



強作用力：構成物質世界的基石

● 傅俊結*

在浩瀚的宇宙中，萬物依循著各種基本作用力而運轉。從星系的宏偉尺度到原子核的微觀世界，這些力量塑造了我們所知的現實。其中，在所有的交互作用中，電磁力（electromagnetic force）、弱作用力（weak nuclear force）、重力（gravity）以及強作用力（strong nuclear force）構成了物理學中的四大基本作用力。接下來我們將寫四篇文章分別探討這四個基本作用力的相關特性性質。雖然重力支配著天體運行，電磁力驅動著化學反應與生命現象，弱作用力則與放射性衰變息息相關，然而，真正將原子核凝聚在一起、賦予物質穩定性的，卻是神秘而強大的強作用力。

強作用力，顧名思義，是自然界中最為強大的力量。它的作用範圍極其微小，僅限於原子核的尺度之內，約為 10^{-15} 公尺。然而，正是在這極其有限的空間中，它展現出了令人難以置信的威力，遠超過電磁力數十甚至數百倍。如果沒有強作用力，原子核將無法穩定的持續存在。原子核由帶正電的質子（proton）和不帶電的中子（neutron）組成。由於同性電荷相斥，質子之間存在著強大的庫侖排斥力（Coulomb repulsion），足以讓原子核瞬間瓦解。然而，在強作用力的束縛下，這些質子和中子能夠緊密地結合在一起，形成穩定的原子核，進而構成我們周遭的一切物質。

強作用力的載體粒子是膠子（gluon）。與電磁力的載體光子（photon）不同，膠子本身也帶有「色荷」（color charge），這使得它們之間也能相互作用，進而產生一系列複雜而奇特的現象。夸克（quark）是組成質子和中子的基本粒子，它們帶有三種「色

* 傅俊結，南臺科技大學電子工程系副教授



荷」：紅 (red)、綠 (green)、藍 (blue)。這種色荷並非我們日常所見的顏色，而是一種抽象的物理性質。與電磁力中正負電荷相互吸引類似，不同色荷的夸克會相互吸引。膠子則扮演著傳遞這種色荷作用力的角色，它們像彈簧一樣將夸克束縛在質子和中子內部。強作用力的一個重要特性是「色禁閉」(color confinement)。這意味著自由的夸克和膠子永遠無法單獨存在。當試圖將夸克從質子或中子中分離出來時，強作用力會隨著距離的增加而急劇增強，就像一條越來越緊的橡皮筋。當提供的能量足夠大時，這些能量並不會使夸克脫離束縛，反而會產生新的夸克-反夸克對 (quark-antiquark pair)，最終形成新的介子 (meson) 或重子 (baryon)，使夸克始終處於束縛狀態。這種現象使得我們在實驗中只能觀察到由夸克組成的複合粒子，例如質子和中子，而無法直接探測到單獨的夸克。另一個與強作用力密切相關的概念是「漸近自由」(asymptotic freedom)。與色禁閉相反，當夸克之間的距離非常小時（例如在極高能量的碰撞中），強作用力會變得非常弱，以至於夸克可以被視為幾乎自由的粒子。這解釋了為什麼在高能物理實驗中，我們可以透過分析碰撞產生的射流 (jet) 來間接推斷夸克的存在。漸近自由的發現為粒子物理學的標準模型 (Standard Model) 提供了重要的實驗基礎，也使得量子色動力學 (Quantum Chromodynamics, QCD) 成為描述強作用力的成功理論。

量子色動力學是描述強作用力的規範場論 (gauge theory)。它將夸克和膠子視為基本的量子場 (quantum field)，並利用拉格朗日量 (Lagrangian) 來描述它們之間的相互作用。QCD 的複雜性在於膠子之間的自我相互作用 (self-interaction)，這使得它在數學理論上的處理遠比在量子電動力學 (Quantum Electrodynamics, QED) 複雜。然而，經過數十年的努力，物理學家們已經能夠利用數值模擬 (numerical simulation) 和微擾理論 (perturbation theory) 等方法，對 QCD 進行精確的計算和預測，並在實驗中得到了大量的驗證。

強作用力不僅僅是原子核穩定的關鍵，它還在恆星的演化和宇宙的形成中扮演著舉足輕重的角色。在恆星內部，強作用力將氫原子核 (hydrogen nucleus) 聚變成氦原子核 (helium nucleus)，釋放出巨大的能量，這就是太陽發光發熱的根本原因。更重元素的形成，例如碳 (carbon)、氧 (oxygen)、鐵 (iron) 等，也離不開強作用力在超新



星（supernova）爆發中的作用。可以說，沒有強作用力，就沒有複雜的原子核，也就沒有我們所知的化學元素，更不會有生命的存在。

雖然我們對強作用力的理解已經取得了巨大的進展，但仍有許多未解之謎等待探索。例如，夸克是如何形成質子和中子，以及它們內部的精確結構是什麼？夸克-膠子電漿體（quark-gluon plasma），一種在極端高溫高壓下形成的物質狀態，其性質和行為如何？這些問題都涉及到強作用力在極端條件下的表現，是當前核物理（nuclear physics）和高能物理（high-energy physics）研究的熱點。此外，尋找超越標準模型的物理學也可能為我們揭示強作用力的更多奧秘。例如，是否存在新的粒子與強作用力相互作用？宇宙中是否存在由非夸克物質組成的奇特物質，例如由膠子組成的「膠球」（glueball）或由多個夸克組成的「多夸克態」（multiquark state）？這些問題的答案將極大地拓展我們對物質基本構成和宇宙演化的理解。

總之，強作用力是我們理解物質世界不可或缺的一環。它在微觀層面上塑造了原子核的穩定性，在宏觀層面上驅動著恆星的核融合（nuclear fusion），並為宇宙中元素的形成奠定了基礎。量子色動力學的建立為我們提供了描述強作用力的強大工具，而色禁閉和漸近自由等奇特現象則展現了強作用力的獨特性。儘管如此，強作用力仍然充滿著未解之謎，這些謎團的解決將會引領我們進入物理學更深層次的探索，揭示宇宙最根本的秘密。對強作用力的持續研究，不僅是為了滿足人類對知識的渴望，更是為了理解我們自身以及所處宇宙的本質。



