

由物理學看生命科學

王唯工

(本文承作者同意轉載自物理雙月刊)

去年秋天至今年春天，在台北物理所余海禮先生的大力促成之下，中研院舉辦了一系列的生命科學演講，請到從事生命科學之研究人員，由物理學的角度來看生命科學中之各種現象及其中可能隱藏的原理。

受邀的講員有周成功、張復、黃榮村、林誠謙、徐明達、陳義裕六位先生及筆者。他們分別在細胞如何通訊；生物信息之傳遞；生物圖型之形成；心靈、意識和認知等方面做了深入淺出的講解。

筆者受命為他們精彩的演講，做一個綜合性的整理，希望做出的這盤什錦是畫龍點睛。如果不幸是畫蛇添足，扭曲了各位講席的本意。還請諸位講席及各位讀者多多包涵。

生物信號傳遞：數位信號或數比信號

生物信號的傳遞其實與我們現代了解的信號是一樣的，有調幅的（數比），也有調頻的（數位）。以往大多集中在調幅的研究，甚至只觀察有或無（0或1），像激素、神經傳導物質等等。然而近年來，研究愈來愈精細，觀察也愈來愈有效，發現許多生物的控制機制是在極短的時間完成的，例如卵子的受精，當一個精子穿過了卵細胞，卵子立刻發生整體性的變化，一方面要阻止下一個精子的進入，同時要全面的動員，開始細

胞分裂。這個受精的信號必須在極短時間內傳遍整個卵細胞。另一方面，生物常常公用許多第二信差，例如CAMP或一些kinase，尤其是 Ca^{2+} 。這些分子在生物體或細胞中，幾乎無所不在。那麼要依靠信號來當廣泛的第二信差，豈不是容易出錯嗎？

其實調頻信號有不易出錯而又可快速傳遞的優點。讓我們由物理學的立場來探討調頻信號如何可能在生物系統中產生及應用。

調幅的信號在生物系統中，多靠擴散。當一種分子，分泌出以後，由其濃度梯度，經由分子運動，作近距離的傳送，其速度是很慢的，所以只適合近距離、慢速度的信號傳遞。

調幅信號系分子由中心點經過 t_1 時間到 X_1 再經過 t_2 時間到 X_2 ，慢慢地向外傳遞（見圖1）。分子濃度的梯度將分子慢慢散開而送出信號。

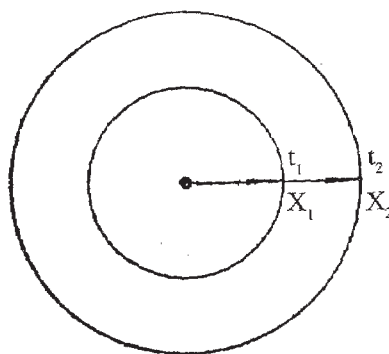


圖1.

中央研究院物理所教授

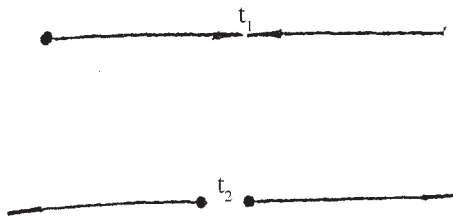


圖 2.

如以波的方式來傳送信號，則只要讓分子在附近產生來回的震盪就可（見圖2）。此震盪可以在廣大同時產生。事實上每個分子只需要做極短空間的來回運動即可達成。

目前的問題是如何在廣大的空間同時產生分子的來回震盪。其實只要有兩種會作用的分子，一邊擴散，一邊作用就可產生。這個問題各位可進一步參考生物圖案形成的理論。

這種震盪的信號分子（調頻信號）對第二信號特別有效，因為第二信號分子本來就是各處都有，只要另有一種快速擴散之分子與此信號分子作用，即可能產生震盪波，此快速擴散之分子不必只由一個點來源。而且，此調頻信號可忍受的雜訊比很高，不受第二信號到處都在的影響，可以快速而忠實地傳送信息。

以上的推論，提出了生物體調頻信號的可能產生機制，但是調幅信號終究是大多數目前已了解的生物信號的傳送方式。生物系統果真有調頻信號嗎？

在神經系統中，早就是調頻與調幅信號交錯使用的。我們的感覺器官中的接收器，大多使用調幅來處理信號，所產生的電位差與所受刺激成正比。在經過了一些中間的神經節，就將調幅的信號轉換為調頻的信號。再由神經索以有或無（1或0）之神經脈沖是0或1之信號，是沒有辦法調幅的；只能以每秒有幾次的方式；也就是以調頻的方式來傳送信號。其實這與第二信號分子有些共同

點。因為電訊號在生物體中也是無所不在的信號。如心電信號，肌電信號。所以神經信號必須不受這些干擾而能真實地傳送信號到中樞去。於是調頻信號就是最好的選擇。

因為是數位信號，就受到解析度的限制。8 bits的解析度，就只有 $2^8 \approx 256$ 級灰度。神經系統也一樣，因為神經脈沖最快只能有200Hz，因此只有0-200的範圍，這在感覺上就有些困難了。我們要感覺毫芒雕刻，或是一粒砂子（就算是0.1g的重量），也要感覺幾十千克的重量（其比例大約有 10^5 以上），那麼這 10^5 的灰度要如何分配呢？而聽覺、視覺更高達 10^{10} 或 10^{20} 的區間，又如何在這 10^5 之區間中分別呢？

生理的反應於是做了一次轉換的工作。這種轉換讓我們能適應各種環境，也就是不同強度的刺激，都能產生有效的反應。這個轉換公式如下： $\Delta I/I = C \Delta I$ 為能夠分辨的刺激， I 為刺激之強度， C 為常數。這個公式表示能夠分辨的刺激與刺激的強度成正比。如 $C=1/10$ 時，當我們拿10千克時，對重視之分辨能力為1千克了。如果寫成微分方程 $dX/I = C dy$ ，則由積分可得 $S = C \ln I$ （ S 是神經脈衝數，即可以分辨的強度， I 為刺激強度， S 是 I 之對數函數。這就是生理學上有名的Weber-Fechner定律。

這個現象中國人數千年前就已經用在診脈的手法上。醫生診脈時有浮、中、沈的取脈法。其實就是對振動大的脈（臟）用沉取。對振動小的脈（腑）用浮取。如此則不論是大振動或小振動都能得到一定的靈敏度。

什麼是定理定律？什麼是信息？

在學習物理學和化學時，老師總是教定理定律，可是到了生命科學，大部分的講座總是強調信息！這兩者之間有何異同？

定理定律多是用等號寫的，是把一個事實用不同的角度來告訴我們或是為一些名詞下定義，例如 $F=ma$ 是牛頓的運動定理，也

是質量的一種定義。而 $F=Gm_1m_2/r^2$ 是萬有引力定理，也可以是對質量的定義。

這兩個定義是一樣的嗎？這讓我們對質量、運動及萬有引力有了更深層的了解。

定理一般而言是對一個事實精確的描述。因此，如果發現了違反定理的事，就要改寫定理。在物理學的發展中，以機械能守恆到能量守恆再到質能守恆就是一個定理演化的例子。定理是對一個事實整體的描述。定理是很難發現的。

信息又是什麼呢？簡單地說，信息是對事物的部分的描述，或不完整的描述。信息可以有對的，也可以有錯的，這裡我們假定信息都是對的（其實對與錯也是很難判定的）。

所有的話都有信息，只是信息的含量不同。小時候學作文，無病呻吟的範本「二郎廟賦」：

二郎者，大郎之弟，三郎之兄，老郎之子也。廟前有樹，樹後有廟，廟內有鼓、鼓旁有鐘，鐘鼓齊鳴，叮叮噹噹……。

這段文字所敘述的，誰不知道。大郎是老大，二郎是老二，三郎是老三，每個廟都有樹，每個廟都有鐘與鼓……。所以是無病呻吟，因為其中沒有我們想知道的信息。

這段文字果真沒有信息嗎？其實也不盡然，如果要教一個電腦，則這段文字要電腦能「懂」，還得先輸入許多資料，即使這個電腦已有處理中文的能力。例如郎是男人的稱呼，男人是性別中的一種，人有男性、女性，性就是生殖上分工的不同……。恐怕一個郎字就得定義個七、八項才夠。只是因為這些知識我們都已耳熟能詳，所以認為是沒有信息。這也是發展人工智慧的困境，愈是普遍的字，教會電腦愈麻煩。所以有沒有信息要靠接受信息的對象而定。這個總結的整理，講的時候比較簡單，因為聽眾都聽了前六次的演講。現在要寫出來，希望沒有聽過前六次演講的讀者也能完全了解就比較困難。

信息像是瞎子摸象。並不是象的全貌，而是隨著所摸的部位及摸了多久而有不同的內涵。

舉一個簡單的例子來說，在教室裡有五十人，忽然傳來一陣臭氣，大家都掩鼻。於是有人說：「不是我」。這句話固然有信息，但是含量不大。也有人說：「由左邊來的」，這句話的信息就比較多些。當然信息最大的是確切地指出放屁的人，而且能證明。

大家常將內容完全不能確定的話叫「外交辭令」，它隨你怎麼解釋似乎都是對的。而這其中的原因就是因為沒有信息的關係。

信息是研究生命科學的特色。生命科學是太多變數的函數。每次的探討總是難窺全貌，只能摸到部分真實的資料或局部正確的描述。

信息理論簡介

簡單的介紹 Shannon 定律中的兩個要點：

(1) 信息的最大量。一串信號所能攜帶的信息最大量為每一個代碼當作一個信號，每 2 個代碼當作一個信號，每 3 個代碼當作一個信號之總和。

由信息之最大量可知，DNA 的信息含量比氨基酸要高得多了。應可能包含蛋白質如何折起來形成特殊之結構，也可能包含了蛋白質之間的相互作用，生長的順序，生理的結構……。

但是生物體又要遵守物理與化學的定理……。所以不是所有的蛋白質都能形成固定結構，進而有特定功能。也不是所有的物種，或個體都能在這世上存活。一個存在的東西，必須不違反基礎的物理及化學原理。

要了解 DNA 與生物體的關係，用字母與文章來作比較最容易了解。DNA 相當於字母，而氨基酸相當於字、句子是蛋白質、段落是器官與組織，而生物體就是文章了。五言絕句是一種生物，十四行詩又是另一種

生物。能在文獻中留下來的文章都是好的品種。雖然字母可用各種形式拼成字，但是字的總數比可能的拼法少得太多了。由字組成句子，……一路上來都會淘汰精選，所有能受時間考驗而不被淘汰的，就像現在生存著的生物一樣都是千錘百練的好文章。

(2) 信息 = 熵的下降。而熵的下降 → 自由度的下降？這裡好像有些矛盾。因為由此推論，我們知道的愈多，自由度愈少？

其實同樣的事實在神經生長時，或記憶形成時，也有類似的情形。神經連結時除了信號的匹配，一些導引分子的引領，很重要的機制就是細胞的死亡，凡是無法接在正確路線上的細胞，就會死掉。就拿打球做比喻，不會打球的人，對一個飛來的球有千百種想法，不知如何去打，也可能有千百種不同的打法。而最好的擊球卻只有一或二種；而一個訓練有素的球員，看到一個球飛來就只會有一或二種打法。因而其他千百種不精確的打法都將被淘汰掉了。在他的神經系統中，千百種不精確的傳遞途徑也就被消滅了。

這也就是信息與自由度的關係。我們有足夠的信息知道什麼是最好的，又有誰會去選不好的，因而就失去了自由度。

我們不去選擇不好的，不是因為我們沒有了選擇，而是因為我們知道那個是最好的（有此信息），所以選擇了最好的，因而就失去了選擇不好的權利（失去自由度）。

這種理論，在宗教上是常用的。耶穌給我們自由與選擇，我們因為覺悟了所以選擇信主耶穌而放棄自由。但此地不同於科學的是在「信」，因為是相信，所以是宗教。如果是證明，那就是科學。

由宗教的這個例子，可以看出來。為什麼很多事至今仍是相信而不是證明呢？

最簡單的答案是因為我們沒有足夠的信息，所以各種可能，無法分辨優勢，因而只能用猜的，或是相信的。例如買股票、簽六合彩，甚至吃什麼對自己身體好……。

很多的科學家相信科學是萬能的，認為經由演繹與歸納的手段，再加上物理學的觀察及實驗的方法，大千世界的所有信息，終將為我們掌握。一些高度複雜的系統也不例外。只要時間夠，總是能了解並預測的。

在20年前，筆者就在第四屆國際科學聯合會提出了在各科學中，一些共有的不可匹配的特性。學生物的都了解測不准原理。位置的測量與動量的測量是不能同時精確的。在政治學中，自由與平等也有相同的特性。過度的自由，例如傳統資本主義的社會，就成了人吃人的社會，平等是不能兼顧的。如過份追求平等，就像在理想的共產主義社會，大家一視同仁，聰明人就沒有一展長才的自由。如果你仔細思考一下，每個學科都有相似的特性。甚至人類最基本的思考法則——邏輯學也有「哥德」證明。認為任何一組公理，如果是完整的，就會互相矛盾。法律要分為刑法、民法、商事法……，就是證明。其實只要是法律就有漏洞。就拿小馬哥提出的反賄選的法律修正案為例。

以往的法律規定賄選罪，要拿了候選人的利益，而且因而投了該候選人的票才能成立，所以舉證困難。小馬哥就提出，只要拿了候選人的利益，就犯罪。(1) 如果因而投票給該候選人，犯賄選罪。(2) 如果不投票給候選人，則犯詐欺罪。

「如果我拿了很多候選人的錢，而選票上也都同時圈了他們的名字。請問小馬哥，我又犯了什麼罪？

人用來思考的規則就不是決定的，那麼當信息愈來愈多，人是否真的自由愈來愈少呢？

這些不可匹配的特性就成了由科學去了解問題時無法克服的洞。這個洞可以因為信息的充分而愈明顯，但是永遠無法補起來。在這個洞之中，我們得到是真正的自由。

中國文化之中對這種真自由有許多描述，例如：孔子說：「吾七十而隨心所欲不逾矩」、「道並行而不相悖」、「形而上者

謂之神，形而下者謂之器」。在現象上，這大千世界各種動植物品種一起存在，也是明證。由這種角度來看事物，則善惡是容易分辨的。增加這種真自由的是善，減少真自由的是惡。

人腦的複雜度

人的DNA與猩猩的DNA，有99%以上的相同，但人腦卻比黑猩猩的腦子功能大得多。

我們由腦子的結構也來探討一下這個問題。

我們的腦子約有150億的神經細胞，每個細胞約有600個連結（細胞數近年來已大致沒有大的爭議。連結數，隨著觀察的進步，20年來已由200「變」到600個）。

如以每個連結為一bit，則bit數為：

$$(150 \text{ 億})^{600} \times 2^{600}$$

普通人約使用10%的腦細胞，也就是：

$$(15 \text{ 億})^{600} \times 2^{600} \text{ bits}$$

如多了0.1%的細胞，或多了一個連結則變成：

$$(15.015 \text{ 億})^{600} \times 2^{600} \text{ 或 } (15 \text{ 億})^{601} \times 2^{601}$$

個bits所增加的bit數都是天文數字。

由此來分析由猩猩到人的演化，就不難了解了。其實人的聰明與平凡，也不同是0.0000...X的差別而已。

而人腦的複雜度更因為每個神經細胞也同時是cpu與記憶體，而變得更複雜。這些記憶體與cpu又會隨著時間而改變。

人腦與電腦都利用電來計算，可是人腦又加上了化學的「傳導物質」。神經細胞與神經細胞的溝通，可以通過電信號，但大多是通過分子的信號，而這些分子信號由電信號驅動。而分子信號又能驅動電信號（見圖3）。

這些由許多神經細胞構成的Loop，就是腦子運作的模式。（關於神經信號的各種知識請參看有關的生理學課本）。

我們的高興、悲傷、想到了、想不出

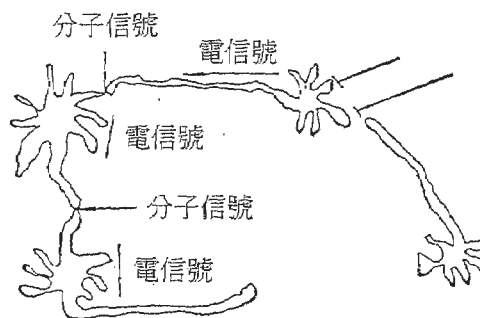


圖3.

來，考試卷會答不會答，都只不過是這些神經細胞上的電位而已！

每個人都一直在變，因為腦子的連結隨時在變。

腦子是很難研究的，除了前述的複雜之外，至少還有下列幾個原因，使腦子的研究更加困難。

(1) 腦子中隱藏的神經元太多。腦子中直接與輸入及輸出有關的神經元大約在 10^6 個，可是隱藏的與輸入及輸出有關的神經元卻可能有 10^{11} 個。經常分成5或6層以上（由大腦皮層判斷的）。目前我們neuro-net work所模擬的系統，只有一層隱藏的單元。總數不過幾十個吧了，就已經叫我們頭昏眼花。

(2) 腦子是三度空間的架構，外加時間的影響。一個神經細胞，因為沒有暫存器，電信號會隨時間而衰減，而又有空間的因素，衰減常數因位置而不同。所以當信號送達時，不僅 $A+B \neq B+A$ ，而A與B之間時間差也會影響 $A+B \rightarrow$ 的結果。

莊子中所提的朝三暮四，莊子是用來當作一個嘲笑猴子及愚笨的例子，其實也就是神經系統運作的特色。向皇上報告時先說好消息，再說壞消息可能得到嘉獎。可是如果先說壞消息，可能還沒說完就已遭殺頭了。

(3) 腦子中記憶體與cpu是合而為一的，並強烈地相互作用。電腦之記憶體也可與cpu相互作用，但腦子記憶中之信息要叫進

了cpu，才能工作。而人腦中之記憶體與cpu都是神經細胞，是合而為一的。電腦之cpu+記憶體約2度。人腦之cpu本身有3度空間加上時間共有四度。而記憶體也同樣有四度。記憶體與cpu又強烈交互作用，因而 $4 \times 4 = 16$ 度，人腦系以16度在運作。雖然電腦每個運作只需大約 10^{-12} 秒，而人腦每個運作需要大約 10^{-3} 秒。但是人腦的能力還是比電腦大得多了。

在認知研究方面的兩個問題

在認知的研究上，最常問的兩個問題是：

1. 什麼是我？什麼在有知覺？
2. 人能主宰自己的腦子嗎？

這兩個問題，都是非常困難的，也沒有標準答案。簡單地說，人的我識是經由知覺而來。因為有知覺，咬自己的手會痛，所以會知道手是自己的，同樣，火燒到手會燙，所以也知道手是自己的。隨著自我意識的擴大，自己的衣服、帳戶、甚至論文都有了「我的」、「不是我的」之分。英文中的我「I」都用大寫，特別重視。可是電腦會有自我意識嗎？多少小說，電影都在探討這個問題。

目前有些討論，在筆者看來是模糊了這個問題。許多探討都在大而複雜的系統中找「我」識。認為人腦因為非常複雜，所以還沒有形成「我」，一旦電腦更複雜了所以能夠形成「我」，電腦因為不夠複雜「我」就會跑出來。

其實小至一個單細胞生物，也能分別「我」與「非我」。一個變形蟲也會趨吉避凶，知道為自己打算。正如前面所說，我識是由知覺而來。如果沒有知覺，再複雜的系統也只是一部供人使用的機器。電腦如果加上了感應器，對內部、外部的環境有了認識，進而學會了如何加強自己的功能，保護自己不受損壞。當然他也就有能力分辨是自己的，或不是自己的。會替自己添加能量、增加功能和維修。你能說這沒有「我」識嗎？

人是天生就有了這些感覺器官，又有了神經系統，可以傳送信號。有肌肉及骨骼來執行趨吉避凶……。一個嬰兒還是要不斷的嘗試，學習才能逐漸發展出「我」識，更進而人我關係，及大我……。

當這個由感覺到反應的系統正常工作時，「我」在其中矣！而當這系統不能正常工作著「我」就退化就消失了。

人能主宰自己嗎？由前述的從知覺到反應的過程中，似乎一切都是直接的反應。很難把人對自己的控制，或人對腦子的控制插進來。早期的物理學家就反對人的自主意識，因為這違反了能量不滅定律。由感覺到反應一切都是物理及化學的現象，怎麼忽然會有另一個外插進來的控制因素呢？而這個因素在這環環相扣的物理化學現象中，如何無中生有呢？

如果我們了解了「我」的形成過程，又知道了腦子中隱藏的神經元是絕對的多數，就不難知道，所謂「我」控制自己的腦子，或是「我」做了決定。其實就是這些在過去受過訓練的隱藏的神經元，在隱藏中選擇其功能。因為在外面無法查覺。就以「我」來代表其功能。所以「我」可能就是這些隱藏神經元的功能的表現。而這些隱藏神經元需有感覺去刺激，並由運動等反應來表現，否則它是隱藏的，又有誰知道呢？

一個嘗試：什麼是更高層次的識（心靈）

佛家在討論「識」時，有意識、我識及阿賴耶識。是屬於高層次的識。低層次的是，眼、耳、鼻、舌、身，也就是所謂的感覺。佛學是高深的心理學。加上輪迴等不能證明的部分就成了佛教。

意識，由前所述，可說是腦中神經正常運作狀況，各電位都在正常地反應身體內部和外部的狀況。這種警覺可說是意識。

我識（末那識）：身體之感覺器官，神經與腦子緊密連結而產生的一體感的警覺。

這個警覺包括過去的經驗，藏在記憶體之中各種資訊，把每個個體都塑成不同的「我」。

阿賴耶識：是最難理解的，也是最奧妙的。佛家說，一切都是幻，一切隨心造。看起來好像是唯心論者。

最近因為電腦科技的發達，我們對各種影像及邏輯的形成，都有了更深的了解。

馮·紐曼 (Von Neuman) 先生，人稱電腦之父。因為他提出了由 0 與 1 的符號，從而不僅可以表達數字、運算、也可以表達抽象的邏輯。反觀人腦何嘗不是同樣。它也是由神經的連結與否，而構成 0 與 1 的符號。由這些符號經過特定規則的組合成了文字、語言，進而有了邏輯、思想……。

人在嬰兒期的事情，我們都記不得，到

了一歲、二歲才牙牙學語。等到學會了語言之後的事情才慢慢能記得。這與電腦是相似的，電腦如沒有 DOS 或 Window 的軟體，是不能工作的，這些工作的規則是後來輸入的。但是一旦進入 Window 中工作時，我們就不再思考原有的 0 與 1 是最基本的運作方式。

人又何嘗不一樣呢？我們活在自行開發的軟體之中，愛得要命，恨得要死。但是回到其根本，不過是神經中的一些 0 與 1，是電位差而已。只要你跳出了 Window，一切都變成沒有意義了。

我想以蘇東坡大師的一首詩，作為這篇文章的收尾：橫看成嶺側成峰，遠近高低都不同，不識廬山真面目，只緣身在此山中。