

新 中 學 文 庫

物 理 學 概 論

第 二 冊

石 原 純 著  
周 昌 壽 譯

商 務 印 書 館 發 行

自然科學小叢書

物 理 學 概 論

第 二 冊

石 原 純 著  
周 昌 壽 譯

王 雲 五 周 昌 壽 主 編

商 務 印 書 館 發 行

## 第三章 熱力學及分子論

### 第一節 溫度

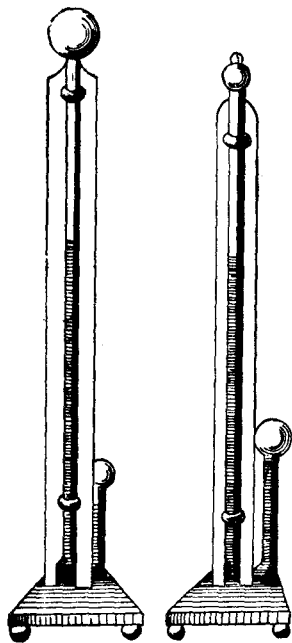
由日常經驗，各物體對於吾人感官，可以引起冷熱不同之感覺，即就一物體而言，其狀態亦隨其所引起冷熱感覺之程度而異。例如水冷則凝固成冰，蠟熱則熔化成液，或則蒸發成爲汽，或則發光現爲赤熱，凡此種種，統括之曰熱現象(thermal phenomena)。然論熱現象，若僅憑冷熱之感覺，頗欠精密。譬如同一冰也，以手撫之，有時覺其酷冷，有時又覺其不如是之甚。故在物理學上表示冷熱之程度，即溫度(temperature)，須用一種可



圖二〇八 德勒柏爾之實驗。  
表示空氣受熱而生之膨脹

以作成標準之現象，以作比較始能得精密結果。

自古即知物體受熱，則其體積膨大，尤以空氣之膨脹程度最大。一六〇八年德國之德勒柏爾 (Drebbel) 曾作一實驗，如圖二〇八所示。將曲頸玻璃瓶之口，浸入水內，加熱於瓶底，見有氣泡由水逸出。瓶如冷卻，則有水自瓶口進入瓶內。最初欲利用此項空氣膨脹 (expansion) 之現象，造成一種量度溫度之器者，為伽利略。其在一六一五年寄人之書翰中，曾述及此事。是為空氣溫度計 (air thermometer) 之嚆矢。至於用液體代替空氣，造成溫度計之人，則為法國之醫師累冉 (Jean Rey)，時在一六三一年。而選定冰開始融化之溫度，即冰點 (freezing point)，及水開始沸騰之溫度，即沸點 (boiling

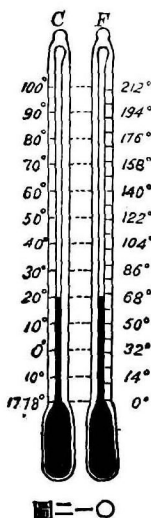


圖二〇九 空氣溫度計。

左為斯圖謨(一六七六年)所製之溫度計，兩球均盛空氣，使一球受熱，即由此求出其溫度。右為同時代之攷邦所製，上部之球為真空。

point) 作為溫度計上之兩定點 (fixed points) 者，則為德國之藍柏 (Lambert)。舊時使用最廣之標度，為華氏標度 (Fahrenheit scale)，係德國之華倫海於一七二四年所定，以水以之冰點作為三二度，沸點作為二一二度，將其間等分為一八〇度。同時又有攝氏標度 (Celsius scale)，則為攝爾修於一七四二年所定，以水之冰點作〇度，以沸點作一〇〇度，而將其間等分為一〇〇度。現今通常使用之溫度計，如圖二一〇所示，為一玻璃細管，下部特別膨大，內盛水銀，將水銀上方之空氣逐盡，然後密封而成。在物理學上所言之溫度，概用攝氏度。例如言人之體溫，在通常之健全者，應在三六度至三七度之間，若在此以上，即非健全狀態，而為發熱狀態。又夏季極暑之時，空氣之溫度較三七度略底，大抵在三〇度內外。

欲知在某一時期中之最高溫度，或最低溫度，則用最高溫度計 (maximum thermometer) 或最低溫度計 (minimum thermometer) 此兩者同為水平之玻璃管，量最高者，內容水銀，水銀頂上面，有一小鐵釘之指標，如圖二一一所示。



圖二一〇

量最低者，內容酒精，在酒精頂面下，有一小玻璃棒之指標。此兩指標，均與管內之液面相接觸，由其位置，可以讀出液面曾經昇到之最高或最低之處，表示其間所歷之最高或最低溫度。

量度人體溫度使用之溫度計，為醫用溫度計 (clinical thermometer)，如圖二一二所示，亦為最高溫度計之一種。管之下部特別膨大

之處，與管相通之一點，製成特別窄狹。當溫度

昇高時，下面之水銀固可由此處通過，昇至上

面。當溫度降低時，業已昇上之水銀，即從此處截斷，仍留原處，不能還其原位，故可

讀出其最高之溫度。此外尚有自記溫度計 (self-recording thermometer)，係用

鐘機關，使一圓筒轉動，而將溫度之連續變化，在圓筒上所捲之紙上，一一記出。

第二節 由溫度而起之體積變化



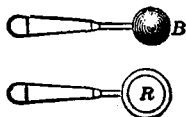
圖二一一 指標。

(上)最高溫度計；

(下)最低溫度計。



圖二一二 醫用溫度計



圖二一三

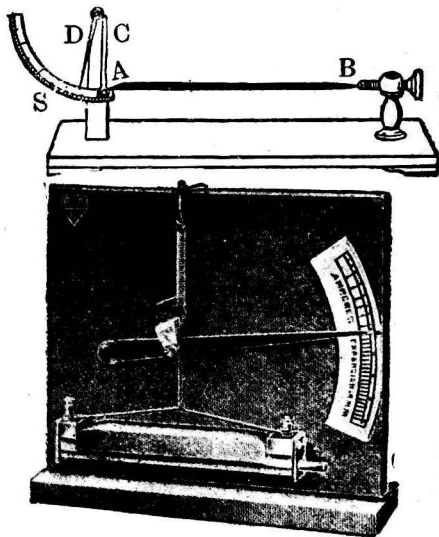
## 一 固體之膨脹

固體受熱，雖亦膨脹，但程度頗低，膨脹之量極微，故不易於觀測。最初作此項實驗之人，為意大利之阿加的米亞得耳西門特，時為一六六七年。其用器如圖二一三所示。S 為一環，其內恰可容球，嵌過，如加熱於球，使其溫度升高，即不能通過此環。又如使用圖二一四之器，即可檢查固體之長度膨脹量為若干。

固體之長度膨脹之比例，大體與溫度差

成正比，換言之，溫度每升高一度，其長度增加對於全長之比，各物質均各有一定不變之值，與現在之溫度無關。此值通稱之曰膨脹係數 (coefficient of expansion)。

固體之膨脹雖不大，但若須要精密之一定長短時，非特別加以注意不可。例如溫度中之米達



圖二一四  
棒因受熱伸長牽動其指針，沿刻度弧而動。

固體線膨脹係數表

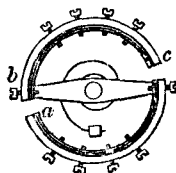
物質	膨脹係數	物質	膨脹係數	物質	膨脹係數	物質	膨脹係數
錳	$2.97 \times 10^{-5}$	銀	$1.94 \times 10^{-5}$	鎳	$1.35 \times 10^{-5}$	玻璃	$0.8 \times 10^{-5}$
鉛	$2.90 \times 10^{-5}$	黃銅	$1.89 \times 10^{-5}$	鋼	$1.16 \times 10^{-5}$	因之鋼	$0.09 \times 10^{-5}$
鋁	$2.42 \times 10^{-5}$	鋼	$1.71 \times 10^{-5}$	鉑	$0.90 \times 10^{-5}$		

免却溫度之影響，正當之辦法，須指定此原器上之兩標線間之距離，在某一溫度時，為一米，方免誤差，通常則定為溫度  $0^{\circ}\text{C}$  時之距離為一米，即一公尺。

原器，即非選用膨脹係數特別小且又極堅牢之物質製造不可。通常此項原器，均用鉑及鈹之合金製成，即由於此。但此種合金，亦不能絕對



圖二一五 補償擺。  
e 為銅棒，b, d, e 及 i 為鐵棒。  
銅之膨脹係數，約為鐵之二倍以上，故若配合適宜，可使擺之全長一定不變。



圖二一六 切開擺輪。  
圓環內層 a 為鐵，外層 b 為黃銅，兩者釘合為一，然後截開，使其成為兩半圓。溫度升高，則黃銅之膨脹較盛，故截斷之口向內部彎曲。再轉動兩端之螺旋，可依附在其上之錘，適宜位置。



又時鐘之擺，亦須有一定不變之長度，其時間方能準確。溫度升高，擺如因膨脹增長，則振動之周期將亦隨之延長，結果將使時針之進行遲緩。表內所用之擺輪，其性質亦同，為輪之半徑增大，則其轉動慣量（moment of inertia）亦隨之加大，結果亦使其進行遲緩。為避免此種影響起見，通常對於擺及擺輪，均用兩種不同之金屬，適宜配合使用，如圖二一五及二一六所示，是為補償擺（compensated pendulum）。又有一種合金名因乏鋼（invar）係由 64% 之鋼及 36% 之鎳合成，其膨脹係數特別微小，故亦可用之製造鐘表之擺。

火車鐵軌接合之處，及鐵橋之端，均必留有少許空隙，不能封滿。因鐵之膨脹係數遠大於地面，夏日酷暑之時，如無此等空隙，軌道或橋必因膨脹結果而生彎曲，即不堪使用。

固體除長度膨脹，即所謂線脹係數（coefficient of linear expansion）而外，尚有體膨脹，其體脹係數（coefficient of cubic expansion），可由線脹係數計算之。即體脹係數均等於線脹係數之三倍。又中空之容器如玻璃瓶等，受熱膨脹時，可將其內部容積，看作即用玻璃充滿，加以計算，當與實際，大致不差。

## 二 流體之膨脹

水銀溫度計管內之水銀面，隨溫度而昇，此時水銀固然膨脹，同時玻璃亦有其膨脹，但玻璃之膨脹係數在於水銀膨脹係數之下，故液面即以兩者之差昇高。不僅水銀與玻璃為然，一般之液體其膨脹係數均較固體之膨脹係數為大。

液體中以水之膨脹最無紀律，其膨脹係數隨溫度而變，在攝氏四度以下，並成為負數。換言之，由  $0^{\circ}\text{C}.$  至  $4^{\circ}\text{C}.$  之間，不特不膨脹，轉而收縮，超過  $4^{\circ}\text{C}.$  以後，方開始膨脹，故水之密度以  $4^{\circ}\text{C}.$  時為最大。冬季湖水或池水結冰之時，因密度大之冰水，在於表面近傍，而密度最大之  $4^{\circ}\text{C}.$  之水，均在池底或湖底，故僅限於表面一部分之水結冰。 $4^{\circ}\text{C}.$  之水，因其密度最大，故質量，重量之單位，及比重之定義，均用之。即一克云者，從精密言之，係  $4^{\circ}\text{C}.$  之水一立方厘米之質量，而一克之重則為其重量。又一切物體之比重，均係對  $4^{\circ}\text{C}.$  之水而言，

### 液體之膨脹係數

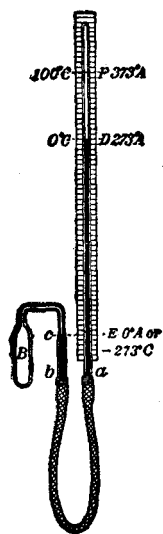
物質	體膨脹係數	物質	體膨脹係數
醚	0.00163	甘油	0.00050
烴	0.00124	水銀	0.00018
醇	0.00110	水 ( $20^{\circ}$ )	0.00018
石油	0.00092		

亦不待言。

氣體之容積變化較液體更為顯著，最初製造溫度計所利用之物質即為空氣，由此一點已足知之。法國之查理 (Charles) 於一八七七年取各種氣體一一加以實驗，發見其膨脹係數恆一定不變，與氣體之種類無關。其後於一八〇二年，再經給呂薩克 (Gay-Lussac) 加以精密之檢查，結果量得各種氣體溫度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，則其容積膨脹之量，等於在  $0^{\circ}\text{C}$  時之容積之  $\frac{1}{273}$ 。

一方面氣體如受壓力作用，則其容積當生收縮。故當溫度升高之時，如保持其容積使成一定，即可測得其壓力之增加。如第二一七圖所示之器， $\text{C}$  內容氣體，周圍用冰包圍，其次改用沸騰之水蒸氣包圍，提高或降低導管內之水銀面，務使其左端管內之水銀面，恆與一玻璃針之尖端相接觸。即恆在  $\text{C}$  點上。由左右兩管中之水銀面之高差，即可算出其內之壓力增加為若干。

試命  $\text{S}_0$  表  $0^{\circ}\text{C}$  時之容積， $\text{S}$  表其壓力。假定保持  $\text{S}_0$  之值，使其不變，而將其溫度



圖二一七

由  $0^{\circ}\text{C}$ . 升高至  $t^{\circ}\text{C}$ . 則其容積之膨脹應為  $v_0 + v_0 \alpha t = v_0 (1 + \alpha t)$ 。此中之  $\alpha$  表膨脹係數。其次再假定保持溫度  $t$  之值，使其不變，而將其壓力由  $p_0$  變至  $p$ ，因此其容積亦不得不變，以  $e$  表之則由波義耳定律得

$$pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t)$$

此式表氣體之壓力，容積及溫度間之一般關係，通稱之為波義耳查理定律 (Boyle-Charles' Law)。

假使  $\alpha$  之值確等於  $\frac{1}{273}$ ，並無少許誤差，又假使上述之波義耳查理定律對於任何情況均可完全適用，則當溫度  $t$  成於  $-273^{\circ}\text{C}$ . 之時，與之相當之容積  $v$  應成爲零。通常即以此  $-273^{\circ}\text{C}$ . 之溫度，定爲絕對零度 (absolute zero)，而由此計算之溫度，則稱爲絕對溫度 (absolute temperature)。(參照本章第八節及第九節) 以  $T$  表之，即  $T = 273 + t$ ，故波義耳查理定律成爲

$$pv = p_0 v_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) = \frac{p_0 v_0 T}{273}$$

或作

$$\frac{pv}{T} = \frac{p_0 v_0}{273}$$

右端之  $20^{\circ}\text{C}$  之值，對於各種氣體，恆有一定不變之值。

又溫度  $0^{\circ}\text{C}$ ，壓力等於一大氣壓即等於水銀柱高 76 厘米時，稱爲標準狀態 (standard condition)。

### 第三節 熱量及比熱

觀測溫度變化之各種現象，而加以研究之時，除用表示冷熱程度之量，即溫度而外，尚須使用另外一種概念，是即熱量 (Heat)。受熱後之物體，放在空氣中，當漸次冷卻。最初對於此現象加以研究者，爲牛頓，時在一七〇一年。當時曾假定冷卻之速度，與物體溫度及周圍溫度之差爲比例，又與物體之表面積爲比例。其後更經多數之人，繼續研究，發見物體受熱或冷卻之速度，隨物質種類而異，水銀較其他之輕液體爲速，銅、黃銅、鋅之類，較其餘各種金屬爲速。惜當時對於溫度與熱度之差別，尙未明瞭，甚至有信除熱量而外，尙有一種冷量存在者。闡明溫度與熱量之關係者，爲英國之布拉克 (Black)，時在一七五七年。



圖二一八 布拉克。

有之熱容量 (thermal capacity) 各不相同。

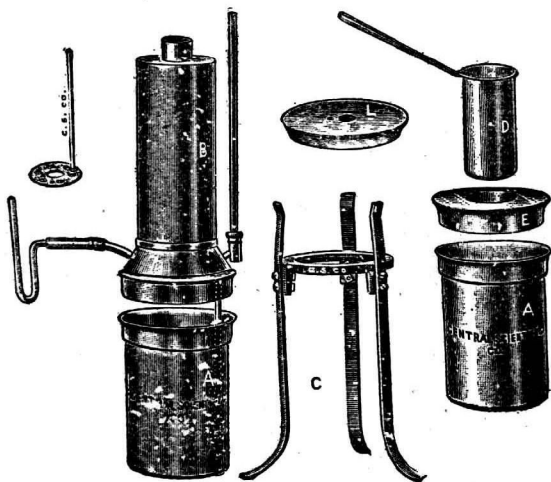
布拉克之思想，在今日固視爲當然之事，但在當時，實不能不謂爲卓見。又風之本身並不寒冷，乃人體中之熱，爲空氣取去所致；皮裘本身，並不溫暖，乃人體中之熱，爲其保留，故不覺寒，此等解釋，亦出之布拉克。

使水一克之溫度升高  $1^{\circ}\text{C}$ ，所要之熱量，取作熱量之單位，稱之曰一卡 (calorie)，其 1000

互相接觸之物體，具有成爲等溫之傾向，由於熱量欲成平衡使然。但各物體所具有之熱量各不相同。例如  $40^{\circ}\text{C}$  之水，與  $60^{\circ}\text{C}$  之水銀，以等量混和時，其混合後之溫度，並不成爲兩者之平均值，即  $50^{\circ}\text{C}$ ，而等於  $40.6^{\circ}\text{C}$ 。此時水所取得之熱量，當然非等於水銀所失去之熱量不可。由此可知同一質量之水，與同一質量之水銀，所具

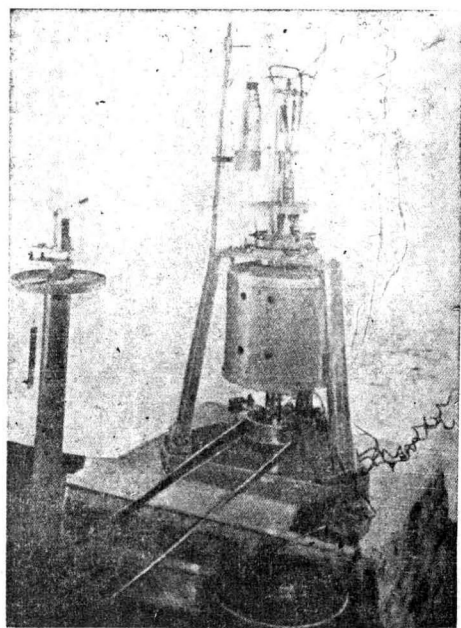
倍曰一仟克卡。(Kilogram calor.) 又使各種物質之溫度升高  $1^{\circ}\text{C}$ 。所須要之熱量，與使等量之水之溫度升高  $1^{\circ}\text{C}$ 。所須要之熱量之比，曰各物質之比熱。(specific heat)。各物質之比熱如下表：

錳	0.029	玻璃	0.19	水蒸氣	0.329
銀	8.055	醋	0.58	錫	0.052
鎳	0.106	空氣	0.169	鐵	0.105
汞	0.033	鉛	0.032	木料	0.7
炭酸氣	0.155	鋅	0.092	汞汽	0.75
金、鉛	0.031	鋁	0.214	氫氣	2.37
銅	0.091	海水	0.94	氯	0.748



圖二一九 卡計。

受熱之物體投入水中，由溫度之升高，以量度其熱量。



圖二二〇 精密之卡計。  
最近新金山(melbourne)大學  
測定熱功當量時使用之儀器。

表中關於氣體者，係就一定容積之比熱而言。  
由表可知，大多數之物質，其之比熱值，均較一小，其中以水之比熱為最大，即受熱固不易，冷卻亦較難。由此可知，通常用水使其他物體冷卻，及利用沸騰之水使其保留其熱量，均極便利。海岸地

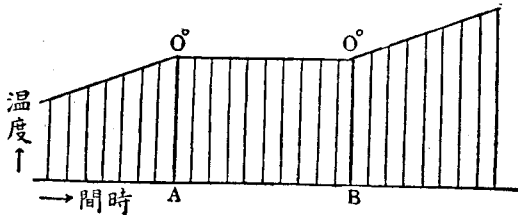


方，氣溫變化不大，反之，山地之氣候，則變化極易，亦由於此。

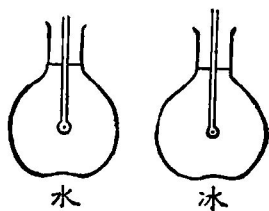
#### 第四節 由溫度而生之狀態變化

##### 一 溶解及凝固

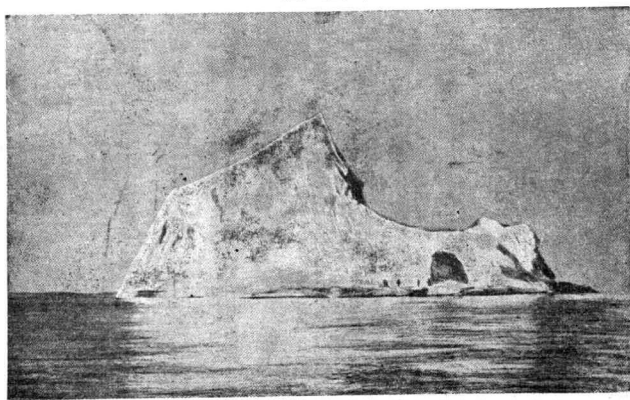
冰熔則成水，水凝則成冰，此為日常經驗之現象。布拉克對於此等現象，曾加以詳細之實驗研究，其結果如下：試將一溫度計插入冰塊中，放在溫暖之處，即見其溫度升高甚速，但昇至  $0^{\circ}\text{C}$ 。即暫時停止，不復再行昇上，直至全體之冰，盡化為水為止，溫度計所示之度數，決不轉變。全體之冰悉成爲水以後，溫度又漸次升高，其狀況圖如二二一所示。當此期間之中，冰塊由其周圍同樣得熱，設將冰塊懸住，即見有寒冷之空氣，自其下方不絕流過，不問冰塊溫度在  $0^{\circ}\text{C}$ 。以下，或  $0^{\circ}\text{C}$ 。以上，及保持  $0^{\circ}\text{C}$ 。之期間中，均如此。由此可知，當其保持一定不變之  $0^{\circ}\text{C}$ 。



圖二二一

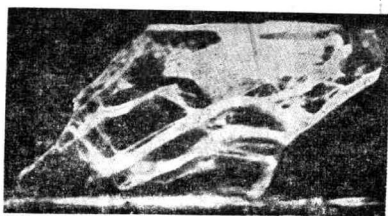


圖二二二



圖二二三 大冰山。

冰浮在水面上時，其在水面以下之部分之容積，約為水面上之部分之容積之 11 倍半。



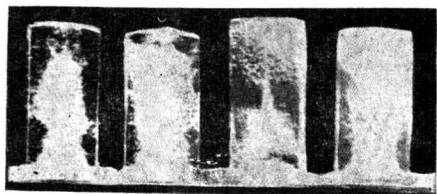
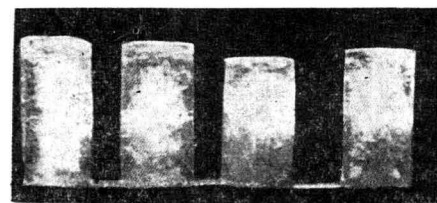
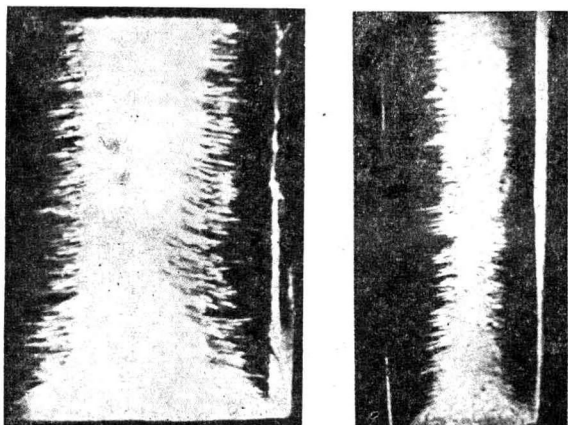
圖二二四 冰之結晶。

之溫度時，由外面取得之全部熱量，均耗消於使冰熔化上，故不使其溫度昇高。

布拉克爲欲量度冰熔化時所要之熱量，遂作下述之實驗。如圖二二三所示，用兩個相等之燒瓶，一瓶內盛  $0^{\circ}\text{C}$ . 之冰，一瓶內盛  $0^{\circ}\text{C}$ . 之水。將兩瓶放在溫度  $20^{\circ}\text{C}$ . 之房內。歷時  $t$  時間後，水之溫度，昇高  $4^{\circ}\text{C}$ .，而冰則須歷其  $20$  倍之時間後，方能全部熔盡。假定在此時間之中，由外面進入瓶內之熱量，始終一樣，在同一時間內進入兩瓶中之熱量，彼此相等，則使冰熔盡所必須之熱量，當等於使同量之水之溫度昇高  $1^{\circ}\text{C}$ . 所須之熱量之  $80$  倍。

不僅限於水如此，即對於其他之物質，作同樣實驗，結果亦復相類。凡使物質開始熔化之溫度，曰各物質之熔點 (melting point)，使各物質一克熔化成爲液態所要之熱量，曰熔解熱 (heat of fusion)。各物質之熔點及其熔解熱，如下表：

物質	熔點	熔解熱	物質	熔點	熔解熱
	(每克卡)	(每克卡)			(每克卡)
鎊	$3500^{\circ}$	—	鉛	$657^{\circ}$	$80$
鈦	$2300^{\circ}$	—	鉛	$327^{\circ}$	$5.4$
鉑	$1755^{\circ}$	$27.2$	錫	$232^{\circ}$	$14.0$
鐵	$1530^{\circ}$	$60$	錒錫	$194^{\circ}$	—
鎳	$1451^{\circ}$	$46$	伍德齊	$66^{\circ}$	—
銅	$1083^{\circ}$	$41.6$	水	$0^{\circ}$	$80$
金	$1064^{\circ}$	—	汞	$-39^{\circ}$	$2.8$
銀	$961^{\circ}$	$21.1$	醇	$-118^{\circ}$	—

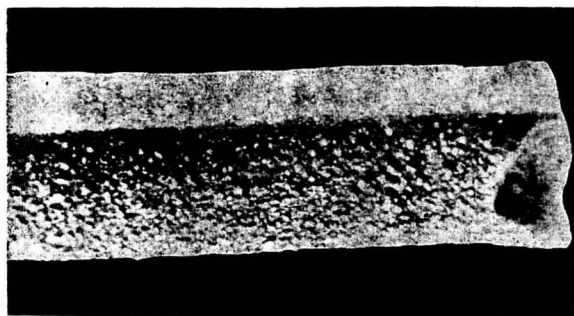


圖二二五 徐徐冷却之冰。

黃銅管內盛水，使其徐徐冷却，即成此狀。

觀表可知冰之比熱既大，其熔解熱亦大，確堪注目。假使不然，則氣溫一旦冷至  $0^{\circ}\text{C}$ ，全部之水，必當立即凝結成冰，而山地所積之雪，一遇氣溫升高，必當立即熔盡成水，其災害不難想像而得。又冰之比重較水為小，則由於凝固時所生之體積膨脹而來。冬季遇嚴寒時，水若全部凍結，則瓶破自來水管裂開之事，時有所聞。尙幸水之熔解熱為值頗大，若等於水銀等類之值，則其為害，當更頻繁矣。

大多數之物質熔解時必伴之以體積膨脹，凝固時必伴之以收縮。就此一點而言，水亦為例外。水在地球上，為量極多，且對於人類生活上，又為必不可缺少之物，而其性質竟如上述，與其他物質迥不



圖二二六 炭之熔解。

拉洛札於一九一一年在高溫度使炭棒彎曲之實驗。此僅僅足以表示炭棒之粘性增大，是否成為真正之熔解，尙未可斷言。但溫度升高至  $3000^{\circ}\text{C}$  以上時，其表面當作圖中所示之狀況。即看作熔解，亦無不可。但一方面又可看作炭由昇華而成之蒸氣，凝固成為固態時之狀況。

相同，是亦自然之具有深意之事也。

當凝固時轉起膨脹者，除水而外，尚有鐵，銻，及錒等。例如鑄鉛字用之物質，即鉛與銻之合金，鑄入銅模中，候其冷卻凝固，即由膨脹作用，而成鮮明之活字。

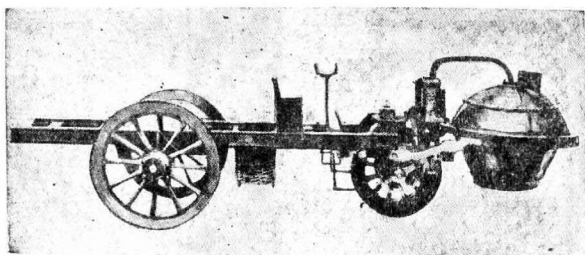
在化學上有極其複雜成分之物質，如玻璃，如蠟，如膠等，其熔點頗不明瞭，先經過一種粘體之狀態，然後始變為液體。又合金之熔點，一般均較其各成分金屬之熔點為低。錒合金屬用之錒錫，為錫與鉛之合金，因其熔點甚低，故極合於用。又有一種伍德齊 (Wood's alloy)，由錫，鉛，鈣及銻合成，雖在沸水中，亦立即熔解，以是著名。

水溶液凝固時之溫度，一般均較純粹水之冰點為低。河中之水雖易結冰，而海水則難，即屬此理。又凡製成熔液之時，必吸收相當之熱。例如使三克之冰，與一克之食鹽，混合攪勻，則其溫度可降下至於  $-22^{\circ}\text{C}$ ，可用之以使其他物體冷卻，通稱之為冷劑 (freezing mixture)。夏日製造冰淇淋 (ice cream) 時，即用此法。又氯化鈣與冰作 3:1 之比例混合時，可生  $-55^{\circ}\text{C}$  之低溫。

## 二 沸騰及氣化

煮水則有氣泡自水底升起，自水面逸出，此為日常所見之事，在古時以為此項氣泡係水中所含之空氣。假使果係空氣，則煮水既久，水量亦減，最後至於涓滴不餘，應均成為空氣，是水由空氣而成，其不合理明甚。最初對於水之沸騰 (boiling) 現象，加以研究，闡明其理者，仍為前述之布拉克。據其所說，則沸騰僅液體化為氣體之現象而已。且證明沸之時，液體之溫度恆保持一定不變之值，與熔解進行中溫度一定之情況相同。故在沸騰進行中所加之熱量，全部消耗於使液體化為氣體，即成為氣化熱 (heat of vaporization)。而氣化熱之值，遠在熔解熱之上，使水一克悉化為蒸汽時，共須 536 卡之熱。又當水氣化之時，其體積之膨脹，頗為顯著。當溫度成為  $100^{\circ}\text{C}$ . 時，水之密度等於  $0.958$  每立方厘米，而同溫度之水蒸氣之密度，不過  $0.589$  每立方厘米毫克而已。故水蒸氣之容積，達於水之 1800 倍之多。水在鐵瓶內煮沸時，蒸汽可以衝動鐵瓶之蓋，即由於此。

利用水蒸氣之壓力，使其做功，係法國人帕旁 (Papin) 於一六八九年最初想到。蒸汽機 (steam engine) 及輪船 (steamer) 均由此人創成。但其後加以改良，使其能供實際使用者，則為英國之瓦特 (James Watt) 於是遂誤傳以為蒸汽機係瓦特所發明。蒸汽機係利用水蒸氣之壓力，使活塞在



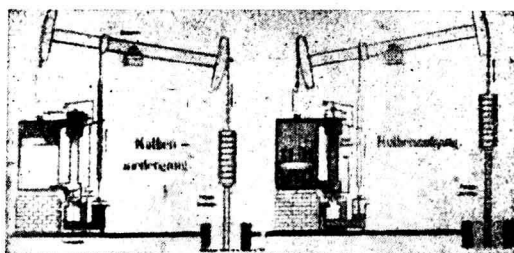
圖二二七 最初之火車。

此圖爲一七六五年，法國之庫諾(Cugnot)製成之車。用以輸送大炮，一時間可行四公里，是爲後來蒸汽機車發明之先驅。



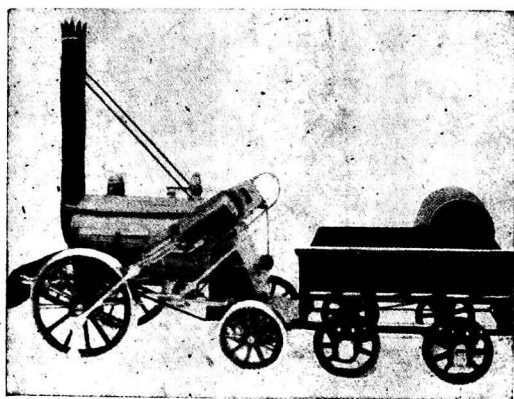
圖二二八 瓦特。





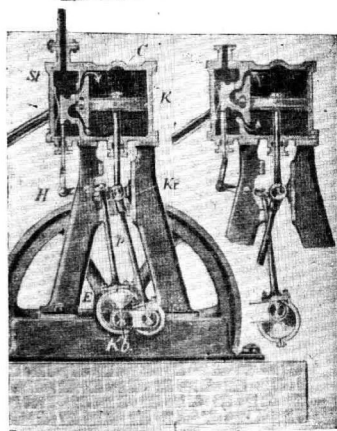
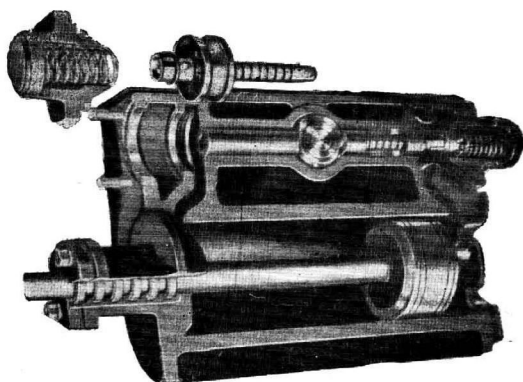
圖二二九 瓦特之蒸汽機。

此為一八一三年製成，用以汲取礦坑內之水，功率為20馬力。



圖二三〇 最初之蒸汽機車。

英國之史蒂芬孫 (Stevenson) 製造，於一八二五年九月二七日，開始在斯托克敦 (stockton) 及達林敦 (Darlington) 間建成之鐵路運轉，搭載客商，圖為一八二九年製成者。



圖二三一 蒸汽機之截面。

St 蒸汽導管；

O 汽筒；

K 活塞；

S 飛輪。

圓筒內交互往復，由此牽動車輪，使其運轉，如圖二三一所示。成爲鐵路上之火車頭，及工場中之發動機，爲世所知。又蒸汽唧筒，(steam pump)，亦與此相類，即使活塞之運動，逕直應用於水唧筒上而成。圖一七六所示之蒸汽輪機(steam turbine)，係使噴出之水蒸氣，衝動水車上之葉板，使其轉動，在種種方面上，均較蒸汽機爲優，故較近異常發達，軍艦及大船上之發動機，均採用之。

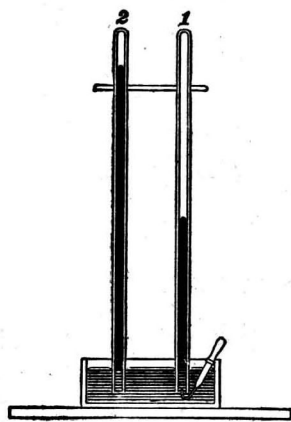
液體除沸騰而外，由其表面，隨時有汽，陸續發出，並無一刻停止，此現象曰汽化，(vaporization)爲水潤濕之物，任其放在空氣中，不久自能乾燥，卽由於此。如轉移至日光直射之處，或火爐近傍，其乾燥更快，卽溫度愈高，乾燥亦愈速。又在雨天，空氣雖溫暖，亦不易使濕者乾燥，但若放在空氣流通甚便之處，使不含水汽之空氣，由其近傍不絕流過，則乾燥卽速。由此項事實，可見液體之汽化與否，與其周圍之



圖二三二 現今鐵路用火車。  
此圖爲德國之特別快車用火車頭。

空氣含有此種液體所成之汽之程度，有密接之關係，達於一定密度以後，汽化即完全停止。如是之狀態，曰汽之飽和，(saturation of vapour)，此時所具之壓力，(satiated pressure) 亦稱最大汽壓(maximum vapour pressure)。

飽和壓力之存在，及其值與空間中有無其他之氣體存在無關，等類事項，均係一八〇九年英國之達爾頓(Dalton)所闡明，可由圖二三所示之實驗證明之。在水銀槽內，豎立玻璃管，造成托里拆利之真空，由管底送入少許之水，使其由管內之水銀面上，達於托里拆利真空中，立即汽化，成爲水汽。其壓力達於飽和壓力爲止，汽化均照常進行，即以其壓力使管內之水銀面降下。如送入之水，超出此量，則昇至管中之水銀面上後，不復汽化，仍保持其液態，在於水銀面上。又加送入酒精或醚等類液體，試之，其水銀面之降下，達於與此等汽之飽和壓力之和相等之處爲止。

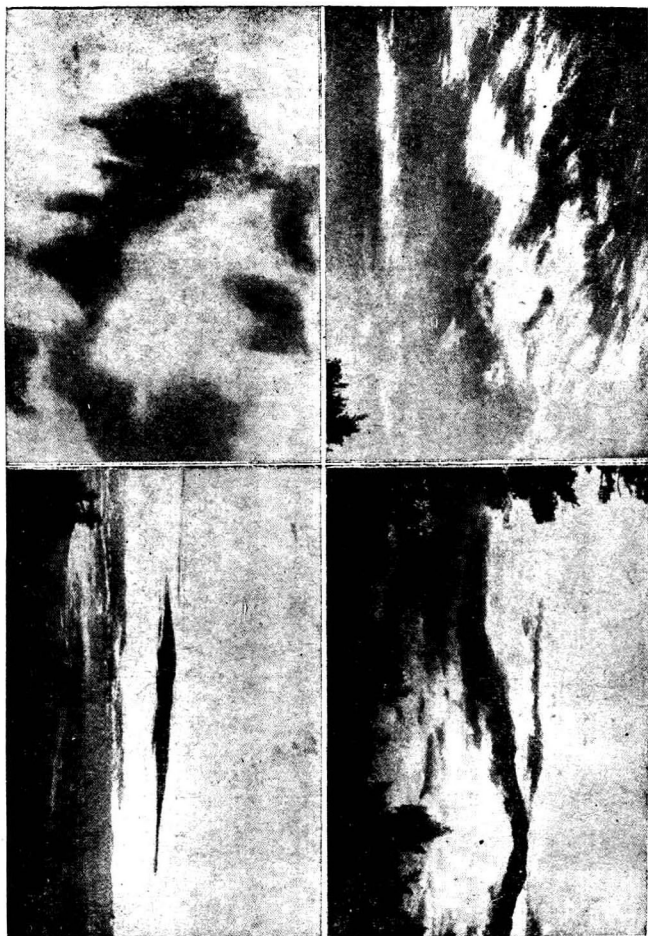


圖二三三

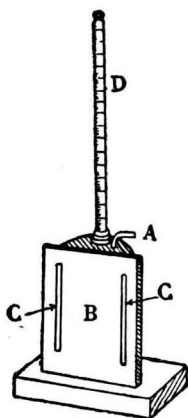
其次溫度愈高，則乾燥愈速之現象，亦可由飽和壓力說明的。因飽和壓力，隨溫度共增，故在低溫時，雖已達於飽和，但溫度升高，又可再行汽化故也。此項關係，係達爾頓及其他多數學者研究而得。盛醴之瓶，有時因氣溫驟昇，自行拔脫，亦由於此。

大氣中含有之水汽分量如何，即其乾濕程度如何，對於吾人身體之衛生上，以及其他日常生活上之各種事項，均極重要。但乾濕之程度，即濕度 (humidity)，不能僅以空氣中含有之水汽分量為斷，尚須視其距離飽和狀態之遠近如何，方能決定。通常以大氣中現有之水汽壓力，與同一溫度之飽和壓力之百分比，定為此時之濕度。降雨固可使大氣潮濕，但除此而外，氣溫降低時，亦未嘗不可使濕度增加。晴夜多露，由於空氣中水汽已超過其飽和量，凝結而成。夏日盛冰之盃，外面滿佈露滴，其理亦同。反之，密閉之室內，如其溫暖，則濕度為之大減，非另外供給水汽，保持適宜之濕度不可。

溫度 (°C)	飽和壓力 水銀柱高(毫米)	濕度與水蒸氣之飽和壓力間之關係
0.0	4.5	
52.2	102.8	
100.0	760.0	
100.7	777.1	
111.7	1131.6	
131.4	2094.7	
148.3	3359.5	

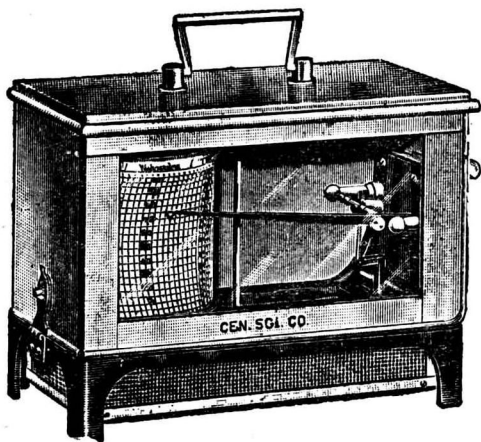


圖二三四 雲及霧，在威爾遜 (Wilson) 山頂照得之相片。



圖二三五 耶布勒門特濕度計。

A 空氣送入口， B 金屬面，  
C 間隔， D 水銀溫度計，

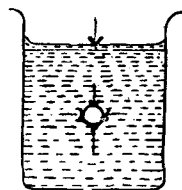


圖二三六 毛髮自記濕度計。

大氣中含有之水氣，當氣溫降下，開始凝結成露，此時之溫度曰露點 (dew point)。露點若在  $0^{\circ}\text{C}$ . 以下，則水汽即凝結成霜。又雲與霧，均為水汽凝結成爲顆粒之現象，而雪與霰，則爲雨水凍結

之現象。

欲量度濕度，只須求得空氣之溫度及露點即得。圖二三五所示之器，為濕度計 (hygrometer)。金屬容器內盛醚，吹入空氣，使醚汽化，則於金屬表面上，有露滴現出，由溫度計讀出此時之溫度，即得露點。此外尚有乾濕球溫度計 (dry and wet bulb thermometer)，由潤濕布上汽化，使溫度降下。又有毛髮濕度計 (hair hygrometer)，則係利用毛髮遇濕則其張力減小，均可量出濕度。



二三七

至於汽化，飽和壓力及溫度之關係，可由下述之理推之。液體之溫度升高，則其飽和壓力隨之而增，同時汽化進行之勢亦盛。如飽和壓力已超過大氣壓力，則即成為沸騰之現象。因此時液體內部所生之汽泡，即飽和泡，能與周圍之壓力抵抗，維持其存在故也，如圖二三七所示。故作用於液面之壓力增大，則液體之沸騰，亦隨之升高。水汽之飽和壓力，係溫度 100°C. 時，等於 760 毫米，即 1 大氣壓，故通常之水在 100°C. 時，等於 760 毫米，即 1 大氣壓，故通常之水在 100°C.

水之沸騰與壓力之關係

壓力	沸點 (°C.)
355 (毫米)	80
760 ,,	100
2 (氣壓)	120
5 ,,	152
195 ,,	360



之溫度發生沸騰。在高山上，大氣壓大減，故未達  $100^{\circ}\text{C}$  以前，水已開始沸騰，在山上煮飯，不能煮熟，即由於此。反之，壓力增大，則沸點亦高。此等之關係如上表所示。

汽化時之須要汽化熱，亦與沸騰時同。以手浸入水內，感覺其冷，即由於水所須之汽化熱即取給於手所致。人造製冰機，係使液態氣噴出，吸收大量之汽化熱，周圍之水，失去此項熱量，遂凝結成冰。

反之，由汽液化 (liquefaction) 之時，當放出其氣化熱。每當雨雪之前，必覺悶熱，即由於此。又汽管係使汽罐內造成之高溫汽，經由鐵管送入室內，使房中溫暖。此汽在房內之鐵管中，發生液化，更放出大量之熱。

### 三 臨界狀態及非常低溫之實現

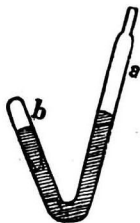
溫度升高，則飽和汽之壓力及其密度，均隨之增大。由此事實係有法國之加尼阿爾得拉屠爾於一八二二年作一實驗，以為使壓力及溫度，增至相當之高，即可使汽之密度與液體密度，相差不遠。其使用之器如圖二三九所示。玻璃管之  $\frac{1}{2}$  一部分盛酒精或醚，其下為水銀他一端之  $\frac{1}{2}$  內，封

有少許空氣，使其受熱。由空氣之容積壓縮程度，可以量度管內之壓力。於溫度  $100^{\circ}\text{C}$  時，醚之全部變為汽，其容積約為液態時之容積之二倍，其壓力則等於  $3.8$  大氣壓。若為酒精，則須  $207^{\circ}\text{C}$  之溫度，始成同一狀態。此時之氣壓則等於  $11.6$  大氣壓。若為水，則須達於錳之熔點，始完全失其液態，此時汽之容積約等於當初之四倍。



圖二三八 壓力鍋。

使鍋內發生之汽，不致外洩，俾其內  
部壓力增大，沸點亦隨之升高。



圖二三九

其後更經多數之人，用硫化氫，氯氣，氟，碳酸氣等，作此實驗，成功其液化。關於此類氣體之液化，有一極重要之特質，係一八

六九年英國之安德魯茲

(Andrews) 所發見。安德魯

茲曾作實驗，使碳酸氣在各

種溫度之下液化，但在  $30^{\circ}\text{C}$ .

$92^{\circ}\text{C}$ . 以上，無論壓力如何

加大，終不成功。反之，如在

$30^{\circ}\text{C}$ . 以下，則液化極易。

即溫度高時，其飽和壓力非

常之大，故若達於某一溫度

以上，即成爲不可能。對於液



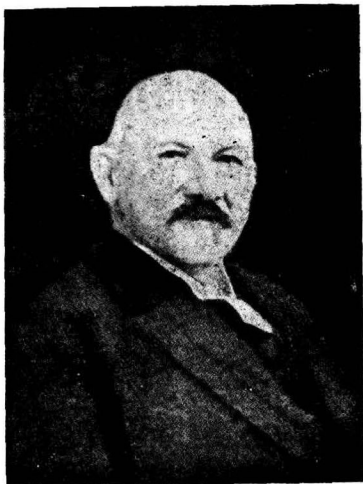
圖二四〇 杜瓦耳。

化之此項限度，經安德魯茲定名曰臨界溫度（Critical temperature），以為各種物質，各有一定不變之臨界溫度。凡在臨界溫度以下，即通常所謂之汽，而超過此溫度者，即為純粹之氣體。當時信為空氣、氧氣、氫氣及氮氣等，均係永久氣體（permanent gas），決不能使其液化。實則不過其臨界溫度甚低，不易達到而已。假使能得充足之低溫則其液化，未嘗不能實現，其後於一八七七年經法國之批克推（Pictet）及卡耶特（Cailletet），始成功氧氣之液化。再後於一八九五年林得（Linde）成功空氣之液化，杜瓦耳（Dewar）於一八九八年，成功氫氣之液化，一九〇八年荷蘭之溫涅斯（Onnes）成功氦之液化。於是一切氣體均實現其液化矣。茲將各種氣體之臨界溫度，臨界壓力及沸點，列表於下：

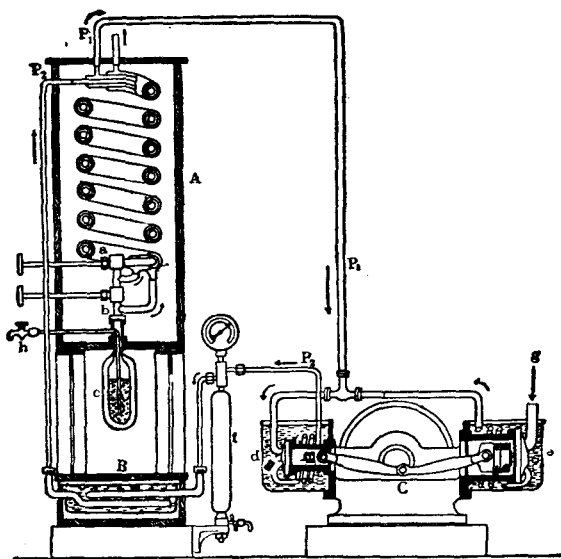
氣體	臨界溫度		臨界壓力		沸點
	(大氣壓)	(大氣壓時)	(大氣壓)	(大氣壓時)	
水汽	364.3°	194.6	100.0°	34	105.7°
氮	120°	115.0	33.5	—	191.0°
碳酸氣	31.4°	72.9	79.0	19	252.8°
氫氣	—118	50.	—182.4	28	—268.7°

觀上表可知，欲使上述各種氣體，實現其液化，必須設法造成非常之低溫。造成低溫之原理，則爲一八五三年經焦爾及凱爾文（Lord Kelvin）發明之氣體絕熱膨脹（adiabatic expansion of gas）將氣體加以強力之壓縮後，使其由極狹窄之處噴出。此時外部無暇供給以熱，即行膨脹，故其膨脹所須要之功，只有取給於氣體本身所含有之熱，因此其溫度下降甚低。圖二四二所示之器械，即反覆應用此理而成之林得之空氣液化器。

液態空氣（liquid air）最初製成之時，全世爲之震驚。此項液態空氣，略帶青色，爲透明液體，在常溫下汽化極速，現爲汽狀，與沸騰狀況相同。如將水或酒精等之容器放入液態空氣中，立即凝成固體。將橡皮放入其中，亦成固體，失却其彈性。皮球浸在液態空氣內取出後，擲於地板上，立成



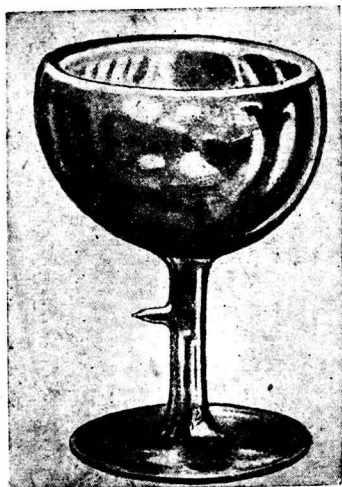
圖二四一 溫涅斯。



圖二四二 杜得之空氣液化器。

用唧筒  $O$  將空氣壓縮至 200 大氣壓後，用  $g$  使其冷卻，然後經由三重管內側通過，自活門  $a$  噴出，再經三重管之中側之管內通過，經由  $P_1$  返回最初之唧筒。

粉碎，宛如一玻璃球。然綿花浸入液態空氣內取出時，因其中之氮，沸點甚低，立即汽化，所殘留者，大都為氧，故一着火，即以猛烈之勢爆發燃燒。又利用此項沸點之差異，可由液態空氣內將氧氣與氮氣分別取出，工業上多使用此法。



圖二四三 液態空氣之容器。



圖二四四 液態空氣之汽化。

### 第五節 熱之移動

物體與其周圍之溫度相同時，是爲熱平衡 (Thermal equilibrium)。除在熱平衡之狀態而外，熱恆移動不已。此事與水頗相類，水之表面如在同一之水平面，則成靜止，否則恆由高處流向低處。

熱之移動有種種方法，視其情形而定。將火鉗放入爐內，則由着火處，熱漸移向鉗柄之一方，此種熱之移動曰熱之傳導 (conduction of heat)。傳導之狀況，當然隨物質之種類而有不同。火鉗等類之金屬棒，其導熱雖極容易，但若加一木柄，則柄之溫度，歷久亦不昇，縱昇亦不高。故由其導熱程度，可將物體區分爲良導體 (good conductor) 及不良導體 (bad conductor)，亦略稱爲導體 (conductor) 及非導體 (non-conductor)。但此兩者之間，本無一定之明瞭界限，孰爲導體，孰爲非導體，實無良法爲之區別。冬日嚴寒，以手觸及金石，即覺其冷，因手上之熱移入物體，爲其傳導而去所致。身着皮裘或毛絨物，則覺其暖，因此等物體，及其間之空氣，均爲非導體，可防止身體之熱不致傳導而出所致。

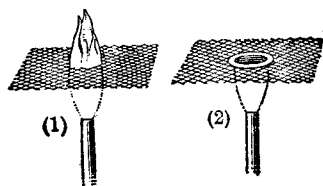
水滴落在燒紅之鐵板上，則成爲球狀，轉動不已，此現象曰球騰態 (spheroidal state)。因此時



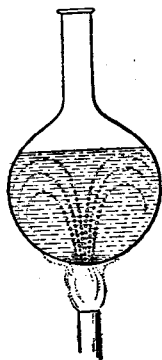
鐵板之溫度甚高，由水滴下部汽化而出之水汽，將此水滴支住，故水滴與鐵板，並未直接接觸。水汽為非導體，不特鐵板上之熱，不能立即傳導至水滴之上，即令有少許傳來，亦將消耗於使水汽化所須之汽化熱上，故水滴之溫度不能昇至其沸點近傍。有種變戲法之人，可將其手，插入業經熔化之鉛內，亦不覺苦，實則先將其手浸在水內，然後放入鉛中，利用此種球騰態之原理，使手與鉛，並不直接接觸，故鉛之熱，不能傳導至於其手而已。

將鐵紗等類金屬線織成之網，

放在酒精燈之火焰上，如圖二四五所示；則網下雖有火焰，網上竟被其隔斷，不復存在。此乃焰中之熱，受網之傳導作用，移至網之全部，故在網上之氣體，溫度已降至發火點以下，不能燃燒。炭坑內使用之安全燈，



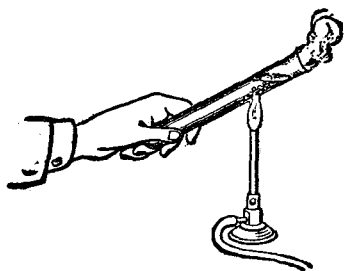
圖二四五



圖二四六 對流。

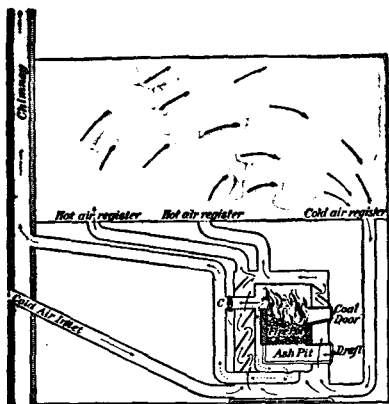
(safety lamp) 即利用此理而成，於燈外包裹金屬網一層，可以防止外面之氣體，不致爆發，如圖二四六所示。

關於熱之傳導之理論，有法國之俾奧 (Biot) 於一八〇四年之研究，是為最始。後至一八二二年，由傅立葉 (Fourier) 始為之完成，即在物質內部，經由單位面積，於單位時間內通過之熱量，



圖二四七

加熱於下部則生對流，加熱於上部則否。

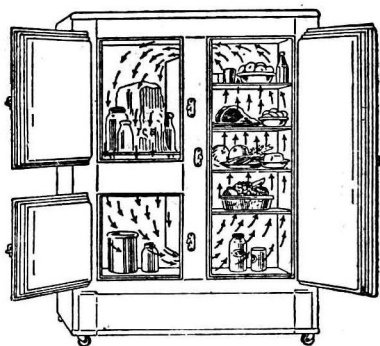


圖二四八 煤爐所生之熱之對流。



圖二四九 烟升起之狀況。

使二甲基烴(xylene)燃燒時發生之烟。就全體而言，固屬直上，但就其各個部份而言，則成此複雜萬般之狀況。



圖二五〇 冰箱內熱之對流。

例。與每隔單位距離之溫度差成正比，與物質所特有導熱係數(thermal conductivity)為正比。

流體受熱，則生膨脹，輕者升起，冷而重者，流來為之補充，熱亦隨之而生移動，此時之移動，與傳

導不同，須伴物質之移動而生，如是之現象曰熱之對流 (convection of heat)。煮水使沸，必須自容器之底加熱，始能發生此項對流，全體溫度上昇極速。反之，如自其上部加熱，則熱僅能由傳導作用移動，歷久亦不能煮熟，如圖二四七所示。用火盆或火爐等生煖時，在使室內之空氣由對流作用，全體之溫度昇高，其作用亦與此同，如圖二四八所示。又爐竈上常加一圓筒形之烟窗，其目的亦在使其發生對流，因此促進火之燃燒。又如圖二五〇所示之冰箱，冰塊均放在箱中之上部，由此發生對流，使箱內全部空氣之溫度爲之降下，用以保存食物，俾免腐敗。

大氣中遇有不平均之溫度發生時，則由對流作用成爲風，海洋中遇有不平均之溫度發生時，則由對流作用成爲潮流。海水之比熱較陸地爲大，故晝間雖同樣受太陽之熱，但其溫度不及陸地爲高，夜間散熱，亦不及陸地爲易。在海岸地帶，晝間有風自海面向陸地吹來，晚間與此相反，由陸地向海面吹去，亦由於此。當此晝夜交替之一瞬間，海面與陸地成同一之溫度，故在此時，無風發生。就地球全體觀之，則赤道地方受太陽之熱最強，其處之大氣昇起，由兩極地方，有冷空氣流來，以作補充，於是遂成爲貿易風。又遇大火災時，每有風起，其理亦同。

熱之移動，除上述之傳導及對流兩種方法而外，尚有第三種方法，是爲熱之輻射 (Radiation of heat)。太陽之熱，達於地球，卽由此法。在其中途並無任何物質存在，且包圍地球之大氣，亦並未受其影響，太陽之熱，居然逕行移來，故與前述之兩種方法，迥然不同。高山之頂，恆較地面普通地方寒冷，卽空氣不受太陽熱影響之一確證。

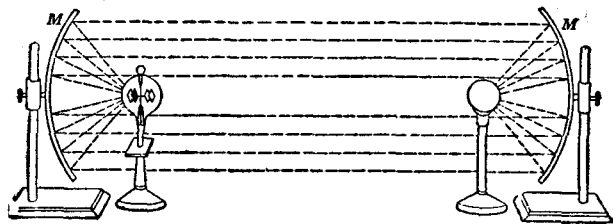
再由日光直射處與背日處比較觀之，雖相隔不遠，但溫度則頗懸殊，由此現象，可知輻射而來之太陽熱，係沿一直線進行。又太陽一爲雲蔽，立覺其涼，雲一移開，又覺其暖，由此事實，可知由太陽輻射而來之熱，在空間中進行異常迅速。此外，輻射而來之熱，在金屬表面上，可以起反射作用，遇透鏡形之物質，可以起折射作用，其性質與光同，（參照第七章光學。）

克希荷夫 (Kirchhoff) 於一六九九年曾作此項實驗，所用之透鏡直徑長在一米以上。用此物將輻射熱 (Radiant heat) 集中於一點，卽其焦點 (Focus)，如在此點上放木屑等類之物，則由熱而至燃燒，放水則生沸騰，放鉛銅等類金屬，則可熔化。除對太陽而外，又曾對於月光作同一之實驗，其結果亦能得相當之熱量，但不及太陽輻射而來者遠甚。

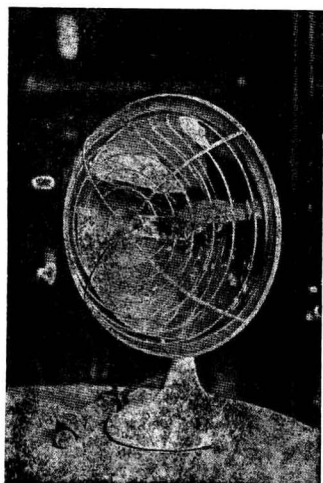
批克推 (I'et) 於一七九〇年曾用鋅製成大凹鏡 (concave mirror) 使兩面相對而立，如圖二五一所示，在一鏡之焦點上放一光源，在他一焦點上放一塗烟之溫度計，使兩者相隔二三米之距離，行此實驗，發見溫度計之溫度，立即升高。又用雪代火行之，則見溫度計立即降低。最初以為除熱之輻射而外，尚有與之相對之冷輻射，但不久即察知此時之溫度計，不過將其自身原有之熱失去而已。

以上各種性質，均表示輻射熱與光相同，其後更經多數學者，繼續對於此兩者之關係，加以研究，現今在物理上，已認定此兩者確為完全同一之現象（參照第七章第十節及第十四節。）

輻射熱尤以被黑色物體吸收最多，結果使吸收者之溫度升高。空氣以及玻璃等對於輻射熱，並不吸收，可以使其自由通過，與對於通常之光線相同。又白色之物以及磨光之金屬表面，對於輻射熱，均

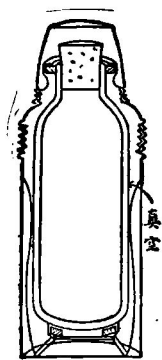


圖二五一 輻射之實驗。



圖二五三 反射電熱器。

用金屬製成之凹鏡將熱反射於室內。



圖二五三 熱水瓶。

使其反射而回。冬日地面所積之雪，先自踐污之處融化，其純粹白色之部分，可保留至於最後，即由於此。夏日由房頂或道路有暑熱之氣返射而回，其理亦同。

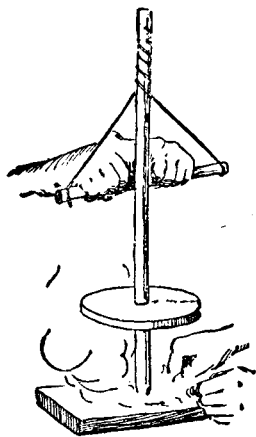
一切物體不問其溫度高低如何，均有熱由之輻射而出。經藍斐德 (Benford) 於一八〇五年及普勒服 (Provost) 於一八〇九年證明黑色之物體，其輻射熱最大。

欲阻止熱之移動，必須對於傳導對流及輻射三種作用，均盡力制止之。盛熱水用之熱水瓶

(thermo bottle) 即爲此目的而設。其壁爲玻璃，且製成兩重複壁，將其間之空氣用唧筒抽去，外側用銀鍍過。如圖二五三所示。兩重壁之間，既無空氣故可免却傳導及對流作用。外面鍍銀，可使外方輻射而來之輻射熱，反射而回。同時又可保持本身原有之熱，不致輻射出外。欲保存液態空氣，即非用與此同樣構造之容器盛之不可。

### 第六節 熱及功，能量不滅原理之推廣

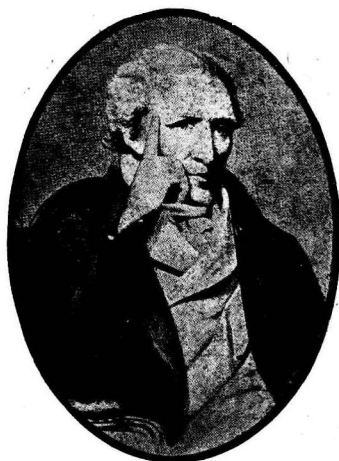
當古代尙未明瞭熱之本性究爲何物之時，即已知其與運動有一定之關係。鑽木可以取火（如圖二五四），鋸木後鋸齒發熱，均日常經驗之事實。但一方面又有一種學說，以爲熱係一種液態物質，而名之曰熱素 (plogiston)，頗具勢力。當一七六六年，英國之卡芬狄士 (Cavendish) 發見氫氣之時，竟有人以爲即係熱素，由此亦可想見信奉



圖二五四 鑽木取火。



此說之八之多。其後化學方面之知識，日遂增長，得知氫氣爲一種化學元素，同時亦悟及熱決非物質。藍斐德於一七九八年在德國之閔行兵工廠內，發見砲身穿孔之時，有大量之熱發出，遂加以實測，歷時兩小時又半，所得之熱，可使零度之水二六·五八磅（一磅等於四五三·六克）達於沸



圖二五五 藍斐德。



圖二五六 噶爾諾。

騰，或使二三〇三・八克之蠟燭，燃燒完盡。據其所言，此項之熱恰與一匹馬所作之功相當，但與其使馬作功而得此熱，不如即將供給馬之燃料，直接燃燒之，應得更多之熱。此項思想，實已表明熱與功間之關係，雖欠精確，但由此實驗，已足表明由摩擦作用，可以發生無盡量之熱，假使承認熱為物質，則此實為不可能之事。

蓋斐德對於熱之見解，其後漸次為多數學者所承認，至一八二四年，經法國之噶爾諾（*Carnot*）

求得熱與功之理論的關係後，今日之

熱力學之基礎，始克建成。實際上與一卡之

熱，相當之功，即熱功當量（mechanical

equivalent of heat），其值一定不變，此關

係出於德國之醫師邁爾（Robert Mayer），

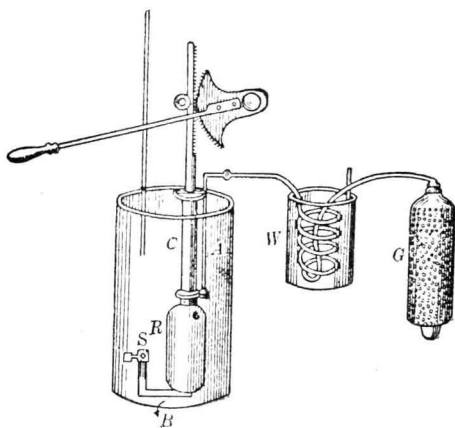
其量度方法，亦出於此人，時為一八四二年。

更經英國之焦耳（Joule）於一八四三年

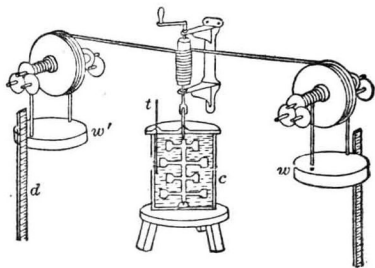


圖二五七 焦耳。

作一精密之實驗，量得與一卡之熱相當之功，等於四·一五焦耳，與現今精確之熱功當量四·一  
 九焦耳比較，頗為相近。  
 焦耳在量度熱功當量之數值以前，已於一八四〇年求得電流生熱之定律（參照第五章第



圖二五八 焦耳空氣壓縮之實驗。  
 由G供給乾燥之空氣，通過放在一定溫度之W管後，導至R，用空氣唧筒C使其縮壓，測定包圍R之容器內之水之溫度升高若干。



圖二五九 焦耳之第二實驗。  
 由兩端所懸之重錘降下，攪動中央容器內之水，測定其上升之溫度，由此即可算出熱與功之關係。

三節。德國之赫爾姆霍斯 (Helmholtz)

於一八四七年，根據此類事實，對於一般之物理的現象，遂樹立一大原理，是即能量不

滅原理 (Principle of conservation of

energy)。根據此說，則力學的功，熱，電流等，

均不外能之一態而已。除此數態而外，尚有

後來之光，音，磁及化學親和力等，亦莫不然。

此等各態之能，互相變化，遂表現成爲物質現象。當其變化之時，如使用適宜之單位，量度其能之總量，其值恆一定不變，既不創生，亦不消滅。此原理所含至廣，一切之物質現象，莫不包括在其內，迄今尙未發見任何事實，有與之矛盾者。

關於人類或動植物之生理現象，此項能量不滅原理，似亦可以成立。當人類靜坐不動之時，其發生之熱量，與其呼吸之氧氣之量相當。登山時須作功，將其重量舉上，故須消耗與此項之功相當



圖二六〇 赫爾姆霍斯。

之熱量。下山時，重力應作功，此功不能成爲動能，而成爲熱。在此等動作中，人之用處只在供給氧氣，故可看作與機械同等，但實際上其情形則頗複雜，決不如是簡單。又若將人類之體溫，看作由於食物消化燃燒時所生之熱，爲之保持，則可計算此時食物必須供給之熱量，而人類必不可少之最小營養量，亦可由此熱量爲之表出。分析各類食物時，恆云其與若干卡相當，即根據此種見地而言。

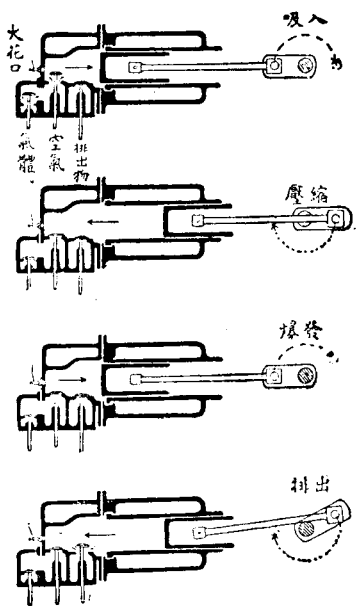
### 第七節 化學作用所生之熱

一言及熱，令人立可聯想及於火或燃燒。自古以來，即視火爲熱之根源，爲人類必不可缺少者。甚至於能不用火，成爲人類與其他動物區別之一特徵。但火之本質，究爲何物，則古人實未明瞭。在希臘時代，以爲地、水、火、風，爲構成世界之四大元素。其後對於火之見解，頗形衆多。降及十八世紀之終，與熱素混爲一起，仍未能明其真相。十九世紀開始，各種化學研究盛興，尤以法國之拉瓦錫(La-voisier)，對於現今化學發展之開拓最爲有力，至此始悉所謂燃燒，亦僅一種化學作用而已，即空氣中之氧氣，與物質中所含之炭分化合時所成之現象，與此相伴發生之熱與光，即吾人所謂之

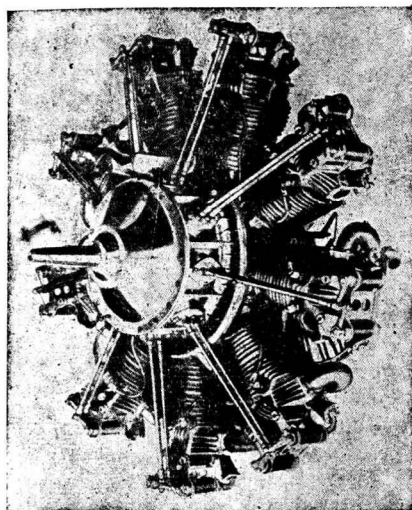
火。此外尚有許多化學作用，均有熱伴之出現，亦有反其道而行者，即須由外供給以相當之熱，方能發生化學作用。通常兩種物質互相化合時，具有一種化學親和力 (affinity)，與在高處之物體，必具有發生落下運動之能相同。故前者應具有化能 (chemical energy)，俾與後者所具有之勢能 (Potential energy) 相對。化合時之所以有熱發出，亦與落下時必得動能，而與地面碰撞後即發生熱，完全相同。換言之，不外由化能一變而成熱能而已。

火藥之爆發，係由熱引起化學作用，於一瞬間發生多量之氣體，因其驟然膨脹，使物體得一極大之動能。火山之噴火及爆發，其狀況亦與此同。

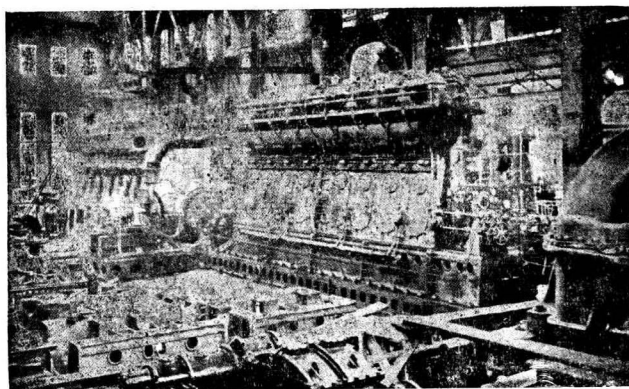
利用氣體之爆發，可以製成  
內燃機， internal combustion



圖二六一 內燃機之動程。  
由上而下共四動程，反覆行之不已。



圖二六二 西門子飛機用發動機。



圖二六三 狄則爾機。

engine) 如圖二六二所示。其種類頗多，有用煤氣者，曰煤氣機 (Gas engine)，有用石油者曰石油機 (oil engine)，有用汽油者，曰汽油機 (Gasoline engine)。其原理不外，在氣筒內將此等氣體與適量之空氣混合後，加以壓縮，然後點火，使其燃燒爆發，由其壓力推動氣筒中之活塞，而利用此活塞之動能，以作各種之功。此器最初係法國之勒訥 (Lenoir) 創成，可供實用，其後經德國之鄂圖 (Otto) 於一八七八年，又狄則爾 (Diesel) 於一八九八年，加以改良。現今用以代替蒸汽機之處頗多，如發電機，輪船，汽車，飛機及飛艇等，莫不賴之。其中尤以飛機之發達，完全得力於內燃機。又歐戰時負有盛名之坦克車 (tank)，如圖二六四所示，亦係使用此種機。



圖二六四 坦克車。



## 第八節 熱程序之不可逆性

據噶爾諾之熱力學 (Thermodynamics) 原理，凡熱作功之後，必由高溫降至低溫。例如蒸汽機，在高溫度之蒸汽，由其壓力推動活塞後，受膨脹之結果，其本身之溫度不得不為之降下。此關係與原在高處之水，因落下衝動水車後，其自身亦降至較低之水平線相同。此兩事雖相類似，但亦僅限於此，不能任意再為之比擬。譬如落至低處之水，雖水平較低，但仍保有其水之原形存在，假使能舉之至於高處，依然可以再行作功。但對於蒸汽機則不然。供給之熱，完全出於石炭之燃燒，一旦燒完，即全部消耗，不能使其恢復原狀，再行作同樣之功矣。然則此兩者之差別，究在何處？

欲解決上述之問題，頗不容易。直至一八五〇年，始經德國之克勞修司 (Clausius)，加以詳細之研究，闡明熱程序 (thermal process) 均具有不可逆性 (irreversibility)。如為力學程序，則如上述水車之例，其能與功為可逆性 (reversibility)。不供給能而欲得無限之功，固不可能。果供給以相當之能，未嘗不可恢復其本來之狀況。反之，如為熱程序，例如蒸汽機，則僅有一部分之熱，變而為

功，其餘之熱量，則由高溫部分移至低溫部分。此時欲將所得之功，再變成熱，俾將低溫之蒸汽，復行升高，固屬可能，但既非前此之熱量全部，當然蒸汽之溫度升高亦有限，不能完全恢復其原有之溫度。欲其完全恢復，成爲原有之高溫，除由外部另外供給以與所消費之熱相當之功而外，別無他法。總括之，卽利用熱作功時，不能利用其全部，必有一部分成爲無益之損失。

因之，任何熱機所能利用之熱量，對於供給之全部熱量之比，恆小於一，此數值曰熱機之效率 (efficiency of heat engine)。假使有一熱機，其效率等於一，則如上面所述水車之例，卽利用此機所作之功作爲熱源，可以繼續動作至於永久。能作如是永久運動之機，爲第二種之永久運動機 (Perpetual-motion machine)，從熱力學原理言之，如是之永久運動機，爲不可能。實際之機，除此而

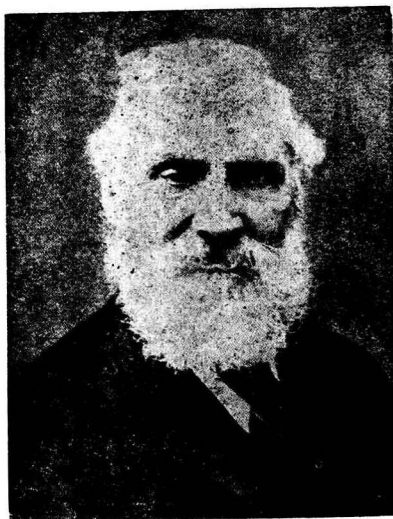


圖二六五 克勞修司。

外，尚須受摩擦及阻力作用，又消耗去一部分之熱，更由傳導及輻射等，有一部分之熱逸至外部，故其效率更減。

在最理想之熱機中，如命熱源最初之溫度為  $T_1$ ，動作後之溫度為  $T_2$ ，則其效率應與前後兩溫度之差，即  $T_1 - T_2$  相比。據英國之湯姆遜威廉 (William Thomson) 即凱爾文 (Lord Kelvin) 所說，如使

溫度  $T_2$  降至力所能達之最低溫度，則效率將隨之而增，但在理論上，效率無論如何增加，終不能超過於一。由此可見最低之溫度，並非漫無制限，而有一定之限度，即以此最低限度之溫度，作為絕對零度 (absolute zero)。由此計算而得之溫度，則曰絕對溫度 (absolute temperature)。由此設想而得之絕對溫度，與前此在第二節所述者，完全一致。命  $T_1$  及  $T_2$  表此種利用氣體之熱而成之



圖二六六 克爾文。

熱機之前後兩次之絕對溫度，則在理想熱機 (Ideal engine) 其效率應等於  $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ 。

轉觀世界內之一切現象，恆有一部分之熱，陸續經傳導及輻射等作用，逸散於四方，此外如運動如電流等，更有種種之能，隨此類現象，變而成熱。由此推想，更歷億萬年後，能之總量，誠不增不減，但各態之動，均一律變而成熱，保持平均之溫度。此時應用任何種類之熱機，亦不能取得些微之功。現今目擊之一切現象變化，至此時亦均消滅完盡，無法出現矣。所謂世界之末日，殆即指此而言。

以上係由熱力學之原理推得之結果，但實際吾人所處之世界，究須歷幾何歲月，方能達於此境，又到此程度，熱力學之原理，是否尙能完全適用，尙有再加考察之必要。譬如論氣體時，知其容積如達於絕對零度即成爲零，但實際之氣體，在未達於絕對零度以前，即已凝結成爲氣體，故其理論不能澈底適用，或許熱力學之原理，正復類是，亦意中事也（參照後節）。

## 第九節 分子之運動

自古以來，即由日常經驗，察及熱及運動，與能之結合情狀相同，其間似有一種關係存在，已於

前節述及之矣。由此着眼，遂成爲一種見解，將熱看成實際組成物質之成分之運動。一切物質均由原子 (atom) 或分子 (molecule) 組成之說，亦自古即已有之（參照第十章第十一節）。至十七世紀，經法國之伽桑狄 (Gassendi) 此說大爲擴充，用分子集合之狀態解釋固體、液體及氣體之不同。據其所說，密度最小之氣體，其分子間的距離最大。但在當時所謂之原子分子，並不如現今化學上，有一定不移之定義，互相區別，僅用作假想上組成物質之成分之代名詞而已。然欲用此等分子或原子之形狀大小及力與運動等，作物質之各種性質的解釋，確爲不可磨滅之事實。後來出現之自然觀，即經此階級，自行發展而成。

其後不久經波義耳用此種分子原子說，說明化學上之事實，同時又想到所謂熱，應由分子作非常迅速之運動而生。同時代之虎克，亦抱同一思想。十八世紀由柏努利丹聶爾 (Daniel Bernoulli) 用分子之運動，說明氣體之各種性質，其中尤以說明波義耳定律，最爲著名。降及十九世紀中葉，經克勞修司於一八五七年及英國之馬克斯維耳 (Maxwell) 於一八五九年，始將氣體動力論 (kinetic theory of gas) 大致完成。

氣體各分子間之距離，不特異常之大，且若不在密閉之容器中，即有瀰漫於全空間之性質。設以兩種不同之氣體，各盛入一容器內，其間用一橫管連通之，不久此兩器內均成爲同樣均勻之混合氣體。此項現象，稱爲氣體之撒散 (diffusion of gases)。由此可以證實，氣體之分子，確係運動不已，在其能達之空間中，無所不至。此種擴散現象，即在液體，亦在所不免。不寧雖是，即在固體中，如金與鉛，如使其互相密接，經歷長時間後，再分別檢查之，即見金中已含有少量之鉛，而鉛中亦含有少量之金。

液體之壓力雖由其重量而來，氣體則否。氣體作用於容器之壁之壓力，確與重量毫無關係，據柏努利丹訥爾之說明，則氣體之壓力實由於其分子因運動與器壁碰撞而生。又物體所有之熱，不外即此項分子之動能。溫度之高低，即由於全部分子所有之動能之平均值，爲之決定。

液體之各分子間距離甚小，同時有分子引力之作用現出。所謂表面張力，所謂毛細現象，均係液體表面之分子，受其內部分子之引力作用，結果成爲向內收縮之傾向，遂成此種現象。液體分子之中，其運動特別迅速者，在表面近傍，其動能可以超過分子引力之拘束，即逸出外部，是爲汽化之

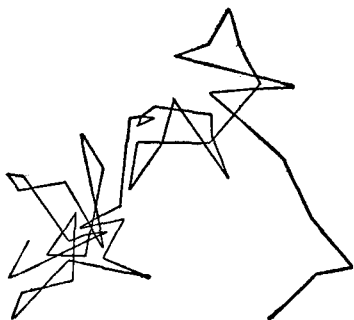
現象。溫度愈高，則高速度之分子愈多，故汽化進行愈盛。蒸氣之分子中有向液體表面飛來，進入液中者，液內之分子有脫出液體飛入汽中者。如此兩方面之分子數，彼此恰相等，則成飽和之現象。由此可見液體與體氣之差別，只在於其分子間之距離遠近而已，如其距離在能受分子引力拘束之範圍內，則爲液體，已超過此項拘束範圍之外，即爲氣體。就此意義而言，氣體與液體之性質變化應爲完全連續的而非間斷的，詳見一八三七年凡得互耳 (Van der Waals) 之研究。又波義耳之定律僅能適用於臨界溫度以上之氣體，溫度漸高之汽，與此定律次第離遠，此事實亦由凡得瓦耳爲之說明。卽此時共有兩種原因，一方面爲分子引力之影響加大，他方面因分子有一定之大小，無論加以任何大壓力，亦決不能超過一定之限界，使其容積減成爲零。

固體之分子間距離極小，不過與分子本身之大小同一程度而已。據最近研究，知構成固體分子之各原子，由相互間之引力作用，保持有一定之排列狀況（參照第十章第二節）。此時之原子，僅容許以其平衡位置爲中心，作往復之振動，表現於外，遂成爲固體之熱能。各物質之單位質量之溫度，與此項熱量之比例，是爲比熱。一八一九年，經度隆 (Dulong) 及普替 (Petit) 由實驗證明

各物質之比熱，與其原子量之乘積，即原子熱 (atomic heat) 爲一常數，恆等於五·九四卡，與物質之種類無關。但計算時，須保持固體之體積，使其一定不變。由此結果，足以表明固體每一克分子 (gram molecule) 之分子動能之平均值，與氣體同樣，對於一切物質均成爲一常數，且與絕對溫度成正比例。

### 第十節 布朗運動

英國之植物學家布朗 (Robert Brown) 於一八二七年，將一種草花中之花粉，浮在水面上，用顯微鏡加以檢查之時，發見花粉之細粒，在水面上作極活潑之運動，無一刻停止。其後更取其他各種之微粒，行同樣之實驗，結果亦同。其運動漫無紀律，是爲布朗運動 (Brownian motion)。通常所謂之膠質溶液 (colloidal solution) 即



圖二六七

拍期所記作布朗運動之微粒每隔三〇秒所  
在之位置，用直線連結之，表其經過之路徑。



有物質之微粒浮游於液體中者，以及焚燒物體所揚之煙，其中亦有無數細微固體微粒參雜其中，均可察見其作布朗運動。當最初發見之時對於其所由成之原因，懸久不得其解。約歷半世紀後，始由尉訥加以說明，以爲此乃由於液體或氣體之分子運動而起，其後至一九〇五年，經愛因斯坦（Einstein）第由理論上完成其說明，因在液體或氣體中之固體分子，受各種方向飛來之分子碰撞，遂被推向各方，作極不規則之運動，於是而成布朗運動。



圖二六八 布朗運動之相片。

因此布朗運動遂成爲證明分子運動之一極有力之現象，爲學界所重視。譬如一葉小舟，受海洋波濤之涵湧，搖曳不已，由其動作，可以推知波浪之存在，其理與此正同。

一九〇三年德國之濟登托普 (Stentorpi) 及濟格夢狄 (Sigmundy)，造成超顯微鏡

(ultra-microscope)，可以觀察歷來用顯微鏡不能窺見之微粒（參照第七章第八節），布朗運動之研究，因此得猛烈之進步。其後更經斯未得堡 (Svedberg) 及拍朗 (Perrin) 等之研究，愈入於微。作此項運動之微粒，所取之徑路，毫無紀律，由圖二六七及圖二六八所示之狀況，可以見其一斑。

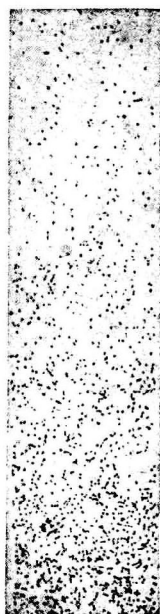
就各個分子之運動而言，當然一切依從力學之定律，其爲可逆性，亦不待言。但據一八六六



圖二六九 波爾茲曼。

年波爾茲曼 (Boltzmann) 之議論，則由此等分子集團而成之物體，因分子全體之運動漫無紀律，故物體所表現之熱現象，遂成爲非可逆性。縱令於開始運動之一瞬間，使各個分子均得同一方向之速度，但因各分子相互間，不絕碰撞，遂令其運動之方向，逐漸改變，散布於各種方向，其速亦種種不一。分子之數非常之大，故速度在此等分子中之分布，須遵從偶然之定律 (Law of chance)，且一切分子之動能之平均值，一定不變。此事恰如人類壽命，雖有修短，但在人壽保險公司，則按照偶然定律計算，決定其保額。故吾人所用之溫度或熱之概念，僅能限於此種多數分子之集團，方能成立，對於各個單獨之分子，完全不能適用。不寧唯是，人壽保險之事業，縱令不致失敗，但個人之壽命，決不能由此決定，分子亦然。如就含有極少數分子之小範圍而論，熱力學及其他全體之定律，即已不能適用，遑云單獨之分子。

拍朗曾由實驗觀測，研究膠質溶液內之微粒之濃度與高度之關係，結果如圖二七〇所示，大致與氣



圖二七〇  
 膠質溶液內之微粒。

體相同，其密度隨高低而變。但此僅就其全體而言，如將範圍縮小，專就其一小部分而論，則不問高低如何，因各個微粒均作布朗運動，四向亂飛毫無紀律，故微粒之平均數，即其密度，亦無一定之值。

波爾茲曼曾述一事，與分子運動之理論有關，頗饒興趣。自然現象之不可逆性，由於分子運動之不規則之偶然性而來，故若更歷億萬年後，漸次與熱平衡之狀態接近，最後即達於世界之末日，已於第八節中述及之矣。但從反對一方面着想，所謂偶然之定律，並未斷定同時不致發生。與此正相反對之狀態。譬如擲骰，如所擲次數頗多，則由一至六出現之次數，次第達於平均之數值，但亦不能限定不致偶然連續出現者均為一而非其他。如在自然界偶然亦有與此同樣之事出現，則世界豈特不到末日，或反將復活，回復其創造時代，亦正意中事也。

## 第四章 靜電學及磁學

### 第一節 摩擦電

電學雖爲近代之知識，但其由來則頗久，紀元前六世紀開闢希臘哲學文化之第一人退利斯（Thales），卽已發見用毛布摩擦琥珀，能吸取輕物體。不過在當時，則歸之於發生運動之靈魂作用而已。同類之紀載，在我國古代，似亦有之。直至十六世紀之末，英國之吉爾柏特（Gilbert）始對於電之現象，加以種種研究。吉爾柏特晚年，曾任依利薩伯女皇（Queen Elizabeth）之御醫，其時除對於磁石之各種現象詳加研究而外，對於電亦曾作種種之實驗。發見由摩擦卽能吸引輕物之性質，並不限於琥珀一種，此外尚有金剛石、青玉、水晶、玻璃、硫黃，以及松香等，莫不有之。十七世紀以空氣唧筒實驗著名之德國之葛利克（Guericke），亦作過種種電學之實驗。用硫黃製成一球，使其轉

動不已，用手擦過，即成一種起電器。一六七一年英國之波義耳 (Boyle) 發見不特摩擦後之物體，能吸引未受摩擦之物體，若將前者用絲線吊下，即見後者亦能吸引之。且此種現象不但在空氣內如此，即在排除空氣後之玻璃鐘罩內，亦復如是。其後又有英國之豪克斯俾 (Hauksbee) 用玻璃球代替葛利克之硫黃球起電。

一七三三年法國之度非 (Du Fay) 始發見摩擦電之根本性質，即有兩種之電存在。度非用摩擦後之玻璃球，使其吸引垂下之線作種種實驗研究之中，偶然發見其指近之亦起排斥現象。更用垂下之金箔代替絲線，亦復如是。與摩擦



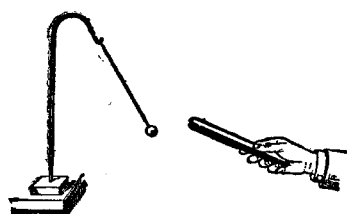
圖二七一

吉爾伯特當依利薩伯女皇及其朝臣之前，作電學實驗時之景况。

後之玻璃棒，一度接觸之後，立被斥開。於是擬用一摩擦後之樹脂塊，與之接近，以爲金箔亦將被其斥去，乃其結果，竟出預料之外，兩者之間以強猛之勢互相引近。因此遂想到電有兩種，而名之曰玻璃電 (vitreous electricity) 及樹脂電 (resinous electricity)，即今日通常所謂之陽電及陰電也。

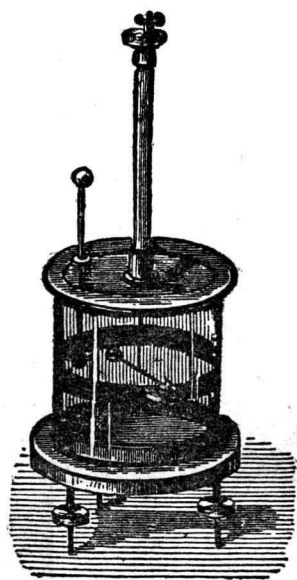
摩擦之電在大氣潮濕之時，不易發生。其理當於後面詳述之。即大氣中之水汽最易將物體上所帶之電傳導而去。經佛蘭克林 (Franklin) 等之研究，始漸次得知不同種數之電，互相吸引，同種類之電，互相推斥，及互相摩擦之兩物體，一方如帶陽電，則他方必帶陰電。一七八五年法國之庫侖 (Coulomb) 由精密之實測，求得帶電體間作用之力之關係。即不問其爲引力或斥力，均與兩者間之距離之平方成比例。又此項作用之力，一方面與電之分量亦有關係。故對於一定之電，只須量得其在一定距離作用之引力或斥力之大小，即可決定其電量。

電量之單位，即由此定律決定。即如有相等之兩電量，隔一厘米



圖二七二

摩擦後之玻璃棒吸引輕球之狀況。



圖二七三 實驗庫侖定律之扭秤。

此器內有兩小球，其一固定不動，其他則用線懸下，使此兩球帶電，則由相互間之引斥力作用，使下懸之球發生偏轉，至與絲之扭力恰成平衡處，始成靜止。故由其靜止之地位，可以求出作用之電力。

之距離，互相作用之力適等於一達因時，如是之電量，名曰一靜電單位 (electrostatic unit)。如是決定之電量單位，為值過小不便於實際使用，故在通常之實用單位 (practical unit)，則取其三十億倍，即  $3 \times 10^9$  倍，作為單位，而名之曰一庫侖 (Coulomb)。

第二節 電之傳導及靜電感應



曾經一度摩擦發生之電，如任其放棄，不久即漸次消滅，此乃由於電已由此物體傳導而至他處所致。一七二〇年英國之史梯芬格雷 (Steven Gray) 始知物體對於傳電，有難易之分。摩擦玻璃、火漆及硬橡皮等，其所以能作起電之實驗者，因發生之電，能保留於此類物體之上，不致傳至他處。反之，如用金屬棒，則縱令同樣有電生出，亦將經由持棒之手，通過人體傳去，故不見金屬棒上有電存在。格雷因此對於金屬等類物質，稱之曰導體 (Conductor)，對於玻璃、硫黃等類物體，稱之曰非導體 (non-conductor)，以相區別。又金屬雖能導電，但若加一非導體製成之柄，以手執柄試之，亦能保留其所發生之電。故非導體可以用作防止電逸去之具，使電與外界斷絕交通，故又名為絕緣體 (insulator)。格雷曾作一實驗，用絲線製成之繩，將一人懸住，加電於其上，即見電並不傳去。

圖二七四為英國之本涅特 (Abraham Ben-



圖二七四 金箔驗電器。

rod) 於一七八七年最初製成之金箔驗電器 (Gold-leaf electroscope) 構造極其簡單，在金屬棒之下端，垂下金箔，或鉛箔兩枚，上端有一金屬圓板。除圓板外，全部由一玻璃瓶口插入，其插入處與周圍須用絕緣體隔住，俾與外部不通。加電於此圓板上，則下端之箔即行張開，其張開之角度大小，由所得之電量多寡而定。通常在瓶內放有乾燥劑，吸收其中之濕氣。因空氣本為非導體，而水汽則為導體，若不除去，即不能將電保留於金箔之上。

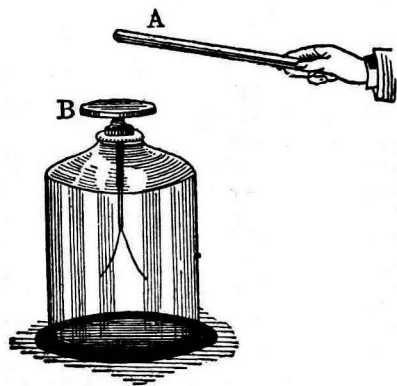
欲得滿意之絕緣，須使用硬橡皮 (ebonite)，瓷器 (porcelain)，橡皮 (rubber)，或蟲膠 (shellac) 等。反之，欲使一方之電容易傳至他方，則非使用金屬製成之線，為之連絡不可。通常所謂之導線 (connecting wire) 即指此種金屬線而



圖二七五 量度用精密之金箔驗電器。  
可由望遠鏡觀測其內部金箔張開之角度。

言，又有一種導線，周圍用絲線纏滿者，則曰絕緣導線 (insulated wire)，或曰包被線 (covered-wire)。

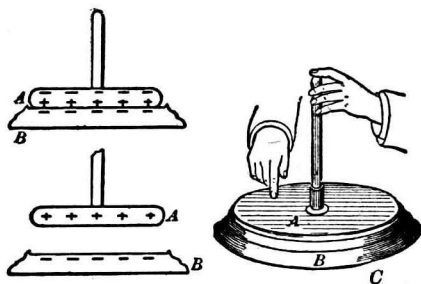
凡得有電之物體，曰帶電體 (electrified body)，而使其得電之現象，曰帶電 (electrification)。一帶電體與其他之導體互相接觸，固能將所帶之電移至此導體之上。但即令並未接觸，兩者如相去不遠，亦能使之受其影響而呈帶電之性質。此現象在格雷時代，即已發見，因名之曰靜電感應 (electrostatic induction)。例如一摩擦後之硬橡皮棒，如持近金箔驗電器之圓板，其下之箔即行張開，且棒與圓板相距愈近，箔所張開之角度愈大，如圖二七六所示。由此可見箔上確已帶電。據度非所說，此時棒上之電為陰電，與棒接近之圓板上，有反對之陽電發生，與棒互相吸引，因此將陰電驅逐於下端之箔，所以張開，用此可以說明其假定有



圖二七六

兩種電存在之理。當未持來硬橡皮棒以前，驗電器上本有此陰陽兩種之電，互相中和存在。棒既持來其近傍，此兩種之電，受棒上之電作用，遂漸次分離，而呈此現象。由摩擦而生之電，其理亦與此同。即由摩擦作用可使本已混合之兩種電互相分離，或將等量之兩種電混合一起，即成中和 (neutralization) 狀態。故陰陽兩種電量，恰與代數學中之正負量相同，儘可照代數學上所用之方法處理之。因此又有稱之為正電及負電者，又用 + 及 - 之符號代之，亦即此意。

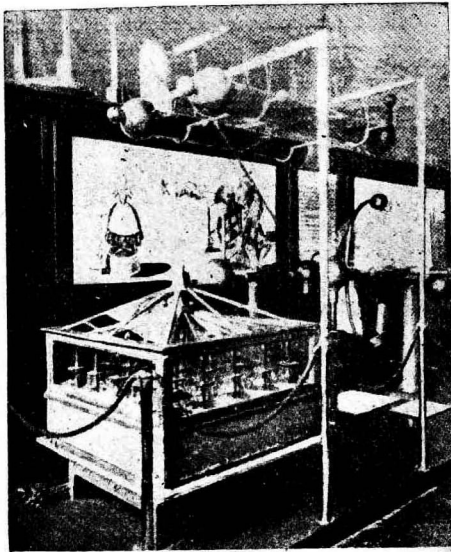
最初度非假定為陰陽兩種不同之流體，欲由此說明各種帶電現象，是為二流體說 (two fluids theory)。其後佛蘭克林根據上述之性質，主張只須假定有一種流體，即足說明。以為物體中含有一定量之此種流體，則呈中性狀態過多則帶陽電，過少則帶陰電，是為一流體說 (one fluid theory)。此種流體之假說，對於通常電現象之說明，確甚便利，但較近電子論 (electron theory) 發



圖二七七 起電盤。

展以來，勢不能不加以更正，詳見第九章中。

執帶電之硬橡皮棒近驗電器之圓板，以手指觸圓板，則經由人體與導體之地面相連絡，故其上之陰電，被推斥而至於最遠之一方。此時使觸着圓板之手離開，同時將硬橡皮亦持至遠處，則驗電器上之陽電，應當有一部分殘留於其上。意大利之弗打 (Volta) 利用此項性質，造成一簡便起電器，名曰起電盤 (electrophorus)，其構造如圖二七七所示。C 爲火漆或硬橡皮製成之盤，其上有一金屬板 B，B 上附一絕緣體之柄 A。先用貓皮等類，在盤內敲擊數遍，使其得有陽電。再將金屬板蓋上，以手指觸及後，執其柄揭去，則圓板上即

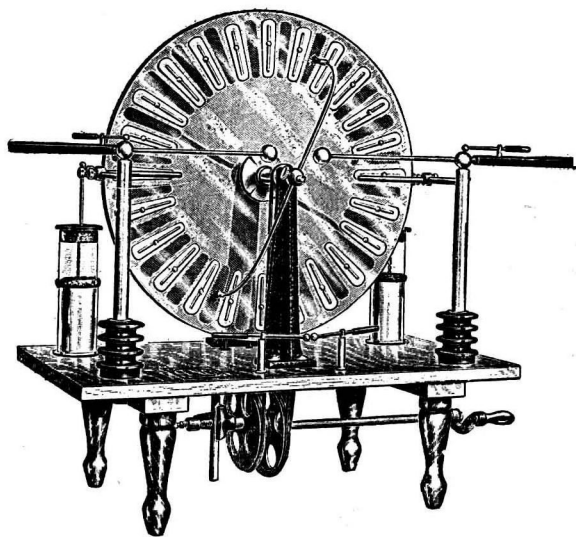


圖二七八 發見電流定律之歐姆使用之起電機。

現尚保存於國行德志博物館內。

有陽電存留。此項陽電，係板與盆接觸時，由靜電感應而生者。

使用上述之電盤，只須照上述方法，反覆若干遍行之，即可陸續得電。再進一步，不必如此周折，亦可使其連續生電，是即感應起電機（influence electric machine）。圖二七九所示即現今使用之感應起電機之一種，其要部為兩枚硬橡皮製之圓板，憑在同一軸上，互相對立，並沿反對方向同時轉動。板上有導體一列，其上由靜電感應而生之電，經由前方之水平金屬棒，傳至於其兩極（electrode），即



1170

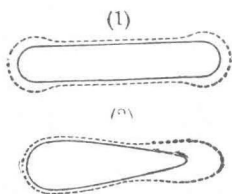
圖二七九 感應起電機。

蓄積於此處。

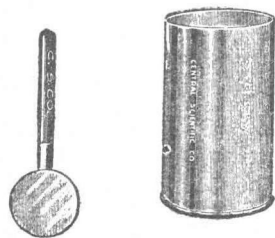
### 第三節 電之分佈，電勢及電容

電在導體內，可以自由移動，不受阻礙，與液體在容器內之狀況相類似。但液體在容器內，造成一水平面之自由表面後，即成平衡；同樣電在導體內之移動，亦達於一定之分布狀況後，即成平衡。關於此項分布狀況，有英國之卡芬狄士 (Cavendish) 及法國之庫隆 (Coulomb) 等之研究。一切金屬之帶電，僅限其表面，內部並無電之存在。表面之電密度 (electric density) 隨導體之形狀而異。

凡彎曲較大之部分，所集之電較多。圖二八〇所示，即其一斑。設加電於圖二八一所示之金屬圓筒上，用右



圖二八〇 導體周圍之電之分布。由表面上各點至點線之距離，表各點之電密度。

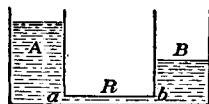


圖二八一

方所示之器即於絕緣柄上附一金屬板，名曰驗電板 (proof-plane)，插入圓筒中，然後取出在驗電器上檢查之，即知圓筒內部並未帶電。又用金屬網籠罩着之內部空間，決不受網外之靜電作用其理亦同。

在同一水平面上之液體，不由此移彼，電亦類是。在導體內達於平衡狀態不生移動之時，稱之曰在同一之電勢 (electric potential)。即導體表面上之電之分佈，其目的在造成導體之各部，使其保持同一之電勢。用一條導線連結兩帶電體，如其間有電移動，即表示此兩導體之間有勢差 (potential difference) 存在。假定甲乙兩導體均帶陽電，電之移動係由甲而乙，則曰甲之勢高於乙。如甲乙均為陰電，其移動亦係由甲而乙，則曰甲之勢低於乙。

此項電勢之高低，在使物體得多量之電時，頗為重要。例如用摩擦後之玻璃棒或起電盤之圓盤等，與驗電器相觸接，或執至其近傍，欲使其增加多量之電時，假使兩者之電勢已達於相等之值，以後即不能再行移動。此事亦與水相類。如第二八二圖所示，兩容器A及B之水平面，如有高低差別，則用一導管B連通後，即



圖二八二

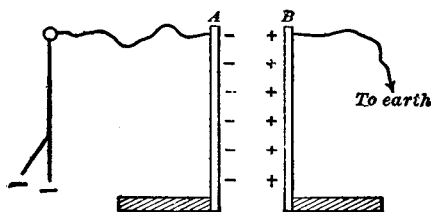


由水面較高之A內，有水流至水面較低之B內。至兩者達於同一之高低以後，水即不能再流。由此類推，可知欲使電量多集，非使其保有較大之電勢差不可。又盛水之容器愈大，對於盛入一定量之水，其表面之水中所高愈有限。同樣，加電於物體後其電勢之增高，亦隨物體而異，有昇高無幾者，有昇高頗大者。故由此電勢之變化，可以測知各物體之電容 (electric capacity)。

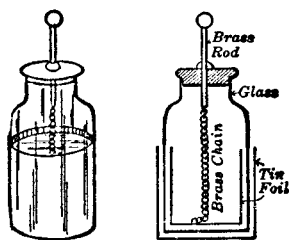
電勢之高低，本係相對的關係，故任取何物以作其比較之基準均可。通常比較水平面之高低時，多用地球之平均海面，以作基準；因海之容量極大，縱令江河之中有水陸續流入其內，但海面高低之變化幾等於零。同樣地球對於電，亦為一導體，其上縱令得少許之電量，地球全體之電勢，儘可看成並未增加，換言之，地球之電容，可以看成無窮大。故即以地球之電位，為基準以與各物體之電勢比較。物體上如帶有陽電或陰電，用一導線使其與地面連結，其上之電，立即移至地面。如物體所帶者為陽電，則可決定其電勢較地面之電勢高；如物體所帶者為陰電則可決定其電勢較地面之電勢低。即力之作用，在使陽電由勢高之物體，移向勢低之物體，使陰電由勢低之物體移向勢高之物體。

用一導線連結驗電器之圓板及一金屬板 $B$ ，如圖二八三所示，加陰電於其上，使金箔張開。再使另一金屬板 $B$ 與 $A$ 相對而立，且互相平行，亦用一導線與地面相連，則由靜電感應結果， $B$ 上帶陽電。此項陽電將陰電吸引至其近傍，故原在金箔上之陰電亦當受其影響，經由導線移至 $A$ 上。因此箔所張開之角度，為之減小。換言之，因有導體 $B$ 與 $A$ 相對而立之結果，致令驗電器之金箔及板 $A$ 之電勢均為之降低。欲使其電勢恢復未與 $B$ 對立以前之程度，非再加以相當之陰電不可。故利用此法，可將多量之電，聚集於一導體之上，如是者曰容電器（condenser）。

圖二八四所示之來頓瓶，（Leyden jar），即容電器之一種。因有此利器，始有十八世紀成功之



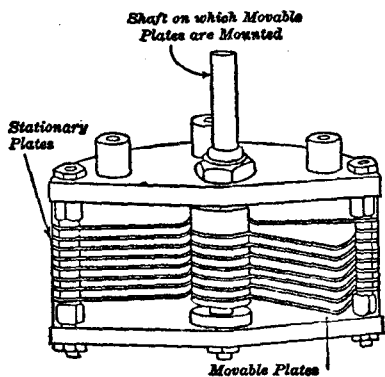
圖二八三



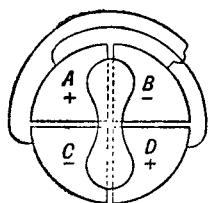
圖二八四 容電器。

各種電學上之實驗，故其關係頗為重要。此器最初由波美拉尼亞 (Pomerania) 之副主教克來斯 (Ewald Georg von Kleist) 於一七四五年製成。翌年荷蘭來頓之教授穆申布洛克 (Pieter von Musschenbroek) 作電之實驗時，欲帶電體上之電不致失去，遂將其放入一玻璃瓶內，不意受激烈之震，遂獨立造成此器，故有來頓瓶之名。其主體為一玻璃瓶，內外各貼錫箔一層，上加絕緣體之瓶蓋，由蓋上插下金屬棒一條，棒之下端垂下一金屬鏈，與瓶底之箔接觸。瓶外所貼之錫箔，則經由支持此瓶之座與地面連絡。故金屬棒及內層錫箔之上，可容大量之電蓄集。前圖二七九所示之起電機上，兩傍各有一來頓瓶，即為蓄集多量之電而設。

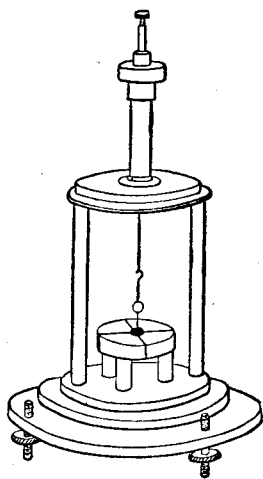
實用上為便利各種用途起見，有各種不同樣式之容器。其簡單者，將浸過石蠟之紙與錫箔各若干枚，相間重疊，每隔一層錫箔，用導線連為一組。任以一組與地相連，即



圖二八五 容電器。



圖二八六 象限靜電計之要部。  
為一金屬圓盒，其壁極薄，分成四象限，在其中央懸一線板形金屬薄片。用導線將A與D及B與C連結，各各連至欲量度電勢差之物體上。中央薄片亦加以一定之電，由相互作用之力，使此薄片轉動若干角度，方行停止。即由其偏轉之角度，可以測出AB間之勢差。



圖二八七 象限靜電計。

得一電容甚大之導體，如圖二八五所示，亦即其一種，因其電容可以任意變更，故名可變電容器 (variable condenser)。

欲量度精確之勢差，可用凱爾文首創之象限靜電計 (quadrant electrometer) 其主要部分如圖二八六所示，為一圓盒，由金屬轉板製成，按四象限分開，各隔少許之距離，用金屬導線將相對之兩象限，各連為一組。由其盒內懸在中央之金屬薄片，即稱為指針 (needle) 之偏轉，可以算出此兩組象限間之電勢差為若干。

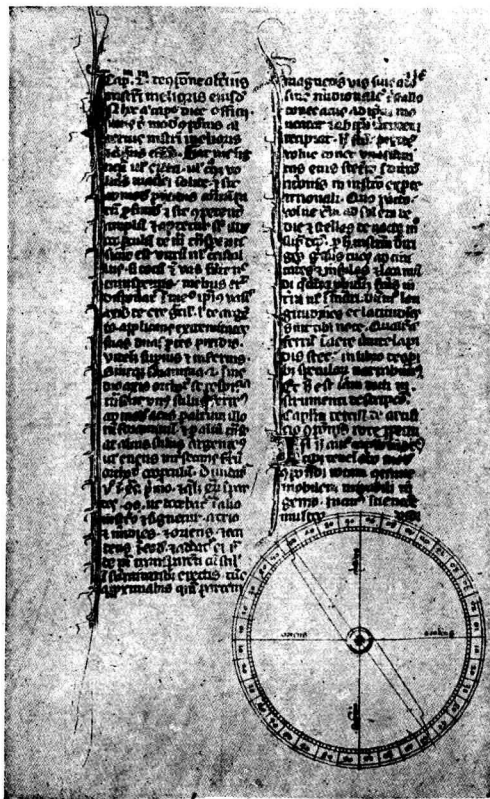
就理論上言之，兩點間或兩導體間之電勢差，係將單位電量，在其間連過時所需要之功。將一靜電單位之電量在其間連過時，所需之功，如恰與一爾格相當，此時之勢差，即用作勢差之靜電單位，而名之曰一伏特 (volt)。在工業上則不曰勢差，而曰電壓 (voltage)。一導體得一靜電單位之陽電，其電勢恰升高一伏特時，此時之電容，用作電容之靜電單位，即九千億倍，即得一庫之陽電後，電勢升高一伏特之電量，曰一法拉 (farad)，又其百萬分之一曰一微法拉 (micro farad)。是為電容之實用單位。

#### 第四節 磁石及磁

磁石 (magnet) 之作用，在紀元前二千數百年，已為中國所發見，並製成羅盤 (Compass)，以定方向。在歐洲則為猶太時代，即紀元前千年，亦有記載，述及所羅門 (Solomon) 王，曾使用磁針。又希臘時代之荷馬 (Homer) 之詩中，亦有磁石之語。天然出產之磁石，為磁鐵礦。希臘時代之哲學家，曾述及磁鐵礦有吸引鐵粉及順次吸引鐵鏈等之性質。尤以琉克理細阿 (Lucretius) 之詩中，

磁石之力，最為著名。

關於磁石之極 (Pole) 在中國則以為指示南方，而在歐洲則以為指示北方。總之，可以指示方



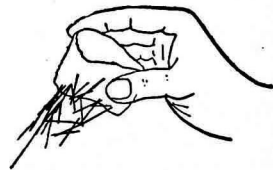
圖二八八

赫勒格立紐斯書中所載之羅盤圖及其記載。是為羅盤之最古之記錄。

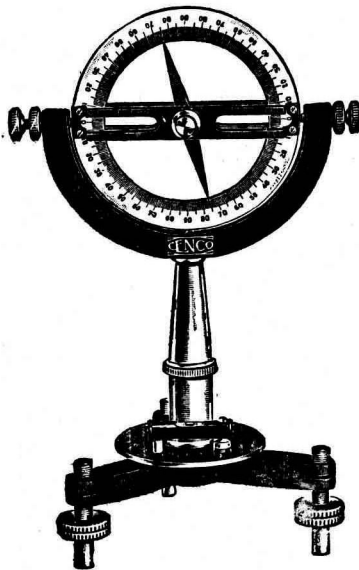
向，直至中世紀上，對於文明之貢獻頗多。

關於磁石之性質，作學術的紀載，當首推十三世紀之荷蘭之十字軍戰士拍勒格立紐斯 (Peregrinus)。據其書中，已知磁石上有一定向南極 (south-seeking pole) 及向北極 (north-seeking pole)。

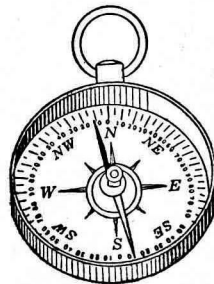
即現今所謂之南極 (south pole) 及北極 (north pole)。又同名之磁極間互相以斥力作用，異名之磁極間，互相以引力作用。又條形磁石 (bar magnet) 如分為兩段，則各段各有兩極現出云。一七八五年經庫侖由實驗證明磁極間作用之



圖二八九 磁石吸鐵。



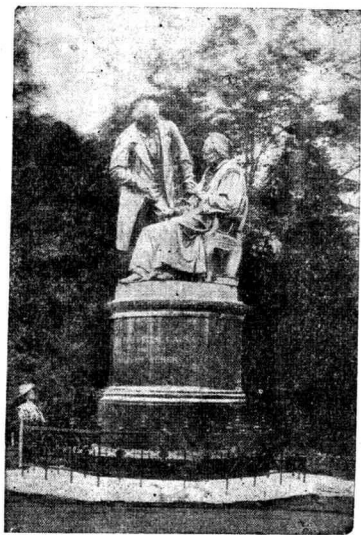
圖二九一 磁傾針。



圖二九〇 磁針。

力之大小，與電力遵從同一之定律。即作用之力與兩極間之距離之平方成反比例，與極之強度（strength of pole）成正比例。由此定律可以決定磁極之強度，與決定電量時相同。同一磁石，其兩極之極度恆相等。

在庫侖之前，有瑞典斯德哥爾摩（Stockholm）之物理學家尉爾克（Wilke）於一七五七年，曾將磁石之作用，歸之於兩種磁流體，其後更經庫侖出而為之補充。據此項假說，以為磁石內含有目力所不能見之小鐵粒，此種小粒之內部有兩種不同之流體存在，使其成為一小磁石。通常之鐵，即由此兩種流體結合而成之中性物。如此兩種流體，彼此分開，即帶磁性，而有上述之磁力表現於外。所謂磁極之強度，不外即此項分離之磁流體之量。此種假說與前

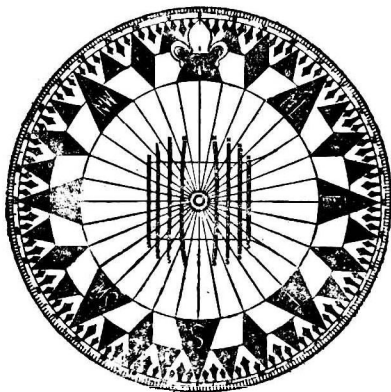


圖二九二  
卑斯及韋柏之銅像，在德國  
格丁根（Göttingen）。



述之電流體假說相類，頗可說明磁石之各種現象。後因磁與電之相互關係發見以後，始知磁現象實由電之運動可以說明（參照第五章第七節）。

在地球上之磁針，其所以能指南北之方向，實由於地球本身，亦為一大磁石。此為一六〇〇年英國之吉爾伯特（Gilbert）之說明，渠對於磁學之研究，貢獻頗多，故負有『磁學界之伽利略』之名。傳聞西班牙之著名航海家哥倫布（Columbus），即已發見磁針所指之方向，並非正確之南北極，與北極星之方向略有差別，且此項差別亦不一定，因地而異。即在同一地點，又因時而變，則為英國之革力布郎德（Collibra）於一六三五年所發見。通常之磁針僅能在水平面內轉動，若改使其能在上下方向轉動，則其靜止時與水平方面，亦將作一定之傾

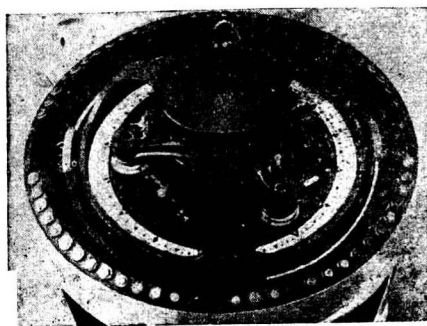
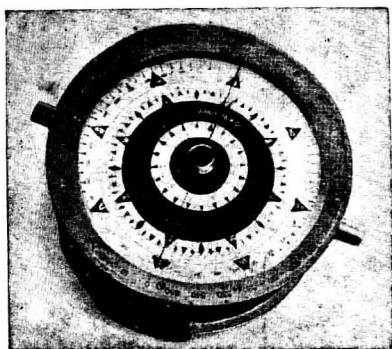


圖二九三 航海用羅盤之圓板。

裏面有數個輕磁針，支在水平方向下，其容器上有一標線表船之頭尾之方向，由此線與圓板上之相對位置，可知船進之方向。

斜，此事爲一五七六年英國製造磁針之人名諾爾曼 (Norman) 者所發見，由上述各項研究，可知地球之磁極，與南北極間，有若干偏轉，其偏轉非一定而有種種之變化。

關於地磁 (terrestrial magnetism) 之研究，曾由德國之皋斯 (Gauss) 及韋柏 (Weber) 兩人自一八三六年開始，繼續數年研究之。以後並在地球上各處實測磁針之方向，即與地理上之



圖二九四 保護羅盤。  
用此保護羅盤，使其磁針不受外部之磁之影響，下圖表其內部狀況。

午線所作之磁偏角 (declination) 及與水平面所作之磁傾角 (dip)。使用羅盤時須先知該處之磁偏角，方能定其方向。

地球磁力之方向之變化，有常年按照一定之規則發生者；有每日反覆而起，周而復始者，亦有突然發生，既無定時又急強烈者。此最後之一種，名曰磁暴 (magnetic storm)；大體與太陽出現之日斑 (sun spot) 同時發生。日斑由氣流之猛烈渦流所成，表現劇烈之磁力作用，與兩磁極相當。

### 第五節 磁之感應



圖二九五 有兩磁極之日斑。

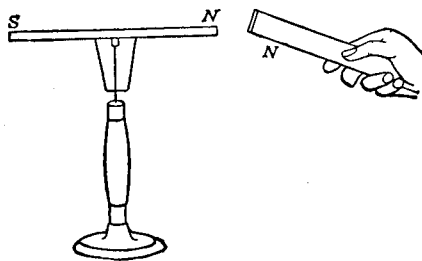
此圖爲一九一七年二月八日照得之相片，左角有一小墨圓點，表示地球之大小，以便比較。

執鐵片近磁石之極，則鐵片自身亦成一磁石，或撒鐵粉於其上，或以一磁針，均可檢出之，如圖二九七所示。此現象，曰磁之感應（magnetic induction）。通常之鐵，必須在磁石近傍，方能表現此項作用，距磁石稍遠，即行消滅。

受磁感應而成磁石之鐵片，其與原本磁石相近之一端，成爲異名之極，較遠之一端則成同名之極。鐵之所以能被磁石吸引而去，即由於此。因感應之結果，作用於異名之極間之引力，終較作用於同名之極間之斥力爲大故也。

原本之磁石愈強，則其感應之作用愈大，但受感應者之強度，不能作無制限之增加，而有一定之飽和度。既達飽和以後，無論如何加強原本之感磁石（inducing magnet），但應磁石（induced magnet）之強度仍不變。

如用鋼（steel）代替通常之軟鐵（soft iron）實驗之，其感應狀



圖二九六 鐵之磁感應。

况大致相同，僅所帶磁性，不及磁鐵為甚而已。但同時有一特性，為軟鐵所無，即若俟鋼已成磁石之後，即令將原本之磁石取去，鋼上之磁仍能長久保留，永久成一獨立之磁石。此處所述鐵與鋼之差別，通常用頑性 (coercive force) 一語表之。即鋼之頑性較大而鐵之頑性較小。殘留於鋼上之磁，曰餘磁 (residual magnetism)。

利用鋼之頑性，可以造成永久磁石 (permanent magnet)。其最簡單之方法，如圖二九八所示。用條形磁石之一端在鋼條上，沿一定之方向擦過，數遍之後，即成磁石。如用條形磁石之北極摩擦，則最終一端現出者，為反對之南極。又收藏磁石時，恆將兩條形磁石裝在平行之位置上，且使兩者之極，互相反對。如此，則相互間之感應，作用可以防止其磁力減弱。其作馬蹄鐵形者，曰蹄形磁石 (horse-shoe magnet)，用處較多，即由於此。

古時以為磁性為鐵及其化合物所特有者，其後始知鎳及鈷等，亦均有

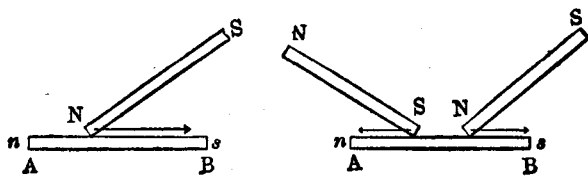


圖 九七 磁石之製法。

之，但不如鐵之甚。此等物質在今日通稱爲鐵磁質 (ferromagnetic substance)。除此而外，其他之一切物質，對於磁之感應無一不受其影響，僅其程度遠遜於鐵磁質而已。於是磁性遂被一般認爲一切物質所具有之通性，此中如銻、銻及磷三種物質，受磁感應後，不特不爲磁石所吸引，轉而被磁石排斥而去，故通稱之爲反磁質 (diamagnetic substance)。與此相對則曰順磁電 (paramagnetic substance)，反磁性係一七八八年布魯格曼斯 (Brugmans) 所發見，而加以反磁性之名，使與順磁質相區別者，則爲英國之有名化學家法拉第 (Faraday) 時爲一八四六年。

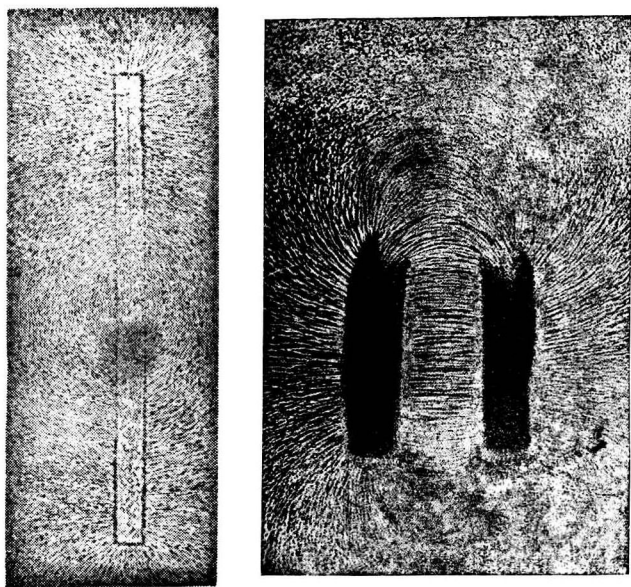
## 第六節 電場磁場及介質

電與磁之間，有若干相同之點。其中最爲顯著者，即電力與磁力，均遵從同一之庫侖定律，又對於感應作用，兩者亦同。僅電有導體而磁則無之，不同只此一點而已。

在磁石上放一玻璃板，或紙一枚，然後撒細鐵粉於其上，微敲之，則鐵粉各沿一定之曲線排列，如圖二九八所示。此時各鐵粉由感應作用，各成一小磁石，互相吸引而成此狀，由各曲線，可知各點

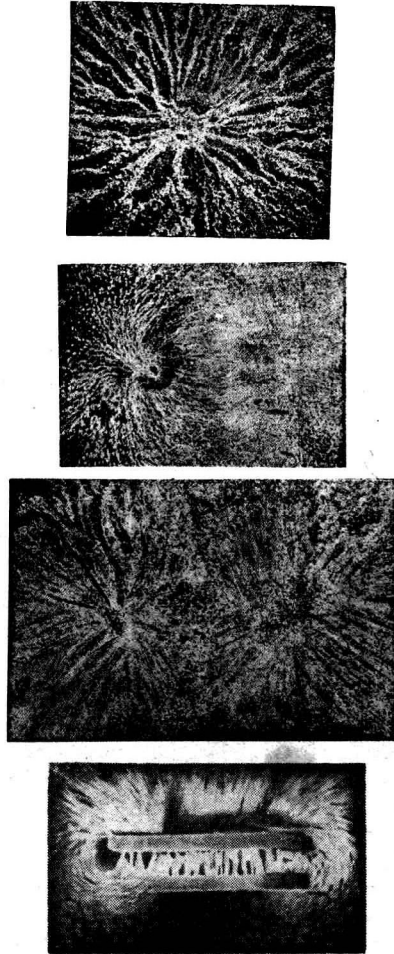
作用之力之方向。對於電亦完全與此相同。在帶電體上放一玻璃板，板上撒佈石膏粉末，亦得表示力之方向之曲線，如圖二九九所示。又圖三〇〇亦與此同。如是而得之曲線，曰力線 (lines of force)。電力及磁力作用之處，曰電場 (electric field) 及磁場 (magnetic field)。其狀況即由此等力線表出。

力線恆以陽電或磁石之北極爲其出發點，以陰電或南極爲其終點。或僅有出發點在有限之距離內，



圖二九八 磁力線。  
左爲條形磁石； 右爲蹄形磁石。

其終點在於無窮遠處。或由無窮遠處而來，以陰電或磁石之南極所在處為其終點。假定由一定量之電量或磁量發出之力線，亦有一定之數。即按照其密度，引一定數之線，作為力線，則由力線之集中或離散情形，可以推知各該點上作用之力之強弱。將單位電量或單位磁極 (unit pole)，將來此點時，所受之作用之力，即定為此一點之場之強度 (intensity of field)。如力線成為直線，且具有



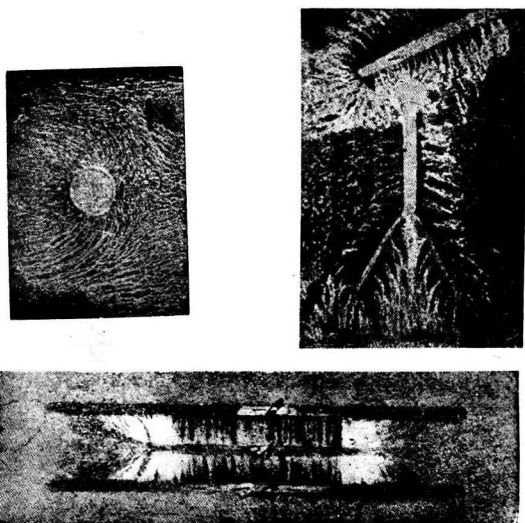
圖二九九 電力線。

- (1) 表單獨之陰電， (2) 表陰陽兩電對立時，  
 (3) 表兩陽電， (4) 表二錫箔上帶反對之電。



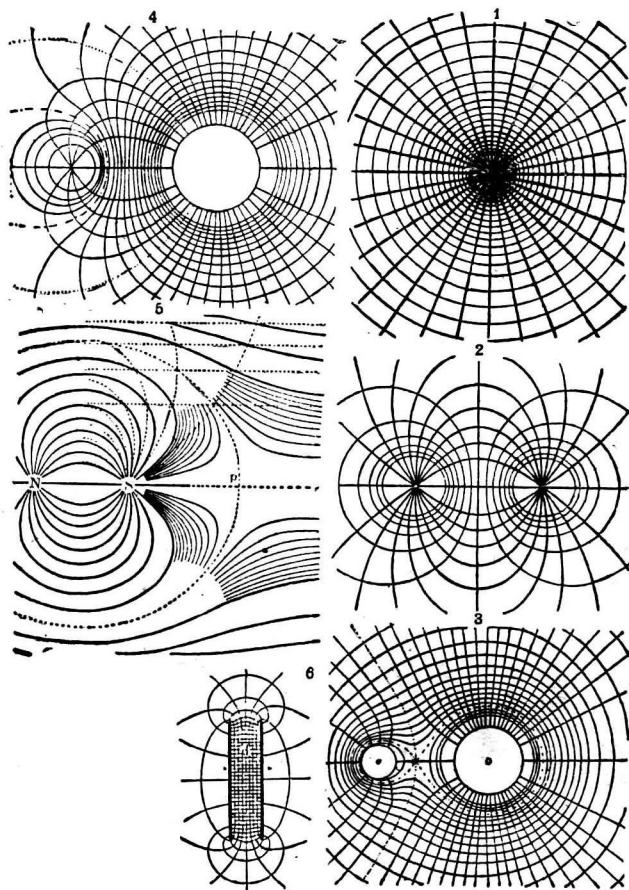
一定之密度，則其處即為均場 (uniform field)。

試作一而，與力線垂直相交，此面在重力場內之水平面相當，因水平面亦與重力之方向恰相垂直。前於第三節內，曾云電在導體內之運動時，與器內液體之水平面相當之量，曰電勢。今在電場或磁場內，放一電量或磁量，其受電力或磁力作用而生之運動亦可用此水平面表出之。由此着想，則與力線垂直之面，應稱之曰等勢面 (equipotential surface)。



圖二〇〇 靜電時之電力線。

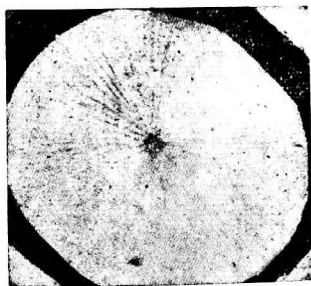
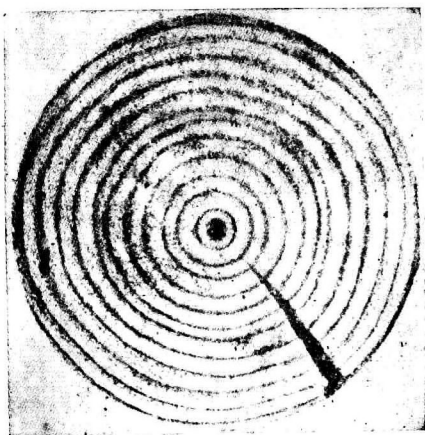
- (1) 表在均一之場內放一帶陰電之銅圓之狀況；
- (2) 表執一帶電之棒與驗電器接近時之狀況；
- (3) 表象限電流計之象限內造成之電場。

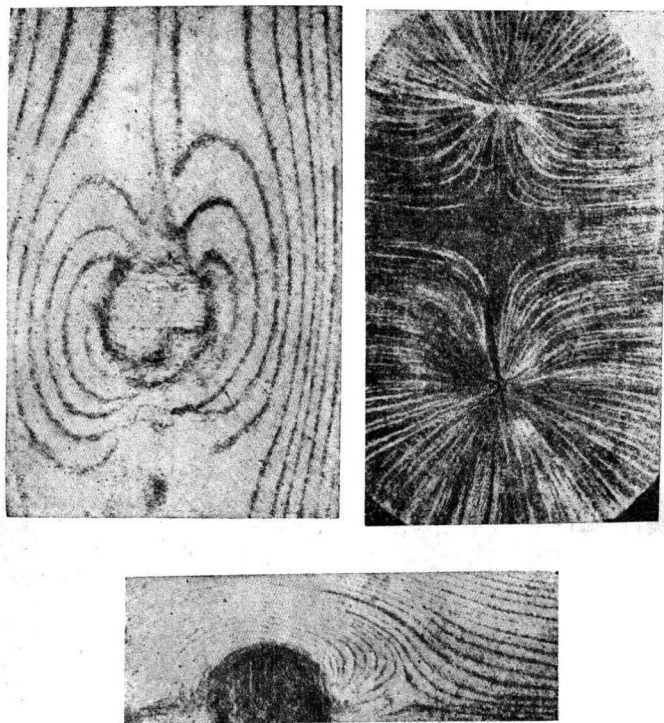


圖三〇一 力線及等勢面。

- (1) 陽電或陰電單獨存在時之狀況； (2) 大小相符，等號相反之兩種電量；  
 (3) 大小不等符號相同之兩種電量； (4) 大小不等符號相反之兩種電量；  
 (5) 大小相符合號不同之兩磁極或電量在均一場內； (6) 兩導體上各有不同之電量時。

surface)。由一等勢面上將電量或磁量移至他一等勢面時，如其移動之方向與力之作用方向相同，則得若干之功，如其相反，則消費若干之功。如所作之等勢面，其相鄰兩面間有單位電量或磁量移動時，所得或所費之功，恰等於一爾格，即可由此等勢面之疎密，查知各點上之場之狀況。按照上述之規定，描出力線及等勢面，如圖三〇一所示。



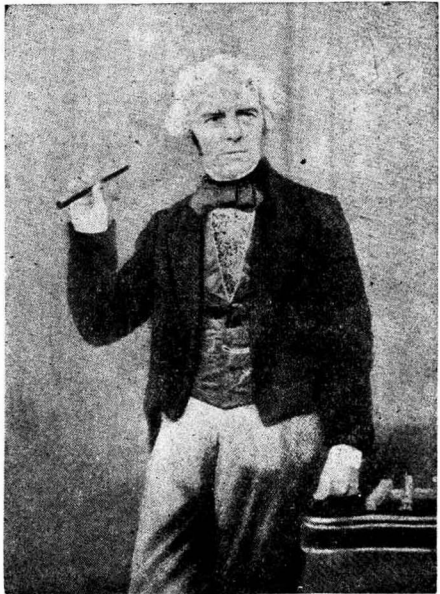


圖三〇二 各種之木理。

與前圖所示之力線及等勢面比較，即見兩者之間，極相類似。

關於電場及磁場之各項性質，至一八三五年，始由法拉第開始作詳細之研究。在此以前，均以為電磁力作用之根源，即在於帶電或帶磁之物體本身，並不注意於此物體以外。但法拉第則不然，由磁石對於其近傍存在之鐵粉，有感應作用之一現象，遂造成場之概念。假定場內有傳遞力之介質 (medium) 存在，由介質之狀態，表現成爲

電力或磁石之作用。由上圖可見在電場或磁場內，凡有引力作用之處，其力線均互相銜連；凡有斥力作用之處，其力線均互相平行。法拉第由此一事實，遂想到力線有如彈性之橡皮線，受有張力作用，故有自行收縮之性質。同時又由若干條力線包圍而成之管，即名力管 (tube of force) 有向橫



圖三〇三 法拉第。

方膨脹之性質，故各力管互相以壓力作用。

由上述法拉第之思想，不僅可以明瞭電力及磁力之作用，並且可以解決玄學上之一疑問，即所謂超距作用 (action at a distance)。由此可知，雖隔虛空無物之空間，力亦能藉介質之狀態次第爲之傳遞，無所謂超距作用也。

法拉第更於一八五八年發見一新現象，足以證實其主張之介質說。容電器之兩板間，如用各種不同種類之物質充滿後，一一檢查之，即見其電容之值，隨物質之種類而異。例如其間用石蠟，則電容爲二倍，用蟲膠則爲三倍，用玻璃則爲六倍，用水則爲八十倍。此等數值，命名爲各物質之介質常數 (dielectric constant)。容電器之電容，既因介質常數而異，可知作用於導體間之力，不僅關係於兩導體上所帶之電量，並與充滿其間之介質，有密切之關係存在。法拉第對於導體表面上有電存在之現象，亦由力管爲之解釋。以爲沿圖三〇四所示之力管上，任何一處，只須注目於一極小之範圍，即見其處之陰陽兩電，互相分



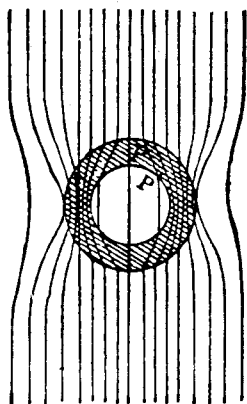
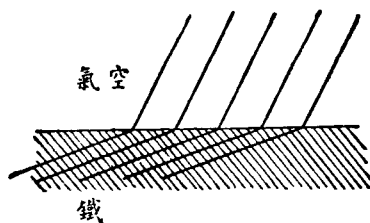
圖三〇四

離，各向一方移動。故在中間者，固與比鄰之反對電互相抵消，而在兩端者，即力管之開始及其終了之處，均有電存在其上。由此着想，則導體表面上出現之電，並不在於導體之本身，仍在於與導體接觸着之介質之中。此種介質即所謂以太 (ether) 是也。以太瀰漫於全空間之中，無所不屆，如遇空間中恰有一種物質存在，則此物質之分子內之電，亦互相分離，使上述之作用加增。在物質內引起此項之電之分離，一般通稱之曰電位移 (electric displacement)。其中物質成爲電位移之狀態，曰極化 (polarization)。

以上所述者雖僅就電之一方面而言，但對磁，亦完全適用，自無庸論。與電之極化相當之量，在磁之一方面，則曰磁化 (magnetization)。舉凡一切之磁性體及絕緣體，均能發生此處所述之極化作用。但若在導體內，因電之移動極其自由，故由極化作用分離而成之陰陽電，不能即殘留於其發生之地點，以維持極化之狀況，必須移動至於保持力之平衡之處，方能靜止不動。故集中於導體之表面。在導體內部，絲毫無電之存在，即由於此。通常對於由位移而出現於物體境界面之電，特稱之曰視電荷 (apparent charge)，其在導體內因自由移動而集合於表面之電，則稱之曰自由電荷。

(free charge) 以相區別。通常出現於導體表面上之電之全體，乃其內部之自由電荷與由外部介質位移而生之視電荷之代數和，通稱之曰真電荷 (true charge)。

由此推論，則放在電場或磁場內之物體，何以發生感應現象之理，異常明瞭。如為絕緣體，則由於極化發生之視電荷；如為導體，則由於自由移動之自由電荷。又在絕緣體內部，雖有力線通過，而



圖三〇五

上圖表磁力線在物質境界面折射之狀況；

下圖表磁力線在鐵之內部彎曲之狀況。最內部之磁場減弱。



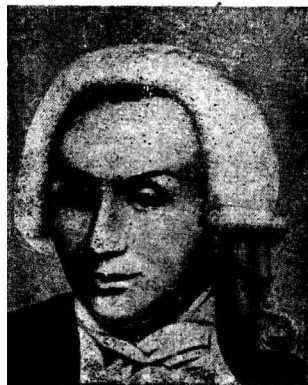
在導體內部則反是。最少在平衡狀態時，其全體應成爲等勢 (equipotential)，故力線無存在之可能。簡言之，即導體應將力線遮斷，故用導體包圍之空間，絲毫不受外部電力之作用。由此觀之，則真正能傳達電力者，只限於真空空間或絕緣體，故又稱爲介質 (dielectrics)。

其後於一八六一年，馬克斯維耳更由數學理論，將上述法拉第之思想，爲之推出。法拉第之卓見，及馬克斯維耳用數學語言爲之翻譯之功，均成不朽。

## 第五章 電力學

### 第一節 電池及電流

十九世紀實爲建成電學文明使人類生活爲之面目一新之一世紀，而其前驅則爲賈法尼 (Galvani)之發見電流，及電池之發明。賈法尼爲十八世紀意大利之醫師，於二十五歲時，任波倫亞 (Bologna)大學之解剖學教授。曾作實驗，加電於青蛙之腳上，則其筋肉發生收縮。一日其妻用其解剖刀，欲截去蛙脚及脊髓之一部分，不意刀與蛙一接觸，即見其筋肉發生激烈之顫動。賈法尼聞之，自身再試一遍，亦復如是。當時之蛙，係



圖三〇六 賈法尼。

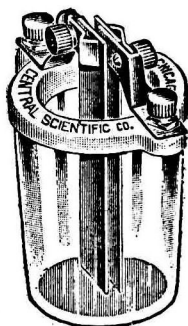
懸在銅鉤之上，而銅鉤則懸在鐵棒之下，由此遂發見鐵與銅相接，可以生電，並另外用銅與鐵實驗證明之。其結果發表於一七八六年。當時又有意大利之弗打（Alessandro Volta），再作賈法尼之實驗時，曾用一條導線，一端連結一金圓，他端連結一銅圓，而將金圓及銅圓放在舌之兩端，使舌與接觸，即感受震動，知有電發生。一七九



圖三〇七 弗打。

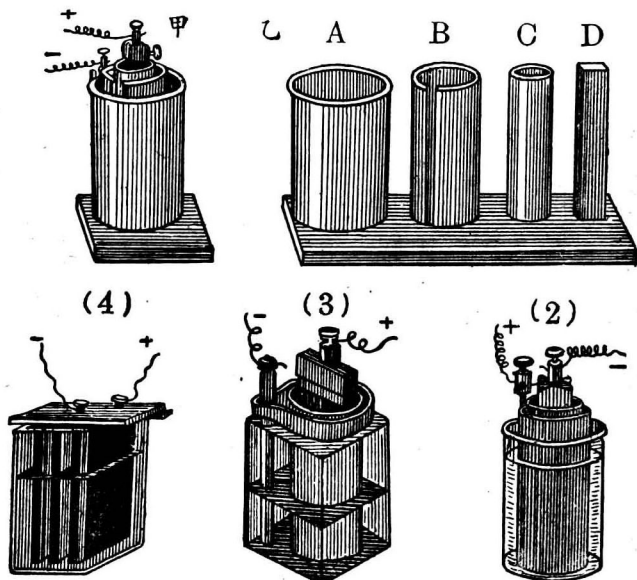
六年造成弗打電池（Voltaic cell），如圖三〇八，係在銅板及鋅板之間，夾用食鹽水或酸類浸濕之紙或布而成。用導線將銅與鋅連結，即有電由其上陸續不絕流過，因稱之曰賈法尼電流（Galvanic current）。

其後關於電流之現象，相繼發見，發生電流之器，即電池之形狀，亦種種不一。一八三六年有丹聶爾電



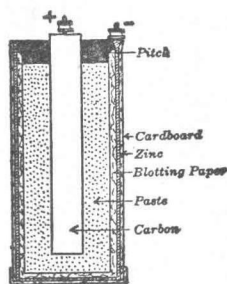
圖三〇八 弗打電池，上方露出之物，即銅板與鋅板。

池 (Daniell cell) 一八四一年  
 有本生電池 (Bunsen cell) 一  
 八六七年有勒克蘭社電池  
 Leclanché cell 一八七三年  
 有葛拉克電池 (Clark cell)。  
 均其中之主要者，如圖三〇九。  
 凡此各種，均用兩種金屬，例如  
 鋅及銅；或鋅及炭，浸入酸內而  
 成。又特為便於攜帶起見，用適  
 宜之物質，吸收酸液使其滲透，  
 然後密封於盒內，將金屬之端  
 露於外方，如是而成者，曰乾電



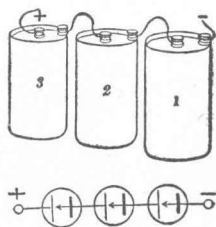
圖三〇九

- (1) 本生電池； (2) 丹森爾電池；  
 (3) 勒克蘭社電池； (4) 重鉻酸電池。



圖三一〇 乾電池。

中央表炭棒，周圍為炭及二氯化錳之粉末。外用鋅板製成，其內側放紙或棉花與粉末同浸在氯化銨之溶液中，令滲透後，始封入盒內。



圖三一— 電路。

上端兩條長短之直線，表電池。通常以較短較粗者表陰極，以較長較細者表陽極。箭頭則表電流之方向。

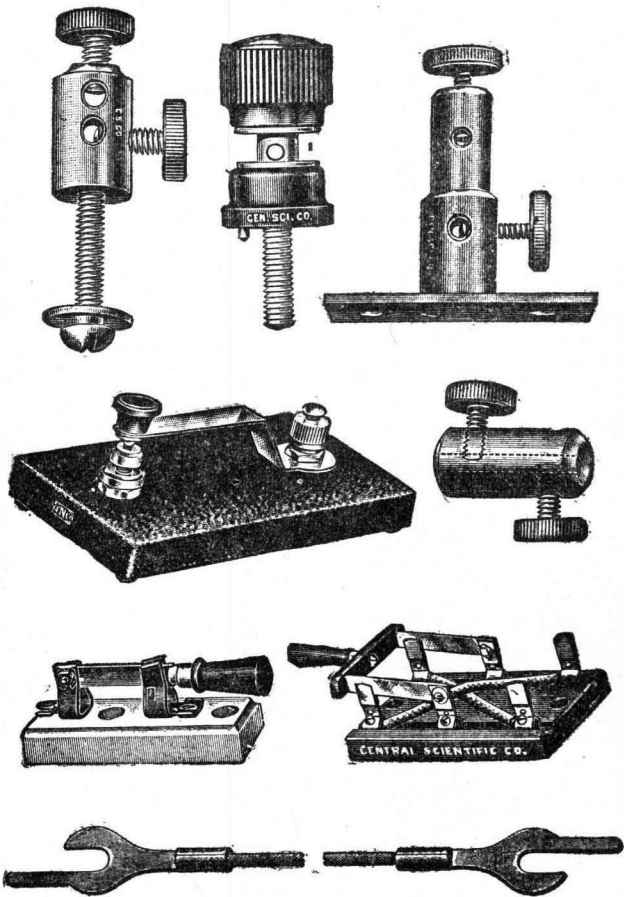
池 (dry cell)，如圖三一〇。

製造電池之兩種金屬中，銅或炭之一方，名曰陽極 (positive electrode)；鋅之一方則曰陰極 (negative electrode)。因前者恆帶陽電，後者恆帶陰電，故名。此兩極間之電勢差 (potential difference) 曰電池之電動勢 (electromotive force of a cell)。其值遠在起電機兩極之電勢差之下，通常不過等於一伏特乃至二伏特而已。用導線將此兩極連絡時，電雖在導線中陸續流過，以相中和，但兩極之勢差，恆保留有一定之數值，決不立即消滅。由此可見電池之內部，必有一種現象，正在

進行不已，方能供給此項與勢差相當之能（參照第四節）。因此，使用電池可以得陸續不斷之電流。

電流通過之導線，曰電流之電路（*circuit*），用導線連結，使其中電流可以通過，則曰結通電路（*to close a circuit*）。

電流仍不外電在導線內移動而成之現象。據第四章第二節所述之度非之二流體說，則陽電自勢高處流向勢低處，陰電則與之相反。究竟此兩種不同之電，應在途中何處相遇而相中和實屬一疑問，不能具體答覆，是爲此種假說之一缺點。但若採用佛蘭克林之一流體說，即無此弊，只須想像一種流體，如何循環即足。輓近發展而成之電子說，亦可導出同一之理論（參照第九章第九節）。總之，此時假定由勢高之一方，向勢低之一方，爲電流之方向，而於單位時間內，經由導線之截面流過之電量，可以量度其電流之強度（*intensity of current*）。即每一秒間，有一靜電單位之電量流過時之電流強度，可定電流強度之單位，是爲一靜電單位。其三十億倍，即一秒間流過一庫侖之電量時，曰一安培（*Ampere*），由對於電流有莫大貢獻之安培（*Ampere*）得名，是爲電流強度之實



圖三一二 用導線連結之電路中，所插入之器具。

用單位。

## 第二節 電阻

用各種金屬製成之導線，連結同一之電池實驗之，所得之電流強度，種種不一，隨導線之種類粗細及大小而定。德國之歐姆（Ohm）於一八二六年欲加以研究，遂先發見關於電流強度之定律如下：

「電流之強度，與其經過之導線之兩端之電勢差成正比例。」

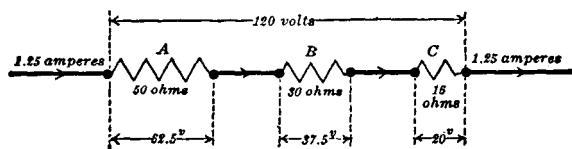
此定律即今日所謂之歐姆定律（Ohm's law）。電勢差與電流強度之比，對於一定之導線，其值恆一定不變，是為電阻（electric resistance）。就



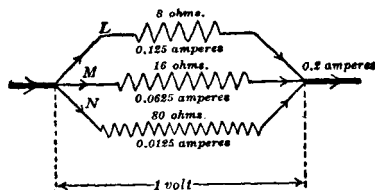
圖三一五 歐姆。



同一之勢差而言，電阻大之導線，其電流弱；電阻小之導線，其電流強。在單位勢差間，有單位之電流流過時，此時之電阻用作電阻之單位，曰一靜雷單位之電阻，其九千億分之一，曰一歐姆。(ohm)，是為電阻之實用單位。就同一物質製成之導線而言，其電阻與導線之長度為正比例，與其粗細為反比例。長一厘米，截面積一平方厘米之導線所有之電阻曰各種物質之電阻係數 (specific resistance)。電阻係數之最小者為銀，其次為銅，再次為鎬、鋅、鐵及鉛等。汞及鉛之電阻係數，約為銀銅等之 100 倍。又各種物質之電阻係數，因溫度不同，亦略有變化。但實際上則以長 103.30



(a)



(b)

圖三一四 導線之連絡

(a)串聯

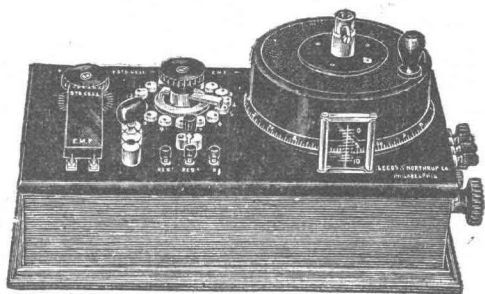
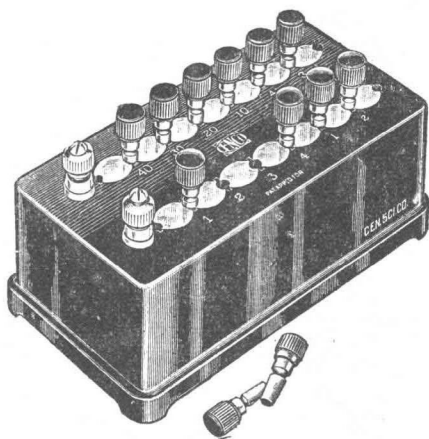
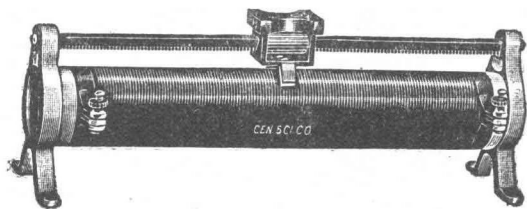
(b)並聯

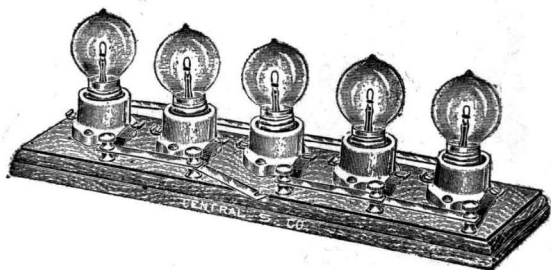
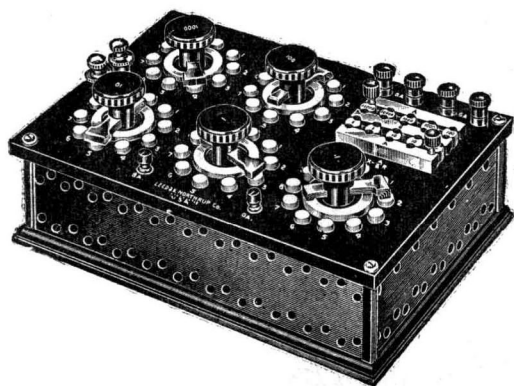
厘米，截面積一平方毫米之水銀柱在溫度  $0^{\circ}\text{C}$ . 時之電阻，作為一歐姆，一切之量度均以此為標準。

將數條導線連結於電路內時，有兩種方法，如圖三一四所示。各條順次啣連，成一單一之長電路如 (a)，曰串聯 (connected in series)，此時全體之電阻，即等於各導線之電阻之總和。如將各條導線之兩端，彙集於兩點，成為若干條並行之分路，如 (b)，曰並聯 (connect d in parallel)，並聯全體電阻之倒數，等於各條導線之電阻之倒數之總和。

欲得強弱適當之電流，只須適宜配置其電路中之電阻即得。為此目的而設之電阻，曰變阻器 (rheostat)，有種種不同之形式及構造，如圖三一五。

電阻既隨溫度而變，故在精確之變阻器，務須使用變化極少之金屬導線。合金中有 *manganin* 即銅、鎳、鋅齊，及 *constantan*，即銅與鎳等量合成者，均為此項目的造成之合金，其對於電流之電阻，幾不受溫度之影響。又如能預知某種金屬之電阻對於溫度而生之變化，即可逆轉利用之，量度其電流之變化，推出其所受之溫度變化。在極高之溫度，通常之溫度計已失其效用時，即由此法以一





圖三一五 各種電阻器。

鉛導線插入其處，量度其電阻後，即可求得溫度，是為高溫計。(Pyrometer)。

### 第三節 電流之熱效應及熱電流

導線中有電流通過時，同時有熱發生，此事在一八一三年，已由英國之契爾德稜 (John George Childron) 發見。當時曾造一巨大之電池，供此事之實驗。使用之銅板及鋅板，長六英尺，寬二英尺八英寸，各用二十枚間隔而成。由此電池而生之電流，在直徑  $\frac{11}{100}$  英寸之鉛線中通過時，鉛線竟成赤熱狀態，雖在強烈之日光之下，亦現出紅色。此外更用其他各種金屬之導線，行同一之實驗，發見各種導線之中，電阻愈大，其熱亦愈多。其後又有德斐 (Sir H. Davy) 於一八二一年，作同樣之實驗。一八四一年，焦耳 (Joule) 更利用卡計 (calorimeter)，將電流所生之熱，精密測定，遂發見下列之定律，即

『由電流在導線之一部分生出之熱量與電阻及電流強度之平方為正比例。』

此關係曰焦耳定律 (Joule's Law)，極為重要，由此可以證明電流亦屬能之一態。在歷史上，於發見

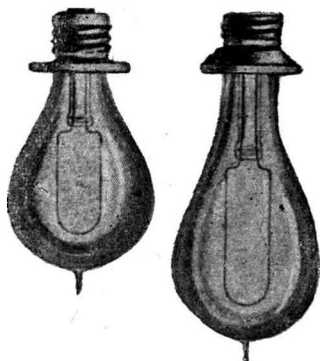
此定律之後，焦耳繼續又量度熱功當量，其結果遂成爲赫爾姆霍斯(Helmholtz)之能量不滅原理。



圖三一七 愛迪生。



圖三一六 白熾電燈。

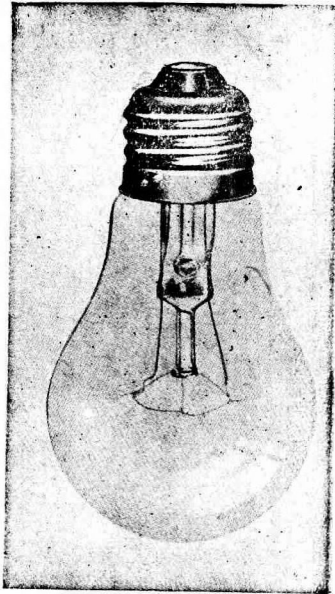


圖一八 愛迪生之炭絲電燈泡。

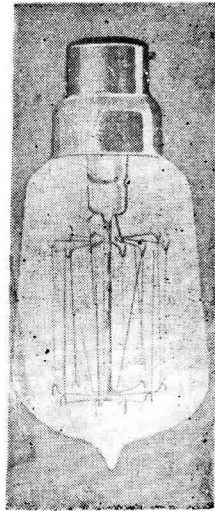
此爲1881—1882年式。

在實用單位上，一安培之電流，在  
 電阻一歐姆之導線上通過時，一秒間  
 應生出  $\frac{1}{4.19}$  卡之熱量，再改換成功，  
 即恰等於一焦耳。通常使用之電之實  
 用單位實際上即在使此種關係成爲  
 最簡單之形式而選定者。

在電路中如插入電阻特別大之  
 導線，則此一部分所生之熱，亦較別部  
 爲多，甚至於熱極遂發而爲光。通常所  
 謂之白熾電燈 (incandescent lamp)  
 卽其應用，對於現代文明生活，其貢獻  
 之大，爲世所周知，無庸贅述，如圖三一



圖三二〇 封氣燈泡。

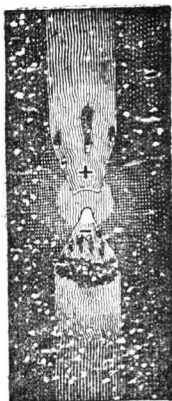


圖三一七 鎢絲燈泡。

八。最初之電燈，係一八七八年經美國之愛迪生 (Edison) 手造而成。使用極細微之鉑絲 (platinum filament)，使其發光。對於實用，須擇價廉之物質，方能使用。因此繼續研究，不久發明用竹之纖維燒成之炭絲 (carbon filament)，代替鉑絲。但炭絲受燒燃作用，應即消毀，為避免計，特將其裝在真空之玻璃泡內，如圖三一八所示。其後更經多數之人改良，用熔點較高之金屬絲代替炭絲。例如一八九八年由德國之衛爾斯巴哈 (Auer von Welsbach) 造成之銻絲燈 (Osmium lamp)；一九〇五年由波爾敦 (Bolton) 造成之鏷燈 (Tantalum lamp)；一九一一年由英國之古力琪 (Coolidge) 完成之鎢絲球 (tungsten lamp)；如圖三一九所示，均為近時通常使用者。又有在泡內封入氮氣或氬等不活潑之氣體，以防金屬絲之氧化，或其分子飛散，致其實質因而破壞者，是為封氣燈泡 (gas-filled lamp)，如圖三二〇所示。

欲得較通常電燈更強烈之光，則用弧燈 (arc lamp)，由兩條磁棒相當之距離相向而立，使電流自其間流過而成。開始時將其間之空隙縮小，俾其電路可通，發生電花，然後使棒互相分離，則由其間發生之碳汽中，有電流流過，現為弧狀之光，如圖三二三所示之狀況。電流發出之一方之



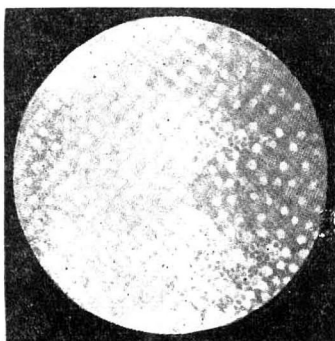


圖三二二 弧燈。

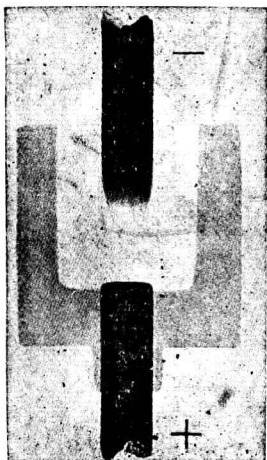


圖三二一

鎢絲受熱而起之組織破壞。  
(用6000倍之顯微鏡放大)



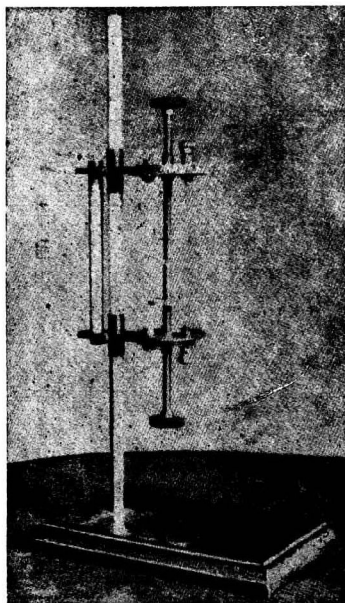
圖三二三 弧燈陽極之凹處之光點。



圖三二五

四門子式電燈。

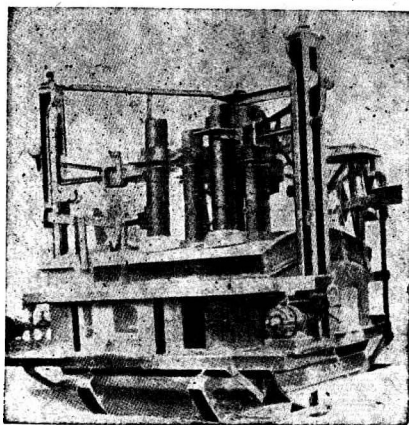
電弧之陽極，裝在石灰器底。

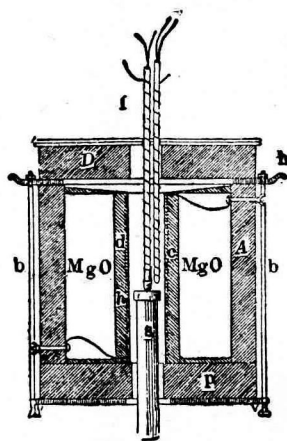


圖三二四 分光用弧燈。

一次可燃十噸之大規模之爐 炭極長五英尺。

圖三二六 赫射式電爐。

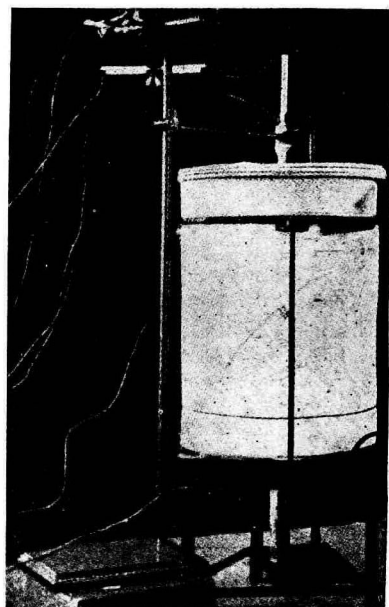




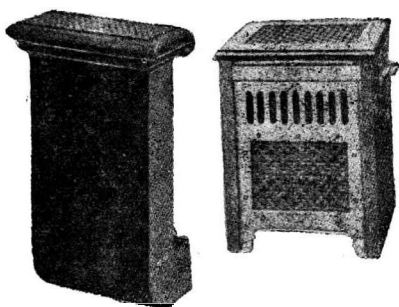
圖三二七 高溫發生及量度用電爐。  
此為精密量度用之電阻爐之一種，器內成爲高溫，同時可由熱電之理量度其溫度。

碳棒，即陽極之尖端，次第四陷，達於非常之高溫，約爲  $3500^{\circ}\text{C}$ ，故發出強烈之光，達於數千燭光，其用途極廣，且極重要。例如探海燈 (search light)，影戲，映畫器等，均使用之。

弧燈不僅利用之發光，又可利用之發生大量之熱，最初利用之者，爲德國之西門子 (Siemens)。



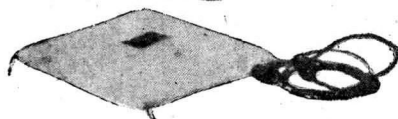
電爐



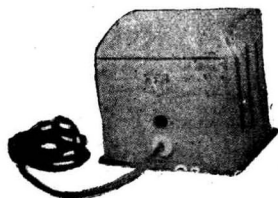
電熨斗



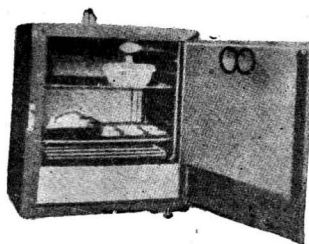
電褥



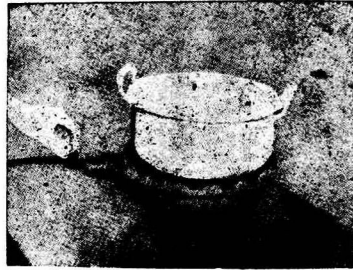
電烘爐



電箱



圖三二八 電熱器



圖三二八 電熱器。

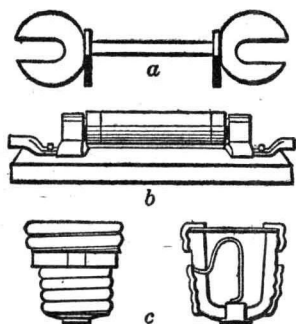
means) 將弧燈用碳棒裝在石灰器內，如圖三二五所示。器中放有苦士 (magnesia) 及碳粒以防石灰之碳化，是為電爐 (electric furnace)。近來多數工業及物理化學之實驗室中，均使用此種電燈，隨使用之目的不同，有種種之形式如圖三二六所示。用電爐熔化物質時，大多數即用欲熔化之物質作電爐中之一極。

又有一種電爐，不用弧燈，而直接利用導線所生之熱而成者，曰電阻爐 (resistance furnace)。圖三二七即其一例。用此可以研究各種物質在高溫度時所呈之性質。冬日屋中使用之電暖爐 (radiator)，及其他各種家庭用之電熱器 (heater)，如圖三二八所示，亦同樣利用導線之電阻而成。此等用具上，使用之導線，近來大都使用鎳及鉻合成之鎳鉻齊 (nichrom)，即鎳內含有 2 至 12% 之鉻者。此物之電阻有銅之電阻之 60 倍之大，故極易生熱。

電路之一部分，如因電流發生強熱，與可燃性物質接觸，即發火燃燒。故由戶外給電之幹線

(main line) 引電流入室內，以供電燈或電熱器之用時，對於此事，須特別加以注意，俾防火災。通常在此種電路中插入一小段特殊之金屬線，稱曰保險絲 (fuse wire) 或曰鉛絲，其熔點頗低。如通過此電路中之電流，已超過一定之強度，則此一段保險絲，即由所生之熱熔化，因此電路不通，即不致發生危險。

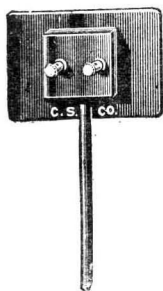
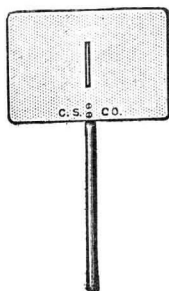
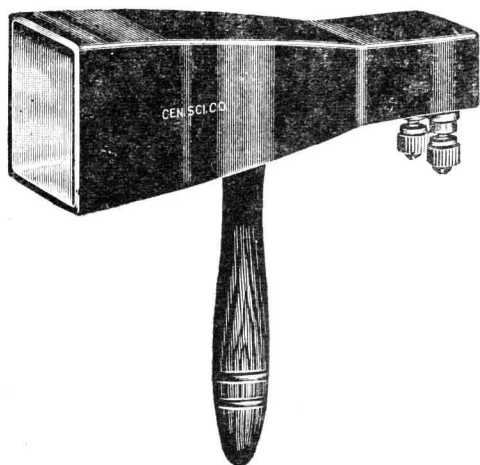
用兩條種類不同之導線相連，使其成一可通之電路，將兩接頭 (junction) 中之一加熱，使其



圖三三〇 保險絲。



圖三三一



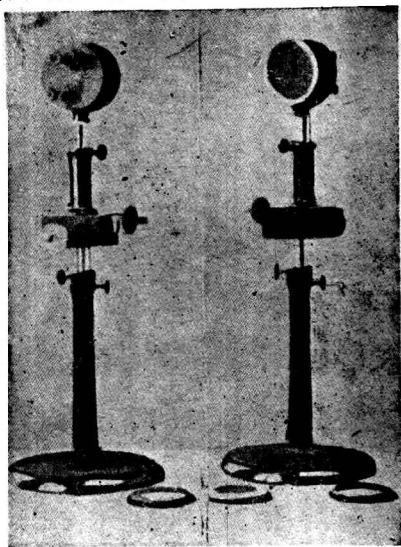
圖五三二 熱電堆。

溫度較其他一接頭為高，即見此電路內雖無電池等類電源存在，亦有電流流過。此現象係一八一五年法國之德賽奴 (Desaiguès) 最初發見，一八二二年得德國之則貝克 (Seebeck) 加以詳細

研究，定名曰熱電流 (thermo-electric current)。發生此項電流之器，曰熱電池 (thermo-electric element) 或曰熱電偶 (thermo-electric couple)。

熱電流之方向，大體可由連接之金屬種類而定。例如連結鐵與銅，則在受熱之接頭處，電流係由銅流向鐵而去，如圖三三一所示。但若將此全體放在高溫處，則電流之方向，完全反過。此種轉變現象，在銅鐵接合時，發生於  $550^{\circ}\text{C}$ 。以上之溫度。

熱電流之強度，通常與兩接頭之溫度差，有密切之關係。如能預知此項關係，即可利用之以作溫度之量度。通常對於極高之溫度，及極低之溫度，不能使用普通之溫度計時，用此法量度，異常便利。量度高溫處使用之熱電偶，一方係用鉑線，



圖三三一

量度輻射光譜中之輻射熱使用之熱電堆。

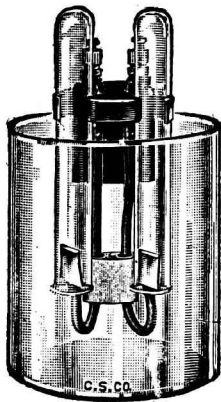


他方則用鉑銖齊之線。

又量度輻射熱 (radiant heat) 亦可使用熱電偶。此時大都聯合若干個熱電偶而成，特稱之曰熱電堆 (thermopile)。例如用銻及鉍之棒各若干條，交互連絡，然後將各接合點彙集成爲兩處，一處上塗油煙，以此正向輻射而來之熱，經油煙吸收之後，此一接頭之溫度，爲之升高，遂成爲熱電池，其中有熱電流通過。由電流之強弱，即可推算其吸收之熱量。如圖三三二及圖三三三所示，即量度全輻射熱及量度其光譜中之熱量時使用之精密熱電堆（參照第七章第十節）。

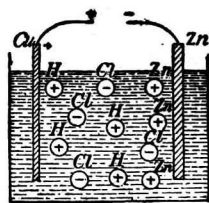
#### 第四節 電流之化學作用

將鉑板兩塊，浸在稀硫酸內，用導線將此兩鉑板，各連結至一電池之兩極上，使電流由其上通過，即見兩板上均有氣體發生，成爲細泡，昇至液面之上。且與電池陽極連結之鉑板上發生者爲氧氣，與



圖三三四 水之電解。

陰極連結之鉑板上發生者為氫氣，如第二三四圖所示。此乃稀硫酸中之水，受電流之作用，而起之化學的分解。當弗打於一七九六年造成電池以後用同種電池二〇個，串聯使用，即發見此項現象，通稱之曰電解 (electrolysis dissociation)。發生電解之溶液，曰電解質 (electrolyte) 插入其中之兩金屬板，曰陽極 (positive electrode) 及陰極 (negative electrode)。



圖三三五 電解之游子。

一八〇五年格洛屠斯 (Grothius) 最初解釋電解之現象，以為分解後之兩成分，因受兩極之引力作用而起，與磁石之極對於鐵之作用相同。其後於一八三三年，始經法拉第為之改良，成為現今之正當解釋。即在溶液內，電解質之分子成分，成為兩種游子 (ion)，游子受電流之作用趨向陽極及陰極，遂成此現象。例如稀鹽酸內分子，分解成為氫游子及氯游子。前者帶陽電荷，後者帶陰電荷，故伴同電流受電勢差作用，趨向陰極及陽極。其中之氫游子，達於陰極後，逕行遊離而出，成為氫氣，而氯游子則與水發生化學作用，使水中之氧氣游離而出。酸類，鹼類以及鹽類之水溶液，均可

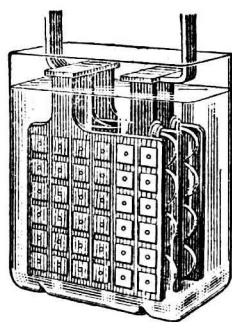
成爲電解質，當是發生電解時，金屬及氫游子，恆帶陽電趨向陰極，故名陰向游子 (cation)，其他之成分，則帶陰電趨向陽極，故名陽向游子 (anion)。

據法拉第之實驗結果，由電解作用在兩極析出之物質之質量，與電流之強度及通電之時間之相乘積，即與電量爲正比例。又由一定電量析出各種物質之質量，與其化學當量 (chemical equivalent) 爲正比例。此關係通稱之曰法拉第定律 (Faraday's Law)。據精密之量度，由 1 安培之電流，每 1 秒間析出之銀爲 0.001118 克。故即用此作爲實際上量度電流強度之標準。又銀之原子量爲 107.88，其原子價爲 1，故析出其 1 化學當量所需要之電量應爲  $\frac{107.88}{0.001118}$  即  $9.649 \times 10^4$  庫倫。無論就任何物質計算之，此數均同，是爲一價之游子所應有之電量。

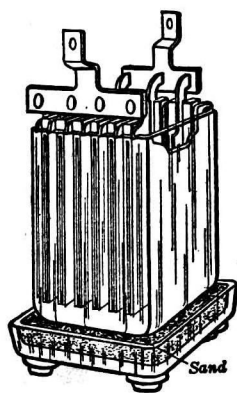
通常之電池，亦係使用電解質之水溶液，而於其內浸有兩種金屬板，故亦可看作一種電解器，其溶液內分離而成之游子，隨同電池本身之電流，驅向兩極，陽向游子集於陽極，陰向游子集於陰極，故在電池內部，其兩極之電勢差，爲之減少。簡言之，即在溶液之內，似有一第二之電池，其電動勢恰與最初之電池之電動勢方向相反，因此原電池之電流，爲之減弱。此現象係一七九一年由英國

之化學家基爾 (James Kiel) 所發見，名之曰電池之極化 (polarization of a cell)。欲免此弊，須用去極劑 (depolarizer)，例如重鉻酸鉀，即其一種，投入溶液之中，可由其化學作用，將集在陽極上之氫氣除去。

將同一金屬製成之板兩枚，浸在稀硫酸中，造成一電解器，使電流由其中暫時通過之後，再使其成爲斷路，用一導線將此兩極連結試之，因上述之極化作用，遂發生與前此方向相反之電流，是爲極化電流 (polarization current)。此事係一八〇一年法國之高特洛所發見，其後於一八〇三年德圖之立忒 (J. W. Ritter)，利用此現象造成一種特殊之器，由此可得電流，是爲蓄電池。

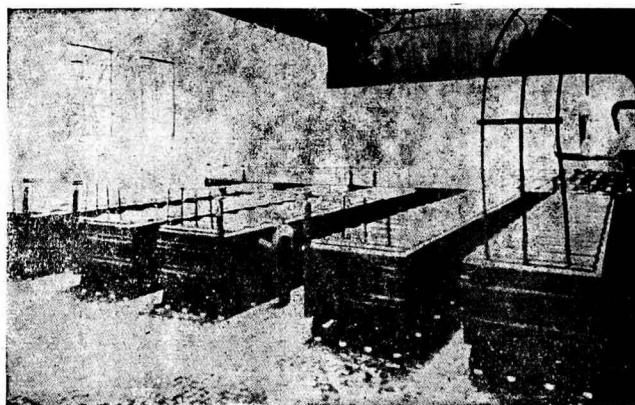


圖三三六 蓄電池之鉛板。



圖三三七 蓄電池。

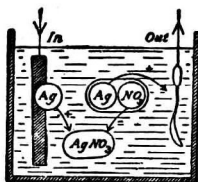
(storage battery) 之始。其法係將浸透稀硫酸之濕布夾在圓形之鉛板間而成。送電流進入其內，使其發生極化作用，曰蓄電池之灌電 (charge of battery)；用導線連結後由其中取用電流時，曰蓄電池之放電 (discharge of battery)。如是反覆行之數遍以後，鉛板之表面上即為過氧化鉛及硫酸鉛蓋住，成為凹凸不平之形狀，因此使極化之有效面積增加。此事經普隆特 (Plante) 於一八五九年觀察得知之後，即利用之，開始即造成格子形狀之鉛板，如圖三三六所示，其內填滿氧化鉛，用作蓄電池之極板。將此板浸入稀硫酸內，自外部送入電流，則陽極成為過氧化鉛，陰極成為海綿狀之鉛。通常將此種鉛板數個，放入電池內，聯合使用之。其電動勢約為二伏



圖三三八 蓄電池室。

特。欲得較大之電動勢，則將此種電池若干個串聯使用之，而貯藏於一室之內，以備隨時使用，如圖三三八所示。又除此種固定者而外，對於汽車等隨時移動之處，亦可使用，或用愛迪生式之蓄電池更佳。其陽極板用氫氧化鎳，陰極板用氫氧化鐵，電解液用苛性鉀溶液。

在實用上，電解現象之應用頗多。使硫酸銅、硝酸銀、氯化金等之溶液，發生電解則銅銀金等之金屬，輻向陰極，即聚集於陰極導體之表面上，是為電鍍 (electroplating)，如圖三三九所示。此時陽極之金屬板，即用欲鍍之金屬，俾其補充於溶液之內。又有一種應用，係用蠟或石膏，取得木板或影



圖三三九 電鍍器。



圖三四〇

明之結晶，由電解成長之狀況。

刻之形，上塗石墨一層，以作導體，放入電解質內作為陰極，電解後與電鍍時同樣，其表面有銅附着於其上，成為銅板，是為電鑄 (electrotyping)。又金屬化合物之溶液內，由電解作用，將金屬析出於其陰極，以達精製之目的，是為電冶 (electrometallurgy)。又可應用之以製成各種物質之純粹結晶，如圖三四〇所示，即其一例。

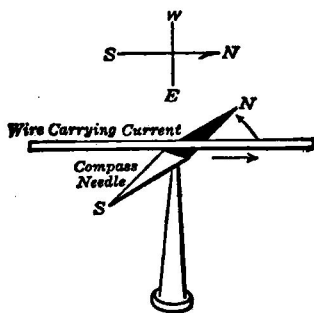
### 第五節 電流之磁力作用

關於電及磁間究有

何種關係存在之一問題，曾有種種研究。其中尤以電流能使磁針移動之一現象，最為顯著，係意大利之羅馬尼阿西於一八〇



圖三四一 厄斯忒德。

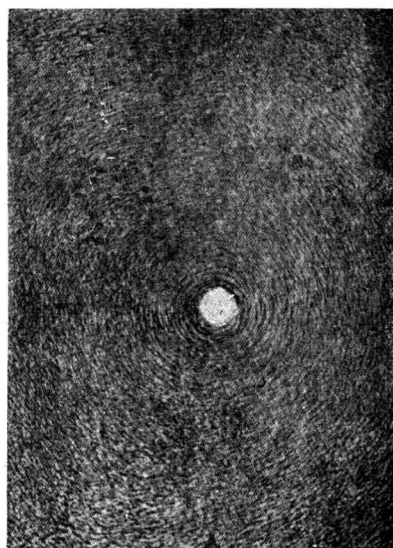


圖三四二 厄斯忒德之實驗。

二年所發見。至於其間之明確關係，則係丹麥之厄斯忒德（Oersted）於一八二〇年，在無意之中爲之發見。是時厄斯忒德任哥本哈根（Copenhagen）之工科大學教授。一日在授課時，於通過電流之導線下，放一磁針，欲作其關於電流之性質之理論。乃出於意料以外，此時之磁針對於導線，竟取垂直之方向。此項重要之發見，於同年七月，發表於世。又於九月十一日在法國之學院，公開講演。一



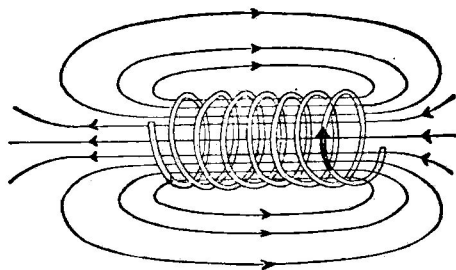
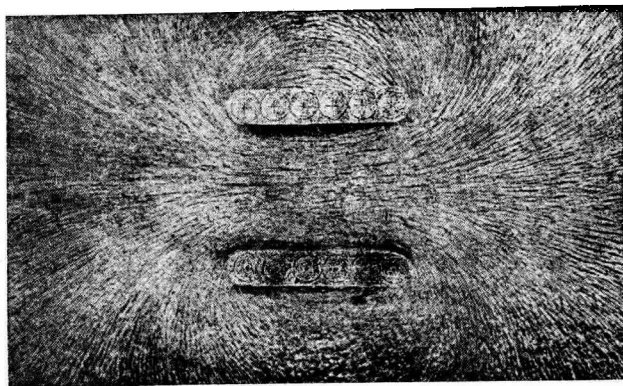
圖三四三 安培。



圖三四四 電流周圍之磁力線。

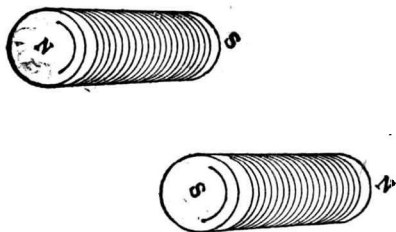


星期之後，即由法國之數學家安培（Amperé），爲之證明。假定如圖三四二所示，電流之方向係自南而北，則放在其下之磁針，其北極向西；如電流之方向反轉，或磁針放在導線之上，則即與此相反。此現象後經法拉第用電場解釋之極爲明瞭。在電流周圍，發生一磁場，其磁力線成圓形。如用厚紙一張，穿在導線上，或用玻璃板亦可，在紙上或板上撒布細鐵粉，電

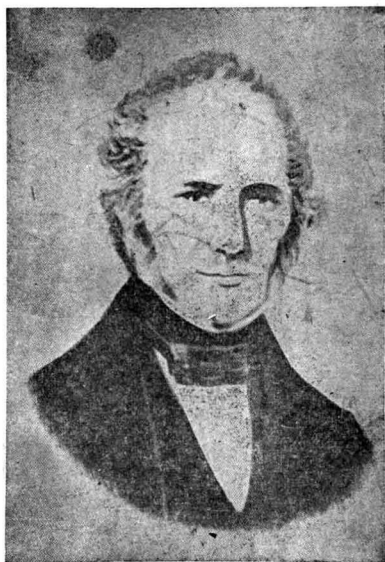


圖三四五 圈之周圍之磁力線之橫斷面。

流通過後，鐵粉即沿力線方向，排列成爲圖三四四所示之形狀。據安培由此關係推出之結果，如將導線捲成螺旋形狀，使電流通過，則其作用，應與一條形磁石相同，並由實驗證明之。由此遂提出一說，以爲在磁石之內部，有無數之小圓形電流存在，其平面與連結分子磁石之兩極之直線垂直。磁石之作用，即由於此等小圓形電流而來，磁石與電流間之具體關係，由此道破，舉世莫不爲之驚異。

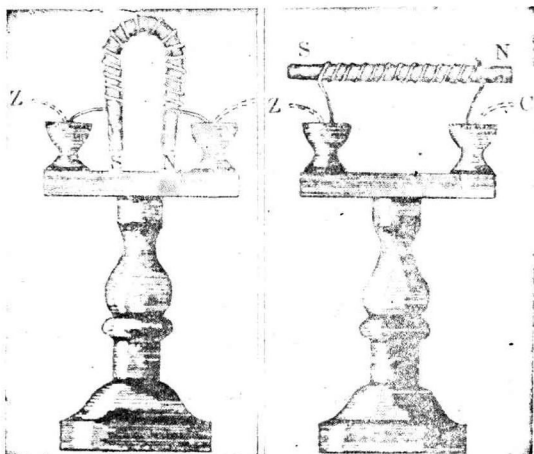


圖三四六

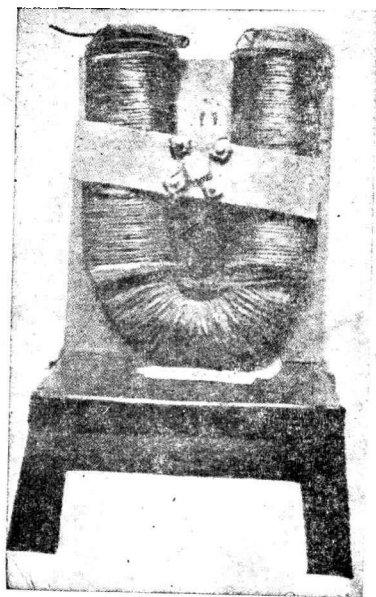


圖三四七 安培。

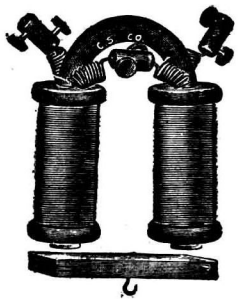
圖三四八 斯忒準最初造成之電磁石。



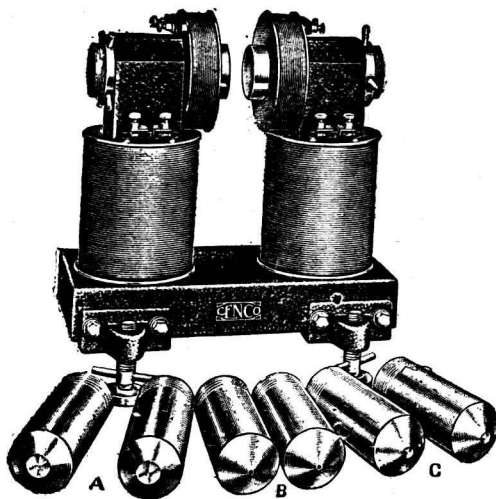
圖三四九 法拉第之大磁石  
 法拉第之各種偉大發見，均用此電磁石而成。  
 現尚保存於英國倫敦之不列顛皇家協會中。



用導線捲成環形曰線圈 (coil)，捲成螺旋形，即若干線圈陸續啣連而成者，曰螺旋管 (solenoid)。螺旋管周圍之磁場，如圖三四五所示。由鐵粉表現而成之磁力線觀之，與條形磁石完全相

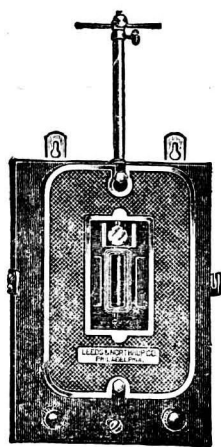


圖三五〇 現在常用之電磁石。

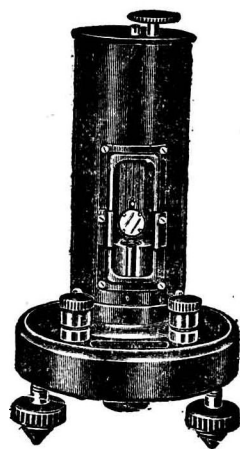


圖三五一 大電磁石之極。

同。自其一端觀之，電流之方向，如為順時針，則此端即為南極，如為反時針，則此端即為北極。其關係如圖三四六所示。又線圈之中心之棒，通常使用鐵棒，通稱之曰鐵心（iron core）。用此可使其磁性增強，如是而成者，曰電磁石（electromagnet）。最初製造電磁石者，為美國之斯忒華（William Sturgeon），及美國之亨利（Joseph Henry）。其後電磁石之用途，與日俱增，極為重要。因電磁石只須加強其通過之電流，即可得任何強度之磁石，其力遠在通常之永久磁石之上。不寧唯是，使用中只須使電路不通，磁性立失，或將電流之方向反轉，磁極



圖三五二 (b) 線圈電流計。



圖三五二 (a) 電流計。  
(盛在硬橡皮箱內，俾其絕緣。)

亦隨之而成反轉，可應目的隨意變化，極為便利。

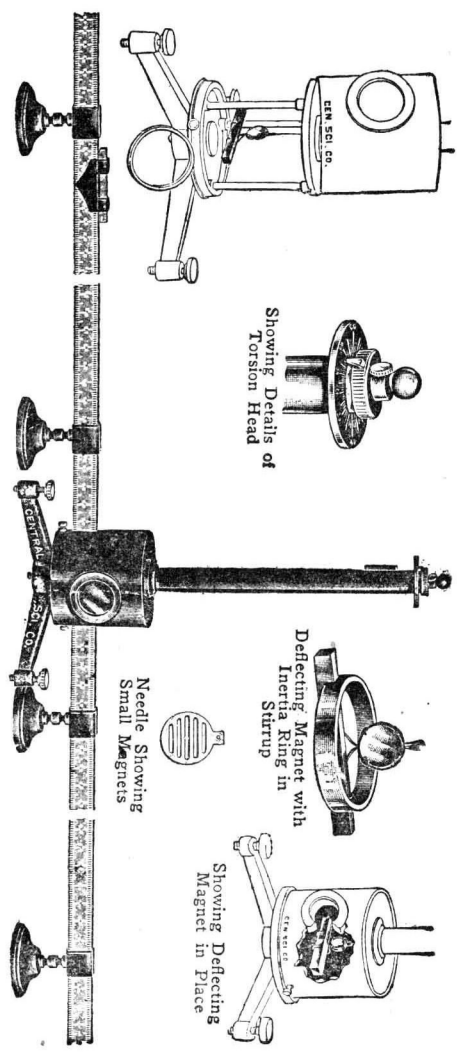
電流之磁效應之第一利用，即為電流計 (galvanometer)，可用以量度電流之強度。其種類形狀雖多，然大抵不外兩種。一種曰固定線圈式 (fixed coil system)，即使電流由一固定不動之線圈中流過，磁針受其效應，發生偏轉，由偏轉角度，即可求得通過固定線圈中之電流強度。他一種曰可動線圈式 (moving coil system)，即在固定之蹄形磁石之兩極間，懸一小線圈，可以自由繞其軸而轉，送電流入線圈內，即由相互作用，使線圈偏轉，故由偏轉，亦可求得通入線圈內之電流強度。



圖三五三 安培計。



圖三五四 伏特計。



圖三五五 磁計。

前一種大都使用於精密之量度，其中尤以克爾文製成之鏡電流計 (reflecting galvanometer) 最為敏銳。其小磁針只須略生偏轉，裝在磁針上之小反射鏡，即現出光線之顯著偏轉，如圖三五二所示，即其外觀。又可將線圈式之電流計，亦可以同樣之光學設備，將線圈之轉動，精密量出。又有將指針處之標度，逕直刻成與此偏轉相當之電流強度之數字者，曰安培計 (ampere-meter or ammeter)，如圖三五三所示。又與此完全相同，如插入於電路中之一部分，使其與原電路作並聯，如圖三五四之(a)，則在此支路上電流過之電流強度，與電阻之相乘積，等於其兩端連結點A及B之電勢差。照此方法，可以量度兩點間之勢差，如將其指針處之標度，逕直刻成此項勢差之數字，則稱之曰伏特計 (voltage meter)，如圖三五四之(b)。

電磁石造成之磁場，可由通過其內之電流強度算出之。故若懸一磁石在其磁場及地球磁場合成之

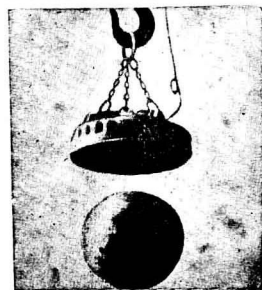
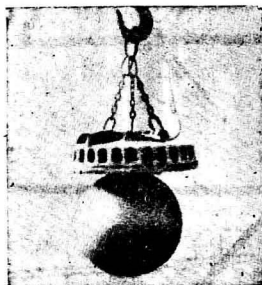


圖三五六

起重電磁石之分解圖。

中央之兩圓形為繞在鐵之周圍之線圈及承受線圈之板。上下兩圓為磁鋼製成之蓋壁。





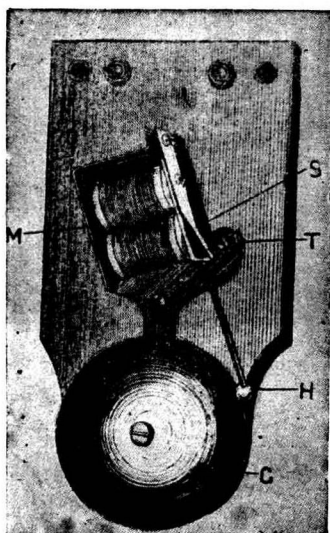
圖三五七

上圖用電磁石提十二萬磅重之鐵球。  
下圖起重機之電磁石將鐵料提起之狀況。

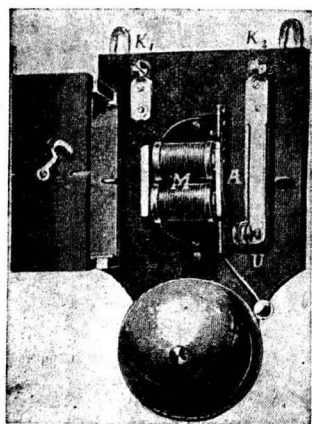
磁場中，觀測其振動之週期，即可得地球磁場之強度。爲此目的而設者，曰磁計（Magnetometer），如圖三五五所示。

利用電磁石吸引鐵之力，可以搬運大量之鐵料，或由海內提取鐵質之物體，成爲一種起重機，如圖三五六及圖三五七即表此種起重機之構造及使用時之狀況，在工業上極爲重要。

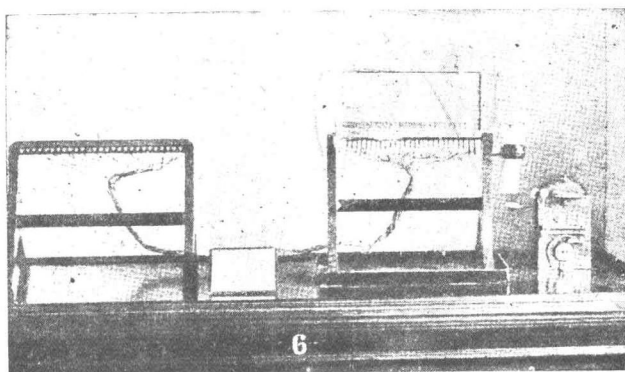
電鈴（electric bell）係英國之邁蘭於一八五〇年所發明，其最初造成者，如圖三五八所示。繞在馬蹄鐵形狀電磁石周圍之導線圈之一端，與其極前之銜鐵（armature）



圖三五八 邁蘭造成之電鈴。



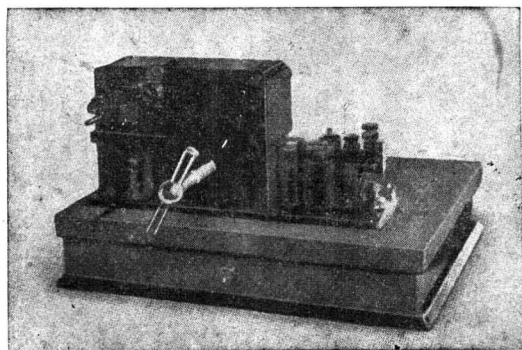
圖三五九 現今電鈴之構造。



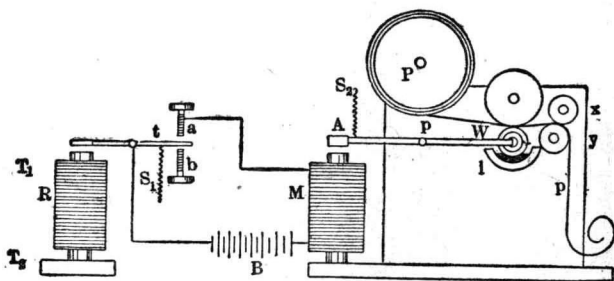
圖三六〇 維多靈利用電解造成之電報。



圖三六一 模斯。



圖三六二 模斯接收機。



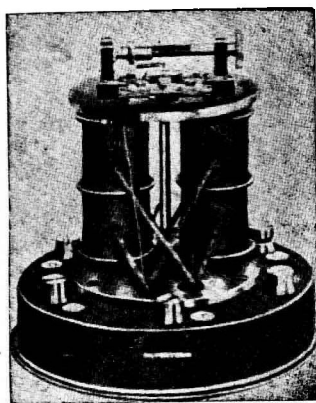
圖三六三 模斯接收機及繼電器之連結。

$M$ 表接收機中之電磁石  $A$ 表銜鐵，受 $M$ 吸引後，牽動其臂 $W$ ，壓在由 $P$ 用鐘機關送出之紙條上。 $R$ 為繼電器電上之電磁石，此內如有發報處送來之電流流過，則牽動 $t$ 之一端，使其他端與螺旋 $a$ 接繼， $M$ 之電路即通。

nature) 之相連。更經由與之接觸着之螺旋，使另外設備之電池之電路成爲通路。將此電路中之卸按下，電路即通，受之磁力作用，被其吸住。同時螺旋之先端離開，電路即從此一點截斷，電磁石失其效用，復回其原位，再與接觸，電路又通。以後照此一通一斷，銜鐵往返運動不已，陸續擊鈴作聲。

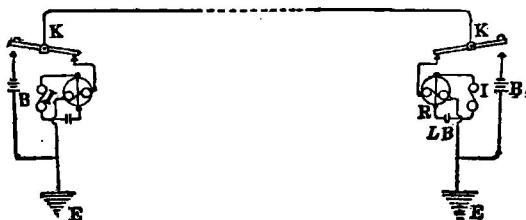
傳達消息之電報 (Telegraphy) 在今日固爲人所習知，但在古時，則曾利用音光等，以求達此目的。最初使用電之效應者，爲德國之薩麥靈 (Samhering) 時爲一八〇九年。係利用水之電解所生之氣泡，由下昇上，以通信號，如圖三六〇所示。其後於一八三三年，有皋斯及韋柏，改用磁針受電流效應而生之偏轉，以通電報。至一八三五年，經美國之畫家模斯 (Morse) 始發明使用電磁石，遂成今日電報之基礎。

電報之構造，分發送機 (transmitter) 及接收



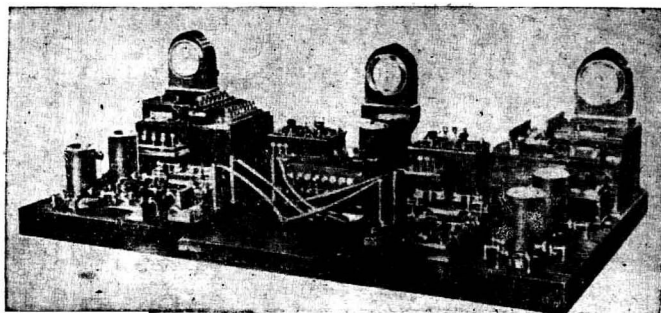
圖三六四 取除蓋後之繼電器，即見其內部之電磁石。

機 (sender receiver) 兩部分，其間則用架空之導線，為之連絡。其發送機由一電池及可接收處電路或通或斷之電鍵 (key) 而成。接收機內，即由此電流，使電磁石發生作用。如兩地相隔甚遠，則電流之能悉被消費成爲架空線中之熱，強度當爲之銳減，不能使接收處發生動作。故通常使用一種繼電器 (relay) 如圖三六三所示，以繼其不足。此繼電器內，亦同樣備有電磁石，由此可使接收處另備之局

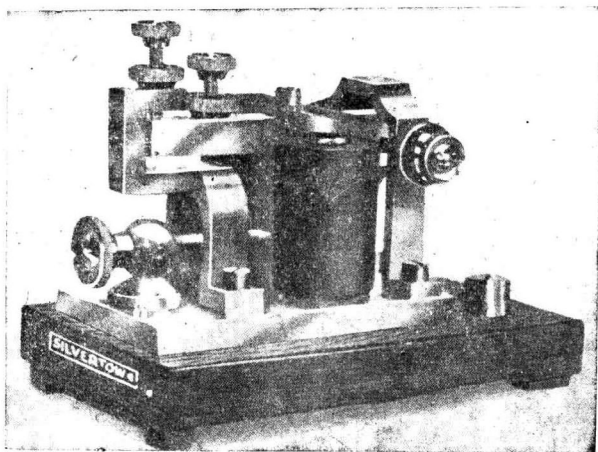


圖三六五 發送機及接收機之連絡。

*B*表電池，*E*表地面，*I*表電磁石，*K*表電鍵，*LB*表局部電池，*R*表繼電器。



圖三六六 增加通信速度之二重通信法。

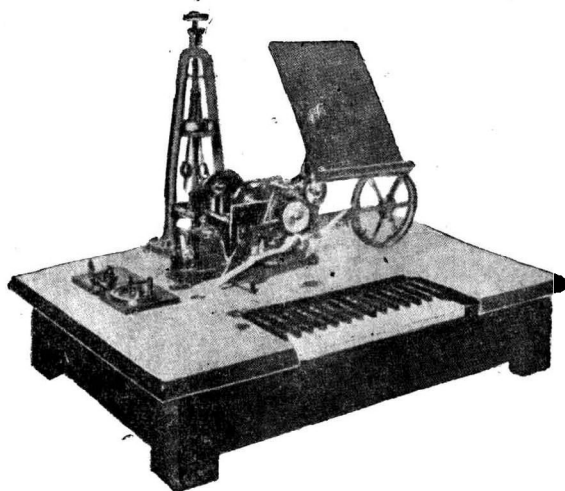


圖三六七 發聲器。



圖三六八 休士。

部電池之電路得通，如圖三六四所示。模斯接收機，當電流通過時，即在紙條上畫一連續之線。將長短兩種之線，適宜配合之，即可代表各種文字。近時多廢棄此種紙條，而用圖三六七所示之發聲器 (sounder) 代替之，即利用銜鐵敲擊電磁時所發之聲之長短，以代替長短線符。為使通信正確起見，又有休士 (David Edward Hughes) 發明之印字電報，如圖三六九所示。其後再加一度改良，即成圖三七〇所示之打字式之接收機。連結發送機及接收機之導線，通常僅用一條即足，其餘則利用地面，作為電流中之一部分。又同一電路既可發送又可接收之連結法，如圖

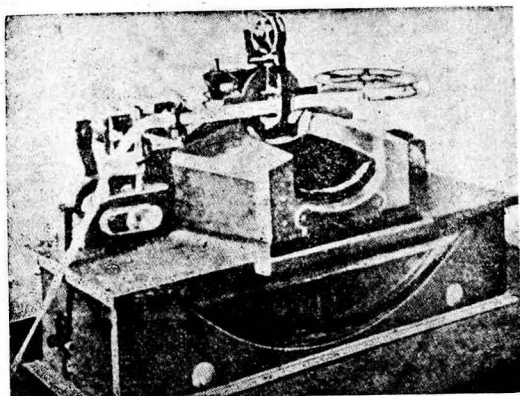


圖三六九 休士之印字電報。

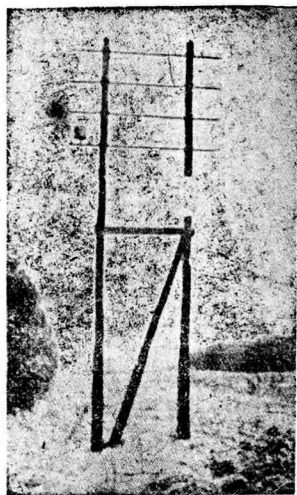


三六五所示。

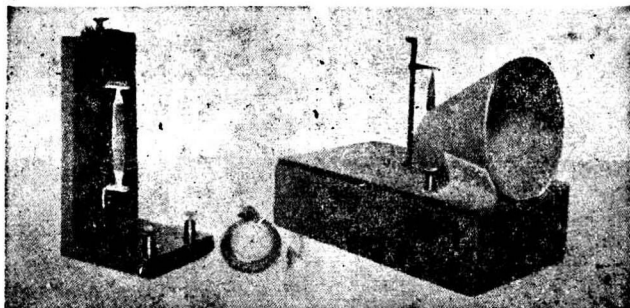
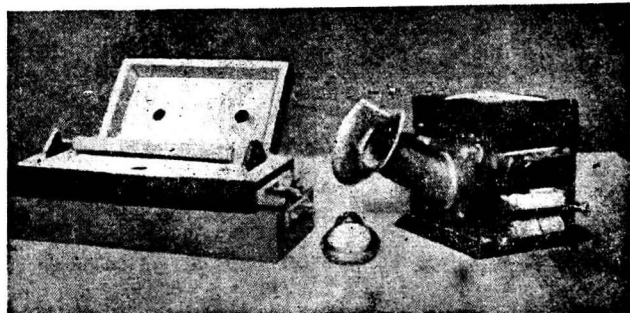
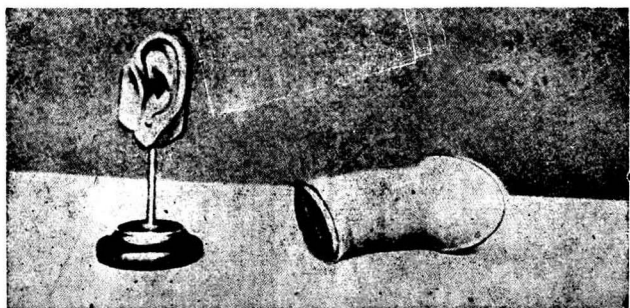
電流在導線內傳達之速度頗大，其值與後面第七章第十三節處所述之光速相近。故利用電



圖三七〇 打字式接收機。



圖三七一 電報線，  
電桿上之鐵箱內有導線圈。



圖三七二

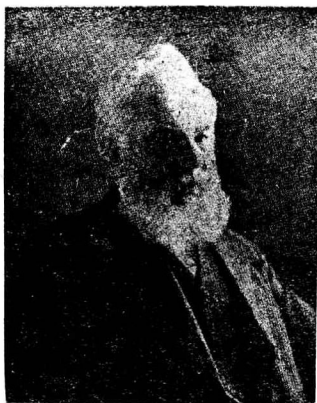
上：賴斯最初造成之電話器；

中：賴斯改其後之電話器；

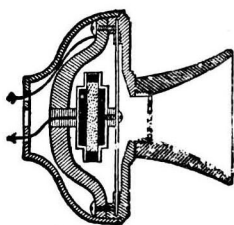
下：休士最初之微音器。

流通信，雖相隔甚遠，而傳達所需之時則極短。不過須受電流強度之限制，如相隔過遠，即非在中途設一轉達之站不可。如此，則全地球上任何處所之消息，均得於極短之時間內，傳遞各處。

電話 (telephone) 大致亦與電報相同，其目的亦在將相隔甚遠之兩地，互相勾通。且不用文字，而用口說，故較電報尤為便利。一八六一年德國之賴斯 (Philip Reis) 即有此種思想，欲將音波變為電流，送至遠方。一八七六年，經美國之柏爾 (Graham Bell) 之手，始克完成。現今使用之發話機，又係其後於一八七八年英國之休士 (Hughes) 發明之微音器 (microphone)。微音器之構造，如圖

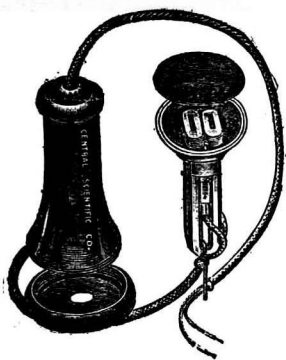
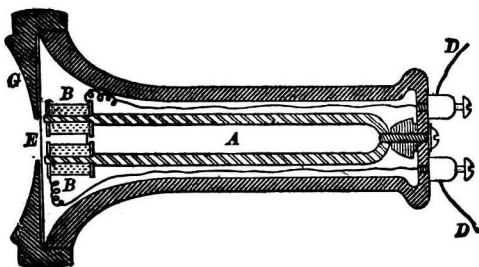


圖三七三 柏爾。



圖三七四 微音器。

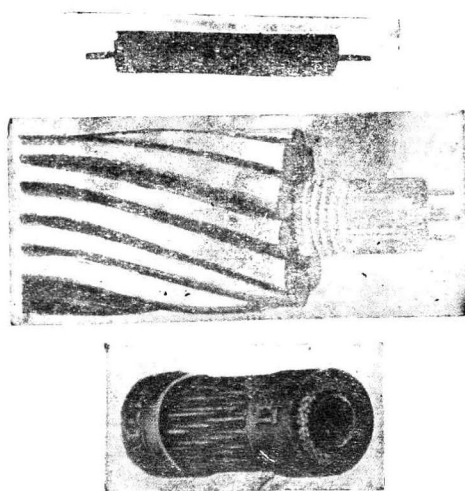
三七四所示，在兩枚之碳板間，填滿碳粒，但不甚緊，振動板受音波載動後，此碳粒之接觸，亦隨之時緊時鬆，故對於電流所呈之電阻，發生時大時小之變化。以此作其電路中之一部分之電流強度，因



圖三七五 接收機截面。

上：用條形磁石代替蹄形磁石之形式。

下：實物之形狀。



圖三七六

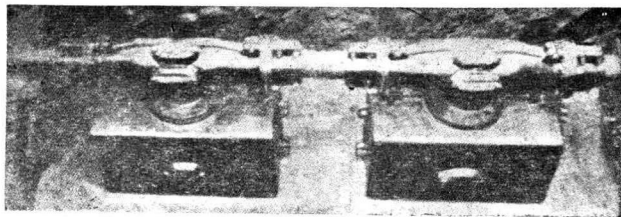
(上)最簡單之電纜。

一八五〇年最初在英國海峽中使用之電纜，  
內用銅線組成，外用馬來樹膠保護。

(中)一八五一年英法海峽中使用之電纜。

外部用鋼保護，內心則為銅線。

(下)一八五八年大西洋海底電線使用之電纜，



圖三七七 海底電線之一部。

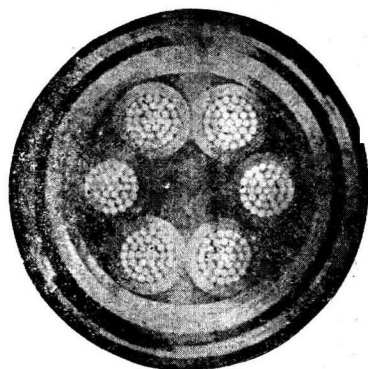
鐵箱內盛線圈，埋入地下。

之，亦受微細之變化，圖三七五所示為接收機，內有條形磁石或蹄形磁石，上繞導線圈。由發送機而來之電流，由此中通過時，磁極之強度，亦應之而有所強時弱之變化，因此引起其前面銜鐵發生振動，再現成爲聲波。但實際上發送機及接收機之連結，必須使用第七節所述之器。

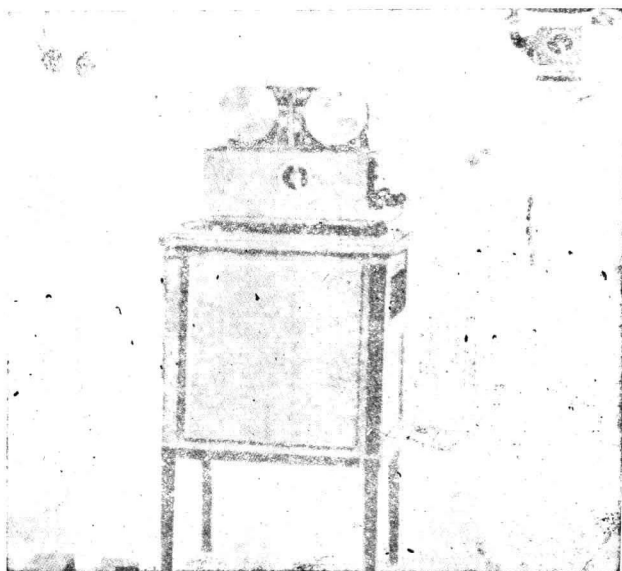
傳達電報或電話之導線，有時須沉入海底或埋



圖三七九 電鐘。



圖三七八 地底電線之截面。  
用紙或麻等類絕緣物質繞在鋼  
綫上，外部再用鋼條爲之保護。



圖三八〇 留聲電話機，  
 庖爾森所發明者。

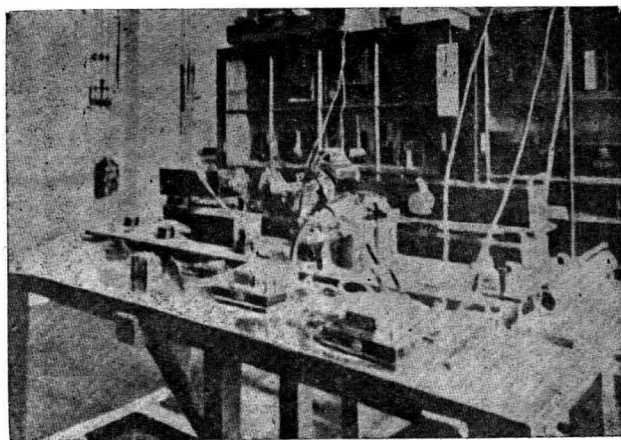
<p>Ich beylüskwünsche          Sie zu dieser gemachten          Erfindung          Gisbert Kapp</p>	<p>Ich beylüskwünsche          Sie zu dieser gemachten          Erfindung          Gisbert Kapp.</p>
---	--

圖三八一 傳真電報，

著名之電學工程師卡普(Kapp)電送發明傳真電報之製電。

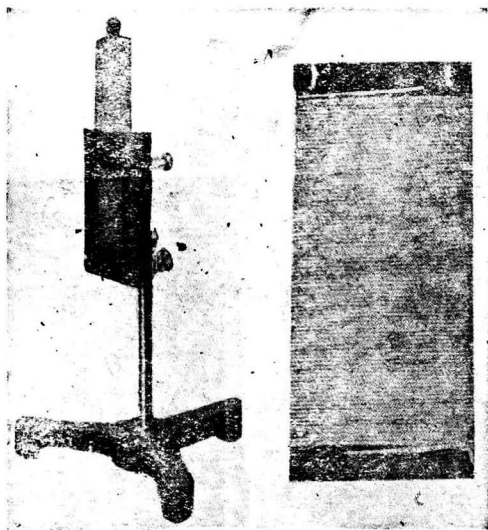


圖三八二 用科輪區劃法電燈之相片。



圖三八三 科輪式傳真電報器。





圖三八四 觸電阻器。



圖三八五

左方爲一九〇七年十一月八日由巴黎於一二分間  
電送至倫敦之相片 其原底則在本書之圖六九四。  
右方爲科繪用其傳真電報送出之最初之相片。

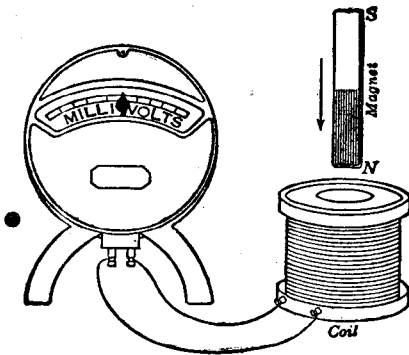
入地下，此時對於其絕緣，須特別注意，並須加以嚴密之保護，方能避免發生障礙。此項電線，特稱之曰電纜 (cable) 如圖三七六圖三七八所示。

利用電流傳達消息之器，除電報電話而外，尚有種種。如圖三七九所示之電鐘，亦其一例。由局中之標準鐘上指針之運動，經由電流，逕行傳至各地所裝之時鐘上，使其現出同一之時刻。又圖三八〇所示之留聲電話機 (telegraphone)，為丹麥之厄爾森 (Poulsen) 所發明，即將通常之留聲機與電話合併而成。其法係將電話器中所收得之電磁石變化，使一條長鋼線磁化，再隨時由此發生同一之聲波。此外又有最近流行之傳真電報，可將文字圖畫以及相片等由電送出。最初發明電傳文字者，係德國之克魯昌納，在紙面畫縱橫細線，區分為若干細格，筆尖向橫移動時之電磁與向縱移動時之電阻，各不相同。將此兩種適宜配合後，即在接收處表現成爲兩小磁針之運動。磁針上各有一小鏡，由鏡上反射之光，射至感光紙上，經顯像後，即現出電送之文字。至於電送相片，則曾有各種不同之方法。一八七七年有法國之森拉克利用硒 (selenium)，因光之強弱，變化其對於電流之電阻之性質，使光射至相片上之各點，由其反射光之強弱，引電流之變化傳達至於遠方，是爲電送

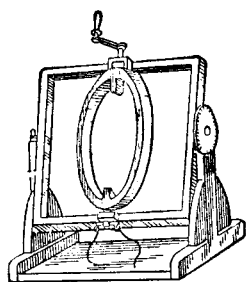
相片之開端。其後又有德國之科倫 (A. Corn) 於一八八六年，將相片分割成爲縱橫之細格，使光由其上透過，應其濃淡而生強弱變化，可以傳至遠方。更於一九〇二年，改良成爲傳真電報 (E. P. rtog aph)，將由晒而來之電流，導至磁極間緊張之一細金屬線上，一方面受磁極吸引之力作用，應其強弱將光遮斷一部分，故生出濃淡之差。其後又經種種改良，始成今日可供實用之傳真電報。

## 第六節 感應電流

厄斯忒德發見磁針受電流之作用，於是始知電與磁之間，有密切之關係，此發見之重要，固不待言。但自其反面，即由磁起電之研究，則尤爲重要，係一八三一年法拉第所發見。此項研究實爲法拉第對於電磁學研究之第一步，其後許多成就及其發展，均由此開始。法拉第最初之意見，以爲靜電可以使其他之導體由靜電感應作用而至帶電，似



圖三八六 感應電流之實驗。



圖三三七 韋伯之地磁感應器。  
此線圈可繞水平軸及鉛直軸而轉。量  
度由其轉動而生之電流強度，即可求  
得地磁之鉛直成分及水平成分。

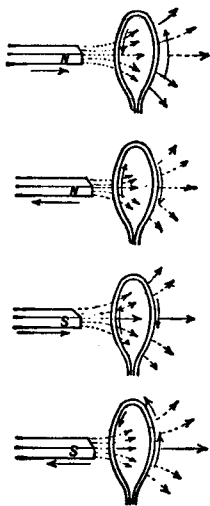


Fig. 363.

圖三三八

磁石之運動及感應電流之方向。

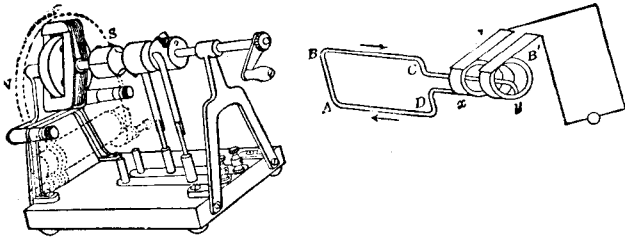
乎電流亦應對於其他之導線，發生類似之感應現象。由是加以實驗，結果遂成功由磁石可以發生之電流。如第三八六圖所示，將線圈之兩端連結至於電流計，使一條形磁石插入線圈內，即見有電流發生。再由線圈內將此條形磁石拔出，可見有反對方向之電流發生。此現象通稱為電磁感應 (electro-magnetic induction)。其次又發見一電流之電路或通或斷之時，在其近傍之其他之導線中，亦有瞬時電流通過。不寧唯是，即將此近傍之導線，由電流離開，或更行接近之時，亦同樣有電流發生。由是而現之電流，通稱之曰感應電流 (induced current)。試設想一平面，以此等導線為其周

邊，凡橫貫此面而過之磁力線數，如有變化發生，均有此項感應電流出現。例如圖三八七所示之地磁感應器 (earth inductor)，係在地球之磁場內，使線圈轉動，即有感應電流發生。一八三四年俄國之楞次 (Lenz)，由實驗求得感應電流之方向如下：

「感應電流發生之方向，在其反作用防止磁石或電路之運動。但增加磁石或電流之強度時，與互相接近之運動相當；減弱時與互相離開之運動相當。」

此關係曰楞次定律 (Lenz's law)。如由能量不滅原理論之，此定律實為當然之結果。其後於一八四五年經伊曼 (F. E. Neumann) 由數學上為之解釋。磁石對於線圈或接近或遠離時引起之感應電流之方向如圖三八八所示。

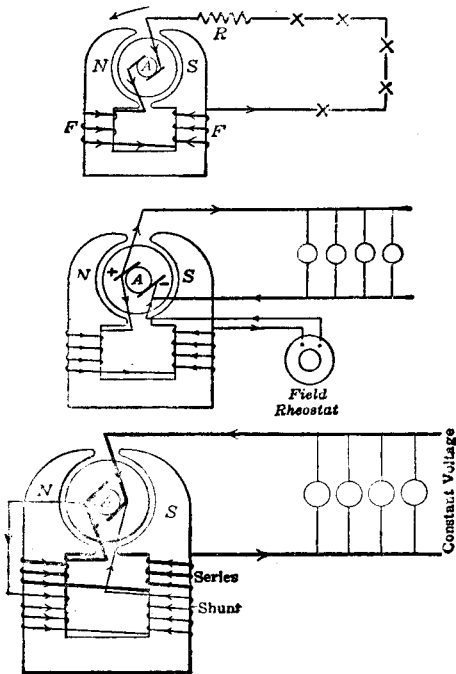
感應電流其後遂被認為發電之一重要手段，發電機 (dynamo) 即由此原理而成。如圖三八九所示，下方為固定不動之蹄形磁石，上方為電磁石，如使其繞中央之軸而轉，則其導線內即發生感應電流。但所得之電流方向對於導線每轉半周，必變換一次，如是而得之電流，曰交流 (alternating current)。與此相對，方向始終不生變化之電流，曰直流 (direct current)。欲由發電機取得直

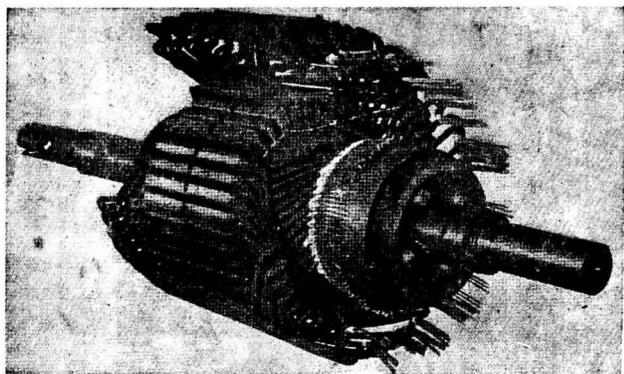


圖三八九 發電機說明器。

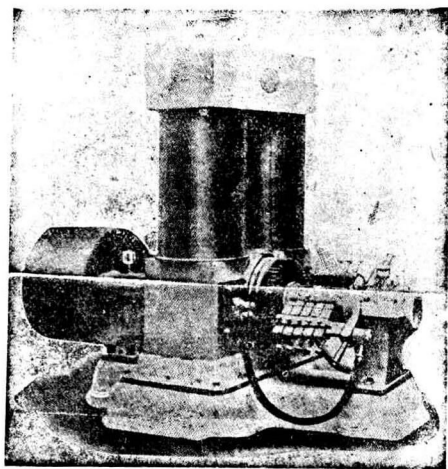
由導線之繞法可分為三類，上為串繞，中為分繞，下為混合繞或複繞。

圖三九〇 發電機之模型

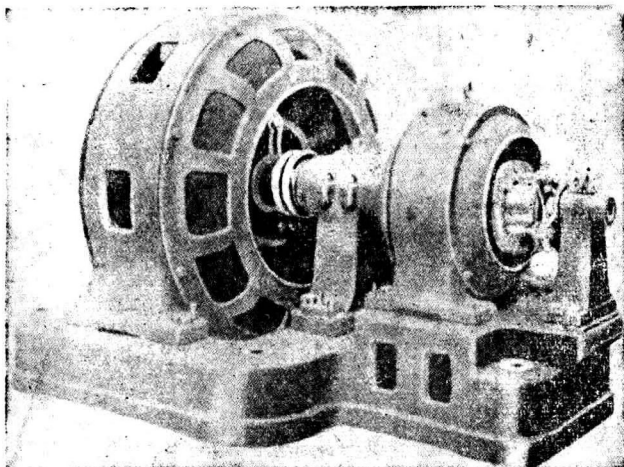




圖三九一 電樞。

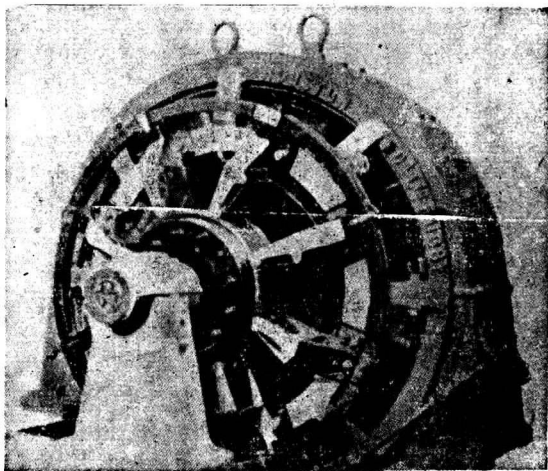


圖三九二 愛迪生和普琴孫之發電機。



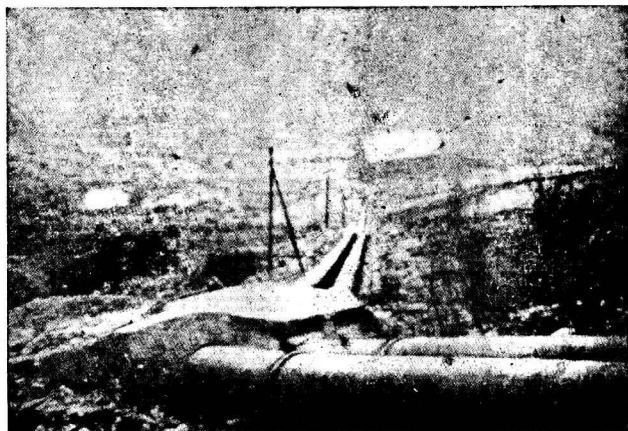
圖三九三 (左)交流發電機;(右)直流發電機。

直流發電機與交流發電機之場磁石 有導線連結, 電流可通入其內。

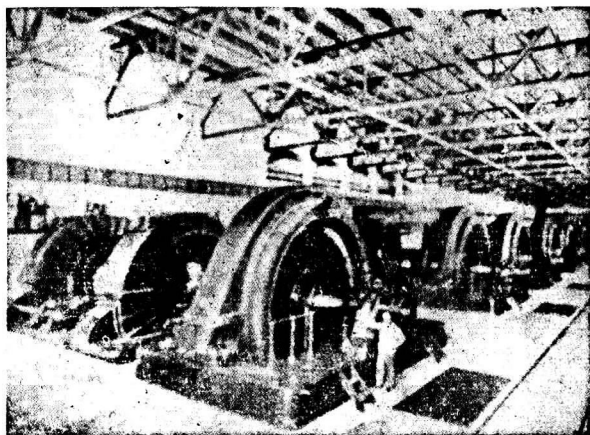


圖三九四 最新式之直流多極發電機。

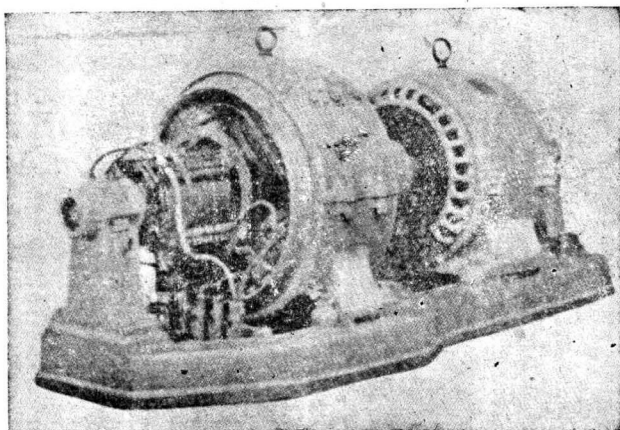




圖三九五 水刀機  
在英國北衛爾斯之士諾敦(Snowdon)  
湖上，由湖送水至士諾敦之自來水管。



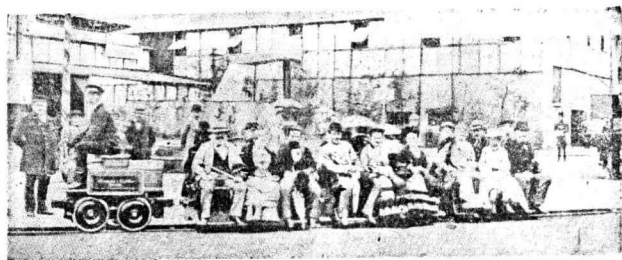
圖三九六 交流發電機。  
在英國安別釐阿 (Ontario) 動力公司中，利用耐亞薩拉  
(Niagara) 瀑布之水力轉動輪機，發生水電，有34000馬力。



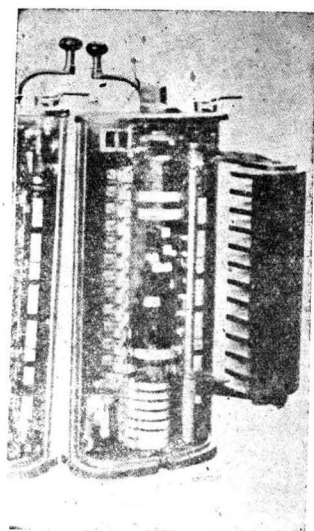
圖三九七 發電機與電動機之連結。



圖三九八 西門子。

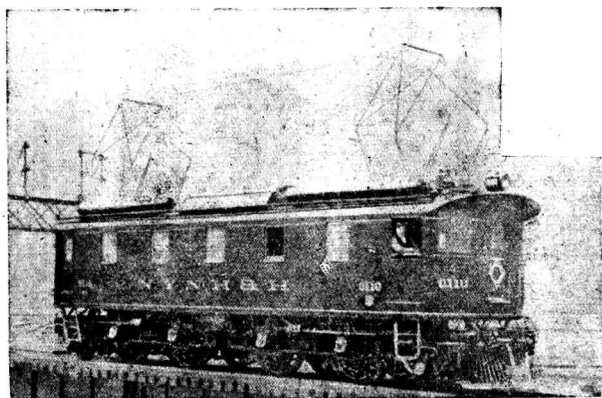


圖三九九 一八七九年柏林博覽會出品之世界第一輛之電車。

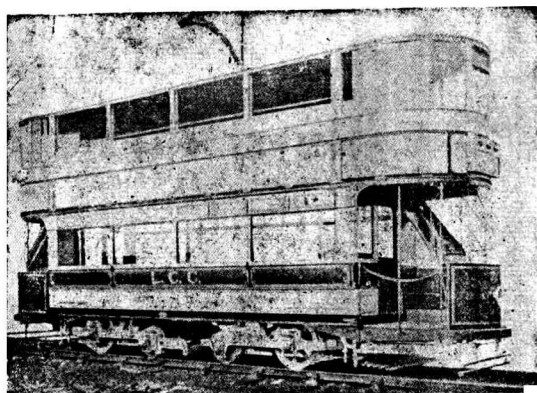


圖四〇〇 電車之節速器。

轉動上方之柄，增減其電阻。其傍之小柄，用以變換電流之方向。



圖四〇一 電機機車。  
約實所用，有100噸。



圖四〇二 倫敦市街用雙層電車。

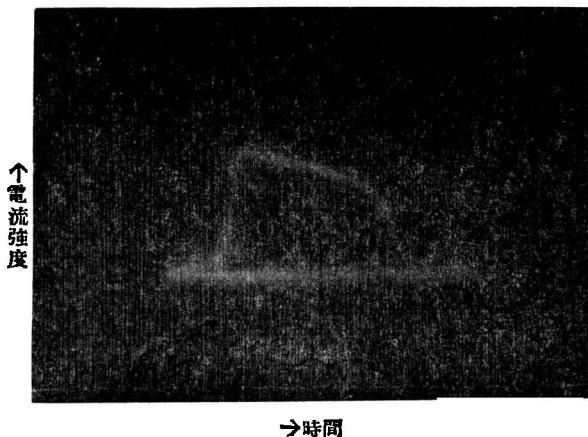
流，當如圖三九〇所示，使轉動線圈之端，每半轉，與刷接觸一次，由刷將電導出外部。實際之發電機中，其位置固定不動之電磁石，曰場磁石（field magnet），在其間轉動之線圈，曰電樞（armature）。由電樞上取出感應電流之方法，可將發電機分為直流發電機（direct current dynamo）與交流發電機（alternating current generator）兩種。又圖三九一所示之電樞，其形狀與鼓相似，曰鼓電樞（drum armature）。通常之場磁石，不僅具有兩極，概由若干對之極，相間排列而成。又日常所謂之水力發電，係利用水力轉動輪機，然後使電樞轉動，由此發生電流。

將發電機之原理逆用之，即由外面送電流進入電樞內，即可使其運動。為此目的而設者，曰電動機（motor）。通常將此機與發電機逕直連結，即可由之使用動力，如圖三九七所示，即其一例。

最初說明電動機之原理者，為德國之西門子，其後應用於各方面，與吾人之生活，有密切之關係。又世界第一輛之電車（tram car），亦經由西門子之手，於一八八一年造成，在柏林郊外，開始運轉。自是以後，即與火車並駕齊驅，成為交通之要具。又汽車（motor car）、電扇（electric fan）、水唧筒、昇降機以及工廠中使用之動力，無一不使用電動機，其重要可知矣。

### 第七節 電流之自感應及交流

導線內之電流發生變化時，由此導線所包圍之面積內橫貫而過之自身之磁力線，勢亦不能不隨之而變，結果即在其本身之電路中，成爲一種感應電流。據楞次定律，則此時發生之感應電流之方向，在反對其磁力線數之增減。故發電流之強度增加時，感應電流起於反對之方向；原電流減弱時，感應電流起於同一之方向。如是之現象，曰自感應 (self-induction)。如將電流看作電之運動，電流強度看作運動之速度，則自感應之現象，即與運動時



圖四〇三

電路通後再斷，其電流強度之變化，當如圖中曲線所示。因有自感應作用，故其增減不依直線進行。

之慣性相當。

電路初通時及初斷時，在此一瞬間，電流之強度由零突然達於一定值，或由一定值突然減成零，當受自感應之影響，進行略遲，如圖四〇三所示。又電流之方向，如隔一定之周期，反轉一次，即為交流時，亦同樣受自感應之影響，成為圖四〇四所示之狀況。

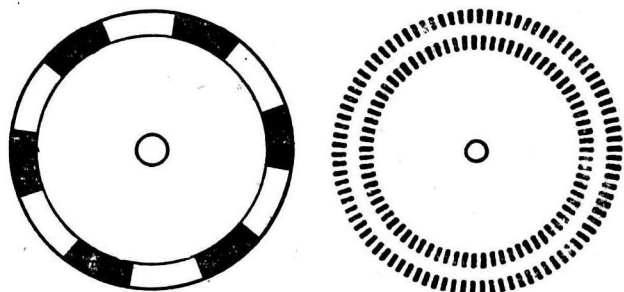
交流之強度無時無刻不在變化中，故言交流之強度，只能指其運往之能量為若干而言，是為交流之有效值 (effective val e)。電流在導線中所生之熱，即與此相當。例如同在同一時間內由交流發生之熱，如恰與一安培之直流發生之熱相當，則此時之交流強度，亦稱之曰一安培。對於電勢差，即電壓，亦與此同，即有效強度 (effective intensity)。



圖四〇四 交流之強度變化。

of current) 與有效電壓 (effective voltage) 之關係，完全遵從歐姆之定律。例如通常供給電燈用之交流，每秒間之振動次數概為 50 次或 60 次，是曰交流之循環 (cycle of alternating current)。此時使用之電燈泡上，恆註明 100 伏特 16 燭光等樣之文字，其意在表明用 100 伏特之實效電壓，可發出 16 燭光之光度。

使用交流時，可隨使用目的，任意變動其電壓，故極便利。為變化電壓而設者，曰變壓器 (transformer)，由導線圈兩個，繞在同一鐵心上而成。其一線圈用細導線，互相密接，匝數較多；他一線圈用粗導線，匝數較少。使電流通入其中之任一線圈，則由感應作



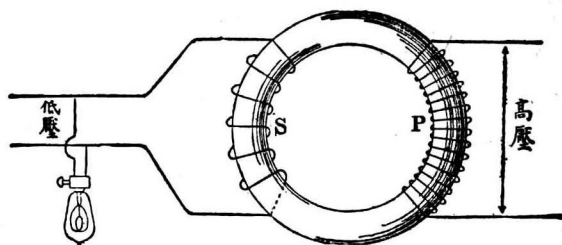
圖四〇五 證明電燈一明一滅之方法。

將圖中所示之圓板，放於留聲機之圓臺上，在電燈光下使其轉動，如調準其轉動速度得宜，即可得見圖中之黑線，宛如絲毫未動者然。因電燈每明滅一次（恰當圖中其次之一黑線，轉到同一地點上所致。右圖表每秒 50 循環之交流，左圖表每秒 60 循環之交流。

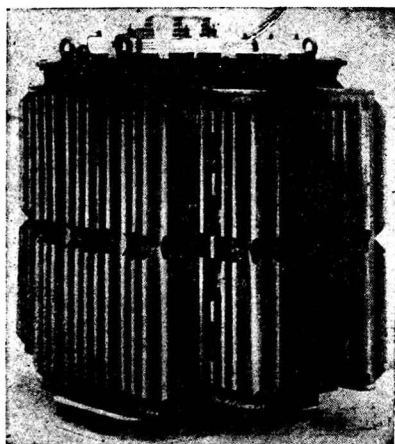


用，在他一線圈內發生周期相等之交流。通常由同一之磁力線變化引起之感應電動勢 (induced electromotive force) 對於原本之交流電壓之比，等於兩線圈之匝數 (number of turns) 之比，故利用之可以任意使交流之電壓或增或減。

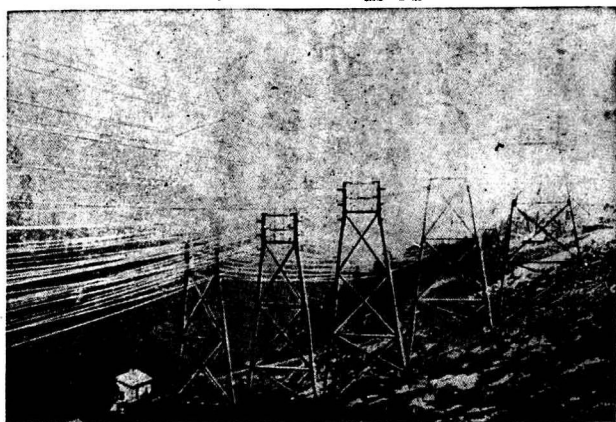
一般供給大規模之電能時，如供給市街電車電燈及各項工廠中之動力時，以利用水力在經濟上最爲有利。但能供此項使用之水力，大都在於深山之中，非用極長之導線，不能傳遞至目的地。導線愈長，則所生之熱愈大，即無益之損失愈多。欲減少此項無益之損失，只有使用電阻最小之導線，或強度最弱之電流，除此而外，別無他法。就設備上之經費着想，現今遂採用務用最弱電流之一法，即對於一定之電能，務必使用最高之電壓。大多數之水力發電廠，均用交流發電機生電，再由變壓器使其電壓升高至數萬伏特，或較此更高，然後



圖四〇六 變壓器原理。



圖四〇七 大形變壓器。

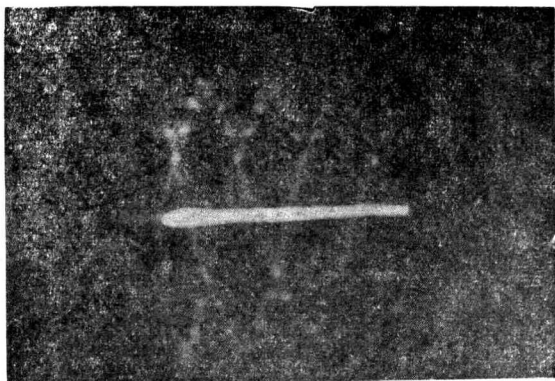


圖四〇八 高壓電流之傳遞。

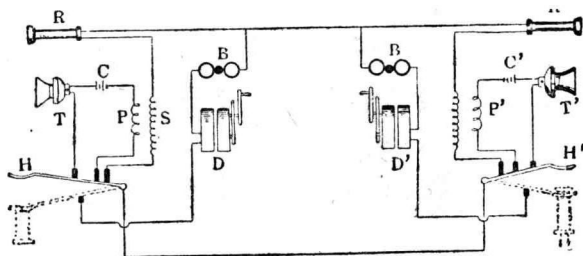
用一萬伏特之高壓並行送出三相交流<sup>20</sup>個之狀況。

始由導線，傳遞至於遠處。實際使用時，再用變壓器，將其降低。通常電壓在 3000 伏特以上者，曰特別高壓，在 300 伏特以上者，曰高壓。特別高壓之電流通過之導線，與之接觸，極其危險，非特別加以注意不可。街市中對於設架此種電線，應在禁止之列。供給用戶使用時，須將其電壓降低數段，為此於各處設有變壓所，或變壓器。

一方面發生交流時，如增多發電機之場磁石之極數，及導線圈之個數，則每一電樞完成一轉動之間，可得若干次之完全振動，故以使用種數較多者為便。如是而設之交流發電機，曰多極發電機 (poly phase generator)。此時各線圈內發生之電流，各用不同之導線導出，故同時可以取得振動相 (phase) 略有差別之交流。如場磁石之極及線圈數為 4，則可用兩組之導線取出，一組上之交流較他一組上，落後半週期。如磁極及線圈數為 6，則得三組之交流，各組之相，各落後半週期。凡如此類，相各不同之交流，同時存在時，通稱之曰多相交流 (poly phase alternating current)。交流之數為二，則曰二相交流 (two-phase alternating current)；交流之數為三，則曰三相交流 (three-phase alternating current)。由圖四〇九所示之曲線，可見三相交流之特色。中央之橫線，表示電

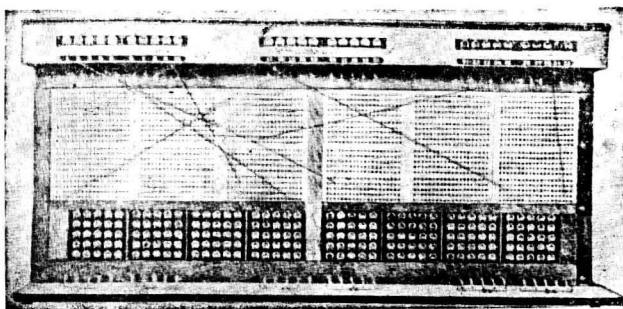


圖四〇九 三相交流之強度變化。

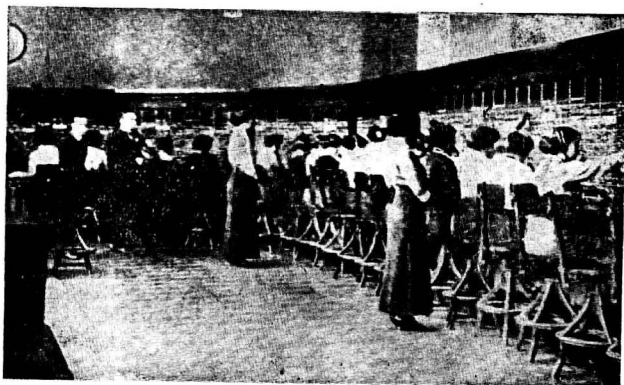


圖四一〇 電話電路之連結。

*T* 為發送機 *C* 為電池, *PS* 為變壓器之兩線圈, *D* 為呼人用交流發電機, *B* 是鈴; *H* 吊鉤; 將接收機掛在鉤上, 則 *DB* 之電路即斷。

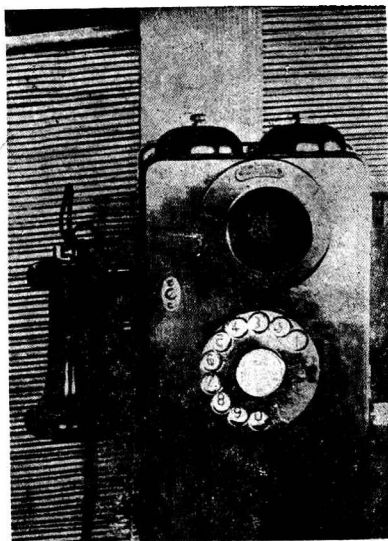


圖四一一 電話接線板。



圖四一二 電話接線之狀況。

流等於零時之值，其上下恆有大小相等之電流存在。故若將三相交流之導線連結於同一之點上時，因方向互相反對之電流，互相重合，故其全體等於零。故引用三相交流時，使用此種連結，即無須再用歸路之導線，實際傳遞電能時，多用此種電流，即由於此。



圖四一三 自動接線電話 上為裝於壁上者；下為安放桌上者。

高壓之應用，亦不僅限於大規模之電能傳遞，例如電話之中，亦復如此。發送機之電路，與接收機之電路，各連結於變壓器之兩線圈上，使發送機電路中流過之電流，發生感應作用，在接收機電路中引起高壓之電流發生，然後傳至遠處。發送處及接收處之連結，法如圖四一〇所示。在共電式公共電話，其電池及叫人用發電機，並未一一附設於各處，而設於接線之總局內。接線舊日專用人工，近來則有美國之斯特魯賈發明之自動接線式，如圖四一三所示，備有一叫人用記數盤，上列各種數字，按所要號數，一一用指勾住轉動，然後放任之，則由其復返原位置之運動，使電流或通或斷，經由總局內之複雜構造，即能自行與所要之號數接通。

## 第八節 放電

陰陽兩種之電，在導體中可以自由移動以相中和，所謂電流之現象，亦不外此種電之移動而已。除在導體中移動而外，如被絕緣質隔斷，但所隔之



圖四一四 放電器。  
彈條之端，開閉自如，而  
其柄則用絕緣質製成。

距離不大，而電勢差頗相懸殊之時，亦可衝破其間之絕緣質，發出音光，以相中和。在靜電之實驗中，恆有此等現象發生，例如以手指近帶電體，注意觀之，即有微小之音，伴同微小之火光出現。使起電機上之兩極，聚集多量之電，然後使兩極互相接近，所發之音與火光，較前更大，如用圖四一四所示之器，曰放電器 (discharging rod)，以其前端之兩金屬球，作來頓瓶內外兩層錫箔間之連絡，則亦有同樣現象發生。

凡如此等衝破絕緣體以相中和之現象，曰放電 (discharge)。如放電時有火光伴同發生者，特曰電花放電 (spark discharge)。其出現之火光，曰電花 (spark)。電花稍猛烈者，均可使夾在兩極間之紙板，穿成小孔。

大氣中出現之雷鳴 (thunder) 電



圖四一五 佛蘭克林。

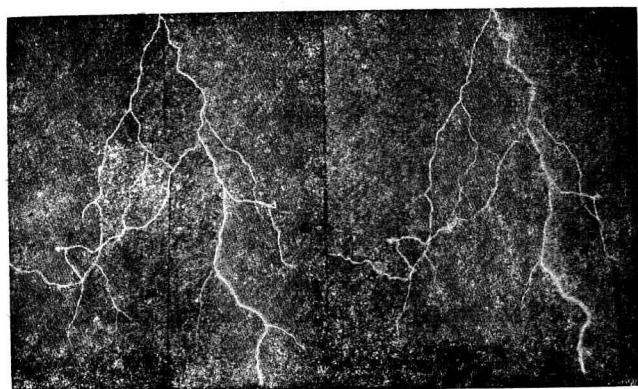




圖四一六 佛蘭克林之實驗。

閃 (lightning) 亦屬同一之放電現象。最初對於此事加以研究者，為美國之一有名政治家佛蘭克林 (B. Franklin)，時在一七五二年。最初本欲待菲列得爾菲亞 (Philadelphia) 之高塔建成之後，再從最高之處，將空中之電導下，以作實驗。但遲之久，久，工事猶未完成。乃為製一風箏，在其尖端附一鐵棒，全體用布製成，欲由此將電導下。佛蘭克林與其子即用此物於同年七月雷雨中，將此風箏放出，如第四一六圖所示，居然使下端連結之頓瓶帶電，證明與通常之電，作同樣之震擊。

電閃以及放電時出現之電光，其進行決不依一直線，而取曲折徑路如圖四一七所示。又凡有尖



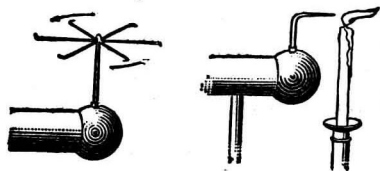
圖四一七 閃電之實驗。

此圖係用實體鏡對於空中現出之閃電照得之左右兩相片，放在實體鏡上窺之，可得立體之視覺。

端之金屬導線，均容易傳電，由佛蘭克林之實驗，可以證明，其說明如下。金屬導線上所帶之電，由於靜電感應而來，但在此導體上，以尖端近傍分佈之密度最大，故空中之塵埃，爲此一部分吸引而去者最多。此等塵埃，一旦與導體接觸之後，亦帶同樣之電，受斥力作用，重與導體脫離，宛如彈回者然。故其結果，成爲一種放電，使此一部分上由感應而生之電，與空中之電，互相中和，而將其反對之電，保持於導體之他端。凡如此種之放電，曰尖端放電 (point discharge)。

佛蘭克林利用此現象，發明一種避雷針 (lightning conductor)，如圖四一六之左上角所示。在房屋上樹一導體，上具尖端，下與地面相通，使雷雲之電，不絕與此尖端上之反對電，徐徐中和，可以保護房屋，不致遭劇烈之雷擊。

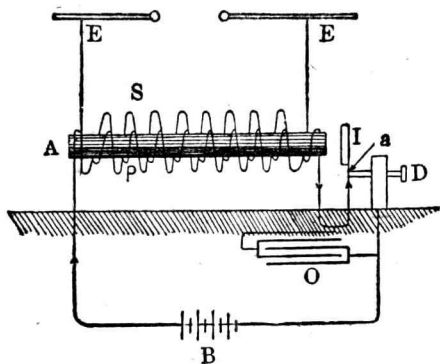
放電現象由於衝破非導體之絕緣性而起，故其電流之強度，雖比較爲小，而其電壓則極大。故欲由電流得強大之放電時，須使用一種變壓器，將其電壓升高，爲此而設者有感應圈 (H-



圖四一八 尖端放電之實驗。

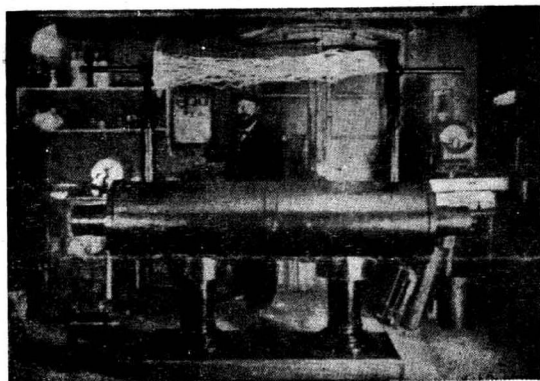
將金屬屬成圖中所示之形狀，使其帶電。當其作尖端放電之時，空氣中之塵埃，順尖端之方向，被推斥而去，故全體由其反作用，沿箭頭所示之方向導動，或將燭火吹滅。

原線圈 (primary coil), 更在其外用細導線繞上, 是為副線圈 (secondary coil)。原線圈之匝數甚



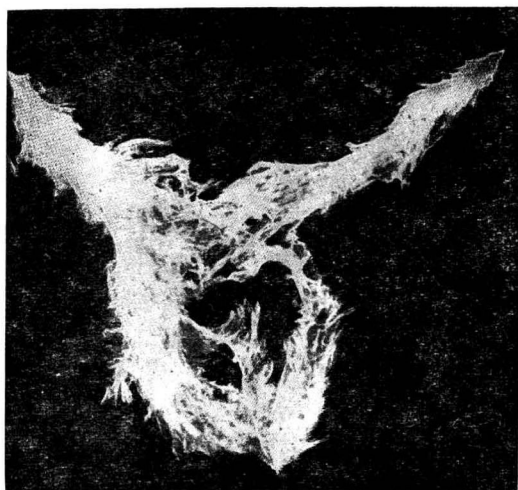
圖四一九 感應圈之構造。

A: 鐵心; P: 原線圈; S: 副線圈; E: 兩極;  
I: 銜鐵; O: 容電氣; B: 電池。

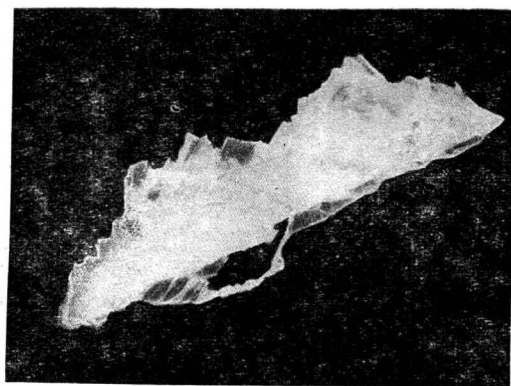


圖四二〇 大規模之感應圈放電。

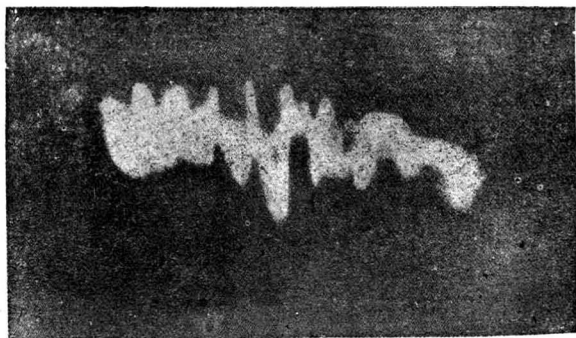
少，而副線圈之匝數頗多。在原線圈之電路內，插入一斷續器 (Interrupter)，即與電鈴中所使用者相同。由此可使此電路中之電流，自行時斷時通，作極迅速之變化，每一斷通之間，必在副線圈內發



(a)



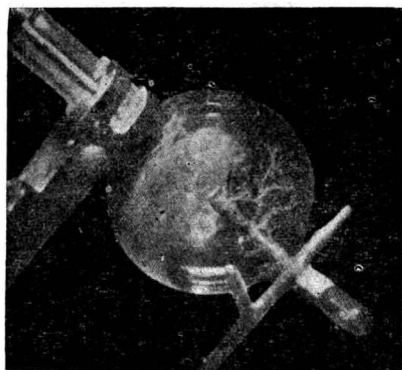
(b)



(a)

圖四二一 電花放電。

- (a) 互隔 9 英尺距離之三電極間之放電。
- (b) 相隔 14 英尺距離之兩極，每秒 6 循環之交流，以百五十萬伏特之電壓放電時。
- (c) 在磁場內之放電，其進路因受磁場作用，盤旋作螺旋狀。

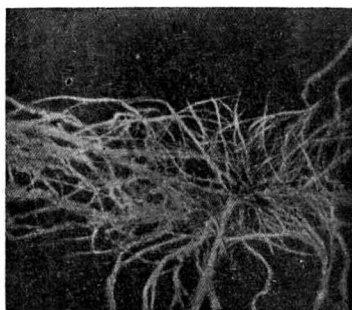


(a)

生高壓之感應電流。此項感應電流之方向，一反一正，與原線圈內之電流一斷一通相應，故成爲一種交流。但其兩種方向之強度，並不相等，其中原線圈電路初斷時由自感應而生者，其感應電動勢之值，遠在復通時所生者之上。故若將誘導圈之兩極放在適宜之距離處，即有與此優勢之一方相



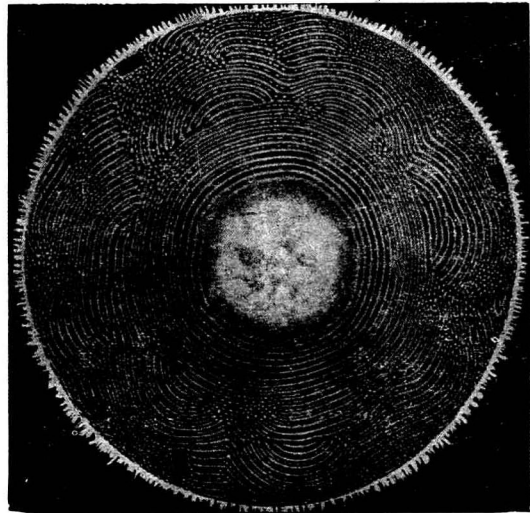
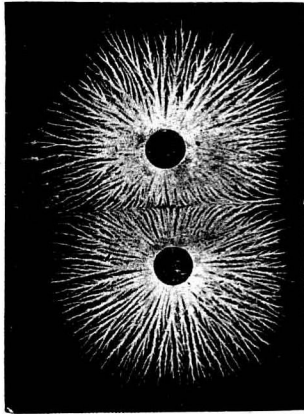
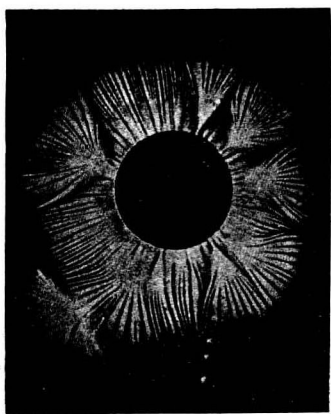
(b)



(c)

圖四二二 滑走電花。

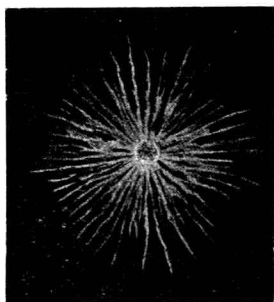
- (a) 沿X射線管現出者。
- (b) 同上裝有側管處出現之樹枝狀電花。
- (c) 沿玻璃板上出現之通常之滑走電花。



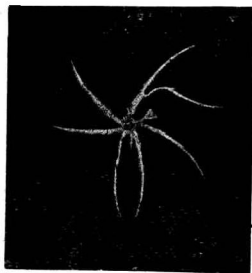
圖四二三(甲) 力喜騰堡圖形之一。

上左角:陰 上右角:陽,二電極。 下:陰。  
陰陽係指來頓瓶之內層錫箔所帶之電為陰電或陽電。

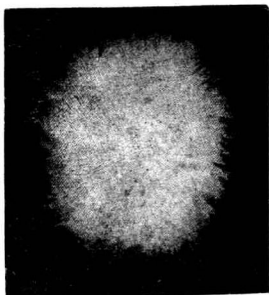




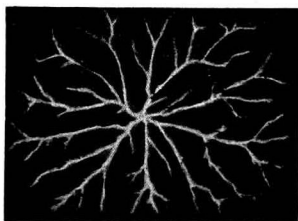
(四) 氦氣：陽；



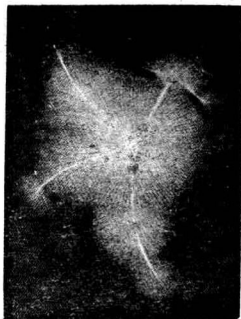
(一) 氦氣 陰；



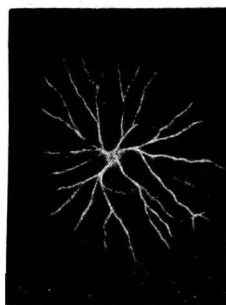
(五) 氦氣 陰；



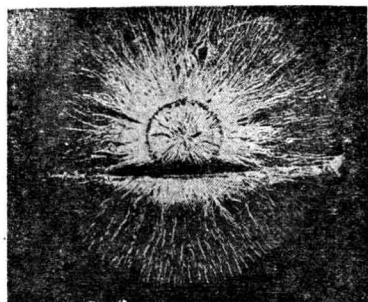
(二) 氦氣 陽；



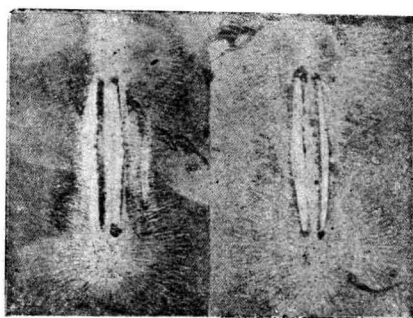
(六) 空氣：陰，



(三) 氦氣 陰；



(七)



(八)

圖四二三(乙) 力喜騰堡型形之二。

(一)至(六)為在各種氣體內出現之形狀；

(七)及(八)為在絕緣體或  
其他物體表面出現之形狀。

當之電花飛過。大規模之電花放電，其形狀如圖四二〇所示。又放電時因其電壓之大小，距離之遠近，周圍之情況等項，條件不同，則其所現出之形狀，亦迥然各別，如圖四二一所示，即其數例。

又放電時發生之電花，亦有沿玻璃管或其他之絕緣體之表面出現者，此時則稱之曰滑走電花 (sliding spark)。在實驗中射線時，常有此種電花發生，槎枒如樹枝或樹根之狀，極為美觀，如圖

#### 四二二所示。

此外尙有一七七七年，經力喜騰堡 (Lichtenberg) 所發見之一現象，與滑走電花頗相類似，通稱之曰力喜騰堡圖形 (Lichtenberg's figure)。法以帶有強烈電之來頓瓶之頭部，與絕緣體之表面接觸，在此處撒布鐵黃及鉛丹之細粉，多餘者吹去之，即現出各種特殊之圖形。按以布摩擦硫黃則帶陰電，摩擦鉛丹，則帶陽電，故此兩物在絕緣物之表面上，各附着於其反對帶電之處。如上述之實驗，不用此等細粉，而用一照相乾板，放在絕緣體之表面上，亦可印成與此相同之美麗圖形。圖四二二之甲乙，即用此法照得之相片。

#### 第九節 電振動及電波

由肉眼觀察來頓瓶之放電，或其他之放電，一瞬即滅。但若改用以極大速度轉動中之旋鏡 (rotating mirror)，即見映出之像，係由多數之往復振動，重合而成。其振幅次第減小，如圖四二四所示，即爲一種阻尼振動 (damped oscillation)。此事之開始，出於美國之亨利 (Joseph Henry)。

於一八四二年用鋼針之不規則之磁化說明後，經一八五三年克爾文更由理論上研究之，其後又有德國之斐達生於一八五八年，始用旋鏡作此實驗。此現象與擺之振動，頗相類似，將擺舉上後，放其自由，必作往返數次之振動，始漸停止於其最下之位置。由此可見，電之運動，亦有與擺之慣性相當之性質存在。又由前面已提及電流之自感應，與此具有同一之意義。試使交流驟斷，亦可得見有同樣之阻尼振動出現，如圖四二六所示。

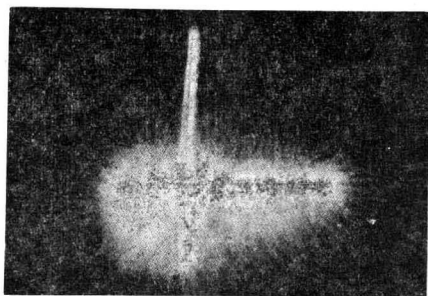
既將電流看作電之移動而成，則其



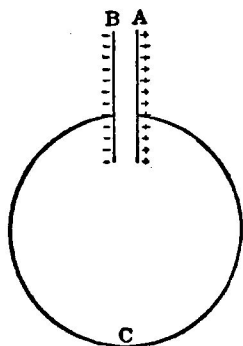
圖四二四 來頓瓶之放電。  
在旋鏡中映出之狀況。(由左至右進行)



圖四二五 亨利。



圖四二六 交流之阻尼狀況。



圖四二八



圖四二七 馬克斯維耳。

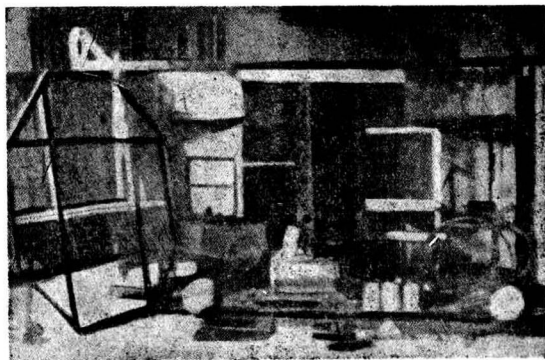
周圍當然有電場移動，伴之而生，同時再根據第五節所述，又非有磁場存在不可。因之，當電發生上述之振動，即有電振動 (electric oscillation) 發生時，電場及磁場，亦必發生振動的變化。據法拉第及馬克斯維耳之場之理論，可以用數學公式，將介質內之場，完全表出。場中如有變化發生，可以看成一種電流，以一定之速度，在此介質中傳播而去，因名之曰介質電流 (dielectric current)。例如圖四二八所示之容器，其兩板 A 及 B，用一導線 C 爲之連結，使其放電，則所帶之陰電及陽電，經由導線上傳導而去，成爲傳導電流 (Conduction current)。同時在 AB 之間，發生場之變化，成爲介質電流。此兩者相合，適成一完全通達之電路。由此可見介質電流在理論上極爲重要。

此種介質電流，凡電場及磁場存在之

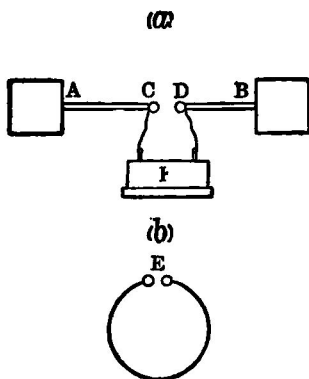


圖四二九 赫芝。

處，莫不有之。上述之電振動，即成爲振動的變化，傳播於全空間中，無所不屆。換言之，即不外一種波動。故此全體通稱之曰電磁波（electromagnetic wave）；如單就其中之電場一方面之振動而言，則曰電波（electric wave）。馬克斯維耳於一八七三年在其理論中，曾作一預言之結論，認爲此種電磁波，應與光波具有同一之性質，由此遂創成光之電磁說（electromagnetic theory of light）。其後德國之赫芝（H. Hertz）於一八八八年，由電振動實際造成電波，將馬克斯維耳之理論，完全證明。赫芝當日使用之儀器，如圖四三一所示。將感應圈A之兩極連結於金屬板A及B所裝之棒上，使其先端所附之小金屬球，離開若干距離，互相對立，一方面再用一導線環B，其上亦具有同樣之隙。使感應圈內有電流通過，則見CD間發生電花。此時如將環B放在適當之位置，則環內亦可發生感應電流，在其隙處，見有微小之電花飛過。此現象與聲學中之共振（resonance）相同，即發來之聲波，如恰與此發聲體之振動相等，則自能發聲。在電路中亦復如是，各電路由其電阻及自感應等，決定其固有之振動。兩電路之固有振動之週期，如彼此相等，亦能發生共振現象。根據此意，在振動中之電路，曰振動器（oscillator），由共振而起振動之電路，曰共振器（resonator）。

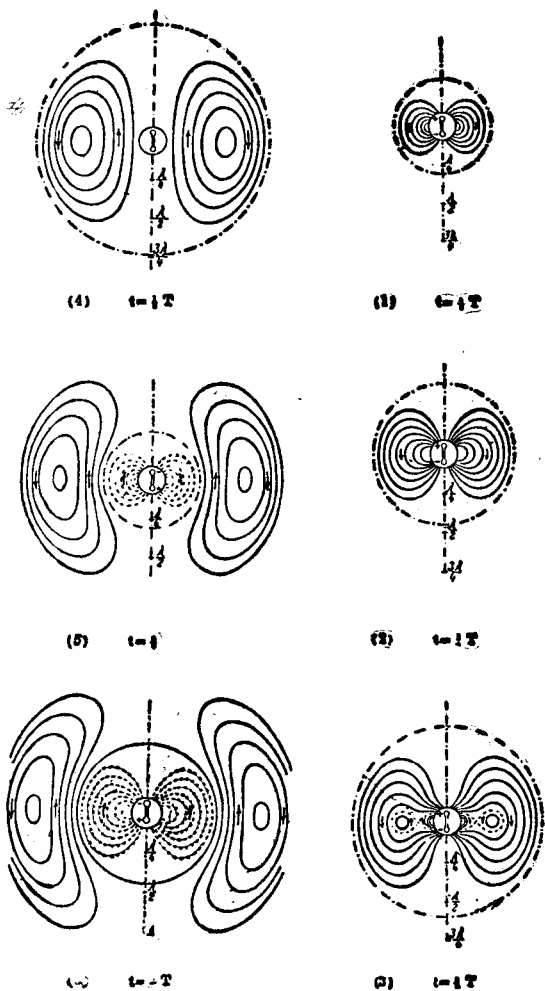


圖四三〇 赫芝用電波實驗器。  
現尚保存於德國因行之德意志博物館內。



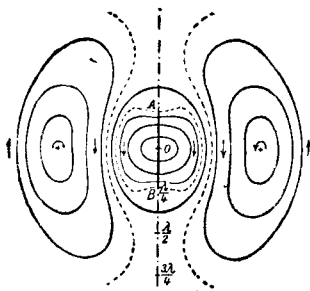
圖四三一 赫芝之實驗器具。



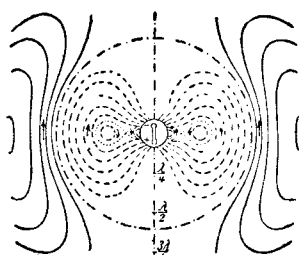


此圖表示每隔  $\frac{1}{4}T$  時間出現之電力線之狀況， $\lambda$  表振動之週期， $\lambda/2$  表波長。由 (1) 至 (6) 之半週期程序，在由 (5) 至 (6) 之間重行出現，再反覆一遍。由 (1) 至 (3) 表陰陽兩電點之振動而由 (4) 至 (6) 則表在一直線  $\lambda/2$  上分佈之電振動。

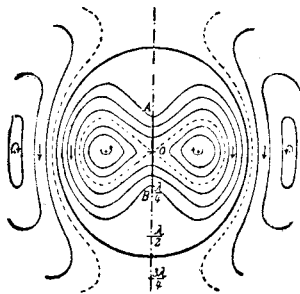
圖四三二 赫芝之振動器所生之電波。



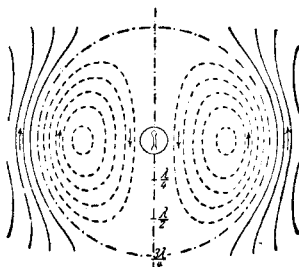
(10)  $t = \frac{1}{4} T$



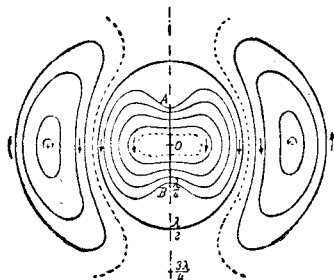
(7)  $t = \frac{1}{2} T$



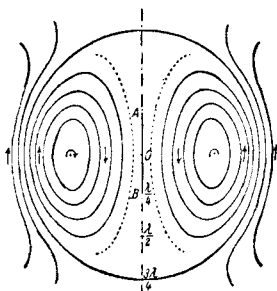
(11)  $t = \frac{3}{4} T$



(8)  $t = T$



(12)  $t = \frac{5}{4} T$

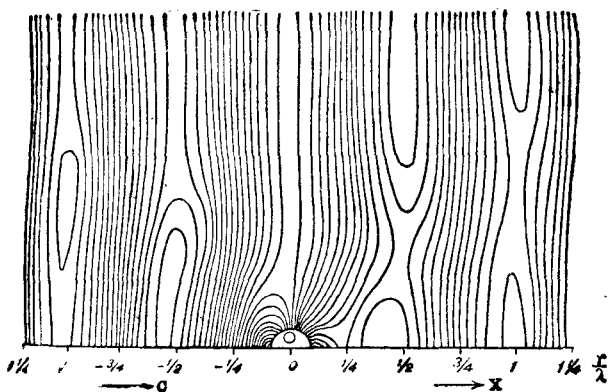


(9)  $t = 0$

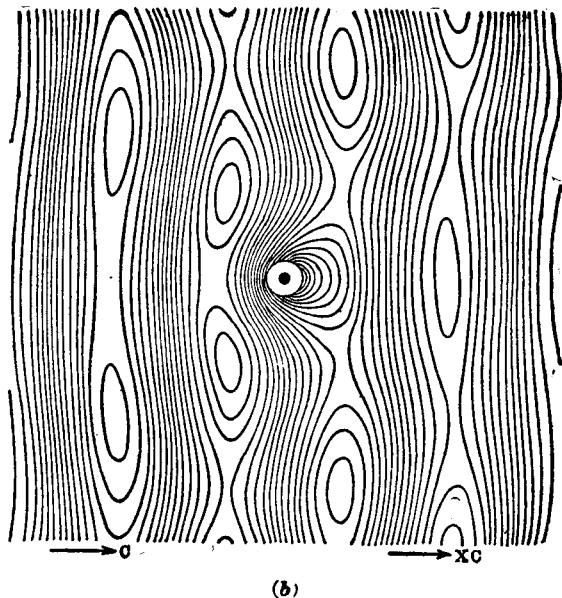


圖四三三 粉末檢波器。

$TT'$  爲一玻璃管，內插有兩銀極  $P, P'$ ，其間填有稀鬆之金屬粉。任其如此，並不導電，但一遇有電波傳到，則一變而能傳電。此後再將玻璃管輕微敲動，又恢復原狀。



(a)

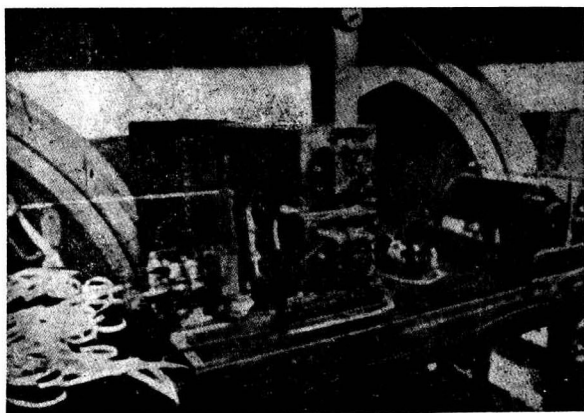


圖四三四 天線周圍之電場及磁場。

將天線垂直立於地面之上，則包含天線之鉛直面內之電力線，如(a)所示，而其水平面內之磁力線則如(b)所示。

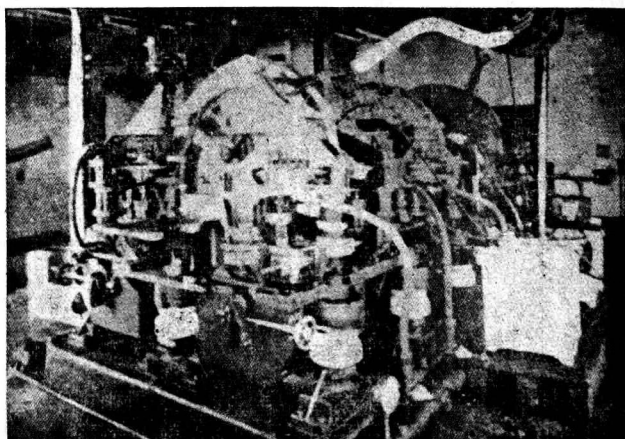


圖四三五 馬可尼。

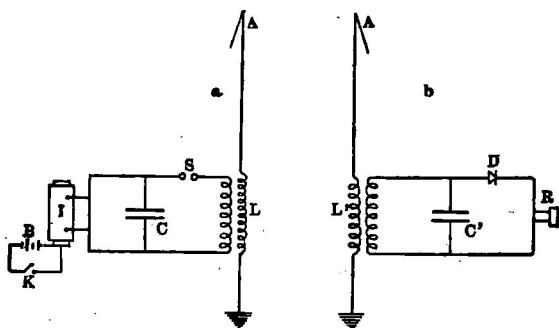


圖四三六

一八九九年英國多維 (Dover) 市政廳內，佛來明 (Fleming) 在英國科學總會內講演時所裝設之馬可尼式接收機，用此曾接收由法國發來之無線電線報。



圖四三七 馬可尼式電波發生器。



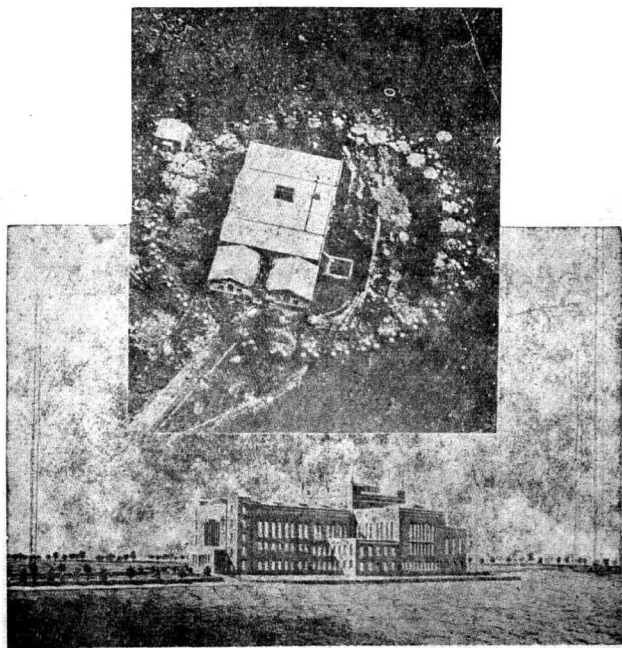
圖四三八 無線電報原理。

(a)發送機

A 天線。 B:電池; C:容電器; B:地面;  
I:感應圈; K:電鍵; L:變壓器; S 電花隙。

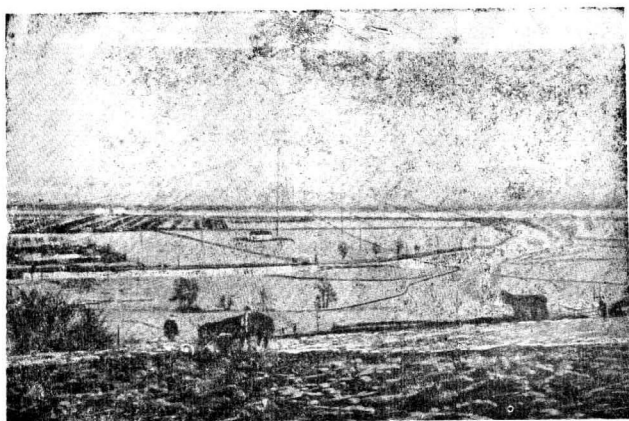
(b)接收機

A':天線; C':電電器; D 檢波器; R:接收機。



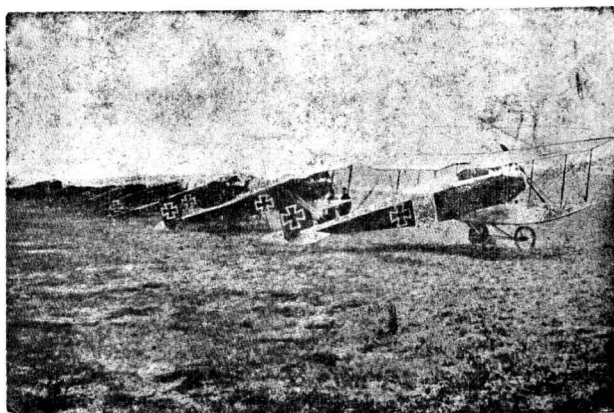
圖四三九

上圖係由天線之頂，下眺英國中央廣播局之  
全景；下圖為德國有名之勞因無線電臺。



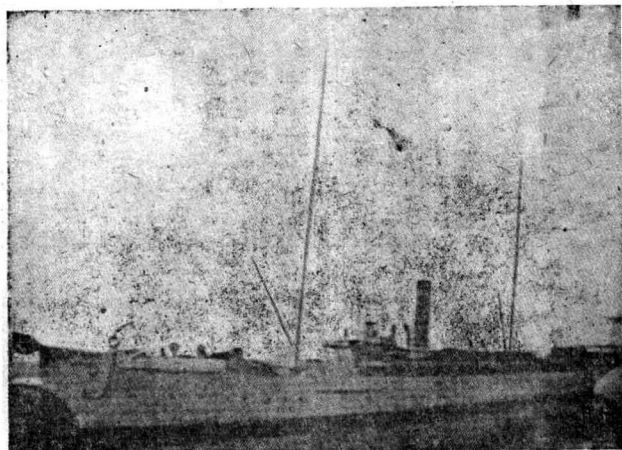
圖四四〇

德國羅倫轍公司 (Lorent·Geoellschaft) 之  
亞拍茲發得 (Eberswalde) 研究所之傘式天線。



圖四四一 飛機上裝用之無線電天線。





圖四四二

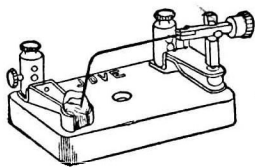
(上) 船用無線電報，天線裝在前後兩桅之間。

(下) 艙內之無線電報之設備。

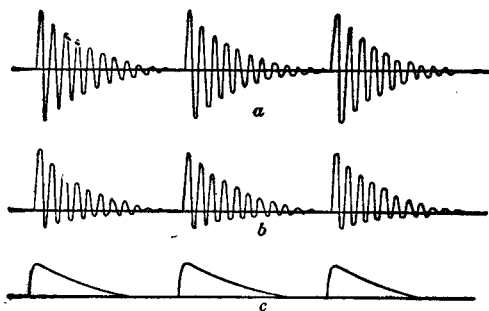
經赫芝發見之電波及其共振現象，其進展頗速，無線電之基礎，即由此而成。最初成功實際之通信者，為法國布朗力（Braney）發明之粉末檢波器（coherer），及利用之以通信至意大利之馬可尼（Marconi）。一八九七年馬可尼始成功隔數公里距離間之通信。其後增大電花之強度，及天線（antenna）之高度，通信之距離，亦逐漸及遠。一九〇一年十二月，最初成功橫斷大西洋之通信，由英國送一與  $\alpha$  字相當之電碼至 加奈大之紐芬蘭（Newfoundland）。

馬可尼使用之發送接收原理及其器具，大致如圖四三八所示。其發生振動與赫芝之振動器相同，經一次昇壓後，再由天線向各方輻射而出。在接收處亦然，由其天線接收而得之電波，經檢波器適宜變化後，進入電話上使用之接收機中，成為音樂之符號。

最初使用之檢波器，為粉末檢波器，其次則用晶體檢波器（crystal detector），係一九〇一年布朗發明者。法用特種之兩種礦石，使一方之尖端，與他方之面接觸，如圖四四三所示。插入電路內，則對某一方

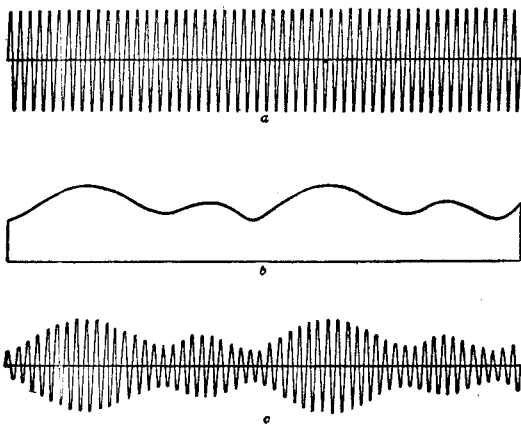


圖四四三 晶體檢波器。



圖四四四 檢波器之作用。

- (a) 表傳入檢波器內之振動交流；
- (b) 表經檢波器作用後變成之形狀；
- (c) 表對於接收機所生之平均效應。



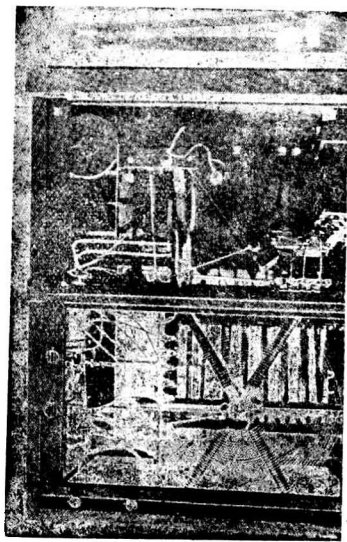
圖四四五 無線電話之電波。

- (a) 表無阻尼振動；
- (b) 檢波器接收之振動；
- (c) 表受聲變化後之振動。

電流，電阻極小，而對於其反對方向之電流，電阻絕大，故其結果，只容交流之一方通過接收機內，如圖四四四所示。此種檢波器通常用黃銅鑲及鐵，或用黃銅鑲及洋銀，或用斑銅鑲及紅鋅鑲，或用一

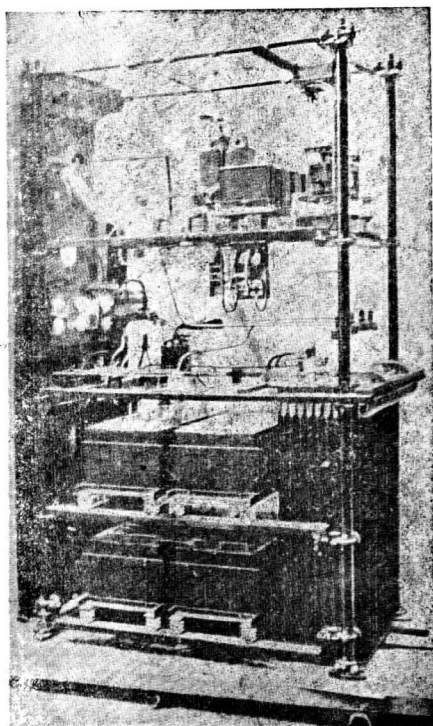
碳化矽之結晶及黃鐵鏽等。較近更用後面第九章第七節說明之真空管檢波器 (vacuum tube detector)，對於極遠之電波，亦能接收。又無線電對於船上使用，極為重要，自不待言。即在學術上，亦有各項用途。如在特別指定之處，發出信號，報告正確之時刻於全世界，即其最顯著之一例。

又無線電話 (wireless telephony) 較之無線電報，又多一層困難，故其發達略遲。由前所述，已知由電火花放電所生之電振動，其振幅逐漸減小，終至完全消滅，係一種阻尼振動 (damped oscillation)，對於無線電報雖可使用，對於無線電話，則非有無阻尼振動 (undamped oscillation) 不可。因在無阻尼振動電路中，使與由聲音引起之電流變化，相伴發生，成爲電波，送至遠方。再經接收處之檢波器作用，復返成爲聲音。其後有三極真空管 (triode) 之發明，可以發生此項無阻尼振動，同

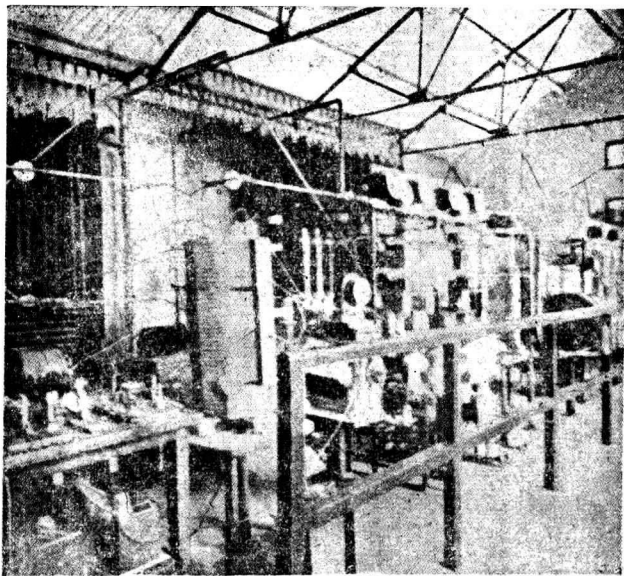


圖四四六 德國之德律風根式發送機。

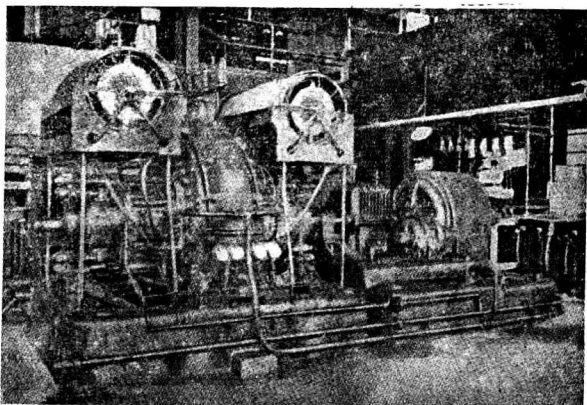
時又有美國之亞歷山大遜 (E. F. W. Alexanderson) 德國之哥德士密特 (Godschmid) 等之高頻交流發電機 (high frequency alternator) 之發明，無線電之通話，漸臻完成。尤以在歐戰中，需要甚殷，遂以一日千里之勢進展不已。歐戰終了後，於一九二一年，在美國始有公開之廣播 (broadcasting)，開始進行，不及數年，即遍及於全世界。



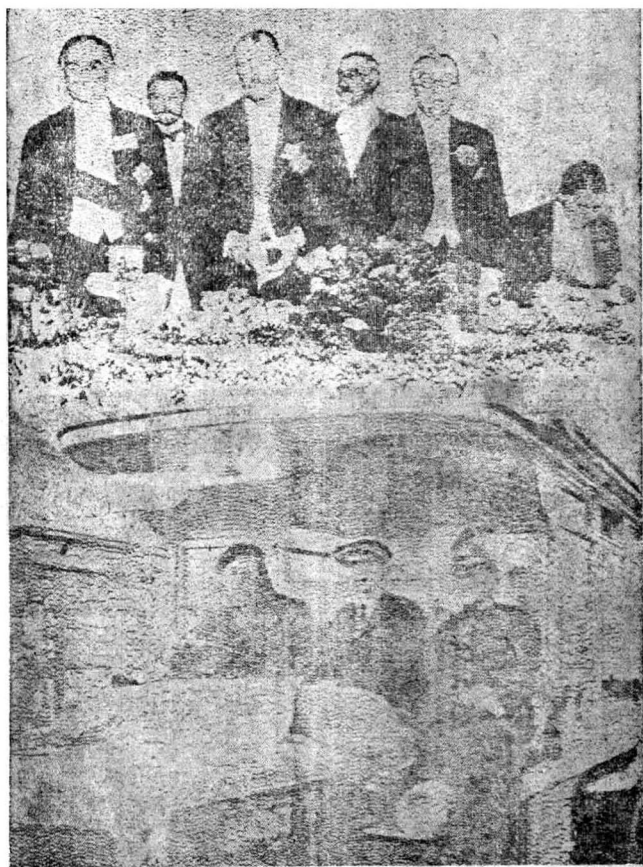
圖四四七 德律風模式發電機。



圖四四八 倫敦中央廣播局內部發送機。



圖四四九 亞歷山大遜高頻交流發電機。  
磁鐵石有數百磁極。電樞每分轉動數千次。共  
用二百仟瓦特。



圖四五〇 相片之無線電廣播。

本圖爲一九二六年四月三〇日由英國之馬可尼公司，最初發至美國之無線電公司(Radio Corporation)之相片。上圖爲時事畫報，下圖爲當時英國大罷工之狀況。

同時又有將印刷物及相片等，由無線電送至各處者，又有用無線電操縱飛機及戰艦之類者。將來之無線電世界必大有可觀，且實現之期，亦將不遠。

電波之波，隨其發生器而異，有僅數毫米者，有達數仟米者，種種不一。廣播時，各國各有特定之波長，以防混淆。