

相對論與量子力學都是現代物理學最重要的理論，在歷史影響甚深。但這兩個理論並不是憑空生出來的，它們都是人類歷史上不斷探索自然的最新發展。在討論相對論與量子力學之前，讓我們先回顧一下運動理論與萬有引力（或稱重力）的歷史。

1.1 畢達哥拉斯(Pythagoras)的宇宙和諧論

畢達哥拉斯是古代重要的哲學家，他雖然是二千五百年前的人物，但到今天仍可以感覺到他的影響 [Huf09, Rie05]。他創立的教派，把數字提升至神聖地位，建立了以數學描述自然的傳統¹。有論者認為此傳統是西方發展出現代科學的源頭 [Cha09]。據說畢氏有一天路過工匠的店舖，聽到工人用鎚拷打金屬的聲音，其中一些是悅耳的和音，夾雜着一些不和諧的聲調。畢氏正在思索着音樂的原理，便走進店舖詢問工人怎樣造出不同的聲音。他發現拷打的聲調與鎚的重量有關，而做出和音的鎚重量是整數比例，如2:3, 3:4等。畢氏欣喜若狂，回家後便做了很多實驗，例如把弦線從屋頂吊着不同的重量，研究弦線發出的音調與重量的關係，又做了一個可調校弦線長度的單弦琴(圖1-1)，以找出和音由整數比例的弦線長度所發²。畢氏把這個數學化的音樂理論推廣至天文學，建構了一個行星運動的模型。他認為星球（包括地球都是球體）在太空運行會發出音調，而各行星的音符應合奏出和音，因此各行星軌道半徑應成整數比例 [Jam93]。這套宇宙的和諧(cosmic harmony)思想，影響深遠，甚至現代天文學之父開普勒(J. Kepler)也是繼承者。開普勒在他的經典著作”Harmony of the Universe”內把畢氏的行星運動理論推廣及修正。由於開普勒知道行星軌道不是圓形，而是橢圓形的，因此每一行星運行時發出的聲音不再是單音符的，而是多音符的。開普勒便把這個天堂樂章變成一套交響樂 [Jam93]！

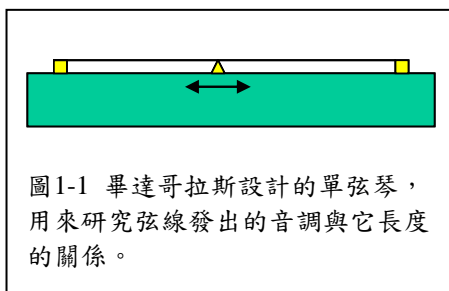


圖1-2 阿里士多德(右)與柏拉圖(左)。此圖由 Raffaello Sanzio的著名畫作”School of Athens”中截取中心部份。由維基共享資源下載
http://zh.wikipedia.org/zcn/File:Sanzio_01_Plato_Aristotle.jpg

¹ 究竟畢氏自己有甚麼重要發現，已很難確切得知。甚至乎著名的「畢氏定理」亦很可能不是他發現的。但他的學派在古希臘有很大影響，柏拉圖亦把很多畢氏思想發揚光大。

² 不過，這故事應是後人捏做的 [Huf09]。

1.2 阿里士多德(Aristotle)的力學

阿里士多德是柏拉圖(Plato)最有名的弟子(圖1-2)，亦是西方最重要的哲學家之一。他的物理學思想[Sac95]，影響西方幾達二千年。阿里士多德的力學，可說由觀察萬物所得到的歸納，再加上柏拉圖主義³而成。據阿里士多德所言，地上的自然萬物由四種元素⁴造成，即地、水、風和火，物體的**自然運動**(natural motion)由其屬性所決定：地與水移向宇宙的中心、而火與風移向天空。自然運動以均速(速度保持不變)進行，當物體抵達適當的地方時，運動就會自動停止。由於柏拉圖學說以**地心模型**(geocentric model)作為宇宙學的基礎(地球是宇宙的中心)，所以地與水的自然運動，目的地就是地上，越重的物體墜落得越快。這可以說是阿里士多德的重力學說了。不過把物體下墜的原因稱為重力作用卻不甚對，因為自然運動是不需要加力的。只有當物體被移離其適當的地方時，才需要施加外力，這種便稱為**強迫運動**(violent motions)。

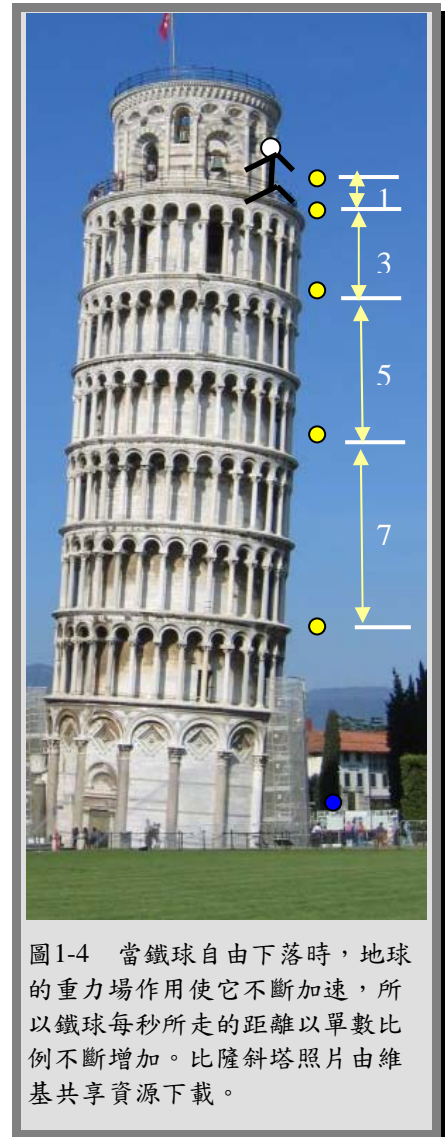
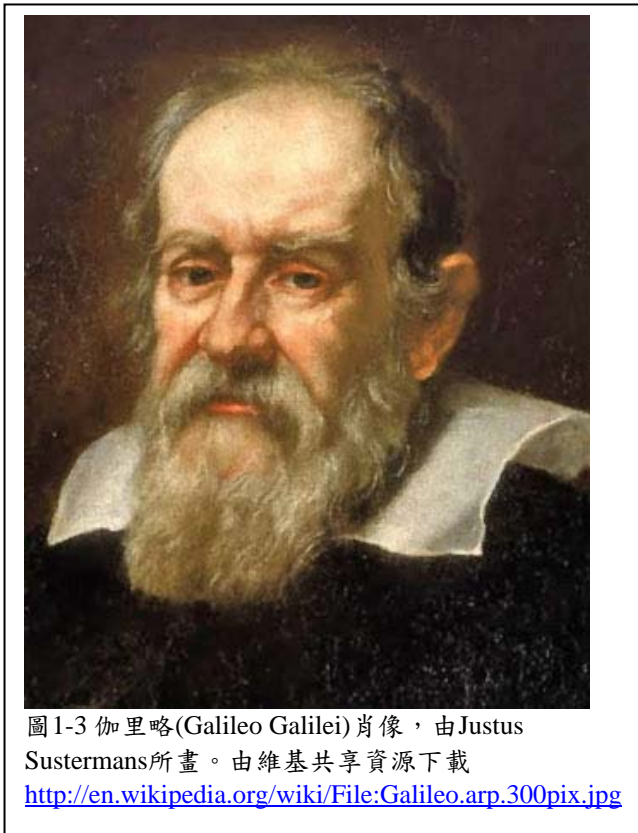
今天連中學生也知道，阿里士多德這套運動理論，由四大元素論、地心模型、以至自然運動的描述(均速，愈重愈快)等，全部皆錯誤，看來似乎不值一談。但細看下可發現這理論實在是奠立現代科學的經典之作。首先它是定量(quantitative)的，例如自然運動速度不變及速度與重量成正比等，因此可以實驗否證。而且理論由幾個假設(如四大元素、地心說等)，邏輯地推論物體的運動模式，可說是科學理論的典範。其實科學的進程，正正是憑藉不斷建立然後推翻這些理論而走出來。科學理論都建基於實驗或觀測結果的歸納，並作出預測，再經受實驗驗證。在科學裏沒有神聖不可侵犯的教條，所有理論都可能錯誤，相對論如是，量子力學亦如是。錯誤的理論幫助我們進一步了解自然，絕對有其價值。科學的精神，包括不怕錯誤，不避錯誤。

1.3 伽里略(Galileo)的發現

在歐洲的文藝復興期，新思維湧現，一些思想前衛者向權威的舊思想信念提出挑戰。**伽里略**(圖1-3)便是其中之一[Dra90]。他從具體的實驗中證明阿里士多德的力學理論是錯誤的。他的一些發現，成為牛頓力學的基本元素，可說是科學革命之先行者，他樹立了用實驗驗證理論的典範，是現代實驗物理之父。

³ 特別是柏拉圖思想中天堂只有完美的物體，而地上世間可見到的都是不完美、會衰敗的物質。

⁴ 這和佛學的「四大」相同。



伽里略發現物體自由下跌時會**加速(accelerate)**⁵ [Dra73]，即速度隨著時間增加，使得其每秒鐘所下跌的距離愈來愈大，以單數比例增加。若第一秒距離為一單位，第二秒便是三單位，第三秒五單位，如此類推⁶(圖1-4)。物體下墜時越跌越快，當然便直接否證了阿里士多德理論中自然運動以均速運動的假設。不單如此，伽里略又證明物體下落時的加速度和速度與它的重量無關。據說伽里略走上著名的比薩斜塔頂做示範⁷，把兩個重量，構造成份不一樣的球體拋出塔外，發現二者差不多同時到達塔底，而不像阿里士多德所說的，較重的先到達。其實這實驗不容易做的，因為不同物件下跌時受到的空氣阻力不同，要把空氣、風等影響撇除，才可以看到萬有引力之下，加速度與物體重量（或質量）無關。在二十世紀六十年代，太空人在幾乎沒有空氣的月球上示範了這實驗[Fea08]。一根羽毛與一把斧頭在真空中同步下落時，它們的加速度與速度相同。

⁵據說達文西Leonardo da Vinci 比伽里略更早提生物體自由下跌時的加速概念。

<http://arcsecond.wordpress.com/2009/10/09/the-renaissance-man-uniform-gravitational-acceleration-smackdown/>

⁶以累積計算，路程與下跌總時間的平方成正比 $s \propto t^2$ 。

⁷一般相信伽里略並沒有真的走上比薩斜塔做這費驗。

伽里略的另一重要發現，是**慣性定理(Law of inertia)**。經過很多實驗觀察，他提出物體運動時不會無緣無故地自己停下來，唯有當它受外力作用時，才會逐漸**減速(decelerate)**以至停止。亦即是說，物體在不受外力的作用下以不變的速度（均速）運動。伽里略的思考如下：當一個球體在桌面上滾動時，球體與桌面之間的**摩擦力(frictional force)**會使它慢下來，直至完全靜止。不過若能把桌面打磨得愈來愈平滑，以減低摩擦力，球體的減速便愈來愈小，滾動很遠才停下。想像若摩擦力趨向零時，球便完全不減慢，以均速直線前進[Los66]。這裏我們可以看到伽里略如何巧妙地把實驗結果與邏輯推演結合，從而突破環境的限制（當時不可能做到沒有阻力），得出在理想情況下的正確結論。這可說是一種**思想實驗(thought experiment)**，我們將在下一章見到愛因斯坦精采的思想實驗。

1.4 牛頓力學

牛頓(圖1-5)在1687年出版了<<自然哲學的數學原理>>(Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica) (圖1-6)，開啟了科學革命，催生了啟蒙運動，是科學史及人類文化史上等一的大事[Bec91]。書裏提出**牛頓運動定律 (Newton's laws of motion)**及**萬有引力(Universal Gravitation)**，創立經典物理，奠下之後幾百年人類對宇宙認知的基礎。

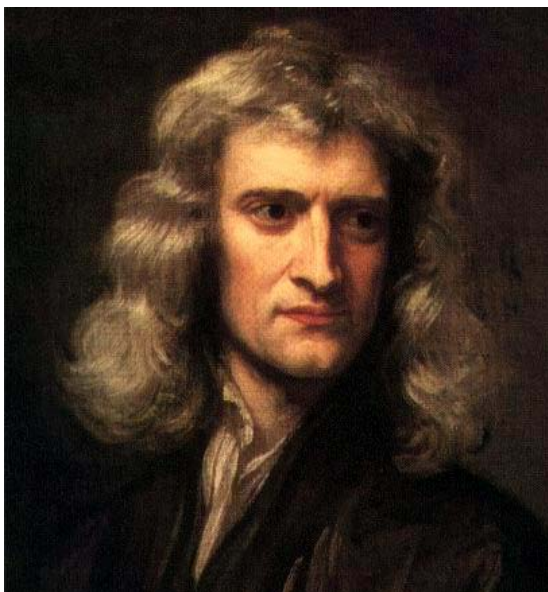


圖1-5 牛頓(Isaac Newton)肖像，由Godfrey Kneller 所畫。由維基共享資源下載
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg> .

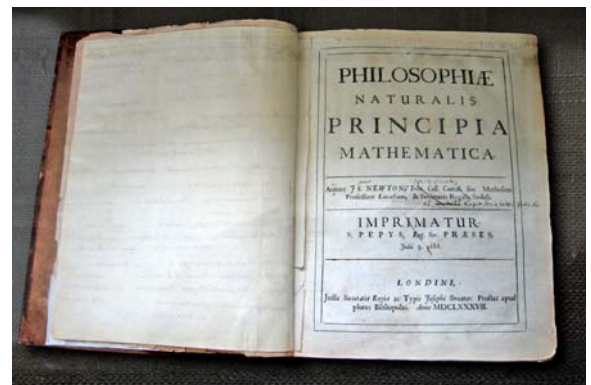
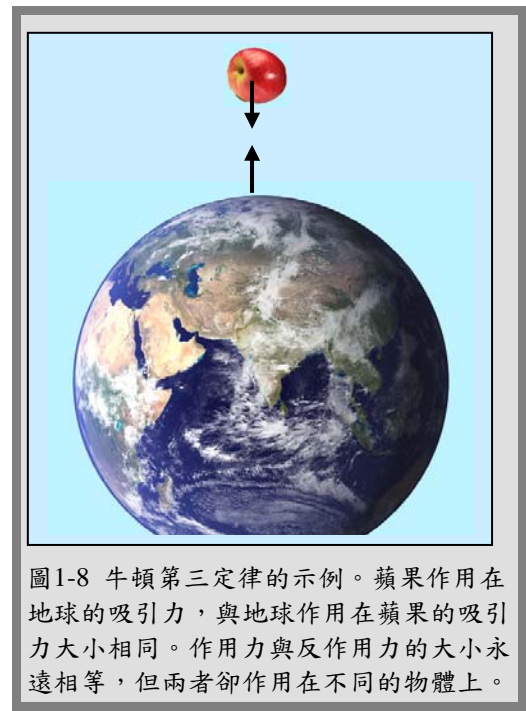
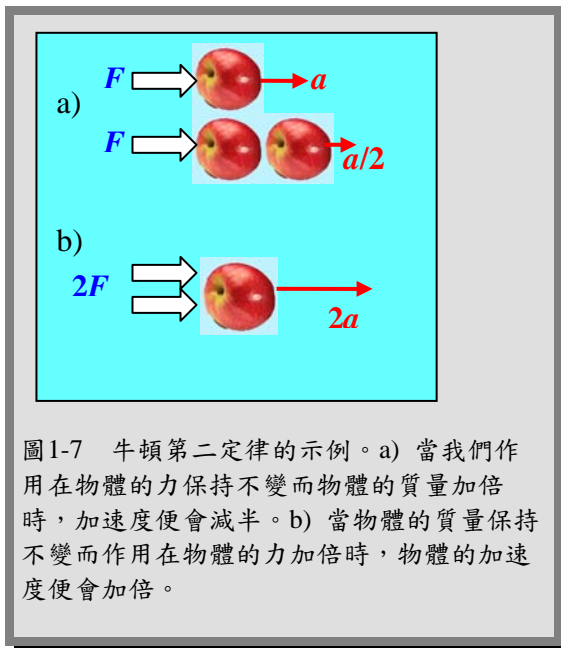


圖1-6 牛頓自己藏有的<<自然哲學的數學原理>>(Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica)。由維基共享資源下載
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/NewtonsPrincipia.jpg> .



牛頓力學[Fey65A]的基礎是三條定律。牛頓**第一定律**，即**慣性定律 (Law of Inertia)**：除非受淨力作用(外力總和不等於零時產生淨力 F)，否則物體會繼續保持其靜止狀態，或在直線上均速度運動。這基本上是上述伽里略的發現。第一定律界定了兩種運動：均速及非均速的。均速運動是物體慣性使然，不涉淨力。若有淨力施加於物體，便不再保持均速，而有加(或減)速了。淨力愈大，加速愈大。這便是牛頓**第二定律**，加速度和淨力成正比， $F = ma$ ，和物體的質量(m)成反比，而且加速度與淨力的方向相同(圖1-7)。這裏牛頓引入質量⁸的概念：物體的質量決定其加速的難易，加速大質量的物體較困難(需要較大的作用力才可以達到一定的加速度)。這可能是物理學最有名的定律，極之簡單而普遍，無論是那一種作用力，如萬有引力、電磁力、或甚至是尚未發現的力，作用於任何物體，不管其材料、形狀、大小、在宇宙任何一角落，都會令物體按其質量得到相應的加速。知道加速度，我們便可以計算物體的速度及軌跡⁹。第一及二定律¹⁰似乎已清楚界定了物體的運動，但物體之間往往是相互作用的，例如兩電荷相吸，我們不能說只有其中之一施加力於另一粒，倒過來說也正確。因此我們需要牛頓**第三定律**：對於每一個**作用力 (action)**，必會產生一個方向相反、大小相等的**反作用力 (reaction)**(圖1-8)。作用力與反作用力總是一對的出現，而各自作用於不同的物體。為甚麼反作用力與作用力大小相等？原因是動量守恆。想像宇宙只有兩物體A和B，進行相互作用。A的作用力把B加速，那B的動量(momentum = mv 質量乘以速度)便會改變，要保持動量守恆¹¹，便需要A有相反的動量改變，亦即B施加於A的反作用力。至於那一是作用力或反作用力，就只是觀點與角度了。

牛頓的力學第二定律，除了告訴我們如何計算任意物體的運動，亦提出了研究力學的方向，重點是找出所有的作用力，以及每一種力與物體位置、速度等的關係。牛頓

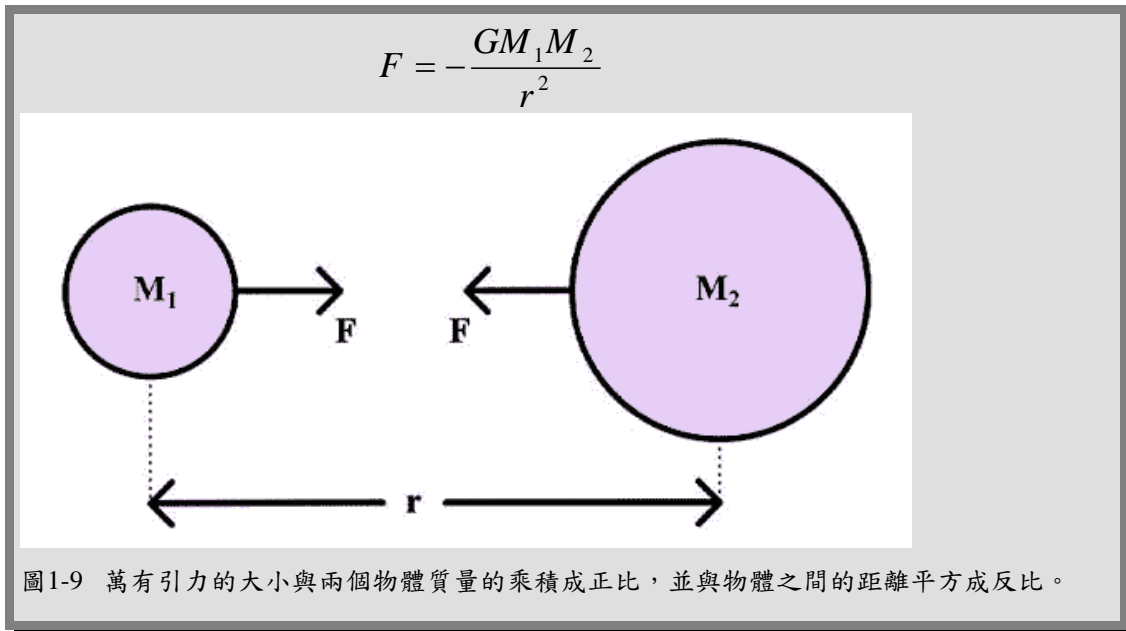
⁸ 嚴格來說，這是慣性質量(inertial mass)。

⁹ 這些計算很多時需要引入微積分的方法。

¹⁰ 第二定律已包含第一定律，因 $F=0$ 時， a 亦為零，即均速運動。

¹¹ 沒有任何外力了。

提出描述其中一種基本力¹²的萬有引力定律 (Newton's Law of Universal Gravitation)。：宇宙間任意兩個物體之間必然存有一吸引力，這引力(F)的大小與兩個物體質量(M_1 和 M_2)的乘積成正比，並與兩個物體的距離(r)的平方成反比(圖1-9)：



物體質量越大，吸引力就越強。物體分隔越遠，吸引力就越弱。宇宙間任何物體，不論他們是蘋果、月球、或是太陽等，都同樣地遵守這條定律。兩物體之間的吸引力是**相互 (mutual)**的，換言之， M_1 作用在 M_2 的吸引力，與 M_2 作用在 M_1 的吸引力大小相等。例如說，一個人和地球之間有相互的引力，人被地球的引力「拘留」在地上，要逃離地球得花很大的力氣，但同樣地，人以同樣大的引力亦把地球拉着。不過這兩個同樣大的引力，作用於不同物體，對龐大的地球影響當然比起對人來說小很多。注意牛頓的萬有引力是一種超距作用(action at a distance)：某一處地方的物體所產生的效應會**即時**影響其他任何地方的物體，即使物體之間相距非常遠¹³。萬有引力比電磁力弱很多倍，但龐大的物體往往是電中性的(由於正、負電荷互相吸引以至互相中和)，因此在天文學的尺度下¹⁴，萬有引力支配星體的運動。

牛頓的運動定律及萬有引力定律，便構成一個由力學支配的機械宇宙觀 (a mechanical universe)，所有天體完全按照相互的引力作用及牛頓定律而運動。我們若能準確地知道所有天體在某一時刻的位置及速度，便可以計算每一天體在之後**所有時間**的運動。這是一個很公平、「守法」的情景，由最微不足道的小行星，到龐大的星系團，無一例外地遵從這套力學法則，不以任何人或神的意志而轉移。而且所有運動都是決定論(deterministic)的，沒有隨機性，「上帝不玩擲骰子」¹⁵。這思想影響深遠，催生了科學革命，替啟蒙運動提供不少精神彈藥，在歷史上有劃時代的意義¹⁶[Coh80]。

¹² 另外三種是強力、弱力、及電磁力。

¹³ 這可從引力定律沒有時間的影響看出。而且無論 r 是多大， F 亦非零。

¹⁴ 強、弱作用力更強，但都是很短程的，只在原子核內才感覺得到。

¹⁵ 這是愛因斯坦在反對量子力學時說的名句。

¹⁶ 法國文豪、思想家伏爾泰(Voltaire)便受到牛頓力學影響，而鼓吹人權、平等及公義。他亦將牛頓的著作由拉丁文翻譯成法文，使其在歐洲大為流行。

根據牛頓力學我們可以解釋伽里略關於物體自由下跌運動的發現。物體下跌加速是因為物體受到地球的引力作用。物體質量愈大，引力愈大，但加速亦愈難，那是因為要把引力除以質量才得到加速($a = F/m$)，質量的影響剛好抵消。因此下跌速度及加速度與物體質量無關。

牛頓力學帶來一個很重要的啓示：**天體的運動，和地上物體的運動並無二致**。月亮和蘋果遵守着同樣的定律而運行。若果沒有地球或任何星體的引力，月球以直線在太空均速運動（慣性運動）。但地球的引力不斷把月球拉向地球(圖1-10)，使到月球的公轉軌道不斷改變方向，成為彎曲的軌迹。那為甚麼月亮留在天上，不跌落到地上？想像把一個蘋果拋出去吧，大力一拋，蘋果像箭一般接近直線飛出，但地球的引力把蘋果拉向下，做成向下彎曲的拋物線軌迹。明顯地，拋出時用的力愈大，蘋果離開手時速度亦愈大，軌迹的彎曲愈小，跌落地面前飛行的距離愈遠(圖1-11)。若果不斷加大力度，終於蘋果的軌跡彎曲程度比地面的還要低，亦即是說，蘋果下跌的距離小於地面水平的改變，結果是，蘋果不斷下跌，卻不能着陸。**蘋果上了軌道！**成為天體的蘋果，並不比地上的蘋果神聖，它們的運動亦沒有本質上的分別，只因初始速度不同，使得二者有遨遊天上與流落凡間的不同際遇而已。若果初始速度再增加，軌道便愈來愈扁，變成橢圓形¹⁷。各個行星，便是以這種軌道繞日公轉。當初始速度達到一個臨界值¹⁸，軌道便變成開放的（拋物線或雙曲線），蘋果有足夠能量逃離地球的引力，一去永不回！今天我們可以把人造衛星放上軌道，或把太空船送到木星、土星、或甚至離開太陽系，都建基於牛頓的理論。利用牛頓力學的方程式，我們能夠準確地計算各行星、月球、彗星等的軌道，從而預測各種天文現象。著名的天文學家哈雷(E. Halley)，便是以牛頓的方法，預測了哈雷彗星的回歸，以及1715年的日全食而聲名大噪[Coo98]。

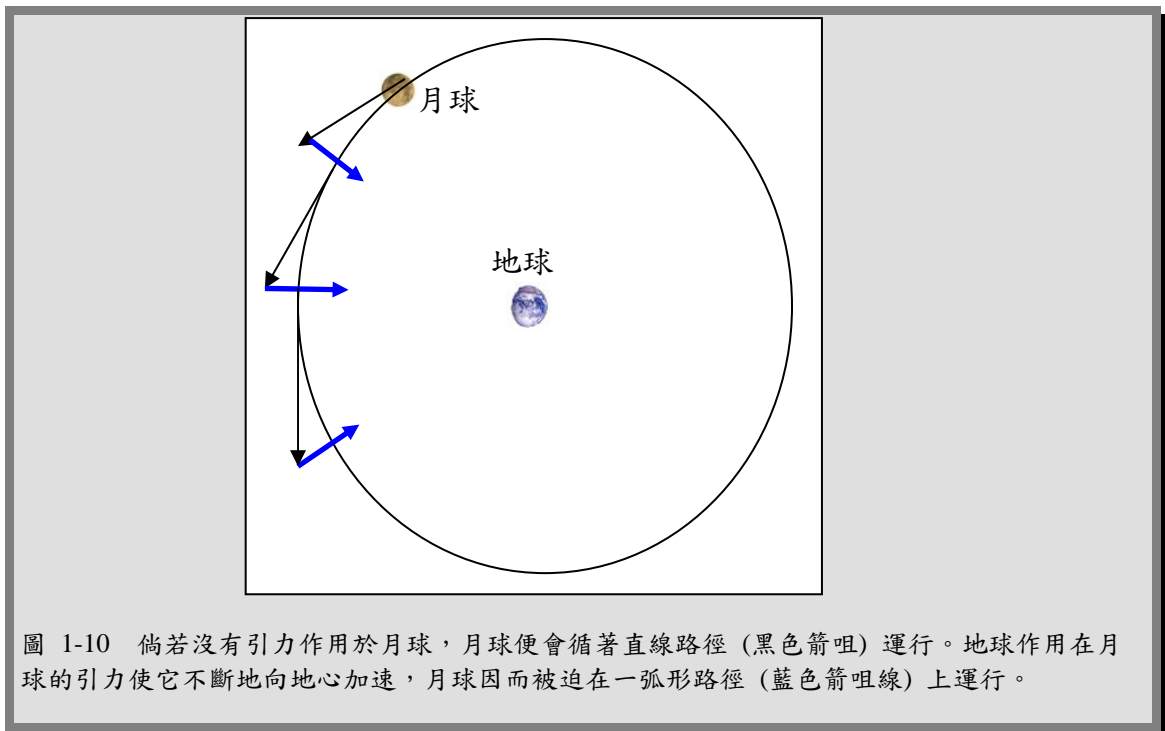


圖 1-10 倘若沒有引力作用於月球，月球便會循著直線路徑（黑色箭咀）運行。地球作用在月球的引力使它不斷地向地心加速，月球因而被迫在一弧形路徑（藍色箭咀線）上運行。

¹⁷ 圓形是橢圓的一個特例（偏心率等於零）。

¹⁸ 稱為逃逸速度(escape velocity)。

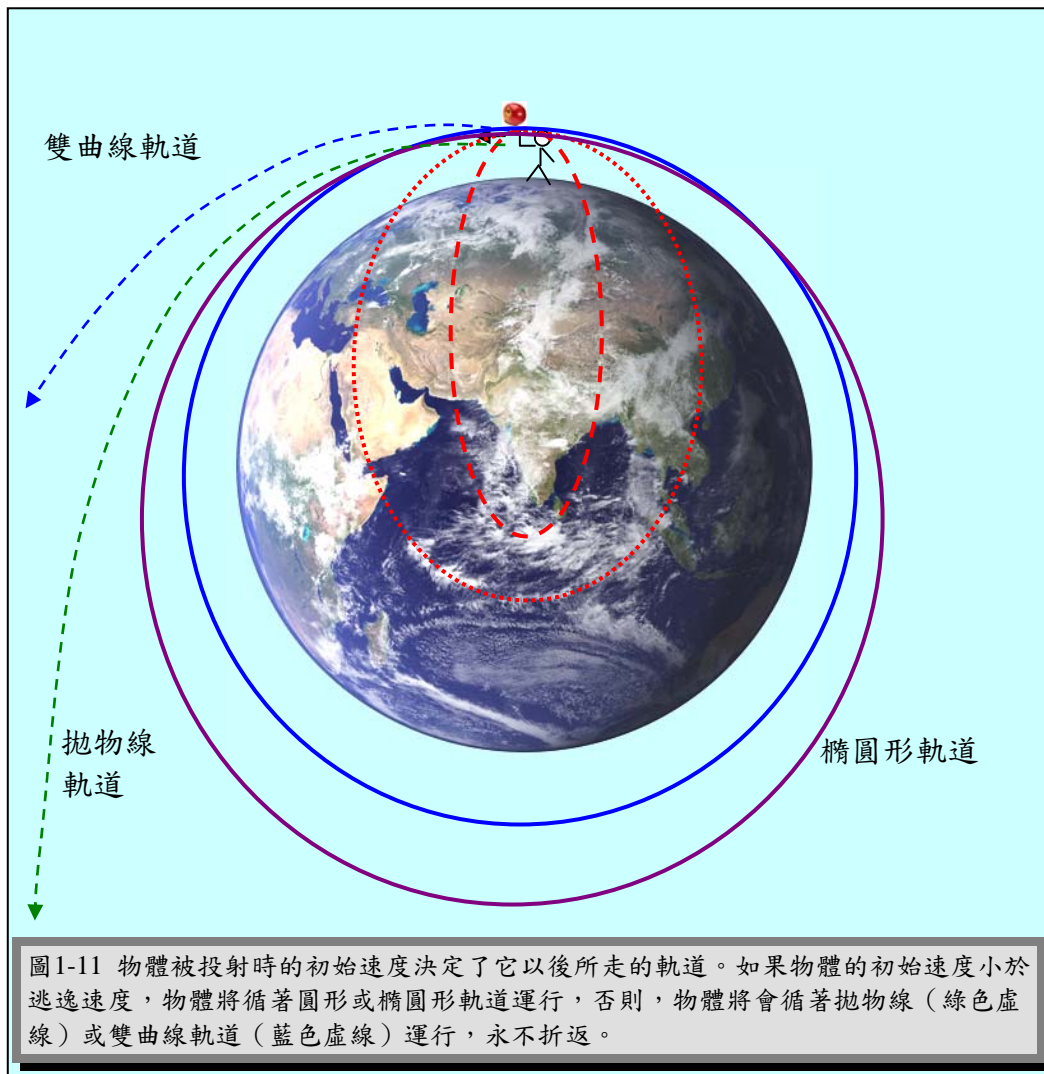


圖1-11 物體被投射時的初始速度決定了它以後所走的軌道。如果物體的初始速度小於逃逸速度，物體將循著圓形或橢圓形軌道運行，否則，物體將會循著拋物線（綠色虛線）或雙曲線軌道（藍色虛線）運行，永不折返。

牛頓力學與萬有引力定律亦成功地解釋了開普勒行星運動定律(Kepler's Laws of Planetary Motion)[Fey65a, Ste05]。開普勒[Gin93]受僱於當時最出色的天文學家第谷(Tycho Brahe) [Tho91]，把第谷二十年來的天體位置觀測數據整理成為數學方程式。開普勒歸納出三條行星運動定律。第一定律是行星以橢圓形(elliptical)的公轉軌道繞日而轉，而太陽在橢圓的其中一個焦點(focus)上。牛頓證明這與行星與太陽之間的相互吸引力遵守反平方定律相符。不過牛頓發現除了橢圓形軌道，亦可以有開放的軌道（雙曲線式拋物線），可說預測了人類飛出地球(或太陽系)作太空探索的可能。行星軌道既為橢圓形，行星便有時較接近太陽，有時較遠。第二定律指出當行星接近太陽時，行星運行比較遠時快。這定律可以用角動量守恆(Conservation of angular momentum)¹⁹ [Cro98]來理解，情況就如溜冰選手把雙手張開（收縮）時，自旋減慢（加快）一樣。我們可以比較各行星的公轉周期，及它們與太陽距離的關係。第三定律指行星距離愈遠，周期愈長²⁰。這定律可以從萬有引力及力學第二定律推導出來。距離太陽較遠的行星，所受的引力較弱，因此加速度及速度較低，運行較慢，公轉周期便較長。牛頓的理論，讓我們洞悉開普勒行星運動定律背後的物理機制，亦奠下現代物理學的一個典範。

¹⁹ 這只因為萬有引力是連心力(central force)，而不依賴於引力與距離的關係。

²⁰ 周期的平方與軌道半長軸(semi-major axis)的三次方成正比。

參考書目

- [Bec91] Zev Bechler, *Newton's Physics and the Conceptual Structure of the Scientific Revolution* (Springer, 1991).
- [Cha09] 陳方正, 《繼承與叛逆—現代科學為何出現于西方》(三聯書店, 2009)。
- [Coh80] I. B. Cohen, *The Newtonian Revolution* (Cambridge University Press, 1980).
- [Coo98] Alan H. Cook, *Edmond Halley: Charting the Heavens and the Seas* (Clarendon Press, 1998).
- [Cro98] http://www.lightandmatter.com/html_books/2cl/ch05/ch05.html#Section5.1 有詳盡講解。
- [Dra73] Stillman Drake, "Galileo's Discovery of the Law of Free Fall", *Scientific American* **228**, 84–92 (1973).
- [Dra90] Stillman Drake, *Galileo: Pioneer Scientist*. Toronto (The University of Toronto Press, 1990).
- [Fea08] 可到http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html 觀看影片及實驗的詳情。
- [Fey65a] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I (Addison-Wesley, Reading, 1965).
- [Gin93] Owen Gingerich, *The Eye of Heaven: Ptolemy, Copernicus, Kepler* (American Institute of Physics, 1993).
- [Huf09] Carl Huffman, *Pythagoras* (Stanford Encyclopedia of Philosophy) <http://plato.stanford.edu/entries/pythagoras/#PytWon>
- [Jam93] J. James, *The Music of the Spheres – Music, Science and the Natural Order of the Universe* (Springer-Verlag, New York, 1993).
- [Los66] J. Losee, "Drake, Galileo, and the Law of Inertia", *American Journal of Physics*, **34**, 430 (1966).
- [Rie05] Christoph Riedweg, *Pythagoras: His Life, Teaching and Influence*, (Cornell University Press, 2005).
- [Sac95] Joe Sachs, *Aristotle's Physics: A Guided Study* (New Brunswick: Rutgers University Press, 1995).
- [Ste05] <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/stargaze/Kep3laws.htm> 有詳盡講解。
- [Tho91] V. E. Thoren, J. R. Christianson, *The Lord of Uraniborg: a biography of Tycho Brahe* (Cambridge University Press, 1991).