

自然科學小叢書

電 靜 及 磁

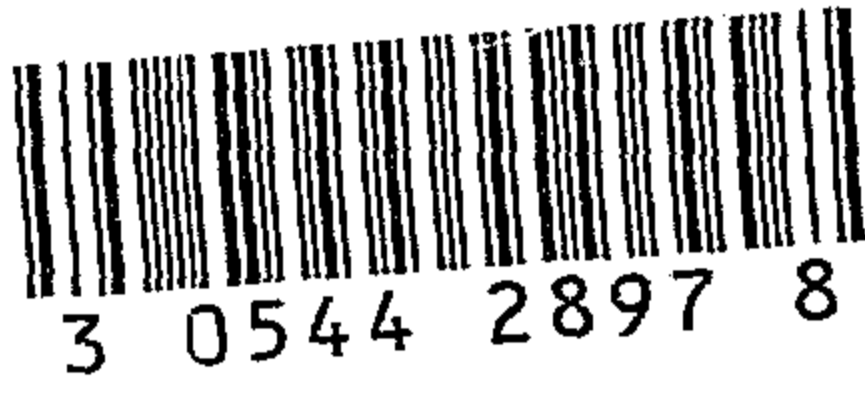
三枝彥雄著

周 斌 譯

王雲五 周昌壽 主編

商務印書館發行

338
100



目次

第一章	磁	一
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
目次		一

50927

磁及靜電

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

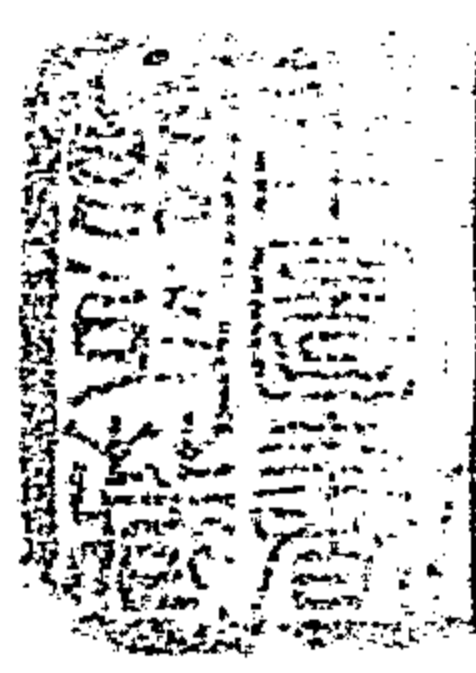
第一章 磁

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 (Lodestone) 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，好不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，這就是磁石所以名爲 magnet 的原委。又有一說，在當時鐵的主要出產地爲亞細亞海沿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 (Titno Lucretius Carus 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（*Petrus 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，彼此互相排斥。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 Gioja*）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。所以就用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。照此推論起去，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 (Michael 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，經斯特仲 (William Sturgeon, 1783-1850) 造成第一個電磁石，用的是馬掌釘形狀的軟鐵，能够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 Ruhmkopf, 1803-1877) 造成魯謨科夫式的電磁石，通稱爲魯謨科夫線圈 (Ruhmkopf'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) 的人是伯松 (Siméon Denis Poisson, 1781-1842) 和韋柏 (Wilhelm Edward Weber, 1804-1891)。伯松以爲將磁質 (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，他以為磁質的各個分子，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。他以為磁質的各個分子，都是可以自由轉動的小磁針。在通常的狀態時，各個分子因為相互的作用，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，鐵片也就成為磁石。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，是為磁石的極 (Pole)。試取一磁針，支住其中夾一點，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

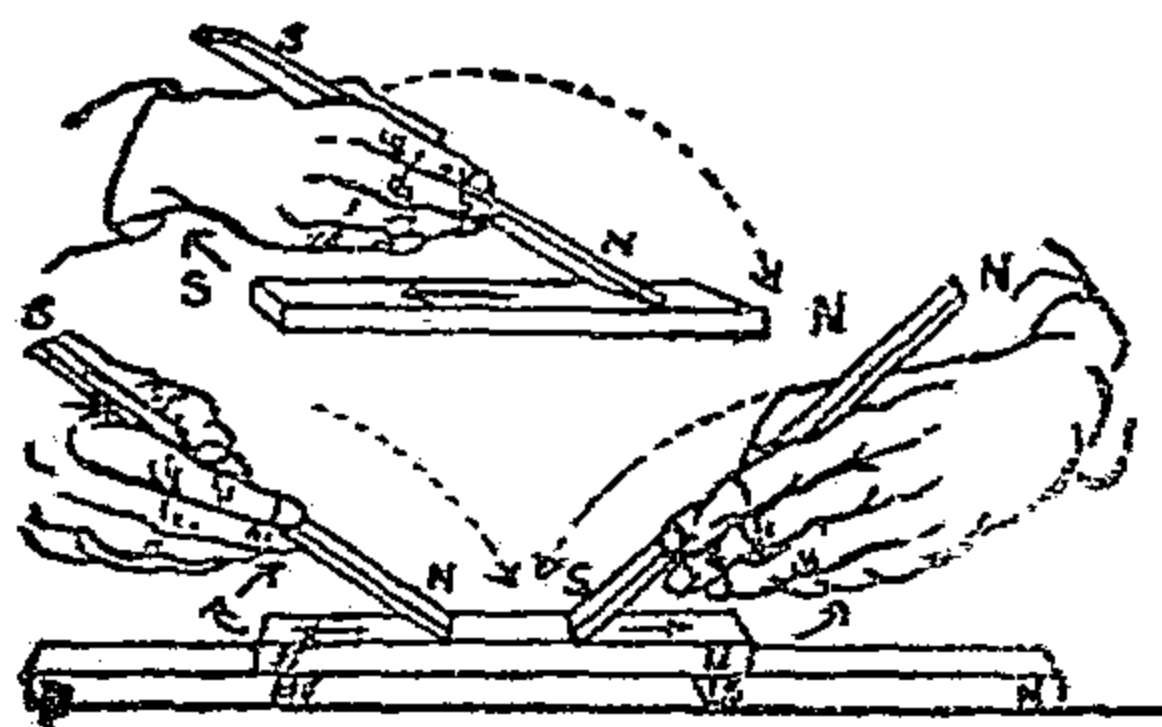


圖 2.

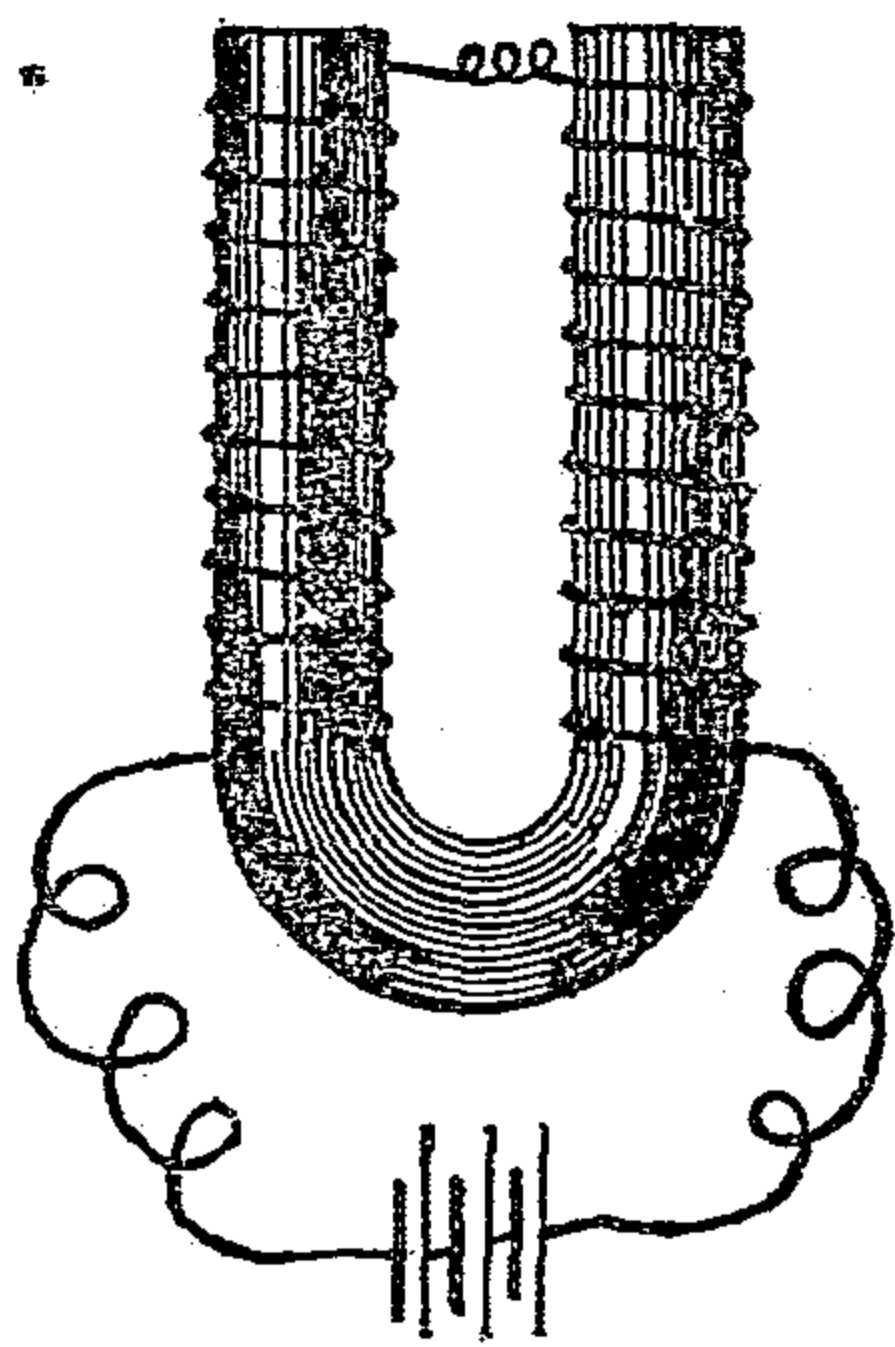


圖 3.

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，通稱爲磁感應 (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，在同名極間作用的排斥力，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，卽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，單位面積卽一平方

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，互相排斥的結果，磁場強度成爲零。所以在這裏的鐵粉，排

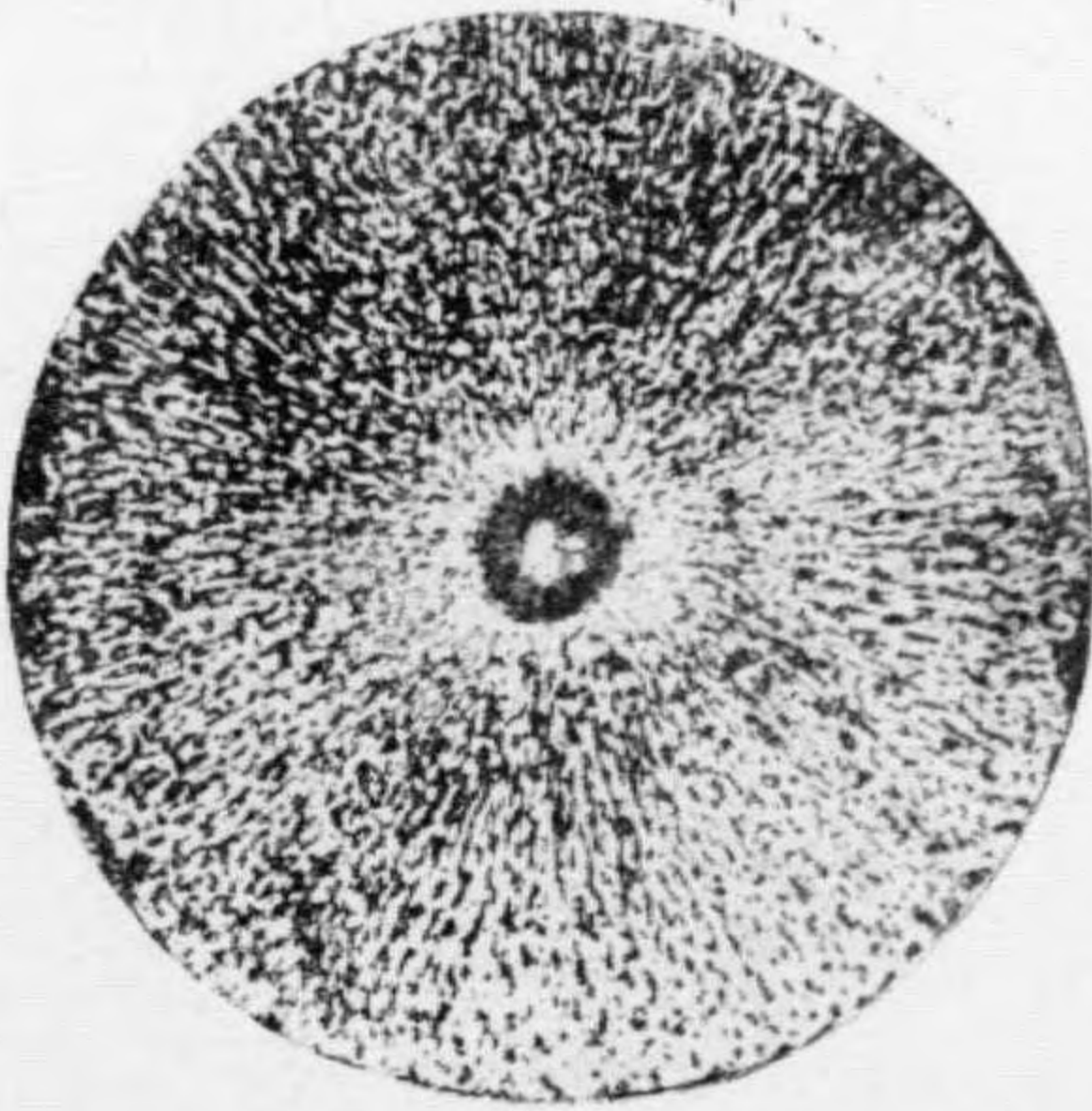


圖 4

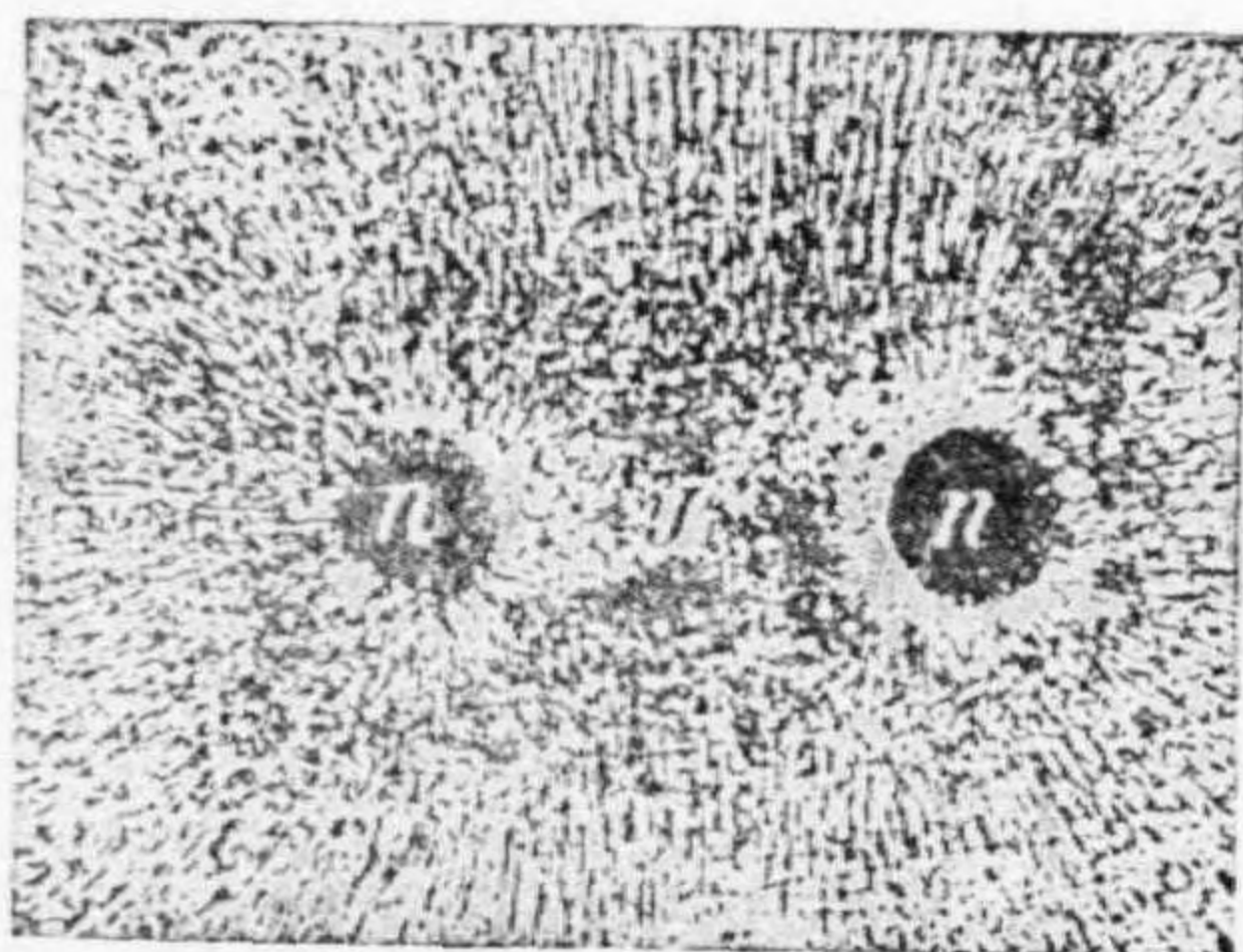


圖 5.

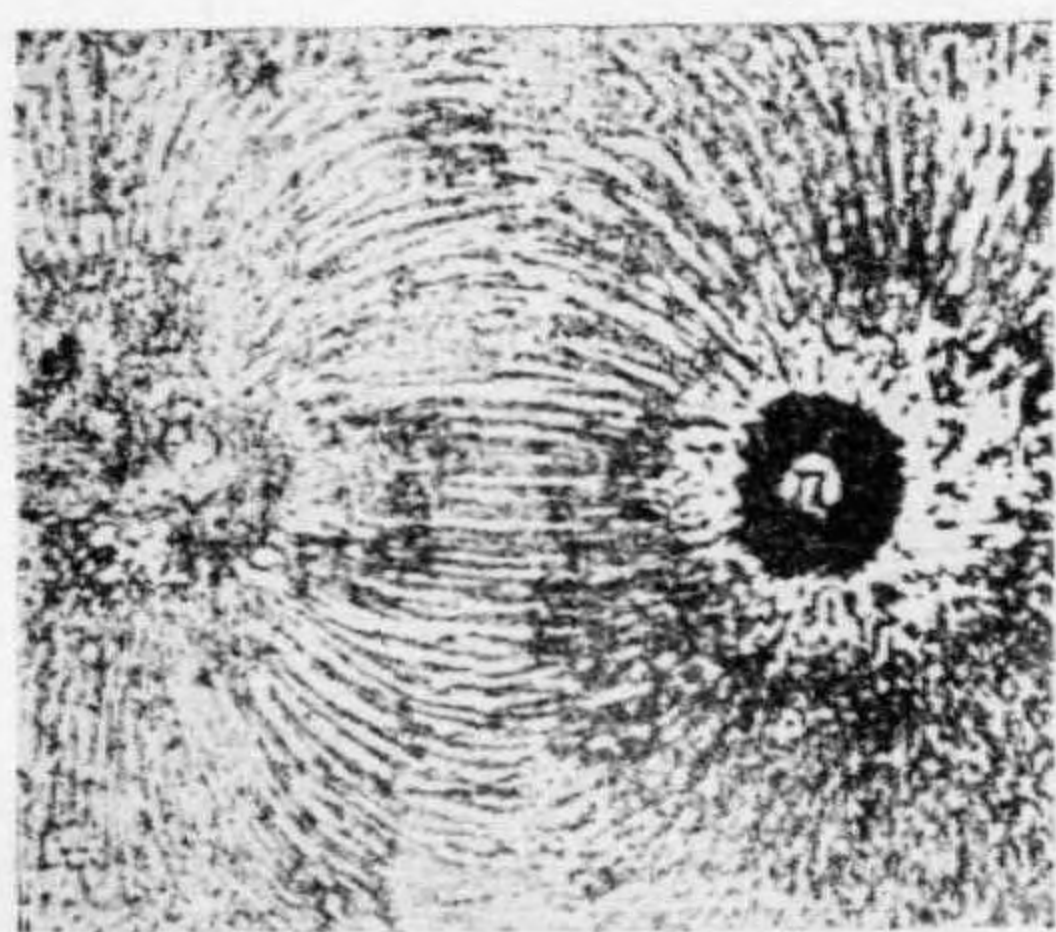
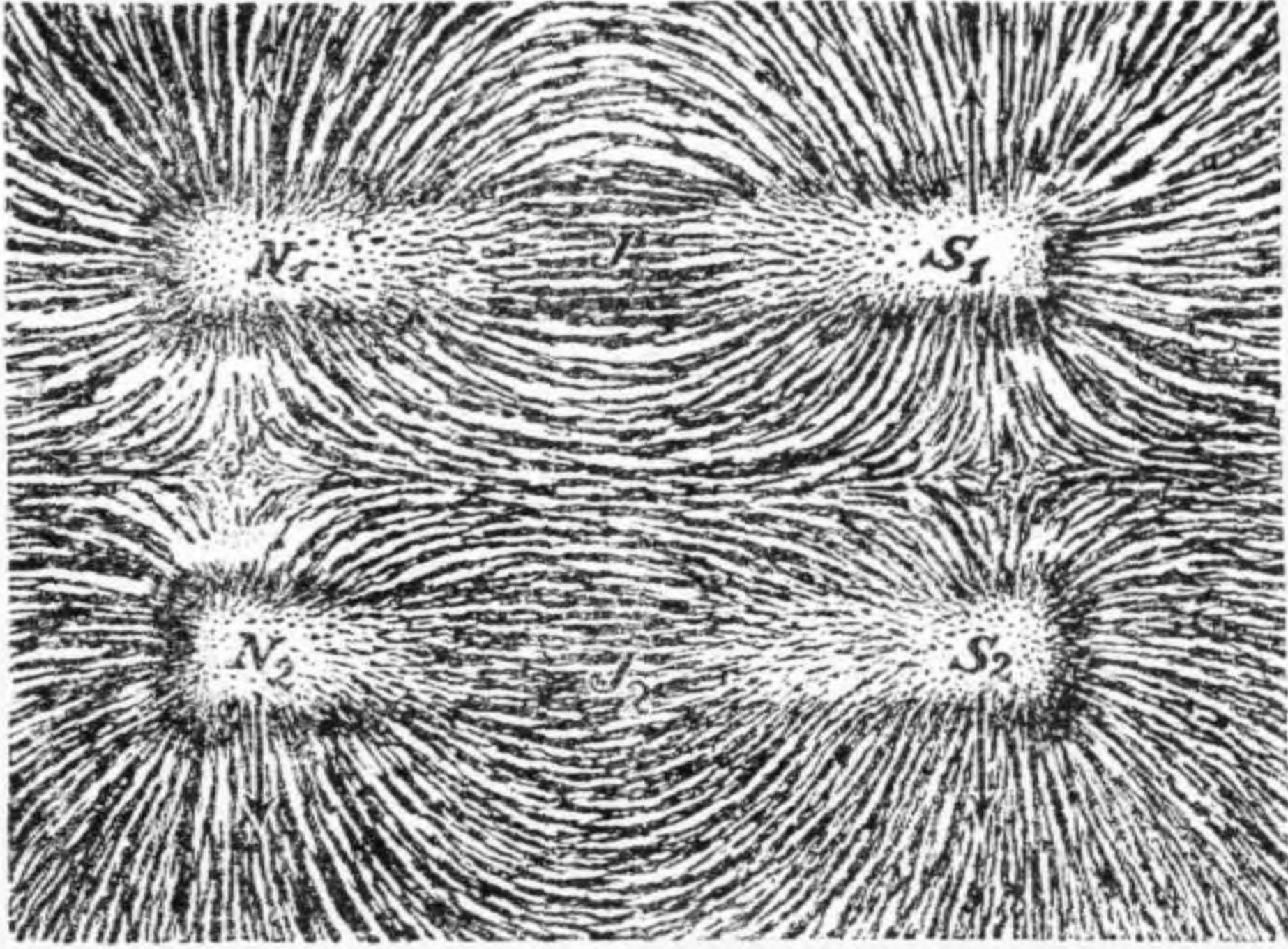
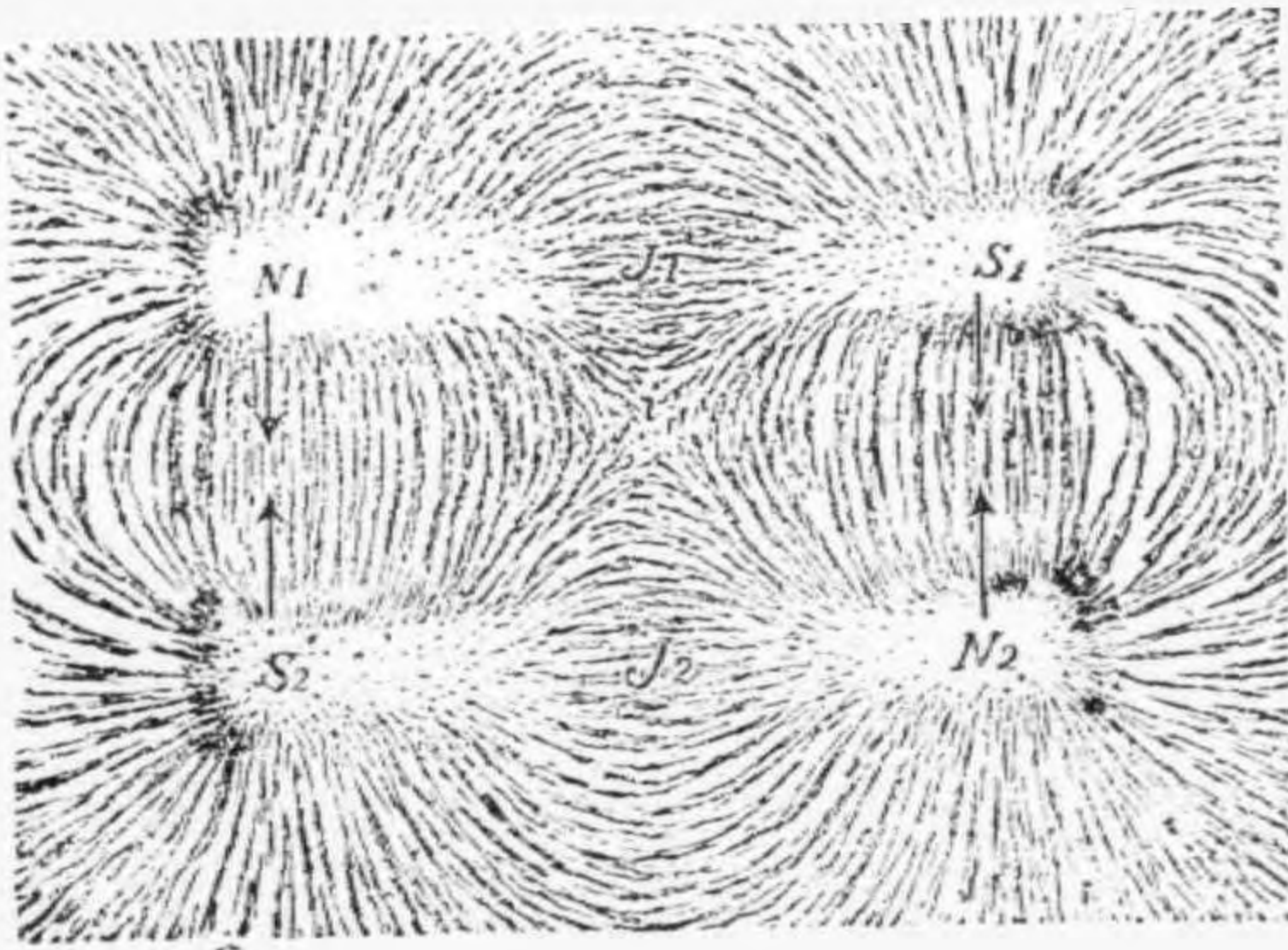


圖 6.

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。



■ 7.



■ 8.

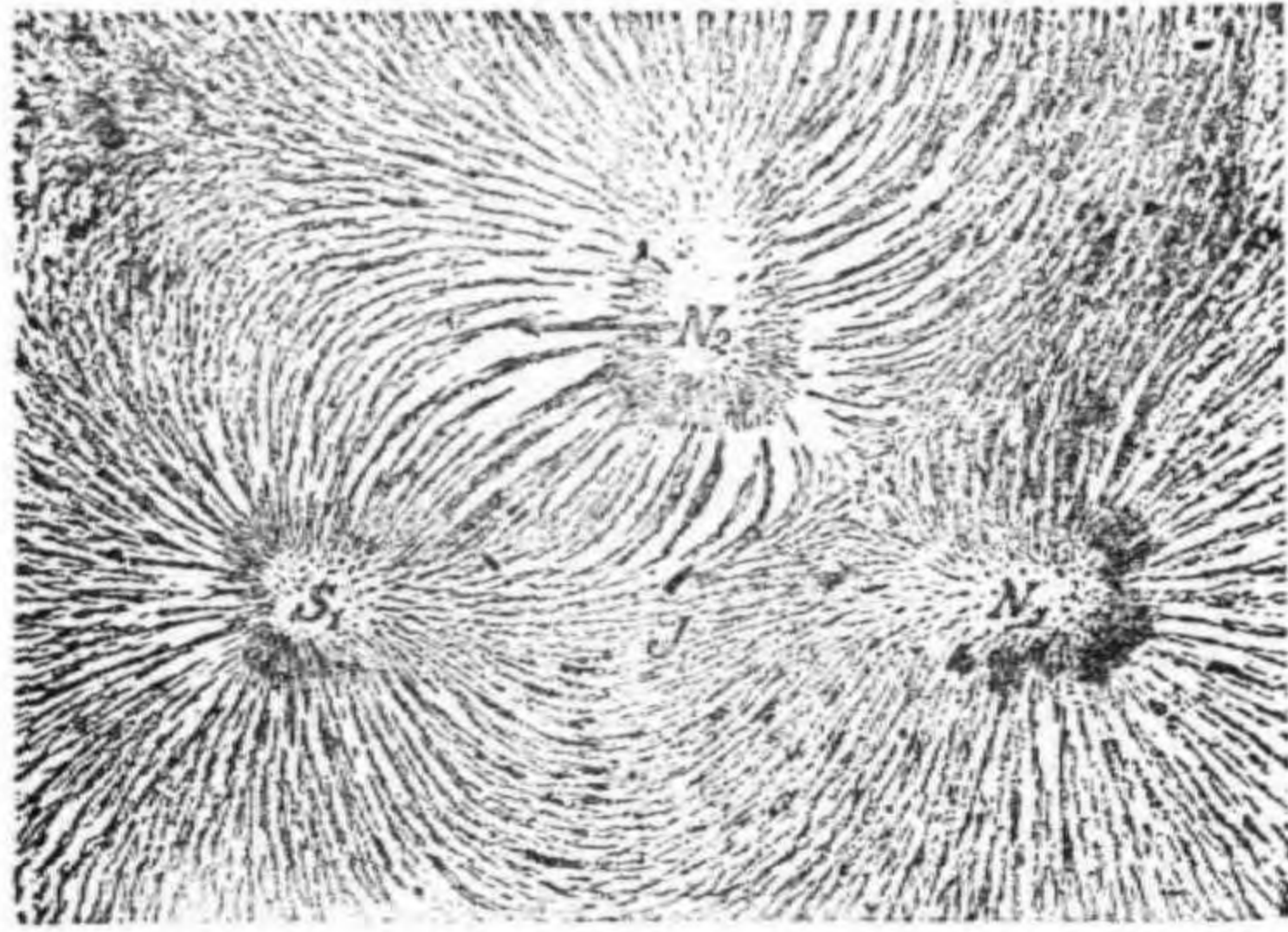


圖 9.

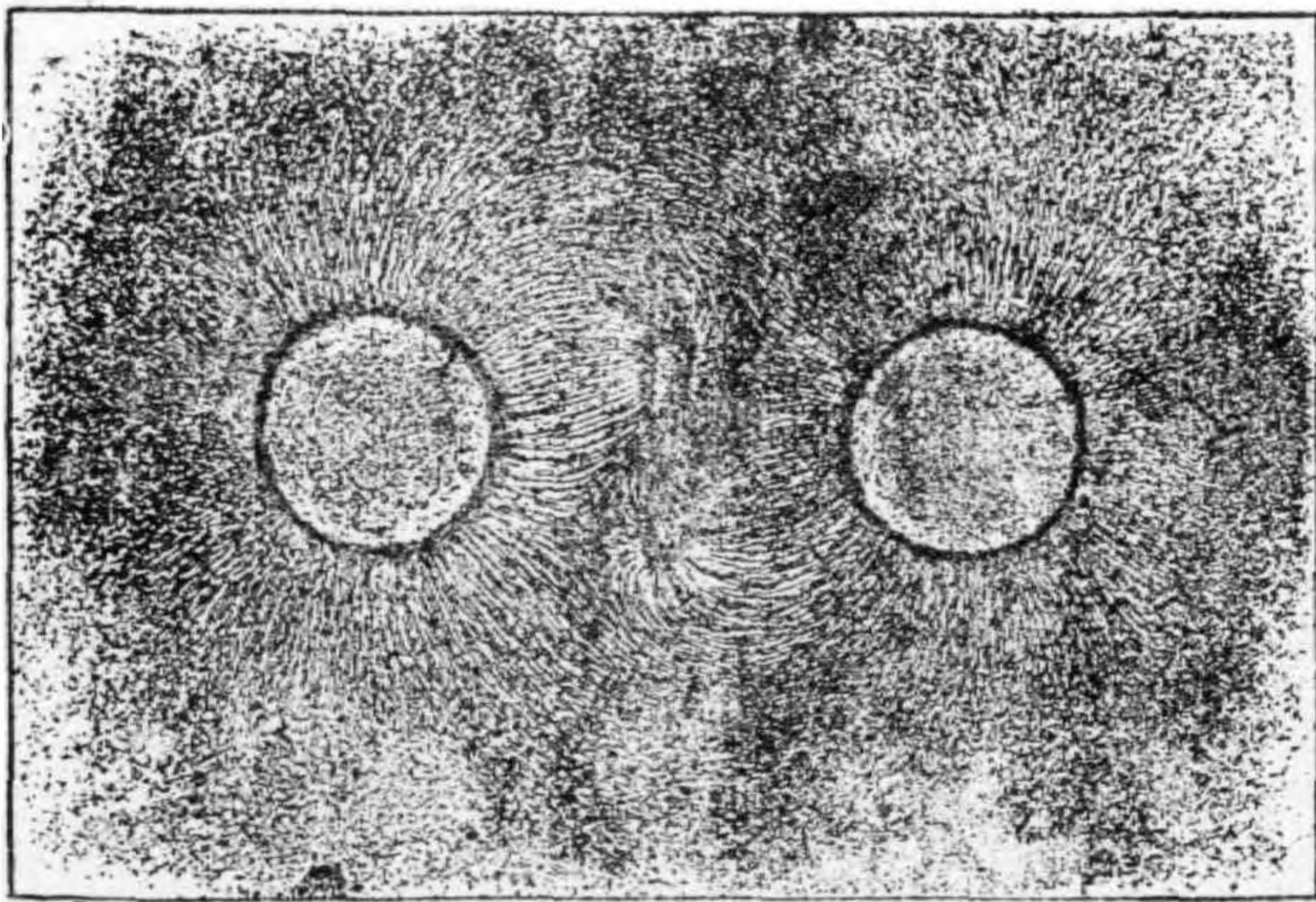


圖 10.

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

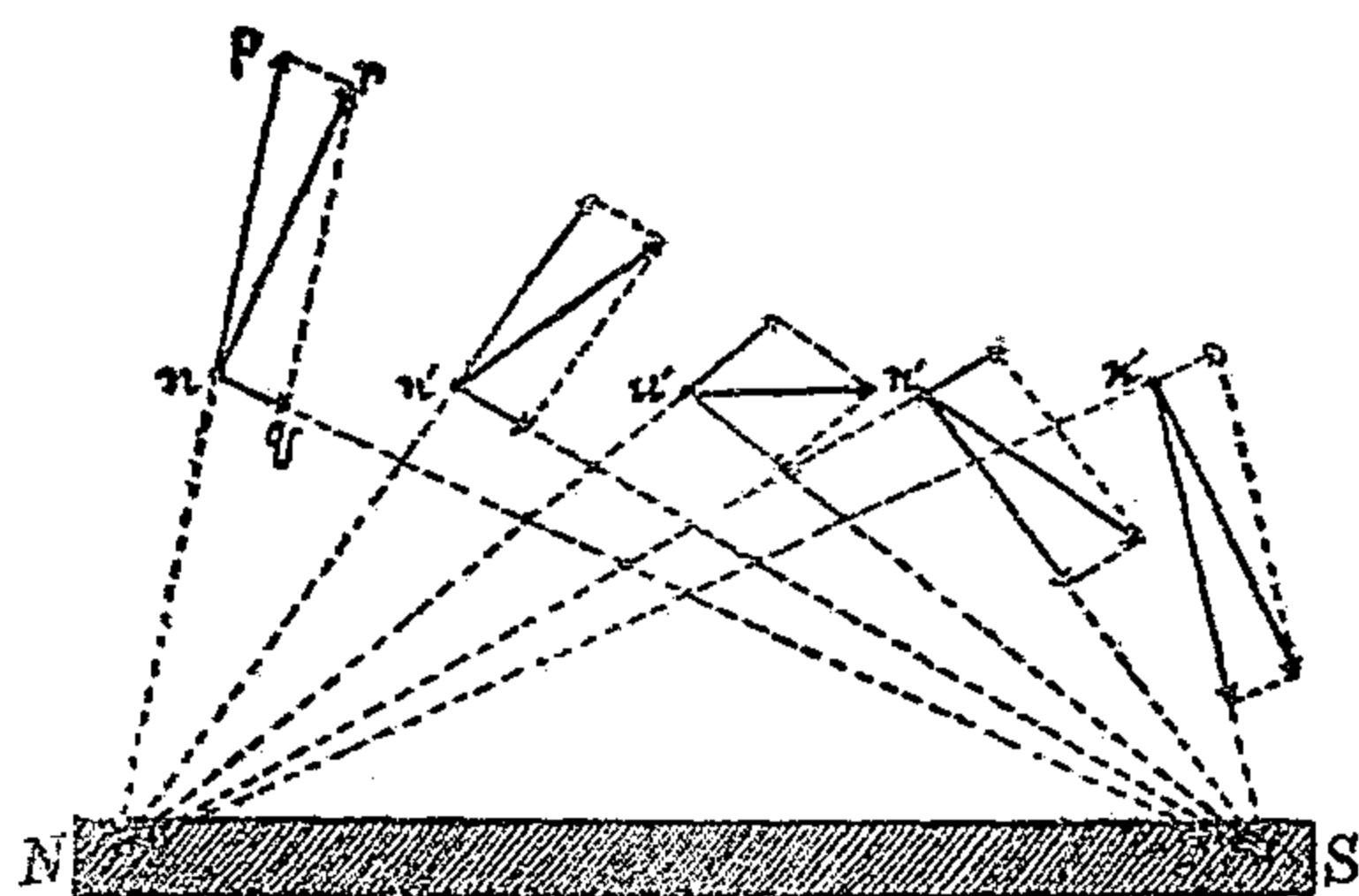


圖 11.

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 Ln 及 Sn 而定。 N 對於 n 作用的力是斥力，如圖 11 中的 $\vec{L}n$ ， S 對於 n 的作用，是引力，如 $\vec{S}n$ ，兩者均與縱 n 至 N 及 S 間的距離的平方成反比例。以 $\vec{L}n$ 及 $\vec{S}n$ 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。

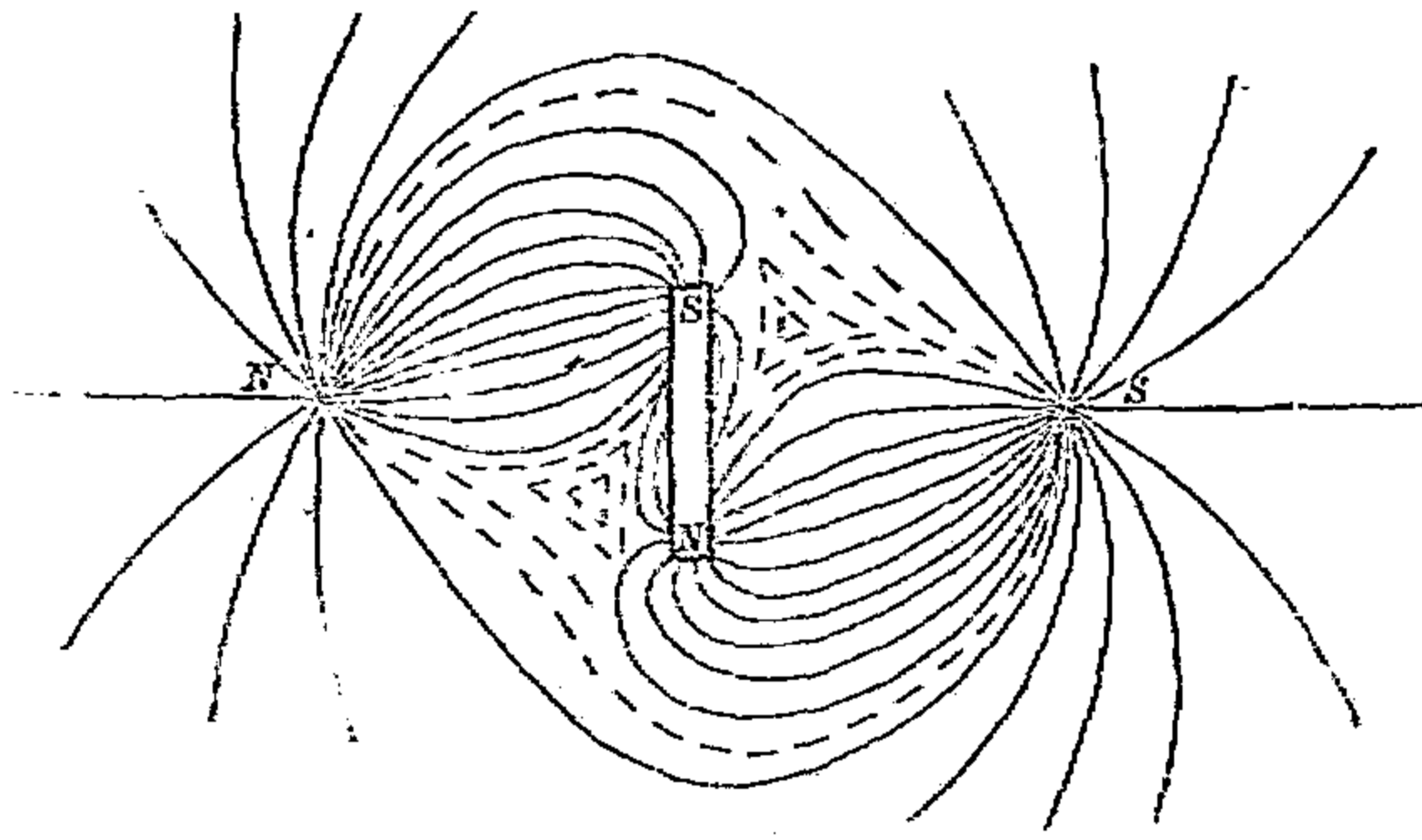
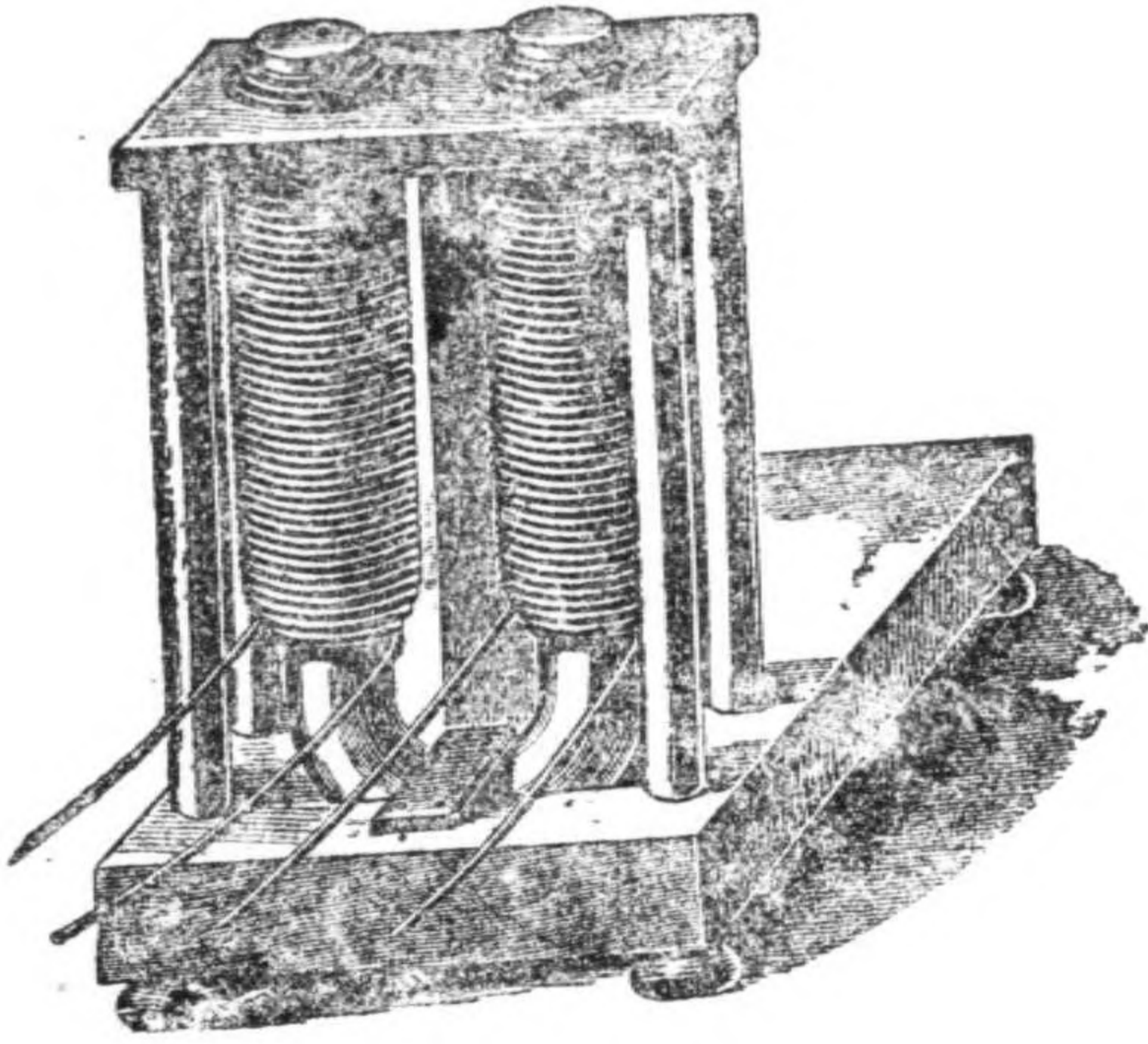


圖 12.

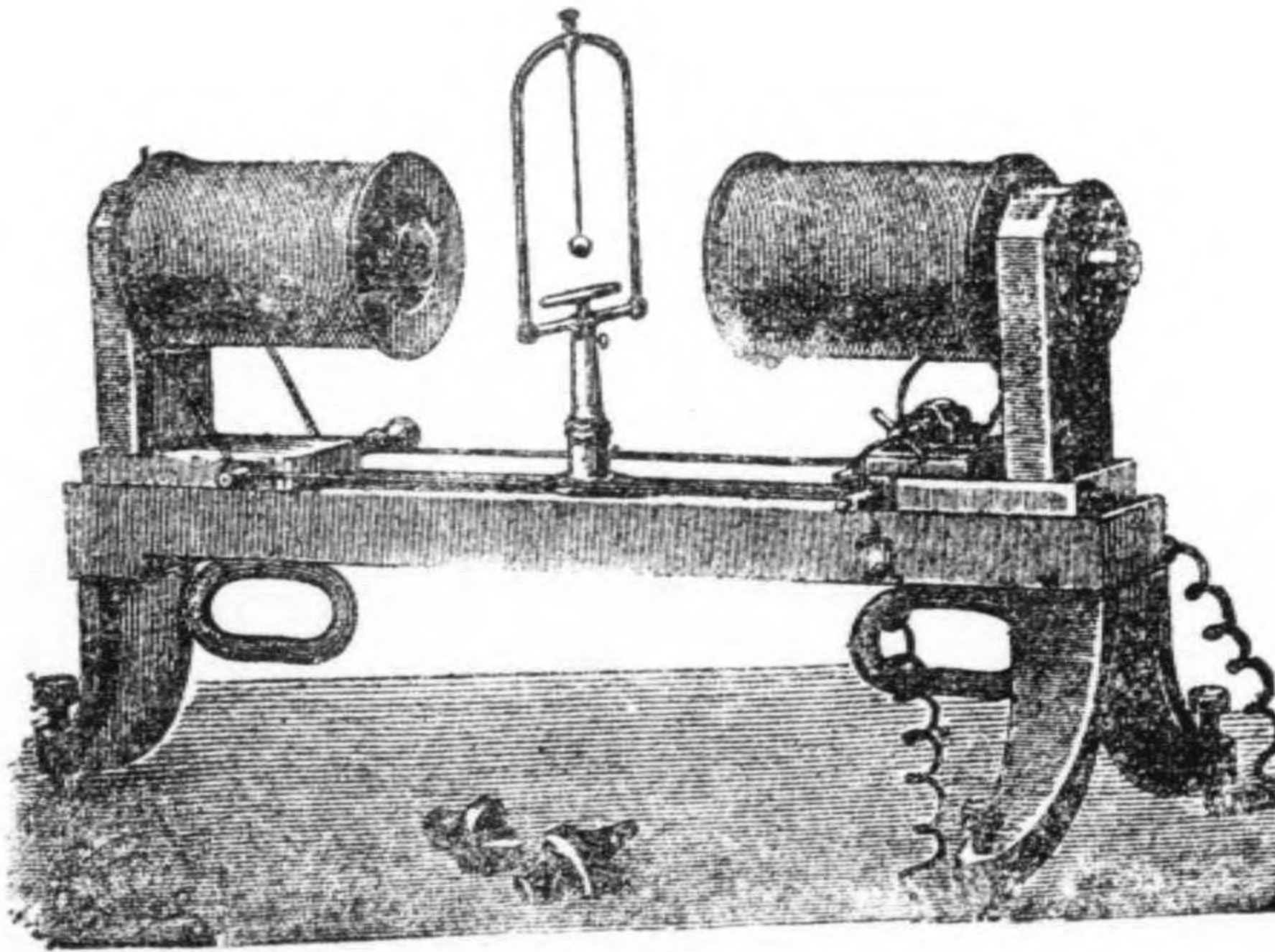
第五節 電磁石

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 François Jean Arago 1786-1853) 於一八二二年，最初造成成功的。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，

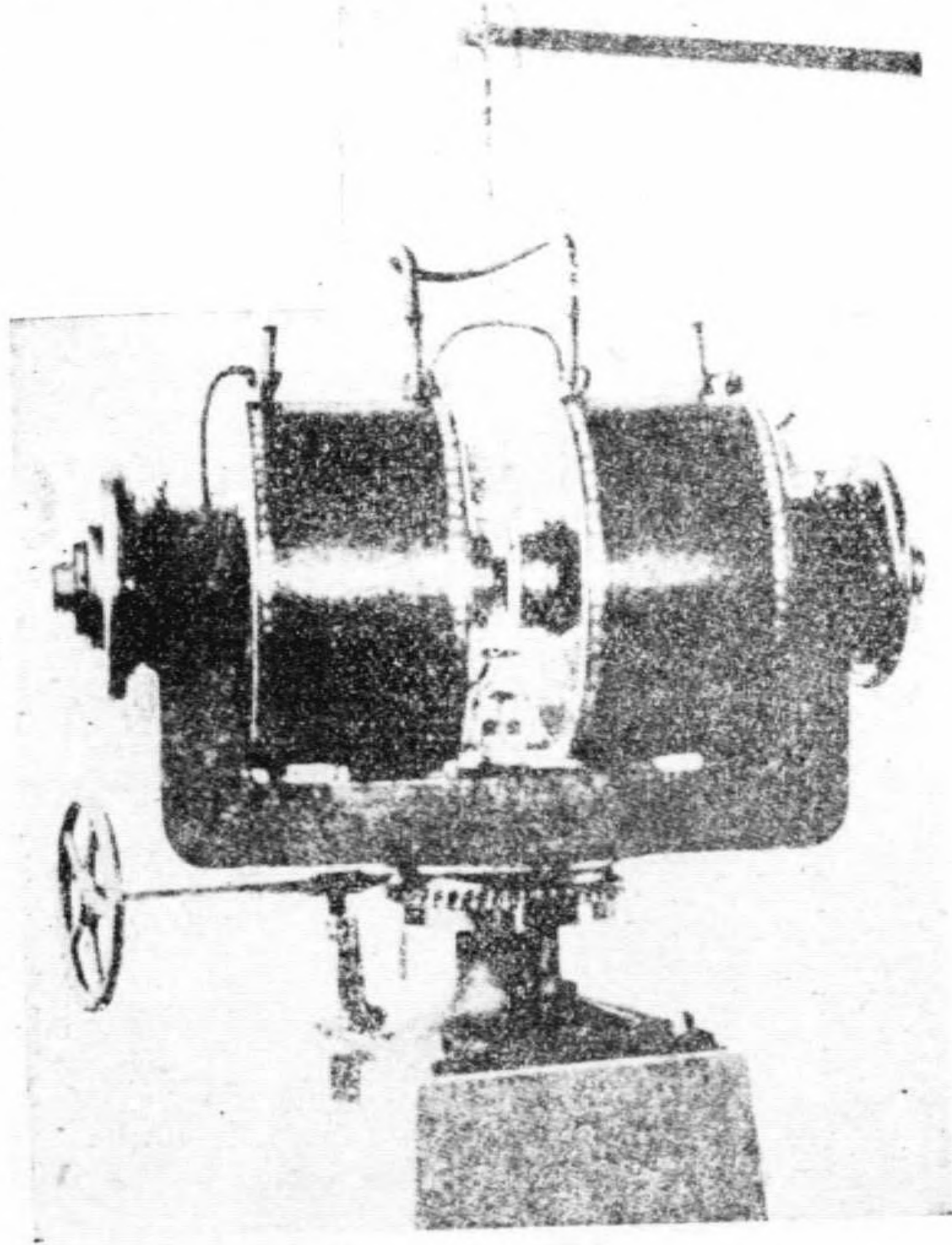


13.



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淮斯 (Pierre Weiss, 1865-) 式的磁石。淮斯式的電磁石，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

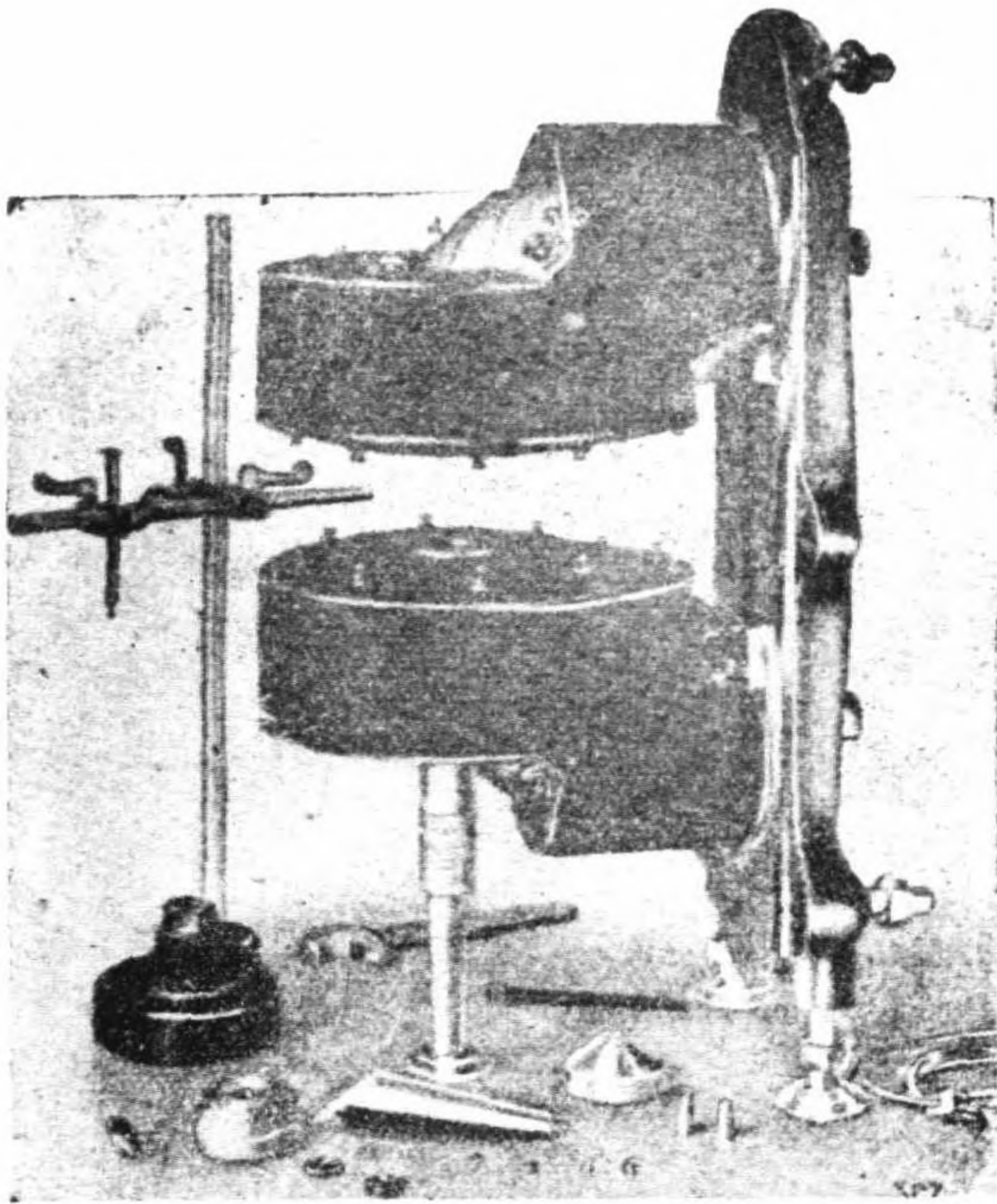


圖 16. (甲)

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，

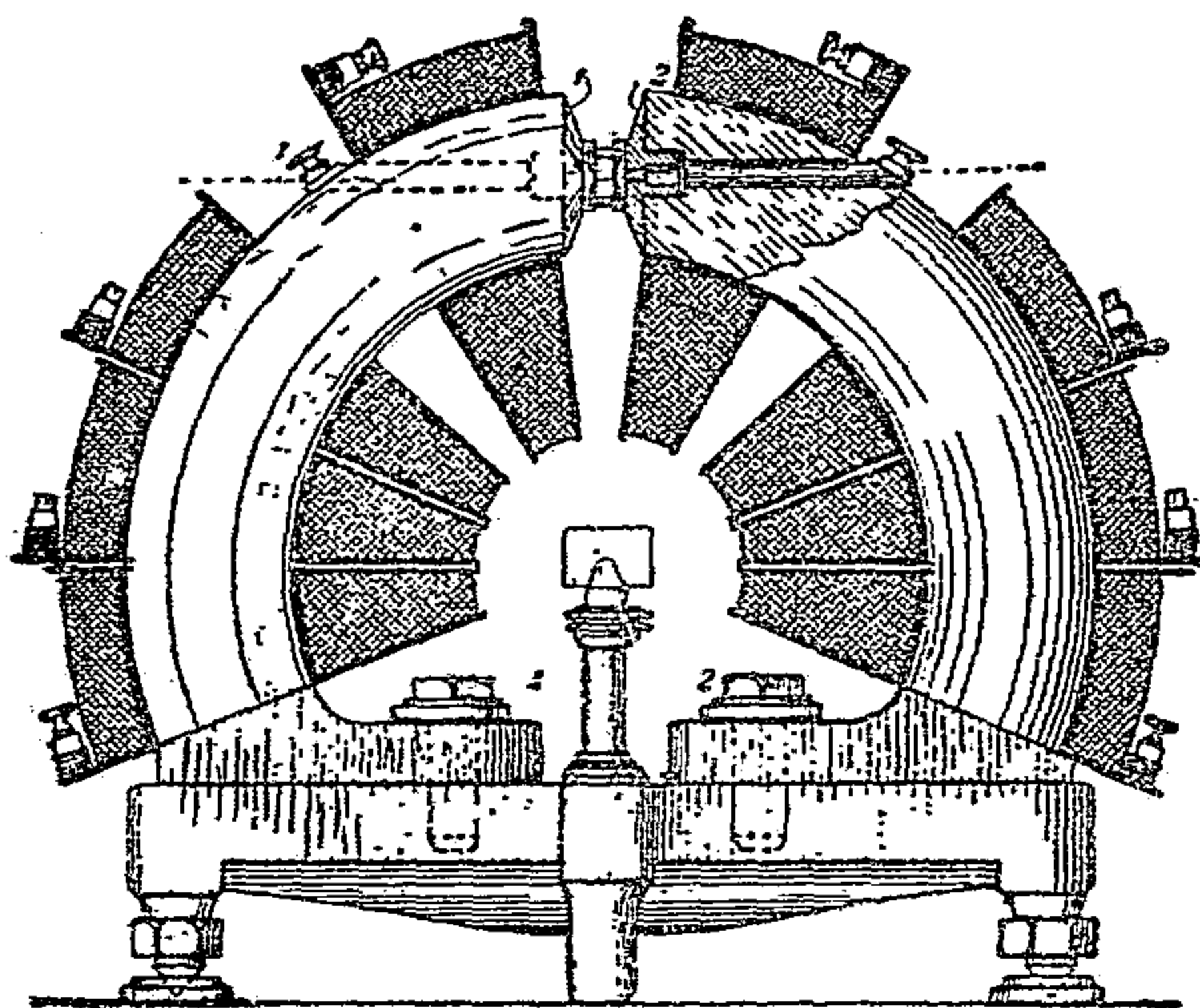


圖 16.(乙)

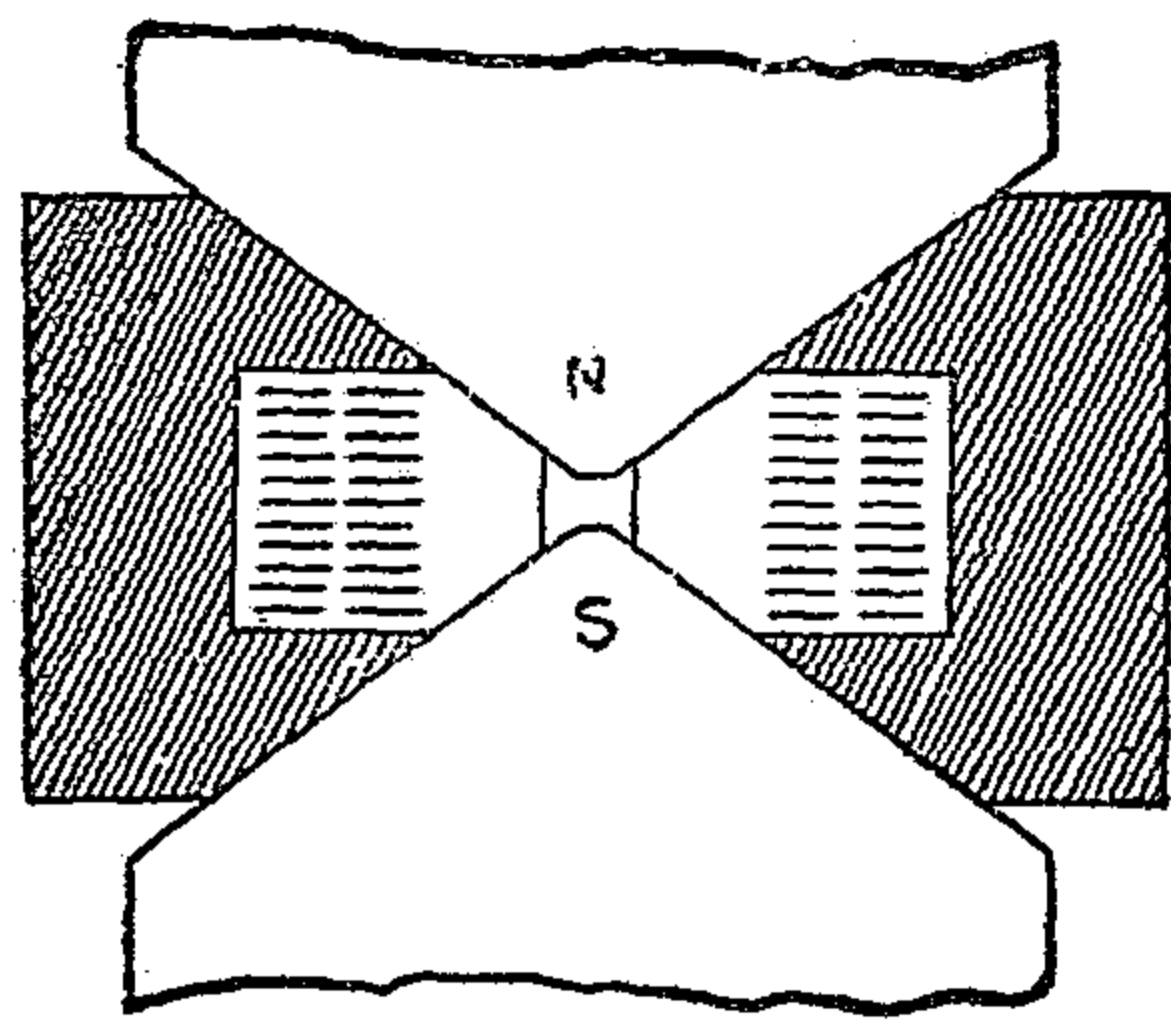


圖 17.

纏繞銅板，以作線圈，如圖17所示，並在其周圍使冷卻到 -15°C 或 -20°C 的油，循環不息的流過，俾其一而受冷，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，對於外部好像似沒有磁的一樣。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

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

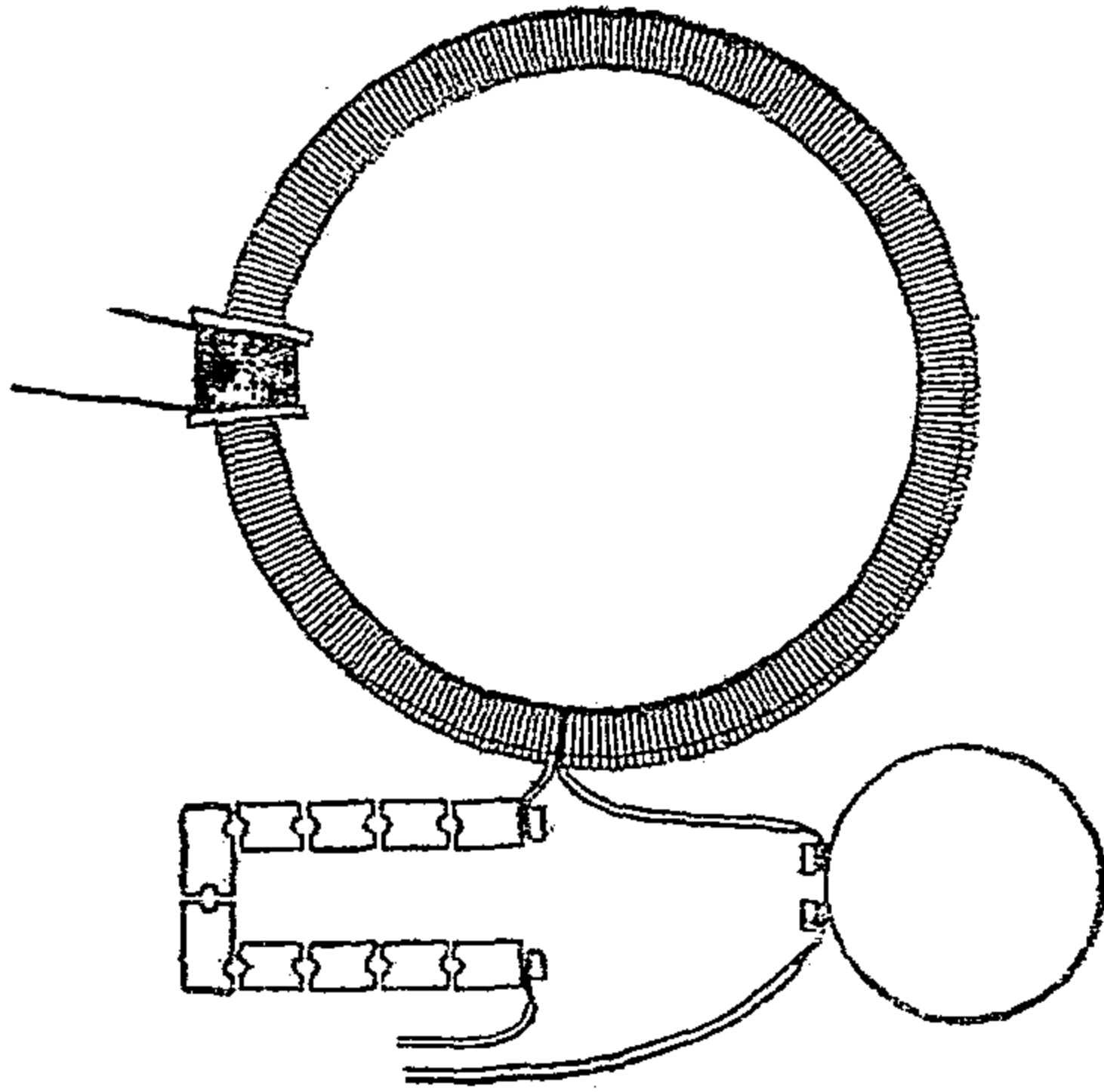


圖 18.

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，

通過 $I \parallel I_1$ 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，命為 $a, b,$

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

I_1 所要的 H 之值最小，以後縫隙次第加大，欲得

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

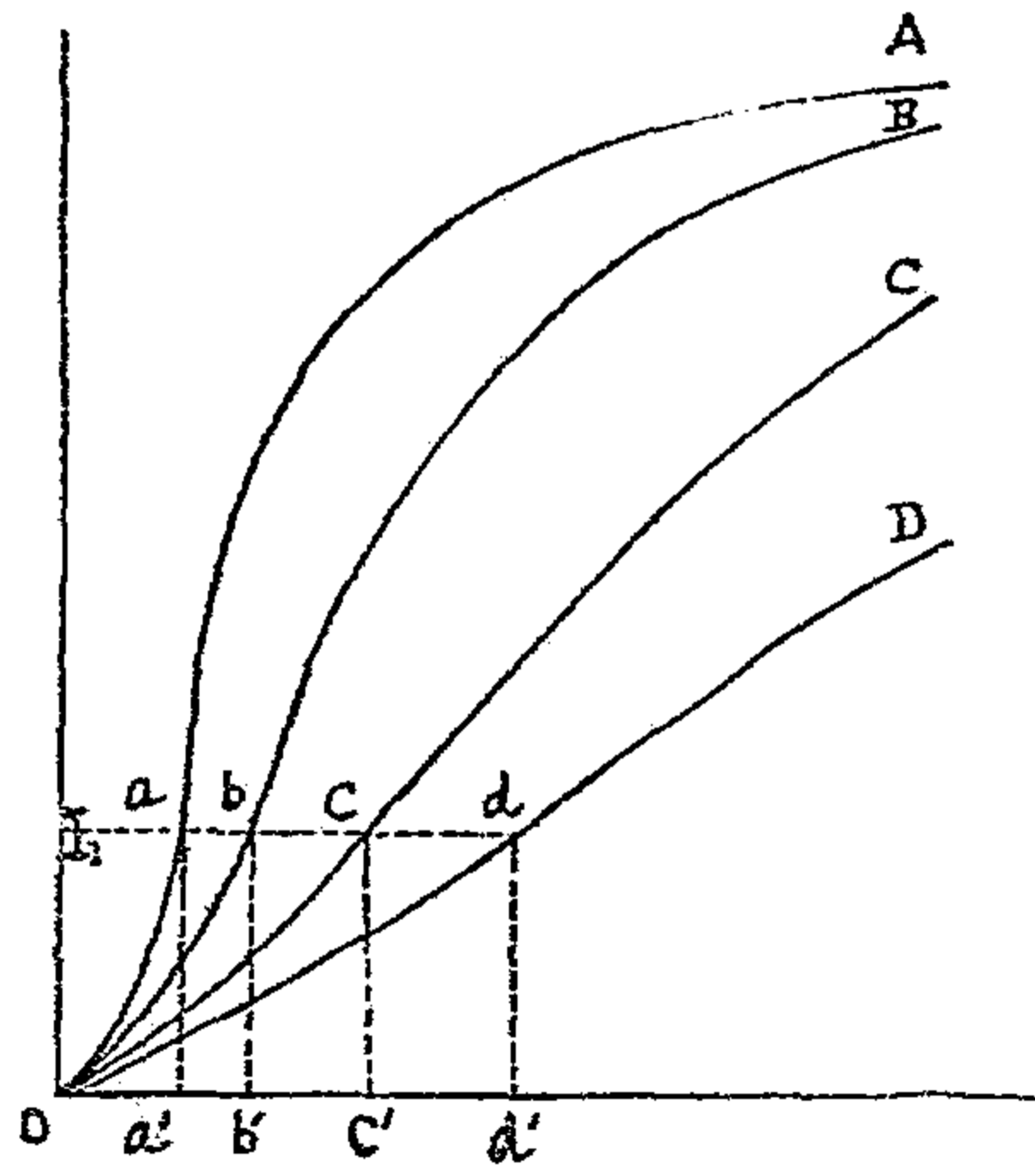


圖 19.

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 O_1c 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起去，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 O_1c 那一段，完全不同，是另外的一段，如 bc 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 O_1c 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 ca 的一段曲線。和 O_1c 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 O_2a 作用於其上不可。所以和 O_2a 相當的磁場強度，通稱為矯頑磁力 (Coercive 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

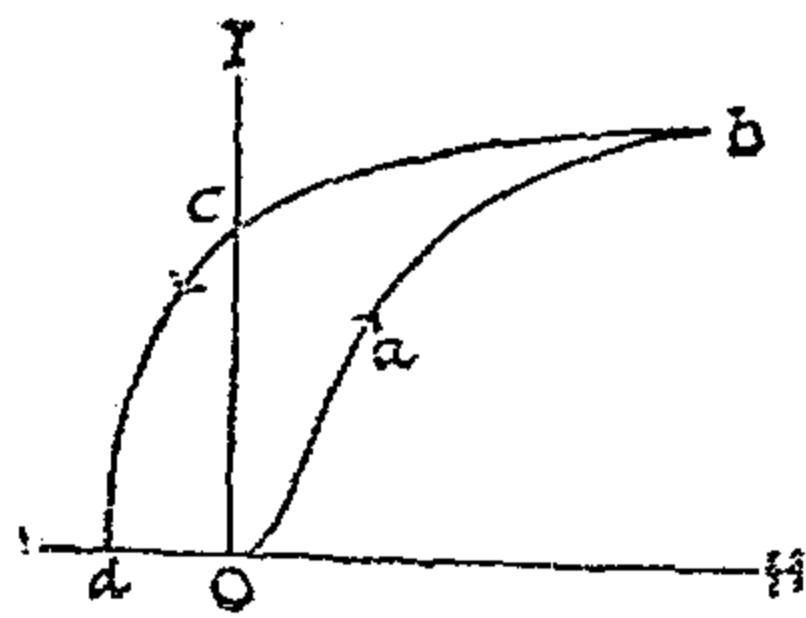


圖 20.

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，則用鋼和銻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 \mathcal{H} 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 μ 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) 卽

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

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 μ 等於 1，此時的磁場強度和磁感應強度相等。順磁質的 μ 恆大於 1，反磁質的 μ 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，卽

(1) 鐵磁質 (ferromagnetic substance)

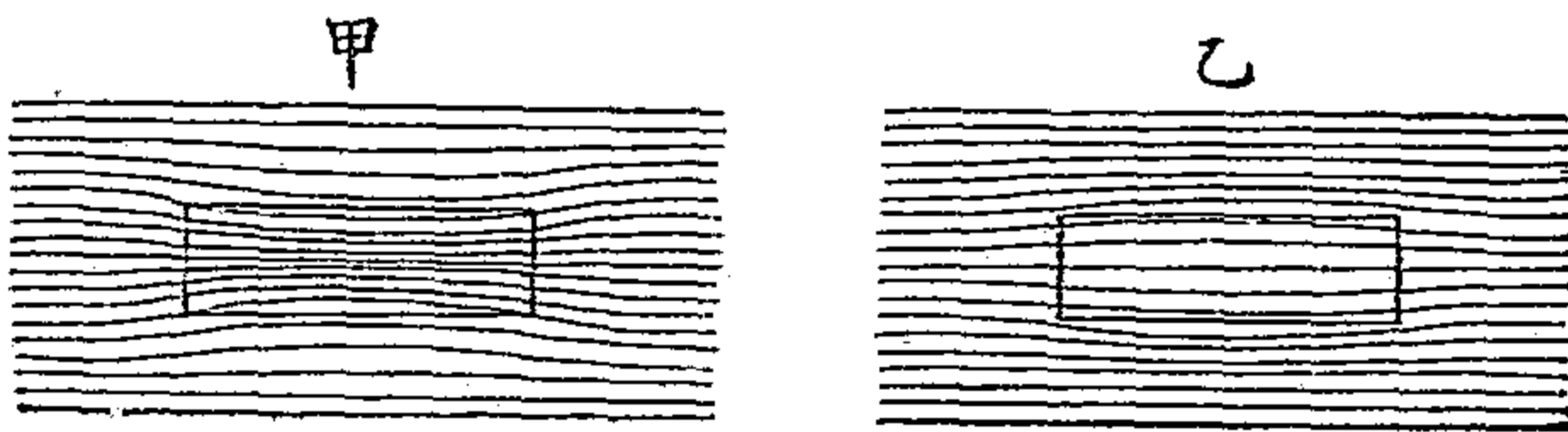
(2) 順磁質 (paramagnetic substance)

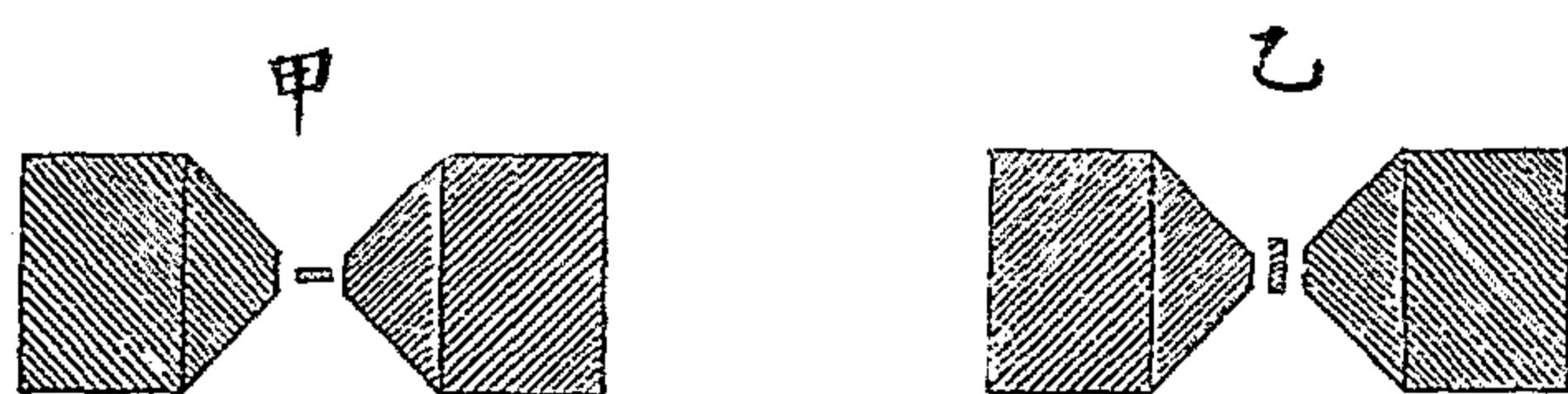
(c) 反磁質 (diamagnetic substance)

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。





22.

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、鉻等的某種化合物。

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、銻等為主。

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 (Owden) 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 $\times 10^{-9}$	元 素	記 號	磁化係數 $\times 10^{-9}$
鋰	Li	+0.50	錳	Mn	+9.66
鈹	Be	-1.03	銅	Cu	-0.056
硼	B	-0.71	鋅	Zn	-0.156
碳	C	-0.49	鋁	Ga	-0.225
鈉	Na	+0.51	鍺	Ge	-0.114
鎂	Mg	+0.55	砷	As	-0.31
鋁	Al	+0.58	硒	Se	-0.32
矽	Si	-0.13	溴	Br	-0.40
磷	P	-0.88	銫	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	釷	Th	+22.29
鈦	Ti	+1.24	釷	Ta	+0.81
鉬	V	+1.50	錳	W	+0.252
鉻	Cr	+2.87	鐵	Os	+0.048
鉑	Pt	-0.80	鉑	Ir	+0.129
金	Au	-0.152	鉛	Pb	-0.120
汞	Hg	-0.193	鉍	Bi	-1.458
銻	Tl	-0.231	銻	Tl	+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 B_l ，稱為因磁性體之感應而生之磁鐵之磁矩 (magnetic moment)。但磁量 B 則與磁性體之截面積 ω ，及磁化強度 I 之乘積 $B = I\omega$ 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 B_l 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 $\frac{I}{H}$ ，

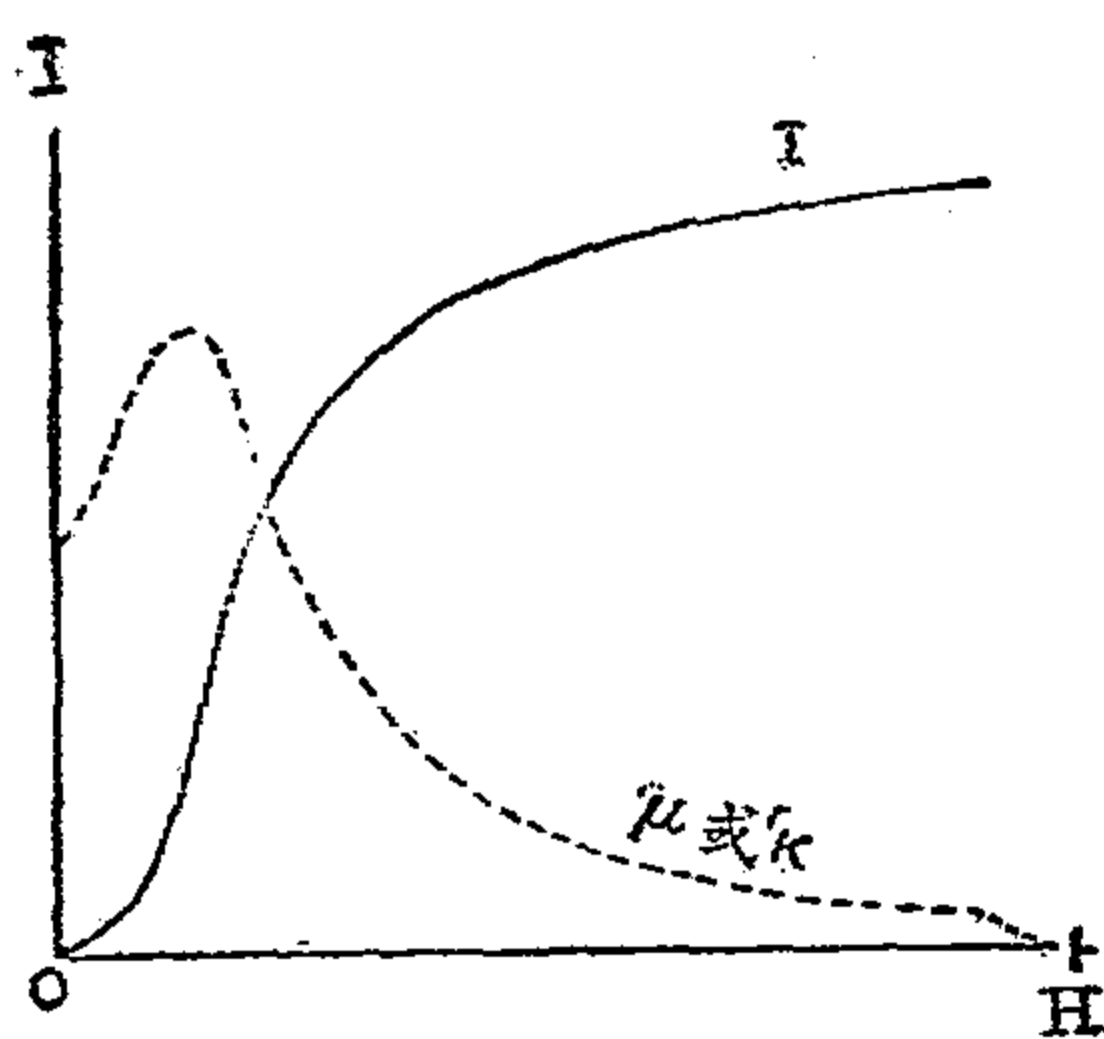


圖 23.

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 $\frac{I}{H} + I$ 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

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

式中之 I ，表磁化強度之飽和值， α 及 β 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。此係發堡 (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。如為軟鐵, 則面積較小, 如為鋼則較大, 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, 卽

第一章 磁

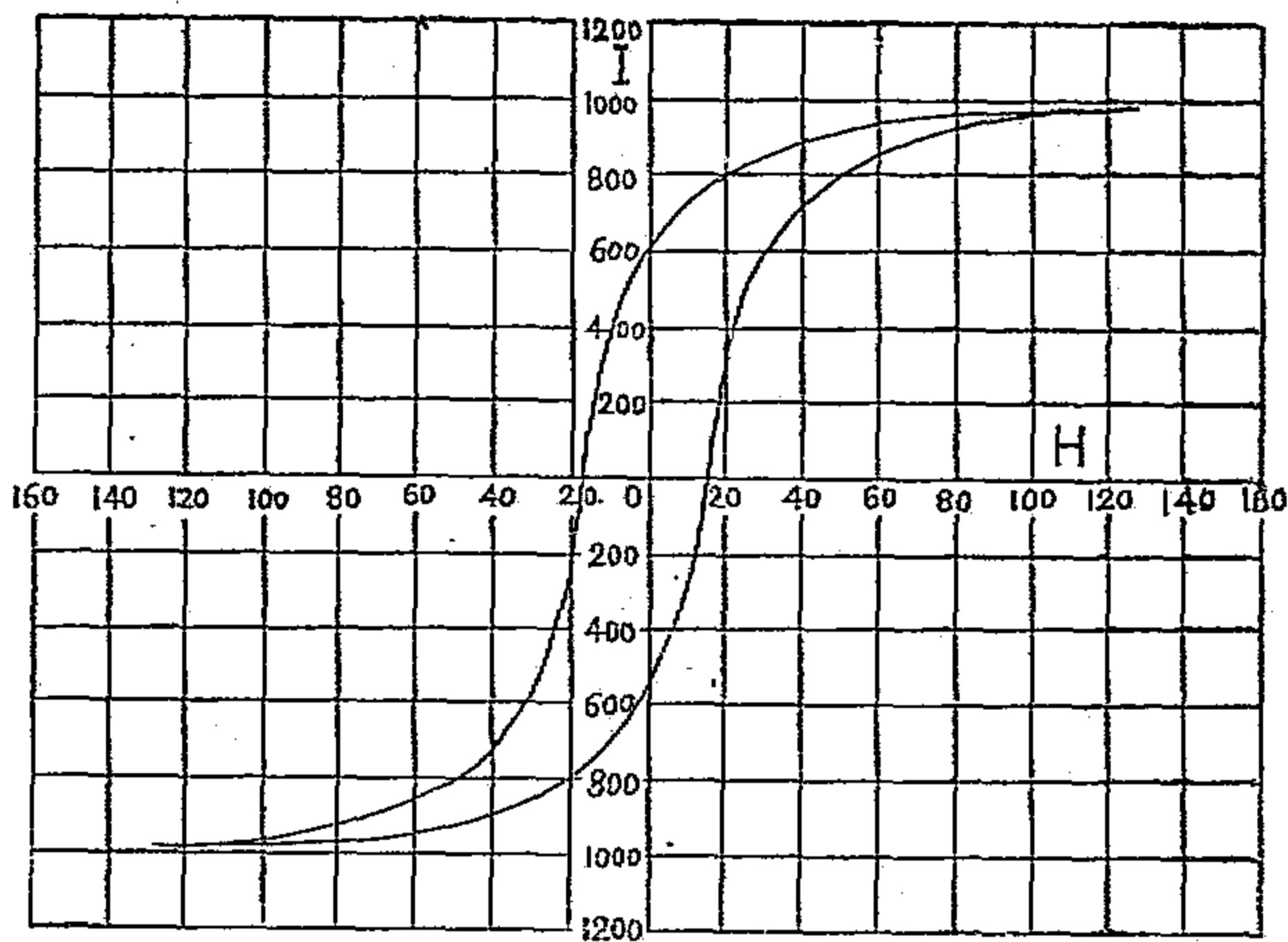


圖 24

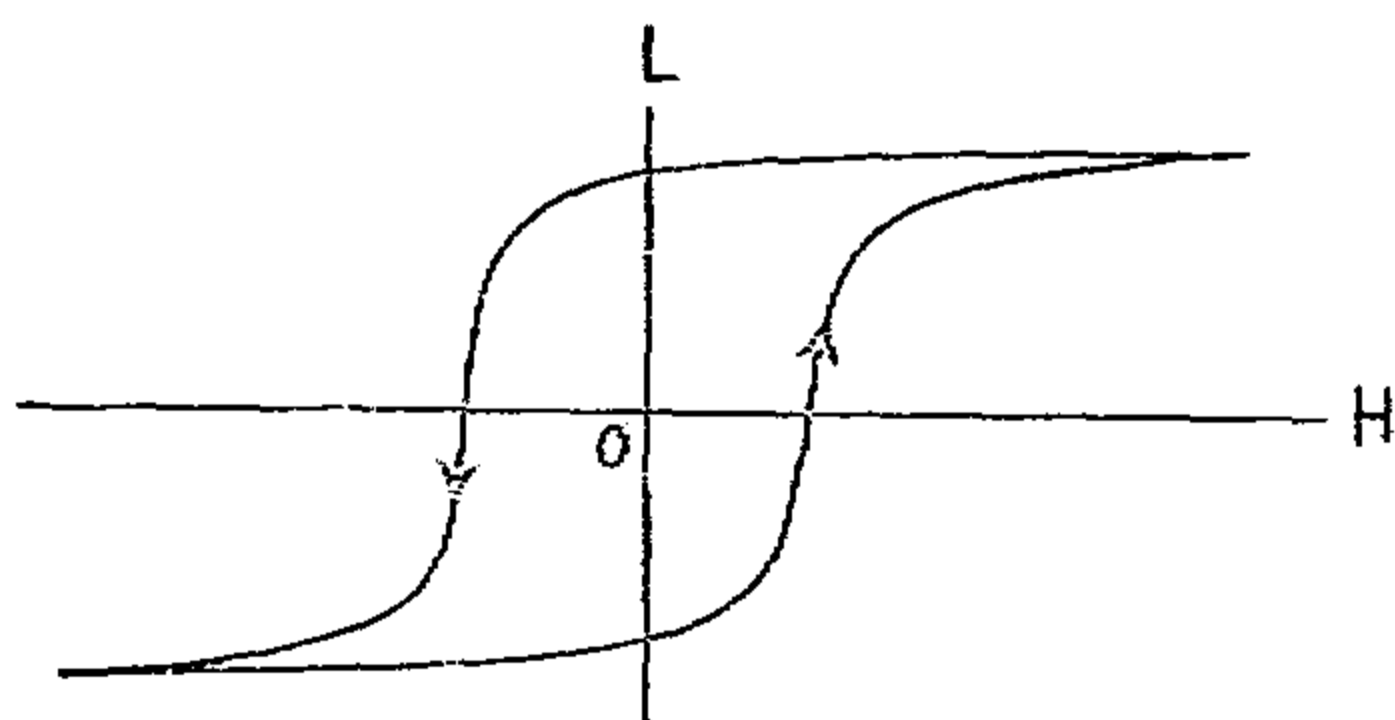
$$W = \eta B^2 l^3$$

式中的 W 表熱量, B 表磁感應強度, η 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。如欲檢查其上磁性之分布狀況, 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。

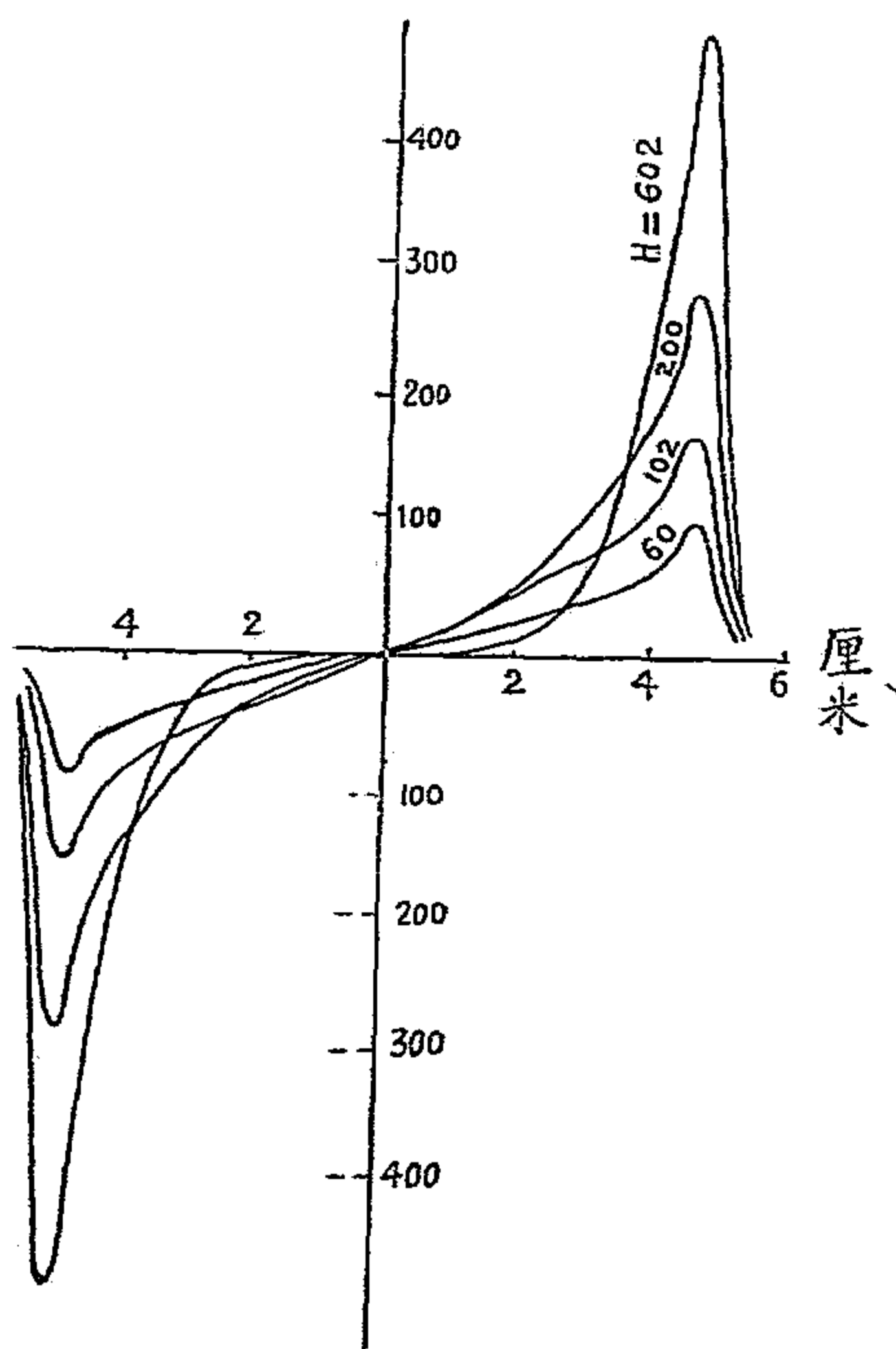


圖 26.

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。

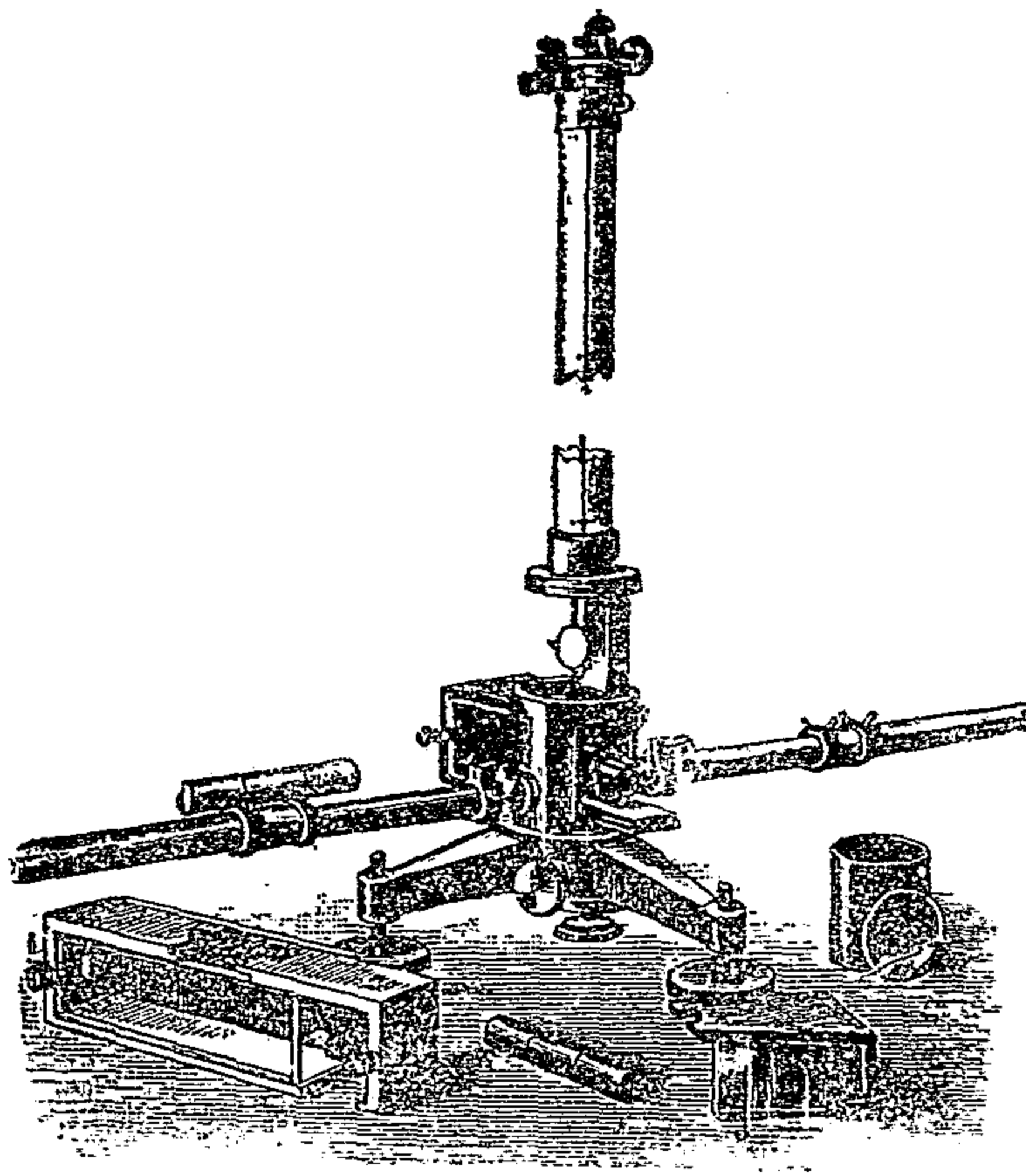


图 27.

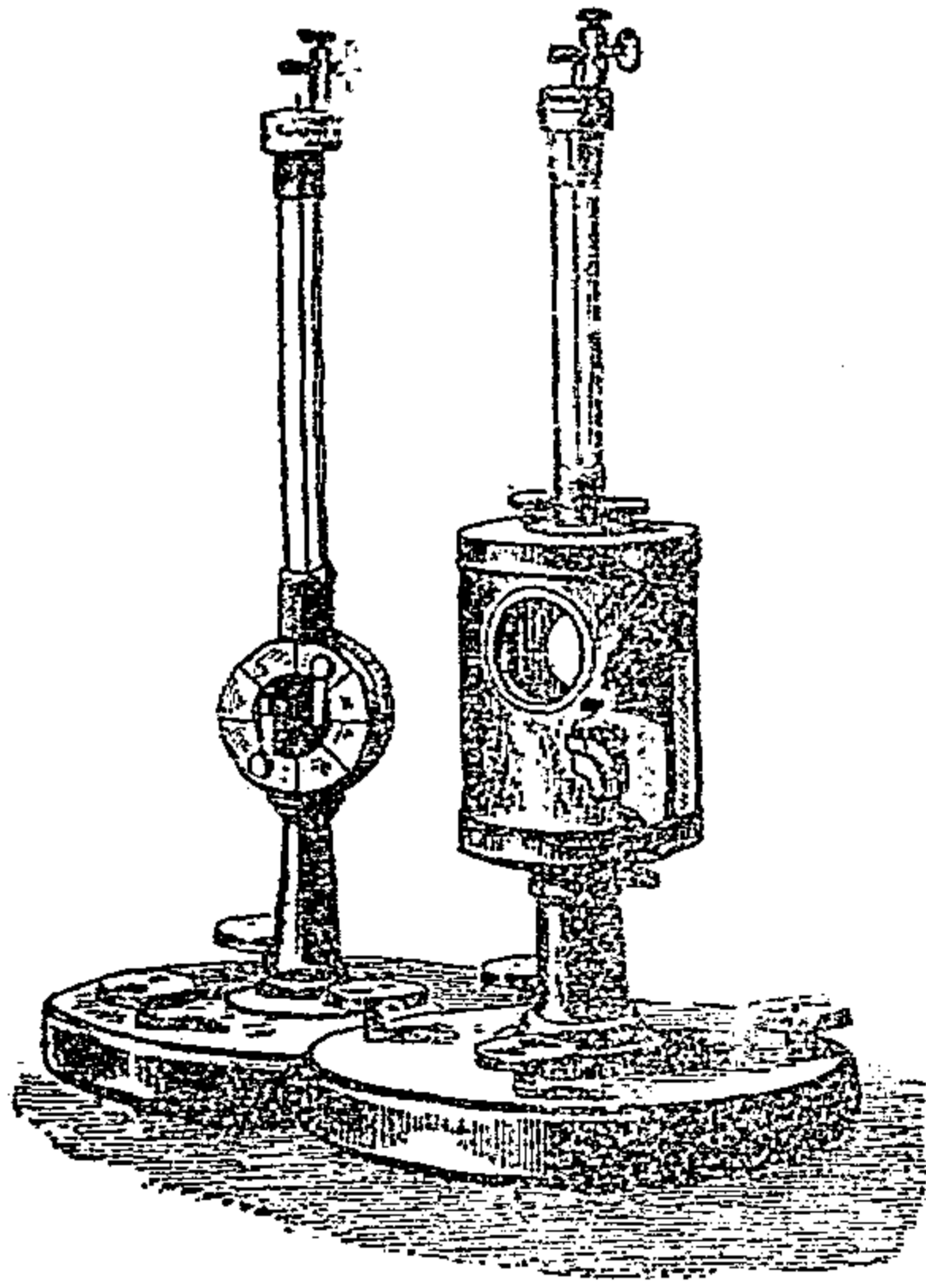


圖 28.

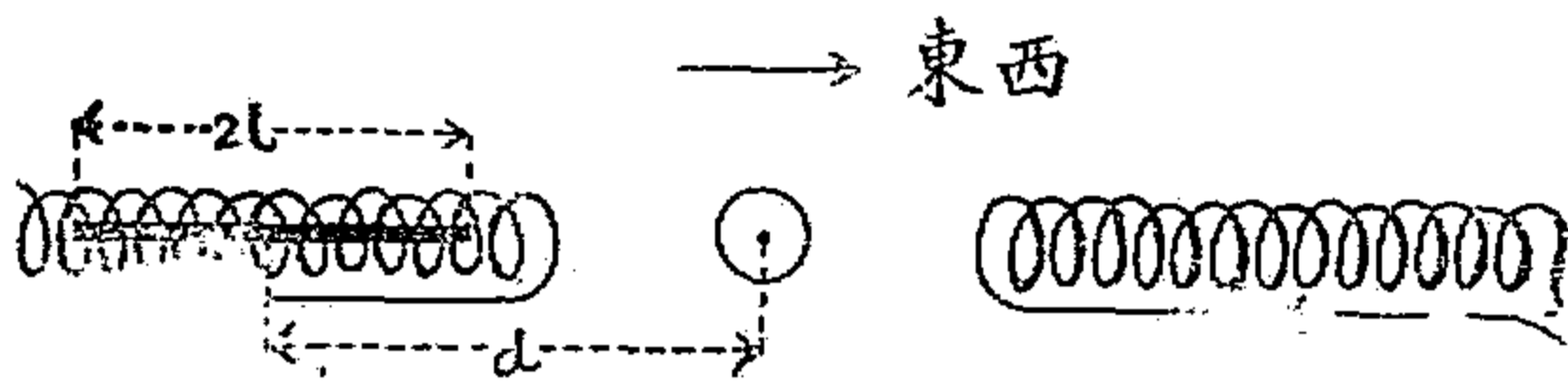


圖 29.

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

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

$$I = \frac{\left\{ d^2 - \left(\frac{5}{3} l \right)^2 \right\}^2}{2Vd} H \tan \theta$$

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， θ 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：

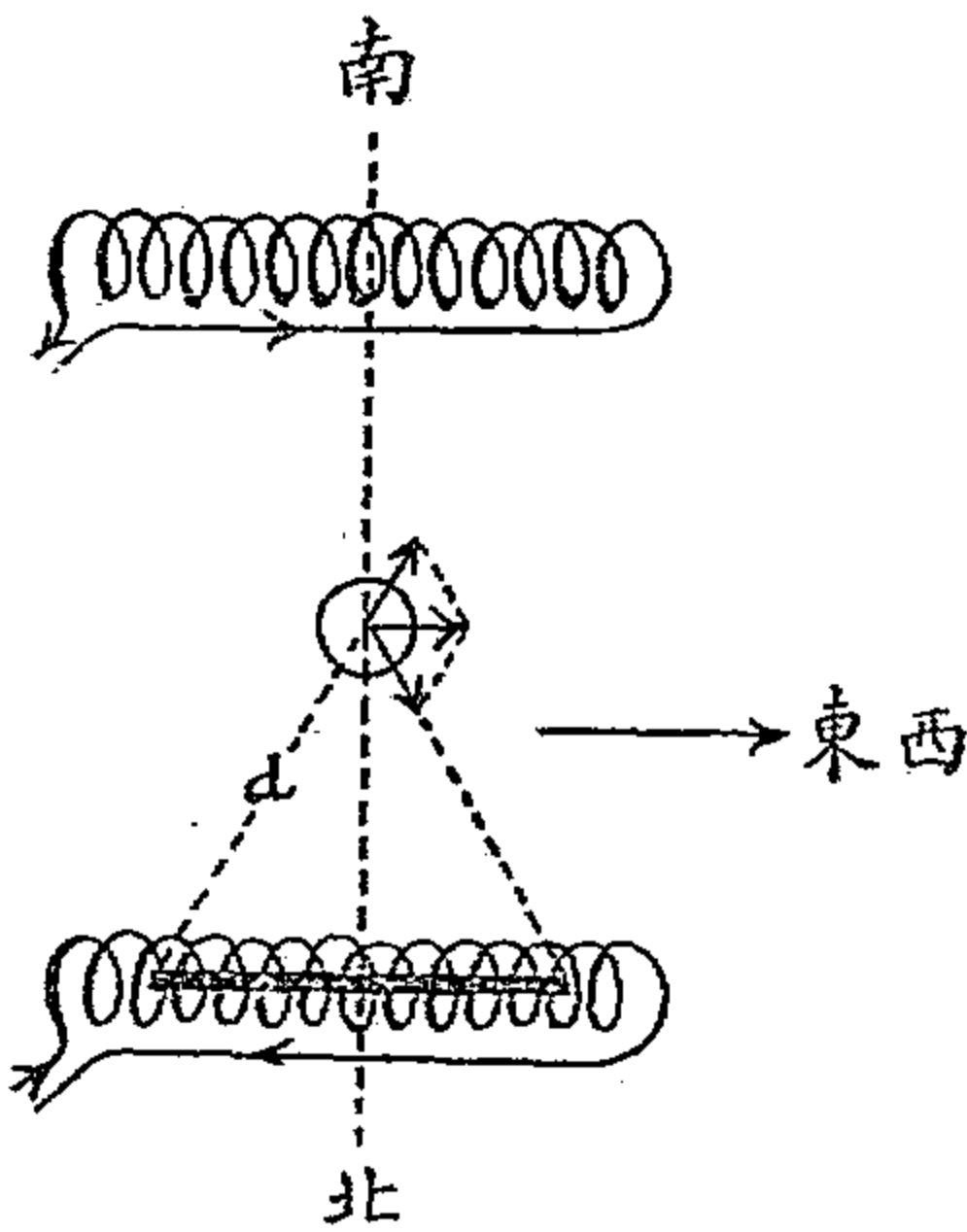


圖 30.

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

(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：

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

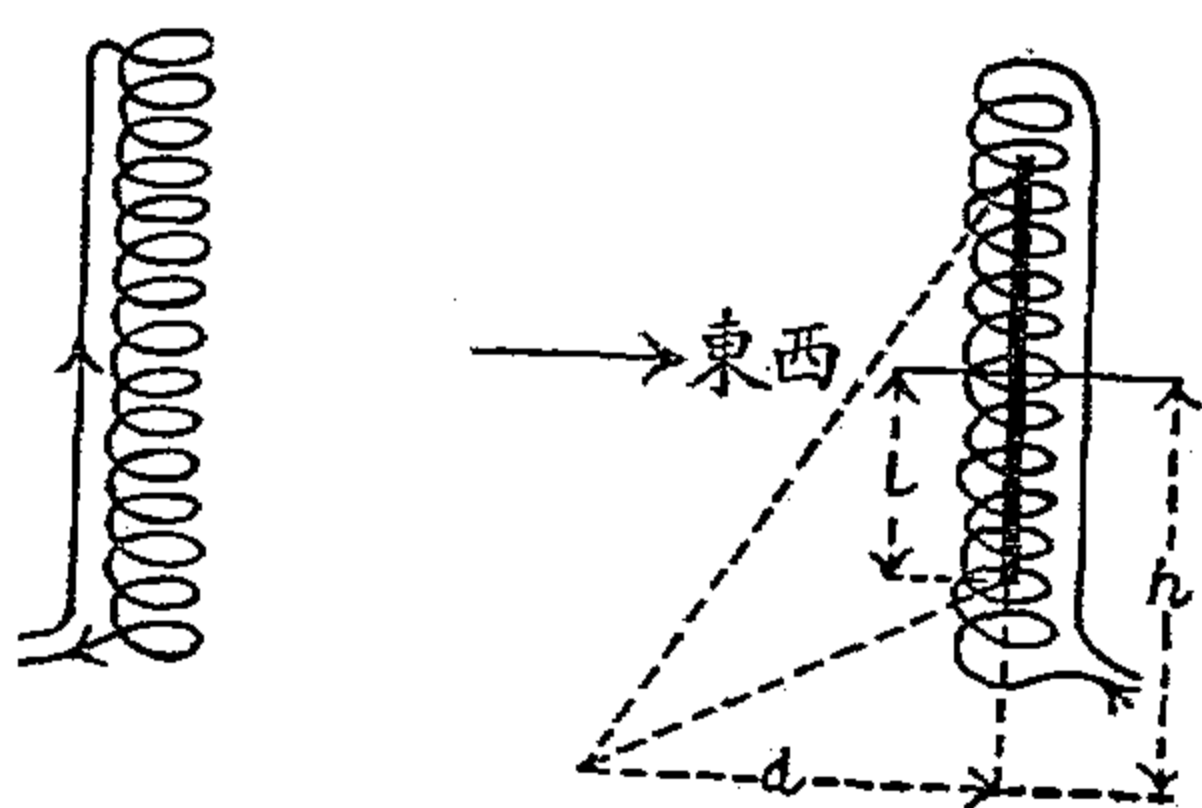
式中之 b ，表棒心與磁強計內磁鐵中心間之垂直距離，其餘與前全同。但若欲作精密之量度，須如前此辦法，用 $\frac{a}{r}$ 代替式中之 1 。

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 sus-



31.

用爲最甚。故所得結果甚爲精確，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 θ 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 θ ，與前次測

得之 θ 平均後，定爲偏向。

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：

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

式中之 l 表兩條線之平均長度， e 表兩線間之距離， ρ 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 θ 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 θ_1 及 θ_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 θ_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 M_3 ）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 θ_4 表此時兩磁鐵之北極向地磁北極時之偏轉， θ_5 表其向地磁南極時之偏轉，則得

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

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

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 $N^2 \mu$ 。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：

$$Q_0 = \frac{N_0}{R_0} = \frac{4\pi n i m_0 s_0}{R_0}$$

R 表副線圈電路之電阻，再命 θ_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 θ ，則通過電量 Q，當如下：

$$Q = K\theta = Q_0 \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{msB}{R_0}$$

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

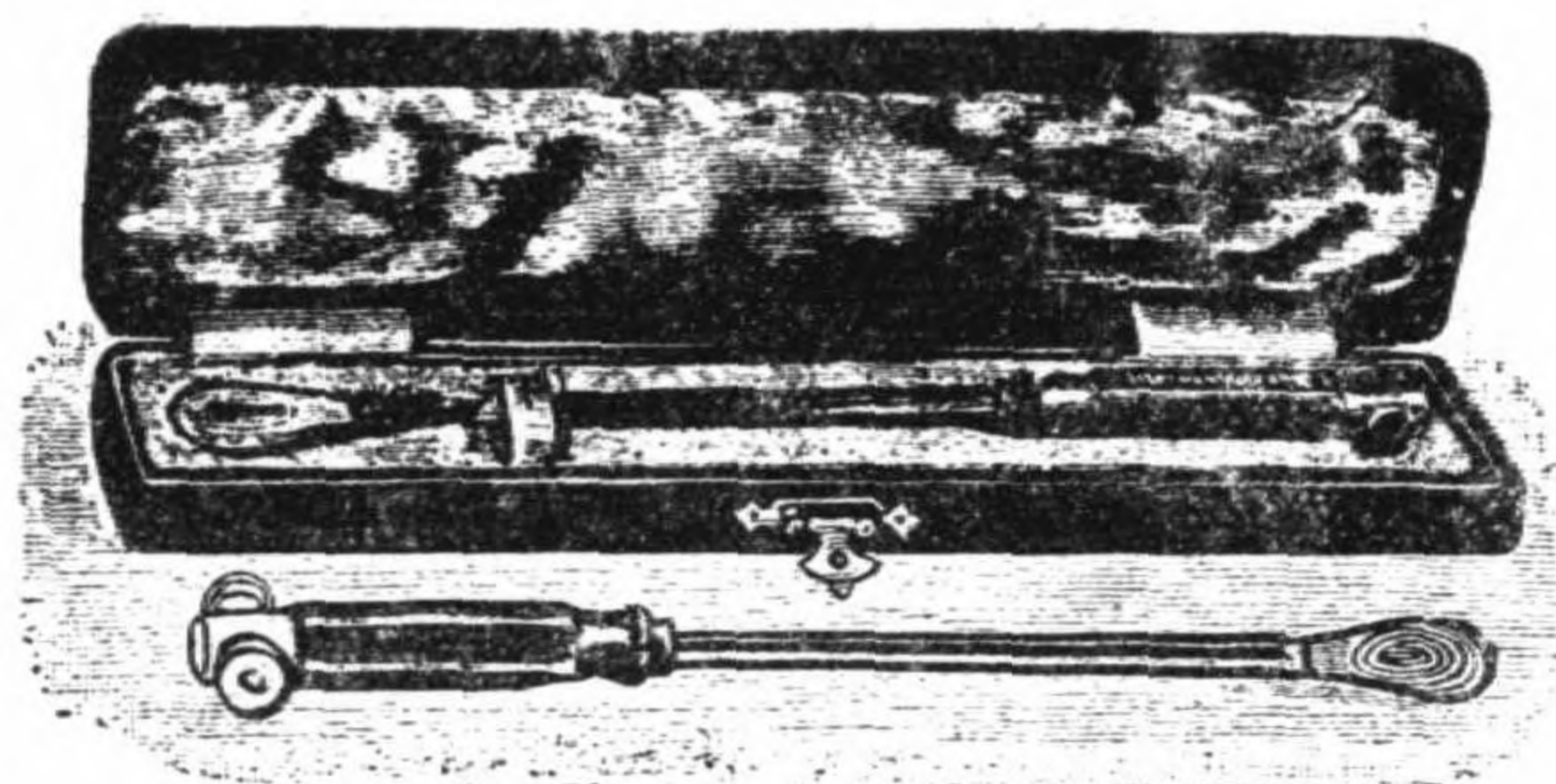


圖 32.

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，成正比例。如命 θ 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 θ 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)	α (分)	波長 (μm)	α (分)
043.9	0.01885	330.9	0.04334.
589.0	0.01684	257.3	0.10725.
508.6	0.02285	219.4	0.16332.
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 ϕ ，其磁化強度命為 I ，關係如下：

$$\phi = KI.$$

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，更可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：

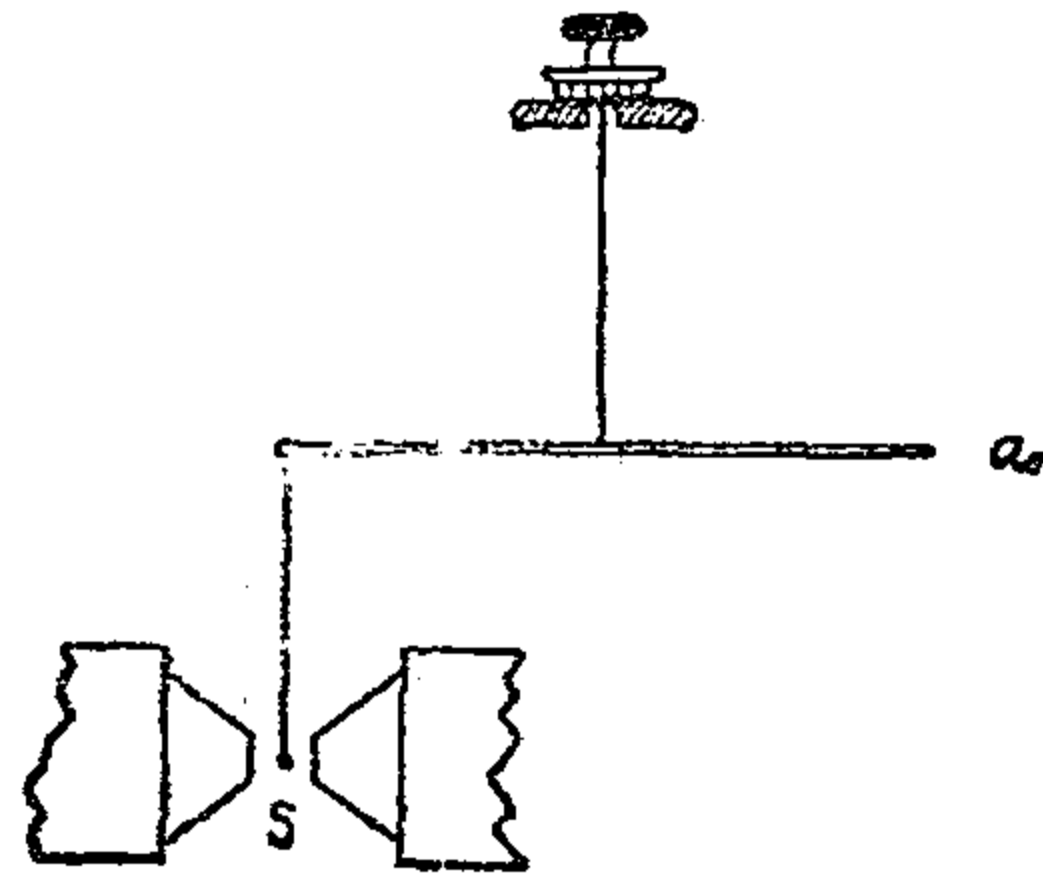
將順磁體或反磁體放入強度不均之磁場中。如為順磁體，則按照磁場梯度之方向，從強向弱而動；如為反磁體，則向反對方向而動。故如測定其作用之力，即可求得其係數 K 。命 f 表在磁場梯度方向上，使磁性體移動之力，則其磁力常數、磁場強度及其梯度之間，有下列之關係式：

$$K = \frac{f}{\frac{\partial H}{\partial y} V H} \quad , \quad \chi = \frac{f}{\frac{\partial H}{\partial y} m H}$$

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 。



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：

$$K = \frac{2ap\rho g}{H^2} \quad \alpha = \frac{2ap\rho}{H^2}$$

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， ρ 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。

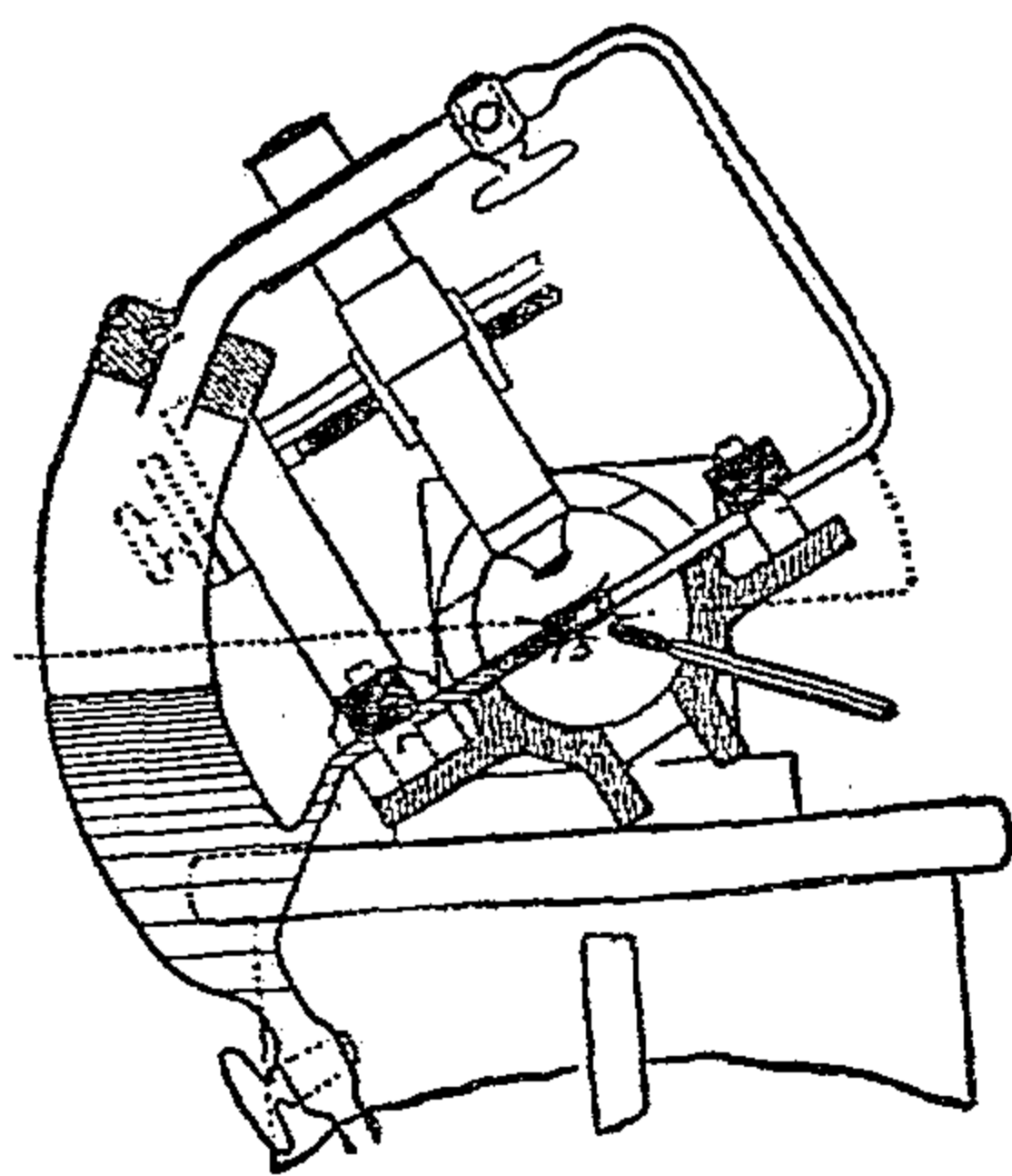


圖 34.

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：

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

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。自一八三六年至一八四一年之間，得德國人高斯及韋伯，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。

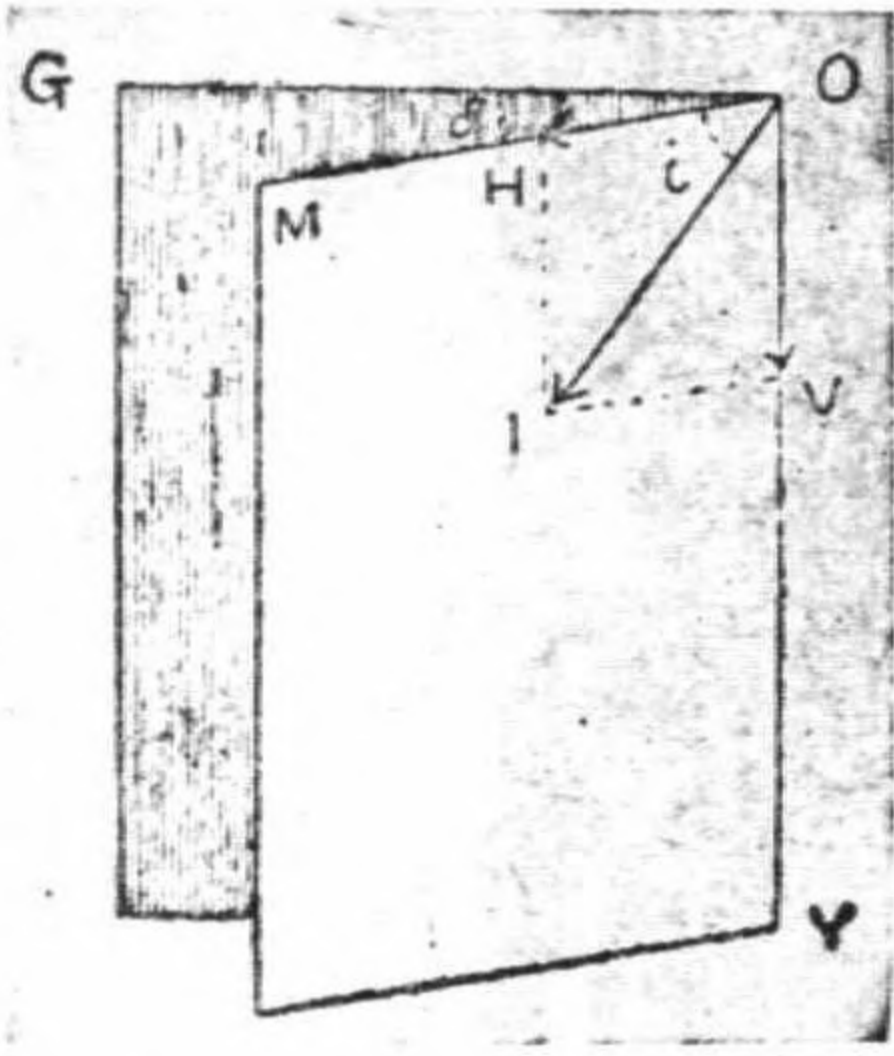


圖 35.

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， δ 表磁偏角， i 表磁傾角， OI 表地磁之水平成分， OY 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

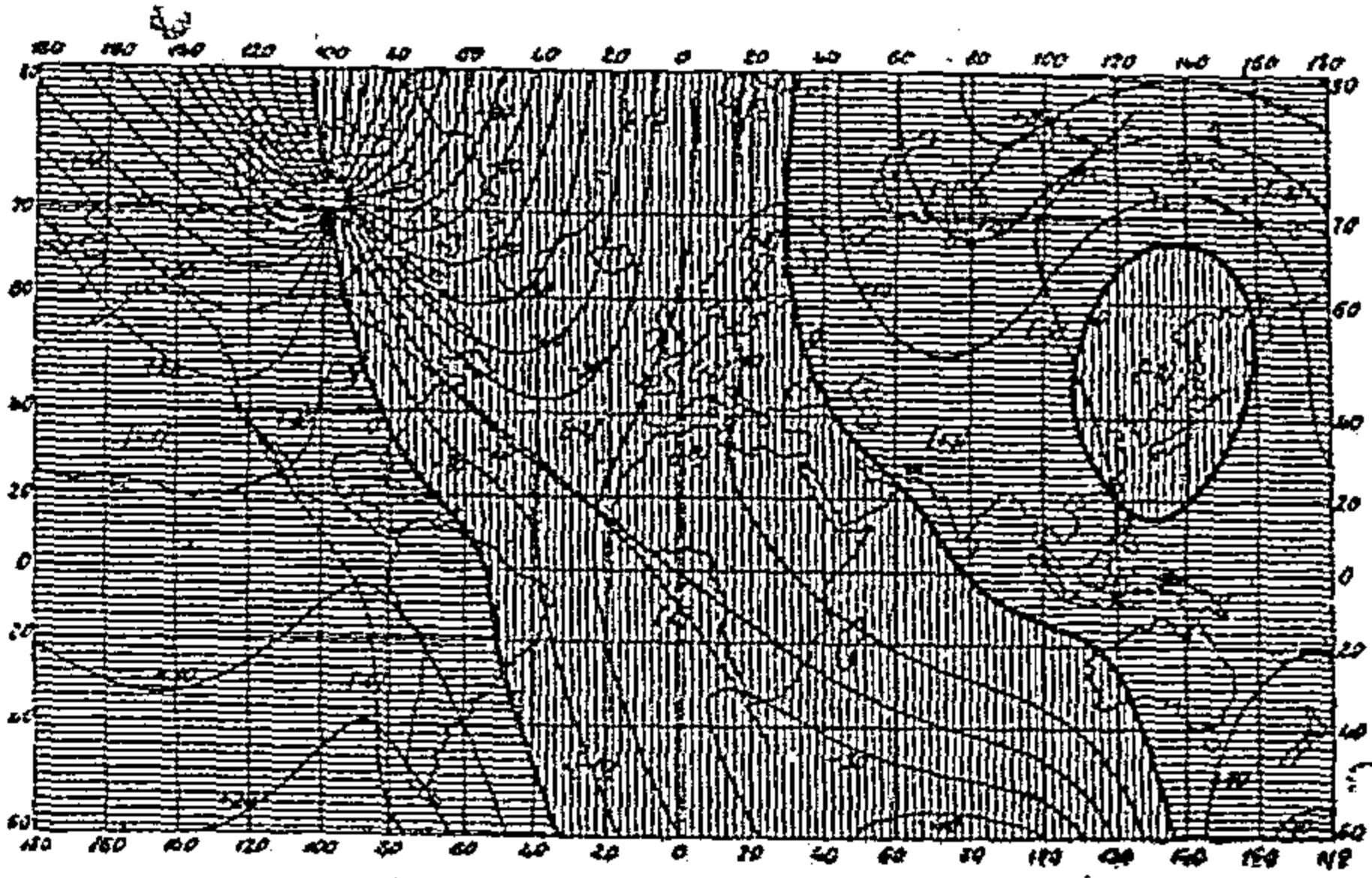


圖 36.

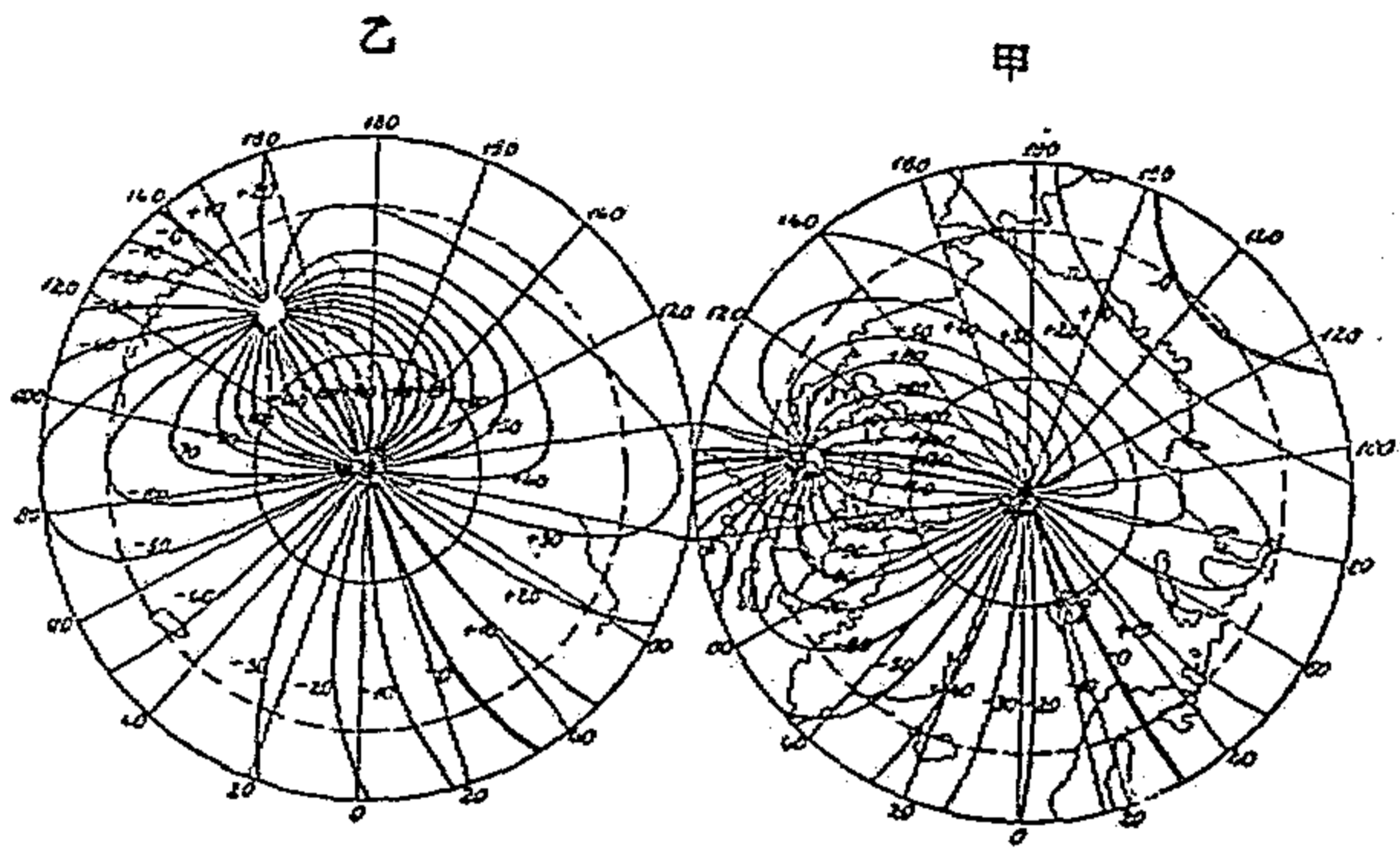


圖 37.

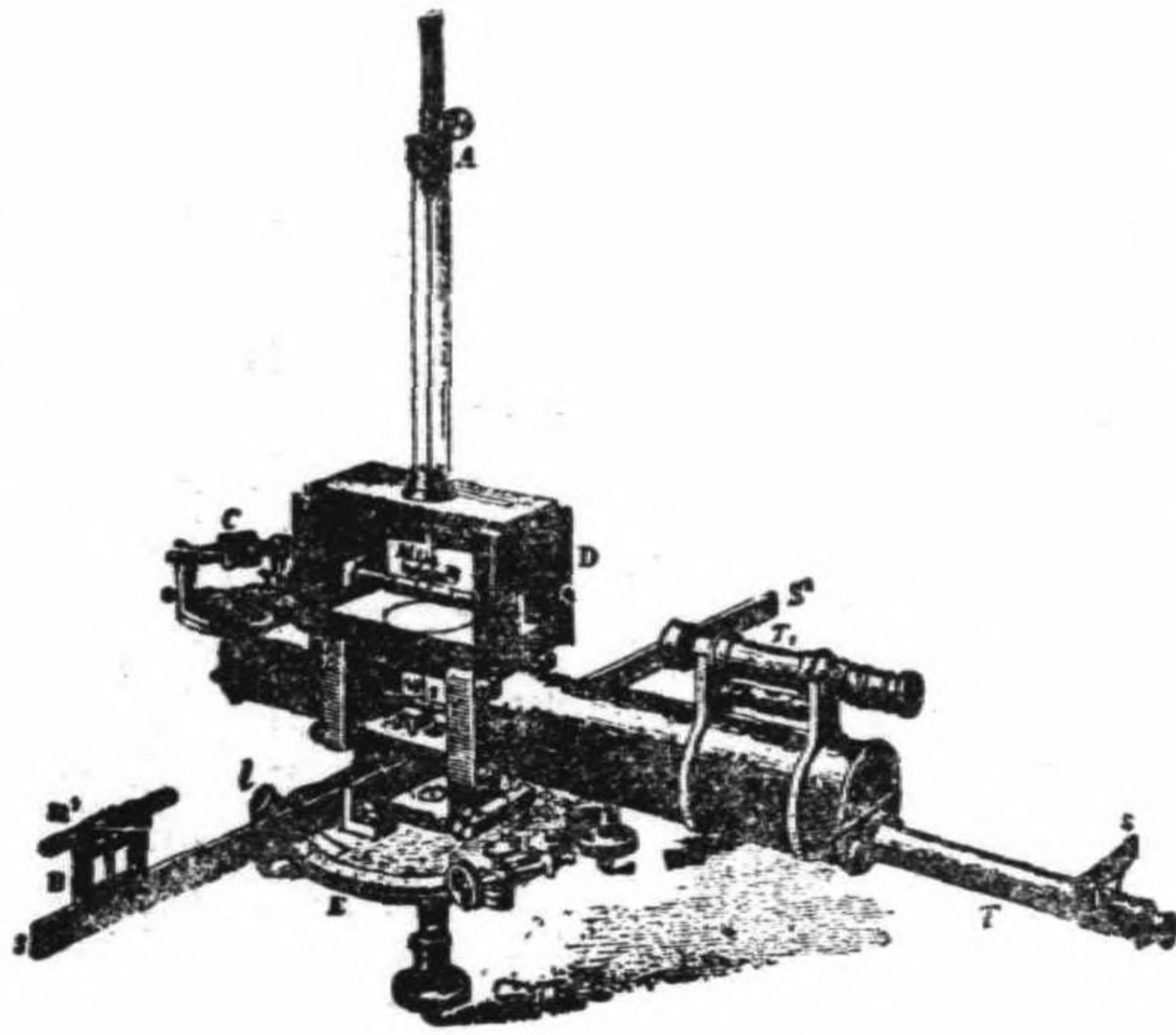


圖 38.

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. 所示，為邱觀象臺 (Kew Observatorium) 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 M₁。其中之 M₁M₂ 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 W 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 W 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。

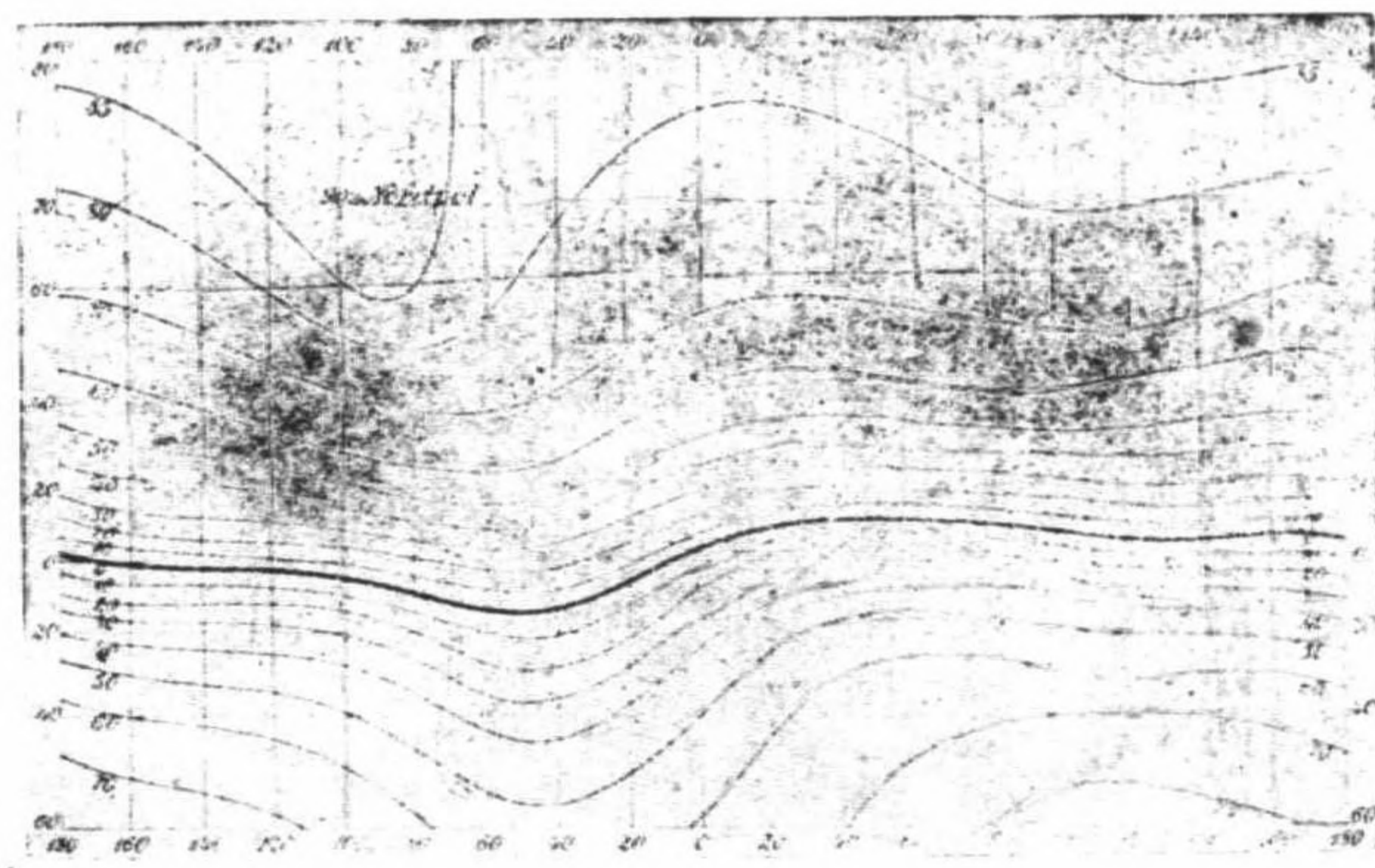
3. 磁傾角

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

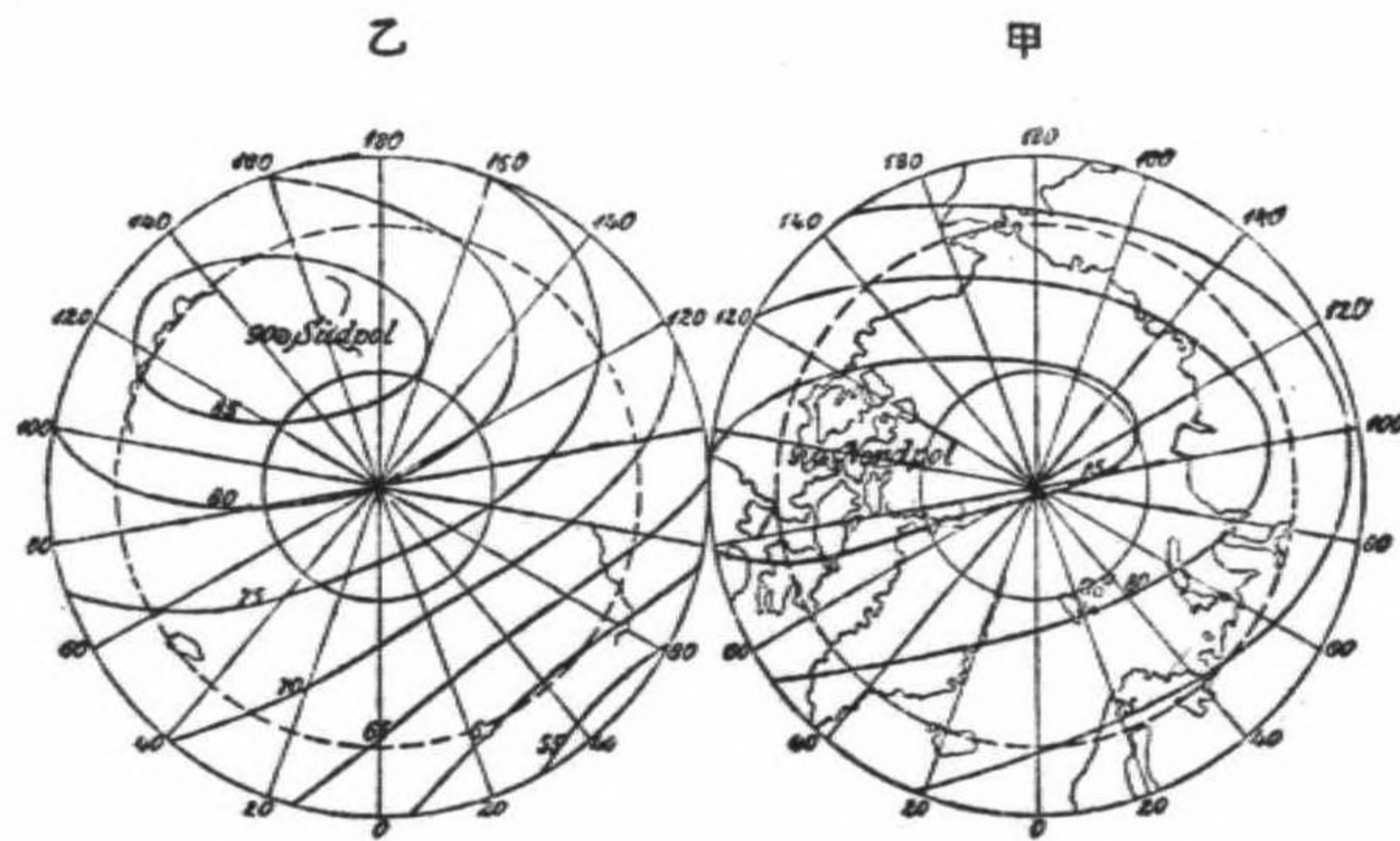
等於九十度。在赤道上，磁針停止於水平方向，故其磁偏角等於零。圖39及圖40之甲乙，表等傾線 (isoclinic lines) 之狀況。由圖可見磁傾角等於零之線，並不完全與赤道一致。圖中用粗線表出者，即此線，通稱爲地磁赤道。此項地磁赤道，與地理上之赤道間之角距離，隨地不同。最大之角距離，不過三十度近傍而已。在南半球上，表示有最大之偏向，在北半球上最大偏向出現在東非洲與錫蘭之間，而地理上之北極，磁傾角等於八十六度，在南極等於八十度。

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 MM ，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 GG ，及放在水平位置上之圓形標度盤 HH 。顯微鏡 mm ，用來測定磁針兩端之位置，放大鏡 gg ，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



39.

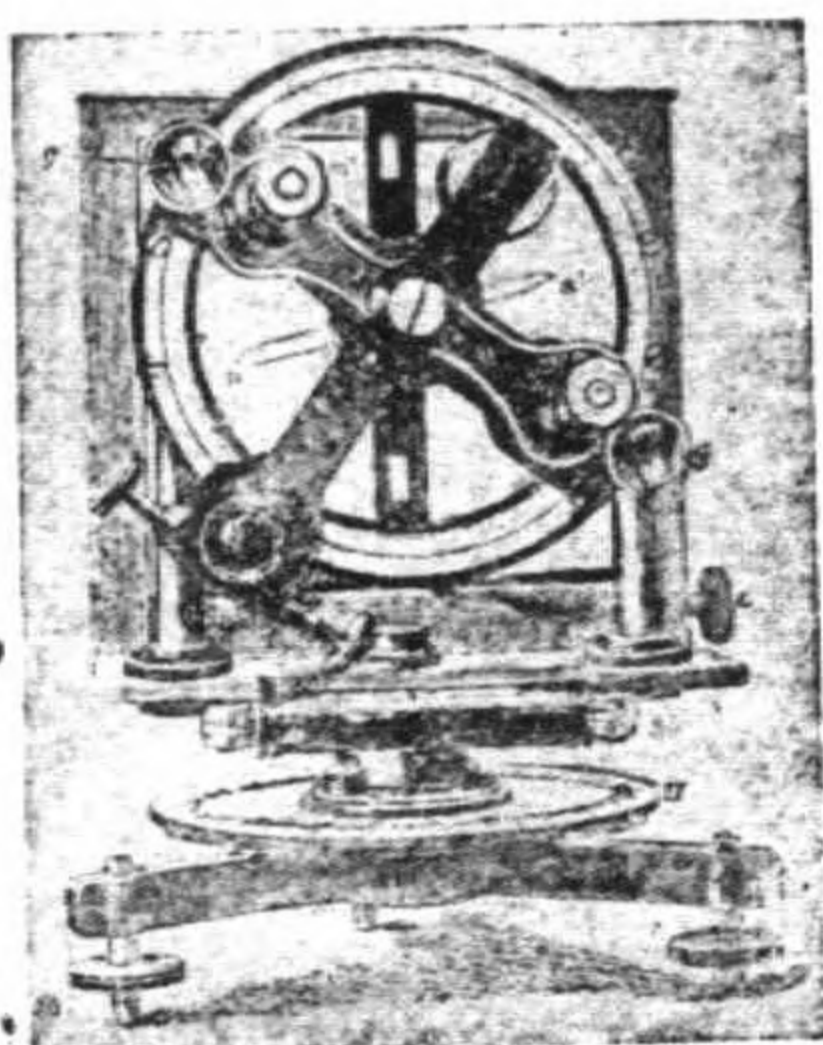


40.

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。

4. 水平成分

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



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：

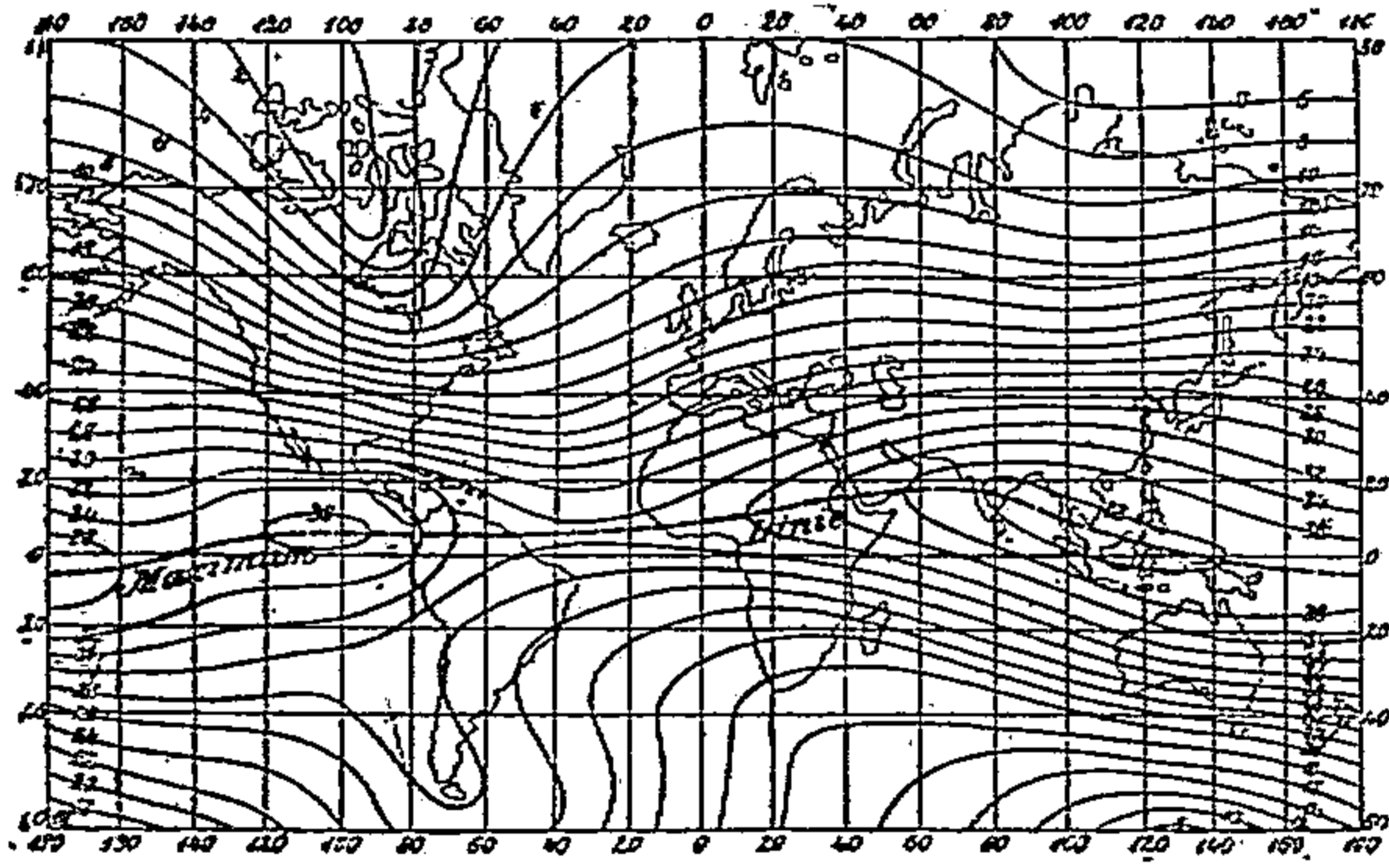


圖 42.

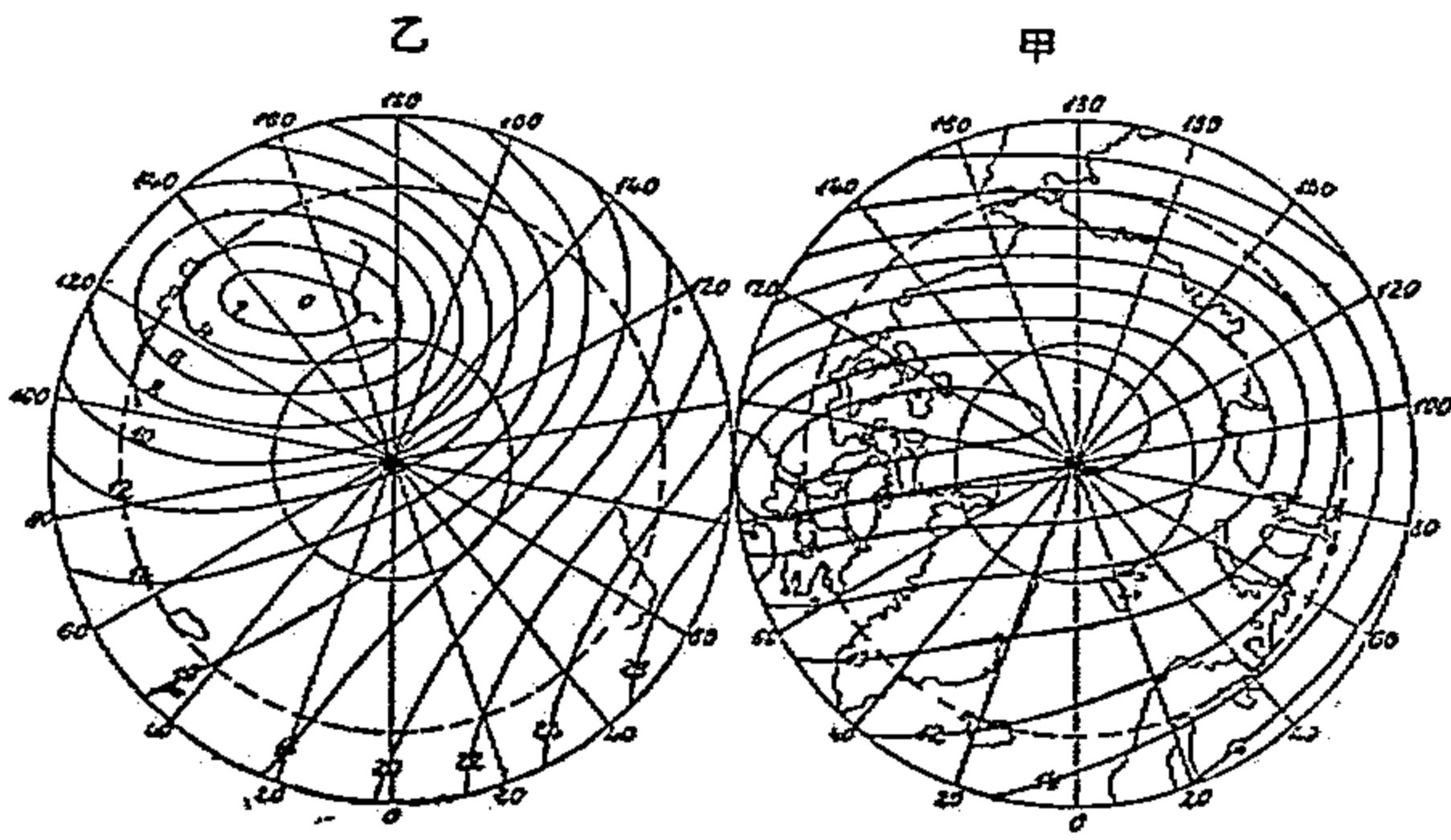


圖 43.

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

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。 l 表磁石之長， θ 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 l 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 ；

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

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 θ 。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
Powlowsk	0°40'	70°38'	0.1666
Kopenhagen	-10°10'	68°38'	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°33'	0.167

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

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

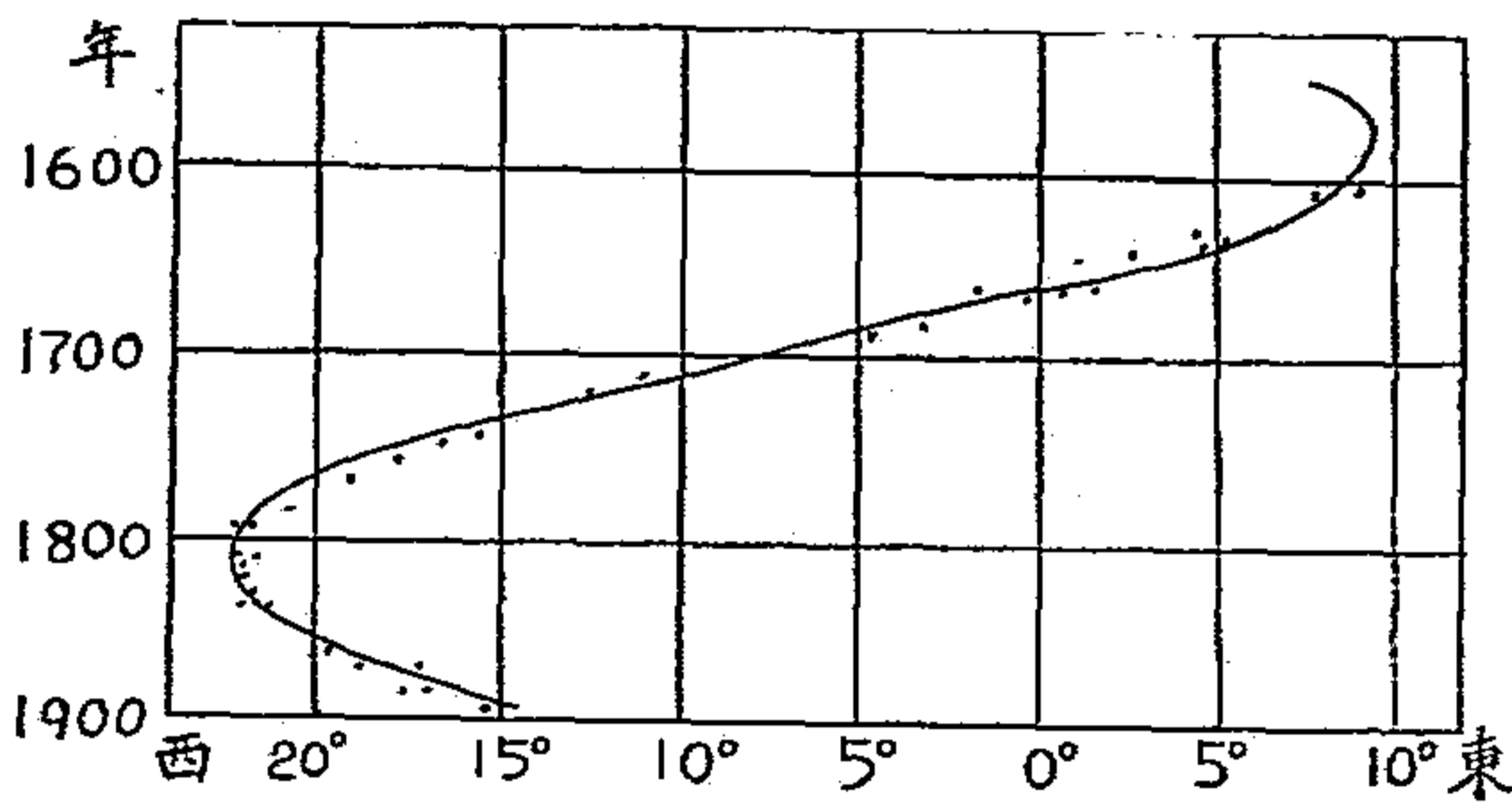


圖 44.

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° 43'	6.0'	1835	67° 24'	2.5'
1806	69° 12'	4.5'	1858	66° 26'	2.4,
1814	63° 33'	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：

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

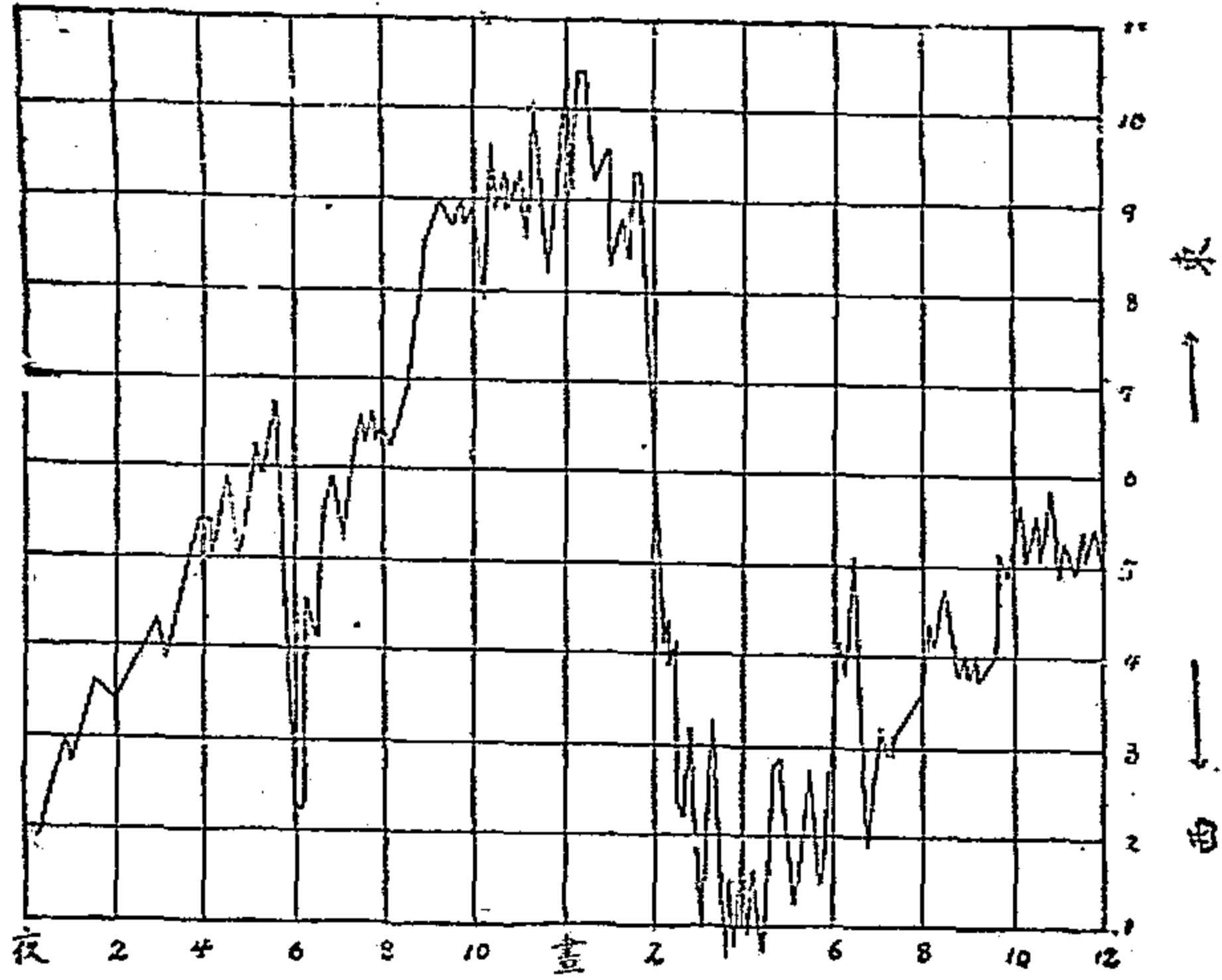
據法國巴黎觀測之結果，自一八四八年至一八八五年之間，水平成分從22變到28。此種變化，當然隨地略有不同，並且每日亦有差別。就一日間之變化而論，以磁偏角之變化最大，水平成分次之，磁

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，出現於反對一方。

6. 磁暴

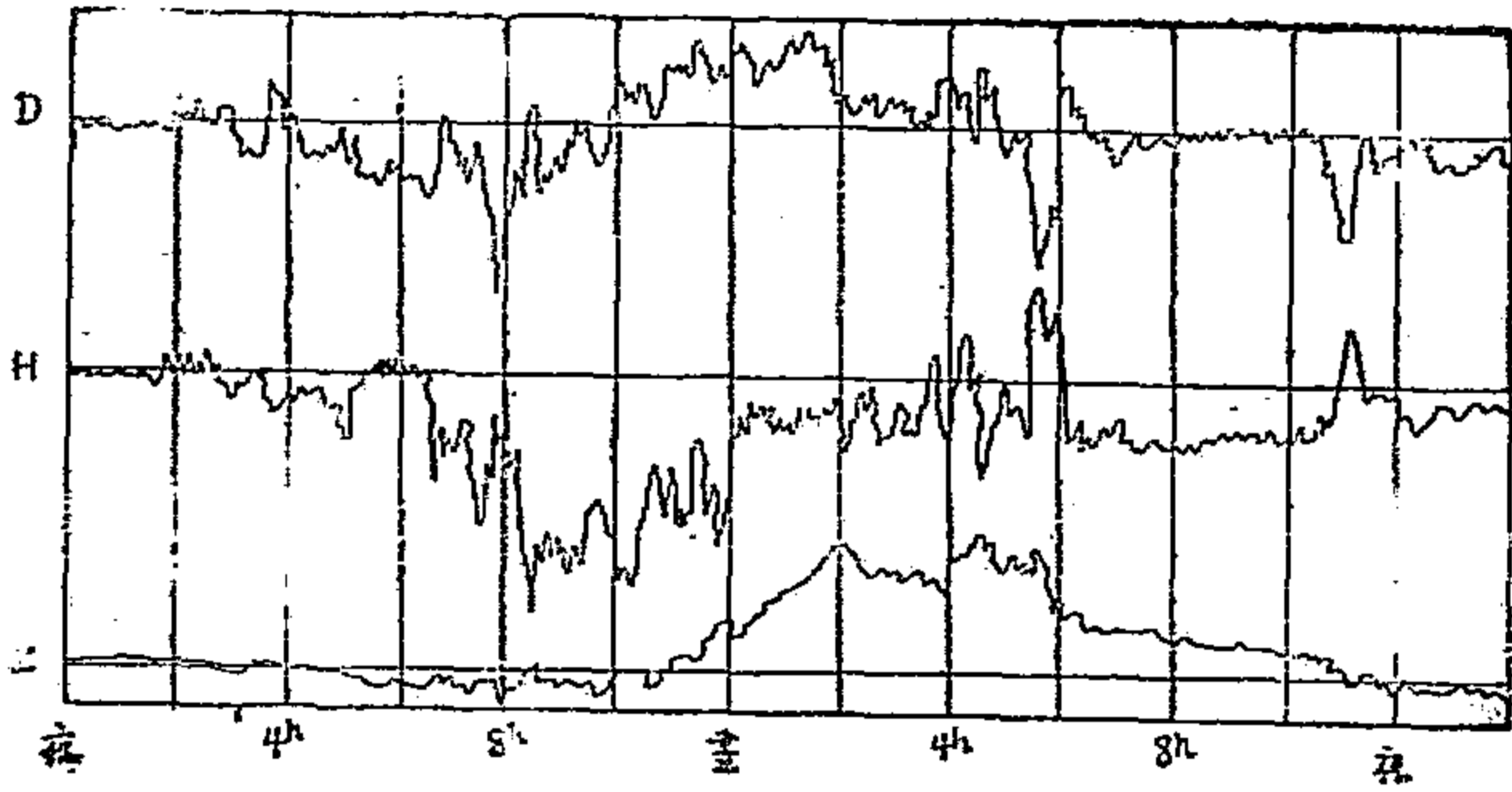
磁暴 (magnetic storm)，顧名思義亦足以察知其爲地磁之激烈變化，及非常之變化。其主要之變化爲水平成分及磁偏角靜止着的磁針，突然發生劇烈之振動，且漫無一定之方向。即此現象通常所經歷之時間均極短，然亦有時延長至二小時之久。圖45即一八八二年十一月十五日極地觀象臺所得之記錄，爲磁暴中之顯著者。圖中所示爲其磁偏角之變化，橫軸示時間，自午夜零時起，一晝夜間所得之結果。其變化範圍約七十度。對於同一磁暴，如從各地同時觀測，即見其強度隨地而異。最先到來者較爲微弱，其次爲主要部分之強烈變化，最後又來一後暴，以作結束。磁暴中變化最大者爲水平成分，磁偏角之變化極小。圖46爲一九一五年六月十九日德國 (Potsdam)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

磁及靜電



— 30 —

圖 45.



七二

圖 46.

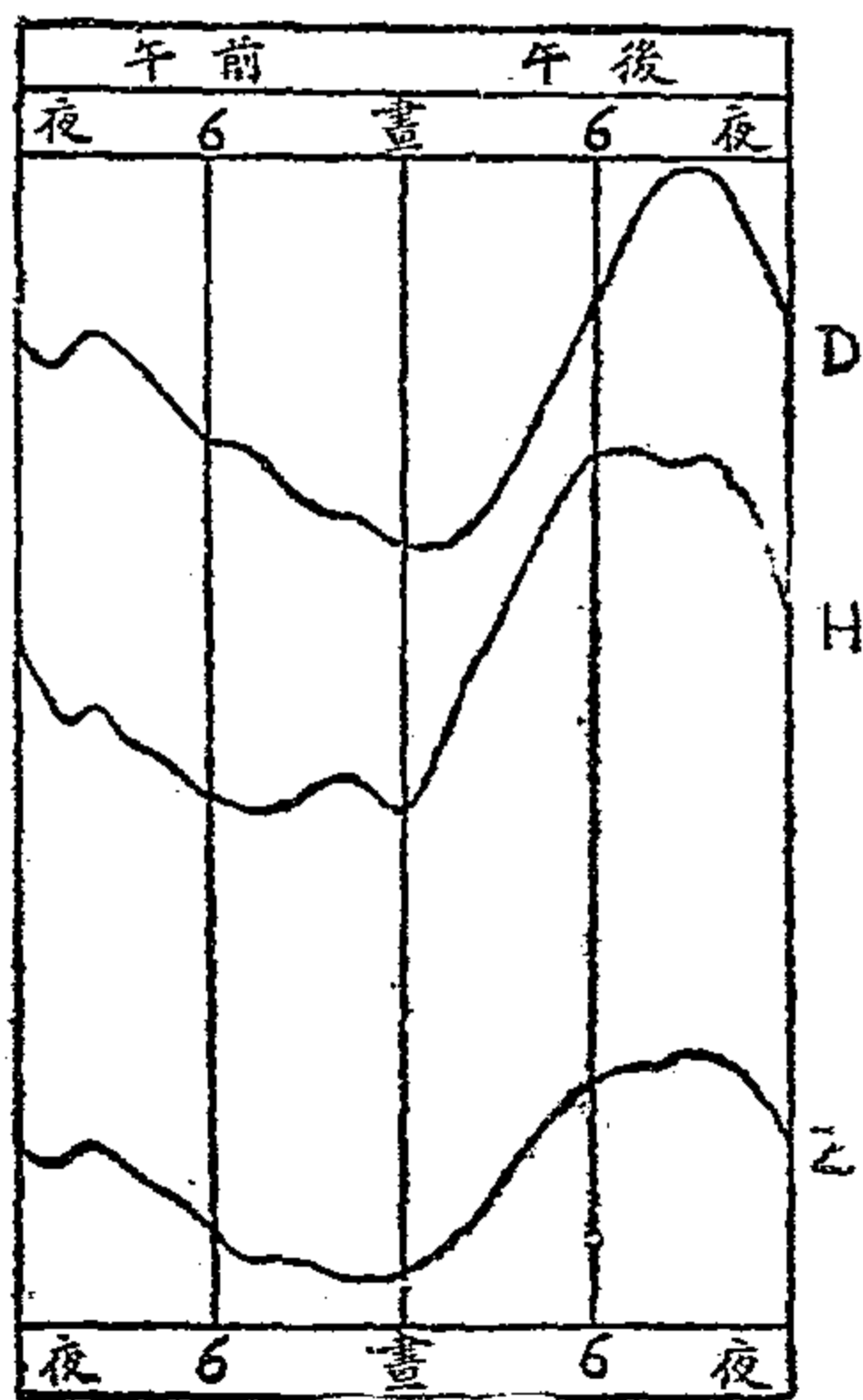


圖 47.

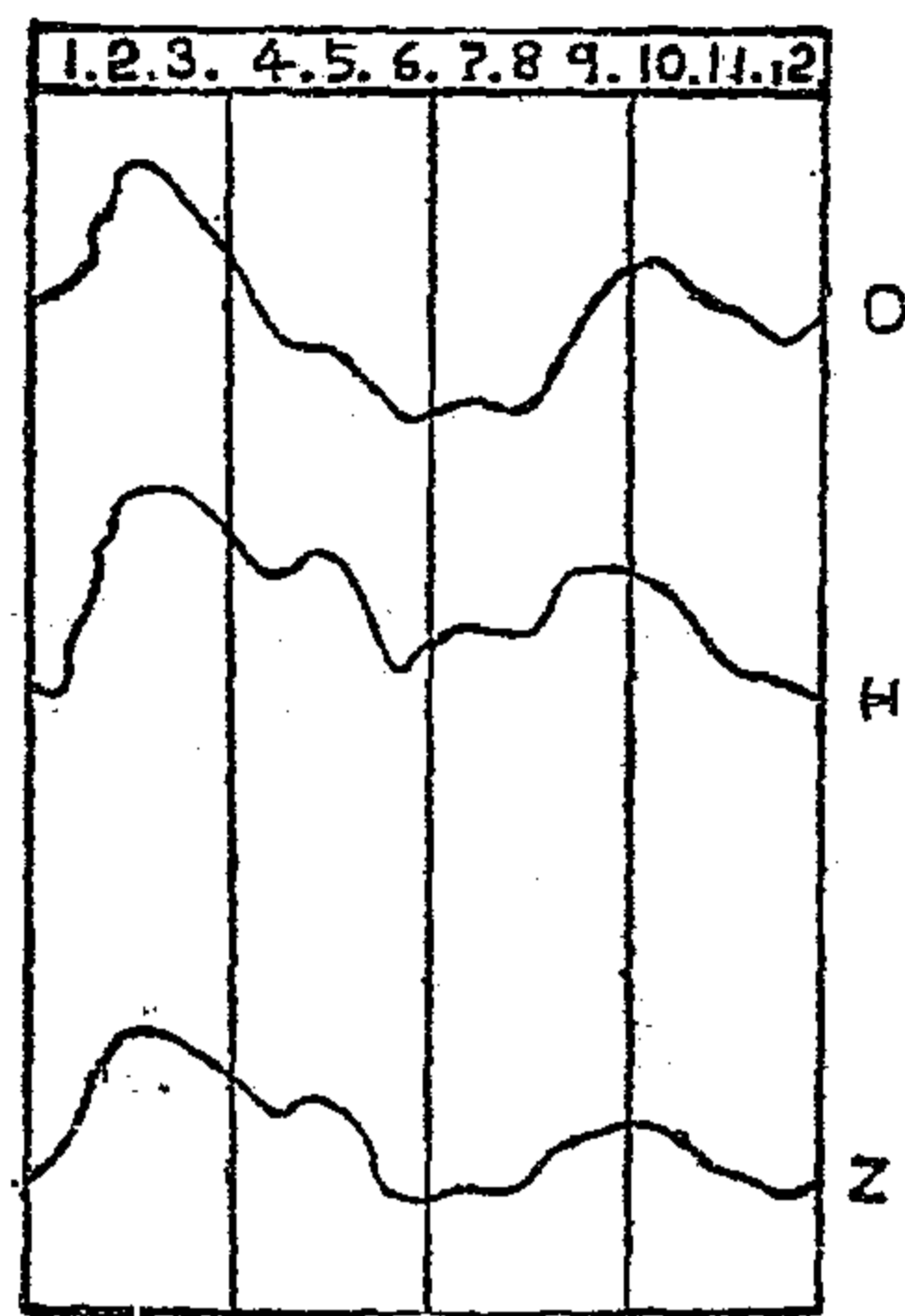


圖 48.

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

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，有人以為係電氣自太陽飛來，因此攪動地磁，但尚無詳細之說明。

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，亦爲一種導電體。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) 因受格雷實驗之刺激，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。即用此假說，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，即覺受震，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 (Onnaeus) 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 (Reaumur, 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。此即來頓瓶 (Leyden 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) 不贊成丟腓之二流體說 (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)，是否即天空中出现之閃電 (lightning)，遂進而實驗，以爲可用一條導線將雷導入來頓瓶內。但當時美國尚無高大建築，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，即由紙鳶之線，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，有英國之卡芬狄士 (Henry Cavendish, 1731-1810) 及法國之庫隆 (Charles Augustin Coulomb, 1736-1806)。卡芬狄士關於化學、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，在當時卡芬狄士則用英寸。曾將各種介質 (dielectrics) 之介質常數 (dielectric constant) 測定。現今使用之電勢 (potential)，在當時卡芬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(Aloisius Galvani, 1737-1798)在一七八〇年得一偶然機會，發見電流通入蛙之肌肉中，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. Volta, 1752-1827) 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

coil) 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感應電流，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，一八五三年經凱(Kelvin)氏由數學上，爲之證明。

法拉第自一八三五年來，即作靜電感應之研究，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。即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(Lines 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。其後經韋伯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 (Jacobi) 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。一八九五年德國之鑾琴 (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鋇板上，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。樂琴因稱之爲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，一八六六年經德國西門子及法國之格刺謨(Granine)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

(Rama)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 (Wicheert)等發見陰極射線，亦由電子而成。又證明自鐳放出之 β 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 4.77×10^{-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，其電量適成爲電子之整數倍，即所謂 α 射線 (α 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，亦可使火漆棒帶電。

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

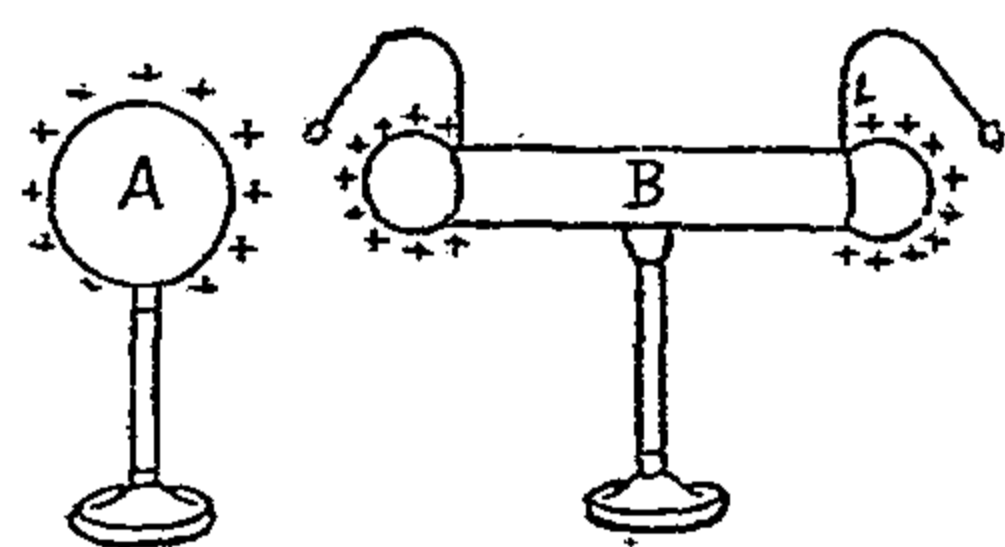
互相摩擦時，兩物體上均各帶電。一方所帶者爲陽電，他一方所帶者爲陰電。茲將常見各種物質帶電之次序，列舉如下：

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：

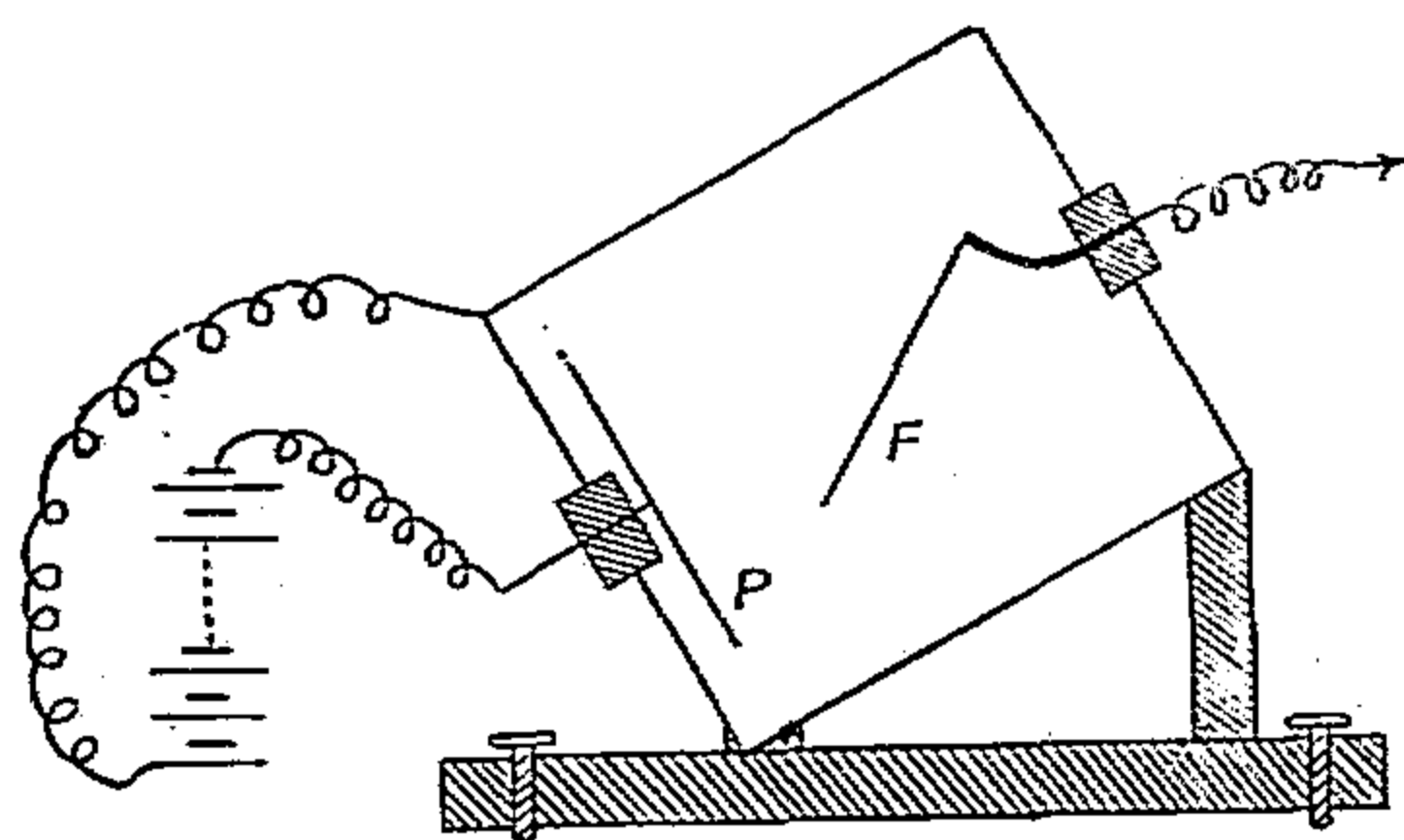
有一金屬棒，固定在金屬板上。棒之下端附有金箔兩細條，密裝在玻璃箱內。金屬棒與箱，互相絕緣，俾棒上所帶之電，不致逸失。先將已知符號之一定電量，加在金屬板上，卽見金箔張開之角度，或增或減。無論增減，其變化程度，恆與持來之帶電體所帶之電量，具有關係。故由其角度之增減，可知電荷之爲陰爲陽。由其增減之程度，可以推知其電荷之分量。欲得精密之結果，可用布朗氏靜電計。外箱由金屬製成，形如圓筒。下端不用金箔，而以一可以轉動之金屬針代之。其轉動軸線在水平

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 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 (emanation) 之強度，更將靜電計加以種種之改良。

圖 50.



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

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，

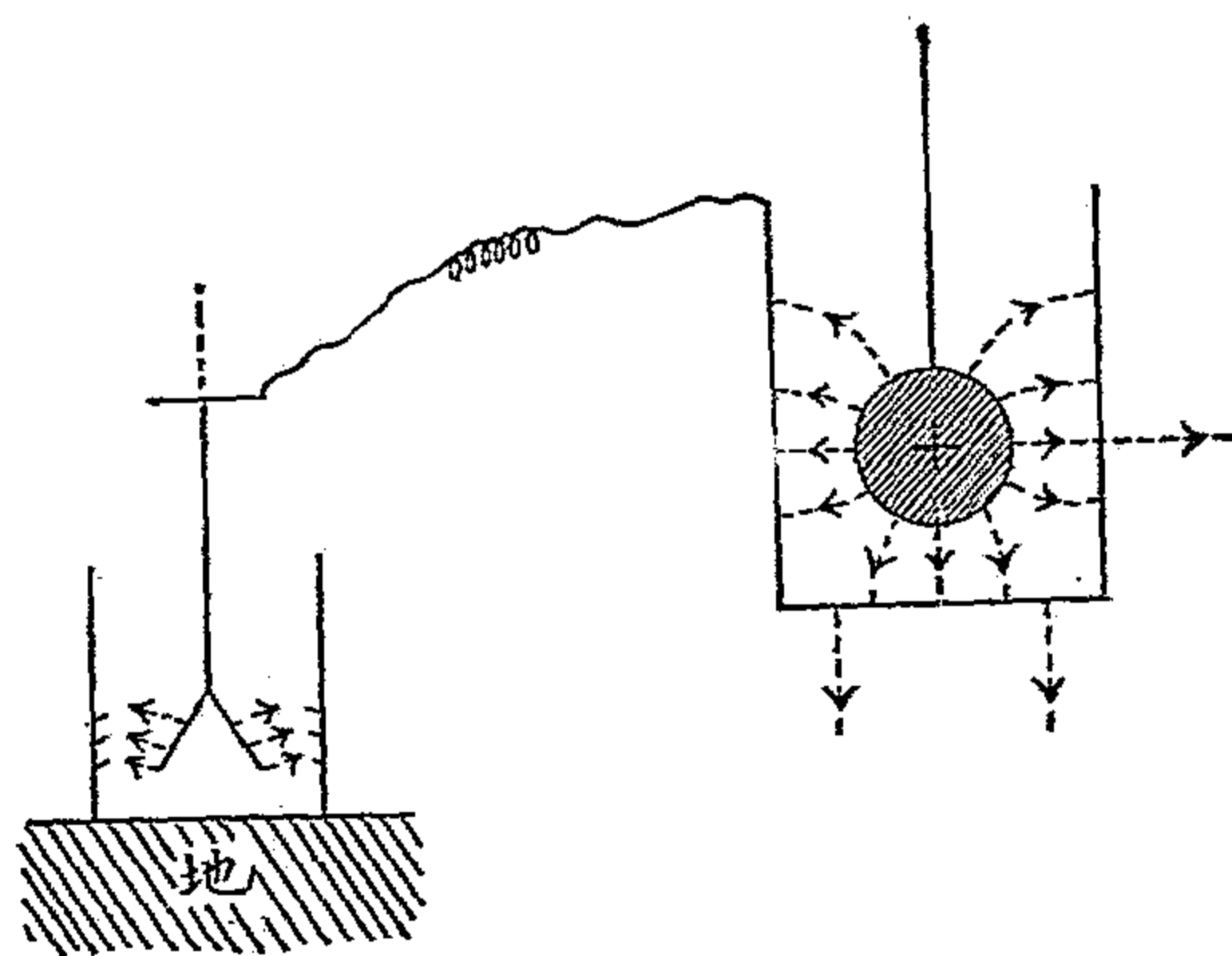


圖 .15

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，命為 β ，則所求之電荷 e ，可由

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

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：

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

尚有 a ，表由可吊之線至球心為止之距離。

6. 庫侖定律

兩帶電體之間有引力或斥力作用。如兩者均為同名之電，即係斥力；如為異名之電，則為引力。此事實前已述及之。凡如此種在兩電荷間作用之力，通稱為電力 (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。

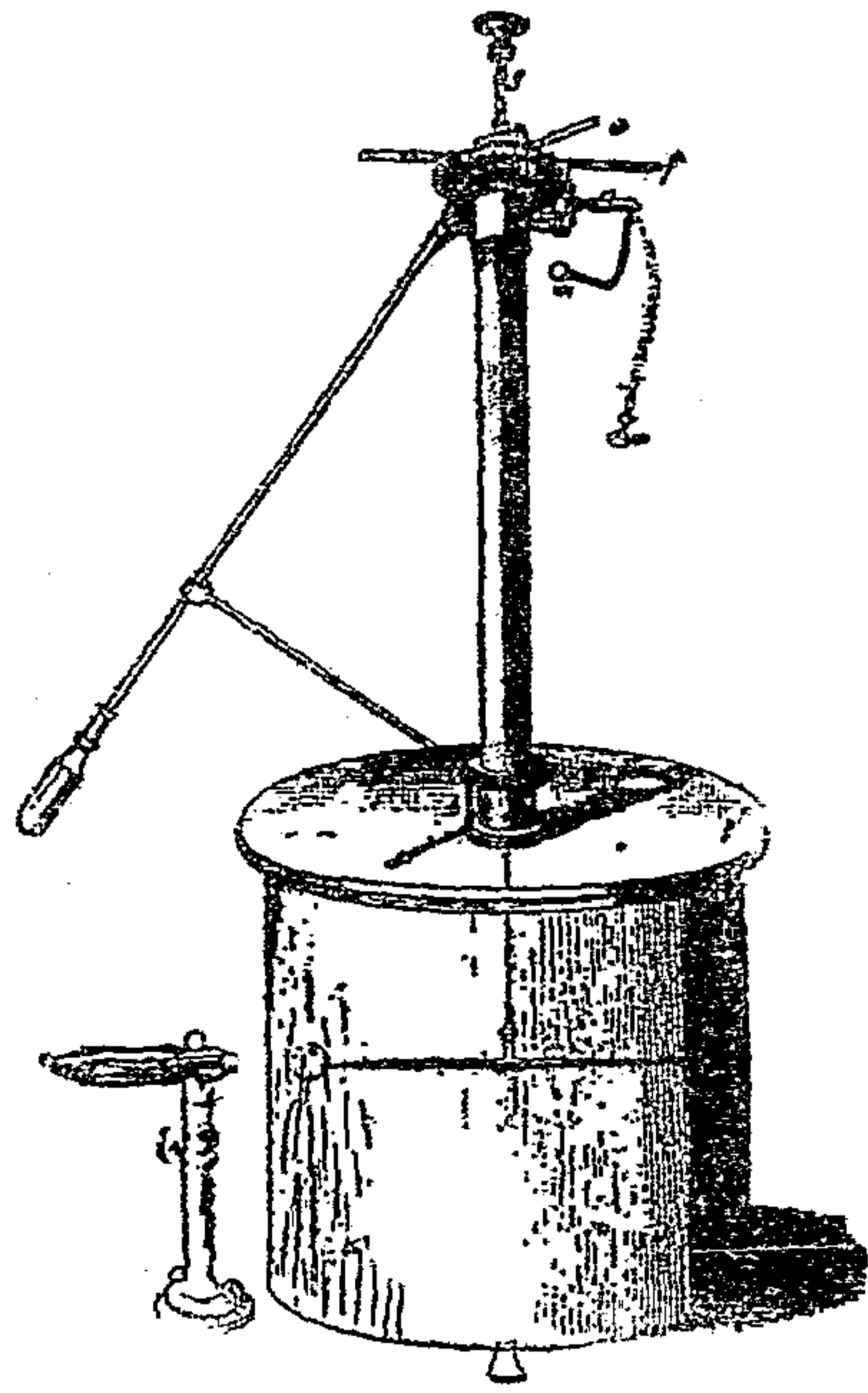


圖 52.

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，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 3×10^9 靜電絕對單位之電量相當。

7. 發生靜電之機械

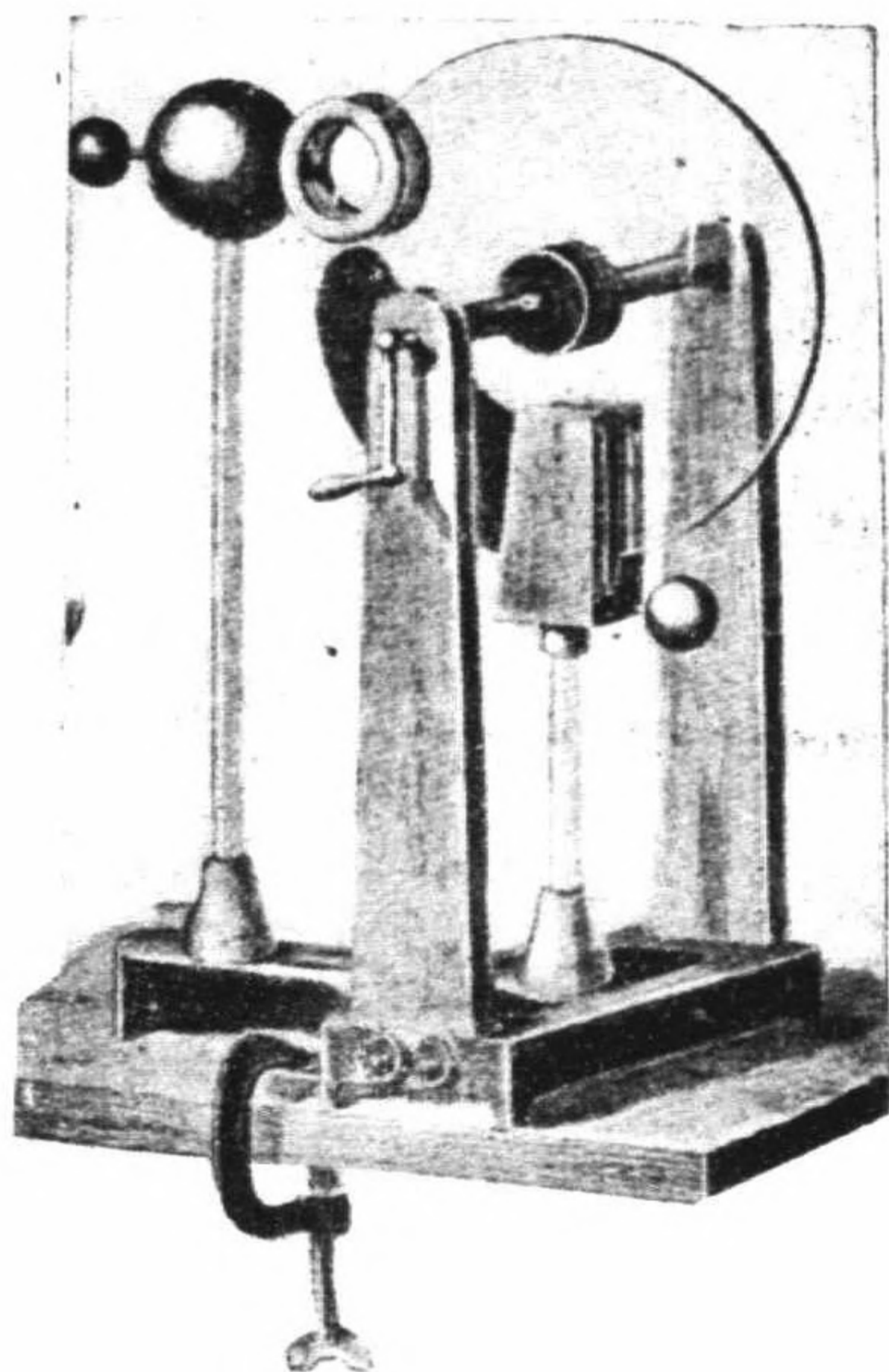


圖 53.

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，為聚集所生之電而設。

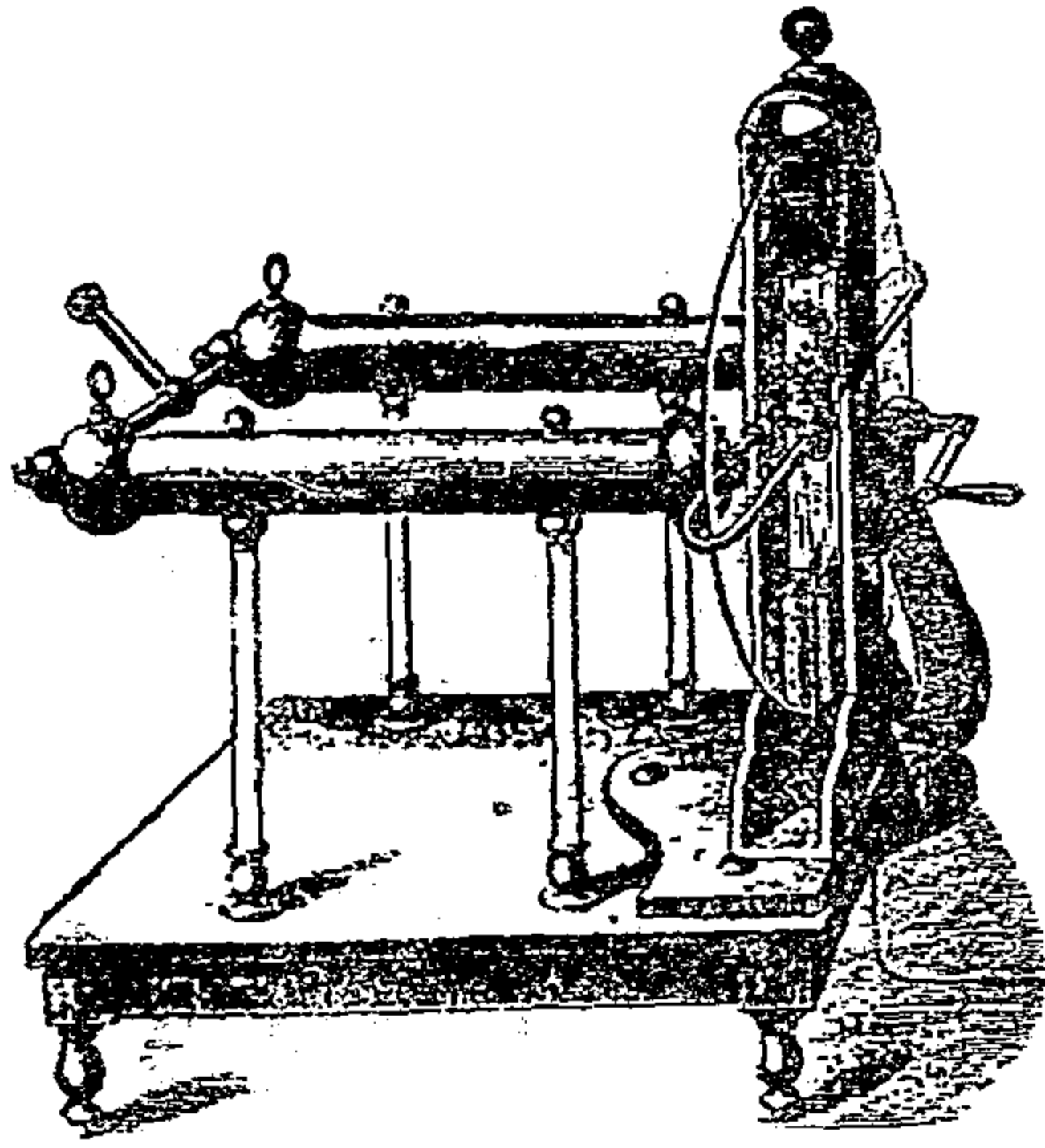


圖54所示者為一七七六年經藍姆斯頓改良之形式。摩擦部共有兩個，其收集所生之電，用金屬梳。即將金屬板曲作U字形，跨在玻璃板兩邊，並由棒上內方排列若干細齒而成。

此外尚有多種，均已成為歷史遺物，現今能圖供實用者，則為感應起電機。

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，將陽電蓄積到來頓瓶內。如是反覆行使此法，可得多量之陽電。

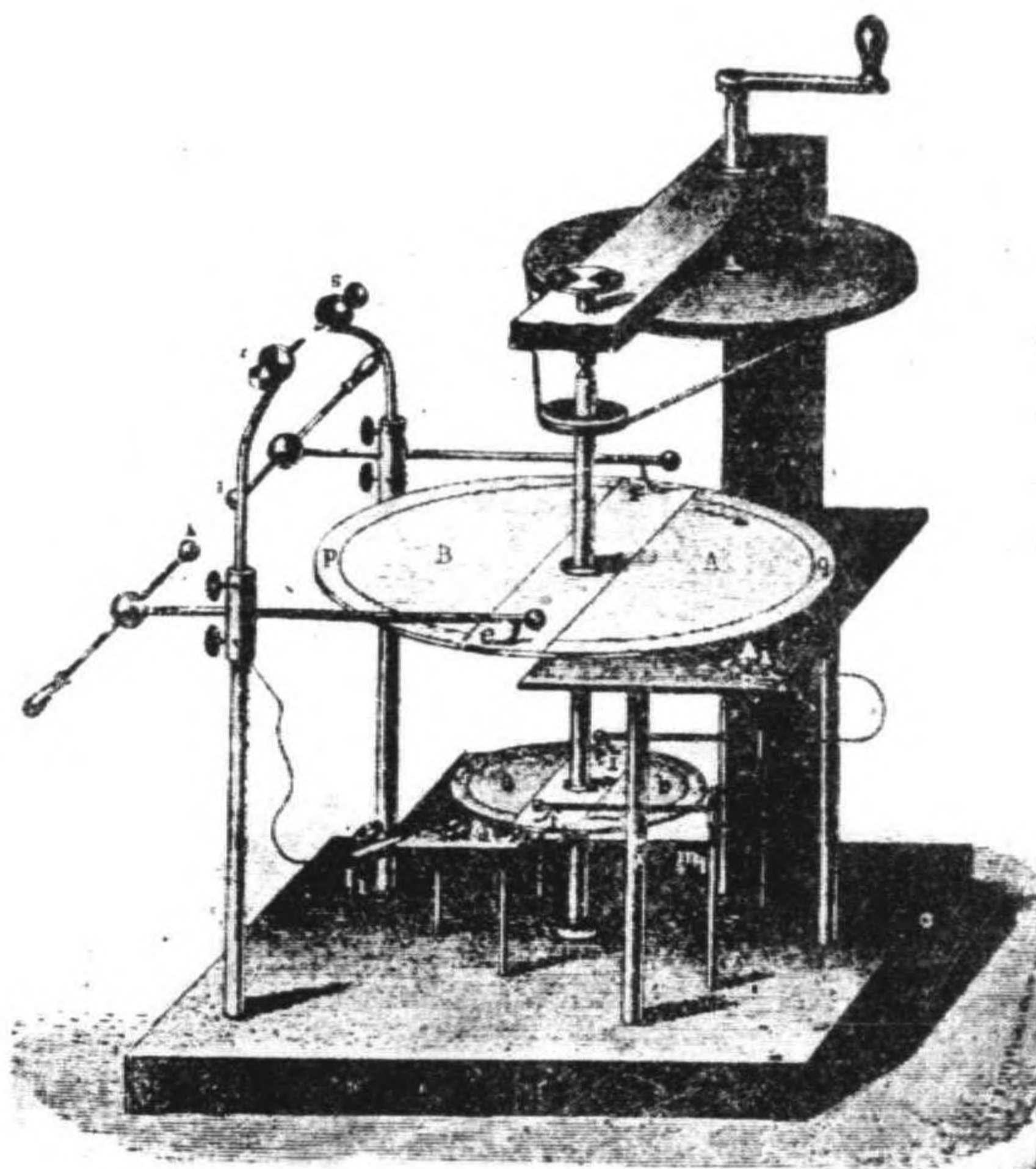
a板不用硬橡皮，改用樹脂、硫、火漆等，亦同。此起電盤現今亦已成爲廢物，僅講述時用之而已。

圖 55.

3. 感應起電機

a. 忒卜勒第一起電機

圖55. 所示爲忒卜勒(Töppeler)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。A₁為感應板，用金屬製成。

使用時，先假定A₁上帶有極微弱之陰電。在圖中所示之位置上，因A₁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A₁上之電荷增大，因此更可增大ik之電。

b. 霍斯起電機

圖56所示為一八六九年經霍斯（Holtz）改良後所得之霍斯起電機。B為玻璃圓板，兩面均塗蠟，能在水平軸線周圍自由轉動。A為玻璃板，中央穿有圓孔，與B平行，相距約有3毫米之遠。將

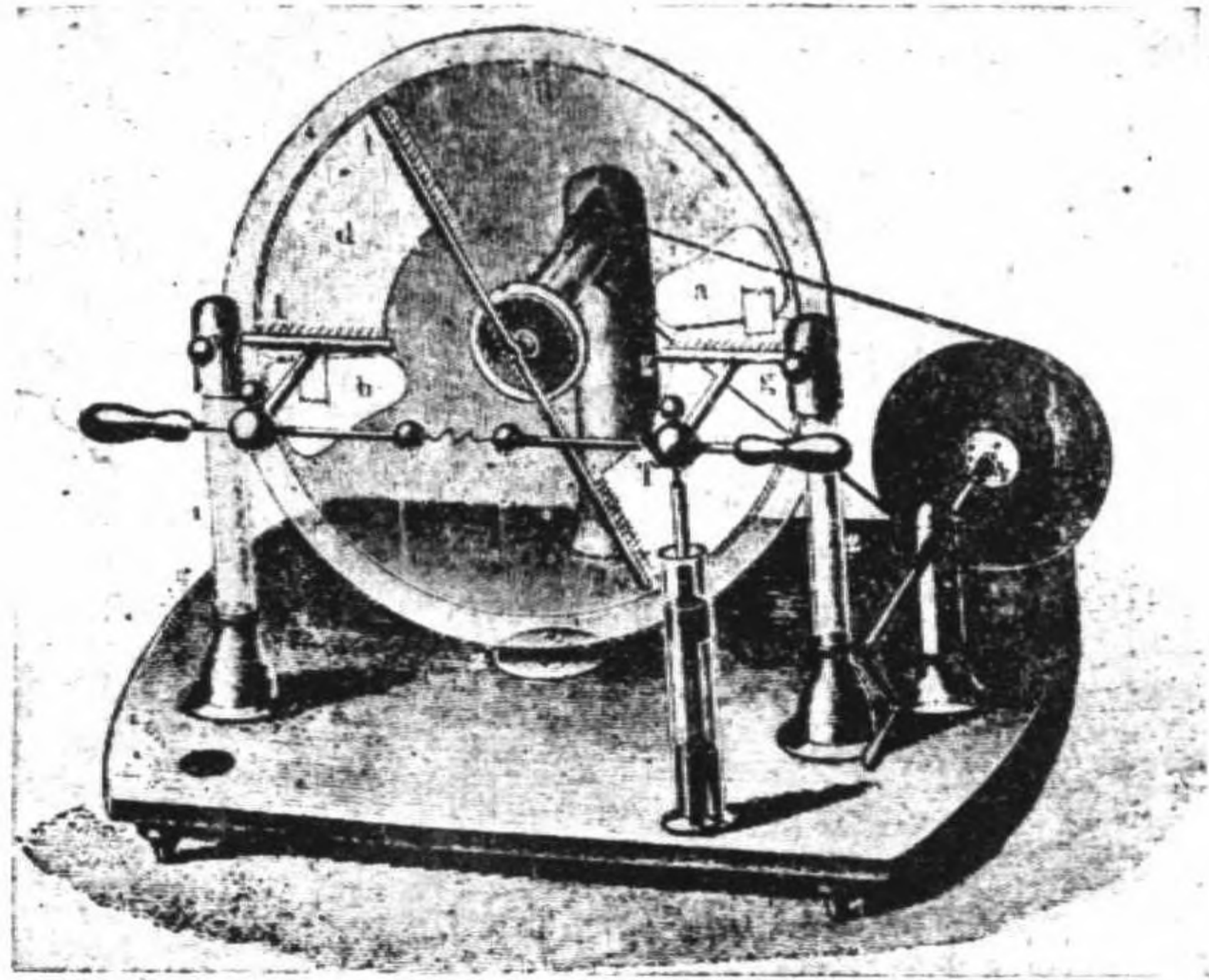


圖 56.

之轉動而到d處，使其陰電增多。如是反覆行使，結果以tV為對稱軸線，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，約夾有六十度為宜。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

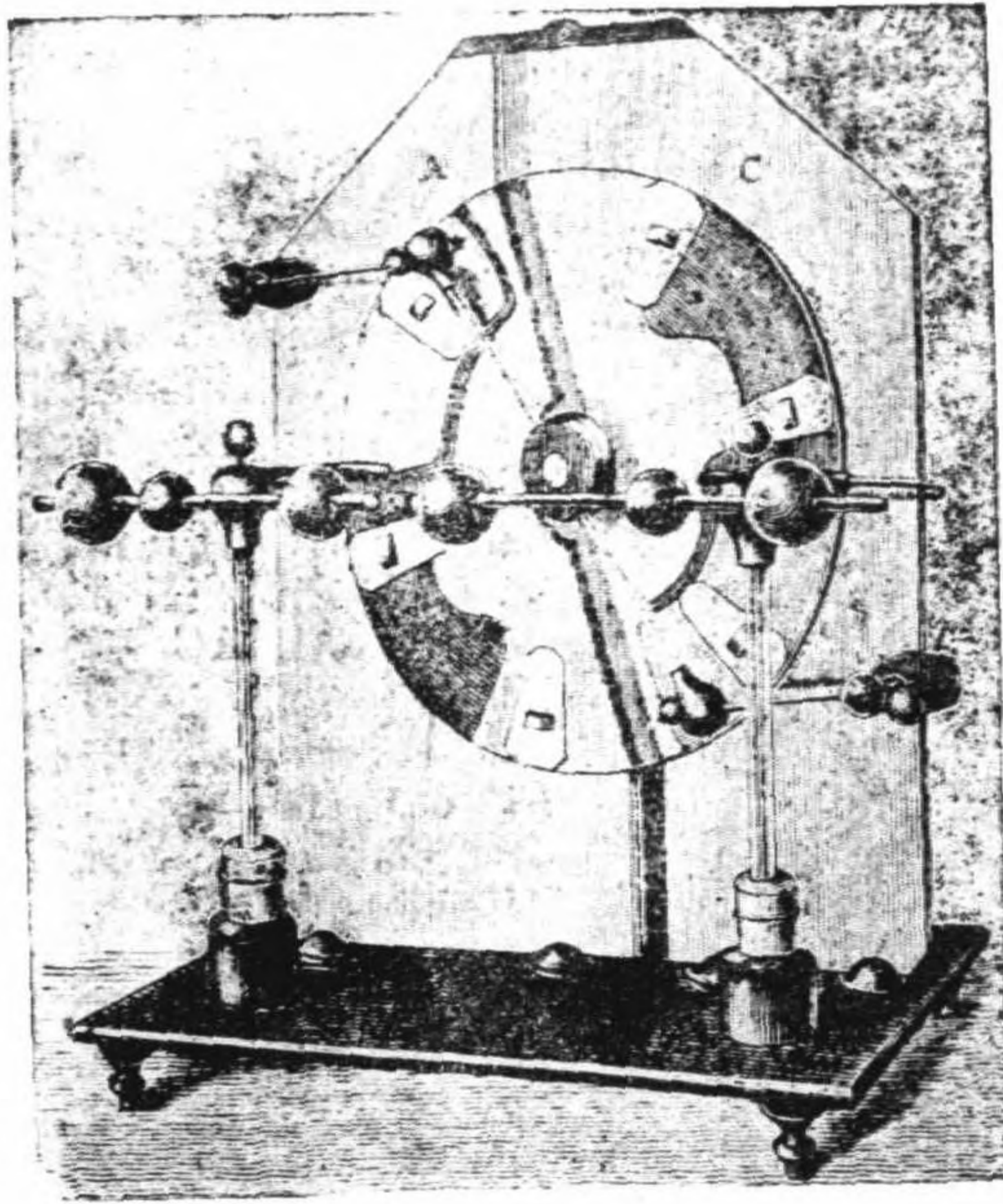


圖 57.

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，在其通軸線周圍，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

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

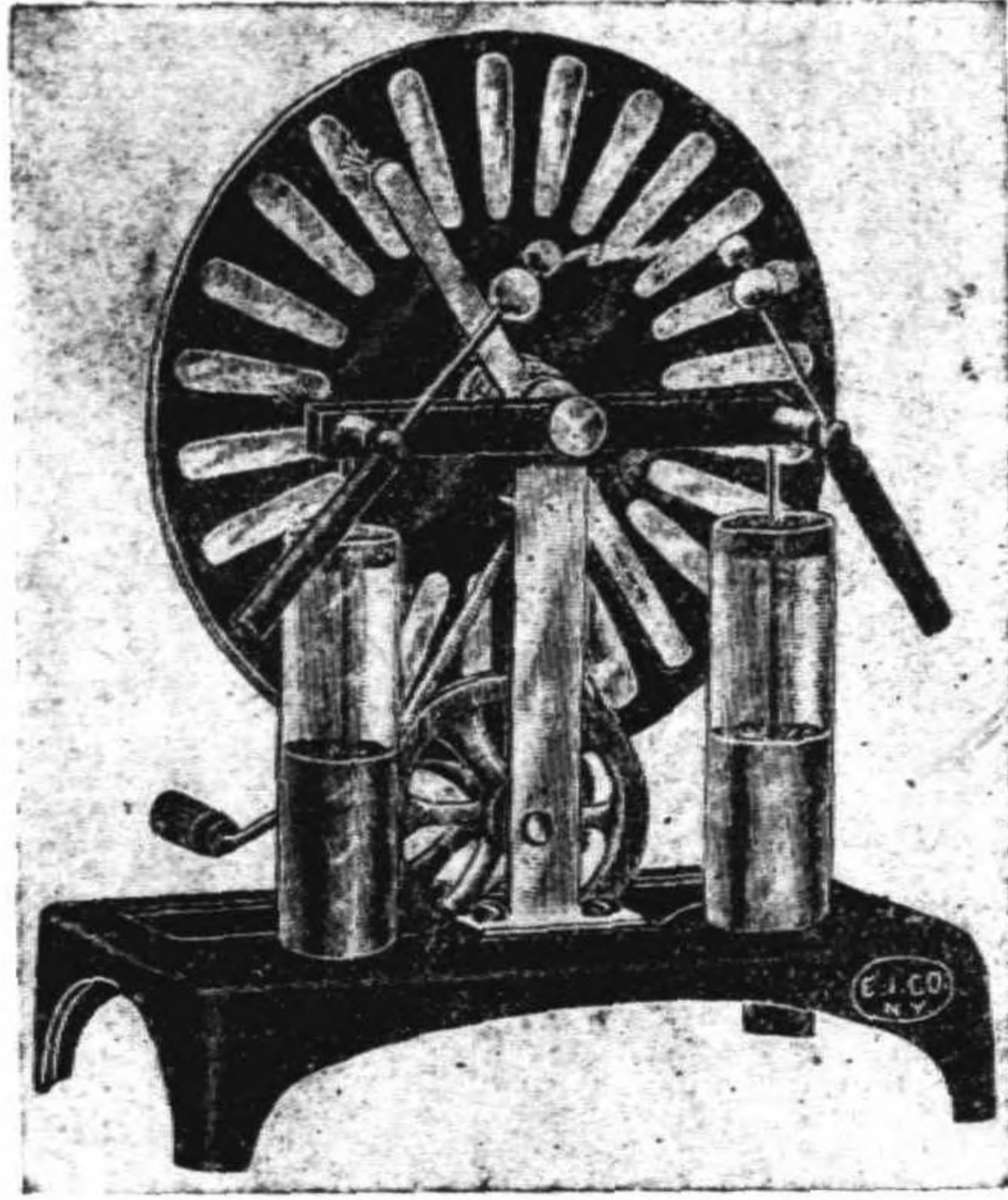


圖 58.

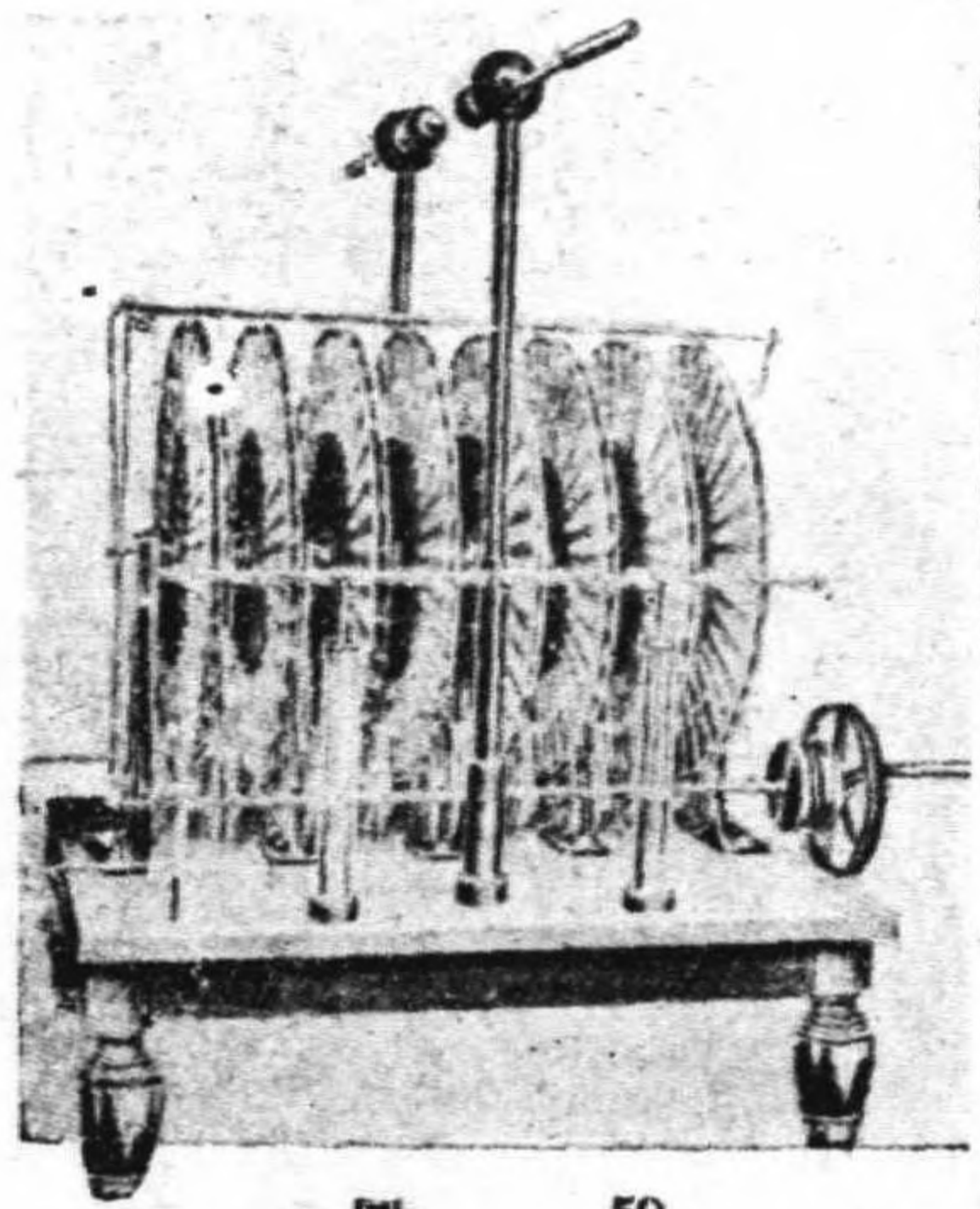


圖 59.

反，亦能增多蓄電。又將兩端運至來頓瓶上，蓄積之電，再為增大。圖59所示為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，通稱之為電場 (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，此等垂線之方向，即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，即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，即按照力線方向，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

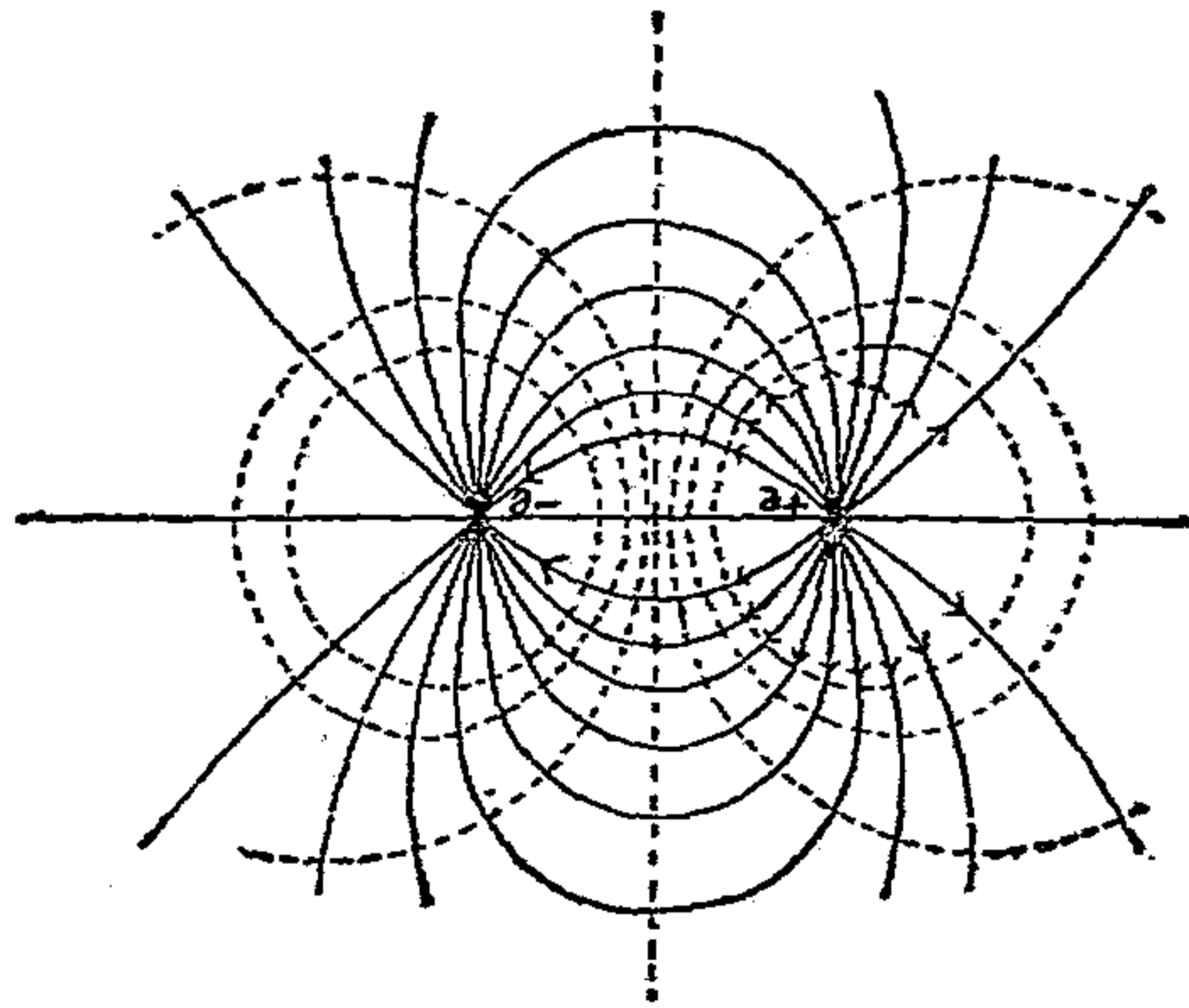


圖 60.

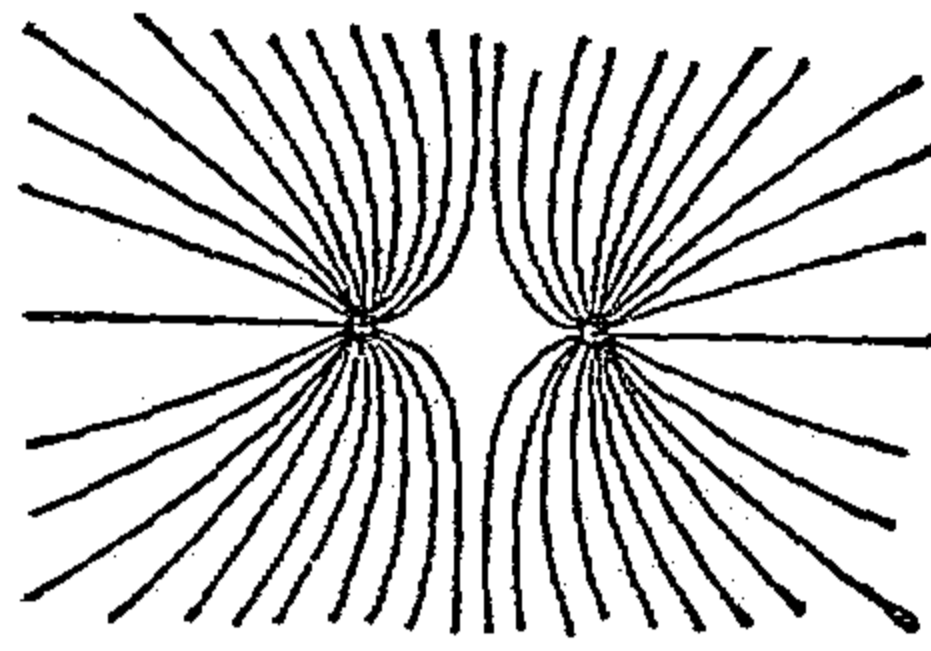


圖 61.

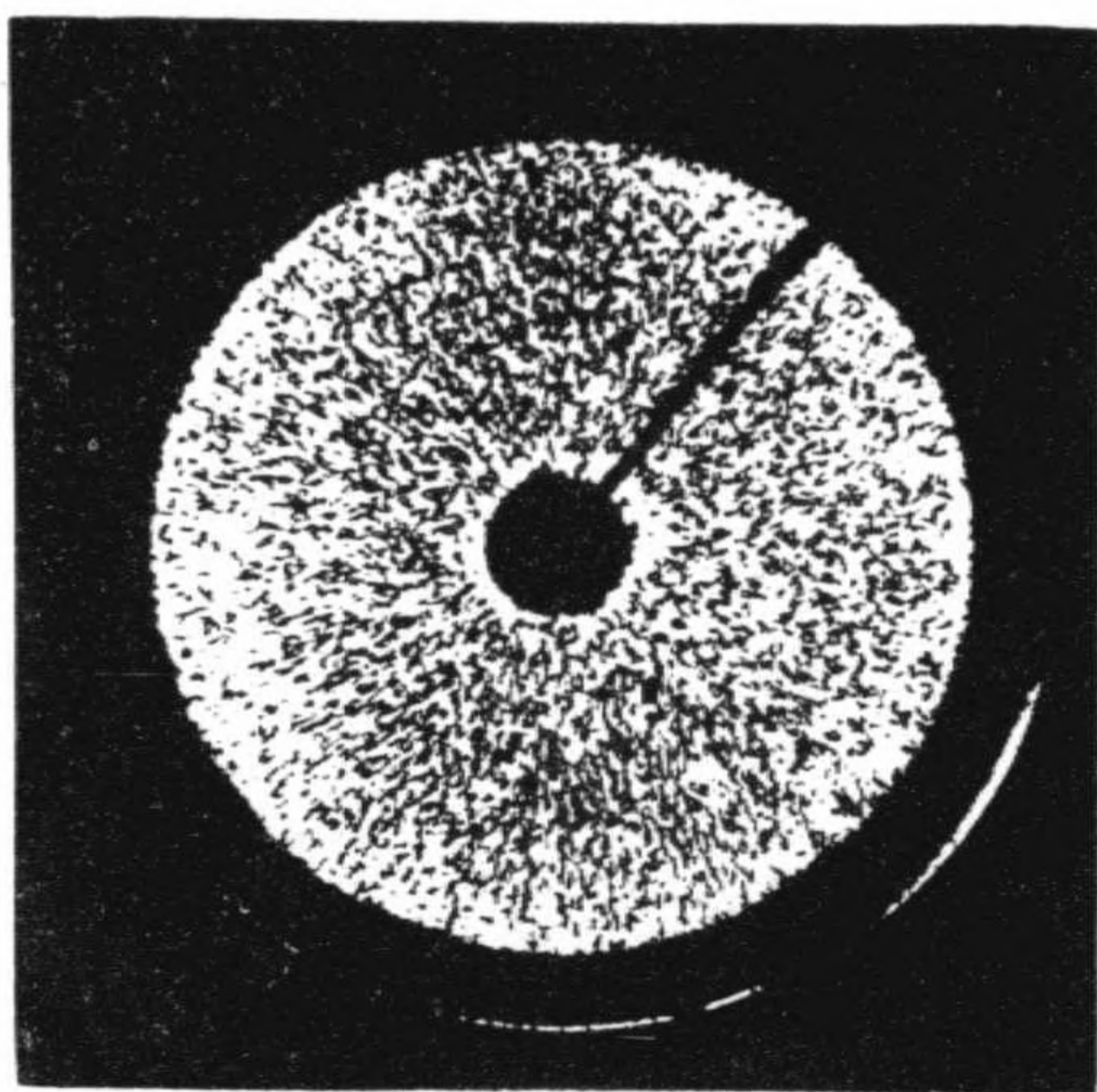


圖 62.

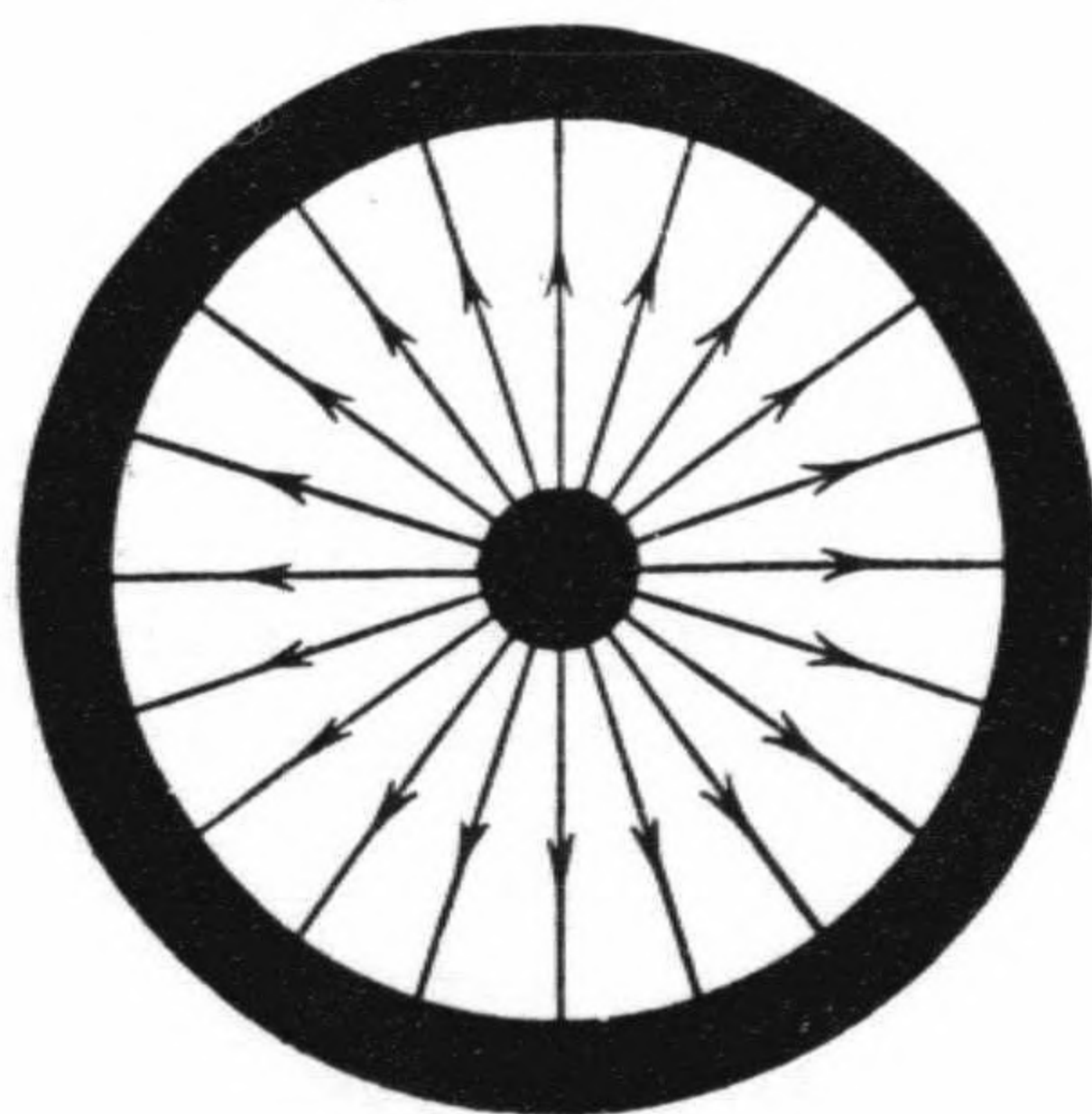


圖 62

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

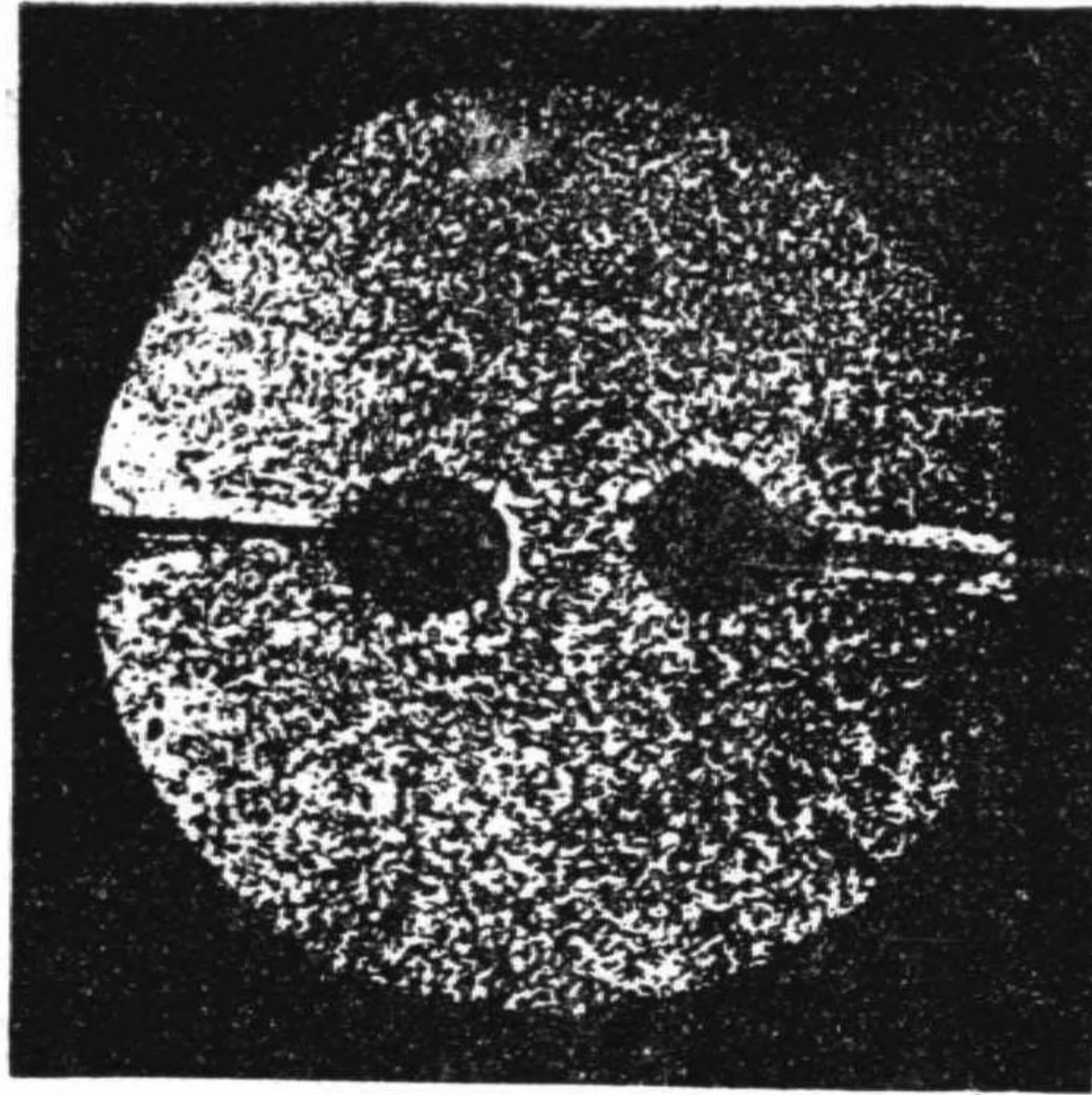


圖 63.

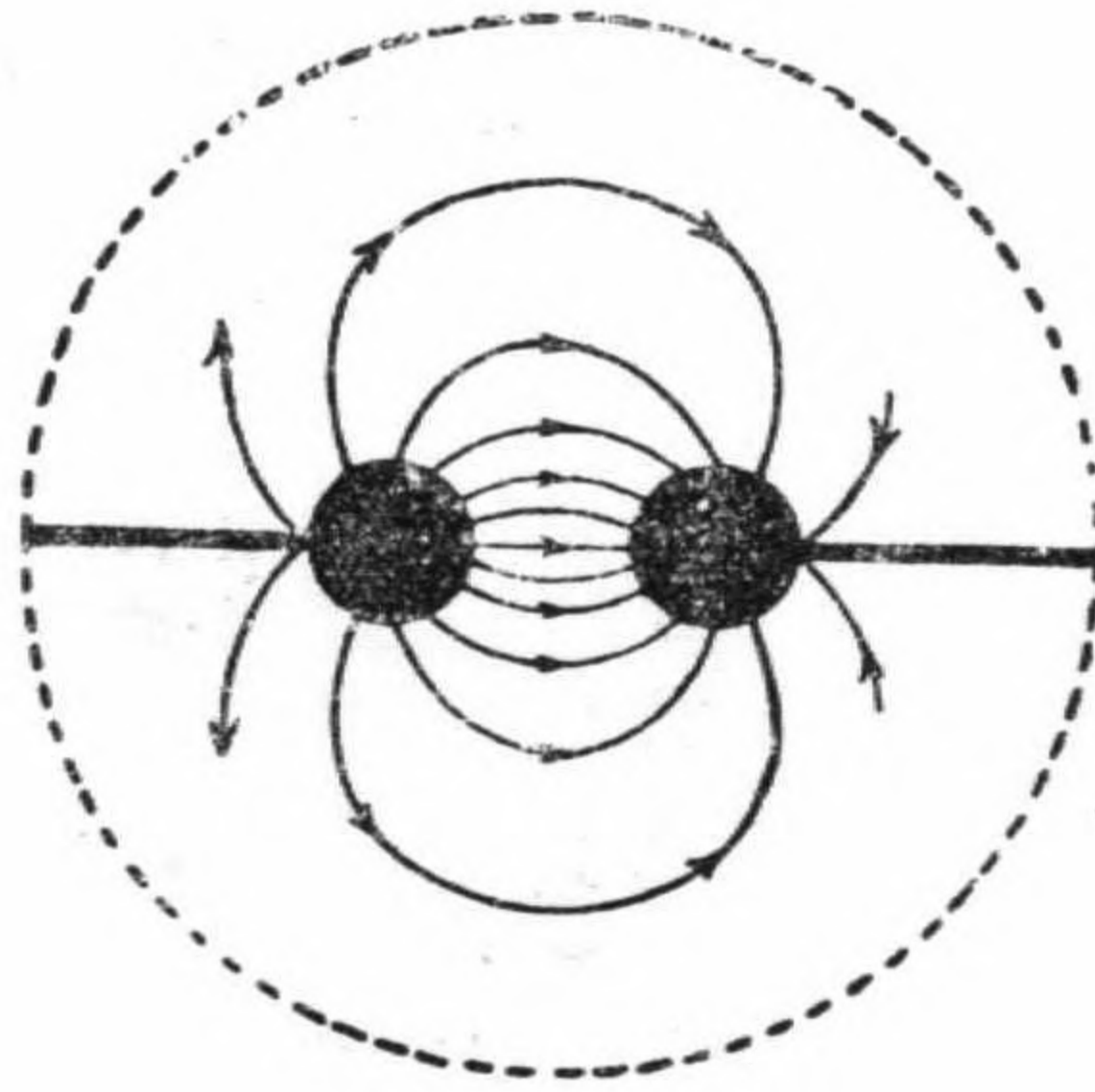


圖 63.

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

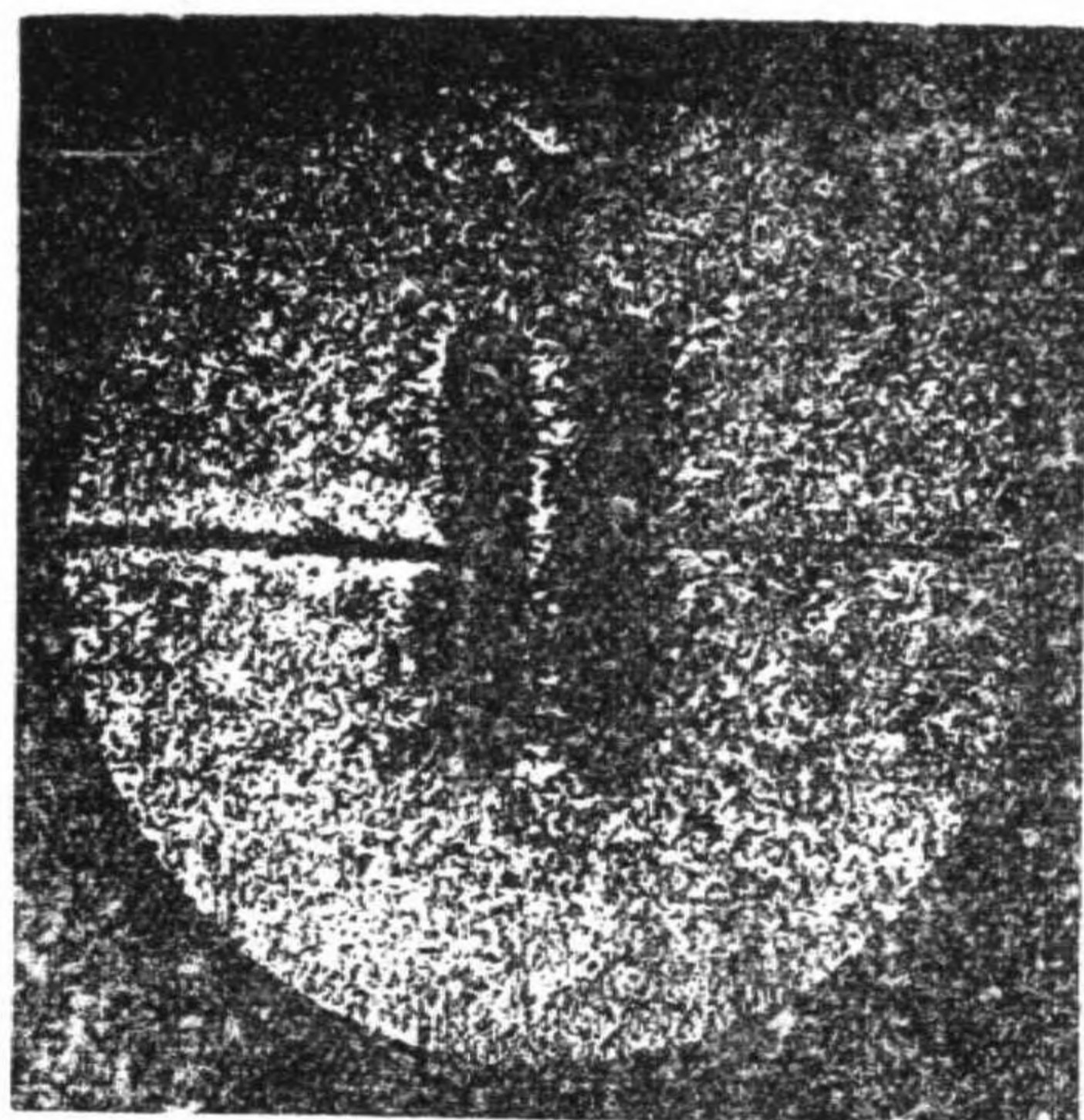


圖 64

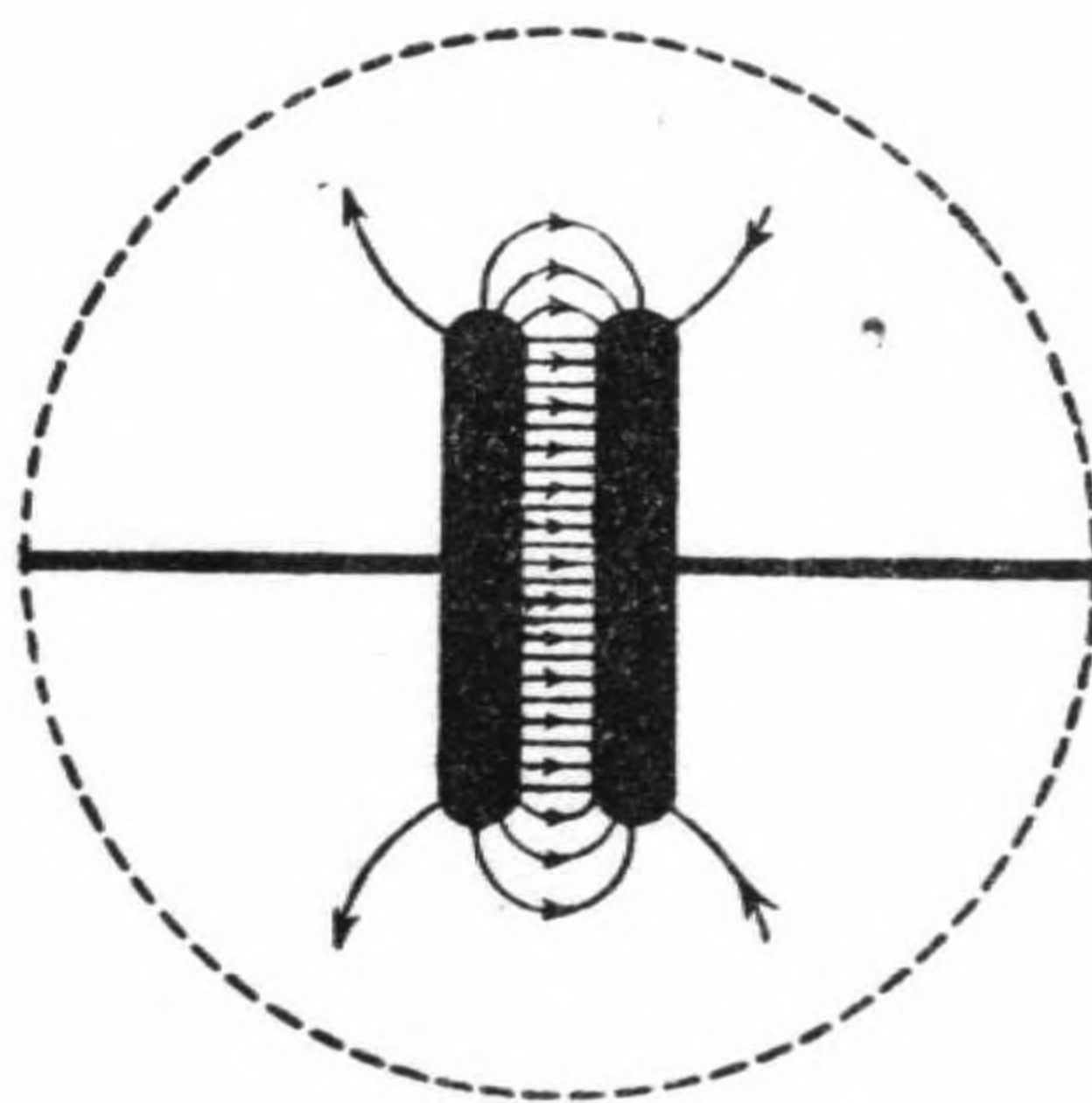


圖 64

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。

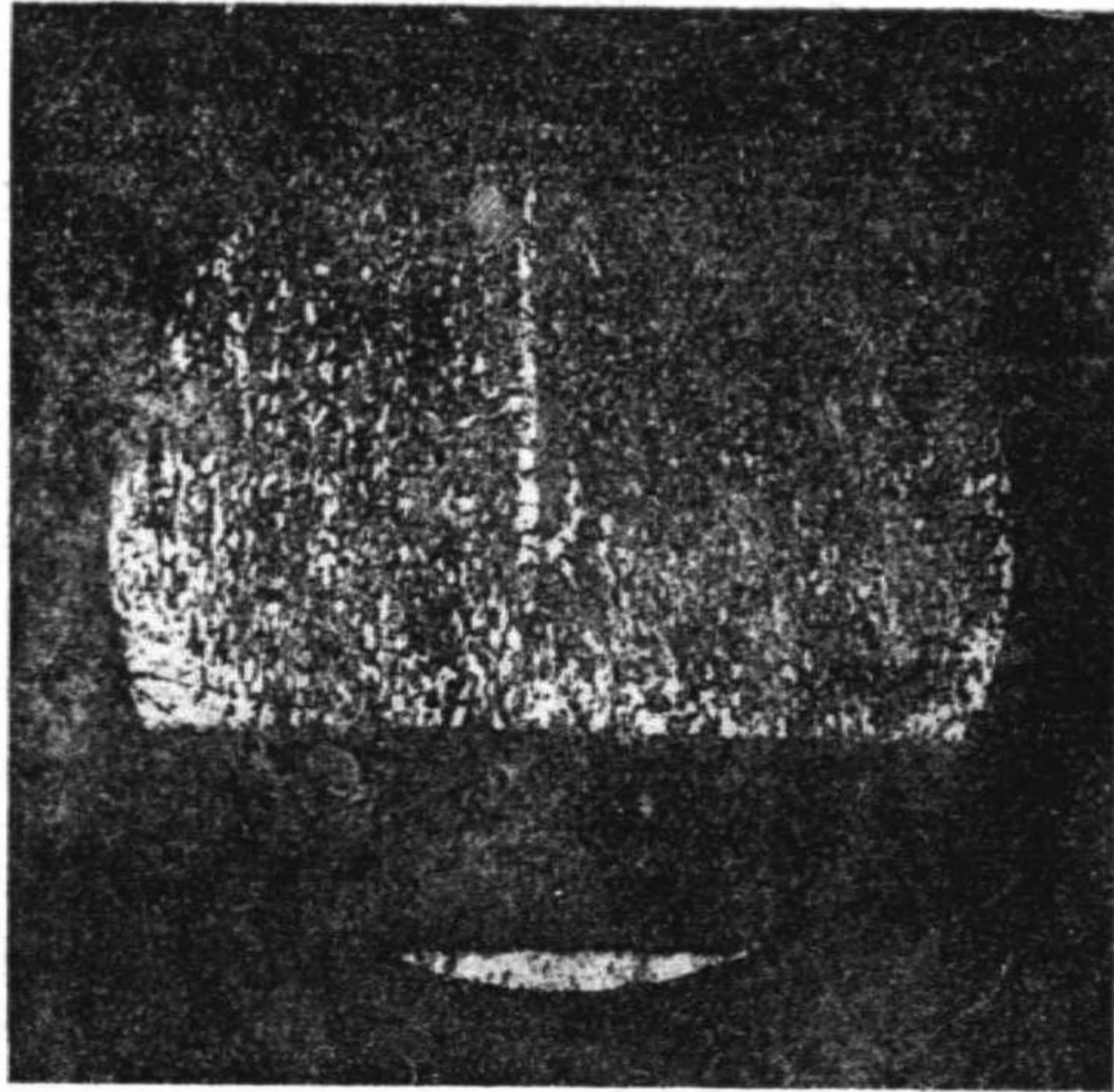


圖 65.

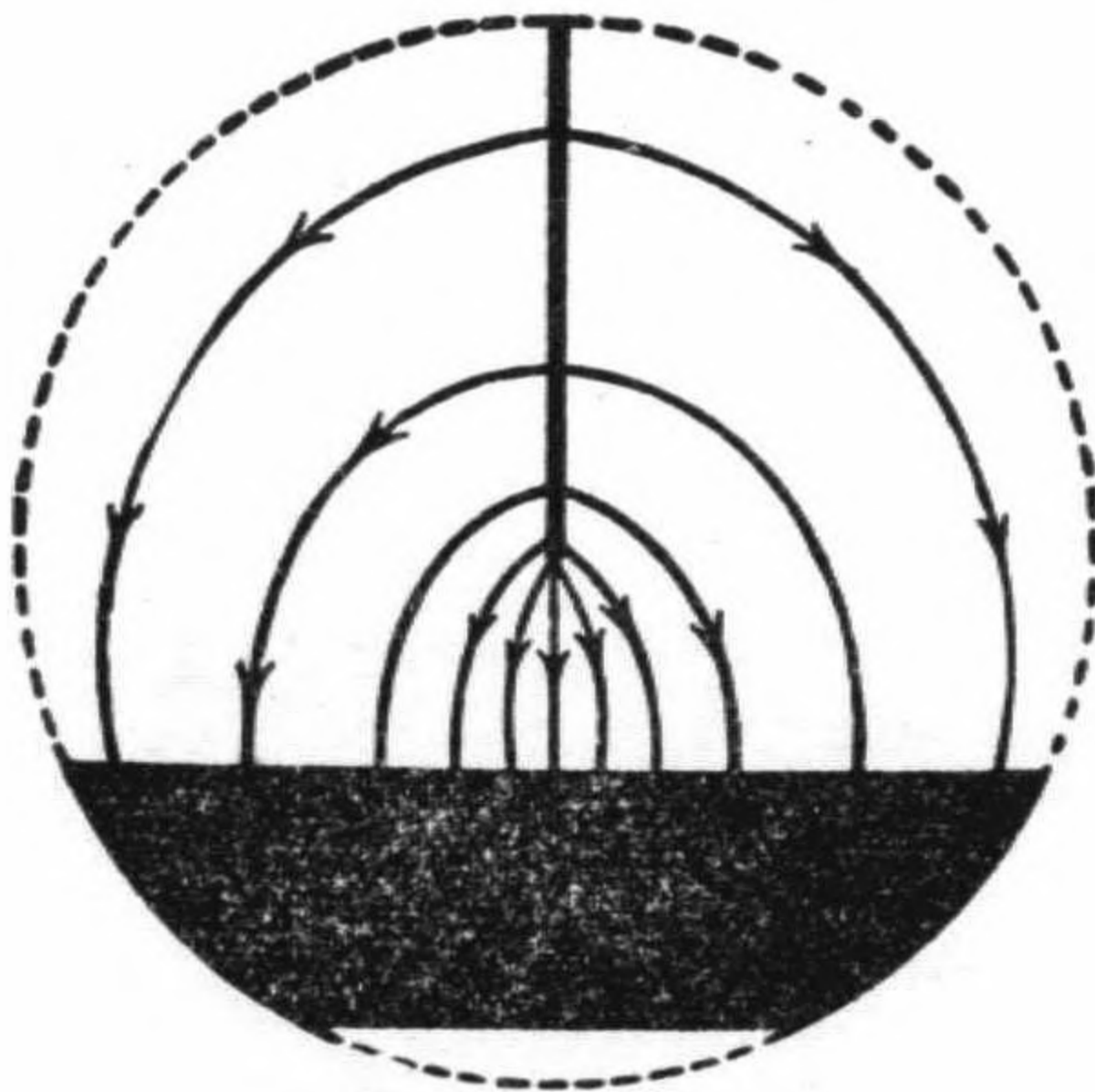


圖 65.

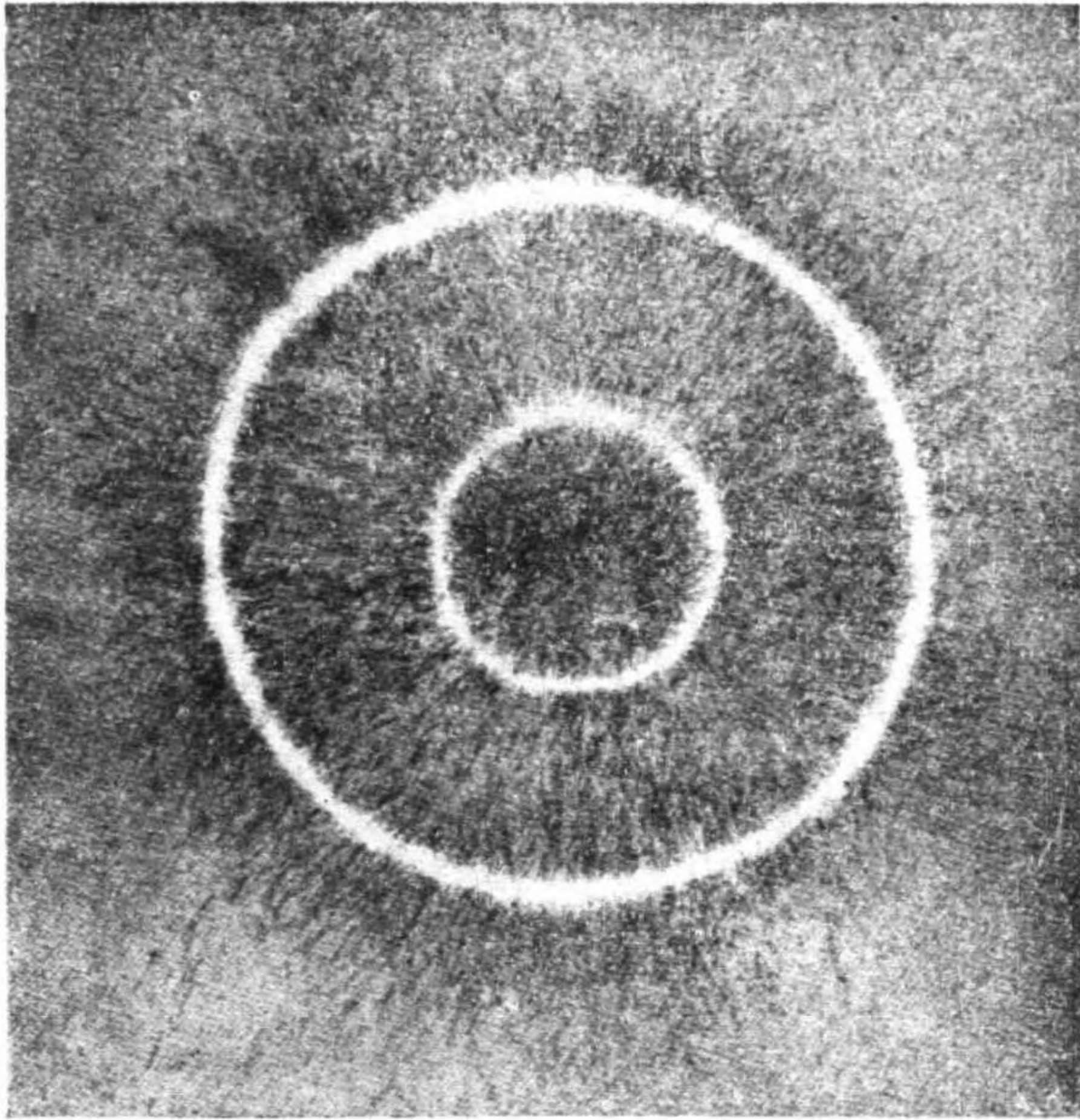


圖 66.

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 (tubes 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，則力管即行縮短。如從力管之兩端，施以張力，則力管即行伸長。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，即行縮短。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，此即放電之現象。

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，即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，卽無限制。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，卽造磁場。此磁場之強度，卽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 σ ，由此導體造成之電場強度，很易求出。命 \mathbf{r} 表導體近旁之電場強度，則 $\mathbf{H} \parallel \mathbf{v}$ 。故在此電場中，從單位面積上通過之力管數，卽 $\frac{1}{4\pi} \frac{F_r}{r^2}$ ，卽等於其電荷之密度。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 \mathbf{F} 之自乘成比例。每一單位面積上，應有 $\frac{1}{8\pi} \frac{F_r^2}{r^2}$ 。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 $\frac{1}{8\pi} \frac{F_r^2}{r^2}$ 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。由庫倫定律，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 $\frac{1}{r}$ ，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 3×10^{10} 倍定爲 1 電磁單位，又以 3×10^9 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 $F \parallel e$ 。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 $F \parallel eD \parallel KE$ ，此時之 D 表電場之強度。據馬克斯威，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

因其為電之介質所致。此 D 與真空中之電感應度 E 之差，用 P 除之，則稱為電之極化 (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 為大，故在任何介質中之電場強度，均較在真空中之電場為強。

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。即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) 為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 (Kohlrausch) 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

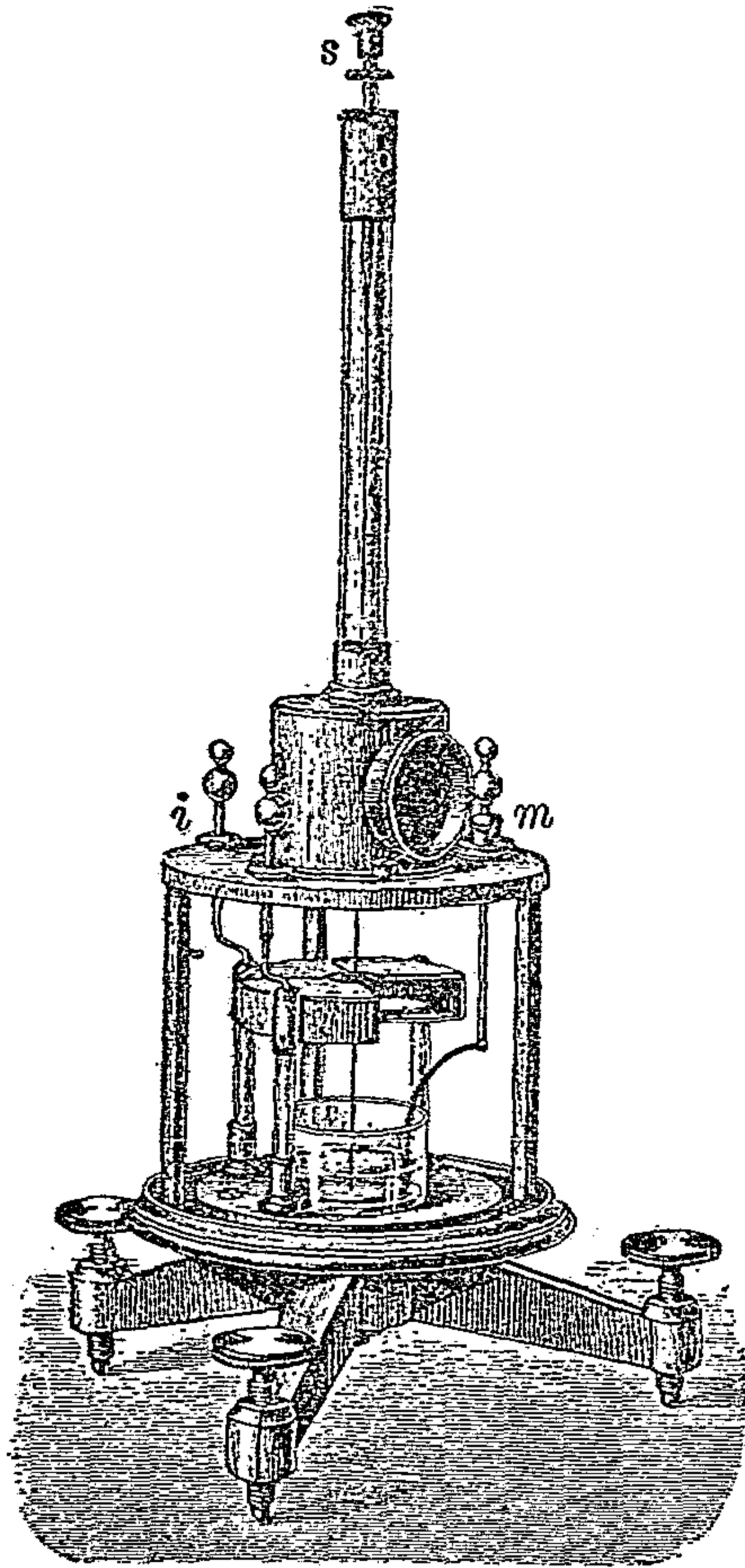
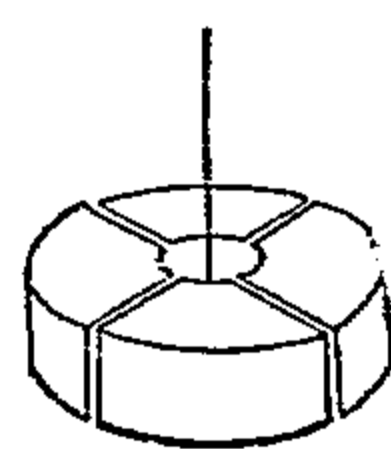


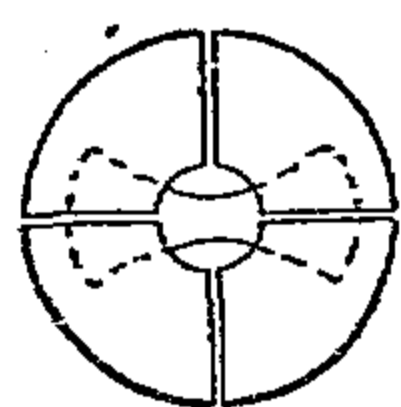
圖 67.

成四象限，互隔相當距離。盒中有一碟形金屬薄板，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 二 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， θ 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例，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，約爲一萬分之一伏特。

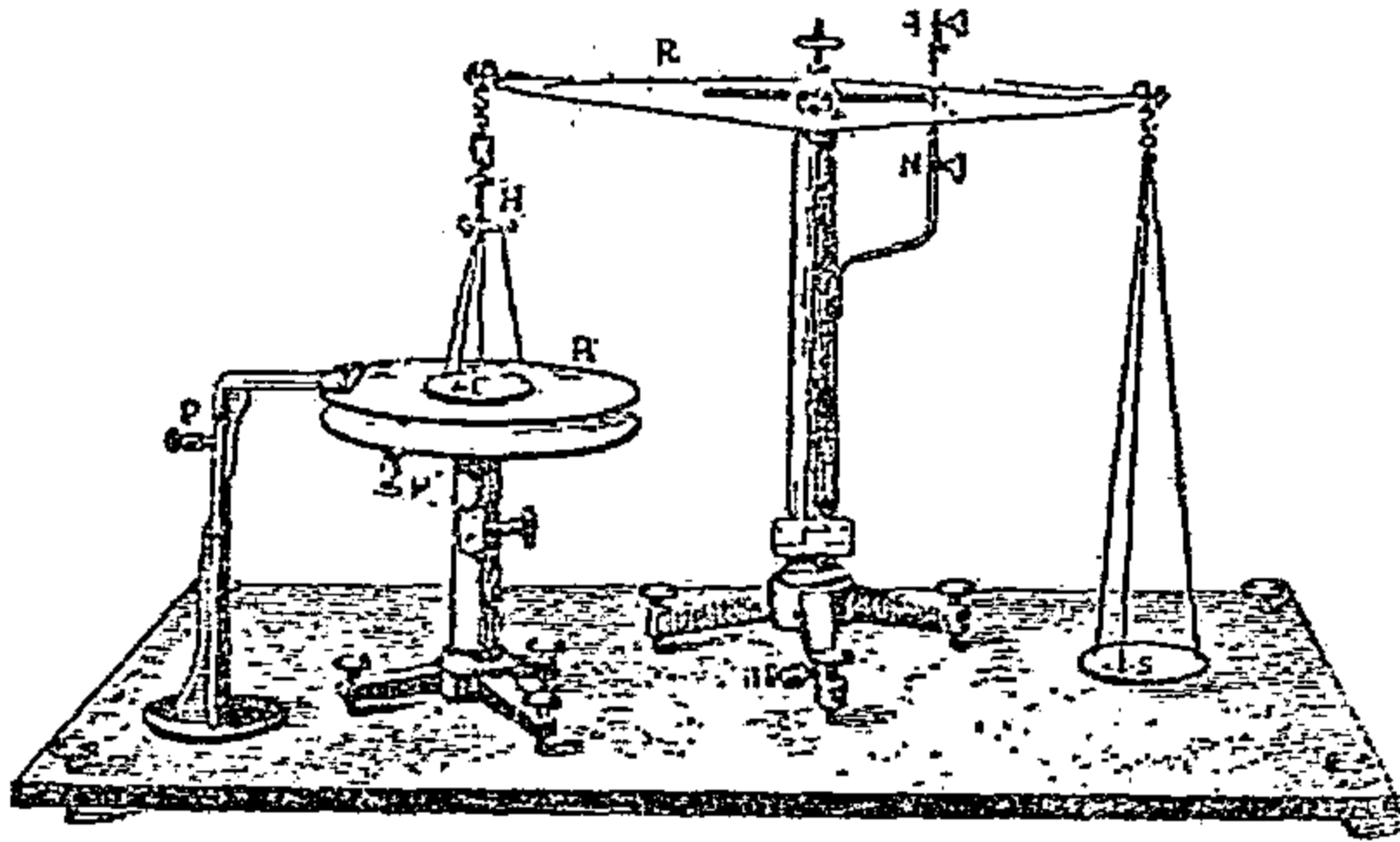
最近昆卜頓更將全形體縮小，電容亦極小，並將一對象限與地連結，且能上下移動，因此靈敏度大爲增加，是爲昆卜頓象限靜電計。

(2) 絕對靜電計

圖69所示，爲愷氏絕對靜電計 (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名爲護環 (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：



$$F = \frac{F}{2} (r^2 + R^2).$$

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。

69.

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：

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

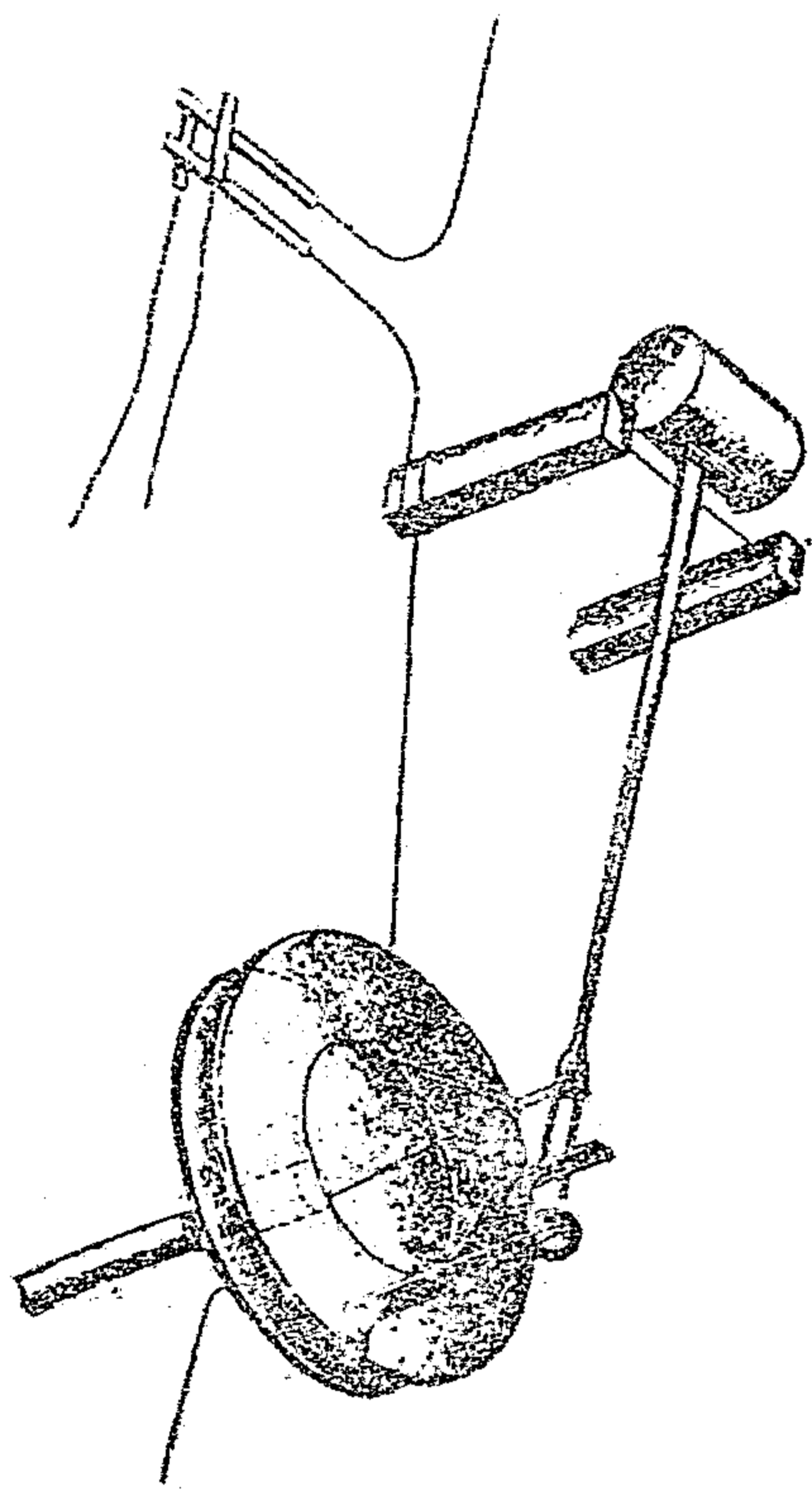


圖 20.

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



第二章 電

圖 71.

圖71.所示，為斯文本 (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，為衛斯吞 (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。

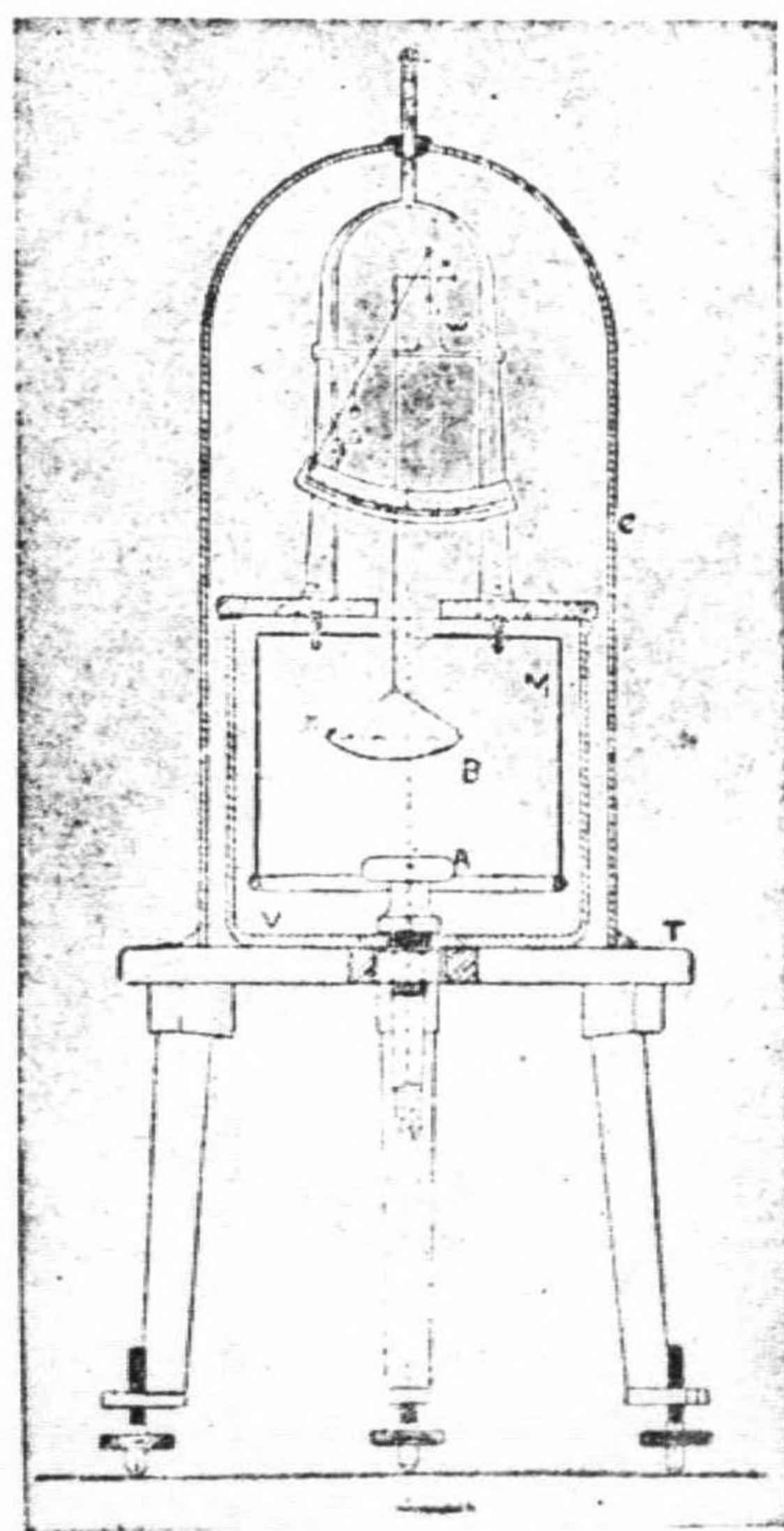


圖 72.

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10⁸，1庫侖在絕對單位爲10¹¹，故1法拉用絕對單位表出時，當爲

$$1 \text{ 法拉} = \frac{10^{-11}}{10^8} = 10^{-19} \text{ 絕對單位。}$$

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

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

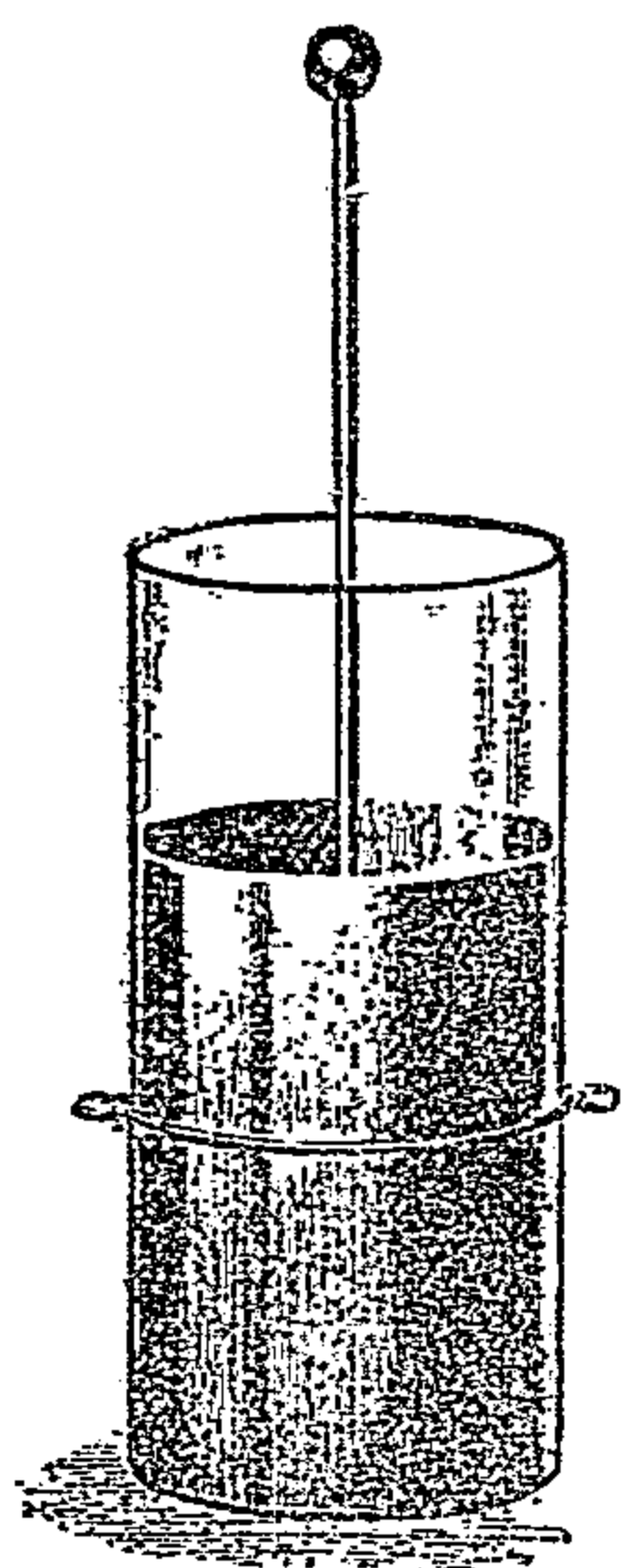


圖 73.

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_1 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

$$C = \frac{l}{2} \frac{1}{\log_e \left(1 + \frac{r_1}{r} \right)}$$

又如兩筒間之間隔 a ，較內筒半徑 r 甚小時，則成爲 $C \approx \frac{1}{2a} \ln \frac{R}{r}$ 。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

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

式中之 r ，表環內小圓板之半徑， r' 表環內徑。如 $C \approx \frac{r+r'}{2\pi}$ 之值，較圓板之厚遙小時，其 β 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

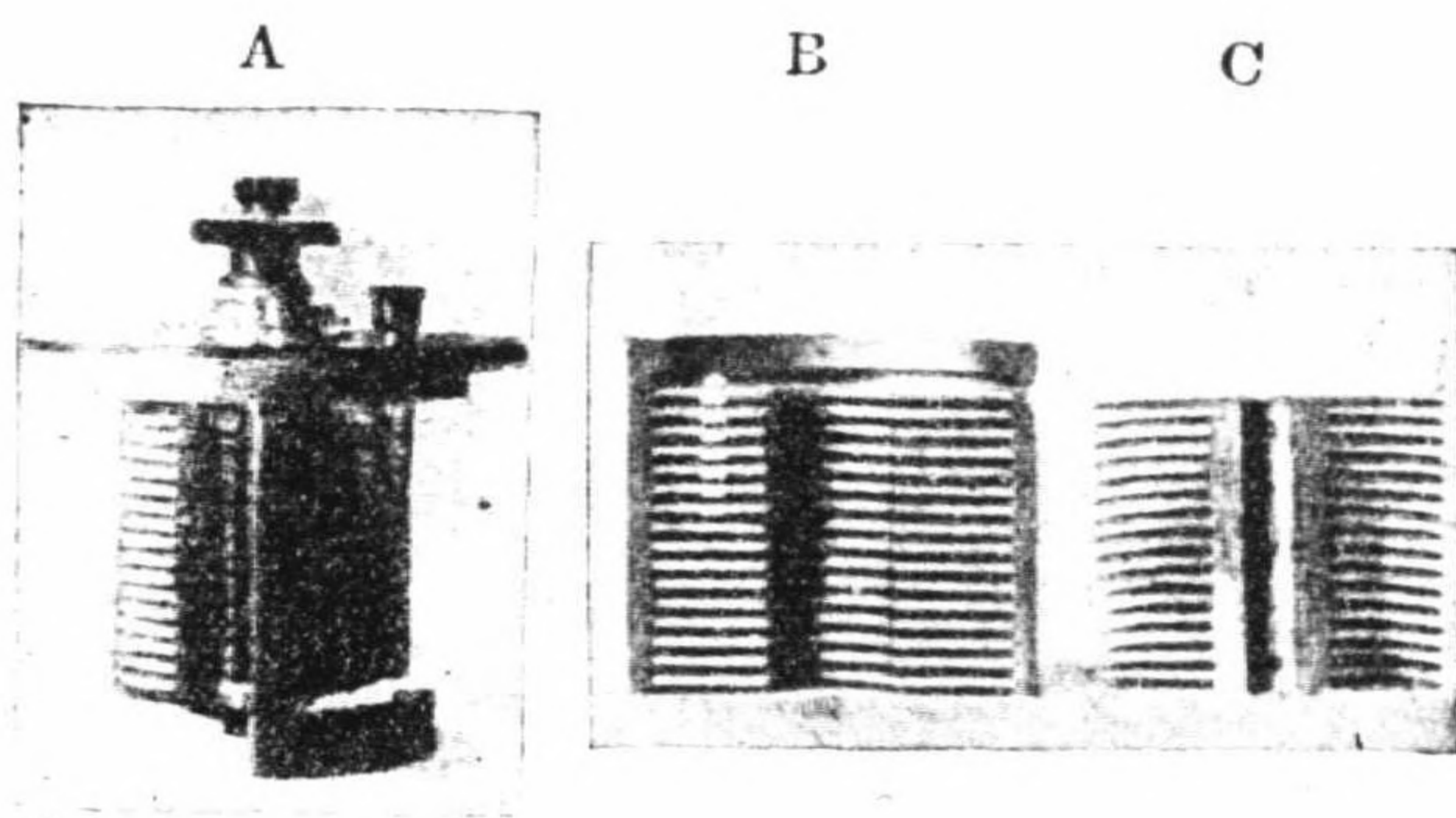


圖 74.

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，多由鋁板製成，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。

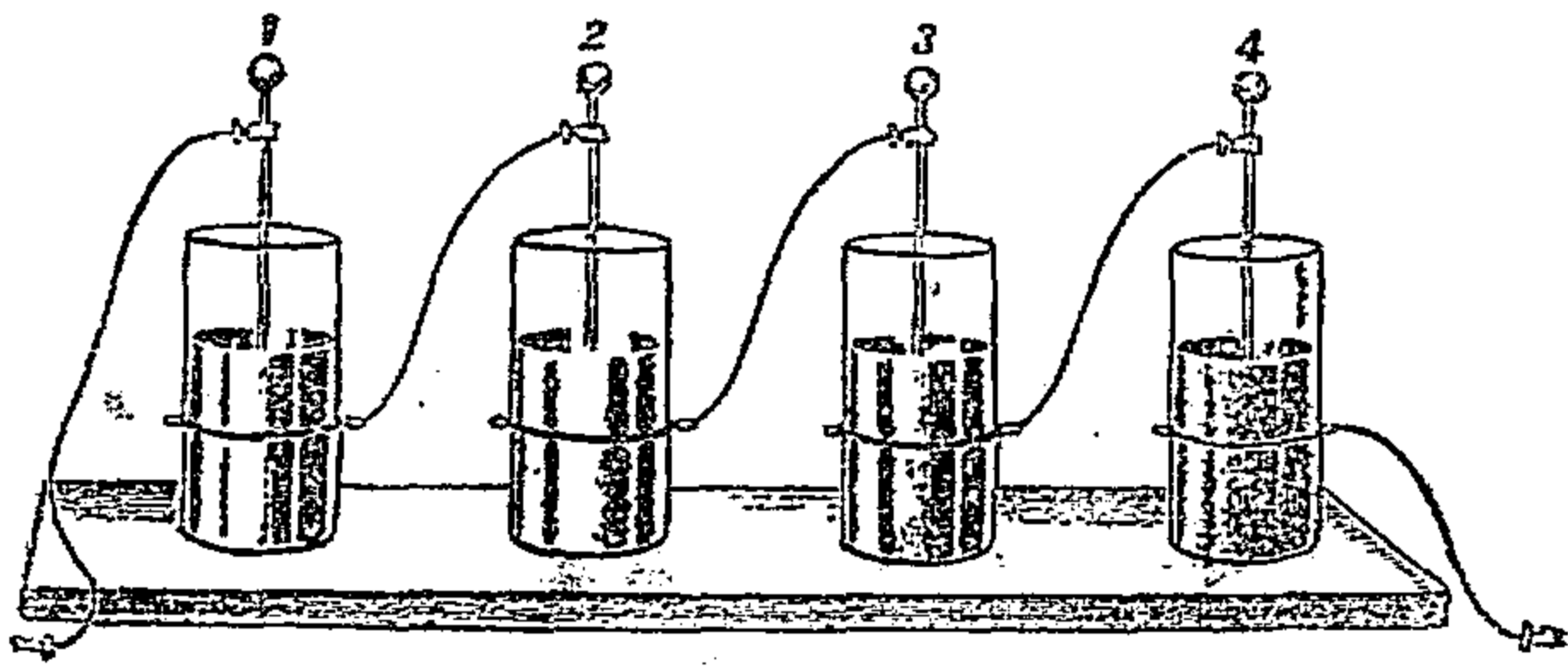


圖 75.

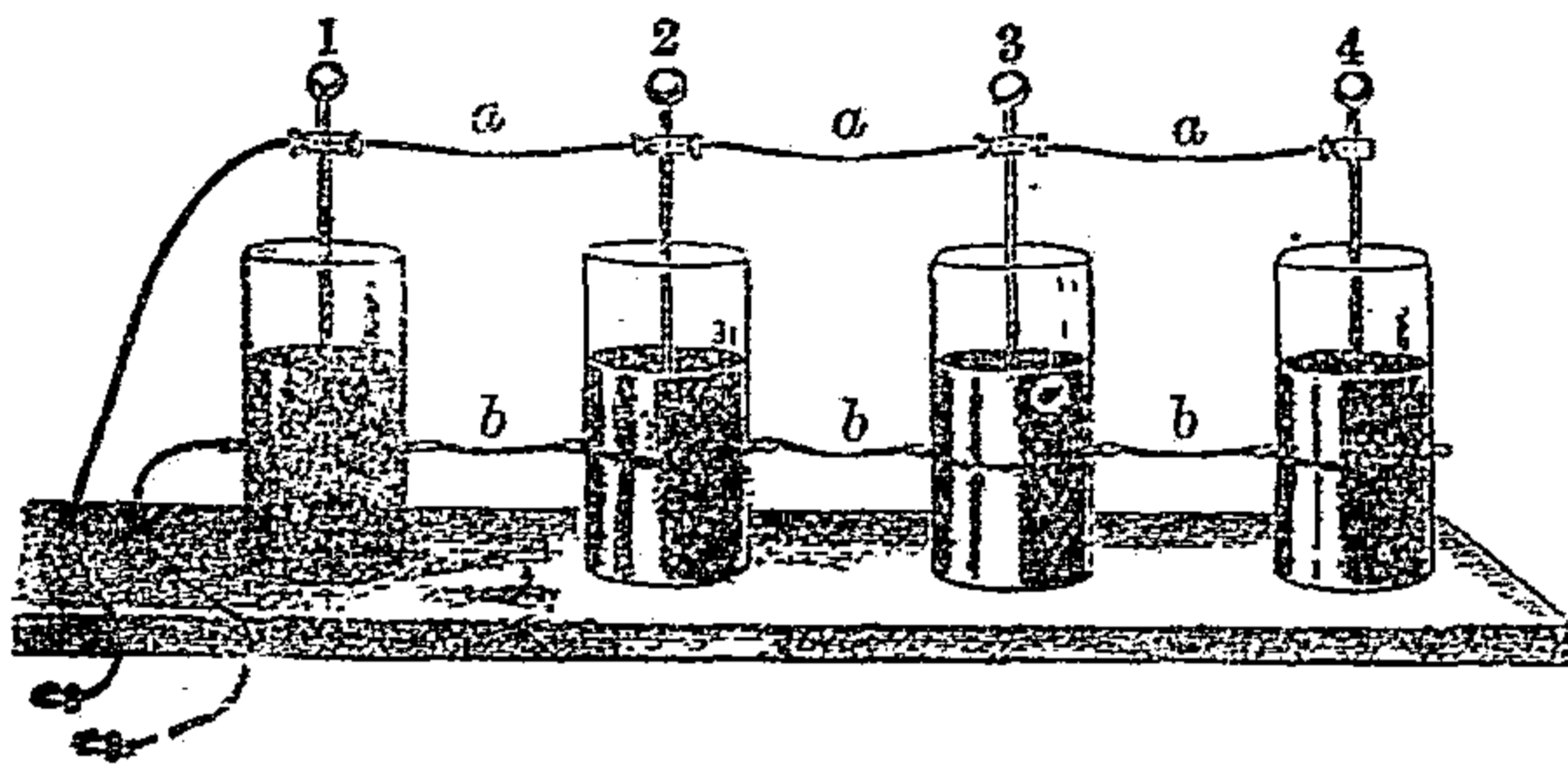


圖 76.

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

$$q_1 C = q_2 (C_1 + C)$$

之關係。由此二式，可得下列之關係：

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{V_2}{V_1 - V_2} \quad \frac{q_1 - q_2}{q_1}$$

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 為已知數，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，其中一個尚須能夠任意使其變化。此三個與欲測之電容相合，共為四個。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

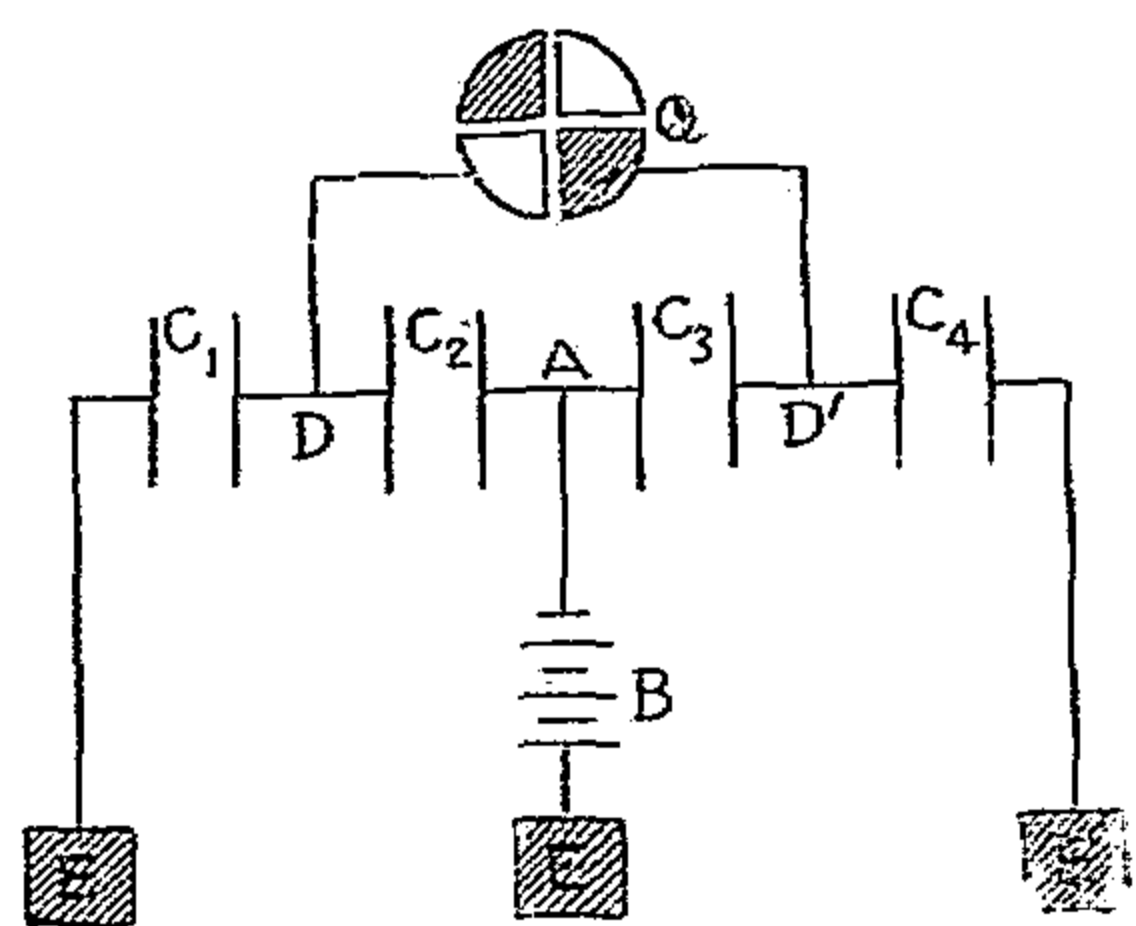


圖 77.

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_1 及 C_4 之他一端，則與地相連。適宜變動 C_4 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

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

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

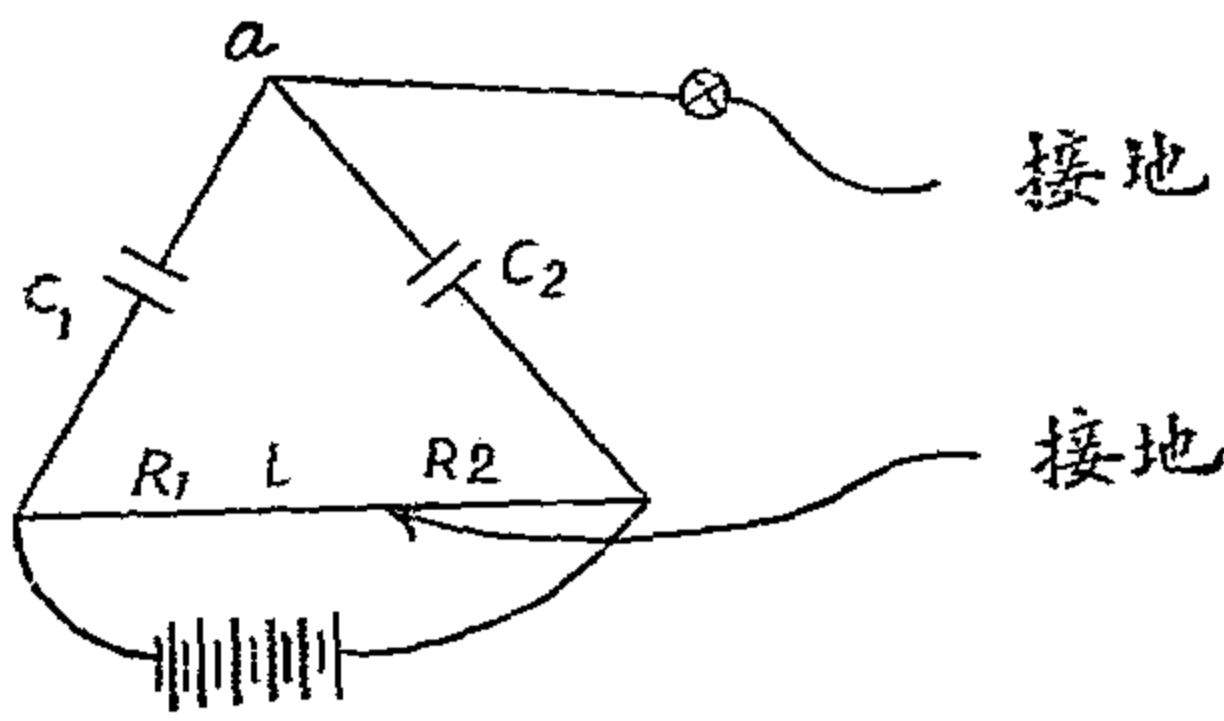


圖 78.

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，C₂ 表已知之電容，R₁ 及 R₂ 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

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 C₀。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。

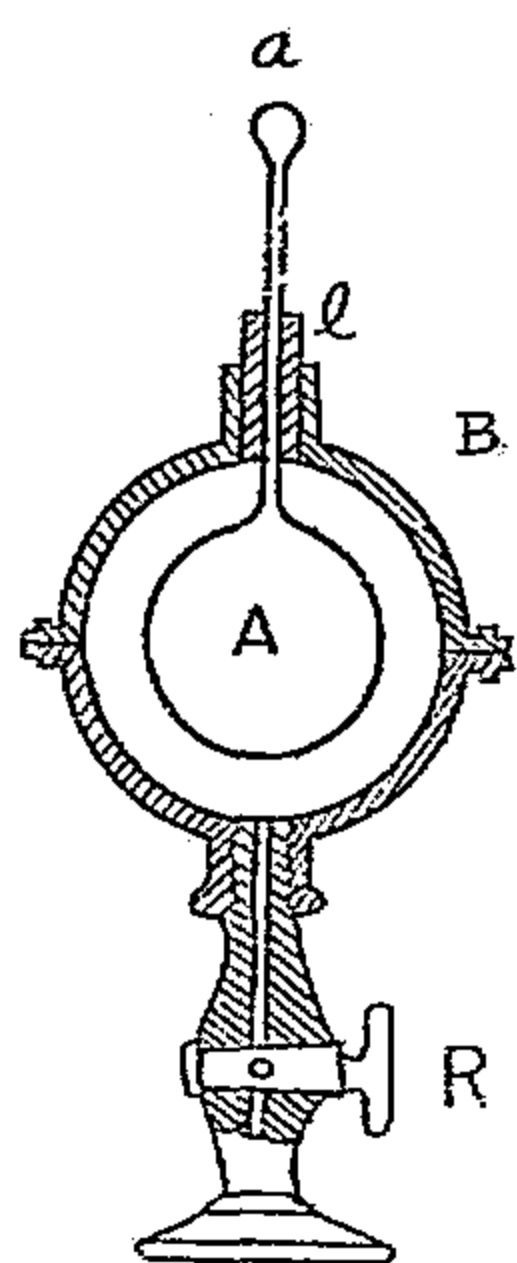


圖 79.

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方內部球上，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。通常恆較其二分之一為小。命 C_1 表一方之容電器之電容， 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。

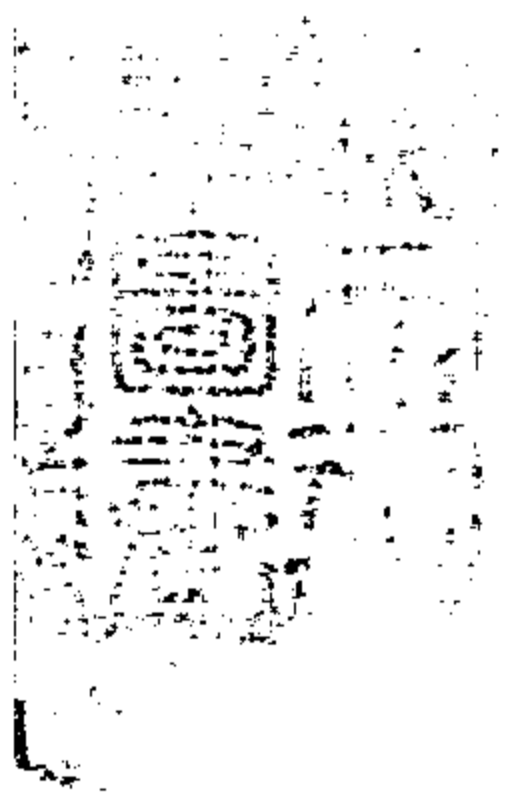
最近更有一法，將欲測介質之容電器，與振動電路之容電器並聯，測定其頻率之變化。由此可將容電器之電容算出。故可作介質常數測定之用。此法所得結果，甚爲精確。通常欲精確測定介質係數，或欲測定其受溫度等類物理條件變動引起之影響時，多使用之。

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
硬質陶瓷	5.73	土 瀝 青	2.68
雲 母	7.1-7.7	石 蠟	1.94-2.07
水 晶	3.75	賽 璐 珞	6.7

硬 橡 皮	2.55	電 鏡 用 紙	2.0-2.5
Bernstein	2.80	石 蠟 油 (28°O)	2.11
硫 黃	4.05	橄 欖 油 (21°O)	3.11
馬 來 樹 膠	4.43	密 氣 (19°O)	1.000576
橡 皮	2.45-2.73	氫 (20°O)	1.000273
火 油	2.70-2.14	氮 (0°O)	1.000074
乙醇 (14.07°O)	26.8	二 氧 化 碳 (0°O)	1.000943
甲 醇 (18.4°O)	35.3	水 蒸 氣 (145°O)	1.0070
水	80.0	水晶板 { 光軸平行 光軸垂直	4.35 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。



0156
廿八年十月廿一日
大同書店

中華民國二十七年七月初版

(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

版權所有
翻印必究

發 行 所	印 刷 所	發 行 人	主 編 者	譯 述 者	原 著 者
商 務 印 書 館	商 務 印 書 館	王 長 沙 雲 南 正 路 五	周 王 昌 雲 壽	周 王 昌 雲 斌	三 枝 彥 雄

☆F四五一六

