

愛因斯坦 1905 年的三大貢獻

譯/蕭如珀、楊信男

譯者按：每月出刊的「美國物理學會新聞」(APS News)自 2000 年 3 月起，開闢了一個專欄「本月物理史」，內容有趣，深具啟發性。因此，在徵得美國物理學會的同意後，我們決定將其翻譯出來，從 2006 年開始，定期刊登於「物理雙月刊」中，與大家分享。

2005 年為「世界物理年」，「本月物理史」專欄特別刊出一系列的文章，記錄愛因斯坦的貢獻與其相關的歷史，以紀念這位科學界的巨人。我們趕在 2005 年結束之前，翻譯出其中的四篇，報導愛因斯坦在 100 年前(1905 年)所提出的光電效應、布朗運動與特殊相對論三個劃時代革命性理論的相關歷史，以表達我們對一代偉人崇高的敬意，也做為我們明年開始一系列翻譯的先聲。

愛因斯坦與光電效應〈APS News，2005 年 1 月〉

1887 年時，德國物理學家 Heinrich Hertz 觀察到，將紫外光束照射到金屬板時會迸出火花。金屬是良導體，電子和原子的連結較為鬆散，若突然遇到外來的能量就會分開，所以放出電子並不足為奇。

但令人困惑的是，不同的金屬要放出電子所需要光的最低頻率並不相同，而增加光的強度只會產生更多的電子，無法增加外逸電子的能量；當增加光的頻率雖然可以產生更高能量的電子，卻無法增加電子的數目。這就是後來眾所周知的光電效應，但卻一直等到 1905 年時靠著一位叫愛因斯坦的年輕科學家，我們才得以理解其中的道理，當時愛因斯坦 26 歲。

愛因斯坦於四、五歲第一次看到磁鐵羅盤後便對科學深感興趣，他著迷於讓羅盤針總是指向北方的那看不見的力量，也深信每個現象都「深深地隱藏著什麼」。因此，他窮極一生致力於解開宇宙中深不可測的奧秘。

現在，形容一個人是「愛因斯坦」意謂著他是天才的意思，但是愛因斯坦的父母多年來卻都認為自己的兒子有些「遲緩」，因為他講話總是吞吞吐吐的，在學校的表現並不傑出。其實，愛因斯坦只是對於學校強調死背，與對權威盲從的制式教育方式感到厭煩而已，他寧可自己在家研習數學、物理與哲學。後來他曾說：「現代的教育方式沒有完全抹殺了真摯的好奇心

與探究慾真是不可思議，因為我這棵脆弱的小樹所最需要的，除了啟發外，就是自由了。」



Photo Credit: The American Institute of Physics

在專利局當職員時的愛因斯坦。

愛因斯坦在參加知名的瑞士聯邦理工學院考試落榜後，就讀於 Aarau 當地的一所瑞士學校，就在那裡，他找到了啟發和自由。這是他求學生涯的第一次，老師讓他完全自由地去追求他的理想，因此，愛因斯坦能傾全力研讀馬克斯威爾的電磁學理論，在那個世紀交替的年代幾乎沒有大學開這門課。後來，他又到蘇黎世的理工學院主修物理，不過畢業時成績平平，因此無法在大學謀得數理科的教職，只好到伯恩的專利局當職員，利用業餘時間研究理論物理。此外，他和一群朋友合組「奧林匹亞學院」(Olympia Academy)，〈譯者按：有暗諷當時主導科學界的學術機構之意。〉空暇時碰面讀書，討論科學的書籍等。

1905 年 3 月，愛因斯坦發表論文解釋光電效應時，他仍是瑞士專利局的一個小職員。在此前五年，

蒲朗克就已解決了黑體輻射的問題，他證明，組成黑體表面的原子只能吸收或放射已被「量子化」的輻射，因此，每個量子的能量是輻射頻率乘以一個新常數的整數倍。

蒲朗克認為他的量子理論只是為了讓理論符合實驗的數學「技巧」，但是愛因斯坦將其延伸到光上面（蒲朗克認為只有原子的震動才可以量子化）。愛因斯坦說，光是一束粒子，根據蒲朗克的公式，它的能量和頻率有關。當一束光粒子照射在金屬上時，光子和原子會相互碰撞，當光子的頻率足以撞出電子時，那麼這個撞擊就會產生光電效應。光粒子所帶的能量和光波頻率成比例；光波的頻率則取決於粒子的能量。愛因斯坦因此光電效應的研究獲得了 1921 年的諾貝爾物理獎，但這只是開始而已。

愛因斯坦和布朗運動 〈APS News, 2005 年 2 月〉

1905 年 3 月，在瑞士專利局一位叫做愛因斯坦的年輕職員提出了一篇震撼性的論文，將蒲朗克 1900 年的量子概念延伸到有著波與粒子雙重性質的光上面。論文刊登於 *Annalen der Physik*。5 月時，此期刊又收到愛因斯坦的另一篇論文，這是一篇有關氣體運動學的研究，它的結論和前一篇文章一樣令人震撼。

19 世紀時，物理學家修正了氣體運動學，說明熱是原子不停運動所產生的效應。Ludwig Boltzmann 和美國的物理學家 J. Willard Gibbs 利用運動論來解釋物理學上所謂的「可逆性的矛盾」，因為熱力學第二定律說明大部分的自然過程都不能逆轉，這和牛頓的質點力學似乎相互抵觸。

波茲曼重新詮釋第二定律只是就統計上來說的，而非絕對的。他說，例如在小至如小冰塊都是由無數的原子與分子所組成的，因此，雖非完全不可能，但卻極不容易讓已溶化小冰塊中的分子從液態中不規則的狀態，恢復到原來很規則的排列。然而，那些在統計上不可能出現的分子集體行為，就是大自然所觀察到看起來不可逆轉的原因。



*Photo Credit:
American Institute
of Physics*

愛因斯坦、他的第一任妻子和大兒子。

當愛因斯坦仍是蘇黎世理工學院的學生時，他在物理課上遇到了班上唯一的女生，來自塞爾維亞的 Mileva Maric。愛因斯坦的父母在 Mileva 生了一個女兒後仍反對他們結婚（他們顯然將女兒送人領養）。不過，在愛因斯坦進入專利局工作後，他們終於在 1903 年結婚。1904 年第一個兒子誕生，1910 年又生了第二個兒子。

1902-1904 年，當愛因斯坦開始獨自研究熱力學第二定律，及至後來他得到自己的統計力學形式時，他應該並不知道波茲曼的研究工作。他應用力學、原子和統計的論述形成了「熱量的廣義分子理論」。

愛因斯坦在蘇黎世大學的博士論文是專門研究液體的分子統計理論，之後，他將熱的分子理論應用到液體上，來解釋所謂「布朗運動」的難題，將之寫成另一篇論文。

1827 年，英國的植物學家 Robert Brown 觀察到，懸浮於水中的花粉粒會做不規則的「群體」運動，愛因斯坦因此認為，若看的見的微小粒子懸浮於液體中時，在液體中那些看不見的原子會撞擊懸浮的粒子，使得粒子微微地搖動。愛因斯坦詳細地解釋這些運動，並很精確地預測這些在顯微鏡下可以直接觀察到的粒子不規則的隨機運動。

當愛因斯坦的論文首度在 1905 年發表時，原子和分子的概念仍是當時科學界激烈爭論的焦點，許多的科學家，如 Ernst Mach 和物理化學家 Wilhelm Ostwald 都否認它們的存在。他們辯稱，熱力學法則不必以力

學為基礎來論述看不見的原子運動。Ostwald 尤其鼓吹他自己的看法，認為熱力學只在討論能量與它在生活中如何改變的問題。〔因此，他與他的信徒被稱之為「能量力學家」。〕

1908 年 5 月，愛因斯坦已經發表了他對布朗運動研究的第二篇論文，比 1905 年所發表的論文更為詳細，也提出了驗證他的理論之實驗方法。就在同一年，一個法國的物理學家 Jean Baptiste Perrin 做了一系列的實驗，證實了愛因斯坦的預測。Perrin 在他的實驗結果這樣寫著：「對於愛因斯坦所提出的公式之正確性無庸置疑」，他也因此實驗於 1926 年獲得諾貝爾物理獎。

實驗的證明終於完全證實了愛因斯坦布朗運動理論的正確性，因此反對者也不得不接受物質原子的存在。愛因斯坦應用統計的方法於牛頓的原子隨機運動之基本研究，加上他發現熱量統計理論與電磁輻射之間的重要關係，更使得他進一步洞察到光電效應，這是他統合兩個領域的第一步。直到那時為止，馬克斯威爾於 19 世紀末所提出的電磁原理已成功地阻止了來自各方企圖要將其視為力學過程的努力，但惟有愛因斯坦得以突破達成。

愛因斯坦與特殊相對論 〈APS News, 2005 年 3 月〉

愛因斯坦小時候曾讀過 Aron Bernstein 的《自然科學國民手冊》(The People's Book on Natural Science)，其中有一章，作者伯恩斯坦請讀者想像自己與電流一起滑過電報線路的情形，這個想像一直盤踞在年輕愛因斯坦的心中。愛因斯坦 16 歲時開始思考，假如他能趕上光的速度，那麼光束看起來會像什麼呢？孩童時代的愛因斯坦總認為，如果有人能隨著光一起衝刺的話，光束看起來應該是靜止的，就像靜止的波一樣，但是一直沒有人曾經觀察到靜止的光，所以讓他開始思考其中可能的原因。

自從伽利略和牛頓以來，物理學家就已經觀察到，在實驗室中觀測力學現象時，不管儀器是靜止的，

或是沿直線做一等速運動，結果並無差別；物體在等速前進的船隻中，和停泊在港口的船上，其行為也都是相同的，當時的科學家稱其為相對性原理。但是大家都認為此原理不適用於光上面。

19 世紀末時，大家都認為光是一種波。對於科學家來說，既然光是一種波，則它必需透過媒介體才能傳播，如聲波或水波一般。於是，他們相信世界上一定充滿著一種叫做乙太的特殊物質，而這也可以解釋光為什麼能在看起來空蕩的空間中行走。但是，若情況如此的話，那麼光速就不應像馬克斯威爾方程式所預測是不變的，它會受運動的影響而改變。經過無數次的實驗後，大家仍是無法對此假設找到可靠的證據。

1887 年，Albert Michelson 和 Edward Morley 在美國俄亥俄州克里夫蘭所做的實驗是其中最著名的。他們的實驗儀器是一個巨大的石箱，裡面有許多鏡子及交叉的光線，可以精確地測出光速的變化。據此，當地球在太空中快速運動時，Michelson 和 Morley 預測光束應該會改變，可是他們卻無法測出光束任何的變化，這讓他們很驚訝。愛因斯坦是否留意到這個特別的實驗一直為大家所爭論，但是他對時間與空間的嶄新分析倒是給這個意料之外的結果提供了一個解釋。

在 Michelson 和 Morley 所測得的結果(或沒結果)出現後，愛因斯坦決定在他的特殊相對論中完全摒棄乙太的觀念，而從兩個基本假設著手。

第一，任何一個做等速運動的觀察者都會有相同的物理法則；第二，不管光源運動速度的快慢，或是方向有別，光速 c 都是一定的。假若這兩個假設都成立的話，那麼我們對於時間的概念一定不正確，尤其是，兩件在同一座標系中同時發生的事情，在另一座標系中就不會同時發生。時間不是絕對的，它是相對的。

因為測量長度時需要決定物體在同一時間前後端的位置，因此，這相同的相對原理必須適用到長度上，也應適用到物質與能量的數量上。因此，時間經過的速率也會因物體(或人)運動的快慢而有所不同，當人

運動得越快，則時間經過得越慢；物體運動得越快，距離越短，物體也會越重。事實上，當一個有重量的物體到達光的速度時，時間會慢下來直到停止，沒有距離，而物體的能量則變得無限大。



Photo: Yerkes Observatory, University of Chicago

Henri Poincaré (1854-1912)

愛因斯坦並非是唯一一個質疑時間絕對性的科學家或哲學家，在那個時代，許多人都沈浸在探討如何讓不同地點的時間同步化的問題上，原因之一是，這對各鐵路公司時刻表的相互配合很重要，愛因斯坦也對此有他自己的看法。根據 Peter Galison 在他的書《愛因斯坦的時鐘，普因克爾的地圖》(Einstein's Clocks, Poincaré's Maps)中所述，在愛因斯坦於伯恩的瑞士專利局任職的那個時代，要讓鐵路網中各站的時鐘都能同步是一項要求高度精密的行業，當時有很多的專利申請都是有關以信號來連結時鐘的設計。

1890 年代時，天文學家和工程師都要會算出電的信號從一個地方傳到另一地方所需花費的時間，有些工程師甚至要來回都發送時間的信號，以補救可能發生的錯誤。

當時在巴黎經度局任職的 Poincaré 經常思索「時間傳送」的問題。1898 年 1 月，他寫了一篇有名的哲理性文章《時間的測量》(The Measure of Time)，討論時間同步只不過是兩個時鐘交換信號，再加上考慮到電或光的信號所需的傳送時間如此而已的可能性。Poincaré 一直到 1900 年時才將他的想法應用到物理上，當時他受邀參加為了對運動物體的電動力學大師勞倫斯(H. A. Lorentz)致敬所舉辦的集會，他上台演講時表示，他已經可以將勞倫斯純數學上的時間觀念重

新詮釋，做為實際上調整時間之用。

然而，Poincaré 卻無法揚棄真正時間(在乙太的座標系上)，與在其他座標系上所測出的「表面時間」兩者之間的基本差異，也無法摒棄乙太的觀念。愛因斯坦將兩者皆拋棄，而得到了真正革命性的結果。

能量和質量是等同的〈APS News, 2005 年 4 月〉

1905 年 9 月，愛因斯坦發表了他特殊相對論的一個重要結果：假如一個物體放出能量，那麼那個物體的質量一定會減少，減少的質量和放出的能量成比例。正如他給朋友的信中所解釋的：「和馬克斯威爾方程式有關的相對原理說，質量是物體內所含能量的直接計量；光會傳送質量…。這種想法很迷人，但是我不知道上帝是不是在開我玩笑，讓我誤入歧途。」

愛因斯坦並非提出質量與能量之關係的第一位科學家，早在 1881 年，發現電子的 J. J. Thomson 就提出電磁質量的概念，說明一種特定的能量會增加物體的質量，並提出它們之間的關係。19 世紀末和 20 世紀初，有不少物理學家都著手研究這個理論，其中最著名的是德國哥廷根的 Max Abraham。Abraham 提出的模型說明電子是一個剛體球，電荷密度均勻。勞倫斯修正 Abraham 的理論，說明球體的長度在運動方向會縮短。Poincaré 則證明，若要讓勞倫斯的模型前後都能一致的話，則需要增加一種新的作用力，即是 Poincaré 應力。這些研究都希望利用已觀察到的電子能量、質量與速度之間的關係來決定哪一個模型是正確的。相對論卻將這些全擺在一邊，它告訴我們其正確的關係是，

$$E=mc^2g \quad (1)$$

在此， $g^{-2}=1-v^2$ 純只是一個運動性因子，不管內部的動力情況，對任何粒子皆適用。

1905 年 6 月，愛因斯坦提出特殊相對論基本概念的論文，9 月時，他又提出簡短的續文。藉由運動學的簡單理論與已知電磁輻射中能量與動量之間的關

係，愛因斯坦得到了一個方程式，此方程式後來和愛因斯坦永遠齊名。在 Julian Schwinger 的書《愛因斯坦不朽的貢獻》(Einstein's Legacy, 93-98 頁, Dover 出版, 2002 年)中，作者對愛因斯坦的推理做了很好的詮釋：

$E=mc^2$ 是方程式 (1) 在 $v = 0$ 的極限； E 是物體在其靜止座標系的能量， m 是靜止的質量， c^2 是光速的平方。在他 9 月的論文中，愛因斯坦已經知道由放射物質所放出的粒子能量可能會使放射物質的質量減少，因此，他提議要仔細地測量鐳鹽的質量，以做為可以證明他的方程式是正確的方法。然而，因為 c 在實驗室中的值很大，以致於質量減少一點點就會產生巨大的能量，結果在此過程中質量減少的數量太小了，所以觀測不到。

這個方程式過了很久，一直到 1933 年時，才得到實驗的證實無誤。當時在巴黎的 Irene 和 Frederic Joliot-Curie(譯者按：居里夫人的女兒與女婿，於 1935 年同獲諾貝爾化學獎。)得到了能量轉變為質量的直接顯相的證據；同時，1932 年時，在英國的劍橋亦反過來觀察到了質量轉變為能量的過程。後來 John Cockcroft 和 E. T. S. Walton 使用他們的儀器，以 125 keV 能量的質子來撞擊 ${}^7\text{Li}$ 的原子核，碎裂結果所產生 2 個粒子合起來的質量比原來的 ${}^7\text{Li}$ 加上 p 的質量和少了一些，但是它們飛離時，帶有 17.2 MeV 的動能。若以已知新產生與已消失的粒子質量來計算，可以清楚地證實愛因斯坦方程式的正確性。

$E=mc^2$ 也是核分裂和核融合的基本原理，在核分裂中，一顆原子核分裂成兩個或多個碎片，所有碎片的總質量會比原有原子核的質量少，少掉的質量就是

排放出的熱量與輻射。自然界存在的輻射性物質其能量的排放往往太緩慢了，以致於沒有什麼實際的用處。匈牙利的物理學家 Leo Szilard 首先提議，使用足量的鈾會產生連鎖反應，因為鈾的原子核會吸收中子，然後分裂，再產生更多的中子，造成它成指數般地極速衰變。在經過無數次的技術創新與理論突破後，終於製成了第一顆原子彈及核反應爐，可以將物質的質量轉為熱量，然後再轉變成電能。

輕原子的核融合也可以產生熱量，在極高溫下，原子核會融合在一起而形成更重的原子，它的質量會比原來所有原子的總質量少一些，少掉的質量都轉化為動能排放出去，正如 Hans Bethe 和其他物理學家所做的專業分析一般。各種不同的核融合反應使我們了解到太陽和其他的星球如何會發光，Bethe 也因此成就於 1967 年榮獲諾貝爾物理獎。

$E=mc^2$ 是愛因斯坦最著名的貢獻，但並不是最偉大的成就。我們以後將會介紹他最超凡的理論—廣義相對論。本文資料來自美國物理學院網站：<http://www.aip.org/history/einstein/>；Julian Schwinger 的書“Einstein's Legacy”；Abraham Pais 所著的“Subtle is the Lord”，和 John S. Rigden 所著“Einstein 1905”。

譯者簡介

蕭如珀、楊信男

台灣大學物理系

E-mail: snyang@phys.ntu.edu.tw