

乙太存在與否的爭辯

古希臘的乙太只是用來填補空間，而近代的空間則似乎有取之不盡的各種乙太

賴昭正

前清大化學系教授、系主任、所長；合創科學月刊

天生我才必有用，因此一個無所用之「虛無」空間是很難想像與接受的；相信是基於此，古希臘哲學家亞理斯哥德（Aristotle）在其「談天空」（On the Heaven）一書裡，認為外太空不可能是「虛無」的，而是充滿了一種不變的「第一」元素（first element）：它不像地球上之土、水、空氣、及火四元素一樣可互變構成萬象。後來的哲學家們漸漸改稱此一新元素為「第五」元素「乙太」（aether 或 ether）。

古典乙太

被稱為近代西方哲學之父的法國哲學家、科學家、數學家笛卡爾（René Descartes，1596-1650）謂「一個什麼都絕對沒有的真空或空間之存在是違反邏輯的」。他認為流體「乙太」充滿了固體外的所有空間，所有固體就是靠其旋渦產生我們現在所謂的萬有引力現象。

1676年丹麥天文學家羅莫耳（Ole Christensen Rømer）研究木星之衛星運動而認為光的傳播不是瞬間，而是有一定的速率；荷蘭物理學家惠更斯（Christiaan Huygens）從其資料推導出光速為每秒 $16\frac{2}{3}$ 倍地球的直徑（70%現在公認值）。因此當惠更斯於1678年提出光之波動說，成功地解釋了光之折射與反射現象時，他認為光也像聲波藉空氣傳播一樣，是透過充滿所有空間之堅硬彈性粒子「乙太」碰撞來達成的。可是光速比聲速快得多了，因此「乙太」粒子的彈性必須非常好。

1687年7月5日，牛頓（Issac Newton）發表「自然哲學的數學原理」，闡述了萬有引力及三大運動定律，奠定了此後三百多年之天文學及力學的基礎。但此書出版後，牛頓即受到不少攻擊，謂他超距離的作用力是將「超自然的神秘性」帶進科學。因此他於1713年再版時，辯護謂他之所以未提出作用力是如何產生的，是因為他「不捏造假」來做為物理解釋的緣故。雖然如此，但相信他也不停地在思考此問題；因此於1717年「光學」（Opticks）再版時，他終於還是忍不住提出其對萬有引力及其它作用力的看法：空間充滿了稀鬆的「乙太」，萬有引力的來源是因密度不同的原故（越重物體的周邊「乙太」越稀）。他認為「乙太」也可能像光一樣是由微粒組成的。

1748年瑞士物理學家雷沙基（George Le Sage）認為這些「乙太」微粒以非常高的速率在空間到處飛行，兩物體因相互遮攔這些撞擊而造成其間壓力降低，因此相吸：為萬有引力提供給了動力學基礎。因深信傳播定須媒體及不信超距離作用，不少物理學家均不

斷地提出「乙太」之存在與理論。這些理論的一個共同點是：「乙太」像空氣或流體一樣無固定形態。

光乙太

1808年法國物理學家馬勒（Étienne-Louis Malus）在研究光之反射現象時，發現了光的極化；因縱波不可能有極化現象，因此光顯然應是以橫波形式傳播：像水波一樣，波的起伏（振動）方向與前進方向垂直。1817年另一法國物理學家菲涅耳（Augustin-Jean Fresnel）發展出光的橫波理論，成功地解釋了所有當時已知的光學現象！1860年代，英國物理學家馬克士威（James Clerk Maxwell）成功地統合了電磁現象，證明光也是一種電磁波後，電磁波的存在似乎是無可置疑的！

這巨大的整合成就卻碰到一個問題：自十九世紀中葉後，幾乎所有的科學家均認為宇宙是完全由物體組成、依牛頓力學運行的。這「力學觀」的宇宙當然無法想像電磁場能在「虛無」之空間波動；他們認為光一定通過什麼可變形的「東西」——光乙太——從美女苗條的身材到達我們的眼睛。事實上連馬克士威自己本人也認為「波動可以在虛無空間傳播是難以想像的」：他甚至提出光如何在乙太中傳播的力學機制。乙太被認為是靜止的、是馬克士威理論中光速定值的參考座標。

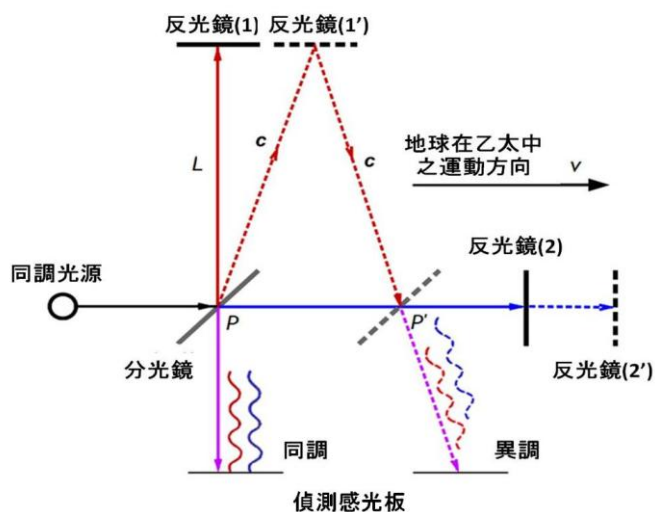
馬克士威電磁波理論及牛頓力學的成功，使「乙太」不再是那麼抽象，而是「呼之欲出」的物質：橫波振動只能在固態物體裡傳播，加上光速比聲速快得多了，因此如果「乙太」存在，它顯然應是相當堅硬、但又不能影響一般物體的運動。儘管這是很難想像的「東西」，但卻阻止不了物理學家開始認真地考慮偵測它的實驗。其中最有名也是影響後來理論物理發展最大的應首推1887年之「麥可森-莫利」（Michelson-Morley）實驗了。

歷史上最「失敗」的實驗

麥可森（Albert A. Michelson）1852年出生於現在的波蘭，兩歲時隨父母移民到美國。於1869年被總統「保送」到美國海軍官校後即顯示出其在光學、熱學、氣象學、及繪圖上的天份。麥可森對測量光速有特別濃厚的興趣：1877在海軍官校任物理及化學講師時，即在課堂上展示其測量光速的實驗。幾經改良，他於1879年量得光在空氣中的速率為每秒299,864 ± 51公里，只比現在之公認值大了72公里。1881年在歐洲遊學時，他開始發展「麥可森干涉儀」（Michelson interferometer）。兩年後，他接受俄亥俄州 Case School of Applied Science之聘，成為該校之物理教授，專心注力於發展及改進干涉儀。1887年他決定與共用校區之它校教授莫利（Edward A. Morley）合作，用干涉儀來測量地球與乙太的相對運動速率。1892年擔任剛成立之芝加哥大學的首屆物理系主任，1907年因「光學精確儀器及使用它來做分譜學與度量衡學的研究」而成為第一位獲得到諾貝爾（物理）獎的美國科學家（「老」羅斯福總統於1906年獲諾貝爾和平獎）！

1887年8月，麥可森寫給雷利爵士（Lord Rayleigh）的一封信謂：「偵測地球與乙太之相對運動已經完成了，結論毫無疑問是負的。」地球以每秒30公里左右繞太陽運轉，加上自轉，因此每天、每時、每刻與乙太之相對運動速率都在變；但不管麥可森及莫利什麼時候做、儀器怎麼放，他們測出來的最高速率 v 大約只有每秒4到8公里而已。他們認為這是在實驗的誤差之內，因此下結論說：如果乙太存在，地球與乙太的相對運動速率為零！這有兩種可能的解釋：(1)在地球表面之乙太被地球拖著走；或(2)根本沒有乙太。

麥可森-莫利的實驗事實上很容易瞭解（見右圖）；因其在物理學發展上具重要的地位，我們擬在這裡略加說明。從左邊送出之同調單一頻率的光線，經分光鏡分成向上及向右的兩道（較弱之）光線；經 L 距離後，它們分別被反光鏡(1)及(2)反射回來。如果地球在乙太中是靜止，我們很容易看出它們到達偵測感光板時還是應該保持著同步（光度）。但如果地球在乙太中是以 v 的速率向右運動呢？我們用高中（國中？）所學過之物理及數學就可算出（採用乙太為靜止座標體系**：



取自Wikimedia Commons

$$T_1 = \text{往上之來回時間} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

$$T_2 = \text{往右之來回時間} = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c} \left(\frac{1}{1 - v^2/c^2} \right)$$

因 T_1 不等於 T_2 ，所以兩道回來的光線將不再同調而互相干涉使光線變暗。我們可以從變暗的程度計算出時差 ($T_1 - T_2$)，再由上面之公式算出地球之運動速率 v （事實上因「變暗程度」很難量化，麥可森-莫利是使用白光，而且有點角度——不是平行——地重合）。

**不管從實驗者或乙太的觀點，結果都是一樣的。不要忘了光在乙太中的速率永遠是 c ：例如從P點到反光鏡(1')須時 t ，則 $ct = \sqrt{L^2 + (vt)^2}$ ，解 t 即得 $t = T_1/2$ 。

不必要的乙太

麥可森是相信第一種解釋，但這解釋似乎無法說明十七世紀天文學家所發現之星球位差 (stellar aberration) 的現象；莫利則似乎不太相信自己的結果，廿世紀初又與他

人合作做了兩個實驗（結果還是負的）。各種企圖拯救乙太存在之理論當然不停地出現，但較成功的是1889年愛爾蘭科學家費茲玖拉德（George F. FitzGerald）所提出之「物體在運動方向的長度因乙太之滯礙而縮短（對靜止者而言）」。1892年，荷蘭名物理學家羅倫茲（Hendrik A. Lorentz）也有類似的想法，並定量地從馬克士威方程式裡推論出「羅倫茲轉換」（Lorentz transformations）公式。依此轉換，運動方向的長度應從 L 縮短為

$$L' = L\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

用 L' 取代前面之 T_2 裡的 L ，馬上得到 $T_1 = T_2$ ！顯然乙太還是健健康康地存在的！

1905年是理論物理的一個「奇跡」時代：那年一位名不見經傳的瑞士專利局小職員愛因斯坦在德國名雜誌「物理年鑑」（Annalen der Physik）發表了四篇諾貝爾獎級的論文。其中一篇就是大家耳熟能詳的「狹義相對論」：在該篇文裡，他只用「等速運動者所觀測到的物理現象完全相同」及「光速為一定值」兩個假設，整個改變了物理學家300多年來的時間與空間之觀念！在那裡根本不須假設「乙太」的存在：光速對任何等速運動者都是相同的；在那裡「羅倫茲轉換」是必然的結論，不是為了解釋實驗之負結果而捏造出來湊答案的。因此「狹義相對論」雖然沒有直接回答「乙太」是否存在的問題，但物理界幾乎清一色地認為它與麥可森-莫利的實驗結果毫無疑問地判了「乙太」之死刑！古希臘哲學家及後來科學家所想像之充滿空間的「乙太」根本只是不必要的！

近代乙太

1915年，那位瑞士專利局小職員不但已是名物理學家，更用純邏輯推理地將「萬有引力」融合到「狹義相對論」裡，完成了巨世創作「廣義相對論」。在「廣義相對論」裡，時空已不再是靜態，而是因物體分佈而不斷地在變，而物體分佈則又決定於時空的重力場（幾何）。這重力場充滿了空間，因此愛因斯坦似乎又將乙太帶回到物理。1920年5月5日，他在荷蘭最古老之來登大學（University of Leiden）演講總結謂：

我們可以說廣義相對論使空間具有物性；因此依此觀點，乙太應該存在。依廣義相對論，一個沒有乙太的空間是不可思議的：在這樣的空間裡，不但沒有光的傳播，時間與空間的標準（量尺與時鐘）也將不可能存在，因此任何具物理意義的時空間距也一樣不能存在。但我們不能因此認為這乙太具有實體之任何性質，或是由可隨時跟蹤的零件組成的。運動的觀念將不適用於它。

1928年英國理論物理學家狄拉克（Paul Dirac）為了解釋其電子波動方程式所暗示的結論，提出空間充滿了「負能量」之電子：若外界給予能量，則可將它打出，空間可以無中生有地同時出現一對電子及正電子！從此以後近代物理的空間便再也不是一個沈默死寂的地方，而是熱鬧充滿活力的舞台：我們在「對稱與物理」一文裡（《科學月刊》2010

年3月號)看到了喜格登場(Higgs field);在「愛因斯坦的最大錯誤——宇宙論常數」一文裡(《科學月刊》2011年12月號)則看到了用「均勻地分佈於空間的一種奇怪能量」(宇宙論常數)來解釋1998年所發現之宇宙的加速膨脹、及用「急脹子」(inflaton)來解釋1979年所提出的「宇宙剛出現時之短暫急加速膨脹」理論。當我們不瞭解宇宙空間幾何為什麼是平的,天文學家就告訴我們:空間充滿了不尋常之「暗物體」與「暗能量」(《科學月刊》2014年6月號)!

這些新的「乙太」到底又是什麼「東西」呢?我們似乎又回到了2000多年前的古希臘了?!不同的是:那時候只是用來填補空間,而近代的空間則似乎是科學家的「百寶箱」——裡面有取之不盡、用之不竭的各種「乙太」!老實說,筆者有時不免懷疑近代物理是否走上了歧途(註二)?但願正如1889年法國數學家、理論物理學家、工程師、科學哲學家龐加萊(Jules Henri Poincaré)所說的:

「乙太」存在與否不重要——讓我們將此問題留給玄學家們吧;對我們來說,重要的是:萬事發生似乎因它的存在——我們發現此一假設適用於解釋我們觀察到的現象。仔細想想,難道我們還有其它理由相信「物體」真的存在嗎?它事實上也不過只是一個假設而已——只是我們將永遠認為如此(註三);但毫無疑問地,乙太總有一天會被認為無用而被棄之一旁的。

這些近代更抽象的乙太也將因我們對自然界更進一步的瞭解而像古典乙太一樣地只是個「過眼雲煙」!

結論

雖然「狹義相對論」與麥可森-莫利的實驗結果並沒有否定古典「乙太」的存在,但因沒有必要,因此物理界在1905年後普遍認為「乙太」不存在。但隨著「廣義相對論」及量子力學的發展,古典「乙太」的概念卻改頭換面以五花八門的不同形式重現江湖。這些近代更抽象的乙太是否也僅是「曇花一現」呢?我們不得而知。

儘管如此,企圖挽救古典「乙太」的理論還是不斷地出現。例如貝爾(John Bell)在1986年就曾謂古典「乙太」的存在或許可解決EPR悖論(《科學月刊》2016年5月號)。還有一些物理學家則認為麥可森-莫利的實驗事實上是量得了地球與乙太之相對運動(不是在誤差範圍內,註四);他們號稱乙太的存在可以讓我們更輕易、直覺地解釋或消除許多主流物理的悖論及衝突:如宇宙的膨脹、波動與粒子的雙重性、波函數的崩潰等等。

像「如果月亮不在那裡,空間是否還存在」(《科學月刊》2013年8月號)及「如果我們不去看它,月亮是否真的在那裡」(《科學月刊》2016年5月號)一樣,「乙太是

否存在」或許也是個哲學的問題，將永遠爭辯不休，但無可否認的是：這些爭論均是推動物理學發展的巨輪！

註二：讀者真的相信虛無「空間」那麼複雜嗎???

註三：事實上「物體」的概念在近代物理中也不再是那麼「實在」地「存在」：例如月亮理論上可以同時存在許多地點，也可以突然消失或出現——還好其機率幾乎是零。

註四：1940年代前的許多類似實驗也均得到不為零之最高可能速率；但隨著科技之進展，許多新的實驗技巧已將光速之方向均勻性誤差縮小到 10^{-17} 左右。