

質子半徑的量子問題

重點提要

- 一項測量質子半徑的新實驗發現，質子比預期來得小。
- 這個情況意味著物理學家若不是不夠深入了解質子，就是還不夠澈底了解目前最精準的科學理論——量子電動力學。
- 我們希望，這個較小的質子半徑數值能夠導致物理定律從根本進行修訂。

精確測量質子半徑的兩項實驗，得到了完全不一樣的數值，到底是量子電動力學仍不完備，還是我們忽略了什麼？

撰文／伯諾爾（Jan C. Bernauer）波爾（Randolf Pohl）

翻譯／高涌泉

如果你一直以為科學家已經很了解質子，沒人能指責你錯得太離譜，因為質子畢竟是宇宙中物質最主要的成份、恆星熔爐的燃料。質子所帶的正電拉住了帶負電的電子而形成氫原子，在一個世紀前，對於這種現象的研究開啟了量子力學革命；現代物理學家則可以設法讓超高能量的質子對撞來產生像希格斯粒子這種奇異的東西。

但是對於質子的最新研究卻讓我們大吃一驚。我們兩人（伯諾爾與波爾）以及各自的實驗團隊，用了兩項互補的實驗，對於質子半徑做了至今最精確的測量。在實驗開始之初，我們以為所得到的結果只會讓已知質子大小的精確性提高一些而已，但是我們錯了。測得的質子半徑和已知半徑相差很大，這個差值是任一測量誤差量的五倍以上，意味著發生這種巧合的機率將小於 10^{-6} 。

因此一定有什麼地方不對勁，若不是我們還不夠充份理解質子，不然就是我們並不了解這些質子精密測量實驗所使用的物理原理。我們進入宇宙深處，卻看到了異常現象，因此有很大的機會可以得知一些新東西。

欠缺的移位

我們的故事起於義大利的聖塞扶羅島，數十位物理學家在這座島上會面，討論的主題是如何更嚴格地檢驗物理學中（甚至於可說是一切科學中）最精確的理論——量子電動力學（quantum electrodynamics, QED）。

QED 的歷史可追溯至 1928 年，當時狄拉克 (P.A.M. Dirac) 結合了量子力學與狹義相對論而得到今天所謂的狄拉克方程式。這是電磁現象的最佳理論，因為它可以完整描述光與物質如何交互作用。一個例子是，QED 可以用物理定律與基本常數（譬如電子質量）來說明原子結構。也因為如此，物理學家便利用簡單的原子如氫原子來檢驗 QED。他們能夠從理論去預測實驗的結果，誤差不超過 10^{-12} ，實驗誤差也差不多就是這麼大。

我們兩人在聖塞扶羅島首次碰面。那時我們為了增進對於 QED 的了解，都正著手測量質子。當時對於質子最精密的測量來自某種實驗技術，伯諾爾的實驗改進了這種實驗技術，已經開始要探究質子的內部結構。

波爾的實驗團隊則用了全新的方法。他們研究的系統是一種奇異、沒有電子的氫原子型態，他們查驗了這個系統的能階細微移位，這個移位與質子大小密切相關。這種移位由已過世的藍姆 (Willis E. Lamb) 於 1947 年首次在正常的氫原子中測得。雖然物理學家仍然稱呼這種現象為「藍姆移位」(Lamb shift)，但是他們已經了解它其實來自兩種不同的因素。

對於藍姆移位的第一項貢獻來自所謂的虛粒子，即在原子內部一下子蹦出來但又馬上消失的幽靈。科學家能夠用 QED 計算這些虛粒子如何影響原子能階，準確度極高。但是近年來，對於藍姆移位第二項貢獻的不準度已經開始限制科學家的預測能力。這第二項因素與質子半徑有關，也與電子奇特的量子性質有關。

在量子力學中，用來計算電子行為的是雲狀、散佈在原子內的波函數。波函數（更精確地講，是波函數絕對值的平方）描述了在某處找到電子的機率，而且它只有幾種特殊的形式，我們稱為原子態。

有些原子態（因為某些歷史原因它們稱為「S 態」）的波函數在原子核的位置上有最大值，也就是說，我們在質子內部找到電子的機率不為零，而且這個機率會隨著質子半徑變大而增大。當電子跑到質子內部，電子所「感受」到的質子電荷（和電子位於質子之外相比）會比較小，因此質子與電子之間的整體束縛力會減低。

由於束縛力降低，使得原子最低能量態（即 1S 態）的藍姆移位改變了 0.02%。這個比例或許看起來微不足道，但是科學家已經把原子基態（1S 態）與第一激發態（2S 態）之間的能量差測得非常精確——誤差在數個 10^{-15} 而已。因此如果我們想用精密實驗來查驗 QED 理論，當然必須把質子半徑造成的極小效應考慮進來。

過去八年，波爾的實驗團隊已經試著要把質子半徑精確量出來，但是在聖塞扶羅島第一次會議時，實驗似乎還無法上軌道，讓大家感到疑惑。

這時，伯諾爾的團隊正要開始澈底研究質子半徑；他的方法並不依賴氫原子能階的測量，反之，他們把電子射向氫原子，看它們如何散射開來，以推算出質子半徑。