

二零零八年最引人注目的物理學新聞，應該是大型強子對撞機(Large Hadron Collider LHC)的落成¹。這個位於歐洲核子研究中心(CERN)、耗資近九十億美元建造的粒子對撞機，是歷史上最昂貴的科研設施。LHC 將有六個實驗進行，其中最大的兩個(ATLAS²及 CMS³)各有來自三十七國家的超過二千科學家參予研究。實驗是利用能量達各 7 TeV 的強子對撞，驗證關於基本力場的理論。這包括搜尋希格斯粒子⁴(Higgs particle)、超對稱粒子⁵(Supersymmetric partners)、多餘空間維度⁶ (extra dimensions)、及夸克物質⁷(quark matter)等。這些粒子物理學最基礎的研究，很可能突破人類對微觀世界認知的極限，揭開物理學的新一頁。

粒子物理學的標準模型

要瞭解 LHC 實驗的重要性，我們首先需要簡介粒子物理學的標準模型⁸(Standard Model)。物理學家相信所有已知物質皆由夸克及輕子(電子及中微子)組成(圖一)。這些粒子通過規範場(gauge fields)進行相互作用。由楊振寧及米爾斯兩位提出的楊米規範場理論⁹(Yang-Mills Gauge Field Theory)成為電磁、弱及強作用力的統一理論基礎。理論假設物理系統遵守規範對稱¹⁰(gauge symmetry)。最簡單的例子是 U(1)規範對稱，指粒子的波函數的相位(phase)應可隨意加減一個常數，因相位只可通過干涉(interference)觀測，而干涉現象只視乎兩個相位的差別，相位的絕對值並不影響物理現象。因此，規範轉換(gauge transformation)可視為一種座標變換，如 U(1)的例子，只對應改變相位角度何處定為零而已。而且正如座標的選擇應為局域化的一樣(即每空間點的座標可自由定方向)，相位角度何處為零亦應有局域(local)的自由。其它更複雜的規範轉換可視為此原理的推廣，例如 SU(2)對應二維的相位，餘此類推。問題是，單獨的基本粒子場(如一粒電子)，並不遵守局域的規範對稱(local gauge transformation)，需有規範場，才正好補足對稱的缺失(圖二)。換言之，基本粒子與規範場其實是一體的！理論物理學最重要的其中一個洞察，就是物理系統的對稱性決定其中的相互作用。從規範對稱衍生出強、弱、電磁幾種基本作用力，理論上預測了膠子(gluons)、 W^\pm 、 Z 等規範場粒子的存在及強作用力的漸近自由¹¹(asymptotic freedom, 即近距離作用力減弱)等等，都可說是二十世紀理論物理的一個重大勝利。

¹ <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>

² <http://atlasexperiment.org/>

³ <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/CMS-en.html>

⁴ <http://www.exploratorium.edu/origins/cern/ideas/higgs.html>

⁵ http://hitoshi.berkeley.edu/public_html/susy/susy.html

⁶ <http://physicsworld.com/cws/article/print/403>

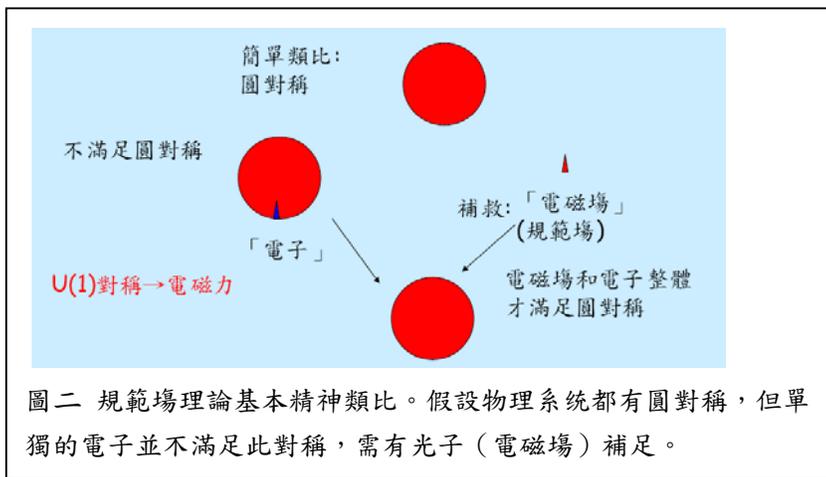
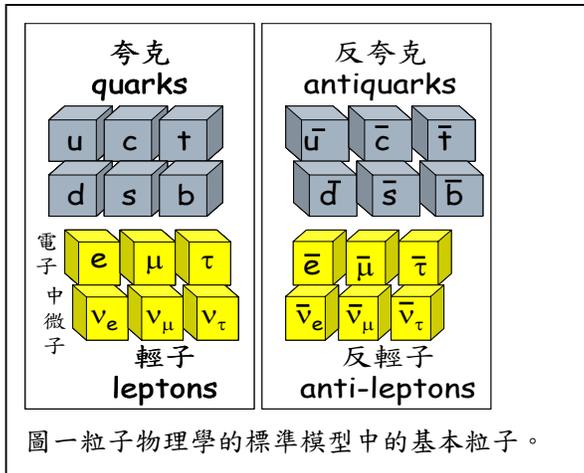
⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/QCD_matter

⁸ http://www.particleadventure.org/frameless/standard_model.html

⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Yang-Mills_theory

¹⁰ <http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/rqm3.pdf>

¹¹ <http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/quark-3.ppt>



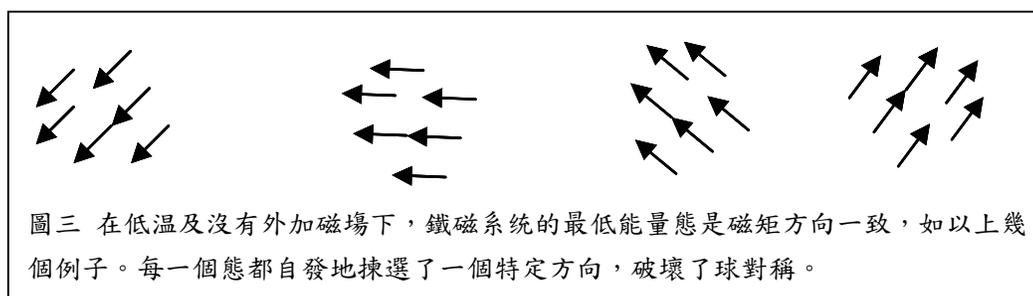
上帝粒子

以規範場理論描述弱作用力卻遇到一個大難題。若要滿足規範對稱，規範場是不可以有質量的。這對於電磁及強力沒有問題，因對應的規範場便是光子及膠子，二者的確都沒有靜止質量。不過，弱作用力的規範場(W^\pm 和 Z)卻有很大的質量。而事實上夸克和輕子的質量亦不知從何而來。為了解決這些問題，物理學家引入希格斯場(Higgs field)，它是真空的一部份，而各種本來沒有靜止質量的基本粒子與這個場的相互作用令它們得到有效質量(effective mass)。這情況有如電子在晶格內可以有很大的有效質量類似。常用的一個類比，是想像在一個酒會有一位天王巨星(基本粒子)出現，吸引一大羣人(希格斯場)圍着，這位明星走動時帶動整羣人，慣性質量便變得很大了。

希格斯理論建基於規範場的自發對稱破壞¹⁰ (Spontaneous Symmetry Breaking)，即指物理系統的最低能量態，不保存相互作用的所有對稱性。常用的類比是一圍酒席上的杯子排列。每座位的左右均有相同的杯子，左右對稱。但第一位賓客選擇了左或右的杯子，這個對稱便被破壞了。系統出現兩個「最低能量態」- 整桌的客人用左方的或右方的杯子。另一例子是鐵磁系統(ferromagnet)，磁矩之間的相互作用沒有特定方向性，但最低能量態是磁矩的方向一致(圖三)，破壞了方向

的球對稱。對稱的破壞是自發的，而不是外在的其他力場所引起。注意所謂對稱破壞，並不是說沒有對稱，事實上相互作用仍是遵從對稱性的。這對於規範對稱尤其重要，相互作用仍由規範對稱所衍生出來，但物理態自發破壞規範對稱，這便容許規範場得到質量。二零零八年的諾貝爾物理學獎得主之一¹²南部陽一郎¹³ (Yoichiro Nambu)，便是研究場理論自發對稱破壞的先驅。希格斯、英格爾(Englert)及布德(Brout)三人應用南部的自發對稱破壞機制於相對論性的規範場理論，從而解決規範場的質量問題⁴。

粒子物理學的標準模型利用希格斯機制賦予基本粒子質量，希格斯場可說是質量之源，因此希格斯粒子被稱為「上帝粒子」¹⁴。這理論卻差不多完全沒有實驗證據支持，因為仍未找到希格斯場存在的證據。理論上若有足夠能量，便可以把希格斯場提升至激發態，出現希格斯粒子。這便是 LHC 實驗最重要的任務之一。



超對稱粒子

夸克和輕子都是費米子(fermions)，規範場粒子卻都是玻色子(bosons)。這似乎亦破壞某種對稱，是否另一個自發對稱破壞的例子？是否存在超對稱 - 即費米子和玻色子對稱地出現？姑且把粒子的超對稱伴侶名為超粒子(sparticles)吧。按照超對稱猜想，宇宙早期溫度很高時，夸克和超夸克(squarks)、輕子和超輕子(sleptons)對稱地存在，當然規範場粒子的費米子伴侶，如光微子(photinos)，膠微子(gluinos)等，亦充斥宇宙。但隨着宇宙膨脹，溫度下降，超對稱被自發破壞(如上述鐵磁情況一樣)，超對稱粒子變得質量很大，在我們低溫的世界，便只見到較低質量的基本粒子了。這猜想有兩個理論證據支持。首先，加入了超對稱伴侶，使得一些原本在標準模型下出現發散的計算收斂。例如希格斯粒子的質量，通過與基本粒子以及它自身的相互作用，趨向無限大。但引入超對稱伴侶後，粒子引起的發散和超對稱伴侶的相互抵消，使得希格斯粒子剩下有限的質量⁵。此外，強、弱、電磁作用力的耦合常數都會隨着能量而改變。一般相信，在高能量時，力場統一，幾個耦合常數(coupling constants)應趨向同一數值。這情況卻只有在加入超對稱伴侶後才出現⁵。

¹² 關於另外兩位得主的工作，可參考楊綱凱教授公開講座

http://www.phy.cuhk.edu.hk/public_lecture/20081121_KYoung.pdf

¹³ http://en.wikipedia.org/wiki/Yoichiro_Nambu

¹⁴ 'The God Particle', Leon M. Lederman, Dick Teresi, Mariner Books 2006.

超對稱理論的一個有趣預測，是宇宙仍遺存一些質量很高的超對稱粒子。例如在很多版本的超對稱理論中，最低質量的超對稱粒子是穩定的，稱為中性微子¹⁵ (neutralino 是光微子及另一些不帶電荷的超對稱粒子的組合)。事實上，天文學家已普遍相信宇宙中有大量暗物質¹⁶存在，而中性微子正是暗物質最熱門的「侯選人」。物理學家亦希望在 LHC 實驗可以找尋到它的蹤跡。若能在實驗室中製造出超對稱粒子，絕對是粒子及宇宙學上的大突破。

微型黑洞

標準模型中，重力在很多方面都是格格不入的。例如重力遠比其他三種力弱，兩個質子之間的重力與靜電力的比例為 10^{-38} 。一些物理學家相信，這個小得不自然的數字必有玄機！其中一個近年頗受注目的猜想，是提出多餘空間維度⁶的存在。這些多餘空間捲曲至很細小，而電磁、強弱作用力不能傳播至其中，所以我們未能偵察它們的存在。理論假設重力傳播至所有空間維度，其中很大部份藏在細小而封閉的多餘空間內。因此我們在大尺度感受到重力的弱，只因為重力被多餘空間「分薄」了而已。若然如此，當距離足夠近，在尺度比多餘維度更細小時，重力應大大增強。這衍生一個有趣的預測：在高能量的粒子撞擊，因為短程的重力增強，可能製造出微型黑洞。根據這些理論的推算¹⁷，LHC 可能平均每秒製造一個半徑約 10^{-19} m 的微型黑洞。不過這些微型黑洞的霍金輻射¹⁸非常強烈，於 10^{-26} s 內便整個蒸發掉！若能從黑洞輻射的粒子能量分佈，找到微型黑洞存在的證據，應可大大促進我們對重力和時空的理解。若證實多餘維度的存在，將是劃時代的成就。

微型大爆炸

除了質子撞擊外，LHC 亦會進行重離子（如鉛核子）的撞擊實驗¹⁹。這實驗的重要性，在於驗證強作用力理論中夸克膠子相變⁷(quark-gluon phase transition)的存在。如上所述，強作用力有漸近自由的特性，夸克和膠子在高能量時相互作用變得很弱。這意味着，物質在高溫時，夸克和膠子應變得相當自由，被釋放出來形成夸克-膠子漿²⁰(quark-gluon plasma)。晶格規範場理論²¹(lattice gauge theory)計算的結果告訴我們，這個由強子物質至夸克物質的相變，應在 $kT \sim 140$ MeV 發生，即約一萬七千億度 K。LHC 的重離子撞擊實驗，將產生一個溫度更高的火球。這火球急速膨脹及冷卻，待溫度降低到相變臨界溫度，便凝結出各種粒子(圖四)。這情形就有點像宇宙大爆炸的初期，因此亦被稱為微型大爆炸(mini-Big

¹⁵ <http://en.wikipedia.org/wiki/Neutralino>

¹⁶ <http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/darkm.ppt>

¹⁷ S. Dimopoulos, G. Landsberg, "Black holes at the LHC", *Phys. Rev. Lett.* **87**: 161602 (2001).

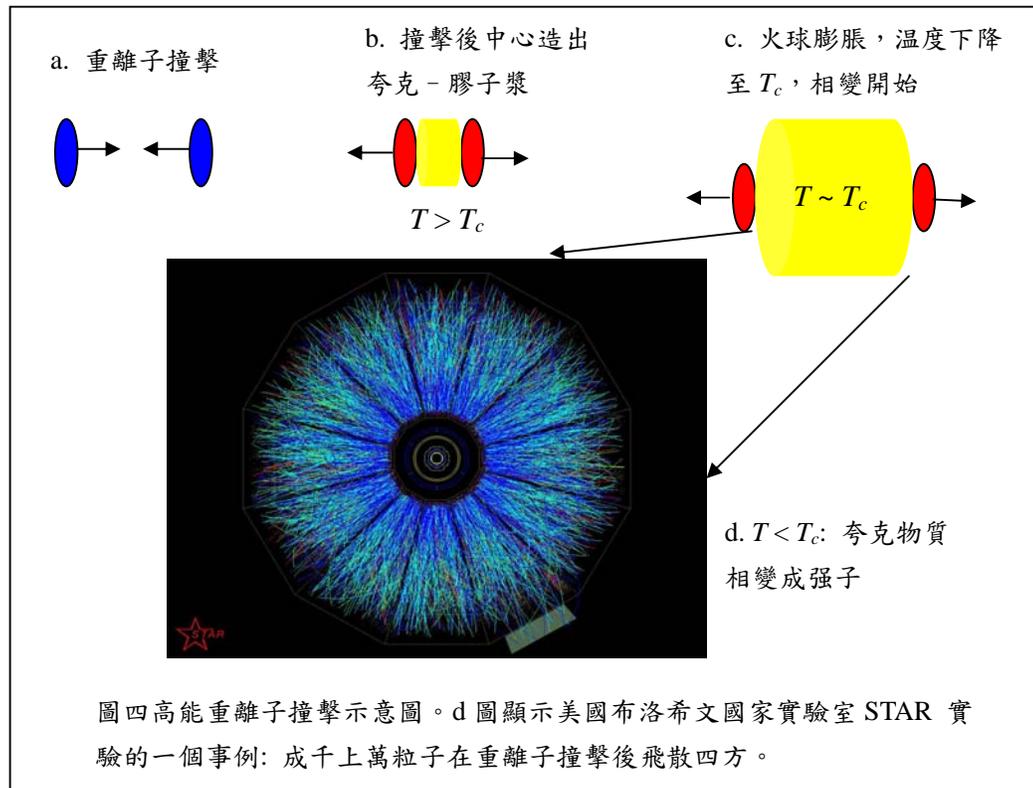
¹⁸ <http://casa.colorado.edu/~ajsh/hawk.html>

¹⁹ <http://aliceinfo.cern.ch/>

²⁰ <http://www.bnl.gov/RHIC/QGP.htm>

²¹ Heinz J. Rothe, 'Lattice Gauge Theories: An Introduction', World Scientific, 2005.

Bang)。這實驗將促進我們對強作用力的理解，特別是關於夸克物質的狀態方程²² (equation of state)及夸克禁閉²³(confinement)等問題，前者則對緻密星²⁴及超新星²⁵研究尤其重要。



末日實驗？

LHC 被部份傳媒渲染成末日實驗，不少人擔心，粒子撞擊製造出黑洞或小型宇宙爆炸，毀滅世界！其實不但理論上這些撞擊絕對安全，事實上地球不斷受宇宙射線撞擊，其中與 LHC 能量相若的平均約每平方米每分鐘就有一粒，能量更高一億倍的亦有，地球仍然絲毫無恙。LHC 的實驗不會帶來末日，反而是開啟基礎物理學新窗戶的鑰匙。

²² Willibald Plessas, Leopold Mathelitsch, 'Lectures on Quark Matter', Springer, 2002.

²³ http://en.wikipedia.org/wiki/Colour_confinement

²⁴ Norman K. Glendenning, 'Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity', Springer, 2000.

²⁵ <http://en.wikipedia.org/wiki/Supernova>