

愛因斯坦對二十一世紀 理論物理學的影響

• 楊振寧

一百二十五年前愛因斯坦誕生於烏爾姆 (Ulm)。今天我受邀在此城市作關於愛因斯坦的演講，實感到非常榮幸。我很希望我能用德文來講，可是我知道，如果我這樣做，可能因為我的德文用字不當，會使你們聽起來很費力。承蒙你們同意，我將用英文來講。

愛因斯坦是二十世紀最偉大的物理學家，他和牛頓是迄今為止，世界歷史上最偉大的兩位物理學家。他的工作的特點是：深入、廣闊、豐富和堅持不懈。二十世紀基礎物理學三個偉大的概念上的革命，兩個歸功於他，而對另外一個，他也起了決定性的作用。

一 第一個革命：狹義相對論 (1905)

相對論這個名詞，並不是愛因斯坦，而是龐加萊 (Henri Poincaré, 1854-1912) 發明的。龐加萊在1905年的前一年的一次演講中講道^①：

按照相對論原則，不論是對於一個不移動的，或者是以均速運動的觀察者來說，物理現象的定律應該是相同的。因此，我們不能，也沒有任何方法可以分辨我們是否在從事這樣的運動。



圖1 1905年的愛因斯坦。時為瑞士專利局職員。那一年他提出狹義相對論，從而導致基礎物理學的革命。

* 原為2004年3月14日楊振寧在德國紀念愛因斯坦誕生一百二十五周年大會上的英文演講稿

這段說話不僅提出了「相對論」這個名詞，而且描繪出在哲學上絕對正確的、令人吃驚的洞察力。不過龐加萊並沒有了解此想法在物理學中的全部含義。在同一演講後面的段落顯示出他沒有能領悟「同時性」是相對的這個關鍵的和革命性的概念。

愛因斯坦也不是第一個寫出下面這組極為重要的變換公式的人：

$$x' = \gamma(x - vt), y' = y, z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

這是洛倫茲 (Hendrik A. Lorentz, 1853-1928) 早已提出來的。這個變換曾經，至今仍是，以洛倫茲的名字命名。可是洛倫茲也沒有領悟「同時性」是相對的這個革命性的概念。他在1915年寫道^②：

我沒有成功的主要原因是我墨守只有變量 t 可被看作是真正的時間，我的局部時間 t' 最多只被認為是一個輔助的數學量。

這就是說，洛倫茲懂了相對論的數學，可是沒有懂其中的物理學，龐加萊則是懂了相對論的哲學，但也沒有懂其中的物理學。

龐加萊是當時偉大的數學家，洛倫茲則是當時偉大的理論物理學家。可是這個革命性的、反直觀的發現，即「同時性」實際上是相對的，卻有待於二十六歲的瑞士專利局職員愛因斯坦來完成。這個發現導致了物理學的革命。

這個革命還將另一個重要的概念帶進了物理學，即對稱的概念。對稱今日已成為二十世紀物理學的中心主題之一，而且肯定將引導並決定二十一世紀理論物理學的發展。在本演講的後面我們將回到這個概念。

二 第二個革命：廣義相對論 (1916)

廣義相對論是愛因斯坦卓越和深奧的創造。就其原創性和膽識而言，我相信它在物理學史中是無與倫比的。廣義相對論是由下述兩方面所推動：等效原理以及在對稱(或不變性)思想方面的有遠見的發展。關於後者，愛因斯坦在其晚年著作《自述註記》(Autobiographical Notes) 中寫道^③：

……狹義相對論(洛倫茲變換下的定律的不變性)的基本要求太窄，即必須假定，定律的不變性對於四維連續域中座標的非線性變換而言，也是相對的。

這發生在1908年。

可是要實現這個思想是艱難和緩慢的，它花了愛因斯坦八年之久。它對第一次世界大戰後的歐洲產生了巨大的衝擊，愛因斯坦因而成為全世界家喻戶曉的名字。

廣義相對論已在二十世紀、而且還將在二十一世紀產生深遠和廣泛的影響：它已導致幾何學的重要發展。它導出統一場論思想，而統一場論已成為基礎物理學中迄今尚未完全解決的主要目標之一。它還導出現代宇宙論這門學科，這門學科肯定將成為二十一世紀重要的科學領域之一。



圖2 愛因斯坦在柏林 Haberlandstraße家中

三 第三個革命：量子論 (1900-1925)

量子論是人類歷史上一次偉大的知識革命。這個革命肇始於1900年普朗克 (Max Planck, 1858-1947) 提出的大膽假設，即黑體輻射的發射和吸收是量子化的。然而這個大膽的假設以後的發展卻極其困難，而且有時看起來是沒有希望的。1953年奧本海默 (J. Robert Oppenheimer) 在他的萊斯講座中生動地描述了從1900到1927年為弄懂量子化思想的努力④：

我們對原子物理的了解，即我們稱之為原子系統的量子理論，源自世紀交替之時以及20年代時大量的綜合和解析工作。那是一個異常大膽的時代。它不是某一個人努力的結果，它包括來自許多國家的科學家的合作，……

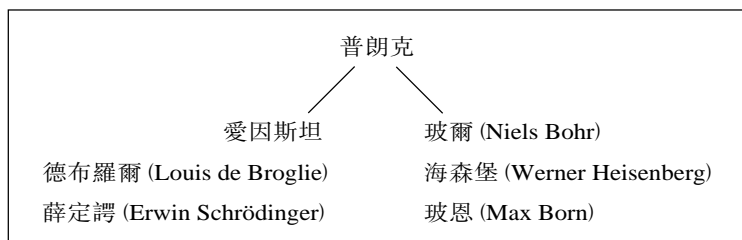


圖3 量子論發展之兩條路線，左面的路線遵循愛因斯坦關於電磁波是粒子的想法。右邊的路線遵循玻爾的原子結構量子化的想法。

1924-25年間，物理學中量子化的意義尚未被最後澄清，愛因斯坦又提出了一個大膽的思想：玻色—愛因斯坦凝聚。當時的物理學家對此都很驚詫和懷疑。而這個思想在最近幾年中卻已經成為基礎物理中最熱門的課題，並且可以指望它在未來會有神奇的用處。整個發展是愛因斯坦具有敏銳洞察力的又一個例子：他的洞察力遠遠超越他同時代的人。這是愛因斯坦天才的標誌。

藍佐斯 (Cornelius Lanczos) 在《愛因斯坦的十年 (1905-1915)》(The Einstein Decade [1905-1915]) 中曾這樣描述愛因斯坦在柏林當教授時的風格⑤：

幾乎每一個和他接觸過的人，都對他的風格的魅力留下了深刻的印象。



圖4 1922年愛因斯坦在巴黎法蘭西學院 (Collège de France) 演講

在沃爾夫 (Harry Woolf) 為慶祝1979年愛因斯坦百年壽辰而編的文集上，威格納 (Eugene P. Wigner) 寫道^⑥：

那些物理學討論會使我們認識了愛因斯坦思考的明晰，他的坦率、謙遜以及講解的技巧。

四 「着迷」於統一場論

在普林斯頓，愛因斯坦有一連串的助手。在前述沃爾夫編的文集中，愛因斯坦的助手之一霍夫曼 (Banesh Hoffmann) 這樣描述愛因斯坦和助手們的關係^⑦：

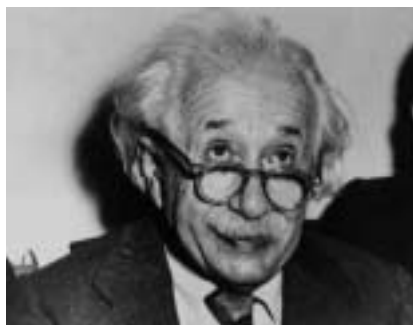
他從未對我們採用居高臨下的姿態。不論是在學術上還是在感情上，他都使我們感到非常輕鬆自在。

請允許我在這裏插進一些關於我個人的話題。1949年我到普林斯頓高等研究所時，愛因斯坦已經退休。我們這些年輕物理學家對我們領域中這位傳奇人物非常崇敬，但是很自然，我們都不敢去打擾他。不過在他對我和李政道在

1952年寫的兩篇關於相變的文章發生興趣後，曾找過我一次。那次我去了他的辦公室，在他那裏呆了一個多小時。在他面前我很拘謹，並沒有真正聽懂他主要的想法，只知道他對於李和我闡明的液—氣相變的麥克斯韋式的圖很有興趣。

我現在很懊悔從來沒有和愛因斯坦一起合影，不過1954年秋天，我為我的兒子

圖5 愛因斯坦在普林斯頓



和他拍過一張照片。那張照片是在我和米爾斯 (Robert L. Mills) 已經寫了非阿貝爾規範場那篇文章以後拍的。今天我很自然會問，如果那時我和他討論了我們這篇文章的主要思想，他會有甚麼反應：他曾對相互作用的初始原理着迷多年，也許對非阿貝爾規範場理論會有興趣。

愛因斯坦在普林斯頓主要研究統一場論。他在創立廣義相對論以後就專注於這項研究。他在這方面的努力是不成功的，而且招來了廣泛的批評，甚至嘲笑。舉例來說，拉比 (I. I. Rabi) 曾說^⑧：

回想愛因斯坦從1903或1902年到1917年的成就，那是非凡多產的，極具創造性，非常接近物理學，有驚人的洞察力。然後他去學習數學，特別是各種形式的微分幾何，他變了。

他的想法變了。他在物理學中那樣重大的創見也變了。

拉比對不對？愛因斯坦有沒有變？

為了回答這個問題，讓我們來讀一下愛因斯坦在其《自述註記》中寫的，數學怎樣會變得對他重要了^⑨：

在還是學生時我並不清楚，深奧的物理學基本原理和最複雜的數學方法的關係密切。只是在我獨立地從事科學工作多年後，我才逐漸明白這一點。

由此可見，愛因斯坦尋找「物理學基本原理」的目標並沒有變。改變的只是他探討問題的方法。創立廣義相對論的經驗告訴他^⑩：

可是創立(廣義相對論)的基本原理蘊藏於數學之中。因此，在某種意義上來說，我認為純粹推理可以掌握客觀現實，這正是古人所夢想的。

愛因斯坦的目標始終是探索「物理學的基本原理」。1899年當他還是學生時，他寫信給米列娃 (Mileva Marić，他們後來在1903年結了婚)^⑪：

亥姆霍茲的書還了，我現在仔細重看赫茲的有關電的力的傳送，因為我不懂亥姆霍茲電動力學中最少運動原則的理論。我愈來愈相信今日所提出的運動物體的電動力學與事實並不相符，我們可能可以用更簡單的方法去表示出來。

他在二十歲時已經對物理學的基本原理發生興趣。而到1905年，他所注意的這個基本原理就成為物理學偉大的革命之一：狹義相對論！

今天來評價愛因斯坦對統一場論的執着，我們可以說他確是着了迷。可是這是個多麼重要的迷，它為以後的理論研究指出了方向，它對基礎物理學的影響將深入到二十一世紀。



圖6 1954年愛因斯坦與楊振寧的長子楊光諾

更具體地講，愛因斯坦曾一再強調的下列研究方向，直到現在物理學家才真正認識它們的重要性：

(a) 物理學的幾何學化

1934年愛因斯坦在〈物理學中的空間、以太和場的問題〉（“The Problem of Space, Ether, and the Field in Physics”）一文中寫道^⑫：

存在度規—引力和電—磁兩種互相獨立的空間結構，……我們相信，這兩種場必須和一個統一的空間結構相對應。

在這裏他已經直覺地認識到電磁是一個「空間結構」。這個直覺促使韋爾 (Hermann Weyl, 1885-1955) 在1918-19年提出電磁學是一種規範理論，「規範」的意思是「量度」，是一個幾何概念。愛因斯坦當時批評這個理論是非物理的（下面我們還將回到這一點）。後來在1927-29年間，福克 (Vladimir A. Fock) 、倫敦 (Fritz London) 和韋爾本人修改了這個理論，在「規範」的指數中加了一個因子 $i = \sqrt{-1}$ ，使規範成為「相位」，從而形成了一個完美的幾何理論。

這個新的規範理論在1954年被推廣為非阿貝爾規範理論。自那時以來，非阿貝爾規範理論已經成為基本粒子物理中非常成功的標準模型的基礎。從許多方面來看，非阿貝爾規範理論是一個尚未竟全功的統一場論，部分地圓了愛因斯坦的夢。

非阿貝爾規範理論的數學基礎是一個稱為纖維叢上的聯絡的幾何結構。它和幾何學密切相關的另一個理由是它廣泛地，在基礎上用了對稱的概念。

在前面我們曾提到，愛因斯坦靠了廣泛的對稱性創立了廣義相對論。非阿貝爾規範理論也具有類似的、廣泛的對稱：用數學語言來說，廣義相對論的對稱在於正切叢，而非阿貝爾規範理論則在於以李群為基礎的叢。

對稱本來是一個純粹的幾何學概念。這個概念就這樣成為基礎物理學的基礎。我曾用「對稱支配相互作用」來描述這個發展。

(b) 自然定律的非線性化

愛因斯坦在其《自述註記》中寫道^⑬：

真正的定律不會是線性的，也不能從線性定律導出。

廣義相對論和非阿貝爾規範理論都是高度非線性的，這是高度對稱的內在要求。

(c) 場的拓撲

愛因斯坦通過兩個不同的途徑將拓撲學引入了場論。第一個途徑是在他創立宇宙學的時候，拓撲學立即作為他考慮對象的一個基本要素。第二個途徑則比較不太為人所知，那就是前面已經提過的，他對韋爾早期的規範理論所持的

異議。按照韋爾的理論，一根直尺在四維空間—時間中繞了一圈再回到原點，其長度將有改變。愛因斯坦在他給韋爾早期文章之一所寫的跋中對此提出異議：長度因此而有改變意味着不可能將直尺標準化，因此不可能有物理定律。

愛因斯坦的短跋具有愛因斯坦所特有的思考風格：直搗物理的核心。它給了韋爾的原始思想以致命的打擊。只有在前面已經提到過的，插入了因子 i ，將長度改變轉換為相位改變之後，才救活了這個思想。

上述轉換也消除了愛因斯坦原來的異議。可是相位改變是一個可以測量的量。如何測量呢？這就是由阿哈羅諾夫 (Yakin Aharonov) 和玻姆 (David Bohm) 兩人在 1959 年提出的，有名的阿哈羅諾夫—玻姆實驗 (當時他們並不知道愛因斯坦所寫的跋)。這個實驗涉及到兩股電子束流的干涉，它和愛因斯坦原來的跋中繞圈的幾何相當。這是一個很難做的實驗，

外村彰和他的共同工作者們在 1986 年左右出色地、定量地完成了這個實驗。

我要指出，這是首個實驗，證明在電磁學中，拓撲十分重要。電磁場是阿貝爾規範理論。在非阿貝爾規範理論的未來發展中，拓撲肯定將起更重要的作用。

五 愛因斯坦的反思

愛因斯坦在研究工作中非常獨立和執着。他的動力來自他對自然的強烈好奇心。在 1931 年的〈我所看到的世界〉(“The World as I See It”) 一文中，愛因斯坦清楚地透露出來了他的力量的源泉。也就是說他清楚地透露出來了愛因斯坦之所以為愛因斯坦^⑭：

我們能有的最奇妙的經驗是神秘感。是這種原始的激情孕育了真正的藝術和真正的科學。

不論是誰，如果沒有這激情，如果不再感到好奇和驚異，那就和死去了一樣，他的眼睛即失去了光明。這種神秘感，再滲入些恐懼，就形成了宗教。

認識到存在某些我們無法洞察的事物，認識到我們只了解最深的理論和最美麗的結構的皮毛，是這種認識和這種情感構成了真正的宗教信仰；在這個意義上，也只是在這個意義上，我是一個深深投入宗教的人。

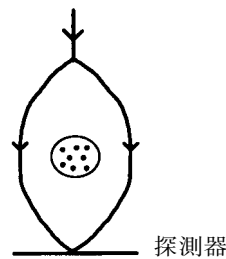


圖7 阿哈羅諾夫—玻姆實驗示意圖。中間是一線圈，其中磁力線垂直於紙面。兩邊的電子束在探測器上產生干涉線。線的位置與磁通量有關。電子束不受到任何電力或磁力。

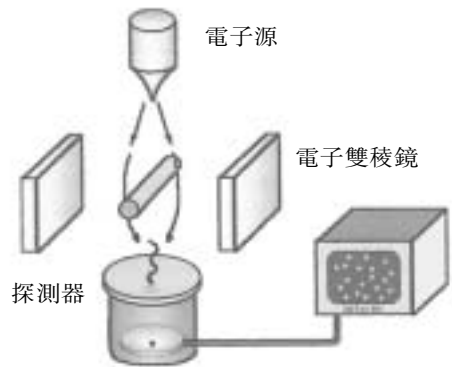


圖8 外村彰與合作者的實驗。

在另一場合，愛因斯坦強調「品性」對研究工作的重要性。在1935年一次紀念居里夫人的會上，他講道^⑮：

領袖人物的道德素質，比純粹的知識方面的成就，對於一代人和整個歷史發展進程的影響，似乎更為重要。

即使知識方面的成就，也取決於品性的崇高程度，而其所起的作用，比一般認為的要大得多。

在愛因斯坦誕生後一百二十五年，去世半個世紀的今天，他的思想依然左右着基礎物理的前沿。他不僅深深地改變了我們對於空間、時間、運動、能量、光和力這些基本概念的了解，而且還繼續以他的品性來激勵我們：獨立思考、無畏、不受拘束、富有創造力而執着。

范世藩、楊振玉 譯

註釋

① Henri Poincaré, "The Principles of Mathematical Physics", in *Physics for a New Century: Papers Presented at the 1904 St. Louis Congress*, The History of Modern Physics, vol. 5 (New York: American Institute of Physics, 1986), 284.

② Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), 167.

③⑨⑬ Albert Einstein, *Autobiographical Notes*, trans. Paul Arthur Schilpp (La Salle, Ill.: Open Court, 1992), 63; 15; 85.

④ J. Robert Oppenheimer, "A Science in Change", in *Science and the Common Understanding* (London: Oxford University Press, 1954), 37.

⑤ Cornelius Lanczos, "Introduction", in *The Einstein Decade (1905-1915)* (New York: Academic Press, 1974), ix.

⑥ Eugene P. Wigner, "Thirty Years of Knowing Einstein", in *Some Strangeness in the Proportion: A Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein*, ed. Harry Woolf (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1980), 461.

⑦⑧ "Working with Einstein", in *Some Strangeness in the Proportion*, 476; 485.

⑩ Albert Einstein, "On the Method of Theoretical Physics", in *Ideas and Opinions* (London: Alvin Redman, 1956), 270.

⑪ Jürgen Renn and Robert Schulmann, eds., *Albert Einstein/Mileva Marić: The Love Letters* (Princeton: Princeton University Press, 1992), 10. 中譯引自童元方的譯本：《情書：愛因斯坦與米列娃》(台北：天下遠見出版股份有限公司，2000)，頁27。

⑫ Albert Einstein, "The Problem of Space, Ether, and the Field in Physics", in *Ideas and Opinions*, 285.

⑬ Albert Einstein, "The World as I See it", in *Ideas and Opinions*, 11.

⑮ Albert Einstein, "Maria Curie in Memoriam", in *Ideas and Opinions*, 76-77.

楊振寧 當代物理學大師，現任清華大學教授、香港中文大學博文講座教授。