

※「上帝、生命與宇宙：
在十字路口的當代科學與哲學」專輯※

生命科學的邏輯性定律加註系統 之必要性

蔡有光、盧清佑、鄭凱元*

邏輯屬於哲學領域的範疇，探討以語言推理的各種原則。隨著分子生物學的進步，也開啟了邏輯與科學相互結合的契機。然而，（古典）邏輯應用於（生命）科學時，並無法全盤套用原有的邏輯原則。為了讓生命科學的推理更加嚴謹，我們必須修正原有的邏輯規則，甚至加入新的邏輯規則。有條新規則強調：使用邏輯敘述的生命科學定律，必須註明該定律成立的生命系統條件。這不但凸顯生命科學定律受限於實驗系統的局限性，也合理解釋了前臨床階段細胞、動物實驗的結果，為何會與臨床階段人體試驗結果發生差異。而這群定律不像是物理、化學領域的眾多宇宙定律，他們並非絕對不變，而是會因時因地而變化，屬於相對性的科學定律。

一、現代生命科學必須使用邏輯做數據解讀

分子生物學是生命科學最新、最重要的進展。一九六〇年代的分子生物學，原在探討 DNA、RNA、蛋白質三類巨分子其序列資訊間的相互聯結。之後證明，生命多以 DNA 序列當作模板產生 RNA，依據 RNA 序列製造蛋白質。以生物功能的角度來看，蛋白質是真正具備化學、物理功能的生命分子，是負責生物功能的實務性物質；而 DNA 則是記載這些物理、化學功能的序列資訊，是負責生物功能長期持續傳遞的資訊性物質。介於 DNA 和蛋白質之間的 RNA，也是屬於資訊性物質，但是負責 DNA、蛋白質間短期性的序列資訊傳遞。總而言之，序列資訊的傳遞方

* 蔡有光，國立陽明大學生化暨分子生物研究所副教授。盧清佑，國立陽明大學醫學系。鄭凱元，國立陽明大學心智哲學研究所教授。

向，會從 DNA 流動到 RNA，再從 RNA 流動到蛋白質。另外，DNA 是遺傳物質，可以把序列資訊從親代生命系統傳送到子代生命系統。一九八〇年代後，分子生物學家應用 DNA-RNA-蛋白質的序列資訊流動方式，開發了新的科學技術，可以藉由改變 DNA、RNA 的序列資訊，精確地改變特定的蛋白質功能。

第一大類的分子生物學技術，是關閉蛋白質功能，發生從一到〇的變化，也就是讓蛋白質功能「消失」。在邏輯上，「消失」是定義必要條件的核心觀念：當 X「消失」保證 Y「消失」時，我們就定義：X 是 Y 的必要條件。若是使用分子生物學技術，使得蛋白質 X 消失，而生物活性 Y 隨之消失時，我們自然也推斷：蛋白質 X 是生物活性 Y 的必要條件。使用這類的實驗探討因果關係時，由於 X 是可操縱變數、是原因，Y 是回應變數、是結果，也可以改寫成 X 是 Y 的必要原因。這裏有個重要的古典邏輯互易規則 (reciprocity) 修正，當初「X 是 Y 的必要條件」就全等於「非 Y 是非 X 的必要條件」，在分子生物學的結論中，X、Y 位置若是互換，會有倒果為因的謬誤；因此，這個全等推導並不適用於探討因果關係的生命科學。

第二大類的方法，是打開蛋白質功能，使之發生從〇到一的變化，也就是讓蛋白質功能「出現」。在邏輯上，「出現」是定義充分條件的核心觀念：當 X「出現」保證 Y「出現」時，我們就定義：X 是 Y 的充分條件。若是使用特定分子生物學技術，使得蛋白質 X 出現，而生物活性 Y 隨之出現時，我們就可以推斷：蛋白質 X 是生物活性 Y 的充分條件。使用這類的技術探討因果關係時，X 是可操縱變數、是原因，Y 是回應變數、是結果，也就改寫成 X 是 Y 的充分原因。如同上面提到的邏輯修正，「X 是 Y 的充分條件」、「非 Y 是非 X 的充分條件」的互易全等關係，一樣不適用於探討因果關係的生命科學。

「必要」和「充分」源自二元性的概念，黑白分明、明確而沒有歧義，對於講究精確闡述實驗數據的科學家，當好好運用這類概念。目前生命科學領域，「必要」和「充分」的觀念很普遍嗎？以《自然》期刊的原始論文為例，二〇一八年共有八七八篇科學論文，其中二四〇篇論文使用了兩大類的分子生物學技術，但有趣的是，並沒有任何論文的本文使用「必要」(necessary) 這個單字，而使用「充分」(sufficient) 這個形容詞的論文僅有八篇。雖然兩個單字各有其同義詞，但「必要」、「充分」的使用率還是顯然偏低，似乎犯了「結論不到位」(understatement) 的謬誤；由於「必要」、「充分」邏輯概念的使用沒有共識，以至於大部分的研究

者由於不熟悉，因怕發生錯誤而避免使用這些字眼。另外，有些論文的确在題目中使用了這兩個單字，但檢查其實驗方法，並未用到「打開」或「關閉」類的生命科學實驗，這就犯了「言過其實」(overstatement)的謬誤。顯然也有少數的研究者，因誤解而錯用了「必要」、「充分」。過與不及，都是邏輯推理上的錯誤。綜言之，根據現代生命科學的數據特性，的確應該好好運用「必要」、「充分」的概念，才是到位確實的數據解讀。然而這類二元性邏輯推理的推廣，還需要生命科學界的共同努力。

二、生命科學的「必要」且「充分」兩難問題，以及「充要兩難」的解方

假設我們使用人體細胞 Z，針對它的生物活性 Y 進行測試，當使用分子生物學技術使蛋白質 X 消失，沒有蛋白質 X 的細胞 Z，生物活性 Y 的確跟著消失。因為蛋白質 X 消失，生物活性 Y 消失，我們可以下：

「蛋白質 X 是生物活性 Y 的必要條件」 (語句 1)

的結論。我們也可以從沒有蛋白質 X 的細胞 Z 當作起點做推論，這個細胞的生物活性 Y 是○，當讓蛋白質 X 表現在這個細胞時，生物活性真的隨著出現了；蛋白質 X 出現，生物活性 Y 出現，我們就下了：

「蛋白質 X 是生物活性 Y 的充分條件」 (語句 2)

的結論。按照這個範例做推論，根據任何一組這樣的「打開」、「關閉」的數據，我們就可以直接推論：

「蛋白質 X 對於生物活性 Y，既是必要條件，也是充分條件」 (語句 3)

的衍生結論。很顯然地，這是相當突兀、直觀上有問題的「充要兩難」。

這樣的兩難，也會發生在不是以細胞作為實驗本體的生命系統。例如：凡是健康的人都有一個健康的心臟，對有心臟衰竭的病人來講，心臟不健康，當然是不健康的病人。健康的心臟不見了，人體健康就不見了，我們就下：

「健康的心臟是人體健康的必要條件」 (語句 4)

的結論。假使醫師跟衰竭嚴重的病人決定，要用心臟移植的方式來恢復健康，在移除心臟、新心臟尚未植入的手術時期，是沒有心臟、不健康的人體；隨著植入健康的心臟，人體健康也隨之恢復；健康的心臟出現了，人體健康也跟著出現了，我們

就下：

「健康的心臟是人體健康的充分條件」 (語句 5)

的結論。接著，我們真的可以下：

「健康的心臟對於人體健康，既是必要條件，也是充分條件」 (語句 6)

的結論嗎？如果不行，為何會出現這樣的「充要兩難」呢？又如何防止「充要兩難」的發生呢？

我們可以加註配對實驗的對照組，看看是否能夠防止「充要兩難」的發生。配對實驗的對照組，也就是操縱變數發生變化的生命系統。以第一個例子來說，測得「蛋白質 X 是生物活性 Y 的必要條件」的實驗配對中，對照組是人體細胞 Z，蛋白質 X 會從這個細胞消失，加註生命系統後，就變成：

「對人體細胞 Z 來說，蛋白質 X 是生物活性 Y 的必要條件」 (語句 7)

的結論。而測得「蛋白質 X 是生物活性 Y 的充分條件」的實驗配對中，這時的對照組是沒有蛋白質 X 的人體細胞 Z，蛋白質 X 將會出現於這個細胞，註記對照組後，就變成：

「對沒有蛋白質 X 的人體細胞 Z 來說，X 是生物活性 Y 的充分條件」 (語句 8)

的結論。由於系統不同，「必要」和「充分」的結論句，就不能疊加，也就不會推導出「充要條件」的謬論。

同樣檢視第二個例子，由於必要條件的測試，使用的是健康的人體，推論就修改成：

「對健康的人來說，健康的心臟是人體健康的必要條件」 (語句 9)

的結論。相對地，測試充分條件的生命系統，沒有健康的心臟的人體，是配對中的對照組。因此，語句需要修正成：

「對沒有健康心臟的人來說，健康的心臟是人體健康的充分條件」 (語句 10)

的結論。同樣地，由於系統不同，「必要」和「充分」的結論句不能相互累加，也不會發生「充要條件」的結論。的確透過加註生命系統，可以避免結論語句「充要兩難」的發生，也突顯加註生命系統的必要性。因此，使用「必要」和「充分」觀念的結論語句，都應該要有兩部分，一是推論的語句，另一則是生命系統的描繪。在這個規則限制下，沒有註明生命系統的推論語句，都屬於不完整的判讀結果，無

法判斷他們的真偽。這也是生命科學的推理中，必須增加的新的邏輯規則。

三、加註生命系統的必要性，於生命科學、生物科技發展的影響

如果生命科學定律真的與生命系統有關，又會怎麼影響這類研究推論的延伸呢？由於分子生物學是以基因—蛋白質當成實驗操作的基本單位，大部分的生命科學研究者相信，研究特定蛋白質的功能，可以由序列的類似性，延伸至功能的類似。以研究人體蛋白質為例，由於在倫理上不允許直接拿人體做基因改造實驗，因此使用各類動物、甚至細菌當作取代性的系統，是領域內普遍認可的研究模式。透過分子生物學的操作，改變取代系統中的蛋白質功能，觀察其生物活性變化，以間接方式探索這個蛋白質在人體的功能。以小鼠為例，基因體學的進步，讓我們觀察到小鼠與人類基因體間的架構相似性。因此，在目前的新藥開發流程中，小鼠實驗是絕對不可或缺的臨床前試驗。此外，小鼠修改其基因體的生物實驗技術已十分成熟，目前已成功製造出數以千計的人造小鼠，可以精確關閉、打開選定的基因，探討這些基因在特定細胞、組織、器官的功能。根據人類疾病所建立的小鼠動物系統陸續被開發出來，也被視為發展生醫科技最重要的工具。根據「加註生命系統的必要性」的規則，目前的確可以精確地寫出以下的科學定律：

「對小鼠來說，器官 Z1 中的蛋白質 X1 是生物活性 Y 的必要條件」
(語句 11)

「對小鼠來說，器官 Z2 中的蛋白質 X2 是生物活性 Y2 的充分條件」
(語句 12)

簡言之，累積數十年的科學發展，小鼠儼然已成為前臨床研究中最重要取代性系統。

然而，我們可以用取代系統的結論，直接由語句十一推導：

「對人體來說，器官 Z1 中的蛋白質 X1 是生物活性 Y 的必要條件」
(語句 13)

或是由語句十二直接推演出：

「對人體來說，器官 Z2 中的蛋白質 X2 是生物活性 Y2 的充分條件」
(語句 14)

的衍伸定律嗎？如果來自人類的兩種不同細胞，特定蛋白質的邏輯性因果關係都可以大相逕庭，我們又如何保證這個蛋白質邏輯角色於跨物種時的完全等同呢？目前透過各個物種基因體、蛋白質體計畫，已有許多資料庫記載蛋白質、RNA 在各物種的不同組織、器官分布的方式。若是拿蛋白質、RNA 分布當作指標，檢查每個蛋白質、RNA 在不同物種的使用方式，總是會出現令人驚訝的發現：即使序列幾乎相同的同一蛋白質，在人類和小鼠的分布，可以截然不同。這些資料說明著：人體、小鼠可以透過組合不同的蛋白質零件，產生類似生理功能的器官。換言之，如果 X1 只會出現在小鼠的 Z1 器官，而不會出現在人類的 Z1 器官的機率極大，從語句十一到十三的投射就可能發生錯誤。同樣地，語句十二到十四的投射，也未必可以永遠成立。而特定蛋白質、RNA 因器官組織不同，也足以證明人類與小鼠使用的方式並不全然相同。當蛋白質的使用方式並不全然相同，科學定律跨物種的衍伸推論，就很容易發生錯誤。使用蛋白質的差異現象，也許可以合理解釋前臨床、臨床試驗結果間的不一致。這也說明，取代性的動物系統對人體疾病研究的應用價值，必須謹慎評估。

四、加註生命系統的必要性，證明生命科學的邏輯性 定律並非宇宙定律

自然科學中的物理學、化學領域，其定律通常被視為宇宙定律，不會因時、因地而改變。生命科學領域的一般共識，目前被認為只有「規則」，但沒有所謂的「定律」。例如：在維基百科中以人名作為名稱的定律中，多半是物理、化學定律，並沒有任何生物學定律。真的是這樣嗎？究竟什麼是科學定律呢？根據英文字典，透過重複實驗或持續觀察，對自然現象的描述或預測，一般就稱為科學定律。所謂的自然現象，可以大至天文、地理，可以小至構成原子核的微粒子行為等。分子生物學研究，的確是為了探討自然現象所做的實驗，而實驗結果也具有可重複性，還能嚴謹地使用邏輯原則做語句陳述。因此，生命科學實驗所導出的語句，如語句七至十，應該可以滿足科學定律的條件。

也有科學哲學家認為，科學定律通常用來釐清自然界中的因果關係。而分子生物學透過打開或關閉蛋白質，探討生物活性是否隨之開、關，以充分、必要的基本推理架構做蛋白質是否是生物活性間的充分原因、必要原因的推導。並且這類型

的因果關係，不會因為使用分子生物學技術的差異，發生任何改變；因為這樣不變性、一致性的邏輯性語句，的確是釐清生命系統中因果關係的科學定律。

然而，生命科學的邏輯性定律是宇宙定律嗎？前面為解決「充要兩難」所推導的加註生命系統的必要性，已經明確指出這類科學定律的限制性。證明一生命系統的必要性因果關係的實驗，把實驗組、對照組的方向反轉，對另一系統卻是確立充分性的因果關係。所以，同一套數據所建構的因果定律，會隨生命系統不同而截然不同。另外，我們之前提出充分、必要的驗證結果組合，可得到四類因果關係¹，依據「加註生命系統的必要性」的規則，若是要證明某蛋白質對於生物活性的充分、必要性的因果關係，都得把同一個生命系統當作對照組，才能探討這類的因果關係。而這類的因果關係，因加註了生命系統，也限制了這類關係的應用範圍。隨著探討系統而改變，絕非宇宙定律的特徵。

拿地球生命的演化史來印證，也可以得到相同的結論。地球約在四十五億年前形成，第一個單細胞生物約在四十億年前出現，能進行光合作用的生物約在三十五億年前出現，有細胞核的真核生物約在二十億年前發生，多細胞生物則約在十五億年前出現，植物與動物則出現在七、八億年前。每跨入新的生命演化階段，就代表新階段的生命科學定律出現了。光合作用的出現代表生命系統中光能轉變成化學能的定律出現了；細胞核的出現，代表細胞內區隔轉錄、轉譯的定律出現了；多細胞生物的出現，就是以細胞作為分工合作的基本單位的科學定律出現了；植物、動物的出現，代表細胞分化所得的特定器官，成為分工合作的基本單位的科學定律出現了。根據這樣的時間軸，不同的座標值上所對應的生命科學定律的數目，就會大不相同。因時間而有所變動，當然不能稱為宇宙定律。

另外，試想在宇宙的另一個角落，有一個行星具備地球孕育生命的類似條件，由於宇宙中的距離遙遠，其生命演化與地球當毫無關聯，其演化的速度與地球就很難完全同步。即使演化的順序與地球相仿，但於時間軸的某個定點，其演化的進程與我們的地球極可能有巨大差異；演化階段的位置不同，該星球就具備不同的生命科學定律。如此說來，生命科學的定律會因探討的行星不同，而出現顯著差異。因地點不同而有差異，當然也不能稱為宇宙定律。這些辯證，都在證明生命科學的邏

¹ 黃彥鈞、蔡有光：〈從分子生物學的定義談起〉，《科學月刊》第44卷第2期（2013年），頁119-125。

輯性定律，由於時間、地點不同而有所更動，當然不會是宇宙定律。