

知識天地

上帝粒子初瞥

李湘楠研究員(物理研究所)

如果聽到有人問：「為何物質有質量？」想必多數人會覺得莫名其妙、懶得理會；其實出乎意料之外的，物理學家及至今日仍不確定這深奧問題的答案，而且正在進行經費高達數千億台幣的大型實驗，冀望能解開質量起源之謎。

基本粒子

莊子天下篇中有句話：「一尺之捶，日取其半，萬世不竭」，十分貼切得描述了人類探索宇宙基本組成物質的歷程：隨著新實驗技術的開發，科學家似乎能夠不斷得找到更小的組成單位。五行「金、木、水、火、土」為構成宇宙萬物的基本元素，曾是中國古代的物質觀，這五個要素的運行和互動決定了自然界的變化；古希臘哲人以為宇宙是由空氣、火、水、泥土所組成，和中國人的看法雷同，也有相異之處，但基本上不脫日常生活中接觸的事物。隨著科學的進展，人類對於基本物質的認知也與日俱進，現在隨便請教周遭的親朋好友，大概不會有人回以「金、木、水、火、土」！最可能的答案應該是化學周期表上的元素(亦即原子)，但即使元素或原子也已經是一百年多前的看法了。

陰極射線管中發現的電子，著名的拉塞福實驗中證實的質子，加上後來找到的中子，取代原子的地位，成為二十世紀初的三個基本粒子。二十世紀中葉，先進的粒子偵測器讓科學家從宇宙射線中搜尋到許多基本粒子，陸續發現了 π 介子、K介子、重子…以及反物質，如反質子、反中子…(以上統稱為強子)。當強子的數目達到上百個時，科學家不禁懷疑為何基本粒子又變得如此之多，他們真得都是「基本」粒子嗎？

60年代末，史丹佛線性加速中心進行深度非彈性散射的實驗，以高速電子撞擊質子，發現質子內部的確有結構，確認更基本的「夸克」粒子的存在。根據夸克模型，只需三個夸克，即上夸克、下夸克和奇夸克，便可組合出當時已知的所有強子。隨著加速器能量的增加，較重的夸克一個接著一個被發現，如1974年的魅夸克，1977年的底夸克，最近的是1996年以美國費米實驗室高達2兆電子伏特的加速器產生的頂夸克，本院物理所的實驗團隊也參與了發現頂夸克的研究計畫。頂夸克的質量約為上夸克的3萬5千倍，所以需要很高的能量才能碰撞出來。

夸克、輕子(如電子、微中子)、規範玻色子以及他們的反物質形成粒子物理世界的標準模型(見圖一)。規範玻色子的功能是傳遞自然界中的基本作用力：光子傳遞電磁交互作用，推動電子產生電流或震動電子產生光熱，電燈、微波爐、電磁爐等日常電器都來自電磁力的應用；膠子傳遞強交互作用，使夸克結合成質子、中子，亦即產生日常所見的物質；W、Z玻色子傳遞弱交互作用，發生在夸克及輕子之間的弱作用可產生能源，如核融合的過程是太陽發光發熱的機制，核能電廠反應爐內進行的則是核分裂過程，可以說傳遞作用力的規範玻色子造成我們充滿「活力」的世界。

粒子無質量

直覺上「左」與「右」沒有本質上的區別，以交通規則為例，可制定靠右行車的規則(臺灣)，譬如左轉車禮讓直行車，也可制定靠左行車的規則(日本)，譬如右轉車禮讓直行車。「靠左」與「靠右」的國家同時存在，運作規則本質上相同，即轉彎車應禮讓直行車。基本粒子也分成「左」與「右」，基本粒子運動時可同時



圖一 粒子物理的標準模型

「自轉」(稱為自旋)，從粒子後方看，順時鐘自旋的稱為右旋粒子，逆時鐘自旋的稱為左旋粒子。物理學家之前認為左旋和右旋粒子本質上相同，這個最自然且幾乎無人懷疑的看法卻受到挑戰，1956年李政道、楊振寧博士提出宇稱不守恒：左旋和右旋粒子進行弱交互作用時的行為不同，因為只有左旋粒子參與弱作用。1957年吳健雄博士以高難度的實驗證明宇稱的確不守恒：極化的鈷60弱衰變時只產生左旋的電子，亦即電子自旋方向和運動方向相反，這震驚世界的結果將李政道、楊振寧博士推向1957年的物理諾貝爾獎。

質能互換是愛因斯坦最著名的公式，若能量轉化成粒子，須同時產生左旋和右旋粒子，才能平衡角動量；譬如直升機需要尾翼的螺旋槳，否則機體會相對於大螺旋槳反方向旋轉，這是角動量守恆定律的結果。粒子若有靜止質量，靜止質量可扮演類似能量的角色，使左旋粒子和右旋粒子產生關聯，即左旋粒子可轉變成右旋粒子，右旋粒子可轉變成左旋粒子，但左旋和右旋粒子本質不同，不可互換，因此粒子不能有靜止質量！若粒子無質量，如何解釋萬物具有的質量？原來我們習以為常的「物質有質量」的概念，其實是非常深奧的物理問題！

上帝粒子

1964年三組物理學家幾乎同時發表論文(Guralnik、Hagen、Kibble合著一篇，Brout、Englert合著一篇，Higgs獨自發表)，提出希格斯粒子(即圖一中的H粒子)透過今日所稱的希格斯機制，賦予各個基本粒子不同的質量。如何了解希格斯機制？如圖二所示，新聞中常見到一個畫面，某極富話題性的人物出現，媒體記者蜂擁而上，將他團團包圍，或遞出麥克風，或七嘴八舌提問，讓該人物舉步維艱，甚至動彈不得，而旁邊不相干的人們則是一派輕鬆的經過。從旁觀者的角度來看，那話題人物的體重似乎是正常人的數倍，所以行動遲緩。其實他並不比一般人重，只因為他的話題性或新聞性比較高，亦即他和媒體的互動比較強，因此常被媒體阻擋，以致他的體重顯得超過於一般人。若將希格斯機制和這個常見的畫面類比，無處不在的希格斯粒子就是媒體記者，夸克和希格斯粒子的交互作用便等同於某人的話題性，所以上夸克不具話題性，可像路人般自由行動，頂夸克則像話題人物，總是被希格斯粒子包圍，以致運動緩慢，質量顯得特別大；亦即基本粒子因為和希格斯粒子的不同交互作用，而顯出不同的質量。

粒子有質量後才不會以光速前進，有機會凝聚形成宇宙塵埃，再因重力吸引聚集形成太陽、星星以及千千萬萬個銀河系，也造就地球上的生命，所以希格斯粒子稱為「上帝粒子」。基本粒子之間的交互作用決定了浩瀚宇宙的形成與演化，這呼應了威廉·布萊克的著名詩句「一沙見世界，一花窺天堂」，瞭解極小尺度的物理定律就能瞭解整個宇宙的運行，基礎研究的過程中其實經常發現哲理的實踐。2010年美國物理學會將理論粒子物理領域的最高榮譽Sakurai獎頒給提出希格斯機制的六位物理學家。

欲驗證希格斯機制，便必須找到希格斯粒子。為了搜尋希格斯粒子及其他可能存在的新粒子，來自34個國家的兩千多位科學家通力合作，耗資數千億台幣，費時13年，在日內瓦附近的歐洲核子研究組織(CERN)，跨瑞、法兩國邊境深約一百公尺的地底下，建造了周長27公里的大型強子對撞機(Large Hadron Collider，簡稱LHC)，目前正以8兆電子伏特的高能量進行質子和質子的碰撞。LHC自2008年9月10日成功試傳以來，可說是佔據最多新聞版面的科學實驗，連湯姆漢克斯主演的電影「天使與魔鬼」的故事都始於LHC。2012年7月4日即希格斯機制提出約半世紀後，CERN公布了發現上帝粒子



圖二：被記者(著黃衣)包圍的話題人物顯得體重超過於一般人

的初步證據，公布的時刻，CERN與正在澳洲墨爾本召開的高能物理國際研討會現場連線，CERN的主任Rolf-Dieter Heuer教授高聲問：「我們找到這顆粒子了嗎？」，全場回答：「是的！」眾多物理學家同步分享了這令人激動的一刻。

質量起源的探索仍未塵埃落定，雖然觀測到的粒子很像希格斯粒子，但衰變行為和預期的並不盡相同，它真的是標準模型中的希格斯粒子？亦或是另一顆新粒子？還是受到其他新粒子影響下的希格斯粒子？或兩顆質量相近的希格斯粒子？物理學家需要更多數據的累積才能確定其特性。預計兩年後LHC將以14兆電子伏特的超高能量碰撞，可能產生比頂夸克更重的基本粒子，人類或有機會對科學的進展再做一次革命性的突破，且讓我們拭目以待。

註：圖一摘自維基百科、圖二摘自CERN網頁