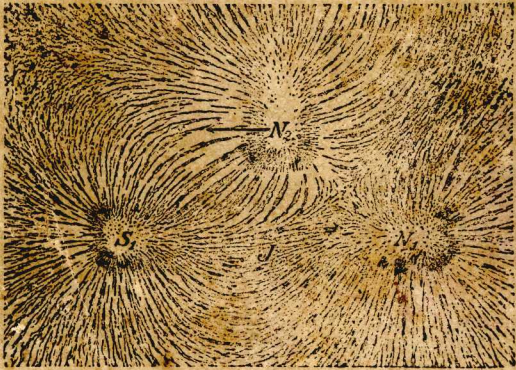


自然科學小叢書

電 靜 及 磁

三枝彥雄著  
周 斌 譯

王雲五 周昌壽主編



商務印書館發行







自然科學小叢書

# 磁 及 靜 電

三枝彥雄著  
周 斌譯

王雲五 周昌壽 主編

商務印書館發

貴州

省立圖書館

丁

13.34  
1040-

總登記

第7421



十七年七月初版

(51150)

自然科學  
小叢書  
磁及靜電 一册

每册實價國幣柒角

外埠酌加運費匯費

原著者 三枝彦 雄

譯述者 周斌 五

主編者 周雲昌 壽

王長沙南正路五

發行人 王雲 五

長沙南正路

印刷所 商務印書館

各商務印書館

發行所 商務印書館



# 目次

## 第一章 磁

第一節 磁	一
第二節 磁感應	一〇
第三節 磁場	一一
第四節 磁力線	一二
第五節 電磁石	一七
第六節 磁的性質	二二
第七節 磁化現象	三二



磁及靜電

二

第八節 磁之量度.....三八

第九節 地磁.....五五

第一章 電.....七五

第一節 靜電.....七五

第二節 電場.....一〇六

第三節 電容.....一二九

# 磁及靜電

## 第一章 磁

### 第一節 磁

#### 1. 磁學小史

從前希臘有七個哲人，其中的一個名叫退利斯 (Thales 公元前六四〇——五四六年) 發見指路石 (Loadstone) 有吸引鐵片的能力，這件事要算是磁學最早的歷史。圖 1 所表示的是一塊指路石，後來叫做磁石 (magnet)，放在鐵粉中，周圍吸引着不少的鐵粉。

當時的人對於指路石會有這樣奇怪性質，很不可解，所以就留下了不少的傳說。其中有一說，說是古時曾有一人名叫馬格內斯 (Magnes) 在克利特島 (Crete Island) 的愛達山 (Mount

Ida) 上游覽的時候，忽然腳上穿着的靴子，被地面吸住，不能移動；於是就將手中拿着的手杖，用力撐住地面，以便將腳拔起，不意手杖也被地面一同吸住。後來用盡平生的氣力，好容易纔能離開這塊奇怪的地面。當時詳加檢查，方纔發見其處地面上有一塊能吸引鐵片的指路石在那裏作怪。

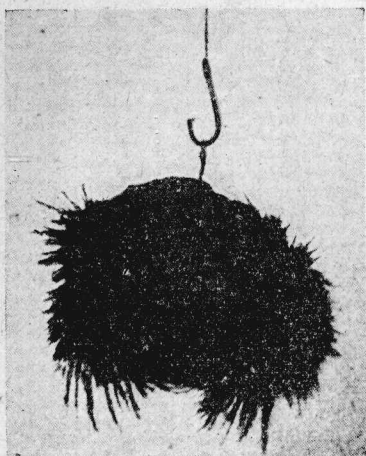


圖 1.

所以就用本人的名字，加在這塊石頭上，這就是磁石所以名為 magnet 的原委。又有一說，在當時鐵的主要出產地為亞細亞海岸及地中海內的諸島。磁鐵礦也出產在小亞細亞的馬格尼西亞 (Magnesia) 的近傍，所以就用地名的馬格尼西亞，來表磁鐵的這種特性。此一說略近情理。

最初研究磁學的人，當推意大利的琉克利喜

阿斯 (Titno Lucretius Carnus 公元前九五——五一年) 曾經研究過磁石吸引鐵粉，又曾實驗過同名的磁極互相推斥，並有記載留下。他的筆記內還有一段事，說是將黃銅做成的箱子，放在磁



石上面，放入鐵粉，鐵粉就會在箱內跳舞起來。

磁石的製造究竟始於何年何月，已不可考。當中世紀時，已經知道利用磁石做成羅盤（compass），對於文明有過非常的貢獻。由此推測磁石的製造，當然還在中世紀以前，是不成問題的了。一方面在我國的記錄上，十三世紀時代已經有了羅盤，至於用在陸地上，則更遠在十一世紀時代。據當時的記載，若用磁石擦鐵針，針即向南。究竟磁石的製造始自歐洲，還是從我國開始，尚無法證明。

據歐洲方面的記載，則當十二世紀時，英國人亞歷山大·內卡姆（Alexander Neckam）最初造成航海用的羅盤。又一二六九年八月十二日法國彼得·得·馬利科特（Peter de Maricourt）地方的人，名叫柏累格利那斯（Peregrinus），寫過一封信，信中有關於磁性的議論。據他說：若將大磁石切成兩段，各段都會有兩個磁極。又說：異種的兩磁極，彼此互相吸引；同種的兩磁極，彼此互相推斥。較強的磁極，能使較弱的磁極發生變化。他又自己造成很精密的羅盤。又在意大利的那不勒斯（Naples）地方，曾替夫雷維奧·佐雅（Flavio Groja）造了一個銅像，因為他是一三〇二

年最初造成功羅盤的。

最初使用磁石的極 (pole) 的名稱，是由英國之吉爾伯特 (William Gilbert, 1540-1603)。他曾經發現磁石要是燒紅了以後，就會失掉磁性。又發現如何能使鐵片變成磁石。至於他對於地磁 (terrestrial magnetism) 的研究，更是劃時代的大貢獻。他得到的結論是：地球好像一個大磁石。所以就指路石來造成一個地球儀，做種種關於地磁的研究。

此後很長久的時期中，都是電學方面的研究在進步，關於磁學方面，都寂無所聞。法國的安培 (Ampere, 1775-1835) 發見有電流流過的導線，對於磁針有作用，即是磁針受着電流的影響，會發生方向的偏轉 (deflection)。因此想到磁性應是電流的作用。他以爲或許磁石內部的各微粒，成爲一個通路 (closed circuit)，電流從此流過，於是造成磁極。所以只要能够使這種想像上的分子電流成爲同一的方向，物質就應當表現出帶磁的現象。照此推論去，地球之所以有磁性，也是因爲內部有電流存在，沿着內部周流而過所致。自安培以後，關於磁的研究，又復中斷。其後到得法拉第 (Michel Faraday, 1791-1867) 的時代，磁學的研究又呈顯著的進步。一八二一年法拉第想

到安培研究的反對的一方面，以爲若是磁石的周圍，有了電流的線路，就應該自行轉動起來，並會照着這個意思去做過實驗，可惜沒有成功。但磁針在電流的周圍的轉動，則於一八二一年實現成功。接着在一八三一年發現——應電流(induced current)。後來更由此成爲電動機(motor)和發電機(dynamo)的發明。當時用過的一個鐵環，周圍纏繞着許多匝的導線，送電流入其中，造成強有力的磁場，這就是後來發現電磁石(electromagnet)的導火線。同年，法拉第爲要說明磁的感應(magnetic induction)，設想了磁力線(magnetic lines of force)。一八二五年，羅斯特仲(William Sturgeon, 1783-1850)造成第一個電磁石，用的是馬掌釘形狀的軟鐵，能夠將九磅重的物件吊起來。其後更經荷蘭的摩爾(Moll)、美國的亨利(Mary A. Henry, 1797-1878)等，逐漸改良。至一八五一年，由德國魯謨科夫(Heinrich Daniel Ruhmkof, 1803-1877)造成魯謨科夫式的電磁石，通稱爲魯謨科夫線圈(Ruhmkof's coil)，爲斷磁路(open magnetic circuit)式的電磁石，成爲後來發明變壓器(transformer)的端緒。

一八四五年，法拉第在強有力的磁場裏，放下玻璃等類透明的物質，然後使光線由其中通過，



發見光波的振動方向，有了變動。這個現象，就是後來所謂偏極面之旋轉 (rotation of plane of polarization)，通稱爲法拉第效應 (Faraday effect)，要算是關於光與磁的關係的第一個發見。法拉第對於順磁質 (paramagnetic substance) 和反磁質 (diamagnetic substance) 的區別，也有不少貢獻。

再後又有馬克士威 (Clark Maxwell, 1831-1879) 出來，在一八六一年至一八六二年，出版一篇論文，題爲物理的力線。內容是用數學上的言語，將法拉第的實驗表示出來。接着又於一八七三年，出版一部電磁學，主張電磁現象和光現象同等，遂成爲光的電磁說 (electromagnetic theory of light)。其說更於一八八八年，經赫芝 (Heinrich Rudolph Hertz, 1857-1894) 由實驗爲之證明。

最初說明磁化現象 (magnetization) 的人是怕松 (Simeon Denis Poisson, 1781-1842) 和韋柏 (Wilhelm Edward Weber, 1804-1891)。怕松以爲將磁質 (magnetic substance) 放到磁場 (Magnetic field) 裏面，因受磁場的影響，各分子都受磁化，所以全體也就變成磁石。韋柏

的意見又不同，他以爲磁質的各個分子，都是永久磁石 (permanent magnet)。

後來一八九一年，攸因 (J. A. Ewing) 又將韋柏的理論，略加變更，來說明磁化現象。他以爲磁質的各個分子，都是可以自由轉動的小磁針。在通常的狀態時，各個分子因爲相互的作用，受到一種阻力，排列得漫無秩序。一旦受到磁場的作用，多少就照着磁場的方向排列起來，表現成爲磁性體，所以成爲磁化現象。這就是分子磁說 (Theory of molecular magnets)。

磁場的強度增大，照着磁場方向排列成功的磁分子數目跟着增加，磁化的程度也就提高。可是磁分子的方向轉動，有一定的角度，超過這個限度以後，磁分子就不穩定 (unstable)。所以磁化程度雖然跟着磁場的強度激增，但是到了一定的限度以後就不能更進一步了。這就是磁化現象達到了飽和 (saturation) 的說明。同時還說明了剩磁 (residual magnetism) 和循環磁化時所起的滯後現象 (hysteresis)。

對於磁力和磁化強度的關係，最初使用鐵和鎳來做精密的實驗，是一八七三年羅郎德 (Henry A. Rowland, 1848-1901) 發表的論文。接着又將法拉第和亨利所發見的應電流等類電

磁現象，發展到應用方面去。一八三六年，經西門子 (Ernst Werner Siemens, 1816-1892) 將發電機加以改良。其後發電機的研究盛行於世，更經西門子的兄弟 (Sir Wilhelm Siemens, 1823-1883)，布拉什 (Charles Francis Brush, 1849-1929)，愛迪生 (Thomas A. Edison, 1847-1931)，和其他諸人，逐加改良，遂成現今使用的機械。

由十九世紀末葉至二十世紀，曾在各種物理條件下，對於磁性加以研究。所得的結果，亦頗豐富。其中本多光太郎的研究，尤為精細。發見磁性和溫度的變化，又造成合成鋼，用來製造永久磁石，極為有效。

## 2. 磁石

磁石可分為永久磁石 (permanent magnet) 和電磁石 (electromagnet) 兩種。

現今使用的永久磁石，多係用鋼棒製成，也有形狀和馬掌釘一樣的。像棒的磁石，稱為條形磁石 (bar magnet)；像馬掌釘一樣的，稱為蹄形磁石 (horseshoe magnet)，其受磁化的方法，有下列各種：



最簡單的方法，是用永久磁石去摩擦鐵片，這鐵片就會變成磁石。或者在鐵片的周圍，纏繞電線，使電流從電線中流過，鐵片也就成爲磁石。前一種方法只適於製造小的條形磁石時使用，第二種方法則適於製造蹄形磁石，或大的磁石時使用。圖 2 所示的就是第一種方法，摩擦時沿着一定的方向，如圖中箭頭所示。圖 3 所示的是第二種磁化方法，製造蹄形磁石時使用。照着上述方法製造成功的磁石，兩端的作用最強，是爲磁石的極 (pole)。試取一磁針，支住其中央一點，使其取水平位置，並能在鉛直軸上自由轉動。當此磁針停止不動時，其方

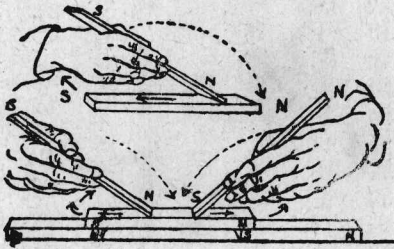


圖 2.

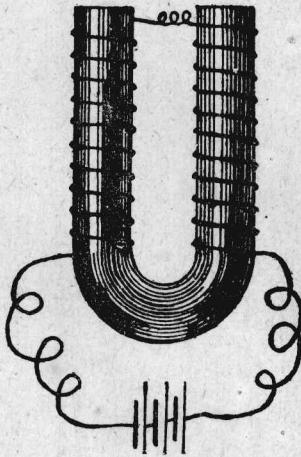


圖 3.

向大致和地球的南北方向一致。指着地球南極的一端，稱爲磁石的指南極 (south seeking pole)，或簡稱南極 (south pole)，通常用 S 來表示。反對的一端，稱爲磁石的指北極 (north seeking pole)，或簡稱爲北極 (north pole)，通常用 N 來表示。同種的兩磁針，互相接近時，同名的極相斥，異極則相引。

## 第二節 磁感應

如使鐵塊和磁石的一端接近，則被磁石吸引。此時鐵塊也就變成了一塊磁石。假使其接近的磁石的一端，原是南極，則和此南極接近的鐵塊的那一端，就變成北極，較遠的一端則成爲南極。假如鐵塊是和磁石的北極接近，那麼鐵塊和磁石相隔最近的一端，就成爲南極，最遠的一端成爲北極。這是因爲鐵塊內的分子，受着磁石的作用，沿着其方向排列起來，成爲磁化所致。這樣的現象，稱爲磁感應 (magnetic induction)。受了感應而成功的磁極，恆與引起感應的磁極相反。

通常的條形磁石，在同名極間作用的推斥力，總要比在異名極間作用的吸引力，略微小些。這

也是因爲磁感應的作用，即是同名的極互相接近時，彼此都有使對方的一極，變成反對的極的作用，結果遂將極的強度減弱。反之，要是異名的兩極互相接近，則同樣由感應作用，彼此都可使對方極的強度加強。

### 第三節 磁場

在磁石周圍的空間中，均當受磁力的作用，這個磁力作用的範圍，叫做磁場(magnetic field)。要表示出磁場內某一點的磁狀態必須知道在這一點的磁場方向和磁場的強度。今先就磁石的一極所造成的磁場來說，在這種磁場內的任意一點的磁場強度和距離的平方成反比例，和磁極的強度成正比例，其方向則和以磁極作中心所劃的球面垂直。以上是就一個單獨的磁極而言，要是同時有數個的磁極存在，或是對一個磁石的兩極而論，磁場的狀態就很複雜。

在磁場內任意一點上的磁場方向，是通過這一點，由一極引至他一極的曲線上，在此一點所引的切線的方向，其強度則用通過此一點所引的和磁場方向垂直的平面上，單位面積即一平方



釐米內包含的磁力線數來表示。

#### 第四節 磁力線

沿着磁場的方向，即由N極發出向着S極而去的方向引曲線，所引的曲線數則和磁場的強度成一定的比例，這樣得到的曲線，稱為磁力線 (magnetic lines of force)，這是一八三七年由法拉第題名的。

在磁石上面放一張平滑的紙，或玻璃板，再在其上輕輕的撒布鐵粉，各鐵粉受磁化後，均將其較長的一方，排列成爲磁場的方向。用這個方法，可以做成種種情況的磁場的圖，表示磁力線分布的狀態。圖4爲單獨一個磁極造成的磁場，圖5爲兩個同名極合成的磁場。因爲兩極的中間，互相推斥的結果，磁場強度成爲零。所以在這裏的鐵粉，排

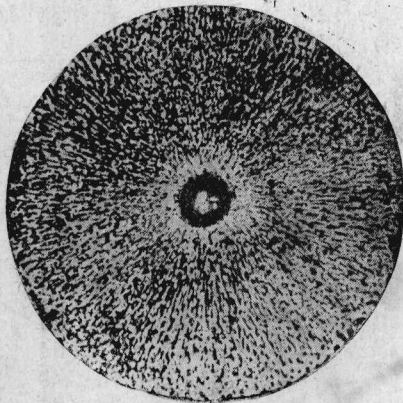


圖 4

列不齊。圖 6 爲兩個異名極合成的磁場。圖 7 和圖 8 爲兩個同樣強度的條形磁石平行排列時合成的磁場。圖 9 爲兩磁石互相垂直一方的磁極，正對他一方的磁石的中央所成的磁場。圖 10 爲一蹄形磁石和一條形磁石合成的磁場，蹄形磁石的截面爲圓形，條形磁石則放在蹄形磁石的兩極之間。

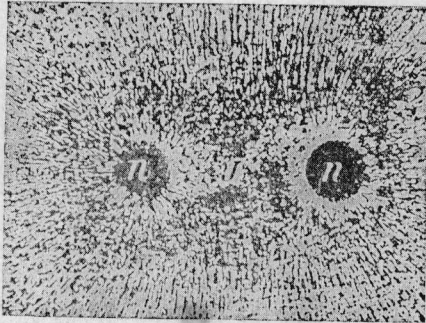


圖 5.

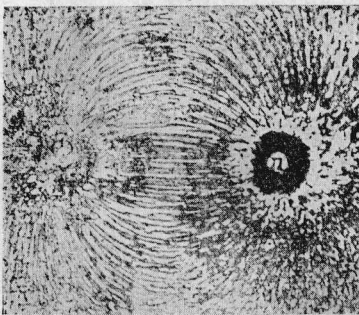


圖 6.

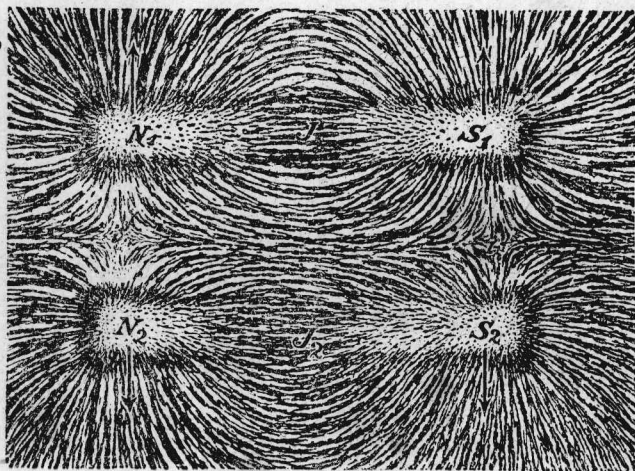


圖 7.

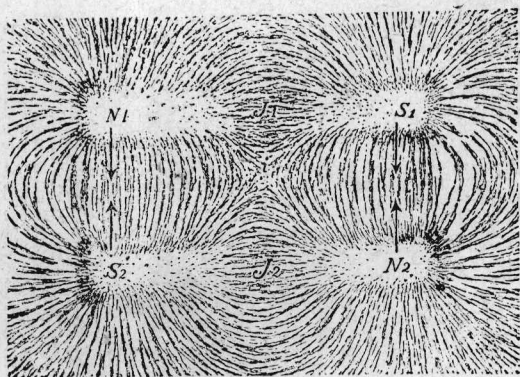


圖 8.

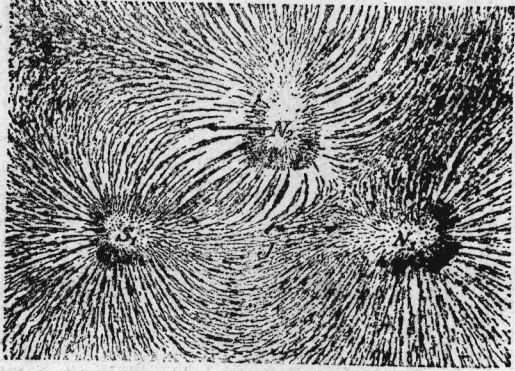


圖 9.

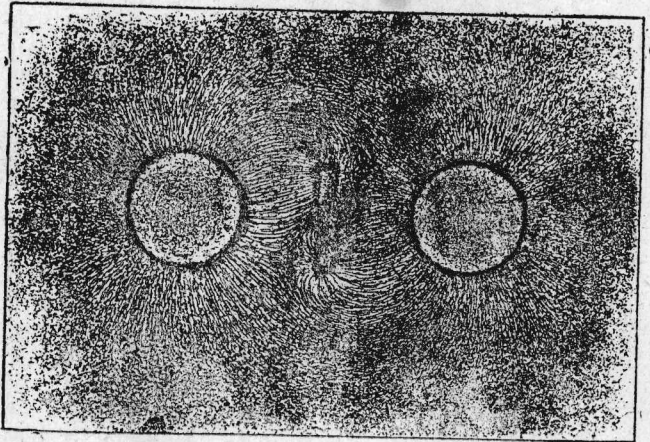


圖 10.



磁場中的磁力線，除由上法可以表出外，又可由幾何學，爲之作圖。爲簡便計，先就條形磁石說

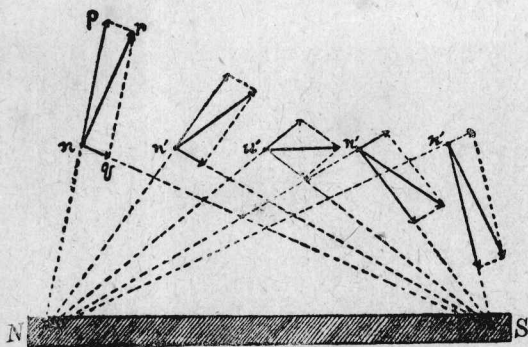


圖 11.

明如何畫出其磁力線。欲在磁場內一點  $n$  決定其處的磁力方向，其法如下：先在此磁場內，放入  $N$  極，由磁石的  $N$  極和  $S$  極而來的力，應由兩距離  $nq$  及  $np$  而定。 $N$  對於  $n$  作用的力是斥力，如圖 11 中的  $np$ ， $S$  對於  $n$  的作用，是引力，如  $nq$ ，兩者均與縱  $n$  至  $N$  及  $S$  間的距離的平方成反比例。以  $nq'$  及  $np'$  作平行四邊形的兩邊，其對角線即可將合成力的大小和方向，同時表出，如圖 11 所示。若將小磁針放在  $n$  點，磁針停止時所取的方向，即此合成力的方向，這就是磁場在  $n$  點的方向。照着這樣，在磁場內各點，一一畫去，就可以得出磁力線的圖形。圖 12 所示的即其一例，這是就前圖 10 的例求出來的。

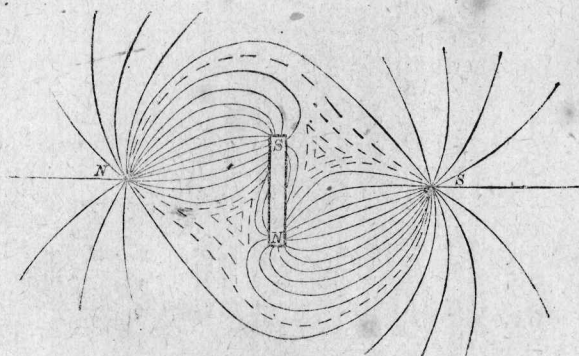


圖 12.

### 第五節 電磁石

永久磁石不能造成強有力的磁場，其強度又不能一定，每每跟着時間的經過，次第減弱。故欲得一強而有力，且其強度又一定不變的磁場，通常都用電磁石。電磁石 (electromagnet) 係利用在線圈中流通的電流發生的磁效應，由阿拉谷 (Dominique Franois Jean Arago 1786-1853) 於一八二二年，最初造成功的。電流通入線圈中，即可造成磁場，也是由阿拉谷發見的。當時德斐、法拉第等使用的電磁石，如圖13所示，而最初造成功的電磁石，其軟鐵心 (iron core) 是直立着的。

現今使用的電磁石，有兩種形式：第一種如圖14所示，

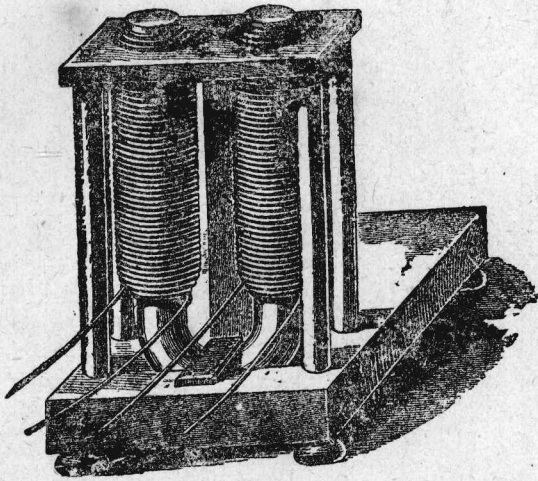


圖 13.

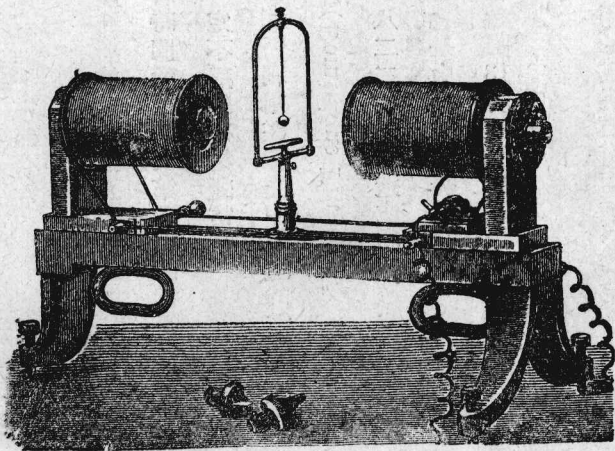
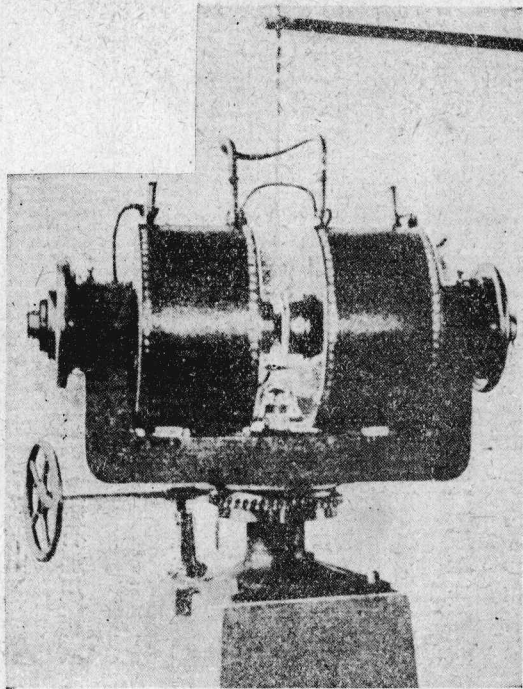


圖 14.

爲魯謨科夫式，其兩磁極互相對峙，線圈內的鐵心裝置在同一直線上。使電流通過線圈內，則鐵心即受強力的磁化，兩磁極間發生強有力的磁場。其兩極間的距離，又可自由縮短或放長。此種電磁石其後再經一度改良，就成爲現今所使用的滙斯（Pierie Weiss, 1865-）式的磁石。滙斯式的電磁石，磁場更爲強大，鐵心甚粗，可防磁力線逸出外面，並在線圈周圍裝有冷水，周流不息，俾免由電流而生的熱，使線圈受害。圖15所示的就是裝有這種冷卻器的電磁石。



圖

15.



第二種的電磁石，爲丟罷 (Du-Bois) 式的電磁石，如圖 16 甲乙所示，用圓弧狀的鐵心，可防磁

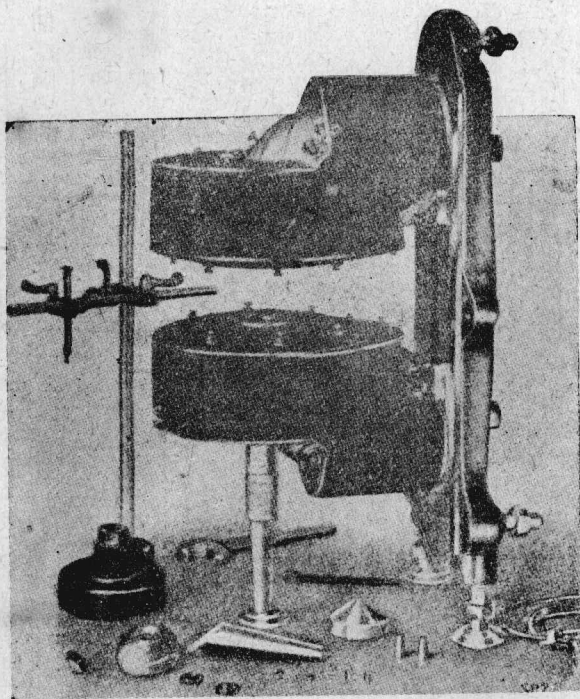


圖 16. (甲)

力線不致逸出外部。就同一重量的電磁石加以比較，丟罷式的比淮斯式的，磁場要強得多，不過用這種方法得到的磁場強度，仍不能超出六七萬高斯 (gauss) 以上。要想得到較此更強的磁場，必須在上述的電磁石之外，更加上線圈的磁場。一九一三年法國的得蘭得 (Deslandres) 和培羅 (Perault) 在電磁石的兩極周圍，

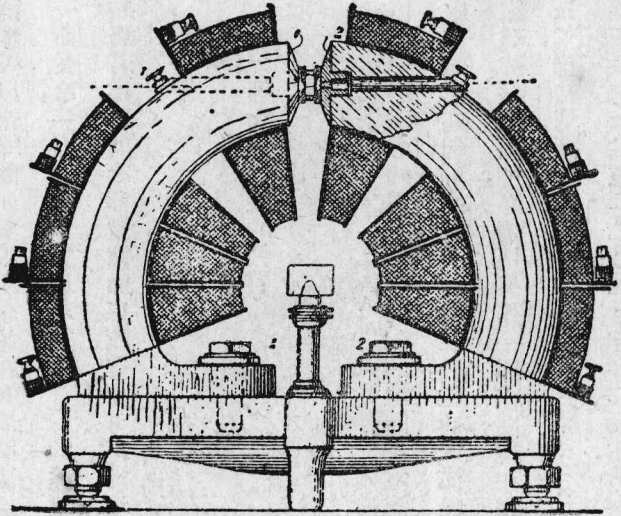


圖 16.(乙)

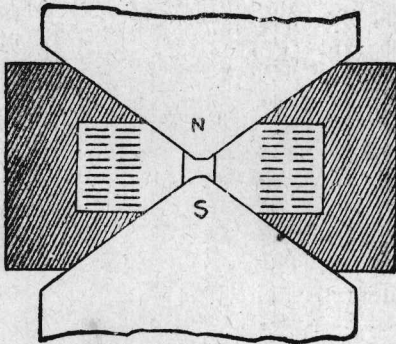


圖 17.

纏繞銅板，以作線圈，如圖17所示，並在其周圍使冷卻到 $-75^{\circ}\text{C}$ 或 $-20^{\circ}\text{C}$ 的油，循環不息的流過，俾其一面受冷，一面使一千安培 (ampere) 的強電流，從線圈中流過。這樣一來，可以增加十萬高斯的磁場。若果再將冷卻設備加以改良，更可以加增電流的強度，造成幾十萬高斯的磁場，並不是難事。

## 第六節 磁的性質

### 1. 反磁力

在環形鐵心的周圍，纏繞均勻的線圈，使電流從線圈中通過，鐵心所受到的磁場，大致甚為均勻，故其磁化亦勻。可是鐵心既為環形，磁極無從表現，對於外部好像沒有磁的一樣。要量度這樣的鐵環的磁化強度，必須用另外一個線圈，繞在鐵環上面，如圖18所示，造成副線圈 (secondary coil)，聯結到衝擊電流計 (ballistic galvanometer)。原線圈 (Primary coil) 內有電流通過，則副線圈中有應電流 (induced current) 發生，衝擊電流計可以將電流的強度測出。命測得的電量

爲  $Q$ ，磁化強度爲  $I$ ，磁場強度爲  $H$ ，則其間的關係爲

$$Q = \frac{m_1}{R} (4\pi I + H)$$

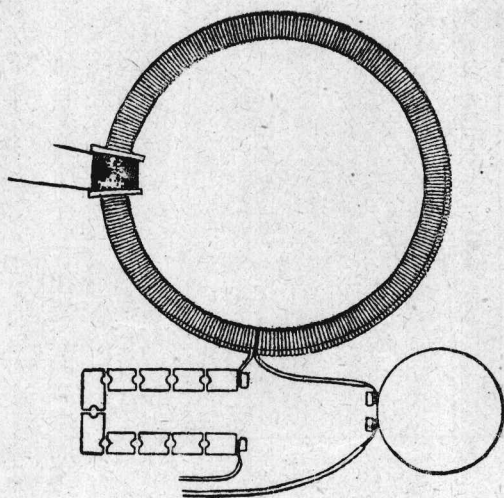


圖 18.

磁場強度  $H$  可由原線圈中之電流，及原線圈之匝數 (number of turns) 求得。從此又可得知  $I$  和  $H$  間的關係。圖 19 中的曲線 A，即表此種關係。曲線的形狀，由原線圈的鐵心的物質性質而定，通稱爲標準磁曲線。

其次將上述的鐵環截開一極狹的縫隙，照前使電流通過，求其  $I$  與  $H$  的關係，結果雖和沒有縫隙時相類似，但卻也有少許的差異。此時所得的曲線，如圖 19 中的 B。若再將上述的縫隙次第擴大，則得圖中的 C、D 等曲線，漸



次和直線接近。

如有上面所述的各種縫隙的鐵環，而又要受到同一強度的磁化，究竟各各需要怎樣的磁場，方能辦到，可照着下述的方法去求。試在縱軸上

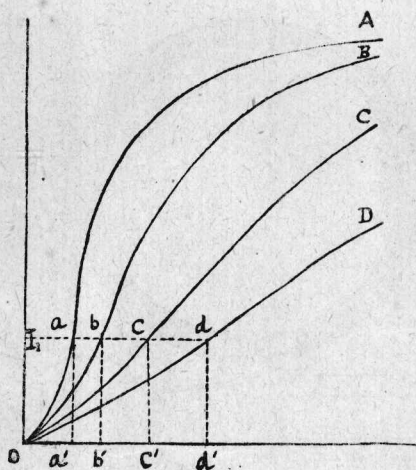


圖 19.

同一的  $I_1$ ，所要的  $H$  之價，亦跟着次第加大。其次  $I_1$  的值如更加大，則  $H$  的增加，也次第隨着加大。縫隙要是範圍異常狹小，這個關係，成爲比例。總之，具有縫隙的鐵心，比沒有縫隙的鐵心，需有較大的

通過  $I = I_1$  的一點，作一直線，和橫軸  $H$  平行，此直線和 A, B, C, D 各曲線相交的點，命爲  $a, b, c, d$ 。從  $a, b, c, d$  各引垂線，與水平軸相交於  $a', b', c', d'$  各點。由  $O$  點至此各點的距離，即表示欲使各鐵環俱達到同一磁化強度  $I_1$  時，所需要的磁場強度。由圖可知，鐵環上沒有縫隙時，產生的  $I_1$  所要的  $H$  之值最小，以後縫隙次第加大，欲得

磁場方能達到同一強度的磁化。此項增加的磁場強度，通稱爲去磁力 (demagnetising force)。因爲此刻既要多用此項磁場，方能使有縫隙的鐵環，得到和沒有縫隙的鐵環同樣的強度，就如像外面另外還有一個反對方向的磁場存在着的一般，所以纔有這樣一個名稱。

在均強磁場 (uniform magnetic field) 內，沿着磁場平行的方向放一個細而且長的磁性體，其中任何一點的磁場強度，是原本的磁場強度，和在磁性體兩端感應出來的磁極所生的磁場強度，兩種合成成功的。可是這種由感應而來的磁場方向，恰和原本的磁場反對，所以這種磁場，也可以說是去磁力，不過這種由感應而成功的去磁力，在磁性體內面，因地位而異，在中央處最小，愈近兩端，其值愈大。無論在那一點，其值總是和磁化強度  $I$  成比例的，故其平均值也和  $I$  成比例。由此種平均的感應而生的磁場強度，稱爲平均去磁力。如鐵棒的長度比較其截面積爲大時，此項去磁力之值，當愈減小。

## 2. 剩磁和矯頑磁力

將鋼和鐵放在同樣的磁場裏面，雖都可受磁化，可是鐵比鋼的磁化，要容易得多。然後再將磁

場除去，鐵上所表現的磁，也就跟着消滅無餘。鋼卻依然留有不少的磁性。這種殘留下來的磁化狀態，稱為剩磁 (residual magnetism)。即是鋼的剩磁，比鐵的大。

照着圖 19 所用的方法，使鐵環所受的磁場強度，次第增大，得圖 20 所示的  $Oab$  一段曲線。等到了  $b$  的一點，即停止電流的強度，不再增加，並且反而使電流次第減小，則磁場強度也就跟着減弱。因而磁化程度，也不得不漸次減小，可是此刻所得的磁化曲線，和先前的  $Oab$  那一段，完全不同，是另外的一段，如  $bcd$  所示。即是當電流已經減到零的時候，磁場亦已成爲零，鐵環上仍舊殘留有和  $Oc$  相當的磁化。其次更將電流的方向反轉，即是使反對方向的磁場強度，次第增加，即得出來  $cd$  的一段曲線。和  $Oc$  相當的磁化量，是磁場消滅時所留下來的磁性，即是剩磁。要使這一點剩磁也消滅無餘，非用反對的磁場  $Od$  作用於其上不可。所以和  $Od$  相當的磁場強度，通稱爲矯頑磁力 (Coersive force)。

凡曾一度受過磁化的物質，因自己感應而生去磁力，更受機械的打

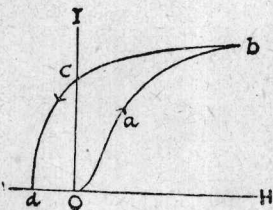


圖 20.

擊或加熱等項作用，往往將其磁性失去。所以製造永久磁石，務要選用矯頑磁力較大的材料，方能耐用。

通常用來作永久磁石的材料，以鋼為主要物質，但在製造精密的電磁量度器械裏，則用鋼和鈷或錳等混合成功的合金。

### 3. 導磁係數和磁化係數

放一塊軟鐵在均勻磁場裏去，軟鐵受到磁場的作用，即成磁化。即因放入軟鐵的結果，使其空間中的磁力線數增加。如命  $I$  表軟鐵因受磁場作用而成的磁化強度， $H$  表原本磁場的強度，命  $k$  表兩者的比，即

$$k = \frac{I}{H}$$

如是的  $k$ ，通稱為磁化係數 (magnetic susceptibility)。又用  $4\pi$  乘磁化強度  $I$ ，再加原有之磁場強度  $H$ ，稱為磁感應強度 (magnetic induction)，通常用  $B$  來代表。這是單位面積中通過的原本磁場中的磁力線，與由磁化作用而增加的磁化力線，兩者的總和。這種磁化線，稱為磁感應線。磁



感應強度  $B$  的公式爲

$$B = H + 4\pi I.$$

用  $\mu$  來表示磁感應強度  $B$  對於原磁場  $H$  的比，通稱爲導磁係數 (magnetic permeability) 即

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

由此可知，導磁係數和磁化係數間的關係，爲

$$\mu = 1 + 4\pi k, \quad k = \frac{\mu - 1}{4\pi}$$

在真空中  $\mu$  等於 1，此時的磁場強度和磁感應強度相等。順磁質的  $\mu$  恆大於 1，反磁質的  $\mu$  恆小於 1。

#### 4. 磁質

一切物質可按其所表示的磁性，爲之分類。通常可大別成爲三類，即

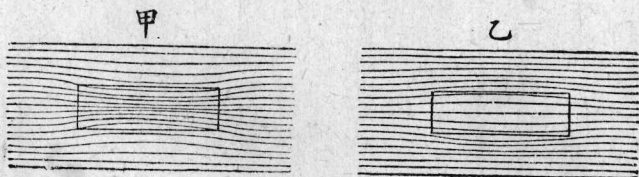
- (1) 鐵磁質 (ferromagnetic substance)
- (2) 順磁質 (paramagnetic substance)

(c) 反磁質 (diamagnetic substance)

鐵磁質和順磁質的差別，不過是剩磁特別為大而已。至於磁性作用，則完全同一方向。所以就看成是順磁質中的一種，亦無大差。

鐵磁質和順磁質的磁化係數，均為正數，反磁質的磁化係數，則為負數。將順磁質放入磁場，則受磁化作用，將磁力線吸入其內部。圖21的甲，表示順磁質內磁力線分布的狀況。將反磁質放入磁場，則不僅不受磁化，且反而防礙着他，將磁力線推出於其外部。圖21的乙，表示反磁質內磁力線分布的狀況。又如將順磁質放到磁極間，受磁化後，所成的兩極，各各和磁場的反對的極，務求接近。反之，要是將反磁質放到磁極間，則其極和磁場的極，務求遠離。圖22的甲，表順磁質的狀況，乙表反磁質的狀況。

鐵磁質具有異常強大的磁感應係數，且和磁場的強度不相比例。並且不僅和現有的磁場強度相關，還和以前的磁化狀態，有密接的關係。



圖

21



22. 圖

鐵磁質是鐵、鎳、鈷三種物質，以及由他們造成的合金。此外還有錳、鉻、鈷、鎳等。

順磁質的磁感應強度，較磁場為大，屬於這一類的物質，為鋁、鈉、錳、鉻、鉑、銻等。

反磁質的磁感應強度，較磁場為小，屬於這一類的物質，以氫、氧、碳、錒、鎘等為主。

鐵磁質和順磁質，如前所述，其間並無明確的界限，僅順磁質不及鐵磁質那樣容易受磁化，且對於以前的歷史，也沒有什麼關係。

各種元素的磁化係數，即對於其單位質量的磁化係數的數值，據一九〇九年本多光太郎和一九一二年奧文 (Owen) 的精密測定的結果，得知其值和元素的週期律 (Periodic law) 有密切的關係。各元素的磁化係數的實值，如下表所示。表中的負號表反磁質，正號表順磁質，均對於

單位質量測得者：

元 素	記 號	磁化係數 $\times 10^{-6}$	元 素	記 號	磁化係數 $\times 10^{-6}$
鋰	Li	+0.50	錳	Mn	+9.66
鈹	Be	-1.03	銅	Cu	-0.086
硼	B	-0.71	鋅	Zn	-0.156
碳	C	-0.49	銻	Ga	-0.225
鈉	Na	+0.51	鍺	Ge	-0.114
鎂	Mg	+0.55	鉀	As	-0.31
鋁	Al	+0.58	硒	Se	-0.32
矽	Si	-0.13	溴	Br	-0.40
磷	P	-0.88	鉍	Cs	+15.35
硫(斜方晶體)	S	-0.48	鐳	Pr	+25.20
鉀	K	+0.40	釷	Nd	+36.21

元素	記號	磁化係數 $\times 10^{-9}$	元素	記號	磁化係數 $\times 10^{-9}$
鈣	Ca	+1.10	鉕	Er	+22.29
鈦	Ti	+1.24	鉭	Ta	+0.81
釩	V	+1.50	鎢	W	+0.252
鉻	Cr	+2.87	鐵	Os	+0.048
鉑	Pt	-0.80	銻	Ir	+0.129
金	Au	-0.152	鉛	Pb	-0.120
汞	Hg	-0.193	鉍	Bi	-1.458
銻	Tl	-0.231	釷	Tb	+0.081
			鈾	U	+3.26

第七節 磁化現象

1. 磁矩



設在均強磁場中，放一長為  $l$ ，斷面積為  $S$  之細長圓筒形磁性體，其軸線與磁場方向平行，由感應作用，在磁性體兩端生出  $-B$  及  $+B$  之極，此項磁性強度  $B$ ，與其長度  $l$  之乘積  $ml$ ，稱為因磁性體之感應而生之磁鐵之磁矩 (magnetic moment)。但磁量  $m$  則與磁性體之截面積  $S$  及磁化強度  $I$  之乘積  $IS$  相等。故若將上述之磁性體，放在單位強度之磁場內，俾與磁場成爲垂直，此時當受  $ml$  之力偶作用，而起轉動。故有磁矩之稱。通常即以  $M$  表磁矩，故  $M = ml = ISl = IV$ 。式中之  $V$ ，表  $Sl$ ，即磁性體之體積。故

$$I = \frac{M}{V}$$

即磁化強度  $I$ ，等於單位體積所有之磁矩。

## 2. 磁化曲線

磁化強度與磁場強度間之關係，因磁性體之種類而定。通常對於順磁體及反磁體，均極簡單，磁化強度恆與磁場強度成正比例。但在鐵磁體，則其關係即異常複雜。故導磁係數及磁化係數之變化，在鐵磁體內，極複雜，隨物質種類而異。但通常之變化狀況，則如圖 23 所示。即當磁場弱小時，其

變化與磁場強度成正比例。故此一部分之曲線，幾成爲直線。到得磁場強度達到一定數值時，磁化強度即驟急增大，以後漸次與一定值接近。如是之曲線，通稱爲磁化曲線。因磁化係數  $k$  等於  $\frac{I}{H}$ ，

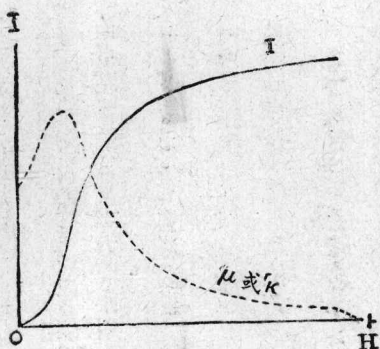


圖 23.

故在圖中如虛線所示，用一條有極大值之曲線表出。又因導磁係數可用  $\frac{4\pi k}{1+k}$  表出，故用與磁化係數相類似之曲線表之。關於  $I$  與  $H$  間之關係，古來研究之者極多，然尙未得定論。實際計算時，爲便利計，有下列之實驗式，即

$$\frac{I}{H} = \frac{\alpha H^n}{1 + \beta H^n}$$

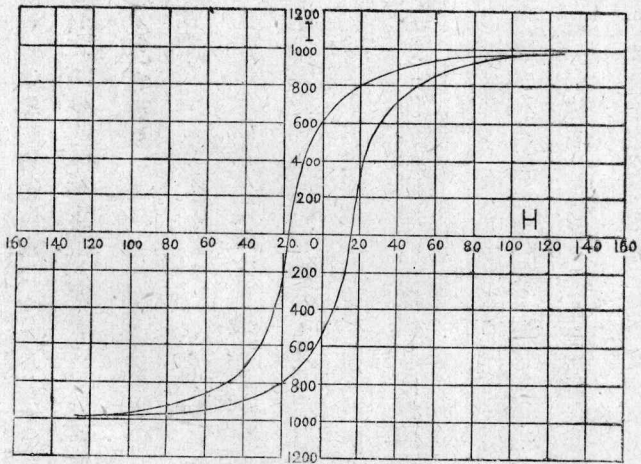
式中之  $I$ ，表磁化強度之飽和值， $\alpha$  及  $\beta$  均爲常數，由物質而定。

### 3. 磁滯迴線

如使磁性體循環不已受磁化，用曲線表出其間磁場強度磁化強度以及磁感應強度間之關係時，可得一閉鎖之迴線。內包一定面積，此迴線通常爲磁滯迴線 (hysteresis loop)。其所包括

之面積表示受循環磁化期間所消費之能量。此係發保 (Emil Gabriel Warburg, 1846-1931) 於一八八一年，及攸因於一八八二年，各各獨立所發見者。圖 24 表鐵磁體之磁滯迴線。其迴線中之面積，隨物質種類而有不同。如爲軟鐵，則面積較小，如爲鋼則較大，如由電解而得之鐵，其分子排列整齊，則成爲圖 25 所示之形狀，迴線幾成爲矩形。尤其是結晶之鐵磁體，更近於矩形。

磁滯迴線包含面積所表示之能量，當循環磁化時，成爲熱量，消費於磁性體內，使其溫度上升。此項消費能量，與磁感應強度之間，有斯泰恩美 (Steinmetz) 發見之實驗式，即



圖

24.

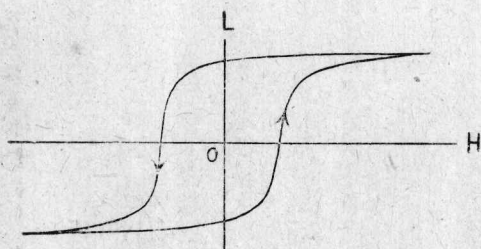
$$W = \eta B^{1.6}$$

式中的  $W$  表熱量， $B$  表磁感應強度， $\eta$  為物質所特有之常數。上式僅能適用於普通強度之磁場，如磁場強度過強或過弱，均不適用。

#### 4. 在磁性體之磁之分布

使磁性體受磁化作用，或如永久磁鐵之兩極，表示其兩端近旁磁性最強。通常均以兩端為最強烈，愈內部，愈形減弱，到得中央部分，竟減成零。但實際上條形磁鐵上，磁性最強處，並非兩端。其兩極距兩端，約等於全長之六分之一。即條形磁鐵的長度，與其兩極間距離之比，等於 1:0.85 時，為最常見。

例如將條形磁性體，放在均強磁場內，使其磁化。如欲檢查其磁性之分布狀況，可將一副線圈 (secondary coil) 套在其上，沿棒滑動，測出所生之應電流 (induced current)，即可求得各部分之磁性。據實測結果，使用十釐米



長六毫米直徑之鐵條，檢測結果，如圖26所示，最大磁性處，雖近兩端，但卻在其內部。圖中有曲線數條，為使用各種強度之磁場時所得之結果。由此可見，磁場強度愈大，其最大磁性處，愈與兩端相近。

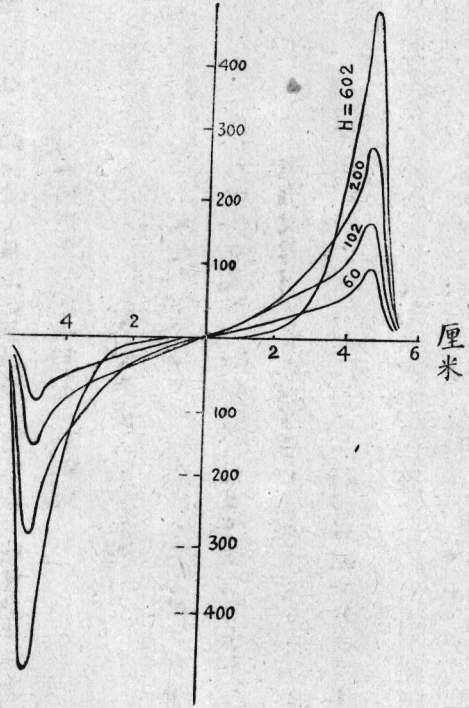


圖 26.



轉動橢圓體之磁性分布，又不同。由中央至兩端之增加，幾成爲一定之比例。

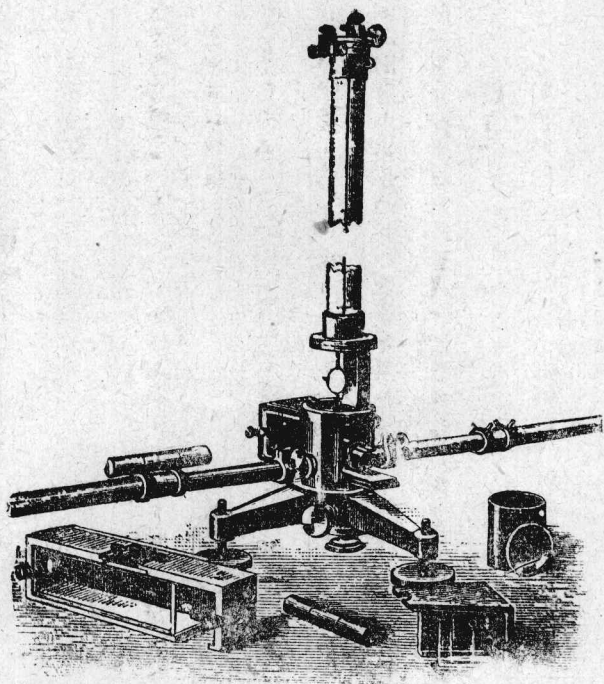
## 第八節 磁之量度

關於磁之量度，有種種方法，要之不外測定磁場強度或磁極強度而已，其重要者如下：

### 1. 使用磁強計法

磁強計(magnetometer)之主要部分，爲一小磁鐵(大都爲蹄形)用極細之石英絲或絲線懸住，上方有一小鏡，固着於線上。圖27所示者，爲高斯韋柏式磁強計。圖28所示者，爲克勞修式磁強計。測定原理係在磁強計近傍，持來一磁鐵，因受磁鐵作用，磁強計之蹄形磁鐵略生轉動，轉動角度則用望遠鏡尺法測定。在此法中須有磁化線圈，俾磁性體受其磁化作用。此種線圈與磁強計之相互位置不同，情形亦異，可分如下列三條：

(A)另取一第二線圈和磁化線圈爲同一種類，使此兩線圈之軸線同在一直線上，且取水平方向，正向東西方，而在兩線圈中央放磁強計，如圖29所示。



將磁性體之棒，插入磁化線圈中，送電流入其內，電流強度與在第二線圈內流過之電流強度

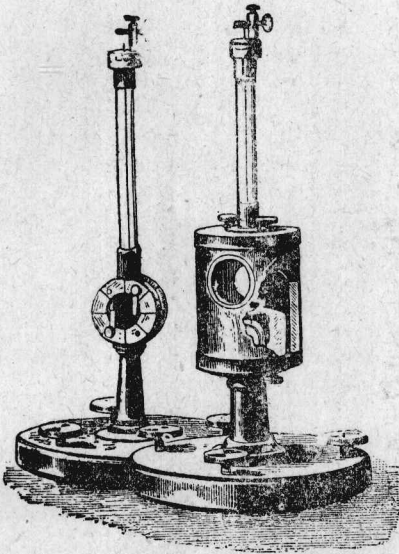


圖 28.

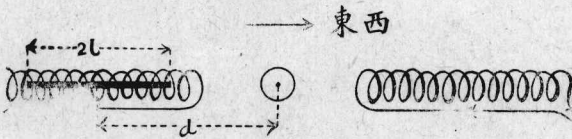


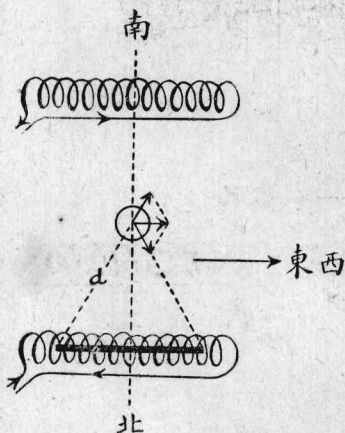
圖 29.

相等。調準兩線圈之距離俾兩者對於磁強計所生之影響，恰相等；如此，則僅餘磁性體受磁化後對於磁強計所生之影響，可由下式算出。此時之磁化強度  $I$ ，應為

$$I = \frac{\left\{ r^2 - \left( \frac{5}{6} l \right)^2 \right\}^2}{2Vd} H \tan \theta$$

式中之  $2l$  表磁性體之棒之長度， $d$  表棒心與磁強計內磁鐵中心間之距離， $V$  表磁性體之體積， $H$  表地磁之水平成分， $\theta$  表磁強計內鏡面轉動之角度。

(B) 第二種情形，如圖 30 所示，兩線圈互成平行，且作水平，軸線取東西方向，連結兩線圈中心之直線，則向南北方向。磁強計即放在此兩線圈之中央，通入兩線圈內之電流方向，彼此相反。故對於磁強計所生之影響，互相抵消，此時之磁化強度  $I$  如下：



30.

$$I = \frac{\left[ d^2 + \left( \frac{b}{2} - l \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{V H \tan \theta}$$

(C) 第三種情形如圖 31 所示，兩線圈之軸線均鉛直，彼此平行，連結兩線圈中心之直線，則取東西方向，此時磁化強度  $I$  之值如下：

$$I = \frac{Vd}{2H \tan \theta} \left\{ \frac{1}{[d^2 + (b-l)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{[d^2 + (b+l)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

式中之  $b$ ，表棒心與磁強計內磁鐵中心間之垂直距離，其餘與前全同。但若欲作精密之量度，須如前此辦法，用  $\frac{1}{2}l$  代替式中之  $l$ 。

此外尚有利用磁強計振動之阻尼方法，將於後面地磁部分中詳述之。

## 2. 雙線懸置法

### (a) 雙線懸置磁強計方法：

其主要部分為一磁針，用兩條極細之絲線或石英線懸住，通常稱為雙線懸置 (bifilar suspension)。



得之  $\theta$  平均後，定為偏向。

阻力  $D$  由懸掛之線之重量，及其對於彎曲和扭轉所呈之彈性而定，可用下式表出之：

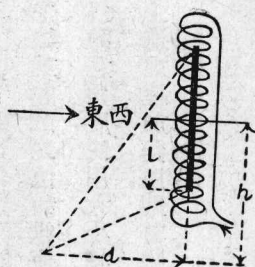


圖 31.

pension) 此種磁強計不甚受外力作用之影響，尤以不受扭力作用為最甚。故所得結果甚為精確，且所懸置之磁鐵，亦不必要在磁子午面內停止。

假定將磁鐵原懸在地磁東西方向上，因受地磁之水平部分及現所欲測之磁鐵之作用，向南北方向轉動  $\theta$  角度而成靜止。命  $D$  表此時對於偏向之阻力， $M$  表磁鐵之磁矩， $H$  表水平部分，則其間有下列之關係：

$$MH = D \tan \theta.$$

次將磁鐵之方向顛倒後，再作同樣之觀測，求其偏向  $\theta$ ，與前次測

$$D = gm \frac{e^2}{4(1-\rho^2) \sqrt{2\pi} \frac{E}{m}} + \frac{2\pi}{5} \frac{\rho^4 E g}{1-\rho^2 \sqrt{2\pi} \frac{E}{m}}$$

式中之  $l$  表兩條線之平均長度， $e$  表兩線間之距離， $\rho$  表其半徑， $E$  表彈性係數， $m$  表所懸磁鐵之重量， $g$  表重力常數。

(b) 維爾德方法 (Wild's method)

用雙線懸置磁鐵，使磁鐵軸線之方向與磁子午線方向一致。次將兩線之平面轉九十度，俾其與磁子午線成垂直。此時下端所懸之磁鐵，因受地磁之影響，其軸線之方向，並不能來到真正與磁子午線垂直的地位。如欲使其與此地位一致，必須將兩條線之面，繼續再加轉動。命  $\theta$  表示此項追加轉動之角度，使用大小相等重量相等僅磁矩不同之兩磁鐵，照上述方法，分別實驗。命  $\theta_1$  及  $\theta_2$  表上述之追加角度，則其關係如下：

$$M_1 H = D \sin \theta_1, \quad M_2 H = D \sin \theta_2.$$

其中阻力  $D$  在雙方完全相等。

次用磁矩不同重量亦略異之第三磁鐵，作同樣實驗，測得追加之角度爲  $\theta_3$ ，即得

$$M_3 H = D \sin \theta_3.$$

其次再將最先之兩磁鐵，放在雙線懸置磁強計（其中之磁鐵須用  $N_2$ ）之兩邊，與磁強計內之磁鐵，作等距離  $r$ ，且與懸置面成垂直方向，即與磁子午線方向一致。求此時磁強計之偏轉命  $\theta_4$  表此時兩磁鐵之北極向地磁北極時之偏轉， $\theta_5$  表其向地磁南極時之偏轉，則得

$$M_3 H + 2M_2 \frac{M_1 + M_2}{r^3} = D_1 \sin \theta_4,$$

$$M_3 H - 2M_2 \frac{M_1 + M_2}{r} = D_1 \sin \theta_5,$$

故得

$$H^2 = \frac{4D}{r^3} \frac{\sin \theta_3 (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin \theta_4 - \sin \theta_5}.$$

其中之阻力  $D$ ，可照前述方法求之。偏轉角度  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  等測定後即可由上式計算出地磁之水平分力。

### 3. 使用衝擊電流計法

此法係測出在磁化體上所繞之副線圈中發生之應電流，由此推算副線圈內之磁感應強度，再由此即可求得磁力強度。

法在磁性體上繞一線圈，更於其上繞副線圈，將衝擊電流計 (ballistic galvanometer) 連入副線圈電路中。通電流進入原線圈中，使磁性體受磁化，則在副線圈內，即有應電流發生。用電流測出其分量，因衝擊電流計之最大偏轉，與通過其中之電量成正比例，故須先求出使用電流計之常數。

欲求電流計之常數，可用標準線圈。標準線圈由原線圈及副線圈合成。原線圈有一定不移之線圈常數，其值為  $k_{10}$ 。原線圈中有電流通過時，在其副線圈中發生之應電流，可由計算而知。故電流計之偏轉，與通過之電量間之比例常數，立可求出。

實際觀測時，係將標準線圈中之副線圈，與繞在欲測之磁性體上之副線圈，同時串聯入電流計之電路中。

命  $s$  表標準線圈之原線圈之截面積， $i$  表通入其中之電流強度， $m$  表副線圈之匝數， $Q$  表

通過其中之電量，則其關係如下：

$$Q_0 = \frac{N_0}{R} = \frac{4\pi n i m_0 s_0}{R}$$

R 表副線圈電路之電阻，再命  $\theta_0$  表此時電流計之最大偏轉，則：

$$Q_0 = K\theta_0, \quad K = \frac{Q_0}{\theta_0}$$

K 表電流計常數。

其次送電流進入繞在磁性體上之原線圈，讀出電流計之最大偏轉  $\theta$ ，則通過電量 Q，當如下：

$$Q = K\theta = Q_0 \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{msB}{R}$$

m 表繞在磁性體之副線圈之匝數，s 表其截面積，R 表其電阻，B 表磁感應強度，故得

$$B = H + 4\pi I = \frac{4\pi n i m_0 s_0 \theta}{ms\theta_0}$$

H 表磁場強度，可由通入磁性體上所繞之原線圈中之電流強度求出。故若用各種強度不同之電流通入其中，求出與之相應之磁場強度，即可依上式將各種情形下之磁感應強度及磁化強度，分別求出。



#### 4. 使用鈹螺線方法

鈹有一特性，即受磁場影響時，對於電流之電阻必改變。故可利用此特性，測定電磁鐵等造成之強大磁場之強度。法將鈹之細線，繞成一線圈，形扁平，作螺旋形。放入磁場內，因其電阻發生變化，故若預先將磁場強度與電阻變化測定，即可反轉過來，測出其電阻所生之變化，轉而計算其磁場強度。

實際上之鈹螺線圈，係繞在雲母板上，如圖32所示，成爲扁平螺旋狀線圈。其線圈之兩端，經兩條互相絕緣之銅線，連結至電流計上。

欲測磁場之強度時，先須測定鈹螺線之電阻。其次再將其扁平線圈面，放在和磁場成直角之方向上，測出其電阻。由兩次所得電阻之差，即可算出磁場強度。

按鈹之電阻，又須隨溫度而異，其變化亦頗大。故由上法測出之結果，須加以溫度之改正。

#### 5. 光學法

(A) 利用光轉偏極面法

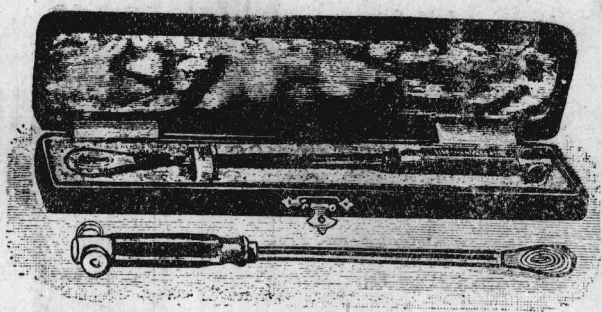


圖 32.

使平面偏極光 (plane polarized light) 由強磁場內之透明體中通過，即發生偏極面之旋轉 (rotation of plane of polarization)，其轉動角度則與磁場強度及光在物質中通過之路程，成正比。如命  $\theta$  表此項轉動角度， $H$  表磁場強度， $l$  表光所透過之板之厚，則其關係如下：

$$\theta = CHl.$$

式中之  $C$  為比例常數，通稱為弗爾德常數 (Verdet's constant)，其值由物質之性質及光之波長而定。由實驗將  $\theta$  測出，即可從上式將磁場強度  $H$  算出。

通常為此目的，多選用水晶，因其偏極面之旋轉，特別為大。水晶即不在磁場內，亦可發生偏極面之旋轉。故欲免除此種自然發生之旋轉，多用同厚之左轉及右轉水晶，合併使用。水晶之常數  $C$ ，與波長之關係，如下表所示：

波長 (μm)	C (分)	波長 (μm)	C (分)
043.9	0.01385	330.9	0.04634
589.0	0.01684	257.3	0.10725
508.6	0.0285	219.4	0.1632
480.0	0.02605	219.4	0.16032
467.9	0.02785		

## (B) 利用由磁極面反射法

使偏極光射至磁極面，由此反射而回之光，亦發生偏極面之旋轉，此為刻爾效應 (Kerr effect)。

本法即利用此效應。

實際上係用磁性體造成平板，再磨成鏡面，固定在磁鐵的一方極上，再在他一方磁極上穿孔，使平面偏極光通過。由此磁性體鏡面反射而回之光，將發生偏極面之旋轉。測定其旋轉角度，命為  $\varphi$ ，其磁化強度命為  $I$ ，關係如下：

$$\varphi = KI.$$

式中之K，即通常所謂之刻爾常數 (Kerr's constant)。由此可得

$$H = B - \frac{4\pi\phi}{K}; \quad B = H + \frac{4\pi\phi}{K}.$$

使用此法，K決不受溫度之影響。故由上式可以求出磁感應強度B。此法須在相當強大之磁場內方能生效。

#### 6. 使用線圈中之應電流法

將線圈從磁場中驟然抽出，則在線圈中有應電流發生。使用衝擊電流計，即可測定此時之磁場強度。

對於電磁鐵，因其極面異常狹小，故使用之線圈，亦須極端扁平。通常此種線圈之厚，約1毫米，直徑約5毫米而已。欲知此線圈對於感應作用之有效面積，可以之與一已知其精確直徑之單匝線圈之感應作用，互相比較決定之。法將此兩線圈串聯後，放入磁場，然後分別一一由磁場中抽出，讀出電流計之偏轉。由此兩次偏轉之比，即可求出兩線圈之有效面積之比，更由此導出所用線圈之有效面積。

用此測定磁場強度時，先將上述之線圈，與前述之標準線圈串聯後，再結至衝擊電流計上，然後將線圈放入磁場，其方向與磁場成垂直。再由磁場中驟然抽出，觀測電流計之偏轉，由此可求得磁場之強度。電流計之常數，則由標準線圈測定之。

### 7. 法拉第方法

此法大都用來測定順磁體及反磁體之導磁係數，其測定次序如下：

將順磁體或反磁體放入強度不均之磁場中。如為順磁體，則按照磁場梯度之方向，從強向弱而動；如為反磁體，則向反對方向而動。故如測定其作用之力，即可求得其係數  $K$ 。命  $f$  表在磁場梯度方向上，使磁性體移動之力，則其磁力常數、磁場強度及其梯度之間，有下列之關係式：

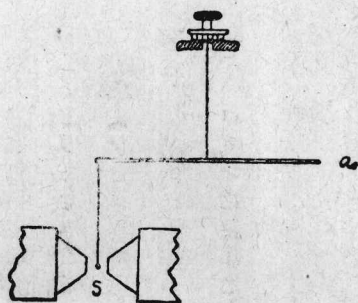
$$K = \frac{f}{VH \frac{\partial H}{\partial y}}, \text{ 及 } X = \frac{f}{mH \frac{\partial H}{\partial y}}$$

式中之  $m$  表磁性體之質量， $V$  表其容積， $\frac{\partial H}{\partial y}$  表磁場強度  $H$  之梯度，力  $f$  可用扭秤測定之。

照圖 33 所示，將所測物質放入磁場內時，係吊在扭秤的一端。物質欲沿磁場梯度移動，則扭秤



當受到扭力作用。此時將扭秤頂上之轉盤旋動，俾物質回轉原位。讀出此時轉回角度，即可算出作用於物質上之力  $f$ 。



33. 求磁場強度之梯度時，將小線圈放在磁場內各點上，一一抽出，測定各次所生之應電流，即可求得各點之磁場強度。各點之磁場強度，既已分別求得，則其對於位置之分布，即其梯度，亦已求出。結果在連結磁極之直線上，梯度為零。去此愈遠，其值愈大。如是增加至最大值以後，又漸次減小。通常係將物質放到梯度最大處，測定其作用之力。

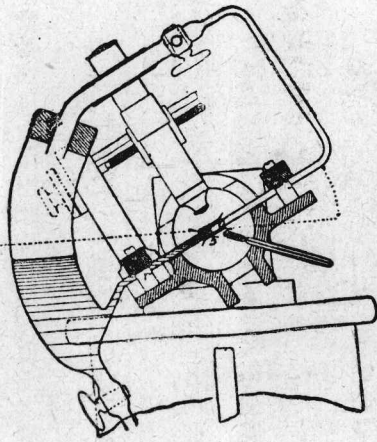
#### 8. 利用液體上昇或下降之法

此種方法，以用來測定液體之磁化係數為主。欲測之液體，盛入容器中，用細管引到磁極之間，使細管內液面，恰到磁極之中央。如此液體為順磁體，則受磁場作用後，其液面上昇。如為反磁體，則液面下降。故用顯微鏡測定液面之上昇下降，即可從下列之關係式，計算其磁化係數：

$$K = \frac{2apg}{H^2} \quad x = \frac{2ag}{H^2}$$

式中之  $a$  表液面之高低變化，亦即未受磁場作用時之液面高度，與既受磁場作用後之液面高度之差， $\rho$  表液體密度， $g$  表重力常數， $H$  表磁場強度。

欲作精密之測定，則加以適當之壓力，俾受磁場作用後之液面高度，得以恢復其未受磁場作用前之位置，即由所加之壓力，可以測出應有之液面高度變化  $a$ ，此法又名水壓法。



圖

34.

使用此法如能得知液體之磁化係數，亦可反轉去求其磁場強度  $H$ 。圖 34 所示，為丟罷之精密儀器。用此器測定磁場強度時，可用下列之關係式：

$$H = \left( \sqrt{\frac{2gp}{K}} \right) \sqrt{b \sin u}$$

式中之  $b$ ，表斜向流動之液面高度， $u$  表盛液體之斜管對於水平方向之角度， $K$  表磁體之磁化

係數。

## 第九節 地磁

### 1. 地磁三要項

地磁 (terrestrial magnetism) 爲一種宇宙現象，故其研究屬於宇宙物理學之範圍。以下僅就物理學方面，略述其概要：

地球爲一大磁石，發見甚早，已如前述。時代爲一六〇〇年，發見人爲英國之吉柏 (Gilbert)。據吉柏之說，則磁偏角 (declination) 之值，無論在地球上何處，均相等，後經該利布郎德 (Henry Gellibrand, 1597-1637) 始發見其說不確，磁偏角之值，不僅隨地而異，並隨時亦不同。

磁傾角 (dip) 之發見人爲航海家諾曼 (Robert Norman)，時在一五七六年。自一八三六年至一八四十年之間，得德國人高斯及韋柏，作種種研究，始造成其基礎。

在十七世紀中，已有在各處同時觀測之系統研究，但真正之系統研究，直至一八三五年，經高

斯及韋柏等，在革丁根 (Göttingen) 創設磁學協會之後，始行開始。其後歐、美各國，均繼之而起，全地球上成立之地磁觀測所，為數已在一萬以上。

表示地球表面之地磁強度，以及隨時隨地之變化，須有三要項。即 (1) 磁偏角、(2) 磁傾角、(3) 水平成分 (horizontal component)。如能得知此三項之值，則其處之地磁強度，即可約略決定。

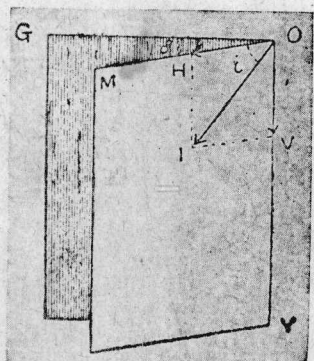


圖 35.

圖35所示，即此三要項間之關係。圖中之GOY，為一鉛直平面，表地理上子午線面，MOY表磁子午面，OI表地磁之磁場方向及其強度，位置即在於MOY平面內， $\delta$ 表磁偏角， $i$ 表磁傾角，OH表地磁之水平成分， $\alpha$ 表其鉛直成分，O表觀測地點。

2. 磁偏角

磁偏角係地球上之磁子午線 (magnetic meridian)

與地理子午線 (geographic meridian) 間之角度，如其偏

向東方，則取正號，偏西方則取負號。故其範圍在於零度與正一百八十度，及零度與負一百八十度之間。

圖36.及圖37.所示，爲等偏角線之地圖。其中圖36.表在北緯八十度與南緯六十度間之等偏線(isogonic lines)之分布狀況。圖37.之甲，表北半球之射影，乙表南半球之射影。由圖可見，等偏線在每一半球上，均有兩個會合點。其中一點與地球之一極相當，其餘一點則與地球之極相去甚遠，通稱爲偏角之極，又或稱爲地磁之極。在北半球上，此地磁之極，在於北緯七十度三十分，西經九十七度四十分。在南半球上，則在南緯七十三度三十九分，東經一百四十六度十五分。由圖可見，在地球之極與地磁之極之間，等偏角線非常密集。故知其間之磁偏角變化甚大。又其中之粗線，表磁偏角等於零之各點。

各地點之磁偏角，可照下法求出。測定時，須作兩次測定。第一，爲地理子午線之測定；第二，爲地磁子午線之測定。地理子午線之測定，爲天文學上之問題，地磁子午線之測定如下：

在條形磁石之兩端，各黏一厚紙，上開相等大之小孔，孔上用細線交錯張緊，將此條形磁石懸



磁及靜電

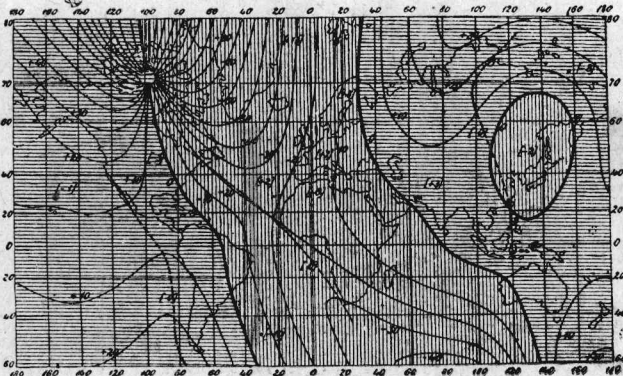


圖 36.

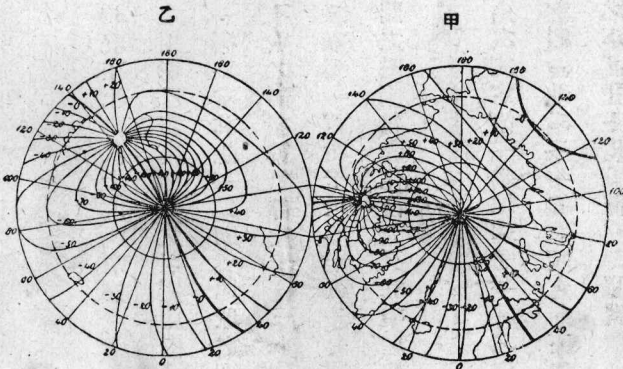


圖 37.

置，使取水平方向而成靜止。從孔中透過兩端細線交錯處望去，將看見之線記在紙上。其次將磁石顛倒位置，照前法實驗，仍在同一紙上將所見之線記下。此兩線所作之角度，即表示其地之磁子午線之方向。

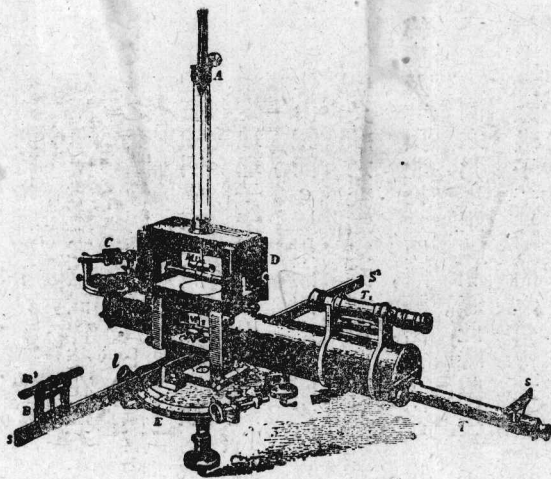


圖 38.

圖 38. 所示，為邱觀象臺 (Kew Observa-

tory) 中觀測磁偏角之儀器，其測定磁偏角，並不須要望遠鏡 T，黃銅棒 SS，及磁石 m，其中之  $M_1M_2$  係一磁石，用絲線從 A 點懸置。磁石為圓筒形，內部穿通。距望遠鏡較遠之一端，裝有標度玻璃板。距望遠鏡較近之一端，則裝一透鏡，其焦距 (focal length) 與磁石之長相等。c 為鏡面，可繞水平軸線而轉，其面可施調準，俾與望遠鏡軸線成垂直。又全體可在圓盤 E 上轉動任意角

度，實際觀測時步驟如下：

先調準望遠鏡之位置，俾裝在磁石上之標度，結成明瞭之像。其次轉動全體，俾望遠鏡之目鏡中叉絲之交點，恰到裝在磁石上之標度中央。此項轉動角度，可從顯微鏡 $l$ ，將 $E$ 之標度讀出。其次再將磁石顛倒過來，作同樣之觀測。取兩次結果之平均值，即得磁子午線之方向。

測定地理子午線時，可用望遠鏡 $T_1$ 、鏡 $c$ 及時計。使鏡面 $c$ 之垂線，與望遠鏡之軸線一致。轉動全體，俾由鏡面 $c$ 反射而回之太陽之像，可從望遠鏡 $T_1$ 中望見。測定太陽像之中心點通過望遠鏡目鏡中叉絲之交點之時刻。由此計算此時太陽與子午線間之角距離。更從表上查出此時之太陽緯度，及其與北極之距離，讀出 $E$ 上之標度。其次再將全體轉動，所轉角度恰與先前求得之太陽與子午線間之角度距離相等。此時望遠鏡之方向當與子午線之方向一致。求最後讀得之角度，與先前求得之磁子午線方向之角度之差，所得之角度，即其地之磁偏角。

### 3. 磁傾角

磁傾角爲磁針之方向與水平面間之角度，故在地球之磁極上，磁針取鉛直方向，故其磁傾角

等於九十度。在赤道上，磁針停止於水平方向，故其磁偏角等於零。圖39及圖40之甲乙表等傾線(isoclinic lines)之狀況。由圖可見磁傾角等於零之線，並不完全與赤道一致。圖中用粗線表出者，即此線，通稱爲地磁赤道。此項地磁赤道，與地理上之赤道間之角距離，隨地不同。最大之角距離，不過三十度近傍而已。在南半球上，表示有最大之偏向，在北半球上最大偏向出現在東非洲與錫蘭之間，而地理上之北極，磁傾角等於八十六度，在南極等於八十度。

測定磁傾角之法如下：先支持磁石，俾能在其中心周圍且在鉛直平面內自由轉動。其次令其轉動面與磁子午線一致，求出此時磁石軸線與水平面間之角度，即其處之磁傾角。

圖41亦爲邱觀象臺中使用的儀器，其主要部分爲磁針  $m$ ，由圓筒形之鋼軸，架在三角形之瑪瑙尖端上。此外尚有備有放大鏡之顯微鏡  $mn$ ，及放在水平位置上之圓形標度盤  $H$ 。顯微鏡  $mm'$  用來測定磁針兩端之位置，放大鏡  $og$  則用來讀出垂直固定圓盤周上之標度。先令此儀器之面正向東方，此時磁針之面亦向東方，將磁針兩端之示度讀出。次由磁針之支點，將磁針方向顛倒，照樣將其兩端所指之標度讀出。其次再令全儀器繞鉛直軸線轉動一百八十度，使其表面正

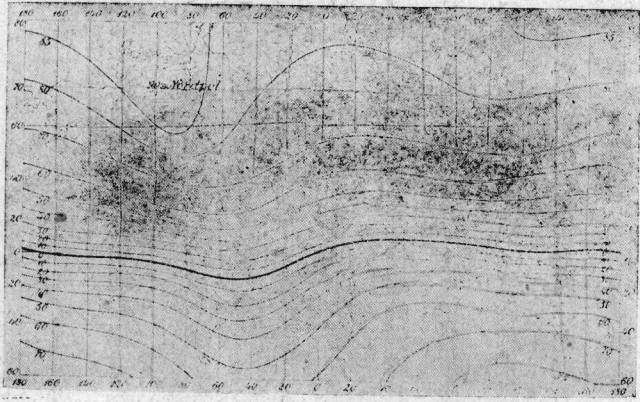


圖 39.

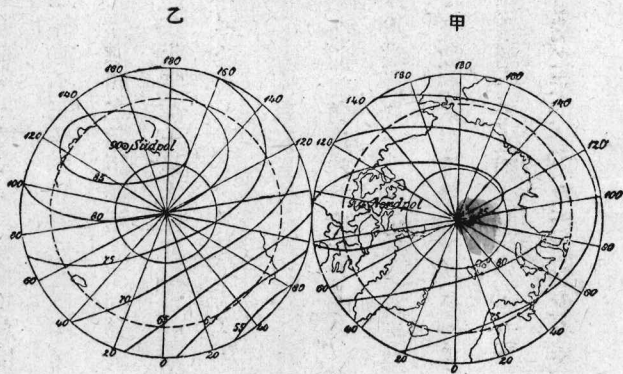


圖 40.



向西方，照前法讀出四個示度。其次亦復如前，將磁針顛倒過來，讀出八個示度。將總計十六個讀數平均之，即可消除一切誤差，得到正確磁傾角數值。

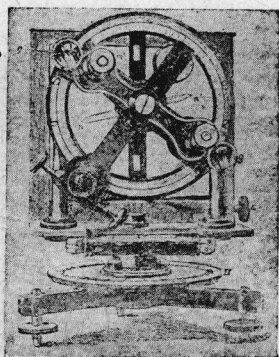


圖 41.

各線上標出之數字，即其水平成分之強度，單位則用絕對單位。

圖 42. 及 43. 爲等力線 (isodynamic lines) 分布之狀況。

#### 4. 水平成分

在地球磁極上，磁石恆取鉛直位置，故其處之水平成分

爲零。在地磁赤道上，磁計在水平方向上，取任意位置，故此處之水平成分最大，即地球在此等地所，與其全體之強度相等。圖中用粗線表示之部分，幾與磁傾角之磁赤道相等，表示水平成分最大之等力線，又稱爲水平成分赤道。等力線之分布狀況，大致與等傾線之分布狀況相同。

測定等力線，包有兩種測定在內：(1) 將磁石懸置成爲水平，使其振動如擺，求其週期，即可由下列各式，計算其各種量：

磁及靜電

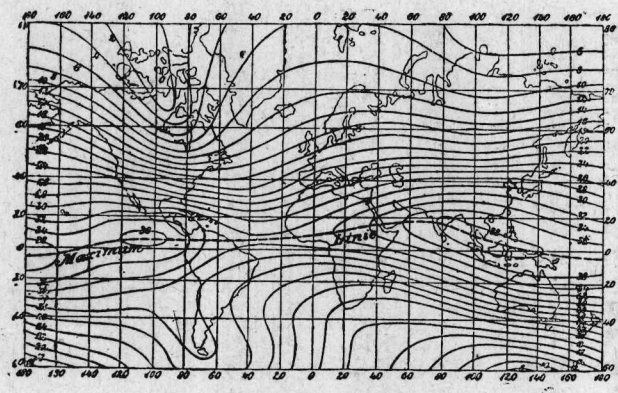


圖 42.

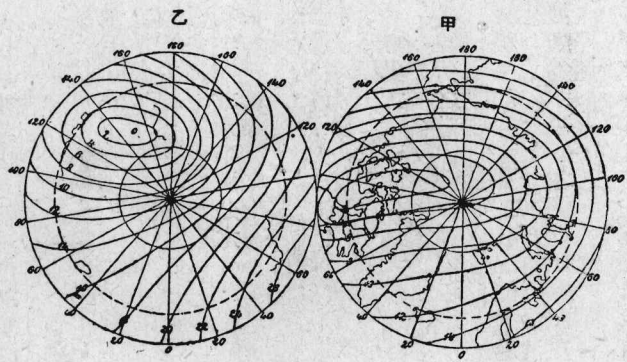


圖 43.

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{J}{MH}} \quad \text{或} \quad MH = \frac{4\pi^2 J}{t^2}$$

式中之  $J$ ，表磁石之惰矩， $M$  表磁矩。(2) 使用磁強計測定此磁石之強度，此法已在前面測定磁量時詳述之，其關係式如下：

$$\frac{M}{H} = (d^2 + l^2)^{\frac{3}{2}} \tan \theta$$

式中之  $d$  表磁強計中之磁石中心，與欲測之磁石中心間之距離。 $2l$  表磁石之長， $\theta$  表磁強計上鏡面之偏轉角度。從上列兩式，求得水平成分  $H$  之關係式如次：

$$H^2 = \frac{4\pi^2 J}{t^2 (d^2 + l^2)^{\frac{3}{2}} \tan \theta}$$

使用之磁石如為圓柱形，則其惰矩如下：

$$J = \left( \frac{4l^2}{12} + \frac{r^2}{4} \right) w$$

其中之  $2l$ ，表磁石之長， $r$  表截面積半徑， $w$  表磁石之重量，單位用克。

邱觀象臺測定水平分力之儀器，如圖 38。令磁石  $M_1$  與其附屬之黃銅圓筒共同振動，測出其週

期，命爲  $t_1$ 。其次除去黃銅圓筒，令磁石  $M_1$  單獨振動，測出其週期，命爲  $t_2$ 。從下式求磁石  $M_1$  之惰矩  $J_1$ ；

即

$$t_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_1 + j}{MH}}, \quad t_2 = 2\pi \sqrt{\frac{j}{MH}}, \quad J_1 = j \frac{t_1^2}{t_2^2 - t_1^2}$$

式中之  $j$ ，表黃銅圓筒之惰矩，可預行測定。

其次將儀器上之木箱  $D$ ，及望遠鏡  $T_1$  撤下，將玻璃管  $A$  放下，使其停放於下部箱上。磁石  $M_2$  上裝有一鏡面，其方向與磁石軸線垂直。望遠鏡  $T$  上附有標度尺  $S$ 。此標度尺經磁石  $M_2$  下面之鏡反射後，入於望遠鏡中。調準其位置，俾標度尺之中心點，恰到目鏡中叉絲之交點。其次將磁石  $M_1$  放入  $m_1$  之位置上，此時  $M_2$  即發生振動。令全體繞鉛直軸線而轉，俾標度尺之中心點，恰到望遠鏡  $T$  之叉絲上。由水平標度盤上，讀出偏轉角度，命爲  $\theta$ 。因磁石  $M_1$  之位置與  $M_2$  互成垂直，故有下列之關係：

$$\frac{M}{H} = \frac{(d^2 - l^2)^2}{2d} \sin \theta,$$

故由此可以算出  $H$ 。

世界上各重要地點之磁偏角、磁傾角及水平成分，有一九〇一年斯密德蒐集之資料，列表如

地 點	磁 偏 角	磁 傾 角	水 平 成 分
Powlovszk	0°40'	70°36'	0.1666
Kopenhagen	-10°10'	68°33'	0.175
Potsdam	-9°54'	66°24'	0.189
Irkutsk	2°1'	70°16'	0.201
De Bilt	-13°48'	66°56'	0.185
Kew	-16°51'	67°11'	0.184
Greenwich	-16°28'	67°6'	0.185
Brussel	-14°11'	66°9'	0.190
Praha	-9°4'	.....	0.200
München	-10°25'	63°17'	0.206
Tronto	-5°30'	74°32'	0.167



地點	磁偏角	磁傾角	水平成分
Nizza	-11°56'	60°10'	0.224
Coimbra	-17°18'	59°22'	0.228
San Fernando	-15°88'	55°9'	0.247
東京	-4°37'	49°3'	0.299
香港	0°17'	31°23'	0.368
Bombay	0°23'	21°26'	0.374
Manila	0°52'	16°14'	0.381
Batavia	1°6'	-30°7'	0.368
Rio de Janeiro	-8°3'	-13°20'	0.250

## 5. 地磁之時間變化

同一地點之磁偏角、磁傾角及水平成分，若不絕加以測定，即見其值隨時均略有不同。

## (1) 磁偏角之時間變化

觀測磁偏角對於時間之變化，大致如一種拋物線形狀，其關係如下：

$$D = D_0 - a(t - t_0) - b(t - t_0)^2$$

式中之  $D$ ，表在時刻  $t$  時之磁偏角。  $a$  及  $b$  各為常數，其值由所在地點而定。  $D_0$  表在另一時刻  $t_0$  時之磁偏角。其變化狀況，如圖 44 所示。此圖所表示者，為法國巴黎之磁偏角所起之變化。縱軸表年號，橫線  $O$  表境界線。在其右方者，表向東偏；在其左方者，表向西偏。由圖可見其變化由東而西，後由西而東，作一種週期性變化，其半週約為二百三十年。

(2) 磁傾角之時間變化

磁傾角之隨時間變化，不如磁偏角之甚，但其變化狀況，仍為一種拋物線關係，其式如下：

$$I = I_0 + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2$$

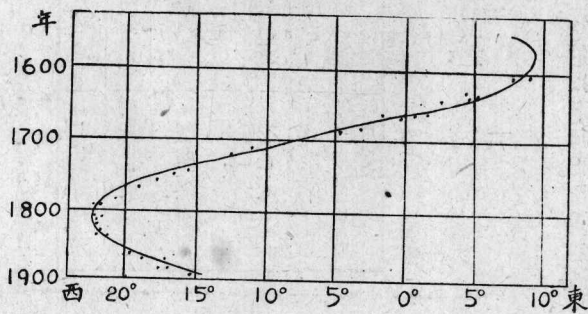


圖 44.

其意亦與磁偏角之公式同，在法國巴黎觀測所得之結果如下：

年 號	磁 傾 角	一年間之變化	年 號	磁 傾 角	一年間之變化
1671	75° 0'	1.8'	1831	67° 40'	4.0'
1780	71° 48'	6.0'	1835	67° 24'	2.5'
1806	69° 12'	4.5'	1858	66° 26'	2.4,
1814	68° 36'	2.7'	1885	65° 20'	1.1'
1820	68° 20'	4.0'	1912	64° 50'	—
1825	68° 0'	3.3'			

(3) 水平成分之時間變化

水平成分之隨時變化，亦成一種拋物線關係，可用下列之式表出之：

$$H = H_0 + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2$$

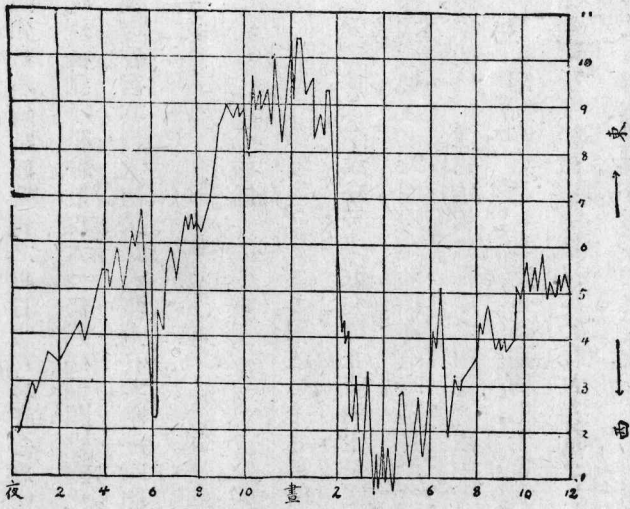
據法國巴黎觀測之結果，自一八四八年至一八八五年之間，水平成分從22變到28。此種變化，當然隨地略有不同，並且每日亦有差別。就一日間之變化而論，以磁偏角之變化最大，水平成分次之，磁

傾角最小。通常磁偏角之每日變化，以正午近傍爲最大，午前及午後均各有其最小值。磁傾角之變化規模雖小，但其狀況大致仍與磁偏角之變化相同。水平成分之變化，則以正午時爲最小，午前午後均各有其最大值。又最大值及在其附近時間之值，對於最小值及其近傍時間之值，出現於反對方。

## 6. 磁暴

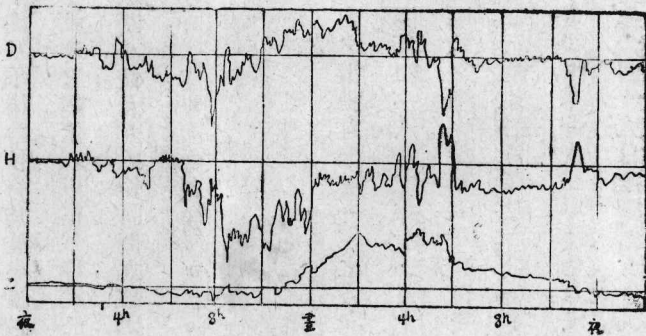
磁暴 (magnetic storm)，顧名思義亦足以察知其爲地磁之激烈變化，及非常之變化。其主要之變化爲水平成分及磁偏角靜止着的磁針，突然發生劇烈之振動，且漫無一定之方向。即此現象通常所經歷之時間均極短，然亦有時延長至二小時之久。圖45即一八八二年十一月十五日極地觀象臺所得之記錄，爲磁暴中之顯著者。圖中所示爲其磁偏角之變化，橫軸示時間，自午夜零時起，一晝夜間所得之結果。其變化範圍約七十度。對於同一磁暴，如從各地同時觀測，即見其強度隨地而異。最先到來者較爲微弱，其次爲主要部分之強烈變化，最後又來一後暴，以作結束。磁暴中變化最大者爲水平成分，磁偏角之變化極小。圖46爲一九一五年六月十九日德國 (Potsdam) 紀錄之

磁及靜電



— 26 —

圖 45.



七二

圖 46.



磁暴，表示水平成分H、磁偏角D、及其鉛直成分Z等變化之狀況，又與地球之極愈近，磁暴發生之次數愈多。從可推知地球之極，磁暴必異常頻繁。

又一日之中，在晝間發生之磁暴，大都較在夜間發生者為強。發生次數則以正午時為最少，晚間最多。再就一年間而論，二月與十月佔最大數，六月與十二月佔最少數。故知其變化為週期性，而其週期約為半年。圖47表示一日中所起之磁暴次數之變化。圖48所示，則為一年中所起次數之變

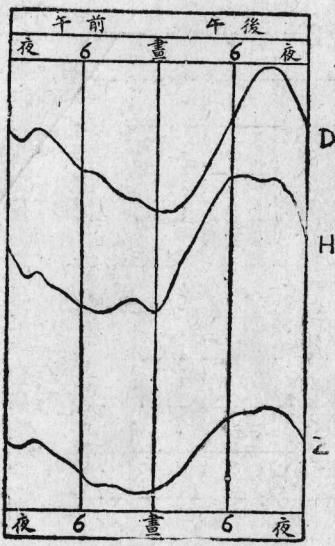


圖 47.

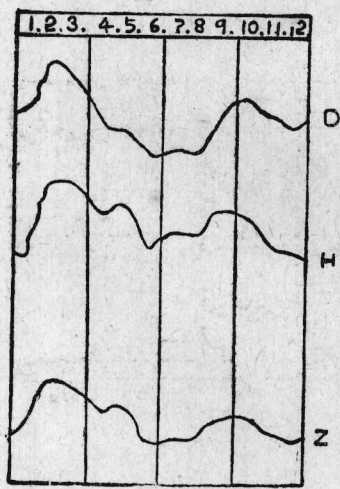


圖 48.

化。據觀測結果，知磁暴發生之次數，與日斑 (sunspot) 數之變化，大致並行。

關於磁暴之發生，有人以爲係電自太陽飛來，因此攪動地磁，但尙無詳細之說明。

## 第二章 電

### 第一節 靜電

#### 1. 電之歷史

磁鐵礦之能吸引鐵粉，與琥珀引芥，均由希臘人退利斯所發見。故最先發見之電，實爲由摩擦而生之電。當時一般稱金與銀之合金，以及金之本身，均曰 *electron*。因其色黃，與琥珀類似，故凡摩擦琥珀所具有之特性，亦稱之曰 *electricity*，即現所謂之電。其後又歷三世紀之久，經西俄夫拉斯塔斯 (*Theophrastus of Eresus, 371-286 B. C.*) 發見，尙有其他之礦物，亦能由摩擦使之帶電。摩擦琥珀後被其吸引之物體，曰帶電體 (*electrified body*)。如爲金屬，則不能吸，如是者稱爲非帶電體。又最初創用電性吸引，以及電力等類名稱者，爲吉柏。至十七世紀時，關於帶電體間發生

之吸引與排斥等類，頗能引起研究者之興趣，故研究所得之結果亦不少。

牛頓在英國皇家學院中用布摩擦玻璃棒，即能吸引紙屑，當場實驗，觀者爲之震驚，其事載在皇家學院紀錄中。

德國之革耳刻 (Otto von Guericke, 1602-1686) 用磁製成一球，令其轉動，以手觸之，亦能生電。

英國之波義耳亦曾發見真空中電之吸引。

在全物理學中，電之發達極遲，一直到十八世紀以後，電學始得長足進步。

格雷 (Stephen Gray, 1670-1736) 曾取種種物質，實驗結果，分一切物質爲兩類。一類能將電傳導而去，他一類則不能。同時發見人之身體，亦爲一種導體。並於一七三〇年，用絲線將人懸住，使之帶電。其後又發見可用樹脂等類物質，使導電體絕緣。

丟腓 (Dufay, 1698-1739) 因受格雷實驗之激刺，亦作各種帶電之實驗。結果創出電有兩種之說，以爲電係兩種性質。各不相同之流體，如彼此分量相等，則互相抵消，並無電之作用表現於

外。摩擦帶電體之目的，在於使其原有之兩種電，彼此分開。所以有電作用表出。卽用此假說，作吸引與排斥之解釋。

其後更有德國之戈登 (Andrew Gordon)、瑞士之馬爾丁·蒲郎德 (Martin Planta)、英國之藍茲登 (Jesse Ramsden)、法國之溫克勒 (Johann Heimpler) 等，製成發生摩擦電之機械。更於一七六二年，改良後，遂能產生大量之摩擦電。各種實驗，由是得以暢行。

將摩擦電儲蓄於包藏導體之玻璃瓶內，以指觸之，卽覺受震，此現象係德國牧師克來斯特 (Ewald Georg von Kleist) 在一七四五年發見。二年後，荷蘭來頓地方之穆申布洛克 (Peter van Musschenbroek, 1692-1761)，在瓶內盛水，使其帶電。其友人克紐斯 (Cinnaeus) 一手執此帶電之瓶，他手欲去其帶電之導線，因此受到強烈震動，爲之大驚。經過種種研究之後，穆申布洛克寄信與列氏 (Réaumur, 1683-1757)，仍宣言雖與之以法蘭西王國，亦不願再受到此項電擊云。此卽來頓瓶 (Legden jar) 發見時之情形。來頓瓶發見以後，研究電學者，又得到極有力之武器。

佛蘭克林 (Benjamin Franklin, 1706-1790) 不贊成手腓之二一流體說 (two-fluid theory)



以爲只有一種流體，是爲一流體說 (one-fluid theory)。一切物體均共同有一定分量，如因某種原因，致其所有者較此一定分量略多，則帶陽電。反之，如較此一定分量少，則帶陰電。由是而得陽電 (positive electricity) 及陰電 (negative electricity) 之名。直至法拉第 (Faraday) 及馬克士威 (Maxwell) 爲止，此種電之物質論，均爲人所採用。佛蘭克林更於一七四九年夏間，懷疑來頓瓶放電時出現之電花 (spark)，是否即天空中出現之閃電 (lightning)，遂進而實驗，以爲可用一條導線將雷導入來頓瓶內。但當時美國尙無高大建築，足供其作此實驗。後來由法國人達里罷 (Dalibard)，在巴黎郊外，於一七五二年，居然實驗成功。用十三米長之金屬棒，豎立在下部絕緣之棹面上。在其近旁將黃銅導線放在玻璃瓶上，俾能從金屬棒上發生電花。果然雷雲從此金屬棒上通過。同時在棹上與銅導線之間，有電花出現。一時傳爲有妖物沿棒降落。其後佛蘭克林始想到放起紙鳶，將雷引下，卽由紙鳶之線，使來頓瓶帶電。由是遂證明雷亦電現象之一種。再後佛蘭克林又將紙鳶上之線電，導入其研究室中，檢查的結果，發見雷之電爲陰電。佛蘭克林之研究，後又引出狄衛士 (Procopius Divisch) 對於避電針 (lightning arrester) 之發明。

降及十八世紀之末，靜電學之研究更盛，其進步愈形顯著。其中尤應特筆書之者，有英國之卡汾狄士 (Henry Cavendish, 1731-1810) 及法國之庫隆 (Charles Augustin Coulomb, 1736-1806)。卡汾狄士關於化學、熱學及電學，均曾做過不少實驗。其關於靜電學上之重要實驗，大都在於一七七三年。但其大部分從未發表於世。後經理論物理學大家馬克士威，始爲之宣揚。其所作實驗，爲關於容電器 (condenser) 之電容 (capacity) 爲主。現今使用之電容單位爲釐米，在當時卡汾狄士則用英寸。曾將各種介質 (dielectrics) 之介質常數 (dielectric constant) 測定。現今使用之電勢 (potential)，在當時卡汾狄士則稱之爲帶電度。又曾證明作用於導體間之電力，與兩者之距離平方成反比例。

庫隆於一七七七年研究帶電之頭髮及線條之扭力，結果發明扭稱 (torsion balance)。其後又證明電及磁之引斥力關係，與牛頓之萬有引力定律相同。即兩帶電體間作用之引力，與兩者之電量乘積爲正比例，與兩者間之距離平方爲反比例。這就是通常所謂的庫隆定律 (Coulomb's law)。庫隆贊成二流體說，並提倡超距作用 (action at a distance) 學說。以爲兩電荷間作用之力，

與介在兩者間之介質無關。

醫學家賈法尼 (Aloisis Galvani, 1737-1798) 在一七八〇年得一偶然機會，發見電流通入蛙之筋肉中，可使蛙足抽動，由是發見電流在物體中通過。

伏打 (Alessandro Volta, 1745-1827) 因受賈法尼發見之影響，在研究動物電時，將銀幣和金幣，放在人類舌的兩邊，各連一導線，即覺舌上受到一種刺激。經種種研究之結果，發見電不僅在帶電體內可起運動，並能刺激動物神經。且此項刺激，由於不同種類之金屬，互相接觸而來。如是一八〇五年，發見鋅板與銅板接觸，可以生電，因名之曰人工起電器，而報告於英國之皇家學院。這就是第一個伏打電池 (Voltaic cell)。其後不久，即由英國之尼可遜 (William Nicholson) 造成電池，用來做水的電解，這一實驗後來即成爲電化學 (electrochemistry) 之基礎。

十七世紀中之著名研究大家，當推德斐 (Sir Humphery Davy, 1778-1829)。其所作之實驗，以電化學爲主要。其著名之實驗，爲鹼類之電解。由此使鉀鈉等金屬，分離出來，遂於一八〇七年發見鉀元素及鈉元素。當時電化學上尤以電解問題，膾炙人口。結果引起學者對於伏打電池之電

動勢 (electromotive force) 加以研究。意大利之法布洛泥 (Giov. Val. Mattia Fabroni, 1752-1822) 等信爲伏打電池之電動勢，由於化學作用而來。其後經法拉第作種種實驗，知接觸作用之起因，可由化學作用代替。據涅龍斯特 (Walter Nernst) 所說，則由於電解質內所生之游子 (ion) 之作用。

一八三六年英國丹聶爾 (John Frederic Daniell, 1790-1845) 造成丹聶爾電池 (Daniell cell)，由一定之電源可得強力之電流。其後一八四一年丹聶爾電池更經改良，遂成本生電池 (Bunsen cell)。一八六七年由勒克蘭社 (Georges Leclanche, 1839-1882) 造成勒克蘭社電池 (Leclanche cell)。一八七三年又有葛拉克 (Latimer Clark) 造成葛拉克電池 (Clark cell)，有一定之電動勢。其後更經多數人爲之改良，遂成現今之標準電池 (standard cell)。

一八〇三年德國之立特由水之電解，想到一種蓄電備用之蓄電池 (storage cell)。一八五九年普隆特 (Plante, 1834-1889) 用鉛板作電極，爲之造成。送電流入內，則其陽極鉛板蒙上一層氧化鉛，陰極之鉛板則成爲多孔性，是即灌電 (to charge)。較諸以前所述各種原電池 (primary

cell), 電勢既高, 電流又大。後於一八八一年經福爾再為改良, 用氧化鉛塗在鉛板上以代鉛板, 則其所蓄之電量, 更為增大。

一八一九年丁抹人厄斯特(Hans Christian Oersted, 1777-1851)使用電池, 發見電流對於磁石之影響。當時安培(Andre Marie Ampere, 1775-1836)亦正發見電流與電流之間有吸引或排斥之作用存在。即使用兩條平行導線實驗, 令電流流入其中。如兩線上之電流方向相同, 則互相排斥; 如方向相反, 則互相吸引。一似載有電流之導體, 與一磁石性質相同, 這就是安培定律(Ampere's law)。

歐姆(Georg Simon Ohm, 1789-1854)為發見歐姆定律(Ohm's law)之人。於一八二六年作各種金屬之導電係數(conductivity)之測定, 逆推出關於電阻(resistance)之歐姆定律。有歐姆定律之後, 對於電阻精密測定, 遂成為必要, 因此遂有惠斯登(Charles Wheatstone, 1802-1875), 作電阻測定器之研究。後於一八四三年, 遂造成有名之惠斯登電橋(Wheatstone bridge)。十九世紀中最偉大之實驗電學家, 當首推法拉第。一八三一年由彼發見應電流, 成為電動機



(motor) 及發電機 (dynamo) 發明之先鋒。又由電解研究出游子電量之測定，並發見電解定律 (law of electrolysis)。

美國人亨利 (Joseph Henry, 1799-1878) 於一八三二年發見自感應 (self-induction)。翌年法拉第亦發見之。其後亨利又於一八四二年實驗來頓瓶放電時，發見電振動，對於後來之電磁說，有重大之任務。其後於一八四七年，經赫爾姆霍斯 (Helmholtz, 1821-1894) 由實驗上，一八五三年經經愷 (Kelvin) 氏由數學上，爲之證明。

法拉第自一八三五年來，卽作靜電感應之研究，結果知電力之作用，並非由於超距作用，實由於絕緣體之介質內，有一種微粒作用。微粒依次相傳，遂將作用傳達至於遠處。欲用實驗作證，遂做各種實驗研究，結果得一結論。卽感應之力並不如超距作用所主張之直線進行，而在其間之介質內，沿曲線傳達。因稱之爲力線 (line of force)。中間之介質不同，其強度亦隨之而異。由是遂引出絕緣質所特有之介質常數。

法拉第的大發見，後由馬克士威用數學爲之統一。在一八六一年及其翌年，發表其論文，題目

爲物理的力線。在絕緣質內受電力作用後，電荷之分佈，發生變化。因此發生一種電流，與導體內之電流相別，特稱之爲位移電流 (displacement current)。馬克士威即引用此種位移電流，來整理法拉第研究之結果，在一八七三年出版電磁學書中，發表其光之電磁說。

馬克士威之光之電磁說，其後由德國之赫芝 (Heinrich Hertz, 1857-1894) 於一八八八年，用實驗爲之證明。赫芝使來頓瓶放電，因此發見有電磁波 (electromagnetic wave) 射出。又造一種電磁波之器具，名曰赫芝振動器 (Hertz oscillator)。現今盛行之無線電，即由赫芝之發明發展而成。其後英國之洛治 (Sir Oliver Lodge) 等，即由赫芝所發表之論文，造成粉末檢波器 (coherer)。在理論電學中，最初導入電勢 (potential) 之觀念者，爲德國之格林 (Green, 1793-1841)。對於理論上之研究，實有重大之意義。

一八三二年德國之高斯提倡應有一種絕對單位，遂利用地磁理論之結果，以求之。其後經韋柏將電學上各種量之絕對單位分別導出。電阻之實用單位，最初由俄國之雅科俾 (Jacob) 提議，採用一定大小的銅線，將其電阻用絕對單位測出，再取其一定之比例，爲實用單位。然銅線之變化

甚大，故一八六〇年德國之西門子 (Siemens, 1816-1892) 提議用長一米截面積一平方毫米之汞柱，在攝氏〇度時之電阻，爲電阻之實用單位。一八八一年巴黎召開國際電學會議時，始決定廢棄以前所定之 B. A. 單位，而將韋柏之絕對單位中之釐、米、秒、克採用。並以絕對單位之十億倍定爲實用單位，而稱之爲一歐姆 (Ohm)。同時又由絕對單位決定出伏特 (Volt)、安培 (Ampere)、庫隆 (Coulomb)、法拉第 (Farad) 等各種單位。一八九二年在英國召集公議中，又改定歐姆之實用單位。以長一、〇六三毫米，截面積一平方毫米，在攝氏〇度，有質量一四·四五二一克之汞柱，所有之電阻，爲一歐姆。又在此會中，決定以亨利 (Henry) 爲自感應 (self-induction) 之實用單位。

十九世紀中葉，真空放電之研究，極爲盛行。德國有蓋斯勒 (Heinrich Geissler, 1814-1897) 造成蓋斯勒管 (Geissler tube)。關於真空管中出現之種種放電現象，則由英國之克魯克斯 (William Crookes, 1832-1919) 發見，並稱由真空管中陰極而出之放射線，爲物質之第四態 (ultragaseous state 或 fourth state)。此種陰極射線經赫芝及勒納爾 (Lenard) 作種種研究，始發見其性質係由帶有陰電荷之電子而成。一八九五年德國之羅琴 (Röntgen) 在用克魯克

斯管作真空放電研究時，發見在相當遠處之鉑氰化銀板上，有光發出。由此發見此種放射線，有貫穿通常光線所不能透過之物質之性質。鱗琴因稱之爲X線射(X-ray)。翌年經湯姆遜及其他諸人之研究，得知X射線與陰極射線完全不同。

一八九六年法國之柏克勒爾(Henry Becquerel)發見鈾(uranium)之化合物中，亦有類似X射線性質之放射線發出。同時又由居里(Curie, 1859-1906)及斯密德(Schmidt)發見，鈾(thorium)中亦有同樣放射線射出。凡此種種，均發見鐳(radium)及發見放射性(radioactivity)之前驅。

熱電流現象係一八二一年德國人席具克(Seebeck, 1770-1831)所發見，十三年後由法國人柏爾提(Peltier)發見柏爾提效應(Peltier effect)。

根據法拉第及亨利發見之應電流原理，一八六六年德國西門子及法國之格刺謨(Gramme)等，利用電磁石製成發電機。其後更經多數學者改良，效率大增。發電機之效率既大，於是電燈使用之燈泡製造之研究，亦隨之盛行。其中以美國之愛迪生(Edison)對於白熾電燈之燈絲，

特爲改良成爲碳絲燈泡 (carbon filament lamp)。

一方面又利用法拉第、亨利發明之應電流，以供通信之用。最初提出者爲安培，一八三三年最初作電報實驗者，爲德國之高斯及韋柏。其後一八三七年經美國之模斯 (Morse) 發明電碼 (Morse code) 後，一八四四年始在美國 華盛頓與巴爾的摩 (Baltimore) 之間，開始商業上通信。一八三七年始開始海電實驗，大西洋之海底電報，則至一八五七年方開始。對於海底電報收發時差等，發生困難，得湯姆遜之理論上研究，始得解決。於是一八五八年英、美間始成通電。

電報成功以後，更繼之以電話研究。最初由法國於一八五四年有理論方面之研究。其後於一八七六年，經美國之柏耳 (Bell) 造成現今使用之電筒 (receiver)。惜尚不完全，後於一八七七年經愛迪生造成發話器 (transmitter)。現今所使用者，卽由此改良而成。柏耳以發明電鈴著名。

經法拉第發見電解定律之後，關於電之理論，遂由流體說一轉而爲微粒說 (corpuscular theory)。一方面又有光學現象，尤其是受強力磁場作用後，光譜之頻率，發生變化之現象，卽所謂最曼效應，由事實上證明電之微粒說。於是遂有一八九二年羅倫徹 (Lorentz)，一八九四年拉馬



(Raman) 等提出電子說 (electron theory) 主張由理論方面討論電之微粒組織及物質之電子組織。更經陰極射線、X 射線及放射質發出之放射線等之研究，得到實驗上之證據。一八九六年經荷蘭人最曼之手，發見最曼效應，認其原因出於電子之作用。一八九七年又經湯姆遜及韋赫耳特 (Wiechert) 等發見陰極射線，亦由電子而成。又證明自鐳放出之  $\beta$  射線，亦為電子。一九一〇年及一九一二年美國密爾根 (Millikan) 精密測得電子所有之電荷為  $4.77 \times 10^{-10}$  靜電單位。並知其質量約等於氫原子質量之一千八百分之一。於是電量由電子組成，物質亦由電子組成之說，在理論實驗雙方，都得到確認。

一九〇八年英國之刺德福 (Rutherford) 發見自放射質發出之放射線中，除電子而外，尚含有一種陽電射線，其電量適成為電子之整數倍，即所謂  $\alpha$  射線 ( $\alpha$  ray) 是也。一九一〇年經湯姆遜，一九一一年經刺德福，一九一三年經波耳 (Bohr) 等製成種種原子模型，由電子及陽核 (positive nucleus) 而成。

綜上觀之，物質係由電構成之說，已具有不可動搖之堅固根據。於是馬克士威所提出之光之

電磁說，不得不改變成爲電子說。凡關於電子論方面之考察，已在各種方向上，得到偉大之貢獻。例如現今盛行之無線電，其接收機中之真空管，不外利用金屬線因受熱而放電子之一現象而已。

## 2. 摩擦起電

用適當材料摩擦物體，即得到一種特性，能將在其近旁之輕微物體吸住。此時此物體稱爲帶電 (electrified)，或稱爲已具有相當之電荷 (charge)。例如用綢摩擦玻璃棒，可使玻璃棒帶電，能將在其近旁之紙屑等吸住。如再加摩擦，其吸引之力亦隨之增強。又用絨布擦火漆棒，亦可使火漆帶電。

試取一已帶電之火漆棒，用絲線懸吊。另將第二條帶電火漆棒，持到其近旁。即見彼此互相排斥。反之，如改用已帶電之玻璃棒，接近此懸吊着的火漆棒，即見彼此互相吸引。

如是同屬帶電，但因物質種類不同，所表現之情況亦異。照佛蘭克林之命名法，用綢擦玻璃在玻璃上出現之電，稱爲陽電 (positive electricity)；用絨布擦火漆，在火漆上出現之電，稱爲陰電 (negative electricity)。如此，上述現象即爲同名之電相斥，異名之電相引。再進一步而論，兩物體

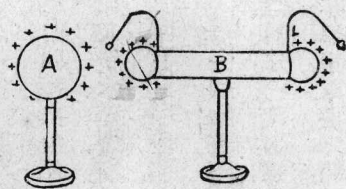
互相摩擦時，兩物體上均各帶電。一方所帶者爲陽電，他一方所帶者爲陰電。茲將常見各種物質帶電之次序，列舉如下：

絨布、玻璃、金屬、樹脂、羊毛、綢、橡皮、硫、水晶、木料、火漆。

上表中任取兩種摩擦，位置在前者均帶陽電，在後者均帶陰電。

據十八世紀中丟腓提出之二流體說。陽電與陰電爲完全不同之兩種流體，用以解釋摩擦生電之現象。其後佛蘭克林提出一流體說，以爲僅有陽電一種。當其進入中性物體之中，即成爲帶陽電。反之，如自中性物體中取去若干之電，即成爲帶陰電。但據最近提倡之電子說，則電子爲帶有陰電之物，用以說明摩擦起電時，適與前說相反。即從中性物體中取去若干個電子，則帶陽電；若附加以若干電子，則帶陰電。

利用靜電感應 (electrostatic induction)，亦可使物體帶電。如圖 49 所示，先使絕緣之導體 A 帶電，次在其近旁放第二導體 B，亦同樣絕緣，並附有金屬小球於其兩端。如 A 上所帶之電爲陽電，則與 A 最接近之 B 上之一端，即帶陰電，其較遠之一端，則帶陽電。試再用一條導線將 B 與地球連



49. 結，則B與地球成爲一體。其最遠之一端應爲地球，故應行出現之陽電，全部生於地球之上，因而全部消失。僅餘最近一端出現之電，於B之上。其移到地球上去之電，通稱爲自由電 (free electricity)。殘留在B上之電，稱爲束縛電 (bound electricity)。或稱爲自由電荷 (free charge)，與束

圖 縛電荷 (bound charge)。所謂束縛之者，即受A上電荷之束縛，不能自由移動之意也。其次再將B與地球間之聯絡分開，然後將A移到遠方。此時B上之電，即遍布於B全體之上，成爲自由電荷矣。其電荷之符號，則與A上之符號相反。又當A在B之近旁，受A之影響兩端各帶不同符號之電荷時，即將A移至遠處，俾不再有影響達於B上，則B上所帶之電，陰陽恰相抵銷，成爲中和，完全消滅無餘。由此可知，因受A之影響，在B上出現之陽電與陰電，其量恆相等。

### 3. 導體與非導體

帶電後之火漆棒或持在手內，或用銅線等使其與地球連結，則火漆上所帶之電，即失去其一

部分。又若將金屬球放在玻璃板或橡膠板上，以帶電後之棒接觸之，金屬球亦能帶電。即帶電後之棒上之電，移到金屬球上。其次再將絕緣金屬球與帶電之金屬球相接觸，電亦由此球移到彼球，使絕緣之金屬球帶電。再用手或用銅線等類，將帶電後之絕緣金屬球與地球聯絡，則其所帶之電，即完全消歸烏有。

綜上觀之，用與地球聯絡之金屬與火漆相接觸，則僅有相接觸之一部分失卻電荷。如係金屬球與地球一點相連，則其全部電荷均行失去。可見火漆等類物質，電在其中移動，極不自由，而在金屬內，則甚自由。凡電能在其中自由移動之物質，稱爲導體 (conductor)。一般之金屬均爲導體。又人體、水、碳、含有水分之纖維物質等，亦均爲導體。與此相對，電在其中移動不自由者，曰非導體 (non-conductor)。空氣、玻璃、火漆、橡皮、硫、綢、油類、乾燥之紙、木料等，均爲人所盡知之非導體。

一切物質不問其爲天然產生，或由人工製造而成，均可分作導體與非導體。但此兩者間之嚴格區分，已甚困難，完全之導體固不存在，完全之非導體亦無之。實際之一切物體，均介在於導體與非導體兩者之間。其相互間之差異，僅其中含有之自由電子數，有多寡之不同而已。但自由電子之



數，又須視此物質之物理狀態而有變化。例如石蠟一物，在固態時爲非導體，但受熱溶成液態後，卽成爲顯著之導體矣。故何種物質爲導體，何種物質爲非導體，實難繼言。只能將特別容易導電者，認爲導體，特別不容易導電者，認爲非導體而已。通常對於比玻璃稍易導電之物體，特稱爲半導體 (semi-conductor)。

#### 4. 靜電計

測定靜電荷之儀器，稱爲靜電計 (electrometer)。最常見者爲金箔驗電器 (gold-leaf electroscope)，用以測定小量之靜電荷，極爲便利。其構造如下：

有一金屬棒，固定在金屬板上。棒之下端附有金箔兩細條，密裝在玻璃箱內。金屬棒與箱，互相絕緣，俾棒上所帶之電，不致逸失。先將已知符號之一定電量，加在金屬板上，卽見金箔張開之角度，或增或減。無論增減，其變化程度，恆與持來之帶電體所帶之電量，具有關係。故由其角度之增減，可知電荷之爲陰爲陽。由其增減之程度，可以推知其電荷之分量。欲得精密之結果，可用布朗氏靜電計。外箱由金屬製成，形如圓筒。下端不用金箔，而以一可以轉動之金屬針代之。其轉動軸線在水平

方向上，針尖指在標度上。其轉動可由標度上讀出。箱之前後均裝玻璃窗，通常測定大量之電荷，多使用之。

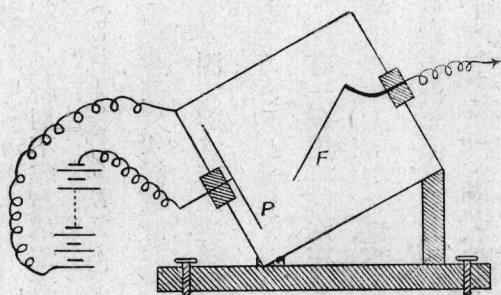


圖 50.

圖 50 所示者為啓白爾式靜電計，使用金箔，在與金箔相對之反對一邊，裝一金屬板。令此金屬板帶電，保持一定之電壓，然後用銅線將欲測之電荷與金箔連結，俾金箔帶電。箱作長方形，前後均有玻璃窗。其後更經改良，靈敏度大為增加。為欲觀察其可動部分之精確移動，又附一顯微計，是為斯密德氏靜電計。其後為欲測定放射質之電荷，即其射氣 (emarration) 之強度，更將靜電計加以種種之改良。

### 5. 電荷之量度

測定電荷，可用靜電計或驗電器，已如前述。其定量的觀測法，則出於法拉第法。試如圖 51 所示，用絕緣線懸帶電體，吊在金屬圓筒內。此圓筒則與驗電器上金屬

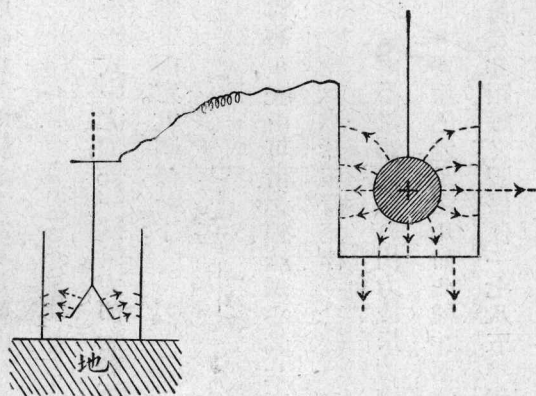


圖 .15

板相連。由感應作用使金箔張開，其次用手與圓筒接觸金箔上之電荷即經由手中，散至地面上。金箔因而垂下。次令帶電體與圓筒接觸，將帶電體取去，金箔又復張開。如是使帶電體與圓筒接觸數次，直至金箔張開之角度，已增到一定值，不復更增。即將其所示標度讀出。由讀得之數，可以推算帶電體所帶之電荷之總量。此圓筒又稱為法拉第圓筒 (Faraday's cylinder)，由雙重合成。

此外尚有庫隆之轉動式方法，其一部分儀器如圖52所示。用細線懸樹脂所製成之轉針，一端附金屬小球，他端附雲母圓板，俾其重量得與金屬小球相平衡。其目的在防止轉動時之振動細線。上端固定於上部圓盤上，俾其扭轉角度，可在圓盤上標度讀出。圖中之m，即此項鍍金之金屬球，其大小與可動部分上之球相等。可以吊到與可轉動之球同一高度。先

令  $m$  帶電，次用望眼鏡觀測此時可動部之球轉動之角度。其線之扭轉程度，則由上部標度讀出。試命  $a$  表  $m$  未帶電以前與可動部之球相隔之角度。 $m$  既帶電後，在與  $a$  同一方向，繼續再轉之角度，命爲  $\beta$ ，則所求之電荷  $e$ ，可由

$$e^2 = 4D(\beta - a) a \sin \frac{\beta}{2} \tan \frac{\beta}{2}$$

求出。式中之  $D$ ，表一種阻力，即對於可動部之轉動而生者，其值由可動部之惰矩  $J$ ，及其振動之週期  $T$  而定。其關係如下：

$$D = 4\pi^2 \frac{J}{T^2}$$

尙有  $a$ ，表由可吊之線至球心爲止之距離。

#### 6. 庫侖定律

兩帶電體之間有引力或斥力作用。如兩者均爲同名之電，即係斥力；如爲異名之電，則爲引力。此事實前已述及之。凡如此種在兩電荷間作用之力，通稱爲電力 (electric force)。此力與兩電荷及其距離之關係，係一七八五年庫侖由實驗上求出。

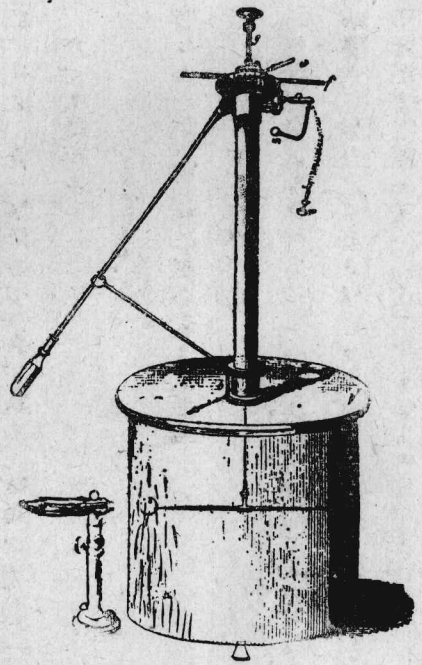


圖 52.

庫侖當時係用前述測定電荷所使用之儀器，測定兩電荷。然後求出其間作用之力，是即庫侖定律（Coulomb's Law）。即兩電荷間作用之電力，與兩電荷之乘積成正比例，與兩者間之距離平方成反比例。

此種電力當然隨電荷所在處之介質種類而異，經求得之結果，其值實與介質常數成反比例。今若用達因作單位，表出兩電荷間作用之電力，用釐米作單位，表出兩者之距離。即可由此求出電荷之單位。假定在真空中兩電荷相距 1 釐米，其間作用之力為 1 達因，此時兩電荷即各定為 1 絕對靜電單位（absolute electrostatic unit）。但此時兩電荷均在真空中，故此時之介質常數



等於 1。

電量之實用單位 (practical unit) 為 1 庫侖 (coulomb)。1 庫侖之電量，與  $3 \times 10^9$  靜電絕對單位之電量相當。

7. 發生靜電之機械

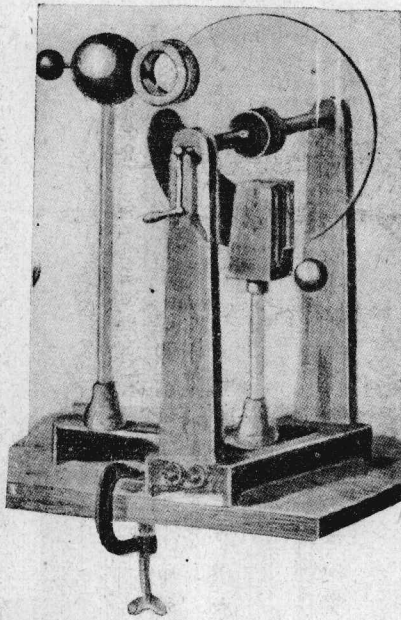


圖 53.

1. 摩擦起電機

摩擦起電機在一七七二年即已有之。其後迭加改良，成為現今之形狀，專供講演時作表演之用。如圖 53 所示，用直徑四十乃至七十釐米之玻璃板，使其能在水平軸線周圍轉動。其摩擦部分為木板上蒙皮，將玻璃板夾在其中。圖上左邊在玻璃

兩面有金屬物夾住，係用玻璃棒支着，爲聚集所生之電而設。

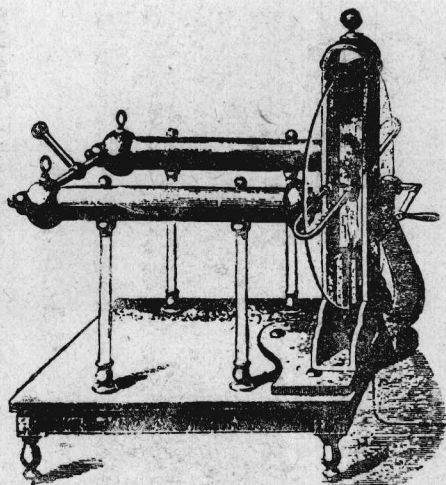


圖 54. 所示者爲一七七六年經藍姆斯頓改

良之形式。摩擦部共有兩個，其收集所生之電，用金屬梳。即將金屬板曲作 U 字形，跨在玻璃板兩邊，並由棒上內方排列若干細齒而成。

此外尚有多種，均已成爲歷史遺物，現今能供實用者，則爲感應起電機。

## 2. 起電盤

起電盤 (electrophorus) 係一七七五年經

伏打最先造成之物，木盆上有硬橡皮 (ebonite)

製成之板 a。其上更載一硬橡皮板 b，表面用鋅板包住。上部用絕緣之線吊起（現今則用硬橡皮柄代替之）。使用時，先將 b 板揭去，用毛布等類敲打 a 板，或用毛布或用綢摩擦之亦可。使其帶有

少許陰電。次將 b 蓋在 a 上，則發生感應作用。在其上部之自由陰電，因與地面相連，遂行散去。次將

b 從 a 取去，將陽電蓄積到來  
瓶內。如是反覆行使此法，可得多  
量之陽電。

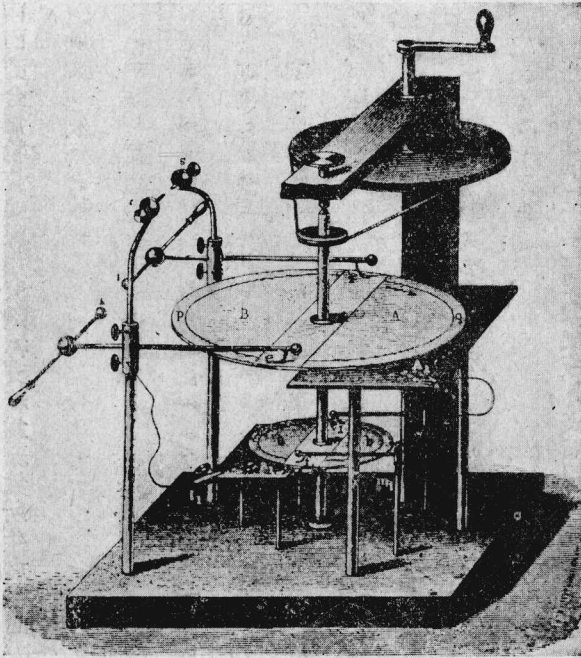
55. a 板不用硬橡皮，改用樹脂、  
硫、火漆等，亦同。此起電盤現今亦  
已成爲廢物，僅講述時用之而已。

3. 感應起電機

a. 忒卜勒第一起電機

圖 55. 所示爲忒卜勒 (Töpp-

ler) 在一八六五年造成之第一  
起電機。A、B 爲金屬板，其周圍有



玻璃圓板pq固着於上。此圓板之中央部分用玻璃板隔住，俾相互絕緣，且在鉛直軸周，可以自由轉動。ef係用細金屬線製成之刷，與在AB周圍之pq玻璃板接觸。其他一端則與電花隙（spark gap）ik相連接。A<sub>1</sub>爲感應板，用金屬製成。

使用時，先假定A<sub>1</sub>上帶有極微弱之陰電。在圖中所示之位置上，因A<sub>1</sub>上之感應，使B處帶有陰電，A處帶有陽電。AB轉動後，B部分上之玻璃板p，轉到與刷f相接觸之地位時，由感應作用，使發生之陰電，經由此刷f，集於i處。同時由A之感應發生之陽電，則經由刷e，集於k處。其次到得B已轉到圖中所示A之位置時，B帶陽電，A帶陰電。再繼續轉去，到得與刷e接觸時，陽電即送到k上，陰電送到i上。照此繼續轉動不已，即在ik處聚集多數之電。下部附有小規模之同樣儀器，由同一原理，可使A<sub>1</sub>上之電荷增大，因此更可增大ik之電。

#### b. 霍斯起電機

圖56. 所示爲一八六九年經霍斯（Holtz）改良後所得之霍斯起電機。B爲玻璃圓板，兩面均塗蠟，能在水平軸線周圍自由轉動。A爲玻璃板，中央穿有圓孔，與B平行，相距約有3毫米之遠。將

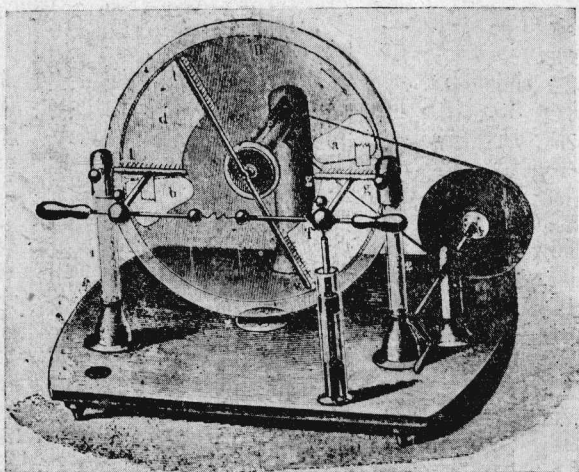


圖 56.

之轉動而到 d 處，使其陰電增多。如是反覆行使，結果以 tV 爲對稱軸線，上部分恆帶陽電，下部分恆

A 板照對稱位置，截去 ab 部分，在裏面亦照對稱位置，黏貼紙片 df。其寬對於中心，約夾有六十度爲宜。在轉動玻璃板 B 前，裝有金屬刷 ii 及 gg。其他端均各與電花隙相連。假定轉動板在於前面，d 上帶有陰電，則 ii 及 t，將由感應作用而帶陽電，電花隙則帶陰電。轉動板隨轉，則 t 之先端隨將陽電傳與所接觸之轉動板之部分，在 t 之他一方 V 處，則收集陰電。如是受到陽電之部分，隨板轉動而到 gg 之先端部分，由感應作用使 gg 帶陰電，同時 f 一部分則帶陽電。電花隙之球亦帶陽電。因此 V 上帶陰電，由其先端將陰電傳與動板。受到陰電之部分，又隨板



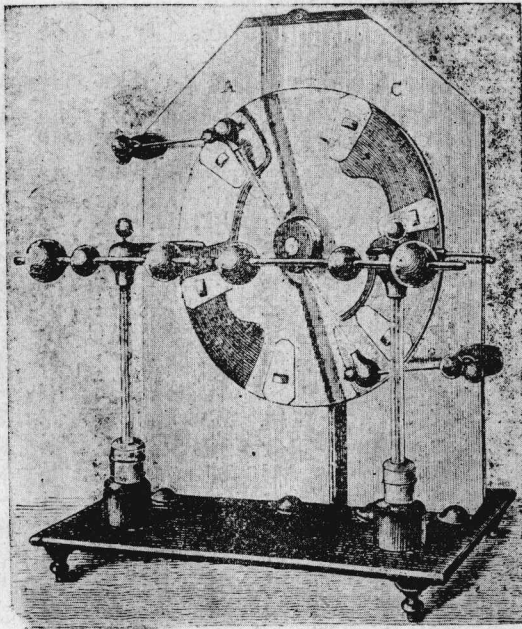


圖 57.

帶陰電。因此可使其所帶之電增大。於是兩電火隙之球上蓄積之陽電與陰電亦次第增加。霍斯其後又於一八六七年製成第二種起電機。使用大小相同之玻璃圓板兩塊，在共通軸線周圍，反向而轉。並將各個集電用金屬梳，裝在直角位置上。同名之極互相連接。其起電之理與其第一種起電機完全相同，僅發生之電較前增大而已。

c. 新式忒卜勒起電機

圖57. 所示為新式忒卜勒起電機之模型。其主要部分由三塊玻璃板而成。其裏邊兩塊，在於圖中AB所示之位置，靜止不動。在前方則為動

板。在靜板之裏面，貼有扇形之紙片與錫箔，一如霍斯之方法。在動板上，則於前方貼有六張錫箔，中央附有圓柱形之突起。當板轉動中，俾刷得與之作瞬時的接觸。但各刷均用玻璃互相絕緣。在A及C之紙片與錫箔，全靠跨在AC玻璃板上之刷，爲之接續。此外尚有兩個金屬梳，作集電之用。在圖中即以水平之玻璃棒表示之。用此機起電之順序如下：最初對於A及C，應分別使其各帶陽電及陰電。其後由感應作用，而使電荷愈積愈多。其情況只須將前述各器，合併推之，即可明瞭，此處從略。實際使用之器械，更由多數之玻璃板組合而成，故可得相當強大之電壓。

#### d. 摩擦感應起電機

僅由感應作用之起電機，在氣候潮溼之時，效率極小。現今實際使用之起電機，大都將感應與摩擦兩種作用，同時並用。其中大多數概應用忒卜勒之新式起電機，亦即應用霍斯起電機之原理製成。

一八八三年威姆胡斯特 (Wimshurst) 應用霍斯第二種起電機之原理，遂造成現今使用極廣之威姆胡斯特起電機 (Wimshurst electrical machine)。圖58所示者，即更經改良而成者。

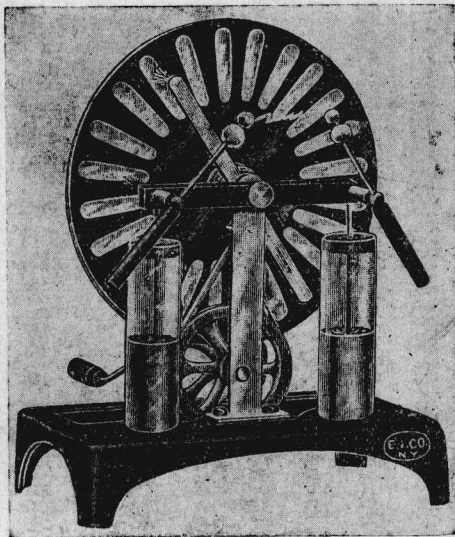


圖 58.

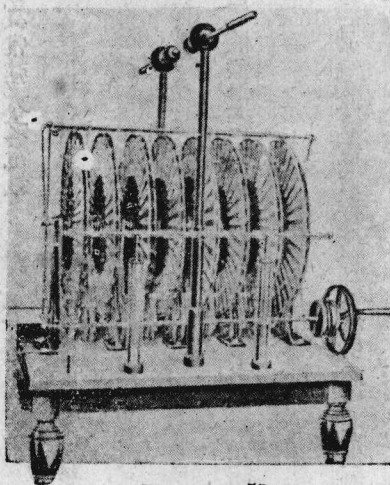


圖 59.

也。圖中可見板上貼有若干扇板之錫箔，最初由其與刷摩擦而生摩擦電，再由感應作用而得大量之電荷。隨轉隨生摩擦電，又隨受感應，故所集之電，異常之多。同時兩塊玻璃板之轉動方向，彼此相

反，亦能增多蓄電。又將兩端連至來頓瓶上，蓄積之電，再爲增大。圖 59 所示爲一九〇二年造成之起電機，係將上述之起電機若干個併合而成。用此可得異常強大之電量。

## 第二節 電場

### 1. 電場之強度及方向

凡有帶電體或電荷存在之空間，如再來另一帶電體或電荷，即發生吸引或推斥之作用。在此種空間內所生之各種物理現象，與沒有電荷或帶電體存在之空間中發生者，大不相同。即與發電體或電荷相隔極遠之處發生者，亦復有異。由此可見有帶電體或電荷存在時，其近旁之空間，別有一種特殊狀態。當然此種特殊狀態之所由起，完全出於存在其近旁之電荷或帶電體之作用。如是之空間，通稱之爲電場 (electric field)。

其次若使帶電體上之電荷，或單獨之帶電本身，增加若干，則其周圍空間中所表現之特性，亦隨之顯著。換句話說，即表現之吸引或推斥作用，隨之增大。其他之各種物理現象，亦復如是。故在電

場中言及一種現象，必須連帶聲明其電場強度。例如將一陽電荷，拿到一電場中，即見電荷因受電場之影響，向一定之方向運動時，由此遂想到電場之方向。故言及電場，必須對於強度及方向，兩方面同時舉出。通常對於電場極度 (intensity of electricity)，係照下法決定之。將單位陽電荷移到電場中某一點，即以其所受之力，作此一點之電場強度。例如有電荷  $e$  存在時，距此電荷有  $r$  距離之一點上，如有單位電荷存在，則按庫侖定律，此單位電荷應受到  $\frac{1}{r^2}$  之力作用。故此一點之電場強度，即為  $\frac{1}{r^2}$ 。故距此電荷  $e$  愈遠之處，其  $r$  之值愈大，故其處之電場愈小。即電場強度與距電荷之距離平方成反比例。

此地應注意之點，即電場強度雖用電荷所用之力為之決定，但其性質與力並不相同。電場強度係用電荷除其作用之力而得之商。換言之，即對於單位電荷之力。故在強度等於  $F$  之電場內，將電荷  $e$  移來時，此電荷所受之作用之力，當為  $F \cdot e$ 。故若用電荷  $e$  除此力，即得電場強度  $F$ 。

若將單位陽電荷移入電場中，則電荷受電場作用之結果，當生運動。即以此時運動發生之方向，定為電場之方向。



故若電場係由陽電荷造成，則以此陽電荷所在處爲中心，任意畫一球面。由中心對於球面上各點，引垂直線，此等垂直線之方向，卽表示球面上各點之電場方向。凡與中心相隔等距離之各點，其電場之強度，在數量上均相等。故欲測定各點之電場強度，可用前述之庫倫儀器。

## 2. 電力線

沿電場方向而作之直線或曲線，通稱爲電力線 (lines of electric force)。在此力線上任何一點，設想一面積，與電力線垂直，面積等於 1 平方釐米。通過此面積中之力線數，可認爲與此點之電場強度成正比例。如此，則由帶陽電之金屬球造成之電場，其力線當與球表面成垂直放射狀，卽可用放射狀直線表出。

由帶有陰陽兩種電之金屬球兩個造成之電場，可由其間之力線表出。如圖 60 所示。各條力線均出自陽極，進入陰極。若兩球均帶同名之電時，其力線之分布狀況，如圖 61 所示。

電場中之力線分布狀況，可用一簡便方法求之。將木屑或金紅石粉，撒布於電極之玻璃板上。再用玻璃棒輕敲板邊，則板上粉屑，卽按照力線方向，排列而出。圖 62 所示者，中央圓板爲陽極，周圍

之輪形爲陰極時，電場中力線分布之狀況。圖 63. 所示，則爲兩圓板相對而立，一爲陽極，一爲陰極時

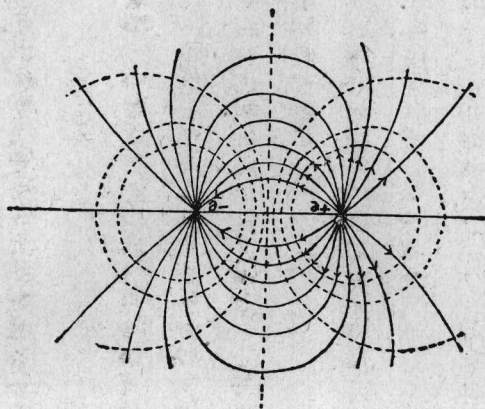


圖 60.

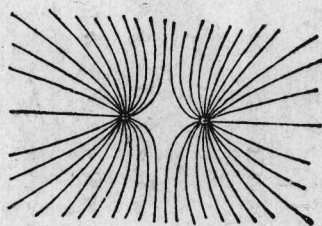


圖 61.

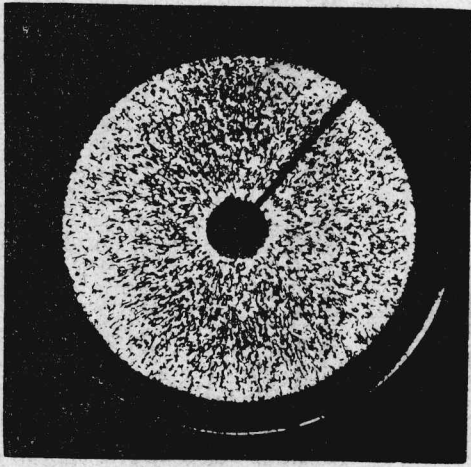


圖 62

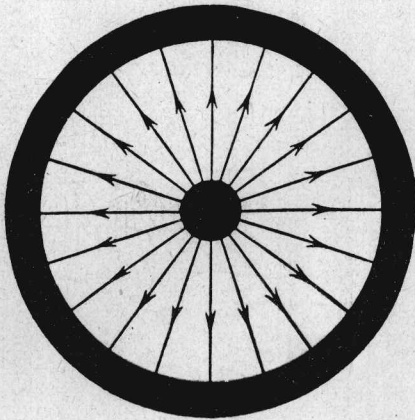


圖 62

之力線分布狀況。圖64所示，爲兩板平行排列，一爲陽極，一爲陰極時，其間之電場中力線排列之狀況。圖65所示，爲一板及一棒，棒與板恰成垂直，一方爲陽極，一方爲陰極時，造成之電場中力線分布

之狀況。

又不用玻璃板而用賽璐珞 (celluloid) 之平板, 不用木屑或金石紅粉而用碎髮, 即將髮洗淨

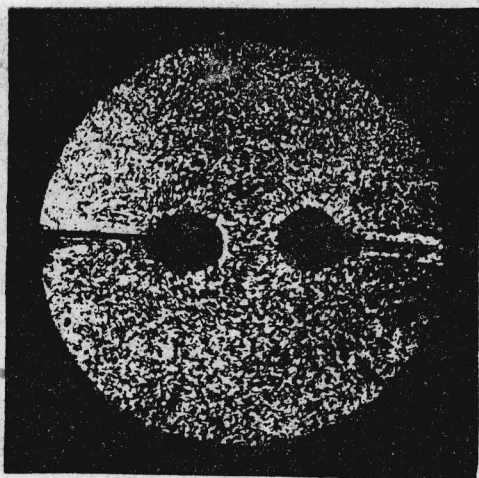


圖 63.

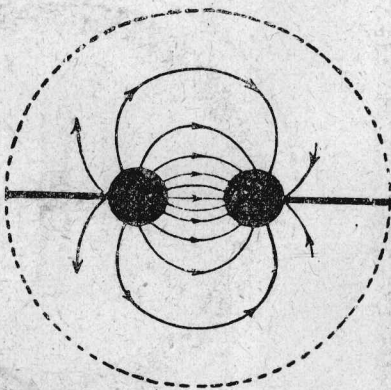


圖 63.

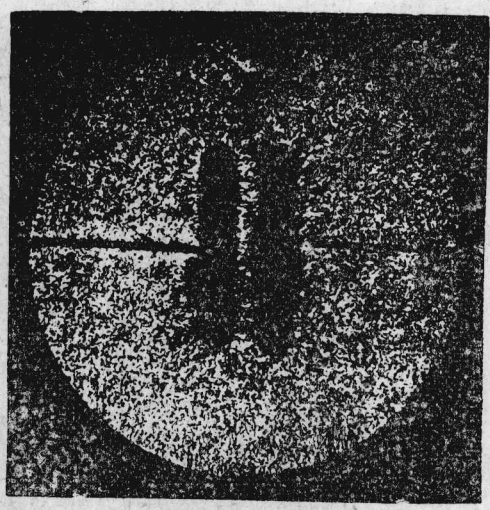


圖 64

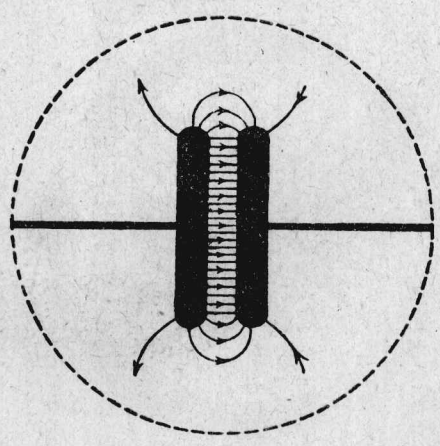


圖 64

後，截成長約1毫米之碎屑，亦可將電場中力線分布之狀況顯出。圖66所示者，為同心輪間之力線分布圖。如不用照相法，則在賽璐珞或玻璃板上載蠟紙一張，再將髮屑撒於其上，俟力線排成後，再



加熱於蠟紙之底，使紙上之蠟，略為熔解，俟其冷卻後，髮屑即凝着於紙上，不再移動，即可將力線狀  
 況留住。

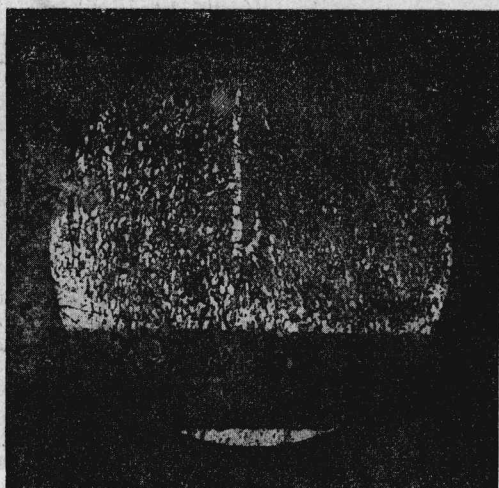


圖 65.

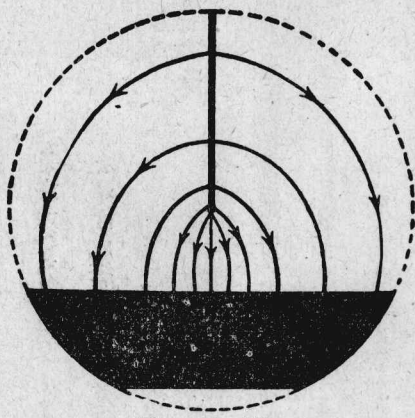


圖 65.

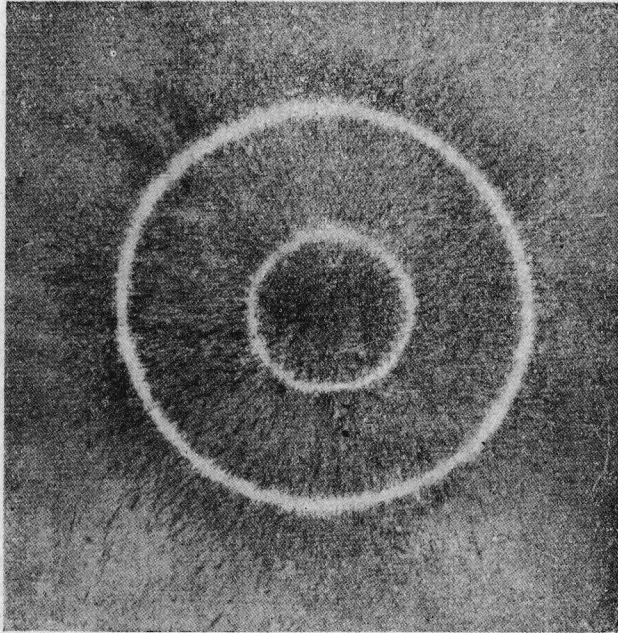


圖 66.

### 3. 電力管

使帶有陰電與帶有陽電之物體互相對立，應有力線從陽電一方發出，進入陰電一方之內，已如前述。如是之力線，為數甚多。由若干條力線相聚而成管，是為力管 (tube of force)。力管之兩端，一為陰電，一為陽電，其量恰相等。故電場可以看作由此種獨立之力管若干條集合而成。如兩端面積上所有之電荷，適等於單位電荷時，此力管即稱為單位力管 (unit tube of force)，又名

法拉第管 (Faraday's tube) 故一絕緣導體上之電荷密度，可由通過其單位面積之單位力管數，爲之表出。

上述之力管，亦與力線相同，具有特殊之物理性質。如從此種力管側面，施以垂直之壓力，則力管卽行縮短。如從力管之兩端，施以張力，則力管卽行伸長。種種靜電現象，均可用如是之力管解釋之。

例如令一帶有陽電之導體，與地球表面接近，則此兩端物體間之力管，卽行縮短。其次令接地之導體，與帶電體接近，則力管次第縮短，直至兩導體互相接觸時，力管亦縮至完全消滅，此卽放電之現象。

又介在帶有絕大電荷之導體間之介質，其能容受各力管之應力 (stress)，隨介質種類而有強弱之別。任何介質均有其一定之限度，如已達其限度之後，猶使所帶之電荷增加不已，或使導體間距離減短，卽使其間之力管再行增加，則介質已無法容受。於是電荷遂突破介質之絕緣性質，而相中和。

如爲導體，則其容受力管之應力之能力，即無限制。故在導體內，力管之移動，極其自由。

依照法拉第所定，電場中存在之力管數，與帶電體上之電荷相等。力管如有運動發生，即造磁場。此磁場之強度，即與力管對於觀測者之相對速度，成一定之比例。

設有一帶電導體，其密度爲 $\sigma$ ，由此導體造成之電場強度，很易求出。命 $F$ 表導體近旁之電場強度，則 $F = \frac{\sigma}{4\pi}$ 。故在此電場中，從單位面積上通過之力管數，即 $\frac{F}{4\pi}$ ，即等於其電荷之密度。又此時在電場中之介質，可以看成受有一種應力作用。應力之大小，與電場強度 $F$ 之自乘成比例。每一單位面積上，應有 $K \frac{F^2}{8\pi}$ 。式中之 $K$ 爲常數，由介質種類而定。如介質爲空氣，則 $K$ 約等於1。如是之力，通稱爲靜電壓力 (electrostatic pressure)。

電場因受有電之應力，故具若干之能，其量與電場強度之自乘爲比例，每單位面積中，爲 $K \frac{F^2}{8\pi}$ 。爾格式中之 $K$ 與上同，爲一常數，其值由介質種類而定。如爲空氣，則 $K$ 約等於1。此值稱爲電場之能 (energy of electric field)。

#### 4. 電勢

電現象中之電勢 (potential) 與熱現象中之溫度及水力學中之水面，頗相類似。熱由溫度之差而移動，水亦由水面高低不同而流動，在導體中有電之移動，亦由其電勢不同所致。

欲求電場內任何一點之絕對電勢，殊不可能，但其電勢之差，則求之甚易。

由帶有陽電之導體造成之電場中，欲求其近旁一點之電勢，其法如下。如將一單位陽電荷，從無窮遠處移來此一點上，所需要之功，即定爲此一點之電勢。換言之，即此一點之電勢，與無窮遠點之電勢之差。因無窮處一點之電勢，可看做等於零。如帶有陰電之導體造成之電場，則須由電場中一點，將一單位陽電荷移到無窮遠處一點之上，此時所需要之功，定爲此一點之電勢。

又電場中任意兩點間之電勢差，即係將 1 單位陽電荷，在此兩點間移動時，所需要之功，功之單位則用爾格。

以上所言電荷之移動，與移動所取之路線形狀，完全無關，其值恆一定不變。

電場內兩點間之電勢差，既與單位陽電荷在此兩點間移動時所需要之功相等，故所要之功，即以兩點間之距離與電場強度之乘積表之。由此可知電場強度，即等於每隔單位距離之電勢減



少率。換言之，即電場強度等於該點之電勢之梯度 (gradient)。

試想有陽電荷  $q$ ，由其造成之電場中任何一點之電勢，可以照下法求之。按定義，電勢係將單位陽電荷從無窮遠處移到此一點時所要之功。命  $r$  表電荷  $q$  所在一點與現在設想之點之距離。由庫侖定律，知在設想之一點處受到之力，應為  $\frac{q}{r^2}$ 。故反抗此力將單位陽電荷移動時，所要之功，等於其乘積，即  $\frac{q}{r}$ 。即在此點之電勢為  $\frac{q}{r}$ ，其值與其距離  $r$  成爲反比例。故由  $q$  所在之點相去愈遠，則其電勢愈小，到得無窮遠處，其值即等於零。又凡與  $q$  所在之一點相隔距離爲  $r$  之各點，其電勢均一律相等。將此項電勢相等之各點，連結成面，稱爲等勢面 (equipotential surface)。就上例而論，等勢面成爲球面，力線即與此球面垂直之直線，即等勢面爲與力線垂直之面之集團。在電場內使一單位陽電荷由低電勢面移向高勢面所要之功爲 1 爾格時此兩等勢面間之電勢差，定爲一靜電單位，其  $3 \times 10^{10}$  倍定爲 1 電磁單位，又以  $3 \times 10^9$  除靜電單位，爲 1 實用單位，通稱爲 1 伏特 (volt)。國際協定之伏特，即上述之實用單位，係跟據電流之電動勢 (electromotive force) 而定者。

通常使用之電勢，係指一點之電勢與地球電勢之差而言，地球電勢恆視之爲零。

### 5. 電感應度（電的單位移）

將單位電荷移來電場中時，所受之力即等於其所在處之電場強度，已如前述。嚴格言之，須其介質爲真空時，始能如是。今再就非導體而成之介質論之，當然即使介質爲空氣，情形亦同，命  $E$  表電場強度， $e$  表移來之電荷， $F$  表作用之力，則由前述，知  $F = eE$ 。如介質爲均勻之非導體或流體，則在此介質中，當生出電感應度  $D$ ，其與真空之電場強度  $E$ ，有下列之關係式：

$$D = KE.$$

式中之  $K$  爲介質所特有之常數，通稱爲介質常數 (dielectric constant)。故在真空中，其感應度與電場強度恆相等。

在上述之均勻介質中，如將電荷  $e$  移來，則電荷所受到之力，應爲  $F = eD = eKE$ ，此時之  $D$  表電場之強度。據馬克士威，此  $D$  稱爲電的位移 (electric displacement)。在均勻介質中所起之位移電流 (displacement current)，由位移  $D$  對於時間之變化率表出之。上述之電感應度  $D$ ，乃

因其爲電之介質所致。此  $D$  與真空中之電感應度  $E$  之差，用  $\frac{1}{4\pi}$  除之，則稱爲電之極化 (electric polarization) 以  $P$  表之，則

$$P = \frac{1}{4\pi} (D - E) = \frac{K-1}{4\pi} E$$

故電感應度  $D$  又可用下式表出：

$$D = E + 4\pi P$$

通常之介質常數  $K$ ，均較 1 爲大，故在任何介質中之電場強度，均較在真空中之電場爲強。

故將介質放入電場中時，可使電場中原有之力線分布，發生變化。卽有集中其力線之性質。其集中之程度，則隨介質常數  $K$  而定。又真空內  $D \parallel E$ ，故真空之極化等於零。

## 6. 靜電計

### (1) 象限靜電計

象限靜電計 (quadrant electrometer) 爲通常測定微小電壓之精密儀器，係利用靜電力作用，以作測定。

(a) 愷氏象限靜電計

圖 67. 所示為愷氏 (KELVIN) 象限靜電計, 其主要部分則如圖 68. 所示, 為一密閉之金屬空盒, 截

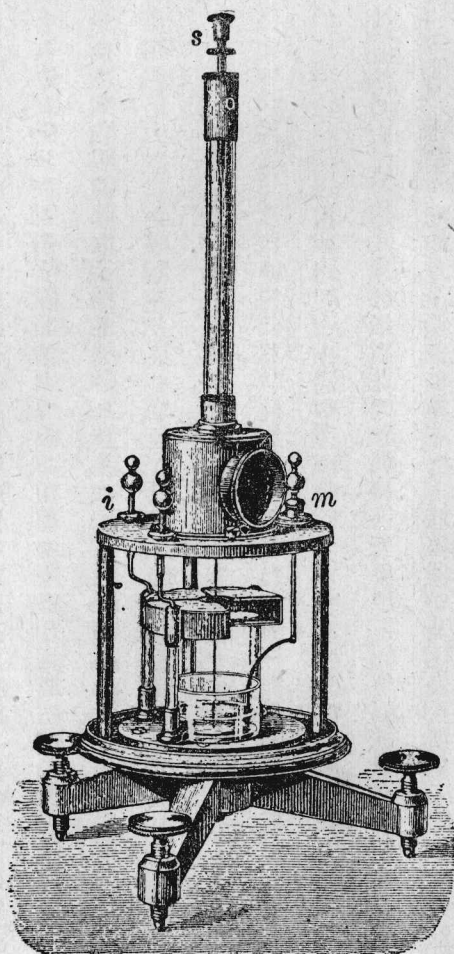
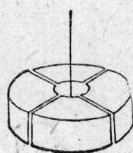


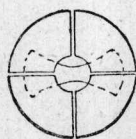
圖 67.

成四象限，互隔相當距離。盒中有一蝶形金屬薄板，用鍍金石英細線吊下，俾其恰在象限中心，並可調準其位置，使其在對稱位置上。又用導線將相對兩象限互相連結。將導線絕緣，俾能從外面導入電量，使兩對象限間成立一種電勢差。在石英線上，離象限略高處，裝有小鏡，俾金屬薄板之偏轉，得

由望遠鏡及尺度法讀出。更用一條鉑線，繫在金屬薄板下，從象限中垂下，浸入盛有稀硫酸之玻璃碟內，用以阻尼薄板之振動。



68.



圖

使用此器時，先加一定之電壓於薄板上。如懸吊薄板之石英細線，未曾鍍銀，則用圖中上端右旁標明 III 之灌電棒，加電荷於薄板上，俾成爲一定之電壓。其次將欲測之電壓，加於兩對象限上。如是讀出鏡之偏轉，即可求得所測之電勢差。命  $V$  表金屬薄板之電勢差， $V_1$  及  $V_2$  表兩對象限間之電勢差， $\theta$  表鏡面之偏轉，則

$$\theta = c(V_1 - V_2) \left( V - \frac{V_1 + V_2}{2} \right).$$

式中之  $c$  爲一常數，由此可知偏轉角度與薄板電勢差成正比，與兩對象限間之電勢差亦約略爲比例。如豫將已知之電勢差加諸兩對象限上，將常數  $c$  求出，即可求得  $V_1$  或  $V_2$  之值。通常多將  $V_2$



或  $V_1$  中之一，與地連結，使其電勢成零。實際上  $V$  之值較  $V_1$  與  $V_2$  均甚大，故上式可改寫為

$$\theta = c(V_1 - V_2)V.$$

若再命  $V_2 = 0$  則  $\theta = cV_1V$ ，即偏轉角與板之電勢差及象限之電勢差均成爲比例。

(b) 德勒茲阿勒克式象限靜電計

一九〇一年德勒茲阿勒克製成之象限靜電計，其靈敏度極高，原理則與愷氏之象限靜電計相同。其金屬薄板受空氣之阻尼，自能防止振動。薄板裏面剪卻一部分，仍成對稱形，既可防止振動，又可減輕板之重量，同時電容亦可減少，靈敏度因之大爲增加。

用 ambroid 或 bernstein 等類絕緣物質造成小柱，象限即固定於柱上，象限上之導線則由下部接出外面，石英線則由金屬棒上吊下。將棒上之金屬頭部，與電池連結，即可使其得到一定之電壓。又爲防止受外面之電之擾亂起見，將象限及薄板之一部分，用金屬圓筒蓋住，由筒上所裝之玻璃窗，即可觀測筒內情況，通常製成者，其薄板振動之週期爲二十秒至三十秒。懸吊薄板之鍍銀石英細線之直徑，約一千分之三毫米至一千分之五毫米。加在薄板上之電壓爲百伏特時，尺度

與鏡之距離約 1 米時，使薄板偏轉 1 毫米之遠，其兩對象限間之電勢差，約為一萬分之一伏特。

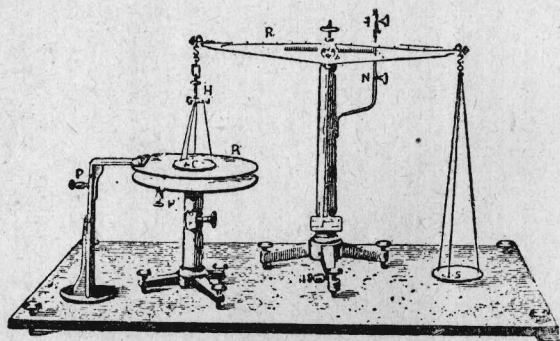
最近昆卜頓更將全形體縮小，電容亦極小，並將一對對象限與地連結，且能上下移動，因此靈敏度大為增加，是為昆卜頓象限靜電計。

### (2) 絕對靜電計

圖 69 所示為愷氏絕對靜電計 (absolute electrometer)。其主要部分由容電器及天平而成，其平行圓板 A B，即容電器。B 板之中央截下一小圓形之板 C，吊在天平一端砝碼盤下，與 B 在同一平面上。B 名為護環 (guard ring)，經由 P 與地連結，加電壓 V 於 A 上，則對於 C 即有吸引作用。如在天平他一端之砝碼盤，加入適當砝碼，使其恢復平衡，即可由所加之砝碼量，將電壓 V 求出。此時電壓 V 與吸引 C 板之力 F，有下列之關係：

$$F = \frac{f}{8\pi d^2} V^2$$

d 表 A B 間之距離，f 表對於吸引力有效之板面積。如 B C 間之距離，比之 C 之半徑甚小時，F 之關係如下：



$$f = \frac{\pi}{2} (r^2 + R^2)$$

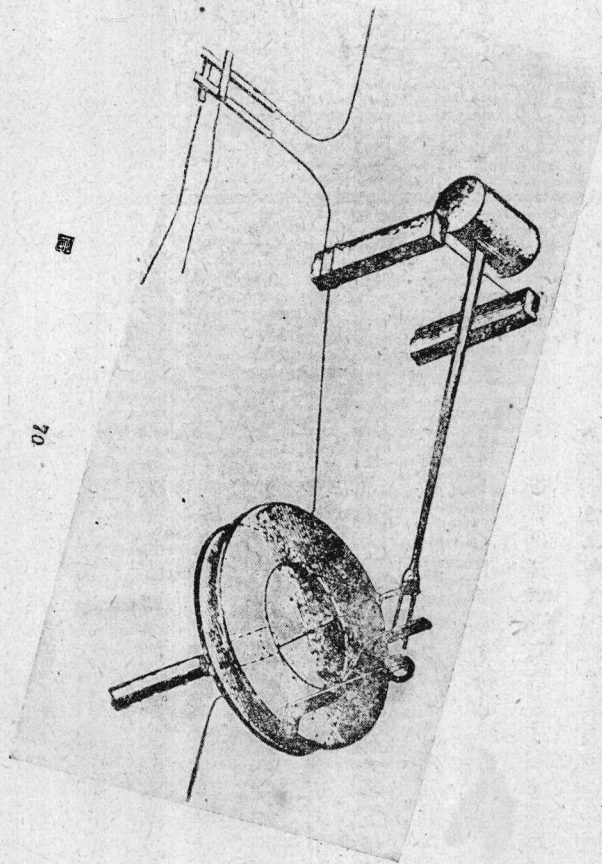


69.

式中之  $r$ , 表  $C$  之半徑,  $R$  表  $B$  板上被截去之空洞之半徑。用此靜電計測得之吸引力  $F$ , 係用達因作單位表出。故求得之電壓, 亦為絕對單位。此器通常測定相當高度之電壓時用之。

圖 70 所示亦為同一原理, 不過不用天平, 而用一條水平方向之棒, 支住  $C$  板, 在棒之他端加重量, 使成平衡。未加電壓於  $A$  板上時, 使  $C$  板與  $B$  板在同一平面上, 在  $C$  板上部之轉軸上裝鏡,  $A$  上既受電壓以後,  $C$  板移動, 可由鏡面觀測而得。由其移動之距離, 即可將電壓求出。命  $l$  表板所移動之距離, 則電壓如次:

$$V = l \sqrt{8\pi \frac{F}{\epsilon}}$$



70

式中之  $F$ 、 $f$  等值，與使用天平時，完全相同。

(3) 高壓靜電計

(a) 斯文本電壓計



圖 71. 所示，爲斯文本 (Swinburne) 之象限式高壓靜電計，使一薄鋁板，可在兩對象限之間轉動。鋁板上端附一鋁製指針，由圓弧形標度，即可將電壓之數值讀出。在鋁板下端加重量，可使其靈敏度隨意增減。此種儀器多用以測定一千伏特以上之高電壓。

(b) 衛斯吞式電壓計

圖 72. 所示，爲衛斯吞 (Weston) 式靜電電壓計。其兩個電極 A 及 B，均浸在油槽中。其在下部



者，爲固定之電極，上部用槓桿吊住，其上端附有指針。受靜電引力作用後，吊下之電極即移動。由指針讀出此項移動，即可求得其電壓。用此儀器可將二十萬伏特爲止之大電壓測出。

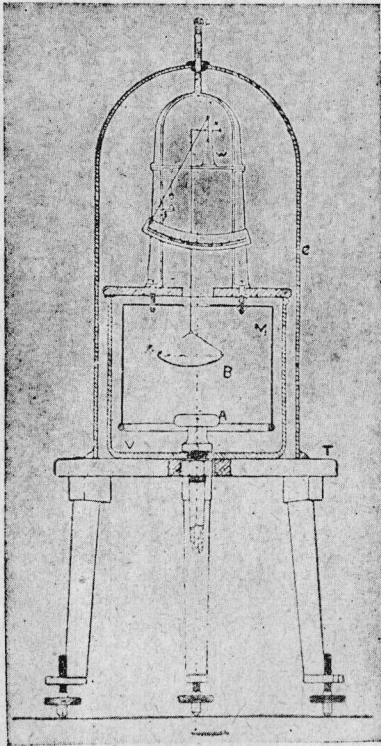


圖 72.

又對於十萬伏特之電壓，可用兩金屬球作電極，測定兩極間開始有電花飛過時兩極間之距離，亦可算出兩極間之電壓。

### 第三節 電容

#### 1. 電容

如將電荷  $e$  加到一絕緣導體之上，使其電勢差增加  $v$ ，則  $e$  與  $v$  之比，即定為導體之電容 (electric capacity)，即

$$\text{電容} = \frac{\text{電荷}}{\text{電勢差}}.$$

如用  $C$  表電容，則成  $C = \frac{e}{v}$ 。

換言之，電容為使導體之電勢差升高一單位所要之電量。此項電量由導體之大小及其周圍存在之介質種類而異。例如導體為一金屬球，其半徑為  $r$ ，則加以電荷  $e$  時，其表面之電勢差為  $\frac{e}{r}$ ，故此球之電容等於  $a$ 。故若其半徑增大，則其電容亦比例增加。次取兩塊金屬圓板，令其中一塊與地相連，他一塊則與之平行。兩塊間隔距離命為  $r$ ，則其電容當與兩塊金屬板之面積成比例，與兩板

間之距離成反比例，與介在其間之介質常數成正比例。

電容之實用單位爲法拉 (farad)，或微法拉 (microfarad)，即由1庫侖之電量，使其電勢差增加1伏特時之電容，爲1法拉。1伏特在絕對單位爲 $10^8$ ，1庫侖在絕對單爲位 $10^{-1}$ ，故1法拉用絕對單位表出時，當爲

$$1 \text{ 法拉} = \frac{10^{-1}}{10^8} = 10^{-9} \text{ 絕對單位。}$$

用靜電單位表出時，

$$1 \text{ 法拉} = 10^{-9} \times (3 \times 10^{10})^2 = 9 \times 10^{11} \text{ 靜電單位。}$$

電容之靜電單位用釐米表出。又法拉用作電勢容之單位，殊嫌過大，故通常取其百萬分之一，名之爲1微法拉，即

$$1 \text{ 微法拉} = 9 \times 10^5 \text{ 靜電單位。}$$

設想地球爲一球形，如其浮在真空之中，則其電容應與其半徑相等。按地球之平均半徑，等於六千三百六十七仟米。故其電容亦等於靜電單位之六萬三千六百七十萬釐米。改算作法拉時，應

等於一百萬分之七〇七法拉，即等於七〇七微法拉。

## 2. 容電器

容電器 (condenser) 係將電量蓄積在絕緣導體與另一導體間之儀器，有一定不移之電容，其值由導體之形狀大小及兩導體間之介質種類而定。

最初之容電器為來頓瓶，形如圖 73。係一玻璃瓶，下部內外均貼錫箔，中插一金屬棒，上端有一金屬小球，下端有一鏈條或細金屬棒，與瓶內底部相連。性質與一種平板容電器相同。中間介在者為玻璃，故如命 C 表其電容，則

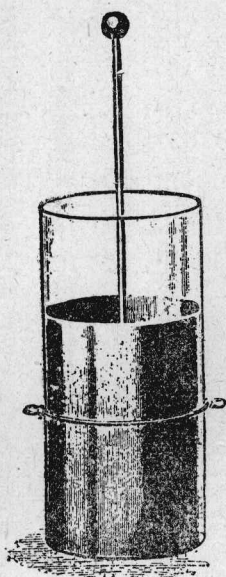
$$C = \frac{KA}{4\pi d}.$$


圖 73.

A 表貼有錫箔處之面積，d 表玻璃之厚，K 表玻璃之介質常數。

茲將各種常見之容電器或其電容容易計算而知之容電器，一一將其電容列舉如下：

## (1) 球形容電器

半徑等於  $a$  及  $b$  之兩金屬球，在同心位置上，其間之介質為空氣時，

$$C = \frac{ab}{b-a}$$

## (2) 平行圓板容電器

將半徑  $r$  之金屬圓板兩塊，放在互相平行之位置，其間相隔之距離為  $a$ ，則在空氣中，

$$C = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} \left( \log_e \frac{16\pi r(a+b)}{a^2} + 1 + \frac{d}{a} \log \frac{a+d}{d} \right)$$

式中之  $d$  表圓板之厚，第二項為校正數，因在板邊之力線數，與中央不同故也。如與半徑  $r$  相較， $a$  之值極為微小，則上式即成爲

$$C = \frac{r^2}{4a}$$

## (3) 圓筒形容電器

將長等於  $l$  之兩圓筒，放在同一軸線上，使成爲同心，並令在外之圓筒與地相連。命  $r$  表內筒之半徑， $r+a$  表外筒之半徑，則兩筒之間如由空氣充滿時，如  $l$  較  $r$  大，其電容應爲

$$C = \frac{1}{2} \frac{l}{\log_e \left( 1 + \frac{2}{r} \right)}$$



又如兩筒間之問隔  $a$ ，較內筒半徑  $r$  甚小時，則成爲  $C = \frac{1}{2a}$ 。通常將此種圓筒形容電器，造成精密器械，以供研究時作標準容電器之用。

#### (4) 護環容電器

上述之平行板容電器，如將其中一板之半徑改小，而在其周圍另加一環形圓板，使其間隔相當之距離，但保有同一的電勢，再將其他之一圓板，連結至地，則此時之電容，當爲

$$C = \frac{(r+r_1)^2}{16a} - \frac{r+r_1}{2\pi} (\beta \tan \beta + \log_e \beta) .$$

式中之  $r$ ，表環內小圓板之半徑， $r_1$  表環內徑。如  $b = r - r_1$  之值，較圓板之厚遙小時，其  $\beta$  等於  $\tan^{-1} \frac{b}{2a}$ 。此種器械，亦可作標準容電器使用。

#### (5) 轉動式平行板容電器

圖 74 所示者，爲轉動式平行板容電器。無線電等之振動電路中，概用此種容電器。此器由多數金屬半圓形之板而成，互隔等距離，且彼此平行，均固定在水平位置上，如 B。更有一套較此略小之

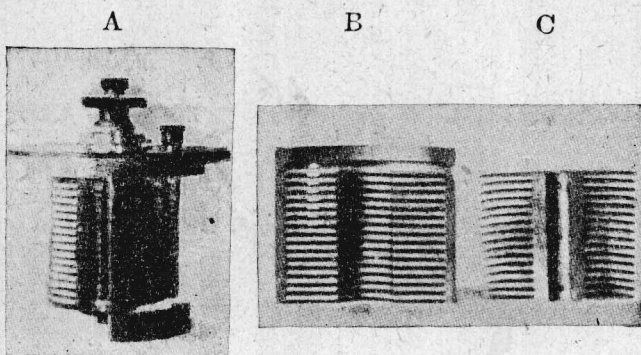


圖 74.

半圓形金屬板，亦作等距離平行排列，如 C，恰如嵌入 B 之空隙中。C 之軸線，可以轉動。C 轉，則 B 與 C 之相對位置，亦隨之而變。結果容電器亦不得不跟着變動。此種儀器使用之金屬圓板，多由鉛板製成，全體裝在一玻璃圓盒內。有時盒中盛石蠟油等類液態介質，以增大其電容。最大可到二千釐米（靜電單位）。

(6) 雲母容電器

在雲母板上鍍銀，照前法連結後，裝入密閉盒內而成。其容電範圍有自十分之一至一微法拉，與自一千分之一至一法拉等，各種。

又在同心圓筒之間，灌入石蠟，亦可造成種種範圍不同之電容。

### 3. 聯用容電器之電容

聯合若干個容電器，可使其電容增大。其聯用之法，可分兩類。

#### (1) 聯法

圖75所示係將各容電器排成一列，使一器之陽極與第二器之陰極，依次連結，成爲一氣，是爲串聯 (connection in series)。命  $C$  表總電容， $C_1, C_2, C_3$  等，表個別之電容，則

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

即總電容之倒數，與各個電容之倒數之和相等。此項關係，對於各種形式之容電器，均可適用。

#### (2) 並聯法

圖76所示，係將各容電器同名之極，總連一起而成，是爲並聯 (connection in parallel)。此時之關係，成爲

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

即總電容等於各器電容之和。此關係對於各種形式之容電器，亦均適用。

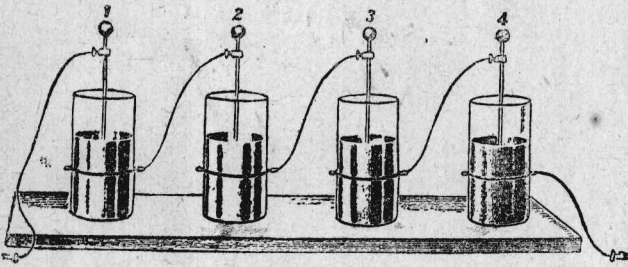


圖 75.

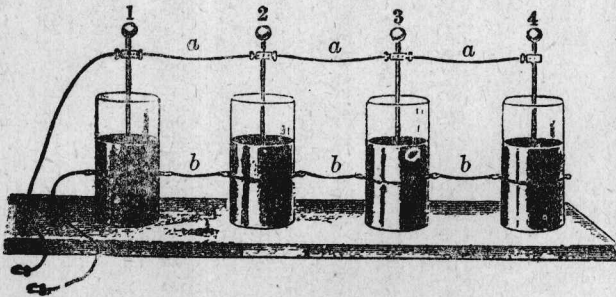


圖 76.

#### 4. 電容之測定

電容之測定，原極困難。茲僅就其中簡便者，略述一二如次。

##### (1) 法拉第方法

使電容為  $C_1$  之容電器，得到電壓  $V_1$ 。然得將其兩極連至象限靜電計之兩對象限上，測定其電壓。其次再使其他之容電器之兩極，與象限靜電計作瞬時之連結，測出此時共通之電壓  $V_2$ 。此新用之容電器，最初係與原有之容電器並聯。故  $V_2$  應較  $V_1$  為小。命  $C$  表象限靜電計之電容， $C_2$  表新容電器之電容，則  $V_1(C_1 + C) = V_2(C_1 + C_2 + C)$ 。

次使靜電計得到  $v_1$  之電壓，與  $C_1$  容電器連結時之電壓為  $v_2$ ，則與前次相同，應成爲

$$v_1 C = v_2 (C_1 + C).$$

之關係。由此二式，可得下列之關係：

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{V_2}{V_1 - V_2} = \frac{v_1 - v_2}{v_1}.$$

靜電計之電容甚小時，可作

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{V_2}{V_1 - V_2}.$$



故若  $C_1$  爲已知數，則只須測出電壓，即可求  $C_2$ 。

(2) 愷氏消盡法

此法須使用三個已知之電容，其中一個尚須能够任意使其變化。此三個與欲測之電容相合，共爲四個。如圖 77 所示，先串聯使用，其中之  $C_1$ ，表欲測之電容， $C_4$  表可以變動之電容。圖中之 A 點，可

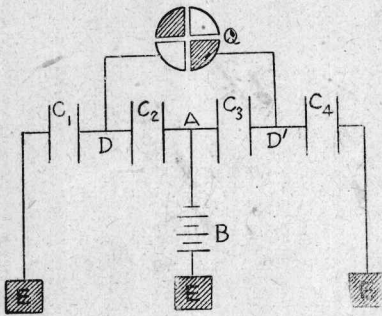


圖 77.

任意連至電池 B 之陽極或陰極，亦可與地球相連。D、D' 兩部分，則與象限靜電計之兩對象限相連。C<sub>1</sub> 及 C<sub>4</sub> 之他一端，則與地相連。適宜變動 C<sub>4</sub> 之電容，俾象限靜電計之指針（金屬薄板）不生振動。此時 D 與 D' 之電勢差，應成爲零。故此時各電容間，有

$$C_1 = \frac{C_2}{C_3} C_4.$$

之關係成立。由此即可算出所欲求之  $C_1$ 。

(3) 惠斯登電橋法

此法須用兩個已知之電阻，及一已知電容之容電器。其連

結方式，如圖 78. 所示。變更電阻之值，俾象限靜電計中之指針不生振動。命  $C$  表欲測之電容， $C_2$  表已知之電容， $R_1$  及  $R_2$  表已知之電阻，則其間之關係如下：

$$C_1 = \frac{R_1}{R_2} C_2.$$

### 5. 介質常數

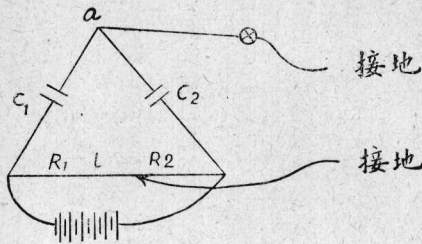


圖 78.

試在平行板容電器之板間，放入各種介質，測定其電容，即見介質之種類不同，則所得之電容亦隨之而異。又在兩個帶電體之間，換用各種介質，而測定其表現之引力或斥力，亦隨介質種類不同而相懸殊，已詳前述。可是介質對於電現象，實有莫大之影響。即介質實具有一種電的特性。表示此種發生影響之特性，稱為介質係數 (dielectric constant)。例如在平行板容電器內，如用真空作其介質，此時之電容，命為  $C$ 。如改用玻璃，或其他之非導體作介質時，命其電容為  $C'$ ，而以  $K$  表其介質常數，則

$$K = \frac{C}{C_0}$$

真空之介質常數為1，空氣之介質常數亦與1極相接近。故用某種非導體作介質時之電容，與用空氣時之電容，兩者之比，即定為所用非導體之介質常數，亦無大差。

### (1) 法拉第實驗

介質常數之一觀念，最初係由法拉第導出。在當時法拉第則名之為 *specific conductive capacity*。法拉第當時使用之儀器，如圖79所示。B為黃銅球殼，A為黃銅球。兩者之中心，均裝在同一點上。A連有一導體，其頂端有一小球。I為絕緣質，將A與B隔開。下部之R為一管塞，備掉換A、B間之氣體時使用。

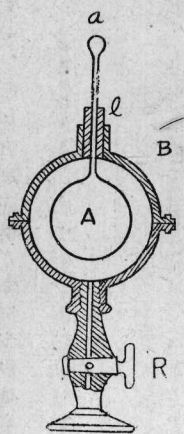


圖 79.

上述之容電器，共用二個。先令空氣充滿內部，後將外面球殼連接至地。次導入少許電荷於一內部球上，測定因此造成之電勢差。次將尚未帶電之另一容電器，與此帶電後之容電器並聯，再測出

其電勢差。此時如兩器之電容相等，則第二次測得之值，應等於第一次測得之半。其次再使兩器一律放電，然後使空氣充滿一器，用硫黃充滿第二器。再照前實驗一遍。此時第二次所得之值，即決不等於第一次所得者之半。通常恆較其三分之二為小。命  $C_1$  表 1 方之容電器之電容， $V_1$  表第一次測得之電勢差， $V_2$  表兩器並聯時測得之電勢差， $C_2$  表第二容電器之電容。兩器中均為空氣時，

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{V_1 - V_2}{V_2} ;$$

一方改用硫黃時，

$$K = \frac{C_2}{C_1} = \frac{V_1 - V_2}{V_2} .$$

此  $K$  之值，即硫黃之介質常數。法拉第即用此法，將各種物質之介質常數測出。

### (2) 介質常數之測定

測定介質常數之法，亦如測定電容即用種種介質，造成容電器，而測定其電容。以之與使用空氣時之電容相比，即可求出其介質常數。但通常則可從計算上而知其電容之容電器，概由幾何上算出其電容，再就換用各種介質時測定其電容。取兩者之比，定為介質常數。

據馬克士威之電磁理論，先測定介質內電波成爲定波 (stationary wave) 時之波長。由此求在介質內之折射率 (index of refraction)。此折射率之平方，卽等於所求之介質常數。此法多用以測定氣體之介質常數。

最近更有一法，將欲測介質之容電器，與振動電路之容電器並聯，測定其頻率之變化。由此可將容電器之電容算出。故可作介質常數測定之用。此法所得結果，甚爲精確。通常欲精確測定介質係數，或欲測定其受溫度等類物理條件變動引起之影響時，多使用之。

茲將各種物質介質常數，列表如下：

介質名稱	介質常數	介質名稱	介質常數
耶拿玻璃	5.52	樹脂	3.10
硬質陶器	5.73	土瀝青	2.68
雲母	7.1-7.7	石蠟	1.94-2.07
水晶	3.78	賽璐珞	6.7



硬 橡 皮	2.55	電 鏡 用 紙	2.0-2.5
Bernstein	2.80	石 蠟 油 (26°C)	2.11
硫 黃	4.05	橄 欖 油 (21°C)	3.11
馬 來 樹 膠	4.43	空 氣 (19°C)	1.000576
橡 皮	2.45-2.73	氫 (20°C)	1.000273
火 油	2.70-2.14	氮 (0°C)	1.000074
乙 醇 (14.07°C)	26.8	二 氧 化 碳 (0°C)	1.000946
甲 醇 (13.4°C)	35.3	水 蒸 氣 (145°C)	1.0070
水	80.0	水 晶 板 { 光 軸 平 行 光 軸 垂 直	4.38 4.46

晶體介質之介質常數，隨光軸之方向而異，觀表中水晶即知之。