後，始達於此類物體之上，再由之反射而入目中，仍係間接由太陽而來。

§558. 透明體及不透明體。

透過空氣、水、玻璃板等，可以窺見他一面之物體，即由此等物體發出之光，經過此類物質內部時，完全不受妨礙，以入於眼中。具有此種不妨礙光之進行之性質之物質，曰透明

物質，或曰透明體 (transparent body; *durchsichtiger Körper*)，反之，如木、石、金屬等類，不能使光通過，具有此種不能使光通過之性質之物質，曰不透明物質，或曰不透明體 (opaque body; *undurchsichtiger Körper*)。又如乳白玻璃、白紙、薄木片等類，介在發光體與眼之間，只見其能透過少許之光，然不能看清他一面之物體，凡具有此種能通過一部分之光，而不能看清他一面物體之性質之物質，曰半透明物質，或曰半透明體 (translucent body; *durchscheinender Körper*)。以木而論，則厚者為不透明，薄者為半透明，然不能有一定之界限，謂其在幾分幾釐之厚以上即為不透明，在幾分幾釐以下，即為半透明。不但木如此，即其他一切物質，莫不有此同樣之性質。要之，透明、半透明、不透明，三者之間，實無明確之界限。

透明物質不妨礙光之進行，又可換言之如下：即由一方傳來之光，達於此種物質上面，即由其一部分傳至他部分，漸次以傳至他一方面，而出於物質之外。故透明體實一種可以傳光之作用之媒質，故又稱之曰光媒 (medium of light; *Lichtmedium*)。

§559. 光之直進。

光在組織一樣之光媒中傳達時，恆沿一直線之方向進行。於暗室壁上開一小孔，由此小孔射入室內之日光，照及室內浮游之塵埃，由側面看去，其進路即成為一直線。

§560. 光在組織一樣之媒質中沿一直線進行之事實，應用極廣。例如於相隔較遠之處，植三條木柱，而欲各柱之頂均在一直線上，欲檢查其果否，列成一直線，只須行至一處，使眼中看出兩柱之頂，正在視線之內，然後再看其餘一柱，是否亦在此直線上。因由此三點發出，入於眼內之光線，本為直線，如其相重，則三點與眼，應在同一直線上。又欲檢查棒是直或曲，亦復同樣，即將棒之一端放在眼之近傍，沿棒窺去，如其各部分，皆可相重，則為直，否則即為曲。

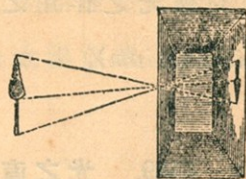
[問] 射箭放槍礮等，其對準目標，是何作用？

(答) 使箭上，槍礮上之某兩定點，(如在槍礮則為其礮身上所謂照尺及照星之兩點，如在弓箭，則為射箭人之眼與弓上之一定點)與目的物，三者成同一直線，是即對準目標。

§561. 小孔所生之像。

在暗室之壁上，開一小孔，則室外之景物，即倒懸於小孔正對之暗室中之牆壁上，是曰像(image; *Bild*)。此亦由光之直進而起，如圖 290。

由樹頂發出之光，只有將樹頂與小孔連結成一直線之方向者，方能通入室內，行至對面壁上一點。由樹根或其中中央發出之光，亦各僅有一條，穿進孔內，行至壁上，如



290.

圖所示，例如樹後黑暗，只有樹能受日光，發為綠色，則凡由樹上各部分發出之綠光，各如上述，集於對面壁上一點，其他之

光,均不能來,故壁上由各光點集合而成此倒立之樹像。

§562. 由小孔所生之像,若孔口甚小,則不問孔之形狀如何,像形恆一定。例如孔為一直立長線,如圖 291, 由孔之上部 P 所生之像為 ab, 由其下部 P' 所生之像為 a'b', 彼此相重, 上下兩端雖不及左右鮮明, 然大體仍現為物體原有之形狀。但若孔更大, 令 ab 與 a'b' 完全脫離, 即不能成原有之形狀, 而成次節所述之影與半影等。

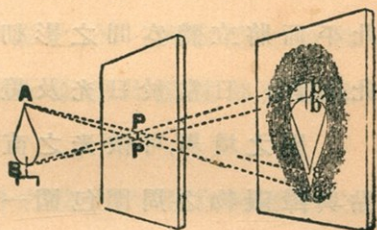


圖 291.

反之, 孔口愈小, 則所生之像亦愈暗淡, 但輪廓却極鮮明若於像處, 放一照相用之乾板 (參照 §618), 雖不用照相用之透鏡, 亦可撮取比較鮮明之相片。

[問] 晝間日出時, 在樹葉密佈之林中, 見由葉間透入林內之日光, 射至地面, 皆成爲圓形, 試言其故。

(答) 由上述小孔所生之像, 與孔之形狀不生關係, 故樹葉密集時, 葉與葉之間所餘之空隙, 或爲三角四角, 或爲極不規則之形狀, 但由此通過之日光, 與之毫無關係, 只在地面上作太陽之倒立像, 故均爲圓形。當日蝕時, 太陽成爲新月之形, 若亦此時在林內葉底觀察, 則日光射至地面, 即不成爲圓形而成爲新月形矣。

§563, 影。

由光源發出之光, 途中如遇有不透明體遮住時, 此不透明體之後面, 即無光來。

[定義] 凡爲不透明體所遮斷無光到來之處，稱曰影
(shadow Schatten).

故凡言影，均指立體的空間而言。在此立體空間之影中，或有一平面，如牆壁或屏風等，橫於其處時，則在影內之部分，即成暗黑，而在影外之部分，則仍光明。此暗黑之部分，即此平面將立體空間之影切斷時之斷面，通常俗稱之影，即指此而言。日常於日光及燈光之下，均可經驗之。

影之境界，可依光之直進定律定之，即用直線將光源之點與障礙物之周圍包圍一周，如是而成之面內，皆屬於影之

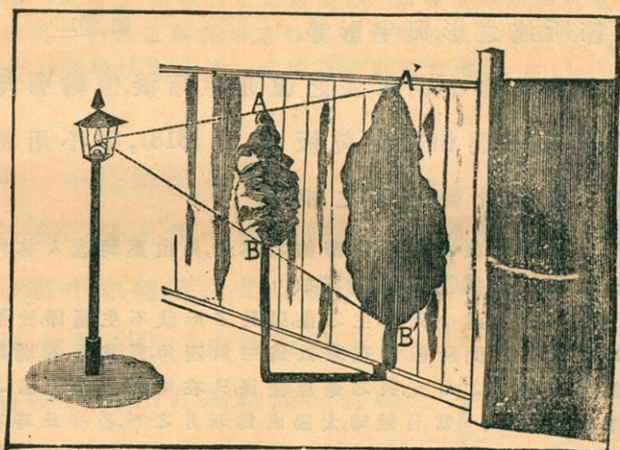


圖 292.

範圍。例如圖 292，即由路燈所生之影，投於牆上時之狀況，牆上暗黑部之邊上各點，與實物對應之點，及光源，均同在一直線上。

§564. 以上所述，係就光源爲一點時而言，如光源不僅一點，而有相當之大小時，不透明體之後面，有完全不受光之暗黑部分，有僅受一部分之光而成之淡黑部分。完全暗黑不受絲微之光之處，曰本影 (*umbra*; *Kernschatten*)；淡黑部分，曰半影 (*penumbra*; *Halbschatten*)。洋燈之焰，有相當之面積，並非一點，故其所生之影，亦有本影與半影之分。與物體相隔較遠之處作成之投影，其周圍輪廓，均極朦朧，此朦朧部分即此處所言之半影。

注意：通常所言由物體投出之陰影，均須有極強烈之發光體發出之光，始能造成，但並不限於自身發出之光，即反射之光，亦同樣可以投出，例如在月光中，亦有影可見。通常在吾人周圍之各種物體，並未見有能生如是之影者，實際非無此種之影，乃因其光太弱，故在不透明體後面投出之影，與其他直接受光之部分，明淡幾全相同，一方面由無數之光源所投出之影，彼此互相交錯，故其界限極不鮮明。又若將周圍光源物體之全體總括成爲一個光源觀之，則不透明體之周圍，各處皆應成爲半影，故全體不見有所謂影，僅於有特別明亮之光點存在時，方能察見。若在暗室中，用一白紙片受強烈之光，則由此紙面反射出之光線，對於周圍物體，亦能造成鮮明之影，與由燈光投出者，完全相同。

§565. 日蝕 (*solar eclipse*; *Sonnenfinsternis*) 由於月球行至

太陽與地球之間而生，光源之太陽甚大，故於月後生本影與半影，如圖 293。其本影在月球後面若干距離，即圖中之 C 點，約至地球表面之距離

為止，地球若進入此部分內，地球表面，即成本影之一部分，其處即完全不受

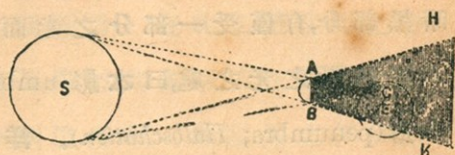


圖 293.

太陽發來之光，故完全不見太陽，通稱曰皆既蝕 (total eclipse; *totale Finsternis*)，在此點周圍之部分，均在半影之範圍內，故可看見一部分之太陽，稱為部分蝕 (partial eclipse; *partielle Finsternis*)。又若地球表面之某一部分，適當 C 點之後，即在 AC, BC 之延長線之間，則由此處，只可看見太陽周圍之部分，狀如一環，稱為金環蝕 (ring eclipse; *ringförmige Finsternis*)。

注意：上圖所繪之日蝕狀況，僅表其大體之關係，至彼此之大小比例，則與實物相差甚遠。若欲用同一之比例繪出之，則月之直徑若作 1 分，地球與之相隔距離應作 1 尺 1 寸，地球之直徑則應作 4 分，太陽與地球應隔 480 尺之遠，其直徑應在 4 尺以上。

§566. 又月蝕 (lunar eclipse; *Mondfinsternis*) 為地球在太陽與月球之間，月球適入於地球之本影中而生之現象，在地球本影中之部分，即成為暗黑，故蝕去之部分，即地球投至月球上之影。

§567. 面之明亮。

一物體之表面，因受外來之光，而至明亮時，其明亮之程度，一由於所受之光量（見次節）大小，一由於此表面之性質如何而定。受同一之光量時，當以白色之面最明，灰色及其他各色次之，以黑色為最暗。

§568. 亮度。

物體表面之單位面積所受之光量，可以表其光亮之程度，通稱之曰亮度 (illumination; *Beleuchtung*)。故兩物體表面之亮度之比，即此兩物體上之同一面積所受之光量之比。

§569. 亮度之第一定理。

[定理] 受同一光源之光，在同一位置上，將表面轉向各種方向而比較其亮度時，以此面正與光源方向垂直時為最大。

此定理可用圖 294 說明之。

AB 為受光之面，其中心 P 之位置不變，S 為光源。AB 若與 SP 垂直時，其亮度較其他一切方向均大。但將此面

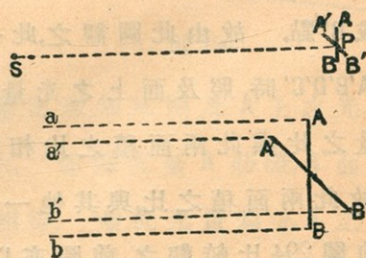


圖 294.

積過大，則其周圍部分，當然不能垂直。故上述之定理，只能

適用於小面積之面，或大面積中之一小部分。

證明： AB 之面積若不甚大，則由光源 A 而來之光線 aA 與由 B 而來之光線 bB，均與 AB 幾成垂直。在 aA, bB 間之光均照在 AB 面上。將 AB 傾斜至 A'B' 之位置時，則只有在 a'A' 與 b'B' 之間之光線，方能照及 A'B' 面上。由圖自明，a'b' 不過 ab 之一部分，故在傾斜位置之面所受之光量，較同一面積而在垂直方向時所受之光量為少。

注意： 上雖只用 AB, A'B' 兩線，而云其各表一面積，其實乃各為一矩形面積，如圖 295。其一對之邊 AB 與 CD，相重而成前圖 294 之 AB，其後又相重而成 A'B'。其他一對之邊 AC, BD，與紙面成垂直，今由橫面看去，故 AC 縮成 A 點，BD 縮成 B 點，其後傾斜時 A'C' 縮成 A' 點，B'D' 縮成 B' 點。

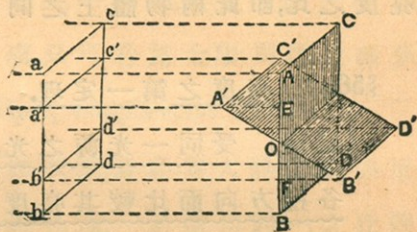


圖 295.

故由此圖觀之，此一定面積之位置，由 ABDC 傾斜成 A'B'D'C' 時，照及面上之光量，即由 abdc，一變而成 a'b'd'c' 即光量之比與此兩面積之比相等。但一對之邊 ac 與 a'c' 相等，故此兩面積之比，與其他一對之邊，即 ab 與 a'b'，之比相等。與前圖 294 比較觀之，前圖亦以 ab 與 a'b' 之比，表其光量之比。如用三角法之公式，命傾斜之角度，即角 APA'，為 α ，則

$$\frac{a'b'}{ab} = \frac{a'b'}{AB} = \frac{EF}{A'B'} = \frac{OE}{OA'} = \cos \alpha.$$

故其結果爲

[定理] 受光之面，與光源方向之垂直面所作之角度若爲 α ，則其亮度，等於在與光源方向垂直之位置時之光度之 $\cos \alpha$ 倍。

[問] 一面與光源方向垂直時之亮度，與在對於垂直面成 60° 傾斜之位置時之亮度之比爲若干？

(答) 等於 2 與 1 之比。

§570. 亮度之第二定理。

[定理] 與光源方向垂直之面之亮度，距光源愈遠，則愈減小，其值與光源之距離之平方爲反比例。

例如與光源之距離加二倍，則垂直面之亮度即減爲 $\frac{1}{4}$ 。

證明：圖 296 之 A, A' 爲兩受光面，與光源 S 間之距離爲 d, d' ，同垂直於光源之方向，

又爲同樣矩形面積，互行平行，且由 S 引至 A 之各邊上各點之直線，均必各達於 A'

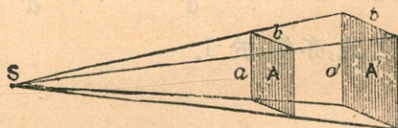


圖 296.

上各邊中之一點。由光之直進定理，知凡照及 A 上之光，假使若無 A 面存在，必全照及 A' 上。即假使無 A 妨礙， A' 面上所受之光量，恰與 A 上所受者相等。命此光量爲 g ， A 之面積爲 F ， A' 之面積爲 F' ， A 之亮度 i 當爲 $\frac{g}{F}$ ， A' 之亮度 i' 當爲 $\frac{g}{F'}$ ，故亮度之比 $i : i'$ ，等於面積之反比，即 $F' : F$ 。但如照圖

上所示,以 a, b, a', b' 等表各邊之長,則面積之比 $F:F'$ 等於 $ab:a'b'$,而 A 與 A' 之相應邊之比,即 $a:a', b:b'$,同等於距離之比,即 $d:d'$,故矩形面積之比 $F:F'$,等於距離之比 $d:d'$ 之平方。即亮度之比等於 $d'^2:d^2$,即上述之定理。

注意: 關於第二定理之應用,有一特別之例。光源若在極遠之處,則一切光線,均幾成平行線,此時上圖之 A 與 A' ,即成相等之面積。光源不必甚遠,只須用特殊裝置,使光線成爲平行時,其關係亦同。要之,

[定理] 光線平行時,無論放於何處與光源方向垂直之平面,其亮度恆一定不變。

欲由上述之第二定理,求此關係時, d 與 d' 均看成極大,而其差,即 $d'-d$,則爲通常之值,如此則 $\frac{d}{d'} = 1 - \frac{d'-d}{d'}$,但 $d'-d$ 比 d' 甚小,故 $\frac{d'-d}{d'} = 0$,即 $\frac{d}{d'} = 1$,故與 $\frac{d^2}{d'^2}$ 成反比例之亮度之比,亦等於 1。

§571. 光度.

[定義] 比較各種光源強弱之量,曰光度 (intensity of light; Helligkeit),以與光源相隔一定距離而與光源方向垂直之平面之亮度測之。

用一定之方法作成之光源,在一定情形下所生之光度,選作單位,以比較其他光源之光度時,常稱之爲若干燭光 (candle power; Kerze)。此種光度標準所用之光源,有數種之多,最普

通者爲英國制之燭光。英國之標準蠟燭，係用鯨蠟作成，重 $\frac{1}{6}$ 磅，每一時間燃燒120格令，即7.776克，時所發之光度，爲1燭光。又德國之黑夫勒 (Hefner) 燈，係用乙酸戊烷 (Amyl acetate) 液體點燃而生火光之燈，燈心有一定粗細，火焰亦有一定之高低(約爲4釐)，此時所發之光度，用爲測光之單位。1燭光，約合此種光度之1.2倍。

以上所定之光度單位，若非燃在目前，亦不知所謂一燭光，究爲若何強度之光。至於通常使用之洋燭，其燭光約爲1燭光，洋油燈之燈心帶寬五分者，發出之光，約有四燭光之譜，寬三分者約有三燭光之譜。

[問] 發于燭光之電弧燈，照及若干尺遠之平面，其光度始與受1尺遠之標準燭光時相等。

(答) 由亮度之第二定理，知隔電弧 $\sqrt{1000}$ 尺，即隔31.6尺之距離時，其亮度與隔1尺距離時之千分之一，即與在1尺距離之1燭光之光源所生之亮度相等。

§572. 光度計.

光度計 (photometer; *Photometer*) 爲比較兩種光源之光度之器械。其原理卽上舉之問題之反面。如命 A, B 爲兩光源，將受光之面放在種種距離，使兩光源照至其上之亮度恰相等。此時光源與 A 之距離爲 x 尺，與 B 之距離爲 y 尺， x 與 y 均可實測而出。A 對於 1 尺遠之面，當生其 x^2 倍之亮度，B 對於 1 尺遠之面，當生其 y^2 倍之亮度。故 A, B 之光度

比,當爲 $x^2 : y^2$, 故用光度計之職務,即在尋出此一點,使雙方所發出之亮度恰相等

本生(Bunsen)光度計之原理,如圖 297,用一白紙造成一屏風,中央有一無色之油點 C。白紙對於所受之光,反射者多而通過者少,油點部分則反是,對於所受之光通過者多而反射者少。故將此

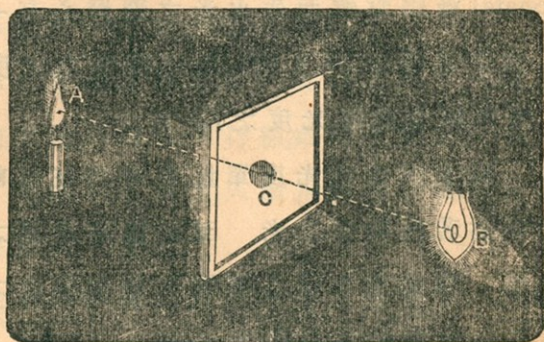


圖 297.

屏風放在光源 AB 之間,若由 B 之一方看去,則油點之亮度大部分屬於由 A 而來,周圍之部分,其亮度則大致均由 B 而來。故若 A 之亮度小, B 之亮度大時,其狀況如圖中所示,周圍明亮而中央之油點則暗黑。若 A 之亮度大, B 之亮度小,則與此正相反。故若將 A, B 各置於左右兩邊一定之位置,而移動其間之紙屏,變化油點及其周圍之明暗程度,至油點與周圍成同一之明暗時爲止,此時 A 與 B 對於此屏之亮度即恰相等。求出此位置後,即可由下列之算式,比較 A, B 之光度。

$$\frac{\text{A 之光度}}{\text{B 之光度}} = \frac{AC^2}{BC^2}$$

第二章 光之反射

§573. 反射。

前於§557中說明物體所以能現出之理由時，曾用過反射 (reflection; *Reflexion*) 一語，通常分爲兩種，一曰正反射，一曰亂反射。前此所用之反射，係指發光體射出之光，傳至物體表面，即由其各點改變方向，沿一切方向向空氣中射回時而言。換言之，即由此種物體表面各部分，均有光線發出，沿一切方向進行，與發光體自能發出各方向之光線，同一狀況，故能使人認知其存在。凡如此類，

[定義] 射至物體上一點之光，即由此點向各方向反射而回之現象，曰亂反射 (diffuse reflection; *diffuse Reflexion*)。

亂反射實爲使吾人認知發生反射之點之存在之原因，須特留意及之。

574. 正反射。

液體表面或鏡面等，完全無凹凸不平之處，光射及其上，只能向一定之方向反射而回，其方向由射來時之方向而定。凡如此類，

[定義] 射至物體上一點之光，即由此點沿一定方向反射而回，其方向則由射來之方向而定者，曰正反射 (regular reflection; reguläre Reflexion).

將日光由小孔導入暗室內，如圖 298，使其射至鏡面，即可實驗上述之事項。光所通過之路，可由浮游空中之塵埃察見之。由 S 方向射來之光，在鏡面 O 點反射後，即取一定之方向 OR 射去。

上之實驗，係用極強之光，至於用弱光反射之例亦甚多，如通常鏡中映成物體之像，即由鏡面之正反射而成。

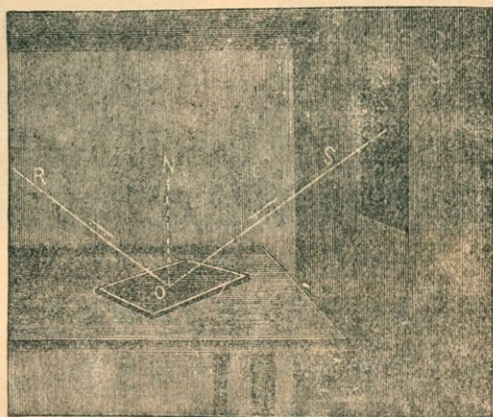


圖 298.

§575. 於敘述正反射後光線應取若何方向之前，以先下入射角 (angle of incidence; *Einfallswinkel*)，及反射角 (angle of reflection; *Reflexionswinkel*) 等語之定義為便。光射至反射面時，曰入射；達於鏡面為止之光線，曰入射線 (incident ray; *einfallende Strahl*)，即 SO ；與鏡面相遇之一點，曰入射點 (point of incidence; *Auftreffpunkt*) 即 O ；於入射點作一直線與鏡面垂直，曰法線 (normal; *Einfallslot*)，即 ON ；入射線與法線間之角，曰入

射角，即角 SON ；由 O 點反射後之光線，曰反射線 (reflected ray; *reflektierte Strahl*) 即 OR ，反射線與法線間之角，曰反射角 (angle of reflection; *Reflexionswinkel*)，即角 NOR 。表示入射線與反射線兩者之方向間之一定關係，曰反射定律 (Law of reflection; *Reflexionsgesetz*)。

[定律] (1) 入射線及反射線各在法線之一邊，三者均
在同一平面內；

(2) 反射角與入射角恆相等。

就圖 298 言之，則 SO , ON , OR 三直線應在同一平面內， ON 在於 OS 及 OR 之間，角 NOR 與角 SON 相等。

§576. 注意：反射現象，不僅限於光線在空氣中射至平滑表面如鏡面等類時而起，例如將鏡放入水中，或使光線通過空氣以外之透明體，射至其他之透明體時，亦能發生。

最後射達之物體，亦為透明體，故一部分之光，透入其內，一部分之光則反射而回。例如在空氣內射來之光，達於水面或鏡面時，一部透入水內或玻璃內，他一部分仍反射回入空氣中。最宜注意之處，為反射不僅限於此種由密度較小之空氣，射至密度較大之水或玻璃時為然，反之，即由密度較大之水中或玻璃中傳來之光，達於與空氣相接之表面時，亦一部分通過，一部分反射。其最有趣之實例，如圖 305。

§577. 因正反射與亂反射不同而起之現象，如人對鏡

面時，不知鏡面之存在。前說明人能認知物體之存在，由於物體各點所受之光，反射後沿一切方向進行，與自能發光之物體，同一狀況。鏡面之一點，則無此性質，故不能認出其存在。但此係就理論而言，實際則鏡面之存在，確可看出，因鏡面恒不明，故有一小部分之光作亂反射，不難由此察知。如鏡面全無不明之處，則除由其邊緣或鏡中所映之像而外，實無由認知鏡之存在。演魔術之人，常用多數之鏡，即由於此又如乍入懸鏡之室，不覺其為鏡而欲由是走過，非至自身碰着鏡面，不審其為鏡，亦足以證明此說。

§578. 平面鏡。

由上述反射定律，可以推知平面鏡 (plane mirror; *ebener Spiegel*) 內映成物體之像之狀況。由光源之一點 S 射出之光線，達於鏡面 AB 上之任意一點 P ，反射後則成為 PR 之方向。欲求 PR 之方向，其法如下：由 S 點作直線 SO ，與鏡面 AB 垂直，延長之，取 OS' 與 SO 相等，則反射後之光線，即宛如由此 S' 點發出者然 (圖 299)。直角三角形之 SOP 與 $S'OP$ 中， SO 與 $S'O$ 相等， OP 為共通之邊，故角 SPO 與角 $S'PO$ 彼此相等，又由反射定律，知角 SPO 與角 RPB 相等，故角 OPS' 與角 RPB 相等。即 $S'P$ 與 PR 為同一之直線。由 S 發出之光線由鏡面上其他各點反射後，如圖中虛線所示

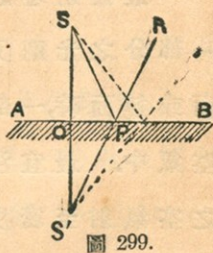


圖 299.

之狀況，反對延長之，仍必通過此 S' 之一點，故與由此 S' 點直接發出之光線相同。因之，此等反射光線入於眼中時，所生之感覺，與光源在 S' 時所生之感覺相同。換言之，即 S 所生之像，當在此 S' 點上。

以上係指光源為一點時而言，若光源有一定之大小，如圖 300 中之 ST ，其作用亦同。即 ST 之各點，照上述之關係，各有一定之像，結果 ST 之全體，於 $S'T'$ 處結成其像。物體與像之位置宛如以鏡面處為折縫，將紙折疊時，物體與像即完全相重，此種相對之位置，通稱曰對稱位置。故

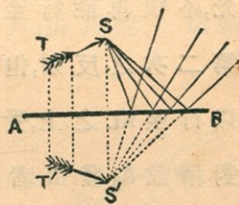


圖 300.

[定理] 由平面鏡生出之像，與實物同大，對於鏡面與實物成對稱形。

例如以右手之掌心向鏡，則其像與左手對右手時無異。又通常之文字，在鏡內作出之像，均成反背之形。

注意：普通玻璃鏡所成之像，由於玻璃底面所貼之水銀面反射而來之光，集合而成。至於玻璃本身，亦可反射一部分之光，特分量極少而已（參照 §581 之問題）。

§579. 例題 1. 將兩平面鏡放在互相垂直之位置，在兩鏡前面之物體，可在鏡內造成三個之像，試說明之。

證明：如圖 301， HK 為向右之鏡， KL 為向上之鏡，兩鏡之

間有ABC之物體。由A發出之光，經HK反射後，均似自A對於HK之對稱點 A_1 發出者然，故 A_1 為A之一像。又由HK反射後之光，不復再能行至HK之上，受其第二次之反射，但有一部分

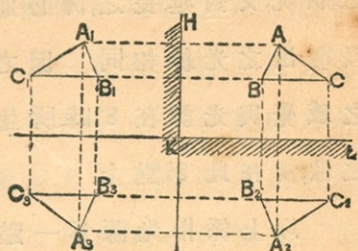


圖 301.

可以行至KL之上，受其反射，如是反射後之光，與自 A_1 對於KL之對稱點 A_3 發出者相同，故 A_3 亦A之一像。但由 A_3 發出之光，已不能再行至HK與KL兩者之上，故此外不能再行造像。但最初由A發出之光，直接進至KL之上者，反射後與由A對於KL之對稱點 A_2 發出者無異，故 A_2 亦為A之一像。此種光線射至HK之上，亦可再作一像於 A_2 對於HK之對稱點，但此點却與 A_3 完全相重。何則？試命A與HK之距離為 p ，與KL之距離為 q ，則 A_1 與HK之距離亦為 p ，與KL之距離亦為 q ， A_3 亦相同。又 A_2 與HK之距離亦為 p ，與KL之距離亦為 q ，故其對於HK之對稱點，亦同樣恰與 A_3 一致。但此次之 A_3 ，因最後由HK之面反射而來，故亦能在將HK上之點與 A_3 連接之直線上見之。由 A_3 發出之光，對於任何鏡面，均不能再行反射，亦即不能再生像，故A之像僅有 A_1, A_2, A_3 之三種。由物體上其他各點所造之像亦復相同，故物體全體造成之像，亦只有此三種，其位置如圖中所示。

§580. 例題 2. 小孩玩具中有名萬花筒 (kaleidoscope; *Kaleidoskop*) 者,係用長寬各各相等之小鏡片三枚,如圖 302 之 $ABB'A'$, $BCC'B'$ 及 $CAA'C'$, 將其相等之邊結合一處, 造成一橫斷面為正三角形之柱之側面, 各鏡之面皆向內方, 在柱之一端如三角形 ABC 之中, 隨意放入各色之碎片, 由其他一端窺之, 即見其現為種種變幻萬般之形狀。

證明: 此三鏡片以圖 303 中之 I, II, III 表之。在此中之物體發出之光, 經 I 反射一次之後, 其像即生於 1 之三角形內, 經 II 反射一度之後, 其像即生於 2 之三角形內; 經 III 反射一

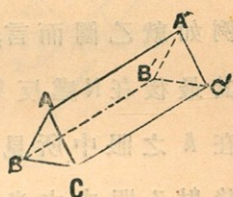
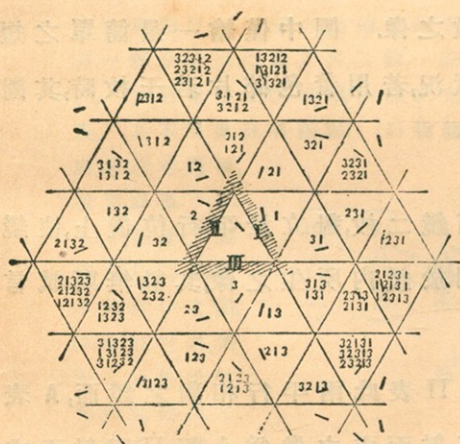
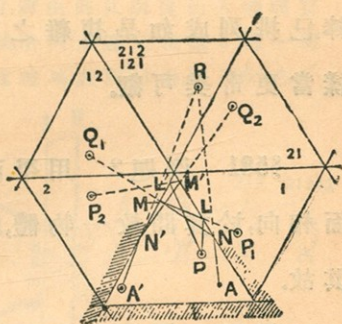


圖 302.



甲



乙

圖 303.

次之後, 其像即生於 3 之三角形內。至經 I 反射一次後之光再經 II 之反射所生之像, 與 1 內之像對於 II 所生之像相

同，故其像當在圖上 12 之三角形內，其他倣此。例如在 2132 三角形中之像，係最初由 II 反射，次由 I 反射，次又由 III 反射，最後再由 II 反射而來之光線結成，對於 II 之鏡面言，當在 213 之對稱位置上。圖中一三角形內而有兩個符號，如 121, 212 之例，表示 121 之像與 212 之像，均同生於此一三角形內，但並不必然彼此相重，因看法而有不同，或為 121，或為 212。例如就乙圖而言，由 A 觀察在此三角形內之 P 之像 R，由於其最後在 N 處反射發來之光，故其光線之通路為 PLMNA。故在 A 之眼中所見者為 121 之像。由 A' 點觀察同點 R 時，其最後射入眼中之光之方向為 N'A'，故光線之經路應為 PL'M'N'A'。故在 A' 之眼中所見者為 212 之像。因此三角之像，充滿於全平面之內，成為無限多數之像。圖中僅繪一最簡單之短棒，已排列成如是複雜之狀況，若用着色碎片若干枚時，其圖樣當更奇美可觀。

§581. 例題 3. 用平面鏡二枚，對立於平行位置上，使鏡面相向，於其間放一物體，則於鏡內所生之像，其數無窮，試言其故。

證明：圖 304 之 I 及 II 表此兩平行相對之鏡面，A 表介在其間之物體。經 I 反射而成之像為 1，經 II 反射而成之像為 2，先經 I 之反射再經 II 之反射而成之像為 12，以下準此，即可得無窮數之像。且各像每隔一個，其排列之間隔

必相等，即等於由光源至兩鏡之距離之二倍，且每隔一像，即有一倒轉之像。

$$(A, 1) = (2, 12) = (21, 121)$$

= A 至 I 之距離之二倍。

$$(A, 2) = (1, 21) = (12, 212)$$

= A 至 II 之距離之二倍。

[問] 蠟燭之火焰在玻璃鏡內所生之像除一最強之像外，尚有光亮較弱之像若干個存在。試言其故？

(答) 玻璃鏡所生之反射，最主要之反射面，為玻璃底面鍍銀之處，但玻璃之表面當然亦可反射。

又由銀底反射而回之光線，須通過玻璃內部，行至玻璃表面處，只有一部分透出空氣之外，其餘一部分，將由此反射復回入玻璃質內。故若單着眼於玻璃內部之光線，恰與上述之例題 3 同一問題。其不同處只有兩點：(1) 物體在玻璃表面以外，圖 305 之 I

即此玻璃表面。

故造成像 1 之光，不能達於鍍銀面 II 之上，故不能有 12 之像。

(2) 眼在玻璃表面 I 以外，故眼中所能得見之像，除 1 而外，均

由經過銀面反射通過玻璃表面出於空氣中之光線集成，至於最後經玻璃表面反射向內之光線所造之像，則不能見，即能見者僅有 1, 2, 212, 21212 等各像，而 21, 2121, 等像則均不能得見。故結果如圖中所示，各像以 2 之光最強，其前有一弱光之 1，其後有 212,

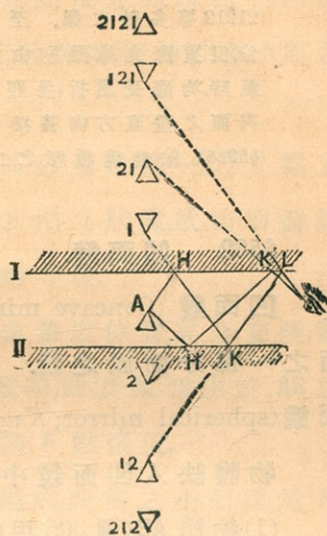


圖 304.

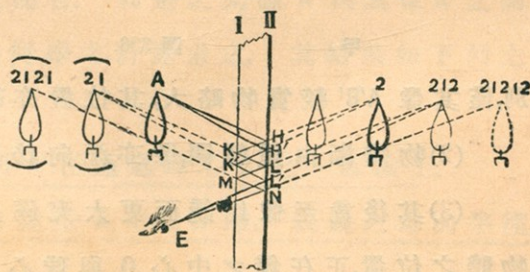


圖 305.

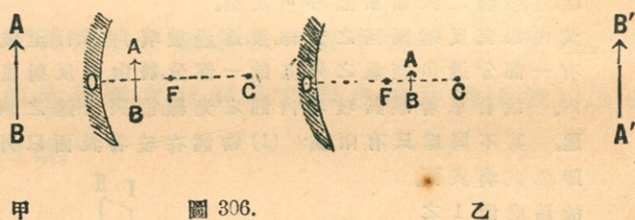
21212 等多數之像。至各像之排列距離，圖中均為玻璃板厚之二倍，但實際光線最初由空氣進入玻璃時，以及最後由玻璃復出空氣時，均應受屈折（參照 §593）作用，不能如是簡單。若觀看之方向，與面之垂直方向甚接近，則各像間之問隔等於以屈折率（參照 §5935）除玻璃板厚之二倍所得之商（參照 §600 之問題）。

§582. 凹面鏡。

凹面鏡 (Concave mirror; *Konkavspiegel*) 為將鏡面磨成球面之一部分而成之鏡。與下面所述之凸面鏡，合稱之曰球面鏡 (spherical mirror; *Kugelspiegel*)。

物體映入凹面鏡中所成之像與實物之關係如下：——

(1) 物體 AB (圖 306 甲) 在鏡面近傍時，與平面鏡時無甚差



甲

圖 306.

乙

別，僅其像 A'B' 較實物略大，其位置亦較平面鏡時略為退後。

(2) 物體漸由鏡離開，像亦漸向後退，同時隨之漸次增大。

(3) 其後竟至像比鏡面更大，充滿全鏡，不復能辨別，此時物體之位置，正在鏡之中心 O 與球心 C 之中點 F 處。

(4) 物體再遠於此 F 點，像又轉在鏡內前進，同時現為倒立之大像。物體若距 F 尚未遠，則像亦在遠處。非自極遠之處向鏡觀察，不能得見此像。

(5) 物體離開 F 漸遠，像亦次第與鏡接近，同時縮小，然仍較實物為大，物體行至乙圖中之 AB 近傍時，像即生於 $A'B'$ 之近傍。

(6) 物體若移至球心 C ，像亦同時移至此同一之 C 點上，此時像之大與實物相等，但仍不改其倒立狀態，故由前面觀察，即可望見物體與其倒立之像，同時存在。

(7) 物體由此再行移遠，則物體與像之位置，完全交換，像亦縮小，物體若移至乙圖之 $A'B'$ 近處時，則其像即生於 AB 之近傍，由此物體再行移遠，像亦漸次與 F 點接近。

(8) 物體若移至無限遠處，像亦縮成非常之小，而現於 F 點上。

§583. 光源之一點 A 所生之像 A' ，係指由 A 點發出之各光線，經鏡面之種種部分反射之後，其所取之方向均似自此 A' 點發出者之狀況而言。如是之光源 A 與其像 A' 之關係，可由反射定律，依幾何學之計算求之。其結果如下列之二定律：

[定律] (1) A 與 A' 在通過球心 C 之一直線上。

(2) 命 u, v 表由鏡至 A, A' 之距離， r 表鏡之球面半徑，則有下列之關係：

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}$$

但此關係僅限於鏡面之大，較半徑 r 及 u, v 等均極小時，方能適用，即一近似之關係，由鏡至某處之距離，係指由鏡面之任何部分至此點之距離均相等而言。又 u, v 若在鏡之前方，則取正號；若在後方，則取負號。

上面所列舉由(1)至(8)之種種實際情形，均包含於此兩定律之內。第一定律表實物與像之長之比，等於距離之比；第二定律表此比，等於由鏡面之距離之比(參照 §587 之問題)。又第二定律表源與像之位置間之關係，上舉之八段關係，均可由此說明。即(8)為 $u = \infty, v = \frac{r}{2}$ ；(7)為(8)之 u 漸減小， v 漸增大；(6)為 $u = r, v = r$ ；(1)為(7)中之 u 與 v 交換而成，再經過(4)即成為(3)，此為 $u = \frac{r}{2}, v = \infty$ ，即(8)之 u, v 交換而成。其次(2)中 $u < \frac{r}{2}$ ，由式計算而出之 v ，成為負量。 v 為負量，表示像不在鏡前而在鏡後之意。(1)所表者為 $u =$ 小正數， $v =$ 小負數。又大小之關係以及倒正之關係，一一均與本節之兩定律一致，可一一自行驗之。

證明：圖 307 之 MO 表鏡面， C 為球心， A 為光源，由光源

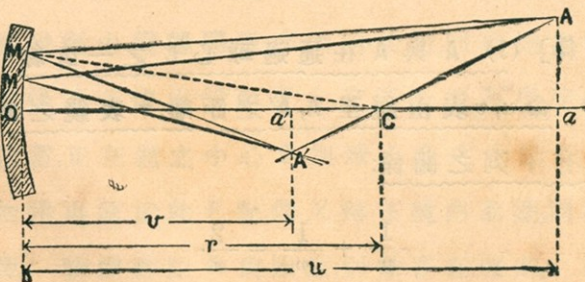


圖 307.

發出之光線 AM 由鏡面 M 點反射後成爲 MA' 之方向，與 AC 線相交於 A' 點，於 M 點作與鏡面垂直之直線，即爲球面之半徑 MC ，一方面角 $AMC = CMA'$ ，故由幾何學定理得 $\frac{AM}{A'M} = \frac{AC}{CA'}$ 。由前述之假定， $AM, OC, A'M$ 等均較 OM 甚大， AM 可看成由 A 點至鏡面之距離，即於 O 點引一切線，此切線與 A 點間之距離，如命之爲 u ；又由 A' 至 O 點切線間之距離，可看成與 $A'M$ 相等，而命之爲 v ，則上之關係即變爲

$$\frac{u}{v} = \frac{AC}{CA'}$$

今由 A, A' 引至 OC 線之垂線，則得以 AC 及 $A'C$ 爲弦之兩直三角形，由其相似之關係，可知 $\frac{AC}{CA'}$ 之比，等於由 C 至垂線點之距離，即 $u-r$ 與 $r-v$ 之比。故

$$\frac{u}{v} = \frac{u-r}{r-v}$$

由此

$$\frac{r-v}{v} = \frac{u-r}{u}$$

$$\frac{r}{v} + \frac{r}{u} = 2,$$

故

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}$$

此式表由 A 點發出，在 M 點反射之光，與 AC 相交之 A' 點，應在鏡面若干距離之處之關係。今試求由 A 發出在鏡面另一點 M' 反射之光線，與此 AC 相交之點。由上述之理，應爲

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}$$

公式所決定之點。但此時之 u 與 r ，與前並無不同之處，故 v 亦應與前相同。同樣，在 AC 線上，與鏡面相距為 v 之點，亦僅有一點，故對於由 M' 反射之光之 A' 點，與對於由 M 反射之光之 A 點；應為同一之點。即由 A 點發出在鏡面各點反射之光，均通過此一定之 A' 點。故在眼中受此種反射光線時，所生之感，與由 A' 點發出者相同。故 A' 為 A 之像，其位置由上列之兩定律而定。

§584. 共軛點。由前節之作圖，可知源若在 A 點，則像生於 A' 點；源若在 A' 點，則像即生於 A 點。又由公式觀之，若 $u=a$, $v=b$ ，所成之關係，對於 $u=b$, $v=a$ 時，亦同一成立。凡如此種可以相互為源為像之兩點，曰共軛點 (conjugate points; *konjugierte Punkte*)。

§585. 焦點。通過凹面鏡之球面中心 C 與鏡面中點 O 之直線，曰凹面鏡之鏡軸(圖 308)。

凡與鏡面平行之光線，經由鏡面反射後，均集於一點，曰凹面鏡之焦點 (principal focus; *Brennpunkt*)。圖中

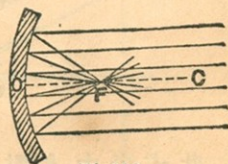


圖 308.

所示即各條光線反射後，均集於 F 點，即焦點。

凡與鏡軸平行之光線，可以看成為由於在無窮遠之源點

發來之光線，焦點即在軸上無窮遠點之像點。故若欲由前節公式，求其位置時，應將 $u = \infty, v = \frac{r}{2}$ 代入式中，即得

$$OF = \frac{1}{2} OC.$$

[定理] 凹面鏡之焦點為球心與鏡面中點連成直線之二等分點。

注意：此定理不必由前之公式亦可直接證明。AM // CO 時，MF 為反射光線(圖 309)。

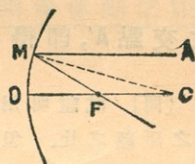


圖 309.

$$\angle AMC = \angle CMF,$$

故
$$\angle MCF = \angle CMF,$$

故
$$MF = CF.$$

但 CF, FM 較鏡面上之長 MO 甚大時，可以看成 $FM = FO$, 故

$$CF = FO.$$

§586. 光源在焦點上時，反射光線均與鏡軸平行。即公式中 $u = \frac{r}{2}$, 因之 $v = \infty$ 之時。用強烈之光照及遠方之器械，如探海燈者，即利用此作用製成，以其凹面，正向目的處，而以極強之光源，放在焦點之位置上。如此則反射光線，不致散亂，射至遠處，大致仍可維持平行之狀態 (§570 之注意)。

§587. 像點之作圖法. 如圖 310, 由 A 點發出至鏡面反射後取各種方向之光線中, 與鏡 OC 平行之 AM, 反射後成爲 MA' 通過焦點 F. 此關係如 A 之位置已知, 求作 A' 點之位置時, 最爲有用. 作圖法即先由 A 點引 AM 線與鏡軸平行, 與鏡面相交於 M 點, 連結 M 點與 F 點引一直線, 求其與 AC 線之交點 A', 即得 A 之像點之位置.

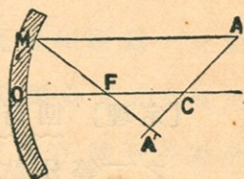


圖 310.

[問] 試證明用凹面鏡結成之像, 與實物之長短之比, 等於與鏡面之距離之比. 但所謂長短, 係指與鏡軸垂直方向之長而言.

(答) 命源長爲 l , 像長爲 l' , 將此兩共軛點用直線連結時, 此直線必通過球心, 故

$$l' : l = r - v : u - r.$$

但

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r},$$

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{r} = \frac{1}{r} - \frac{1}{u},$$

$$\frac{r-v}{v} = \frac{u-r}{u},$$

即

$$r - v : u - r = v : u.$$

故

$$l' : l = v : u.$$

§588. 凸鏡面.

凸面鏡(convex mirror; *Konvexspiegel*) 係將鏡面磨成球之外面之一部分而成者. 鏡中所映種種物體, 均較實物爲小, 像之位置在鏡後, 較平面鏡時更與鏡面接近, 恆爲正立之像. 無論在何處之物體, 不問其與鏡面之距離爲遠爲近, 其像均

在於鏡面之後與球心距離之半之間。如用玻璃磨成小球，即見所映各物之像，莫不盡在球中，且均接近於球面而不接近於球心。

§589. 上述之事實，可由反射定律證明，源點與像點之位置關係，亦可求出，法均與凹面鏡處相同，其結果為

- (1) 像點在連接源點與球心之直線上。
- (2) 如用負號表由鏡面向其後方測至像點之距離，則其關係仍為

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}.$$

證明：此時之幾何學的關係，如使用與前此同樣之記號，當如圖 311. CM 為三角形 $A'MA$ 之外角 AMR 之二等分線，故

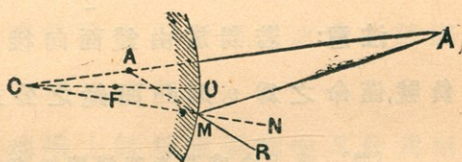


圖 311.

$$\frac{A'C}{AC} = \frac{A'M}{AM}.$$

因 A' 在鏡後，故由鏡面測至 A' 之距離 v 之前，應加一負號，即 $A'M$ 表 $-v$ ， AM 表 u ，則

$$A'C = r + v \quad AC = r + u.$$

故上之關係成爲

$$\frac{r+v}{r+u} = \frac{-v}{u},$$

即

$$\frac{r+v}{-v} = \frac{r+u}{u},$$

$$-\frac{r}{v} - 1 = \frac{r}{u} + 1,$$

$$\frac{r}{u} + \frac{r}{v} = -2,$$

即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = -\frac{2}{r}.$$

由此式，可知 u 之值由 0 以至於 ∞ 時， $\frac{1}{v} = -\left(\frac{2}{r} + \frac{1}{u}\right)$ ，

即 v 恆成負數，且恆小於 $\frac{r}{2}$ ，故與上述之事實恰相符合。

注意：若對於由鏡面向後方測至像點之距離，不加以負號，僅命之爲 v ，則凸面鏡之公式即成爲 $\frac{1}{u} - \frac{1}{v} = \frac{2}{r}$ 。

〔問〕草上水珠，受光即燦爛如空中之星體，其故安在？

〔答〕光源之像，盡造成於水珠內部，故水珠本身與能發光之發光體狀況相似。

〔問〕能否由球面鏡之定律導出平面鏡之關係？

〔答〕能。球面鏡之球心若在無窮遠處，則其球面即成爲平面。故源點之像，應在由源點引至鏡面之垂直線上，其距離因 $r = \infty$ ，故由公式知 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} - \frac{2}{\infty} = 0$ ，即 $v = -u$ ，與前平面鏡處所述者恰相符合。

§590. 試一比較凸面鏡與凹面鏡之公式，即可見其不同處，只在於球心若在鏡後，則 r 之符號須變爲負而已。故

若無論何時，均以負數表凸面鏡之半徑時，即用 $-r$ 代上用之 r ，則凸面鏡之公式，即一變而成凹面鏡之公式矣。故得

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{2}{r}.$$

可以看作凸面鏡與凹面鏡兩者共通之公式。但式中之 u , v , r 表由鏡面測至源點，像點，及球心之距離，而在鏡之前面者用正號，在鏡之後面者則用負號。

§591. 像之種類。

像之一語，有兩種用法。一種用法，如在 §561 處所述由一小孔所生之像，為在屏風或牆壁上所現出之圖形。一種用法，如在平面鏡或球面鏡中造成之像，為射入觀者眼中之光，宛如由一定地點之一物體直接發出者然，因之遂生該處有此物存在之感，而認知其物體之形狀。

第二種意義之像，在物理學上特為重要，其中又分為兩種。如由平面鏡凸面鏡等造成之像，位置均在鏡之後方，為光線不能直接達到之處，只不過反射光線之方向如是，與由此一點直接發來者相似。但在凹面鏡時，若 $u > \frac{r}{2}$ ，即圖 306 中之乙，像生於鏡之前方，實際之光，確係由此點通過，然後入目，非僅相似而已。故

[定義] 凡造成像之光線實際通過像點時所成之像 曰 實像 (real image; *reelles Bild*); 並未實際通過像點時

所成之像，曰虛像 (virtual image; *virtualles Bild*)。

此兩種像在實際上不同之處，為光源若甚強烈時，實像可在紙屏上現出，而虛像則不能。在凹面鏡之前方，於相當遠處，放一燭火，在像之位置上，立一紙屏，以受反射光線，因光線實際上由此通過，故在屏上，現出燭光之形狀。若為平面鏡或凸面鏡，則須在鏡之後方立紙屏，當然毫無意義。

§592. 虛源。用特別裝置如凹面鏡之類，使光線均集合於一點 A，但在其尚未集合之前，用平面鏡或球面鏡受此將集而未集之光，則 A 點成為入射光線應集合之一點，故為源點，實際上光確未嘗通過此點，故稱之曰虛源 (virtual source, *virtuelle Quelle*)。

虛源點由平面鏡造成之像，如圖 299，圖中 RP 等類光線，均應集於 S'，但未達 S' 即被鏡面反射而取 PS 之方向，造成 S 之實像。故若將虛源亦加入論之，則對於平面鏡，源點與像點，亦成為共軛點之關係。球面鏡亦然。凡沿與造成虛像之反射光線正相反對之方向而來之光線，達於鏡面時，其源點實為應在虛像處集合之虛源，其像則生於原有之源之處。凸面鏡時，源點像點同屬於虛，即 §589 之公式中 u 與 v 同為負量之時。

第三章 光之屈折

§593. 屈折。

光由一種媒質中進行至於與第二種媒質交界之處，其一部分由境界反射而回，同時其他之一部分則進入第二之媒質內，當其入於第二媒質以後，進行方向即與在第一媒質中進行時之方向不同，此種現象曰屈折 (refraction; *Brechung*)。

用四方之玻璃箱一個盛水，內混少許之紅墨水，令太陽光線斜向射至其表面，如圖 312。如此，則光進入水中之後，其所經過線路，為光所照，呈特種之色，極易觀察。轉動水箱，使

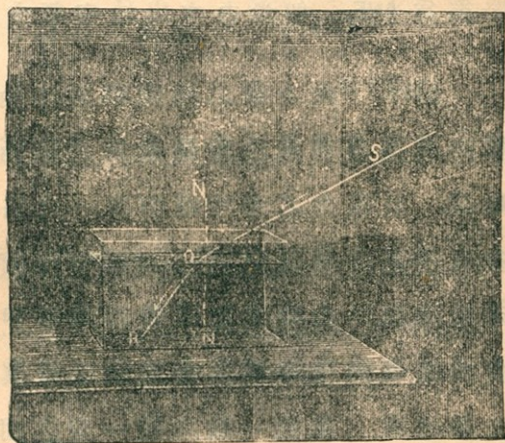


圖 312.

其一側面與入射角 (§575) 之平面，在於平行之位置，以便由橫面觀察。由 SO 方向而來之入射線，在表面屈折後，改取 OR 之方向。此時屈折後之光線與法線所作之角 $N'OR$ ，曰屈折角 (angle of refraction; *Brechungswinkel*)，恆較入射角 SON 為小。凡

如此類屈折角較入射角為小時，稱為光線屈折後與法線接近。

反之，原在水內進行之光線，行至與空氣接觸之表面時亦起屈折，可如圖 313 實驗之。先於容器底放一目標 A，由側面之一斜處之 E 點觀之，同時漸次傾水入於此容器之內。如是，器內之水愈多，目標 A 愈行浮起，宛如由 A 移至 B 處者然。即由 A 發出之光，透出空氣中時，已一變而取 NE 之方向。即光線所經過之路徑為 ANE。即光由水出於空氣中時，屈折後與法線離開。

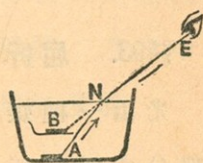


圖 313.

§594. 由上舉之兩例觀之，光由甲之媒質入於乙之媒質時，其進路若與法線接近；反之，若由乙入於甲時，即與法線離開。且兩方之光均確沿同一之路進行，只不過方向反對而已，如圖中箭頭所示之方向。此時之乙媒質稱為較甲媒質為光學的密；甲媒質稱為較乙媒質為光學的疎。氣體一般均較一切之固體液體為光學的疎，故由氣體進入液體或固體之光，必與法線接近，由液體固體進入氣體內之光，必與法線離開。

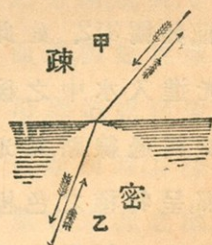


圖 314.

注意：光可以逆進之事實，由光之波動說，極易說明，詳

見 §671.

[問] 以直棒斜向插入水內，則於水面處宛如折為兩段者然，其故安在？

(答) 在水中之棒上各點，均應如圖 315 所示浮起若干距離，故在水中之一段，宛如向上折起者然。

§595. 屈折定律.

由實驗檢查，知入射線與屈折線之方向間之關係，可由屈折定律 (law of refraction; *Brechungsgesetz*) 為之表出。普通表示此定律，概用三角函數，今亦沿用之，以求簡便，然後再避去三角函數敘述之。

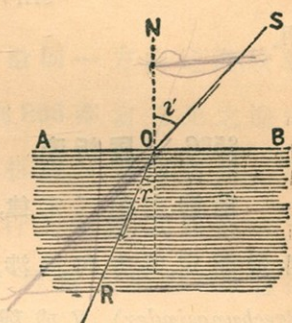


圖 315.

[定律] (1) 屈折線在入射線及入射點之法線所包含之平面內。

(2) 入射角 i 之正弦對於屈折角 r 之正弦之比，即 $\frac{\sin i}{\sin r}$ ，

其值恒不變，由兩光媒之性質而定，與入射方向無涉。

此第二定律即一般使用三角函數時之陳述，今若不用三角函數，則當作

用與境界面垂直之任何直線，截斷入射線之延長部分及屈折線時，以自入射線延長部分上之交點至入射點間之長，除自屈折線上之交點至入射點間之長，所得之商，由兩媒質之性質而定，與入射之方向無涉。

用圖 316 說明之，即 SO 爲入射線，其延長爲 OS' ， OR 爲屈折線， RS' 爲任意所作與境界面垂直之直線。上述定律，係言 $\frac{OR}{OS'}$ 與入射之方向無涉，爲一定之值。但此比適與前用三角函數時之 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 完全相同，由圖自明。

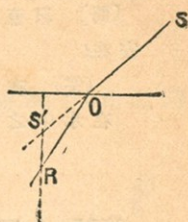


圖 316.

§596. 屈折率.

前節之第二定律，言 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 之值一定不變，由兩媒質之性質而定，與方向無涉，此比通稱曰**屈折率**(index of refraction; *Brechungsindex*)，又或稱爲有角 r 之一方之媒質，對於有角 i 之一方之媒質之屈折率。若命之爲 n ，則第二定律即成爲

$$\sin i = n \sin r.$$

由光學的疎媒質入於光學的密媒質所起之屈折，恆與法線接近，故 i 恆大於 r ，即 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 恆大於 1，即

光學的密媒質對於疎媒質之屈折率，必較 1 爲大
茲將常見之二三種光媒對於空氣之屈折率，列舉如下：

水	1.33	普通玻璃	1.5—1.7
酒精	1.36	金剛石	2.4

通常僅言『某物質之屈折率』爲若干時，均指對於空氣之屈折率而言。

注意： 1. 上述屈折率隨兩媒質之性質而定一語，僅就其大略而言，若欲作精確之計算，尚有不足。因屈折時，不特兩媒質之性質，即通過之光線種類（如光之色），亦與之有關係，光若不同，則屈折率亦略有異，當於 §685 時，再為詳述之。

2. 有種礦物不能遵從此屈折定律，詳見 §683。

§597. 由前節所述，知光線可以沿同一方向逆進，故就圖 315 而言，若 SOR 為光之進路，反之，則 ROS 亦當為光之進路，即 RO 為入射線， r 為入射角，OS 為屈折線， i 為屈折角。沿 SOR 之方向進行之光線，與沿 ROS 進行之光線，其屈折率大不相同，即沿 SOR 進行者屈折率 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 若為 n ，則沿 ROS 進行者之屈折率 $\frac{\sin r}{\sin i}$ 即為 $\frac{1}{n}$ 。即

[定理] 如有甲乙兩種光媒，由甲入乙時之折屈率若為 n ，則由乙入甲時之屈折率必為 $\frac{1}{n}$ 。或可換言之如下：乙對於甲之屈折率若為 n ，則甲對於乙之屈折率必為 $\frac{1}{n}$ 。

[問] 由兩面平行之玻璃板之一方斜向射入之光線，通過玻璃復出空氣中時，其方向與入射時之方向平行，試證明之。

(答) 如圖 317 之 i, r 表上面之入射角及屈折角， i', r' 表底面之入射角及屈折角。

$\sin i = n \sin r, \sin i' = \frac{1}{n} \sin r'$
但上下兩面彼此平行，故
 $r = i'$ 。

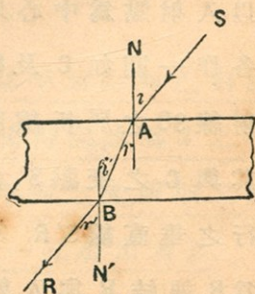


圖 317.

$$\begin{aligned} \therefore \sin i &= n \times \frac{1}{n} \times \sin r' \\ \therefore i &= r' \end{aligned}$$

又兩面之法線 AN 及 BN' 彼此平行,故 SA 及 BR 亦平行。

§598. 如甲乙兩光媒,對於其他同一媒質(如空氣)之屈折率為 n_1 及 n_2 ,則乙對於甲之屈折率為 $\frac{n_2}{n_1}$ 。例如水對於空氣之屈折率為 $\frac{4}{3}$,玻璃對於空氣之屈折率為 $\frac{3}{2}$,則光線由水進入玻璃時之屈折率應為 $\frac{3}{2} \div \frac{4}{3}$,即 $\frac{9}{8}$ 。

屈折之第二定律及此處所述之關係,均可由波動說為之說明,詳見 §671。

§599. 屈折線之求法。

已知屈折率,則對於任何之入射角度,均可由三角函數表,將其相應之屈折角算出,即由 $\sin r = \frac{1}{n} \sin i$, 可以算出 r 之值為幾度幾分。

又不使用三角函數表,亦可由作圖法求出之,如圖 318。以入射點為中心,以 1 及 n 為半徑各作一圓如 C 及 C'。欲求任一入射線 SO 之屈折線時,法將 SO 延長,求其與 C 之交點 S',由 S' 作與法線平行之垂直線 S'R,與圓周 C' 之交點為 R,連結 R 與入射點之直線 OR,即屈折線。

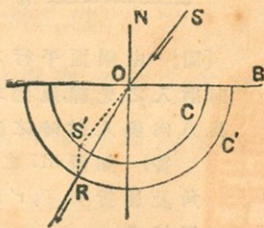


圖 318.

§600. 例題。沿鉛直線方向下望靜止之水，此時眼中所見，水底之深，僅為實際之深之四分之三，其故安在？

證明：如圖 319，由水底一點 P，以極小之入射角上行之光線 PM，進入空氣中屈折而取 MR 之方向，於 P 點作垂線 PN，延長 MR 與 PN 相交，得 P' 點。反之，沿 RM 由空氣中射來之光線，進入水內時，必當屈折而取 MP 之方向，故其圖與上所作者相同。即 $\frac{PM}{P'M}$ 之

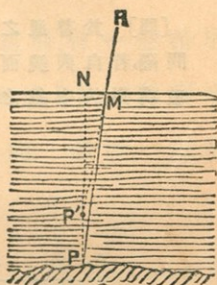


圖 319.

比，為水對於空氣之屈折率，與 $\frac{4}{3}$ 相等。由正上面垂直下望水中時，PM 之線與 PN 極為接近，PM 等於 PN，P'M 等於 P'N。故 P'N 等於 PN 之 $\frac{1}{n}$ ，即其四分之三。凡出於空氣中之光線，均宛似由 P' 點發出者然，故眼中所見之光線，皆覺其在 P'，簡言之，即 P' 為 P 之像點。

上述之關係，不僅限於水，凡由光學的密媒質，出於疎媒質時，均可適用。要之，

[定理] 甲乙兩光媒之交界處若為平面時，如乙對於甲之屈折率為 n ，在乙內由表面測得深處為 d 之一點，沿幾與界面垂直之方向，出至甲內之光，所取之方向，宛如由垂直線上深處為 $\frac{d}{n}$ 之一點發出者然。

例如在玻璃板底面所作之記號，由表面垂直觀之，所見板厚，僅等於實厚之 $\frac{2}{3}$ 。又光源之點在光學的疎媒質中

進入密媒質內時，亦與此同樣。例如由空氣中之一點，進入玻璃之光，所取之方向，宛如自 $\frac{3}{2}$ 倍之距離處發出者然。

[問] 於普通之玻璃鏡前，立一燭光，則見映出若干之像，其排列之間隔，若自與鏡面垂直之方向觀之，即等於(玻璃之厚) $\times \frac{2}{n}$ ， n 為玻璃對於空氣之屈折率，試證明之。

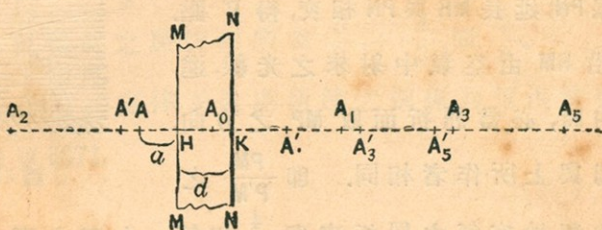


圖 320.

(答) 如圖 320, MM 為鏡面, NN 為其着銀之一面, A 為光源。又命 $AH = a$, 玻璃之厚 $HK = d$ 。由 MM 反射後之光, 造成之像為 A_0 , 但 $A_0H = AH = a$, 由 MM 屈折後進入玻璃內之光, 造成之像為 A' , 但 $A'H = n \cdot AH = na$ (此處之 n 與前面例題中之 $\frac{1}{n}$ 相當), 此光在 NN 反射後, 造成之像為 A_1 , 但 $A_1K = A'K = na + d$, 此光在 MM 處屈折後向左方射出, 而成 A_1' 之像, 但 $A_1'H = \frac{1}{n} A_1H = a + \frac{2d}{n}$, 又在 NN 反射後由 A_1 而來之光, 在 MM 處反射後造成 A_2 之像, 再由 NN 反射後造成 A_3 之像, 但 $A_2H = A_1H = na + 2d$, $A_3K = A_2K = na + 3d$ 。此光經 MM 屈折而出於左, 造成 A_3' 之像, 但 $A_3'H = \frac{1}{n} A_3H = a + \frac{4d}{n}$, 再經 NN 之反射, 由 A_3 而來之光, 又經 MM 反射, 復經 NN 之三度反射, 造成 A_5 之像, 由 MM 出於右方, 而造成 A_5' 之像。此 A_5' 之位置, 可與前同樣計算而出, 知其為 $A_5'H = a + \frac{6d}{n}$ 。以後做此, 再經 MM 與 NN 反射幾次而出於右方之光所造成之像, 在於 H 後方之位置, 為 $a + \frac{8d}{n}$, $a + \frac{10d}{n}$ 等。簡言之, 即由 MM 向左方進行之光, 造成 A_0, A_1', A_3', A_5' 等之像, 其與 H 之距離為 $a, a + \frac{2d}{n}, a + \frac{4d}{n}, a + \frac{6d}{n}, a + \frac{8d}{n}$ 等, 其間隔皆為 $\frac{2d}{n}$ 。此等作等距離間隔之像之中, 以 A_1' 之光為最強, 其次為 A_0 與 A_3' , 自 A_5' 以下, 愈

後亦愈弱。普通在玻璃鏡內所見之像，則為 A_1 之類。

§601. 全反射。

光由光學的密媒質進入光學的疎媒質時，有一極特別之現象。如圖 321 在疎媒內沿境界面之 AM 或 BM 方向射來之光，進入密媒後，即屈折而取 MK, MK 之方向。即於一般屈

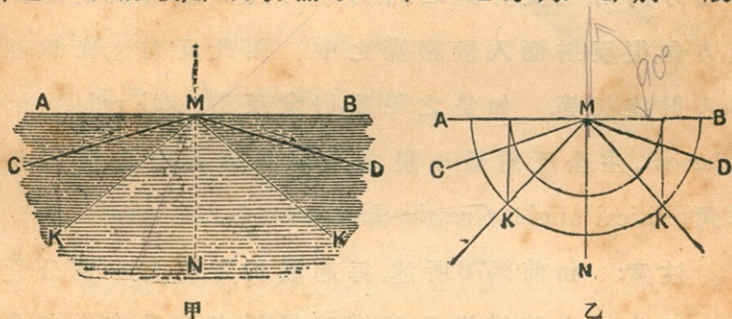


圖 321.

折公式內，以 90° 代 i ，則由 $\sin r = \frac{1}{n}$ 求出 r ，角 NMK 即表此 r 。其作圖法則如乙圖，以 M 為中心，以 $1:n$ 為半徑作兩半圓，由小圓與境界面之交點引垂線與大圓相交之點，即 K ，引 MK ，即得屈折線。如此凡由疎媒向 M 點射來之一切光線，屈折後均包含入於 KMK 之間。故由密媒進入疎媒之光線中，凡在 KMK 內之各線，當其出於疎媒中時，均各有其一定之屈折線。但在 KMK 以外，如 CM 等類之光線，却不能用前述之定律求出。由公式論之， $\sin i = n \sin r$ ，式中之 i 表疎媒中之角度， r 表密媒中之角度， r 若較 NMK 為大， $\sin r$ 亦當較 $\frac{1}{n}$ 為大，即 $n \sin r$ ，

或 $\sin i$, 當較 1 爲大。然求其正弦較 1 爲大之角, 實屬不可能。更就作圖法論之, 圖 318 之 R, 更在乙圖之 K 之外方時, 雖作 RS' 之線, 亦永不與內圓相交, 故屈折線之方向, 無論用何種方法, 均無從得知。

徵之於實驗, 此時實無光線由密媒射出疎媒, 凡由 CM 等類方向射至交界處之光, 全部均遵照通常反射定律, 沿 MD 之方向, 復反射而入於密媒之中。因此反射之光線, 強度幾與入射線相等。如是之現象, 曰全反射 (total reflection; *Total-reflexion*), 生全反射最小限之入射角, 即圖中之角 KMN , 曰臨界角 (critical angle; *Grenzbrechungswinkel*)。

注意: 如前 §576 所述, 每起屈折時, 必有一部分之反射, 隨之發生, 光由疎媒進入密媒時, 屈折者亦僅有一部分, 其餘之一部分, 仍反射而回。又光由密媒進入疎媒中時, 凡在角 KMK 間之方向者, 達於境界面後, 一部分屈折而入於上面, 同時一部分, 仍反射而向下面。不過反射之光, 僅屬入射線中之一部分, 通常均甚微弱, 入射角若增至臨界角以上時, 入射之光即全部反射無餘, 故此時之反射線最強。

§602. 由水之表面以下部分, 斜向觀望杯內, 如圖 322 時, 如其觀望之方向傾斜, 即其對於境界面之垂線間所作之角度, 超過臨界角時, 與前圖由 DM 之方向觀望時相當, 由疎媒進至水面之光, 全部不能入目, 只有沿 CM 方向全反射而

回之光，始能望見。故此時望見之水面，為不透明體，完全與磨光之鏡面相同，故在水中之物體，極為明亮奪目，如圖中所示。不但水如此，即其他之透明體如玻璃等類，莫不皆然，通常皆以水面及玻璃之表面為透明體，而不知其有此奇觀，實則不過全反射之現象而已。

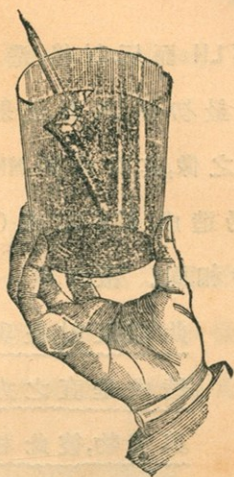


圖 322.

[問] 用玻璃造成三角柱，即通常所稱之稜鏡，其斷面為一直角三角形，如圖 323 之 LMN，其 L 與 M 之兩角，各等於 45°。對於與 LN 成垂直之方向射來之光，則 LM 呈最良之鏡之作用；對於與 LM 成垂直之方向射來之光，則 LN 及 MN 均呈最良之鏡之作用。試證明之。

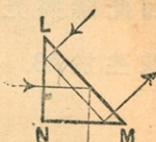


圖 323.

(答) 玻璃與空氣之鏡界面處，其臨界角之正弦為 $\frac{1}{n}$ ，即等於 $\frac{2}{3}$ 。又 45° 之正弦等於 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 。此兩者孰大孰小，可自乘以比較之。前者等於 $\frac{4\sqrt{2}}{9}$ ，後者等 $\frac{1\sqrt{2}}{4}$ ，故 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，即 $\sin 45^\circ$ ，較 $\frac{1}{n}$ 為大。即 45° 較臨界角為大。故凡以 45° 之方向射來之光，皆在全反射之範圍內。如題中所云之光，沿與三角柱之面之垂直方向而來，當其最初入玻璃時，不受屈折作用，進至其次之一面，而成 45° 之入射角，故起全反射。因此各面遂呈作用最良之鏡之狀況。如是之玻璃多應用之以製造光學器械。

注意：如上問由 LM 面進入玻璃中再出於玻璃外之光，造成之像，與僅經平面鏡反射一度而生之像，其形狀不同。如圖 324，物體 AB 發出之光，經 MN 面反射後，造成 $a_1 b_1$ 之像，

再經 LN 面反射後，造成 A'B' 之像。最初經 LN 面反射後，造成 $a_2 b_2$ 之像，其次再經 MN 面反射後，仍造成 A'B' 之像（與圖 301 之時相同）。故

此種反射，在與稜鏡之稜成垂直之方向時，像與實物，彼此相背，在與稜平行之方向時，像與實物即不相反。

又如此時將光線之進路反對而觀之，即成爲虛源在於 A'B'，實像生於 AB。

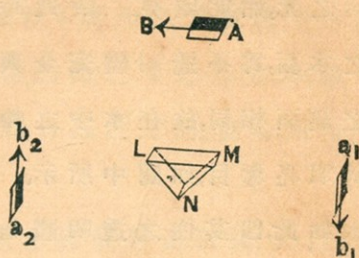


圖 324.

§603. 透鏡.

光線屈折之最緊要之應用，厥爲透鏡 (lens; *Linse*)。通常爲圓形扁平之玻璃片，兩面彎曲而成球面之一部分。亦有時一面成爲平面者。試用通過透鏡中心，而與透鏡之面成垂直之平面，將透鏡切開觀之，其斷面因透鏡之種類而有種種不同之圖形。就其對於光線之作用，可分之爲兩大類，如圖 325 之甲乙丙三種，中央部較厚，周圍較薄者，曰凸透鏡，或曰收斂透鏡 (convex lens; *Sammellinse*)；如丁戊己三種，中央部分較薄，周圍較厚



圖 325.

者，曰凹透鏡或曰發散透鏡(concave lens; *Zerstreuungslinse*)。

§604. 凸透鏡。

先由實驗以檢查凹透鏡之性質：

實驗：如圖 326，取一凸透鏡，於其一面稍遠之處，置一燭火，其他一面，放一紙屏，將此紙屏對於透鏡移前或移後，至於一定之位置，即見燭火之鮮明倒像，現於屏上。此時光源

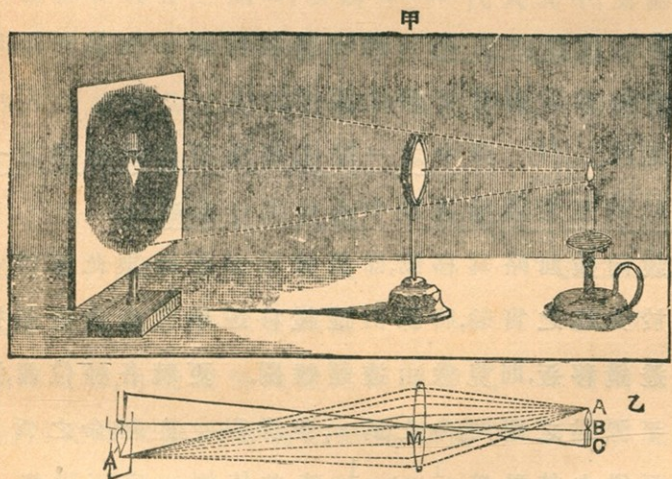


圖 326.

上之一點例如乙圖中之 A，若用他物蔽住，使此部分之光，不能進行時，像上與此相當之點 A' 處，即成暗黑。由此可以證明在像中之 A' 部所受之光，實由於光源之 A 部發來。其次再將透鏡之各部分用物蒙住，使光僅能經由透鏡上之任意一部分通過時，其所生之像，視蒙住之透鏡部分之大小，而有

暗明之分，至其位置及其形狀，則毫不受影響。由此可知透鏡之根本性質如下：

由光源上一點 A 發出，通過透鏡上任何部分之光，當其通過時，均轉變其進行之方向而集合於一定點 A'。各光線之進行狀況如乙圖所示，此為透鏡最重要之根本性質。如是之 A' 點為 A 點之像點，由 B, C 等各點發出之光，亦各有其像點。集合此種像點，即造成物體之像。

§605. 像點之位置。 就前節之實驗，一查其源點與像之位置，即知其當遵從下列之定律：

[定律] (1) 源中之一點 A，與像中與此相應之一點 A'，同在於通過透鏡中心 M 之一直線上。

試將透鏡向橫面略為移動，即見像點及源點，與此定律相符。

又於上述之實驗，將源由透鏡移遠，則見像與透鏡接近，將源向透鏡移近，則見像由透鏡離開。更就各種位置，測其由透鏡至源點之距離，命之為 u ；至像點之距離，命之為 v ，則由實測而得之值，計算 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v}$ 時，其值恒一定不變，即

[定律] (2) 由透鏡至源點之距離 u ，與至像點之距離 v ，恒有下列之關係

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

式中之 f 為一常數，名曰焦點距離，詳見次節，其值因透鏡而

定。源點與像點，名曰共軛點，與凹面鏡處相同。

注意：上式所云由透鏡至源點及像點之距離，無論視爲由透鏡之中心之距離，或視爲由透鏡表面之距離，均無關係。因此種關係，僅屬近似性質而已，其精確程度有限，實無顧慮及透鏡厚薄之必要。

§606. 凸透鏡之焦點距離。前節求出之公式，若適用之於源點在極遠之處時，須將 $u = \infty$ 代入其中，其結果即成爲 $v = f$ 。由此可知，各透鏡所特有之 f ，即在極遠處之物體對於各透鏡所生之像與透鏡相隔之距離。例如以透鏡正對太陽，於其後放一紙片，即見

紙片上現一光亮極強烈之圓。

移動此紙片，使其或前或後，至

此光圓成爲最小時爲止，此圓

即太陽之像，由透鏡至此像之距離，即 f 。今若將太陽看成

一點，則此時光線所通過之路徑，如圖 327 所示。光未到透

鏡以前，均與在透鏡面之中點所引與透鏡面成垂直之線，成

平行即與鏡軸平行，通過透鏡以後，則均集於 F 點，距透鏡之

距離爲 f 。如是，

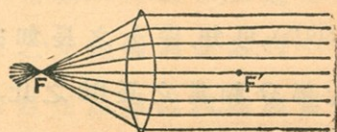


圖 327。

[定義] 與鏡軸平行之光線，收斂而集合之一點，曰焦點 (focus; Brennpunkt); 由焦點至透鏡之距離，曰焦點距離 (focal length; Brennweite)。 透鏡之兩面各有一焦

點，對於從右面發來之光，則爲左面之 F，對於從左面發來之光，則爲右面之 F'。

反之，若光源在於 F，光線與鏡軸平行時，即前節公式中， $u=f$ ， $v=\infty$ 之時。與前 §586 之凹面鏡相同，可以將光送至遠方，亦不減弱，利用此性質之處頗多。

[問] 光源對於凸透鏡在 1 尺之距離，像即現於在 8 尺距離處之紙屏上，此凸透鏡之焦點距離若干？

(答) 如命焦點距離爲 f 尺，則由上述公式得 $\frac{1}{1} + \frac{1}{8} = \frac{1}{f}$ 。
故 $f = \frac{8}{9}$ ，即焦點距離爲七寸五分。

§607. 像之形狀。由前述關於像之位置之第一定律 (§605)，可知，像上之長，如圖 326 之乙中之 $B'C'$ ，對於物體上與此部分相當之長 BC 之比，等於距離 $B'M$ 與 BM 之比。

[定理] 由透鏡之一方觀之，像之形狀與實物相似，像與物體相應部分之長之比，等於 $\frac{v}{u}$ 。

[問] 欲使像與實物同大，須將物體置於何處？

(答) 物體與像之長之比，與至透鏡之距離爲比例，故欲其大小相等，須使 $u=v$ ，故由公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ，知 $\frac{2}{u} = \frac{1}{f}$ ，即 $u=2f$ 。

§608. 生虛像之例。以上各節所述，物體對於透鏡若在甚遠之處，像即生於反對之一面之焦點 F 處；物體由此漸向透鏡接近，像即由焦點漸次離開；物體若達於焦點 F'，則像即移至無窮遠處。物體由此若更進，即在於 F' 與透鏡面之間時，通過透鏡後之光線，方向即與前不同。在鏡軸上之光

源點發出之光通過鏡緣者，如光源點在右邊極遠之處，則如圖 328，其方向正向 F 而來，但若物體漸近透鏡，由 I 而 II 而 III，

其通過透鏡後之光線方向，亦即由 1 而 2 而 3，逐漸變化，其狀況可云集合力漸次遲鈍，通稱之曰收斂度減小。物體達於 F' ，

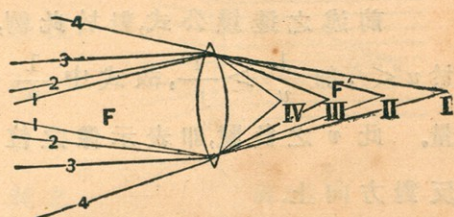


圖 328.

通過光線之方向即變成與鏡軸平行。光源點若更近至 F' 以內，屈折光線之方向，更轉向外方，成爲 4 之方向，不復再行集合，即成所謂發散光線。故此種光線所作之像，與通常光線所作者在反對之一方，並非實際之光線通過此點，乃一虛像而已（參照 §591）。簡言之，即物體若在焦點以內，像與實物均在透鏡之同一面，而成虛像。

由實驗以檢查之，結果確如上述。如圖 329，將光源 AB 放在焦點以內，則通過透鏡之光線，進入眼中，即成爲 $A'B'$ 之像。即

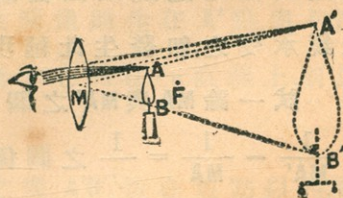


圖 329.

物體若在焦點以內，則造成正立廓大之虛像，

與實物同在透鏡之一方，且其位置更在實物之後。

就圖而言，由 A 點發出之光線，通過透鏡後，仍帶有發散之性質，所取之方向，宛如由 A' 點發出者然，而 A 與 A' ，與前同樣，與

透鏡中點 M 在同一直線上。由光源上其他各點發出之光線，亦各照此造成其像點。

前述之透鏡公式，對於此例，亦可適用。其不同處只在於 $u < f$ ，即 $\frac{1}{u} > \frac{1}{f}$ ，故式中 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 之 v ，應成爲負量。此 v 之負號，即表示像之位置，在於與光線進行方向之反對方向上。

§609. 虛源點。試將前節所述之光線進行方向，逆轉

而考之，如圖 330，凡向 A 點收斂之光通過透鏡後，即在 A' 造成其像，本圖之 A 與前圖之 A' 相當，而 A' 則與前圖之 A 相當。即源點爲虛，而像點爲實，由光

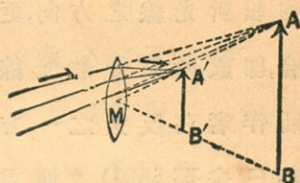


圖 330.

源發出之光，直接進行至於透鏡面時，雖無如是之事發生，但若用其他之透鏡或凹面鏡等，將光線收斂一度以後，再以此透鏡承受之，即發生此種現象。

試一論 MA 與 MA' 之關係，若源點在於 A' ，虛像生於 A ，故有 $\frac{1}{MA'} - \frac{1}{MA} = \frac{1}{f}$ 之關係。現在之像却爲實像，故應將此 $+MA'$ 作爲 v 。故成爲 $-\frac{1}{MA} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 。若仍欲以一般之公式，即 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ，表出之，只須令 $u = -MA$ 即可。即收斂光線遇透鏡時，如源爲虛源，則將 u 作爲負量，即可使用一般之透鏡公式。

§610. 凹透鏡

光線若與凹透鏡之鏡軸平行射至透鏡時，即行發散，通過後所取之方向，宛如由透鏡後面一定距離處之一點 F (圖 331) 發出者然。此 F 之一點，曰凹透鏡之

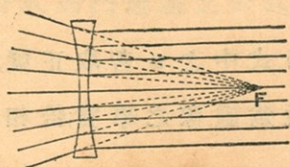


圖 331.

焦點，由透鏡至此點之距離，曰凹透鏡之焦點距離。由左面發來之平行光線，其焦點則在左方與此等距離之處。如是之 F 點，可以看作在

極遠處之光源點所造成之像點。源點由遠處漸次移近，至於圖 332 之 A 之位置時，通過透鏡後之光

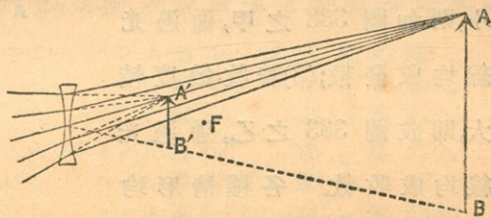


圖 332.

線，較之由平行方向射入者更為散開，像則生在 A' 點，與 F 更行接近，且為虛像。但 A, A' 與透鏡中心同在一直線上，則與凸透鏡時同。故

一物體 AB 經凹透鏡所造之像 $A'B'$ ，恆在焦點以內，較實物為小，為正立之虛像。

試一檢查凹透鏡之源點與像點之位置之關係，與凸透鏡時用同一之符號，即命 u 表由凹透鏡至源點之距離， v 表至像點之距離， f 表其焦點，則三者間之關係為

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = -\frac{1}{f}.$$

故式中之 u 若取正號,則 v 恆為負數。此事與凹透鏡之像恆為虛像之事實,恰相符合。

§611. 虛源。當收斂光線,達於凹透鏡時,若(1)其集合之點,在透鏡前面,恰隔焦點距離之處,即成沿圖 331 所示進路逆進時之狀況,通過光線

均成平行。(2)若收斂度較小,則如圖 333 之甲,通過光線均成發散;(3)若收斂度較大,則成圖 333 之乙,通過光線均成收斂。各種情形均包含在上舉之公式內,只不

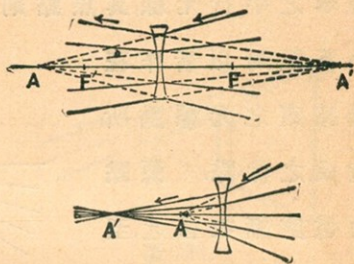


圖 333.

過向透鏡發來之光,如向透鏡之反對一邊之一點收斂時,當如前節所述, u 須取作負量,對於 v 則與前同樣。簡言之(1)為 $u = -f, v = \infty$; (2)為 $-u > f, v < 0$; (3)為 $-u < f, v > 0$ 。

§612. 透鏡之公式。

最初就實源實像求出之公式,只須將記號之約束,適宜變更,對於各種不同情形,均一律可以適用。又對於凹透鏡,只須於 $\frac{1}{f}$ 之項前,加一負號,亦即全同,亦詳述於前。若對

於凹透鏡之焦點距離，由開始時，即作成負量，而加一負號，則 $-\frac{1}{f}$ 即變成 $\frac{1}{f}$ 。如是，凹透鏡之公式與凸透鏡之公式即完全相同。故在於

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \text{ 式中, 其}$$

u , 如為實源則取+, 虛源則取-,

v , 如為實像則取+, 虛像則取-,

f , 如為凸透鏡則取+, 凹透鏡則取-,

則對於一切情形, 皆可適用。

又如將種種情形，為之分類，並附以源及像之性質，當如次表：

凸透鏡： $f > 0$	$\left\{ \begin{array}{l} u > f, \quad v > f, \text{ (圖 326)} \\ f > u > 0, \quad v < 0, \text{ (圖 329)} \\ u < 0, f > v > 0, \text{ (圖 330)} \end{array} \right.$	源，實，像，實，倒。
		，，實，，虛，正，大。
		，，虛，，實，正，小。
凹透鏡： $f < 0$	$\left\{ \begin{array}{l} u > 0, 0 > v > f, \text{ (圖 332)} \\ u < f, \quad v < f, \text{ (圖 333 甲)} \\ 0 > u > f, \quad v > 0, \text{ (圖 334 乙)} \end{array} \right.$	，，實，，虛，正，小。
		，，虛，，虛，倒。
		，，虛，，實，正，大。

§613. 像之作圖法。

無論透鏡之為凸為凹，只須知其焦點距離 f 之數值，對於任意之一源點 A ，均可將其像點 A' 之位置求出，由 §605 之定律，知其

(1) 在於通過 A 及透鏡中心之直線上，

(2) 與透鏡相隔之距離 v ，可將已知之 u 及 f ，代入公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 中，即可算出。

但若在圖上求其位置，則不必用(2)之計算法，而另有作圖法。

即凡沿與軸平行之方向而來之光，通過透鏡後，均須經過後方之焦點 F ，或向之而進，又凡經過焦點或向之前進之光線，通過透鏡後，即與後方之軸平行。應用此兩種性質，像之位置，立即可由圖上求出，如圖 334。通過透鏡中心 C ，引一直線 CP 與鏡軸垂直，由 A 引直線 AP ，與鏡軸平行，得交點 P ，連結 P 與 F ，則 A' 點應在此直線 PF 之上。故 AC 與 PF 之交點，即此 A' 點。

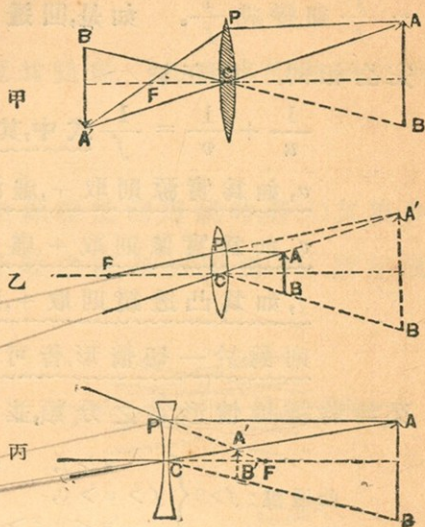


圖 334.

此時所取之焦點，因透鏡之凸凹不同，須應之以擇其右方或左方者而用之，不可有誤。此時只須一考慮凸透鏡為收斂性，凹透鏡為發散性，即易於決定所應取之 F ，究為左抑為右矣。

圖中係應用由 A 發出之平行線，其後須經過 F 點之性質而成。反之，若應用其反對之方向，即由 A 引一直線通過他一方之 F （即與圖中之 F 在反對一方之 F ），此線與 CP 相切於一點，由此點引一直線與鏡軸平行，亦可求出同一之 A' 點。此圖雖僅就最常遇之情狀，即光源為實源時，求出其像之位置，但即令對於虛源，亦可準此作圖。

§314. 重疊透鏡.

兩透鏡密接重疊時,若兩透鏡中心間之距離極小,可以略去不計,如圖 335, 看成均在同一之點 M, 則其作用, 與單一之透鏡相同. 試命 f, f' 表此兩透鏡之焦點距離. 由 A 點

發出之光, 對於第一之透鏡造一虛像於 K 點, 此光進入第二之透鏡時, 宛如有一

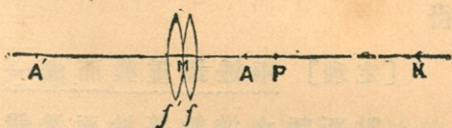


圖 335.

實源在 K 點者然. 如是之光線通過第二之透鏡後, 即在 A' 處造成實像, 應用透鏡公式以行計算時, 因 K 為虛像, 故 A 與 K 之關係, 應作

$$\frac{1}{MA} - \frac{1}{MK} = \frac{1}{f},$$

又 K 為實源, 故 K 與 A' 之關係, 應作

$$\frac{1}{MK} + \frac{1}{MA'} = \frac{1}{f'},$$

將此兩式相加, 即成

$$\frac{1}{MA} + \frac{1}{MA'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}.$$

再命 F 為兩透鏡合成作用時之焦點距離, 則 A 為此合成透鏡之源點, A' 為其像點, 故 MA 為 u , MA' 為 v , 上式成爲

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}.$$

但此合成之一個透鏡，既有 F 爲其焦點距離，即應爲

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{F},$$

比較此兩式，即知 $\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$ 。

故得

[定理] 兩透鏡重疊而成一透鏡時，其合成透鏡之焦點距離之逆數，等於兩透鏡之焦點距離之逆數之和。

由此且可知即將兩透鏡之重疊順序改變，其作用亦不變。

注意：上述事項，雖僅就兩凸透鏡重疊時而言，但兩凹透鏡重疊時，或一凸一凹重疊時，均可用同一論法求出。要之，凹透鏡之 f 應取負號，則對於第一之透鏡用 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ，對於第二之透鏡用 $\frac{1}{u'} + \frac{1}{v'} = \frac{1}{f'}$ 。而第一透鏡之像，與第二透鏡之源，位置恆一致，虛實則恆相反，即第一透鏡若成實像，對於第二透鏡必成虛源，第一透鏡如成虛像，對於第二透鏡即成實源。故

$$v = -u',$$

因之， $\frac{1}{u} + \frac{1}{v'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$ ，

u 爲最初之源點之距離， v' 爲最後之像點之距離，故若命 F 爲合成透鏡之焦點距離，則

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v'} = \frac{1}{F},$$

故

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$$

上之公式，無論對於 f, f' 兩者同為負量，或一正一負，均可適用。不過若有一正一負時，則 $\frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$ 即成為 $\frac{1}{f}$ 與 $\frac{1}{f'}$ 之差，強度彼此相消結果應減去一部分。

§615. 焦點距離之值。

焦點距離，為各透鏡所固有之量，極為重要，由於玻璃之質（同名為玻璃，但有若干種類）及兩面之彎曲度而定。玻璃之質不同，屈折率即不同。故對於一定形狀之透鏡，由一面上各點而來之光，各依其屈折率之大小，進入玻璃內或更屈折復出於空氣中。因此，透鏡之焦點距離，實由於兩彎曲面之球半徑及屈折率而定，因透鏡之兩彎曲，各為球面之一部分故也。

由任意一點向透鏡上任意一點而來之光，只須由屈折定律以檢查其進路，即可求出上述各種性質，但嫌其過繁，今將上述之各種性質，一律看作由實驗得到之結果，目的只在用透鏡之兩面之球半徑 R, R' 及屈折率 n ，表出其焦點距離，不如將光源放在對於此項計算最為便利之位置上而論之。如圖 336，由軸上一

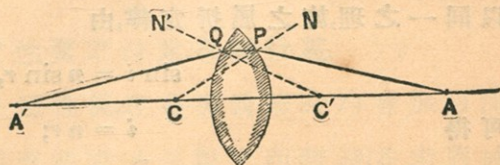


圖 336.

點 A 發出之光線,最初與透鏡面相遇之一點為 P,由透鏡出於空氣中之一點為 Q,造成之像為 A'。在軸上選擇 A 點之位置時,使光線在鏡中通過之線路,即直線 PQ,恰與鏡軸平行。C 為透鏡右邊之球心, C' 為左邊之球心。CP 即成爲在入射點處所作之法線,故

$$\angle NPA = i,$$

$$\angle QPC = r,$$

即

$$\angle PCA = r,$$

故

$$\angle PAC = i - r.$$

又令

$$PC = R,$$

$$PA = u,$$

則由三角法之定理,知

$$\frac{PC}{PA} = \frac{\sin PAC}{\sin PCA},$$

即

$$\frac{R}{u} = \frac{\sin(i-r)}{\sin r}.$$

假定 i 與 r 同屬小角,可以角之值代其正弦之值,即得

$$\frac{R}{u} = \frac{i-r}{r}.$$

以同一之理,施之屈折定律,由

$$\sin i = n \sin r,$$

可得

$$i = nr;$$

代入上式,即得

$$\frac{R}{u} = n - 1$$

又命透鏡左邊之球半徑爲 R' , QA' 之長爲 v , 則由同一計算而得

$$\frac{R'}{v} = n - 1,$$

兩方相加, 即得 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$.

此式應與 $\frac{1}{f}$ 相等, 故

[定理] 透鏡之焦點距離 f , 屈折率 n , 及兩面球半徑 R, R' 之間, 有下列之關係。

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

但此係就兩面均爲凸面之透鏡計算而得。若兩面均爲凹面, 或一凹一凸時, 只須將凹面之一方之球半徑, 加一負號, 上式仍可成立。

[問] 用屈折爲 1.5 之玻璃, 磨成兩面皆爲球半徑 8 寸之凹透鏡, 求其焦點距離。

$$(\text{答}) \quad \frac{1}{f} = (1.5 - 1) \left(-\frac{1}{8} - \frac{1}{8} \right) = -\frac{1}{8}$$

$$\therefore f = -8 \text{ 寸}$$

即焦點距離爲 8 寸。

§616. 關於透鏡之性質之注意, 及球行差。

以上所述透鏡之各種性質, 在各種情形時均曾加以注意; 如云 u 及 v , 爲由透鏡至源點及像點之距離時, 並未對於透鏡之某一部分加以區別; 又光源上之一點, 與像中與此相

應之一點，同在通過透鏡中心之一直線上，亦係將透鏡兩邊之面之中點，看成一點，而將其間之距離略去不論，稱之為中心。凡此種種，可以簡言之，即

(1) 將透鏡之厚，置之度外而不計及。

又前節求出之公式，係將入射角及屈折角之角度，均看成極小，可知實含有

(2) 透鏡面之彎曲度不甚大(即球半徑 R, R' 不甚小)

(3) 入射光線對於鏡軸之角度不甚大(即大約均正向透鏡之面射來)。

等假定在內。即前述之種種性質，均在此三假定之下求出，由此三種假定觀之，可見透鏡之種種性質，與實際均不能精確符合，僅其近似之性質而已。

欲得實際精確之性質，非將透鏡之厚，加入計算之內，對於上述之各種關係式，而加以更正，方可使用。縱令如此，然若透鏡面之彎曲度，略微加大，或入射光線對於鏡軸所作之角度過大時，由一點發出之光通過透鏡之各部分後，仍不能完全集合於一點。即物體上之各點，不能造成明瞭之像，凡如此種

[定義] 因透鏡面之彎曲度過大，或投射光線對於鏡軸所作之角度過大，而生之像點之不明，曰透鏡之球行差 (spherical aberration; sphärische Aberration)。

實際使用之器械，目的在造比較寬廣之角度中之物體

之精密之像，對於此類缺點，須特加以考慮，施複雜之計算，然後始能決定透鏡應作何種特殊形狀，方屬適用。如是造成之透鏡，即令鏡面之彎曲度增大，物體之方向對於鏡軸所作角度增大，亦可得輪廓極其鮮明之像。如圖 339 之照相器械所用之透鏡，即其最好之一例。

第四章 光學器械及眼

§617. 映畫器。

映畫器 (projecting lantern; *Projektionsapparate*) 之主要部分為一凸透鏡，如圖 337 之 *L*。將物體或欲映出之圖畫 *S*，放在距焦點距離略遠之處，而移前移後，以配準其在遠處所立之

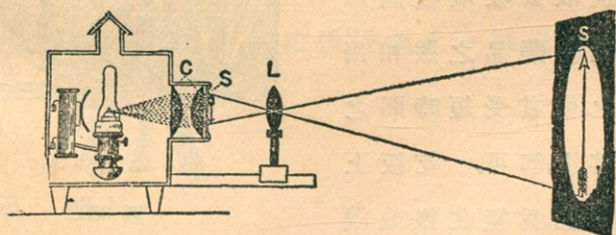


圖 337.

紙屏上現出之廓大倒立之像 *S'*，使其輪廓鮮明。欲得大而鮮明之像，原圖 *S* 非受極強烈之光照及不可，故在光源與圖畫之間，插入透鏡 *CC* 將光線集於圖畫之上。大形之映畫器，

多用強光之電燈(如 §789 之電弧燈)作其光源。本圖之裝置,圖畫爲玻璃片上所繪之畫,光由其後面而來,通過畫片,然後進至透鏡,但在大形之映畫器,則用不透明體之表面,如書籍之插畫或文字等作爲原畫,而以強烈之光照於其上,使亂反射之光在紙屏上造成鮮明之像。對於此種目的,尤須有更強之光源。

§618. 照相器械。

照相器械(photographic camera; *photographisches Apparat*)

如圖 338。其要部爲一暗箱,前面有一透鏡 L,後面有一玻璃板,先將此兩者間之距離伸長或縮短,使目的物體在玻璃板上造成一極鮮明之像。然後取去玻璃板而以塗有感光性藥品之照相用乾板代之,使其受短時間之光照於其上,即可。乾板上所塗之藥品,爲氯化銀或溴

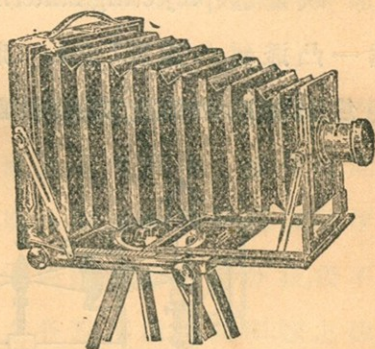


圖 338.

化銀等類,在玻璃面上成一層薄膜,此等藥品受光後,具有發生化學變化之性質,像中各部分之藥品,因其受光之強弱不同,發生之化學變化,亦各有程度差異。將受光後之乾板取出,浸入現像液內,則受光最多之部分,即變成極黑,受光較少

者，其黑亦較淡。由此取出，再浸入定像液內，未受光之部分，以及受光較少之部分，殘留下之感光性藥品，即溶解離板而去，只留已變成黑暗之部分於其上，以後雖再受日光，亦不復有變化發生矣。如是而得者，曰陰畫，或曰底片，其濃淡與實物恰相反。將此陰畫放在塗有感光性之銀化合物之紙片上，露出光中曬之，則陰片上黑暗部分在紙上即生明處，陰片上之明亮部分在紙片上即成黑暗部分，如是而成之畫，即與原物之明暗完全一致。將此紙片用前此洗乾板時之方法洗出，即成通常之照片。

暗箱前面之透鏡，通常由數枚透鏡集合而成。彼此間之作用，恰足使前述之球形差 (§616) 及後述之色行差 (§651) 互相抵消，對於鏡軸雖在較大之角度所謂廣角透鏡，

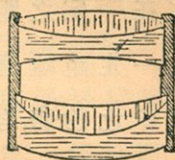


圖 339.

角度約四五十度)之方向上之物體，由此亦可造成明瞭而且正立之像。圖 339 所示，即此種透鏡之一種，表示用通過鏡軸之平面切斷後之狀況。

§619. 眼.

眼(Eye; *Auge*)之橫斷面，如圖 340，可以看成人體上之透鏡之應用。外蒙一

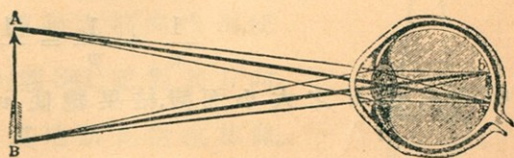


圖 340.

強韌之厚膜，膜之前部爲透明體，其餘之部分均不透明。後部之內面，有網膜，其上滿佈視神經。眼球內稍前處有一透鏡狀之透明體，曰水晶體，其前後均爲液體充滿，液體之屈折率較水晶體略小，在前面者曰水狀液，在後面者曰玻璃狀液。

以上爲眼之大體構造，由外界物體上各點發來之光，通過此等透明體時，經眼球之前面及水晶體之收斂，在網膜上造成物體之像，再經視神經之作用，始生視覺。

§620. 調節。由一定集合狀態而成之重疊透鏡，欲求其在一定之距離欲造成鮮明之像，非將物體放在與此相應之一定距離處不可。但人類之眼，無論對於遠處之物體，或近處之物體，均能明瞭看出，其作用則在於支持水晶體之筋肉，能應物體之遠近而運動，使水晶體之彎曲度，隨之而變，以達適宜之程度。如是之作用，曰眼之調節 (accommodation of eye; *Akkommodationsfähigkeit*)。所以眼內筋肉在弛緩之時，水晶體極其扁平，在明視區域中之最遠之物體，此時均可看出。物體由此地位，漸次與眼接近，筋肉亦應之作適當之收縮，以增加水晶體之彎曲度，無論何時，均能使其在網膜上造成鮮明之像。就透鏡之公式言之，即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

中之 f ，隨 u 之大小而變，結果總使 v 成同一之值。

§621. 明視之區域。眼有標準之眼，即通常之眼，與老

眼,近眼,遠眼等之區別。標準眼(normal eye; *regelrecht stehendes [emmetropisches] Auge*)之明視區域,爲由無窮遠處以至於距眼之前約四寸之間,其中尤以在25 厘米遠處,爲標準眼最能明視之距離。老眼(aged eye; *weitsichtiges [presbyopisches] Auge*)因肌肉之作用力不足,水晶體不能過於彎曲,故對於近處之物體,不能明視。近眼(short-sighted eye; *kurzsichtiges [myopisches] Auge*)則因水晶體之自然形狀,已與在若干近距離處之物體最爲相宜,故由肌肉之作用,較此更近之物體,皆能明視,但較此更遠之物體則無法看出。此乃由於水晶體之彎曲度過大,或眼球後部,即網膜,過於退後所致。反之,遠眼(long-sighted eye; *übersichtiges [hypermetropisches] Auge*)之水晶體則過於扁平,雖經肌肉作用,對於過於接近之物體,仍不能得見。故老眼與遠眼,性質雖不相同,而實際上之缺點則同。

老眼,遠眼,近眼等之人,應使用何種眼鏡,方能補其缺憾,當於 §626 再爲詳述。

§622. 距離之判斷。判斷物體之遠近,完全由於左右兩眼球,正對物體時,其方向爲何而定。即若注視一定之點時,不必運動頭部,只由使眼球運動之肌肉作用,使眼中之一定線,即軸 AB(圖 341),正對其方向,使其點在網膜上之一定地點 B,造成其像。故兩眼望遠處之物體時,左右眼軸幾成平



圖 341.

行，望近處之物體時，兩軸間之角度，隨物體之遠近而有小大之別。即物體愈近，則角 APA 愈大。故與筋肉之作用狀況相關聯，自然足以判斷物體之遠近。欲實驗此說，可於室之中央懸一細線，立於 1 尺內外之距離處，蒙住一眼，只用單眼注視之，一面用手指由橫面欲捉住此線，極不容易。因此時無兩眼之方向作用，故不能判斷線所在之處為遠為近故也。

上述之作用，只能在近距離處有效，對於過遠之處，即失其效能。凡判斷遠處物體，或人或馬，之距離時，須先知其人或馬之實大，然後與此時觀看人馬時之視角之大小聯想之，始能下其判斷。由物體上之兩點，例如上下

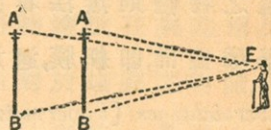


圖 342.

兩端，引至眼球之直線間之角度，如圖 342 之角 AEB ，曰視角。如圖所示，本為同一物體，但若在近處，則視角 AEB 較大，若在遠處，則其視角 $A'B'E$ 即較小。故若實際已知其大小之物體，如何看去，則在如何之距離，由日常之經驗（當然有巧有拙）自能判斷而出。若在目的物近傍，有此種已知其實際大小之物體存在，固不難由此判斷目的處之遠近，若無此種便利之目標，即無法判定。例如太陽，月球等類之天體，究在若干距離，無論如何，亦無從斷定，即其實例。

又此種視角之關係，有逆轉而應用之之時。即已知其距離之處所之物體，可由其當時之視角大小，而推出其實際之大小。即同一視角之物體，其位置愈遠者，其物體亦愈大；

位置愈近者,其物體亦愈小。

§623. 實體鏡. 用兩眼看物體,可以窺知物體在前後方向之凹凸狀況,及其距離。右眼中所見者與左眼中所見者略有不同。因長久之經驗,故能由左右兩眼所見之形狀差異,自然發生此種立體的感覺。實體鏡 (stereoscope; *Stereoskop*) 即應用此種原理,使平面圖,大概為照片,現為立體與原物相同之器械。右眼所見之形狀如圖 A (圖 343), 左眼所見之形狀如圖 B, 將此兩圖相並而立, 中置一隔板, 由透鏡 LM 觀察之, 如是, 左眼只能望見左圖, 右眼只能望見右圖, 更經 LM 之作用, 使兩圖之像在同一位置 Z 處相重, 於是眼中所見之圖, 即浮出紙上, 與實物之狀況無異。

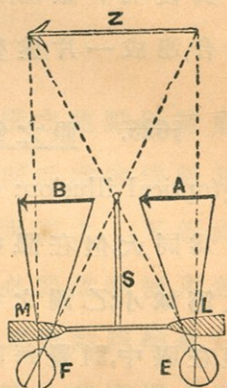


圖 343.

實體鏡所用圖片, 左右不同之狀況, 其最簡之一例, 如圖 344. 不必用透鏡, 只須隔適當之距離, 並使左眼只能看見左圖不能看見右圖, 右眼只能看見右圖不能看見左圖, 注意觀察, 即見兩圖退至紙後相重為一, 圖中之大小圓, 宛如大小球體排列於遠近各處者然。

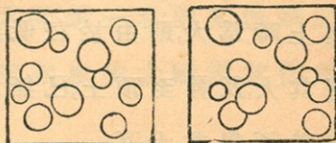


圖 344.

§624. 活動影戲. 光源引起視覺後,立即移去,視覺仍能繼續若干時間。試以着火之線香,迅速繞轉,即見香頭之火連結而成一光圈。雨滴降下時,不成圓形而成一連續之直線狀,凡此種種均為日常生活上所習見之實例,活動影戲(Cinematograph; *Kinematograph*),亦即此理。將運動中之物體,隔一定之時間,為之攝下一照片,如是而得之若干照片,次第使其復現於眼前,前者之視覺尙未消去,後者業已到來,彼此融合,連成一片,遂覺片上物體,運動如生。

§625. 眼之錯覺. 用眼觀察物體時,往往發生種種錯覺(optical illusion; *optische Täuschungen*),例如圖 345 之甲,三者本為同大,但在眼中則覺由左而右次第減小;乙圖之各縱線,本均平行,但在眼中,則覺每隔一線即向左斜,或向右斜。又在暗處發強光之物體,較之實際,似覺較大,例如新月初出時,其光輝部分較其暗黑部分為大,故覺其浮出圓外,如脹起者然。又日月出沒之時,較昇至頂上時為大,則由於在低處因與其近傍之物體,可作比較,故覺其大,及昇至頂上,已無此項可以用作比較之標準物體存在,遂不覺其大耳。

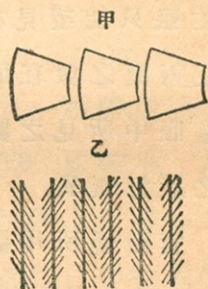


圖 345.

§626. 眼鏡

老眼或遠眼之人，欲望見近處物體，則使用由凸透鏡製成之眼鏡 (spectacles; *Brille*)。將物體放在此透鏡之焦點距離以內，其像即生於遠處 (§608)，故雖老眼或遠眼，亦可明視之。反之，近眼之人，欲望見遠處物體，則用由凹透鏡製成之眼鏡。則無論在何遠處之物體，其像皆能生於透鏡前方之焦點距離以內之近處 (如圖 332)，故透鏡之焦點距離若配置適當，即可明視此像。

§627. 眼鏡之度數。老眼鏡即凸透鏡之焦點距離愈短，愈能望見近處之物體，如焦點距離過長，則近處物體經其造成之像，不能十分過遠，故有時老眼不能明視之。又近視之人，其程度愈深者，愈有使像生於近處之必要，故須使用焦點距離甚短之透鏡。要之，無論何種眼鏡，其焦點距離愈短則其作用愈強；焦點距離愈長，則其作用愈弱。其極端之例即焦點距離增至無限之長時，透鏡一變而成一平面玻璃板，完全不生屈折作用矣。

通常眼鏡之度數 (degree; *Stärke*)，係用吋為單位將其焦點距離表出之數字。例如二十度之眼鏡云者，即其透鏡之焦點距離等於二十吋之謂也。故度數愈少之眼鏡，其作用愈強。

又表眼鏡之度數，此外另有一種方法，即以焦點距離除

1 呎之長，於所得之數，附一 dioptric 之語以表之，音譯作『第』。例如 3 第之眼鏡，其焦點距離等於 1 呎之三分之一。如用此種方法，則數愈大者其作用愈強。

[問] 十度之眼鏡爲若干第？

(答) 10 吋等於 $\frac{10}{12}$ 呎，即 $\frac{10}{12 \times 3.3}$ 呎，故等於 $\frac{12 \times 3.3}{10}$ 第。即約爲 4 第。

[問] 將十度之近視眼鏡與二十度之近視眼鏡重疊使用時，與若干度之眼鏡相同？

(答) 將焦點距離爲 f 及 f' 之兩眼鏡重疊使用時，其焦點距離假定爲 F ，則

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$$

$$F = \frac{f f'}{f + f'}$$

而十度與二十度之眼鏡，其焦點距離爲 10 吋及 20 吋，代入上式，即

$$F = \frac{10 \times 20}{10 + 20} = \frac{200}{30} = 6 \frac{1}{3} \text{ 吋}$$

故與 $6 \frac{1}{3}$ 度之眼鏡同等。又凹透鏡之焦點距離若加一負數，亦可用此法計算。

注意：若欲用第表眼鏡之度數時，如 f, f' 之單位用呎，則 $\frac{1}{f}$ 及 $\frac{1}{f'}$ 即成兩透鏡之第數，故兩鏡重疊使用時，其合成透鏡之第數 $\frac{1}{F}$ ，只須將兩透鏡之第數相加即得。如上問之兩透鏡十度爲 4 第，二十度爲 2 第，將此兩者重疊使用時，即與 $4+2=6$ 第之一透鏡同等。

§628. 廓大鏡。

物體若在凸透鏡之焦點距離以內，則生廓大之像，應用

此理,以觀察細微物體而用之短焦點距離之凸透鏡,曰廓大鏡 (magnifying glass; *Lupe*)。使用廓大鏡時,如圖 346,將其放在眼之近傍,而移動物體之位置,使其像 $A'B'$ 恰生於明視距離之處。此時廓大之比例,等於

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{MA'}{MA},$$

MA' 為明視距離,其值恒一定不變, MA 比透鏡之焦點距離略小,但

$$\frac{1}{MA} - \frac{1}{MA'} = \frac{1}{f}$$

$$MA = f \times \frac{MA'}{MA' + f} = f \times \frac{1}{1 + \frac{f}{MA'}}$$

MA' 約為 25 厘米, f 則為 1 至 2 厘米,故 $\frac{f}{MA'}$ 為一極小之分數,因知 MA 與 f 大略相等。故結局可云廓大率與透鏡之焦點距離為反比例。即廓大鏡之焦點距離愈短,則其作用愈強。

注意: 廓大鏡與老眼鏡,其使用透鏡處完全一樣。不過老眼鏡在利用像生於遠處,而廓大鏡則利用其像之廓大,目的各有不同而已。但通常廓大鏡之焦點距離,特別為短。

§629. 顯微鏡。

顯微鏡 (microscope; *Mikroskop*) 為觀察細微物體時使用之器械,有各種之形式。圖 347 示一簡單顯微鏡之外形。其

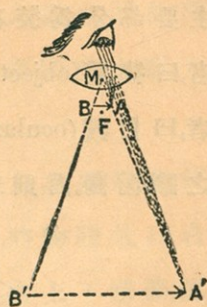


圖 346.

主要部分爲裝在一圓筒兩端之兩套透鏡，一套與物體接近者，曰物鏡(objective; *Objektiv*)如圖中之 O，其他一套與眼接近者，曰目鏡(ocular; *Okular*)如圖中之 E。乙圖表示此種透鏡之斷面圖，丙則表其原理。

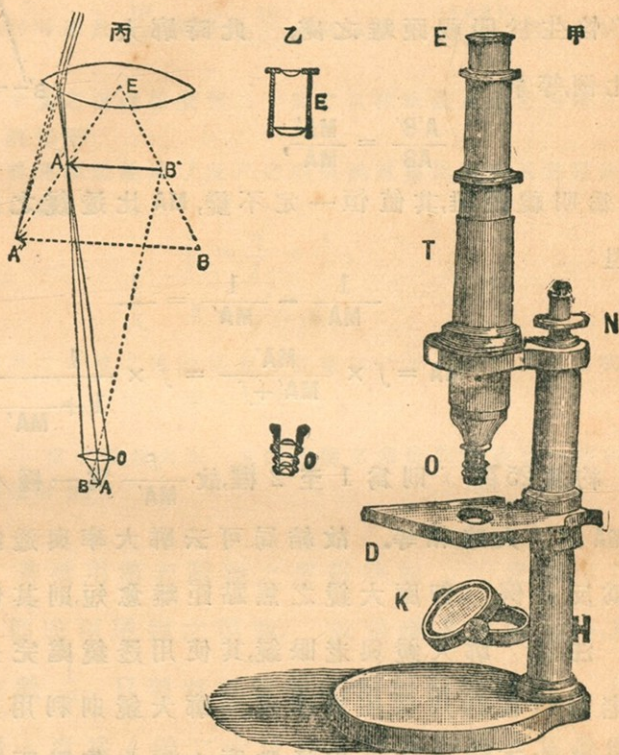


圖 347.

物鏡 O 由數個透鏡，集合而成，其作用與一短焦點距離之凸透鏡同等，故在丙圖中，只作成一個單一之透鏡，以便說明。使用顯微鏡時，先將物體 AB 放在焦點外離焦點不遠之處，使其廓大之實像 A'B'，生在筒之上端近傍。E 之目鏡，則

由兩個透鏡集合而成，如乙圖，其作用與一廓大鏡相同，故丙圖中只作一凸透鏡以代之。其目的在使 O 處所生之廓大實像，更爲廓大而成 $A'B''$ 。

物鏡及目鏡之兩套透鏡，均固着於 OE 筒上之兩端，此筒之全體，則支持於另一圓筒 T 之上。使用時，將物體放在台（甲中之 D ）上， O 之下面，使筒 OE 之全體，在 T 內上下滑動，變化物體與物鏡間之距離，令其最後作成之像 $A'B''$ ，生於與眼相隔適當之距離之處。但 OE 若在 T 內作單純之滑動，則對於精確細微之調節，頗不便利，故俟大體之位置定奪後，即不移動 OE ，而將裝在 N 處之螺旋，向左或向右轉動，以作細微之調節。 N 既轉動，則 N 內因螺旋作用，使筒 OE 在 T 內上下畧微轉動。

顯微鏡之倍率，即最後造成之像 $A'B''$ 之長，對於實物 AB 之長之比，通常爲數十倍乃至數百倍。因欲廓大如是程度，故須有極強之光照及物體，方足敷用。通常於器械之下部，裝一反射鏡 K ，使其向適當之方向，由窗中進入室內之光，由 K 反射後照及物體之上。

§630. 倍率極高之顯微鏡，有用『液浸』（用水或油）之法。物體放在物鏡下時，通常多用一薄玻璃片，蒙在其上，以防與物鏡之面直接接觸。液浸法係於物鏡與此薄玻璃片之間，夾入液體少許，因此間之空隙甚小，故夾入之液體，可由其

表面張力支住,不致散開。

§631. 望遠鏡。

望遠鏡(telescope; *Fernrohr*)爲使遠處之物體現於近處以便觀察之裝置,其要部亦爲兩套透鏡各裝於長圓筒之一端。圖 348 之甲,爲觀察天體或其他遠處物體所用之簡單望遠

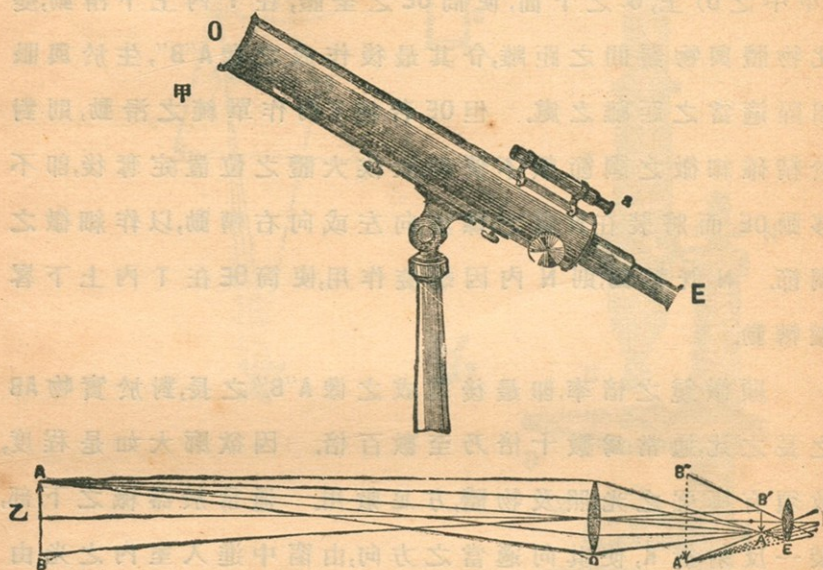


圖 348.

鏡之外形。O 爲物鏡,由一長焦點距離之凸透鏡而成,正對物體 AB,其原理如乙圖。使物體之實像生於目鏡 E 之近傍,如圖中之 A'B'。目鏡通常由兩個透鏡集合而成,其作用在使實像 A'B' 更爲廓大,與廓大鏡之性質相同,故在乙圖上只作一凸透鏡以代之。

在顯微鏡，則使全筒滑上或滑下，以配置實物與物鏡間之距離；在望遠鏡，則因實物之位置在於遠處，有一定之距離，不能加以配置。又因實物遠近不同，其所生之實像 $A'B'$ ，不在同一之位置上，故只有使目鏡移前或移後，俾 $A'B'$ 之像生於適宜之處，即使最後所成之虛像 $A''B''$ ，對於眼在最相宜之距離。由乙圖可知，用如是之望遠鏡窺見物體之像，均為倒立之像。

欲將在遠處之物體廓大觀之，須使 $A'B'$ 之像加長，即物鏡非用焦點距離較大之透鏡不可。又廓大後欲其鮮明，則非多集由物體發來之光不可，即物鏡非有極大之鏡面不可。因此望遠鏡所用之物鏡，其鏡面既異常之大，焦點距離又異常之長，故通常皆作粗而且長之形狀。世界中最大之望遠鏡，為美國芝加哥附近之葉耳歧茲 (Yerkes) 天文臺設備者，其筒口之透鏡，直徑等於40吋，焦點距離則約等於57尺。

對於此種目的使用之望遠鏡，又可用一凹面鏡以代物鏡，由目鏡以觀其作成之實像，如是者曰反射望遠鏡。

§632. 望遠鏡之緊要用途，不僅在於明視遠處之物體，與其謂為明視遠處之物體，勿寧謂為在於確定遠處物體之方向，更為得當。對於此種目的使用之望遠鏡，通常在筒之內部，於物鏡所生之實像處，即圖349之C點，用極細之絲，通常均用蜘蛛之絲，縱橫各張一條，成一十字形，由目鏡觀察物體

時,使其恰與此十字絲相重。此時物體上與十字絲之交點



圖 349.

相重之一點,即用直線連結物鏡之中心與十字絲之交點延長後與物體相交之一點。此直線 CO 通稱曰望遠鏡之視線。故由此關係,可以移動望遠鏡使視線正對目的物體上之一點。天文學家觀察天體之位置,以及測量學家作種種之測量時,均根據此原理以使用其望遠鏡。通常使用之正確時刻,亦由於天文學家在天文臺上用此方法,觀測天體得來;通常使用之精密地圖,亦由測量學者用同樣方法測量而得之結果。此等時候所使用之望遠鏡,並不一定需要長大者,即一尺長短之望遠鏡,亦足以得精密之結果。

注意: 視線與物體無涉,為固定於望遠鏡上之直線。

§633. 雙眼鏡.

雙眼鏡 (opera glass; *Feldstecher*) 為短形之望遠鏡,其主要部分為一凸透鏡之物鏡,與一焦點距離較此為短之凹透鏡而成之目鏡。如圖 350 之 AB 為實物,經物鏡造成實物之像

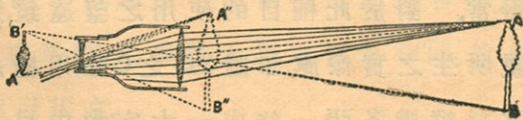


圖 350.

爲 $A'B'$ 。但光線由物體發出，尙未達於 $A'B'$ 之前，已與凹透鏡相遇，其位置較凹透鏡自身之焦點距離略遠，故將欲造 $A'B'$ 實像之光線，經凹透鏡發散之後，在其前面造成 $A''B''$ 之虛像。移進或移出目鏡，使其與物體距離及使用者之目力相應，即可將此虛像，明視而出。

注意：此時凹透鏡之屈折狀況，當如圖 333 之甲，其源 $A'B'$ ，與像 $A''B''$ 同爲虛者，故透鏡公式中之 u, v, f 三者，均應加以負號。

§634. 近年來最流行之稜鏡式雙眼鏡，其外形之大小，及使用之目的，均與上述之雙眼鏡相同，但其作用則甚有別，應列之於望遠鏡之類中，較爲得當。即

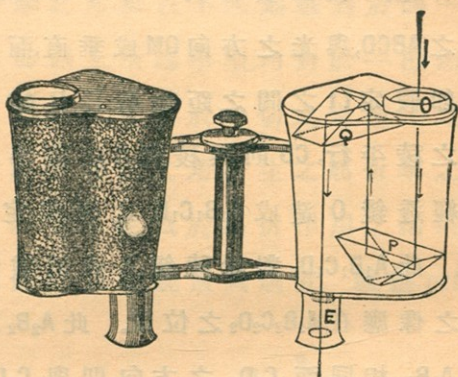


圖 351.

光由物鏡以至於凸透鏡之目鏡之間之路徑，不用一直線，而由反射作用使其分爲五段進行，故在望遠鏡非用極長之圓筒不可者，在此只須短筒即足。但此等反射時，並不用平面鏡而用兩個稜鏡，如圖 351 中之 P, Q ，使其作圖 324 之全反射。 P, Q 之稜互相垂直，由物鏡 O 進入之光，在 P 內作全反射兩

次之後，即退出筒內，而達於 Q ，在 Q 更作兩次全反射之後，始入於目鏡 E 。如此裝置之後，則由物鏡所生之實像，即不致倒立，其方向與實物正同，而在於 E 之前面，故由 E 看出之像，亦與實物同一方向，極為便利。若不用稜鏡而用長筒之望遠鏡，則如前述一切景物皆非倒轉不可，故不適於觀望景色人物之用。

注意：像之方向與實物在同一方向現出之事實，可由前圖 324 所說明之定理解釋之，例如實物為一十字形，如圖 352 中之 $ABCD$ ，與光之方向 OM 成垂直，而在於遠處，即假定 tt 之間之距離甚長，且 AB 與稜鏡 P 之稜平行， CD 則與稜鏡 Q 之稜平行。此物經透鏡 O 造成 $A_1B_1C_1D_1$ 之像（假定無 P 存在）。此 $A_1B_1C_1D_1$ 對於稜鏡 P 成爲虛源，其造成之像應在 $A_2B_2C_2D_2$ 之位置。此 A_2B_2 之方向與 A_1B_1 相同，而 C_2D_2 之方向則與 C_1D_1 相反。其次此等光線尙未到達應成之像之前，即與 Q 相遇，故 $A_2B_2C_2D_2$ 對於 Q 成爲其虛源，由此造成之像爲 $A_3B_3C_3D_3$ 。此 A_3B_3 之方向與 A_2B_2 相反，而 C_3D_3 之方向則與 C_2D_2 相同。故 $A_3B_3C_3D_3$ 之全體之方向，與 $A_1B_1C_1D_1$ 之方向，完全正相反對，即與物體 $ABCD$ 之方向全同。

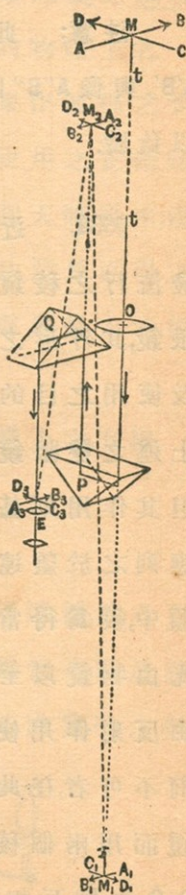


圖 352.

目鏡 E 之目的,只在將 $A_3B_3C_3D_3$ 之像更形廓大觀之,故最後由此觀見之像,與實物之方向完全無別。

第五章 光色

§635. 分散.

以上各章所述光之屈折率,對於各種物質,僅有一種不變之值。但實際上,若發來之光,顏色不同,則雖對於同一之物質,屈折率亦不一致。即以上所述事項,均對於一種類之光,即下述之單色光或單光,而言,若對於一切之光適用之,即不能得精確之結果。但由不同色之光所生之屈折率之差異,其值甚小,故欲由實驗研究,只能就於屈折作用之結果最顯著者論之。對於此種目的,以稜鏡最為適宜。稜鏡(prism; *Prisma*)係由玻璃等類

之透明體,磨成互相傾斜之兩平面,尤以兩面間之傾斜角度等於 60° 者,為最普通,光線由其

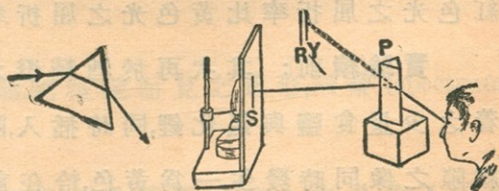


圖 353.

一面射入,由他一面射出時,其狀況如圖 353,其屈折方向如圖中箭頭所示,即僅由屈折,已足以使其方向發生顯著之變化。因其屈折作用如是顯著,故屈折率雖僅有少許之差,亦

足以使其方向變動之量，達於相當之值。

§636. 今試由實驗以檢查各色光之屈折率之不同。

實驗：使稜鏡直立如乙圖所示，在由此通過可以望見之位置，立一板，上有細隙 S，板後放一火酒燈，將燈點燃，即可由細隙窺見其火焰。但酒精燈之火焰，為無色之光，故由稜鏡透視之，細隙只呈暗黑色。若以白金線着少許食鹽，放入火焰中，則焰即成黃色之光，故隔稜鏡觀之，即見 Y 處現出黃色之細隙之像。次用白金線着少許之氯化鋰放入火焰中以代食鹽，則焰即成紅色之光，隔稜鏡觀之，即見有紅色之細隙之像，但其位置則與前此之 Y 略有不同，而現於 R 處。

綜上兩次實驗之結果觀之，光若為黃色，則原在 S 處之物體，即變位而至於 Y 處；光若為紅色，則原在 S 處之物體，即變位而至於 R 處。即紅色光當通過稜鏡時，所起之屈折，較之黃色光所起之屈折為少，換言之，即對於同一之物質（玻璃）紅色光之屈折率比黃色光之屈折率為小。

實驗（續前）：其次再於酒精燈之火焰中，將白金線上附着之少量食鹽與氯化鋰，同時插入，隔稜鏡觀之，即見有兩條細隙之像，同時發生，一為黃色，恰在前此之 Y 處，一為紅色，恰在前此 R 處。

由此可知，火焰中若混有食鹽之黃色光及氯化鋰之紅色光在內，則由細隙通過稜鏡之光，為黃色光與紅色光之兩

種。此兩種色光通過稜鏡時受稜鏡之兩面屈折作用，而分成黃色光與紅色光，互相獨立。並且分出後之黃色光之屈折方向，與單獨只有黃色光一種存在時之屈折方向相同，紅色光亦然。

§637. 此實驗之結果，對於一般色光均同樣成立，要之，

[定律] 1. 一種物質之屈折率，隨光色而異。

2. 有數色之光混合存在而起屈折時，各色之光，各依其自己特有之屈折率，改變其方向，與其他之光存在與否，完全無涉。

[定義] 含有各色之光屈折時，各色之光因其屈折率不同，各向不同方向進行之現象，曰光之分散 (dispersion; *Farbenzerstreuung*)。

注意：對於紅黃兩色以外之各種色光之屈折率之比較，當於次節詳述之。

§638. 景。

由前節所述之實驗，隔稜鏡而見之圖形，曰景 (spectrum; *Spektrum*)。

[定義] 景為一細隙之像，隨照於其上之光色不同，或成一條，或由二條以上排列而成，之圖形，各條之位置均按其光色之屈折率各有一定，

景通常均如前節所述之實驗，利用分散之作用而成，然不由分散而由其他之作用，亦可造成，詳見 §677。

設有一發光體，使其發出之光，分散後而檢查其作成之景，即知此光是否只有一種類之光，如有兩種以上，則究含有何種與何種。如由一種類之光而成，則稱之為單色光，或曰單光 (monochromatic light; *monochromatisches Licht*)；如為二種以上之光合成者，則曰複色光，或曰複光 (complex light; *kompliziertes Licht*)。

§639. 景析器。

實際上利用分散作用，造成所設之光之景，所使用之器具，與前節所述實驗中之裝置，其理完全一樣，只不過將其各部分，收集成為一套，以便使用而已。如是之裝置曰景析器 (spectroscope; *Spektroskop*) 亦曰分光器，其形狀如圖 354。

S 一端為細隙，P 為稜鏡，與前述實驗中之簡單裝置不同處，約有數端：
(1)不用由細隙通過而來之發散光線，使其直接達於稜鏡，而於細隙前面加一圓筒 A，其右端有一凸

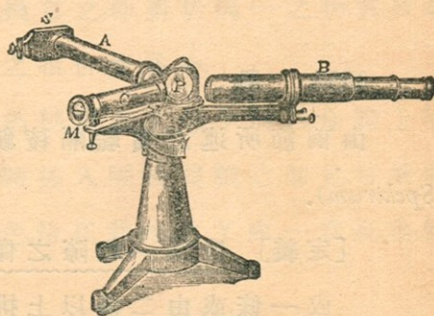


圖 354.

透鏡，細隙之位置即在此凸透鏡之焦點，故由細隙通過之光，

經此圓筒，遂變為平行光線以達於稜鏡之上。(2) S 之像不用肉眼直接觀察，而用望遠鏡 B 代之(望遠鏡可以在左右方向很小之範圍內，自由移動)。(3) 因欲明確比較景中各線之位置，而附一圓筒 C。C 之外端 M 處，橫一極細之尺度，此尺度經裝在內端之小透鏡屈折後，更經稜鏡與望遠鏡相對之一面反射後，與景同時可由望遠鏡明視得見。如此則望遠鏡中即見景與尺度恰相重合。對面所插之圖上，附有由 10 以至 170 之尺度，通稱之本生刻度。

有種景析器不用 C 之圓筒，而將 B 裝在刻有角度之圓盤上面，使其能在圓盤之上轉動，由此可以測出景中各色光線之屈折率為若干。

§640. 各種元素之光。

前述實驗之景中，由食鹽而成者，為鈉之特殊之景，用其他之鈉化合物實驗，亦可生同一之景。又由氯化鋰而成者，為鋰之特殊之景，用其他之鋰化合物實驗，亦可生此同一之景。同樣一切之金屬化合物，若放在無色之火焰中燒之，使其發光，即生出各金屬所特有之景。又如養氣，輕氣等類之氣體，亦可用適當方法(詳見 §745)使其發光，仍由同樣實驗，可以檢出各有其一定之景，插圖中之鈉鋰鋇氫，皆即其例。

注意：由插圖觀之，鈉之景似為單色光，實則不然，其細隙之像，由兩條極為接近之線而成。細隙有相當之廣，故此

兩像有一部分相重，故合成一條。若增強分散之力，同時使細隙縮窄，即可分而為二。但此兩種光，幾同一顏色，故通常將鈉光，看成單光，大致亦無不可。

又在前之實驗中，說明鋰光僅為紅色，其實於紅色之外，同時尚有一淡黃色，如乙圖。不過因此色甚淡，故前此說明時，略去未論而已。

一種金屬或其他之元素，通常亦放出由各色混合而成之複光，如丙之鋇及丁之氫，皆即其例。至於鐵則有數千條之多。但不拘多寡如何，各元素均各有其特殊之線，決不至與他元素混同。

§641. 景析術。

利用上述景之性質，即各種元素各有其特殊之景，且有無其他之物質混在，並無影響，以檢查各種物質所生之景，即可知此物質內所含有之成分如何，如是之分析法，曰景析術 (spectrum analysis; *Spektralanalyse*)。對於此項研究所使用之器械，即前述之景析器。

§642. 輝線景。

插圖之甲乙丙丁等，細隙所生之像，各各獨立，並列排成之景，曰輝線 (bright-line spectrum; *Linienpektrum*)。

輝線景中某一部分因輝線過於密集，為數甚多之時，特

稱其景曰帶景 (band spectrum; *Bandenspektrum*)。

§643. 燈光。

試一檢查洋燈或蠟燭之光所成之景，即見其狀況如插入圖版中之戊，紅、橙、黃、綠、青、藍、紫各色，順次排列，融成一片，並不見有細隙之像，分別現出，如是之景，曰連續景 (continuous spectrum; *kontinuierliches Spektrum*)。

此處雖明言有紅、橙、黃、綠、青、藍、紫之七色，然不過僅言其大體之目標而已，實際上景中之色，由紅色之一端以至紫色之一端，逐漸變化而去。縱命能假定由某處到某處為紅色部分，然在此同一部分之中，各處之紅色亦決不一致。至於紅色與橙色之交界處，更不能明確斷定。即景中之色之種類，實無窮盡，欲一一為之命名，殊不可能。

再進而研究此種連續景之意義。按景本為各色之光照及細隙而生之像。細隙稍廣，則屈折率僅有少許差別之兩種不同之光所生之像，因過於接近，一部分相重，遂成連續之狀。但燈光所生之連續景，無論將細隙縮窄至於若何程度，仍不改其連續。即景中無論何處，其細隙之像均互相密接。故光之種類，其數無窮，即洋燈蠟燭等所發之光，實含有無限多數種類之光在內。此事實與上述景中之色之種類實無窮盡，完全同理。

由化學而知洋燈蠟燭之光，由於在焰中浮游之無數細

微白熱固體發出，而連續景並不僅限於洋燈與蠟燭，一般由白熱固體發出之白光，均所共通。要之，

白熱固體所發之光，生連續景，即由屈折率連續變化之無數種類之光集合而成。在普通之透明體，紅色光之屈折率最小，橙，黃，綠，青，藍，紫等以次遞加。

§644. 日光。

日光所作之景，如細隙不甚狹窄時，與洋燈蠟燭等光所生之景相同，但若將細隙特別縮窄以檢查之，則呈一種特別狀態，如前插入之圖版，所示之狀況，於連續景內，各處皆有與細隙平行之暗黑線，其位置恆一定。此種暗黑線，總稱之曰夫牢因和斐線 (Fraunhofer's line; *Fraunhofersche Linien* 如分殊言之，則如圖中所示，各附以 A, B, C 等之名稱，而稱之曰夫牢因和斐之 A 線，或單曰 A 線，B 線等。其 D 線之位置，恰與鈉景中之輝線一致。

注意：若用精密之器械檢查夫牢因和斐線，即見其為數衆多，遠非插入圖版中所繪者可能比擬，僅對於其中最顯著之若干條，附以上列之名稱而已。

日光大體與白熱之固體所發出者無異，由於屈折與連續變化之無限多數種類之光集合而成，僅與夫牢因和斐線相當之各屈折率之光，日光中無之，或即有之，亦必因其太弱，故不能現出。

§645. 吸收.

究竟上述之夫牢因和斐線，何由而來，關於此問題，則有克希荷夫 (Kirchhoff) 之實驗，可依據之以作推定。

試取電弧燈等類能發生連續景之高溫發光體，裝入於一景析器中，於發光體與細隙之間，即在光之通路中，放一有食鹽之酒精燈焰，則於其連續景中，與鈉之輝線景中之D線相當之處，發見一暗黑之線。但若將電弧燈滅熄，只留酒精燈不動，則如前此之實驗，此處即有鈉之輝線現出。此乃由高溫體發出之光，當其通過比較低溫之酒精燈焰中之時，鈉之蒸氣即由其中將其與自己固有之光（即自己獨自存在時所發之D線之光）吸收而去所致。吸收之後，此處當然無光可到，故成暗黑，當然此時由酒精燈焰中必有相當之鈉光放出，與此鈉光相應之輝線，應仍在其處，不過酒精燈之溫度，遠在發光體之溫度之下，故其發出之光，萬不能與電弧之光比擬，故在此極強之連續景中，因被吸收而缺少之D處，雖有由鈉蒸氣發出之弱輝線，亦仍不免成爲黑暗部分。一般言之，

[定律] 由高溫發光體而來之連續景之光，途中通過比較在低溫之某種蒸氣時，此蒸氣即由來光中，將其與己身所發之同種之光吸收而去，連續景中與此光相當之處，即成暗黑。因此種作用而於連續景中生出種種暗線之景，曰吸收景 (absorption spectrum; *Absorptionsspektrum*).

§464. 夫牢因和斐線之說明。

由上述之實驗定律以推求夫牢因和斐線之由來，其事至易。由太陽之主要部發出之光，與白熱固體發出者無異，應生連續景。但由太陽至於地球之途中，有在夫牢因和斐線位置上生出輝線景之物質之蒸氣存在，且其溫度較太陽為低，故由太陽發出之光，通過此種蒸氣時，被其吸收，故生暗黑之線。至於此項吸收，因太陽之表面，溫度比較為低，大約即在此處發生。故知與夫牢因和斐線相當之物質，例如與D線相當之鈉，與CF線相當之氫，及其他種種，均存在於太陽之表面。

§647. 天體之景。不但太陽如此，即研究在任何遠處之各種恒星之狀態，景亦為極重要之研究手段。例如恒星所生之景若為輝線景，則其全部均在高溫度之蒸氣狀態，由其輝線之位置，即可推知其成分之物質；如為吸收之景，則與太陽相做，中央為白熱固體，周圍則為較冷之蒸氣，其蒸氣之種類，即由夫牢因和斐線之位置推知之。

§648. 光之種類。

光有單光與複光之別，已於§638中述及。單光亦有若干種類，例如由白熱固體所生之連續景，凡與其各部分相當之光，莫不為單光，而單光之種類，亦盡於此。換言之，

光之種類，爲白熱固體景中所排列之各種，除此以外並無他種。

故光之種類，大體可依景中各色，分爲紅，橙，黃，綠，青，藍，紫各種，亦未始不可。但欲精密指出一定之單光，例如此光在紅色部中，則紅色之光，亦有無限數，故欲由其色指定，實不可能。又如對於玻璃而言，各光之屈折率，各不相同，則用此屈折率之數字，或在本生刻度上若干度之數字，以表此一定之光，較之用色，雖略精密，但同一之光，亦依玻璃之性質不同，屈折率有異（參照次節），故亦不能得正確之結果。故實際上區別光之方法，皆以夫牢因和斐線爲標準，而言與夫牢因和斐之某一線相當之光。

如用夫牢因和斐線尙不能精切之時，則照後 §672 所述之方法，依各色之光在空氣中之波長而區別之，如言波長爲若干秒(μ)之光，或若干毫($\mu\mu$)之光。秒爲耗之千分之一，即呎之百萬分之一，毫又爲秒之千分之一，即呎之十億分之一，用此單位以表各色之光，大約如下：

暗紅(A線)	0.7604 秒
紅(C線, 輕氣發出者)	0.6562 ,,
黃(D線, 鈉發出)	0.5892 ,,
綠(E線)	0.5269 ,,
青(F線, 輕氣發出者)	0.4861 ,,
藍(G線)	0.4307 ,,
紫(H線)	0.3968 ,,

§649. 不同種類之光之屈折率。

屈折率因光之種類而生之變化，視物質而定，例如紅光與青光之屈折率，對於各種物質，決不能為成同一之比例。

例如對於同為玻璃之物質，因玻璃有鉛玻璃與鉀玻璃之別，此兩色光之屈折率之差，亦大不相同，即

	紅(C線)	青(F線)	差
鉀玻璃	1.515	1.523	0.008
鉛玻璃	1.617	1.635	0.018

就此例而言，屈折率之本身對於此兩種玻璃之差別，雖相差不遠，但若以紅色與青色之屈折率之差比較觀之，即知有鉛者較無鉛者大二倍以上。即鉛玻璃之分散性，遠大於無鉛者。此種性質，對於實用上實具有絕大之深意，詳 §652。

§650. 變則分散。有少數特殊之物質，因所受色光不同，致屈折率之大小順序，亦與普通之物質不同。此種現象曰變則分散 (anomalous dispersion; *anomale Dispersion*)。例如有種物質名曰洋紅 (fuchsine; *Fuchsin*)，對於黃色之屈折率最多，對於紅，紫，藍，青，則次第減小。故其所生之景，不啻將普通之景，由其綠色部分為左右兩段，然後將此左右兩段，互相交換其位置，即成此狀況。

§651. 色行差。

分散係由於不同色光之屈折率不同而起之現象，故混

合色光即複色屈折時，必發生此現象。例如白光與鏡軸平行射至凸透鏡時，其中之紅色光，屈折後，當取圖 355 之方向 rr ，焦點當在 R ；紫色光之屈折率較大，故當取 vv 之方向，焦點當在 V ，較 R 點距透鏡更近。故經此分散之

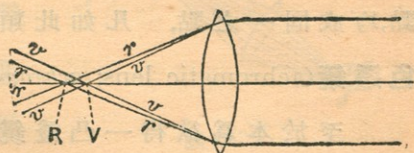


圖 355.

結果，在 V 處立定之紙屏上，現一光圈，中心為紫色，周圍則為紅色；在 R 處立定之紙屏上，所現之光圈，中心為紅色，周圍為紫色。無論將此紙屏放在何處，均不能得白光之焦點，與最初所受之白光同色。因此，凡由白色光經過透鏡所成之像，因分散結果均不鮮明之現象，曰色行差 (chromatic aberration; *chromatische aberration*)。

欲補救此種缺點，使其對於白色光，亦能完成其作用之透鏡，由於種類不同作用相反之兩玻璃透鏡集合而成。例如欲得一凸透鏡，則用無鉛之玻璃製成一凸透鏡令其強度較所要之強度略強，再用鉛玻璃製成一凹透鏡，令其強度較前略弱，將此兩者重疊用之，如圖 356 之狀況，即得。光線中經凸透鏡收斂過多而集於 V 點之紫色光，再經凹透鏡分散過甚之結果，遂集

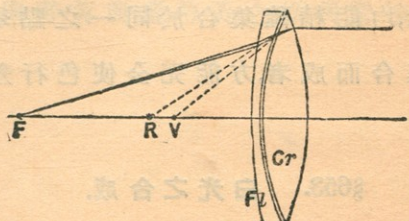


圖 356.

於 F；經凸透鏡收斂過少而集於 R 之紅色光，再經凹透鏡分散過弱之結果，遂亦恰集於同一之 F 點，於是兩種色光之焦點，均成同一之點。凡如此類無色行差之缺點之透鏡，曰消色透鏡 (achromatic lens; *achromatische Linse*)。

至於本為欲得一凸透鏡，何以須用此兩種玻璃造成一凸一凹之透鏡而重疊用之之理，可觀前 §649 之表即明。因此兩種玻璃之屈折率之本身，雖大致無十分差別，但對於不同色光所生之屈折率之差，却極顯著。無鉛者分散之效應小，有鉛者分散之效應大。故對於同一程度之分散，用無鉛者較有鉛者須多屈折若干程度，方可辦到。故將有鉛者逆轉使用之，則其分散之效應，亦成反對，故與無鉛玻璃所生之分散，恰足相消，同時就屈折度而言，兩者相消之結果，無鉛玻璃之一方向餘下若干，故能適於目的之用。此處所說之屈折度，分散效應等，並未用一定之數量標準表出，雖語意不免有模糊之嫌，然欲明其大致，則即此已足。

望遠鏡，顯微鏡，照相器，及其他各種光學器械所用之優良透鏡，全為消色透鏡。由上述之方法，當然不能使一切色光，均能精確集合於同一之點，須用由比較極為複雜之方法集合而成者，方能完全使色行差消滅。

§653. 白光之合成。

使太陽光或白色燈光分散之結果，即得前述之各種色

光之連續景，由此逆推之，則集合景中各種之色，似亦可復得此白色之光。更由實驗檢查之，取圖

357 之裝置，用稜鏡將白光分成七色以透鏡 L 承之，則於 T 處紙

屏上，果現為白光。又同一原理，將可以自由轉動之圓板，或陀羅，之上面，區分為七部分如圖 358，塗成七色，然後使其迅速轉動，則全體當現為淡白色，即灰色。由此

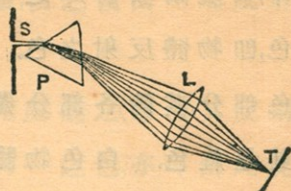


圖 357.



圖 358.

此實驗亦可以證明七色相合即成白色之光。

但白色之光，不必盡如日光或燈光等，非全合七色不可之理，除七色全用外，尚有種種方法，可以集成。例如紅色單光與略帶青色之綠色單光，若以適當之比例混合時，亦現白光，又橙與青，黃與藍，帶黃之綠與紫，均可混合成為白色。

不問色光之為單光與複光，凡相混合而生白光之兩色，均稱曰互為餘色 (complementary colors; *Komplementär-farben*)。上述各例，即紅與帶青之綠，橙與青，黃與藍，帶黃之綠與紫等，均互為餘色之例。

§654. 物體之色。

自身不能發光之物體所呈之色，由於對於照及其上之

光中，只反射其特殊之一部分，其餘則全數吸收所致，其所呈之色，即物體反射之色。例如紅色物體，係反射所受光中之紅色部分，其餘各部分盡被此物體吸收，不能發出，故眼中只見其呈紅色。白色物體對於所受之光，可以全部反射；黑色物體，對於所受之光，則完全吸收，不復反射。

白色物體或其他各種色之物體，受白光照及時，因白光中含有各色之光，故能呈各自固有之色，但若受別色之光照及時，即不能如此。即照及物體之光中，若未含有物體反射之光在內，則有反射此種光之性質之物體，與有不反射性質之物體，即無差別。例如用紅色光照物時，則紅色物體與白色物體，均呈同一之紅色，不可得而加以區別；其他各色之物體，則與黑色物體，呈同一狀況。用青色光照物時，只有青色物體與白色物體兩種，呈青色，其餘均與黑色物體相同。用他各色之光時，亦可類推。要之，物體實際現出之色，由於其物體之性質及所照之光色而定，通常單言某物為某色時，係就用白光照及時所呈之色而言。

注意：(1) 多數之物體雖云可以反射某種某種之色光，但非真正由其表面反射而回，光線實可深入其表面下若干距離之下，且一面進入內部，一面隨即發生反射。故若將不甚厚之白紙一張，放在黑色物體上面，此時所呈之白色，較之將同一之紙若干張重在黑色物體上面時，略為微弱，即由於有若干張相重時，光有一部分由上層進入下層，又由下層漸

次反射出於上面，故其反射光之總量，較之僅由一層反射者為多，故覺其較白。

草花，色紙等多數之物體，在有光處觀之（即由其反射之光）或隔光觀之（即其通過之光）皆現同一之色，亦可由此說明。雖云由反射光觀之，實際光並不僅限於表面之一層，即其表面下若干距離處之物質，皆能反射。且在表面以下之反射，對於色並不選擇，至其所呈之色，完全由於通過物質中時吸去之光缺乏所致。故由通過之光觀之，亦缺少此同一之色，故兩面皆呈同一之色。

(2) 有少數之物質，確由於在其真正之表面上反射，而呈其固有之色。此種物質，若隔光觀之，其色當然不同。尤其以此種物質造成之極薄之層，隔光觀之，因通過物質層太薄，吸收效應不大，故所呈之色，為其餘色。其顯著之例為金箔，在光中觀之為黃色，然隔光觀之則為青色。

[問] 在燈光之下，不易辨別白色與黃色之布，其故安在？

(答) 燈火中含有之青藍色光，為量甚少。白布與黃布之差，在於白布能反射青色，而青色適為黃色之餘色，故黃布不能反射青色，今燈光中既缺少青色，故此區別不易判出。

[問] 用水銀電燈之光以察染色之材料，則見紅色部分皆呈黑色，究由何故？

(答) 因水銀電燈之光中缺乏紅色光，故呈此現象。

§655. 顏料之混合。

黃色光與藍色光相混，則如前述，成為白色之光；但黃色

之顏料與藍色之顏料相混，則不成爲白色，而成爲綠色之顏料。因黃色顏料，並不能發出黃色光，僅有吸收青藍紫色光之性質。藍色之顏料亦不能發出藍色光，僅有吸收紅橙黃色光之性質。故以白色光照及此兩顏料之混合物上，七色光中，只有綠色一種，能免吸收，而反射以入人眼，故成爲綠色之顏料。要之，

混合顏料對於各成分顏料所吸收之光，均一律吸收完盡，只能反射其殘餘之色光。

第六章 光之作用及暗線

§656. 光之主要作用。

光之作用，其主要者有三種，即使人之眼發生光感之作用，化學作用，及熱作用。

§657. 引起光感作用之程度，因光之色而有不同，試就景中各部檢查之，當以黃色部分爲最強，一端由綠而青而紫，次第漸弱，他端則由橙而紅，亦次第漸弱。及至紫色與紅色之兩端，漸次成爲暗黑，故其兩端之位置，究在何處，殊難明言。因此遂令人自然發生一種感想：以爲此紅紫兩端之外方，不過因其太過於黑暗，實際上難於察見而已，並非真正達於其

端即完全無光存在也。再經下述之實驗，更足以證明此說之爲不虛。換言之，即紅色部與紫色部，並不得稱之爲景之兩極端。

§658. 光之化學作用，其主要者爲照於銀化合物上變化其性質，即前述照相之原理。今就景中各部分，一一爲之檢查，此種作用，以紫色部爲最強，藍青部分亦有相當之強度，至綠已最弱，至黃，紅則幾完全無有矣。反之，在紫色部以外，即屈折率較大之一方觀之，化學作用雖亦漸次減弱，然仍保有相當之強度，且其範圍亦頗廣，即人目所不能見之處，亦有此項作用，連續存在。

紅色黃色部分對於光之化學作用甚弱，故通常照相之暗室中多用紅色光，即屬此故。因紅色之光對於人之眼，雖亦能引起光之感覺，而對於乾板，則不起作用，故極便利。

又用洋油燈光照物體之相，無論如何長久，亦不能照出其理亦同。因洋油燈發出之光中缺乏青色以上之部分（見§654之第一問）故不能使乾板感光。

§659. 光之熱作用爲光達於物體上，被其吸收而生熱之作用。今就景中各部分一一檢查之，此種作用以綠色以上之部分爲極弱，由綠而黃，而橙，而紅，次第增大。在紅色端外之部分，即目力所不能見之處，作用最大。由此再向屈折率小之一方更進，始次第減弱。

§660. 暗線.

由前節之實驗結果觀之，在景中紫色一端以外，即屈折率更大之處，有化學作用，在紅色一端以外，即屈折率更小之處，有熱作用，由此觀之，可知景之範圍，不僅限於有光之部分，即此等部分，亦應包括入內。即由太陽發出之光中，不僅此可見之光，並屈折率較紫光更大，較紅光更小，而與光性質相同者，亦包含在內。總括此種性質之部分，曰暗線 (*dark rays*, *dunkle Strahlen*)，若分別言之，則在紫色部分以外屈折率更大之暗線，曰紫外線 (*ultraviolet ray*; *ultraviolette Strahlen*)；在紅色部以外，屈折率更小之暗線，曰紅外線 (*infrared ray*; *ultrarote Strahlen*)。紫外線又可稱爲化學線 (*chemical ray*; *chemische Strahlen*)；紅外線又可稱爲熱線 (*thermal ray*; *thermische Strahlen*)。

此種暗線與光線之區別，完全由於人之視覺有一定範圍而來，若離開人類之視覺，則光線與暗線之本身性質，並無差別。假使人類之眼，構造與現在略有不同，則光線與暗線之範圍，或有變動亦未可知。例如人類之眼，若能直接感知化學之作用，則眼中所見者即無所謂紅色與黃色之光，同時現在稱爲紫外線之暗線，亦將入於有光之部分中。同樣假使人類之眼，若能直接感知由熱而起之作用，則眼中所見者，即無所謂綠青色光以上之部分，同時紅外線之暗線，亦將列入有光之部分中（綠青以上並非絕對無熱之作用，不過因其甚弱，此處僅就其大體而言，故如是耳）。

要之，光線與暗線之區別，若就其本身之物理的構成性質及其作用等而論，完全無意識，光線與暗線實為完全同一種類之物。更就太陽發來之光研究之，夫牢因和斐線，即在紅外部與紫外部中，亦有多數存在，與在紅紫間者相同。試用乾板將太陽之景照出，即見紫外部中之黑線，較黃色之D線及紅色之C線，均更明瞭。又紅外部之範圍內之狀況，雖不能如紫外部可用照相方法檢查，但若用極細之白金線，上塗煤烟，即所謂輻射熱計 (bolometer; *Bolometer*)，插入紅外部中各種之位置上，使其方向與細隙之方向平行，因白金線吸收紅外線結果，溫度升高，用後述 (§784) 之裝置以檢查之，即不難認出紅外線之存在。用此方法檢查之結果，即見有種種位置上，完全缺乏紅外線，即與紅紫間之黑線相當，故知紅外部中亦有夫牢因和斐線存在。

注意：屈折率為對於一種光媒質而言，如物質為玻璃，即對於玻璃之屈折率為若干，方有意義，上文說明紅外線及紫外線時，僅言其屈折率之或小或大，而未指出其所關係之光媒，實不得當。尤以欲指定某一條之暗線而言時，決不能謂其對於某一特殊物質之屈折率為若干 (參照 §648)。欲言光線對於暗線之關係，或指定某一暗線而言之時，最適當之方法，仍以用其波長表出之，如前對於指名光色時，所用之方法 (詳見後 §672)。即紫外線亦為光線之一種，不過其波長，較紫色一端之波長更短，紅外線亦然，不過其波長較紅色

一端之波長更長而已。紫端之光，其波長爲 0.4 秒，而紫外線之波長，最小有至 0.1 秒者，紅端之光，其波長爲 0.76 秒，而紅外線之波長，最長有至 313 秒者。以波長之比論之，可見之部分尚不及由 1 至 2 之間之範圍，而紫外暗線之範圍，則由 1 以至於 4，紅外暗線之範圍，更由 1 以至於 400 以上之多。由此可知，吾人眼中所見之景，僅全景中之一極小部分而已。

§661. 輻射熱。

前於 §§408, 411 等處，曾言由太陽或其他之物體，有輻射之熱放出。但由此等物體放出者，捨光線及暗線而外，並無他物，並非另有所謂輻射熱者存在。輻射熱之真相，即光線與暗線而已，物體吸收輻射熱後，發而爲熱云者，即上述光線及暗線之熱作用而已。

謂某物體發出輻射熱，本來即有語弊。由輻射而出者，實非熱，若其爲熱，則其在物體中進行時，此物體之溫度應升高，但前 §408 已曾力言其不升高，故知輻射而出者非熱，而爲他狀態。所謂甲將熱輻射出外，而乙吸收之云者，其實乃甲將其本身之熱，變化成爲光線或暗線（若此物體之溫度，不能如赤熱或白熱之高，則僅有紅外之暗線），故輻射而出者，實此光線及暗線。乙物體將此光線或暗線吸收後，由光線及暗線之熱作用，復變化而成爲熱。故若不着眼於其中途之情況，則與本在甲內之熱，不使中途之物體溫度升高，而移至

乙之說，本無不同，此即所謂熱之輻射作用是也。

要之，當熱輻射之際，實際由物體射出者，爲光線與暗線，不過此光線與暗線之前身，爲輻射體內之熱，其後又成爲吸收體內之熱，故遂稱之爲輻射熱而已。

如是觀之，則所謂輻射熱者，與光線同樣有反射屈折等之作用，自屬當然之結果。只不過當其屈折時，其一部分之紅外線，較通常光線之屈折率，爲值略小而已。

[問] 在日光中之黑色物體溫度轉高，其理何在？

(答) 所謂黑色物體，即對於一切光線皆吸收無餘之物體。光線及暗線，在物理上爲同一性質，故對於暗線，亦可吸收，既經吸收光線暗線之後，由其熱作用，使物體之溫度升高。故與通常黑色物體能吸收輻射熱之事實相同。

§662. 螢光。

石油爲淡黃色之液體，但若使日光中照及之，則見日光所着之處，均呈青色。此項青色並非由於日光中所含有之青色，反射而來，乃係受日光照及之後，由其自身另外發出者。試將石油裝入試驗管內，放入日光所生之景中各部檢之，若此現象，僅係青色光之反射而成，則試驗管在景中各部，即應呈與此一部分相應之色，不應作其他之色。但實際則不然，即放在青以上之部分如藍色或紫色等處，所呈之色，與其在處之色決不相同，仍作青色。凡如此種，受光照及，不作單純之反射，而發出自身所特有之光，曰螢光 (fluorescent light)；

Fluoreszenzlicht). 硝酸金雞納,紅色墨水,均放淡青色之螢光,又將草之綠葉浸於酒精中,所成之葉綠溶液,本為綠色,亦放紅色之螢光。又鉑蜻化鋇塗在黃色紙上,亦放綠色之螢光,如以鉑蜻化鋇之紙,放在日光所生之景中,雖在紫外線之部分,亦放綠色之光。

如上所述各種物質,均吸收照於其上之光之一部分,而發出與之不同而為其固有之光,即螢光,此時所依從之定律如下:

放出之光(即螢光)之屈折率,必較其所吸收者之屈折率為小。

因此大多數之實例,均以屈折率大之青,藍,紫,及化學線,等,所呈之螢光作用為最著。

§663. 燐光。

有若干固體,如硫化鈣氟化鈣等不特當其受光照及之時,發出螢光,並於取去光源以後,在相當長久之時間內,仍可自行發出其特有之光,如是之光,曰燐光(*phosphorescent light*; *Phosphoreszenzlicht*)。即螢光為物質受光中所放之光,而燐光則為取去光源後,暫時之內仍自能繼續發出之光。

注意: 螢光燐光,與字面之螢及燐,毫無關係,真正由螢放出之光,並非此處所說之螢光,真正由燐放出之光,亦與此處所說之燐光不同。

第七章 大氣中之現象

§664. 大氣中之屈折。

同一空氣之中，若疎層與密層相接觸時，亦生出光學的疎密之別，光達於此種疎密層之境界面，即起屈折。實際上大氣中密度，雖無在一點突然發生變化者，但密度只須逐漸變去，則屈折亦逐漸現出，密度之變化緩，則光線之方向變化亦緩，總之變化之結果，本為直線進行之光線，遂呈彎曲之狀況。故於此時，進入眼內之光之方向，與實際光源之方向，大不相同，而同時眼中所見之物體之位置，與實際之位置，亦自有異。

試舉一例，如在地面焚火，或受日光曬熱之地面或房頂，從其上方，透過空氣，以觀前面之物體，則見物體向左右動搖不定，此種現象，通稱之曰陽炎。因熱處之空氣，始終搖動不已，故此處之空氣密度，亦變化不定，其與周圍冷處之空氣之境界面，時時變動，故由此種空氣內，通過之光線，其屈折之方向，亦時左時右，變化萬狀，故入於眼內，即覺前面之物體動搖不已。

此外尚有一現象，即太陽或月球在水平方向時，在眼中看去較在實際之位置為高。因由太陽或月球而生之光，由

空氣之稀層薄，漸次進入密層，當太陽或月球行近水平線時，如圖 359 所示之狀況，入射角甚大，故屈折之量亦大。屈折結果，漸次向下，故

光線之通路，大致如圖中之 AE，本在



S 處之太陽或月

圖 359.

球，在眼中看去，則覺其在 S'，故較其實際之位置為高。圖中之點線，為自 E 點所引之 AE 之切點。至其高出若干，則可由下述之事實，不難推想之，即眼中所見之太陽或月球，其下端適與地平線相接之時，實際上太陽或月球，已完全沒入於水平線下，此時正當其上端適與水平時相接之一瞬間。

故屈折之結果，致日出較實際略早，日入較實際略遲，其結果使晝間之長，因屈折而延長至於 4 分間以上。

§665. 蜃樓.

大氣因溫度之關係，其疎密排列成爲一種特別狀況時，光線受其影響，屈折後入於眼內，而呈一特殊之現象，曰蜃樓 (mirage; *Fata morgana*)，其發生方法有種種不同。在海面上

所起者如圖

360，圓形之

曲圓表示海

面。C 爲觀

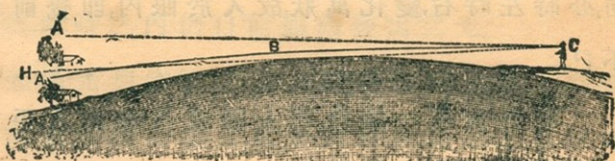


圖 360.

察者，對於此人則 CH 爲水天之境界，即地平線之方向，在此線下之物體 A ，通常不能望見。但若空氣之上層密度較尋常特別爲疎時，由前節所述之作用，光線始終向下方彎曲而來。故通常爲海面所遮斷，不能得見之 A 點發出之光，此時則沿 ABC 之曲線，由海面上通過以達於 C 之眼中。假定到達 C 眼之一瞬間之方向爲 CA' ，則在 C 之眼中看去，本在 A 處之物體，出現於 CA' 之方向上，宛如在 A' 點浮起者然。

又如圖 361 所示，爲日光直射於沙漠之上，與地面接近之空氣層，溫度升高密度減小，故與上述之一例，恰相反對，光

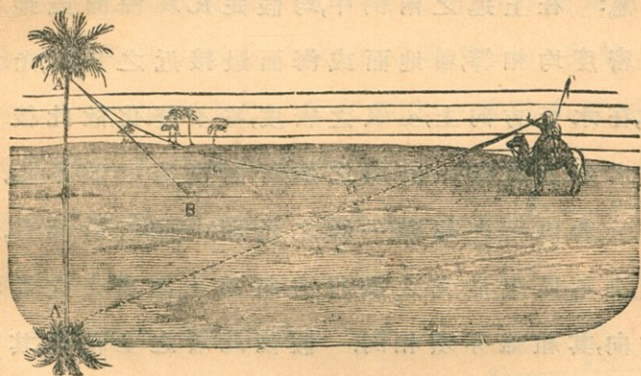


圖 361.

線始終均向上方屈折彎曲，故由 A 點發出之光，沿 ABC 曲線之方向，以達於觀察者 C 之眼中，故在 C 之眼中觀去， A 處之物體，出現於 CA' 之方向上之 A' 點，且成一倒立之像。此時僅有與地面接近之一部分之空氣，特別稀薄，故生此現象。而由 A 直接達於 C 處之光線，並無十分顯著之影響，故在 A 處

之物體，亦同時可以望見。因此在 C 處之人所見之像，宛如湖水邊上植立之樹，實物與其映在水面之倒像，同時可以望見。

除上述兩例之外，尚有在海上能見者，即於實物之上，現一倒立之像，在此倒像之上，又現一正立之像，如是一倒一正，重疊數次出現之時，亦屢有之。此與砂漠之例相同，砂漠之例係由一點發出之光，分爲兩途以入於眼，此例則由一點發出之光，分作數途並進，以入於眼，各光入眼之一瞬間，方向各不相同，故各現成一物體之像。

注意：在上述之兩例中，均假定凡與海面或地面平行之空氣密度均相等，與地面或海面最接近之 B 點；光之方向爲水平，在水平方向上，空氣之密度，並不變化，故此後光似應即沿此水平方向作一直線之進行，而實際則並不然。因光之直進云者，係指在組織一樣之光媒中進行時而言，所謂組織一樣，決不僅限於光之進行方向爲止，即與光之進行成垂直之方向，其組織亦須相同。假使此層之上稀薄，其下密集，則必向密層彎曲而去。此事若由後述之光之波動說 (§671) 推之，當不難說明。

又圖 361，亦可由下法說明之。凡光線進行之路均可逆轉，使反對方向之光線，沿之作逆進。今假定由 A 點如圖所示而來之光，在 B 點成爲水平方向，由 C 點如圖所示而來之光，至 B 亦成水平，則在 B 點，此兩者之方向完全一致。即

由兩路進行而來之光，至此連續成爲一條。故能如圖所示，沿 ABC 進行。

§666. 虹。

虹(rainbow; *Regenbogen*)爲降雨處受太陽之光所照，於太陽反對之方位，出現之彩色大弓形，明顯時有大小兩種弓形相重出現。虹之位置對於太陽之關係一定不變，將虹看成圓弧，則其圓心恒在與太陽正相反對之方向，且在連結太陽與觀察者之眼之直線上。兩弓形之中，以在內之一重即較小者，尤易望見，其光較強。其彩色之排列，外側爲紅色，內側爲青色，大體與景中各色之順序相同，稱曰一次虹(primary rainbow; *Hauptregenbogen*)。又在外之一重，其光較弱，各色之排列次序，與小者正相反對，內紅而外青，稱曰二次虹(secondary rainbow; *Nebenregenbogen*)。

虹之出現，由於太陽發出之光達於雨滴，反射後而入於眼中，故眼中所受之光線方向，正向雨滴，在此方向上之光極強，故現爲虹。

圖 362 之甲中之圓 ABC，表一雨滴，E 表觀察者之眼之位置。由雨滴及眼之位置，以論太陽，可云相隔

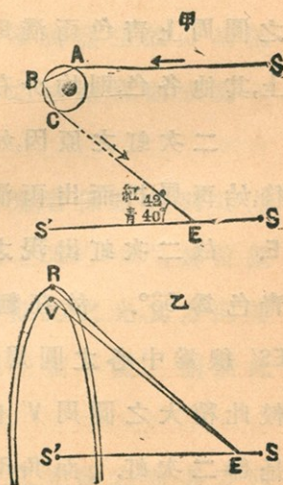


圖 362

極遠，故可將太陽看成在於平行之方向上，如 S 。即 AS 與 ES 爲平行線，均正向太陽。由太陽沿 SA 之方向射來之光，達於水滴 ABC 之上，在 A 處起屈折入於滴內，至 B 起一度反射，至 C 再屈折而出雨滴，遂達於眼 E 。 CE 之方向與太陽反對之方向 ES' 間之角度，紅色爲 42° ，青色爲 40° 。角度之不同，由於在 A, C 兩處之屈折而來，因色不同故屈折率亦異。故在觀察者之眼中，只見與 ES' 線作 40° 之角度方向，現有青色光之雨滴，如乙圖之 V ；與 ES' 線作 42° 之角度之方向上，現有紅色光之雨滴，如 R ，但與 ES' 線作一定角度之方向，如乙圖所示，以 ES 爲軸，以 EV 及 ER 之直線，使其角度不變，在軸之周圍轉動，無論轉至何處，其方向皆能滿足上述之條件，即與 ES' 作一定之角度。故紅色雨滴，均排列於以 ES 線上一點爲圓心之圓周上，青色雨滴則均排列於以同一點爲圓心之小圓周上，其他各色，則均介在此兩色之間。如是而成者，即一次虹。

二次虹之原因，如圖 363 所示，光線入雨滴中反射兩次後，始再屈折而出雨滴，其經路如 $SABCDE$ ，以入於觀察者之眼 E 。故二次虹出現之方向，爲 DE ，與 ES' 所作角度，紅色爲 50° ，青色爲 53° 。故在觀察者之眼中，只見紅色雨滴排列於以 ES' 線爲中心之圓周 R' 之上，青色雨滴則排列在同一中心較此稍大之圓周 V' 上。至其他各色，則介在於此兩色之間，是即二次虹。而角 $R'ES'$ 及 $V'ES'$ 等於 50° 及 53° ；圖 362 之 RES' 角及角 VES' 則等於 42° 及 40° 。故兩虹之位置如乙圖，與實際

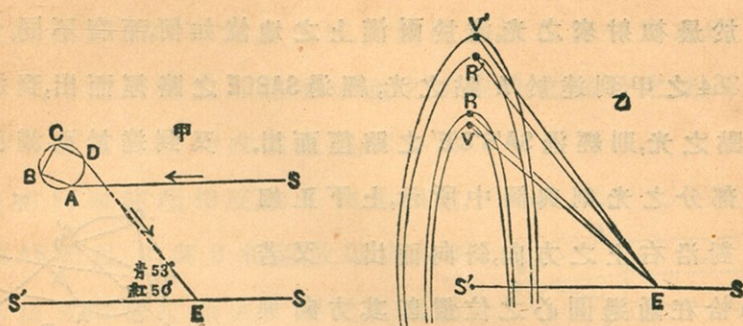


圖 363.

所見之狀況一致。

注意：(1) 到達水滴上之光，全部不能均如上述，作兩種之反射屈折。來光之一部分在 A 處反射，又一部分在 B 點屈折而出於滴外，在 C 點誠有一部分如圖 362 所示之狀況，屈折而出，然同時又有一部分如圖 363 所示之狀況，再起反射。如是反射與屈折均同時併起，並非單獨發生，故分為種種之路而進，其所取各路之中，只有上述之兩路，現而成為一次虹與二次虹。

(2) 在水滴中經一度反射而出之光，若係紅色則其方向 CE 應為 $\angle CES' = 42^\circ$ ，若係青色則應為 $\angle CES' = 40^\circ$ ，其位置恒一定不變。如在水滴中經二度反射而出之光，其方向亦同樣為 50° 及 53° 之兩種角度，其值亦恒一定不變。對於此層試尚有再詳加說明之必要。

先就一度反射後由 C 點出於滴外之光論之，察其方向 CE 對於太陽 方向，具有何種關係。實際上此項方向，完全

由於最初射來之光，達於雨滴上之地位如何，而有不同。如圖 364 之甲，到達於 A 點之光，經過 SABCE 之路徑而出，到達於 A' 點之光，則經過 SA'B'C'E' 之路徑而出。又到達於雨滴面下之部分之光，則與圖中所示，上下正相反對，沿右上之方向，斜向而出。又若 SA 恰在通過圓心之位置，即其方向與原本平行，則其出入雨滴時，即無所謂屈折，故 AB 為 SA 之延長方向上之圓之直徑，而 BC 則為同一直徑折轉之而已，CE 與 SA 成爲平行。由此觀之，因 A 點

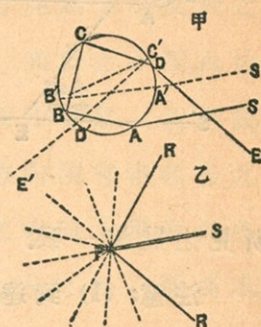


圖 364.

在雨滴表面上所占之位置不同，CE 之方向，即隨之而變，但由計算之結果觀之，則 CE 對於 AS 之角度，均在於一定之限制以內。即如乙圖所示，雨滴 P 正向太陽之半球面所受之日光，由 P 散開時對於 PS 方向，成一定角度，即在此角度以內，沿種種角度方向發散而出。故由此散出之光，總覺甚弱，只有 PS 之方向，及作最大限角度之 PR 及 PR 之方向，光較爲聚集，故特別覺其強烈，如乙圖中粗線所示之狀況。送出此種特別強烈之光之一定方向，與 A 及 C 處之屈折有關係，故因屈折率之大小，而有少許之差別。紅色光對於 PS 之方向作 42° 之角度，青色光則對於 PS 之方向作 40° 之角度。

對於反射兩次而出之光，亦與此同樣。只不過此時雨滴之半球面所受之光，散開之區域與前不同而已。如圖 365

如是，即由反射屈折後發散而來之光，其所作之角為 DES' ，較上述之一定之角度為大，故由二次虹以外之水滴，發來如是之光，雖可入於眼內，而由二次虹以內之水滴發來者，即不能入於眼內。故二次虹之外部較為明亮，內部較為暗黑。至於較明之部分，不現特殊色彩之理，亦與一次虹相同。故有兩重之虹出現時，兩虹之間之部分，天空特別黑暗，而在小虹以內，大虹以外部分之天空，則較為明亮。恰與上述之理論，完全一致。

§667. 暈。

天空中遇有薄雲浮在時，每於太陽左右一定距離處，現一光亮極強之點，且略帶有少許色彩，有時且似有數個太陽并列於空中之狀況。又有時以太陽為其中心，於其圓周上現出光亮甚強之輪形，輪之半徑對於眼之夾角，約等於 23° 或 46° 。又有時出現光亮極強之橫線，橫貫太陽而過。舉凡此種種之現象，通稱之曰暈 (halo; Halo)，如圖 366 所示為最常見之一種類。

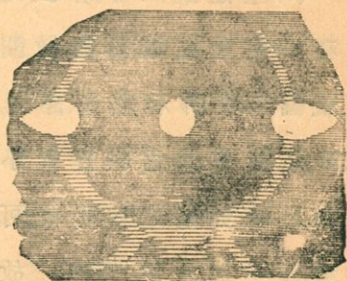


圖 366.

冰塊之小形結晶片浮游於空中，成為此種薄雲，太陽之光，射至此種結晶片上，反射屈折而後，改變其方向以入於觀

察者之眼中。

又月球之周圍，亦常現同樣之狀況，所謂月暈是也，其理亦同。

第八章 光之波動說

§668. 光之速度。

光在媒質中傳播時，有一定之速度，其值視媒質之性質而定。由天體發來之光之觀測，以及對於地上之光之實驗，推求之結果，知光在真空中或各種氣體中傳播之速度，為三億每秒呎。即每秒可進行3億呎之遠，約可繞行地球周圍七周又半。在液體及固體中光之傳達速度，其值均較此甚小。總括一切媒質而言，則

[定律] 以各種物質對於空氣之屈折率，除光在空氣中之速度，即得各物質中之光之速度。

例如水之屈折率為 $\frac{4}{3}$ ，則光在水中之速度應為三億每秒呎之 $\frac{3}{4}$ 倍，即二億二千五百萬每秒呎。

注意：上述光在真空中之速度，與在各種氣體中之速度相等，不過言其大略而已。若精密言之，則在各種氣體中之速度，實較在真空中者為小。但在通常狀況之氣體中，則相差只在萬分之一以上，千分之一以下。例如空氣中之光

速較在真空中僅差萬分之2.4，相差既如是其微，故通常可以略去不計。

§669. 上述之定律，與前 §598 所述之定律相合，由此可推出任意兩種光媒之速度與屈折率間之關係。今試假定 n_1 為甲種光媒對於空氣之屈折率， n_2 為乙種光媒對於空氣之屈折率， n 為乙對於甲之屈折率，則由 §598 之定律，知

$$n = \frac{n_2}{n_1}.$$

又命 v_1 為甲媒質中之光速度， v_2 為乙媒質中之光速度，則

$$v_1 = \frac{1}{n_1} \times 300,000,000 \text{ 每秒呎},$$

$$v_2 = \frac{1}{n_2} \times 300,000,000 \text{ 每秒呎},$$

故
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

即
$$n = \frac{v_1}{v_2}.$$

故得

[定律] 乙對於甲之屈折率，與以乙之光速除甲之光速所得之商相等。

注意：上述之證明，係將前節及 §598 之定律，看成實驗上之既知定律，而後加以說明，至其理論的證明，則當於後面 §671 中再詳述之。

§670. 光波。

由各種事實推察，上述在各種媒質內各以一定之速度進行之光，實為一種波動。

波動可由一切之媒質，為之傳達，即非有一種能傳波動之物存在其處不可。但光之進行，雖在真空中，即無任何物質存在之處，亦無所礙。譬如托里拆利之真空 (§212)，嚴格言之，實為充滿稀薄水銀蒸氣之處，雖尚不能謂之為真空，但與地球隔離極遠之宇宙空間中，空氣固勿庸論，即其他任何氣體，亦不存在，成為所謂真正之真空。光在此種真空之內，傳達更易。夜間所見之各恆星發來之光，以每秒遠地球七周又半之速度，不知經歷若干歲月，方達於地球，均經由此種真空中傳達而來。由此可知，真正之真空，不能不謂為傳光最良之媒質。即真空中雖無所謂物質存在，但却有非物質之傳光媒質充滿其中。再合§1之物質之定義而考之，可以換言之如下，即“光波之媒質，為不能捉住，使其脫離某處之一種特別之物”。此種不可思議之特別之物，通稱之曰能媒 (ether; *Äther*)。

§671. 屈折定律之說明。

由光為一種波動之說，可以證明屈折定律及前部所述之光速與屈折率間之關係。

茲先就光由甲之媒質，進入速度不同之乙之媒質內時

所起之屈折現象言之。如圖 367, S 表光源, AB 表兩媒質之境界面, 假定下面之媒質中之光速度較在上面之媒質中時為小。若此兩方面之光之速度相等, 則波面當如圖上所繪之 ACB, 成為圓弧擴散而去。

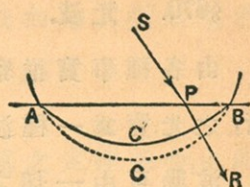


圖 367.

但實際上, 在下面之媒質中之光之速度, 較此為小, 故進入下面媒質中之光, 應較 ACB 所行略遲, 當如 AC'B 之形狀。此 AC'B 之形狀為在 S 上面之光源發來之光, 作一樣均勻之擴散而成之波面, 故屈折光線, 與垂線較前接近。AC'B 之曲線, 當然非正確之圓弧, 故光源若更在 S 之高處, 則由 S 發來之波, 不能與此同樣。故對於以一定方向達於境界面之光, 尚有詳加研究之必要。

假定光由圖 368 之上方, 沿 AB 及 A'B' 之方向而來, 其入射角 NBA 與 i 相等, 進入下面之媒質後, 改作 BD, 及 C'D' 之方向, 屈折角 N'BD 等於 r , 則在上面之媒質中, 波面與 AB 垂直, 即向 AA' 之方向, 及其行至 BB' 之位置時, 一部分已達於境界面上。由此再進, 當入於下面之媒質內, 其波面之方向即變成與屈折線 CD 垂直之面 CC' 之位置, 再進即成爲 DD'。

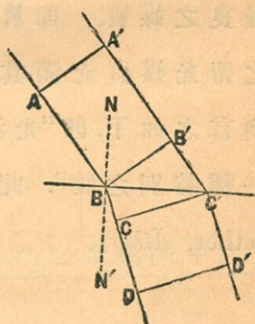


圖 368.

今試就光波由 BB' 之位置, 變至 CC' 之位置之間之狀況

論之。在此時間之內，在上面之媒質中，光波進行 $B'C'$ 之距離；在下面之媒質中，光波進行 BC 之距離。故若命上面媒質中之光速爲 v ，下面媒質中之光速爲 v' ，則其關係當爲

$$\frac{B'C'}{BC} = \frac{v}{v'}$$

今角 $B'BC'$ 等於 i ，角 $BC'C$ 等於 r ， $B'C'$ ， BC 皆可用其共通之一邊 BC' 表出，則

$$B'C' = BC' \sin i,$$

$$BC = BC' \sin r,$$

$$\frac{B'C'}{BC} = \frac{\sin i}{\sin r}.$$

即得

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}$$

之關係。再就以其他之方向入射之光線論之， i 與 r 誠有種種之變化，但光在上下兩種光媒中傳達之速度，即 v ， v' ，則不能變動，故 $\frac{v}{v'}$ 恆取同一之值，即 $\frac{\sin i}{\sin r}$ 之比，其值恆一定不變。是即所謂屈折之定律。而此一定不易之比 $\frac{\sin i}{\sin r}$ ，即所謂屈折率 (§596)，如命之爲 n ，則有

$$n = \frac{v}{v'}$$

之一關係，是即 §669 所述之定律。

又若假定甲之媒質爲空氣，則上之關係改書作

$$v' = \frac{v}{n},$$

即成爲 §668 所述之定律。

又命 n_1 爲乙對於甲之屈折率, n_2 爲丙對於甲之屈折率, n 爲丙對於乙之屈折率, v_0 爲光在甲內之速度, v_1 爲光在乙內之速度, v_2 爲光在丙內之速度, 則

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{v_0}{v_1}, \\ n_2 &= \frac{v_0}{v_2}, \\ n &= \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_0}{v_2} \div \frac{v_0}{v_1} = \frac{n_2}{n_1}, \\ n &= \frac{n_2}{n_1}. \end{aligned}$$

是即 §598 即所述之定律。

§672. 光之波長.

光波之波長, 因色而異。在真空或空氣中, 紅色光(即景中之紅色一端)之波長, 約爲 1 耗之一萬分之八, 屈折率愈大之光, 其波長愈短, 紫色光之波長, 約爲 1 耗之一萬分之四, 其爲值之小, 實堪注意(參照 §648)。

對於其他之透明體, 可由 §510 之定理, 推知其波長較在空氣中更短, 與光速爲比例。

[問] 試就紫光與紅光, 計算光媒每秒之振數。

(答) 波長爲波在一振動周期中進行之距離 (§510), 故一秒間。

光媒之振數，等於以一秒間光進行之距離除其波長而得之商。
故紫光之一秒間之振數應為

$$\frac{300,000,000,000}{4 \div 10,000} = \frac{3}{4} \times 10^{15}$$

對於紅光之振數，約等於紫光之半。

此等數字之大，可用一比喻表之。鐘表所發之噹噹噹噹之音，一秒間可發五響，一年間所發出者為 $5 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 = 157680000$ ，再加大計之，亦僅為 16×10^7 。故若以鐘表之響聲所須之時間，計光之振數應需 $\frac{5 \times 10^{14}}{16 \times 10^7}$ ，即 3×10^6 ，應須三百萬年以上，其數之大，可以由此想見。

§673. 干涉.

前於音學中，曾述及干涉 (§553) 之現象，此乃一般波動所共有之普遍現象，光既為一種波動，當然亦應有之。試以石油一滴，落於水面上，石油立即擴開，同時呈種種之色，此色與石油自身所發者不同。直接由石油表面反射而回之光與一度進入石油內部，再從石油與水之境界面反射而出之光，彼此重疊而生干涉，結果始現此光。因由石油表面進入石油內部再由水面反射而回復出於石油表面上者，須在石油層內往返一次，故其進行當較直接由石油表面反射而回者略遲。石油之層雖極薄，而光之波長亦極短，故在層內多經此一度往返之光，與未經此一度往返，即直接反射而回者其振動之狀況，頗有參差不齊之處。此種參差不齊之處，由光之振動周期或其波長而定。如對於某種波長之光，參差狀況恰相差半周期，或一周期半，則彼此作用互相抵消，其光減

弱，而對於另一種波長之光，參差狀況，恰相差一周期或二周期，則彼此作用，互相助長，其光增強。故各種波長之光，因其對於石油層厚之關係不同，成爲各種程度不同強弱互異之光，以入於觀察者之眼中，故覺此薄膜，呈種種之色。故石油層所現之色不同之處，即表示此等地方之厚薄不一。又如吹石鹼液成球時，球愈大則膜愈薄，同時膜上之色，亦隨之而變，亦屬同一之理。其他一切薄膜所現之色，均與此爲同一種類之現象。

§674. 牛頓環。由無色之玻璃板，亦可望見與薄膜呈同樣之色。於磨成極平之玻璃板面 A 上，放一略有彎曲之凸透鏡 B，如圖 369 之乙，即見以兩者接觸之一點 C 爲中心，有數重之環形出現，其色與虹相同，狀如甲圖，因在 B 之下面反射之光，與在 A 之上面反射之光，互相干涉。

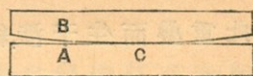
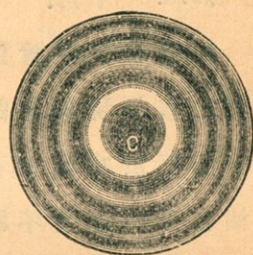


圖 369.

凡與 C 在同一距離之處，即以 C 爲圓心之圓周上各點，其空氣層之厚薄均彼此相等，故干涉時同在一圓周上者，均呈同一之狀況，即現爲同一之色。故各色之環均同一以 C 點爲其圓心。如是之現象稱曰牛頓環 (Newton's ring; *Newton'sche Ringe*)。

§675. 透折。

圓形之水波在寬廣之池面上進行，如遇有障礙之物，橫於其進行之途中，波爲其所阻，似在障礙物之後方，不應有波紋發生，但實際上則却不然，到着於障礙物之兩傍之波紋，通過障礙物之時，即繞過其後方，引起障礙物後面之水，亦爲之動搖不已。音波亦有此種現象，故在建築物之後方之人，亦能聽見由被隔一方發來之音。光雖係一種波動，然在障礙物之後方，却成爲極鮮明之陰影，並無光透來。此一點實爲光與其他之波動不能相同之一現象。

但此不過僅就外觀而言，大略如是，若作進一步之精密考查，則光對於此一點，實與音波及其他一切波動，共同受同一之定律所支配，未曾或異。即光波實亦透至障礙物之後方。至於光之所以生出陰影與其他波動不同者，不過因其波長不同而已。光之波長，如前所述，爲值極微，若與其他之波動之波長相比較，直不足道。波長如是之短，故雖透進障礙物之後面，亦因受與干涉同一種類之作用，結果大致與未曾透進後方者相同，此事可由理論上面，爲之證明。總之，障礙物後方所以無光，並非光之不能透來，實乃由種種地方透來之光彼此重疊而生干涉，遂不顯其作用。

但光之波長，雖云極短，終有一定之值，不能認爲完全沒有，故由精密方法加以檢查，始知光確能透至障礙物之後方，與其他之波動之性質相同。

嚴格言之，在障礙物後方所生之陰影之境界，不能如 §563 所述之簡單明確，即由光源引至障礙物周圍之直線包圍之內部，亦有少許之光透入，此種作用，通稱之曰遠折 (diffraction; *Diffraktion*)。

§676. 光之遠折現象，以光源極細極小之時，以及障礙物極狹極小，或通常之障礙物上有一極狹極小之細隙時，特別顯著。其中以下述之實驗，最為簡易，無論何人皆能為之，且又極饒興趣。

實驗(1). 如圖 370，取一洋油燈，燈心須用帶狀者，即有扁平燈心之燈，正向其火焰之極狹之一方，如甲圖，用意在选择極細之光源。用筆管兩條，執於手中，使其間成一極狹之細隙，透過此細隙以窺燈光，則除望見燈光而外，於其兩傍，如乙圖所示之狀況，當有若干着色之條紋，與景相似者，存在。且筆管間之細縫愈狹，則着色之條紋愈廣。



圖 370.

由此可見，光除由細隙處一直通過以外，並可沿稍為傾斜之方向，亦有一部分通過，是通常所稱為影之部分中，亦有光來。且此項作用與干涉同一種類，故在傾斜之方向，亦可

望見，其方向則由波長之大小而有不同。左右排列之條紋，其所以有景色者，即屬此理。

由鳥類之羽毛間，或由綢綾等類材料之織紋間透過窺視日光，所見之彩色，亦為同一之作用。

實驗(2)。在玻璃板上，遍撒大小一樣之細粉，如石松屬(*lycopodium*)之花粉，一薄層，將其放在離眼少遠之處，透過此板以窺光源，即見有着色之環，以光源為中心現出。此亦與上述之實驗相同，由小障礙物周圍遠來之光，因其波長不同，與直線之方向，作種種之角度，或強或弱，而成此種現象。天空有雲浮起時，日月周圍，每有彩色之環出現，亦即此理，因光由雨滴通過而起遠折之現象，所現之環愈大，則雨滴愈小。

6797. 遠折格子 遠折最緊要之一應用，為遠折格子 (*diffraction grating; Diffraktionsgitter*)。在玻璃或金屬板上，引無數等距離而且互相密接之平行細線，每 1 厘米含四五千條之譜。由與此平行線在平行位置之細隙中通過之光，達於此格子上，除通常之通過或反射之光外，尚於與此作一定角度之方向上，有一極強之光。例如圖 371 之甲，AB 為玻璃板上所引之直線格子，由線之延長之方向觀察時之狀況。由 L 之方向送來之光，通過格子後除向直線方向之 L' 進行而外，尚有由格子之細線間遠折後之光，沿傾斜之方向 MM 而來，且極強烈。此 LM 間之角度 α ，由於格子之細線間之距離，

及光之波長而定。如爲長波長之紅光，則如乙圖之RR方向，其光最強，如爲短波長之紫光，則其傾斜角度較小，當以VV之方向，光最強烈。在此兩者間之光，均排列於R與V之間。故

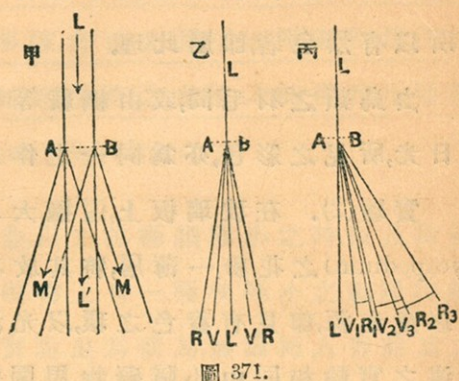


圖 371.

發來之光L，若爲白光，則其左邊之RV之間，右邊之VR之間，即有景現出。如是之景，曰**透折景**(diffraction spectrum; *Diffractionsspektrum*)。此種景中之各色位置，與用稜鏡造成者(參照§638)同，不致因特殊玻璃之屈折率而異，完全由其波長而定，故對於景之研究，此種景較之稜鏡所作者，實極重要，故又稱爲**正常景**(normal spectrum; *normales Spektrum*)。

更就理論檢查之，L'M間之角度 α ，由於

$$\sin \alpha = \frac{mL}{a}$$

而定，式中之L表光之波長，a表格子相鄰兩平行細線間之距離，m表1, 2, 3等之整數。故每一格對於發出紅光最強之方向，不僅只有一處，即m等於1時，有一 α ，m等於2時，又有一 α ，如是遂得R₁ R₂ R₃等之方向。對於發出紫光最強之方向，亦有V₁ V₂ V₃等。上述之透折景，其實當如丙圖所示之

狀況,同時有 $V_1 R_1, V_2 R_2, V_3 R_3$ 等若干個存在

§678. 光之極化.

前此雖將光認為波動,但其究為何種之波動,則尚未下一斷語. 經種種事實推論之結果,光波與音波之性質,完全不同,為一種橫波, 今試假定圖 372 之 AB, 表光之進行方向, 則其所通過各點之媒質,當在圖上小箭頭所指示之方向,即在與 AB 成垂直之平面內之各種方向,作其振動.



圖 372.

光之極化(Polarization; *Polarization*)

現象係光為橫波之一種自然結果,而同時又為其證據之一種.

§679. 如圖 373, 光線沿 AB 方向進行時,若其媒質之振動在振動平面中,即在與 AB 垂直之平面中,僅限於一

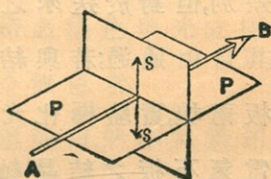


圖 373

定之方向如 SS 之時,此種光稱之曰極化光, (*Polarized light; polarisiertes Licht*). 此時與 SS 方向成垂直之平面,如 PP, 曰極化面 (*Plane of polarization; Polarisationsebene*)

欲得極化光,只須用極化器 (*Polariser; Polarisor*),使通常光線通過其內,即得. 極化器由通過其中之光之振動中,只能容許某一定方向之振動通過,對於與此方向成垂直之

振動，則吸收之，阻其前進，極化器有此性質，故通過其中之光，自能成爲極化光。極化光只用肉眼觀察，或照在通常物體之上，與非極化光，即普通之光，並無特異之處，非用特別之裝置檢查，不能發見其與通常光線不同之點。如是用以檢查極化光之裝置，亦與極化器之狀況相同，只須令欲檢查之光線，通過其內，即得，爲此目的而設之裝置，雖其實際與極化器一樣，但仍別稱之曰**分析器** (Analyser; *Analysator*)。

§680. 極化器之種類甚多，其中最簡單者，用一種礦物，名爲電氣石 (Turmaline)，沿其結晶軸平行之平面，切成薄板而成。此種薄板，乍觀之爲帶綠色之透明體，似與玻璃板無差別，但對於送來之光，若其振動方向與結晶軸平行，固能使其自由通過；若與結晶軸垂直，則吸收之無餘。故若用此種板兩塊，實驗極化光，爲事極易。圖 374 所示之平行細線，表電氣石板之結晶軸之方向，實際之電氣石上，當然無此等平行線存在，今爲便於說明，特作此等平行線，以表出其晶軸之方向。將此兩板相重，使其晶軸之方向互相平行，如甲圖之狀況，則由一板通過之光，可以完全通過第二板，故由他面觀之，雖相重亦見有光通過。但如相重時，兩板之結晶軸方向，恰相垂直，如乙圖之狀況，則由一板通過

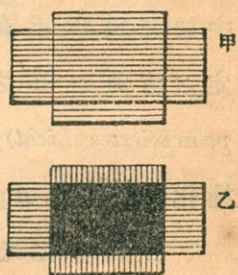


圖 374.

之光，全被第二板吸收無餘，故由他面觀之，因無光通過，故相重處，成爲暗黑部分。

換言之，即通過第一電氣石板之光，爲一種極化光，而第一電氣石板，則爲極化器。今將第一板之位置固定不變，則第二電氣石板，適成檢查通過第一板之極化光之裝置，即分析器。分析器之使用法，恆如上述之實驗，須隨轉隨檢查通過其中之光，如發見一種位置如乙圖所示，無光通過時，即知進入分析器中之光爲一種極化光。若將分析器無論如何轉動，終不能尋出無光位置時，則通過其中之光，即非極化光。又檢查時，不必就光之全部通過與否而言，若通過之光，因位置不同有強弱之別，亦可知其爲極化光，無強弱即非極化光。

注意：(1) 通過電氣石之光，其所帶之綠色，與光之極化並無關係。次節所述之極化光，即完全無色者。

(2) 電氣石因帶有綠色，故其裝置雖簡單，然不甚適用。通常所用之極化器，多爲§684所述之尼古爾之裝置。

§681 由反射而生之極化 通常之光線以 56° 之入射角達於玻璃上時，試用分析器一檢查其反射光，即知其爲一種極化光，其振動方向與反射角之平面恰相垂直，概括言之，

[定律] 在透明體之表面，以有 $\tan i = n$ 之關係之入射角 i 射來之光，其反射光線，均爲極化光。

入射角若與此角度不同，其反射光雖非完全之極化光，

但若通過電氣石檢查之，即見其明暗程度，隨電氣石之方向而異。故知如是之反射光線，其一部分必為極化光。又在通常桌面等反射而回之光，均有一部分成為極化光。

§682. 極化面之轉動 水晶，白糖之溶液，以及其他若干種特殊之物質，如以極化光通過其中（如為水晶，則與結晶軸平行通過之光）；其極化面應有轉變之性質。例如用鈉光作圖 374 之實驗時，於兩電氣石板之間，插入厚約 1 耗之水晶板一枚（用與結晶軸相垂直之平面切成），則由前之乙圖所示之位置，尚須將一方之電氣石板，約轉動 22° ，方成真正之暗黑。白糖之溶液，亦有同樣之作用，其程度雖遠不及水晶為甚，但若將白糖溶液盛入長管之內，亦可測出其極化面轉變之角度。凡有此類性質之物質溶液，皆可利用此種作用，檢出其化學成分或濃度。為此目的而製成之實用器械，曰檢糖計 (Saccharimeter; *Saccharimeter*)。

§683. 複屈折。

試取兩面平行之方解石結晶體，放在寫有文字之紙面上，如圖 375 之甲，由上視之文字現為二重。由文字上一點 A，如乙圖，發來之光，通過結晶體行至外面時，分為 AB, AB' 之兩種方向，入於觀察人之眼中時，與通常由屈折後而起之分散時之狀況不同，乃沿同一方向之 BC 及 B'C'，同時而來。於 A



圖 375.

點外，尚有光線 $B'C'$ 引起之 A' 點存在，故同時現為兩點。如是之現象，曰複屈折 (Double refraction; *Doppelbrechung*)。

此時凡沿 $AB'C'$ 之路徑屈折而來之光線，均不復依從通常之屈折之定律，故通稱之曰**非常光線** (Extraordinary ray; *ausserordentlicher Strahl*)；而與此相對待，依從屈折定律之光線，則曰**正常光線** (Ordinary ray; *ordentlich Strahl*)，即沿 ABC 之路徑進行者。此兩種光線之所以不同，由於光媒之振動方向有異。非常光線 $AB'C'$ 為與乙圖之圖面，即含有方解石之結晶軸之平面，作平行方向振動之光，而正常光線之 ABC ，則與此平面作垂直方向振動之光。如方解石等類之結晶體，均有此種將光線分而為二之作用，即有複屈折之作用。

由上述複屈折現象之原因，可知現出兩重文字之光，均屬極化光，其振動之方向，彼此互成垂直。只須用便利之極化器以檢查由此兩重文字發出之光，即足以證明之。

§684. 尼古爾之稜鏡 極化器及分析器最普通使用

者，爲尼古爾之稜鏡 (Nicol's prism; *Nikolsches Prisma*)，係用方解石之結晶，作成斷面斜方形之柱，(其側面則爲最易裂開之結晶面)。將其兩端之面，切成適當之角度，由側面觀去，如圖 376 之乙，角 A 及角 C' 各切成爲 68° ，並將柱之中間，用與

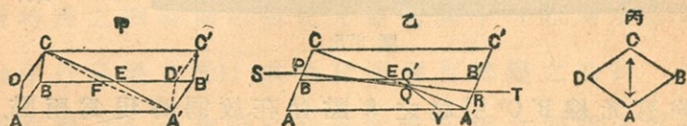


圖 376.

AC 垂直之平面 CA'，即用甲圖中之平面 ECFA'，切成兩段，然後用加奈大芳香樹液 (Canada balsam; *Canadabalsam*) 將此兩段，照原狀膠合而成。光線沿 SP 之方向 (如乙圖) 而來，達於 P 點，即起複屈折，分爲兩路，一沿 PQ，一沿 PQ' 之方向進行。

此中之 PQ 爲正常光線，此光線達於加奈大芳香樹液之面上之 Q 點，因屈折率及光之方向之關係，而成全反射，出於側面之外。但非常光線之 PQ' 則進入加奈大芳香樹液之內，透過後入於結晶體，通過其第二段，然後沿 RT 之方向，由其他之一端射出。此光線如上所述，應爲極化光，媒質之振動方向，若由柱之一端看去，如丙圖應爲斜方形之短對角線之方向。簡言之，即尼古爾稜鏡只能使在包含兩端之斜方形之短對角線之平面內振動之光通過，故可用爲極化器。

第八篇 電磁學上

磁 學

§685. 磁石

通常用以決定東南西北方向之指南針，即一磁石 (Magnet; *Magnet*)。由於鋼製之細長小片而成，裝於一小盒內，其中中央之窪處，支在盒底固定之針尖上。故磁石能以此支點為中心，在其周圍自由轉動。如使其表面向上，任意轉動其下端之盒，即見此磁石，恆指南北之方向，不隨其盒移動。

即磁石若能在鉛直軸之周圍自由轉動時，有恆指南北方向之性質，不特指南針所用之針狀磁石如此，即通常之鋼片，只須施以特別之處理，均能有此項性質。故通常凡具有

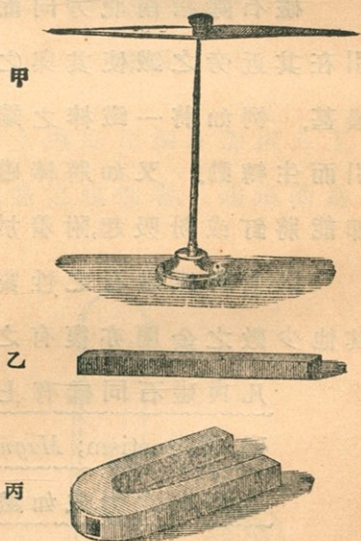


圖 377。

如是性質者，統概括之稱曰磁石。

若由其外形加以區別，則如指南針之類，用作指示方向而作針狀者，曰磁針，如圖 377 之甲，作直棒之狀者，曰棒磁石，如乙圖又有作馬蹄鐵之形狀者，曰蹄形磁石，如丙圖。如將棒磁石或蹄形磁石之中點，用線懸住，則其一端亦恆指南方，他端恆指北方，與磁針之性質相同。其向南方之一端，曰磁石之南極 (South pole; *Südpol*)，其向北方之一端，曰磁石之北極 (North pole; *Nordpol*)。

磁石除指南北方向而外，尚有一極顯著之性質，即能吸引在其近旁之鐵，使其與之接近，此性質尤以磁石之兩端為最甚。例如將一鐵棒之端，持近磁針，則磁針之一端，為其所引而生轉動。又如將棒磁石持近鐵釘或鐵粉等類之近旁，即能將釘或粉吸起，附着於棒端。

以上所述磁石之性質，不僅限於鋼而已，此外尚有鐵及其他少數之金屬，亦復有之。

凡與磁石同樣有上述之兩種性質之物體，稱之曰有磁 (Magnetism; *Magnetismus*)，又如有磁之物體能指南北方向之力，或如鐵與有磁物體間互相作用之引力，即因有磁而生之作用之力，曰磁力 (Magnetic force; *magnetische Kraft*)。

注意：磁石所以能吸引鐵類之理，詳見 §699。

§686. **羅盤** 在一望無際之海洋中航行時,通用羅盤

(Compass; *Kampass*)以定其應取之方向。羅盤之形如圖 378

所示,為一周圍刻度之輕圓盤,其中心支在一針尖之上,圓盤下面,貼有若干細磁石,如圖中之 NS, NS 等,均沿同一之方向。磁石之 N 均恆指北方,故由圓盤上所刻之度數,可以推知東南西北及其間之方位。

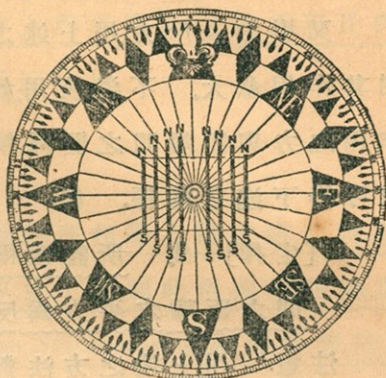


圖 378.

§637. 實際使用之磁石,均如上述,係用鋼片加以人工製成,但天然產之礦物中,亦有具如是之磁性者。磁鐵礦為

一種氧化鐵,即其最顯著之例。

§688. **極之引斥作用。**

用一轉動極其容易之磁針,製置如圖 379,以另一磁石之一極,持近此磁針之一極試之,如北極與北極接近,或南極與南極接近,則兩磁石彼此互相斥離;如南極與北極接近,或

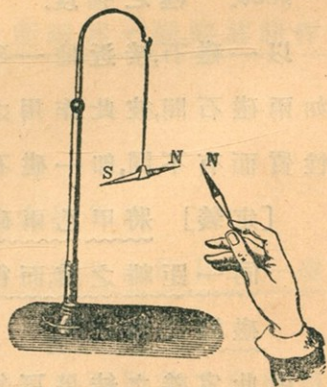


圖 379.

北極與南極接近，則彼此即互相引近。 卽

[定律] 1. 同名之極相斥，異名之極相引

又引力及斥力，用上述之實驗，亦可推知，兩端相距愈近，則其作用愈大。不過僅用如是簡單之裝置，當然不能將此作用之力與距離間之關係，精確測出，但若使用精確之裝置，即可得下述之關係。 卽

[定律] 2. 所設兩極間作用之引力或斥力，與兩者間之距離之平方爲反比例。

注意：用上述之方法對於同名之極，實驗其斥力時，如兩極過於接近，有時轉起引力之作用。此時所起之引力，係後面 §699 節所述另外一種作用，與此不同。故作斥力之實驗時，不可使兩極太過於接近。

§689. 極之強度。

以一磁石，接近他一磁石，如兩者之間之距離，一定不變，例如兩磁石間，彼此作用之引力或斥力，因兩磁石之大小及其性質而有不同，卽一磁石之極，有強弱之別。

[定義] 將甲乙兩磁極，各各放在與第三磁極丙相隔同一距離之處，而得之引力或斥力之比，稱爲甲乙丙磁極之強之比。

由此定義之結果，可知將任意兩磁極散在一定之距離處所現之引斥力，與各磁極之強爲比例。將此關係，與前節

所述之定律 2 相合併，即得庫倫定律 (Coulomb's law; *Coulomb-sches Gesetz*).

[定律] 兩磁極間之引斥力，與各磁極之強爲正比例，
與其間之距離之平方爲反比例。

§690. 極強之單位

[定義] 將等強之兩磁極，放在相隔 1 糎之處，此時兩
極間作用之引斥力，若等於 1 達，則此兩極均各稱爲
單位極 (unit pole; *Pol von der Stärke eins*) 或極強各等於 1。

由上述之定義及庫倫定律，可知極強等於 1 之極，與極強等於 m 之極，相隔 1 糎之距離時，其相互間之引斥力當爲 m 達；極強爲 m 之極，與極強爲 m' 之極，相隔 1 糎之距離時，相互間作用之力當爲 $m m'$ 達，如相隔之距離爲 r 糎，作用於其間之力當爲其 $\frac{1}{r^2}$ 倍，即

極強爲 m, m' 之兩磁極間之距離爲 r 糎，則其間作用
之引斥力當爲 $\frac{m m'}{r^2}$ 達。

§691. 磁石之兩極 由實驗之結果，知

[定律] 一切磁石，均同時具有南北兩極，且同一磁石
之兩極，其強必相等。

將磁石載在木片上，使全體浮於水面，則其方向雖轉向南北之方向，但全體并未向南方運動，亦未向北方運動，故知。

其兩極之強必相等(參照 §695)。

§692. 地球之磁力。

一切磁石,並未受其他之磁石作用,而其北極恆向北方,南極恆向南方,由此可以推知地球必為一大磁石,其磁石之南極當在北方,故能引近通常磁石之北極,而斥離其南極;又此大磁石之北極,當在南方,故能引近普通磁石之南極,而斥離其北極。故通常磁石與地球大磁石間作用之力,即磁石所受之向南北之力,曰地球之磁力,此力之所由生,則曰地磁 (Terrestrial magnetism; *Erdmagnetismus*)。

§693. 方位角 地球磁力之作用方向,恆為南北云者,只不過就其大體而言,若加以精密之觀察,則知其與正南北之方向不同,其間恆有少許之差。此相差之量,可用磁石之北極作用之力,距正北之方向所作之角度,及其偏東或偏西之方向以表之。如是之角度,曰方位角 (Declination; *Deklination*)。如言某處之方位角為西五度,係表磁

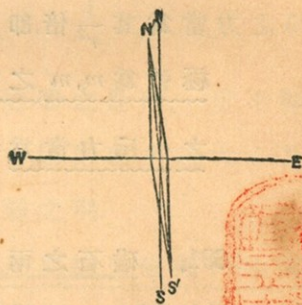


圖 380。

針之北極 N' , 與正北 N 所作之角度,等於 5 度,且係偏向西方。若從南極言之,亦與正南作 5 度之傾斜,且偏向東方。即圖

380 之 E, W, S, N 表東西南北之方向, S' N' 則表磁針之方向。

方位角之值,因地而異,在我國大約爲西七度之間,在英國則約爲西十七度之譜,在布哇則爲東九度。

§694. 伏角 上述之事項,係磁針只能在水平面內轉動時所取之方向,與磁石之兩極有無受上下方向之力作用無涉。欲檢查其上下方向所受之力如何,則須用圖 381 所示之裝置。

仍用有兩尖端之磁針一枚,在其重心點上,裝一軸棒 X,使 X 之方向與磁石之長之方向垂直,軸棒之兩端向外凸出,支在架上,取水平之位置,若令此軸棒正向東西方向,即磁針可在南北之鉛直面內自由轉動時,因重心點既在軸棒之上,當然重力作用不能使其發生轉動,故

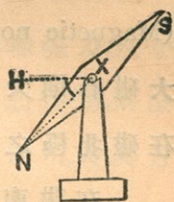


圖 381.

此磁針完全依地球之磁力而變其方向,用如是之裝置以行實測時,即可見磁針不特不能成水平之方向,且與之所作之傾斜角度,爲值甚大,北極向下,南極向上,其傾斜之角度在我國各地大約爲四十度或六十度之間。如是之角度,曰

伏角 (Dip; *Inklination*)。

注意: 通常支在針尖上取水平位置之磁針,其北極雖受磁力引向下方,南極雖受磁力斥向上方,仍能保持其大致之水平方向者,因其重心,實並未在支點,而在其南極之一方,即南極之一端,特別加有少許之重量。

伏角因地方而異，緯度相等之處，其值大約相同，愈向南其值愈小，達於赤道近旁時，伏角即成爲零。由赤道更向南進，則磁針之南極即向下墜而其北極轉向上昇，愈南其角度亦愈大，至南極洲中之某處，完全成爲鉛直之方向。此一點特稱爲地球之磁南極* (Magnetic south pole; *magnetischer Südpol*)。又在北半球之地方亦復相同，由赤道以北，緯度愈大則伏角亦愈大，至北美洲之加奈大地方之某一處，磁針之北極正向下，全體成爲鉛直線之方向，故此一點，特稱地球之磁北極 (Magnetic north pole; *magnetischer Nordpol*)。如將地球看成一大磁石，則大磁石之北極正在磁南極之下；大磁石之南極，正在磁北極之下。

在磁南極，或磁北極之處，地球磁力正向鉛直之方向，故若將通常之磁針，放在此兩處，並不能指出任何方角。又由磁北極，稍東地方，磁針之北極，均向西方，故其方位角成爲西九十度；又在磁北極稍西之地方，其方位角成爲東九十度；又在磁北極與地理上之北極之間，磁針之北極，轉指南方，故其方位角成爲百八十度。

§695. 地球磁力之強度 由方位角及伏角表出之方向上作用之地球磁力，對於單位磁極 (§690) 作用之強度，因

*此處所謂之地球之磁南極及磁北極，因其所在地點，在於地球之南極近旁或北極近旁，故定此名。如就磁性而言，則在地球南極近旁之磁極，應稱爲磁北極，而在地球北極近旁者，應稱爲磁南極，方爲正當。

地方而有不同，在赤道近旁約爲 0.36 達，在兩極地方則約爲 0.7 達，在我國則約爲 0.4 達至 0.5 達之間。

上述之磁力，係就其作用方向上之強度而言，即向地面傾斜作用之地球磁力之強度，如專就水平方向之分力而言，則爲水平分力 (Horizontal component; *Horizontalintensität*)。如命 T 爲全體之強度， H 爲水平分力， i 爲伏角，則得

$$H = T \cos i.$$

一磁石之兩極，其極強相等，故其所受之地球磁力，大小相等而方向相反。因此一磁石雖受地球磁力之作用，其全體亦不致向南方進行或向北方進行，僅由偶力作用，將其方向轉向南北之方向而已 (§145)。

§696. 地球磁力之變化 上述之方位角，伏角，及地球磁力之強度，均不過其大體如是而已。如嚴格言之，則此等各值，均不一定，隨時變化不已。即在一日之中，亦有小變化，小增減，在長年月之間，又有其進行甚緩之變化增減。尤以方位角一項爲最甚，一日之中，午前十時前後爲最東，至午後二三時前後，則爲最西，前後相差約有角度十分左右。又倫敦之方位角，在二百五十年以前，本向東方，漸次減少至二百三十年前，已成爲零，由是以後，即漸次向西，直至增至西二十五度半爲止，現今又復漸次向 0 而回矣。

§697. 磁場

磁石之周圍，凡受其磁力作用之處，曰磁場(Magnetic field; *magnetisches Feld*)。如將一定之磁極，持至此磁場中，如其所受之作用之力甚大，則稱此磁場甚強，如作用之力甚小，則其磁場亦稱爲甚弱。地球上一切地方，均爲地球力之場，但爲比較甚弱之磁場而已。又棒磁石或蹄形磁石之近旁，均爲較強之磁場。又磁場不必限於磁石，即與地球或磁石完全無關係之其他之作用，如電流之作用等，亦可生出，其事極爲重要，當於 §802 詳述之。

磁場之強以單位磁極在此點所受之力之大小表之。

論磁場時，如在地球磁力處所述，除場之強度而外，尚須言明磁極在此一點所受之作用力之方向。例如論棒磁石近旁之磁場之狀況時，將一小磁針持至其近旁各處檢查之，其結果如圖 382 之甲圖中之短線所示之狀況。圖中箭頭所指之方向爲小磁針北極所受之力之方向，由此圖觀之，可知沿磁力方向所引之短線，彼此相聯，成爲一連續之曲線，是曰力線 (Lines of force; *Kraftlinien*)。

對於棒磁石或蹄形磁石近旁之強磁場，欲知其力線之狀況，別有一種簡便之方法。即於磁石之上放一玻璃板，或紙片，木板均可，使其成水平之位置，然後將細鐵粉撒佈於其上，並用指微敲之，則鐵粉即沿磁力作用之方向相連而成曲線之形狀，是即力線。乙丙兩圖即用此法繪成乙表棒磁石

近旁之場，丙則表蹄形磁石近旁之場之情狀。

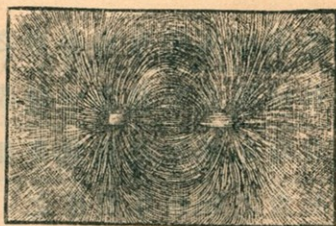
至鐵粉何以能互相啣連而排列於力線之方向，其作用當於下 §699 中詳述之。

§698. 力線在通常之磁場內並不間斷而成一連續不斷之線，如作力線之方法得當，則由其排列之疎密狀況之差別，即可推出何處之磁場為強，何處為弱。即於場中各處假想一任意之平面，與此處之力線垂直，計算其一定面積內穿過之力線數（即假定全體之力線數甚多，故穿過此一定面積之力線數亦不少）。此數即與此處之場強恰成正比例。例如圖 383，表一棒磁石周圍之力線，其兩極近旁，為力線密集之處，即表示此處之場

甲



乙



丙

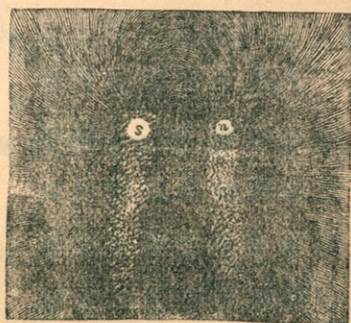


圖 382.

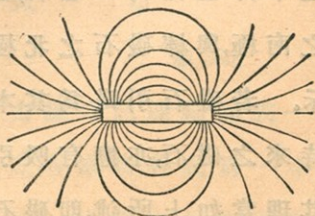


圖 383.

甚強；遠處力線漸疎，即表示其處之場漸弱。

§699. 磁誘導。

前云磁石能引近鐵類，為磁石之特性，似與磁極間之作用無關，而為磁石之本來之性質，實則不然。此現象仍不外極與極間之引力之一種表現而已。即鐵片之近旁，如來一磁力，則此鐵片之自身，亦即化為一磁石，此磁石之極，與新來之磁力之極，相互引斥之結果，遂呈磁石引鐵之現象。

上述之理可用實驗證明之如圖 384，一棒磁石之北極，有鐵釘附在其上時，持其他之磁石，近釘之下端，則此磁石之北極，即將釘之下端斥開。因

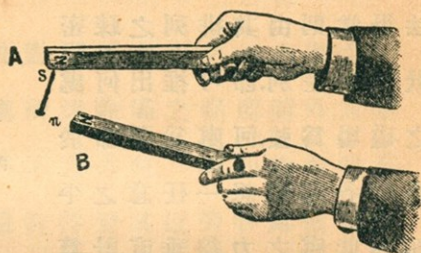


圖 384.

釘之本身已化為一磁石，上端成為南極，下端成為北極。上端之南極，與棒磁石之北極相引，下端之北極，則與他之北極相斥。若磁石引鐵為其本來特有之獨立性質，則在下端新近持來之磁石，亦應有吸引鐵釘之力。實驗既與之相反，故知其理當如上所述，即磁石之引鐵，決非磁石固有之獨立性質。

此時鐵釘上生出之 n s 之極，當然由於棒磁石上之北極 N 而來，即應被 N 斥開之北極 n ，生於 N 之遠方；應被 N 引近之南極 s ，生於 N 之近旁。如是生法，不僅限於此一實驗為然，一般

[定律] 凡放在磁場內之鐵片，其自身即化為一磁石，如將一磁針持至此處，其針之北極被斥而去之方向，之一端，即鐵片之北極，磁針之南極被引而來之方向即鐵片之南極。

此現象曰磁誘導 (Magnetic induction; *magnetische Induktion*)。此項作用，以鐵片之形狀為一長棒，且其方向與所放處之力線方向一致時，尤為顯著。

受誘導作用中之鐵片，如受敲擊，使起振動，即有促進誘導之作用。

在磁石近旁受誘導中之鐵片，其本身可使其他之鐵片發生誘導。如圖 385 被磁石一端吸住之鐵釘，可以支持第二之鐵釘，第二之鐵釘又可支持第三之鐵釘，即其一例。

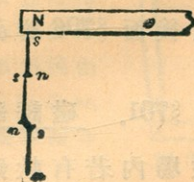


圖 385。

又前述細鐵粉在強磁場內，沿力線方向連絡而成一連續之曲線，亦即此理。即在力線上之各鐵粉，各成為一小磁石，其南北極均正在力線之方向上，且一鐵粉之北極與次一鐵粉之南極互相引近，故相連結成為一線。

注意：磁誘導之發生，並不限於在磁石之近旁，後面於 §802 以後所述，不用磁石而用電流，亦可引起誘導，其應用極為重要。即在此時，上述之定律，亦可完全適用，即無論何時凡由誘導而生之磁極，均可持一磁針至其近旁，由磁針所指之方向，以定其磁極之為南為北。

§700. 磁化之飽和 因誘導而生之磁之強度，如發生此誘導之磁場愈強，則亦隨之而強，但不能作無限之度增加。原本之磁場，漸次加增時，由誘導而生之磁強即漸向一定之極限接近，及其既已達於極限以後，無論如何加增原本之磁場強度，亦無些微影響矣，即

鐵所能具有之磁，有一定之飽和度。

注意：鐵所能具有之磁，有一定之飽和度，其理由當於後面 §706 詳述之。

§701. 磁誘導之力線

磁場內若有軟鐵片受其誘導之作用時，其力線形狀當與前略異。例如棒磁石周圍之力線，如其獨自存在時，當如圖 386 之甲，如其一端 N 之前面有一軟鐵片

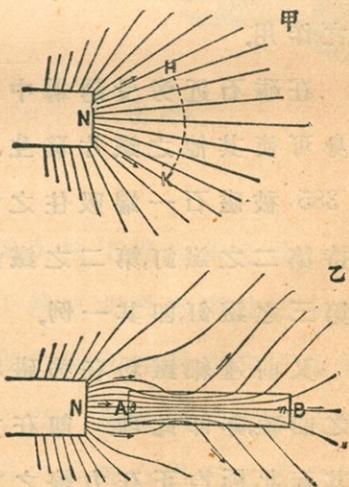


圖 386.

AB, 則生 sn 之極, 力線即成爲乙圖之形狀。由撒布鐵粉之方法, 即可檢出。

又如乙圖之力線, 由 N 發出至 A 之近傍爲止之力線, 與由 B 發出之力線, 並非各各獨立彼此無關係者, 可以看成當其在軟鐵 AB 之中, 實有一種連絡。即由 N 發出之力線中, 有一部分由 A 處進入軟鐵片內部, 再由 B 處復出於外。

由是以比較甲乙之力線配布之狀況, 即軟鐵片有將 HK 間之力線集合而收縮之之作用, 或 HK 間之力線, 有被軟鐵片吸收之形勢。不特此一例如此, 即在其他之例, 亦莫不皆然。要之,

凡在磁場內之軟鐵片, 皆有聚集吸收力線之作用。

[問] 於蹄形磁石之兩極相對處, 常放一輕鐵棒, 則磁石與鐵之引力即特別強大, 其故安在?

(答) 在通常未放軟鐵棒時, 即圖 384 所示之狀況, 其一極 N 對於 s 間之引力, 與對於 n 間之斥力之相差, 始爲吸引軟鐵片 ns 之作用, 如放一軟鐵棒於其兩極相對之處, 如圖 387, 則由 N 所生之誘導作用, 與由 s 所生之誘導作用, 彼此互相增長, 而生強磁極之 ns, 且 s 與 n, 同爲 N 與 s 所吸, 故其引力較前此單獨存在時爲強。



圖 387.

[問] 一磁石之 N 吸住一鐵釘, 若於此時, 在此磁石之上面, 再加一磁石, 使上面之 s 向下面之 N 處漸次接近, 如圖 388, 則下面原本吸住之鐵釘, 即行墜下, 其故安在?

(答) N 若與 s 接近則其近傍之磁場即與無磁石時相同。因若持一北極來此近傍則 N 之斥力與 s 之引力, 彼此恰足相消, 故不呈作用。故對於鐵釘之誘導作用, 亦因之成爲極弱。不但如此, s 若來至 N 之

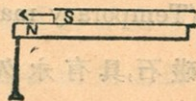


圖 388.

上面，則釘之上端之南極，本由於 N 之引力支住，今則又須受此 S 之斥力作用，即其所受之支持之力，為 N 之引力與 S 之斥力之合力，幾等於零，故不能不自行落下。

§702. 頑性

前節所述，雖為通常之鐵，即軟鐵，之誘導作用，但鋼亦有同樣之性質，只不過在同一情況下，鋼所得之磁性不及軟鐵為強而已。

軟鐵與鋼對於磁性之差別，尤以既受誘導以後，移至磁力不作用之處，或將引起誘導作用之磁源取去時，為最顯著。如為軟鐵，則於引起誘導之磁源消滅以後，由誘導而得之磁性大部分同時消滅，即完全失去其磁石之性質，復成為原本之鐵。鋼則不然，因誘導而得之磁，為量雖少，但一旦既得以後，雖將誘導之磁源取去，其大部分仍依然存留其上，永久成為一獨立之磁石。此處所述之鋼與軟鐵之差，通常用頑性 (Coercive force; *Koerzitivkraft*) 一語以表之。

[定義] 由誘導而得之磁性，於誘導之磁源既經取去以後，猶能保持之之性質，曰頑性。

即鋼之頑性較大，而軟鐵之頑性較小。

軟鐵只限於在受誘導作用之中，成為磁石，故曰暫時磁石 (Temporary magnet; *tempörer Magnet*)，與之相對如由鋼所成之磁石，具有永久之性質者，曰永久磁石 (Permanent magnet; *permanenter Magnet*)

§703. 磁石之製造

各種磁石，無論其為磁針，棒磁石或蹄形磁石，均由鋼製成，因鋼之頑性甚大，故利用之。至於製造方法，不過使鋼由適當之方法受誘導作用，即化為磁石。其中最簡單之誘導方法，係將鋼片製成所要之形狀，以一棒磁石之一端，沿一定之方向，在其上面擦過若干次，如圖 389 之甲。AB 為製成棒狀之鋼片，用

另一棒磁石之北極 N 在

此 AB 上面，沿

一定之方向，

即由 A 而 B，

如箭頭所指，擦過若干遍後，則擦末之一端，即 B 端，成為南極。

如不用北極而用南極，仍沿同一方向擦過，則在 AB 上所生出

之極，亦與前此正相反對。或如乙圖，用棒磁石兩條，以其一

之南極，其他之北極，放在鋼片之中央部分，由此向其兩端擦

去，各如箭頭所示之方向，如是數回之後，亦即成一磁石。此

時北極 N 擦末之一端，即 B 端，成為南極，而南極 S 擦末之一

端，即 A 端，成為北極。

注意：若欲作極強之磁石以行實驗時，通例係將軟鐵

片放在電流所生之強磁場中，使其成為電磁石而用之，詳見

後 §816。

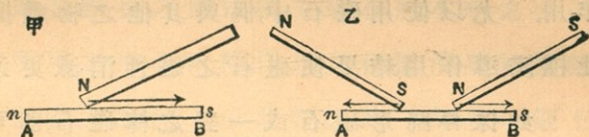


圖 389。

§704. 磁石之保存 關於磁石之保存法,有應特別注意之事項。試將一條磁石,如圖 390 中之 NS, 看作由兩半條之磁石並排而成,則右半條對於左半條之誘導作用,當使其成爲與現在之方向正相反對之磁石,故其作用在使磁石之磁性減弱。左半條對於右半條之誘導作用,亦復如是。故凡如圖所示單獨存在之磁石,常有使其自身之磁性減弱之作用。尤以使用磁石中,偶與其他之物體撞着時,更易促進此種誘導作用,結果使磁石之磁性消滅更速。



圖 390.

如保存蹄形磁石或一對之棒磁石,即可使其不致發生上述之自行減弱其磁性之作用。例如圖 391 所示,上爲一蹄形磁石,則於其兩極 NS 處放一軟鐵片 AB,使其與兩極互接觸。如此,則軟鐵與蹄形磁石之北極 N 接觸之一端,成爲南極 s, 與南極 S 接觸之一端,成爲北極 n。兩方之作用,同時恰相抵消,故 N 與 S, 即無自相減弱之作用。下爲一棒磁石,亦與此相同,

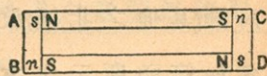
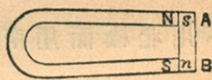


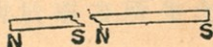
圖 391.

將兩條放在相隔少許距離之處,方向彼此互相反對,再用軟鐵片兩條,如 AB, CD, 接觸於兩方之棒磁石之端,則無論何種磁極,均必與其反對之導誘磁極,同在一處,互相抵消,故無自行減弱之作用。

§705 磁石之組織

如前 §691 所述，任何磁石之兩極，其強度均必相等。如將磁石自其中點，折為兩段，似應成為一段只有南極，一段只有北極之磁石，而實際則不然。

於折斷處，又新現出磁石之極，



如圖 392 所示。因之兩段均

各自成一完全之磁石，南北兩

圖 392。

極皆備。再將此折斷後之兩段獨立磁石，照本來之位置接合之，則折斷處所現之南北兩極，作用互相抵消，與無極無異，復成為未折斷以前之狀況。由此觀之，此一部分外觀上雖似毫無磁性，實際上並不如是簡單，只不過其南北兩極，左右相接，故其作用，不能現出而已。

再將磁石折為若干段，均與此相同，任取其一小段觀之，均為兩極俱備之完全磁石，故知即令在未曾折斷之磁石中，

磁石之各最小部分，無論其為兩端之部分，或為中央之部分，均為同樣之兩極俱備之完全磁石。不過因各小部分均排列成為同一之方向，故中央部分南北兩極之作用，互相抵消，無從表現，僅在兩端者，始呈作用而已。

若磁石之全體各部分，均如圖 393 之甲所示之狀況，由完全同樣之小磁石，排列在完全相同之方向上，則其側面，當然無磁性出現，但實際之磁石，則如乙圖所示，各小磁石，不能

成爲完全之平行，即在其側面，亦不免有少數之小磁石之端現出，故鐵粉在兩端近傍之側面上，亦能附着。



圖 393.

§706. 磁化之說明

由磁石之最小部分亦具有磁性之一點觀之，可以推知鐵化爲磁石之作用，並非由外面有何物進入鐵內使然，乃鐵中受磁力作用，自然化爲磁性。故磁石之分子與鐵之分子，並無不同之處。即

鐵之分子本爲磁石

只不過在通常鐵內，此等分子排列之方向，極不整齊，故不能區別其何處爲南極，何處爲北極而已。若受磁力作用，則與在磁場內之磁針，轉向磁力方向之狀況相同，分子磁石，亦皆轉換其排列之方向，故其全體之各部分，均呈磁性，於兩端現出磁極。即

磁化云者，乃分子磁石改變其排列之方向之謂也。

鐵中分子密接之處，分子改換方向，不能十分自由，故非磁力充足，不能使其全體一律改變成爲磁力作用之方向，即作用之磁力弱，則改變方向之作用，比較不甚完全，磁力愈強，改成同一方向之磁石愈多。故全體所呈之磁性，因磁力大小而有強弱之差。但磁力無論如何增加，若分子磁石已完

全排成一律之方向以後，亦決不能再使其改善。此即鐵之磁化，有一定之飽和度之說明。

§707. 各種物質對於磁力之性質。

磁石由鋼或鐵製成，其他之物質對於磁力，所生之作用，有種種不同，大別之為三類。

鐵以外如鎳，鈷以及含有此種元素之化合物，多數均與鐵相同，受磁力之誘導，可得相當強度之磁性，堪與鐵所得者相比擬，如是之物質，曰強磁性物質 (Ferromagnetic substances; *ferromagnetische Körper*) 舊時以為除含有鐵，鎳，鈷等而外，不能有強磁性之物質，但近年却發見由錳，與錫及鉛等之合金，其各成分之金屬，雖無一種有呈強磁性者存在，但由此混合而成之合金，則呈極強之磁性，通稱之曰惠斯勒齊 (Heussler alloy; *Heusslersche Legierung*)

除上述之惠斯勒齊一種，誠屬例外，至於其他凡未含有鐵，鎳，鈷等物質，對於磁力之誘導作用，皆極微弱，程度遠在鐵等之下，不足與之比擬。此中又分為兩類。雖作用甚弱，然究與鐵之作用相類似者，曰常磁性物質 (Paramagnetic substances; *paramagnetische Körper*); 其作用完全與鐵之作用正相反對者，曰反磁性物質 (Diamagnetic substances; *diamagnetische Körper*)

欲檢查此類物質之性質時，須取極強之蹄形電磁石，(參

照 §816) 將欲檢查之物質之短棒，放在電磁石之兩極之間，觀之。如為常磁性物質，則短棒當取連結兩極之直線方向，如為反磁性物質，則取與之垂直之方向。例如錳，鉻等為常磁性物質，而銅，鈹等則為反磁性物質。

第九篇 電磁學中 靜電學

第一章 電之發生

§780. 電之兩種。

用乾燥之絲巾，摩擦乾燥之玻璃棒，將棒持至紙片或其他輕物體之近傍，輕物體即被玻璃棒吸引而去。又用絨布或毛皮摩擦火漆棒，持近輕物體，亦呈同樣之作用。此時之玻璃棒或火漆棒上，常稱為有電 (Electricity;

Elektrizität)。欲實驗此種引力以圖 394 之裝置

為最相宜。將絲線一條繫在支台之上，在其下端懸一輕物體，如燈心草之小球，以備生電之棒或引或斥之用，此種裝置，曰電擺 (Electric pendulum; *elektrische Pendel*)

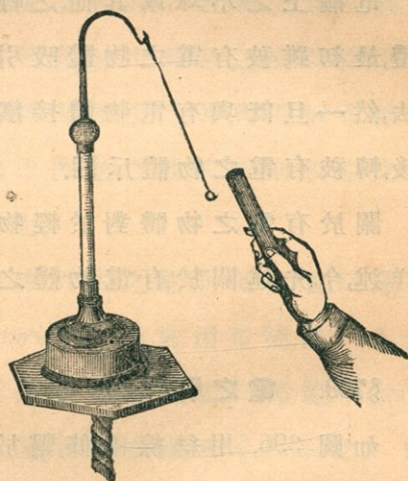


圖 394。

檢查物體生電與否，較電擺更為敏銳之裝置，通常用金箔驗電器 (Gold-leaf electroscope; *Goldblattelektroskop*)，形如圖 395。將欲檢查之目的物，持近驗電器上端之金屬板，如物體上有電，則器中本如甲圖垂下之兩張金箔，即行張開如乙圖；如物體上無電，即無此種作用。至於驗電器之構造及其說明，當於 §725 中再為詳述之。

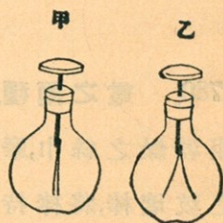


圖 395。

電擺上之小球，或其他之輕物體，最初雖被有電之物體吸引而去，然一旦既與有電物體接觸以後，轉被有電之物體斥開。

關於有電之物體對於輕物體或引或斥之作用，當於後面詳述，今先述關於有電物體之根本作用之實驗。

§709. 電之引斥力。

如圖 396，用絲線兩條，繫於固定之橫柱上，下端各懸一鈎，以備乘棒之用。另備絲巾摩擦兩條玻璃棒，使其生電，又備絨布摩擦兩條火漆棒，亦使其生電。先將其中之一條，垂在鈎上，然後將其他之棒上有電之部分，執近在鈎上者之有電部分，即知

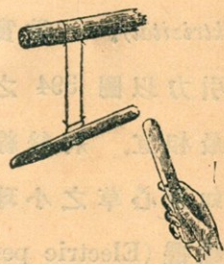


圖 396。

在鈎上者若爲玻璃,則斥開其他之玻璃棒,而吸引火漆棒;
在鈎上者若爲火漆棒,則斥開其他之火漆棒而吸引玻璃棒。

由此實驗觀之,用絲巾摩擦玻璃棒時,棒上所生之電,與用絨布摩擦火漆棒時,棒上所生之電,對於其他之帶有電之物體,呈正相反對之作用。生電本不限於此兩種方法,其他尚有種種,但無論用何種方法,生出之電,其作用均與由此兩種方法所生出者之中的一種,完全相同。若與用絲巾擦過之玻璃棒上之電相同,對於其他用絲巾擦過之玻璃棒,則斥逐之,對於用絨布擦過之火漆棒則吸引之;若與用絨布擦過之火漆棒上之電相同,對於絲巾擦過之玻璃棒則吸引之,對於絨布擦過之火漆棒則斥逐之。

凡與用絲巾擦過之玻璃棒所生之電同種類者,曰陽電 (Positive electricity; *positive Elektrizität*), 通常用正號,即 (+), 表之; 與用絨布擦過之火漆棒所生電同種類者,曰陰電 (Negative electricity; *negative Elektrizität*), 通常用負號,即 (-) 表之。除此兩種而外,不能更有其他之電。由上述之實驗,遂得

[定律] 凡具有同種之電之物體,彼此相斥;具有異種之電之物體,彼此相引。

注意: 1. 本章最初所述之實驗,即凡有電之物體,均能吸引輕物體。由此一點觀之,兩種之電既相反對,似不應生此同樣之作用,但實際則因種種複雜情況始呈此象,當於

§724 再爲詳述，與兩種電之正相反對，並無衝突之處。

2. 電擺或其他之輕物體，一旦附着帶電物體以後，轉被其斥離之理，亦極簡單。因輕物體附着於帶電物體時，即有一部分之電，由帶電物體移至輕物體之上，兩方成爲帶有同種類之電，故互相斥逐。

3. 因此，如將已知種類之電，加於電擺之上，然後持近其他帶有電之物體，即可由其或斥或引，而判斷此物體所帶之電爲陰爲陽。

§710. 庫倫定律 有電物體間作用之力之大小，用上述之簡單裝置，雖不能得達精確之結果，但由他種精密之實驗研究，得知庫倫定律如下：

[定律] 有電之兩物體間之引力或斥力，與此兩物體間之距離之平方爲反比例，與兩物體上所有之電量之乘積爲正比例。

例如甲乙二帶電物體，如定甲之電量加倍，乙之電量及其距離均不變，則引斥力當爲前此之二倍；又如甲乙兩物體之電量各加一倍，但其間之距離照舊不變，則引斥力當爲前此之四倍；又如甲乙兩物體之電量各加一倍以後，再將其間之距離增加一倍，則引斥力即與前此完全相同。

§711. 電量之單位 帶有等電量之兩物體，相隔 1 厘米之距離時，彼此互相作用之引斥力，當然須由於電量之大小

而定，但若此力適等於 1 達，則兩物體之電量，自成一定，此一定之電量，即用為測定電量之單位。

將單位電量之定義與庫倫定律合併之，設有 e 及 e' 之電量之兩物體，相隔 r 厘之距離時，此兩物體間彼此作用之引斥力，等於 $\frac{e e'}{r^2}$ 達

電量之單位除上述者而外，尚有一種，名曰庫(Coulomb)，詳見 §756，較此處之電量單位大三十億倍，大抵均用於電流方面，如以之表靜止之電量，未免過大，故不相宜。

[問] 在一點上繫等長之絲線兩條，於其下端各懸一輕小物體，如加以同種之電，則因斥力作用，兩線互相分開。今試假定兩線之長各為 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 厘，兩物體之重各為 1 厘，受同量之電後，兩絲張開之角度為 45° ，則各物體上所有之電量，即與此節所述之單位電量，大略相等。試證明之。

[答] 如圖 397，兩線之角度既為 45° ，則 AB 間之距離當為 1 厘。PP 表物體間之斥力，其方向為水平，WW 表重力沿鉛直之方向作用，此兩力之合力為 RR，與線之張力成平衡。合力對於各分力之角度，同為 45° ，故 P 恰與 W 相等，即等於 1 厘之重，與 1 達之力大

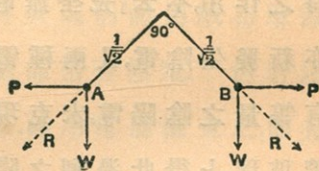


圖 397。

略相同，故兩物體相隔 1 厘之距離時，彼此相互之斥力，大約等於 1 達，故此時各物體所有之電量，約為一單位電量。

§712. 兩種之電同時發生

試一檢查擦過玻璃棒之絲巾，即見其帶有陰電，且若用適當之方法檢查，如 §736 所述，即知其電量與玻璃棒上所生

之陽電之量恰相等。又同樣檢查擦過火漆棒之絨布，即知其所帶之陽電恰與火漆棒上之陰電量相等。同樣事實，在一切情形中均通有之，即

[定律] 甲乙兩物體互相摩擦時，甲上如生有若干電量，則乙上亦必生相等相反之電量。

§713. 生電作用之看法。 陰陽兩種之電，其性質本正相反對，故一物體之中，假使有等量之陰陽電，則對於他物體所生之電作用，彼此恰相抵消，完全無所表現，與完全未曾有電者相同。即一物體毫無電量時，與有等量之兩種電時，事實上既無何種區別，當然無從加以判斷，謂之為無電固可，謂之為有等量之兩種電，亦無不可。例如言絲巾與玻璃摩擦時之作用，不云『完全無電之物體，一方新發生陽電，同時他方亦新發生陰電，且兩種電量恰相等』，而云『玻璃與絲巾，本各有等量之陰陽電，未克現出，經摩擦以後，陽電由絲巾移至玻璃，玻璃上得此過剩之陽電，故表現出陽電之作用，絲巾上因失去此不足之陽電，故表現出陰電之作用』，亦未始不可。

與其謂為電忽然而生，忽然消滅，勿寧謂為電由一處移至他處，較便於理解，故上述之兩種說法，當以後述之一種，為能表出事實。故上述之定律，可以換言之如次：——

[定律] 電不能生，亦不能滅，凡不呈電性之物體，均由於陰陽兩種電量之作用，彼此恰互相抵消，成為中和

(Neutralization; *Neutralization*) 之狀態所致。如有少許之陰陽電分存於兩物體之上，則一方即現出陽電之作用，他方同時亦現出陰電之作用。換言之，起電必由於陰陽兩種之電之分離。

以上雖係對於兩物體，互相摩擦所起之作用而言，但如推廣之，以論一般起電之時，亦莫不如是，無論由於任何作用，在任何地點發生若干之陽電，同時必在他處有等量之陰量發生。

注意：玻璃與絲巾摩擦之時，不云有少許之陽電由絲巾移至玻璃，而言有若干之陰電由玻璃移至絲巾亦可。

§714. 導體與非導體。

試取附有玻璃柄之金屬棒，手持玻璃柄而用絨布摩擦金屬之部分，以電擺檢查之，即見金屬部帶有陰電。但若以手指略觸及金屬部分上之任何一點，再用電擺檢查之，即見其上，已完全無電存在。

最初在金屬部分現出之電，因手指觸及金屬部分，故經由手指傳導而去。但金屬部與手之間，若有玻璃柄介在時，電即無從消去。由此觀之，金屬或手指等類之物質，可以容許電之通過，而玻璃則不能。一般之物質，均有此種之差別。即

[定義] 凡如金屬或手指等類物質，有能容許電之通

過之性質者，曰**導體**(Conductor; *Leiter*)，如玻璃等類，不

容電之通過者，則曰**非導體**(Nonconductor; *Nichtleiter*)。

或曰**絕緣體**(Insulator; *Isulator*)。

前曾用手執火漆棒，以絨布摩擦之，作生電之實驗時，因火漆為非導體，方屬可能，否則所生之電立即逸去，無從實驗矣。其他如絲巾，硬橡皮，瓷器，蠟類，均為重要而又有用之絕緣體。

絕緣體之名因其斷絕電之通路而來，欲使導體保留其所帶之電，非用此種絕緣體以為之柄不可。

注意：導體與非導體之區別，並無絕對之界限，通常稱為非導體之物質，實際亦能導去少許之電。

又在上述之實驗中，雖同一為導體，然亦有程度之不同，如金屬則為良導體，人之手指則遠在金屬之下。又有時(如§748以下所述關於電流之處理時)人之手指，亦可以看成非導體。故此種物質，或稱為**半導體**(Semi-conductor; *Halbleiter*)。

§715. 導體上之靜電。

在導體中通過之電，即所謂電流，與上述之引斥力作用不同，另有一種特殊之作用，當於第十篇詳述之。與之相對在靜止狀態之電，曰**靜電**(Static electricity; *statische Elektrizität*)。

在非導體上之電，其移動不甚自由，故與最初所起時之狀況一樣，存於其上。若將電付與導體時，則不問最初付與

之時，爲導體之任何部分，均立即散布於導體之全體，其分佈狀況完全由其本身之形狀，及在其近傍之其他物體之狀況而定，

§716. 關於導體之靜電的性質，有一極緊要之事實。

試取外形完全相同之導體，內部空虛者與內部充實者而比較之，其對於靜電之作用，完全同等，兩者之間不能認出有何區別。

導體之內部，不問是否用其物質充滿，均爲同樣，則充滿內部之物質，對於靜電之作用，完全無關係可知，因之內部不應有電量存在。即電只能存在於導體之表面。故

[定律] 導體上靜止不流之電，只能存在於其表面上。

§717. 在導體表面上之電，對於面積，決不能以同一之比例分佈於各處。今試就帶電物體之近傍並無其他物體存在時，檢查導體表面各部分之等面積上之電量，而比較之，其結果如下；——

- (1) 導體若爲球形，則電在表面上作一樣之分布。
- (2) 導體若爲棒形，兩端部分之電較中央濃厚。
- (3) 導體若爲圓板形，邊緣部分之電較中央濃厚。
- (4) 導體若爲卵形，其尖端部分之電最濃。

一般言之，導體之表面中，彎曲最急之突出部分所載之電最濃。其窪下部分之電最少(參照次節)

導體上如有突出之尖端如針尖時，其電之分佈當於後面 §740 處述之。又將兩導體用金屬細線連接之，使其成爲一個導體，而加電量於其上，此時兩導體上所分佈之電之狀況，當於 §734 中述之。

§718. 中空之導體。

由上述中空之導體與內部充實之導體對於靜電之性質完全相同之事實，可以推知。

中空之導體 (如其內部無其他物體存在) 帶電時，內面並無電存在。

雖非完全密閉之中空導體，如開有一小口之器具，其小口處無甚影響，亦與密閉之中空導體相同，內面并無電量存在。不特小口之導體如是，即稍長之圓筒，其兩端開放，亦復如是。或用金屬網製成之中空導體，內面亦完全無電。

欲用實驗證明此說，可如圖 398，將圓筒狀之導體，安放在絕緣臺上，而加以電，如取一附有絕緣柄之小金屬板，即所謂驗板 (Proof plane; Probescheibchen) 者，形如乙圖所示，插入圓筒，使驗板與筒之內面相觸，然後取出，用金箔驗電器檢查其有無帶電。驗板與圓筒之內面相觸時，此板即成爲圓筒內面之一部分，故圓筒

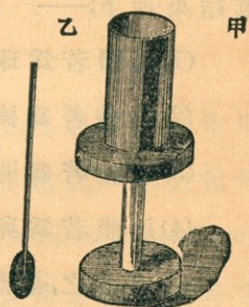


圖 398。

內面若有電，則其一部分之驗板上亦應分佈若干，故持其絕緣柄由圓筒內取出時，應仍留在板上。但用驗電器檢查之結果，並未見有少許之電存在。故知圓筒內面不能有電。

對於金屬網製成之導體，亦可由同樣之實驗證明之。

注意：(1) 導體表面之凹處，與突出處恰相反對，電之分佈極少，愈凹則愈少，幾於完全無電，圓筒以及其他之中空導體之內面，不過凹處最著之一例而已。

(2) 中空導體之內面極深處，即令有突出之處，仍不能有少許之電存在。例如用絲線懸一小球形之導體，而加以電，垂入圓筒中，使其與圓筒之內面相接觸，小球與圓筒即成爲一個導體，球亦成爲中空導體內面之一部分，故原在球上之電，均出至表面上，不少殘留。只須由其中取出，再用驗電器檢查之，即可證明。

§719. 起電之種種情況。

以上所述，雖係就由摩擦發生之電而言，但陰陽兩電，除摩擦而外，尚有種種方法可以發生。如是發生電之作用或其裝置中之主要者如下：——

(1) 次章所述之靜電之誘導。

(2) 次篇即第十篇所述之電池 §748，電磁誘導 (§833)，及熱電流之裝置 (§769)。

以及下節所述之焦電及壓電等。

§720. 焦電。

有種結晶體，其溫度變化時，即有一部分發生陽電，他部分發生陰電之性質。如是而生之電，曰

焦電 (Pyroelectricity; *Pyroelektrizität*)，如圖 399，為一電氣石之結晶，溫度降下時，

A 端發生陽電，B 端發生陰電。又溫度昇高時，恰與此正相反對。

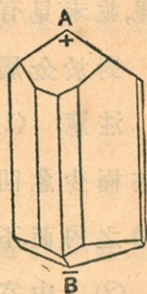


圖 399。

通常檢查此時兩端所生之電之方法，係將硫黃及鉛丹之混合粉，用篩向此

種溫度正在變化中之結晶體篩下。如此，則當搖篩中，細粉互相摩擦，硫黃粉帶陰電，鉛丹粉則帶陽電，故結晶體有陽電之部分上，附有硫黃，故呈黃色，而有陰電之部分上，則附有鉛丹，故呈紅色。即黃色者為陽極，紅色者為陰極，觀色即知其何處為陽，何處為陰。

§721. 壓電。

有種結晶體其某一方向受壓力作用時，有一部分發生陽電，他部分發生陰電之性質。如是而生之電，曰壓電 (*Piezoelectricity*; *Piezoelektrizität*)。例如方角柱之水晶，將其相對之兩稜夾住，施以壓力，或將與柱垂直之平面夾住，施以壓力，則各稜均生電，相鄰之柱，其電恆相反。取前節所述之硫黃與鉛丹之混合粉，仍用篩過之方法，撒佈於其上，即可檢出，

第二章 靜電之誘導

§722. 靜電之誘導.

靜電之誘導，爲使導體內陰陽電分離之作用。例如圖 400 之 BC 最初爲毫無電性之導體，如將一帶陽電之物體 A，不問其爲導體或爲非導體；持至 BC 之近傍，則原在 BC 內成中和狀態之陰陽電，立即分開。



圖 400.

其與 A 上之電反對之陰電，行至與 A 最接近之一端 B，與 A 上之電相同之陽電，則行至與 A 相隔最遠之一端 C，故電在 BC 上分佈情形，當如圖中之 (+) (-) 所示。若持來之 A 上之電爲陰電，則 B 端即成爲陽，C 端即成爲陰。凡如此種，

[定義] 一導體之近傍有電存在時，導體中之電因受其作用而爲分兩種之現象，曰靜電誘導 (electrostatic induction; elektrostatische Induktion)。

欲實驗此項作用，可用圖中之裝置，而以 §718 所述之驗板，與 B 之部分或 C 之部分相觸，分取其上之電之一部分，用 §709 之注意(3)之方法以檢查其電性。

或用下述金箔驗電器 (§725)，亦可作誘導現象之實驗。

觸及 B 上始可。

應用此節所述之作用，可得一種裝置，不必依賴摩擦，亦能聚集多量之電，當於 §727 及 §730 中，再詳述之。

§724 最初所述電之實驗，為電能引近輕物體，此實由於誘導之作用。在輕物體中如電分離成為上圖之 BC 之狀況，則與有電物體 A 接近之一端，發生反對之電，為 A 所引，其他之一端雖生同種之電，為 A 所斥，然因其距離不及反對之電為近，故引力與斥力除互相抵消去一部分外，尚餘有一部分之引力，結局輕物體即以此力被引至 A。既與 A 接觸以後，則由 A 上分來之一部分電，與 A 之種類相同，故反被斥而去，前亦曾述及之。

由此說明，則用絲巾摩擦玻璃，與用絨布摩擦火漆，所生之電雖正相反對，而對於引近輕物體以及接觸後轉又斥逐等項作用則同，應不難了解。即當輕物體尚未與玻璃或火漆接觸之時，玻璃上之電與火漆上之電誠屬反對，然由玻璃誘導而生之電，與由火漆誘導而生者，亦正相反對，均與引起誘導作用之電源相反。故無論在何種時候，均一律發生引力之作用。

§725. 金箔驗電器

檢查物體有電與否之器，通稱之曰驗電器 (electroscope)；

Elektroskop)。前於 §708 所述之電擺，實亦驗電器中之一種。當時並曾提及如欲作更敏銳更精密之實驗，須用金箔驗電器。此器由一玻璃瓶而成，瓶口插入一絕緣體之塞，如白蠟或硬橡皮等類。由塞上插入金屬棒一條。棒之上端，有一金屬球或金屬板，如圖 403 之 B；下端則有細長之金屬兩張，密接垂下。由 B 至 C 之金屬成爲一導體，而由絕緣體之瓶塞支住。

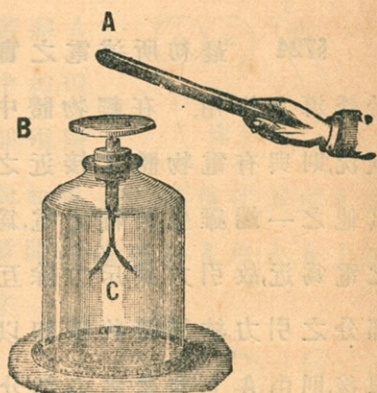


圖 403。

若將一有陽電之導體

A，持近此導體之 B 之部分，則由誘導作用，使導體內之陰陽兩電分離，與 A 反對之陰電，行至 B 之部分，與 A 同種類之陽電，則行至 C 之部分。兩張金箔所得之電，均屬同一種類之陽電，因彼此相斥之結果，遂分開如圖所示之狀況。

如持來之 A 爲陰電，亦復同樣，不過此時兩張金箔所得之電，同爲陰電而已，仍由相斥而行分開。但若 A 上無電，當然即不生此種作用。故欲檢查物體有電與否，只須將其持近 B 處，視 C 之金箔張開與否，即可決定。

A 若有電，將其放在不十分與 B 接近之處，使 B A 間保持相當之距離，檢查完後，再將 A 取去，則 C 處張開之金箔，又復垂下如故。因分離而至於 B 之部分與 C 之部分上之等

量反對之電，至此又復混和而成中和，故導體之全體，恢復其舊有形狀，與無電時相同。但若 A 與 B 過於接近，或與 B 接觸時，其上之電即有一部分移至 B 上。以後雖再將 A 取去，亦有同名之電，殘留於 B 之上，故其金箔依然張開。

§726. 用上述之方法，雖可檢出物體 A 上有電與否，然不能知其所有之電，究為陰電抑為陽電。如並其電之種類亦欲查知，則當另用他法。即先將已知其種類之電，加少許於導體 BC 之上，例如用絲巾擦過之玻璃，或用絨布擦過之火漆，與 B 之部分略為觸及，令其上之電，移一部分至 BC 之上，或如次列問題之方法亦可。如此，則金箔即張開成一適當之角度，然後再將欲檢查之物體 A，次第持近 B，此時，如金箔愈張愈大，則 A 上之電與驗電器上原有之電，為同一種類。如金箔間之角度，漸次愈縮愈小，則 A 上之電與驗電器上原有之電，為反對之種類。不過電若為反對時，最初固然愈收愈小，以至於完全閉合，但一旦閉合以後，轉又徐徐張開。

此種作用可以簡單說明之如下。例如 BC 之導體最初所得之電為 (+)，如圖 404 之 (1)，而所欲檢查之物體 A 上之電，亦為同名之 (+)，則因 A 之誘導作用，將 B 上之 (+)，驅至遠方，轉由其後方將 (-) 集合至於 B 上，其作用在使 C 處金箔上之同名之電，愈加愈多，故金箔愈行張開，如 (2)，(3) 所示。若欲檢查之物體 A 上之電，與驗電器上原有之電相反，則由

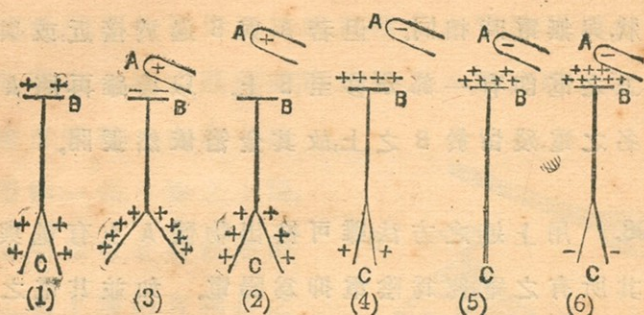


圖 404.

A 之誘導作用，將在 C 處之電，引至 B 處，故 C 處之電愈減愈少，如(4)及(5)，金箔間之角度，因之次第收小，至 C 上無電之時，金箔亦同時相合垂下。此時若再使 A 與驗電器更行接近，其誘導作用，當更大，B 上所集之 (+)，若較 C 處原有之 (+) 全體更多時，C 上轉生出 (-)，金箔又復張開，如(6)所示。

[問] 將有陽電之物體 A，持近金箔驗電器之球部 B，令金箔張開若干角度，此時用手指觸及 B 上之一點，金箔應立即閉合垂下，然後指與 B 分開，再取去 A，金箔又復張開。但手指觸及時，不可遮斷 A 與 B 之間。試說明其作用，且決定此時箔上所得之電為陰抑為陽。

(答) 手指觸及 B 點時，導體 BC 與手指，人身，及地球，全體連結成爲一整個之導體，此導體受 A 之誘導，故與 A 同名之陽電不能在 C 上停留，經由人身而行至最遠之地球之上，故 C 之箔相合垂下。此時由誘導而生之陰電，依然存在於與 A 接近之 B 之一端，故手指雖與之分離，仍存留於其上。但若其後再取去 A，則陰電已不受 A 之拘束，立即散佈於導體 BC 之全表面上，C 處之金箔上，亦得有其一部分之陰電，故復張開。故用此法加於驗電器上之電，與 A 上之電正相反對。

§727. 電盆

由前 §723 所述之作用造成之集電用器械中，有一種名曰電盆 (electrophorus; *Elektrophor*)。

電盆由兩部分而成，一部分爲一金屬製淺盆，內用火漆或硫黃，石蠟等類，溶化後填滿凝固，一部分爲一金屬蓋，其直徑較盆之邊略小，而有一絕緣體之柄。圖



圖 405。

405 表其橫斷面圖，上爲蓋，下爲盆。

今用絨布或毛皮等類，摩擦盆內填滿之物質，使其發生陰電，將蓋放在其上，以手指略觸及蓋上，立即離開，再持柄將蓋取下觀之，蓋上即生陽電。或用 §26 所述之方法，亦可檢出。

蓋在盆上，因盆內填滿之物質，其表面凹凸不平之處甚多，故蓋之下面，並未全部與此種物質接觸，真正接觸之處，不過如圖上所示之三四處而已。且此等物質，均爲非導體，故除直接接觸之三四點以外，其他各部分上之陰電，對於蓋之作用，與在帶電物體近傍而受其誘導作用中之一導體無異。故施以上述之處理方法，由 §723 之作用，蓋上得有與盆內物質，正相反對之陽電。

當此作用進行中，蓋內所填之物質上之陰電，即成引起誘導作用之電源，仍完全殘留於其上，未曾稍減，將蓋取去，令

其上所生之陽電傳至他處，然後再放在盆上，仍與前用同一方法，不必再用絨布等摩擦盆內所填之物質，重演數遍，均可取得陽電。

注意：上述之說明中，下面之金屬盆，似毫無作用，實則不然。因盆底放在桌上，並未絕緣，當蓋取去之時，盆之內面，由誘導作用而得陽電，即與內填物質相接之一面，帶有陽電，故能將內填物質上之陰電留住，使其不易散逸。



圖 406。

§728. 利用填有絕緣物質之金屬盆，由其取出若干回之陰電，亦可辦到。法於盆上附一絕緣體之柄，用手執蓋，將盆覆在蓋上，或覆在其他與大物體連接着之平面導體之上，以手指略觸及盆底，如圖 407 之甲。如此則內填物質上之陰電，對於其近處之導體面上，誘出陽電。而此兩電對於其他物體之作用，適足相消，故盆之金屬上，幾無誘導作用發生，故亦無電。其

次取去手指，持絕緣之柄，將盆取上。如是則內填之物質之陰電，在盆之金屬上引起誘導

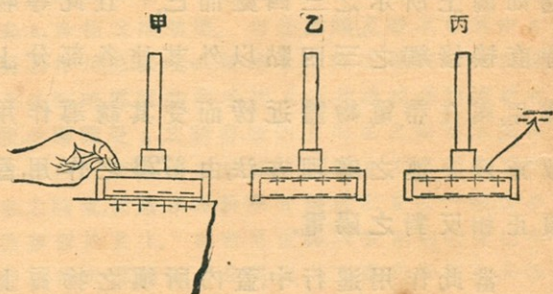


圖 407。

作用，內面發生陽電，外面發生陰電。陽電爲內填物質上之陰電拘束，故盆之金屬如與其他之導體有連絡，則只有陰電移至其他之導體上如丙。其次再如甲行之，一切恢復舊狀，以後再演若干遍，每次均可取出陰電，移至其他之導體上。

§729. 電花

在電盆之實驗中，若將其帶有陽電之蓋之邊緣處，持近手指或其他之導體，如其間之距離甚近，則聞發出細音而有閃電形狀之物在其間現出，曰電花 (spark; *Funken*)。電花發生以後，再用驗電器檢查，蓋上又不見有電存在。即發音與電花同時出現，電亦完全消滅。

此時之作用，可用圖 408 說明之如下。最初以手指接近蓋邊時，指上因誘導作用而生陰電，與蓋上所帶之陽電，互相引

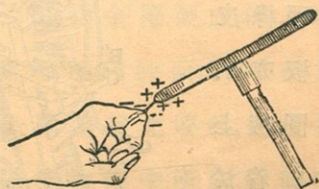


圖 408.

近。如兩者間之距離過近，兩者間作用之引力亦愈大，故衝破其間之空氣，互相混合，結果遂成中和狀態，雙方之電亦同時消滅。至於此時所發之微音，以及現出之電花，即電衝破中間空氣而通過時之現象。不僅此一實驗爲然，一般凡

兩種電之間有空氣或其他之絕緣質存在時，如其相互之引力過大，遂衝破其間之絕緣質而相中合，同時有音與電花發出。

此種動作又稱爲放電 (discharge; *Entladung*)

§730. 誘導起電機。

應用上述電盆之原理以聚集多量之電之器械，曰誘導起電機 (influence electric machine; *Influenzelektrisierungsmaschine*)。誘導起電機之種類甚多，其中使用最廣者，爲威姆斯哈斯特 (Wimshurst) 之起電機。其原理如下：

器械之說明：圖 409 之 AA'，爲兩平面圓玻璃板，互相平行而且極爲接近，或用硬橡皮之板亦可。各圓板上，有固着於板上之小輪，其上有溝，適當圖

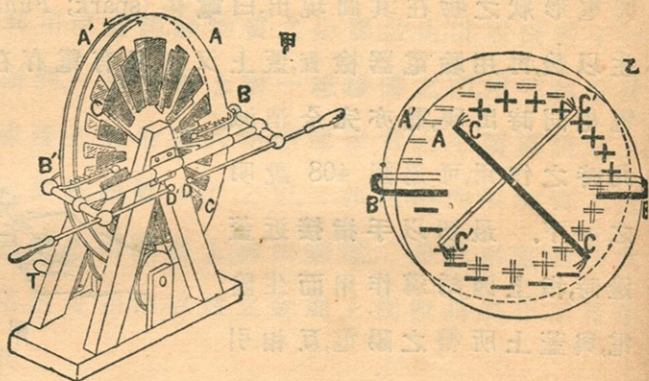


圖 409。

上支持軸棒之部分後面，爲其遮蔽，故不能見。轉動時所用之柄 T 之軸棒上，亦有較此略大之輪，輪上亦有溝，輪有前後二個，圖中僅見其半，此兩輪之溝與板上小輪之溝，各用繩一條掛於其上。故用手轉動 T，則兩圓板 AA' 亦同時轉動。但一方之繩，如圖中所示，在柄上之輪與圓板上之輪之間，扭轉

一次，故固定在柄上之兩輪，雖沿同一方向轉動，而 A 與 A' 之轉動方向，則恆互相反對，如圖中箭頭所示。A 若沿順時針方向轉動，A' 即沿逆時針方向轉動。

兩圓板之外面，均貼有若干扇形之錫箔狹條。CC 為一固定之金屬棒，裝在板 A 之外面，方向不正而斜，兩端各有一金屬細絲製成之刷毛，正向板 A，且與之觸接。故當圓板轉動時，板上所貼之錫箔，其轉至左上與右下之位置者，必與此兩刷毛作一度之接觸，然後離去。他一面之板 A' 之後，亦有同樣之裝置，但其金屬棒之 C'C' 之方向，則與 CC 相垂直，斜向右上與左下，在甲圖中雖不可得見，而在乙圖中則可見之。

圓板之兩旁，更有固定之兩曲棒 BB，由金屬製成，棒上有齒，棒曲作一 U 字形，齒在其內面，故齒均正向板面，AA' 則在其間。B 與 D 之間，B' 與 D' 之間，均有金屬棒為之連絡，各成爲一個導體，在中央柱上，裝有玻璃之橫棒，如圖中所示，以支持此 BD 與 B'D' 之導體，使其絕緣。BD 及 B'D' 爲此器械中集聚陽電與陰電之處，若 D 與 D' 相距過近，則在其上所蓄集之電，即開始放電。在多數之器械內，均將 B 與 B' 連結在次節所述之來丁瓶上，令其蓄集之電加多，但此乃一種附屬品，與起電之作用，並無關係。

實驗：最初先用適當之方法，發生少量之電，加在板 A' 上與 CC 相對之近旁錫箔條上，(或加在板 A 上與 C'C' 相對之近旁錫箔之上亦可)，然後轉動其柄，使兩板沿箭頭所示之方

向轉動， BB' 之上即生多量之電，如將 DD' 間之距離縮短，其間即見有電花發生極盛。

§731. 作用之說明：此器械發生之電，其原理與電盆處所述者，完全相同。今試假定以 $(-)$ 之電，加在板 A' 上左上之錫箔，即與 C 正相對之錫箔條，先就兩圓板之上半面論之，正在其前面之板 A 上之錫箔，一面受其誘導，一面與 C 之刷毛作一度之接觸，隨即離開，恰與電盆之蓋同樣，故均得有若干之 $(+)$ 電，向右方而去。行至右方達於 C' 之刷毛之上方時，此等 $(+)$ 之電，與板 A' 上錫箔呈同樣作用，故在板 A' 上之錫箔，與 C' 之刷毛作一度之接觸，隨又離去者，均得有若干 $(-)$ 之電，向左方而去。故即令最初只有一條錫箔，得少許之 $(-)$ 電，亦可由其對於板 A 之錫箔及板 A' 上之錫箔間之相互誘導之作用，使板 A 之錫箔，全體均得 $(+)$ 之電，向右而去；板 A' 上之錫箔，全體均得有 $(-)$ 之電，向左而去。而此等有電之錫箔，數目既多，則其誘導之作用亦愈隨之加強，各錫箔上所生之電亦次第加多，全體之作用，因亦漸次加強， $(+)$ 之電陸續向右， $(-)$ 之電陸續向左，進行不已。

以上所述，均僅就兩圓板之上半面而言，同時其下面亦有作用。板 A' 之左上錫箔，所有之 $(-)$ 電，對於與導體 CC 接觸中之板 A 之錫箔，發生誘導作用，因此而被斥開之 $(-)$ 之電，生於與下面刷毛接觸中之板 A 上錫箔之上，向左進行至於下面與 C' 相對之位置。由同一之作用，於下面板 A' 上，與

刷毛 C' 作一度接觸隨即離開之錫箔上，發生 (+) 之電。而此 (+) 之電，又於板 A' 上之錫箔，與下面 C 之刷毛相接觸之處，引起 (-) 之電，與上半段呈同一之作用，而此等誘導作用，與由上半部分之圓板上 (+) (-) 之電所生之誘導作用，恆互相助長。例如就與 $C'C'$ 接觸着之板 A' 上之上下錫箔所起之誘導作用而言， A 之上半之 (+) 與其下半之 (-)，互相輔助，於與上面之 C' 接觸之錫箔上，發生 (-)，而於與下面之 C 相接觸之錫箔上，發生 (+)。

再將兩圓板全體之電之分佈綜合言之，為避去繁雜計，將各錫箔省略不畫，其狀況如乙圖。即 (+) 之電，在板 A 之錫箔上者，則由上方運至右方，在板 A' 之錫箔上者，則由下方運至右方，即凡屬 (+) 之電，均運至右邊與 B 之齒相對之位置。凡與尖端相對者，其作用與連結於導體上相同（詳見 § 41），故運至齒前之 (+) 之電，即經由齒處而移至 B 之導體上面。同時 (-) 之電，由板 A' 之上方，及由板 A 之下方，同運至左邊與 B' 之齒相對之位置，更經由齒處而移至 B' 之導體上面。而由 CC 及 $C'C'$ 分作四分圓之四部分中，右邊之四分圓 $C'BC$ 上之 (+)，與左邊之四分圓 $CB'C'$ 之 (-)，更於與 CC 及 $C'C'$ 之刷毛作一度之接觸隨又離去之錫箔上，發生誘導作用，兩種之電更行分離。

此處雖說於實驗之最初，須將 (-) 之電少許加於板 A' 之左上之錫箔，若不加以 (-) 之電而加以 (+) 之電亦可，

不過一切之電之分佈，與圖上所表示者，均完全正相反對而已。又最初若加電於板 A' 之右下，或板 A 之右上或左下之錫箔，所生之作用及電之分佈，均不難推知：

注意：此種誘導起電機之作用，如上所述，最初雖僅有少許分量存在，不久即集為巨量，即最初不必故意加電，或由摩擦以及其他作用，亦可於錫箔上生出電，行至上述之位置立起作用，仍可得大量之電。

§732. 來丁瓶。

來丁瓶 (Leyden jar; *Leydener Flasche*)，亦為應用誘導作用而集多量之電之器械。圖 410 之甲為通常附屬在起電機上作圓筒狀之來丁瓶之縱斷面，乙為不能附屬在起電機上之通常形狀之來丁瓶之外狀。兩者不同之處，只在其頸部有無縮小之一點而已，其他全部，均完全相同。

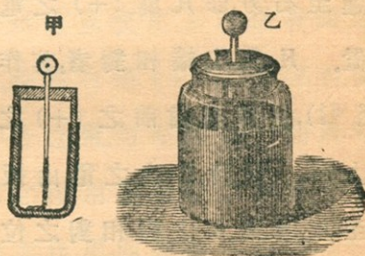


圖 410。

無論何種，均於其內外表面，由器緣以至器底，全部貼滿錫箔，并由蓋上插入一金屬棒，棒之上端為一球，下端連一金屬鏈，垂至瓶底，與內面之錫箔相接觸。簡言之，即此裝置由兩導體相對而立，其間隔一極薄之絕緣體而成，內外錫箔即導體，玻璃即絕緣質。瓶上之金屬球以及瓶底之鏈，均不過

用以連絡內外導體之裝置而已。

本來玻璃有將空氣中之水蒸氣引至其表面上之性質，玻璃之表面上，恆有一極薄之水膜，故電極易沿玻璃之面傳導。來丁瓶亦然，玻璃之表面若被水潤濕，則內外之錫箔即經由玻璃面越過瓶口而相連絡，失去其絕緣之性質。故通常之來丁瓶均於錫箔以上之部分之玻璃面上，滿塗假漆，以防其吸引水分。

來丁瓶之構造既明，更進而研究其所以能蓄積多量之電之作用。將來丁瓶放於導體之臺面上，令其球部與起電機之一發電部連絡，轉動起電機，所生之電即進入來丁瓶之內層錫箔上。內層錫箔既已有電，則由誘導作用，在外層錫箔上生出反對之電。外層錫箔經由導體之臺面與地球相通，故同名之電被逐而出於地上。故外層錫箔上之反對電，與進入內層錫箔之電，分量恰相等（參照§36之例2）。如是，互相反對之等量之電，隔極近之距離存在，故其對於在他處之電之引斥作用，恰互相抵消。即內層之錫箔上雖已蓄有不少之電，但其後若有欲繼續移來之電，此內層之錫箔對之亦不現斥離之作用，故凡有來者，均可收容，所來既多，則在外層之錫箔上，亦誘出等量之反對電，內外之電量既恆相等，則對於後來之電，仍不生斥逐之作用，故雖陸續來電不已，而錫箔對之仍依舊可以收容。因此來丁瓶上可以蓄積多量之電。

注意：(1) 來丁瓶之作用，既如上述，故若將其放在絕緣體上，而欲使其蓄積多量之電，即不可能。非使其外層之錫箔上同時亦有等量之反對之電發生不可。

(2) 又將來丁瓶附屬在起電機上時，即無須如此。此時不必將其放在導體之臺上，使與地面連絡而生誘導之電，只須將外層之錫箔連絡於他一發電部即足，如圖 411 之甲。又起電機上如附屬有兩個來丁瓶時，則使各瓶各與一發電部相連，而以一導線

將兩瓶之外層連絡即足，如乙圖。如此，則在兩外層錫箔相合而成之導體中之電，自行分開，俾與左右兩內層之電相等，故能集成多量。

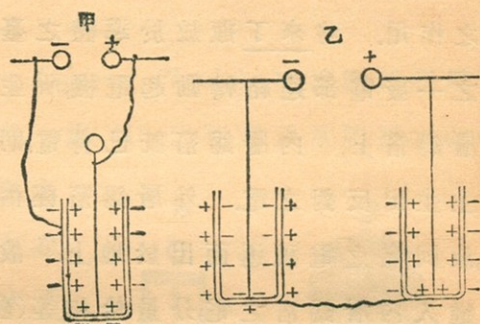


圖 411。

§733. **實驗：**欲由實驗證明來丁瓶上，果能蓄積多量之電，其法如下：將起電機上放電用之球部，即圖 409 之 DD' ，放在相當之一定距離，以一定之速度轉動起電機，而比較裝有來丁瓶時與未裝來丁瓶時，所放電花之狀況。未裝來丁瓶時所起之電花，比較甚弱，且所隔之時間甚短；有來丁瓶時，所起電花甚強，但須隔較長之時間。時間之間隔，表示在其

間所起之電，全部均可蓄於來丁瓶上，即相隔愈久者，其所集之電愈多。至電花之強弱，則表示一時中和之電量之多寡，即中和之量愈多，則電花愈強。

注意：關於處理蓄有電之來丁瓶，應當注意之事項，當於 §739 中詳述之。

§734 導體之電容

用金屬絲將兩導體連結，而加以電時，此兩導體上所分佈之電量，恆成一定之比例。如導體甲上之電量為導體乙上之 n 倍，則謂甲之電容 (capacity; *Kapazität*) 為乙之 n 倍，

[定義] 若干導體之間有金屬絲連絡，電之交通極其自由時，表示各導體上所分佈之電量之比，曰電容。

例如有一球形導體，又不受其他之影響時，由理論可以證明其電容與其半徑為正比例。又如將半徑等於 5 寸之球，與半徑等於 1 尺之球，用一導線連絡，而使其間相隔之距離甚遠，相互間之誘導作用，不致生出影響時，此兩球上所得之電量之比，等於 1 與 2 之比。

由此可知，一導體之電容，與其大小，形狀，以及其近傍有無他種導體存在，均有關係。前節之來丁瓶，即其最緊要之一例。將來丁瓶內層錫箔與其他之孤立導體連絡，(來丁瓶之外層錫箔，通常均看成係與地面連絡者)，而加電於其上，則由上述之作用，電之大部分進入瓶中，故來丁瓶之內層

錫箔爲電容甚大之導體。不僅來丁瓶爲然，一般凡

有寬廣表面之導體，隔極薄之絕緣體與其他之寬廣表面之導體相對而立時，其電容極大。

例如用石蠟浸

過之蠟紙若干張，如

圖 412 之 RR，夾入同

數之錫箔 SS' 彼此相



圖 412.

間，將每隔一層之錫箔由右方引出，連在一處，成爲一整個之導體 A，其餘各層之錫箔，亦爲每隔一層，由左方引出亦連成一片，成爲另一導體 B。如此則 A 與 B 彼此之面積均極廣大，又互相對立，且彼此之間均隔有一層非導體之蠟紙，故若將其中之一，如 B，連絡至於地面，則他一方之 A，即成電容甚大之導體。凡如此類，用絕緣體使兩導體相對而立之裝置，曰蓄電器 (condenser; *Kondensator*)。

一導體之電容，以電容與此相等之孤立球形導體之半徑表之。例如通常之小形之來丁瓶，其電容約爲三四十呎，即與半徑等於三四十呎之球形導體孤獨存在時之電容相等。又有用半徑等於 1 哩之孤立球形導體之電容之九千萬倍，即半徑等於九百呎之孤立球形導體之電容，用爲測定電容之單位，而稱之爲 1 渺 (micro farad) 者，表大量之電容時多用之。

注意：在理論電學上，則用電勢以表電容，其定義如下：

“使一導體之電勢成爲 1 時，所加於其上之電量，曰電容”關於此項可參閱 §760 及 §762 之注意。

§735. 中空導體之誘導

將圓筒形之導體 A，放在絕緣臺 D 之上，而連絡一驗電器 G 於其上，如圖 413 之狀況。其次用絲線懸一金屬球 C，其上加以少許之陽電，徐徐垂入圓筒之中觀之。球由外部漸次行至圓筒近傍時，最初本爲合閉垂下之金箔，次第張開。但球由圓筒口通過，進入筒內以後，無論其在筒底或在中間，或在橫壁，金箔張開之角度，均不生變化。

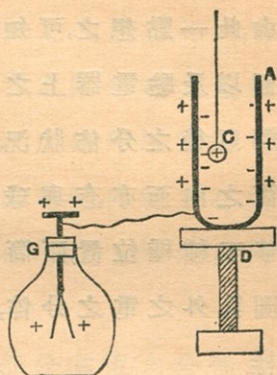


圖 413.

球在筒之內面，雖極接近，只要兩者之間不至發出電花，則取出球後金箔當然垂下，恢復其故狀。即球在筒中，金箔之所以能得張開，因與球上之電，同種之電，被驅至遠處，即驗電器上，亦有此項之電散佈，故金箔可以張開。至於與之相反對之電，當然須生於與球接近之部分，即在圓筒之內面。

再將球放入圓筒內一遍，注目於金箔之張開狀況，然後使球與圓筒之內面接觸，金箔並不受其影響，依然張開如故，但此時球已成爲圓筒內面之一部分，如 §718 之注意(2)，球上

及圓筒內面，均已無電存在。故球上原有之電，已分配在圓筒之外面及驗電器之上。

但球與圓筒內面接觸之前後，金箔張開之狀況並不稍變，由此一點想之，可知當球尚未與圓筒內面接觸之前，圓筒外面以及驗電器上之電之分佈狀況，當與球既與圓筒內面接觸以後之分佈狀況，完全一樣，與球上之電同名同量。故圓筒之內面亦有與球上等量而且相反之電。又球在筒內雖移至種種位置，而筒外之電分佈，並未受其絲毫之影響，故知圓筒外之電之分佈，與圓筒內並無任何之電存在時，完全一樣。

§736. 上述之實驗，實為下列兩大定律之一例。

[定律] (1) 中空導體之內面上，有與中空導體內部之電相等相反之電。 換言之：電量在其周圍之導體所誘導而生之反對電之總量，與其原有之量相等。

若有數個之帶電物體在於中空導體之內部，則由此等物體，在導體上誘導而生之電量，與各物體上之電量之代數和相等，而且種類相反。且在中空導體內之物體，不必盡為導體，即將玻璃絲巾等類之非導體放在其內，亦與此相同。

同時在中空導體之外面上，亦有與各物體之電量之代數和相等相反之電生出（當然係指中空之導體本來無電時而言）。故又可言“中空之導體為實驗上將各物體之電量

加成一處之方法”。

例 1. 用此定律可以由實驗證明由摩擦而生於兩物體上之電，相等又相反。例如用絨布摩擦火漆後，任將其一放入前圖之裝置之圓筒中，則金箔張開之角度均相同，若兩者同時放入，則金箔即不張開，表示兩者之陰陽電其量恰等。

例 2. 由此定律又可證明來丁瓶之內外層錫箔上，恆生相等相反之電。因外箔為一中空之導體，內箔為在其內部之帶電之物體，故有此現象。至於在外箔上所生與內箔同名之電，當然行至遠方不能現出。

[定律] (2). 被導體隔開之兩部分，其電之分佈，彼此完全無關係，一方之電之分佈，與他方完全無電在時相同。 換言之：電為導體隔住，即不能傳達其作用至此導體之後方，或導體能遮斷靜電之作用

§737. 電媒

以上所述之事項，對於非導體，不僅有不傳電之消極意義而已，此外尚有積極之意義。導體一方面有傳導電之性質，同時一方面又有遮斷其作用之性質，即

電之作用之傳達，為不傳電之非導體之職務。

由此意義而言，非導體所以又稱為電媒(dielectric; Dielektrikum)。電之根本作用為引力及斥力，即就此力之傳達而言，亦足證明此說。即陰陽兩電之相引，或同種之電之相斥，

均須其間有非導體之空氣存在,方能發生,如無空氣而爲其他之導體,在其周圍,即決無此項作用。

§738. 電媒究依何種方法而能傳達引斥力之作用,解決此問題者爲法刺第 (Faraday), 其說大致如下:—

假定空氣中有若干個導體存在,其上之電的分佈亦爲任意的。於電媒中之一點,假想將一帶有極小之 (+) 電之物體持來,則因受各種物體之電之引斥力,結果必沿一定之方向,即沿各引斥力之合力作用方向,受力之作用,即電媒中不外一電場 (electric field; *elektrisches Kraftfeld*)。今將此小物體由有 (+) 之電之導體 A 上之一點出發,如圖 414, 恆沿其所受之力之作用方向運動,則其所通過之路徑,即爲表示其各點之電力作用方向之線,即與前此表磁力作用時之線相同,爲一種力線。而此路徑之終點,必爲有 (-) 之電之處無疑,在出發點 A 時,因受 A 上之 (+) 之斥力作用,被驅逐而開始其運動,及行至終點 B, 則因受 B 上之 (-) 之引力作用而停止其運動。

若出發點不在此處所述之 A, 而爲與 A 略爲離開之一點 A', 則其到達之終點 B', 亦將略爲離開

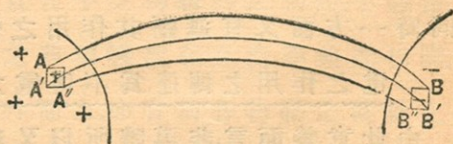


圖 414。

B, 同樣由 A' 而來者, 即達於 B''

今在 A 之近傍取一小面積, 內包含有若干之 (+) 之電, 由此小面積之邊上各點各引其力線, 則此等力線在 B 之近傍, 亦包圍一小面積。在途中則此等力線相集, 即成爲一管形, 而稱之曰力管 (tube of force; *Krafttröhren*)。由理論上計算, 在此種力管之兩端之小面積上之 (+) 之電, 與 (-) 之電, 其量恆相等。

以上所述, 係專就空氣中僅有導體存在時而言, 如於導體之外, 尚有帶電之非導體存在時, 亦與此相同。要之, 在電媒連續之空間中, 陽電之各部分必經此種力管, 而與等量之陰電相連絡。故陽電與陰電, 就全體而言, 其量必相等。前所舉圓筒中之帶電物體上之電量之代數和, 必與圓筒內面所生之電, 等量相反之例, 實亦此種關係之一實例而已。

室內若僅有一物體帶有 (+) 之電時, 其對手方之 (-) 之電, 必在天花板, 四壁, 或桌椅等物體之上存在。

依據法刺第之思想, 知在電媒中沿力線之方向上之相鄰兩部分, 無論其在何處, 均無引力作用。換言之, 即力管之兩端恆受一種張力作用, 如被張緊之線之狀態, 任意取其一橫斷面觀之, 均見其左右皆有引力, 彼此互相引近。又相並相接之兩力管間, 恆互相壓迫。通常電之引斥作用, 並非陰陽兩種之電, 本身之直接相引或相斥, 乃係電媒中有上述之力管間之相引相壓作用, 因此方始現出此種結果。

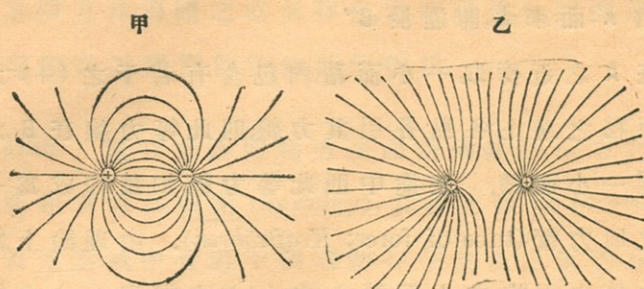


圖 415.

例：帶有陰電之物體與帶有陽電之物體互相引近之原因，由於圖 415 之甲所示之力線方向上之電媒，恆欲收縮而來。又帶有陽電之兩物體互相斥離之原因，由於其對手方之（-）在於遠處，故其力線當如乙圖。而與力線成垂直方向之電媒，彼此相壓相推，故左右離開。

由此見解說明甲乙兩空間若被一導體隔斷，則兩處即不能通其電之作用，為事至易。因導體為一切力線力管之終點，故在甲之空間中附屬於電之力線力管，固然不能直接達於乙之空間（因其間無電媒存在故也），並其引斥作用，亦無間接傳達之理。

第三章 放電

§739. 電花放電

作起電機之實驗時，在兩導體上蓄集之電過多，則衝破