

自由落體主題教學探討及其教材教法發展模式

邱韻如

長庚大學通識中心 物理科

(投稿日期：民國 97 年 10 月 20 日，修訂日期：97 年 12 月 20 日，接受日期：97 年 12 月 30 日)

摘要：自由落體是中學以上每階段物理課程必定會遇到的主題。從作者擔任教師至今，每年都會教到這個主題，近 20 年來，在教材教法的發展上，歷經守成 (Base)、互動 (Interaction)、擴展 (Getting development) 等三個時期，並以此為基礎，繼續循環 (Cycle) 持續不斷的改進與發展，作者將此發展過程稱為 BIG Cycle 模式。

這個主題教案，是根據學生的迷思概念與背景知識而設計的，以互動的方式來進行，除了穿插讓學生動手動腦動口的活動以及結合科學史、影片、動畫等等媒介之外，更大量以提出問題但不立刻講答案的方式帶領學生思考與討論。主題內的各個單元依照學習環 (Learning cycle) 三階段教學模式建構，各單元可以個別獨立實施，放在一起則彼此呼應。在教學相長的精神下，以 BIG Cycle 模式不斷的延伸發展新的單元，教學時可視學生的程度或課程需要而靈活彈性調整。本研究提供了許多與自由落體主題相關的問題與討論，以及學生在課前及討論時可能會有的想法與迷思概念，讓教師在備課時能有所參考。這些多元且豐富的單元，可以作為各級教師備課時的選擇，更可以據此為基礎，再繼續發展適合自己學生的教材與教法。

關鍵詞：自由落體、迷思概念、背景知識、學習環、互動、教材教法

壹、前言

在物理教學上，『自由落體』通常被認為是相當簡單的學習主題，但從國內外相關的研究文獻及作者長期的教學及研究經驗來看，很多學生在學過之後，仍然存有許多迷思，問題出在哪裡？怎樣的教材教法能促進教學相長，不僅幫助學生學習，也能豐富老師

的教學，讓老師在教學上能不斷的創新，持續教學數十年而不厭倦？本文從這個主題教材教法的內容及發展過程出發，探討與這個主題相關的一些教學問題。

貳、教材教法的發展過程

從作者擔任教師至今，每年都會教到自

由落體這個主題。本節敘述近 20 年來，作者對於這個主題教材教法的發展過程及教學內容：

一、守成時期(Base)：

作者在任教高中時期，發現學生對於等加速度運動與自由落體的學習有不少困難，不斷的解題訓練，對學生相關概念的建立及提高對學習物理的興趣與信心，不僅沒有什麼幫助，甚至常常會有反效果。為了幫助學生瞭解自由落體的規律及建立基本概念，作者設計了一座紙上的物理大樓，每層樓高設定為 4.9 公尺，樓層由上至下依序編號，並依年代先後安排每層樓住不同的物理學家，以在教學過程中順便讓學生認識這些物理學家（圖 3）。

作者以教師為中心的教法，利用這棟物理大樓當媒介，帶領學生用 $s=(1/2)gt^2$ 以及 $v=gt$ 等公式計算並一一畫出從頂樓丟下的物體，每一秒鐘的位置、速度及位移是幾層樓高，除幫助學生熟悉自由落體的規律之外，還可瞭解這個運動的 s-t 圖、v-t 圖和 a-t 圖，並作為延伸到上拋、平拋及斜拋運動的學習基礎。這樣的教學，主要是幫助學生建立基本概念，作者認為這是很重要的紮根工作，需要足夠的學習時間才能融會貫通。但實際上，高中生要學的教材內容實在很多，坊間教材及考題又都有一定的難度，因此學生的信心很容易被這些難題所擊潰，在短視近利求速效的學習風氣下，解題成為教學的主軸，教師與學生都很少能花足夠的時間與耐心做好紮根的工作。幾年後，作者任教大一普物，發現大一理工科新生對自由落體的迷思概念和學習困難與高中生是不相上下的。

二、互動時期(Interaction)：

作者任教大一普通物理之後，教學法漸漸由從教師中心轉為以提問、示範實驗等互動的方式，帶領學生探討相關問題，在引起學生討論及回答的過程中，蒐集學生對此主題的迷思概念。

（一）質疑 free 的意義：自由落體自由嗎？

自由落體和自由有什麼關係？這是作者開始任教大一普通物理時才開始思考的問題。在此之前，作者一直以為自由落體指的是初速為零的落體。但卻從沒去想『初速為零』和『自由』有什麼關係。

自由落體的英文是 free fall（或 freely falling body），和 free body diagram（有些書本翻譯為『自由物體圖』）同樣都有 free，也都翻譯成『自由』，但實在很難由此顧名思義，它們是同樣的意思嗎？作者查了很多書籍甚至英文字典，得到了一些看法。

我在課堂上問學生，『自由落體』的自由是什麼意思？通常學生都被我問得愣住了，他們從來沒有想過要問這樣的問題，更不知道答案是什麼。有些學生會說是因為不受重力的影響，有些學生會說是因為初速為零，不管學生說什麼或說得對不對，總是跟『自由』扯不上關係。我從高速公路叫 freeway 開始，問他們 free 是什麼意思，引導他們講出 free 的各種意思，然後討論將 free fall 翻譯成自由落體是否恰當。

（二）示範實驗：真的會同時著地嗎？

我在上課時，通常都會拿出大小相同、質量不同的二顆球（一顆是塑膠製的玩具棒球，一顆是壘球），請班上最高的同學出來做實驗，讓同學們仔細觀察哪顆先著地。這些大一理工科新生，大都知道『會同時著地』，但這時卻面臨理論與實驗不一致的抉擇。當示範的同學同時將兩手放開後，他們有的看到棒球先著地，有的看到壘球先著地，有的則說同時，有的則是直怪示範的同學不

夠高或沒有同時放手。

在教室反覆作了幾次實驗之後，大家最後都同意在當時的狀況下，二顆球『幾乎同時』到達地面。我問他們為什麼，大多數學生從來沒認真想過這個問題，只是背下答案而已，根本說不出個所以然來。這是一個很值得討論的議題，幾乎每次上課都會有學生說出『因為所受的力相同』的理由，然後立刻被其他同學駁斥而引起討論，但學生還是很難講清楚為何二顆球所受的重力不相同，卻會同時著地。

學生大都知道硬幣和羽毛在抽真空管中一起落下的實驗結果，但請他們解釋理由時就會發現，有的學生會說二者所受重力相同或者是處於無重力狀態。從這裡我們可以猜想他們是將真空和太空混淆了，或是認為抽真空後重力就沒有了。討論之後讓學生猜最早做這個實驗的是誰，我們玩起全班大猜謎，從亂猜的過程中，我慢慢的給他們一些提示，漸漸的縮小猜的範圍，一方面帶動上課的互動氣氛，讓學生敢發言，一方面也趁機瞭解學生對這些科學家們的認知。

（三）融入科學史：學生對伽利略的認識

物理課本幾乎都是從伽利略的運動學開始教起，很多物理老師都以為學生對於伽利

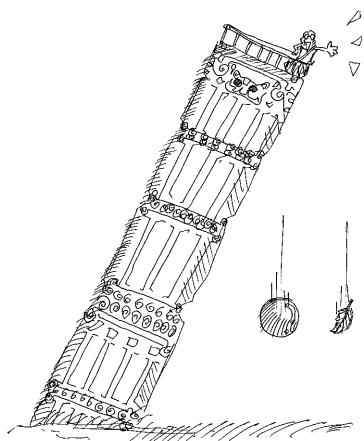


圖 1：學生所畫的圖(比薩斜塔實驗)

略的故事早已耳熟能詳，我自己也不例外。有一次，我突發奇想的做了一個試驗，在開學第一次的普物課，要大一理工科系新生寫下他們所知道的伽利略。學生洋洋灑灑寫了很多，有很多都不是伽利略的事蹟，這些答案讓我有了不少教學上的啟發。除此之外，其中一位學生畫了一張非常生動的圖（圖 1），我赫然發現和他有同樣想法的學生還為數不少呢！

在學生寫出來的事蹟中，包括了下列答案：證明地球是圓的、提出行星運動定律、用兩面鏡子在兩座山頭測出光速、發表太陽中心論、研究人體和解剖學、發現人體的黃金比例、利用汞柱測量大氣壓力、幫國王測出皇冠是否純金、愛因斯坦說他的成就是因為站在牛頓和伽利略兩大巨人的肩膀上...等等。我把這些『錯誤答案』當作教材，在第二次上課時一一列出，在輕鬆活潑的氣氛中和他們討論哪些人物被錯置了，並在順勢提出正確答案的過程中介紹相關的人物、書籍及影片。我想，這樣的教學應該會比起平鋪直述的說故事更能引發他們的興致及加深印象吧！在此不禁想到，高中物理課本在一開始的章節就用了一些篇幅來介紹物理史，要在短短幾小時的授課時數中，讓學生認識物理史的發展並對其內容有興趣，實在不是一件容易的事[7]。

三、擴展時期(Getting Development)：

基於前一時期對學生迷思概念和背景知識的瞭解，作者持續不斷蒐集資料，繼續補充新的單元，設計問題，讓教材更加豐富多元及符合以學生為中心。以下是幾個例子：

當作者實地親身體驗過遊樂區的『自由落體』設施後，對自由落體及失重有了更多的想法，立刻將其融入教學。對於在遊樂場

玩過自由落體的人來說，很難理解這裡的『自由』是什麼意思。因為被高高綁在椅子上，在高空等待墜落的心情，絕不是『自由』二個字可以描述的。這個刺激遊樂設施和『自由』有什麼關係？

在連續二年請學生寫下伽利略的事蹟之後，我改用概念圖的方式請學生畫出他們所知道的伽利略，藉由這兩種方式都可以瞭解學生的背景知識，且都發現大一新生對伽利略相關事蹟的瞭解既貧乏又混淆，但卻不容易統計。後來我乾脆直接問傳說中伽利略從比薩斜塔上丟了哪兩樣東西下來，他到底想證明什麼？表 2 是 101 位大一新生的回答，有 68 位認為是鐵球和棉花¹。這些學生有的認為是二者同時著地，有的則說是鐵球先著地，有人甚至認為伽利略是要證明空氣阻力的存在。作者更進一步，直接問一公斤的鐵球和等重的棉花同時從 54 公尺高的比薩斜塔上掉下時，哪一個會先著地？表 3 是以高中生為對象的教學活動中的一些統計結果，除此之外，作者也做了一些深入的面談，探討科學史及科學本質觀的相關問題[10]。

太空人在月球上做過一個著名的落體實驗，學生也大都知道其實驗結果是鐵鎚和羽毛同時落下。我找到 NASA 網站上當年在月球上所做的落體實驗影片[4]，在課堂上播放。是不是讓學生親眼看到歷史鏡頭之後，他們就立刻瞭解相關物理概念？我在播放之後問『兩者為什麼會同時落地？』，發現有為數不少的學生認為二者都沒受到重力或是二者所受的重力是相同。

四、循環時期(Cycle)：

¹ 其它還包括鐵球和羽毛、鉛球和棉花、蘋果和羽毛等等答案，為方便敘述起見，在本文中一律以『鐵球和棉花』代替。

2006 年底，作者應邀在虎尾高中 TEAL 教室進行示範教學，於是以過去的教學經驗為基礎，將許多小單元依照 Karplus 的學習環 (Learning cycle) 三階段教學模式建構成自由落體為主題教案(圖 2)[3]。直到 2008 年年底，期間進行了許多次的教學，也發表幾篇相關的論文，教案因不同對象及教學時間的不同而有更新及調整。這一系列課程的教案，是根據學生的『迷思概念』與『背景知識』而設計的，以互動的方式來進行。在活動的教學過程中，除了穿插讓學生動手動腦動口的活動以及結合科學史、影片、動畫等等媒介之外，更以大量以提出問題但不立刻講答案的方式帶領學生思考，鼓勵學生回答。圖 3 是作者為此主題課程所精心設計的圖，印製成大型海報，在上課前可以藉由這張圖引起學生的好奇及學習興趣，也可由此提問問題引發學生思考及討論。這張圖片的右邊是作者所設計的物理大樓，可以利用來講述自由落體的規律。課後，學生再看到這張圖時，將會有許多和課前不一樣的想法及學習心得。

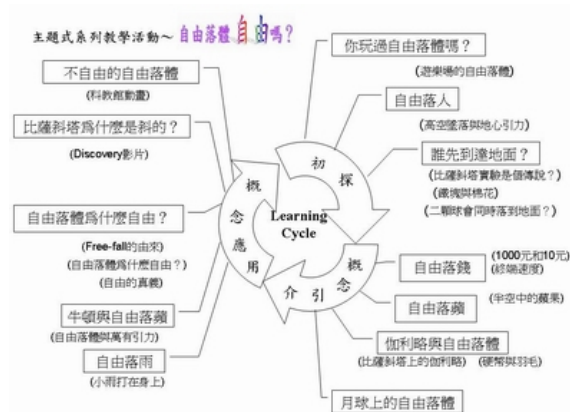


圖 2：整個系列活動式是依照 Karplus 的學習環三階段教學模式所鋪陳的

3.誰先到達地面？

這個單元由三個問題組成，請學生預測結果。一是從 54 公尺高的比薩斜塔上同時丟一公斤的鐵球和等重的棉花（統計結果請見表 3 問題 B）；二是從二樓高的地方同時丟大小相等但輕重相差兩倍的二顆球；三是在教室丟大小相等但輕重不同二顆球。預測之後，請班上最高的同學高舉輕重不同（大小相等）二顆球然後放下，重複實驗幾次後進行討論。

（二）概念引介階段（Concept Introduction）

概念引介是適時的引入新的方法、新的觀點、或新概念，讓學生能以更合理的方式來解釋他們先前的猜測。我們透過下面幾個活動，介紹空氣阻力與終端速度的基本觀念。

1.自由落錢

一張 1000 元鈔票和一個 10 元硬幣，猜猜哪一個會先落到地上？每位學生的答案都和實驗結果一樣，但是問起原因來，他們卻不見得說得清楚。有些學生會說因為硬幣比較重，有些學生會說因為鈔票受到的空氣阻力比硬幣大。在一一畫出鈔票和硬幣在不同時間時所受的重力和空氣阻力，跟學生介紹終端速度的概念之後，問學生怎樣可以讓 10 元硬幣達到終端速度以及發玩具假鈔給學生，請他們設法讓 1000 元鈔票和 10 元硬幣同時落到地上。

2.自由落蘋

蘋果正從樹上掉落，當它還在半空中時，仍然受到重力的作用，這時重力的反作用力是不是空氣阻力？（學生的回答情形見表 3 問題 C）。如果把蘋果放在桌子上，這個重力的反作用力又是哪個力呢？這個單元的問題，來自作者對作用力與作用力的研究[5]，並與前面『自由落人』、『自由落錢』和後面的『牛頓與自由落蘋』等單元所問的問題是

相互呼應的。

3.伽利略與自由落體

在簡單介紹伽利略之後，告訴學生，根據科學史專家們的研究，到目前為止，並沒有找到伽利略在比薩斜塔上做過落體實驗的歷史文獻紀錄。但也告訴學生伽利略在《二種新科學的對話》書中的巧妙的推理，以及後人在比薩斜塔上實地做過的落體實驗結果。

4.硬幣和羽毛

延續並呼應前面的問題，以等重的鐵球和棉花做示範實驗，大部分學生都很驚訝等重的鐵球與棉花的體積差別竟如此之大，實驗後再一次從兩者所受的合力出發，和學生分析討論鐵球會先到達地面的原因。

接著示範硬幣和羽毛的實驗，讓他們看到沒抽真空和有抽真空二種情況下的實驗結果及討論。討論之後讓學生猜是誰最早做這個實驗的，趁機瞭解學生對這些科學家們的認知。這個實驗是十七世紀，波以耳（Robert Boyle, 1635~1703）首先做的，當時他剛發展了抽真空的技術（在伽利略當時還沒有抽真空的技術）而想到可以驗證伽利略的想法[1]。

5.月球上的自由落體

播放 1971 年太空人大衛史考特（David Scott）在月球上所做的落體實驗的紀錄片[4]。問學生鐵鎚和羽毛同時著地的原因是什麼？

（三）概念應用階段（Concept Application）

這個階段的活動，是引領學生將前一階段所學到的概念應用於新情境，解答相關的問題以及強化所學得的概念。每個活動都能與前面的活動相呼應。

1.比薩斜塔

我們讓學生實際計算從 54 公尺高的比薩斜塔上丟下來的球，幾秒鐘會落到地上以

及落到地上時的速度。這是一題非常簡單的物理計算，但因為必須開根號，因此學生常常就被卡住了。通常學生算出來的速度的單位是每秒多少公尺，我特別要他們換算為每小時多少公里，以實際感覺其大小。

2.自由落雨

從 1200 公尺高空落下的雨滴，終端速度大約 7.4 公尺/秒，如果沒有空氣阻力，落到地上時的速度是多少？在此我們直接幫學生算出答案是 153 公尺/秒，請學生換算成時速幾公里，讓學生體會到空氣阻力的作用。

3.牛頓與自由落蘋

回應前面所討論在下落過程中蘋果所受到的重力，討論自由落體與萬有引力的關係以及蘋果落下與月球繞地球轉之間的共通性。

4.自由落體為什麼自由？

從英文 free 的字義、其他人對 free body 的翻譯以及伽利略在《二種新科學對話》書中所使用的文字等試圖解答『自由』的意義。

(四) 補充教材與後續新增單元

隨著教學的經驗、教學對象與教學時數的不同，作者會視情況調整內容、加入補充教材或新增單元。

1.斜而不倒的比薩斜塔

在時間的允許下，可以播放 Discovery 的『比薩斜塔』影片的片段，由此，學生可以瞭解比薩斜塔為什麼會斜，是否會倒塌等問題。作者設計了一些問題，讓學生在看完此片之後可以進行討論或在看之前可以掌握重點（圖 5）。

2.不自由的自由落體

作者以上的教學經驗與內容為本，撰寫成動畫的腳本（圖 6）。讀者可以進入國立台灣科學教育館的網頁，從『學習資源』進入『線上學習平台』就可以找到『玩物理探究』裡面的自由落體單元[12]。只要經過

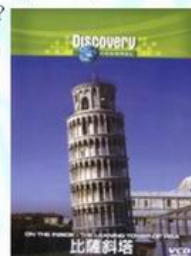
簡單的註冊的程序，就可以看到這些動畫，教師可以播放動畫的片段當作上課的輔助，帶領學生討論。

3.失重

物體在做自由落體運動以及以萬有引力當向心力繞著地球轉時，所處的正是失重狀態。在 2008 年的後半年，作者在這套教材中加入了和『失重』有關的一些相關單元活動，在初探階段加入『失重大體驗』，概念引介階段加入『自由落梯與太空船繞地球』，概念應用階段加入『失重是失去什麼？』等三個單元。這樣不僅可以針對自由落人單元中的幾

比薩斜塔（問題與討論）

- 當時為什麼要興建比薩斜塔？
- 比薩斜塔開始興建於那一年？完工於哪一年？
- 比薩斜塔是什麼時候開始傾斜的？
- 800 年來，比薩斜塔逃過了哪些劫難(包括人們的挽救措施)？
- 最近一次，經過多久的整修，比薩斜塔什麼時候又重新開放了？
- 比薩斜塔會被扶正嗎？



<http://memo.cgu.edu.tw/yun-ju/CGUWeb/SciKnow/PhyStory/Galileo/PisaTower/DiscoveryFilm.htm>

圖 5：比薩斜塔影片的問題與討論

不自由的自由落體

- A、到遊樂園玩自由落體(3'42")
- B、那個球會先落地？(2'09")
- C、亞里斯多德的想法(2'13")
- D、伽利略的比薩斜塔實驗(2'45")
- E、硬幣和羽毛會同時落下嗎？(1'06")
- F、去掉空氣做實驗(2'47")
- G、落地的速度有多快(2'07")
- H、自由落體其實並不自由(1'05")

(國立台灣科學教育館 動畫) 玩物理探究
<http://elearning.ntsec.gov.tw/moodle/index.php>
 經簡單的註冊程序後即可登入



圖 6：本文作者撰稿的動畫：
不自由的自由落體

個問題進行更深入的探討，也和『牛頓與自由落體』做很好的呼應與延伸。根據作者的研究，學生對於失重有許多的迷思概念，也分不清楚萬有引力與重力、重力與重量兩兩之間的差異。要幫助學生釐清這些力的概念，還可以設計發展更多的教案。

參、學生作答統計

一、取樣對象：

本文統計的對象是教學時的學生，並非隨機取樣，因此所做的統計不具抽樣代表性，但仍有參考的價值。

表 1：統計對象

對象	人數	年級	97 年度入學基測 Pr 值*
樣本 MA	78	國三	
樣本 HA	41	高一	58
樣本 HB	90	高一	39
樣本 HC	41	高一	83
樣本 HD	45	高一	99
樣本 UA	101	大一	(理工科系新生)

* 以 97 年度入學基測 Pr 值作為該校學生程度的參考

表 2：問題 A (樣本 UA，開放式問卷)

	同時落地	不同時落地	真空時才會同時落地	空白	合計
兩顆球	29	2	0	2	33
鐵球和棉花*	42	16	3	7	68
合計	71	18	3	9	101

*其它還包括鐵球和羽毛、鉛球和棉花、蘋果和羽毛等等答案，均歸類為『鐵球和棉花』。

表 3：問題 B 與問題 C

樣本	問題 B：鐵球與棉花				問題 C：重力的反作用力	
	(1)鐵球*	(2)棉花	(3)同時到達	(4)以上皆非	(1)O	(2)X*
MA	13(17%)	0	64(82%)	1	46(59%)	32(41%)
HA	6(15%)	0	35(85%)	0	—	—
HB	18(20%)	0	72(78%)	0	52(58%)	38(42%)
HC	21(51%)	0	20(49%)	0	19(53%)	17(47%)
HD	41(91%)	1	2(4%)	1	—	—

* 為正確答案

表 4：自由落人 (回答正確的百分比)

題號	題目	MA n=78	HA n=41	HB n=92	HC n=41	HD n=45
D1	人在墜落的過程中，有沒有受到地心引力？(1)有* (2) 沒有	95%	97%	97%	100%	100%
D2	墜落的過程，有『失重』嗎？(1)有* (2)沒有	50%	41%	70%	17%	82%
D3	墜落的過程，是『無重力狀態』嗎？(1)是 (2)不是*	80%	95%	89%	95%	89%

* 為正確答案

二、問題：

(一) 鐵球和棉花

【問題 A】傳說中伽利略從比薩斜塔上丟了哪兩樣東西下來，他到底想證明什麼？表 2 是以開放式問卷的結果。可以看到，101 位學生中，有 68 位的答案是鐵球和棉花。這 68 位學生中，有 42 位(61.8%)認為為鐵球和棉花會同時掉到地上[10]。

表 3 是用選擇題的方式所得的統計資料。【問題 B】一公斤的鐵球和一公斤的棉花，同時從比薩斜塔上丟下來，哪一個會先到達地面？(1)一公斤的鐵球 (2)一公斤的棉花 (3)同時到達 (4)以上皆非。

(二) 重力的反作用力

【問題 C】落在半空中的蘋果，仍受到重力的作用，這個重力的反作用力就是空氣阻力。(1) O (2) X。問題 C 的一些統計結果見表 3。這個題目是根據研究者先前的研究所設計的，905 位大一理工科新生有 41 % 的學生認為這個重力的反作用力就是空氣阻力[5]。

(三) 自由落人

從表 4 中的 D2 題可以看到，學生對於『失重』的概念非常分歧，這是值得深入研究的議題，目前相關教案還在發展中，故不在本文中論述。

肆、簡單中的不簡單-問題與討論

一、自由落體為什麼自由？

在學生對『自由落體』耳熟能詳的基礎下，探討『自由』的真義成爲一個與學生互動、教學生提問的好題材。看到 free 這個字，直覺想到的就是『自由』和『免費』。自由落體在落下期間，受到重力的作用，每個

時刻的位置及速度都可以用公式算出來，它會『自由』嗎？再說，『自由』和『免費』有什麼共通性呢？

在英文裡，free 有 without 或是 not 的意思，所以『自由』和『免費』都有不受束縛、去除等等意思，因此，我採用『去除』的意思，將自由落體的 free 解釋爲去除空氣阻力(亦即可以不考慮空氣阻力的情況下)，這樣不僅符合教科書的教學內容，也可與 free-body diagram(去除物體²)和 freeway(去除紅綠燈的限制)的 free 達到一致性。

清末，由江南製造局刊印的《物理學》一書中，將 free fall 譯爲『無礙直墜』[15]；劉源俊教授也不滿意『自由落體』的譯名，認爲應當譯爲『無阻落體』[16]，這二個譯名都已隱含不考慮空氣阻力的意思。但翻譯成『自由落體』，則難以彰顯『自由』和落體運動的關係。

對於大一理工科新生來說，『自由』意義的探討，帶動了課堂的互動及活潑氣氛，一方面教學生提問，另一方面也帶領學生把思路由不考慮空氣阻力的情況進一步延伸到不能忽略空氣阻力的情況，引入終端速度的觀念。不過，在探討空氣阻力對落體的影響之前，老師應該要知道，學生是不是已經瞭解輕重不同的兩個物體在可忽略空氣阻力的情況下，同時落下後會同時著地的原因了呢？

二、比薩斜塔落體實驗，是否真有其事？

根據科學史專家們的研究，到目前爲止，並沒有找到伽利略在比薩斜塔上做過落體實驗的歷史文獻紀錄。有關這個實驗的傳說，可能來自他晚年的學生維維安尼(Viviani, 1622~1703)在其所著的《伽利略傳》裡的一段不太準確的回憶，這篇傳記是

² 意指畫力圖時，不畫物體，而用『點』來取代。

1657年出版的，此時伽利略已過世十多年[14]。不過，在伽利略所著的《二種新科學的對話》書中，雖然沒有提到比薩斜塔上的這個實驗，但用巧妙的推理，藉由將一個重物和一個輕物綁在一起，讓它們落下，以此想像實驗的推理與結論來駁斥亞里斯多德的說法[2]。

那麼，到底有沒有人在比薩斜塔上做過落體實驗呢？有書上記載，1612年，有一個人在比薩斜塔上做過這個實驗。不過他是支持亞里斯多德觀點，爲了反駁伽利略而作這個實驗的，實驗結果是二者並沒有同時到達地面[13]。1956年，國際科學史大會在義大利舉行，科學史家科恩（Cohen, I.B.）親自爬上比薩斜塔，將二顆球從塔頂上同時丟下來，在眾人引頸期盼下，兩球幾乎同時撞到地面[1]。從這裡我們看到，同樣的實驗，在不同的觀點與理論背景下，有不同的結果。

不管伽利略是否真的做過這個落體實驗，這個故事早已深入人心，並爲比薩斜塔增添許多風采與魅力，當然可以借力使力，在物理教學上好好運用與發揮。藉由這個故事，可以有效的帶動學生思考，幫助學生進行更深入的學習，例如帶領學生學習提問與討論，幫助學生瞭解力和加速度，瞭解下落時空氣阻力的影響及終端速度概念，甚至思考變加速度問題。

三、遊樂設施的刺激感主要是來自速度還是加速度？

從高空落下，會感到刺激的主要原因不是因爲『地心引力』很大，而是因爲有『重力加速度』不斷讓速度增加。以生理的觀點來說，人體敏感的不在於速度，而是加速度[1]。人在高速但等速行駛的電車或飛機中，並不會不舒服，甚至不覺得在移動，但是

在有加速度的情況下（如緊急煞車、突然啓動或圓周運動時），生理就會有明顯的感覺，刺激的遊樂設施就是利用『加速度』讓人產生快感的！

四、等重的鐵球與棉花，會同時落地？

絕大多數的學生不僅不知道故事中的伽利略『應該』丟什麼東西下來才合理，更不清楚伽利略做這個實驗到底是想證明什麼，或證明了什麼。重的會比輕的先落到地面，對一般大眾來說，是一種相當普遍且自然的想法，如果學生在學習這個單元時，還沒有足夠的能力去推理與思考誰會先掉下來和物體所受的力及其加速度的關係，當然有可能只記住『同時落地』這個答案，而不記得其它內容。

爲什麼會有那麼高比例的學生認爲一公斤的鐵球和一公斤的棉花會同時落到地面？作者推測可能跟下面幾件事有關：一是只記得『同時落地』這個答案，卻不記得是哪兩樣東西同時落地；二是一公斤的鐵球和一公斤的棉花哪個比較重，是一個眾所皆知的腦筋急轉彎問題；三是可能聽過硬幣和羽毛在玻璃管裡同時落下的那個實驗；四是聽過太空人在月球上所做的落體實驗；五是重的物體會先落到地面，是一個普遍的迷思，由此認定同時落地的二樣東西應該是一樣重的。綜合上述幾件事，他們認爲當時實驗是『一公斤的鐵球和一公斤的棉花』，甚至同時落地，似乎變得『理所當然』了。

把一公斤的鐵球和一公斤的棉花，同時從約17樓高的比薩斜塔上丟下來，真的會同時到達地面嗎？我們實際用半公斤的棉花（因爲一公斤實在太大包了）和等重的鐵球，讓學生實際看到其大小，並請學生在教室當場做實驗。很多學生看到棉花之後，才

驚覺半公斤就如此大包，他們根本沒有真的想像過一公斤棉花的份量有多少。這不僅僅只是製造視覺效果，讓學生記住正確的答案而已，更重要的是，雖然沒有真的爬到 17 樓高做實驗，還是可藉此帶動學生討論與動腦思考這個實驗的相關問題。

五、輕重不等的二顆球，真的會同時落地嗎？

我在課堂當場讓學生用二顆球（大小相同，輕重不同）作示範實驗時發現，有些學生其實是不太相信他們所看到的結果，有的怪實驗者沒同時放手，有的則嫌實驗者站得不夠高。有的學生深信，只要爬得夠高，就可以看到重球先落地。

在日常生活中，隨手放下二個物體，應該是很容易看到它們是『幾乎』同時落地的，除非其中一個是羽毛棉花之類的物體，否則從實驗中實在不容易能明顯『看』出重的先著地。

重的會先著地的想法其實『想』出來的，是一個相當普遍的迷思概念。學生並非沒看過二物體同時著地，也並非已將空氣阻力仔細的考慮計算進去。他們『直覺』的認為重的會先著地是『本該如此』，因此，要破除『重的會先著地』的想法，不是一件容易的事，但絕不是要求學生把答案『背』起來或是做實驗讓他『看到』答案就可以達成的。

不考慮空氣阻力時，問題就容易解決了嗎？二顆球所受的重力並不相同，要解釋受力不同卻會同時著地，要從速度的變化（加速度）的概念切入分析，才能解釋清楚。對大多數學生來說，『加速度』雖然很基本也很重要， $F=ma$ 也都能朗朗上口，但卻不容易運用自如。因此，我們的中學生（從國三

到高二）在學到自由落體時，可能頂多只是背下『同時落地』這個答案，即使學生寫出『因為重力加速度都相同』的答案，都還不見得能代表他們真正理解這個問題。通常物理教師並沒有花費很多時間在自由落體單元的教學上，一方面，這個單元和其他單元相比，被認為是相對簡單的；另一方面，一般的評量方式，並無法讓教師體驗到學生在此概念上的迷思與推理上的困難，在進度壓力下，更難能用互動的方式帶領學生進行討論。

六、輕球所受空氣阻力比重球大？

輕重不等但大小相同的二顆球，在可以忽略空氣阻力影響的情況下，幾乎會同時落地。那麼，如果必須考慮空氣阻力呢？不少學生以為是因為輕球所受到的空氣阻力比較大，使得重球先到達地面。這又是一個很好的討論題目。

這個問題的重點，並非是哪個物體所受的空氣阻力比較大，而是要從空氣阻力和重力的合力，及此合力所造成的加速度來考慮。在下落過程中，空氣阻力會因物體速度增加而逐漸增大，當空氣阻力增加到與重力相等時，物體所受合力為零，而以等速度落下，這時的速度稱為終端速度。對學生來說，達到終端速度前的運動情況比終端速度的概念還不容易理解。因為從開始落下到達到終端速度之前，整個過程中，物體的加速度會越來越小，速度卻是越來越大，是變加速度的問題。這樣的思考與推理，若課本及老師沒有引導，學生並不容易自己推想。

對大一學生來說，要帶著他們用確切的公式逐步推導甚至運用到空氣流體力學，是有困難的，但可以幫助學生僅用 $F=ma$ 的觀念來思考與推理。作者在大一普通物理的課

程中，讓學生畫出輕重二顆球在必須考慮空氣阻力的情況下同時從高空落下的 $v-t$ 圖，等學生畫完圖之後再和他們討論這個問題 [6]。

七、等重的鐵球和棉花，誰先落到地面？

空氣阻力的大小不僅和物體的速度有關，還和截面積有關。等重的鐵球和棉花，兩者所受重力相等，但棉花的截面積遠比鐵球大很多，因此空氣阻力對棉花的影響就會比鐵球明顯很多，而使得棉花所受的合力小於鐵球所受的合力，棉花因為加速度較小而較慢到達地面。

若有學生提出，還可進一步探討空氣浮力的影響、比較空氣浮力和空氣阻力、探討空氣阻力什麼時候是和速度的一次方或二次方有關係等等，這些議題可以當作延伸的專題研究，讓有興趣鑽研的學生繼續探討。

八、討論時，變因有沒有控制好？

自由落體在物理上雖然是屬於較簡單的主題，但深究起來，其實並不簡單，可以探討的問題相當多。在二個落體是否會同時到達地面的討論過程中，學生必須考慮二者重量是否相等、大小是否一樣、受力是否相同、是否要考慮空氣阻力、空氣阻力的影響是否相同等等的因素，在這樣的討論情境下，需要全方面的思考以及『控制變因』的能力。因此，在討論時，如果變因沒控制好，討論的內容可能會失焦。『控制變因』是學習科學很基本的的能力，這些問題的探討可以幫助學生在潛移默化中練習控制變因的掌握。

九、自由落體只是運動學的問題嗎？

伽利略當年因為發現落體的運動實在太快，聰明的想到用斜面來『沖淡』加速度的

效應。伽利略在研究自由落體和斜面問題時，真知灼見得看出這不是『速度』問題，而是『速度的變化』(也就是『加速度』)問題。

運動學關心的是 *how bodies move*，也就是著眼於物體的位移、速度、加速度與時間的關係。在物理課本裡，通常是把自由落體的例子放在運動學的章節裡，講述的重點是強調其加速度是 g 、瞭解自由落體運動的規律以及要求學生能熟練運用運動學的公式，作者在教材教法的守成時期所做的努力即為此。如上所述，在分析講解自由落體的問題時，似乎可以都不提及力。但是，學生心裡卻不可能不想到力，因為要解釋輕重不同的二物體，落下時會同時著地，不僅僅是 *How* 的問題，還必須牽涉到 *Why*。

動力學講的就是 *why bodies move*，受到力，物體的速度就會有變化(就有加速度)。我們的學生雖然都會背 $F=ma$ ，但是，當遇到實際問題時，還是習慣用『受力越大時，速度會越大』的迷思概念來解題。因為『加速度』的概念並不是那麼容易就能深入學生的心裡，因此，在教到動力學時，可以從『力』出發，和學生再次探討自由落體，可算是多一個管道幫助學生學習與澄清一些相關的概念。

在本文中有一些活動是和『力』有關的，例如自由落人、自由落蘋和失重等單元。由於篇幅有限及擔心主題偏離，本文中沒有對學生在此類問題的表現及相關議題深入探討，將另文再述。

伍、體現教學相長的教材教法發展模式-BIG Cycle 模式

一、怎樣的教學法能促進教學相長？

（一）從『單向』到『雙向』

作者在與物理教師分享或演講時發現，多數老師並不知道他們的學生不知道伽利略有哪些事蹟，也不知道故事中的伽利略應該從比薩斜塔上丟什麼東西下來，他們很訝異怎有那麼多比例的學生會以為答案是等重的鐵球和棉花，甚至還同時著地。

為什麼老師們不知道學生有這些『錯誤答案』？如果課堂的教學是以解題及單向灌輸方式為主，考試也都是用坊間的選擇題，老師當然不知道學生的『錯誤想法』。作者在守成時期，用自創的物理大樓來幫助學生瞭解自由落體的規律，雖然自認為很有創意，但基本上還是停留在『以教師為中心』的教學法，這樣單向的教學畢竟無法探察到真正的民意。直到採用『互動』的教學法，從單向傳授『解與答』轉為雙向的『問與聽』時，才開始漸漸聽到學生的各種想法，這是發展『以學生為中心』教材的第一步。

（二）答案與事實之外

提出問題是思考活動的重要體現，要促使學生提問，不是老師多問幾個『為什麼』就能讓學生開口的。如何讓學生在課堂上敢說、敢問、敢質疑，是互動教學的一個重要開端及挑戰。學生越常提問，提問的能力才能提升，思考才能更加靈活。

近年來，國內有越來越多的教學及研究致力於推動藉由示範實驗或科學史故事來進行教學的互動，在此『互動』的教學氛圍下，示範實驗不僅僅只是讓學生親眼看到答案而已，科學史故事更非只是陳述事實或用來提高教學的趣味而已。

學生在示範實驗進行前所預測的答案或想法會錯，不見得是因為沒有真正看過這個實驗的現象，而是受限於其背景知識與迷思概念。示範實驗的過程與具體經驗，可以幫助學生進行思考與提問，也可以幫助老師瞭

解學生的想法。但要注意的是，概念的改變並非一蹴即成，因此，絕不是一看完實驗之後，原來的錯誤想法就會立刻豁然開朗。透過課堂的討論，以及運用認知衝突的教學策略，才能引起學生重新建構背景知識，達到澄清迷思概念與統整相關概念的功效。

本文中所敘述的物理大樓、猜硬幣羽毛抽真空實驗者、伽利略事蹟等等，都是將科學史融入教學的例子。平鋪直述的說故事，相信是引不起學生興趣的。讓故事具有互動性，設計相關活動，或在重要關鍵停下來讓學生思考與討論，問一些認知衝突性的問題，都可以帶動學生思考與推理、進行討論及發表。

（三）沒有問題才是問題

在資訊爆炸的現在，教學生問問題，應該是比要學生背各種答案來得重要吧？但是，教學時數不夠，哪有時間跟學生討論，讓學生思考？於是很多老師幫學生把概念及重點都整理好，直接告訴學生答案。

從本文中看到，老師及課本所教的『正確』知識，在經過學生腦袋解讀之後，常常會產生錯誤或迷思。當學生只記誦答案時，不僅常常會把這些答案的題目或問題給忘記，也通常不去思考為什麼；但學生若記得問題，把問題放在心裡，則可能會有機會找到或看到答案，否則，就算答案在眼前，也是視而不見的。

很多老師在上課時問『有沒有問題？』時，都得不到什麼回應，因為我們的學生大都不會也不敢問問題。單向灌輸式的教學，容易讓學生把老師所教的都當作是理所當然而不敢質疑，當然也不需思考。因此，在教學上，老師必須有智慧的拿捏好給答案的時機，太快將答案全盤托出，可能會造成學生只記憶不思考的『揠苗助長』效果，不可不慎。

二、讓教材教法不斷創新與成長的 BIG Cycle 模式

除了自由落體這個主題之外，作者先前已陸續發表了成影概念、示波器教學、來電傳奇等等主題式系列教學活動。這些活動都以 Learning Cycle 為架構，將許多小單元有結構的組織起來，各個單元可以個別獨立運作實施，放在一起則彼此呼應又環環相扣，像組合式積木一樣，不僅靈活可彈性調度，又可以繼續延伸發展，增加新的單元。

以上這些主題活動的發展過程，都是相類似的。守成時期 (Base)，是以教師為中心的觀點熟悉課本內容與準備教材，幫助學生建立基本概念，熟練定律與公式，打好基礎。互動時期 (Interaction)，教法從單向傳授轉為雙向互動，教材則建基於守成時期的紮根工作之上，在互動的教學情境下，傾聽學生的想法，掌握學生的背景知識與概念，據此調整或發展教材與教法。擴展時期 (Getting development) 以前一階段互動教學所蒐集來的學生的『迷思概念』與『背景知識』為基礎，繼續互動或換個方式問，發現更多學生的想法及問題，創造出新的研究議題與教學題材，新添更多相關的單元活動。循環時期 (Cycle) 是把已發展的這些教材組織起來，單元之間互相呼應，並在原來的基礎與 Learning Cycle 的架構上，進一步加深加廣，持續發展。

以上所敘述的教材教法發展過程，作者將其稱為 BIG Cycle 模式：B 是 Base，I 是 Interaction，G 是 Getting development。如圖 7 所示，BIG 三個階段，是螺旋式循環 (Cycle) 上升且不斷擴大的。這和作者先前所提出的 BIG 學習模式 (Background knowledge - Inquiry - Getting beyond) [9]互相呼應 (圖 7) 並都充分展現了 Learning Cycle 的精神。

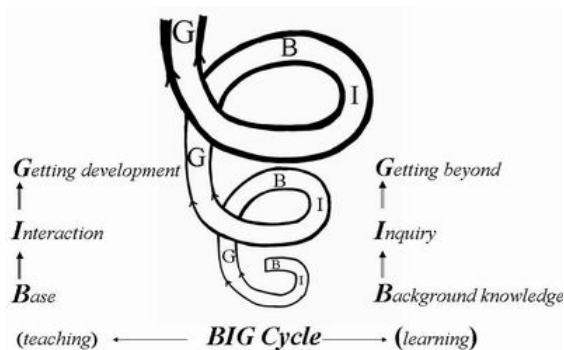


圖 7：BIG Cycle 模式

陸、結論與建議

單單這個自由落體主題，就可以發展出這麼多的教學單元及問題討論，其它的主題當然也不例外。我們看到，在『以學生為中心』的互動教學下，整套教材以 BIG Cycle 模式持續不斷的加新、加廣、加深。我們不必擔心教材越發展越多，在有限的教學時數下，是否教得完，因為知識不斷的推陳出新，學習也是無止盡，教學時數則永遠有限，教師不可能教完所有的內容。因此，教師在面對不同程度的學生及教學時數限制下，當然需要篩選教材，擬定教學策略。

本研究提供了許多與自由落體主題相關的問題與討論，以及學生在課前及討論時可能會有的想法與迷思概念，讓教師在備課時能有所參考。這些多元且豐富的單元，可以作為各級教師備課時的選擇，更可以據此為基礎，再繼續發展適合自己學生的教材與教法。

物理教學當然不是以應付升學考試為主要目的，也不僅僅只是訓練學生熟練定律及公式，或改變學生的錯誤概念而已。讓學生不討厭物理以及具有帶著走的能力，例如增廣學生的視野及背景知識、引起學生的學習

動機、引發自動探索的興趣與熱情、帶動學生思考與提問、增進學生討論與思辨的能力、發展學生多元智慧等等，可能是更重要的。教師在備課時必須針對教學的目的及學生的程度做專業的考量，來選擇教材的內容，因材施教，才能在有限的教學時數內讓學生的學習有意義。

不管是教師的教學還是學生的學習，都符合 BIG Cycle 模式。守成紮根的備課及教學是基本且重要的，但如果一直停留在守成階段，教材教法的發展空間是有限的。在此基礎之上，當教師的教學法從單向傳授的『以教師為中心』轉為雙向互動的『以學生為中心』時，教材教法就會有很大的成長空間。學生的學習亦然，當學生根據其背景知識提出適當的問題進行探究時，他們的背景知識就會在探究的過程中超越原有的內容及架構而成長，並據以進行更深入的探究活動，不斷的超越自己。

以 BIG Cycle 模式所發展的教材，內容豐富多元，各個單元可以個別獨立實施，放在一起則彼此呼應。在教學相長的精神下，不斷的繼續延伸發展，不僅不會一成不變，而且會不斷的推陳出新，並可視學生的程度或課程需要而彈性調整，在物理科的各個主題甚至其它學科，都可以據此來發展教材。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會資助(計畫編號 NSC96-2511-S-182-002- MY2)，謹此敬致謝忱。更感謝兩位審查委員細心的指正與建議。

參考文獻

1. 邱韻如(2006a): 從學生對牛頓第三定律的迷思概念探討教學上的一些問題。論文發表於第22屆科學教育學術研討會。台北市: 國立台灣師範大學科教研究所。
2. 邱韻如(2006b): 大一普物教學的迷思之我見我思。物理雙月刊,28(3), 554-562。
3. 邱韻如(2008a): 比薩斜塔下的沈思—伽利略與自由落體。論文發表於自然科學教育及示範研討會。台北市: 台北市立教育大學。
4. 邱韻如(2008b): 不自由的自由落體。國立科學教育館線上學習動畫: 玩物理探究竟。
<http://elearning.ntsec.gov.tw/moodle/index.php>
5. 邱韻如(2008c): 以背景知識為本的探究教學活動—Maxwell's Wheel 和 Yoyo, 物理教育學刊,9(1),95-108。
6. 邱韻如(2008d): 從學生對比薩斜塔落體實驗的迷思概念探討科學史故事運用在教學時的一些問題。論文發表於第 24 屆科學教育學術研討會。彰化市: 彰化師範大學主辦。
7. 馬文蔚、唐玄之、周永平編(1995): 物理發展史上的里程碑。新竹市: 凡異出版社。
8. 國立台灣科學教育館(2008): 玩物理探究竟。學習資源, 線上學習平台, 網址: <http://elearning.ntsec.gov.tw/moodle/index.php>
9. 張光熙、宋加麗(2002)。科學的故事。台中市: 好讀出版社。
10. 郭奕玲(1994): 伽利略的運動學研究。載於李慎、陳慶雲主編, 來自歷史的啓示—

- 近代科學 15 例。新竹市：凡異出版社、北京大學出版社聯合出版。
11. 劉昭民編(1987)：中華物理學史。台北市：台灣商務印書館。
 12. 劉源俊(2005)：物理教育從名詞談起。物理雙月刊,27(4),621-623。
 13. Benson, H. (1996). *University Physics, revised edition*. John Wiley and Sons Inc.
 14. Galileo (1638). *Dialogues Concerning Two New Sciences*. (中譯本：伽利略：關於兩門新科學的對話。大塊文化出版。)
 15. Karplus, R. (1977). Science Teaching and the Development of Reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*. 14(2), 169-175.
 16. NASA History Division, The Hammer and the Feather, (1971 年，太空人大衛史考特 (David Scott) 在月球上做了一次落體實驗的精彩表演)
<http://history.nasa.gov/alsj/a15/a15.clsout3.html>