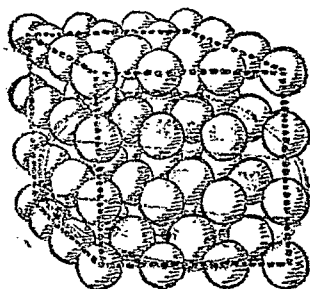


物理學的進化

愛因斯
坦·菲
爾·佛
著
劉·佛
年·述
譯



商務印書館印行

國立邊疆學校

圖書館

分類號 530.2

4405

登錄號 8503

M6
04-09
3/2

物 理 學 的 進 化

愛 因 斯 坦
著 原 著
菲 爾 斯 坦
劉 佛 年 譯 述



商 務 印 書 館 印 行



3 1773 5522 3

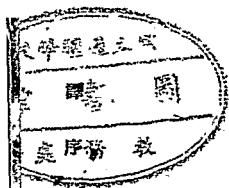
譯序

愛因斯坦是相對論的建立者。對於量子論也有極大的貢獻。他現在假定我們毫無數學和物理學知識，要在這本書裏面和我們談怎樣從過去的物理學發展到現代的相對論和量子論，你想，這是多麼有趣的事。他又找了最善於寫通俗的物理學的茵菲爾和他合作。茵菲爾的物質與量子（科學在今日），在我國也已經有了兩種譯本了。凡是看過那本書的人都知道他的通俗文章寫得多麼好。

這本物理學的進化和在一九三八年由劍橋大學印書館出版。那一年我正在劍橋大學讀書，看見報紙雜誌上都熱烈地介紹這一本書，便也買了來看。果然覺得好得很。間與研究物理學的朋友們談起這本書，莫不交口稱讚，便存了一個翻譯的念頭。次年在法國，看見法文的譯本也已經出版了。近三年來在國立師範學院教書，得暇的時候便翻譯一點，時作時輟，直到最近才完成，惟譯筆拙劣，未免使原書減色，良用歉然。

譯稿由吾妻王家柚，吾妹光年，方年，強年繕正，劉仕英小姐繪圖，楊端六，袁昌英兩先生介紹出版，朱有瓚先生，文杜英小姐也給我很多幫助，謹此致謝。

名詞翻譯大致根據教育部公布的物理學名詞。



劉佛年 一九四三

原序

在開始閱讀以前，你一定期望我們答覆幾個簡單的問題：寫這本書的目的是甚麼？它是爲怎樣的讀者寫的？

一開始便要明白地確切地答覆這些問題，是很困難的。而在本書終結時便容易得多，但是全書既已看過，也就不需要答覆這些問題了。我們覺得，說這本書不是怎樣的書倒簡單些。這不是一本有系統的介紹基本的物理事實和理論的書。我們的目的只是要敘述，人類如何努力把觀念世界與現象世界連繫起來。我們只想說明是怎樣的動力逼迫科學家發明許多觀念來解釋實在。但是我們的敘述必須簡單。在錯綜複雜的事實與概念中，我們只選擇那些最有代表性的和最有意義的。其餘的理論和事實都省略了。本書的目的既然只是敘述物理觀念的發展，因此我們不能不對於事實與觀念作一定的選擇。一個問題的重要性不能用它所佔的篇幅來判斷。我們略去了幾種主要的思想，並不是因爲它們不重要，而是因爲它們不在我們所選定的路線上。

在寫這本書的時候，關於本書讀者的性質，我們作過很長的討論，而處處都在替他着想。我們想像他完全缺乏物理學和數學的知識，但是卻具有很多的好德性，足以彌補這種缺陷。我們發現他對於物理學和哲學的觀念很感興趣，同時我們不能不讚美他努力鑽研書中比較無趣味和困難的部分的那一種忍耐。他知道，要理解任何一頁，必須仔細讀過以前的每一頁。他知道，即使是一本通俗的科學書，也不能像讀小說一樣的去讀它。

這本書是你我之間的親切的閒談。你也許覺得它討厭或有趣，枯燥或激動。但是假如本書能使你多少知道發明家怎樣始終如一地奮鬥，以求了解支配物理現象的法則，我們的目的便算達到了。

愛因斯坦

茵菲爾

目錄

譯序

原序

一 機械觀的興起

大偵探故事	一
第一個線索	二
向量	六
運動之謎	九
剩下一個線索	一六
熱是一種質嗎？	一八
升降鐵路	二四
兌換率	二六
哲學的背景	二八
物質動力論	三〇
總結	三四

二 機械觀的衰落.....三三五

兩種電流體.....三五

磁流體.....四〇

第一個嚴重的困難.....四三

光的速度.....四六

作爲質的光.....四八

色之謎.....四九

波是甚麼？.....五一

光波說.....五三

縱光波還是橫波呢？.....五九

以太與機械觀.....六〇

總結.....六一

三 場論相對論.....六三二

場的圖示.....六三

場論的兩大柱石.....六九

場的實在.....七二

場與以太.....七六

力學的問題.....七八

以太與運動.....八四

時間，空間，相對論.....九二

相對論與力學.....一〇〇

時空連續區.....一〇四

廣義相對論.....一〇九

升降機內外.....一一二

幾何學與實驗.....一一七

廣義相對論及其證實.....一二四

場與物質.....一二七

總結.....一二九

四 量子論.....一三一

連續不連續.....一三一

物質與電的元量子.....一三五

光子.....一三五

光譜.....一三九

物質波.....一四二

或然波.....一四七

物理學與實在.....一五四

總結.....一五六

物理學的進化

一 機械觀的興起

大偵探故事——第一個線索——向量——運動之謎——剩下一個線索——熱是一種質嗎？——升降
鐵路——兌換率——哲學的背景——物質動力論——總結

大偵探故事

我們可以想像一個最完美的偵探故事。在這樣的一個故事中，作者把所有的重要的線索都告訴我們，使我們對於那個案子非提出一種理論來不可，假如仔細研究案情，則最後如何解決，不待作者宣布，我們早已完全預料到了。在壞的偵探故事中，作者故意提出一個誰也沒有料想到的解決來，使我們非常失望；但是，在完美的偵探故事中則不然，解決完全不出我們所料。

我們能不能把科學家比作一個讀偵探故事的人呢？大自然像一本大書，這裏面有許多神祕，歷代的科學家不是在繼續不斷的努力尋求它的解決麼？這個比喻當然不很正確，最後會要放棄它的，但是暫時却不妨利用它，也許以後為方便起見，還要把它加以擴充和修改。

這個大偵探故事，至今還沒有解決。我們甚至不能肯定它會有一個最後的解決。不過自讀這本書以來，我們所獲的也已經很不少了，我們已經有了關於這本書中所用的文字的基本知識，又懂得了一些線索，而且在科學的艱難困苦中的發展過程中，得到了很多的愉快與興奮。但是，我們發現，雖則讀過的卷帙已經很不少了，離最後的解決還是遠得很。而且有沒有有一個最後的解決還是問題呢！在每一個階段上，我們都想找一個解釋，



能符合一切已經發現了的線索。但是我們所接受的任何理論，雖能解釋許多事實，卻始終沒有一個能解釋一切已知的線索。每每有一個理論似乎是很圓滿的，但是繼續讀下去以後，又會發現它還是不圓滿。新的事實產生了，舊的理論不能解釋它，或者根本與舊理論不合。我們讀得愈多，愈覺得這本書的結構完美；但是我們不斷地往前進，那最後的解決卻不斷地往後退，因此我們始終得不到一個最後的解決。

在柯南道爾或他人的偵探故事中，偵探首先把他所需要的事實都搜集起來。這些事實往往是很奇怪的，互相衝突的，毫不相關的。可是這個大偵探知道暫時不需要再繼續偵察了，現在所需要的是用純粹的思想，把所有搜集好的事實聯貫起來。於是他拉拉提琴，或是躺在椅上抽煙斗。突然，他靈機一動，恍然大悟！現在他不僅能解釋已有的事實，而且他知道一定還有旁的許多事實也已經發現了。他知道在甚麼地方可以找到這些事實，假如他願意，他可以出去，多找些事實來證實他的理論。

科學家讀自然之書，這已經是一句老生常談了。但是科學家却必須自己找解決。他不能像有些人讀偵探故事一樣，因為急於想知道案子是怎樣解決的，便翻到書末去看那最後的結果。可是科學家讀自然之書却不能這樣。他是讀者，同時也是偵探。他必須解釋一件事實與旁的事實之間的關係。他即使要得到部分的解決，也必須把所有漫無秩序的事實搜集起來，用創造的想像力去理解和貫穿它們。

正如偵探有時須用純粹的思想，物理學家也必須如此。本書的目的便是描寫物理學家的這一部分工作。我們主要的是要敘述物理研究中思想與觀念的作用。

第一個線索

自有人類思想以來，便有人要讀這個大偵探故事。但是直到三百多年以前，科學家才開始懂得這個故事的文字。那是伽利略和牛頓的時代。從那個時代起，這本書便讀得很快了。偵察的技術，尋求線索與研究線索的系統的方法都發展了。有些自然之謎已經解決了。不過有許多解決在繼續研究以後，證明並非最後的解決，而

只是一種很膚淺的暫時的解決。

有一個根本問題，幾千年來都因為它太複雜了，無從解決它，這就是運動的問題。我們在自然界中看見許多運動。例如石子在空中，船在海上，車在街上的運動。這些運動事實上都是很複雜的。因此要了解這些現象，必須由最簡單的例子開始，然後逐漸研究複雜的例子。試看一個靜止的物體，它一點運動也沒有。要變更這樣一個物體的位置，必須推它，提它或是用馬力或是蒸汽機作用於它。我們的直覺認為運動是與推、提、或拉的動作相連的。許多經驗告訴我們，假如要使物體運動愈快，必須愈用力推他。我們自然會斷定，對於一個物體的作用愈強有力，它的速率便愈大。一輛四匹馬的車比一輛二匹馬的車要動得快些。於是直覺告訴我們，速率主要地是與作用相連的。

凡是讀過偵探小說的都知道，一個錯誤的線索，往往把案情弄混亂了，以致遲遲得不到最後的解決。根據直覺的推理方法是不可靠的，它使我們關於運動發生一種錯誤的意見。這個意見自亞里士多德至伽利略的千餘年間，始終為學術界所接受。而因為亞里士多德在歐洲中世紀學術界具有無上的權威，他既贊成這種直覺的觀念，自然沒有人敢反對了。在兩千年來一般人認為他所寫的力學中，他說：

「推一個物體的力不再去推它時，物體便歸於靜止。」

伽利略却能應用科學的推理方法發現亞里士多德的錯誤；他的發現是人類思想史上最偉大的成就，而且是物理學的真正開端。這個發現告訴我們，根據直接觀察的直覺的結論不是常常可靠的，因為它們有時會得出錯誤的線索來。

但是直覺錯在那裏呢？難道說一輛四匹馬的車比一輛二匹馬的車走得快些，還會有錯嗎？

讓我們更加仔細地研究關於運動的基本事實，先從簡單的日常的經驗研究起，這些經驗是自有文明以來，我們便熟悉的，而且是在生活的奮鬥中得來的。

假如在平路上推一輛車，突然停止推它，車不會立刻停止，它還會繼續往前運動一個很短的距離。我們

問，怎樣才能增加這個距離呢？這有許多辦法，例如車輪上塗油，把路修平滑等。車輪轉動得愈容易，路愈平滑，車便可以繼續運動得愈遠。但把車輪塗油和把路修平滑有甚麼作用呢？只有一種作用，即外部的影響減小了，車輪間及車輪與道路間的所謂摩擦力的影響減小了。這已經是對於觀察的現象的一個理論的解釋，不過事實上這個解釋很武斷。再往前研究一下，我們便可以得到那正確的線索。設想一條絕對平滑的路，而且車輪毫無摩擦，那麼便會沒有甚麼東西使車輪停止，而車輪也會永遠運動下去。這個結論是從一個理想的實驗產生的，而這個實驗實際上是無法做的，因為把所有的外部的影響都除掉，這是絕對做不到的。

由上可知，對付運動問題有兩個方法，我們現在且把這兩個方法加以比較。我們可以說，直覺的看法是——作用愈大，速度便愈大。因此速度本身表示有無外力作用於物體上。伽利略所發現的新線索是——假如一個物體，我們不去推它，拉它，或用旁的方法作用於它，或簡單些說，假如沒有外力作用於它，則這個物體會用等速依直線運動下去。因此速度並不表示有無外力作用於一個物體。伽利略的結論是正確的，一個世紀之後，牛頓把它列為慣性定律。這是我們在學校初讀物理學時，必須首先記着的一條定律，也許有人還記得罷：

『一個物體，假如沒有外力改變它的狀態，便會永遠保持靜止，或等速直線的運動狀態。』
我們已經看到，這個慣性定律不能是直接從實驗中來的，而是根據觀察由思想得來的。這個理想的實驗事實上是不做的，雖或做不到，它卻能使我們對於實際的實驗有更深刻的理解。

從世界上形形色色的複雜運動中，我們選等速直線的運動作為第一個例子。這種運動是最簡單的，因為它是沒有外力作用的。可是等速直線的運動是永遠不能實現的，石子從塔上掉下來，車在平路上推動，都不能絕對等速直線地運動。為甚麼呢？因為我們不能消除所有外力的影響。

在偵探故事中往往有些最明顯的線索，我們以為它們是可靠的，結果却發現是錯了。同樣的，在尋求自然的定律時，最明顯的直覺的解釋也往往是錯的。

宇宙觀是日新月異的。伽利略的貢獻就是毀滅了那直覺的看法，而用一種新的理論來代替它。這就是伽利略的發現的重要意義。

但是關於運動立刻又發生了新問題。假如速度不表示有無外力的作用，甚麼才表示外力作用呢？伽利略發現了這個根本問題的答案，而牛頓把這個問題答覆得更明確。這個答案便成為我們偵察中的另一個線索。

要得到一個正確的答案，我們必須再仔細想想那絕對平滑的道路上的車輛。在那理想的實驗中，運動所以是等速直線的，是因為沒有任何外力。我們現在設想有人把這輛等速直線運動的車子朝它的運動方向推一下。很明顯的，它的速率會增加。假如朝相反的方向推一下，則速率會減小，這也是同樣明顯的事。在前面的例子中，車因被推而加速，在後面的例子中，車因被推而減慢。由此可以立刻得到一個結論：一種外力的作用改變速度。因此速度本身不是推或拉的結果，速度的改變才是它們的結果。這樣一個力究竟是增加還是減小速度，完全看它是朝運動的方向作用，還是朝相反的方向作用。伽利略對於這一點看得很清楚，在他的兩種新科學中有這樣的話：

「……一個運動的物體假如有了某種速度以後，只要沒有增加或減小速度的外部原因，便會始終保持這種速度。但是這個條件只在平面上才可能；因為假如是在朝下的斜面上則已經有了增加速度的原因；假如是在朝上的斜面上，則已經有了減小速度的原因；由此類推，只有平面上的運動才是永恆不變；因為假如速度是等速直線的，則它既不能減弱，也不會弛緩，更不會消滅。」

根據正確的線索進行研究，我們對於運動的問題，居然有了較深刻的了解。甚麼是牛頓的力學的基礎呢？並非如直覺所想的，是力與速度本身之間的連繫，而是力與速度改變之間的連繫。

我們已經應用了舊力學上很重要的兩個概念，即力與速度的改變。科學再往前發展後，這兩個概念的內容都擴充和推廣了。因此我們應該更加仔細地研究它們。

力是甚麼呢？在直覺上我們知道這個名詞的意義。這個觀念是從推、拉、拋等動作的筋肉感覺來的。但是

可以把它推廣，使它不限於這些簡單的例子。我們可以想像有些力的作用並不都像馬拉車子一樣！我們說在太陽與地球之間，地球與月亮之間有吸引力，就是這種力造成潮汐現象。我們說地球有一種力把我們和我們周圍的物體都限制在它的影響範圍之內，我們又說風有力可以掀起波浪，吹動樹葉。我們只要看見甚麼東西的速度改變了，我們便認為那種改變是由於外力。

牛頓在他的原理中寫道：

「加力便是對於一個物體加一種作用，以改變它的靜止或等速直線運動的狀態。

這個力就只在那作用中，作用過去了，物體中便再沒有力了。因為一個物體只靠着它的慣性便可以保持它所得到的每一個新的狀態。力有許多不同的來源，如打擊力，壓力，向心力等。」

一個石子從塔頂上掉下來，它的運動不是等速的，而是愈來愈快的。我們於是斷定：有一個外力朝運動的方向作用。或者換句話說，地球吸引石子。我們再來舉個例。假如把石子朝上拋，結果會怎樣呢？它的速度慢慢減小，等它到了最高點時，便開始往下墮。物體上升時速度的減小，和物體下墮時速度的增加，都是由於同一的力。不過，一者的力朝運動的方向作用，他者的力朝相反的方向作用。力只是一種，它是產生增加速度或者減小速度，全看石子是朝上拋還是朝下拋。

向量

我們在上面所討論到的一切運動都是直線的。現在我們必須更進一步。我們要了解自然的定律，須首先分析最簡單的例子，把較複雜的例子放在後面研究。一根直線比較一根曲線要簡單些。可是我們不能在理解了直線運動以後便滿足了。力學定律，應用最成功的許多種運動，如月亮，地球，行星的運動都是曲線的。從直線運動的研究進到曲線運動的研究，會遇到許多新的困難。我們必須有勇氣克服這些困難，不然便不能理解舊力學中的定律，而舊力學因為首先給了我們許多線索，所以成了科學發展的起點。

我們再研究一個理想的實驗。設想一個極圓的球在平滑的桌上等速直線地運動。我們知道假如推這個圓球一下，或者說對它加以外力，它的速率便會變更。現在假定推的方向不是如前面所說的例子中一樣，沿圓球運動的路線，而是與那路線垂直的方向，結果圓球會怎樣呢？我們可以看出這個運動有三個階段：最初的運動，力的作用，以及力停止作用以後的最後的運動。根據慣性定律，在力作用以前和以後的速率都是絕對等速直線的。但是力作用以前和以後的等速直線的運動有一點不同：方向變了。圓球最初的路線與力的方向是互相垂直的。最後的運動不會在這兩條線上。假如推它的力大，而它最初的速度小，它就會接近力的方向，假如推它的力小，而它最初的速度大，它就會接近原來的運動路線。我們根據慣性定律所得到的新結論是：一般說來，外力的作用不僅改變運動的速率，而且改變運動的方向。理解了這種事實以後，才可以理解向量的概念在物理學中所起的推廣作用。

我們可以繼續應用簡單的推理方法。我們仍以伽利略的慣性定律為出發點。這是解決運動之謎的有價值的線索，從這個線索還可以推出許多結論來。

在一平滑的桌面上，有兩個圓球朝不同的方向運動。為便於想像起見，我們假定這兩個方向是互相垂直的。因為沒有外力作用，這些運動是絕對等速直線的。再假設它們的速率相等，即在相同的時間內經過相同的距離。但若說這兩個圓球有同樣的速度是否正確呢？可以答是，也可以答否。假使二輛汽車的速率計上都表示每點鐘四十英里，我們通常便說它們的速率或速度相等，不論它們是朝那一個方向開行。但是科學必須創造它本身的文字和觀念供它本身使用。科學觀念最初總是日常生活所用的普通語言中的觀念，但是發展以後便變成為完全不同的東西了。在普通語言中，觀念的意義是很含糊的，但為適用於科學思想起見，它們必須具有很嚴格的意義。

從物理學家的觀點看來，兩個圓球的運動的方向不同則速度也不同，這種說法是有種種的便利的。四輛汽車從一處出發，雖然速率計上所記的速率都是每點四十英里，我們卻說這四輛車的速度不同，雖則這種說法完

全是習慣上規定的，但是有很大的方便。速度與速率的區別，表示物理學如何從日常生活中的觀念出發，而又把它加以改變，使它有利於科學的進一步的發展。

假使測量長度，其結果是用某種單位的數表示出來的。一根棍的長度也許是三尺七寸，一樣東西的重量也許是二磅三兩，而時間則為多少分多少秒。在每一種情形之中，測量的結果都是用一個數來表示的。可是單用一個數還不夠描寫某些物理上的觀念。認識這種事實，在科學研究上是一大進步。例如速度便須用一個方向和一個數來表示。一個既有數值又有方向的量叫做向量。它的符號是一根箭。速度可以用一根箭，或者簡單說來，用一個向量表示。向量的長度表示速度，它的方向便是運動的方向。

假如四輛汽車從一處開行，方向不同而速率相等，它們的速度可以用同樣長的方向不同的四向量表示，假使有二輛汽車在大路上相擦而過，速度都是每點鐘四十英里，我們可以用箭頭方向相反的兩根向量來表示它們的速率。因此表示紐約的『上行』和『下行』的地道車的箭頭，也必定指着不同的方向。但是所有的上行的火車，只要速率相同，則不論在那一條路軌上或經過那一個車站，都有同樣的速度，可以用一根向量來表示。一根向量不能表示火車經過那一個車站，或是在許多平行路軌中的那一條路軌上。換句話說，根據習慣的規定，平行的，長度相同的，方向相同的向量都可以認為是相等的。向量的不同或是長度不同，或是方向不同，或是兩者都不同。四根不同的向量可以畫成從一共同的點出發。因為出發點沒有甚麼關係，所以這些向量可以代表從一處出發的四輛汽車的速率，也可以代表在不同的地方，以一定的速度朝一定的方向開行的四輛汽車。

這種向量的圖示法，可以用來描寫我們已經討論過的關於直線運動的事實。我們說過，一輛作直線等速運動的車，朝它運動的方向推它一下，它的

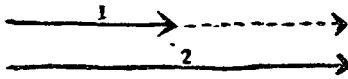


圖 一 第

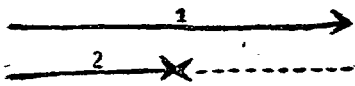


圖 二 第

速度便會增加，若畫圖，便可以用兩根向量表示，一根較短的表示推以前的速度，一根同方向而較長的表示推以後的速度。再用點線表示的向量，代表因推而產生的速度的變更。至於所加的力若與運動的方向相反，則運動會遲緩下去，那種情形的圖又稍稍不同了。那用點線表示的向量也是代表速度的變更，但是方向却不同。由此可以明白，不僅速度本身，便是速度的變更也都是向量。但是速度的變更是由於外力的作用，因此力也必須用一個向量代表。要表明一個力，單說明使多大的勁推車子是不夠的，還需要說明朝那一個方向推它。力正如速度及速度的變更一樣，不能僅用一個數表示，而必須用一個向量表示。因此外力也是一個向量，與速度的變更的方向相同。在前面的兩個圖中，用一點線表示的向量既表示速度變更的方向，也表示力的方向。說到這裏，懷疑家也許會說，他看不出介紹向量有甚麼好處。以上無非是把已經知道的事實，翻譯成爲一種生疏的複雜的文字而已。在目前的階段上我們很難使他相信，他的意見是錯誤的。事實上暫時他是對的。不過，我們立刻會看到，這種生疏的文字會產生一種很重要的結果。

運動之謎

以上只討論到直線運動，但自然界中直線運動很少，因此研究過直線運動以後，我們還是不能理解自然界中所觀察到的運動。我們必須研究曲線的運動，而我們的下一步工作便是決定這種運動的定律。這是很不容易的。在直線運動的研究中，速度，速度變更及力這幾個觀念是很有用處的。但是我們不能立刻看出來這幾個觀念如何能應用於曲線運動。我們甚至可以想像這些舊觀念不適於描寫一般的運動，而必須創造新的觀念。我們應該循着舊路走呢？還是應該找一條新路走呢？

把一個觀念加以推廣這在科學上是常有的事。至於推廣的方法却不只一種，而可以有無數種。但是必須嚴格地合於一個要求：假如原來的條件具備時，推廣了的觀念必須簡化為原來的觀念。

我們可以用現在所研究的例子來解釋這個意思。我們可以把舊的速度，速度變更，力等觀念推廣，用來解

釋曲線的運動。在科學的術語上，曲線這個名詞，是包括直線在內的。直線是曲線的一種特別的不十分重要的例子。假使把速度，速度變更，力應用於曲線運動，它們便會自動的應用於直線運動。但是這種結果，必須不與前面所得到的結果互相矛盾。假使曲線變成了直線，所有推廣了的觀念都要簡化成描寫直線運動的已經熟悉的觀念。但是這種限制還不夠。依照這種限制來推廣一個觀念，可以得出許多可能的結果來。科學史上告訴我們最簡單的推廣有時是成功的，有時是失敗的。我們必須首先作一個猜測。在目前這個例子中，我們很容易猜出那正確的推廣的方法。那些新觀念是很成功的，它們幫助我們了解石子拋在空中的運動，也能幫助我們了解行星的運動。

在一般的曲線運動中，所謂速度，速度變更和力是甚麼意義呢？我們首先說速度。一個小物體沿曲線由左到右運動。這樣一個小物體通常叫做一個質點，假設知道了質點在某一刻的位置。在這一時刻中和這一位置上的速度是怎樣的呢？伽利略的線索又能幫助我們解決這個速度的問題。我們必須再用我們的想像力去想像一個理想的實驗。在外力的影響之下，質點沿曲線由左到右運動。設想在一個一定的時候，質點正在那個位置上，所有的外力突然沒有了。那麼根據慣性定律，運動便會是等速直線的。在實際上我們自然不能使一樣物體完全不受外力的影響。我們只能這樣猜想：『假使……結果會怎樣呢？』猜想是否正確，就看出它推出來的結論是否與實驗相合。

當一切外力都消滅以後的質點的等速直線運動的方向，就是所謂切線的方向。在顯微鏡下去看一個運動的質點，我們可以看出，曲線的一小部分很像一小段直線。切線便是它的延長線。因此速度向量便是在切線上。它的長度代表速度的數值，或是像汽車的速率計所表示的，速率的數值。

破壞運動以求速率的向量的這個理想實驗不要看得太認真了。它只是幫助我們了解甚麼



圖 三 第

應該叫做速度向量，而且使我們能夠決定一定的時刻和一定的點上的速度向量。

在下圖中畫着一個質點沿一根曲線而運動的三個不同的位置上的速度向量。在這個例子中，不僅速度的方向，而且由向量的長度所表示的速度的數值，在運動中都是時時變化的。

這個新的速度觀念是否適合推廣的一切要求呢？就是說：假使曲線變成了直線，他是否也簡化為我們已經熟悉的觀念呢？很明顯的，它是如此。一根直線的切線便是這根直線本身。速度向量便在運動線上，例如那運動的車子或那滾動的圓球，便是如此。

其次便要介紹在曲線上運動的一個質點的速度變更。這也有許多種方法，我們選擇其中最簡單的，最方便的一種。下圖中有幾個速度向量，代表路線的不同的點上的運動。前面兩根向量可以再畫過，使它們從一共同的點出發，而我們知道這樣畫向量是可能的。那用點線表示的向量我們叫做速度的變更。它的起點是第一根向量的末端，而它的末端是第二根向量的末端。初看起來，這個速度變更的定義似乎不自然而且沒有意義。在向量(1)與(2)的方向相同這種特殊情形中，它的意義便清楚得多。自然，這又回到直線運動去了。假使兩根向量的起點相同，而又用點線的向量把它們的末端連接起來，這個圖便和前節中的第一圖完全相同，而以前的概念便成了新概念的一種特殊情形。在圖中我們必須把兩根線分開來，因為假使不然，這兩根線便會合而為一分辨不出來了。

現在我們必須進行推廣的最後一步了。在我們所作的猜測之中，這是最重要的。力與速度的變更之間必須建立一種聯繫，然後才能做出一個線索，使我們了解一般的運動問題。

解釋直線運動的線索是簡單的：外力產生速度的變更，而力的向量與變更的方向相同。現在我們問，解釋曲線運動的線索是甚麼呢？完全一樣！唯一不同的便是速度變更的意義比前廣些。假使曲線上的每一點的速度

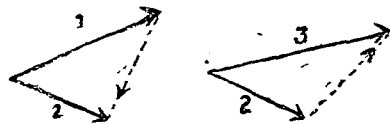


圖 四 第

都知道了，每一點的力的方向便可以立刻推出來。我們必須把相距的時刻極相近，因此位置也極相近的兩根速度向量畫出來。連接第一根向量的末端與第二根向量的末端的向量表示作用的力的方向。但是有一點很重要，兩根速度向量相距的時間必須是『極短』的。對於『極短』、『極近』一類的字作嚴格的分析是很不容易的。便是這樣的分析使牛頓和萊布尼茲 (Leibniz) 發明了微積分。

把伽利略的線索加以推廣的過程是冗長而艱難的。我們在這裏不能詳細敘述推廣的結果是如何的豐富。應用它以後，我們對於許多在過去不是互相一致的與理解錯誤的事實，才有了簡單而圓滿的解釋。

在各色各類的運動之中，我們只選擇那最簡單的，而應用剛才所提出的定律來解釋它。

子彈從槍筒裏射出來，石子以一定的角度拋出去，一股水從水龍的皮管裏射出來，所經的路線都屬於一類——拋物線。設想在石子上繫一個速率計，那麼它每一時刻的速度向量便都可以畫出來。作用於石子的力的方向便是速度變更的方向，而我們已經知道它是怎樣決定的。其結果表示力是鉛直的，朝下的。和石子從塔頂上掉下來時完全一樣。路線完全不同，速度也不同，但是速度變更的方向却相同，就是說，都是朝向地球的中心。

一個石子繫在一根繩子的末端，然後在水平面上揮動它，使它在圓的路線上運動。

假使運動的快慢是等速的，則表示這種運動的圖中所有的向量的長度都相等。可是因為路線不是直線，因此速度不是等速的。只有在等速直線的運動中才沒有力的作用。速度的數值沒有變更，但速度的方向有變更。根據運動定律，這種變更必定是由於某種力，而在這個例子中，則是由於石子與握繩的手之間的一種力。於是立刻又發生了一個問題：力在那一個方向作用呢？又可以用一個向量的圖回答這個問題。把兩個

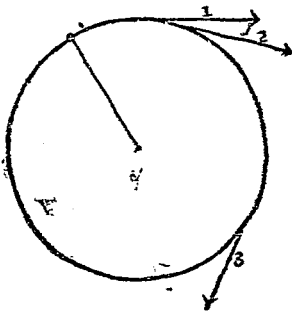


圖 五 第

極近的點上的速度向量畫下來，便可以發現速度的變更的向量。我們可以看出來那根向量是由繩朝向圓圈的中心，而且永遠是與速度的向量或切線垂直的。換句話說，手利用繩對於石子加了一種力。

月亮繞地球而轉，便是與這很相似的一個更重要的例子。這種繞轉大致可以畫作一種等速的圓的運動。力是朝向地球的，正和前例中力朝向手是一樣的道理。地球與月亮並沒有用繩連接起來，但是我們可以想像一根線，連接這兩個物體的中央，方便在這根線上，而是朝向地球之中央，和拋在空中的石子或從塔上掉下的石子一樣。

上面關於運動所說的一切可以用一句話總括起來。力與速度的變更都是方向相同的向量。這是運動問題的最初的線索，但是它自然不能徹底解釋一切觀察到的運動。從亞里士多德的思想路線轉變到伽利略的思想路線，這是科學的基礎的最重要的一塊基石。這個轉變一旦做到了，以後發展的路線是很清楚的。我們的興趣只在發展的最初的階段上，只是要研究最初的線索，看新的物理概念如何從它與舊的觀念的艱苦的關爭中產生。我們只注意科學上的開闢新的發展路徑的工作。只注意創造日新月異的宇宙觀的科學思想的冒險。最初的和最基本的步驟總是帶有革命的性質。科學的想像力發現舊的概念太窄狹了。於是用新的概念來代替舊的概念。沿着已經開闢了的新的路線繼續往前發展，却比較是帶着一種進化的性質，這樣進化下去，到第二個轉捩點時，又需要開闢更新的路線。可是要了解是甚麼理由和困難強迫我們改變根本的概念，我們不僅要知道最初的線索，而且要知道從這些線索中可以推出甚麼結論來。

從最初的線索所推出來的結論不僅是質的，而且是量的。這是近代物理學的一個最重要的特色。我們再研究石子從塔上掉下來的問題。我們知道石子掉下來時，它的速度是增加的，但是我們還願意知道更多一些。這種變更是多麼大小呢？在它開始掉下來以後的任何時候的位置和速度是怎樣呢？我們希望能夠預言現象，而且用實驗來決定觀察的結果是否證實這些預言，假使能證實預言，也就能證實那最初的假設。

要得出量的結論來我們必須用數學的文字。多數科學上的基本觀念是簡單的，而且照例可以用一種每個人

都懂的文字說出來。要繼續研究這些觀念却需要一種極精深的研究技術。假使我們要推出可以與實驗比較簡緒論來，便必須用數字作為推理的工具。我們若只研究基本的物理觀念，便可以避免應用數學的文字。因為在本書中我們一貫地避免數學，所以有時為了理解繼續發展中所產生的重要的線索起見，必須引用一些未加數學證明的結果。放棄數學文字所必須付的代價，便是失去精確性，而且有時要引用一些結果，却不能說明這些結果是怎樣得到的。

地球的繞太陽是一個很重要的運動的例子。我們知道這種運動的路線是所謂橢圓的路線。把速度變更的向量圖構造出來便可以看到地球上的力是朝向太陽的。但是無論如何這一點知識還是太貧乏了。我們希望能夠預測地球以及其他行星在任何時刻的位置，我們要預測下一次日蝕的時間，並且要知道日蝕的時候有多久，還要預測許多旁的天文現象。要做到這些事是可能的，不過不能單根據最初的線索，因為我們不僅必須知道力的方向，還要知道它的絕對值——它的數值。牛頓在這一點上作了一個極富靈感的猜測。根據它的引力定律，兩物體間的引力與它們互相的距離之間有一種很簡單的關係。距離增加，力便減小。為確切起見，我們說，假使距離增加一倍，力便減小 $\frac{1}{4}$ 倍；假使距離增加三倍，力便減小 $\frac{1}{9}$ 倍。

因此我們看到在萬有引力方面，我們能夠很簡單地把運動的物體間的力量與距離的關係說出來。將來遇到其他不同種類的力，例如電力磁力之類，我們也要同樣的進行。關於力，我們想用一種簡單的說法。這種說法是否可靠，只看它所推出來的結論是否能經實驗證實。

但是徒然知道引力，還不夠描寫行星運動。我們已經知道，代表很短的時間內的力和速度變更的向量的方

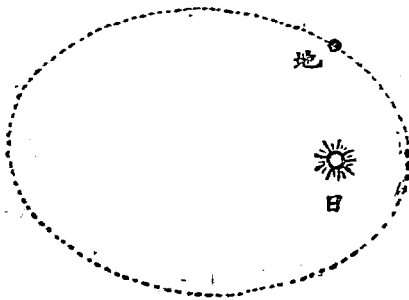


圖 · 六 · 第

向是相同的，但是我們必須再往前追隨牛頓一步，而假設在它們的長度之間有一種簡單的關係。牛頓說，假使其他一切條件都相同，就是說，運動的物體相同，變化的時間相等，則速度的變更與力成正比例。

因此關於行星的運動要得出量的結論來，需要兩個補充的猜測。一個是一般性質的，說明力與速度變更的關係。另一個是特殊性質的，說明這類特殊的力與距離的關係。第一個是牛頓的一般的運動定律。第二個是他的引力定律。這兩個定律合起來就可以決定運動了。用下面的聽來似乎很笨的推理，可以把這個意思弄清楚。假使我們可以決定在某一個時候一個行星的位置和速度，同時知道了力。那麼根據牛頓的定律，我們便知道在一個短時間中的速度的變更。知道行星在某時間內的最初的速度和位置，我們便可以求出它的最後的速度和位置。把這個過程繼續地重復許多次，於是行星運動的全部路線便都可以求出來了，而不必憑藉觀察的材料。在原則上這就是力學上預測一個運動物體的位置的方法，但是這裏所用的方法却是太不實際了。在實際上這樣一步一步的進行方法，是極端繁冗的而且不精確的。幸而這個方法完全是不必要的，數學供給了我們一條捷徑，而使我們能夠用很少的墨水對於運動作精察的描寫，甚至比寫一句話所用的墨水還要少。用這種方法所得到的結論可以用觀察證明或推翻。

我們看到石子從空中掉下來和月亮繞地球而轉，都是由於同一種外力，即地球對於物體的吸引力。牛頓發現石子，月亮行星的運動都不過是作用於任何兩個物體之間的所謂萬有引力的特殊表現。在簡單的情形之中，可以利用數學解釋和預測運動。但是在遠處的以及極端複雜，牽涉許多物體的互相作用的那種情形之中，數學的解釋便不是這樣簡單了，但是根本的原則卻是一樣。

我們發現從最初的線索中推出來的結論，在一個拋在空中的石子的運動中，在月亮，地球與行星的運動中實現了。

需要由實驗證明的或推翻的，實在是全部猜測。沒有一個假定可以從旁的假定中分離出來，單獨地由實驗證明或推翻。在行星繞太陽的例子之中，我們發現力學系統可以圓滿地應用。可是我們很可以想像，根據不同

的假定的另一個系統，也可以同樣圓滿地應用。

物理的概念是人類心靈上自由地創造出來的，而不是純粹由外面的世界所決定的。我們企圖理解實在，很有些像一個人想理解一個關了錶殼的錶內的機構。他看見錶面和那些運動的針，甚至可以聽得到它的響聲，但是却無法開啓錶殼。假如他是聰明的，他可以想出一幅關於裏面的機構的圖形來，以解釋他所觀察到的一切，但是他永不能十分確定，這便是唯一可以解釋這些現象的圖形。他永不能把他的圖形和實在的機構加以比較，他甚至不能想像這樣的比較，有何可能或有何意義。但是他確實相信，知識愈增加，他的關於實在的圖形也會愈來愈簡單，而且它們所能解釋的感覺印象的範圍也會愈來愈廣。他也可以相信知識有一個理想的限度，而人類的心靈在漸漸地接近這個限度。他也許把這個理想的限度叫做客觀真理。

剩下一個線索

在我們最初研究力學的時候，我們有一種印象，即這門科學中的一切都是簡單的，基本的，而且是毫無問題的。沒有人疑心到還有一個重要的線索，直到三百年後才引起人的注意。這個忽略了線索與力學上的一個根本概念——質量有關。

我們再回轉來研究那個簡單的理想的實驗。一輛車在絕對平滑的路上運動。假如車在起先是靜止的，然後推它一下，以後它便以一定的速度等速直線地運動。假設力的作用可以儘量地重複許多次，推的機械總是以同樣的方式作用，而且總以同樣大小的力加於同一輛車。無論這個實驗重複多少次，最後的速度總會是一樣的。但是假如把實驗改變一下，車上起先是空的，現在讓它裝載東西，結果會怎樣呢？載重的車的最後速度會比空車的小些。結論是：假如以同樣的力作用於兩個不同的靜止的物體，所發生的速度不會一樣。我們說，速度與物體的質量有關，質量愈大，速度愈小。

因此我們知道物體的質量至少在理論上是怎樣決定的，或者更正確地說，一個質量比另一個質量大多少倍

是怎樣決定的。我們以同樣大小的力作用於兩個靜止的質量。若發現第一個質量的速度比第二個大三倍，我們便斷定第一個質量比第二個小三倍。這自然不是決定兩個質量的比例的一種很實際的方法。可是我們很可以想像，用這種方法或其他根據慣性定律的與此相類似的方法來決定質量的比例。

實際上我們是怎樣決定質量的呢？自然不是用上面所描寫的那種方法。每個人都知道那正確的答案。我們把物體放在天秤上秤一下，這樣便決定了它的質量。

我們把這兩種決定質量的方法更仔細地討論一下。

第一個實驗與重力或地心引力無關。車在被推之後，沿着絕對光滑的水平面上運動，使車附着於水平面上的萬有引力並沒有變，因此在決定質量上完全不生作用。可是秤一樣東西就完全不同了。假使地球不吸引物體，假使重力不存在，我們決不能使用天秤。這兩種決定質量方法的差異，是前者與重力無關，而後者則全靠重力的存在。

我們問：假使我們用上面所說的兩種方法決定兩個質量的比例，所得的結果會是一樣的嗎？實驗給我們的答案是很明白的。結果恰恰一樣！這個結論不是能夠預言的，是根據觀察的，不是根據理性的。為簡便起見，我們把用第一種方法所決定的質量叫做慣性質量，而把用第二種方法所決定的質量叫做引力質量。在我們的世界中兩者碰巧相等，但是我們也很可以想像它們不相等。另一個問題立刻產生了：這兩種質量的相等是純粹偶然的呢？還是它有更深的意義呢？根據舊物理學的觀點的回答是：這兩種質量的相等是偶然的，沒有更深的意義。近代物理學的回答恰恰相反：這兩種質量的相等是根本的，而且成爲一種新的重要的線索，這種線索使我們對於宇宙能有一種更深刻的理解。事實上，這是產生所謂廣義相對論的一個最重要的線索。

一個偵探故事，假使把奇怪的事解釋爲偶然發生的，這個故事便不會是第一流的。依照一種理智的計劃而發展的偵探故事通常總令人滿意些。同樣的假如一個理論能夠解釋引力質量和慣性質量的相等，而另一個理論却認爲二者的相等是偶然的，而兩個理論又都與觀察的事實相合，則前一個理論比後一個爲優。

因為慣性質量與引力質量的相等對於相對論非常重要，我們應當把它更仔細地研究一下。有甚麼實驗確實證明兩種質量的相等呢？伽利略從塔上把不同的質量掉下來的舊實驗答覆了這個問題。他發現任何質量掉下來所需要的時間總是一樣的，一個墮體的運動與它的質量無關。要把這種簡單的但是極端重要的實驗結果，與這兩種質量的相等連接起來，需要一點相當複雜的推理。

一個靜止的物體受了外力的作用以後，便會以一定的速度開始運動。要使靜止的物體運動，其難易與慣性質量有關，假如物體的質量大，他便不容易動，反之，若質量小，便容易動。若不求十分嚴格，我們可以說：一個物體對於外力呼喚的反應的難易與慣性質量有關。假使地球真的以同樣的力吸引一切物體，則慣性質量最大的物體，其降落也最慢。但是事實不如此，一切物體以同樣的快慢降落。這表示地球必定以不同的力吸引不同的質量。地球只用它的重力吸引石子，對於石子的慣性質量，毫無所知。地球的「呼喚」力與引力質量有關，而石子的「答覆」的運動與慣性質量有關。因為「答覆」的運動總是一樣的，——同樣高度的一切物體以同樣的快慢掉下來——所以可以推論出來，引力質量必定與慣性質量相等。

這個結論，由物理學家說出來，便帶着一種學究的氣味。一個墮體的加速度的增加是與它的引力質量成正比例的，而其減小是與它的慣性質量成正比例的。因為所有的墮體都有同樣的不變的加速度，這兩種質量，必定是相等的。

在我們的大偵探故事中，沒有一個完全解決了的問題，三百年之後我們又不能不回到最初的運動問題，改變研究的過程，發現過去忽視了的線索，而因此關於我們周圍的宇宙得到一種不同的理論。

熱是一種質嗎？

現在我們又開始研究一個新的線索，這是從熱的現象範圍中產生的線索。可是我們不能把科學分成許多獨立的，無關的部分。我們不久，就會看到在這裏介紹的新概念，會與已經熟悉的概念以及我們將來要遇到的概

念交織在一起。在科學的一部門所發展的一線思想往往能夠應用來解釋表面上完全不同的現象。在這種過程中，原來的概念每每須經過相當的改變，然後才能幫助我們理解產生它的那些現象和應用它來解釋的那些新現象。

用來描寫熱的現象的最基本的概念是溫度與熱。在科學史上經過了叫人不曾相信的那樣長的時間，我們才知道分別這兩個概念，但是一旦作了這個分別以後，便產生了很迅速的進步。雖然這些概念現在每人都是熟悉的，我們還是要把它仔細加以研究，着重地指出兩者的區別。

我們的觸覺能夠很明白地告訴我們，一個物體是熱的，而另一個物體是冷的。但是這是一種純粹質的標準，用來作量的描寫是不夠的，而且有時甚至是含糊的。這可以從大家都知道的一個實驗中看出來：設有三個容器，一個裝冷水，一溫水，一熱水。假使我們把一隻手浸在冷水中，另一隻手浸在熱水中，我們所接受的消息是，前者是冷的，後者是熱的。然後我們把這兩隻手同時浸到溫水中去，兩隻手所接受的消息是互相矛盾的。同樣的道理，一個愛斯基摩人和一個赤道附近的人，假使當春季時在紐約見面了，他們對於天氣是熱還是冷的問題也會有不同的意見。我們可以用一個像伽利略所做的那樣的原始的溫度計解決所有這類的問題。伽利略，我們又遇到這個熟悉的名字了！溫度計的應用是根據某些明白的物理學上的意見。關於這些意見，我們可以徵引一百五十年前布勒克(Brahe)的幾行話，他在清除關涉熱及溫度這兩個概念的困難上有很大的貢獻：

「用這種器具我們發現，假使把一千種甚至更多的物質，如金屬、石、鹽、木、羽毛、羊毛、水、以及各色各類的液體，放在一個沒有火而太陽也射不進去的房內，這些物質原來的熱是各不相同的，熱會從較熱的物體漸漸傳到較冷的物體上，經過幾小時或一天以後，我們再一一用溫度計去檢查它們，就會發現它們的溫度都相等了。」

熱字旁邊加點。是因爲照現在的名辭用法，這個字應該用溫度代替。

一個醫生從病人口中把溫度計拿出來，也許這樣推理：『溫度計以水銀柱的長度表示它自己的溫度。我們認為水銀柱的長度是與溫度的增加成正比例的，但是溫度計和我的病人接觸了幾分鐘，因此病人和溫度計的溫度是相等的。我因此推斷，我的病人的溫度就是在溫度計上所看到的那種溫度。』醫生也許只是機械地動作，但是他是在不自覺地應用物理的原理。

但是溫度計所含的熱量是否和人身所含的相等呢？自然不是。假如因為兩個物體的溫度相等，便說它們的熱量也相等，布勒克認為這是：

『把問題看得太馬虎了。這是把不同的物體中的熱量和它的一般的強度相混了，而明顯地這是兩件不同的事，在研究熱的分配時，必須常常加以區別。』

從一個很簡單的實驗中便可以了解這種區別。一磅水放在一個氣體的火焰上，要使它從房子的溫度達到沸點，必需相當的時間，可是假如用同一個容器裝十二磅水，用同一個火焰去燒它，必需更多的時間才能使它達到沸點。我們解釋這種事實說，現在需要更多的「某種東西」，我們叫這種東西為熱。

從下面的實驗中可以得出一個更重要的概念，即比熱。一個容器中裝一磅水，另一個容器中裝一磅水銀，同樣地加熱。水銀熱起來比水快得多，這表示要增加它的溫度一度需要較少的「熱」。一般地說，要把質量相同的不同類的質如水、水銀、鐵、銅、木等的溫度變更一度，例如從華氏四十度變到四十一度，它要不同量的「熱」。我們說，每種質都有它的特殊的熱容量或比熱。

既已有了熱的概念以後，我們便可以仔細地研究它的性質。兩個物體，一熱一冷，或更加確當的說，一溫度較高，一較低。我們使它接觸，使它不受到任何外部的影響。我們知道它們最後會達到同樣的溫度。但是這是怎樣發生的呢？從它們開始接觸到達到同樣的溫度的時間中發生了甚麼呢？我們可以想像熱由一個物體「流」到了另一個物體，正如水由較高的水準流到較低的水準。這種想法雖然很原始，卻似乎合於許多事實，我們的類推是這樣的：

水——熱

高水準——高溫度

低水準——低溫度

這樣的流動一直要到兩個的水準，就是說，兩個的溫度相等時才會停止。這種簡單的看法在量的研究上更有用處。假如把一定質量的水與酒精混合起來，而二者各有一定的溫度，則知道了它們的比熱，便可以預言它們在混合以後的最後的溫度。反之，只要觀察了最後的溫度，再用一點兒代數，便可以求出兩種比熱的比率來。

我們看到，在這裏出現的熱的概念，和旁的物理學概念有一種相似之點。根據我們的看法，熱是一種質，和力學中的質量一樣。它的量可以變更，也可以不變更，正如錢一樣，可以貯存在保險櫃裏，也可以花掉。只要保險櫃始終鎖着，貯存在它裏面的錢量始終不會變，一個孤立的物體中的質量與熱也是如此。理想的溫度瓶正和這樣的一個保險櫃相似。而且即使發生了化學變化，一個孤立的系統的質量不會變。和這一樣，熱即使由一個物體流到另一個物體也不會損失。甚至熱不是用來提高一個物體的溫度，而只是用來融解冰等時，我們還可以把它想像為質，只要把水凍結為冰時，或蒸汽凝為水時，又可以重新得到它的。溶解與蒸發的潛熱這一類的舊名詞，都表示這些概念是由於把熱想像為質而發生的。潛熱是暫時潛伏，正如把錢暫時存在保險櫃中，但是假如有人知道鎖的開法，便可以把它拿出來用。

但是熱之為質當然與質量之為質不同。質量可以用天秤來秤定，熱怎樣呢？一塊赤熱的鐵是否比一塊冰冷的鐵重些呢？實驗證明並不如此。假如熱是一種質，則它是一種無重量的質。「熱質」在過去通常叫做卡路里 (Calorie)，在一族無重量的質中，這是我們最初認識的一種。以後我們還會有機會研究這一族的盛衰的歷史。現在只注意到這一個分子的出生便夠了。

任何物理學的理論的目的，都是要儘量解釋最大範圍的現象。只要它能夠理解現象，它便有存在的理由。

我們已經看見質的理論解釋了許多熱的現象。可是不久就會明白，這又是一個錯誤的線索，熱不能看作一種質。即使說它是無重量的質也不可能。我們只要把自開始有文明的時候，便已經有的幾個簡單的實驗想一想，便能明白這一點。

我們認為質是一種既不能創造也不能夠毀滅的東西。可是原始人用摩擦的方法創造了足以燃燒木材的熱。用摩擦生熱的例子事實上是太多了，太熟悉了，用不着一枚舉。在這些例子中都是創造了一些熱量，這件事實很難用質的理論解釋。一個擁護這種理論的人自然還可以發明一些證據來解釋它。他可以這樣推理：『質的理論能夠解釋熱的創造這種現象。舉最簡單的例來說。拿兩塊木頭互相摩擦。摩擦影響了木頭，而改變了它的性質。也許性質改變的結果，使一種不變的熱量竟能產生較前為高的溫度。總之，我們所看到的是溫度的增高。很可能的是摩擦改變了木頭的比熱，而沒有改變熱的總量。』

在目前的討論階段上和一個擁護質的理論的人爭辯，是沒有用處的，因為這是一件只能用實驗來解決的事情。設想有兩塊相同的木頭，用不同的方法使它們發生同樣的溫度的變更，一個方法是摩擦，另一個方法是與輻射體接觸。假設兩塊木頭在新的溫度中有相同的比熱，整個的質的理論就會崩潰。有些很簡單的方法可以決定比熱，而這個理論的命運便繫於測量比熱的結果。在物理學史上常有一些試驗能判決一個理論的生死，這種試驗叫做決定的實驗。一個實驗的決定的價值，只能從提出問題的方式中顯示出來，而只有一個關於現象的理論能夠受它的判決。同類的兩個物體，一則用摩擦的方法，一則用熱流的方法，都達到相同的溫度，然後決定這兩個物體的比熱，這樣的實驗便是一個決定的實驗的典型例子。這是一百五十年前倫福德 (Rumford) 所做的一個實驗，它給了熱質論一個致命的打擊。

現在從倫福德自己的記述中引一段下來：

『在日常生活的普通事務和職業中，每每會有機會給我們研究自然界的一些最奇妙的作用，而且差不多不必花多少精力和金錢，而只利用為工藝與製造而設計的機器，便常常可以做出很有興味的哲學的實驗。』

我常常有機會作這一類的觀察，而且深信，只要養成一種習慣，時常留心日常生活中所發生的一切，則往往會引起有用的懷疑和有意義的研究與改進的計劃，這一切有時像是偶然發生的，有時像是在由觀察普通現象而引起的想像中發生的。這樣產生的懷疑與研究，比那些整天坐在書齋裏深思熟慮的哲學家所能引起的要多些。

我最近受命監督明興兵工廠中鑽炮的工作，發現銅炮被鑽能在短時間中發生大量的熱，而鑽子所分離出來的銅屑的熱更高，用實驗可以證明它比水的沸點更高……

在上面所說的機械動作中所實際產生的熱是從那裏來的呢？

這是由於鑽子從銅的堅塊中所分離出來的銅屑所供給的麼？

假使如此，則根據近代的潛熱與卡路里的學說，熱容量不僅要變而且要變得相當大，然後才能解釋所產生的一切熱。

但是這樣的變化是沒有的，因為我發現拿同樣重量，同樣的沸點溫度的這種銅屑，和用很細的鋸子所鋸下來的銅塊，放在同量的冷水中（華氏九五·五的溫度）浸着，銅屑的水看起來並不比浸着銅塊的水冷些或熱些。」

他最後的結論是：

「我們研究這個問題時必不可忘記一件很顯著的事實，即在這些實驗中由摩擦所生的熱的來源似乎是無窮盡的。」

不待說，任何絕緣的物體或許多物體，能夠無限制地供給的東西，決不可能是物質的質，一種能夠像在這這些實驗中的熱一樣地激發和傳達的東西，我們除了認為它是「運動」以外，很難甚至根本不能把它想像為旁的東西。」

這樣一來，我們看見舊的理論是崩潰了，或者更正確些說，我們看到舊的理論只能限於熱流的問題，如倫

福德所指示的，我們又不能不找一個新的線索了。要做到這一點，我們暫且丟開熱的問題，再回到力學。

升降鐵路

我們來研究一下娛樂場所中的升降車的運動。一輛小車升到或開到軌道的最高點，放鬆以後，它便在地心引力的影響之下朝下急駛，沿着一條古怪的曲線一上一下，使坐在車裏的人因速度的突然變更，感到驚心的愉快。每個升降鐵路，都有它的最高點，那就是它的出發點。在以後運動的途徑中，它決不能達到同樣的高度。把這種運動作一完全的描寫是很複雜的。一方面有力學的問題，即速度與位置在時間中的變化。另一方面則有摩擦，因此並有軌道上和車輪中所產生的熱。把這個物理過程分成這兩個方面的唯一有意義的理由，便是使我們能夠應用以前討論過的觀念。這樣分成兩方面以後，便會引起一個理想的實驗，因為一個只表現力學的方面的物理過程是只能想像不能實現的。

我們可以想像在這個理想的實驗之中，有人能夠完全消除因運動而發生的摩擦。他決定應用他的發明去構造一個升降鐵路。車是一上一下地運動，它的起點假定為拔地一百英尺。用嘗試與錯誤的方法，他立刻會發現他必須遵從一條簡單的規律：他無論沿那一條路線建築軌道都可以，只有一個條件，即任何點不能比起點更高。假使車自始至終能自由進行，則它要達到一百英尺的高度，無論多少次都可以，但永不能超過這個高度。在實際的軌道上，由於摩擦的關係一輛車永遠不能達到最初的高度，但是我們的理想實驗中的工程師不需要考慮這一點。

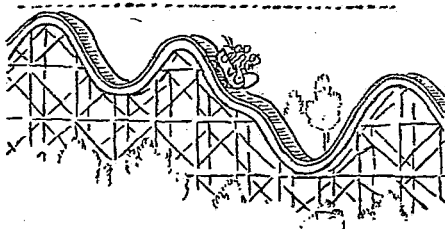
我們來研究在理想的升降鐵路上駛行的理想的車，當其從起點開始下駛之際的運動。當它運動時，它與地面的距離減小了，但是它的速率增加了。初看起來這句話很像初小國文書上的話，如『我沒有筆，但是你有六個橘子。』可是這句話卻並不是那樣笨拙可笑。我有一枝筆和你有六個橘子之間並沒有甚麼連繫。但是在車與地的距離和車的速率之間，卻有一種很實在的關連。假使我們知道它離地多高，便可以隨時計算它的速

率。因為這是量的性質的問題，最好用數學公式表示出來，因此在這裏我們撇開不談。

車在最高點時速度是零，而離地則為一百英尺。在最低的位置速度最大，與地面之間毫無距離。這種事實可以用旁的名辭表現出來。在最高點上車有位能，但是沒有動能。在最低點上，它有最大的動能，卻沒有位能。在所有的中間的位置上，都是有些速度也有些高度，它既有動能也有位能，位能隨高度而增加，而速度愈大，動能亦愈大。力學原理足以解釋這種運動。這兩種能都出現在數學的描寫中，每種能的量都變，而總和不變。因此我們可以用數學嚴格地介紹與位置有關的位能的概念，和與速度有關的動能的概念。自然的，這兩個名詞的介紹是武斷的，只是由於方便才這樣做的。兩種量的總和不變，因此叫做運動常數。位能與動能加起來的全部的能，可以比之於錢幣，其總和不變，但不斷地根據一定的兌換率，由一種錢幣變成另一種錢幣，例如由美金兌成英磅，再由英磅兌成美金等。

在實際的升降鐵路中，雖則摩擦使車不能再達到起點的那種高度，在動能與位能之間還是有一種不斷的變化。不過，總和卻不是不變的，而是逐漸減小的。現在再需要一個重要的勇敢的步驟，才能把運動的力學的一面和熱的一面連起來。這一步驟的結果與推廣之豐富，在以後就可以看到。

在實際的升降車的運動中，不單是有動能和位能，而且有由摩擦所創造的熱。這種熱是否相當於機械能，即動能與位能，的減小呢？一個新的猜測已經在潛伏着了。假使我們可以把熱看成一種能，則也許熱、位能、與動能三者的總和還是不變的。單是熱還可以毀滅掉，而熱與他種能合起來才是像質一樣不能毀滅的。這正好像一個人把美元兌成金磅時，必須付自己一些法郎作為手續費，而這種手續費也節省下來了，因此美元，金磅，與法郎的總和，根據一定的兌換率是



第七圖

一種不變的數量。

科學的進步破壞了舊的以熱爲質的觀念。我們要創造一種新的質即能，而以熱爲能的一種。

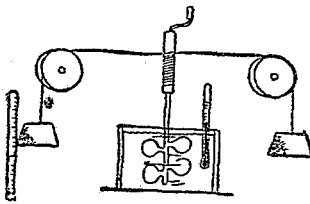
兌換率

不到一百年以前，邁爾(Mayer)猜測了一個新的線索，由這個線索發生了以熱爲一種能的概念，這個線索由焦耳(Joule)用實驗證明了。有一件很奇怪的事實，就是差不多所有關於熱的性質的基本工作，都是非職業的物理學家所做的，他們把物理學不過當作消遣而已。例如多才多藝的蘇格蘭人布勒克，德國的醫生邁爾，偉大的美國冒險家倫福德男爵，這位男爵後來住在歐洲，有過種種的活動，做過巴塞利亞的軍事部長。此外還有英國的釀酒師焦耳，他在閒暇之際，關於能量不滅做過幾個最重要的實驗。

焦耳用實驗證明了熱是一種能的猜測，而決定了兌換率。他的結果如何，很值得我們注意。

一個系統的動能與位能合起來構成它的機械能。前面說到升降鐵路時，我們猜測有些機械能變成了熱。假使這是對的，則在所有旁的物理過程中，兩者之間也會有一定的兌換率。嚴格地說，這是一個量的問題，但是定量的機械能可以變成定量的熱，這件事實是極重要的。我們很想知道表示兌換率的數是怎樣，就是說，從一定數量的機械能中可以得出多少熱來。

這個數的決定便是焦耳的研究的目標。他的一個實驗中的機械很像一個垂直量的鐘。這樣一個鐘的繞法，是把兩個重量提升起來，因此使系統增加了位能。假使不再去干涉這個鐘，便可以把它認爲一個封閉了的系統。重量逐漸往下降，在相當時間之後，重量會達到最低的位置，而鐘也會停止。能有了甚麼變化呢？重量的位能變成了機械的動能而又漸漸地散逸爲熱。



第九圖

焦耳把這種機械巧妙地改革一下，便能夠測量失去的熱和兌換率。在他的儀器中兩個重量使一個浸在水中的機葉轉動。重量的位能便變成運動部分的動能，由動能復變成熱，以增高水的溫度。焦耳測量了這種溫度的變更，而利用已知的水的比熱，計算了它所吸收的熱量。他把許多次試驗的結果總結如次：

『第一、任何物體，無論固體或液體，互相摩擦所生的熱量和所費的力（焦耳所說的力即能）的量是成正比例的。而

第二、要產生能夠把一磅水（在真空中 32° 與 60° 之間秤定的）增加華氏一度的熱量所需要費去的機械力（能）可以用 772 磅的物體在室間中下降一英尺來代表。』

換句話說，把 772 磅的物體升高離地一英尺的位能，等於把一磅水從華氏 32° 升高到 60° 。所需要的熱量。以後的實驗比這個更精確些，但熱功當量主要的還是焦耳在他的先驅的工作中所發現的。

這個重要的工作一旦完成了，以後的進步就快得很。我們立刻會發現機械能和熱能不過是能的許多種形式中的兩種形式。凡是能夠變換為兩種中的任一種的一切東西都是能的形式。太陽所發出的輻射是能，因為它的一部分變成了地球上的熱。電流也有能，因為它能使電線發熱，或是轉動電動機。煤代表化學能，這種能在燒煤時便解放為熱。在自然界的每種現象中，一種能總是以一定的兌換率變換為另一種。在一個封閉了的不受外部影響的系統中，能便保存着，因此很像質。在這樣一個系統中，雖則任何一種的量也許在變，所有可能的能的形式和卻是變的。假使我們把全宇宙看成一個封閉了的系統，則我們可以和十九世紀的物理學家一樣，驕傲地宣布宇宙的能是不變的，不能創造一部分，也不能毀滅一部分。

我們的兩個質的概念是物質與能。兩者都遵從不滅定律：即一個孤立的系統的質量和全部的能都不能變。物質有重量，但是能卻沒有重量。因此我們有兩個不同的概念和兩個不滅定律。我們現在還能把這些觀念認真嗎？物理學有了新的發展以後，這些表面上很鞏固可靠的理論是否有了變更呢？有！在相對論中這兩個概念又有了變更。以後我們再會回到這個問題。

哲學的背景

科學研究的結果，每每使遠在狹窄的科學本身範圍之外的問題的哲學觀點發生變更。科學的目的是怎樣呢？一個描寫自然的理論應該是怎樣的呢？這些問題，雖然超過物理學的範圍，卻是與它發生很密切的關係，因為科學正是它們的材料，而它們又是從科學中產生的。哲學的推廣必須根據科學的結果。可是哲學一旦成立，而且普遍地被接受以後，每每能影響科學思想的進一步的發展，指示科學如何在許多可能的路中間選擇一條路。等到這種已經接受了觀念被推翻以後，又會有一種出乎意料的和完全不同的發展，成爲一個新的哲學的源泉。除非在物理學史中引出例子來說明，這些話聽來一定很含糊和空泛。

我們現在來描寫最初的關於科學目的的哲學觀念。這些觀念很影響了物理學的發展，一直到差不多一百年前才爲新的證據、新的事實和理論所推翻，而這些新的證據、事實、和理論又構成一種新的科學背景。

在全部科學史中，從希臘哲學到近代物理學，學問家不斷地努力把表面上極複雜的自然現象，簡化爲幾個簡單的基本觀念與關係。這是所有的自然哲學的基本原則。它甚至表現在原子論者的著作中。二千三百年前的德謨克利圖 (Democritus) 寫道：

「依照習慣，我們以爲有甜、苦、冷、熱、和顏色。但究其實，只有原子與空虛。就是說，我們通常慣於把感覺的事物當作實在的，但是真正說起來，它們不是實在的。只有原子與空虛是實在的。」

這個觀念，在古代哲學中不過是巧妙的想像而已。自然定律，希臘人是不知道的。把理論和實驗連接起來實在是從伽利略的工作開始。我們已經研究過如何產生了運動定律的最初的線索。在兩百年的科學研究中，力與物質是理解自然的一切努力中的基本觀念。我們不能想像這兩個觀念可以缺少一個，因為物質能作用於旁的物質，因此是力的源泉。

我們試研究那最簡單的例子：兩個質點，其間有力作用。最容易想像的力是引力和斥力。在這兩種情形之

中，力的向量都是在連接物質的點的直線上。為求簡單起見，我們想像質點互相排斥與吸引，任何其他關於作用的力的方向的假定，都複雜得多。關於力的向量的長度，我們也能夠作一個同樣簡單的假定嗎？我們即使想避免太專門的假定，也還可以假定一件事：任何兩個質點之間的力只與它們中間的距離有關，如萬有引力。這似乎很簡單。我們也可以想像更加複雜的力，例如不僅與兩個質點間的距離有關，而且與它們的速度有關的力。可是若以物質與力為基本的概念，則假設力只作用於連接質點的直線上，而且只與距離有關，比較簡單，我們很難想像更簡單的假設了。但是是否能單用這樣一類的力來描寫所有的物理現象呢？

力學的各部門的偉大的成就，在天文學發展上的驚人的成功，以及力學觀念的應用於表面上不同的和非力學性質的問題，這一切都使我們相信，用不變的事物之間的簡單的力來解釋一切自然現象是可能的。在伽利略時代以後的兩百年間，這樣的一種企圖，便有意無意地表現在差不多所有的科學的研究中。赫爾姆霍斯 (Helmholtz) 約在十九世紀中葉，把這個意思說得很清楚：

『因此最後我們發現物理的物質科學的問題，是要把自然現象都用不變的引力和斥力來解釋，而這些力的強度只與距離有關。這個問題的解決，便是完全了解自然的條件。』

因此照赫爾姆霍斯說來，科學發展的路線是決定了的，而是嚴格地遵循一條固定的途徑：

『只要一旦把一切自然現象都簡化為簡單的力的工作完成了，而且證明了自然現象只能這樣簡化，科學的職務便算結束了。』

這種意見，在二十世紀的物理學家聽來，是枯燥而幼稚的。他假如想到偉大的研究的冒險會如此迅速結束，而從此以後便確立了一種宇宙理論，這種理論即使毫無錯誤，總也是不再能令人激動的，他一定會覺得可怕得很。

雖然這些理論要把一切現象都用簡單的力來解釋，卻還有一個問題沒有決定，便是這些力與距離之間有何關係。很可能在不同的現象之中，這種關係也不同。從哲學的觀點看來，假如為解釋不同類的現象，必須介紹

許多不同類的力，自然是很不圓滿的。可是赫爾姆霍斯陳述得最清楚的這種所謂機械觀，在它的時代中卻起了很重要的作用。物質動力論便是直接受機械觀影響的一個最偉大的成就。

在敘述它的衰落以前，我們暫且接受十九世紀物理學家所接受的觀點，而且看從他們的關於外部世界的理論中可以得出怎樣的結論來。

物質動力論

我們可以利用以簡單的力互相作用的質點的運動來解釋熱的現象嗎？一個封閉着的容器中，裝着某種質量和某種溫度的氣體，例如空氣。加熱以後它的溫度增高了，也因此增加了能。但是熱怎樣與運動連繫起來呢？從前面所試着接受的哲學觀點，以及熱由運動產生的事實，就可以看出這樣的連繫是有可能的。假使每個問題都是機械的，熱必須是機械能。動力論的目的便是要這樣研究物質的概念。根據這個理論，一種氣體便是極大數目的質點或分子的集團，這些分子朝各個方向運動，互相碰撞，而每一次碰撞之後便改變運動的方向。分子必定有一種平均的速率，正如在一個大社團中必定有一種平均的年齡，或一種平均的財富。因此會有一個質點的平均的動能。在容器中有更多的熱，意思就是有更大的平均動能。因此根據這個理論，熱不是與機械能不同的一種特殊形式的能，而就是分子運動的動能。事實上這不是一個武斷的假設。假使我們要有一個一致的關於物質的機械的理論，則我們不得不把一個分子的動能看作氣體溫度的量度。

這個理論不單是想像的遊戲。我們可以證明氣體動力論不僅與實驗相合，而且實際上使我們對於事實能有更深刻的理解。這是可以幾個例子來表示的。

設有一個容器用一個活塞關閉住，活塞可以自由運動，容器中包含定量的保持不變溫度的氣體。假使活塞在最初是在某個位置上休止，只要加減重量，便可以使它或下或上地運動。要把活塞推下去，必須使用力，以抵抗內部的氣體的壓力。根據動力論，這種內部壓力的機構是甚麼呢？構成氣體的極大數目的質點向各方面運

動。它們撞擊容器的壁與活塞，撞了又跳回來，正像擲在牆上的球一樣。這樣的很大數目的質點的撞擊，足以反抗朝下的作用於活塞與重量的地心引力，因此能使活塞保持某種高度。在一個方向有不斷的地心引力，在另一個方向則有分子的許多不規則的打擊。假使兩方平衡，則所有這小些的不規則的力對於活塞的作用必定等於地心引力的作用。

假使把活塞推下去，氣體壓縮到只有原有的體積的一部分，假定說，只有二分之一，而溫度卻維持不變。根據動力論，我們可以預料甚麼事實會發生呢？難道由於撞擊所生的力會比過去更有效些或更無效些嗎？質點現在是更加緊束了。雖然平均的動能還是照舊，質點與活塞的撞擊的次數會更多些，因此全部的力會大些。從動力論可以明白看出來，要使活塞維持這樣低的位置，需要更大的重量。這件簡單的實驗事實是大家都知道的，但是它的預測卻是由物質的動力論邏輯地推出來的。

再研究另一個實驗。兩個容器都裝着同等體積的不同氣體，假定為氫與氮，而且溫度相同。假設兩個容量都用同樣的活塞封閉住，活塞上的重量也相等。簡單說來，這就表示兩種氣體都有同樣的容積，溫度與壓力。因為溫度相同，因此根據這個理論，每個質點的平均的動能也相同。因為壓力相同，這兩個活塞都是受同樣的全部的力所撞擊。平均起來，每個質點都帶着相同的能，而兩個容器都有相同的容積。因此雖然在化學上說兩種氣體是不同的，但是每個容器中的分子數必定是相同的。這個結果對於理解許多化學現象是很重要的。它表示在一定的溫度和壓力之下，在一定的容積中的分子數，不是那一種特殊的氣體所獨有的，而是一切的气体都具有的。最驚人的是動力論不僅能預言這樣一個普遍數的存在，而且能幫助我們決定它。

物質動力論，在量的方面和質的方面，都能解釋由實驗所決定的氣體定律。更有進者，這個理論的最大的成功雖然是在氣體的範圍之中，卻不限於氣體。

一種氣體可以因降低溫度而液化。物質的溫度的降低，意思就是它的質點的平均動能的減低。因此一個液體質點的平均動能很明白的會比一個相對應的氣體質點小些。

質點在液體中的運動的顯著的表現，首先就是所謂布朗運動 (Brownian Movement)。這種顯著的現象，假如沒有物質動力論，便會是完全神祕的和不可解的。首先觀察到這種現象的是布朗，而八十年之後，本世紀之初，才得到解釋。觀察布朗運動所必需的儀器，不過是一架顯微鏡，甚至不必是特別好的顯微鏡。

布朗當時正研究某種植物的雄蕊粒子，這是：

『特別大的質點或粒子，長度從四十分之一英寸至五十分之一英寸不等。』
他又報告說：

『當我觀察這些浸在水中的質點的形式時，我注意到很多都在運動。待我多次觀察以後，我可以斷定這些運動既不是由於液體的流動，也不是由於它的逐漸的蒸發，而是屬於質點本身。』

布朗所觀察到的，是懸在水中的而且可以用顯微鏡觀察到的粒子的不停的激動。這是一幅很動人的景象！這種觀察是否與那一種特殊植物的選擇有關係呢？布朗爲了回答這個問題，便用各種不同的植物來做同樣的實驗，而發現所有這樣的粒子，只要是相當地小，浸在水中，都會表現這樣的運動。他進一步發現無機體的極微的質點，也和有機體的質點一樣，有同樣不停的不規則的運動。他甚至在一個獅首人身像的碎粉中，也觀察到同樣的現象！

怎樣解釋這種運動呢？它似乎與所有過去的經驗都矛盾。把一個懸在水中的質點觀察三十秒鐘，就會看出來它的路徑的奇怪的形式。可驚異的是這種運動是永無止境的。把一個擺動的鐘擺放在水中，假如不加外力，很快地就會靜止。一種永遠不會減弱的運動，似乎與所有的經驗都不合。這種困難，卻是用物質動力論很美妙地解釋了。

甚至用最強的顯微鏡，也不能看見物質動力論中所說的分子與分子運動。我們必須斷定，假如把水看作質點的集團的理論是正確的，則這類質點的大小必定超出最好的顯微鏡的可見範圍。可是我們還是不放棄這個理論，而認定它是關於實在的一種可靠的理論。可以用顯微鏡看到的布朗質點，是受着較小的水的質點所撞擊。

假如被撞擊的質點相當小，便會發生布朗運動。它之所以會發生，便是因為從各方面來的不規則的撞擊不是相等的，而且是不能夠互相抵消的。因此能夠觀察到的運動，便是不可觀察的運動的結果。大質點的行為頗能反映分子的行為，可以說它是把小質點的行為放大，使它能在顯微鏡中看得見。布朗質點的運動路徑的不規則，反映那構成物質的較小的質點的路徑的同樣的不規則。由此，我們可以懂得何以對於布朗運動作一個量的研究，能夠使我們對於物質動力論有更深的理解。很明顯的，可見的布朗運動與不可見的撞擊的分子的大小有關。假如那撞擊的分子沒有相當多的能量，或者換句話說，沒有質量與速度，便不會有布朗運動。因此，布朗運動的研究，能夠使我們決定一個分子的質量，是不足為奇了。

由於理論方面用實驗方面的堅苦的研究，動力論的量的方面也成立了。由布朗運動的現象所產生的線索，便是量的數據的一個來源。從許多完全不同的線索，用不同的方法，也可以得出同樣的數據。所有這些方法都支持同樣的觀點，這件事實是最重要的，因為它證明了物質動力論的內在的一致性。

由實驗與理論所得的許多量的結果中，這裏只引一個。假使有一克最輕的元素氫，我們問：在這一克氫中有多少質點呢？這個答案，不僅可以應用於氫，而且可以應用於任何其他的氣體，因為我們已經知道，在怎樣的條件之下，兩種氣體會有同樣數目的質點。

根據對於一個懸在水中的質點的布朗運動所作的某種測量，這個理論可以使我們回答這個問題。答案是一個驚人的大數字：三後面接二十三個零！一克氫的分子數是：

300,000,000,000,000,000,000

設想一克氫的分子都增大到可以用顯微鏡看得見，假定說，它的直徑為五千分之一英寸，像布朗質點那樣大小。要把它們緊束起來，必須用一個箱子，它的每邊都有四分之一英里長！

我們只要把上面所引的數字除一，便可以很容易的計算出這樣的一個氫分子的質量。答案是一個小得古怪的數：

0.000,000,000,000,000,000,000,000,0033 克,

這個數代表一個氫分子的質量。

布朗運動的實驗，不過是決定這個數的許多獨立的實驗中的一個，而這個數在物理學上有很重要的作用。物質的動力論與它所有的重要的成就之中，我們看到，把一切現象解釋為物質質點間的交互作用的一般的哲學計劃實現了。

總結

在力學中假如知道一個動體的現狀以及作用於它的力，則它的未來的路徑是可以預料的，而它的過去也是可以發現的。例如所有的行星的未來的路徑都是可以預測的。作用的力是牛頓的萬有引力。舊力學的偉大的結果使人相信機械觀可以應用於物理學的任何部門，任何現象都可以用引力或斥力解釋，而這些力只與距離有關並且作用於不變的質點之間。

在物質動力論中，我們看到如何這個從力學問題中產生的觀點竟包括了熱的現象，而且構成了一個很成功的關於物質構成的理論。

二 機械觀的衰落

兩種電流體——磁流體——第一個嚴重的困難——光的速度——作爲質的光——色之謎——波是甚麼？——光波說——縱波呢還是橫波呢？——以太與機械觀——總結

兩種電流體

在下面的幾頁中，我們要報告幾個枯燥的實驗。自然，描寫一個實驗總不如做一個實驗那樣有趣，但是我們所以會覺得下面的幾個實驗無趣味，還不單是因爲這個緣故，而是我們不明白這些實驗的意義。一定要等到理論把它們解釋了以後，我們才會對它感覺興趣。我們的目的是要供給一個顯明的例子以表示理論在物理學中的作用。

(1) 把一根金屬棒放在一個玻璃的基上，棒的兩端都用線連接在驗電器上。驗電器是甚麼東西呢？這是一種很簡單的儀器。短短的一片金屬，一端繫着兩片金葉，放在一個玻璃瓶內。金屬只與所謂絕緣體的非金屬接觸。除了驗電器與金屬棒之外，我們還要一根很硬的橡皮棒和一片法蘭絨。

現在可以開始做實驗了。我們首先察看兩片金葉是否合攏在一起，因爲這是它們正常的位置。假如它們偶然沒有合攏，只要用手指輕輕觸那金屬棒一下，它們就會合攏來的。做過了初步的手續以後，於是用法蘭絨用力磨擦橡皮棒，再使它接觸金屬棒。兩片金葉立刻分開！甚至在橡皮棒移開以後，它們還是繼續分開的。

(2) 我們再做一個不同的實驗。所用的儀器還是一樣，金葉最初也還是合攏的。不過這次我們不使橡皮棒接觸金屬棒，而只接近它。金葉也還是立刻分開。但是有一點不同，橡皮棒移開以後，金葉立刻恢復原來的合攏的位置，而不是繼續分開。

(3) 我們把儀器稍微改變一下，來另做一個實驗。假定金屬棒是由兩節連接起來的。橡皮棒用法蘭絨擦過以後，把它接近金屬棒。金葉立刻分開，和前面一樣。但是現在我們把金屬棒分成兩節，然後把橡皮棒移開。我們發現兩片仍舊分開，並不如第二個實驗中一樣，恢復原來的位址。

這樣簡單的實驗實在引不起我們熱烈的興趣。假如是在中世紀，做這樣一個實驗的人，恐怕會要活活燒死。而在我們看來，則這些實驗既枯燥，又不合邏輯。把上面的敘述讀過一遍以後，要再重述一遍而不會弄混，恐怕都不是容易的事。但是一點兒理論，就可以幫助我們了解它們的意義。我們甚至可以進一步說，這樣的實驗決不會是偶然做來好玩的，一定預先已經多多少少知道了它們的意義。

我們現在可以以把一個理論的基本觀念說出來，這個理論能說明上面的各種事實。

電流體有兩種，一種叫做正(+)的，而另一種叫做負(-)的。它們頗像已經解釋過的那種意義的質，因為它們的量可以增減，而在一個孤立的系統中，其總量是不會消失的。可是電和熱、物質、或能之間有一根本不同之處。電的質有兩種。假如還要用前面所說的錢的比喻，則必須把這個比喻略加修改。假如正的電流體和負的電流體互相抵消，則這個物體的電的性質既非正，也非負，而是中性的。一個人若一無所有，可能是因為他確實一無所有，也可能是因為他放在保險櫃裏面的錢，恰恰等於他所負的債。我們可以把正負電比之賬簿中的借項和欠項。

這個理論的第二個假定是，同類的兩種電流體互相排斥，而異類的兩種電流質互相吸引。

最後還需要一個假定：物體有兩類，在一類物體中這種流體可以自由運動，這類物體叫做導體，而在另一類物體中，它們不能自由運動，因此叫做絕緣體。不過，這種分別不是很嚴格的。完全的導體或絕緣體在事實上都是沒有的。金屬、地、人身都是導體，但傳導的程度並不一樣。玻璃、橡皮、磁器和這一類的東西，都是絕緣體，這是從上面的實驗可以看出來的。通常做靜電實驗的人，遇到結果不好的時候，總是怪空氣太潮濕，因為潮濕的空氣增加它的傳導性。

這幾個理論的假定已經夠解釋上面的三個實驗了。我們還是照上面的次序，一一用電流體學說加以解釋。

(1) 橡皮棒的電也是和其他物體一樣，在通常的情形中，是中性的。它包括正負兩種流體，其量相等。用法蘭絨摩擦它以後，這兩種流體便分開了。這種說法純粹是依照習慣的規定，這是應用理論所創造的描寫摩擦過程的名辭。橡皮棒被擦以後，一種電便比另一種電多些，這較多的電叫做負電，這個名辭當然完全是習慣規定的。假如是用貓皮擦玻璃棒，則較多的電依照習慣規定叫做正電。在實驗中我們把橡皮棒接觸金屬的導體，於是電流便傳到那金屬上去了。在金屬上它自由運動，於是整個的金屬上，連兩片金葉在內，都有了這種電。因為負電與負電之間有斥力，兩片金葉上既然都是負電，於是儘量地分開。金屬放在玻璃或其他的絕緣體上，因此電流體能始終留在導體上，除非空氣漸漸把它傳導掉。現在我們懂得了，爲甚麼在做實驗之先，必須用手指去接觸金屬。金屬，人體與地面構成一個大的導體，因此金屬上的電流體便沖淡到極點，在驗電器上實際上是一點也沒有留下來了。

(2) 這個實驗在開始時，是和前面的實驗完全一樣的。但是這次不接觸金屬，而只接近它。導體上的兩種流體是可以自由流動的，因此被分開了，一種被吸引，一種被排斥。假如把橡皮棒移開，它們又重新混合起來，因爲不同類的兩種流體是互相吸引的。

(3) 現在我們把金屬分成兩節，在把橡皮棒移開以後，這兩種流體不能再混合了，每兩片金葉上的較多的電都屬於一種，因此互相排斥而繼續分開。

利用這個簡單的理論，便把上面這些事實都解釋了。這個理論不僅能解釋這些事實，還可以解釋『靜電學』上其他許多事實。每個理論的目的是領導我們去把握新事實，指示我們去做新實驗，而且引我們去發現新現象和新法則。舉一個例子就明白了。設想把第二個實驗加以改變。假設把橡皮棒接近金屬，而同時用手接觸金屬。結果會怎樣呢？理論可以回答這個問題：被排斥的流體（）經過我們的身體逃走了，結果只留下一種流體即正電流體。只有接近橡皮棒的驗電器會繼續分開。你去實際做這個實驗，準可以證實這個推論。

從現代物理學的觀點看來，這個理論是太簡陋了。可是它也能代表每個物理學的學說的特色。

在科學中是沒有永遠的理論的。一個理論所預言的事實，每每由實驗推翻了。每個理論都有它漸漸發展的時期和勝利的時期，經過這個時期以後，它就很快地衰落。上面說過的熱質說的盛衰便是許多例子中的一個。還有其他更深刻更重要的例子，以後會要討論到。差不多科學上的大進步都是由於舊理論有了危機，於是不得不設法解決它的困難。我們必須研究舊的觀念和舊的理論，雖然這些觀念和理論都是過去了的東西，但若不先研究它們，便不能了解新觀念和理論的重要，也不能了解它們的正確的程度。

本書開端把研究者比之偵探家，他首先搜集必需的材料，然後用純粹的思想去發現那正確的解決。至少在一點上，這個比喻是很不恰當的。無論在生活裏面或在小說裏面，必定是先有人犯罪，然後偵探才去查信件、驗指紋、子彈槍枝等。總之，他至少是知道發生了一件暗殺案子。科學家則不然。我們很容易想像一個人對於電毫無所知，例如古人對於它沒有一點知識，但也生活得很快樂，你把金樹棒、金葉、瓶子、硬橡皮棒、法蘭絨，總之所有做那些實驗的器具都交給他。他即使是一個很有教養的人，也許會把瓶子盛酒，把法蘭絨擦東西，而從不會想到拿它們去做一個實驗。一個偵探已經知道有一個謀殺案發生了，他只要問：究竟誰殺了柯克羅賓呢？科學家卻多少要自己犯罪，然後去偵察它。而他不要解釋一個案子，所有已發生的甚至未發生的現象，他都要解釋。

流體學說也是受了機械觀的影響，因為機械觀是要用質和質間的簡單的力來解釋一切。要知道機械觀能否應用來描寫電的現象，我們必須研究下面的一個問題。有兩個圓球，都有電荷，就是說都有一種較多的電流體。我們知道這兩個圓球或者會互相排斥，或者會互相吸引。但是力只與距離有關，假使與距離有關，這關係又是怎樣的呢？最簡單的猜想，自然是這種力與距離的關係，正如萬有引力與距離的關係一樣。例如距離增加三倍，它的原來的強度便減小九分之一。庫倫(Coulomb)所做的實驗證明這個法則是確實靠得住的。在牛頓之後一百年，庫倫發現電與距離的關係和萬有引力一樣。庫倫定律與牛頓定律之間的兩個大差別是：萬有引力是

物體常常有的，而電力卻是只在物體具有電荷時才有的。萬有引力只是吸引，而電力則或者互相排斥，或者互相吸引。

前面談熱的現象時曾問過一個問題，現在也要同樣的問一句。電流體是有重量還是沒有重量的質呢？換句話說，一片金屬在具有電荷和完全中性時，其重量是否完全相等呢？我們把它秤一下，看不出有何相差。由此可以斷定電流體也是沒有重量的質的一種。

電的理論的進一步的發展需要再介紹兩個新觀念。我們還是要避免嚴格的定義，而只利用已經熟悉的觀念作比喻。我們記得要了解熱的現象，區別熱與溫度是如何重要。而區別電位和電荷也有同樣的重要。這兩個新觀念的區別用類比的方法便可以弄明白：

電位——溫度

電荷——熱

兩個導體，例如兩個大小不同的圓球，也許有不同的電荷，就是說，所多的電流體相同，但是電位卻不會相等，小圓球上的電位高，大圓球上的電位較低。電流體在小圓球上較密較緊。因為愈密則互相排斥的力愈大，因此小圓球上的電荷，逃去的趨勢也愈大。電荷從導體逃出的趨勢可以直接測量電位，要明瞭電荷與電位的差別，我們必須說幾句關於熱的物體的行為的話，然後看電的方面，與這些話相對應的是些甚麼話。

熱

兩個溫度不同的物體互相接觸後，漸趨於同一溫度。

電

兩個電位不同的絕緣了的導體互相接觸以後，即趨於同一電位。

若兩物體的熱容量不同，則同量的熱會產生不同的溫度的變更。

若兩物體的電容量不同，則同量的電荷會產生不同的電位的變更。

溫度計與物體接觸以後，其水銀柱的高度，表示它自己的溫度，因此也表示物體的溫度。

表示它的電位，因此也表示傳導體的電位。

但是這樣的類比不能推得太遠。只舉一個例子，便可以看出它們的同點和異點來。假使一個熱的物體與一個冷的物體接觸，熱會從較熱的物體流到較冷的物體上去。在另一方面，假設我們有兩個絕緣了的導體，電荷相等，但是相反，一是正電荷，一是負電荷。這兩個電荷的電位不同。依照習慣，我們說負電荷的電位較低，而正電荷的電位較高。假使這兩個導體互相接觸，或是用線連起來以後，則依照電流體說，它們便不會表示電荷，因此根本不會有電位的相差。我們必須想像在電位的相差趨於平等的短時間內，電荷會從一個導體「流」到另一個導體。但是怎樣流的呢？是正的流體流到負的物體，還是負的流體流到正的物體呢！

單是根據這裏所提到的材料，我們無法決定那一個答案對。我們可以認為這兩種流法都可能，甚至可以同時有兩個方向的流動。我們的選擇完全是根據習慣。沒有甚麼意義，也沒有實驗的方法可以決定這個問題。將來有了更深的電的理論以後，才能答覆這個問題，那個答案若用簡單的電流體理論中的名詞說出來，是毫無意義的。我們且採用下面的說法。電流體是從電位較高的導體流向電位較低的導體，在前面所說的兩個導體中，電是由正的流到負的。這種說法是根據習慣，暫時是完全武斷的。這種困難表示電並不能完全與熱相類比。我們看到運用機械觀來描寫靜電學中的基本事實是可能的。用機械觀來描寫磁的現象，也是可能的。

磁流體說

我們還是依照上面的方法，首先敘述幾件極簡單的事實，然後去找它們的理論的解釋。

(1) 假如有兩根磁棒，一根的中央安在一個架上，但可以自由轉動，另一根拿在手裏，然後使兩棒的極端互相接近，因而發生很強的吸引。這是一定可以做到的。假如沒有吸引的現象發生，只須把磁棒掉過頭來，用

旁的一端去試試。只要那棒具有磁性，一定會有些現象發生的。磁棒的兩端叫做極。我們把手裏的磁棒的極，沿着那可轉動的磁棒移動。磁極愈移近可轉動的磁棒的中央時，吸引力愈減小，在中央處根本就沒有吸引力。磁極再朝着這個方向往前移，則漸漸發生推斥的現象，到了可轉動的磁棒的另一極時，斥力最大。

(2) 上面的實驗引出另外一個實驗。每根磁棒有兩極。我們難道不能夠把它的一極分離出來嗎？辦法很簡單：只要把一根磁棒分成相等的兩段便夠了。我們在前面看到一根磁棒的極與另一根磁棒的中央之間，是沒有力的，但是實際上把一根磁棒折成兩段的結果，卻是驚人的，出乎意料的。假設我們把前面實驗中那根可以由轉動的磁棒折成兩段，然後拿它的一段做實驗，結果仍是一樣！本來沒有磁力的痕跡的地方，現在居然成了很強的極。

這些事實怎樣解釋呢？因為磁的現象也和靜電的現象一樣，有斥力和引力，所以我們可以模倣電流體的學說來做一個磁的學說。設想有兩個圓的導體，電荷相等，一個是正的，另一個是負的。所謂「相等」，便是有相同的絕對值，例如 $+q$ 和 $-q$ 便有相同的絕對值。假定這兩個圓球用一種絕緣體如玻璃棒之類互相連起來。若畫成圖，這種佈置可以用一個從其負電荷的導體指向其正電荷的導體的一支箭表示出來。我們可以把這整個的東西叫做一個電的偶極子。很明顯的這樣的兩個偶極子的行為，應該和第一個實驗中的磁棒一樣。假設把這個發明看成一根實在的磁棒的模型，我們便可以說，假定有磁流體，則一根磁棒便是一個磁偶極子，兩端各為不同類的流體。這個簡單的理論是模倣電的理論的，用它解釋第一個實驗是圓滿的。在一端含有引力，在另一端有斥力，在中央則兩種相等而相反的力互相平衡。但是怎樣解釋第二個實驗呢？把電偶極子的中間的玻璃桿折斷，我們便得到兩個孤立的極。磁偶極子的磁棒也應該如此，但這是與第二個實驗不合的，由於這種矛盾，我們不能不介紹一種更細緻的學說。我們放棄前面的模型，想像磁棒是由許

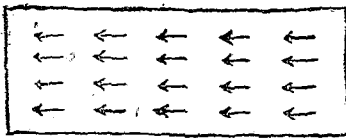


圖 九 第

多極小的元磁偶極子組成的，這些元磁偶極子不能再折斷為分開的極。在整個的磁棒中有一種秩序，因為所有的元磁偶極子都是指着一個方向。我們立刻知道了為甚麼把一根磁棒折成兩段以後，那新的兩端又變成新的兩極，這個改造過的理論可以解釋前面的兩個實驗。

那個較簡單的理論不需要改造，也能解釋許多事實。舉例來說：我們知道一根磁棒能夠吸鐵屑。為甚麼呢？因為在普通的一片鐵屑中，這兩種磁的流體都有，而且混合在一起，因此不會顯出甚麼效應來。把磁棒的正極移近鐵屑，便會『命令』這兩種流體分開，吸引負的流質而排斥正的流體。結果便發生鐵與磁間的吸引現象。移去磁棒以後，流體又多少恢復原來的狀態，究竟恢復多少，要看它們記憶外力的命令的程度。

我們不必說到這個問題的量的方面。用兩根極長的磁棒，我們就可以研究兩極在互相接近時的吸引或排斥的力。假設棒長得很，棒的另一端便不會有多少影響。吸引力或排斥力與兩極間的距離有何關係呢？庫倫做的實驗回答了這個問題，這種關係與牛頓的引力定律及庫倫的靜電定律是一樣的。

這個理論又應用了機械觀，因為機械觀認為一切現象都可以用不變的質點之間的引力和斥力解釋，而這種力的大小與距離有關。

我們只提起一件很著名的事實，因為以後我們還要用到它。地球是一個大的磁偶極子。我們一點也不能解釋它何以如此。北極接近地球的負（-）磁極，而南極則接近地球的正（+）磁極。這正負的名詞，不過是習慣上所規定的，但一旦規定了，便可以使我們決定旁的現象的磁極。一根可以自由轉動的磁針會服從地球的磁力的命令。它的正極會指向北極，就是說，指向地球的（-）磁極。

我們雖則能把機械觀應用於電與磁的現象範圍之中，但是也不必因此特別驕傲或喜歡。這個理論中有些部份實在很不圓滿。我們必須發明許多新的質，如兩種電流體還有許多元磁偶極子。質實在太多了。

力是簡單的。無論是萬有引力，或電力，或磁力都可以用同樣的方式表示。但是為求簡單，我們所付的代價也高得很，我們憑添了許多新的，沒有重量的質。這些都是頗為勉強的觀念，而且與根本的質完全無關。

第一個嚴重的困難

我們現在可以談應用前面所說的一般的哲學觀點所發生的第一個嚴重的困難了。在後面我們還會看到，這個困難與另一個更嚴重的困難，使我們絕對不再相信一切現象可以用機械觀解釋。

自發明電流以後，作為科學與技術的一部門的電學才有了大的發展。偶然的發現產生很重要的結果，這種例子在科學史上很少，在這裏我們卻遇到這樣一個例子。蛙腿痙攣的故事有各種的說法，不管那些細微節目的真假如何，加爾文尼 (Galvani) 的偶然的發現，使得弗打 (Volta) 在十八世紀末年發明所謂弗打電池組，這件事實總是毫無疑問的。這種電池現在是沒有甚麼實際用處了，但是在學校的實驗中，或是在教科書中，總是把它用作最簡單的例子來說明電流的來源。

它的構造的原則是很簡單的。拿幾個大玻璃杯，裏面裝水，再加一點點硫酸。每個玻璃杯中有兩個金屬片，一銅片一鋅片，都浸在溶液中。一個玻璃杯中的銅片連接於另一個玻璃杯中的鋅片，而第一個杯中的鋅片卻不與第二個杯中的銅片連起來。假設構成電池組的裝有金屬片的玻璃杯相當的多，我們可以用相當靈敏的電器發現第一個杯中的銅片與第二個杯中的鋅片之間有一種電位的相差。

要得到可以測量出來的電流，必須用很多玻璃杯所構成的電池組。但在以後的討論中，用那最簡單的電池作例子就夠了。我們發現銅的電位比鋅的電位高些。所謂高些的意思，等於說 $+10$ 比較 -10 要大些。假使把一個導體連接於那個自由的銅片，另一個導體連結於鋅片，則兩個導體上都會有電荷，前一個有正電荷，後一個有負電荷。到此為止，還沒有發現有甚麼特別新的了不起的現象，我們還可以應用以前關於電位差的觀念。我們已經知道兩個電位不同的導體用線連接起來以後，可以使電位差消滅，而電流體便會從一個導體流到另一個導體。這種現象與由於熱的流動使溫度相等的現象是相似的。但是這種觀念能否應用於弗打電池組呢？弗打在他的報告中說，金屬片的作用和導體一樣：

「它上面有輕微的電荷，而每一次放電以後，又立刻有了新電荷，總而言之，它所供給的電荷是無窮盡的，或者說，會發生一種永遠不斷的電流體的作用與推動。」

這個實驗的結果是驚人的，銅片與鋅片上的電位差並不會消滅，可是兩個荷電的導體，用線連接起來以後，其電位差卻會因此消滅掉。電位差既然繼續存在，那麼根據電流體的理論，便有電流體不斷地從較高的電位（銅片）流到較低的電位（鋅片）。我們假如不願放棄電流體學說，便必須假定有一種力量不斷地產生電位差，因此使電流體不斷地流動。但是從能的觀點看來，這整個的現象是很驚人的。在電流經過的線中產生了相當多的熱量，假使線很纖細，甚至會因此熔掉。由此可知，在線中產生了熱能。但是這整個的弗打電池組構成一個孤立的系統，因為沒有外部的能加進來。假設我們不願放棄能量不滅的定律，便必須研究能的變換發生在甚麼地方，這許多熱是由甚麼能變換出來的。我們很容易發現，在電池中有很複雜的化學變化過程，而在這過程中，銅片鋅片以及溶液都有很積極的作用。從能的觀點看來，這一串變換，是這樣的：化學能 \downarrow 流動的電流體即所謂電流的能 \downarrow 熱。一個弗打電池組不能用之無窮，在一個相當時期以後，產生電流的化學變化便會使弗打電池組失效用。

有一個實驗，把應用機械觀的大困難表示出來了。這個實驗初聽起來是很奇怪的。它是奧斯特 (Oersted) 約在一百二十年前所做的。他的報告中說：

「從這些實驗裏看出來，我們可以用一個加爾文尼的儀器，使磁針移動位置，但只是在電路通的時候有這種現象，而不是在電路斷的時候。近來有些極著名的物理學家想在電路斷的時候發現這種現象，卻徒勞無功。」

假設我們有一個弗打電池組，並且有一根傳導線，假設把線連接在銅片上，而不連接在鋅片上，便會發生一種位差，但是卻不會有電流。假設把線變成一個圈，在它的中央擺一根磁針，線和針都在同一平面上。在線不接觸鋅片

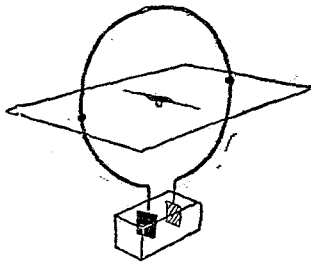


圖 十 第

的時候，不會有甚麼現象發生。不會有任何力的作用，已經存在的位差對於磁針的位置不會發生任何影響。我們簡直不懂爲甚麼奧斯特所說的那些「極有名的物理學家」以爲會有這樣的影響。

但是現在我們把線連接在鋅片上，立刻便發生了很奇怪的現象。磁針從它原來的位差移動了。假使把這本書的頁代表圍的平面，則它的一個極現在正指着讀者。這是一種垂直於平面的力作用於磁針。根據實驗的事實，我們不能不認爲力的作用的方向是垂直的。

這個實驗之有趣味，首先是因爲它表示在兩種表面上完全不同的現象，磁與電流之間，有一種關係。其次還有一點更加重要。磁極與電流通過的線的小部分之間的力，不是在連接線與針的直線上，或是連接流動的電流體的質點與元磁極子的直線上。力是與這些線垂直的！根據機械觀我們要把外部世界中的一切力的作用，都化成像萬有引力一樣的作用，而我們現在第一次發現一種力，與過去所說的力完全不同。我們記得服從牛頓和庫倫的萬有引力，靜電及磁的力，都是在連結兩個互相吸引或推斥的物體的直線上作用。

另一個實驗把這種困難表示得更明顯。羅蘭 (Rowland) 在差不多六十年前做了一個很精巧的實驗。我們把實驗的技術的詳細情形丟開不談，只敘述實驗的大意。設想一個小的荷電的圓球。再設想這個圓球順着圓的軌道，很快地運動。在軌道中央擺着一個磁針。在原則上，這個實驗和奧斯特的實驗相同，惟一的區別便是他不是一種通常的電流，而用一種荷電的機械運動。羅蘭發現結果與電流通過圓形的電線的結果相似。磁針受着一種垂直的力而發生偏轉現象。

現在我們使電荷運動快些。作用於磁極的力因此增加了，它從原來的位差偏轉的程度便愈加大。這個觀察產生了另一種嚴重的困難。不僅力不在連接磁針與電荷的直線上，而且力的強弱與電荷的速度有關。整個機械觀是建築在一個信仰上，以爲一切現象都可以用只與距離有關，與速度無關的力來解釋。羅蘭的實驗的結果推翻了這個信仰。可是我們還可以持一種保守態度，設法在舊觀念中去找解決。

當一個理論在很勝利的發展時，突然發生一些出乎意料的阻礙，這類的困難在科學上常常發生。有時把舊

觀念簡單地推廣，似乎可以把困難解決，至少暫時像是解決了。例如在這個例子中，似乎把過去的觀點推廣，而在元質點間假設一些更加普遍的力便夠了。可是那舊理論每每已經無法彌補，而困難終於使它場台，於是新的理論應運而生。在這裏，不是單單一個小小磁針的行爲把表面上很鞏固的很成功的機械論打倒了。從一個完全不同的方向來了一種更厲害的攻擊。但是這是另一個故事，以後我們再談。

光的速度

在伽利略的兩種新科學中，我們聽到師生間關於光的速度的談話。

「沙格勒多：我們應該認爲光的速率是屬於那一類呢？有多少大呢？它是瞬時的呢？還是暫時的呢？或是像其他的運動一樣，需要時間呢？我們能用實驗決定這個問題嗎？」

辛普利波：日常的經驗告訴我們，光的傳播是瞬時的，因為當我們看見遠處開炮時，閃光不需要時間便傳到了眼睛，但是聲音卻只在一個相當的時間以後才傳到耳鼓。

沙格勒多：辛普利波，從這種熟悉的經驗，我們只能推論傳到我們耳鼓的聲音，比較光要走得慢些，它並不告訴我們光的傳播是瞬時的，還是需要時間的。……

薩爾維蒂：我因爲覺得這種觀察以及其他類似的觀察不能得出甚麼結論來，因此設計一個方法，用這個方法我們可以很精確地決定，光的傳播實在是否瞬時的。……」

薩爾維蒂繼續解釋他的實驗。爲了解他的觀念起見，我們不妨設想光的速度不僅是有限的，而且是很小，光的運動慢下來了，像電影片的運動慢下來一樣。A和B兩個人都拿着遮蓋了的燈，而站的地方相隔一英里。第一個人A開了他的燈，這兩個人預先約好，B看見A的光時要立刻關自己的燈。我們假定光線在「慢下來」以後，每秒鐘走一英里。A把燈上的遮蓋物拿開，於是一個光的信號便送出去了。B看見這個信號，便送一個信號回答。A在送出自己信號以後兩秒鐘接到了B的信號。那就是說，假使光的快慢是每秒一英里，

則 A 在放出信號和接到一英里外的 B 的信號之間要經過兩秒鐘。反轉來說，假如 A 不知道光的速度，但假定他的同伴會守約言，他若看見在開自己的燈以後兩秒鐘，B 的燈也開了，他就可以斷定光的速率是每秒一英里。

以伽利略時代的實驗技術，自然無法用這種方法測光的速率。假使距離是一英里，他必須能測出十萬分之一秒的時間來！

伽利略提出了決定光速的問題，但是卻沒有解決它。提出一個問題比解決一個問題，有時更為重要，因為解決一個問題也許僅僅是一種數學的或實驗技巧的事。而提出新的問題，新的可能，從新的角度去看舊的問題，卻需要創造和想像力，而且是一種科學上的真正的進步。慣性定律，能量不滅定律，都只是運用新的和獨創的思想對付已知的實驗和現象所得來的。在本書以後的部分中，我們要特別注重從新的觀點上看已知事實的重要性，而且要描寫一些新的理論，因此還可以找到許多這類的例子。

我們再回到比較簡單的決定光速的問題。很奇怪，伽利略居然沒有想到他的實驗可以更簡單地、更準確地由一個人做出來。他不必請一個伙伴站在遠處，只要在那裏安置一面鏡子就夠了，鏡子接受了光以後，便立刻自動地送回一個信號。

約在二百五十年之後，菲左 (Fizeau) 便利用了這個原理，他是第一個用地上的實驗，決定光速的。遠在菲左之前，已經有雷墨爾 (Raimet) 用天文的觀察決定了觀察，不過沒有菲左那樣精確。

光的速度大極了，因此很明顯的，要測量它，必須利用一種很大的距離，如地球與另一個太陽系統的行星間的距離，或者便須用極精巧的實驗技術。雷墨爾所用的是第一種方法，菲左所用的是第二種方法。在這些最初的實驗之後，又有很多次決定光速的實驗，而且愈來愈準確。在本世紀，邁克爾孫 (Michelson) 為這個目的設計了一種極精巧的技術。這些實驗的結果可以簡單地說出來：光在『真空』中的速度約為每秒 186,000 英里或 300,000 公里。

作為質的光

我們又從幾種實驗的事實出發。上面所引的數字是光在「真空」中的速度。光在「真空」中以這種速率進行，而不會受到阻礙。把一個空的玻璃的容器中的空氣抽去了，我們還可以透過它看東西。我們看見行星，恆星，星雲，可是它們的光必須經過真空，才能到達我們的眼睛。不論容器中有無空氣，我們能透過它看見東西，這件簡單的事實表示空氣的有無是無關緊要的。因為這個道理，所以我們做光學實驗時，在一間普通的房子中間所做的結果，和在沒有空氣的地方所做的結果一樣。

一件最簡單的光學事實便是光的傳播是直線的。我們要描寫一個能說明這種事實的原始而簡單的實驗。在一個點源前面擺一塊屏。所謂點源，就是一個小小的光源，例如遮蓋了的燈上的一個小小的缺口。光通過屏上的孔以後，在很遠的牆壁上的暗的背景上，現出白光。把這個實驗畫成平面圖，則點源與屏上的孔的邊緣，及牆上的白光的邊緣，可以連成一線。所有這類的現象，甚至現出光影及半影，那些比較複雜的現象，都可以用光在「真空」或在空氣中沿直線進行的假定來解釋。

我們再舉一個光通過物質的例子。一柱光通過真空，落在玻璃片上。結果會怎樣呢？假如直線運動的定律還是可靠的，光應該還是照直進行。但是實際上却不是的。光的路線發生了曲折。這種現象叫做折射現象。把一根棍子的一半浸在水裏面，看起來這根棍子的中央像是彎了，這種大家都熟悉的現象，便是許多折射現象中的一個例子。

這些事實足夠指示如何可以做出一種光的機械論來。我們在這裏的目的是要指出質，質點，力的觀念如何侵入光學的範圍，而最後這種舊的哲學觀點如何崩潰。

我們現在看這個理論的最簡單的最原始的形式。我們假定所有的發光的物體都發射光的質點或微粒，這些微粒射到眼睛上便產生光的感覺。我們爲了對於現象作機械的解釋，已經慣於介紹新的質了，因此現在可以不

需要多大的躊躇，再來介紹一種新的質。這些微粒必須以一定的速度在真空中沿直線進行，而把消息由發光體帶到我們的眼睛。所有表現光的直線傳播的現象，都支持微粒說，因為通常都認為微粒的運動正是直線的。這個理論也可以很簡單地把鏡子上的光的反射，和把具有彈性的球拋在壁上的那種力學實驗中的反射，解釋為同一類的反射。

折射的解釋略較為難一些。我們不必仔細研究它，便可以看出這是可以由機械論的解釋的。假使微粒射在玻璃面上，很可能物質的質點對它們發生一種力，很奇怪的，這種力只在最隣近物質的地方才發生作用。任何作用於動的質點的力都會改變它的速度，這是前面已經說過的。假設加於光的微粒的力是與玻璃面垂直的引力，則新的運動的路線，會是在原來的路線與垂直線之間。從這種簡單的解釋，似乎可以推想，光的微粒說會有很大的成功。可是要決定這個理論的用處和有效的範圍，我們必須研究新的和更複雜的現象。

色之謎

首先解釋世界上的豐富的色的又是牛頓的天才。這裏引牛頓自己描寫他的一個實驗的一段話：

『在一六六六年（那時候我正從事於磨球面玻璃以外的其他形式的玻璃），我得到一個三角形的玻璃的稜鏡，利用它研究有名的色的現象。我把房間弄成漆黑的，在窗戶上做一個小孔，讓適當的日光射進來，我又把稜鏡放在光的入口處，使光可以折射到對面的牆上去。當我最初看見因此而產生的鮮明的強烈的色時，我覺得那是一種極有趣味的玩意。』

從太陽射來的光是『白』的，經過稜鏡以後，它便現出所有世界上的色來。自然本身在虹霓的美麗的色中也是表現同樣的結果。自遠古以來，似乎人類便想解釋這類的現象。聖經中說虹霓是上帝與人類訂盟約的一個記號，在一種意義上說，這也是一個理論。不過它不能圓滿地解釋何以虹霓會常常發生，而且總是與雨相連而發生。在牛頓的偉大的著作中才首先用科學的方法研究色之謎，而且指示了它的解決。

虹霓的一邊總在紅的，而另一邊總是紫的。在兩者之間排列着其他的顏色。牛頓對於這種現象的解釋是這樣的：在白光中已經有各種色。它們都混合在一起經過太空和大氣，而產生白光的效應。白光可以說是屬於不同的色的不同類的微粒的混合。而在牛頓的實驗中，稜鏡又把它們分開了。根據機械論，折射是由於玻璃的質點所發生的力，作用於光的質點上所致。屬於不同的色的微粒也不同，紫色的力最大，而紅色的力最小。因此每種色都會沿着不同的路線折射，而在光離開稜鏡以後，會互相分開來。在虹霓的情形中，雨點的作用便等於稜鏡的作用。

光質說比較前面質的理論更加複雜。光質不止一種，不同的色有不同的質。可是假使這個理論有幾分真，它的結論必須符合觀察。

像牛頓的實驗中所顯示的太陽的白光中的色系叫做太陽的光譜，或者更加確切些說，它的可見光譜。這樣把白光分解為它的成分叫做光的色散。假如上面的解釋不錯，則光譜中分開來的色可以用一個適當配準的稜鏡再混合起來。這個過程應該恰和前面的相反。我們應該從前面已經分開的光得到白光。牛頓用實驗證明我們確可以用這種簡單的方法從白光的光譜得到白光，而且從白光得到光譜，無論要做多少次都可以。這些實驗很有力地支持光的微粒的理論，而每種色的微粒都像是不變的質。牛頓這樣寫道：

「……那些色不是新產生的，而只是在分離以後才顯出來的；因此假如再把它們混雜起來，它們又會合成分離以前的那種色。同理，把許多種色合起來所產生的變質不是實在的；因為如果這些有色的光再分開了，它又會表現在進入合成以前的那種色了；正如你看到藍色與黃色的粉，假如很細緻地混合，則從肉眼看來是綠色，可是作為成分的那些微粒的色，卻並不因此實在有了變質，而只是混雜起來了。因為只要用一付好的顯微鏡去看，它們還是藍色與黃色互相混雜着。」

假設我們已經把光譜中很窄狹的一條紋分離出來。這就是說，在許多色之間，我們只讓一色通過縫隙，其餘的用屏擋住。通過縫隙的光柱便會是一種單光，就是說，不能再分析為許多成分的光。這是這個理論的結

論，而且是很容易用實驗證明的。要得到單光的源有很簡單的方法。例如鈉在白熾時發出黃色單光。用單光作某些光學實驗常常是方便的，因為我們可以想像得到，實驗的結果會要簡單得多。

讓我們想像突然發生了一件奇事：太陽只射出某一種色例，如黃色的單光了。那地球上的種種色都會立刻消失，任何東西都是黃的或黑的！這種預言是光質論的一個結論，因為新的色是不能產生的。它的可靠可以用實驗證明：在一個只有白熾的鈉作爲光源的房內，任何東西都是黃的或黑的。世界上豐富的色反映着組成白光的

那些豐富的色。

光質論在所有這些例子中似乎都很圓滿，只是不得不爲每種色介紹一種質，使我們略感不安而已。而假定所有的光的微粒在真空的空間中都有完全相同的速度，似乎也勉強。

我們可以想像另一種假定，另一個性質完全不同的理論也能同樣的圓滿，而能解釋一切。我們確實立刻會看到另一個理論的興起，那個理論是根據完全不同的概念，可是能夠解釋同樣的光學現象。可是在提出這個新理論的基本假設之前，我們必須回答一個與這些光學的研究毫無關係的問題。我們必須回到力學，而問：

波是甚麼？

在倫敦發動的一個謠言很快就到達愛丁堡，可是傳播謠言的人並未往來兩城之間。這裏有兩類不同的運動，一種是謠言由倫敦到愛丁堡的運動，另一種是傳播謠言的人的運動。經過麥田的一陣風，會激起一個波，經過整個麥田傳播出去。我們又必須分別波的運動與每株植物的運動，每株植物只有小的振動。我們都看到，把一個石子丟到池內，會產生一些波，以愈來愈大的圈子傳播出去。波的運動與水的質點的運動很不同。質點只上下運動。我們所觀察到的波的運動是一種物質的狀態的運動，而不是物質本身的運動。看一個浮在波上的軟木塞就可以明白，因為它是模放着水的運動而上下運動，卻並不爲波所帶走。

要了解波的機構，我們又要研究一個理想的實驗。假定一個大的空間完全均勻地充滿着水，或空氣，或旁

的『介質』。在中央處有一個球。在實驗之始根本沒有運動。球突然有韻律地『呼吸』起來。它的體積一下膨脹，一下收縮，不過始終保持着球的形式，結果介質會怎樣呢？在球開始膨脹之際，極鄰近球的介質的質點都推向外面，以致那一層球殼形的水或空氣的密度都增加到超過它的平均值。同樣的，當圓球收縮時，環繞着它的最鄰近的那一部分介質的密度便會減小。這種密度的變化便會傳播於整個的介質。構成介質的質點只作小的振動，但是整個的運動却是一個前進的波的運動。這裏有一點重要的新的事實，便是我們第一次研究到一種不是物質的東西的運動，而是藉物質傳播的能的運動。

用脈動的圓球作例，我們可以介紹兩個物理概念，這些概念對於描寫波是很重要的。第一個概念是波的傳播的速度。這是與介質有關的，例如水與空氣便不同。第二個概念是波長的概念。例如海上或河上的波，其波長便是從一個波的谷到第二個波的谷的距離，或是從一個波的峯到第二個波的峯的距離。因此海波的波長比河波為大。至於由脈動的圓球所產生的波，其波長則為在某時間內表現最高和最低密度的兩個鄰近的球殼形介質間的距離。很明顯的，這種距離不是單與介質有關。圓球的脈動率當然也會有很大的影響，脈動愈快則波長愈短，脈動愈慢則波長愈長。

波的概念在物理學中的應用是很成功的。這確實是一個機械的概念。這種現象可以簡化為質點的運動，而根據動力論，質點是構成物質的成分。因此一般說來，每一個應用波的概念的理論都可以看作一種機械觀的理論。例如，聲學現象的解釋，主要地便是根據這個概念。振動的物體，例如聲帶與提琴絃，都是聲波的源，而聲波在空氣中的傳播，和脈動的圓球所造成的波的傳播，可以同樣地解釋。因此我們可以利用波的概念，把所有的聲學的現象都化為力學。

前面已經着重說過，我們必須分別質點的運動與波本身的運動，而波只是介質的一種狀態。兩者是很不同的，但是很明顯的，在脈動的圓球的例子中，兩種運動都是在同一直線上。介質的質點沿短的線段而振動，而密度隨這種運動週期地增減。波傳播的方向，與振動的路線相同。這類的波叫做縱波。但是只有這一類波嗎？

爲了進一步的研究起見，必須知道還可以有另一類所謂橫波。

我們試改變前面所舉的例。還是假定有一個球，不過把它浸在另一類介質中，不是水或空氣，而是一種菓醬。再則圓球不再是脈動的，而是朝一個方向轉一個小的角度，又轉回來，總是以相同的韻律而且繞着一定的軸運動。菓醬附着於圓球，其附着的部分便不能不模倣它的運動。這些部分又使再稍微遠一點的部分模倣同一運動。這樣模倣下去，於是在介質中便產生了波。假如我們記得介質運動與波的運動的區別，我們便會看到這兩種運動不是在同一條線上。波是朝圓球的半徑的方向傳播的，而介質的每部分的運動則與這個方向垂直，這樣便創造了橫波。

在水面上傳播的波是橫的。一個浮動的軟木塞上下跳動，而波却沿水平面傳播。在另一方面，聲波是縱波的最熟悉的例子。

還有一點：在一種均勻的介質中，由一個脈動的或振動的圓球所產生的波是球面波。它所以有這樣的名字，是因為在任何一個時候圍繞源的介質的任何圓球上的任何點的行爲都相同。我們試研究離源甚遠的介質的一個圓球的一部分。這一部分愈遠，我們所取的部分愈小，則它愈像一個平面。假如不求太嚴格，我們可以說，平面的一部分，和一個半徑相當大的圓球的一部分，並沒有很重要的區別。我們常常把離源很遠的一個球面波的一小部分叫做平面波。平面波的概念也和許多旁的物理概念一樣，不過是一種虛構，它只能大致實現，不能完全實現。可是這是一個有用的概念，我們以後還需要用到它。

光波說

我們大概記得前面是爲甚麼停止描寫光學現象的。我們當時的目的是要介紹另一個光的理論，與微粒說不同，但是也想解釋同類的事實。爲了這個緣故，我們不得不中斷我們的故事，而介紹波的概念。現在我們可以回到原題了。

牛頓的一個同時代的人惠更斯(Huygens)提出了一個新的理論。在他的光學論文中，他寫道：

「假如光的通過需要時間——這正是我們現在要從事研究的——則這種加在中間的物質上的運動便是相繼的。而因此它是和聲音一樣，以球面及波的形式傳播的，而我所以把它叫做波，是因為它與石子丟在水上所激起的波相似，這些波也是相繼地以一個個的圈子傳播出去，不過產生的原因不同，而且只在平面上而已。」

照惠更斯說，光是一種波，是能的遷移，而不是質的遷移。我們已經看到微粒說解釋了許多觀察的事實，這些事實，光的波動說也能解釋嗎？我們必須把微粒說已經回答了的問題再問一遍。看光波說是否也能夠回答得同樣地好。我們試採用談話的方式，說話的一方是牛頓學說的崇拜者，簡稱爲牛；另一方是惠更斯學說的崇拜者，簡稱爲惠。兩個人都不許利用這兩位大師死後所發展的論據。

牛。在微粒說中光速有一種很確定的意義。這是微粒通過真空的空間的速度。在波動說中它的意義是怎樣呢？

惠。它的意義自然是光波的速度。我們所知道的每一種波都是以某種一定的速度傳播的，光波當然也是如此。

牛。不是這樣簡單。聲波在空氣中傳播，海波在水中傳播。每一種波都必須有一種物質的介質，波在這種介質中通過。但是光能經過真空而聲却不能夠。假定一種真空的空間中的波，等於根本不假定波。

惠。是的，這是一個困難，不過我覺得這並不是一個新困難。我的老師已經把這種問題仔細想過，而認爲唯一的出路，便是承認一種假設的質，以太，這是一種充斥於整個宇宙的透明的介質。整個的宇宙可以說便是浸在以太之中。只要我們有勇氣介紹這個概念，其餘一切都是明白而確切的了。

牛。但是我反對這樣一個假定。首先因爲它介紹了一個新的假設的質，而物理學中的質已經太多了。還有一個反對它的理由。毫無疑問的，你相信我們必須用力學來解釋一切。但是以太怎樣呢？你能答覆下面這個簡

單的問題嗎？以太如何由元質點構造出來，而且如何表現於旁的現象中呢？

惠。你的第一個反駁自然有道理。但是介紹了稍不自然的無重量的以太以後，我們便可以立刻放棄那自然得多的光的微粒。我們只有一個『神秘的』質，而不會有與光譜中的種種的色相對應的無數的質。你不覺得這是一個進步嗎？所有的困難至少都集中在一點上了。我們不再需要勉強假定各種色的質點都以相同的速度，通過真空的空間。你的第二個論據也是真的。我們不能夠以太作一個力學的解释。但是毫無疑問的，將來關於光學的現象以及旁的現象的研究也許會顯示它的構造。暫時我們必須等待新的實驗與結論，但是我希望最後我們能夠解決以太的機械的構造的問題。

牛。我們暫且丟開這個問題，因為暫時無法解決它。即使我們撇開那些困難，我還想知道你的理論，如何解釋那些從微粒說看起來都是明白而易解的現象。例如：光線沿直線通過『真空』或空氣的事實。把一張紙放在燭前面，結果會在牆上產生一個清晰的，輪廓分明的影。假使光波說是正確的，清楚分明的影決不可能，因為光會繞着紙的邊緣而彎曲，因此影像會是模糊的。你知道，在海洋中小船不能障礙波，波會繞過它而彎曲，不會投影。

惠。這不是一個能令人折服的論據。試看河裏的波浪打在大船的邊上。由船的一面發生的波在另一面看不到。假如波相當小而船相當大，便會現出一個很清晰的影。我們所以覺得光是直線進行的，很可能是因為它的波長，比起普通的障礙以及實驗中所用的孔來，要小得多。在實驗上要構造可以使光彎曲的儀器也許非常困難。可是假使能設計這樣的一個實驗，那麼關於光波說與光微粒說的孰是孰非，便可以下一個最後的判詞了。

牛。光波說也許在將來能產生新事實，但是現在並沒有任何實驗的材料確切地證實它。除非用實驗確實證明了光可以彎曲，我看不出有甚麼理由不相信微粒說，這個學說，比較起光波說來，似乎是要簡單得多，因此也要好得多。

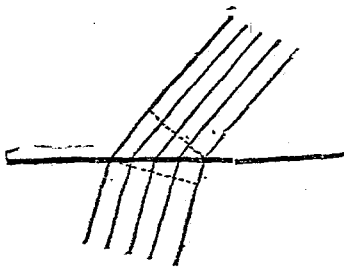
到此我們可以中止這個談話了，不過這個問題却決沒有完結。

我們還需要說明光波說，如何解釋光的折射和色的豐富。我們知道微粒說能夠如此。我們現在開始研究折射，且首先研究一個與光學毫無關係的例子。

假設在一大的空地上有兩個人走路，有一根棍子由兩人各執一端。最初兩人以相同的速度筆直朝前走。只要他們的速度始終相同，則不論速度的大小如何，棍總是作平行的位移，就是說，它的方向不會變更。所有的棍的速度位置都是互相平行的。但是我們現在設想在一短的時間之內，也許只是一秒的幾分之幾，兩人的速度不同了。結果會怎樣呢？很明顯的，在這一瞬間，棍的方向變了，因此對於原有的位置不再作平行的位移了。等到恢復相同的速度時，它的方向已經與原來的方向不同了。兩個行路者的速度不同的瞬間，便發生了方向的變更。

這個例子可以使我們了解波的折射。一個經過以太的平面波射在玻璃片上。下圖中的一個波在前進時有比較大的波前。波前是一個平面，在任何時候，平面上的以太的各部分的行動都完全相同。因為光的速度依光所通過的介質而異，因此在玻璃中與在『真空』中，光的速度自不相同。在波前入玻璃的短時間內，波前的不同的部分有不同的速度。很明白的，已經達到玻璃的那部分便會以玻璃中的光的速度進行，而其餘的部分則仍以光在以太中的速度運動。由於浸入玻璃時波前各部分的速度不同，波本身的方向便有了變更。

由此可見，不僅微粒說可以解釋折射，光波說也可以。假如利用一點兒數學作進一步的研究，便會發現光波說的解釋更簡單，更好，而且結果與觀察完全相符。假如我們知道一柱光進入介質時如何折射，則量的推理方法可以使我們推出折射介質中的光速來。直接的測量美滿地證實了這些預言，而因此也證



第十圖

實了光波說。

還有一個色的問題。

我們必須記得一個波是用兩個數來確定的：它的速度和它的波長。光波說的主要的假定是：不同的色有不同的波長。黃色單光的波長與紅的或紫的不同。在微粒說中，不同的色有不同的微粒，這種辦法是很勉強的，而在波動說中，波長的不同却是自然的。

因此牛頓的關於光的色散的實驗可以用兩種不同的文字描寫，即微粒說的文字和波動說的文字。例如：

微粒說的文字

屬於不同的色的微粒在『真空』中具有相同的速度，但在玻璃中具有不同的速度。

波動說的文字

屬於不同的色的不同波長的光線在以太中具有相同的速度，但在玻璃中具有不同的速度。

白光是屬於不同的色的微粒的組合，而在光譜中它們是分開來的。

白光是各種波長的波的組合，而在光譜中它們是分開來的。

關於同一種現象居然有了兩種不同的理論，我們爲了避免這種情形起見，似乎最好把兩者的優劣作一仔細的研究，然後決定去取。但是聽過牛與惠間的談話以後，我們知道這不是容易的工作。暫時要有所去取，似乎只能取決於趣味，而不能取決於科學的確證。在牛頓的時代以及其後百餘年，多數物理學家都贊成微粒說。

其後，在十九世紀中葉，歷史判決了光的波動說是對的，微粒說是不對的。在惠、牛間的談話之中，牛說過這兩個理論之間的是非，在原則上說是可以實驗決定的。微粒說不容許光彎曲，而要求有清晰的影。在另一方面，依照波動說，一個相當小的障礙不會投影。在楊(Young)與夫累涅爾(Fresnel)的實驗中，這個結果居然實現了，而且理論上的結論也推出來了。

我們已經討論過一個極端簡單的實驗。把一個有孔的屏放在光的點源之前，而在牆上現出影來。我們要把

這個實驗再化簡單些，假定光源只發射單光。如果要得到最好的結果，必須有很強的光源。我們設想屏中的孔做得愈來愈小。假如我們用很強的光源，而把孔做得相當小，便會有一種新奇而驚人的現象出現，這種現象從微粒說的觀點看來，是完全不可解的。光暗之間不再有明顯的區分。在光點之外，有一串光環與暗環，漸漸消失於暗的背景上。環的出現正是波動說的特徵。何以會有一串光環與暗環呢？這個理由，要看另一個稍微不同的實驗，才更容易明白。假設我們有一張黑紙，紙上有兩個針孔，光經過這兩個孔。假如孔非常接近而且非常小，而且假如單光的源相當強，則在牆上會現出許多光帶與暗帶來，而漸漸消失於暗的背景上。解釋是很簡單的。暗帶便是從一個針孔所射出的的一個波的谷，與從另一個針孔所射出的的一個波的峯相遇時，互相干涉的處所。光帶便是從不同的針孔來的兩個波的兩峯或兩谷相遇而加強的處所。前例中光環與暗環的解釋要複雜得多。那裏所用的是只有一個孔的屏，但是原理是一樣的。有兩個孔便現出光帶和暗帶，只有一個孔便現出光環和暗環，這件事實必須牢記在心，因為以後我們還要回轉來討論這兩幅不同的圖畫。此處所描寫的實驗顯示光的繞射，即把小的孔或障礙放在光波的路線上時，光不依直線傳播。

利用一點兒數學還可以更進一步。我們可以發現，要多大或者無寧說多小的波長，才能產生一個特殊的繞射花樣。因此此處所描寫的實驗，可以使我們測量作為光源的單光的波長。要知道這種數如何小，我們可以寫下兩種波長，代表太陽光譜中的兩極端，即紅光與紫光的波長。

紅光的波長是 0.00008 厘米。

紫光的波長是 0.00004 厘米。

我們不必因數字之小而驚異。我們所以能在自然中觀察到清晰的影與光之直線傳播這一類現象，正是因為通常所有的孔與障礙，比起光的波長來都大得多。只有用極小的障礙與孔，才能顯示光的波動的性質。

但是尋求一個光的理論的故事，却並沒有就此完結。十九世紀的判決不是最後的與終結的。在現代物理學家看來，在微粒與波動之間決擇一種的全部問題仍舊存在，不過這一次這個問題取了一種更深刻更複雜的形

式。在認識波動說的勝利的不可靠以前，我們暫且承認光的微粒說的失敗。

縱光波還是橫光波？

我們已經研究過的一切光學現象都是支持波動說的。光繞過小的障礙而彎曲的現象以及折射的解釋都是支持它的有力的證據。依照機械觀，則還需要答覆一個問題：決定以太的機械性質的問題。要解決這個問題，主要的必須知道以太中的光波是縱的還是橫的。換句話說，光是像聲一樣傳播的嗎？光波是由於介質的密度的變化，而因此質點的振動在波傳播的方向嗎？還是以太像一種彈性的菓醬，一種可以產生橫波的介質，而它的質點運動的方向與波本身運動的方向是垂直的呢？

在解決這個問題之前，我們試決定那一個答案是我們所最歡迎的。很明白的，若光波是縱的，那真是再好不過了。因為在這種情形之中，要設計一個機械的以太便簡單得多了。以太的理論大概就會和解釋聲波傳播的氣體的機械的理論相似。要想像一種能帶走橫波的以太就要困難得多。想像一種菓醬式的介質，這種介質由質點構成，橫波藉它傳播，這不是容易的工作。惠更斯相信以太會是『空氣式』的而不是『菓醬式』的。但是自然毫不理會我們給它的限制。物理學家一向想從機械的觀點來了解一切現象，在這件事情上他們也想這樣做，自然會依照他們的意思嗎？要回答這個問題，我們必須討論幾個新的實驗。

我們只詳細討論許多實驗中的一個，這個實驗可以供給我們一個答案。假設我們有很薄的一片熱電石結晶，用一種特殊的方式去切，切的方法我們不需要在這裏描寫。結晶片必須很薄，使我們可以通過它看見一個光源。但是現在我們試拿兩片這樣的結晶，而把它們放在眼與光之間。我們會看到甚麼呢？假如兩片都相當薄，便又可以看到一點光。這種機會是很多的，而實驗可以證實這一點。我們不必管這只是一種機會的話，我們只假定通過兩個結晶看見光點。現在轉動一片結晶，以漸漸改變它的位置。但轉動的軸必須是固定的，這句話才有意義。我們以入射的光所決定的線為軸。這就是說，我們移動一片結晶的所有的點的位置，只有軸上的

點的位置不變。一件奇怪的事發生了！光愈來愈弱，最後完全消滅。假如繼續轉動，它又會再現出來，而等到回到最初的位置時，又重新恢復最初的景象。

我們不必細究這個實驗以及諸如此類的實驗，我們可以問下面的問題：假設光波是縱的，能夠解釋這些現象嗎？假設是縱波，則以太的質點便會沿軸而運動，和光柱一樣。結晶轉動時，沿軸上的一切都沒有變。軸上的點沒有動，只在其附近有很小的位移。因此假如是縱波，則光的消失與顯現決不能發生。這個現象以及諸如此類的現象，只有假定光波是橫的而非縱的才能解釋！換句話說，我們必須假定「葉醬式」的以太。

這真是太慘了！要機械地描寫以太，我們必須準備遭遇極大的困難。

以太與機械觀

研究作為傳光介質的以太的機械性質的嘗試很多，假如一一加以討論，未免太多了。我們知道，所謂一種質有機械的結構，便是說那種質是由質點構成的，力在連接質點的直線上作用，而且力只與距離有關。爲了以太構造爲一種「葉醬式」的機械的質，物理學家必須作一些很勉強而不自然的假定。此處我們不準備把這些假定引下來，它們已經過去了，而且差不多已經被人遺忘了。但其結果却是有意義的和重要的。這些假定非常勉強，而且互相之間毫無關係，這些事實都足以動搖我們對於機械觀的信仰。

但是比起構造以太的困難來，還有其他更簡單的反對它的理由。假如要機械地解釋光學現象，必須假定以太到處存在。假如光只能在一種介質中通過，便不能有真空的空間。

可是我們由力學知道，星球間的空間不能阻止物質的運動。例如行星在以太——葉醬中運動，便沒有受到任何阻止，而任何物質的介質却都阻止物體的運動。假如以太不能阻止物質的運動，則在物質的質點與以太的質點之間便不能有一種交互作用。光通過以太，也通過玻璃與水，但在玻璃與水中它的速度却變了。這種事實怎樣能夠機械地解釋呢？很明顯的，只能假定以太的質點與物質的質點之間有交互作用。我們剛看到，

要解釋的物體的自由運動，必須假定這樣的交互作用不存在。換句話說，在光學現象中，以太與物質之間有交互作用，在力學現象中，却沒有！這實在是一個很自相矛盾的結論。

似乎只有一個方法能解決這些困難。自科學發生的時期以至二十世紀，爲了從機械的觀點理解自然現象，必須介紹許多很不自然的質，如電流體，磁流體，光微粒，以太等。其結果只是把所有的困難集中在主要的幾點上，例如光學現象中的以太。而所有想簡單地構造以太的嘗試都沒有成功，再加上旁的困難，於是我們覺得，錯誤似乎在根本假設，即我們不應該認爲可以用機械的觀點解釋一切自然現象。科學未能認真實現機械觀的計劃，時至今日已經沒有一個物理學家再相信它有實現的可能了。

在前面我們簡單地回溯了主要的物理觀念的發展，我們遇到了一些沒有解決的問題，遭逢了一些困難與障礙，使我們不敢再提出一種包羅萬象的理論。在舊力學中，引力質量與慣性質量相等，這個線索沒有人注意。而電流體與磁流體又非常不自然。電流與磁針之間的交互作用也是一個沒有解決的困難。我們記得這種力不是在連接電線與磁針的直線上作用，而且與運動的電荷的速度有關。表現它的方向與數值的定律又極端複雜。最後還有關於以太的大困難。

近代物理學家研究了所有這些問題，而且解決了它們。但是爲求解決這些問題，又創造了新的與更深的問題。我們的知識比十九世紀的物理學家，更廣更深，但是我們的疑惑與困難也要比他們更廣更深。

總結

電流體的理論，和光的微粒說與波動說，都是進一步應用機械觀的結果。但是在電與光方面，機械觀的應用遇着嚴重的困難。

一個動的電荷作用於一個磁針。但是這種力不僅與距離有關，而且與電荷的速度有關。這種力既不排斥也不吸引，而是在與連接針和電荷的直線垂直的方向作用。

在光學中我們決定採用光的波動說，而不用光的微粒說。傳播波的介質是由質點構成的，其間有機械的作用，這自然是一個機械的觀念。但是傳播光的介質是甚麼呢？它的機械的性質怎樣呢？在沒有答覆這個問題以前，我們無法把光學現象化成功率學現象。但是因為解決這個問題的困難大得很，我們不能不放棄它，而因此同時放棄了機械觀。

三 場論，相對論

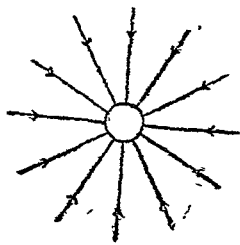
場的圖示——場論的兩大柱石——場的實在——場與以太——力學的間架——以太與運動——時間
空間相對論——相對論與力學——時空連續區——廣義相對論——升降機內外——幾何與實驗——
廣義相對論及其證實——場與物質——總結

場的圖示

在十九世紀下半期，物理學中產生了新鮮的革命的觀念；它們展開了一條到新的哲學觀點的道路，這個新觀點與舊的機械觀不同。經法拉第 (Faraday)、馬克士威 (Maxwell) 與赫芝 (Hertz) 等努力的結果，新物理學發展了，新觀念產生了，一種新的關於實在的理論也構成了。

我們現在要做的便是描寫這些新觀念如何在科學上產生一個革命，而且漸漸的愈來愈明白而有力。我們要用邏輯的次序來敘述它的發展，不一定依照實際的時間的次序。

這些新觀念是為了解釋電的現象而產生的，但是為簡便起來，我們不如首先從力學中介紹它們。我們知道兩個質點互相吸引，而引力的增減與距離的平方成反比。我們可以把這種事實與一種新的方法表示出來，雖則這樣做有甚麼好處一時很難看出來。圖中的小圓代表一個吸引的物體，例如太陽。實際上你應該想像這是在空間中的一個模型，而不是在平面上的一幅圖。因此圖中的小圓實際上代表在空間中的一個圓球，例如太陽。把一個物體，即所謂檢驗體，放在太陽的附近，它就會被太陽所吸引，而引力發生在連接這兩個物體的直線上。因此圖中的



第 十 二 圖

綫表示太陽對於檢驗體在各種地位上的引力。而每根綫的箭頭則表示這種力是朝着太陽的，就是說，這種力是引力。這些都是引力場中的力綫。暫時看來，這不過是一個名辭，沒有甚麼理由叫我們十分着重它。圖中的一個特色以後還要再加發揮。力綫是在空間中的沒有物質的地方。在目前所有的力綫，或簡單說，場只表示一個放在圓球附近的檢驗體會如何行動。

在我們的空間模型中的力綫都是與圓球的表面垂直的。因為它們都是由一點發散出去的，因此最近圓球的地方最密，愈遠愈疏。與圓球的距離增加兩倍或三倍，則力綫的密度會減小四倍或九倍。因此力綫有兩種作用。它們一方面表示作用於一個圓球附近的物體的力的方向。在另一方面，力綫的密度又表示力如何隨距離的大小而變化。場的圖，若正確地解釋，表示引力的方向及其與距離的關係。從這樣一個圖中可以看出引力定律來，正如從描寫引力作用的言語中，或明確而經濟的數學文字中，可以看出引力定律來一樣。我們叫這種方法做場的圖示法。它雖然清楚而有趣，但是我們沒有甚麼理由相信它是一種實在的進步。在引力的例子中很難看出它有甚麼用處。也許有人認為這些綫不僅是圖形，而想像確有許多實際的力的作用經過它們。這樣想像自然可以，但是你必須同時想像沿着力綫的作用的速度是無限大的！根據牛頓定律，兩物體間的力只與距離有關，與時間毫無關係。力從一個物體傳到另一個物體並不需要時間！但是一個有理性的人不會相信所謂速率無限的運動，因此認為力綫不僅是圖形，並沒有甚麼用處。

我們現在不準備討論引力問題。我們所以首先介紹它，只是因為它比較簡單，在電的理論方面也可以用同樣的推理方法，但是比較複雜。因此不如從引力問題談到電的問題。

我們首先討論一個實驗，這個實驗很難用機械觀去解釋。電流經過圓形的電路。在電路的中央擺一個磁針。電流在流動時，產生一種新的力，這種力作用於磁針，而且與任何連接磁針和電線的直綫垂直。假如這力是由環流的電荷產生的，則羅蘭的實驗告訴我們，這個力的大小與電荷的快慢成正比。這些實驗的事實與機械觀的哲學觀點不相合，實為依照機械觀，任何力都只在連接兩個物體的直綫上作用，而且只與距離有

關。

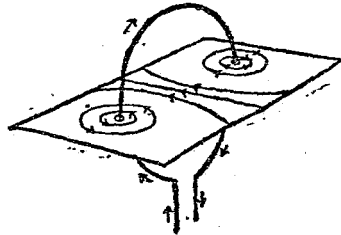
電流作用於磁針的力要精確地表示出來是很複雜的，比較表示引力要複雜得多。可是我們也能把這種作用想像出來，正如我們能想像引力的作用一樣。我們問：電流怎樣作用於它附近的磁針呢？要用言語描寫這種力是相當困難的。甚至用數學公式來表示，這個數學公式也一定複雜而笨拙。最好是把我們關於這些力的知識畫成力線。可是也有困難，一個磁極總是與另一個磁極連在一起。不過我們可以想像磁針極長，因此只須計及作用於與電流最近的磁極上的力。另一極因為距離太遠，作用於它的力可以略掉。爲了清楚起見，我們假定接近電線的磁極是正極。

作用於正磁極的力的性質可以從圖中看出來。

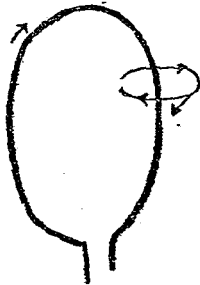
首先我們注意到電線附近有一個箭頭表示電流從高的電位流到低的電位的方向，其餘的線都是屬於這個電流的力線，而且在某一個平面上。假如畫得好，它們能把電流作用於磁極的力的向量以及向量的長度告訴我們。我們知道力是一個向量，要決定它必須知道它的方向和長度。我們主要的是注意作用於磁極的力的方向的問題。我們的問題是：怎樣從圖中去看空閒任何一點的力的方向呢？

在這樣一個模型中要看出一個力的方向，不會像前例一樣簡單，在前例中力線是直的。在下圖中爲了明白起見，只畫了一根力線。我們可以看出來力的向量是在力線的切線上。力的向量的箭頭和力線的箭頭都是指着同一個方向。這就是這一點上作用於磁針的力的方向。一個好的圖形，或是一個好的模型，也能夠把這一點上的力的向量的長度告訴我們。愈近電

三 場論，相對論



圖三十第



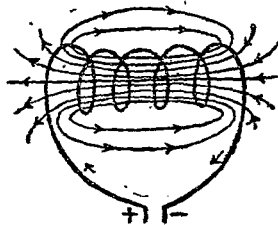
圖四十第

線的地方力線愈密，而向量愈長，離電線愈遠，力線愈稀，向量愈短。

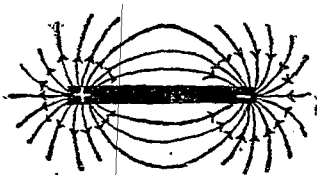
力線或場便是這樣地幫助我們決定空間中任何一點上作用於磁極的力。我們所以不憚煩地構造一個場，暫時只有這個理由。我們知道了場表示甚麼，然後才可以有更深的興趣來研究與電流對應的力線。這些線都是圍繞着電線的圓圈，它們所在的平面是與電線所在的平面垂直的。我們看圖內的力的性質，可以斷定力的作用的方向，是與連接電線和磁極的任何直線垂直的，因為圓的切線總是與半徑垂直的。我們的關於作用的力的全部知識，都可以總括在場的構造中。我們所以在電流與磁極的概念之間加入一個場的概念，便是爲了要把這些作用的力很簡單地表示出來。

每一電流都連着一個磁場，就是說假如把磁針放在通電的線附近，便會有一種力作用於磁針。我們不妨順便說一件事，即這種性質使我能製造測量電流的存有的最靈敏的器具。我們一旦知道了如何從電流的場的模型來看磁力的性質，以後要表示在空間中任何一點的磁力的作用，便可以把電線附近的場畫出來。首先一個例子便是電流螺旋管。如圖中所示，這是一種電線圈，我們的目的是要利用實驗來發現與螺旋管中的電流相連結的磁場，而把這些知識都綜合在場的構造中。畫一個圖便可以把結果表示出來。力的曲線是兩端相連的，而且以電流的磁場所特有的形式圍繞着螺旋管。

磁棒的場也可以用同樣的形式來表示。看下面的圖就明白了。這些力線都是從正極到負極的。力的向量在力線的切線上，而且近極處最長，因爲在這些地方力線最密。力的向量表示磁體對於正的磁極的作用。不過在這裏場「源」不是電流而是磁體。



第十圖



第十圖

前面的兩個圖，須仔細加以比較。在第一個圖中是通過螺線管的電流的磁場，在第二個圖中是磁棒的場。我們且莫注意那磁棒和螺線管，而只注意外面的兩個場。我們立刻會注意到它們是一模一樣的，兩者的力線都是由一端伸到另一端。

場的圖示法有了收獲了！在通電的螺線管和磁棒之間我們很難看出甚麼很大的相似之處，但是場的構造卻能把這種相似告訴我們。

場的觀念究竟有無用處，現在可以有一個嚴重的試驗的機會了。我們快要知道它是否僅僅一種新的關於作用力的圖示法。我們可以這樣想：暫且假設場代表由它的源所決定的一切作用的特性。這自然只是一個猜想。這句話的意思是，假如螺線管和磁棒的場相同，則所有它們的影響也會相同。那麼，兩個有電流的螺線管等於兩根磁棒。兩根磁棒互相吸引或排斥，而引力或斥力與距離有關。螺線管與磁棒之間也會有吸引或排斥的現象和兩根磁棒間一樣。簡單地說，通電的螺線管和磁棒所有的作用都會是一樣的，因為作用怎樣完全靠場，而兩者的場完全一樣。實驗充分證明我們的猜想。

不利用場的觀念要想發現這些事實會是多麼困難呀！要把通電的線與磁極間的力表示出來是非常複雜的。假如是兩個螺線管，便須研究兩個電流的相互作用的力。但是一旦利用場的觀念，我們知道螺線管的場和磁棒的場是相似的，所有這些作用的性質便立刻注意到了。

我們現在應當更加重視場了。在解釋現象上似乎惟有場的性質是重要的；至於場源卻無關緊要。場的觀念能夠引導我們發現新的實驗的事實，因此益發顯得重要。

場是一個很有用處的觀念。它最初只是當作在它的源與磁針間的一種東西，用來描寫這中間的作用的力。我們認為它是電流的「經紀人」，電流的一切作用都是靠它才能行使的。但是現在除了把它當作經紀人以外，還可把它當作翻譯人，它把定律翻譯成簡單的，明白的，容易理解的文字。

場的描寫有了這個大成功以後，我們便覺得在研究電流，磁石，電荷的一切作用上，把場作為翻譯人，大

概是很方便的。我們可以認為一個電流總是連着一個場。即使沒有磁極檢驗它的存在，它也還是存在的。我們且把這個線索加以引伸。

我們可以用介紹引力場，電流的場，磁的場的方法來介紹一個荷電的導體的場。我們又只舉簡單的例子！要畫一個荷正電的圓球的場，必須知道，假如有一個小的荷正電的檢驗體放在那荷電的圓球的附近，檢驗體上會受到怎樣的力的作用。我們所以用一個正的檢驗體，而不用一個負的檢驗體，全是照習慣規定的，它只是指示力線的箭頭，應該朝那一個方向畫。這樣一個模型與前面的引力場的模型很相似，這是因為庫倫定律與牛頓定律很相似。兩個模型的唯一不同之點便是箭頭的方向不同。兩個正電荷互相排斥，兩個質量則互相吸引。可是一個荷負電的圓球的場會與引力場相同，因為小的檢驗電荷會受這圓球的吸引。

假使電極與磁極都是靜止的，則其間不會有作用，既無吸引作用，也無排斥作用。我們若用場的文字來表示這件事實，便可以說一個靜電的場不會影響一個靜磁的場，反轉來說，靜磁場也不會影響靜電場。所謂「靜場」即不依時間而變化的場。假如沒有外力的擾亂，磁體與電荷可以放在一處，而永不發生作用。靜電場、靜磁場、和引力場的性質都不同。它們不會互相混合，而不管有無旁的場，它們總是保持自己的個性。

現在假定那個靜止的荷電的圓球由於某種外力的作用開始運動。荷電的圓球動了。這句話用場的文字說便是：電荷的場隨時間而變化。但是從羅蘭的實驗，我們知道荷電的圓球的運動等於電流。而每一電流又總是與一個磁場相伴。因此我們的一串推論便是這樣的：

電荷的運動 ↓ 電場的變更

電流 ↓ 相伴發生的磁場

因此我們斷定：由於電荷的運動而產生的電場的變更總是與磁場相伴發生。我們的結論是根據奧斯特的實驗，但是它所包含的卻不止此。它使我們認識到隨時間而變化的電場常與磁

場相伴發生，這件事實對於進一步的推論是很重要的。

電荷在靜止的時候只有靜電場。而電荷一旦運動，磁場便發出了。我們還可以進一步說。假使電荷比較大，運動比較快，則由電荷運動所產生的磁場也愈強。這也是羅蘭實驗的一個結果。用場的文字來說：電場變化愈快，相伴的磁場便愈強。

電流體說是依照機械觀建立起來的。我們在這裏把熟悉的事實由電流體的文字譯成了新的場的文字。我們在後面會看到，這種新的文字是怎樣的清楚，而且有着怎樣大的用處。

場論的兩大柱石

『電場的變化常與磁場相伴』。假使我們把『電』與『磁』兩個字互換一下，這句話便變成『磁場的變化常與電場相伴』。只有實驗才能決定這句話是否正確。但是我們所以會提起這個問題，完全是由於我們使用場的文字。

約在一百年前，法拉第做了一個實驗，這個實驗使他發現了應電流。

這個實驗是很簡單的。我們只需要一個螺線管或旁的電路，一根磁棒以及一種檢驗電流的存在器具。螺線管的兩端是連接的，磁棒擺在它的附近。在電線中沒有電流，因為電線沒有連接着電源。它的附近只有一個磁棒的不隨時間而變化的靜磁場。現在我們很快的變更磁棒的位置，或者移開些，或者挪近些。立刻就有電流產生，隨即又消滅了。磁棒的位置每變更一下，便產生電流，而這種電流可以用相當靈敏的器具測驗出來。但是從場的理論的觀點看來，一個電流表示有電場存在，這種電場使電流體在電線中流動。當磁棒再電止時，靜流便消滅了，因此電場也消滅了。

我們設想，假使沒有場的文字，而這種實驗的結果要用舊的力學上的觀念去作質的和量的描寫。實驗表示，一個磁的偶極子的運動產生一種新力，而使電線中的電流體流動。其次一個問題便是：這種力與甚麼有關

呢？這是很難答覆的。我們必須研究這種力與電線的形式，磁棒的速率及形式的關係。而且用舊的文字來解釋這個實驗，不能告訴我們除了磁棒的運動可以產生應電流以外，另一個電路的運動是否也能產生應電流。

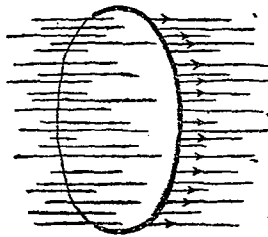
假使我們用場的文字，並且相信一切作用都是由場所決定的原則，結果便不同了。我們立刻發現，通了電的螺線管可以代替磁棒的作用。假設有兩個螺線管，一個較小，有電流通過，另一個較大，其中的應電流，可以檢驗出來。我們可以移動小的螺線管，像前面移動磁棒一樣，結果在較大的螺線管上便會產生應電流。用旁的方法也可以得出同樣的結果。我們不必移動小的螺線管，只須使電路與電池忽連忽斷，便可以使磁場消滅或產生。我們又看到，場論所推出來的新事實又為實驗所證實了。

我們舉一個比較簡單的例子。有一沒有電源的通線，在它的附近有一個磁場。至於磁場的源是另一個通了電的電路，還是一根磁棒，沒有多大關係。圖中畫着通電路和磁場的力線。用場的文字對於感應現象作量的和質的描述是很簡單的。從圖中看出來有些力線經過電線所圍成的表面。我們必須研究那些經過電線圈內的平面的力線。不論場有多麼強，只要場不變，便不會產生電流。但是一到經過電線圈的表面的力線的數目變更了，電線上便立刻有了電流。電流是由經過表面力線數目的變更所決定的。不論這種變更是怎樣造成的。力線的數目的變更這個觀念在對於誘導電流作量的和質的描述上是很重要的。『力線的數目的變更』，意思就是力線的密度的變更，而我們記得，這句話的意思就是場的強度的變更。

我們一串推論中的重要的幾點是這樣的：磁場的變更 \downarrow 應電流 \downarrow 電荷的運動 \downarrow 電場的存在。

因此：一個變化的磁場總是伴着一個電場。

於是我們發現兩個重要的支持電場和磁場理論的柱石。第一個是說在變化的電場與磁場間有一種連繫。它



第七十圖

是由奧斯特的關於磁針擺動的實驗產生的，它的結論是：一個變化的電場總是伴着一個磁場。

第二個柱石把變化的磁場和應電流連起來。它是從法拉第的實驗中產生的。這兩個柱石便成爲量的描寫的基礎。

伴着變化的磁場的電場也似乎是實在的。我們在前面設想過，即使沒有檢驗的磁極，一個電流的磁場還是存在的。同樣的，即使沒有電線來檢驗是否有應電流，電場還是存在的。

事實上，這兩個柱石可以化成一個，就是說，化成根據於奧斯特實驗的那一個。法拉第的實驗可以根據能量不滅的定律從這個實驗中推論出來。我們所以用兩個柱石，只是爲了明白與經濟。

我們再說一個場的描寫的結果。假使有電流通過電路，而電源爲弗打電池。電路與電源之間的聯繫突然斷了。當然就不會再有電流了！但是在這電流斷的一頃刻間卻發生了一種複雜微妙的過程，這種過程只有用場的理論才能夠預言到。在電流斷之前電線周圍有一個磁場。電流斷了以後，這個磁場便不存在了。因此由於電流的斷，產生了一個磁場。經過電線圈內的平面的力線有一種很快的變化。但是不管變化是怎樣產生的，它一定會產生一種應電流，要緊的是磁場有了變化，這個變化愈大，則應電流愈強。這種結果又是場的理論的一個試驗。電流的斷會產生一種很強的暫時的應電流。實驗又證實了這個預言。任何人把電流弄斷過都會注意到有一個火花發生。這個火花便顯示由於磁場的激變而產生的很強的位差。

這個過程也可從另一觀點即能的觀點去看。一個磁場消滅了，卻發生了一個火花。這個火花代表能，因此磁場也代表能。因此我們必須認爲磁場是能的貯蓄。只有這種看法才能根據能量不滅的定律解釋電與磁的現象。

場在最初不過是一個頗有用處的模型而已，但是卻愈來愈實在。它使我們了解奮的事實，預言新的事實。認識場是能的貯蓄，這在場的觀念發展上是一大進步，場的觀念愈來愈見重視，而機械觀中最重要質的觀念則愈來愈見貶抑了。

場的實在

關於場的定律的量的數學的解釋，都概括在所謂馬克士威爾(Maxwell)方程式中。上面所說的事實，使他做出這個方程式來，但是他的方程式的內容，比我們所能指示的要豐富得多，在它們的簡單的形式下，卻藏着一種很深的內容，這種內容的深度只有靠仔細的研究才能發現。

馬克士威的提出這些方程式來，可以說是自牛頓的時代以來物理學上一件最重要的事，不僅因為這些方程式的內容豐富，而且因為它是一種新型的定律。

馬克士威的方程式的特色在近代物理學的一切其他的方程式中都有，這種特色可以用一句話概括起來：馬克士威方程式是代表場的結構的定律。

馬克士威的方程式何以在形式上和性質上都與過去舊學中的方程式不同呢？我們說這些方程式解釋場的結構究竟是什麼意義呢？從奧斯特和法拉第的實驗中怎樣能做出了一類新型的定律來，而這類定律在物理學的向前的發展上又是這樣重要呢？

從奧斯特的實驗，我們已經看到一個變動的電場周圍有一個磁場。從法拉第的實驗，我們又看到，一個變動的磁場周圍有一個電場。要把馬克士威理論的特色說一個大概，讓我們暫時專注意一個實驗，例如法拉第的實驗。前面的第十圖，表示一個變動的磁場感應電流，我們已經知道假使穿過電線圈的表面的力線的數目有變化，便會發生一種感應電流。因此假使磁場有變化或是電路變了形式，變了位置，便會有電流發生，總之，不論經過表面的磁力線的數目是因為甚麼原故變化的，只要有了這種變化，便會有電流。要把這種種可能都計算在內，研究它們的特殊影響，必定會得出一種極複雜的理論來。但是我們怎樣把這個問題化簡單呢？我們試把關於電路的形式，長度，電線的表面的一切都排除於考慮之外。我們可以想像第十四圖的電路逐漸縮小，最後變成一個極小的電路，只包圍空間的某一點。於是關於形式及大小的一切問題便可完全不問了。在通電路

縮成一點的這種極限問題過程中，大小與形式會自動地從我們的考慮中消失，而我們便可以得到連接在任一時刻及空間的任一點上的磁場與電場的變化的定律。

這是得出馬克士威方程式的主要的步驟之一，這又是在想像中把法拉第實驗的電路縮成一點所做的，一個理想實驗。

我們應該叫它做半步，而不是一整步。我們的注意力，一直是集中於法拉第的實驗。但是場論的另一個柱石是根據奧斯特的實驗，也必須用同樣的態度很仔細地加以研究。在這個實驗中磁力線盤繞在電流的周圍。把圓形的磁力線縮成一點以後，其餘的半步便算完成了，而從這整個的一步便得出在空間中任何一點及任何一刻的磁場與電場的變化之間的連繫。

但是還需要一個很重要的步驟。根據法拉第的實驗，必須用電線檢驗電場是否存在，而在奧斯特的實驗中也必須用磁極或磁針檢驗磁場是否存在。但是馬克士威的新的理論的觀念卻超過了這些實驗的事實。在馬克士威的理論中電場與磁場，或簡單些說電磁場，是實在的東西，一個變化的磁場總是產生電場，不管有沒有電線檢驗它的存在；一個變化的電場也總是產生磁場，不管有沒有磁極檢驗它的存在。

由兩個重要的步驟得到馬克士威的方程式，第一、要使奧斯特和羅蘭的實驗中，盤繞於電流及變化的電場周圍的磁場的圓形力線縮成一點；要使法拉第的實驗中，盤繞於變化的磁場周圍的電場的圓形力線縮成一點。第二、要把場看成實在的東西；電磁場既產生之後便會依照馬克士威的定律存在，作用和變化。

馬克士威方程式解釋電磁場的結構。所有的空間都是這些定律的舞臺，不是像力學定律一樣，只有物質和電荷存在之點才是它們的舞臺。

我們記得在力學中是怎樣的情形。知道了一個質點在某一時刻的位置和速度，又知道了作用於它的力，便可以預言這個質點的未來的路線。在馬克士威的理論中，假如知道場在某一時刻的情形，便可以根據這個理論的方程式，推論整個的場在空間和時間中怎樣變化。馬克士威的方程式可以使我們研究場的歷史，正如力學

的方程式可以使我們研究物質的質點的歷史一樣。

但是在力學的定律和馬克士威的定律之間，還有一個重要的不同之點。把牛頓的引力定律和馬克士威的場的定律作一個比較，便能看出這些方程式的一些特色。

利用牛頓定律，我們可以從作用於太陽與地球之間的力，把地球的運動推論出來。這個定律使地球的運動與遠處的太陽的作用連接起來。地球與太陽雖則相隔很遠，在力的表演中都是演員。

在馬克士威的理論中，根本沒有物質的演員。這個理論的數學方程式表現支配電磁場的定律。它們不是像牛頓的定律中一樣，連接兩個相隔很遠的事件；它們不是把此處所發生的事情連接於彼處所發生的事情。此處與現在的場只與最鄰近的以及剛過去的場發生關係。假使我們知道此處和現在所發生的，這些方程式便可以幫助我們預測在空間上稍微前一些，在時間上稍微後一些會發生甚麼。它們能使我們用小的步驟增加關於場的知識。把這些小的步驟加起來，我們便可以由遠處所發生的事件推論到此處所發生的事件。牛頓的理論恰恰相反。它只允許有連接距離很遠的事件的大步驟。奧斯特和法拉第的實驗可以從馬克士威的理論中得出來，但是只能用把小步驟加起來的辦法，而每一個小步驟都是由馬克士威的方程式支配的。

把馬克士威的方程式作一個徹底的數學的研究以後，便會發現從這些方程式中可以推出一些新的而且出乎意料的結論，而使這整個的理論在一個更高的水準上受到試驗，因為這些理論上的推論，結果具有一種量的性質，而且是由一整串的邏輯的推論得出來的。

我們再設想一個理想的實驗。用某種外力使一個具有電荷的小圓球很快地而且有韻律地振動，像鐘擺一樣。根據我們已經有的關於場的變化的知識，我們怎樣用場的文字來描寫這裏所發生的一切呢？

電荷的振動產生了一個變化的電場。與這相伴而發生的便是一個變化的磁場。假如把構成一個通路的電線放在附近，於是與變化的磁場相伴而發生的便是電路中的電流。這些話無非是覆述已知的事實，但是研究馬克士威的方程式以後，對於振動的電荷便會有一種更深的見解。從馬克士威的方程式中作數學的推論，便可以發

現圍繞一個振動電荷的場的性質，在電荷的近處和遠處的場的結構，以及它如何隨時間而變化。這樣推論的結果便是電磁波，從振動的電荷所輻射的能以一定的速率經過空間，而能的遷移，狀態的運動，是一切波的現象的特色。

我們已經研究過不同種類的波了。有由圓球的脈動所產生的縱波，密度的變化由介質傳播。又有一種莫醬式的介質，橫波便是在這種介質中傳播的。在電磁波的例子中，傳播的是那一類變化呢？便是一種電磁場的變化！電場的每一變化產生一個磁場；磁場的每一變化產生一個電場；電場的每一變化……，這樣一直下去。因為場代表能，所有這些在空間中以一定的速率傳播出去的變化都產生一個波。從這個理論推論出來，這些磁力線和電力線都是在與傳播的方向垂直的平面上。因此所產生的波是橫波。由奧斯特及法拉第的實驗所構成的場論的最初的特點還是保存了，但是我們現在看到它有一種更深的意義。

電磁波在真空中傳播。這又是這個理論的一個推論。假使振動的電荷突然不動了，它的場便變成靜電的了。但是由振動所產生的一串波還繼續傳播。這些波有一種獨立的存在，而我們可以研究它們的變化的歷史，正如研究任何其他物質的東西的歷史一樣。

電磁波以一定的速度在空間中傳播，在時間中變化，這種知識是從馬克士威的方程式中推出來的，而所以能夠從這些方程式推出來，正是因為它們描寫電磁場在空間的任何一點時間的任何一刻的結構。

還有一個很重要的問題。電磁波在真空中的速率是多少呢？馬克士威的理論，依據一些從簡單的實驗中得來的，而與實際的波的傳播完全無關的材料，作了一個明白的答覆：電磁波的速度與光的速度相等。

奧斯特和法拉第的實驗是馬克士威定律的基礎。上面所有的結果都是由於仔細地研究這些用場的文字表現的定律得來的。從理論上發現以光速傳播的電磁波，這是科學史上的最偉大的成就之一。

實驗證實了理論的預測。五十年前赫芝第一次證明了電磁波的存在，而且用實驗證實了它的速度等於光的速度。時至今日，千千萬萬的人都能證明電磁波的收放。他們所用的器具，已經比赫芝所用的要複雜多了，而

且能收到千萬里處傳來的電磁波，而赫芝的器具卻只能收到幾碼以外傳來的波。

場與以太

電磁波是橫波，在真空中以光速傳播。光與電磁波速度相等的這件事實，暗示在光的現象與電磁現象之間有很密切的關係。

在前面，當我們對於微粒說與波動說不能有所選擇時，我們決定選擇波動說，光明的繞射現象是影響我們的決定的最大的理由。但是假如我們認為光波是一種電磁波，這個假定與關於任何光學的事實的解釋都不會發生衝突。恰恰相反，還可以得出旁的結論來。假使光波確實是電磁波，那麼在由這個理論所推出來的物質之光的性質和電的性質之間應該有某種連繫。事實上我們確可以得出這樣的結論來，而且可以用實驗證明，這便是我們接受光之電磁說的很重要的理由。

這種偉大的結果便是由場論產生的。表面上毫無關係的兩個科學部門居然能用一個理論解釋。用同樣的馬克士威方程式可以解釋電的感應現象，也可以解釋光的折射現象。假使我們的目的是要用一個理論來解釋已發生的或會發生的一切現象，那麼，毫無疑問，光學與電學的結合便是很大的一步進展。從物理學的觀點看來，普通的電磁波與光波的唯一區別是波長；光波的波長較小，肉眼可以檢察它，普通的電磁波的波長較大，須用無線電接收機才能檢察它。

舊的機械觀想把一切自然現象都化成作用於物質的粒子間的力。電流體說便是根據這種機械觀的第一種簡樸的理論。在十九世紀初期的物理學家的心目中，場是不存在的。在他看來，只有質和它的變化是實在的。他想解釋兩個電荷間的作用，而在解釋中，他只利用直接關連於兩個電荷的概念。

在最初，場的概念不過是為方便我們從機械觀的觀點去理解現象的一種工具。在新的場的文字中，要理解兩個電荷的作用，重要的不是描寫電荷本身，而是描寫電荷間的場。對於這種新概念的認識是逐漸增加的，到

後來，場的觀念竟掩蓋了質的觀念。於是大家覺得在物理學中發生了一樣重要的東西。一種新的實在產生了，一種在機械觀中沒有地位的新概念產生了。場的概念漸漸地奮鬥，終於在物理學中取得了一種領導的地位，而至今還是基本的物理概念之一。在一個現代的物理學家看來，電磁場正和他所坐的椅子一樣地實在。

但是假如以為新的場論使科學免除了舊的電流體理論的錯誤，或者說，新理論毀滅了舊理論的成就，那是不公正的。新理論顯示了舊理論的功績和限制，而使我們能從一種更高的水準重新得到舊的概念。不僅電流體及場的理論如此，任何物理學說的變化，無論表面上是怎樣革命的，都是如此。我們還可以在馬克士威的理論中發現電荷的概念，不過只把電荷看作電場的源。庫倫的定律還是有用的，而且包含在馬克士威的方程式中，可以從這些方程式中推演出來，成為它們的許多推論之一。我們還可以應用舊的理論，只要我們所研究的事實是在這個理論的有效範圍之內。但是我們也可以應用新理論，因為一切已知的事實都是包含在它的有效範圍之內。

若用一個比喻，我們可以說創造一種新理論不是像毀掉一個舊的穀倉，而在那地面上建起一個摩天樓來。它倒是像爬山一樣，得到了新的更廣大的眼界，發現了我們的起點與它們的豐富的環境之間的出乎意料的連繫。但是我們出發的地點還是在那裏，而且可以看得見，不過現得小些，而只成為我們克服種種障礙爬到山巔所得到的廣大眼界中的一極小的部分而已。

經過很久大家才認識到馬克士威理論的全部內容。在最初大家都以為終歸是可以利用以太對場作一種機械觀的解釋。現在我們知道這種計劃是不能實現的，場論的成就實在太大了，太重要了，我們決不能把它換一種機械觀的教義。在另一方面說，替以太做一個機械的模型的問題愈來愈沒有興趣了，而只要看看那些假設的勉強的和不自然的性質，便可以知道結果又是愈來愈令人沮喪。

唯一的出路，便是認定空間有一種發送電磁波的物理性質，而不去十分理會這句話的意義。我們還可以用以太這個字，但只是表示空間的某種物理性質。以太這個字的意義在科學的發展中已經改變了很多次。在目前

它不再是一種由質點組成的介質。它的故事還沒有結束，還要在相對論中繼續下去。

力學的間架

我們的故事說到這個階段時，必須回溯開始所說的伽利略的慣性定律。我們再把它引下來：

『一個物體，假如沒有外力改變它的狀態，便會永遠保持靜止，或等速直線的運動狀態。』

既已懂了慣性的意義，似乎對於這個問題，已經沒有甚麼可說的。但是雖則我們已經很徹底地討論過這個問題，卻不能說一切都已經討論完盡了。

設想有一個很嚴格的科學家，他相信慣性定律可以用實際的實驗證明或否認。他在水平的桌面上推動小的圓球，而設法儘量地消除摩擦。他注意到桌面與圓球愈加平滑，運動便愈加是等速的。當他正要宣佈慣性定律時，有人突然開他的玩笑。這個物理學家在一個沒有窗子的房子裏工作，與外面世界完全隔絕。開玩笑的人安置一種機構，可以使整個的房子繞一根穿過它的中心的軸而旋轉。旋轉一開始，物理學家立刻得到新的出乎意料的經驗。原來是等速直線地運動的圓球現在盡量離開房子的中央，而靠近房子的牆壁。他所經驗到的感覺和在一個轉急灣的火車或汽車中的人所感到的相似，和坐在輪轉機(merry-go-round)上所感到的更相似。他過去所得到的的一切結果現在都粉碎了。

這個物理學家既已放棄了慣性定律，便要同時放棄所有的力學定律。慣性定律是他的起點，假如這個改變了，其餘的一切也會跟着變。在另一方面，假使在進房子之前，他對於物理學的原則已經有了很深的知識，很堅的信仰，則他對於力學所以不能應用的解釋，便是房子在動。用力學的實驗，他甚至能決定它是怎樣轉動的。

我們爲甚麼對於這個在旋轉的房子中的觀察者發生這樣大的興趣呢？只是因爲我們在地球上也可以說多少是居於同樣的地位。從哥伯尼的時代以來，我們便知道地球是繞着自己的軸旋轉，而又繞着太陽轉動。甚至這

個每個人都覺得很清楚的觀念也因科學的進步而發生了問題。但是我們且暫時丟開這個問題，而接受哥伯尼的觀點。假使那個旋轉的觀察者不能證實力學的定律，我們在地球上，自然也不能夠證實。但是地球的轉動是比較慢的，因此他的影響也不很明顯。可是有許多實驗都與力學的定律有些偏差，這些偏差都是互相一致的，因此可以作為地球轉動的證明。

我們不幸不能置身於太陽與地球之間，在那裏去證明慣性定律的絕對可靠性，並且觀察轉動的地球。這只有在想像中才做得到。我們所有的實驗，都是在地球上做的，因為我們只能住在地球上。這件事實可以有一種更科學的說法：地球是我們的坐標系。

要把這些字的意義弄得更清楚，我們且舉一個簡單的例子。一個石子從塔上掉下來，我們能預言它在任何時候的位置，而且可以用觀察證實我們的預言。假使把一根量桿放在塔邊，我們便可以預言在某個時候，墮體會與桿上的那一個數碼相合。很明顯的，塔和桿必須不是橡皮製的，或旁的在做實驗的時候會發生變化的物質做的。事實上，一根嚴密地連接於地球的不變的刻度尺和一只好的鐘，便是做這個實驗時，在原則上，我們所需要的一切。我們只要有了這兩樣東西，不僅可以不管塔的建築，甚至有沒有塔都可以不管。上面所說的種種假定，都是無關緊要的，通常描寫這樣的實驗時都不會提起的。但是這個分析表示了，在我們的每一句話後面都有許多隱藏着的假定。在這個例子中，我們假定了一根堅牢的桿和一只理想的鐘，若沒有這兩樣東西，便不能檢查伽利略的墮體定律是否可靠。用這樣簡單而根本的物理儀器，一桿一鐘，我們可以相當精確地證實這個力學的定律。這個實驗若做得非常仔細，便會發現在理論與實驗之間有些不合，這種不合是由於地球的轉動，或者用旁的話說，是由於這裏所做的力學定律，在嚴密地連接於地球的一個坐標系中，不是嚴格地可靠的。

在所有的力學實驗中，不論是那一類的實驗，我們必須決定物質的點在某一定的時間上的位置，正和在上面的實驗中，決定墮體的位置一樣。但是位置總是對於某樣東西說的，例如前面的實驗中，墮體的位置是對於

塔與刻度尺說的。我們必須有所謂參考坐標，這是用來決定物體位置的力學的間架。要描寫一個城市中的人和物的位置，大街小巷便是我們的參考坐標。一直到此為止，我們引力學定律時，都沒有描寫參考坐標，這是因為我們恰恰住在地球上，而在任何情形之中，都不難固定一個與地球嚴密相連的參考坐標。我們把所有的觀察都關連於這個坐標。這樣一個用堅牢的不變的物體做成的坐標，就叫做坐標系 (Co-ordinate System)。因為我們要常用到這個字，所以有時把它簡單地寫成 $O.S.$ 。

到此為止，我們所有的物理的敘述都缺少了一點東西。我們沒有注意到任何觀察都要在某一個 $O.S.$ 中從事的一件事實。我們沒有描寫這個 $O.S.$ 的結構，我們根本不理會它。例如，在前面我們寫道：『一個物體等速地運動……』，其實我們應該這樣寫『一個物體對於某一 $O.S.$ 等速地運動……』。那個旋轉的房子經驗告訴我們，力學實驗的結果，也許與我們所選擇的 $O.S.$ 有關。

假如兩個 $O.S.$ 相對轉動，則力學定律不能在兩者之中都有效。假如把一個游泳池的水面作為一個坐標系，而這個水面是水平的，則在另一個坐標中，一個同樣的游泳池的水面就會是曲線的，這種曲線形式，凡是用茶匙攪過咖啡的人都是熟悉的。

在前面敘述力學的主要的線索時，我們忽略了很重要的一點。我們沒有說它們在那一種 $O.S.$ 中是有效的。因為這個道理，全部舊力學就等於懸在空中，因為我們不知道它屬於那一個坐標系。可是我們暫且不去管這種困難。我們且作一個稍微有些不正確的假定，即在一切嚴密連接於地球的 $O.S.$ 中，舊力學定律，都是有效的。我們所以作這樣的假定，是為了固定一個 $O.S.$ ，而使我們的話能夠確定。雖則說地球是一個適宜的參考坐標是不十分正確的，但是暫時不妨這樣承認。

因此我們假設有一個 $O.S.$ ，力學定律在這個 $O.S.$ 中是有效的。這樣的坐標系只有一個嗎？假設有一個 $O.S.$ ，例如一列火車，一隻船，一隻飛機，對於地球而說，是在運動的。在這些新的 $O.S.$ 中力學定律也會是有效的嗎？我們確實知道它們不是常常有效的，例如火車在轉灣，船在風暴中搖蕩，飛機在翻身的時

候。我們首先說一個簡單的例子。有一個 O_1S_1 對於一個『好的』 O_2S_2 等速地運動。所謂一個『好的』 O_2S_2 便是其中能應用力學定律的 O_2S_2 。例如，有一列理想的車或一隻理想的船，沿着直線異常平穩地動着，速率始終不變。從日常的經驗中，我們知道這兩個坐標系都會是『好的』，在這樣一個等速地運動的火車上或船上所做的物理實驗，會和在地面上所做的結果完全一樣。但是假如火車突然停了，或突然加快了，或者海面突然起了風浪，便會發生奇怪的事。在車裏面，箱子從行李架上掉了下來；在船上，桌子和椅子都弄成一團糟，乘客也暈船了。從物理學的觀點看，這只是表示力學的定律不能在這些 O_2S_2 中應用，它們是『壞的』 O_2S_2 。

這種結果，便是所謂伽利略相對原理：假使力學定律在一個 O_2S_2 中是有效的，則在任何其他對它作等速直線運動的 O_1S_1 中也是有效的。

假使有兩個 O_1S_1 ，互相作不等速的運動，則力學定律不會在兩者之中都有效。『好的』坐標系就是說，力學定律能夠應用的坐標系，叫做慣性系。是否有一個慣性系的問題至今還沒有解決。但是假如有這樣一個系統，便會有無限多的這樣的系統。每一個與慣性系作等速直線運動的 O_2S_2 也是慣性的 O_2S_2 。

我們來研究這樣一個例子：有兩個 O_1S_1 從一個已知的位置出發，而且以一種已知的速度互相作等速直線的運動。假如有人喜歡具體的圖形，他可以想像一隻船或是一列火車，對於地面運動。力學的定律可以在地面上，也可以在與它作等速直線運動的車內或是船上，用實驗證實，而得到同樣的精確程度。但是假如兩個系統的觀察者開始討論從他們的不同的觀點對於同一事件的觀察時，便會有些困難產生。每一個人都想把旁人的觀察翻譯成爲自己的語言。再舉一個簡單的例子：從兩個 O_2S_2 觀察一個質點的運動——例如從互相作等速直線運動的地面上與火車中觀察。這兩個 O_2S_2 都是慣性的。假如兩個 O_2S_2 的某時間的相對的速度與位置是已知的，那麼是否知道了一個 O_2S_2 中的觀察的結果，便可以求出另一個 O_2S_2 中的觀察的結果呢？要描寫事件，最要緊的是知道如何從一個 O_2S_2 過渡到另一個，因為兩個 O_2S_2 都是相等的，而且都是同樣地適宜於描寫自然中的事件的。確實，只要知道在一個 O_2S_2 中的一個觀察者，所得到的結果，你便可以知道在另一個 O_2S_2

中的一個觀察者所得到的結果。

我們暫且不利用船或火車作例，而更抽象地來研究這個問題。爲簡單起見，我們只研究直線的運動。我們有一根不變的刻有標度的桿和一只好的鐘。在簡單的直線運動的情形中，這根不變的桿，代表一個 $O.S.$ ，正和伽利略的實驗中的塔上的標度一樣。在直線運動的情形中，把一個 $O.S.$ 想像爲一根不變的桿，在空間的任意運動的情形中，把一個 $O.S.$ 想像爲一個由平行與垂直的桿所構成的架子，而不管甚麼塔，牆，街道以及其他這一類的東西，總是比較簡單些，好些。假設在最簡單的情形中，有兩個 $O.S.$ ，就是說，有兩根不變的桿；我們把一根畫在另一根的上面，而分別叫它們做『上面的』和『下面的』 $O.S.$ 。我們假定這兩個 $O.S.$ 以一定的速度相對運動，一個沿着另一個滑動。爲妥當起見，再假定兩根桿都是無限長的，只有起點，沒有終點。這兩個 $O.S.$ 只用一只鐘就夠了，因爲兩者的時間之流是一樣的。在觀察開始的時候兩根桿的起點是相合的。在這個時候一個物質的點的位置在兩個 $O.S.$ 中都是用同一個數字來表示的。這個物質的點與桿上的標度的一點相合，因此便有了一個決定這物質的點的位置的數字。但是假如兩根桿相對作等速直線的運動，在開始運動例如一秒鐘之後，表示位置的數字便不同了。試看上面的桿中的一個物質的點。決定在上面的 $O.S.$ 中的位置的數字並不隨時間變更。但是在下面的桿中的對應的數字卻是會變的。我們不必說『與一點的位置對應的數字』，而另外有一種簡單的說法，就是『一點的坐標。』雖則下面的話聽來像是很深奧的，卻是正確的，而且所表示的意思是極簡單的。在下面的 $O.S.$ 中一點的坐標，等於在上面的 $O.S.$ 中的座標，加上面的 $O.S.$ 的起點對於下面的 $O.S.$ 的座標。重要的是，假如我們知道在一個 $O.S.$ 中的一個質點的位置，便能計算它在另一 $O.S.$ 中的位置。爲了這個目的，我們必須知道在每個時刻這兩個座標系的相對的位置。上面這些話聽起來似乎很高深，其實是很簡單的，而且如果不是因爲在後面要用它，還值不得作這樣詳細的討論。

我們很值得去注意決定一點的位置與一事件的時間的差異。每一個觀察者有他自己的桿，作爲他的 $O.S.$ ，但是他們卻共有一只鐘。時間是『絕對的』，對於所有的 $O.S.$ 中的觀察者，它都是同樣地流的。

現在再舉一個例。有一個人以每小時三英里的速度沿着一隻大船的甲板散步。這是他的對於船的速度，或者換句話說，對於嚴密地連接於船的一個 $O.S.$ 的速度。假使船對於岸的速度是每小時三十英里，而人與船的等速直線的運動的方向又相同，則這個散步的人，對於一個岸上的觀察者的速度會是每小時三十三英里，或者對於船是每小時三英里。我們可以把這件事實說得更抽象一些：一個動的物質的點的對於下面的 $O.S.$ 的速度，等於它對於上面的 $O.S.$ 的速度，加或減上面的 $O.S.$ 對於下面的 $O.S.$ 的速度，究竟是加還是減，完全看速度的方向是相同還是相反。因此假使我們知道兩個 $O.S.$ 的相對的速度，我們不僅可以把位置變換，而且可以把速度從一個 $O.S.$ 變換到另一個 $O.S.$ 。位置，或座標，與速度這都是在不同的 $O.S.$ 中便不同的量，卻是用某種變換定律連繫着的，在這個簡單的例子中，所用的是很簡單的變換定律。

可是有些量在兩個 $O.S.$ 中都是相同的，不需要變換定律。例如假設在上面的桿上有兩個定點，而不止一個點。我們研究這兩點間的距離。這個距離便是兩點的座標之差。要找出這兩點對於不同的 $O.S.$ 的位置，我們必須應用變換定律。但是在構造兩個位置之差時，由於 $O.S.$ 之不同而發生的影響互相抵消了。我們必須加或減兩個 $O.S.$ 的起點間的距離。因此兩點的距離是不變的，就是說與 $O.S.$ 之選擇無關。

其次一個與 $O.S.$ 無關的量的例子便是速度變更，這是力學中的熟悉的概念。從兩個 $O.S.$ 去觀察一個沿直線運動的物質的點。對於每一個 $O.S.$ 的觀察者，其速度變更便是兩個速度之差，把這種差計算了以後，則由於兩個 $O.S.$ 的等速直線的相對運動所產生的影響便消滅了。因此速度變更是一個不變數，但自然有一個條件，即兩個 $O.S.$ 的相對運動須是等速直線的。不然，在每個 $O.S.$ 中速度的變更也會不同，這種相差是由於代表我們的座標系的兩桿的相對運動的速度發生變更所致。

現在舉最後的一個例！設有兩個質點，作用於其間的力只與距離有關。在等速直線運動的情形中，距離是不變數，因此力也是不變數。因此把力和速度變更連結起來的牛頓定律，在兩個 $O.S.$ 中都是有效的。我們又得到了一個為日常經驗所證實的結論：假使力學定律在一個 $O.S.$ 中是有效的，則在對它作等速直線運動的一

切 $O.S.$ 中都是有效的。我們的例子自然是很簡單的，是一種直線運動的例子，其中的 $O.S.$ 可以用一根堅平的桿代表。但是我們的結論是一般地有效的，可以概括之如次：

(1) 我們不知道有甚麼規則可以發現一個慣性系。可是假定有一個，我們便可以找到無限個，因為任何互相作等速直線運動的系統，只要其中有一個是慣性系，便都是慣性系。

(2) 與一個事件相對應的時間，在一切 $O.S.$ 中都是相同的。座標與速度卻都是不同的，而依照變換定律變更。

(3) 雖然座標與速度，由一個 $O.S.$ 過渡到另一個時是變更的；但依照變換定律，力與速度變更都是不變的，而因此所有的力學定律都是不變的。

這裏為座標與速度所做的變換定律，我們叫做舊力學的變換定律，或簡稱舊變換。

以太與運動

伽利略相對原理在力學現象範圍內是有效的。在所有的相對運動的慣性系中都可以應用同樣的力學定律。非力學的現象，尤其是場的現象，也都能應用這個原理嗎？與這個問題有關的一切問題立刻把我們帶到相對論的起點。

我們記得在『真空』中，或者換句話說，在以太中的光速是每秒 186,000 英里，而光便是在以太中傳播的電磁波。電磁場帶有能，這種能一旦從它的源發射出來以後，便有一種獨立的存在。暫時我們還繼續相信以太是傳播電磁波的介質，不過我們充分知道關於它的機械的結構有許多的困難。

我們坐在一個關着的房子裏，與外界完全隔絕，空氣不能進出。假使我們說話，從物理學的觀點說，我們是在創造聲波，這種波從靜止的源以空氣中的聲速傳播。假使在口與耳之間沒有空氣或旁的物質的介質，我們便不能聽到一個聲音。實驗告訴我們，假使在我們所選擇的 $O.S.$ 中沒有風，而空氣是靜止的，聲在空氣中的

速度在各個方向中便都是相同的。

現在我們想像房子在空間中等速直線地運動。一個外面的人可以透過動的房子（假如你高興，說是火車也可以）的玻璃牆看見內面的一切。他能夠從內面的觀察者的測量，推論聲對於連接於它的環境的 Q_2 的速度，而房子是對於他的環境運動的。這裏又是前面那個舊的討論了很多的問題，即假如知道一樣東西在一個 Q_2 中的速度，如何決定它在另一個 Q_2 中的速度。

房內的觀察者主張：在我看來，各個方向的聲的速度都是相等的。

外面的觀察者主張：在動的房內傳播的而由我的 Q_2 決定的聲的速度，在各個方向都不是相等的。在房子運動的方向，聲速比標準聲速大些，在相反的方向則比較小些。

這些結論都是從舊變換推出來的，而且可以用實驗證實。房子把物質的介質，即聲波賴以傳播的空氣，帶着運動，而因此聲速對於內面的和外面的觀察者是不同的。

我們還可以從聲為物質的介質中所傳播的一種波的理論，推出其他的結論來。要聽不到自己所說的話，一個辦法便是以大於聲速的一種速度向前跑。於是我們所創造的聲波便會永遠不能達到我們的耳鼓。在另一方面，假使我們忘掉了一句永遠不能重述的重要的話，則我們必須以大於聲速的速率，跑到我們所創造的波那裏聽到那一句話。這兩個例子並沒有甚麼不合理的地方，不過所難的是在兩種情形之中，我們必須以每秒約四百碼的速率跑，但我們很可以想像，將來技術更發展以後，這樣的速率會是不可能的。從砲裏發出來的砲彈的速度實際上比聲速更快，而在這樣一個砲彈上的人便永遠不能聽到發射砲彈時的聲音。

所有這些例子，都屬於純粹的力學的性质，現在可以問一個重要的問題：關於聲波所說的一切是否可應用於光波呢？伽利略相對原理與舊變換是否除了應用於力學現象以外，也能應用於光學和電學現象呢？假如對於這些問題簡單地答覆一個『是』或『否』，而不深究它們的意義，是很危險的。

關於對外面的觀察者作等速直線運動的房子中的聲波，須經過下面的兩個中間步驟才能得到結論：

動的房子把傳播聲波的空氣帶走。

在相對作等速直線運動的兩 $O \cdot O'$ 中，所觀察到的速度是用舊變換連繫的。

光的問題的提出稍微不同。在房子裏的觀察者不再是說話，而是向各個方向發出光的信號或光波。我們再假定發出信號的光源在房子裏是永遠靜止的。光波在以太中運動，正和聲波在空氣中運動一樣。

房子是否帶着以太走，和帶着空氣走一樣呢？因為我們不能想像以太的機械的結構，所以很難答覆這個問題。假設房子是關着的，內面的空氣便不得不隨它運動。假如想像以太也是如此，很明顯地是毫無意義的，因為所有的物質都是浸在它裏面，而它是無所不在的。任何門戶關不住以太。所謂「動的房子」，意思只是一個動的與光源嚴密地連接着的 $O \cdot O'$ 。可是我們並非絕對不能想像房子把光源和以太帶走，正如關着的房子把聲源和空氣帶走一樣。但是我們也可以想像一種相反的情形：房子在以太中通過，正如船在絕對平靜的海中通過一樣，不把介質的任何部分帶走，而是通過它。在第一種假設中，帶着光源運動的房子，也帶着以太動。我們可以把光波和聲波類比，而得出類似的結論來。在第二種假設中，帶着光源運動的房子不把以太帶走。因此不能和聲波類比，而關於聲波所得的結論便不能應用於光波。這是兩種極端的可能性。此外還可以有更複雜的可能性，例如以太只是部分地被帶着光源運動的房子所帶走。但是我們在研究實驗對於這兩種簡單的極端的情形如何判斷以前，沒有理由討論更複雜的假定。

我們從第一種假設開始，而暫且假定：與光源嚴密地連接着的動着的房子把以太帶走。假使我們相信那簡單的應用於聲波的速度變換原則，我們也可以把前面的理論應用於光波。我們沒有理由懷疑簡單的力學的變換定律，這個定律不過是說在某種情形中必須加上速度，在旁的情形中必須減去速度。因此我們暫時假定光源隨着運動的房子帶着以太走，而舊變換是可靠的。

假使我們發光而光源又是嚴密地連接於我們的房子，則光的信號的速度為有名的實驗值，每秒 $186,000$ 英里。但是外面的觀察者會注意到房子的運動，而因此也會注意到光源的運動——而因為以太是帶着走的，他的

結論必定是：在外面的 $O\Sigma$ 中，光在不同的方向有不同的速度。在房子運動的方向它比較標準光速爲大，在相反的方向則較小。我們的結論是：假使以太被帶着光源運動的房子所帶走，而假使力學定律是有效的，則光速必須與光源的速度有關。假如運動是朝向我們的，則從運動的光源到達眼睛的光，會有一種較大的速度，假如運動是離開我們的，則它會有一種較小的速度。

假如我們的速率較光速爲大，則我們可以逃開光的信號。我們可以趕上過去所發出的光波，而看到過去所發生的事情。我們趕上它們的次序和它們發送的次序相反，而我們地球上所發生的事情就會像一個倒映的電影片一樣，從大團圓開始。這些結論都是從假定動的 $O\Sigma$ 把以太帶走，而力學變換定律有效，所推出來的。

但是沒有事實表示這些結論是真的。恰恰相反，所有的爲了要證明它們的觀察都與它們不合。這個判決的明確，是毫無可疑的，不過因爲光速的值太大，要直接做一個實驗，在技術上是很困難的，因此都是從頗爲間接的實驗中得來的。不論發射的光源是不是動或怎樣地動，在所有的 $O\Sigma$ 中的光速都是相等的。

這個重要的結論，是從許多實驗中得出來的，我們不詳細描寫這些實驗。可是我們可以作些很簡單的推論，這些推論雖不能證明光速與源的運動無關，但能使人覺得這件事實可信而且可解。

在我們的行星系統中，地球與旁的行星都繞着太陽運動，我們不知道還有甚麼旁的行星系統和我們的相似。可是還有許多雙星系統，是兩個星繞一點而轉，這一點叫做它們的重心。對這種雙星的觀察顯示了牛頓引力定律的正確。現在假定光的速率與發射體的速度有關，則從星發出來的光或信息是快是慢，就要看發光之際光的速度如何。於是雙星的整個的運動便都會是混亂的，而我們便根本不能證實那支配我們的行星系統的萬有引力。

我們再研究另一個根據一個很簡單的觀念的實驗。設想一個旋轉得很快的輪子。根據我們的假定，以太是被運動帶走的，而且是參加運動的，因此在輪附近通過的光波，會因輪的靜止或運動，而有不同的速度。在靜

止的以太中的光的速度，和那被輪的運動很快地帶動的以太中的光的速度不同，正如聲波的速度，在平靜的和有風的日子不同，是一樣的道理。但是沒有發現這樣的差異！不管我們從那一個角度研究這個問題，或不管我們設計怎樣的決定的實驗，結果總是與以太為運動帶走的假設不合。此外還有更詳細的實驗結果使我們斷定：

光的速度與發光的源的運動無關。

不能假定動的物體把它周圍的以太帶走。

因此我們必須放棄聲波與光波的類比，轉而研究第二種可能：所有的物質都是在以太中運動，而以太不參加任何運動。這表示我們要假定有一個以太海，所有的 $C.S.$ 都對它靜止或對它運動。我們暫時丟開實驗是否能證實這理論的問題。最好先把這個新假設的意義，和能從它裏面推出來的結論，更仔細地研究一下。

有一個 $C.S.$ 對於以太海是靜止的。在力學中，若有許多相對作等速直線運動的 $C.S.$ ，其中沒有一個會是特出的。所有這樣的 $C.S.$ 都是同等地『好』或『壞』。假如我們有兩個相對作等速直線運動的 $C.S.$ ，則問那一個在運動，那一個在靜止，在力學中是毫無意義的。能觀察到的只有相對的等速直線運動。由於伽利略相對原理，我們不能談絕對的等速直線運動。所謂有絕對的等速直線運動，而不是只有相對的等速直線運動，這句話的意義是怎樣呢？不過是說有一個 $C.S.$ ，在它裏面有些自然定律和在所有旁的 $C.S.$ 中的定律不同。每一個觀察者都可以拿能應用於他的 $C.S.$ 中的定律，和能應用於這一個專作標準的 $C.S.$ 中的定律比較，以決定他自己的 $C.S.$ 究竟是運動還是靜止。這是與舊力學不同的一種情形，在舊力學中，由於伽利略的慣性定律，絕對的等速直線運動，是毫無意義的。

我們若假定通過以太的運動，則在場的現象範圍之中，可以推出怎樣的結論來呢？所謂通過以太的運動，意思就是說有一個與所有旁的 $C.S.$ 都不同的 $C.S.$ ，它對於以太海是靜止的。很明顯的，在這個 $C.S.$ 中有些自然定律必定是特別不同的，不然，『通過以太的運動』一辭便沒有意義。假如伽利略相對原理是可靠

的，則通過以太的運動決不會有任何意義。這兩種觀念是無法融洽的。可是假如有一個由以太所固定的特出的 O_1 ，則『絕對運動』或『絕對靜止』便有了一定的意義。

我們已經假設過每個物體在它的運動中把以太帶走，想挽救伽利略相對原理，但是結果發現它與實驗不合。唯一的出路便是放棄伽利略相對原理，而試用一切物體都在平靜的以太海中通過的假設。

第二步，就是研究與伽利略相對原理相矛盾的幾種結論，而支持通過以太的運動的觀點，並且用實驗來檢驗它。這樣的實驗很容易想像，但是很難做。因為我們只研究觀念，所以不需要理會技術上的困難。

我們再回頭研究有內外兩個觀察者的動的房子。外面的觀察者代表由以太所特定的標準 O_1 。只有在這個特出的 O_1 中光速總是有同樣的標準值。所有的光源，不論在平靜的以太海中是運動或是靜止，都以同樣的速度傳播光。房子和它的觀察者在以太中運動。設想在房子中央，突然發出一光，隨即熄滅，並且設想房子的牆是透明的，內外的觀察者都能測量光速。假使我們問這兩個觀察者，他們預料會得到怎樣的結果，他們的答覆大概會是這樣的：

外面的觀察者：我的 O_1 是以太海所特定的。在我的 O_1 中的光總是有標準值。我不必管光或旁的物體的源是否運動，因為它們永不會把以太海帶走。我的 O_1 是和旁的 O_1 不同的，在我的 O_1 中，不論光柱或光源的運動的方向如何，光速必須為標準值。

內面的觀察者：我的房子通過以太海。一扇牆逃開光，另一扇則接近它。假使我的房子對於以太海的速度和光速相等，則從房子中央發射出去的光永遠不能達到以光速逃開的牆。假如房子的速度較光的速度為小，則從房子中央送出一個波的抵達一扇牆，會比抵達另一扇牆早些，它抵達朝光波運動的牆，會在抵達對光波後退的牆之前。因此雖則光源是嚴密地連接於我的 O_1 ，各方向的光速卻不會一樣。對於以太海運動的方向的光速較小，因為牆在逃開，在相反的方向的光速較大，因為牆朝光波運動，因此接觸它較早些。

因此只有在以太海所特定的一個 O_1 中，各個方向的光速是相等的。在其他對以太海運動的 O_1 中，

則光速與我們測量的方向有關。

剛才所研究的決定的實驗，使我們能夠檢驗通過以太的運動的理論。事實上，自然供給了我們一個運動速度相當高的系統——每年繞太陽運動的地球。假如我們的假設是正確的，則在地球運動方向的光速比在相反方向的光速會不同些。這種差異是可以計算的，而且可以設計一個適當的實驗來檢驗它。根據這個理論，這種時間之差一定很小，因此必須想出很巧妙的實驗裝置來。有名的邁克爾遜——摩黎 (Michelson—Morley) 實驗便是爲這個目的而設計的。其結果是判決了那一切物質都在靜止的以太海中通過的理論的死刑。它毫未發現光速與方向有何關係。若假定以太海的理論，不僅光速，便是其他場的現象，都會與動的 $O.S.$ 的方向有關。每個實驗都和邁克爾遜——摩黎的實驗一樣，得着「負」的結果，而從來沒有發現與地球運動的方向有何關係。

形勢愈來愈嚴重了。兩個假設都已經試過了。第一個是說動的物體把以太帶走。光速與光源運動無關的事實和這個假設不合。第二個是說有一個特出的 $O.S.$ ，而動的物體不把以太帶走，却是在永遠靜止的以太海中通過。假使是這樣，伽利略相對原理便是不可靠的，而在每個 $O.S.$ 中的光速便不會相等，而實驗結果又與他不合。

比較更勉強的理論也試過了，例如假定實在的真理在這兩極端之間：以太只是部分地被動的物體所帶走。但是它們都失敗了，每一次企圖用以太的運動，通過以太的運動，或這兩種運動，來解釋動的 $O.S.$ 中的電磁現象，都是不成功的。

於是發生了一次科學史上最緊張的形勢。所有的關於以太的假設都沒有結果！實驗的判決總是負的。回顧物理學的發展，我們看到以太自出生以後便成了物理的質族中的頑童。第一、構造一個簡單的機械的以太理論證明是不可能的。因此我們把這個工作放棄了。第二、我們不能再希望，由於看以太海，於是承認有一個特出的 $O.S.$ ，而且由此可以認識除相對的運動之外，還有絕對的運動。除了把波帶走以外，以太要想顯示或維持它自己的存在，這就是唯一的辦法了。我們很想使以太成爲實在的東西，但一切努力都失敗了。它既不顯示它

的機械的結構，又不顯示絕對運動。除發明以太時所賦予它的一種性質：傳電磁波的能力以外，其他任何性質都沒有了。我們極想發現以太的性質，但一切努力都引起了困難和矛盾。在這樣的不幸的經驗之後，現在應當是完全忘記以太的時候了。以後再也不要提起它的名字。我們說：我們的空間有傳波的物理性質，這樣便不用我們所決定避免的一個字。

避免用一個字典中的字自然不是救藥。我們的困難確是太深了，不能這樣了事！

我們現在把實驗相當充分地證實了的事實寫下來，而不必再管『以太』問題。

(1) 光在『真空』中的速度皆為標準值，與光源及光的接受者的運動無關。

(2) 在兩個相對作等速直線運動的 O_1O_2 中，所有的自然定律都是完全相同的，而無法分辨出絕對的等速直線運動。

有許多實驗證實這兩點，而沒有一個實驗和它相矛盾。第一點表示光速的不變性，第二點把應用於力學現象的伽利略相對原理推廣來應用於一切自然現象。

在力學中我們看見：假如一個物質點對於一個 O_1O_2 的速度是若干，則它對於另一個和第一個作等速直線運動的 O_1O_2 ，其速度又不相同。這是用簡單的力學的變換定律推出來的。這種定律是直接從我們的直覺（如人對於船和對於岸的運動）中得來的，似乎不可能有任何錯誤！但是這個變換定律是與光速的不變性不合的。或者，換句話說，我們添一個第三原則：

(3) 位置與速度依照舊變換從一個慣性系變換到另一個慣性系。

這種矛盾是很明顯的。我們不能結合(1)(2)與(3)。

舊變換看來是太明顯太簡單了，不容我們改變它。我們已經設法去改變(1)與(2)，而使它與實驗一致。所有關於『以太』問題的理論都需要更改(1)與(2)。但沒有好結果，我們又發現了我們的困難的嚴重性。現在又需要一個新線索了。這個新線索是接受(1)與(2)的基本假定，而看來奇怪得很，却放棄(3)。這個新線



索是由分析最基本的與原始的概念開始的；我們要看這個分析如何逼迫我們改變舊的看法，而除去所有的困難。

時間距離相對論

我們的新假定是：

(1) 在所有的互相作等速直線運動的 O, O' 中的光在真空中的速度都是相同的。
 (2) 在所有的互相作等速直線運動的 O, O' 中的一切自然定律都是相同的。
 相對論便是由這兩條主張出發的。從此以後我們不再用舊的變換定律了，因為我們知道它與前面兩條主張

衝突。

在科學上常常需要把根深蒂固的而每每是未經批判便為一般人所接受的偽見除掉。因為我們知道若把(1)與(2)加以變更，會與實驗衝突，所以我們必須有勇氣明白地承認它們是靠的，而攻擊那一個可能的弱點，即位置與速率從一個 O, S 變換到另一個 O', S' 中的方法。我們的意思是說從(1)與(2)中推出結論來，看這些主張在甚麼地方，而且如何與舊變換定律衝突，而找出我們所得到的結果的物理意義來。

我們再利用前面的一個例子，一間動的房子，有內外兩個觀察者。一個光的信號由房子的中央發射出去，我們再問這兩人，他們預期會觀察到怎樣的結果，他們只假定上面的兩個原則，完全忘掉前面所說的一切關於光的傳播的介質的話。我們把他們的答覆引下來：

內面的觀察者：由房子中央發出的光的信號會同時到達房的四面的牆，因為四扇牆與光源的距離都相等，而光的各方向的速度又是相等的。

外面的觀察者：在我的系統中，光的速度與隨着房子運動的觀察者所看到的完全一樣。在我的系統中光源運動與否毫無關係，因為光源的運動不能影響光速。我所看到的，只是光的信號以同樣的標準速度向各個方向

進行。一扇牆要逃避光的信號，而另一扇牆則要接近光的信號。因此信號到達那逃避的牆，比較到達那接近的牆要稍微遲一些。假使房子的速度比起光的速度來是小得很多的，那麼信號到達兩牆的時間之差也小得很。雖然這種相差小得很，但信號決不會完全同時到達與運動方向垂直的兩扇相對的牆。

把這兩個觀察者的預言加以比較，我們便會發現一種最可驚的結果，這種結果與舊物理學中的表面上非常鞏固的概念絕對不合。在內面的觀察者看來，兩柱光同時到達兩牆，而外面的觀察者卻認為它們不同時。在舊物理學中，任何 *C.S.* 中的觀察者都是用的同一只鐘，都有同一的時間之流。時間，如所謂「同時」「早些」「遲些」等字，都有一種與任何 *C.S.* 無關的絕對的意義。在一個 *C.S.* 中同時發生的兩件事，在任何其他的 *C.S.* 中也必定是同時發生的。

(1)與(2)兩條主張，就是說相對論，使我們不能不放棄這種意見。我們已經描寫過，在一個 *C.S.* 中同時發生的兩件事，在另一個 *C.S.* 中卻不是同時的。我們的工作是要了解這種定律，了解所謂「在一個 *C.S.* 中同時發生的兩件事，在另一個 *C.S.* 中卻不是同時的」這句話的意義。

所謂「在一個 *C.S.* 中的兩件同時的事」是甚麼意義呢？每個人在直覺上似乎都知道這句話的意義。但是我們必須謹慎些，所下的定義必須嚴格，我們知道太重視直覺是如何危險。我們首先回答這個簡單的問題。甚麼是一只鐘呢？

關於時間之流我們有一種原始的主觀的感覺，這種感覺使我們能夠分別印象的次序，斷定這一件事早些，那一件事遲些。但是要表示兩件事情的時間相隔十秒鐘卻需要一只鐘，利用一只鐘，時間的概念便成為客觀的了。任何物理現象都可以用作一只鐘，只要它能夠任意照原樣重覆多少次，把這件事的首尾之間的時間作為時間的單位，則重覆這種物理過程，便可以測量任何時間。所有的鐘，從最簡單的沙漏到最精巧的器具，都是根據這種意思。例如沙漏的時間單位便是沙由上面的玻璃瓶流到下面的玻璃瓶所需的時間，把玻璃瓶倒轉來便可以重複這種物理過程。

在兩個距離很遠的點上有兩只極端準確的鐘，上面所顯現的時刻完全一樣。這句話不論我們如何設法去證實，它總應該是真的，但是實在說來它的意義是怎樣的呢？我們怎樣才能確定兩個距離很遠的鐘所顯現的時刻是完全一樣的呢？一個可能的方法便是用電視。讀者必須知道我們只是用電視作例，它在我們的推論中並不重要。我可以站在一只鐘的附近而看着另一只鐘的電視的像，於是我可以斷定它們是否同時顯現相同的時刻。但是這不會是一個好的證明方法，電視的像是由電磁波傳遞的，因此是以光速進行的，在電視中我所看到的是一個短時間以前所發出的像，而在那實在的鐘上我所看到的卻是此刻所發生的。這種困難也很容易避免。我們可以在與這兩只鐘距離相等的中點攝取它們的電視的像，然後在這一點上觀察它們。假使信號是同時發出的，它們便會同時到達這一點上。假使從這一個中點上所觀察的兩只好鐘都顯現相同的時刻，那麼它們便很適宜於表示距離很遠的兩點上的事件的時間。

在力學中我們只用一只鐘。但是這是不很方便的，因為我們必須在這只鐘的附近作所有的測量。假如從遠處望鐘，例如用電視的方法去望遠處的鐘，我們必須時時記得，我們現在所看到的實在是過去發生的，正如在看日落時，我們都知道這件事其實發生在八分鐘之前。在我們讀數時間的時候，必須根據我們與鐘的距離作相當的改正。

因此只用一只鐘是不方便的。可是現在我們既已經知道了怎樣判斷兩只或更多的鐘在同時顯現相同的時刻，我們便很可以想像在某一個 O_1O_2 中可以隨我們的意思設置多少只鐘，每一只鐘都可以幫助我們決定它的鄰近所發生的事件的時間。這些鐘對於這個 O_1O_2 都是靜止的。它們都是『好』鐘，而且是同步的，就是說在同時表現相同的時刻。

關於鐘的裝置沒有甚麼特別可驚或奇怪的。我們現在用了很多的同步的鐘，而不一而足，因此很容易判斷在一個 O_1O_2 中，兩件相距遙遠的事情是否同時發生。假使兩件事情發生時，它們附近的鐘都顯現同一的時刻，則它們便是同時的。在兩件相距遙遠的事情中，說這一件比那一件發生的時間早些，現在有了確定的意義

了。這都是可以用對於我們的 $C.S.$ 靜止的同步的鐘來判斷的。這是與舊物理學相合的，沒有一點與舊變換定律矛盾的地方。

要給同時的事件下定義，必須利用信號，使鐘同步。在這樣的裝置中有一點很重要，便是信號必須以光的速度進行，而光的速度在相對論中有一種根本的作用。

因為我們想研究兩個相對作等速直線運動的 $C.S.$ 的重要問題，所以我們必須想像兩根桿，每根桿上有一只鐘。這兩個 $C.S.$ 相對作等速直線運動，在它們上面的觀察者，現在都有了他們自己的桿，和固結於桿上的一組鐘。

在舊物理學中講到測量時，在任何 $C.S.$ 中我們都只用一只鐘。在這裏每個 $C.S.$ 中都有許多只鐘。這種區別是沒有甚麼重要的。一只鐘也就夠了，但是決沒有人反對用很多只鐘，只要它們確是很好的同步的鐘。

現在我們接近那表現舊變換定律與相對論的矛盾的矛盾的重要之點了。假如這兩只鐘相對作等速直線的運動，結果會怎樣呢？舊物理學家會回答說：沒有甚麼，它們還會有相同的快慢。我們可以用運動的鐘也可以用靜止的鐘來表示時間。依照舊物理學，在一個 $C.S.$ 中是同時的兩件事，在另一個 $C.S.$ 中也會是同時的。

但是這不是惟一的可能性的答案。我們很可以想像一只運動的鐘與一只靜止的鐘的快慢不同。我們現在研究這種可能性，暫時不必確定鐘在運動的時候是否確實改變快慢。

說一只運動的鐘會改變快慢是甚麼意義呢？為簡單起見，我們想像在上面的 $C.S.$ 中只有一只鐘，在下面的 $C.S.$ 中卻有許多。所有的鐘都有相同的機構，而下面的鐘是同步的，就是說，它們在同時顯現相同的時刻。我們把兩個相對運動的 $C.S.$ 的三個相繼的位置畫了下來。在第一圖中上面的和下面的鐘的針的位置照規定都是一樣的，因為我們故意把它們這樣裝置。所有的鐘都顯

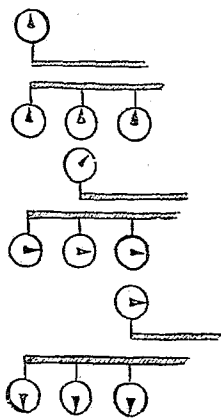


圖 八 十 第

現相同的時刻。在第二圖中我們看見兩個 $O.S.$ 的稍後的相對位置。所有在下面的 $O.S.$ 中的鐘都顯現同樣的時刻，但是上面的 $O.S.$ 中的鐘的快慢卻不同了。慢慢變了，時間不同了，因為那只鐘對於下面的 $O.S.$ 是運動的。在第三圖中我們看到針的位置的差異隨時間而增加。

一個在下面的 $O.S.$ 中的靜止的觀察者會發現一只動的鐘會變更它的快慢。假如鐘對於在上面的 $O.S.$ 中的靜止的觀察者運動，自然也可以發現同樣的結果；在這種情形之中，上面的 $O.S.$ 中會有許多只鐘，而下面的 $O.S.$ 中卻只有一只鐘。在兩個相對運動的 $O.S.$ 中的自然定律必定是相同的。

在舊力學中，我們默認一只動的鐘不會改變快慢。這似乎太明顯了，簡直值不得提起。但是沒有甚麼事情應該是太明顯的。假如要認真謹慎，我們必須分析一向在物理學上所已經認可的假定。

我們不能夠單因為一個假定與舊物理學的假設不同，便認為它是不合理的。我們很可以想像一只動的鐘變更它的快慢，只要是這種變更的定律對於所有的慣性的 $O.S.$ 都是相同的。

再舉一個例。試拿一根碼尺；這種尺在一個 $O.S.$ 中靜止時有一碼長，現在讓它等速直線地運動，在代表 $O.S.$ 的桿上滑過。它的長度還會是一碼嗎？我們必須預先知道怎樣決定它的長度。只要桿是靜止的，它的兩端便會與 $O.S.$ 上的相隔一碼的記號相合，由此我們斷定靜止的尺的長度是一碼。我們怎樣測量運動時的尺呢？可以用下面的方法。在一定的時刻，兩個觀察者同時拍照，一個拍尺的起點，另一個拍尺的末端。因為照片是同時拍的，我們可以把與動的尺首尾相合的 $O.S.$ 桿上的記號加以比較。我們這樣便決定了它的長度。必須有兩個觀察者，在一個 $O.S.$ 中的不同部分，觀測同時的現象。我們沒有理由相信這樣測量的結果會與尺在靜止時的結果相同。因為照片須是同時拍的，而我們已經知道，同時是與 $O.S.$ 有關的一個相對的觀念，因此似乎很可能在不同的相對運動的 $O.S.$ 中，這樣的測量有不同的結果。

我們很可以想像，不僅動的鐘會變更它的快慢，一根動的尺也會變更它的長度，只要變更的定律對於所有的慣性的 $O.S.$ 都是相同的。

我們只討論了幾種新的可能性，都沒有說出爲甚麼要假定它們的理由。

我們記得在所有慣性的 O_1 中的光速都是相同的。這件事實要和舊變換融洽是不可能的。解決這個困難的關鍵必定在甚麼地方。難道就在此處嗎？我們難道不能假定動的鐘的快慢和動的桿的長度會變更，而由這些假定便直接推出光速的不變性來嗎？我們確實能夠！這是相對論和舊物理學根本不同的一例。我們的推論可以倒轉過來：假如在所有的 O_1 中光速都是相等的，則動的桿必須變更它們的長度，動的鐘必須變更它們的快慢，而支配這些變化的定律都是嚴格地決定的。

這一切都沒有甚麼神祕的和不合理的地方。在舊物理學中總是假定動的鐘和靜止的鐘都有相同的快慢，而動的桿和靜止的桿都有相同的長度。假如在所有的 O_1 中光速都是相等的，假如相對論是可靠的，則我們必須犧牲這個假定。這些根深蒂固的偏見是很難除掉的，但是除此以外別無辦法。從相對論的觀點看來，舊概念似乎是武斷的。爲甚麼要像前面幾頁中一樣，相信對於所有的 O_1 中的一切觀察者都是同樣地流動的絕對時間呢？爲甚麼相信不變的距離呢？時間是由鐘來決定的，空間座標是由桿所決定的，而決定的結果也許與鐘及桿的運動有關。我們沒有理由相信它們的行爲會符合我們的希望。觀察間接地告訴我們，在電磁場的現象中，一只動的鐘會改變它的快慢，一根桿會改變它的長度，而只在力學的現象中才沒有這類的事情發生。我們必須接受在每個 O_1 中的相對時間的概念。因爲這是解決困難的最好的方法。從相對論所發展的科學的進步，顯示出來這個新的概念不應當看作一種不得已才接受的厭物，因爲這個理論的成就是非常顯著的。

以上是說明怎樣得出相對論的根本假設來，以及相對論何以需要修正舊變換定律，而用一種新的方法處理時間和空間。我們的目的是要指出那構成新的物理和哲學觀點的基礎的觀念。這些觀念都是簡單的，但是在這裏所提出的形式中，它們還不夠得出任何結論，不僅質的結論得不到，便是量的結論也得不到。我們又必須用那舊方法，即只解釋主要的觀念，而把旁的一些觀念不加證明便提出來。

我們爲要弄清楚舊物理學家的觀點和新物理學家的觀點的區別，設想他們互相談話，相信舊變換的舊物理

學家以舊字代表，相信相對論的新物理學家以新字代表。

舊 我相信力學中的伽利略相對原理，因為我知道在兩個相對作等速直線運動的 $O'S'$ 中，力學定律是相同的，或者換句話說，依照舊變換這些定律是不變的。

新 但是相對論必須應用於外部世界中的一切現象，在相對作等速直線運動的 $O'S'$ 中，不僅力學定律相同，便是所有的自然定律都必須是相同的。

舊 但是在相對運動的 $O'S'$ 中，所有的自然定律難道可能是同樣的嗎？場的方程式，就是說馬克士威方程式，依照舊變換，不是不變的。這是由光速的例子可以明白看出來的。依照舊變換，這種速度，在兩個相對運動的 $O'S'$ 中，應該是不相同的。

新 這只是表示舊變換是不能應用的，而兩個 $O'S'$ 之間必須有一種與舊變換不同的連繫，而我們不能用變換定律把座標和速度連繫起來。我們必須代以新的定律，而從相對論的根本假定中把它們推出來。我們且不必管這種新變換定律的數學的形式，知道它與舊的不同就夠了。我們把它簡單地叫做羅倫茲變換 (Lorentz transformation)。馬克士威的方程式，就是說場的定律，依照羅倫茲變換是不變的；正如力學定律，依照舊變換是不變的。我們記得在舊物理學中是怎樣的情形：關於座標，我們有變換定律，關於速度，也有變換定律，但是兩個相對作等速直線運動的 $O'S'$ 中的力學定律是相同的。關於空間我們有變換定律，但是關於時間卻沒有變換定律，因為時間在一切 $O'S'$ 中都是相同的。可是在相對論中卻不同了。關於空間時間和速度都有與舊變換定律不同的定律，但是自然定律在所有相對作等速直線運動的系統中又必須是相同的。依照舊變換，自然定律不是不變的，而依照一類新的變換，即所謂羅倫茲變換，自然定律才是不變的。在所有的慣性的 $O'S'$ 中都可以應用同樣的定律，而從一個 $O'S'$ 到另一個的過渡是依照羅倫茲變換。

舊 我承認你的話，但是我很想知道舊變換和羅倫茲變換的差異。

新 你的問題最好是用下面的方式答覆。你且說出一些舊變換的特色，而讓我來解釋一下它們是否保存在

羅倫茲變換之中，而假如沒有保存，再解釋它們是如何變化的。

舊 假如在我的 O_1 中，有一件事情發生於某一點某一刻，則在另一對我的 O_2 作等邊直線運動的 O_2 中的觀察者，會用不同的數來確定這事情發生的位置，但是當然還是會用同一個時刻確定它發生的時間。在所有的 O_2 中都是用同一的鐘，鐘是否運動毫無關係。這在你看來也是真的嗎？

新 不，不是的。每個 O_2 必須在靜止時自備鐘，因為運動改變鐘的快慢。在兩個不同的 O_2 中的兩個觀察者，不僅會用不同的數來確定位置，而且也會用不同的數確定這件事情所發生的時刻。

舊 這表示時間不再是不變的。在舊變換中，在所有的 O_2 中的時間總是相同的。在羅倫茲變換中，時間是改變的，而多少和舊變換中的座標一樣。距離又怎樣了呢？根據舊力學一根堅牢的桿無論在靜止中或運動中，都保持它的長度。這也還是真的嗎？

新 不是真的了。事實上從羅倫茲變換可以推出來，一根動的桿在運動的方向會收縮，而且假如速率增加，收縮也會增加。一根桿運動愈快便愈現得短。但是這種情形只發生於運動的方向。假如一根動的桿的運動速度近於光速的百分之九十，則它的長度會收縮一半。但是在與運動垂直的方向卻沒有收縮。

舊 這表示一只動的鐘的快慢和一根動的桿的長度都與速率有關。但是這種關係是怎樣的呢？

新 速率愈增加，這種改變便愈明顯。從羅倫茲變換可以推出來，假如一根桿的速度等於光速，則它會縮為烏有。同樣的，一只動的鐘的快慢比較它所經過的桿上的鐘的快慢也要慢些。而假如這只鐘是一只『好』的，則在它的運動的速度等於光速時，它便會完全停止。

舊 這似乎與我們所有的經驗都不相合。我們知道一輛汽車不會在運動的時候就短些。而我們又知道汽車夫常能拿它的『好』錶和他所經過的路上的錶加以比較，而發現它們總是一樣快慢。這是與你的話不合的。

新 這當然是真的，但是這些力學上的速度比起光速來都是小得很多的。因此把相對論應用於這些現象是很奇怪的。每個汽車夫即使增加速度十萬倍，也能安然應用舊物理學。只有當速度近於光速時，才能期望實驗與

舊變換之間有不合的地方。只有在速度很大時，羅倫茲變換的可靠才能證實出來。

舊 但是還有另一個困難。根據力學，我們可以想像比光速更大的速度。一個物體對於浮動的船以光速運動，則它對於岸的速度當更大於光速。一根棍子的速度等於光速時，它便縮為烏有，假如速度大於光速時，它會怎樣呢？我們不能想像有一種負的長度。

新 你實在沒有理由作這樣的諷刺！根據相對論的觀點，一個物質的物體的速度不能大於光速。光速是物體的速度的最高的限度。假如一個物體的速率等於光對於船的速率，則它等於光對於岸的速率。加減速度的簡單的力學的定律不能再應用了。或者更加確切地說，對於小的速度若不求精確，還可以應用；而對於近於光速的速度，則完全不能應用。表示光速的數明白地出現在羅倫茲變換中，而成爲一種極限的情形，像舊力學中的無限速度一樣。這個更一般的理論並不與舊變換和舊力學衝突。恰恰相反，從新的理論看來，舊的概念，在一定的範圍之內還是可靠的，這個概念在速度小時還能應用。根據新理論的觀點可以很明白地看出來，在怎樣的情形中舊物理學是有效的，而它的限制在那裏。把相對論應用於汽車輪船火車一類的運動，正和只用乘法表便可以夠的地方卻應用計算機，一樣可笑。

相對論與力學

相對論的產生是由於事實上的需要，由於舊理論中的矛盾非常嚴重和深刻，而這種矛盾似乎是無法解決的。新理論的力量，在乎它解決這些困難時，很一致很簡單，只應用很少數的可靠的假定。

雖然這些理論是從場的問題產生的，但它必須包括所有的物理的定律。這裏似乎發生了一個困難。場的定律和力學定律是完全不同類的。依照羅倫茲變換，電磁場的方程式是不變的，而依照舊變換力學的方程式是不變的。但是相對論主張一切自然定律的不變，必須是依照羅倫茲變換，而不是依照舊變換。後者只是在兩個的 $O.S.$ 相對速度比較很小的特殊情形中，才能應用。假使如此，舊力學必須改變，然後它的定律依照羅倫茲

變換才是不變的。或者換句話說，舊力學在速度近於光速時便不能應用。只有一種從一個 C 到另一個 C 的變換能夠存在，即羅倫茲變換。

要把舊力學改成既不與相對論衝突，又不與由觀察所得的，而舊力學已經解釋了的，豐富的材料發生衝突，是一件簡單的事。舊力學只能應用於小速度，而成爲新力學中的特殊情形。

研究相對論改變舊力學的一個例子，一定會是有興味的，也許會因此發現一些能用實驗證明或否證的結論。

假設一個有一定質量的物體依直線運動，而且在運動的方向受一種外力的作用。我們知道，力是與速度變更成正比例的，或者更加清楚些說，一個物體無論是從每秒 100 英尺的速度，增加到每秒 101 英尺的速度，或是從每秒 100 英里，增加到每秒 100 英里又一英尺的速度，或是從每秒 18,000 英里，增加到每秒 180,000 英里又一英尺的速度，所用的力都是一樣。相同的力，在相同的時間內，總是產生相同的速度變更。

這句話從相對論的觀點看來也是真的嗎？不是的！這個法則只能應用於小的速度。根據相對論，大到近於光速的速度的定律是怎樣的呢？假如速度是大的，便需要極強的力去增加它。把每秒 100 英尺的速度增加每秒 1 英尺，和把每秒近於光速的速度增加每秒 1 英尺，決不是一樣的。速度愈近於光速，便愈難增加它。假如一種速度與光速相等，便無法再增加它，由相對論所產生的這種變更並沒有甚麼可驚的地方。光速是所有的速度的最高限度。無論怎樣大的有限的力量，不能夠把速度增加到超過這個限度。一種更複雜的連接力與速度變更的定律代替了舊力學的法則。從我們的新觀點看來，舊力學是簡單的，因爲在差不多所有的觀察中，我們所看到的都是遠較光速爲小的速度。

一個靜止的物體有一定的質量，叫做靜止質量。我們從力學中知道每個物體在運動中都是阻止外力變更它的速度的；質量愈大，阻力也愈大，質量愈小，阻力也愈小。但是相對論的主張卻不止此。不僅因爲一個物體

的靜止質量大，它對於變化的阻力便愈強，它的速度大時也會如此。在舊力學中一個物體的阻力是一種不變的東西，僅僅由它的質量來決定。在相對論中，則它與靜止質量和速度都有關。當速度近於光速時，阻力便成爲無限大。

剛才引下來的結果，使我們能夠用實驗來檢驗這個理論。近於光速的射彈，其對於外力的阻力，是和理論所預料的一樣嗎？在這一點上相對論討論這個問題的主張，具有一種量的性質，假如我們能發現速度近於光速的射彈，則我們可以證明或否認這個理論。

在自然界中我們確可以發現這種速度的射彈。放射性物質，例如鐳的原子，其作用等於礮台，能發射極大的速度的射彈。我們只能引用近代物理學和化學上的一種很重要的見解，而不能詳加敘述。所有宇宙中的物質都是由很少幾類元質點所構成的。正如在一個城市中，有各種大小不同的房屋建築等，但是從茅屋以至摩天樓，都同樣地是用很少數幾類磚頭築成的。我們物質世界中的所有的已知元素，從最輕的氫起到最重的銻止，都是由同類的磚頭，就是說，同類的元質點所構成的。最重的元素，或最複雜的建築，是不穩固的，它們會分裂，或者照我們的說法，是會放射。有些構成放射性原子的磚頭或元質點，有時會以一種很大的速度拋出來，這種速度將近光速。根據我們現在的見解，一種元素，例如鐳的原子，是一種很複雜的構造，而放射性物質的分裂，正是顯示原子是由比較簡單的磚頭或元質點所構成的一種現象。這種見解是由無數的實驗所證實的。

利用很巧妙而複雜的實驗，我們能夠發現這些質點如何阻止外力的作用。這種實驗告訴我們，這些質點所生的阻力與速度有關，恰如相對論所料。在許多其他的情形之中，也可以發現阻力與速度有關，而理論與實驗是完全相合的。我們又看到科學中的創造工作的特色：由理論預言事實，而由實驗證實它。

這種結果暗示我們更進一步，作一個重要的推廣。一個靜止的物體有質量，但是沒有動能，就是說，運動的能。一個動的物體既有質量，又有動能。它比較靜止的物體更強有力地阻止速度的變更。動的物體的動能好

像增加了它的阻力。假如兩個物體有同樣的靜止質量，則有較大的動能的一個，對於外力作用的阻力也較強。設想一個裝着球的箱，而箱和球在我們的 $O'x'$ 中都是靜止的。要運動它，要增加它的速度，需要某種力。假如球在箱中很快地朝各方運動，像一種氣體的分子一樣，其平均速度近於光速，那麼用同力是否能在同時增加同量的速度呢？由於球的動能的增加，增強了箱的阻力，因此必須用一種更大的力。能，至少是動能的阻止運動和可秤的質量是一樣的。所有的能都如此嗎？

關於這個問題，從相對論的根本假設中推論出來了一個明白而確切的答案，而且是一種具有量的性質的答：所有的能都阻止運動變化；所有的能的作用都和物質一樣；一塊赤熱的鐵秤起來比冷的時候要重些；由太陽發射出來的通過空間的輻射含有能，因此也有質量；太陽與所有發出輻射的恆星，都由於發出輻射而失去質量。這種一般性質的結論是相對論的一種重要的成就，而與所有已經試驗過的事實都相合。

舊物理學介紹了兩種質：物質與能。第一種質有重量，但是第二種卻是沒有重量的。在舊物理學中有兩個不滅定律：一個是物質不滅定律，另一個是能量不滅定律。我們已經問過，現代物理學是否還相信有兩種質和兩種不滅定律。答案是：『否』。根據相對論，在質量與能之間沒有重要的區別。能有質量而質量代表能。我們現在沒有兩個不滅定律，而只有一個，即質量——能量不滅定律。這種新的見解在物理學的更進一步的發展中是很成功的，很有效果的。

何以能有質量和質量代表能的事實，在過去始終沒有被人注意到呢？難道一塊熱鐵的重量會大於一塊冷的嗎？現在對於這個問題的答案是『是』而以前的答案是『否』。但是前面所說過的一切，自然還不夠解釋這個矛盾。

我們在這裏所遇到的困難和前面所遇到的相同。相對論所預言的質量的變化是小到不能測量的，甚至在最靈敏的天秤上也不能直接秤出來。要證明不是沒有重量的，可以用許多很可靠的，間接的方法。

直接證據何以這樣缺乏呢？這是由於物質與能之間的兌換率太小了。能和質量比較，正如賤價的貨幣和高

價的貨幣比較。舉一個例便可以把它弄清楚。能夠把三萬噸的水變換為蒸汽的熱量只有一克重！能所以一直認為沒有重量，無非是因為它的質量太小了。

舊的論——質是相對論的第二個犧牲品。第一個犧牲品是傳播光波的介質。

相對論的影響遠超過了產生它的問題。它除去了場論的困難和矛盾，它提出了更一般的力學定律，它用一個不滅定律代替兩個不滅定律，它改變了舊的絕對時間的概念。它的可靠性不僅限於物理學的某一範圍之內；它能應用於一切自然現象。

時空連續區

『法國革命於一七八九年之七月十四日在巴黎開始』。在這句話中說到了一件事情的空間和時間。對於一個初次聽到這句語卻不懂『巴黎』為何物的人，你可以告訴他這是位於地球上東經 10° 。北緯 46° 。的一個城市。用這兩個數便能夠確定這件事情發生的地點。而『一七八九年之七月十四日』則可以確定它的時間。正確地確定一件事情發生的時間與地點，在物理學中比在歷史中更為重要，因為這些數據是量的解釋的基礎。

為簡單起見，我們在前面只研究了直線的運動。我們的 $O.S.$ 是一根有首而無尾的堅牢的桿。我們暫且繼續應用這樣的一個 $O.S.$ 。在桿上有不同的點；它們的位置只能夠用一個數確定，即應用點的座標。說一點的座標是 7.536 英尺，意思就是，它與桿首的距離為 7.536 英尺。反轉來說，假如有人給我一個數和一個單位，我總能夠在桿上找出和這個數相對應的一點。我們可以說：桿上的一個一定的點與每一數相對應，而一個一定的數則與每一點相對應。數學家對於這件事實的說法是：桿上所有的點構成一個一因次連續區，在桿上的每一點旁無論怎樣接近的地方都有一點。我們可以用任意小的步驟把兩個相距遼遠的點連起來。連接相距遼遠的點的步驟可以任意地小，這便是這種連續區的特色。

再舉一個例。假設有一個平面，你若喜歡舉一樣具體的東西作例，則假設有一個長方形的桌面。桌面上的

一點的位置可以用兩個數確定，而不是和前面一樣，只用一個數確定。這兩個數便是與桌的兩互相垂直的邊的距離。和平面上的每一點對應的不是一個數而是一對數。一個一定的點與每一對數相對應。換句話說，平面是兩次連續區。在平面上的每一點旁無論怎樣近的地方都有旁的點。兩個相距遼遠的點可以用分成任意小的步驟的一根曲線連起來。連接兩個相距遼遠的點的步驟可以任意地小，而每一點可以用兩個數代表，這又是兩次連續區的特色。

再舉一個例。設想你要把你的房子看作你的 $O\omega$ 。這表示你要利用房子的堅牢的牆來描寫所有的位置。一盞燈的尾端的位置可以用三個數描寫：兩個數決定它與兩個垂直的牆的距離，而第三個數則決定它與天花板或地板的距離。三個一定的數與空間的每一點相對應；空間中的一個一定的點與每三個數相對應。這可以用下面的話說出來：我們的空間是三因次連續區。在空間中的每一點旁時很近的地方都有旁的點。連接相距遼遠的點的步驟可以任意地小，而每一點都用三個數代表，這又是一個三因次連續區的特色。但是這一切都簡直不是物理學。現在回轉來研究物理學，則必須研究物質的質點的運動。要觀察和預測自然界中的現象，我們不僅要研究物理現象發生的地位，而是要研究它發生的時候。我們又來舉一個很簡單的例。

一個小的石子可以看作一個質點。現在把石子從塔上掉下來。設想塔有 200 英尺高。從伽利略時代起，我們就能預言石子掉下以後在任何時刻的座標。下面是一個「時間表」，描寫石子在 0, 1, 2, 3 及 4 秒後的位置。

時 刻 (以計)	秒 鐘 (以計)	離地高度 (以計)
0		256
1		240
2		192
3		112
4		0

在我們的「時間表」中記載着五個事件，每一事件用兩個數代表，即每一事件的時間與空間座標。第一個事件是石子在零秒時從離地 250 英尺之處掉下來。第二個事件是石子與塔的堅牢的桿離地 200 英尺處相碰。這是在第一秒之後發生的。最後的事件是石子與地面相接。

我們可以把由「時間表」所得到的知識用不同的方式表示。我們可以把「時間表」中的五對數用平面上的五個點代表。首先確定一種比例，一段線相當於一英尺，另一段線相當於一秒。於是畫兩根垂直的線，把橫線作為時軸，直線作為空軸。我們立刻看到「時間表」可以用時空平面中的五點來代表。

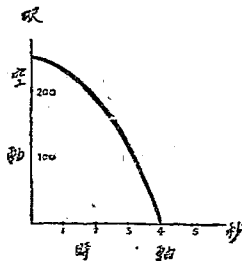
與空軸的距離代表「時間表」第一行所記載的時間座標，而與時軸的距離則代表空間座標。

同一件事實用兩種方式表達了出來：用「時間表」和用平面上的點。每一種方式都可以從另一種方式中構造出來。在這兩種表示方法之中選擇那一種，這只是隨人所好，因為事實上它們是相等的。

我們且再前進一步。設想有一個更好的「時間表」，不僅載着每秒的位置，而且載着每百分之一秒或每千分之一秒的位置。在我們的時——空平面上便會有許多點。最後，假如每一時刻的位置都記載了，或者，如數學家所說，假如空間座標作為時間的函數，則這一組點便成爲一根連續的線了。這樣的一根曲線所代表的，不是關於石子運動的一部分知識，而是全部知識。

沿着堅牢的桿（塔）的運動，是在一因次空間中的運動，而此處用兩因次時——空連續區中的一根曲線代表。和我們的時空連續區中的每一點對應的是一對數，一個數表示時間座標，另一個表示空間座標。反轉來說，在我們的時——空平面中的一個一定的點，與確定一個事件的每一對數相對應。兩個接近的點代表在兩個略微不同的時刻中和兩個略微不同的地點上發生的兩個事件。

你也許這樣反對我們的圖示方法：把一個時間單位用一段線來代表，把它機械地和空間連起來，從兩個一



第十圖

因次連續區，構成一個兩因次連續區，是毫無意義的。但是假如你要反對這個辦法，那麼你便要同樣激烈地反對許多圖表，例如表示去夏紐約城的溫度變化的圖表，表示最近八年的生活費用的變化的圖表，因為這些都是用的同一種方法。在溫度圖中，一因次的溫度連續區，和一因次的時間連續區連成一個兩因次的溫度——時間連續區。

我們回頭研究從一個 205 英尺的塔上掉下來的質點。把運動畫成圖表是一種很有用的辦法，因為它確定質點在任意一時刻中的位置。知道了質點是怎樣運動的以後，我們再把它運動畫圖。有兩種不同的畫法。

我們記得一種是在一因次空間中隨時間而變化的質點的圖。我們把運動描寫成一因次空間連續區中的一串事件。我們不把時間和空間結合起來，我們所用的是動圖，位置隨時間而變化。

但是我們可以把同樣的運動，用不同的方式加以描寫。我們可以構成一幅靜圖，把運動用兩因次時——空連續區中的曲線來代表。運動是用某種存在的東西來代表的，這種東西存在於兩因次時——空連續區中，而不是一因次空間連續區中變化的東西。

但是這些圖都是完全相等的，用那一種或不用那一種，完全是隨各人的習慣與嗜好。

以上關於運動的兩種圖示法所說的一切，都與相對論無關，兩種圖示法都可以用，不過舊物理學比較喜歡用動圖，把運動描寫為空間中所發生的事件，而不是作為存在於時——空中的東西。但是相對論改變了這種觀點。它是明白地贊成靜圖的，它發現把運動表示為存在於時——空中的某種東西的方法，是關於實在的一幅更方便的更客觀的圖。我們還必須答覆這個問題：何以這兩個圖，從舊物理學的觀點看來是相等的，從相對論的觀點看來，却是不相等的呢？

要懂得這個答案，必須再想想作相對等速直線運動的兩個 $O.S.$ 。

根據舊物理學，在兩個相對作等速直線運動的 $O.S.$ 中的觀察者，會用不同的空間座標，和相同的時間座標來確定一個事件。所以在我們所選定的 $O.S.$ 中，質點和地面的相接是用時間座標『4』和空間座標

『0』來確定的。根據舊力學，一個與選定的 $O.S.$ 作等速直線運動的觀察者也會認為石子在四秒鐘之後碰到地面。但是這個觀察者，却會把距離關連於自己的 $O.S.$ ，而一般說來，會把不同的空間座標確定石子碰地的事件，不過他和所有有相互作用等速直線運動的觀察者所取的時間座標都是相同的。舊物理學只知道所有的觀察者都適用的『絕對的』時間之流。對於每一個 $O.S.$ ，兩因次連續區都可以分裂為兩個一因次連續區：時間與空間。由於時間的『絕對的』性質，由描寫運動的『靜圖』過渡到『動圖』，在舊物理學中便有一種客觀的意義。

但是我們在前面已經相信了，舊變換無從普遍地應用於物理學。從實際的觀點看來，它還可以適用於小的速度，但是決不適於解決基本的物理問題。

根據相對論，石子碰地的時間，在所有的觀察者看來，不會是一樣的。在兩個 $O.S.$ 中，時間座標和空間座標都不相同，假如兩個 $O.S.$ 的相對速度近於光速，則時間座標的變更會是很明顯的。兩因次連續區不能夠像舊物理學中一樣，分成兩個一因次連續區。在決定另一個 $O.S.$ 中的時——空座標時，我們必須不把時間與空間分開來研究。從相對論的觀點看來，把兩因次連續區分裂為兩個一因次連續區，似乎是一種沒有客觀意義的武斷的辦法。

前面所說的一切，不是僅限於直線的運動，把這一切推廣起來，是很簡單的。我們必須用兩個數，而不是用四個數來描寫自然界的現象。用物體與它們的運動來設想的物理空間，是由三個數確定的。一個事件的時刻是第四個數。四個一定的數與每一事件對應；一個一定的事件與任何四個數對應。因此：事件的世界構成一個四因次連續區。這是一點也沒有甚麼神秘的，而上面這一句話可以適用於舊物理學，也可以適用於相對論。可是若研究兩個相對作等速直線運動的 $O.S.$ ，便會看出有一種區別來。房子是動的，房子內外的觀察者決定同一事件的時——空座標。舊物理學家又把這四因次連續區分成三因次空間和一因次時間連續區。舊物理學只管空間的變換，因為他以為時間是絕對的。他覺得把那些四因次世界連續區分裂為空間與時間是自然而方便的。但

是從相對論的觀點看來，時間與空間由一個 $O.S.$ 過渡到另一個時都會變的，而羅倫茲變換便是研究我們的四因次的事件世界的四因次時——空連續區的變換性質。

事件的世界可以描寫為隨時間變化，而且投射於三因次空間的背景上的動圖。但是也可以描寫為四因次時——空連續區的背景上的靜圖。從舊物理學的觀點看來，這兩個圖，一個動的一個靜的，都是相等的。但是從相對論的觀點看來，靜圖是比較方便的，而且是更加客觀的。

甚至在相對論中，我們也還可以用動圖，只要我們願意。但是我們必須記得這樣把時間與空間分開來，是沒有客觀意義的，因為時間不再是『絕對的』了。以下我們還是要用『動』的文字，而不用『靜』的文字，但是不要忘记它的缺點。

廣義相對論

還有一個需要解決的問題。有沒有一個慣性系呢？這個最根本的問題還沒有解決。關於自然的定律，我們已經略有所知，知道根據羅倫茲變換定律，它們是不變的，知道在所有作相對的等速運動的慣性系中，它們都是有效的。我們有了定律，但是不知道它們屬於那一種間架。

要更加了解這種困難，我們且訪問舊物理學家，問他幾個簡單的問題。

『一個慣性系是甚麼？』

『是可以應用力學定律的一個 $O.S.$ ，在這樣一個 $O.S.$ 中，一個沒有受外力作用的物體等速直線地運動。這種性質可以使我們把慣性的 $O.S.$ 從其他的 $O.S.$ 中辨別出來。』

『但是說沒有力作用於物體，是甚麼意思呢？』

『這只是說，在這樣一個慣性的 $O.S.$ 中，物體等速直線地運動。』

於是我們又可以再問：『一個慣性的 $O.S.$ 是甚麼？』但是因為要想得到一個與上不同的答案，沒有多少

希望，我們不如把問題改變一下，或許可以得到一些具體的知識。

『一個嚴密的連接於地球的 C.S. 是一個慣性系嗎？』

『不是，因為由於地球的轉動，力學定律在地球上不是可以嚴格地應用的。在許多問題上我們可以把嚴密地連接於太陽的 C.S. 看作慣性系；但是我們有時也說到太陽的轉動，可見連接於它的 C.S. 也不能嚴格地看作慣性的。』

『然則，具體地說來，甚麼才是你的慣性 C.S. 呢？而且怎樣選擇它的運動狀態呢？』

『這只是一個有用的虛構的東西，我也不知道怎樣去實現它。只要我能夠遠離一切物質的物體，而且使我們不受任何外力的影響，我的 C.S. 便會是慣性的。』

『但是你所謂免除了一切外面影響的 C.S.，是甚麼意思呢？』

『我的意思是，那個 C.S. 是慣性的。』

於是我們又回到那原來的問題了！

我們的訪問顯示了舊物理學的一個嚴重的困難。我們有定律，但是不知道它屬於那一種間架，因此整個的物理學都好像是建築在沙上。

我們可以從另一種不同的觀點來研究這個困難。設想在全宇宙中只有一個物體，它是我們的 C.S.。這個物體開始自轉。根據舊力學，在自轉的物體上的物理定律與在不自轉的物體上的物理定律不同。假使慣性原理能在這兩種物體中的一種中應用，則在他種中便不能應用。但是這些話聽起來很令人懷疑。假使全宇宙中只有一個物體，我們可以想像它的運動嗎？所謂一個物體在運動，是說它對於另一個物體的位置在變更。因此唯一的一個物體的運動，是與常識不合的。在這一點上，舊物理學與常識意見相差很厲害。牛頓的標準是：假如慣性定律能應用，則這個 C.S. 或者是靜止的，或者是等速直線地運動的。假如慣性定律不能應用，則這個物體不是作直線等速的運動。因此一個 C.S. 的運動或靜止的標準，便是所有的物理定律能否在它裏面應用。

設有兩個物體，例如太陽和地球。我們所看到的運動又是相對的。要描寫它，可以把 O_1 連接於地球，也可以連接於太陽。從這個觀點看來，哥伯尼的偉大的成就在乎把 O_1 從地球轉移到太陽。但是因為運動是相對的，任何參考座標都可以用，似乎沒有甚麼理由贊成這個 O_1 ，而反對那一個。

物理學又來參加意見了，它改變了我們的常識的觀點。連接於太陽的 O_1 ，比較連接於地球的更像一個慣性系。物理定律應該應用於哥伯尼的 O_1 ，而不應該應用於多祿某 (Polony) 的。哥伯尼的發現之偉大，只能從物理學的觀點去體會。它說明了以嚴密連接於太陽的 O_1 描寫行星運動，有很大的好處。

在舊物理學中，沒有絕對的等速運動。假如兩個 O_1 相對作等速運動，則說「這個 O_1 是靜止的，那個是動的」是毫無意義的。但是假如兩個 O_1 相對作不等速的運動，便可以有很好的理由說，「這個物體是動的，而那一個是靜止的（或等速地運動的）。」因此絕對運動便有一種很確定的意義。關於這一點常識與舊物理學之間，隔着一條鴻溝。前面說過的慣性系的困難和絕對運動的困難，是相連的。絕對運動之所以可能，是由於我們以為有一種慣性系，自然定律能在其中應用。

這種困難似乎無法打破，任何物理學說似乎都無法避免它。困難的根源在於自然定律只能應用於一種特殊的即慣性的 O_1 。解決這種困難有無可能，全看對於下面的問題怎樣回答。我們能否做出一種能應用於一切 O_1 的物理定律呢？它們不僅要能應用於相對作等速運動的系統，而且要能應用於相對作完全任意的運動的系統。假使這是做得到的，困難便可以解決。於是我們便可以把自然定律應用於任何 O_1 。過去科學上多祿某和哥伯尼的意見間的激烈的鬭爭，也就會變成毫無意義的了。隨便用那一個 O_1 都可以。「太陽靜止而地球動」，或「太陽動而地球靜止」，這兩句話，便只是關於兩個不同的 O_1 的兩種不同的習慣說法了。

我們能否建立一種能應用於任何 O_1 的相對論的物理學呢？在這種物理學中不會有絕對運動，一切運動都是相對的。這是可能的嗎？這確是可能的！

關於怎樣建立這種新物理學，我們至少有一個指標，不過是很弱的一個指標。真正相對論的物理學，必須

應用於一切 $O.S.$ ，因此也須應用於慣性的 $O.S.$ 。我們已經知道應用於慣性 $O.S.$ 的定律。這種能應用於一切 $O.S.$ 的新的一般的定律，必須在應用於慣性系時，還原為舊的已知的定律。

做一種能應用於一切 $O.S.$ 的物理定律的問題，為所謂廣義相對論所解決了。前面的那個相對論，只能應用於慣性系，因此叫做狹義相對論。這兩個理論自然不能互相衝突，因為我們必須把舊的狹義相對論包含在廣義相對論裏面。但是在前面，物理定律只應用於慣性的 $O.S.$ ，而現在這種 $O.S.$ ，却成了一種特殊的有局限的系統，因為在廣義相對論中，一切相對作任意運動的 $O.S.$ 都是許可的。

這就是廣義相對論的計劃。但是要描寫這個計劃是怎樣實行的，我們必須說得比前面更模糊些。在科學發展上所產生的新困難，使我們的理論不能不愈來愈抽象。意料不到的冒險還在等待着我們。但是我們最後的總是要更加了解實在。要清除由理論到實驗的道路上的一切不必要的以及不自然的假設，要使理論包括更廣大的事實範圍，我們必須使推論愈來愈冗長。我們的假設愈簡單，愈根本，則我們所用的數學的推理工具便愈艱深；而由理論到觀察的道路也愈長，愈艱難，愈複雜。雖然聽來好像不通，但我們確可以說：現代物理學比較舊物理學更簡單，因此也似乎更困難而且更艱深。對於外部世界的理論愈簡單，所包括的事實愈多，它便愈加在我們的心理上反映宇宙的和諧。

我們的新的計劃是很簡單的：做一種可以應用於一切 $O.S.$ 的物理學。為了實現這個計劃，不能不使物理學的形式更加複雜，而且不能不用一些數學工具，與過去物理學上所用的完全不同。在這裏我們只指出實現這個計劃與兩個主要問題之間的聯繫，這兩個主要問題便是：引力與幾何學。

升降機內外

慣性定律的發明，是物理學上的一個大進步，事實上，是它的真正的開端。這是由於研究一個理想的實驗得來的，這個理想的實驗，假定有一個物體永遠運動，既沒有摩擦，又沒有任何外力作用。從這個例子以及後

來許多旁的例子中，我們認識到用思想創造理想實驗的重要。現在我們又要討論到一些理想的實驗。雖然這些理想的實驗聽來似乎很荒唐，可是却能夠幫助我們用簡單的方法了解相對論。

前面說過一個等速地運動的房子的理想實驗。在這裏，我們再變換一下，假定一個降落的升降機。

設想這個升降機在摩天樓的頂上，而這個摩天樓比任何實在的摩天樓還要高得多。突然繫住升降機的電纜斷了，升降機毫無阻礙地向地面降落。在降落之際升降機裏面的觀察者正在做實驗。描寫這些實驗的時候，我們不要去管空氣的阻力或摩擦力，因為在理想的實驗中，可以假定它們不存在。一個觀察者從袋裏拿出一塊手帕和一只錶，讓它們掉下來。這兩樣東西結果會怎樣呢？升降機以外的觀察者從升降機的窗子望進去，發現手帕和錶以同樣的加速度掉向地面。我們記得，一個墮體的加速度與它的質量無關，而這件事實顯示了引力質量和慣性質量的相等。我們又記得，從舊力學的觀點看來，這兩種質量的相等完全是偶然的，在舊力學中毫無作用。可是在這裏，這兩種質量的相等是很重要的，它表現為一切墮體都有同樣的加速度的事實，而且構成我們全部推論的基礎。

我們回轉來談那降落的手帕和錶；在外面的觀察者看來，它們都是以同樣的加速度降落。但是升降機，連它的四壁，天花板，地板也都以同樣的加速度降落。因此兩個物體與地板之間的距離不會變更。在升降機以內的觀察者看來，這兩個物體就停在他鬆手讓它們掉的那個地方。內面的觀察者可以不管引力場，因為它的來源在他的 $C.S.$ 之外。他發現在升降機以內沒有任何力作用於這兩個物體，因此它們是靜止的，就好像它們是在一個慣性的 $C.S.$ 中。在升降機中奇怪的事情發生了！假使這個觀察者把一個物體朝任何一個方向，例如朝上或朝下推動，在它沒有碰到升降機的天花板 and 地板以前，它就會永遠等速地運動。簡單說來，在升降機以內的觀察者，發現舊力學定律是可以應用的。所有物體的動作都依照慣性定律。這個新的嚴密連接於毫無阻礙地降落的升降機的 $C.S.$ ，與慣性的 $C.S.$ 只有一點不同。在慣性的 $C.S.$ 中，一個沒有受到外力的作用的物體，會永遠等速地運動下去。舊物理學中的慣性的 $C.S.$ ，在空間與時間上都是無限的。可是在這個升降機中

的觀察者却不然。他的 $O.S.$ 的慣性的性質，却是局限於一定的時間與空間中的。這個等速地運動的物體，遲早會碰到升降機的壁，而等速運動便毀壞了。而且遲早這整個升降機會碰到地面，而連內面的觀察者和他的實驗都要毀壞了。這個 $O.S.$ 只是一個實在的慣性 $O.S.$ 的『袖珍本』。

這個 $O.S.$ 的局部的性質是很重要的。假使這想像的升降機的一端在北極，一端在赤道，而手帕放在北極，鑲放在赤道，則由外面的觀察者看來，這兩個物體的加速度不會相等，它們不會是相對地靜止的。我們的全部推論便都瓦解了。升降機的大小必須有一定的限制，然後才能認為，對於外面的觀察者，一切物體的加速度都相等。

在這種限制之下，對於內面的觀察者，這個 $O.S.$ 有一種慣性的性質。我們至少能指出一個 $O.S.$ ，所有的物理定律在它裏面都能應用，不過在時間和空間上受限制而已。假如我們想像另一個 $O.S.$ ，另一個升降機，對於那一個自由下降的升降機作等速直線的運動，那麼這兩個 $O.S.$ 都會是具有局部性的慣性的。所有的定律在兩者之中都是完全一樣的。從一個 $O.S.$ 過渡到另一個 $O.S.$ 是依照羅倫茲變換的。

我們試看這兩個觀察者，內面的和外面的，怎樣描寫升降機內面所發生的事情。

外面的觀察者觀察升降機和機內一切物體的運動，而發現它們與牛頓的引力定律相合。在他看來，由於地球的引力場的作用，運動不是等速直線的，而是加速的。

可是在升降機內出生和長大的一代物理學家，却會作不同的想法。他們相信自己保有一個慣性系，而把所有的自然定律都關連於他們的升降機，而且很有理由地說，在他們的 $O.S.$ 中，定律都有一種特別簡單的形式。很自然的，他們會認定他們的升降機是靜止的，而他們的 $O.S.$ 是慣性的。

要解決外面的觀察者與內面的觀察者之間的差異，是不可能的。他們每一個人都有權利把一切現象關連於自己的 $O.S.$ 。兩種描寫現象的方法，都可以是同樣地一致的。

從這個例子中，我們看到在兩個並非相對作等速直線運動的 $O.S.$ 中，也可以對於物理現象作一致的描

寫。但是要作這樣的描寫，我們必須計及引力，引力造成從一個 $O.S.$ 過渡到另一個的「橋樑」。外面的觀察者認為有引力場，內面的觀察者，却認為沒有。外面的觀察者認為升降機在引力場中作加速運動，而內面的觀察者，則認為升降機是靜止的，而且引力場也是不存在的。但是引力場這個「橋樑」，使兩個 $O.S.$ 中的描寫成爲可能，這個橋樑建築在一個很重要的基石上：引力質量與慣性質量的相等。若沒有這個爲舊力學所沒有注意到的線索，目前的推論會完全崩潰的。

現在再說一個稍微不同的理想的實驗。我們假設有一個慣性的 $O.S.$ ，在它裏面，慣性定律是有效的。我們已經描寫過在這樣一個慣性 $O.S.$ 中的一個靜止的升降機中所發生的事。但是現在我們把前面的假設改變一下。有人在外面繫一根繩子在升降機上，再以一种不變的力，朝上扯動。至於用甚麼方法扯動，並沒有關係。因爲力學定律在這個 $O.S.$ 中是有效的，這整個的升降機，以不變的加速率，朝運動的方向動。我們又來聽聽升降機內外的觀察者怎樣解釋升降機內所發生的現象。

外面的觀察者：我的 $O.S.$ 是慣性的。升降機以不變的加速率運動，是因爲有一個不變的力在作用。內面的觀察者是在作絕對的運動，他們不能應用力學的定律。他們發現沒有受外力作用的物體並不靜止。假如一個物體任其自由，則它立刻會碰撞在升降機的地板上，因爲地板是往上朝物體運動的。錶和手帕也是完全一樣。我覺得很奇怪，升降機內的觀察者必須常常在「地板」上，實爲當他跳起來的時候，地板立刻又會碰到他。

內面的觀察者：我不覺得有甚麼理由相信我的升降機是在作絕對運動。我同意，與我的升降機嚴密連接着的 $O.S.$ 實在不是慣性的，但是我不相信它與絕對運動有關。我的錶，我的手帕，以及一切物體都下降，是因爲整個的升降機都是在引力場中。我所觀察到的運動和人們在地球上所看到的完全一樣。人們很簡單地用引力場的作用來解釋地球上的物體下降的運動。我也是如此。

這兩種描寫，一個是外面的觀察者的描寫，另一個是內面的觀察者的描寫，都是完全一致的。我們根本不能決定那一個是正確的。我們可以假定任何一種來描寫升降機中的現象：或是依照外面的觀察者所主張的，升

降機作非等速直線運動而沒有引力場，或是依照內面的觀察者所主張的，升降機靜止，却有引力場。

外面的觀察者可以假定升降機是在作『絕對的』等速直線運動。但是由於假定一種引力場便可以消除的運動，決不能看作絕對的運動。

也許我們能在這兩種不同的描寫的矛盾中找一條出路，而決定那一種對，那一種不對。設想有一柱光線從旁邊的窗內水平地射進升降機內，在短時間之後射到對面的牆上。我們再看這兩個觀察者怎樣預測光的路線。

外面的觀察者，因為相信升降機的加速運動，會這樣推論：光線射進窗內，水平地以不變的速度，循直線射到對面的牆上。但是升降機正在朝上運動，而在光抵達牆的時間之內，升降機已經改變了位置。因此光線所射着的點不會與入口的點恰恰相對，而會稍微低一點。這種相差大概小得很，可是總是有，而對於升降機而言，光線不是依直線進行，而是依曲線進行。這種差異，是由於光線經過升降機內部時，升降機運動了相當的距離。

內面的觀察者，相信引力場作用於他的升降機內的一切物體，他說：升降機的加速運動是沒有的，只有引力場的作用。一柱光是沒有重量的，因此不會受到引力場的影響。假使是朝水平的方向射去的，它就會射到與入口恰恰相對的一點上。

從這個討論看起來，在這兩種相反的觀點之間似乎有方法決定誰是誰非，因為這兩個觀察者對於這個現象的預測是不同的。假使剛才所引的兩種解釋都沒有甚麼不合理的地方，那麼我們前面的全部推論都會崩潰，而我們便不能夠用兩種一致的方法描寫一切現象，一種利用引力場，另一種不利用引力場。

但是幸而內面的觀察者的推理中有一個很嚴重的錯誤，才使我們免去前面的結論。他說：『一柱光是沒有重量的，因此不會受引力場的影響。』這是不對的！一柱光具有能，而能有質量。但是每一慣性質量都受引力場的吸引，因為慣性質量和引力質量是相等的。一柱光在引力場中會彎曲，正如以等於光速的速度水平地拋動的物體會彎曲一樣。假如內面的觀察者的推理正確，而且計及引力場中的光線的彎曲，則他的結果會與外面的

觀察者的結果完全一樣。

地球的引力場自然是太小了，不能用實驗直接證明光線的彎曲。但是當日蝕時所做的有名的實驗，雖則是間接地，但却是確切地證明了，引力場對於光的路線有影響。

從這些例子可以看出來，要建立一種相對論的物理學是很有希望的。但是要做到這件事，首先要解決引力問題。

從升降機的例子，我們看出來兩種描寫的一致。可以假定非等速直線運動，也可以不假定。根據這些例子，我們可以用一個引力場消滅『絕對』運動。那樣一來，非等速直線運動便毫無絕對的地方了。引力場是可以完全消滅它的。

我們可以把絕對運動與慣性 $O'W'$ 的鬼，從物理學中驅除出去，而建立一個新的相對論的物理學。前面的理想實驗，告訴我們廣義相對論的問題，如何與引力問題有密切的關係，而何以引力質量與慣性質量的相等，對於這種關係如此重要。很明顯的，廣義相對論中的引力問題的解決，與牛頓的理論必定不同。引力定律必須和所有的自然定律一樣，能應用於所有可能的 $O'W'$ ，而牛頓所提出的舊力學的定律則只在慣性 $O'W'$ 中有效。

幾何學與實驗

其次一個例子比下降的升降機的例子更奇特。我們必須研究一個新的問題：即廣義相對論與幾何學之間的連繫問題。我們且首先描寫一個世界，在那裏面生活的是兩因次生物，而不是像我們的世界中的生物一樣，是三因次的。電影已經使我們熟悉了在兩因次銀幕上的兩因次生物。我們現在設想這些影像，或銀幕上的演員，是實際存在的，他們有思想的能力，他們能夠創造他們自己的科學，兩因次銀幕就是他們的幾何空間。這些生物不能具體地想像一種三因次空間，正如我們不能想像一個四因次世界一樣。他們能夠偏轉一根直線，他們知

道圓是甚麼，但是他們不能構造一個球，因為這就等於放棄了他們的兩因次銀幕。我們也是處在同樣的地位上。我們能夠偏轉與彎曲線與面，但是我們很難想像一個偏轉的與彎曲的三因次空間。

這些影像靠生活，思想與實驗，最後可以得到兩因次歐幾里德幾何學的知識。因此他們能證明三角形的內角之和為 180° 度。他們能夠做兩個圓，一大一小，同一圓心。他們會發現，兩個這樣的圓的圓周之比等於它們的半徑之比，這種結果正是歐幾里德幾何學的特色。假使銀幕無限大，這些影像會發現，若筆直往前旅行，永遠不會回到起點。

我們現在想像這些兩因次生物的環境改變了。我們再想像有人在外面，即「三因次」中，把他們從銀幕上遷移到具有很大的半徑的圓球上。假如這些影像比起全部球面來特別小，假如他們無法作遼遠的通信，又不能運動很遠，則他們不會感覺到甚麼變更。小的三角形的內角之和還是 180° 度。具有共同圓心的兩個小圓，其半徑之比還是等於其圓周之比。沿着直線旅行，永遠不會回到起點。

但是久而久之，這些影像便會發展他們的理論的和技术知識。假定他們有了交通工具，能夠很快地經過很大的距離。他們便會發現，筆直往前旅行，最後還會回到起點。「筆直往前」就是沿着圓球的大弧。他們也會發現具有共同圓心的兩圓，假如一根半徑很小，另一根很大，則其圓周之比不等於其半徑之比。

假如這些兩因次生物是保守的，假如他們在過去許多世紀中都是學的歐幾里德幾何學，那時候他們不能往遠處旅行，因此他們的幾何學與觀察的事實相合，他們一定會想方設法維持這種幾何學，不管他們的測量上的證據與它有何出入。他們會用物理的原因，來解釋這種相合。他們可以找一些物理的理由，例如溫度之差，來解釋線的變形，這種變形使測量結果與歐幾里德幾何學不合。但是他們遲早會發現，描寫這些現象，有一種更加合理更加確切的方法。他們最後會懂得世界是有限的，世界的幾何學原則與他們所學的有很大的不同。他們即使無從想像，但至少能懂得，他們的世界是一個圓球上的兩因次的表面。他們立刻會學到新的幾何學原則，這些原則雖與歐幾里德的不同，但還可以是同樣一致的與邏輯的。下一代的生物便具有圓球的幾何學知識，他

們會覺得舊的歐幾里德幾何學，似乎是更加複雜和不自然的，因為它與觀察到的事實不合。

我們再回轉來研究我們的世界中的三因次的生物。

說我們的三因次空間有一種歐幾里德的性質是甚麼意義呢？這句話的意義是，所有歐幾里德幾何學中邏輯地證明了的命題，都能夠用實際的實驗證明。我們能夠用堅牢的物體或光線，構造合乎歐幾里德幾何學中的理想的形體的實際形體。一把尺或一柱光的邊緣相當於線；用很細的堅牢的桿所造成的三角形的內角之和是 180° ；兩個用很細很韌的線所構造的同心圓的半徑之比等於其圓周之比。歐幾里德幾何學經這樣解釋以後，便成了物理學的一章，不過是很簡單的一章而已。

但是我們能夠想像在實際的形體與理想的形體間發現了相差；例如，用堅牢的桿所構造的一個大三角形的內角之和不是 180° 。因為我們已經習慣於用堅牢的物體具體地代表歐幾里德幾何學中的形體，我們也許要找出一些物理的力來解釋桿的變態。我們要設法發現這種力的物理性質，及其對於旁的現象的影響。要挽救歐幾里德幾何學，我們會責備物體不堅牢，因此與歐幾里德幾何學中的體不完全相合。我們要設法找出一種更好的方法來表現物體，使物體的行為符合歐幾里德幾何學。可是假如我們不能把歐幾里德幾何學和物理學結合起來，成爲一種簡單的與沒有矛盾的理論，則我們必須不再認爲我們的空間是歐幾里德的，而應該對於我們的空間的幾何性質作更一般的假定，以求得一種更加確切的關於實在的理論。

這種必要可以用一個理想的實驗說明，這個實驗告訴我們，一個真正的相對論的物理學不能夠建築在歐幾里德的幾何學上。我們的推論要應用我們已經學到的關於慣性 $C.S.$ 和狹義相對論的結果。

設想一個大的圓盤，上面畫着兩個同心圓，一個很小，一個很大。圓盤迅速旋轉。圓盤是對於外面的觀察者轉動的，在圓盤上還有一個內面的觀察者。我們假定外面的觀察者的 $C.S.$ 是慣性的。外面的觀察者也可以在他的慣性 $C.S.$ 中，畫一大一小的同樣的兩個圓，這兩個圓在他的 $C.S.$ 中是靜止的，而與轉動的圓盤上的圓相合。因爲他的 $C.S.$ 是慣性的，因此可以應用歐幾里德幾何學。他會發現兩圓周之比等於其半徑之比。但

是圓盤上的觀察者又怎樣呢？從舊物理學和狹義相對論的觀點看來，他的 $C.S.$ 是一個被禁止的 $C.S.$ 。但是假如我們想為物理定律找出新形式來，以適於任何 $C.S.$ ，則我們必須以同樣的嚴肅的態度，來研究圓盤上和圓盤外的觀察者。我們現在是從外面去看那內面的觀察者，看他如何想靠測量去發現旋轉的盤上的圓周與半徑。他所用的小的測量尺，與外面的觀察者所用的是一樣的。所謂「一樣的」，是實實在在是一樣的，就是說，是外面的觀察者遞給內面的觀察者的，或者說，是當其在一個 $C.S.$ 中靜止時長度相同的兩把尺中間的一把。

內面的觀察者，開始測量小圓的半徑與圓周。他的結果一定是與外面的觀察者一樣的。圓盤旋轉的軸穿過它的中心。圓盤上接近中心那些部分的速度很小。假如圓很小，我們很可以放心應用舊物理學，而不必顧及狹義相對論。這就是說，對於外面的觀察者和內面的觀察者，尺的長度相等，而他們所得的兩種測量的結果也會是一樣的。現在在圓盤上的觀察者又來測量大圓盤的半徑。這把尺放在半徑上，對於外面的觀察者是動的。可是這樣一把尺是不收縮的，因為運動的方向與尺是垂直的，因此兩個觀察者都發現它們是同樣地長。於是兩個觀察者發現三個測量結果都是相同的：兩半徑，一小的圓周。但是第四個測量結果則不然！兩個觀察者發現大圓周的長度是不同的。依照外面的觀察者的觀測，放在圓周上的運動方向的尺，比起他的靜止的尺來，會現得收縮起來。外圓的速度遠較內圓為大，因此必須計及這種收縮。因此假如應用狹義相對論的結果，我們必須斷定：兩個觀察者所測量的大圓周的長度是不同的。因為兩個觀察者所測量的四種長度中只有一種是互不相同的，則內面的觀察者不能和外面的觀察者一樣，發現兩半徑之比等於兩圓周之比。這就是說，在圓盤上的觀察者不能在他們的 $C.S.$ 中證實歐幾里德幾何學的可靠性。

圓盤上的觀察者得到這種結果以後，還可以說他不想研究歐幾里德幾何學不能應用的 $C.S.$ 。歐幾里德幾何學之崩潰，是由於絕對旋轉，由於他的 $C.S.$ 是壞的和被禁止的。但是在這樣的推論中，他放棄了廣義相對論中主要的觀念。在另一方面，假如我們想放棄絕對運動，而保持廣義相對論中的觀念，則物理學必須建築在

比歐幾里德幾何學更一般的一種幾何學上。假如所有的 $O.S.$ 都是可以允許的，便無法逃避這種結果。

廣義相對論所產生的變更，不能只限於空間。在狹義相對論中，在每一個 $O.S.$ 中靜止的許多鐘，有相同的快慢，而且是同步的，就是說，在同時表現相同的時刻。在一個非慣性的 $O.S.$ 中的一個鐘會怎樣呢？前面的圓盤的理想實驗又用得着了。外面的觀察者，在他的慣性的 $O.S.$ 中，有完美的鐘，都有相同的快慢，都是同步的。內面的觀察者，拿兩只同類的鐘，一個放在小的內圓上，另一個放在大的外圓上。內面的鐘，對於外面的觀察者以一種很小的速度運動。因此我們可以放心斷定，它的快慢和外面的鐘相同。但是大圓上的鐘有很大的速度，和外面觀察者的鐘比較起來，快慢是不同的，因此和放在小圓上的鐘比較起來快慢，也是不同的。因此兩個旋轉的鐘會有不同的快慢，而我們應用狹義相對論的結果，又發現在旋轉的 $O.S.$ 中，所作的布置不能和慣性 $O.S.$ 中一樣。

要明白知道，從這個理想的實驗以及前面所描寫的實驗中，可以得出怎樣的結論來，我們不妨再引相信舊物理學的舊物理學家與相信廣義相對論的新物理學家之間的一席談話。舊物理學家是外面的觀察者，在慣性 $O.S.$ 中，而新物理學家是在旋轉的圓盤上。

舊 在你的 $O.S.$ 中歐幾里德幾何學是不能應用的。我看見了你的測量，而我同意兩個圓周之比，在你的 $O.S.$ 中，不是等於兩個半徑之比。但是這表示你的 $O.S.$ 是被禁止的。可是我的 $O.S.$ 是慣性的，而我能夠放心應用歐幾里德的幾何學。你的圓盤是在作絕對運動，而從舊物理學的觀點看來它是一個被禁止的 $O.S.$ ，在那裏面力學定律不能應用。

新 我不願意聽甚麼絕對運動。我的 $O.S.$ 和你的是一樣地好。我看見你對於我的圓盤旋轉。沒有人能夠禁止我把一切運動關連於我的圓盤。

舊 但是你不覺得有一種奇怪的力使你離開圓盤的中央嗎？假如你的圓盤不是一個很快地旋轉的輪轉機，則你不會觀察到下面的兩件事。你不會注意到有一種力把你推向外面，也不會注意到歐幾里德的幾何學不能

在你的 $O.M.$ 中應用。所有這些事實不是足以使你相信你的 $O.M.$ 是在作絕對運動嗎？

新 一點也不：我自然注意到你們所提起的兩件事實，但是我以為這都是由於有一種奇怪的引力場作用於我的圓盤。這個引力場是朝圓盤的外面的，它使堅牢的物體變形，使鐘變更快慢。在我看來，引力場，非歐幾何學，快慢不同的鐘都是密切地相連的。若承認任何 $O.M.$ ，則我必須同時假定一種相當的引力場，以及它對於堅牢物體和鐘的影響。

舊 但是你知道你的廣義相對論所產生的困難嗎？我要拿一個簡單的非物理的例子來把這一點說清楚。設想一個理想的美洲的城市，平行的街道互相垂直。街與街之間的距離以及路與路之間的距離總是一樣的。假如合乎這些假定，則由街道圍成的每一堆房屋都是同樣大小。這樣我們能夠很容易地確定任何一堆房屋的位置。但是假如沒有歐幾里德幾何學，這樣的一種構造是不可能的。例如，我們不能夠把一個極大的美洲城市放在整個的地面上。把地球看一眼，你就會相信這一句話了。但是我們也不能把這樣一種『美洲城市構造』放在我們的圓盤上。你認為你的棹是由於引力作用而變形了。你不能證實歐幾里德的圓周之比等於半徑之比的命題，這件事實明白告訴你，假如你把這樣的一種街道的構造擴充到相當的地步，便遲早會發生困難，而發現在你的圓盤上這樣的構造是不可能的。在你的旋轉的圓盤上的幾何學很像曲面上的幾何學，在一稍大的曲面上，這樣的街道構造自然是不可能的。再舉一個更帶物理性質的例子。一個平面上的各個不同的部分不規則地用各種不同的溫度加熱。你能夠用受熱便會膨脹的小的鐵條，做出下面所畫的這種『平行——垂直』的構造嗎？自然不能！你的『引力場』對於你的棹所起的作用，正如溫度的變更對於小鐵條所起的作用是一樣的。

新 這些都不能使我害怕。我們需要街道的構造來決定點的位置，用鐘來決定事件的次序。城市不必是美洲式的，它也可以是古代歐洲式的。設想你的理想

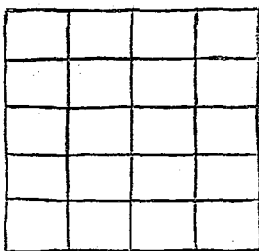


圖 十 二 第

的城市是用易於變形的質料做的，然後使之變形。雖則街路已經不是筆直的和等距的了，我還是能夠認識它們。而且可以確定每一堆房屋的位置。同樣的，在地球上，雖然沒有『美洲式城市構造』，我們也能用經緯度確定地點的位置。

舊 但是我還看出一種困難。你不能不用你的『歐洲式城市構造』。我同意你能夠確定點或事件，但是這種構造會把一切關於距離的測量都弄混亂了。它不會給你以空間的度量性質，而我的構造都能夠。舉例來說，在我的美洲城市中，走過十堆房屋所經過的距離為走過五堆房屋的一倍。因為我知道每一堆房屋是相等的，所以我能夠立刻決定距離。

新 這是真的。在我的『歐洲式城市構造』中，我不能夠立刻用已經變形的許多堆房屋的數目來決定距離。我必須有其他的知識；我必須知道我的空間表面的幾何性質。正如每個人都知道，赤道上自經度 0° 至 10° 的距離，與北極的經度的 0° 至 10° 的距離不相等。但是每個航海家都知道如何決定地球上的這樣兩點間的距離，因為

他知道地球的幾何學性質。他或者根據球面三角學的知識來計算，或者用實驗的方法來決定，把船以同樣的速度駛過這兩個距離。在你的『美洲式城市構造』之中，這整個的問題是無關輕重的，因為所有的街與路之間都有同樣的距離。在整個地球上，便要複雜得多； 0° 與 10° 的兩根經線在北極相交，而在赤道則距離最遠。在我的『歐洲式城市構造』中也一樣，我必須比你在你的『美洲式城市構造』中所需知道的，知道得更多些，然後才能決定距離。我可以在每種特殊情形中研究我的連續區的幾何學性質，以得到這種知識。

舊 但是這一切都不過表示，把歐幾里德幾何學的簡單的構造放棄，而換上你那不能不用的錯綜的結構，是如何的不方便和複雜。難道這是必需的嗎？

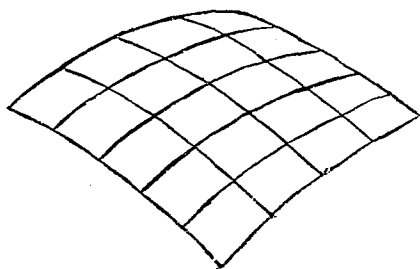


圖 一 十 二 第

新 我想是的，假如我們想把物理學應用於任何 $O.S.$ ，而不要那神祕的慣性的 $O.S.$ 。我同意，我的數學工具比你的複雜得多，但是我的物理學的假定卻簡單得多。

這個討論只限於兩因次連續區。在廣義相對論中的問題還要複雜得多，因為那裏不是兩因次連續區，而是四因次時空連續區。但是觀念還是和在兩因次的例子中所描寫的一樣。我們不能在廣義相對論中，也和狹義相對論中一樣，應用平行與垂直的桿的力學的間架和同步的鐘。在一個任意的 $O.S.$ 中，我們不能和在狹義相對論的慣性 $O.S.$ 中一樣，用堅牢的物體和同快慢與同步的鐘，來決定一個事件的點與時刻。我們還能用非歐幾里德的桿和快慢不齊的鐘來確定事件。但是需要堅牢的桿和絕對同快慢，同步的鐘的實際實驗，是只能在局部性的慣性 $O.S.$ 中做的。在這種 $O.S.$ 中整個的狹義相對論都能適用，但是我們的『好』 $O.S.$ 只是局部性的，它的慣性的性質是受時間與空間的限制的。甚至在任意的 $O.S.$ 中，我們也能預見在局部性的慣性 $O.S.$ 中所作的測量的結果。但是要做到這一點，我們必須知道我們的時——空連續區的幾何性質。

我們的理想實驗只指出新的相對論物理學的大致的性質。由此可以看出來我們的基本問題是引力問題。而且可以看出來，廣義相對論把時間與空間概念更進一步推廣了。

廣義相對論與其證實

廣義相對論，想提出一種能適用於一切 $O.S.$ 的物理定律。這種理論的基本問題，是引力問題。從牛頓時代以來這種理論第一次重新提出一種引力定律來。這是真正必須的嗎？我們已經知道了牛頓理論的偉大的成就，以及根據他的引力定律的天文學的偉大的發展。牛頓的定律還是一切天文計算的基礎。但是我們也知道了對於舊理論的一些責難。牛頓定律只能在舊物理學中的慣性 $O.S.$ 中應用，而我們記得，能應用力學的定律的，才是慣性的 $O.S.$ 。兩種質量之間的力與其互相之間的距離有關。我們知道，依照舊變換，力與距離的聯繫是不變的。但是這種定律與狹義相對論不相合。根據羅倫茲變換，距離不是不變的。我們已經很成功地把運

動定律推廣了；我們也應該可以設法把引力定律推廣，使它適合狹義相對論，或者，換句話說，提出一種定律來，依照羅倫茲而非依照舊變換，這種定律是不變的。但是牛頓的引力定律，無論如何也無法簡單化，而使之適合狹義相對論。我們即使在這方面成功了，還要更進一步：從狹義相對論的慣性 O, P ，進到廣義相對論的任意的 O, S 。另一方面，下降的升降機的理想實驗明白告訴我們，除非解決了引力問題，我們決不能提出廣義相對論來。從我們的推論中可以看出來，何以引力問題的解決在舊物理學中與在廣義相對論中不同。

我們已經說過了，達到相對論的過程，以及我們不得不再改變舊的觀點的理由。我們不敘述這種理論的形式上的結構，而只描寫新引力理論與舊引力理論比較起來有什麼特色。在說過以上的一切以後，要把握這些區別的性質並不是十分困難的事。

(1) 廣義相對論的引力方程式，可以應用於任何 O, S 。在某種情形中選擇某種 O, S ，全看如何方便。在理論上說，所有的 O, S 都可以選擇。略去引力，則我們會自動地回到狹義相對論的慣性 O, P 。

(2) 牛頓的引力定律，把此時此地的一個物體和同時的遠處的一個物體的作用連接起來。這是全部機械觀的一種典型的定律。但是機械觀崩潰了。在馬克士威的方程式中，我們看到了一種新型的自然定律。馬克士威的方程式是結構定律，它們把此時此處所發生的事件與稍近和稍後的事件連接起來。它們是描寫電磁場的變化的定律。新的引力方程式，是描寫引力場的變化的結構定律。在規模上說，我們可以說牛頓的引力定律的過渡到廣義相對論，頗像庫倫定律的電流體理論的過渡到馬克士威的理論。

(3) 我們的世界是非歐幾里德的，我們的世界的幾何性質，是由質量及其速度所決定的。廣義相對論的引力方程式是要顯示我們世界的幾何性質。

我們暫且假定廣義相對論的計劃已經毫無矛盾地實現了。但是我們是否有太遠的危險呢？我們知道舊理論如何解釋天文觀察。在新理論與觀察之間能否建築一座橋樑呢？每一個理論都必須用實驗來檢驗，而任何結果不論如何動人，假如和事實不合，便必須放棄。這新的引力理論也能夠受實驗的檢驗嗎？這個問題可

以用一句話答覆：舊理論是新理論的一種有限的特別情形。假如引力比較小，則舊的牛頓定律便會大致接近新的引力定律。因此所有支持舊理論的觀察，也支持廣義相對論。我們從更高的新理論的水準上重新得到了舊理論。

即使我們不能引出額外的觀察來支持新的理論，假使它的解釋和舊的解釋同樣地好，則要我們在兩種理論之中自由選擇一種，我們也應當決定選擇新的。因為從形式的觀點看，新理論的方程式是要複雜得多。可是從基本原則的觀點看，它是要簡單得多。那兩個可怕的鬼，絕對時間與慣性系，已經消滅了。引力質量和慣性質量的相等，也沒有忽略掉。關於引力及與距離的關係，不需要任何假定。引力方程式具有結構定律的形式，這是從場的理論的偉大成就以來任何物理定律所需要的形式。

有些新的推論不包含在牛頓的引力定律之中，卻能從新的引力定律中推出來。我們已經引了一個推論，即引力場中的光線的彎曲。現在再提起兩種推論。

既然在引力比較小時，舊定律會從新定律中推出來，則只有在引力比較大的地方，才能發現與牛頓的引力定律不合的事實。就太陽系統來說。所有的行星連地球在內都是沿橢圓的路徑繞太陽運動。水星是最近太陽的行星。太陽與水星之間的引力，比較太陽與任何其他行星之間的引力要大些，因為其間的距離小些。假如我們希望發現與牛頓定律不合的事實，則最大的機會便是在水星的運動中。從舊理論中可以推出來，水星的運動和任何其他行星相同，只是它比較更近太陽而已。根據廣義相對論，則它們的運動應該稍微不同。不僅水星要圍繞太陽而轉動，而且它的橢圓軌道，會很慢地對於與太陽相連的 O_0 轉動。這種橢圓軌道的轉動表現了廣義相對論的新的效果。新理論預言了這種效果的數值。水星的橢圓軌道會在

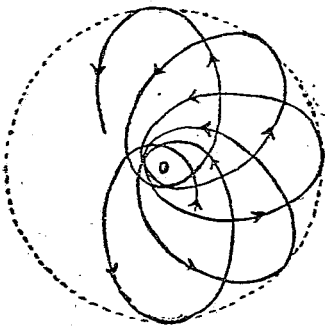


圖 二 十 二 第

三百萬年之內完全轉動一次！由此可見這種效應如何小，而要在其他與太陽相距較遠的地方去發現它，又是如何無望。

在相對論沒有提出以前，便已經知道了水星的運動與牛頓定律有些不合，但是無法加以解釋。在另一方面廣義相對論也不是爲研究這個專門的問題而發展的。只有在後來，才從新的引力方程式中，推出這太陽的行星的運動的橢圓軌道轉動的結論來。在水星的例子中，廣義相對論很成功地解釋了與牛頓定律不合的事實。

但是還有一個從廣義相對論推出來，而又可以和實驗比較的結論。我們已經看到放在轉動的圓盤的大圓上的一只鐘和放在小圓上的一只快慢不同。同樣的，從相對論可以推出來，放在太陽上的一只鐘也會有不同的快慢，因爲引力場在太陽上比在地球上要強得多。

在前面我們提到過，鈉在燃燒時便發射一定波長的黃色的單光。在這種輻射中，原子顯示了它的一種律動；原子代表一只鐘，而發射的波長則代表它的一種律動。根據廣義相對論，由太陽上的鈉原子所發射的光的波長應該比地球上的鈉原子所發射的光的波長要略大些。

用觀察檢驗廣義相對論的推論的問題是很複雜的問題，而且還沒有得到確定的結果。因爲我們只管重要觀念，因此不擬再就這一點作深入的討論，但可以說，到此爲止，實驗的判決似乎證實廣義相對論所推出的結論。

場與物質

我們已經看到機械觀如何以及何以崩潰。機械觀假定在不變的質點之間有些簡單的力作用，而利用這種主張來解釋一切現象，證明是不可能的。我們第一次在電磁範圍中超越了機械觀而介紹了場的概念。並且爲電磁場提出了結構定律，這種定律連接空間與時間中異常接近的事件。這些定律適合狹義相對論，因爲依照羅倫茲變換，它們才是不變的。以後廣義相對論提出了引力的定律。它們又是描寫物質的質點之間的引力場的結構定

律。要推廣馬克士威的定律，使它可以應用於任何 O, ∞ ，像廣義相對論的引力定律一樣，也是容易的。

我們有兩種實在：物質與場。毫無疑問的，我們現在不能像十九世紀初年的物理學家那樣，設想全部物理學建築在物質的概念上。目前我們接受了這兩個概念。我們能夠認為物質與場是兩種分開的和不同的實在嗎？試就一小塊物質來說，我們可以想像這個質點有一定的表面，在表面處它便不存在了，而它的引力場便出現了。在我們的想像之中，場的法則可以應用的區域和有物質的區域是突然分開的。但是分別物質與場的物理學的標準是怎樣的呢？在我們知道相對論之前，我們可以這樣回答這個問題：物質有質量而場沒有。場代表能力，物質代表質量。但是我們已經知道，在知識進步以後，這樣的一個答案是不夠的。根據相對論，我們知道物質代表巨量的能力，而能力代表物質。我們不能從質的方面分別物質與場，因為物質與場之間的分別不是一種質的分別。大部分的能集中在物質之中；但是圍繞質點的場也代表能，不過是一種特別小量的能而已。因此我們可以說，物質便是能量濃度大的地方，場便是能量濃度小的地方。但是假如確是如此，則物質與場的差別便是量的，而不是質的。把物質與場看成兩種迥不相同的質，是沒有意義的。我們不能想像有一定的表面把場和物質分開來。

關於電荷與它的場，也發生了同樣的困難。似乎不能有一個明白的質的標準，分別物質與場或電荷與場。我們的結構定律，即馬克士威定律與引力定律，在能量的濃度極大的地方，便不能應用了，或者說，在有場源，即電荷或物質的地方便不能應用了。但是我們能否略微改變我們的方程式，使它能到處應用，甚至在能量極濃的地方也能應用呢？

我們不能單在物質概念的基礎上建築物理學。但是在認識質量與能相等以後，便不能再把物質與場截然分開了。我們能夠放棄物質的概念，而建築一個純粹的場的物理學嗎？我們的感官上所認為物質的東西，實在只是很大的濃度的能集中在比較小的空間之中。我們可以把物質看作空間中場特別強的區域，這樣一來便可以產生一個新的哲學背景。它的最後目的便是用隨時隨地都可以應用的結構法則來解釋自然界一切現象。從這種觀

點看來，一個拋動的石子便是以石的速度經過空間的，場的濃度最大的處所。在我們的新物理學中，不容有場與物質兩種實在，場是唯一的實在。這種新的觀點的激發，是由於場物理學的偉大成就，以結構定律的形式表現電磁、引力的成功，並由於質量與能的相等，我們的最後的問題便是改變場的法則，使它在能量極濃的區域也能應用。

但是我們至今還沒有確實地一致地實現了這個計劃。究竟能否實現，須待將來決定。目前在所有的理論的構造中，我們還必須假定兩種實在：場與物質。

基本的問題還在我們前面。我們知道，所有的物質只是由幾類質點構造出來的。各色各類的物質是怎樣由這些元質點建築起來的呢？這些質點與場是怎樣交互作用的呢？爲求答覆這些問題，必須介紹新的觀念到物理學裏面來：量子論的觀念。

總結

一個新的概念在物理學中出現了，這是自牛頓的時代以來最重要的發明：場。要發現在描寫物理現象上重要的不是電荷，也不是質點，而是電荷之間與質點之間的空間中的場，這需要很大的科學的想像力。場的概念證明是最成功的，而由這個概念便產生了描寫電磁場的結構和支配電的以及光的現象的馬克士威的方程式。

相對論是從場的問題產生的。舊理論的矛盾與不一致使我們不得不給物理世界的一切現象的舞臺，時空連續區，以新的性質。

相對論是經過兩個步驟發展的。第一步發生了所謂狹義相對論，這種理論只能應用於慣性的座標系，就是說，只能應用於牛頓所提出的慣性定律有效的系統。狹義相對論根據兩個基本的假定：在所有的互相作等速直線運動的系統中物理定律都是相同的；光速總是具有相同的值。從這些爲實驗所充分證實了的假定中推論出來動的桿與鐘的性質，桿的長度與鐘的快慢如何依速度而變更。相對論改變了力學定律。假如動的質點的速

度近於光速，舊的定律便不能應用了。相對論所提出來的關於動的質點的新定律由實驗美滿地證實了。狹義相對論的另一結論便是質量與能的連繫。質量是能，而能也有質量。質量與能量的兩個不滅定律，在相對論中結合爲一個質量——能量不滅定律。

廣義相對論對於時——空連續區作了一個更深的分析。這個理論的應用不再限於慣性的座標系。這個理論研究了引力問題，並且提出了關於引力場的新的結構定律。它使我們不得不分析幾何學在描寫物理世界上的作用。它把引力質量與慣性質量的相等看成重要的，而不是像舊力學中一樣，看成偶然的。廣義相對論的實驗的結果只與舊力學略有不同。凡是與舊力學比較的地方它都能經得起實驗的檢驗。但是這種理論的力量在乎它的內在的一致性，和它的基本假定的簡單性。

相對論更增加了場的概念在物理學中的重要性，但是我們還不能夠造出一種純粹的場的物理學來。我們暫時還要假定場與物質兩者。

四 量子論

連續不連續——物質與電的元量子——光量子——光譜——物質波——或然波——物理學與實在——總結——連續不連續

擺一張紐約城和其四郊的地圖在我們前面。我們問，地圖上的那些點是火車可以達到的呢？在火車的時間表中把這些點找出來，再把它標記在地圖上。現在我們再問那些點是汽車可以達到的呢？假如我們在地圖上畫些線，代表所有從紐約出發的道路，則事實上這些路上的每一點都是汽車可以達到的。在這兩種情形之中都是有許多點。在第一種情形中，這些點是互相分開的，而代表許多火車站，在第二種情形中，它們便是代表汽車路的線上的點。我們其次再問，每一點與紐約的距離，或者更嚴格些說，與紐約城中某一處的距離。在第一種情形中，每一點都有一個數表示它的距離，那些數的變化是不規則地，但總是有限地跳躍的。我們說，火車所能到達的地點與紐約的距離，只能不連續地變化。而汽車可以到達的地方則可以隨意作無論怎樣小的變化，它們是能夠連續地變化的。在汽車的情形之中，距離的變化可以任意地小，而在火車的情形之中則不然。

一個煤礦的出產量能夠連續地變化。出產的煤量可以任意增加或減少。但是所雇的礦工數卻只能不連續地變化。假如有人說：『從昨天起，雇工的數目增加了 3.763。』這句話自是荒唐之至。

假如問一個人袋裏的錢有多少，他只能回答一個包括兩位小數的數。錢的數量只能跳躍地變化，不連續地變化。在美國，最小的錢幣，或者說美國錢的『元量子』是一分。英國錢的元量子是一個法星，約值美國錢的元量子的半，這兩種元量子的價值可以互相比較，它們的價值的比例有一定的意義，因為一者為他者之一

倍。

我們可以說，有些量能夠連續地變化，又有些量只能不連續地變化，或是只能以不能再減小的步伐一步步地變化。那不能再分的一步，便是那種特殊的量的元量子。

我們能夠秤大量的沙，雖則我們明知道它是由一粒粒的沙構成的，但還是可以把它的质量當作連續的。但是假如沙成了很貴重的東西，而我們所用的秤是非常靈敏的，我們便會注意到質量的每一次變更皆為一粒沙的倍數。這一粒沙的質量就是我們的元量子。從這個例子我們看出來，一種量雖則一向我們認為它是連續的，在測量的精確性增加以後，卻能發現它是不連續的。用一句話便可以概括量子論的主旨：我們必須認定，有些一向認為連續的物理的量是由元量子所組成的。

量子論所包括的事實的範圍大得很。這些事實都是用近代高度發展的實驗技術所發現的。我們甚至不能把最基本的一些實驗加以描寫，因此不能不常常武斷地把它們的結果引下來。我們的目的只是要解釋那些主要的基本觀念。

物質與電的元量子

在物質動力論中，已經說過所有的元素都是由分子構成的。試看最輕的氫元素。布朗運動的研究使我們能決定一個氫分子的質量。它的值為

$$0.000,000,000,000,000,000,000,0033 \text{ 克。}$$

這表示它的质量是不連續的。氫的質量只能一步步地變，而最小的一步便是一個分子。但是化學過程告訴我們氫分子還可以分成兩部分，或者換句話說，氫分子又是由兩個原子所組成。在化學過程中作為元量子的是原子，而不是分子。把上面的數以二去除便得出一個

$$0.000,000,000,000,000,000,000,0017 \text{ 克。}$$

質量是一種不連續的量，但是當我們決定重量時，當然用不着理會這一點，甚至最靈敏的天秤，也不能測出質量改變的不連續性。

讓我們回頭來講一件大家都知道的事實。把一根電線連接於一個電池，電流由高電位經過這根電線流到低電位。究竟是正的電流由高電位流到低電位，還是負的電流由低電位流到高電位，這完全是習慣規定的。我們暫且不管所有由於場的觀念所產生的進步。甚至用簡單的電流體的觀念去思想，也還有些問題尚待解決。從『流體』這個名字可以看出來，電在過去是被看作一種連續的量。根據舊觀點，電荷的量可以隨意加減，無論所加減的是怎樣小的量都可以。因此不需要假定元電量子。但是因為物質的動力論很有成就，所以我們不妨問：電流體有沒有基本量子呢？還可以問：電流是正電流體的流動呢？還是負電流體的流動呢？所有答覆這些問題的實驗，都是要把電流體從電線中分離出來，使它脫離物質，然後才能研究它的性質，因為只有在這樣的情形之下，才能把它的性質研究清楚。在十九世紀之末這類的實驗做了很多。我們預備至少舉一個例子來說明這類實驗佈置的觀念。但在說明之前先把實驗的結果引下來。經過電線之電流是負的，是從低電位流向高電位。假如我們早知道這個，則在我們當初提出電流體的學說時，我們一定會把名辭變換一下，把橡皮棒上的電叫做正電，玻璃棒上的電叫做負電。那樣變換一下以後，則把電流體看作正電，便要方便多了。但是因為我們最初的猜測錯了，現在只好忍受這種不方便。其次一個重要問題，便是這種負流體的構造是否『粒子的』，是否由電的量子組成的。有許多獨立的實驗表示，負電的元量子毫無疑問是存在的。負的電流體是由粒子構成的，正如海岸是沙粒構成的，房屋是由磚頭構成的一樣。這個結果在差不多四十年前湯姆孫(J. J. Thomson)就很清楚地說出來了。負電的元量子叫做電子。因此每一負電荷都是由許多元電荷即電子所組成的。負電荷如質量一樣，只能不連續地變化。可是元電荷太小了，因此在研究電的現象時可以把它看作連續的量，而且把它看作連續的還方便些。因此原子說和電子說，把不連續的只能跳躍地變化的物理的量介紹到科學中來了。

設想兩片平行的金屬片，金屬片所在的地方的空氣都抽盡了。一片上有正電荷。一個正的檢驗電荷放在兩

片間，會爲荷正電者所排斥，爲荷負電者所吸引。因此電場中的力線，便是由荷正電的金屬片指向荷負電的一片。作用於負的檢驗電荷的力的方向則恰恰相反。假使金屬片相當大，則其間的力線到處都會是一樣的密，不論檢驗體放在那裏，這個力或力線的密度總是一樣的。在兩片之間的電子會像地面的引力場中的兩點一樣，平行地由荷負電的金屬片的一面落到荷正電的金屬片上。有許多實驗能夠把許多電子放在這樣的一個場中，而場都同樣地影響它們。一個最簡單的實驗是把一根燒過的電線放在荷電的金屬片間。這樣的燒過的線會發射電子，而這些電子以後便會受到外部的場的力線的影響。例如每個人都知道的無線電管便是根據這個原理。

科學家對於一柱電子作了很多的巧妙的實驗。並且觀察了在外部的電場與磁場中它們的路線的改變。我們甚至能把一個電子分離出來，以決定它的元電荷和它的質量，就是說，它對於外力作用的慣性阻力。我們現在只把一個電子的質量的值引下來。它比一個氫原子的質量還要約小兩千倍。因此一個氫原子的質量雖然小，比起一個電子的質量還要大得多。從一致的場論的觀點看來，一個電子的全部質量或者說全部能力，就是它的場的能力；它的強度的主體是在一個小範圍之中，而在電子的「中央」以外的地方便比較弱。

前面說過一種元素的原子就是它的最小元量。過去有很長的時期一般人都相信這個意見。可是現在卻沒有人再相信了！科學已經造成了一種新的意見，從這種意見可以看出舊的意見的限制。原子有一種複雜的構造，這個主張有很多事實的根據。恐怕在物理學上有這樣多的事實根據的主張還很少呢！首先我們發見負電流體的元量子，所謂電子，便是構成一切物質的一種基本的磚頭。前面所舉的一個例中說加熱的線會發射電子，便是從物質中取出電子的許多例子中的一個。這種結果把物質構造的問題和電的構造問題連結起來了。而這種結果，毫無可疑的，是從許多獨立的實驗事實中推出來的。

要從一個原子中取出幾個組成它的電子來是相當容易的事。可以用加熱的方法，例如前面所說的把電線加熱；也可以用旁的方法，例如用電子轟擊原子。

假如把一根很細的赤熱的金屬線，放在很稀散的氫氣中。線會向各方面發射電子。在一個外部的電場作用

之下，它們會得到一定的速度。電子增加它的速度，正如石子在引力場中增加它的速度一樣。用這種方法我們可以得到一柱電子，以一定的速度朝一定的方向衝去。近來，我們靠很強的場的作用，可以使電子的速度近於光速。假如具有一定速度的一柱電子射在很稀散的氫分子上，結果會怎樣呢？速度相當大的電子不僅會把氫分子打散成爲兩個氫原子，而且能從一個氫原子中，取出一個電子來。

我們必須承認電子構成物質的事實。那麼取出了一個電子的原子，在電的性質上，就不會是中性的了。假如它過去是中性的，現在便不是的了，因爲它已經少了一個元電荷了。剩下的必定有一個正的電荷。再則因爲一個電子的質量，比較最輕的原子也要小很多，我們很可以說，原子的大部分質量不是電子的質量，而是剩下來的那種元質點的質量。這種元質點比電子重得多。我們把原子的較重的部分叫做它的核。

近代實驗物理學發展了許多方法可以把原子的核打碎，可以使一類元素的原子，變成另一類元素的原子，而且可以從核中把那重要的元質點取出來。物理學的這一章叫做『原子核物理學』。辣德福(Rutherford)在這方面的貢獻最多，而從實驗的觀點看來這部分也是最有意思的。但是能把原子核物理學中所有的豐富的事實連結起來，而根本觀念又很簡單的一種理論，至今還沒有。因爲本書只注重一般的物理觀念，所以雖然這一章物理學極重要，我們仍只好割棄它。

光量子

假如我們在海邊築一道牆。海水的波繼續打在牆上，把它的表面洗去，再退轉去，讓新的浪打上來。牆的質量漸漸減少，我們可以問，在一年之中洗去了多少質量。我們再想像一個不同的過程。我們還是要使牆減少同量的質量，但是要用不同的方法。我們用鎗射擊牆，子彈射到那一處，那一處便壞了。牆的質量也會漸漸減少，我們很可以想像，用這兩種方法所減少的質量完全相等。但是從牆的表面上，我們很容易發現是連續的波浪的作用，還是不連續的一陣陣的子彈的作用。要瞭解下面所談到的現象，最好常常記着波浪和子彈的區

別。

前面說過一根燒過的線會發射電子。我們現在再介紹一種從金屬中取得電子的方法。把一種有一定的波長的單光，如紫光，射在金屬的表面上。金屬中的電子便取出來了，而一陣電子便會以一定的速度發射出去。從能的原理的觀點上，我們可以說：光的能一部分變成了被迫逃出的電子的動能。現代實驗技術可以使我們記錄這些電子子彈，決定它們的速度，而由此決定它們的能。把光射到金屬上以取出電子，這種現象叫做光電效應。

我們的出發點，是某種強度的單光的光波的作用。在實驗上，每每要改變實驗布置，看對於觀察到的效應有無影響，我們現在也來這樣做一下。

我們首先把射在金屬片上的紫色的單光的強度加以改變，看射出來的電子的能與光的強度有何關係。我們暫且不用實驗，只用推理來解答這個問題，而我們可以這樣推論：在光電效應中有一部分的輻射能變成了電子的運動能。假使光的波不變，而讓它從更強的光源出發，使它射在金屬片上，因為輻射的能更豐富，則金屬上發射出來的電子的能也更大。我們因此預料，假如增加光的強度，射出的電子的速度也會增加。但是實驗與我們的預料恰恰相反。我們又發現自然法則不能恰如人願。這種預測是根據光波說，而我們現在正逢到一個推翻光波說的實驗。從光波說的觀點看來，這種實際的實驗結果是很可驚的。觀察到的電子都有同樣的速度與能，速度與能並不依光的強度而變。

這種實驗的結果，不是光波說所能預言的。由於實驗與理論的衝突，於是新的理論產生了。

我們不妨故意以不很公平的態度對付光波說，忘掉它的偉大的成就，和它對於光線經過小障礙物時所發生的彎曲的現象的圓滿的解釋。我們專心壹志來研究光電效應，看有沒有一種理論能圓滿地解釋這種效應。很明顯的，從光波說決不能推論出來，由金屬片逃出的電子的能與射在金屬片上的光的強度無關。因此我們必須另試一個理論。我們記得牛頓的微粒說能夠解釋許多光的現象，但卻不能解釋光的繞射，這種現象我們暫且不去

管它。在牛頓的時代，能的觀念還沒有。依他看來，光的微粒是沒有重量的，每種顏色都保存着它本身的實質的特性。後來有了能的觀念，而大家發現光是帶着能的，但沒有人想到把這種觀念應用於光微粒說。牛頓的理論是死了，一直到本世紀為止，誰也沒有想到要正式恢復它。

要保存牛頓的理論中的主要的意思，我們必須假定單光是由能粒子所組成的，而用光量子去代替舊的光微粒。這種光量子叫做光子，是以光的速率通過空間的小量的能。在這種新的形式中恢復過來的牛頓的理論叫做光的量子說。不僅物質與電荷，便是輻射能也有一種粒子的構造，就是說，它是光的量子構成的。除物質的量子與電的量子外，又有能的量子。

能量子的觀念是蒲郎克(Planck)在本世紀開始的時候創造出來解釋一種比光電效應複雜得多的現象。但是光電效應更能簡單明白地使我們認識改變舊觀念的必要。

我們立刻可以看出來光的量子說，能夠解釋光電效應。一陣電子落在金屬片上。輻射與物質間的作用是什麼呢？光子射在原子上，把其中的一個電子取出來。我們又知道增加光的速率，用這種新的文字說來，便是增加光子的數目。射在金屬片上的光的數目增加，而每一個光子的能並未變更，因此我們看到，這個理論與實驗是絕對相合的。

假使有一柱不同的色的單光，例如不是紫色的單光，射在金屬的表面上，結果會怎樣呢？我們讓實驗回答這個問題。這種光所取出來的能必須加以測量，而且拿來與紫色的光所取出來的電子的能加以比較。我們發現由紅光所取出來的電子的能比較由紫光所取出來的電子的能小些。這意思就是，不同顏色的光，其光量子的能也不同。紅光的光子的能僅為紫光的光子的能的一半。或者更加確切些說：波長愈增加，則一種光量子的能便愈減少。能的量子與電的量子之間有一種很重要的差別。不同的波長有不同的光量子，而電量子總是一樣的。假使我們還用前面的一個比喻，則光量子可比之最小的錢幣量子，而各國都有它不同的錢幣量子。

我們繼續放棄光波說，而假定光的構造是粒子的，它是由光量子構成的，就是說，是由以光速通過空間的

光子所構成的。因此在這個新的理論中，光是一陣光子，而光子是光的能的基本量子。可是假使我們放棄了光波說，波長的觀念也就跟着消滅了。甚麼新的觀念來代替這個觀念呢？光量子的能！用光波說的名辭所說的話都可以翻譯成幅射的量子說的話。例如：

單光有一定的波長。光譜中紅端的波長爲紫端的
一倍。
單光包含一定的能的光子。光譜中紅端的光子的能爲紫端的一半。

我們可以把光學的現狀用下面的話概括起來：有些現象可以用量子論解釋，不能用光波說解釋。光電效應便是一個例子，此外還有許多這一類的例子。也有些現象能用光波說解釋，卻不能用量子論解釋。光線經過障礙物時，所發生的彎曲，便是一個典型的例子。最後，還有許多現象用光波說和量子論都可以解釋，例如光的直線傳播。

但光是實在是什麼呢？是波呢，還是一陣光子呢？我們所問的問題和過去所提出的一個問題很相似：光是波呢，還是一陣光粒子呢？在過去我們很有理由放棄光的微粒說而採用光波說，因爲光波說能解釋一切現象。可是現在這問題卻複雜多了。只用一個理論似乎不能解釋光的一切現象。我們似乎有時候要用這個理論，有時候要用那個，而有時候兩個都要用。我們又遇到了一種新的困難。關於實在，有兩個互相矛盾的理論；分開來則任何一個都不能圓滿地解釋光的現象，而合起來則能夠！

怎樣才能夠把這兩個理論合起來呢？我們怎樣才能解釋光的這兩種不同的狀態呢？這個新的困難是很難解決的。我們又遇到了一個根本問題。

我們暫時接受光的光子說，而利用它來解釋光波說所已經解釋了的事實。這樣的辦法可以使我們愈加看出這兩種理論初看似乎不能互相融洽的困難。

我們記得：經過一個針孔的一柱單光會產生光環和暗環。假使放棄光波說，怎樣利用光的量子論解釋這種現象呢？一個光子經過一個孔。假如光子通過了，屏上便現出光來，假如沒有通過，屏上便是暗的。可是我們

却發現光環和暗環。我們可以設法這樣解釋：也許孔的邊緣與光子之間有一種交互作用，因此才現出繞射的環來。這句話簡直不能認為是一種解釋。最多只能認為它提出了一種解釋的途徑，使我們覺得，將來用物質與光子之間的交互作用來解釋繞射現象，還有幾分希望。

但是甚至這一點點微薄的希望，也被前面的關於另一個實驗的討論所粉碎了。假設有兩個針孔。經過這兩個孔的單光會在屏上產生光帶和暗帶。怎樣從光的量子論的觀點來解釋這種現象呢？我們可以推論：一個光子通過了兩個針孔中的一個。假使單光的光子代表一個基本的光的質點，我們不能想像它再會分裂，而經過這兩個孔。然則其結果應該和第一個例子中一樣，是些光環和暗環，而不是光帶和暗帶。何以有了另一個針孔在旁邊，便能夠使結果完全改變呢？一個光子所不經過的針孔，甚至在相當的距離之外，居然能把環變成帶！假使光子的行為是和舊物理學中的微粒一樣，它必須通過兩個孔中間的一個。但是這樣一來，繞射現象便似乎完全不可解了。

科學使我們不能不創造新的觀念，新的理論。這些觀念和理論的目的是要打破那常常阻礙科學進步的矛盾的牆壁。所有科學上的重要觀念都是從實在與理論之間的激烈衝突中產生的。目前的這個問題也是需要新的原則才能解決的。現代物理學企圖解釋光的量子現象及波動現象的矛盾，在敘述這種企圖之前，我們要談談在物質的量子方面如何也產生了同樣的困難。

光譜

我們已經知道所有的物質只是由幾類質點所構成的。電子是我們所發現的第一種物質的元質點。但是電子也是負電的元量子。我們又已經知道，有些現象使我們不能不承認光是由元光量子組成的，波長不同則光量子也不同。在繼續研究之前，我們必須討論幾種物理現象，在這些現象中物質與輻射都有很重要的作用。

太陽所發出的輻射可以用一個稜鏡把它分成許多成分。這樣便得出來太陽的連續光譜。在可見光譜的兩端

間，所有的波長都有。我們再舉一個例。前面說過，鈉在熱到白熾的時候會發出十種單光，一種顏色，或一種波長的光。假使把白熾的鈉放在稜鏡前面，它所發的光便會分裂為許多成分，而顯出這種放射體所特有的光譜來。

在一個裝着氣體的管中放電，便會產生一個光源，例如在商業廣告上常用的氬管。假設把這樣一個管放在分光鏡前面。分光鏡是一種與稜鏡作用相同的儀器，但是要精密而且靈敏得多；它把光的成分分裂出來，就是說，它分析光。從太陽來的光，經過分光鏡以後，便會產生連續的光譜，裏面各種波長都有。可是假使光源是電流通過的氣體，光譜的性質便不同了。

它不會是像太陽的光譜一樣是連續的多色的，却是在連續的暗底上現出白的，互相分離的條紋。每一條紋，假使是很窄的，便會相當於一種色，或者用光波說的說法，相當於一種波長。例如，假使在光譜上看見二十個條紋，則相當於它們的波長的數便有二十個，而每一個條紋便可以用一個數表示。不同的元素的氣體有不同的光譜線系統，因此表示組成光譜的各種波長的數的組合也不同。在其特有的光譜中，任何兩種元素不會有相同的條紋系統，正如任何兩個人不會有完全相同的指紋。物理學家把這樣的光譜線彙集起來，於是漸覺其間有一定的法則，而且可以用一個簡單的數學式，代替表示各種波長的似乎不連續的數。

上面所說的一切都可以翻譯成光子說的文字。每一條紋相當於一種波長，換句話說，相當於一定能量的光子。因此發光的氣體不發射一切可能的能的光子，而只發射那種質所特有的光子。實在又限制了豐富的可能性。

一種特殊元素的原子，例如氫原子，只能發射具有一定能量的光子。只有一定的量子的發射是許可的，其餘的都被禁止的。為簡單起見，假想有某種元素只發射一條明線，就是說，一種一定能量的光子。原子的能在發射之前要豐富些，在發射之後則要貧乏些。根據能量原則，一個原子在發射之前的能水準較高，而在發射之後則較低，兩個水準之差必定等於發射出來的光子的能。因此某種元素的原子只發射一種波長的輻射，就

是說，只發射一種一定能量的光子。這種事實可以用一種不同的說法說出來：這種元素的原子只許可有兩個能水準，而一個光子的發射相當於原子從較高能水準到較低能水準的過渡。

但是通常在元素的光譜中總不止一根明線。發射出來的光子相當於許多種能量，而不是只相當於一種。或者換句話說，我們必須認定，在一個原子中可以有許多個能水準，而一個光子的發射，相當於從較高水準向較低水準的過渡。我們不說每個原子的光譜有某幾條明線，某幾種波長，卻可以說每個原子有幾個能水準，而光量子的發射，相當於原子從一個能水準到另一水準的過渡。通常能水準都不是連續的，而是不連續的。我們又看到實在限制了豐富的可能性。

波爾 (Bohr) 首先說明了爲甚麼在光譜中恰恰是這些明線，而不是旁的明線。他的理論是二十五年前提出來的，從他所提出的原子理論中可以計算元素的光譜，至少在簡單的情形之中這是做得到的，而且表面上枯燥而又不相連的數字經這種理論解釋以後，都突然變成互相一致的了。

波爾的理論是走向一種更深的更普通的理論的過渡的理論。這種新理論叫做波動力學或量子力學。我們預備把這個理論的重要的觀念力加以敘述。在敘述之前，我們必須提起一種比較帶特殊性質的理論的和實驗的結果。

我們的可見光譜是由紫色的某種波長開始，到紅色的某種波長終止。或者換句話說，在可見光譜中的光子的能量，是在紫光 and 紅光的能量所構成的限度之內。自然，這種限制只是我們的眼睛的一種性質。假使能水準的能量之差相當大，便會有一種紫外線的光子發射出來，在可見光譜之外現出一條明線來。它是不能用肉眼看到的，因此必須用照相片。

X射線也是由一種比可見的光子的能量強得多的光子所組成的，或者換句話說，它們的波長小得多，事實上比可見的光的波長小幾千倍。

但是我們可以用實驗決定這樣小的波長嗎？決定普通的光的波長已經是很難了。我們必須有很小的障礙物

或很小的孔。兩個很接近的針孔會顯出普通的光的繞射現象來，假使要使X射線也顯出繞射現象來，兩個針孔必須再小多少千倍，更接近多少千倍。

我們怎樣能測量這些射線的波長呢？自然本身幫助我們解決了這個困難。

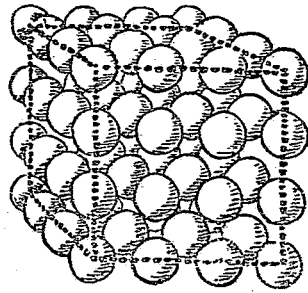
結晶體中的原子是排列得非常有秩序的，而且彼此之間的距離非常小。因此我們不必用極小的孔，而可以用由元素的原子所形成的極小的障礙物，那些障礙物排列很有秩序，而且互相緊接。原子彼此間的距離既然非常之小，應該可以顯出X射線的繞射現象來。實驗上證明利用結晶體中很有秩序地排列於三度空間中，而且擠得很緊的障礙物，確能繞射X射線的波。

假定一柱X射線射到結晶體上，通過以後，現在照片上。照片上便會顯出繞射花樣來。關於研究X射線的光譜，曾經用過許多方法，從繞射花樣中推出關於波長的材料來。在這裏用幾個字說出來的，假使要把所有的理論的和實驗的細節都寫出來，非許多卷書不行。X射線的繞射花樣也表現，惟有光波說能解釋的光環和暗環。在中央可以看到未經繞射的射線。假使不把結晶體放在X射線與照相片之間，便只能看到中央的光點。從這類的照相片，可以計算X射線光譜的波長，而在另一方面，知道了波長，也可以推論結晶體的構造。

物質波

在每種元素的光譜中只有某幾種波長現出來，這種事實怎樣解釋呢？

在物理學上往往因為在表面上互不相關的現象之間看出相似之點，而加以推演，結果竟產生很重要的進歩。在本書中我們已經屢次看到一個科學部門中所產生和發展的觀念，後來居然能應用於另一部門。機械觀與



圖三十二

場論的發展就給了我們許多這類的例子。把已經解決的問題和沒有解決的問題連起來，也許能發生一些新的觀念，幫助我們解決困難。要作一種很膚淺的而事實上甚麼也不能解釋的類推是很容易的。但是要在表面上不同的現象之後發現很重要的相同之點，而且以此為基礎，構成一個新的成功的理論，這却是很重要的創造的工作。不到十五年前由德布洛伊 (de Broglie) 和施魯丁格 (Schrodinger) 開始發展的所謂波動力學便是利用一種深刻的幸運的類推而得出一種很成功的理論的一個典型的例子。

我們的出發點是與近代物理學完全無關的一個舊的例子。用手握着一根很長的柔順的橡皮管，或是一根很長的彈簧的一端，設法使它有節奏地上下運動，於是這一端便發生振動。從許多旁的例子中，我們已經知道這樣的振動便會產生一種波，以一定的速度經過橡皮管傳播。假使我們想像一根無限地長的管，那麼，波既開始之後，便會無阻攔地繼續它們的無盡的旅程。

現在再舉一個例子，把這根管的兩端都繫牢。假如你願意，你可以用一根提琴的絃。假使在管或絃的一端產生了一個波，結果會怎樣呢？波還是和前例中一樣開始它的旅程，但是立刻由管的另一端反射轉來了。現在有了兩種波，一種是由振動產生的，另一種是由反射產生的，它們朝不同的方向運動，而互相干涉。要研究這兩種波的干涉，並且去發現由於它們的重疊所產生的波是容易的；我們叫這種波做定波。『定』與『波』這兩個字似乎互相矛盾；可是我們認為不妨把它們結合起來，因為這種波是兩個波重疊的結果。

一個定波的最簡單的例子便是一根兩端繫牢的絃的一上一下的運動，如圖中所示。這種運動是當兩個波朝相反的方向運動時一個波臥在另一個波上的結果。這種運動的特色是：只有兩端是靜止的。它們叫做波節。波便定立在兩個波節之間，而絃的各點都同時達到它們的歧離的最高度與最低度。

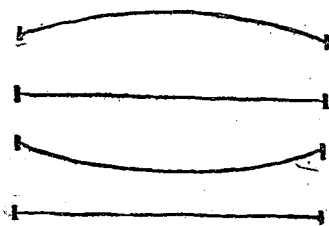


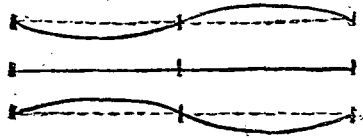
圖 四 十 二 第

但這只是定波的最簡單的一類。還有旁類的定波。例如一個定波可以有三個波節，兩端各一個，中央一個。在這種情形中有三點是靜止的。看圖就知道這裏的波長爲前面只有兩個波節的波長的一半。同樣的，定波也可以有四個，五個，以及更多的波節。在每種情形中波長與波節的數目有關。這個數目只能是整數，只能跳躍地變化。『在一個定波中的波節的數目是 3.576 』，這樣的一句話是毫無意義的。因此波長只能不連續地變化。在這個最舊的問題中，我們又認識了熟悉的量子論的特色。事實上，一個提琴手所產生的定波是更加複雜的，它是許多具有兩個、三個、四個、五個乃至更多的波節的波混合起來的。物理學能夠把這樣的混合物，分析爲組成它的簡單的定波，或者利用前面的名詞，我們可以說，振動的絃有它的光譜，正如發出輻射的元素一樣。也正如元素的光譜一樣，只有某幾種波長是許可的，其餘的都是被禁止的。

因此我們在振動的絃和發出輻射的原子之間發現了一個相似之點。這個類比雖然似乎很奇怪，但既選定了它以後，便不妨把它加以引伸，看可以得出甚麼結論來，而且繼續去比較它們。每一種元素的原子都是由元質點所組成的，重的質點構成核心，輕的構成電子，這樣的質點系統正和一個產生定波的小樂器一樣。

可是定波是兩個，或者一般地說，是更多的動波互相干涉的結果。假如我們的類比有幾分真，則應該有一種比較原子更簡單的配置，和動波相當。最簡單的配置是甚麼呢？在我們的物質世界中，沒有一樣東西比較不受外力作用的元質點或電子更簡單的了。所謂不受外力作用的電子便是靜止的或等速直線地運動的電子。在我們的類比的鎖鍊中我們可以再猜出一環來！等速直線地運動的電子↓一定波長的波。這就是德布洛伊的新穎而勇敢的觀念。

前面說過在許多現象中光顯示波狀性質，在另一些現象中光顯示微粒性質。我們因爲習慣於光是一種波的



第二十五圖

觀念，因此在光電效應一類的現象中，發現它的行為很像一陣光子，便覺得驚奇不置。關於電子則恰恰相反。我們已經習慣於電子是質點，是電和物質的元量子的觀念了。它們的電荷和質量都已經研究過了。假使德布洛伊的觀念有幾分真，則應該在某些現象中間，物質顯示波狀的性質。這個結論原是由聲學類推得來的，初看似乎很奇怪難解。一個運動的質點怎樣能與一個波有甚麼關係呢？但是在物理學上我們已經不是第一次遇到這樣的困難了。在光的現象的範圍中，我們也遇到同樣的問題。

要構成一種物理學的理论，最重要的是根本觀念。物理學的書裏面充滿着複雜的數學公式。但是每種物理學的理论的開端都不是公式，而是思想與觀念。這種觀念以後必須具有量的理论的形式，使它與實驗比較。這是可以目前所研究的這個問題作例來解釋的。主要的一個猜想是，在某些現象中等速直線地運動的電子的行為會像波一樣。假使一個電子或一陣電子等速直線地運動，而且都具有同樣的速度。我們知道每一個電子的質量，電荷和速度。我們假如願意把波的概念和一個等速直線地運動的電子或一些電子連起來，那麼我們接着便要問：波長是怎樣呢？這是一個量的問題，因此必須做出一個多少是數量的理論來回答它。這倒是一件很簡單的事。對這個問題作了一個答案的德布洛伊的作品，其數學的簡單真是最令人驚異的。在它的作品出現時，其他的物理的理论的數學技術都是比較非常深奧複雜。而研究物質的波的問題的數學是極端簡單而元始的，但是觀念却非常深遠。

在前面談到光波與光子的問題時，我們看見每一句用波的文字所陳述的話都可以翻譯成爲光子或光微粒的文字。電子波也是如此。關於等速直線地運動的電子，微粒說的文字前面已經敘述過了。而且每一句用微粒的文字所陳述的話都可以翻譯成爲波的文字，正和光子的情形一樣。翻譯的規則可以根據兩個線索。光波與電子波或光子與電子之間的類比是一個線索。對於物質，我們所用的翻譯方法，和對於光所用的方法一樣。狹義相對論是另一線索。自然法則必須依照羅倫茲變換定律爲不變的，而不是依照舊變換定律爲不變的。這兩個線索合起來便決定相當於一個運動的電子的波長。根據理論，一個速度例如爲每秒 $10,000$ 英里的電子，其波長很容

易計算出來，它是與X射線在同一波長範圍之中。因此我們可以再下一個結論，物質的波的性質，假如可以在實驗中檢驗出來，其方法應該與檢驗X射線相似。

設想有一柱以一定速度等速直線地運動的電子，或者用波的名辭說，一種均勻的電子波，再假定它射在很薄的一片金屬上，這片金屬的作用便是一種繞射花柵。金屬中的繞射障礙間的距離小到可以產生X射線的繞射現象。電子波的波長既然與X射線相等，也應該有同樣的現象發生。電子波經過很薄的一層金屬片所發生的繞射現象，可以用照相片記錄下來。理論上的一個無疑的很偉大的成就居然在實驗中產生了：電子波的繞射現象。電子波和X射線的繞射現象是很相似的。我們知道繞射花柵的圖可以使我們決定X射線的波長。電子波也是如此。繞射花柵能夠決定物質的波的長度，而理論與實驗之間的在量的方面的完全一致，美滿地證實了我們的推論。

我們前面的困難因這個結果更增廣而且加深了。這只要舉一個例，便可明白，這個例與前面關於光波所舉的例相似。一個電子向一個小孔射去使像光波一樣彎曲。在照片上會現出光環和暗環。這種現象，也許有幾分希望用電子與孔的邊緣間的交互作用來解釋，雖則這樣的解釋似乎不很有把握。但是怎樣解釋兩個針孔的結果呢？現出來的不是環而是帶。何以有另一個孔在旁邊，便完全改變了效果呢？電子是不可分的。它似乎只能經過兩個孔中間的一個。經過一個孔的電子何以知道在附近還有另一個孔呢？

在前面我們問過，光是甚麼？是一陣微粒呢，還是波呢？現在我們問，物質是甚麼，電子是甚麼？它是質點呢還是波呢？電子在外部的電場或磁場中運動時，它的行為像質點。為結晶體所繞射時，它的行為像波。關於物質的元量子，我們所遇到的困難，和關於光的量子所遇到的是一樣的。最近科學進步所引起的一個最基本的問題便是如何調和物質與波的兩種矛盾的見解。這是最基本的困難之一，既經提出之後，終久會引起科學的進步的。物理學已經嘗試解決這個問題。將來必然可以判定，近代物理學所提出的解決是永久的還是暫時的。

或然波

根據舊力學，假使我們知道某個物質的點的位置與速度，並知道甚麼外力作用於它，便可以根據力學法則預言它的未來的全部路線。「物質的點在某時候有某位置與速度」這句話在舊力學中有確定的意義。假如這樣一句話失去了它的意義，那麼我們在面前的關於預言未來路線的論斷都要靠不住了。

在十九世紀初期，科學家想把一切物理學都化成作用於物質的質點簡單的力，而這些質點在任何時候都有一定的位置和速度。我們試回憶，當我們在物理領域內開始討論力學時，我們如何描寫運動。我們沿著一定的路線畫許多點，表示物體在某時刻的正確的位置，又畫一些切線向量，表示速度的方向和大小。這是既簡單而又可信的。但是對於物質的元量子，電子，或能的量子，光子，這種辦法却不能用。我們不能把光子或電子的運動，和舊力學中的運動一樣畫下來。兩個針孔的例子便把這一點表示得很明白。電子與光子似乎經過兩個孔。因此我們根本不能用舊的方法，把電子或光子的路線畫出來，以解釋這種效應。

我們自然必須假定有元作用，例如電子或光子的通過孔。物質與能的元量子的存在也是不容懷疑的。但是我們却確實不能用舊力學那樣簡單的辦法決定任何時候的位置與速度，而做出基本的法則來。

因此我們必須試用不同的辦法。我們不妨把那元過程繼續地重復許多次。我們把電子一個一個地朝着針孔的方向射去。這裏用「電子」這個字只是為確定起見；這些論斷也可以適用於光子。

重復地實驗的結果，必定還是一個孔產生光環和暗環，兩個孔則產生光帶和暗帶。但是有一個很重要的區別。假如只有一個電子，這種實驗的結果便不可解。假如把實驗重復許多次，就比較容易理解了。我們現在可以說，許多電子射着的地方現出光帶。較少的電子射着的地方比較暗些。一個完全暗的地方便是沒有電子的地方，我們自然不能假定所有的電子都經過兩個孔中的一個。假使如此，則把另外一個孔掩蓋或不掩蓋，決不會有任何區別。但是我們已經知道把另一個孔蓋住會產生一種區別。因為一個質點是不可分的，我們不能想

像它經過兩個孔。把實驗重復許多次的事實却指示了另外一條出路。有些電子經過第一個孔，其餘的經過第二個孔。我們不知道爲甚麼一個電子恰恰選擇了那個特殊的孔，但是重復地實驗的結果，必定是兩個孔都有從源到屏的電子穿過去。假如我們只說在實驗重復許多次以後，一羣電子會怎樣，而不管每個質點的行爲，環和帶的圖形的區別就可以理解了。由於討論一串實驗便產生了一個新的觀念，即一羣之中的個體的行爲是不能預測的。我們不能預言一個電子的路程，但是我們可以預言，在總結果中屏上會現出光帶暗帶來。

我們暫且丟開量子物理學不談。

在舊物理學中，假如知道一個物質的點在某一刻的位置和速度，和加於它上面的力，我們便能預言它的未來的路線。我們又知道機械觀怎樣地應用於物質動力論。但是在這個理論中，有一個新的觀念從我們的推論中產生了。要了解以後的推論，把這個觀念徹底地把握住，是很有用處的。

一個容器中裝着氣體，要研究每個質點的運動必須首先找出最初的狀態來，就是說，必須知道所有的質點的最初的位置與速度。即使這是可能的，要把這些結果寫在紙上，即使窮一個人的畢生之力也是辦不到的，因爲我們所要研究的質點的數目太大了。假如有人想應用已知的舊力學的方法來計算這些質點的最後的位置，那種困難簡直是無法克服的。在原則上應用研究行星運動的方法是可能的，但是在實際上這是沒有用的，而必須代以統計法。這種方法不需要對於最初的状态有確切的知識。我們對於系統的任何時候的狀態所知比較少，因此也比較地不能說出它的過去與未來。我們對於每一個氣體質點的命運不關心了。我們的問題的性質變了。例如，我們不問，「在這個時候的每一質點的速率是甚麼？」但是我們可以問：「多少質點有每秒一千英尺至一千一百英尺的速率？」我們不管個體。我們所要決定的是整個集體的平平均值。很明白的，必須那個系統所包括的個體是很大的數目，然後統計的推理方法才有用處。

我們不能應用統計的方法預言一羣中的一個個體的行爲。我們只能預言它作某種特殊的方式的行爲的機會，或然率。假如統計的定律告訴我們，質點的三分之一有每秒一千英尺至一千一百英尺的速率，那就是說，

對於許多質點重復地觀察許多次，我們會得出這個平均數來，或者換句話說，在這個限度內，找到一個質點的或然率是等於三分之一。

同樣的，知道一個大社會的生殖率，並不是知道任何一個特殊的家庭是否有一個小孩。所知道的是統計的結果，在這種結果中參加的個體並不生作用。

我們只要觀察許多汽車的登記的牌號，便立刻會發現其三分之一的數目是可以三除盡的。但是我們不能預言在下一刻中經過的汽車是否有這種性質。統計的定律只能應用於大集團，而不能應用於其中的個體。

現在我們可以回頭討論量子問題。

量子物理學的定律都是統計性質的。這就是說，它們不管一個系統，而只管許多相同的系統的集團，要證實它不能單測量一個個體，而只有作一串重複的測量。

量子物理學對於許多現象都要做出定律來。其中一種便是放射性物質的分裂。量子物理學便要做出一種支配由一種元素自動地蛻變成另一種元素的定律。例如，我們知道在 ^{238}U 年之中一克鎊會分裂一半，剩下一半。我們能夠大概地預言在下半小時中有多少原子會分裂，但是即使在理論的描寫中我們也不能說，為甚麼恰是這一些原子分裂，而不是旁的原子。根據我們目前的知識，我們沒有能力指出來，那些原子會分裂。一個原子的命運與它的年齡無關。支配它們個體行為的定律，還是一點影子也沒有。我們只能做出支配大集團的原子的統計定律。

再舉一個例，放在分光計前面的某種元素的發光的氣體，會現出一定波長的明線來。原子現象的一種特色便是只現出一組不連續的波長，在這種現象中可以顯示元量子的存在。但是這個問題還有其他的一面。有些光譜線是很清楚的，有些比較模糊。一根清楚的線表示有比較多數的屬於這一特殊波長的光子發射出來了；而比較模糊的線則表示比較少數的屬於這一特殊波長的光子發射出來了。理論又只給了我們一種統計性質的結果。每一根線相當於從較高水準到較低水準的過渡。理論只告訴我們這些可能的過渡中，每一種過渡的或然率。

但是却絲毫不告訴我們一個原子的實際的過渡。這種理論在這些方面很成功，因為所有這些現象都關涉大的集團而不是一個個的個體。

新的量子物理學似乎有些像物質動力論，因為兩者都是統計的性質，而且都關涉大的集團。但是不然，在這樣的類比中，最重要的不僅是要了解同點，而且要了解異點。物質動力論與量子物理學的同點在於它們的統計的性質。可是它們的異點是甚麼呢？

假如我們想知道在一個城市中有多少男人和女人年齡超過二十歲，我們必須叫每個公民都填一個表，表中有『男』，『女』，『年齡』等項。假使每一個答案都是正確的，則把它們計數一下，再加起來，便可以得到一種統計性質的結果。這種統計的意見是由研究個體的事例而得來的。物質動力論也是一樣。我們是根據個體的定律，而得出支配集團的統計的定律。

但是在量子物理學中情形却完全不同。那裏面的統計定律是直接得來的。個體的定律放棄了。在一個光子或一個電子與兩個針孔的例子中，我們不能像舊物理學一樣描寫元質點在空時中的可能的運動。量子物理學放棄了關於元質點的個體定律，而直接定出支配集團的統計定律來。我們不能根據量子物理學描寫一個元質點的位置與速度或預測它未來的路線，像舊物理學一樣。量子物理學只管集團，而它的定律都是關於集團的，而不是關於個體的。

我們所以不得不改變舊的觀點，完全是由於事實上的必需，而不是由於玄想，或愛好新奇。我們只舉了一個例子說明應用舊觀點的困難，即繞射現象。但是還可以引許多旁的同樣有力的例子。我們因為要理解實在，所以不得不繼續不斷地改變觀點。但是必須等到將來，才能決定我們所選擇的是否是惟一的出路，或是還可以找到更好的解決困難的方法。

我們必須放棄描寫個體在空間與時間中的客觀的行為的方法，而必須介紹一種統計性質的定律。這些都是現代量子物理學的主要的特色。

在前面每逢介紹新的物理的實在，例如電磁場或引力場時，我們總設法把表現這些觀念的數學的方程式的特色大概地說說。對於量子物理學我們也要這樣做一下，但只能很簡短地涉及波爾、德布洛伊、施魯丁格、海森堡 (Heisenberg)、迪拉克 (Dirac)、和波恩 (Born)的工作。

我們來研究一個電子的例子。這個電子可以受一個任意的外面的電磁場的影響，也可以毫不受外面的影響。例如它們可以在一個原子核的場中運動，或者在一個結晶體上繞射。量子物理學告訴我們怎樣對於任何這一類的問題做出數學的方程式來。

我們已經認識了，任何樂器如振動的絃、鼓面、管樂器，與一個放射的原子之間的相似。在支配聲學問題的數學方程式與支配量子物理學問題的方程式之間，也有些相似之處。但是關於這兩種情形之中所決定的量的物理的解釋却又是完全不同的。假如是絃，我們便問在任意的時刻中，任意一點與正常的位置的偏差。知道了某一時刻的振動的絃的形式，我們便知道了所要知道的一切。從關於振動的絃的數學方程式，我們可以計算任何時候的與正常位置的偏差。絃的每一點有一種一定的與正常位置的偏差。這種事實可以更加嚴格地用下面的方式說出來：在任何時候與正常值的偏差數是絃的座標的函數。絃上所有的點構成一個一因次連續區，而偏差數則為在這個一因次連續區中所限定的一種函數，而是可以由振動的絃的方程式計算出來的。

電子的情形也是一樣，有某種函數決定其空間的每一點與時間的每一刻。我們叫這個函數做波。把量子問題與聲學問題加以類比，或然波相當於聲學問題中的與正常位置的偏差數。或然波是某時刻的三因次連續區的一個函數，而在絃的情形之中，則偏差數為某時刻的一因次連續區的一個函數。或然波構成我們所研究的量子系統的知識的總彙，可以使我們回答關於這個系統的一切有意義的問題。它不能告訴我們電子在任何時候的位置與速度，因為這樣的問題在量子物理學中是沒有意義的。可是它告訴我們在某一地點遇到電子的或然率，或是在甚麼地方有最大的遇到一個電子的機會。其結果不只關涉一次測量，而是關涉多次的重復的測量，因此量子物理學的方程式決定或然波，正如馬克士威的方程式決定電磁場，而引力方程式決定引力場。量子物

理學的方程式又是結構定符。但是由這些量子物理學的方程式所決定的物理概念的意義比較電磁場與引力場要抽象得多；它們只是回答一種統計性質的問題的工具。

以上我們只研究了在外部的場中的電子。假如不是電子這一種最小的可能的電荷，而是相當大的電荷，包含億萬電子，我們便可以不管全部量子理論，而根據舊的量子論以前的物理學來研究這些問題。關於電路中的電流，荷電的傳導體，電磁波，我們可以應用包含在馬克士威方程式中的舊的簡單的物理學。但是關於光電效應，光譜線的強度，放射現象，電子波的繞射，以及旁的許多顯示物質與能的量子性質的現象，便不能應用舊物理學了。我們必須升高一層。在舊物理學中我們說到一個質點的位置與速度，而現在則必須研究相當於一個質點的三因次連續區的或然波。

量子物理學對於處理一個問題有它自己的方法，只要我們已經知道如何從舊物理學的觀點去處理一個類似的問題。

關於一個元質點，電子或光子，假使把實驗重複許多次，便可以有三因次連續區中的或然波來描寫這個系統的統計的行爲。但是假使不是一個質點，而是兩個相互作用的質點，例如兩個電子，或一個電子與一個光子或一個電子與一個核，又怎樣辦呢？我們不能分開來處理它們，各用一個三因次連續區中的或然波來描寫，因為我們所要研究的是它們的相互作用。要猜想量子物理學如何描寫由兩個交互作用的質點所組成的系統，確不是很難的事。我們必須降下一層，暫時回到舊物理學。空間中兩個物質的點在任何時候的位置，是用六個數描寫的，每個點用三個數。兩個物質的點的所有可能的位置，構成一個六因次的連續區，而不是一個物質的點一樣，其所有的可能的位置只構成一個三因次連續區。假如我們又升高一層，升到量子物理學，我們就會有在六因次連續區中的或然波。同樣的，對於三個，四個，和更多的質點，或然波便是九因次，十二因次，乃至更多因次的連續區中的函數。

這就明白地表示或然波比較存在，而且傳播於三因次空間中的電磁場與引力場更加抽象。許多因次的連續

區構成或然波的背景，而只有在一個質點的情形中，因次數與物理的空間相同。或然波的惟一的物理的意義，便是它能幫助我們回答關於許多質點或一個質點的有意義的統計的問題。例如，關於一個電子，我們可以問在一個特殊地點遇到一個電子的或然率。關於兩個質點，我們的問題可以是：在某時和某兩地點遇到兩個質點的或然率是怎樣呢？

我們離開舊物理學的第一步便是放棄描寫作為時空中的客觀事件的個體情形。我們不得不應用或然波所供給的統計方法。一旦選擇了這條路以後，便逼着我們愈來愈抽象。我們必須為許多質點問題介紹在許多因次中的或然波。

為簡便起見，我們把量子物理學以外的一切都叫做舊物理學。舊物理學的目的是要描寫存在於空間中的個體，而且做出支配它們在時間中變化的定律來。但是許多現象逼着我們放棄這種觀點，例如顯示物質和輻射的質點與波浪性質的現象，和明顯地帶有統計性質的現象，如放射性物質的分裂，繞射，光譜線的發射，以及許多旁的現象。量子物理學的目的，不是要描寫在空間中的個體事物和它們在時間中的變化。像這樣一句話：『這是某物，有某種性質』，在量子物理學中是沒有地位的。在量子物理學中有這類的話：『這是某物和有某種性質的或然率是若干。』支配個體事物在時間中的變化的定律，在量子物理學中是沒有地位的。在量子物理學中，却有支配或然率在時間中的變化的定律。量子論在物理學中造成了這樣一種根本的變更，這樣變更以後我們才能夠圓滿地解釋何以顯示物質與輻射的元量子的現象範圍中的事件，會明顯地具有不連續的和統計的性質。

可是新的更困難的問題又發生了，那些問題還沒有確實地解決。我們只在這類沒有解決的問題中舉一個作例。科學不是而且永遠不會是一本寫完了的書，每一重要的進展都產生新的問題。每一發展在最後都顯示新的與更深的困難。

我們已經知道在一個或許多質點的簡單情形中，我們能夠從舊的描寫法升高到量子的描寫法，從時空中的事件的客觀描寫升到或然波。但是我們記得舊物理學中的極重要的場的觀念。我們怎樣能夠描寫物質的元量子的

與場之間交互作用呢？假使爲了對於十個質點作量子的描寫，必須用三十因次中的一個或然波，則對於一個場作量子的描寫便須用無限因次中的一個或然波了。從舊的場的概念過渡到量子物理學中的或然波的問題是非常困難的。這方面的升高一層不是容易的工作，解決這個問題的一切嘗試都是不圓滿的。還有旁的一個根本的問題。從所有關於舊物理學過渡到新物理學的推論中，我們所用的都是舊的相對論以前的描寫法，把時間和空間分開來處理。可是假如我們想從相對論所主張的古典的描寫法開始，則升高到量子問題似乎更要複雜得多。這是近代物理學所研究的另一問題，離完全而圓滿的解決還遠得很。還有一個困難，便是如何做出一種關於構成原子核的重的質點的物理學。雖然實驗的材料已經有了許多，並且有了許多解決核的問題的嘗試，但是關於這個範圍中的一些最根本的問題我們還是茫無所知。

量子物理學毫無疑問解釋了很多種事實，大部分在理論與實驗間得到美滿的一致。新的量子物理學使我們離開舊的機械觀念愈來愈遠，要回到原來的位置似乎更不可能了。但是無疑的，量子物理學還必須根據兩個概念：物質與場。在這種意義上說，它還是一種二元的理論，還沒有實現那化一切爲場的概念的舊問題。

未來的發展是否沿着量子物理學所選擇的路呢？或者是否會有新的革命的觀念介紹到物理學中來呢？發展的路線是否會和過去所常見的那樣突然轉向呢？

在過去幾年中量子物理學的一切困難都已經集中在主要的幾點上。物理學正在焦灼地等待它們的解決。但是我們沒有方法預知在甚麼時候和在甚麼地方這些困難會得到解決。

物理學與實在

本書把物理學發展中的最基本的觀念的大體的輪廓敘述過了，從中可以得出怎樣的結論來呢？

科學不是許多法則的彙集，也不是許多互相無關的事實的總匯。它是人類心理利用自由發明的觀念與概念的一種創造。物理學的理论是想構成一幅關於實在的圖畫，而把它與廣闊的感覺印象世界連繫起來。我們的心

理上的創造是否正確呢？其唯一的標準便是看我們的理論是否而且怎樣構成這樣一個連繫。

我們已經看到，由於物理學的發展，創造了新的實在。但是這種創造的歷史可以追溯到有物理學之前。最原始的一個概念便是一個物體。一株樹，一匹馬，與任何一個物質的東西的概念，都是以經驗為基礎的創造，不過產生這些概念印象，比較起物理現象世界來，是很原始的罷了。一隻貓戲弄一隻老鼠，也是在用它的思想創造它自己的原始的實在。貓對於它所遇到的任何老鼠都是同樣地反應，這種事實表示它也構成了一些概念與理論，這些概念與理論便是它在感覺印象世界中的引導。

『三株樹』是與『兩株樹』不同的東西。『兩株樹』又是與『兩個石子』不同的東西。純粹的數目 2, 3, 4, 5……等概念是從這些物體中抽象而得的，這些概念便是有思想的心靈為描寫我們世界的實在的一些創造。

心理上關於時間的主要觀的感覺，使我們能夠把印象排成一定的秩序，使我們能說一件事在另一件事之先。但是利用鐘錶把時間止的每一時刻和一個數連起來，把時間看成一個一因次連續區，已經是一個發明了。因此歐幾里得幾何和非歐幾里得幾何以及把我們的空間看成三因次連續區的概念，也都是一種發明。

物理學實在是由發明質量，力與慣性系統開始的。這些概念都是自由的創造。它們產生了機械觀。在十九世紀初年的科學家看來，我們的外部世界的實在是在許多質點，質點之間有些簡單的力作用着，而這些力只與距離有關。他們想始終用這些關於實在的基本觀念解釋一切自然現象。由磁針的偏轉所生的困難，由以太構造所生的困難，使我們創造一種更複雜的實在。電磁場的重要發明便出現了。必須用一種勇敢的科學的想像力，才能完全發現，要整理和理解現象，重要的不是物體的行為，而是在物體間的某種東西的行為，就是說，場的行為。

以後的發展既毀壞了舊的概念，又創造了新的概念。絕對的時間與慣性的座標系為相對論所放棄了。任何現象的背景不再是一因次時間和三因次空間的連續區，而是具有新的變換性質的四因次時——空連續區，這又是一個自由的創造，慣性的座標系不再需要了。每一個座標系都是同樣地適宜於描寫自然界中的現象。

量子論又創造了新的和重要的關於實在的圖畫，不連續代替了連續。放棄了支配個體的法則，出現了或然法則。

近代物理學所創造的實在確是與昔日的實在離得很遠。但是任何物理學理論的目的始終還是一樣。

我們想藉物理學的理論的幫助，在觀察的事實的迷宮中找一條出路，以整理和理解我們的感覺印象。我們希望觀察的事實，能夠從我們的關於實在的概念中邏輯地推論出來。假如不相信我們可以用理論的構造把握實在，假如不相信世界的內在和諧，決不能有科學。這種信念是，而且永遠會是一切科學創造的根本的動機。在我們所有的努力中，在每一次劇烈的新舊觀念的鬭爭中，我們可以發現一種永恆的求解解的欲望，和對於世界的和諧的始終不渝的信仰，而在求知上所遭遇的困難愈增多，這種欲望與信仰也愈增強。

總結

在原子現象範圍之中有各種各樣的極豐富的事實又使我們不得不發明新的物理概念。物質有一種粒子的構造，它是由元質點，物質的元量子所組成的。電荷也有一種粒子構造，而——從量子論的觀點看來最為重要——能也是如此。光子便是組成光的能的量子。

光是一種波呢，還是一陣光子呢？一柱電子是一陣質點呢，還是一種波呢？這些問題都是實驗逼迫物理學去研究的。要答覆這些問題，我們必須放棄描寫在時間中所發生的原子事件的方法，我們必須更加擺脫舊的機械觀。量子物理學所做出的定律是支配集團的，而不是支配個體的。所描寫的不是性質，而是或然率，這些定律不預言系統的將來，而是支配或然率在時間中的變化的，而且只涉及許多個體所組成的大集體。

「物理學的進化」勘誤表

頁 行

誤

正

九	二	再用點線……	那用點線……
一〇	一六	在顯微鏡下……	在顯微鏡下……
二七	七	……在室間中下降……	……在空間中下降……
三三	八	由於理論方面用實驗方面……	由於理論方面與實驗方面……
四七	八	卻需要創造和想像力	卻需要創造的想像力
五〇	四	……色的微粒也不同，紫色的力最大，而紅色的力最小，實為依照……	……色的微粒所受的力也不同，對紫色的力最大，而對紅色的力最小因為依照……
六四	二〇	前面的第十四圖	前面的第十七圖
七二	一三	……想像第十四圖……	……想像第十七圖……
七三	一七	……力學定力……	……力學定律……
七四	一六	……一個俱有電荷……	……一個具有電荷……

七六	光線的繞射……	五
	……和電的性質之間……	
	我們必須用四個數，而不是用兩個數……	八
一〇八	實爲當他……	四
一一五	……幾何學中的物體……	五
一一九	因爲兩個觀察者……	一
一二〇	因爲兩個觀察者……	一
一三四	……引力場中的兩點……	一五
	……原子的質量雖然小……	三
	……重要觀念加以……	九
一四一	……在面前的……	一二
一四七	……質點的簡單的力……	三
一五三	……量子物理學……	四
一五四	……標準的……	八
	……古典的……	五

8503

520.2 物理學史

4407 Albert Einstein

國立邊疆學校
圖書館

借閱者注意

- (一) 加意愛護勿失原有形狀
- (二) 損壞或遺失應照原價加倍賠償
- (三) 借閱以一星期為限期滿欲續借者須持書至館聲明但本館於必要收回時須即繳還
- (四) 逾期不歸還者應照章終金

中華民國三十四年十一月重慶初版
上海初版

（92173 滬報紙）

物理學的進化一冊

The Evolution of Physics

定價國幣叁元伍角

印刷地點外另加運費

Albert Einstein
Leopold Infeld

劉佛年

上海河南中路

朱經農

商務印書館

商務印書館

版 權 所 有
翻 印 必 究

著 者 劉 佛 年
譯 述 者 朱 經 農
發 行 人 朱 經 農
印 刷 所 商務印書館
發 行 所 商務印書館

3
202-9
(4)

