



2008 年諾貝爾物理獎介紹 -基本粒子「對稱性破壞」

張嘉泓

台灣師範大學 物理系

今年諾貝爾物理獎是由南部陽一郎 (Yoichiro Nambu)、小林誠 (Makoto Kobayashi) 和益川敏英 (Toshihide Maskawa) 三位先生共同獲得。這三位先生的貢獻，都是在基本粒子物理理論，時間上相距近十五年。南部年長約一個世代，出生於日本，戰後到美國後便留在當地，而小林與益川嶄露頭角時，日本的研究能力已漸漸成熟，所以他們大部分的生涯就以日本為主。南部在圈內一直以獨樹一格的洞察與前瞻性的眼光著稱，有人形容，粒子物理的方向常常被南部的文章預測出來，只是往往都像謎一樣藏在小字的註腳中。還有一位較南部年輕的知名物理學家還開玩笑說：他曾想如果能和南部談一談，知道南部的點子，他就可以比其他人領先十年，於是他就與南部討論了很久，可是等他弄清楚南部的意思是甚麼，十年已經過去了。

就是這樣，這一位在主流邊緣的魔術師，對西方主流來說，是一個難解的謎。

今年的得獎工作的主題，或許可以歸納為夸克與對稱兩個概念。夸克是 1960 年代所發現自然界物質的組成成分，質子、中子（統稱為重子）及 π 介子等等所有強子（參與強作用的基本粒子）分別由三個夸克（重子）及一個夸克一個反夸克（介子）所組成。現在已經發現了 6 種風味的夸克，兩兩成對形成三個家族。不像電子可以離開所組成的原子，因為強力特殊的性質，夸克無法獨立地被分離觀察。所以對夸克的研究，有一點像瞎子摸象。但我們有一個非常有力的工具：對稱原則，我們可以由強子的性質來推論出組成強子的夸克的對稱性，並進一步了解支配夸克的物理定律。對稱原則是對應於一個變換，物理世界及定律在特定變換之後，與變換前沒有差異。例如質子和中子在強力中扮演相同的角色，所以我們可以將兩者互換，對強力的物理來說將一點影響也沒有，這就是質子中子互換的對稱。量子力學容許我們將上述的互換推廣到更複雜的變換：不是彼此互換，質子及中子可以分別變換到質子中子態互相獨立的兩個線性疊加，我們依舊預期強力還是不變，而線性疊加的係數有連續的可能性，因此這個對稱具有連續 Lie 群的結構。這個對稱與自旋 1/2 的量子態的旋轉對稱 SU(2) 在結構上完全一樣，因此被稱為同位旋 Isospin SU(2)。

有些對稱乍看之下應該成立，但仔細測量才發現微小的破壞。左右對稱 (Parity) 看來似乎非常明顯，但李政道楊振寧已指出在弱作用中是被破壞的。物理學家在 Parity 後再加上正反粒子互換的電荷共軛變換 (Charge Conjugate)，期待弱作用會有 CP 對稱。但 1960 年代依舊在 K 介子系統中觀察到些微的破壞。這一次這個破壞倒有些正

面意義，如果沒有 CP 破壞，就很難解釋為什麼宇宙中物質會比反物質多那麼多。CP 破壞是如何產生一直不是非常清楚，小林與益川得獎的工作就與此有關。在 1973 年，那時還只有觀察到兩個家族夸克，他們很有創意地指出，如果還有一個家族的夸克存在，那麼在夸克質量項中就自然可以存在複數的係數，這係數便會產生 CP 對稱的破壞，而如果只有兩個家族，這就不能成立。在這工作之後，果然第三個家族的夸克陸續被發現，而這個機制也在近幾年 B 介子的實驗中，被證實可能就是造成 CP 對稱破壞的原因。

對稱除了直接被少量破壞，也有可能被隱藏起來而表面上看不出來。最常見的辦法是，物理系統的運動方程式或是控制它的漢米爾頓量是對稱的，但由漢米爾頓量決定的基態或稱真空卻不是對稱的，這樣的機制稱為自發對稱破壞 (Spontaneous Symmetry Breaking)，南部先生的工作就是最早認識到這樣的機制對粒子物理的重要性。在日常生活中，這樣的例子也非常多見，例如一隻直立於桌上的鉛筆，它的性質及能量在水平面上的所有方向都是一樣的，因此有繞鉛直軸的旋轉對稱。但當它倒下時，一定得選擇一個方向，倒下的鉛筆所對應的基態就不遵守這個對稱。在粒子物理中通常會用一個純量場 Φ 來實現自發對稱破缺。考慮複數純量場 Φ ，它的位能寫成： $\mu|\Phi|^2 + \lambda|\Phi|^4$ 。很明顯地，此位能有一 U(1)對稱： $\Phi \rightarrow e^{i\alpha}\Phi$ ，但是如果參數 μ 是負數，位能對 Φ 的複數平面作圖，就會看起來像一個墨西哥帽，最小值並不發生在 $\Phi = 0$ ，而是發生在帽緣的凹圈，任一 Φ 只要滿足 $|\Phi| = \sqrt{-\mu/\lambda}$ 都可以是基態的真空期望值，也因此任一選出的基態的 $|\Phi|$ 並不遵守 U(1)對稱。換句話說，選

定一個基態，便破壞了 U(1)對稱。在這樣的情況下，能量高時，基態的效應較小，因此看起來會有對稱性，但當能量降低時，基態的效應就變得較明顯，看起來對稱性就被破壞掉。但這個位能的對稱性在低能量還是有跡象可循：沿著位能的墨西哥帽帽緣，它凹下的一圈是一系列與所選定的基態能量相等的狀態，所以從基態出發沿著凹圈的方向震盪，所需的能量幾乎是零，這就對應一個無質量的粒子，稱為 Goldstone 波色子。所以觀察自然，如果有這樣的無質量波色子存在，就表示有一個被真空隱藏起來的對稱性。如果這個被真空隱藏起來的對稱性一開始已經存有相對小量的破壞，Goldstone 波色子就會是一個相對很輕的粒子。

南部發現這個機制的過程非常特別，他剛到美國發展的 1960 年代，正好是 Bardeen 等人成功地提出超導體 BCS 機制的時候。與其他高能物理學家專注於自己領域剛好相反，南部對與他無關的 BCS 機制非常感興趣。南部注意到質子與中子比起 π 介子要重非常多，他就猜想或許前者的質量並不是原來就有的。如同 BCS 機制中，電子與聲子的作用，使超導體的基態複雜化，與激發態形成能差 Gap，核子的強作用也可以改變真空（基態）結構，使核子在低能時就如同有一個質量一般。如此，核子的質量主要來自真空，而在漢米爾頓量中是沒有質量的，這就引發了一個更重要的結果。沒有質量的費米子左手旋的部分與右手旋的部分是互相獨立的，因此左右手可以分別進行不同的 Isospin SU(2)變換，而不影響核子的性質。這個比原來左右手一起變換的同位旋 Isospin SU(2)對稱還大的對稱，就稱為 Chiral SU(2)手徵對稱。在南部的劇本中，核子的漢米爾頓量，因為無質量，是遵守 Chiral SU(2)手徵對稱，

但它的真空卻引發一個質量般的效應，將左右手聯在一起，因而將 Chiral SU(2)手徵對稱破壞（，留下一般的同位旋 Isospin SU(2)對稱），這正是一個典型的自發對稱破壞。對稱破壞在低能處會出現無質量的 Goldstone 波色子，南部立刻認出來這就是相對非常輕的 π 介子，所以 π 介子正是這個自發對稱破壞機制的見證。 π 介子的這個身分，使被隱藏的手徵對稱對它的行為有非常強的限制，用這個辦法我們可以對 π 介子的實驗結果有非常完整的預測。這個質子中子的 Chiral SU(2)手徵對稱後來進一步被分析，就是極輕的 u,d 夸克左右手獨立變換的對稱性。

南部的洞見除了闡明了 π 介子的真面目，更開啓了基本粒子物理學家將發對稱破壞機制引入高能物理的先河，1970 年代成型的電弱作用標準模型，就是以希格斯場的真空期望值，來自發破壞電弱統一的規範對稱，這個模型大量精密的預測已經證實，未來的大強子對撞機（LHC）更希望進一步發現希格斯粒子。南部以特立獨行的思想模式，由看似不相關的凝態物理出發，卻解開了宇宙給我們設下極隱密的一個謎題。畢竟在研究的前端，要提出有突破性的洞見，或許就得先將自己的心靈放逐到主流之外，如此才能看到，那麼多的聰明才智還未曾注意到的，上天意料之外的暗示吧。



大學物理中利用液態氮動手操作的一些實驗

陳義勳

臺北市立教育大學 自然科學系

一、熱脹冷縮現象的實驗：

通常在物理實驗的熱脹冷縮皆要花一段長時間才能看出稍微之變化，但透過加溫或降溫緩慢的看出端倪，上課時學生有時不耐煩，依教育的理論，其產生變化若是即時或瞬間才能有爆發性的效應，如何配合此理論，研究者想藉助液態氮的低溫(沸點為 79K)充氣之氣球浸泡在液態氮之中，瞬間發現鼓鼓的氣球馬上縮小，乾扁的氣球如影片的快速變化又置於常溫之中的乾扁氣球又快速恢復原狀，此為熱脹冷縮的良例，其情形如圖 1~圖 4。

二、噴泉效應：

在常溫之下，液態氮會快速汽化，所以如果將裝有曼陀珠放入可樂中，又快速倒入於裝有液態氮的錐形瓶中，噴泉效應於焉形成，甚為壯觀，其情形如圖 5~圖 8。