

# 物理系學生的電子波動概念發展

柯俊良

國立高雄師範大學 科學教育研究所

## 摘要

本研究著重於不同階段物理系學生對「電子在原子結構中」的概念發展，研究目的為：(1)描繪並記載學生在不同概念階段的模式；(2)找出核心概念與這些概念之間的關聯性；(3)探討學生發展心智模型過程中的主要影響因子。研究對象為物理系大一、大三、碩士班與博士班的學生，研究工具包含問卷、概念卡與面談。本研究結果發現：(1)學生的經驗（感官知覺或直覺知識）為學生發展電子波動心智模型過程中的重要基礎；(2)某些學生的心智模型中同時存在古典物理和量子物理的概念，而學生並未知覺這些概念之間的衝突；(3)較有經驗的學生也同時持有古典物理和量子物理的概念，但他們能在不同的情境下，轉換於古典物理與量子物理的知識系統之間來解釋現象。

關鍵詞：迷失概念、概念改變、物理教育

## 壹、研究目的

在剛開始學習量子力學(QM)時，學生經常能以其數學能力通過考試，但卻未能真正了解數學方程式中的一些概念。有關於過度重視解題能力，在研究文獻中已有研究者以「意義學習」(meaningful learning)或「專家與生手對於物理概念了解的不同」做為其標題(Reif & Allen, 1992; Reif, 1995)。由於對量子物理概念缺乏清楚的了解，導致許多學生不適當的使用量子物理的概念。例如，一些研究顯示，學生經常混合古典力學(CM)和量子力學的概念來解釋量子物理的現象(e.g. Fischler & Lichtfeldt, 1992)。Ireson (2000)也提

醒大家注意這類混合概念結構的問題，他提出證據來說明學生可能有「衝突的量子觀」(conflicting quantum thinking)或「衝突的力學觀」(conflicting mechanistic thinking)。Gilbert 和 Boulter (1995)將這類混合概念定義為混成模型(hybrid models)，即無法完全符合古典力學的概念或量子力學的概念情境。

為了解決以上的問題，Fischler 和 Lichtfeldt (1992)設計了一個量子力學的教學模式，其中刪去所有對古典力學概念的類比。相反的，Budde, Niedderer, Scott & Leach (2002)設計了另一個量子力學的教學模式，其中融合了古典力學的概念並提出一個新的液狀電子(Electronium)的原子模型，Budde 等人

主張液狀電子較能呼應學生的先前概念如電子軌道(orbit)或電子殼層(shell)等概念。問題是，以上的這兩種量子力學的教學模式—避免古典力學或融合古典力學的概念，均以實驗證明其為成功的教學模式。因此，一個更詳細的研究來探討學生如何發展量子物理概念似乎還是需要的。本研究將檢視：(1)古典物理概念在量子物理教學中所扮演的角色—正面，負面或中性；(2)學生的舊／古典力學的知識系統如何演進到新／量子力學的知識系統。本研究的結果將提供建議給新的量子力學教學模式設計。

## 貳、理論背景

在 1980 年代的物理教育中，學生的先前知識有時被形容為先前概念(preconceptions)，迷失概念(misconceptions)，或另有概念(alternative conceptions) (Minstrell, 1982; Clement, 1983; McCloskey, 1983)。近來，在物理學中先前知識也被稱為直覺知識(intuitive knowledge/p-prims) (Smith, diSessa & Roschelle, 1993; diSessa, 1993)，因為這些知識活躍於學生的概念中，並且很難被改變。為了解決在學習物理時學生的先前概念所引起的問題，教學設計者可能採用演化的(evolutionary)或革命的(revolutionary)概念改變主張。採用革命觀的學者們沿用 Kuhn (1970)科學革命的認識論和 Lakatos (1978)研究綱領中的理論改變。在此架構下，先前概念被視為發展新概念的障礙，概念改變的過程被視為如同理論改變，稱為弱重建(weak reconstruction) 或 根本重建(radical

reconstruction)的過程(Posner, Strike, Hewson & Gertzog, 1982)。相反的，另一群演化觀的學者們比較認同 Laudan (1984)零碎的(piecemeal)科學改變觀，並將概念改變視為知識系統之間的過渡(transition)。在這樣的主張下，直覺或先前知識被視為發展新概念的重要且有效基礎(diSessa, 1988; Smith, 1992; Smith et al., 1993; diSessa, 1993; Hammer, 1994; Sherin, 2001)。

在討論學習物理的困難時，許多研究者將問題指向學生與這個世界互動時所建構的心智表徵，即心智模型(mental models) (Gentner & Gentner, 1983; Johnson-Laird, 1983; Greca & Moreira, 2000)。在物理教育中，心智模型議題的探討大多與意義學習(Ausubel, 1963)的問題相關。因此，若遵循 Ausubel 的建議，有效教學的第一步應是先確定學生已知道的知識，並從那裏開始進行教學。在 diSessa (1993)的研究中，心智模型(如物理學的概念)位於認知機制的高層，小單元的直覺知識(p-prims)位於中層，而感官基模(sensory schema)位於認知機制的低層(如感官知覺)。在本研究中，Piaget (1970)的感官基模和 diSessa 的直覺知識，將被用來詮釋學生對電子在原子結構中的概念發展。

除此之外，許多物理教育的研究將焦點著重於學生的認識論信仰 (Hammer, 1994; Monk, 1994; Hammer & Elby, 2003)，這些研究的目標是提供證據來證明認識論的信仰和成功學習物理之間的關係。例如，Hammer 將學生對物理學知識內容的信仰區分為兩個極端：方程式(formulas)與概念(concepts)。有些

學生認為物理學的知識是由事實、方程式和過程所組成。有這樣信仰的學生，傾向於找尋合適的方程式並運用這些方程式來解物理問題。另一方面，有些學生認為物理學知識是由概念系統所組成，而這些概念系統是由符號和方程式來表徵。持這種認識論信仰的學生，傾向於將解物理問題和其概念系統連結。所以，對於那些認為物理學知識由數學方程式所組成的學生，持那樣的認識論信仰將形成他們了解物理學概念的一道障礙。在學習物理時，數學方程式的學習和心智模型的建立是相關聯而非獨立的。學生若能充分了解數學方程式的意義，將可導致一個合適心智模型的建立。對於物理的學習，心智模型和數學模型均扮演十分重要的角色。

在以上的討論中，關於學生學習電子波動的概念，問題存在於學生混合了古典力學和量子力學的概念。以上的討論，也介紹了兩個重要影響學生了解物理學概念的因素—心智模型和數學方程式。關於電子在原子結構中概念的學習，本研究提出三個研究問題來檢視學生對電子在原子結構中概念的發展：(1)不同概念階段的學生，其對電子波動概念的心智模型有何不同？(2)不同概念階段的學生，其組成對電子波動心智模型的核心概念與概念之間的關係為何？(3)不同概念階段的學生，影響其對電子波動心智模型發展的主要影響因子為何？

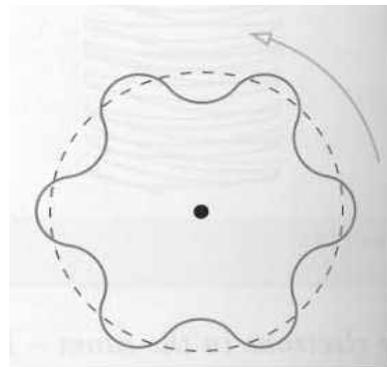
### 參、研究設計與過程

為了回答以上的三個研究問題，本研究使用三種研究工具：問卷，概念卡和面談。

本研究挑選的對象為物理系大學部、碩士班到博士班的學生，以探測不同階段學生對電子在原子結構中概念發展。本研究主要在台灣的一所大學中進行，共有 150 位物理系學生完成問卷。從分析這些學生的問卷回答中，分布於不同概念階段的 28 位學生被選取做進一步的概念卡和面談。

本次問卷的設計，主要目的檢測是否學生能不被古典的駐波概念影響（如圖一），是否能區分古典波動和電子波動的概念。問卷第一部分要求學生描述對電子在原子結構中的概念，第二部分則要求學生解釋古典波動和電子波動的不同點。

圖一 電子在原子結構中的波動性



從分析量子力學的歷史發展中，其概念發展大致可分為三個階段（如表一）—舊量子力學階段(OQM)，過渡波動力學階段(TWM)，機率波動力學階段(PWM)。

表一 量子力學發展歷史的概念階段

年 代	概 念 階 段	貢 獻 與 想 法
1900 – 1922	舊量子力學階段 (OQM)	卜朗克(Planck, 1900) 對黑體輻射的分析並提出量子論 愛因斯坦(Einstein, 1905) 對光電效應的分析並提出光子理論 波耳(Bohr, 1913) 對氫原子光譜的分析並提出行星軌道模型
1923 – 1926	過渡波動力學階段 (TWM)	德布洛衣(De Broglie, 1923) 對電子在氫原子中的穩定性提出電子物質波的解釋 薛丁格(Schrödinger, 1926)的波動方程式以能量決定電子在氫原子中的位置 海森堡(Heisenberg, 1926)提出矩陣力學
1927 之後	機率波動力學階段 (PWM)	波恩(Born, 1927)對波函數的機率詮釋

基於這個量子力學歷史發展的概念架構，本研究將學生的問卷回答區分為三個不同的概念階段，並選取不同概念階段的學生進行面談和概念卡的工作。在面談的過程中，學生被要求詳細解釋他們在問卷中的回答。在概念卡的工作中，學生則被要求去組織並連結 9 張概念卡來解釋電子在原子結構中的概念，其中包含 4 張古典（能量，駐波，節點，振幅）、4 張量子（機率，薛丁格方程式，不確定原理，波函數）和 1 張較不相關（力）的概念卡。整個面談和概念卡的過程都以錄音記錄，之後並將概念卡錄音部分轉錄繪製成概念圖，這些概念圖可代表和象徵學生用來解釋電子波動概念的心智模型。

#### 肆、研究發現

從分析學生的問卷回答中，學生對電子在原子結構中概念大致可分為三個階段：(1) 電子必須以相同半徑環繞原子核做圓周運動

的「古典量子力學階段」(OQM)；(2) 電子必須沿駐波軌跡移動以保持原子能量穩定的「過渡波動力學階段」(TWM)；(3) 電子的位置無法確定且只能從波函數預測其出現機率的「機率波動力學階段」(PWM)。

從分析學生的概念圖中可以看出（見附錄），舊量子力學階段的學生在古典的概念之間有較多的連結，而機率波動力學階段的學生在量子的概念之間有較多的連結。若分析從舊量子力學、過渡波動力學至機率波動力學階段學生的概念圖，可以看出學生一點一點的改變一些概念之間的連結，概念改變牽涉到知識系統之間的調整，比較像是一個演化／過渡的過程，比較不像 Kuhn 所說的革命／整體的改變，如典範的轉移(paradigm shift)。在這些概念圖中，某些舊量子力學階段的學生也有量子概念之間的連結，而某些機率波動力學階段的學生也有古典概念之間的連結。因此，本研究的資料顯示，某些學

生的概念能橫跨於這三個歷史概念階段之間的分界。這個研究發現建議，從量子力學歷史發展所建構的三階段模型—OQM, TWM, PWM，似乎不足以完全解釋學生的量子力學概念發展，而必須做一些修正和擴充。為了解釋學生的電子波動概念發展，從學生概念圖中的證據可以看出，必須將原有的歷史三階段模型擴展為七個概念模式系統。這個新的概念模式系統，除了原有的量子力學歷史發展的三個概念階段(OQM, TWM, PWM)之外，多增加了四個重疊區域（如圖二）。

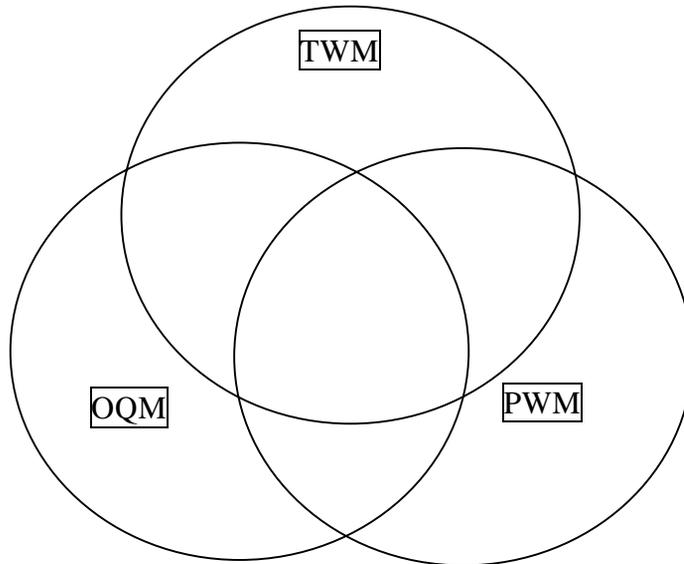
除了學生的概念圖之外，在此我提出兩位具有代表性學生的面談資料—過渡波動力學階段(TWM)和機率波動力學階段(PWM)，並分析此二位不同概念階段學生的電子波動概念的相似與相異處：

*TWM 階段學生的面談資料：*

“我對物質波的觀念是，如果我們以微觀來觀察，每個物體的行為都必須以波函數來描述，就是以機率描述〔量子〕。不過問題是，在微觀的世界波動性比較顯著，但是在每天生活的巨觀生活中，波函數的效果比較不會被注意到。例如當我們投出一個棒球，將會有一個物質波跟隨這個移動的球，但我們無法觀察。但是假如我們能進入微觀的世界中，我們將會看到這個棒球並不是沿著直球移動，而是沿著物質波的曲線前進，例如正弦波的曲線〔古典〕。”

*PWM 階段學生的面談資料：*

“我認為物質波是一種機率的觀念。例如當電子通過一個單狹縫，你會觀察到有干涉條紋產生，這顯示電子較可能在某些地方出現。事實上，電子物質波的概念比較接近機率的觀念〔量子〕”...“我認為把電子物質波視



圖二 面談學生的概念分布(比歷史發展的三個概念階段多四個重疊區域)

為電子會沿駐波軌道環繞原子核的說法並不正確。以駐波環繞原子核的概念，只是用來幫助我們理解為什麼電子能穩定存在於原子行星模型的一些軌道上〔古典〕...“從解薛丁格的波動方程中，你會得到波函數，這波函數代表的是機率的觀念...”

從學生面談資料的分析中，本研究有三個主要發現。第一，學生的經驗（感官知覺，直覺知識等）為學生發展電子波動心智模型的重要因子。第二，過渡波動力學(TWM)階段的學生，同時持有古典力學和量子力學的概念，但這些學生並未察覺這些概念之間的衝突。第三，機率波動力學階段(PWM)的學生，也同時持有古典力學和量子力學的概念，但他們和過渡波動力學階段學生不同的地方是，機率波動力學階段的學生能在不同的情境下，轉換於古典力學和量子力學的知識系統之間來解釋現象。

## 伍、結論與建議

從分析面談學生的資料中發現，學生的電子波動心智模型發展奠基於學生的經驗（感官知覺或直覺知識），而不是只靠數學方程式的學習。因此，本研究提出一個三維向量模型—經驗，心智模型，認識論工具—來描繪學生對電子波動概念的學習。對於學習物理，學習代數方程式（認識論工具）必須伴隨著概念（心智模型）和實作或閱讀（經驗）的學習，因為這三個軸均為組成學生知識系統的重要成分。在這三個軸之間存在一股張力，而且這三個軸在學生學習物理時必須同時發展。

從比較過渡波動力學階段(TWM)和機率波動力學階段(PWM)學生的面談資料中，研究證據顯示，學生同時持有古典力學和量子力學的概念，但是較有經驗的學生(PWM)，展現了在不同情境下彈性的轉換於古典力學和量子力學知識系統來解釋現象的能力。回到之前所討論有關於學習量子物理的問題，一些研究者主張學習新／量子物理應避免(learning by avoiding)提到舊／古典力學的概念(Fischler & Lichtfeldt, 1992)。相反的，另一些學者建議學習新／量子物理應融合(learning by mixing)舊／古典力學的概念(Budde et al., 2002)，並提出一個液狀電子(Electronium)的混成原子模型。從本研究的資料分析和研究結果，我建議一個學習量子物理的第三個方向，我主張應讓學生有機會培養其轉換於(learning by switching)舊／古典力學和新／量子力學的知識系統之間的能力，本研究並強調應提供學生在不同情境下獲得不同經驗的重要性。

最後，回到最初許多研究提到關於學習量子物理所發生的問題，即學生經常混合古典力學和量子力學的概念來詮釋次原子的行為。針對這個問題，已經有兩派不同的學者提出兩種截然不同的量子物理教學模式—應避免(avoid)提到古典力學或應融合(mix)古典力學—來幫助學生了解量子物理的概念。然而，從本研究的幾個主要發現中顯示，真正的問題焦點應著重於學生「如何學習」，而不是以上提到的「不該使用」或「應該使用」古典力學這兩個大問題。這樣的「學習」問題的取向，將學習量子物理的問題重新定位

於：(1)某些學生對電子在原子結構中概念發展，奠基於不合適的感官經驗／直覺知識之上；(2)某些學生同時持有古典力學和量子力學的概念，而且並未知覺這些概念之間有任何衝突。因此，任何對於量子力學教學模式的建議，都應注意這樣的學生學習的證據。

基於以上所討論的主要發現，本研究提出一個新的教學架構，其焦點著重於：(1)如何幫助學生在合適的感官經驗／直覺知識的基礎上，發展電子波動的概念；(2)如何促進學生發展在不同情境下，轉換於古典力學和量子力學知識系統之間來解釋現象的能力。這個新的教學架構有以下五大主張：

提供學生機會在實驗中經歷各種量子現象的經驗；

要學生嘗試分別以古典力學和量子力學的模型來解釋量子的現象；

選取不同量子力學歷史概念階段的文章或書籍給學生閱讀；

鼓勵學生討論古典力學和量子力學模型之間的關係；

奠基於合適的感官知覺／直覺知識上來介紹量子力學的數學方程式。

## 參考資料

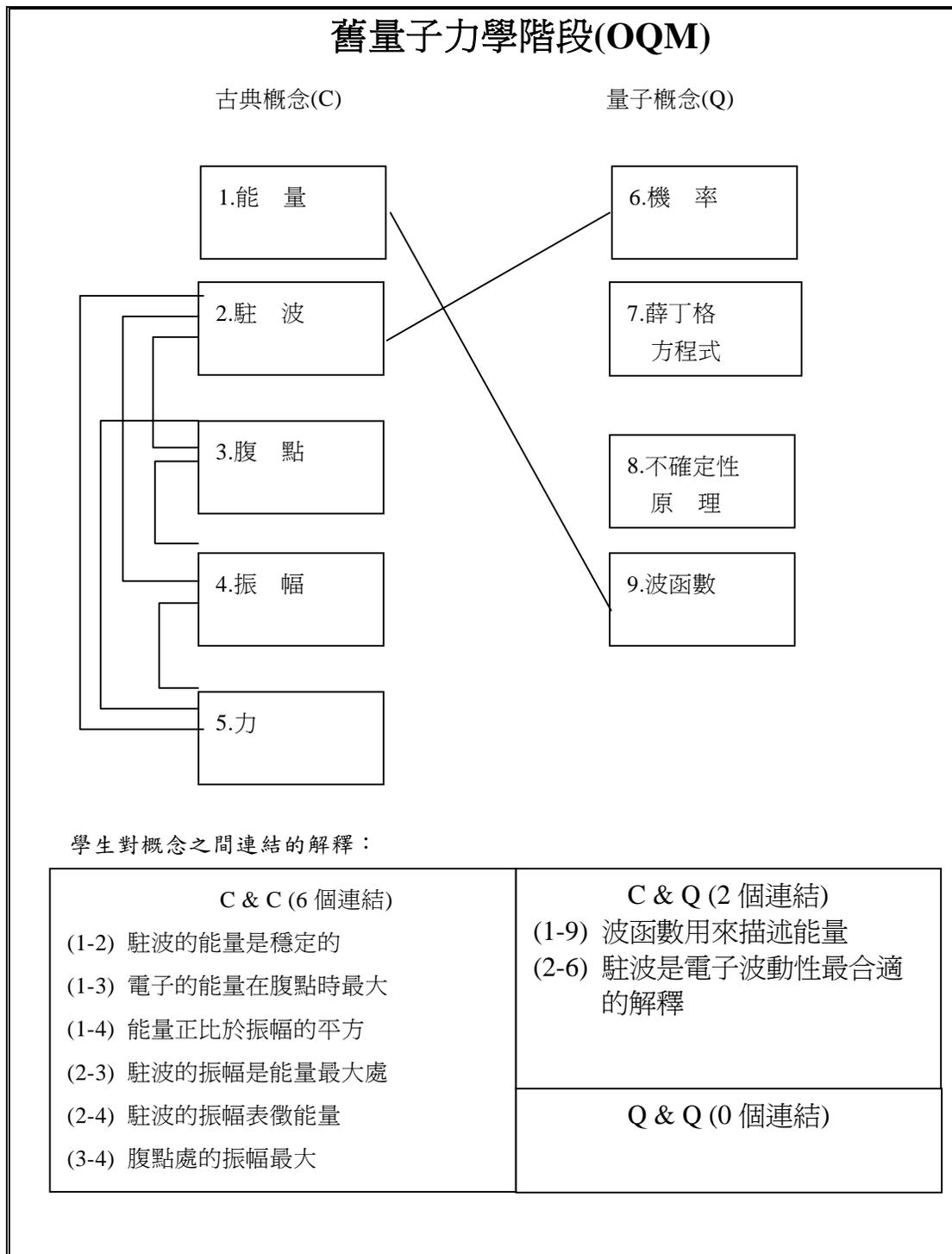
- Ausubel, D. P. (1963) *The Psychology of Meaningful Verbal Learning*. London: Frune & Stratton.
- Budde, M., Niedderer, H., Scott, P. & Leach, J. (2002a) 'Electronium': a quantum atomic teaching model. *Physics Education*, 37(3), 197-203.
- Clement, J. (1983) A conceptual model discussed by Galileo and used intuitively by physics students. McCloskey, M. (1983) Naïve theories of motion. In D. Dentner & A. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 325-340). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- diSessa, A. (1988) Knowledge in pieces. In G. Forman and P. Pufall (eds) *Constructivism in The Computer Age* (pp. 49-70). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- diSessa, A. (1993) Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2 & 3), 105-225.
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1992). Modern physics and students' concepts. *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.
- Gentner, D. & Gentner, D. R. (1983) Flowing water or teeming crows: Mental models of electricity. In D. Genter and A. Stevens (eds) *Mental Models* (pp. 99-130). Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Gilbert, J. K. & Boulter, C. J. (1995) Stretching models too far. Paper presented at the annual meeting of the American Educational Research Association (San Francisco).
- Greca, I. & Moreira, M. (2000) Mental models, conceptual models and modelling. *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11.

- Hammer, D. (1994) Students' belief about conceptual knowledge in introductory physics. *International Journal of Science Education*, 16(4), 385-403.
- Hammer, D. & Elby, A. (2003) Tapping epistemological resources for learning physics. *The Journal of the Learning Science*, 12(1), 53-90.
- Ireson, G. (2000) The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1), 15-21.
- Johnson-Laird, P. (1983) *Mental Models*. Cambridge: Harvard University Press.
- Kuhn, T. (1970) *The Structure of Scientific Revolutions*. Second edition. Chicago: University of Chicago Press. Originally published 1962.
- Lakatos, I. (1978) *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Laudan, L. (1984) *Science and Values: The Aims of Science and Their Role in Scientific Debate*. Berkeley: University of California Press.
- McCloskey, M. (1983) Naïve theories of motion. In D. Dentner & A. Stevens (Eds.), *Mental Models* (pp. 299-324). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Minstrell, J. (1982) Explaining the "at rest" condition of an object. *The Physics Teacher*, 20, 10-14.
- Monk, M. (1994) Mathematics in physics education: a case of more haste less speed. *Physics Education*, 29, 209-212.
- Piaget, J. (1970) *Genetic Epistemology*. New York: Columbia University Press.
- Posner, G., Strike, K., Hewson, P. & Gertzog, W. (1982) Accommodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.
- Reif, F. & Allen, S. (1992) Cognition for interpreting scientific concepts: a study of acceleration. *Cognition and Instruction*, 9(1), 1-44.
- Reif, F. (1995) Millikan lecture 1994: understanding and teaching important scientific thought processes. *American Journal of Physics*, 63(1), 17-32.
- Sherin, B. (2001) How students understand physics equations. *Cognition and Instruction*, 19(4), 479-541.
- Smith, J. (1992) *Old Learning Mechanisms Die Hard: The Problem of "Replacing" Students' Conceptions*. Paper presented at the Annual Meeting of American Education Research Association, San Francisco, CA.
- Smith, J., diSessa, A. & Roschelle, J. (1993) Misconceptions reconceived: a constructivist analysis of knowledge in transition. *The Journal of The Learning Science*, 3(2), 115-163.

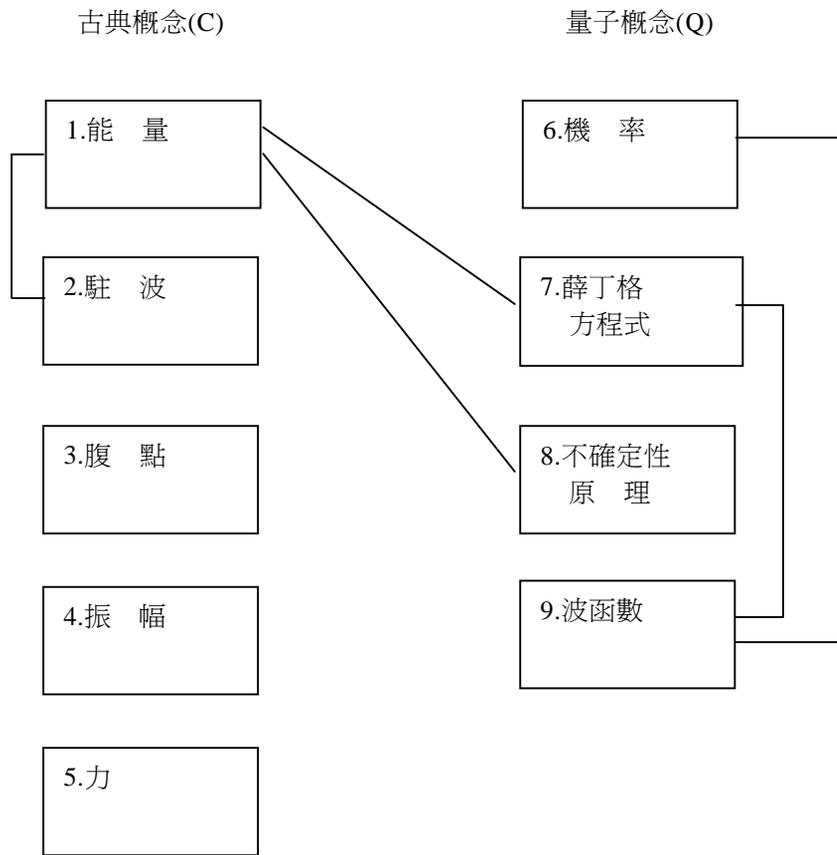
投稿日期：民國 93 年 3 月 16 日

接受日期：民國 93 年 10 月 15 日

附錄：學生在不同概念階段(OQM, TWM, PWM)的概念圖



### 過渡波動力學階段(TWM)



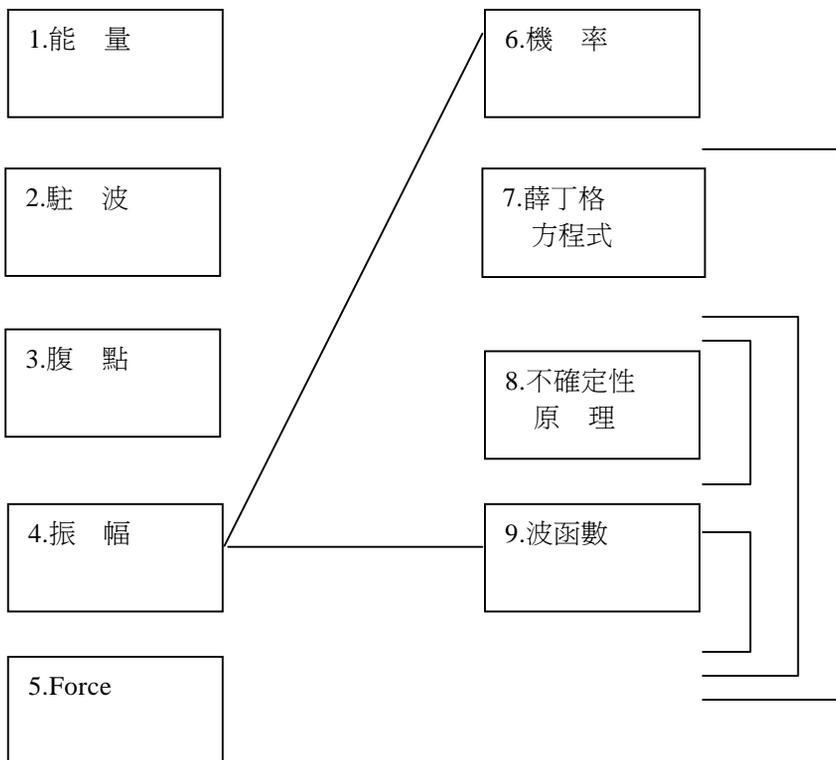
學生對概念之間連結的解釋：

<p>C &amp; C (1 個連結)</p> <p>(1-2) 駐波表徵能量守恆</p>	<p>Q &amp; Q (2 個連結)</p> <p>(6-9) 波函數用來描述機率分佈</p> <p>(7-9) 波函數是從薛丁格方程式中求出</p>
<p>C &amp; Q (2 個連結)</p> <p>(1-7) 薛丁格函數是用來計算能量和位置之間的關係</p> <p>(1-8) 在測量能量時存在不確定性原理</p>	

### 機率波動力學階段(PWM)

古典概念(C)

量子概念(Q)



學生對概念之間連結的解釋：

C & C (0 個連結)	Q & Q (4 個連結)
C & Q (2 個連結)	
(4-6) 電子波動的振幅表徵機率的 概念	(6-9) 波函數是用來描述發現電 子的機率分佈
(4-9) 波函數的振幅表徵找到電子 的機率	(7-8) 薛丁格方程式中的運算子 必須遵守不確定性原理的 規則
	(7-9) 波函數是從薛丁格方程式 中求出
	(8-9) 從波函數的計算可以導出 不確定性原理的關係

# The progression in physics students' concepts of an electron wave

Jiun-Liang Ke

## ABSTRACT

This research focuses on how physics students at different higher educational levels learn Quantum Mechanics (QM). A common problem in the learning of QM is that many students use QM concepts inappropriately and mix QM with classical mechanic (CM) concepts to interpret the subatomic behaviour. This has led some researchers to suggest that CM concepts should be avoided when teaching QM. The research methodology used both qualitative and quantitative procedures. The goals are to (1) document the conceptual patterns at different conceptual stages, (2) find out the core concepts and conceptual relationships, and (3) explore the key factors in the progression of students' QM mental models. Research samples are physics students from undergraduate through master on to PhD levels. Research instruments adopted questionnaire, concept cards and interview. There are three main findings. First, students' experience (sense perception, p-prims) is one of the key factors on which students develop their QM mental models. Second, some students use mental models that keep both CM and QM concepts in their minds without being aware of any conflict. Third, the more experienced students also hold both CM and QM concepts in their minds but they can switch between CM and QM knowledge systems to explain phenomena in different contexts. Based on the major findings, a learning model and a teaching framework for QM are proposed.

Keywords: misconception, conceptual development, physics education