

巧妙與奇蹟

β 蛻變理論的一則簡史

原作者：吳健雄博士

譯者：劉培
望 鴻

(本文節譯自 Columbia University Forum Winter 1966)

一直被公認為物理學基石的守恆定律 (the conservation law)，其實僅僅是由我們對「時空」簡單的對稱觀念導出的結果。也就是說我們綜合多種對稱性的一些假設，而成一不變性的原理 (invariance principle)。應用這種不變性原理而產生了這些守恆定律。舉例來說，在古典物理中最重要的守恆便是「能量」與「動量」不減。它說明了「時空」是「均一」而且「無向性」的，隨着狹義和廣義相對論的到來，尤其是量子力學的發展，使對稱性所扮演的角色地位大大的增高。這些不變性原理是常常由動力學定律的複雜實驗演導而來。但這些定律顯示出內部實在的對稱性和自然的美。

衆所周知的 β 蛻變是充滿了奇蹟的。它明顯的怪異特性導至物理學上的兩大危機，而且再三的警告我們去懷疑守恆定律的熱愛。無論如何，現在似乎很清楚地，那第一個謎—— β 質點被從原子核放射出來，而帶着各種不同能量的事實——只是用來證明去發現一種不可捉摸、不可察覺的微中子 (neutrino) 存在性的綫索。第二個危機是：當對等性 (parity) 和電量共軛 (charge conjugation)，在 β 蛻變中同被破壞，使物理界被震動和迷惑。於是實驗再次的顯示出移去那些限制而使了解弱交互作用 (weak interaction) 的大門廣開。

在 β 蛻變理論的發展中的第一個轉捩點，導出那神聖不可侵犯的動量不減定律之可靠性的問題。當然 β 質點只是一個從原子核射出的快速電子。但在開始時它的能量是很難量的。一個 β 質點源放近光譜儀 (Spectrograph) 造成一個複雜的影像，有許多窄細綫呈現在電子的各種不同能量連續分佈上。但這些綫中，那些是代表真正的蛻變電子 (disintegration electrons) 呢？這些 β 光譜中的細綫很快的便被認定是屬於secondary

origin的。在分析的工作中，無論如何却引起了一個更深奧的問題。

在那時，量子論已經被接受，而且在1922年Lise Meitner提出了很重要的一個觀念，那便是一個可假定作量子化的核子，無需放出各種連續變化能量的電子。然而又是什麼引起能量的連續分佈呢？假若能量變化是從核子放出電子而導出，它將導至所有的電子均有相同的蛻變能量 (disintegration energy) 而且等於光譜的上限 (upper limit)；假若相反的，這種蛻變電子事實上是從原子核以不同能量放出；則平均的蛻變能量將對應到連續光譜的平均能量。這兩種類型的結論，最後是由已知其光譜的 β 放射器，平均蛻變能量的量度而來，而 E 正好適合這種目的實驗之所需。Ellis和Wooster的工作結果一致合乎連續光譜的平均能量，而且完全反對那些從所謂電子均有相同蛻變能量的假設為出發點，所預言的數值結論。

同時這種實驗證明了「不同能量是蛻變電子的本性」的疑問。物理學家們知道他們將面對着某些令人迷惑的事。在那時，核子的基本成份還只假定為質子和電子。由於 β 光譜能量連續分佈的觀點而引起的困惑，Niels Bohr在他1930年Faraday紀念演講會提出了在 β 蛻變中能量守恆的問題。他說：在這原子說的時代，對於在 β 蛻變情形下的能量理論……，可能迫使我們放棄能量量度 (energy balance) 的種種念頭。

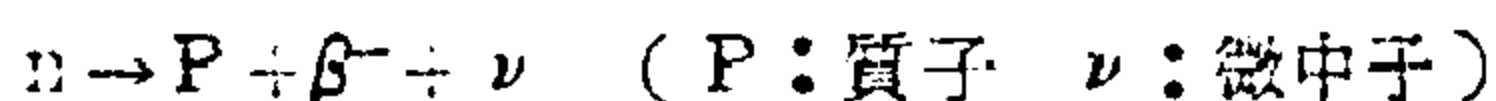
Wolfgang Pauli不贊成Niels Bohr的說法，他提出下面的陳述來反駁：

Niels Bohr提出的解釋承認：當在一個輕質點佔重要地位的核子作用過程中，能量和動量守恆不能通用，但電量是守恆的。而我看不出為什麼電量守恆將比能量及

動量守恒更爲基本。再說…假若守恒定律不成立，人們將可從這些關係推斷， β 蛻變的產生是能量的損失而非獲得。這個結論導至一個「時間的不可逆性」的結果。那是我完全不能接受的。

爲了補救這缺憾，Pauli 提議必須存在一種不可捉摸、會消失，質量很小的中性質點——微中子——它帶走失去的能量和動量。質子、電子和光子是在那時僅知的基本粒子，所以 Pauli 的一個尚不可偵測的新質點的假說，將遇到很多的懷疑是不令人驚奇的。

後來由於 Chadwick 對中子的發現，核子結構的質子、中子假說立刻解決了關於核自轉 (nuclear spins) 和統計上，以及 Pauli 的意見所給予的某些困惑。1933 年 Fermi 和 Pauli 均出席了在 Brussels 的 solvay Congress，隨後 Fermi 提出了他那有名的 β 蛻變說。在 Fermi 的理論中， β 質點是在放射的瞬間產生的。同時微中子也產生了。我們可將中子的 β 蛻變寫成：



其中 β 質點和微中子經常帶走了在蛻變中放出的極大部分能量。Fermi 的 β 蛻變學說現在是以極精確的預測 β 蛻變速率和蛻變能量的關係，以及 β 光譜的形狀而着稱。

1956 年， β 蛻變貢獻出一個很好的機會來決定在弱交互作用中，對等性定律 (the law of parity) 之可靠性的艱巨試驗。首先談到三個守恒定律 (其中至少有兩個現已在 β 蛻變中不被確定。) 它們是：對等性守恒定律 (P)、電量共軛 (C) 和時間倒轉 (T)。對等性定律是對於空間反轉不變性的結果。亦即倒轉一個坐標軸 $r \rightarrow -r$ ，而質點 \rightarrow 質點、 $t \rightarrow t$ 。則一個右手坐標軸變成了左手坐標軸。物理定律的左右完全對稱的觀念被接受了一段很長的時間。也就是說，不論在原坐標或反轉坐標，物理的基本定律都將相同。

時間的倒轉不變性定義爲： $t \rightarrow -t$ ，但是仍然質點 \rightarrow 質點，而且 $r \rightarrow r$ 。因此時間不變性將導致對於一個系統運動的任何情況，物理定律允許有一個對應的反轉運動的情況，在其所有質點傳遞的原有路徑 (path) 以相反的速度和自轉而返回。

電量共軛 (C) 是定義作：質點 \rightleftharpoons 反質點，但是然

$r \rightarrow r$ ， $t \rightarrow t$ 仍然成立，電量共軛的不變性並不是像對等性運作中的左右對稱般的簡單，而是一個介於物質與反物質間的對稱性。相對論量子力學的 Dirac theory 導致每一個質點都存在一個相同質量 and 自轉 (spin)，但電量相反的反質點。電量共軛的不變性，因而導致對於一質點系統的每一情形，對應於另一種除了「質點 \rightarrow 反質點」以外，完全相同的情形。

在 1927 年，Eugene Wigner 說對等性守恒，事實上是左右對稱的直接結果。而且對等性守恒定律立刻可以引申到原子核反應、介子交互作用、 β 蛻變和其他很多方面。它的發現是極有用的，而不甚理解的。它包括三種強度差異極大、完全不同的交互作用等級。這四個等級是

等級	強度
(1) 核力	1
(2) 電磁力	10^{-2}
(3) 弱交互作用	10^{-13}
(4) 重力	10^{-38}

β 蛻變屬於弱交互作用，而且在弱交互作用中推翻對等性和電量共軛時，扮演重要角色。事實上，在 1952 年 Wick Wightman 和 Wigner 做了一個奧妙而明顯的關於鏡反射對稱性的討論。……，「C」和「P」均只是約略的而已。然而「CP」是唯一精確的對稱定律。雖然如此，但大多數的物理學家對於對等性的可靠性都未加懷疑，一直到李政道和楊振寧做了他們的工作。

李政道和楊振寧提出了挑戰。他們起手去有系統的研究對等性守恒的實驗知識。他們對於這個定律的可靠性，在電磁方面 (原子物理) 以及在強交互作用 (核子物理) 中發現了給人深刻印象的證據。問題是：在所有的弱交互作用中，對等性是否守恒？放射性同位素的 β 蛻變是這個問題的一個實驗。

在 1956 年秋天，Amber Hayward、Hoppe、Hudson 和我用放射性 Co^{60} 作 β 源 (source) 處理這偏極化的核子實驗。實驗的儀器是頗爲複雜的：需要現代化的電子和 γ 量計器、一個非常強的磁場和極低的溫度 (約在絕對零度以上 $\frac{1}{100}$ 度)，然而其原理是頗爲簡單的。

平常的一個 Co^{60} 源，每秒要產生幾萬次蛻變，每次均排出一個很快的電子。但是它們釋放的方向是完全依統計取平均值的。且在每一方向所量到的 β 質點數相同。今若將放射性 Co^{60} 放在磁鐵的兩極間，要是在對稱於磁極各方向排出的電子數相同，則對等性是守恒的。反之，要是對磁場方向的電子數是不對稱的改變，則對等性是不守恒的。這就是物理學史上想像的實驗推翻一個基本定律的第一次。

這實驗的結果是 β 蛻變不對稱性的很大發現。那就是 β 質點的發射，在核子自轉的反方向所獲較多。這表示：從 β 放射的觀點看， Co^{60} 核子是左旋性的，因而左右是可以分辨的。於是在 β 蛻變中，對等性是不守恒的。由於這發現，緊接着哥倫比亞大學的 Garwin、Lederman 和 Weinrich 認定在 π 介子蛻變和 μ 介子蛻變中，對等性也不守恒。

從極化的 Co^{60} 核子的 β 質點不對稱分佈，給予破壞對等性的顯明例證。在弱交互作用中，大量的不對稱性也給予電量共軛C非不變的明證。於是這長期被接受的不變性原理 (invariance principle) 因此隨着對等性定律被推翻了。

這結果完全改變了我們對自然 (nature) 的觀點。在1957年以前，物理學家假定在自然界中有完全的對稱性，而且在自然界現象中沒有左右的分別。然而在 Co^{60} 實驗中，大多數電子的放射方向顯示出核子是自左向右轉的。這就相當於說在 β 蛻變 Co^{60} 核子像一個左螺旋般的自轉。自然界並不是左右對稱的；從左右對稱性導出的對等性定律在弱交互作用中並不成立。

在 β 蛻變中，對等性不守恒的一個重要結論建議： β 質點（以及微中子）是縱的極化。那就是說它們的自轉軸是在它們的運動方向。測量 β 質點偏極化的實驗是開始在伊利諾伊斯大學。其結果是肯定而簡單的。所有的人都贊同 β^- 質點——快速電子——是有如左手螺旋的自轉；而 β^+ 質點——正子——是有如右手螺旋的自轉。

由於在弱交互作用中對等性不守恒的發現，知道某些鏡所成的像並不相當於真實的運動。於是被想像可能有某些對稱性是被包含在「合成轉換」(combined transformation) 中。在其中作了左右鏡面反射，而且變物質為反物質 (antimatter)

。雖然C和P不變性在弱交互作用中均被破壞，而物理定律在CP的合成運作下仍然有不變性，正如Wigner, Landau 楊振寧和李政道等理論物理學家所預言的。假若所有的質點在鏡面成像中，以其反物質替代，則空間中的左右對稱仍能正確。我們如何證明「CP」不變性呢？

假若一個人應用「CPT」合成運作，因此所有的四度空間座標的符號相反，而且每一個質點，被改成了其對應的反質點，於是獲得了不變性的運作，（雖然三個運作C, P, T可能單獨會變。）從極化的 Co^{60} 實驗以及其他的實驗，我們知道在弱交互作用中，電量共軛和對等性並不守恒。特別有趣的是時間倒轉不變性仍然是完整的。假若時間倒轉的運作T是不變的，則從CPT定理知：合成運作CP是不變的。目前有各種的實驗在進行，企圖解決時間倒轉不變性的問題。

簡而言之，物理是不斷的在改變和進步的，並沒有什麼一成不變的定律或觀念不久的將來，由於 β 蛻變理論必須假設存在一種尚未發現的質點——boson W——來適合弱交互作用，假設這種質點存在，核子的 β 蛻變可能寫成：

$$n + P \Rightarrow W \Rightarrow e + \nu_e$$

雖然一個boson的存在將解除某些困難，但它也產生其他的問題。假若 W^* 存在，則環繞 μ 的 W 雲將在 β 蛻變的過程中產生一個光子 (photon)

$$\mu^* \rightarrow e^* + \gamma$$

由哥倫比亞大學的 Feinberg 所提出的問題是：為什麼 μ 介子的電磁蛻變 ($\mu \rightarrow e + \gamma$) 從未被發現。解除這困難的方法是假設最少有兩種微中子存在：一種是與 μ 質點合在一起的叫作 ν_μ 另一種是與電子合在一起的名叫 ν_e 。而這兩種微中子確會被觀測到，而且被哥倫比亞大學在 Brookhaven 工作的一群物理學家所證明——如 Danby, Gaillard, Goulianos, Lederman, Mistry, Schwarz 和 Steinberger。一種「協調性」的boson可能的存在性和其性質是正在被研究探討的。

按：本文譯者之一劉培煊為本系1969級同學。於民國五十六年二月間轉學加拿大U.B.C物理系。來信中屢屢向師長和同學們問好，並且極願為本系同學提供U.B.C.有關資料。