

## 量子色動力學

文／林志隆

2004 年 10 月 5 日，瑞典皇家科學院宣布 2004 年諾貝爾物理獎得主為 3 位美國科學家——大衛葛羅斯 (David J. Gross)、大衛波立哲 (H. David Politzer) 以及法蘭克威查克 (Frank Wilczek)，得獎主題是他們 30 年前發現的「漸近自由」現象，以及從而展出的量子色動力學 (Quantum Chromodynamics, 簡稱 QCD)。這個理論解釋並描述核粒子內部更基本的組成粒子 (夸克 quark) 的許多特性，是追尋物質基本結構終極理論 (theory of everything) 的重要里程碑 (請參考本館 136 期簡訊)。

QCD 理論濫觴於 1960 年的核子碰撞實驗。當時的實驗物理學家讓核粒子在加速器 (請參考本館 154 期簡訊) 中互相撞擊以研究核子的次結構，結果發現許多性質類似中子與質子的新粒子，總稱為「強子」(hadron)，其中包含由 3 個夸克組成的重子 (baryon) 與由 1 對正反夸克組成的介子 (meson) 兩種。當時發現了數以百計的強子，但是它們可以分成幾大類，每一類粒子的性質相近但是質量略有不同。科學家認為這可能是成分相同而組合方式不同的結果，因此猜測它們內部應該還有更小的結構，當時稱這種比核子更小的基本結構為「夸克 (quark)」或「部分子 (parton)」。

既然核子 (包含中子與質子兩種組成原子核的粒子) 有更小的結構，於是科學家就想要像從原子核中分離出中子與質子一樣，利用核子的高能碰撞分離出單獨的夸克。但是這個努力卻遇到目前還無法突破的巨大障礙，並導致了量子色動力學的產生。

當時的實驗發現除了我們常見的重力與電磁力以外，在原子核作用中還有「強作用」和「弱作用」兩種「核力」。簡單說，強作用負責把夸克綁在一起形成強子，而弱作用則負責讓這些組合粒子衰變分裂。

當時在輕子與核子間的深度非彈性散射 (可以深深刺入粒子內部才被彈出來的強力撞擊) 實驗中，發現強作用有「漸近自由」(asymptotic freedom) 現象出現。所謂的「漸近自由」，簡單說就是距離越近越沒有束縛，距離越遠作用力反而越大。這和一般常見的重力和電磁力恰好相反，重力和電磁力遵循的是距離越近作用力越強的平方反比定律 ( $F = GMm/r^2$ )。

結果夸克就好像參加了一個組織嚴密的黑社會幫派一樣，當夸克緊緊綁在一起時就算橫衝直撞也沒人管。但是只要任何一個成員稍微脫離其他夸克一點點，就會出現巨大的強作用力把它押回來。所以，即使現在的加速器威力比當時大了數十倍，科學家還是連一個夸克都沒有「策反」成功過。

一方面由於實驗學家一直無法分離出獨立的夸克，另一方面理論學家葛羅斯、波立哲以及威查克也發現，在不可交換規範理論 (non-Abelian gauge theories) 中有距離越近作用力越弱的現象 (即漸近自由現象)。在這樣的理論中，夸克彼

此間的距離只要超過質子大小，強作用就會變得非常強而將夸克拉了回來。描述強作用的 SU(3) 不可交換群規範理論，便解釋了為何夸克不能單獨出現的問題。所謂的「群論」是數學上一種研究對稱性的學問。當物體具有某種對稱性時，它的某些特性在做過某些轉動或移動之後也不會改變（守恆）。把所有能夠維持物體特性不變的各種轉換（包含轉動、移動或其他轉換）合成一「群」，就可以描述這個物體的對稱性。

除了漸近自由之外，強作用理論還有一點很重要的特徵是：實驗所找到的強子只有由 3 個夸克組成的重子 (qqq) 和 1 個夸克加 1 個反夸克 (qq) 組成的介子兩種，以及對應的各種反粒子。像 qq 和 qqqq 這樣組合的粒子從來沒有出現過。這一點讓科學家非常困惑，因為漸近自由只會要求夸克一定要參加組織，可是並沒有要求參加哪一種幫派或幾個粒子才能結成一幫。夸克們會有這樣的行為，那一定是上帝另外規定了我們還不知道的誠律，這種誠律在量子力學裡面稱為「量子數守恆」，像電荷就是一種會守恆的量子數。

當科學家遇到用現有的守恆理論無法解釋的現象時，他們的第一個反應就是：「一定有新的守恆律（量子數）在裡面作怪」。科學家們把這個新的量子數稱為「顏色」(colour)，因為夸克一定要三個三個一組或正反一組才能出現，感覺好像光線必須要三原色或正反（互補）色組合才能形成白光一樣，所以他們說上帝規定我們的世界只能是純潔的白色。夸克所帶的顏色（量子數）有 R（紅）、G（綠）、B（藍）三種，可是我們的世界必須是白色的，所以夸克一定要三個三個一組或正反成對出現，絕不可以有落單或是兩個、四個一組的情形。因為理論中多了這個「色」量子數，所以這個理論被稱為「量子色動力學」。

在量子色動力學中，每一種夸克都還帶有某種顏色，它們會組成一個所謂 SU(3) 群的三合態 (triplet) 的 3。例如 u 夸克（寫成  $u=(u_R, u_G, u_B)$ ）屬於這個群的 3，反 u 夸克的則是  $3^*$ 。根據 SU(3) 群的規則，一正一反搭配的組合 ( $3 \times 3^*$ )，以及 3 個夸克一組的組合 ( $3 \times 3 \times 3$ )，結果都可以得到代表無色（白色）單態 (singlet) 的 1。而像 2 個夸克或 4 個夸克的組合則不行，所以實驗找不到由 2 個或 4 個夸克組成的粒子。在粒子物理（或稱高能物理）的研究中，群論是非常重要的數學工具，幾乎所有的理論都免不了要用到群論。

就像量子電動力學 (Quantum Electrodynamics, QED) 是經由交換光子傳遞電磁作用一樣，量子色動力學也必須經由交換媒介粒子來傳遞強作用。強作用的媒介粒子叫做「膠子」(gluon)，意思是像膠水一樣把夸克緊緊黏在一起。在 QED 裡面只有 1 種光子，可是在 QCD 中則有 8 種帶著顏色的膠子。目前已經證實 QCD 是一套非常成功的理論，葛羅斯、波立哲及威查克便是因此而獲得今年的諾貝爾物理獎。

在目前已知的重力、電磁力、強作用（強核力）及弱作用（弱核力）4 種作用力中，電磁力早已經證明適用 U(1) 群的規則，弱作用具有 SU(2) 群的規則，強作用則具有 SU(3) 的規則，重力的規則反而還是個謎。物理學家的夢想是希望把所有作用統一起來，只要一套數學理論（群）就可以處理所有作用力。

最先成功的是把電磁力和弱作用統一成一個  $SU(2) \times U(1)$  的電弱理論，1979 年和 1984 年的諾貝爾物理獎都是頒給對這項研究有貢獻的人。目前還在努力的目標則是把強作用和電弱作用統一起來，希望成爲一個可以包含  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  的大統一理論，這個理論已經有明顯進展，但是還是不夠完美。至於統一重力和其他作用力的終極理論，那就還有待努力了。

量子色動力學一般要到物理研究所碩士班階段才開始有機會接觸，所以看不懂這篇文章一點也不用難過（尤其是那些群論的符號和名詞），一般讀者看看科學的發展過程就足夠了。如果隨便就讓你看懂了，那諾貝爾獎不是太沒價值了嗎？

台大物理系高涌泉教授在 1999 年介紹諾貝爾物理獎得主的文章中，就曾預測量子色動力學的研究應該會獲得諾貝爾獎。果然今年就被他說中了，而且得獎人數和名單還一點都不差呢！