

# 意識是什麼？

林善雄

東海大學生命科學系教授

## 【綱目】

壹、引言：意識的問題

貳、時間及意識

2.1 意識是連續的還是一序列離散的事件？

2.2 意識經驗的節奏

2.3 嚴肅看待逆時確認

參、意識的神經相關物

3.1 大腦的功能性組構

3.2 大腦皮質及神經元細胞集團

3.3 軸突及樹突

3.4 神經同步性

3.5 間隙接合的細胞集團—「超神經元」

3.6 意識神經相關物的新視野—神經元內部及細胞骨架

肆、神經元的細胞骨架

4.1 微管及神經元內的網路

4.2 微管自動器

4.3 蛋白質構象動力學—自然位元及量元

4.4 麻醉

伍、量子資訊處理

5.1 量子力學

5.2 量子計算

5.3 潘洛斯客約的量子計算

陸、量子潛意識

柒、微管的量子計算—協調客約模型

7.1 協調客約的細節

7.2 消散

7.3 可檢驗性及可證偽性

捌、協調客約有關意識和認知的應用

8.1 視覺意識

8.2 意志力及自由意志

8.3 量子聯合記憶

8.4 意識經驗的難題

8.5 意識是什麼？

8.6 意識及演化

玖、結 論

【參考文獻】

## 【摘要】

意識界定我們的存在與實相，但大腦產生思維及感覺的機制仍然不明 (Hameroff 2009)。意識是發生在腦神經元-微管-土撥靈量子槓桿-忌水真空袋-范德瓦爾斯量子倫敦力-掌管蛋白質構象態-量子疊加-時空分開成碳原子核直徑大小的小泡空間內，當實相的某一樣式的同調疊加總數或總質量充裕時，糾結生命及宇宙歷史的非時間性的潘洛斯量子重力使疊加塌縮 (迷你黑洞)，意識出現，我們感受到我們的存在。致於大腦產生思維及感覺的機制目前雖然不清楚，但還是在量子粒子理論及量子重力論的範圍。意識顯然與量子重力脫不了關係。我們知道愛因斯坦相對論直指重力使時空扭曲，而潘洛斯則告訴我們量子重力等效於時間倒置。最近 Maldacena (2005) 更提出全像原理可使實相二維邊界的量子色動力學 QCD (量子粒子理論) 與造成幻覺三維空間的量子電動力學 QED (量子重力論、弦論) 取得關聯，簡言之，全像性使重力幻化為第三維，此新理論或許可以用來進一步詮釋大腦神經元內協調客約所謂非可計算的柏拉圖影響的意識形成機制。Sorli (2008) 認為「時空只不過是觀測者透過測量過程，創造出來的重力場內的結構品質。時間存在於只在當我們觀測它時，人類並非存在於時間，而是時間如影隨行於人類，宇宙乃非時現象，意識亦為非時現象，只是心智在感受到時間流，是心智在創造時間。重力是作用在建構重力場的空間量子之間，把存在於重力場內的物質體約束在一起。在 EPR 思維實驗中，重力場是基本粒子之間的一種直接資訊介質，意識屬於非時間的資訊介質。在基本粒子 A 與基本粒子 B 之間並無資訊移動，重力場單純知道它們的自旋」。我們尚在尋找的重力子，它近似使宇宙創生的理論希格斯粒子，而全像性量子大腦能透過量子疊加進入了它們的非域性及非時性的多重糾結世界裡，逆時確認，在塌縮當下，意識呈現單一的幻覺具相世界。人類的意識是生物演化的最高峰，從生物學看，它是有利於人類的存在。以下本篇「意識是什麼？」一文是參考 Hameroff (2006) 發表在「新興的意識物理學」一書中第六章「意識、神經生物學及量子力學：論三者的關聯性」的內容。

意識，雖然常被認為是由腦神經元中之突觸計算突現出來，但還是沒有說出意識的關鍵特質。潘洛斯-漢莫洛夫的「協調客約」模型指出：意識是腦神經元內微管的一連串量子計算，在免於脫散及受到防護的情況下，抵達客觀化約的閾值，這個門檻就是潘洛斯量子重力，它可以用來解答測量的問題。量子計算是由神經元/突觸的輸入所「協調的」(故名之為「協調客約」)，並透過間隙接合的穿隧輸出，遍及大腦皮質。每一次的協調客約就是一個意識事件，類似於懷德海哲學上的「經驗機緣」，它的發生與腦電生理相呼應。

## 意識是什麼？

### 壹、引言：意識的問題

意識 (consciousness) 包含現象經驗、自知、感覺、選擇、動作控制、以及世界模型等。但什麼是意識？意識是否為某種特別的東西，或只是資訊處理的副產物？不論它是什麼，意識仍是一個多面向的謎。儘管在行為和腦科學的研究已有重大進展，意識本質還是難以解釋清楚。其中無法解決的問題包括：

- (1) 在刺激感覺器官後 150 到 500 毫秒，意識知覺的神經相關物才出現，這對意識知覺及意志行動而言，顯得太遲而無因果關係。例如色動現象 (the color phi) 及臂感跳動 (cutaneous rabbit) 的異例，很明顯的是腦會事前填補尚未備妥的意識感覺資訊。別人的回話在被我們意識確認之前，我們要講的話可能早就已經準備好了。還有打網球時，在意識尚未確認一個快速來球的位置之前，你早就以精準的動作予以回擊。儘管如此，我們仍主觀認為這些知覺，都是由我們的意識去感覺和回應的。
- (2) 腦如何統整下面的問題：a) 把各層面融合為一個模組 (modality) (例如，視覺的形狀、顏色及移動)，b) 把不同模組加以融合 (例如景象和聲音)，c) 把感覺不同步的成員在時間上統整為同步事件 (例如景象和觸覺)，以及 d) 把非自我中心的空間 (被模擬的外在世界的空間)、自我中心的空間 (個人觀點的空間) 和內感受的空間 (身體感覺的空間)，融合為統一的意識當下？
- (3) 意識的電生理相關物及專注力 (例如  $\gamma$  腦波圖/同調 40 赫茲) 可能與假定的意識神經層級相關物 (neural-level correlate of consciousness) (一連串的軸突動作電位，電鋒) 以及意識網路層級相關物 (network-level correlate of consciousness) (軸突-樹突之間，受神經傳遞物質調節之突觸網路的赫比細胞集團) 無法相容。
- (4) 絕大多數的腦活動都是無意識。無意識活動與意識有什麼區別？
- (5) 艱難問題：腦如何產生感質，現象經驗的素材—玫瑰之味道，情緒之感覺品質以及意識思想流之經驗？為什麼意識經驗總是與腦有連帶關係？

普遍的研究都推測，意識是來自腦內之資訊處理過程，然而，隨著各種哲學立場的不同，又有不同層級的相對描述。一般而言，軸突動作電位 (電鋒) 全有-全無之發射，被認為是腦功能的基本通路，相當於電腦中，扮演的單一資訊狀態或開關角色一樣。意識被認為是從複雜計算中突現出來：由受電鋒媒介的化學突觸 (赫比細胞集團)，調塑成軸突-樹突神經元網路之非線性動態，形成奇異穩定模式—吸引子—此即意識經驗。

我之所以會把當代所有的研究，都歸類為古典功能主義（classical functionalism）（也許不公正），是因為他們好像在暗示，只要造一個機器人，能完全精準的模仿傳統神經科學家所認為的相關意識的腦活動，又能表現出與人類意識相關的功能，那麼這個機器人就稱得上是有意識了，且可以不在乎它是由什麼材質合成。

古典功能主義者，對上述問題所做的粗略解釋是：

- (1) 當下意識的知覺和決斷力，是一種幻覺；無意識過程會啟動許多行為。
- (2) 統整，例如，在丹尼特多重草稿模型的時間統整，是來自於編輯過的記憶，而不是當下統一的意識知覺。
- (3) 透過頭皮、腦表面或在腦內的細胞外液（例如  $\gamma$  腦波圖/同調 40 赫茲），測定的電生理活動，雖然看似和認知及意識有關，但還是被懷疑，主要理由是軸突電鋒無法說明它們之間的同步性。
- (4) 無意識過程，在和最活躍（或最佳同步）神經群的實質內容的競爭下，會贏得意識。
- (5) 意識經驗，是功能性資訊處理的一種突現特性。

因此，古典功能主義把意識解釋成一套無法理解、事後性、虛幻的副象<sup>1</sup>（epiphenomena）。雖然這個觀點有可能被證實為真，但由於缺少可靠方法和錯誤假定（我會進一步說明），是屬於一種不負責任、長期被默認的見解。若硬要把與意識形成無關的神經元活動，裁製成合適的電腦類似物，這樣就會疏忽基本的神經生物學要素，而偏離目標<sup>2</sup>。所以我要特別論證：軸突電鋒和化學突觸的傳遞並不是意識的主要通路，意識的電生理相關物是衍生自窗形間隙接合（window-like gap junctions）連結的樹突活動，膠細胞也參與一腳，以及樹突內細胞骨架微管（intradentritic cytoskeletal microtubules）的量子處理才是意識的真實基質。

十二年前，Roger Penrose（羅傑·潘洛斯）和我（Stuart Hameroff，司徒華·漢莫若夫）根據腦神經元內細胞骨架微管中的量子計算，提出了一個模型叫做，協調客觀化約（orchestrated objective reduction）（協調客約，Orch OR）<sup>3</sup>。之後，協調客約就一直受到主流科學家及哲學家的質疑。其中一個被質疑的有力理由是，量子計算在技術上，是被設計成只有在避開脫散（decoherence）的超低溫 and 隔離的環境下，才能發生—因為極端脆弱的量子態，在溫度/環境交互作用下，很容易瓦解。因此，量子計算，根本不可能發生在液態腦溫的介質環境中。然而，生物分子內之量子處理，不僅能發生，而且在較高溫度之下，還可被增強。再者，神經元內部，也能以一種隔離、非液體、凝膠有序的狀態存在（第 5.2 節）。另一個反對意見是—一個神經元內的量子態，不可能超越細胞疆界，延伸到其他神經元—但隨後激盪出來之看法，卻相信透過窗形間隙接合（這種接合，基本上，能將許多神經元融合成超神經元，第 3.5 節）的

量子穿隧 (quantum tunneling)，有能力完成這樣的延伸。目前，間隙接合網路，在腦內是非常普遍的，可以調節  $\gamma$  腦波圖/同調 40 赫茲的神經元活動，也是意識最理想的電生理相關物 (第 3.4 節)。最後儘管，a) 傳統理論之解釋欠缺進步，以及 b) 協調客約與神經生物學雖有完美的契合，但由於協調客約與傳統解釋差異太大，協調客約一直無法完全被接受。然而十年過去了，眾所皆知的神經生物學研究，還是轉向協調客約。

本文提出意識，神經生物學及量子力學 (quantum mechanics) 三者的關聯性。在此先預覽它們三者間的相關性：

*意識及神經生物學 (第 3 節)*：意識是發生在，以間隙接合 (gap junctions)，把眾多皮質神經元樹突相連成的巨大赫比「超神經元」(Hebbian “hyperneurons”) 內。在超神經元樹突內的意識處理，是由化學突觸輸入，再由軸突電鋒輸出傳遞，此與  $\gamma$  腦波圖/同調的 40 赫茲以及一般麻醉的後突觸機制是一致的。意識的分子相關物是樹突內之細胞骨架，特別是微管及相關蛋白質，後者的資訊處理能激發軸突電鋒，也能調節突觸。

*神經生物學及量子力學*：量子疊加，糾結及其他量子效應，被認為會在超分子層級時，受環境的干擾(脫散)而消失 (第 4.3 及 4.4 節)。然而，功能構象態會受到微細量子力管控的某些蛋白質，是可以充當量子槓桿的角色。當麻醉氣在不影響其他腦部活動的情況下，麻醉氣對消弱微細量子力，並造成意識消失的效應，會受到該蛋白質的調節。因此，只有直接參與意識的蛋白質才稱得上是量子槓桿 (其功能類似量子計算裡的量子位元或量元)。證據顯示，這些機制已經演化為反脫散 (counter decoherence)，並能使大規模的量子態存在於 36.7°C 的腦裡。

*量子力學及意識 (第 5.1 節)*：在量子力學誕生之初，意識觀察者就已被引進到量子力學中。實驗顯示，量子疊加 (在一個量子波函數控制之下，粒子/系統可同時以多重狀態或多重位置存在) 能持續到被觀測為止，然後化約/塌縮為確定態及確定位置。對這種現象，有各種不同的解釋：在哥本哈根詮釋中之一種變型認為，既然意識觀察者會造成量子疊加的塌縮/化約，就不可以把意識納入物理學裡。David Bohm 提議，波函數含有能導引粒子運動的主動資訊，認為意識與主動資訊有連帶關係。如同 Bohm 所說，多重世界假說避談塌縮/化約，但卻要求每一個個體或單一宇宙心智 (mind)，具有無數的心智。脫散理論也不談被隔離的疊加 (及意識)。Henry Stapp 則肯定意識與塌縮/化約是一致的，只是未詳述原因或特性。Roger Penrose 的客觀化約 (簡稱客約，objective reduction, OR) 認為意識與塌縮/化約完全相同，除明確說明造成塌縮/化約的原因及其閾值外，並把意識連接到基本時空幾何學 (fundamental space-time geometry)，介紹非計算柏拉圖的影響 (noncomputable Platonic influences) 及原始意識感質 (protoconscious qualia) 的機制。就像 Stapp 的看法一樣，Penrose 客約也能與 Whitehead (懷德海) 對意識的哲學探究取得關聯。

## 貳、時間及意識

### 2.1 意識是連續的還是一序列離散的事件？

William James 起初主張意識是一序列表觀的當下，但後來卻執著於連續的意識流。Arfred North Witehead 描繪意識是一序列離散的事件：經驗機緣（occasions of experience）。就像動畫一樣—其序列相框被感受為連續—變得愈來愈普遍，意識觀念所顯示的就和離散事件一樣，例如，Stroud 的感知瞬間（知覺當下）理論。近年的證據提到感知的週期在二十到五十毫秒（珈瑪腦波圖）範圍的反應時間，以及範圍在數百毫秒（阿爾法及貝塔腦波圖）的週期，後者與眼跳（saccades）及視覺完形一致。依據 Lisman & Idiart 有關記憶的研究，Van Rullen & Koch 提議視覺的多路複用（multiplex），其內一系列快速伽馬波（每一個波對應明確的視覺成員）騎在較慢速的，例如，西塔波（對應到一個整合的視覺）上。一個與前述伽馬/西塔複波模型類似，並支持構成意識視覺基礎的量子力學將在第 8.1 節討論。Freeman 已展示過腦中神經興奮的電影攝影效果（cinematographic effects），並支持離散意識相框的概念。

若意識是一系列事件，那它的速率或頻率是什麼？它會改變嗎？在車禍當中，罹難者常提到時間似乎緩慢了下來。這種興奮態是否牽涉到每一客觀時間主觀意識當下速率的真正增加？意識當下是什麼，它們為何是主觀的以及它們與神經生物學的關係是如何？

### 2.2 意識經驗的節奏

許多行為顯然發生太快以致無法由意識來發起。Max Velmans 所舉的例子有：感覺輸入分析及其情緒內容，聽講的聲音及語意分析及自己一言及一句話的準備，學習及記憶形成，以及自願動作（voluntary acts）的選擇，計畫和執行。因此，這些行為的意識控制之主觀感覺就被視為是幻覺的。

在說話時，顯示意識的辭彙識別（word recognition）的誘發電位在聽覺輸入後約 400 毫秒才發生，然而語意（semantic meaning）卻只花 200 毫秒後就瞭解（或開始反應）了。誠如 Velmans 指出，只有 2 個音素（phonemes）在 200 毫秒時被聽到，以及平均起來 87 個辭彙分享它們開始的 2 個音素。即使當語境效果（contextual effects）被考慮進去，語意處理及開始回應都在意識認知之前發生。

Jeffrey Gray 觀察到「打網球，在發球之後，球速即使很強，以及球移動的距離即使再短，接發球者能意識到自己有足夠時間在看到球離開發球拍之前把球回擊。意識感知來得太遲而不能影響擊球」。John McCrone：「對網球手...面對一個快速發球...即使確實知道是瞬間，但這個知道還是太慢...」。

對一個物體的形狀，顏色，動作及語意的視覺認知是分別發生在視覺皮質的不同部位，以及不同時間。然而，我們仍意識這些特徵是同時被感受到的（時間統整問題）。

觸覺也牽涉到時間的統整。假若你用手指輕拍你的足部，手指及足部的感覺是同時發生的。然而來自足部的感覺信號比來自手指的感覺信號顯然需要較長的時間來抵達感覺皮質。大腦是如何提供同步性？

在臂感跳動的實驗（the cutaneous rabbit experiment）中，沿著一位受試者手臂 3 處敲打，譬如腕部敲打 5 次，跟著在肘部敲 2 次，最後在上臂敲 3 次。受試者感受到規律有序等距移動的敲打，好似一個小動物沿著他們的手臂跳躍。隨著第二次敲打就有從腕部開始「離去」的感覺，但如果上方敲打還未釋出的話，所有 5 次腕部敲打都在腕部被感覺。它好像意味著大腦事先知道，沿著手臂會（或不會）一再有敲打。

在色動效應（“color phi” effect）中，一個紅點在一個螢幕左角短暫出現，在停止後，一個綠點跟著在右角出現。觀察者報說一個點來回走動，顏色會在中途橫過時改變（圖 1）。大腦是否事先就知道這個點將要變成那一種顏色？

有關時間及精神事件（mental events）最難解的實驗也許就是 Benjamin Libet 及其同仁在 1960 到 1970 年所做的研究。他們對意識清醒且肯合作的病人進行局部麻醉的腦手術，病人的大腦是裸露的。在這些病人中，Libet 能刺激那些對應到每個病人手皮膚的體覺皮質特區（中央後回）（圖 2），並將這些資料存取，鑑別，記錄。他發現皮質的體覺「手」區的直接電刺激會造成腦電活動（直接皮質反應，DCR，direct cortical response due to neuronal dendritic activity，由於神經元樹突活動產生的直接皮質反應）。這會隨後造成向手確認的意識感覺，但也只在一連串延續 500 毫秒的閾級脈衝（以及直接皮質反應活動）之後才有可能。這種從直接皮質刺激到產生意識經驗（Libet 的 500 毫秒）的不間斷延續電活動的需求是由 Amassian et al., Ray et al., Pollen 及其他人所確定的。

但什麼是正常的感覺？手或他處的單一閾值層級的刺激（閾級刺激），好像同時有意識地感受到；當我們碰觸某物時，並無 500 毫秒的延遲發生。在大腦體覺皮質內，位在手皮膚處之閾級刺激，在皮膚刺激後之 10 到 30 毫秒，會造成一個初級誘發電位（primary evoked potential）（EP），隨後跟著數百毫秒的不間斷活動，甚似 Libet 的直接皮質反應（DCR）。

但初級誘發電位對產生意識經驗所需的量是不夠的：

在感覺路徑中被送出到次皮質腦區的單一刺激造成一個無意識經驗或無延續活動的初級誘發電位。

次閾值皮膚刺激造成一個初級誘發電位，但無延續的皮質活動，亦無意識經驗。

在一般麻醉下，任何一種的皮膚刺激能造成一個初級誘發電位，但沒有持續進行的皮質活動，亦沒有無意識經驗的發生。



反之，延續的皮質活動（Libet 的 500 毫秒），對意識經驗而言，是即充分而又必要的條件，但因缺少一個初級誘發電位，所以只能產生延遲的意識經驗。

Libet 的直接皮質反應 DCR 病人（Amassian et al., Ray et al., 也是）有皮膚刺激 ~ 500 毫秒延遲的意識經驗，該刺激並沒有一連串脈衝造成的初級誘發電位傳送到皮質。

Libet 認為對意識經驗而言，500 毫秒延續的皮質活動是不可少的條件—NCC，或意識的神經相關物。以近乎立即的意識經驗為目的的初級誘發電位是必要的（但不充分）。初級誘發電位及延續活動在一起時才能產生近乎立即的意識經驗。

但若意識經驗的神經相關物被延遲 500 毫秒，我們對感覺事件是如何/為何好像幾乎立即感受到？如 Dennett 提議的（下一節 2.3），難道我們是活在過去，但只記得（虛幻地）生存在此處及現在嗎？為了討論這個問題，Libet 及其同僚提出並測試一個頗為離奇的假說——一個刺激的感受確實為了大腦活動延遲了 500 毫秒，但在刺激後 10~30 毫秒，卻又主觀地逆時向初級誘發電位去確認。

實驗時，病人接受二種刺激，一為手區皮質的直接刺激，另一為在手上真正的皮膚刺激。雖然這二者都是手的感受，但品質上有不同，所以病人能夠區分它們。接受刺激的兩個位置雖靠得很近，但時間不同（如在 1 秒內），病人被問那一個最先感覺。病人說從皮膚生的感覺比誘發皮質生的感覺來得早，即使在皮質刺激之後，皮膚脈衝被耽擱了數百毫秒。只有當皮膚脈衝在皮質刺激開始之後約 500 毫秒，病人才說同時感覺到二個刺激。被誘發的皮膚經驗沒有出現耽擱。皮質引發的經驗比起由皮膚引發的感覺是延遲了 500 毫秒。

因此，由皮膚引發及皮質引發的感覺，二者都需要 500 毫秒的皮質處理，但是由皮膚引發的感覺是有近乎立即的經驗。然而，不同於皮質引發的經驗，由皮膚引發的感覺會有一個初級誘發電位標記。這樣的不同是真的嗎？

為了調查這個問題，Libet 開始研究在病人丘腦下方的內側丘系（medial lemniscus）植入電極（為了醫療目的），也就是說，位在從手到皮質途中的腦感覺通路。他準確算出內側丘系的刺激，只在刺激及皮質活動 500 毫秒之後，能產生意識經驗。但內側丘系刺激不像直接皮質刺激（而像皮膚刺激）產生初級誘發電位。然後，Libet 及他的同僚進行另一組實驗，手刺激與內側丘系刺激的比較，把這二個刺激在各樣不同的時間間距耦合。他們發現與皮膚刺激相比時，內側丘系刺激並沒有延遲。但病人的內側丘系刺激在滿 500 毫秒刺激之前若被中斷的話，他們是無所感覺的。因此，要產生意識經驗，延續的皮質活動是必要的，而要產生近乎立即的主觀經驗，初級誘發電位是必要的。

Libet 得到下列結論：

爲了達到神經元充裕量 意識感受需要腦活動～500 毫秒。

資訊會逆時足足 500 毫秒向初級誘發電位去確認—在周邊刺激後 10 到 30 毫秒—爲了要產生近乎立即的意識感受。

Libet 的結果及結論一再被重複挑戰過，但其正確性從未被駁倒。

### 2.3 嚴肅看待逆時確認

我們要如何來解決這些時間異例的問題呢？色動效應顯然「...留給我們，要在回顧建構理論及確信有神力之間，做一個選擇」。

Daniel Dennett 在多重草圖模型的環境中選擇回顧建構，在此模型中，感官輸入及認知處理會在不斷訂正下製造出草擬內容。一個確定的，最終版便被插進記憶內，騎在從前的草圖上。一個關鍵特徵是：意識（譬如，屬於一個特別的感受）並不是在某一特定瞬間發生，而是隨意發生的，就像名譽遭受攻擊或戰爭何時會結束都是隨意發生一樣。大腦會回顧式地去創造出內容或判斷，就像在色動實驗中的干擾移動一樣。

依據回顧建構（retrospective construction）（我假設）：a）網球員潛意識地（unconsciously）看球及擊球，但有意識地記得看球及擊球。b）物件或事件的感覺成員不是同步被感受到，但都同步被記得。c）在臂感跳動實驗中，受試者感受到腕被敲，然後肘被敲，然後上臂被敲，但卻記得一序列均勻的敲打節奏。d）在燈色跳動現象中，觀察者看到左邊的紅點，然後看到右邊的綠點，但卻記得紅點移動及紅點在中途改變顏色。

因此依據 Dennett 及其他人，順暢的即時意識經驗是一個被編輯的建構—一個幻覺。Dennett 及 Kinsbourne 想要否定 Libet 的發現變得益發困難，只能描述 Libet et al. 研究報告爲「有意思，但不得要領」。

Libet 進行其他與意志力（volition）有關的實驗。Kornhuber 及 Deecke 曾記錄受試者的前運動皮質，在沒有事先告知的情況下，受試者被要求隨意移動他們的手指。Kornhuber 及 Deecke 發現受試者在手指動作前，已有 800 毫秒的電活動，此活動被稱爲預備電位（readiness potential）。Libet et al. 重複此實驗，但也要求受試者，在意識到決定移動手指時，要把此決定的剎那時間正確地按下記錄。此決定移動手指的時刻，大約在手指動作前 200 毫秒，手指動作的時間是在預備電位之後數百毫秒。Libet 結論指出，許多好似有意識的動作，是由無意識歷程（nonconscious processes）起動的。

Libet 不認爲意志力有逆時確認，因爲在他的感覺實驗中，提前發生被栓在初級感覺的誘發電位，同時也沒有那樣的標識存在於自發性手指動作實驗中。然而，對刺激（擊球，選擇一句話中某辭彙）回應的自願動作確有那樣的標誌，就像在同步事件中，會把時間不同步的感受成員統整一樣。Libet 不認爲逆時確認有真正時間倒置的暗示，

只把它當做類似於回顧建構的一種現象而已。Libet 說到：

「...一個感覺節奏是主觀地被確認...而不是有意識的感覺本身逆時跳躍...主觀經驗的內容...是藉較早節奏信號的確認來修改的。」

但落後於實相 (reality) 半秒鐘的意識，使意識變得十分不重要 (及幻覺的)。我們會是 (以 T. H. Huxley 口氣) 「無助的旁觀者」。感受變得只是由不相連事件編輯記憶的一種噪音，對許多好似有意識的動作而言，這樣的意識控制顯然太晚了。也許真是如此，但會不會有另一種可能呢？

是的。為了解釋 Libet 的結果，Roger Penrose 提出大腦逆時送出潛意識的量子資訊。在量子世界裏，時間是對稱的，或是雙向的 (正如它也出現在潛意識的夢中一樣—第 6 節)。Aharonov 及 Vaidman 提議量子態的化約，會逆時送出量子資訊；但這樣的逆時確認 (backward time referral) 只是對量子糾結中產生實驗觀測 EPR 效應的表觀解釋 (apparent explanation) (圖 3，第 5.1 節)。

量子資訊實際上是不能運送資訊的，因此，量子資訊的稱呼是一個不恰當的名稱 (Penrose 以它在量子糾結中所扮演的角色，稱它為「子結」)。子結 (quanglement) 僅能修飾古典資訊，但雖只是修正，在 EPR 實驗及量子技術裡確有極大的意義 (第 5 節，量子資訊處理)。以古典時間向後走的量子資訊/子結也受因果違反律的約束，亦即是，肇因於可觀測的改變，結果造成一個弔詭事件，就像逆時去殺祖先，以便達到阻撓你出生的目的的一樣。任一甚至可能被觀測的效應也會被禁止。然而，在意識當下，修飾腦內現有資料的量子資訊/子結，它們的無意識逆時確認 (例如，把感質加到初級誘發電位，去影響選擇) 是不會違反因果律的，因為在它們發生之前這些效應是看不見的。

在大腦裡的潛意識量子資訊/子結的逆時確認，能提供時間統整及近乎立即的感受及近乎立即的意志力，意識終於從過去被誤以為是幻覺附帶現象的唯物主義觀念中獲得重生 (亦即是，根據來自不久將來所諮詢的感覺資訊，能作出近乎立即的意識決定)。這種事是如何實際發生的，將在第 7 節加以討論，但在下面一節，我們將先討論，意識的神經相關物可能發生的地點。

## 參、意識的神經相關物

### 3.1 大腦的功能性組構

大多數的大腦活動是無意識的；意識只是神經功能的冰山一角。許多大腦活動—例如，被腦幹調節的自主功能—從來就未曾進入意識。在一般麻醉下，當意識被抹除時，無意識腦的腦波圖 (腦電波，EEG) 誘發電位雖有減少，但會持續。

對應於特殊精神狀態的功能單位，通常被視為相當於由 Donald Hebb 最初描述的

神經元網路或神經元細胞集團。Hebb 把細胞集團描寫為神經元的封閉的因果環，它可藉特別輸入被點燃，並持續活動達數百毫秒，隨即跟著另一相關的細胞集團會點燃，然後又另一個依次呈現相位序列地傳播點燃下去。Hebb 把細胞集團描述為數千個神經元的「三度空間魚網」。在任一時刻，一個單一特別的細胞集團就會是意識的神經相關物（neural correlate of consciousness, NCC）。

為何一個特殊的細胞集團就會有意識呢？如同 Susan Greenfield 的震央模型，Dennett 的多重草圖模型提議，伴隨意識的大腦活動除能與潛意識腦活動屬於同類外，還能顯露出它的本來面目。代表一個特別整套內容的一個神經細胞集團，不論其位置在那裡，假如它的活動是以某種形式的競爭超越所有其他的細胞集團，那它就贏得進入意識的獎品。

有關伴隨意識正確的神經活動仍有待說明。全面工作空間理論（global workspace theory）描寫它很可能發生於：以協調方式交互連接的多重特化的大腦區，雖然協調方式是可以多變。Bernie Barrs 介紹了這個曾被 Changeux & Dehaene 在解剖學上詳細描述過的觀念。Crick & Koch 及 Edelman & Tononi 也做了相同的探究。

全面工作空間是描述交互連接的皮質神經元中的一個的水平層，它夾在自丘腦及基底前腦由下而上的上升輸入，以及自前額葉皮質（譯註：大腦處理痛覺經驗的情緒和認知區域）由上而下，下行輸出的執行功能之間。由下而上的輸入是運輸感覺資訊，也運輸一般覺醒和引人注意的凸顯經驗，諸如來自基底前腦輸入的情緒內容。由上而下的影響是把意外的特徵加以分類及經營管理，例如，那些與危險，報酬等有關的。由下而上及由上而下的兩個活動，同心協力選出一個神經細胞集團——一個特別亞組的皮質-皮質發射——為了專注力及意識，去催促充裕活動以便使細胞集團成為意識的神經相關物。超過時間，意識的神經相關物及它的內容，會隨著神經元和細胞集團所拼湊出的動態變遷臨時團隊而改變。全面工作空間模型演示了一個能調節意識的功能結構。

把意識置於由下而上及由上而下神經元通路之間的模型與 Ray Jackendoff 的中間層次理論（the intermediate level theory）一致，它指出我們即不正常地知道純感覺，亦不知道純觀念構造，而只是這二者的適中混合。這個中間層次也與 Jeffrey Gray 的比較測定器假說（comparator hypothesis）一致，它指出意識是把一個歷程輸出，此歷程就是將新資訊（例如，輸入的，由下而上的）及先行（執行的，由上而下的）計畫做一比較。

來自視覺的證據支持 Jackendoff 的主張及全面工作空間理論。輸入的視覺資訊會突觸傳遞於丘腦內，並發射大多數未經處理資料至位於後枕葉皮質的初級視覺區 VI。然後從 VI 區送出资訊向前到視覺皮質的其他區域，例如能認識形狀及輪廓的 V2 區，可以感受顏色的 V4 區以及可以偵測動作的 V5 區。這些及其他次級視覺區再射出资訊到前額葉皮質區進行分類和計畫。然後前額皮質區再將資訊射回到 VI 及其他視覺區。

Crick & Koch 主張視覺的意識神經相關物不在 VI 區，也不在額前葉，而是在中間區。Jackendoff 則認為，VI 區主要處理「未受到概念說明影響的純感覺」。視覺意識發生於夾在（但也可能是包含在）VI 區及前額皮質區之間的中間區—皮質-皮質發射的變換細胞集團區。

然而 Zeki 表示，在任何特徵選取區的過度活動或許就足夠其本身將該特徵進入意識。因此在 V4 區的單獨活動就能造成顏色經驗的結果。

其他意識的神經相關物的候選者包括有 Jeffrey Gray 的比較測定器假說的海馬，以及 Antonio Damasio 和 Jaak Panksepp 二人分別有關情緒核心意識主張的腦幹。因此當意識普遍發生在所謂的一個全面性工作空間時，意識也可能出現在較為局部和也許分開的區域。有關意識如何/為何發生在任何區域的問題仍然無解。究竟是那方面的神經活動才會產生意識？

### 3.2 大腦皮質及神經元細胞集團

大腦皮質有二種不同的階層系統。微觀而言，第四層接受來自丘腦的初級感覺輸入，所以第四層等於位在底部。撇開地形，第 1-3 及 6 層多少是位在中間位置。第 5 層的巨大錐體細胞（它輸送皮質處理的裁決到次皮質區）則是在此階層系統的上層。上面的這種微觀安排又與底部的初級感覺區（如 VI 之於視覺），和頂部的前額葉執行皮質區，一起被套疊成一個較大尺度的解剖階層系統。與 Jackendoff 的中間理論一致的是，夾在遍及無數皮質區內的許多型神經元的變換細胞集團，它們看來像是扮演意識神經相關物的角色。

主要藉著在樹突形態內的交替導向去提高突觸活動及降低閾值進行特別迴路，可以形成和強化特別的赫比細胞集團。由後突觸改變—突觸可塑性—鍛鍊出來的細胞集團是建構學習，記憶及意識神經相關物的理論機制的基礎。可塑性之機制包括後突觸受器，樹突刺及分枝型的適中幾何，樹突-樹突連接，以及後突觸電位的遞減傳導的修改次數，敏感度及分群。所有這些改變都受到在神經元樹突內部構造細胞骨架的調節。

### 3.3 軸突及樹突

自從 Cajal 以來，神經元教條（the neuron doctrine）一直認為資訊是從軸突流經化學突觸到達樹突或其他神經元的細胞本體。因興奮的累積（藉抑制抵銷），當後突觸的閾值適宜時，第二個神經元的軸突發射，隨後在最近的軸丘（axon hillock）動作電位或電鋒就被引發。藉鈉離子流穿過膜管腔的調節，電鋒沿著軸突傳輸到另一個會影響神經傳遞物質釋放的突觸。雖然在下流處它們也許會分枝，但是每個神經元僅具一個軸突。如是，多重後突觸輸入被整合導向一個輸出，這便是電鋒的全有或全無的發射。

電鋒可藉橫過或通過附近軸突膜的電極而被量化。如此我們會知道電鋒的頻率(以及可能的樣式)與刺激及/或行爲的強度有相互關係。電鋒移動迅速並且巨量，越過長途也不消退。它們普遍被認為是大腦內信號及資訊傳遞的主要方法，因此電鋒就像是意識的流通貨幣—神經密碼。多重輸入被整合到一個閾值，導向一個單一輸出的這種概念，非常適合用電腦來類比推理。亦即是，電鋒 = 位元！

然而，作為意識的神經相關物還有別的細胞層級的候選者。在頭皮或腦表面的電極可偵探到大多數錐體細胞的樹突偶極電位，它具有軸對稱，亦即，向著腦表面垂直排列的。置入腦部的電極主要偵測來自輻射對稱的皮質中間神經元的局部電場電位 (local field potentials, LFPs)，大多由樹突-樹突間隙結合及抑制化學突觸連結。因此，在腦波圖及 LFPs 的同步性不是來自軸突電鋒，而是來自樹突活動。更且，用於功能磁共振成像 (fMRI) 的血氧水準依賴 (BOLD) 的訊號，它廣泛地被認為能代表與意識有關的神經代謝活動，此訊號與局部電場電位元的交流會比軸突電鋒更緊密。

有人曾主張腦部的複合電磁場 (廣域的 LFPs 及表面電位) 組成意識的神經相關物。然而，如 Koch 指出，大腦的電磁場本身在某些特殊情況言就是一個粗陋和不勝任的通訊方式。在其他方面，產生 LFPs 及/或表面電位的樹突活動的確可能是意識的神經相關物的最好代表。Eccles 也和 Pribram 一樣提出樹突是以軸突電鋒輸送意識結果的方式來主導意識的。

粘連到前樹突受器的神經傳遞物質會改變橫過樹突膜或細胞體膜的電位，造成即興奮或抑制的後突觸電位 (EPSPs, IPSPs) 和在某些情況的樹突動作電位。然後，這些電位據推測會在近軸丘處匯集成膜電位，抵達閾值，以便進行電鋒起動。

然而，觸發電鋒的膜電位整合並非樹突功能的全貌。有些皮質神經元沒有軸突，樹突是與其他樹突交互作用以及大規模的樹突活動可以在沒有電鋒造成的情況下發生。證據顯示在局部樹突室內的複雜邏輯運算公式，訊號增強 (如，在枝端)，過濾及改變軸突電鋒敏感度。低於電鋒閾值的樹突膜起伏 (通常認為是噪音) 可以使腦部廣大區域同步振動！

樹突處理也不需局限於膜電位。許多後突觸受體是代謝型的，把訊號向內送入樹突細胞骨架，使酵素活化，造成構象訊號及沿著肌動蛋白絲的離子流以及連結微管到細胞骨架網路的去磷酸化微管關連蛋白質 2 (MAP2)。進行學習及記憶時需要 MAP2 的活動，MAP2 活動是樹突代謝能量的最大消費者。細胞骨架內的改變會調整突觸的可塑性。

樹突處理被認為是在整體全有或全無經由軸突輸出的制約下，及樹突處理的存在被認為只為觸發軸突電鋒。但此兩個假說都未被證實。樹突內部處理之全貌雖未知，但它的能力是巨大的。例如突觸活動造成在樹突刺內醣解產生 ATP，此能量可被用於離子通道及蛋白質合成以及訊號之傳遞進入樹突細胞骨架。因此，Kasischke & Webb

提議，大腦功能可能「...在較高時域及較小空域尺度上進一步被精緻化」。

圖 4 顯示 a) 一個真實的具有多重的樹突錐體神經元；二個進入軸突 (incoming axons) 突觸在 2 個不同的樹突 (一個錐體神經元似乎具有數千個這類的進入突觸)，b) 一個漫畫神經元具 2 個軸突輸入 (axonal inputs) 突觸於一個細胞本體 (如功能主義者模型的推測)，及 c) 一個具有 3 個樹突 (以及 2 個進入突觸 incoming synapses) 的更精緻的漫畫神經元顯示內部的細胞骨架。圖 5 顯示這種形式的漫畫神經元具有一個化學突觸及樹突-樹突間隙接合。

### 3.4 神經同步性

證據支持意識及同步活動之間的相關性。從頭皮，大腦表面或置入電極的電記錄顯示，由 LFPs 或表面電位造成在各種頻率的腦波圖都是同步活動。在這些當中，所謂的在 30 及 70 赫茲之間的伽瑪頻率與專注力及意識有最好的相關性。Gray & Singer 在強烈依賴專一視覺刺激的貓視覺皮質的各個 LFPs 裡發現同調振動。雖然同步性發生在 30 及 70 赫茲的範圍內，但此現象已成眾所皆知的同調 40 赫茲。

隨著 Vonder Malsburg 有關同步神經能夠解決統整問題的提議，von der Malsburg & Singer, Crick & Koch, Varela 及其他人提出任何特別意識內容的神經相關物是一個神經元的細胞集團同調地興奮於 40 赫茲或附近。Varela 簡明地觀察到每當被相隔腦區促發的成員過程被整合成意識時，神經同步性便會運轉。

在伽瑪頻率範圍的神經同步性已在許多動物研究中被觀察到，這些研究如利用多重單位頭皮，表面及植入電極。他們示範的同步性發生在皮質區，腦半球及會反映知覺完形標準及實作的感覺/運動模組三處裡面及各處。在利用頭皮腦波圖及腦磁波 (MEG) 人體的研究中，在整合及統整方面，大多數支持作為同步的角色。伽瑪同步性與下列有相關性，聲音及語言刺激的感受，動眼期的作夢態，專注力，工作記憶，臉部認知，體覺及視覺元素統整為單一的認知，以同步性的幅度隨著刺激重複而遞減。伴同一般麻醉開始的意識喪失的特點是伽瑪腦波圖(腦電波)活動的降低，當病人醒來時，他的腦電波(腦波圖)才又恢復。

有些人體研究未能支持在感覺及認知方面的神經同步。Menon et al. 發現伽瑪同步局限於皮質表面少於 2 cm 的區域，因此他反對長距同調。然而僅測驗一個 7 cm x 7 cm 區域的研究及其他的研究顯示同步性在中間範圍下滑，但在長程距離時又再出現。有些矛盾會因所用方法不同而發生。但整體而論，伽瑪/同調 40 赫茲還是意識最好的電生理相關物。

伽瑪同調是如何被調節？超越大距離的同調，在有些情形，發生在多重皮質區及兩個腦半球，顯示零，或接近零相位落後 (zero, or near-zero phase lag)。有意義的相位落後定可從軸突導引速度及突觸輸導的耽擱中被期待。

沒有證據支持對等的軸突電鋒可以充當伽瑪同步的源頭。正如 Koch 所指：

「在 LFPs 的伽瑪振盪能慣例地都能被觀察到，但當記錄多重神經元活動（那就是，鄰近細胞的總合電鋒）時，則較少觀察到。偵測這些在各個神經元電鋒樣式的韻律已証實比較有問題...」。

有一篇嚴厲的評論，其結論僅因依據電鋒活動缺少同調性，就將同步與時間統整（及意識）的關係加以拼棄，這種作法，就像傾倒洗澡水之同時，把嬰兒也一起倒掉一樣。然而許多研究已顯示出伽瑪頻率是藉樹突間隙接合的電突觸來達到同步的。進行測定貓視覺皮質多重區域的電鋒及樹突 LFPs 時，Fries et al. 表示視覺認知所對應的是發自 LFPs 的伽瑪腦電波，而不是電鋒。

圖 6，是依據軸突電鋒及化學突觸來顯示一個卡通神經元網路。興奮/資訊流過網路；沒有同調。圖 7 顯示一個被間隙-接合-連結的神經元網路（一個超神經元，包含膠細胞）具有連續的膜及細胞質。遍及超神經元之樹突膜被同調地興奮起來。

### 3.5 間隙接合的細胞集團—「超神經元」

間隙接合，或電突觸，是相鄰細胞之間的直接通道，它是由含有一類蛋白質名為連接蛋白（connexins）的一對接環組成。間隙接合發生於神經元樹突之間，軸突與軸突之間，神經元與膠細胞之間，膠細胞之間，以及軸突與樹突之間—是繞過化學突觸的另一通路。離子，養分及其他物質通過這些打開的間隙，所以由間隙接合聯接而成的神經元有著連續性的膜表面，也有連續性的細胞質內部。由間隙接合連接的神經元就具有電耦合，同步去極化以及「行為像一個巨大神經元」的特性。

在初期的發育中，間隙接合是與錐體細胞彼此連接的，也與非錐體神經元連接，而在皮質迴路形成時期是與膠細胞連接。之後，皮質間隙接合的數目開始減少，所以間隙接合被認為與認知或意識有關。然而，許多研究顯示間隙接合一直有意義地宿存在成體的哺乳類大腦內。此外，在成人大腦的皮質中間神經元的間隙接合迴路會調整伽瑪腦電波/同調 40 赫茲以及其他的同步活動。

在哺乳類大腦中目前至少有 10 個不同的連接蛋白被發現，而它們的位置及功能是動態的。單獨一個神經元可以有極多的間隙接合，其中只有一些是隨時開通的，其他大多數都受細胞骨架微管及/或受到經由 G-蛋白質代謝型受器活動磷酸化作用的調節而迅速開閉。因此間隙接合網路至少像化學突觸所精製的網路一樣既動態又有突變性，此外間隙接合網路還包括了膠細胞成員。間隙接合網路滿足了成為赫比細胞集團（Hebbian assemblies）的準則，具有同步興奮的額外優勢。由間隙-接合-連結的神經元（及膠細胞）的網路已被稱為超神經元（hyperneurons）。

有關皮質抑制中間神經元的研究，是特別選用由間隙接合聯接 20 到 50 個細胞的中間神經元來研究。許多中間神經元有雙重突觸—即是，當相同的二個中間神經元分



享樹突-樹突的間隙接合的時候，它們的軸突會在另一中間神經元的樹突上形成抑制的 GABA 化學突觸。在各個皮質半球內，中間神經元間隙接合網 (interneuron gap junction networks) 的範圍—所謂超神經元—其內可形成一個「巨大」連續的綜合囊 (syncytium)，並無明顯限制。

有關間隙接合超神經元是否涉入初級神經元如在成熟大腦的錐體細胞，以及是否延伸到兩個腦半球的問題仍不清楚。然而 Venance et al. 顯示間隙接合存在於幼年老鼠大腦的中間神經元及興奮神經元之間。海馬體切片的錐體細胞顯現出軸突-軸突的間隙接合的耦合性，也顯現出膠細胞在許多化學突觸中會把軸突及樹突一起包住。因此神經元-膠細胞-神經元的間隙接合能供給化學突觸另一個自我作為超神經元內的連結。產生同步  $\alpha$  及  $\theta$  皮質活動的丘腦-皮質細胞是藉間隙接合在丘腦內被連接的，所以丘腦-皮質的投射（或穿越-腦胼胝體通路）能與二半球在超神經元內耦合，以便進行兩側同步性。

理論上，所有大腦的神經元及膠細胞都能藉間隙接合連結在一起。然而，太多主動活躍的間隙接合及近乎全部的同步性（例如，像在癲癇）會降低大腦的資訊處理能力。每一神經元有 3 個以上的主動活躍的間隙接合（意即，與三個不同神經元或膠細胞相連）會將整個大腦連接成一個單一的超神經元拓撲學。因此修剪及稀疏是需要的。為達到本文目的，超神經元泛指被間隙接合相連的皮質中間神經元，膠細胞，如錐體細胞的初級皮質神經元，以及也許諸如能延伸遍及二個腦半球及次皮質區的視丘-皮質神經元。

藉間隙接合調節的全腦伽瑪同步性是最好的電生理意識的神經相關物。一個合乎邏輯的最終結論，就是間隙接合網路—超神經元—是細胞級的意識神經相關物。它真能有助於解答意識是什麼嗎？

間隙接合超神經元的關鍵特徵是連續的樹突膜，它能同調地去極化。另一項關鍵特徵就是連續的細胞質內部。

### 3.6 意識神經相關物的新視野—神經元內部及細胞骨架

以腦為基礎的神經元的輸入-輸出活動包含突觸可塑性，離子傳導，神經傳遞物質泡囊 (neurotransmitter vesicle) 的運輸/分泌，及間隙接合調節—所有都受到名為細胞骨架的絲狀蛋白聚合體的內部神經元網路的控制。若簡單的輸入-輸出活動才能完全描述神經功能，那麼更微粒的細節就不足道了。但簡單的輸入-輸出活動—其神經元充當開關角色—其實只是一種猜測，同時也是對神經元真實活動及能力的最遜色的模擬。

為了正確地量度單一神經元功能如何可以超過簡單的輸入-輸出活動，我們想到單細胞生物草履蟲 (paramecium)。那些細胞遊起來幽雅，它們躲避障礙及掠食者，它們尋找食物及性伴侶進行性關係。它們也能學習；若置於吸管内，它們就逃走，當被放

回吸管內，就逃得更快。像這樣的沒有突觸連接的單細胞，這些行為、學習、記憶它們是怎麼做到的？考慮到像這樣的單細胞生物似乎都具有智力的活動，著名的神經科學家 C. S. Sherrington 因而推測：

「單細胞生物內雖然沒有屬於神經的痕跡，但細胞骨架也許可以充當神經的角色」。

若細胞骨架真是原生動物的神經系統的話，它又能為神經元做些什麼？

## 肆、神經元的細胞骨架

### 4.1 微管及神經元內的網路

神經元的形狀，構造，生長和功能是由它們的細胞骨架（cytoskeleton），絲狀蛋白聚合物之內部鷹架來決定，鷹架包括微管（microtubules），肌動蛋白絲（actin）及中間絲（intermediate filaments）。浸埋在肌動蛋白內並由微管關連蛋白（MAPs）交互連結的硬直微管（MTs）會形成一個自我支持，動態的張拉整體網路（dynamic tensegrity network）。細胞骨架也包括能策劃有絲分裂以微管為基礎名為中心粒的胞器，有膜包圍以微管為基礎的纖毛，和連接微管及細胞膜的蛋白質。神經元內細胞骨架結構物的瓦解會使認知削弱，例如阿滋海默症（早老性癡呆症）的 *tau*MAP 對微管的錯亂連結。

肌動蛋白絲是樹突刺（dendritic spines）的主要成員，同時也按肌動蛋白結合的蛋白質，鈣等的不同，形成各樣形式，普遍存在於其餘神經元內部。當肌動蛋白聚合成密集網路時，細胞質內部會由液體溶液（液膠態，sol state）轉變成準固體，膠質態（凝膠態，gel state）。在液膠態中，肌動蛋白，微管及其他細胞骨架的構造會形成帶負電的基質，在這樣的基質中，極性細胞水分子會呈現有序結合。麩胺酸鹽一旦鍵結到 NMDA 及 AMPA 接受者，隨即擊發啟動肌動蛋白刺內的凝膠態（triggers gel state in actin spines）。

神經元的微管會自我集結，與肌動蛋白能一起使軸突及樹突生長。運動蛋白質沿著微管輸送物質以維持及調節突觸。運動蛋白質之方向及指導和突觸之成員（例如，從細胞本體遍及分枝樹突）視微管次單位構象態的情況而定。因此微管不僅是被動的路徑，似乎也能主動輸導。在神經元細胞骨架成員當中，微管是最穩定，同時好像也是最適合進行資訊處理。只要那裡有需要細胞組成及智力的地方，微管就會在那裡出現並牽連進去。

微管是圓筒狀聚合物，直徑 25 奈米（1 奈米 =  $10^{-9}$  米），由 13 條縱向原始絲組成，每一條原始絲是由蛋白質土撥靈（tubulin，土撥靈，亦稱微管蛋白）串成的一條鏈（圖 8）。每一個土撥靈像一棵落花生狀的雙聚體（8 奈米 × 4 奈米 × 5 奈米），此

雙聚體 (dimer) 由 2 個稍為不同的單體 (monomers) 組成，此 2 單體分別為  $\alpha$  土撥靈 (alpha tubulin) 及  $\beta$  土撥靈 (beta tubulin) (每一土撥靈單體大小為 4 奈米  $\times$  4 奈米  $\times$  5 奈米，重量 55000 道爾頓)。在微管內之土撥靈次單元是以六邊形晶格排列的，這些晶格略呈扭旋，這使得在各個次單元以及每個次單元的六個最近鄰居當中，造成不同的鄰居關係 (圖 9)。因此，沿著連續土撥靈的路徑每隔 3, 5, 8, 等列 (費伯納齊數列) 之重複，便形成各種的螺旋式樣。 $\alpha$  土撥靈單體比  $\beta$  單體帶較多負電，所以每一個土撥靈 (以及一整條微管) 就是一條兩端有正 ( $\beta$  單體) 負 ( $\alpha$  單體) 極之電鐵偶極物 (ferroelectric dipole)。

在非神經元的細胞及神經元的軸突中，微管是連續，並從細胞中心發散，像輪輻一樣放射狀地排列成行。在非神經元的細胞內，微管的負 ( $\alpha$ ) 極端點開始於中央的細胞輪軸 (或靠近中心粒，或靠近細胞核附近的微管組成中心)，而在軸突的情況，它們的正 ( $\beta$ ) 極端點則向外延伸，在該處連續微管的負極端點則始於軸突電鋒，而正極端點到達前突觸區。

然而，樹突細胞骨架是獨特的。不像軸突及任何其他細胞，在樹突的微管是短而斷續及混極性的 (mixed polarity)。它們由極性大略相等的混合物的 MAPs (尤其是樹突專一性的 MAP2) 交互連接形成網路。從結構觀點來說，此處並無明顯的理由解釋一樹突內的斷續微管會比軸突內連續微管來得合適。但由 MAPs 連結的混極性微管網路來看，這些網路作為資訊處理也許是適中的。

樹突內的 MT-MAP 網路，藉由鈣及鈉的流動，肌動蛋白及代謝型傳入 (metabotropic inputs)，包括次級傳遞信號，如 MAP2 的磷酸化作用，而與樹突突觸膜及受器 (包括樹突刺) 進行耦合。在樹突 MT-MAP 網路中的交替現象與受器的位置，密度及敏感性有相互關係。突觸的可塑性，學習及記憶視樹突 MT-MAP 網路而定。

自 1957 年 Sherrington 的觀察以來，許多科學家都有了細胞骨架—尤其是微管—可充當細胞神經系統的觀念。Vassilev et al. 報導土撥靈鏈在細胞膜之間傳遞信號，及 Maniotis et al. 證明微管把資訊從細胞膜傳輸到細胞核。但微管不會只是條傳輸線。優良設計的微管晶格是用來表現及處理資訊，以個別土撥靈的狀態來扮演電腦位元角色。蛋白質的構象態，一般而言 (如開/關之離子管道，與神經傳遞物結合之受體等)，是活細胞即時活動的流通貨幣 (currency)。許多因素在任一時刻都會影響一個蛋白質的構象，所以，個別蛋白質構象可視之為生物學中實質的輸入-輸出功能。

#### 4.2 微管自動器

落花生狀的土撥靈雙聚體在 2 種構象間開閉，其間， $\alpha$  單體彎曲偏離了垂直排列的  $\beta$  單體有 30 度。這就是所謂的開和閉的狀態 (圖 8)。

Atema 提出土撥靈構象的變化可視為是在纖毛內沿著微管傳導的信號。Hameroff

及 Watt 提議微管晶格充當一個二維電腦狀開關的矩陣，此矩陣之土撥靈狀態是受鄰近土撥靈之影響，以及此矩陣之資訊輸入/輸出是透過 MAPs 來發生。微管資訊處理的潛力可見於下面有關細胞自動器 (cellular automata, CA, 又稱方格自動器、格仔自動器、元胞自動機，眾數系，是一種生命遊戲) 的描述。

細胞自動器是根據基本單位晶格的自我組織化之資訊系統，晶格中每個細胞的狀態在離散時間步階 (at discrete time steps) 會與鄰近細胞交互作用。在一個二維棋盤晶格中，每個細胞有 8 個鄰居 (包括角間的鄰居) 並存於 2 (或更多) 種可能狀態。鄰居交互作用的規則在下一個時間步階，決定各個細胞的狀態。

一個著名的例子是生命遊戲，其間，各個細胞 (亦稱方格) 在棋盤晶格上反覆無常地代表即活或死。此處有 3 條鄰居規則：

若活鄰數為 2，細胞可在下一代維持續活的狀態。因此，一個活細胞仍保持活態，一個死細胞仍保持死態。

若活鄰數為 3，細胞在下一代還是活。一個死細胞會誕生，一個活細胞會續活。

若活鄰數為 0, 1, 或 4-8，細胞在下一代由於鄰居支持數不足 (0 或 1) 或鄰居擁擠數超過 (4-8) 而造成死亡。

每個世代都受制於宇宙定時機制而同步化。開始自隨機初始樣式，複雜行為隨後突現，例如混沌動力學。然而，樣式的常見形式一般會出現：隱定的物件，振盪者/閃爍者和滑翔機，它們在網格中遊走。滑翔機的流動能表演電腦所根據的所有邏輯及記憶功能。一般而言，生命遊戲及細胞自動器是宇宙的電腦。

微管被模擬為自動器，是因為土撥靈構象態 (開, 關) 藉偶極交互作用而與相鄰之土撥靈狀態進行交互作用。在開和關的構象中的偶極強度被用於產生交互作用的規則。因此，在每一世代中，每個土撥靈的偶極耦合構象的決定都受制於圍繞它的 6 個鄰居的偶極總和。因為是斜向六角形幾何，所以來自每個六角形的 6 個鄰居的貢獻都不同 (圖 9)。按照 Fröhlich 對同調興奮的提議，這些世代或時間步階都被設定為奈秒。

Herbert Fröhlich 提出，囿限於一個共同幾何及電場的一組偶極，若有生化能量的供應，定會在同相 (in phase) 上振盪不已，其同調性就像雷射一樣。膜蛋白及微管土撥靈的振盪範圍預估在  $10^{-9}$  到  $10^{-11}$  秒。

微管自動器模擬顯示穩定的樣式，閃爍者，及傳播滑翔機 (速度為 8 到 800 公尺/秒，圖 10)。由 MAPs 連接的 2 個微管自動器是在展示認知及學習 (圖 11)。

微管自動器能夠巨量地增加細胞及全腦的資訊處理。每個神經元至少含有  $10^7$  土撥靈；以奈秒 ( $10^9$ /秒) 的開關預估每一神經元每秒約有  $10^{16}$  次的操作。但是增大的資訊處理在本質上並未回答有關意識的基本問題。答案隱藏在蛋白質內的狀態開關。

### 4.3 蛋白質構象動力學—自然位元及量元

蛋白質是生命的引擎，以多重尺度動態地改變構象的形態。功能改變發生於  $10^{-6}$  秒到  $10^{-11}$  秒的轉換。蛋白質具有每摩爾數千焦耳的巨大能量，但蛋白質僅邊緣穩定，以  $40 \text{ kJmol}^{-1}$  預防變性。因此，蛋白質構像 (protein conformation) 是一個「在強大對抗力量當中的精密天平」。

各個蛋白質是氨基酸的線狀鏈，它折疊成三維的構象。造成折疊之驅動力是包括不帶電的非極性氨基酸基的吸引，及受溶劑水的排斥。這些忌水基被范德瓦爾斯力 (van der Waals forces) 拉在一起，避開水，並將它們自己埋在蛋白質內部，形成 (在有些蛋白質內) 忌水袋 (hydrophobic pockets)。袋子的容積 (0.4 立方奈米) 是單一蛋白質體積的 1/30 到 1/250。雖然微小，但忌水袋對蛋白質構象在折疊方面及構象動力學調節方面的決定具有關鍵的重要性。忌水袋可以充當一個蛋白質的腦。

在忌水袋內的非極性 (但有能力極化) 氨基酸側基團藉范德瓦爾斯倫敦力 (van der Waals London forces) 進行交互作用。中性原子及非極性分子，就電學而言，在它們的電子雲分佈中可以有瞬間的偶極。在雲裏來自鄰近非極性氨基酸側基的電子彼此排斥，誘發出相互起伏的偶極，然後這些偶極彼此耦合就像振盪的磁鐵一樣。一旦高能量刪除，微弱但很多的 (每一個蛋白質就有數千個) 倫敦力就管控起蛋白質構象 (圖 8)。<sup>4</sup>

由於電子定位 (electron localization) 是先天的不確定性，所以倫敦力是量子力學的結果。因此，在忌水袋內受制於倫敦力的蛋白質是量子槓桿 (quantum levers)，它會將倫敦力放大去管控構象變化及物理效果。阻礙量子槓桿可以用來說明麻醉氣的作用。

### 4.4 麻醉

每年數百萬人在手術進行時爲了要完全失去意識以及在手術完畢後能自失去意識中蘇醒過來，而接受一般的麻醉。在適量麻醉藥濃度下，意識被抹除了，但許多大腦及其他器官無意識功能還是繼續進行 (例如腦波圖，喚起電位，呼吸控制)。這是怎樣發生的呢？

情況似乎令人困惑，因爲許多不同型的麻醉藥是作用在許多不同型的大腦分子上。經過肺及血液到達大腦的吸入性麻醉氣是由各樣不同類型的分子組成：鹵化烴，醚，惰性元素氬，笑氣 (二氧化二氮) 等。然而它們有一個重要的共同特徵。

所有麻醉氣分子都是非極性，因此不易溶於水/血液，但很容易溶於一種特別的類脂的忌水環境，像橄欖油。麻醉氣拭去意識的能力完全與該環境的溶解度有關。大腦有一個很大的類脂 (類橄欖油) 構造域，即在神經膜的脂區以及在某些蛋白質內的忌水袋。麻醉藥起先被認爲是作用在膜的脂區，後來才確定蛋白質忌水區才是麻醉藥作

用的主要位置。藉著形成袋子及管控構象動力學的同量子力，范德瓦爾斯倫敦力，麻醉氣結合到袋內的非極性氨基酸基團（例如，苯氨基丙酸內的類苯環，以及色胺酸裡的吲哚環）。

爲什麼微弱的量子力會有如此深遠及選擇的效應呢？麻醉氣形成它們自己與非極性氨基酸基團交互作用的倫敦力，因而妨礙或改變了把正常發生需要用於蛋白質構象動力學及意識的倫敦力。此即是，麻醉氣妨礙了量子槓桿。

大多數蛋白質構象變化不受一般麻醉的影響—如，肌肉收縮，酵素功能及大多數的腦部活動（像腦波圖及誘發電位的證明）都在麻醉期間繼續運作。軸突動作電位也不太受一般麻醉的影響。會受影響的蛋白質包括感受乙醯膽鹼，血清張力素， $\gamma$ -胺基丁酸（GABA）及甘氨酸的後突觸受器，在間隙接合內的連接蛋白，在微管及肌動蛋白內的土撥靈，而在樹突刺內之該肌動蛋白當暴露於麻醉藥時也會瓦解。

麻醉藥並不會作用到任一腦區，或任一類型的神經元或特殊蛋白質。相反的，麻醉及意識發生在遍及腦部樹突內一類蛋白質的忌水袋內。在這些忌水袋內，量子倫敦力管控意識的蛋白質功能。這是否在暗示意識是一個量子過程？

## 伍、量子資訊處理

### 5.1 量子力學

量子物理定律所描述的實相(reality)會在某種大尺度限制下(at certain large-scale limits)化約爲古典規則（例如牛頓的運動定律）。根據量子物理定律：

物體/粒子同時可存在於 2 個或更多個地方或狀態—它們比起粒子更像是波，它們是受控於一量子波函數 (quantum wave function)。這種多重可能性共存之現象就叫著量子疊加 (quantum superposition)。

多重物體/粒子能被統一，它們的活動像由一個波函數管控的單一同調物體 (a single coherent object)。若一成員受擾，其他成員都會知道，同時作出反應。這個就稱爲非域性 (nonlocality)，它是古典物理和量子物理之間的主要差異。若物體仍舊相處一起，非域性就叫著玻色-愛因斯坦凝結 (Bose-Einstein condensation)。

若統一的物體在空間上有分開，它們仍屬統一。這種非域性也被稱爲量子糾結 (quantum entanglement)。

爲什麼在我們的世界我們看不到量子疊加？量子粒子如何超距連接？

實驗顯示量子疊加持續存在，直到它們被測量，被觀察或與古典環境（消散）交互作用爲止。若這樣的交互作用發生，量子疊加便化約，塌縮或消散成特殊的古典狀態，從明顯隨機狀態中進行特殊抉擇。是什麼實際地構成了測量/觀察作用目前仍不明

白，就如同那被隔離，未測量之量子疊加的命運一樣。量子疊加詮釋對此議題的看法有：

**Copenhagen** 詮釋（測量或意識觀察會把波函數塌縮）把意識及基本實體排除在物理學之外。

多重世界觀念（**The multiple-worlds view**）認為每一個疊加被放大，導向一個新宇宙。不會有塌縮，但無窮的實體（和意識心智）是必需的。

**David Bohm** 的詮釋避開化約/塌縮，但需要另一層實體。物體是受可能性複合波的導引（主動資訊，與意識伴隨）。

**Henry Stapp** 把宇宙視為單一的量子波函數。在腦內宇宙某一部分的化約就是一個意識當下（類似於 **Whitehead** 的「經驗機緣」）—化約/塌縮即是意識。

在脫散理論（亦稱去相干化理論）中，任何一個量子疊加與一個古典系統（例如受熱，直接交互作用或資訊交換）的交互作用（失去隔離）會侵蝕量子系統。但是 a) 避談被隔離的疊加的命運，b) 沒有一個量子系統曾經真正被隔離過，c) 消散不會真把疊加打亂，只是把它埋在噪音當中而已，d) 一些量子過程會受到熱及/或噪音的強化。

造成化約的客觀閾值（客觀化約，客約）的存在是由於，譬如，疊加的粒子數（**the number of superpositioned particles**）（**GRW** 理論，**Ghirardi et al. 1986, 1990**）或像在 **Károlyházy et al. (1986)**，**Diosi (1989)** 以及 **Roger Penrose (1989)** 客約論中的量子重力（**quantum gravity**）。

物體如何能同時真正地在許多地點出現或多重狀態存在呢？**Penrose (1989, 1994)** 把疊加當成是真實的分開，是位於潛在實體的最基層，就是在蒲朗克尺度  $10^{-33}$  公分的基本時空幾何。這與多重世界觀念類似，然而，依據 **Penrose** 說法，分開是不隱的，而且會由於在時空幾何中的一個客觀閾值（而不是完全分岔）自發性地化約（自我塌縮）。因此，疊加愈大，疊加就化約愈快。例如一個隔離的 1 公斤疊加物體只要  $10^{-37}$  秒就很快抵達客約。一個隔離的疊加電子卻需要在 1 千萬年之後才會進行客約。目前 **Penrose** 客約正在接受實驗測試當中。

在他的「皇帝新腦」一書中，**Penrose** 提到從客約來的抉擇不是隨機的，而是受到埋在宇宙基本層次蒲朗克尺度下柏拉圖資訊的影響。而且，這種非隨機，非算術的（非可計算的）選擇是具有意識的抉擇，在根本方法上不同於古典電腦的輸出。**Penrose** 認為受客約調節的量子計算一定發生在腦內。量子計算（見下面一節）是仰賴疊加及糾結二者。

糾結比疊加更陌生。量子理論預測互補的量子粒子（譬如，耦合的上旋及下旋的

電子對)即使被分開時,也仍糾結在一起。Einstein, Podolsky & Rosen (EPR) 描述一個思維實驗,其目的就是要對這個糾結觀念提出異議(圖3)。一對糾結互補的疊加電子(EPR對)勢必會被分開,並沿著2條不同的傳輸線傳送,但各個電子仍在疊加中。當一個電子在它的目的地被測量時,假設觀察到上旋,在數哩外,那與它糾結的另一個雙生電子當下定會相應地化約為下旋,它一定能由測量來確認。顯然,這需要有一個比光還快的信號,但此早已被愛因斯坦狹義相對論所排除。雖然如此,自1980代早期以來,這類實驗已利用傳輸線,光纖及經由微波束穿過大氣被執行過。糾結自此已一再被証實確認。當下的溝通機制仍然不明,它似乎違反了狹義相對論。

為了解釋糾結, Penrose 提出量子資訊的逆時確認,即是,從測量逆時往統一的互補對(the united complementary pair),然後,順時往相反的另一個雙生子(圖3)。在量子世界,時間是對稱(雙向)的,或時間的流動是不存在的。

雖然對它們的瞭解有限,糾結及疊加還是被使用於量子計算及相關技術。

## 5.2 量子計算

最初由 Benioff, Deutsch 及 Feynman 所提出的量子電腦(以及量子密碼及量子隱形傳輸)已被發展成各種技術應用。

基本概念是這樣的。傳統電腦代表數位資訊,如即1或0的二位元。量子電腦能夠代表量子資訊如1及0二者之疊加(量子位元或量元)。當疊加時(與環境隔離下),量元藉非域性的糾結與其他量元交互作用,允許交互作用演進到巨大速率及近乎無限平行的計算。當交互作用/計算被執行後,藉由測量,量元化約/塌縮成為特殊的古典位元態,得到輸出或給出解答。

對量子計算最大的障礙是裝配的疊加量元對熱振動的敏感性或對任何與環境交互作用干擾的敏感性—消散。因此,所建造的量子計算原型,為了避開熱擾需要在極低溫及與環境隔離下進行操作的。

在1990代中期,能夠偵測及更正消散,並貯存量子資訊的量子糾錯密碼被發展出來。而研發出來的拓樸學量子糾錯,其內量子電腦晶格的幾何,在本質上就能對抗消散。例如,一臺量子電腦可以利用 Aharonov-Bohm 效應,在此效應裏,一個量子粒子交替的可能路徑都被考慮為疊加的路徑。因此,晶格路徑(而不是那些路徑的各個成員)能成為整體量元對消散產生耐受力或具有抗消散性。

## 5.3 潘洛斯客約的量子計算

工業技術的量元受到測量影響而化約/塌縮,此測量藉平均冗餘度而引入隨機(introducing randomness averaged out by redundancy)。依據 Penrose 的說法,藉客約自我塌縮的量子計算為了避開隨機,而改以提供一個源自埋藏於蒲朗克尺度下柏拉圖



價值的非可計算影響。這樣的量子計算會是演算的，連同額外的修飾，然後發生抵達客約的當下。Penrose 依據 Gödel 原理所主張的非可計算性，雖受到嚴厲的批判，但未被反駁。對意識問題，客約也提供對下列難題的解釋：

從無意識（疊加的量子資訊）到古典資訊的轉換，轉換本身帶有意識。

透過量子同調，濃縮及/或糾結的統整。

Libet 的逆時確認及其他的時間異例。

經由 Whitehead 泛原靈論（pan-protopsyhism）連接到基本時空幾何的意識經驗難題。

Penrose 最初提議把發射及不發射二者當作神經元疊加可能性的量元。微管似乎就是 Penrose 所提量子計算的理想模式。

Penrose 暗示無意識過程利用量子資訊有能力轉變為意識。我們對無意識過程知道些什麼？

## 陸、量子潛意識

德國心理學家 Frederic Meyer 在 1986 年描述閾下意識（subliminal consciousness），繼之而起的是 William James 的超限意識（transmarginal consciousness）或邊緣（fringe），一個心智區域雖在意識的外面，但容易取用意識（access consciousness）。

Sigmund Freud 把夢視為「通往潛意識的（the unconscious）絕佳途徑」，其古怪特性是出於挫折驅力的偽裝及檢查。Freud 的理念後來被低估，作夢被當成是精神靜態干擾。然而晚近大腦影像顯示，與作夢伴隨的動眼期睡眠活動區域是與情緒及滿足有關聯的。

智利心理學家 Ignacio Matte Blanco 把在夢中的邏輯結構與清醒意識的亞理斯多德邏輯作一比較，譬如，邏輯陳述：

若為  $x$ ，則是  $y$

並無暗示陳述：

若為  $y$  則是  $x$ 。

對我們的意識心智來說這是明顯的。譬如：

若燈轉綠，則我走

並無暗示：

若我走，則燈轉綠。

然而，Matte Blanco 從數十年對夢的分析，決定了二項屬於潛意識邏輯學的非亞里斯多德公理（two non-Aristotelian axioms of the logic of the unconscious）：對稱及概括（symmetry and generalization）。在夢中：

若為 x 則是 y

（依照對稱）亦暗示：

若為 y 則是 x。

在夢中，依照 Matte Blanco：

若燈轉綠，則我走

亦暗示：

若我走，則燈轉綠。

概括意指任一獨立存在物是一個全部的一部分，而當對稱及概括被結合時，悖論（paradox，亦稱弔詭之論）便發生。概括例如：

若手是身體的部分

則亦：

身體是手的部分。

任何一組是它自身的亞組的這種反峙現象（the seeming contradiction）就是定義一個無窮組，也就是全像性的（holographic，亦稱全息性的）（及碎形的，and fractal）。整體的任一部分也包含部分內的整體。

對稱也意指：

若事件 a 發生在事件 b 之後，

則亦：

事件 b 發生在事件 a 之後。

由此，Matte Blanco 結論：「...潛意識的過程...在時間上是沒有次序的」。

潛意識邏輯的另一暗示是表觀否定命題（例如 p 與非 p）也許是真實，造成矛盾並存。悖論譬如（採用 Matte Blanco 的例子）：

X 是活的

以及

X 是死的

二者都是真實的（譬如，當時間被移除時）。講白一點，依據 Matte Blanco，「潛意識是無法將任何兩件事物彼此區分的」。

潛意識之運用多重共存的可能性，不可分開性以及永恆性或不受時間影響，非常酷似量子資訊。Matte Blanco 把潛意識總結為「在悖論或弔詭盛行及對立的地方會合而為一」，也可以說是，對量子世界一種恰當的描繪。

## 柒、微管的量子計算—協調客約模型

### 7.1 協調客約的細節

在意識機制的建議裏，Roger Penrose 和我提出神經元內的微管量子計算是由突觸輸入及微管關連蛋白（MAPs）協力互補，一起協調的（orchestrated），而由 Roger 的客觀化約（客約）機制所終結（譬如，在 25 毫秒，40 赫茲之後）。因此，此模型被命名為協調的客觀化約（orchestrated objective reduction），協調客約（Orch OR）。完整的詳情可見於 Penrose & Hameroff（1995），Hameroff & Penrose（1996a, 1996b）及 Hameroff（1998）。關鍵點是：

- (1) 在樹突微管內的土撥靈蛋白次單位的構象態藉偶極耦合與鄰近土撥靈態交互作用，如此的偶極耦合，使微管以類似於細胞自動器方式處理資訊，即調節神經元活動（激發軸突電鋒，藉 MT-MAP 結構等來修改突觸的可塑性及固化的記憶）。
- (2) 土撥靈構象態及偶極是由在土撥靈內部（非極性忌水袋）的量子力學倫敦力所操控，因此土撥靈能以不同構象態的量子疊加存在，而起到像量子槓桿及量元一樣的作用。
- (3) 正當疊加時，土撥靈量元藉糾結與其他在同一微管的，在同一樹突內的其他微管的，及在其他間隙接合相連的樹突內的微管（即在一個超神經元內）的土撥靈量元進行交流/計算。於是量子計算經由穿隧，透過間隙接合或其他機制在遍及大腦宏觀區域的微管中發生。
- (4) 樹突內部兩相之間的交替 受肌動蛋白聚合物的決定：a) 在液相（溶液：液膠，solution: sol），肌動蛋白被去聚合化，而微管與外在世界古典地（土撥靈位元）交流/處理資訊。在此相之際，突觸活動，透過藉 MAPs 的協調微管處理，提供輸入。化約之後，液膠相微管的輸出態會調節軸突之發射及樹突之可塑性。b) 當肌動蛋白聚合時（例如，被麩氨酸鹽啟動，結合到在樹突刺上的受體），樹突細胞質轉變

為準固體的膠質狀凝膠 (gel) 相，微管遂與環境隔離，並進入量子疊加模式，在此模式中，土撥靈起了類似量子位元或量元一樣的功能 (圖 12)。這兩相是以 40 赫茲相互交替的 (圖 13)。

- (5) 在凝膠相中，土撥靈/微管的量子態運用以下的生物學機制：肌動蛋白絲膠質化作用結成的繭殼 (encasement)，有序水，Debye 螢幕掩護，同調幫浦 (coherent pumping) 以及拓樸量子糾錯 (topological quantum error correction)，來避開環境的-消散，而獲得隔離/防護。
- (6) 在量子凝膠相之際，微管土撥靈量元以量子資訊—像作夢內容一樣，就是多重可能事件疊加的例子—來代表前意識 (潛意識，下意識) 資訊。
- (7) 依據  $E = h/t$ ，前意識土撥靈疊加抵達 Penrose 客約的閾值 (例如 25 毫秒)，其中  $E$  是疊加質量的重力自身能量 (gravitational self-energy of superpositioned mass) (譬如，在疊加的土撥靈數目)， $h$  是蒲朗克常數 (Planck's constant) 除以  $2\pi$ ，而  $t$  是達到客約所需的時間。疊加愈大 (愈強烈緊張的經驗) 抵達閾值愈快。因為  $t = 25$  毫秒 (即 40 赫茲)，所以  $E$  大略是  $10^{11}$  個土撥靈，每一意識事件至少需要  $10^4$  個神經元的一個超神經元。超神經元的組成量 (makeup) (和意識內容) 會跟著隨後事件而演變。
- (8) 每個 25 毫秒客約事件選用微管自動器處理過的  $10^{11}$  土撥靈位元態，去管控神經生理事件，例如，啟動軸突電鋒，指明 MAP 之結合位置/重構樹突結構，調節突觸及膜功能。量子計算是演算的，但在客約當下，一個非計算影響 (即是，來自基本時空幾何的柏拉圖價值) 便發生了。
- (9) 每個客約事件把過程約束到基本時空幾何，使懷德海泛原靈主義者能夠對主觀經驗的難題加以探究。這樣的事件順序產生了我們熟悉的意識流。

協調客約有關意識和認知方面的應用將在下面第 8 節加以思考。

## 7.2 消散

消散就是量子疊加發生中斷，這是由於能量或資訊與古典環境交互作用的結果。所以，量子科技之發展一般都要在超冷隔離的環境中，也因此，物理學家對於「暖，濕，吵」的腦內能夠存在量子計算是抱持懷疑的態度。

然而，生物學系統在好幾方面是可以延遲消散的。其一是藉阻隔/防護把量子系統從環境交互作用中隔離開來。蛋白質內部的忌水袋免受外部范德瓦爾斯熱的交互作用；微管也可受到抗衡離子 Debye 電漿層 (plasma layer) (由於土撥靈上帶電的 C-端尾巴) 和受到有序水的肌動蛋白膠質的掩護。生物學系統也可以開發熱動力學梯度以產生極低的有效溫度。

另一可能就是有關免於消散的次空間。弔詭的是，當一個系統透過某種自由度，強力地耦合到它的環境時，它能有效地（藉所謂的量子季諾效應，quantum Zeno effect）凍結其他的自由度，使得同調疊加（coherent superpositions）及糾結能夠持續不停（persist）。而供應給微管的集體動力學（如 Fröhlich 的同調）的代謝能量，能抵消消散（其方法類似於雷射在室溫下之避開消散）。最後，在理論上，微管構造似乎很適合於藉 Aharonov-Bohm 效應的拓樸量子糾錯。

爲了企圖證明意識與量子態無關，Max Tegmark（2000，並參閱 Seife 2000）計算出微管消散時間是  $10^{-13}$  秒，這時間對神經活動來說是太短暫了。然而，Tegmark 並未描述協調客約，也未描述任何以前的建議，而只描述他自己的量子微管模型（quantum MT model），他的確成功地證明了意識與量子態無關。Hagan et al.（2002）用 Tegmark 的方程式重新計算微管消散時間，但以協調客約模型的條件爲基礎。例如，Tegmark 算出沿著微管移動的孤子波（a soliton wave）的量子疊加從自身分開的距離是 24 奈米。而在協調客約中，土撥靈的量子疊加從自身分開的距離是等於一個碳原子核的直徑（約 1 費米或  $1 \times 10^{-15}$  米），比起 Tegmark 的 24 奈米（或  $24 \times 10^{-9}$  米），短了  $10^6$  次方倍（6 orders of magnitude smaller）。因爲分開距離是消散方程式的分母，單是此種矛盾就把消散時間延伸 6 個數量級成爲  $10^{-7}$  秒。另外的矛盾（電荷對抗偶極，更正的雙電常數）就把計算的消散時間延伸爲  $10^{-5}$  to  $10^{-4}$  秒。防護（抗衡，肌動蛋白膠質）把時間延伸進入生理學範圍爲數十到數百毫秒。拓樸（Aharonov-Bohm）量子糾錯可以把微管消散時間延伸到無限期。

大腦是真的「又濕又吵」嗎？在膠狀固體相中，微管是在一個具有有序水的準固體環境中。至於「吵」，電生理學背景的起伏（background fluctuations）顯示，繼續向前一直「吵」到在腦內有一段能達到真正相關的距離爲止。

由有機苯分子連接的量子點（quantum dots），在其間發生的量子自旋轉移（quantum spin transfer），在適溫是比在絕對零度較有效率的。相同的構造在蛋白質忌水袋中的氨基酸（苯氨基丙酸，酪胺酸，色胺酸）中被發現。其他實驗已顯示生物學紫色素分子的量子波行爲，以及還有其他顯示吵鬧能加強一些量子歷程。演化已用了數十億年來解決消散的問題。（第 8.6 節）。

### 7.3 可檢驗性及可證偽性

1998 年協調客約的 20 個可檢驗的預測被發表過。在它們當中，以下是被認爲有效的：信號是沿著微管的，突觸的功能/可塑性是與細胞骨架構造有相關的，心理促動藥物的作用（actions of psychoactive drugs）會牽涉到微管，以及間隙接合會調節珈瑪同步性/40 赫茲（許多參考文獻被引用於第 3.5 節）。其他目前已被檢驗的則列在附錄 1（本篇未附）。沒有一個被證明是錯誤的。除了蒲朗克尺度幾何的連結有可能是例外以外，所有其他都急待檢驗（testable）。協調客約是可証偽的（falsifiable）—它只要能被顯

示在沒有樹突，間隙接合，微管（或某些其他可造成泛腦量子同調的機制）或量子計算之下，意識若還能發生，那就可證明協調客約是騙人的。

## 捌、 協調客約有關意識和認知的應用

### 8.1 視覺意識

視覺成員雖在隔開的腦區及在不同時間被處理，但會整合為統一的視覺完形（visual gestalts）。這是怎樣發生的呢？而 40 赫茲的興奮又如何的與較長週期的聯合視覺完形（例如，250 到 700 毫秒）取得關連呢？到達 V1 的丘腦輸入被供輸到（are fed-forward to）區域 V2，V3，V4 及 LO 作形狀的認知，而後到 V8 及 V4v 作顏色認知，到 V5，V3A 及 V7 作動作認知，然後回到 V1 及前額皮質。在 Woolf & Hameroff 文中，我們提議每個成員步驟對應一個 40 赫茲興奮，類似 Zeki 所提的微意識（microconsciousness）。在數百毫秒之後，為了將各個成員統一為一個視覺完形，一個累積的滾雪球效應—漸強加倍—發生了（對應一個超神經元的生長，圖 14）。在對此提議的評論裡，Gray 指出我們只對視覺完形有意識，對增進中的成員並無意識。這就是在建議各個協調客約事件將視覺成員的量子資訊/感質向初始的 V1 電位（the initial V1 potential）逆時確認（持續的時間與  $E$  成正比），結果是在整合過程的初期就形成了整合的視覺完形。因此，網球員及棒球員能成功回應來球，是因為他們在意識上很早就已看到及認知到球的形狀，顏色及動作的緣故。在燈色幻變現象中，大腦從隨後的位置逆時填補空隙。因此，不像回顧建構（retrospective construction），意識感覺實際上是發生在二個位置之間的轉移。

### 8.2 意志力及自由意志

意志力（volition）及自由意志（free-will）引起二個議題。一是時間，在時間方面，我們行動顯然是在我們回應處理相關輸入之前。潛意識量子資訊的逆時確認能解決這個問題。另一是決定論（determinism）。倘若在我們的環境裡大腦流程（包含無意識流程）及事件是算術的話—即使是高度非線性/混沌—那我們的行為便是遺傳影響及經驗的決定論產物。Wegner 結論出自由意志是決定論行動下的（幻覺）意識經驗。Penrose 客約的非計算觀點有助於解答此一問題。

假若我現在在打網球，正要回擊我對手的觸地球。當我開始準備好拍子位置時，我考慮 a) 打向他的正拍，b) 打向他的反拍，c) 給他一個短球。這三種可能性的一個量子疊加（以土撥靈量元表現）便在一個前運動皮質的超神經元內發展並抵達作為客約的閾值，就在那當下對應一個動作（例如，打他的正拍）的一組土撥靈態便被挾取，導致去執行這選擇的一組適恰的軸突電鋒因而形成。

如此的動作會完全是演算及古典的嗎？是的，但除了有利的時間效果外，在 Penrose 客約內的非可計算影響還能提供直覺，把天平微觸到適恰的選擇。有時候（至

少對我是如此) 我們做事, 我們會不太確定為什麼我們要做這些事。

就最終徹底的發動力來說, 這不是自由意志, 因為非可計算的影響才是最終確定者<sup>5</sup>。我們所經驗以為的自由意志, (其實) 是受非可計算因素所影響的運算過程。這與 Wegner 的主張不同在於 a) 我們的動作不完全是運算的, 及 b) 因為是逆時確認, 所以決定是與選擇及動作的經驗有意識地同時並存的, 以及 c) 意識並不是副象。

### 8.3 量子聯合記憶

證據顯示記憶是被深植固化 (hard-wired) 在樹突細胞骨架結構裡。Woolf & Hameroff 提議一個刺激的感受是經由糾結(聯合的)資訊的 EPR 的客約將聯合記憶 (associated memory) 的意識感知沉澱。此乃暗示統一意識的兩個不同的內容仍然在記憶中糾結著。

### 8.4 意識經驗的難題

大腦如何產生由感質組成的現象經驗—玫瑰的氣味, 情緒的感覺品質, 及意識思維流的經驗—是一個「難題」。

一般而論, 有二個科學途徑: a) 突現 (經驗恰似一個新特性產生自階層遞歸系統之簡單成員當中複雜的交互作用), 及 b) 泛靈論 (panpsychism), 泛原靈論, 或泛經驗論的一些型式 (意識經驗的主要特徵或前驅物是實相的基本成員, 經大腦過程而加以取用與組織)。

突現衍生自非線性動態數學, 如, 氣候模式, 蠟燭火燄及電腦程式的自我組織。意識也會是在神經元 (或在微管之土撥靈蛋白) 交互作用中的新興特性嗎? 也許, 但突現現象一般會有可預測及可測試的轉換閾值, 而它們都無法對意識加以證明。

泛心靈論, 泛原始心靈論, 及泛經驗論把意識視作為像電荷, 或自旋, 可以從基本的不可化約的物理實相成員滋長出來。就正是這些成員。泛心靈論認為原始意識就是所有物質的品質: 原子及它們的次原子成員具有主觀的心靈特性。懷德海避開泛心靈論 (如我所做的), 主張過程而非物件及特性。在懷德海的泛經驗論裡, 意識是一序列事件—經驗機緣—是以他所描述的一種較廣的基本場域 (basic field) 的原始意識經驗發生的。

哲學家 Abner Shimony 觀察到懷德海的機緣可被解釋為量子態的化約, 與 Penrose 的客約一致。果真如此, 懷德海的原始意識經驗的基本場域是什麼?

Penrose 客約是描述在基本時空幾何的事件, 是宇宙的根本層級。在尺度上走下到原子時空的大小 ( $10^{-8}$  cm) 是滑順的, 直下到蒲朗克尺度  $10^{-33}$  cm 大小才變成粗粒度。蒲朗克尺度是透過弦論, 量子重力, 扭論, 自旋網路等, 在現代物理學裡被探討的。雖然正確描述不明, 但已知道蒲朗克尺度是量子化的及非域性的, 而 Penrose 提議的此層級就是量子疊加發生分開, 在那兒存在著柏拉圖價值。也就是在此無所不在的層

級，原始意識感質被認為是被埋藏的，也因此才會有泛原靈論。

如果是這樣，懷德海的經驗機緣也許就是發生在蒲朗克尺度下一個泛原靈者場域裡的協調客約事件。在微管內具有客約的量子計算把我們的大腦連接到實相的基本層級。每次的協調客約事件會取用及選擇在化約瞬間當下代表意識的一特別組合/樣式的原始意識感質——一個經驗機緣。這樣的一系列事件便產生了我們的意識流。

### 8.5 意識是什麼？

協調客約是一個以閾值為基礎之事件，應驗 Freeman 的意識準則：自我組織的臨界性（self-organized criticality）發生在腦。意識即客約。客約即意識。不論意識在那裡或如何發生，為達到前後一致：a) 所有量子疊加是原始意識，以及 b) 任一潘洛斯客約必是意識。腦會是意識唯一發生的地方嗎<sup>6</sup>？

疊加雖然普遍（無所不在於蒲朗克尺度的世界，因此稱為泛原靈主義），但潘洛斯客約需要嚴格的條件。到達客約閾值所需的時間與疊加總質量（ $E = h/t$ ，疊加愈大，抵達閾值愈快）成反比。藉隔離疊加，以避開脫散（即受環境的交互作用）必須維持到閾值出現。小疊加較易隔離/避開脫散，但到達閾值需要的時間較長。大疊加雖能快速到達閾值，但它有隔離上的困難。意識腦活動發生的時間範圍在數十到數百毫秒（譬如，每秒振動 40 次的 40 赫茲，即是，每震動 1 次需時 25 毫秒），需要的疊加蛋白質重量為奈克。只有在腦部才有相當大量的疊加可被隔離（譬如在超神經的樹突內）和連結到認知。

蛋白質是最適中的量子槓桿，夠大到會對巨觀物理世界產生致果性，但也夠小（及夠敏感地被平衡）到能存在於疊加中，並受到量子倫敦力的自動管控。以蛋白質為基礎的客約/意識，是發生在臨近量子世界及古典世界之間的一種自我組織過程。

### 8.6 意識及演化

演化會偏袒意識嗎？功能主義者把意識看成幻覺副象（illusory epiphenomenon）的觀念對適應及生存似乎提供很少的好處。然而協調客約可提供下列：a) 量子計算（如，搜索演算法，search algorithms）提供比傳統計算更快的（近乎平行的）處理，b) Penrose 的非可計算性會賦予直覺的不可預測性，例如，在掠食者-獵物的相關性，及 c) 逆時確認（backward time referral）及近乎瞬間語覺（near-instantaneous semantic perception）及反應也會是有利的，例如，在掠食者-獵物的相關性。於是，演化為了獲得一再而再更大的疊加，定會支持量子隔離機制，譬如，蛋白質，蛋白質集團（assemblies of proteins），蛋白質集團的集團（神經元），神經元的細胞集團/超神經元... 大腦，結果是客約所需時間愈迅速也愈有效率。另外，生物學也有可能不斷的演化和適應於前存的原始意識（pre-existing protocsciousness）。



## 玖、結 論

潘洛斯－漢莫洛夫的「協調客約」理論，走出孤立無援的危險境遇，直指令人費解的意識面向。它引來批判的原因是 a) 它與傳統理論明顯不同，和 b) 有意義的量子歷程似不可能出現在溫腦之環境裡。但是，傳統理論未能直述令人費解的意識面向，証據顯示，生物學已為腦-溫下的量子處理，演化出機制。「協調客約」雖然在理論上它擴及到所有已知的神經科學，認知科學，生物學以及物理學，但它與這些學門之間並沒有矛盾存在。此外，不像傳統理論，「協調客約」是經得起檢驗和反證的。統合涵蓋神經生物學，物理學和哲學三個領域，它是最完備的意識理論。

### 【參考文獻】

1. Diosi, L. 1989. *Physica Reviews A* **40** : 1165–74.
2. Ghirardi, G.C., Rimini, A., & Webber, T. 1986. *Physica Reviews D* **34**: 470.
3. Ghirardi, G.C., Grassi, R., & Rimini, A. 1990. *Physica Reviews A* **42**: 1057–64.
4. Hagan, S., Hameroff, S.R., & Tuszynski J. 2002. *Physical Reviews E* **65**: 061901-1 to -11.
5. Hameroff, S. 1998. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A* **356**, 1869–96.  
<http://www.quantumconsciousness.org/penrose-hameroff/consciouscomputation.html>
6. Hameroff, S. 2006. Consciousness, Neurobiology and Quantum Mechanics: The Case for a Connection. In: *The Emerging Physics of Consciousness*. Tuszynski, Jack A. (ed.): chapt. 6, pp. 193–253. Springer Berlin Heidelberg.
7. Hameroff, S. 2009. What is consciousness? Club Bulletin, Rotary Club of Hong Kong South, No. 46.
8. Hameroff, S.R., & Penrose, R. 1996a. In: *Toward a Science of Consciousness The First Tucson Discussions and Debates*. Hameroff, S.R., Kaszniak, A.W. and Scott, A.C., (eds.): 507–540, MIT Press. Also published in *Mathematics and Computers in Simulation* (1996) **40**: 453–480.
9. Hameroff, S.R., & Penrose, R. 1996b. *Journal of Consciousness Studies* **3(1)**: 36–53.  
<http://www.quantumconsciousness.org/penrose-hameroff/consciousness.html>
10. Károlyházy, F., Frenkel, A., & Lukacs, B. 1986. In: *Quantum Concepts in Space and Time*. Penrose, R. and Isham, C.J. (eds.), Oxford University Press. Oxford, U.K.
11. Maldacena, J. 2005. The illusion of gravity. *Sci. Am.* **2005(Nov.)**: 56–63. 馬多西納 (高湧泉 譯) 2005。重力是一種幻覺嗎? *科學人* **2005 (12 月號)**: 64–71。
12. Penrose, R. 1989. *The Emperor's New Mind*. Oxford University Press. Oxford, U.K.
13. Penrose, R. 1994. *Shadows of the mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press. Oxford, U.K.

14. Penrose, R. & Hameroff, S.R. 1995. *Journal of Consciousness Studies*. 2: 98–112.
15. Seife, C. 2000. *Science*, 287: 791.
16. Sorli, A. 2008. Space-time is a structural quality of the gravitational field created by the observer in the process of measurement. *The General Science Journal*.  
<http://www.wbabin.net/sorli/sorli9.pdf>
17. Tegmark, M. 2000. *Physica Rev. E* 61: 4194–4206.

<sup>1</sup>Epiphenomenal 在此個案指的是某種立即動作，也許是反射作用的（如受背流或受背神經束調停、斡旋、介導或媒介的反射作用 dorsal stream-mediated），但誤以為我們有意識地去表演它們。那些把此動作認為是屬於無意識活動的人，主張意識在其他功能上扮演重要的致果角色，例如，否定，比較及長期計畫和行為。（第 1 節）

<sup>2</sup>有些科學家及哲學家的確思考到更微粒的細節。譬如 Koch 雖提出在意識神經相關物的脈絡中有關細胞內鈣離子的議題，但又維持軸突電鋒是初級介質。Chalmers 指出即使腦中各個受器，離子及分子的精確活動及狀態都知道，意識經驗的肇因還是無法被解釋。然而，我將主張，腦內某些模式所組織的量子過程能說明以懷德海泛原靈哲學（此哲學以現代物理學為基石）為根據的意識經驗。（第 1 節）

<sup>3</sup>Penrose 提出原始動機是根據人類思維及選擇的非可計算性（即是，非算術過程），如同 Gödel 定理所主張的。（第 1 節）

<sup>4</sup>鑑於 Mossbauer 的效應，在土撥靈內的電子運動藉反沖（recoil）現象必與核運動耦合，並將蛋白質的構象連結到倫敦力。移動會是一點點，因為單一電子與質子之間的質量差異非常懸殊—若一個單一電子移位一個奈米定會改變核的質量，因此蛋白質構象，只動了  $10^{-8}$  奈米。然而，假若所有核集體受影響，這樣的每一個電子的移動（每一個蛋白質數千個電子倫敦力）會是有意義的。在協調客約中的構象疊加/分開距離是 2.5 費米（fermi）長（碳原子核直徑），即是  $2.5 \times 10^{-6}$  奈米。所以  $\sim 250$  個倫敦力（在每一蛋白質數千個當中）會是必要的。一個單一電子的電荷改變，等於一個質子的電荷，就非常像在構象上所施行的影響。Roitberg et al. 及 Tejada et al. 也有提出蛋白質的量子態。（第 4.3 節）

<sup>5</sup>換句話說，自由意志涉及選擇是否允許自身受非可計算因素的影響。（第 8.2 節）

<sup>6</sup>在非生物系統的量子疊加會怎麼樣？目前量子電腦在技術上是採用具有低質量分開/低  $E$ （例如，離子，電子，或光子）的量元的疊加，並在客約閾值能到達前，藉由測量的化約得以順利發生。然而，理論上，若利用較大質量量元的疊加之量子電腦，如富勒烯技術（fullerene technology），或許可達客約閾值而產生意識當下。（第 8.5 節）

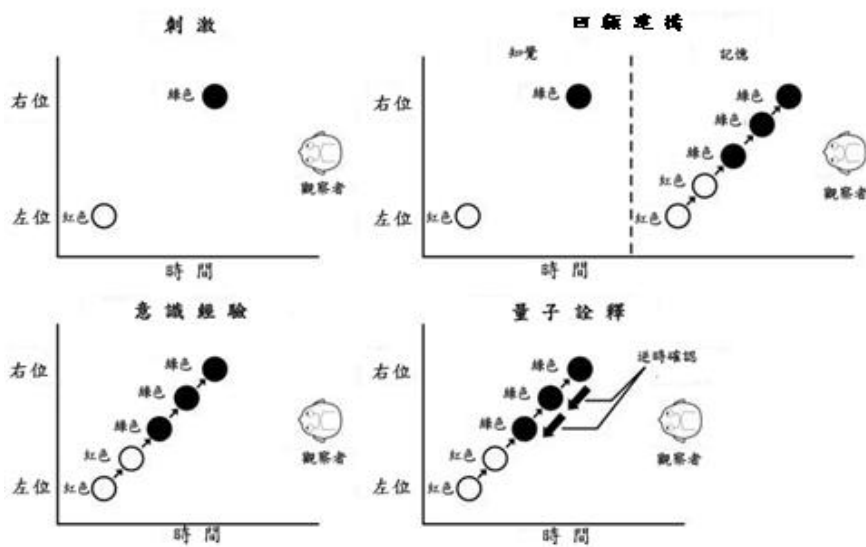


圖 1. 色動現象。左上：觀察者在螢幕上看見左邊紅點出現，消失，隨後在右邊出現綠點。左下：前述觀察者之意識(報導)經驗是，一個紅點由左向右移動，並在中途轉換為綠色。右上：回顧建構詮釋，認為觀察者之當下知覺是屬於二個各自分開的點，這分開的二點，隨後，被當成紅點移動至中

途轉變為綠點，而加以訂正及記錄於（延遲的）記憶內。右下：量子詮釋則認為大腦逆時傳送了意識的量子資訊，來填補中途之紅轉綠。

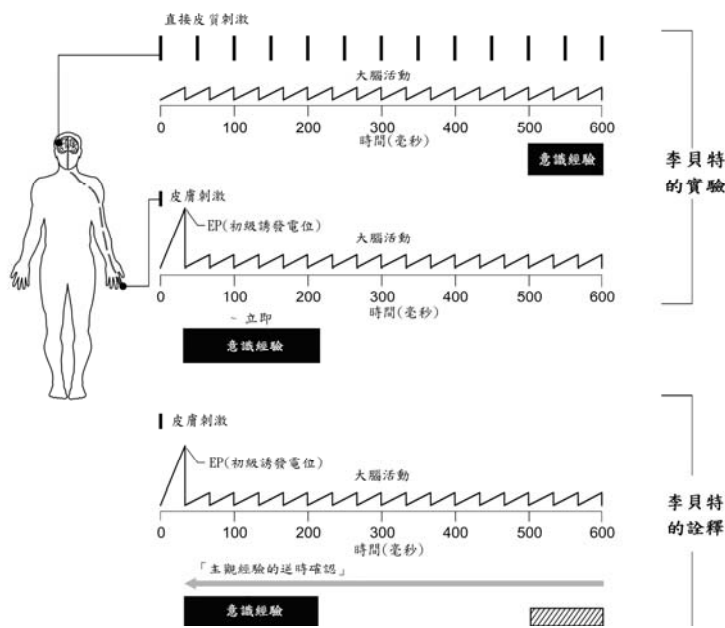


圖 2. 李貝特 (Libet) 的實驗及詮釋。病人(左)的資料藉由下列二個入口分別取得，1) 體感覺皮質之手區，及 2) 相對應的手皮膚。上：每 50 毫秒電脈衝的直接皮質刺激，造成皮質腦部活動，此活動必要進行 500 毫秒才能造成一次手感的意識經驗。中：對於手皮膚之單次脈衝在 10~30 毫秒後，造成初級誘發電位 (EP)，並持續至少 500 毫秒久的大腦活動。意識經驗是隨初級 EP 之出現而發生。下：李貝特的

詮釋—神經活動充裕量，必要花 500 毫秒的持續活動，這個充裕量，是要讓主觀經驗，有足夠充分的時間，去向初級 EP 逆時確認。

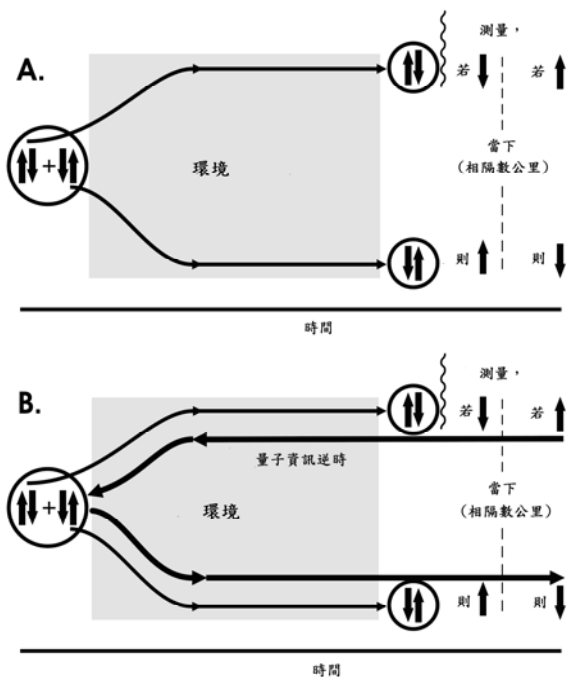


圖 3. 在愛波羅效應 (EPR effect) 中的倒流時光。A. 愛波羅的實驗已被 Aspect et al., Tittel et al. 以及其他人所證實。在左邊的是一對被隔離糾結的疊加互補量子粒子，譬如，兩個在上旋態及下旋態的電子。這一對被分開送到 (藉由環境而非測量) 相隔數公里遠的不同地點/測量儀器。在上方的單一電子(上旋態及下旋態兩者疊加中) 被測量到，並化約為單一的古典態 (譬如，下旋)。當下，它數公里外，互補的雙生子，化約為上旋的互補態 (反之亦然)。這個效應是當下超越了明顯的距離，因此這個被傳遞的效應似乎比光速還快。B. 根據潘洛斯的詮釋，對上方電子的測量/化約，會把量子資訊逆時送回整體糾結的原點，然後順時向前送往雙生子的

電子。到目前為止，至少還沒有其他更合理而又具體的詮釋被提過。

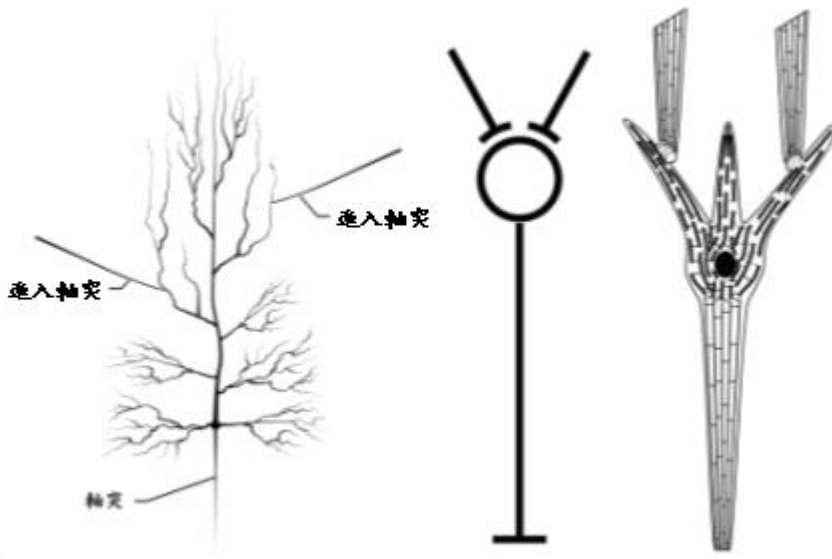


圖 4. 神經元的特徵。左：一個實際錐體神經元，具有許多先端樹突及基部樹突（頂端及中部）以及一條朝下的軸突。二條進入軸突顯示，突觸於先端樹突上。中：一個漫畫式的神經元，如同在神經網路及功能主義者模型中所描畫的。右：一個漫畫式神經元，如同本章所採用的，顯示三個樹突，細胞本體及一個朝下的軸突。內部的細胞骨架—微管被微管關連蛋白交互相連著—

以精心設計的簡圖顯示之。位在樹突及細胞本體微管，是短而斷續的（屬於混極性，當然看不到）。在軸突的微管則是連續的（屬於單極性，當然也看不到）。二條進入軸突，突觸於樹突刺上。

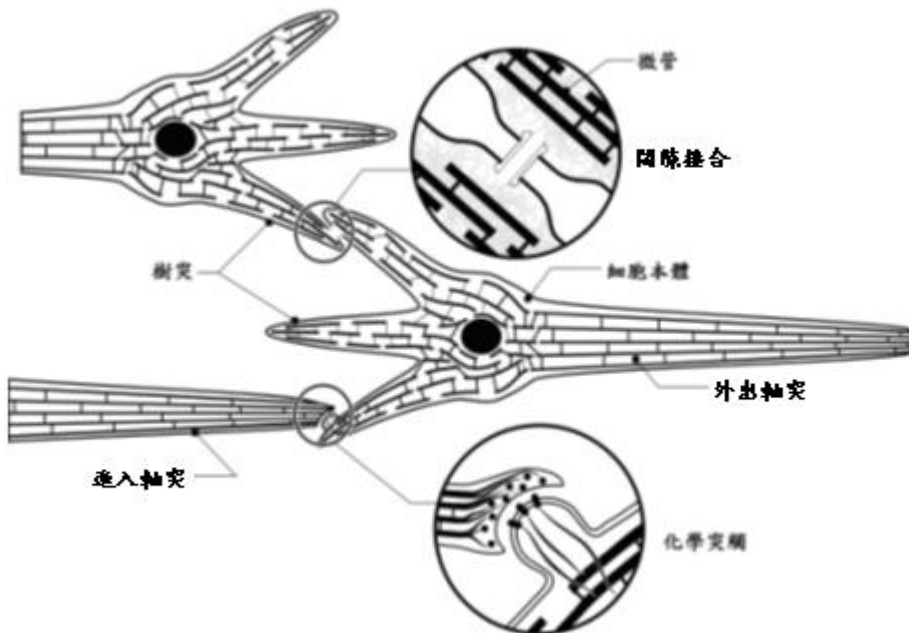


圖 5. 漫畫式的神經元有 2 種連接方式。內部結構代表細胞核（黑圈），以及由柱狀微管關連蛋白連接的細胞骨架微管。在軸突的微管是連續的（以及單極性的），而樹突的微管是斷續的（以及混極性的）。左下：進入軸突在一個樹突刺上形成一個化學突觸。近照顯示，神經傳遞微囊，位在前突觸軸突末端，在

刺上的後突觸接受者，連結到與微管連接的刺內肌動蛋白絲。左上：樹突-樹突的間隙接合，是兩個神經元之間的窗口。兩個細胞的細胞膜及細胞質內部都是連通的。

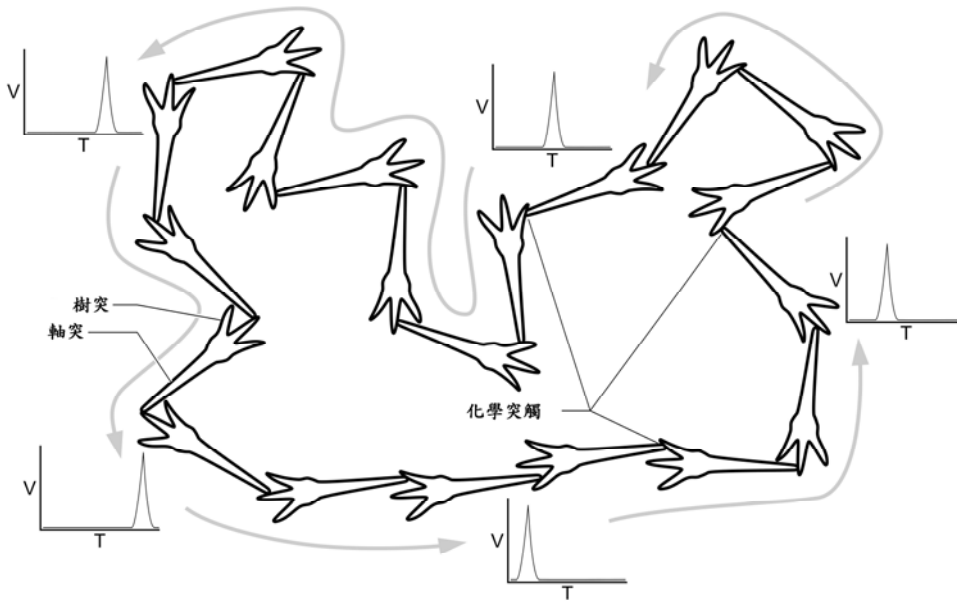
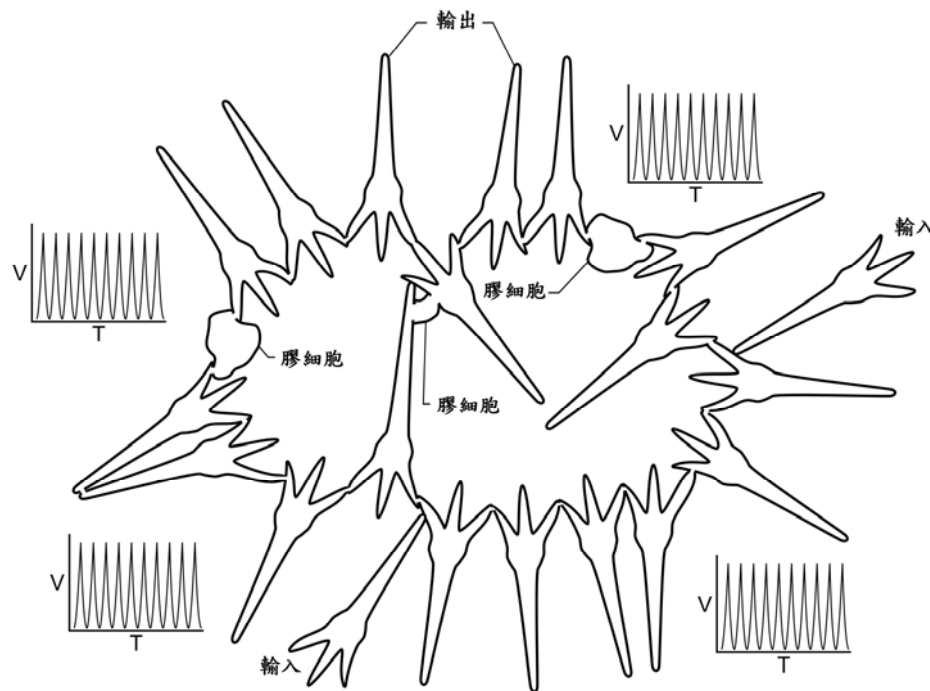


圖 6. 漫畫式神經元的神经网络/赫比細胞集團，是由軸突-樹突之化學突觸連結。資訊/興奮從軸突到樹突單向（反時針）流遍網路。在各個不同點（T = 時間）的電紀錄，顯示單獨的電壓電鋒電位（V）正傳播於網路中。

圖 7. 神经网络/赫比細胞集團（超神經元）大多是由為樹突-樹突之間的窗形間隙接合連結而成，這其中也有膠細胞的間隙接合參與。超神經元的輸入是來自軸突-樹突的化學突觸。超神經元的輸出是以超神經元成員的軸突輸出。因為這些間隙接合的神經元同步去極化，類似「一個巨大神經元」，所以在每一不同點的電記錄（T = 時間），都顯示同步電壓去極化（V），譬如，所有神經元都同調在 40 赫茲。在超神經元內的所有細胞膜及細胞質之內部都是連續相通的。



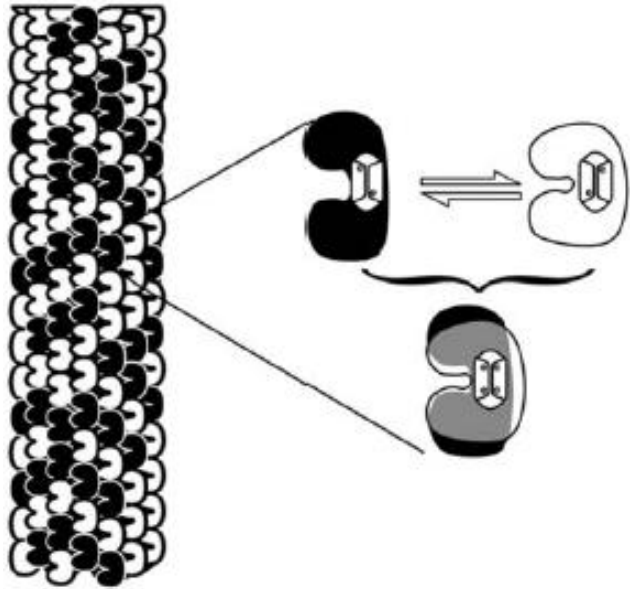


圖 8. 左：微管是由排成斜向六角型晶格、被稱作是土撥靈(tubulins)的次級單元組成一條圓柱狀聚合體。每一個土撥靈能存在於二個或更多個構象態，譬如，開（黑）或閉（白）。右：每一個土撥靈態，受到量子力學倫敦力的管控—土撥靈內非極性忌水區內之數百個電子之集體位置（在此，以二個電子代表）。因受量子力的控制，故提出土撥靈能以兩者構象之量子疊加存在（黑及白 = 灰）。在疊加分開中之實際位移僅需一個碳原子核的直徑，但在此，粗略地以蛋白質體積的十分之一來圖示之。

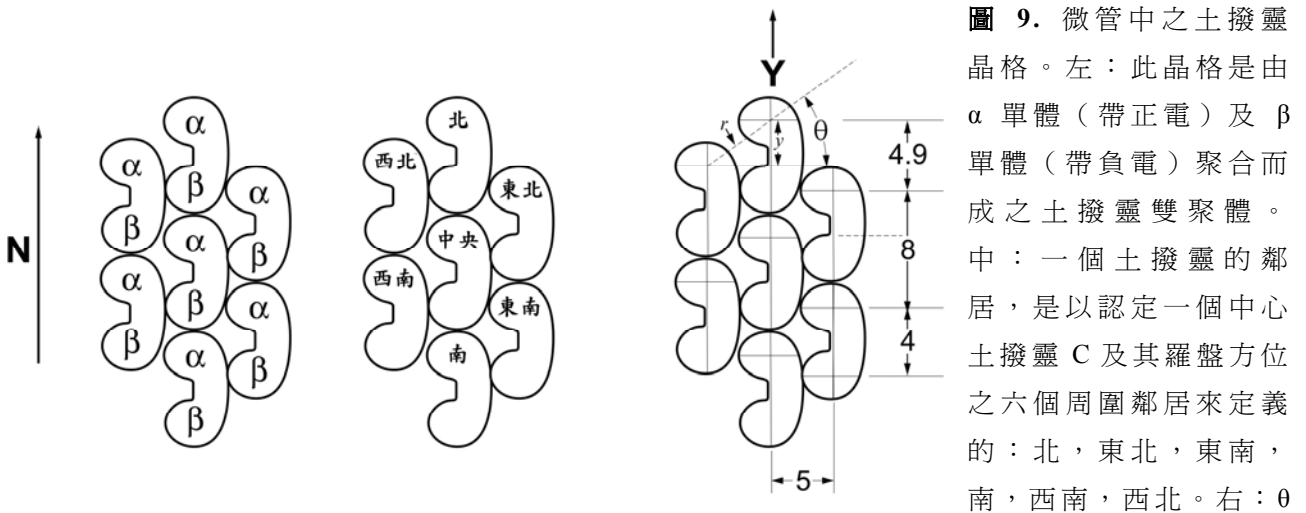


圖 9. 微管中之土撥靈晶格。左：此晶格是由  $\alpha$  單體（帶正電）及  $\beta$  單體（帶負電）聚合而成之土撥靈雙聚體。中：一個土撥靈的鄰居，是以認定一個中心土撥靈 C 及其羅盤方位之六個周圍鄰居來定義的：北，東北，東南，南，西南，西北。右： $\theta$

角的定義及其間隔（奈米單位）。 $y$  是任何兩個鄰居雙聚體之間的垂直距離， $r$  是它們之間的絕對距離。當  $y$  怎麼變，水準距離總是 5 奈米。圍繞圓柱體的曲率不計較，雙聚體間的偶極力對應於  $y/r^3$ 。引自 Rasmussen et al.。

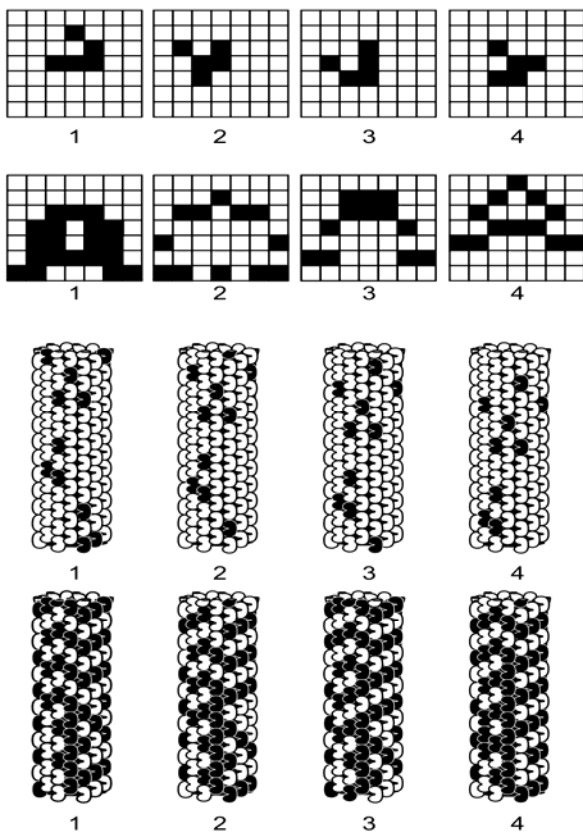


圖 10. 細胞自動器。上兩列：兩種不同次序的滑翔機，在生命棋盤中移動。第一列滑翔機向下移動；第二列滑翔機向上移動。下兩列：在微管自動器中，兩個不同順序的滑翔機正在移動，以及它們的不同模式正在演變。第三列，滑翔機通過微管向下移動；第四列，不同模式同時向上移動（黑行，第四行的原始絲）及向下移動（白行，第二列原始絲）。

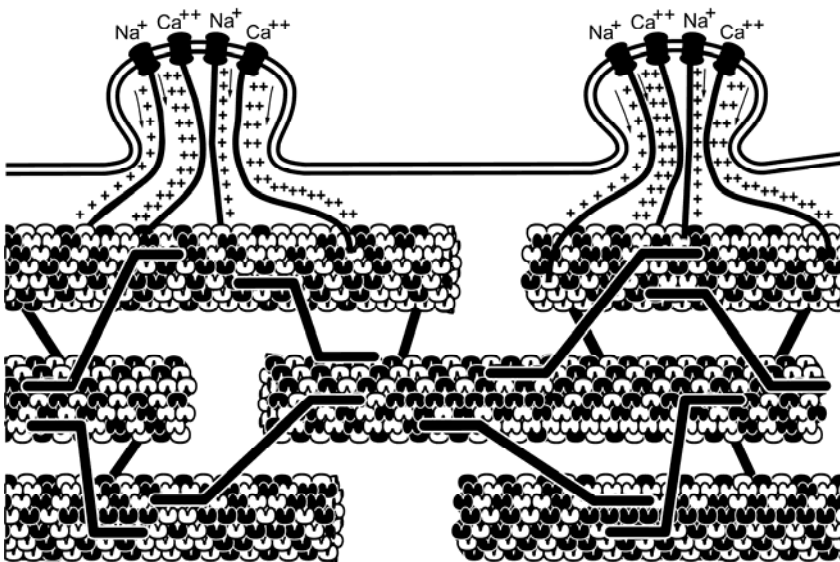


圖 11. 樹突內部示意圖，顯示微管自動器，因受微管關連蛋白的交互相連，具有獨特的混極化網路。譬如，樹突刺接受器的麩胺酸鹽之致活，會將鈉離子及鈣離子流通量，沿著肌動蛋白微絲運送，進入微管自動器（協調）。微管關連蛋白輸送資訊於微管間，形成一個自動器網路。微管自動器網路處理的輸出/結果，能起動軸突電鋒，調節突觸及深植腦內固化的記憶。（譯註：樹突的內部是在液膠形式中）

部是在液膠形式中)



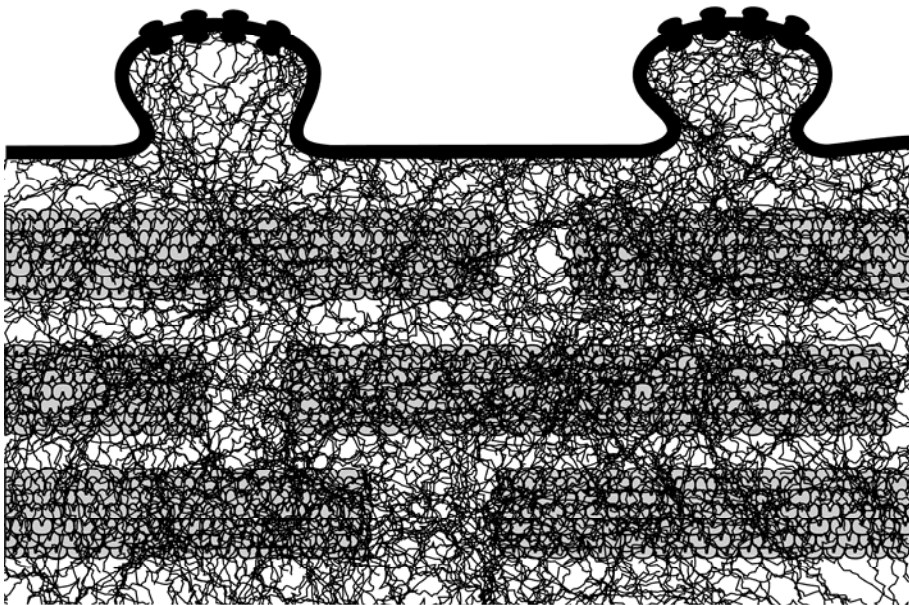


圖 12. 樹突內部的量子隔離相的示意圖。肌動蛋白已聚合成凝膠形式，以及微管關連蛋白已被抽離。正在防護及隔離中的微管，其土撥靈已演進到量子疊加。

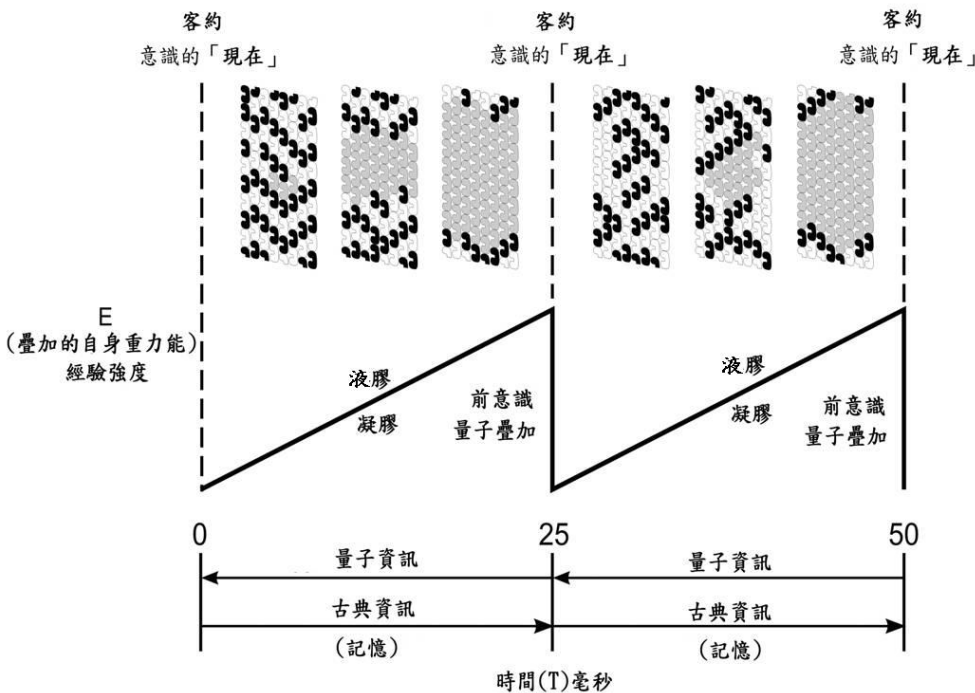


圖 13. 意識事件。上：微管自動器進入前意識的量子疊加相（灰色土撥靈），直至 25 毫秒後，客約閾值到達為止（此時包括，在數萬個由間隙接合交互相連的神經元內的  $10^{11}$  個土撥靈的疊加）。一個意識當下（現在）一發生，新的土撥靈的古典態就被選取，並開始新的排序。中：譬如，在凝膠相中正在增加的疊加與 25 毫秒後的閾值相遇。一個意識事件（當下）發生，並重複循環。下：在每一次客約事件之後，量子資訊被逆時送回去影響前事件。古典資訊（記憶）則順時向前走。

件。古典資訊（記憶）則順時向前走。

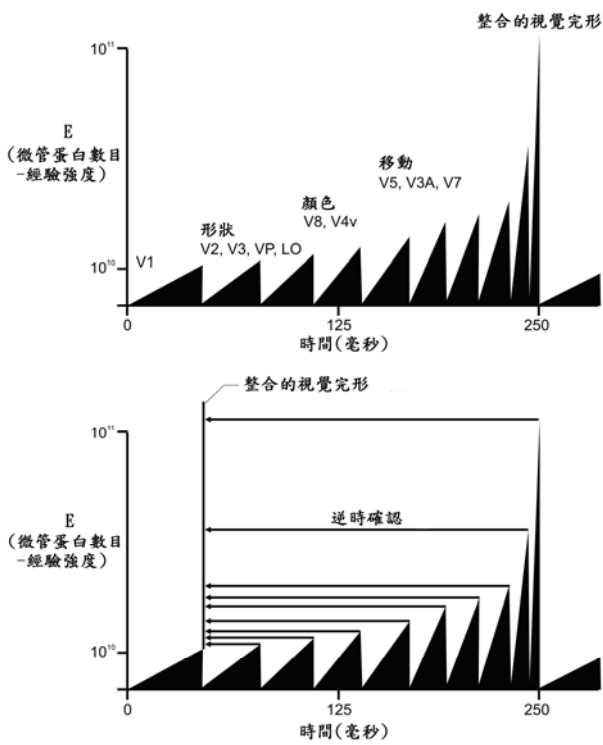


圖 14. 視覺完形。上：意識視覺成員的 25 毫秒 /40 赫茲的量子計算/意識事件呈一序列地在逐步增強中，例如，在到達 250~700 毫秒後，就攀上了最高峰的整合視覺完形。強度 (y 軸) 與  $E = \hbar/t$  代表的疊加量有關聯。各個事件的斜率/強度與到達客約的時間成反比。下：修正版，所有成員的無意識的量子資訊，逆時被確認。不同逆時所需的古典時間，與各個成員事件的斜率/強度有關聯。因此，一個整合視覺完形，是發生在視覺資訊處理的早期。(譯註： $E = \hbar/t$ ， $E =$  土撥靈疊加總質量的自身重力能， $\hbar =$  蒲朗克常數除以  $2\pi$ ， $t =$  達到客約所需的時間)