

# 2004 年諾貝爾物理獎介紹— 漸近自由

文/高涌泉



葛羅斯



波力徹



威爾切克

獲得今年諾貝爾物理獎的是三位美國籍理論物理學者—葛羅斯(D. Gross, 1941-)、波力徹(D. Politzer, 1949-)、與威爾切克(F. Wilczek, 1951-)。葛羅斯目前是美國加州大學聖塔芭芭拉校區卡夫力(Kavli)理論物理研究所所長，波力徹與威爾切克則分別是美國加州理工學院(Caltech)與麻省理工學院(MIT)的物理教授。他們三人是因為「發現強交互作用中的**漸近自由**(asymptotic freedom)」而獲獎。這項工作是他們在 1973 年完成的，當時葛羅斯是普林斯頓大學的物理教授，威爾切克是他所指導的研究生，兩人一起在《物理評論通訊》(Physical Review Letters)發表了一篇三頁短文，宣布他們合作計算的結果；波力徹當時則是哈佛大學的研究生，獨自一人完成了計算，他的文章也只有三頁，也是出現在《物理評論通訊》，恰好緊跟在葛、威二人的文章之後。對於威爾切克、波力徹二人來說，這兩篇得獎文章是他們生平的第一篇文章。

漸近自由是非常奇特的性質，一般的場論並沒有這種性質，葛、波、威三人發現**楊—密爾斯規範場**(Yang-Mills gauge fields)是唯一的例外，所以恰好可以用來解決長久以來令人困惑的質子、中子等強子結構之謎。人們也因而才了解以楊—密爾斯規範場為基礎的**量子色動力學**(Quantum Chromodynamics, 簡稱

QCD)或許正是描述夸克之間的交互作用形式的正確理論。因此漸近自由的發現可以說是解決強交互作用之謎的關鍵，所以高能物理界早就預期葛、波、威三人遲早會獲得諾貝爾獎。

大致上說，能夠獲得諾貝爾獎肯定的理論物理學家都是頭角崢嶸的不凡人物，今年獲獎的三人也不例外。但是從某個觀點看，這三個人的工作是「凡人」的工作，因為他們並沒有像某些理論物理學家，例如費曼(R. P. Feynman, 1918-1988)、許溫格(J. Schwinger, 1918-1994)、楊振寧(1922-)等人(且不論更上一代的海森堡、狄拉克等大師)那樣，能夠提出漂亮的理論來，而只是利用當時已有的計算工具，搶先一步在楊—密爾斯規範場理論中發現了漸近自由這個奇怪的性質；威爾切克自己承認：「很明顯地，漸近自由正等著被人發現，即使我們沒有發現它，物理的進展也不會延緩太久。」可見當時一切條件其實都已成熟了，漸近自由已快呼之欲出(事實上，已有其他人知道這項性質，但並未正式發表；見下文)。不過葛、波、威三人能夠拔得頭籌，也不是純然僥倖，因為他們的確有過人的見識與能力。

在解釋所謂「一切條件都已成熟」的意思之前，我先說明當時高能物理學家所面對的一個難題。這是

難題來自弗利德曼(J. L. Friedman, 1930-)、肯達爾、(H. W. Kendall, 1926-1999)、泰勒(R. E. Taylor, 1929-)等人在 1960 年代於美國史坦福線性加速器中心(SLAC)所做的「**深度非彈性散射**」(deep inelastic scattering)實驗。這個實驗的構想很簡單：將高能電子射上質子，然後觀測散射出來的粒子。實驗的結果大致上可以這麼描述(依據理論學家布約肯(J. D. Bjorken)與費曼等人的分析)：質子內部有更小的夸克，電子和質子的深度非彈性散射可以看成是電子與夸克的彈性碰撞，而且這些夸克是近乎**自由**、彼此沒有交互作用的粒子。換句話說，弗利德曼等人的實驗證實了夸克的存在。夸克是葛爾曼(M. Gell-Mann, 1929-)在 1960 年代初期所提出的概念—它們是自旋 1/2 的費米子，帶有分數電荷(例如 1/3 電子電荷)。葛爾曼認為所有參與強交互作用的重子(baryon, 如質子)與介子(meson, 如  $\pi$  介子)都是由夸克所組成的。由於夸克帶有前所未見的分數電荷，是相當奇怪的東西，所以不少人對於夸克這個假設半信半疑。直到 SLAC 的深度非彈性散射實驗結果出現，夸克才從「假設」變成「事實」。弗利德曼、肯達爾、與泰勒三人為此獲得了 1990 年諾貝爾物理獎。不過這個實驗的另一項結論對於理論學家來說則引來一個難題：夸克既然擠在質子內很小的空間之中，應該是很強烈地被束縛著，它的行為怎麼可能像是自由粒子呢？它們彼此間為什麼沒有什麼交互作用呢？

傳統上，我們用「**荷**」(charge)這個(耦合)參數來指明交互作用的大小：兩個粒子間交互作用的強度和它們所帶(相對應於這個特定交互作用)的荷有關，荷越大，作用強度就越強。以大家熟悉的電磁交互作用為例，所謂的荷指的就是電荷，兩個帶電粒子之間的力和兩者電荷的乘積成正比，所以電荷是電磁交互作用強度的指標。至於量子色動力學中的荷則稱為**色荷**(color charge)，它是強交互作用大小的指標。如果粒子間沒有什麼交互作用，它們帶的荷一定很小。不過在量子場論中，我們必需考慮量子場起伏所造成的效應，例如真空極化(vacuum polarization)等。因此我們得要處理荷的**重整化**(renormalization of charge)問

題，也就是我們必需區別重整化前後的荷，兩者是不一樣的；一般實驗上測量到的是重整化後的荷。以量子電動力學為例，真空極化會導致**屏蔽效應**(screening effect)，所以重整化後的電荷比重整化前所謂的「裸電荷」(bare electric charge)要小；換句話說，我們如果離開一個電荷越遠，由於熟知的屏蔽效應，所量到(已重整化)電荷會比本來的裸電荷要小，但是如果越靠近電荷，所量到電荷就會較大。這種情況是一般認知中的「正常」情形。反過來說，萬一在某種理論中出現了「反常」的**反屏蔽效應**(anti-screening effect)，那麼越靠近荷，所感受到的荷反而就會越小。這種反常的性質就是所謂的「漸近自由」。我們似乎需要這種奇特的效應才能解釋 SLAC 的實驗結果。在量子場論中，了解**已重整化荷**如何隨著測量距離而變是非常重要的事，因為我們可以由此理解交互作用的**強度**在不同**標度**(scale)下的變化。

理論物理學家已經發展出一套完整的理論，來描述物理在不同的標度之下會有什麼變化。這套學問稱為「**重整化群**」(renormalization group)，裡頭的核心議題正是已重整化荷會如何隨著標度而變。為了說清楚已重整化荷的變化情況，理論專家定義了一個函數，一般稱之為**貝他函數**( $\beta$  function)。大致上講，它是已重整化荷對於(能量)標度的**變化率**；只要掌握了貝他函數，我們就能夠了解理論的重要性質，也就是**交互作用在距離減小的時候到底是變強還是變弱**。重整化群中有一全套方法可以用來計算特定理論中的貝他函數，所以是非常重要的場論工具。最早提出重整化群概念的正是提出夸克假設的葛爾曼以及其夥伴妻(F. Low)等二人，他們在 1954 年發表了一篇重要的文章，裡面列出了重整化群方程式。(其實當時在歐洲以及俄羅斯也有人在使用重整化群的概念，但是他們的影響較小。)不過在葛爾曼與妻之後，這方面的研究並沒有什麼太大的進展，一直要等到威爾遜(K. Wilson, 1936-)在 1960 年代中期之後將它發展成重要的場論工具，人們才真正深刻理解重整化群的意義。威爾遜並且在 1970 年代初將重整化群技術應用於臨界現象(critical phenomena)，計算出臨界指數(critical

exponent)，解決了數十年來的難題。爲此，威爾遜獲得 1982 年的諾貝爾物理獎。

威爾遜在 1950 年代底於加州理工學院攻讀博士學位時的指導教授正是葛爾曼，所以他對於粒子物理尤其是強交互作用並不陌生，因此可以預期他會將重整化群應用到強交互作用之上。他的確也這麼做了一他在 1970 年發表了一篇文章，題目就是「重整化群與強交互作用」。這是一篇很具遠見的文章，裡頭解釋了如何用重整化群的觀念與技術來探討強交互作用的問題，並且列舉了各種邏輯上可能的貝他函數，可惜威爾遜恰恰就遺漏了可以導致漸進自由的貝他函數。他之所以如此不是沒有原因的：首先，威爾遜很了解量子電動力學中屏蔽效應的機制，並且知道這種機制也適用於他所知道的一切「正常」場論，而他並不熟悉楊-密爾斯規範場，所以他壓根沒想到**反屏蔽效應**的可能性。當然，當時其他人也沒能想得到這一點。

楊-密爾斯規範場論誕生於 1954 年，這是一個描述**帶荷的自旋 1(向量)粒子**的理論。光子也是自旋 1 粒子，但是光子不帶荷，所以光子之間沒有直接的交互作用。楊-密爾斯粒子由於帶荷，因此彼此間有交互作用。我們可以說楊-密爾斯規範理論是描述光子的馬克斯威爾理論的推廣。由於自旋 1 粒子在很多地方都派得上用場(因爲它們和光子一樣，可以用來傳遞交互作用)，人們很快地就拿楊-密爾斯規範場論來建構模型，用以描述各種基本交互作用。一個例子就是 QCD—在 QCD 中，楊-密爾斯粒子稱爲**膠子(gluon)**有傳遞強交互作用的功能。此外如果我們把楊-密爾斯規範場論與**希格斯機制(Higgs mechanism)**結合起來，就可以得到帶質量又帶荷的自旋 1 粒子理論，正好適用於描述**弱交互作用**。無論有沒有加入希格斯機制，楊-密爾斯理論因爲有微妙的規範對稱，數學上很不好處理，尤其是量子化與重整化的問題相當麻煩。經過了兩三個世代的努力，這些深奧的問題終於被一位年輕荷蘭研究生特胡夫特(G. 't Hooft, 1946-)在 1971 年解決了。當年特胡夫特的這項成就(特別是

證明了加入希格斯機制後的可重整化性)震驚了高能理論物理學界，他和其指導教授維特曼(M. Veltman, 1931-)也因爲「闡明了電弱交互作用的量子結構」而獲得 1999 年的諾貝爾物理獎。

葛羅斯是強交互作用專家，在 1970 年代初決心好好面對 SLAC 深度非彈性散射所引出的理論問題，也就是自由夸克的問題。他那時已經從威爾遜那裡學到了重整化群理論，也知道除了當時很熱門的楊-密爾斯規範場論之外，所有的理論都不具備漸進自由的特性。所以他就決定和學生威爾切克一起解決這漏網之魚，兩人便開始計算楊-密爾斯理論的貝他函數。如果貝他函數在原點附近大於零，這個理論就和一般理論一樣，有正常的**屏蔽效應，因此可以排除**。波力徹當時則是哈佛物理系高年級研究生，正急著尋找博士論文題目，就想到了何不把他從指導教授寇曼(S. Coleman, 1937-)那裡學到的重整化群方程式，用於楊-密爾斯規範場論，以了解這個理論的低能量行爲。(波力徹當時受到寇曼與師兄溫伯格(Eric Weinberg)一篇討論對稱破缺的文章影響頗深。依波力徹後來回憶，溫伯格自己博士論文的附錄本來應該包括楊-密爾斯理論的貝他函數，以做爲寇曼-溫伯格原先研究的推廣。但是波力徹猜測溫伯格自己可能覺得論文材料已夠，也就沒有試著去把這貝他函數算出來。)寇曼在 1972、3 年間正好從哈佛休假到普林斯頓研究，波力徹後來回憶說：「我下到普林斯頓去找我的指導教授寇曼，問他我(想要計算楊-密爾斯規範場論的貝他函數)的想法如何，他認爲是一個好點子。我問他有沒有其他人已經算過？他說就他所知沒有，但是我們應問一下葛羅斯，我們就到隔壁問葛羅斯，他說沒有。我稍微和葛羅斯談了一下爲什麼計算不會太困難，雖然它過去看起來極爲複雜，但是只要用點腦筋，一切就蠻直接了當的。」由於重整化群和楊-密爾斯規範場論都是當時的熱門領域，所以如果葛羅斯、威爾切克、波力徹三人沒有想到研究這個題目，其他人也絕對會去做這項計算。這就是爲什麼威爾切克會說「漸近自由正等著被人發現」，因爲一切條件都已成熟。

葛羅斯原先相信楊—密爾斯規範場論也會和其他「正常」的理論一樣，沒有漸進自由的性質，這麼一來他們就可以宣稱量子場論無法解釋深度非彈性散射，而可以被放棄。事實上，葛羅斯與威爾切克在完成計算之後還以為他們殺掉了楊—密爾斯理論，一直到開始下筆寫論文才發現他們弄錯了正負號—正確的貝他函數在原點附近應該是**小於零**的。如此一來，他們就發現了漸進自由—夸克越靠近，彼此的影響越小，就越自由；反過來說，當夸克彼此越遠離，交互作用就越強，所以可以永遠綁在一起，而不能成為自由粒子（這種現象稱為「**夸克局限** (quark confinement)」。因此以楊—密爾斯規範場論為基礎的 QCD 正好可以用來解釋史坦福加速器的實驗。強交互作用之謎解決了！依威爾切克的講法，他很快就想到他們可能因此獲得諾貝爾獎。至於孤軍奮鬥的波力徹，他所得到的答案也和葛、威二人的答案一致。其實以時間先後而論，由於波力徹沒有和葛、威一樣歷經更改正負號的轉折，所以他可以說比葛、威師徒還早一步得到正確的答案。

前面提過最早發現漸進自由的其實並非葛、威、波三人—最了解楊—密爾斯理論的特胡夫特早已知道這個理論具有這項性質，但是他由於一來還不清楚它在實驗上的意義，二來還正忙於自己的研究，而沒有急著發表他的發現，後來特胡夫特對此頗感懊惱。另外有兩個俄國人在一九六四年也知道了這個結果，但是也同樣地沒有了解其物理意義。

葛、威、波三人純然是透過複雜的費曼圖計算去得到貝他函數，對於漸進自由背後的物理機制其實並不那麼了解，否則他們不會一開始對於關鍵的正負號那麼沒有把握。最早了解漸進自由物理機制的正是特胡夫特，他的說法是這樣子的：一般的理論(例如電動力學)中有屏蔽效應，所以我們越靠近(電)荷，所量到(電)荷就會越大。反過來說，如果要有漸進自由，我們就得要有反屏蔽效應。可是從**磁性**—而非電性—的角度來看，屏蔽效應就等同「**抗磁性** (diamagnetism)」，而反屏蔽效應就等同「**順磁性**

(paramagnetism)」。因為從基礎物理可知**帶自旋又帶荷的粒子可以導致順磁性**，而楊—密爾斯粒子恰好**帶自旋又帶荷**，所以包含楊—密爾斯粒子的系統很自然地就**可能**具有順磁性；我們只需透過一些不太困難的計算就可以確認這個性質。一旦了解了楊—密爾斯規範場論中的順磁性，也就可以了解反屏蔽效應的由來，漸進自由這個性質也就不會那麼令人驚訝了。

威爾切克在獲獎之後，寫了一封感謝信給眾多向他道賀的人，信中特別感謝寇曼，因為「這麼一位特別聰明的人，會對於我們的工作感興趣，就夠鼓舞我們的了，何況他還問了很多有挑戰性的問題，有助於我們一步步地掌握了最後的結果。」信的最後還說：「我要謝謝葛爾曼與特胡夫特沒有把一切都發明掉，還留下一些東西給我們做。」

附記：2004 年的諾貝爾物理獎公佈之後，葛羅斯與威爾切克當然非常興奮，兩人都很高興地公開接受眾人的祝賀。可是波力徹卻出人意料之外的低調，甚至未出席校方特別為他舉辦的記者會。葛羅斯與威爾切克兩人去年十二月初在斯德哥爾摩得獎演說的錄影於事後馬上就被放到諾貝爾獎網站 (<http://www.nobel.se>) 上，供人們在網上觀看。可是波力徹的演講錄影(題目是有些耐人尋味的 "The Dilemma of Attribution") 卻沒有同時也出現在網站上，引人特別好奇他究竟講了什麼。波力徹在今年初終於將其諾貝爾演講稿放在他個人的網頁 (<http://theory.caltech.edu/people/politzer/>) 上，裡頭說了一些人們以前不知道的故事。

---

---

作者簡介

高涌泉

台大物理系教授

[yckao@phys.ntu.edu.tw](mailto:yckao@phys.ntu.edu.tw)