

# 沃納·海森堡 (1901–1976)

• 楊振寧

沃納·海森堡 (Werner Heisenberg) 是歷史上最偉大的物理學家之一。

當他作為一個年輕的研究者開始工作時，物理學界正處於一種非常混亂而且令人灰心喪氣的狀態，對此，派斯 (Abraham Pais) 曾用狄更斯 (Charles Dickens) 在《雙城記》(A Tale of Two Cities) 中的話，將其描述為①：

這是希望的春天，這是絕望的冬天

人們在做的是一場猜謎遊戲：純粹是通過直覺，一次又一次地，有人提出一些臨時方案，驚人地解釋了光譜物理學中

某些規則，這些了不起的成就讓人歡欣鼓舞。可是進一步的工作總是揭示出新方案的自相矛盾或不完善，於是又帶來了失望。在最後的光明到來之前的那些年月中，這種司空見慣的起伏不定典型地反映在泡利 (Wolfgang Pauli) 在四個月前後寫給克羅尼希 (Ralph Kronig) 的兩封信中②：



物理再一次走入了死胡同。至少對我來說，物理是太困難了。

泡利致克羅尼希

1925年5月21日

海森堡的力學讓我恢復了對生活的興趣。

泡利致克羅尼希

1925年10月9日

\* 為紀念海森堡百年誕辰 (1901-2001) 而作。

在第二封信中，泡利提到的是海森堡在1925年夏天所做的工作。不過這一次與以前那些充滿歡欣與希望但又總是給人帶來失望的時期不同，這是物理學中一個新時代的開端。因為就在泡利寫這兩封信之間的那段時間，海森堡獨自在赫里戈蘭 (Heligoland) 渡假時，得到了一個新的想法，這個新想法將給由牛頓在大約250年前最先建立的偉大的力學科學帶來革命。它帶來了無疑是人類歷史中最偉大的智力成就之一的新科學，即量子力學。

對於這一震驚世界的成就，或是對於這一成就的應用後果，怎樣講都不能算是誇張。在這裏，我們只需說海森堡當時並未充分理解他的想法的意義，但他卻把它寫了下來，並於1925年9月發表在《物理學雜誌》(*Zeitschrift für Physik*) 上。許多年以後，在回憶當時是如何尋找新的方向使這一關鍵的想法呈現時，他以登山作為類比<sup>③</sup>：

有些時候……你想攀登某座山峰，但到處都是霧氣……你雖然有地圖或其他甚麼東西指示你可能要去的地方，但你依然在霧中完全迷失方向。這時，你突然在迷霧中模模糊糊地看到一些細微的東西，你會說「噢，那正是我要找的石頭」。在你看到它的這一瞬間，整個情況完全改變了，儘管你並不知道是否你會走到石頭那裏，但此時你會說，「……現在我知道我在那裏了，我必須再走近一點，那樣我肯定就會找到要走的路……」只要我看得仔細些，就像在任何登山運動那樣，我可以說好了，我要再前行15碼，或100碼，甚至也許是一公里，但我仍不知道是走對了，還是完全偏離了正路。

這是一份極為有趣的自我分析。這個比喻揭示了海森堡如何看待他自己的創造過程：當在迷霧中摸索時，他能夠看到「一些細微的東西」，因此「整個的情況完全改變了」。在下面我們將看到，這確實是對他在物理學中大多數重要工作的一種恰當的描述。

1925年9月的論文一旦打開了大門，由玻恩 (M. Born)、約爾丹 (P. Jordan)、狄拉克 (P. A. M. Dirac) 和海森堡本人所寫的許多重要論文便相繼迅速地隨之而來。接着泡利以雷霆萬鈞之力證明了海森堡的力學確實正確地給出氫的光譜，這對所有追隨海森堡的人來說是一種極大的精神鼓舞。從而，下一個關鍵的問題就是下一個原子，即氦的光譜了。但這裏有一個首先要克服的障礙：人們從實驗中得知，氦的兩個電子或是具有平行的自旋，或是具有反平行的自旋，因而它有兩種不同的形式，即三重態或單態。奇怪的是，為甚麼在三重態和單態的基態間有如此巨大的能量差。戈德史密斯 (Samuel A. Goudsmit) 是電子自旋的發現者之一，為了解釋這種巨大的差別，他嘗試了在兩個電子之間所有種類的磁相互作用，結果發現這些相互作用在數量級上太小，不足以解釋能量差。

當時戈德史密斯正在哥本哈根訪問，在那裏，玻爾 (Neils Bohr) 讓他解決這個問題，但他沒有成功。許多年以後，在一次訪談中，戈德史密斯說<sup>④</sup>：

於是他(即玻爾)要海森堡來做，海森堡確實找到了答案——即反對稱的波函數等等。這發展可就完全**超出我能理解的範圍**了。

在這裏面，海森堡發現的還要更重要：他發現神秘的泡利不相容原理與兩個電子的波函數的反對稱相關，這一要求反過來導致了單態和三重態被一個由交換積分來近似地表示的能量差所分開，而且這個交換積分具有庫侖相互作用的數量級，足以解釋被觀察到的巨大的能量差。

海森堡在1926年快到4月末的時候到了哥本哈根，顯然玻爾馬上就告訴了他戈德史密斯那不成功的嘗試。他們意識到戈德史密斯被困惑在迷霧中，不知道該走哪條道路。只用了不幾天的時間，海森堡就奇迹般地指出了走出迷霧的道路。他特色鮮明地做到這點，既不是通過與實驗相吻合的完整計算，也不是通過對波函數進行完整的理論分析(這項工作是狄拉克後來在1926年做的)，而是在摸索的過程中覺察到了**本質性的線索**：

你突然在迷霧中模模糊糊地看到一些細微的東西，你會說「噢，那正是我要找的石頭」。

值得注意的是，在這些細微的東西中有對不相容原理意義深遠的重要了解(泡利不同意這種了解<sup>⑤</sup>，表明海森堡的看法是如何不那麼顯而易見)。更為值得注意的是，海森堡得出這種了解是在他看到薛定諤(Erwin Schrödinger)的波函數觀點<sup>⑥</sup>之前。事實上，大約在海森堡到達哥本哈根一周後，當他在1926年5月給泡利寫信時<sup>⑦</sup>，在他的辭彙中還沒有波函數的反對稱這個觀念：

我想要寫信告訴給你，我發現了一個相當決定性的論點，即你排除相同軌道的觀點與單態—三重太的分離有聯繫。

這是在他了解對此想法的數學意義之前。達到一種新的本質性的線索——還不够清晰的線索——的這種能力，是海森堡之天才的標誌。他真正讓人震驚的能力，就是能在模糊而不確定地、以直覺而不以邏輯的方式，覺察出控制物理宇宙的基本定律的本質性線索。

從海森堡在另一個完全不同的領域的工作中，可以找到其天才的另一個範例。這是關於在兩塊平行板之間的湍流突然出現的問題。這是一個著名的問題，在去哥廷根之前，他就在索末菲(Arnold Sommerfeld)的指導下研究這一問題。令人驚奇的是，他猜出了對這一問題的近似解。若干年後，在1944年，加

州理工學院的林家翹在他的博士論文<sup>⑧</sup>中以分析的方法證明了海森堡的猜測。後來，IBM 的馮·諾意曼 (J. von Neumann) 和托馬斯 (L. H. Thomas) 以數值計算的方式證實了林的結果。海森堡因為這些後來的發展而感到非常高興，並寫信將這些發展告訴了他舊日的老師索末菲<sup>⑨</sup>。

1928年，狄拉克以其關於電子的相對論方程讓所有的物理學家都感到震驚。這個方程是如此的簡單，又是如此的意義深刻：它說明了為甚麼電子有 $1/2$ 的自旋，說明了為甚麼電子有在實驗中觀察到的磁矩，說明了為甚麼電子有同樣是從實驗中得知的自旋—軌道偶合。

這是一項天才的卓越工作，它肯定使年輕的海森堡既欽佩又惱火。1928年5月3日，他寫信給泡利說<sup>⑩</sup>：

為了不永遠因狄拉克而煩惱，我做了一些別的事情以求改變(心情)。

這一些別的事情成了另一項劃時代的成就：它解釋了在鐵磁體中相鄰自旋之間很大的相互作用的起源，為現代理解一個磁體為甚麼是一個磁體奠定了基礎。

在1925-32年間，由於在物理學中有如此眾多的革命性成就，顯然是為主要的貢獻者授予諾貝爾獎的時候了。1932年底，瑞典皇家科學院宣布1932年的物理學獎延期。一年後，在1933年底，它宣布：

因為創立量子力學，特別是它的應用導致了對氫的同素異形的發現；

將1932年的獎授予海森堡。而1933年的獎則同時授予薛定諤和狄拉克，這是

因為發現了新的富有成效的原子理論形式。

1932年和1933年獎的這種同時而不對稱的頒發，以及在頌辭中的用語，明顯地是諾貝爾獎委員會中複雜的內部討論的結果。

當此海森堡百年誕辰紀念中，我們很自然地注意到，在1900-1902年這三年間，有四位二十世紀偉大的物理學家誕生：

泡利	(1900-1958)
費米	(1901-1954)
海森堡	(1901-1976)
狄拉克	(1902-1984)

這四人中，每一位都對物理學作出了偉大的貢獻，每一位都以與眾不同的風格來從事物理學研究。我們可以對他們每個人的風格的主要特徵做總結嗎？幾年來，在一篇以中文寫的題為〈美與物理學〉的文章中<sup>⑪</sup>，我曾嘗試將海森堡與狄拉

克進行比較。把這樣的討論拓寬，將他們四個人一起進行比較應是有趣的事。在古代中國的藝術與文學批評中有這樣一種傳統，是選用很少幾個詞來印象式地描繪每個畫家或詩人的獨特風格。現在允許我用同樣的方法對這四位偉大的物理學家進行初步的嘗試性比較，不過我用的是英文：

- 泡利 —— 威力 (power)  
 費米 —— 穩健，有力 (solidity, strength)  
 海森堡 —— 深刻的洞察力 (deep insight)  
 狄拉克 —— 笛卡爾式的純粹 (cartesian purity)

第二次世界大戰之後，海森堡曾多次到美國旅行，我有機會聆聽了他數次在美國和在歐洲的演講。其中有一次，1958年他在歐洲原子核研究所 (CERN) 召開的羅切斯特 (Rochester) 高能物理學大會的演講，是最戲劇性並且令人難忘的。他談的是他部分地與泡利合作的關於「世界方程」的工作，這是對工作的總結，也是在由泡利主持的會議上的主要發言。在大會之前幾個月，泡利決定退出合作，並對海森堡做了一些非常嘲諷的公開評論。這天，聽眾大多數人都是我們這一代的物理學家。我們知道這兩個人之間關係緊張。儘管如此，我們還是沒有料到泡利在海森堡發言結束時為嘲笑這一工作而使用的措詞，諸如「愚蠢」、「廢話」、「垃圾」。這正是泡利在這次戲劇性的場合中所使用的辭彙。海森堡則很冷靜，而且是非常鎮靜地對待泡利的攻擊。他站在自己的立場上寸土不讓，但卻沒有使用任何帶有感情色彩的詞語。這似乎只是給泡利的兇猛火上澆油。在聽眾中，我們都很驚訝。在這兩個我們都佩服和尊敬的人之間這一令人尷尬爭辯中，我們都覺得相當不自在。

今天，在回憶那次會議上所發生的事情時，與泡利的勃然大怒和諷刺挖苦相比，海森堡拒絕泡利的公開挑釁的能力給我留下了深刻的印象。

二十世紀70年代，海森堡出版了他的自傳《物理與物理之外》(*Physics and Beyond*)，對他早年參與青年運動、對他研究的開端、對在赫里戈蘭日出時的突破、對希特勒的興起及其對德國的影響，都作了敏感的低調描述，而且，也敘述了他在戰爭期間和在戰後重建期間的經歷。他追憶了與愛因斯坦 (Albert Einstein)、狄拉克、歐拉 (Hans Euler)、費米 (Enrico Fermi)、玻爾以及其他一些人的重要談話。人們在字裏行間中可以感受到他對祖國的深愛。在第191頁上，他描述了他以及他的家人在戰爭快要結束時遭受的苦難。然後，

5月4日，當帕什上校帶領一小股美軍先遣部隊將我俘虜時，我感到就像是一個完全精疲力盡了的游泳者腳踩在了堅實的土地上。

夜間，雪花飄落，當我離開時，春天的太陽在深藍的天空中照耀着我們，把它耀眼的光芒播撒在雪原上。一位來抓獲我的美國兵，曾在世界上許多地方作過戰，我問他是否喜歡我們的山中湖泊，他告訴我說，這是他所見過的最美麗的景色。

何等痛苦！何等深愛！何等記憶！何等原樸性的感情！這些在他錘塑這段文字時，都一定曾在他的胸中起伏！

在第二次世界大戰之後，海森堡不是一個快樂的人。圍繞着他在戰爭期間做了些甚麼和沒做甚麼，有眾多的爭論。就此，人們寫出了許多著作，而還有更多的著作將會問世。但塵埃終將落定。最終，將為人們記住的，是他在23歲時發動的那場改變了整個世界的偉大革命。

劉兵 譯

### 註釋

①③ Abraham Pais, *Niels Bohr's Times* (Oxford: Clarendon Press, 1991). Title of Section 10; 276.

② In Wolfgang Pauli, *Scientific Correspondence*, vol. 1 (New York: Springer-Verlag, 1979).

④⑤⑥⑦ Jagdish Mehra and Helmut Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory*, vol. 3 (New York: Springer-Verlag, 1982), 283; 300; chap. V.6; 286.

⑧ C. C. Lin in *Quarterly of Applied Mathematics* (1945).

⑨ Heisenberg's letter to Sommerfeld was dated October 6, 1947. See Mehra and Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory*, vol. 2 (New York: Springer-Verlag, 1982), 65.

⑩ Abraham Pais, *Inward Bound* (New York: Oxford University Press, 1986), 348.

⑪ 楊振寧：〈美與物理學〉，《二十一世紀》（香港中文大學·中國文化研究所），1997年4月號，頁71-79。

**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年出任紐約州立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博文講座教授。1998年起兼任北京清華大學教授。