

量子力學 中概率的起源

張為民

從開放量子系統看量子力學的本質問題。

因建立電弱統一理論而於 1979 年獲諾貝爾物理獎桂冠的著名物理學家溫伯格（Steven Weinberg），於 2016 年 11 月 25 日在美國科學家作家寫作協會的 Patrussy 講座上，給了一個關於量子力學基本問題方面的演講，題目是「量子力學到底怎麼了」（What's Matter with Quantum Mechanics ?）。

在這次講座中，溫伯格深入分析了量子力學發展過程中一直存在著疑慮的一些基本概念，特別是一個世紀以來，科學家對量子力學波函數的本質所提出的各種一直都無法令溫伯格滿意的詮釋。一時間，有如被擾動的池水，很多媒體都用很醒目的標題宣稱：篤信量子力學大半輩子的溫伯格，最近忽然開始懷疑起量子力學！再加上科學部落客透過網路平台的推波助瀾，刻意引用溫伯格演講中一、二句聽上去很聳動的話語，導致部分不明就裡的人真的以為量子力學出錯了。

其實，溫伯格在整個演講中很客觀地回顧量子力學發展過程中所出現的疑慮，以及是否有某些超越量子力學的物理理論，提出了他個人的看法，並指出未來可能發展的一些方向。其中一些想法非常值得我們進一步思索，但也有一些論述沒有涵蓋到最近因量子資訊科學發展而取得的進展，因此本文擬對此做進一步的回顧與展望。

溫伯格的演講主要是關注在長期以來量子力學一直困擾大家的一個基本問題：量子力學中描述物質狀態的波函數是一種概率波，但其概率的起源是什麼？這是量子力學發展之初最被質疑的重點，包括愛因斯坦及薛丁格都曾對此表示難以接受。即使量子力學發展至今，人們還是認為沒有給出滿意的答案。

但當初人們對概率波的疑問，與現今人們所探討的問題和方向已有所不同。正如溫伯格所描述，過去一百多年來的實驗結果都與量子力學的概率波預測一致，量子力學已成為我們理解原子、原子核、各種交互作用力（除引力外）和基本粒子，以及物體的導電性、磁性、

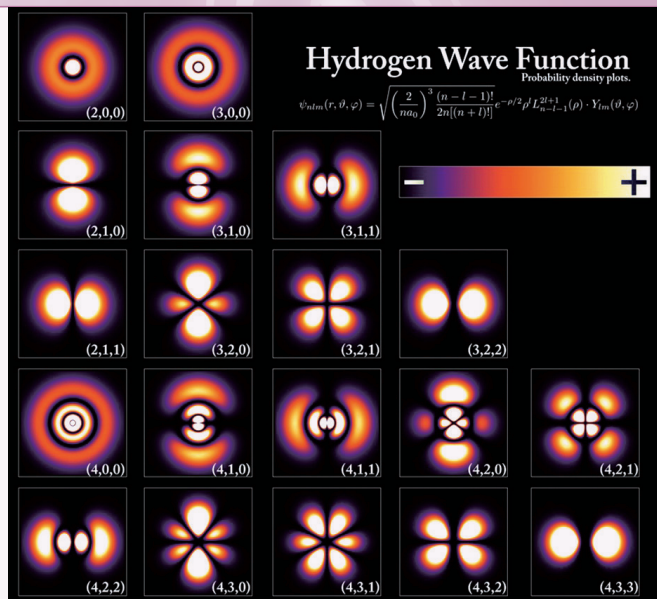
半導體、超導體、電磁輻射等各種物理現象的基礎；過去一百年發展起來的物理理論，包括標準模型甚至弦理論，都是在量子力學的基礎上建立起來的。

因此絕大多數物理學家已經不再那麼關心波函數概率起源的問題。在相當長的一段時間內（從上世紀 40 年代至 90 年代），概率波的詮釋成了少數物理學家與哲學家仍在糾纏的問題。

然而，波函數的概率詮釋以及與實驗量測的關係，在過去 20 年中又成為人們研究的熱門課題，主要原因是量子資訊及量子電腦的發展迫使人們必須重新考慮其相關的問題。溫伯格的演講中把問題分析得蠻透徹的，他指出「概率」本身不是量子力學薛丁格方程的產物，因為薛丁格方程是決定性的，因此在薛丁格方程的框架下，所有的結果都是可以預知的。

至於波函數的概率特性主要是與量子量測有關，它是玻恩（Max Born）引進的，並經哥本哈根學派進一步地詮釋，即：波函數是物理可觀測量的各個特徵態（eigenstates）的線性疊加，其疊加係數的絕對值平方則代表了系統會落在對應的特徵態的概率，當人們量測這物理量時，會導致波函數以相應的概率崩塌（collapse）到某一確定的特徵態，而量測結果是其對應的特徵值（eigenvalue）。

然而量子量測過程涉及到量測儀器及操控量測的人，而這兩者都是宏觀體系，並未包含在薛丁格方程中。因此，波函數的哥本哈根詮釋是強加到薛丁格方程上的，或者說量子力學是一個拼裝的理論。但神奇的是，玻恩的概率波概念及哥本哈根詮釋讓薛丁格方程的預測與實驗量測結果有效地符合，這是玻恩及哥本哈根學派的智慧與成就，玻恩因此獲得 1957 年諾貝爾物理獎。

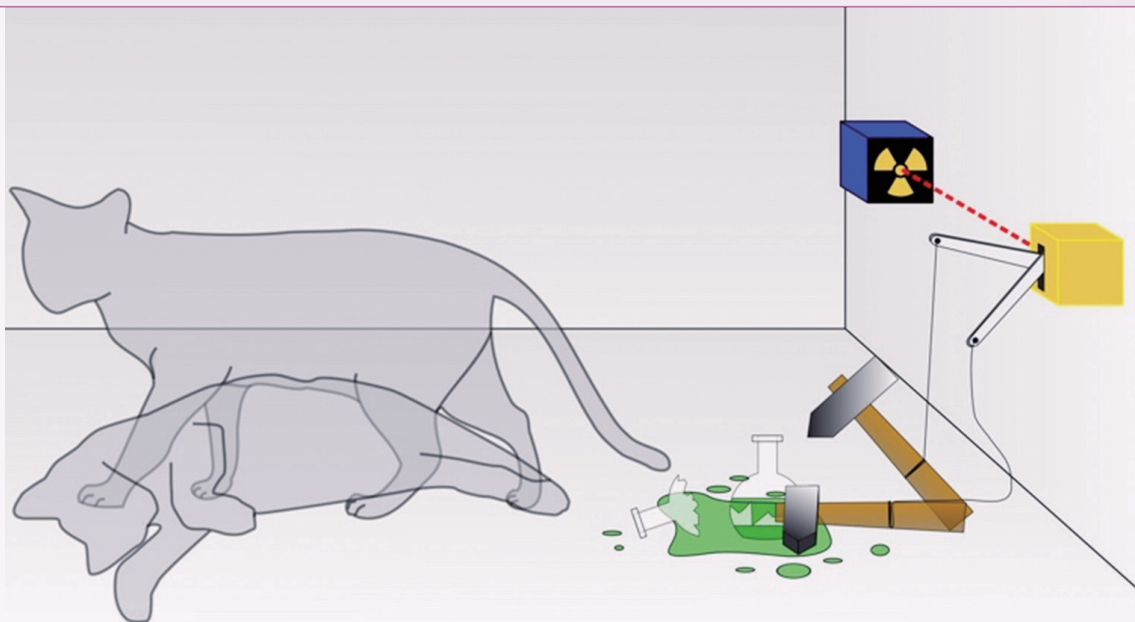


氫原子各種量子態對應的波函數的概率分布，圖中各個量子態的概率分布中越亮的地方找到原子中電子出現的概率越大。（圖片來源：Hydrogen Density Plots.png，由 PoorLeno 製作）

但正如溫伯格在演講中指出的，概率詮釋意味著我們對量子物理過程的了解並不够詳細全面，而實驗量測導致波函數崩塌在物理上又是怎麼一回事？玻恩本人及哥本哈根學派並沒有確切回答這些問題的本質，導致愛因斯坦無法相信量子力學，也讓薛丁格為他自己的理論被哥本哈根學派搞得不倫不類而幾乎屏棄量子力學！同時也使量子力學雖已被認為是個成功的理論，但近百年來卻一再處於爭議之中。正如著名物理學家費曼所說：在這個世界上誰也搞不懂量子物理！

也因此一個世紀以來，仍然有人堅持不懈地對概率波的本質問題深入探討。溫伯格在他的演講中指出，這些探討可主要概括為工具主義和現實主義兩類學派。

前者認為波函數並不是真實的，只是人們量測時計算概率的一種工具，因此主張把人的因素加入到物理量測的過程中，即只有當人做出量測時，量子力學才會告訴我們量



薛丁格關於活貓與死貓的思想性實驗。1935 年針對愛因斯坦對量子力學的質疑，薛丁格試圖用這觀念來解釋量子糾纏及微觀量子世界與宏觀古典世界的區別與聯繫。(圖片來源:Schrödinger's Cat.svg, 由 Dhatfield 製作)

測的結果。換句話說，人參與了自然現象的基本規則，是人的意識決定了哪個量子態該出現或不該出現，由此點出概率的起源。這可以說是哥本哈根詮釋的某種延伸，惟仍然迴避了波函數的本質問題。

雖然人的意識參與量測不是不可能，但這種想法讓問題變得更複雜，因為至今還沒有找到能描述人意識行為的物理原理。當然最近有人（包括量子引力學家 Roger Penrose 及凝態物理學家 Matthew Fisher）正在用量子力學探討腦科學中的意識及認知問題，稱之為量子意識學及量子認知學，但那是另一回事。

至於現實主義學派則認為波函數是真實存在的，是自然的一部分。他們把系統與量測儀器看作是一個 universe 系統，其時間演化遵循薛丁格方程。當系統被量測時，系統與儀器的交互作用會產生系統與儀器間狀態的量子關聯。這種量子關聯導致系統的狀態與儀器的狀態在一複合的波函數中一一對應，從而避免了波函數崩塌的假設。

現實主義學派主張：複合系統的波函數疊加態經重複量測後會演化成一個多重量子世界，人們在各自的世界裡量測只能得到他那個世界裡給定的結果。這派人希望由此給量子量測理論一個新的架構，同時希望能建立一個可涵蓋整個宇宙在內的量子理論，這就是現實主義學派所謂的多重宇宙觀。

與現實主義觀念相關的一個重要的物理現象，即複合系統量子態的非局域量子糾纏（nonlocal quantum entanglement）。這個曾讓愛因斯坦完全無法接受的量子力學怪現象，文獻上稱其為 EPR 悖論，即：兩個處於量子糾纏的物理系統，不管分開多遠，即使是處在兩個不同的星球上，當人們量測其中一系統的量子狀態時，另一系統的狀態也會瞬時變化。

現實主義學派所關心的系統與儀器間狀態的量子關聯，其實就是一種量子糾纏。但量子糾纏的非局域性反過來又衝擊了現實主義學派堅持的，物理事件是局域的且決定性的基本觀念。

但非局域量子糾纏這種神奇的現象已在實驗上觀測到，最近還不斷被製備出來，成為實現量子通訊及量子電腦最關鍵的要素。然而，溫伯格對工具主義和現實主義兩類學派對概率波及其與量測之間關係的描述都不甚滿意。這種不滿意加強了一些人的渲染：「著名物理學家諾貝爾獎得主溫伯格在篤信量子力學大半輩子女後，最近忽然開始懷疑起量子力學。」

其實，在用量子力學計算各種物理問題時，很少用到概率的概念。量子力學所有的計算過程都是決定性的，正如前面所講的，概率的引入與解釋實驗量測的結果密切相關。因此溫伯格指出，要找到概率的起源，需要超越量子力學本身，把量測儀器與被量測系統間的交互作用一起考慮進來！這樣被測系統本身就不再是個孤立系統，不再滿足薛丁格方程了。

現在要解決的就是一個微觀系統與一個宏觀量測系統耦合在一起的複合系統的動力學問題，當然問題變得複雜多了。現在是否存在著描述這類微觀與宏觀系統耦合在一起的物理理論並不清楚，甚至該如何區分微觀與宏觀世界的邊界也不清楚，這就是溫伯格所說的需要發展超越現有量子力學的物理理論的原因及所面臨的困境。

溫伯格沒有講清楚的是，上述觀點某種程度上正是現實主義學派解釋概率波的出發點。但現實主義學派所偏好的並加以渲染的多重宇宙觀，把問題的本質又給哲學化了。

事實上，如果儀器與被量測系統的交互作用不是很強，被測系統的狀態將滿足林德布萊德（溫伯格演講中所稱的 Lindblad）方程。林德布萊德方程形式上可以看成是薛丁格方程的一種推廣，它是在薛丁格方程的基礎上加入環境效應（量測儀器可看成是被測系統的一種環境），即環境對系統的影響所產生的耗散與漲落效應。若忽略環境效應，

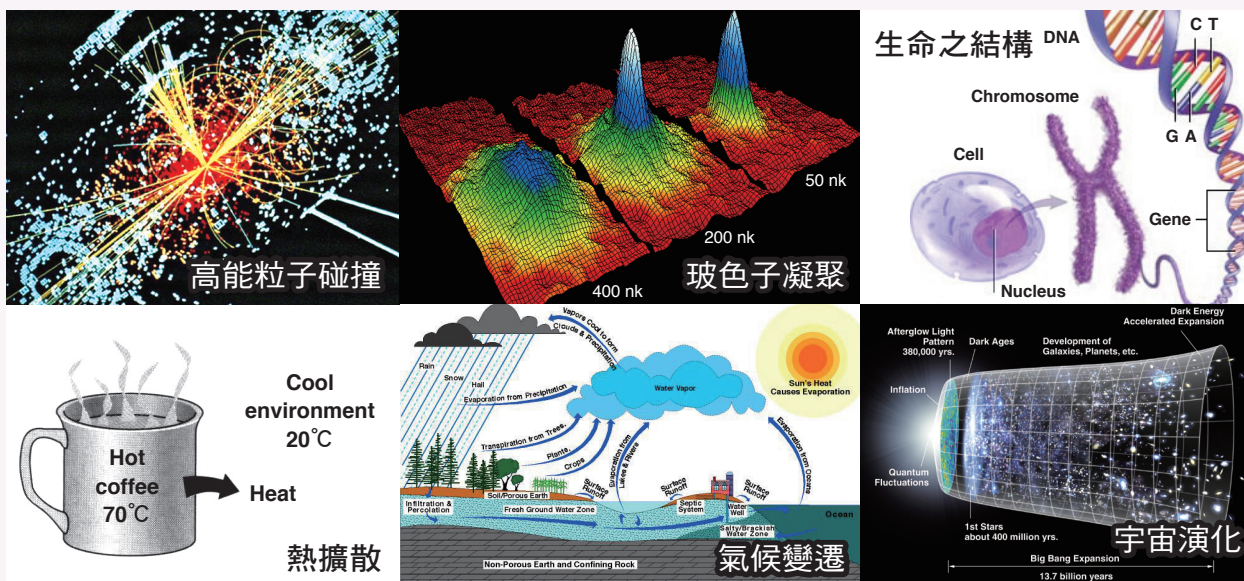
林德布萊德方程就會回到薛丁格方程。如果把林德布萊德方程解出來，其結果會是，經時間演化後系統的狀態是一概率分布。這樣，概率的概念自然地出現了。

另一方面，林德布萊德方程也可以從系統與環境所構成的孤立複合系統所滿足的薛丁格方程得到。簡單地說，通過對系統—環境（或儀器）交互作用作二級微擾展開，可以很容易推導出林德布萊德方程。這意味著通過解系統與環境的複合系統的薛丁格方程，可以得到量測過程概率是如何出現的，這是目前對量子力學概率起源最物理的描述（比較接近現實主義學派的描述，當然多重宇宙觀是除外的）。

但溫伯格想從林德布萊德方程出發來思考能超越量子力學的更基本的物理理論，則顯得不夠深入。其實費曼等人從上世紀 60 年代就已開始在做這件事了。我們知道薛丁格方程只適用於孤立系統，然當系統受到環境或量測儀器的影響而發生交互作用時，它們不再滿足薛丁格方程，這類的系統稱為開放系統。開放系統的動力學方程稱為主方程，而林德布萊德方程只是其中的一個近似的主方程。

從費曼開始，經萊格特（Anthony Leggett，2003 年獲諾貝爾物理獎）等物理學家的努力，描述量子布朗運動（就是處於熱庫中的簡諧子隨機運動）的嚴格主方程在上世紀 80 年代就已找到。從一定的初態出發，萊格特等人解出了統計力學的平衡態概率分布函數。

在過去幾年，另有學者進一步推導了一系列的玻色子及費米子物理系統在各種環境下的主方程，並證明在任意初態下如何得到玻色及費米統計的概率分布函數。而若忽略環境的影響，主方程會回到原來的薛丁格方程。因此量子力學的概率統計



真實的物理系統都是開放系統，例如：高能粒子碰撞、玻色愛因斯坦凝聚、生命起源、我們的日常生活、氣候變遷到宇宙的演化。

分布，在非平衡態的動力學演化下是可以解出來的。

事實上，當系統與任何環境的交互作用不可忽略時，系統最終的狀態都會演化到一個具有一定概率特性的混態，這是普適（universal，或普世）的量子退相干的現象，並不是量測才會有的結果。就此，溫伯格對量子力學概率起源的疑慮可以說已經得到了解決。

當然，對任意開放系統的嚴格主方程，現在還只是形式上存在，能實際應用的普適主方程仍有待進一步探討。而溫伯格在演講中提到的他自己所考慮的如何超越現有量子力學的觀點，其過程基本上與他二十多年前在研究量子混沌時，曾探討量子力學的非線性擴充的可能性有點相似。我認為這些觀念對量子力學未來的發展不見得有太多影響，但是對開放量子系統的研究確是物理科學未來發展的一個大方向。

時至今日，開放量子系統的普適動力學方程還沒建立起來，但已成為很多研究團體努力的方向。

另一方面，開放量子系統在物理上表現出兩個非常重要的量子特性，即量子糾纏和量子退相干。量子退相干是開放量子系統固有的特性，因此也是非平衡物理中最普遍的現象，是量子熱化（quantum thermalization）的關鍵因素。而量子糾纏更是退相干的起源，也是近年來研究凝態物理，特別是物質的拓樸相，以及研究量子引力所必備的知識，可能是比時空和交互作用更為基本的物理要素。

而在量子資訊及量子電腦的研究中，一方面希望能充分製備及利用量子糾纏，另一方面又希望能克服因環境、操作或量測等過程中的交互作用所產生的量子糾纏所引發的量子退相干。這就是為什麼要實現量子電腦是如此的艱難！值得一提的是，

這些研究涵蓋了物理學所有的領域，並正成為開啟物理新領域的起點。

總而言之，量子力學中的量測及概率詮釋在物理上曾經帶給研究人員這麼大又這麼久的困擾，其原因正如溫伯格所指出的，是因為量測及概率並不內含在系統本身的薛丁格方程中。因此想在這樣的薛丁格理論架構下探討量子量測及概率，就會如北宋詩人蘇軾（蘇東坡）所言：

橫看成嶺側成峰，遠近高低各不同；
不識廬山真面目，只緣身在此山中。

若能跳出系統本身的薛丁格方程去尋找概率的起源，問題就會變得清楚多了。

其實自然界中所有系統都不是孤立存在的，本身都不會滿足薛丁格方程。因此開放量子系統的研究才是真正超越目前量子力學架構的研究方向，且其研究領域廣泛，涵蓋了量測系統、控制系統、各種還未經探測的生物系統，乃至整個宇宙。相信開放量子系統的研究必將開啟物理以及整個科學發展的一個全新世界。

張為民
成功大學物理系

深度閱讀資料

S. Weinberg, Patrusky Lecture: What's Matter with Quantum Mechanics
<https://www.youtube.com/watch?v=3nnLbRaxtCE>;
The Trouble with Quantum Mechanics
<http://www.nybooks.com/articles/2017/01/19/trouble-with-quantum-mechanics/>

Feynman, R. P. and F. L. Vernon (1963) The Theory of a General Quantum System Interacting with a Linear Dissipative System. *Ann. Phys.* **24**, 118-173.

Caldeira, A. O. and A. J. Leggett (1983) Path Integral Approach to Quantum Brownian Motion. *Physica A*, **121**(3), 587-616.

Zhang, W. M., et al. (2012) General Non-Markovian Dynamics of Open Quantum Systems. *Phys. Rev. Lett.* **109**(17), 170402.

Weinberg, S. (1989) Precision Tests of Quantum Mechanics. *Phys. Rev. Lett.* **62**(5), 485-488.