

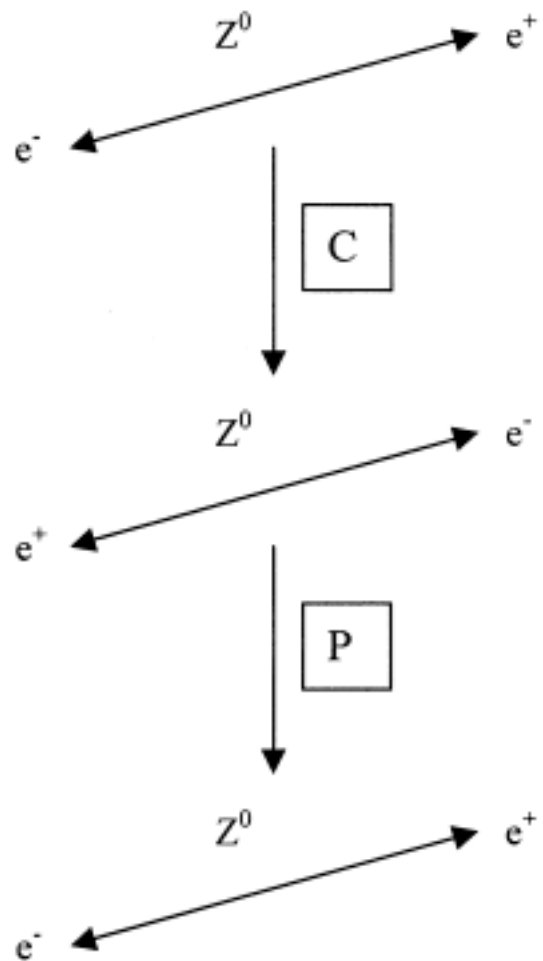
# CP 對稱性與物質起緣

陳彥竹  
中央研究院

1967 年沙卡洛夫(Sakharov)提出產生宇宙的三個基本條件：(1) C 和 CP 對稱性的不守恆，(2) 重子數不守恆，(3) 熱平衡的被破壞<sup>[1][2]</sup>。倘若 CP 對稱性是絕對守恆的，則物質如何產生這一個尚未解決的課題將會更有趣。

CP 對稱性實際包含兩種對稱性，其一為電荷共軛(C)對稱性亦即物質與反物質的對稱性，其二為宇稱性(P)是為空間反轉的對稱性。物質(反物質)在 C 操作子的運作下轉換為反物質(物質)，如圖一上半部份所示。以  $Z^0$  粒子衰變至正負電子為例，在 C 操作子的運作下正電子轉為電子，電子轉為正電子。 $Z^0$  粒子為其本身的反粒子。圖一下半部顯示在 P 操作子的運作下，所有三維空間座標全部反號，因此正負電子的運動方向反轉。所謂的對稱性即是轉換前後其狀態不變。倘若宇宙真的誕生自一個大爆炸而且 CP 對稱性是守恆的，則由於物質和反物質的互相湮滅，在現在的宇宙中所存留的重子數相對於光子數的比值將遠小於觀測值。理論估計約為  $7 \times 10^{-20}$ ，而觀測值則在  $(6 \text{ 至 } 10) \times 10^{-11}$ <sup>[2]</sup>。

1964 年 Christenson, Cronin, Fitch 和 Turlay 首先發現到在 K 介子的衰變中存在有 CP 對稱性不守恆的現象<sup>[3]</sup>。由實驗觀測所得，K 介子有兩種，其中之一具有較短的半衰期， $(0.8934 \pm 0.0008) \times 10^{-10}$  秒，稱為  $K_S$ 。另一種具有較長的半衰期， $(5.17 \pm 0.04)$



圖一 C 和 P 操作子的運作

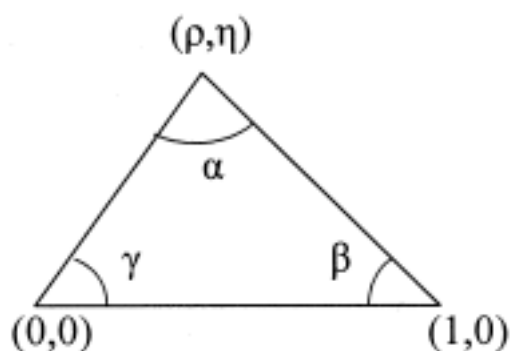
$\times 10^{-8}$  秒，稱為  $K_L$ 。 $K_S$  一般衰變至兩個  $\pi$  介子， $\pi^+ \pi^-$ ，而  $K_L$  則普遍衰變至三個  $\pi$  介子， $\pi^+ \pi^- \pi^0$ 。 $\pi^+ \pi^-$  和  $\pi^+ \pi^- \pi^0$  分別具有 CP 本徵值  $+1$  和  $-1$ 。如

果 CP 對稱性在此衰變過程中是守恆的，則 CP 本徵值應該是不變的。Christenson 等人卻發現到有少部分的  $K_L$  會衰變至  $\pi^+\pi^-$ ！如此的發現意謂著， $K_S$  和  $K_L$  的波函數都具有 CP 本徵值 +1 和 -1 的成分！其混合的程度一般以  $\varepsilon$  來表示。另一種可以導致  $K_L$  衰變至  $\pi^+\pi^-$  的原因是  $K_L$  本身 CP 本徵值為 -1 的部分有少許的機會直接衰變至  $\pi^+\pi^-$ ！這種現象稱為直接 CP 對稱性破壞，也是可能可以用來解釋物質起源相關的現象。直接 CP 對稱性破壞的程度一般以  $\varepsilon'$  來表示。實驗上對直接 CP 對稱性的研究一般是量測  $\varepsilon'/\varepsilon$ 。歐洲 CERN 實驗室的 NA31 在 1988 首先發表其量測  $\varepsilon'/\varepsilon$  的結果<sup>[4]</sup>。爾後的 NA48 不斷的改進以求量得更準確。已發表的結果是  $(18.5 \pm 4.5(\text{統計誤差}) \pm 5.8(\text{系統誤差})) \times 10^{-4}$ <sup>[5]</sup>。(註：與本文撰寫同時，NA48 宣佈了更新的結果。結合 1997 年和 1999 年的數據，其所得結果為  $(14.0 \pm 4.3) \times 10^{-4}$ 。)美國費米實驗室的 E731 和其後續的實驗 KTeV 先後於 1997 年及 1999 年發表了其量測  $\varepsilon'/\varepsilon$  的結果，分別為  $(7.4 \pm 5.2) \times 10^{-4}$ <sup>[6]</sup> 和  $(28.0 \pm 3.0(\text{統計誤差}) \pm 2.8(\text{系統誤差})) \times 10^{-4}$ <sup>[7]</sup>。雖然這些實驗結果相互之間略有出入，但是  $\varepsilon'/\varepsilon$  的值很有可能不為零。換句話說，在 Kaon 介子的衰變中，直接 CP 對稱性被破壞的現象是很可能存在的！

另一個可以測試直接 CP 對稱性的領域是觀察超荷粒子(Hyperon)的衰變。例如觀察  $\Xi^- \rightarrow \Lambda \pi^-$ ， $\Lambda \rightarrow p \pi^-$  的衰變過程中質子(p)在  $\Lambda$  粒子的質心系統中的角度分佈。將此分佈與其相對應的反粒子( $\Xi^+$ )的衰變中反質子在  $\Lambda$  粒子的質心系統中的角度分佈做個比較。倘若此分佈型態相同則 CP 對稱性在超荷粒子的衰變中是守恆的。反之則代表 CP 對稱性的被破壞。在費米實驗室的 HyperCP 實驗即

是如此的一個實驗。此實驗為求減低各種可能的因素所造成的系統偏差，乃以簡單快速為原則。HyperCP 實驗分別在 1997 年及 1999 年取了數據。總共取得大約三萬卷磁帶，每卷最多可以儲存 5GB 的數據。(一本百萬字的中文書以電腦儲存大約需要 0.2GB。)欲分析如此大量的數據所需要的電腦能力及時間極為可觀。目前 HyperCP 實驗尚在積極進行數據分析之中。

B 介子的衰變是另一個可用以研究 CP 對稱性的領域，而且是繼 K 介子之後為大多數人所注目的焦點。一般研究 CP 對稱性，以獲得單元三角形(Unitarity Triangle)(圖二)中的參數為目標。倘若 CP 對稱性被破壞的現象只與標準模型之中的 CP 相位有關，則此三角形的面積不為零意謂著 CP 對稱性不守恆。此三角形中的  $\rho$ ， $\eta$  參數為 L. Wolfenstein 所提出的 CKM 混合矩陣中與 CP 相位有關的參數<sup>[8]</sup>。



圖二 單元三角形(Unitarity Triangle)

1998 年 CDF 實驗組經由對  $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S^0$  的研究，首先發表了  $\sin 2\beta$  的量測，而後更不斷的進行更精密的分析<sup>[9][10]</sup>。OPAL 和 ALEPH 也分別於 1998 年和 1999 年發表了  $\sin 2\beta$  的實驗結果<sup>[11][12]</sup>。綜合所

有的實驗，所得的結果是：

$$\sin 2\beta = 0.78 \pm 0.37。$$

此結果主要以 CDF 的數據為主。正在進行中的 BaBar 及 BELLE 實驗也可以量測  $\sin 2\beta$ ，並可將誤差縮小至 0.15。未來在 RUN II 的實驗中 CDF 和 D0 當可更精確的量測  $\sin 2\beta$ ，其誤差將可分別小至 0.07 和 0.15。

在單元三角形之中除了  $\beta$  之外，其他的角度和長度的測量則有待正在進行的實驗(如 BaBar，BELLE，...)和未來的實驗(如 ATLAS，CMS，LHCb，BTeV，...)。例如  $\sin 2\alpha$  的值可由研究  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  及其相對應的反物質的衰變的不對稱性來獲得。對  $\gamma$  的研究則主要考慮  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ 。

除了上述的實驗以外，在 D 介子的衰變中，如  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$  或  $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ，亦可研究 CP 對稱性，例如費米實驗室的 E791 量測物質和反物質的衰變速率的比值<sup>[13]</sup>。還有其他的實驗方式來研究 CP 對稱性，如帶電荷 K 介子的衰變。然而到目前為止尚未在這些領域裡觀測到 CP 對稱性被破壞的現象。

雖然 CP 對稱性被破壞的可能性極大，然而明確的證據尚待未來的實驗來提供。未來幾年之內當有重要的結論產生。

假設 CP 對稱性確實被破壞，其被破壞的程度是否可以解釋物質的起源？這仍然是個問題。再者造成 CP 對稱性破壞的原因如何？也是未解的謎題。展望未來幾年，在理論上和實驗上 CP 對稱性仍將是熱門的課題。

#### 參考書目：

1. A.D. Sakharov, Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5**, 32 (1967) [JETP Lett. **5**, 24 (1967)].

2. Kolb and Turner, *The Early Universe*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
3. J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch and R. Turlay, Phys. Rev. Lett. **13**, (1964) 138.
4. H. Burkhardt *et al.* (NA31), Phys. Lett. **B206**, (1988) 169.
5. V. Fanti *et al.* (NA48), CERN-EP-99-114, 1999.
6. L.K. Gibbons *et al.* (E731), Phys. Rev. **D55**, (1997) 6625.
7. A. Alavi-Harati *et al.* (KTeV), Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 22.
8. L. Wolfenstein, Phys. Rev. Lett. **51**, (1984) 1945.
9. F. Abe *et al.* (CDF Collaboration), Phys. Rev. Lett. **51**, (1998) 5513.
10. F. Abe *et al.* (CDF Collaboration), "A measurement of  $\sin 2\beta$  from  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ ", FERMILAB-PUB-99/225-E, Sep. 1999.
11. K. Ackerstaff *et al.* (OPAL Collaboration), Eur. Phys. J. **C5**, (1998) 379.
12. ALEPH Collaboration, ALEPH 99-099, CONF 99-054, contributed to the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. On B Physics and CP Violation, Taipei, Taiwan, December 1999.
13. E. M. Aitala *et al.* (E791), Phys. Lett. **B 421** (1998) 405.