
伽利略強調的是實驗方法或理論思維？

姚玗^{1*} 余建鑫²

¹ 國立臺灣師範大學 物理系

² 新北市立永平高級中學

談到伽利略 (Galileo Galilei, 1568-1642)，大家就容易想到比薩斜塔的落體實驗，而認為他是實驗物理的重要開創者，並主張實驗方法是他在物理學上的主要貢獻。本文將檢視比薩斜塔實驗的可靠性，藉著回顧伽利略的物理工作，詮釋科學專家們為何會尊稱其為近代科學之父。

壹、落體實驗的歷史記載

科學上許多重要思想並非立刻便能形成最終的正確形式，常常是需要經過一段時期的醞釀，甚至會有一些錯誤發生，但這並無損於該科學思想的成果，反而更有助於我們了解其可貴的創見內涵之背景，落體定律的發現便是一個很好的實例。

一般人會認為落體定律是由比薩斜塔的實驗發現而得，主要是由於維維安尼 (V. Viviani, 1622-1703) 在其著作《伽利略傳》中的一段內容所述：

「材料相同、重量不同的物體在同樣的介質中下落，其速率並不像亞里斯多德所說會與其重量成比例，而是以相等的速率運動。伽利略在其

他教授和全體學生面前，從比薩斜塔頂反覆地做實驗證明這一點。」
(Drake, 1978)

然而，維維安尼並未真的親眼見過伽利略做過落體實驗。因為假如伽利略曾在比薩斜塔做過落體實驗，大概的時間是在1589-1592年擔任比薩大學教授其間，但那時維維安尼還未出生。他是在1639年才來到伽利略的身邊，所以維維安尼記述有可能不準確。

此外，有人曾找遍比薩大學那時期的有關紀錄，均未發現有關伽利略在比薩斜塔做落體實驗的記載 (Cooper, 1935)：

「伽利略在比薩大學教書時，從未提過與寫過這件事，在後來的著作中也從未提及過。」

事實上，第一個做落體實驗的人並非伽利略，而是由意大利人史帝文 (Stevin, 1548-1620) 於1586年首先描述出此實驗：

「輕球與重球同時一起落至木板上，以致於他們兩個聲音聽起來似乎只有一個，似乎是同一時間撞擊。」
(Cohen, 1960)

* 為本文通訊作者

伽利略早期在 1589 年《論運動》的文稿裡頭，不但沒有駁斥亞里斯多德（Aristotle, 384 - 322 BC）的落體觀「重物比輕物落得較快」，並且還加以修飾延伸，可見得當時的伽利略仍然是支持亞里斯多德的。人們習慣所言的高塔實驗很有可能與伽利略在《兩大世界體系的對話》裡的敘述有關：

「如果地球有自轉的話，那麼一塊石頭從高塔上落下，由於高塔被地球的旋轉所帶動，在石頭落下的時間內，高塔會向東移幾百碼，而石頭也應該落在離高塔底部同樣距離遠的地方。」（伽利略, [1632 原著發表年]）

在此的落體實驗主要是描述：若在地表高處自由釋放物體，它們是落在高塔正下方，並非高塔西邊，而不會發生如地心說的人們所預測的結果；亦即地球是否轉動，不能以落體著地處是在塔底何處來證實或否證。但伽利略在此並未敘述：重物與輕物皆以相等的速度變化落下，並同時著地的落體運動定律。

雖然伽利略在 1610 年左右曾探討落體下落規律，而暗示重物與輕物將同時著地，但真正推翻「重物比輕物落得較快」的論點且有文字記錄的記載，卻是在多年後伽利略所發表《關於兩門新科學的對話》裡，藉他的化身薩維阿蒂（Salviati）對亞里斯多德物體下落速度與重量成正比的說法，進行批駁時所確認下來的：

「薩維阿蒂：如果我們取兩個自然速率不同的物體，把兩者連在一起，快者將被慢者拖慢，慢者將快者拖快。您同意我的看法嗎？」

辛普利丘：毫無疑問，您是對的。

薩維阿蒂：但是假如這是真的，並且假設有一塊大石頭以 8 單位的速率運動，而另一塊較小的石頭以 4 單位的速率運動，當它們被連結在一起時，整個系統就將以一個小於 8 的速率運動；但兩塊石頭被綁在一起後，將比原先的大石頭更大，而這更重的物體是以比較輕的物體速率更小的速率運動的，這樣子的情況是與您的假設相反的。因此，從您那「重物比輕物運動得較快」的假設下，我卻可推論出「重物是運動得較慢」之矛盾結果。」（伽利略, [1638]）

故對伽利略而言，「重物與輕物將同時著地」的結論並不是由實驗觀察所獲得，而是邏輯的論證結果。由比薩斜塔的實驗發現落體定律的說法，也一直未獲得科學史家的證實，它比較像是一種傳奇，而非事實。

貳、伽利略最初的錯誤分析

伽利略在《論運動》一書中表現出的落體思想，與亞里斯多德的想法並無太大

的差異。亞里斯多德認為：物體下落「速度 v 」取決於「物重 F 」與「介質密度 R 」；即重物比輕物落得快，且若介質密度越大，阻力越大，下落速度則越慢。如以現今代數符號來表示，則可大致寫成

$$v \propto F/R$$

伽利略在《論運動》書中，則寫道：

「正如我們證明的，運動物體的速率並不取決於這一點，而是取決於物體重量與介質重量差的大小。……我們得到的一般結論是：在物體材料不同的情況下，只要它們大小相同，則它們（自由下落）運動的速率之比，與它們的重量之比是相同的。」

簡言之，伽利略認為：下落「速度 v 」取決於「物體 F 與介質 R 的重量（或密度）差」，可大致寫成

$$v \propto F - R$$

表示他當時顯然仍相信，同樣大小的物體在空氣中下落，較重的要比較輕的快，他甚至還為實際觀測所得結果與上述結論不符，進行辯護（郭奕玲，1994）。

接著很可能伽利略認識到重物輕物皆會以相同速度落下，並在1604年10月16日寫給友人保羅（Paolo Sarpi, 1552 - 1623）的信中，第一次具體的表達了「距離與時間平方」成正比的規律（Shapere, 1974）。雖然如此，但是他在信中的論證卻是錯誤的，因為他是由下落速度(v)與距離

(S)成正比，即 $v \propto S$ ，獲得距離與時間平方成比例的關係。他如此寫著：

「要對我所觀察……在自然運動中所通過的距離正比於時間的平方，進而得知在相等的時間內所通過的距離有連續的奇數比關係。這些結果的假設是：自然運動物體速度的增加與物體離開初始位置的距離成比例。」

可以作一條與 AF 成任一角度的一條直線 AK ，並畫出通過點 C 、 D 、 E 、 F 的平行線 CG 、 DH 、 EL 、 FK 。……因此在點 F 、 E 、 D 、 C 的速度大小和與線段 FK 、 EL 、 DH 、 CG 的長短成比例（譯註：在此使用 $v \propto S$ 成正比關係，與 $AF:AE = FK:EL$ ，如圖 1）。……

運動物體從 A 到 D 的速度是由在線 AD 上每一點所獲得的速度大小所構成的，……通過線 AD 的速度和通過線 AC 的速度的比例，……就是三角形 ADH 與三角形 ACG 的比，即 AD 的平方與 AC 的平方之比。

因此，通過線 AD 的速度與通過 AC 的速度之比就是 AD 與 AC 長度之比的平方。由於速度比是時間比的倒數（增加速度等同於減少時間），所以通過 AD 所用的時間和通過 AC 所用的時間之比就是路程 AD 與 AC 之比的 $1/2$ 次方。因此離開下落點的距離就與時間的平方

關，也就有相等時間內所通過的距離是奇數的關係。這和我總是提到的觀點以及所觀察到的實驗都相吻合。」(柯伊列，2002)

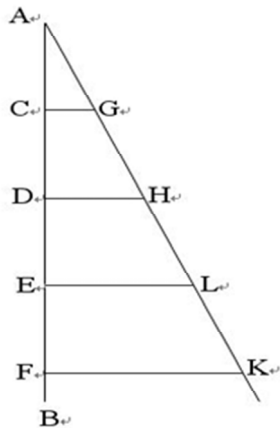


圖 1、伽利略最初對落體運動的描述圖

在上述論證裡，伽利略除了引用“運動物體速度的增加與物體離開初始位置的距離成比例”不正確之關係外，他還犯了兩個主要的錯誤。首先，速度比是時間比的倒數，僅在物體通過相同距離下才成立，而非任意狀況下均為真。其次在第四段的論述裡，若在 D 及 C 點之速度分別與距離平方 AD^2 及 AC^2 成正比，即

$$\frac{v_D}{v_C} = \frac{AD^2}{AC^2} = \left(\frac{S_D}{S_C}\right)^2$$

若時間比為速度比倒數之關係為真，則時間比應為距離平方比的倒數，可表為

$$\frac{t_D}{t_C} = \frac{v_C}{v_D} = \left(\frac{S_C}{S_D}\right)^2 = \left(\frac{S_D}{S_C}\right)^{-2}$$

並非如伽利略所述：時間比為距離比的 1/2 次方，即

$$\frac{t_D}{t_C} = \left(\frac{AD}{AC}\right)^{1/2} = \left(\frac{S_D}{S_C}\right)^{1/2}$$

而得到

$$t \propto S^{1/2} \text{ 或 } S \propto t^2$$

也就是他是由錯誤的假設 $v \propto S$ ，經過錯誤的論證，而獲得最後的正確結果。因為如此，1604 年伽利略所提之落體定律 $S \propto t^2$ 並未被科學史家認為是最早的運動學定律，反之，克卜勒 (J. Kepler, 1571-1630) 於 1609 年所提出之行星橢圓與面積定律，被視為是史上最早的運動律 (姚珩，2004)。

參、笛卡兒對落體運動的觀點

伽利略所犯的錯誤，笛卡兒 (R. Descartes, 1596-1650) 很清楚，因此他拒絕 $v \propto S$ 成正比的落體關係，自然也不會接受 $S \propto t^2$ 的落體定律。在 1629 年，他認為落體在空間中每處均受到衝力 (impetus) 的作用，在空中停留處愈多，受到的衝力也愈大。如圖 2 所示，一物體自起點 A，經過中點 B，抵達末點 C，他將起點至末點的空間位置均勻地平分成相同的約 40 個等分點，圖中以 1, 2, …, 10 標示出，每一空間上的瞬間點，均受到向下的衝力影響，並以線段的長度代表對應點所受衝力的大小。

由於經過空間中每個瞬間點，皆受到其對應的衝力作用，結果自 A 到 B 所受衝力累積的大小，便可用衝力線所含蓋的面積來表示，也可視其為 A 到 B 的平均速率大小。因為通過 BC 仍保持通過 AB 時的所有衝力，而 BC 線段內所含蓋的衝力面

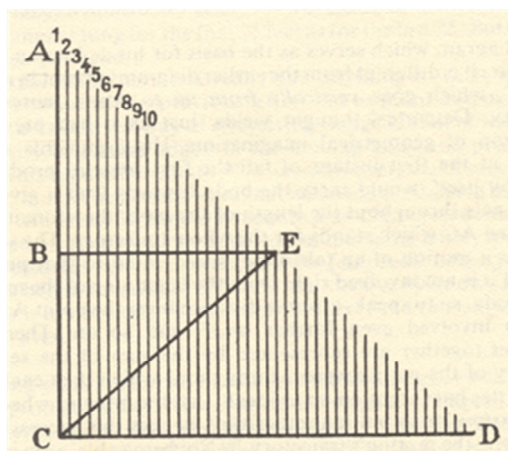


圖 2、笛卡兒落體運動示意圖

積恰為 AB 的 3 倍，故物體通過 BC 將快於 AB，且若從 A 到 B 需要 3 個時刻，那麼從 B 到 C 需要 1 個時刻，因大致上其平均效應可表為

$$t_{AB}:t_{BC} = \frac{S}{v_{AB}}:\frac{S}{v_{BC}} = \frac{S}{1}:\frac{S}{3} = 3:1$$

即 4 個時刻所通過距離 AC 是 3 個時刻所通過距離 AB 的兩倍。依次類推，12 個時刻所通過距離是 9 個時刻的兩倍，16 個時刻所通過的距離是 9 個時刻的四倍等等（柯依列，2002）。

以現今正確的落體定律來看笛卡兒的分析，雖然有誤，但卻非常接近真實，因按笛卡兒所述，若通過一單位長度 AB 所需時間為 1 秒，則通過二單位長度 AC 所需時間為 4/3 秒，而由落體律 $S \propto t^2$ ，通過二單位長度所需時間為 $\sqrt{2}$ 秒，與 4/3 秒比較相差不到 6%。雖言如此，但是笛卡兒的方法卻未被日後的物理學家所接受，他的分析也不盡完善充分，所以會造成如

此結果，主要是由於他將「衝力」的「動力學」概念引進入「運動學」的分析上，而這是晚期伽利略所極力避免的，也是他成功的第一步，即單獨將運動概念孤立出來，暫且先不要觸及運動成因。

肆、落體定律發現的思想背景

伽利略那時代的西方科學思想一直是受到古希臘思想的影響與支配，其中希臘一項著名的爭論為：將數學應用於自然科學中，作為推理的方法和證明的媒介，是否合適？也就是說，它是會帶來真理與實在，還是無用與危險？柏拉圖（Plato, 427-347BC）相信對於物理學的思辯，數學是特別合適的。而亞里斯多德則持著完全相反的看法，並且把柏拉圖的錯誤歸因於他對數學的過份熱愛。如果像柏拉圖所言（柏拉圖，[380 BC]）：

「算術有一種很高尚的作用，迫使靈性去論證抽象的數目，並能免於受可見、可觸之物所困。」

「惟幾何能令人洞見真理。」

聲稱數學具有較高的價值，並且在物理學中賦予數學一個真實價值和重要位置，那麼這樣的人則是柏拉圖學派的。相反地，若似亞里斯多德把

「實體分成十個範疇：本體、性質、關係、地點、時間、位置、狀態、作用、反應、量。」

量只是其中之一，且不是最重要的範疇（羅

伊德，1984)。而將數學看作是一門純抽象的科學，認為它比研究實在事物的物理學和形而上學的科學具有較低的價值，尤其是對直接依賴並建立在經驗上的物理學，數學僅被賦予一種輔佐的角色，持有這樣觀點的人便稱為是亞里斯多德學派者。

至於伽利略是持何種觀點，在他書中記載：

「辛普：我已經有很多次對您的論證方法留下了強烈的印象，它使我認為您傾向於柏拉圖的觀點。

薩維：我可以以語言和事實來向您說明我對柏拉圖觀點的看法，使您更容易理解我獲得知識的觀點。」

因此，很清楚地伽利略認為自己是柏拉圖知識論的支持者。然而，持柏拉圖論點者的數學化工作總是遇到雙重的障礙，一是性質難以量化，二是運動的複雜現象常與數學化相抵觸。亞氏認為性質的數學化是不可能的，因為性質不屈從於數學觀念的嚴格性。性質和形式不能被幾何化，天文學是可能的，但天文學不是物理學，若欲追尋對自然的數學化，我們什麼也得不到。另一方面，在運動現象上，尤其是落體運動，有落體的重量因素，還有空氣的浮力與阻力問題，若要以數學推演出每個內容細節是不可能的。如果不能隔離出其中任何一個現象，人們便不能以任何數學形式建立起簡單的定律，造成物理學進展相當

緩慢（柯依列，2002）。

然而這些困難與障礙皆被伽利略逐一解決，首先他只專注於落體「如何」運動，而不去考慮前人所在意的「為何」會運動；他也不考慮鐵球與樹葉所造成的下落差異，而只單純地注意不受浮力影響的重物下落問題。他於是可把問題簡化，並將現象隔離出來，成為對位置的單純描述。其次，他善用前人奧里斯姆（N. Oresme, 1323-1382）已定義，但尚不知被利用在自然現象上的「等加速度」概念，應用於真實的落體運動上，而將抽象的概念實體化，或將落體運動的性質量化（格蘭特，2000）。最後，再利用數學所具有清晰的數量分析，與嚴謹幾何關係的特質，可論證掌握與預測出許多新現象。換言之，伽利略認為：對結果的推演要先於對觀察的求助；並承認發現物理學的真实定律過程中，數學研究具有最高的必要性；以及對物理事物的認識，數學的作用非常明顯，它扮演著關鍵角色。基於這些信念與方法，伽利略透視並瞭解了千年來人們所無法看到的世界。

伍、落體定律的發現

落體定律的完整呈現要一直到 1638 年伽利略晚期，也是他智慧成熟時期，所發表的《關於兩門新科學的對話》裡，方得見其清晰與嚴謹的全貌。在該書中，他是清楚的定義、公理及定理出發，隨之演譯出 58 個命題，包含了直線的等加速度運動與水平及斜向拋射運動。這是物理史

上第一部具有此種格式的專著，也成為日後牛頓 (I. Newton, 1642-1727)《自然哲學的數學原理》的參考模式。在伽利略廣泛應用他的重要原理前，他總結了當時物理上迷思偏差的部份，並一一加以駁斥，再以嚴格的論證提出最新穎正確的觀點與方法，現僅簡略地勾勒其基本精神。

一、數學論證提出假設

1. 物體下落速度不與重量成比例：如在本文第一節中所述，他以重物與輕物下落速度若不同，將會產生矛盾的歸謬證法，指出「重物與輕物同時釋放後，必會同時著地」。因此，接著要探討的是任意物體被釋放後將如何運動的問題。
2. 任意物體，不論是重物或輕物，釋放後的速度會愈來愈快，但其下落速度 v ，不會與距離 S 成正比，即 $v \propto S$ 是不可能的：

伽利略是通過內在思考的一個想像實驗，而知曉他過去所採用 $v \propto S$ 之原理為錯誤的，並指出若該關係為真，將會造成另一荒謬，即物體掉落一倍距離與兩倍距離，所花費的時間會相同；換言之，物體在後半段的運動，將不需花費任何時間。因為若一物體自 A 點靜止落下到距離為 l 之 B 點，再落下到距離為 $2l$ 之 C 點，若在 B 處之速度為 v ，因設 $v \propto S$ ，則在 C 處之速度為

$2v$ 。因物體之速度均勻增加，設 A 至 B 之平均速度為 $(0 + v) / 2 = v / 2$ ，而 A 至 C 之平均速度為 $(0 + 2v) / 2 = v$ 。如圖 3 所示，則 A 至 B 與 A 至 C 所花費之時間分別為

$$t_{AB} = \frac{l}{(v/2)} = \frac{2l}{v}$$

$$t_{AC} = \frac{2l}{v}$$

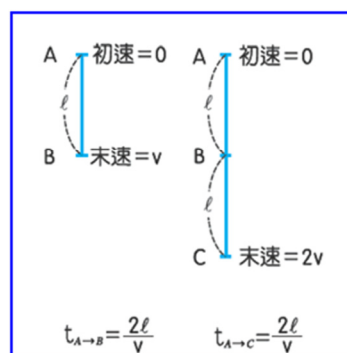


圖 3、落體速度與距離成正比 ($v \propto S$) 將導至矛盾

兩值相同，代表 $t_{BC}=0$ ，即物體在後半段，自 B 點到 C 點的運動，不需花費任何時間，這是矛盾荒謬的。因此物體下落速度不會與距離成正比。

3. 那麼該如何描述物體的下落速度呢？

「薩維：在自然加速運動的探索中，我彷彿被親手帶領去追隨大自然本身的習性和方式，並只應用那些最平常、最簡單、和最容易的方法在自然界中所有其他的程序裡。」

伽利略深信自然現象會遵循最簡單的規律，因此，他提出了重大的假設：物體的下落速度僅與時間成正比，即

$$v \propto t$$

而不是與物體重量或下落距離成正比。也就是，落體將遵循均勻地等加速度運動。

換言之，落體速度為何會依循與時間成正比的關係，對伽利略而言僅有一個原因，那就是因為它「簡單」。而為何重物、輕物皆以相同的速度變化落下，以及為何落下速度會與時間成正比的物理學或動力學原因，則暫且不是他所關注或能力所及的問題。

至於他相信此種簡單的數學關係得以實在地描繪自然現象，是否的確為真，則要經過事實驗證。然而要觀察或測量出落體在空間中每一瞬間的速度，在當時並不是一件容易的事，因此要如何證實自然現象背後的結構是遵照最簡單關係的主張，依然有待後續的檢視。

二、形成原理預測現象

雖然落體的瞬時速度甚難測出，但物體運動速度與下落距離隱含有特定關係，而物體行進的距離則較易測量，伽利略於是強調與寫下等加速度運動與等速運動相關的第一原理：

定理 1 命題 1

從靜止開始做等加速度運動的一物體，通過任意空間所需時間，等於此

一物體以最大和最小速率平均值的等速度運動，通過該空間所需的時間。

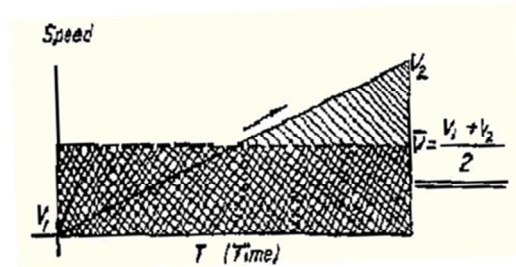


圖 4、等加速度運動與平均等速度運動的關係

也就是說物體自起點到末點，作等加速度運動所需的時間，等於以平均速度

$$\bar{v} = (v_i + v_f) / 2$$

在相同的兩點間作等速運動所費的時間。或言，等加速度所行進的距離，就等於以平均速度 \bar{v} 在相同時段裡作等速運動所行進的距離。如圖 4 的速度 - 時間關係圖，等加速關係斜線下底邊為 t 的三角形面積（位移），等於長為 t 寬為 \bar{v} 的長方形面積。

利用此關係及 $v \propto t$ ，物體若自靜止釋放或初速為零，平均速度亦與時間成正比，即 $\bar{v} \propto t$ ，則物體所行進的距離與時間平方成正比。我們亦能由附表所示，若 $v \propto t$ 而可得到累進距離 $S \propto t^2$ 。伽利略於是寫下了可供實驗檢驗的距離與時間關係的預測原理：

定理 2 命題 2

從靜止開始以等加速度運動的一物體，所通過空間的距離比等於所用時間的平方比。

表 1、伽利略從 $v \propto t$ 得到 $S \propto t^2$ 成正比的推論

t	v	ΔS	S
0	0	0	0
1	1	$(0+1)/2=1/2$	$0+1/2=1/2 \cdot 1$
2	2	$(1+2)/2=3/2$	$1/2+3/2=1/2 \cdot 4$
3	3	$(2+3)/2=5/2$	$4/2+5/2=1/2 \cdot 9$
4	4	$(3+4)/2=7/2$	$9/2+7/2=1/2 \cdot 16$
5	5	$(4+5)/2=9/2$	$16/2+9/2=1/2 \cdot 25$

陸、實驗驗證—斜面實驗

為了要證實落體是以最簡單的 $v \propto t$ 成比例的等加速度運動，其下落距離必定有 $S \propto t^2$ 的預測關係，伽利略設計了他有名的斜面實驗，完全證明其假設與延伸原理為真。

「薩維：我們取了一根木條，…在它的邊上刻一個槽，約一指多寬。把這個槽弄得很直，…給它裱上羊皮紙，也儘可能地弄光滑，我們讓一個光滑的銅球沿槽滾動。將木條的一端比另一端抬高…，使木條處於傾斜位置，…讓銅球在槽中滾動，同時用一種立即會加以描述的辦法注意它滾下所需的時間。我們重複進行了這個實驗，以便把時間測量得足夠準確，使得兩次測量之間的差別不超過 1/10 次脈搏跳動時間。完

成了這種操作並相信了它的可靠性以後，我們就讓球只滾動槽長的四分之一；測量了這種下降的時間，我們發現這恰恰是前一種滾動的時間的一半。其次我們試用了其它的距離，把全長所用的時間，和半長所用的時間，或四分之三長所用的時間，事實上是和任何分數長度所用的時間進行了比較，在重複了整百次的這種實驗中，我們發現所通過的空間彼此之間的比值，永遠等於所用時間的平方之比，而且這對…讓球沿著它滾動的那個木槽的一切傾角都是對的。…恰恰就是我們所預言和證明了的那些比值。實驗結果和我們所證實的這些性質，互相符合，且確切的彼此對應。」

因此由《關於兩門新科學的對話》內容的安排與討論來看，落體定律是伽利略經由嚴格的數學幾何推導所得出，並不是由實驗得來，也沒有大量的數據分析。他之所要做斜面實驗，只是用來讓不相信這定律的人得到信服的一個方法。

在伽利略之前，精於理論或操作技術的人們不能隔離出任何一個落體現象，落體現象中的距離與時間關係若不能被隔離

出來，人們便不能以任何數學形式建立起簡單的定律。實驗可支持或削弱我們的論證，但科學賴以建立的根本問題是不能求助於實驗來解決的。我們不應低估伽利略落體運動的觀點與創見，因為直至今日，縱然使用最先進的實驗儀器來測量，若無清晰的理論來引導時，可能不少觀測者仍只能獲得許多精確的實驗數據，或僅歸納出與中世紀科學家相似的主張，而無法提出真實深刻的內涵，因為科學不是僅嘗試盡力精確地去描述自然而已，真正重要的訊息常常是隱藏在現象背後，有時甚至很不明顯。對自然略顯粗糙、近似之規律的發現，常被證實比看似詳盡、但卻無要點的敘述更為重要（Pollard & Huston, 1969）。

伽利略所深信可以用簡單的數學關係，來掌握與描述自然界裡複雜現象的這種新方法，取代了當時兩千年來，西方傳統以性質來描述自然的思考方式，而開啟了近代科學的大門，伽利略也被視為物理學的開拓先驅。

柒、實驗科學方法的發展

雖然伽利略清楚描述了斜面實驗的必要性，但他並非是第一位發明或強調實驗方法的人。在他之前的中世紀，哲學思想與神學的結合，導致對經驗的箝制，工程技術被人們從科學中分離開來，腦與手的相互合作亦沒有受到鼓勵。但馬里考特的彼得（Peter of Maricourt）在《關於磁鐵》（Letter on the Magnet, 1269）一文中，

即要求從事實驗科學的專家們不僅要有哲學知識，而且還要掌握手工技能，只有在技師們的實踐的刺激下，數學科學才能夠繁榮發展，也才能夠糾正那些僅僅憑藉物理的和數學的知識所無法發現的錯誤。哲學家羅傑·培根（R. Bacon）還稱彼得是「實驗大師」，可知實驗方法很早便被提出（霍伊卡，1999）。

實驗的結果是一種無可否認的事實，它可以防止年輕人「光憑自己的大腦冥思而漸漸滋生驕傲情緒」。隨後也出現了一種普遍的願望，要求有更多的「可視證明」，有更多的「動手實驗」，以及要求「大量增加機械學知識」。當時學者有言：

「當從事機械工作的勞動者擁有哲學的頭腦，而哲學家們擁有能夠從事機械工作的雙手之時，哲學便臻於盡善盡美。」

可知實驗漸受重視。1598年倫敦格沙姆學院建立，成為學者與技術人員的一個會面地點，以及用拉丁文與英文講授科學、數學及神學的地方。技術人員與學者的相互合作，導致了實驗方法的飛速發展和改進。

1600年左右三位偉大的數學家（Digges, Harriot, Dee），對於有發明創造的技術人員最為敬重。卓越的技師對科學懷有興趣，著名的學者亦對技術懷有興趣，呈現科學知識可為機械技術服務（霍伊卡，1999）。

「這種轉向實驗方法的普遍趨勢，很

難視為是由於一個人的工作的影響，這不如說是由於社會條件的改變所產生的結果，自然地導向經驗科學。…於是觀察與實驗創造了整個由科學事實與科學定律所組成的新世界。」(萊興巴哈，1986)

伽利略之所以常被視為在實驗方法上有重大貢獻，主要是有一些重要學者宣稱：

「伽利略著作的所有解釋的關鍵，因此也是近代科學的總體解釋的關鍵是實驗在科學中的作用。伽利略是一個謹慎而有洞察力的觀察者。」
-法國史學家 P. Jouguet (1869 - 1949)

「伽利略是實驗方法的創立者。」
-奧國物理學家 E. Mach (1838 - 1916)

然而到底實驗在伽利略心中是扮演什麼樣的角色？我們底下可看他如何說：

「薩維：任何人從來也沒有做過這個實驗。石塊總是落在桅杆的腳下，而且由此得不到支持還是反對船在運動任何結論。

辛普：您做過這個實驗嗎？沒有做過這個實驗，討論就是無益的。只有實驗可以做出決定。

薩維：完全是不必要的。對於我自己，沒有實驗，我也確信事實就像我告訴您的一樣，因為它必定是這樣。」

雖然實驗的確在伽利略所開創的物理學中具有一定份量，但對他個人而言，「論證」的重要性在「實驗」之前，數學論証才是他發現自然奧秘之關鍵。在《關於兩門新科學的對話》中，他結論道：

「薩格：只有在數學中才能找到必要的證明，這種力量讓人充滿驚奇與喜悅。……了解為什麼會如此的理由，遠勝過……重複的經驗。

薩維：您的推理很適當。藉著發現某一事實的原因，來獲得其知識，提供了去理解和確定其他現象的心靈思維，而勿需求訴諸於實驗。」

愛因斯坦 (A. Einstein, 1879 - 1955) 也表示：

「伽利略使用了很多邏輯推導，他接受事實知識 (factual knowledge) 指導的努力並不比從理解 (comprehension) 那裡來得多。而理解基本上是從已經被接受的邏輯系統裡去獲致結論。」(Einstein, 1954)

捌、物理的數學化

伽利略的創造才智使他能從與運動相關的內容中，直接提煉出可以清楚用數學描述的概念，如等加速度運動、及速度與時間成正比的等概念等。科學史家認為

「伽利略的成功來自於他清楚地認

識到，需要從大量混亂的定性變化研究中，提煉出能夠恰當數學化的部份。伽利略把有關運動的所有重要概念、定義、定理、推論組織成一個邏輯的、有序的整體，並且用它來研究實際物體的運動。等加速不再是一個純粹定義的概念，而是自然界中物體下落方式的真實描述。用這些中世紀的零散術語，他建造了一門新的力學科學，並構成牛頓科學的一個關鍵部分。單是這一成就，就足以把伽利略排在科學天才之列，正是他們這些天才，一次又一次深刻地改變著科學的性質與方向。」(柯依列，2002)

當伽利略認為此種能夠掌握住正確數學化部份的方法，以及因此能把握自然界背後規律性的思考方式，是如此地令人激勵、興奮且有趣，並對其他人為何都未這麼設想而感到驚訝。一如偉大的畫家、音樂家對他們的創作感到振奮時，也同時會為他人未能分享此份喜悅而訝異 (March, 1970)。伽利略深知他的發現之重要性，最後因此說：

「廣大與最優秀的科學在此已被展開，其中我的工作僅是一個開端，日後其他比我更敏銳者的思想方式與手段，將會探究並挖掘出更深奧的境界。」

不同的哲學家與科學思想史專家也曾分別如此評論：

「正是伽利略通過實驗推翻了一門古老的科學，開啟了只立足于先驗理由的一門新宇宙理論，正是他奠定了近代最驚人的理智征服的基礎，即關於自然物理學數學化的基礎。他拋棄了作為一個基本說明原理的目的論，他的公設和方法的重大含意，為力學知識的進展提供了決定性的辯護。」(伯特，1994)

「在伽利略之前沒有任何人如此有意識、有耐心、有恆心地朝著物理發展的一重大目標努力：物理學的數學化。」(柯依列，2002)

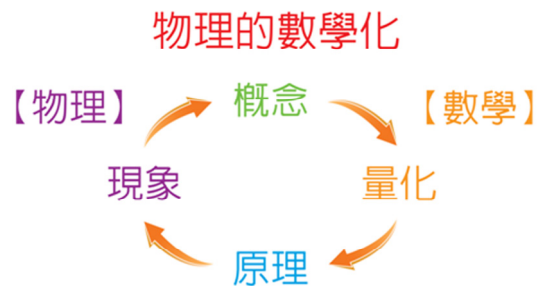


圖 5、物理的數學化之意義

此種從物理現象中抽譯出重要概念，且必須將它量化，藉此逐漸形成數學形式的普遍性原理，來詮釋預測現象背後的結構，可稱為物理的數學化(圖 5)，它是伽利略所開啟劃時代的創新方法，也一直是今天研究物理學的基本方法。愛因斯坦也因此尊稱伽利略

「就是近代物理學之父，事實上也是

近代科學之父。」(Einstein, 1954)

玖、結語

正如二十世紀中葉重要的科學史家柯依列 (A. Koyre, 1892-1964) 所言：

「自然定律即數學律，實體為數學之化身。」(柯依列，2002)

伽利略終其一生，認為宇宙自然是被設計而成的，它是合乎理性的，造物者是按照和諧的數學規律，設計及創造出整個世界，祂將嚴謹的數學秩序注入世界，人只有通過艱苦的努力，方能理解、領悟其中的秩序。而伽利略所開拓的新物理學—數學物理學，便為尋找自然界裡的秩序提供了空前最佳的利器。

參考文獻

- 伯特 (Burtt, E. 1994)：近代物理科學的形而上學基礎。成都：四川教育出版社。
- 伽利略 (Galilei, G. [1632], 2006)：兩大世界體系的對話。北京：北京大學出版社。
- 伽利略 (Galilei, G. [1638], 2005)：關於兩門新科學的對話。台北：大塊文化出版公司。
- 柯依列 (Koyre, A. 2002)：伽利略研究。南昌：江西教育出版社。

- 柏拉圖 (Plato, [380 BC], 1982)：理想國。台北：台灣商務印書館。
- 姚珩 (2004)：行星面積定律的建立。台北：科學教育月刊，274，32-38。
- 格蘭特 (Grant, E. 2000)：中世紀的物理科學思想。上海：復旦大學出版社。
- 郭奕玲 (1994)：伽利略的運動學研究。台北：凡異出版公司，1-15。
- 萊興巴哈 (Reichenbach, H. 1986)：科學的哲學之興起。台北：水牛出版社。
- 霍伊卡 (Hooykaas, R. 1999)：宗教與現代科學的興起。成都：四川人民出版社。
- 羅伊德 (LLoyd, G. 1984)：亞里斯多德思想的成長與結構。台北：聯經出版社。
- Cohen, I. (1960)： *The Birth of a New Physics*. New York：Norton & Company.
- Cooper, L. (1935)： *Aristotle, Galileo and the Tower of Pisa*. Ithaca：Cornell Univ. Press.
- Drake, S. (1978)： *Galileo at Work*. Chicago：Univ. of Chicago Press.
- Einstein, A. (1954)： *Ideas and Opinions*. New York：Crown Pub.
- March, R. (1970)： *Physics for Poets*. New York：McGraw-Hill Inc.
- Pollard, E & Huston, D. (1969)： *Poets' Physics*. New York：Oxford Univ. Press.
- Shapere, D. (1974)： *Galileo—A Philosophical Study*. Chicago：Chicago Univ. Press.