

愛因斯坦的最後一搏—EPR 悖論

你真的相信除非我們去看它，否則月亮就不在那裡嗎？

—愛因斯坦

[賴昭正](#)

前清大化學系教授、系主任、所長；合創科學月刊

十九世紀末的物理學家曾非常自滿地認為物理已走到了盡頭，該被發現的都已被發現了，剩下的只是些細節的小問題而已。沒想到廿世紀的曙光才一現，傅朗克（M. Planck）便不知覺地率先敲響了「量子力學」的革命鐘聲；1905年，在瑞士專利局做事的一無名小卒愛因斯坦，不但火上加油舉旗響應（「太陽能與光電效應」，科月2013年四月號），他自己也在另一戰場發動了另一革命：相對論！

相對論雖然改寫了三百多年來物理學家對時間及空間的看法，但並未改變人類幾千年來對「客觀宇宙」——「實在」（reality）——的認知與經驗：不管我們是否去看它，或者人類是否存在，月亮永遠不停地依一定的軌道圍繞地球運轉。可是量子力學呢？它完全推翻了「客觀宇宙」存在的觀念。在它的世界裡，因果律成了或然率，物體不再同時具有一定的位置與運動速度.....。這樣違反「常識」的宇宙觀，不要說一般人難以接受，就是傅朗克及愛因斯坦本人也難以苟同！但在經過一番企圖挽回古典力學的努力失敗後，傅朗克終於牽就了新革命的產物；但愛因斯坦則一直堅持不相信上帝在跟我們玩骰子！EPR 論文就是他反對聲浪中的最後一篇影響深遠的傑作。

量子力學的世界

海森堡（Heisenberg）測不準原理是一耳熟能詳的量子力學原理：它謂我們不能非常準確地同時測定一物體之位置及其運動速度（動量）——因為測量位置（動量）時，測量這一動作無可避免地將影響到其動量（位置）。事實上，測不準原理的內含比此更深：它認為物體不可能同時具有非常精確之位置與動量！在我們沒去測量前，物體是處於一個只能以「波函數」來形容的物理態：該波函數只能告訴我們在什麼地方可以發現該物體、或測得某一動量值的或然率。只有在我們測量那「一瞬間」，波函數才會突然崩潰，集中到我們所量得之位置（或動量值）上，而其它的可能便同時全部消失。

除了位置與動量外，在量子力學裡還有許多類似的互補物理量；例如我們將談到之基本粒子或光之「自旋」（spin）：粒子不可能同時非常精確地具有多方向的自旋。除此之外，自旋事實上還有一個非常不同於位置或動量的量子性質：「量化」。在古典力學或經驗裡，一個物體想怎麼自旋都可以；但在量子力學裡，如果粒子的自旋數為 s ，則在任何方向就只能有 $+s$ （順時鐘）或 $-s$ （逆時鐘）的旋轉而已。

EPR 論文

1933年在普林斯頓定居下來後，愛因斯坦又開始思索著其「實在」的問題。終於在1935年，與波都斯基（B. Podolsky）、及羅森（N. Rosen）聯名在美國物理回顧（Physical Review）雜誌上發表了一篇共四頁，題為「量子力學能完整地解釋實在性嗎？」的論文，再次反駁量子世界觀的正確性。這篇後來被稱為「EPR 悖論」（EPR Paradox）影響深遠，可能是愛因斯坦移居美國後所發表的一篇最重要論文。

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct'

SEE FULL FOR ONE POSSIBLE

Bohr's 'Whole Description of
the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

1935年五月日紐約時報
愛因斯坦攻擊量子理論
他及兩位同事發現它雖正確，但不完整

該論文一開始便先定義「實在」性：在完全不影響一體系下，如果我們能精確地預測到某一物理量，則此一物理量應該是確實存在的，與我們是否去觀察它無關。接著他們便開始闡釋他們的「假想實驗」：兩個粒子相撞後分別往左、右兩個不同方向飛離；因曾相撞作用之故，它們具有「關連」（correlated）的物理量（例如總動量為零）。常識與經驗告訴我們，如果分開得夠遠的話，它們之間應不再互相影響[「可分離性」（separability）的假設]，因此我們在任一體系所做的測量也應只會影響到該體系而已[「局部性」（locality）的假設]。這兩個假設可以說是物理學成功的基石（註一），因此沒有人會懷疑其正確性的。

如果我們此時去量左邊粒子的位置，則我們可以透過「關連」而預測到右邊粒子的位置。基於物理體系的「可分離性」與「局部性」，右邊粒子一直是孤立的；因此如果我們可以預測到其位置的話，則其位置應該早就存在，為一「實在」的自然界物理量。同樣地，如果我們想去量左邊粒子的動量，則我們也可以透過「關連」而預測到右邊粒子的動量。但右邊粒子一直是孤立的，因此其動量也應該早就存在，亦為一「實在」的自然界物理量。所以即使我們不去觀察它，右邊的粒子毫無疑問地應同時具有一定的位置與動量；同樣的論點也告訴我們：左邊的粒子毫無疑問地也應同時具有一定的位置與動量。如果量子力學說粒子不能同時具有一定的位置與動量，而只能告訴我們或然率，那量子力學顯然不是一個完整的理論！

量子糾纏態

當此論文傳到波爾（N. Bohr，註二）耳中時，聽說他反應非常強列，謂「我們必須馬上澄清此一誤解！」經過日以繼夜不斷地討論與修正，他終於在六個禮拜後，以同一標題在同一雜誌上回覆 EPR 的挑釁。波爾的回答似乎只是不同意 EPR 之「完全不影響某一體系」的表達方式而已，基本上並沒有

我，不管怎麼說，相信
祂(上帝)不玩骰子的

愛因斯坦，請停止告訴
上帝做什麼



證明 EPR 是錯的。但 EPR 論文並未反駁測不準原理，因此大部分物理學家均採保立（W. Pauli）的態度：反正不能同時量得一物體之位置與速度，因此探討它們是否實際存在只是一個哲學問題，不是物理家的工作。

真正反駁成功的應是量子力學的另一大師薛定鐸（E. Schrödinger）：他從 EPR 論文裡悟到了「糾纏」（entanglement）的觀念。他認為在相互作用後，兩個粒子便永遠糾纏在一起，形成了一個量子體系。因是一個體系，因此當我們去量左邊粒子之位置時，右邊的粒子也將立即像波函數一樣崩潰到一固定位置。有趣的是：薛定鐸事實上也像愛因斯坦一樣，深信量子力學是不完整的（註三），但他在這裡卻幫了波爾一個大忙！可是右邊的粒子如何「立即」知道我們在量左邊的粒子呢？那只有靠愛因斯坦所謂之「鬼般的瞬間作用」（spooky action at a distance）了——看來量子理論真如他1912年所預測的「越成功，看起來越滑稽」！

貝爾的發現

1957年，波慕（D. Bohm）將 EPR 的論點擴展到自旋粒子上：量左粒子之任一方向的自旋，便可推知右粒子在同一方向的自旋；因此粒子在任何方向的自旋均應是「實在」的。但量子力學卻謂如在某一方向量得 $+s$ ，則其他方向的自旋就「測不準」了，只能知 $+s$ 或 $-s$ 的或然率而已。這看似沒什麼太大的改變，沒想到卻導致了某些物理學家稱為「最有深度的發現」。

1965年，貝爾（John. Bell）發現：我們雖然不能同時精確地量得兩個方向以上的自旋，但如果真如 EPR 論文所說的「粒子應同時具有不同方向的自旋」，則可以設計出一個實驗來證實它。例如我們可以在 EPR 實驗的左、右端各設相同之相隔 120度的三個軸來測左、右粒子之自旋，如果粒子真的在三軸上均具有一定且獨立之自旋的話，則同時分別測得相反之自旋的或然率（假設相作用前的總自旋為零）應 $\geq 5/9$ （註四）。

貝爾不但是愛因斯坦的崇拜者，他事實上也覺得量子力學有點古怪，因此曾表示希望他所設想的實驗能證明對的是愛因斯坦，而不是波爾。沒想到1980年代的許多實驗，竟然發現左、右同時測得相反之自旋的或然率只有50%而已（註五）——正是量子力學的預測！所以同時具有三方向自旋之「實在」的假設錯了（註六）！儘管如此，貝爾還是很欽佩愛因斯坦之智慧的：「對我而言，愛因斯坦的想法不幸錯了；合理的事就是不成功。」

結論

EPR 所探討的「實在」問題，與三百多年前牛頓和萊布尼茲（G. Leibniz）所爭論之「絕對空間是否實際存在」非常相似。在「牛頓的水桶」（科月2013年八月號）一文裡，我們探討了「如果月亮不在那裡，空間是否還存在」的胡思；在本文裡，我們探討了「如果我們不去看它，月亮是否真的在那裡（用時具位置與速度）」的亂想。這些或許都是哲學的問題，將永遠爭辯不休，但無可否認的是：這些爭論均是推動物理學發展的巨輪！

愛因斯坦的想法雖然不幸錯了，但像他最大錯誤之「宇宙論常數」（科月2011年十二月號）一樣，因他質疑所導出的量子糾纏態與「鬼般的瞬間作用」已成了許多近代研究——如量子密碼學、量子計算機、量子資訊理論、量子遠距傳送等——的觀念與工具。*

- (註一) 「隔離體系」的可能是物理成功的主因；生物的研究裡幾乎不可能有「隔離體系」，因此永遠爭論不停（見筆者文「人體太複雜了」，泛科學，2015年十一月十一日）。
- (註二) 波爾是量子力學之「哥本哈根解釋法」的主要推動者及守護神。
- (註三) 因不滿量子力學之解釋法，在與波爾的討論中，薛定鏢曾謂「如果我們一定非要那鬼量子跳躍不可，那我後悔參與量子理論」的發展。「薛定鏢的貓」（論文，不是真的貓）就是在 EPR 論文後不久出現的。
- (註四) 假設左粒子在三軸的自旋為（順、順、逆）；則因總自旋須為零，右粒子在三軸的自旋相對應為（逆、逆、順）。在此情況下，（左右）同時偵測的組合有（順逆）（順逆）（順順）（順逆）（順逆）（順順）（逆逆）（逆逆）（逆順）九種；其中相反自旋的結果佔了5/9。讀者應該不難推出：不管三軸的自旋為何，其結果不是5/9就是9/9，即永遠 $\geq 5/9$ 。
- (註五) 依量子力學的計算，如果在左邊A軸量得的是順（逆）時鐘的話，則右邊A軸量得的便一定是逆（順）時鐘，而在其他兩軸量得逆（順）時鐘的或然率則各為1/4，因此左、右同時測得相反之自旋的或然率只有50% [$(1+1/4+1/4)*3/9$] 而已。
- (註六) 貝爾理論事實上是含蓋更廣的：沒有任何「局部隱藏變數」的物理理論能複製所有量子力學的預測。

*Alain Aspect（法國）、John Clauser（美國）、Anton Zeilinger（奧地利）三人因「用光子糾纏的實驗，確定（量子力學）違反貝爾不等式和開創量子信息科學」獲諾貝爾2022年物理獎。