

人腦是量子電腦嗎？

文・圖／張慶瑞

記憶、意識、思想與靈魂，甚至大腦如何運作，至今仍是個謎。曾看過類似這樣對話，主人問AI機器人：『機器人不過是AI編碼與金屬材料組成，不可能有思想與靈魂』，但機器人卻反問主人，『人也不過是碳水化合物與DNA構成的，為什麼人深信有思想與靈魂？』

人腦是甚麼？^[1]

人類常用當代先進產品來類比人腦功能。古希臘視人腦為水鐘，由體液循環提供動力，工業革命後認為是機械力提供動力。現代將人腦視為電力驅動的超級電腦，而每個神經元就類似電晶體般儲存與運算。

A.人腦的記憶容量與運算速度：成年人大腦內有大約860億個神經元，神經元間有上百至上千個突觸（synapse）連結。每個突觸約儲存4.7位元^[2]，依此估計大腦約有1PB(10^{15})位元的記憶容量，小於現代電腦的記憶體容量，若加上硬碟則相差更遠。2013年日本與德國使用每秒 10^{16} 浮點運算的『京超級電腦』（K computer），由 1.73×10^9 個神經元及 1.04×10^{16} 個突觸連接的網絡用 40 分鐘模擬人腦 1 秒活動^[3]。依此估計，若使用現代exa scale($\sim 10^{18}$)超級電腦，至少也要24秒才能完成人腦1秒的工作，加上複雜思維絕不是以線性比例可以估計，因此推估人腦至少有zetta scale($\sim 10^{21}$)的浮點運算能力。

B.人腦的能量消耗與散熱效率：理想位元操作一次要消耗 2.87×10^{-21} 焦耳（ ~ 0.0175 eV）的能量。現在GPU H100約有800億個電晶體，而運算速度有4 petaflops(10^{15})，所以峰值操作時，依此估計H100至少每秒耗能 9×10^5 焦耳，也就是90萬瓦。一瓦是1焦耳/秒，但H100的散熱設計功率（thermal design power, TDP）卻只有約1000瓦。Nvidia的Blackwell B200 GPU擁有2,080億顆電晶體，AI運算效能可達20 petaflops，理論耗能峰值將高達千萬瓦（見表1）。GB200晶片由一顆Grace CPU以及兩顆B200 GPU組成，而GB200 NVL72則連接36個Grace CPU和72個Blackwell GPU，所需耗能量更將是驚人。AI資料中心則需要大量的GB200 NVL72機架，難怪最近新建的資料中心紛紛喊出需要核能。人腦消耗的功率僅約20瓦，以能量消耗而

言，人腦的節能至少是電腦的幾萬倍以上，這表示人腦絕對不可能是數位電腦。

大多數環境下，人的體溫都比環境溫度來得高，是個「熱源」。熱的傳遞方式有三種：傳導、對流和輻射，平常狀況下人體是靠輻射散發能量，效率約55W。特殊情形下，則會利用排汗與蒸發來散熱，相對濕度與人體與環境的溫度差決定排汗的散熱效率。目前晶片散熱模組也分為「氣冷」和「液冷」，其中「氣冷散熱」是用空氣對流進行散熱，而「液冷散熱」則是透過液體對流散熱，使晶片降溫。TDP決定晶片效率，目前氣冷散熱的極限約在500W，超過必須採用液冷散熱，未來或許仿效人類，在特殊狀況下使用排汗的蒸發熱來加速散熱會更有效率。

表1：照Landauer's principle，H100 FP64峰值運算理論上至少需耗能7800瓦，這還不包括傳輸的耗能，實際真實系統的耗能甚至可能高幾個數量級。目前系統的TDP遠小於峰值理論耗能，這顯示在TDP下，全部電晶體並未同時進行計算操作，而是在進行『以空間換取時間』的平行計算，而晶片中的大多數區域只是在平行運算、儲存與待機中。晶片的發展主要重點應該不是在微小化而是如何管理電晶體的分配，節能與散熱。

種 類	A:電晶體 數目	B:計算頻率	C:理論耗能峰值	D:報導耗 能值(TDP)	備 註
GA100, FP32	542 億	19.49 teraflops	3,031.7W	400W	D<<C,表示晶片內的 電晶體並未同時進行 計算。計算真正效率 受限於實際散熱上 限，計算瓶頸在散熱 設計而不在晶片數目 與計算頻率。
H100,FP8 Tensor Core	800億	3,958 teraflops	908,756.8W	700W	
H100, FP64	800億	34 teraflops	7,806.4W	700W	
B200	2,080億	20 petaflops	11,939,200W	1000W	
L40, FP32	763億	90.5 teraflops	19,817.8W	300W	
AMD M1300A, FP16	1460億	1.3 petaflops	544,726W	600W	
Landauer's principle : $E \geq k_b T \ln 2$ ，每位元耗能 2.87×10^{-21} 焦耳。耗能理論峰值等於 $A \times B \times E$ ，依此估計H100(Fp64) 耗能理論峰值= $8 \times 10^{10} \times 34 \times 10^{12} \times 2.87 \times 10^{-21} = 7.8 \times 10^3 \text{W}$ 遠大於TDP所容許。真實系統的 耗能每bit大約是 10^{-15} 焦耳，耗能將更遠遠超過TDP上限。					

C.長期記憶與短期記憶：記憶不僅是資料的存取，也是將過去活動、感受、經驗儲存在腦神經元內，是屬於心理學與腦科學的複雜跨域研究方向。學過電腦的人都知道，電腦有兩種儲存資料的地方，一種是RAM，一種是硬碟。RAM是資料暫存區，存取資料的速度快但價格貴。硬碟存取資料的速度慢，但價格較便宜，資料可以永久保存。人腦也一樣，也分成兩種記憶區，一種叫「工作記憶區」（Working Memory），另一種叫「永久記憶區」（Long Term Memory）。記憶形成機制的模型，目前區分為三個不同階段：編碼，儲存與檢索。但這只是正常使用的狀況，人腦常會出現超越正常記憶的功能，有點類似AI幻覺，例如潛意識與瀕死意識經驗都常被討論。

D.潛意識與瀕死經驗：潛意識是指意識之外的東西，人的思維像一座冰山，意識只是露出

水面的一小部分，絕大隱藏在水面下的泛稱為潛意識。潛意識範圍太廣，本文就略過不談。瀕死意識經驗與大腦活動密切關聯，也是科學家有興趣探討但卻一直不得其門而入的議題。1975年，雷蒙德·穆迪（Raymond Moody）的《死亡回憶（life after life）》，首次探討「瀕死經驗（Near-death experience，NDE）」。

我曾有過瀕死經驗，去美念書時，考取駕照後就買部二手Fiat 128來開，有天深夜時忘了甚麼事，突然要去學校。由Mesa apartment經過VA hospital 門前時，轉彎速度過快又急踩剎車，於是車鎖死打滑後，完全失控。可能因為過度緊張，人反而瞬間平靜下來，有種安詳平靜像要回家的舒適感覺。接著人生跑馬燈（life review）出現在我腦海內，過往人生展開重現在我眼前。更奇妙的是，感覺時間變慢了，不只是平靜而深入回顧一生，而且像個旁觀者般的誠實而好奇的瀏覽。意識恢復後，車翻個底朝天，由於沒有綁安全帶，人被拋離駕駛座而坐在旁邊客座上，更神奇的是，我的頭仍然朝天空。因為碰巧是在VA Hospital 前出車禍，等打

開車門出來時，醫生與護士已經在車門旁，等著接我入醫院。

這件事後，讓我困惑很久，但由於我身體移動沒有違反物理慣性定律，車子對我做了180度旋轉與平移，所以我仍然相信科學，而只是運氣好沒有受傷。但是人生跑馬燈與時間凝結的經歷則讓我非常困惑。我是無神論者，於是花了些時間企圖尋找答案。那時沒有Google或是ChatGPT，這件事讓我在圖書館足足待了三個月，找尋各種瀕死者的主觀敘述。經過許久的圖書館搜尋，瀕死經驗可分三大類：隧道盡頭的白光接引、靈魂出竅的神奇飄浮、人生經歷的影像「重播」（如圖1）。我當時想了很久，認為瀕死的意識經驗應該與大腦激烈活動有極大關係，我得出簡單猜想的推論，可能因為過度緊張，腎上腺素大量分泌引發多巴胺與腦啡跟著釋放，所以瞬間平靜下來，



圖1：根據研究，瀕死經驗可分三大類：隧道盡頭的白光接引、靈魂出竅飄浮起來、時間變慢與人生跑馬燈。人生跑馬燈類似《楞嚴經》八卷中的「一生善惡，俱時頓現」，往事歷歷在目。我個人體驗認為時間變慢與人生跑馬燈是由於遇到危險，腎上腺素大量分泌後引發多巴胺與腦啡釋放後的腦皮質激烈活動。另外兩種我沒有體驗，但我在讀過許多資料後，推測白光接引與靈魂出竅都是由於血中缺氧程度不同而引發不同腦部反應狀態。因為我雖然昏迷但並沒有缺氧所以並不會出現這兩種體驗。插圖為大同大學何明果校長繪製。

而且出現莫名的舒適與安全感。多巴胺與腦啡的釋放可能也引發大腦顳腦的皮質區相應變化，記憶資訊因而快速激發出人生跑馬燈現象，但是完全沒有道德與價值評斷的感覺。我當時以為這些都是瞬間發生，所以有時間變慢的感覺，但是有次餐會上與楊泮池聊到此事，他認為我有段不短時間應該是失去意識的。後來我仔細回想一下，當我打開車門出來時，醫生與護士已經在車門口，所以確實有段時間是昏迷的。現在也有科學家認為時間變慢是大腦為了求生而採取的策略，感知時間變慢是因為大腦進入高度緊張狀態，以便創造更多機會對危害做出最佳反應。

中國古代瀕死經驗傳說多是見到閻王或是過奈何橋與喝孟婆湯等敘述，與近代記載的瀕死經驗完全不同，看來是道德警示成分多於真實經驗記載。反而在《楞嚴經》八卷中的「一生善惡，俱時頓現」與人生跑馬燈類似敘述。瀕死經驗之父葛瑞森（Bruce Greyson）說瀕死經驗通常發生在接近死亡，或是處於情緒高度危險情況的人。也有專家認為瀕死經驗完全是當事者主觀心理感受，是一種事後回憶的自我心理安慰現象，而非大腦真實活動的客觀表現。最近許多研究顯示臨死前會有伽馬波（ γ wave）劇烈活動，這又顯示人生跑馬燈是腦部真實活動而不只是心理上的自我安慰現象。越來越多的學者認為瀕死經驗是種獨特精神狀態，可以為意識本質提供新穎見解。由於瀕死經驗敘述的共通性極高，因此應該不是少數人特例。但這只是大腦在死前激發出的無意識的影像和聲音，或是傳說中的意識與靈魂在脫離身體前的真實現象？這也引發另一個長久以來的爭論，靈魂是否存在與是否有重量？

E. 靈魂的重量：1901年麥克道格（Duncan MacDougall）測量彌留者的體重，病人斷氣時，彷彿有東西瞬間離開軀體。麥克道格測重量少了 21 公克，這就是有名的『靈魂重21公克』的傳說起源。後來麥克道格又做了五次實驗，發現每個人減少重量都不同，由10克變到31克。麥克道格後來還用狗做了 15 次同樣實驗，但奇怪的是狗死時完全沒有重量減輕。物理學家費雪（Len Fisher）在《靈魂有多重？（*Weighing the Soul*）》書中推測是因為人死後體溫下降，造成周遭空氣對流變化而影響天平的偏斜，而狗的皮毛可以隔熱，所以溫度沒有變化。但真正的關鍵是這些瀕死實驗的可重複性有多高？實證科學必須要有可以重複的實驗來支持。

因為伽馬波和應付危急狀況的意識感知有關，可以同時處理來自不同大腦區域的資訊，現在實驗知道瀕死時確實是伽馬波（ $\sim 30-100\text{Hz}$ ）主導。若如前估計人腦約等於zetta scale (10^{21})的浮點運算能力，瀕死時腦細胞被激化成峰值運算能力，而每位元需要消耗 2.87×10^{-21} 焦耳，以50Hz的伽馬波估計，每秒就需要至少耗能143.5焦耳，這值遠大於人在正常思考工作時的能耗20瓦。死亡昏迷時間如果超過60秒，則將消耗掉8.61千焦耳。葡萄糖每克含有15.8千焦耳，人腦在

彌留期間所需提供腦部活動1分鐘的能量約略多於0.5g葡萄糖，但加上循環與傳輸的能耗，則必將比理論值多，比照電子產品的實際耗能比例，則人死前的記憶能耗就有可能需要燃燒至少10g以上的葡萄糖。彌留時間增加時，消失質量會更多，再加上水份蒸發，或許就是靈魂重量的真實來源。

人腦可能是量子電腦？

由於數位電腦無論從運算，耗能與儲存容量，都無法解釋人腦功能，更不要說意識與靈魂了。簡單來說， $2+3=?$ 與 $98732+65378=?$ 對電腦都是同一種問題，但人無法以同樣速度回答以上問題。人明顯不是用數位方式處理，而是以樣型符號辨識方式進行。看到2，+，3三種符號後產生一個新符號5，這也類似於人工智慧的「道元」（token）識別方式^[4]。既然人腦不是數位電腦，那就有個有趣問題出現，人腦是量子電腦嗎？有許多人猜想人腦是量子機器，但大腦中發生量子計算的想法受到科學界的強烈批評，主要因為量子糾纏非常脆弱，只能在接近真空與絕對零度附近才有機會發生。

然而生物學界目前已有證據顯示鳥類的磁感應定位與遷徙，可能是量子效應。當鳥的眼細胞中的隱花色素的「自由基對」中糾纏電子自旋狀態在磁場下的改變時，可以『看到』磁場的強度和方向^[5]。甚至有人認為葉綠素的光合作用也是一種量子機制，否則能量傳播與生成不會如此有效率。以上的這些生物中的『開放量子系統』的案例，可能是微觀量子系統與宏觀古典系統的混成系統，但未來都需要更多的實驗與理論分析支持。量子與宏觀的混成系統如何互動？微觀與宏觀的邊界又在哪裡？都有待更多的研究才能了解。如果確認生物體的特殊現象是『開放量子系統』，並且能充分了解與掌控形成機制，則未來室溫的通用量子電腦就不只是夢想。

2022 年利用MRI測量腦脊液中質子的NMR訊號，發現類似心跳誘發電位（Heartbeat evoked potential, HEP）的腦部反應，因此推測心與腦之間也可能出現量子糾纏。如果人的腦神經元確實有量子糾纏能夠執行量子計算，這可能會徹底改變大腦的潛力，更可用於啟發如何製造腦基晶片（Brain-based Processor Unit, BPU）。隨著人工智慧將消耗越來越多的全球能源供應，模擬人腦的腦基晶片可能是真正解方。哲學家普特南（Putnam）在《Reason, Truth, and History》中早就提

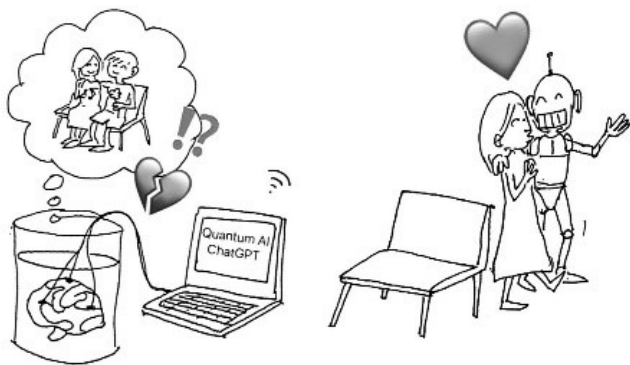
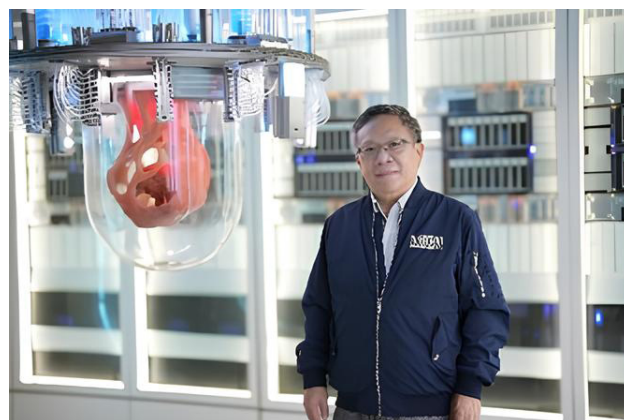


圖2：(A)桶中之腦能自行分辨出是在瓶中接受機器人傳來的資訊或是人腦的自由意識？腦中的影像是真實體驗或只是虛假資訊造成的喜悅？插圖為大同大學何明果校長繪製。



(B)本圖是連續劇量子預言（Q18）的場景，量子電腦中的量子位元就是由桶中之腦來執行操作。未來仿生的腦基晶片處理器（BPU），或許可以創造出節能又快速的量子與古典的混成型電腦。

出『桶中之腦（brain in a jar）』的想像實驗，如果人的意識體驗都是大腦所轉化的神經訊號，那是『顱中之腦』還是『桶中之腦』並無差異。但有腦機晶片後是否就會產出意識，仍然有待更多研究與了解。諾貝爾獎得主潘洛斯（Penrose）1994出版《意識的陰影》（*Shadows of the Mind*），大膽猜測人的腦微管（microtubule）可以產生量子糾纏效應，並據此說明自由意識的起源，但這種跳躍式猜想的基礎相當薄弱，已經有點近於科幻。

結論

大腦是量子電腦嗎？UCSB量子大腦計畫（QuBrain）^[6]現在專門研究人腦的量子機制。未來探討生命系統裡的量子現象會是重要的方向，生物體內的『開放量子系統』是否可以在多噪音的複雜環境下，仍維持量子狀態且不斷與周圍宏觀環境交換能量與資訊？『開放量子系統』中的量子糾纏是否存在，而使得各個分子緊密相連，甚至量子疊加造成多個分子形成更多單一個體所沒有的態，進而發生「超輻射（Superradiance）」^[7]的現象？超輻射就像交響樂，眾分子同時交互發光，產生的集體閃光遠比獨奏的變化更豐富，且衝擊更強烈。然而大腦在攝氏37度的潮濕環境下，量子現象是否存在，受到科學家強烈質疑，這疑問並非一個『開放量子系統』的籠統名詞就可以移除疑慮，而是需要更多的實驗證據來證明。生物的『開放量子系統』未來是否可接續薛丁格的『生命是甚麼（What Is Life?）』後，再造燦爛量子生命學續篇，甚至進一步解開「我思故我在」的哲學與意識神秘面紗，都有待未來科學家更努力的持續探索。世

界上最大的監獄就是人的大腦，但是意識真的走出這大腦的監獄後，人類是否就會更幸福？人腦是否是量子電腦仍然是個開放問題，需要更多科學研究，未來科技或將可能源自仿生，從而解開大自然奧秘。有詩為證曰：「名利化灰魂魄烝，重回今世馬追燈，白龍引入神仙界，瀕死陰陽君可曾。微觀糾纏彰聖境，乾坤萬象本天成，質能互換形千變，科技新篇源仿生。」

註：

- [1] 感謝心理系謝伯讓教授一些建議。
- [2] Nanoconnectomic upper bound on the variability of synaptic plasticity, Nanoscience, Nov 30, 2015
<https://doi.org/10.7554/eLife.10778>
- [3] Largest neuronal network simulation achieved using K computer, https://www.riken.jp/en/news-pubs/research_news/pr/2013/20130802_1/index.html
- [4] 「萬物皆道元」，老子早知道？張慶瑞，臺大校友雙月刊155期，九月號，2024。
- [5] 量子生物學一揭開生命的謎團，<https://qt.ntu.edu.tw/qoa/202304-qt-biology/>
- [6] Quantum Brain , Are we quantum computers, or merely clever robots? <https://www.kitp.ucsb.edu/mpaf/quantum-brain>
- [7] 相干激發後的原子或離子集合體的集體發射，<https://m.oe1.com/encyclopedia/7018118055077183488.html>



張慶瑞 小檔案

1979 年畢業於臺大物理學系，1988 在加州大學聖地牙哥分校取得物理博士學位，1989 年二月進入臺大服務，曾經擔任臺大副校長並代理校長。

張教授從事微磁學數值研究與自旋傳輸機制，已發表 280 篇以上專業論文並獲得 28 個專利。他是美國物理學會（APS）與國際工程學會（IEEE）會士。曾擔任亞洲磁性協會理事長，及臺灣磁性協會理事長暨臺灣物理學會理事長。近來曾主持 NTU-IBM 量子計畫，積極加速培養新興跨領域人才。近期推動量子計算相關研究，應用於新材料、新藥物合成，與財務金融領域，並創建臺灣量子電腦暨資訊科技協會，擔任理事長。於 2022 年擔任中原大學物理系講座教授並兼任校級量子資訊中心主任。