



量子電動力學

高涌泉



「我想請教你一件事。當一位數學家致力於物理現象的探討，並且得到了結論。這些結論能不能像數學式那樣完整明確地用日常語言表達出來？如果這樣做，不是有很大的益處嗎？——從一些難懂的符號變為日常語言，那樣我們就可以也從實驗來下手了。」

——引自法拉第給馬克斯威爾的信

在科學的歷史上，雖然有些事件彼此相似，但是不會完全一樣。每一個階段的進展和它以前的比較起來，都會有所不同。雖然如此，如果我們把古典電動力學的演進和近年量子電動力學的發展互相比較，會有些意想不到的收穫。先讓我們從適當的角度來看看目前所具有的知識及面臨的困難。要是引言中法拉第的疑問在當時能受到更多更廣泛的重視，並且提出恰當的解答，電磁波的發現或許不用再等上三十年？當然，我們無法回答這個假想的問題。但是，每一位理論物理學者讀到這段文字，都會感覺到我們目前面臨同樣的情形。這篇文章就是來說明，目前在量子電動力學上的研究。雖然不很完全，但是盡量做得清楚、明確。

首先，應該界定量子電動力學的範疇。由於我們對物理世界了解不周全，只得把已有的物理知識大致分為三部分。

第一部分包含所了解的核子結構，質子、中子、介子，微中子及這些粒子間的相互作用。

第二部分則牽涉到宇宙的幾何、結構，愛因斯坦的重力理論這一類大尺度的世界。

第三部分包括尺度介於原子、核子到星球之間的一切現象。例如：古典力學，光學，量子電動力學，特殊相對論及核外原子物理（extra-nuclear physics）等等。

這樣區分的好處是使我們能夠劃分那些是所知不多，那些是幾乎一無所知。在前兩部分，有許多還無法解釋的實驗數據，經驗定律及一些相互抵觸的假設。這些都正待我們進一步去研究整理。可是，在第三部分我們有的理論在邏輯上自成系統，並能融合已知現象。這理論的方程式包括電子、正子、光子的運動定律，電磁公式，量子力學和特殊相對論的原則。在誤差範圍內，實驗數據完全符合這些方程式。而我們所謂的量子電動力學就是這第三部分。

量子電動力學在近代物理上佔有一獨特的地位。到目前為止，它是唯一用一套精確的方程式就能完全涵蓋的部門。我們可以任意假想一個實驗，預測它的結果到五位小數，並且相信這理論已經把所有該考慮

的因素都考慮到了。從量子電動力學我們可以很詳盡地描述電子的行為，也就相當地掌握住了“電子到底是什麼？”在量子電動力學方面的知識已經精確到使我們認為基本粒子的性質都給把握住了。所以，最近三十年來，物理學家把他們的注意力集中在電子上。

當初用來研究電子的概念及方程式，今天又被拿來研究基本粒子。要不是有這些概念和式子，所有關於基本粒子性質的思索就僅僅是猜測罷了。我們可以預期將有一個更廣泛的基本粒子理論來包容這些概念和公式。

1927—1929年間，海森堡、泡立、狄拉克寫下了量子電動力學的基本公式。從歷史觀點來看，他們可稱為是現代新科學的“馬克士威爾”。馬克士威爾方程式發表三十年，有一個接一個的實驗證實。同樣的，三十年代的一些已知現象：複雜的原子光譜，高能宇宙射線中觀察到的電子和正子的增殖現象（cascade-multiplication）都吻合了海森堡—泡立—狄拉克方程式。即使不要太牽強附會，我們還是可以繼續在古典和量子電動力學之間尋找這種相似性，甚至包括目前的發展。

馬克士威爾理論一開始雖很圓滿，後來却陷入一個困境。它預測實驗儀器在空間中的速度對實驗結果有某種效應。這空間是指由以太構成的絕對座標系。牛頓力學的基礎之一就是“由實驗無法測出絕對速度”，牛頓非常強調這一點。馬克士威爾理論和牛頓力學雖然不是完全不符，却隱含了牛頓鍾愛的定律之一需要放棄。幸好，馬克士威爾所預測的效應數量級僅約 V^2/C^2 ，他那個時代還無法測這麼小的值。這種情況下，就有兩種觀點並存，不是證明牛頓定律不對就是修改馬克士威爾理論。既然當時實驗還不能驗證孰是孰非，物理學家也高興能夠同時相信這兩種理論。

1930年代，量子電動力學的觀念也有非常類似的演進。很久以來就曉得電子周圍的電磁場具有能量。根據愛因斯坦“質能守恒律”，能量具有質量和慣性。那麼電子自身電磁場的慣性對電子運動會有種牽引力。這效應叫“場反作用力”（field reaction）。嚴格說來反作用力是由電子輻射出去的場和跟隨電

子不輻射的場一起造成的。這裡“場反作用力”僅指第二種。再進一步去研究，就有兩件事逐漸明朗。一方面是，如果故意忽略“場反作用力”出現的情況，計算的結果和實驗完全相符。另一方面，如果把“場反作用力”考慮進去，往往得到無意義的結果。也就是說電子會像一個有無限大質量的粒子，因為它自身電磁場的慣性會無窮大。當時的物理學家實在束手無策。他們已經有了一個和實驗相符的理論，然而這理論的成立却需要排除“場反作用力”。可是，排除這個力等於否定牛頓反作用力定律。既然電子能在周圍的電磁場有張力，電子本身怎麼可能不受反作用力呢？

當時的物理學家都同意：即使“場反作用力”效應存在，也小到當時技術無法測出的程度。為了探討這個事實，物理學家分成兩派意見。一派主張理論的基本公式沒錯，需要改進的是計算的方法，這樣可以把無限大的反作用力消去，測得的反作用力就恰為零。另一派認為需要修改基本公式，使反作用力為有限值，相當小但不為零。這兩派意見都無法使人信服，也都沒法提出任何物理模型來證實他們推介的辦法。既然沒有實驗來驗證這些假說，多數物理學家只好同時相信量子電動力學理論和反作用力定律大體上是正確的。一直要到1947年，這種困境才有了轉機。

無論馬克士威爾理論或量子電動力學，都是由一個決定性的實驗迫使理論物理學家在相互抵觸的理論中作一選擇。1887年邁克生摩里(Michelson-Morley)實驗證明馬克士威爾理論中由絕對速度造成的效應事實上並不實在。1947年拉姆和雷塞福(Lom-Retherford)以新的“射頻分光譜”(Radio-frequency spectroscopy)技術精確測量了氫原子光譜的精細構造，證實“場反作用力”存在，並且在光譜線上造成可測得的位移。1890年代的物理學家面臨重寫量子電動力學的需要，同樣的，1940年代的物理學家也必須重寫量子電動力學的理論。在這兩個情況中，都是先有實驗，決定了理論應該如何，引發理論學家更進一步努力，而獲得成功的結論。

新的古典電動力學是羅倫茲(Lorentz)帶來的。事實上，他並沒有違背馬克士威爾理論，只是把它重新加以闡述。他這樣做是基於：由實驗無法區分測量工具的力學和電學性質。例如：一把尺的長度和它內部原子間的電力有關。其他還有一些力學性質也和電磁效應有關。在邁克生摩里實驗中，如果以太沿物長方向有個絕對速度，物體長度會收縮，收縮係數和速度有關。這種力學效應1893年由費次吉拉(Fitz Gerald)提出，所以命名為“費次吉拉收縮”。羅倫茲發現在以太中的絕對速度引起的電磁效應和儀器的絕對速度引起的力學效應都應該可以測量，而且數量級相同。如果把絕對速度、力學、電磁效應都考慮進去，彼此會完全抵消。所以任何實驗就和絕對速度無關。這就符合了邁克生摩里實驗。

羅倫茲這理論重新闡述馬克士威爾理論，而保存了牛頓定律中“絕對速度無法觀測到”的性質，聽起來就像神話一樣。它從“以太對實驗工具有絕對速度”下手，最後却發現以太速度對數據根本沒有影響。羅倫茲自己也很滿意這個理論。又巧妙又解答了問題，還有什麼好要求的呢？

量子電動力學也有類似的情形，羅倫茲在來登(Leiden)的後繼者克拉馬西(Kramers)於1947年提出一個新的理論。(他的去世，是物理界一大損失)。後來再經徐文格，貝特，朝永振一郎(Schwinger, Bethe, Tomonaga)等人寫下了數學式子。克拉馬西的想法很簡單和羅倫茲五十年前的想法類似。克拉馬西注意到，由“場反作用力”施於電子的慣性力(inertial force)和電子自己的力學慣性總無法由實驗區別得出來。我們觀測到的事實上是總慣性—電磁、力學效應的總和。1930年代物理學者的錯誤在於沒有把無法測到的力學質量(m_0)和觀察到的自由電子質量(m)分別清楚。例如，他們計算氫原子內電子的場作用慣性(δm)是無限大，而結論是束縛電子總質量 $m + \delta m$ 為無限大。這表示一應可觀察的值為無限大。顯然理論是錯的。然而，克拉馬西指出一束縛電子的總慣性不是 $m + \delta m$ 而是

$$m_0 + \delta m = m + \delta m - (m - m_0) \quad \text{依定義}$$

$m - m_0$ 值是場慣性或是自由電子計算得的 δm 值。雖然，測得到的總慣性是有限值， δm 不一定要有限，只要自由電子算出的 δm 和束縛電子的 δm 的差為有限就行了。克拉馬西認為（後來由徐文格計算）差的確是一有限值。此差為束縛電子和自由電子總慣性之差，也就是在拉姆—拉塞福實驗中測量到的。近來，可知精確計算的理論值和實驗非常相符。（大約 1/1000 準確度，十年前還無法做到如此）。這新量子電動力學就像羅倫茲新電學一樣，只是舊理論的一新聞釋，而沒有完全更改。它和舊理論不同的地方是我們把“場反作用力”效應考慮進來。不只考慮測得的值，而且包括用來和測得質量相比較的標準質量 m 。我們可證明當可測量值經計算出來，並以質量表示，而不是以無法測得的 m_0 表示時，無限大的部分總會消去，就得到了有限值。進而，這有限值總是符合實驗的。同樣的論證也可用到電荷上。我們令電子上可測量電荷為 e ，這不同於出現在理論方程式中的 e_0 。如果 e 以 e_0 來計算，結果得出無限大。但 e_0 是測不到的，可測到的值如以 e 表示總得到有限值。終於我們有了一完全精確可行的理論。原方程式中包含的是 m_0 和 e_0 值，他們是無法測出的。

當我們計算可測量效應時，我們得到的式子包括有 m_0 和 e_0 及無限大值和發散積分等等。但不必擔心無限大值，我們可當他們只是平常數字。因計算結果只會剩下質量 m 和電荷 e （可測量），所有無限大值都不見了。我們的新量子電動力學真值得驕傲。就好像羅倫茲理論，這是才智的勝利。它的成功在於無需放棄任一有價值的部分，解決了所有舊理論的矛盾。它也和羅倫茲理論一樣有一奇異的特性，就是，理論的成功寄託於一無法解釋的“妙物”。在羅倫茲理論中有一個靜止以太，在量子電動力學中有個測不到又沒有數學意義的 e_0 ， m_0 。兩個理論中有複雜的“數學消去”計算出可測值的結果事實上和以太速度或無意義的符號無關。為什麼會有這種奇蹟式的消去，理論無法提出解釋。我們已將這種歷史比較推到現在，能再往前推嗎？人人都曉得羅倫茲精研了這麼多年

的理論，後來愛因斯坦帶來了這些奇蹟的解釋。他說明有一個包含新物理原則但是更簡單的理論“狹義相對論”可以導出所有羅倫茲理論的結果。這新理論中沒有以太，沒有絕對速度。一開始就可確知實驗測不出絕對速度。愛因斯坦由此出發就可導出一切。愛因斯坦理論的推測和羅倫茲沒有什麼太大的不同。他不過把羅倫茲理論掉頭，使結果成為假設。這樣一變換，所有羅倫茲理論令人滿意的部分仍然保留，而不可測的那些東西，以太及絕對速度就不見了。愛因斯坦古典電動力學的推導是那樣的簡單而完全，所以它到今天還是像 1905 年時一樣屹立著。

我們也能在量子電動力學上有同樣的改變嗎？我深信我們能，我們須要做的還是一樣，讓理論都翻個身，使它的結論不變，而原理更簡單清楚。我們需要一個方向來開始動手，使 e_0 ， m_0 這些沒法測到的值不出現在方程式中。所以我們一開始就要以一整體來描述電子，而不必分為力學部分。新的描述應建立在一類似相對論的物理原理上，表明沒法由實驗區別電子的力學和電學部分。只有當我們有這麼一個原理，我們才能真正了解為何目前理論如此成功。對我們而言，這推論導至一肯定的結果。目前理論“無法解釋”的成功，保證應有一新的更簡單的描述等着我們發現。我們還要等多久？沒人能猜，我們要耐心等待，要知道認識基本原理是需要很長一段時間的。從馬克士威爾到愛因斯坦是 40 年，從狄拉克到現在才過了 25 年。

作者 Freeman J. Dyson 理論物理學家（康乃爾大學核子研究實驗室）他是少數這幾年來對量子電動力學數學發展有重大貢獻的理論家之一。

譯者註：1 這篇文章雖發表於 1952 年，但文中所提到的問題目前仍然存在。

2 Feynmann: Lectures on Physics Vol. 2 Ch. 28 “電磁質量”一章也談到電子無限大質量的問題。從很基本電磁公式出發，引導至矛盾的所在。也談到物理學家想解決這問題的努力，很精彩。