

程式人



用十分鐘瞭解

《電的歷史》

陳鍾誠

2016 年 1 月 18 日

話說、我中學的時候

- 總是在《歷史、地理、物理、化學、數學、國文、英文》這些課程上死念書。
- 我和大家一樣，就是每天《考試、考試、考試》。

雖然我物理念得不錯

- 但其實很心虛

我只會算算算

- 這樣真的代表我學會物理了嗎？
- 我連實驗都沒做過，《三用電錶》也不會用，更別說《示波器》了。

上了大學之後

- 大一要修物理課

我念交通大學資訊科學系

- 物理課程是《電子物理系》
老師教的

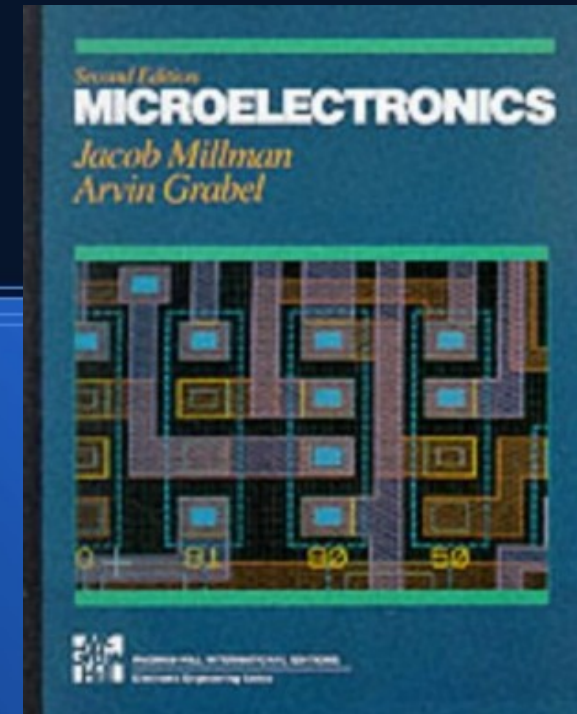
奇怪的是

- 既然是電子物理系老師教的
- 那為何教到《力學》就沒了

那電學呢？

更糟的是

- 我唸交大資訊科學系
- 大一有門電子學
- 用的應該是這本



我覺得好難

- 有看沒有懂！

最近我自己重學

- 才發現不能從《電子學》開始
- 應該從《基本電學》念起
- 然後才能學《電子學》

雖然高中物理課有教電的部分

- 但都是理論
- 沒什麼真實感

而我卻是那種

- 非常需要真實感的學習者
- 所以對《電子電路》總是感到很
困惑

我從圖書館借了一些電子電路的書

- 發現寫給大學看的都偏理論
- 而寫給高職看的都比較實務易懂

所以

- 雖然我已經在大學教書了
- 但是我看的課本卻是
《高職用的》

我買的課本如下



對於我來說

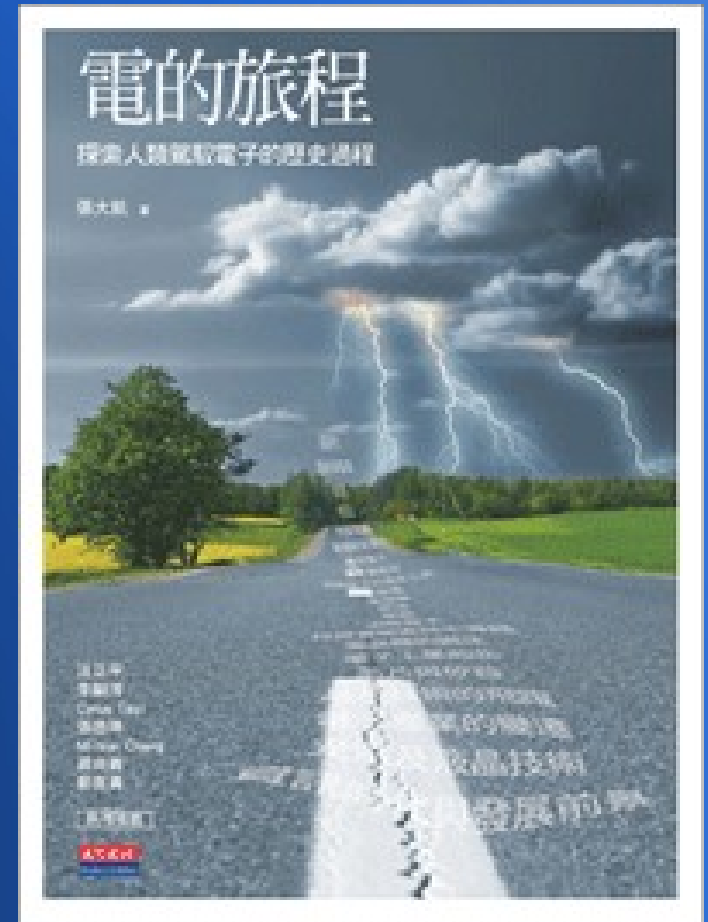
- 一本書有沒有學術價值不重要
- 重要的是我能看懂，然後學會

接著

- 我又買了《麵包板》、《三用電錶》和《一堆線》，還有《強力磁鐵》等等東西
- 還買了 Arduino 板子來做些實驗
- 重新學習當初沒學好的那些電子電路

然後、我還買了一本有趣的書

- 根據《好書都絕版》定律，這本在博客來果然已經沒賣了。



我超愛這本書的

- 因為它讓我對《電的理解》
活了起來。

然後、我根據書上的線索

- 查了維基百科，企圖串起這些故事。

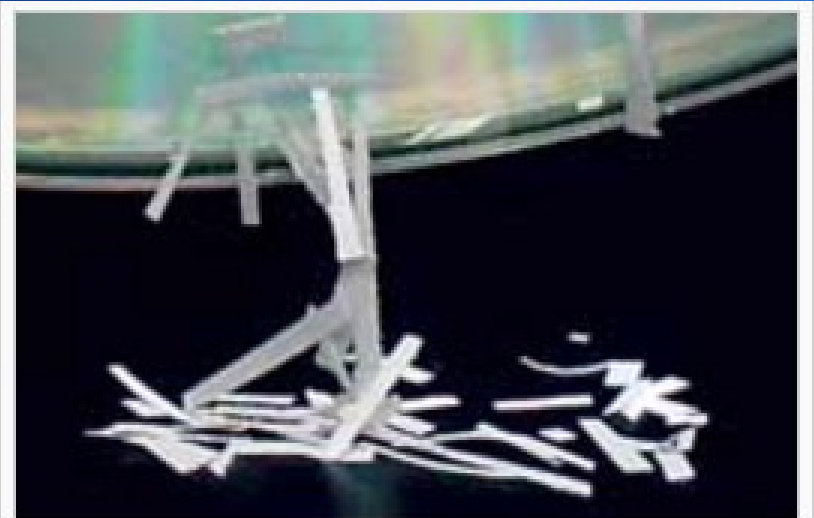
這就是

- 我接下來所要講的故事了！

在公元前六世紀

- 希臘人就發現琥珀摩擦後，能夠吸引輕小物體的「靜電現象」。

琥珀	
	
琥珀與昆蟲化石	
基本資料	
類別	有機化合物
化學式	$\sim C_{10}H_{16}O \cdot (H_2S)$
性質	
顏色	黃、褐、紅褐、乳黃色紋路



因為電荷感應，紙屑被帶電的光碟吸引。

二千五百年前

- 希臘、印度及中國都紀載了磁石與磁力現象



由鋁鎳鈷永磁合金製成的馬蹄磁鐵。
這形狀試圖拉近兩個磁極之間的距離，藉以產生能夠吸引沉重鐵磁體的強烈磁場。



公元前 220 年的戰國時代

- 有匠人用琢玉的技巧將磁石做成湯匙形狀，然後造出了這個



您應該知道那是甚麼！

1453 年東羅馬帝國滅亡後

- 文藝復興開始了

說起了文藝復興

- 或許您還記得本系列中的那篇
 - 用十分鐘看懂《近代科學發展史》
- 投影片裏談到他們家~~馬桶不通水~~抽不上來，結果導致發展出真空抽水機的故事。還有柯博文把能源火種藏在他們家，導致近代科學大爆發的故事。

如果您看了那份投影片

- 應該還記得文藝復興的關鍵影響人物，梅蒂奇家族。



佛羅倫斯的「豪華者羅倫佐」，
是文藝復興高峰期的偉大領袖

但是、不只梅蒂奇家族

- 還有一些貴族也對文藝復興貢獻頗大



死後獲稱「世界第一夫人」的伊莎貝拉·埃斯特（1474-1539年），雖然只是小國曼圖亞的侯爵夫人兼攝政，但是她對藝術的贊助、政治技術的妙用、科學知識的興趣，使她成為羅倫佐之後，文藝復興的典範人物

關於貴族的貢獻

- 那當然是和錢有關

而平民們的貢獻

- 那當然就和錢無關了！

1600 年英國女王的御醫

- 威廉·吉爾伯特 (William Gilbert) 出版六大巨冊《論磁石》(De Magnete)

威廉·吉爾伯特 (William Gilbert, 1544年5月24日－1603年12月10日)，英國伊莉莎白女王的御醫、英國皇家科學院物理學家。主要在電學和磁學方面有很大貢獻。

威廉·吉爾伯特1540年5月24日生於英國科爾切斯特 (Colchester)，1569年獲得劍橋大學醫學博士學位。吉爾伯特起先研究化學，1580年前後開始對磁學和電學發生興趣。1600年出版了《論磁石》是物理學史上第一部系統闡述磁學的科學專著。伽利略稱它「偉大到令人妒忌的程度」。1601年擔任御醫。1603年在倫敦逝世。

吉爾伯特按照皮埃·德馬立克 (Pierre de Maricourt) 的辦法，製成球狀磁石，取名為「小地球」，在球面上用羅盤針和粉筆劃出了磁子午線。他證明諾曼所發現的下傾現象也在這種球狀磁石上表現出來，在球面上羅盤磁針也會下傾。他還證明表面不規則的磁石球，其磁子午線也是不規則的，由此認為羅盤針在地球上和正北方的偏離是由陸地所致。他發現兩極裝上鐵帽的磁石，磁力大大增加，他還研究了某一給定的鐵塊同磁石的大小和它的吸引力的關係，發現這是一種正比關係。

吉爾伯特根據他所發現的這些磁力現象，建立了一個理論體系。他設想整個地球是一塊巨大的磁石，上面為一層水、岩石和泥土覆蓋著。他認為磁石的磁力會產生運動和變化。他認為地球的磁力一直伸到天上並使宇宙合為一體。在吉爾伯特看來，重力無非就是磁力。

吉爾伯特關於磁學的研究為電磁學的產生和發展創造了條件。在電磁學中，磁動勢的單位吉伯 (gilbert) 就是以他的名字命名，以紀念他的貢獻。

威廉·吉爾伯特
William Gilbert



威廉·吉爾伯特

出生	1544年5月24日 英國科爾切斯特 (Colchester)
逝世	1603年11月30日 (59歲) 英國倫敦
職業	物理學家
知名於	磁學研究, 《論磁石》

威廉·吉爾伯特提出下列理論與觀察

- 電和磁是不同現象
- 正負磁極不能完全分開
- 電的吸力在水中消失，磁力在水中仍然存在
- 磁力在高溫時消失
- 認為地球是一塊大磁鐵

接著、故事又接到了

- 上次 用十分鐘看懂《近代科學發展史》 那篇中發明能源火種的那個 《奧托·馮·居里克》(Ott von Guericke)。
- 他除了接續《托里拆利》的氣壓計研究，然後在 1650 年發明了《真空幫浦》之外，還在 1657 年展示《馬德堡半球實驗》給皇帝看之外，接著在 1660 年順手發明了一部《摩擦起電機》

(同時他還在 1646 年至 1676 年間任馬德堡市市長，換句話說，這些實驗都是在市長任內做的)

(這讓我想到一邊開刀一邊當台北市長的柯 P ，他有時候還要處理彰化選民的陳情案 …)

然後在 1729 年的英國

- 斯蒂芬·格雷 (Stephen Gray) 發現有些物質可以導電，有些不行。並進行導電實驗，還曾經把帶靜電男童吊在半空中，然後撒一堆花瓣到他身邊，花瓣會因靜電感應繞著小男童飛舞。



斯蒂芬·格雷

天文學家

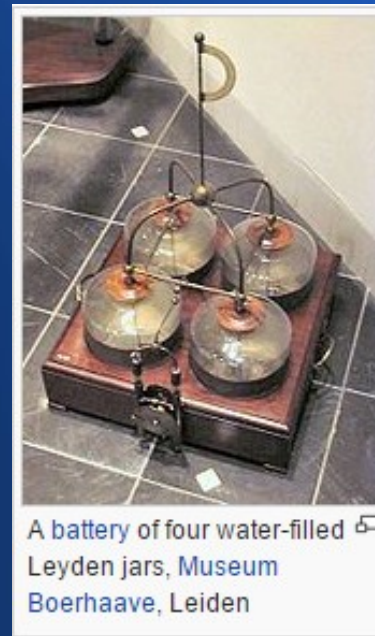
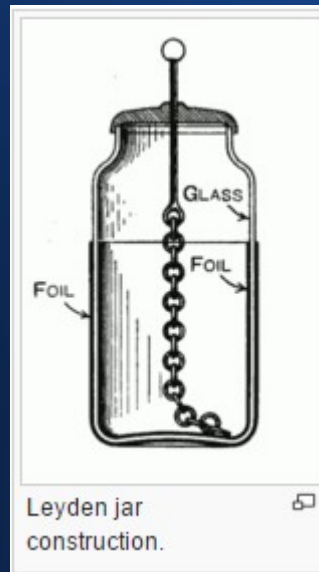
出生：1666 年 12 月，英國坎特伯雷

逝世：1736 年 2 月 7 日，英國倫敦

獲獎紀錄：科普利獎章

1745 年荷蘭的萊頓大學

- Pieter van Musschenbroek
發明了萊頓瓶，
可以用來把
電儲存起來



Pieter van Musschenbroek



1741 portrait of Pieter van Musschenbroek

Born	14 March 1692 Leiden, Dutch Republic
Died	19 September 1761 (aged 69) Leiden, Dutch Republic
Nationality	Dutch
Fields	Physics, mathematics, philosophy, medicine, astrology
Alma mater	Leiden University
Doctoral advisor	Wolferd Senguerd Herman Boerhaave
Notable students	Andreas Cunaeus
Known for	Leyden jar, Tribometer, Atmometer

後來

- 很多人會帶著萊頓瓶去把妹，玩玩《來電遊戲》 ... XD

但是、把妹只是小事

- 以下這件比較刺激

1746 年，法國神父 Jean Nollet

- 弄了一個特大號的萊頓瓶
- 然後找來兩百名修道士，每人拿一隻銅棍圍成一大圈，最後接上那只特大號萊頓瓶
- 於是、您應該可以想像那個結果...



後來、神父還想做實驗

- 然後當然就被圍毆沒人要做，神父只好去求法皇路易十五。
- 皇帝命令 180 名御林軍配合，接下來的事情你應該就知道了。

筆者註：現在你應該知道 40 年後為何會發生法國大革命了吧！

路易十五

法國和納瓦爾國王



路易十五

在位	1715年9月1日—1774年5月10日
加冕	1722年10月25日，蘭斯
全名	Louis le Bien-Aimé
頭銜	安茹公爵（1710年—1712年） 法國王太子（1712年—1715年）
出生	1710年2月15日 凡爾賽宮
去世	1774年5月10日（64歲） 凡爾賽宮
葬於	法國聖德尼聖殿
前任	路易十四
繼任	路易十六

1752 年美國的富蘭克林

- 放銅線風箏把電引到萊頓瓶，
因此發明了避雷針
- 後來一位丹麥人學他，結果被
電死了

筆者註：這個故事告訴我們，電的實驗不要亂做，很危險的 ...

班傑明·富蘭克林
Benjamin Franklin



班傑明·富蘭克林

第六任賓夕法尼亞州州長

任期

1785年10月18日—1788年11月5日

副總統 查爾斯·比德爾
托馬斯·米福林

前任 約翰·迪金森

繼任 托馬斯·米福林

美國駐法國大使

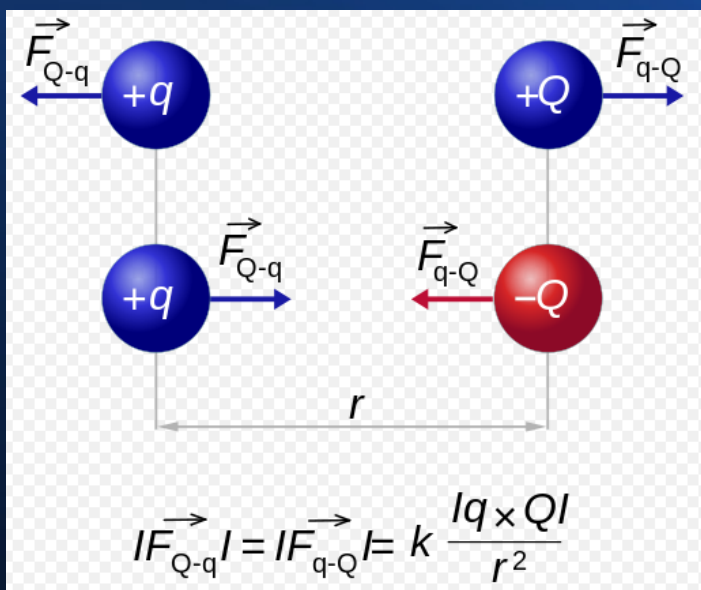
以上看來很精采

- 但是接下來，真正《研究電的科學家》才剛要出現而已！
- 閃開、讓專業的來 …

1777 年、庫倫出場了

- 就是那位提出庫倫定律的傢伙

他並不是閒閒沒事幹去發明庫倫定律的



查爾斯·庫倫的肖像

- 他之所以發明庫倫定律，是因為軍事任務

法國的皇家科學院

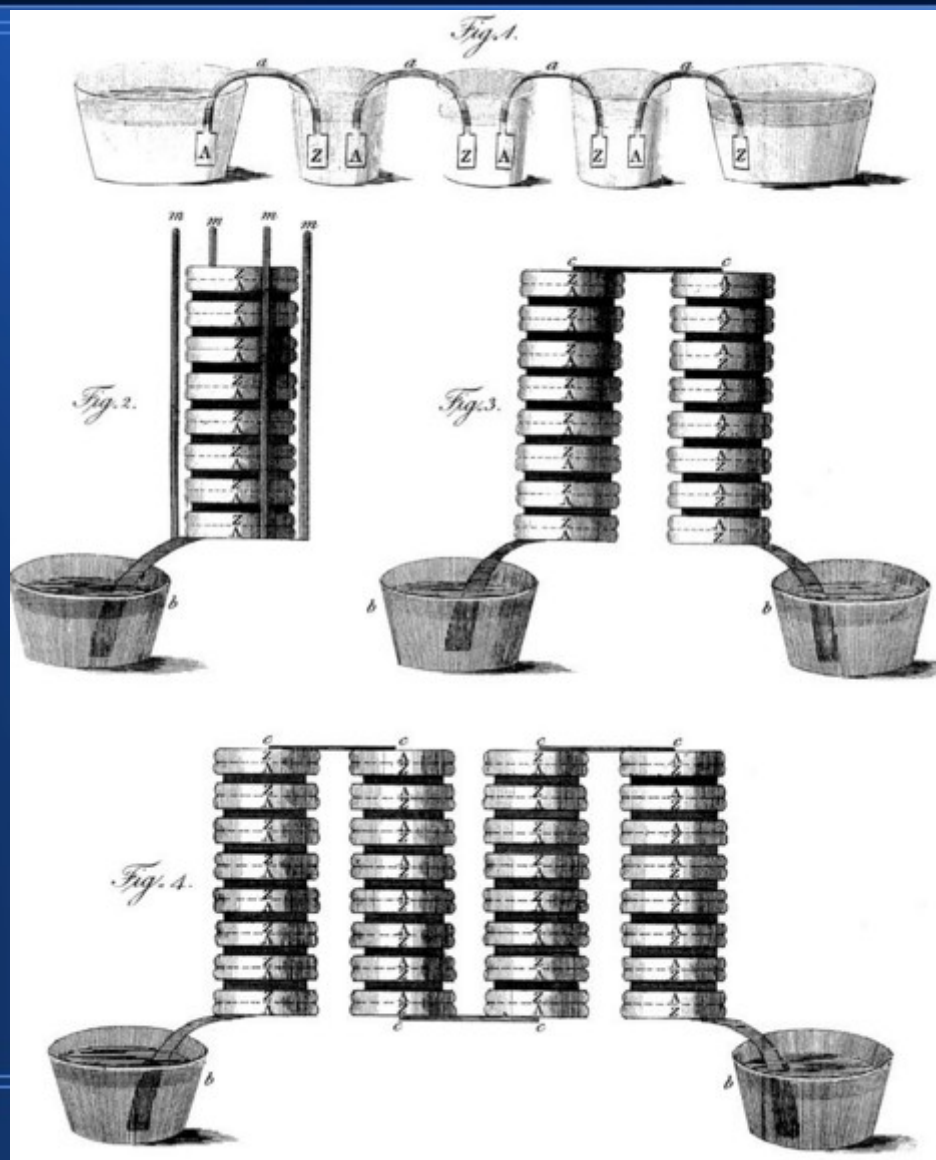
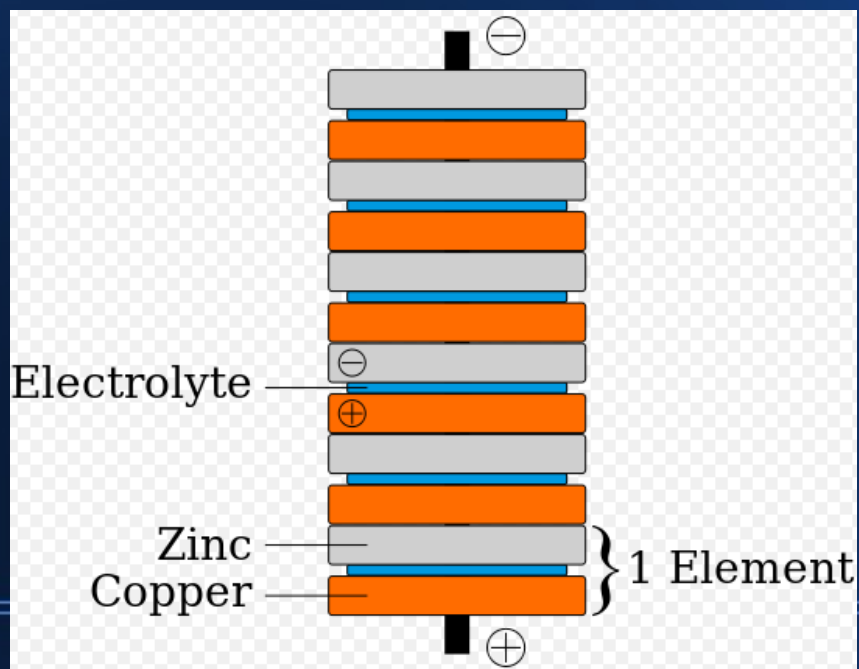
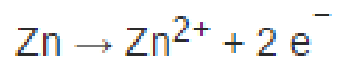
- 要求軍事工程院的《庫倫》，負責改善指南針的精確度，幫助航海者精確識別方位
- 為了減少摩擦力，庫倫用頭髮把磁針吊起，果然靈敏度大有改進，但是 ...
- 髮絲的扭力會影響指南針的方向，於是庫倫才會投入全部的心力去研究扭力。
- 結果磁力研究沒有進展，卻在電力的理論上開花結果了 ...

接著時間來到 1800 年，兩個人吵架

- 因為銅盤上青蛙王子的腿用鋅夾碰的時候會抖動
- 《伏打》和《伽伐尼》爭吵到底是動物電還是化學電，兩位好友因而翻臉，然後伽伐尼就死了
- 後來伏打做出秘密武器如右圖



於是、證實了化學方法就能產生電



接著幾年

- 英國皇家研究院的《戴維》做了很多電化學實驗
- 1807 年《戴維》把兩根碳棒磨尖後通電，結果靠近時會產生放電現象，射出電弧 …
- 但是、這並不是《戴維》最大的貢獻 …

漢弗里·戴維爵士



Thomas Phillips 畫

出生	1778年12月17日 英國 英格蘭康沃爾郡彭贊斯
逝世	1829年5月29日 (50歲) 瑞士 日內瓦
國籍	英國
研究領域	化學
任職於	英國皇家學會、Royal Institution
著名成就	電解、鈉、鉀、鈣、鎂、鋇、硼
施影響於	法拉第、威廉·湯姆森
獲獎	科普利獎章 (1805年)

《戴維》最大的貢獻是

- 收法拉第當徒弟



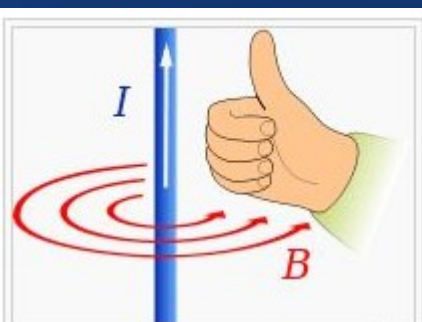
筆者註：這點讓我想起《葉問》，他最大的貢獻不是一個打十個，或者一個打百個。他最大的貢獻是收了李小龍當徒弟，培養出了青蜂俠的助手，否則、美國就毀滅了…

但是、現在還沒輪到法拉第登場

- 我們還得等待一個人

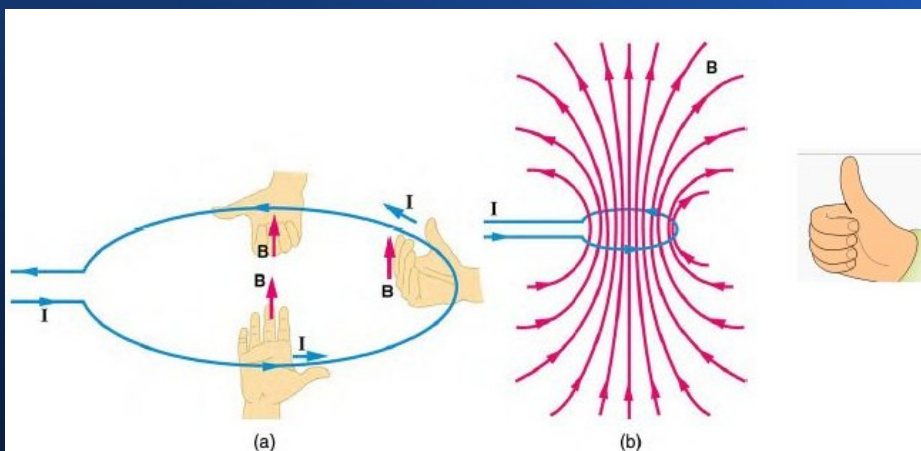
那個人就是

• 安培



安培右手定則：將右手的大拇指指向電流 I 方向，再將其它四根手指握緊電線，則彎曲的方向決定磁場 B 的方向。

圖、安培右手定則



圖、環形電流的安培定則

安德烈-馬里·安培



安德烈-馬里·安培 (1775-1836)

出生	1775年1月20日 法國里昂
逝世	1836年6月10日 (61歲) 法國馬賽
居住地	法國
國籍	 法國
研究領域	化學物理學數學
任職於	Bourg-en-Bresse École Polytechnique
著名成就	安培定律

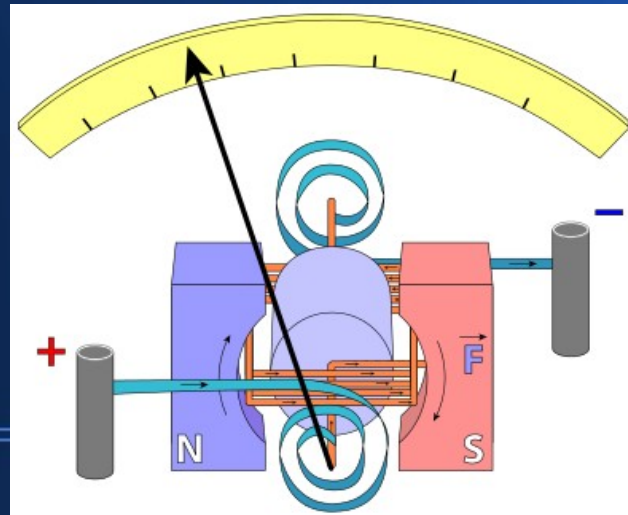
	積分形式	微分形式	「馬克士威-安培方程式」的微分形式
安培定律	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

要說明安培的研究

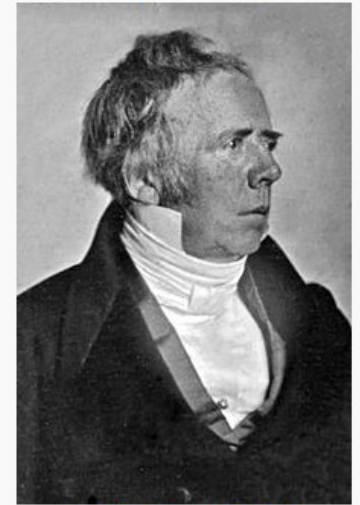
- 還必須先帶出兩個人
- 那就是
 - 丹麥的奧斯特 Hans Oersted
 - 德國的 Johann Salomo Christoph Schweigger

1820 年、丹麥物理學教授奧斯特 Hans Oersted

- 上課示範電流現象，結果卻發現通電的一瞬間旁邊的指南針會偏轉
- 然後德國的 Johann Salomo Christoph Schweigger 知道這現象後就發明了檢流計



Hans Christian Ørsted



Danish physicist & chemist

Johann Schweigger



Born

Johann Salomo Christoph
Schweigger
8 April 1779
Erlangen, Brandenburg-
Bayreuth

奧斯特發現電磁相互影響的事情

- 讓法國物理學家必歐和沙伐兩人提出了《必歐－沙伐定律》（Biot-Savart Law），精確的描述這個現象。

必歐-沙伐定律表明，假設源位置為 \mathbf{r}' 的微小線元素 $d\ell'$ 有電流 I ，則 $d\ell'$ 作用於場位置 \mathbf{r} 的磁場為

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} d\ell' \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3};$$

其中， $d\mathbf{B}$ 是微小磁場（這篇文章簡稱磁通量密度為磁場）， μ_0 是磁常數。

已知電流密度 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ ，則有：

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\mathbb{V}'} \mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3r';$$

其中， d^3r' 為微小體積元素， \mathbb{V}' 是積分的體積。

然後終於輪到法國的《安培》登場了

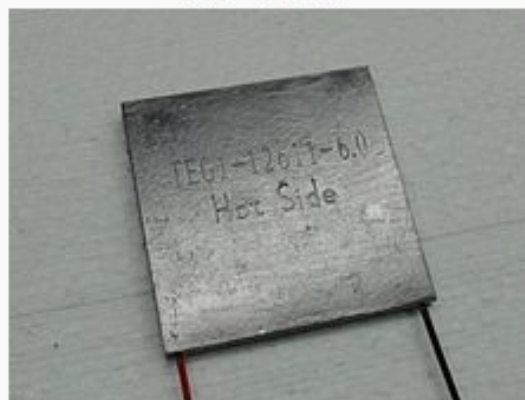
- 他集中精力研究，幾周內就提出了安培定則即右手螺旋定則
- 隨後很快在幾個月之內連續發表了3篇論文，並設計了9個著名的實驗，總結了載流迴路中電流元在電磁場中的運動規律，即安培定律。
- 1821年安培提出了電動力學這一名詞，電學自此成為物理學重要的領域

1821 年的另一個插曲是 塞貝克發現了熱電效應

熱電效應是一個由溫差產生電壓的直接轉換，且反之亦然。簡單的放置一個熱電裝置，當他們的兩端有溫差時會產生一個電壓，而當一個電壓施加於其上，他也會產生一個溫差。這個效應可以用來產生電能、測量溫度，冷卻或加熱物體。因為這個加熱或製冷的方向決定於施加的電壓，熱電裝置讓溫度控制變得非常容易。

一般來說，熱電效應這個術語包含了三個分別經定義過的效應，塞貝克效應（Seebeck effect，由Thomas Johann Seebeck發現。）、帕爾帖效應（Peltier effect，由Jean-Charles Peltier發現。），與湯姆森效應（Thomson effect，由威廉·湯姆森發現）。在很多教科書上，熱電效應也被稱為帕爾帖-塞貝克效應（Peltier-Seebeck effect）。它同時由法國物理學家普·查理·阿提鞍斯·帕爾帖（Jean Charles Athanase Peltier）與愛沙尼亞裔德國物理學家托馬斯·約翰·塞貝克（Thomas Johann Seebeck）分別獨立發現。還有一個術語叫焦耳加熱，也就是說當一個電壓通過一個阻抗物質上，即會產生熱，它是多少有關係的，儘管它不是一個普通的熱電效應術語（由於熱電裝置的非理想性，它通常被視為一個產生損耗的機制）。帕爾帖-塞貝克效應與湯姆森效應是可逆的，但是焦耳加熱不可逆。

熱電效應



原理

隱藏 ▲

熱電效應 (塞貝克效應 · 帕爾帖效應 · 湯姆森效應) · 熱電能 (Seebeck coefficient) · Ettingshausen effect · Nernst effect

應用

顯示 ▼

閱 · 論 · 編

接著終於輪到法拉第登場了

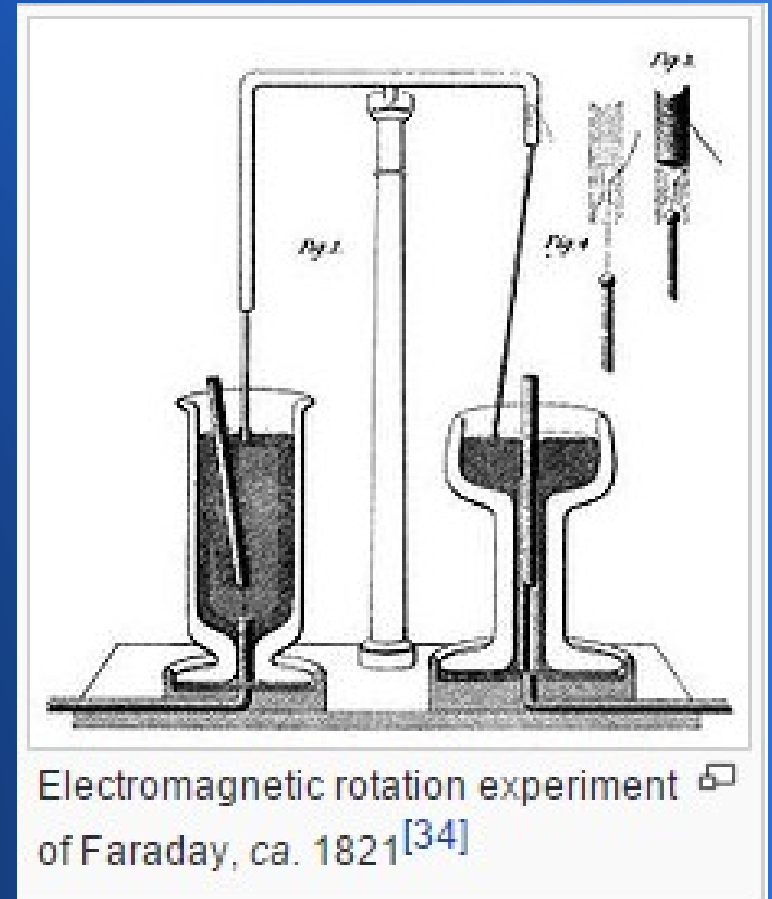
- 法拉第當戴維助手，旅行時還被他老婆當傭人使喚
- 然後在 1821 年做出了一個單極電動機

台灣慣老闆：
這不是應該的嗎？

現代版的單極電動機



DIY simple homopolar motor made with a drywall screw, a battery cell, a wire, and a disk magnet. The magnet is on top of the screw head. The screw and magnet make contact with the bottom of the battery cell and are held together by the magnet's attraction. The screw and magnet spin, with the screw tip acting as a bearing.



法拉第的單極電動機

我也有重做了一次單極電動機的實驗

- 影片網址如下：

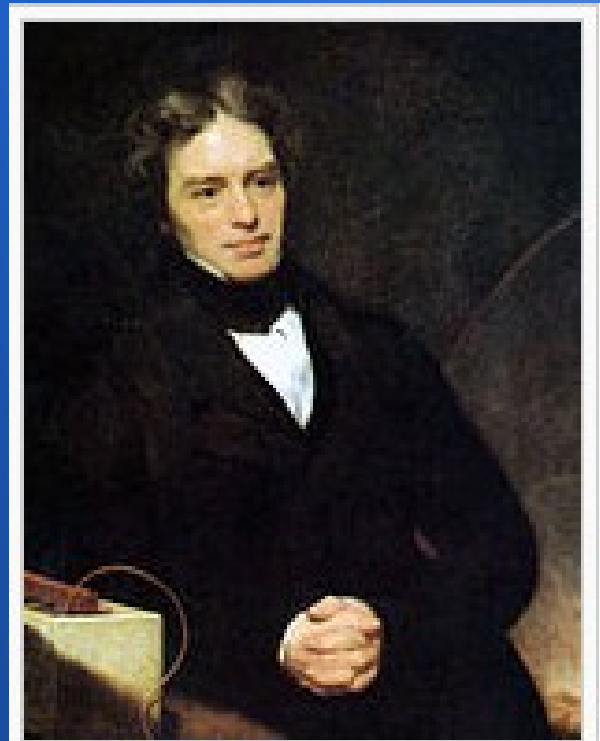
<https://www.facebook.com/ccckmit/videos/vb.814251892/10153140124986893/>

然後

- 法拉第卻做了一件不智之舉，在沒有通知戴維跟渥拉斯頓情況下，擅自發表了此項研究成果。此舉招來諸多爭議，也迫使他離開電磁學研究數年之久（因為戴維改叫他去做光學）。

（念碩博士班的同學們，切記切記，小心謹慎）

（千萬不要犯同樣的錯誤 … ）



麥可·法拉第肖像畫



在法拉第做光學的這幾年

- 電磁學的世界仍然繼續前進

1823 法國安培發表有關電流相互作用的數學理論。

1824 法國阿雷葛 (Arago, 1786-1853) 製作渦流迴轉圓盤。

1825 英國史達約翰 (William Star John, 1783-1850) 研製成功電磁鐵。

1827 德國歐姆 (Georg Simon Ohm, 1787-1854) 發現歐姆定律。

1830 美國亨利 (Joseph Henry, 1797-1878) 發現電磁感應及自感等現象。

1829 年，戴維去世

- 法拉第停止了光學工作並開始他想做的實驗。
 - 在 1831 年，他開始一連串重大的實驗
 - 他將兩條獨立的電線環繞在一個大鐵環，固定在椅子上，並在其中一條導線通以電流時，另外一條導線竟也產生電流。
 - 他因此進行了另外一項實驗，並發現若移動一塊磁鐵通過導線線圈，則線圈中將有電流產生。
- 同樣的現象也發生在移動線圈通過靜止的磁鐵上方時。

於是、法拉第定律出現了

- 他的展示向世人建立起「磁場的改變產生電場」的觀念。此關係由法拉第電磁感應定律建立起數學模型，並成為四條馬克士威方程組的重要公式之一。

本定律可用以下的公式表達：[2]

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

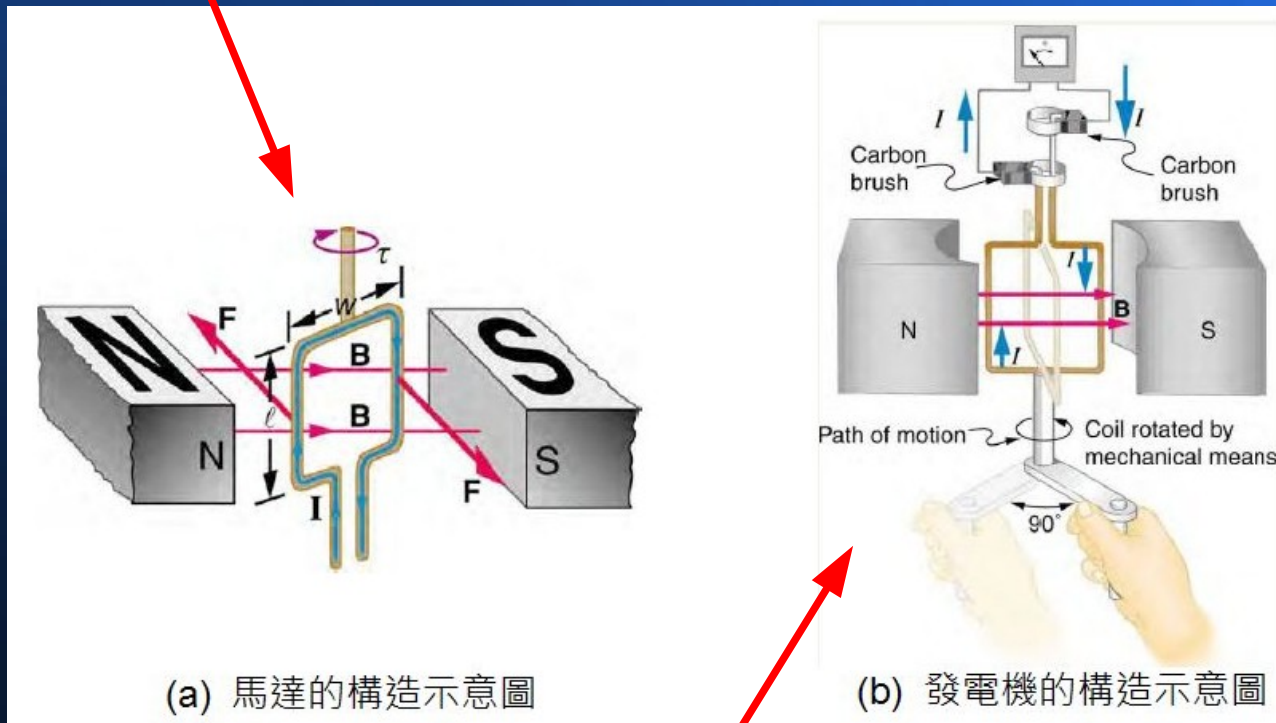
其中：

\mathcal{E} 是電動勢，單位為伏特。

Φ_B 是通過電路的磁通量，單位為韋伯。

電力領域最重要的兩個裝置終於出現了 《馬達》和《發電機》

1834 德國 赫里蒙 (Helimon, 1801-1874) 製成馬達。



1832 法國 必柯錫 (Picosi, 1808-1835) 利用電磁感應現象製成發電機。

1839 年

- 法拉第使用「靜電」、電池以及「生物生電」以產生靜電相吸、電解、磁力等現象。
- 經由這些實驗，他做出與當時主流想法相悖的結論，認為雖然來源不同，產生出的電都是一樣的，另外若改變大小及密度（電壓及電荷），則可產生不同的現象。

然後、時代繼續推進著

- 電子和通訊領域繼續發展

1836	英國	丹尼爾(Daniel,1790-1845)發明丹尼爾電池。
1837	美國	摩斯(Morse,1791-1872)發明有線電信機，並編摩斯電訊碼。
1837	美國	惠斯通、柯克在休士頓與卡姆登之間做有線通訊。
1838	德國	卡鳳(Card Phone,1801-1870)發現地面是良導體，並應用於電訊方面。
1840	英國	焦耳(Joule,1818-1889)發現焦耳之熱定律。
1842		克卜勒提出克卜勒效應。
1843		歐姆發現 2 倍振盪音、3 倍振盪音。
1844		冷次提出金屬電阻隨溫度上升按比例增加。
1855	法國	雷昂(Leon,1819-1869)發現渦電流。
1858	德國	布魯加(Bluca,1801-1868)發明陰極射線。
1860	法國	普蘭第(Wass Tolu Plande,1834-1889)發明鉛蓄電池。
1861	德國	李斯(John Lies, 1834-1874)製造電話機。
1863		赫茲著(音響感覺的理論)。

在法拉第生涯的晚年

- 他提出電磁力不僅存在於導體中，更延伸入導體附近的空間裡。這個想法被他的同儕排斥，法拉第也終究沒有活著看到這個想法被世人所接受。
- 法拉第也提出電磁線的概念：這些流線由帶電體或者是磁鐵的其中一極中放射出，射向另一電性的帶電體或是磁性異極的物體。這個概念幫助世人能夠將抽象的電磁場具象化，對於電力機械裝置在十九世紀的發展有重大的影響。而這些裝置在之後的十九世紀中主宰了整個工程與工業

除此之外、法拉第也是電化學大師

- 他發現在物質電解過程中
 1. 參與電極反應的質量與通過電極的電量成正比。
 2. 不同物質電解的質量則正比於該物質的化學當量，
這個發現可以寫成以下定律。

$$m = \frac{MQ}{Fn} \quad (F=96485.3383 \pm 0.0083 \text{C/mol})$$

- 這就是法拉第電解定律

法拉第非常會做實驗

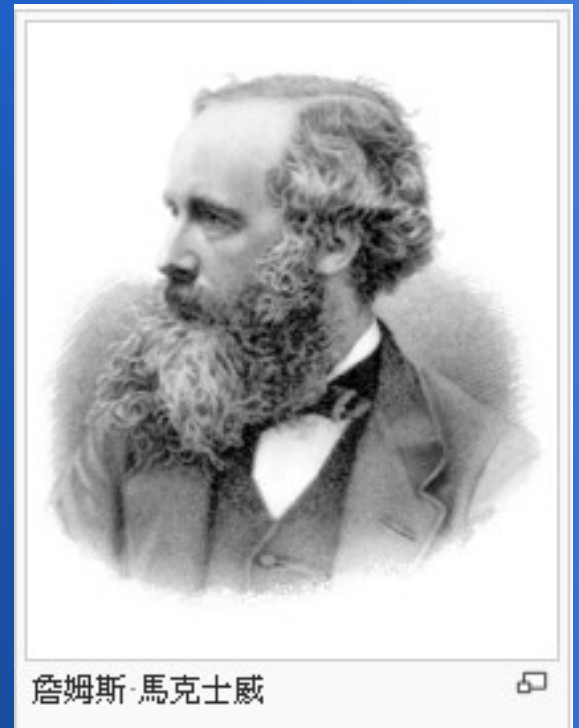
- 但是數學不好，不擅長理論
- 就像是個《劍宗高手》
 - 劍術很強，但內功不行

不過沒關係

- 接下來有位《氣宗高手》出場了
- 那就是《馬克士威》

馬克士威出生於 1831 年

- 正是法拉第提出電磁感應定理的那年
- 後來、馬克士威注意到法拉第的研究，閱讀了 Experimental Researches in Electricity 這本書，於是深深的著迷了。



1855 年

- 馬克士威 24 歲時發表了一篇論文，名稱為《論法拉第力線》，並將這篇論文寄給法拉第看。
- 隔年、64 歲的法拉第回了一封信給馬克士威，說到下列這段話。

I was at first almost frightened when I saw such mathematical force made to bear upon the subject, and then wondered to see that the subject stood it so well

翻譯成中文就是：「當我看到你論文中的那些數學，我幾乎是被嚇到了。但是很好奇你為何會將這個主題做得這麼好 ... 」

那個年代

- 電磁學可以形容為眾多實驗結果和數學分析的大雜燴，急需整合成一套內外一致，有條有理的學術理論。
- 《法拉第》的數學背景不夠強，無法完成這件任務，結果《馬克士威》漂亮的完成的這個任務，成為繼法拉第之後《電磁學領域的一代宗師》。

1855 年馬克士威的論文

《論法拉第力線》

馬克士威將法拉第想出的力線延伸為裝滿了不可壓縮流體的「力管」。這力管的方向代表力場（電場或磁場）的方向，力管的截面面積與力管內的流體速度成反比，而這流體速度可以比擬為電場或磁場。

然後、透過借用「威廉·湯姆森」等人在流體力學的一些數學框架，馬克士威推導出一系列初成形的電磁學難論。

像是在「傅立葉熱傳導定律」裏有下列的公式：

$$\Gamma = -k \frac{dT}{dx}$$

其中， Γ 是熱通量（heat flux）， k 是物質的熱導率， T 是溫度。

如果將這樣個概念套用到電磁學領域中，電場和電勢之間的關係式可表達為

$$E = -\frac{d\phi}{dx}$$

其中， E 是電場，是電勢。

很明顯地，設定熱導率 $k=1$ ，則電勢可以比擬為溫度，而電場可以比擬為熱通量。

法拉第的電力線變為了熱流線，等勢線（equipotential）變為了等溫線。所以，解析熱傳導問題的方法，可以用來解析靜電學問題。

馬克士威又注意到一個問題：熱傳導依賴的是物質的緊鄰的兩個粒子之間互相接觸而產生的「鄰接作用」（contiguous action）；

思考兩個相距很遠的電荷，不經過任何媒介，互相直接施加於對方的作用力，假若電場力是這種作用力，則電場力是一種超距作用（action at a distance）。兩種完全不同的物理現象，居然可以用同樣形式的數學方式來描述，這給予馬克士威很大的遐想空間。

然後、透過這樣的比擬（將源電荷 q 比擬為力管源，將電場比擬為流速），馬克士威越推論越深遠，結果得到了「庫倫定律」與「高斯定律」等電學的基本公式。

$$E = \frac{q}{4\pi r^2}$$

$$V = \frac{q}{4\pi r}$$

$$E = -\frac{dV}{dr}$$

但是、上述論文還不夠出色

- 只是馬克士威借用熱力學來解釋電磁學的一個初步嘗試
- 接下來在 1861 年的《論物理力線》才是重要之作

1861 年《論物理力線》提出 馬克士威方程組

在《論物理力線》這篇論文裏，馬克士威提出了力線（或稱場線）這樣的概念，這種力線可以描述「電力、磁力、重力」所形成的力場，並且透過微積分的數學原理，計算這些力場的強度。

然後，馬克士威透過這種改良的分子渦流想法，推論出一些數學公式，以下是幾個範例：

$$dF_c = \rho r^2 \omega^2 dr d\theta dz$$

其中， ρ 是流體的密度，是一個常數。

$$p_{cR} = \int_0^r \rho r \omega^2 dr = \rho R^2 \omega^2 / 2 = \rho v^2 / 2$$

其中， R 是渦胞的半徑， $v = R\omega$ 是流體位於周邊的周邊速度。

從這模型，經過一番複雜的運算，馬克士威能夠推導出安培定律、法拉第感應定律等，這也就是後來被稱為「馬克士威方程組」的那些公式。

(1) 安培定律

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \beta}{\partial z} \right), \\ p_y &= \frac{1}{4\pi} \left(-\frac{\partial \gamma}{\partial x} + \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right), \\ p_z &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right). \end{aligned}$$

原安培定律的方程式

$$\begin{aligned} p_x &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \beta}{\partial z} - \frac{1}{E^2} \frac{\partial Q_x}{\partial t} \right), \\ p_y &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial z} - \frac{\partial \gamma}{\partial x} - \frac{1}{E^2} \frac{\partial Q_y}{\partial t} \right), \\ p_z &= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\partial \beta}{\partial x} - \frac{\partial \alpha}{\partial y} - \frac{1}{E^2} \frac{\partial Q_z}{\partial t} \right). \end{aligned}$$

修正後的馬克士威 - 安培方程式

(2) 法拉第電磁感應定律

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_z}{\partial y} - \frac{\partial Q_y}{\partial z} &= -\mu \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \\ -\frac{\partial Q_z}{\partial x} + \frac{\partial Q_x}{\partial z} &= -\mu \frac{\partial \beta}{\partial t}, \\ \frac{\partial Q_y}{\partial x} - \frac{\partial Q_x}{\partial y} &= -\mu \frac{\partial \gamma}{\partial t}. \end{aligned}$$

(3) 高斯定律

$$e = \frac{1}{4\pi E^2} \left(\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} \right).$$

(4) 高斯磁場定律（自然定律）

$$\frac{\partial \mu \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \mu \beta}{\partial y} + \frac{\partial \mu \gamma}{\partial z} = q_m.$$

圖、馬克士威論物理力線中的四大群方程式

接著是 1864 年的 《電磁場的動力學理論》

- 馬克士威提出了電磁波的波動方程式。

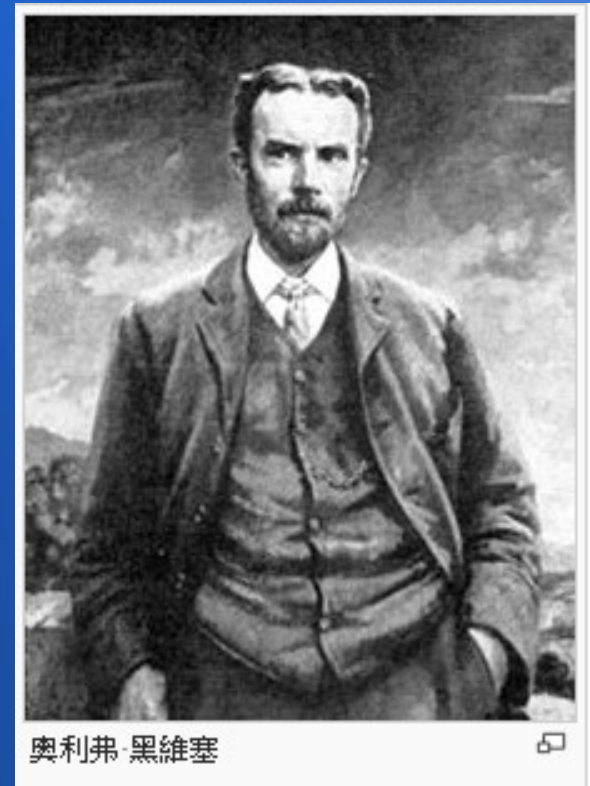
並推論出波動的速度非常接近光速。於是寫下

這些殊途一致的結果，似乎意味著光波與電磁波都是同樣物質的屬性，並且，光波是按照著電磁定律傳播於電磁場的電磁擾動。

- 這個推論預示了《光是一種電磁波》，只要能發送與偵測電磁波，就能以光速傳遞訊息。

然後、在將近十年後的 1873 年

- 馬克士威出版了《電磁通論》這套名著，總結了整個《電磁學》的理論
- 1880 年，奧利弗·黑維塞（Oliver Heaviside）馬克士威方程組用向量微積分的旋度散度等巨型算子重新表述，將馬克士威原來 20 條方程式整併為 4 條微分方程式。



於是、電磁學的理论架構已然完整

- 但問題是、電磁波是否存在，該如何使用，仍然沒有被實驗證實
- 而這些問題，還得等待另外幾個領域的真英雄、假英雄、還有悲劇英雄。

接下來的英雄是

- 德國的《海因里希·赫茲》
(Heinrich Hertz)
- 1885 年赫茲擔任卡爾斯魯厄大學教授，
後來用實驗證明了電磁波的存在
- 所以後來頻率的國際單位命名為
《赫茲》。

Heinrich Hertz

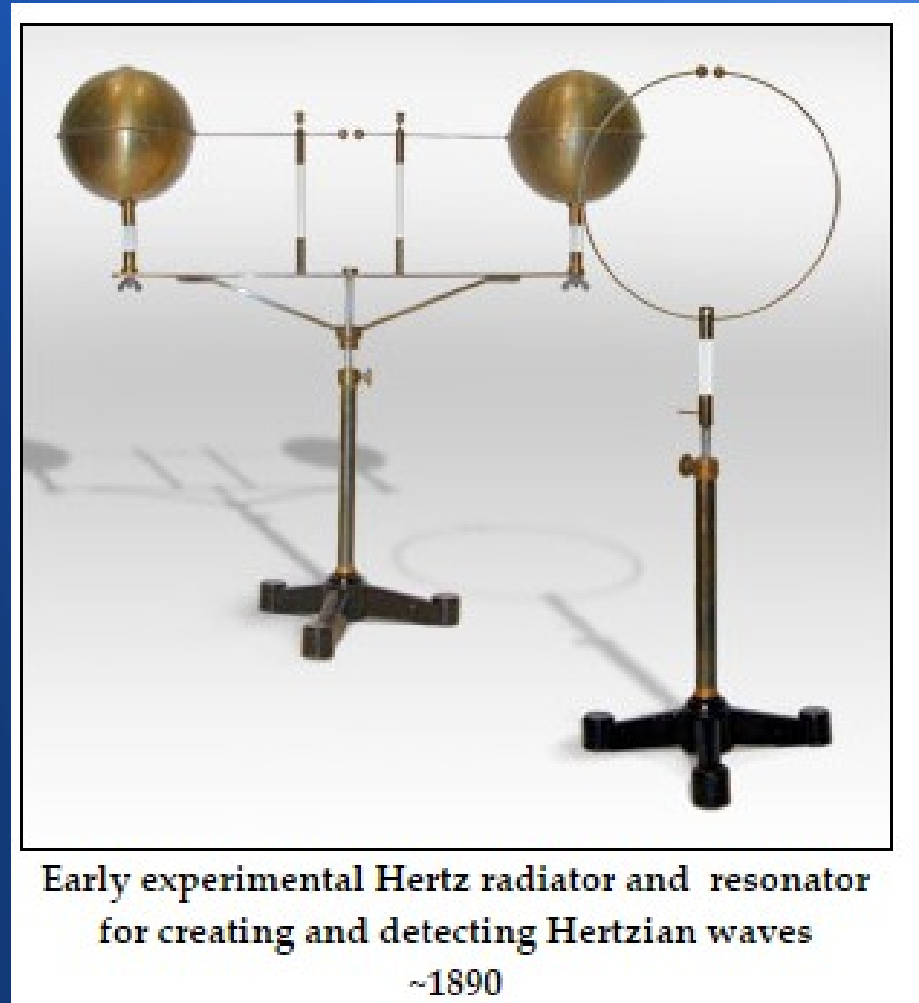


「我不認為我發現了的那些無線電磁波可以有任何實際的應用。」

出生	1857年2月22日
	 漢堡自由市
逝世	1894年1月1日
	 德國普魯士萊因省波昂
居住地	 德意志帝國
公民權	 德意志帝國
研究領域	物理學

1888 年、赫茲用圖中的裝備

- 兩銅球間產生了波長一公尺左右的電磁波，此時中間小間隙會產生火花
- 線圈感應到電磁波，於是中間的小間隙也會產生火花，於是就能《看到電磁波》了。
- 這被稱為《火花間隙》實驗



Early experimental Hertz radiator and resonator
for creating and detecting Hertzian waves
~1890

但是、赫茲的裝備，只能算是實驗作品

- 距離工業化，還有很長一段路

於是、接下來一堆英雄競逐無線通訊領域

- 像是美國的《特斯拉》、俄國的《波波夫》、印度的《波賽》、還有最後勝出的義大利《馬可尼》

1874 年出生的馬可尼

- 12 歲就仿照富蘭克林作了
《避雷針》
- 後來在知道 1888 年赫茲的
實驗時，就將家裡的閣樓改
建成實驗室，重複《火花間
隙實驗》

Guglielmo Marconi
古列爾莫·馬可尼



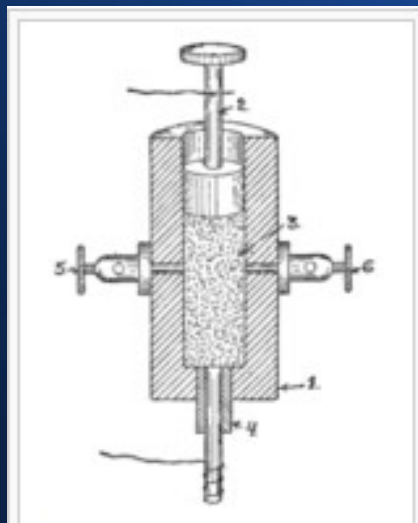
出生	1874年4月25日  義大利波隆那
逝世	1937年7月20日 (63歲)  義大利羅馬
居住地	 義大利、  英國
國籍	 義大利王國
研究領域	電氣工程師
任職於	馬可尼無線電報公司
母校	波隆那大學

後來馬可尼改用 《金屬屑檢波器》(coherer) 來收訊號

- 其原理是電磁波讓兩端產生電壓後，會透過金屬屑導通，這個現象很早就知道了
- 1890 年法國的 Edouard Branly 寫了一篇論文描述背後的理論



Metal filings coherer



Branly's electrical circuit tube filled with iron filings (later called a "coherer")



Marconi's 1896 coherer receiver, at the Oxford Museum of the History of Science, UK. The coherer is on right, with the decoherer mechanism behind it. The relay is in the cylindrical metal container (center) to shield the coherer from the RF noise from its contacts.

有了《金屬屑檢波器》之後

- 偵測電磁波訊號的工作，就能完全自動化了
- 接著搭配美國人《薩繆爾·摩斯》在1836年發明的《摩斯密碼》，就能形成《無線電訊號傳輸系統》了。

国际摩尔斯电码

1. 一点的长度是一个单位。
2. 一划是三个单位。
3. 在一个字母中点划之间的间隔是一点。
4. 两个字母之间的间隔是三点（一划）。
5. 两个单词之间的间隔是七点。

A	● —	U	● ● —
B	— ● ● ●	V	● ● — —
C	— — ● —	W	● — — —
D	— ● ●	X	— ● ● —
E	●	Y	— ● — —
F	● ● — ●	Z	— — ● ●
G	— — ●		
H	● ● ● ●		
I	● ●		
J	● — — —		
K	— ● — —		
L	— ● ● ●		
M	— — —		
N	— ●		
O	— — —		
P	● — — ●		
Q	— — ● —		
R	● — ●		
S	● ● ●		
T	—		
		1	● — — — —
		2	● ● — — —
		3	● ● ● — —
		4	● ● ● ● —
		5	● ● ● ● ●
		6	— ● ● ● ●
		7	— — ● ● ●
		8	— — — ● ●
		9	— — — — ●
		0	— — — — —

摩斯電碼字母和數字對應表



馬可尼發現

- 只要把電源加大，天線舉高，訊號就可以傳得更遠
 - 於是他向《義大利政府》提計劃要錢做無線通訊，結果當然是 - 被義大利政府拒絕了。
 - 後來 22 歲的馬可尼戴著自製的無線通訊設備來到英國倫敦。
- 這點很有啟發性，台灣的創業家們，如果國家不支持你，那就去尋找能支持你的人。此處沒發展，就到另一個地方去吧！

馬可尼在英國

- 和郵政電報部主任工程師普理斯（William Preece）兩人相見恨晚。普理斯還幫馬可尼召開《實驗展示記者會》。
- 馬可尼的家鄉親友們集資了十萬英鎊給他開設《無線電報公司》

更重要的是，馬可尼根本就是個 像賈伯斯一樣行銷奇才

- 他善用各種機會行銷無線通訊並造勢。像是他為《維多利亞女王》在遊艇與別墅間設立無線通訊系統，讓女王和皇夫可以每天互送訊息。於是記者整天來拍就變成了免費的活廣告。

1899 年、法國政府決定資助馬可尼

- 打造一個橫跨英法海峽長達 50 公里的無線通訊系統
- 這個系統很快地被馬可尼實現了！

接著馬可尼開始了他的奇幻旅程

- 他決定打造一個橫跨大西洋 3200 公里的無線通訊系統，把歐洲和美國連起來。
- 他設立美國馬可尼公司，用 500 英鎊重金聘請《弗萊明》設計發射站，並且全程保密。

後來他們決定把接收站設在 加拿大紐芬蘭島的聖約翰鎮

- 《發射站》和《接受站》間相距 2800 公里
- 那個超大發射站得用 25 千瓦的發電機，增壓到兩萬伏特，用高達十幾公尺的超大電容器，以及長達六十公尺的天線，在五公分的《火花間隙》隔絕情況下，發射出像打雷一般震耳欲聾的《電磁波》。

經過一年多的努力

- 他們終於在紐芬蘭島收到了第一個摩斯密碼訊號『...』
- 查查右圖的摩斯密碼表，您會發現...代表字母 S

国际摩尔斯电码

1. 一点的长度是一个单位。
2. 一划是三个单位。
3. 在一个字母中点划之间的间隔是一点。
4. 两个字母之间的间隔是三点（一划）。
5. 两个单词之间的间隔是七点。

A	● —	U	● ● —
B	— ● ● ●	V	● ● — —
C	— — ● —	W	● — — —
D	— ● ●	X	— ● ● —
E	●	Y	— ● — —
F	● ● — ●	Z	— — ● ●
G	— — ●		
H	● ● ● ●		
I	● ●		
J	● — — —		
K	— ● — —		
L	— ● ● ●		
M	— — —		
N	— ●		
O	— — — —		
P	● — — — ●		
Q	— — ● — —		
R	● — — ●		
S	● ● ●		
T	— — —		
		1	● — — — — —
		2	● ● — — — —
		3	● ● ● — — —
		4	● ● ● ● — —
		5	● ● ● ● ●
		6	— ● ● ● ● ●
		7	— — ● ● ● ●
		8	— — — ● ● ●
		9	— — — — ● ●
		0	— — — — — —

摩斯電碼字母和數字對應表



但是、這個訊號非常微弱

- 馬可尼決定把巨型接收天線搬上郵輪《從倫敦一路到紐約》親自驗證訊號的接收情況。
- 他發現訊號一開始很清楚，後來在 2480 公里後開始模糊不清，但是晚上接收時就比較清楚，他猜測這或許和太陽有關。
- 1909 年，馬可尼和德國科學家布勞恩一起獲得了諾貝爾物理學獎。（筆者註：一個曾經得過諾貝爾獎的《賈伯斯》，這太猛了…）

馬可尼的公司

- 從此壟斷了全球無線通訊領域
- 《鐵達尼號》沉沒那天，船上就有兩位馬可尼公司的無線通訊員，盡責地發出了求救訊號。
- 另一艘郵輪收到訊號，趕到現場救了 700 個人

這當然包含那位《美艷動人的 Rose》，但是那位《英俊青年 Jack》就從此葬身海底，變成冰棒了！

還有那顆《海洋之星》，從此不知下落，或許被《哥爾羅傑》搶走了…

鐵達尼號沉沒之後

- 英國國會立法規定，所有大型船隻都必須加裝無線電報裝置。
- 於是《馬可尼公司》的業務蒸蒸日上...

不過、好景不常

- 1905 年之後、新的無線電技術出現，但馬可尼仍然抱著火花間隙技術不放，導致被後來的公司超越
- 1912 年冬天馬可尼因車禍瞎了一隻眼睛，並且脊椎受傷，淡出經營。

晚年的馬可尼

- 熱中政治，後來極力支持《墨索里尼》，成了法西斯黨員。
- 1937 年馬可尼逝世時，墨索里尼就陪在他身邊。

當然在其他領域，也有很多英雄 競逐著科學與工業的世界

- 像是：

- 電報領域：摩斯
- 電話領域：格雷、貝爾、費爾
- 電氣領域：愛迪生、特斯拉、西門子
- 原子核：請看用十分鐘看懂《近代科學發展史》

另外、還有

- 收音機：費生登、沙諾夫、阿姆斯特壯、
- 電視：尼卜可、貝爾德、法斯沃、曹利金...
- 雷達：華生瓦特、樂道、布特、二次大戰...
- 電腦領域：這又是一大堆故事了 ...

時代繼續向前推進著

1864	德國	麥斯威爾(Maxwell,1831-1879)發表電波理論。
1866	德國	吉米斯(Weiluna Fone Gemeis,1816-1892)發明自激式直流發電機。
1868	法國	洛魯蘭氏(Geroluge Luglulanse,1839-1882)發明以鋅與碳為電極之錳乾電池。
1874		克魯斯將放電效應定為"第四狀態"。
1874		威廉西蒙斯製成應用電阻的溫度計。
1876		戈爾茨坦將真空放電時從負極發出的放射線命名為"陰極線"。
1876	美國	貝爾(Bell,1847-1922)發明磁鐵式電話。
1877	美國	愛迪生(Tomas Edison,1847-1931)發明機械式留聲機。
1877	英國	休斯(Lebedo Huse,1831-1900)製成碳式麥克風。
1881	美國	愛迪生在紐約建造火力發電廠，開始供應電燈用電。
1883	美國	愛迪生發現金屬的熱電子放射。
1884		波爾茲曼從理論上證明史蒂芬、波茲曼定律。
1885	美國	史達林(William Starlin,1858-1916)改良變壓器使其可供應用。
1886	美國	威斯金豪斯(George Wisgenhouse,1846-1914)使用變壓器作交流輸配電成功。
1887	德國	赫茲(Hertz,1857-1894)發現紫外線對放電的影響、經實驗確定電波存在。

繼續向前

1889		哈爾瓦克斯發現充電效應。
1891		斯托尼提議用"電子"的名稱。
1892	-	第一座水力直流式發電廠在琵琶湖建造。
1895		馬可尼的無線電通訊裝置在英國獲得專利。
1897	德國	湯姆生發表陰極線是電子流。 布朗(Phlude Nludo Brown,1850-1918)發明影像管。
1901		無線電電波橫渡大西洋。
1904	英國	佛來銘(Anbrowz Flamin,1849-1945)發明二極真空管。
1907	美國	胡萊德(Le Do Flesdo,1873-1961)發明三極真空管。
1910	美國	克利基(Lebugdo Crige,1873-)發明鎢燈炮。
1910	法國	克路德(Geolugeo Cludo,1870-1960)發明霓虹燈。
1913		范登.布魯克研究原子序數與核電荷的關係。
1925	英國	貝爾度(John Beardo,1888-1966)製成機械式電視機。
1926		布什提出電子幾何光學。
1931		威蘭遜提出關於半導體電子能極的威爾遜模型。
1932		安德生發現正電子。 查德威克發現中子。 在德國首次製成電子顯微鏡。
1950		使用"電子學"一詞。

至於這些故事

- 就請各位自己去看以下這本書了

