

## [ 研究成果報導 ]

## 希格斯玻色子精密測量時代 -- Higgcision

國立清華大學物理系 張敬民

## 背景

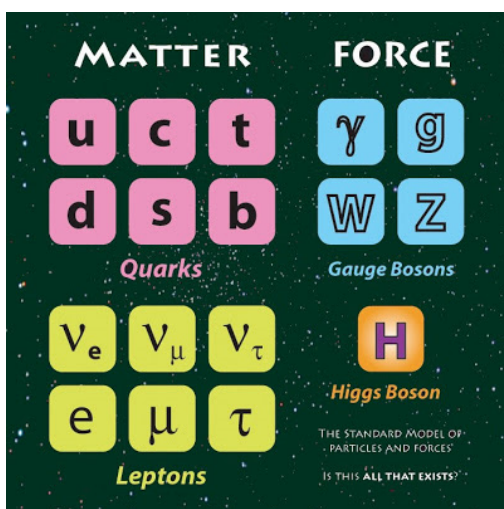
粒子物理學的標準模型由一組物質粒子或費米子組成，稱為輕子和夸克，還有一組負責電磁，弱和強相互作用的力載體。輕子由帶電輕子和微中子所組成，及有三個味道-電子、介子和 tau。另一方面，夸克有六種味：上、下、奇怪、魅力、底部和頂。它們從的幾千分之一 GeV 增加到超過一百 GeV。示意圖如圖一所示。

到目前為止，我們確定了一種理論，我們稱之為標準模型，基於所有以前的實驗數據的規範對稱性，並在 1983 年發現了 W 和 Z 玻色子。這樣一個理論的直接問題是量規對稱性要求所有的粒子都是無質的；這是一個問題，因為我們知道在現實中，每個粒子，除了光子，有一個質量。我們陷入僵局，我們有一個美麗的理论，可以統一弱電和電磁相互作用，但不能解釋質量。P.W. Higgs 等人[1]提出了所謂的希格斯機制，可以產生質量到費米子和玻色子。爲了了解希格斯機制，我們可以想像如下。

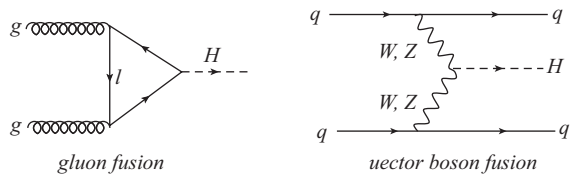
假設宇宙以規範對稱開始，其中的每個粒子都是無質的。理論家通過引入遍布整個宇宙的希格斯(Higgs)場，在宇宙中創造了一個位能。這個想法很簡單，類似於我們在電力或重力學習中學到的東西。測試電荷總是希望去到位能最低的地方 – 最穩定的地方。想像一下，這個位能在希格斯場的起源點上是最小的，它滿足規範對稱性。然後由於一些更根本的原因，位能的變化，並從起源點開始發展另一個較低的最低點。所以接下來的事情是，一切都會移動到新的最低位能點，因爲它更加穩定。整個宇宙將會跑達到新的最低位能點 – 像氣泡在整個宇宙橫掃一樣。在新的最低位能點，原始的規範對稱性不再受到滿足，因此破壞了原始的規範對稱性爲電弱對稱性破壞。因此，幾乎所有的粒子都接收到質量，從而解決了質量起源的問題。希格斯玻色子是上述圖像的殘餘物。這個希格斯玻色子的發現會是上述圖像確實發生的有力證據。在上面的描述中，我們提到了一些更爲根本的原因，爲什麼位能從起源點發展到另一個最低位能點。標準模型沒有提供解決方案，而是作爲一個特設的條件。事實上，位能發展新的最小值，從而觸發電弱對稱性破壞的根本問題是一個積極的研究領域。例如，超對稱-玻色子和費米子之間的對稱框架-提供了觸發電弱對稱性破壞的動力學機制。當前的實驗也在積極尋找超對稱證據。

## 希格斯粒子產生和衰變

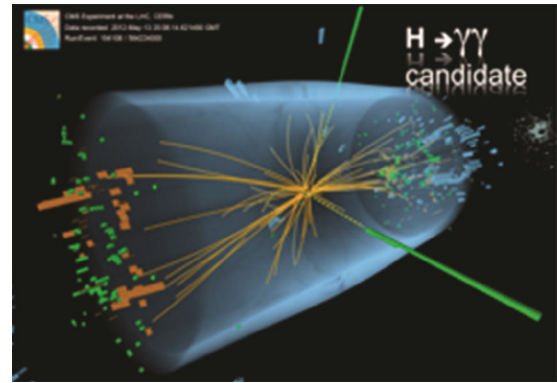
在 LHC 中，希格斯玻色子最主要的生產來自膠子融合(ggF)及下一個主要是通過矢量玻色子融合(VBF)。Feynman 圖如圖二所示。位於質子內部的膠子可以通過頂夸克的環路圖湮滅到希格斯玻色子；而 W 或 Z 玻色子在 VBF 中湮滅到希格斯玻色子。膠子和矢量玻色子融合之間最重要的區別是在 VBF 中兩個伴隨的噴射，如圖



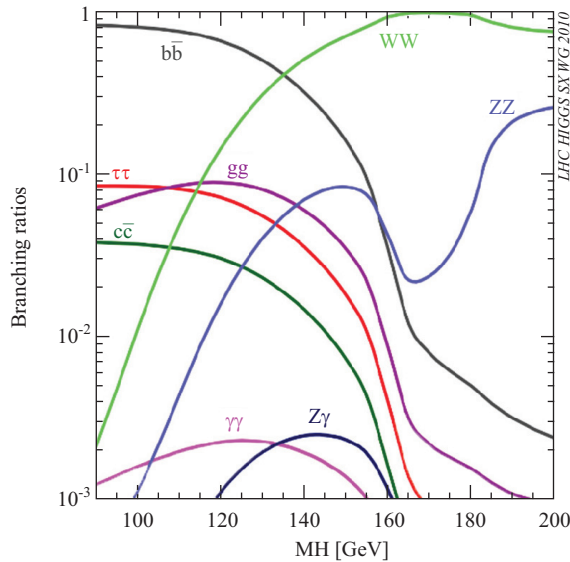
圖一 標準模型的示意圖



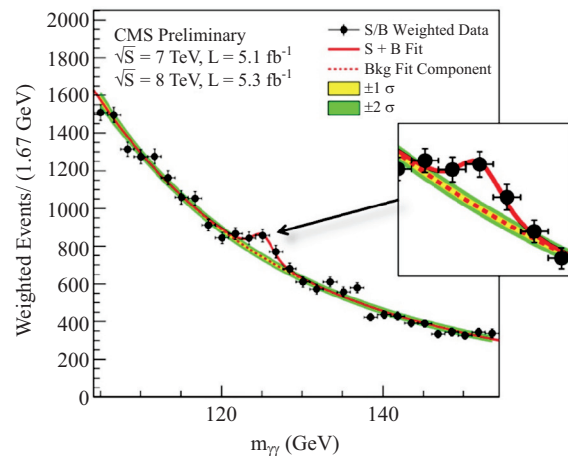
圖二 希格斯玻色子的生產：膠子融合(ggF)及  
矢量玻色子融合(VBF)



圖四 希格斯玻色子衰變成雙光子



圖三 希格斯玻色子的衰變分支



圖五 不變質量譜看到的一個峰

所示。實驗可以開發一組選擇切割，以識別噴射標記，以區分兩種類型的融合。膠子融合取決於循環中運行的粒子，從而允許來自任何新理論的任何其他粒子在循環中運行；而 VBF 是電弱對稱斷裂的干淨探針。

希格斯玻色子的質量和衰變模式以及來自其他實驗背景決定了希格斯玻色子的檢測方法。實驗沒有希格斯玻色子的推測質量範圍，所以他們必須從理論和以前的搜索中獲得允許的範圍，即從 115 GeV 到 1000 GeV，儘管有 LEP 實驗的暗示，它應該小於 180GeV。

希格斯玻色子的衰變分支比例如圖三所示。圖中底部附近的  $\gamma\gamma$  曲線是 115 和 130 GeV 之間最重要的模式。而其他衰變模式遭受大量背景或檢測不夠乾淨。在圖四中，我們顯示了一個計算機輔助的圖片。這是雙光子生產。然後，CMS 和 ATLAS 將所有事件用兩個光子相對於不變質量進行繪製，令人驚訝的是它們在 125-126 GeV 附

近發現了一個峰（見圖五）。

第二好的渠道是  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow llll$ ，其中最終狀態由 4 個帶電的輕子組成，包含  $4e$ ,  $4\mu$ , and  $2e2\mu$ 。再次，實驗然後將所有事件繪製為四個帶電輕子的不變質量，令人驚訝的是，它們也發現了 125-126 GeV 附近的一個峰。由於來自雙光子最終狀態的峰與 4 帶電輕子的峰非常一致，因此可以將大約 125-126 GeV 的統計學顯著性加在一起，其總和達到  $5\sigma$ 。CMS 和 ATLAS 實驗都發現希格斯玻色子[2]。

### 希格斯精準時代

自 2012 年以來，收集了越來越多的希格斯玻色子數據。在 2013 年 3 月，實驗更新了希格斯玻色子信號強度的數據。我們開始了對於希格斯玻色子精密耦合研究課程。我們於 2013 年 5 月在 JHEP 期刊，發表了希格斯精密耦合研究的

第一件工作-希格斯精密(Higgscision)時代[3]。

我們根據目前的希格斯數據制定了約束希格斯玻色子耦合的框架。它可以很容易地擴展到更大的數據集，並且在未來也擴展至其他希格斯模型，可以涵蓋超過 SM 的大量模型，包括 two-Higgs-doublet 模型、超對稱模型、小希格斯模型、希格斯單線模型、和第四代模型。

實驗測量的是信號強度 – 生產和衰變的組合：

$$\hat{\mu}(P, D) \approx \hat{\mu}(P)\hat{\mu}(D)$$

其中  $P = ggF, VBF, VH, ttH$  及  $D = \gamma\gamma, ZZ, WW, bb, \tau\tau$  衰變渠道。生產部分和衰變部分可以寫成希格斯玻色子的有效耦合：

$$\hat{\mu}(ggF) = \frac{|S^g(M_H)|^2 + |P^g(M_H)|^2}{|S_{SM}^g(M_H)|^2},$$

$$\hat{\mu}(VBF) = g_{HWW, HZZ}^2,$$

$$\hat{\mu}(VH) = g_{HWW, HZZ}^2,$$

$$\hat{\mu}(ttH) = (g_{H\bar{t}t}^S)^2 + (g_{H\bar{t}t}^P)^2;$$

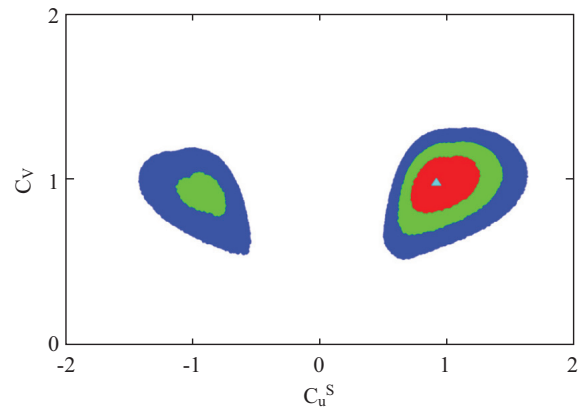
$$\hat{\mu}(D) = \frac{B(H \rightarrow D)}{B(H_{SM} \rightarrow D)}$$

$$B(H \rightarrow D) = \frac{P(H \rightarrow D)}{P_{tot}(H) + \Delta P_{tot}}$$

注意，我們引入了對總衰變寬度的任意非標準模型貢獻。因此，我們可以將所有希格斯信號強度的實驗數據，以獲得有效耦合的擬合範圍。在圖六中，基於截至 2014 年收集的數據，我們顯示了 Yukawa 耦合和規範場耦合，最好的擬合點是三角形所示的點，它是標準模型點[5]。我們可以看出，規範玻色子耦合受限於接近 1。另一方面，Yukawa 耦合仍然有兩個解，但最好還是+1 附近的。我們獲得的範圍是：

$$C_v = 0.98_{-0.11}^{+0.10}, C_u = 0.92_{-0.13}^{+0.15}$$

規範玻色子耦合約在標準模型值約 10%左



圖六 Yukawa 耦合和規範玻色子耦合的 1-sigma 範圍

右，Yukawa 耦合有約 15 的不確定性。在未來運行中收集更多數據時，不確定性將進一步降低。

我們還使用相同的數據集約束 2HDM [4]、MSSM [7]、希格斯單線模型[8]、約束電子和中子的 EDM [6]。

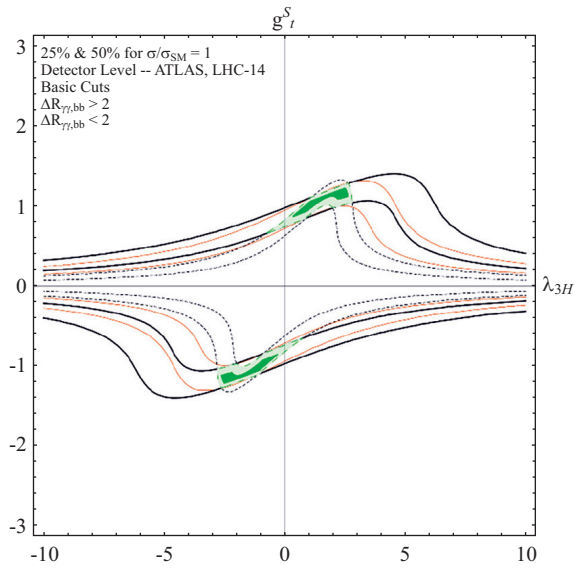
### 希格斯耦合精度的影響

希格斯玻色子耦合的當前限制告訴我們，數據最好由標準模型希格斯玻色子解釋。然而，還有更多的東西在弱電對稱破缺區需要探索，最重要的一個是希格斯玻色子的自耦合。在標準模型中，自耦合由希格斯玻色子的質量決定，但是超出標準模型的任何模型，自耦合都完全不同，自耦合是探索電弱對稱破缺的最重要渠道。

希格斯玻色子對的生產是眾所周知，能夠探測希格斯的自耦合，對生產取決於頂夸克 Yukawa 耦合和自耦合，我們將橫截面和干涉項計算為每個耦合的平方或四次方的係數。我們採用希格斯玻色子對的  $HH \rightarrow \gamma\gamma bb$  衰變模式來研究，從框圖中分離出三角形圖的可能性，以便在 LHC 處具有一個乾淨的自耦合探頭。我們發現  $b$  和  $\bar{b}$  之間的角間距，以及兩個光子之間的角間距是有用的。我們在 14 TeV LHC 和未來的 100 TeV pp 機器上獲得每對耦合的靈敏度範圍。如圖七所示。

### 結 論

希格斯玻色子物理學是未來 LHC 實驗的重點。所有與費米子的耦合，規範玻色子的耦合，



圖七 14 TeV LHC 耦合的靈敏度範圍

自耦合對於確定希格斯的身份是非常重要的。此外，搜索額外的希格斯玻色子或希格斯玻色子的罕見衰變，對於探討超出標準模型的物理學來說

都是非常重要的。

#### 參考文獻

- [1] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13, 508 (1964).
- [2] ATLAS Coll., Phys. Lett. B 710, 49 (2012); CMS Coll., Phys. Lett. B 710, 26 (2012).
- [3] K. Cheung, J.S. Lee, P.Y. Tseng, JHEP 1305 (2013) 134.
- [4] K. Cheung, J. S. Lee and P. Y. Tseng, JHEP 1401, 085 (2014).
- [5] K. Cheung, J. S. Lee and P. Y. Tseng, Phys. Rev. D 90, 095009 (2014).
- [6] K. Cheung, J. S. Lee, E. Senaha and P. Y. Tseng, JHEP 1406, 149 (2014).
- [7] K. Cheung, J. S. Lee and P. Y. Tseng, Phys. Rev. D 92, 095004 (2015).
- [8] K. Cheung, P. Ko, J.S. Lee, J. Park and P.Y. Tseng, Phys. Rev. D 94, 033010 (2016).
- [9] C.T. Lu, J. Chang, K. Cheung, J.S. Lee, JHEP 1508 (2015) 133.