

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

Why a 'Whole Description of
the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

1935年五月廿四日時報
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，基本上並沒有證明 EPR 是錯的。但 EPR 論文並未反駁測不準

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



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（J. 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証實它。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。