

量子力學的基礎詮釋

曾可維

量子力學從 1920 年代建立以後，迅速地成為人類歷史上最精準的理論。如量子電動力學的 g factor 測量（以一個量表示磁矩與角動量的關係，在量子力學歷史上有重要的實驗意義：如蘭姆位移）影響了現代社會的各個層面，包括現代資訊工業的基礎 --- 半導體、雷射、核物理、核磁共振等。但是即使它是如此有效而成功的理論，如何詮釋量子力學的紛爭卻從未停止。量子教皇波耳說：「沒有被量子力學震驚的人從未理解量子力學」，費曼也說：「我想沒有人懂量子力學」。我們究竟是否能夠理解量子力學？還是量子力學的真義將永遠隱藏在奧妙的方程式底下？本文將試著綜合量子力學的發展歷史和理論架構，來分析不同量子力學詮釋帶來的洞見與困惑。

哥本哈根詮釋

首先是最普遍的哥本哈根詮釋：二十世紀的天才馮紐曼在其《量子力學的數學基礎》中定義哥本哈根詮釋包括三個公設

- 1、運用完備的波函數、算符與希爾伯特的 複數空間來代表量子態
- 2、量子態遵循決定性的演化：即遵守波動方程式（如：薛丁格方程式）
- 3、量子態於觀測後塌陷：隨機性的出現和 疊加態的消失（波恩機率）

第一點與第二點指的是量子態已代表系統所有資訊，並照方程式決定性的演化；第三點反映我們總是觀察到「正常」的日常古典世界。稍微停下來思考，我們會發現第一、二部分和第三部分產生矛盾。量子力學系統反常的現象、連續的演化，如何經過不連續的塌陷過程，形成我們日常所見的古典世界？如果量子力學是適用於微觀和巨觀的普世理論，這個內在的不一致性便會讓人感到相當不快。對此波耳說：「沒有量子世界，只有抽象的量子物理描述」。這可以解釋成量子力學不追求底層的真理，而只尋求表面現象的解釋。除此之外，波函數只是用來描述微觀世界的數學工具，而波函數的完備性只是數學意義上的完備而已，適用於無法直接觸及的微觀量子世界；而量子世界的奇異，則與符合古典物理的日常世界隔開。當量子數很大時量子現象可以退化逼近古典定律。

這說明了哥本哈根詮釋具有極強的實用屬性：量子力學的奇異只要透過實驗設置（互補原理）、由觀測者進行測量後，便會消失無蹤，而實驗之前的東西屬於超出操作型定義外的無意義。至於非連續性的塌陷和觀測者的身份，以及古典量子的界線都是可以擱置的問題，畢竟有誰能不透過實驗設置觀察奇異的量子世界？由於以上務實的優點，哥本哈根詮釋即使有「觀測者觀察導致塌陷」這種難看的缺陷如影隨形，哥本哈根學派對於量子力學的解釋長久以來都是主流看法。不過就如愛因斯坦說：「我不看月亮的時後月亮還在那裡嗎？」，一直有前仆後繼的不同觀點試圖挑戰哥本哈根詮釋地位！

局域實在論：反對論點一的釜底抽薪

愛因斯坦身為著名的局域實在論者，對於哥本哈根微觀世界機率性的描述和觀測者創造的現實感到非常不滿。具體來說，他認為理論應遵守相對論的因果律、並要求物理性質：如自旋和動量在測量前即獨立存在。但不論其如何提出精妙的思想實驗想要衝破哥本哈根學派的謬誤，從未能越過波耳的雷池一步。不論是光箱實驗還是雙狹縫干涉實驗都挑戰失敗，如費曼所說：「測不準原理保護了量子力學」，於是愛因斯坦只能繼續低吟「上帝不擲骰子」，堅持物理學要有局域性和實在性，以 EPR 理論作為最終武器說明量子力學的不完備。但是 EPR 提出之後的三十年，這場量子力學創始人之間的辯論彷彿煙消雲散不起波瀾，物理學

世界朝核物理和粒子物理的方向狂奔，把這些惱人的問題丟在一邊，直到約翰貝爾橫空提出那美妙的不等式。貝爾理解到古典實在論認為哥本哈根詮釋的論點一是否正確，不僅只是哲學上的爭論，還可以化為實驗進行檢測。他所提出的不等式如果正確，量子力學不僅是不完備、而且是錯誤的；但如果是正確的話，則隱變數勝券在握。可惜最終實驗結果出爐，被否認的是局域實在論！EPR 糾纏態粒子的超強連結看似逼迫人們放棄局域實在性的美好幻想，貝爾和諾貝爾獎得主胡夫特仍舊堅持局域實在論的正確性：他們假設宇宙在大霹靂時所有的物質都已經交換完資訊且已決定了未來，所以相關實驗的類空空間都只是假象，不等式被違反只是決定論中的欺騙，未來、過去與現在都是被決定的，只是以隱諱的方式存在，故此看法被稱為最終決定論。

導波理論：反對論點一、三（量子的機率隨機源自亞量子的決定機制）

以上是較為常見的量子力學詮釋爭議歷史，著重於局域隱變數理論和愛因斯坦的攻擊，但其實愛因斯坦和薛丁格也曾在 1920 年代支持德布羅意的導波理論。導波理論是指：量子力學的波函數底下其實隱藏著具有明確的軌跡和位置的粒子（反對論點一），而波函數會引導粒子移動，使其表現出隨機性的表象、但本身是決定性的理論。導波理論可重現非相對論性的量子力學預測，但由於 1930 年代時馮紐曼錯誤地宣稱自己用五條公設（錯在第五條）證明了隱變數理論的不可能定理，使得一時紅透半邊天的導波理論被打入冷宮。偶然的歷史錯誤就此把讓導波理論消聲匿跡，要在三十年後才由約翰貝爾翻案、大力推廣。可惜大勢已去，即使後來波姆重建了導波理論、引入量子勢重現經典力學的預言，允許超光速機制渡過貝爾不等式門檻成為非局域隱變數理論，導波詮釋仍舊不受親睽。另外的理由也包含它難以推廣到多粒子系統。值得一提的是，導波理論預言波恩機率只是一個長時間的平衡近似（反對論點三）。

多世界理論（去相干理論）：反對論點三（塌陷與觀察者不存在）

當艾弗雷特三世提出多世界詮釋時，主流物理學界沒有反應、也不置可否。他認為孤立的波函數真實存在，從未塌陷（反對論點三），只是分裂（如同宇宙）或者稱去相干。量子系統之所以反映古典的性質有以下兩種類似解釋：自由度不高的量子系統與環境交互作用後由於自由度大增使不同可能性的波函數接近正交（例如最初電子孤立於環境，處於自旋向上與向下的疊加態，與環境接觸後，環境與電子的總波函數仍舊疊加存在，處於不同分支中的觀測者只能看到向上或向下的態）、密度矩陣對角化退化為古典（注意是接近正交而非完全正交，所以原則是可逆的），也可以說系統與環境產生量子糾纏，而由於實驗者只能掌握巨大量子糾纏的一部份，使波函數間的干涉遺失無法追蹤（去相干）。實驗的進展使人們已經可以觀測到分子量上萬的物質能有干涉效應、可以觀測去相干（塌陷）的連續過程甚至逆轉此過程，使去相干的系統再度同調，充分攻擊了哥本哈根詮釋的弱點（古典量子界線問題、波函數不連續塌陷演化等），加上人們對於量子力學是否能適用在宇宙學的興趣增加，使得多世界理論成為目前次受支持的理論，僅次於哥本哈根詮釋。

量子意識詮釋：對於量子力學主流詮釋提出近似異端的少數派看法，反對論點一、二點（意識是具基本物理學意義的現象）

潘羅斯爵士因為廣義相對論和數學物理的研究獲得狄拉克獎章和沃爾夫獎，但他最著名的理論應是其於〈皇帝新腦〉中提出的量子腦詮釋，他從哥德爾不完備定理顯示了人類可以構造「無法證明」但可「理解為真」的命題存在，來論證人類的直覺是不可計算的現象，而量子力學中塌陷的不可計算過程看似是人類的靈感來源，故結論意識是基本物理學的研究範圍而非僅是生物學的複雜現象。他認為我們需要一套關於意識的物理學（反對論點一、二）；另外，他也認為量子力學的不可計算是源自量子重力的現象（後者因為無限大故無法計算），所以人類的意識也是宏觀的量子重力現象。認為意識具有基本物理學地位的科學家雖然是少數，但是也有不少大師如馮紐曼、諾貝爾獎得主約瑟芬和物理巨人惠勒認同，後者的宇宙自

觀測理論（又稱最終人擇原理）是相對正統、由哥本哈根詮釋演繹的極端意識版本。為甚麼宇宙是我們現在看到的樣子？因為我們的意識使宇宙波函數塌陷所以宇宙必須如此，宇宙的演化歷史在人類出現之前都可以說是未塌陷的疊加，直到觀察者現身創造世界（賦予意識物理意義反對論點一，意識創造波函數演化結果反對論點二）。

量子貝氏機率詮釋：以不同的機率論重新檢視量子力學（反對論點一）

受量子資訊領域啟發的量子貝氏詮釋與哥本哈根詮釋非常類似，但其認為後者使用客觀機率（即拉普拉斯機率）是錯誤的類比，量子力學方程式所描述的波方程並不是客觀世界的事件機率分布（反對論點一），而是反映觀測者主觀資訊的主觀機率理論（即貝氏機率），量子力學的塌陷是指不同的系統在更新之後的資訊分布（如同股票操盤手交換資訊改變看法），從頭到尾的悖論都是妄圖把描述系統內的方程式外推成跨系統也適用（機率與資訊是主觀而非客觀的），此舉沒有意義，因為觀測是個交換資訊創造現實的過程。此外，此詮釋已經使用量子資訊的方法推導出等價波恩規則的版本。

交易者詮釋：古典世界的形成是一個客觀的非時間過程（反對論點三）

此看法受到費曼和惠勒吸收子理論啟發，指出不只是電磁學定律，薛丁格方程的演化也會有順時波和逆時波（超前波），並且把方程式的時間演化對稱性提高到核心的地位，所有時空中的事件都會發射順逆時間的機率波進行演化和干涉，以雙狹縫干涉為例：光子的波函數順時演化（出價波）與屏障的逆時波函數（確認波）發生建設性干涉，產生我們所看見的事件（塌陷），兩者的順時波函數與逆時波函數都會發生相消性干涉，所以物理性的事件只會在兩個時間點（發射光子與接觸屏幕）被觀測，這種看法精妙的解釋古典事件如何從量子世界中浮現，並且迴避主流詮釋中關於觀測者導致塌陷的缺點（誰是觀測者？何時觀測？怎麼樣算觀測？）此詮釋的問題在於部分理論主張其要求非加速擴張的宇宙才能成立與事實不符，即宇宙的演化如果能以超光速存在（大撕裂），則出價波到達接收者之後，確認波要如何逆時演化抵達發出者會出現機率守恆的問題。

小結

量子力學基本的數學結構並非十分複雜，相信大多數的人都能在課程結束後有相當的掌握，但其背後的意涵詮釋和隨之而來的哲學問題卻是難以驅離的附骨之蛆，我們固然可以選擇「閉嘴計算詮釋」，或者如同阿斯佩克特將量子力學的奇異當成可利用的計算資源，卻也可以擁抱此爭議正面面對，說不定跨時代的洞見就在其中！愛因斯坦之所以在科學史上成為超脫的獨特，除了物理上的直接貢獻外，濃厚的哲學修養、深刻探究根本問題的特質也功不可沒，謹以他的名言期許對量子力學詮釋爭議有興趣的讀者：「關於歷史與哲學背景的知識，可以提供給那些大部份正受到當代偏頗觀念所左右的科學家們一種不隨波逐流的獨立性。這種由哲學的洞察力所創造的獨立性，依我來看，正是一個工匠或專家，與一個真正的真理追尋者之間，最大的區別。」