

稀有 B 衰變數據對因子化與 γ 相角的啟示

台灣大學物理學系 侯維恕

1997 年初位於康乃爾大學的 CLEO 實驗組宣佈發現數個無魅 B 介子衰變，其中以 $B \rightarrow \eta' K$ 分支比為 8×10^{-5} （亦即每 12500 個 B 衰變中有一個）最為突兀，因為事前之理論值雖參差不齊，但未有超過 10^{-5} 者。尤有甚者， $B \rightarrow \eta' K$ 加數（0 至 4）個 π 介子，即使要求 η' 之動量大於 2 GeV/c，其分支比亦接近 10^{-3} 之多。這些奇特現象，指出「強企鵝」圖之振幅相當大。

1997 年尚有另一條脈絡，同樣與「強企鵝」圖有關，三年來藉數據的累積，確實增進了我們對 B 衰變動力學，甚至於對標準模型中唯一之 CP 破壞參數 $-\arg V_{ub}$ 相角之了解。

一、緣起：1997 「強企鵝」年

1997 年初，CLEO 公佈 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 分支比小於 $B^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ ，分別約為 1.5×10^{-5} 及 2.3×10^{-5} 。這個觀測激發了 T. Mannel 及 R. Fleischer 這兩位德國人的探討，指出 $K^+ \pi^- / K^0 \pi^+$ 分支比應大於 $\sin^2 \gamma$ ，因此，CLEO 數據已開始提供對 CP 破壞相角之限制！這個宣告，一方面引起不少人指出其漏洞，但也造成理論家風起雲湧般的討論。

我們當時走的方向，與多數人有異。當時有個傳言，說 CLEO 僅見 $K^+ \pi^-$ 事例（ $K^- \pi^+$ ？我的線民沒說），亦即 CP 破壞百分之百（100%）！俗云謠言止於智者，但那是指具破壞性、傷害性之流言。在這裡的傳言讓我們稱之為內部快訊吧！正屬於激發理論家之想像與思考的那種，一般而言對人類至少是無害甚且有益的。因此，我們著手探討。

1997 年，時值國家理論中心成立，我與中研院鄭海揚教授及成大李湘楠教授共同提出 BCP 與 PQCD 之 Topical Program，於 1998 年 2 月至 6 月執行（原提計劃為期兩年），我並適時自澳洲墨爾本邀請何小剛教授（後聘台大）加入。我與何小剛並當時於中研院任博士後之楊桂周教授（現任教於中原大學）一同研究超越標準模型之物理引發 $B \rightarrow K \pi$ 衰變中極大 CP 破壞之可能性。為了這個目的，我們探討了 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 及 $B^+ \rightarrow K^0 \pi^+$ 之 γ 依存性，指出標準模

型之 CP 破壞不會大過約 10%，而即使放入一個大的 $K^+ \pi^- \leftrightarrow K^0 \pi^0$ 「終態作用」（FSI）散射相角，亦不能使 CP 破壞大過 30%。我們再引入某種新物理，其 CP 破壞相角為任意可調，我們以數字指出 CP 破壞可大於 50%。在這個工作[1]中，我們僅僅把 γ （弱相角）及 δ （強相角）參數當遊戲來玩，卻種下了日後發現之伏筆。

二、契機 1998： γ 相角與電弱企鵝之重要性

1998 年暑假，我們的「新物理」討論大致完成，我決定看看 CLEO 又有些什麼新結果。上網一查，發現新測量到了 $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ ，其分支比 1.5×10^{-5} 大於 $K^+ \pi^-$ 之 1.4×10^{-5} ，而原本大於 $K^+ \pi^-$ 之 $K^0 \pi^+$ 則降為與 $K^+ \pi^-$ 相當。我立刻知會何小剛，我們興奮的趕緊在兩週內寫出一篇文章 [2]。何小剛執意於他 1995 年的得意之作，強調「電弱企鵝」必須加在計算中，方能增強 $K^+ \pi^0$ （但仍不能解釋 $K^+ \pi^0 / K^+ \pi^-$ ），而我則強調，雖然 Fleischer-Mannel 限制因 $K^0 \pi^+$ 不再大於 $K^+ \pi^-$ 而失效，然而，我們需要相當大的 γ 角方能將 $K^+ \pi^-$ 及 $K^+ \pi^0$ 衰變率放大到與 $K^0 \pi^+$ 相當。

實在說，在這個階段我仍將 γ 參數對 B K 衰變率之影響略以兒戲視之，沒那麼當真。而我在撰寫上述論文的前後，利用台大高能組參與日本「B 介子工廠」Belle 實驗已進入緊鑼密鼓之硬體裝設最後階段，於 1998 年 8 月底赴美 Brookhaven 國家實驗室（BNL）及康乃爾大學訪問半年。這次由國科會資助的出國研究，使我與 CLEO 數據「面對面」接觸，對我造成不少的衝擊。

三、突破： $B \rightarrow K \pi$ 強於 $\pi \pi$ 的啟示

$B^0 \rightarrow h^+ h^-$ 早在 1995-96 年便已有徵兆，但 CLEO 實驗因為缺「粒子鑑別器」（2.5 GeV 動能之 K^+ / π^+ 極難分辨），只好不斷改進分析方法並累積數據量。到 1997 年 CLEO 公佈觀測到 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 時，其言下之意便是 $K^+ \pi^-$ 衰變率大過 $\pi^+ \pi^-$ 衰變率。這個結果告訴我們企鵝

圖振幅 P 在 $B \rightarrow K^+\pi^-$ 衰變中大過樹圖振幅 T 。因為，在 T 振幅壟斷的極限， $B^+ \rightarrow K^+\pi^-$ 之衰變率將僅有 $\pi^+\pi^-$ 衰變的大約 20 分之一，顯然與事實不符。

到了 1998 年， $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 衰變還是沒看到，顯示其衰變率比 $K^+\pi^-$ 小了不少。這就令人費解了。若 $\pi^+\pi^-$ 僅比 $K^+\pi^-$ 小一點，則或許是控制其衰變之 V_{ub} 參數，其絕對值略小於我們原本所以為的。但 $\pi^+\pi^-$ 衰變若遠低於 $K^+\pi^-$ 衰變，要把 V_{ub} 降太多，我們便要有別的麻煩！

我於 1998 年 8 月底到達 BNL 安頓，於 9 月中旬初次赴康乃爾，開始了我每兩週一次的定期訪問。CLEO 實驗組接納我成為「Visiting Member」(直到 1999 年底)，使我得以參與 CLEO 內部一切活動，讓我大開眼界，知道了很多物理分析的秘辛與細節。另一方面，德國的 Ali, Kramer 及呂才典 (AKL)，以及鄭海揚教授的 CCTY 研究群 (BCP Topical Program 的一部份)，分別已將 B 介子之 70 幾個二體衰變之因子化計算完成了，不但提供數值表，亦提供公式。

有了這兩大方便，我常在定期訪問康乃爾 CLEO 實驗組時，面對 CLEO 數據，思考其意義。11 月份某一夜，在反覆推敲與對照之後，我注意到了一件事情。後來我對 CLEO 的朋友說，那一夜是我近來最受用、最充實的一夜。

我注意到了什麼呢？大約在 1997 年，主要是因 B_s 介子混合強度下限在實驗上的推展，有一批人從事 Cabibbo-小林-益川矩陣 (CKM；前述 V_{ub} 即為其中一重要矩陣元) 的正性分析，推斷 γ 大小當在 60° 上下，且至為精確。這個結果，雖然其方法備受質疑，但卻深入人心。譬如我們在作「新物理」分析時，便將 γ 設定在 60° 。我首先注意到， $\pi^+\pi^-$ 衰變強度大約等於 K 的「印象」，其實是因為大家 (如 AKL 及 CCTY) 以 $\gamma = 60^\circ$ 為基準的緣故。我們在前面已注意到，若 $\gamma > 60^\circ$ ， $K\pi$ 衰變率增加特別是進到第二象限約 180° 時達到極大值。但我們發現，以我們對 CKM 矩陣之已知性質，可推論 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 衰變率之 γ 依存性與 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 衰變率恰成負相關 (negative correlation)，亦即當 $K\pi$ 隨 γ 增大而上升時， $\pi^+\pi^-$ 則下降，而反之亦然，如圖一所示。我們找到了 $\pi^+\pi^-$ 遠小於 $K\pi$ 的自然機制。

我第二天與康乃爾大學主導 $K\pi/\pi^+\pi^-$ 分析

之 J. Alexander 教授送 e-mail，問他除了 $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$ 散射把 $\pi^+\pi^-$ 「吸收」了的怪異可能外，他還想不想知道別的辦法。他答曰：想死了！我便到他辦公室，講解給他聽，他十分高興說不知為何沒有聽人提起，並給我不少建議。

我們當時除了指出 $\pi\pi \ll K\pi$ 表示 γ 相角在第二象限而非第一象限外，也在 $K^+\pi^-$ ， $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 及 $B^+ \rightarrow \pi^+\pi^+$ 等衰變式中尋得旁證。12 月至 1 月，雖因寫「卓越計劃」而延遲，但我終於在 2 月份離開 BNL 前寫出論文 [3]。

讓我們略略說明這當中的基礎物理。如圖二所示， $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 及 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 之樹圖振幅分別正比於 $V_{us}^*V_{ub}$ 及 $V_{ud}^*V_{ub}$ ，而圈圖則正比於 $V_{ts}^*V_{tb}$ 。前兩者同相位 (均正比於 γ) 而後兩者則因已知 (「粒子數據群」相角約定下) $V_{ts}^*V_{tb} \cong -|V_{ts}| |V_{tb}| e^{-i\eta}$ ， $V_{td}^*V_{tb} \cong (1 - i\eta) \times |V_{us}| |V_{ub}|$ ，而 $1 - i\eta > 0$ ，所以我們很快看到，當相角使 T-P 干涉在 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 為建設性時，在 $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 則成為相消性，亦即前述 $K^+\pi^-$ 與 $\pi^+\pi^-$ 對 γ 依存度的負相關。我們也馬上理解到為何圖一 $K^+\pi^-$ ， $K^+\pi^0$ ， $\pi^+\pi^-$ 等曲線大致為 γ 角之三角函數。

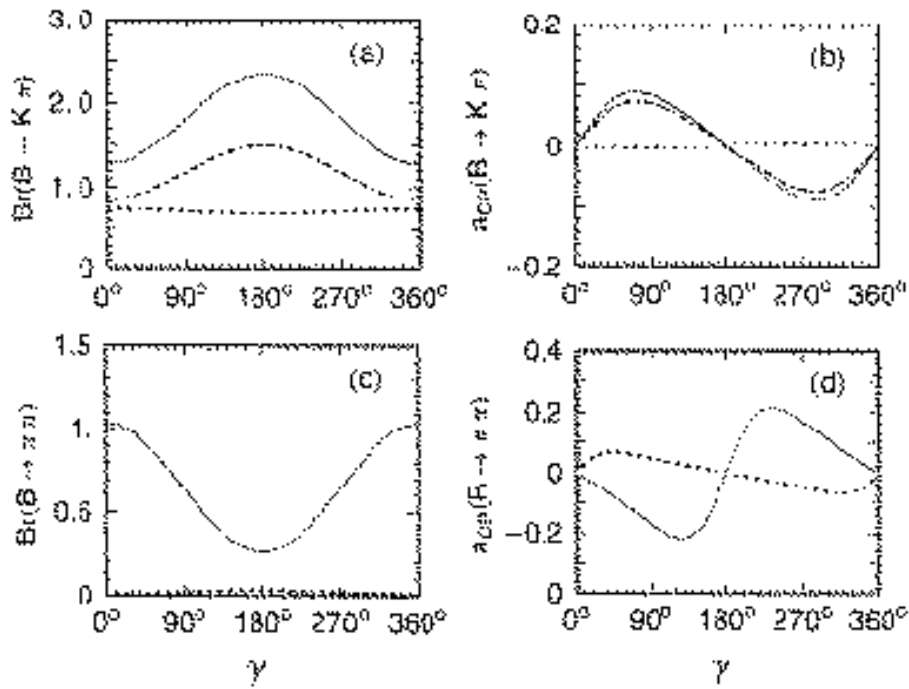
對實驗數據能夠提出最直觀而簡單的解釋是令人欣慰的。

四、驚愕：「因子化」在二體無魅 B 衰變中成立！？

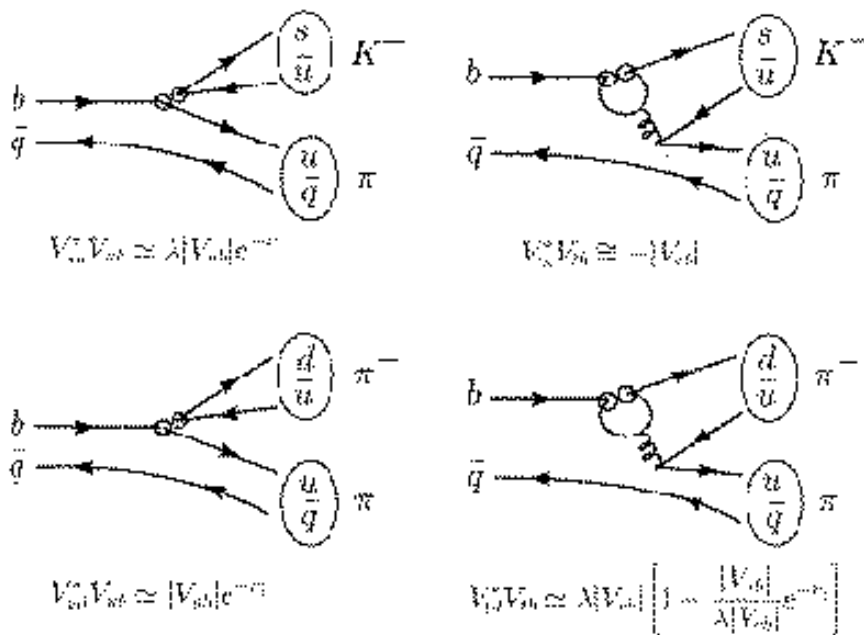
前述之觀察雖然簡單扼要，但我必須說明我在 1998 年 11 月所受之震撼及想法上的改變。

圖二所繪，實為「因子化」 B 衰變圖像，亦即幾乎以夸克層次之物理來解釋所觀測到的現象。我在 10 餘年前開始從事 B 物理研究時，集中在所謂「通括性」(inclusive) 衰變，因為藉著「表裡 (對等)」性 (duality) 之論證，這些過程大致可與夸克層次之反應畫上等號。但我堅持未再去深入討論「特定性」(exclusive) 衰變，如 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ ，因為實在看不出夸克層次的現象如何能透過「強子化」(hadronization) 之迷霧 (或，「毛玻璃」) 而顯出來。強作用具非微擾特性，太難了。

回顧起來，我在 1998 年初的切入點 [1]，是玩「新物理」遊戲，接受「因子化」為工具討論 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 等對 γ 之依存度。暑假時仍是玩票性的指出 γ 依存度對解釋 $K^0\pi^+/K^+\pi^-$ 之功用 [2]。直到我們在 CLEO 實驗組，以較宏觀



圖一 B $K\pi, \pi\pi$ 衰變率及 CP 不對稱 a_{CP} 之 依存性。圖(a)、(b)在 $\gamma = 180^\circ$ 自上至下為 $K^+\pi^-, K^0\pi^+, K^+\pi^0$ 及 $K^0\pi^0$ ，圖(c)、(d)則為 $\pi^+\pi^0, \pi^+\pi^-$ 及 $\pi^0\pi^0$



圖二 B^0, K^+, π^+ 衰變之樹圖與企鵝圖振幅及相關之 CKM 矩陣元

的態度將已知之「因子化」公式與已量得的數據一一檢示比對時，驀然發現他們都若合符節但必須把 γ 角從第一象限調大至第二象限。這對我是個極大的衝擊，我把它比為一個

「宗教性」的感化經驗：我從全然不信「因子化」會成立，轉變成相當相信因子化在（未受打壓的）B 介子無魅衰變中大致成立。這個轉變，我把它反應在 1999 年 2 月份投出的文章

中 [3]：若 $\cos \gamma < 0$ (亦即 γ 相角在二、三象限之數學化表出) 則「因子化」為稀有 B 衰變數據所支持；亦即 γ 在第二象限與因子化在稀有 B 衰變中成立是唇齒相依的。

這個宣告，使我們與 CKM 分析所間接推論的 $\gamma \sim 60^\circ$ 起了衝突。然而，到了 1999 年底，所有的 B 工作者已轉而使用大相角，不再用 $\gamma \sim 60^\circ$ 了。而 2000 年暑假之大阪高能大會中 Belle 及 BaBar 實驗所公佈之 $\sin^2 \beta$ 值亦遠小於 CKM 分析所預期之 0.7 (小於其半!)，不但使 CKM 分析遭到質疑，「新物理」的存在幾乎可說是呼之欲出了。

值得一提的是，自 1999 年起歐美之 Beneke 等作者與東亞之李湘楠 (台灣) 三田等作者，分別提出從微擾 QCD 方法，討論「因子化」在 B 介子無魅衰變中大致成立之推演與證明。我們的貢獻，乃是從實驗數據推論 (或預告) 因子化當成立 (若 $\gamma > 90^\circ$)。

二、結語：宏觀與微觀

我們所帶出的信息，雖如上述「若 $\gamma > 90^\circ$ 左右，則因子化分析可解釋 B 介子稀有衰變率」，亦即 γ 相角可藉樹圖與圈圖 (企鵝圖) 之相干而僅從平均分支比得出，但我在這裡，還要略為推演一下實驗與理論的互動，以及「見林」與「見樹」在作研究上的不同功用。

在 1997 年之前，咸信 γ 角是最難獲得的。

但自 1997 年起，實驗數據首先引出如今已失效的 Fleischer-Mannel 限制，而後續十來個稀有 B 衰變分別出現，使得 1997 年回想起來，僅是個序幕。實驗達到一千萬 B 介子衰變數據門檻的序曲。當衰變式如一個個音符般出現時，我們不但要仔細聆聽欣賞每一個音符的鏗鏘，或許更重要的，是要去欣賞與體會大自然這音樂大師在樂章中所譜下的悠揚旋律。我相信我們在眾「樂迷」牽引下不但聽進了各個音符，更體會出了「作曲家」的一部份心意 (大 γ 角與因子化)。這個美感是動人的。

下個樂章即將響起！2000 年已證明 Belle 及 BaBar 兩個「樂團」之實力。我們離一億個 B 介子衰變數據已指日可待。且聽樂聲琮琤中大自然又將再給我們什麼啟示。(不要只聽見音符，要聽出曲子。)

參考文獻

- [1] X. G. He, W. S. Hou and K. C. Yang, Phys. Rev. Lett., **81**, 5738 (1998).
- [2] N. G. Deshpande, X. G. He, W. S. Hou and S. Pakvasa, Phys. Rev. Lett., **82**, 2240 (1999).
- [3] X. G. He, W. S. Hou and K. C. Yang, Phys. Rev. Lett., **83**, 1100 (1999).