

# 4

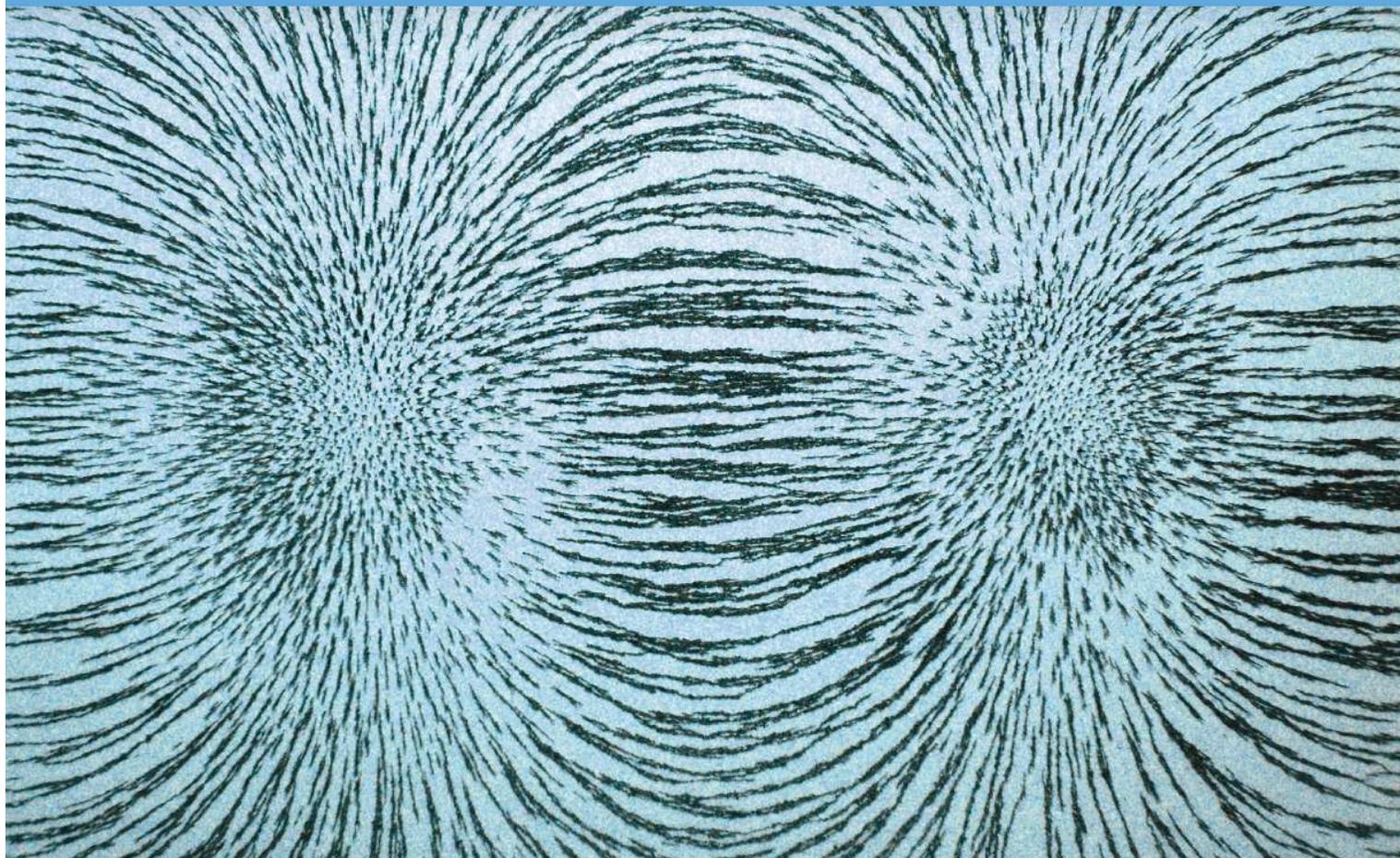
## 物質間的基本交互作用

- ◆ 第一節 重力
- ◆ 第二節 電力與磁力
- ◆ 第三節 強力與弱力
- ◆ 習題

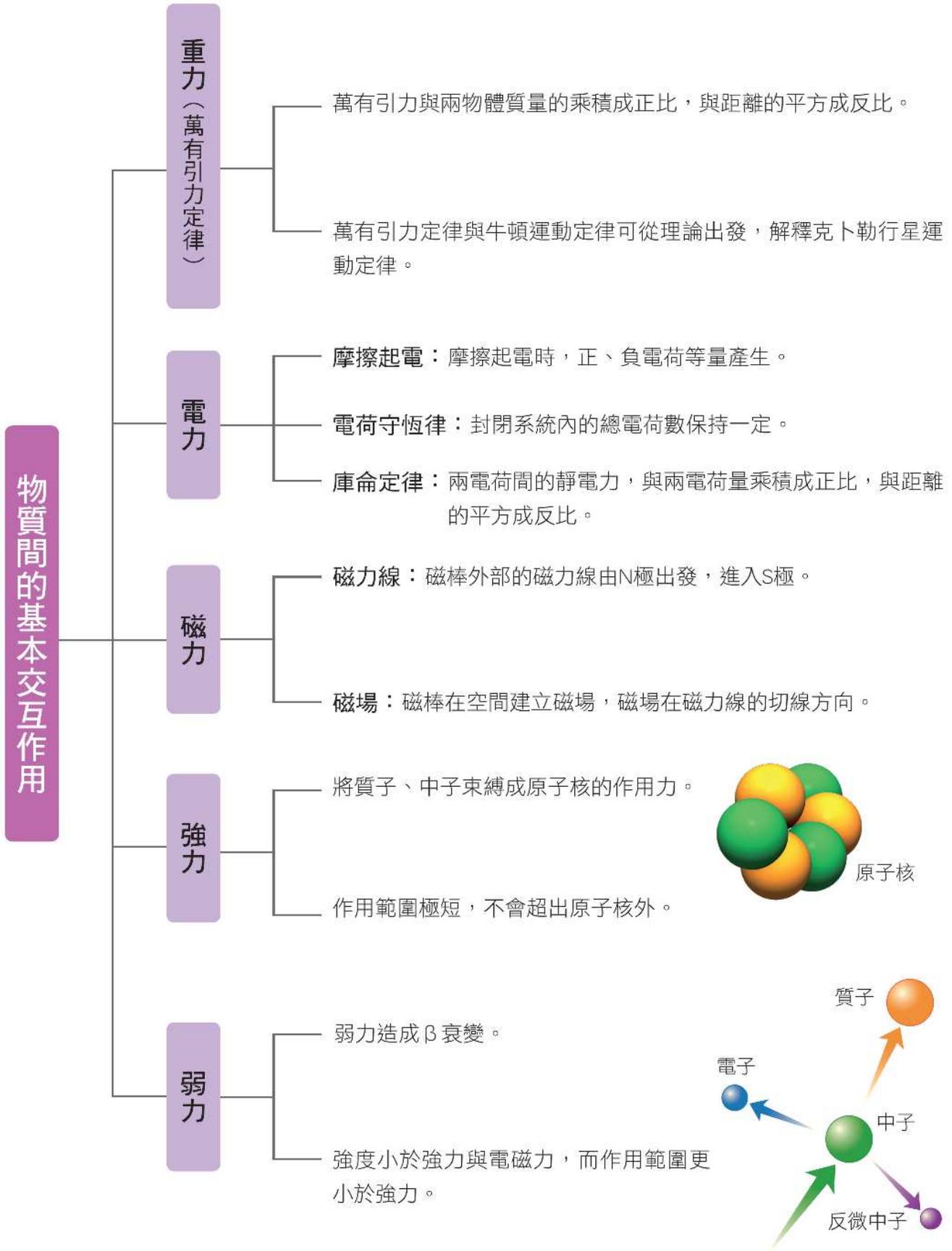
我們將在這一章介紹基本交互作用這個重要的物理概念。就字面的意思而言，「交互作用」這幾個字指的是相互的影響，所以當我們說兩物體間有交互作用，意思即是兩物體彼此會相互影響。若用以前學過的力的概念來說，兩物體間有交互作用即是兩物體會相互施力。

由於物體的運動狀況取決於其所受的力，而世界上物體的運動型態又是無窮無盡，因此我們可能以為物體間的交互作用必然是非常複雜、無從分析起。的確，以一塊石頭掉入水中往下沉的現象為例，在此過程中石頭與水之間的力確實相當複雜，很難用簡單的數學式子來描述。

但是物理學家在過去三百多年間發現，雖然物質間的力從表面上看起來好像很複雜，可是這些看似複雜的力化約到最後，其實只剩少數幾種基本交互作用罷了。換句話說，物質間的交互作用是由少數幾種基本交互作用所組合成的。依我們目前所知，自然界中的基本交互作用有重力、電力、磁力、強力與弱力。物理學家已經能夠深入地掌握這些基本交互作用的數學形式。以下我們將一一介紹這些基本交互作用。



# 重點概念圖



## 一、萬有引力定律

在所有的**基本交互作用** (fundamental interaction) 之中，重力最為人所熟悉：自古以來，人們都知道地表附近的一切物體都會自然地往下掉，不會往上飛。依據牛頓運動方程式，這種自由落體現象意味著一切物體都會受到來自地球的吸引力，我們今天稱這種力為重力。其實源自地球的重力不僅將我們吸附在地球表面，也將月球束縛在地球附近，讓它成為繞著地球轉的衛星。事實上，宇宙中任何兩個物體，只要具有質量，兩者都會向對方施加重力。

### Key Point

重力是具有質量的物體間相吸的力。

#### 1. 牛頓提出萬有引力定律

上述是亞里士多德對重力作用的看法，局限於地表附近的人，他看出了表面上毫不相干的現象（例如：蘋果落地和月球繞地球），其實有著非常微妙的關連。牛頓於《自然哲學的數學原理》一書中提出了**萬有引力定律**(law of universal gravitation)，清楚地用數學描述了重力的性質。這個定律指出任何兩個帶有質量的物體，彼此都會受到對方所施的重力，這個力是吸引力，也就是其方向是指向對方，力的量值則和兩者的質量乘積成正比、和兩者之間的距離平方成反比（圖 4-1）。若以數學公式來表達，兩物體間的重力量值  $F$  等於

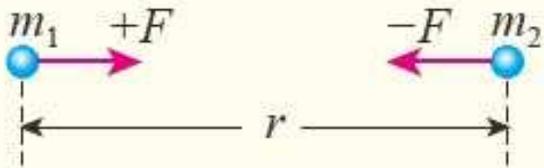
#### 4.1 式

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

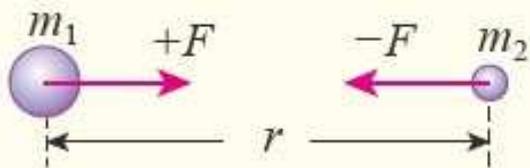
式中的  $m_1$ 、 $m_2$  分別是兩物體的質量、 $r$  是兩物體間的距離。 $G$  是比例係數，稱為**重力常數**(gravitational constant)，牛頓當初並不知其真實量值。關於這個公式有一點必須說明，那就是

我們把物體當作是點狀物體（圖 4-1(a)），亦即我們假設兩物體的大小和它們之間的距離相比微乎其微，可以忽略。如果物體的大小不可忽略，則我們必須根據平方反比律將物體各處的重力一一考慮進來。一個簡單但常見的狀況是兩物體皆為均勻的球形物體，那麼在計算兩者之間的重力時，我們可以將它們的質量看成都是集中在球心上（圖 4-1(b)）。

a 質量分別為  $m_1$ 、 $m_2$  的兩點狀物體之間有與  $r^2$  成反比的相吸重力。



b 質量分別為  $m_1$ 、 $m_2$  的兩均勻球體之間有相吸的重力，在計算重力時，我們可以將它們的質量看成是集中在球心上。



◀圖 4-1 重力表示圖。

重力的量值與距離平方成反比。

由於  $G$  很小，除非兩個物體質量很大，否則物體間的重力將很微弱。以兩個 60 公斤的人來說，即使相鄰只有 1 公尺，他們之間的重力仍比  $10^{-6}$  牛頓還要小。



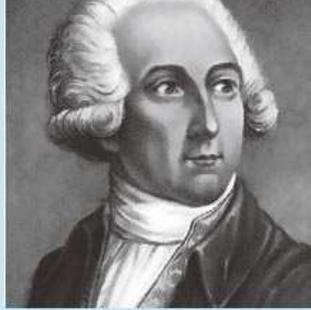
是非題

( ) 兩質點間距離加倍，其間重力的量值降為原來的一半。

## 2. 卡文迪西的扭秤實驗

微弱的重力不容易量，首先能夠在實驗室測量出兩物體重力的人是卡文迪西（Henry Cavendish，1731—1810，英國人）。他以很精巧的**扭秤**(torsion balance)（圖 4-2），在 1798 年前後量出了鉛球間的重力，如此便可以檢驗重力是否真的遵循平方反比律。結果卡文迪西一方面證實了牛頓的萬有引力定律，另一方面也定出了  $G$  的大小。一旦掌握了  $G$  的大小，我們只要知道物體的質量與距離，便能算出重力的

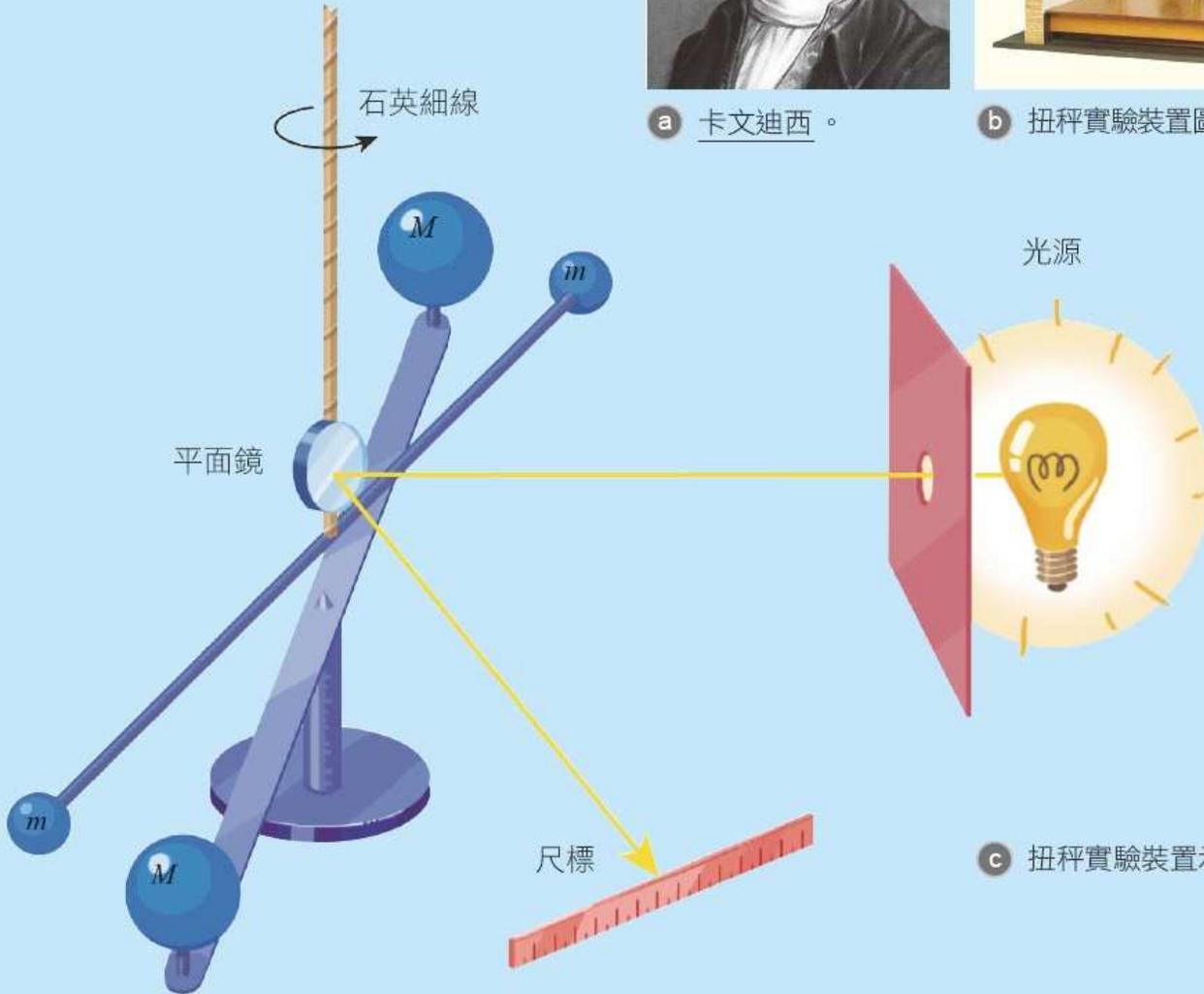
量值。目前所知  $G$  的量值為  $6.67 \times 10^{-11}$  公尺<sup>2</sup>/公斤<sup>2</sup>。



a 卡文迪西。



b 扭秤實驗裝置圖。



c 扭秤實驗裝置示意圖。

## 例題 4-1

卡文迪西扭秤實驗的原始設計者為米契爾 (John Michell, 1724—1793, 英國人) 神父，卡文迪西利用兩顆鉛球間的重力驗證物質間的吸引力，所使用的大鉛球質量為 50.1 公斤，小鉛球質量為 0.782 公斤。當兩球的球中心相距 15.0 公分時，測量出兩球間重力的量值為  $1.16 \times 10^{-7}$  牛頓，試據此推算出重力常數  $G$  值為何？

### 分析

計算兩球體間重力的量值時，可以將它們的質量看成都是集中在球心上。

### 解

$$G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2} = \frac{1.16 \times 10^{-7} \times (15.0 \times 10^{-2})^2}{50.1 \times 0.782} = 6.66 \times 10^{-11} \text{ (N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)$$

# 一、平方反比重力與克卜勒的三大行星運動定律

我們在前一章介紹過克卜勒的三大行星運動定律：(1)行星以橢圓軌道繞著太陽轉，太陽位於橢圓的焦點上；(2)行星與太陽連線在相同時間掃過相同面積；(3)行星繞太陽週期的平方和軌道半長軸的立方成正比。克卜勒能夠在複雜的數據中萃取出這三個定律已是極了不起的成就，但是物理學家還要追問：在這三大行星運動定律背後是否還有什麼更深刻的道理？

在牛頓的時代，已經有科學家如虎克在猜想太陽會對行星施加一個和兩者距離平方成反比的力，行星由於受到了這種力，才會以橢圓軌道運行。但是除了牛頓，其他人都無法將遵循平方反比律的重力和克卜勒行星運動定律聯繫起來，原因是他們的數學能力不足以承擔這項工作。

牛頓擅長於推理，數學功力過人一等。他從克卜勒行星運動定律推論出行星加速度的方

向心是指向太陽，而且此加速度的量值與行星和太陽距離的平方成反比；一旦知道了加速度，配合上運動方程式  $F = ma$ ，即可求得力的型態。牛頓的結論是行星會受到太陽所施的重力，此力之方向指向太陽（即重力為連心力），而量值則和兩者距離的平方成反比（圖 4-3）。此外，牛頓也反過來證明了如果行星的運動滿足運動方程式，而且行星只受到來自太陽的平方反比重力，那麼行星軌跡必然滿足克卜勒行星運動定律。

## Key Point

牛頓解釋了行星運動三定律背後的物理機制。



◀圖 4-3 地球受太陽的重力作用，而作繞日運動的示意圖。

**自然現象的重要方法**，從此人們體認到千變萬化的自然現象背後可能隱藏著巧妙的數學方程式。自牛頓以來，物理學家的主要工作之一便是透過實驗與推理找出這些描述自然現象的數學方程式。

你知道嗎？

## 平方反比重力與行星橢圓軌道

1684 年初，天文學家哈雷（Edmond Halley，1656—1742，英國人）與虎克和瑞恩（Christopher Wren，1632—1723，英國人）三人在英國皇家學會聚會，論及行星運動的問題。虎克宣稱他已能從平方反比力推論出橢圓軌道，但不願立即公布，因為他想要等別人都證不出來，知道問題極為困難後，才要公布其證明。不過哈雷與瑞恩都不相信虎克，瑞恩還提出懸賞給能夠在一個月內提出正式證明的

受平方反比力影響的行星，其運動軌跡為何？沒想到，哈雷才一問，牛頓當下就回答說是橢圓。哈雷大吃一驚，希望能看到證明。牛頓一時找不到原先寫下的證明，答應哈雷儘快補一份給他。數個月後，牛頓寫出一篇短文〈論運動〉給哈雷，裡頭已有《自然哲學的數學原理》一書的雛型。在哈雷的督促下，牛頓才著手撰寫《自然哲學的數學原理》，完整地闡明他的力學體系與萬有引力理論。從 1685 年初至 1686 年中，花了一年半才完成。科學史家認為，牛頓應該是在 1679—1680 年間解決了行星軌道問題，卻沒公開宣揚。為什麼牛頓會如此，仍是個謎，沒有定論。

## 第二節

## 電力與磁力

### 一、電荷

#### 1. 摩擦起電與電荷

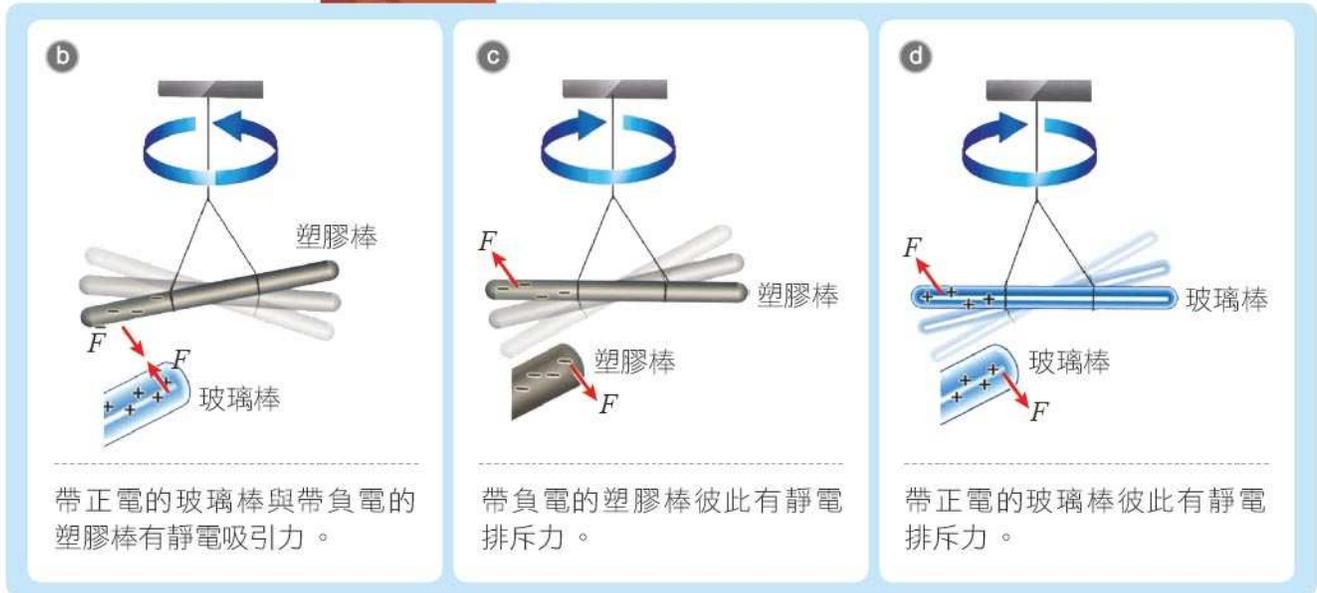
電的現象和重力一樣，也是人們自古以來

就并非帶點愚昧的自然現象。例如，我們拿毛皮去摩擦兩根塑膠棒，在摩擦過後，毛皮與塑膠棒會互相吸引，而兩根塑膠棒之間則會產生排斥力；若拿絲絹去摩擦兩根玻璃棒，在摩擦過後，絲絹與玻璃棒會互相吸引，兩根玻璃棒則會相互排斥；但是我們若拿摩擦後的塑膠棒去接近摩擦後的玻璃棒，則塑膠棒與玻璃棒反而會相互吸引（圖 4-4）。儘管這些所謂的靜電現象極為平常，不過物理學家卻到十八、十九世紀才發展出比較完備的電學理論來解釋這些現象。

圖 4-4 摩擦起電實驗



a 絲絹與玻璃棒摩擦，毛皮與塑膠棒摩擦。



帶正電的玻璃棒與帶負電的塑膠棒有靜電吸引力。

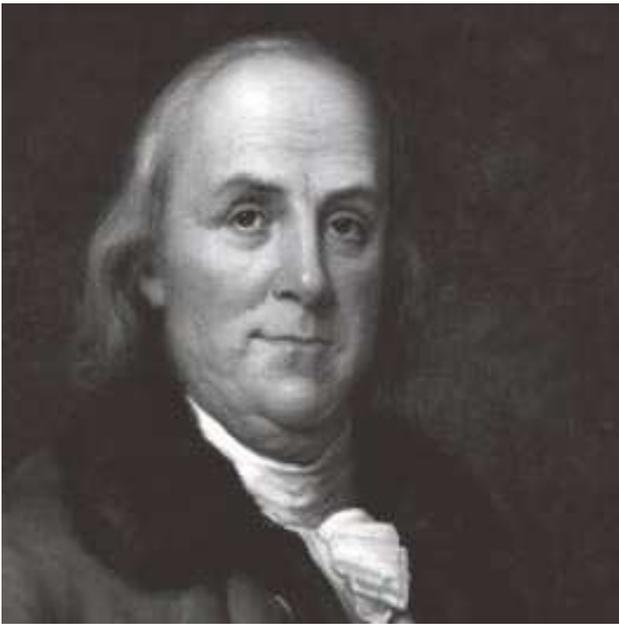
帶負電的塑膠棒彼此有靜電排斥力。

帶正電的玻璃棒彼此有靜電排斥力。

**電荷**(charge)是電學理論的核心概念，大家以前已學習過，我們在此扼要複習。電荷可分為正電荷與負電荷兩類。我們可以這麼用電荷來解釋上述的現象：毛皮與塑膠棒摩擦後，帶有負電荷的物體從毛皮跑到了塑膠棒上，使得塑膠棒變成帶有負電荷，而毛皮因為失去負電荷而變成帶有正電荷；類似地，絲絹與玻璃棒摩擦後，則是帶有負電荷的物體從玻璃棒跑到了絲絹上，以至於玻璃棒變成帶有正電荷，而

絲綢變成帶負電荷。我們只要進一步假設帶同性電荷的物體之間會相斥，而帶異性電荷的物體之間會相吸，便可以說明上述的靜電現象。

前述正負電荷的定義是富蘭克林 (Benjamin Franklin, 1706–1790, 美國人, 圖 4-5) 所設下的。在此定義之下，電子帶負電荷，質子帶正電荷。電荷的單位是**庫侖**(C)。電子所帶電荷的大小為  $1.6 \times 10^{-19}$  庫侖。



◀圖 4-5 富蘭克林。

## 2. 電荷守恆律

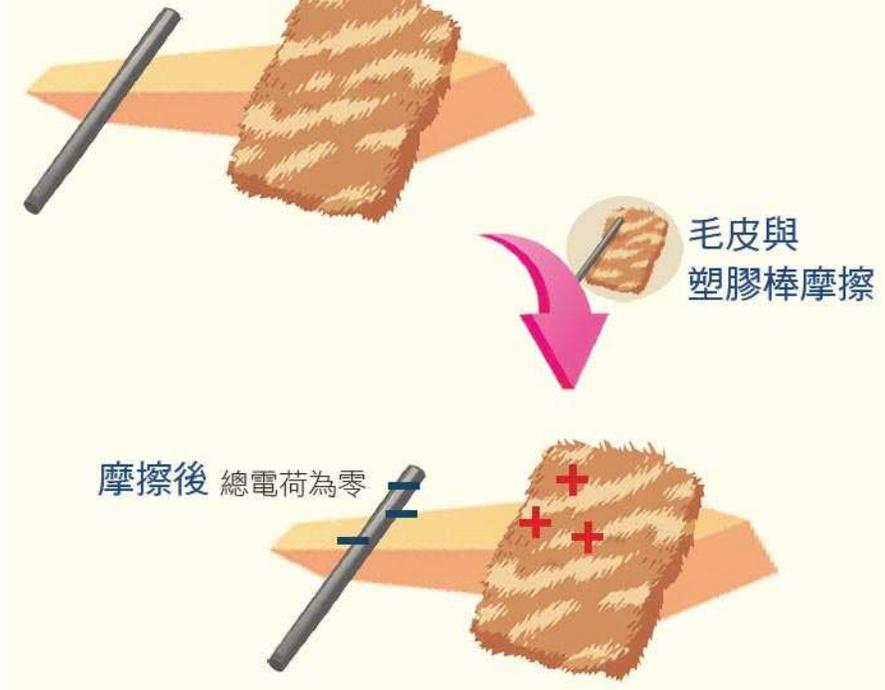
關於電荷，有一件極重要的事必須提：一個封閉系統所帶的**總電荷是守恆的**。以毛皮與塑膠棒為例（圖 4-6），在摩擦之前，毛皮與塑膠棒皆不帶電，都是中性物體，所以總電荷等於零；但是在摩擦後，一些負電荷，譬如說 $-q$  ( $q > 0$ )，從毛皮跑到了塑膠棒上，如此一來塑膠棒就帶有電荷 $-q$ ，而毛皮則帶有電荷 $q$ ，兩者的總電荷還是零。

### Key Point

摩擦起電時，產生等量的正負電。

封閉系統的總電荷守恆。

◀圖 4-6 電荷守恆律：毛皮與塑膠棒摩擦前後總電荷皆為零。





是非題

( ) 摩擦起電代表電荷可以無中生有，所以電荷守恆不成立。

## 二、庫侖定律

我們現在可以用簡單的數學式說明帶電荷物體之間的**電力**(electric force)為何：考慮兩個分別帶有電荷  $q_1$  與  $q_2$  的物體，兩者的距離為  $r$  (假設物體的大小與距離相比可以忽略；以電子來說，我們一般將電子當成是沒有大小可言的點粒子，所以符合一開始的假設)，則兩物體之間的靜電力和重力一樣是連心力，其量值  $F$  和電荷乘積的絕對值成正比，和距離平方成反比，也就是說

4.2 式

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

這裡的  $k$  是比例常數  $k$  等於  $9.0 \times 10^9 \text{ (N} \cdot \text{公尺}^2 / \text{庫侖}^2)$ 。如果  $q_1$  與  $q_2$  是同性電荷，則  $q_1q_2$  大於零，在此情況下靜電力是相斥力；反之，如果  $q_1$  與  $q_2$  是異性電荷，則  $q_1q_2$  小於零，在此情況下靜電力是相吸引的力（圖 4-7）。



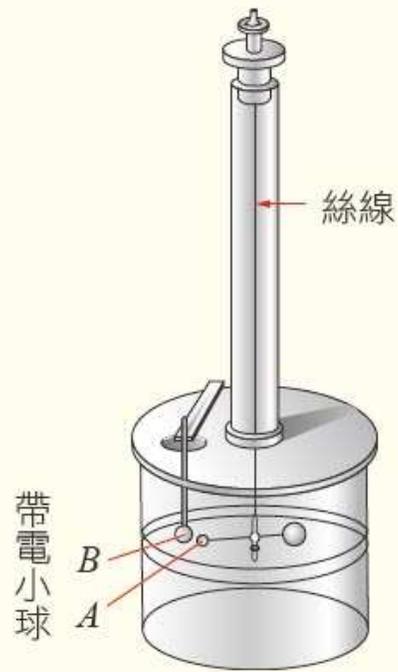
## Key Point

靜電力的量值是與距離平方成反比。

所以帶負電的電子與帶正電的質子之間有相吸的庫侖靜電力，而電子之間則有相斥的靜電力。同理，原子內帶正電的原子核與原子核外的電子也有相吸的靜電力。就是這種庫侖靜電力將電子束縛在原子核附近，電子與原子核才能形成原子。

物理學家稱公式(4·2)為庫侖定律(Coulomb's law)，這是物理學家庫侖(Charles-Augustin de Coulomb，1736—1806，法國人，圖4-8(a))在1785年前後所發現的。他所用的實驗裝置(圖4-8(b))和十多年後卡文迪西測量重力的裝置類似，兩人都是利用扭秤。

▼圖 4-8 庫侖與其研究靜電力所用之裝置。



我們在討論重力的時候曾提過，重力非常微弱。現在我們已經學到了庫侖靜電力，有人可能好奇重力與靜電力相比，兩者量值到底差多少？由於重力與靜電力都與距離平方成反比，所以很容易比較。拿兩個電子來說，它們之間有相斥的庫侖力與相吸的重力，我們很容易算出庫侖力的量值約是重力量值的  $4.17 \times 10^{42}$  倍！難怪我們在考慮電子間的交互作用時常常忽略重力。但是對於像行星、太陽這種不帶電、質量又相當大的物體而言，反而只有重力才重要。

## 例題 4-2

氫原子是由一個質子與一個電子所組成。質子與電子所帶的電荷均為  $1.6 \times 10^{-19}$  庫侖，質子帶正電，電子帶負電。電子繞質子運轉的平均距離為  $5.3 \times 10^{-11}$  公尺，則

- (1) 試計算氫原子中質子與電子間的靜電力量值為多少牛頓？
- (2) 已知質子的質量為  $1.7 \times 10^{-27}$  公斤，電子的質量為  $9.1 \times 10^{-31}$  公斤，試計算氫原子中質子與電子間的靜電力量值為其間重力量值的幾倍？

## 分析

- (1) 由庫侖靜電力公式，代入數據直接計算。
- (2) 由庫侖靜電力公式與萬有引力定律公式，代入數據計算。

## 解

$$(1) F = \frac{k|q_1q_2|}{r^2} = \frac{(9.0 \times 10^9) \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2}$$

$$\approx 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$(2) \frac{F_e}{F_g} = \frac{\frac{kq_1q_2}{r^2}}{\frac{Gm_1m_2}{r^2}}$$

$$= \frac{(9.0 \times 10^9) \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{(6.67 \times 10^{-11}) \times (1.7 \times 10^{-27}) \times (9.1 \times 10^{-31})}$$

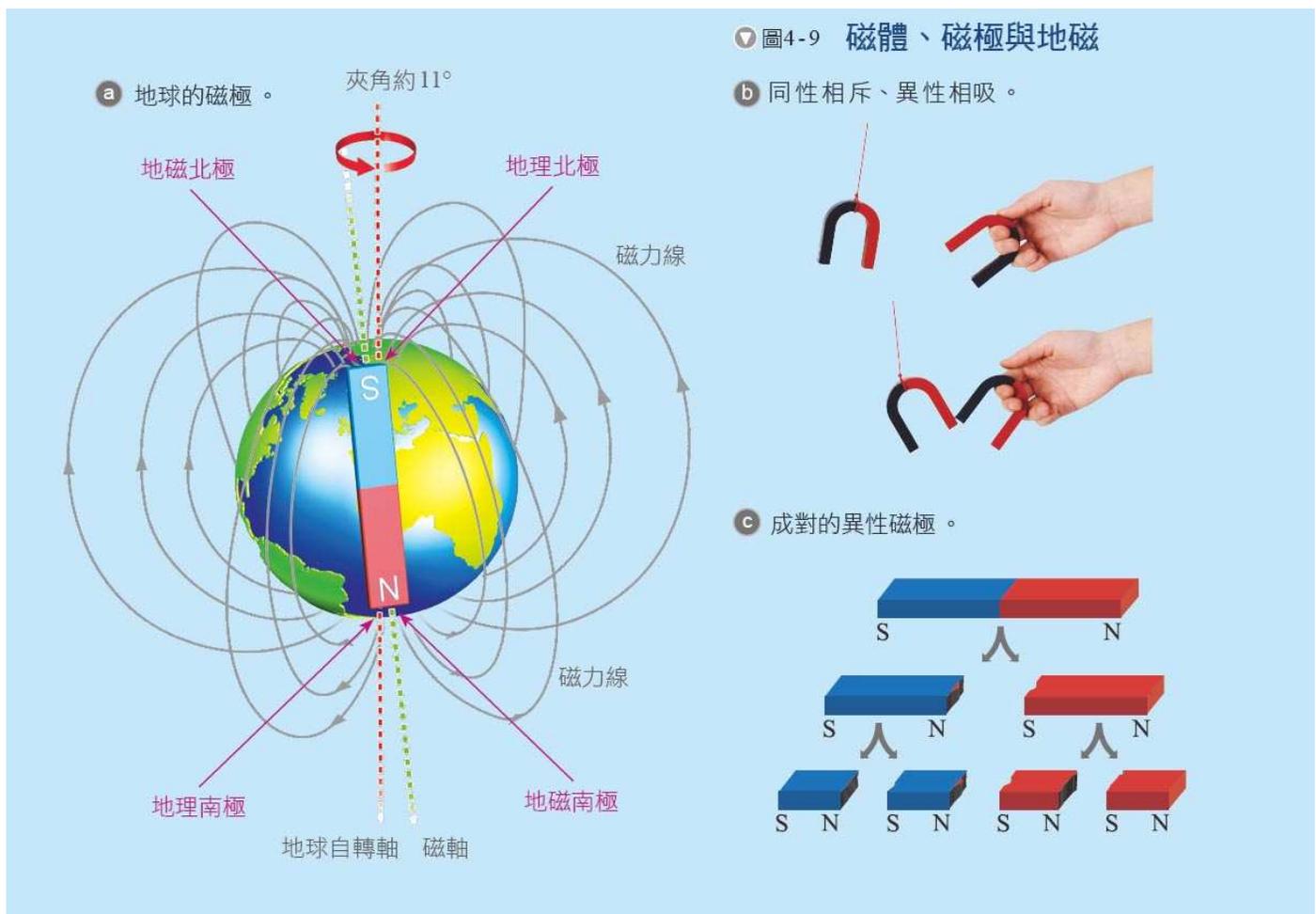
$$\approx 2.2 \times 10^{39} \approx 10^{39} \text{ 倍}$$

### 1. 磁體、磁極與地磁

磁的現象也是自古以來就為人知曉的。人們早已發現有些物體具有磁性，這些**磁體** (magnet)彼此之間可以相吸或相斥，這和帶電物體的行為有些類似。然而磁體和帶電物體其實有很重要的差異，主要的差異是帶電物體可帶單一電性（正電或負電），但是每個磁體必然同時具有兩個異性**磁極** (magnetic pole)，我們稱這兩個異性磁極為「北極（N 極）」與「南極（S 極）」。此名稱的由來是地球本身就是個大磁體，具有稱為**地磁極** (geomagnetic pole)的磁極，地磁北極（磁性 S 極）位於地理北極附近，地磁南極（磁性 N 極）位於地理南極附近（圖 4-9(a)）。N 極和 S 極會相互吸引，但是兩個 N 極會相互排斥，兩個 S 極也會相斥（圖 4-9(b)）；所以每根具有 N 極和 S 極的磁針受到地磁極的影響就會指向地球的南北，這就是「指南針」



不就可以得到單獨的 N 極與 S 極了嗎？這樣不就很容易得到和電荷相似的單一磁極？然而一旦你這麼做，便會發現在斷裂處又會衍生出 N 極與 S 極(圖 4-9(c))。這是磁現象的一個特性。到目前為止，還沒有人發現過一個孤立的磁單極。



## Key Point

磁體必有 N、S 兩極。



是非題

( ) 單一磁極的磁體處處可見。

## 2. 磁力線

一般而言，兩個磁體間的磁力非常複雜，因為兩者的同極相斥，而異極相吸，所以兩磁體間的總磁力會和它們的相對位置與相對方向有關，很難用簡單的數學公式來表達。

我們如果隔著白紙板把鐵屑均勻地灑在磁棒旁，會見到如圖 4-10(a)所示的情況。極富想像力但數學底子並不強的法拉第提出了**磁力線**(line of magnetic force)的概念來說明此磁性現象。他設想在磁體周圍的空間中存在著磁力線，其分布與鐵屑的分布一致。這些磁力線是封閉不相交的曲線，而且有方向性。圖 4-10(a)顯示了一根磁棒附近的磁力線，大家可以看到磁棒外的磁力線的方向大致上是背離 N 極而指

向 S 極。也就是說我們可以把磁棒內的磁力線看成是發自 N 極而終止於 S 極。由於磁力線是封閉的，所以磁力線在磁棒內又從 S 極回到 N 極。前面提過地球是一大磁體，圖 4-9(a)中的灰色曲線即代表地球磁場的磁力線。

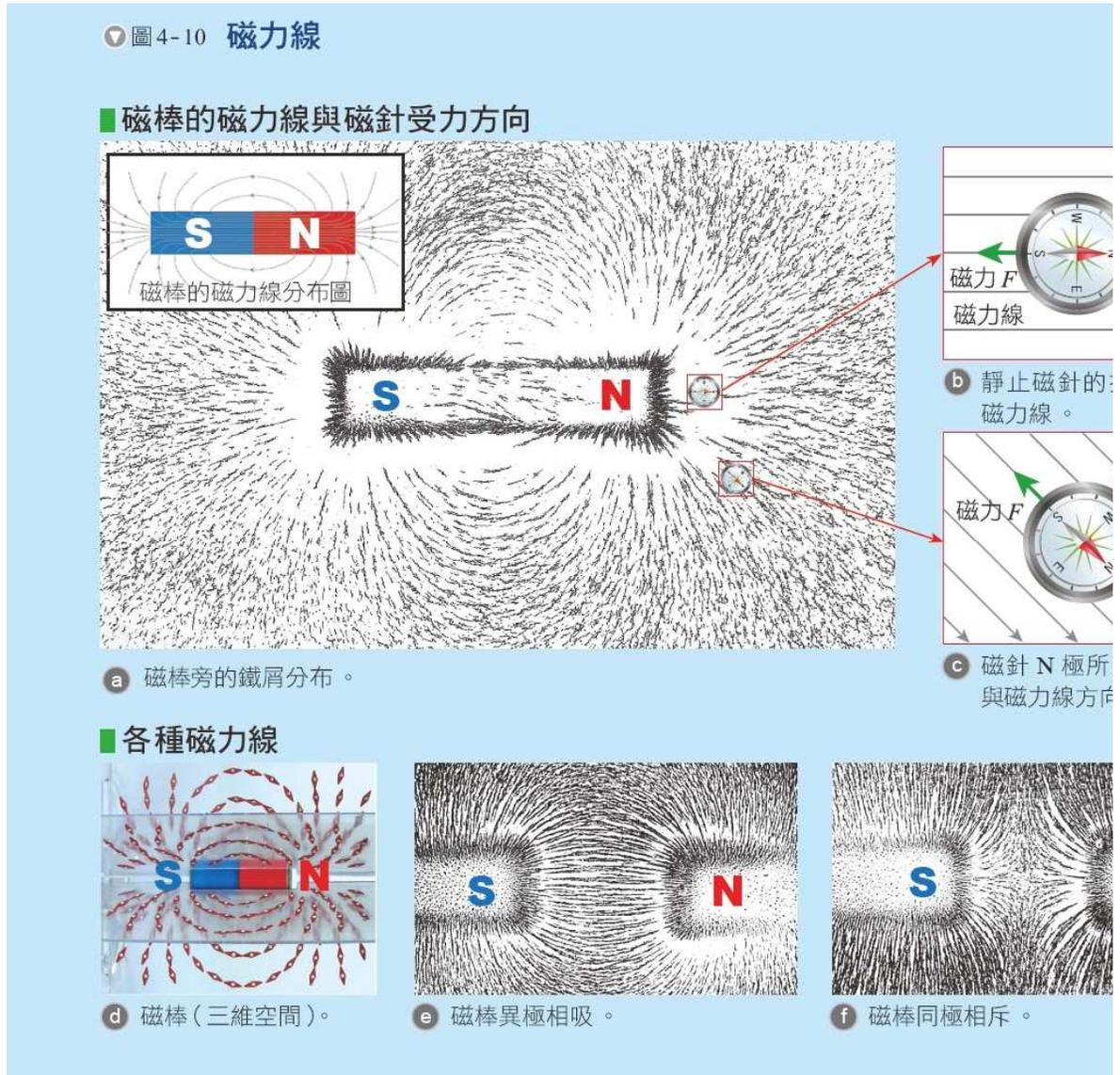
## Key Point

**磁力線不相交。**

**磁棒外部磁力線方向由 N 極到 S 極。**

當我們把小磁針擺在磁力線範圍內，這些小磁針的 N 極與 S 極就會感受到磁力，磁針 N 極所受磁力的方向是順著磁力線，磁針 S 極所受磁力的方向則是逆著磁力線（圖 4-10(b)(c)）。無論是 N 極或 S 極，所受磁力的量值都與它們所在位置磁力線的密度成正比。也就是磁力線愈密，N 極或 S 極所受的磁力就愈大。在平衡的時候，這些小磁針的指向將和所在處磁力線的方向一致（圖 4-10(b)(c)）。

之前提是磁棒為鐵屑之分布如磁棒之  
 成因即是鐵屑被磁棒磁化，故會像一大堆極小  
 磁針一樣沿著磁力線排列（圖 4-10(d)）。圖  
 4-10(e)(f)則顯示了兩根磁棒附近的磁力線分  
 布。



是非題

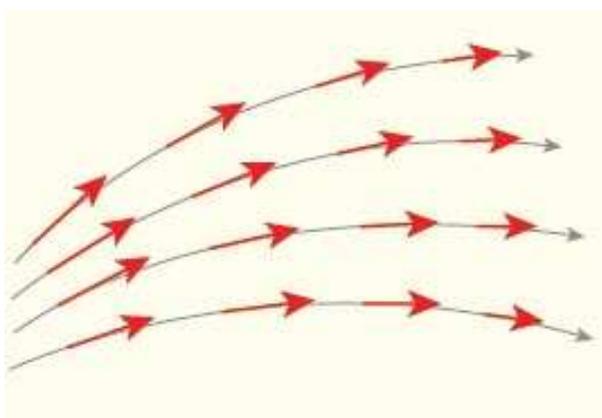
( )磁體在周圍空間產生的磁力線不會交會。

## Key Point

磁極在磁力線密集處所受磁力較大。

### 3. 磁場

了解了磁力線的意義，我們便可以介紹磁學另一個重要的概念——**磁場**(magnetic field)。由於磁力線不會相交，空間中每一點只能有一條磁力線通過，所以我們可以在空間中每一點設定一個小箭頭。這個小箭頭的方向就是通過此點磁力線的切線方向，我們讓此箭頭的長度和空間中此處磁力線的密度成正比（圖 4-11）。這種空間中處處有個上述小箭頭的情況就代表一個磁場。我們可以從磁力線分布得到磁場，反過來說，也可以由磁場得出磁力線分布。兩者基本上是等價的。



◀圖 4-11 由磁力線分布可得到磁場，灰線代表磁力線分布，紅色小箭頭的指向為磁力線切線方向，磁場量值與磁力線密度成正比。

電與磁一向被人當做是不相干的兩種現象。但是到了十九世紀初，有人發現電與磁其實關係密切，基本上是一體的兩面。我們將在



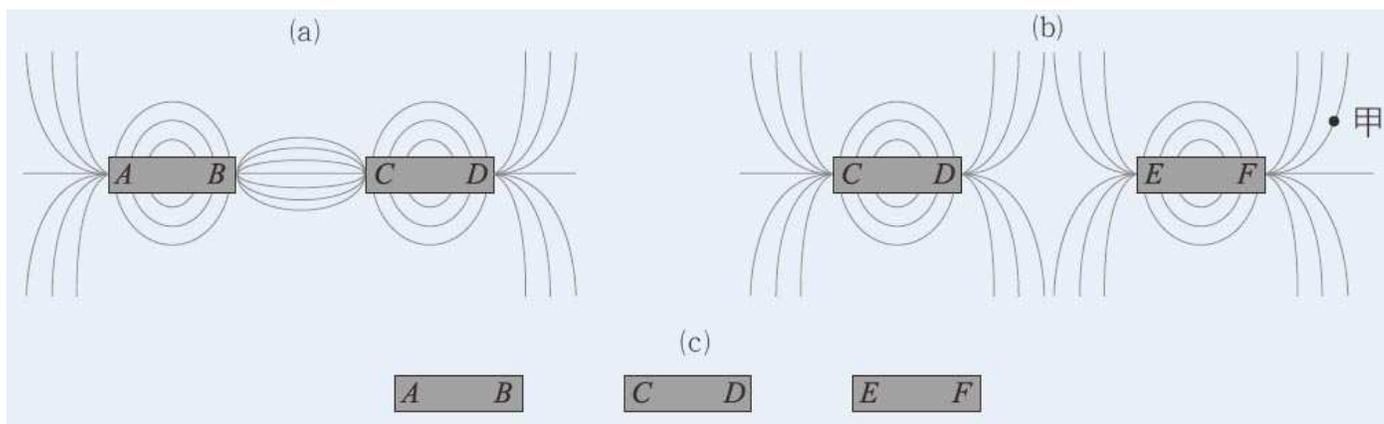
是非題

( ) 磁場的方向在磁力線的法線方

向。

### 例題 4-3

有 3 個相同的磁鐵棒  $AB$ 、 $CD$ 、 $EF$ ，若分別將  $AB$  與  $CD$  靠近； $CD$  與  $EF$  靠近，在其周圍撒上鐵粉之後，發現它們所形成的磁力線示意圖如圖(a)、(b)，今若將 3 根磁棒排列放置於一直線如圖(c)，請回答下列問題：



(1) 已知磁棒的  $A$  端會吸引磁鐵的  $S$  極，請問於圖(b)中甲位置放置磁針，磁針的  $N$  極大

(D)↘ (E)無法判斷。

(2)若將羅盤放置於圖(c)磁極的  $D$  和  $E$  中間(忽略地磁)，則磁針的  $N$  極大約指向哪個方向？ (A)↓ (B)↑ (C)→ (D)← (E)無磁場，故磁針可為任意方向。

## 分 析

(1) $A$  端吸引磁鐵的  $S$  極，故知  $A$  端為  $N$  極  $\Rightarrow B$  端為  $S$  極  $\Rightarrow B、C$  相吸， $C$  端為  $N$  極  $\Rightarrow D$  端為  $S$  極  $\Rightarrow D、E$  相斥， $E$  端為  $S$  極  $\Rightarrow F$  端為  $N$  極。磁針的  $N$  極在磁場中受磁力作用，指向磁場的方向，即磁力線的切線方向。

(2) $D$  和  $E$  磁極同為  $S$  極且等距離，磁針所受磁力反方向抵消； $C$  和  $F$  磁極同為  $N$  極且等距離，磁針所受磁力亦反方向抵消，所以  $D、$

$E$  中間的磁場可說是  $A$ 、 $B$  磁棒所產生。 $A$  端為  $N$  極、 $B$  端為  $S$  極，磁鐵外部磁力線由  $N \rightarrow S$ ，所以該處磁針  $N$  極所受磁力方向向左。

**解**

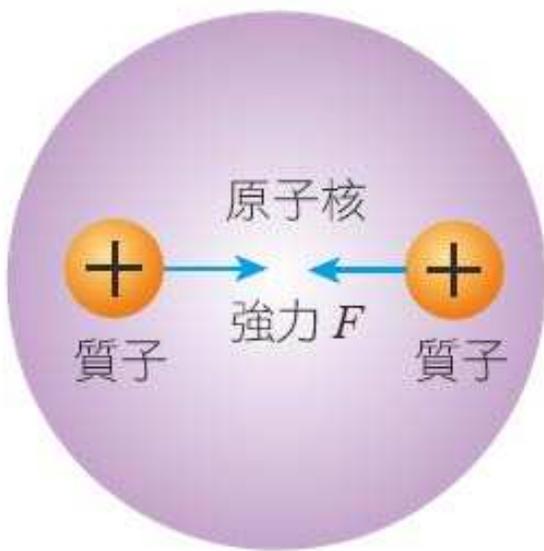
(1)(B)；(2)(D)。

## 一、強力

我們在第二章介紹過原子核的結構，那就是原子核是由質子與中子所組成的（質子與中子通稱為核子）；但並沒有解釋為什麼質子、中子可以聚在一起構成原子核。原子核很小，帶正電的質子之間有很強的庫侖相斥靜電力，為什麼原子核能在這種情況下維持穩定，沒有飛散開來？

物理學家湯川秀樹（Hideki Yukawa，1907—1981，日本人）在 1935 年提出**強交互作用**（strong interaction）的假設，他主張在質子與質子間、質子與中子間、中子與中子間有一種新型的力，和任何之前已知的力全然不同，這種力是很強的吸引力，甚至強過庫侖電力，因此稱為**強力**（strong force）；它足以將質子與中子束縛在一起，形成原子核（圖 4-12）。湯川秀樹的假設後來獲得實驗證實。

我們之前介紹過質子與中子都是由更小的夸克所組成的，所以夸克之間也必然有某種力將 3 個夸克束縛成質子與中子。物理學家在 1970 年代透過實驗與理論研究已深入理解夸克之間的力，他們發現可以把湯川秀樹的強力看成是夸克之間束縛力的延伸。無論是夸克間的力或是湯川秀樹的強力，我們一般都通稱為強力。強力作用的範圍很短，不會超出原子核之外，所以平常並不會察覺到強力。



◀圖 4-12 質子之間有強力作用，箭頭代表強力。

## Key Point

強力使質子與中子束縛於原子核內。

強力作用範圍很短。



## 一、弱力

物理學家在十九世紀末、二十世紀初發現有些原子核會發射出帶負電的  $\beta$  射線（這個名稱是拉塞福定下的），然後轉變成另一種原子核，即甲原子核  $\rightarrow$  乙原子核 +  $\beta$  射線。物理學家將這一類新的核輻射現象稱為  $\beta$  衰變 ( $\beta$  decay)。  $\beta$  衰變前的原子核甲和衰變後的原子核乙相比，兩者有相同的質量數 (mass number，即質子數加中子數)，但是後者的質子數為前者的質子數加 1。  $\beta$  衰變的一個例子是：鈷 60  $\rightarrow$  鎳 60 +  $\beta$  射線，60 即為質量數。



是非題

( ) 原子核以強力吸引核外電子。

( ) 原子核內的中子不帶電，所以中

子與中子不會互相吸引。

後來人們發現  $\beta$  射線其實就是電子，並且弄清楚了這種現象之所以發生的根本原因是在

這當中的原因，原子核內的中子可以衰變成質子、電子與一種極輕的新型粒子（現稱為反微中子，此名稱來源我們不必深究；反微中子的意義在第七章還會進一步介紹）。就一個單獨的自由中子（即不是在原子核內的中子）而言，它會有以下的  $\beta$  衰變（圖 4-13）：

### 4.3 式



因此自由中子的壽命是有限的，其**平均壽命** (mean lifetime) 約為 887 秒。物理學家發現這種衰變過程不能用已知的強力、電力、磁力、重力去解釋，所以便設想出一種全新的機制、一

圖 4-13 已知的四種基本交互作用

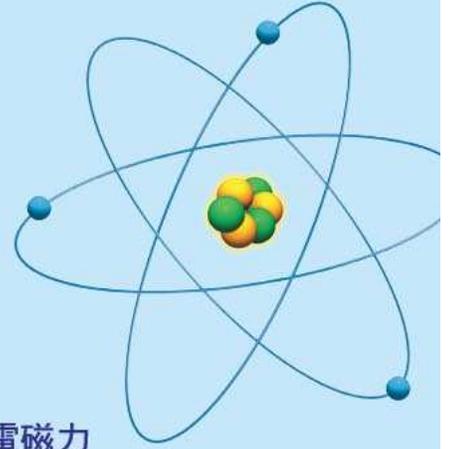


### 重力

宇宙中任何兩個具有質量的物體，都會互相施加重力。

作用範圍： $\infty$

相對強力強度： $10^{-39}$



### 電磁力

電磁力使電子束縛在原子核旁。

作用範圍： $\infty$

相對強力強度： $\frac{1}{137}$

僅全新的交互作用來說， $\beta$ 衰變。這種新的交互作用稱**弱交互作用**(weak interaction)，也稱**弱力**(weak force)。

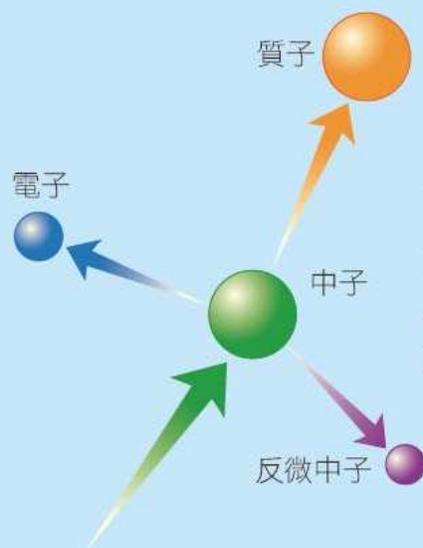
前面提過強力作用的範圍很小，但是弱力作用的範圍更小。我們可以從中子的壽命去推論弱力的強度，結果發現弱力的強度和強力或電磁力相比，要小很多，這就是為何我們將造成  $\beta$  衰變（與其他類似的衰變現象）的作用稱為弱交互作用。假設弱力變得更強一些，則  $\beta$  衰變就會更容易發生，中子的平均壽命就會變



### 強力

質子與質子間、質子與中子間、中子與中子間存在很強的吸引力，它足以將質子與中子束縛在一起形成原子核，稱為強力。

作用範圍： $10^{-15}$  m



### 弱力

弱力讓中子衰變成質子、電子與反微中子。

作用範圍： $10^{-18}$  m

相對強力強度： $10^{-13}$



Key Point  
弱力造成  $\beta$  衰變。

弱力作用距離比強力更短。

傳統的力如重力、電力只會改變受力物體的運動狀態，不會改變物體的本質。但是弱交互作用除了改變物體運動狀態之外，還會改變它們的本質，例如：中子在  $\beta$  衰變中就消失了，而留下質子、電子、反微中子。如果我們將弱交互作用當作是一種「力」，我們已經擴充了「力」的意義。

我們已扼要介紹完了重力、電力、磁力、強力與弱力等基本交互作用（圖 4-13），最後還要重複強調一點：各位於未來可能會在報章上讀到物理學家找到了新的基本交互作用，不過在那發生之前，我們目前所見到發生於物質間任何的力，都僅是這幾種基本交互作用所綜合而成的。尤其是我們在日常生活中很容易經驗到的力，如：各種物體間的摩擦力、各種「接

弱力(如原子核間的力)、重力(如我們身體的力)、彈性力、氣壓所涉及的力(氣體分子碰撞容器壁所產生的力),若從原子的觀點來看,其來源其實都是電力與磁力的作用。

## 你知道嗎？

### 弱交互作用有什麼用？

我們知道重力會把我們束縛在地球表面、電力會把電子束縛在原子核旁、磁力會轉動磁針、強力會把質子與中子束縛在原子核內,所以這些較為人熟悉的力都具有某些我們容易理解的「好處」。但是和這些力相比,弱交互作用似乎就沒有什麼「用處」?其實弱交互作用的用處可大了,因為如果沒有它,太陽便無法利用核融合發光。太陽所發出的能量皆來自於太陽內部一系列的核融合反應,此反應的第一步即是質子和質子的高速碰撞,兩者若極靠近便可藉由弱交互作用與強交互作用轉變成為氘原子核(含1個質子與1個中子),並產生微中子

與正電子（這一步關於核融合反應的討論請見第七章）。所以當太陽將大量核融合產生的光送到地球來時，它同時也會發射出非常多的微中子來到地球。事實上，每秒鐘就有約 50 兆個微中子穿過我們每個人身體，但因微中子和其他物質的交互作用極弱，所以我們才會完全不察知這回事。由於上述融合反應起自弱交互作用，所以進行得很慢——太陽內質子的壽命平均長達約百億年。幸虧如此，太陽才有夠長的壽命，人類也才有機會演化出來。



## 第一節

## 重力

1. 自然界中的基本交互作用有四種：重力、電磁力、強力與弱力。
2. 萬有引力定律： $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ ， $G = 6.67 \times 10^{-11}$  牛頓·公尺<sup>2</sup>/公斤<sup>2</sup>。
3. 均勻的球形物體在計算重力時，可將其質量視為集中在球心。
4. 牛頓從克卜勒行星運動定律和運動方程式，推論出萬有引力定律。

## 第二節

## 電力與磁力

1. 富蘭克林將電荷分為正電荷與負電荷兩類。
2. 兩物體彼此互相摩擦，失去電子者帶正電，而獲得電子者帶負電。但整個系統電荷守恆，電子所帶電荷的大小為  $1.6 \times 10^{-19}$  庫侖。

3. 庫侖定律： $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ ， $k = 9 \times 10^9$  牛頓·公尺<sup>2</sup> / 庫侖<sup>2</sup>。
4. 每個磁體必然同時具有兩個異性磁極：指北極（N 極）與指南極（S 極），自然界不存在磁單極。兩個同性磁極間之磁力為互相排斥，而兩個異性磁極會互相吸引。
5. 法拉第提出了磁力線的概念來說明磁性現象，一根磁棒的磁力線發自 N 極而終止於 S 極；磁棒內的磁力線又從 S 極回到 N 極，即磁力線是封閉的。磁力線的分布由空間中磁體的狀況決定。
6. 我們可以從磁力線分布得到磁場，也可以由磁場得出磁力線分布，兩者是等價的。磁力線不會相交。磁場的量值與該處磁力線的密度成正比。

### 第三節

## 強力與弱力

1. 在質子與質子間、質子與中子間、中子與中子間有強交互作用（或強力），強過庫侖電

力，足以將質子與中子束縛在一起形成原子核。

2. 核子間的力或夸克間的力，一般都通稱為強力，其作用的範圍不會超出原子核之外。
3. 弱力讓中子衰變成質子、電子與反微中子，其作用範圍比強力更小。

## 一、基本題

### 第一節

### 重力

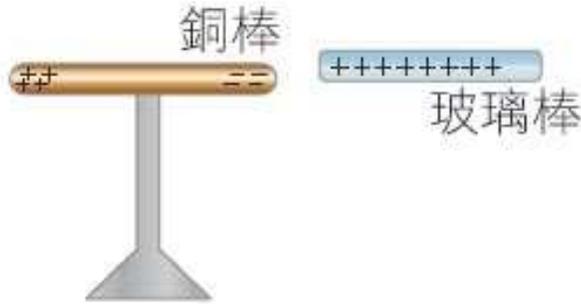
1. 太空船由地球至月球的途中，物體的重量會如何變化？其質量是否改變？
2. 請舉出三個例子說明，哪些天文運動現象是受到萬有引力的影響？
3. 已知木星的質量約為地球的 318 倍，半徑約為地球的 11.1 倍，則一太空船飛抵木星表面時所受的重力量值約為其在地球表面的幾倍？

### 第二節

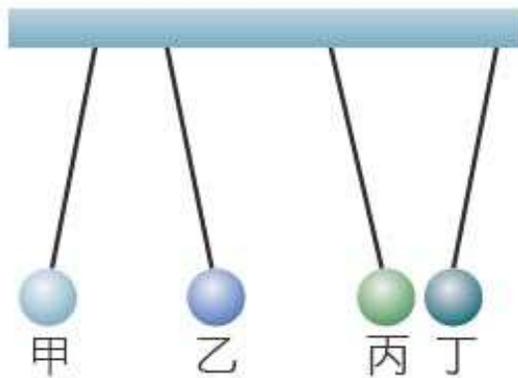
### 電力與磁力

4. 一銅棒位在絕緣支架的上方，若將一帶正電的玻璃棒移近（但不接觸）銅棒，則銅內的自由電子被吸引至一端，如圖所示，則
  - (1)說明玻璃棒是否受到靜電作用力？
  - (2)說明為何最後自由電子不再繼續移往右

(3)銅棒的電荷數目是否增加或減少？



5. 保利綸球很容易因摩擦起電而帶靜電，如圖為 4 個以絕緣細線懸吊的保利綸球，其相互間因靜電作用而呈現的排列情形。如甲球帶正電，則丙球及丁球所帶的電性符合下列哪些選項？（多選）〔93 學測〕



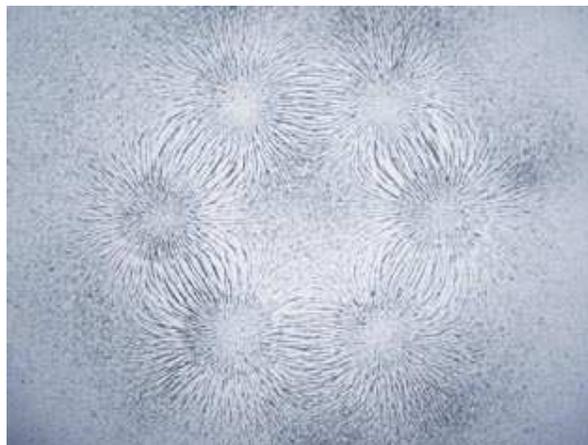
選項	(A)	(B)	(C)	(D)
丙球	正電	正電	負電	負電
丁球	正電	負電	正電	負電

6. 兩個點電荷的靜電力原為  $F$ ，若兩個點電荷的電量，皆增加為原來的 2 倍，而兩個點電

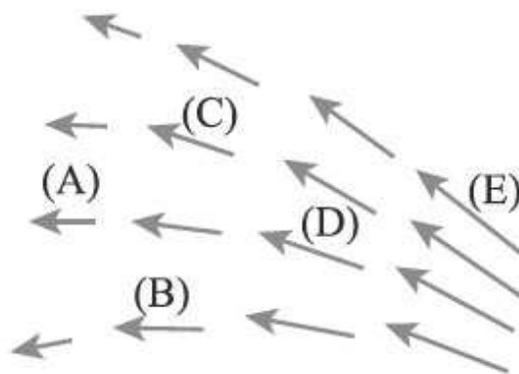
電力為何？ (A) $F$  (B) $2F$  (C) $4F$  (D) $\frac{F}{2}$

(E) $\frac{F}{4}$ 。

7. 如圖是在一張白色紙卡，下方放置磁鐵，由上方慢慢灑下細鐵粉所形成的圖樣。請你想想：



- (1) 下方的磁鐵可能是什麼情形？  
(2) 圖樣的中央磁場量值為何？
8. 如圖為空間某區域的磁場分布狀況，則



受的磁力最大？

(2)磁力最大時，其 S 磁極所受的磁力方向為何？

(3)又哪一位置，其磁極所受的磁力最小？

### 第三節

## 強力與弱力

9. 請問湯川秀樹提出強力的假設，目的為何？
10. 為何我們平常感受不到強力？
11. 請問在「鈷 60 原子核→ 鎳 60 原子核+電子+反微中子」這個弱交互作用過程中，電荷是否守恆？
12. 下列哪些是弱交互作用的特性？（多選）  
(A)弱交互作用的範圍比強力更短      (B)弱交互作用即為作用力很小的電磁力  
(C)弱交互作用現象比強力更不容易發生      (D)弱交互作用過程中可產生新粒子。

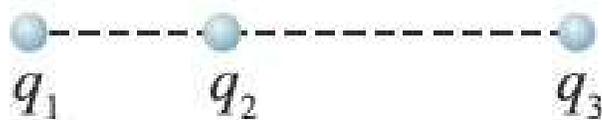
## 二、進階題

13. 設地球的半徑為  $6.38 \times 10^6$  公尺（正圓球體），地表的重力加速度為  $9.80$  公尺/秒<sup>2</sup>，試由萬有引力定律推算出地球的質量約為若干公斤？
14. 一個極高空處物體的重量若為其地表時的  $\frac{1}{2}$ ，則物體距離地表的高度為地球半徑的幾倍？
15. 已知地球與月球的距離約為  $3.8 \times 10^5$  公里，地球質量約為月球的 81 倍。一太空火箭行駛在地球與月球之間，當它經過受到地球引力等於月球引力的地點時，至地球的距離約為多少公里？ (A)  $1.8 \times 10^5$  (B)  $2.2 \times 10^5$  (C)  $2.6 \times 10^5$  (D)  $3.0 \times 10^5$  (E)  $3.4 \times 10^5$ 。
16. 若將人當作質點看待，則一位 60 公斤的男生與另一位 50 公斤的女生相距 1 公尺時，他們之間的重力約為多少公斤重？ (A)  $2 \times 10^{-9}$  (B)  $2 \times 10^{-8}$  (C)  $2 \times 10^{-7}$

## 第二節

## 電力與磁力

- 17.(1)如圖，3 個點電荷  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  固定在一直線上， $q_3$  與  $q_2$  的距離為  $q_1$  與  $q_2$  的 2 倍。若  $q_1$  帶正電且所受靜電力的合力為零，由此可判定  $q_2 : q_3$  可能為下列哪些選項？（多選） (A)  $1 : (-3)$  (B)  $(-1) : 9$  (C)  $1 : (-9)$  (D)  $(-1) : 3$  (E)  $1 : \sqrt{3}$ 。

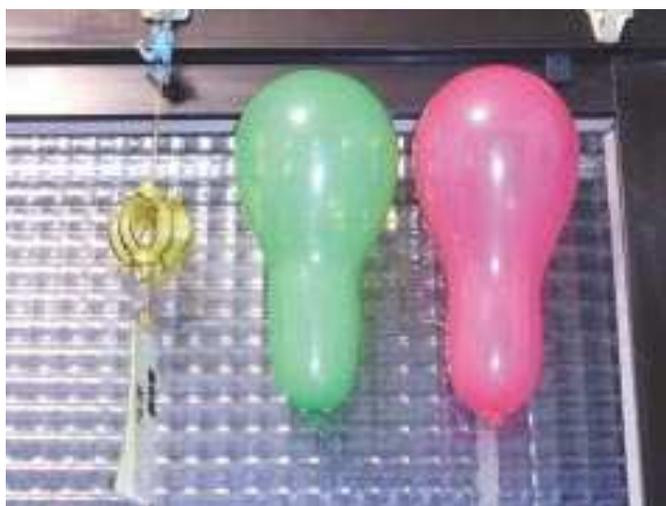


- (2)若  $q_1$  與  $q_2$  的距離為  $d$ ，將  $q_1$  向右移到  $q_2$  與  $q_3$  之間，欲使  $q_1$  所受  $q_2$  與  $q_3$  的靜電力相等（注意：方向是相同的，合力不為零），則  $q_1$  向右移的距離為 (A)  $\frac{7}{6}d$  (B)  $\frac{6}{5}d$  (C)  $\frac{5}{4}d$  (D)  $\frac{4}{3}d$  (E)  $\frac{3}{2}d$ 。
- 18.有一支 PVC 塑膠管與一塊棉布摩擦後若帶有  $3.2 \times 10^{-5}$  庫侖的負電，試問（已知一個電

(1)電荷如何發生轉移？

(2)轉移的電荷數為多少個？

- 19.靜電現象在日常生活中很常見，請回家作個有趣的靜電實驗：吹一個小氣球，然後綁緊氣球嘴，再用棉布摩擦（在自己身上的衣服摩擦亦可），可看見它會吸附在門的玻璃板上，如圖。看看摩擦後的氣球還可以吸附在哪些東西上？（並說明原因）



### 第三節

## 強力與弱力

- 20.依我們目前所知，自然界中的基本交互作用力可分為四種：(A)重力；(B)電磁力；(C)強力；(D)弱力。則下列物理現象主要為上述何種作用力所造成？

(1)原子核內質子衰變放出 $\beta$ 射線

(2)物體在桌面上滑動時受到摩擦力的作用。

(3)地球表面有大氣層的存在。

(4)自然界中物質的存在。

### 三、閱讀題

21. 微中子的身世頗為有趣。故事起於 1930 年，那時物理學家研究原子核的  $\beta$  衰變過程，也就是某原子核甲會自動放出一個電子而變成另一個原子核乙，以符號表示就是〔甲 $\rightarrow$ 乙+電子〕。又由於原子核是由許多中子與質子所組成的，從微觀的角度看， $\beta$  衰變就是一個中子轉變成一個質子，同時釋放出一個電子。如果我們假設物體總能量在衰變前後相同，而且衰變後產生物僅有原子核乙與電子兩個粒子，就可以推算出電子應該帶有固定的能量。可是物理學家仔細地測量了衰變過程所放出電子的能量，發現其能量並不固定。這意味了什麼呢？波耳相信能量守恆這一個物理基本原理錯了。但是包立

則覺得係冇別法。因此包立提出假設，揣測原子核  $\beta$  衰變後除了放出電子，還同時釋放出一個質量很小又不帶電的中性粒子，這個粒子與其它粒子的交互作用極端微弱，很難偵測。因為這個沒有被偵測到的粒子會帶走能量，所以表面上看能量才會變少了，好像不是一個守恆量。……費米於 1933 年提出現代的  $\beta$  衰變理論，結合了當時新發現的中子與包立所假設的粒子（費米將之稱為微中子，意思就是「小的中性粒子」），寫下基本  $\beta$  衰變過程：中子 $\rightarrow$ 質子+電子+微中子。……費米這個  $\beta$  衰變理論非常成功，因此微中子的身分與奇特的性質暫時得到認可，可是很多人還是希望能直接地觀察到微中子。一直要等到 1956 年，美國物理學家萊內斯 (Reines) 與科安 (Cowan) 方才頭一次偵測到微中子。〔節錄自普通高級中學課程物理學科中心第 43 期電子報科學新文摘—微中子，作者高涌泉〕

(1)  $\beta$  衰變是符合泡利不相容原理：

(2) 包立假設的中性粒子是後來發現的中子嗎？

(3) 由  $\beta$  衰變（中子 $\rightarrow$ 質子+電子+微中子）來看，中子與質子的質量何者較大？

## 解答

1. 地表 $\rightarrow$ 重量逐漸變小 $\rightarrow$ 重量等於零（地球引力與月球引力抵消） $\rightarrow$ 重量逐漸變大 $\rightarrow$ 月球，質量不改變。
2. 略。 3. 2.58。 4. (1)是；(2)略；(3)否。
5. (B)(C)。 6. (A)。
7. (1)三支棒形磁鐵做六邊形排列（兩磁鐵間有間隙），兩磁極皆異性端靠近，即為 N-S、N-S、N-S；(2)0。
8. (1)(E)；(2) $\searrow$ ；(3)(A)。
9. 為了說明質子、中子為何可以結合在一起構成原子核。
10. 因為強力的作用範圍極短。 11. 是。

12. (A)(C)(D) 。 13.  $5.98 \times 10^{-7}$  。 14.  $\sqrt{2} - 1$  。
15. (E) 。 16. (B) 。 17. (1)(B)(C) ; (2)(E) 。
18. (1)電子由棉布轉移至塑膠管 ; (2) $2.0 \times 10^{14}$  。
19. 略 。
20. (1)(D) ; (2)(B) ; (3)(A) ; (4)(C) 。
21. (1)是 ; (2)不是 , 是微中子 ; (3)中子 。