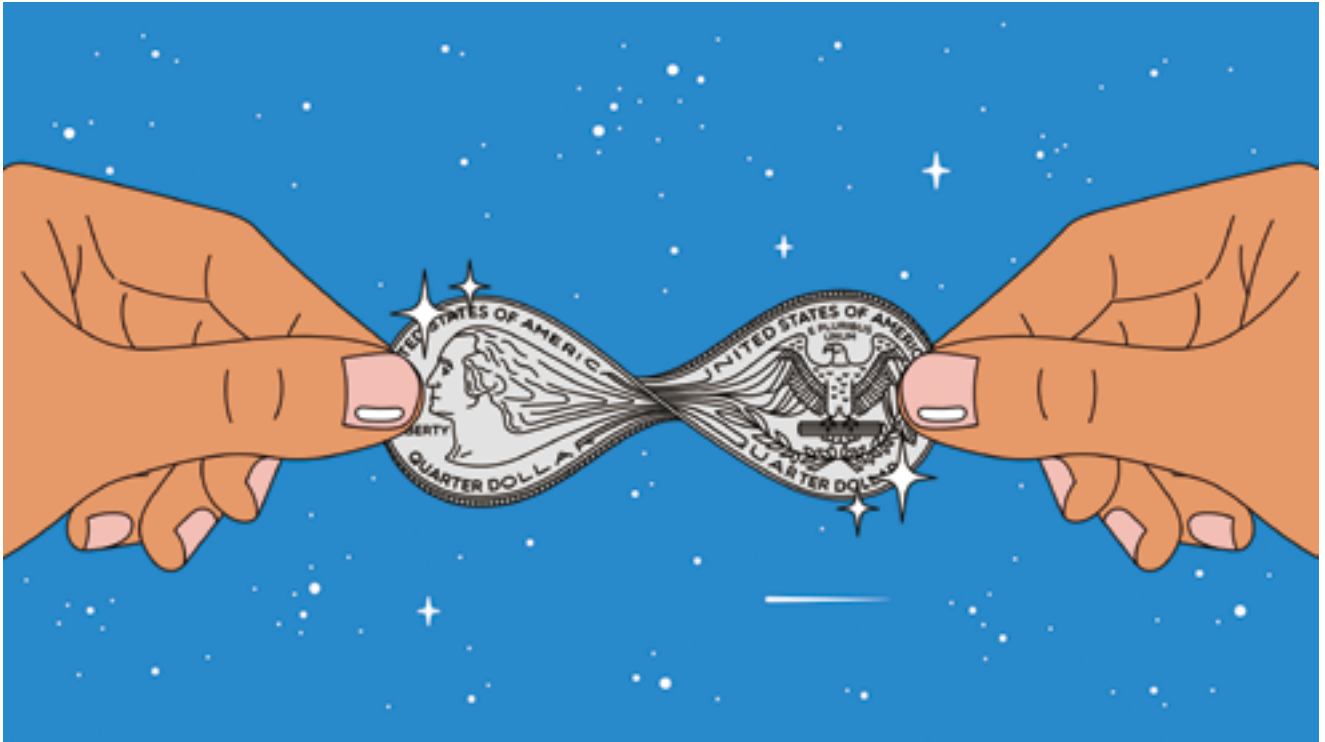


# 量子悖論透漏玄機「真實」並非如此理所當然

有個假想實驗撼動了量子世界的根基，迫使物理學家釐清諸如多世界與哥本哈根詮釋等各種版本的量子詮釋，究竟揚棄了哪些關於「真實」的合理假設。

作者：阿南塔斯瓦米（Anil Ananthaswamy） 譯者：戴守煌

作者簡介：阿南塔斯瓦米為記者兼作家，曾獲頒英國物理學會物理新聞獎與英國科學作家協會最佳調查新聞獎。曾任《New Scientist》新聞副總編，現為《PNAS》期刊前部內容自由採訪編輯。他定期為《New Scientist》雜誌撰稿，也為《Scientific American》、《Nature》、《Discover》、《Nautilus》等期刊雜誌供稿。



如果擲硬幣的結果不會同時出現正面和反面，物理學家就必須拋棄對於「真實」本質的簡單假設。（Allison Filice 為 Quanta 雜誌製作）

**量**子力學是個成功的理論，這點毋庸置疑。它為微觀世界的本質提供了無比精準的預測。近一世紀以來的爭議點卻是在於，它所告訴我們關於存在與真實究竟為何。已有眾多詮釋對這個問題表達各自的見解，每種都要求我們接受某些有關真實本質未經證實的主張（亦即假設）。

現在有一個新的假想實驗正面挑戰這些假設，並且撼動了量子物理的基石。這個實驗十分怪異。比方說，它所進行的量測，能抹除剛剛所觀察事件的

任何記憶。這項怪異實驗無法在人類身上實施，但或許可以利用量子電腦來進行，而且還具有區分不同量子物理詮釋的潛力。

「每隔一段時間就會冒出一篇激起眾人思考和討論的文章，這篇就是。」加州橘郡查普曼（Chapman）大學的量子物理學家萊弗（Matthew Leifer）說：「這個假想實驗將名列量子基礎研究的奇聞怪譚中。」

這個實驗是蘇黎世聯邦理工學院的弗勞奇格



Quanta Magazine 是西蒙斯基金會（Simons Foundation）出版但編輯獨立之網路科普雜誌（<http://www.quantamagazine.org/>），希望能提高數學、物理與生命科學前沿研究進展的公眾能見度。本文譯自：

<https://www.quantamagazine.org/frauchiger-renner-paradox-clarifies-where-our-views-of-reality-go-wrong-20181203/>

本刊感謝 Quanta magazine 與主編 Thomas Lin 同意翻譯轉載，翻譯之文責由本刊自負。

(Daniela Frauchiger) 與雷納 (Renato Renner) 設計出來的，牽涉到一系列乍看之下完全合理的假設。但實驗卻產生矛盾的結果，意謂至少有一個假設是錯的。選擇放棄哪個假設，將影響我們對量子力學的理解，並且暗示量子力學並非一個普適性理論，所以無法應用在如人類等複雜的系統上。

量子力學惡名昭彰的地方在於，一旦論及描述量子活動方程式的正確詮釋，物理學家就分裂成好幾派。但是在這個新假想實驗中，沒有任何一種量子世界的詮釋觀點能毫髮無傷地通過考驗。每種詮釋都抵觸一個以上的假設。當我們在追尋對於真實毫無異議的描述時，是否有個全新的理論正等著我們發現？



量子論在光子、電子、原子、分子，甚至巨分子尺度上運作極為良好。然而它能否運用在比巨分子大很多很多的系統上？「我們在實驗上還沒確認量子力學可用於較大尺度；較大指的是達到病毒或小型細胞的尺寸，」雷納說：「我們尤其不知道它對人類大小的物體是否仍然適用，更不知道能不能用在黑洞大小的物體上。」

儘管缺乏實證的支持，物理學家認為量子力學可用來描述所有尺度的系統，也就是具有普適性。為了驗證這個主張，弗勞奇格與雷納想出他們的假想

實驗。它是由物理學家威格納 (Eugene Wigner) 於 1960 年代首先構思的版本推展出來的。這個新實驗顯示，在量子世界中，兩個人對同一個無可反駁的確切結果 (例如硬幣擲出哪一面) 可能產生不同見解，這意謂我們關於量子真實的假設有所缺失。

在標準量子力學中，次原子粒子等量子系統是以「波函數」的抽象數學概念來表示。物理學家計算波函數如何隨時間改變。

但是波函數並沒有提供任何有關粒子性質 (例如位置) 的確切數據。如果我們想知道粒子在哪裡，空間與時間上任一點的波函數值只容許我們計算在該點找到該粒子 (如果我們決定看它的話) 的機率。在我們「看」它之前，波函數是攤散開來的，並且在不同位置賦予粒子不同的存在機率。這個粒子被描述成「同時存在於很多位置」的量子疊加。

更一般地說，量子系統可以是許多態的疊加，所謂的「態」可以是其他性質，例如粒子的自旋。弗勞奇格 / 雷納假想實驗主要在於處理複雜量子物體 (甚至人類)，使它們處於疊加態。

這個實驗共有四位參與者：愛麗絲、愛麗絲的朋友、鮑伯、鮑伯的朋友。愛麗絲的朋友在實驗室裡對一個量子系統進行量測，愛麗絲在實驗室外監看實驗室和她朋友的狀況。鮑伯的朋友在另一間實驗室裡，鮑伯在外面觀察他的朋友和該實驗室，並將它們當成一個系統看待。

在第一間實驗室中，愛麗絲的朋友量測硬幣的結果，該硬幣被設計成擲出後有三分之一機會是正面朝上，三分之二機會反面朝上。如果擲完出現正面，愛麗絲的朋友就製備一顆自旋向下的粒子；若



威格納是匈牙利裔美國理論物理學家，是量子論發展的關鍵人物之一，獲頒 1963 年諾貝爾物理學獎。（美國能源部橡樹嶺國家實驗室 ORNL）

出現反面，她製備的粒子則是具有自旋向上與自旋向下機率相同的疊加態。

愛麗絲的朋友將製備好的粒子傳送給鮑伯的朋友，後者再量測粒子自旋。根據量測結果，鮑伯的朋友就可以推斷愛麗絲朋友看到的擲硬幣結果。比方說，如果他發現粒子是自旋向上，就知道硬幣擲出反面。

實驗繼續進行。愛麗絲將「她的朋友與實驗室」

當成一個量子系統，測量它的態，並且用量子論預測結果。鮑伯對「他的朋友與實驗室」也進行相同的作業。接下來第一個假設要出場了：「實驗參與者可以用量子力學分析另一個系統，即便是包含其他參與者的複雜系統。」換句話說，量子論具有普適性，宇宙中所有系統（包括整個實驗室，以及其中的科學家）都遵循量子力學法則。

此一假設允許愛麗絲將她的朋友與實驗室看成一

個系統，並且針對它的某種特定性質進行量測，導致包含內容物在內的整個實驗室處於某種疊加態。這不是一項簡單的測量，本假想實驗的怪異之處就蘊含在其中。


理解這個程序的最好方法，是設想處於水平與垂直極化疊加態的單一光子。假設你測量極化，發現它是垂直極化。接著，如果反覆測量該光子是否為垂直極化，你會一直得到肯定的答案。但是如果測量這個垂直極化光子是否在其他方向（例如與垂直

方向交 45 度角）極化，你會發現有 50% 機率答案為是，50% 為否。接著如果回頭測量這個你以為已經垂直極化的光子，會發現它有一定的機率不再是垂直極化，而是變成水平極化。剛剛 45 度夾角量測已使光子重新回到水平與垂直極化的疊加。

這對單一粒子來說完全沒問題，而且這類量測已經在真實實驗中被大量驗證。然而在上述假想實驗中，弗勞奇格與雷納想要對複雜系統進行類似的量測。

## 假想實驗的進行方式

**愛麗絲的朋友** ① 愛麗絲的朋友擲一枚硬幣並製備一顆粒子  
在她的實驗室中




- 若硬幣出現正面，將粒子製備為自旋向下。
- 若硬幣出現反面，將粒子製備為自旋向上與向下的疊加態。

愛麗絲測量她的朋友與實驗室，並推論擲硬幣的結果。



**鮑伯的朋友** ② 愛麗絲的朋友將該粒子傳送給鮑伯的朋友  
在他的實驗室中



③ 鮑伯的朋友測量粒子的自旋

結果：愛麗絲與鮑伯對硬幣擲出正面或反面有時持相反意見。

鮑伯測量他的朋友與實驗室，並推論擲硬幣的結果。



(Lucy Reading-Ikkanda 製 · Quanta 雜誌)

實驗進行到這個階段，愛麗絲的朋友已經看到硬幣擲出正面還是反面。但愛麗絲的複雜量測卻將整個實驗室（含她的朋友）置於看到正面和反面的疊加態。這種態十分怪異，幸好本實驗沒有要求愛麗絲的朋友做更多測量。

不過愛麗絲的任務還沒結束。她根據自己的複雜量測結果（可能為「是」或「否」），可推知鮑伯朋友的量測出什麼。假設愛麗絲得到「是」的答案，她可以用量子力學推斷鮑伯的朋友一定是發現粒子自旋向上，因此愛麗絲的朋友硬幣擲出反面。

愛麗絲用量子論得到結果，得有另一個假設才

行。她不只推敲出自己所知道的，而且還推敲出鮑伯朋友如何從他的觀點用量子論得知硬幣丟擲的結果。愛麗絲是自行得出結論的。這種「一致性假設」認為，不同實驗參與者用量子論所做的預測不會互相矛盾。

在此同時，鮑伯也可以對他的朋友及其實驗室進行類似的複雜量測，使之處於某種量子疊加態，量測答案可以也是「是」或「否」。如果鮑伯得出「是」，實驗設計將令他做出愛麗絲的朋友擲出硬幣正面的結論。

愛麗絲和鮑伯顯然可以在量測後核對他們對於擲



雷納是瑞士蘇黎世聯邦理工學院物理學家，他與弗勞奇格共同提出此悖論。後者在不久之後離開學術界。（Giulia Marthaler 攝，蘇黎世聯邦理工學院）

硬幣結果的推論。不過這裡還需要用到一個假設：如果實驗參與者說硬幣擲出正面，那麼相反的結果（也就是硬幣擲出反面）就不能同時為真。

現在矛盾出場的時機已經成熟。當愛麗絲的量測結果為「是」，她推論硬幣擲出反面；然而當鮑伯的量測結果為「是」，他推論硬幣擲出正面。在大多數量測中，愛麗絲和鮑伯的測量結果相反。但弗勞奇格與雷納指出，愛麗絲和鮑伯有 1/12 機率在同一輪實驗中都測得「是」，導致他們對於愛麗絲的朋友擲出硬幣正面或反面意見相左。「結果就是，他們兩個人談論的都是過去發生的事件，而且都確定發生了什麼，但他們的陳述內容卻剛好相反，」雷納說：「這就是矛盾之處。這表示一定有什麼地方弄錯了。」

這促使弗勞奇格與雷納主張，支撐這個假想實驗的三個假設當中，一定有一個不正確。



「科學的部份就到這裡為止了。我們只知道三個當中有一個錯了，但是我們無法提出好的論證確認哪個被抵觸了。」雷納說：「接下來就是詮釋和偏好的問題了。」

幸運的是，量子力學有為數眾多的詮釋，而且幾乎所有詮釋都提到量測時波函數如何改變。以一顆粒子的位置為例，在量測之前，我們能談的只有在

某個（指定的）地方找到該粒子的機率大小。一旦做了量測，粒子就獲得一個確切的位置。在哥本哈根詮釋中，量測導致波函數「塌縮」（collapse），塌縮之前我們無法談論諸如位置之類的粒子性質。有些物理學家將哥本哈根詮釋視為「量測之前性質並未真實存在」的論據。

這種形式的「反實在論」（anti-realism）令愛因斯坦相當反感，現今有些量子物理學家也這麼覺得。「量測導致波函數塌縮」的觀念亦然，尤其是因為哥本哈根詮釋對於量測由哪些要素構成講得不清楚。其他主要詮釋或理論要不是提倡實在論觀點（亦即量子系統具有獨立於觀察者和量測之外的性質），不然就是避開量測誘發的塌縮，或兩者兼具。

例如「多世界詮釋」（many-world interpretation）就把波函數演變視為真實現象，否認它會塌縮。如果一枚量子硬幣可擲出正面或反面，那麼在多世界場景中，兩種結果都發生，但分別出現在兩個不同的世界中。在此狀況下，「一次量測只有一個結果」的假設就站不住腳了；「如果硬幣擲出正面，就不會同時擲出反面」亦然。在多世界中，擲硬幣的結果是正面和反面都有，因此愛麗絲與鮑伯得到的答案有時相反，就不再是矛盾了。

「我得承認如果你在兩年前問我，我會說（我們的實驗）恰恰顯示多世界事實上是個好詮釋，而且你得放棄（量測只會產生單一結果的規定）。」雷納說道。

這也是牛津大學理論物理學家多伊區（David Deutsch）的觀點。他在弗勞奇格與雷納的論文剛出現在 arxiv.org 網站上時就注意到它。在該版本

## 量子矛盾

弗勞奇格 / 雷納假想實驗迫使物理學家放棄三個貌似合理假設的其中一個。每個都對應一種主要的量子力學詮釋。

假設：

**量子力學  
具有普適性**

宇宙中的一切，從小粒子到大實驗室，都遵循量子力學法則。



抵觸：

主張較大的量子系統將自發塌縮成古典態的理論捨棄了這個假設。

假設：

**量子力學  
具有一致性**

不同實驗參與者用量子論所做的預測不會彼此矛盾。



抵觸：

QBism之類的理論主張，量測結果依觀察者個別觀點而定。

假設：

**互斥的事實  
不能同時為真**

若某陳述為真，則其相反陳述不能亦為真。



抵觸：

在量子論的多世界詮釋中，量測的所有可能結果都會出現，但每種結果在各自的宇宙中發生。

(Lucy Reading-Ikkanda 製, Quanta 雜誌)

論文中，兩位作者支持多世界構想。（最新版本的論文已受同儕審查並於 2018 年 9 月刊登在《自然通訊》期刊，改為採取較偏向不可知論的立場。）多伊區認為這個假想實驗將繼續支持多世界詮釋。「我傾向於認為，它將波函數塌縮或單一宇宙版本的量子論置於死地，不過它們已經毫無疑問掛點

了，」他說：「我不確定再用威力更強大的武器攻擊它們可以達成什麼成效。」

不過雷納已經改變主意。他認為最有可能失效的假設是「量子力學具有普適性」的想法。

舉例來說，所謂「自發塌縮理論」就抵觸這個假設，該理論認為波函數會自發且隨機地產生塌縮設



（正如其名所示），與量測無關。這些模型確保粒子群等所構成的小系統能夠幾乎永久維持在疊加態，但是當系統質量愈來愈大，自發塌縮到某個古典態的可能性就愈高。量測只會觀察到系統塌縮後的態。

在自發塌縮理論中，系統質量一旦超過某個門檻，量子力學就不再有效。這些模型雖然尚未被實驗資料證實，但也未被否定。

日內瓦大學的吉辛（Nicolas Gisin）認為自發塌縮理論可解決弗勞奇格 / 雷納實驗中的矛盾。「我對他們難題的解答肯定是：『不對，到了某個門檻之後疊加原理就不再適用了。』」他說。

如果你堅持量子論具有普適性以及量測只會得到一種結果的假設，那麼就非得放棄最後一個假設不可，也就是「一致性」：不同實驗參與者用量子論做出的預測不會互相矛盾。

萊弗藉由一個稍加修改的弗勞奇格 / 雷納實驗，指出如果哥本哈根型式的理論為真，就得放棄上述最後一種假設。在萊弗的分析中，這些理論具有一些共通特性，包括具有普適性、反實在論（意謂量子系統的性質在量測前不具有確切的數值，例如位置）以及完備性（意謂並沒有理論未涵蓋到的隱藏現實）。在這些特性前提下，他的研究顯示，一項特定量測中沒有任何結果對所有觀察者都客觀成

立。因此若愛麗絲的朋友在實驗室裡讀到偵測器信號，對她來說就是一種客觀事實，但對於在實驗室外用量子論描述整個實驗室狀態的愛麗絲而言卻不是。量測結果與觀察者的觀點有關。

「如果你想沿用哥本哈根式詮釋，最好的作法是採用這種個人觀點式的版本。」萊弗說道。他指出，某些詮釋（例如量子貝氏論，縮寫為 QBism）已經採取量測結果係觀察者主觀而定的立場。

雷納認為，理論是實驗參與者知道彼此知識狀態的有效工具，而放棄一致性假設將使理論喪失這種能力。這種理論將淪為唯我主義。因此，任何傾向於「事實是主觀的」的理論，都必須重新建構某些傳遞知識的管道，並且令其滿足兩種互相對立的限制條件。首先它必須弱到不致於引發弗勞奇格 / 雷納實驗中所見的矛盾。然而它卻必須強到足以避免唯我主義的指控。目前還沒有人提出這種能滿足各方要求的理論。



弗勞奇格 / 雷納實驗從三個貌似合理的假設中產生出矛盾。加拿大滑鐵盧圓周理論物理研究所（Perimeter Institute for Theoretical Physics）的史貝肯斯（Rob Spekkens）說，仔細解讀量子論各種詮釋如何抵觸這些假設，已成為「一項極為有用的練習」。



「這個假想實驗是一片很棒的放大鏡，透過它我們可以檢驗量子論不同詮釋陣營的看法差異，」史貝肯斯說：「我不認為它真的排除了任何之前大家所認同的選項，不過它釐清了不同詮釋陣營應該要相信什麼假設，才能免於發生實驗裡的矛盾。它在這些課題上有助於闡明大家的立場。」

即便理論物理學家無法區分這些詮釋誰是誰非，實驗學家正在設法實現這個假想實驗，以便進一步釐清這個問題。這將是一項艱鉅的任務，因為該實驗的需求甚為怪異。舉例來說，當愛麗絲對她的朋友和實驗室進行某種特定的量測時，會使每件東西（包括她朋友的大腦）都處於一種疊加態。

澳洲布里斯本格里菲斯（Griffith）大學的懷茲曼（Howard Wiseman）表示，就數學上來說，這種複雜量測等同於：首先將系統的時間演化逆轉（實驗參與者的記憶因此被消除，且量子系統回到初始狀態，例如被量測的粒子），然後僅對粒子進行較為簡易的量測。這種測量或許簡單，但正如吉辛委婉指出的：「將實驗觀察者的狀態逆轉，包括大腦與記憶，才是棘手的部份。」

儘管如此，吉辛並不否認，也許有一天可以用複雜量子電腦模擬實驗室中的參與者（扮演愛麗絲朋友與鮑伯朋友的角色），來進行這個實驗。原則上量子電腦的時間演化可以逆轉。有一種可能是，即便量子電腦愈來愈複雜，這類實驗將重現標準量子力學的預測。但也有可能不是這樣。「另一種可能是，當量子電腦的發展超過一定複雜程度之後，它就達到疊加原理的上限，結果我們發現量子力學事實上並非普遍適用。」吉辛說。

萊弗對於他的研究主題則是堅持將有新發現。

「我認為以上提到的都不是正確的量子力學詮釋。」

他認為量子力學目前的情況很像愛因斯坦提出廣義相對論前的時代。實驗物理學家找不到「乙太」（一般認為光波在牛頓宇宙中傳播所需的介質）存在的證據。愛因斯坦主張乙太根本不存在。相反的，他指出空間和時間可延展變形。「在愛因斯坦的發現之前，我無法告訴你真正改變的是時間與空間的結構。」萊弗說。

他認為，量子力學正面臨類似處境。「我們對世界運作方式所做的某些隱含假設很有可能並不正確，」他說：「一旦我們改變想法，一旦我們修正那種假設，一切都將在剎那間水落石出。未來的指望差不多是這樣。任何對於所有量子力學詮釋都抱持懷疑態度的人，一定都有類似想法。我能不能告訴你這種假設是否有合理的候選者？嗯，如果我能的話，我早就開始研究這理論了。」<sup>30</sup>

## 本文出處

*Quanta Magazine* December 3, 2018。本刊特別美國能源部橡樹嶺國家實驗室（ORNL）授權刊登威格納照片與蘇黎世理工學院雷納教授授權刊登他的照片。

## 譯者簡介

戴守煌畢業於臺大物理系，英國德倫大學（Durham University）基本粒子理論博士，現為南臺科技大學助理教授。

## 延伸閱讀

- Philip Ball，〈為何多世界詮釋有眾多問題〉，*Quanta* 雜誌，2018/10/18：  
<https://www.quantamagazine.org/why-the-many-worlds-interpretation-of-quantum-mechanics-has-many-problems-20181018/>
- Amanda Gefter，〈有關量子真實的個人之見〉，*Quanta* 雜誌，2015/6/4：  
<https://www.quantamagazine.org/quantum-bayesianism-explained-by-its-founder-20150604/>

# 《數理人文》訂購單

(請填妥資料後傳真至 03-5731915 或郵寄至交通大學丘成桐中心)

數理人文為半年刊，固定於每年之 1 月及 7 月各出版一期。

訂閱方案	優惠價
一年2期(印刷品)	450元
一年2期(掛號)	490元
二年4期(印刷品)	900元
二年4期(掛號)	980元

自\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月號開始訂閱。  
(未填寫期數者，將由最新一期寄發)

續訂依原訂閱到期後續寄送。

客服專線：03-5731915

客服信箱：alicefsy@math.nctu.edu.tw

yushan.deng@intlpress.com

## ■ 基本資料 (請以雜誌收件者之資料為主)

姓名：\_\_\_\_\_ 性別：先生 小姐

電話：日( ) \_\_\_\_\_ 夜( ) \_\_\_\_\_ 手機：\_\_\_\_\_

E-mail：\_\_\_\_\_

收件地址：□□□ \_\_\_\_\_

## ■ 付款資料

付款總金額：優惠價\_\_\_\_\_元 × 份數\_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_元

郵政劃撥(劃撥帳號：50422323 戶名：馮肅媛)

您可以使用本頁所附之劃撥單訂購，並將交易憑證傳真至 03-5731915，或使用郵局之劃撥單訂購，並請在劃撥單上寫明訂閱方案、聯絡方式及 E-mail。

網路訂購 (<http://yaucenter.nctu.edu.tw/journal/index.php>) 期刊之網站提供電子平台的訂購連結

## ■ 發票資料

抬頭：\_\_\_\_\_ 統一編號：\_\_\_\_\_

98-04-43-04 郵政劃撥儲金存款單

存款帳號	5	0	4	2	2	3	2	3	金額	億	仟萬	佰萬	拾萬	萬	仟	佰	拾	元
								(內含掛號費)										

◎寄款人請注意背面說明  
◎本收據由電腦印錄請勿填寫  
郵政劃撥儲金存款收據

通訊欄(限與本次存款有關事項)

自\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月號訂閱

續訂依原到期數後續寄送

一年2期(印刷品)450元

一年2期(掛號)490元

二年4期(印刷品)900元

二年4期(掛號)980元

訂戶姓名：\_\_\_\_\_

連絡電話：\_\_\_\_\_

E-mail：\_\_\_\_\_

統一編號：\_\_\_\_\_

發票抬頭：\_\_\_\_\_

收款戶名 馮肅媛

寄款人 他人存款 本戶存款

姓名 \_\_\_\_\_

地址與電話 □□□□-□□□□

主管：\_\_\_\_\_

申請人請於瞭解「郵政儲金匯兌人資料直接蒐集告知聲明」內容後，填妥本單提交郵局辦理。

經辦局收款章戳

收款帳號戶名 \_\_\_\_\_

存款金額 \_\_\_\_\_

電腦記錄 \_\_\_\_\_

經辦局收款章戳

虛線內備供機器印錄用請勿填寫