

說淺學電

著爾布頌堪
譯樟樹子

商務印書館發行



堪頌布爾著
于樹樟譯
周昌壽校

電
學
淺
說

商務印書館發行

中華民國二十年二月初版

每册定價大洋肆角

外埠酌加運費匯費

原著者 堪頌布爾

譯述者 于樹樟

校訂者 周昌壽

發行人 王雲五
上海寶山路五〇一號

印刷所 上海寶山路
商務印書館

發行所 上海及各埠
商務印書館

THE PRINCIPLES OF ELECTRICITY

BY NORMAN R. CAMPBELL

TRANSLATED BY YÜ SHU CHANG

EDITED BY C. S. CHOW

PUBLISHED BY Y. W. WONG

1st ed., Feb., 1931

Price: \$0.40, postage extra

THE COMMERCIAL PRESS, LTD., SHANGHAI

All Rights Reserved

B 六九一分

序

這本小書是打算藉電學的基本定律和學說，來將各種科學所共具的主要原理說明幾條。他是爲一般的民衆作的；讀他的人不要預先具有所討論的事實的知識，但是必要具有精密的注意和周到的思想。我不是要寫出他來充數的，是要滿足真正求知的人的一部分需要的。

這樣小的一本書，去寫這樣大的範圍，細的條目自然不能彀去注意。書中所有的敘述都極力打算不要把重要的事情引錯了路，但是沒有打算把這些敘述弄到像教科書中所必須的那樣精確的地步。然而卻極力避免敘述的含糊或思想的混亂。

目次

第一章	靜電的定律和學說	一
第二章	屬於靜電的計量	三四
第三章	電磁學	五六
第四章	法拉對的學說	七八
第五章	麥克司威爾的學說	一〇二

電學淺說

第一章 靜電的定律和學說

1 電是什麼？

有一個問題，凡學過物理學的人，大概都被他的不懂科學的朋友問過。不懂科學的朋友常問「電是什麼？」假設我們不能彀直截了當的回答出來，他們心裏便以爲我們所知道的不比他們多，便有些瞧不起我們，但是外面卻多少有些恭敬的說幾句遮飾的話，恐怕我們難爲情。其實，是這種問法表示不懂科學，並不是不能彀回答表示不懂科學。懂得科學越多，越不能彀回答這個問題；因爲讀的科學越多，我們越知道這種樣式的問題是不能彀回答的。然而，在問的一方面的心理，大概是不要讀很多的科學，便得到這種知識。這本小書便

是要給沒有讀過多少科學的人這樣的回答。因為他們的原來問題的樣式，不只表示他們不懂科學，並且表示他們已經有錯誤的觀念存在心裏，所以假設我的敘述方法也抄襲教科書中的樣子，把科學家們討論電的現象的意思照樣寫出來，恐怕我所寫的他們不惟大半誤解，並且他們的錯誤觀念將要愈加鞏固了。所以最好開始先作一簡單說明，說明科學的意思是什麼，科學所詢問的是什麼，科學所回答的是什麼，作一個引導。曉得這個引導了以後，隨便什麼支派的科學，都可以使詢問我們的人明白。

2 科學的基礎

電學教科書大概都是開宗明義的先說：「希臘人曾察見一塊琥珀被手摩擦以後，有吸引附近輕物體的性質。」敘述琥珀這種特別性質的這一段話，是我們所要討論的科學提議中的一個絕好的例子。

這段敘述是說有一件事情曾被察見。這個例子中的觀察似乎極為簡單，

似乎不必更進一層去詢求其所以然了，然而略加思索便當知道這件事情不十分像初見時那樣簡單。我們試想像我們碰見一個懷疑這段話的人，他說這段話在他看不十分簡單，他要知道這段話的意思，並且他的不懂不是因為語言不同。他大概先要問「琥珀」是什麼。我們可以回答說琥珀是黃，脆，硬的物質，出產在近海的地方，等等。現在他要問「黃」「脆」「硬」是什麼意思。我們很容易告訴他「脆」的意思；我們說假設用錘子來擊這物質，這物質不能殼展開，而破成碎塊。我們也可以解釋「硬」的意思，但是比較難一點；我們說假設把琥珀夾在手指中間，我們不能殼使手指相接觸。但是他要問「黃」是什麼意思，我們卻無法回答了；假設他不懂什麼叫做黃，就是我們把這個字用世界上所有的語言繙譯出來，也不能殼使他懂得。假設他懂得「黃」那麼，我們的談話方纔可以接續下去，他方纔可以繼續發問。比方他問「錘子」是什麼，「破碎」是什麼。我們對於這些問題又要想想，或是可以作更淺顯的解釋，

或是和「黃」一樣已經簡單到家，不能覈作更淺顯的解釋。如此類推，解釋下去，一直到發問的人將可能的解釋完全得到而後已；發問的人已經強迫我們把原來的一段敘述分析成了許多段敘述，這許多段敘述又分成了更多的許多段敘述，如此分析下去，一直分到簡單到家不能覈再分而後已。

3 定律

凡作這樣完全分析到家的人，不久便當曉得原來的敘述極爲簡單，而所包含的意思卻極複雜；這便是前面所舉的例子要表示的一個結論。前面所舉的例子還要表示另一個結論，這個結論不像前一個那樣容易得到，非影響到全體的分析不可；作全體的分析是非常困難的一件事。這個結論所表示的，是分析得的最後的種種敘述和觀念的稟性；最後的敘述和觀念，是簡單到家的敘述和觀念，和「黃」的敘述和觀念一樣，不能覈再拿話來解釋。現在一般都相信，若是一種敘述可以分析，則所分成最後的種種敘述，和「這是黃」的敘

述一樣，都是關於知覺的敘述；就是說，最後的種種敘述，都是由司知覺的機官立刻可以知道的事情，例如色由司視覺的機官知道，音由司聽覺的機官知道，力由司觸覺的機官知道。我們至少可以明白，這種稟性的敘述是最後的敘述，不能彀再作更淺顯的解釋；隨便什麼人，我們不能彀使他懂得聽見音樂是什麼意思，運動四肢是什麼意思，一件東西是黃色是什麼意思。

所以像以前所舉的例子那樣的科學敘述，是由關於知覺的多數簡單敘述組成的，可以分析成一組這樣簡單的敘述，由這樣簡單敘述的真偽，來判斷原來的整個的敘述的真偽。這個結論，凡是曉得關於科學知識原理的新思想的人都完全熟悉。我們所舉的例子通常叫做科學的「定律」。「定律」是描寫知覺的順序的一段話。「順序」一名詞為定律中應注意的一個特點，但是對於我們現在的目的卻居於次要，然而仍不能彀完全忽視。

4 定律的稟性

關於被摩擦的琥珀的提議，爲關於知覺的簡單敘述的集合體，但不只集合起來就算了事，並且還要排列成一定的順序，其間有確定的關係。譬如「琥珀被摩擦過」這個敘述，是全個敘述的一部分，「琥珀吸引輕物體」這個敘述，是全個敘述的另一部分；全個敘述不只將這兩部分的敘述集合起來，並且還確定他們的連絡。這連絡法，是第一部分的敘述所表示的知覺，比第二部分的敘述所表示的知覺先發生，琥珀被摩擦以後纔吸引輕物體。像這樣，一組知覺較他一組知覺先發生。這種兩組最後敘述間的連絡，在科學的哲理上，早已引起著作家的最大注意；凡是這樣連絡極明顯的一段提議，通常都叫做「定律。」

但是科學的敘述中不只限於這一種連絡。譬如「琥珀被摩擦」這個敘述已包括着「有一種琥珀那樣的東西」這個敘述在裏頭。而「有一種琥珀那樣的東西」這個敘述的意思，我們已經知道是「有一種東西，這種東西黃，

硬，脆，並且出產在海附近。」這個敘述還可以分爲許多零碎的敘述，例如「有一種硬的東西，」「有一種脆的東西，」等等，每一個零碎的敘述都是許多知覺的敘述集合起來的。但是此處，全個敘述中的各部分敘述的連絡，並沒表示此一組知覺在他一組知覺之後發生；凡是一種物質，先知道他是硬的然後知道他是脆的，或是先知道他是脆的然後知道他是硬的，都叫做琥珀。然而，我們若再進一步分析「他是脆的」這個敘述，可以知道他的意思是「用錘子擊他，他便破成碎塊；」這兩部分敘述中的知覺的發生，又見得出來有前後的順序了。

分析並且描寫關於知覺的發生的敘述間的種種連絡，例如以上所舉的提議，範圍太廣，並且和我們這本書的目的相差太遠。但須要注意，不可變更的最後的敘述間的連絡法不能數只有一種，就是在通常我們所認爲「定律」的那些敘述中也甚爲罕見。在這些情形中，若是打算把這種連絡法特別顯著

的那樣提議纔叫做「定律」我看太做作氣，並且引人入迷途；在下文裏，凡是確定知覺間的連絡的一段提議都叫做定律。我們不只把「琥珀被摩擦，便吸引輕物體」這樣的提議叫做「定律」並且把「有一種琥珀那樣的物質，」「色黃，」「質脆，」等等這樣的敘述都叫做「定律。」

現在我們要丟開籠統討論科學提議的真性，而只討論本書所要講的特殊的一部分。以前所敘述的意思恐怕不很明顯；他的意思，不限於在使你們了解所要描寫的電的定律，而在使以後能將電的定律和很容易和電的定律相混的一種科學提議相比較。以下數節中我們只討論定律。由以前所說的看起來，應當明白，要規定一種提議是不是定律，必須把他完全分析過；但是凡是實實在在的提議都是定律，這裏不過因為篇幅的關係，所以不能彀把這句話證明給你們看。你們既是不甚懂科學，所以不得信任我的判斷。

5 靜電的定律

以下所說的幾件事實，凡是翻閱過電學教科書的或是常常聽講演的人，通通熟悉；但是還要把他們小心陳列出來，以便閱看以下的討論。這些事實可總括爲以下數項，這數項是電學所依爲根據的主要定律。

試用幾塊綢子在適宜的狀況之下，摩擦幾塊玻璃，可以曉得這幾塊綢子和玻璃已經獲得以下的性質：

(1) 一塊玻璃和一塊綢子互相吸引。

(2) 兩塊玻璃或兩塊綢子互相排斥。

(3) 一塊玻璃或一塊綢子都吸引不會和他接觸過的任何一件其他的物體。吸引的物體間或排斥的物體間的距離越大，吸引力或排斥力越小。

(4) 一塊第三種物體已經和一块玻璃或一塊綢子接觸後，便獲得所接觸的玻璃的或綢子的(1)(2)(3)條的性質至一定範圍。被第三種物體接觸過的玻璃或綢子失去(1)(2)(3)條的性質至一定範圍；就是說，他的

得受過摩擦的玻璃的性質至一定範圍。

這些事實是電的科學所由萌芽的事實；這些事實的這種敘述方法把無關緊要的繁文通通避去了。爲簡單起見，最好引用幾個專門名詞，這些名詞讀者大概都很熟悉。玻璃或綢子受摩擦以後，當表示(1)(2)(3)條所敘述的性質的時候，我們說他「帶電」。甲類的物體叫做「導體」，乙類的物體叫做「不導體」。第(6)條所述的使物體帶電的法子叫做「由誘導帶電」。

由研究這些現象所得出來的定律自然不只這幾條。和這幾條的定律稟性相同的還有許多，描寫玻璃和綢子以外的物體互相摩擦後所表現的類似的性質。和這幾條定律稟性完全不同的也有許多。例如，讀者大概知道計量是電學中的一重要部分，有許多定律和剛纔所說的定律不同，不只表示性質，並且表示分量；兩帶電的物體間的吸引力不只兩物體相距越遠越減小，並且距離和吸引力有確定的數值的關係。這樣的新定律現在我們要注意；這樣的

定律和其餘的一切的定律，來歷上和稟性上，都不相同；於進行討論其他的事，情以前，這種區別須弄清楚，最爲要緊。上一段中所述的定律都是純粹由實驗和觀察的程序發見出來的，實驗和觀察的程序我們通常都認爲是各種定律的根源；其餘的定律都是於研究這些現象得到新發展以後纔發見的。這種新發展我們還不曾談過。

6 新發展

這種新發展可以由兩種完全不同的點分別研究。由一種研究點看來，這種新發展是創造已經發見的定律間的關係。我們已經知道定律是描寫觀察所用的知覺的。創造定律的程序，是求一個簡明的敘述將許多屬於最後的知覺的敘述集合起來；定律既已創造成了以後，由這定律，凡是那些關於知覺的簡單敘述都可以推演出來。例如由「被摩擦的玻璃和綢子互相吸引」這個敘述可以推演出「隨便那一塊玻璃都吸引摩擦過他的隨便那一塊綢子」

這個敘述來；再進一步，和從前一樣，可以推演出「有一種硬，透明，……的物質」這樣的敘述來，因為若是沒有玻璃這樣物質，則被摩擦而顯現的事情的敘述便顯然無意義了。所以，創造定律在求由觀察而得的最後的敘述間的關係。這個關係是什麼呢？這個關係是，已知表示關係的定律，我們可以推演出所觀察的事實來。

現在我們可以問，我們創造定律可以創造到什麼地步？我們能創造一條定律，將所有的一切觀察都完全包括了麼？我們能彀由這一條定律，將所有的這樣的觀察完全推演出來麼？或是我們可以求出不能彀再簡單的數條定律，以描寫所有的觀察麼？欲澈底回答這問題，須要甚較大的篇幅和甚較多的探尋，不適宜於此書；但是我想，把所有的觀察集成一條定律，一定不可能。定律的數目可以略為減少；例如（5）和（6）可以結合為一條定律，說「只有能彀傳達帶電物體的性質的物體，纔能彀自己由誘導帶電。」但是這樣將所能

有的結合都結合了以後，仍然還有數條定律不能彀結合。

雖然將所有的定律合爲一條定律是不可能的事，但是所有的定律可以合成不是定律的另一種提議。這種更進一步的發展是可能的事，並且在科學的研究中最爲重要；這種發展是我們現在所要討論的。但是因爲現在我們還沒有法子去求得這樣一種適宜的提議，所以非等到我們更爲明瞭所欲得的提議的真性了以後，求這樣的提議以包括其他的多數提議是十分靠不住的。這種提議的真性，假設我們由所說的發展的其他一個研究點去研究，我們可以得到一個暗示。

7 科學的目的

人們究竟爲什麼要研究科學？人們打算把知覺的敘述化簡的目的是什麼？究竟因爲什麼我們要敘述我們的觀察和知覺？有一種回答，說「研究科學爲的是實用」就是說「我們研究科學，因爲科學幫助我們處理我們所經驗

的知覺而增進身體的安適——但是我們不採取這種回答，自然有許多人研究的某種支派的科學，的確爲的是這個目的，但是純粹科學的隨便什麼發展都不會由這個原因得來；此書所討論的是最純粹的最抽象的科學。研究純粹科學的科學家，忙碌他的考察，完全是爲的求知，當他考察成功的時候，所工作的結果供給他一種不可限量的智慧上的快樂，這種快樂和讀著名的文章或看著名的圖畫所得的快樂一樣，不是身體上的快樂，乃是精神上的快樂。

這樣研究科學的人，除去規定定律外，還要去作科學的新發展的工作；因爲定律就是得着了的時候，也不能供給他所求的智慧上的滿意，他不能歡天喜地的承認定律是他的最後的工作。因爲什麼他得到了定律還不滿意，卻十分不容易說出來，恰像技術家很難說出他的作品因爲什麼到那一步是最好的一樣，僥倖我們用不着去追求因爲什麼得到了定律還不滿意。讀這本書的人，是假定不懂科學的人。他一定想這不滿意的定律是科學的最後結果。

假設這本小書現在就算完結，讀者只知道有第5節的幾條定律，用這幾條定律包括偌大研究範圍的科學，我想讀者不只覺着所研究的結果過於枯燥，並且覺着這些結果都是錯的。除非有比他應當知識較高的人曾經灌注錯誤的觀念在他腦子裏，他的天賦的真性應當使他問「因為什麼？」他應當說「這些定律通通不錯，但是早就希望告訴我因為什麼帶電的物體能吸引不帶電的物體，因為什麼惟獨良導體纔能殼由誘導帶電。」引導科學家們得到他們的大發見的便是這種質問。

然而，把這種問題做成「因為什麼？」的樣式來質問，不能殼使我們明白所要的回答的本意是什麼；因為略一思索，應當知道，普通談論這樣問法的時候，所得的各種樣式的回答，顯然都不適用於已經由觀察發見的種種定律的問題。但是知識略高一些的人，有時用另一種方法質問，說他請求把定律「解釋出來。」這種質問法還是有些含糊；因為「解釋」可以有多種，其中

的最多數不適用於此處所舉的例子。但是各種解釋有一共同的點，都是用較爲熟悉的觀念或語言代替所解釋的觀念或語言。所以「解釋」這個名詞的意義，是用較熟悉的觀念代替較不熟悉的觀念。這種解釋是我們所要的解釋，也是我們現在所討論的科學的新發展所供獻的解釋。

那麼，我們所要取的新步驟，是用不是定律的提議來代替所已發見的定律。這新的提議必須要滿足兩種目的；第一，定律能彀由這提議中推演出來，並且這提議能彀總括定律，恰和定律能彀總括各單個的觀察那樣；第二，這提議必須能彀供給由定律不能彀獲得的理想上的滿意。因爲要滿足第二種目的，所以這樣的提議所包含的意義必須比定律所包含的更爲熟悉。

所要解決的問題雖然這樣特別限制，也顯然可知不能彀立刻解決；隨便什麼法子我們都想不出來用來解決這個問題，不像算學中的問題總有法子來解決。消耗空間和時間去想法子來解決這個問題，是白消耗，沒有用處；我們

立刻要進行討論以前所提議的解釋。可以有其他的解釋，能數相等的滿足這兩種意思，但是就是有，我們也不去討論他。必須不要忘記我們所由開始的那個問題——「電是什麼？」現在所提議的解釋是惟一無二的告訴我們電是什麼的解釋。

8 「流體」學說

這個解釋是根據着一個比喻得來的。我們請專專注意第(4)條所描寫的事實——不帶電的物體單單和帶電的物體接觸便獲得他一部分的性質。在其他類的觀察中，這樣作用有許多顯明例子。例如，我們用手去接觸飽和着水的海綿，手便獲得海綿的一部分性質，手變溼了。在這個例子中，試作更進一步的考察，便知道海綿的性質傳到我們的手上，係由於有一種「物質」水由海綿傳到我們的手上的緣故。那麼，由比喻可以知道，帶電物體的性質由互相接觸傳到不帶電物體上去，係由於有一種物質由帶電物體傳到不帶電物體

上去的緣故；由比喻更可知道，我們說物體帶電的時候，帶電物體的性質表示有一部分假定的物質跑到物體上去，這種假定的物質叫做「電。」假設我們承認這個提議，那麼，試考察考察帶電物體和不帶電物體所由區別的性質，我們應當知道「電的性質」是怎麼一回事。因為有兩種帶電的物體，一種是帶電的玻璃，一種是帶電的綢子，所以我們必須假定有兩種假定的物質，一種是「玻璃電」，一種是「綢子電。」(1)(2)(3)三條定律表示兩部分玻璃電或兩部分綢子電互相排斥，而一部分玻璃電和一部分綢子電互相吸引。照我們的比喻說，若欲表示帶電物體吸引不帶電物體的事實，我們必須造出一種假定來，來表示不帶電的物體的狀態對於電是怎麼樣。最自然的假定是不帶電的物體不含有電。但若這樣假定，我們的比喻便有些不通了；兩個不帶電的物體互相摩擦，隨便那一個物體都不能發發現出電來。另有一種假定，是不帶電的物體包含着玻璃電和綢子電兩種，其配合的比例恰好這一種的效應被

那一種中和，摩擦的效應是將兩種電分開，使一種粘着在玻璃上，他一種粘着在綢子上；比方我們使海綿帶兩種液體，這樣的作用應當可以得到。依賴着這種假定來講，兩種不帶電的物體應當不互相吸引，因為此一物體中的玻璃電吸引他一物體中的綢子電的力，和此一物體中的綢子電排斥他一物體中的綢子電的力相抵銷的緣故。但是帶玻璃電的物體若是持近不帶電的物體，這帶電物體上的玻璃電便要吸引不帶電物體上的綢子電而排斥他的玻璃電。現在我們試更假定電在物體中能殼移動，那麼，綢子電應當聚集在近帶電物體的部分，玻璃電聚集在遠的部分；近帶電物體的綢子電受吸引的力較強，距帶電物體遠的玻璃電受排斥的力較弱，所以全體所表現的是吸引力。

我們已經把(1)(2)(3)(4)這幾條定律「解釋出來」了。我們今試討論(5)(6)兩條。海綿的比喻仍然能殼幫助我們想出一種提議來。我們若把實心棒的一端和海綿接觸，我們用手觸棒的他端，不能殼使手溼；但是若以

管代替棒來接觸海綿我們便能使手溼照這種理想來我們提議導體和管相當；導體是電能殼緣着自由移動的物體，而不導體是電不能殼緣着自由移動的物體。(二)

這種提議立刻供給我們一條路引導我們到第(6)條定律上去。帶電的玻璃近不帶電的物體的一端的時候，我們已經知道帶電的玻璃使綢子電聚集在這一端，而使玻璃電聚集在那一端。若物體爲導體，並且我們觸他的遠端，則物體中的玻璃電因爲能殼自由移動，所以便遠離帶電的物體而跑到手上去，只餘剩下綢子電在物體上。若物體爲不導體，則玻璃電不能殼流去，所以當帶電的玻璃移去了的時候，物體仍然有他原來部分的玻璃電和綢子電；該物

(一)讀書留心的人應當覺着這裏有一點困難。蓋欲解釋不帶電的物體被帶電的物體吸引，無論不帶電的物體爲導體或不導體，我們曾假定電在隨便什麼物體中都能殼移動；然而現在我們假定電只能殼在導體中移動。這種矛盾點，若不借助於現代最新的觀念，則不能殼解除，但是這最新的觀念不在本書所討論的範圍以內。

體仍然表示不帶電。

9 學說

這便是我們的科學的新發展，便是我們所要的解釋。我想讀這本書的人同意這是他所希望的解釋，我想這種解釋的確使我們所討論的現象甚為明瞭。真的，這種解釋讀者一定十分熟悉，敘述定律的時候須要留神以避免和這種解釋相混亂；但是須要明白這種解釋的確是一種新發展，並且一定可以敘述所討論的現象的定律而不粘惹這種解釋。由帶電的玻璃和綢子所察得的作用是極不熟悉的作用，一種物質由一物體傳到他一物體的作用是極熟悉的作用，而這種解釋的優點一定是在把極不熟悉的作用變為極熟悉的作用。

第八節所述的這種解釋，我提議給他一個名詞，叫做「學說」。科學所給我們的定律的確怎樣解釋，現在還不知道；又因定律和他的這種解釋間的主要異點不能說明白知道，所以常常發生混亂。許多科學書中常見「學說」這

個名詞，但是我的這個名詞的用途不永久和許多科學書中採用的用途相符。在我看，最多數的著作家不給這個名詞確定的定義，而用以表示各種完全不同的科學提議。

現在我們必須要討論「學說」的意義的確是什麼，並且討論「學說」和他所解釋的「定律」間的關係。我們已經說過，若是學說適用於，定律必須能彀由他推演出來；我們試看怎樣推演法。在普通的說法，以上所得的學說可以這樣說：「帶電物體的特別性質係由於物體裏頭所具的兩種流體的一種過多的緣故，這兩種流體我們叫做電。這兩種流體，每一種流體的一部分吸引他一種流體的一部分，而排斥和自己同種的其他部分；這兩種流體能彀自由通過甲類的物質，而不能彀通過乙類的物質。」這兩句話的意義甚不相同。第二句話說明「電的性質」；這句話真確告訴我們由學說引導出來的新觀念的意義。第一句話，關於電的事情隨便什麼都沒有告訴我們，只告訴我們電和

我們所觀察得的現象間的連絡；這句話幫助我們將新觀念——電——和學說所解釋的定律中包含着的觀念連絡起來。

無論什麼學說，都是同樣由兩部分組成，一部分描寫由學說所引導出來的新觀念，其餘一部分幫助我們將由學說的觀念得出來的敘述轉變成由定律的觀念得出來的敘述。這第二部分可以說是一種「辭典」；在我們所舉的例子中，我們說一件物體含二種電流體中的一種過多，恰等於說一件物體表現帶電的玻璃或綢子的特殊性質；譬如在英國辭典中說「It is yellow」恰等於說「他是黃的。」定律由學說推演出來，惟有應用這種辭典的方法。所以，比方我們的學說說「異性的流體互相吸引，他們能殼自由通過金屬，」自然，由這學說可以直接得到一種結論，說「若是我們用一種金屬連接含異性流體的兩件物體，這兩種流體便互相攙雜而互相中和他們的作用。」但是這個結論並沒有定律中所能殼敘述的意思，一直等到用辭典的法子將「含異性流

體「解釋成一帶玻璃電和綢子電」這個結論纔有定律中所能彀敘述的意思呢。這樣解釋了以後，我們乃得到了定律的一部分如第(5)條中所述的。

由此看來，在一種觀察上着想，學說由兩部分組成，一部分對於一些新的觀察作確定的說明，一部分爲辭典，辭典幫助我們將由這些新觀念所成的敘述解釋成由觀察所得的敘述，所以學說簡直等於他所解釋的定律，和起頭我們所規畫的相符。學說不過將那些定律換一種樣式再說一回，有數種理由使我們覺得這種式樣的說法較爲方便，並且較爲滿意。學說中所說的不過是關於所觀察出來的事情，這所觀察的事情完全是定律中所觀察的事情，並不用其他所觀察的事情來構成這學說。又，須要注意，（此爲須要特別注意之點，）關於觀察的敘述所以能彀完全由學說推演出來，只係由於應用辭典；凡不能彀由辭典確實解釋出來的敘述，都不是描寫觀察的敘述。例如我們的學說說「電是流體。」試檢查檢查我們的辭典，我們找不出能彀解釋這樣敘述的門

徑來；我們只能覈找出解釋「物體含着流體電」的敘述，而找不出解釋「電是流體」的敘述來。所以「電是流體」這個敘述，不是由觀察得來的敘述；假設這句話表示一些意義，也不是由觀察得來的意義。假設我們加給這句話一些意義，我們不得不由憶想去解釋電，而不能覈用觀察去解釋他，所以「電」的意義並不是完全由觀察描寫出來的。我們以後所說「電是流體」的意義便是由憶想得來的意義。這個顯明的結論，千萬不可輕忽，凡輕忽這個結論的，都要獲得無限的困難。

10 學說的價值

學說這個東西，一方面有價值，一方面又危險。學說所表示的東西，外面看起來，似乎多於其實在所表示的。這種事實，實在很危險。因為危險，所以必須要說明學說所不表示的是什麼。學說所表示的事情多於其實在所表示的多得很。當我們說「電是流體，具某某的性質」的時候，我們對於自己讀這本書

的人，沒有法子不表示電不惟有我們派給他的性質，還有流體所公有的性質。我們把「電」叫做流體，因為我們曾經假定電在某物體中甚易移動而在其他物體中則不能動的緣故；但是既已經把他叫做流體了，我們不能不疑惑電是不是和其他流體一樣有重量，有體積，加熱則蒸發，加冷則凝固，等等。

這些提議的真正意思是什麼，不易顯明；因為按照着剛纔所說的看起來，「電有重量」這個敘述，除非能動用解釋定律的辭典來解釋，有沒有意義不得明晰。事實上，所提議的東西自然是一條新定律了；所提議的是「含電較多的物體應當較重。」但是須要牢記，關於電所提議的新敘述應當是新定律，新的名詞應當添在辭典裏；這種新名詞在有種提議中不很明顯，而在其他提議中卻十分明顯。例如，「電有明確的體積」這句敘述，不能動用解釋為物體含電越多，體積越大；因為，試看看我們原來的比喻，海綿的體積溼的時候不一定比乾的時候大。我們須謹謹提防，勿以為這種敘述有一些的意義，須等到我們的

確知道辭典中有將這敘述解釋成定律的名詞，然後纔可以爲這敘述有意義。我們不能駁因爲原來的學說中所搜集的定律是對的，便以爲由這學說所提議的進一步的定律也是對的。這新定律對與不對，只可由實驗和觀察來確定；我們必須明白知道所觀察得的東西是這些新定律所精確描寫的東西，然後這新定律纔可確定是對的。常常查得學說所提議的東西是不對的；例如，方纔以電的「流體學說」爲根據所得的種種提議都是錯的。「電有重量或體積」「電冷則凝固或熱則蒸發」這些很確實的敘述出來的提議現在還不知道是定律。我們自然喜歡提議正確定律的學說，而不喜歡提議錯誤定律的學說；就這一方面想，種種真實的學說間的差異，是程度上的差異，而不是種類上的差異，因爲各種真實的學說幾乎都是同時提議對的定律和錯的定律。所以，若是可能的話，我們願意確定如何得到事實上確能提議真正定律的學說。沒有人曾提議過任何種的正式法則，我並且不想以後將有人提議任何

種的正式法則，由這正式法則去創造對的學說——即提議對的定律的學說——而不創造錯的學說。讀者定規曉得，曾有人希望作種種法則去發明定律，雖然這些希望在我看完全不能覈滿意；但是不曾有人希望作種種法則去發明學說。然而試再返回去想，因為什麼我們製造學說，在這事情上便可以得到一線曙光。我們製造學說，前面已經說過，是因為定律不能覈使我們滿意的緣故，是因為定律不能覈滿足我們心意中的美的欲望的緣故。無論什麼真實的學說都曾得到過，其始創的目的只在要替某某幾條定律求另一種新說法，但是既已得到了這學說以後，即能覈獲得一種新樣式的敘述，這新樣式的敘述，不惟表示所替求的幾條定律，並且原先含糊不曾審計過的其他定律也表示出來；這是很可注意的一件事實。在我看，這事實告訴我們，人們的天性催促人們製造學說，並且引導人們製造真實的學說。假設人們由經驗知道他們只能覈由定律常常得到或永遠得到錯誤的學說，他們將不要去求學說，並

且不要研究科學了。科學是一派純粹學問，科學所以能彀成爲科學，純是由於觀察和道理一致，——雖然不盡是這樣，但是大都是這樣。

11 科學的技術

我曾說過「人們的」智慧上的需要；但是對於這些需要，人與人各不相同。有的人歡喜研究文學，有的人歡喜研究數學，有的人歡喜研究科學。有一種人，他們的智慧上的需要爲自然界事情的先導。這種人是誰？這個回答很明顯，他們是真正的大科學家。有許多哲學家，尤其是在上一世紀裏，想分析並且描寫「科學方法」把這方法幾乎看作由觀察推求結果的數學方法；這些哲學家從來沒有考查過因爲什麼科學中的大進步不是由最懂「方法」的人作成的，而是由哲學知識卑劣的人如牛頓或法拉對等作成的。這樣的哲學家打算將科學的結果使平常人信服的時候，都是想法子隱匿着不說這些結果是由平常人不能彀有的理想想出來的。沒有真正的科學哲理不承認凡是得到

有價值的學說都須要智慧，這智慧是屬於個人的，和大技術家的智慧一樣，是不能敷衍傳授的，是描寫不出來的。科學在他的最高的貌像看來，不和技術反對，是技術的貌像的一種。

要懂科學，必須要有這種特別的智慧力，其大小恰和要發明學說所必須的一樣。學說可以提議真實的東西，也可以提議虛偽的東西，但是具有真實的科學的真性的人所易感受的是真實的提議，而不是虛偽的提議。前頁中所說的虛偽的提議不阻礙科學的進步，因為那些提議（除去「電有重量」這個提議不一定完全虛偽）凡是對於科學有知覺的人都立刻覺得是可笑的提議，永遠不會戀戀不捨的。但是這些虛偽的提議對於沒有科學知覺的人甚為危險，這些提議曾經發生過許多無味的討論。平常人，尤其是哲學家，聽見科學家說電是物質的時候，他們立刻斷定說凡叫做物質的東西的性質「電」都有。這個混亂的由來，一部分是由於字面：「電是物質」這個敘述和「琥珀是

物質」這個敘述的真實意義有些難捉摸，然而我們已經知道後一個敘述完全是描寫觀察而得的事情，前一個敘述所說的不是由觀察完全規定的觀念。不懂科學的人們常常不高興科學上所用的專門名詞；其實科學越多用專門名詞，他們的錯誤越少；沒有比用常見的名詞表示新的意義再容易惹人錯誤的了。就是用專門名詞，也免不掉混亂；平常人對於學說的虛偽的提議容易感受，而對於真實的提議反不容易感受。科學的學說是懂科學的人們計畫出來的，是講給懂科學的人們聽的；惟獨懂科學的人們纔懂得學說；沒有科學天性的人們頂好是越不討論學說越好。科學不是「有組織的常識」是各種學問中最奧妙的學問。

在這本小書的開端，我們不高興「電是什麼？」這種樣式的問題，就是爲的是這些理由，因爲這種樣式的問題的回答不能豁免掉「電是物質」的緣故。以後我們將要知道，有許多電現象的學說，完全不許有這種樣式的回答；就

是所承受的學說引導我們使我們作這樣的回答，而若不多方解釋，差不多一定會引導我們到錯誤的道路上去。

我們的長的引導的話現在完結了，我們能毅然放開大些的膽子去討論由研究電現象得出來的些少有條理的結果，而不致有大錯誤了。以下我們還要討論定律，但是這定律不是只由觀察得來的，而是由已經證明真實的學說提議出來的。這些定律中，最要緊的是關於種種屬於電的量的計量的定律。

第二章 屬於靜電的計量

12 計量是什麼？

計量的意義人人都熟悉；很少的人去想解釋他可見其熟悉程度之大了。隨便什麼人都承認有些性質可以計量，有些性質不可以計量，但是隨便什麼人都不能彀辨別出可計量的性質和不可計量的性質間的主要異點來。例如我們有許多瓶子在眼前，其大小，重量，顏色，硬度和美術上的設計各不相同。這些性質中，前兩個立刻可以承認可以計量；隨便什麼人都懂這個瓶子比那個瓶子大三倍，大五倍，或重三倍，重五倍是什麼意思。瓶子的顏色的計量的意思，非熟悉光學的最近發展的人不能彀明白；瓶子的顏色的計量的意思，是說用不同的數目字把兩個瓶子的顏色的異點表示出來。硬度的計量，就是在最懂科學的人，也不過只好用不滿意的法子做去。至於美術上的設計的計量，便十

分不能數了；「這個瓶子比那個瓶子好看兩倍」這個敘述的精確意思，沒有人知道是什麼。

用數由性質去區別東西，有兩種用途。第一，只是便於表示條目。一組數可以當作一組字看，他具有一種極有用的性質，就是願意要多少便有多少。我們若要特別注意一隻新瓶子，可用這隻瓶子和其他的瓶子比較大小，那麼，我們可以說這隻瓶子和那隻斷柄的瓶子大小差不多，又和那隻有藍點的瓶子差不多。用這樣的法子去分別瓶子，若是瓶子的數少還可以，若是瓶子的數很多，那就很難了。最便當莫過於在每隻瓶子上粘一個條子，條子上寫一個數，把斷柄的那隻瓶子叫第1號，把有藍點的叫第2號，如此類推。這樣，無論有多少瓶子，標示他們的法子總沒有窮盡。

數的這種用法，日用上最熟悉的，是家宅的記法。都市中的聰明人不把他們的住宅稱「東海寄廬」，而稱做某某路第幾號。數的這種用途可賴以區別

物體的任何性質，或是美或是大小，都可以。數雖是區別東西的最滿意的法子，但是不是惟一的法子；假設我們預先知道東西的數目是有限的，我們可以用干支字去表示他們。論理，干支字雖然可以用作計量，然而不是正當的計量法。我們用數來計量而不只用他，他表示性質的時候，我們以為叫做「2」的那種性質和叫做「3」的那種性質，和叫做「5」的那種性質間有種關係；假設我們用叫做「4」的性質去代替叫做「3」的性質，其間的關係便不能彀保持了。我們表示這種關係的時候，我們說性質「5」是性質「2」和性質「3」的和。這種關係我們不得不更詳細些去討論。

13 計量的論理學

我們說這個瓶子比那個瓶子大5倍的意思是什麼呢？這個意思是說，若是我們用水裝滿那個瓶子，再將那個瓶子的水注在這個瓶子裏，重覆五次，這個瓶子裏的水恰好裝滿。我們說這個瓶子比那個瓶子重5倍的時候，我們的

意思是說，若是我們把和那個瓶子同樣的5個瓶子放在天平的一個盤上，將這個瓶子放在那一個盤上，天平恰好平衡。在每個例子中，數5都是表示在一個瓶子上所作的一種手續的次數，以使這種手續在第二個瓶子上作一次即得同樣的效果。但是這種手續的稟性在各例子中各不相同。最要緊的要知道這種手續的稟性不是模糊的，而必須有密切的規定。除非我們知道什麼手續是適當的手續，「一件物體的某種性質5倍於他一件物體的這個性質」這個敘述沒有什麼意思。我們不得不問的問題是因為什麼我們計量某種性質的時候，要選擇這一種手續而不選擇別一種，並且我們怎麼樣去規定什麼手續是「適宜」的。

欲求這個問題的回答，要想一想計量不得不自相一致；表示同一物體的性質的數必定不能設有兩個。我們試只就大小來討論。比方我們有四個瓶子，甲，乙，丙，丁。其中的一個瓶子甲已經由某種理由知道可以用1代表他的大小。

我們用東西將甲充滿，並且將充滿的東西小心倒在乙，丙，丁裏頭，以滿爲度；我們由此曉得2個甲中的東西恰好充滿乙，4個甲中的東西恰好充滿丙，6個甲中的東西恰好充滿丁。那麼，由我們所說的可以知道乙，丙，丁的大小爲2，4，6。由以前所說的更可知，就計量大小的意思說，若用東西將乙和丙充滿而倒在丁裏，丁恰好充滿，因爲 $2+4=6$ 的緣故。我們試驗一下，恰好是這樣，不多也不少，丁恰好充滿。但是這個結果不能預先知道；這個結果不是計量大小的定義的論理學的結果，也不是數學的提議；這個結果只可由觀察得知；這個結果是定律。假設我們以前對於計量的適宜手續的意義曾作不同的解釋，我們便不能彀得到像以上那樣同一的結果。「一個瓶子的大小5倍於其他一個瓶子」這個敘述的意思，我們原先也可以說若是我們充滿後一個瓶子並且倒在第一個裏頭，將這個手續重覆5次（而不是將瓶子裏的東西小心傳過去）則前一個瓶子恰好充滿。但是在這個例子裏，我們求不出以上我們所

求出的乙，丙，丁間的大小的關係來，因為我們的計量不自相一致。小心傳遞和隨意亂倒，這兩種手續中，不由實驗不能彀知道那一種可以使我們得到適宜的結果。我們覺得這一種手續合理而那一種手續背理，只是由長久不斷的經驗得來的。

我說這些話所要得的結論，是因為要使計算成爲完全可能的事，所以必須有某某定律的有條理的知識；我們必定要求出一種適宜於計量的手續來，用這種手續永遠引導到一致的結果。什麼手續能彀引導到一致的結果，什麼手續不能彀，只好由實驗證明。有某某性質能彀計量，有某某性質不能彀計量，能彀與不能彀的理由，是因為在某某性質這種適宜的手續已經求出來了，在某某性質這種適宜的手續還未曾求出來的緣故。這種手續，在大小和重量兩種事情中已經求出來了；在顏色的事情中也已經求出來了，不過比較複雜得多；對於硬度，還未曾求出滿意的手續來；對於各種美術上的設計都還沒有求

出來。

我們還沒有斷定怎樣能穀知道某一隻瓶子的大小是1。我們完全不知道，不過假定他是1。假設我們已經求得一種「適宜」的手續，隨便那一個瓶子的數，自然要依賴我們所選擇為1的那個瓶子來規定。

若欲正式解釋這件事，我們不得不作三段敘述，由這三段敘述然後能穀完全計量一種性質。(1)我們說，當兩個物體對於某種性質相同的時候，我們所計量的量對於這兩個物體相同。例如，當充滿一個瓶子的水也充滿那一個瓶子的時候，這兩個瓶子的大小相同。(2)我們說，對於某種特別指定的物體，這個量是1。例如我們說有藍點的那隻瓶子的大小是1。(3)我們說，一件物體的量是其他兩件物體的量之和，這句話的意思，是說做一種特別手續到末兩個物體上和做這個手續到第一個物體上發生相同的結果。例如我們說一

個瓶子的大小是那兩個瓶子的大小的和，這意思是說我們將末兩個瓶子裏的東西倒在另一個容器裏，和將第一個瓶子裏的東西倒在這個容器裏，得到同樣高的表面。

這三段敘述都是定義。(1)是純粹屬於字義的定義，辭典中的定義是這一種定義。(2)是純粹模糊的定義，譬如把某一匹馬叫做「赤兔」便是這一種定義。(3)是要緊的定義，須很小心的去選擇他；因為他告訴我們計量是完全可能的事情，引導我們得到一致的結果，所以他指示一條很要緊的定律，這定律可以甚為複雜。

現在我們已經知道計量的意思是什麼了，我們能彀進行討論屬於電的種種量的計量了。

14 電量

我們眼前的這個問題可以這樣說。我們有幾塊帶電的玻璃在這裏，這幾

塊帶電的玻璃，就是在如前邊所說的環境之下，具有吸引輕物體的性質的玻璃。這幾塊帶電的玻璃，不以相同的法子吸引所指定的一件物體；現在所要的，是用不同的數來表示玻璃塊的性質的這幾個不相同的點，其表示法係無論用何種方法所得的加給玻璃塊的數，永久相同，永久和我們表示數的法子相一致。

我們第一要曉得，我們沒有從科學的起頭說起。我們假定有一些科學已經知道了，有一些可計量的量已經規定過了。這些規定過的量中有「長」和「力」。我們已經知道長和力是什麼了，但是我們不能設阻止人們問這些量怎樣計量。我們既已知道這兩種可計量的量，便可藉這兩種量表示各塊玻璃間的吸引力的異點；我們求出來，同一塊玻璃施於同一塊輕物體上的吸引力視玻璃和物體間的距離而不同。我們所正在考察的異點的一部分可以這樣表示：考察一塊帶電物體施於一塊輕物體上的力的數，考察這帶電物體和這

輕物體間的距離，再考察這力和距離間的關係，然後再取許多塊帶電物體來考察各帶電物體和這被吸引的輕物體間的距離。但是這種手續已經做好了以後，我們將要曉得除這些異點以外，還有其他未決的異點；我們既已藉所發見的關係求出距離上的異點以後，或是既已將各塊帶電物體置於距所吸引的物體同一距離，因之而求出力上的異點以後，我們仍然求得由各個帶電物體所施的吸引力(二)各不相同。以前所知道的，可計量的量現在已經用盡了，我們不得不發明一種新量，用這新量來計量這異點。

現在正是用着電的學說的時候了。規定一種可計量的量有必須的三條定義，其中的兩條不需學說的幫助就可以發明出來。前兩條定義，依照第四十頁的計畫，可以敘述如下：——(1)「當兩件物體距同一物體一樣遠的時候，若兩件物體施同一的吸引力於該一件物體上，就我們現在所正要計量的量

(二)若是於行文不甚妨礙，爲簡單起見，我用吸引力這名詞的時候，排斥力也包括在內。

來說，這兩件物體相同。」(2)「若兩件物體的這兩種量相同，並且兩物體相距的距離爲1，當這一件物體吸引那一件物體的力爲1的時候，各物體的這種量爲1。」但是製造定義(3)的手續是什麼呢？這問題的不得不有的回答，一定是由學說得來的無疑。

電和流體間，我們曾作過一個比喻。代表兩個瓶子的異點的可計量的量，就瓶子裏所盛的水說，叫做瓶子裏的「水量」；適宜於計量水量的手續，我們已經知道是把這個瓶子裏的水倒到那個瓶子裏。在電的現象，有一種手續，最初看來，似乎恰和將一個瓶子裏的水倒到那個瓶子裏相當。這樣的情形有許

(一)定義(1)不是純粹屬於字義的。若是想得一致的結果，則可知兩物體以同一的力吸引物體甲，也必定以同一的力吸引物體乙；因爲若不是這樣，則用甲試驗的時候和用乙試驗的時候，量的大小便要不同了。但是我們只知道無論用甲或乙來作試驗，結果都不相同。照此說來，在這個例子裏，(1)是定律；若是將各條定義改變一改變，把這條定律包在(3)裏頭，而不包在(1)裏頭，則這條定律應當更合於論理學，但是用來作解釋則嫌太繁了。

多；例如，使帶電物體甲和另一個帶電物體乙接觸，然後引開，我們便查知甲不帶電，同時乙的吸引的性質變更了，乙立刻不以同一的力吸引從前的距離的物體了。由比喻可以知道這種手續可以「適宜」。照此看來，我們把我們所要規定的量叫做物體中的「電量」，並且我們打算提議以下的定義：（3）「當在某種狀況之下甲和乙接觸的時候，甲上的電量加到乙上的電量上。」（什麼樣的狀況，對於讀者無精確敘述的必要。）

現在我們必須求出這種定律是否引導出一致的結果來。要做這件事情，我們必須作以下的實驗。取三件物體，甲，乙，丙，都不帶電；再取許多物體，各帶電量1，電量1的意義照（2）的解釋。在已定之狀況下，於這些物體中取 n 個和甲接觸，取 m 個和乙接觸；然後取甲和乙接觸，再取乙和丙接觸；按照着我們的定義來講，丙現在帶有 $\approx + \approx$ 電量。使丙吸引另一個物體丁，記出丙吸引丁的力來，然後再使丙不帶電。我們現在取 $\approx + \approx$ 個帶單位電的物體和丙接觸；丙

又帶有 $n + m$ 電量；我們使丙和丁相距以前的距離，再記出丙吸引丁的力來。若是無論試驗多少次，無論取甲、乙、丙那一件物體，無論 n 和 m 的數是什麼，吸引力都相同，這定義便是引導我們得到一致的計量，我們的目的便得告成功。

這樣的實驗曾經常常做過；自然，實在的條目比現在所敘述的複雜得多。我不知道曾經用這種實驗來試驗過計量的一致沒有，因為科學家們，至少在昔日，不承認計量合於論理學的緣故；但是每日試驗，不曾有不一樣的結果發現過。我把他叫「電量」的這種量在科學中已經成立鞏固了，並且為最多數其他屬於電的計量的根基，但是對於電的計量所必須的理由和觀察有許多學生們大概很難清晰說明。

15 陽電和陰電

你們應當知道，以前所說的「電量」只是一種，而學說要我們承認兩種電——玻璃電和綢子電。我們要把各種電現象完全解釋出來，不需要兩種電

量麼？這是我們所已採用的定義的一個可注意的推斷，又是這定義中我們所未採用的主要利點的一種。

我們已經知道，若是一件物體被帶玻璃電的物體吸引，便被帶綢子電的物體排斥。若是使這兩種帶電的物體接觸，使電得互相攙合，他們的效應便互相挫折，而他們的吸引力小於單個作用的時候。猛然看來，因為每一帶電物體都吸引中性物體，似乎攙合過的電吸引中性物體應當比單個作用的時候更厲害。但是這種假定錯了。攙合過的電吸引中性物體的力比單個作用的時候減小，其減小的比例和吸引帶電物體的時候一樣。這種事實立刻可用學說解釋。設甲帶玻璃電，乙帶綢子電，並且按照定義所說的，設將甲和乙上的電都加在丙上；那麼，有時丙上完全不帶電。但是將甲的電加在丙上以後，我們若不將乙的電加在丙上而由丙減去甲的電，或是將乙的電加在丙上以後，我們若不將甲的電加在丙上而由丙減去乙的電，所得的結果都完全和以前相同，丙上

完全不帶電。可見加上一種電所得的效應，和減去其他一種電所得的效應完全相同。照算學上的道理來講，當加上一個數所得的效應和減去其他一個數所得的效應相同的時候，第二個數叫做第一個數的負數；例如在某一數上加 $+2$ 所得的效應和減去 -2 所得的效應相同。照此說來，在我們剛纔所討論的電的例子中，若是我們把甲上的電量叫做 $+a$ ，把乙上的電量叫做 $-a$ ，或是把乙上的電量叫做 $+a$ ，把甲上的電量叫做 $-a$ ，我們不必再用其他的定義，即可計量兩種電的量。我們還必須要問一問這種方法是不是可以得到一致的結果，其試驗法和以前所作的實驗的試驗法性質上相同；事實上，所得的計量的結果是一致的。

但是我們還可以問一問，我們不還要把定義(2)再做精密些麼？所選擇以規定電量1的單位物體，帶玻璃電的時候和帶綢子電的時候，所計量出來的物體上的電量不得出不同的得數來麼？由實驗得知，將單位物體上的電由

玻璃電改成綢子電所得的惟一的效果，不過是將由定義所求得的隨便什麼物體上的電量的記號由 $+$ 改爲 $-$ ，或是將單位物體上的電由綢子電改成玻璃電，所得的惟一的效果，不過是將由定義所求得的隨便什麼物體上的電量的記號由 $-$ 改爲 $+$ ，而代表電量的數則不改變；例如電量 $+2$ 改爲電量 -2 ，而不改爲 -3 或 -1 。這個發見是由實驗而得到的定律，並且是最方便的一條定律。另換一種說法來說，則爲，設帶玻璃電的甲吸引其他一物體丙的力，和帶綢子電的乙排斥該物體丙的力相同，或是設帶玻璃電的甲排斥其他一物體丙的力，和帶綢子電的乙吸引該物體丙的力相同，那麼，若用以上所述的方法，將甲和乙上的電量加在丁上，丁上的電量不變。

那麼，因爲玻璃電的量很精密的等於綢子電的量而符號相反，所以我們用正數代表一種量，用負數代表其他一種量。那一種電用那一種符號代表，都沒有關係；習慣上，都是用正數表示玻璃電，用負數表示綢子電。所以「玻璃電」

應當叫做「正電」，「綢子電」應當叫做「負電」；但是現在一般都把「正電」叫「陽電」，把「負電」叫「陰電」。

16 計量的應用

在任何一種科學中，當我們將可計量的量的定義規定成功的時候，在研究上有一新地域開闢出來；我們能覈在可計量的量間求出永久成立的關係來。當這樣關係求出來的時候，敘述這關係的文字便是定律；這定律和我們開始引用的定律一樣，是描寫所觀察得的事情的。但是須要注意，這樣定律是一種極特別的描寫文字；他所描寫的觀察得的事情要反覆觀察，一直等到隨便什麼不預先知道這樣描寫的人也能覈作這樣觀察的時候，這觀察纔算妥當。若以為只由實驗和觀察即可表示定律，那便走錯了路了。只由觀察去發見定律，就論理學一方面說，誠然不是不可能的事，但是事實上，定律的樣式——最要緊的是樣式——在最要緊的定律中，不是由觀察得來的，是由學說所提議

的意義規定的。雖然照論理學的手續說，定律在學說之先，但是物理學中已經發見的最要緊的定律都是在學說之後；這些要緊的定律差不多都是敘述可計量的量間的關係的。除由學說的提議所得的結果外，沒有新的可計量的量曾發現過在物理學裏，這句話這樣說法我想沒有不妥當的地方。凡是著名科學家的研究都依靠學說；除非「學說」這個名詞不作此處所引用的解釋，我們方纔可以說著名科學家的研究不依靠學說。

我們所討論的電學中，敘述可計量的量間的關係的最要緊的定律是：

(1) 設兩個帶電物體置於一定的距離，則一個帶電物體施於其他一個帶電物體上的吸引力，和物體上所帶的電量成正比。(2)

(2) 在絕緣的一系統物體之中，無論物體如何變更，各物體上的電量

(一) 在現代電的數學學說裏頭，(1) 不像定律，像「電量」的定義；第14節中前兩個定義保留不變，而第三個定義變為「當我們說一個物體上的電量二倍於他一個物體上的電量的時候，我們的意思是說，若這兩個物體對於第三個物體居於相同的位置，一

的總和保持不變。事實上，我想這個顯明的定律不過是「絕緣」這個名詞的合於論理學的定義，然而這個定律確乎描寫極要緊的事實。若更想不能殼用論理學來駁斥的樣式來解釋這些事實，殊覺繁難。

用這兩條定律的幫助，不要再作進一步的研究，我們能殼規定新的可計量的量的定義；因為，若是我們求出來某某量永久和其他的量以同一的方法相關係，我們能殼給這個整個的結合一個新的名詞。例如，當我們已經規定出「一部分水的重量」，「一部分水的體積」這些量的定義來，並且求出來這些

「一物體施於第二物體上的力二倍於其他一物體施於該第三物體上的力」那麼，這定義(3)變為一條真正的定律，其樣式是「在已定狀況之下，接觸確使一物體接受其他一物體上的全量的電。」

我高興採用教科書上的定義，有兩個理由：第一，對於所討論的事物的歷史上的發展似乎比較好一點；第二，他們給我們一個極好的機會來解釋計量的論理學。就電的科學說，現代的定義完全不依論理學上的規定，而以力為力學中可計量的量，力學中曾由實驗證明力為永久一致的可計量的量。規定力的計量的時候，有許多與一般計量的論理學無關的特別難處，所以似乎最好作一種不應用力的觀念的計量以避免這些困難。你們應當看出來，敘述我們的計量的時候，我們從來不曾說過這一個力二倍於那一個力，只說這一個力等於那一個力，規定力的三個定義之中，我們只會用過前兩個困難的地方，和通常一樣，只屬於第三個定義。

量互成正比的時候，我們不要再作進一步的研究，便可規定「水的密度」的定義爲重量和體積的比。由論理學的方面看來，這樣的定義都是純粹屬於字義的；但是若要注意量的某種結合有特殊興趣這件事，則這種定義頗爲重要。

這樣規定出來的各種屬於電的量中，惟獨有一種要特別注意，這一種叫做「電勢」。設帶同種的電的兩件物體和一條導線連結起來，一般其中的一件失電而其他一件得電；但是一直到現在，我們所說過的事中，沒有一件事能穀幫助我們規定那一件物體得電那一件物體失電；得電的一件物體不一定是含較少的電量的物體。電勢是一種量，當兩件帶電的物體用導線連結起來的時候，這種量使具高電勢的物體失電；那麼，我們由物體所帶的電規定他的形狀和他對於其他物體的位置。這種量也可以用作電學中初步的可計量的量，以代替用叫做「電量」的量去作初步的可計量的量，因爲他的定義的法子，也是由學說提議出來的緣故。設盛水的兩件容器用管連結起來，水要從

具高水壓的容器中流出；照此說來，電勢可以比作流體的壓力。這種比喻記在腦子裏，甚爲有用。

17 靜電的科學

以前我們所述的定律和學說屬於電學的一支派，這一支派的電學叫做靜電學。對於現在的目的，靜電學我們用不着再往深裏研究了。但是我們所研究到的地方，不過是高等學生所開始的地方。高等學生所研究的電學由兩部分組成。第一部分討論我們以前所說的定律的論理學的結果；一般所討論的問題是：已知一系統的物體的形狀和位置，由這一系統的物體規定數種屬於電的量的值，再由這數種屬於電的量的值規定其他屬於電的量的值。這個問題可以討論到許多數學上的興趣，而對於高等電學的第二部分甚爲重要。第二部分爲依賴數學的討論的結果去描寫種種實驗的計畫，這種計畫可以應用來計量各種量。但是這兩部的討論對於一般的讀者都沒有興趣，所以我們

把他們刪去，而一直跳到一堆完全新的現象來討論。這些新的現象使我們規定新的定律而發展新的學說。

第三章 電磁學

18 基本定律

試將一片純粹的鋅板和一片純粹的銅板置在一個淡硫酸盆裏，使他們彼此不相接觸，則見沒有變化發生。但是若兩塊板互相接觸，或是用一條金屬線將他們連起來，乃有化學變化發生；一般，鋅板溶解於酸中，同時由酸中發出來的氫氣泡包裹在銅的表面上。這個時候，試注意連結兩塊板的導線；導線發熱，並且若將自由懸着的磁針持近導線，便見原來指南北的磁針現在打算和導線成直角。只要導線不斷開，化學變化和磁針的指向繼續不停，一直等到鋅溶解完了方纔停止；但是導線若斷開，化學變化和磁針的指向便都立刻停止。

凡是玩弄過科學的人，都知道這些事實，並且知道這些現象是「屬於電的」；但若有人請他解釋「這些現象是屬於電的」的意思，或是請他舉例證

明這句話的真確，恐怕他要覺着難了。現在讓我們較爲精密的尋求尋求這句話的意思，並且要用什麼明顯事情去證明出他來。

19 「摩擦的」電和「弗打的」電

「這現象屬於電的」這句斷語，顯然是說這現象和前章中所描寫的所分析的那些現象有關連，但是這些現象不只是以前那些特殊現象。剛纔所說的新定律，無論用什麼法子，都不能彀由以前的定律推演出來，因爲這定律中包含着以前沒有說過的觀念，例如磁石的觀念。並且我們可以看出來，在敘述定律的範圍內，用不着引用「電」和「屬於電的」這些名詞；惟有發展解釋定律的學說的時候，纔用得着這些名詞呢。「這新現象是屬於電的」這句斷語，必定和前章的學說有些關係。略加思索，應當知道，這句斷語的意思，是這新定律可以用原來的學說解釋，或將原來的學說略加發展些用來解釋他們，以便將舊定律和新定律由電的一個學說打爲一氣。

但是除非新舊兩組定律有相同的地方，我們不能彀把他們打爲一氣；就是說，除非有一種重要的作用兩組定律中都描寫，他們不能彀打爲一氣。就歷史的事實來說，最初表示兩組定律間的連絡觀念的作用，我們還沒說過；但若只就說過的事實來說，兩組定律都將金屬的固體和非金屬的固體分別得清清楚楚，由這種分別也可以得到一種連絡；若將連接兩塊板的導線換成我們所研究的靜電學中叫做非導體的線，這非導體的線不表示以上所說的特別性質。兩組現象都將物質分成兩類，這種分法是兩組現象所公有的點。

這個事實最先使我們覺得電的學說可以使這新現象得到一線曙光。電的學說曾提議過一種比喻，說物質的導體和非導體間的不同，就流體經過於其中來說，好像空心物體和實心物體間的不同一樣。空心管的性質，視流體是否經過於其中而不同；由這比喻可以知道，和管相當的物體的性質可以解釋爲，當其連接鋅板和銅板的時候有「流體」的電經過於其中，當其不連接的

時候，沒有「流體」的電經過於其中。這個提議發生得很早，差不多連接板的導線的這種特別性質剛纔發見之後，即發生了這個提議。鋅，銅，和淡硫酸的組合叫做「弗打式電池」。「弗打的電和摩擦的電相同麼？」這個問題有許多年不曾有充分的解釋。

試把以前所採取的學說拿來分析分析，便覺得這樣問法的問題不滿我們的意。這問題以爲「弗打的電」和「摩擦的電」都是物質，和說水是物質一樣，這話說得太強硬了。事實上，這樣問法的問題一定要引出許多的混亂來，而使回答的話不能彀明顯。我們知道，雖然約在西曆1830年以後就沒有人疑惑這樣的回答是真實的，但是這回答的真正必須的實驗直至其後約五十年方纔作成。實驗既已作成以後，實驗所回答的問題和以前的問題完全不同。假設科學家們論事，原先就合於論理學，當他們思想以前我們所說的問題的時候，他們一定不會問出這樣的問題來。試參閱十九世紀初葉的電學說的歷史，

名詞的應用上甚爲危險；人們不正確考察考察名詞的意思，便用出來；但是事情過了以後，容易明白過來。

20 「弗打的」電和「摩擦的」電相同的證明

若是弗打的電和摩擦的電是一種東西，當我們就摩擦的電完全知道一系統的物體的情形的時候，我們就弗打的電一定也完全知道該一系統物體的情形。完全知道一系統的物體對於摩擦的電的情形，是說完全知道該系統每一部分的前章所述的屬於電的各種量的值，知道在隨便什麼時間各部分的相互位置是怎樣，知道各部分所含的電量。另一方面說，「弗打的電」的意義是說當導線連接着板的時候，他是使導線發生種種性質的經手者；所以完全知道一系統的物體對於弗打的電的情形，是說完全知道由導線的性質所規定的各種量，知道導線中所發出來的熱量，知道作用於距導線已定位的磁針上的力的大小和方向，知道溶解的鋅的量，知道發生的氫氣的量。那麼，若

是弗打的電和摩擦的電是一種東西，必定這一組的量完全可以由其他一組的量規定；只知道一組的量，而不知道此一組以外其他的量，必定可以充分規定這其他一組的量，恰和只知道氣體的體積，溫度，和密度即可充分規定他的壓力相類。

對於回答這個問題所必須的實驗是：預備許多各樣的電池，一方面規定電池的每一部分的各種靜電的量，一方面規定作用於磁針上的力的大小和方向等量。這些規定既已做好已後，必須要考察這兩組量的關係是否永遠一樣。這樣的考察，除非預先知道一些觀念，例如容易求得的關係的稟性，差不多都是引導不出真確的結果來，因為這關係可以極爲複雜而不能設一試便知的緣故。但是作這樣工作的時候，我們還要受學說和比喻的幫助。我們試考察考察空心管由水流經過所得的性質和流動的水的情形間的關係，我們應當求出來由這些性質所規定的量中最要緊的是和水流的速度或水流所受的

壓力這些量有連絡。所以自然而然的，我們第一步要曉得（例如）由導線的性質規定導線中所發生的熱量，要曉得電流動於導線中的速度——即在已定之時間內出於一板而入於他一板的電量，然後尋求熱量和速度間的關係。電的這種流動速度顯然依導線所連接的板的電勢（二）規定；電的流動速度，差不多都視為計量中最要緊的一種考察。

作實驗的時候，種種的觀察極為困難；因為就最能說明白表示靜電學的種種量的值言，弗打電池系統中的種種值，比上章所述的靜電學現象系統中的種種值，不是太大就是太小，所以很難用同一的方法計量兩造的量，其難法

（一）一直到現在，我們還沒有說過板的電勢。但若導線的特別性質果真是由於有電流流經於其中，則兩板的電勢顯然不同，因為惟獨有不同的電勢的時候電方纔能敷由一物體流至他物體的緣故。在最初有電學的時候，發見兩板間有電勢的差異，便以為證明了「弗打的電」和「摩擦的電」是一樣的；但是這證明還沒有完結，必須等到證明弗打的電完全可由靜電學中的量規定的時候，纔算證明了兩種電是一樣的。不惟電勢有差異，並且當電勢的差異及其他種種屬於靜電的量相同的時候，所發生的熱，所施於磁針上的力，等等，也都相同；由這些事實可斷定弗打的電和摩擦的電是相同的。

和用同一的方法精確計量水滴的直徑和地球的直徑一樣。但是這困難的點已經克服了，由實驗的結果完全得到「弗打的電和摩擦的電相同。」發生於導線中的熱量可由兩個靜電學的量的乘積完全規定，這兩個靜電學的量一個是由一板至他板已經流過的電量，一個是導線兩端間的電勢的差；作用於磁針上的力的大小可由電經過導線的速度完全規定；所溶解的鋅的量或所發生的氫的量可由經過導線的總電量完全規定。發見了這些事情以後，不是以前，我們用弗打式電池的性質去計量靜電學的電量，是可以辦得到的了。例如電經過導線的速度——叫做「經過導線的電流」——現在可以由觀察施於磁針上的力來規定；實用上，這樣法子已經通行了。

21 兩種電相同的結果

弗打式電池的學說證明摩擦的電和弗打的電相同。由這學說可以得兩種特殊的結論。這兩種結論要分別注意。因為在絕緣的一系統物體中，例如板

在酸中所成的系統中，電的總量爲常數，所以由一板緣導線流出的電不能盡消滅於他一板上，而存留於他一板上，或是由一種路返回至出發點。由實驗知道，由一板緣導線流出的電，取路於板所浸的液體復返回至出發點；試小心考察這液體，知道他具導線所具的各種特殊性質。

又，以前曾說過，施於磁針上的力，依電由一板至他板經過導線的速度規定，依導線的形狀和其對於磁針的位置規定。但是我們能設不用導線連板，而將電由一板傳至他一板；試取一組物體，使之接觸一板，而後移之至他一板，也能設將電由一板傳至他一板。若是這些物體小，若是他們由一板至他一板所行的路無論什麼地方都和以前導線所佔的地方相符合，若是在一段時間內這些物體受於一板而授於他一板的電量等於在相同的時間內經過導線的電量，那麼，這些移動的物體，就電循已定之路流動來說，恰和導線相類。若是摩擦的電和弗打的電相同的學說是對的，則這些移動的物體必定恰好以其所

代替的導線所施的精確相同的力施於磁針上；否則施於磁針上的力將要用靜電學的量以外的量規定，而弗打的電和摩擦的電將要「不是一種東西」了。事實上，精確的實驗已經證明這兩種傳播電的法子相同；這個斷語，對於電的學說的現代的發展，極爲重要。

有一個問題還不曾討論過，這個問題讀者或許曾覺着過困難；摩擦的電讓我們承認有兩種「流體」，而我們討論摩擦的電和弗打的電相同的時候，並沒有參照這個事實。弗打的電和那一種「流體」相同呢？直至現在，我們所討論的現象不能彀使我們回答這個問題。試用導線將帶陽電的物體甲和帶陰電的物體乙連結起來，電的流動還是陽電由甲流至乙呢，還是陰電由乙流至甲呢，還是兩種都有呢？這樣的問法沒有意義；因爲「電的流動」這句話，必須先承認電的學說，然後纔有意義，而以前所述的電的學說確確實實的告訴我們這兩種流動不能彀分別，並且告訴我們沒有一種現象是發生於陽電的

遺失而不是發生於陰電的獲得的。學說確實提議這樣的現象可以發見出來；但是這樣的現象雖是現代學說的根基，然而不在本書所討論的範圍以內。

22 安培的學說

第56頁中所述的定律包括不了由電流的經過所生的種種效應。每一條定律都很深的研究過，其結果現在都和我們無關；惟有一條我們將要細細的討論。導線發熱這一件事情於工業上最爲要緊；但是導線發熱的研究，在現代的觀念發展出來以前，不曾引導出學說上隨便什麼有興趣的結果來。鋅的溶解和氫的發生等化學變化的研究，造成一種新的科學，這新科學對於化學和物理學都發生影響不小，但是這些事情也是在本書的範圍以外。然而，我們若是再往下寫下去，我們不得不更往深裏研究電流在磁針上的效應。

磁針的偏向自然不只由於經過導線的電流，取另一塊磁石置在他的近旁他也偏向。安培考察磁針的偏向，導線路的形狀，和流於導線路中的電流的

大小三者間的關係定出來了好幾條定則。用這定則就在磁針上的作用說，和已定的電路相當的磁石的形狀可以規定出來；他求得磁石的形狀完全由電路的形狀和流於其中的電流的大小規定。今若有兩個電路，就他們在磁針上的作用說，和兩個磁石相當，那麼，由比喻可以知道，就他們的互相作用來說，他們也應當和這兩個磁石相當，並且他們以力交相作用，也和兩個磁石一樣。事實上，就各種作用說，隨便什麼電流的路都可以完全用一塊適宜的磁石代替，或隨便什麼磁石都可以完全用一條適宜的電流的路代替。爲學物理學的學生編的教科書中，大部分都是討論安培的定則，並且討論如何應用這些定則來規定磁石和電流路間或兩電流路間相施的力。這種規定，在工業上和理論上，都很要緊。

23 能的道理

現在讓我們在另一方面觀察觀察這件事情。當導線的兩端連接電池的

兩板而有電流流動於導線中的時候，旁邊的磁石打算移動。那麼，我們要問有什麼「逆的」作用沒有呢？即，當有一塊磁石在導線附近移動的時候，有電流在導線中發生沒有呢？要懂「逆的」作用的意義，要懂因為什麼他有發生的希望，我們必定要極簡陋的說說一些「能」的道理。

當我們考察隨便怎樣一組物體的變更的時候，通常都看見若其中的一件有變更，則其他一件也隨着有變更。在前邊所討論的例子中，電池中的鋅不變更，磁石的位置也不變更；磁石的位置不變更，電池中的鋅也不變更。每一種這樣相關的變更，經過正當的考察之後，都能覈用來規定各種可以計量的大小；在這些大小中，一個的值不變，其他的值也不變。我們容易按照着一種情形規定這各種大小，這種情形是當由這些變更中的一種所規定的量的大小增加的時候，由其他的變更所規定的量的大小減少。更有一個重要的點是，我們通常能覈由這樣的相關的量中找出一對量來，由其中的一種量的變更所規

定的量的增加等於由其他一種量的變更所規定的量的減少。這樣的量，若是能覓求出來，都叫做「能」；由規定「能」的定義的法子，立刻可以知道全系統的物體的能的各種量的和永久相同，因為一物體的能增加的時候，必有他一物體的能隨着減少的緣故。我們常常說「能不會創生，也不會消滅」這句話是表示一種真理；總而言之，我們要知道，有許多量叫做「能」，我們要牢牢的記着。

但若有「能」那樣的量，我們立刻可以明白，當這些相關聯的變更中的一個顛倒方向的時候，必有其他一個也顛倒方向；因為若是一方向的變更使由這變更所規定的量增加，則逆方向的變更使這量減少。物理學家的基本信仰之一，為能覓用能的種種性質去規定一種量的定義；因為這是他的基本信仰，所以他必定希望在各種例子中求出「逆的」變更來。設一物體中由甲至乙的變更引起其他一物體中由丙至丁的變更，他便希望求出若在適宜狀況

之下(二)他將第二個物體由丁的狀態變回至丙的狀態，同時他也將第一個物體由乙的狀態變回至甲的狀態。

24 電流的誘導

在本題所討論的事情中，這適宜的狀況容易求出來，其結果和我們討論能的時候所預料的一樣。試取一導線套，在其一點的近旁置一自由懸掛着的磁針，使磁針的軸在該點和導線平行。今將導線套割斷，把他的兩端連於弗打式電池的兩板；這時候有電流經過導線，並且磁針自己使自己的軸和導線垂直。然後使導線兩端和電池的兩板斷開，而將兩端再互相連接。我們由這事情發見兩種變更；第一，有電流經過導線，第二，磁針變更他的位置。能的道理使我

(一)「在適宜狀況之下」這句話非常重要；因為容易發現——通常誠然一定發現——第二件物體由丁至丙的逆變更引起第三件物體的状态變更，而這第三件物體於其他物體由甲變到乙和由丙變到丁的時候不會變更過，在這樣的情形中，能的道理不引導我們希望由丁到丙的逆變更引起由乙到甲的逆變更，因為第三件物體中的能的變更也須計算在內的緣故。但是若能發選擇出適宜的狀況來，使由丁到丙的變更只引起第一件物體的變更，而不引起其他物體的變更，那麼第二件物體由丁變到丙的時候，必定引起第一件物體的由乙到甲。

們想像，在適宜狀況之下，若是使磁針恢復其原位置，將有一電流在和以前相逆的方向內流動。適宜的狀況容易得到；我們只用手將磁針轉動，即可察見有電流實在以逆方向流動於導線之中。這樣普通的狀況不容易使我們於磁針移動的時候，預測流經於導線中的電流的真確稟性，但是若再更精密的考查考查電流在磁針上的作用，我們便能彀預測。磁針的位置的已定的變更，使已定的電量繞經導線之路；電流的大小和流動的時間，依導線的稟性和其他的事情規定，但是只若磁針移動的位置和導線的位置前後相同，則繞經導線路的電量也前後相同。若磁石只由一位置移至他一位置便停止，則電流不久也便停止；若欲電流繼續不停，必須保持磁石的適宜運動。

這便是我們所希望的「逆的」變更。這種變更在工業上極為要緊，發電機不過是藉導線路和近旁的運動着的磁石以保持連續不斷的電流。但是這種作用的其他情況更使我們有興趣。

有一種問題可以問出來。這作用是依磁針的實在的運動規定呢，還是因為磁針的運動將其施於導線中的電流所表的磁石上的力改變了，所以纔生這作用呢？欲回答這個問題，可用等於磁針的電流路代替磁針；既用電流路代替磁針，所以我們能穀變更由這電流路磁石所施於導線套上的力，其變更之法，或為移動電流路，或為變更流於其中的電流強度，均可。我們所求得的結果恰為我們所希望的結果，隨便那一種手續都使一暫時的電流發生於導線套之中；再作進一步的討論，能穀使我們斷定由暫時電流所攜帶繞行於導線套中的電量只由磁石施於導線套上的磁力的變更來規定，至於這磁力的變更如何得來，則完全沒有關係。

25 電惰性

由以上所討論的，我們得到一個著名的結果：變更流於鄰近電路中的電流，可使一電路中有電流流動。這個作用的專門名詞叫做「電流的誘導。」現

在更有一個問題立刻自己發現出來：若是一電路中電流的變更引起鄰近電路中電流的變更，他不也可以引起自己電路中電流的變更麼？電路中電流的變更應當引起電流於自己的電路中這種提議，似乎是難的提議，並且幾乎沒有意義，但是我們若記得電流中的變更的效應只可希望發生暫時的電流，而使定量的電繞經於電路之中，則這個提議便不沒有意義了。所提議的現象是只於變更後一短時間內影響於電路中的電流。試更小心注意，更知道若是任何電路中電流的變更誘起變更於自己的電路中，且所誘起的變更和誘起於其他電路中的稟性相同，則可求出電路的狀況的任何變更都打算引起其中的電流的變更；例如割斷導線是電路的一種變更，這種變更終必使電流停止。但是所引起的電流變更不立刻表現出來，而必有一段時間容許所誘起的電量繞經電路，在這一段時間之內電流漸漸變更，由適宜於舊的狀況漸漸變為適宜於新的狀況。這種效應由觀察便可知道。假設我們突然使導線和電池的

板斷開而將導線的兩端連結，我們可以察知在一段時間之後沒有任何的電流流動於導線之中。但是若在斷開後一段甚短的時間之內考察考察，我們可以知道電流不突然停止，而漸漸消滅以至於無，所經過的時間的長短依導線的形狀，材料，等等而定。

我們所述的電的學說便提議有這樣的現象存在，而不必再特別的去參考磁的現象或能的道理；我們曾用流體的比喻解釋過幾條定律，無論所解釋的定律的稟性是什麼，只由這事實便可知道我們的電的學說提議有這樣的現象存在。因爲，我們曾將導線連接電池的板時所起的作用比作由唧筒唧水流於閉合的水道中的作用，連於水道上之一點的唧筒和電池相當；今若唧筒停止，水流不突然停止，而漸漸消滅以至於無。

我們描寫水的這種性質所用的話，是說水有惰性，並且用惰性來規定水的一種最要緊的量叫做「質量」的定義。由這比喻可以想到，當將電池移去

了的時候，電的流動應當慢慢的消滅，而不突然減小；果然，這種提議我們已經曉得是對的了。以前我們說過，解釋關於學說的意義的時候，有必須戒着的一些事情，若是牢記着這些事情，則上邊所說的結果可以用以下的話表示：我們已經求出來電有惰性。並且我們可以想法子去規定叫做「電的質量」的這個量。

不幸，我們雖然在這一方面努力，但是尙未完全成功。我們不能殼像水那樣去規定這種量，說他只依流於電路中的電量規定，而與別的量無關；我們能殼規定一種有幾件重要點和水的質量相類的量的定義，但是這量依電路的形狀而定，又依和其他電路的關係而定，這是和水的質量不同的地方。電流所具的惰性的觀念極爲重要，更進而發展電的學說的時候，用他的幫助的地方極多。

26 結論

我們可用這個結論作爲考查「電的流體學說」的終結。我們已經求得以前所述的定律可用二流體的作用來解釋，至少也可用二流體的作用來解釋他們的一般的種種要點。二流體有兩組分明的性質。第一組的性質爲解釋靜電學所必須的，第二組的性質爲解釋「電磁學」所必須的，所謂電磁學就是方纔所說的這一枝派的題目的名稱。我們已經知道，當我們討論每一條新鮮定律的時候，學說所根據而成立的比喻所提議的事情，通常都幫助我們想像出一種新性質來加給這流體，以使用之把定律解釋出來；但是同時我們曾說過，凡是比喻所提議的事情都不正確，若是一味盲從這些提議而不用實驗去試驗，殊爲危險。

這學說現在算完全了；沒有其他有用的性質能加給這流體，以幫助學說去解釋其他的定律了，凡是加出來的性質都是和以前所加給的性質相矛盾的。電的學說現今有新的發展，這新的發展將流體學說中的諸點保留一部

分而將其餘的都剔去。但是這本小書裏不去討論他。現在我們可以把流體學說丟下，而討論完全和流體學說的稟性不同的學說；這個學說原來本是打算代替流體學說的，但是以後竟和他結合了一個學說。這個學說在過去的幾年中使我們有顯著的進步。這個學說叫做法拉對的學說。

第四章 法拉對的學說

27 「間隔作用」和「媒介作用」

我們有時說法拉對的學說和流體學說相反對；我們說法拉對的學說是「媒介作用」的學說，流體學說是「間隔作用」的學說。這兩句話曾引起了無終了的討論；哲學家，專門家，和賞玩技藝的人們曾以純粹空想的理由希望這一種學說比那一種好。但是試一考察學說的命意，便當擯斥這樣和科學相違背的議論；若是這一種學說比那一種好，必定是那一種學說所不能彀解釋的定律這一種能彀解釋。採取這一種，而拋棄那一種，必須以實驗為根據。然而，在隨便怎樣一個特别的例子中，能彀判斷這兩種學說所用的實驗是具什麼稟性的實驗呢？我們試舉出一個例子來看看。

宇宙引力的作用是「間隔作用」，而火車頭施於列車上的作用是「媒

介作用」是人人所都許可的。略一思索，便知道其間的區別由於下列的事實。物體甲施於物體乙上的宇宙引力作用只依這兩物體的性質和他們的位置規定，而與第三物體的性質無關，並且與在甲和乙間的物體的性質無關。至於火車頭施於列車上的作用卻不惟依火車頭和列車的性質規定，並且依介於其間的物體的性質規定；若將中間連絡的東西拿去，二者之間便沒有作用了。「間隔作用」的學說以爲兩物體間的作用與一第三件物體的性質無關，而「媒介作用」的學說卻以爲兩物體間的作用依介於兩作用物體間的物體的性質規定。

28 法拉對的發見

在電的流體學說確定以前，宇宙引力的學說已經發展得很好了。兩帶電的物體間的力和其間的距離的關係，和兩物體間的宇宙引力和其間的距離的關係甚爲相似；我們既已曉得了這個相似點，我們自然打算使電的作用和

宇宙引力的作用處處相似。尤其是不經試驗便假定，只若兩帶電物體間的媒介物不傳電而不使兩電量互相中和，則兩帶電物體間的電的作用和隔離他們的媒介物的稟性無關。法拉對似乎是把這個假定當成一個問題的第一個人，並且更很考慮的作這種實驗。他取了兩個帶電的物體，先用空氣隔離他們，考察其間的力，然後又用硫黃或其他不導體隔離他們，考察其間的力。他求得當有硫黃存在的時候其間的作用改變，他由此斷定電的作用不是一間隔作用。

他若斷定他的發見和電的流體學說不相一致，他的斷語便錯了。互相抵觸的學說，一次實驗即斷定誰是誰非，除非完全不懂科學的哲學家只賴理想所作的神話，不會這樣。差不多隨便什麼樣的實驗結果和隨便什麼樣的學說，若作許多充分的假定來幫助，都能彀使兩造互相一致；不過惟一的問題是做這些假定是否有價值。在現在我們眼前的例子之中，使法拉對的結果和流體

學說二者間互相一致所必須做的假定極爲簡單明白，差不多沒有人不懂得。解釋帶電的物體吸引不帶電的物體的時候，我們的學說假定不帶電的物體中相反的兩種電在帶電的物體勢力之下分解爲兩部分。那麼，若是將一塊硫黃放在兩帶電物體甲和乙中間，硫黃中的電的分布便要變更。硫黃未在這地方以前，作用於乙上的惟一的力是由甲來的；當硫黃在這個地方的時候，硫黃中的電已被分開而不互相中和，於是作用於乙上的力，除去由甲來的外，還須加上由硫黃中的兩種電來的力。硫黃和空氣不同，可視爲由於這兩種物質中所含的電量不同的緣故，亦可視爲由於外界的電將這兩種物體上的電分開有難有易的緣故。事實上，這種解釋可以證明爲完全適當；關於硫黃中和空氣中的電，我們若作種種適宜的假定，則凡由這兩種物質中的一種代替他一種所得的效應，都可藉此假定由電的流體學說推演出來；電的流體學說以爲兩電量間的力只由兩電量的大小和其間的距離規定。

29 法拉對的學說

惟獨討論這樣的事情的時候，最要緊的是要牢記着學說的美的方面和論理學的方面。假設物理學的大才子法拉對要擁護電的流體學說，他應當最先明白上節所曾指示出來的解釋的可能性。但是他不要擁護他。那個學說永久不滿意他的美的知覺，而他所發見的種種事實使他決意去尋求另一個學說，並且指示給他在什麼地方去尋求。他想他應當尋求出一個比喻來，來比帶電的物體和不帶電的物體的異點，這個異點並不是在不帶電的物體上加上一種特殊的物質，乃是由於環繞物體的媒介物的性質的變更。

他所採取的比喻是由磁石附近的鐵屑所取的样子想起來的。試將一張紙片水平置於棒磁石的上方，將鐵屑散布於紙片之上，鐵屑乃自己排成一組曲線，由磁石的一端達於他端；若將一塊磁石的兩端代以兩塊磁石的兩相似極，（這樣的兩極自然互相排斥），鐵屑還是自己排成曲線，但這曲線始於這兩

極中的一極的不終於他一極，並且由這一極所發出來的曲線不和由他一極所發出來的曲線相交叉。磁石的兩極間的吸引力和排斥力的定律和兩電量間的吸引力和排斥力的定律相同，所以把實驗略改一改，以紅鉛和硫黃的混合物代替鐵屑，即可得類似的線伸張於兩個電量間的地方。試用一件小帶電物體置在一條線上的任一點上，這小帶電物體便連續緣着這一條線行走，永不離開他，一直等到行到其他一個電量或後退到很遠的距離然後停止；線的形狀即由此情形規定。

法拉對看了兩相吸引的極的圖形，乃以為屑所成的線可用有收縮性的彈性線來代替，這些線由收縮的傾向將兩極拉在一起；法拉對由這種設想來解釋極的吸引力。因為要解釋線的彎曲形狀，所以他不得不更設想每一條線在自己的長的方向內收縮的時候，同時排斥其鄰線；各線互相排斥的性質又可用來解釋同類的極互相排斥的力。這個觀念是法拉對的學說的根基。他設

想電的吸引力和排斥力係由於有這些線存在的緣故，這些線他叫做「力線」，帶電的物體是這些線的端所終止的物體，帶相反的電的物體是這些線的兩端所止終的物體。帶電的物體和不帶電的物體的不同，按照着這學說來講，不是因為這些物體自己不同，乃是因為是否有這些力線將這物體和其他的物體連結的緣故。由此看來，「間隔作用」的學說被「媒介作用」的學說代替了。

30 「力線」的性質

這個學說可按照着舊的學說的路線去發展。第一步是按照着學說所提議的情形去規定可計量的量。以前的學說以為「電量」或「電壓力」應當可以計量，法拉對的學說以為「力線的數」和「力線所施的張力或壓力」可以計量，這些量的定義已經適宜的規定出來了。因為這兩組的量的定義是參照着同樣的觀察規定出來的，自然這兩組中間必定有一種連絡。事實上我

們求得「力線的數」和「電量」成正比例，然而「力線的張力」和「電勢」間的關係卻甚複雜。這學說提議隨便緣那一條力線的張力都應當和其餘的力線的存在無關，而依力線的長規定；不幸，這個提議錯了（和關於電的質量的提議一樣）緣力線的張力，和力線的長無關，而與鄰近的其他力線的數有關。

有一件事要注意。若是採用了這個新學說，則「電是什麼？」這個問題實在不能駁回答，因為這個學說不用電的觀念的緣故。「電是什麼？」這個問題所希望的回答是：——電是一種物質，當有這種物質加在物體上的時候，我們便說這件物體「帶電」。然而這新學說否認這個說法。信仰地是平的人不能駁告訴我們地的曲度半徑；希望法拉對回答「電是什麼？」這個問題，和希望信仰地是平的人告訴我們地的曲度半徑，同樣沒有道理。

所以，法拉對的學說是用連結兩個帶電物體的力線的張力和壓力來解

釋帶電物體的吸引力。物體間的媒介物的稟性有變更，這些力也有變更，是由於假定這些線的性質隨所經過的物質而改變的緣故。力線的張力隨着所經過的不導體的稟性而變更；張力在硫黃中小於在空氣中，就是一例。在導體中，力線完全不能殼存在；力線的端在導體裏頭能殼自由移動，而在不導體裏頭是固定不動的；照此說來，因為力線有張力，所以力線的端互相接近，力線收縮而消滅。

31 法拉對的學說和電磁學

力線收縮的這個程序和他們終究消滅於導體中的事情，在舊學說中叫做電流在導體中經過；照此說來，導線的發熱和磁針的偏向，必須和這個程序偕同發生。在力線消滅的程序中，因為鄰近的力線行至導體則消滅，消滅則壓力免除，所以原來在導體以外的力線以和自己成直角的方向移動。試在種種狀況之下討論磁效應的量，知道在有些狀況之中，力線消滅的時候不在和自

已成直角的方向內移動，而在其他的狀況之中確在和自己成直角的方向內移動。由這種討論知道，惟當力線在和自己成直角的方向內移動的時候，其所掃過的磁針方纔偏向；若力線的端互相接近的時候，除在其長之方向內移動之外，力線全個沒有運動，則磁效應不會發生。要知道，以前舉過一個事實，說力線的張力不視其長的變更而變更。方纔這個結論也可以根據着這個事實，由「能」的討論，推演出來。因為張力沒有變更，可知「能」沒有變更，「能」既沒有變更，磁針依仗着什麼運動呢！

所以，以前以為磁效應是由於電流的流動，現在卻必須以為磁效應是由於力線在與長成直角的方向內的移動。有一種理由，從前他引導我們設想電有惰性，現在他卻強迫我們設想力線在與自己成直角的方向內移動的時候纔有惰性，但是力線緣其自己的長移動的時候沒有惰性。這個結論極為重要，不久就可知道。

32 「能媒」

現在我們要注意關於種種問題的一件較難的事情了。這件事情的討論已經引起了沒有終了的混亂。前邊曾說過，力線的性質必定要推想爲依其所經過的物質的稟性規定。這個事實使我們想像力線是由他所經過的那種物質做成的，做成的法子差不多和水波由水做成的那樣；若是不然，怎麼物質一變更，力線的性質便隨着變更呢？但是電的吸引力，就是兩相吸引的物體間沒有物質的時候也有；就是說，就是把兩相吸引的物體擱放在我們所能殼做出來的真空中，兩物體也有吸引力。在這樣的情形之中，做成力線的是什麼物質呢？自然隨便什麼人都預備下回答的話了。他們將要說力線是由「能媒做成的，能媒是充滿着太空的東西，光的傳播便是經過這東西。」這個回答是法拉對所應當給我們的回答，也是現在最要緊的回答；這個回答似乎替我們預備出一個新理由來，使我們推想引導出能媒的觀念來的光的學說有價值。現在

我要請讀者回想從前所說關於「電是物質」的話，因為我恐怕你們不由正當的思想和理解便以為能媒是物質。「能媒」和「電」都是學說的觀念，不是定律的觀念。

讓我們稍為密切一點考察考察這件事情。若是經過硫黃的力線是硫黃做成的，我們應當想到當硫黃移動的時候力線也移動。若是力線移動而他們的兩端固定不動，這力線施於他們的端所附着的物體上的合力不是變更大小就是變更方向；若是這些力線都拉到一邊，則施於兩物體上的力也要跑到這一邊來。那麼，我們應當想到，若是將兩件物體擱在一塊大硫黃板中，使兩物體的周圍和中間都有硫黃圍繞，先使兩物體帶電，然後使硫黃板向一邊移動，而使物體不動，那麼，施於物體上的力的方向也應當隨着變更。但是實驗表示無論硫黃板怎樣移動，（假定硫黃板甚大，沒有力線可以出他的範圍，）力線的方向都沒有變更，所以我們必須斷定力線未曾隨着硫黃移動，而停止於其

原來所在的地方。

我們可以這樣設想，以免去這個難點：力線雖然是由硫黃做成的，但是不是永久由同一塊的硫黃做成的，恰若水波是由水做成的而不是由同一塊的水做成的那樣；所以硫黃雖然移動，而力線不隨着他移動。但是這個觀念也證明是不可能的。因為還有一個法子試驗力線是否移動。我們已經明白力線在和他們自己成直角的方向移動的時候使磁石偏向。若是硫黃移動的時候力線不移動，那麼，當硫黃移動的時候應當磁石不發生偏向。但是精緻的實驗已經指示當硫黃移動的時候，有磁力發生，就是力線的端所站立的帶電物體不動也有磁力發生。對於簡單吸引力所做的各個實驗都似乎表示力線不和硫黃共同移動，而對於磁力所做的各個實驗卻都表示力線和硫黃共同移動。

要解決這個矛盾的點，這學說必須略改一改，我們必須略回顧一回電的流體學說。電的流體學說假定帶電的物體將硫黃中的相反的兩種電分開。

若是已經知道硫黃對於吸引力發生效應，其上的電必定已經分開了。但是依照着法拉對的學說來講，電的分開的意思是有連接他們的力線發生。所以照此說來，我們可以假定連接外方的帶電物體而經過硫黃的力線使硫黃中發生新的力線。因為力線的張力依鄰近的力線數規定，所以新的力線要改變緣原來的力線的張力，既改變緣原來的力線的張力，所以改變外方的兩帶電物體間的吸引力。當硫黃移動的時候，新的力線隨着他移動，所以使磁力發生，但是因為他們移去了的時候尚有其他的力線發生出來，所以屬於外方的帶電物體的力線的張力沒有變更。用這個法子，我們能彀解釋因為什麼硫黃中的力線似乎隨着硫黃移動而原來的力線的性質不變。

就這一方面觀察，用不着假定經過硫黃的力線是「硫黃做成的」，用不着設想他們是隨便什麼東西做成的。由外方的帶電物體所來的力線，無論經過什麼物質，都是相同的。經過硫黃的力線和經過空氣的力線所顯露出來的

不同，不是由於力線的性質有變更，乃是由於鄰近附帶發生出來的力線的數目不同的緣故。惟有我們能設想力線是各種東西做成的時候，我們說力線是隨便什麼一種東西做成的纔最爲明白；不過是因爲明白，所以纔說力線是一種東西做成的。其實力線就是力線，他們的存在和他們周圍的物體無關；力線的解釋不過是這樣就算完了。

但若經過硫黃的力線不是硫黃做成的，則力線經過真空的時候，用不着設想真空中充滿着可以做成力線的物質了；換句話說，我們的電的學說完全不需要能媒這個觀念，我們用能媒這個觀念，不過是在幫助能媒觀念的成立，我們的電的學說所需要的不過是力線的觀念；沒有力線的地方，完全用不着有什麼東西存在。我們用不着設想帶電的物體所來到的鄰地方有可以做成力線的物質存在，因爲帶電的物體有他們自己的力線跟隨着他們，這力線是已經做好的，並且是不改變的。

所有的這些議論似乎過於精細，似乎非所必須，但是的確確極爲要緊。因爲，我們若設想經過硫黃的力線是硫黃做成的，經過能媒的力線是能媒做成的，那麼，既是移動硫黃而不移動帶電物體會發生磁力，移動能媒也應當會發生磁力。「移動能媒」的意思不易明瞭，但是二三十年以前的物理學家會費過許多的力氣，想作種種的實驗，使能媒可以對於帶電物體作相對的運動；當他們求出來實驗的結果表示沒有磁力發生的時候，他們極爲驚訝，並且作種種精緻的假定來辯明他們的失敗。但是現在我們明白他們所從事於工作的比喻絕對錯誤；(二)移動硫黃發生磁力，是因爲硫黃中附帶發生的力線移動的緣故。在真空中沒有這樣的力線，因爲在真空中沒有可分開的電，並且由此處所給的議論所行的實驗沒有一種可以希望發生磁力的緣故。這比喻所根

(一)自然我不是說用錯誤的比喻是表示應用的人的弱點。我從前曾說過，在科學中，事情過了以後，極易明白；沒有人剛纔有了議論，便明白這議論。必須等到這議論所引導出來的結果知道了以後纔能數明白這議論。

據的，完全是以爲法拉對的學說遍地需要能媒；但是能媒不是必須的；所必須的東西是力線，力線不是由其所經過的媒介物做成的。

33 電學和光學

但是光怎麼樣呢？能媒的觀念最初先需要於光學中；若是對於光學現象我們保留着能媒的觀念，對於電學現象我們又拋棄了他，那麼，當我們想能媒對於電的現象和光的現象都是必須的時候，我們當然永久不能想到這兩支派的科學應當有一種連絡的希望。對於光的現象，我們能毅然拋棄能媒而用力線的觀念來解釋麼？我們能毅然用力線所具的性質來解釋光的現象，恰像我們用電的流體的性質來解釋電流的現象的法子那樣。成就這個解釋的學說是有名的「光的電磁學說」，是麥克司威爾依據着法拉對的觀念發展出來的。一直說到現在，我們還沒有看見法拉對的學說比舊學說有什麼多大好處；果真，我們不得不改變法拉對的學說，使他和舊的學說更相一致；

畢竟，我們不得不把拋棄在第81頁中的意見再引用來。但是到底這新學說的種種真實提議永遠未曾由舊的學說得到過，這是他的特出之點。

讓我們暫時討論怎麼樣能覈有光的電學說。驟然一看，似乎光的現象和電的現象間沒有連絡，似乎我們看見色和形狀這個事實和兩塊摩擦過的玻璃互相吸引這個事實間沒有連絡，因為這兩種敘述中的觀念極為不同的緣故。但是必須牢記在心裏，我們不是求這兩組現象的**定律**間的連絡，乃是求解釋這定律用的學說間的連絡。學說貢獻許多的機會使完全不相同的定律間有了連絡，學說的大半的價值就在於此；雖然兩條定律不包含着公有的條件，但是解釋他們用的學說可以包含着公有的條件，由這公有的條件可以做成所欲的連絡。因欲使這事成功，我們第一步的責任在考察光的學說和電的學說，希望求出充分的公共觀念來，使這問題可以解決。

光的學說，和其他的物理學的學說一樣，也是本着比喻得來的。最早的要

緊的學說是牛頓的學說，是根據着物質的傳遞的比喻得來的，和最初的電的學說一樣；我們所說的看見光，是我們眼裏的一種變化，這種變化牛頓假定爲由於有一種物質由發光體傳遞到我們的眼裏。這個學說已經證明出來不圓滿；他所提議的許多定律都已經證明出來是錯誤的，而真實的很少。這個學說已經完全由海互史氏，楊氏，富雷聶氏等人的學說代替了，這後一個學說是根據着波的比喻得來的。

波是時間中的和空間中的周期變更；換句話說，若是我們注視一定的地方，可以看見有一組有規則的變更按照着有規則的一段一段的時間反來復去的表現，若是我們注視全空間，可以看見有一組有規則的變更按照着有規則的一段一段的空間反來復去的表現。波的最常見的樣子是海裏的波，或是投一塊石頭到靜水裏所生的波。隨便怎樣一系統簡單的波，都可以用三個可計量的量表示他的性質：（1）強度，就水的比喻說，用由陵至谷的高表示；（2）

周數，用在已定時間內經過一定點的陵的數目計量（3）速度，等於在單位時間內已定的一個陵所經過的距離。

光的波動學說以爲光是由這樣波組成的；這學說假定用波的強度規定光的亮度，用波的周數規定光的顏色，用波的速度規定光所經行的路線。若是和從前一樣，用一段斷言和一段辭典來表示學說，我們可以作以下的敘述：

斷言。——光由波的擾亂組成，行經於透明媒介物中；已定的擾亂的周數在其全路程中保持不變；波的速度依媒介物而周數規定；在媒介物甲中，周數爲 b 的擾亂以速度 c 進行（此處的甲， b ， c 都有已定的意思）；在媒介物乙中，周數爲 d 的擾亂以速度 e 進行，照這樣，各種媒介物中對於各種波長的各種速度都一一枚舉出來。

辭典。——當我們說光的擾亂達到眼所占的空間的時候，我們的意思是說我們看見光。當我們說擾亂的周數爲 b 的時候，我們的意思是說我們看見

顏色 B ，當我們說擾亂的周數爲 d 的時候，我們的意思是說我們看見顏色 D ，依此類推。

由這斷言和辭典，定律能彀推演出來，並且能彀和實驗比較；所得的結果差不多通通滿意。光的波動學說大概比物理學中隨便那一個其餘的學說都圓滿。

那麼，光的學說中的基本觀念是波的觀念了；我們若必定要光的電學說，我們必須證明這個觀念可以應用到電的學說裏去。這個觀念驟然一看好像很明顯的可以應用到流體學說裏去，因爲流體學說裏有一種似水的物質，波可以經這物質傳播的緣故。但是不幸這個學說沒有理由使我們假定在沒有帶電的物體的地方或在沒有可以帶電的物體的地方有電來攜帶波；在真空中沒有電來攜帶波，但是波可以經過真空。電的流體學說所以不能彀和光的學說融和，正是因爲這流體學說把真空當作絕對沒有東西的地方的緣故。

在別一方面去想，法拉對的學說不把真空當作絕對的沒有東西，而以爲真空中有力線。但是這些力線能穀傳播波麼？他們一定能穀，不過這樣的波可以和水波很不一樣罷了。力線我們曾設想爲好像緊張的繩子，緣着他們的長有張力，並且當他們在和他們自己的長成直角的方向內移動的時候，他們有惰性；就和他們的長成直角的方向運動來說，他們恰（一）像緊張在固定的柱子和手間的繩子。

（一）「恰」字用在這個地方，可以說是正當，也可以說是不正當。有幾件事情由繩子和力線間的比喻可以提議出來，但是對於這幾件事情現在還沒有實驗上的證據可以舉示。例如，繩子都是完全分離的，緣着某一條繩子出發的擾亂只緣着那條繩子向外行，而不發起擾亂於其他的方向之內。在光的情形中，「每一條繩子都是分離的」這個觀念大概不得不拋棄，在隨便那一點發出去的擾亂都沒有差異的向各方向行去；事實上，由一點發出去的擾亂的進行法子的較好的比喻，是投石於水中所引起來的波，不是搖繩子的一端所引起來的波。但是這件事情不參考最近的辯論問題不能穀十分討論。

若是使持繩子的手在和繩子的長成直角的方向迅速移動，很容易看見有波緣着繩子向外走。我們所加給力線的性質使我們斷定波可以緣着力線進行；但是這波和光的波相同麼？

我們只加給了波三種性質，(1)強度，(2)周數，(3)速度；若是對於緣力線的波所計算出來的這三種量間的關係，隨便在什麼情形中都由實驗求出來的光波相同，那麼，這兩者相同便沒有問題。緣着力線進行的波的速度由力線的張力和惰性規定，和在繩子的情形中一樣。張力和惰性這兩種量都視力線所佔據的媒介物而不同；張力可由觀察擺放在媒介物中的兩物體間的引力計算出來，惰性可於繩子放在媒介物中的時候由觀察第75頁所述的現象規定出來，所以對於無論什麼媒介物，速度都可以規定出來。

試將這樣所得的預料和實驗比較，我們求得在有的情形中相符，在其他的情形中不相符。在真空中，在空氣或其他的氣體中，緣力線進行的波的速度

和光的速度精確相同。另一方面，在最透明的媒介物中，光波的速度依周數而變更得很厲害，而我們的學說預料隨便什麼周數的波都以同樣的速度進行；在這樣的媒介物中，惟有周數很小的時候，學說所預料的纔和實驗相符。這件事情的更深的討論，和證明怎樣由科學的更深的發展不惟將這個不符的點已經除去，並且還做成了我們幾種所尋求的事情的工具，都不在此書的範圍之內。

不消說，這個不符的點已經除去了，光的電磁學說現在都承認是光的各種學說的堅固根基了。差不多上一代中的理論光學的進步，都是直接由這個學說的提議得來的。

第五章 麥克司威爾的學說

35 歷史上的討論

假設我們的惟一的目的只在解釋流行的電的學說的稟性，那麼，於根據法拉對的觀念所成的學說之外，用不着再加說別的了。但是不能說完全不顧，並且也不願意完全不顧，科學的發展的歷史。若以為以前所描寫的思想的路線就可以引我們到光的電磁學說上去，那便走錯了路了。若是不參考學說所實在藉以獲得的法子，必至於忽略研究物理學所用的最要緊的工具中的一個工具。

法拉對自己只略描寫以前所說的他的學說的大綱；他只普通的說電的作用或磁的作用能穀用靜止着的或運動着的力線的作用來解釋。他不是數學家，他沒有打算把我們的討論中所常常用的量加入他的學說裏去。自然他

承認緣着力線的長有張力，在和力線成直角的方向內有排斥的力；但是他沒有根據着這些觀念規定過一種量的定義，也沒有打算用他努力代替的舊學說中可計量的量來連絡這些觀念。就是力線必定有惰性這件事情，他似乎也不曾認為是實在的。力線有惰性這個觀念是湯姆孫介紹給我們的。湯姆孫在法拉對的工作五十餘年以後，在光的電磁學說由極不同的理由完成了二十餘年以後，纔緣着前章所說的線索，發展法拉對的觀念。湯姆孫並且告訴我們法拉對的觀念直接引導到麥克司威爾用別的法子所得的結果。

不先規定出緣着力線的張力的定義和力線的惰性的定義來，不能設預料「擾亂」用什麼速度緣着力線傳播。所以光的電磁學說的主要的證明，法拉對完全沒有研究到。但是很奇怪，力線對於擾亂在真空中的傳播可以供給一種法子這個觀念，他從來也沒有想到過；這是很奇怪的，因為法拉對很堅決的想到光的現象和電的現象間可以成就出一種連絡來，他並且消費了許多

的時間在光經過的物質上加上電的和磁的力，想由實驗求出些在光的傳播上的影響來。他畢竟發見了這樣的影響，但是這個發見沒有使他有更進步的發展。誠然，法拉對的學說和光的學說沒有融洽，一直等到電子的學說發見了以後這兩種學說纔融洽了。電的現象和光的現象的公共點，最有力量使我們想這兩種現象間必定有連絡的，是這兩種作用都能殼在真空中傳播；法拉對所以失敗，因為他沒有在這裏尋求連絡的緣故。

所有的重要的結論，到麥克司威爾纔得到了；麥克司威爾的物理學的見識不如法拉對，而數學的才氣卻比他好。麥克司威爾所得着的結論，真的說起來，不過是法拉對的觀念的論理學上的結果，但是他得到這個結論所用的法子卻完全和以上所說的不同。由緣着力線有張力的觀念，由在和力線成直角的方向內有壓力的觀念，他推演出來了許多的量。他是拿具有惰性的系統來比電路的第一個人。但是他雖然是拿具有惰性的系統來比電路的第一個人，

他卻沒有說力線有惰性。他論靜電的現象，和法拉對的觀察點相一致；但是當他討論到電磁現象的時候，他差不多完全改變了安培的法子。引導他發見光的電磁學說所用的學說，固然是受法拉對的工作的影響；但是就論理學的一方面說，卻和他無關。麥克司威爾的學說的稟性和法拉對的學說的稟性絕不相同；法拉對的學說是物理學的學說，麥克司威爾的學說是數學的學說。在此處我們須略停片刻，騰出工夫來簡單的討論討論數學的學說是什麼樣學說。

36 數學的學說

我們已經曉得物理學的學說，就他的情景中的一種來說，是一組提議，由這些提議可以推演出其他提議（定律）來；就論理學的一方面來說，學說的提議不過等於他們所要解釋的定律，但是和那些定律不同的地方在學說能假提議其他的定律。數學的學說，就這些地方看來，很和物理學的學說類似；數學的學說也是由可以推演出定律來的提議組成的，由這些提議又可以推演

出原來製造學說的時候不曾審計過的定律來。物理學的學說和數學的學說的主要異點，在學說所由組成的提議的稟性，又在由這提議所引導出來的觀念。

凡物理學的學說的觀念都是由比喻得來，這比喻的一種機械系統我們由經驗極爲熟悉；而數學的學說的觀念則和純粹數學中所用的觀念的稟性相同。這稟性是什麼，這本小書中沒有工夫去說他，而且對於一般讀者以適宜的情形描寫這種觀念的書又少，實在不幸。但是這些觀念中有一組觀念，叫做有理數，凡是讀過算學的人都曉得，至少也曉得他的一些皮毛。對於這些觀念和純粹數學中的其餘的許多觀念，可以應用加法和減法來處理。但是純粹數學中還有其他的觀念，不只加法或減法可以應用，並且可以應用有理數不能數應用的方法；這些觀念便是數學的一支派叫做微分學的所討論的觀念。今古的數學的區別便是在是否應用微分學。

物理學的學說所引導出來的量的大小類似有理數，可以用類似加法和減法的法子來處理，而不能彀用微分學上的法子來處理。就微分學上的法子的真正稟性來說，量的大小不能彀用知覺——物理學的究極的根基——來規定。所以凡包含着應用微分學的觀念的定律都不能彀敘述。我們若要利用這些法子，我們必定要在我們的科學中加入不能彀用知覺來規定定義的觀念；就是說，這觀念是學說的觀念，不是定律的觀念。

這種觀念是由數學的學說加入的。物理學的定律敘述物理學的量間的關係。例如我們若討論由電流的路所得的磁效應，我們可以用以下的量：電流的強度（ C ）施於一磁石上的力（ H ）和規定磁石對於電流的路的位置所用的種種的長（ L, M, N ，等。）物理學的定律說，當 C 的值為 c ，而 L, M, N 的值為 l, m, n 的時候， H 的值為 h ；此處的 c, l, m, n, h 都是確定的數。數學的學說引導出新的觀念 C', H', L', M', N' 來。這些觀念要用微分學處理。數學的學說並

且告訴我們這些觀念間的其他關係；這些其他的關係必須是用論理學上的理，由以下的敘述能彀推演出來的關係：若是 C' , L' , M' , N' 的值爲 c , l , m , n ，則 H' 的值爲 h 。引導出這個結論的提議就做成了數學的學說。要知道，數學的學說和物理學的學說一樣，也可以分爲斷言和辭典兩部分。斷言是剛纔所說的提議。辭典是如下的一組提議：例如當我們說 C' 的值是 c 的時候，我們的意思是斷定 C 的值是 c 。這些話似乎都是極不必要的複雜，但是我要確確實實的告訴你們，有許多的混亂都是由不曾注意此處所說的這些要點發生出來的。

討論數學的學說構成的方法的時候，我們所遇見的困難，和討論物理學的學說的時候所遇見的困難相類。我們所確實知道的，是由學說推演出來的定律。但是推演出同樣定律的學說多得很。我們怎麼樣去選擇這些所做成的無限數目的學說呢？一種學說一經提出，由這學說不惟可以推演出他發明的

時候所要解釋的定律來，並且可以推演出其他種種的定律來。必須這些新定律和由觀察所得的事實相符，這個學說纔算滿意。這件事情告訴我們試驗所提出的學說的法子，但是對於初次提出學說的時候沒有幫助。

事實上，試考察考察所成功的數學的學說，知道他們和所成功的物理學的學說具有同樣的要點；他們不惟能較解釋舊定律和預料新定律，並且滿足智慧上的美的需要。主要的數學的學說的提議所取的特別樣式，無論在什麼情形中，都是要簡潔；因為這樣式難解釋得很，惟有純粹的數學家纔覺着有意思，其餘的人都莫名其妙。我們更要曉得，幾幾乎有神奇的力量來預料真實的定律的那些提議，也是由聰明人的奇想得來的。使學說有價值的，使真正的科學成立的，便是由於兩種甚相分馳的性質這種常常的結合。

物理學的學說和數學的學說間有一個要緊的不同地方，必須要告訴你們。我們老早曉得，物理學的學說，除去就論理學上說他等於他所解釋的定

律外，就他所提議的事情說也是有用的。由這樣的學說去推演定律，除去他原來所要解釋的定律人人都能彀外，惟獨具有特殊天資的人纔能彀成功。學說的提議有的真實，有的虛偽，而大物理學家所具的特殊科學天資使他感受真實的提議而不感受虛偽的提議。但是在數學的學說，不是由少數的有天資的人容易感受的提推演出來，而是由嚴密的論理學的演繹法的手續推演出來的。這種手續凡是具有必須的數學訓練的人都能彀做，而數學的訓練凡是能彀懂他的人都能彀明白。由物理學的學說求結論的方法，只極少數人能彀料度得到；由數學的學說求結論的方法，凡是經過必須的訓練的人都能彀料度得到。因為只由人人所承認的原理即能彀得到信認數學的學說的地步，所以數學的學說的可信認的程度比物理學的學說的可信認的程度為深；著名的大數學家的學說，例如牛頓的宇宙引力的學說，或安培的電磁學說，永遠未曾被人疑惑過，而在物理學的學說，差不多每一個學說在他的歷史上都曾經過

一段疑惑的時期。但是千萬不要想物理學的學說的價值比數學的學說的價值小，也千萬不要想科學的發展用不着物理學的學說。兩種學說的論理學上的真性，和他們和定律的關係，都是一樣，並且都是科學的究極的根基。無論由那一種學說所推演出來的新定律，在安全承認爲真實以前，都必須和實驗比較。由安培的電磁學說所推演出來的結果，不作更進一步的尋求即承認他是對的，是沒有道理的事情；法拉對的學說所提議的結果，不由實驗證明即承認他是對的，也是沒有道理的事情。這些討論都是歷史上的討論。曉得科學的歷史，比不曉得科學的歷史而只由空想，要緊得多。

37 麥克司威爾的學說

引導麥克司威爾得到他的大發見的，便是這樣的數學的學說。最初造這學說的時候所要解釋的定律，是由電流路所得的磁作用的定律，和由變更一電路鄰近的磁石所得的該電路中的電流誘導的定律。在麥克司威爾的時代

以前，這些定律都已經規定出來了，並且已經發明出數學的學說來解釋這些定律了。麥克司威爾用兩種法子把這些學說改變了改變。第一種改變的法子，他是受法拉對的學說的影響作成的；按照着舊的學說，在完全的真空中，不能發生磁石作用的電流，因為該學說以為磁石作用永件導體電路發生的緣故；但是按照着法拉對的學說，對於磁石有作用的東西是運動着的力線，雖力線的兩端固定着，而力線也能發生運動，所以就是在完全的真空中也應當可以有電流使磁石作用發生。麥克司威爾在他的學說中表示這種可能性，一定是由於討論數學中的對稱的和簡淨的道理得來的無疑。他不得不引用一種屬於電的量，這量就是在真空中也能發生有限制的值，並且這量變更的時候有磁石作用隨着他發生。他選擇出來了這樣的量，因此，當所討論的作用都發生於真空中的時候，學說中解釋由電流而生磁石作用的定律所用的提議的簡淨樣式，和學說中解釋由磁石的變更而生電流所用的提議的簡淨樣式，精確

相同。這兩組提議間的惟一不同的點，是屬於電的量發現於一組提議中，屬於磁的量發現於其他一組提議中；這兩組提議，在對於純粹數學有興趣的人例如麥克司威爾看起來，完全是對稱的。

所以麥克司威爾得到了兩組提議，每一組都是敘述屬於電的量，屬於磁的量，和屬於各種科學的普通的量，例如長和時間之間的關係。麥克司威爾更往深裏推斷這些提議，他得到以下的結果：在某一地方，屬於電和磁的狀況中所生的任何變更，在一定時間之後，都在另一個地方發現，這些變更只由兩地方間的距離和介於兩地方間的媒介物的屬於電的和磁的量規定。但是這句話的意思完全等於說，一種擾亂由一個地方向其他一地方傳播的速度，由媒介物的屬於電的和磁的性質規定。若是媒介物的屬於電的和磁的性質已經知道，並且若是能由實驗規定出來，傳播的速度應當可以知道。將這種預料的傳播速度和這媒介物中已知的光的速度比較一下，便得到第34節所述的

結論。所以光的電磁學說便由此發生出來了；這學說未曾即刻被人們承認，一直等到由麥克司威爾的學說更推演出來的其他的結果和實驗比較過了以後，他纔被人們承認了。在這一個方向中的最顯明的進步是由赫支做成的，由這一步的進步纔達到了麥克司威爾的學說的最後的承認。但是這件事情的再深一些的討論將要離開這本書的意旨太遠；我著此書的目的，在解釋科學的意義是什麼，在解釋科學怎樣發展，而不在敘述科學中所獲得的實在結果的任何條目。

38 輓近的發展

這一步是電的科學的一步顯明的發展。舊的學說從此告終，新的學說從此開始，差不多我們的自然現象的觀念都從此改革了。雖然其間有一段很長的時間內沒有顯著的進步，但是這時候的最有遠眼光的科學家們都已知道新的進步向着那一方面進行。現在我們已經曉得，就光在真空中進行來說，光

的電磁學說十分完備，並且和已知的各種事實都相符合；惟有當我們打算使物質的屬於電的性質和屬於光的性質互相連絡的時候，矛盾的地方纔顯露出來。

當我們開始尋求物體的純粹屬於電的性質的時候，我們便開始曉得所經營的學說中沒有一種是完全滿意的。這些學說中，有幾種已經在前邊敘述出來了。在靜電學中所說的導體和不導體，試進一步去研究，他的嚴格的界線便破壞了，因為凡是物體都多少具有這兩種性質的緣故；又，我們的由誘導帶電的解釋和電不能殼在不導電的物體中移動的假定，也難調解為一氣。這樣的例子差不多有無限的數目，所以在電的學說完成以前，我們要大大注意各種物質的電的性質的相異的點和相同的點。一直到現在，我們僅以為物體將其所佔據的真空的屬於電的性質略略改變；我們沒有適宜打算把物體的屬於電的性質和其他的性質連絡起來，也沒有適宜的打算作一個物理學的學

說來解釋這些性質。我們對於電的學說現在所必須要趨向的方向，便是造一個物理學的學說來一致的解釋物體的屬於電的性質和其他的性質。按照着電學的最舊的學說，我們可以問：（1）在不帶電的物體中，我們所假定的相等而相反的電，在物體中怎樣的分佈呢？（2）物體中的這些電和物體所由組成的原子或分子間的關係是什麼呢？這問題的樣式，當未決的困難得到第一步解法的時候，誠然恰好是這樣。最後我還要說一句，學說由他的失敗所得到的價值，比由他的成功所得到的價值大；若是我們以為麥克司威爾的學說所預料出來的正確的定律可以完成舊的電學，那麼，他的學說所預料出來的錯誤的定律一定會使新的電學出世。