

## 通往希格斯粒子之路

經過 30 年的追尋，科學家似乎找到了那難以捉摸的粒子。它奇特的性質意味著一個物理新時代可能就要來臨。

撰文／黎奧丹 (Michael Riordan)、東奈里 (Guido Tonelli)、吳秀蘭 (Sau Lan Wu)  
翻譯／高涌泉

### 重點提要

■希格斯玻色子 (Higgs boson) 是標準模型中還沒找到的最後一塊拼圖。物理學家幾十年來不斷努力想偵測它，但都未能成功。

■位於歐洲核子研究組織 (CERN) 大強子對撞機 (LHC) 的兩個巨大實驗：超導環場探測器 (ATLAS) 與緊緻繃子螺管偵測器 (CMS)，已經在 2011 年底找到希格斯玻色子的跡象。當時物理學家希望在 2012 年春天的運轉所產生的數據中，可以發現希格斯粒子。

■物理學家把 2012 年春天蒐集到的數據藏了起來，甚至自己也不能看，如此進行的「盲分析」才不會帶進偏見。到了 6 月中，他們才首次查看新證據。

■在數據中出現的「類希格斯」粒子具有很多物理學家在尋找的性質。它的某些初期跡象令人驚訝，可能指引了物理的未來。

2012 年 6 月 14 日深夜，一群群在大強子對撞機 (LHC) 工作的博士後研究員以及研究生，開始查看一個剛打開的數據快記區。LHC 這座巨大加速器坐落於日內瓦附近的歐洲核子研究組織 (CERN)，幾個月前，它才從冬天休眠狀態甦醒過來；自那時起，LHC 已經產生了極大量的數據。但是 LHC 最大兩個實驗組的 6000 多名物理學家，卻很怕他們在分析數據之時，無意間加進了自己的主觀偏見，因此他們相約在 6 月中前完全不去知道結果，也就是執行所謂的「盲分析」，一直要等到 6 月中，在發狂挑燈夜戰之後，才揭開答案。

眾多年輕科學家徹夜分析剛開放的數據。雖然 LHC 這個巨大的對撞機「餵養」了很多實驗，但是只有其中兩個最大的實驗：超導環場探測器 (ATLAS) 與緊緻繃子螺管偵測器 (CMS)，才擔負著尋找希格斯玻色子 (Higgs boson) 的責任，這個大家找尋已久的粒子是粒子物理標準模型 (即次原子世界的理論架構) 唯一還沒補足的拼圖片。質子在這兩個實驗的龐大偵測器裡對撞，產生的次原子碎片源源噴出，由偵測器記錄下來。對於這些碰撞殘餘物仔細且獨立的分析，可能揭露一閃即逝的新現象，其中或許包括那難以捉摸的希格斯粒子。但是偵測器必須過濾大量的粒子軌跡以及留下的能量，在此同時，還得忍受低能量背景粒子的不停衝擊，而有趣的訊號可能會被這些背景粒子遮蓋掉。這就好像一方面從消防水管喝水，同時還要用你的牙齒搜出幾粒很小的金子。

幸好，科學家知道自己要尋找的是什麼。在度過 LHC 啟動初期所遇上的災難性意外（2008 年 LHC 啟動九天之後，連接兩個磁鐵的電路接頭髮熱並熔化了，產生巨大的火花，刺穿附近的容器，因而釋出了幾公噸的氦氣，把幾十個昂貴的超導磁鐵從支座上扯了下來）之後，對撞機在 2011 年間已經蒐集了很多數據，足以看到希格斯粒子的初步跡象。

在 LHC 於 2011 年 10 月停止運轉（這是事先排定的冬季停機）之後，ATLAS 的發言人吉亞諾提（Fabiola Gianotti）與當時 CMS 的發言人、同時也是本文作者之一的東奈里，於 12 月中在擠滿了人的 CERN 大講堂，一起給了一場特別的學術演講。這兩個實驗團隊都從數據中看到意味著希格斯粒子存在的跡象。

此外，這些希格斯粒子的跡象也相互呼應。ATLAS 與 CMS 都看到了兩個總能量為 125GeV（GeV 為 10 億電子伏特，是粒子物理的質量與能量標準單位，大約等於一個質子的質量）光子射出的事例，這些事例的次數比預期的背景值還多上數十個。如果質子碰撞產生了壽命很短的希格斯玻色子，它們可以衰變成兩個光子，而這兩個實驗也都發現，總能量約為 125GeV 的四個帶電荷輕子（電子或緲子）射出的事例數量比背景值高，它們可能來自希格斯粒子（見 40 頁〈找尋希格斯粒子的四條線索〉）。這種情況前所未見，表示某種真實的東西開始要從數據中浮現。

不過由於粒子物理的標準很嚴格，2011 年的一切訊號尚未強到足以宣稱「發現」了希格斯粒子。在過去，類似的數據訊號經常後來就消失無蹤，也就是它們只是隨機的漲落而已。LHC 在今年春季成功運轉，11 個星期間的質子碰撞次數就比 2011 年一整年還要多，蒐集的更多數據可以輕易地把去年看到的跡象給抹除掉，讓它們淹沒於背景雜訊之中。

當然，也可能出現相反的情況。如果之前的跡象的確來自真實的希格斯粒子，而不僅是殘酷的統計漲落，則所有的新數據將提供研究人員絕佳的機會，得以宣稱正式發現了希格斯粒子，讓數十年的搜尋劃下句點，並開啟了解物質與宇宙的全新時代。

### 漫漫追尋 30 年

希格斯玻色子從來就不是另一個粒子而已，因為現代粒子物理是由一組環環相扣的理論構成的，稱為標準模型，而希格斯粒子正是標準模型這個宏偉智性體系的基石。英國愛丁堡大學的希格斯（Peter W. Higgs）在 1964 年提出有這樣一個粒子存在，它是一種微妙機制的必然結果，這個機制賦予基本粒子質量；比利時布魯塞爾大學的翁勒（François Englert）與布饒特（Robert Brout）以及英國倫敦皇家學院的三位研究人員也獨立提出了這個機制：宇宙的每個角落都充滿了一種難

以捉摸、極纖細的流體（稱為希格斯場），它讓基本粒子帶有各自的質量，希格斯粒子即是這種流體的實體展現。由於人們在 1970 年代發現了夸克與膠子，到了 1980 年代初，質量很大的、傳遞弱核力的 W 玻色子與 Z 玻色子也被發現了，大部份的標準模型便已很精巧地組合起來。

雖然理論學家宣稱希格斯粒子（或某種很像它的東西）必須存在，卻無法預測它的質量，再加上其他的因素，尋找希格斯粒子的研究人員沒有太多線索可循。早在 1984 年，人們便以為看到了這樣一個粒子，因為似乎有一個質量小於九倍質子質量的粒子，出現於位於德國漢堡、翻新之後的低能量電子正子對撞機。它看似希格斯粒子，但是在進一步研究後，這個初步的可能性便被排除了。

多數理論學家同意希格斯粒子的質量應該更高上 10~100 倍。如果是這樣，我們就需要一座遠比費米國家實驗室的正負質子對撞機（Tevatron）更大、能量更高的對撞機，才足以發現希格斯粒子。Tevatron 是周長為六公里的質子 - 反質子對撞機，完成於 1983 年。同一年，CERN 開始建造花費 10 億美元的大型電子正子對撞機（LEP），在日內瓦附近挖了周長為 27 公里的圓形地道，四度跨越法國與瑞士國境。雖然 LEP 有其他重要的物理目標，希格斯粒子仍是它最想捕捉的對象之一。

美國粒子物理學家受到雷根政府鼓勵要有「大想法」，在 1980 年代後期推動了一個計畫，要建造更大許多、價值高達數十億美元的加速器：超級超導對撞機（SSC）。在此對撞機中，質子與質子碰撞的能量為 40 兆電子伏特（即 40TeV 或 4 萬 GeV），即便希格斯粒子的質量高達 1000GeV 左右，SSC 也尋捕得到它。

但是在 SSC 的建造預算幾乎漲了一倍，變成 100 億美元之後，美國國會於 1993 年投票通過中止 SSC 計畫。失望之餘，美國的希格斯獵人只好回到費米實驗室或 CERN 繼續研究。很快地，LEP 與 Tevatron 的發現與精密測量便暗示著希格斯玻色子質量應該不會高於 200GeV，這表示這些加速器都有潛力發現希格斯粒子。不過，10 多年的追尋都沒有發現希格斯粒子的堅實證據。

在 LEP 於 2000 年夏天的最後一次運轉期間，物理學家決定把碰撞能量拉高至機器依設計所能承擔的範圍之外。這時希格斯玻色子的跡象便開始出現。到了 9 月，LEP 四個實驗的其中兩個發現了幾個這種事例：電子與正子碰撞後產生一個 Z 玻色子，以及另一個能衰變成兩個底夸克的神秘粒子，看起來很像是質量為 115GeV 的希格斯粒子。CERN 當時的主任麥亞尼（Luciano Maiani）因而允許 LEP 在秋天多運轉六個星期，可惜那段時間研究人員只能再多看到一件可能的事例，根本不夠。經過激烈的辯論，麥亞尼決定不再延長 LEP 的壽命，而將它關閉，並開始已規劃好的工程：把 LEP 轉換成設計來尋找希格斯粒子的 LHC。

## 為希格斯粒子而設計

LHC 是有史以來最驚人的高科技組合。它是由數百位加速器物理學家與工程師，在計畫經理艾萬斯 (Lyndon Evans) 的領導之下，於原來 LEP 的地道裡建造的，但它並沒有用上什麼 LEP 遺留下來的東西。LHC 的主要組件包括 1200 多個超導偶極磁鐵，每個磁鐵看起來是 15 公尺長的閃亮圓柱，價值約 100 萬美元。這些磁鐵由法國、德國和義大利的廠商建造，它們或許是人類大量製造出來的最複雜組件，包裹著兩條射束管，而射束管外圍又環繞著鋯鈦磁鐵線圈，磁鐵線圈又浸在溫度低至 1.9K 的液態氦裡。在射束管中，有兩條能量可高至 7TeV 的質子束，以近乎光速雙向繞行。

LHC 的質子束比較類似雷射脈衝，而不像手電筒光束：每條質子束是由約 1400 群質子所構成，每群質子的數目可高達 1500 億個，大約跟銀河系中的恆星一樣多。在正常情況下，每群質子互相穿越時，會發生 10~30 次的質子碰撞，相當於每秒會發生約五億次碰撞。

質子碰撞遠比電子正子碰撞要來得雜亂，美國加州理工學院的理論物理學家費曼曾經把質子碰撞過程比喻成垃圾桶與垃圾桶相撞，使得很多垃圾散落各處。質子是由夸克與膠子構成的，在最有意思的碰撞事例中，兩個膠子會以超過 100GeV (有時甚至高達 1000GeV) 的能量相撞。物理學家利用精密的偵測器、特製的電子儀器與最先進的電腦，試圖從數十億個事例中過濾出那些代表有趣物理的少數幾個事例。

ATLAS 與 CMS 無法直接觀測到希格斯粒子，因為它會很快就衰變成其他粒子，這兩個實驗所尋找的是希格斯粒子在質子對撞後被創造出來的證據。希格斯粒子可以衰變成各種更輕的粒子 (參見上方〈找尋希格斯粒子的四條線索〉)，其細節取決於希格斯粒子的質量為何。到了 2011 年，大家的關注點開始聚焦於兩種罕見的衰變過程——衰變成兩個光子或是四個帶電荷輕子，原因是除了這兩種罕見但突出的訊號以外，其他希格斯訊號很容易被過多的背景訊號所掩蓋。

2008 年的磁鐵意外災難延緩了 LHC 的進度，因此費米實驗室的物理學家獲得了搶先發現希格斯粒子的最後一次機會。就在 Tevatron 預計於 2011 年 9 月關閉之前，在 Tevatron 做實驗的對撞偵測器 (CDF) 與 D-zero 兩組團隊發現了一點跡象，即總能量在 125GeV 與 155GeV 之間的底夸克 - 反底夸克對產生的次數比背景值稍微多了一點。但是就和之前 LEP 在關閉前才看到某些跡象時的情況一樣，研究人員無法說服實驗室主管暫緩關閉 Tevatron，所以過沒多久，Tevatron 就關閉了 (參見 2011 年 11 月號〈上帝粒子在何方？〉)，而今年 3 月，費米實驗室的這群物理學家提出了更詳細的分析，顯示在 125GeV 有個東西，這支持了 CERN

的結果。

### 重要證據出爐

到了 2012 年 5 月，LHC 產生數據的速度比 Tevatron 的最高速度快了 15 倍，這得歸功於加速器主任邁爾茲（Stephen Myers）領導的物理學家與操作員。這次運轉是 ATLAS 與 CMS 的數千位物理學家 20 多年工作的最高潮，他們建造並且操作了偵測器、設計並且運作了一座可把數據分配到世界各地的電腦系統、創造了嶄新的硬體與電腦軟體以辨認出最有意思的碰撞、寫下可以在龐大的數據記錄中挖掘出最相關事例的演算法……他們帶著期盼的心情狂熱地工作。所以，當研究人員在 6 月中打開數據組時，他們有洪流般的數據要過濾。在研究生與博士後研究員挑燈夜戰之後，他們迫不及待地準備公佈結果。

在 6 月 15 日那個炎熱的下午，CMS 物理學家開始聚集於 CERN 的過濾工廠 222 室，準備聽年輕物理學家的報告。很快地，這個房間擠滿了幾百位團隊成員（CMS 團隊總人數約 3000 名），很多人站著或坐在地上，多數前一晚沒怎麼睡，房間裡的氣氛既緊張又興奮。

第一位講員討論了希格斯粒子衰變的一個可能途徑，即衰變成一對 W 玻色子。數據顯示這一途徑在最令人感興趣的低質量區域，其事例數目比背景值稍大一些，但是微弱的訊號引不起大家太大的興趣。接下來就是關於四個輕子衰變的報告與雙光子衰變的報告，現在希格斯粒子的確看起來終於現身了。2012 年的數據顯示，六個月前如此誘人的訊號再次出現，同樣在 125GeV 附近。科學家幾乎馬上體認到如果將新數據與 2011 年的結果合併起來，CMS 便有很大的機會可以宣稱發現了希格斯玻色子。大家在這兩場關鍵報告結束之後，歡呼了起來。

在 ATLAS 那邊也出現了類似的結果。當研究人員查看了新數據之後，好幾組人員便自發性地慶賀起來。但是這些物理學家仍必須日夜加班工作一個星期之後，才能有把握地說，所看到的訊號來自於隨機漲落的機率小於 300 萬分之一；以術語講，這就是粒子物理學家所嚴格要求的「 $5\sigma$ 」訊號，只有這樣的訊號才足以讓他們宣稱訊號真正發現了東西。當他們體會到此事的時候，如雷的掌聲與興奮的歡呼聲此起彼落。

到了這時候，發現新粒子的消息已經洩露出去了。全世界對這件事的興趣高漲到大家都在積極探聽，但是在正式公佈結果之前，消息沒有更進一步走漏，特別是因為正在準備的文件其詳細內容可能改變。ATLAS 團隊成員不可以和 CMS 物理學家談論最新的結果，反之亦然。不過個別的物理學家卻忍不住要去談論這眾人等待已久的新聞，CERN 走廊與餐廳中的竊竊私語意味著大事要發生了，因此趕快公開的壓力很快就節節升高。

CERN 的主任霍爾（Rolf-Dieter Heuer）在今年 6 月 22 日，和 ATLAS 發言人吉亞諾提以及 CMS 發言人、美國加州大學聖巴巴拉分校的因坎德拉（Joseph Incandela，即本文作者東奈里的繼任者）會面，因而先看到了兩個實驗的結果，他當下判斷證據已經夠強，可以向大眾公開。霍爾馬上通知 CERN 理事會，讓他們能夠跟得上這快速的進展，並決定於 7 月 4 日在 CERN 舉行一場共同發表會，這個時間是為了配合在澳洲墨爾本舉行的第 36 屆國際高能物理會議的開幕，在發表會之後緊接著開記者會。

在發表會前一晚，數百位物理學家熬夜等在（關著的）主講堂外面走廊上，急切希望能夠佔到講堂內開放的座位。加速器主任邁爾茲、計畫經理艾萬斯以及參與 LHC 籌劃與建造的四位 CERN 前主任坐在第一排。希格斯本人才剛飛至日內瓦，他走進講堂時，歡迎的掌聲不斷，他走到翁勒旁邊坐下。

首先是因坎德拉，接著是吉亞諾提，兩人秀出了一大堆的圖片，以呈現新數據與結果，大半是關於 2012 年的測量。和去年 12 月時類似，雙光子的數據圖顯示 125~126GeV 之間有明顯的峰值。今年實驗也同樣發現總能量約為 125GeV 的四個帶電荷輕子射出的事例，而且這一回此類事例的數目超過背景值 10 幾個，顯示有一個很重的粒子衰變成四個帶電荷輕子，因此這個衰變途徑的數據也開始出現了些微的突起。

這個衰變途徑給了我們信心。把四個輕子與雙光子的結果合併起來，CMS 和 ATLAS 兩個實驗的獨立結論就是：這一切只是巧合（訊號來自隨機漲落）的機率小於 300 萬分之一。訊號一定是真的！當攝影機鏡頭轉向希格斯時，我們看到他拿出手帕擦拭眼淚。

發表會結束時，掌聲停不下來，霍爾非常興奮地總結：「我想我們找到它了。」又說：「我們有了一項發現……」然後還是審慎地用上了那個關鍵名詞說：「我們已經觀察到一個新粒子，它符合我們要找的希格斯玻色子。」

### 邁向物理新時代

現在已少有物理學家不相信人們找到了一個大質量的新粒子。但是到底這是個什麼樣的粒子？CERN 的物理學家非常謹慎地談論這個問題，他們稱呼這個粒子為「類希格斯玻色子」，並堅持需要更多的數據才能確認其性質。CERN 其實也還沒有百分之百證明新粒子的自旋為零，就如標準模型所要求的那般；不過若將 LHC 的數據和 Tevatron 的數據（於 7 月 2 日發表，顯然是為了也能沾點光）對比，新粒子的自旋的確似乎為零。此外，ATLAS 與 CMS 實驗所蒐集的雙光子事例數目比標準模型的預測要更高一些，是否出了什麼差錯？或是這點差異暗示著

什麼有趣的新物理？

目前實驗與理論的關注焦點在於確認新粒子是否正是標準模型所預測的希格斯粒子。要解決這個問題，我們需要更多的數據以及精確測量這個新粒子如何衰變成其他粒子。兩個團隊於 7 月底發表的正式論文中，包括更多的衰變途徑數據，它們並沒有違背標準模型。CMS 的論文依舊描述了一項「 $5\sigma$ 」的發現，但是 ATLAS 的結果卻更強了。CERN 的理論學家艾里斯（John Ellis）與游（Tevong You）初步分析了 LHC 與 Tevatron 的合併數據，其結論是，以他們的話來講，新粒子「走起來、叫起來的確非常像是希格斯玻色子」。

新粒子與一對高能量的光子的關聯引發了聯想。因為希格斯場賦予基本粒子質量，所以它應該和較重的粒子有更強的交互作用。光子沒有質量，所以希格斯粒子不會直接和光子作用，它衰變成光子的機制涉及了其他帶質量的粒子。額外的帶質量粒子（超對稱與其他理論要求這種粒子存在）會增強雙光子衰變過程，而最早的數據似乎就意味著的確如此。如果這個傾向持續存在，這就表示存在著超越標準模型的物理現象（見 2008 年 3 月號〈粒子物理革命即將來臨〉）。

新粒子的發現是劃時代的。它代表一個很長的粒子物理時代的結束，以及一個令人興奮的新時代的來臨——研究 TeV 能量尺度物理現象的時代。這個物理領域在消沉了幾十年之後，如今又因理論與實驗的熱烈交流而重啟生機。如果進一步研究這個有趣粒子或其可能的夥伴，許多問題或許就可以找到答案。這個粒子是否在暴脹機制（此機制被認為是驅動宇宙大霹靂起源的力量）中扮演了一個角色？它是否和宇宙中的暗物質粒子有交互作用？什麼高能量機制或過程（如果存在）會防止脆弱的真空變成不穩定（這種不穩定性會威脅到我們的生存）？

儘管我們慶賀著標準模型的成功，但質量如此小的希格斯玻色子，應該對於超越標準模型的物理極端敏感。這粒子成為很棒的實驗對象：它的性質是否完全符合理論的預測？最初數據與預測之間的矛盾可能來自隨機漲落，因而在未來幾個月就會消失；但這個矛盾也可能暗示著微妙的新物理。

[ 大事年表 ]

希格斯粒子 50 年

今年夏天發現了類希格斯粒子，代表數十年的追尋走到了終點。在粒子物理標準模型成形之前的幾年，物理學家體認到他們無法解釋粒子何以應該帶有質量。一連串的理论洞見引導出一個想法：一種新的場（現稱為希格斯場）能夠讓粒子慢下來並賦予它們慣性。這個場應該有個隨附的粒子，所以物理學家便開始了對於希格斯粒子的追尋。

1964 年 8 月

論文出爐

有三篇論文提出一種機制以及一種粒子，後來以希格斯（左圖）為名。翁勒與布饒特發表了三篇論文中的第一篇。希格斯的論文為第二篇，發表於兩週之後。古拉尼克、哈根與奇波於 11 月發表了第三篇論文。

1979 年 8 月

發現膠子

科學家首先在德國電子同步加速器（DESY）觀察到膠子，亦即負責核力的粒子。根據理論學家的計算，膠子的融合會比任何其他過程產生更多希格斯玻色子。

1983 年 1 月

發現 W 玻色子

當 CERN 的超級質子同步加速器首次發現 W 玻色子，科學家便找到了標準模型最後欠缺的拼圖之一。

1989 年 7 月

新對撞機啟動

為了追尋更遠大的目標，CERN 在 27 公里長的環形地道裡建造了大型電子正子對撞機（LEP）。

2000 年 9 月

尋找希格斯粒子的最後衝刺

正當 LEP 依預定計畫要永久關閉時，科學家偵測到了希格斯玻色子的跡象。管理當局便允許 LEP 多運轉六個星期，並把碰撞能量推高到超過機器的設計值，但終究一無所獲。我們現在知道那微弱的跡象並非希格斯粒子，因為質量不符。

2000 年 11 月 2 日

一個時代的結束

CERN 關閉了 LEP 對撞機，以便開始建造大強子對撞機（LHC），它最終找到了希格斯粒子。

2008 年 9 月 10 日

一切妥當

剛完成的 LHC 完成了首次質子束繞行。

2008 年 9 月 19 日

災難來臨

連接兩個磁鐵的電路接頭髮熱並熔化掉，巨大的火花刺穿了磁鐵的容器，釋放出幾公噸的氦氣，超過 50 個超導磁鐵因而從支座上被扯下來，或者是被毀掉了。

2012 年 7 月 4 日

發現類希格斯粒子

CERN 科學家宣佈他們在 125GeV 發現了一個類希格斯粒子。