

## [ 研究新領域報導 ]

## 大型強子對撞機以及早期物理簡介

台灣大學物理研究所 陳凱風

大型強子對撞機(LHC, Large Hadron Collider)是一個位於瑞士日內瓦近郊的超大型質子加速器，隸屬於歐洲共同核能研究中心(CERN)。LHC對撞中心的能量高達14 TeV(質子束7 TeV對撞7 TeV)，設計上的對撞亮度(Luminosity)可以達到 $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ，可以說是到目前為止，由人類製作出來最強大的粒子加速器、同時也是最大的『人造機械』，每次粒子集叢的對撞可以達到平均約25次的物理反應。在實驗初期相對較低的亮度( $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )下，一年可以收集到 $10 \text{ fb}^{-1}$ 的實驗數據。而在設計亮度下，則可以收集到 $100 \text{ fb}^{-1}$ 。為了支持能量高達7 TeV質子束運轉，一共有1232個超導偶極磁鐵和736個超導四極磁鐵被安裝在周長為26.6公里的地下隧道裡，而這些超導磁鐵的磁場高達8.4 Tesla。2007年3月時，超導磁鐵已經被成功的安裝到隧道裡，而剩下的部件在今年初(2008)被安裝完成，在7月時所有的磁鐵已經冷卻到1.9K，而且在9月10日已成功地注入質子束作首次運轉。目前預定在10月底展開的低能量(10 TeV)對撞，已因為一個在第34區段的意外而延遲到2009年春天，之後才會全力以14 TeV來運作。

僅以質子對撞的14 TeV質心能量，絕對是前所未有的能量範圍，這將使得粒子物理學家可以直接、詳細地研究TeV規模下的物理現象，非常具有物理研究潛力。預計能夠探討電弱作用下的對稱破缺(EWSB, Electroweak Symmetry Breaking)，以及提供超出『標準模型』的物理證據(例如直接找到SUSY粒子等等)。除了直接搜尋新物理的可能性外，在重味(Heavy flavor)物理下的精確研究也可能找到間接的新物理現象，比如在B介子的稀有衰變中才會被辨認出來的間接反應。如果將質子置換成鉛離子來加速，那前所未有的能量密度可能會形成新形式的partonic matter，尤其是『夸克膠子電漿』(QGP,

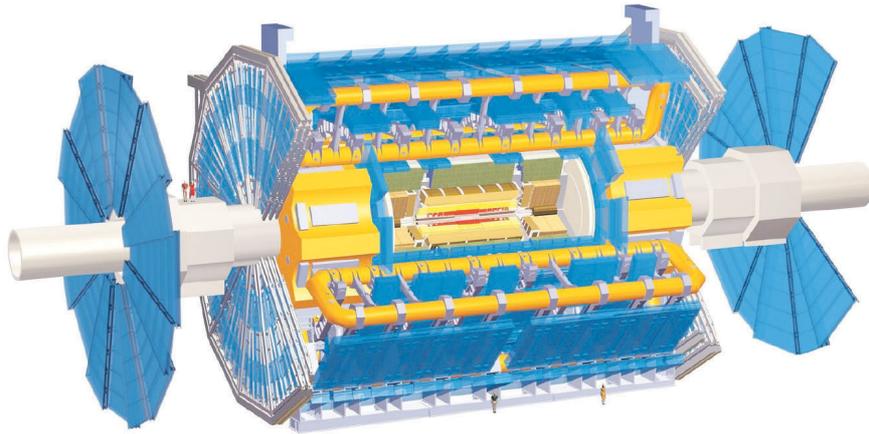
Quark-Gluon Plasma)等等。這些物質態，以及如何相變化，將會成為新的話題研究。不過在整個實驗的初期(從現在開始，到2010, 2011年之間)，基本上還是以偵測器的校正、調整為主，而在物理上的早期目標也不會超出標準模型的範疇。我們這邊就以接下來早期的實驗目標，來作一個簡單的介紹。

## 一、LHC 實驗群與調試運轉

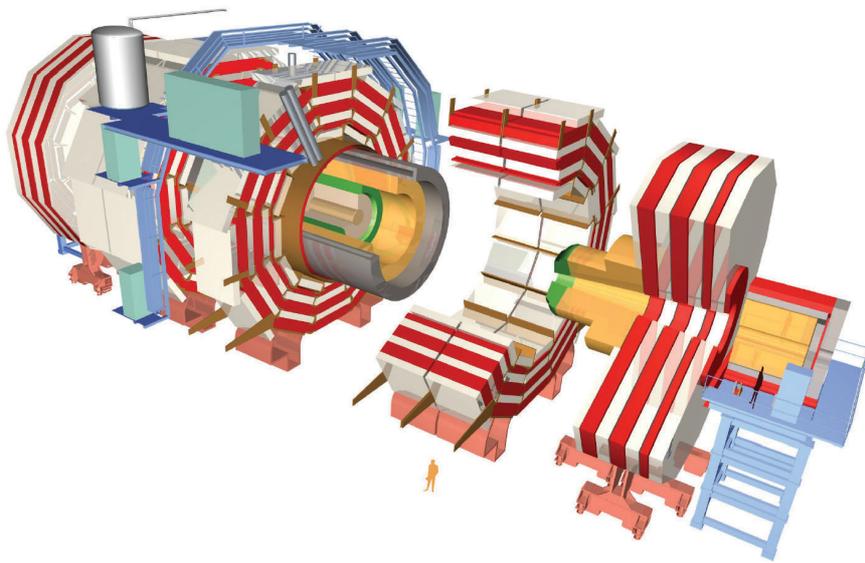
在LHC，總共有6個實驗計劃在進行中：ALICE、ATLAS、CMS、LHCb、TOTEM、以及LHCf(前4個為LHC的核心計劃)。其中ATLAS與CMS為通用的偵測器，而ALICE為重離子物理、LHCb為B物理特殊用途的偵測器。對台灣有參加的ATLAS與CMS實驗來說，大部份的偵測器元件都在2008年底以前安裝完成了。圖一與圖二為ATLAS與CMS偵測器。

ATLAS是『A Toroidal LHC ApparatuS』的縮寫。是一個圓筒狀、典型的多用途的粒子偵測器，同時也是目前世界上最大的偵測器：長46公尺、直徑25公尺，重達7000噸。而CMS為『Compact Muon Solenoid』的縮寫，同樣是個多用途的圓筒型粒子偵測器。體積上稍微小於ATLAS，長21公尺、直徑15公尺，但因為設計上的差異，使得總重量超過ATLAS、高達12,500噸。基本上CMS與ATLAS的架構是差不多的，有非常好的量能器，包括內層的ECAL與外層的HCAL，分別針對。量能器可以測量電子與光子，也可以重建Jet以及縱向能量逸失(Missing  $E_T$ )等等。內層的軌跡量測器可以取得帶電荷粒子通過時的軌跡紀錄，也可以用來重建事件的頂點(Vertex)。偵測器的外層則是渺子偵測器，可以鑑別穿出量能器外渺子的軌跡。更多的資料可以從參考資料[1,2]中獲得。

LHC的偵測器系統是前所未有複雜的巨大裝置，如何將這些複雜的機械達到預期的效能表



圖一 ATLAS 偵測器 (電腦繪圖)



圖二 CMS 偵測器 (電腦繪圖)

現，將是最大的挑戰之一。在 LHC 正式啟動運轉之後，只有「上軌道」的偵測器才有可能在第一時間來探索新的物理世界。在偵測器的元件安裝至地下之後，『調試運轉』是非常重要的任務。調試運轉的主要目標為儘量優化探測器的性能以迎接物理實驗數據的到來，而這些準備工作包含：高效率運作的觸發(Trigger)系統和數據收集(DAQ)系統、軌跡量測器與渺子偵測器的校準、量能器的校正等等。當這些基本偵測器系統上軌道後，就可以來調整更高階的物理工具，如 Jet 重建、b-tagging、以及縱向能量逸失的校準等等。這些調整都需要足夠的對撞、宇宙射線、和 beam-halo/gas 等等物理事件累積，基本上可以從偵測器安裝完成後即可開始，一直可以延伸生到早期啟動階段。對於觸發系統與數據收集系統

而言，可以對系統的同步性、以及對數據的完整性進行檢查。對於觸發系統的演算法也需要調試和改進。對於量能器的校準可以達到大約 2% 的精確度。對於軌跡量測器與渺子偵測器而言，宇宙射線以及來自 beam-halo 的渺子都能提供良好的資料。一般而言，依實際粒子束運行的狀態，共有三個不同的階段可獲得數據，以提供偵測器校準：

1. 無粒子束運行：此時將收集宇宙射線，以進行軌跡量測器的校準。事實上，當一個偵測器組裝後，即可開始收集宇宙射線的數據，也同時開始這一部分的校正。
2. 單一粒子束運行：當只有單一粒子束在加速器中運行時，會有所謂的 beam-halo 或 beam-gas 事件(如粒子束撞擊到存在對撞區域中殘留的

氣體)。這時會產生低角度的 beam-halo 渺子可以幫助頂蓋(endcap)部份的渺子偵測器校正。

3. 粒子對撞：在實際的粒子對撞實驗中，會產生一個混合、什麼都有的物理事件，而數據量則取決於加速器的亮度。為了偵測器校準，來自於 W、Z 玻色子的電子、渺子都是很好用的資料。而來自色動力學(QCD, Quantum Chromodynamics)的雙 Jet 事件，也有非常大的校正用途。

當然使用粒子對撞的校正是最後才會進行。在實驗剛開始的早期階段，數據多來自所謂的 minimum bias 或是 QCD 事件。一旦亮度提高後，我們就會看到非常大量的 W、Z 玻色子，就可以在短時間內累積數據來調整偵測器系統、提高精確度。

## 二、LHC 的早期物理

雖然 LHC 是設計來『發現』新物理的，但本身也是一套全新的儀器。所以在還沒成功的『重新測量』標準模型，還是不能討論任何的新發現。故就像先前所言，在頭幾個月的收集數據，有很大一部分是為了理解探測器的性能，檢查、調試觸發系統與數據收集系統。為了盡可能地實現最佳性能，量能器以及軌跡量測器都需要校準。因此，在早期物理的分析時，通常得把『失校』(mis-calibration)與『位置失準』(mis-alignment)的影響給考慮進去。這邊我們就三個早期物理目標：底層事件(underlying event)、W、Z 玻色子的生成、以及頂夸克的量測作一介紹。

### (一) 底層事件(underlying event)

在強子與強子的對撞時，夸克與膠子的深度散射(hard scattering)通常都會伴隨著初始態與終末態的輻射、和來自剩餘粒子束的輕度反應。基本上，只要不是深度散射的事件，就能被列為所謂的『底層事件』(underlying event)。我們對輕度反應的描述並不是從根本的定理開始推導，反而是使用一些現象學模型。當這些『底層事件』伴隨著電子與渺子發生時，就會提供一個很好的資料來研究輕子的『隔離度』(isolation)以及相對應的效率。另外就是底層事件會在量能器上面殘留能量，這將會使得對 Jet 的測量有一定的不準度。因此，了解底層事件的反應率就是一個非常

重要的課題了。一個很常見的方法就是去測量對應於一些共振態或是粒子衰變成強子的質量的分佈圖(例如 Z 衰變成雙夸克等等)。基本上輕度反應的反應率是正比於加速器的亮度，所以亮度的測量也是一個很重要的因子。這些研究在 LHC 的初期是非成重要而且事關重大的。

如果要比較一些對應於底層事件的模型，基本的作法就是去選取背對背的雙 Jet 事件，然後計數垂直於雙 Jet 的軸心方向下帶電荷的粒子數。目前數個物理模型在美國費米實驗室 Tevatron 能量(1.96TeV)下是有相似的預測，但是他們在 LHC 的能量下卻出現分歧的結果(當展示帶電荷的粒子數與 Jet 動量的垂直分量的關係時)。

CMS 已經有一個使用 minimum bias 和雙 Jet 事件的研究[3]，並且不同的校正等級也被考慮在裏面，而一些模型：PYTHIA 加上 DW、DWT、S0 的修正，以及 HERWIG 被拿來做比較。以  $100 \text{ pb}^{-1}$  的數據量，在考量統計、以及儀器校準的影響下，DW 和 DTW 修正的幅度已經顯示出很大的不同。這兩種修正在 LHC 的能量下 20% 的差異，但是在 1.96TeV 的能量下卻沒有什麼不同。ATLAS 利用一些已經存在的實驗數據(多半來自費米實驗室的 CDF、UA5 和 E735)，修正了 PYTHIA 的參數，然後比較這些修正結果和來自 PHOJET 的預測分佈。他們發現在帶電荷粒子數的平均值和他們的垂直動量的和，在這兩個產生器的預測結果上差了兩倍[4]。

### (二) W、Z 玻色子的生成

W 與 Z 玻色子的測量有數個優點。比如說，他們的反應截面還不小(約 nanobarn 的等級)，再加上通常都伴隨著一個帶電荷的輕子可以輕易的被觸發。這兩個玻色子的特性都已經被測量的非常精準，所以這些事件都可以提供很好的參考資料。在理論上也有很好的支援，現在已經有針對這些反應的 NNLO (Next-to-next leading order)等級的完整計算結果，有完整的角度以及動量上的關係式。這些計算使得在理論上的誤差已經小於 1%。像是對應於 Z 玻色子的背景事件還可以從它質量分佈的邊界區域來作更進一步的研究。

在 CMS，已經有針對初期  $10 \text{ pb}^{-1}$  的實驗數

據的 W 與 Z 玻色子的測量[5,6]。如果考慮電子的終末態，我們會先要求存在 20 GeV 動量以上的候選電子。基本上這些候選電子的飛行軌跡不能和其他的帶電荷粒子太靠近，並且這個候選電子所指向的量能器訊號必須大多是電磁能量、而非強作用的能量。對於電磁能在量能器上的分佈寬度也必須小於一個上限值。當然，電磁能的分佈位置必須要正對著候選電子的飛行軌跡。

如果是 Z 玻色子的分析，首先會要求兩個候選電子形成的質量必須介於 70 GeV 到 110 GeV 之間。在  $10 \text{ pb}^{-1}$  的實驗數據中大約可以擷取出 4000 個事例，而且背景事件還非常少。這約是 33% 的接受率再乘上 68% 的選擇效率。如果我們要測量反應截面的大小，最大的系統誤差將會來自於亮度的測量值。事實上，理論計算的反應截面還遠比亮度的測量來得精準的多，甚至有人反而打算用這個測量來估計加速器的累積亮度。關於 W 玻色子的分析，那背景事件可能來自於 W 衰變成 tau 或是 Z 玻色子。利用電腦模擬來估計，這些背景事件大約佔信號的 5%。另外就是來自強作用的背景事件（大多來自雙 Jet 事件、而其中一個 Jet 被誤認為電子），從實驗數據就可以直接拿來估計。我們預估在  $10 \text{ pb}^{-1}$  的實驗數據中可以得到約 68000 個 W 玻色子的事件，相對於 52% 的接受率、乘上 65% 的選擇效率。

在以渺子為終末態的分析中，研究起始於一或二個候選渺子（W 玻色子需要一個、Z 玻色子需要兩個）。在渺子的軌跡附近一樣不能有其他的帶電荷粒子的紀錄，同時也要求候選渺子最少要有 20 GeV（針對於 Z 玻色子）或是 25 GeV（針對於 W 玻色子）的動量橫向分量。在 Z 玻色子的分析中，渺子對的質量必須要高於 40 GeV；在 W 玻色子的分析中，W 的橫向質量分佈必須要高於 50 GeV。對於 QCD 背景事件的估計，則是採用了相似於電子通道的分析方法。基本上就是把隔離(isolation)的要求給倒反過來，這樣可以用來計算背景事件的數量。而背景事件對 W 橫向質量分佈的影響，則可以利用 Z 玻色子的事例，將其中一個渺子忽略形成擬似 W 玻色子的事件，以得到背景事件的橫向質量分佈。

另外一個重點就是如何從真實的實驗數據取得效率值。在這個方面，Z 玻色子便提供了很好的素線索。通常是利用所謂『標記與探測』的方

法。首先，將來自 Z 玻色子其中一個輕子作嚴格的要求(也就是『標記』)，剩下帶相反電荷的輕子就用來『探測』，可以得到真實數據的效率值。

### (三) 頂夸克的量測

頂夸克的生成截面積在 LHC 是  $830 \text{ pb}$  (NLO 等級的計算下)，遠比 Tevatron 的截面積(約  $8 \text{ pb}$ ，來自 CDF 與 D0 實驗的測量值)大了非常多，差了約 100 倍。就算 LHC 只用『低』亮度來運作的每年  $10 \text{ fb}^{-1}$  數據量，都會產生非常多的頂夸克對。所以 LHC 可以稱做一個頂夸克的工廠，並且可以將頂夸克的性質測量得相當精準。頂夸克幾乎都衰變成 b 夸克再加上 W 玻色子，故頂夸克對的事件是以 W 玻色子的衰變終末態來分類的：強作用反應的終末態(46%)、單輕子的終末態(44%)、以及雙輕子的終末態(10%)。因為頂夸克對的事件會有許多不同的物理物件（包括電子、渺子、輕夸克 Jet、底夸克 Jet、以及橫向能量逸失），故頂夸克會對整個實驗的事件重建有很大的幫助：不管我們要尋找什麼新物理，都應要先把頂夸克給測量準確。

在  $20 \text{ pb}^{-1}$  數據量下，大約有 800 個雙輕子的頂夸克對事件、4700 個單電子或單渺子的終末態事件被產生出來。如果數據量能達到 10 倍，那背景事件的數量就可以從實驗數據直接取得。之後，許多重要的頂夸克相關特性就能被測量的十分準確，如質量、動量分佈、以及產生的截面積等等。而且含有 tau 輕子的事件也能被測量。

ATLAS 有一個是針對於初期數據的分析[7]，僅使用  $150 \text{ pb}^{-1}$  的數據量而且不使用 b-tagging。這個研究訊號，一定要存在一個獨立的輕子並且其橫向動量得大於 20 GeV，而橫向能量逸失也必須要大於 20 GeV。然後事件中只能剛好有 4 個 Jet，並且其橫向動量得大於 40 GeV。這樣的重建效率大概是 4.5%。在這樣的選擇下，會導出四種可能性。如果將其中的 3 個 Jet 當成是來自同一個頂夸克。基本上這個分析是選擇橫向動量最大的 3 個 Jet，然後計算他們的總和質量。在 167 GeV 左右就會看到非常清楚的訊號，高於 W+jet 的背景事件。CMS 雙輕子的頂夸克對事件分析，起始於單一輕子或雙輕子的觸發[8]。再要求至少兩個獨立相反電荷的輕子與兩個 Jet 物件存在於事件中。所有的物件的橫

向動量都得大於 20 GeV。因為事件中必存在兩個微中子，所以要求橫向能量逸失必須要大於 40 GeV。同時也實行 b-tagging 要求兩個底夸克的 Jet 存在。頂夸克的質量則是由一個動力學的計算得到（假設了 W 玻色子的質量在裏面）。雖然重建效率只有 1.2%，但是在  $1 \text{ fb}^{-1}$  數據量下也有 657 個訊號事件。因為訊雜比(S/N ratio)非常高，使得這個分析的系統誤差相當小。

### 三、結論

LHC 即將啟動，目前預計將在 2009 年初實行質子與質子的碰撞。重要且全新的物理題目，會是兩個全方位的實驗偵測器、ATLAS 與 CMS 的主力目標。我們都十分期待著，即將看到第一個對撞反應數據的一瞬間。在未來這幾年的粒子物理學將會是令人非常興奮的，從首次檢視 TeV 能量下的標準模型，然後到一個完全開闢的世界搜尋新物理。此外，對於希格斯粒子的追尋也將會終結於此，無論發現與否。對於其他被預測的新粒子，他們的質量與衰變特徵也將以實驗數據

來驗證。

### 參考資料

- [1] ATLAS Technical Proposal, *CERN-LHCC-43*, (1994).
- [2] CMS Technical Proposal, *CERN-LHCC-38* (1994).
- [3] CMS Collaboration, *CMS Physics Analysis Summary QCD-003* (2007).
- [4] A. Moraes, C. Buttar, and I. Dawson, *ATL-PHYS-PUB-007* (2005). *ATL-COM-PHYS-010* (2005).
- [5] CMS Collaboration, *CMS Physics Analysis Summary EWK-001* (2007).
- [6] CMS Collaboration, *CMS Physics Analysis Summary-002* (2007).
- [7] S. C. M. Bentvelsen and M. Cöbe, *ATL-PHYS-PUB-024* (2005); *ATL-COM-PHYS-039* (2005).
- [8] M. Davids et al., *CMS NOTE- 077* (2006).