
複雜系統、突現及其對科學教育的啟示

湯偉君* 邱美虹

國立臺灣師範大學 科學教育研究所

前言

近二十年來，一種新的認識論已逐漸站穩其地位，也就是複雜系統觀（complex system）。和數百年來主導西方科學思想的化約論不同，複雜系統觀以整體論的角度，試圖彌補化約論「見樹不見林」的缺點(Bosomaier & Green, 1998)，學者甚至稱此為典範轉移，一場新的科學革命(Gleick, 1987; Goldstone, 2006; Jacobson & Wilensky, 2006; Resnick & Wilensky, 1998; 武杰 & 李宏芳, 2000)。面對這一個新的科學解釋觀的建立、一種新的認識世界方式誕生，身為科學與素樸知識中介者的科學教師，不可不知這種認識論的存在。限於篇幅，筆者在本文主要將討論複雜系統為何？簡介其特性，其次討論複雜系統的重要性，尤其是對科學教育參與者而言。

壹、什麼是複雜系統

複雜系統普遍存在於真實世界中，他可能是人為營造出來的或是自然存在的，諸如水族箱、森林(Hmelo-Silver & Pfeffer, 2004; Lesh, 2006)；可用數學定律（規則）表達或難以用定律表達，如鳥成人字飛行或細胞的運作(Lesh, 2006)；有些複雜系統甚至超越複雜本身，而另涉及自我調節或

持續適應，如生物的演化，可另稱為複雜適應性系統(Lesh, 2006; Waldrop, 1992; 范冬萍, 2005; 范冬萍 & 張華夏, 2005)。它不一定是自然現象，也可能是一種社會現象，因人群互動而產生，例如股市、交通擁擠狀況。

複雜系統所探討的標的，其實早就是人們研究的對象，生態系和演化論的討論早在一百多年前就開始。但受限於傳統科學認識論的侷限，從化約論的觀點難以掌握全貌。隨著混沌理論在 70 年代的出現和逐漸成形(Gleick, 1987)，電腦運算能力的增長，及許多原被稱為異端學者的努力(Gleick, 1987; Jacobson & Wilensky, 2006; Waldrop, 1992)，複雜系統觀得以出現，人們更加掌握了世界運作的另一種本質，大家因此能瞭解到自然現象的形成，不能完全用化約、線性的角度來解釋和預測，甚至也部分解答了一些自然現象之謎，如鳥群為何能成人字飛行，白蟻為何能堆出可通風的蟻窩，原始生命如何誕生。

要賞析這種新認識論的優美，並承認其效力，首先得先瞭解複雜系統到底具有什麼特性？他和非複雜（簡單）系統又有何差異？由於他是一門新興學門，目前為止對於他的侷限和範圍並沒有一致共識(Waldrop, 1992)。不過整理諸家之說後，大體而言，學者認為複雜系統可能具備如下列小標題的特性。

* 為本文通訊作者

一、多層次

這個特性其實不只有複雜系統才有，但要瞭解複雜系統，必須先知道其有此一特性。所謂多層次，即是以至少兩個層次的角度去考量一個現象，例如現象和造成現象的組成分子之間便至少有兩個層次。以染料在清水中的擴散現象為例(Chi, 2005)，我們所見「染料由濃度高往濃度低的移動」，是一種可觀察到的現象，這是一個層次，而這個現象是因為染料分子和水分子的碰撞所產生，水分子和染料分子是另一個層次。一般常將此兩層次區分成，不可觀察到的微觀和可觀察的巨觀層次，但多層次的意涵超越於此，例如生物體的組成和運作，可以從器官、組織、細胞、基因等不同層次的面相來討論。筆者認為所謂層次不是由可觀察與否來界定，而應是由底下要提到的「上向因果關係」來界定。

二、上向因果關係

上向因果關係指的是低層次性質對高層次性質的因果作用(范冬萍, 2005)。高層次由低層次組合而產生，他不能脫離低層次事物而獨立存在，例如沒有心靈是不包含生命的，也沒有生命是不包含物質的(范冬萍 & 張華夏, 2005)。沒有細胞這個低層次成分，就不可能有高層次的人體運作。同時，要討論人體現象時，可以從細胞層次，也可以從器官層次或是基因層次來看(Craver, 2002)，因此人體這個系統，屬於多層次，而每個低階層次對於人體的

運作，都有一套因果相關，也就是可從任一低階層次對人體運作現象提出解釋。因此所謂的「多層次」不可僅以「可觀察與否」來簡單劃分，而應是一種含括關係，即系統裏有次系統，次系統裏有次次系統等等。依論述點的不同，可以有不同層級的基本單位，在解釋現象時所用的基本單位，可以稱為成分或作用體 (components, constituents, parts, agents)，例如白蟻是白蟻築巢這個現象的作用體(Chi, 2005; Chi *et al.*, 1994; Glennan, 1996; Machamer, 2004; Waldrop, 1992)。

非複雜系統當然也有上向因果關係，例如滑輪組是由許多小單位：滑輪所組成，但滑輪組明顯的不被認為是一個複雜系統。(Hmelo-Silver & Azevedo, 2006)指出這是因為它沒有異質性的成分、階層數太少。但筆者覺得不然，諸如鳥群成人字飛行或白蟻築巢，現象的組成成分也都同質(都是鳥或都是白蟻)，且涉及的階層數都只有兩層(蟻和巢，鳥和人字)，但這兩種現象，在討論複雜系統的文獻中，一再被引用。因此要被稱為複雜系統，必須考量成分、階層之外的其他特性，例如突現、不可預測、動態性等。

三、突現，不可預測、不可化約、非線性

照字面解釋，突現就是突然出現，不被預期的出現，無法有「先見之明」的預測，也就是現象無法由低層次的成分行為所推論出來。在認識論的觀點上，這稱為

整體論。通常對突現或是整體論最通俗的表達為：「整體不等於部分之和」、「整體的行為並非個別組成分子所具有」(范冬萍 & 張華夏, 2005)。凡是複雜系統必具備此一特性，也就是「只有在整體 (system-as-a-whole) 運作的情境下才有意義」的特性(Lesh, 2006)。也就是「高層次的事物整體所具有，而其組成成分所不具有，且事先不能由此加以預測的特性。」例如生命之於生命的物理化學特性，心靈之於神經細胞的生理活動，就是一種突現(謝愛華, 2003)。

突現具有不可化約、不可預測的意涵，前面所提到的滑輪組的運作，其整體的效能可以從單一滑輪的功能來加總，因此它不具突現特性，其整體的表現可以化約到個別滑輪的行為，可以從個別滑輪去預測整體滑輪組的作為，所以不能算是一個複雜系統。化約論的觀點是，所有的現象都可由其個別組成份子的行為來解釋，因此生命可以化約到基因，基因可以化約到 DNA，DNA 可用物理化學來解釋。傳統科學解釋觀重視化約，企圖用粒子（物質科學）的角度來解釋萬事萬物，進而藉著操弄單一成分，便可預測某種現象會出現。但是生命現象的發生，真的可以用原子的角度來解釋嗎？人類的創造力可以化約到神經細胞的行為嗎？其間自然有著很大的，我們想不透的隔閡，這也就是突現。

利用非線性的物理觀，可以部分表達突現的特性：難以預測和化約，因此突現性和非線性可以並談。非線性指的是兩個

量之間不成正比關係，在直角座標中成曲線。線性系統是可解的，而非線性系統是不可解的(武杰 & 李宏芳, 2000)。利用非線性的成因，我們可以探討為何會有突現現象？為何它難以預測？關鍵在於多重因子的共同影響以及因子之間的交互作用。

四、多重因果

在一個複雜系統裡，層級和成分都很多，因此系統的行為，受到諸多因子的影響，而且主要是受到成分交互作用的影響。隨著涉及面的增加，其計算量將以失控方式遞增，造成非線性、難以預測的變化(Bosomaier & Green, 1998)。因此，任何系統行為，其實很難歸因到某一因子（某一成分或某兩成分間的交互作用）。這也是從事社會科學或教育研究的重大困難，太難掌握所有控制變因。問題便在於因為我們所研究的對象，便是屬於複雜系統。

五、成分互動（關係）的重要性大於成分本身

Waldrop(1992)指出生命的本質在於分子的組織和互動，不在於分子。也就是當許多小分子彼此相互作用之後，讓整體突現出新的獨特的特質。例如鳥成人字飛行，關鍵不在於鳥各自的飛行技術，而在於每隻鳥與其他鳥的互動。Waldrop 也引述人造生命研究者對鳥成人字飛行之模擬，發現鳥只要遵循三個簡單的規則，而每一規則都只在規範單一作用體應該如何和他作用體互動，如此，電腦程式繪出的

鳥群們，便可同樣排出人字形。

其他互動比分子個別行為重要的例子，如演化，所謂「適者生存」，某一生物或構造適應與否，並非全看生物或構造的本質和功能，而是要看生物與環境的互動。例如有著三公尺大角的愛爾蘭鹿為何在一萬年前絕種？這是因為原本大角公鹿有著生殖優勢，受到雌鹿青睞，導致鹿群往大角方向演化，但隨著冰河時期結束，氣候溫暖，森林長出，大角的愛爾蘭鹿在森林中行動不便，因此絕種 (Gould, 1992)。無論大角或小角，作用體的個別特性都不足決定自己的生存優勢，關鍵在於與其他作用體（環境因子或同群鹿其他個體）的互動。

或許從上方愛爾蘭鹿的例子，我們會有個想法：環境主導生物的演化方向。這想法基本沒錯，也是達爾文演化論的核心概念，環境作為一個選擇者，挑選了某些個體（適應環境者）。但實則在一個生態系中，生物不是純粹被動地被選擇，生物也可能去改造環境（例如水獺築水壩），環境的被改造，進一步影響生存在這環境的生物，如魚種、植物種等，魚種的改變又可能影響到水獺的食性、、、。作用體之間的互動是交互的、動態的、不停止的。

六、動態的，不停止的

動態的、不停止的，也是複雜系統的重要特性之一，此特性來自於作用體之間的交互作用。Lesh (2006)指出為何滑輪組不能算是複雜系統，乃因其不像生物（living entities）而是似機器的

（machine-like），也就是說它不會去主動作用在別人身上，只會被運作，而且其現象終會停止。複雜系統則不然，演化是不會終止的，現在的生命和十億年前截然不同，環境亦是如此；昆蟲與植物的共同演化、掠食者與獵物數量之間的波動平衡，也彰顯了現象的產生來自於永無休止的互動。

七、下向因果關係

這也是複雜系統的重要特性，但並非所有突現現象都有此一特性。所謂下向因果，指的是高層次具有低層次所不具有的性質，並對其組成部分（低層次）有支配作用。例如昆蟲的下顎來自於蛋白質結構，後者又來自於基因（上向因果關係），但下顎與環境互動的效應，會影響基因的延續機率(范冬萍, 2005)。高層的下顎和環境會影響低層的基因，使之在下一代中存續或絕滅，這便是一種下向因果。又譬如股市的升降，是來自各散客大戶各自的互通暗盤消息、閱讀金融資訊後，買或賣股票而造成股市市場的波動（上向因果），而市場的降或跌也會影響作用體（股民）們的買賣行為（下向因果）。下向因果的存在，闡明了複雜系統內的交互作用，不僅限於同一階層內成分的互動，實際上也有跨階層的互動。跨階層的互動，使得系統最後的輸出難以被精確預測，例如有誰能精確預測股市未來一年的走向呢？

但某些複雜系統裡，並沒有下向因果，例如當鳥已成人羣飛行之後，並不會

影響個別鳥的飛行行爲。又譬如認知心理學家 Chi (2005)常引用的擴散例子，擴散現象並不會影響個別粒子的碰撞行爲，每個粒子的行爲還是遵守我們所謂的布朗運動。

八、無中央控制

誠如前面所學的鳥飛行的例子，便是一個無中央控制的系統運作，系統的運作純粹來自個別分子的互動及特定的互動規則。同樣的擴散現象的產生也是如此，在系統當中，並沒有主導者來影響整個系統的主要行爲。Resnick (1996) 指出這是複雜系統的重要特性，而一般人卻總是有「必有一個中央控制的想法」，例如 Resnick & Wilensky (1998) 發現學童對於白蟻築巢的現象，總是認定是由蟻后或蟻王發出命令，而由工蟻所完成任務，這就是標準的中央控制系統觀。金庸「射雕英雄傳」提到蒙古人之所以驍勇善戰，戰無不捷，起因在部隊編制有萬夫長、千夫長、百夫長、十夫長等，作戰時「如肩使臂，如臂使掌」，這種作戰方式便是標準的中央控制，眾人都以為他好。但實則如此嗎？會不會有非中央控制的優秀戰術作為呢？筆者非軍事專家，在此沒有解答，只是提出一個複雜系統跨學科應用的議題。

九、自我組織

神創論者之所以仍未被完全放棄，除了有宗教因素外，也是因為以往的演化論難以解釋諸如人體或是眼睛這麼複雜的系

統，如何可以靠著演化而發展出來。另外，不需提及如此複雜構造，單就蛋白質這種大分子，如何能從數十億年前一大鍋胺基酸湯組合出來，就難以解釋，因為這過程違反了熱力學第二定律，單靠機率來解釋也難以做到，常聽到的形容為，胺基酸自發成為蛋白質，此機率就像是暴風吹動廣場上的零件，把它們吹成一架波音 747 客機。但藉由複雜系統的「自組織」特性，複雜構造或是生命起源的難題，便可能得到答案。

自組織是部分複雜系統才具有的特性，成分會自動組織成一個體系，如勞力需求、商品、服務自動組織成市場結構，而這個體系的存在強化了每一成分的連結和存續。又如古代之分子如何聚成蛋白質，是因為分子 A 可催化分子 B，B 可催化分子 C...分子 X 可催化分子 A，造成反應網中所有分子會穩定的比網外分子快速成長，稱為一個自動催化組 (Waldrop, 1992)。因此，自組織可以解釋，為何靠著演化可以產生人類這麼複雜的生物，或穩定的迴路的產生不像打牌時拿到清一色那樣難得。因為穩定的迴路（自動催化組）能自我強化，所以會比游離份子有更高的生存優勢，因此自組織可以擺脫熱力學第二定律的扯後腿。更進而許多小迴路自組織成能自我強化的大迴路，如此複雜的生物體和原始生命的確有可能誕生和演化出來。

自我組織要突破熱力學第二定律的反組織傾向，就必須具備有自我強化的能

力，使得組織能強過個別分子，而這個自我強化能力之一，便是正回饋（positive feedback）。

十、正回饋或報酬遞增

正回饋的例子在自然界可能造成兩大結果，一個是形成自我強化組，例如前面提到的化學反應連鎖催化組。另一個效應則是搭配系統內各成分的互動，使得初始狀況的小變動，可以導致之後系統的巨大改變，即眾所周知的蝴蝶效應(Gleick, 1987)。在一個自組織系統裡，有可能會受到不起眼的關鍵分子的影響，而大幅改變了原有的組織型態。例如汽車取代馬車之後，所引起的人類經濟體系轉變，包括行業的興衰、能源需求、運輸能力等都發生了重大改變(Waldrop, 1992)。

十一、適應性

如果每一個組織都有自我強化而穩定存在的能力，而初始狀態可以導致重大改變，這樣應該會使得各種型態的組織充斥於現今的地球中，可是事實又不然，例如絕大多數動物都是兩側對稱、兩個眼睛。為何某些組織型態又會強過其他型態而取代而存在呢？以生物演化的例子，為何人類不是四隻眼睛？或長得像珊瑚呢？以今日的眼光看來，在奧陶紀生物大爆發的時代裡，生物的相貌是古里古怪、千變萬化的(Sterelny & Griffiths, 1999)，為何這些組織系統不復存在？又如以汽車為運輸工具的社會組織為何取代以馬車為主的社

會組織？紙幣的商業行為為何能取代以物易物的交易行為？這些都得用適應性來解釋。也就是所有的組織型態都要經過環境的挑選，才可能存在。

經過自組織形成的迴路（系統）若恰通過環境考驗，則會存在。成為下一個更高階複雜系統的模組之一，此時可構成所謂的複雜適應性系統，這種系統包括腦、免疫系統、生態、細胞、政黨等。因此，以演化的例子來看，適應性系統不是按部就班的在可能性的廣大空間中搜尋，而是重組基本單位，採取大躍進式的突破。演化也不是隨機的突變和天擇，也是突現與自我組織的過程。

貳、複雜系統觀的重要性及其對科學教育的啟示

複雜系統觀的出現，對於純科學界或是科學教育界，可能具有以下幾點啟示：建立新的科學認識論、方法論；可整合日益分化的各科學學科；可能解答部分概念學習困難之因。

複雜系統觀改變人們認識世界的方式，人們不再把是自然界看成和諧與簡單的統一，而是復活了秩序與混沌之間古老的和諧蘊涵(武杰 & 李宏芳, 2000)。以笛卡爾哲學為基礎的近現代科學以及文化傳統強調的是從上到下的還原、分析方法，例如把社會現象化約到個人心理，把心理化約到神經生理，把神經生理化約到細胞，把細胞化約到生物化學，進而化約到原子科學。傳統觀點也強調有一個中心控

制單元的結構，是機械的觀點，有完美的秩序，其變化是可確定的。複雜性代表的是另一種看待世界的哲學觀，強調整體性的觀點，由下而上的集合和突現，是機率性的變化，沒有中央控制，其結果的產生是機率式的，僅靠分解還原無法理解釋物的全部實質的(Bosomaier & Green, 1998; Resnick & Wilensky, 1998; Waldrop, 1992; 李夏 & 戴汝為, 1999)。這是一個新的認識論建立，當我們要去解釋魚成群游動、鳥成人字飛行、擴散，甚至演化、創造力等現象時，採用複雜系統的突現觀，會更能賞析所謂的「現象真正成因」。正如Waldrop (1992)所指出，科學或許不只是追求預測和控制自然現象，而是要包括賞析和詮釋現象。

複雜系統的研究導致一新的整合性理論和方法學架構的建立，配合電腦科技的進步，使得研究者得以探討真實世界裡系統的多重因果，彌補了原本過度簡化且忽略了系統(systematically ignored)的傳統科學化約論之不足，也挑戰了化約論的地位(Jacobson & Wilensky, 2006)。當然，化約論有助於釐清參與系統的成分、層級，因此仍有其重要地位(Bosomaier & Green, 1998)，不可能被複雜系統觀所全然取代，因此把複雜系統觀的出現，說成是認識論的革命，可能有些太過，不過突現與整體觀念的進入，將使我們對自然現象的成因，更多了一些瞭解。

複雜系統的引入，由於其具跨學科特質，因此也可以扭轉科學學門日益分化的

趨勢(Goldstone, 2006; Hmelo-Silver & Azevedo, 2006)。例如自然生態系和經濟體系，文化的誕生與生物的演化，都可以從複雜系統觀的角度，找到許多共通點。複雜系統觀也對原有的純科學理論造成許多衝擊，例如演化論領域，以往強調「競爭和選擇」，但複雜系統自組織的概念，提昇了互依(interdependence)和共同演化(coevolution)的地位，使之與前者相提並論(Jacobson & Wilensky, 2006)。

在教育上，雖然演化論、平衡、恆定性的議題，已出現在科學課程中，但複雜系統的核心概念卻未提及(Jacobson & Wilensky, 2006)，甚至只著重在記憶、理解系統內成分的名詞(Hmelo-Silver & Azevedo, 2006)，而演化卻是在複雜系統當中運作的，換言之，現今的科學課程有必要重新思考這些議題的教學方式，而能用更符合系統本質的複雜系統觀，來感知現象變化的成因。並非說化約論的解釋法完全不對，但只偏重分析，卻可能造成知識零碎，見樹不見林，由整體論角度出發的複雜系統觀，正足以彌補。

另外，許多學習困難，正是因為現象具有複雜系統的特性，如突現、非線性、無中央控制、不可預測、自組織、階層性，而這正與學生的直覺相左，學生會用直接、線性、有中央控制、可預測的角度來認識現象的起因。這使得他們難以理解諸如生態系中族群的變異現象，分子碰撞導致的整體統計上的形貌，也因此造成許多迷思概念(Chi, 2005; Chi & Roscoe, 2002;

Jacobson & Wilensky, 2006; Penner, 2000, 2001; Resnick & Wilensky, 1998)。的確，專家和生手在理解自然現象上，的確有著差異，不僅是知識量和知識結構，感知自然世界的方式也有著差異。如對水族箱或人類呼吸系統這類複雜系統的感知，生手主要以分解性的「結構」角度去理解系統，而專家卻比較能以整體性的「行為」、「功能」的角度來理解之 (Hmelo-Silver & Pfeffer, 2004; Liu *et al.*, 2005)。

因為真實世界中普遍存在複雜系統所造成的現象，科學界裡，以複雜系統為主的解釋模式也已常見(Penner, 2001)。現今科學課程中，也有諸多涉及複雜系統特性的概念，這些現象或概念無法由化約論的角度，得到完整的解釋，必須藉助複雜系統觀。另外，學生素樸的想法會造成理解自然現象的許多困難。若學生能得到複雜系統的想法，他們不僅降低迷思概念的固著、發展出對科學整合性的賞析，也可以遷移其所學至其他不熟悉的領域 (Goldstone, 2006; Goldstone & Sakamoto, 2003)。

基於以上所提的認識論變遷、課程的改革需求、學生固有的化約想法會影響科學學習、複雜科學有整合學科的特質等。因此我國科學教育界有必要審思現今的課程內容，增納瞭解複雜系統的學習目標。事實上，這十年，的確有一些西方教育學者、學習心理學者注意到此一問題，而嘗試在課堂上教導這些觀念，但本文因篇幅所限，暫不討論這些教學法。

參、結論

本文分析整理出複雜系統的特性和意義，及其對科學教育界可能有的啓示，有些出現在國內中小學科學課本的概念或現象，其實隱含著複雜系統運作的本質，科學教師在和學生討論這些自然現象時，除了傳統式的分析、化約，也可引入複雜系統的整合性想法，或許能讓學生對真實世界的「真實」運作，有全新而更清晰的視野。複雜系統觀在二十世紀末出現，至今已二十多年歷史，筆者卻訝異國內科教育界鮮少討論此一議題，期盼本文能幫助科學教師瞭解複雜系統，也能引起國內科教育研究界重視複雜系統的趨勢。

參考文獻

- 李夏、戴汝為(1999)：突現--系統研究的新觀念。控制與決策，14(2)，97-102。
- 武杰、李宏芳(2000)：非線性是自然界本質嗎？。科學技術與辯證法，17(2)，1-5。
- 范冬萍(2005)：論突現性質的下向因果關係。哲學研究，7，108-114。
- 范冬萍、張華夏(2005)：突現理論：歷史與前沿。自然辯證法研究，21(6)，5-10。
- 謝愛華(2003)：突現論：科學與哲學的新挑戰。自然辯證法研究，19(9)，84-87。
- Bosomaier, T., & Green, D. (1998). *Patterns in the sand: Computers, complexity and life*. Australia: Allen & Unwin Pty Ltd.
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The journal of the Learning Science*, 14(2), 161-199.
- Chi, M. T. H., & Roscoe, R. D. (2002). The processes and challenges of

- conceptual change. In M. Limon & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change. Issues in theory and practice* (pp. 3-27). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Chi, M. T. H., Slotta, J. D., & de Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction, 4*, 27-43.
- Craver, C. F. (2002). Interlevel experiment and multilevel mechanisms in the neuroscience of memory. *Philosophy of Science, 69*(3), S83-S97.
- Gleick, J. (1987). *Chaos*: Penguin Books.
- Glennan, S. (1996). Mechanisms and the nature of causation. *Erkenntnis, 44*(1), 49-71.
- Goldstone, R. L. (2006). The complex systems see-change in education. *The journal of the Learning Science, 15*(1), 35-43.
- Goldstone, R. L., & Sakamoto, Y. (2003). The transfer of abstract principles governing complex adaptive systems. *Cognitive Psychology, 46*, 414-466.
- Gould, S. J. (1992). *Ever since darwin: Reflections on natural history*. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- Hmelo-Silver, C. E., & Azevedo, R. (2006). Understanding complex systems: Some core challenges. *The journal of the Learning Science, 15*(1), 53-61.
- Hmelo-Silver, C. E., & Pfeffer, M. G. (2004). Comparing expert and novice understanding of a complex system from the perspective of structures, behaviors, and functions. *Cognitive Science, 28*, 127-138.
- Jacobson, M. J., & Wilensky, U. (2006). Complexity systems in education: Scientific and education importance and implication for the learning science. *the journal of the Learning Science, 15*(1), 11-34.
- Lesh, R. (2006). Modeling students modeling abilities: The teaching and learning of complex systems in education. *The journal of the Learning Science, 15*(1), 45-52.
- Liu, L., Marathe, S., & Hmelo-Silver, C. E. (2005). *Function before form: An alternative approach to learning about complex system*. Paper presented at the the Annual Meeting of the American Educational Research Association, Motereal QC.
- Machamer, P. (2004). Activities and causation: The metaphysics and epistemology of mechanisms. *International Studies in the Philosophy of Science, 18*(1), 27-39.
- Penner, D. E. (2000). Explaining systems: Investigating middle school students' understanding of emergent phenomenon. *Journal of Research in Science Teaching, 37*(8), 784-806.
- Penner, D. E. (2001). Complexity, emergence, and synthetic models in science education. In K. Crowley, C. D. Schunn & T. Okada (Eds.), *Designing for science: Implication from everyday, classroom, and professional settings*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Resnick, M. (1996). Beyond the centralized mindset. *Journal of the Learning Science, 5*, 1-22.
- Resnick, M., & Wilensky, U. (1998). Diving into complexity: Developing probabilistic decentralized thinking through role-playing activities. *The Journal of the Learning science, 7*(2), 153-172.
- Sterelny, K., & Griffiths, P. E. (1999). *Sex and death: An introduction to philosophy of biology*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Waldrop, M. M. (1992). *Complexity - the emerging science at the edge of order and chaos*. New York: Touchstone.