

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。

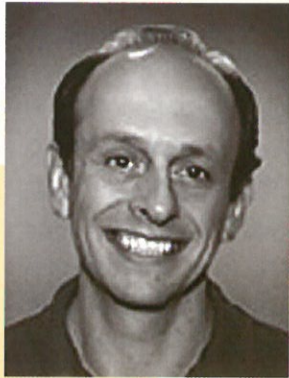
當時的實驗發現除了我們常見的重力與電磁力以外，在原子核作用中還有「強作用」和「弱作用」兩種「核力」。簡單說，強作用負責把夸克綁在一起形成強子，而弱作用則負責讓這些組合粒子衰變分裂。

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（ $F = GMm/r^2$ ）。

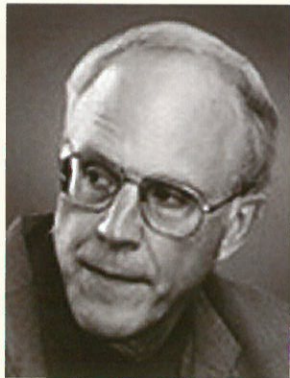
結果夸克就好像參加了一個組織嚴密的黑社會幫派一樣，當夸

2004年諾貝爾物理獎簡介

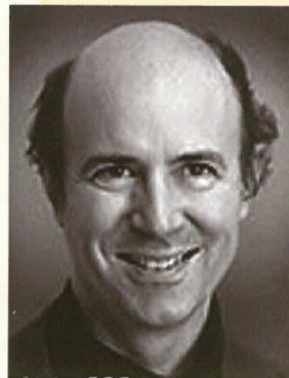
量子色動力學



大衛波立哲



大衛葛羅斯



法蘭克威查克

（取材自諾貝爾獎官方網站nobelprize.org）

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（q \bar{q} ）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 x 3*），以及3個夸克一組的組合（3 x 3 x 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) x 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) x SU(2) x 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！

本館研究客座介紹

胡忠恆博士

現職：退休教授

專長：古生物學、地史學

學術造詣及對本館之貢獻：

1. 曾榮獲日本國古生物學會年度最佳論文獎、國科會傑出研究獎、中國生物學會科學研究獎及教育部特優教師獎。
2. 研究範疇涵括三葉蟲、介形蟲、螃蟹、石蝦、苔蘚蟲、

有孔蟲、腕足動物、腔腸動物、軟體動物及珊瑚藻等生物。

3. 著作等身。已發表百餘篇學術論文，著有「臺灣貝類化石誌」等專書卅餘冊。
4. 曾任本館籌備處顧問委員會委員，自民國78年起多次捐贈各種門類化石達4885件。