

量子力學的過去與現在

◇ 物理一 曾可維

量子力學的過去：愛因斯坦的質疑及不等式的判決

相信大家在高中時都已經略有耳聞量子論的奇妙現象。在二十世紀的前 15 年，從黑體輻射(blackbody radiation, 1900)、光電效應(photoelectric effect, 1905)、康普吞效應(Compton effect)與氫原子模型(1913)，都一再顯示了，假設離散的能量，能夠解決許多古典體系下難以回答的問題。

當時的許多物理學家樂於接受量子論為解釋世界的新利器，因為其與實驗數據有極為精確的吻合。但是愛因斯坦已經開始感到不安了：玻爾(Bohr)模型成功的使用量子論解釋了類氫原子光譜，**卻無法解釋電子在能階中跳躍的原因！**不過當時的氛圍把量子論當作是一種現象的描述，相關的懷疑都可以等到完整的動力學建立後回答，所以他也就容忍這缺點。只是當時沒人料到量子論噩夢才正要開始！

1926 年矩陣力學與波動力學的建立和機率詮釋的提出，以及 1927 年不確定性原理的發表，讓世界翻天覆地從此全然改觀！愛因斯坦與薛丁格(Schrodinger)、德布羅意(de Broglie)在第五屆索維爾會議(主題是用干涉狹縫的思想實驗)與第六屆(主題是用光箱的思考實驗)中，與剛成形的**哥本哈根學派**展開論戰：在這個階段愛因斯坦相信不確定原理必定有內在矛盾，可以被違反、繞過去，摧毀量子力學的迷霧重回真實的懷抱！(特別說明一下，“uncertainty principle”被譯為測不準原理，常會讓人誤以為這代表是仍舊存在準確的物理量，只是被觀測的動作破壞了。這完全是誤導！在哥本哈根詮釋下，我們不討論測量前的物理量，而不確定性原理的描述了測量後其各結果的機率分布。)

愛因斯坦認為，**原本意義下的準確物理量不存在**，代表物理定律無法再完整的描述這個世界，因為要描述的對象在量子力學看來沒有意義！愛因斯坦無法容忍物理學數百年來愈發精準的描述與定律如此消逝。真實，難道不存在嗎？他不能接受！

1935 年，愛因斯坦發表了影響物理極為深遠的 EPR 論文。他在裡面承認量子力學具有內在一致性，但是不完整；而我們只是**不知道**那些被隱藏的物理量，不代表**不存在**！由於愛因斯坦的**局域性**(遵守相對論)**隱變數理論**能夠重現當時量子力學對於實驗的預測，兩者的是非似乎只是哲學問題，無法以實驗區分。於是，除了與愛因斯坦論戰三十年的量子教父波爾外，這問題被放在一旁數十年之久。

1964 年，物理學家貝爾想要追隨愛因斯坦的腳步重現物理學的光輝，於是他練出一把寶劍：貝爾不等式(Bell's inequality)，從中發現了局域性隱變數與量子力學的差別。以偏振片實驗為例：前者與 θ 的餘角 $\pi - \theta$ 成正比，但後者與 $\cos \theta^2$ 成正比，預測大不相同。

他卻沒想到，強大的武器是能斬斷一切的雙面刃：如此嚴格的定理最後給出的實驗結果是局域性隱變數的死亡！1970年代的阿斯佩克特(Aspect)實驗指出，雖然貝爾不等式的違反還有一些實驗細節須要克服，但是物理學家竟難得有共識。也就是說，愛因斯坦錯了：世界中若沒有因果性(因早於果)、就是沒有命定性的現實(因一定造成果)。我們不知道如何捨棄狹義相對論(因果性)，只好放棄描述所謂的現實。

不過物理學家也承認：愛因斯坦對量子力學持續而有力的質疑促進了量子力學的發展，迫使其支持者加深對於對量子力學的科學和哲學意義的理解。難道說明愛因斯坦是錯的就代表哥本哈根學派能高枕無憂了嗎？新的戰爭才正要開始，畢竟沒有理論像是量子力學在給出預測上如此精準，但是對於其理論的意義又如此模糊不清，人們的好奇心總是想要了解更多！

最後以一句話說明愛因斯坦等最後一代古典物理學家的消逝：

“要接受一個新的科學真理，並不用說服它的反對者，而是等到反對者們都相繼死去，新的一代從一開始便清楚地明白這一真理。”——蒲朗克 (Max Planck)

量子力學的現在：醜陋的觀測與塌陷，以及多世界的救贖

量子力學所給出的不同機率的狀態，如光子激發原子的機率為一半。哥本哈根詮釋認為，在觀察者觀察它塌陷後變成一種單態：換句話說，只有量子過程，沒有量子世界！以薛丁格的貓(Schrodinger's Cat)思想實驗為例：放射性原子有無衰變與毒氣瓶是否被打破和貓是否死亡，無法分開討論。衰變、瓶破、貓死的態在被觀測者觀察後可能坍塌為結果。

這樣的論述看似吻合實驗結果，卻是大有問題：其從來無法有效定義何謂系統外的觀測者。這使得哥本哈根詮釋深受質疑：

1. 誰能當觀測者。如上所述，放射性元素是否衰變，並因此啟動毒氣瓶的機器成為觀察者而會成為疊加態的一環，可能被毒死的貓也是如此進入疊加態的一環。那打開箱子的人類有何特殊之處不會成為疊加態的一環，反而當上觀測者使系統塌陷？人類也只是由原子分子所組成的複合物；自然界沒有任何理由偏好人類的這種組成模式，而不偏好貓組成的那種型式。

2. 如果量子力學是個遍及於全宇宙皆通行的定律，那麼宇宙這個最大的獨立系統從創生至今所有可能的態——如太陽是否能形成、微波背景輻射(CMB)的起伏大小等——只有一個塌陷成我們今日所見的宇宙。那麼究竟誰是觀測者使得宇宙從不同可能的狀態中塌陷至此？畢竟宇宙是包含一切的代名詞，並沒有系統外可言，任何想要研究量子宇宙論的人都必須正視此問題，也因此宇宙學家中多世界詮釋(many-worlds interpretation)的支持者眾。

對此質疑，約翰惠勒(John Wheeler)認為人類的心智是我們能夠成為觀測者而萬物不行的分別。惠勒後來將哥本哈根詮釋延伸，進一步認為宇宙之所以是現在這樣，是我們觀測而使其塌陷的結果，而宇宙在人類出現並觀測前都處於疊加態。由於參與式宇宙違反了平庸原理：我們沒有任何特別之處，並賦予心靈特殊的地位，被視為瘋狂言論而未受重視！

為了解決此一問題，惠勒的學生艾弗雷特三世(Everett III)提出多世界詮釋進行解答。他認

為在量子力學中從來沒有波函數塌陷的機制，因此波函數塌陷不存在，所有可能發生的狀態都發生了。

而之所以我們無法與其他分支互動、而可以與電子等微觀粒子互動，原因是這樣。維度愈高的系統，愈易正交。這結論可藉由比較 2 維與 3 維空間中的兩個粒子互動來類比。自由電子是存在於 6 維空間中的質點(三個座標，三個動量分量)，與另外分支的電子的波函數不正交而可以進行干涉，於是兩個世界的互動產生了量子現象。但是一個人是由 N 個(超過 10^{25} 的數字)組成的巨大物體，因此要與另一個分支的人於 $6N$ 為空間中互動，非常可能因為正交而無法進行干涉。

沒有觀測者、沒有觀測、沒有塌陷，一切聽起來都很美好。但是兩個競爭的科學理論必須藉由實驗得分出優劣乃是科學的原則，而至今確實仍未有決斷實驗能讓兩者實際分出高下。

誠然隨著介觀(e.g., 巴克球干涉)與巨觀(e.g., 超導)量子現象的發現與研究，我們活在量子世界的看法已受眾人認同。那多世界詮釋呢？

哥本哈根詮釋認為其它可能的分支都塌陷消失了，而多世界詮釋認為其他分支只是接近正交而無法互動，所以只要擁有足夠強大的量子電腦進行實驗，詢問事件的態在分開後是否又進行干涉。這樣就可望否認兩者中的其中一個：如果分支永遠消失則哥本哈根詮釋正確，如果分支只是因為難以互動但仍舊存在則代表多世界詮釋正確。