

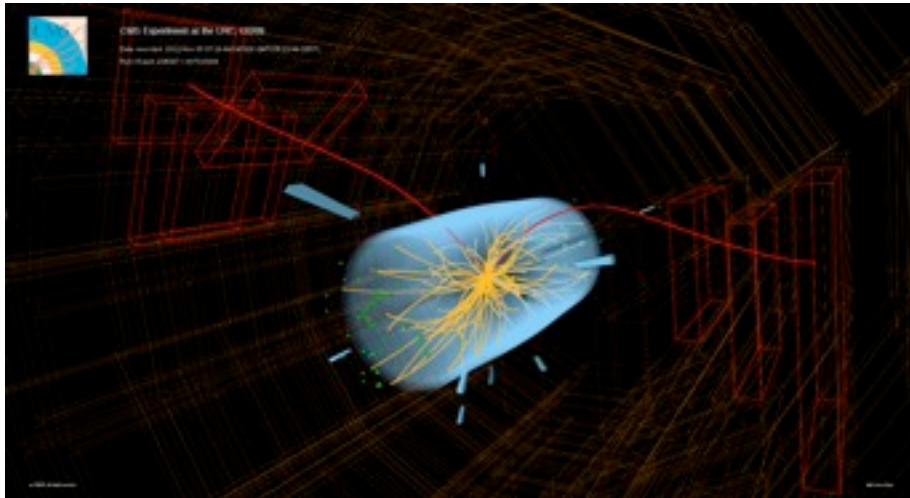
# CMS 團隊觀測稀有衰變事件

CMS 緊湊渺子線圈實驗團隊,  
CERN 歐洲核子研究機構  
2013 年 7 月 19 日

CMS 團隊測量到在粒子物理的標準模型中預測重要的稀有衰變事件。在數個實驗開始嘗試的將近 25 年之後，直接觀測到  $B_s$  (唸作 B-sub-s) 介子衰變成渺子對的實驗結果，在瑞典斯德哥爾摩舉辦每兩年一次的歐洲物理學會高能物理大會上宣布發表。

在每十億個  $B_s$  介子中，我們預期只會有三個  $B_s$  會衰變成渺子對 (渺子是輕子的一種，可以類比成是比較重的電子)。這種稀有的衰變模式是很好的機會檢視是否有新物理的存在：只要是測量到衰變機率不同於標準模型 (Standard Model) 的預測，即是新物理 (超越標準模型 BSM, beyond the Standard Model) 的間接證據。

CMS 團隊測量到統計顯著性 [1] 4.3 個標準差的  $(3.0^{+1.0}_{-0.9}) \times 10^{-9}$  衰變機率。這個衰變機率值符合標準模型所預期的  $(3.6 \pm 0.3) \times 10^{-9}$  衰變機率。而 4.3 個標準差的統計顯著性代表所觀測到的訊號事件是因為背景事件擾動摻生的機率只有十萬分之一。



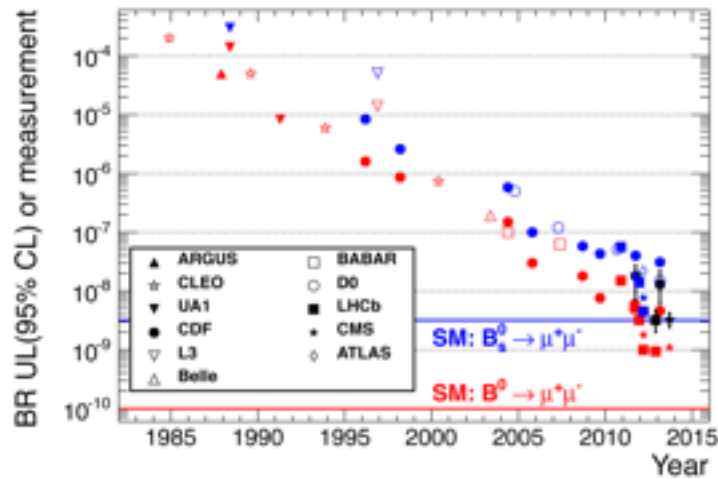
圖一：CMS 偵測器在 2012 年 8 TeV 質子與質子對撞的數據中，其中一個  $B_s \rightarrow \mu\mu$  的訊號候選事件

## 尋找新東西

雖然在這麼多年來，標準模型似乎很成功的解釋或預言所有的實驗數據，包括這次的  $B_s$  衰變機率，我們知道其實標準模型還不完備：例如，標準模型並沒有解釋什

麼是宇宙學上觀測到的暗物質。CMS 一直以來也嘗試在不同的物理分析中，尋找新物理 (BSM) 直接的證據或間接的跡象。如果新物理就在 LHC 能量可及的範圍，我們應該可以在實驗數據中看到徵兆。

B 介子 (一個底夸克和一個較輕的夸克組成) 衰變成渺子對的管道就是一個適合的分析，用來間接觀測是否有新物理 (BSM)。在標準模型中，不管是  $B^0$  介子 (底夸克  $b$  + 下夸克  $d$ ) 或是  $B_s$  介子 (底夸克  $b$  + 奇異夸克  $s$ )，要衰變成渺子對的機率都是被預期會很小。不過卻有好幾個新的理論模型提出不同的衰變機率，有明顯加大機率的，也有預測更小的衰變率。所以只要能夠在實驗上測量出不同於標準模型預測的衰變機率，就會是新物理存在的間接證據。在過去 25 年來，全球已經有十數個對撞機和實驗組嘗試著想要尋找這個稀有衰變管道，也改進了衰變機率上限達數萬倍，接近標準模型的預測。於是在 2012 年 11 月，先由 LHCb 實驗組發表了有 3.5 標準差的第一個實驗證據，觀測到  $B_s \rightarrow \mu\mu$  的衰變徵兆。



圖二：過去 25 年來數個不同的對撞機還實驗組尋找  $B_s$  和  $B^0$  衰變成渺子對所得到的機率上限值。可以看得出來實驗結果改進了大約數萬倍。

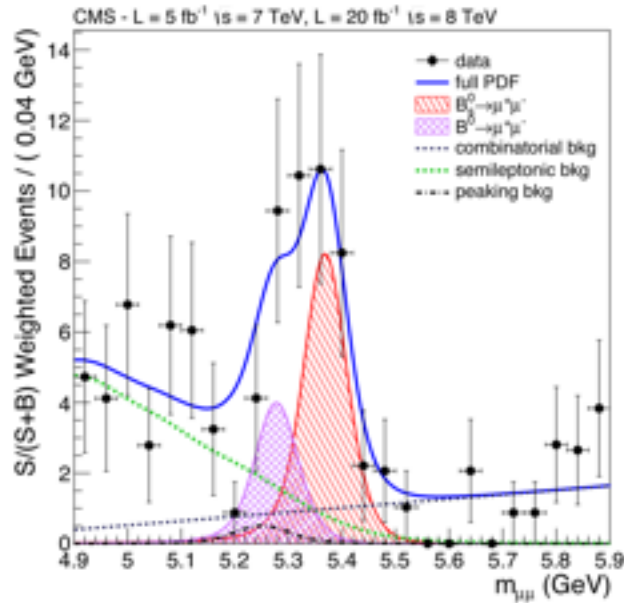
### 還未被了解的 B 介子現象

尋找稀有衰變的徵兆通常代表著分析工作要在大量的實驗數據中，選找僅有數個的訊號事件：在這個分析中，每十億個  $B_s$  介子只有三個介子會衰變成渺子對，而  $B^0$  介子的機率更是小於  $B_s$ 。

尋找稀有衰變分析的第一步就是在 CMS 蒐集 質子與質子對撞的數據中，找出有可能的訊號事件。CMS 每秒記錄下 400 個物理學家會有興趣的事件，而其中每秒就有 10 個可能是  $B \rightarrow \mu\mu$  需要分析的事件。這些事件會被進一步的依照兩個渺子的測量性質而分類，並利用來盡可能的篩選掉背景事件，同時保持訊號事件。

另外在分析 B 介子衰變之外，CMS 也必須要能夠精確的知道有多少 B 介子被產生出來，畢竟物理上測量的是衰變機率。B 介子的數量是從其他被熟知的衰變管道反推算得。

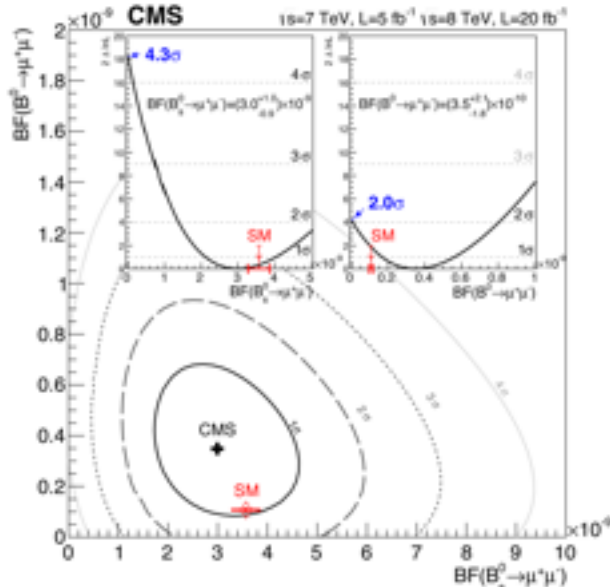
### 預期訪客的第一個徵兆



圖三：渺子對的質量分布圖。紫色與紅色的曲線區域分別代表  $B^0$  和  $B_s$  訊號，而黑虛線，綠虛線和黑曲線則是三種不同的背景事件。藍色實線則是所有訊號和背景事件的總和，而黑圓點即是觀測到的實驗數據。

這個研究分析了 CMS 在 2011 和 2012 蒐集的  $4.9 \text{ fb}^{-1}$  and  $20.4 \text{ fb}^{-1}$  ( inverse femtobarns [2] ) 數據。在渺子對的質量分布圖上，我們可以明顯地看見高於背景預期的訊號事件數量。這個訊號事件數相當於  $(3.0^{+1.0}_{-0.9}) \times 10^{-9}$  的衰變機率和 4.3 標準差的統計顯著性。這個分析論文也已經投稿到 Physical Review Letters 期刊。

CMS 測量到的  $B_s \rightarrow \mu\mu$  衰變機率符合標準模型的預期。這似乎又是標準模型再一次的成功。我們也測量了  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  的衰變機率，因為沒有足夠的統計顯著性，衰變機率的上限可以被訂在  $1.1 \times 10^{-9}$  ( 百分之九十五的信心水準下 [3] )，同時也符合標準模型預測。



圖四：二維的等高線圖顯示出  $B_s \rightarrow \mu\mu$  和  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  測量結果的統計重要性。上方的兩個小圖則是二維圖的投影圖。曲線顯示出測量到的衰變機率（與 X 軸交接處）和統計重要性（與 Y 軸交接處）。

下一步會是？

這個重要的實驗發現雖然讓人興奮，但同時也帶來了一點失望，沒有發現新物理徵兆的失望。 $B_s \rightarrow \mu\mu$  的實驗分析最吸引人的極是發現新物理或是說找到標準模型漏洞的機會。不過這個研究工作還沒結束。隨著 LHC 運行和數據的增加，CMS 和其他實驗組將會持續改善測量結果。更精確的實驗結果可以幫助去除不是用的新物理模型，也可以幫助物理學家指出在今日高能物理研究的題目之外或未來該研究的方向。另外，在 2015 之後，LHC 回復運轉的新數據將會增加 CMS 對  $B^0 \rightarrow \mu\mu$  的實驗靈敏度到標準模型預期的衰變機率範圍內。

觀測到這個  $B_s$  稀有衰變的發現不啻是高能物理界 25 年來的一個重要里程碑。不過在眼前還是有許多位觀測到或未解釋的現象，需要我們去探索。

## 關於 CMS

更多的資訊可以在 CMS 的網站上獲得：<http://cern.ch/cms> 或聯絡 [cms.outreach@cern.ch](mailto:cms.outreach@cern.ch)。

CMS 是大強子對撞機上兩個綜合型實驗的其中之一，而建造的目標即在尋找新物理現象的存在。實驗偵測器的設計即針對大強子對撞機高能量質子與質子或重離子對撞時可能產生的各種粒子或現象的偵測，並試著回答像是『宇宙是由什麼物質與力組成』或『是什麼提供物質于萬物』的問題。CMS 也會針對已知的粒子們做出

更精確的測量並同時留意全新且未知的新現象。這樣的研究不只是幫助增加我們對宇宙運行的了解，也同時刺激了新科技的進步而影響了我們生活的周遭。

概念上的 CMS 設計早在 1992 即被提出。這個大型的偵測器（直徑 15 公尺、長 29 公尺並重達一萬四千公噸）是由一個大型的國際科學研究團隊：從全球 41 個國家 179 個學術單位來的 3275 位科學家（包括 1535 位學生）加上 790 位工程師與技師，花了 16 年的時間才建造完成。

## 註解

[1] 統計學上的訊號顯著性通常是用來表示在一個假設之下，某個觀測到的現象有多不尋常。而物理學家通常會用“標準差  $\sigma$ ”為單位來量化這個顯著性。當顯著性的標準差數愈大，標示觀測的現象愈不符合某個假設或假說。於是對於一個人們不預期會發生的新物理或新現象，物理學家會要求相當高的顯著性數值來說服大家某個新的發現。

[2] 實驗數據單位。見 <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femtobarn-721.html>

[3] 信心水準是統計學上的一個側量估算方法，用來表示某個結論在預期的範圍之內的機率。譬如說，95% 的信心水準指得是在百分之九十五的情形之中，事件發生的結果會落在所預期的範圍之內。