

美與物理學

● 楊振寧

十九世紀物理學的三項最高成就是熱力學、電磁學與統計力學。其中統計力學奠基於麥克斯韋 (J. Maxwell, 1831-1879)、波耳茲曼 (L. Boltzmann, 1844-1905) 與吉布斯 (W. Gibbs, 1839-1903) 的工作。波耳茲曼曾經說過^①：

一位音樂家在聽到幾個音節後，即能辨認出莫扎特 (Mozart)、貝多芬 (Beethoven) 或舒伯特 (Schubert) 的音樂。同樣，一位數學家或物理學家也能在讀了數頁文字後辨認出柯西 (Cauchy)、高斯 (Gauss)、雅可比 (Jacobi)、亥姆霍茲 (Helmholtz) 或克爾期豪夫 (Kirchhoff) 的工作。

對於他的這一段話也許有人會發生疑問：科學是研究事實的，事實就是事實，那裏會有甚麼風格？關於這一點我曾經有過如下的討論^②：

讓我們拿物理學來講吧。物理學的原理有它的結構。這個結構有它的美和妙的地方。而各個物理學工作者，對於這個結構的不同的美和妙的地方，有不同的感受。因為大家有不同的感受，所以每位工作者就會發展他自己獨特的研究方向和研究方法。也就是說他會形成他自己的風格。

今天我的演講就是要嘗試闡述上面這一段話。我們先從兩位著名物理學家的風格講起。

* 1997年1月17日在香港中華科學與社會協進會與香港中文大學主辦的演講會上的講詞，講題原為「科學工作有沒有風格？」。



圖1 狄拉克1969年
在美國紐約州石溪
(L. Eisenbud攝)。

一 狄拉克

狄拉克 (P. Dirac, 1902-1984) (圖1) 是二十世紀一位大物理學家。關於他的故事很多。譬如：有一次狄拉克在普林斯頓大學演講。演講完畢，一位聽眾站起來說：「我有一個問題請回答：我不懂怎麼可以從公式 (2) 推導出來公式 (5)。」狄拉克不答。主持者說：「狄拉克教授，請回答他的問題。」狄拉克說：「他並沒有問問題，只說了一句話。」

這個故事所以流傳極廣是因為它確實描述了狄拉克的一個特點：話不多，而其內含有簡單、直接、原始的邏輯性。一旦抓住了他獨特的、別人想不到的邏輯，他的文章讀起來便很通順，就像“秋水文章不染塵”，沒有任何渣滓，直達深處，直達宇宙的奧秘。

狄拉克最了不得的工作是1928年發表的兩篇短文，寫下了狄拉克方程^③：

$$(\mathbf{pc}\boldsymbol{\alpha} + mc^2\boldsymbol{\beta})\psi = E\psi \quad (\text{D})$$

這個簡單的方程式是驚天動地的成就，是劃時代的里程碑：它對原子結構及分子結構都給予了新的層面和新的極準確的了解。沒有這個方程，就沒有今天的原子、分子物理學與化學。沒有狄拉克引進的觀念就不會有今天醫院裏通用的核磁共振成像 (MRI) 技術，不過此項技術實在只是狄拉克方程的一項極小的應用。

狄拉克方程“無中生有、石破天驚”地指出為甚麼電子有「自旋」(spin)，而且為甚麼「自旋角動量」是1/2而不是整數。初次了解此中奧妙的人都無法不

驚歎其為“神來之筆”，是別人無法想到的妙算。當時最負盛名的海森伯 (W. Heisenberg, 1901-1976) 看了狄拉克的文章，無法了解狄拉克怎麼會想出此神來之筆，於1928年5月3日給泡利 (W. Pauli, 1900-1958) 寫了一封信描述了他的煩惱④：

為了不持續地被狄拉克所煩擾，我換了一個題目做，得到了一些成果。
(按：這成果是另一項重要貢獻：磁鐵為甚麼是磁鐵。)

狄拉克方程之妙處雖然當時立刻被同行所認識，可是它有一項前所未有的特性，叫做「負能」現象，這是大家所絕對不能接受的。狄拉克的文章發表以後三年間關於負能現象有了許多複雜的討論，最後於1931年狄拉克又大膽提出「反粒子」理論 (Theory of Antiparticles) 來解釋負能現象。這個理論當時更不為同行所接受，因而流傳了許多半羨慕半嘲弄的故事。直到1932年秋安德森 (C.D. Anderson, 1905-1991) 發現了電子的反粒子以後，大家才漸漸認識到反粒子理論又是物理學的另一個里程碑。

二十世紀的物理學家中，風格最獨特的就數狄拉克了。我曾想把他的文章的風格寫下來給我的文、史、藝術方面的朋友們看，始終不知如何下筆。去年偶然在香港大公報大公園一欄上看到一篇文章，其中引了高適 (700-765) 在《答侯少府》中的詩句：“性靈出萬象，風骨超常倫。”我非常高興，覺得用這兩句詩來描述狄拉克方程和反粒子理論是再好沒有了：一方面狄拉克方程確實包羅萬象，而用“出”字描述狄拉克的靈感尤為傳神。另一方面，他於1928年以後四年間不顧玻爾 (N. Bohr, 1885-1962)、海森伯、泡利等當時的大物理學家的冷嘲熱諷，始終堅持他的理論，而最後得到全勝，正合“風骨超常倫”。

可是甚麼是“性靈”呢？這兩個字聯起來字典上的解釋不中肯。若直覺地把“性情”、“本性”、“心靈”、“靈魂”、“靈感”、“靈犀”、“聖靈” (Ghost) 等加起來似乎是指直接的、原始的、未加琢磨的思路，而這恰巧是狄拉克方程之精神。剛好此時我和香港中文大學童元方博士談到《二十一世紀》1996年6月號錢鎖橋的一篇文章，才知道袁宏道 (1568-1610) (和後來的周作人 [1885-1967]，林語堂 [1895-1976] 等) 的性靈論。袁宏道說他的弟弟袁中道 (1570-1623) 的詩是“獨抒性靈，不拘格套”，這也正是狄拉克作風的特徵。“非從自己的胸臆流出，不肯下筆”，又正好描述了狄拉克的獨創性！

二 海森伯

比狄拉克年長一歲的海森伯 (圖2、3) 是二十世紀另一位大物理學家，有人認為他比狄拉克還要略高一籌⑤。他於1925年夏天寫了一篇文章，引導出了量子力學的發展。三十八年以後科學史家庫恩 (T. Kuhn, 1922-1996) 訪問他，談到



圖2 海森伯1924年前後在德國格廷根(Göttingen) (原刊於D.C. Cassidy, *Uncertainty, The Life and Science of Werner Heisenberg*, W.H. Freeman, 1992)。

構思那個工作時的情景。海森伯說^⑥：

爬山的時候，你想爬某個山峰，但往往到處是霧……你有地圖，或別的索引之類的東西，知道你的目的地，但是仍墮入霧中。然後……忽然你模糊地，只在數秒鐘的功夫，自霧中看到一些形象，你說：「哦，這就是我要找的大石。」整個情形自此而發生了突變，因為雖然你仍不知道你能不能爬到那塊大石，但是那一瞬間你說：「我現在知道我在甚麼地方了。我必須爬近那塊大石，然後就知道該如何前進了。」

這段談話生動地描述了海森伯1925年夏摸索前進的情形。要了解當時的氣氛，必須知道自從1913年玻爾提出了他的原子模型以後，物理學即進入了一個非常時代：牛頓(I. Newton,



圖3 狄拉克與海森伯1930年前後在美國劍橋(原刊於D.C. Cassidy, *Uncertainty, The Life and Science of Werner Heisenberg*, W.H. Freeman, 1992)。

1642-1727) 力學的基礎發生了動搖，可是用了牛頓力學的一些觀念再加上一些新的往往不能自圓其說的假設，卻又可以準確地描述許多原子結構方面奇特的實驗結果。奧本海默(J.R. Oppenheimer, 1904-1967) 這樣描述這個不尋常的時代^⑦：

那是一個在實驗室裏耐心工作的時代，有許多關鍵性的實驗和大膽的決策，有許多錯誤的嘗試和不成熟的假設。那是一個真摯通訊與匆忙會議的時代，有許多激烈的辯論和無情的批評，裏面充滿了巧妙的數學性的擋架方法。

對於那些參加者，那是一個創新的時代，自宇宙結構的

新認識中他們得到了激奮，也嚐到了恐懼。這段歷史恐怕永遠不會被完全紀錄下來。要寫這段歷史須要有像寫奧迪帕斯 (Oedipus) 或寫克倫威爾 (Cromwell) 那樣的筆力，可是由於涉及的知識距離日常生活是如此遙遠，實在很難想像有任何詩人或史家能勝任。

1925年夏天，23歲的海森伯在霧中摸索，終於摸到了方向，寫了上面所提到的那篇文章。有人說這是三百年來物理學史上繼牛頓的《數學原理》以後影響最深遠的一篇文章。

可是這篇文章只開創了一個摸索前進的方向，此後兩年間還要通過玻恩 (M. Born, 1882-1970)、狄拉克、薛定諤 (E. Schrödinger, 1887-1961)、玻爾等人和海森伯自己的努力，量子力學的整體架構才逐漸完成^⑩。量子力學使物理學跨入嶄新的時代，更直接影響了二十世紀的工業發展，舉凡核能發電、核武器、激光、半導體元件等都是量子力學的產物。

1927年夏，25歲尚未結婚的海森伯當了萊比錫 (Leipzig) 大學理論物理系主任。後來成名的布洛赫 (F. Bloch, 1905-1983，核磁共振機制創建者) 和特勒 (E. Teller, 1908-，「氫彈之父」，我在芝加哥大學時的博士學位導師) 都是他的學生。他喜歡打乒乓球，而且極好勝。第一年他在系中稱霸。1928年秋自美國來了一位博士後，自此海森伯只能屈居亞軍。這位博士後的名字是大家都很熟悉的——周培源。

海森伯所有的文章都有一共同特點：朦朧、不清楚、有渣滓，與狄拉克的文章的風格形成一個鮮明的對比。讀了海森伯的文章，你會驚歎他的獨創力 (originality)，然而會覺得問題還沒有做完，沒有做乾淨，還要發展下去；而讀了狄拉克的文章，你也會驚歎他的獨創力，同時卻覺得他似乎已把一切都發展到了盡頭，沒有甚麼再可以做下去了。

前面提到狄拉克的文章給人“秋水文章不染塵”的感受。海森伯的文章則完全不同。二者對比清濁分明。我想不到有甚麼詩句或成語可以描述海森伯的文章，既能道出他的天才的獨創性，又能描述他的思路中不清楚、有渣滓、有時似乎茫然亂摸索的特點。

三 物理學與數學

海森伯和狄拉克的風格為甚麼如此不同？主要原因是他們所專注的物理學內涵不同。為了解釋此點，請看圖4所表示的物理學的三個部門和其中的關係：唯象理論 (phenomenological theory) (2) 是介乎實驗 (1) 和理論架構 (3) 之間的研究。(1) 和 (2) 合起來是實驗物理，(2) 和 (3) 合起來是理論物理，而理論物理的語言是數學。

物理學的發展通常自實驗 (1) 開始，即自研究現象開始。關於這一發展過程，我們可以舉很多大大小小的例子。先舉牛頓力學的歷史為例。布拉赫

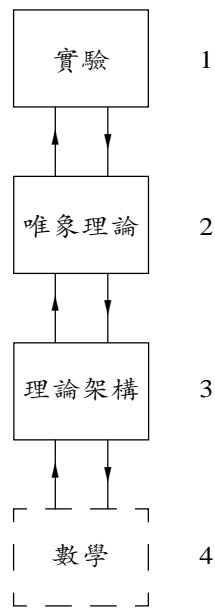


圖4 物理學的三个領域。

(T. Brahe, 1546-1601) 是實驗天文物理學家，活動領域是(1)。他做了關於行星軌道的精密觀測。後來開普勒(J. Kepler, 1571-1630)仔細分析布拉赫的數據，發現了有名的開普勒三大定律。這是唯象理論(2)。最後牛頓創建了牛頓力學與萬有引力理論，其基礎就是開普勒的三大定律。這是理論架構(3)。

再舉一個例子：通過十八世紀末、十九世紀初的許多電學和磁學的實驗(1)，安培(A. Ampère, 1775-1836)和法拉第(M. Faraday, 1791-1867)等人發展出了一些唯象理論(2)。最後由麥克斯韋歸納為有名的麥克斯韋方程(即電磁學方程)，才步入理論架構(3)的範疇。

另一個例子：十九世紀後半葉許多實驗工作(1)引導出普朗克(M. Planck, 1858-1947)1900年的唯象理論(2)。然後經過愛因斯坦(A. Einstein, 1879-1955)的文章和上面提到過的玻爾的工作等，又有一些重要發展，但這些都還是唯象理論(2)。最後通過量子力學之產生，才步入理論架構(3)的範疇。

海森伯和狄拉克的工作集中在圖4所顯示的那一些領域呢？狄拉克最重要的貢獻是前面所提到的狄拉克方程(D)。海森伯最重要的貢獻是海森伯方程 \textcircled{H} ，是量子力學的基礎：

$$pq - qp = -i\hbar。 \quad (\text{H})$$

這兩個方程都是理論架構(3)中之尖端貢獻。二者都達到物理學的最高境界。可是寫出這兩個方程的途徑卻截然不同：海森伯的靈感來自他對實驗結果(1)與唯象理論(2)的認識，進而在摸索中達到了方程式(H)。狄拉克的靈感來自他對數學(4)的美的直覺欣賞，進而天才地寫出他的方程(D)。他們二人喜好的，注意的方向不同，所以他們的工作的領域也不一樣，如圖5所示。(此圖也標明玻爾、薛定諤和愛因斯坦的研究領域。愛因斯坦興趣廣泛，在許多領域中，自(2)至(3)至(4)，都曾做出劃時代的貢獻。)

海森伯從實驗(1)與唯象理論(2)出發：實驗與唯象理論是五光十色、錯綜複雜的，所以他要摸索，要猶豫，要嘗試了再嘗試，因此他的文章也就給讀者不清楚、有渣滓的感覺。

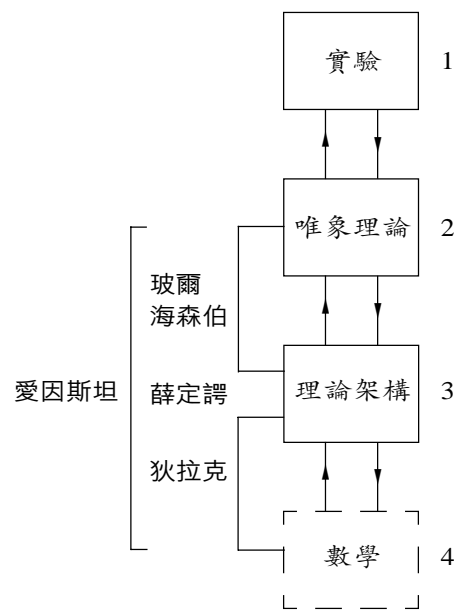


圖5 幾位二十世紀物理學家的研究領域。

狄拉克則從他對數學的靈感出發：數學的最高境界是結構美，是簡潔的邏輯美，因此他的文章也就給讀者“秋水文章不染塵”的感受。

讓我補充一點關於數學和物理的關係。我曾經把二者的關係表示為兩片在莖處重疊的葉片(圖6)。重疊的地方同時是二者之根，二者之源。譬如微分方程、偏微分方程、希爾伯特空間、黎曼幾何和纖維叢等，今天都是二者共用的基本觀念。這是驚人的事實，因為首先達到這些觀念的物理學家與數學家曾遵循完全不同的路徑，完全不同的傳統。為甚麼會殊途同歸呢？大家今天沒有很好的答案，恐怕永遠不會有，因為答案必須牽扯到宇宙觀、知識論和宗教信仰等難題。

必須注意的是在重疊的地方，共用的基本觀念雖然如此驚人地相同，但是重疊的地方並不多，只佔二者各自的極少部分。譬如實驗(1)與唯象理論(2)都不在重疊區，而絕大部分的數學工作也在重疊區

之外。另外值得注意的是即使在重疊區，雖然基本觀念物理與數學共用，但是二者的價值觀與傳統截然不同，而二者發展的生命力也各自遵循不同的莖脈流通，如圖6所示。

常常有年青朋友問我，他應該研究物理，還是研究數學。我的回答是這要看你對那一個領域裏的美和妙有更高的判斷能力和更大的喜愛。愛因斯坦在晚年時(1949年)曾經討論過為甚麼他選擇了物理。他說^⑩：

在數學領域裏，我的直覺不夠，不能辨認那些是真正重要的研究，那些只是不重要的題目。而在物理領域裏，我很快學到怎樣找到基本問題來下功夫。

年青人面對選擇前途方向時，要對自己的喜好與判斷能力有正確的自我估價。

四 美與物理學

物理學自(1)到(2)到(3)是自表面向深層的發展。表面有表面的結構，有表面的美。譬如虹和霓是極美的表面現象，人人都可以看到。實驗工作者作了測量以後發現虹是 42° 的弧，紅在外，紫在內；霓是 50° 的弧，紅在內，紫在外。這種準確規律增加了實驗工作者對自然現象的美的認識。這是第一步(1)。進一步的唯象理論研究(2)使物理學家了解到這 42° 與 50° 可以從陽光在水珠中的折射與反射推算出來，此種了解顯示出了深一層的美。再進一步的研究更深入了

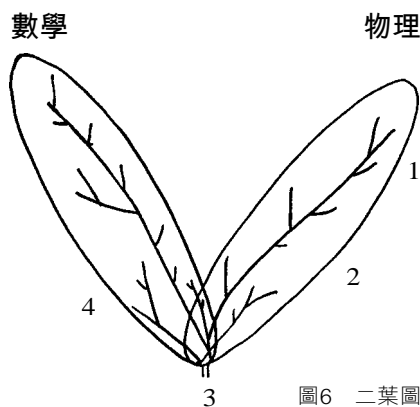


圖6 二葉圖

解折射與反射現象本身可從一個包容萬象的麥克斯韋方程推算出來，這就顯示出了極深層的理论架構(3)的美。

牛頓的運動方程、麥克斯韋方程、愛因斯坦的狹義與廣義相對論方程、狄拉克方程、海森伯方程和其他五、六個方程是物理學理論架構的骨幹。它們提煉了幾個世紀的實驗工作(1)與唯象理論(2)的精髓，達到了科學研究的最高境界。它們以極度濃縮的數學語言寫出了物理世界的基本結構，可以說它們是造物者的詩篇。

這些方程還有一方面與詩有共同點：它們的內涵往往隨着物理學的發展而產生新的、當初所完全沒有想到的意義。舉兩個例子：上面提到過的十九世紀中葉寫下來的麥克斯韋方程是在本世紀初通過愛因斯坦的工作才顯示出高度的對稱性，而這種對稱性以後逐漸發展為二十世紀物理學的一個最重要的中心思想。另一個例子是狄拉克方程。它最初完全沒有被數學家所注意，而今天狄拉克流型(Dirac Manifold)已變成數學家熱門研究的一個新課題。

學物理的人了解了這些像詩一樣的方程的意義以後，對它們的美的感受是既直接而又十分複雜的。

它們的極度濃縮性和它們的包羅萬象的特點也許可以用布雷克(W. Blake, 1757-1827)的不朽名句來描述①：

To see a World in a Grain of Sand
And a Heaven in a Wild Flower
Hold Infinity in the palm of your hand
And Eternity in an hour

它們的巨大影響也許可以用蒲柏(A. Pope, 1688-1744)的名句來描述②：

Nature and nature's law lay hid in night:
God said, let Newton be! And all was light.

可是這些都不夠，都不夠全面地道出學物理的人面對這些方程的美的感受。缺少的似乎是一種莊嚴感，一種神聖感，一種初窺宇宙奧秘的畏懼感。我想缺少的恐怕正是籌建哥德式(Gothic)教堂的建築師們所要歌頌的崇高美、靈魂美、宗教美、最終極的美。

註釋

① 見Ludwig Boltzmann, ed. E. Broda (Oxbow Press, 1983), 23.

② 楊振寧：《讀書教學四十年》(香港：三聯書店，1985)，頁116。

③ 此方程式中 p 是動量， c 是光速(= 300,000公里/秒)， m 是電子的質量， E 是能量， ψ 是波函數。這些都是當時大家已熟悉的觀念。 α 和 β 是狄拉克引進的新觀念，十分簡單但卻影響極大。在物理學和數學中都起了超級作用。

④ 譯自A. Pais, *Inward Bound* (Oxford University Press, 1986), 348。海森伯是當時最被狄拉克方程所煩擾的一位物理學家，因為他是這方面的大專家：1913年玻爾最早提出了量子數的觀念，這些數都是整數。後來於1921年還不到20歲的學生海森伯大膽地提出量子數是1/2的可能。1925年兩位年青的荷蘭物理學家把1/2的量子數解釋成自旋角動量。這一些發展都是唯象理論(2)，它們得到了許多與實驗(1)極端符合的結果，十分成功。可是它們都還只是東拼西湊出來的理論。狄拉克方程則不然，它極美妙地解釋了為甚麼自旋角動量必須是1/2。由此我們很容易體會到當天才的海森伯看了狄拉克方程，在羨佩之餘，必定會產生高度的煩惱。

⑤ 諾貝爾獎金委員會似乎持此觀點：海森伯獨獲1932年諾貝爾獎，而狄拉克和薛定諤合獲1933年諾貝爾獎。

⑥ 譯自A. Pais, *Niels Bohr's Times* (Oxford University Press, 1991), 276。

⑦ 譯自J.R. Oppenheimer, *Science and the Common Understanding* (The Reith Lectures 1953, Simon and Schuster, 1954)。引文最後一句是說荷馬(Homer, 古希臘詩人)和喀萊爾(T. Carlyle, 1795-1881)都恐怕難以勝任。

⑧ 緊跟着海森伯的文章，數月內即又有玻恩與約爾丹(P. Jordan, 1902-1980)的文章和玻恩、海森伯與約爾丹的文章。這三篇文章世稱「一人文章」、「二人文章」及「三人文章」，合起來奠定了量子力學的數學結構。狄拉克和薛定諤則分別從另外的途徑也建立了同樣的結構。但是這個數學結構的物理意義卻一時沒有明朗化。1927年海森伯的「測不準原理」和玻爾的「互補原理」才給量子力學的物理意義建立了「哥本哈根解釋」。

⑨ 事實上海森伯並未能寫下(H)。他當時的數學知識不夠。(H)是在註⑩所提到的二人文章與三人文章中最早出現的。

⑩ 節譯自愛因斯坦的“Autobiographical Notes”，原文見*Albert Einstein, Philosopher-Scientist*, ed. P.A. Schilpp, Open Court, Evanston, Ill. (1949)。

⑪ 陳之藩教授的譯文(見他所寫的《時空之海》[台北：遠東圖書公司，1996]，頁47)如下：

一粒砂裏有一個世界
 一朵花裏有一個天堂
 把無窮無盡握於手掌
 永恆寧非是剎那時光

⑫ 我的翻譯如下：

自然與自然規律為黑暗隱蔽：
 上帝說，讓牛頓來！一切遂臻光明。

楊振寧 當代物理學大師，在基本粒子理論和統計力學方面都曾作出許多卓越貢獻。他在1956年和李政道共同提出在弱衰變過程中宇稱性不守恆的可能，跟着這革命性觀點由實驗證明，整個物理學界為之轟動，楊、李二位在翌年因此獲得諾貝爾物理學獎。楊教授在1954年和米爾斯(R. Mills)所提出的廣義規範場理論，今日已經成為討論一切相互作用的基礎語言和工具，其重要性與廣義相對論可相比擬。楊教授早年先後在西南聯合大學和芝加哥大學攻讀物理學，1949年受聘於普林斯頓高等學術研究所，1966年出任紐約大學石溪分校理論物理所所長迄今，1986年起兼任香港中文大學的博文講座教授。