

心臟與大腦中的秩序與混沌

冪次律和自相似性一例

講者：陳志強 作者：楊穎任

陳志強為中研院物理所研究員，研究興趣為腦神經網絡、生物物理與非線性物理。

楊穎任為臺灣大學物理研究所碩士。

心臟和大脑在人類神經系統中扮演重要的腳色。近年來隨著科學家的努力以及電腦科學的發展，了解這樣複雜的系統已經不再是不可能的任務。我們對於大腦的好奇，甚至在近年致使世界各地紛紛開啟大型大腦研究計畫，如美國的 The Brain Initiative 和歐盟的 Human Brain Project。究竟我們的心臟和大脑是處在有序的狀態還是接近混沌的狀態？而科學家近年又對這兩個重要的複雜系統有甚麼了解呢？

神經系統是一個非線性的系統

一個滿足歐姆定律的電阻，其兩端的電位差與流過電阻的電流成比例。這樣的電阻屬於線性的系統，我們給這個電阻幾倍的電流，就會得到幾倍的電位差。但對於神經系統的作用單元神經元來說，事情卻並不單純。神經元的細胞膜內外具有的一個電位差，稱為膜電位（membrane potential）。當我們給神經元一個流入內部的電流，並量測膜電位如何隨時間改變時，會發現所得到的反應並不成比例，而是非線性的。

藉由標準神經元動力學的霍吉金 / 赫胥黎模型（Hodgkin-Huxley model），可以模擬出神經元的動態 [1]。如圖 1 所示，我們可以看到隨著給予的電流越來越大，膜電位的反應大小一開始與電流大小成比例。然而，當電流夠大時，膜電位卻有了快速的增減變化，稱為動作電位（action potential）。而一旦可以產生動作電位，反應的大小便不會隨

著電流的增強而大幅增加。這個非線性的特性使得神經元像電腦裡的運算位元一樣可以傳遞穩健的資訊，組成神經網絡，產生有用的功能，或藉由彼此交互作用產生複雜有趣的運算。

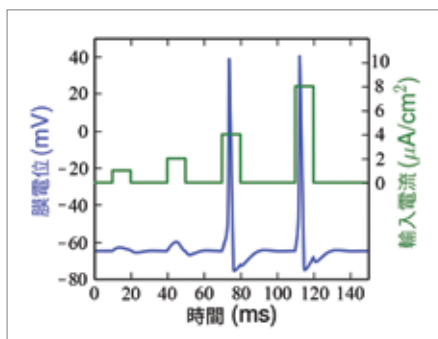
在本專題的其他文章中，我們看到簡單的非線性系統就可以產生十分複雜的動力學，甚至可以產成看似雜亂無章的混沌現象 [2]。而我們的心臟與大脑是由多個神經元（多個非線性單元）與其他輔助性的神經膠細胞所組成，神經元更可以組成複雜的網絡。藉由神經元間的連結與交互作用，心臟與大脑中的神經網絡，可以具有哪些單一神經元所沒有的複雜特性呢？什麼樣的神經網絡，可以使我們的心臟週期性搏動？使大脑具有做複雜運算的能力呢？

心臟中的可激發波

心臟的搏動靠的是各部位心肌細胞有序的收縮。因為心肌細胞間可以直接靠細胞之間間隙連結（gap junction）傳遞電流，產生動作電位、收縮並快速的刺激與它相鄰的心肌細胞。由於心肌細胞在產生動作電位後，會有幾百微秒（約 0.1 秒）時間很難再被激發，於是訊息傳遞產生方向性，並製造出激發波。就好像棒球比賽時，現場球迷靠起立

和坐下產生的波，每個人（心肌細胞）只需要看到隔壁鄰居站起來（產生動作電位）就被激發而跟著站起來，並在站起來後馬上坐下即可。

圖 1 不同強度電流（綠色）造成神經元膜電位不同強度的變化（藍色）。此圖是由經典神經元模型之「霍吉金 / 赫胥黎模型」模擬出來的。（楊穎任提供）



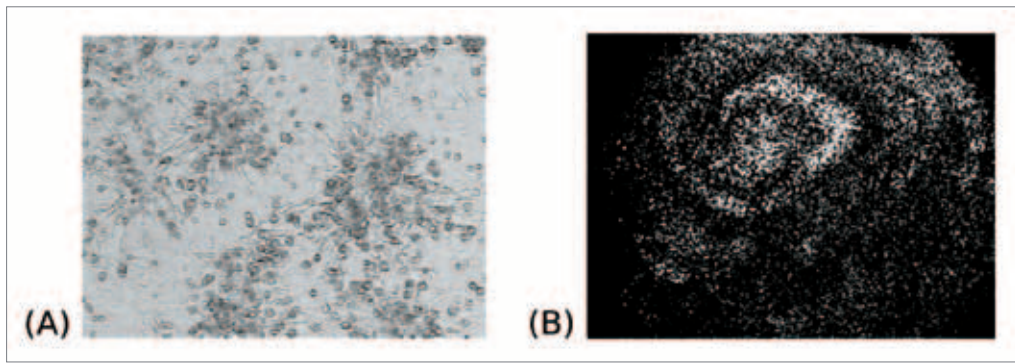


圖 2 (A) 高放大倍數下培養在培養基上的老鼠心肌細胞分佈情形。(B) 為低倍數下螺旋波的產生，亮點代表新肌細胞收縮。(中研院物理研究所陳志強實驗室提供)

事實上這種可激發波可以具有複雜的結構。中研院物理所陳志強的研究實驗室，可以讓老鼠的心臟在被取出體外幾小時後仍具有跳動的能力。如圖 2 (A) 所示，如果把這些心臟中的心肌細胞培養在培養基上，並放在高倍數顯微鏡下觀察，就可以看到心肌細胞自己聚在一起並產生搏動。

如果把鏡頭拉遠，在一個比較低倍率的攝影機下觀察，會發現系統產生前述的可激發波且具有螺旋向外傳遞的特性，是謂螺旋波(圖 2 (B))。螺旋波在其他非線性系統也被發現，譬如說某些生物系統 [4] 或一些特定化學反應，如貝魯索夫 / 扎鮑庭斯基反應 (Belousov-Zhabotinsky reaction) [5]。如果這種螺旋波發生在心臟，心率會比平常快上數倍，稱為心室心律過速 (ventricular tachycardia)，屬於心律不整的一種。如果不趕緊做適當處理，有可能造成螺旋波破碎成許多雜亂的小螺旋波(一種混沌的現象)。此時心臟將喪失血液幫浦的能力，稱為心室纖維顫動 (ventricular fibrillation) [6]。

心室心律過速或心室纖維顫動這種心律不整症狀其實是一種非線性動力學的現象，而非細胞的病變或感染。現今針對心律過速或心臟顫動的急救方法是使用自動體外心臟去顫器 (AED)，其原理是向心臟施加極強的電流，使每個心肌細胞近乎同時被激發並回復平靜，再配合 CPR 等急救技術使患者回復心跳。陳志強認為這種強行停止心肌細胞搏動的治療方法並不是最安全的方法，他的實驗室嘗試利用如 $T_1 T_2$ 回饋控制等方法控制心律不整的問題。我們期望在對於心臟中的螺旋波有更深入的了解

後，可以研究出針對心律不整有效的解決方法。

腦神經網絡的自發反應與自組織臨界性

相較於心臟，大腦是一個更為複雜的器官。科學家估計人類大腦有大約 10^{11} 個神經元，足足比世界人口 (約 10^{10} 人) 多了約 10 倍。這些神經元更可以藉突觸 (synapse) 相互連結與交互作用，大腦中的突觸多達 10^{15} 個 [7]，而且這些連結甚至可以隨著大腦的動態改變其強度。想要了解這麼龐大的動態神經網絡近乎不可能。然而科學家相信，不同的網絡與其動力學性質對應到不同的大腦功能或運算，想要了解大腦，勢必要了解神經網絡根據什麼樣的規則產生相應的運算與功能。一個簡化問題的辦法是先研究較小型的神經網絡，例如生長於培養基上的小型腦神經網絡或是動物的腦切片。實驗上，就可以利用具有多個電極的探針陣列紀錄，這種腦神經網絡的活動，嘗試找出規則，了解這樣的簡化系統。

這樣的小型腦神經網絡可以自發產生複雜而有趣的反應。藉由電極的偵測，可以量測到一次又一次像雪崩般的自發同步反應。這些自發反應的持續時間 T 以及一次自發反應中所有電極的反應總數 S ，有大有小，不盡相同。我們也可以得到對於持續了時間 T 的自發反應中，某個時刻 t 的反應電極數量 $s(t, T)$ 。有趣的是，實驗發現，這些自發反應大小與時間持續長度的機率分佈皆具

① 心肌細胞的動作電位與圖 1 所顯示的略有不同。動作電位的型態與時間尺度皆有所差別 [3]。

有幂次律 (power law) 的關係： $P(S) \sim S^{-\tau}$ 、 $P(T) \sim T^{-\alpha}$ ，其中 P 為機率密度函數。更令人驚奇的是，如果將瞬時反應電極數量 s 對相對時刻 t/T 作圖，並適度的標準化反應大小 $\tilde{s} = s/T^\gamma$ ，結果不同長短、不同大小的自發反應，在這樣的圖上竟然會重疊在一起 [8]！這告訴我們這個 \tilde{s} 與 t/T 的關係在不同尺度都適用，進一步告訴我們這些自發反應在時空上具有自相似性！

事實上，幂次律與這種自相似性有密切的關係，而且自相似性與幂次律在雪崩或地震的系統也常常被發現 [9]。由於在物理中，自相似性與幂次律是系統在相變時特有的性質，這種在動力系統中發現的現象被稱為「自組織臨界性」(self-organized criticality) [10]。在培養的腦神經網絡上以及老鼠皮層切片上都曾被發現 [8, 11]。值得注意的是，這種現象並不是單一神經元所具有的，而是從眾多神經元間彼此交互作用中出現的突現性質 (emergent property)。

然而大腦是否具有自組織臨界性，其實仍是一個有爭議的問題。如果真具有這樣的有趣現象，這個現象又代表甚麼意義？為什麼大腦要在這樣的環境下工作呢？相較於追求穩定與有序的心臟來說，我們可以預期腦神經網絡應具有更為複雜，甚至接近看似無序 (混沌) 的動力行為。畢竟一個腦神經網絡如果太過於同步或是有序，它可以傳遞與處理的資訊量勢必受到限制。研究者進一步指出，一個具有自組織臨界性的神經網絡，可以具有最大可反應刺激範圍、最大資訊保真度與最大資訊儲存量 [12]。至今，科學家仍致力於研究哪些腦神經網絡會具有或是需要具有此種自組織臨界性。可以確定的

是，我們正往深入了解大腦的路途上前進。

結語

心臟與大腦是由許多非線性的單元：神經元與其他輔助型細胞所組成。藉由這些神經元的交互作用，我們的心臟與大腦才具有所需的功能。心肌細胞間的交互作用產生可激發波，這些可激發波在心臟的正常運作上扮演重要的功用。藉由研究複雜的可激發波，科學家有望對於異常可激發波造成的心律不整提出根本性的治療之道。大腦中的神經網絡又比心臟更為複雜。藉由研究較為簡單的系統，例如培養基上的腦神經網絡或小鼠的腦切片，科學家可以更深入了解腦神經網絡的性質。研究這類神經系統不僅對醫學有直接的貢獻，甚至更可藉由了解大腦的運算原則，對電腦設計產生革命性的影響。



本文參考資料請見〈數理人文資料網頁〉<http://yaucenter.nctu.edu.tw/periodical.php>

本文出處

本文主要內容為陳志強 2016 年 5 月 28 日在臺灣大學科學教育發展中心「秩序與複雜的華爾滋」系列講座的演講稿，並由楊穎任改寫完成。

延伸閱讀

► 陳志強〈心臟與大腦中的有序和混沌〉(2016/5/28)，CASE 探索《秩序與複雜的華爾滋》系列講座第七講錄影：

<https://www.youtube.com/watch?v=uQChQ56Yusk>