

# 基本粒子的標準模式

賴昭正

我想近代物理已無可否認地偏袒柏拉圖 (Plato)。事實上, 物質的最小單位已不再是我們一般所認為的「東西」, 而是僅能用數學語言才能精確地表達的形式與觀念。

-1932 年海森伯 (W. Heisenberg)

大約在西元前 400 年左右, 古希臘哲學家德謨克利特 (Democritus) 就提出原子論: 世界萬物都是由不可再被分割之看不見的各種大小及形狀之固態原子 (atom) 所組成的。他可以說是人類歷史上的第一位基本粒子物理學家; 他的此一想法終於這在十九世紀初完全被證實了。西元 1811 年達爾頓 (John Dalton) 提出了到現在還是整個化學基礎的「原子論」: 化學反應——產生萬物——只是各種不同原子在空間的重新排列組合而已! 西元 1869 年, 門德雷業夫 (Dimitri Mendeleev) 提出元素週期表後; 這一理論的發展可以說是達到高峯。化學家已不再懷疑原子的實在性; 但儘管證據確鑿, 大部分的物理學家卻遲至二十世紀初才相信原子之存在的!

就在物理學家開始相信原子存在之時, 他們卻也開始覺察到原子並不是不可再被分割。物理學家不但相繼地發現了組成原子之電子、質子、以及中子, 他們也了解到了那時已知的物理根本不適用於了解這些微觀世界的現象! 因此在布郎克 (Max Planck, 註一) 及愛因斯坦 (Albert Einstein, 註二) 先後提出奇怪的觀念後, 物理學家竟然群策群力地於 1920 年代末發展出一套更令人迷惑的「量子力學」 (quantum mechanics)! 1930 年代初, 他們也漸漸清楚重力 (gravity) 及電磁作用力 (electromagnetic force) 不能夠解釋 (1) 為何質子及中子可以聚在一起組成原子核、及 (2) 放射性元素的蛻變, 而意識到了微觀世界裡應該還有兩種新的作用力量存在: 強作用力 (strong force) 及弱作用力 (weak force)。

隨著加速器技術的發展, 物理學家也不斷地繼續發現其它許許多多生命期甚短的新粒子! 在相信上帝不應該會如此笨手笨腳地製造出這麼許多不同的「原子」的信仰下, 經過 40 年的努力, 物理學家終於在 1970 年代真正確定了不可再被分割的古希臘「原子」, 以及瞭解了它們如何相互作用, 建立了基本粒子的標準模型 (standard model)。2012 年 7 月 4 日, 當兩組歐洲核子研究組織 (CERN) 裡的科學家同時宣布在大強子碰撞機 (LHC) 裡偵測到了該模型中尚未被發現的喜格斯子 (higgs) 時, 此一標準模型算是正式被「證實」了!

在「規範對稱與基本粒子」(註三)一文裡, 筆者已介紹了規範對稱及基本粒子的發展史, 因此在本文裡, 筆者將只做個基本粒子的標準模型之敘述性的總結。還有, 在這裡我們也不談非常重要但甚弱的重力場 (gravitational field) 及可能存在的重力子 (graviton) ——雖然在這裡所談到的所有基本粒子都會與它作用。

## 基本粒子

標準模型的數學基礎是綜合了古典場論、特殊相對論、以及量子力學所發展出來之「量子場論」(quantum field theory)。古典場只是一個時、空的函數，但量子場論將它「量化」了：基本粒子只是充滿時空之動力場(dynamic field)的激態而已；因此每種基本粒子都有其自己的量子場。這些場的相互作用之「運動方程式」形式則受制於(需符合)「局部規範對稱」(local gauge symmetry)群  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  [詳見「群論、對稱、與基本粒子」，註四]。

基本粒子如下表所示分成兩大類，自旋(spin)數為1/2之費米子(fermion)及自旋數為整數之波色子(boson)：

	第一代	第二代	第三代	自旋	電荷	質量 (Gev)	弱作用	強作用
費米子	u	c	t	1/2	+2/3	>0	x	x
	d	s	b	1/2	-1/3	>0	x	x
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	1/2	0	0	x	
	e	$\mu$	$\tau$	1/2	-1	>0	x	
玻色子	gluon (黏子, 8種)			1	0	0		x
	$W^\pm$			1	$\pm 1$	80.4	x	
	Z			1	0	91.2	x	
	$\gamma$ (光子)			1	0	0		
	H (希格斯子)			0	0	126	x	x

費米子需符合費米-迪拉克統計(Fermi-Dirac statistics)，不許兩個或兩個以上的粒子在同一量子狀態下，為構成不同化學元素的重要條件。波色子則需符合波色-愛因斯坦統計(Bose-Einstein statistics)，比較喜歡群聚(註五)，為雷射及日常生活中之電磁波出現的原因。除了希格斯子(higgs boson, H)外，其它波色子都是因「局部規範對稱」之要求而「出現」，因此稱之為「規範波色子」(gauge boson)，為基本粒子之間相互作用的媒介。

費米子之間的相互作用可依其強度分成具  $SU(3)$  對稱之強作用及具  $SU(2) \times U(1)$  對稱之電弱作用(electroweak interaction)兩種。雖然所有的費米子均能感到電弱作用；但只有最上面兩排的夸克(u, d, c, s, t, b)可以感受到強作用力。夸克之所以可感受到強作用力是因為每個均帶有稱為藍(B)、紅(R)、或綠(G)之「強作用力電荷」的關係。因此嚴格來說，夸克不應該只有六種，而是18種；但因為  $SU(3)$  對稱之關係，不同顏色的夸克[如紅、藍、綠之u]應具完全同樣的性質，在實驗室中是無法分辨的——因此實在沒有另外給予名字的必要。傳達強作用力的「規範波色子」稱為黏子(gluon)：共有八種，因本身也帶強作用力電荷(同時帶顏色及反顏色，註六)，故也感受到強作用力。

除了希格斯子外，所有表中的其它基本粒子均因「局部規範對稱」之要求而不能具有質量！此一與實驗結果不符的要求，阻擋了「局部規範對稱」理論的發展長達十二年之久。不只如此，因為SU(2)對稱之關係，第一行與第二行之上、下夸克（u及d等）應具同樣的性質，在實驗室中應是無法分辨的；同樣地，第三行與第四行之上、下輕子（lepton,  $\nu_e$ 及e等）也應具同樣的性質，在實驗室中也應是無法分辨的！既然也像黏子顏色一樣在實驗室中沒辦法分辨，為什麼我們在這裡卻給它們不同的名字呢？原來是它們的SU(2)×U(1)對稱在宇宙的演進中被破壞了——因此在實驗室中可以分辨了！

## 自發對稱性破壞

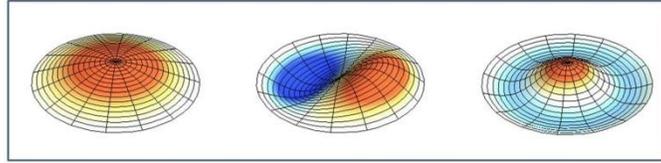
「自發對稱性破壞」在基本粒子裡是一個非常重要的觀念，因此筆者在此除了重覆一段《量子的故事》裡的描述外，將進一步地用一數學例子來闡釋此一觀念。

假設我們是生活在一個非常巨大的磁鐵裡，磁鐵的N極指向北方。磁鐵是由許多小磁鐵整齊排列而造成的，但決定此排列的作用力事實上與方向無關，磁鐵的N極沒什麼理由一定要指向北方，它照樣可以指向東方。但它一旦指向了北方，則對住在裡面的我們而言，空間方向的對稱性（均勻性）便被破壞了：北方對我們而言是很特別的。因為該磁鐵的極性影響了我們的所有實驗，而我們又沒辦法去改變其極性的方向，因此如果有外太空人告訴我們說：『自然界的物理定律是與方向無關的』，我們是很難相信的。小磁鐵間的作用力是不具方向性的，但它的「狀態」破壞了空間方向的對稱性。例如當溫度高得使小磁鐵的動能足以克服其與周遭的作用力時，磁鐵便不再具有極性，空間方向的對稱性便可顯示出來。當溫度下降，而致小磁鐵整齊排列時，此一對稱性便被隱住（破壞）了。

如果你想進一步了解，且不怕看到數學方程式，那圓形鼓面的震動將是一個更具體的例子。圓形鼓面在(x, y)平面上具有圓形的對稱性，因此使用極坐標(r,  $\theta$ )來表示將較方便。鼓面受敲打後的上、下震動震幅H(r,  $\theta$ , t)的「運動方程式」可用牛頓力學導出：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = u^2 \left( \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \theta^2} \right) \quad r = 0 \text{ 到 } R; \theta = 0 \text{ 到 } 2\pi$$

式中u為波的傳播速度，t為時間，R為圓鼓的半徑。H(r,  $\theta$ , t)為一時、空函數，在物理上稱為「場」。因為除了微分部份外，式中不含 $\theta$ ，因此該運動方程式具有垂直軸旋轉的對稱[用 $\theta \rightarrow \theta + c$  (任一常數)代入，方程式不變；所有的常數{c}構成一個數學上的「群」，註四]。下面是此運動方程式許多解中的三個解之圖形：

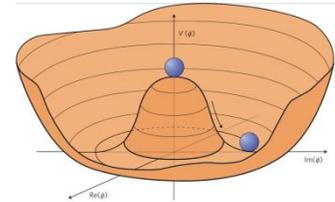


By Daniel A. Russel, The Pennsylvania State University (Creative Commons)

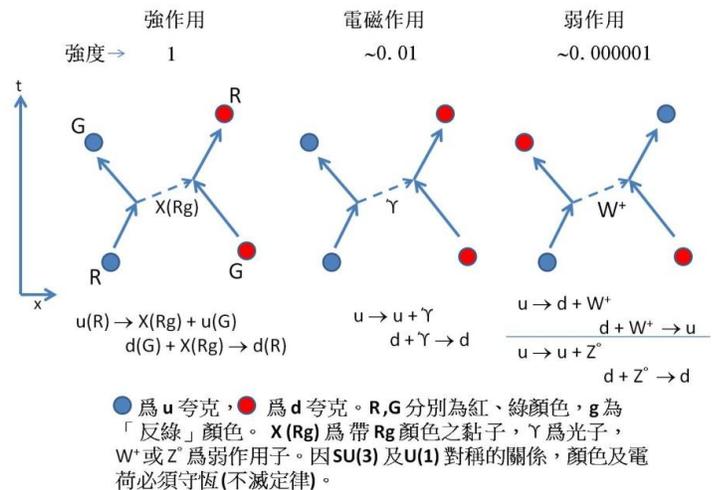
如果你在鼓面上一點輕輕一敲，鼓面的震動一般都會是相當複雜的（但可用所有可能的解來表示）；但如果你「敲對」了，你將可能只激發了上面的一種震動形態而已！上圖中的左右兩個震動形態均保持著原來之垂直軸旋轉的對稱性；但中間的一個則不再具有原來之垂直軸旋轉的對稱，造成了所謂的「自發對稱性破壞」：從這一個特別解裡，我們看不出原來方程式所具有的對稱；此一特別解破壞（隱藏）了原來之對稱。

### 希格斯子破壞電弱作用對稱

在宇宙出現時，「希格斯場」（Higgs field）即像其它場一樣充滿了宇宙；但它卻不像其他場一樣，其真空平均值（vacuum expectation value）不為零，其位能形狀則像酒瓶瓶底：中間內凸、（能量）較周邊為高。此一希格斯場具有以酒瓶中心為軸旋轉之對稱性（如右圖）；因此在宇宙初現、溫度（能量）還是非常非常高之際，沒有任何基本粒子在意這一個不平的酒瓶瓶底。但隨著宇宙溫度的下降，希格斯場的能量也漸漸下降，最後終於像本無磁性之磁鐵需要選擇一個方向磁化下來一樣，掉到周邊之較低的能量溝內的某一點（自發對稱性破壞）；因溝內那一點的位能不為零，因此破壞（隱藏）了原來之電弱作用的  $SU(2) \times U(1)$  對稱性，將它分家成了兩種我們現在所知道的電磁作用（electromagnetic interaction）及弱作用（見下圖）。



電弱作用破壞前之四個  $SU(2) \times U(1)$  「規範波色子」—— $B$ 、 $W^1$ 、 $W^2$  及  $W^3$ ——因與此一希格斯場之作用而重新組合成帶電之  $W^+$  與  $W^-$ ，以及不帶電之  $Z^0$  與光子 ( $\gamma$ )。  $W^+$ 、 $W^-$  及  $Z^0$  成為弱作用中的規範波色子 [嚴格來說，弱作用不具  $SU(2)$  之局部規範對稱]；新出現的光子是唯一還保持零質量的規範波色子：正是具  $U(1)$  局部規範對稱之量子電動力學（quantum electrodynamics, QED）中的規範波色子 [但不是原來之  $SU(2) \times U(1)$  中的  $U(1)$ ]。事實上除了微中子  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、及  $\nu_\tau$  外，其它能感受到弱作用的所有基本粒子（包括  $W^+$ 、 $W^-$ 、及  $Z^0$  本身）也均因與希格斯場之作用而取得了質量（見表）！因為黏子不參與弱作用，故還可以保持不具質量的身材；可是這下子問題又來了：依照特殊相對論，一個質量為零的粒子應只能以光速運動，所以黏子應該像光子一樣，以光



速傳遞強作用力到遠方才對，怎麼強作用力也像弱作用力一樣是短距的呢？

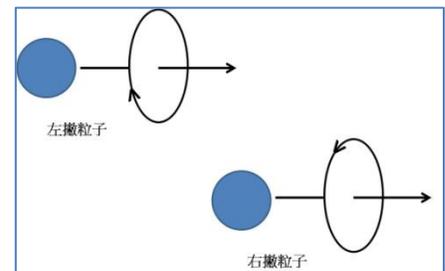
## 漸近自由

因為強作用力的規範波色子（黏子）本身也參與強作用的關係，使得強作用力具有一種非常不尋常的「漸近自由」（asymptotic freedom）的性質：當兩個帶顏色之粒子漸漸接近時，它們之間的作用力越來越小！反之，當它們漸漸遠離時，它們之間的作用力將越來越大，最後將大到有足夠的能量產生新的一對帶顏色之粒子。換言之，帶顏色之粒子不可能單獨存在，它們將永遠地被綁在一起——稱為「幽禁」（confinement）。正是這一個原因，使得黏子不能（不需）像光子一樣傳遞長距離的作用力！事實上，量子顏色動力學（quantum chromodynamics, QCD）裡還要求「穩定」的粒子均是白色的：說明了為什麼實驗室中所能偵測到的粒子均是由三個夸克（紅+藍+綠=白色）、或兩個夸克（顏色+反顏色=白色）組成的。

電磁作用力的規範波色子（光子）本身則不參與電磁作用，因此不具有「漸近自由」的性質：電磁作用力隨作用距離之增加而降低。此一特性事實上也是因為規範對稱的關係：U(1) 在群論（group theory）上有一與 SU(2) 或 SU(3) 非常不同的性質：前者的對稱運作與先後次序無關（註四）。事實上正是 U(1) 之此一特性使得透過電磁作用之費米子（如電子）可以具有質量。所以我們可以說物理學家很幸運，不需尋找讓電子具質量的原因，很早就能成功地發展出具局部規範對稱之量子電動力學，成為後來發展強、弱作用之局部規範對稱理論的藍圖！誰說成功不需要靠運氣？

## 手徵

事實上除了 SU(2)×U(1) 要求費米子不能具質量外，弱作用破壞了鏡像對稱（註七）的這一實驗的結果，也要求費米子不應具質量！依照特殊相對論，一個質量為零的粒子應只能以光速運動，因此如果它具有自旋，則便應該有兩種可能的手徵（chirality）：自旋與運動方向相同或者相反（如右圖）。但具質量之粒子不能以光速運動，因此當觀察者的速度由比它慢變成比它更快時，手徵將由左撇改成右撇（或由右撇改成左撇），故具質量之粒子沒有固定的手徵；換言之，手徵不是具質量之粒子的性質。因此如果弱作用只能與左撇（left handed）費米子作用，顯然費米子也不應具質量！

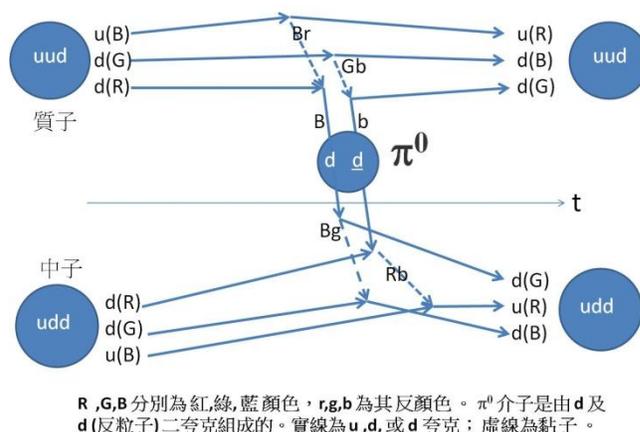


與希格斯場作用的結果，費米子不但取得了質量，也透過希格斯子使左撇及右撇費米子混成一個我們在實驗室中所觀察到的不具手徵之費米子：同時具有左撇及右撇的量子態。因左撇及右撇費米子具有同樣的自旋及電荷，故依自旋及電荷「不滅定律」，做媒婆之希格斯子的自旋必須為零且不帶電：正是實驗所發現的結果。

這許多因希格斯子而取得了質量的費米子當中，很奇怪的卻不包括微中子（註八）；更奇怪的是：微中子如果沒有取得質量，左撇及右撇應該都存在才對，但物理學家卻從未在宇宙或實驗室中發現過右撇的微中子！因此在標準模型裡認為右撇的微中子根本就不存在。

## 殘留強作用力

我們前面提過「穩定」的粒子均必須是白色的，因此質子是由分別帶紅藍綠之三個夸克  $uud$  組成的，而中子則是由分別帶紅藍綠之三個夸克  $udd$  組成的。可是它們一旦變成白色，依量子顏色動力學，它們之間便應該沒有強作用力了，那為何質子及中子可以聚在一起組成原子核呢？我們不是想了解此一原因才發展出強作用力理論嗎？



事實上我們早就在化學上碰到同樣的問題：氫原子是由帶正電的質子及帶負電的電子所組成的，因此是不帶電的，但兩個氫原子還是可以透過電磁作用力而結合成氫分子的。我們知道其原因是因為兩個氫原子核「合用」了它們外圍的電子，形成化學鍵所致。同樣地，質子或中子之間的作用也是透過帶有顏色之成份的 u 或 d 夸克來達成的：交換（合用）由一夸克及一反夸克組成之介子（meson），如不帶電之  $\pi^0$ （見上圖，註九）。正像化學鍵比直接的電磁作用弱一樣，這稱為殘留強作用力（residual strong force）、核子強作用力（nuclear strong force）、或核子力（nuclear force）雖然比直接的強作用力弱得多，但是還是足夠克服質子間之靜電排斥力，將質子及中子結合成穩定的原子核（但不像強作用力，它的強度隨粒子間距離的增加而急速減弱，所以質子或中子可以是被分離、單獨存在的）！

我們說希格斯子使許多基本粒子得到質量，但是這些質量卻不是我們周遭物體質量的主要來源：例如質子是由  $uud$  三個夸克組成的，但那三個夸克的總質量大約只有實驗室中量得之質子質量的百分之一而已！質子或中子之其它質量都在使那三個夸克在一起的束縛能量裡（ $m=E/c^2$ ）。

## 結論

物理學家於 1897 年發現了不可再被分割之電子；經過 100 多年的努力，終於在 2012 年發現了理論上必須存在的最後一種不可再被分割之喜格斯子，奠定了瞭解宇宙萬物組成與運行之基本粒子的標準模式理論。

現在的基本粒子雖然不是像當初古希臘哲學家所追求的只有一種，但是卻比化學上之基本粒子——化學元素——少得多。如果不算反粒子及顏色（註十），物理學上只有 12 種基本費米子、以及 6 種波色子而已！就日常生活以及化學來看，我們所常「接觸到」

的基本粒子事實上只有四種而已：u 夸克、d 夸克、電子、及光子！離當初所追求的「只有一種」也算是不遠了！儘管如此，化學上的原子似乎還可以想像，讓人有「實際存在」（實在）的感覺；但現在物理學上的基本粒子則似乎是有點「玄」了！

\*\*\*\*\* 註 \*\*\*\*\*

- (註一) 「量子力學的開山祖師—布郎克」，《科學月刊》，1982 年 4 月號；《我愛科學》，第 51 頁。
- (註二) 「太陽能與光電效應」，《科學月刊》，2013 年 4 月號；《我愛科學》，第 155 頁。
- (註三) 「規範對稱與基本粒子」，《科學月刊》，2014 年 11 月號；《我愛科學》，第 186 頁。
- (註四) 「群論、對稱、與基本粒子」，《科學月刊》，2018 年 9 月或 10 月號。
- (註五) 這命名正好與當事人相反：玻色較害羞內向，費米則非常合群外向。
- (註六) 黏子之所以有八種，乃是因所帶之顏色不同的關係。黏子同時有顏色 (R, G, B) 及反顏色 (r, g, b)，因此理論上應該有九種才對，為什麼只有八種呢？那是因為代表 SU(3) 之  $3 \times 3$  矩陣只有八個獨立變數（見註四）；就顏色的組合上來講，(Rr+Gg+Bb) 組合不受 SU(3) 對稱轉換的影響，不能作為傳遞強作用的規範玻色子；(9 個自由度 - 1 個條件) 只剩下 8 個在 SU(3) 對稱轉換下「相同」的黏子。
- (註七) 沒有任何物理學家知道為什麼：事實上當他們發現自然界竟然是這樣時，他們也非常感到意外；詳見「對稱與物理」，《科學月刊》，2010 年 3 月號；《我愛科學》，第 178 頁。事實上不止微觀世界這樣，巨觀世界裡也是充滿著鏡像不對稱的現象。詳見「[左旋還是右旋？化學對稱跟你我的身體有關！](#)」，1015 年 9 月 25 日泛科學；「對稱與化學」，《我愛科學》，第 193 頁。
- (註八) 在物理及天文學家發現「微中子擺盪」(neutrino oscillation) 之現象後，不少物理學家已認為微中子應該具有些微質量。詳見「微中子的故事」，《科學月刊》，1982 年 3 月號；《我愛科學》，第 105 頁。
- (註九) 日本物理學家湯川秀樹 1935 年所提出的理論。湯川秀樹 26 就當了大阪大學的助理教授，29 歲時提出了這被忽略達兩年之久——但對以後基本粒子及其作用力研究影響非常大——的理論，獲 1949 年諾貝爾物理獎。原子核內的作用力事實上因多體（至少 6 夸克）、自旋、及角動量等關係，比這裡所形容的複雜得多。
- (註十) 除了  $W^+$  是  $W^-$  反粒子外，其它波色子沒有反粒子。

\*\*\*\*\* 參考資料 \*\*\*\*\*

- (1) 《量子的故事》，新竹市凡異出版社（1982 年；2005 年第二版）。
- (2) 《[我愛科學](#)》，台北市華騰文化有限公司出版（2017 年 12 月）。本書收集了筆者自 1970 年元月到 2017 年八月間在科學月刊及其他雜誌發表過的科普文章。