

參與「大強子對撞機」國際合作計畫

中央研究院物理研究所 李世昌

一、標準模型

經過五十多年的理論與實驗之發展，粒子物理學家大都接受所謂的「標準模型」可以解釋尺度大於 10^{-16} 公分的所有粒子物理現象。在標準模型中，基本的費米子有三個家族，每一個家族包括兩個夸克(如上夸克與下夸克)及兩個輕子(如電子微中子與電子)。其中最重的夸克是頂夸克，其質量接近金的原子核。頂夸克於 1995 年在美國的費米實驗室找到，台灣的實驗團隊對此發現有相當貢獻。

基本粒子間有強作用及電弱作用，由所謂的「規範波色子」媒介。規範粒子包括媒介強作用的 8 個膠子、媒介電磁作用的光子及媒介弱作用的 W^{\pm} 與 Z 等 3 個粒子。

標準模型最重要的理論基礎之一在於指出基本粒子作用的最低能態並不是甚麼都沒有的「真空狀態」，而是由無窮多能量幾乎為零的粒子沉積(condensate)而成的狀態。要把粒子從沉積中激發出來，需要相當大的能量。激發出來的粒子稱為「希格斯粒子」(Higgs)，而所需要的最低能量即為 Higgs 之質量。歐洲粒子物理研究中心(CERN)的「大正負電子對撞機」(LEP)最近的實驗顯示 Higgs 之質量大於質子質量的 120 倍。台灣的實驗團隊對此結果亦有相當的貢獻。

沉積的粒子不參與強作用及電磁作用但參與弱作用。這使得能量太低的弱作用規範粒子無法在沉積中行進(相當於超導體中之 Meissner 效應)。能行進的最低能量即為規範粒子 W 與 Z 的質量。基本的費米子在真空中質量為零，但在沉積中運行時，與沉積之粒子作用(稱為湯川作用)，每次作用，左(右)手之費米子會變成右(左)手，相當於費米子具有等效質量，其質量和它與沉積粒子之耦合強度成正比。在標準模型中，微中子沒有質量且祇有左手的微中子而沒有右手的微中子。因此微中子不會與沉積粒子作用，也不會有等效質量。

Higgs 是標準模型中惟一尚未被找到的基本粒子。搜尋 Higgs 曾經是美國「超導超級對撞機」(SSC)及 CERN「大強子對撞機」(LHC)

計畫之主要目標之一。然而過去近十年來 LEP 的精密實驗及費米實驗室頂夸克質量之量測顯示 Higgs 之質量應小於質子質量之 250 倍，而很接近 120 倍。LEP 實驗原訂於今年九月三十日結束以便 CERN 能集中全力於 LHC 計畫。但最近 CERN 決定再延長 LEP 實驗一個月至 11 月 2 日結束，顯示有 Higgs 之跡象。費米實驗室之 Tevatron 對撞機實驗，第二輪實驗正進行測試中，預定明年三月正式進行實驗。若 Higgs 之質量在質子之 200 倍以下，Tevatron 之實驗應可找到。因此，即使 LEP 在一個月內沒發現 Higgs 粒子，Tevatron 有很大的機會在一、兩年內發現。

二、超越標準模型

雖然標準模型相當成功，但也有不少觀測結果，顯示它不能解釋所有的現象，其中包括了兩個近兩年內最受矚目的發現。第一個是日本的「超級神岡偵測器」計畫。日本與美國之實驗團隊發現了宇宙射線撞擊大氣產生的繃子微中子，由不同方向入射到超級神岡偵測器的數目不一樣，而電子微中子則無此現象，顯示屬於第二家族之繃子微中子在行經與地球直徑相當之距離時，有不小的機會轉變為屬於第三家族之濤子微中子。不同家族的微中子在行進間的轉換稱作「微中子振盪」。若微中子之質量為零或是三個家族微中子之質量相同，則它們為退化(degenerate)狀態，振盪不會發生。超級神岡偵測器之量測結果意味著微中子有質量，且三個家族微中子之質量不同。

第二個是在南極上空進行的氣球實驗。此實驗精確量測宇宙背景微波輻射之不等向性。此很小的不等向性是由早期宇宙物質分佈很小的不均勻性經宇宙之演化而造成的，因此與宇宙的質量密度及所謂的「宇宙常數」有關。宇宙常數相當於宇宙之「真空態能量密度」。氣球實驗之結果顯示宇宙之質量密度與真空態能量密度之和約等於宇宙之臨界質量密度(每立方米約 5 個質子的質量)。一般認為宇宙之質量密度約為臨界密度之三成，因此真空能量密度約為臨界密度之七成。標準模型無法解釋此真空

能量密度的來源。

由早期宇宙演化至今殘留的氦及氫等元素的含量，可推測在大爆炸後夸克的含量，從而得知宇宙中「一般物質」(即標準模型可解釋之物質)的密度。此一般物質之密度約為臨界密度的百分之五，僅是宇宙質量密度的約六分之一，其餘之六分之五為標準模型無法解釋之暗物質。暗物質存在及其密度，可由星系及星系群之運動推知。目前認為最可能的暗物質，是自大爆炸之初即存在的很重的基本粒子，它與一般物質幾乎沒有作用。

費米實驗室之CDF實驗在1990年至1996年之第一輪實驗中，不祇找到了頂夸克，也發現了不少標準模型無法解釋之事例。跡象顯示在明年春展開之第二輪實驗中，不祇有很好的機會找到Higgs，也可能發現其它超越標準模型的新的基本粒子及新的作用。

即使不算微中子之質量及振盪，標準模型也有約二十個參數。很少物理家相信它是最基本的理論，可以解釋 10^{-33} 公分尺度以上所有的粒子物理現象。

LEP及Tevatron之實驗顯示超越標準模型之現象很可能在 10^{-17} 公分的尺度附近出現。大強子對撞機計畫主要即是要搜尋這個尺度附近的新物理。

三、大強子對撞機計畫

大強子對撞機(LHC)是建造中的下一代質子對撞機，由CERN的會員國及非會員國的美國、日本、俄國、加拿大、印度、巴基斯坦等共同建造。LHC將由7 TeV (10^{12} eV)之質子束對撞，其亮度較Tevatron高一個數量級以上，LHC會與LEP共用同一個周長27公里深入地下200呎的隧道。LHC使用約5000個8.3Tesla在1.8°K運轉之雙極超導磁鐵。它也可以加速重離子使其對撞或讓LEP之電子與LHC之質子對撞。目前規畫中有四個實驗，其中最主要的兩個為ATLAS及CMS偵測器實驗組，各有三十餘個國家二千多名研究人員參與偵測器之建造並分攤費用，預計在2005年中開始運轉。

ATLAS及CMS均是所謂「general purpose」的對撞機偵測器，適合在高速質子對撞下搜尋各種可能的物理。ATLAS之特點是首次使用超大型之Toroid超導磁鐵以在最外層之綫子偵測器的地方，產生環繞對撞軸線之磁場，使綫子偵測器得以獨立精確量測綫子之動

量。CMS之特點則是使用很大之圓柱形超導線圈於量能器之外側，以產生平行對撞軸之4 Tesla的磁場。將超導線圈置於量能器外，使得粒子之能量可精確測量。在軌跡追蹤方面，二偵測器均採用矽位素(Pixel)及矽微條偵測器，但ATLAS祇讀出粒子通過之位置，不讀取信號脈衝之大小，CMS則要讀取位置及脈衝大小。因此ATLAS在前端之數據傳輸祇需要數值聯(digital link)而CMS則需類比聯(analog link)。中程軌跡追蹤ATLAS採用穿越輻射追蹤器，CMS則採用微條氣體偵測室(最近決定改用矽微條偵測器)。此外，ATLAS僅提供軸向之2 Tesla磁場，CMS則有4 Tesla。大致而言，負責軌跡追蹤的內偵測器(inner detector)ATLAS之設計較保守，功能也略遜CMS。量能器方面，ATLAS主要是採用液氫偵測器而CMS則以鎢酸鉛晶體偵測器為主，在對光子及電子之能量量測上，功能相當。

ATLAS及CMS偵測器之造價各約5億瑞朗(1995年幣值)，由CERN及參加的會員國與非會員國分攤研製費用。其中超導磁鐵及伴隨之致冷系統均列為共同分攤項目。參與之國家除了負責研製部分之偵測器組件外，需分攤一定比例的共同項目費用。由於ATLAS之超導磁鐵較貴，需分攤的共同項目費用亦較CMS為高。

四、規畫過程

自1996年起，ATLAS及CMS之主持人即多次組團、派員或親自訪問台灣，爭取台灣團隊加入。由於LHC將是二十一世紀初二十年内最大且最具發現潛能的對撞機，而國內高能物理團隊目前參與之國際合作實驗計畫在2005年時多將結束或近尾聲，因此粒子物理界對參與LHC計畫有很高的共識，有意組成單一團隊參加ATLAS或CMS其中之一。

國科會認為參與大型國際合作計畫為一長期之承諾，因此需審慎評估，並希望藉此機會，建立一評估之模式。於是在1998年10月成立規劃委員會，由張達文負責。另外成立了審查委員會，由吳茂昆、魯國鏞、陳建德、朱國瑞、李羅權等擔任委員，負責審查參與LHC計畫之規畫。

規畫委員曾訪問CERN，與ATLAS及CMS實驗組研究人員詳談，諮詢多方意見，同時在國內召集多次會議，尋求共識。最初我們認為

以單一團隊加入同一個實驗貢獻會較顯著，人力亦容易調配。但經深入評估發現，由於 ATLAS 及 CMS 計畫已進行多年，偵測器大部份設計已完成，即將開始採購元件建造，要能配合台灣各團隊之專長及國內工業界之能力，選擇單一實驗非常困難。例如若加入 CMS 則中研院團隊勢必投入類比光聯(analog optical link)之研發工作，這與光電產業以數值光聯(digital optical link)為主之發展方向不合，發展出來之技術，也不會有太大的應用前景。同樣的，由於 ATLAS 之矽微條偵測器由英、日、美等國主導，進展較快，若加入 ATLAS，中央大學之團隊，幾乎沒有發揮其專長的空間。因此，在時程之限制下，勉強加入單一實驗，將無法達到預期之效果，反而可能淪為祇是出錢購買國外製造之組件或造成台灣團隊彼此間之摩擦。

規畫委員最後建議由中研院之團隊加入 ATLAS，負責 optical link 之研製及參與 PC-farm 平行計算系統之研發；另由中央大學及台灣大學合組團隊，參與 CMS pre-shower 偵測器之研製。兩個計畫之經費，全程以不超過各二百萬美元為限（包括分攤共同項目之費用）。審查委員經過兩次審查(其中一次並有 ATLAS 及 CMS 之代表列席備詢)後，大致接受規畫之方案。

五、進展狀況

由於事先已與 ATLAS 及 CMS 實驗組密切協商，中研院團隊及中大—台大團隊於 1999 年 6 月分別被 ATLAS 及 CMS 實驗組成員一致通過，成為新成員，並於同年 9 月，由實驗組分別通過雙方合作意向書(MOU)。此意向書尚待國科會與 CERN 正式簽署才算完成。由於大陸團隊於 1999 年 3 月間已先與 CERN 簽訂 MOU，分別加入 ATLAS 及 CMS，因此有權對台灣團隊在 MOU 中之名稱提出異議，國科會與 CERN 之簽約遂擱置至今。希望此問題，能儘速解決。

自 1999 年 6 月起，中研院團隊及台大—

中大團隊已積極參與 ATLAS 及 CMS 之研發工作。在 ATLAS 方面，中研院與捷耀科技、光環科技及中華電信公司電信研究所合作，開發出超小型之 transceiver，並正開發各種光纖連接器及高速驅動晶片中。CMS 也考慮委託台灣做超小型 transceiver 之包裝。台大—中大團隊已有一名博士後長駐於 CERN，負責 CMS 相關之研發聯繫工作。由於國科會規定，大陸籍及外國籍的博士後不能在國外長期工作，使得博士後之延聘，極為困難，阻礙了國際合作計畫之順利進行。此外，國科會不能補助研究助理長期在國外工作，這增加了人力調度上的困擾，大幅降低了台灣團隊在國際上之競爭力。

六、結語

毫無疑問未來二十年內，LHC 將是人類探討在 1 TeV 的能量尺度所能發生的物理現象最有力的工具，較費米實驗室 Tevatron 所能達到的能量尺度增進了一個數量級。近年來粒子物理及天文物理之觀測顯示標準模型不太可能是最基本理論，而重大的突破，很可能在 1 TeV 尺度發生。

LHC 計畫的主要目的之一為搜尋 Higgs 及超對稱粒子(最輕的超對稱粒子很可能是暗物質的主要成分)。然而重大的發現，經常是在意料之外的。最近的例子即為前面提到的神岡偵測器。神岡偵測器建造的目的是要觀測質子衰變現象，結果卻發現了微中子的振盪。LHC 計畫將探索人類從未到過的領域，台灣團隊參與此計畫，就有機會對重大的物理發現做出貢獻。

參與 ATLAS 及 CMS 實驗計畫，將使得台灣各實驗團隊，得以在既有的研發基礎上，更進一步提昇技術能力，並可與台灣之工業界及工業技術研究機構，密切合作，開發具有商業價值的先進產品。

無論從物理上或技術上，參與 LHC 計畫都是台灣團隊很自然的選擇。雖然粒子物理實驗在台灣發展還不到十年，但是我們有信心台灣團隊可以在 LHC 計畫中有很好的表現。