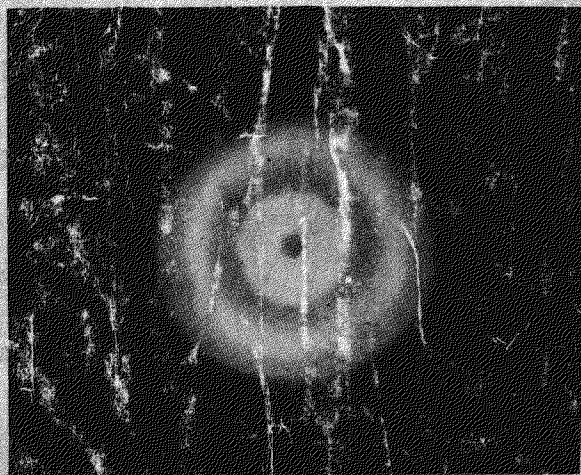


自然科學小叢書

物理學之新境界

PAUL R. HEYL 著

高孰可 譯



商務印書館發行

自然科學小叢書

物理學之新境界

Paul R. Heyl 著
高 執 可 譯

王雲五 周昌壽 主編

商務印書館發行

中華民國二十四年六月初版

(52171.2)

自然科學
小叢書
物理學之新境界一冊

New Frontiers of Physics

每冊定價大洋叁角伍分

外埠酌加運費匯費

原著者 Paul R. Heyl

譯述者 高執可

主編者 王雲五

發行人 王雲五
上海河南路

印刷所 商務印書館
上海河南路

發行所 商務印書館
上海及各埠

版 翻
權 印
所 必
有 究

(本書校對者杜其壘)

原著者序

寫物理的作者，在寫的時候應當負有某種責任。他當使每個讀者能漸漸欣賞到物理在科學集團裏之地位。

你去問一個化學家關於他日常應付的原子和分子的性質，以及其化合時，力的作用，他會打發你去向物理學家找答案。你向一生物學家問到他研究的生命組織的變化，他很容易告訴你，這都是複雜的化學作用。你要是探問心理學家對研究方面的意見，他會和你說他研究的主要對象是生理學之複雜者。心理學家靠著生物學家，生物學家靠著化學家，化學家還得依賴物理學家。但在物理學家與自然之間有直接的關係。

物理學家的工作是在於明瞭自然的基礎如物質，能及其間之相互作用。這種東西之趨於複雜者便成爲化學家，以及於生理學家，以及於心理學家研究的資料。工程師，地質學家，天文學家之

中沒有一個能利用到純粹是他自己的理論。他們所用的，全是廣義的物理學化學的基本原理。物理學家真可說是科學的基礎研究者。

有一個古的故事說到，蘇羅門 (Solomon) 王廟建造的工匠之爭論。他們爭論著誰的工藝是最重要的。金匠說這廟之雄壯美麗是他手藝的結果。木匠說所謂美麗是要附在他造的骨架上面。石匠說要是沒有基礎廟都不能有。

蘇羅門的智慧在解決這爭論再適合也沒有。他叫各工匠的工頭來，聽他們報告他們的辯論。然後再對一個個地問：『誰造你的工具！』由每人得到同樣的答語：『鐵匠。』

蘇羅門說：『鐵匠在那裏把他帶來？』

那鐵匠還滿身垢污由鐵鋪裏被人帶到王前。

蘇羅門問：『告訴我誰製造你的工具？』

那鐵匠慌亂地向他的鐵鎚和鐵鉗望了一下，因為他應王的召見，急忙之中，無意把這兩件東西帶來。

他笑一笑說：『我的工具我祇能自己製造工具！』

這個戴了冠冕穿了長袍的王走下寶座，示意鐵匠上那空的寶座。

他說：『看著這是工匠之主宰！』

由一方面看，我們可以說物理學家是一個基礎研究者。另一個看法，他是很時髦的，這並不是說他毀壞一切舊的。過去物理之進步是在，擴充古時的物理研究境界，加入不少新奇的觀念。就是最與物理有接觸的人們，也不容易把這境界的情狀看得清楚。要是我們再想前進，我們必須把這一點弄得清楚。不然我們就無法對付新的獨立的事實。此書之列在這一輯叢書「此書爲大衛 (Davis) 主編阿波里頓 (Appleton) 新世界科學叢書之一 (譯者注)」之裏，編者與發行者之目的卽在於此，著者書寫這本書也存有這種觀念。

著者海爾 (Paul R. Heyl)

物理學之新境界

第一章 過去——十九世紀之末的物理學（一八九五年）

從前常常有人說波士頓 (Boston) 不算一個地方，算是思想的情狀；同樣地我們可以說十九世紀末葉的物理，是物理學者的思想的情狀。

在十九世紀，物理學的進步，和別項人類的活動一樣地快。關於這過去的敘述，別本書裏也可以找到，在這裏我可簡單地說一說。十八世紀的物理是一件稀疏沒有連絡的東西，裏面主要的內容是不連貫的事實，當時所認的宇宙本質，差不多有半打之多——物質，熱，光子，電，磁，與燃素 (phlogiston)；到一八九〇年這些東西已互相連絡團結成一精密的組織。這組織是基礎於三個基本概念：物質，能，與能媒。

那時的物理學家對這堅密的組織覺得滿意。大家都認為畢竟這理論已跑上軌道，將來我們祇需發展與擴充以前定下來的大綱而已。事實上科學家很有充分樂觀的理由。洛基 (Lodge) 在一八八九年演說詞裏曾說：

『現在是自然科學突進時期。幾個月，幾星期，差不多幾天都在進步。以前發現的一串小波現在卻合成一個極大的波，在這波峯上我們可以看出未來的一種偉大的包羅一切的理論。這種猶疑不決的情狀，簡直使人發狂，有時甚至於痛苦。一個人的感覺好似一個小孩在亂捺一個棄置的風琴，好像有一種看不見的能力由這琴箱吐出很生動的氣息。他驚奇極了，手指一碰，就一個音應着而生。他差不多能隨便召喚任何音出來，他猶疑着。一半是高興，一半是懼怕。他恐怕這音會使他耳聾。』

但到一八九五，這種態度已變，一種奇怪的悲觀的態度散佈在人心，把以前的樂觀的態度趕走。大家都相信，差不多所有的大發明都已被人做過。物理學的教授警告他們的學生說別項科目比物理有希望得多，將來的物理祇是餘下的滓質，次要的事實，以及永遠不止的要求：『再來一位

小數，」

這種思想的情狀是很奇怪的，我沒有特殊理由，爲什麼態度變得這樣。現在還有活着的，一八九〇至一八九四的研究物理的人，我們可以由他們證實當時物理界確有這種態度。要是沒有他們口頭傳話，我們現在不會曉得當時的這種情形，因爲當時的科學著作上沒有這種記載。

這不過是在天亮之前的黑暗時期。因爲在一八九五鑾琴 (Pontgen) 發現愛克司光線，於是我們又在波峯上面。再等十年，我們又看到放射體的發現，量子論的巧妙，及愛因斯坦 (Einstein) 發表第一次相對論的論文。汗塞的冰塊散了，而那「發現」之河再飽滿漲起來。

要正確明瞭現代物理的背景，我們先得很清楚地知道剛在鑾琴發明之前的情狀。因此我們應當詳細考察那時三個基本概念——物質，能，與能媒。

大多數人承認物質是原子構成的，在上一世紀之內這觀念沒有經過什麼改變，雖然有幾個落伍的人不同意於這個學理。最後一個有名的反對者是維愛納 (Vienna) 的馬赫 (Ernst Mach)，他在一九一六年死的。

物質是一個很分明的概念。物質有兩個特著的性質，惰性與引力作用。從這兩個性質我們可以區別和認明物質。隨便什麼人都自然而然地用這兩性質去斷定一個封閉的圓桶是空的或實的。——即是說有沒有物質在內。這人可以輕輕地踢那桶，看看那桶容易不容易滾動，或者把這桶舉舉看。要是不容易踢動，那麼按科學的說法就是有惰性，試的人可以斷定裏面有東西。若是這桶很重，不容易舉起來，換句話說就是這桶的引力作用很大，他可以得到與上面相同的結論。用這兩試驗，我們可以斷定一樣東西是物質或不是物質。若不是物質，那就該是一種能或是能媒的表現。

十九世紀的早年，成立了一個學理——物質的量不因物理或化學的變化而變大變小。這就是質量不滅定律。

物質本身是無生命的東西。我們對物質的主要興趣卻在於牠是能的運載物。

能分明是十九世紀的觀念。他們把前世紀所謂「不可衡量」這特性歸附於能的觀念。廣義的說法，能是一種做工作的力量。當然須有一樣東西才能應用這力量，於是能在物理理論的組織上是一個次要的觀念。譬如玫瑰花之美麗在於牠的顏色，但是若沒有這花或是別種物質的根據，

決不能有這顏色。所以能是物質的生命。要是單獨說能，那是一無意義的。

當時不把能看作如物質那樣之有原子構造，他們以為可以無限止地分下去。於是一樣物體裏的能可慢慢地加增或減少。當時認為能有多種形式：熱、光、電、磁，以及於純粹力的能之有動能與位能。他們並且以為這多種形式的能可以互相變換。這原理叫做能的相互關係論。並且那時已有實驗證明過，在這種變換之中，能是不會損失也不會憑空產生。這就是所謂的能量不滅定律。這個定律之成立，可算是十九世紀之大勝利。

若能是不能創造與消滅，又是不能單獨存在，那末日球的熱能怎樣會及到我們？費了八分鐘的時間，這熱能經過多少萬里的空間——這空間之真空程度比我們實驗室的真空高得多。什麼東西把這些能帶到我們這裏來？

由於這一點還加上別的關係，我們創造了空間的能媒，並且歸入為當代自然科學的宇宙本質之一。能媒的觀念在牛頓 (Newton) 與海金斯 (Huygens) 的時代已經有的。直到十九世紀前半期，光的波動說替代微子說的時候，才恢復了這概念。從前曾有人以光為一種波動。他們當然

要懷疑，這是什麼東西的波動？因此產生半滑稽的能媒定義：震動這動詞的主詞。

多數物理學家把能媒看爲一重大問題。這問題是這樣，我們可以假設空間裏佈滿着一種媒質，要不然就該承認作用能直接及於遠處。這樣明白地說一說，沒有幾個人還會有疑問。雖然能媒既不可見又不可捉摸，我們之認能媒爲本質之一，好像能媒是如物質一樣地真實存在，我們的理由與物質之被認爲本質之一的理由相同。一八九五的物理學家說：『我們之知道物質是完全根據於其性質。實在我們之知道能媒的性質，與知道鐵的性質，一樣地熟悉。我們知道聲波在鐵裏以某速度進行，我們也知光在能媒裏傳佈的速度。我們知道鐵是不透明的，而能媒是透明的。鐵有阻力，而能媒一定是絕對沒有阻力的，不然天體行動要受着阻力而減低其速度。我們知道鐵的密度是八，而最近克爾文 (Lord Kelvin) 算出能媒的密度爲 10^{-18} 。我們還能再要求什麼？』

在能媒是否由微粒構成這問題上，物理學家的意見稍有不同。但大家都認爲，即使能媒是由微粒所組成，——相當於物質之原子，——這微粒大小與物質微粒比當可算爲無限小。

臨到馬克司威爾 (Maxwell) 的光的電磁理論，能媒之承認，成爲必須的，要是可能的話，簡直

是強迫的。因爲這理論能解答我們久長討論到的電的性質——電是物質或是能？馬克司威爾另外安置電和磁，他把電和磁由物質的領域裏取了出來——十八世紀把電和磁歸附於物質裏面——再把他們搬到剛才成立的能的領域裏，將牠們看作能媒裏面的一種能。

於是能媒觀念變得很有名望。有一時竟有人把物質附屬於能媒，作爲能媒情狀之一。這是克爾文造成的。他在一八六七創議物質的原子，也許是爲能媒裏的一種旋環，如空氣裏的煙圈一般。在大英百科全書第九版（一八七五）馬克司威爾一篇『原子』裏可以看出當代物理學家對克爾文說法的信仰。直到一千八百八十幾年，多數人才放棄這種假設。因爲那時用數理研究的結果知道這種旋環一點不像會有引力的性質。

我們可以由洛基在一八八二的演說詞裏，可以看到當代物理學家心目中能媒觀念之簡單情狀：

「一樣連續的東西充滿了空間；這樣東西能顫動而生光；能折散爲正負電；旋動之後成爲物質；牠的傳佈是連續的並不是個別的衝動組成的。物質有了牠才可能有刺激與反應。這是能媒及

其功用的近代觀。』

這是十九世紀終了幾年的，自然科學的大綱的簡單內容。這樣一個分明又有連絡的理論，裏面每個現象有一個相當地位。這樣一個理論在牠統治範圍之下是很一致的，並且很可使人感覺滿意。雖然克爾文在皇家學院（Royal Institution）一九〇〇年四月廿七的演說詞曾說青天之上有兩朵雲。

我們不能不想到克爾文用這幾個字的時候。他有預言這兩朵雲有變大可能性的意思，正如伊利亞（Elijah）為希伯來（Hebrew）預言家所見者。事實恰巧如此發生。他說的一朵雲是有名的邁克爾孫，摩黎（Michelson-Morley）關於能媒移動的實驗，這實驗促成相對論。另外一朵雲是能的分佈的統計理論之缺點。同樣地這理論引導我們到量子論。

人們在對過去覺得滿意，對將來抱悲觀的態度中，直到十九世紀之終了。

第二章 物質及其構造

在廿世紀之內，自然科學內部發生了多種變化，但尚有少數觀念，未有改變。其中之一即是「物質的構造爲顆粒狀或爲不連續」的學理。不但「分子與構成分子的原子」的概念仍爲現代所認可，而現代的物理還進一步，將原子的組織介紹給我們。

在十九世紀，科學家將分子定名爲物理變化中最小單位物質，而原子爲化學變化中最小單位物質。這兩種變化之不同處就在化學變化是物質組織上的變化；而物理變化僅是性質變化而已。所以分子是當時物理學家的最後單位；而原子卻是化學家的最後單位。至於原子是否可以再分爲更小單位，當時認爲是理論上的問題，因爲並沒有現象，需用這種「原子組成」的假設來解釋。在一八九六年柏苦勒爾 (Bequerel) 之發現放射物質，與這個觀念以一打擊。這新的現象是不能單拿分子與原子來解釋，還用得着比原子更小的單位。於是物理學家立刻跳過化學家的範

圍，而急忙於探考原子的組成部分的活動。這些組成部分的作用好似充電的顆粒一樣。帶有負的顆粒名爲電子；帶有正電的是陽電子 (proton)。

對於這些造成自然界的單位，我們就想到兩個問題：牠們有多麼大？牠們像些什麼東西？科學家的疑問也不過像普通人一般，但在回答方面說，那就兩樣。

對於第一個問題，至於說到分子就很確定，說到原子就稍差一些，說到陽電子與電子更不確實了。對於第二個問題我們所已知道的可以說是絕對沒有一點。

在十九世紀所成功的總算有點成績，其中之一便是分子大小的確定。於一八〇五年湯姆氏楊 (Thomas Young) 的估計——可以算最早的——後來被七十五至一百年後的雷利 (Rayleigh) 與別人證實了。他們的結論是利用薄層的液體性質之研究來達到的。一滴油放在水面上會伸展開爲不可思議之薄的膜。牠的最低限度的厚至少爲分子的直徑。若油的密度是已知的，此滴油的重量是已知的，於是此滴油的容積可求出。我們再把膜的面積量出來，那麼牠的厚度很容易算出。利用這種實驗，算出液體的分子的直徑爲一萬萬分之一生的米突 (公分) (10^{-8} cm.)。根

據別種實驗的結果，簡單氣體（如氫，氧，氮，二氧化碳等）分子直徑為 10^{-8} 的二至三倍。至於固體分子，據布刺格 (Bragg) 在廿世紀的工作，應用愛克司光影子所得到的分子直徑為一至五倍於 10^{-8} cm.——依據不同的物質而變其值。

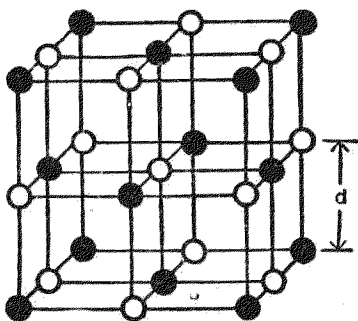
這種利用愛克司光所照的相，很不容易看出分子中原子的空間的排列位置。但是一旦看出來之後，我們就得到很滿意的結果。至於原子本身的結構，我們至今還沒有知道些什麼。對於這件東西，在下一章裏尚須討論到。目前先把物質的結構用圖來解釋一下。我們可以看布刺格氏得到的幾種足以爲代表的物質的構造的圖解（見第一圖）舉個例，岩鹽 (rock salt) 的氯原子與鈉原子次第的鑲在一個立方體的格子的頂點上。金剛石的結構是很特殊的，牠是由碳原子組成四面體 (tetrahedron)，其中每個頂點有一個碳原子，而在中間還有一個。

所有可用的證據都表示分子的直徑——無論是氣體，液體，固體——爲數倍於 10^{-8} 公分（厘）。而原子的直徑約在 10^{-8} 厘左右。

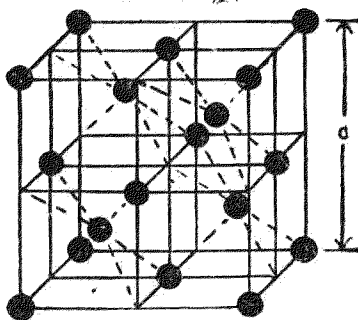
原子的結構，也就是物質究竟的結構，仍是一個值得注意的大問題。克爾文在他將死時，說他

有好幾年每天都想起這個問題。各色各樣的原子模型已產生了不少，但後來每一個產生不久另外一個又取而代之，所以我們的概念時刻在改變好似活動電影一般。表面上是如此，但在實質上我們察得出，這變動是一個有方向的趨勢。

古人也推測到有原子這種東西，但他們是沒有受實驗結果所支配，他們所有的祇是玄想而已。在科學歷史內，第一個原子模型是牛頓所提議。他在「光學」裏說：



食鹽 (NaCl)
 鈉原子 ○ 氯原子 ●
 $d = 2.8 \times 10^{-8}$ 厘米



金剛石 (C)
 $d = 3.6 \times 10^{-8}$ 厘米

第一圖 氯化鈉及金剛石分子內的原子排列形狀。

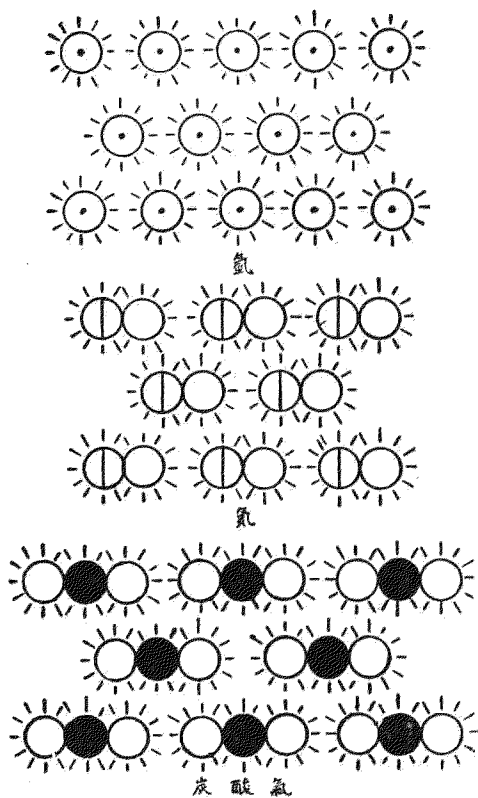
「我以為大概上帝造成一切東西的顆粒是實體的，有質量的，硬的，不可穿透的，可移動的。這種顆粒有這樣大小，形狀，各種性質，如此分配於空間，以致能達到上帝造牠們時的目的。這種原始顆粒都是固體，牠們的硬度比各種牠們所組成的有孔隙的物體，不知大多少。牠們是磨不碎敲不破的。普通的能決不能把上帝自己所創造的顆粒中之一分裂開。」

牛頓的原子形狀，雖是內容很空虛，但其中包含兩個大的意義。第一，對於他，物質是基本的實質。別的東西可以拿物質來解釋，但物質不可取別的東西來解釋。第二，他以為原子是無極限的硬，——如燧石屑一樣硬——他解釋原子所構造的東西之所以軟，是因為這些硬的顆粒的排列與其間相互的作用。

二百年之後，克爾文（我們就將要看到）把這種態度反了一下，把我們觀點轉了一個向，這方向大概不會再改變了。

在一七五八意大利人波斯科維赤（Boscovich）創了一個很玄虛的原子概念。他把牛頓的顆粒縮小至數學的點子，名為「力的中心點。」這概念是太過玄虛，太過數理化，所以不能認為趨

近於所謂的實體。所以道爾頓 (Dalton) 仍回復到牛頓所認為有限大小的原子。在他的「化學哲學的新系統」(New System of Chemical Philosophy) (一八一〇) 書裏，他把以前所認為符號式的，形式上的原子緊湊成一團，而組成各種物質的分子。(見第二圖) 道爾頓如牛頓一樣，只有



第二圖 道爾頓分子形式

簡單理論。但確定的概念一直到克爾文才有。他在一八六七年創了很有名的旋渦（vortex）原子的假設。

當時已得普遍承認的「能媒」就是克爾文概念的根基。「能媒」已做了不少事，或許牠還能多做一點。連絡與混合是當時常做的事。也許「能媒」與物質也可發生關係。

克爾文的創議是說原子即是能媒中疾轉的旋渦環，如空氣中的煙環。能媒既是絕對沒有阻力，所以這樣一個疾轉的環，若是一經開始轉動就永不會停止，於是適合了物質的永久性。真如一個煙環的顫動，能自圓圈形顫動變到橢圓圈形顫動或是局段的顫動，而這旋渦環也能如此顫動，散出波動於週圍的能媒中。換句話說，即是放光。

這建議是很有膽量的，並且是獨創的，所以對於當代的科學思想有很深刻的印象。牛頓以為硬的東西可以造成軟的東西，而克爾文把這概念反了一面，使我們看到物質之所以硬是由於軟的東西以快速度轉動的結果。我們可以引幾件常見的事物來證明這新觀念。救火水龍頭裏噴出的水，可以將正在劈砍的斧推歪。磨亮東西的破布輪，在靜止時，我們可想像出牠是如何之鬆軟，但

在很快轉動時，那就很硬了。要有很大的力量才能使牠彎曲。看起來這個理論是很有吸引力。但要完全接受這理論，有一個很難的條件必須滿足。馬克司威爾對此說：『我覺得我是太不留情，因為我說這幼稚的理論是不能解釋引力作用。』這理論是不能解決那個不可少的條件——引力作用。

雖是這理論的本體是死了，但他的精神至今還存在從那時起，每個原子模型包含一個概念：物質的本身不是一個實質，而是別一種東西表現出的狀態而已。

自旋渦環的原子失敗之後，有一代之久，沒有人像有膽量再嘗試一下。羅蘭得 (Rowland)

看見了鐵的分光景 (spectrum) 之有這麼多根線——各自代表不同顫動週率 (vibration frequency)。他有一次說：『我不知道原子大概是什麼，但原子一定是如一個鋼琴一樣複雜。』

約在十九世末了，梭諾爾咨 (Osborne Reynolds) 創造一個原子模型。也如克爾文原子相似，他的原子也是能媒的特殊構造，但他的基礎是有負的特性而不是正的。梭諾爾咨把原子不想為能媒扭曲成的結，而為能媒中的洞或孔隙。奇怪得很，這負原子會生引力。但牠還未令人認識牠

之前另外一個更能適應的原子概念已發現了。

有好幾年，很明顯地有一個趨勢，想在電和物質之間產生關係。早至一八九三湯姆孫 (T. J. Thomson) 依據了理論立場，表示出一個充電的球體在能媒裏動的時候就遇到阻力，而這種阻力的結果好似球體的惰性——也就是質量——會加增了些。由計算而知，當充電體的速度之大近於光時，這種效果方才能覺察得出。

在一八九三，這個暗示祇能引起理論上興趣而已，因為沒有東西能動得如此之速足以應用來做實驗。幾年後，情形改變了，放射體已發現了。這種東西能射出充正電與充負電的顆粒，而其速度比以前所知道的任何東西的速度要大得不少，有時這種速度也近於光的速度了。在這裏，似乎湯姆孫的增加質量的假設可有機會去實驗一下。不幸得很，我們的難題在於不能夠得到單獨質量，所得到的祇是顆粒上充電量與其質量之比 $(\frac{e}{m})$ 。

考富曼 (Kaufmann) 發現，對於較快的顆粒，上面所說的比例，是比慢的小些。解釋這事實，可由兩方面說：當這些顆粒的速度加增之後，質量加增或是充電量減少都可。

普通的意見傾向於質量加增這一說，這是多半因為理論已預先迎合這方面，並且我們得不到暗示說充電量有改變之可能。但目前沒有實驗可確定這變質量的學理是否對，所以此學理在當時仍認為假定的。大家都以為若是能計量每顆粒的充電量就可解決這問題，但這是不容易做到的。湯姆孫，威爾孫 (C. T. R. Wilson) 與威爾孫 (H. A. Wilson) 後來能把一羣的顆粒的平均充電量求出。但我們不能擔保說每顆粒的充電量沒有差異。最後於一九〇九年密立根 (Millikan) 能量出每顆粒的充電量——不論其質量之大小——他還發現這些顆粒有相等的充電量，無論牠們的電由何而得。這最小的充電量——可作為電的原子——名為電子充電量。現在被認為自然界基本常數之一。由 e 與 m 之比，現已算出充負電的顆粒之質量 m 為 $1/1800$ 倍於氫原子，此為我們所知道的物體之最小的了。而那充正電的陽電子簡直似充電的氫原子。

至於電子再分的可能性，仍不為當時的學者所否認。有好幾個學者，其中最有名的是愛倫哈富脫 (Ehrenhaft)，都說他們由實驗中發覺有比電子的充電量更小的東西，密立根把這件事澈底研究，所得的結論說在一九二四以前，沒有可靠的證據可以說有一樣東西牠的充電量能有比

電子的充電量更小。對於這方面的實驗工作還在進行中。其中最近的一個是愛倫哈富脫與瓦司歐 (Wasser) 在一九二八年所成的。

也許考富曼的實驗中所改變的是充電量而不是質量。這種可能性，也可得人注意，加以推測。我們可以參考格來希 (Gleich) 與安德得孫 (Anderson) 的幾篇著作 (1928)。安德得孫的主張說變充電量的假設較變質量的假設來得適合於密立根所觀察的宇宙線。

由考富曼的及其他的實驗，我們明瞭至少有一部份的質量是由電所生的。自然，然而我們就問：『爲何全部的質量不可由電產生呢？』回答這問題雖不能即刻成功，然而可以預先造一個結論。物質的神祕行爲已局部解決了。第一塊磚石，已由道路上取去；駱駝的鼻子已鑽進帳幕了。

後來這問題就證實出來。考富曼計算出，他實驗時所用的顆粒在動得慢時，所有的「電質量」會佔到總質量的四分之一。在計算時，他假定那顆粒有如一小金屬傳導體的性質。他並且很小心指出，倘若換了一個假設之後，其論結又將不同。湯姆孫採用了較簡單的假設——即是說那顆粒無金屬的傳導性，其行爲如一充電之點——而他發覺考富曼的結果符合於「電質量」之爲顆

粒質量之全部』之假設。

質量之完全爲電的性質，這個現代概念，現在是站在預先假定的理論與實驗混合的立場上。理論祇要自己內部沒矛盾，並且對實驗結果符合，就算對的。現在物質的電的理論之情況，也就是如此。雖然我們承認完全不知道電的究竟的性質，我們還是暫時接受物質與電的相互關係的概括原理。

我們不可把這種態度看作以更少知道的事物去解釋少知道的事物。我們（至少在表面上）對物質很熟悉，但我們對牠究竟的構造能知道多少呢？假使我們能把兩個神祕的事物減爲一個，豈不更有價值嗎？

現在還可容許一個正確的新理論：『祇看他們的效果就可知道。』倘若以後有實驗或新發現能完美地證實這個理論。而又有一個原子構造模型建築在這電的物質之理論上面。假定此原子比以前所提議出的來得適合各種現象。那麼反過來這原子模型就可有益於實驗，即是牠能指示出幾條有希望的研究的路徑。

在未敘說這個模型之先，我們要有一個正當的心境。我們決不可因某種原子模型的成功，受其欺騙，而相信那是一個新發現。至今沒有一個模型能擔得起新發現這個名義。把牠們名爲發明較妥當些。現在把推理的進展寫在下面：

由實驗與觀察而知物質的原子要做幾件事。我們應用巧妙的發明力去想像出一個原子模型能做這幾件事。由新的實驗，我們又知道一個原子還能做幾件新的事物。倘若我們造的型能隨機應變，也能成就上面的幾種新事物，能成就的愈多，當然是愈好。但遲早總有一日發現的步驟太快而爲原子模型所跟不上。常有發現某種事物，爲這模型所認爲不能成就的。在這種情形之下，我們要把模型改良一下，或是丟掉，再製造一個新的。後面的辦法適用於克爾文旋渦原子的情形。前者屢次應用於我們現在所要說到的模型的進展路程中。

很早提議的一個原子的電模型便是湯姆孫。他以爲這個模型包括一個有原子直徑（約爲 10^{-10} 厘米）大小的正電球，內部含有一個或一個以上的負電（電子），近似玻璃缸水中的金魚。按照公認的電的吸力定理，禁錮在裏面的電子，在正電球的中心附近，以一定週期而顫動。於是依據

舊的理論應當生出特種週率與波長的光浪。這就足以應付氣體分光景的亮線之解釋。不至於此，這模型還能應用於西曼 (Zeeman) 所發現的奇怪效應——那些分光線爲極強磁場所拆散的作用。但這種原子模型，在另外幾方面是失敗的：牠不能說明斯塔克 (Stark) 發現的同樣效應——分光線爲電力場所拆散。並且牠也不能解說另外一個被蓋革 (Geiger) 與馬茲登 (Marsden) 所發現的奇特效應。

這些實驗者發現放射體所射出的充正電顆粒，當撞碰於或趨近物質原子時，有時他們的方向會轉了九十度的角。這種情形是發生於顆粒行經薄金屬片時。要使這樣高速的顆粒轉向這麼大的角度是非爲湯姆孫原子所辦得到的。困難就在於正電球還不夠密不夠結實。

要解決這問題，魯塞福特 (Rutherford) 建議將湯姆孫原子加以改良。第一步，他假設那正電球壓縮到適當半徑和密度。於是那些電子便露在外面，而引力定律又需按情形而變更。因爲這新定律與日球及行星之引力定律相同。魯塞福特就提議說那些負電子繞着正電核而環行。環行的規則是依據天體所用的天體力學，這些環行的電子，按照電的定理，也如湯姆孫的顫動電子之

能放光。這種光波之週率與長度是由電子環繞的週期而定的。

把魯塞福特的原子詳細攷察一下，就可發現一個嚴重的缺憾。假使一個繞行的電子放射能成爲光，那末牠自身行動的能必致消耗去，並且牠的行動速度當逐漸減小。按照力學的理論，這電子減小了速度的結果，他的軌道會以螺旋形的行動趨近中心的核。但軌道縮小之後繞行的週期(Period)就會改變。於是這種電子若是放射光，那末所發出光的波長當連續地變更。

但由分光景所得到的證據與上面的結論相反。發光的氣體的分光景的特性就在於牠有固定，明顯，光亮的線，這些線表明着各種的波長，如今線既是固定，所以波長也不會改變。這些線的波長如此之不會改變的，如此之能確實地指示各種特殊的原素以致於我們在分光景裏能利用牠去認出極少量的某種原素，且我們還以其中之一（鎘的紅線）的波長，有人提議作爲標準公尺的根據長度。因了這種緣故，魯塞福特的原子模型就有被棄之慮。後來幸虧被波耳(Bohr)加以澈底的修改，方能存在。

波耳以很穩健的力量對付這件事。他說：「這個困難就在，令放射電子做他所不能做的事。補

救的方法是很簡單。我們只要不許那繞行的電子有放射本領就得咧。」

對這補救的方法，有兩種反對的理由。第一個就是說這補救方法是不合法。公認的電的理論，有了實驗上根據，說繞行的充電體當放射出能。波耳以爲這理由至少可暫不討論。但是還有一個事實的反對：原子能放光。

波耳說：『要對付這個問題，我們可假設一個電子在他軌道上行動時不能放射能，但在牠由一個軌道跳到另一個軌道的當兒，牠就會放光。在幾萬萬的發光氣體原子裏，有許多電子在這樣跳一下，所以看起來，放出的光仍是連續的。』

波耳又規定了第三個條件：倘若一個原子要改變牠的軌道，牠不能隨便選擇任何距離中心大小的軌道。牠可以由幾個有規定的軌道中選出一個，但在這些軌道中間的地帶牠是被禁止的。這些電子雖然須跨過這種地帶，但牠要約定不在這種地帶停留。波耳對這些軌道規定了幾個整數的關係。

這些基本假設是如此之武斷如此之反常，以致沒有人比波耳自己還要情願去接受。他之認

爲這些假設是對的，乃是因爲牠們應用起來成績很好。運用的結果果然是奏效的。以波耳原子去解釋物理化學事件之成功是出人的意料，灰生 (Whetham) 以此原子觀念爲魔鬼的。在這種爲人所反對的假設上，波耳與其工作者建築了一個確合真理的像，但這像的腳卻是泥做的。當時人們都以爲若有一個較適合並卽有同等效能的替代物發現，波耳的原子論就要被推翻。

這種觀念對於那些念過「行星式的原子」的人，是極驚奇的。但是這是因爲他們沒有知道這理論之根據。

實際上，波耳原子是特別幸運，因爲牠的長處很容易爲普通人明瞭，而其短處的性質是較難解較專門。那是毋須懷疑的，波耳原子之比擬於行星系對許多人是一個有力的保薦。自然的構造由原子到星體是劃一的。這是一個極有魔力的暗示。看起來，這假設是這樣美麗，以致我們認爲必對的。

詩人的哲學是這樣的。而科學家是不能把圖中的缺點置之不看。他的哲學是這樣說，假使我們能看見一原子的真構造，那一定是十足完美的，確不能更美麗了。

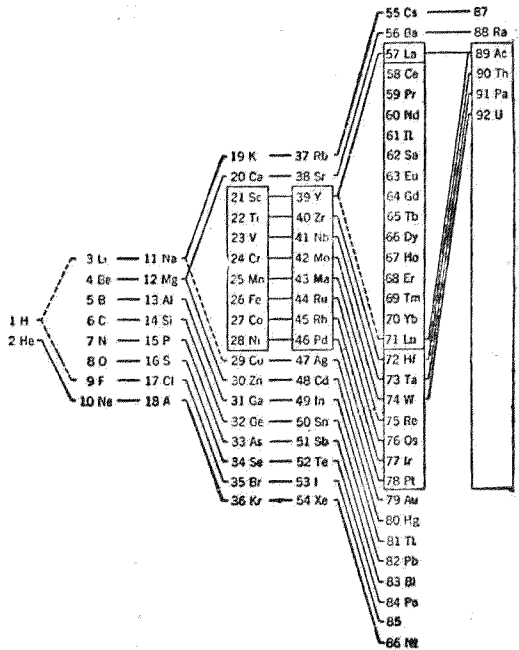
波耳的原子的長處是多得很。在效用方面，才力方面，與解釋事物的活動性方面，牠是遠超過一切以前所造的原子型。我們先說，下面一件事。就是自從普宰特 (Prout) 在一八一五創說所有的原素都由氫凝成，或倍數的氫合成的。而這波耳原子求證於這在人心中心中足足有一世紀之久的觀念。在普宰特的時代，這假設是很說得通。因為當時所知道的各原素的原子量是不精確。但是當後來承認氧的原子量並不是正十六倍於氫，並且在原素表中還有許多相似的例子。普宰特的假設就不爲人所理睬。當時有許多人覺得很可惋惜。

波耳恢復這個概念，不過形式上稍有改變。他把氫——最簡單的原子——看爲一個充正電的核，附有一個負電子作一行星。氦——在原素週期表中是第二個原素——他認爲是一個較重的核，附有兩個電子環繞着。在鋰 (lithium)——排列爲第三的原素——裏，這種環繞的電子卻有三個。就像這樣地繼續在軌道上加電子，核裏加陽電子，一直到鈾有九十二個環繞電子，整列的原素就此造成。

波耳這樣的累積而加大的步驟，不是永久平整而有規則的。據我們所設想，自然每個電子當

選擇一個最穩固的在許可範圍裏空着的軌道。普通點說，最有吸引力的軌道就在系統中頂外面一條。但有時一新由外到電子會穿過那外面幾層已全被佔的軌道，進到這系統內部有空隙的地方。在內部的軌道，原來因為吸引力太弱，故不值去注意。但因外面漸聚集了不少電子的影響，所以這軌道就漸變穩固，一直到牠吸引力大到能誘到一電子為止。

波耳指示出每次這種結構的不規則特性在理論上是可能。因為這種特性是符合於原素週



第三圖 波耳原素周期表

期表排列的特性。(見第三圖)在一特別情形之下，這理論已告訴我們，在外面的軌道至少要有十五個連續加增電子，然後電子才會丟了外面的軌道而去找尋裏面的軌道。這情形恰指着一羣接近的稀土 (rare earth) 元素。

這樣組成的波耳原子，實際上自成一個小天地。這小天地包含着直徑有 10^{-8} 厘米的小太陽系。有許多人估計中心核與電子的直徑的大小，他們的結論都以爲波耳原子是像太陽系那樣的散漫的結構。

雖然這個巧妙模型使那普宰特的舊說復活，但我們仍須想到對此假設的主要反對理由——各原子量並不是氫的整倍數。在有幾個元素，這種差異是很小，譬如說，氧與氫的比例是 16 與 1.008。在另外幾個元素裏，這差異就大了，譬如說氯的原子量爲 35.46。

後來發現這種小差異，可用電的理論中一點來說明。這理論一直等到「物質的電性」的理論爲人承認之後，方才引起人的注意。按照這理論所說，假使一個充正電的物體與一個充負電的物體放得夠近，牠們的總質量會稍減少些。這就名爲「填裝效應」。這種效應的可覺察的有效距

離是比原子直徑小得多。於是這效應只能在原子核裏產生。而原子核卻是全波耳原子的總質量所在地，並且（除了氫之外）一切原素的核都是由緊湊的電子與陽電子所組成，而陽電子比電子來得多，所以呈現出正電性。

原子量的數字都以氧為 16，氫為 1.008 為根據。好似以氫為單位來計算其他原子量來得合於論理。但是不及原來單位來得便利。我們要記得，在波耳原子論理，氫是唯一有單陽電子為核的原素，所以不會有填裝效應。而這填裝效應在其他所有的原素——這些原素都不是氫的整數倍數——都有的。

對於小差異已說了這許多。至於大的差異如氮這一原素，填裝效應就不足以解釋了。後來利用了一個新發現，才解決此等差異，這新發現就是指有兩個以上的原素同其化學性質不能分別，而原子量差至一或二個單位。這種相等性質且在原素表上是同位的原素。在希臘文名為「相同地方」——同位原素 (isotopes)。舉個例，阿斯吞 (Aston) 發現普通的氮是一個混合體，包括二種同位原素。一個原子量是 32，另一個是 34。這兩種同位原素的比例恰巧使得混合體的平

均原子量爲 35.46。氧與碳及其他幾個少數的原素都是單純原素所組成。牠們的原子量是整數。沒有一個同位原素曾被單獨分析出來。但是部分分析離已能做到。這種同位原素除了有不同原子量之外，同時還附有不同的物理性質，譬如說，密度與沸點。用了很費力的手續把氣體鹽酸 (hydrochloric acid) 經過幾次擴散 (diffusion) 作用，分離出兩份密度稍有差異的氣體鹽酸。用部份蒸溜法，水銀也可分爲同樣的兩部份。

我們可以看出，普宰特的舊假設，經過波耳原子幫助，就以改過的新方式出現。這改良過的方式就是說，各種不同原素的構造都以氫爲根基；並且（可以有細微的填裝效應之差異）牠們的原子量都是氫的倍數。

這個波耳原子我們已見到能應付許多疑難。但我們回想到旋渦原子的惡幸運，我們自然要問：『波耳原子能不能有引力作用？』

這是不能的，並且是毋須得的。

但這話包含什麼意思？是不是說引力作用的定律，自克爾文 (Kelvin) 時就已被換掉了嗎？

在這段時間裏，有什麼事發生？

回答是——愛因斯坦(Einstein)。

我們在下一章就要討論到愛因斯坦對引力理論供獻。因爲他的理論的結果，在目前我們說一個原子模型不再需要有能力去吸引另外一個同樣的原子。照愛因斯坦所說，引力作用不是質量的性質，乃是空間的性質。只談引力作用，各種原子型都是一樣好的。

我們自然不能恢復從前的原子型。近十年來，對原子行爲有許多新發現的事實，以致舊的觀念決不能通行於現在這個時代。就是說波耳原子牠的壽命也快完了，在後面我們就要看得到的。在過去的三年內，有兩個新原子型先後上台。

在廿世紀沒有一個新概念列入物理學的範圍。能比波耳原子更容易得到羣衆接受與認識。這也許是因爲波耳原子比較簡單些，並且還能給我們較具體的印象。但是對於專門學者，這印象並不是如普通讀者所看得那麼簡單。在印象之外，還包着數學理論所織成的一層網。最首先要說的，就是原子裏的軌道並不是圓圈的，有許多是橢圓的。這橢圓的形狀是由兩個數字所定的，正如幾

何裏，橢圓是以長軸 (major axis) 與短軸 (minor axis) 來定的。波耳把這兩數字名爲「半徑量數與方位量數」(radial and azimuthal quantum numbers)。他說各個不同軌道是在不同「能位」(energy level) 一個電子由高能位的軌道跳到低能位軌道，就會以所差的能變爲光向外射出。要是外面加進能到電子上面，那麼才能倒頭跳回來。

每個橢圓形（或圓形）都附有一個標別的數字代表牠的能位，正如我們說到不同的發動機是二馬力或十馬力。並且既然每個橢圓形的大小與形狀可由兩個「量數」來決定，而那代表能位的數字可看作爲以二量數爲變數 (variables) 所得的函數 (function)。

在討論波耳原子的時候，我們常用 W_{23} 的符號來代表一個有半徑量數二與方位量數三的能位軌道。一個原素的波耳原子的所有軌道的符號就包含好幾個如此的形式符號。

現在所說的一套的數量最自然的排列法當然是方形的，例如九個數量：

W_{11}

W_{21}

W_{31}

W_{12}

W_{22}

W_{32}

數學家把這樣數量的佈置名爲方陣式 (matrix)。這方陣式的應用已有好多年了。方陣式的理論是屬於代數的範圍。這法子是揆力 (Cayley) 所創的，已有多種規則完成專爲方陣式的加減乘之用。這種規則近似代數的加減乘法，不過方陣式的乘法是不能倒換的（或是數學家稱爲替換）；換句話說，方陣式甲乘上了方陣式乙並不等於方陣式乙乘上了方陣式甲。

海孫堡 (Heisenberg) 與另外幾個人在三年前指出：在原子論裏，物理學家會寫用方陣式而不知其爲何，並且方陣式的代數使我們能以符號表示各種原子現象比從前所有的表示方法來得更簡要。「方陣式力學」就是如此發源。

我們很容易看出對波耳原子的反對是如何之利害，以致於寧願棄了波耳原子所供給的具體印象，而採用極抽象的方陣式來解釋機械作用。並且在方陣式力學之後接踵而到的，又是一個創議。這個創議雖是年輕，但是很有希望。牠便是波動力學，由牠所供獻的東西，我們也許能承認，在波耳原子的皇宮裏壁上的字已受着第一個打擊。

這新的概念也不過是三年多些的歷史。他是布洛利 (Louis de Broglie) 的推論所產生出來的。似乎布洛利看到廿世紀所產生的各色各種新概念，引起他的好奇心，把這些概念混合起來，看有什麼結果。這種態度正如才學化學的人帶有害怕的心理，去冒險把幾瓶藥品混在一起。布洛利就是這樣問他自己：『倘若我們應用相對論於量子論或應用於物質與能相等的學理，當有何結果呢？』他就試一試。因作用而起的煙，遮蔽了他的眼光。當這煙散了之後，他和後來的斯勒丁格耳 (Schrödinger) 苦心經營成波動力學的理论。

布洛利在他關於波動力學的第二篇論文裏，把他自己達到這新假設的心理變化，詳細地寫出。物質與能相等的定律（在第四章內我們就要說到）說任何 m 克的質量等於 mc^2 能的單位， c 是光的速度。能可認爲一束或不連續的單位，這單位可比擬於物質的原子；每個單位都附有不可分離的週率。說明週率，最簡單的方法是以物體的機械的顫動作比，在這裏週率的範圍比此還大得多。這種週率可談論到任何週期變化，無論這變化是屬於機械的，電的，或是超經驗的。週期變化的週率常以 ν 代表。量子論說：每一個量子的能，或一原子的能是正比於牠伴着的

週率。換句話說就是以 $h\nu$ 這符號表示。

由 m 質量的顆粒說起，與這質量的相等的能可以 mc^2 或以 $h\nu$ 代表。把這關係寫成方程式如下：

$$mc^2 = h\nu$$

布洛利說：『這方程式是指一靜止的顆粒而言。若是這顆粒在動，這方程式的形式當爲何？』要知道一動的顆粒對固定的觀察者所現的狀態，我們就要求助於相對論。關於相對論，在第六章就要討論到。按照這個理論，動可使一動體之質量加增些，並明顯地使這物體附帶的週率慢下去。這僅限於一個固定的觀察者而言。於是前面所說的方程式，對靜止的顆粒是對的，而對動體是錯的。在動體的情形左項加增而右項減少。

這個出人意料的结果疑難了布洛利。不久他找出一條出路。這種阻礙布洛利的情狀與引導愛因斯坦造成物質與能相等原理之情狀恰巧相同（第四章）。根據這兩事件把已公認且證實的原理合併在一起，卻產生矛盾的結果。解決這困難，必須採用一新概念。不過這兩種情形有很重

要之不同點。愛因斯坦的事件，祇有一條出路，所以他的方法是硬的。布洛利是不是如此受限制的。他所想到的解決方法，並不一定是祇有一個可能，雖然同時沒有人拿出另一個，以備選擇之用。

布洛利的假設是這樣：每個有質量的顆粒被一羣波（不管他是怎樣的波）所包圍着，這波是像衛兵那樣隨着顆粒而移動。雖然這羣波隨顆粒而移動，但組成羣的個別小波動得更快。這小波在顆粒之前小距離內就消滅掉，而新的小波就在此波後面一點的地方產生。同樣地，在時間的舞台上，連續幾代的人迅速地走過，而人類進步向前走得慢些。這種「羣速與波速」的現象，物理學家早已知道。

布洛利發現，若要使那方程式應付動體，同時仍可恢復平衡，只要假設那有質量的顆粒的移動比光速小，個別波動得比光快，而這兩速度的幾何中數（mean）等於光的速度。

看來這假設好似奇怪，但不久他就能表現出好結果，我們看到在波耳原子中，未有解答事件之一，即指一電子環繞中心核而動，牠對中心的距離不能任意定的。有指定的軌道是許可的，中間的地帶是禁止的。並且波耳於這些軌道之間還定一整數關係。

布洛利的假設對此關係能引導我們到一個簡單的解釋。這些原子軌道的廣幅是很小。照布洛利的描寫，那被波羣包圍的電子在軌道上繞行着，電子附帶的波羣往後拖延，向前伸展。在一個小的軌道，這波羣二端會相連成一圓圈形。倘若這波環連接得很適當，以致波頂與波頂，波谷與波谷相合，那麼什麼都很順利。但若有不符合之處，干涉作用便發生，安穩狀態是不可能的了。而布洛利發現當這種連接時，安穩狀態所需的條件與波耳許可軌道的整數條件完全相同。

再研究的結果，覺得布洛利的假設不能實行牠起初允許的事，所以就發生論理的困難。然而他的提議，在斯勒丁格耳的觀察之下，開始了那更能一致符合的且有大效果的假設。這假設在現代稱為波動力學。

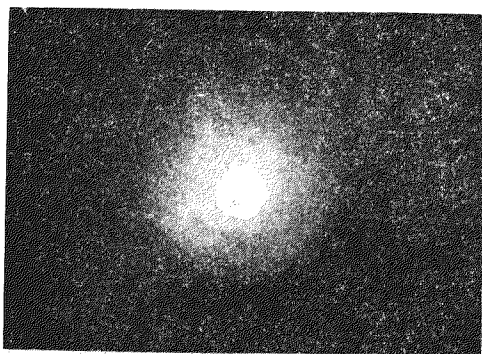
斯勒丁格耳對自己說：「倘若像這樣一羣的波隨顆粒而動，爲什麼不把整個系統認爲一顆粒？讓我們看看，假使我們假定那羣波即爲所謂的有質量的顆粒，該有什麼結果。」

斯勒丁格耳看出，第一件要做的事就是替那創議的「波動原子」建設一個滿意的可接受的家系，他由科學的書架上拿下那舊式的有好多年被灰塵所蓋著的理論。這理論是由哈密爾登

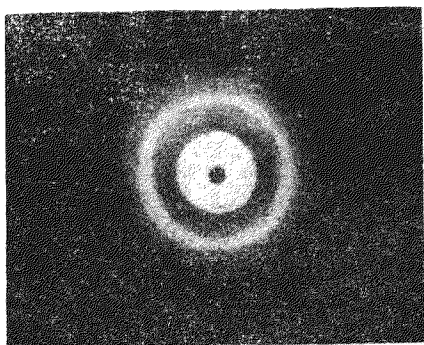
(Hamilton) 所創的。這理論在他的時代算是極好的，雖爲多數人所不注意，但有少數人十二分看重牠。威爾遜 (Edwin B. Wilson) 教授曾說到這理論爲：『數學物理中最基本最重要的單個定理。』好像一切的普通力學發源於這理論。並且斯勒丁格耳求出一個方程式，而這方程式所表示的東西，差不多就是布洛利的波羣。由這理論的家系及牠的數學上的關係的推論，斯勒丁格耳能夠定，在不同條件之下，波羣的行爲。並且由別方面，他又發現，按照波動定律，一羣的波的一「重心點」的移動的路程恰巧與一有質量的顆粒在普通力學定律所得的行動之路程，完全相同。像這樣的一個波羣行經一有質量的顆粒的附近，會受那顆粒所轉向，其影響與引力作用所生之效果相同。依着許多定律，波羣說比有質量的顆粒之說更符合。最近幾年我們才知道奇怪得很普通力學不能應用於原子那麼小的系統裏。然而在這種問題內波動力學的理論就有用了，並且用在原子構造上面，覺得極有價值。

記得沒有幾年前，我們聽到不少關於留伊思 (Lewis) 與蘭格質 (Langmuir) 所創的原子與波耳原子競爭這原子名爲「化學家的原子」或是「靜的原子」，對比於波耳的動的原子。

在留伊恩，蘭格質的原子軌道上，電子不是在環行，而是差不多靜止的。這些電子是有規則地散佈在一幻想的球體上。好似托勒密 (Ptolemy) 假設天體上鑲着固定的星體一般。他們以為這些



第四圖 相當於波耳原子單圓軌的斯勒丁格耳原子。圖示原子內部充之分佈。



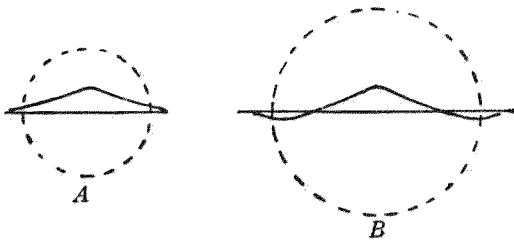
第五圖 相當於橢圓波耳軌道的斯勒丁格耳原子。此圖僅示半徑分佈情狀，而未將方位分佈情狀示出。

電子在顫動，但永不會遠離牠們的平均地點。不論這原子概念真不能像波耳原子那樣能夠解釋事件，不論這概念有未受到巧妙的處置，但是這靜的模型總不能如波耳的動的原子一樣地有效用是一件事實。

斯勒丁格耳的原子離開波耳概念也是很遠。這原子也沒有環行的電子。我們可設想爲一種質體的球，球的各部份稍有不同的密度。最簡單的密度變化，是球體內的密度漸增或漸減變化。我們假定密度的變化，在中心是最大，表面密度變化爲零。這種密度的變化可以圖表示之。第六見圖A。

倘若這球體再小一點，密度的起復式變化仍是相同，不過較快些。好似一根短線比長線所生的音調高。

這種顫動還有分段的可能性。見第六圖B與第七圖。有幾種的顫動方式共存於一球體，是可能的。斯勒丁格耳原子的主要構



第六圖 相當於(A)波耳圓軌；(B)波耳橢圓軌的斯勒丁格耳原子。

造就是：一球體可以以簡單或複雜形式整個地起復變動。什麼東西做的一個球體？那一種的起復？

斯勒丁格耳暫時擱起對這些問題的回答。但後來因為沒有解決這問題就不能向前進，他就被迫去發現此中的祕密。這發現之前，他的微分方程式討論到一種神祕的「 ψ 」在一球體區域的起復。「 ψ 」是什麼？

斯勒丁格耳的回答是有一點迂曲且複雜。在他的微分方程式裏，他用 ψ 作為一代數的複數量 (complex quantity) 包含 $\sqrt{-1}$ 之式。這複數如一切的複數也有其軛複數 (conjugate complex)。他以 ψ 指示此軛複數。他回答就是： $\psi \psi = \psi \psi$ 。

斯勒丁格耳的原子如波耳的或留伊斯和蘭格質都是以電為根本性質。但這裏有個分別；在波耳原子那充電的電子走一圓形的路軌，在留伊斯蘭格質原子，電子是在一平均地點顫動，而在斯勒丁格耳原子，電是連續地散佈在球體內，並且（我們就要看到）大部份的密度是不變的，但有時也有小的起復式的變化。

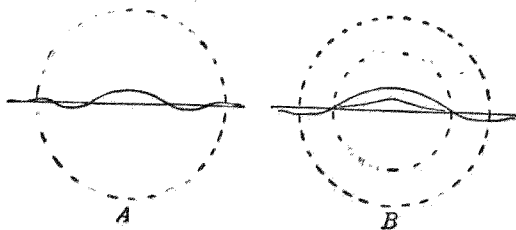
對於 ψ 的值，另外一個以為此值可定有無電子在此點之或然性。在一個高電密度的區

域，每單位體積有很多的電子。第四圖第五圖與是根據這理論所畫的斯勒丁格耳原子。這圖是由標準局蘭給博士 (Dr. R. M. Langer, of the Bureau of Standards) 所做的圖案裏採用得來。

攷慮一個假設是否可以接受，並不是看牠是近於習慣或是詭異，抽象或簡單，乃是看牠能做什麼。在所有的科學之內沒有東西比相對論看來更玄虛更空幻。但牠能漸得羣衆承認，因為牠比牠的前者能多做點事。

斯勒丁格耳的情形也是如此。我們就要看到，這原子能做波耳原子所能做的事，並且能做得同樣的好。不止於此，這原子還能給我們一簡單且不勉強的解釋，去說明那「許可軌道」與「禁止地帶」。

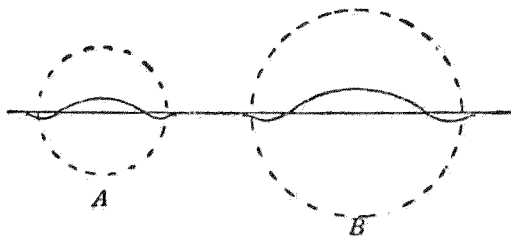
用了他的解釋，就不受任何人成見所影響。還能指給我們看，在原子裏怎樣某樣東西在穩固地顫動而不有放射作用產生；又能告訴我們一原子怎樣地由一種週率變到另一週率時，就



第七圖 相當於(A)單電子橢圓軌；(B)圓軌及橢圓軌之混合之斯勒丁格耳原子。

會放射。牠有一個餘地留爲那些麻煩的東西；半量子數，在穩健地發達，好似班庫（Banco）的鬼在騷擾那恭賀波耳原子的宴席。並且公認最重要的事件，牠也能做到，而這事卻使波耳束手無策——分光線的比較強度的計算。這樣一個『新來的』是很可歡迎，雖然他穿了一件古怪的衣服。也許牠的裝束是預言將來的時式服裝。

斯勒丁格耳經營 ψ 顫動的數學，並且定出支配定律如第六至八圖各曲線所示。他發現任何 ψ 的顫動，會各方向地散佈到無窮遠，但爲實際用途，我們認爲遠原子半徑處，顫動的大小就微得不能覺察得出。這種跨過橫軸一次或多次的曲線，（見第七與第八圖，）都在半徑之內穿過那橫軸。用數學的文字來說，那函數有有限的根，這些根都包含在普通原子半徑之內。並且（這是第一要緊）這些根的數是比擬於波耳原子所謂的「半徑量子數」。



第八圖 相當(A)高週率及(B)低週率之斯勒丁格耳原子。

一個波耳原子軌道可以是圓的或橢圓形。圓形的軌道的半徑量數是零；橢圓形軌道的半徑量數是整數，橢圓的度照半徑量數而變化的。在斯勒丁格耳的原子，一個基本顫動見於第六圖A是沒有交叉點，比擬於圓的波耳原子。這裏斯勒丁格耳球體半徑近於波耳原子軌道的半徑。

一波耳原子有兩個電子，在兩個直徑不等的軌道上，其中一個是圓的另一個是橢圓的。這形式可比擬於第七圖B的斯勒丁格耳球體。在那裏有兩種不同週率的顫動同時存在，而高週率的顫動實際上是禁錮於一小半徑之球體。二者結果所生顫動有很複雜的形式，這裏用不到談到。

這些圖畫僅解釋最簡單的幾件顫動。在斯勒丁格耳的原子裏的擾動狀態也許是極複雜的。在波耳原子特別有第二個標別性質的數字，名爲「方位量子數」而斯勒丁格耳原子給我們一個對待數字，這數字是容易申說，並且不用數學是無法去討論，但用這數字來完成二種原子的理論比較是極有用的。波耳概念說電子由一軌道跳到另一不同能位軌道，斯勒丁格耳也有同樣對稱的情狀。這可由第八圖看去。在那裏一個高週率的顫動看得出是限於小半徑的球體，當變到低

* 斯勒丁格耳的球體沒有明顯的界限，關於這一點與波耳原子之對照，祇是大概的。

週率時就用得着一大點的球體去包藏着。在這情狀上，二個波耳原子軌道都是橢圓的。

不用再加說明，我們可說在波耳原子的說法中有這樣一個字，斯勒丁格耳也有對待的名詞。既然波耳原子的各種性質都以軌道，能位，量子數之類來表示，斯勒丁格耳能做波耳原子所做的事同樣的好，雖然看起來沒有像波耳原子那樣清楚。

現在我們不談波耳原子缺點，我們看到怎樣一斯勒丁格耳原子能有一穩定的 ψ 顫動而不放射能。我們要記清楚， ψ 並不是電密度而電密度之值據此而定。由數學而知道， ψ 可能以單獨週率而顫動，但電密度仍能維持不變。根據以往的理論，就不會有放射發生。

倘若那 ψ 顫動包括兩個不同週率的成份，情形要就改變。那時當然有一種節週率 (Beat-frequency) 發生。這節週率由二組成週率之差而定。由以前的方程式看出，在這情態下，有週率差異的電密度之起復變化，當然發生放射作用。這樣的放射就產生一條線的分光景。若有多於兩個簡單週率，不論在同樣或不同樣的原子裏，分光景裏的線條便會很快加增。

一個簡單 ψ 顫動於是好比一個黑暗原子。倘若這顫動變到另外一個簡單而週率不同的顫

動，最後的結果仍是黑暗原子；不過在變換的時候一單根線就放射出來，因為我們務須假設這種變換不是突然的乃是連續的。這新的顫動自然由小的幅開始，漸漸耗用那舊的顫動的能，一直到舊的顫動完全消散。在變化的時候——所用的時間也許佔一秒的萬萬分之一——就有一種能放射出來。

斯勒丁格耳原子成就這舊有指定必需的工作之容易，在所有的數學物理裏，算是一件極美麗的東西。

斯勒丁格耳原子一樣能對付那許可軌道與禁止地帶。這一方面的教學告訴我們那包藏球體的直徑不是明顯劃定，乃是大概而言；並且不同的直徑指着不同的週率所依據的公式，粗略地適合波耳許可軌道的條件。

斯勒丁格耳之推測半量子數與分光線的強度，是太過複雜的一會事，所以不用數學來解釋是不可能的。說到這一類東西，畢格斯 (Riggs) 所著的一本書是寫得很妙。

像「電子與原子撞擊」與「電子的放射」這一類事件，斯勒丁格耳給我們一個容易的印

象。照這個理論，一放射出的電子是由一大的顫動的球體所拋出的一束波，好似一小束的火焰由炭火裏拋去。所不同之點，在於射出的電子仍能存在。也許這電子遇到另一個大顫動球體，與之合併，再把牠所有的能加在那球體中原有的顫動，或是再創一新的週率加於那原子。

現在我們說到斯勒丁格耳概念與波耳概念極端不同之點。在波耳的理論，射出的高速度電子——有時近於光的速度——作為證明電子在未脫離原子，未以切線飛出之前，的高速度的證明。斯勒丁格耳理論，射出的速度與以前在原子裏的速度是沒有連帶關係。因為在他假設的原子性質沒有如速度這樣東西。這種電子行動速度是由波動的傳播的定律來解釋由一光源發出的光其速度並不能以其源而定，只能根據光走的媒質來決定。

在這假設上面，我們尚須解釋一件事實。就是說放射的電子在同一媒質裏以不同速度進行。有時其速度達到光速，然而總未能及到光速。斯勒丁格耳理論的波大致與布洛利相同，都是成羣而行動。這許多波羣的波長與速度稍有不同，如光波在擴散媒質如水或玻璃中行動。在這種情形，那「羣速」比單獨的波的「波速」小，但當波長小時，「羣速」能趨近於光速。於是電子速度是

「羣速」而電子的能卻是顫動的能，同光的能是一樣。最快的顫動波是有最短波長。這種波的速度最近於光的速度了。照愛因斯坦的引理理論，這裏所說的電子的速度是空間的性質，而不是電子自己的速度。

最近戴維孫 (Davisson) 與鳩賀 (Germer) 做成新實驗證據，也許能達到證實原子與電子的波動理論。他們發現一陣電子流向一個大鎳晶體的面上射擊，由擴散狀態而推測電子是一束的波而不是顆粒。所發生的合規則的反射亦受在同樣環境之下約束愛克司光線的定律所支配。倘若這一陣電子向普通不至一個晶體的鎳的面上射擊，所生出的反射作用，永不會有規則。在這一點上，電子的行爲也如愛克司光線一樣。

我們預料在這種情況之下像電子這樣小的顆粒的撞擊，不會有有規則的分散作用，因為電子的大小共有原子的十萬分之一。戴維孫拿烏槍散彈射向礮彈聚成的金字塔那麼大的一堆之情形作比於一陣電子射向，原子組成的平面。這樣一個靶子太過粗糙，不足爲這樣小的撞擊顆粒之有規的反射面。

這就是第一件實驗的證明有利於波的原子。大概這不至於是末了的一個證據吧！

斯勒丁格耳原子有多量成績，並且因為他能比波耳原子所成就的來得多，所以牠能替代波耳原子。但我們承認，雖然斯勒丁格耳原子是從前各種概念改良結果，但他仍有許多缺點，不久一定要讓位於較完美的概念。

這理論的基本困難之點一就在波的傳達。要使一羣有限大小的波能夠存在，必須要設想這些波是在一傳達媒質裏走，這媒質是像水或玻璃，而不像是我們習慣所謂的空的空間。這困難情況的唯一解決方法就是去假設這組成物質的波是與光的波不同，空間允許光波以同樣速度行動，而對別種的波卻生分散效果，不論這是什麼波。

在這樣有真力量的新理論上，吹毛求疵，未免是太不客氣。我們的責任還該是去努力消化這新概念（這種複雜的數學是不容易的）中的有暗示之處。做了這件事之後，我們也許能看得夠明白，以致於能撥去剩下來的微塵，

目前我們可停止了。斯勒丁格耳原子是現代物理對物質構造的推論之境界。

倘若我們往回看到各種連續原子的概念——這是我們已提綱絜領說過——我們可看出，自克爾文旋渦原子起，始終有一種單獨的趨勢；物質不是基本的東西，物質是要以別的東西來解釋。克爾文與稜諾爾咨想用以太中的特殊結構來說明物質，但以後的原子型都是以電為基礎。電到底是什麼現在人不常討論的，雖在十九世紀之末，這是一個平常討論的題目。現代的推論，說到組成物質的最後單位的究竟性質，是及討論結構的狀態形式那麼多。

第三章 能及其結構

在第一章裏，我們已看到，一新的「能」的概念，及支配「能」的相互作用的原理，與「能」的不生不滅的原理之產生，實可認爲十九世紀大成功之一。廿世紀所繼承下來的「能」概念確是很巧妙。而那能的永存定律是自然科學中未有的，最能及遠的概論。但這能的概念，也有一方面是不獨立的——能是不可看作獨立的本質，牠需要物質與能媒作牠運動時傳達之工具。

能，雖然當時看爲三基本質體（及物質與能媒）之一，但牠被人認爲次要且附屬於其他二者。能與物質還有一個重要不同點——卽是能是連續的，可以無窮的分下去。在這一點，能與物質及其原子式的構造是絕對相反的。

我們已知道物質的原子構造性質，是一個很舊的概念。牠是古人所創的；牛頓及波義耳（Boyle）因運用便利作此假設；但是真正的基本理論是十九世紀初葉，但耳頓（Dalton）的成

績。

在但耳頓之後，原子概念僅純粹屬於性質方面，他是第一人看出在化學配合作用裏，整數關係是一個重要的關鍵。因沒有解釋足以說明物質是連續的，很明顯地，我們斷定以物質為不可分裂的原子所成的，是一個較簡明的較自然的說法。這些不可分裂的原子，聯合起來生出整數比例。以但耳頓定律說即是簡單比例與倍數比例。

但耳頓使一個舊的理論生出新生命。他給他一個十九世紀的特有性質——他使牠有量的關係。自這一次灌輸入新的血液，原子論就有大的成就，因此但耳頓被人稱為「原子論的始祖」。而現代的化學建於這理論上面。那一類可以用熱力學與相對論來解說的現象，也許是可以不必用到原子假設，但原子假設在多數的自然理論中是有主宰的威權。

原子論之操縱整個科學思想如此之久，以致有許多人現在覺得難以設想，再可有別的觀念來替代。但主張原子結構為連續的定律，經過整個十九世紀仍有維護者，如韓德 (T. Sterry Hunt) 那樣地位的人——他是一個地質學家，在一八九二死的。最末了一個有名望的反對者，最

近於一九一六死掉。

這是很有趣的一會事，我們看到那末了一個堅持者死後，才使活着的人看到原子概念自征服物質的地界且衝進了能的範圍。因為普蘭克 (Planck) 在一九〇〇創了一個假設說，能雖在那時以前，已被默認爲連續的，然而至少有時當看作不可分裂的單位，或量子所組成的，這概念已被證實，是有如此的效果，我們可以尊普蘭克爲廿世紀的但耳頓。

原子概念對但耳頓並不是完全新的，同樣地能的不規則結構的概念，在普蘭克以前已有人提到。湯姆孫 (J. J. Thomson) 在他的普鱗斯吞講演 (Princeton Lecture) 一八九八說；很奇怪地，當一氣體受愛克司光線的作用，結果生出的離子 (ions) 數比我們所設想的少了許多。舉個例，在氫裏，離化的原子佔全數，不及兆分之一 (10^{-12})。就說碘氣與水銀氣，雖比氫是很好的傳導體，離化的氣體佔全數的成分仍是很少，雖然屢次用愛克司光線掃射，也是無用。湯姆孫後來解釋這事是這樣說，愛克司光線的波面不是整齊的而是結塊的。這些波的能，集在幾點，向外漸漸散開。當此種強烈點撞在氣原子上時離子方才產生。波面單薄部份是不能生出這種效應。

把這概念用論理的方法推到他的極端限止；將能集在幾個強烈的點上，而點之間是缺少能的空間，於是我們得到現代量子理論的光波的觀念。像這樣的波面，放得很大來看，我們看到的，不是平均明亮的一片，而是好幾個強烈的亮點，很空虛地散在黑暗的背景上。

湯姆孫的概念在先導方面說，值得我們注意，但也如耳頓之前的原子論，缺乏量的要素。這一點是普蘭克所完成的。所以也如原子論一樣，因得到量的關係，使新的概念變到有效果。

普蘭克在推論能的原子性，他並想不到湯姆孫所敘述的現象，但他是由放射論——克爾文「二雲」之一——的早已有的困難推到他的假設。有許多人想找一公式足以代表發亮體分背景裏能的分配，但終未成功。對於任何實驗符合的公式，都不足以滿意地應用於整個分光景，所有公式不是在一端便是在另一端失效。實驗結果的精確性也未尚不為人懷疑，但重複的結果證實這懷疑是錯誤的。普蘭克結論說，根據現有的能概念，這種符合性是永不能使人滿意。他所指出的新概念也就是耳頓給我們的暗示的概念，就是整數關係之重要性。

按照舊有的概念，一顫動分子或原子，藏有一數量的能，可以漸漸以放射作用而失去，餘剩的

能以細微的階段減少下去。普蘭克否認此說，他說原子包含的能必須是一種基本單位（名爲量子）的倍數。這些單位是這樣的小（小到幾 10^{-12} 分之一歐格），我們可以說這種情形與連續結構沒有什麼差異。照此說法我們也可說原子也是如此。實際上原子與量子的太小已足以使現象有所差異。

照普蘭克所提議的概念說，當一分子失去能時，失去的能是突然的，每次有一個或多個的量子失去。這種步驟不是連續的。這概念與舊的概念之不同點，可以一盒藏有許多相同的彈子作比。倘若這盒裏的東西減少，那必是跳掉一個或多個彈子；而盒子裏東西的重量必是單彈子的整倍數。倘若這些彈子被磨成粉，整數關係是沒有了，而連續的關係才可能。

量子觀念是極革命化的，他已圓滿地證實自己並且毫無懷疑地站得住。把這概念用到以前不圓滿的放射公式，牠可以使此公式改變以致能除去，在長波區裏，實驗與公式之差異，而另一方面仍不破壞餘下的分光景與此公式的符合性。就這一件已足證實他的概念，但實際不止於此。普蘭克所成就的比他自己知道所能做的更好。

普蘭克的公式，（在分光景各波長的能的分配公式）包含二常數以 h 與 k 表示之。用他的公式，與當時可應用最好的實驗結果作一比較，他能求出這兩常數之值。後來的研究使普蘭克的數字稍改良些。第一個常數 h 名爲「動作常數」但亦常稱爲普蘭克常數。這常數與光速，引力常數充電常數都被認爲自然的基本常數。牠的值（以 C. G. S. 單位表之）爲 6.554×10^{-27} 歐格秒。第二個常數 k 之值爲 1.372×10^{-16} 歐格每度。

現在已經發現普蘭克第二個常數與別的理论有幾個很好的關係。有一個關係（由氣體熱力學得到）使普蘭克以新的立場去計算亞佛加德羅 (Avogadro) 數——即是任何東西每「克分之」的分子數。好比十八格蘭姆的水。他得出的數值爲 6.175×10^{23} 與現在接受的數值 6.061×10^{23} 是很近。在這種問題中這樣的數字算是很符合了。在應用這新理論去計算別種常數。也得到同樣的成功，而以電子充電常數爲最顯著。普蘭克得到的常數值爲 4.69×10^{-19} 靜電單位。在一九〇〇，實驗結果所知道數值，尙未如此之精確。僅是此數之位數是知道的。當時決定的值，先後爲 1.29×10^{-10} 與 6.5×10^{-10} 。十七年後，密立根得的數值，也即現在所公認的是

4.774 × 10⁻¹⁰。在這事件上，普蘭克等他的報酬等了不少時間，但他的計算可算是一預言。

還不至這些。在比熱的理論裏，放射能的分配，早已有同樣的不一致的毛病。每個念化學的學生都知道度隆 (Dulong) 與拜梯脫 (Petit) 的定律。這定律說，一原子量與比熱之乘積為一常數。用這沿革的形式表明這定律，這定律不足為我們的規則，因為這「常數」也起了算不清的變化，特別在低溫度。這裏我們又有一定律在極端是不能應用的。那當然是很自然的方法，把應用於分光景的放射能而得成功之量子概念，在這關鍵上面。

第一個應用者是愛因斯坦。他對於量子論之供獻是很大，就算他對相對論一個字都沒有說，他的聲譽尚可次於普蘭克。愛因斯坦之後有別人〔耐而斯脫 (Nernst)，林得門 (Lindemann)，對把 (Debye)，波納 (Born) 與卡門 (Karman)〕先後把愛因斯坦的公式加以改革，到後來，這公式能把原子熱的不規則行為滿意地表明出來。

還有一次，在那奇怪的名為光電效應的現象上，這新的概念又顯出牠的能力。在這裏，光的作用使某種金屬放射電子，愛因斯坦應用這量子概念，得到解釋這現象的公式。

最重要與最能達遠的量子論的應用，是波耳在原子上的應用。在第二章裏我們已梗概地說到波耳原子的規模，並且也說到牠的適合和有力量，以解說化學物理的現象。我們可注意到，若是沒有普蘭克「能的原子」的理論，波耳原子也永不會有的。在波耳原子之前，湯姆孫與魯塞福特原子沒有應用量子論；但當波耳把量子論注射到垂斃的魯塞福特原子，其結果又表明一次量子論之應用，其培養與刺激能力之偉大。

我們已說過波耳關於原子型的構造與行為曾舉出三個假設。而其中之一包含着量子論。波耳在假設某軌道為許可與其間空隙為禁止地帶時，（起初單說圓圈路徑）他規定一個條件說，一電子在各軌道上的動量（角度動量）的能率（moment），當包含普蘭克量子的某種小單位的整倍數。他又假設當放射能時，電子由高能位降到低能位時，放射的能為量子的倍數。

量子概念應用到上面所說各件之成功，使牠有存在之理由，在舊的理論失敗之處，他能成功。舊的波動說用來解釋近代我們熟悉的現象之不適用，並不是普遍為人覺察。關於此類現象中有一個極好的例，就是光電效應。琴斯（Jears）說：「這現象好似能供我們以一堅強證據，使

我們相信普蘭克量子的確實存在，而不僅是數理的想像，爲解釋原來不能解釋的放射公式之用。關於這一點的討論的大要已見於琴斯的『量子論的報告』(Report on the Quantum Theory)。

當某種臨界 (critical) 的或更高的週率的光落於金屬上面，就有電子由金屬射出。對於鈉，這臨界週率是在帶黃色的綠色部份的分光景。這裏的週率爲 5.15×10^{14} 顫動每秒。光線的週率要是等於或大於此，就會使金屬即刻放射電子，但是低於此週率的光，無論是如何的強，如何的久，是不能生出這種效應。

「即射電子」這現象，光的波動說的解釋是與一種共振或觸動的效應有關。倘若在鈉裏有一電子以這臨界的週率顫動，並有剛要逃散的能量。那末一些小的光的刺激就會使電子放射。根據這假設，我們就須假定鈉電子必須以臨界週率起以上的週率顫動而沒有較此低的週率顫動。用分光鏡得來的證據就不能與之一致。每固體當熱到放射時，牠的分光景包含高低全有的連續週率；就是範圍較小的鈉氣分光景也有比臨光電週率的數值低的線條。

若是沒有這種觸動的效應，吸收的能足以使電子射出，所需時間好像比實際上時間來得多些。坎伯爾 (Campbell) 在十五年前於他的『現代電的理論』 (Modern Electrical Theory) 一書裏說得很妙。

『當能落在平方厘米的物質上其量每秒遠不及一歐格時，光電效應靠得住可以覺察得出……且每電子所放的能確是大於 10^{-12} 歐格……根據普通光的理論，一個電子吸收的能決不能多過牠所處分子所受到的能；而一單個分子的剖面的面積當少於 10^{-16} 平方厘米，由此看來，電子要能得到足夠的能，而跑出來，就除非光的作用有一千秒之久，或約為一刻鐘……但事實上，這種效應好似與光作用同時開始』。

在這問題上，要想去保留波動說，一定是失敗的，甚至於有人建議取消能的永存學理或加以改良。這裏的困難是如此，在一波面上任何點任何時，沒有足夠的能成就必需的工作，而不知怎樣這工作竟然做成。有人說，當一連續的波面碰到一電子上，而電子受了激刺，以某種方法自己創造一量子的能，然而要去對抵這生出的能，波面別處當有能消去。這變化並不一定要在附近，也不一

定要在同樣時間，所以總計起來，平衡仍該是保持着。但是，以我們能做到的實驗來攷察這說法之對否，好似與此假設相反。

我們決不要因此推測，以為舊式光的理論完全潰散，而量子論無疑是一個優勝者。差得遠哩！目前兩個理論之間之情勢是一個僵的局面。在有的事件上尤其是光的干涉作用，舊的理論有所成就，而量子論卻一無辦法，如洛基所說這兩概念是像一鯨魚和一老虎，各人有其特長，而各人在對方的長處方面，卻是一無能力。解決這問題，無疑的當要得到一個廣闊的概念，而這兩個概念卻是牠的特種情形而已。

目前我們沒有滿意的量子印象。這使我們想到老舊的光子說，但在一百年前，干涉與屈折作用已同樣有力量把光子說解決掉。在量子的構造上面當有週期的性質在裏面。

上面我們所下的結論，因各量子有不同能值的事實而更覺有力量。各量子包含能的大小以其來源而改變。舉個例，組成紅光的能單位，每個約為 3×10^{-12} 歐格，而紫光的數值近於此二倍之大。量子能與其來源顫動週率成正比。

時常有人想把量子實體化。最早的創議中有一個是這樣說，量子是一羣有限大小的波，名為「射點」(dart)。既然干涉作用可由有二三十個纏的路程差所生出，所以量子至少要那般長；因為干涉作用祇能為二羣同源而又同時生的波所產生的。

羅倫刺(Lorentz)以同法去推究，使我們注意到一量子之闊可有其長的數倍。邁克爾孫在研究星體直徑時，發現干涉作用可由距離六呎之光線產生。一「射點」的比喻——以這觀點看來——如一片有波紋的鐵皮屋頂。

還有哩！一量子的能可以進瞳孔而為比牠小得許多的電子所吸收。這樣的效驗使我們想到把神仙裝到瓶子裏去的一會事。

由這些推測結果之矛盾，我們可明顯地看出，我們現在所對付的東西是太廣闊太散漫，其究竟是為我所不可捉摸的。在這一點上，我們好似印度古典裏三瞎子看象的情狀。一個親切的朋友帶他們到象那裏，說：『象在你們前面幾步路。你們可上前去考察吧。』他們伸開兩手慢慢地前進。

第一個人，恰巧碰到象的鼻子。他上下的撫摸而說：『奇怪得很！一個象是像一棵粗皮的小樹！』

但是第二人卻摸到象尾。他說：『你那裏可以這樣說？象是比較像一根繩！』第三個人，他碰到象的身體，他說：『你們兩個都錯了；象是像一片大而平的牆。』

幾年前湯姆孫 (J. J. Thomson) 仍做成一個具體的量子，可以免去無理的矛盾。他以爲量子是一環或兩端相連的法拉第 (Faraday) 力管。這力管在能媒中行動，其大小或形狀是不改變。週圍有馬克司威爾 的能媒波包圍着。這些能媒波的波長等於環的週圍之長。這就給量子以週期性質。湯姆孫並不以這些波能夠成就干涉作用。差不多完全量子的能都在環裏。這些波的用處是在引導那裏行動的路程。

湯姆孫總計量子平均散佈的情狀，(眼與感光片所能覺察的範圍) 他的結論爲量子經過一狹縫，牠們會展開成一種形式，相似於著名的干涉帶的形態。

湯姆孫的創議之力量在於牠的廣闊與籠統性質。他認爲波動與量子概念都有正當存在之理由，所以他想合併爲一個二重的構造，一部份似於波動說，另一部份迎合量子論的條件。環與波雙方的構造都以電力場爲共同的根基。

湯姆孫這個模型使我們聯想到布洛利顆粒及其波的衛兵。這兩個模型都被有活動性的斯勒丁格耳原子所替代。斯勒丁格耳原子接受了量子論給與波耳原子的力量，但牠本身並未向量子論採用一點東西。沒有人會進一步，給我們一暗示，使我們能說明斯勒丁格耳原子（就是代表着電子）拋出的一束顫動的能的大小。那斯勒丁格耳原子在等着接受量子論的魔力；倘若我們用過去推測將來，這魔力可有照常的效應表示出來。

由我們所用的力量去求一具體的量子印象，即可證明我們承認量子論存在，並且也承認我們要儘力去認識牠。這概念的範圍漸漸增大。牠竟然進到磁的範圍裏。威斯（Wiegss）由研究溫度使某物體分子磁力感受性之變化，得到一個結論為：分子磁力率（magnetic moment）是一平常宇宙間極小的要素名為磁子（magneton）的倍數。格爾拉赫（Gerlach）與斯騰（Stern）在實驗銀原子在磁場裏的偏傾，達到一個結論為：有威斯磁子五倍大磁子存在。他們名之為波耳磁子。關於這東西的普遍討論可見於邁克（McKeehan）登於佛蘭格林學院雜誌一篇文裏

（Journal of Franklin Institute, June, 1924）。

起初人們都普遍地接受原子或分子不連續放射能之概念。但對於放射出的能的原子化，或原子吸收能的狀態，就不一定是一致的。一學派的思想（包括普蘭克自己）趨向於能的放射與吸收爲連續的，但在放射時候是以量子爲射出的單位。反面的一派是愛因斯坦領頭的，以爲放射能以量子成束而行動，並且吸收與放射都是不連續的步驟進行。

昆普登 (A. H. Compton) 工作的結果使不連續的觀念更其有力。我們都知道，任何週率的光，受一阻礙物反射與屈折作用之後，這光的週率是要改變的。譬方說藍光，無論受多少次的反射，仍是藍光。但昆普登發現愛克司光有時受阻礙物而反射回來，其結果致週率減小，好似藍光被反射後成爲綠光。同時也把當時的情態考察過，而這種情態不能以散波說來解釋，除非我們放棄能之永存論與動量的永存論。由反面說，愛克司光線不以連續的散波而是以分離的束或量子而傳達。這一說法卻與觀察的現象，與已承認的原理符合。

我們還注意到在普通的光波裏有無昆普登效應。據我們所看到的，由普通材料反射的光裏沒有證據，可證明有波長的改變現象。有數千個計量波的長，這些波有的是從光源直接得到，有的

波是已經過一個或一個以上反射作用，但是這些計量的結果都很精確地符合，然而十分可靠地。雷曼 (Raman) (Nature, March 31, April 21, and May 5, 1928) 發表當光受特殊有機物如一烷困 (toluene) 分散，就有這種效應發生。這結果後來又被幾個觀察者所證實。

最近有所謂的「新量子論」為一羣物理學家所創。我們不要太看大這裏「新」的意義。這理論僅是一新的方陣式的數學推理的系統，而不是一新的具體印象（見第二章）。常有人說英國的物理學家因為他們偏好於具體印象及模型構造，所以與僅滿意於抽象的數學方式的大陸物理學者，分道而馳了。

研究目前的量子論的人，不當苛求量子論的長處。這理論雖然長得很快，但僅為一強壯的嬰孩而已。有不少的話已證明，量子論為廿世紀最有效用的概念，這句話是對的。相對論雖是牠的唯一的競爭者，但相對論已到完老年時期，然而量子論雖比相對論老幾年，但仍是有力而堅強的。

第四章 物質與能的相互關係

當廿世紀的開場，「能」已是一個成熟的概念。當時牠已有半世紀之久的歷史；牠在自然科學內已佔有相當的立足點。當時牠有兩個標別的性质：一，非原子式的結構；二，很重要的地位，但與物質的地位比起來，牠的地位祇是次要的與附屬的了。廿世紀的人們用很直率的手段把那舊的概念改換一下。先將能原子化；然後再把牠地位提高，使牠的地位與物質的地位平行，或者甚至於高出物質的地位。在第三章裏我們已看怎樣把能「原子化」，現在卻要說到怎樣提高牠的地位。

相對論存在也好，廢除也好；電子說儘可與波動說爭曲直，直等到雙方理體都不能成立的時候，那些沒有科學常識的人們或許要嘲笑地說：『最新科學的結論是什麼？我還沒有看過今天的晨報呢！』然而我能够確定地說，雖然廿世紀是一個很短的時期，但牠對於自然科學，至少有一個超等偉大的永久的供獻——物質與能的相互關係的學理，即是所謂的能的惰性。

在這打倒偶像的時代，說到某物理概念是永久的，恐怕不很穩妥罷！但是能的惰性是一個很靠得住的例。雖然，這學理是趨於極端的，並且對於已成立的觀念有推翻之趨勢，然而我們要知道牠是從一個老而爲人所敬重的家系出來的。因爲愛因斯坦的名字常和牠並論，普通人以爲這學理是相對論的系論（corollary），而這系論與相對論的關係他們還以爲是很玄奧的。守舊者自然然而對此學理起了懷疑。這是不對的，「舊式」（classical）這名辭總佔有最大的威權。這學理是直接由馬克斯威爾（Maxwell）和牛頓傳下來的。牠的家世是清白的了；牠的手臂上沒有掛着私生兒的標章。倘若相對論的結論與這學理符合，對於相對論豈不是更好嗎！相對論的力量因而加增而不是因此分散掉。

十八世紀的人，像他們先輩一樣，對於自然現象都是抱着唯物論的態度。當時他們沒有認識現代對能的概念。他們以爲一切的力都是物質的特性。而引力也是這許多特性之一。到愛因斯坦方始宣布引力不是物質的特性，而是空間的特性。因了能的概念輸入人心，因了公認這概念之重要，十九世紀就與沿革的唯物論脫離關係。到了十九世紀的末了，物質與能——主要的與次要的

——加上了不能覺察的能媒，聯合主宰當代的自然科學。這個聯合的主宰把幾個奇異的特色介紹與旁觀的哲學家。最重要的特色就是人類統治歷史中兩個各趨極端的見解之融合。這兩個見解就是：物質當然是「物質的」了；能就說不是「非物質的」也該是「無物」。再之，物質有幾世紀歷史的立足點，無論何地何時牠總被人承認；但是能呢，自出世時就被認為物質的狀態。能之所以被加冠為聯合的主宰，全依賴牠的才幹，因為牠能使各種現象發生關係，並且能把獨立的，難以處置的現象歸成定律與系統。這種能力好似墨西哥 (Mexico) 的開明專制君王地亞士 (Diaz) 把漂泊的盜匪招安為鄉村的警察隊。守舊的物理家一方面雖然承認能為自然科學的主宰，但另一方面心中總有一個特殊的感覺，尊重物質為最後的實體。有了這實體的存在，才有能，不然能祇是一個空名而已。

當愛因斯坦發表說：從此以後是尾巴去搖狗；物質不過是變幻不定的能之另一狀態；並且能與物質之間有一個確定的關係；於是那種守舊的信仰大受了擾亂。正如 4.2×10^7 歐格 (erg) 的能等於一開洛里 (calory) 的熱，一克的物質可以消滅而生出 9×10^{10} 歐格的能。

但是物質何能消滅呢？那拉瓦節 (Lavoisier) 物質不滅定律——已成立了一世紀，又久爲人公認爲科學永存的供獻——又將如何說呢？何以在一地的能沒有消滅，而另一地會有能產生呢？自成立已來，與物質不滅定律有同等榮譽的能力不滅定律，如何說呢？

能的惰性學理膽大地宣佈上面兩個定律是錯的：物質確實可以消滅，而有相等替代的能產生。我們可有一個廣闊替代的定理——「物質與能」的不滅。

然而，倘若物質可以消滅，那麼爲什麼在十九世紀所舉行的幾個精密而正確的實驗未能證實？這是因爲物質與能之間相關係數是一個大數目 9×10^{20} 。對於十的二十方，實驗是幾乎無法可想。熱的機械當量的係數不過包含了十的七方，所以實驗能夠證明這原理。這事實明白白使得維多利亞時代中葉 (mid-Victorian) 的物理學家覺得工作與能之可交換的概念是說得通的——當代人對於這個概念之驚奇也正如現代的我們對於物質與能之相等性一般的態度。從前有人批評過梅依爾 (Mayer) 的熱的機械當量學理說：倘若這學理是對的話，那麼把水搖動就會使水變熱。梅依爾暫時不能回答。等到實驗證明了實在是如此，才算把這問題回答了。

物質的消滅和能的產生，這個革命化的概念之證實是很困難的，這是人人承認的。不幸得很，我們現在不能用實驗去證實這理論。這理論確定地說當一個發熱或射光體冷掉的時候，這物理當失去牠質量的一小部份。舉一個例，一克的水由一百度降到零度，餘下的質量當爲一克減去能的質量的當量算法如下：把一百開洛里或 4.2×10^9 歐格被 9×10^{20} 除得出 5×10^{-12} 克。就算是這麼許多的鈎，我們還不是能考察出這比十萬萬分之一還小的差數 (10^{-9})。

我們所知道的最猛烈的化學作用之一就是氫氧的化合。當十八克水造成時，有 69,000 開洛里的熱或是 3×10^{12} 歐格的能放出，把這數用 9×10^{20} 除，得到失去的質量爲 3×10^{-9} 約六十萬萬分之一克。

在放射物體散放能的情形上，粗看過去，並不是無望。一克的鐳變到鐳錠 D（在這一組裏第一個重要的級位）的時候，每小時有 130 開洛里的熱放出。這個變化是很慢的，每個鐳錠原子的平均壽命有 2600 年或約爲 2×10^4 小時。因此一克鐳變到鐳錠 D（及氫）放出的總能約有 $130 \times 2 \times 10^4 \times 4.2 \times 10^7 = 1.1 \times 10^{14}$ 歐格。拿 9×10^{20} 除，得到 1.2×10^{-4} 克。約爲萬分

之一。

但這一個實驗，事實上辦不到的。開始用一克鐳錠作試驗，一年變換的總數爲十分之四，總共失去的重量（鐳錠與氦都在內）祇有 6×10^{-10} 克。並且還要擔保沒有洩漏（如以 α 線的形式而射出的氦）在內。因此貯藏盒的壁一定要很厚，結果以失去的重量和盒重比，失去的重量是太小，遠在我們覺察範圍之下。

撇開上面的不說，我們轉到天文學家的試驗室，我們碰到很大的數量，似乎夠給我們計量。我們的日球每秒所輻射的能是很大。把這些能化作相等的物質，得到驚人的數字爲每秒四百萬噸的質量。這不是如此容易考察我們知道日球的質量是如此之大，以致於牠能如此消耗下去，可支持到十兆兆年（ 10^{13} ）之久。

由此可知我們的日球和天上所有的星體都在漸漸化爲光。好像這是很新奇，但這不是新的觀念，因爲牛頓的光子說的系論已與此觀念相彷彿。在他的「光學」(Optics) 第三十疑問裏他問：『粗大的「天體」與「光」是否能互相變換？』下面一節引用語是由尼古爾森 (Nicholson)

的自然哲學 (Natural Philosophy 倫敦一七八六年) 取來，再把這一點意思進一步地說明一番，並且附帶地說到當時人們的推考膽量敢到什麼地步。

『假使彗星可以居住生物的話，那末彗星的動物一定和我們常見的動物大不相同。我們可以想像得出，或許這些彗星除了居住生物之外還有別的用處。彗星尾上的物質會漸漸落到日球或是牠們所經過的附近的行星。也許對日球或行星發生什麼影響也未可知，但因為我們不知牠們的性質的緣故，不容我們去猜度。在日球裏這種物質或有補償日球因繼續放射光子所受的損失。』

這裏可以看出十八世紀與廿世紀對日球消蝕觀念之區別：十八世紀的概念完全是唯物論的；而廿世紀的卻是相反的。

很明顯的，十八世紀的觀念可用「牛頓學的」四字形容，因為這大哲學家是光子說的主要擁護者；但我怎樣說現代物質與能相等的學理可以追溯到牛頓，再到馬克斯威爾。

在一九〇五年，愛因斯坦根據相對論的特殊理論的結論，而發表能的惰性的學說。又不多時

他指示出，這原理可以由純粹「舊式」的根據演繹出。假設有一個空心的圓筒，圓筒的二端是封沒的。裏面有一個活塞。假定活塞先在圓筒的左面。活塞與筒的空間有些炸藥。倘若這些炸藥爆發，那活塞就要被推至右邊去，圓筒因受反動的緣故向左移動。這相對的運動要等到活塞擊到圓筒的右邊才停止。

對於一個外面的觀察者，因不覺筒內有一個活塞，只看到這未受外力影響的圓筒，牠的質量（惰性）中心會向右移動一些。因此這現象與舊式的機械學起了衝突。假使他認定公認的機械學是對的，他或許會推度圓筒裏穩藏着的質量的惰性中心向右移動，而這移動的程度恰與圓筒向左移動抵消。於是理智之眼把這隱匿機械作用的玩意看破。

愛因斯坦又假設同樣的圓筒一個，裏面沒有活塞，不過筒之左端較右端熱些。假使有一個輻射熱波由左端經過圓筒的空間到右端。分析一下，這事件的狀況也如上面說的活塞一樣。馬克斯威爾根據了純粹舊式的立場告訴我們，輻射熱有動量（momentum），並能對所射擊之面生一壓力；再根據牛頓第三定律，這能對所離之面生一相等而相反之力。那輻射熱造成活塞當能把圓

筒向左推移些。這移動的數量，若用實驗來檢定，是太小。但我們既承認舊式理論是對的，我們就不能不承認這移動之存在。使圓筒左面冷掉，而右面加熱，就有一數量的能由一端移到另一端；再要保持舊式的學理說一個不變的系統的惰性中心是不動的，我們就得假定一個小的惰性體由一端移至另一端。馬克斯威爾指示輻射能是有動量的；愛因斯坦又加上一項惰性。要保存舊式的機械學，能活塞的惰性當量該為每克 3×10^{10} 歐格。這個係數是輻射能前進速的平方。那公式裏之所以包含這速是因為能的活塞的速度是確定圓筒移動之因子。假使速度是無限大的，那麼沒有時間容許圓筒移動。因為能已碰撞到右端把牠離左端時所生的反動力抵消掉。能移動得越慢，那麼能的當量也越大。這完全與物質活塞的情形同樣的。

現在我們可以用惰性或重量去計量質量；實際上說，我們看得出惰性與重量（或引力）是物質的定義，所用的僅有的兩個特性。「能」有了惰性之外是否還該有重量？

在放射物的事件上，我們已經知道經過了幾千年的「能」的散失，結果會使放射物的惰性變更。公認放射物經過充足的時間，成形於我們所易得到含鉛或含鈾的礦物內。這兩種原素，是一

個變化鏈鎖的起點與終點。這變化需幾千年的時間去完成。鈾的破裂是很慢的，一部份在變化成鉛的長程中，而另一部份卻仍是未變的鈾。倘若在這些變化中，逃失去的能帶走了惰性而未帶去重量，我們可預料第一部變成鉛，第二部未分解的仍是鈾。同重量的鈾和同重量的鉛當有不同的惰性。結果地心吸力作用下的加速力也不相同。重量與質量之比例的問題，或是引力作用因物而異的問題，已受了敏銳實驗所考察過。其中最精細的是歐得浮斯 (Eötös) 用他的扭轉擺所做的實驗。

這個研究家發見：多數物質的惰性與重量之比例之符合程度可達二萬萬分之一。至於放射體，——祇有小量的材料可用——精確的程度祇能達一百萬分之二。

這種證明指示着說：能兼有物質的兩個代表本性。於是物質變成能一定有一個確定數字關係。

但這不是一個好的定則，因為牠不能正反雙方應用。假使氫氧化合為水，而化合的質量細微減少一點，試問把水電解之時，當有若何結果？分解出的氫氧氣體是否比水稍重些？

是的，我們當容納這是對的，雖然實驗時對於這麼小數量差異是不能探考的。分解化合物所用的能當與加增的質量相抵。這個推論由新闢的途徑啟發到勢能 (potential energy) 的概念。這種原是不可稱重的能變成可以確定稱重的能了。

對那輩在發明愛克司光線 (X-rays) 之前，念初步物理的人們，物質變到能的觀念是太空幻的了。這觀念足以使他們驚惶失措。我能否用一個具體的影像幫他們了解。

我想這是可能的，愛因斯坦的引力論給我們一個很好的概念，可以幫助我們明瞭物質之化成能。這理論將在第五、六章內討論。凡是對這理論不熟悉的人，可先看那兩章，再到這裏繼續看去。

照愛因斯坦說，物質是一個紐結 (kink) 或一個歧點 (cusp) 或是某種空間的特殊點。輻射能久被人認為空間的一種東西的振動。根據這個見解，物質與能之相等就容易說得通了。物質是靜的，物質是空間原始扭曲；能是動的，當扭曲的束縛鬆的時候，能就是由扭曲成爲四散的波紋。在這一個見解上面，舊的能媒概念和愛因斯坦空間概念，沒有什麼大差別。倘若空間，可使之變

曲，也可使之伸直。這種動作重複地連續下去，我們就可說空間在振動。把愛因斯坦的空間在變形 (Deformability) 之外再同樣地加上彈性 (resiliency)，說也奇怪，我們能得到與舊有的「能媒」相似的東西了。

在電解水或是任何包含增加勢能的化學作用裏，當能變為物質時有何事發生？這並不是不可思議的一會事，能波之振幅達到某強度時，那能所處的媒質（名之為空間能媒，隨便什麼都可以）達到固定的或似固定的扭曲。這好似一個物體被引張過彈性限止。這種扭曲若是受了能波經過的影響，會漸漸伸直還原。根據量子說，這種還原作用是突跳的。這種情狀，我們可以想像為一大堆礫子，受了地震的影響，慢慢地分解，而實際上卻是一個個移動而跌落。着實點說，若空間稍有正曲度 (positive-curvature) —— 可比於球面（見第五章）—— 上面所說的強度就能達到。這樣，那末由任何點出發之輻射，結果必致於歸聚於宇宙相反面之極點。在此極點上，輻射的強度必與出發時之強度相等。說也奇怪，在一極點上的物質蒸發，經過輻射能的形態，而於另一極點凝為物質。這個理論至少對我們有一個好處，因為要我們假定輻射能好似漂泊的猶太人一般地永

遠進行。這假設使我們理智上感覺難受。現在有了這理論，我們不覺難受了。

承認了物質與能的變換之可能，最後我們對日球熱的來源得到一個適當的解釋。現在很多人以為日球所放出的浩大的能是由氫凝成別的原素——尤其是氦——得來的。

在第一章裏已說過那「填裝效應」(packing effect) 可以解釋各原素（包括同位原素 (isotopes) 的原子量之所以近於氫原子量的倍數的緣故。舉個例，氫的原子量為 1.008，而氦的原子量為 4。在特種原因之下，四個氫原子結合為一氦原子，我們當然預期其原子量為 4.032。但由這情形看來，這種凝合作用必使質量減少；但物質的能的當量是極大，所以失去的質量的能的當量也該大。

現在我們已用分光鏡證明日球含有多量的氫與氦。我們想像在日球內部的情形之下，分子的凝成也不是不可能的；倘若這是事實的話，日球裏能源之大，足以解釋日球產生出的能。

現在有不少宇宙線 (cosmic rays) 的研究家，他們努力工作的結果，使這假設尤其有力。人們已有多年知道在地球各處大氣之中有一種很『硬』或穿透力極強的愛克司光線，牠的

來源久未爲人所得而知。我們已知道這種線不是由地球發生的——牠們既不是雷電所生，又不是日光離子作用所生——但牠是地球外來的。這種宇宙線在空間是沒有一定的方向（譬如說由銀河來的），牠們與時間時季或地點——不論南北極——不生關係。

這種線的穿透力很大。實驗室所用的最硬的愛克司線能穿過半吋厚的鉛。但這種宇宙線經過整個地球的大氣（等於三十吋的水銀），餘下的力量足以穿過二百呎深的水——等於十八呎厚的鉛。這麼強的穿透力，表示這線的週率是極高的。密立根 (Millikan) 估計我們所見到的宇宙線的最高週率，約爲一千萬萬 (10^{11}) 倍於可目見的光線。真奇怪，有人考察出這些宇宙線有四種不同有次序的週率。這些不同週率宇宙線的分光帶展過三級 (octaves) 的地位，由 0.00053 至 0.00021 翁斯特稜單位 (Angström unit 即 10^{-8} 厘)。

實驗室內造愛克司光的方法是在真空內用帶電的微粒——大概用電子——射擊一個靶子。這些微粒的速度可由管的兩端的電壓差調節之。微粒所帶的能越大，那所激出的愛克司線的週率越高。但普通電子沒有帶這樣大的能，足以生如宇宙線這樣高的週率。但是氫之凝成高級原

素時，卻能產生出如密立根宇宙線實驗中所觀察到的那一等高的週率。由氫凝結成任何原素所需之能可以推算到凝結時的週率。現在已經算出四種週率帶 (frequency band) 中最大穿透力的一種，與氫凝合爲氦時的預先算出的週率正相同。還有另外三個週率帶，同樣指着氧或氮，硅或錳，與鐵之造成的週率。

有人以爲宇宙線給我們一個證據說，在宇宙的各處只要有了適當的情形，就有從輕的原素造成重的原素的進程。這種進程在抵消分解作用——在這裏重的原素分裂爲輕的原素。

密立根說：『倘若這個推測能證實，這新立的證據可證明這個世界是變更的，活動的。並且不單是在分解也同時在繼續進化着……以前在空間不停散着的神祕的宇宙線，也就是能媒所傳達的消息，報告着原素的產生。』

這些宇宙線分光景的地位是在已知輻射地位的頂端。照現代考察的結果，這已知的輻射波由最長的無線電波一直到實驗室所用的最短的愛克司光線波。但在這最短的愛克司光線與新發現的宇宙線之間，還有一個大間隙待將來的研究家去填滿。

第五章 空間與時間

在前面的幾章裏，我們已經以廣闊的觀念，梗概地說到自然科學中廿世紀的時勢，所造成的變化。我們已看到，這時代的趨勢怎樣斷定那個「能」的概念是好的，而把牠的地位提高；他又怎樣降低物質的地位爲次要的地位，又令之爲「能」的變化形式之一新形式而已。沒有東西會逃出牠的變化的掌握。這時勢既然把物理科學改頭換面，牠還是不滿意，再伸展牠的雙手達到空間與時間這種基本的東西上面去。

我想我可大膽；在這裏用極端的形容字。我們可由我們平時承認的概念所經過的改變，看到廿世紀的最膽大，最自信，與最迷惑的情狀。

我們對此情狀的默認，也是同樣的奇怪。一個人祇須有五十歲的年齡就可記得，空間曲率與四度空間（如哥白尼理論在舊的學派中，與許多現代人心目中的進化論）在從前祇可稱爲理

論而不爲事實，不然說的人就要受社會擯棄的刑罰，或許人們要疑他瘋狂。但現在呢，琴斯、愛丁登（Eddington），或愛因斯坦，不提別人，可自由談論着，興登（O. H. Hinton）所想而不敢說的東西。不過這種談論只是嚴密地限於高深團體內。

非歐几里得（Non-Euclidean）幾何

非歐几里得幾何爲數學家所認識已有一世紀之久，但祇是在最近的幾年，這些理論在物理學家中纔有立足點。因爲普通的自然科學家對於這學理的來源，內容，預兆以及其在現代物理中所得之重要地位之不熟悉，所以爲這些理論着想，我們該留幾張空白的紙申說之。

公理（axiom）是一簡單真理之敘述。而這真理不能再依據更簡單的真理來申說。譬方說那幾何「直線公理」。這公理說：直線爲二點間之最短距離。又如「超地位公理」說圖形無論移到空間何部份，其大小與形是不改變。著名的「平行公理」也是如此。這公理說經過一點，有一且僅有一不與另一線相交之線可畫。

當我們只說到，平面上的圖形，這些公理的真實，自從歐几里得（Euclid）以來無人懷疑過；但

是此外我們還有別的面，也可畫圖形。譬如在球面上或高脚酒杯的脚上都可畫圖。在這種面上，我們可有完全不同的幾何學，而這幾何學本身卻是一致的。

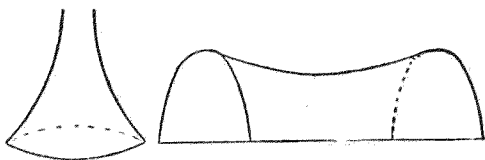
在球面上，兩點的最短距離（每個航海家都知道）為一大圓的弧。這就是球面的「直線」兩點之間的線——這線上的各點都在球面上——不能比此再短再直些。既然每個大圓都互相交叉，所以在球面上是不可能畫一直線而不與另一指定直線相交。換句話說：球面幾何不知道有所謂平行線這東西，所以當然少了那個「平行公理」，雖然那「超地位公理」仍為有效。

所謂的「緯度平行線」並不是二點為最短距離，而為球面幾何的「曲」線。琴斯指出，在巴拿馬 (Panama) 與錫蘭 (Ceylon) 之間張一緊展之線於球面上，雖這兩點都在一平行緯度上，其延長線當穿過倫敦。一飛行者欲以最短距離飛到錫蘭，須由西北向錫蘭而行。

我們可以在球面上畫一三角形。這三角形的邊為大圓的弧。在這種三角形裏，各角度之和不如平面三角形為 180° 。這和數大過 180° 。其數是以三角形之大小而增減。這超過之數名為「球面過贖」。

若在球面上，以一「直」線方向無窮延長，我們遲早總要達到出發點。這些事實與大規模幾何問題（如航海與測地）有關係的人們都知道。球面幾何與平面幾何在這些重要點是有分別。有這種幾何性質的面是稱爲正曲率面。要注意這名詞並不是指凸性或凹性。畫在球面外面與裏面的圖形的性質完全有同樣的幾何性質。

各種正曲率面的幾何雖與平面幾何的種類不相同，但牠自己也同樣地有理的且自己前後一致的。並且還有別種面也自有一種特殊的幾何。譬方說酒杯的脚，馬鞍或山峽（第九圖。）這種面與球體不同之點在於牠一方向是凸形而另一方面是凹形，而一球面各方向是凸形。在酒杯脚的面上，二點間最短距離，大概是一種扭曲的線；這是很奇怪的，倘若我們追究這面上的線，我們可經一點（此點不在此直線上）畫不止一個，而是一束的直線，這些直線無論如何延長能夠永不碰到前面那個指定的直線（第十圖。）



第九圖 負曲率面

在球面上是沒有平行線，而在平面上僅有一個，但第三種面上有多根，但是那「平行公理」（只許有一根平行線）在這裏是不能用的。

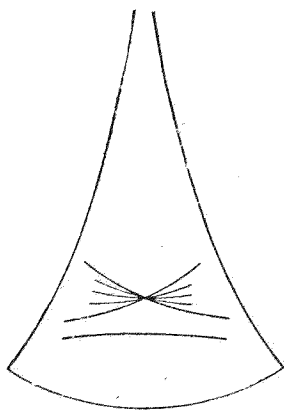
還有在這第三種的面上的三角形的邊是直的，但三角之和總不及 180° 。並且一直

線以一方無限延長，不會回原來出發點。雖然延長線能與原來的線交叉。

有這種特性的面都叫為負曲率面。

一平面是沒有曲率，而平面的幾何是上面說過的二者之間隔幾何。這關係可由下表看出：

	曲率		
	正	零	負
三角形各角之和值	大於 180°	180°	小於 180°
能有平行線之數	無	一根	多根



第十圖 負曲率面之多根平行線

適合歐几里得要素的幾何是平面上的幾何，所以平面幾何名爲歐几里得幾何；並且一平面能不受引伸或撕裂而屈成的面如圓柱體或圓錐體，都是歐几里得面。凡是正或負曲率面的幾何都是非歐几里得面。

歐几里得所寫的關於他的幾何要素的十本書中，不盡是關於平面幾何，他的末了三本討論立體圖形的幾何。他在討論立體空間時，他暗暗地用平面幾何同樣的假設——直線，超地位與平行線公理也同樣的有效用。照歐几里得的眼光，立體空間也是屬於歐几里得形式的。

要是不說這種形式，那麼立體空間，還能有別的什麼性質呢？所有的非歐几里得平面之特有性質是由於牠們有特別的彎屈方法，即是在第三度空間彎屈。而這第三度不爲一平面所包含的。這是可能的，因爲每一個二度空間的面是浸在或鑲在三度空間裏，所以在三度空間裏，二度空間纔有彎曲的餘地。但是立體只有三度，牠已取盡了所有空間，怎能再彎曲呢？這是不可思議的。

但僅是不可思議決不能使數學家放棄他們對這科目之嚴重注意。除非這科目之不能一致，纔能使他們置之不理。也夠奇怪，立體幾何少了那平行公理，也能如平面幾何一樣地前後一致符

合。實際上，歐几里得幾何公理已爲人認爲僅是空間的定義，以決定我們所研究的空間的特性。無論我們說在立體空間中沒有平行線或多條平行線可畫，而無論在那一種說法，我們都可達到一種空間的幾何，而這幾何仍能首尾一致的。在第一種說法，那立體空間是屬於正曲率，在這第二種是負曲率。

能不能把曲空間畫出來或照樣做一模型，這是沒有什麼大關係的。讀者都會注意到在初等數學書上有不少略圖。最艱難的最深奧的科目，其圖形必少。這些圖形都是以數學符號來表示之。對這些符號熟悉者都能應用。

在一八二六年，研究非歐几里得幾何的人，以羅巴刺夫斯基 (Lobatchevsky) 開始，還有許多數學名人可列成一名單——波里愛 (Bolyai)，高斯 (Gauss)，拜耳脫拉米 (Beltrami)，里曼 (Riemann)，海爾姆霍斯 (Helmholtz)，克來因 (Klein)，克利佛德 (Clifford)，里曼的供獻於此項科目是最有意義，因他的成績是二十世紀奇特的物理發展的某部份的根基。

球體的面，和任何面同樣地是二度空間，雖然牠是在第三度空間裏彎曲着。設想一紙人，其行

動僅限於球面，他僅能感覺出表面上的範圍。他能在這面上行動而不受限制；僅當他行動到相當的距離，他會由後面達到他的出發點。以數學的話說，他所在生活，行動生存之空間，雖不受限制，而包含一有限止之多少方吋。倘若紙人之大小比較球體小得多，他所能畫或計量的幾何圖形，對他似有歐几里得的特性。祇是當他擴大他研究的範圍到他（因不知而稱）的「天文距離」，他方能覺察他的空間是彎曲的。

脫離了我們所束縛的觀念，里曼指出計量立體的曲率的意義，可對比於高斯之計量二度空間的曲率。倘若以實驗去計量這曲率的結果，證其為正的且各處曲率一樣大小，我們的立體空間可對比於有限量而無盡端的球面。倘若在這種空間我們垂直向上動，經過廣大的距離，而達到出發點；其方向是由下面行到這出發點。因為在一恆定立體曲率，每直線是重複的，好比球體上大圓之弧。

事實上計量曲率的結果為零，並且我們的空間為歐几里得的，這也許因於曲率之過小，而我們所畫計量的圖形不足以探出之。換句話說，我們本身與這問題的廣大作比，實是太微小。

我們未曾忽略過這一點；假使空間曲率是存在的，在天文的大三角裏可看得出。這種曲率特別能生出星體的視差 (parallax)。現在我們所研究的星體之視差可以是零或是一小正角度。有時也得到小的負的數值，但這也可能是因為觀察差誤所產生的。倘若能有一星體，牠的負視差之值的確夠大，空間曲率的學說之爲事實，可以解釋之。但由目前實驗的證明看來，我們的空間仍是歐几里得的。

超等幾何

曲空間的概念當然包含默認四度空間之存在。在這空間裏我們的空間如球面之浸在或鑲在三度空間裏，如此我們的空間纔有彎曲的餘地。若在這假設的四度空間裏，平行公理仍爲有效，牠的本身可以不是彎曲的；或者牠也以一正或負的曲率而彎曲。若是彎曲的，那麼，必需有一五度空間去包含之。依超等幾何——三度以上的空間的幾何——的新名詞說，這也可能是歐几里得也許是非歐几里得的。雖然歐几里得自己並沒有想到三度以上的空間。

說起非歐几里得幾何，我們又要注意這一點：「不可思議」數學家看來是無甚緊要。所有對

他有關係的就是不一致的問題；然而四度空間的幾何的發展是能夠完全一致符合的。在聖丹尼斯 (St. Denis) 的故事內有這麼一句話：『祇有第一步是有關係的。』那聖徒是受殺頭的刑，照故事說，他的頭砍掉之後，他自己站起來，撿起他的頭，帶了頭走二十步。有一個嘲玩的人問旁人『你信不信？』那人忠實回答：『爲什麼不能信？倘若我信他走一步，我就信他走二十步。』若認有四度空間，其餘的也就好辦，這題目之困難在於那基本的假設。

發展超等幾何的工具早已在我們支配之下的解析幾何公式裏。 $x^2 + y^2 = r^2$ 這方程式代表一圓，這是一二度圖形，其半徑爲 r 。同樣地， $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ 這相似的三變數方程式代表一三度空間，有近似圓的性質的圖形——一半徑爲 r 之球體。那是不一定要畫一圓或球才能解決其相關的問題。每個這種問題可用代數形式來表示之。求這方程式之解，要是對的話，其結果與幾何圖形構造的推理之結果是一樣的。於是， $x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = r^2$ 這四變數的方程式若有所表示，當比擬於可名爲超等球體的一件東西——這是一四度空間的圖形與球體之關係，也如球體之與圓之關係；應用代數於這些四變的方程式，四度空間幾何的各種定理 (propositions) 可得出。

正如立體幾何比平面幾何複雜，超等幾何之可能性比立體幾何多。在平面幾何，如圓這樣的圖形，可不離平面以一點爲中心轉動。這一種動作對在此平面之紙人是可理解的。但在三度空間，我們知道，一圓能繞一線（直徑）而轉動。要想與那在此面內紙人解釋這運動，其結果必至使他陷於不可解決疑難之境。當我們以這形式開始動那圓，在他的眼界這圓忽然不見，而僅有其直徑看得見，一直到我們轉了 180° 時，這圓也忽然發現。假定在圓的一面作一記號，這圓再現時這記的地位恰相反。這整個變化的順序，對他有魔術的意味。

在立體空間一球體能附一直線旋轉，如地球附其軸而旋轉，這是很平常的一會事；若有人告訴我們說一球體可以一面爲軸而轉動，我們會怎樣說呢？在三度空間裏；這是在二度空間以一圓附於一線而旋轉之同樣不可能；但在四度空間這是很可能的。若有某超等聰明的人，想試演給我們看，這球體會忽然脫離我們的眼界，只剩有一圓可見，再經四度空間的半週又出現。若在球的一面作一記號，或者我們不用球體而用一不對稱的物體，在再現時，其形狀爲以前形狀之反像。這反像是在此轉動的平面上。

不扭轉而使右手像左手的形狀是不可能的；但若我們能在四度空間，以一平面爲軸而轉，這件事是容易做成的。

但四度空間的歐几里得幾何並不是完全相似的一會事，而是另外一件事。這裏有奇怪與出乎意料的發展可以發現。在三度空間五個正立體是可有的，在四度空間當有六個，而在五度空間或（以上任何數的空間）祇有三個。

這些都是說到高度空間的幾何。讀者感覺好奇，再要多看些，可以看下面兩本書：阿波特（E. A. Abbott）著平地（Flatland）及興登（O. H. Hinton）著的科學的神奇（Scientific Romances）。我們現在可轉移我們的注意力到時間的概念，看她怎樣與前面的概念調和。

常常可見到生物學家，把一蟲浸在蠟裏，然後把牠切成橫薄片，然後按次序安置，——如活動電影的順序——然後放在顯微鏡底下觀察。起初可以是幾片空白，然後蟲的尖端以一小點之狀出現，再看下去這點漸趨複雜而這點也增大。我們按時間的順序看到這些先後的薄片，然而實際上我們看的時間順序乃對比於空間順序。

回到那祇有平面觀念的紙人。我們假定紙人所居的平面以垂直方向在空間裏運動。其運動結果先後碰到一兩個物體，而這物體在紙人看來是一串的部分。假是碰到一球體，他起初看到一點，又成一個圓。這圓的直徑漸增到極點，然後漸縮小而結果消失；至於形狀更複雜的東西，所生出的各種變化更多。要是他不知他的平面世界之移動，他把這種變化歸於隨時間而變的生長與死亡。用我們的視覺來看，這些都是因為三度空間的運動，而這是他完全所不能覺察的。他所看到的生長的有機體，我們認為是一不變立體各部份的一串剖面。

還有，若在這三度空間裏有許多根線（有的是直的，有的是扭曲的，有的平行，有的相聚或交叉），若這紙人所居的面漸漸在這線網裏行動，每線與平面的交點，在他看來是一質點。若有一線與平面進行方向是相同的，那麼這線似是靜止的；至於一斜的線，這點就會動；若是兩線相聚，這兩端就會趨近；若兩線相交，這兩點就會相碰。

同樣地，我們可假設一羣扭曲的線在四度空間裏，與我們的立體間各相交一點。若我們所能覺察的空間，穩定地在這四度的纏結的線裏運動，結果在我們的眼光裏，好似一羣如氣體分子的

點在亂動。現代物理名之爲「世界線。」並且談論時，就說是「一動點的世界線。」

用這種概念，時間與空間就得調和。將來的事實，是以我們趨進的世界線相對的排置形狀來規定的，實際上將來的事實也就是這些線；過去的事實就是在我們背後的線的排置形狀。超等幾何不知有過去與將來，只知道向前與向後。牠是以 t 來替代 t' 。

幾何在這裏不意的轉到哲學上面去。在老舊的自由意志與決定論上面，牠供獻一新的意義。很容易地把一點之世界線明顯地推廣，我們可把每個三度空間的物體看作一串扭曲世界線的立體段面，其中一線替代一點。我們本身，由這觀點看，祇不過是高度空間的東西的立體部份。若我們偏於決定論，我們可認爲目前的動作，是以我們所到的那一部份的纏結之佈置形狀來決定，並且這些線永久在等我們到那裏。若我們主張自由意志，我們可說這些世界線是可爲我們所改變的，至少在我們範圍內的線的佈置，我可有某程度的改變能力，譬方說，把這些線稍移動些，以免二點之兇猛的撞擊。但任何此類干涉作用於世界線的構造，一定會在前後一小距離生出影響，使我們不能見到部分的世界線受改變。這是像我們把地上一繩索中部提起來，這提點的兩邊會稍抬

高些，在改變我們前面的世界線，這一方面說，我們的影響到將來，普通人都以這爲可能的；在改變後面的部份我們影響到過去。

這是很奇怪的概念——以我們現在的動作可實際上取消掉我們從前的錯事，且可使之（除了記憶之外）好似從未發生過一樣。

這種對時間與空間的概念並不是新的。牠已早已於十九世紀之末完成，但祇爲少數人所懂的。這新世紀所做的，乃是選納這數學的產兒，使之與物理學家住在一起。這樣一件事在五十年前是爲人們不信的。但很安穩的在二十世紀，明考斯基（Minkowski）在他發表下面的言論時，他不會因此而失去聲譽，或被人指爲瘋狂，而其聲譽竟可因此抬高，且又爲同道者所看重。

『我替你們發展的時間與空間的概念是由實驗物理學裏長出來的。就是因爲這樣其力量纔會增加。這些概念的趨向是突變的。由這一點鐘起，空間本身與時間本身變成僅是影子，而祇是二者之混合，方有獨立存在之可能。』

第六章 愛因斯坦——引力及宇宙學

廿世紀的物理學是太廣闊太深奧，決不是一個人所能支配的。不如從前牛頓能主宰他那時的科學，或如亞里斯多德（Aristotle）死後他一手蓋着中古時期的學術。愛因斯坦對於現代物理的供獻是很重要，我們可以以一章來討論之。

愛因斯坦並非孤立的。他可學牛頓的話說：『倘若我看得遠些，那是因為我站在大人的肩膀上。』相對論宣佈於世時並非是沒受人警告。這學理所要解決之困難問題已有一時爲人認識。其中之一（著名的邁克爾孫，摩黎實驗的反結果）爲克爾文所說的青白的天上僅有的兩朵烏雲之一。在一九〇五年前，有幾個思想家下的幾個結論多少有點遙遠地預言着愛因斯坦的理論。特別是羅倫刺（Lorentz），他在一九〇四年所發表的文章，差不多達到愛因斯坦在下年公佈的特殊相對論之目標。時間是已到了，這新的概念就出現了。

大概普通人的印象以爲愛因斯坦是一個大改革家，一個迷信破除者；並且物理的整個構造的根基是他推翻的。並且自他發表之後，牛頓的力學認爲作廢。但相對論並不存心搗亂。反而言之，牠的目的是想消除現有的困難。在那標別十九世紀，且一直繼續到廿世紀的物理概念中，這僅是牠本身的相互調和同團結的運動前進之一步。在這一觀點上，愛因斯坦的一九〇五年的論文所以爲重要。他不名之爲『相對論』。他名之爲『動體之電的動力學』。

自牛頓以後，動體的力學已很夠明瞭，這科目的理論當時是（現在還是）完全且一致符合的，只要我們不拿牠去討論近光速的速率。牛頓力學從未想到這種速是可行的，而事實上到現代纔能由實驗上測知之。在十九世紀，力學定律是一件事，而電磁學定律（包括光學）又是另外一件事。在力學與電學之間有一條明顯的分裂界線。愛因斯坦想把雙方的現象合併於一總括的理論之下。在這一點，他在一九〇五年的論文是局部成功。在這文裏，他發展一普遍動體理論，而那舊的力學僅爲一特別情形而已。當我們所討論的速度，（常是如此）與光速比爲極小時，特殊相對論公式變成牛頓力學的公式。

我們看一看，動體的力學當應用到光學或電學的現象上，就有錯誤產生。

兩個孩子在船兩邊的甲板上，扔球與接球，無論船是靜止或以最高速度前進，其結果仍是同樣容易。在兩種情況之下，拋球的人可以不必管船的速度而對受球人扔球。不如在碼頭上向船扔時那樣。以力學來說，無論這系統是靜止的或以定速移動，那動的定律，仍是不變。

但說到電磁學那就不同。這些定律因這系統之移動而改變其形式。

那是很實在的，這些變化是很小，普通不為實驗所覺察的；但在有幾件事上，由這理論可看出其結果足為實驗所覺察。

有幾個實驗者，曾做實驗考察這幾件事中之一。即是去測量地球在空間的能媒中之行動。這好像應該是可能的。許多的實驗，雖有不同的形式，然其目的都專在這一點上。邁克爾孫及摩黎想找出干涉屈折帶 (interference fringes) 之遷移，雷利 (Rayleigh) 及布雷斯找透明媒質之移動所產生的雙屈折作用；屈老登 (Trouton) 與諾不爾 (Noble) 找一細線上懸一充電之凝電器所受之旋轉影響。在每一件實驗中，其結果與所預料的相反。

在起初的時候，得不到一正結果，並不是重要。爲什麼地球附近的能媒不能爲地球拖了一起動。但是另外有一現象與這假設不符合——這就是光差（aberration）作用。這作用自從在二百年前伯來得累（Bradley）發現與解釋之後，各天文家都知道。

『這個理論（移動的能媒）在解釋光差作用時所遇到的困難，羅倫刺在一八九五說：『好似太大，所以我不能同意於這說法。』

要免去這困難，羅倫刺與菲次澤刺得（Fitzgerald）各自發展這說法：動體在動的方向的長度縮小些；別的方向是不改變；而在一九〇四羅倫刺更進一步達到一完全而又一致符合的理論，預先說到愛因斯坦於一九〇五所發表中之幾點。愛因斯坦在寫他的論文時不會知道羅倫刺的論文。在他一九〇五的文章裏，他給我們各種包括等速直線運動的系統的物理現象之整個理論。愛因斯坦知道他的理論僅限於等速直線運動，但在十一年後纔把這理論擴充到任何運動上面去。因此一九〇五的理論名爲特殊或限止的相對論，而後來的發展是爲普遍相對論。

那特殊相對論所做的工作乃是除去物理現象的理論——無論是動力的或是電磁力的

——中的矛盾之點。牠能把這些現象以同樣的論理去推說，但這樣一來，就生出各種觀念至少爲科學界所不熟悉的。對於那些不以天體爲根據，而去推測地球在空間行動的學者，愛因斯坦認爲他們的反結果是應有的，他又根據這一點造出一概論或假設：

(一)受一系統所限的實驗者決不能推測這系統的等速之運動。

這些實驗中有些是與光速有關，愛因斯坦又造成第二個基本假設：

(二)在虛空的空間裏，光的表面速率不以觀察與光源之間相對行動而改變。

這第二個假設需得詳細考慮方能接受，因爲外表看起來與所謂「常識」起衝突。

我們就要認識，當觀察者是靜止着，而光由遠處達到他那裏，無論光源之爲靜止或運動，光之速恆不變。若在動時，觀察者覺得波長之減短（端布樓 Doppler 效應），而光行之速仍是照舊不變。

假定光源是靜止的而觀察者是在動。端布樓效應仍可看得出，然而按照各種水波或音波之理說來光對觀察者之速當改變；譬如我們在一小船裏，與水波之流動方向相同而進行，我們改變

船之速率而使波的表面速率改變。同樣地我們推測光的表面速率也當因地球向光或離光之速而改變。

物理學家發現了這個實驗結果並不如所設想，他們覺得十二分奇怪。由力學到電動力學，是不能對比的。但對比並不是不致生錯誤。我們知道若以對比方法推測得過遠也會失敗。愛因斯坦接受這實驗的判斷而創他的第二個假設。

要是就只有這一點，相對論現在也會如量子論那樣不為羣衆所知道。這些假設的論理的結果是很觸目的，所以纔為羣衆所注意。舉個例，對於靜止系統上的一觀察者看來，以下各項奇怪的事件，會發生於另一動的系統。

那動系統及其內的東西會以動的方向而縮短。這是如羅倫刺與菲次澤刺得所設想的一樣。對於動向垂直的方向是沒有變化的。若那動體之對靜止觀察者之速趨於光時，其長減為零。於是立體就變成平面圖形，立方變成平方，球變成圓。

在動系統上的鐘對於靜止的觀察者看來，走得慢些，而當那動系趨於光速時，這鐘完全停止。

在動系統中的觀察者看得靜系統的東西也是一樣。他把那表面上的運動歸於那靜系統。相對學理的主旨是說什麼東西都是相對的；各種現象之關係也是對稱的；而不能僅以一系統爲根據，而說這一個根據比別的系统作根據來得有理由些。這個說法之作用，能使每觀察者『以別人的處地看他自己』。若有任一觀察者心中發生一懷疑的問題，那一個是對的，相對論很冷淡地回答：『任一個都對，這是看你用那個系統做根據。』

若動系統的相對速率超過光時，結果怎樣呢？在這裏愛因斯坦的公式就不能應用，因牠們的答案爲幻數，有人說其意義是說一物體之速永不能超出光速。在這一關鍵上，我們記得愛因斯坦的推理是根據於一光線由定體射出一動體再反射回那靜體，要是動系統之速不大，這實驗的結果一定是有理的（雖是很奇怪），若那動系統之速大於光時，發出的光是不能達到那動體，所以不能反射回來，以致實驗是做不成的。

這就是數學公式的脾氣。當那公式之引伸超出自然限度之外，這公式就會說這一類的亂話。由物理的立場看，任何物體的速度之不能超出光速，必有其原因。我們已信原子分子之最後

組織，必含有電的性質。在第一章裏，我們已說到那在相對論之前的發現，這就是『充電顆粒之質量，因其行動速度增加而亦增大』。質量增大率，在起始增加時是不易覺察的。直至其行動速度趨近於光速時，質量增加率是很大很大的。所以當速度漸近於光速時，要促進該物體速度之增高，必需更加大的力量。最後質量和力同趨於無限大之值。

由特殊相對論我們可得一個關於動的充電粒子的質量變化的公式。恰巧這公式所表示的，與前面討論的質量變化完全相似。若我們把光看為一自然的限值，我們必須記得這是物理的性質，我們必須拿相對論前的實驗為出發點。至於相對論祇是肯定，而不是報告這件事。

密勒 (D. C. Miller) 複試邁克爾孫摩黎實驗，他所發表的結果是正的。這件事引起不少人注意。他實驗的結果是以威爾孫山上的實驗為根據。自他的結果發表後，就有一連串類似的實驗產生。人們對此興趣即可由此看出。亥得爾拜格 (Heidelberg) 地方之湯墨斯魯克 (Thomaschek) 複試屈老登，諾不爾實驗於少婦山 (Jungfrau)，其實驗地點之高度約兩倍於威爾孫山。他所得的結果是反的。畢卡 (Piccard) 與許大愛爾 (Mt. Stahel) 在利吉山 (Righi) 上汽球內做一邁

克爾孫摩黎實驗，後來在海平面上又做一次。他們的兩次結果都是反的。以後實驗中之重要者有開納地 (Kennedy) 仿密勒方法重試邁克爾孫摩黎實驗。他把儀器縮小，以致可以放在封沒氮氣箱內去操縱箱內的溫度。他在海平面與威爾孫山上都做實驗，其結都是反的。後來有人在同一地點，用同樣方法去做實驗，這結果證明開氏結果沒有錯。

邁克爾孫複試那以他和摩黎的名字爲名的，有歷史意義的實驗。他的實驗是在密勒得到正結果的威爾孫山上做的。實驗的結果於一九二八，十一月發表。其結果，證實和增強他從前實驗的反結論。他的實驗結果也被密勒認爲對的。現有的實驗結果都一致告訴我們密勒的正結果，也許是由於未知的錯誤。因此特殊相對論也就站得住了。

我們要記得特殊相對論祇限於各種直線運動系統內發生的現象。這理論之不完全，愛因斯坦自己也承認。但是要把這理論擴充到任何行動方式之系統，其困難之大是無可諱言。所以他費了十一年的功夫，纔得成功。擴充的目的是要造成一個前後一貫的理論，以致可以應用到各種變速運動系內任何現象上——無論是力的電磁的。

愛因斯坦運氣很好，當他着手創造普遍相對論時，他所需數學工具是現成，他就可利用。這些數學是張量 (tensors) 之理論和累維錫繼他 (Levi-Civita) 之絕對微積分。一九一六年時很少人懂得普遍相對論，以致於愛因斯坦說恐怕能看他的論文的人不到十二個。普遍相對論理論上的發展，所需數理技術之艱難是無可諱言。由特殊相對論我們可以得到幾個出乎意料的結論。這幾個結論中有幾個可以拿實驗來證明。

恐怕相對論最顯著的結果就在牠能把引力作用歸入牠的系統裏。引力作用在相對論裏佔了一個很大部份，所以我們現在一旦提到引力作用這個名詞，我們就不能不聯想到牛頓和愛因斯坦這兩個名字。

我們先很簡單地回想到牛頓對於引力作用的主張。以地球的引力去解釋物體之下落，這一個說明當然不是牛頓首創。伽里略 (Galileo) 對這觀念已是很熟悉。亞里斯多德 (Aristotle) 也已知道的。就說反平方定理，在牛頓格物宗論 (Principia) 發表之先，已不至一兩個人想到。牛頓對引力作用的特殊貢獻乃是：他促成反平方定律應用之宇宙化的概念，他並且用事實來證明

這定律。他用這定律足以解釋第一，月亮繞地球之行動；第二，行星繞日球之行動。最後他再用合理的歸納法說明宇宙間星體的行動。

說明事物原因的假設，即使牠在邏輯上數學上一點毛病都沒有，我們非得經實驗證實之後，是不能與以最後的承認。我們要證實牛頓引力定律，就非得經過很長的年代，連續觀察行星的行動不可。十年一次的觀察的結果，那些天體的行動是很正確地按照反平方定律所預定的路線而行動，時間漸漸過去，儀器愈變愈精確，而「比較測量法」也更準確，但是天體行動與牛頓所定的路線很是接近，以致過了一世紀，簡直看不出觀察與理論不一致的地方。後來在一八四五，勒未累（Leverrier）引起當時人注意到水星行動之稍有不規則的地方，即是說與反平方定律不符合。而且這差誤是很大，決不可以歸之於觀察的錯誤。後來又有天文學家證實過，有許多人想法去解釋這異常的情狀，但是他們都失敗，由這一點可看出大衆把這問題看作很嚴重的一回事。當時最極端的辦法乃是把牛頓定律的指數由 2 改爲 2.0000001612。這辦法是荷爾（Asaph Hall）——火星衛星的發現者——想出來的。這辦法就是當代名家像牛昆（Newcomb）都很覺得滿

意。但是直到布朗 (E. W. Brown) 告訴他們月球的行動與 2 這指數完全符合，牛頓就不信荷爾的主張。因此這水星的異常的行動，仍是一個不能解的謎。牛頓反平方定律之簡明，在幾何觀點上之合理性蓋然性，都使我們特別喜歡牠。因此有人以未曾發現的天體對水星引力的作用去解釋其行動之不規則。而他們一次一次地失敗，卻引起他們轉移他們注意到別的方面，推究到我們根據的異常情狀的本身方面。

於是愛因斯坦帶了他有名的引力定律在這種情狀之中上臺。他的定律在外表上一無美點可取。他的定律之極端複雜恰與牛頓定律特殊簡單對待。牛頓定律祇須一個微分方程式即可表示出，而愛因斯坦的要十個聯立微分方程式去表示，並且每一個的形式都是很新奇很可怕的，所以一定要用一種很簡括不常見的符號去寫他的公式。比愛因斯坦理論力量差得多的理論都失掉牠們的立足點。但他的理論雖然外表難看，然而這理論完全根據成就的能力，慢慢地使人不得不承認他。牠不但能解釋牛頓定律所能解釋的，並且解釋得一樣好，並且還能很順利地解決偉大水星不規則行動的難題。不止這一點，他還做那常是危險的預言工作。他告訴我們某種現象

是存在的，但這現象我們以前是沒有看見過的。這就是光線的方向因日球強大的引力而屈折。這預言曾經日蝕考察團實驗結果所保證。

新理論的這樣一個成績引起了許多自名爲物理學家的人的注意。爲了明瞭這問題所需的背景，我們可以很簡單地把引力理論的歷史溫習一遍。

自牛頓起，物理學家研究各種不同的現象時，總把引力作用分爲獨立的一類。除了這一類之外，各種物理現象很迅速地走向一統的路上去。熱原是一種獨自存在的不可衡量的實質（溫素 caloric），後來也加入爲善變的能的多種形式中之一。電與磁電與光之間的關係都已找到。就是物質本身的組織也是認爲有電的性質，並且物質也被認爲「能」的多種形態之一。

當在這大團結的時候，引力作用遠遠地站着，不願和別種物理現象發生瓜葛。老實說電與磁的吸力作用在表面上的確與引力作用有相似之點，但這僅限於反平方定律。磁的吸力作用可以有東西隔絕，並且也因溫度改變而受影響。在靜電方面也與間隔的媒介體發生關係。這些現象都不能在引力作用裏找出。許多實驗的目的都在想發現一樣東西可使引力作用因牠而起變化，但

所有的努力結果全失敗。由這些實驗的結論，我們嚴格地承認：各種物質同樣地受着引力的作用；引力作用不以溫度而改變；我們不能找出隔離引力的東西。實際引力作用除了爲作用體質量與空間地位之函數外不與任何東西發生關係。

臆度的工作始終沒有停止過。牛頓在他的早年書裏，雖未作任何假設，但在他信扎裏，他私下很大膽下假設。這種態度是每個科學家所當採取的。有很多解釋引力原因的理論曾經提出。斯密孫報告年刊 (Smithsonian Annual Report) 在一八七六那一期裏收集了多種這一類的假設。這些文章共有二十五至三十之數，都是在牛頓後，會上過書本的。自那時起恐怕還可有半打加上去，如梭諾爾咨 (Osborne Reynolds) 所提出的。那是不用說的，這些假設在現在除了有歷史意味之外，一無用處。

由這些理論和實驗的結論，我們可說在廿世紀初的時候我們對於引力的智識還只是牛頓給我們的那一點。反面的結果是很多，但沒有一個正面的。於是愛因斯坦出來，他給我們很重要的結果（前面已說過的），這是兩世紀以來，引力理論前進的第一步。

我已說過引力作用在各種物理現象中自成一類。在現在這到並不盡然。愛因斯坦是第一個指出另外還有一種現象，也是與引力作用處於相同的地位。這就是惰性，惰性在離心力的形式最像引力作用。離心力與物質的性質無關，又不是溫度的函數，並且又不能為任何東西所隔離掉。實際離心力如引力作用，只是該系統的質量與空間時間的函數。

愛因斯坦用一個轉動的圓盤來說明惰性。設想一個很大平圓盤，好似遊戲場裏可看到的那一種。上面可以站人。這盤上可以有一個大的半球形的蓋子蓋着，那觀察者在裏面不能直接看出這盤是否在動。假設這盤先是靜止着。觀察者在裏面走來走去，不覺得任何一點與其他一點有不同之處。若我們把圓盤轉動，雖然那人不能直接看出盤在行動，但他能覺得有些不同。在盤上各點除非是正在盤的中心，他覺得有一股力量迫他由中心向外動，這人覺得他好像住在翻轉來的引力場。這排斥的力，只是由於惰性。由此看來，這力並非由盤旋轉中心產生，所以若有一隔離放在他與中心之間，他所受到的力決不會因此減少。這裏一個例告訴我們怎樣一個系統的運動可以產生一類似引力的力場。當那個系統行動一旦停止，這力場就不見了。

我們還可以舉一個升降機的例來幫我們思索。假設有一個關密的升降機裏面藏着一個人。這機先是停着。若有一個鎗彈穿過這機，這彈的路徑由這人看是由壁到壁的一直線。這直線方向不一定是水平的。要是那機以等速行動，那人看到的仍是如此。若是那機以加速向上行動，子彈的路徑便不是直的，而是一個向上凸的彈道。那觀察者以兩種力的合力來解釋這彈道之彎曲。這兩種力是；子彈原有的衝動使牠以直線行動，再加上某種引力把子彈向地下拖。這又是一種力的假設，但這力並沒有存在。要是不用牠，就難以解釋了。實際的變化僅是觀察者的系統由靜的變為動的而已。

用這些例去表示真實一個物體的引力場雖是差得遠，但多少可以幫我們了解愛因斯坦所謂的引力場乃是相當於一種適當的坐標變換後的惰力場。但是以上所舉的例，沒有一個能以適當坐標變動去表明有質量物體的三度空間力場。若果真有這種坐標系統，找出這系統的工作就是最有學問的數學家也不敢下手。愛因斯坦對他自己的直覺有超越的自信力，他就把這工作，肩在他的肩上。

很奇怪的事發生，他從一點細微的線索，根據所謂的超人的直覺，竟然成功！他發現一種坐標的變換，可以表示真正的引力的各種現象，比牛頓定律更來得精確。

這新的坐標系的性質是怎樣呢？牠是否像一上升的升降機或旋轉的圓盤？不，一個都不是，牠一點都不像二者之一。這是一個極端空幻的一個概念，根據這概念空間既是四度又是非歐几里得的，這四度空間是在五度空間裏稍些扭曲着。

這裏的話很不容易說。要使這些話在我們腦筋裏能有一影像，我們就得往下跨二度空間。就是說二度空間的東西在三度空間裏彎曲着。

設想一個平面的靜水。這靜水面祇是二度空間——有寬有長而無厚。這面是絕對的平，所以上面的幾何形體完全是歐几里得的。假設這面是球面的——如大規模觀察之下的洋面。在這面上各種幾何形體都呈現着正曲率 (positive curvature) 非歐性質。

若在這水面上浮着一個物體，這物一經被推動後，——不再受任何阻力，吸力等力的作用——牠就按照牛頓第一動律最短「直線」路線進行，但此直線祇是限於球面上。在任何曲面上

一最短的路線，我們另有一個普通的名稱叫做「最短線」(geodesic line)。在一曲面上，不受外力的動體的自然行徑是在這「最短線」上。

現在回到原來平的水面。我們設法把牠用另一種方式彎曲着，使牠仍是屬於非歐性質。我們可以巧妙的手術把一個比水重的東西如金鉛之類，使牠可以浮在水面上。我們只須不要把水面弄破，就能做到。這物體受着凹陷水面之支持而浮着。這個二度的平面在一物質的附近彎曲於三度空間內。若我們觀察這曲面內幾何形體，我們知道這些都是屬於非歐的，而同時又是反曲率這一種。這曲面裏的「最短線」是一特種的曲線。要是把曲線無論在何方向，延長到凹陷面之外，「最短線」與普通直線不能分別。於是離這凹面遠的地方的幾何是屬於歐几里得的。

假設一個比較重的物體浮在水面上，造成一個深而且廣的凹陷。在很遠的地方——歐几里得的平面——有一個小而輕的物體在那裏動着。牠動的方向使牠能經過這重體的附近，換句話說，經過這重體的凹陷。那動體的路線，起先是一直線，後來跑進這凹陷裏，就漸按照這空間的「最短線」而行。假設二物體之間沒有引力存在，那動體就離開這曲面，而以後的路線仍是直的。但因

牠路徑受了這回陷曲折了一下，所以後來的直線與先前進凹陷的直線不成一直連的直線，運動體的路線就受了永久的轉向。

觀察者由歐几里得——牛頓的眼鏡裏看——他當然看不出水面的彎曲——就說：『哦，輕的物體經過重體時，受了一種力而改變牠直線行動的方向。』假使他換了一付愛因斯坦所製的眼鏡，他就要說：『不，我現在知道這裏沒有引力存在。這完全是那物體的惰性和牠所經曲面的形狀使牠改變牠的路程。』

這些都是說到，二度面在三度空間裏的彎曲。愛因斯坦對引力作用的解釋，乃是設想上面的現象發生於多度空間。他和明考斯基都認為我們三度立體空間祇事實真像的一部份，至於四度空間，我們所能看到的祇是在時間變換中一連串。但愛因斯坦又發現光用四度空間，仍是不足以使引力作用合乎規律。他不得不假設在物體的近傍這四度的空間稍彎曲於五度空間裏。一根由星體來的光線經過廣大的區域，遠離物質的天體，所以是「平」的或歐几里得的。經過這區域，光線的路程是直的。若這光線經過日球的附近。那麼日球的大質量使附近空間有相當的彎曲，變成

非歐空間。於是光線直線行徑便受了彎曲。當他離開那曲的空間再直線進行時，光進行的方向，已與原來的不同了。

愛因斯坦計算出光線剛擦過日球表面所受的曲折角度爲一又十分之七秒。光線擦過木星的曲折角爲百分之二秒。木星那種曲折我們是完全看不到，至於日球的曲折已爲幾個日蝕觀察團所證實。

這些結果並非沒有受人詰難。哥倫比亞大學 (Columbia University) 的普爾 (Poor) 教授以爲星體光線向日球彎曲，是由於日蝕時，月影在地球大氣中造成一錐形的冷空氣所生的影響。由星體來的光線進到這錐影裏，即是由外面熱的空氣跑影裏冷而密的空氣，必須向裏曲折。既然月球的邊緣很是分明，那麼擦過月球的光線也當以同理而曲折。就是說月的直徑必較常時來得小些。

斯窩司摩耳學院 (Swarthmore College) 的斯普老爾 (Sproul) 天文臺日蝕觀察團於一九二六，一月，蘇門答臘 (Sumatra) 日蝕時曾用照像去計量曲折影響。由拍下來的照片看來月

球的直徑很精確地和平時一樣大小。

愛因斯坦的解釋水星行動之不規則也不能受人詰難。有許多人想以舊的立場去說明這現象。有的以太陽附近有一條微細吸引質體的帶去說明。但要產生這不規則現象所需的量是不小，決不能不爲我們所看見。因爲這緣故，普麟斯吞 (Princeton) 天文臺的拉塞爾 (Russell) 教授下一判斷說，愛因斯坦的說明得勝利。

現在還要說到由相對論得到的第三個預言。這是愛因斯坦自己的預言。由那方程式裏看出，一個很重的物體如日球等放出的光的光帶必向紅端移動。這移動是很難證實，因爲這移動的量是不夠大，因爲同時有別種原因所產生的，差不多大小的移動存在。與他預言相反的結果已有好幾個人發表。當時很難判定孰是孰非。到威爾孫天文臺的亞當斯 (Adams) 拍到天狼星 (Sirius) 的伴星淡弱的光帶，方得一解答。我們不用日球而用這星之理由，是在於這星有極大的引力場，所以愛因斯坦預言的移動就有幾倍大。

天狼星的伴星在星體中可算是很奇特的一個。克拉克 (Alvan G. Clark) 在一八六二年

試望遠鏡時發現了牠。牠是一個暗的星。牠的光亮祇有天狼星的萬分之一。牠的質量有日球那麼大。由牠的光帶的性質看來，牠的溫度有攝氏八千度左右，而日球有六千度。因此牠每單位面積的光亮程度必比日球大，雖然牠總共放出的光遠小於日球的光。所以牠的面積（與直徑）一定是比日球小得多，雖然牠與日球有同樣的體積。換句話，牠的密度一定比日球大得多。

一經計算出來，牠的密度竟然大得不可思議。愛丁登（Eddington）算出牠的密度約爲五萬。照這密度算來，一品脫（pint）這物質，在地球上的重量約爲二十五噸。

這物體以這樣驚人的密度，竟能發光並且服從氣體的定律，粗看起來是不可能的。而愛丁登給我們一個巧妙的說明。他說星體的原子（指波耳原子說）在星體內部的極高溫之下，會失掉電子，——阿爾弗來得（Sir Alfred）所謂的失去牠們的「裙」（crinoline）——於是牠們便能靠很近，仍然有很大的空間，所以這物體的結構，還是像氣體一樣。

在這樣密度星體的表面上，愛因斯坦的光帶移動約有三十倍與同質的日球。於是愛因斯坦移動在實驗上可看得出了。亞當斯所看到的移動與愛丁登算出的不差到百分之十。要知愛丁登

的計算祇是很約略的。這就可算第三次考試愛因斯坦的結果是完全滿意的了。

第四個實驗用來考試愛因斯坦對引力作用的基本假設，是於幾年前在美國標準局做的。我們已知道這理論是根據引力即是惰性的假設。我們可用一種異向異性結晶體（non-isomeric crystals）做一個靈敏的實驗去試他的假設。在這種結晶體裏，任何物理性質（除了惰性，也許引力也在外）都因對結晶軸方向不同而改變。在這種結晶體裏，光的速度也因對結晶軸方向不同而改變，至於電導熱導也有同樣的變化；膨脹係數，彈性模數（modulus），光的選擇吸收，熱電性質（pyro-electric）及壓電（piezo-electric）性質（若是有的話）也是因向而變。甚至於各方向的硬度也是不同。因此我們就要留意，在這種結晶體裏，引力作用的行態是否與這麼一大羣的物理性質相同，或者和單獨的惰性站在同一線上。

這種結晶體引力作用因方向而改變之可能性，未始不爲人注意到。在愛因斯坦前對此作的實驗都一致不能證明這一點。實驗精細程度不夠大。比較最精細的如泡音丁（Poynting）及格雷（Gray）的實驗能達到一萬六千分之一，但還不足以回答這樣重大的問題。並且這些實驗都

是用六方 (hexagonal) 晶體做的。

標準局所做的實驗，想包括所有異向異性的結晶體的樣品，並且把實驗精細程度儘量提高。實驗的方法是直接衡量結晶體對地球的不同方向的重量。實驗的精細程度竟達十萬萬分之一。在這樣精細程度之下，沒有重量變化可以看得出。

錫拜爾斯坦 (Siberstein) 提出第五個實驗。這實驗在這裏是很有意義的。這實驗後來是邁克爾孫做的。這實驗是根據地球自轉對光速影響之可能性。若是能媒跟着地球轉，那麼在地球表面各方向光的進行不生加速或減速的影響。要是地球與能媒有相對行動時，我們可以兩反向的光線所產生的干涉帶 (interference fringes) 之移動看出。錫拜爾斯坦由普遍相對論——不用能媒——算出干涉帶的移動之大小，相當於完全靜止能媒所產生的移動之最大值。因此若我們能找出沒有移動，或是移動量小於那最大值時，相對論就該是錯了。若是那移動恰為最大值，那麼就分不清楚了。或是相對論是對的，或是能媒不跟地球轉都可以，邁克爾孫所得的結果恰是如此。

在哲學家的眼光看來，相對論最有趣的特徵乃在於牠能很自由地應用超越空間（hyper-space）的概念。四度空間的概念在洛伯切夫斯基（Lobatchevsky）時，曾多次被人由物理中笑走，但牠總再回來，而現在好似比以前來得更堅固。

四度空間「空時間的連續系」（continuum）與「世界線」（world lines）在普遍相對論佔一基本的地位，並且曲的空間好似普通力學的「約束面」（surface of constraint），頂替了引力的概念。

愛因斯坦在發展他的普遍相對論，他認為我們的立體空間是正曲率的（相當於球體之面）並且容量為有限，但沒有邊緣。並且奇怪得很，愛因斯坦把我們空間之所以曲，歸因於裏面的物質之存在。他認為要是沒有物質在裏面，這空間一定是歐几里得的！

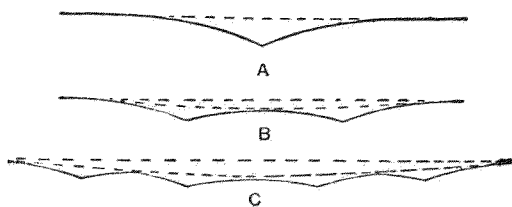
要理解這觀念，我們必得回到二度空間。我們已知，照愛因斯坦的說法，物質附近有皺紋，或許他本身就是一種空間的皺紋或扭曲。（第一圖A）這種扭曲理論上該伸展到無限遠，但實際上在物體的短距離外，就變得非常之小，小得可用不着計量。若有兩個質體靠近一起，牠們中間的

空間比原有面低一些（第一一圖B）。要是再加幾個質體在裏面，往下低落程度來得更利害些。於是空間的輪廓就漸現出曲的形態。（第一一圖C。）只要加增質體的數，和減少牠們的距離，我們可以得到任何大曲率的空間。若物質的散佈範圍是很大，我們可以料想到，原來的平面會曲成一球面，這球面各部都嵌入這些小質點的扭曲裏。這球體的半徑和面積是由這些扭曲的距離而定的，就是說要看空間質量的散佈的密度而定的。

再回到立體的空間，我們用同樣的理論去對付牠。愛因斯坦給我們的公式，可以由星體的散佈密度與引力常數算出我們的空間的曲率半徑和容積——假設我們的空間相當球體那樣正曲率的。傑安

（Jeans）以此為根據，說我們若能週遊空間千萬萬光年之距離，我們仍舊回到原來的出發點。

普遍相對論常引導我們到這種空幻古怪的觀念，使我不能看到這種境況的實在形態。不管



第一一圖 因物質而生之空間曲率

牠的結果是怎樣地空虛，相對論是一個爲工作便利而設的假設，用以迎合實驗的事實比牛頓的假設來得更適合些，這是一件無可諱言的事實。相對論比老的理論更近於事實，但牠的性質是人的，太不近自然。所以我們萬不能把牠認爲自然真理的最後的表現。

愛因斯坦認爲他的思想的結論很健全。以數學家的地位他自然認爲他以他的經驗方程式 (empirical equation) 去配合那曲線，當然與原來代表那曲線的方程式完全不同，並且應用到稍遠的部份牠便要和曲線分離。有人聽見愛因斯坦說：『沒有實驗的結果，可以證我是對的。只要一個實驗任何時都可證明我的理論是錯的。』

相對論最不自然的部份不是關於引力作用而是那舊的或是特殊相對論的部份。愛因斯坦的這一部份學說乃是受邁克爾孫摩黎實驗的反結果和其他試驗地球在空間行動的實驗的刺激而創的。這學說裏面有這樣一個假設說，要考察地球在空間的絕對行動，無論那一實驗都是不可能做到的。由物理學方面看，移動之運動應該不能看出，但是旋轉的運動另是一回事。旋轉該含有一種絕對的性質。若地球被一片連續的雲所包圍，我們還可以拿佛科 (Foucault) 鐘擺或是環

動儀 (gyroscope) 去考察牠的轉動。關於這一個辯論點，相對論自有牠的答語；但是愛丁登說到旋轉運動時，相對論不能說明事實，並且把事實改變。

對於這個問題，相對論者退回到托勒密 (Ptolemy) 天文學。我們所熟悉的旋轉地球，附着一種離心力，圍着比較上靜止的宇宙星體；在相對論者看為一個靜止的地球與旋轉的天球！這簡直是向黑暗時代倒退一大步。要不是他的方程式說明空心旋轉體，會對牠內部物體有一種力的影響，我們真相信他在開倒車。愛因斯坦方程式說，在一個很重的空心筒裏面的一個鐘擺，會被那動體慢慢拖着轉。他的方程式還能指示在空心旋轉體裏，一個靜止系有一種類似離心力的情狀。

數理上這理論有一個答案。這答案雖在數理是完全，但牠缺少一種很重要的性質。這種性質，愛丁登名之為「收斂性」 (convergence)。要產生這種類似離心力的作用，雖是很小的作用，所需的旋轉質量要非常之大；若是加大這空心旋轉體的半徑，所需的質量更要大。若是我們看到的地球表面的離心力作用是由天球與其所有的恆星總共質量旋轉所造成，這種質量一定是非

常大，遠過於我們所能估計的。要不是無光星體多過於有光的，我們就得歸這種影響於更遠因而更大的質量。我們算得愈遠，我們需要更來得大。根據這種假設的宇宙是像一個倒立的金字塔。在這裏相對論現出牠性質：一個空無一物的數理殼子；當牠能適合事物的時候牠是有用的，不能的時候就沒有用。

相對論把能媒弄走，而不能以另外說明光怎樣傳達，尤其是牠對光的干涉作用始終未提一句話，引起不少人批評。對於這一點我想相對論者可以回答說相對論所研究的只是大規模的光的傳達。這種傳達是在「最小作用的路程上」(path of least action)，這就是曲空間裏的最短線。並且許多別的光傳達的現象都可由這假設得來。至於說到把能媒弄走這回事，我們要知道在愛因斯坦前已有人達到這一步。在他前常時有人下能媒的定義為「波動這動詞的主詞。」實際愛因斯坦的空間不比現代能媒觀念壞，因為我們也可以照樣說「彎曲這動詞的主詞。」若牠能彎曲，牠為什麼不能震動呢？為什麼我們不能有一種細波重疊在物質所產生的靜止的大的曲弧上，而同時這種細波是按照普通光在彈性能媒中傳達定律而進行。由這一點看來，新與舊是不相

上下。物質是一種靜的變形，一種空間——叫牠能媒也可——固定的變形。只要在愛因斯坦的空間加上了彈性與變形性，就可得到一種可以說明愛因斯坦所未談及的光現象的結構。

也許有人受了這評論的影響而想去看愛因斯坦的書。我一定要說他的書差不多可以說是讀不懂，就是對於一個比平常物理學家，多知道些數學的物理學家，也難能懂得。無論在數學或是不在數學方面，由各方面紀載他的理論的書我可以介紹的有弗老因脫烈希 (Freundlich) 的小冊書『愛因斯坦引力理論之基礎 (The Foundation of Einstein's Theory of Gravitation)』。這書有不羅斯 (Prose) 的英譯本。要看老的相對論或是特殊相對論，可以看克寧格汗 (Cunningham) 的『相對論與電子論 (Relativity and the Electron Theory)』。愛丁登的書在沒有數學的一部份寫得很靈巧很有刺激性的，但他數理方面不是為初步的人而設的。

愛因斯坦對於宇宙的觀念，使我們聯想到托勒密的天文學。在當時，托勒密的理論並不為人所輕視。這是一個很不壞的概念，牠能完全解釋當時我們所能知道的天文事實。假使沒有哥白尼 (Copernicus)，等到佛科臨到，這理論也得倒。愛因斯坦的理論也是這樣。單單複雜這一方面說

他的理論超過托勒密。我們之中有不少人會想到且表同情於那托勒密時代的，（雖不敬到還實際的）阿爾芬蘇（Alphonso）王，他覺得可惜在創造世界時他沒在那裏，因為他可供獻一個較好的宇宙構造計劃。目前沒有一個人能有比愛因斯坦更好的理論，但他的理論也許近來或是將來一定會成爲過去的事物，只要時機成熟那發明者到臨。牛頓的理論太過精確，所以過了二世紀之久，纔有愛因斯坦的公式比他的好。此後多久我們纔能有修正現有代表自然之彎曲構造的，經驗方程式，現在誰也不能知道。

有思想的讀者，讀了愛因斯坦的普遍相對論，會有一種失望的情緒。這理論不但不夠普遍，以包括所有的物理現象，牠還給我們一種印象，就是所有的東西都附在引力作用旁邊。引力當然是個很值得注意的題目，但是此外還有別的同等的東西如電磁。

自馬克司威爾時——差不多到現在有五十年——我們有一個數學的理論，這理論很能精確地形容電與磁的基本現象。自從愛因斯坦發表了他的普遍相對論——已有十二年——我們有一個數學理論，這理論能比牛頓描寫引力現象更精確。馬克司威爾的方程式一點也不像愛因

斯坦的引力公式。

由物理方面看來，其間有一種超然的共同性。因為電力磁力引力全服從反平方比定律。爲了這一點，我們早在數學物理裏分出一支，名爲位之理論。這理論乃是以完全相同的數學，來討論這三種現象。不一會這種方法之應用就須停止，因為當我們一旦不談物質與物質之吸引時，我們就碰到引力與電或磁力之不同點。充電體或磁極間之相互作用很受間隔的能媒之影響；但在引力方面我們找不出一種隔絕體。

在這幾方面，我們要描寫全個自然，有兩個不同的數學理論是必須用的。二元論多元論在現在概而言之不是一個滿意的哲學思想，尤其對於科學家是如此。這一世紀來物理思想是努力向着科學化的一元論走。愛因斯坦是這運動的領袖。由他的特殊相對論論文的開端可看出作者的思想用在習慣的二元論去解釋自然現象。他說到一磁石與一傳導電路因相對地位之變動所生之相互作用。他說明結果的感應電流，無論磁石動或電路動，仍是一樣。因此我們有兩個解說去對付這兩種情形。真真的一元論者覺得，這不是一個正當的哲學態度，一個結果祇需要一個解釋。當

馬克司威爾連合這種好似不同的現象如光與電時，他促進了一元論的思想。要是他能這樣做，他想爲什麼不能把電和引力放在一個的總的理論之下呢？

要做到這一點卻是困難。愛因斯坦看出他自己所謂的「普遍」相對論之不完全，他努力改進他理論使牠更概括。至少有一次他認爲他已把這難題解決，但後來又覺得這尙須考慮一下。威爾（Weyl）一九一八普魯士科學學院會議報告裏曾經對這綜合工作有一個有名的嘗試。但他後來一篇文章「力場與物質」（Feld und Materie）〔登在物理年刊（Ann. d. Physik）第六十五卷，一九二二，五四三至五六三頁〕他好似放棄了僅以力場的理論來解決電的物質之希望。

後來在一九二八年，愛因斯坦不久有一篇關於這題的文章，消息傳出，引起了羣衆的興趣。他的論文登在一九二九，一月份「會議報告」裏。下面可以簡單地說一說。

普遍相對論把我們的空間看作正曲率，或名爲里曼（Riemann）空間，以區別於負曲率的羅伯切夫斯基（Lobatchevsky）的空間。在這里曼幾何空間裏是沒有平行線，除非這兩線之距

爲無窮小。「遠距平行」(平行線相合與無窮遠)是歐几里得或是不曲的空間裏，可以有的，而在里曼空間是找不到的。

由數學公式所表示出的里曼空間之寶藏，已被愛因斯坦和其他學者所發掘出。他們的目的，是希望由這裏找出一種性質，足以使普遍相對論把電磁的現象包括在內。費了這麼許多的力量，結果仍是一場空。最後愛因斯坦下斷語說里曼空間包括電磁現象之可能性是很小。

奇怪得很，歐几里得空間雖是比雷曼空間範圍狹窄，但是富有各種概念。牠可以有「遠距平行」。愛因斯坦看得很清楚，我們所要的，能夠把電磁現象與引力作用包括在一起的空間，是一種能同歐几里得空間一樣地有豐富概念之空間，與有雷曼空間之不受限止的性質。怪得很，他好像已找到了。

這新的一種空間，愛因斯坦也不敢想像。牠的定義純粹是數理的。牠有普通里曼空間性質，再加上了歐几里得空間的遠距平行的性質。數理方面牠是站在二者之間。在這種空間裏，愛因斯坦能以張力微積分去造成前後一貫的幾何學，由這樣一個空間裏他造成一個普遍的數學理論。這

理論在某一個特殊情況之下化爲馬克司威爾的方程式；在另一個情況變爲愛因斯坦的引力理論。差得這麼遠的兩特殊理論，竟會由一個來源發生。同一父親的兩個兒子，會有很不同的性質。

與這論文有關係有兩篇較早的論文（也是愛因斯坦著的）該先看一看。這兩篇論文是登在一九二八六月份「會議報告」裏。一篇是說到一種里曼幾何學，可以保留遠距平行的概念。另一篇名爲『引力與電共有單個力場理論之新可能性』。一九二九的論文是這兩篇的結果和頂點。科學化的一元論，繼續擴充他的地盤，牠沒有再比愛因斯坦更大的預言家泰尼孫（Tennyson）的「一統定律」（one law）表示自然任何現象都是自然現象的特殊情形而已。這說法不再被人看爲不可能的了。愛因斯坦最近的成就實際已把自然科學每件事東西都合成一個廣大的組織。現在餘下的工作，祇是生物與非生物的組合。

第七章 儀器與技術之進步旁的科學對物理學的反應

當我們看着廿世紀物理的偉大成就，再與十九世紀一比較，我們必得想到這全部成績的實驗基礎。在實驗方面是否有與理論物理之改革的對待的事物？前世紀實驗方法有沒有被取消而另外換新的更有力量的方法？

那是決沒有如我們設想的那麼多。十九世紀的實驗工作已是很不錯。當時成立的事實現在還是被承認；所不同的大部份在於事實之解釋，衡與量之精確程度，只有一點進步。大部份十九世紀的工具現在還在用。過去三十年實驗物理之進步大部份是由於多量新的研究材料，而少由於新的儀器之應用。

這新的材料是大部由於下面三種新發現來的：愛克司光線，放射物質，與光電作用。這三種發現內種種複雜現象之分析，差不多全部以十九世紀之末的實驗方法來做的。

並不是廿世紀沒有創造完全新的工具。有是有的，但是少得很。比較最重要的我們能說的有兩個——電子管，和分子抽氣機。

愛克司光線告訴我們結晶體的結構，和我們知道氣體構造一樣地清楚。牠可使我們重新把原子週期表排列一下。在週期表裏，原素是按照牠本身的愛克司光譜，而不依着原子量排列着。量子論，受愛克司光的散光折光現象，很不少的益處，並且最近這種現象使我們由實驗證實了波動原子的假設。近代物理得到愛克司光線的供獻，不能說是不重要的。

我們更要多多感謝放射體與光電作用之發現。由這些現象研究的結果，我們知道原子可以再分為電子與陽電子。這是由十九世紀流通的原子觀念——可由這字在文字學上的來源看出——前進了很大的一步。我們可以自由支配以近光速運動的充電體，再由這現象我們知道怎樣把物質看為一種電的現象。有的微粒以牠們的大小言，有極大的能，含在裏面。利用牠們的衝擊，我們可以把分子打破成新奇的形式。

波耳原子與牠的繁盛理論枝葉，在放射體現象上生根；並在電子行為，如自然放射電子，或因

光射而放射電子等現象上，建設着那近代波動原子。

差不多所有的愛克司光線和電子的實驗需要高度的真空管。對於製造這種管子，我們要感謝這種近代式的抽氣機。他的名子有分子擴散或凝聚抽氣機多種。這種抽氣機，其形式雖然有多種，但有一共同特性可以區別於老式的抽氣機。這機的作用根據氣體在低壓呈現的特性而造的。爲這緣故，這種機必須附帶着一個老式的抽氣機，先把壓力減低到某程度時，然後再用擴散抽氣機去應用。這擴散抽氣機一用上去之後，空氣就很快地減少，在幾分鐘之內可以抽得很空。同樣空的程度用老式的抽氣機來應用，需要好幾點鐘的時間。

要是近年來我們需要了很多的時間和工作去達到二十年或十五年前工作所需用的真空程度，那末用到抽氣機這一方面的工作，能否做到現在的十分之一，確是很可疑的。

電子管恐怕在二十世紀是一件散佈得最廣，最常見的物理發明。全部的近代無線電傳佈系統，建在真空管上面。在這發明之先，一九〇五年時當時稱「無線電報」只是一種很微弱的事業。信息是以凝屑器 (coherer) 與聽筒接收。在較大的水面上可以傳達信息，特別在晚上更好些，但

在陸上一百哩距離就不可靠了。「無線電話」在那時仍是一個烏托邦的夢想。

電子管之有用不但在羣衆裏佔一地位，並且在實驗室裏，是一個少不了的工具。用牠產生高週率的電流，牠有彈性而無惰性，且週率區域之寬，牠是所向無敵的。拿來做放大器，沒有別的可以裝卸的儀器，在精確，可靠與放大能力上，能比得上他。電子管是一種電的望遠鏡與顯微鏡的合成物。

近代實驗物理，實際在新的實驗技術方面，全靠這五件東西，愛克司光，放射體，光電器具，電子管，與分子抽氣機。至於其餘的十九世紀「拖車的馬」還在應用——分光器，電阻橋，干涉計，藏冰量熱器，旋光計，驗電器，浸油中的物鏡。但是我們能不能舉出同樣多的前世紀的理論，到現在還站得住脚的？

不論在上世紀或近年來，與物理同類的科學，向來就很迅速地儘量應用物理的實驗技巧。光器與電爐是天體物理學者的必需品。化學家利用量熱器，電爐，抽氣機，電解儀器，與精確天秤。野外地質學家用到磁力計，扭轉擺，且由聲在固體之傳達，以探尋油與礦藏，又根據上面研究之結果

與力的平衡之理論發展成均衡說 (isostasy)。生物學家應用擴散電池，滲透作用，光吸收之選擇性，與旋光計。所有的科學家都用到顯微鏡。物理，像所羅門 (Solomon) 王的鐵匠，替別的工匠造工具。

暫不談天文與物理，別的同類的科學之漸漸多用數學已很明顯。當一個科學，達到某種複雜程度，以致一種縮寫法是必須的時候，這科學之數學化是免不了的。有的先到，有的後到，最後總是一樣的。

不多年前，化學與生物學，都被認為大學之中有科學興趣而無數學頭腦的學生之寄身處。將來在化學與地質學裏有微分方程；在生物學裏有對數，拗曲分配，統計公式。我們將來都要看到這種不幸之情狀。時候不遠了，那時所有科學的大門，都如古時貼着警告的告示：「不是幾何學者，不得入內。」在這數學化的運動中，物理儀器與方法之應用卻是一個促進的要素。

但物理對於同類科學之供獻不僅是物質上面的幫助。我想近代物理對別的科學，尤其是生物學可以說是有一種精神上的影響。

在十九世紀的後半期，物理理論已成爲一種很結實，清楚，不求外助，整個的學說。大家都完全曉得，還有很多的東西爲我們所不知道；並且都以爲當時已成立的學說，只需稍加修改，即可永遠用下去。上世紀的物理理論，爲當時熱心者所極端贊頌，因了這個關係，有時使他們態度有一點趨於獨斷。若物理與別的同類科學有矛盾的地方，物理總是對的。

這種態度可以由從前物理學對地質學和生物學關於地球年齡之爭論看出。恐怕在十九世紀的歷史上，物理對別的科學之印象，沒有再比這個深。這爭論繼續了三十二年，還是那麼緊張，直到放射物質之發現，方纔解決。

在一八六二年，克爾文根據傅利葉 (Fourier) 熱的傳導定律，計算從地球由液體凝結成固體時起，到現在至少二千萬年，或許會超過四萬萬年，他認爲凝結所需的時間當然是很長。他還覺得那小的數字比較近些。

對於這一個估計生物學者與地質學者覺得太奇怪。想把整個有機進化的步驟，由阿米巴到人，併在這麼短的四萬萬年對生物學者無論怎樣也說不通，地質學者看來，這情形更是糟了。我們

都承認，地球是凝結之後，尚需很長的時間，方纔有原始生物發生。而這時期加上了進化的時期，再去配到克爾文強暴的四萬萬年。地質學家以爲照這樣看來，我們簡直回到十八世紀地質學原始的學說。

十九世紀之前地質學思想是屬於災變學派。他們相信自然的力量在過去的地質學時代，比現在更活動更有力。自然的巨大震動，把地殼分離爲山谷，再在別的地方凸起成山。在十九世紀中葉反面的等速變動說學派（uniformitarian school）的世界佔了優勢。這學說的勝利大部受着拉愛爾（Lyell）的影響。根據這種說法，一切現在地質的變化與從前向來差得不多，根據這理論，造成古時的地層地球年代必是很古。

克爾文投了一個炸彈。反對聲浪還是有的，但不足以搖動克爾文。他說物理不能再讓步，因爲物理爲時代的主宰。

羣衆對這爭論的普遍與久長的興趣，可由一八九五年一月至四月的自然（Nature）內關於這方面的來信之多看出。這是值得注意的，沒有一個物理學家的意見，不幫克爾文，不過在限度

上面，大家以爲可以放寬些。後來培理（John Perry）教授——這問題就是他發起的——下一結論說克爾文定的最高限度可以乘四倍。但讓了這一步，兩方面的估計仍不能接近。二方面沒有近到可以商量的餘地。

這著名的問題之孰是孰非，使物理對同類的科學，有不幸的影響。尤其是生物學家，感覺得物理學家不注意他們的問題的性質，和他們結論所根據的證據。他得到的印象乃是物理對於生物學的問題是無能爲力，並且這生命的科學之全部討論與發展所需要的東西，不能在物理學裏面找到。我想這應該沒有什麼疑問的，物理學之不適用的影像，足以增加生機說的壽命和力量。

新的物理把這種情形完全改變過來。放射體發熱之怪現象推翻了克爾文的基本假設。結果地質學家可以有寬裕的時間拿來應用。原子之再可分裂，和自然之偉大組織，與可能性的發現，以及近年來其他的發明，使物理學者的眼光放大，並且使他們更容易知道物理的理論未能把許多重要的原因歸入。十九世紀所謂穩當的學說之被推翻，時時在我們心上警告我們不要再專橫。

同類的科學，看到物理理論已失掉牠從前的苛刻與頑固的性質，牠們再恢復原來對物理的

信心。信任結果之一，乃是增加反生機學說運動之力量。這全由於物理理論之漸變廣闊之有活動性，並且能表現出富有發展的可能性。或許有一日機會好，牠會升而為基本科學，也許竟能把生命現象歸入牠研究範圍之內。

第八章 未來

古今各地的人都努力於未來之推測。這是人類的性質，科學家也不能除外。科學家之有這種性質是用不到辯護的，因為求預知的慾望，本身就不是一件壞性質。也許因為過去迷信的無意識的方法，使這種推測大失信用。但現代推測方法所根據的意識不是夢，預兆，行星會合或祭物的內臟。

解釋過去可以引導將來。以適當方法去研究歷史的價值即在於此。這研究不僅僅是對一串日期，戰爭，與君主而言，而在於人類思想，與成就之原因，及其影響之認識。人類的性質變得很慢，並且歷史常有重複的事發生，不過在不同的時間和地點而已。

科學家可以同樣地得益於科學史之研究。要是他看到一個明顯而久長的，有方向的運動，同時這運動不像受何阻礙，他很可假設這趨勢仍會繼續前進，直到牠的動量喪失完盡為止。

研究物理學歷史的哲學者看得出有兩個這樣的趨勢：第一，我們以前所認為獨立的現象，這些現象之結合與連絡的一種穩健的趨勢。第二，在基本概念中，以離開唯物論而進行的趨勢，這些觀念在別處已說過。

在廿世紀我們看不出這兩種理論物理的大趨勢，有變遲慢的傾向。牠們是向前迅速地進行着。過去二十五年的最大的成績是連絡工作中最大的成功——能與物質及引力與惰性之連絡。以能為基本實質代替物質的地位，這變化是取消物理概念中唯物觀的最後一步。我想我們下面這一個推測，大概不至差到什麼地步。我們推測這兩個趨勢還向前進一直到泰尼孫所預言的邏輯限度：「單位定律，單位要素，」再一直到遠離唯物論的自然哲學。各現象之合成定律，各部份的組合，是物理科學最近活動的特徵。這是一種敘述的工作。最後達到的，包羅萬有的定律，是整個物理現象敘述。在過去的偉大科學著作裏，可以很明顯地看出這種趨勢。譬如牛頓的偉大著作「格物宗論 (Principia)」，牛頓寫這書的目的何在？這書的目的，就是最不經心的讀者也看得出。就是把地球和天空的力的現象合成有規則的定律，並且儘可能的範圍，歸於一個單獨的原因。換句話

說以引力來解釋自然。

這一點之成就，可由當時科學家態度之轉變看出。公認格物宗論是對的。裏面發表的宇宙觀，差不多成爲我們的天生觀念。牛頓居然能夠以他當時的觀念獻給後代。牛頓把我們抬到他自己不能到的山頂上，由這地方，我們好似古時的摩西望到那樂園，雖然這樂園是留着我們的後代進去。無論怎樣，我們總有那寶貴的往前看的權利。

差不多有兩世紀之後，在生物學範圍之內，獨立的生物現象有同樣的結合與連絡。這是達爾文 (Darwin) 的種族之來由一書之結果。現代的物理科學又變混亂，內部不能貫連事實之多，需要再來一個，像牛頓那樣天才的時機是已成熟。就是愛因斯坦都沒有走得多遠。蒲朗克 (Planck) 帶來了他的量子論，結果使我們覺得這情形反而變壞。

解釋宇宙！這是不是自然研究者的基本目標？我們做這工作時的，確產生了不少空幻的說明，並是還有不少是錯誤或是不完全的。托勒密之後有哥白尼。哥白尼之後有替勺 (Tycho)，刻卜勒 (Kepler)，牛頓與愛因斯坦，但這工作仍未成功。無論各人的說明差得怎樣遠，但他們的力量全

集中一方向。宇宙是一個謎，這謎向着聰明的人挑戰，人類的腦筋忍耐不住這樣一個挑戰。人們應了這挑戰，開始攻擊。

在人類之間，沒有比下面兩個動機再普遍。自然真理當前的時候，無論野蠻或文明，真實或虛偽，人類第一個激動是好奇；第二是對其原因的猜測。

雖然當前的工作很大，但是僅是大或複雜，都不足以恐嚇往前看的自然研究者。他明曉得這工作也許不是他或他的三四代的子孫所能完成。他也不能擔保這工作一定可以成功。也許——誰能知道呢？——有什麼大的災禍，星體的撞擊會在工作未及半時候把整個地球上的生命消滅。就是工作能成功，那有什麼好處呢？將來成功時候的人，會不會比現在快樂些？我們能否把死亡完全消滅？但這些反對的言論對自然研究的人們說，好似對着聾子說。他們祇常聽到那富有挑戰意的話：『你們敢來解釋我嗎！』這種刺激可使他們興奮到極點。沒有別的動機能比這更理想；沒有刺激能比這更有力。人類是驕傲的，他是忍不住輕侮的。

從前有一個天文學家發現一個新的星，向地球以高速行動。他算出這星在幾個月之內與地

球相碰。他不發表他的發現，恐怕這會引起全世界的混亂與失望。每夜他醉心於這未來的災禍之研究。有一天晚上，他向那星大聲地說：

『我知道你不久要破壞我與地球上的所有生命；但我能算出那一日，不，甚於那一點鐘你要與地球相撞。你只是瞎眼沒有理性的東西，我決不想與你易地而處！』

這種驕傲的態度是很正當的。人類在分析雜亂的自然現象之成功，是很可驚奇的。一個個的神祕的東西漸漸似乎可以理解，並且合於邏輯。我們因此想信整個自然不致於不爲我們所能了解。自然的研究者永遠是樂觀的。

有一類哲學家的論調，使我們的樂觀受了一個障礙。他們告訴我們——以冷冰冰的論調——說明與單純的敘述是不同的。據他們的意思單純的敘述還可以向前進；但追根求源的解釋另是一會事。隨便多少的敘述，都不能當作最簡單的解釋看。這兩種東西之不同是種類之不同，而不是程度之不同。我們可以知道許多的「怎樣」，而不知道一點「爲什麼？」

斯賓塞 (Herbert Spencer) 在半世紀之前曾下一斷語說，各種現象之真像，完全且永久不

是我們所能知道。自他起，有許多哲學家反覆申說這一點。他們告訴我們，科學最後的目的不是說明而是敘述。他們又引證牛頓的話（格物宗論第三冊）：

『現在我們已能以引力說明天體與海洋的現象，但我們還沒有說到，這種力的來由……至今我們不能由現象去發現引力性質之原因，我不能創一個假設。』

牛頓在他的正式文章裏，只限於「怎樣」的敘述，但同時在他的信裏，他很自由地——一切科學家都該這樣——想「爲什麼」。牛頓有一封信給玻義耳（Boyle），在這信裏他自由地幻想到引力之原因。哲學家會覺得好笑，以爲這不過是一個尊貴的「怎樣」。牛頓私下高興怎樣是不受限制的。他可自由地想，不管這想的結果有用沒有。白朗林（Browning）說：『一人的思想應當超過他所能做到的。』

開姆拜爾（Norman Campbell）說：斯賓塞的斷語引起了很多科學家的反感。大家都認爲我們目前的努力，雖未趨近於「爲什麼」的解釋，我們也都否認目前的失敗，並不足以證明將來之不可能。以我看來，羣衆對這學說之普遍與熱誠的信仰，對科學進化與以莫大的阻撓。以我個人

講，若我相信人的腦筋不能解釋自然之究竟，我決不再費一天的功夫在敘述科學的窮巷瞎摸。我一定要放棄這方面的研究，而轉向於將來有安慰我們心靈的希望東西。

這一類態度是否是合理的或是純粹感情作用？也許表面看出來的合理性，不及他實有的理由之充份。我們現代關於腦筋的概念與六十年之前的，大不相同。在斯賓塞的時代，大家都以為內省心理學，或當時名爲『心理哲學』已把意識現象搜索完盡。而當時以為意識是心的全部。現代的觀念以為我們的意識祇是心的次要部份，牠祇浮在極深的下意識的上面。我們所有的觀念是這下意識中的騷動，在外面的表現。有那一個沒有經驗到多次的這種神祕的下意識的出現呢？有的時候我們費了幾天的功夫，去解一問題，後來因為有別的事務而把這問題丟開。忽然我們萬想不到，那解答竟自己跳出來。牛頓應該有不少這樣的經驗。有人問他，他的發現引力的心理上的步驟是怎樣。他的回答是這樣：他的成功的方法乃是對這問題，專心靜默地等着。直等到牠自己解決。當這問題解決之後，研究者覺得自己在一個很大的波峯上面，不知不覺地被這波帶來帶去。心之內部之有未發現的東西之可能性是很大，要限止心的能力是很不妥的。

我們站在暗房裏把一照片拿來顯影。幾秒之後，看不出什麼東西。然後在照片原來亮的部份，有一塊塊的黑影散佈各處；但這些一片片的黑塊之間，看不出有什麼明顯合理的關係。慢慢的洗下去，各黑塊之間的關係也漸漸看得出，後來乾片全部顯出一種有規律有秩序的形態。

還有更奇怪的事發生，這圖畫在眼睛看來，像是一個立體，由因求果的哲學家也會辯護說這是不可能的——一張祇有二度空間的圖畫不可能顯出三度空間的影像。那是因為那哲學家沒有把頂緊要的東西算進去，他沒有把看這平面畫的頭腦歸入。

我們之研究自然，祇是剛剛起始顯影。東一塊西一塊自成系統的現象，但各塊之間的空隙還沒有補滿。即使顯影完成，我們有的祇是一個「怎樣」就是自然現象與其相互關係的合理描寫。也許——誰能知道？——那奇怪的心之能力，能由這完成的平圖裏看出超然的「爲什麼」出來，也就是說看出自然的究竟。這一點是很清楚的，就是說要做到看出自然的究竟，非得把「怎樣」成功了不少，或竟致成功之後方纔可能。但這有什麼關係呢？我們已看到，自然的研究者，並不以私的動機出發，乃是以一種更有力的理想的動機出發。雖然我們這一生是看不到最後的勝利，我

們還是這樣想嗎？我們可以如在廟裏的西米恩（Simeon）說：『主呀！讓你的傭人平安地離開：我已看見你超度他們。』

自然的研究者懷抱着偉大的志願，並且也覺得這工作也是很重的，但時有的時候也會因進步之過慢，而有灰心。一生忍耐努力的結果祇是一點。最偉大的科學家的心不會完全沒有這感想。就是牛頓也有一次把自己當作海灘上拾石子的小孩。

一個人不永是他自己功績的最好的批評者。我們所做的常超出我們意想的那麼好。這裏有一個含有這種意義的故事。這是諾得（Nordic）種族的古神話。其內容之有趣之富有哲理，使這神話能與塞姆族（Semites）傳下的亞當夏娃在樂園的神話並駕齊驅。我曉得你們知道諾得神決沒有塞姆神話那麼多。我很高興告訴你們這個『托爾（Thor）到猶吐罕（Jötunheim）的旅行』的神話。

在古的烏坡薩拉城裏有一個廟。這廟是供奉衆神之主宰，奧丁（Odin）。烏脫賈得洛基（Utgardeloki）是巨人之王，這巨人族，長期與衆神作戰。巨人之王恨奧丁，他侮辱奧丁，他想毀壞奧丁

的神廟，滅掉廟裏的祭火。

奧丁聽到這消息之後，就在阿斯加脫 (Asgard) 召集一羣神會議，羣神的家就在阿斯加脫。到會之中有奧丁十二個兒子之一的托爾。

托爾是雷神。他的家不在阿斯加脫而在脫魯梵 (Thrudvang) 風雲之處。當他繙眉的時候，他的眼睛放出閃電，他說的話是天上的雷響。他帶着魔術的鎚。這鎚叫做苗尼爾，具有破壞的力量。他的腰上束着一根腰帶，這腰帶只有神用的。束緊了之後，可加增用者的力氣。

在開會的時候，托爾大聲提議即刻對巨人宣戰。但是別的神不贊成。這會議也就無結果而散。托爾憤怒會議之無結果，而決定自己單獨去解決這問題。他跑到巨人國，猶吐罕去，把烏脫賈得洛基，巨人之王找出來，給他受點刑罰，因為他曾侮辱他的父親。他沒有宣佈他這辦法。他偷偷地離開阿斯加脫。他走過了虹橋，離開羣神之家的阿斯加脫。到凡人住處的密脫加脫 (Midgard)。他在密脫加脫漂泊了好幾天，在尋找巨人的住處烏脫加 (Utgard)。後來有一天傍晚，他迷失在一森林裏。碰巧他看到一個奇形怪狀的屋子，這房子沒有窗，有一個門，這門倒佔有房子一面那麼大。

這屋是空的，他就在裏面過夜。

第二天早晨，他覺得地在震動，好像有一個大動物在那裏走動。他由早霧裏現出一個巨人。托爾抓起他的鎚再想一想，又放了下來。他想也許這巨人能帶他到猶吐罕去。這巨人沒有看見托爾。他說：『哦，我的無指手套在這裏！』他蹬下去檢那托爾過夜的房子。他發現托爾在裏面。他對托爾說：『我認識你，由你的鎚與腰帶我知道你是托爾。但你來這裏做什麼？』

托爾說他正在找去猶吐罕的路，他想拜望巨人之王。

巨人說：『那是巧極了。我的名字是斯格林米 (Skrymir)。我服役於烏脫賈得洛基那裏。在我正回到那裏去。要是你高興的話，我們可以一起走。』

托爾願意和他走。那巨人接着說下去：

『既然我們一起走，我們可以把我們的糧食放在我的背囊裏，我們兩人中，當然我的力氣大。讓我來背這袋。』

這巨人把背袋背上。他們兩人一同趕路。這巨人起初勸告托爾說：

「你想我算大，但你可在猶吐罕找到比我大的人，我知你的種族和我的種族自古就互相仇視。要是你去拜訪我的王，你一定要碰到不少的麻煩。一點小事會引出我們舊時的仇恨。你這一次拜望不會得什麼好結果。我希望你放棄了你的主意。」

托爾不接受他的勸告。巨人不再勸他。

他們整天的趕着路，還未出那樹林。天快黑的時候，那巨人說他疲倦極了。他不預備吃東西，就想睡覺。他把那背囊丟給托爾，並且對他說，他可以吃了晚飯，好好地睡一晚。明天還有不少路走，他一面說着，就躺在一棵樹底下。不一刻兒就睡着，並且很響地鼾着。

托爾想他的話倒不錯。他就去開那背囊。但奇怪得很他不能夠解開那帶子。他束緊下他的腰帶，想把那帶拉斷，但他又失敗。他氣極了。他帶了他的鎚一直跑到那巨人睡的地方，把他鎚在斯格米林的臉上，擲了一下。

那巨人受了驚動，有點醒意。他將手摸一摸臉，又睡着了。這一下失敗使托爾氣惱極了。他退了回去，他終睡不着，肚子餓使他更憤怒。將近半夜的時候，他束緊了他的腰帶，再跑到那巨人那裏，再

是很重地擲了一下。他用很大的力，以致那鎚的頭穿進那巨人的頭殼。斯格林米受了這一下驚動，張開了眼，把手在頭上摸了一下。他說：『有沒有一個葉子由樹上落下來呀！托爾，你這麼遲還沒有睡！你該在明天趕路之前睡一回。』他又睡着。

托爾更氣惱。他更退回去。但他不能睡。當天剛剛開始亮的時候。他又跑到那巨人那裏。他把腰帶束到最後的一孔，再擲了一鎚。他用極大的力氣，以致那鎚，連頭帶柄，一直陷到那巨人的腦裏去。斯格林米醒了。他坐了起來，再用手摸一摸頭，並且說：

『我想有一個橡實落在我身上，不然我決不會醒得這樣容易！不過沒有什麼關係。現在已經天亮，我們可以早一點動身。來，我們一起走！』他大踏步地走了。

托爾又氣又慚愧，跟在他後面。沒有幾點鐘，他們走到森林的邊。那巨人對托爾說：

『你現在是在在巨人之國。到烏脫加堡的路是往那邊走，我的路是反對的方向，跨過那些山。我再勸你一次，你可不要再照你原意往前走。恐怕有損害你的事會發生。』

但是托爾搖搖他的頭，照着巨人指點的路向前走。那巨人向反面大踏步地走，不一刻就看不

見了。

托爾費了三天的路程纔到烏脫加堡。這堡站在一個大平原之中，四面都是圍着冰和雪。這堡是高極了。托爾向後彎着頭，纔看到堡頂。堡門旁有兩個巨人看着，他們帶着劍，槍與盾。那兩扇門沒有應着托爾到就開。他把鎚擲了過去，那鎖被他打散，門就向裏開進去。

托爾進了一個暗的大廳，一排一排的巨人靠牆站着。在這廳的那一端，巨人之王，烏脫賈得洛基坐在一個高的寶座上面。托爾向他前進。

這巨人之王認識托爾，先開口說：『我由你的鎚和腰帶知道你是托爾，你們種族好久沒有人來此，我們很感謝你來此的誠意，我們要儘量好好地招待你，我們要表演角力的技術給你看。我們很想見識見識我們傳聞到的你的神雄。』

托爾說他並不是不願意這樣做，不過因為長途跋涉的緣故，他感覺很口渴。

巨人之王說：『你是不是喝蜜酒的能手？』

托爾很驕傲地回答：『是的，我從來沒有見過一個角杯的酒，大得我一口氣喝不完的。』

那巨人對傭人說：那傭人帶進一個很長很長的角杯。這杯的尖端還在門外。托爾有一點猶豫，但是他覺得很口渴，他就很深長地呷了一口。當他喝完了之後，他覺得慚愧得很，那蜜酒好像不會低落。

許多巨人看得很有趣，托爾有點生氣。深深呼吸了一口氣，然後把嘴唇貼在角杯上，使勁地喝，直等到他額頭上青筋都漲了出來為止。他喝完了之後，他發覺那蜜酒真淺了一些，淺的程度，僅足以使那角杯可以帶來帶去，不致把酒潑了出來。

烏脫賈得洛基笑起來，別的巨人也跟着笑，巨人之王說：

「現在你已經解了你的渴。我們有一個小孩子的遊戲，這就是把一個貓由地下舉起來。我本來不預備說這遊戲，因為我想不到你竟是如此柔弱。」

一個奇怪的貓走進這大廳。這貓身上沒有毛，只有鱗片，牠的眼睛發出火光。托爾把一手放在那貓的身下，想把牠舉起來。但那貓把牠的背慢慢向上彎起，直等到高得托爾不能再往上提，他只能把貓的個腳舉起。又氣惱又慚愧，他不再試了。

巨人之王笑得又響又長，其餘的巨人一起都笑。托爾氣滿心頭，他緊握他的拳頭，直到指節變白。他把鎚向烏脫賈得洛基臉上揚了一下，要他和自己比一下武。但巨人之王說：

『這是玩玩的，我看不出有什麼動氣之必要。若是你一定要和我比武，你可把我的老保姆愛烈出來，和你摔角。』

一個沒有牙齒的老婦，跑到大廳裏來，她向托爾前面一躍，一下把他的腰抱住。雷神用很大力量和她鬪，得以耐了不少時候，但最後他被捺得跪下一腿。烏脫賈得洛基宣佈終結，現在是宴席的時候。但托爾氣憤之餘，一點東西也吃不下。他腦筋裏的戰爭的思想完全拋之九霄雲外。

第二天早晨，巨人之王帶托爾出堡，並且指點他回去的路途。當堡門關上之後，巨人之王說：

『你現在是在堡外，要是不給你進來，你就不能再進來。現在我要使你明白，你以往所看見的祇是一種魔術，祇是一場怪夢。我就是斯格林米，在森林裏碰到你的就是我。我都知道你來的目的，我覺得很可怕。我知道你的神威，我知道我們兩種之間的仇意。我想勸你不要來。失敗以後，我只得求助於魔術。我利用魔術去結背囊的帶子。當你用鎚打我的時候，我把一座山攝來遮隔一下。你

巨大的臂力在這山上打出三個深谷。你喝的角杯的尖端通到海裏，你回去走到來時游過的海股時，水祇有膝頭那麼高，你祇需徒步涉水而過。我的貓並不是一個貓，這是一條環繞世界的蛇。這蛇口含着尾，把世界握住，當你用全力去舉這貓的時候，你以為是失敗，我們看見那蛇很勉強咬住牠的尾，我們恐怕牠要被迫鬆口。你想你只把這貓的一腿舉起，我們感覺宇宙的根基在動搖。愛烈是老神，在她的面前，就是神也要下跪。請你不要來，我見你怕。我還有別的魔術，你是不知道的，我永久能對付得過你。』

這幾句話使托爾氣上心頭，他把他的鎚向那巨人一擲。但是烏脫賈得洛基與他的堡一起不見。除了一片平原之外，他看不見什麼。

Waking time! waking time! Lo, a man is born!

Born in Nature's wonderland, in life's fresh morn.

Nature's myriad wonders, beckoning, seem to say,

“Come, live with us and learn of us, in life's long day!”

Working time! working time! Life's high noon!

Waste no precious moment now, for night comes soon!

Much to learn, much to do, all that man can ask.

Summon every energy to life's great task.

Resting time! sleeping time! Lay the task away:

Thou hast earned a peaceful close of life's long day.

All thou hast accomplished, little may it seem;

May'st thou see it clearly after life's strange dream!

本書末附有詩一首。因詩爲韻文，譯出失真，故將原文載出並附該詩大意如下：

人生在神祕宇宙之中，宇宙之神祕性誘出人好奇心。使他以畢生精力從事研究之。一生精力所得之微，可於生命終了之時知之。