

中華科學叢書第六種

33
74466

物理定律的特性

著者：Richard Feynman

譯者：林 多 樑



臺灣中華書局印行

內政部內版臺業字第〇〇〇六號登記證



33
7/4466

物

522045

33
7/4466

物理定律的特性

著者 Richard Feynman

譯者 林 多 標

臺灣中華書局印行

中華民國六十一年八月四版

中華科學叢書第六種

物理定律的特性 (全一冊)

定價：新臺幣十八元正

著者 Richard Feynman
譯者 林 多 標

中華科學叢書編輯委員(以姓氏筆劃爲序)

伍法岳 沈君山 沈慶春 李天培
林多標 吳京生 吳家瑋 吳錦鑑
夏道師 浦大邦 許翼雲 趙曾珏
劉 鑒 劉全生 鄭伯昆 錢致榕
瞿樹元

發行者 中華書局股份有限公司代表
劉克襄

印刷者 臺北市重慶南路一段九十四號
臺灣中華書局印刷廠

發行處 臺北市雙園街六〇巷九〇號
臺灣中華書局

臺北市重慶南路一段九十四號



XXXXXXXXXX

譯者序

XXXXXXXXXX

這是一本非常特殊的書。最顯著的特點是它並非寫出來的，而是講出來的。原來這是作者在美國康乃爾大學梅氏講座（Messenger Lecture）演講的錄音。演講的對象是一批希望用較通俗的語言來了解物理定律的學生，因此全書甚少咬文嚼字之處，而且大部都是日常口語。

特點之二是本書可以說是一本電影故事。因為本書作者范恩曼（R. P. Feynman）教授，是一九六六年的諾貝爾獎金得主之一，他不但是今日世界上理論物理學大師之一，而且是以善於演講著稱的，所以當他應邀作梅氏講座的消息傳出時，英國廣播公司（BBC）就決定將整個演講攝成電影，作為電視臺的教育節目。這部電影也在美國各大學巡迴放映。

特點之三是本書的內容並不像一般書籍，它不僅介紹了物理學的基本定律，更重要的是它告訴你一個研究工作者應該如何思想。這是范教授現身說法，親自傳授紮根基的功夫，不可等閒視之。

本書可供一般人閱讀，藉以對物理學發展的來龍去脈有較深刻的了解。正如書中所說的，人們對自然的了解有程度上的不同，繼續研究下去便可使了解加深一層，所以本書實際上也適合任何程度的讀者。一般稍具物理學知識的讀者，會發

現這不是一本難讀難懂的書；但是嚴肅的物理工作者，也會發現它對研究工作很有幫助，因為恰如倫敦泰晤士報所說，這是一位偉大物理學者思考歷程的紀錄。

林 多 標

民國五十七年（一九六八年）六月

紐約州立大學

我國留美學耆：伍法岳、沈君山、沈慶春、李天培、林多樑、吳京生、吳家瑋、吳錦鎡、夏道師、浦大邦、劉鑒、劉全生、錢致榕、瞿樹元諸先生有鑑於此，曾決定從事科學叢書之編譯，各就其專長，選定寫作部門，目前除計劃於近期內陸續出版關於基本粒子，天文漫談，量子電子學，液態氦，高能加速器等五種外，並擬擴大科學部門，廣邀各方面學者專家從事著述。

叢書編輯委員會諸君，皆年青學者，學有專長，茲能熱心從事著述，爲我國科學教育及青年效勞；而中華書局亦以服務精神發行科學叢書。筆者年來對我國科學教育，未嘗忘懷，祇以力不從心，無善可述，茲聞此叢書行將陸續出版，謹向國人介紹，並致個人欽佩喜慰之感。

吳 大 猷

一九六六年十月

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

物理定律的特性目錄

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

吳 序

譯者序

第一章	物理定律的一例——萬有引力定律·····	4
第二章	數學與物理·····	29
第三章	偉大的守恒定律·····	51
第四章	物理定律的對稱性·····	73
第五章	過去與將來的分野·····	96
第六章	或然率與測不準——由量子力學來看自然·····	112
第七章	新定律的追尋·····	133

XX

第一章 物理學定律的一例 ——萬有引力定律

XX

說起來使人難以相信，每當我被叫去在正式場合作鼓手時，介紹者從來不會覺得需要提到我也做理論物理的。我想這可能是因為人們對藝術比對科學更尊敬的緣故。文藝復興時的藝術家們說過，人主要還是關注他自己，但世界上却還有另外一些值得注意的事。即使是藝術家也還欣賞日落的美景、海洋的波濤及天空中星體的運行。所以還是有理由來談談一些其他的事的，當我們分析這些事時，就可得到因觀察而來的美感。在各種自然現象之間，也有着韻律與模式，肉眼雖然無法看出，但可由分析的眼光獲得。就是這些韻律與模式，我們叫做物理定律。我現在準備講的就是這些物理定律的普遍特性。換句話說，要討論比物理定律本身更高的普遍性。記住我要考慮的是經過仔細分析以後的自然，而且我希望祇談談自然界最普遍的性質。

這樣一個題目極容易變得太富哲學意味，因為它太普通了，普通到每個人都能了解，因此我頗想談得稍微專門一點，我希望我的題目真正被了解而不僅僅被模糊地了解。所以我不想討論很普通的現象，而只是談談物理學定律的一個例子。這樣，在我所要討論的各種事物中，你們至少有一個例子，而我也可以重複地用它舉例說明一些十分抽象的概念。我所選

的例子就是萬有引力定律，即重力現象。爲什麼要選它作例子，我自己也不知道。事實上它是最初發現的幾個偉大定律之一，而且有十分有趣的歷史。你也許要說，“我要聽聽近代科學的發現，對這老問題沒有什麼興趣”。其實所謂近代科學祇不過是發現得晚一點而已，其發現的過程與萬有引力的發現並無二致。我們所談到的也祇是比較晚的發現而已，我一點也不覺得談萬有引力有什麼不好，因爲我完全用近代的眼光與態度來敘述萬有引力定律的歷史與方法、它的性質與它的發現。

這一定律曾經被稱爲“人類心智所能達成的最偉大的普遍化”。從上面的討論，你已經可以明白我們並不是十分重視人類的智慧，而是要指出自然界的一項奇觀：自然的運行居然能服從這麼簡潔而優美的萬有引力定律。所以我的重點不是要說明我們多麼聰明地發現這一切，而是要說明自然是多麼聰明，多麼值得我們去注意。

萬有引力定律說：兩物體互相以力作用於對方，作用力的大小與兩者距離的平方成反比，與兩者質量的乘積成正比。我們可以用數學式來表示，即

$$F = G \frac{mm'}{r^2}。$$

假如我再加上兩句話：物體對力的反應爲加速度，每秒鐘其速度因力而生的改變與其質量成反比，或者說若物體的質量較小則其速度的改變較大，這樣我已經把萬有引力定律所必須要說的一切都說過了。其他一切都祇是數學推理的結果而已。不過我知道並不是每個人都是數學家，因此也就不容易立刻看出這些結果，所以我還是大略地說明一下這定律被發

現的故事，它的一些結論，它在科學史上的影響和它的神秘性。此外，也要談談愛因斯坦 (Einstein) 所作的修改以及它與物理學其他定律的關係。

故事是這樣的：古代的人觀察到行星——包括地球——在空中的運行，似乎都是繞着太陽跑的。這一發現被人們遺忘了很久以後又被哥白尼 (Copernicus) 提出。接着問題就是：到底這些行星如何繞日運行？換言之，我們要問究竟這些行星作什麼樣的運動？它們以太陽為中心作圓週運動？還是作其他曲線運動？速度如何？等等。回答這些問題需要的時間較長。哥白尼以後的時代，人們在爭論到底行星與地球一起繞日運行還是以地球為宇宙的中心。然後布拉黑* (Brahe) 找出一個回答這問題的方法。他覺得如果把行星在空中的位置作非常仔細的觀察與紀錄，也許可以區別各個理論的優劣。這一想法實際上是打開近代科學之門的鑰匙，也是人們對自然有真實了解的開始。這意思是說區別理論的優劣在於觀察事物，紀錄詳情，然後分析結果。布氏是一位富翁，哥本哈根附近有一個小島是他的財產，他在島上安置了一些大銅圈及一些特殊觀測位置，然後每夜去把行星的位置紀錄下來。祇有這樣勞苦地工作，才能在智識上有所發現。

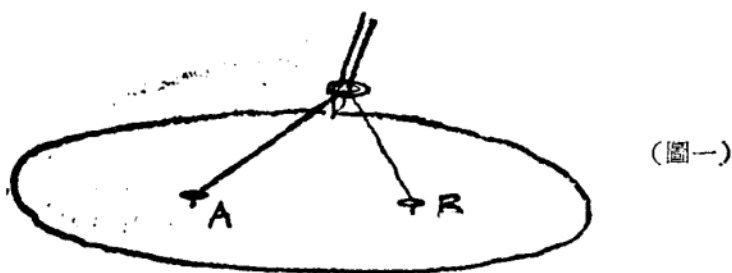
這樣收集起來的觀測資料送到了刻卜勒† (Kepler) 手上，然後由他來分析究竟行星繞日作的是怎樣的運動。他的辦法祇是最基本的研究方法——嘗試與錯誤 (trial and error)。一度他以為行星作圓周運動，但太陽並不在圓心。於是他注意到有一顆行星——我想可能是火星——差了 $8'$ 弧度。他覺得

* Tycho Brahe, 1546-1601, 丹麥天文學家。

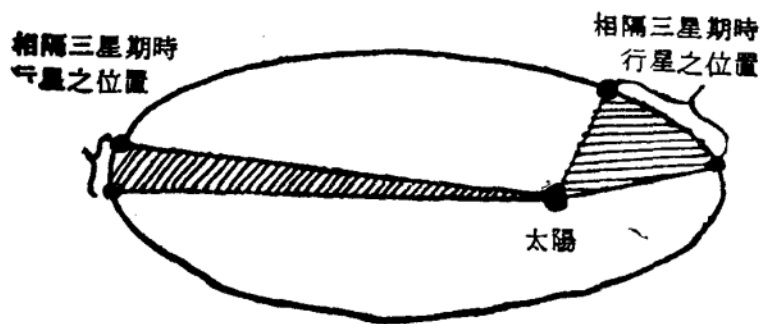
† Johann Kepler, 1571-1630, 德國數學家與天文學家, 布氏的助手。

在布拉黑的觀測中誤差不應該有這麼大，所以這個結論應該是錯誤的，於是因為實驗的準確度，使他得以作另一嘗試，而終於找出三點結論。

第一，他發覺行星的軌道為橢圓，而太陽的位置恰好是兩焦點之一。藝術家們都曉得橢圓是把圓壓偏所得的曲線；兒童們可能也曉得，祇要把童子軍領巾圈套在一條線上，把線兩端固定，再以鉛筆插入領巾圈中就可以畫出橢圓如圖一， A 、 B 兩點為焦點。行星繞日的軌道為一橢圓，太陽的位置為兩焦點之一。另一問題是行星究竟如何在橢圓軌道上運行？是否在距離太陽較近的地方跑得較快，而在距離較遠處跑得較慢？刻卜勒也找出這些答案。如圖二所示，他發覺如果把行星在兩個不同時刻的位置畫出，而時間的間隔是一定的，譬如說



(圖一)



(圖二)

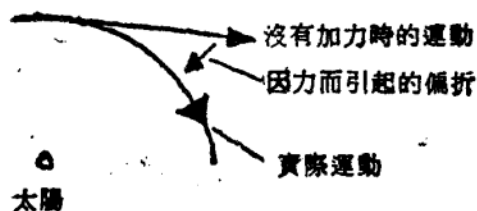
三個星期，同時在橢圓的另一部份也畫出兩個位置，行星從一處到另一處也是三個星期。若把這些位置與太陽的位置用直線連接起來（這些直線叫做向徑 *radius vectors*），則向徑在同時間內掃過的面積是相等的。換句話說，圖二中兩個有陰影的三角形，其面積是相等的。所以行星在近日處必須要比在遠日處跑得快，因為祇有這樣，三角形的面積才可能相等。

一年以後，刻卜勒又發現了第三條規則，它不僅與一個行星的運行有關，而且把各個行星的運動互相聯繫起來。第三條規則說行星繞日運行一週所需要的時間（即週期）與其軌道的大小有關。如果以橢圓的最長直徑為軌道的大小，則週期的平方與直徑的立方成比例。於是刻卜勒發明了三條定律，簡單地說就是：①行星的軌道成橢圓形，②同時間內向徑掃過的面積相同，及③週期的平方與軌道大小的立方成比例。刻卜勒的這三條定律，把行星的繞日運動作了完全的描述。

接着我們要問：是什麼原因使得行星繞日運動？在刻卜勒的時代，有的人說是因為有天使在行星後面展動他們的翅膀來推動行星沿軌道前進。你們馬上會發覺，這個回答與事實相差並不太遠。唯一的不同是天使們坐在另一方面，而他們翅膀展動的方向是把行星向裏推，即向着太陽推。

與此同時，伽利略（Galileo）正在研究普通物體在地球上運動的規律，在研究這些規律時，他也在做很多實驗，如觀測一個球如何在斜面上滾下，單擺如何擺動等。伽利略發現一項偉大的原理，叫做慣性原理（*principle of inertia*）：如果一個正在作等速直線運動的物體沒有受到外力的作用，則它永遠沿同一直線作相同速度的運動。任何人曾經試過要使球在地板上永遠向前滾的，決不會相信它。其實問題在於環境的

不理想，假使沒有外力的影響，例如地板的摩擦等，則球會以相同的速度永遠向前滾的。進一步的問題是由牛頓提出的，他問：“假如物體原來不沿直線運動，則結果又怎麼樣？”他自己回答說：要使速度作任何改變一定要有外力。比方說，球正向前直滾，你若順着它的運動方向推它一把，它一定滾得更快；假使它的運動方向改變了，你一定已經把它向旁邊推了，如何來量力的大小呢？在一段短時間內速度的改變叫做加速度（acceleration），加速度乘以物體的質量，或稱慣性係數（inertia coefficient），所得的乘積就是力。力是可以量度的。例如，你把石子繫於繩子的一端，手握另一端轉動，使石子在頭上轉圈子，你馬上會發現必須用力拉繩子，這是因為雖然石子在作圓形運動時速率不變，但它的方向都隨時在改，所以必須有一向裏拉的力，而此力是正比於石子的質量的。假如我們用兩個不同的物體作同樣的圓周運動，則雖然速率相同，拉繩子所需的力也不一樣，而與它們的質量成比例。其實這是測量物體質量的方法之一，即測量改變其速度所需要的力。舉個簡單的例，牛頓由此看出，若行星繞日運動不受力，則不需要外力便可使它離開軌道，沿切線直進而無止境。但行星並不會沿切線直進，它的軌道是向着太陽彎曲的。換言之，如圖三所示，它的速度與它的運動隨時都折向太陽。所以天使們必須經常對着太陽展動他們的翅膀。



(圖三)

不過使行星沿直線前進的原因至今未明，換句話說慣性定律的起源始終不知道。雖然天使們並不存在，但運動的持續性却是存在的，不過要使軌道彎曲，必須要有力。顯然力是向着太陽施行。事實上，牛頓已能證明即使是沿橢圓運行，只要所有的速度改變都對準太陽就可以了。“等時間內向徑掃過的面積相等”這一事實，祇是數學推理的直接後果，我在以後要詳細說明怎樣進行推理。

牛頓由此確認了力必須向着太陽。然後從不同行星的繞日週期，及它們與太陽間距離的關係，又能推出力怎樣因距離增大而變弱，他的結論是力的大小必須與距離的平方成反比。

到此為止，牛頓並沒有說過什麼新的結論，他祇不過把刻卜勒的兩條定律用不同的語言重述一遍而已。兩定律之一是說力必須向着太陽，另一是說力與距離的平方成反比。

不過當時人們已經用望遠鏡看到木星的衛星繞着木星運行，恰如一個小型太陽系，好像衛星也被木星吸引着。另一方面月亮受地球吸引而繞地球運行，所以也有類似的引力。看起來似乎每一物體都被其他物體吸引。所以下一步就是要把它普遍化而說宇宙中任何兩物體都互相吸引。假如的確如此，則地球一定拉着月亮，恰如太陽拉着行星一樣。另一方面，人們當然知道地球是在拉着物體的，比方說即使你很想浮游太空，你仍然可以穩穩地坐在椅子上。其實地球在拉住物體是衆所週知的重力現象。不過牛頓想到也許地球拉月亮的力，是與它把其他物體從高處拉向地面的重力是相同的。

牛頓的這個想法是可以驗證的（參考圖三），假使地球對月亮沒有引力，月亮便沿直線前進，但因為有引力，軌道便會向下彎。既然我們知道月亮軌道的大小，又知道月亮繞地

球一週所需的時間大約是一個月，自然很容易可以算出每秒鐘月亮被拉下的距離。這個距離一經求得，自然也就可以算出軌道向下彎曲的距離了。這個距離是二十分之一吋。月亮離地心的距離比我們遠 60 倍。我們離地心大約 4,000 哩，月亮則是 240,000 哩。於是平方反比定律若沒有錯，地面附近的物體每秒鐘應該被地球拉下 $\frac{3600}{20}$ 吋或者 16 呎，因為地球的引力到達月亮時，已經比在地面弱了 $60 \times 60 = 3600$ 倍。但由伽利略的各種測量，我們已經知道在地面附近物體的確每秒鐘被地球拉下 16 呎。這是說牛頓的思路是正確的，而且也沒有什麼好懷疑的了，因為兩件完全不相干的事實，居然拉起關係來了。月亮的運行軌道與週期，及其與地球的距離，居然與物體落到地面所需的時間聯繫起來。這當然是非常戲劇性的驗證，其結果却完全成功。

此外，牛頓還有很多其他預測。他能夠從平方反比定律算出軌道的形狀。自然，軌道的確是橢圓形的，所以他的兩個結論實際上包括了刻卜勒的三條定律。此外他還能很明顯地解釋許多新的現象。其中之一為潮汐 (tides)，這是由月亮吸引地球及地球上的海水而引起的。從前也有人想過這一點，困難的是潮汐的漲落大約每天兩次，而假如它是由月亮吸引海水而起，則每日在地球向着月亮的一面漲潮，所以每日只有一次（如圖四）。也曾經有另一種想法，認為潮汐是由地球被月亮自水中拉出一點而起的。牛頓是事實上第一位看出實際情形的。他認為月球吸引地球與吸引海水的力，祇要距離相等便是一樣的。如圖所示，在 y 處的海水受月球的力比地球所受的大，所以被多拉過去一點；在 x 處的海水受力比地球所受的小，所以沒有地球被拉過去的距離大。這是因為 y 處的海水較地球