

[研究新領域報導]

珍稀為貴：極稀有 B 介子衰變的測量

國立台灣大學物理系 侯維恕 陳凱風 呂榮祥

一、緣起

俗話說「物以稀為貴」，但光稀有不見得珍貴，乃是要有進一步的價值與意義。我們在這裡所報導[1]的奇異 B 介子到雙渺子衰變，即 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ，不但是至今量到的最稀有 B 介子衰變，更因再度驗證了粒子物理標準模型的預期、排除了被「超對稱」大大增強的可能，意義不凡。然而同時量測到的（非奇異） B^0 介子到雙渺子衰變（ $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ）徵兆，雖然統計精確度還不夠確實，但若其中央值將來被證實，將會是超越標準模型的「新物理」。以上結果是大強子對撞機 LHC 的 CMS¹ 與 LHCb 兩個大型實驗將數據結合並共同分析的成果，發表在《自然》期刊[1]。LHC 已在 2015 年啟動更高能的 13 TeV 對撞，預期數年內可釐清是否有超越標準模型的新物理。

1984 年 CLEO 實驗首次測量 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變率，測得 0.02% 的上限[2]。 B_s 及 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變的標準模型預期[3]分別是十億次可有四次及百億次可有的一次，非常稀有。到千禧年之際，理論家提出在超對稱(supersymmetry)之下的額外希格斯粒子，有可能將雙渺子衰變增強千倍[4]。同一時期美國費米實驗室 Tevatron 對撞機的 CDF 與 D0 實驗正增強 B 物理的能力，在 2000 年代將 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變的上限推進兩個數量級，進入億分之一的範疇。CDF 實驗更在 2011 年宣稱看到 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 約億分之二的徵兆[5]。然而 LHCb 與 CMS 實驗該年的數據並不支持這個結果，帶進了 LHC 時代，並在 2012 年將 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的上限推到億分之一以下。

二、當今最稀有 B 介子衰變

B 介子衰變到雙渺子的搜尋是 CMS 實驗的「旗

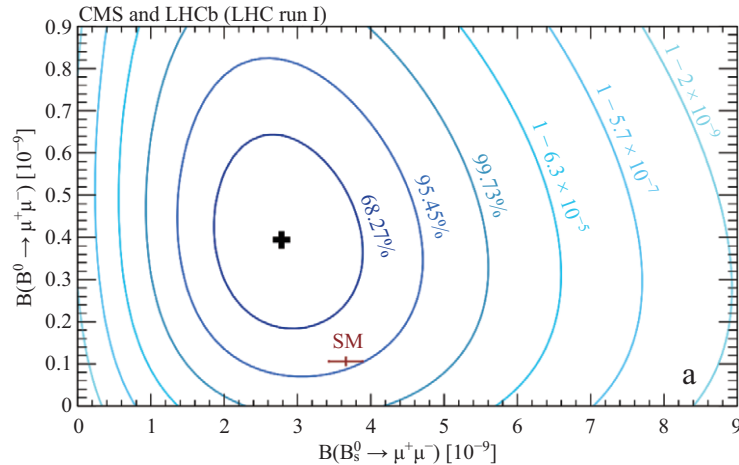
艦級」題目之一。與 LHCb 實驗不同，CMS 偵測器並不是專門為 B 物理設計的，但其高性能像素偵測器與矽軌跡儀使得 CMS 實驗在 B_s 及 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變的測量很有競爭力。

在 LHC 運轉之初，瑞士的保羅·謝熱研究院 PSI 團隊²就不斷的為這個測量做準備。一般而言，如果一個測量的可信度達到三個標準差，我們稱作「徵兆」，但要宣稱「發現」一個新現象，則必須達到五個標準差的可信度。如果一切如標準模型的預期，那麼在 2012 年底，運用約六成的 CMS 實驗數據，預計可以在 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變率的測量突破三個標準差；而到 2013 年暑假，若使用全部實驗數據，CMS 有很好的機會率先「發現」這個極稀有衰變。然而，就在 2012 年底的京都 HCP 會議之前，本來看好的測量卻因為突然發現偵測器的實際效能與預期有些落差， B_s 介子衰變到強子的背景事件因而被低估，CMS 實驗只好在會議的報告中暫保緘默，而 LHCb 實驗則輕鬆達到三個標準差的量測，成為 HCP 會議的焦點。

為了不再在 2013 夏天於瑞典斯德哥爾摩舉行的國際高能會議缺席、陪榜，CMS 必須在這個重要議題上增兵。除了改進渺子的辨識度、並全盤估計來自其他 B 介子衰變的背景事例，還要安排第二研究團隊來獨立交叉檢測整個分析過程，以避免任何人為誤差。本文作者之一（陳凱風）正是在進入 2013 年這個兵荒馬亂的時刻接掌 CMS 實驗的 B 物理召集人工作。除了主持每週約兩次、到後來幾乎日日進行的工作會報外，還要四處尋找、協調新的人力，以解決分析上的數個挑戰。到最後他自己也下海投入數據處理，用台大 CMS 團隊電腦叢集 300 顆 CPU 作計算。

¹Compact Muon Solenoid，或緊緻渺子螺管實驗，台灣參與的有中央大學與台灣大學。

²我們在像素偵測器的合作夥伴，參段落三。



圖一 B^0 與 $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ 可信度輪廓圖[1]。黑、赭紅十字是最可能量測值、標準模型預期值： B_s 略低於預期， B^0 則高於預期

CMS 成功的在 2013 年夏天得出研究成果、得到超過四個標準差的 $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ 量測！LHCb 實驗也更新了他們的測量，剛好達到四個標準差。兩個實驗的成果發表在同一期[6]的物理評論通訊 (Physical Review Letters, PRL)，可以說是自 2012 年發現希格斯玻色子以來最重要的 LHC 成果。然而，兩個實驗都只有四個標準差，離「發現」級的五個標準差，就是少了些。一般來說，只要增加 50% 左右的數據量，應當就能達到「發現」的標準，對這個探討了 30 年的議題給出一個確切答案！然而，LHC 已經進入維修期，分析新的數據至少要等到 2016 年才能見真章。既然兩個實驗團隊數據量都不足，不如把數據合併起來一起分析，就應當足夠了。

為此，陳凱風以 B 物理召集人身份與原論文內部審查委員之一的統計分析專家 Josh Bendavid，以及主要協調文章寫作的內審召集人 Joel Butler，開始與 LHCb 實驗團隊共同討論如何把實驗數據合併、分析。這個工作聽來容易，做起來並不簡單，除了協調兩個風格迥異的大型實驗團隊分析方式的統一，還要處理許多細節，譬如各樣背景事件的描述、許多共通的參數必須要特別處理以避免錯估誤差，等等。最後打造出的分析程式須同時引入兩個團隊的實驗數據，並處理超過 150 個參數，也就是在 150 個維度上尋

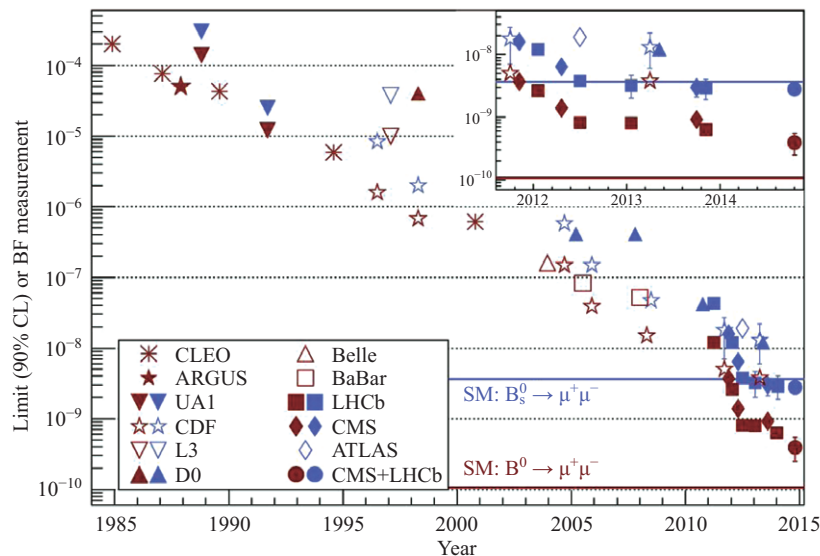
找最佳解。這個複雜度僅次於希格斯玻色子的分析，單單為了能夠畫出一張二維輪廓圖 (圖一)，台大 CMS 團隊電腦叢集的 300 顆 CPU 就 24 小時全力運作了 5 天。另一個非常消耗計算力的 B^0 介子衰變率上限的估計，則消耗了更大的 CERN 電腦叢集一週的時間。結果 B_s 超過六個標準差，而 B^0 竟也有三個標準差。

2014 年春天，合併實驗數據的分析工作總算告一段落，與期刊的聯絡也有進展：作為粒子物理 30 年來的重要里程碑 (圖二)，《自然》期刊同意刊登這個歷史上最稀有 B 介子衰變的發現。於是論文的寫作也如火如荼的進行。CMS 與 LHCb 實驗都有既定的期刊內審規則，很多風格與習慣不同，而《自然》期刊對文字的要求一向都很高。我們不但要滿足《自然》期刊的寫作準則，還花很多時間在 CMS 與 LHCb 之間溝通協調。一步一步通過兩個團隊的內部審查就耗去了數個月的時間，到最後還開了超過 10 個小時的會議逐字編修討論，才誕生這篇本文僅 2500 字的論文[1]。這是 B 物理領域的第二篇³《自然》期刊論文，也是首次由兩個 LHC 實驗合寫發表的。

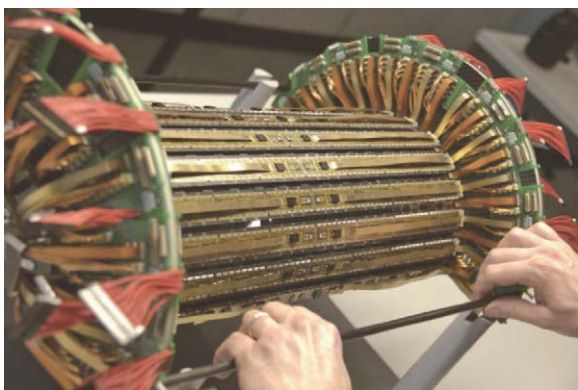
三、CMS 像素偵測器升級

巧婦難為無米之炊；對實驗粒子物理而言，偵測器乃是首要的。沒有硬體則數據免談，而沒

³ 第一篇為 Belle 實驗所發表[7]，台大團隊有更主體的貢獻。



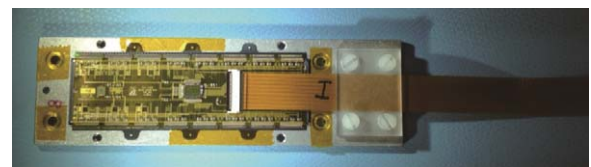
圖二 三十年的 B^0 與 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 搜尋：從 CLEO 實驗[2]的上限，到最後兩、三年（嵌入圖）CMS 與 LHCb 由競爭[6]到合作[1]，合併的最右藍圓已大於垂直線所示誤差範圍



圖三 CMS 實驗精巧的現行像素偵測器

有好的數據，再多的物理分析和想法也無法得出重要的成果。從 1990 年代起，數千名物理學家、工程師和技術人員花了近二十年的時間設計、建造全方位和多功能的 CMS 偵測器，為的就是能夠提供高品質的精確數據。不單是這次稀有 B 介子衰變的發現，還有 2012 年發現的希格斯粒子、多個關於標準模型的測量、和包括超對稱等的新物理分析，都仰賴 CMS 偵測器所擷取、提供的精確數據。

前面提到的 PSI 團隊提供了最佳範例。在 CMS 實驗設計之初，PSI 團隊的領導人 Roland Horisberger 即與 CMS 核心團隊共同提出位於 CMS 偵測器核心的矽像素偵測器 (Silicon Pixel Detector) 設計概念，以精確測量帶電粒子軌跡及



圖四 台大與 CERN 團隊合作製作的一個像素偵測器升級模組

衰變頂點位置。矽像素偵測器在當時還十分新穎，並沒有同等技術加持，但 PSI 團隊帶領的研發，成功建造出三層的像素偵測器（圖三），並安裝在 CMS 裡頭。這個子偵測器無疑是 CMS 實驗成功的關鍵要素，精確地分辨從不同質子-質子對撞點產生的帶電粒子軌跡，區分訊號與背景事件。起初設計建造時，這個稀有 B 介子衰變還未顯明是物理分析重點，但 LHC 運轉後，以 PSI 團隊的貢獻，他們自然肩負起這個分析重任，同時也證明了好的硬體是一切物理發現的基礎。

2010 年台大提出攻頂計畫時也深切體悟到好的硬體計畫是一個實驗組的核心。作者當中的兩位（侯維恕與呂榮祥）到 PSI 登門造訪了 Horisberger 教授，爭取參與像素偵測器第一階段升級計畫 (CMS Pixel Phase 1 Upgrade)，得到他的接納。我們因而榮獲通過攻頂計畫的支助，成功加入 CMS 像素偵測器升級，與 CERN 的矽偵測器團隊合組一個偵測器製作中心（圖四）。為

了提昇性能並面對更高輻射環境，要在短短的六年時間內重新設計、製作像素偵測器並不容易，光是由三層增加到四層，偵測器模組 (module) 就多了 60%。由呂榮祥帶領的台大團隊與 CERN 團隊合作，進行多次粒子束流實驗，測試偵測器原型以回饋設計工作者，同時在無塵室內建立模組製作和測試設備，於 2013 年起操練模組原型製作，於 2015 年初夏進入量產，預期到 2016 年一月完成 250 個模組，安裝到偵測器支架上。升級版的四層像素偵測器將在 2016 年底置入 CMS 核心，取代現有的三層矽像素偵測器。

四、大強子對撞機之展望

LHC 已在 2015 年以更高的 13 TeV 能量重新啓動，進行第二期運行 (Run 2，將持續到 2018 年底)，主要目標是 (希望) 發現超越標準模型的新物理現象。B 介子衰變到雙渺子依然是一個研究重點，我們預計可以在 2018 年以前將 $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變率測量到約 15% 的準確度，若數據量提升，精準度還能再提高。而在《自然》期刊所同時發布的 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變徵兆會是進一步的重點。在標準模型裡 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變率比 B_s 介子小上 30 倍。但在《自然》期刊的測量卻達到三個標準差，有些超乎預期。如果一切如標準模型所預測，則需要原數據量的近 20 倍才能「發現」 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變，恐怕要 10 年的時間，也就是要到第二階段升級的「高亮度」LHC 運轉才做得到。然而，如果 B^0 介子衰變高於標準模型，譬如靠近《自然》期刊結果[1]的中央值，我們就有

很好的機會在 Run 2 期間就讓 $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 衰變的測量突破四、甚至五個標準差，達成新的「發現」，並宣告超越標準模型的「新物理」！無論如何，這都會用到我們所參與製作的升級版四層像素偵測器。我們拭目以待。

參考文獻

- [1] V. Khachatryan *et al.* (CMS and LHCb Collaborations), *Nature*, **522**, 68 (2015).
- [2] R. Giles *et al.* (CLEO Collaboration), *Phys. Rev.*, **D30**, 2279 (1984).
- [3] C. Bobeth, M. Gorbahn, T. Hermann, M. Misiak, E. Stamou, M. Steinhauser, *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 101801 (2014).
- [4] C.-S. Huang, W. Liao, Q.-S. Yan, *Phys. Rev.*, **D59**, 011701 (1999); S. R. Choudhury, N. Gaur, *Phys. Lett.*, **B451**, 86 (1999); K. S. Babu, C. Kolda, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 228 (2000); C. Bobeth, T. Ewerth, F. Krüger, J. Urban, *Phys. Rev.*, **D64**, 074014 (2001).
- [5] T. Aaltonen *et al.* (CDF Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 191801 (2011).
- [6] S. Chatrchyan *et al.* (CMS Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 101804 (2013); R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), *ibid.*, **111**, 101805 (2013).
- [7] S.-W. Lin, Y. Unno, W.-S. Hou, P. Chang *et al.* (Belle Collaboration), *Nature*, **452**, 332 (2008).