

對稱與物理

對稱是常在幾何圖形上見到的特徵，其在微觀的粒子層級影響了許多物理現象的存在與否，並且關係到現有宇宙的存在。

賴昭正

愛美是人類的天性。雖然不是所有的美都具備「對稱」的特徵，但重複的部位如果沒有對稱，便很難構成美。愛美既是人類的天性，物理學家當然也不例外，但什麼是物理學家眼中的對稱？既然物理學家也愛美，為什麼 2008 年諾貝爾物理獎要頒給三位倡導破壞物理學上對稱的物理學家呢？

物理是門在看似雜亂無章的宇宙中尋找次序的科學，所謂次序，指的是「不變的定律」。雖然如此，但物理學家卻是到了二十世紀中，才開始真正注意到這「不變」的意義，並開始以數學家早就發展出來的群論（group theory），來研究及幫助他們尋找物理定律。

我們一般所謂的「左右對稱」(symmetry)，是指左邊的圖案，利用中間的鏡子產生的鏡像，完全與右邊的圖案一樣。但所謂物理的對稱，處理的不單純是圖案的對稱。那麼在物理中所謂的「左右對稱」指的是什麼呢？在物理的力學（mechanics）

裡，定律均是透過空間坐標（ x, y, z ）及時間 t 來表示。放一面鏡子在 xy 平面，其作用是改變 z 軸的方向， z 軸方向一改，定律中的 z 值當然改變成 $-z$ 了，與圖案原理一樣。如果物理定律不因 z 轉換為 $-z$ 而變，我們便說此定律「左右對稱」，即定律（ x, y, z, t ）= 定律（ $x, y, -z, t$ ）。

例如牛頓的第二定律便具有左右對稱的性質：假設 F 原來是在 z 軸方向，當坐標 z 軸改變方向時，原來的力 F 及加速度 a 也將同時改變方向，因此我們還是能得到 $F = ma$ 的定律，只是呈現為 $-F = m(-a)$ 。從以上的推導，我們可以說牛頓的第二運動定律在作左右變換（transformation）後是「不變」的！所以「不變」及「對稱」在物理學上代表相同的意義。

相信許多讀者已經注意到了，牛頓第二定律不只具有左右對稱性，它在同時反射 x 、 y 及 z 軸時也是不變的。我們雖然製造不出這樣的「鏡子」——在物理上稱為「鏡像」或「宇稱」

（parity，簡稱 P ）鏡，但在數學的運算上倒是輕而易舉，只要將定律中的（ x, y, z ）更改成（ $-x, -y, -z$ ）即可。事實上不只牛頓第二運動定律具有鏡像對稱，所有已知的力學定律，例如愛因斯坦的相對論、馬克士威的電磁方程式及量子力學等，均具有鏡像對稱，所以說物理學家也是愛美的，而且比一般人愛得更厲害，因為他們的鏡子可以同時反射三個方向。

力學定律中的對稱

除了具有鏡像對稱外，力學定律還具有其他對稱性嗎〔註〕？當然有，例如將三軸以原點為中心旋轉、坐標位移及時間位移等。因後面兩種對稱既易懂又有趣，因此就來談談它們吧。坐標（平行）位移事實上等於是移動原點（origin），例如本來是以台北為中心的坐標體系，我們可以將它移到以北京為中心的體系，當然，在台北跟北京做出來的實驗結果，雖然其（ x, y, z ）值會因坐標體不同而異，但

所得之物理定律應是不變的。

同樣地，我們也可以將時間位移到明天，物理實驗所得的結果應與今日所得的相同，所以力學定律也應具有時間位移的對稱性。可是未來與過去這「時間的鏡像」呢？力學定律還是具有稱為時間（time，簡稱為 T）的鏡像對稱。您可能會懷疑，過去與未來怎麼會是對稱的？可是如果有人將兩球相撞拍攝成影片，然後倒著放映，我們確實看不出來那是「倒映」的（圖一 A）。牛頓力學的確是具有 T 之對稱性，同樣地，馬克士威及量子力學方程式也是具有過去與未來的對稱性，解過電磁波方程式的讀者大概還記得它有兩個解：一為向外擴散的波，一為向內收斂的波。後者因與「現實」不符，所以我們不採用。

熱力學中的不對稱

物理學中確實有一門具「方向性」的領域，那便是熱力學。熱力學第二定律指出，熱只能主動地由高溫處往低溫處流；將一塊冰塊丟入一杯水中，冰將慢慢融解變成水。如果有人將後者過程拍攝成電影，然後倒映，相信所有的讀者都能立即指出那是倒映，因為一杯水中不可能突然只有一處慢慢自動結成冰塊（圖一 B）！時間是有方向性的，含

有冰塊的水杯是過去，沒有冰塊的水杯是未來，它們不具對稱，那麼是什麼地方出了問題呢？

熱力學的定律是人類由實際經驗歸納出來的，它沒有力學的基礎，也因此它不但毫髮無傷地度過二十世紀的兩大物理革命——相對論及量子力學，它甚至可以說是開啟量子力學的功臣。十九世紀中，熱力學才開始有了力學的基礎（現在稱為統計熱力學），那時雖然還沒有原子或分子存在的實驗證據，但許多物理學家已開始用分子及牛頓力學來解釋熱力學了。

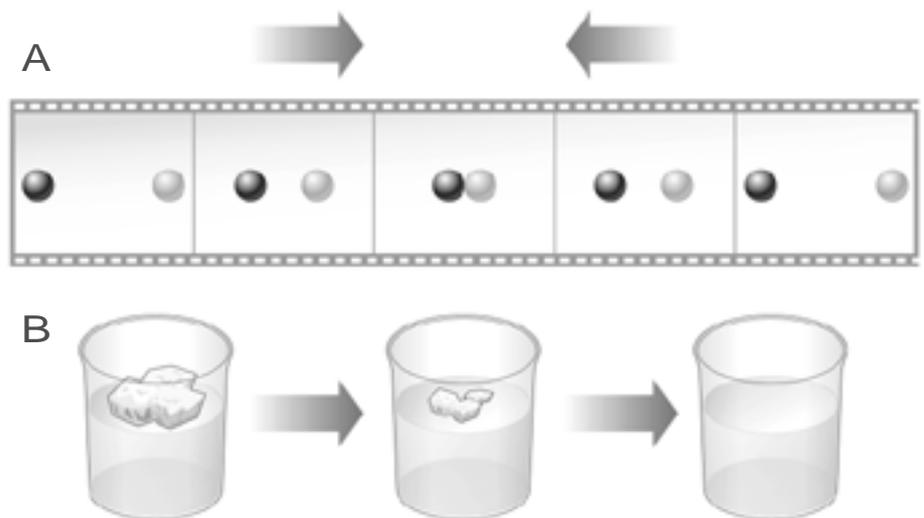
其中最成功者應首推波茲曼（Boltzmann），他於 1872 年提出的 H 定理，成功地解釋了熱力學體系具時間不對稱之行為的機制，被視為以原子觀來證明熱力學第二定律的偉大物理成就。可是一個具有時間對稱性的牛頓力學的推導，怎能產生一個不具時間對稱性的結果呢？因此 H 定理

提出後便立即受到攻擊。關於要解釋現實上時間不對稱的由來，已成了探討宇宙起源的宇宙論所必須回答的問題，離本文主題太遠，在此便不再詳述。

微觀世界對稱否？

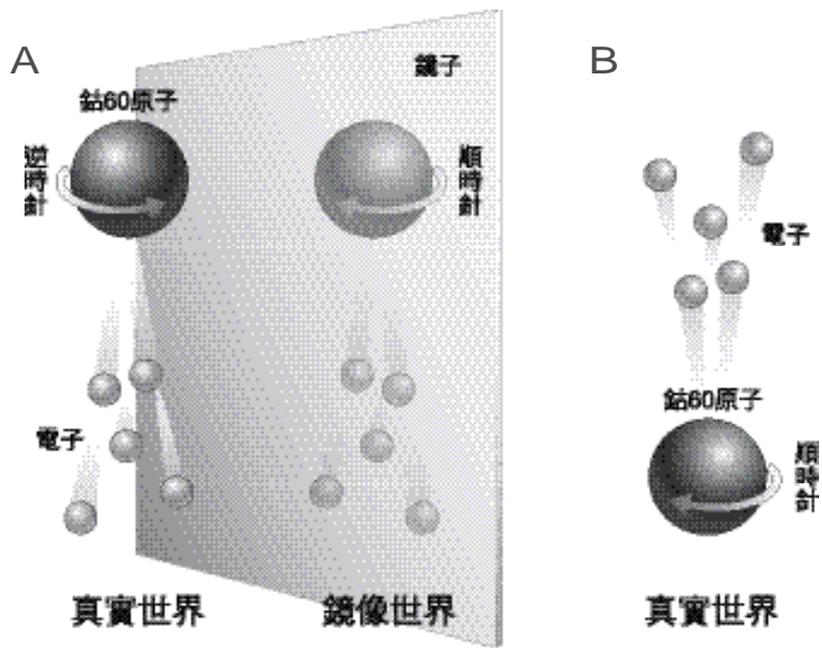
物理學家在二十世紀前尚無反粒子、反物質的觀念，因此牛頓力學裡當然沒有所謂的電荷（charge，簡稱為 C）對稱性的問題。電荷對稱性表示物理定律不因將粒子改成反粒子而不同，粒子與反粒子的質量是一樣的，因此牛頓力學和相對論一樣，應具有 C 對稱性。馬克士威的電磁理論早就適用於正、負電荷，因此也是具有電荷對稱性的，所以我們可以說力學定律是具有 C、P 及 T 對稱性。

人類是經驗的動物，碰到一個新的問題時，我們首先嘗試的當然是用已知且成功的經驗來解決它。不幸的是，當物理學家將



圖一：(A) 力學定律具有稱為 T 的時間鏡像對稱，例如兩球相撞的影片倒著放與正常放映一樣；(B) 但熱力學第二定律是有「方向性」的，例如含有冰塊的水杯是過去，沒有冰塊的水杯是未來，它們不具對稱性。

非常成功的牛頓力學應用到基本粒子的微觀世界時，卻碰到了許許多多與經驗相悖的問題，導致了量子力學的誕生。量子力學的基本觀念可以說完全與我們的日常生活經驗相左，儘管如此，物理學家還是深信 C、P 及 T 這種基本的對稱，在微觀世界裡應該還是適用。因此當楊振寧與李政道在 1956 年首次提出弱作用可能不具有 P 的對稱性（宇稱不守恆），並立即被實驗證實後，諾貝爾獎委員會便「迫不及待」地於次年將物理獎頒發給這兩位大膽的物理學家。楊振寧與李政道不是實驗家，因此他們將問題帶到在美國哥倫比亞大學的吳健雄實驗室。吳健雄設計了一個將鈷 60 放進磁場以控制其自旋方向的實驗，來觀察鈷 60 衰變所放



圖二：(A)鈷原子在自旋方向呈逆時鐘方向時，其衰變的電子多往下釋出。如果宇稱性守恆，則其鏡像反射中的鈷 60 在自旋方向呈順時鐘方向時，衰變的粒子也應往下釋出。(B)然而在現實情況下，自旋方向為順時鐘的鈷 60 卻無法達到鏡像中的現象，電子只會往上方釋出。

出的電子在上下兩方射出的數量，結果發現無法讓射出的電子在方向上產生鏡像，成功地證明宇稱不守恆（圖二）。

鈷 60 本身具有放射性，它

會衰變成鎳並在衰變過程中釋放電子。將鈷 60 放進磁場中，並使鈷原子的自旋方向作相同排列，然後觀察釋放出的電子往上下兩方射出的數量，就會發現當

物質與反物質的不平衡

我們知道我們所生存的宇宙幾乎全為物質所覆蓋著，反物質除了在人為的加速器裡產生，自然界中幾乎完全不存在。「理論」上，或基於美學，大部分的科學均認為這是違反常理的。宇宙出現後，那些反物質全跑到那裡去了呢？1965 年時，蘇聯的物理學家沙卡洛夫（Andrei Sakharov）提出因 CP 鏡破碎而造成微觀中的物質與反物質之不平衡，可能正是造成巨觀中僅有物質存在的理由。1950 年代時，我們即已了解到 K^0 粒子的弱作用脫變可破壞 CP 的對稱性。但那足夠用來解釋宇宙中物質與反物質的不平衡分配嗎？

小林及益川預測必須有 6 種夸克的存在才能破壞 CP 的對稱性。在基本粒子的物理裡，夸克不但可以透過弱作用蛻變（像前面所提之 K^0 粒子），它們也可參加強作用（strong interaction）。弱作用的 CP 違反程度很難精良地計算，因而物理學家很自然地轉而向強作用方面探討。除了想找到更強烈的 CP 破缺外，他們也希望順便證實量子色動力學（quantum chromodynamics, QCD 理論）。

1981 年，中性的 B 介子（B-meson, B^0 ）被發現後，美國洛克斐勒大學（Rockefeller

鈷原子自旋方向是逆時針時，電子向下射出的數量會較多。若透過鏡子觀察，鏡像中的鈷原子其自旋方向成了順時針，多數電子仍然應維持向下射出（圖二A）。可是問題來了，在自然界並不存在這樣的鈷原子！因為當把鈷原子的自旋方向排列成順時針時，多數電子是向上射出的（圖二B），也就是說不可能在現實中產生鏡像世界裡順時針自旋，而電子多往下射出的鈷60。這個結果說明了原子的衰變（屬弱作用）不一定具有P的對稱性！

宇稱性的破壞對深信自然界之美的許多物理學家而言，確實是一個相當大的打擊。不過他們立即指出，如果用一面更神奇的鏡子來看，物理定律或許還有可能具鏡像對稱。此一更神奇的鏡

子，物理學家稱之為「CP」鏡，即同時改變宇稱及電荷的鏡子；不幸地，在1964年此一「幻想」也成了泡沫，因此諾貝爾物理獎又不得不於1980年頒發給戳破此泡沫的菲奇（Fitch）及克洛寧（Cronin）。讀者當然也猜測得到物理學家的下一個希望或幻想是什麼了！即在綜合三項對稱性的「CPT」魔鏡下，物理定律不變，如果此一幻想是事實，則CP的破壞即代表時間對稱的破壞（負負得正）。難道時間的流逝真的不僅僅是人類心理的幻想而已嗎？宇宙本來就有過去與未來之分嗎？

打破對稱之鏡

1973年時，物理學家只知道4種夸克的存在。可是有兩位

日本物理學家小林（Kobayashi）及益川（Masukawa），卻無法從4種夸克的存在下，產生破壞CP鏡的理論，他們發現至少需要6種夸克的存在，才可能打破CP神鏡。他們大膽預測的兩種新夸克終於在1995年及1997年先後被發現，因此共同獲得了2008年的諾貝爾物理獎。

另一位2008年諾貝爾物理獎得主是芝加哥大學的南部（Nambu）。南部是第一個將超導體「自發對稱性破壞」介紹並發展到基本粒子的物理學家。「自發對稱性破壞」現在已成了探討基本粒子的主要工具，它成功地被萬伯格（Weinberg）及薩拉姆（Salam）用來解釋原本是一家的「電弱作用」（electroweak interaction），如何分開成為兩

University) 的卡特 (Ashton Carter) 及仙達 (Tony Sanda) 即預測從 B^0 的各種不同脫變速率，可以用來計算 CP 鏡被破壞的程度。 B^0 介子與 K^0 介子相似，但是由反下夸克（-d 夸克）及一較重的底夸克（b 夸克）所組成的。現在有兩個實驗室在做此方面的研究：美國史丹佛線性加速



（圖片來源：維基百科）

利用大強子對撞機可望找出 CP 對稱破缺的源由。

中心（SLAC）的巴伯（Babar）實驗組，及日本高能加速器研究機構（KEK）的貝爾（Belle）實驗組。到現在為止，他們的結果比起以前的任何實驗，更精確地證明了 QCD 中的 CP 破缺預測。不幸的是，他們所量得的破缺程度實在還不足以用來說明宇宙中的物質及反物質的極端不平衡——與實際狀況仍差了上萬倍！因此一定還有其他的 CP 破缺源頭未在實驗中被發現。歐洲核子研究組織的大強子對撞機（Large Hadron Collider, LHC）也於2008年完工起便加入尋找 CP 破缺的行列。

種我們現在所知道的弱作用 (weak interaction) 及電磁作用 (electromagnetic interaction)。

小林及益川是因基本理論之需要，預測必須有 6 種夸克存在才可能破壞 CP 神鏡，他們並未提出破壞 CP 神鏡的機制。

南部則是提出了「空間」本來無方向性，但它可能被破壞而

具方向性。此處的「空間」並不一定是我們天天所接觸到的實體空間，它可以是一個抽象的物理空間。候唯恕教授曾舉過一個例子（參閱《科學月刊》2008 年 12 月號），說明南部的想法。筆者在這裡就用《量子的故事》裡的一段，再來闡釋一下此一基本粒子的重要觀念，希望能加深讀者

的了解：

「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

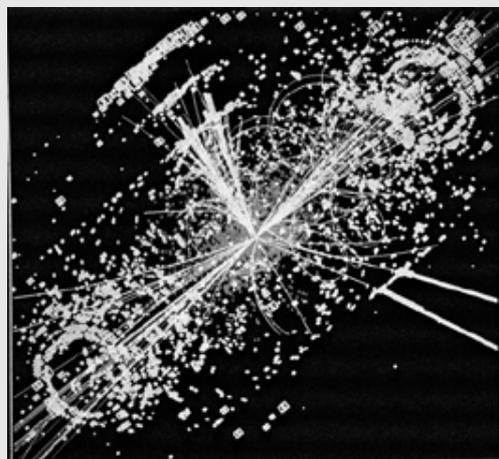
物質質量的來源

現在普遍為物理學家接受的基本粒子理論稱為「標準模式」(standard model)，它幾乎能解釋所有已知的基本粒子現象，但標準模式是否已非常完美了呢？當然不是！其中一個很明顯的缺陷是它無法預測基本粒子之質量，它必須靠實驗來提供這些數據。在標準模式裡，事實上還有一個解釋這些基本粒子如何獲得質量的希格斯機制(Higgs mechanism)。

內文中提到萬伯格及薩拉姆成功地用「自發性對稱破壞」來解釋本是一家的電弱作用，如何分家成兩種我們現在所知的弱作用及電磁作用。在電弱作用中做為媒婆的 4 種基本粒子，本來均是沒有質量的；但其中的 3 種卻因「自發性對稱破壞」而取得了質量！

事實上在標準模式裡，這也正是其他基本粒子取得質量的方法。在 1960 年代時，英國的物理學家希格斯 (Peter Higgs) 曾提出：在對稱未被破壞前，所有的基本粒子都不具有質量，而宇宙也為一希格斯場(Higgs field)所充滿，就像在相對論出現之前所認為的「以太充滿了宇宙」一樣；當對稱被破壞時，這些基本粒子即與希格斯場作用而取得質量。希格斯場的傳遞粒子被稱為希格斯玻色子(Higgs boson)，其符號為 H^0 ，它是在對稱未被破壞前唯一具有質量的基本粒子。當初因未能預測出任何可被偵測的新現象，希格斯的第一篇此類論文竟被有名的物理期刊 *Physics Letters* 所拒絕。他只好在論文結尾前加註他的理論意謂著有一種或多種具有質量的新粒子存在，另投一家有名的物理期刊 *Physical Review Letters* 才被接收。

物理學家預測希格斯玻色子質量為 117GeV ，但也可能高達 251GeV ——這正是大約近代加速器所能達到的範圍。雖然有些實驗結果可用希格斯玻色子的產生來解釋，但尚未有定論。或許前面所提到 LHC 的完成，能讓科學家看到標準模式裡唯一尚未出現的 H^0 粒子？此一粒子給予了所有其他基本粒子質量，所以才有今日的你我，因此某些物理學家又稱此一粒子為「上帝粒子」(God particle)。



「上帝粒子」希格斯玻色子衰變的模擬圖。LHC 觀測希格斯玻色子的實驗預期可解釋宇宙萬物的質量來由。

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之作用時，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。」

對稱破壞之必要

在巨觀世界，物理像人類日常生活中的美學，一樣具有對稱性；可是沒想到在微觀的原子世界裡，這些對稱的美竟然被破壞了！相信物理學家們均很傷心喪失了這些微觀世界中的對稱性。

可幸的是，這些對稱的破壞可能正是現今宇宙與人類存在所必須的因素：若對稱未被破壞，或許根本不會有今日的宇宙跟你我！

註：筆者一直強調力學是因為：（一）我們只要知道所有的力學定律及現狀，我們原則上就可預測未來及過去；（二）物理學中還有一門熱力學，它是有「方向性」的。🌀

參考資料

- 1 賴昭正，《量子的故事》，第二版，新竹市凡異出版社，200年。
- 2 賴昭正，熱力學與能源利用，《科學月刊》147期，198年。
- 3 賴昭正譯，《近代宇宙觀中的空間與時間》，新竹市國興出版社，198年。
- 4 賴昭正，經驗的困境，《科學月刊》115期，1979年。
- 5 侯維恕，微觀世界的對稱性破壞，《科學月刊》468期，200年。

賴昭正：
美國芝加哥大學化學博士