

## 夸克之內 別有洞天？

如果在目前已知最小的物質組成粒子內，還有尚未發現的粒子世界，物理學會發生什麼改變？

撰文／林肯（Don Lincoln）

翻譯／甘錫安

### 重點提要

■ 1869 年，門得列夫（Dmitri Mendeleev）發現化學元素的性質有一定的重複模式，因此創立了元素週期表。物理學家後來認為，這種重複模式源自原子的結構。今天在粒子物理學中，或許也會出現相同的狀況。

■ 目前已知的 12 種基本粒子也有重複模式，因此可能並非真正基本，而是包含更小的粒子。物理學家暫時將這種粒子稱為「前子」（preon）。

■ 但是，其他證據並不支持這種可能性。歐洲核子研究組織（CERN）的大強子對撞機（LHC）和一些其他的實驗，或許可以解決這個問題。

宇宙是個既複雜又難以理解的地方。我們在空氣中行動自如，但沒辦法穿牆而過。太陽將一種元素轉變成另一種元素，讓地球沐浴在溫暖和光亮之中。無線電波可以將人類的聲音從月球表面送往地球， $\gamma$  射線卻可能對我們的 DNA 造成無法復原的損害。從表面上看來，這些現象之間似乎互不相干，但是物理學家發現了若干原理，再整合成極度簡潔的理論，能夠解釋包含這些在內的許多現象。這項理論稱為粒子物理學的「標準模型」，涵括了使牆壁形成固體的電磁力、使太陽放射出光和熱的核力，以及現代通訊賴以運作和可能威脅人類健康的各種光波。

標準模型是史上發展得最成功的一項理論。本質上，這個模型假設無法再加以分割的物質粒子有兩種，分別是夸克和輕子。不同種類的夸克構成了質子和中子，最常見的輕子則是電子。適當比例的夸克和輕子可構成各種原子，再進一步構成宇宙中的各種物質。這些構成物質的粒子由四種力結合在一起，分別是大眾相當熟悉的重力和電磁力，以及較不熟悉的強核力及弱核力。電磁力與強、弱核力是透過交換「玻色子」來傳遞，但由微觀角度來解釋重力的各種嘗試，至今尚未成功。

標準模型還有其他問題無法解答，例如：力為什麼有四種，而不是三種或五種？基本粒子為什麼分成兩類，而不能以單一類別涵括全部的粒子？

這些問題都相當引人好奇，然而長久以來，另一個謎團一直吸引著我和許多物理

學家的注意。標準模型把夸克和輕子視為不可分割的粒子，但令人驚訝的是，有許多跡象顯示，它們可能是由更小的粒子所構成。如果夸克和輕子不是最基本的粒子，而且更小的粒子確實存在，我們勢必得大幅修改我們的理論。拉塞福( Ernest Rutherford) 於 1911 年發現原子結構之前，核能對人類而言難以想像，同樣地，進一步深入探索次原子世界，一定也會揭露我們目前想像不到的現象。

科學家要解決這個問題，必須讓粒子以極高的能量相撞。從 1970 年代開始觀察夸克以來，我們一直缺乏能夠一窺夸克內部的工具。但現在，歐洲核子研究組織 (CERN) 的大強子對撞機 (LHC) 正在加速運轉，將可協助我們完成這項任務。LHC 日前已經發現重要的證據，證明標準模型中最後一個尚未找到的粒子——希格斯玻色子確實存在。

### 世代差異

夸克和輕子具有內部結構的初步線索，來自探討另一個未解難題時的研究，這個難題與已知的各種夸克及輕子數目有關。質子和中子由「上夸克」和「下夸克」這兩種夸克構成，上夸克具有質子的+2/3 單位電荷，下夸克則具有質子的-1/3 單位電荷。雖然只要有這兩種夸克和電子，就足以構成宇宙中所有物質，我們仍觀察到有其他夸克存在。奇夸克的電荷和下夸克相同，但質量較大，底夸克的質量則比奇夸克更大。同樣地，魅夸克的質量大於上夸克，而質量特大的頂夸克則是夸克家族的最後一個成員。粒子物理學家已經觀察到這些夸克，但較重的四種夸克會在幾分之一秒內衰變成較輕的兩種。

電子也有質量較大但較不穩定的表親，分別是緲子和質量更大的濤子，其擁有的電荷與電子相同。目前已知的粒子中共有三種微中子，這三種微中子的質量極小，而且都是電中性。

粒子家族如此枝繁葉茂，物理學家自然有了一個疑問：既然只需要上夸克、下夸克和電子就能構成整個宇宙，它們為什麼還有那麼多表親？正如曾獲諾貝爾獎的物理學家拉比 (I. I. Rabi) 發現緲子時的名言：「是誰下令這麼做的？」

科學家著手破解粒子家族成員眾多之謎的方法之一是畫出表格，說明各種已知基本粒子的特性 (參見右方〈粒子大觀園〉)，方法類似元素週期表。週期表讓物理學家想到，化學元素可能不是最基本的物質單位。某一行或列中的元素具有類似性質，可能是因為原子內部結構具有某種規律。

夸克和輕子表共有三行，稱為三個「世代」(因此粒子數目眾多之謎現在稱為「世代問題」)。最左邊的第一代包括上、下夸克，以及電子和電子微中子，也就是構成我們熟知宇宙的所有粒子。第二代包括前一代粒子質量較大的表親，第三代則

是質量最大的表親。

標準模型把夸克和輕子視為點狀粒子，沒有內部結構。但這個表的模式與化學週期表如出一轍，讓人聯想到世代間的差異可能源自夸克和輕子內部組成單位的組態不同。

20 世紀初還有一項可能與尋找夸克內部結構有關的歷史事件，就是發現放射性衰變。一種元素經由當時還不了解的某種過程，變化成另一種元素。現在我們知道，改變原子核中的質子和中子數目，就可能達成中世紀煉金術士的目標，將不值錢的鉛變成黃金。可能發生的變化其實範圍更大，因為只要改變內部的組成夸克種類，核子煉金術甚至能將中子變成質子。這種變化是透過弱核力進行。弱核力也可改變輕子，但夸克不可能變成輕子，反之亦然。一種元素能夠轉變成另一種元素，代表原子內部有複雜的活動，夸克和輕子的變化可能也告訴我們，這些粒子內部具有更微小的結構。

### 夸克和輕子的生命密碼

關於夸克和輕子的組成單位，目前已有許多假設提出，每種假設的名稱各不相同，不過「前子」(preon) 已經是各種假設的通用名稱。大多數狀況下，這個名稱是用來稱呼傳遞作用於這些物質微點的力的粒子。

為了詳細說明，我們來看看 1979 年由當時任職於美國史丹佛線性加速器中心的哈拉瑞 (Haim Harari) 和伊利諾大學香檳分校的舒普 (Michael A. Shupe) 分別提出，並於 1981 年由當時均在以色列魏茲曼科學研究所的哈拉瑞和學生賽伯格 (Nathan Seiberg) 加以擴充的模型 (參見右方〈粒子製作手冊〉)。他們假設前子有兩種，一種具有  $+1/3$  單位電荷，另一種的電荷為  $0$ 。此外，兩種前子各有反物質粒子，電荷與其相反，分別是  $-1/3$  和  $0$ 。這些前子是費米子 (物質粒子)，而夸克和輕子則由組合各不相同的三個前子構成。舉例來說，兩個  $+1/3$  單位電荷和一個  $0$  電荷的前子構成一個上夸克，而上夸克的反物質粒子則由兩個  $-1/3$  單位電荷和一個  $0$  電荷的前子構成。另外，傳遞力的玻色子則由組合各不相同的六個前子組成。舉例來說，帶有正電荷、負責傳遞作用於夸克和輕子的弱核力的  $W$  玻色子，就是由三個  $+1/3$  前子和三個  $0$  前子組成。

哈拉瑞和舒普運用一連串合理假設，推測出第一代中所有粒子的前子組成內容。負責傳遞強核力，使夸克黏結在質子和中子內部的次原子粒子——膠子，以及其他傳遞力的玻色子，也是由這些組成單位構成。

眾所周知的夸克、輕子和玻色子的內部組成方式，在這些粒子與力之間形成無數的交互作用。前子確實可提供一種易於理解的語言，用來描述次原子過程。舉例

來說，假設一個上夸克和反物質下夸克相撞，產生帶正電荷的 **W** 玻色子，再衰變成反電子（又稱為正子）和一個電子微中子。在哈拉瑞和舒普提出的前子模型中，每個夸克包含三個前子，在碰撞中結合，產生一個 **W** 玻色子，因此每個 **W** 玻色子包含三個 $+1/3$  單位電荷和三個 **0** 電荷粒子。**W** 玻色子接著又分裂，這六個前子又分成不同的組合：一個正子（三個 $+1/3$  單位電荷粒子）和一個電子微中子（三個 **0** 電荷粒子）。

目前為止討論的內容，或許可以稱為夸克和輕子的生命密碼，都是些加加減減的計數遊戲，就像使化學式或數學式兩邊相等一樣，只是比較認真且可行。要真正站穩腳步，前子模型必須能夠用少數的組成單位和幾條掌控規則來解釋夸克和輕子。畢竟，我們是希望找出更底層的架構，將表面上看來不同的粒子加以統整，而不是依據每一項特性特別訂立一套定義。不論是哈拉瑞與舒普的模型，還是其他廣受認可的前子理論，都採取了這種解釋方式。

然而，你或許已經注意到，目前為止討論的內容只涵括第一代的夸克和輕子。當我們把目光轉移到第二和第三代時，狀況就變複雜了。在哈拉瑞和舒普的模型中，把較高的世代假設為第一代組態的激發態。如同電子由原子中的某一能階跳躍到另一能階，可能有某種不明機制將前子結合在一起，因此能以相同的組成產生多粒子的世代。

這個解釋似乎有點語焉不詳，的確如此，其中很多細節還沒有研究清楚。首先提出夸克概念的理論性研究，複雜程度也差不多如此。以數學方式描述使夸克結合成質子和中子的強核力，則是後來才成功。不過世代問題仍然懸而未決，因此有幾位物理學家提出了其他模型。其中一個模型假設有一種前子帶有世代數以及稱為超色（**hypercolor**）的新電荷，這種電荷使前子結合成夸克和輕子。

儘管這裡只介紹一種前子理論，但別以為前子理論只有一種。理論物理學家相當聰明，也很有創意。目前已有數百篇論文提出各種前子模型，但多半是把幾個基本構想加以修改而成。有些模型假設前子具有  $1/6$  單位電荷，而非哈拉瑞與舒普模型的  $1/3$ 。有些模型則認為夸克和輕子包含五個前子，而不是三個。另外還有些模型提出費米子前子和玻色子前子，或是認為玻色子的前子組成內容與〈粒子製作手冊〉的表格不同。可能性事實上相當多，我們還需要更多資料，才能去蕪存菁。

目前已知最小的物質粒子內部可能還有更小的粒子，這個概念本身就十分引人入勝，此外，許多物理學家對前子有興趣還有另一個原因。如果前子確實存在，我們說不定可從中發掘更深奧的東西，探討粒子物理學中另一個謎團。標準模型假設希格斯場是基本粒子質量的來源。具有質量的粒子在這個無所不在的場中移動

時，會感受到某種拉力，而光子這類不具質量的粒子則可不受牽制地自由運動。如果構成第二和第三代的前子與第一代的前子相同，則很可能是前子具有某種性質，使較高世代的粒子與希格斯場的交互作用比第一代更強，因此世代越高、質量隨之越大。相較之下，希格斯機制雖然可以讓粒子具有質量，卻沒辦法加以預測。

在更深入的理論問世前，次原子粒子的質量仍然只能個別測定。或許在了解夸克和輕子的結構和世代間為何有差別之後，我們就能更進一步了解希格斯機制。

**【欲閱讀完整的豐富內容，請參閱科學人 2013 年第 131 期 1 月號】**