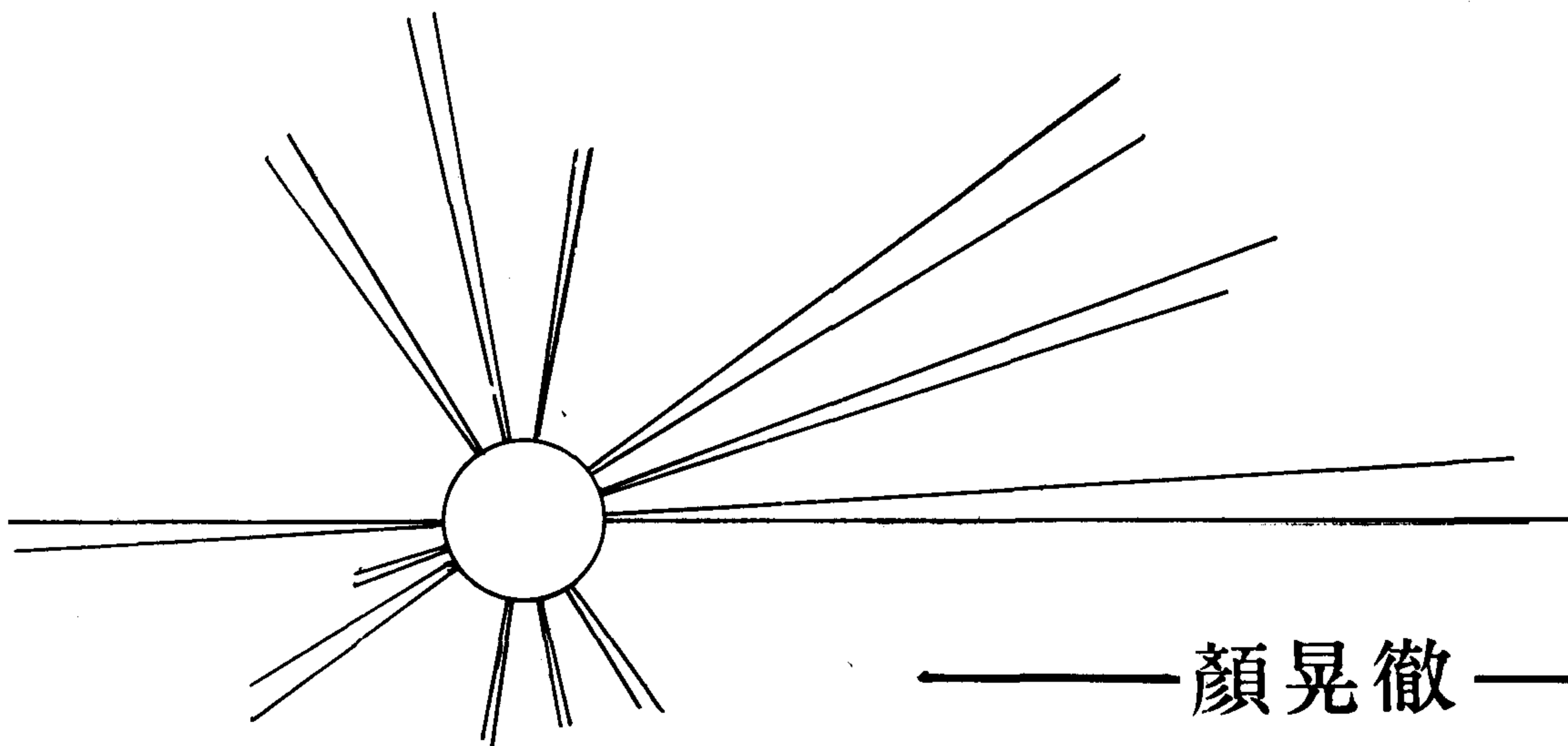


CP 對稱性的破壞

—— CP Violation —— 1980 Nobel Prize.



—— 顏晃徹 ——

今年的諾貝爾物理獎頒給了兩個美國人克羅寧 (James Cronin) 與費契 (Val Fitch) ，因為16年前他們所領導的實驗小組發現了一個很奇特而重要的現象，即 CP 對稱性的破壞。下面我們先介紹一下他們所做的工作，然後討論這個發現所代表的意義。

克羅寧在 1931 年生於芝加哥，1955 年在芝加哥大學取得博士學位，從 1958 年起任教於普林斯頓大學，直到 1971 年轉任芝加哥大學教授迄今。費契則是 1923 年生於內布拉斯加，1954 年取得哥倫比亞大學博士學位，然後到普林斯頓大學任教直到現在。1964 年他們兩人帶隨一名研究生 James Christenson 以及一位從法國 Saclay 來普林斯頓客座一年的物理學家 Rene' Turley 到紐約的布魯克黑汶國家實驗室做實驗，他們原來的目標是要研究中性 K 介子的某些性質，但很意外的由此發現了自然界中竟然有違反 CP 對稱性的交互作用存在。

中性 K 介子有兩種，叫做 K^0 與 \bar{K}^0 ，它們互為反粒子 (就好比電子與正子互為反粒子) ，質量大約是質子質量的一半，是一種不穩定的粒子

。人類最早發現它們是在 1947 年從宇宙線與地球大氣層相撞所產生的粒子當中找到的。其後十幾年的研究逐漸顯示出來， K^0 與 \bar{K}^0 是大自然中行爲特別怪異的粒子。當我們以粒子互撞來產生中性 K 介子時，它們是以 K^0 或 \bar{K}^0 的姿態出現的，但是當它們衰變時，却是以另一種姿態下進行。原來 K^0 本身含有兩種成份叫做 K_L 與 K_S ，此處 L 與 S 分別代表英文的長與短兩個字，凡是比較長命的成份 (生命期約為 5×10^{-8} 秒) ， K_S 是比較短命的成份 (生命期約為 10^{-10} 秒) 。在物理上我們稱 K^0 粒子是 K_L 與 K_S 兩種狀態的疊合 (superposition) 。疊合的概念常見於波的現象裡，例如兩個波的干涉便是由於波的疊合造成的。當 K^0 粒子衰變時，它的兩種成份各自獨立地衰變。同樣地， \bar{K}^0 也是由 K_L 與 K_S 兩種狀態疊合而成的，當 \bar{K}^0 衰變時也是兩種成份各自獨立地衰變。因此一個純 K^0 粒子束在產生的時刻固然完全是 K^0 的身份，但隨著時間的前進它所含的 K_S 成份消滅得比較快，而 K_L 成份消滅得比較慢，這樣兩者所疊合而成的狀態就不再是純粹的 K^0 粒子，而也有 \bar{K}^0 粒子出現了。過了很

久該粒子束當中就只剩下 K_L 一種成份，這時的 K^0 粒子與 \bar{K}^0 粒子變成一樣多。像這樣原來是純 K^0 的粒子束中竟然會自動跑出反粒子 \bar{K}^0 ，在粒子的世界裏是獨一無二的奇景。

根據當時（1964 年以前）物理學家的瞭解，一切物理定律應該都具有 C P 對稱性。所謂 C 與 P 是指兩種轉換，C 是把正粒子與反粒子互相交換的轉換，如電子與正子互換，質子與反質子互換等等；P 則是把空間倒置的轉換，也就是把 x, y, z 三個坐標軸倒置。有時我們也用鏡像反射來代替 P 的轉換，例如只將 x 軸倒置便是一種鏡像反射。C P 轉換就是把上述兩個 C 與 P 的轉換同時作用上去的轉換。當時相信一切物理定律在 C P 轉換之下都是不變的，也就是具有 C P 的對稱性。因此一個不穩定粒子的衰變方式也不能例外地要具有 C P 對稱性。對於中性 K 介子而言，由計算可知爲了維持 C P 對稱性， K_L 應該可以衰變成三個 π 介子（ 3π ），但不能衰變成兩個 π 介子（ 2π ）。反之， K_S 可以衰變成 2π ，但不能衰變成 3π 。這恰好也可以解釋爲什麼 K_S 比 K_L 短命，因爲衰變成 2π 比衰變成 3π 容易進行得多，因此衰變也發生得較快。

克隆寧、費契等人的實驗發現：當 K_L 衰變成幾個 π 介子時，固然絕大部份（99.8%）是變成 3π ，但也有 0.2% 的機會是變成 2π ，這就表示 C P 對稱性有了破壞。這個 0.2% 的效應很微細不易測量，而且事先根本沒有人預料到，這就是他們的實驗高明之處。不久，世界各地的實驗室也紛紛跟進，而觀測到 K_L 衰變成 2π 的現象。理論方面，剛開始時由於大部份的人不情願那麼輕易地就承認 C P 對稱性有破壞，因此很多人提出各種理論，試圖解釋「爲什麼在 C P 對稱不受破壞的條件下還會看到 $K_L \rightarrow 2\pi$ 的發生」。所有這些理論在幾年內都一個一個被擊破了，到今天我們所得到的結論是： K_L 的衰變方式天生地就破壞了 C P 的對稱性。但其他粒子的一切交互作用却似乎仍然遵守 C P 的對稱性。

C P 破壞的發現過了十幾年之後才開始有一些比較像樣的基本理論可能可以說明它的來源，

其中一些理論認爲那是由於夸克具有六種以上的風味。早在 1972 年兩位日本物理學家就指出，如果夸克有六種風味便可以解釋 C P 破壞的發生。但是當時所知的一切粒子只需要三種風味的夸克便已足夠去構成了，因此他們的理論在當時並未引起特別的重視。現在我們已經有了確實的證據知道夸克的風味至少有五種，第六種也正在尋找之中。物理學界有些人認爲就是因爲近幾年來「六風味夸克」的理論又開始紅起來，才促使諾貝爾獎委員會作今年這個選擇。此外，近年來在規範場論裏所發現的 instanton 解似乎也與 C P 破壞的來源有基本的關聯。

C P 對稱性的破壞到底代表了什麼意義？我們不妨先以 P 對稱性的破壞爲例子來檢討一下。

1957 年李政道與楊振寧因爲提出在弱交互作用當中 P 對稱性不再成立而獲得諾貝爾獎。在此之前，物理學家都相信一切物理定律均必須遵守 P 對稱性，也叫左右對稱性。事實上所有那些描述日常現象的物理定律，例如牛頓運動定律和馬克士威爾的電磁方程式等，莫不具有左右對稱性。更淺近地來講，當你拿起一個平面鏡來看，則你看到的鏡中的所有現象必然也可以用我們現有的同樣那套物理定律去描述。舉例而言，我們知道人的心臟是靠左邊的，可是鏡像中的人的心臟却是在右邊。這時我們並不能宣稱「物理定律的左右對稱性被破壞了！」，因爲心臟生在左邊或右邊這一回事並不是物理定律。現在假想我們把人體內的一切東西左右對調了，心臟自然也跑到右邊去，然後我們問一個問題：「這樣構造的人是否能夠像你我那樣好好地活著？」如果答案是「不能」的話，那就表示某些有關人體生命的物理定律失去了左右對稱性。據我所知上面這個問題的答案應該是「能」才對，因爲生命的現象與違反左右對稱性的弱交互作用關係極少。

1957 年以後物理學家瞭解到弱交互作用並不遵守左右對稱性。例如宇宙間存在著一種無質量的粒子叫做微子（ ν ），它永遠以光速在運動，而且它具有自旋，這個自旋永遠是左旋的，亦即當我們以左手大姆指代表它的運動方向時，左手

其餘四指彎曲的方向便是它自旋的轉向。微子的反粒子叫做反微子 ($\bar{\nu}$)，它永遠是右旋的。宇宙間存在了這樣的微子和反微子，就表示左右對稱性有了破壞，因為當我們拿鏡子來看，鏡像中的微子會變成右旋的，鏡像中的反微子則變成左旋的，這些都與我們宇宙間所見的事實不符。因此牽涉到微子的那些交互作用就破壞了左右對稱性。

自然發現了左右對稱的破壞以後，有些人對於自然界竟然有此「瑕疵」難免耿耿於懷。所幸不久就有人指出，如果我們不用普通的平面鏡，而改用一種「C P 魔鏡」，那麼所有的物理定律對於鏡內鏡外又都可以適用了，這樣一來自然界到底還是可以算是完美無缺的。這個C P 的魔鏡，除了有普通平面鏡的作用之外，還能把鏡外的一切物質變成鏡內的反物質（氫原子變成反氫原子，人變成反人……）。例如左旋的微子以此魔鏡所照出來的映像正好是右旋的反微子，此兩者均可用我們現有的同一套物理定律去描述。在1964年以前人們所知的任何物理定律都具有這個C P 的對稱性，因此這些「完美主義者」也再度覺得滿意了。然而克隆寧與費契的實驗結果又一次打破了這些人的美夢， K_L 衰變成 2π 的事實的確證明了C P 對稱性的破壞。不久更進一步的實驗發現： K_L 衰變成 $\pi^- e^+ \nu$ 的機會比它衰變成 $\pi^+ e^- \bar{\nu}$ 的機會略大一些，這個事實更直接地顯示出C P 對稱性的破壞，因為 $\pi^+ e^- \bar{\nu}$ 就是 $\pi^- e^+ \nu$ 對C P 魔鏡的映像。奇怪的事，除了 K_L 的衰變之外，我們從沒有看到過其他證明C P 破壞的實驗證據。

在描述粒子物理的基本理論裏有一個相當有名的定理，叫做C P T 定理，它告訴我們任何物理定律在「C P T」的轉換下必然不會改變。此處T的轉換就是時光倒流的轉換。如果這個定理正確的話，那麼 K_L 的衰變必然也就同時破壞了時光倒流的對稱性。因此在某些新聞報導裏也有這種說法：克隆寧與費契的實驗顯示有些物理定律破壞了時光倒流的對稱性。事實上後來進一步的實驗發現 K_L 的衰變果然破壞了T的對稱性。

爲了闡明P或C P 破壞的物理意義，物理學

家常常用下面這個有趣的想像做例子。假設你正在跟宇宙遠方某個世界上的人通電話，你想告訴他們在地球上的我們所定義的左和右是怎麼一回事。起先也許你會認爲只要告訴他們「心臟所在的那邊就是所謂左邊」便可以了。其實不然，因爲他們不一定有心臟。即使有心臟，也說不定是長在右邊的。後來你學到一點物理，聽說過中子衰變會變成質子、電子和反微子，而且也知道反微子是右旋的。因此你想告訴他們：「把中子拿來，觀察它的衰變產物。其中不帶電的那個粒子我們叫做反微子的，它的自旋方向根據我們所定義的左右是屬於右旋性的。」這個辦法好像不錯，事實上却行不通，爲什麼？因爲我們並不知道對方那個世界到底是由物質組成的（像我們這個世界一般），還是由反物質（anti-matter）組成的。如果他們的世界是反物質世界，那麼當你叫他們拿一個中子來時，他們所拿的却是一個反中子。由於反中子衰變成反質子、正子和微子，而微子是左旋的，這麼一來你所說的右旋其實却是他們的左旋。所以你教他們的左右到了他們的世界裏就恰好相反了。反之，如果他們的世界是物質世界，那麼你所教的左右到了他們那裏還是正確無誤的。問題是：你有什麼辦法知道他們的世界是那一種世界，物質的還是反物質的？

對於這個問題，我們終於在 K_L 的衰變方式裏找出了答案。我們已經知道 K_L 衰變成 $\pi^- e^+ \nu$ 比 $\pi^+ e^- \bar{\nu}$ 稍多一點，因此你可以告訴他們：「請你們觀察長命的中性K介子怎麼衰變。請注意當它衰變成 π 介子和輕子時，它有兩種衰變方式（即 $\pi^- e^+ \nu$ 與 $\pi^+ e^- \bar{\nu}$ ），其中跑出來較多的帶電輕子在我們地球上叫做正子的。請你們把這個粒子拿來和你們氫原子外的那個粒子比較，告訴我它們是否相同……」。這樣子你便可以斷定他們的世界到底是由物質還是由反物質所構成，因此你也就能夠告訴他們什麼是左，什麼是右了。

