

# 新高中 生活與物理

第二版

黃小玲 彭永聰 李浩然 林兆斌 顧問：朱明中 李啟明

# E1

新高中生活與物理（第二版）以第一版的內容為基礎重新修訂，能完全符合 2014 年更新的《物理課程及評估指引（中四至中六）》所列明之要求，並加強討論學習物理的各種基本技巧。第二版課本引用更多切合生活的情景和例子，既能闡述物理學的概念，又能凸顯物理學與日常生活的緊密關係。此外，第二版課本增添詳盡圖解，更新相片，並應用各式各樣的圖表來幫助學生掌握知識。

課本共有 10 冊，六冊屬於「必修部分」，四冊屬於「選修部分」。

## 必修部分

- 第 1 冊\*：熱和氣體
- 第 2 冊\*：力和運動
- 第 3A 和 3B 冊：波動
- 第 4 冊：電和磁
- 第 5 冊：放射現象和核能

## 選修部分

- 第 E1 冊：天文學和航天科學
- 第 E2 冊：原子世界
- 第 E3 冊：能量和能源的使用
- 第 E4 冊：醫學物理學

\*另備 組合科學（物理）版本。

整套教材包括課本、實驗手冊和多媒體學習資源。

OXFORD

UNIVERSITY PRESS

牛津大學出版社

www.oupchina.com.hk

ISBN 978-0-19-944201-0



9 780199 442010

選修部分

OXFORD

新高中  
生活與物理  
第二版

## 教師用書

E1 黃小玲 彭永聰 李浩然 林兆斌 顧問：朱明中 李啟明

# E1

## 新高中

# 生活與物理

第二版

## 天文學和航天科學

教師用書

OXFORD  
牛津



# 目錄

作者簡介	iii
顧問簡介	iii
序言	vi
<b>第 1 課</b>	<b>不同空間標度下的宇宙面貌</b>
1.1 不同空間標度下的宇宙	2
總結 1	15
複習 1	17
自我評核 1	19
<b>第 2 課</b>	<b>天文學的發展史</b>
2.1 行星運動模型	22
2.2 現代天文學的曙光	34
2.3 開普勒的行星運動定律	39
總結 2	45
複習 2	47
自我評核 2	52
<b>第 3 課</b>	<b>重力下的軌道運動</b>
3.1 認識軌道運動	56
3.2 軌道運動中的能量守恆	66
總結 3	77
複習 3	78
自我評核 3	86

<b>第 4 課</b>	<b>恆星和宇宙</b>
4.1 恆星的距離	90
4.2 恆星的亮度	95
4.3 恆星的分類	102
4.4 恆星的多普勒效應	113
總結 4	124
複習 4	127
自我評核 4	138
<b>實驗</b>	
2a 太陽黑子與太陽自轉	142
4a 驗證強度的平方反比定律	145
4b 觀察光譜	148
4c 聲音的多普勒效應	152
答案	154
自我評核題解	158
索引	160
鳴謝	161
圖片鳴謝	162
附錄	163
<b>題解</b>	<b>165</b>



## 多媒體資源

下列多媒體資源讓學生透過不同種類的學習模式來增進知識。

模擬程式 1.1

錄像片段 1.1

- 模擬程式設互動功能，展示不同的物理現象和實驗。
- 錄像片段記錄有趣的物理現象，以及實驗的過程和結果。
- 虛擬實驗室讓學生在虛擬的環境操作實驗儀器。
- 生活中的物理、歷史點滴、物理DIY 提供額外的文章和錄像，供學生參考。
- 詞語表列出課本內的物理學詞語，並附以詳細解釋和英文正確讀音。

以上多媒體資源均上載至牛津物理網  
(<http://www.oupchina.com.hk/physics/chi/>)。



# 1 不同空間標度下的宇宙面貌

我們在这一課會學到

- 一些常用的天文單位
- 一些常見的天體



## 1.1

## 不同空間標度下的宇宙

## 起點 星光處處

你看過這般繁星滿佈的天空嗎？



圖 a 智利的夜空，以及歐洲南天文台位於當地的望遠鏡

除了恆星外，天空還有甚麼？行星、星雲等（參看第10-11頁）

## ✓ 本節重點

- 1 天文學常用的時間單位
- 2 天文學常用的角單位
- 3 天文學常用的長度單位
- 4 宇宙的結構

## 1 天文學常用的單位

讓我們先認識一些天文學常用的單位。

## a 時間的單位

宇宙已經存在了一段很長的時間。天文學常用「年」來量度時間，一年指地球圍繞太陽運行一周所需的時間。

$$1 \text{ 年} \approx 365.25 \text{ 日}$$

天文學的研究項目中，許多都要用「萬年」、甚至「億年」計算。

$$10^6 \text{ 年} = 100 \text{ 萬年}$$

$$10^9 \text{ 年} = 10 \text{ 億年}$$

例如，宇宙已經有大約 140 億年 ( $1.4 \times 10^{10}$  年) 的歷史；而宇宙裏第一個星系在超過 100 億年前形成。

有些學生會以為一年剛好是 365 日。可提醒他們一年並不能以整數的曆日來表示，因此，每隔若干年便要多加一天，否則日曆所顯示的日子便追不上地球公轉的週期。所謂「四年一閏」，可以被 4 整除的年份就是閏年；然而，如果年份以「00」結尾，但又不能被 400 整除，該年就不是閏年。

提醒學生「1 億」就是 1 萬的 1 萬倍。

表 1.1a 列出一些時距的例子。

歷時	事件
$10^{-17}$ 秒	光穿越一個原子
1 日	地球自轉一次
1 年	地球圍繞太陽公轉一次
$1.6 \times 10^2$ 年	海王星圍繞太陽公轉一次
$2 \times 10^8$ 年	太陽圍繞銀河系公轉一次

表 1.1a 一些時距的例子

## b 角的單位

角以度 ( $^\circ$ ) 為量度單位；物體繞一圈，即繞了  $360^\circ$ 。較小的角可以用角分 (可寫成 arcmin 或 ') 和角秒 (可寫成 arcsec 或 ") 來量度。

$$1' = 60'' \text{ 和 } 1^\circ = 60' = 3600''$$

弧度 (rad) 是另一個用來量度角的單位 (圖 1.1a)。繞一圈即繞了  $2\pi$  rad，也就是說，1 rad 等於  $57.3^\circ$ 。

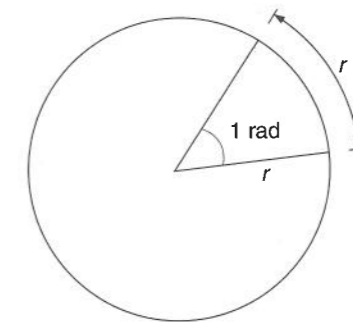


圖 1.1a 1 rad 的定義

$$\begin{aligned} 2\pi \text{ rad} &= 360^\circ \\ 1 \text{ rad} &= \frac{180^\circ}{\pi} \\ &= 57.3^\circ \end{aligned}$$

「物理技巧手冊」載有教學筆記及練習。

## 技巧分析

## 角分、角秒與小數互換

利用以下方法，可把角分和角秒轉換成小數：  
 $23^\circ 45' 36''$   
 $= \left( 23 + \frac{45}{60} + \frac{36}{3600} \right)^\circ$   
 $= 23.76^\circ$

相反，要把小數轉換成角分和角秒，可以用以下方法：  
 $116.805^\circ$   
 $= 116^\circ + 0.805 \times 60'$   
 $= 116^\circ + 48.3'$   
 $= 116^\circ 48' + 0.3 \times 60''$   
 $= 116^\circ 48' 18''$

Handwritten notes: Arc length  $r\theta = s$ ,  $A = B \tan \theta$ , when  $\theta$  is small, then  $\tan \theta \approx \theta$ ,  $\sin \theta \approx \theta$ .

## 例題 1 角度單位之間的互換

從地球觀察，滿月的角大小約為  $0.5^\circ$ 。試把這個角大小轉換為以下的單位。

- (a) 角秒
- (b) 弧度

## 題解

$$(a) 0.5^\circ = 0.5 \times 3600'' = 1800''$$

$$(b) 0.5^\circ = 0.5^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ} \text{ rad} = 8.73 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

習題與思考 1.1 Q2 (p.14)



見第 3 頁例題 1。▶ 我們通常用**角大小** (或稱**角直徑**) 來描述天上物體的大小。物體自觀察者延伸的對角，就是該物體的角大小 (圖 1.1b)。

同樣，天上物體之間的距離可用**角距離**來描述 (圖 1.1c)。

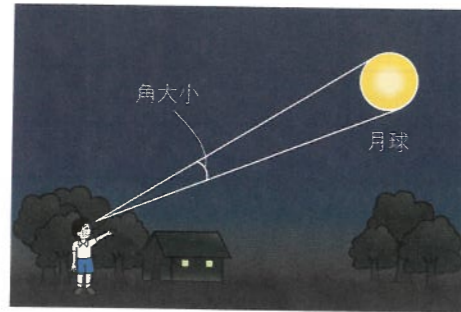


圖 1.1b 角大小的意義



圖 1.1c 角距離的意義

我們可用一個簡單的方法估算角大小或角距離。伸直手臂，食指的闊度大約就是  $1^\circ$  (圖 1.1d)。從地球觀察，太陽和月球的角直徑大約只有  $0.5^\circ$ ，比食指的闊度還要小。觀察天空上其他物體時，會發現它們的角大小一般都比太陽和月球小得多。

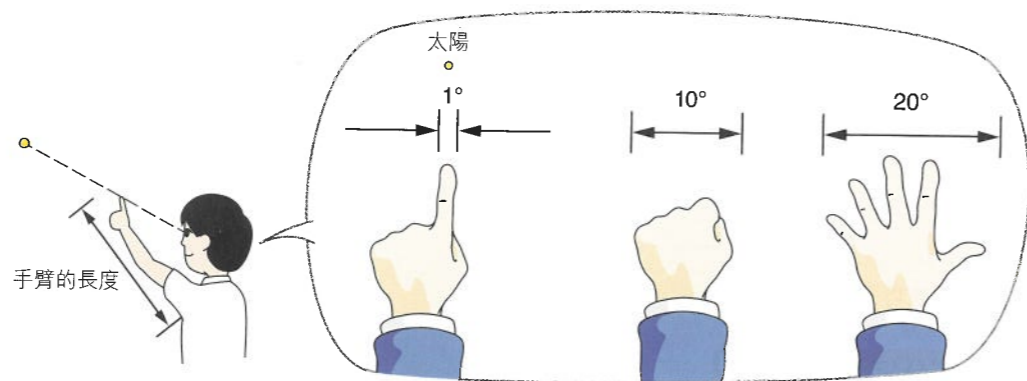


圖 1.1d 伸直手臂，用手就可估算角大小或角距離

這就是我們可看到日全食的原因。▶ 兩個物體的角大小相等，並不表示它們大小相等。眾所周知，太陽比月球大得多，但它們的角大小卻幾乎相等。相樣道理，即使兩個物體的角距離很小，也不表示它們位置相近 (圖 1.1e)。

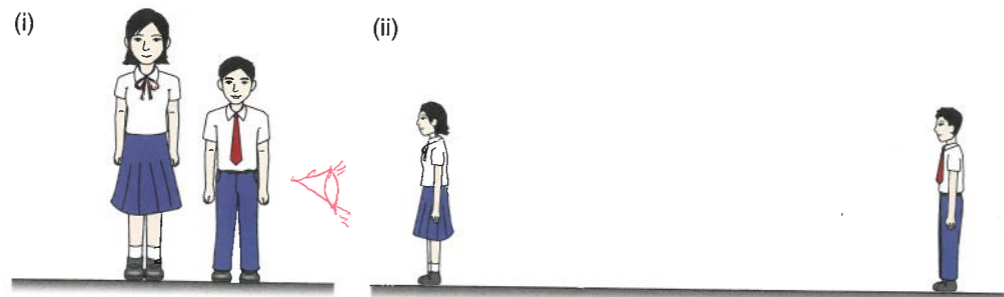


圖 1.1e (i) 兩人看來十分接近，(ii) 但實際上可能相隔很遠

角大小 angular size    角直徑 angular diameter    角距離 angular distance

### c 長度的單位

雖然長度的國際單位是米 (m)，但天文學家通常採用較大的單位來描述長度，例子包括**光年**，它的簡寫是 **ly**。一光年就是光在真空行進一年的距離。由於光在真空中的速率是  $3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ，

光速的準確值為  $299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$ 。

$1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$

$3 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 3600 =$

嚴格來說，1 AU 相等於 ▶ **天文單位**的簡寫是 **AU**。一天文單位大約等於 149 597 870 700 m。地球與太陽的平均距離 (圖 1.1f)。

$1 \text{ AU} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$



圖 1.1f 地球和太陽

parallax 視差

第 4 課會更詳細討論 ▶ **秒差距**的簡寫是 **pc**。1 AU 長度形成  $1''$  的對角時所延伸的距離，就是 1 pc (圖 1.1g)。

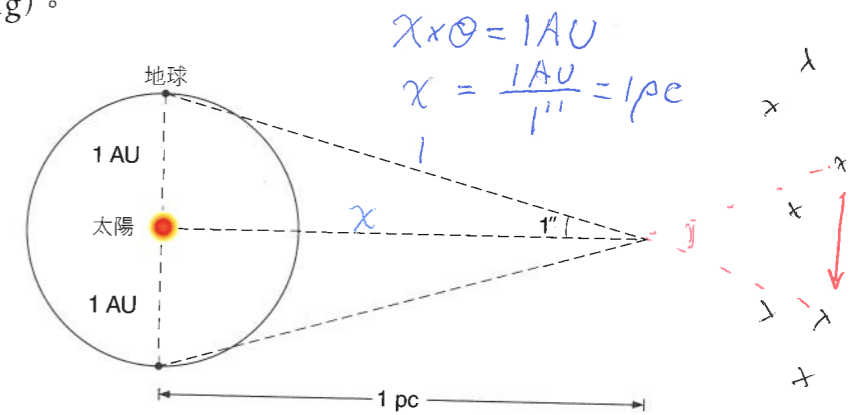


圖 1.1g 1 pc 的定義 (不按比例繪畫)

$1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ ly}$

有時，我們會用千秒差距 (kpc) 和兆秒差距 (Mpc) 來量度更大的距離。

$1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$      $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$

▶ 仙女座星系 (Andromeda Galaxy) 又名 M31 或 NGC 224，是銀河系以外最接近地球的螺旋星系，也是本星系羣中最大的星系。由於仙女座星系的視星等為 3.4，我們用肉眼也看得見它。



圖 1.1h 仙女座星系的直徑約為 70 kpc，即  $10^{21} \text{ m}$

光年 (ly) light year    天文單位 (AU) astronomical unit    秒差距 (pc) parsec



同樣，一光秒就是光在真空行進一秒的距離。  
1 光秒 =  $3.00 \times 10^8$  m

♣ 毗鄰星 (Proxima Centauri) 是一顆紅矮星，位於半人馬座 (Centaurus)。

### 例題 2 長度單位之間的互換

- (a) 光分是另一個長度單位，一光分指光在真空行進一分鐘的距離。試用米表達這個距離。
- (b) 太陽是最接近我們的恆星，其次是毗鄰星 (圖 a)，它距離地球 4.2 ly。試用秒差距和光分表達這個距離。

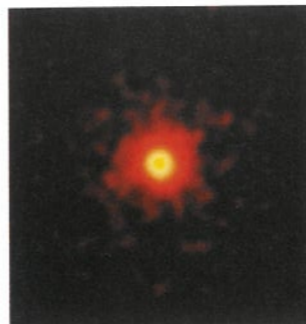


圖 a

#### 題解

- (a) 1 光分 =  $3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \times 60 \text{ s} = 1.80 \times 10^{10} \text{ m}$
- (b)  $4.2 \text{ ly} = \frac{4.2}{3.26} \text{ pc} = 1.29 \text{ pc}$
- $4.2 \text{ ly} = 4.2 \times 365 \times 24 \times 60 = 2.21 \times 10^6$  光分

▶ 習題與思考 1.1 Q3 (p.14)

### 例題 3 角大小

- (a) 大廈 A 的高度是 25 m。從距離這大廈 1.5 km 的 X 點觀察，大廈 A 的角大小是多少？
- (b) 大廈 B 的高度是 167 m。從 X 點觀察，大廈 B 的角大小與大廈 A 相同，大廈 A 和 B 與 X 點的距離相同嗎？

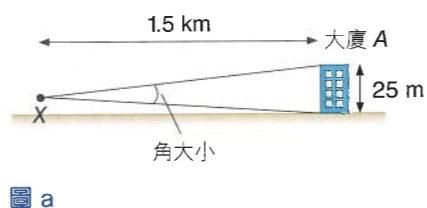


圖 a

#### 題解

- (a) 根據  $s = r\theta$ ,
- $$\theta = \frac{s}{r} = \frac{25}{1500} = 0.0167 \text{ rad}$$
- $$= \left(0.0167 \times \frac{180}{\pi}\right)^\circ$$
- $$= 0.955^\circ$$

- (b) 根據  $s = r\theta$ ,
- $$r = \frac{s}{\theta} = \frac{167}{0.0167} = 10\,000 \text{ m} = 10 \text{ km}$$
- ∴ 大廈 B 距離 X 點 10 km，遠比大廈 A 和 X 點之間的距離大。

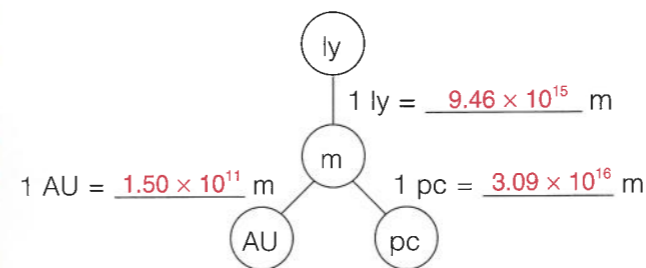
▶ 進度評估 1 Q5 (p.7)

$\theta$  的值十分小，並以弧度為單位時，我們才可應用  $s = r\theta$  找出物體的角大小或角距離。

### 進度評估 1

✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.2)。

- 1 以下哪一項不是長度單位？
- 2,3 A 天文單位                      B 秒差距  
C 角分                                D 光年
- 3,2 恆星 A 和 B 分別距離地球 6 ly 和 5 pc。哪顆恆星和地球相距較遠？
- A 恆星 A                              B 恆星 B
- 3,3 把以下的單位轉換為米。



- 2,4 (a) 某衛星的長度是 100 m，與地面的距離為 400 km。求這衛星的角大小，答案以 (i) 弧度和 (ii) 角秒表示。 (i)  $2.50 \times 10^{-4} \text{ rad}$  (ii)  $51.6''$
- (b) 把  $0.7'$  轉換為弧度。  $2.04 \times 10^{-4} \text{ rad}$
- [提示： $0.7' = \frac{?}{180} \times \frac{\pi}{\text{rad}}$ ]

- 2,5 (a) 考慮日全蝕發生時的一瞬間。
- (i) 比較太陽和月球的角大小。 相等
- (ii) 它們哪個距離地球較遠？實際上哪個較大？ 太陽，太陽
- (iii) 太陽和月球之間的角距離是多少？ 零
- (b) 日環蝕發生時 (圖 a)，對地球的觀察者而言，太陽看似一個光環。試比較當時太陽和月球的角大小。 太陽 > 月球

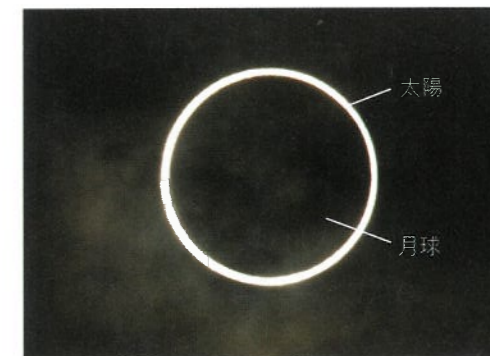


圖 a

### STSE 光污染和天文觀測

香港市區的光污染十分嚴重。燈光照亮夜空，因而減低眼睛對星光的靈敏度。因此，在香港作天文觀測變得十分困難。



#### 討論

- 1 怎樣可以減少光污染？ 關掉不必要的電燈 (或類似方法)。
- 2 怎樣克服光污染來作天文觀測？ 於偏遠地方作天文觀測，因為那些地方的光污染一般較輕微。



以下網站內的影片展示宇宙的不同結構：

<https://www.youtube.com/watch?v=17jymDn0W6U>

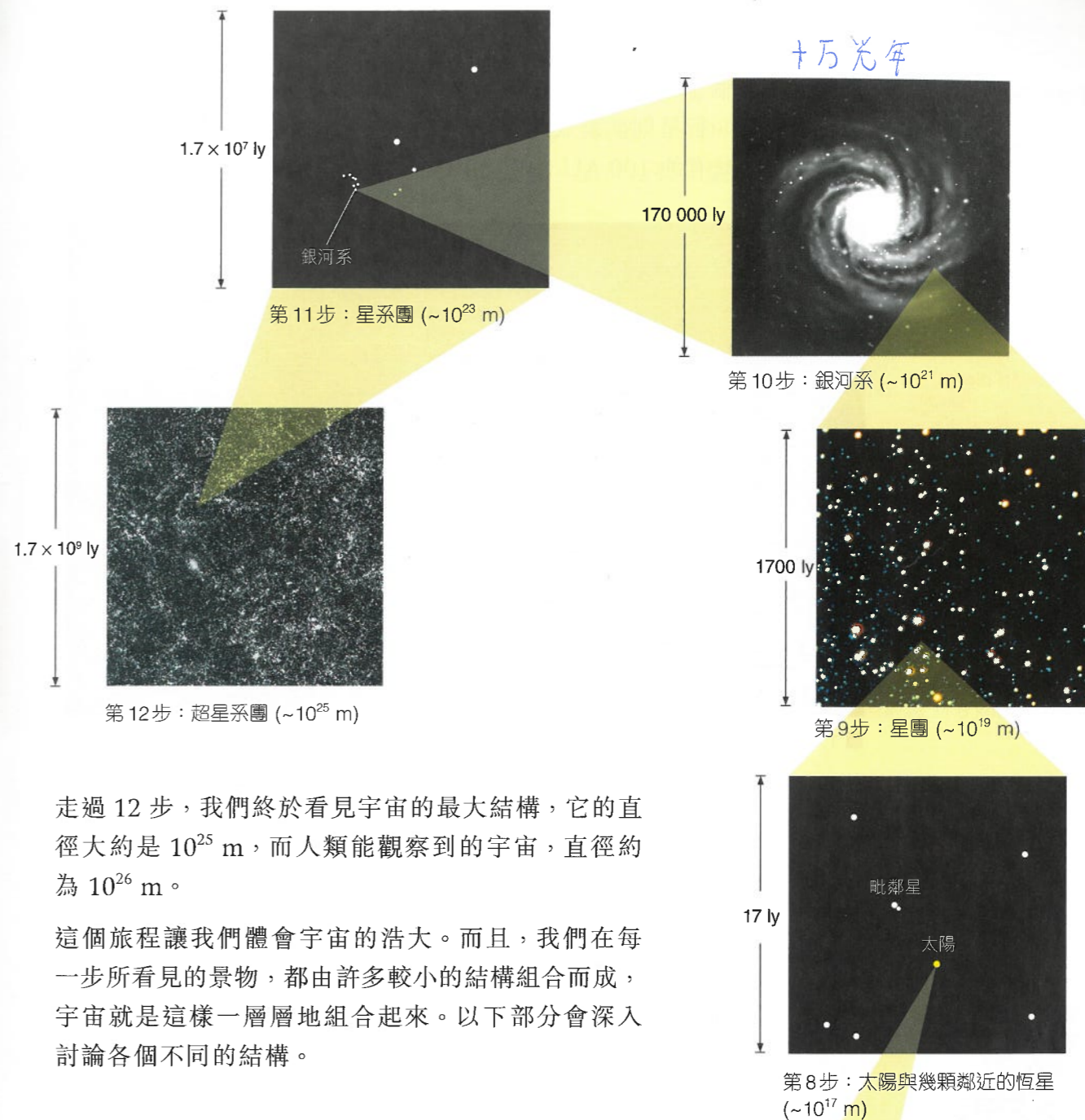
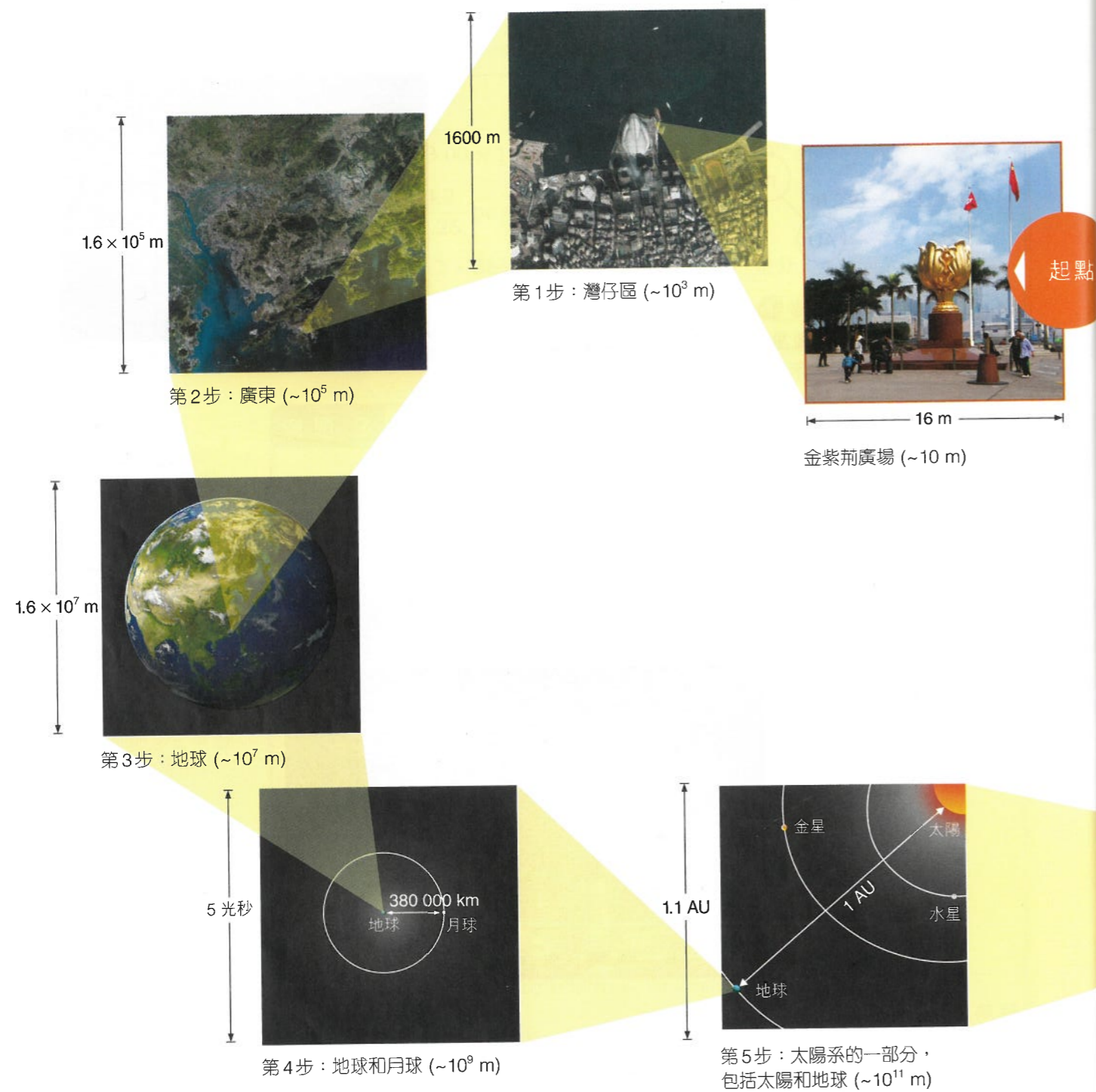


## 2 宇宙的層階組織

浩瀚的宇宙究竟有甚麼？讓我們從灣仔金紫荊廣場出發，向宇宙深處邁進。

### 從金紫荊廣場邁向宇宙的 12 步

我們每走一步，景物的長和闊都會縮小 100 倍。



走過 12 步，我們終於看見宇宙的最大結構，它的直徑大約是  $10^{25}$  m，而人類能觀察到的宇宙，直徑約為  $10^{26}$  m。

這個旅程讓我們體會宇宙的浩大。而且，我們在每一步所看見的景物，都由許多較小的結構組合而成，宇宙就是這樣一層層地組合起來。以下部分會深入討論各個不同的結構。



### a 衛星和行星

冥王星曾經是太陽系的主要行星之一；但是，根據國際天文聯會最新修訂的定義，冥王星應該歸類為矮行星。

太陽系由八個主要行星、許多衛星和較小的物體組成(圖 1.1i)。衛星圍繞行星運行，行星則圍繞太陽運行。在宇宙中，太陽系只是一個很小的結構，直徑只有約 100 AU ( $10^{13}$  m)。

2008年，冥王星(Pluto) 認為「海外天體」(Trans-Neptunian Object) 類型的典型星體，該類型星體統稱為「冥王體」(plutoid)。

矮行星(dwarf planet) 的質量達行星級別(行星質量體)，但又不屬於行星或天然衛星。現時共有5個天體歸類為矮行星，分別是谷神星(Ceres)、冥王星、閩神星(Eris)、鳥神星(Makemake) 和妊神星(Haumea)。

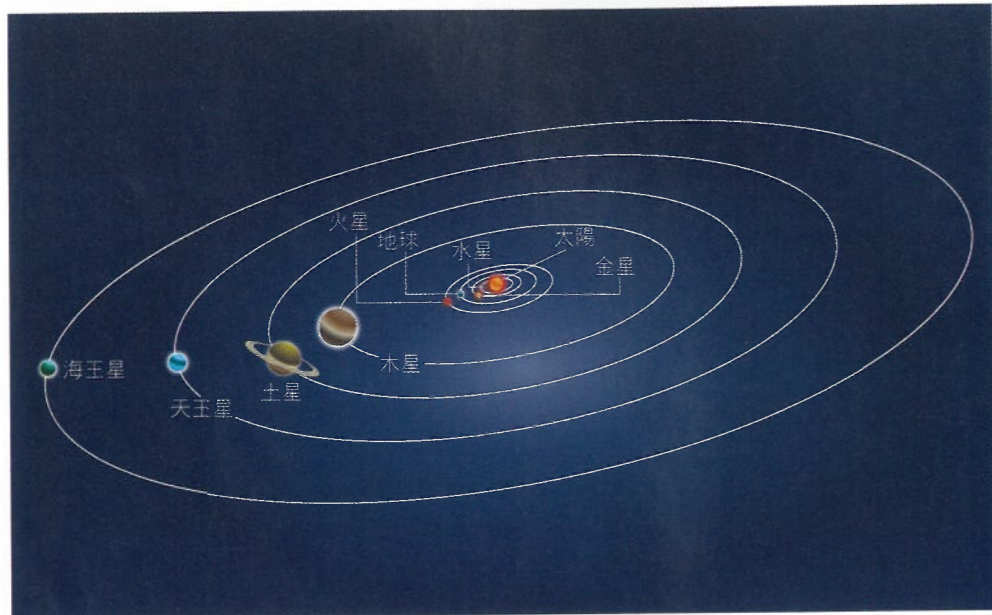


圖 1.1i 太陽系的一部分。由太陽至海王星的距離約為 60 AU

地球是太陽系的行星之一，它唯一的天然衛星是月球。月球本身並不發光；我們能看見月球，是因為它把來自太陽的光線反射到我們的眼睛。

### b 恆星、星團和星雲

關於核聚變的內容，可參閱第 5 冊第 3 課。

獵戶座大星雲(Orion Nebula) 又名 M42 或 NGC 1976，位於獵戶座。這個星雲在香港冬季可以清楚看見。

恆星藉着核聚變產生能量，放出熱和光，屬於發光體。有些恆星會有行星圍繞着它運行，太陽就是一顆典型的恆星(圖 1.1j)。

星團是一組恆星，受引力牽引而聚集在一起(圖 1.1k)。星雲是星際空間中的塵埃和氣體團(圖 1.1l)，恆星就在當中誕生。

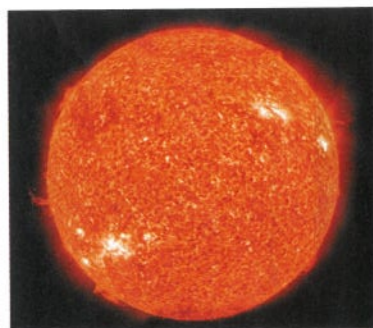


圖 1.1j 太陽

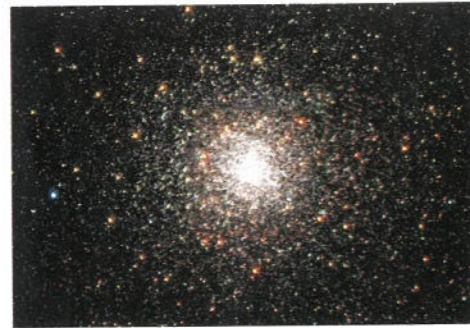


圖 1.1k 球狀星團(直徑約為 50 pc，即  $10^{18}$  m)



圖 1.1l 獵戶座大星雲(半徑約為 3.68 pc)

太陽系 solar system 行星 planet 衛星 satellite 恆星 star 星團 star cluster 星雲 nebula

### c 星系、星系團和超星系團

內文提及的「其他物質」包括中子星、黑洞、暗物質等。

渦狀星系(Whirlpool Galaxy) 又名 M51 或 NGC 5194，是一個螺旋星系，位於獵犬座(Canis Venatici)，與銀河系的距離推算達 106 pc。

星系(圖 1.1m) 是由恆星、星團、氣體、塵埃，以及其他物質受引力互相牽引而組成的龐大系統。一般星系包含  $10^7$  至  $10^{12}$  顆恆星，全都圍繞同一個中心運行。星系是我們觀察到的宇宙的基本結構單元。

宇宙的基本單位

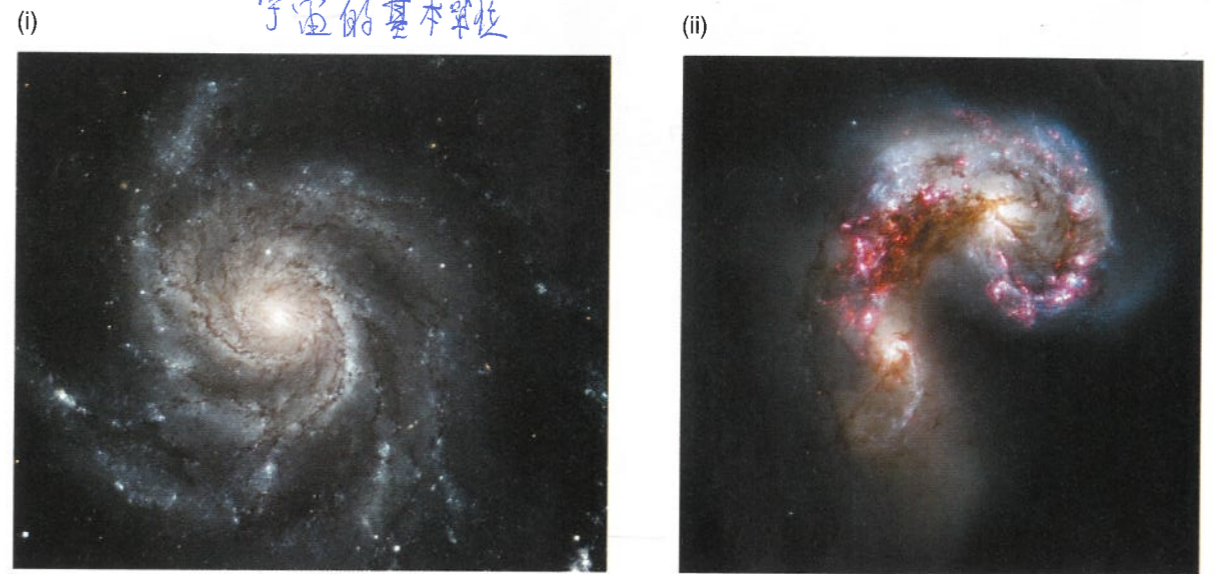


圖 1.1m 一些星系的例子 (i) 渦狀星系(直徑約為 16.5 kpc) (ii) 觸鬚星系(直徑約為 11.6 kpc)

太陽系在銀河系之內。銀河系是一個典型的星系，呈螺旋形，從側面觀看時像一隻碟子，中間部位隆起(圖 1.1n)。從地球望向銀河系的中心，會看見一道由銀河系的恆星組成的朦朧光帶，橫跨夜空(圖 1.1o)。這道光帶稱為銀河。

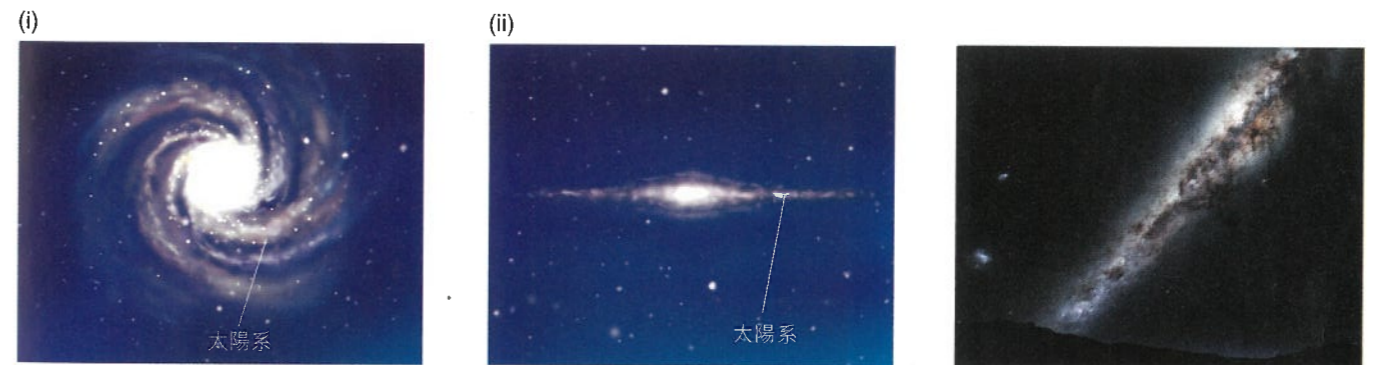


圖 1.1n 從 (i) 頂部 (ii) 側面觀看銀河系(構想圖)

圖 1.1o 從地球觀看，銀河系是一道朦朧的光帶(照片經長時間曝光)

這裏回應了起點提出的問題。除了恆星，天空中還有行星、衛星、星雲等等的結構。但是它們大部分都太黯淡或者太小，難以用肉眼直接觀察得到。大部分星系都位於星系團之內。每個星系團由數個至數千個星系組成，大小約為  $10^6$  pc ( $10^{23}$  m)。我們身處的星系團稱為本星系羣。星系團又會聚在一起形成大小約為  $10^7$ - $10^8$  pc ( $10^{24}$ - $10^{25}$  m) 的超星系團。

星系 galaxy 銀河系 Milky Way Galaxy 星系團 galaxy cluster 本星系羣 Local Group 超星系團 supercluster of galaxies



1 不同空間標度下的宇宙面貌

進度評估 2

各題號旁的數字對應本節重點(參看 p.2)。

4.1 以下哪個結構的體積最大?

A M55 星團



B 草帽星系



C 木星



D 天狼星

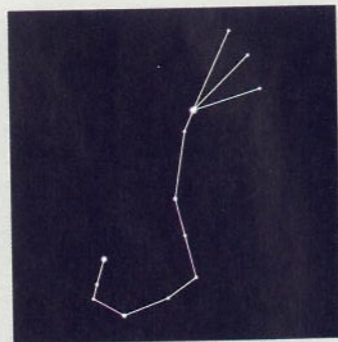


4.2 在下表的空格內，填上可代表左欄長度數量級的結構或距離。

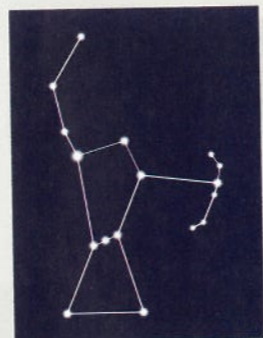
米	結構或距離
1	人類
$10^2$	高樓大廈
$10^7$	地球
$10^9$	地球與月球的距離
$10^{11}$	地球與太陽的距離
$10^{13}$	太陽系
$10^{19}$	星團
$10^{21}$	銀河系

補充資料 星座

望向夜空，會發現天體看似組成不同的圖案(圖 a 和 b)，這些圖案稱為星座。時至今日，天文學家以明確的界線，把整個天空分為 88 個區域，這些區域也稱為星座。要特別留意的是，位處相同星座的天體，實際上並不一定相關或相近。



a 天蠍座



b 獵戶座

星圖就像一幅天空的地圖，能幫助我們辨認星座。現時，坊間有許多不同種類的電子星圖，可安裝在流動裝置內，例如：



iOS

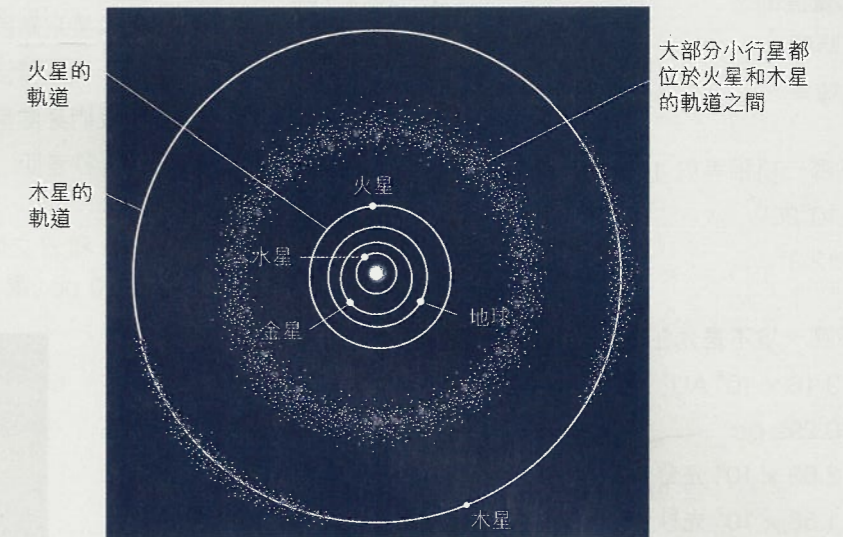


Android

補充資料 太陽系中的小型天體

小行星、流星體和彗星都是太陽系的小型天體。

小行星是圍繞太陽運行的細小岩石碎片，直徑可達數百公里，大部分都位於火星和木星的軌道之間。



流星體是在行星間運行的碎片，有些只有塵埃般細小，有些卻像石塊一樣大。有些流星體會下墜到地球，於進入大氣層時燃燒，並在天空中劃出一道亮光，這些流星體稱為流星。如果流星未完全燃燒掉便墜落地面，那些殘留部分便稱為隕石。

彗星有一個核心，核心直徑一般為數十公里，主要由冰、塵埃或岩石組成。彗星接近太陽時，核心受熱，內裏的塵埃和氣體蒸發，形成彗星的長尾巴。

艾女星位於火星和土星之間的小行星帶內，它的平均直徑為 31.4 km。

獅子座流星雨(Leonid meteor 或 Leonids)的輻射點位於獅子座。它一般在 11 月 15 至 20 日出現，高峯時間一般在 11 月 18 日。

哈雷彗星是唯一能在地球以肉眼觀看得到的短周期彗星。它的質量約為  $2 \times 10^{14}$  kg 直徑約為 11 km。第 40 頁載有它的軌道資料。



小行星 243 (又名艾女星)



獅子座流星雨



在巴西發現的隕石



哈雷彗星



習題與思考 1.1 ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.2)。

除特別指明外，取光速  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ 。  
1 日 = 24 小時。作答時或須參考課文提供的資料。

- 3.1 光年量度的是  
A 時間。 B 長度。  
C 速率。 D 角。

- 3.2 以下哪一項相等於  $1.23 \text{ rad}$ ?  $1.23 \times 57.3^\circ$   
A  $10^\circ 20'$  B  $70^\circ 47'$   
C  $12.3^\circ$  D  $70.5^\circ$

- 3.3 以下哪一項不是光在真空行進半年的距離?  
A  $3.16 \times 10^4 \text{ AU}$   
B  $0.292 \text{ pc}$   
C  $2.63 \times 10^5 \text{ 光分}$   
D  $1.58 \times 10^7 \text{ 光秒}$
- $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$   
 $1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$   
 $1 \text{ ly} = 63067 \text{ AU}$   
 $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly}$   
 $3.26 \quad 3.26$

- 3.4 4 下列哪項敘述是正確的?  
(1) 一秒差距的距離比一光年長。  
(2) 銀河系在太陽系之內。  
(3) 星團在星系之內。  
A 只有 (1)  
B 只有 (1) 和 (3)  
C 只有 (2) 和 (3)  
D (1)、(2) 和 (3)

- ★ 5 圖 a 所示的天體包含以下哪些結構?



- (1) 星團  
(2) 星系團  
(3) 恆星  
A 只有 (1) 和 (2) B 只有 (1) 和 (3)  
C 只有 (2) 和 (3) D (1)、(2) 和 (3)

- 3.4 6 把下列各長度由小至大排列。II · IV · I · VI · V · III

- (I) 一光年  
(II) 由地球至月球的距離  
(III) 本星系羣的大小  
(IV) 一天文單位  $1 \text{ AU}$   
(V) 我們身處星系的大小  $+ \text{光年}$   
(VI) 一秒差距  $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly}$

- 2.3 7 恆星 A 和 B 之間的角距離是  $2^\circ$ ，它們與地球的距離都是  $20 \text{ pc}$  (圖 b)。試估算它們之間的實際距離。

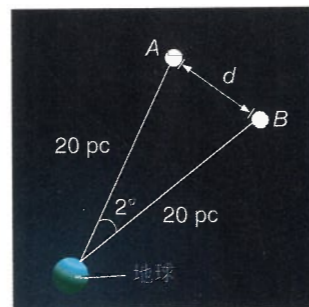


圖 b

$0.698 \text{ pc}$   
 $s = r\theta$   
 $d = 20 \times 2^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ}$

- ★ 8 從地球上觀看，金星像一個亮點 (圖 c)。金星雖然不像恆星那麼熱，但卻像恆星一般光亮。為甚麼?



圖 c

- ★ 9 (a) 火星是太陽的一顆行星。  
(i) 火星與太陽之間的距離是  $1.52 \text{ AU}$ 。試以米和光分表達這個距離。  $2.28 \times 10^{11} \text{ m}$ 、 $12.7 \text{ 光分}$   
(ii) 光從太陽行進至火星需時多久?  $12.7 \text{ 分鐘}$   
(b) 太陽是銀河系中的一顆恆星。銀河系的直徑約為  $75 \text{ 000 ly}$ 。  
(i) 光橫越銀河系需時多久?  $75 \text{ 000 年}$   
(ii) 試以秒差距來表達銀河系的直徑。  $23 \text{ 000 pc}$

$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly}$

總結 1

詞彙

1 角分 (arcmin 或 ') minute of arc	p.3	11 行星 planet	p.10
2 角秒 (arcsec 或 ") second of arc	p.3	12 衛星 satellite	p.10
3 弧度 (rad) radian	p.3	13 恆星 star	p.10
4 角大小 angular size	p.4	14 星團 star cluster	p.10
5 角直徑 angular diameter	p.4	15 星雲 nebula	p.10
6 角距離 angular distance	p.4	16 星系 galaxy	p.11
7 光年 (ly) light year	p.5	17 銀河系 Milky Way Galaxy	p.11
8 天文單位 (AU) astronomical unit	p.5	18 星系團 galaxy cluster	p.11
9 秒差距 (pc) parsec	p.5	19 本星系羣 Local Group	p.11
10 太陽系 solar system	p.10	20 超星系團 supercluster of galaxies	p.11

課文摘要

1.1 不同空間標度下的宇宙

- 時間單位：年  
 $1 \text{ 年} \approx 365.25 \text{ 日}$
- 天上物體可用角大小或角直徑來描述。
- 角度單位：度、角分 (arcmin 或 ')、角秒 (arcsec 或 ")、弧度 (rad)  
 $1' = 60''$   
 $1^\circ = 60' = 3600''$   
 $1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi} = 57.3^\circ$
- 長度單位：光年 (ly)、天文單位 (AU)、秒差距 (pc)  
 $1 \text{ ly} = \text{光在真空行進一年的距離}$   
 $= 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$   
 $1 \text{ AU} = \text{地球與太陽的平均距離}$   
 $= 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$   
 $1 \text{ pc} = 1 \text{ AU 長度形成 } 1'' \text{ 的對角時所延伸的距離}$   
 $= 3.26 \text{ ly}$   
 $= 3.09 \times 10^{16} \text{ m}$

$1 \text{ AU} = \frac{1.5 \times 10^{11} \text{ m}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m/ly}}$   
 $= 1.5856 \times 10^{-5} \text{ ly}$



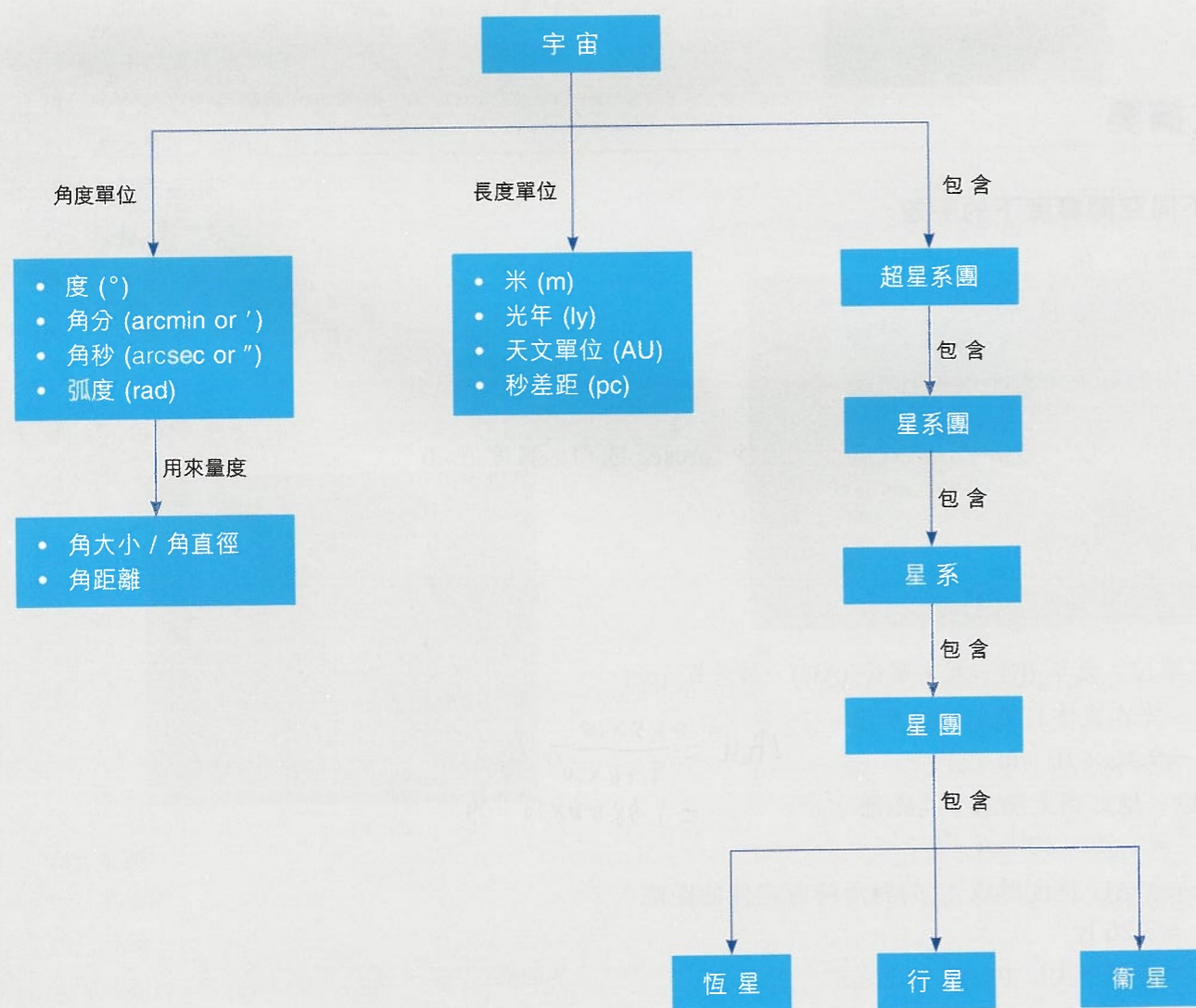
1 不同空間標度下的宇宙面貌

5 各種天體的大小 (表 a) :

結構	例子和大小
衛星	月球 ( $10^6$ m)
行星	地球 ( $10^7$ m)
恆星	太陽 ( $10^9$ m)
星團	-
星系	銀河系 ( $10^{21}$ m)
星系團	本星系羣 ( $10^{23}$ m)
超星系團	-

表 a

概念圖



複習 1

除特別指明外，取光速  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ 、  
1 日 = 24 小時。作答時或須參考課文提供的資料。

概念重溫

(第 1 題) 判斷以下各項敘述是正確的，還是錯誤的。

- 1 一光年相等於  $3 \times 10^8$  年。 **F**  
 光年是長度的單位而不是時間的單位。

多項選擇題

2 以下哪項是時間的單位？

- (1) 秒
- (2) 秒差距
- (3) 光年

- A** 只有 (1)
- B 只有 (3)
- C 只有 (1) 和 (3)
- D 只有 (2) 和 (3)

★ 3 土星是太陽系的一個行星，它以近乎圓形的軌道圍繞太陽運行，軌道半徑約為 9.5 AU，軌道週期約為 29.5 年。土星的運行速率是多少？

- A  $0.322 \text{ AU yr}^{-1}$
- B  $1.4 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$
- C  $9600 \text{ km s}^{-1}$
- D**  $34\,600 \text{ km h}^{-1}$

★★ 4 某天晚上，在地面上觀察，金星、木星和月球在天上的位置就如圖 a 所示，三者幾乎形成一個等邊三角形。



圖 a

下列哪項關於該三個星體的敘述必然正確？

- (1) 它們之間的角距離幾乎相等。
- (2) 它們之間的距離幾乎相等。
- (3) 它們的角大小幾乎相等。

- A** 只有 (1)
- B 只有 (1) 和 (2)
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)

參看 p.4, 6

5 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.3

太陽距銀河系的中心約 8 kpc，而它繞着中心旋轉的速率為  $220 \text{ km s}^{-1}$ 。太陽繞銀河系中心旋轉一周需時多少？

- A**  $2.24 \times 10^8$  年 (53%)
- B  $3.55 \times 10^8$  年
- C  $2.24 \times 10^{11}$  年
- D  $3.55 \times 10^{11}$  年

6 香港中學文憑考試 2013 年卷二 Q1.1

將以下天體依其跟地球的距離由近到遠排列：

- (1) 太陽
- (2) 離地球 8.6 ly 的天狼星
- (3) 離地球 19 AU 的天王星

- A (1) (2) (3)
- B** (1) (3) (2) (78%)
- C (3) (1) (2)
- D (3) (2) (1)

問答題

7 圖 b 是一個稱為艾奧的天體，它圍繞木星運行。

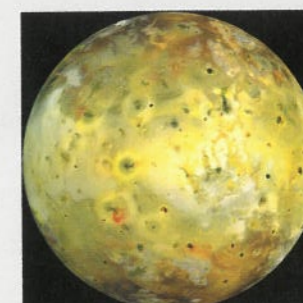


圖 b



1 不同空間標度下的宇宙面貌

- (a) 艾奧應歸類為哪一種天體類別？**衛星** (1分)
- (b) 艾奧本身不會發光。為甚麼我們能看見它？  
(1分)

★ 8 地球和太陽之間的平均距離約為 1 AU。假設地球沿圓周軌道運行。

- (a) 地球在 (i) 一天內 (ii) 一小時內 (iii) 一秒內移動多少距離 (以 m 為單位)？ (3分)  
(i)  $2.58 \times 10^9$  m (ii)  $1.08 \times 10^8$  m (iii)  $2.99 \times 10^3$  m
- (b) 從地球中心觀察，會發現太陽看似圍繞地球移動，週期為一年。估算太陽圍繞地球中心移動的角速率。答案以  $\text{rad s}^{-1}$  為單位。 (2分)  
 $1.99 \times 10^{-7} \text{ rad s}^{-1}$

★ 9 銀河系主星盤的直徑約為 80 000 至 100 000 光年。

- (a) 以下列單位表示銀河系主星盤的直徑。  
(i) 米  $7.57 \times 10^{20}$  m 至  $9.46 \times 10^{20}$  m (2分)  
(ii) 秒差距  $24\ 500$  pc 至  $30\ 700$  pc (2分)
- (b) 太陽與銀河系的中心相距約 27 000 光年。試計算太陽軌道半徑和銀河系平均半徑之比。據此，在圖 c 的銀河系草圖上，標示太陽的大約位置。**0.3** (2分)

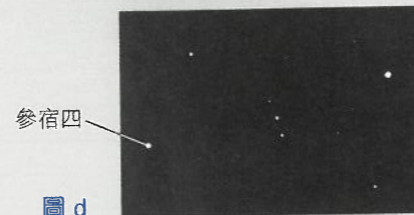


圖 c 銀河系的側面圖

- (c) 舉出比銀河系較大和較小的結構各一個。(2分)  
**本星系羣，太陽系**
- (d) 天文學家通常用甚麼單位來量度 (c) 項中各結構的大小或距離？**pc / ly · AU** (2分)

★★ 10 從地球觀察，會發現太陽和月球的角大小大致相同。

- (a) 寫出角大小的定義，並輔以適當圖片說明。(2分)
- (b) 地球和月球大約相距 384 000 km，和太陽大約相距 150 000 000 km。太陽和月球的實際大小之比是多少？**391** (2分)
- (c) 參宿四是獵戶座的一顆光亮恆星 (圖 d)，半徑約為太陽的 1000 倍。太陽和參宿四的角直徑分別約為  $0.5^\circ$  和  $0.0552''$ 。



- (i) 試估算太陽的半徑。 **$6.54 \times 10^8$  m** (2分)
- (ii) 試估算地球和參宿四之間的距離，並以秒差距表示答案。**158 pc** (3分)

▶ 參看 p.4, 6

☆ Paper 2，略去原題(a)部

11 CCEA GCSE 2005 Foundation Tier Q5

除太陽以外，最接近地球的恆星就是毗鄰星，它與地球相距約 4 光年。

- (a) 解釋光年的意義。(1分)
- (b) 計算地球與毗鄰星的距離，答案以千米表示。  
 **$3.78 \times 10^{13}$  km** (2分)
- (c) 太空船以  $20 \text{ km s}^{-1}$  的平均速率航行。試利用 (b) 部所得的答案，計算太空船前往毗鄰星所需的時間，答案以年作為單位。緊記一年約有 30 000 000 秒。**63 000 年** (3分)
- (d) 要乘坐這太空船前往毗鄰星，須克服甚麼困難？試描述一個最大的困難。(2分)

自我評核 1

⌚ 時間：10 分鐘 ✓ 總分：7 分

答題須知

- 全部題目均須作答。
- 甲部為多項選擇題，乙部為問答題。
- 答案寫在預留的空位內。
- 附錄提供常用的數據、公式和關係式以供參考。

甲部

1 以下是一些宇宙中常見的結構，它們當中哪一個結構最大？

- A 星團  
B 星系  
C 太陽系  
D 本星系羣

**D**

2 地球和太陽之間的距離是 1 AU。光從太陽到達地球需時多久？

- A  $3.33 \times 10^{-9}$  s  
B 0.139 s  
C 8.33 s  
D 500 s

**D**

乙部

3 圖 a 顯示天體 X，它與地球的距離是  $61 \times 10^6$  ly。



(a) 天體 X 屬於哪種天體類別？ (1分)

**星系**

(b) 寫出宇宙中一個大於天體 X 的結構。(1分)

**星系團 (或超星系團)**

(c) 光由天體 X 行進至地球需時多久？ (1分)

**$61 \times 10^6$  年**

(d) 天體 X 的直徑約為 110 000 ly。求天體 X 的角直徑。(2分)

**$1.80 \times 10^{-3}$  rad**





## 2

# 天文學的發展史

我們在這一課會學到

- 地心模型和日心模型
- 伽利略的天文發現
- 開普勒行星運動定律



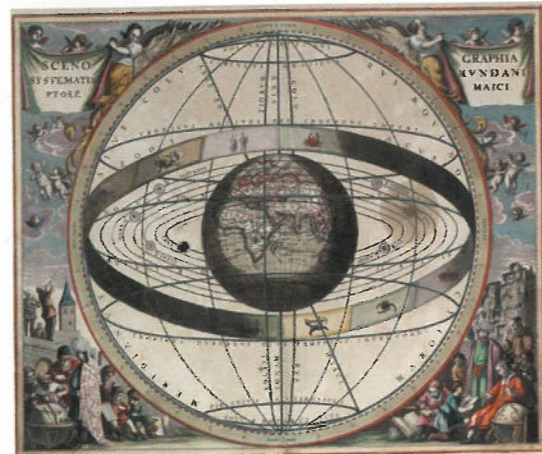
## 2.1

## 行星運動模型

## 起點 早期的天文模型

下圖展示一個古時的宇宙模型。古人認為處於宇宙正中心的是甚麼？

參看第28頁。



## ✓ 本節重點

- 1 行星的特殊運動
- 2 托勒密的地心模型
- 3 哥白尼的日心模型

## 1 古代天文學家的觀察結果

在發明天文望遠鏡之前，古代天文學家觀察夜空時，並沒有天文望遠鏡的協助。但是，經過多年來的細心觀察，即使單憑肉眼，也能得出非凡的觀察結果。

在一個無雲的晚上，除了月球，古人還能看見天上無數的光點（圖2.1a），這些光點的亮度、顏色各有不同。由於不清楚這些光點的本質，古人一律把這些光點稱為「星」或「星體」。

後來的科學家發現這些「星」可分為第1課中提及的恆星、行星，以及其他天體。

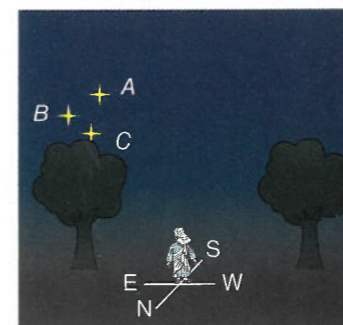


圖 2.1a 繁星滿佈的夜空

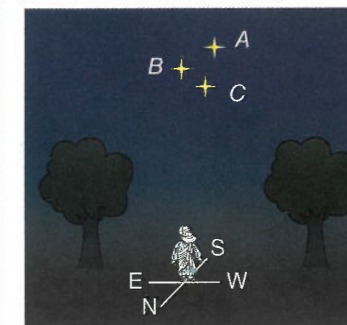
以下是他們的一些觀察結果：

- 1 每天晚上，星體會慢慢由東向西移動。
- 2 所有星體會一同移動，而且它們之間的相對位置是不變的。天空彷彿就是一幅慢慢由東向西移動的巨型畫布，而星體就是固定在這畫布上的光點（圖2.1b）。

(i) 晚上8時



(ii) 凌晨12時



(iii) 早上4時

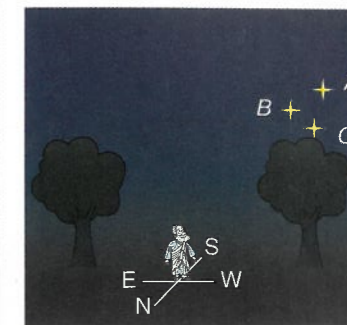


圖 2.1b 所有星體都會一同移動

古代天文學家把這畫布上的星體劃分成不同的星座，並為每個星座起了個優雅的名稱（圖2.1c）。



圖 2.1c 現時整個天空共分為 88 個星座，當中包括圖中所示的獵戶座

## 補充資料 天球

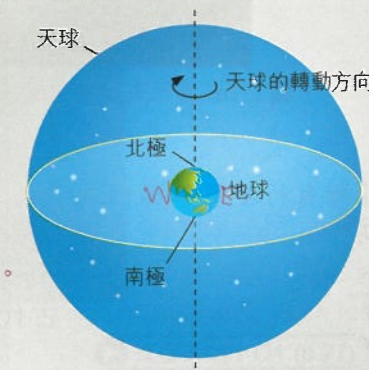
古代天文學家認為，天空是一個稱為**天球**的巨型球體，而地球則位於天球的正中心靜止不動，所有天體都固定在天球上。天球向西轉動時，天體亦隨之圍繞地球移動。

今天，我們都知道轉動的是地球而不是天空，而且各個天體與地球的距離並不相同。但是，我們在研究從地球觀察到的天體運動時，仍會使用天球模型來幫助理解。



模擬程式 2.1  
錄像片段 2.1

- 模擬程式 2.1 解釋天球的結構，以及天球模型各部分的功用。
- 錄像片段 2.1 簡單介紹天球，以及使用天球模型的方法。





2 天文學的發展史

→ 模擬程式 2.2 展示行星的順行和逆行。

模擬程式 2.2

a 逆行運動

行星的英文是「planet」，源於希臘文「planetes」，意思是「漫遊者」。

該五顆行星可以用肉眼觀察得到，是古代天文學家僅僅發現的行星。

幾乎所有星體也如上文所描述般移動。但是，如果觀察數個月，會發現有些星體與其他星體並不一樣，會在那巨型畫布上以另一種方式移動，這些星體稱為行星。古代天文學家已辨認出五顆行星：水星、金星、火星、木星、土星。

行星每天相對於背景恆星稍稍移動。數個月後，行星便好像在畫布上劃出一條路徑（圖 2.1d）。

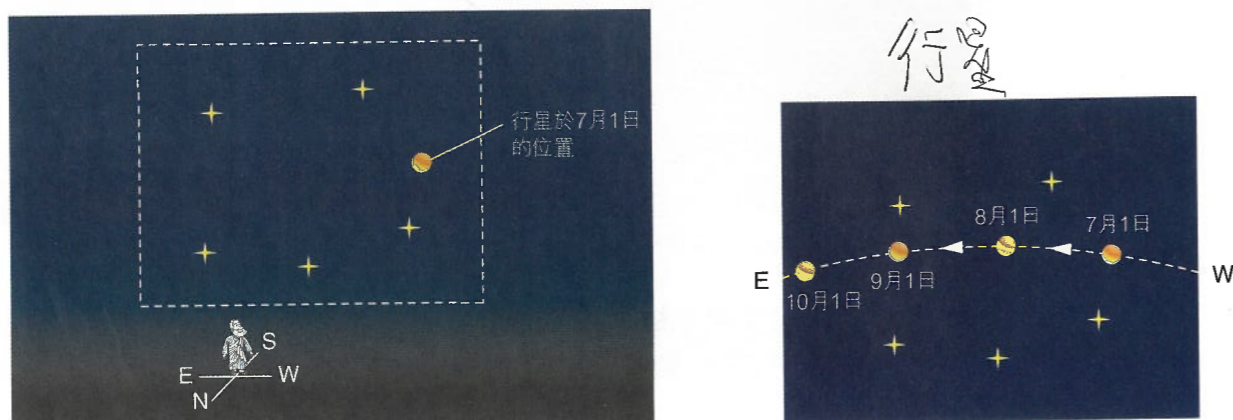


圖 2.1d 行星相對於背景恆星的移動路徑

一般而言，行星會相對於背景恆星向東移動，這種移動方式稱為**順行**。但是，行星有時會向相反方向移動（即向西移動），歷時數個月，然後才往原來的方向繼續順行。這種向西的移動方式稱為**逆行**（圖 2.1e）。

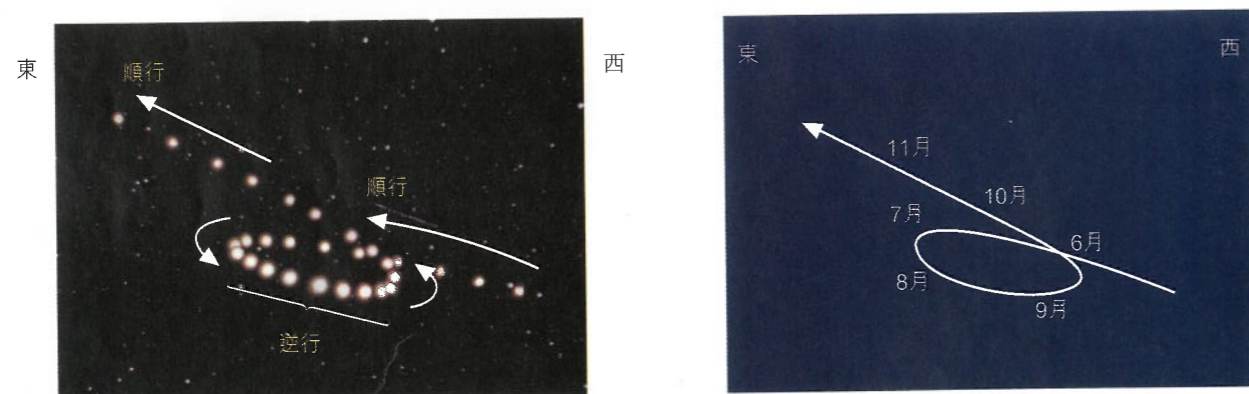


圖 2.1e 展示火星逆行的合成照片

並非所有行星每年都會逆行。

**逆行是指行星相對背景恆星向西移動。**

古代天文學家花了很長時間也想不通行星逆行的原因。

例題 1 逆行

浩揚於每月第一個晚上觀察火星，持續了數個月。在這個期間，火星在水瓶座（可視為背景恆星）附近移動，情況就如圖 a 所示。

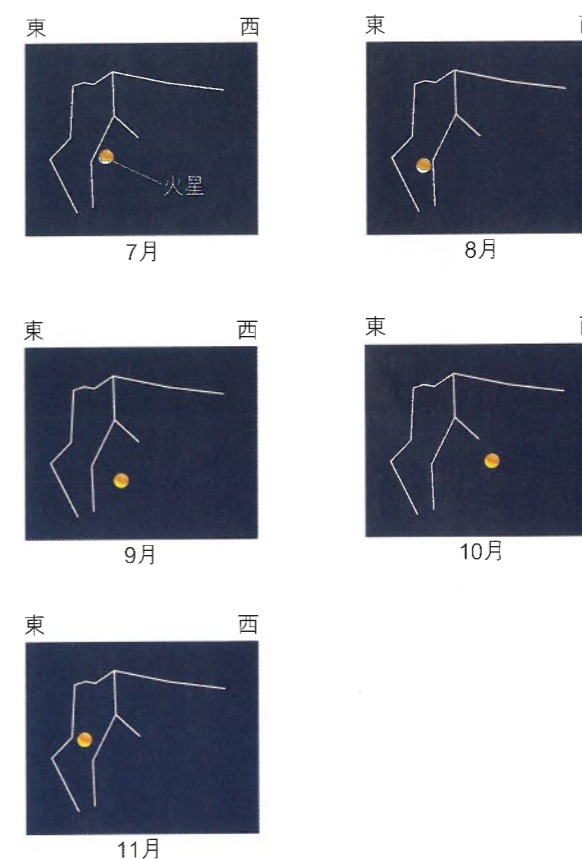


圖 a 火星在數個月內的位置

火星在哪個時候順行，哪個時候逆行？試輔以適當的圖，解釋你的答案。

題解

圖 b 顯示火星在不同月份與水瓶座的相對位置。火星於 7 月至 8 月順行，8 月至 10 月逆行，10 月後再次順行。

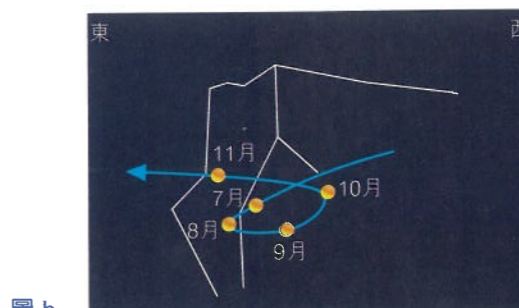


圖 b

▶ 進度評估 1 Q1 (p.27)

以下應用程式可用來找出不同行星的位置：



iOS



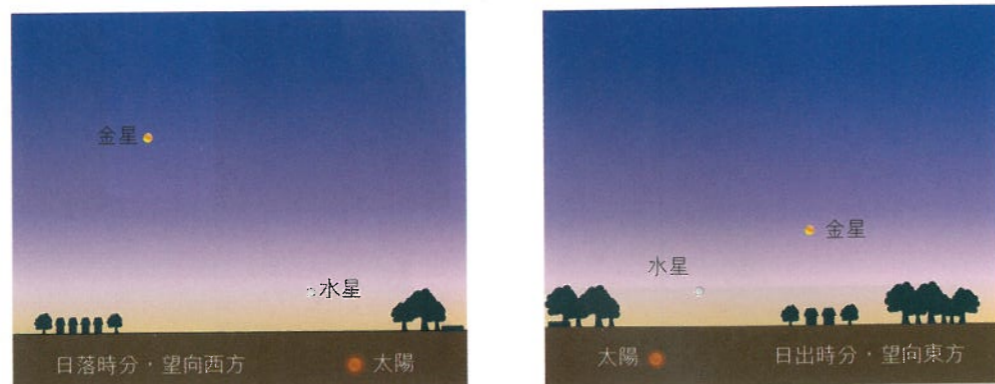
Android



## b 水星和金星的運動

由於太陽亮度太高，我們在日出後至日落前都無法看到水星和金星。

另一個曾令天文學家不解的現象，是從地球觀看水星和金星時，它們總是在太陽附近。它們會於日落後不久在西地平面附近出現，或於日出前不久在東地平面附近出現（圖 2.1f），因此稱為昏星和晨星。



(i) 水星和金星成為昏星的時候

(ii) 水星和金星成為晨星的時候

圖 2.1f 從地球觀看，水星和金星永遠都在太陽附近

### 補充資料 天象軟件

天象軟件對理解上述的行星運動十分有幫助。Stellarium 是常用的天象軟件，可於以下網址免費下載：<http://www.stellarium.org>

### 預試訓練 1 順行

下列哪一項正確描述行星的順行運動？

- A 每天晚上，行星從東方升起，在西方落下。
- B 每天晚上，行星從西方升起，在東方落下。
- C 相對背景恆星而言，行星由東向西移動。
- D 相對背景恆星而言，行星由西向東移動。

### 題解

順行是指行星相對於背景恆星向東移。

∴ 答案是 D。

### 常見錯誤

學生可能會誤以為順行和逆行是指行星每天晚上的東升西落。事實上，行星的確會每天從東方升起，在西方落下，情況就如背景恆星一樣。但這是因地球的轉動而引起的，與行星和背景恆星之間的相對運動無關。

### 進度評估 1

各題號旁的數字對應本節重點（參看 p.22）。

- 11 下列哪一項正確地描述火星的逆行？
  - A 從地球觀看一整晚，火星由東向西移動。
  - B 從地球觀看一整晚，火星繞了一圈。
  - C 從地球觀看一整年，火星有時會相對背景恆星由東向西移動。
  - D 從地球觀看一整年，火星的運行時快時慢。
- 12 從地球觀察，下列哪顆行星只會於日落後不久在西地平面附近出現，或者於日出前不久在東地平面附近出現？（可選多於一項。）
  - A 水星
  - B 木星
  - C 金星
  - D 火星
- 13 逆行運動一般歷時多久？
  - A 數小時
  - B 數日
  - C 數月
  - D 數年

## 2 地心模型

可指出科學家經常要提出不同的模型去解釋觀察結果。能解釋的觀察結果愈多，模型就愈為人接受；如果兩個模型所能解釋的觀察結果大致相同，則愈簡單的模型愈優勝。

天文學家嘗試提出一個可以解釋上述運動的行星模型。最早的行星模型是地心模型，它指出地球是宇宙的中心，其他天體都繞着它運行。

地心模型廣為天文學家接受。公元 140 年左右，托勒密（圖 2.1g）再把模型改良。他的地心模型能解釋當時已知的五顆行星、太陽和月球在天空中的移動路徑。



圖 2.1g 托勒密（公元 2 世紀）

### 歷史點滴

#### 早期天文學家對宇宙的认识

在古代，天文學家認為宇宙由地球、太陽、月球、背景恆星和五顆行星組成。當時已知的五顆行星是水星、金星、火星、木星、土星，它們單憑肉眼也可觀察得到。



模擬程式 2.3

→ 模擬程式 2.3 展示行星和太陽在托勒密的地心模型中怎樣移動。

起點中的圖畫描繪了古代的地心模型。圖畫正中央的小球體是地球，較大的球體是天球，亦即圖 2.1h 中的最外圈（背景恆星）。天球和地球之間的就是圍繞地球運行的太陽和五顆行星。

a 托勒密的模型

圖 2.1h 展示了托勒密地心模型的簡化圖。

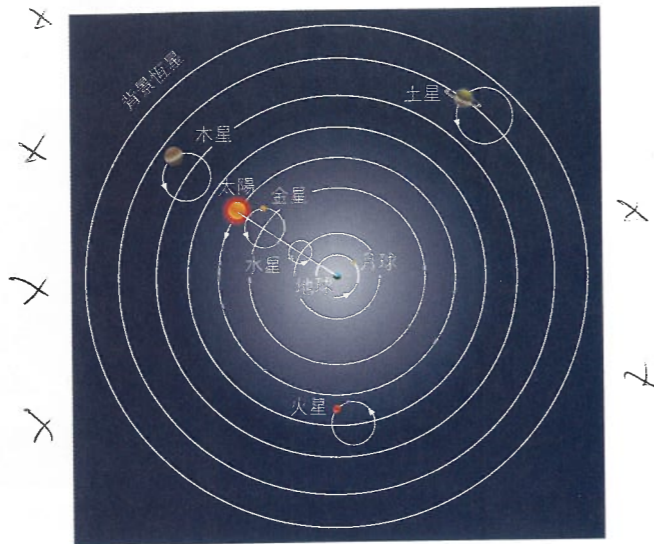


圖 2.1h 托勒密的地心模型（簡化圖）

i 解釋逆行運動

在托勒密的模型中，每個行星沿一個較小的圓形軌道以勻速運行，該軌道稱為**本輪**，而本輪的中心則圍繞地球沿一個較大的圓形軌道以勻速移動，該軌道稱為**均輪**。換言之，行星的運動由兩種獨立的圓周運動組成，因此，行星便可逆行（圖 2.1i）。

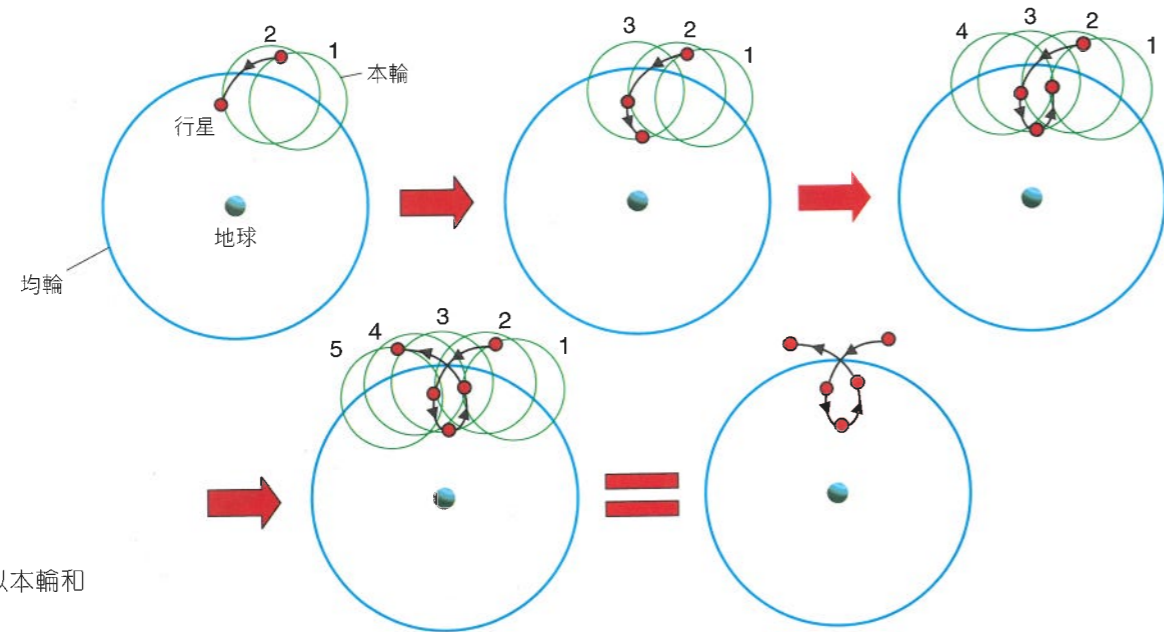


圖 2.1i 托勒密以本輪和均輪來解釋逆行

ii 解釋水星和金星運動

托勒密假設水星和金星本輪的中心固定在連接太陽和地球中心的直線上（圖 2.1h），這樣就解釋了這兩顆行星永遠在太陽附近的原因。

本輪 epicycle 均輪 deferent

b 托勒密模型的優點和缺點

早期的天文學家調整本輪和均輪，從模型得出與觀察結果大致吻合的行星路徑。此外，根據這模型所作的預測尚算準確，至少能達至當時觀測星體的準確度。

但是，真正的托勒密模型其實是十分複雜的。它要用上 80 多個圓形軌道，才能符合觀察所得的結果。可是，隨着觀測的準確度不斷提高，天文學家便發現托勒密模型依然不夠準確，於是便加入更多圓形軌道來修正模型，模型因而變得更加複雜。

3 日心模型

隨着時間不斷推移，觀測便愈見準確，地心模型更顯不足。天文學家不斷修改托勒密的模型，以為可以使它所預測的與觀測結果更一致，然而卻忽略了模型的根本錯誤。於是，在往後的一千多年，地心模型從未受過質疑。

a 哥白尼的模型

16 世紀，哥白尼提出**日心模型**。根據這個模型，地球沿它的軸心自轉，同時又和其他行星一樣沿圓周軌道圍繞太陽運行；只有月球圍繞地球運行（圖 2.1j）。日心模型能用較簡單和自然的方法，解釋前文提及的行星現象。

奧坎剃刀  
Occam's Razor

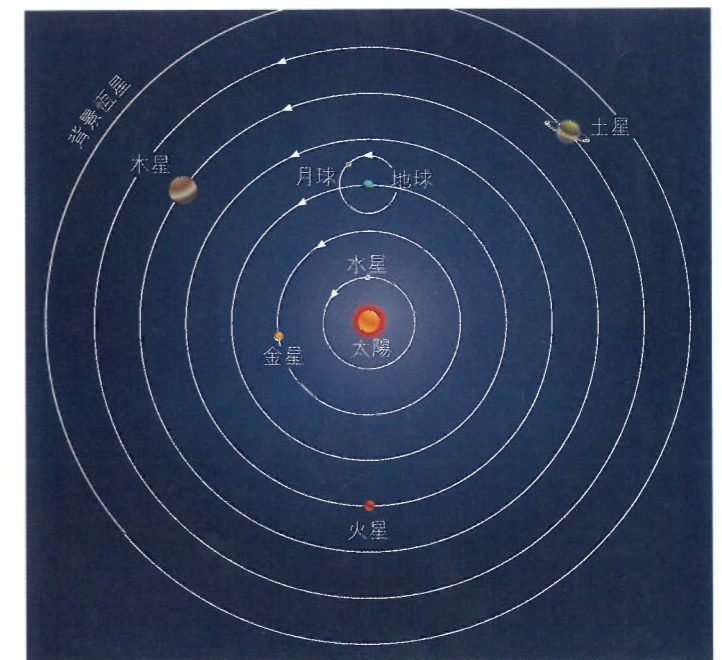


圖 2.1j 哥白尼的日心模型

哥白尼 Nicolaus Copernicus 日心模型 heliocentric model



模擬程式 2.4

→ 模擬程式 2.4 說明哥白尼的模型怎樣解釋行星的逆行。

由於行星的軌道平面並非重疊在一起，行星逆行後，不會沿原來的路徑繼續向東移動。

i 解釋逆行運動

圖 2.1k 展示哥白尼的模型怎樣解釋火星的逆行。假設地球較火星移動得快（在太陽觀察），因此，它有時會超越火星。出現這個情況時，從地球觀察，火星看似向後移動，形成逆行現象。

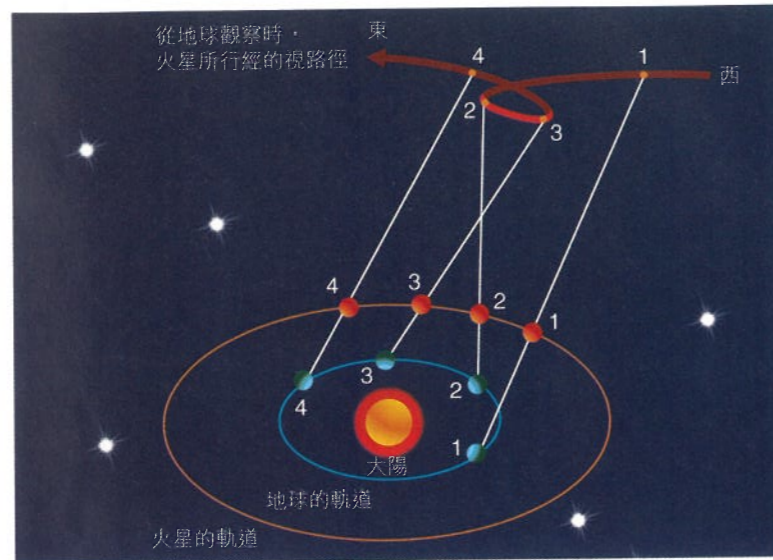


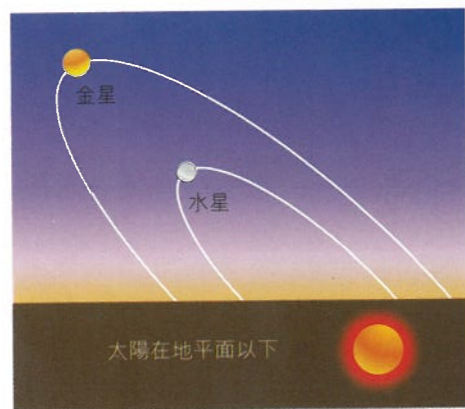
圖 2.1k 以哥白尼的模型來解釋逆行

與托勒密模型不同的是，行星實際上沒有在本身的軌道中往相反方向移動。

ii 解釋水星和金星的運動

水星和金星的軌道都在地球軌道之內，這兩顆行星稱為內行星；在地球軌道之外的行星則稱為外行星。

在日心模型中，水星和金星的軌道在地球的軌道之內，這樣便解釋了水星和金星永遠在太陽附近的原因（圖 2.11）。



(i) 水星和金星成為昏星的時候（在北半球向西觀察）



(ii) 水星和金星成為晨星的時候（在北半球向東觀察）

圖 2.11 解釋水星和金星的運動（不按比例繪畫）。圖中顯示兩顆行星與太陽呈最大角距離時的情況

b 哥白尼模型的優點和缺點

當時，大部分哥白尼模型能夠解釋的觀察結果，用托勒密模型也解釋得到，例如逆行、晨星、昏星、日蝕等。這是哥白尼模型要花這麼多時間才被科學界接受的原因之一。

哥白尼的模型較托勒密的模型簡單得多，但模型用於預測行星位置時卻不及托勒密模型準確。為了提高準確度，哥白尼只好引入本輪，結果他的模型變得同樣複雜，可是依然無法超越托勒密模型的準確度。當中的誤差是由於他錯誤假設軌道是圓形的。

下表總結了托勒密模型和哥白尼模型的特點。

	托勒密的模型	哥白尼的模型
種類	地心模型	日心模型
本輪的用途	解釋行星的逆行	提升預測的準確度
出現逆行的原因	行星在本輪上移動	地球超越行星
解釋晨星和昏星	假設水星和金星本輪的中心固定在連接太陽和地球中心的直線上	水星和金星的軌道在地球的軌道之內
背景恆星	在最外圍的均輪上，這均輪圍繞地球轉動	在最外圍的均輪上，這均輪靜止不動
優點	預測行星位置時相對較準確	能更簡單和自然地解釋逆行、晨星和昏星 <i>奧坎剃刀</i>
缺點	太複雜	即使加入本輪，預測行星位置時也不夠準確

表 2.1a 比較托勒密和哥白尼的模型

哥白尼的模型也可用來找出行星的週期，以及行星與太陽的距離。托勒密的模型中，行星的軌道距離是隨意的。

雖然哥白尼的模型並非完全正確，但地球並非宇宙的中心這個概念卻正確無誤。這對於我們認識太陽系的發展起了關鍵作用，因此，現代人把他的思想稱為哥白尼革命。

除了準確度不足外，哥白尼的日心模型還違背了當時的宗教教義。它令地球降格，地球變成不再是宇宙的中心，而是宇宙中一個平凡不過的地方。結果，只有少數人接受這學說。

科學本質 為甚麼地心模型較為人接受？

古人偏向認為地球是宇宙的中心，因為這樣會讓人感覺到人類在宇宙中具有特殊地位；由於星體看似圍繞地球運行，這個信念就更加鞏固。當時，教會也認同這個信念，因此挑戰地心說就等同挑戰教會的信念，可能會惹來教會的抨擊。



**例題 2 木星的逆行**

圖 a 展示幾個月內，木星相對背景恆星的運動。

- (a) 試根據托勒密的模型，繪圖解釋木星的逆行現象。  
 (b) 試根據哥白尼的模型，解釋以上運動。

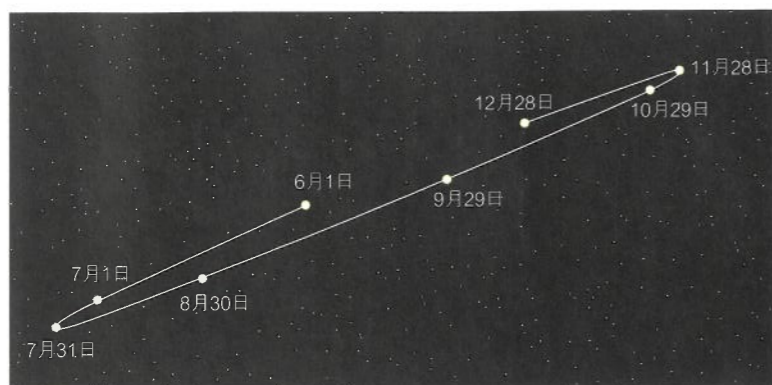


圖 a

**題解**

- (a) 根據托勒密的模型，木星沿本輪勻速運行，本輪的中心則沿均輪圍繞地球勻速移動。圖 b 的虛線為木星的路徑。木星由 P 移至 Q 時（即 7 月 31 日至 11 月 28 日）便出現逆行現象。  
 (b) 根據哥白尼的模型，地球和木星都圍繞太陽運行，而木星的軌道在地球軌道以外。由於地球移動得比木星快，有時地球會超越木星，所以木星在天空中看似往後退，形成逆行現象。

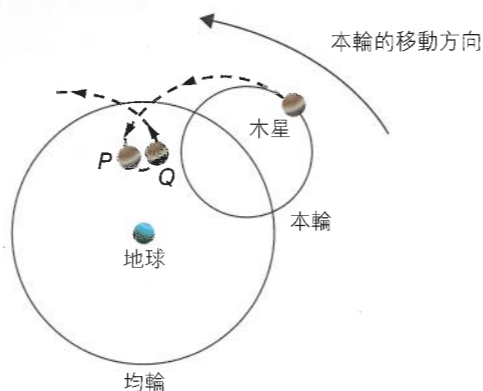


圖 b

這課展示了我們可以用兩個（或更多）不同的模型去解釋同一組數據。每個模型都有長處和短處，我們需要一些較新或較準確的數據去指出哪個模型不正確（或兩個模型都不正確）。

習題與思考 2.1 Q6 (p.33)

**進度評估 2**

各題號旁的數字對應本節重點（參看 p.22）。

- 21 是非題：在托勒密模型中，行星圍繞地球作勻速圓周運動。（對/錯）  
 22 是非題：在托勒密模型中，只有火星、木星和土星會逆行。（對/錯）  
 33 哥白尼提出的革命性思想是甚麼？  
 他提出（地球/太陽/恆星）和其他行星都圍繞（地球/太陽）運動。
- 34 根據哥白尼的模型，在地球上會觀察到火星的逆行，因為  
 (A) 火星的移動速率與地球不同。  
 B 火星的軌道在地球的軌道之內。  
 C 火星在本身的軌道沿相反方向移動。  
 D 火星沿均輪圍繞地球運行。

**習題與思考 2.1**

各題號旁的數字對應本節重點（參看 p.22）。

- 21 托勒密的地心模型中，每顆行星都沿 X 以勻速移動，X 的中心則沿圓 Z 圍繞 Y 以勻速移動。X、Y 和 Z 分別是甚麼？  
 23 6 (a) 試描述火星的逆行現象。  
 1,3 (b) 哥白尼的日心模型怎樣解釋火星的逆行現象？

	X	Y	Z
A	均輪	太陽	本輪
B	本輪	太陽	均輪
C	均輪	地球	本輪
(D)	本輪	地球	均輪

- 23 2 與托勒密的地心模型相比，下列哪項是哥白尼日心模型的缺點？

- (1) 不使用本輪的話，模型用作預測行星位置時不夠準確。  
 (2) 不使用本輪的話便無法解釋行星的逆行。  
 (3) 較為複雜。

- (A) 只有 (1)  
 B 只有 (1) 和 (2)  
 C 只有 (2) 和 (3)  
 D (1)、(2) 和 (3)

- 23 3 試舉出哥白尼日心模型和托勒密地心模型的一個共同特徵。

- 2 4 圖 a 展示一個描述行星運動的模型。

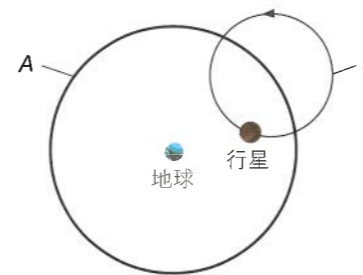


圖 a

- (a) 這是地心模型還是日心模型？地心模型  
 (b) A 是甚麼？均輪  
 (c) B 是甚麼？它怎樣解釋水星和金星不會遠離太陽的原因？本輪 local

- 1 5 若單憑肉眼觀察，行星和恆星都只是天上的一些小光點而已。

- (a) 我們怎樣分辨行星和恆星？  
 (b) 實行 (a) 項提出的方法通常要多少時間？

- 7 圖 b 顯示地球和土星圍繞太陽運行的軌道。

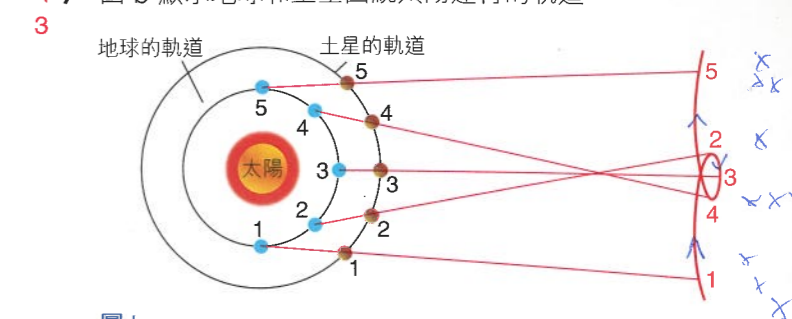


圖 b

在某一時段內，地球和土星分別在各自的軌道上從位置 1 移至位置 5。此外，當地球在位置 1 時，土星也在位置 1，如此類推。

- (a) 繪畫從地球觀察時，土星在天上的路徑。  
 (b) 判斷地球通過 (i) 位置 3 (ii) 位置 5 時，土星正在順行還是逆行。(i) 逆行 (ii) 順行

- 1 8 圖 c 顯示某天早上在香港觀察時，金星和火星的位置。



圖 c

- (a) 圖中哪顆行星是晨星？金星  
 (b) 在 (i) 第二天和 (ii) 3 年後，金星和火星相對太陽的位置還會在與圖 c 所示的位置相似嗎？金星和火星的軌道週期分別為 0.6 年和 1.9 年。簡單解釋你的答案。(i) 兩者都會 (ii) 金星會，火星不會



## 2.2

## 現代天文學的曙光

## 起點 金星的相位

猜猜圖中的天體是甚麼。它並非月球，而是金星！

1611年，伽利略透過小型望遠鏡觀察到金星不同的相位（形狀），為日心模型提供有力的證據。金星相位這項發現怎樣支持日心模型呢？

參看第36頁。



你也可以試試看：用小型望遠鏡（約5-10×）觀察金星數天，看看能否觀察到金星的不同相位。

## ✓ 本節重點

- 1 伽利略觀察月球的結果
- 2 伽利略觀察太陽的結果
- 3 伽利略觀察木星衛星的結果
- 4 伽利略觀察金星的結果

哥白尼死後一個世紀，伽利略在日心模型的發展上舉足輕重。他的研究方向與哥白尼的截然不同。

## 1 伽利略的天文發現

1609年，伽利略以自製的望遠鏡觀察天空。他的多項觀測結果不但和地心模型有很大衝突，甚至提供許多新證據，支持哥白尼的理論。

## a 月球

古人認為，太陽、月球和其他天體都是表面平滑的完美球體。然而，伽利略透過望遠鏡，發現月球表面有山脈、山谷和隕石坑（圖2.2a），情況就如地球表面一樣，一點都不平滑。

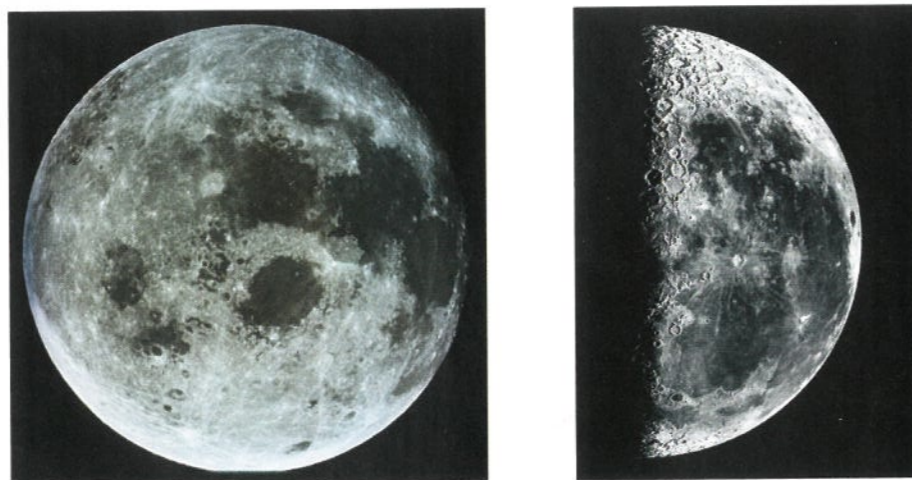


圖 2.2a 透過望遠鏡所觀察到的月球；在滿月以外的日子，月球的地形分外明顯

伽利略 Galileo Galilei

## 實驗 2a

太陽黑子與太陽自轉  
p.142

## 錄像片段 2.3

→ 錄像片段 2.3 舉出觀察太陽黑子和太陽自轉的不同方法。

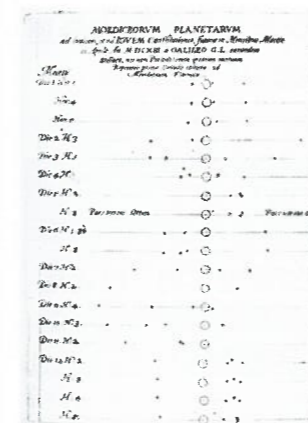


圖 2.2c 伽利略記錄了木星 (O) 與它的衛星 (\*) 與在不同日子的相對位置

木星衛星中，我們可以輕易觀察到的是最亮的四顆。事實上，木星有超過 60 顆衛星。

## b 太陽

太陽黑子是太陽表面一個較冷的暗區域，一般大小為地球直徑的兩倍，可能出現一個星期後便消失。

伽利略發現，原來太陽也有瑕疵。他透過望遠鏡觀察太陽，發現它的表面有一些黑色斑點。這些斑點現在稱為**太陽黑子**（圖 2.2b）。

伽利略根據太陽黑子的位置變化，推斷太陽約每月自轉一周。基於這個結果，伽利略提出地球亦會自轉。太陽並非剛體。

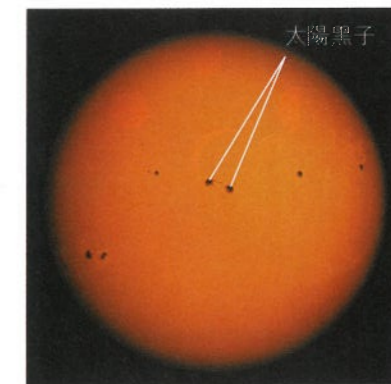


圖 2.2b 太陽黑子

## c 木星的衛星

伽利略看見有四個小光點圍繞木星移動（圖 2.2c）。這些光點很小，用肉眼無法看見，但用望遠鏡輔助就能看得清楚（圖 2.2d）。相對於背景恆星，這些小光點移動得很快，但始終徘徊在木星附近。每個光點都循各自的週期定期回到相對於木星的同一位置。

伽利略了解到這些光點既不是恆星，也不是行星，而是木星的衛星。他相信，如果地球以外的行星也擁有衛星，就證明地球並非萬物的中心。這也是支持哥白尼模型的有力證據。



圖 2.2d 在現代天文望遠鏡下，木星和它的四顆衛星（照片鳴謝：香港中文大學朱明中教授）

## d 金星的相位

伽利略亦發現，金星和月球一樣有完整的**相位 / 相週期**（圖 2.2e）。



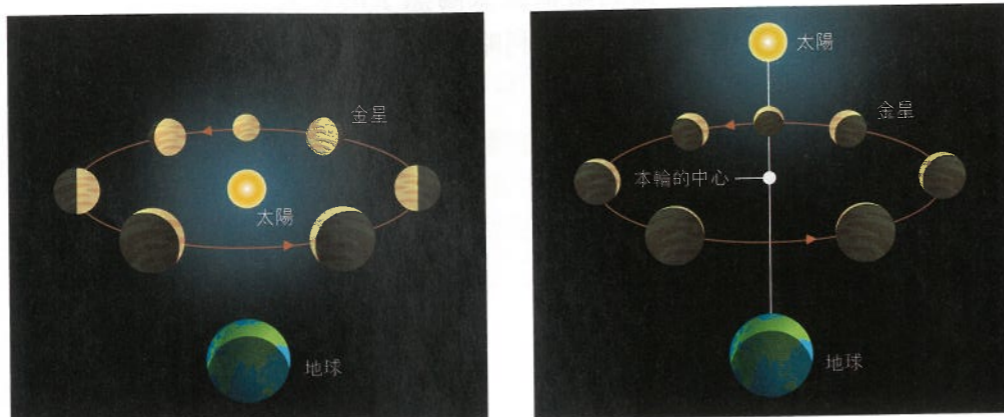
圖 2.2e 金星不同的相位。它在下合相（月牙形）時體積看似較大

太陽黑子 sunspot 相位 / 相 phase



這個發現的唯一解釋，就是金星圍繞太陽運行。根據托勒密的模型，金星根本不會出現滿相（呈現圓形）；相反，日心模型卻可解釋金星所有相位變化（圖 2.2f），也能解釋金星的視大小與相位之間的關連。

前文提及，大部分哥白尼模型能夠解釋的觀察結果，用托勒密模型也解釋得到。因此這裏回應了起點中的問題：金星相位是最早期揭示托勒密模型基本缺陷的證據之一。



(i) 在日心模型中，金星有完整的相位週期 (ii) 在托勒密模型中，金星沒有滿相

圖 2.2f 金星在 (i) 日心模型和 (ii) 托勒密模型中的相位變化

伽利略對科學貢獻良多，試瀏覽以下網站，認識更多他的生平和科學著作：

[http://www.phy.cuhk.edu.hk/astroworld/vote\\_astronomers/galileo.html](http://www.phy.cuhk.edu.hk/astroworld/vote_astronomers/galileo.html)



以上的觀測結果，證明地球不是萬物的中心——至少金星是圍繞太陽運行的。表 2.2a 總結了伽利略的天文發現與它們的意義。

發現	意義
月球表面有類似地球上的山脈、山谷和隕石坑。	月球和地球沒有想像中那麼不同，因此地球未必如古人所認為的那麼獨特，也可能只像月球般圍繞其他天體運行。
太陽表面有黑斑（太陽黑子），它們顯示太陽在自轉。	太陽並不完美；地球也可能會自轉。
木星有四顆衛星。	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球不是萬物的中心，它也可能圍繞別的天體運行。</li> <li>木星與它的衛星之間必定有某種力，使木星在本身的軌道運行時，它的衛星仍能隨之移動。也可能因為這種力，我們才會停留在地球上，月球才會圍繞地球運行，地球才會圍繞太陽運行。</li> </ul>
金星有完整的相位週期。	這個觀測結果與托勒密模型並不脛合，唯一解釋是金星圍繞太陽運行，這正是支持日心模型的有力證據。

表 2.2a 伽利略的天文發現與它們的意義

### 例題 3 金星在軌道上的位置

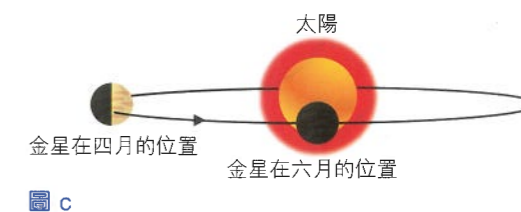
圖 a 顯示在某年的不同日子拍攝的金星照片。



- X、Y 和 Z 是金星軌道上的三點（圖 b）。金星大約在哪天移到這些點上？
- 據此，找出金星朝哪個方向圍繞太陽運行。
- 估算金星的軌道週期。

### 題解

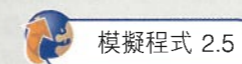
- 金星分別於 2 月 27 日、4 月 13 日和 6 月 8 日移至 X、Y 和 Z。
- 四月至六月期間，金星從正右側受光，轉變為背面受光（新相）。因此，金星是以逆時針方向圍繞太陽運行的，就如圖 c 所示。
- 金星在 4 月 13 日幾乎是正右側受光，到了 6 月 8 日則變為背面受光，這兩天之間共有  $17 + 31 + 8 = 56$  天。這段時間內，金星經過了大約四分之一的軌道。因此，金星的軌道週期  $\approx 56 \times 4 = 224$  天。



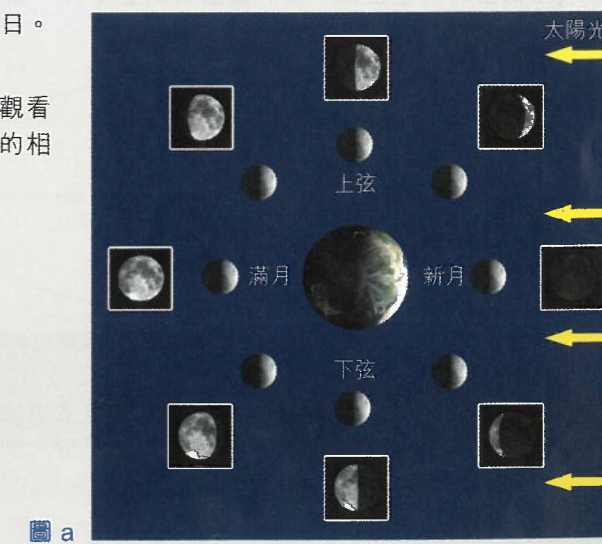
▶ 習題與思考 2.2 Q1 (p.38)

### 生活中的物理 月球的相位

月球的相位（即「月相」）會出現有規律的變化，週期為 29.5 日。圖 a 顯示月相（白框內的圖片）怎樣隨月球位置而變化。無論在任何時候，太陽光只會照射半個月球。因為從地球觀看月球，會看見不同大小的受光部分，所以便會觀察到不同的相位。



→ 模擬程式 2.5 解釋從地球觀察到不同月相的原因。



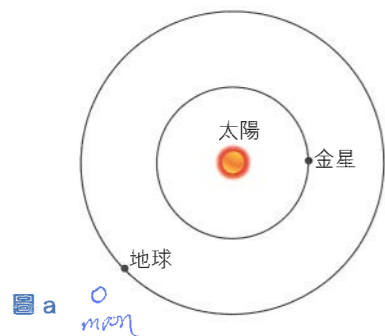


**進度評估 3** ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看p.34)。

- 4 1 下列哪一項伽利略的觀測，展示最少有一顆行星圍繞太陽運行？
- A 月球表面的山脈  
B 太陽黑子  
C 木星的衛星  
D 金星的相位
- 1 2 伽利略發現月球表面有些甚麼？
- (1) 山谷  
(2) 太陽黑子  
(3) 隕石坑
- A 只有 (3)                      B 只有 (1) 和 (2)  
C 只有 (1) 和 (3)              D 只有 (2) 和 (3)

**習題與思考 2.2**

4 1 圖 a 展示地球、太陽和金星在某個時間的位置。



從地球觀察，金星在該時間會呈現哪一個相位？

- A                      B
- C                      D

★ 2 如果托勒密的模型正確，我們無法看到金星哪一個相位？

- A                      B
- C                      D

1-4 3 伽利略是最早透過望遠鏡觀天的人，他從觀測中得出很多太陽系的新數據。

(a) 試舉出他兩項重要的觀測。  
(b) 題 (a) 中的兩項觀測結果挑戰了哪些傳統觀點？試各舉一個例子。

★ 4 望遠鏡的發明怎樣促進天文學的發展？試舉出一個例子。

★ 5 (a) 伽利略透過望遠鏡反覆觀察太陽黑子，並由此推斷出太陽的運動。他從中得出甚麼結論？

(b) 小文說：「我希望成為伽利略那樣的科學家，所以由現在開始，我會每天觀察太陽！」你認為小文應採取甚麼安全措施？

★ 6 伽利略發現木星有四顆衛星。這項觀測結果怎樣衝擊舊有學說？

★ 7 (a) 繪圖說明地球、金星和太陽分別在 (i) 托勒密和 (ii) 哥白尼的模型中怎樣移動。

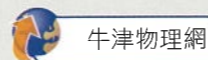
(b) 根據托勒密模型，從地球不能看到金星哪種相位？滿相

(c) 根據 (i) 托勒密模型 (ii) 哥白尼模型，金星與地球相距最遠時，會呈現哪種相位？

(i) 新相 / 月牙形 (ii) 滿相

**歷史點滴 伽利略 (1564-1642)**

伽利略是以望遠鏡觀天的第一人。這是前人無法想像的嶄新觀測方式。伽利略的理論建基於從望遠鏡得到的觀測結果，而並非如古希臘人一般只以哲學為基礎。伽利略這種研究方式，標誌着現代天文學進入新時代，後人更因此稱他為觀測天文學之父。



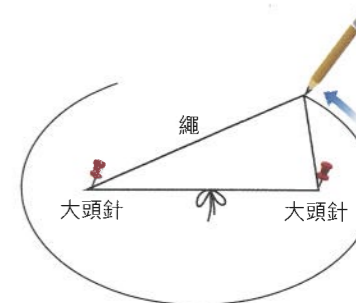
**2.3**

**開普勒的行星運動定律**

**起點 繪畫橢圓**

在紙板釘上兩根大頭針，用繩圍繞着兩根針和鉛筆 (圖 a)。

拉緊繩圈，移動鉛筆，便會畫出一個壓扁了的圓；這個壓扁的圓稱為橢圓。在天文學中，橢圓有甚麼特別之處呢？



參看以下開普勒第一定律。

✓ 本節重點

- 1 開普勒第一定律  
2 開普勒第二定律  
3 開普勒第三定律

**模擬程式 2.6**

→ 模擬程式 2.6 闡釋開普勒第一及第二定律的含意。

**1 開普勒第一定律**

開普勒第一定律指出 (圖 2.3a)：

行星沿橢圓軌道圍繞太陽運行，太陽位於橢圓的一個焦點上。

橢圓是一個壓扁了的圓，有兩個焦點  $F$  和  $F'$  (圖 2.3a)。連接橢圓上兩個點並穿過兩個焦點的直線，稱為長軸，長軸的一半稱為半長軸。

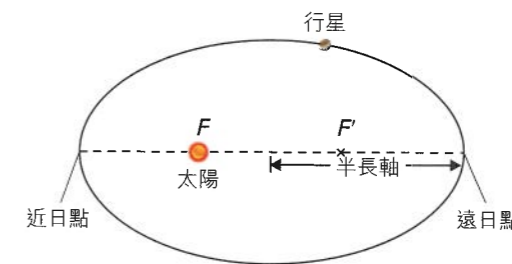


圖 2.3a 開普勒第一定律

在起點中，大頭針的位置就是焦點。若兩個焦點重疊，橢圓就成為圓。由此可見，圓是橢圓的特別例子。要形容行星的軌道，橢圓是較準確的描述。

根據這定律，行星與太陽之間的距離並不是固定的。它和太陽之間的距離有時較遠，有時較近。行星最接近太陽的位置稱為該行星的近日點，距離太陽最遠的位置稱為該行星的遠日點。

開普勒 Johannes Kepler 開普勒行星運動定律 Kepler's laws of planetary motion  
橢圓 ellipse 焦點 focus



## 2 開普勒第二定律

開普勒第二定律指出 (圖 2.3b) :

連接行星和太陽的直線在相等時間內，掃過相等的面積。

圖 2.3b 中，行星用相等時間通過弧  $AB$  和弧  $CD$ 。因此，圖中兩個陰影部分的面積相等。由於弧  $CD$  比弧  $AB$  長，因此行星沿弧  $CD$  移動的速率會較沿弧  $AB$  快。即是說，行星接近太陽時 (例如在  $C$  點) 比遠離太陽時 (例如在  $A$  點) 移動得較快。

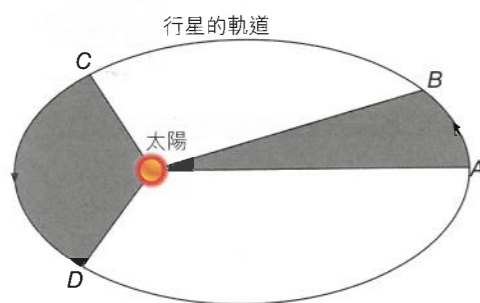


圖 2.3b 開普勒第二定律

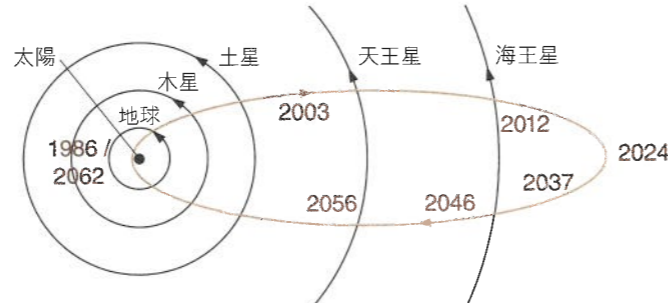


圖 2.3c 哈雷彗星的軌道 (數字代表彗星通過對應位置的年份)

如果天體的橢圓軌道極其扁平 (例如彗星的軌道)，開普勒第二定律所提及的特性就特別明顯。以哈雷彗星為例，它的軌道週期是 76 年。它在太陽系中央部分會移動得特別快 (只需數個月時間)，餘下時間都在遠離太陽的位置緩慢移動 (圖 2.3c)。

## 3 開普勒第三定律

開普勒第三定律指出：

$$T^2 \propto a^3$$

行星軌道週期  $T$  的平方與半長軸  $a$  的立方成正比，

即 
$$\frac{T^2}{a^3} = \text{常數}$$

要注意，開普勒第二定律比較的是行星在同一軌道上不同位置的速率，而開普勒第三定律比較的則是在不同軌道上的運動。

字母 E 代表地球。  
1 AU  
=  $1.50 \times 10^{11}$  m  
= 地球與太陽之間的平均距離  
= 地球軌道的半長軸

描述太陽系的行星時，只要以地球年為時間單位，天文單位 (AU) 為長度單位，就能簡化開普勒第三定律。簡化後，該定律可以寫成：

$$\frac{T^2}{T_E^2} = \frac{a^3}{a_E^3}$$

$$\left(\frac{T}{1 \text{ 年}}\right)^2 = \left(\frac{a}{1 \text{ AU}}\right)^3$$

$$T^2 \text{ (以地球年為單位)} = a^3 \text{ (以 AU 為單位)} \quad (\text{只適用於太陽系的行星})$$

### 歷史點滴

開普勒 (1571–1630)

開普勒是德國數學家 and 天文學家。1600 年，他受聘於第谷，替他尋求解釋行星數據的理論。最後，開普勒發表了三條行星運動定律。



如果以地球年和 AU 為單位，繪畫  $T^2$  對  $a^3$  的線圖，就會得出一條斜率為 1 並通過原點的直線 (圖 2.3d)。

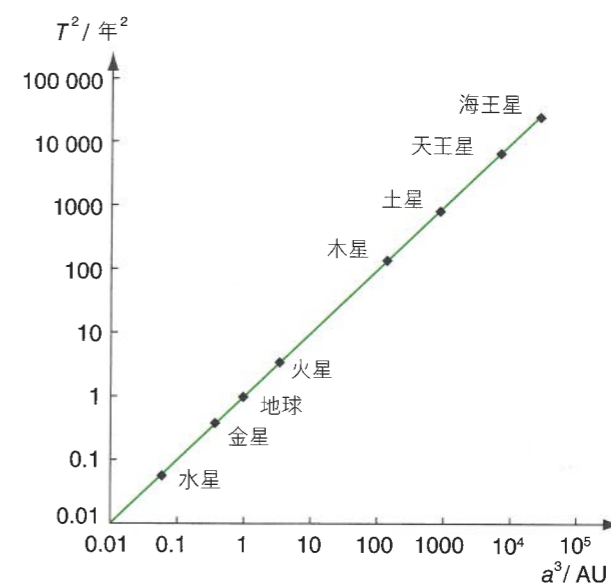


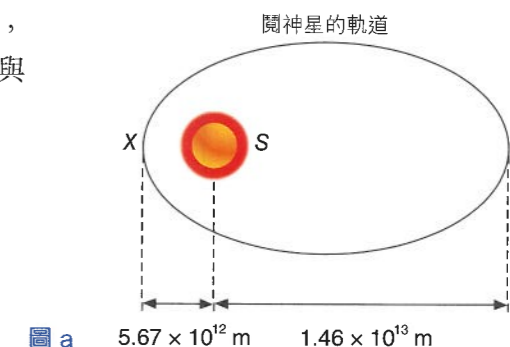
圖 2.3d  $T^2$  對  $a^3$  的線圖

可向學生說明圖 2.3d 的線圖是以雙對數坐標畫出的。

### 例題 4 闖神星的週期

闖神星是圍繞太陽  $S$  運行的矮行星。圖 a 顯示它的軌道，當中  $X$  和  $Y$  分別為距離太陽最近和最遠的位置。這兩點與太陽的距離分別為  $5.67 \times 10^{12}$  m 和  $1.46 \times 10^{13}$  m。

- 求闖神星的軌道週期。
- 闖神星在  $X$  點還是  $Y$  點的速率較高？試簡單解釋。



### 題解

(a) 半長軸  $a = \frac{1}{2}(XS + SY) = \frac{1}{2}(5.67 \times 10^{12} + 1.46 \times 10^{13}) = 1.0135 \times 10^{13}$  m

根據開普勒第三定律，

$$\frac{T^2}{T_E^2} = \frac{a^3}{a_E^3}$$

$$\frac{T^2}{(1 \text{ 年})^2} = \frac{(1.0135 \times 10^{13})^3}{(1.50 \times 10^{11})^3}$$

$$T = 555 \text{ 年}$$

$a_E = 1 \text{ AU} = 1.50 \times 10^{11}$  m

- (b) 根據開普勒第二定律，連接太陽和闖神星的直線在相等時間內掃過相等的面積。由於  $X$  比  $Y$  更接近太陽，闖神星在  $X$  以較高速率移動，掃過的面積才相同。

複習 Q13 (p.48)



## 2 天文學的發展史

☞  $V$ 、 $N$ 、 $M$  分別為灶神星 (Vesta)、海衛十三 (Neso)、烏神星 (Makemake)。

灶神星於 1807 年發現。從地球觀看，灶神星是最光亮的小行星，也是小行星帶中質量第二大的星體。(質量最大的是穀神星，英文名稱為 Ceres，屬一顆矮行星。)

海衛十三是海王星的一顆衛星，於 2002 年發現。

烏神星是一顆矮行星。從地球觀看，烏神星相對許多星體都光亮(亮度約為冥王星的五分之一，現時以高質素的業餘望遠鏡也觀察得到)，但天文學家卻在 2005 年才發現它。

## 例題 5 以開普勒第三定律分析軌道

表 a 列出一些在太陽系內移動的天體。這些天體中，哪些圍繞太陽運行？取地球軌道的半長軸為 1 AU，地球的軌道週期為 1 地球年。

天體	軌道週期 $T$ (地球年)	半長軸 $a$ (AU)
$V$	3.63	2.36
$N$	27.7	0.33
$M$	310	45.7

表 a

## 題解

若某天體圍繞太陽運行，它必然符合

$$\frac{T^2}{T_E^2} = \frac{a^3}{a_E^3}$$

$T^2$  (以地球年為單位) =  $a^3$  (以 AU 為單位)

表 b 列出上述每個天體的  $T^2$  和  $a^3$  的數值。

天體	軌道週期 $T$ (地球年)	半長軸 $a$ (AU)	$T^2$ (地球年 <sup>2</sup> )	$a^3$ (AU <sup>3</sup> )
$V$	3.63	2.36	13.2	13.1
$N$	27.7	0.33	767	0.0359
$M$	310	45.7	96 100	95 400

表 b

根據表 b，天體  $V$  和  $M$  符合上述方程，所以它們都是圍繞太陽運行的天體。在天體  $N$  的數據中， $T^2$  的值與  $a^3$  偏離得太遠，所以它不是圍繞太陽運行。

▶ 進度評估 4 Q3 (p.44)

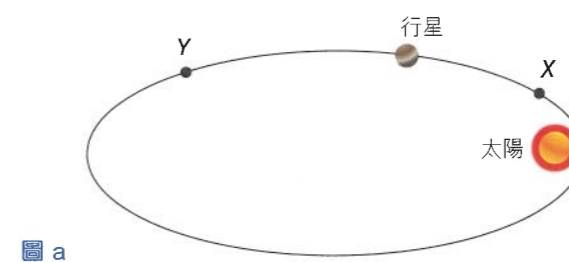
開普勒定律能正確描述多項觀測，並對行星的位置作確切和可驗證的預測，而且預測結果較早期模型更為準確。

然而，開普勒並不明白行星為甚麼會移動，也不理解它們的軌道呈橢圓形的原因。直至半個世紀後，這些疑團才由牛頓解開。在下一課，我們會認識牛頓怎樣根據伽利略和開普勒的研究結果，解開上述疑團。

## 預試訓練 2 行星運動 ☆ BOSTES HSC 2000 Q32A

托勒密模型和哥白尼模型都是試圖解釋行星和其他天體運動的模型。

- (a) 指出它們一個共通之處。 (1 分)
- (b) 從地球觀察，水星和金星永遠在太陽附近。描述這兩個模型怎樣解釋這現象。 (2 分)
- (c) 伽利略有一項觀測結果只能以哥白尼模型去解釋；托勒密模型則無法解釋得到。試指出該觀測結果。 (1 分)
- (d) 寫出開普勒第二定律。 (1 分)
- (e) 圖 a 中，一個行星沿橢圓軌道圍繞太陽運行。



- (i) 比較行星在 X 點和 Y 點的速率。根據開普勒第二定律解釋你的答案。 (3 分)
- (ii) 是甚麼使行星在軌道上以不同速率運行？ (1 分)

## 題解

- (a) 在兩個模型中，軌道都是圓形的。 1A
- (b) 在托勒密模型中，水星和金星本輪的中心位於連接地球和太陽的直線上。 1A  
在哥白尼模型中，水星和金星的軌道在地球的軌道之內。 1A
- (c) 金星有完整的相位週期。 1A
- (d) 連接太陽和行星的直線在相等時間內，掃過相等的面積。 1A
- (e) (i) 由於 X 點比 Y 點較接近太陽， 1A  
行星在 X 點附近須沿較長的弧移動， 1A  
連接行星和太陽的直線才可在相等時間內掃過相等的面積。  
因此，行星在 X 點的速率較在 Y 點快。 1A
- (ii) 太陽和行星之間的引力 1A

## 常見錯誤

學生可能會混淆了本輪和均輪。

## 常見錯誤

學生可能忽略了「相等時間」這條件。

▶ 複習 Q22 (p.51)

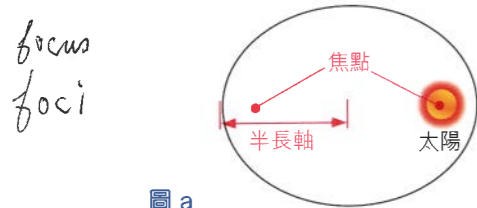


進度評估 4

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.39)。

21 是非題：開普勒第二定律指出，連接行星和太陽之間的直線，在相等時間內掃過相等的角度。  
(對/錯)

12 圖 a 展示某天體的軌道。試標出軌道的兩個焦點和半長軸的長度。



$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3}$$

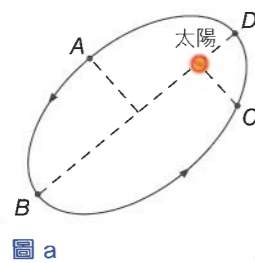
3 表 a 展示一些圍繞太陽運行的天體的資料。試完成下表。

天體	軌道半長軸 a / AU	軌道週期 T / 地球年
A	0.25	0.125
B	2.00	2.83
C	2.92	5.00
D	6.00	14.7

表 a

習題與思考 2.3

21 一個行星沿圖 a 所示的軌道圍繞太陽運行。行星在哪一點的速率最快？ D



14 某天體圍繞太陽運行，圖 b 顯示該天體的路徑。

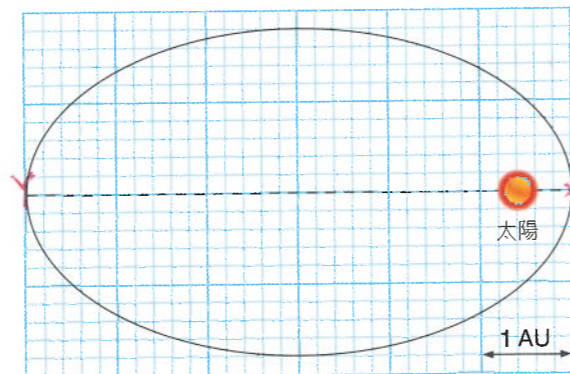


圖 b

2 3 P 和 Q 都是圍繞太陽運行的矮行星。P 的軌道週期是 263 地球年。如果 Q 的軌道半長軸是 P 的一半，則 Q 的軌道週期是多少？

- A 65.8 地球年  
B 93.0 地球年  
C 132 地球年  
D 744 地球年

$$\frac{T_P^2}{a_P^3} = \frac{T_Q^2}{a_Q^3}$$

$$\frac{263^2}{(2a)^3} = \frac{T_Q^2}{a^3}$$

3 下列哪項可用開普勒第二定律來解釋？

- (1) 哈雷彗星在太陽系中央部分移動得較快。  
(2) 沿圓周軌道移動的行星，在任何時間的速率都一樣。  
(3) 水星是最接近太陽的行星，它的週期比地球短。

- A 只有 (1)  
B 只有 (3)  
C 只有 (1) 和 (2)  
D (1)、(2) 和 (3)

5 為甚麼哥白尼模型不能準確預測行星的位置？試舉出一個原因。

6 木星的軌道週期為 11.8 地球年。計算木星軌道的半長軸。取地球的軌道半徑為  $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ ，軌道週期為 1 年。  
 $7.77 \times 10^{11} \text{ m}$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{1^2}{(1.5 \times 10^{11})^3}$$

$$T = 0.611 \text{ yr} = 1.937 \times 10^7 \text{ s}$$

$$V = \frac{2\pi \times 1.08 \times 10^8 \text{ km}}{1.937 \times 10^7 \text{ s}} = 35.0 \text{ km s}^{-1}$$

總結 2

詞彙

1 順行 prograde motion	p.24	7 太陽黑子 sunspot	p.35
2 逆行 retrograde motion	p.24	8 相位 / 相 phase	p.35
3 地心模型 geocentric model	p.27	9 開普勒行星運動定律 Kepler's law of planetary motion	p.39
4 本輪 epicycle	p.28	10 橢圓 ellipse	p.39
5 均輪 deferent	p.28	11 焦點 focus	p.39
6 日心模型 heliocentric model	p.29		

課文摘要

2.1 行星運動模型

1 行星的運動曾經使天文學家十分疑惑，例如：

- a 行星的逆行；  
b 從地球觀察，水星和金星永遠在太陽附近。

2 托勒密的地心模型 (圖 a) 是 15 個世紀以來最具影響力的一個。根據這個模型，地球是宇宙的中心，其他天體全都圍繞地球運行。

3 後來，哥白尼提出日心模型 (圖 b)。根據這個模型，地球和其他行星都圍繞太陽運行。

4 兩個模型都能解釋行星的運動，但亦有不足之處 (見 p.31 表 2.1a)。

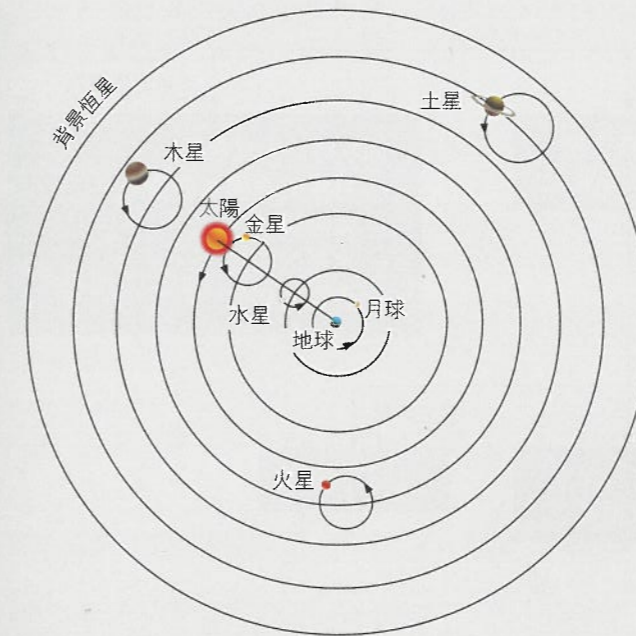


圖 a



圖 b



2.2 現代天文學的曙光

5 伽利略以多項天文觀測支持日心說 (見 p.36 表 2.2a)。

2.3 開普勒的行星運動定律

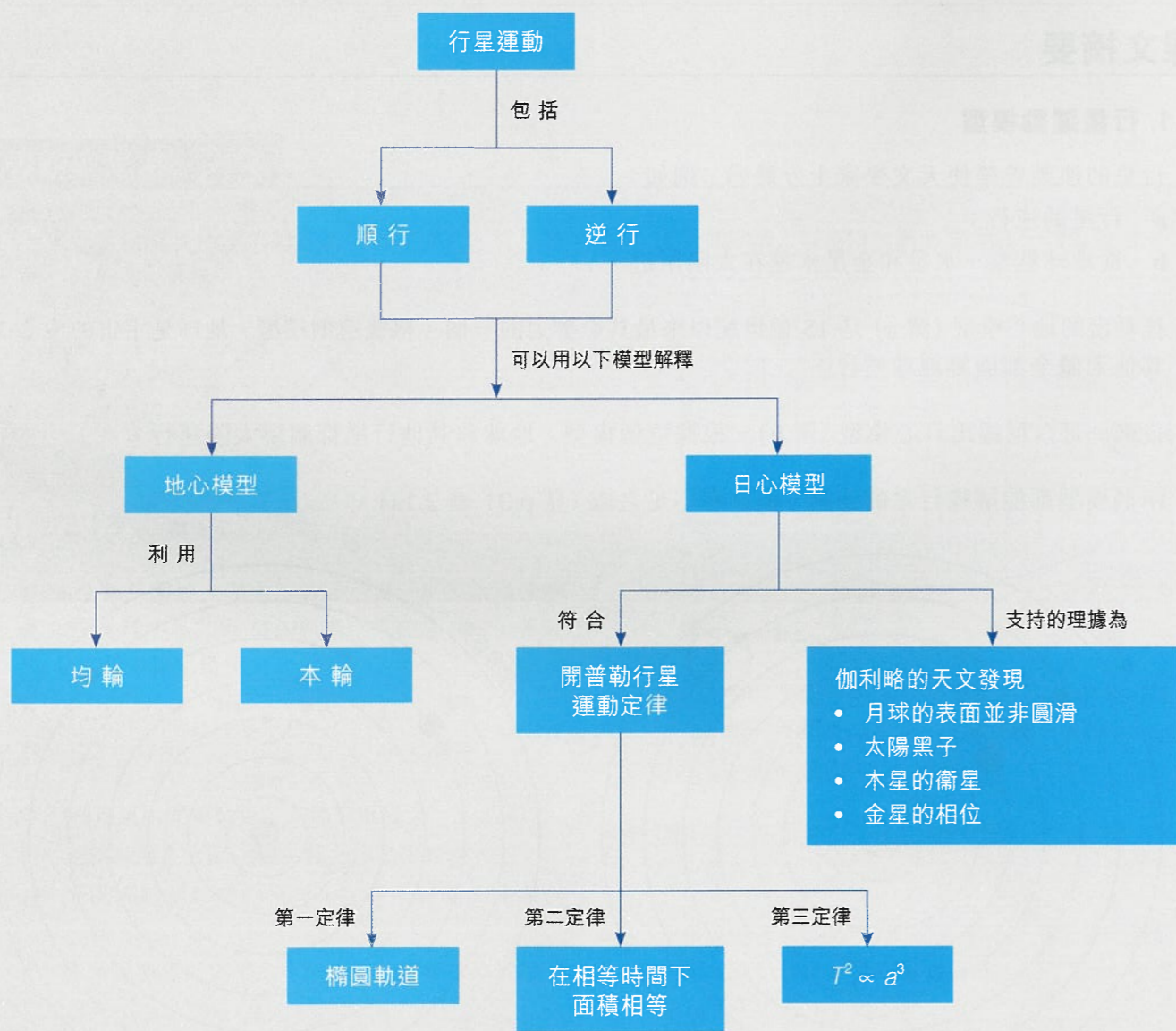
6 開普勒行星運動定律：

第一定律：行星沿橢圓軌道圍繞太陽運行，太陽位於橢圓的一個焦點上。

第二定律：連接行星和太陽的直線在相等時間內，掃過相等的面積。

第三定律：行星軌道週期  $T$  的平方與半長軸  $a$  的立方成正比，即  $\frac{T^2}{a^3} = \text{常數}$ 。

概念圖



複習 2

Q1 太陽應位於行星橢圓軌道的一個焦點上。

Q2 根據開普勒第二定律，行星距離太陽愈遠，應移動得愈慢。

概念重溫

(第 1 至 2 題) 判斷以下各項敘述是正確的，還是錯誤的。

2.31 太陽位於行星橢圓軌道的中心。F

2.32 行星與太陽相距愈遠，移動得愈快。F

多項選擇題

綜合題 3 下列哪項敘述是正確的？

- (1) 在托勒密和哥白尼的模型中，金星移動時都會呈現不同的相位。
- (2) 托勒密和哥白尼的模型都可以解釋行星的逆行運動。
- (3) 哥白尼和開普勒都認為，行星會沿圓周軌道運行。

- A 只有 (1)
- B 只有 (3)
- C 只有 (1) 和 (2)
- D 只有 (2) 和 (3)

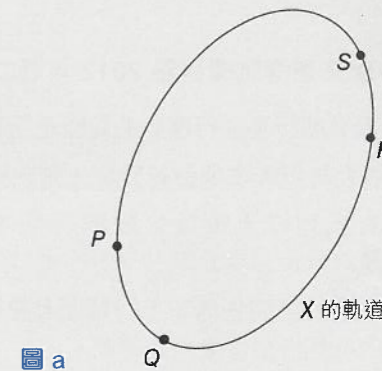
2.34 水星軌道的半長軸是  $5.8 \times 10^{10}$  m，週期為 87 地球日。已知火星軌道的半長軸是  $2.3 \times 10^{11}$  m。求火星的軌道週期。

- A 146 地球日
- B 218 地球日
- C 365 地球日
- D 687 地球日

2.3 5 火星和木星軌道的半長軸之比為 0.3 : 1。它們的軌道週期之比是多少？

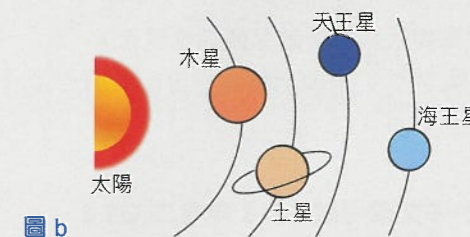
- A 0.11 : 1
- B 0.16 : 1
- C 0.32 : 1
- D 0.44 : 1

2.3 6 X 是圍繞太陽運行的小天體。P、Q、R 和 S 是 X 軌道上的四點 (圖 a)。已知 X 在 P 點移動得較在 R 點慢，X 在以下哪個位置移動得最快？



- A Q
- C S
- B R
- D 無法確定

(第 7 至 8 題) 圖 b 顯示木星、土星、天王星、海王星的軌道 (軌道不依比例繪畫)。



2.1 7 若從土星觀察，哪顆行星會逆行？

- (1) 木星
  - (2) 天王星
  - (3) 海王星
- A 只有 (1)
  - C (1)、(2) 和 (3)
  - B 只有 (2) 和 (3)
  - D 以上皆不會

參看 p.30

2.2 8 若從土星觀察，哪顆行星會具有完整的相位週期？

- (1) 木星
  - (2) 天王星
  - (3) 海王星
- A 只有 (1)
  - C (1)、(2) 和 (3)
  - B 只有 (2) 和 (3)
  - D 以上皆不會

參看 p.36



2.1 9 香港中學文憑考試樣本試卷 2008 年卷二 QA4

根據托勒密的地心說模型，

- A 木星繞地球作圓軌道運動。
- B 地 - 金距離總是小於日 - 地距離的。**
- C 地 - 火距離總是小於日 - 地距離的。
- D 在子夜是沒法觀察到木星的。

2.1 10 香港中學文憑考試練習卷 2012 年卷二 Q1.3

以下哪項有關行星逆行運動的敘述是正確的？

- A 只有在接近赤道的位置才能觀測到逆行運動。
- B 只有較地球更接近太陽的行星才會有逆行運動。
- C 逆行運動期間，地球上的觀測者在數星期或數月內可見行星自東向西移動。**
- D 地心模型不能解釋行星的逆行運動。

2.3 11 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.5

下列哪一項有關地球繞太陽運動的敘述**不正確**？

- A 地球在其軌道上的速率並不固定。
- B 太陽位於地球軌道的中心。(43%)**
- C 地球與太陽的距離呈週期性變化。
- D 一般而言，地球的瞬時速度並非與太陽的萬有引力垂直。

2.1 12 香港中學文憑考試 2013 年卷二 Q1.2

就有關描述宇宙的托勒密地心模型和哥白尼日心模型，下列哪些敘述是正確的？

- (1) 在兩個模型中，軌道皆為圓形。
- (2) 在兩個模型中，地球皆位於月球軌道的中心。
- (3) 兩個模型都可用來解釋逆行運動。

- A 只有 (1)
- B 只有 (3)
- C 只有 (1) 和 (2)
- D (1)、(2) 和 (3) (43%)**

問答題

2.3 13 以下是木星軌道的一些資料：  
與太陽最遠的距離 = 5.46 AU  
與太陽最近的距離 = 4.95 AU

- (a) 木星的軌道是圓形還是橢圓形？試解釋你的答案。**橢圓形** (2分)
- (b) 木星的軌道週期是多少(以地球年為單位)？取地球軌道的半長軸為 1 AU。**11.9 地球年** (3分)

2.1 14 (a) 從地球觀看，會發現火星有時會逆行。試解釋甚麼是逆行。(1分)

(b) 描述以下模型怎樣解釋火星的逆行運動：  
(i) 托勒密的地心模型；  
(ii) 哥白尼的日心模型。  
繪畫適當的圖輔助作答。(6分)

★ 15 (a) 圖 c 顯示某天在香港觀察時，水星和金星在天上的位置。水星和金星可能在軌道上的哪個位置？試在圖 d 分別標示一個例子。(2分)

綜合題



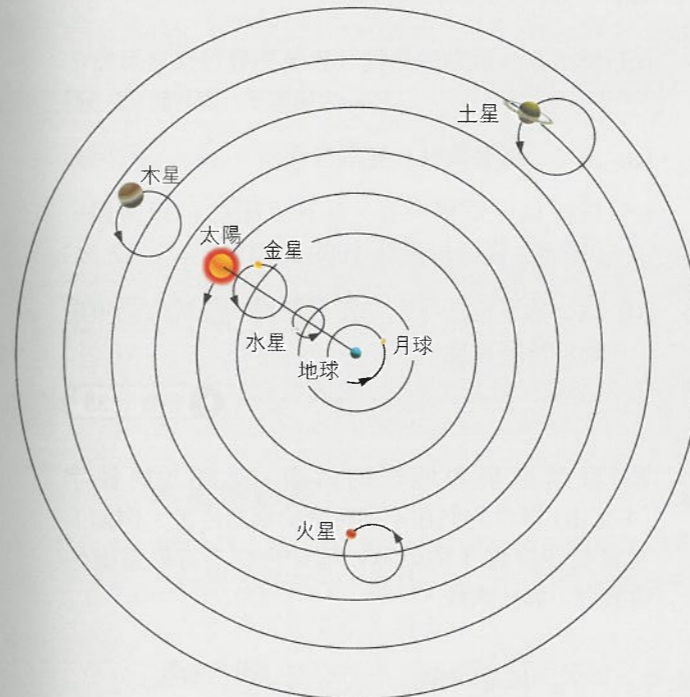
(b) 據此，繪圖展示水星和金星的相位。(2分)

(c) 圖 e 顯示另一天在香港觀察時，水星在天上的位置。金星在圖示的一刻無法觀察得到。水星和金星可能在軌道上的哪個位置？試在圖 f 標示答案。



- ★ 16 (a) 以往曾經出現兩種截然不同的宇宙模型：日心模型和地心模型。
- (i) 簡單描述地心模型。(1分)
  - (ii) 舉出這個模型曾廣受接納的一個原因。(1分)
  - (iii) 簡單描述日心模型。(1分)
  - (iv) 舉出兩個原因，解釋為甚麼日心模型最初發表時，並沒有獲得廣泛接納。(2分)
- (b) 後來，開普勒發展出三條定律。試寫出三條開普勒行星運動定律。(3分)

★ 17 圖 g 顯示簡化了的托勒密地心模型。  
綜合題



- (a) 試解釋托勒密地心模型中，本輪與均輪之間的分別。(2分)
- (b) 在這模型中，背景恆星在哪裏？(1分)
- (c) 在托勒密和哥白尼的模型中，背景恆星的運動有甚麼不同之處？(2分)
- (d) 圖 h 展示一顆彗星的軌道。

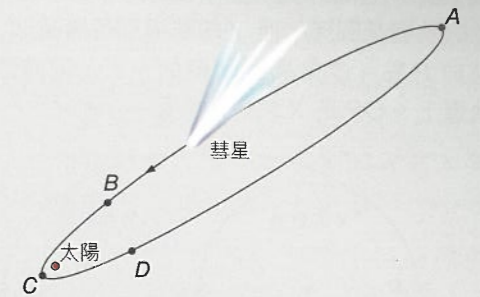


圖 h

- (i) 試描述彗星沿軌道運行一次時速率的變化。(2分)
- (ii) 比較圖 h 中彗星的軌道和托勒密地心模型的行星軌道，舉出它們的兩個不同之處。(2分)

★ 18 (a) 圖 i 展示由一個天文學家提出的宇宙模型。該天文學家是誰？**托勒密** (1分)

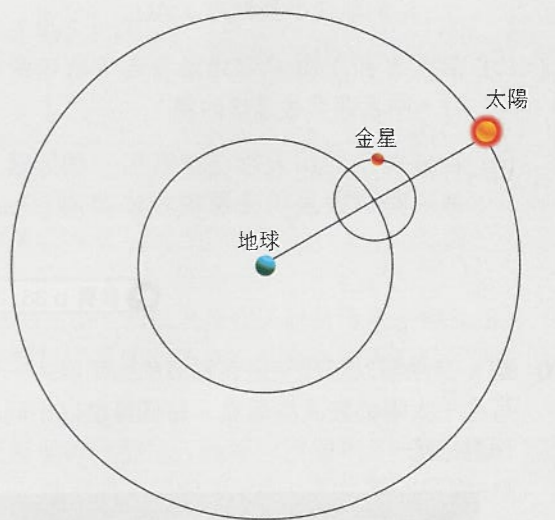


圖 i

- (b) 當地球、太陽和金星處於圖 i 顯示的位置時，從地球觀看，金星會呈現怎樣的相位？試繪圖表示。(1分)
- (c) 解釋伽利略對金星相位的觀察結果，怎樣否定了圖 i 的模型。(2分)
- (d) 哥白尼的模型可以解釋金星的所有相位變化，也能解釋金星的視大小與相位之間的關連。那個關連是甚麼？(2分)



- ★★ 19 圖 j 顯示兩個天體 X 和 Y 圍繞太陽運行的軌道。X 的軌道是圓形，而 Y 的軌道則是橢圓形，兩者相交於 P 點。O 是橢圓軌道的中心，同時位於 X 的軌道上。OP 是 X 軌道的直徑。

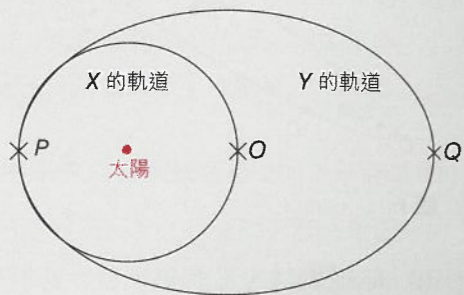
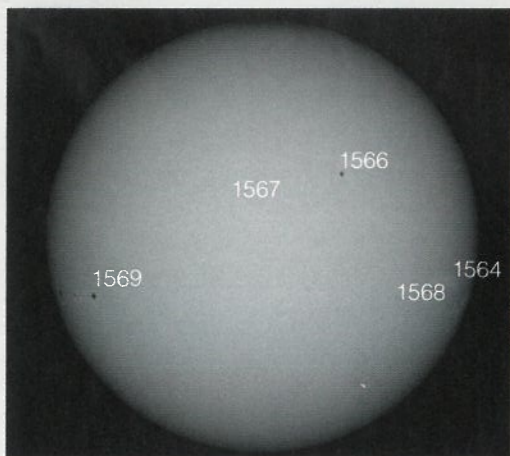


圖 j

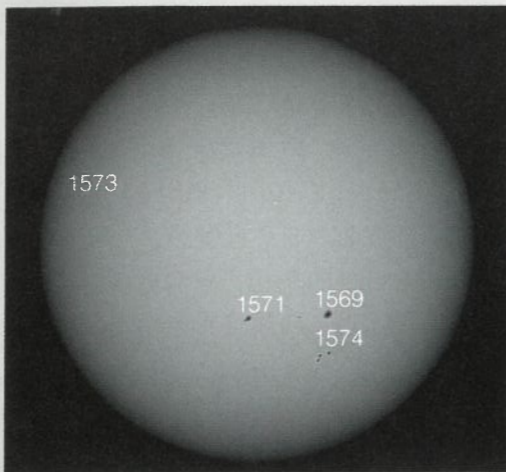
- (a) 在圖 j 標出太陽的位置，並由此指出 Y 達到最高速率的位置。P (2分)
- (b) (i) 寫出 X 的軌道半徑  $r$  和 Y 的軌道半長軸  $a$  的關係。  $a = 2r$  (1分)
- (ii) 據此，推導 X 和 Y 軌道週期的關係。取地球的軌道半長軸為 1 AU。  $T_Y = 2\sqrt{2} T_X$  (2分)
- (c) 描述 X 和 Y 由 P 開始沿各自的軌道運行一周時，兩者速率會怎樣改變。 (3分)
- (d) 若分別在兩個天體上觀察另一個天體，它們當中哪個會呈現完整的相位週期？為甚麼？ X (2分)

參看 p.36, 39-41

- ★★ 20 圖 k 是兩幅以現代望遠鏡拍攝的太陽照片。從照片可見，太陽的表面有黑點。每個黑點以不同的編碼作為記認。



(i) 拍攝於 11/9



(ii) 拍攝於 17/9

圖 k

- (a) 寫出這些黑點的名稱。誰首先發現這些黑點？ 太陽黑子，伽利略 (2分)
- (b) 當時，這些黑點有甚麼含意？ (2分)
- (c) 根據以上兩幅照片，估算太陽的自轉週期。 [提示：試分析黑點 1569 的運動。] 24 天 (2分)
- (d) 指出觀察這些黑點的潛在危險，並舉出一項相應的預防措施。 (2分)

參看 p.35

- ★★ 21 圖 l 顯示金星和地球的軌道。軌道上的數字 (1 至 5) 標示它們在不同時間的相應位置。例如，當金星在位置 1 的時候，地球也在本身軌道上的位置 1，如此類推。

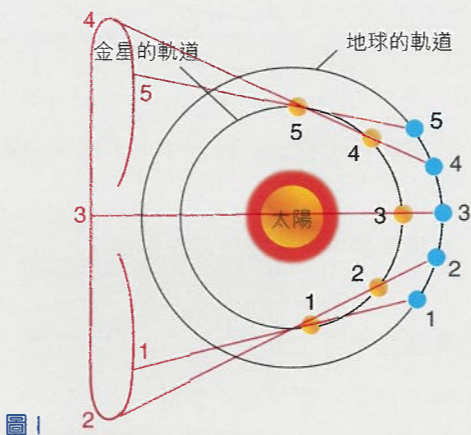


圖 l

- (a) 一般而言，金星相對背景恆星怎樣移動？這運動的名稱是甚麼？ 順行 (2分)

- (b) 就圖中每一個位置，畫出從地球觀察時，金星在天上的位置。 (2分)
- (c) 金星在甚麼時候逆行？ (1分)
- (d) 地球還是金星的軌道週期較長？如果地球和金星的軌道週期相同，在地球上還可以觀察到金星的逆行運動嗎？為甚麼？ 地球，不可以 (3分)
- (e) 金星在哪個位置的角大小最大？ 3 (1分)

參看 p.30

☆ 略去原題 (a)-(b)(i) 和 (e) 部

綜合題 22 BOSTES HSC 2000 Q32A

- (a) 托勒密和哥白尼都提出了解釋行星運動的理論，兩人的理論有哪兩項不同的地方？ (2分)

物理文章分析

- ★ 23 閱讀下列一段有關木星衛星的文章，然後回答隨後的問題。

木星的衛星

1610 年，伽利略首次透過望遠鏡，觀察木星附近的三個天體。起初，他以為那些天體是恆星。但他在第二晚再次觀察時，卻發現那三個天體的移動方式有別於一般恆星，有個別天體甚至會有幾天觀察不到，於是他決定再觀察多幾個晚上。

後來，伽利略發現了第四個類似的天體。木星相對背景恆星移動時，那些天體看似跟隨木星一同移動，從不遠離木星。此外，那幾個天體不斷互相轉換位置 (圖 m)，並且循不同週期返回相同位置；週期由數天至兩星期不等。根據這些觀測結果，伽利略相信這四個天體並非恆星，而是圍繞木星運行的衛星。這是首次發現有天體圍繞地球以外的物體運行。



圖 m 木星的衛星 (不按比例繪畫)

- (a) 試解釋為甚麼有數天看不見木星部分的衛星。 (1分)
- (b) 文中提及的發現，為日心模型提供了有力的證據。為甚麼？ (1分)
- (c) 伽利略首次看見木星的衛星時，以為它們是恆星，只是移動方式與其他恆星不同。假如這些光點不是木星的衛星，而是真正的恆星，試描述預期中木星相對光點的運動。 (1分)



## 自我評核 2

時間：10分鐘 總分：7分

### 答題須知

- 1 全部題目均須作答。
- 2 甲部為多項選擇題，乙部為問答題。
- 3 答案寫在預留的空位內。
- 4 附錄提供常用的數據、公式和關係式以供參考。

### 甲部

- 2.11 下列哪一項是托勒密模型使用本輪的原因？
- A 解釋逆行  
B 解釋順行  
C 令預測更準確  
D 簡化模型
- 2.32 彗星圍繞太陽運行期間，移近太陽時會加速，遠離太陽時則會減速。哪條開普勒定律指出了這個現象？
- A 開普勒第一定律  
B 開普勒第二定律  
C 開普勒第三定律  
D 開普勒第二及第三定律

A

B

### 乙部

- 2.33 圖 a 顯示彗星  $P$  圍繞太陽  $S$  運行的軌道， $O$  是軌道的中心。 $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  是軌道上的四點。已知  $OS = 2 \text{ AU}$ ， $SA = 1.5 \text{ AU}$ 。

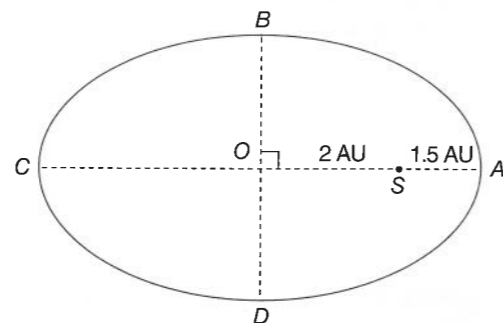


圖 a

- (a) 計算彗星的軌道週期，答案以地球年為單位。取地球的軌道半長軸為 1 AU。 (3分)

6.55 地球年

- (b)  $AB$  的弧長相等於  $CD$  的弧長。彗星沿弧  $AB$  還是弧  $CD$  運行所需的時間較短？試簡單解釋。(2分)

AB

## 人類對宇宙認知的發展



亞里士多德 (384–322 BC)

提出地球是宇宙的中心，其他天體都繞着它，以完美的運動模式（勻速圓周運動）運行。



伽利略 (1564–1642)

- 首位以望遠鏡觀察天空的科學家。
- 憑着望遠鏡，他發現：
  - 1 月球表面有山脈、山谷和隕石坑；
  - 2 顯示太陽自轉的太陽黑子；
  - 3 金星有完整的相位週期；
  - 4 木星有四顆衛星圍繞它運行。

托勒密 (90–168 AD)

為地心模型引入本輪和均輪，用以解釋行星運動，尤其是逆行、晨星和昏星。



開普勒 (1571–1630)

以開普勒定律準確描述行星運動。



哥白尼 (1473–1543)

提出日心模型，以太陽為宇宙的中心。







# 3

## 重力下的軌道運動

我們在这一課會學到

- 更多關於牛頓萬有引力定律和開普勒定律的知識
- 沿軌道運行物體和自由落體的表觀無重狀態
- 天體的重力勢能
- 在天體表面的逃逸速度



# 3.1

## 認識軌道運動

✓ 本節重點

- 1 天體作圓周運動時的軌道速率
- 2 開普勒第二定律和牛頓萬有引力定律
- 3 開普勒第三定律  
 $T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$
- 4 重量與失重

### 起點 自由下落，還是沿軌道運行？

蘋果和月球均受到地球的引力影響。然而，月球會不斷圍繞地球運行，而蘋果卻會從樹上掉下來。如果我們把蘋果放在和月球一樣遠的位置，蘋果又會否像月球般停留在空中，永不掉下來呢？參看第 57 頁。



這一課會探討牛頓的理論怎樣解釋行星及其他天體的軌道運動，當中牽

也可參閱第 2 冊第 9 課 涉到牛頓萬有引力定律和圓周運動。可參閱第 88 頁重溫相關的知識。

→ 模擬程式 3.1 展示物體的運行路徑怎樣受發射速率所影響。

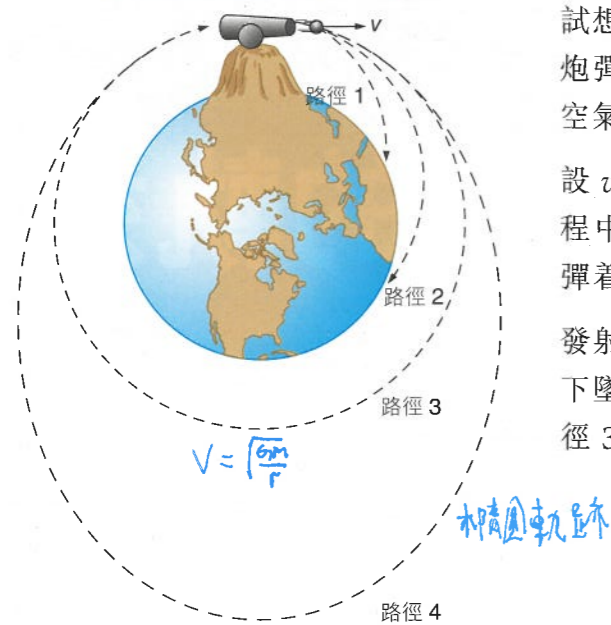
模擬程式 3.1

### 1 開普勒第一定律和牛頓萬有引力定律

試想像一枚炮彈在很高的山峯沿水平方向發射（圖 3.1a）。炮彈發射後，會因萬有引力的作用而自由下墜到地面（設空氣阻力可略去不計）。

設  $v$  為炮彈的初速率。如果  $v$  很低，炮彈在自由下落的過程中，只移動一段距離便墜落地面（路徑 1）。 $v$  愈大，炮彈着地的距離便愈遠（路徑 2）。

發射速率  $v$  為某特定數值時，彎曲的地面剛好抵銷了炮彈下墜的效應。這時，炮彈距離地面的高度可以維持不變（路徑 3）。於是，炮彈永遠不會墜落地面。



3.1a 以不同速率發射炮彈

從公式可見，物體的運行速率和它的質量無關，當中我們假設了  $M \gg m$ 。本課往後的部分均作出了這項假設。

在橢圓軌道運行的速率應小於一個稱為逃逸速度的數值，相關內容會在單元 3.2 探討。

在起點中，假若把蘋果放到相等於月球離地球一樣遠的地方後，蘋果隨後的運動便取決於它的初速度：若初速度和月球的速度相同，蘋果便會圍繞地球運行；如果蘋果初時處於靜止狀態，那麼它便會墜落地面。

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

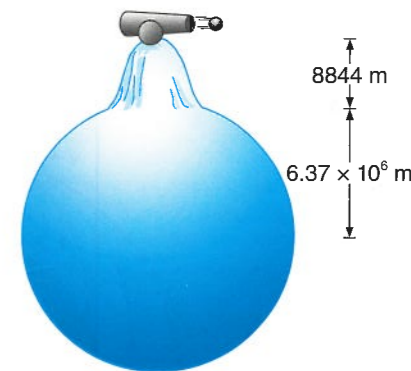
在這情況下，炮彈沿圓周軌道運行，而地球的引力提供向心力。所以，用以下方程便可找到發射速率：

其中  $M$  和  $m$  分別是地球和炮彈的質量， $r$  是地球中心和炮彈中心之間的距離， $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ，是萬有引力常數。

如果炮彈的速率稍高於  $\sqrt{\frac{GM}{r}}$ ，炮彈仍然會圍繞地球運行，但是軌道卻呈橢圓形（路徑 4），地球的中心處於一個焦點上。以上討論把開普勒第一定律由太陽和行星的系統推廣至其他系統。

### 例題 1 炮彈

珠穆朗瑪峯（圖 a）的高度是海拔 8844 m。設一枚炮彈由山峯頂端沿水平方向發射。



- (a) 要炮彈沿圓周軌道圍繞地球運行，發射速率應該是多少？假設空氣阻力可略去不計。取地球質量為  $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，地球半徑為  $6.37 \times 10^6 \text{ m}$ 。
- (b) 如果炮彈改為在地面發射，並同樣沿圓周軌道圍繞地球運行，則應增加還是減小發射速率？

### 題解

(a) 炮彈的發射速率

$$= \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6.37 \times 10^6 + 8844}} = 7.90 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$$

(b) 如果炮彈改為在地面發射，公式中  $r$  的值會減小。因此，應增加發射速率。

▶ 進度評估 1 Q1 (p.59)



牛頓認為，在軌道上運行的月球，以及從半空下落的蘋果，兩者都受同一種力作用（引力），只不過月球和地球相距較遠，力也隨之減弱。以下的例題說明牛頓怎樣驗證他的見解。

### 例題 2 牛頓驗證萬有引力定律的方法

- (a) 在牛頓的年代，科學家已經知道，月球圍繞地球運行一周需時約 27.3 日，而且月球軌道（大致上是圓形）的半徑約為地球半徑的 60 倍。試估計月球的向心加速度。
- (b) 牛頓也知道，蘋果自由下落時，加速度是  $9.81 \text{ m s}^{-2}$ 。試驗證月球和蘋果的加速度都遵從平方反比定律。

#### 題解

- (a) 月球的向心加速度

$$\begin{aligned} &= R_M \omega^2 = R_M \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \\ &= 60 \times 6.37 \times 10^6 \times \left( \frac{2\pi}{27.3 \times 24 \times 3600} \right)^2 \\ &= 2.71 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-2} \end{aligned}$$

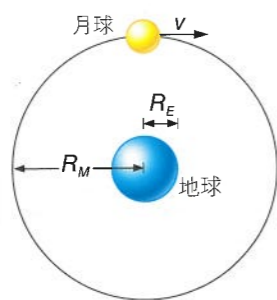


圖 a

- (b) 設向心加速度隨距離的平方而減少，

$$\text{即 } a \propto \frac{1}{r^2} \text{ 或 } \frac{a_1}{a_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

代入數據以驗證上述關係，得出：

$$\text{LHS} = \frac{\text{蘋果的加速度}}{\text{月球的加速度}} \approx \frac{9.81}{2.71 \times 10^{-3}} = 3620$$

$$\text{RHS} = \frac{(\text{月球與地球中心的距離})^2}{(\text{蘋果與地球中心的距離})^2} \approx \frac{(60R_E)^2}{R_E^2} = 3600$$

$$\therefore \text{LHS} \approx \text{RHS}$$

這個結果支持平方反比定律。

$$\begin{aligned} R_M &= 60 R_E \\ &= 60 \times 6.37 \times 10^6 \text{ m} \\ T &= 27.3 \text{ 日} \\ &= 27.3 \times 24 \times 3600 \text{ s} \end{aligned}$$

### 進度評估 1

✓ 各題號旁的數字對應本節重點（參看 p.56）。

- 11 (a) 在月球上，質量為 50 g 的子彈由 20 km 高的位置沿水平方向發射。如果子彈要沿圓周軌道圍繞月球運行，發射速率應該是多？ $1.67 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$
- 取月球質量為  $7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$ ，月球半徑為  $1.74 \times 10^6 \text{ m}$ 。
- [提示： $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$  = ?]  $V = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{1.74 \times 10^6 + 20 \times 10^3}}$
- (b) 若子彈的質量增加， $v$  應怎樣改變？試解釋你的答案。**保持不變**
- (c) 如果發射速率稍大於 (a) 的結果，子彈會怎樣？**沿橢圓軌道運行**

## 2 開普勒第二定律和牛頓萬有引力定律

在第 2 冊，由於物體高度改變較小，物體自由下落時的加速度可以視為常數；在這課中，自由下落運動的加速度則不能視作常數。

在第 2 冊我們學到，物體受重力影響自由下落時，它愈接近地球表面，便移動得愈快。這結果適用於任何接近地球表面的路徑（圖 3.1b）。所以，炮彈沿路徑 3 運行時，它的速率是不變的。若炮彈沿路徑 4 移動，當它移近地球中心時，速率會上升；移離地球中心時，速率會減低。這結果與開普勒第二定律相符。

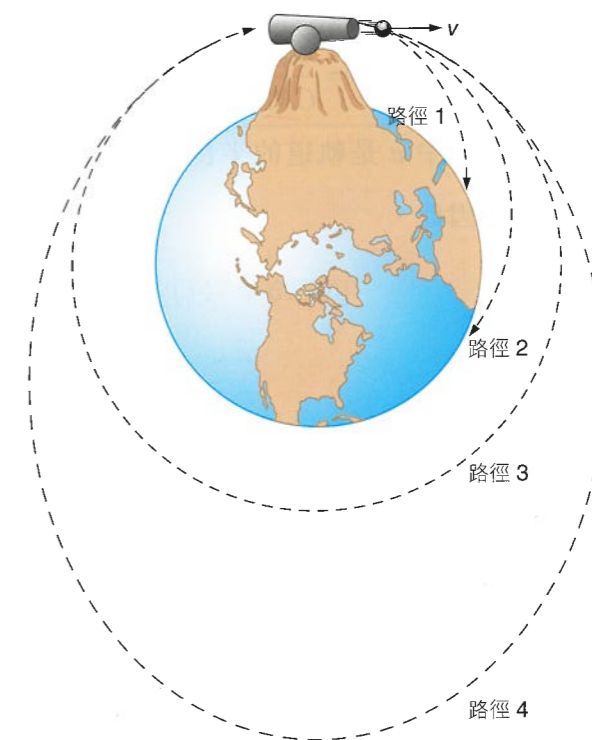


圖 3.1b 接近地球表面的運動路徑



### 3 開普勒第三定律和牛頓萬有引力定律

#### a 圓周軌道

根據牛頓萬有引力定律，能夠輕易推導出應用於圓周軌道的開普勒第三定律。設一顆質量為  $m$  的行星沿半徑為  $r$  的圓周軌道圍繞太陽運行（圖 3.1c）。

太陽（質量為  $M$ ）作用於行星的引力提供了行星所受的向心力。

$$\frac{GMm}{r^2} = m\omega^2 r$$

$$= mr \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 \quad \text{其中 } T \text{ 是行星的軌道週期}$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{常數}$$

或  $T^2 \propto r^3$

這就是應用於圓周軌道的開普勒第三定律。

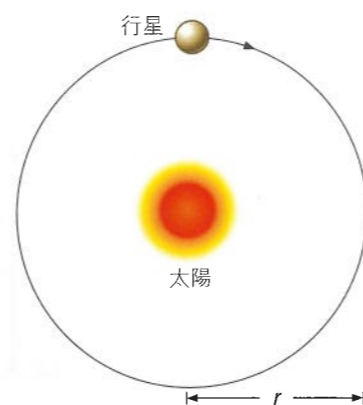


圖 3.1c 行星圍繞太陽運行

#### b 橢圓軌道

根據牛頓萬有引力定律，可以推導出應用於橢圓軌道的開普勒第三定律：

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{常數}$$

→ 同一天體

其中  $a$  是軌道的半長軸。

因此，

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$$

圓是橢圓的一種，只要取  $a =$  軌道半徑，這公式便可應用於圓周軌道。

要強調的是，比例常數  $\frac{4\pi^2}{GM}$  只取決於被圍繞天體的質量  $M$ 。因此，如果  $A$  和  $B$  圍繞不同的天體運行 ( $M$  不同)，那麼

$$\frac{T_A^2}{a_A^3} \neq \frac{T_B^2}{a_B^3}$$

總括來說，不論軌道是圓形還是橢圓形，只要天體的質量遠較它所圍繞的天體為小，三條開普勒定律都適用。

#### 例題 3 太陽的質量

地球軌道的半長軸是  $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ ，地球的軌道週期是 365.25 日。試估算太陽的質量。

#### 題解

$$\text{根據 } T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$$

$$M = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times (1.50 \times 10^{11})^3}{(6.67 \times 10^{-11}) \times (365.25 \times 24 \times 3600)^2} = 2.01 \times 10^{30} \text{ kg}$$

∴ 太陽的質量是  $2.01 \times 10^{30} \text{ kg}$ 。

▶ 進度評估 2 Q2 (p.62)

標準值為  $1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ 。

#### 例題 4 月球和國際太空站

月球是地球的天然衛星，圍繞地球運行的週期為 27.3 日，軌道的半長軸為 384 000 km。

國際太空站 (ISS) 是最大的人造衛星（圖 a）。從地球表面開始量度，ISS 的高度在 320 km 至 347 km 之間。取地球的半徑為 6370 km，國際太空站的軌道週期是多少？

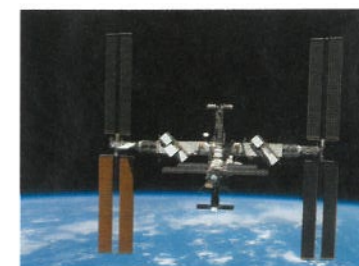


圖 a

#### 題解

ISS 的半長軸

$$= \frac{1}{2} \times [(320 + 6370) + (347 + 6370)] \\ = 6700 \text{ km}$$

根據開普勒第三定律，

$$\frac{T_{\text{ISS}}^2}{T_M^2} = \frac{a_{\text{ISS}}^3}{a_M^3}$$

$$T_{\text{ISS}}^2 = 27.3^2 \times \frac{6700^3}{384\,000^3} = 0.003\,96$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{軌道週期} &= \sqrt{0.003\,96} \\ &= 0.0629 \text{ 日} \\ &= 1.51 \text{ 小時} \end{aligned}$$

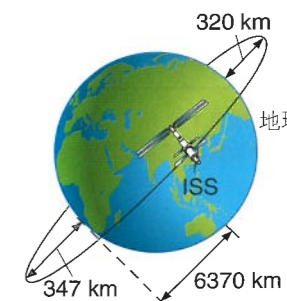


圖 b ISS 的軌道（不按比例繪畫）

▶ 進度評估 3.1 Q2 (p.65)

在這情況下，公式  $T^2$  (以地球年為單位) =  $a^3$  (以 AU 為單位) 並不適用。這公式只適用於圍繞太陽運行的物體。

ISS 每天運行  $\frac{24}{1.51} \approx 16$  周。



**進度評估 2** ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看p.56)。

3.1 某行星圍繞恆星運行。行星的軌道週期會受下列哪個物理量影響？可選多於一項。

- A 行星的質量
- B 恆星的質量**
- C 軌道的半長軸**

3.2 試根據下列月球的資料，估算地球的質量。  $6.02 \times 10^{24}$  kg

月球軌道的半長軸 = 384 000 km

軌道週期 = 27.3 日

[提示：  $T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$ ,  $M = ?$ ]

$$(27.3 \times 24 \times 3600)^2 = \frac{4\pi^2 \times (384 \times 10^3)^3}{6.67 \times 10^{-11} M}$$

**4 重量與失重** 無重狀態

物體於地球上的重量，就是地球作用於該物體的引力。試想像我們坐在椅子上，而椅子安放在地球上 (圖 3.1d)，我們的身體和地球會互相吸引，由於椅子施加反作用力，因此我們不會下墜。就是因為椅子的反作用力，我們才感覺到自己的重量。如果反作用力消失，我們便會感到**失重**。

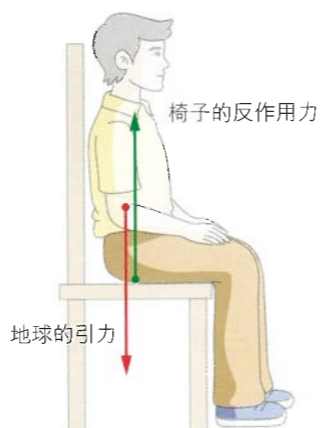


圖 3.1d 椅子的反作用力讓我們感覺到自己的重量

**a 真正的無重狀態與表觀的無重狀態**

只有完全不受任何引力作用時 (遠離地球及任何質量大的天體)，物體才會處於**真正的無重狀態**。然而，我們受地球引力影響時，也可能感受到失重，即處於**表觀的無重狀態**。

太空船圍繞地球運行時，裏面的太空人會感到失重 (圖 3.1e)；「跳樓機」從高處自由下落時，「跳樓機」上的乘客也會感到失重。這些都是表觀無重狀態的例子；事實上，他們依然受到地球引力的影響。



圖 3.1e 處於表觀無重狀態的太空人

**進度評估 3** ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看p.56)。

4.1 找出下列哪個物體正處於無重狀態，並判斷所處於的是真正的無重狀態還是表觀的無重狀態。

- (i) 遠離任何質量的物體 真正的無重狀態：(i)
- (ii) 站在月球上的太空人 表觀的無重狀態：(iii)、(iv)、(v)
- (iii) 在月球自由下墜的錘子
- (iv) 圍繞地球運行的太空船
- (v) 圍繞太陽運行的太空船

**b 認識表觀的無重狀態**

考慮圖 3.1f 的情況。把一個物體放在秤上，然後把兩者同時從靜止中釋放。兩者都以加速度  $g$  下降時，秤的讀數降至零。這顯示秤作用在物體上的反作用力消失。假如我們是放在秤上的物體，便會感到失重。

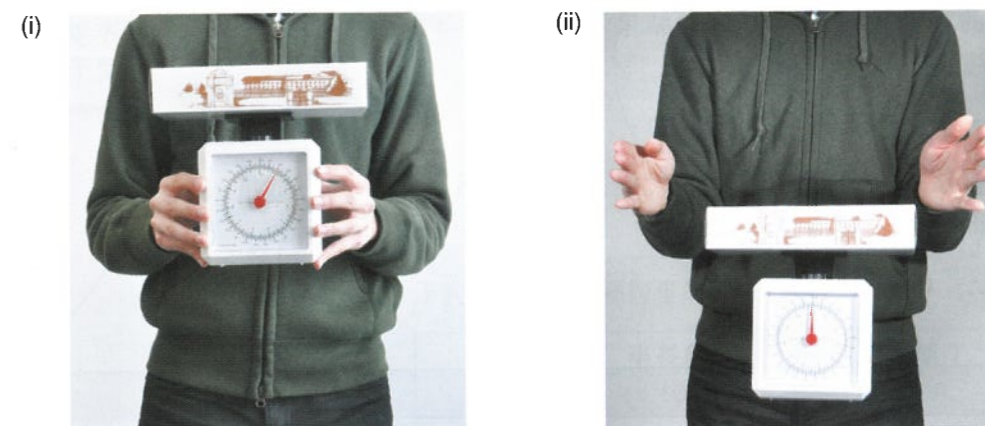


圖 3.1f 自由落體的表觀重量是零

考慮一艘沿圓周軌道圍繞地球運行的太空船以及船內的太空人。由於兩者都可視為向地球中心以加速度  $\frac{GM}{r^2}$  「自由下落」，太空船作用在太空人的反作用力是零。因此，船內的太空人會感到失重。

表 3.1a 總結了表觀和真正的無重狀態。

無重狀態	物理意義
表觀的無重狀態	自由下落運動 / 軌道運動
真正的無重狀態	與地球 (及其他質量大的物體) 相距無窮遠

表 3.1a 表觀和真正的無重狀態

炮彈的例子 (p.56-57) 說明，軌道運動和自由落體運動其實是同一種運動。軌道運動可以視為飛行時間為無窮大的自由落體運動。

此外，注意加速度  $\frac{GM}{r^2}$  與  $m$  無關。

**錄像片段 3.1**

→ 錄像片段 3.1 展示太空人在太空船內處於失重狀態時的情況。



預試訓練 1

無重狀態 ☆ 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.1

太空人身處於太空站內，而這太空站正沿圓周軌道圍繞地球運行。下列哪一項解釋了太空人處於無重狀態的原因？

- A 作用於太空人的淨力是零。
- B 作用於太空人的引力是零。
- C 作用於太空人的法向反作用力是零。
- D 作用於太空人的法向反作用力和地球作用於太空人的引力互相抵銷。

題解

作用於太空人的淨力源自地球的引力，這力總是指向圓周軌道的中心（即向心力），量值相等於  $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ ，因此不等於零。

∴ A 和 B 不正確。

如果法向反作用力和地球的引力互相抵銷，作用於太空人的淨力便是零。但這個結果不可能發生，原因和推翻 A 的道理一樣。

∴ D 不正確。

當法向反作用力是零，太空人便不會感覺到自己的重量，即處於表觀無重狀態。

∴ C 正確。

常見錯誤

學生可能不理解沿軌道移動的太空人仍然受地球重力影響。假如不受重力影響，太空人和太空站便不會圍繞地球運行。

複習 Q14 (p.80)

習題與思考 3.1

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.56)。

取  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

4.1 在下列哪種情況，太空人會感受到失重？

- (1) 乘坐的太空船由地球表面升空
- (2) 乘坐的太空船關掉了推進器，並沿圓周軌道圍繞地球運行
- (3) 站在月球表面

- A 只有 (1)
- B 只有 (2)**
- C 只有 (1) 和 (3)
- D 只有 (2) 和 (3)

3.5 在土星眾多的衛星中，有一顆稱為泰坦的衛星 (圖 b)。它沿半徑為  $1.22 \times 10^9 \text{ m}$  的軌道運行，軌道週期是 16 日。試計算土星的質量。(假設泰坦的質量遠低於土星的質量。)  $5.62 \times 10^{26} \text{ kg}$

$$\frac{(1.22 \times 10^9)^2}{(16 \times 24 \times 3600)^2} = \frac{4\pi^2}{6.67 \times 10^{-11} M}$$

$$M = 5.62 \times 10^{26} \text{ kg}$$

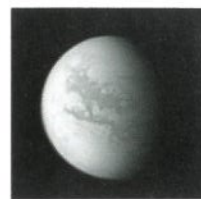


圖 b

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

★ 2 行星 P 和 Q 沿圓周軌道圍繞同一顆恆星運行。P 的軌道半徑是 Q 的 4 倍 (圖 a)。如果  $T_P$  和  $T_Q$  分別是 P 和 Q 的軌道週期，下列哪一項是正確的？

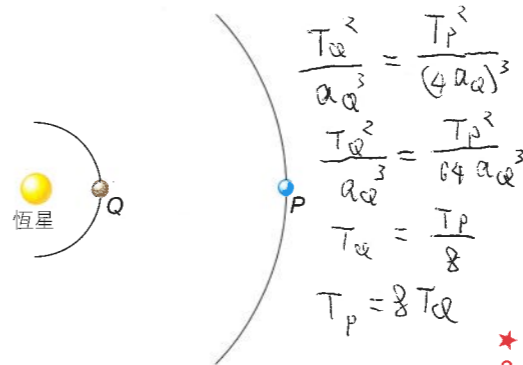


圖 a

- A  $T_P = 4T_Q$
- B  $T_P = 8T_Q$**
- C  $T_P = 16T_Q$
- D  $T_P = 64T_Q$

3.3 火衛一是一顆火星的衛星，軌道半長軸是 9377 km，軌道週期是 7.66 小時。火衛二是火星的另一顆衛星，它的軌道半長軸是 23 460 km。求火衛二的軌道週期。  $30.3 \text{ 小時}$

$$\frac{7.66^2}{9377^3} = \frac{T^2}{23460^3}$$

1.4 已知行星 X 的半徑和質量分別是  $8.21 \times 10^6 \text{ m}$  和  $3.06 \times 10^{25} \text{ kg}$ 。

- (a) 外星人在行星 X 的赤道上感到「失重」。X 自轉的角速率是多少？  $1.92 \times 10^{-3} \text{ rad s}^{-1}$
- (b) 求行星 X 的自轉週期。  $0.909 \text{ 小時}$
- (c) 外星人的向心加速度是多少？  $30.3 \text{ m s}^{-2}$

$$(a) \frac{GM}{r^2} = \omega^2 r, \omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 3.06 \times 10^{25}}{(8.21 \times 10^6)^3}} = 1.92 \times 10^{-3} \text{ rad s}^{-1}$$

$$(b) T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{1.92 \times 10^{-3}} = 3272 \text{ s} = 0.909 \text{ h}$$

$$(c) a = \omega^2 r = (1.92 \times 10^{-3})^2 \times 8.21 \times 10^6 = 30.3 \text{ m s}^{-2}$$

★ 6 人造衛星沿圓周軌道圍繞地球運行，它的軌道半徑是月球的三分之一 (圖 c)。試以月球的軌道週期  $T_M$  表達人造衛星的軌道週期。  $0.192 T_M$

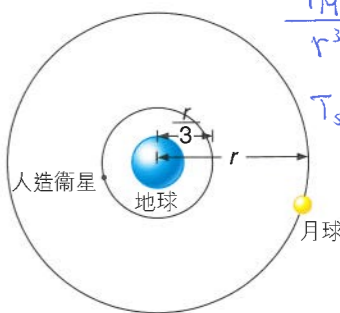


圖 c

$$\frac{T_M^2}{R^3} = \frac{T_s^2}{r^3} = \frac{27 T_s^2}{R^3}$$

$$T_s = \sqrt{\frac{1}{27}} T_M = 0.192 T_M$$

★ 7 下表列出土星四顆衛星的數據 (表 a)：

衛星	半長軸 a (× 10 <sup>8</sup> m)	軌道週期 T (× 10 <sup>5</sup> s)
土衛一	1.85 <i>6.33</i>	0.78 <i>0.684</i>
土衛二	2.38 <i>13.5</i>	1.21 <i>1.4641</i>
土衛三	2.95 <i>25.7</i>	1.64 <i>2.6896</i>
土衛四	3.77 <i>53.6</i>	2.33 <i>5.4289</i>

表 a  $\text{slope} = \frac{4\pi^2}{GM} \Rightarrow M = \frac{4\pi^2}{G \times \text{slope}}$

- (a) 繪畫  $T^2$  對  $a^3$  的線圖。
- (b) 根據以上結果，估計土星的質量。  $5.69 \times 10^{26} \text{ kg}$

★ 8 一艘質量為  $m$  的太空船沿橢圓軌道圍繞太陽運行。太陽的質量是  $M$ 。在某一刻，太空船與太陽之間的距離是  $r$ 。

- (a) 寫出表達式，描述橢圓軌道上的太空船在那一刻的加速度。  $\frac{GM}{r^2}$

(b) 太空船是否處於表觀無重狀態？解釋你的答案。是

進度評估 4

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.56)。

- 4.1 是非題：一個人處於表觀失重狀態時，重量會下降至零。 (對/錯)
- 4.2 是非題：太空人乘坐太空船圍繞地球運行時會感到失重，原因是地球作用於太空人和太空船的引力都是零。 (對/錯)
- 4.3 是非題：所有以加速度  $9.81 \text{ m s}^{-2}$  移動的物體都處於無重狀態。 (對/錯)
- 4.4 某外星人在接近木星表面的位置，以  $25.9 \text{ m s}^{-2}$  的加速度向下運動。已知木星的質量是  $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}$ ，半徑是 70 000 km。
  - (a) 求接近木星表面的重力加速度。 [提示： $a = \frac{GM}{r^2} = ?$ ]  $25.9 \text{ m s}^{-2}$
  - (b) 外星人是否處於表觀無重狀態？解釋你的答案。 是

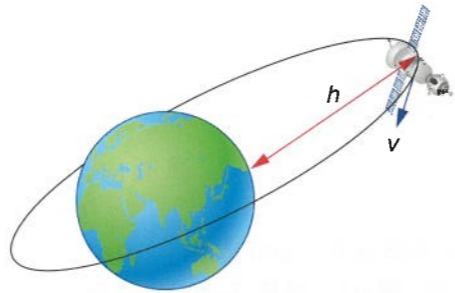


# 3.2

## 軌道運動中的能量守恆

### 起點 重力勢能

在第2冊，我們已經學會重力勢能的公式  $mgh$ 。這公式可用來計算衛星的重力勢能嗎？ 參看第68頁。



✓ 本節重點

- 1 重力勢能
- 2 軌道運動中的機械能守恆
- 3 逃逸速度

### 1 重力勢能

考慮一個接近地球表面而質量為  $m$  的物體以恆速率移動時，它的高度由  $h_1$  提升至  $h_2$ 。根據定義，物體勢能的轉變是外力克服引力所作的功（圖 3.2a），即：

勢能的轉變 = 克服引力所作的功

$$\Delta U = U_2 - U_1 = mg(h_2 - h_1)$$

為方便起見，取地面的勢能為零，公式就可簡化為  $PE = mgh$ 。

然而，如果高度的轉變較大， $g$  就不再是常數，我們也不能應用上述公式。下文展示在這種情況下，應怎樣找出重力勢能。

考慮一個質量為  $m$  的物體。開始時，它和質量為  $M$  的固定物體的中心相距  $r_1$ 。假設把物體移至一個較遠的位置，那處與  $M$  相距  $r_2$ （圖 3.2b）。

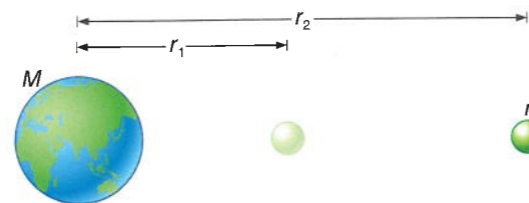


圖 3.2b 把物體由  $r_1$  移至  $r_2$

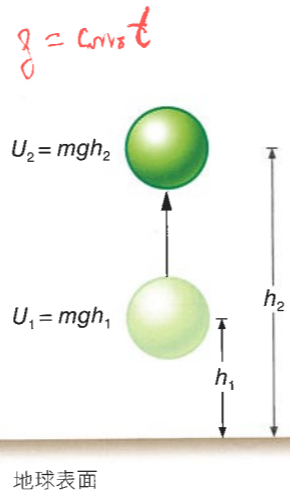


圖 3.2a 接近地球表面時，勢能的定義

要考慮的是勢能的轉變，而不是它在每個位置的值。

由這裏開始，勢能用  $U$  代表。

一些課本取  $U$  的定義為引力把物體由無窮遠處移至某處時所作的功，並取數值為負數。這定義與本書的定義相同。

於是，物體  $m$  重力勢能的轉變就是：

$$\text{重力勢能的轉變} = U_2 - U_1 = GMm \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

和之前的情況一樣，我們可以選擇一個參考點，以簡化上述的表達式。按照慣例，取在無窮遠處的勢能為零，即是說，取  $r_1 = \infty$  和  $U_1 = 0$ 。

$$U = -\frac{GMm}{r}$$

注意以下各項有關重力勢能  $U$  的要點。

- 1  $U$  是標量，單位是焦耳 (J)。
- 2  $U$  相等於把物體以恆速率從無窮遠處移動至  $r$  所作的功。
- 3 與固定物體  $M$  的距離愈遠，物體  $m$  的重力勢能愈大（變為較接近零的負數）（圖 3.2c）。

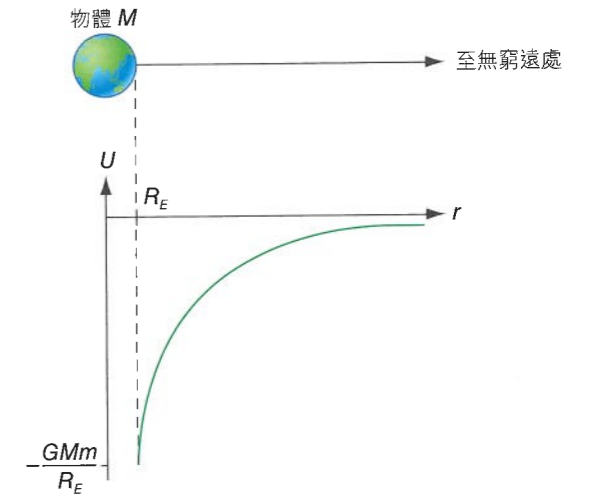


圖 3.2c  $U$  隨  $r$  的變化

- 4 要把物體  $m$  以恆速率從  $r$  移動至無窮遠處，就需要能量，因此過程中  $U$  會不斷增加。在無窮遠處的  $U$  取為零，因此當  $R_E < r < \infty$ ， $U$  為負數。

由於力和位移的方向相同，所作的功是正數。

- 5 我們也可以從力的角度去理解  $U$  為負值原因。要把物體  $m$  以恆速率從  $r$  移動至無窮遠處，須施加外力，過程中必須作功，才能把  $U$  從負值（位於  $r$  時）增加至零（在無窮遠處）（圖 3.2d）。

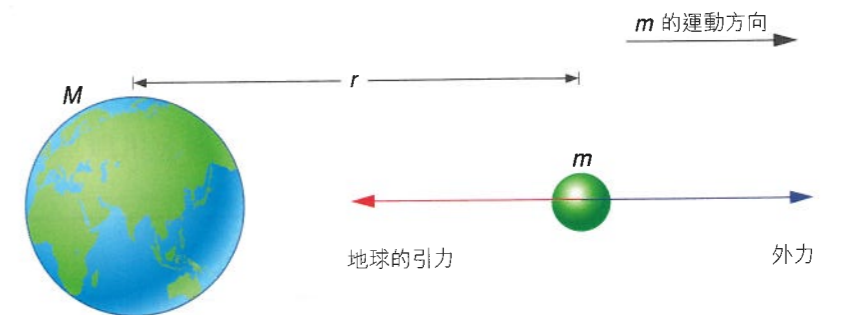


圖 3.2d 外力把物體  $m$  從  $r$  移動至無窮遠處，過程中會作功（正數）， $U$  因而增加



例題 5

$U = -\frac{GMm}{r}$  與  $\Delta PE = mgh$

- (a) 質量為  $m$  的細小物體在地球表面附近，它的高度稍稍提升了  $h$ 。試用公式  $U = -\frac{GMm}{r}$  證明勢能的改變是  $mgh$ 。
- (b) 質量為 50 000 kg 的人造衛星由地球表面發射至與地面相距 850 km 的位置。如果以  $\Delta PE = mgh$  計算人造衛星的勢能轉變，會引致多少的百分誤差？

題解

(a) 如圖 a 所示，物體由 A 移至 B。

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_B - U_A \\ &= -\frac{GM_E m}{R_E + h} + \frac{GM_E m}{R_E} \\ &= GM_E m \left( -\frac{1}{R_E + h} + \frac{1}{R_E} \right) \dots\dots\dots (*) \\ &= GM_E m \left[ \frac{h}{R_E(R_E + h)} \right] \\ &\approx GM_E m \left( \frac{h}{R_E^2} \right) \quad (\text{因為 } R_E \gg h) \\ &= mgh \quad \left( \text{其中 } g = \frac{GM_E}{R_E^2} \right) \end{aligned}$$

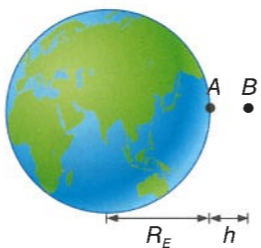


圖 a

(b) 根據  $\Delta PE = mgh$ ,

$$\begin{aligned} \Delta PE &= 50\,000 \times 9.81 \times 850\,000 \\ &= 4.17 \times 10^{11} \text{ J} \end{aligned}$$

應用 (a) 部的方程 (\*)，

$$\begin{aligned} \Delta U &= GM_E m \left( -\frac{1}{R_E + h} + \frac{1}{R_E} \right) \\ &= (6.67 \times 10^{-11})(5.97 \times 10^{24})(50\,000) \left[ -\frac{1}{(6370 + 850) \times 10^3} + \frac{1}{6370 \times 10^3} \right] \\ &= 3.68 \times 10^{11} \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{百分誤差} &= \frac{4.17 - 3.68}{3.68} \times 100\% \\ &\approx 13\% \end{aligned}$$

▶ 習題與思考 3.2 Q11 (p.76)

$$\begin{aligned} g &= \frac{GM_E}{R_E^2} \\ &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{(6.37 \times 10^6)^2} \\ &= 9.81 \text{ N kg}^{-1} \end{aligned}$$

公式  $U = -\frac{GMm}{r}$  能應用於強度不均勻的引力場，因此比起點所提及的公式更具普遍性。

▶ 從例題 5 可見，當物體接近地球表面，而且只稍微轉變高度時，公式  $\Delta PE = mgh$  才會成立。

補充資料

推導  $\Delta U = GMm \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

參考第 66 頁圖 3.2b，並考慮勢能轉變的定義：

勢能的轉變 = 克服引力所作的功

其中作用於物體的引力是：

$$F = -\frac{GMm}{r^2} \quad (\text{指向 } M)$$

如果把物體稍微移動，它經過位移  $dr$  後，外力為克服引力所作的功是：

$$dW = \frac{GMm}{r^2} dr$$

(因為外力和位移方向相同，因此  $dW$  是正數。)

於是，勢能的轉變是：

$$U_2 - U_1 = W = \int_{r_1}^{r_2} \frac{GMm}{r^2} dr = \left[ -\frac{GMm}{r} \right]_{r_1}^{r_2} = GMm \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

進度評估 5

✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.66)。

- 1 1 是非題：重力勢能是一個向量。 (對/錯)
- 1 2 是非題：因為公式  $U = -\frac{GMm}{r}$  包含負號，因此根據這定義，物體在地面比在大廈頂部有較大的重力勢能。 (對/錯)
- 1 3 求質量為 60 kg 的太空人，站在月球表面時的重力勢能。月球的半徑是  $1.74 \times 10^6$  m，質量是  $7.35 \times 10^{22}$  kg。  $-1.69 \times 10^8$  J

[提示： $U = -\frac{GMm}{r} = ?$ ]

$$U = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22} \times 60}{1.74 \times 10^6} = -1.69 \times 10^8 \text{ J}$$

2 軌道運動中機械能的守恆

小球從高處下落時，它的勢能減少，動能增加。過程中小球的總機械能守恆，即：

$$KE + PE = \text{常數}$$

以上的關係也適用於軌道運動，不過，勢能的公式不再是  $mgh$ ：

$$K + U = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{常數}$$

動能也可用符號  $K$  代表。 ▶



3 重力下的軌道運動

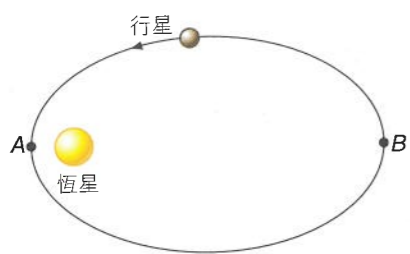


圖 3.2e 圍繞恆星運行的行星

考慮一顆沿橢圓軌道圍繞恆星運行的行星(圖 3.2e)。在行星的軌道中，A 點最接近恆星，B 點則距離恆星最遠。

行星的總機械能守恆，因此，

$$K_A + U_A = K_B + U_B$$

因為  $U_A < U_B$ ，所以

$$K_A > K_B$$

即是說，行星在 A 點比在 B 點移得快，這結果與開普勒第二定律相符，不過我們未能應用現有知識證明這定律。

根據美國太空總署的資料，現時約有 3000 個人造衛星圍繞地球運行，各有不同的用途，包括通訊、天氣預測等。有些人造衛星會停留在地球同一位置的上空，稱為同步衛星；有些則會通過兩極的上空，稱為繞極衛星。

例題 6 同步衛星的運動

同步衛星是指那些在地面觀察時，總是停留在天上同一位置的衛星。這種衛星的軌道週期與地球的自轉週期相同，且軌道平面與地球的赤道面重疊。同步軌道又稱為駐留軌道，或地球靜止軌道。

- (a) 同步衛星的軌道週期是多少？
- (b) 求同步軌道的半徑。已知地球的質量是  $5.97 \times 10^{24}$  kg。
- (c) 求同步衛星的向心加速度。
- (d) 某同步衛星的質量是 1000 kg，求它在軌道中的重力勢能。取在無窮遠處的勢能為零。

題解

(a) 軌道週期 = 1 日  $\approx$  24 小時

(b) 根據  $T^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GM}$

$$r^3 = \frac{GMT^2}{4\pi^2}$$

$$r = \left[ \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times (24 \times 3600)^2}{4\pi^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$= 4.223 \times 10^7 \text{ m}$$

$$\approx 4.22 \times 10^7 \text{ m}$$

同步軌道的半徑是  $4.22 \times 10^7$  m。

(c) 向心加速度

$$= \omega^2 r$$

$$= \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

$$= \frac{4\pi^2 \times 4.223 \times 10^7}{(24 \times 3600)^2}$$

$$= 0.223 \text{ m s}^{-2}$$

(d) 重力勢能

$$= -\frac{GM_E m}{r}$$

$$= -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times 1000}{4.223 \times 10^7}$$

$$= -9.43 \times 10^9 \text{ J}$$

▶ 複習 Q20 (p.81)

預試訓練 2 總機械能 ☆ 香港高級程度會考 2003 年卷二 Q12

設在地球表面的引力場強度是  $g$ 。一個質量為  $m$  的人造衛星在距離地球表面  $5R$  的高度，沿圓周軌道圍繞地球運行 ( $R$  是地球的半徑)。人造衛星的總機械能是多少？

- A  $-\frac{1}{6} mgR$
- B  $-\frac{1}{10} mgR$
- C  $-\frac{1}{12} mgR$
- D  $-5mgR$

題解

根據牛頓萬有引力定律，

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} mv^2 = \frac{GMm}{2r} \dots\dots\dots (1)$$

總機械能

$$= K + U$$

$$= \frac{1}{2} mv^2 - \frac{GMm}{r}$$

$$= \frac{GMm}{2r} - \frac{GMm}{r}$$

$$= -\frac{GMm}{2r}$$

$$= -\frac{GMm}{2(6R)}$$

$$= -\frac{1}{12} m \left( \frac{GM}{R^2} \right) R$$

$$= -\frac{1}{12} mgR$$

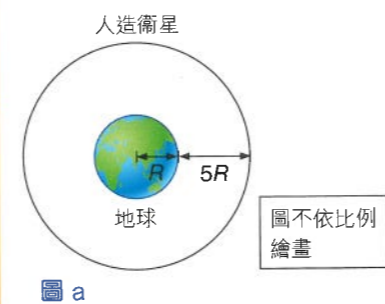
∴ 答案是 C。

由於四個選項都不含  $v$ ，解題時應先以  $R$  來表達 KE。

我們已知人造衛星的軌道半徑，可以輕易計算出它的動能和勢能。


常見錯誤

學生可能誤以為  $r = 5R$ 。要留意  $5R$  是人造衛星與地球表面的距離。人造衛星的軌道半徑應該是  $r = 5R + R = 6R$  (圖 a)。



▶ 複習 Q11 (p.79)



 模擬程式 3.2

→ 模擬程式 3.2 讓學生以不同速率發射火箭，並找出不同天體的逃逸速度。

### 3 天體的逃逸速度

沿水平方向發射炮彈時，如果速率較低，它就會下墜到地面，或者圍繞地球移動；如果發射速率高於一個稱為逃逸速度的值，炮彈就永遠不會返回地球。

如果物體以逃逸速度  $v_e$  離開，它的初動能僅僅足夠讓它移動到無窮遠處（圖 3.2f）。根據能量守恆定律，

在地球表面的總能量 = 在無窮遠處的總能量

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_e^2 - \frac{GM_E m}{R_E} &= \frac{1}{2}m(0)^2 - \frac{GM_E m}{\infty} \\ \frac{1}{2}mv_e^2 &= \frac{GM_E m}{R_E} \\ \therefore v_e &= \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6.37 \times 10^6}} \\ &= 11.2 \text{ km s}^{-1} \end{aligned}$$

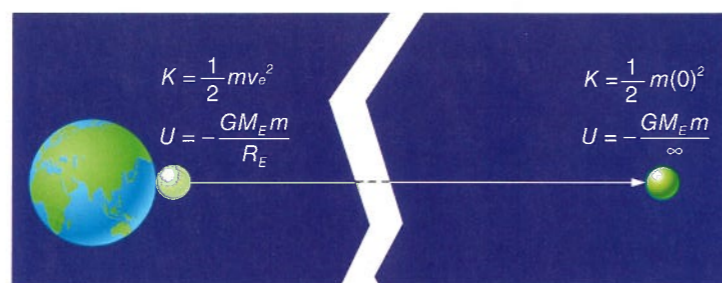


圖 3.2f 物體逃離地球時，動能和勢能的轉變

總的來說，

$$\text{於天體表面的逃逸速度 } v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

其中  $M$  和  $R$  分別是天體的質量和半徑。

注意以下各項：

- 1 天體的逃逸速度與逃逸物體的質量無關。
- 2 公式只適用於沒有推進器推動的物體。如物體由推進器推動（例如火箭），則無須達到逃逸速度，也可逃離天體。
- 3 雖然  $v_e$  稱為逃逸速度，但它是一個標量，與方向無關。只要物體達至逃逸速度，即使不是徑向移動，也能夠逃離天體。

在公式  $v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$  中， $G$ 、 $M$  和  $R$  都是標量。

- 4 以上公式假設物體在天體的表面發射。如果物體初時位於距離天體中心  $r$  的位置 ( $r > R$ )，則只須以  $\sqrt{\frac{2GM}{r}}$  的速率移動便可逃離天體。

圖 3.2g 總結了物體在天體表面沿水平方向發射時，不同的發射速率怎樣影響物體隨後的運動。

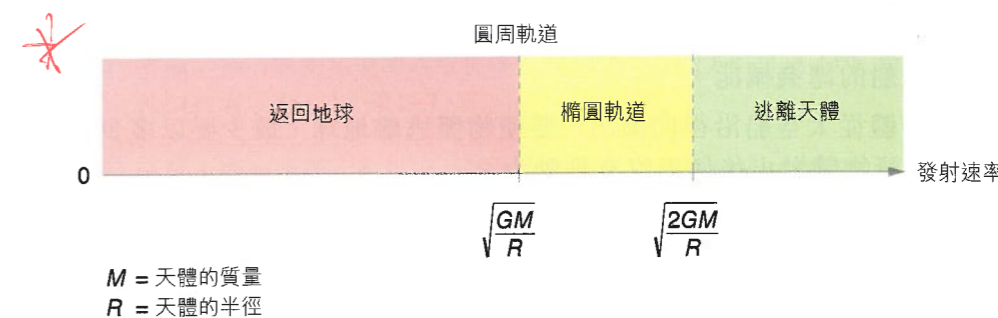


圖 3.2g 物體在天體表面沿水平方向發射時，發射速率對物體隨後運動的影響

#### 例題 7 月球的逃逸速度

求月球表面的逃逸速度。已知月球的質量和半徑分別為  $7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$  和  $1.74 \times 10^6 \text{ m}$ 。

#### 題解

$$\begin{aligned} \text{逃逸速度} &= \sqrt{\frac{2GM}{R}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 7.35 \times 10^{22}}{1.74 \times 10^6}} \\ &= 2.37 \text{ km s}^{-1} \end{aligned}$$

▶ 習題與思考 3.2 Q9 (p.76)

#### 生活中的物理 大氣層

與較重的氣體分子相比，氫和氦等較輕的氣體分子具有較高的平均速率。一些高能分子的速率偶爾比行星的逃逸速度還要高，因此它們就能逃離行星，這就是地球大氣層含有較少氫和氦的一個原因。同樣道理，月球的逃逸速度較低，因此它的大氣層比地球的稀薄得多。

一般來說，我們會比較氣體的方均根速率（即  $\sqrt{\frac{3RT}{N_A m}}$ ，可參閱第 1 冊第 5 課）和天體的逃逸速度，以推測天體的表面是否含有該種氣體。



**預試訓練 3 太空船的能量** ☆ AQA GCE Jan 2010 Q2

一艘太空船從地球發射至圓周軌道，並圍繞地球運行。

已知：太空船的質量 = 8130 kg；地球的質量 =  $5.97 \times 10^{24}$  kg；地球的半徑 = 6370 km

- (a) 太空船的重力勢能  $U$  是  $-4.83 \times 10^{11}$  J。試計算太空船的軌道半徑。 (2分)
- (b) 解釋為甚麼  $U$  是負值。 (2分)
- (c) 求太空船的總機械能。 (3分)
- (d) 一個物體從太空船沿徑向拋出。要使物體逃離地球，最少要以多少速率（相對於地球）把它拋出？假設物體拋出後便再沒有推動力。 (2分)

**題解**

(a) 根據  $U = -\frac{GMm}{r}$ ,

$$r = -\frac{GMm}{U} = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times 8130}{-4.83 \times 10^{11}} = 6700 \text{ km}$$

(b) 要把太空船從軌道移至無窮遠處，便須施加外力做功，以克服地球的引力。

由此可知，太空船在軌道中的重力勢能必定低於無窮遠處時的重力勢能 (= 0)，所以  $U$  是負值。

(c) 總機械能 =  $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r}$

$$= \frac{1}{2}m\left(\sqrt{\frac{GM}{r}}\right)^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}\left(-\frac{GMm}{r}\right) = \frac{1}{2} \times (-4.83 \times 10^{11}) = -2.42 \times 10^{11} \text{ J}$$

(d) 在無窮遠處， $U = 0$ 。若物體剛好能逃離地球的引力，它在無窮遠處的動能也是零。根據能量守恆定律，

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = 0 + 0$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{\frac{2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6700 \times 10^3}} = 10.9 \text{ km s}^{-1}$$

**1M** **常見錯誤**  
學生可能誤用  $mgh$  來計算  $U$ 。

**1A** **常見錯誤**  
學生可能誤以為  $U$  是向量，因此  $U$  是負值。事實上  $U$  是標量，而標量的值也可以是負數（例如攝氏溫標）。

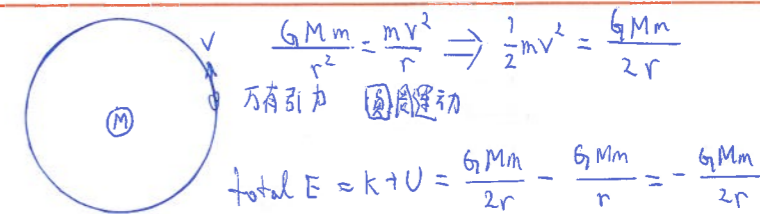
**1A** **常見錯誤**  
學生可能無法分辨究竟功是由地球還是外力所作的。此外，他們可能混淆了功的正負號，以及物體在  $r$  和無窮遠處之間的移動方向。注意  $U$  有多種對等的詮釋方法。

**1A**  
這相等於  $\frac{U}{2}$ 。注意這結果只適用於圓周軌道。

▶ 複習 Q27 (p.83)

**進度評估 6** ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.66)。

- 31 是非題：火箭要從地面逃離地球，就必須一直啟動引擎，以保持它的速率為  $11.2 \text{ km s}^{-1}$ 。 (對/錯)
- 2 物體以逃逸速度離開地球。它距離地球無窮遠時，速率 (等於/大於) 零。 2,3
- 23 考慮一個沿圓周軌道圍繞地球運行的物體，它的 KE 是  $K$ ，PE 是  $U$ 。試計算  $K:U:K+U$ 。 1:-2:-1
- 24 哈勃太空望遠鏡在距地球表面 559 km 的高度圍繞地球運行。假設軌道是圓形的，計算它的總機械能。地球和哈勃望遠鏡的質量分別為  $5.97 \times 10^{24}$  kg 和 11 110 kg，地球的半徑為 6370 km。  $-3.19 \times 10^{11} \text{ J}$



**習題與思考 3.2**

除特別指明外，利用下列數據回答問題。

	太陽	地球	月球
質量	$1.99 \times 10^{30}$ kg	$5.97 \times 10^{24}$ kg	$7.35 \times 10^{22}$ kg
半徑	$6.96 \times 10^8$ m	$6.37 \times 10^6$ m	$1.74 \times 10^6$ m
距離	—	$1.50 \times 10^{11}$ m (和太陽的距離)	$3.82 \times 10^8$ m (和地球的距離)

萬有引力常數  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

- 1 1 衛星沿橢圓軌道圍繞行星運行，X點和Y點分別是軌道最遠和最近行星的位置。設  $U_x$  和  $U_y$  分別是衛星在X點和Y點的重力勢能。下列哪一項是正確的？（取在無窮遠處的重力勢能為零。）
  - A  $0 > U_x > U_y$
  - B  $0 > U_y > U_x$
  - C  $U_x > U_y > 0$
  - D  $0 > U_x = U_y$
- 3 2 質量為  $m$  的衛星沿圓周軌道圍繞質量為  $M$  的行星運行。如果軌道半徑是  $r$ ，衛星的總機械能是多少？
  - A  $-\frac{GMm}{r^2}$
  - B  $-\frac{GMm}{2r}$
  - C  $-\frac{GMm}{r}$
  - D  $\frac{GMm}{r}$
- 4 3 一個物體在行星最高的山峯垂直向上發射。下列哪項轉變會增加物體逃離行星所需的速率？
  - (1) 增加行星的質量  $M$
  - (2) 增加物體的質量  $m$
  - (3) 沿水平方向發射物體

$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$

  - A 只有 (1)
  - B 只有 (1) 和 (3)
  - C 只有 (2) 和 (3)
  - D (1)、(2) 和 (3)

3 2 某行星的質量是  $3.4 \times 10^{24}$  kg，半徑是  $5.4 \times 10^6$  m。如果要把質量為 1.5 kg 的物體從行星表面拋到無窮遠處，需要多少能量？

$$E = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 3.4 \times 10^{24} \times 1.5}{5.4 \times 10^6} = 6.3 \times 10^7 \text{ J}$$

$$U = -\frac{GMm}{r}$$



3 重力下的軌道運動

- ★ 5 某衛星可以沿軌道 P、Q、R 或 S 圍繞地球運行 (圖 a)。

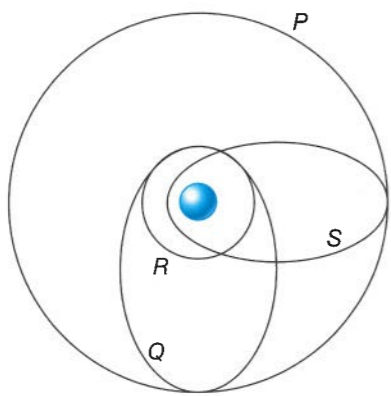


圖 a

哪個軌道的總機械能最大?

- (A) P  
B Q  
C R  
D S

*r 最大  
圓軌道, K 最大*

- 1.3 6 (a) 求質量為 1 kg 的物體在地球、火星、木星表面時的重力勢能  $U$ 。設  $r = \infty$  時,  $U = 0$ , 並利用下列數據 (表 a) 計算答案。

	半徑 / $\times 10^6$ m	質量 / $\times 10^{24}$ kg
火星	3.40	0.642
木星	71.5	1900

表 a 地球:  $-6.25 \times 10^7$  J, 火星:  $-1.26 \times 10^7$  J, 木星:  $-1.77 \times 10^9$  J

- (b) 根據以上結果, 比較在這三個行星上的逃逸速度  $v$ 。解釋你的答案。木星 > 地球 > 火星

- 1 7 地球引力場把質量為 800 kg 的物體, 按以下方式移動: (a) 由無窮遠處移到 A; (b) 由 A 移到 B (圖 b)。求引力場在以上兩個過程所作的功。

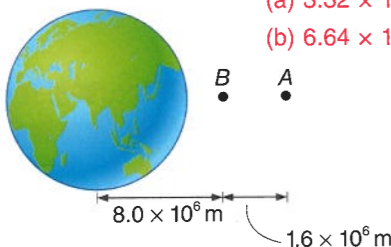


圖 b

*(a)  $3.32 \times 10^{10}$  J  
(b)  $6.64 \times 10^9$  J*

$$W_{\infty \rightarrow A} = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times 800}{8 \times 10^6 + 1.6 \times 10^6} - 0 = 3.32 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$W_{A \rightarrow B} = 6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times 800 \times \left( -\frac{1}{8 \times 10^6} - \frac{1}{1.6 \times 10^6 + 8 \times 10^6} \right) = -6.64 \times 10^9 \text{ J}$$

- 1.2 8 物體從地球表面拋出, 發射速率為  $4.8 \text{ km s}^{-1}$ 。該物體和地球表面最遠相距多少? 空氣阻力可略去不計。  $1.44 \times 10^6 \text{ m}$

- 3★ 9 求在距離太陽表面 50 AU 的逃逸速度。  $5.95 \text{ km s}^{-1}$

- ★ 10 (a) 質量為 1 kg 的物體在地球和月球的中間點時, 重力勢能是多少? (必須考慮地球和月球兩者的引力場。)  $-2.11 \times 10^6 \text{ J}$

- (b) 如果物體稍稍向月球移動, 它的重力勢能會怎樣改變? 解釋你的答案。增加 (較接近零)

*$U = -\frac{GM_E}{r} + -\frac{GM_M}{r} = -6.67 \times 10^{-11} (5.97 \times 10^{24} + 7.35 \times 10^{22}) / 1.91 \times 10^8$*

- ★ 11 (a) 應用  $U = -\frac{GMm}{r}$ , 求一個 50 kg 的人在下列位置的重力勢能:  $U = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \times 50}{6.37 \times 10^6}$

- (i) 地球表面:  $-3.125 58 \times 10^9 \text{ J}$

- (ii) 距離地球表面 100 m 高的位置。  $-3.125 53 \times 10^9 \text{ J}$

答案須準確至 6 位有效數字。

- (b) 應用  $U = mgh$ , 求那人從地球表面移動到 100 m 高的位置時, 重力勢能的變化。  $49 100 \text{ J}$

- (c) 比較 (a)(i) 與 (a)(ii) 之差, 以及 (b) 的結果, 會得出甚麼結論?

- ★ 12 行星沿圓周軌道圍繞恆星運行。如果軌道半徑增加, 下列各描述行星的物理量會怎樣轉變?

- (a) 速率 減少  
(b) 週期 增加  
(c) 重力勢能 增加 (較接近零)  
(d) 動能 減少  
(e) 總能量 增加 (較接近零)

- ★ 13 一艘太空船沿半徑為 6723 km 的圓周軌道圍繞地球運行。

- (a) 計算太空船的軌道週期。  $1.52$  小時  
(b) 太空船是否處於表觀無重狀態? 為甚麼? 是  
(c) 計算太空船每單位質量的機械能。  $-2.96 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$   
(d) 如果要把太空船送往無窮遠處, 太空船每單位質量額外需要多少能量?  $2.96 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$   
(e) 太空船的速率要增加百分之幾, 才能從目前的軌道逃離地球?  $41.4\%$

*(b)  $E_{\text{total}} = -\frac{GMm}{2r} = -\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{2 \times 6723000} = -2.96 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$*

總結 3

詞彙

- 1 失重 / 無重狀態 weightlessness p.62      2 逃逸速度 escape velocity p.72

課文摘要

3.1 認識軌道運動

- 1 引力可以維持行星沿軌道圍繞太陽運行。
- 2 如果天體 A 沿半徑為  $r$  的圓周軌道圍繞天體 B 運行, 則 A 的運行速率是  
$$v = \sqrt{\frac{GM_B}{r}}$$
其中  $M_B$  是 B 的質量。以上公式假設 B 的質量遠大於 A。
- 3 只要物體圍繞一個質量比它大得多的天體運行, 便可以應用三條開普勒行星運動定律。
- 4 根據開普勒第三定律, 如果軌道是圓形, 可得  $T^2 \propto r^3$ 。這結果可從牛頓萬有引力定律推導出來。
- 5 應用於橢圓軌道的開普勒第三定律:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$$

因此,  $T^2 \propto a^3$ 。

- 6 與所有物體相距無窮遠時, 便處於真正的無重狀態。
- 7 當物體進行自由下落運動或軌道運動 (包括圓周和橢圓軌道), 會處於表觀的無重狀態。這些情況發生時, 加速度都可寫成  $a = \frac{GM}{r^2}$ , 大小與  $m$  無關。

3.2 軌道運動中的能量守恆

- 8 重力勢能  $U$  是外力把物體以恆速率從無窮遠處移動至  $r$  時, 因克服引力所作的功。

$$U = -\frac{GMm}{r}$$

- 9 機械能守恆:

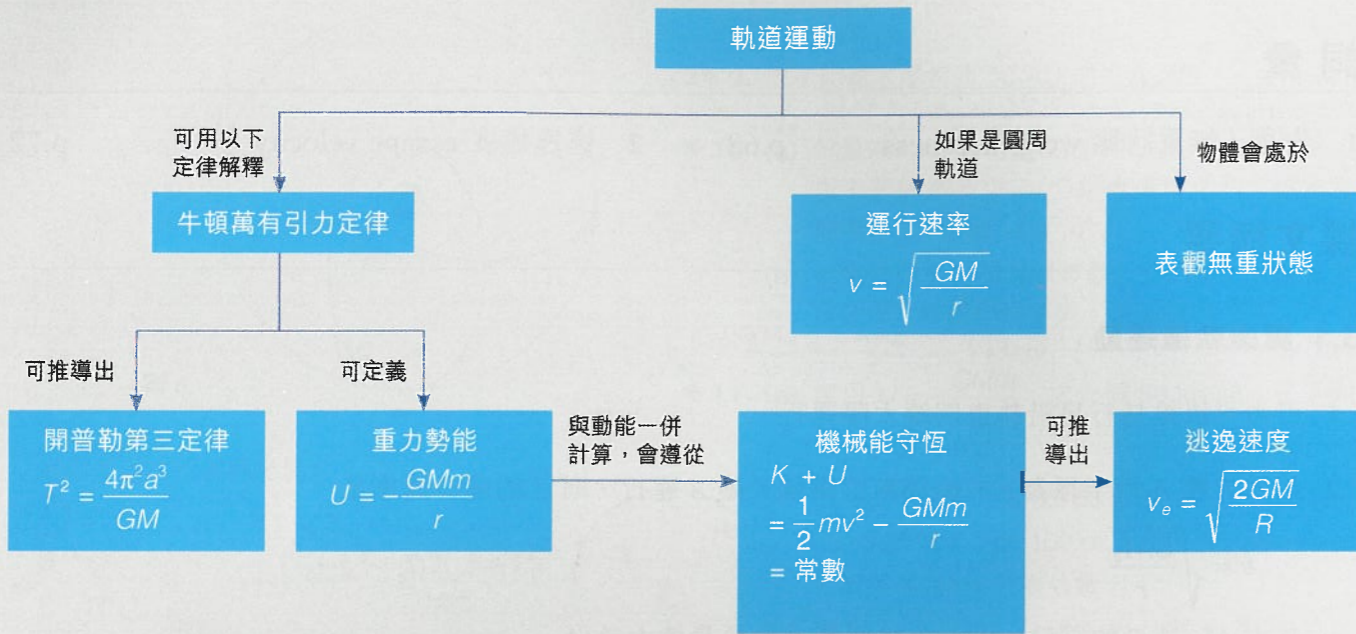
$$K + U = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{GMm}{r} = \text{常數} = -\frac{GMm}{2r}$$

- 10 天體表面的逃逸速度:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



概念圖



複習 3

除特別指明外，利用下列數據回答問題。

	太陽	地球	月球
質量	$1.99 \times 10^{30}$ kg	$5.97 \times 10^{24}$ kg	$7.35 \times 10^{22}$ kg
半徑	$6.96 \times 10^8$ m	$6.37 \times 10^6$ m	$1.74 \times 10^6$ m
距離	—	$1.50 \times 10^{11}$ m (和太陽的距離)	$3.82 \times 10^8$ m (和地球的距離)

萬有引力常數  $G = 6.67 \times 10^{-11}$  N m<sup>2</sup> kg<sup>-2</sup>

- Q1 質量較大衛星所受的向心力的確較大，但運行速率取決於衛星所環繞物體的質量（即地球的質量），與衛星的質量並無關係。
- Q2 題目中的公式只可用來計算圓周軌道上的運行速率。

概念重溫

(第 1 至 2 題) 判斷以下各項敘述是正確的，還是錯誤的。

☆ BOSTES HSC 2010 Q24

- 3.11 如果軌道半徑不變，衛星的質量愈大，所受的向心力亦愈大，因此運行速率就愈高。 **F**
- 3.12 如果物體圍繞一個高質量天體沿橢圓軌道運行，而軌道半長軸是  $r$ ，則該物體的運行速率  $v$  可從公式  $\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$  計算，其中  $M$  和  $m$  分別是高質量天體和物體的質量。 **F**

多項選擇題

3.13 同步衛星是指能在地球上空同一位置停留（從地面觀察）的衛星。兩顆同步衛星沿圓周軌道圍繞地球運行，它們的哪些物理量相等？

- (1) 週期  
(2) 軌道半徑  
(3) 質量
- A 只有 (1)                      B 只有 (3)  
**C** 只有 (1) 和 (2)              D (1)、(2) 和 (3)

$$F = \frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

$$\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}mv_e^2 \quad \frac{GMm}{3r} = \frac{1}{2}mv^2$$

3.2 ★ 4 在半徑為  $R$  的行星表面的逃逸速度是  $v_e$ ，那麼，在行星表面  $3R$  高的位置，逃逸速度是

- A  $\frac{1}{4}v_e$                       B  $\frac{1}{3}v_e$   
**C**  $\frac{1}{2}v_e$                       D  $\frac{1}{\sqrt{3}}v_e$



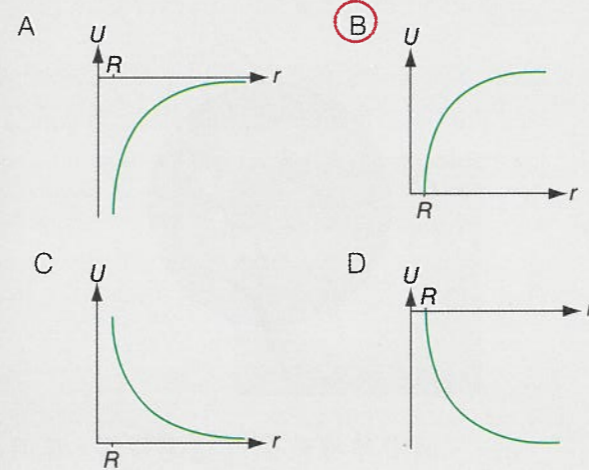
3.1 ★ 5 一個使用已久的通訊衛星會由新的衛星取代。新衛星的質量是舊的一半，兩者的週期相同。如果舊衛星的軌道半徑是  $r$ ，則新衛星的軌道半徑是多少？

- A  $\frac{r}{2}$                       **B**  $r$   
 C  $\sqrt{2}r$                       D  $2r$

綜合題 6 在一項太空任務中，圍繞行星運行的衛星從原來的圓周軌道轉移到一個半徑較小的圓周軌道。衛星的哪一個量會減少？

- A 運行速率  
 B 衛星所受引力的量值  
**C** 重力勢能  
 D 逃離行星的逃逸速度

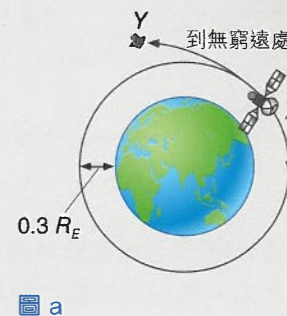
3.2 ★ 7 太空船 X 和行星相距  $r$ ，行星的半徑是  $R$ 。如果取在行星表面的重力勢能為零，則下列哪一幅圖最能表示 X 的重力勢能  $U$  怎樣隨  $r$  轉變？



3.2 ★ 8 設物體在地球表面的重力加速度是  $g$ ，地球的半徑是  $R_E$ 。質量為  $m$  的球體在離地球表面  $R_E$  高的位置發射。如果球體可以逃離地球的引力場，它的發射速率最小是多少？

- A  $\sqrt{mgR_E}$                       B  $mgR_E$   
 C  $\sqrt{\frac{1}{2}mgR_E}$                       **D**  $\sqrt{gR_E}$

★★ 9 開始時，靜止的衛星在地球表面  $0.3R_E$  高的位置，分裂為兩部分（圖 a）：X 部分沿圓周軌道圍繞地球運行，Y 部分剛好能逃離地球至無窮遠處。如果 X 部分的質量是  $m$ ，Y 部分的質量是多少？



- A  $\sqrt{\frac{3}{10}}m$                       B  $\frac{3}{10}m$   
**C**  $\frac{1}{\sqrt{2}}m$                       D  $\frac{1}{2}m$

▶ 參看 p.57, 72

★★ 10 下列有關重力勢能的敘述，哪項是正確的？

- 3.2 (1) 如果改變參考點，取另一點的重力勢能為零，則地球的逃逸速度也會改變。  
 (2) 公式  $U = -\frac{GMm}{r}$  可用來計算物體接近地球表面時重力勢能的改變。  
 (3) 物體遠離地球時，它的重力勢能比接近地球時小。
- A** 只有 (2)  
 B 只有 (1) 和 (2)  
 C 只有 (1) 和 (3)  
 D (1)、(2) 和 (3)

▶ 參看 p.67-68

3.2.11 香港高級程度會考 2003 年卷二 Q12

質量為  $m$  的衛星從地球表面發射，並進入離地面高度為  $3R$  的軌道， $R$  為地球半徑。在這過程中衛星的重力勢能增加了多少？

- A  $\frac{mgR}{3}$   
 B  $\frac{mgR}{4}$   
 C  $\frac{2mgR}{3}$   
**D**  $\frac{3mgR}{4}$  (42%)



3.212 香港高級程度會考 2010 年卷二 Q11

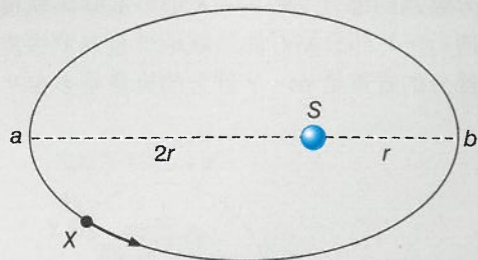


圖 b

彗星 X 繞着太陽 S 沿橢圓軌道運行，在最接近太陽的 b 點其速率等於在距離太陽最遠的 a 點的兩倍。a 點距離太陽 2r 而 b 點與太陽的距離為 r。若彗星在 a 點的動能和勢能分別為 K 和 U，求 K 和 U 的關係。(設在無窮遠處的重力勢能為零。)

- A  $U = -K$
- B  $U = -2K$
- C  $U = -3K$  (30%)**
- D  $U = -4K$

3.213 香港中學文憑考試練習卷 2012 年卷二 Q1.4

若月球表面的重力加速度為地球表面的  $\frac{1}{6}$ ，一件質量為 m 離月球表面 1 m 的物體相對月球表面的引力勢能是多少？

已知： $R =$  月球半徑 ( $\gg 1$  m)

$M =$  月球質量

$G =$  萬有引力常數

$g =$  重力加速度 (接近地球)

- A  $\frac{mg}{6}$
- B  $\frac{mg}{6}$**
- C  $\frac{GMm}{R}$
- D  $\frac{GMm}{R}$

3.114 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.1

無重狀態在沿軌道環繞地球運動的太空船內發生。下列哪一項敘述是正確的？

- A 無重狀態只會發生於沿軌道環繞地球運動的太空船內物體。
- B 在太空船的軌道上地球的萬有引力十分微弱，重力實際上近乎零。
- C 地球的萬有引力跟月球的萬有引力抵銷。
- D 太空船及船內物體皆朝向地球自由落下。 (31%)**

問答題

15 阿波羅登月計劃中，阿波羅 11 號的登月艙登陸月球表面。登月艙的質量是 16 000 kg。設登月艙於月球表面時，地球引力場的影響可略去不計。

- (a) 登月艙從地球航行至月球表面時，它的重量變化是多少？  **$-131\ 000\ \text{N}$**  (3 分)
- (b) 登月艙從地球航行至月球表面時，它的重力勢能變化是多少？  **$9.55 \times 10^{11}\ \text{J}$**  (3 分)

16 表 a 列出圍繞行星 P 運行的三個衛星的資料。

衛星	半長軸 $a / \times 10^6\ \text{m}$	軌道週期 $T / \text{h}$
X	7.0	1.6
Y	7.2	1.7
Z	7.4	1.8

表 a

- (a) 繪畫適當的線圖，證明上述衛星的運動符合開普勒第三定律。 (4 分)
  - (b) 估算 P 的質量。  **$5.87 \times 10^{24}\ \text{kg}$**  (3 分)
- 17 沿越極軌道移動的衛星，每運行一圈，都會經過地球兩極上空或兩極附近的上空 (圖 c)。

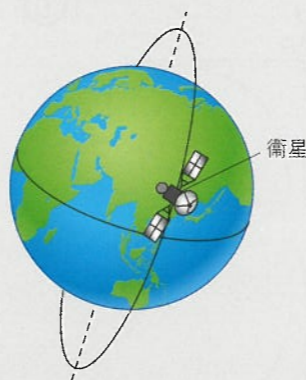


圖 c

- (i) 一個沿越極軌道運行的衛星，週期是 150 分鐘。試計算它與地球表面的距離。  **$2.98 \times 10^6\ \text{m}$**  (3 分)
- (ii) 試舉出衛星沿越極軌道運行的一個好處，並指出這種衛星的一個用途。 (2 分)

(b) 同步衛星是指能在地球上空同一位置停留 (從地面觀察) 的衛星。

- (i) 輔以圖示，解釋為甚麼同步衛星總是位於赤道的正上方。 (3 分)
- (ii) 同步衛星 S 總是位於  $0^\circ\ \text{N}$ 、 $0^\circ\ \text{E}$  的上空 (圖 d)。P 是地球的中心，Q 是可與衛星直接通訊的最高緯度。求角 L 的大小。  **$81.3^\circ$**  (2 分)

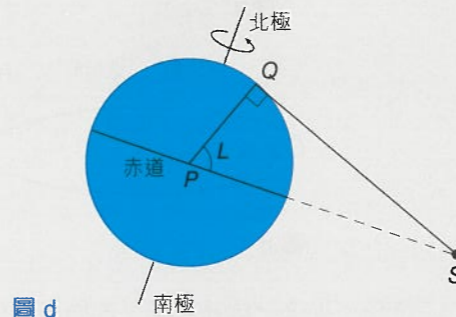


圖 d

18 質量為 9600 kg 的衛星沿圓周軌道圍繞行星運行，與行星的中心相距  $2.74 \times 10^7\ \text{m}$ 。衛星的週期是 218 地球日。試計算：

- (a) 衛星的速率；  **$9.14\ \text{m s}^{-1}$**  (2 分)
- (b) 衛星的加速度；  **$3.05 \times 10^{-6}\ \text{m s}^{-2}$**  (2 分)
- (c) 衛星和行星之間的引力；  **$2.93 \times 10^{-2}\ \text{N}$**  (2 分)
- (d) 行星的質量；  **$3.43 \times 10^{19}\ \text{kg}$**  (2 分)
- (e) 衛星在軌道中的真實重量和表觀重量。  **$2.93 \times 10^{-2}\ \text{N}$ 、0** (2 分)

19 歐羅巴 (圖 e) 是木星的衛星，半徑是 1569 km，在它表面自由下落的加速度是  $1.31\ \text{m s}^{-2}$ 。



圖 e

- (a) 試計算歐羅巴表面的逃逸速度。  **$2030\ \text{m s}^{-1}$  (或  $2.03\ \text{km s}^{-1}$ )** (3 分)
- (b) 試估計歐羅巴的質量。  **$4.83 \times 10^{22}\ \text{kg}$**  (2 分)
- (c) 一個物體在歐羅巴表面沿垂直方向向上拋出，初速率相等於逃逸速度的一半。該物體可到達的最高位置與歐羅巴表面相距多遠？  **$5.23 \times 10^5\ \text{m}$**  (3 分)
- (d) 實際上，要從歐羅巴表面逃離太陽系所需的速率比 (a) 部的答案為高。試解釋原因。 (2 分)

20 質量為 180 kg 的衛星沿圓周軌道圍繞行星運行，衛星的速率 v 為  $8700\ \text{m s}^{-1}$ ，軌道半徑 R 為 7300 km。衛星被推進至較高的軌道，該軌道的半徑為 7600 km。

- (a) 求衛星在新軌道中的速率。  **$8530\ \text{m s}^{-1}$**  (2 分)
- (b) 求衛星下列各個量的轉變：
  - (i) 動能；  **$-2.69 \times 10^8\ \text{J}$**  (2 分)
  - (ii) 重力勢能；  **$5.38 \times 10^8\ \text{J}$**  (2 分)
  - (iii) 總能量。  **$2.69 \times 10^8\ \text{J}$**  (2 分)
- (c) 要從新的軌道逃離地球的引力，速率最少要增加百分之幾？ **41.4%** (2 分)

21 質量 80 kg 的太空人以恆速度在太空移動，身上沒有推進器，並遠離其他天體。他處於哪種無重狀態？解釋你的答案。 **真正無重狀態** (2 分)

(b) 在上述情況下，一個質量為 0.1 kg 的小球沿圓周軌道圍繞太空人運行，軌道半徑為 5 m。計算小球的 (i) 速率、(ii) 角速率、(iii) 週期。假設太空人和小球的大小可以略去不計。

- (i)  **$3.27 \times 10^{-5}\ \text{m s}^{-1}$**  (ii)  **$6.53 \times 10^{-6}\ \text{rad s}^{-1}$**  (iii) **11.1 日** (6 分)
- (c) 計算小球要逃離太空人所需的逃逸速度。  **$4.62 \times 10^{-5}\ \text{m s}^{-1}$**  (2 分)

22 重力勢能 U 可以寫成  $-\frac{GMm}{r}$ 。

- (i) U 在無窮遠處的值是多少？ **零** (1 分)
- (ii) 解釋為甚麼 U 的值為負值。 (2 分)
- (b) 質量為 m 的物體初時在無窮遠處。後來，外力把物體以恆速率移至距離地球 r 的位置。
  - (i) 地球對物體所作的功是正數還是負數？試簡單解釋。 **正數** (2 分)
  - (ii) 外力對物體所作的功是正數還是負數？試簡單解釋。 **負數** (2 分)
  - (iii) 地球和物體這個系統的總能量增加了、減少了，還是沒有變化？為甚麼？ **減少了** (2 分)
  - (iv) 過程中外力所作的功，和 (a) 部提及的表達式有甚麼關係？ **相等** (1 分)

參看 p.66-67



★★ 23 綜合題 太陽系共有八顆行星圍繞太陽運行(圖 f)。

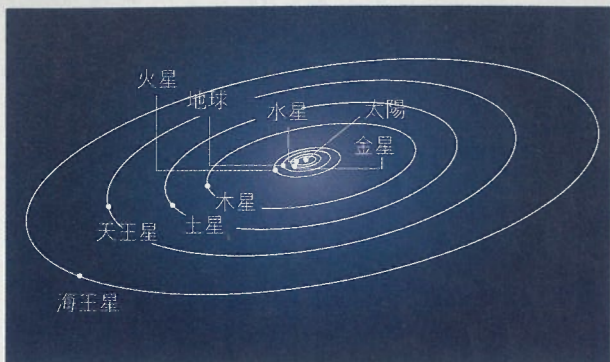


圖 f

- (a) 軌道的半長軸  $a$  與軌道週期  $T$  有甚麼關係?  
 $T^2$  (以地球年為單位) =  $a^3$  (以 AU 為單位) (1 分)
- (b) 哪顆行星的軌道週期最長? 海王星 (1 分)
- (c) 土星的軌道週期大約是 30 年。試估算土星軌道的半長軸, 答案以 AU 表示。9.65 AU (2 分)
- (d) 國際太空站 (ISS) 於地面以上 402 km 的高度, 沿近乎圓形的軌道圍繞地球運行。太空站的質量約為 450 000 kg。
- (i) 計算 ISS 和質量為 70 kg 的太空人之間的吸力。假設太空人位於距離太空站 100 米的位置, 兩者的大小都可略去不計。  
 $2.10 \times 10^{-7} \text{ N}$  (2 分)
- (ii) 計算地球和該太空人之間的吸力。太空人的表觀重量是多少? 608 N · 零 (2 分)
- (iii) 我們可以設想地球是一個圍繞太陽運行的巨型「太空站」。不過, 身處地球表面, 我們卻感受不到失重。為甚麼會這樣?  
 (2 分)

▶ 參看 p.62-63

★★ 24 綜合題 物體在遠離地面的位置墜下, 過程中加速度會持續改變。這道題目說明了怎樣計算自由下落的時間。考慮圍繞地球運行的軌道運動。設地球的質量是  $M$ 。

- (a) 就圍繞地球運行的軌道, 寫出開普勒第一定律。 (1 分)
- (b) 若軌道是圓形的, 地球便在軌道的中心(圖 g); 若軌道變為橢圓形, 地球便不再在中心, 而會靠向近地點(與地球最近的一點), 並遠離遠地點(距離地球最遙遠的一點)(圖 h)。

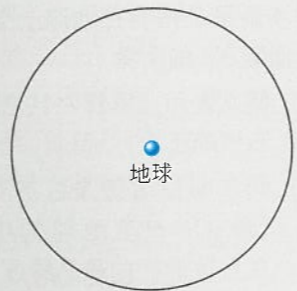


圖 g

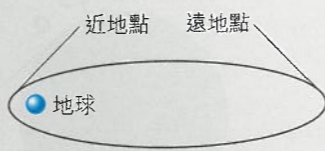


圖 h

現在, 考慮一個非常扁平的橢圓軌道, 形狀就如圖 i 所示。這個橢圓軌道扁平得可以視為一條直線。

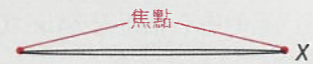


圖 i

- (i) 在圖 i 標示各焦點的位置。 (1 分)
- 圖 i 的軌道上有一個質量為  $m$  的物體。在  $t = 0$ , 物體在遠地點 X。設  $H$  為地球和物體之間在那一刻的距離。物體和地球的大小可略去不計。
- (ii) 橢圓的半長軸是多少?  $\frac{H}{2}$  (1 分)
- (iii) 根據以上結果, 以  $H$  寫出物體週期的表達式。 $\frac{\pi^2 H^3}{2GM}$  (2 分)
- 由於軌道可以視為一條直線, 物體看似直接墜向地球。
- (iv) 推導物體到達地球所需時間的表達式。 $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi^2 H^3}{2GM}}$  (2 分)
- (v) 我們可以運用以下方程來求得與 (iv) 部相同結果嗎? 為甚麼? 不可以

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

(2 分)

▶ 參看 p.60

★★ 25 綜合題 (a) (i) 試證明一個質量為  $m$  的物體, 沿圓周軌道圍繞質量非常大的行星  $M$  運行時, 物體的速率是:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

其中  $r$  是軌道半徑。 (2 分)

(ii) 證明物體的總機械能是:

$$E = -\frac{GMm}{2r}$$

(3 分)

(b) (i) 細小物體在橢圓軌道上的總機械能, 可根據以上結果寫成:

$$E = -\frac{GMm}{2a}$$

(1 分)

其中  $a$  是橢圓軌道的半長軸。假設一個質量細小的物體沿橢圓軌道圍繞質量非常大的物體運行。試證明它們相距  $r$  時, 質量較小物體的速率是:

$$v = \sqrt{GM \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \dots (1)$$

(1 分)

(ii) 證明公式 (1) 應用於圓周軌道時, 這公式可簡化為 (a)(i) 的所得的公式。 (1 分)

(c) 圖 j 展示一個半長軸為  $a$  的橢圓軌道和一個半徑為  $r$  的圓周軌道, 其中  $a = 2r$ 。試利用以上結果, 比較兩者的週期和在 P 點的運行速率。

橢圓軌道 > 圓周軌道 (2 分)

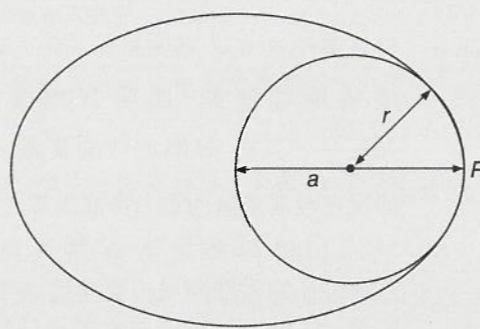


圖 j

▶ 參看 p.69

☆ Physics B Unit G494

26 綜合題 OCR GCE Jun 2010 Q13

這道題目關於哈雷彗星的運動。

圖 k 中, 哈雷彗星沿非常扁平的橢圓軌道圍繞太陽運行, 週期為 76 年。

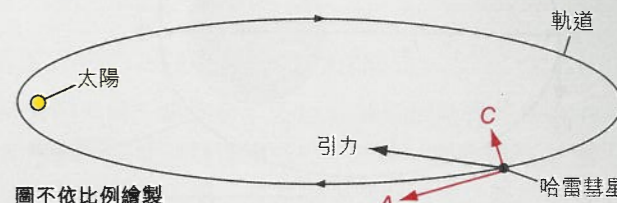


圖 k

- (a) 圖 k 顯示了作用在彗星的引力方向。
- (i) 在圖 k 畫上箭號, 以顯示改變彗星速率的引力分量, 並標示為 A。 (1 分)
- (ii) 在圖 k 畫上箭號, 以顯示改變彗星方向的引力分量, 並標示為 C。 (1 分)
- (b) 在彗星最接近太陽的時候, 它的速率是  $54.6 \text{ km s}^{-1}$ 。
- (i) 證明每單位質量的動能約為  $1.5 \text{ GJ kg}^{-1}$ 。 (2 分)
- (ii) 太陽和彗星最接近的時候, 彼此的距離為  $8.82 \times 10^{10} \text{ m}$ 。試證明每單位質量的總能量約為  $-20 \text{ MJ kg}^{-1}$ 。 (2 分)
- $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$   
 太陽的質量 =  $2.00 \times 10^{30} \text{ kg}$
- (iii) 當彗星與太陽相距最遠的時候, 彼此的距離為  $5.3 \times 10^{12} \text{ m}$ 。試計算彗星在這距離的速率。  $3.2 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$  (3 分)

☆ Specification B Unit 4, 略去 (c) 部

3.27 AQA GCE Jan 2010 Q2

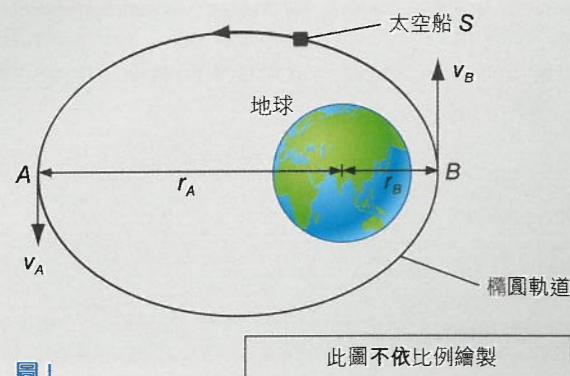
- (a) 某穿梭機的質量約為  $2.0 \times 10^6 \text{ kg}$ 。
- (i) 證明當穿梭機在地球表面時, 它的重力勢能約為  $-1.3 \times 10^{14} \text{ J}$ 。 (2 分)
- 地球的質量 =  $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$   
 地球的半徑 =  $6.37 \times 10^6 \text{ m}$
- (ii) 解釋為甚麼重力勢能是負數。 (3 分)
- (b) 穿梭機升空後進入軌道, 軌道與地面的距離固定為  $3.5 \times 10^5 \text{ m}$ 。
- (i) 計算穿梭機新的重力勢能。  $-1.19 \times 10^{14} \text{ J}$  (2 分)
- (ii) 試解釋 (a)(i) 部和 (b)(i) 部所得數值的差異。 (2 分)



3 重力下的軌道運動

□ 考試報告見第85頁。

28 香港高級程度會考 2012 年卷一乙部 Q8  
綜合題



此圖不依比例繪製

(a) 圖 1 顯示一艘太空船 S 只受地球引力作用下沿橢圓軌道繞地球運動。太空船在關閉了火箭的狀態下作無動力飛行。

(i) 太空船繞地球的運動遵守開普勒第二定律。依據該定律描述太空船的運動。

(2 分)

(ii) A 和 B 分別為太空船 S 在軌道上離地球中心最遠及最近的位置。設  $v_A$ 、 $v_B$  為太空船分別在 A 和 B 的軌道速率， $r_A$ 、 $r_B$  為 A 和 B 分別距地球中心的距離。從開普勒第二定律證明  $v_A : v_B = r_B : r_A$ 。

(2 分)

(b) 太空船在 A 點和 B 點離地球表面的高度分別為 1600 km 及 800 km。

已知：地球半徑  $R = 6400$  km

(i) 求比率  $v_A : v_B$ 。證明

$$v_B^2 - v_A^2 = 2gR^2 \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

其中  $g$  為地球表面的重力加速度。(4 分)

(ii) 根據 (b)(i) 的結果計算  $v_A$ 。

9.96 km s<sup>-1</sup> (3 分)

(c) 太空船稍後須將其軌道由橢圓轉移為圓形，並於距地球表面 1600 km 的高度飛行。求太空船於該圓形軌道的速率，並建議使太空船達成這轉移最簡單的做法，並附解釋。

(3 分)

□ 考試報告見第88頁。

7.16 km s<sup>-1</sup>

29 香港中學文憑考試 2013 年卷二 Q.1  
綜合題

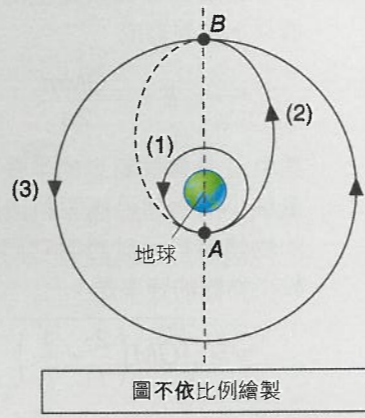
已知： $GM = 4.0 \times 10^{14} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ，其中  $G$  為萬有引力常數， $M$  為地球質量。

地球的平均半徑 = 6400 km

地球靜止軌道的半徑約為 42 400 km，即位於地球表面之上 36 000 km。

以下描述把一個人造衛星發射到地球靜止軌道的一個方法：

- 用運載火箭把人造衛星發射到距地球表面 300 km 的圓形近地軌道 (1)。
- 於 A 點，人造衛星的引擎啟動一段短時間，使衛星推進入橢圓形轉移軌道 (2)，而 AB 為橢圓的長軸。
- 於 B 點，人造衛星的引擎再次啟動片刻，使衛星推進入地球靜止軌道 (3)。



圖不依比例繪製

圖 m

假設三組軌道處共面，而橢圓軌道分別於 A 和 B 點跟兩個圓形軌道相切。當人造衛星在轉移軌道上由 A 至 B 運動期間，引擎是關上的。

(a) 通訊衛星一般會被發射到地球靜止軌道，指出並解釋這個安排的好處。(2 分)

(b) 求人造衛星在近地軌道 (1) 上的速率。(2 分)

7727 m s<sup>-1</sup>

(c) (i) 就質量為  $m$  的人造衛星在半徑  $r$  的圓形軌道繞地球運動，證明其總機械能為  $-\frac{GMm}{2r}$ ，其中  $M$  為地球的質量。設人造衛星在無窮遠處的重力勢能為零。(2 分)

(ii) 利用 (c)(i) 的結果計算將質量為  $m = 2000$  kg 的人造衛星，從通過 A 點的近地軌道 (1) 轉移至通過 B 點的地球靜止軌道 (3) 所需的能量。 $5.03 \times 10^{10} \text{ J}$  (2 分)

(iii) 人造衛星沿轉移軌道 (2) 由 A 至 B 運動需時多久？ $19\ 107 \text{ s}$  (5.3 小時) (2 分)

物理文章分析

★★ 30 閱讀以下一段有關霍曼轉移軌道的文章，然後回答隨後的問題。  
綜合題

霍曼轉移軌道

天文學中，橢圓軌道格外重要，它不僅是行星的運行軌道，也可以是軌道之間的轉移路徑。

考慮簡單的軌道轉移。假設太空船要從一個半徑為  $r$  的圓周軌道，轉移至半徑為  $R$  的圓周軌道，其中  $R$  比  $r$  大，而且兩個軌道都以地球 ( $E$ ) 為中心，就如圖 n 所示。完成這軌道轉移的方法是：太空船在 X 點短暫開動推進器加速，以進入一個圍繞地球的橢圓軌道，並運行至 Y 點，那裏就是橢圓軌道距離地球最遠的位置。在該處，太空船再度短暫開動推進器加速，便可進入預定的軌道。軌道轉移期間所行經的橢圓軌道 XY 就稱為霍曼轉移軌道。

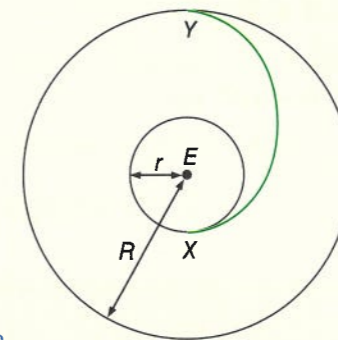


圖 n

這種軌道轉移也可以逆向發生：首先在 Y 點開動推進器一段短時間，讓太空船減速並進入霍曼轉移軌道。到達 X 點時，再次開動推進器一段短時間來減速，便可返回原先半徑較小的圓周軌道。

試把霍曼轉移軌道看成是普通的軌道。

取  $r = 1 \times 10^7 \text{ m}$ ， $R = 2 \times 10^7 \text{ m}$ ，地球的質量 =  $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，太空船的質量 = 5000 kg。

(a) 寫出霍曼轉移軌道與地球最近和最遠的距離。 $1 \times 10^7 \text{ m}$ 、 $2 \times 10^7 \text{ m}$  (2 分)

(b) 根據以上結果，求霍曼轉移軌道的半長軸。 $1.5 \times 10^7 \text{ m}$  (1 分)

(c) 計算太空船沿霍曼轉移軌道從 X 點移至 Y 點所需的時間。 $9150 \text{ s}$  (或 2.54 小時) (3 分)

(d) 計算軌道轉移中總機械能的變化。 $4.98 \times 10^{10} \text{ J}$  (2 分)

(e) 根據以上結果，求整個轉移過程中推進器的平均功率。假設推進器開動的時距可略去不計。 $5.44 \text{ MW}$  (2 分)

□ Q28 考試報告：表現尚可。較少考生能在 (a)(i) 描述太空船的運動。雖然不少考生在 (a)(ii) 知道須考慮太空船所掃描的面積，但能提供相關數學方程者則極為罕見。考生在 (b)(i) 知道怎樣找出  $v_A : v_B$  的比例，亦能應用能量守恆來證明方程  $v_B^2 - v_A^2 = 2gR^2 \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$ 。少數考生在 (b)(ii) 的運算中出錯。大部分考生在 (c) 能找到太空船在圓周運動中的速率，但極少能提出軌道轉移的方法，有些只寫出模糊的答案如「啟動火箭引擎一段時間」。



# 自我評核 3

時間：30分鐘 總分：15分

## 答題須知

- 全部題目均須作答。
- 甲部為多項選擇題，乙部為問答題。
- 答案須寫在預留的空位內。
- 附錄提供常用的數據、公式和關係式以供參考。

## 甲部

3.11 設  $M$  為太陽的質量。以 AU 為長度的單位，年 (yr) 為時間的單位，求  $GM$  的值。

已知太陽和地球的質量分別為  $2.0 \times 10^{30}$  kg 和  $5.97 \times 10^{24}$  kg。

- A  $1.3 \times 10^{20} \text{ AU}^3 \text{ yr}^{-2}$
- B  $4.0 \times 10^{14} \text{ AU}^3 \text{ yr}^{-2}$
- C  $2\pi \text{ AU}^3 \text{ yr}^{-2}$
- D  $4\pi^2 \text{ AU}^3 \text{ yr}^{-2}$

**D**

3.12 下列有關太空人表觀失重的敘述，哪項是正確的？

- 作用於太空人的法向反作用力是零。
- 引力與向心力互相抵銷。
- 太空人必定在圓周軌道上。

- A 只有 (1)
- B 只有 (2)
- C 只有 (1) 和 (2)
- D 只有 (2) 和 (3)

3.23 地球沿略呈橢圓形的軌道圍繞太陽運行。 $P$  點和  $Q$  點分別表示軌道離太陽最遠和最近的位置；兩者與太陽的距離分別為 1.02 AU 和 0.98 AU (圖 a)。

試計算地球從  $P$  點移到  $Q$  點期間，太陽對地球所作的功。

太陽和地球的質量分別為  $2.0 \times 10^{30}$  kg 和  $5.97 \times 10^{24}$  kg。

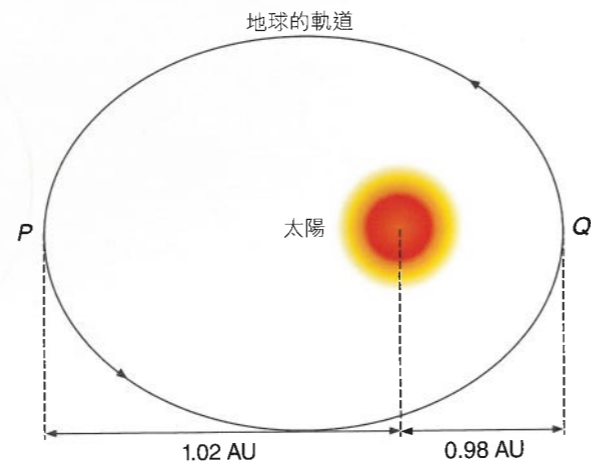


圖 a

- A 0
- B  $-1.98 \times 10^{32}$  J
- C  $2.12 \times 10^{32}$  J
- D  $3.26 \times 10^{33}$  J

**C**

4 一個沒有動力的衛星沿圓周軌道圍繞地球運行。如果考慮空氣阻力的影響，下列哪一項正確描述衛星的速率和重力勢能的變化？

**A** 綜合題

- | 速率   | 重力勢能 |
|------|------|
| A 增加 | 增加   |
| B 增加 | 減少   |
| C 減少 | 增加   |
| D 減少 | 減少   |

**B**

## 乙部

綜合題 5 質量為 2 kg 的物體  $X$  沿圓周軌道圍繞細小的行星  $Y$  運行， $Y$  的半徑是  $1.0 \times 10^6$  m。圖 b 顯示  $X$  的重力勢能  $U$  怎樣隨  $X$  與  $Y$  中心之間的距離改變。取在無窮遠處時， $U = 0$ 。

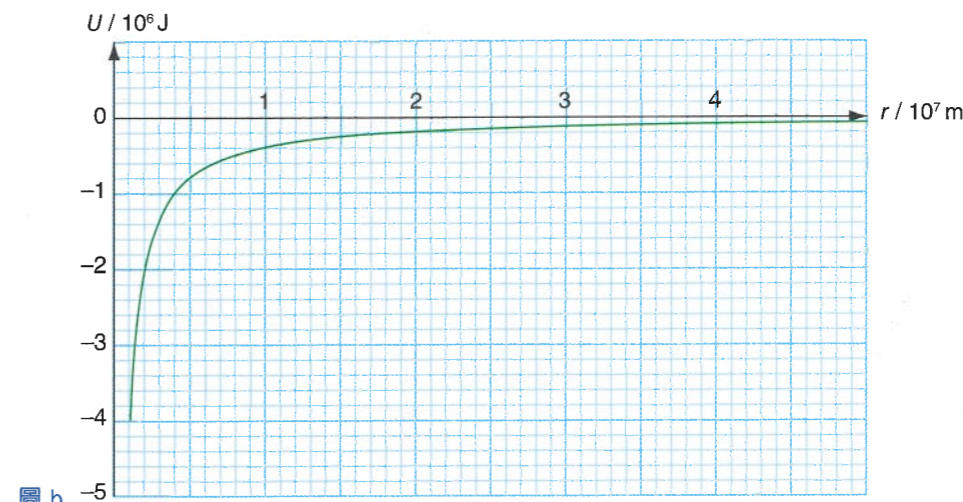


圖 b

(a) 寫出  $U$  的表達式。 $U$  在行星  $Y$  表面的值是多少？ (2分)

$$-\frac{GMm}{r}, -4.0 \times 10^6 \text{ J}$$

(b) 求行星  $Y$  的質量。 (2分)

$$3.00 \times 10^{22} \text{ kg}$$

(c) 圍繞  $Y$  運行的軌道速率最高可以是多少？ (3分)

$$1410 \text{ m s}^{-1}$$

(d) 根據以上結果，找出圍繞  $Y$  運行的最短軌道週期。 (2分)

$$4440 \text{ s}$$

(e) 計算  $Y$  表面的逃逸速度。 (2分)

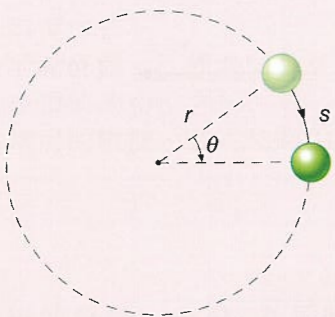
$$2000 \text{ m s}^{-1}$$



## 圓周運動和引力的概念

### 圓周運動

考慮一個作圓周運動的物體 (圖 a)。



■ a

角位移 =  $\frac{\text{經過的弧長度}}{\text{軌道的半徑}}$

$$\theta = \frac{s}{r}$$

角速度 =  $\frac{\text{角位移的改變}}{\text{所需時間}}$

$$\omega = \frac{\theta}{t}$$

週期 ( $T$ ) 是物體沿軌道圍繞一周所需的時間。

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{或} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

頻率 ( $f$ ) 是物體每秒所繞的周數。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

線速率：物體的線速率可以寫成

$$v = r\omega$$

向心加速度：物體向心加速度，量值可以寫成

$$a = v\omega = r\omega^2 = \frac{v^2}{r}$$

向心力：作用於物體的向心力，量值可以寫成

$$F = mv\omega = mr\omega^2 = \frac{mv^2}{r}$$

這個力總是指向軌道的中心。

### 牛頓萬有引力定律

根據這條定律，宇宙中任何兩個物體都會互相吸引，作用於兩者的引力  $F$  與兩者的質量 ( $m_1$  和  $m_2$ ) 成正比，並與兩者之間距離  $r$  的平方成反比，即：

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

其中  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ ，是萬有引力常數。

### 引力場強度

在行星上的引力場強度是

$$g = \frac{GM}{r^2} \quad (r \geq R)$$

其中  $M$  是行星的質量， $R$  是行星的半徑。

如果物件接近地球表面，則

$$\begin{aligned} g &= \frac{GM_E}{R_E^2} \\ &= \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{(6.37 \times 10^6)^2} \\ &= 9.81 \text{ N kg}^{-1} \end{aligned}$$

以上數值與重力加速度的數值相等。事實上， $g$  有兩個含義：

- 1 接近地球表面的自由落體，它的加速度是  $9.81 \text{ m s}^{-2}$ 。
- 2 接近地球表面，每  $\text{kg}$  質量所受的引力是  $9.81 \text{ N}$ 。

物體在高於地面位置所受的引力，較在地球表面所受的引力小。

□ Q29 考試報告：在 (a) 部，有些考生並不熟悉地球靜止軌道以及在軌道上通訊衛星的應用。考生在 (b) 部答得不錯，但常見的錯誤包括代入不正確的半徑，遺漏開方根或錯誤單位等。在 (c)(i) 部，能力較弱的考生不知道總機械能是動能與势能之和，亦有些不懂利用 (c)(i) 部的結果去解答 (c)(ii) 部，或錯誤寫出  $\Delta E = -\frac{GMm}{2} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$ 。個別考生遺漏了因子  $\frac{1}{2}$  或給出負值的  $\Delta E$ 。在 (c)(iii) 部，有為數不少的考生未能求得半長軸，亦有考生忘了轉移軌道 (2) 只需半個週期。



## 4 恆星和宇宙

我們在这一課會學到

- 視差法
- 恆星的強度、光度、視星等和絕對星等
- 恆星放射的能量、顏色和大小的關係
- 怎樣根據光的多普勒效應推斷天體的運動



### 起點 拍攝三維影像

這部照相機能夠拍攝三維影像(圖 a)。為甚麼它有兩組透鏡和底片呢? 具備兩組透鏡的照相系統怎樣估算物體的距離? 參看第 91 頁「生活中的物理」。



圖 a

✓ 本節重點

- 1 利用視差法量度恆星的距離
- 2 秒差距的另一意義

模擬程式 4.1  
錄影片段 4.1

→ 模擬程式 4.1 和錄像片段 4.1 展示從不同位置觀察物體所出現的視差。

### 1 視差法

知道恆星與我們的距離，就可深入了解恆星的特點。我們會應用視差來找出恆星的距離。

觀察物體時，如果觀察者的位置改變，物體的位置看似也隨之而變，這現象稱為視差。如圖 4.1a 所示，從不同位置觀察銅像時，銅像相對於背景的位置看似改變了。



圖 4.1a 銅像的視差。銅像相對於背景的位置看似改變了。

對於離地球不遠的恆星，我們可以利用視差法量度該恆星和地球的距離，方法是在兩個不同的位置，拍攝該恆星的照片(圖 4.1b，見 p.91)，然後比較該恆星和遙遠的背景恆星在照片中的相對位置。恆星愈接近我們，從兩幅照片中看到的位置變化愈大。

視差 parallax

恆星 X 的位置變化只是視覺上的轉變，我們假定恆星實際的移動幅度很少，無須考慮。

*base-line 基線*

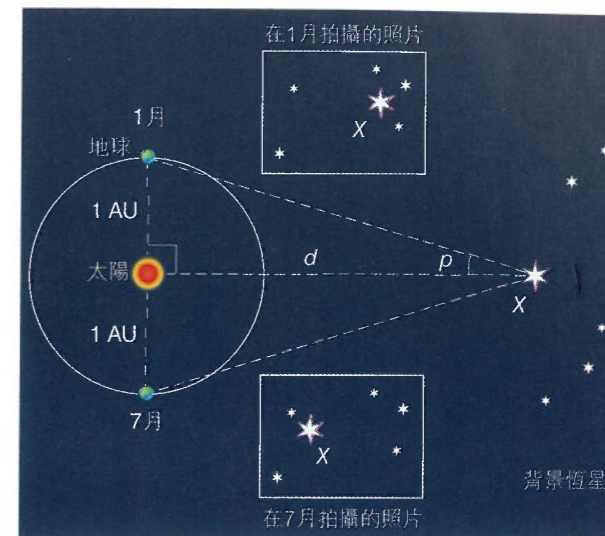


圖 4.1b 量度視差

兩幅照片的拍攝位置相距愈遠，視差的效果便愈大，測得的距離也就更準確。因此，提升量度準確度的最簡單方法，就是拍攝第一幅照片之後六個月，才拍攝第二幅照片。在這兩個時間，地球位置相距 2 AU。

考慮恆星在照片中的兩個位置。這兩個位置的角距離的一半稱為恆星視差 (p) (圖 4.1c)，通常以角秒 (") 為單位。

$$1'' = \left(\frac{1}{3600}\right)^\circ$$



圖 4.1c 恆星移動的角距離是恆星視差 p 的兩倍

毗鄰星是最接近太陽的恆星，視差只有 0.76"。其他恆星的視差則更小。由於遠方恆星的視差太小，因此它們的距離無法用視差法量度，我們會把它們當作固定的背景，幫助找出較近恆星的距離。

### 生活中的物理 距離感與三維電影

我們根據物體的視差來產生距離感。試試以下的簡單實驗：先以遠物作背景，把手指放在眼睛前方一段距離。閉上右眼，僅以左眼觀察手指，然後閉上左眼，僅以右眼觀察手指。在以上兩個情況中，手指看似位於不同的位置，而大腦會根據視差，詮釋兩個影像，產生距離感。

**起點**裏的照相機有兩組透鏡，彼此之間的距離與我們雙眼之間的距離相若。因此，照相機所記錄到的影像，便是我們親臨現場時，雙眼各自會接收到的影像。觀看「三維照片」或「三維電影」時要戴上特製的眼鏡，雙眼會接收到略有不同的影像，於是我們便能從二維影像產生距離感。



## 2 秒差距

在第 1 課，1 秒差距定義為 1 AU 長度形成 1" 的對角時所延伸的距離。這兩個定義是相同的。

秒差距 (pc) 這單位其實是基於視差法而定義的：與地球相距 1 秒差距的恆星，恆星視差就是 1 角秒。

圖 4.1d 中，恆星與地球之間的距離為  $d$ ，恆星視差為  $p''$ 。

$$\begin{aligned} 1 \text{ rad} &= \frac{180^\circ}{\pi} \\ &= \frac{180 \times 3600''}{\pi} \\ &= 206\,265'' \\ \therefore 1'' &= \frac{1}{206\,265} \text{ rad} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1 \text{ AU}}{d} &= \tan p'' \quad \text{tan } p \approx p \\ &= \tan \left( \frac{p}{206\,265} \text{ rad} \right) \\ &\approx \frac{p}{206\,265} \quad (\text{因為角度非常小}) \end{aligned}$$

### 技巧分析

#### 小角公式

角度很小時， $\tan \theta \approx \theta$

其中  $\theta$  的單位為 rad。  
例如： $\theta = 0.1 \text{ rad}$  時， $\tan \theta = 0.1003 \approx 0.1$ 。

「物理技巧手冊」載有教學筆記及練習。

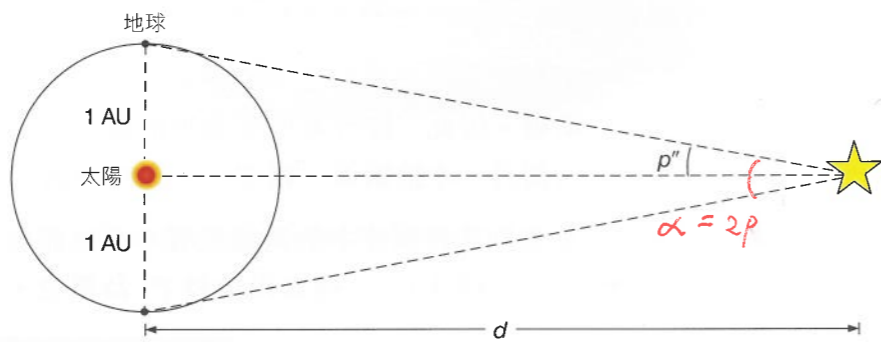


圖 4.1d  $d$  和  $p$  的關係

因此：

$$d = \frac{206\,265 \text{ AU}}{p} \quad \text{..... (1)}$$

根據定義， $p'' = 1''$  時， $d = 1 \text{ pc}$ 。代入 (1) 可得：

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU} \quad \text{..... (2)}$$

(1) ÷ (2) 可得：

$$\frac{d}{1 \text{ pc}} = \frac{1}{p} \quad \text{..... (3)}$$

如果  $p$  以角秒為單位， $d$  以秒差距為單位，(3) 可以簡化為：

$$d (\text{以秒差距為單位}) = \frac{1}{p (\text{以角秒為單位})}$$

量得恆星的視差後，就可以輕易用秒差距寫出恆星的距離。

我們曾以類似方法簡化公式：在第 2 課，我們選取合適的單位 (AU 和地球年)，簡化應用於太陽系的開普勒第三定律。

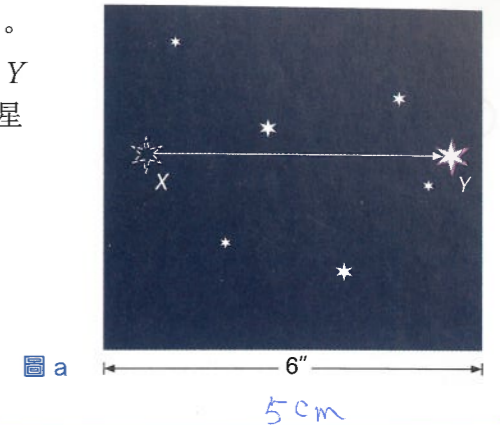
$$\begin{aligned} 1 \text{ AU} &= 1.50 \times 10^{11} \text{ m} \\ &= 1.59 \times 10^{-5} \text{ ly} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ pc} &= 3.26 \text{ ly} \\ &= 3.09 \times 10^{16} \text{ m} \end{aligned}$$

pc 並不是真實距離，是每 3.26 光年距離。

## 例題 1 利用視差求恆星的距離

學生分別於 5 月 21 日和 11 月 21 日拍攝同一部分的星空。在這段時間內，一顆鄰近恆星相對背景恆星由 X 點移動至 Y 點，這個位置上的變化是一年中最大的 (圖 a)。求這顆恆星與地球的距離。照片附有比例。



### 題解

恆星兩個位置的角距離  $\alpha$  大約是照片闊度的五分之四。

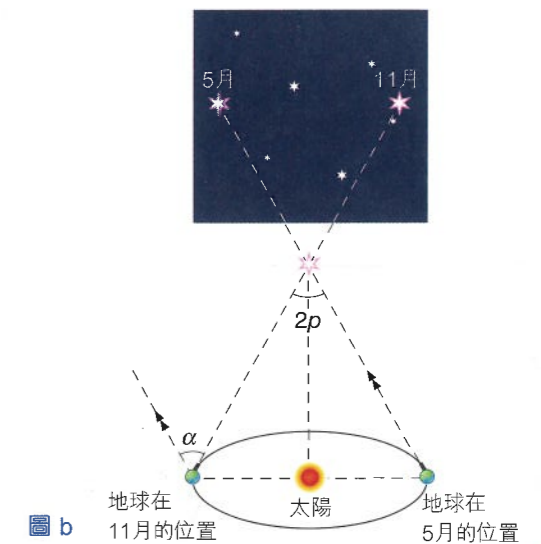
$$\therefore \alpha = 6'' \times \frac{4}{5} = 4.8''$$

圖 b 中， $\alpha = 2p$

$$\text{因此，} p = \frac{\alpha}{2} = 2.4''$$

$$\text{恆星與地球的距離} = \frac{1}{p} = \frac{1}{2.4} = 0.42 \text{ pc}$$

習題與思考 4.1 Q4 (p.94)



## 進度評估 1

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.90)。

21 某恆星的視差是  $0.2''$ ，求它與地球的距離。 [提示：距離 =  $\frac{1}{p} = ?$ ]  $5 \text{ pc}$   $\frac{1}{0.2} = 5 \text{ pc}$

22 某恆星與地球的距離是  $8.25 \times 10^6 \text{ AU}$ ，恆星的視差是多少？ [提示：視差 =  $\frac{1}{d} = ?$ ]  $0.0250''$

23 表 a 列出一些恆星的資料。試在空格內填上適當的數字。

恆星	視差 (")	距離	
		以 pc 為單位	以 AU 為單位
天狼星 A	0.379	2.64	$5.44 \times 10^5$
牛郎星	0.195	5.14	$1.06 \times 10^6$
織女星	0.125	8	$1.65 \times 10^6$

表 a

$$\begin{aligned} \frac{8.25 \times 10^6}{206\,265} &= 40 \text{ pc} \\ p &= \frac{1}{40} = 0.0250'' \end{aligned}$$

$$2.64 \times 206\,265$$

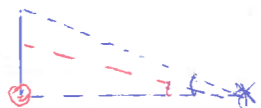


習題與思考 4.1

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.90)。

1 1 如果地球圍繞太陽運行的軌道縮小，恆星的視差會怎樣改變？

- (A) 變小
- B 保持不變
- C 變大
- D 無法確定，因為不知道恆星的距離。



2 2 從一顆與太陽相距約 1 pc 的恆星觀看，地球軌道的角大小是多少？

- A 1°
- B 2'
- C 1"
- (D) 2"

$2 p = 2 \times 1'' = 2''$

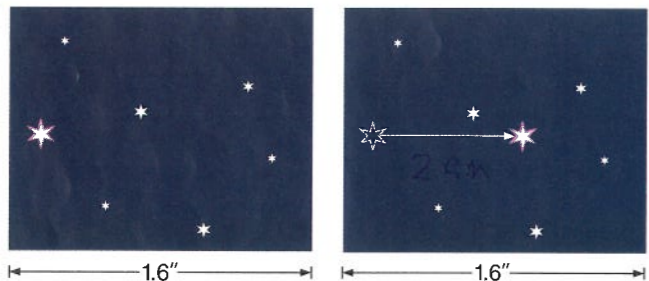
1,2 3 從地球觀看，恆星 X 和恆星 Y 的視差分別是 0.1" 和 0.05"。

- (a) 哪顆恆星較接近地球？ X
- (b) 兩顆恆星與地球的距離相差多少？ 10 pc

$d = \frac{1}{p}$

$20 pc - 10 pc$

2 4 以下兩幅照片是相隔六個月拍攝的 (圖 a)。在這段期間，恆星相對背景恆星的位置變化是一年中最大的。試找出恆星的距離。 2.5 pc



(i) 8月6日 (ii) 2月6日 半年後

圖 a

2 5 獵戶座大星雲的角直徑大約為 60'，視差角則為 0.002 42"。獵戶座大星雲與地球相距多遠？計算獵戶座大星雲的實際直徑。 413 pc 7.21 pc

$60' = \frac{60}{60} = 1^\circ, 1^\circ = \frac{\pi}{180} = 0.017^\circ$

$d = \frac{1}{0.00242} = 413 pc$

$S = r \theta = 413 \times 0.017 = 7.21 pc$

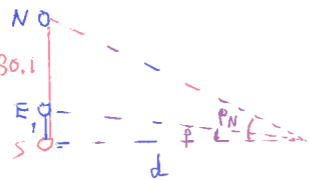
2 6 從地球量度，恆星角宿一的視差是 0.012"。

- (a) 該恆星與地球相距多遠？ 83.3 pc
- (b) 如果從海王星量度，角宿一的視差是多少？海王星軌道的半長軸是 30.1 AU，形狀可以當作是圓形。 0.361"

$d \times 0.012 = 1 AU$

$d \times p_N = 30.1 AU$

$p_N = 0.012'' \times 30.1 = 0.361''$



1 7 (a) 為甚麼視差法不可用來量度遙遠恆星的距離？

- (b) 在火星設置天文台，可以提高量度視差的準確度。為甚麼？ 火星距太陽為 1.5 AU

2 8 某恆星的視差是 0.15"。假設我們向該恆星發射無線電訊號，訊號到達該恆星後再反射回地球。訊號需時多久才會返回地球？ 43.5 年

$d = \frac{1}{0.15} = 6.67 pc$

$= 6.67 \times 3.26 = 21.7 ly$

$t = 21.7 \times 2 = 43.5 yr$

2 9 利用視差法，最遠可以量度與地球相距約 200 pc 的恆星。那些恆星的視差是多少？ 0.005"

$p = \frac{1}{d} = \frac{1}{200} = 0.005''$

2 10 畢宿五是金牛座最亮的恆星，視差約為 0.05"，半徑是  $3.07 \times 10^{10} m$ 。

$= 2.0 \times 10^9 \times 10^{16} = 6.18 \times 10^{17} m$

(a) 計算畢宿五與地球的距離。 20 pc

(b) 找出它的角直徑。 0.0205"

(c) 計算畢宿五的視差角和角直徑的比。 2.44

2 11 某學生根據下圖，量度恆星 P、Q 和 R 的距離。他誤以為三顆恆星的距離都是 1 pc。試就每項量度，解釋該學生所犯的錯誤。

(a) 地球的軌道

(b) 不是直角，不是 1"

(c) 不是 2 AU

(d) 不是 2 AU

(e) 不是 2 AU

(f) 不是 2 AU

(g) 不是 2 AU

(h) 不是 2 AU

(i) 不是 2 AU

(j) 不是 2 AU

(k) 不是 2 AU

(l) 不是 2 AU

(m) 不是 2 AU

(n) 不是 2 AU

(o) 不是 2 AU

(p) 不是 2 AU

(q) 不是 2 AU

(r) 不是 2 AU

(s) 不是 2 AU

(t) 不是 2 AU

(u) 不是 2 AU

(v) 不是 2 AU

(w) 不是 2 AU

(x) 不是 2 AU

(y) 不是 2 AU

(z) 不是 2 AU

4.2

恆星的亮度

視星等  
1-2-3  
2.5倍 2.5倍  
6.25倍  
 $(2.5)^5 = 700$ 倍

起點 最亮的恆星

觀察照片中的恆星 (圖 a)。哪顆恆星每秒發出最多能量？它是最亮的恆星嗎？為甚麼？ 參看第 98 頁。



圖 a

本節重點

- 1 恆星的光度和強度
- 2 恆星的視星等和絕對星等
- 3 視星等與絕對星等的關係

我們常用亮度形容恆星。然而，亮度是主觀的描述。怎樣可以客觀地描述恆星的亮度呢？

1 光度與強度

a 光度

恆星的核心發生核聚變，部分能量以電磁輻射的形式釋出；每秒以輻射形式放射到太空的總能量稱為恆星的光度。

光度 =  $\frac{\text{放射的總能量}}{\text{時間}}$  每一秒

光度的符號為 L，單位是 W 或 J s<sup>-1</sup>。

b 強度

恆星所釋出的能量並非全部都能到達地球，原因是能量在太空傳遞時，會擴散至面積為 4πd<sup>2</sup> 的球面，其中 d 是觀察者與恆星的距離 (圖 4.2a)。要從觀察者的角度描述亮度，我們會使用強度，即每秒內進入每單位面積的總能量。

強度 =  $\frac{\text{總能量}}{\text{面積} \times \text{時間}}$

強度的符號為 I，單位是 W m<sup>-2</sup>。

光度又稱為絕對亮度，強度又稱為視亮度。

I 的單位 =  $\frac{J}{m^2 \times s}$   
=  $\frac{J}{s} \times m^{-2}$   
= W m<sup>-2</sup>

亮度 brightness 光度 luminosity 強度 intensity



4 恆星和宇宙

$$p = \frac{E}{t}$$

光度  $L = \frac{\text{總能量}}{\text{時間}}$   
球面面積  $= 4\pi d^2$

所接收到的強度不僅僅來自可見光，還包括整個電磁波譜的光能。

從第 95 頁圖 4.2a 可以得出光度和強度的關係：

$$\text{強度} = \frac{\text{總能量}}{\text{時間}} \times \frac{1}{\text{面積}}$$

$$\therefore I = \frac{L}{4\pi d^2} \quad I \propto \frac{1}{d^2}$$

**實驗 4a**  
驗證強度的平方反比定律  
p.145

錄像片段 4.2

錄像片段 4.2 演示從燈泡接收的強度與它的距離有甚麼關係。

由此可知，恆星愈接近我們 ( $d$  愈小)，亮度就愈高。強度遵從平方反比定律，即  $I \propto \frac{1}{d^2}$  (圖 4.2b)。如果與恆星的距離  $d$  減半，所接收到的強度  $I$  便會增至原來的四倍。

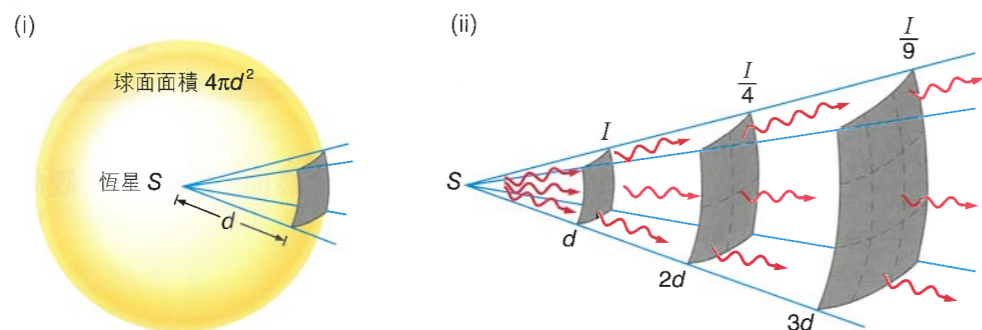


圖 4.2b (i) 能量擴散至面積為  $4\pi d^2$  的球面 (ii) 強度  $I \propto \frac{1}{d^2}$

**例題 2 太陽的光度與強度**

從地球觀察，太陽的強度為  $1358 \text{ W m}^{-2}$ 。已知太陽與地球的距離是 1 AU。太陽的光度是多少？

**題解**

$$\begin{aligned} \text{太陽的光度} &= 4\pi d^2 I \\ &= 4\pi(1.50 \times 10^{11})^2 \times 1358 \\ &= 3.84 \times 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$

由於強度的單位是  $\text{W m}^{-2}$ ，我們必須使用國際單位。  
 $1 \text{ AU} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$

進度評估 2 Q3 (p.96)

**進度評估 2**

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.95)。

- 11 是非題：如果恆星 A 的亮度較恆星 B 高，則恆星 A 必然較恆星 B 接近地球。 (對/錯)
- 12 是非題：恆星的光度取決於它與觀察者的距離。 (對/錯)
- 13 恆星與地球相距 12 pc。從地球量度，它的強度是  $3 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$ 。該恆星的光度是多少？  $5.18 \times 10^{31} \text{ W}$

**2 視星等和絕對星等**

**a 視星等**

除了強度外，**視星等**是另一個常用來描述恆星亮度的物理量，符號是  $m$ 。與強度不同的是，視星等愈小，恆星的亮度愈高。圖 4.2c 顯示一些天體的亮度，以及一些觀測儀器的探測極限。

這部分所定義的視星等和絕對星等統稱為熱星等 (bolometric magnitude)，所考慮的是整個電磁波譜的能量。只考慮可見光譜的物理量，稱為目視星等 (visual magnitude)。

天狼星 (Sirius)、老人星 / 南極老人星 (Canopus)、大角星 (Arcturus)、太陽的視星等都是負數。

天狼星在大犬座 (Canis Major) 之內，實際是一個由天狼星 A 和天狼星 B 組成的雙星系統，前者的視星等為  $-1.47$ ，後者為  $8.44$ 。天狼星呈藍白色，會在香港的冬季夜空出現。老人星是一顆在船底座 (Carina) 的白色恆星，冬季時可以在本港夜空看到。北極星 (Polaris) 是一個三合星系統，位於小熊座 (Ursa Minor)，與北天極非常接近，因此一整年都會在香港的夜空出現。

現正動工興建的「歐洲極大望遠鏡」(簡稱 E-ELT) 座落於智利北部，預計 2024 年建成。E-ELT 是全球最大的望遠鏡，可辨別出視星等只有 30 的天體。

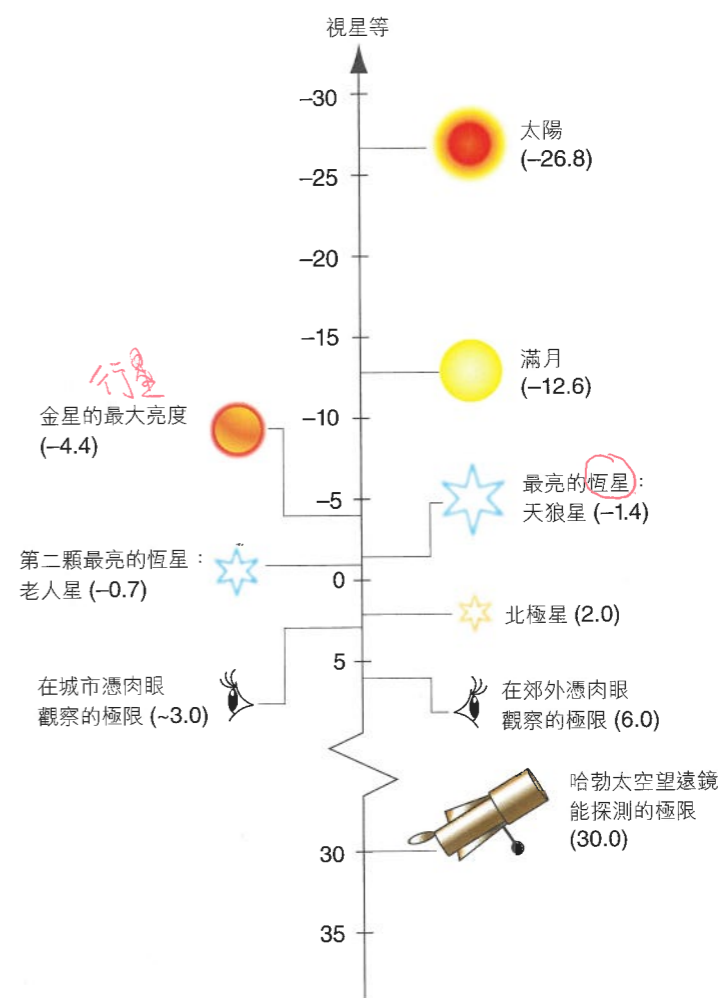


圖 4.2c 視星等尺度

**b 絕對星等**

恆星的強度可以用視星等描述，恆星的光度則可以用**絕對星等**描述。天文學家根據恆星在 10 pc 時的亮度來定義絕對星等。

恆星的絕對星等定義為該恆星在 10 pc 的距離所顯現的視星等。

絕對星等的符號是  $M$ 。恆星的絕對星等愈小，光度就愈高，情況就如視星等一樣。

視星等 apparent magnitude      絕對星等 absolute magnitude



**進度評估 3** ✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.95)。

(第 1 至 3 題) 恆星 W、X、Y 和 Z 的視星等分別是 0、7、2 和 -3，絕對星等分別是 9、-2、3 和 -1。

- 2.1 在地球觀察，哪顆恆星亮度最高？ Z
- 2.2 哪顆恆星的光度最高？ X
- 2.3 哪些恆星無法單憑肉眼觀察得到？解釋你的答案。 X  
[提示：參看 p.97 圖 4.2c]

可向學生解釋，恆星相差 1 個視星等，兩者的強度相差  $\sqrt[5]{100} \approx 2.5$  倍。

**補充資料** 深入認識視星等和絕對星等

兩顆相差 5 個視星等的恆星，它們的強度剛好相差 100 倍。例如：視星等為 1 和 6 的兩顆恆星，前者的強度是後者的 100 倍。換言之，相差 1 個視星等的恆星，強度相差約 2.5 倍。同樣地，相差 5 個絕對星等的恆星，光度相差也剛好是 100 倍。

**c 視星等與絕對星等的關係**

即使兩顆恆星的視星等相同，絕對星等也可以相差很遠。假如絕對星等較高 (光度較低) 的恆星較接近我們，它的亮度也可能和絕對星等較低 (光度較高) 的恆星相同 (圖 4.2d)。

因此，在起點中，我們無法僅以恆星的亮度 (強度)，來比較它們的光度。

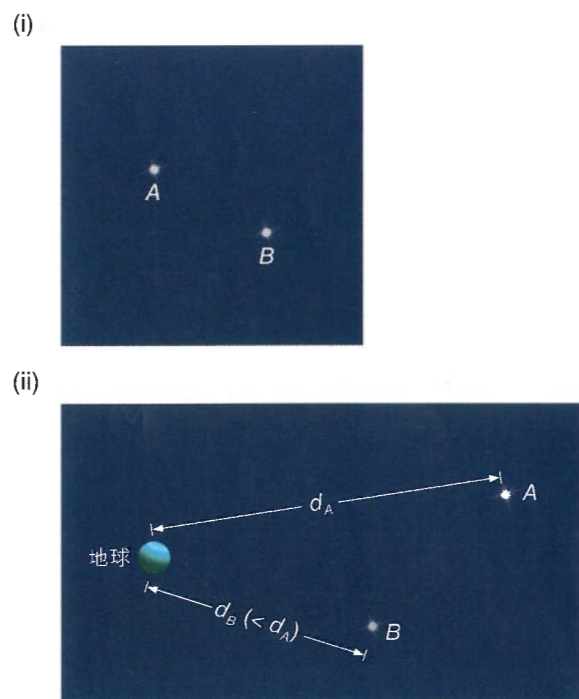


圖 4.2d (i) 從地球觀看，恆星 A 和 B 的亮度相同 (ii) 實際上，恆星 A 的光度較高，但與地球相距較遠

表 4.2a 列出一些天體的視星等和絕對星等。

天體	類別	視星等	絕對星等	與地球的距離
太陽	恆星	-26.8	4.8	1 AU
天狼星 (夜空中最光亮的恆星)	恆星	-1.47	1.42	2.6 pc
北極星	恆星	2.0	-3.6	132 pc
仙女座星系 M31	星系	3.5	-21.0	778 kpc

表 4.2a 視星等和絕對星等

從上表可見，太陽的光度並不算高，但因為它很接近地球，所以亮度十分高。

**例題 3 太陽和參宿四的星等**

下表列出太陽和參宿四的一些數據。

	太陽	參宿四
光度 / W	$3.84 \times 10^{26}$	$4.01 \times 10^{31}$
強度 / $\text{W m}^{-2}$	1358	$8.61 \times 10^{-8}$

表 a

- (a) (i) 哪顆恆星在每單位時間內放射較多的能量到太空中？  
(ii) 在地球觀察時，哪顆恆星的亮度較高？  
解釋你的答案。
- (b) 比較它們的絕對星等。

**題解**

- (a) (i) 因為參宿四的光度較高，所以它在每單位時間內放射較多能量到太空中。  
(ii) 因為太陽的強度較高，所以它的亮度較高。
- (b) 由於參宿四的光度較太陽高，它的絕對星等應該較太陽小。

▶ 習題與思考 4.2 Q3 (p.101)



預試訓練 1

絕對星等與視星等 ☆ 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.6

表 a 列出織女星和天狼星的視星等  $m$  和絕對星等  $M$ 。

	$m$	$M$
織女星	0.03	0.58
天狼星	-1.47	1.42

表 a

- (a) 它們與地球的距離是大於、等於還是小於 10 pc?  
 (b) 哪顆恆星較接近地球? 解釋你的答案。

題解

- (a) 由於兩顆恆星的視星等都小於絕對星等 ( $m < M$ )，它們的亮度較在 10 pc 時高。因此，它們與地球的距離都小於 10 pc。  
 (b) 天狼星的光度較織女星低 ( $M$  較大)。因此，如果兩者與地球的距離相等，天狼星的亮度便會較低。

但是，天狼星的強度較織女星高 ( $m$  較小)。換句話說，在地球觀察，天狼星的亮度較織女星高。

由此可知，天狼星較接近地球。

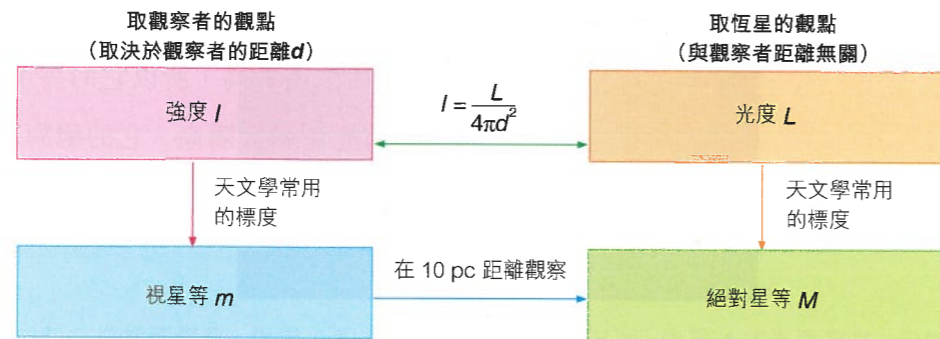
常見錯誤

學生可能不懂根據視星等和絕對星等比較兩顆恆星的距離。按照絕對星等的定義，如果  $m = M$ ，該恆星就剛好位於 10 pc；如果  $m > M$ ，則該恆星與地球的距離大於 10 pc。

織女星和天狼星分別距離地球 7.68 pc 和 2.64 pc。

▶ 複習 Q16 (p.129)

圖 4.2e 展示強度、光度、視星等與絕對星等之間的關係。光度和絕對星等描述恆星本身的特性，與觀察者無關。強度和視星等則取決於觀察者的距離。



視星等和絕對星等的關係可用以下公式表示：  
 $M = m - 5 \log\left(\frac{d}{10}\right)$   
 其中  $d$  是恆星的距離，單位為秒差距。

圖 4.2e 強度、光度、視星等與絕對星等之間的關係

習題與思考 4.2

✓ 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.95)。

- 1 太陽的光度是  $3.84 \times 10^{26}$  W；在地球上量得的太陽強度是  $1358 \text{ W m}^{-2}$ 。如果在火星上量度，太陽的強度是多少？已知火星與太陽相距 1.5 AU。

- (A)  $604 \text{ W m}^{-2}$   
 (B)  $905 \text{ W m}^{-2}$   
 (C)  $2037 \text{ W m}^{-2}$   
 (D)  $3060 \text{ W m}^{-2}$

$I = \frac{L}{A}$   
 $I_E = \frac{3.84 \times 10^{26}}{4\pi d_E^2} = 1358$   
 $I_M = \frac{3.84 \times 10^{26}}{4\pi (1.5d_E)^2} = ?$

- 2 土星和海王星與太陽的距離分別為 10 AU 和 30 AU。在土星探測的太陽強度與在海王星探測的太陽強度，兩者之比是多少？

- (A) 2 : 1 (B) 3 : 1  
 (C) 4 : 1 (D) 9 : 1

$I_S = \frac{L}{4\pi (10)^2}$   
 $I_N = \frac{L}{4\pi (30)^2}$

- 3 恆星 P 和 Q 的光度相等。下列哪項敘述必然正確？

- (1) 它們的強度相等。  
 (2) 它們的亮度相等。  
 (3) 它們在每一秒內放射到太空的電磁能相等。

- (A) 只有 (2)  
 (B) 只有 (3)  
 (C) 只有 (1) 和 (2)  
 (D) 只有 (2) 和 (3)

- 4 恆星 X 的絕對星等為 -1，與地球相距 100 pc。恆星 Y 的絕對星等為 -3，與地球相距 10 pc。與恆星 X 相比，恆星 Y 的

- (A) 亮度較高。  
 (B) 亮度較低。  
 (C) 亮度相等。  
 (D) 視星等較大。

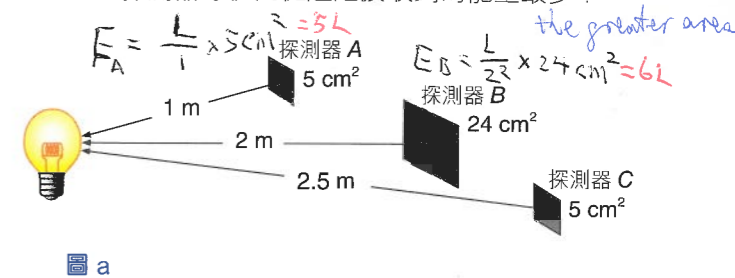
- 5 織女星的視星等和絕對星等分別為 0.03 和 0.58，兩者的數值都接近零。下列哪項敘述是正確的？

- (1) 織女星無法單憑肉眼觀察得到。  
 (2) 織女星的光度很接近零。  
 (3) 織女星與地球的距離小於 10 pc。

- (A) 只有 (3)  
 (B) 只有 (1) 和 (2)  
 (C) 只有 (2) 和 (3)  
 (D) (1)、(2) 和 (3)

- 6 探測器 A、B、C 分別置於燈泡附近 X、Y、Z 三個位置 (圖 a)。

- (a) X、Y、Z 之中，哪一個位置探測到的燈泡強度最大？試解釋原因。  
 (b) 圖 a 也記錄了每個探測器的表面面積。哪一個探測器每秒內從燈泡接收到的能量最多？



- 7 俊傑觀看恆星 A 時，每秒從 A 接收到  $3 \times 10^{-10}$  J 的能量。在這段時間，他的瞳孔半徑為 2.9 mm。如果恆星 B 的強度是  $2 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$ ，哪顆星看起來亮度較高？

- 8 (a) X 和 Y 的視星等分別為 +5 和 +7。哪顆恆星可以憑肉眼觀察得到？  
 (b) P 和 Q 的視星等分別為 +0.5 和 +0.9。哪顆恆星的亮度較高？

- 9 大熊座 61 是一顆恆星，它的視星等是 5.35，絕對星等是 5.41。

- (a) 寫出絕對星等的定義。  
 (b) 根據以上資料，對於大熊座 61 與地球的距離，你能得出甚麼結論？

- 10 表 a 列出兩顆恆星的一些資料。

恆星	視星等	絕對星等
老人星	-0.719	-5.61
參宿四	0.58	-5.14

表 a

- (a) 試比較兩顆恆星的光度。  
 (b) 它們與地球的距離是大於、等於還是小於 10 pc？  
 (c) 哪顆恆星較接近地球？試簡單解釋。



# 4.3

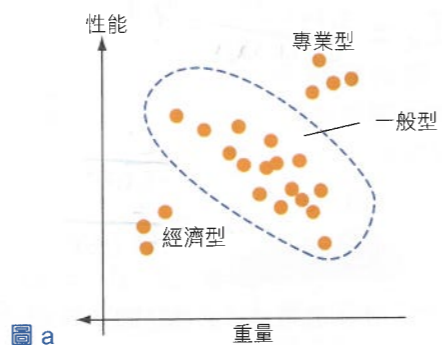
## 恆星的分類

✓ 本節重點

- 1 黑體輻射曲線和表面溫度
- 2 斯特藩定律
- 3 光譜型和赫羅圖
- 4 恆星的光譜

### 起點 購買手提電腦

俊傑想買一部手提電腦，於是繪製了下图來把市面上的手提電腦分類(圖 a)，圖中每一點代表一個型號的電腦。俊傑發現，手提電腦在圖中形成三個不同組別。



俊傑其實借用了天文學家研究恆星時的分類方法。天文學家怎樣利用這種線圖研究恆星呢？參看第 106-107 頁。

把恆星分類之前，我們要先更深入了解恆星的特性。

### 1 黑體輻射

恆星的特性和黑體十分相似。黑體是一種理想物體，有以下的特性：

所有照射在黑體上的電磁輻射，不論波長是多少，都會被黑體完全吸收。

有些學生誤以為黑體會吸收自己發出的輻射，因而錯誤地推斷黑體不會放出任何輻射。事實上，黑體只會吸收照射在它表面的輻射。

換句話說，黑體不會反射任何波長的電磁輻射，但同時又會放射輻射。圖 4.3a 顯示一個黑體所放出各種波長輻射的相對強度，這線圖稱為黑體輻射曲線。

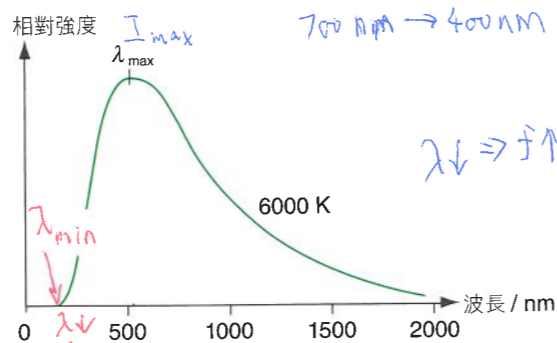


圖 4.3a 表面溫度為 6000 K 的黑體輻射曲線

黑體 blackbody

### 模擬程式 4.2

→ 模擬程式 4.2 展示輻射曲線怎樣隨黑體的表面溫度改變。

黑體輻射曲線的形狀會隨黑體的表面溫度改變(圖 4.3b)。

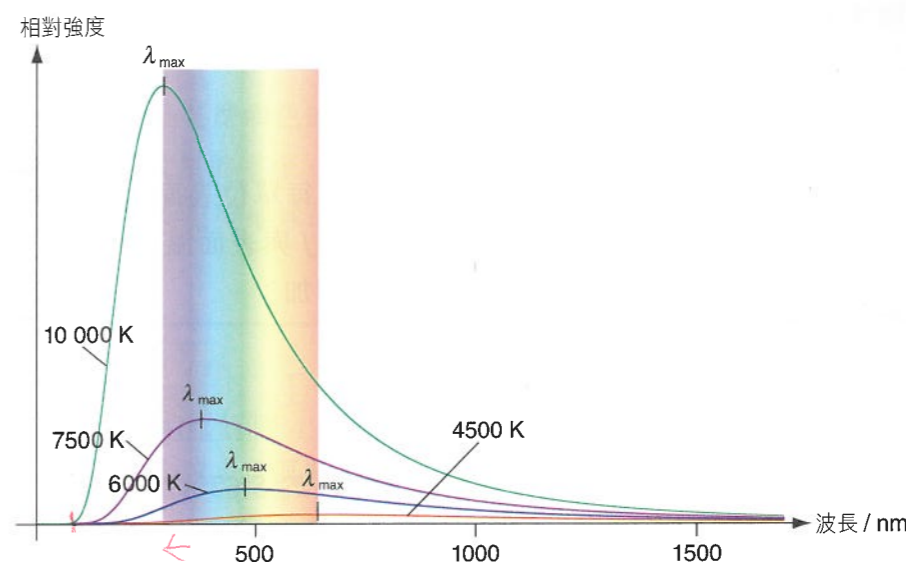


圖 4.3b 不同表面溫度的黑體輻射曲線。圖中的色譜顯示可見光的波長範圍

✧ 黑體輻射曲線有以下特點：

- 1 所有曲線都是連續的。
- 2 曲線的形狀只取決於表面溫度。
- 3 不同表面溫度的曲線不會相交。因此，對兩個大小相同的黑體來說，表面溫度較高的，在任何波長的輻射強度也較高。

黑體輻射曲線可以用來判斷黑體的一些重要特性。

#### a 表面溫度

曲線的最高點代表某一波長 ( $\lambda_{max}$ ) 的輻射強度最高。隨着表面溫度  $T$  上升，最高點會移往較短的波長：

$$T \uparrow \Rightarrow \lambda_{max} \downarrow$$

因此，分析恆星的輻射曲線，就可以找出恆星的表面溫度。

另外，曲線的形狀與恆星的顏色有關。曲線的形狀展現不同波長輻射的相對強度，其中包括可見光。各種顏色的可見光之間的相對強度，影響恆星的顏色。

#### 生活中的物理

##### 日常生活中的黑體輻射

鎢絲燈泡的特性與黑體相似。一條 2500 K 的鎢絲放射黑體輻射，曲線的最高點大約位於 1000 nm，屬紅外輻射。換言之，鎢絲燈泡放射紅外輻射多於可見光，所以能源效益很低。

曲線的最高點在綠光範圍，但這黑體會呈白色而不是綠色。舉例說，從圖 4.3b 可知，6000 K 黑體放出的可見光之中，不同顏色的強度大致相同，所以表面溫度為 6000 K 的黑體會呈白色。



對於其他表面溫度的黑體，顏色大致對應輻射強度最高的可見光。因此，按表面溫度由低至高排列，恆星的顏色順序可以是紅、橙、黃、白、藍。如果恆星的表面溫度十分高，它會呈藍色，而不是紫色。

## b 輻射功率

曲線下方的面積代表每單位表面面積的黑體放射能量的總功率（符號為  $J$ ）。**斯特藩定律**描述  $J$  與表面溫度  $T$  的關係，這定律表明  $J$  會隨着表面溫度  $T$  上升而急劇增加：

$$J = \sigma T^4 \quad \times A$$

其中  $\sigma$  是常數，相等於  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。  $T$  的單位必須為 K，而  $J$  的單位是  $\text{W m}^{-2}$ 。

恆星放射能量的總功率，也就是恆星的光度。因此，對於表面面積為  $A$  的恆星，斯特藩定律可以寫作：

$$J = \frac{L}{A} = \sigma T^4$$

$$L = \sigma A T^4 = A \sigma T^4$$

斯特藩定律有時會寫成  $P = \sigma A T^4$ ，其中  $P$  是恆星放射能量的功率（即光度），而  $A$  是恆星的表面面積。

若恆星是半徑為  $R$  的球體，它的總表面面積  $A$  就是  $4\pi R^2$ （圖 4.3c）。

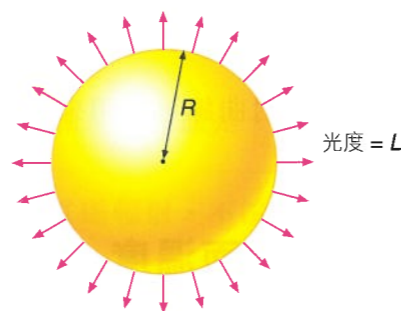


圖 4.3c 半徑為  $R$ 、光度為  $L$  的恆星

由此可以得出恆星的光度：

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

這公式可以用來估算恆星的半徑，方法如下：

- 1 分析恆星的黑體輻射曲線，從而估算  $T$ 。
- 2 量度恆星的視星等  $m$ ，以及恆星與我們的距離  $d$ 。由此可計算出絕對星等  $M$  和光度  $L$ 。
- 3 得出  $L$  和  $T$  後，便能夠從上述公式估算  $R$ 。

## 例題 4 織女星

織女星的光度為  $1.54 \times 10^{28} \text{ W}$ ，是太陽的 40 倍，而表面溫度則為  $9600 \text{ K}$ 。

- (a) 織女星是甚麼顏色的？
- (b) 估算織女星的半徑，答案以太陽半徑  $R_{\odot}$  ( $= 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ) 為單位。
- (c) 已知織女星與地球的距離為  $25 \text{ ly}$ 。求織女星的強度與太陽的強度之比。

天文學中， $\odot$  代表太陽。

## 題解

(a) 根據第 103 頁圖 4.3b 的黑體輻射曲線， $10\,000 \text{ K}$  的恆星放射出來的藍光遠多於其它顏色的光。因此，織女星應該呈藍色。

(b) 根據  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ ，

$$\text{半徑} = \sqrt{\frac{L}{4\pi \sigma T^4}} = \sqrt{\frac{1.54 \times 10^{28}}{4\pi \times 5.67 \times 10^{-8} \times 9600^4}} = 1.60 \times 10^9 \text{ m} = 2.29 R_{\odot}$$

(c) 由於織女星的光度  $L$  是太陽光度  $L_{\odot}$  的 40 倍，且恆星的強度按照

$$I = \frac{L}{4\pi d^2} \text{ 下降，}$$

$$\frac{I'}{I_{\odot}} = \frac{L'}{L_{\odot}} \left( \frac{d_{\odot}}{d'} \right)^2 = 40 \left( \frac{1.50 \times 10^{11}}{25 \times 9.46 \times 10^{15}} \right)^2 = 1.61 \times 10^{-11}$$

$$d_{\odot} = 1 \text{ AU} = 1.50 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$$

▶ 進度評估 4 Q3 (p.105)

## 進度評估 4

✓ 各題號旁的數字對應本節重點（參看 p.102）。

- 2 1 是非題：如果恆星 A 的表面溫度比恆星 B 高，則恆星 A 的光度也必然比恆星 B 高。 (對/錯)
- 1 2 表面溫度是  $7500 \text{ K}$  的黑體是甚麼顏色的？ 藍色 / 藍白色
- 2 3 已知天津四的半徑和表面溫度分別為  $1.41 \times 10^{11} \text{ m}$  和  $8525 \text{ K}$ ，求天津四的光度。  $7.48 \times 10^{31} \text{ W}$   
[提示： $L = 4\pi R^2 \sigma T^4 = ?$ ]
- 1 4 黑體 A 輻射曲線的最高點在  $200 \text{ nm}$ ；黑體 B 和黑體 A 大小相同，但輻射曲線的最高點則在  $1000 \text{ nm}$ 。  
(a) 哪個黑體放射較多  $1000 \text{ nm}$  的輻射？ A  
(b) 哪個黑體的表面溫度較高？ A

根據第 103 頁圖 4.3b， $7500 \text{ K}$  黑體輻射曲線的最高點對應藍光一帶的範圍。



## 2 恆星的光譜型

可用以下句子記住光譜型 ▶ 天文學家按照恆星的表面溫度，把恆星分成七大**光譜型**：O、B、A、F、G、K、M。在這七大光譜型中，O型的表面溫度最高，M型則最低（表 4.3a）。每一光譜型還可細分為「0」至「9」共 10 個分級，其中「0」級的表面溫度最高。

光譜型	O	B	A	F	G	K	M
表面溫度的大約值 / K	40 000	20 000	9000	6500	5500	4500	3000

表 4.3a 光譜型表面溫度的大約值。每一格的顏色代表該表面溫度的恆星所呈現的顏色

舉例說，太陽是一顆 G2 恆星，表面溫度是 5800 K。數字「2」代表 G 型中相對較高的表面溫度。半人馬座  $\alpha$  星也是一顆 G2 星，由此可立即知道它的表面溫度和顏色跟太陽十分相近。

表 4.3b 列出一些恆星的表面溫度、顏色和光譜型。

恆星	表面溫度	顏色	光譜型
參宿四	3400 K	紅色	M2
太陽	5800 K	黃白色	G2
北極星 A	7200 K	黃白色	F8
天狼星 A	12 000 K	藍白色	A1

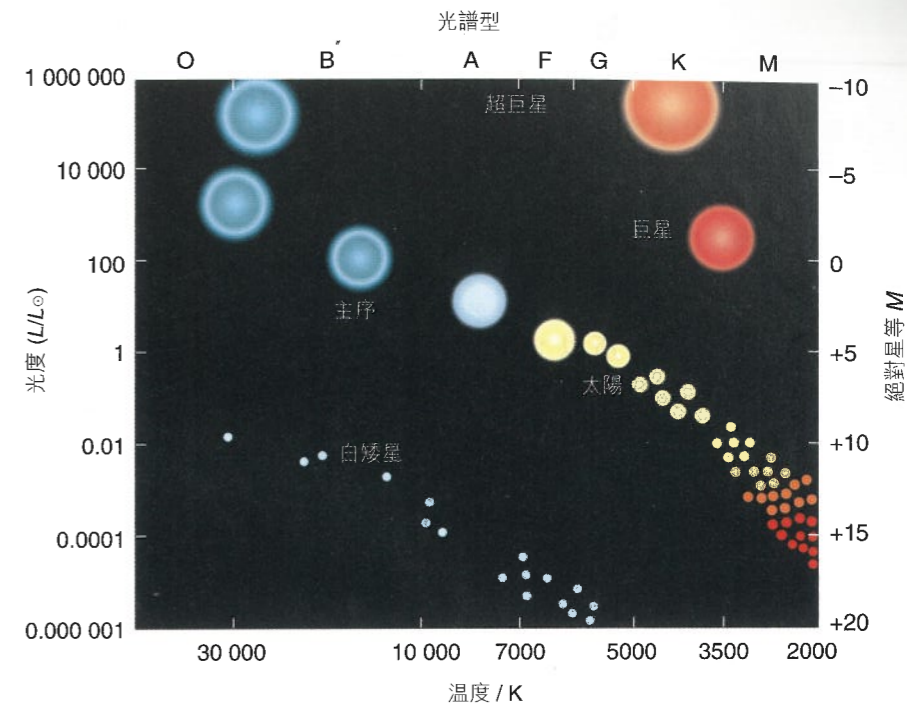
表 4.3b 一些恆星的表面溫度、顏色以及光譜型

## 3 赫茲普龍—羅素圖

赫羅圖於 1910 年由赫茲 ▶ 普龍和羅素所創，也是以他們的名字命名的。如果以縱軸代表恆星的光度，橫軸代表恆星的表面溫度來標繪恆星的數據，便會得出**赫茲普龍—羅素圖**，簡稱**赫羅圖**（圖 4.3d，見 p.107）。赫羅圖是研究恆星的重要圖表。

赫羅圖的縱軸可以是光度  $L$ 、絕對星等  $M$  或恆星相對於太陽的光度  $\frac{L}{L_{\odot}}$ ；橫軸可以是表面溫度  $T$  或光譜型。習慣上，溫度的標度由右至左遞增。

光譜型 spectral class 赫茲普龍—羅素圖/赫羅圖 Hertzsprung-Russell diagram (H-R diagram)  
赫茲普龍 Ejnar Hertzsprung 羅素 Henry Norris Russell



赫羅圖有多種不同的表達方式，一些較簡單的赫羅圖不會顯示恆星的顏色或大小。注意在圖 4.3d 中，恆星的大小並不按比例繪畫。

圖 4.3d 赫羅圖

### a 恆星群組

在起點，傑傑就是借用赫 ▶ 羅圖來把手提電腦分類的。恆星在赫羅圖上形成幾個羣組，分別稱為**主序**、**巨星** / **紅巨星**和**白矮星**（表 4.3c）。  
*Red Giant white dwarf*

羣組	主序	巨星 / 紅巨星	白矮星
赫羅圖上的位置	沿對角線從左上角至右下角伸延	右上方，在主序的上方	左下方，在主序的下方
特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>一般來說，表面溫度愈高，光度也愈高，反之亦然</li> <li>可以有不同的半徑、光度、表面溫度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>光度高</li> <li>表面溫度低</li> <li>半徑長</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>光度低</li> <li>表面溫度高</li> <li>半徑短</li> </ul>
顏色	不一	通常呈紅色	通常呈藍白色
備註	約 90% 恆星屬於這個羣組，它們稱為 <b>主序星</b>	較大的稱為 <b>超巨星</b>	通常和地球大小相若
例子	太陽	參宿四	天狼星 B

表 4.3c 赫羅圖中的各恆星群組

主序 main sequence 巨星 giant 紅巨星 red giant 白矮星 white dwarf  
主序星 main sequence star 超巨星 supergiant



### b 恆星的相對大小

根據赫羅圖和公式  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ ，便可推斷恆星相對於太陽的大小。考慮某恆星和太陽的光度。

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4$$

所以：

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4$$

如果用「太陽單位」量度，即  $L$  以太陽的光度 ( $3.84 \times 10^{26}$  W) 為單位， $R$  以太陽的半徑 ( $6.96 \times 10^8$  m) 為單位， $T$  以太陽的表面溫度 (5800 K) 為單位，就可以把以上的公式寫成： $L = R^2 T^4$  或

$$R = \frac{\sqrt{L}}{T^2} \quad (\text{以太陽單位量度})$$

如我們所見，天文學會涉及龐大的數字，因此天文學家經常會選擇合適的單位來儘量簡化公式。

#### 例題 5 比較恆星

南河三和牛郎星是較顯眼的兩顆恆星。表 a 列出了它們的光度  $L$  和表面溫度  $T$ 。取太陽的表面溫度為 5800 K。

	$L$	$T$
南河三	$6.93L_{\odot}$	6530 K
牛郎星	$10.6L_{\odot}$	7350 K

表 a

- 描述這兩顆恆星的顏色。
- 在赫羅圖中，標示南河三和牛郎星相對於太陽的位置。
- 試以太陽半徑  $R_{\odot}$  為單位，估算南河三和牛郎星的半徑。
- 南河三每單位表面面積放出的紅光會否比牛郎星多？試簡單解釋。

#### 題解

- 根據第 106 頁表 4.3a 和表 4.3b，兩顆星都呈黃白色。
- 南河三和牛郎星的表面溫度都比太陽高，所以應該都在太陽左邊，而牛郎星應在最左方。此外，南河三的光度高於太陽，但比牛郎星低。因此，牛郎星應該在最高位置，而太陽則在最低。

(c) 南河三的半徑 =  $\frac{\sqrt{L}}{T^2} = \frac{\sqrt{6.93}}{\left(\frac{6530}{5800}\right)^2} = 2.08R_{\odot}$

牛郎星的半徑 =  $\frac{\sqrt{L}}{T^2} = \frac{\sqrt{10.6}}{\left(\frac{7350}{5800}\right)^2} = 2.03R_{\odot}$

- 不會。牛郎星的表面溫度較高。根據黑體輻射曲線，牛郎星每單位表面面積放射的紅光較南河三多。

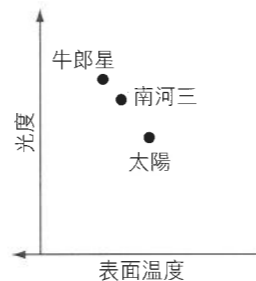


圖 a

習題與思考 4.3 Q13 (p.112)

### 進度評估 5

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.102)。

- 是非題：知道恆星的光度和半徑，便可知道它的光譜型。  
(對/錯)
- 下列哪一項是紅巨星的特徵？  
A 表面溫度高      B 遠離地球  
C 半徑長              D 光度低
- 不論輻射的波長是多少，恆星 X 每單位表面面積所放出的輻射都比太陽多。然而，太陽的光度卻較恆星 X 高。恆星 X  
A 比太陽大。      B 是主序星。  
C 較藍。              D 是巨星。
- 一顆 A2 星與一顆 B1 星相比，哪顆恆星的表面溫度較高？ B1
- 寫出赫羅圖中不同恆星組別的名稱 (圖 a)。

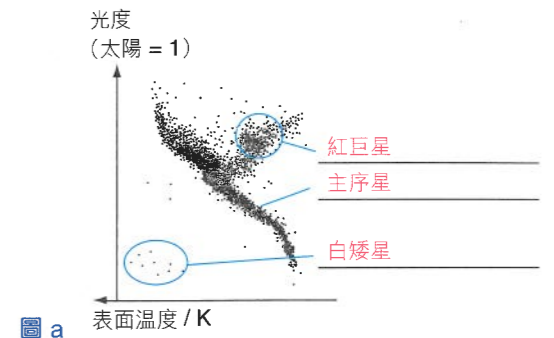


圖 a

## 4 恆星的輻射光譜

我們之前假定恆星的特性和黑體相似。事實上，如果仔細比較恆星和黑體的光譜，會發現兩者有些微差異。根據這些差異，可以推斷出恆星的特性。

要了解光譜形成的原理，可參閱 E2 冊第 2 課。

光穿過平面透射光柵，會形成光譜。詳情可參閱 3B 冊第 6 課。

如果黑體放射的輻射穿過稜鏡或平面透射光柵，就會產生一個連續光譜 (圖 4.3e)。如果放出輻射的是恆星而不是黑體，輻射穿過稜鏡或平面透射光柵後同樣會形成光譜，但是光譜中會有一些黑線 (圖 4.3f)。這代表某些波長的輻射強度，明顯較相鄰波長的輻射強度低。

#### 實驗 4b 觀察光譜 (p.148)

#### 錄像片段 4.3

錄像片段 4.3 演示觀察不同氣體光譜的方法。



圖 4.3e 黑體輻射的光譜是連續的

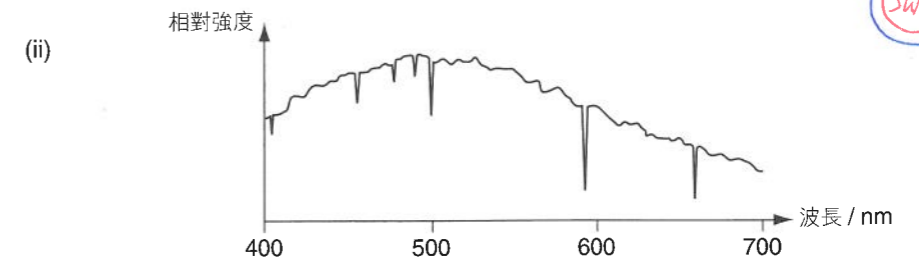


圖 4.3f (i) 太陽的光譜有些黑線；(ii) 與光譜相對應的輻射曲線，顯示在出現黑線的波長，輻射強度明顯較低

可指出物體在極低密度時 (如：低壓氣體) 會產生發射光譜；在極高密度時 (如：固態) 會放出黑體輻射，並產生連續光譜。



可利用以下的應用程式 ▶ 恆星的光譜出現黑線，是因為恆星表面的氣體吸收了某些波長的輻射。這種光譜稱為**吸收光譜**，當中的黑線稱為**吸收譜線**，是**光譜線**的一種。



iOS Android

吸收光譜揭示許多恆星的資料：

- 1 每種元素都會形成獨特的光譜線，因此根據光譜線便可找出恆星表面的氣體含有哪些化學元素。
- 2 吸收光譜在不同溫度下也有所不同。因此，吸收光譜提供了另一種方法給我們推斷恆星的表面溫度。
- 3 光譜線可以用來測定恆星移近或移離地球的速率。單元 4.4 會有詳細的討論。

這些小包稱為光子。有關光子和能級的詳細介紹，可參閱 E2 冊第 2 課。

可向學生解釋能量與光子波長的關係：

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

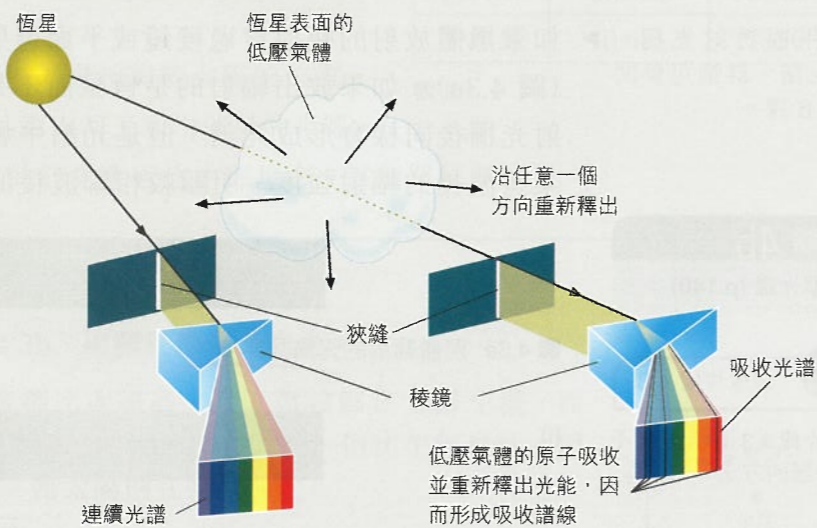
其中  $h$  是普朗克常數，數值為  $6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ， $c$  為光速。

例如，波長為  $656 \text{ nm}$  (紅光) 的光子具有  $3.03 \times 10^{-19} \text{ J}$  能量，這能量對應氫原子兩個能級之差，於是光子就可由氫原子吸收。

**補充資料** 為甚麼會出現吸收譜線？

特定波長的光能會以一個個小包的形式傳播。每個小包帶有特定的能量。如果小包帶有的能量，剛好等於一個原子受激至較高能級所需的能量，小包的能量就會由原子吸收。當原子返回較低的能級，會向任意一個方向以小包的形式釋出相同的能量。

恆星放射的黑體輻射離開恆星時，會先穿過恆星表面的一些低壓氣體，過程中能量可能會按上述的機制吸收並重新釋出。於是，沿星光的方向觀察時，會發現該波長的輻射強度明顯減低，同樣原因，光譜便出現一條黑線 (圖 a)。



每種元素都有一系列獨特的能級，於是在光譜上形成獨特的吸收譜線。因此，憑這些光譜線便可以找出恆星表面的氣體含有哪些化學元素。

**進度評估 6**

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.102)。

(第 1 至 3 題) 某黑體的大氣層含有氫和氦兩種氣體。考慮黑體的光譜。

- 4 1 是非題：氫氣和氦氣產生的吸收譜線，會在光譜不同波長的位置出現。 (對/錯)
- 4 2 是非題：該吸收光譜中，每種氣體各有 1 條對應的黑線。 (對/錯)
- 4 3 是非題：吸收譜線顯示對應波長的輻射強度為零。 (對/錯)

**習題與思考 4.3**

(第 1 至 2 題) 圖 a 顯示一些恆星在赫羅圖的位置。

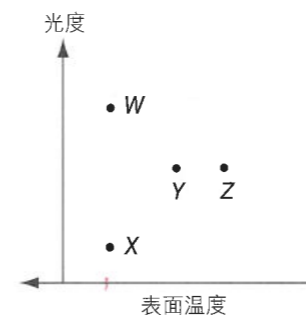


圖 a

- 2★4 一顆表面溫度較低的恆星要符合下列哪一項條件，光度才會較高？
- A 呈紅色
  - B 強度較低
  - C 體積較大
  - D 較接近觀察者
- 2★5 下列哪項敘述必然正確？
- (1) 所有恆星的顏色相同。
  - (2) 光度較高的恆星表面溫度也較高。
  - (3) 細小的恆星光度較低。
- A 只有 (2)
  - B 只有 (1) 和 (2)
  - C 只有 (2) 和 (3)
  - D 以上皆不是
- 2.3 1 與恆星 X 比較，恆星 W 必然
- A 較熱。
  - B 較大。
  - C 較接近地球。
  - D 較藍。
- 2.3 2 恆星 Y 和 Z 差不多在縱軸的同一水平。與恆星 Y 比較，恆星 Z 必然
- A 較熱。
  - B 亮度較低。
  - C 較大。
  - D 屬於相同的光譜型。

(第 6 至 7 題) 表 a 顯示，黑體 W、X、Y 和 Z 的輻射曲線中，最高點所對應的波長 ( $\lambda_{\max}$ )。

	W	X	Y	Z
$\lambda_{\max} / \text{nm}$	550	450	720	650

表 a

- 1★6 哪個黑體的表面溫度最高？
- A W
  - B X
  - C Y
  - D Z
- 1★7 哪個黑體每單位表面面積放射最多紅光？
- A W
  - B X
  - C Y
  - D Z



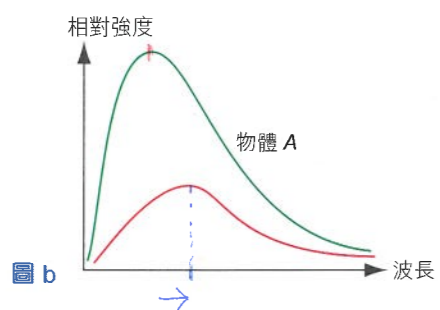
- 4★8 物體 P 是理想黑體。下列哪一項不可能從 P 的光譜推斷出來？
- A 表面溫度
  - B 每單位表面面積釋出的功率
  - C 光譜型
  - D 化學成分**

4★9 某恆星外圍的大氣層含有氫氣。下列哪項關於該恆星光譜的敘述是正確的？

- (1) 光譜中有些對應氫氣的光亮譜線。*暗線*
  - (2) 恆星的光譜是黑體的連續光譜。
  - (3) 該恆星的表面溫度可以從光譜線推斷出來。*由 4.5 T, P. 109*
- A 只有 (3)**
  - B 只有 (1) 和 (2)
  - C 只有 (1) 和 (3)
  - D 只有 (2) 和 (3)

1 10 物體 A 和 B 的黑體輻射曲線，最高點分別位於 200 nm (紫外輻射) 和 650 nm (紅光)。

- (a) 指出它們每個物體主要放射哪種電磁波。*A: 紫外輻射, B: 紅光*
- (b) 哪個物體的表面溫度較高？ **A**
- (c) 圖 b 顯示物體 A 的黑體輻射曲線。在圖中草繪物體 B 的黑體輻射曲線。



*Handwritten notes:*  
 $P. 104$   
 $L = AJ$   
 $L = 1.5 \times 3 \times 10^3 = 4.5 \times 10^3 W$   
 $3 \times 10^3 = 5.67 \times 10^{-8} T^4$   
 $T = 480 K$   
 $J = 8T^4$

3 11 角宿一的光度是太陽的 12 100 倍，表面溫度是 22 400 K。

- (a) 描述角宿一在赫羅圖中與太陽的相對位置。*在太陽的左上方*
- (b) 求角宿一的半徑，答案以太陽半徑為單位。取太陽的表面溫度為 5800 K。 **7.37 太陽半徑**

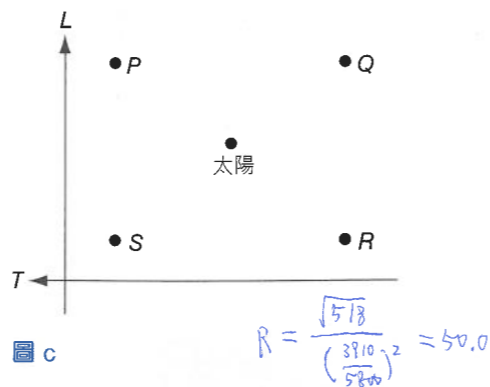
3 12 一顆恆星的半徑是太陽的 10 倍，但表面溫度只有太陽的一半。

- (a) 該恆星的光度是太陽的多少倍？ **6.25 倍**
- (b) 在赫羅圖上標示這恆星與太陽的相對位置。*紅巨星*

*Handwritten calculations:*  
 $R = \frac{\sqrt{L}}{T^2}$   
 $10 = \frac{\sqrt{L}}{0.5^2}$   
 $L = 6.25$

3★13 畢宿五的光度是  $518L_{\odot}$ ，並呈紅 / 橙色。

- (a) P、Q、R 和 S 是赫羅圖上的四個位置 (圖 c)。畢宿五最有可能在哪個位置？解釋你的答案。 **Q**



(b) 畢宿五的表面溫度為 3910 K。求它的半徑，並以太陽單位表示。已知太陽的表面溫度為 5800 K。 **50.0 太陽半徑**

*Handwritten calculation:*  
 $R = \frac{\sqrt{518}}{\left(\frac{3910}{5800}\right)^2} = 50.0$

2★14 以開氏溫度計算，某恆星的表面溫度是太陽的兩倍。

- (a) 該恆星每單位表面面積放射的能量是太陽的多少倍？ **16**  *$J = 8T^4, J' = 2^4 J_0 = 16J_0$*
- (b) 該恆星的直徑是太陽的五倍。整顆恆星放射的能量是太陽的多少倍？ **400**  *$L = 8A T^4, L' = 5^2 \times 2^4 L_0 = 400L_0$*

15 球體 X 是一個黑體，表面面積為  $1.5 \text{ m}^2$ 。X 每單位表面面積所釋出的功率 ( $J$ ) 是  $3 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}$ 。

- (a) 求球體 X 的光度和表面溫度。  **$4.5 \times 10^3 \text{ W}$ ， $480 \text{ K}$**
  - (b) 球體 X 是發光體嗎？試簡單解釋。 **不是**
- 3★16 老人星是一顆巨星，也是夜空中亮度第二高的恆星。以下是一些有關老人星的數據。 *$3 \times 10^3 = 5.67 \times 10^{-8} T^4, T = 480 K, J = 8T^4$*

強度	$5.24 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$
視差 $p$	$0.0104''$
光譜型	F (表面溫度約 7400 K)

- 表 b  *$1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{16} \text{ m}, d = \frac{1}{0.0104}$*
- (a) 求老人星與地球的距離。 **96.2 pc**  *$= 96.2 \text{ pc}$*
  - (b) 求老人星的光度，答案以太陽光度  $L_{\odot}$  為單位。取  $L_{\odot}$  為  $3.84 \times 10^{26} \text{ W}$ 。 **15 100  $L_{\odot}$**
  - (c) 求老人星的半徑，答案以太陽半徑  $R_{\odot}$  為單位。取太陽表面溫度為 5800 K。 **75.6  $R_{\odot}$**

*Handwritten calculations for 16:*  
 (b)  $L = I \times A = 5.24 \times 10^{-8} \times 4\pi \times (96.2 \times 3.09 \times 10^{16})^2$   
 $= 5.818 \times 10^{39} \text{ W}$   
 $= \frac{5.818 \times 10^{39}}{3.84 \times 10^{26}} L_{\odot} = 15100 L_{\odot}$   
 (c)  $R = \frac{\sqrt{15152}}{\left(\frac{7400}{5800}\right)^2} = 75.6 R_{\odot}$

# 4.4

## 恆星的多普勒效應

### 起點 位於太陽系之外的行星

天文學家發現，有些恆星像太陽一樣，有行星圍繞運行。但是，要拍攝這些行星的影像極為困難，因為它們所反射的光大都被恆星的光所掩蓋。

既然這些行星難以直接觀察得到，天文學家是怎樣發現它們的呢？ *參看第 116 頁。*



相片所示為一顆位於半人馬座 (Centaurus) 的褐矮星 (2M1207) 和它的行星。兩顆星相距 55 AU，約為太陽與海王星距離的兩倍。相片中的小紅點是一顆位於太陽系外的行星，是少數可以直接拍攝到的同類行星。

- ✓ 本節重點
- 1 光的多普勒效應
- 2 多普勒效應在天文學方面的應用
- 3 宇宙膨脹

→ 模擬程式 4.3 以波陣面展示多普勒效應。  
 → 模擬程式 4.4 讓學生體驗聲音出現多普勒效應時音調的變化。

模擬程式 4.3, 4.4

實驗 4c 聲音的多普勒效應 p.152

錄像片段 4.4

→ 錄像片段 4.4 示範怎樣用單頻發聲器去產生多普勒效應。

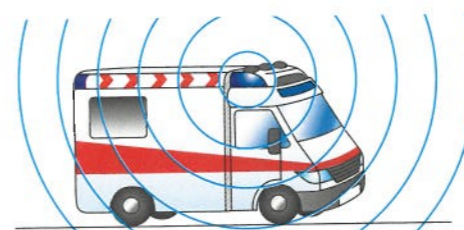
## 1 多普勒效應

### a 聲音的多普勒效應

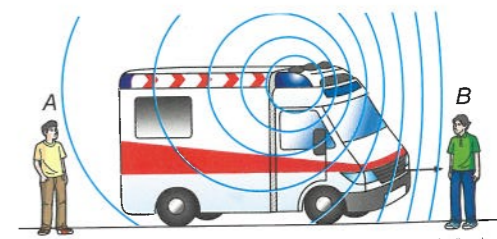
假設有一輛靜止不動的救護車響着汽笛，發出頻率固定的汽笛聲。這時，我們身處任何地方都會聽到相同頻率的汽笛聲 (圖 4.4a)。

可是，救護車移動時，它發出的聲波就不會均勻散開；聲波在車前的部分會「壓縮」，在車後的部分則「拉伸」(圖 4.4b)。因此，救護車駛近時，我們會聽到較高頻率 (波長較短) 的汽笛聲；救護車遠離時，我們會聽到較低頻率 (波長較長) 的汽笛聲。

這現象稱為 **多普勒效應**。各類型的波都會出現多普勒效應，包括光波。



4.4a 固定聲源發出的聲波



聲源離開觀察者 A：頻率較低  
 聲源移向觀察者 B：頻率較高  
 4.4b 波長沿着聲源的運動方向而改變



歷史點滴

多普勒 (1803–1853)

1842年，多普勒嘗試解釋雙星的顏色，因而提出光源放出的光，頻率取決於光源與觀察者的相對速度。然而，光的這種效應十分微弱，在多普勒的年代，根本無法量度出來。不過，科學家不久就觀察到聲音的同類效應。

公式只適用於移動速率遠較光速小的恆星。

可展示聲音多普勒效應的公式。

聲源在移動：

$$f' = \frac{v}{v \mp v_s} f$$

接收者在移動：

$$f' = \left(1 \pm \frac{v_r}{v}\right) f$$

b 光的多普勒效應

來自恆星的光會由於地球和恆星之間的相對運動而出現多普勒效應。

當一顆恆星正在移向我們，所有來自恆星的光，波長都會縮短，可見光會稍微移向藍色的一端，這現象稱為**藍移**。相反，如果恆星正在移離我們，所有來自恆星的光，波長都會增加，可見光會稍微移向紅色的一端，這現象稱為**紅移**。紅移或藍移的幅度一般都很小，因此不會改變恆星的顏色。

圖 4.4c 中，恆星沿徑向移離地球，並放射波長為  $\lambda_0$  的輻射。因為出現多普勒效應，所以在地球觀察到的波長會移至  $\lambda$ 。波長變化  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  與恆星速率之間的關係如下：

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{\text{恆星的速率}}{\text{光的速率}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

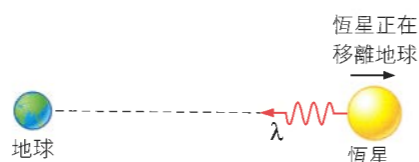


圖 4.4c 沿徑向移動的恆星出現多普勒效應

恆星一般都不會完全沿徑向移動。於是，我們把恆星的速度分解為橫向速度和**徑向速度** (圖 4.4d)。

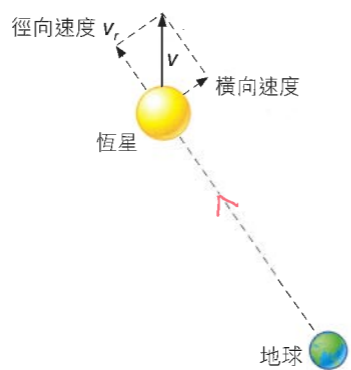


圖 4.4d 恆星的橫向速度和徑向速度

公式 (1) 的恆星速率就是指徑向速度  $v_r$ ，即：

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v_r}{c} \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中  $c$  是光速。

同樣，這公式只有在  $v_r \ll c$  時才成立。

出現紅移時，波長變化  $\Delta\lambda$  是正數；出現藍移時， $\Delta\lambda$  則是負數。因此，恆星移離我們時， $v_r$  是正數；恆星移近我們時， $v_r$  是負數。

比較恆星的光譜和從實驗室所得的靜止光譜後 (圖 4.4e)，便可應用公式 (2) 找出恆星的徑向速度。

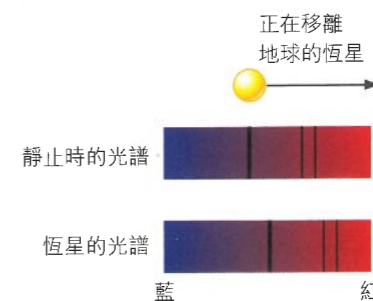


圖 4.4e 光譜線出現紅移，表示恆星正移離地球

例題 6 恆星的多普勒效應

從地球觀察，在某恆星的光譜中，在波長為 600.1 nm 的位置有一條光譜線。根據實驗室的量度結果，如果光譜線沒有偏移，它應該在 600.0 nm 的位置出現。求恆星的徑向速度。

題解

根據  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v_r}{c}$ ，

恆星的徑向速度  $\approx \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right)c$

$$= \frac{600.1 - 600.0}{600.0} \times 3.00 \times 10^8$$

$$= 50\,000 \text{ m s}^{-1}$$

$$= 50 \text{ km s}^{-1} \text{ (移離地球)}$$



$v_r$  為正值，代表恆星正移離地球。

太空穿梭機返回地球時，速率約為  $8 \text{ km s}^{-1}$ 。例題中，恆星徑向速度的量值比太空穿梭機的速率高很多。然而，相對其他高速移動的恆星而言，這恆星算是移動得很慢了。

進度評估 7 Q2 (p.115)

進度評估 7 各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.113)。

- 11 下列哪一項有關多普勒效應的敘述是正確的？
  - A 恆星移向地球時，它放出的光會出現紅移。
  - B** 星光的多普勒效應取決於恆星和觀察者之間的相對運動。
  - C 出現藍移時，恆星的光會變為藍色。
- 12 恆星的光譜線藍移了 0.04 nm。如果光譜線沒有偏移，應位於 486.10 nm。求恆星的徑向速度。  $2.47 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$  (移向地球)



## 2 多普勒效应在天文學方面的應用

人類於 1996 年首次發現太陽系外行星。

嚴格來說，太陽和行星圍繞它們的質心（而不是太陽的中心）移動，但因為太陽的質量遠較所有行星的質量總和大得多，所以整個系統的質心仍在太陽之內。因此，太陽的軌道十分小，在大部分情況下都可以假設太陽是靜止的。這也是我們在較前章節討論行星運動時，假設太陽靜止不動的原因。

### 補充資料

#### 探索太陽系外行星上的生命

2007 年 4 月，天文學家首次發現與地球相似的太陽系外行星，名為 Gliese 581 c，位於天秤座，圍繞距離地球約 20.4 ly 的恆星 Gliese 581 運行。天文學家正了解該行星是否有生命存在。

為簡單起見，我們假設軌道是圓形的，而且地球在恆星的軌道平面。

### a 太陽系外行星

多普勒效應是研究宇宙的重要工具，舉例說，天文學家可應用它來尋找太陽系以外的行星，即**太陽系外行星**。就如**起點**中提及，幾乎所有這類行星都不能直接觀察得到。

行星和恆星在相互的引力影響下，兩者均以相同的軌道週期圍繞它們的共同中心運行，這個中心稱為**質心**。由於恆星的質量通常較行星大得多，所以恆星的軌道比行星小得多。雖然如此，恆星的軌道運動仍足以使它的光譜出現週期性的藍移和紅移（圖 4.4f）。

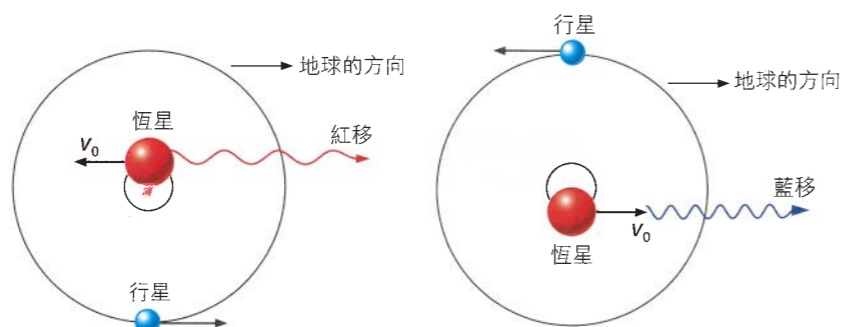


圖 4.4f 一些受行星圍繞的恆星，會出現週期性的藍移和紅移

根據恆星的光譜，我們可用公式  $v_r \approx \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right)c$  計算出恆星在不同時刻的徑向速度。如果繪畫線圖展示徑向速度隨時間的變化，就會得出恆星的**徑向速度曲線**（圖 4.4g）。從徑向速度曲線可以知道：

- 1 行星和恆星的軌道週期  $T$
- 2 恆星的軌道速率  $v$

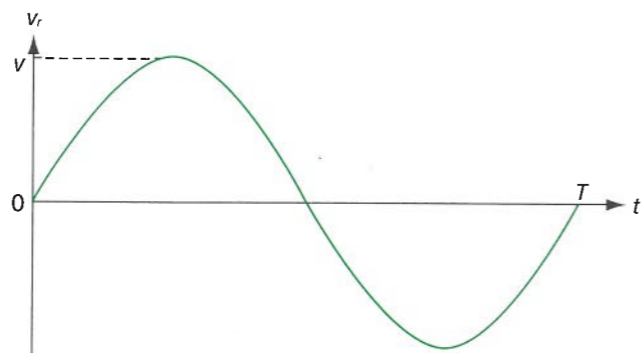


圖 4.4g 徑向速度曲線

因此，如果恆星的徑向速度呈現微小而週期性的變化，就有可能代表有行星圍繞它運行。圍繞飛馬座 51 星運行的行星就是用這個方法發現的。截至 2014 年，天文學家已發現超過 1000 顆太陽系外行星。

大多數太陽系外行星都是透過研究徑向速度曲線發現的。**起點**中提及的同類型行星可以透過直接拍照而發現，是一個很罕見的例外。

太陽系外行星 extrasolar planet 質心 centre of mass 徑向速度曲線 radial velocity curve

### 例題 7 飛馬座 51 星的徑向速度曲線

假設沿飛馬座 51 星和它的行星的軌道平面觀察，並假設它們的軌道是圓形的。早前測量得知，飛馬座 51 星的質量是  $2.10 \times 10^{30}$  kg，約為太陽的 1.05 倍。利用飛馬座 51 星的徑向速度曲線（圖 a），找出

- (a) 飛馬座 51 星和行星的軌道週期和角速度；
- (b) 飛馬座 51 星的運行速率和軌道半徑；
- (c) 行星的軌道半徑和運行速率。

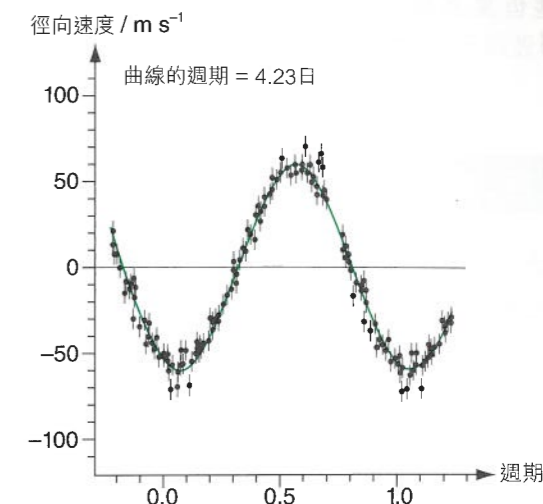


圖 a 飛馬座 51 星的徑向速度曲線

### 題解

- (a) 行星的週期 = 飛馬座 51 星的週期  
= 徑向速度曲線的週期  
= 4.23 日

飛馬座 51 星和它的行星的角速度  $\omega$  相同。

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4.23 \times 24 \times 3600} = 1.72 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

- (b) 飛馬座 51 星的運行速率  
= 徑向速度曲線的幅度 =  $60 \text{ m s}^{-1}$   
設  $R$  為飛馬座 51 星的軌道半徑。  
根據  $v = R\omega$ ,

$$R = \frac{v}{\omega} = \frac{60}{1.72 \times 10^{-5}} = 3.49 \times 10^6 \text{ m}$$

- (c) 設  $r$  為行星的軌道半徑。考慮恆星和行星之間的引力。

$$\text{根據 } \frac{GMm}{r^2} = m\omega^2,$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{GM}{\omega^2}} \\ &= \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 2.10 \times 10^{30}}{(1.72 \times 10^{-5})^2}} \\ &= 7.80 \times 10^9 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{行星的運行速率} &= r\omega \\ &= (7.80 \times 10^9) \times (1.72 \times 10^{-5}) \\ &= 1.34 \times 10^5 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

◀ 行星的軌道半徑小於地球的軌道半徑 ( $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ )。

以這方法發現的太陽系外行星，通常質量都較高，並且較接近它們所屬的恆星。

▶ 複習 Q33 (p.133)



## b 雙星系統

有些恆星系統包含更多恆星。雙星系統是指一個由兩顆恆星組成的系統，這兩顆恆星圍繞它們的質心運行。應用多普勒效應和徑向速度曲線，就可以研究雙星系統內每一顆恆星的運動。

## 例題 8 雙星系統

圖 a 所示的雙星系統中，恆星 P 的質量大於恆星 Q。圖 b 是兩者的徑向速度曲線。假設所有結果都是沿軌道平面觀察而得出。

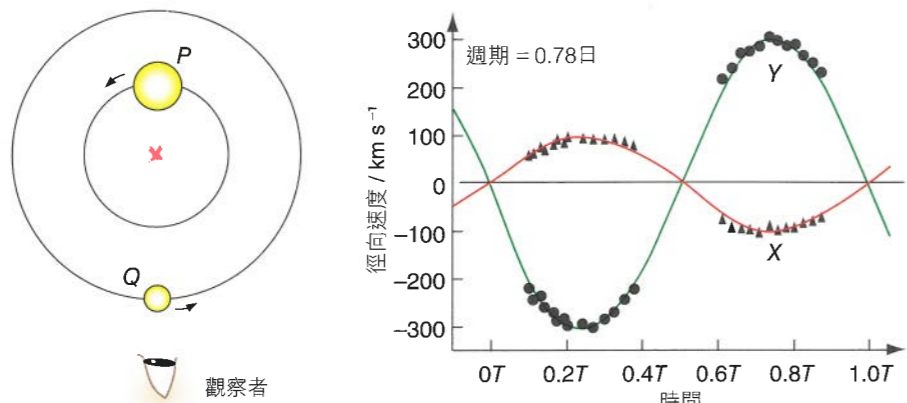


圖 a 雙星系統

圖 b 徑向速度曲線

- 曲線 X 還是 Y 描述恆星 P 的運動？試簡單解釋。
- 參考徑向速度曲線。圖 a 描述恆星在哪一刻的位置？
- 求恆星 P 和 Q 的運行速率。
- 已知 P 和 Q 的角速度是  $9.32 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ ，求 P 和 Q 的軌道半徑。

## 題解

- 曲線 X 描述恆星 P 的運動。  
因為 P 和 Q 的週期相同，而且 P 在每個週期移動的距離較 Q 短，因此 P 的運行速度必然較小。
- P 和 Q 在圖 a 所示的位置時，它們的徑向速度為零。而且，P 的徑向速度將會變為負值，Q 的徑向速度將會變為正值，因此，圖 a 描述時間為  $0.5T$  時恆星的位置。
- P 的運行速率 = 曲線 X 的幅度 =  $100 \text{ km s}^{-1}$   
Q 的運行速率 = 曲線 Y 的幅度 =  $300 \text{ km s}^{-1}$
- 根據  $v = r\omega$ ，  
P 的軌道半徑 =  $\frac{v_P}{\omega} = \frac{100 \times 1000}{9.32 \times 10^{-5}} = 1.07 \times 10^9 \text{ m}$   
Q 的軌道半徑 =  $\frac{v_Q}{\omega} = \frac{300 \times 1000}{9.32 \times 10^{-5}} = 3.22 \times 10^9 \text{ m}$

▶ 複習 Q29 (p.132)

## 進度評估 8

各題號旁的數字對應本節重點 (參看 p.113)。

- 已知恆星 X 有行星圍繞它運行。下列各項有關恆星 X 徑向速度曲線的敘述，哪項是**不正確**的？
  - 從徑向速度曲線可直接讀出恆星 X 的軌道半徑。
  - 從恆星 X 的多普勒效應可以得出它的徑向速度曲線。
  - 徑向速度曲線顯示週期性的紅移和藍移。

A 只有 (1)  
B 只有 (1) 和 (2)  
C 只有 (1) 和 (3)  
D 只有 (2) 和 (3)
- 下列哪項有關雙星系統的敘述是正確的？假設兩顆恆星的軌道都是圓形的。
  - 兩顆恆星的角速度量值必然相同。
  - 從它們的徑向速度曲線可直接讀出它們各自的質量。
  - 從它們的徑向速度曲線可找出它們各自的運行速率。

A 只有 (1)  
B 只有 (1) 和 (2)  
C 只有 (1) 和 (3)  
D 只有 (2) 和 (3)

## c 暗物質

討論星系轉動時提及的恆星運行速率，就是指星系的旋轉速率。

在星系中，所有恆星都圍繞星系中心運行 (圖 4.4h)。透過量度恆星的徑向速度，便可推斷它們的運行速率。把運行速率隨恆星與星系中心距離的變化繪成線圖，便會得出該星系的**旋轉曲線** (圖 4.4i)。另一方面，如果知道恆星軌道內物質的總質量，也可以按牛頓定律預測恆星的運行速率。

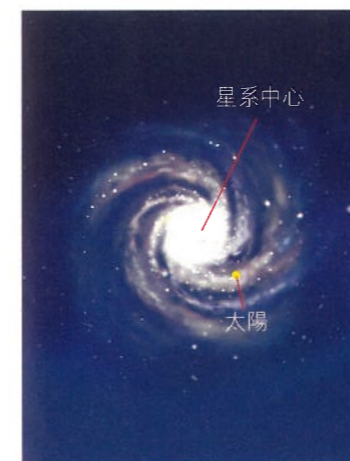


圖 4.4h 銀河系的構想圖

星系

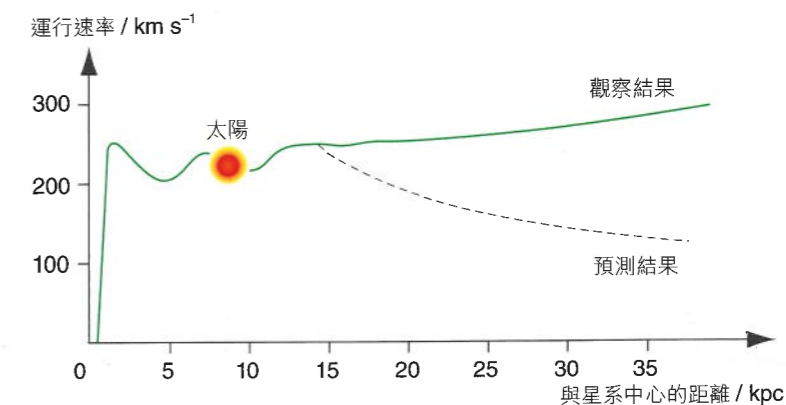


圖 4.4i 銀河系的旋轉曲線

暗物質不一定是黑洞。

然而天文學家發現，對於距離星系中心較遠的恆星，量度所得的運行速率與預期結果不符。從觀察結果推斷，星系中除了現有的物質外，應該還有大量觀測不到的物質，那些物質稱為**暗物質**。暗物質不會發出或反射任何波長的輻射；而且，宇宙中暗物質的總質量遠大於可見物質的總質量。

暗物質

旋轉曲線 rotation curve 暗物質 dark matter



### 3 宇宙膨脹

天文學家發現，大多數星系的光譜都出現紅移，即是說這些星系正在逐漸遠離我們。哈勃定律指出星系的遠離速度與距離之間的關係（圖 4.4j）：

距離我們愈遠的星系，遠離速度愈大。

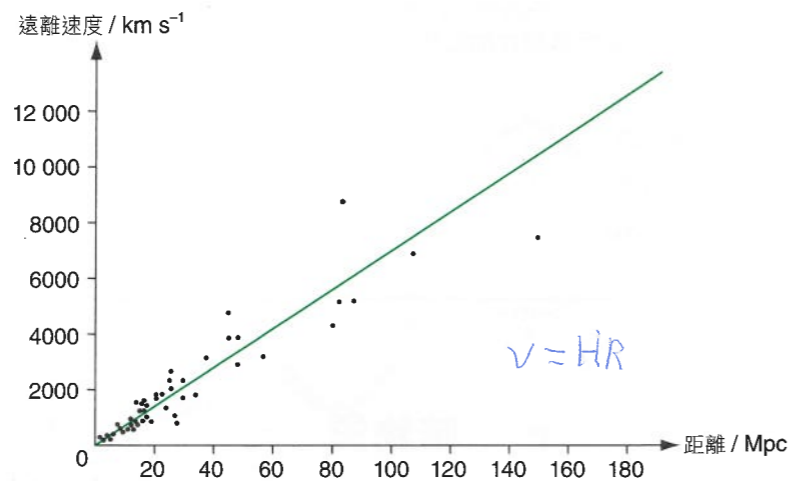


圖 4.4j 哈勃定律 Hubble

如果宇宙（或空間本身）正在膨脹，就可解釋哈勃定律。這情況和烘葡萄乾麵包相似（圖 4.4k）。烘麵糰時，它會膨脹（麵包變大），每粒葡萄乾都會「看見」其他葡萄乾漸漸遠離自己。原本很接近的葡萄乾分開得

較慢，但原本相距較遠的葡萄乾卻分開得較快。與葡萄乾麵包不同的是，宇宙既沒有中心，也沒有邊界。

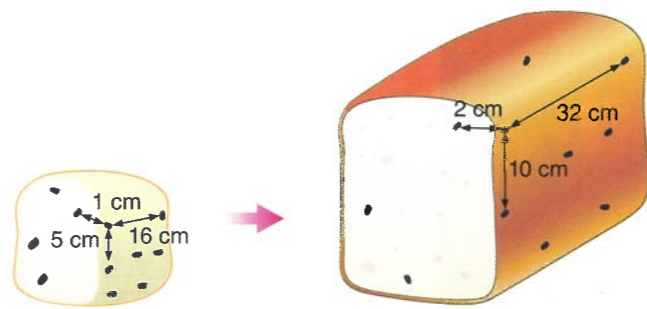


圖 4.4k 宇宙膨脹與烘麵包相似

宇宙一直在膨脹。在過去某個時刻，宇宙間所有物體的距離都極為接近。由那時開始，空間以高速膨脹，這膨脹稱為**大爆炸**。

以下網站介紹大爆炸，所載有的影片展示宇宙怎樣形成。

<http://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/what-powered-the-big-bang/>



### 預試訓練 2

### 分析星系

☆ 香港中學文憑考試練習卷 2012 年卷二 Q.1

圖 a 中，X 和 Y 是星系 G 的兩顆恆星，它們與星系中心的距離相同，彼此之間的角距離為  $1.8^\circ$ 。該星系與地球相距 560 kpc。

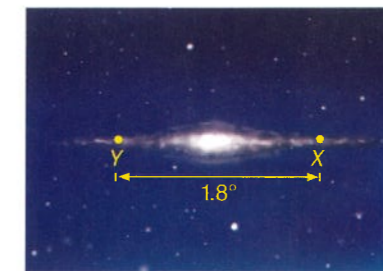


圖 a

- 估算 X 和 Y 之間的距離，答案以 m 為單位。 (2 分)
- 某光譜線在 X 和 Y 的光譜中，分別位於波長為 486.63 nm 和 485.54 nm 的位置。相同的光譜線在地球上靜止光源的光譜中，則位於 486.01 nm 的位置。
  - 根據以上資料，估算 Y 的徑向速度。 (2 分)
  - Y 的運行速率實際值可能比 (i) 部較大、較小，還是兩者相等？試簡單解釋。 (2 分)
  - X 以  $383 \text{ km s}^{-1}$  移離地球。舉出一個原因，解釋為甚麼 X 的速率與 Y 不同。 (1 分)
- 除了徑向速度外，分析恆星的輻射還可以推斷恆星的哪些特性？試舉出一個例子。 (1 分)

### 題解

- (a) 設  $x$  為 X 和 Y 之間的距離， $d$  為星系與地球之間的距離。

根據小角公式， $\frac{x}{d} = \theta$  1M

X 和 Y 之間的距離

$$= d\theta = (560 \times 10^3) \times 3.09 \times 10^{16} \times 1.8 \times \frac{\pi}{180}$$

$$= 5.44 \times 10^{20} \text{ m}$$
1A

- (b) (i) 根據  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v_r}{c}$ , 1M

$$v_r \approx \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c$$

$$= \frac{485.54 - 486.01}{486.01} \times 3.00 \times 10^8$$

$$= -2.90 \times 10^5 \text{ m s}^{-1} \text{ (移向地球)}$$
1A

- (ii) 實際數值或會較大， 1A

因為 Y 可能有橫向分量，只是 (b)(i) 部的運算過程把它略去不計。 1A

- (iii) 星系正在移離地球。 1A

- (c) 恆星的表面溫度 1A

#### 常見錯誤

學生可能忘記把角度轉換為弧度，或忘記把 kpc 轉換為 pc。

#### 常見錯誤

學生可能會混淆 X 的光譜和靜止光源的光譜。

因為 X 和 Y 與星系中心的距離相等，所以它們徑向速度的量值理應相近。由於 X 移離地球的速率比 Y 移近地球的速率高很多，這星系應該正在移離地球。

▶ 複習 Q38 (p.135)



進度評估 9

各題號旁的數字對應本節重點(參看 p.113)。

3 1 下列哪項有關暗物質的敘述是正確的?

- (1) 暗物質不能用可見光直接探測得到。
- (2) 暗物質不會影響恆星的運動。
- (3) 暗物質是在研究星系旋轉曲線時發現的。

- A 只有 (1) 和 (2)
- B 只有 (1) 和 (3)**
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)

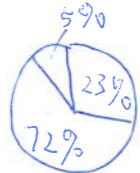
3 2 下列哪一項敘述是正確的?

- A 大多數星系的光譜都出現藍移。
- B 宇宙膨脹是指宇宙中大多數星系都在膨脹。
- C 過往，宇宙中所有物質之間都相距較近。**
- D 大爆炸指星系發生爆炸。

習題與思考 4.4

3 1 在銀河系中，以下哪一項的總質量最大?

- A 恆星
- B 氣體
- C 塵埃
- D 暗物質**



- A 只有 (1) 和 (2)**
- B 只有 (2) 和 (3)
- C 只有 (3) 和 (4)
- D (1)、(2)、(3) 和 (4)

1 4 某星系的光譜出現紅移， $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$  的比是 0.01。該星系的徑向速度是多少?

$3 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$

1 5 恆星以  $25 \text{ km s}^{-1}$  的徑向速度移近地球。它放出輻射時，原來在  $500.00 \text{ nm}$  的光譜線會在哪个波長出現?

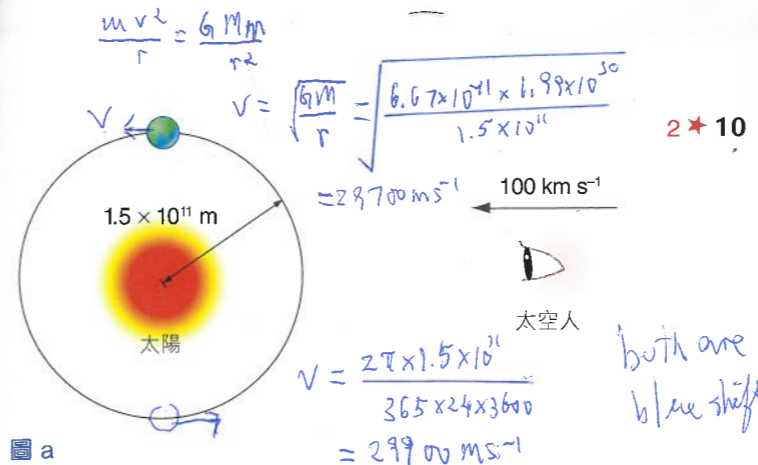
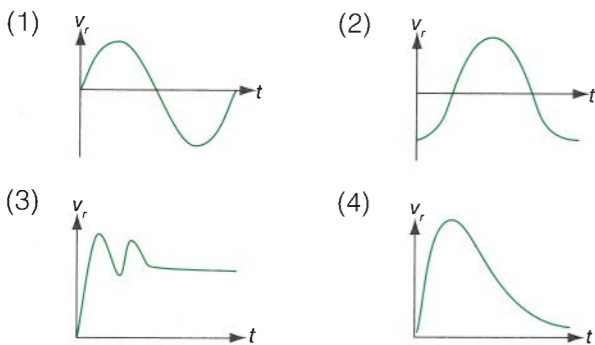
$499.96 \text{ nm}$

1 6 恆星的光譜上有一條本來位於波長  $656.3 \text{ nm}$  的線。如果恆星以  $1000 \text{ km s}^{-1}$  的速率移離我們，那麼，從地球觀察，這條線會在哪个波長出現?

$658.5 \text{ nm}$

2 7 恆星 P 圍繞恆星 Q 運行。恆星 Q 的質量遠比恆星 P 大得多。假設 P 的軌道中心有一名觀察者，試解釋這觀察者可以怎樣利用恆星 P 的光譜，驗證恆星 P 的軌道是圓形的。

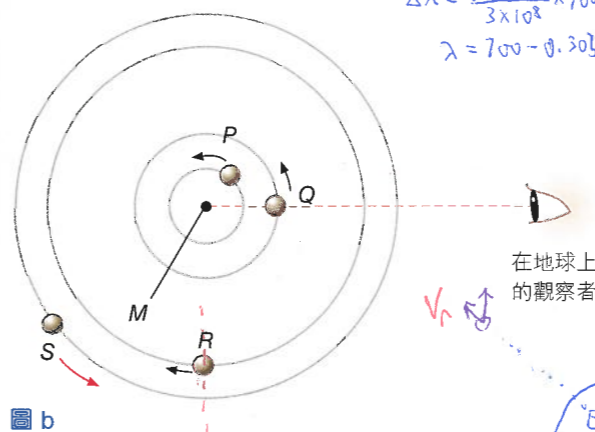
2 8 太空人一邊以  $100 \text{ km s}^{-1}$  的速率向着太陽系移動，一邊觀察從地球發出的  $700 \text{ nm}$  紅色激光束(圖 a)。太空人的移動路徑與地球軌道在同一平面上。(取地球的軌道半徑為  $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ 。)



(a) 太空人看見地球移動的最小速率和最大速率分別是多少?  
 (b) 根據以上結果，求地球圍繞太陽運行時，太空人觀察到的最小波長和最大波長。

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$   
 $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \lambda$   
 $\Delta\lambda = \frac{100 \times 10^3}{3 \times 10^8} \times 700 \text{ nm} = 0.1636 \text{ nm}$   
 $\lambda = 700 - 0.1636 = 699.836 \text{ nm}$

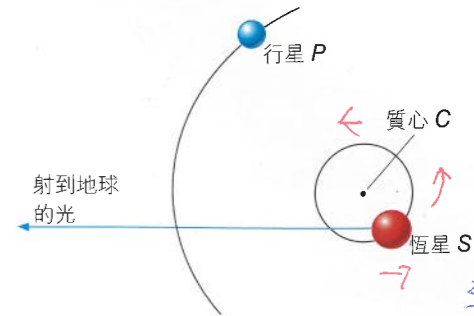
2 9 恆星 P、Q、R 和 S 沿圓周軌道圍繞一個高質量天體 M 運行。圖 b 顯示 P、Q 和 R 的運動方向。整個恆星系統相對地球的徑向速度可略去不計。



(a) 在圖 b 顯示的一刻，在地球的觀察者記錄了這四顆恆星的光譜，並與實驗室內獲得的光譜作比較。根據這些光譜，地球上的觀察者可以測定恆星 P、Q 還是 R 的運行速度? 試簡單解釋。  
 (b) 在圖 b 顯示的一刻，恆星 P、Q、R 之中，哪顆的光譜會出現紅移? 試簡單解釋。  
 (c) 恆星 S 在圖 b 顯示的位置時，它的光譜中有一條位於  $655.88 \text{ nm}$  的光譜線。根據實驗室測量所得，這條光譜線應該在  $656.30 \text{ nm}$  的位置。  
 (i) 在圖 b 繪畫箭號，以標示恆星 S 的運動方向。  
 (ii) 求恆星 S 在那一刻的徑向速度。

$\frac{656.3 - 655.88}{656.3} = \frac{v}{3 \times 10^8}$   
 $v = 192 \text{ km s}^{-1}$  (移向地球)

2 10 如圖 c 所示，行星 P 圍繞恆星 S 運行，兩者都圍繞共同的質心 C 移動。



實驗室靜止光源的光譜上，有一條波長  $\lambda$  為  $656.3 \text{ nm}$  的光譜線。

天文學家觀察恆星 S 的光超過 100 小時，把同一條光譜線的波長變化  $\Delta\lambda$  記錄在表 a 內。

時間 / 小時	$\Delta\lambda / 10^{-15} \text{ m}$	徑向速度 / $\text{m s}^{-1}$
1	7.72	3.53
9	65.6	30.0
18	109	49.9
26	117	53.5
34	93.6	42.8
43	38.1	17.4
52	-30.6	-14.0
60	-83.6	-38.2
67	-112	-51.1
76	-114	-52.1
85	-77.9	-35.6
94	-15.4	-7.04
100	30.6	14.0

表 a  
 (a) 試在表 a 的空白位置填上數據。  
 (b) 繪畫線圖，以顯示恆星徑向速度隨時間的變化。  
 (c) 根據 (b) 部的線圖，估算行星圍繞質心 C 運行一周所需的時間。



## 總結 4

## 詞彙

1 視差 parallax	p.90	15 主序星 main sequence star	p.107
2 亮度 brightness	p.95	16 超巨星 supergiant	p.107
3 光度 luminosity	p.95	17 吸收光譜 absorption spectrum	p.110
4 強度 intensity	p.95	18 吸收譜線 absorption line	p.110
5 視星等 apparent magnitude	p.97	19 光譜線 spectral line	p.110
6 絕對星等 absolute magnitude	p.97	20 多普勒效應 Doppler effect	p.113
7 黑體 blackbody	p.102	21 藍移 blue shift	p.114
8 斯特藩定律 Stefan's law	p.104	22 紅移 red shift	p.114
9 光譜型 spectral class	p.106	23 徑向速度 radial velocity	p.114
10 赫茲普龍—羅素圖 / 赫羅圖 Hertzsprung-Russell diagram (H-R diagram)	p.106	24 太陽系外行星 extrasolar planet	p.116
11 主序 main sequence	p.107	25 質心 centre of mass	p.116
12 巨星 giant	p.107	26 徑向速度曲線 radial velocity curve	p.116
13 紅巨星 red giant	p.107	27 旋轉曲線 rotation curve	p.119
14 白矮星 white dwarf	p.107	28 暗物質 dark matter	p.119
		29 大爆炸 Big Bang	p.120

## 課文摘要

## 4.1 恆星的距離

- 1 鄰近恆星的距離可用視差法量度。
- 2 與地球相距 1 秒差距的恆星，它的視差就是 1 角秒。

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ AU}$$

$$d (\text{以秒差距為單位}) = \frac{1}{p (\text{以角秒為單位})}$$

## 4.2 恆星的亮度

- 3 恆星的光度  $L$  是它每秒以輻射形式放射至太空的總能量。

$$L = \frac{\text{放射的總能量}}{\text{時間}}$$

光度的單位是 W 或  $\text{J s}^{-1}$ 。

- 4 恆星的強度  $I$  是觀察者在每秒內每單位面積接收到的能量。

$$I = \frac{L}{4\pi d^2}$$

其中  $d$  是恆星和觀察者之間的距離。強度的單位是  $\text{W m}^{-2}$ 。

- 5 視星等  $m$  從觀察者的角度描述天體的亮度。視星等愈小，亮度愈高。
- 6 天體的絕對星等  $M$  定義為該天體在 10 pc 的距離所顯現的視星等。絕對星等愈小，光度愈高。

## 4.3 恆星的分類

- 7 黑體是一種理想物體，所有照射在黑體上的電磁輻射，不論波長是多少，都會被黑體完全吸收。黑體也是完美的輻射發射體。
- 8 黑體輻射曲線是連續不斷的，它的形狀只取決於黑體的表面溫度。代表不同表面溫度的曲線永不相交，因此，兩個大小相同的黑體，表面溫度較高的，在任何波長的輻射強度也較高。
- 9 黑體輻射曲線的最高點和黑體的表面溫度有關。隨着表面溫度上升，黑體輻射曲線的最高點會移往較短的波長： $T \uparrow \Rightarrow \lambda_{\text{max}} \downarrow$
- 10 黑體輻射曲線下方的面積代表每單位表面面積的黑體放射能量的總功率  $J$ 。根據斯特藩定律， $J = \sigma T^4$ ，其中  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ 。
- 11 恆星的光度、半徑和表面溫度之間的關係：

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- 12 恆星可根據它們的表面溫度分類為不同的光譜型 (表 4.3a, 見 p.106)。
- 13 赫羅圖的縱軸代表恆星的光度 (或絕對星等)，橫軸代表恆星表面溫度 (或光譜型) (圖 4.3d, 見 p.107)。
- 14 恆星在赫羅圖上形成幾個羣組：主序、紅巨星和白矮星。
- 15 恆星的半徑可用以下公式計算：

$$R = \frac{\sqrt{L}}{T^2} \quad (\text{以太陽單位計算})$$

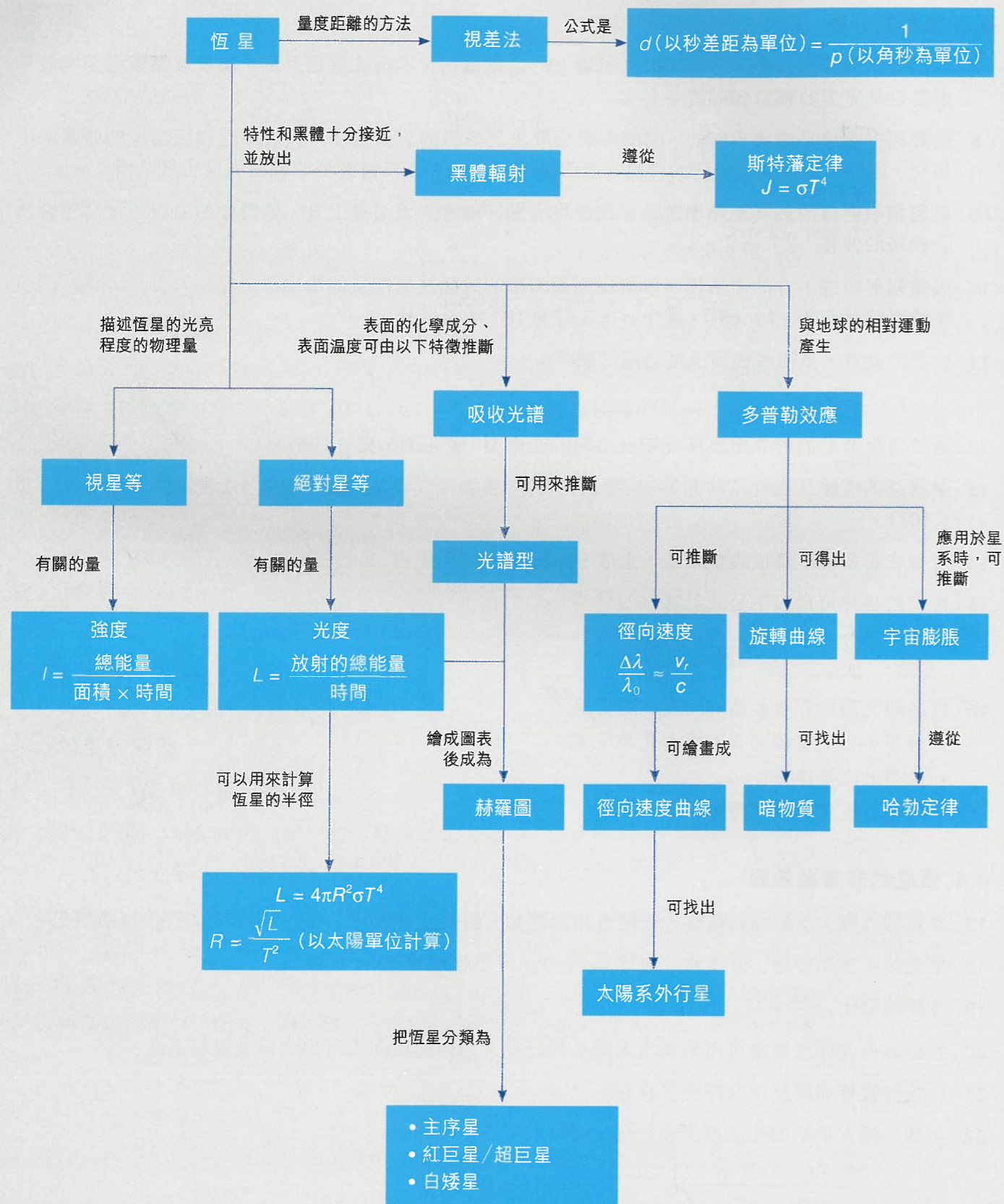
- 16 恆星的光譜中有吸收譜線。這些線揭示了：
  - 恆星表面的氣體中含有哪些化學元素；
  - 恆星的表面溫度；
  - 恆星正在移近或移離地球。

## 4.4 恆星的多普勒效應

- 17 多普勒效應：當波源和觀察者之間有相對運動，觀察者接收到的頻率 (和波長) 所出現的變化。
- 18 星光的多普勒效應：恆星移近地球  $\Rightarrow$  藍移，恆星移離地球  $\Rightarrow$  紅移
- 19 波長的變化： $\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} \approx \frac{v_r}{c}$  ( $v_r \ll c$ )
- 20 恆星的徑向速度曲線可用來找出太陽系外行星。徑向速度曲線可用來研究雙星系統。
- 21 星系的旋轉曲線反映有暗物質存在。
- 22 大部分遠方星系的光譜都出現紅移，這顯示宇宙正在膨脹。



概念圖



複習 4

- Q1 所有照射在黑體上的電磁輻射，不論波長多少，都會被黑體完全吸收。物體吸收電磁輻射，並不代表它會把那些電磁輻射完全吸收。
- Q2 黑體的顏色取決於可見光的相對強度。如第 103 頁圖 4.3b 所示，最高點位於 500 nm 的曲線中，不同色光的相對強度大致相同。因此，該黑體呈白色。

概念重溫

(第 1 至 2 題) 判斷以下各敘述是正確的，還是錯誤的。

☆ 以 WJEC GCE Summer 2009 PH2 (New AS) Q7(a)

- 4.3 1 如果某物體吸收不同波長的電磁輻射，就必定是黑體。 **F**
- 4.3 2 如果黑體輻射曲線的最高點在 500 nm (綠光)，黑體必然呈綠色。 **F**

★ 6 下列哪項敘述是正確的？

- 4.3 (1) 1200 K 黑體每單位表面面積放射的輻射，大約是 1000 K 黑體的兩倍。
- (2) 恆星每單位表面面積所放射的功率只取決於恆星的表面溫度。
- (3) 黑體的顏色取決於它的表面溫度。
- A 只有 (1)
- B 只有 (1) 和 (3)
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)**

多項選擇題

綜合題 3 下列哪項敘述必然正確？

- (1) 鄰近恆星的視差較遙遠恆星的視差大。
- (2) 亮度高的恆星比亮度低的恆星較接近我們。
- (3) 太陽光譜含有吸收譜線。

- A 只有 (1)
- B 只有 (3)
- C 只有 (1) 和 (2)
- D 只有 (1) 和 (3)**

4.3 4 根據斯特藩定律，若太陽的溫度增至原來的 3 倍，它所釋放的能量會怎樣改變？

- A 增至原來的 3 倍
- B 增至原來的 12 倍
- C 增至原來的 81 倍**
- D 增至原來的 243 倍

4.4 5 下列哪項有關宇宙膨脹的敘述是正確的？

- (1) 大部分星系都正在遠離地球。
- (2) 遙遠星系的遠離速度與距離成正比。
- (3) 宇宙膨脹是研究星系的多普勒效應時發現的。

- A 只有 (1)
- B 只有 (1) 和 (3)
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)**

★ 7 一輛車移離無線電發射站時接收到一個無線電訊號，下列哪項正確描述當時的情況？

- 4.4 (1) 汽車所接收到的無線電訊號會向較短的波長偏移。
- (2) 對於同一車速來說，無線電訊號的波長愈長，波長的偏移便愈大。
- (3) 汽車與發射站相距愈遠，波長的偏移便愈大。

- A 只有 (2)**
- B 只有 (1) 和 (3)
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)

★ 8 如果恆星正移向地球，它的黑體輻射曲線會出現甚麼變化？

- A 曲線的最高點在強度較高的位置出現。
- B 曲線的最高點在強度較低的位置出現。
- C 曲線的最高點在波長較長的位置出現。
- D 曲線的最高點在波長較短的位置出現。**

★ 9 下列哪項敘述必然正確？

- (1) 黑體放射的所有輻射都屬於同一頻率。
- (2) 黑體輻射曲線最高點的位置取決於黑體的表面溫度。
- (3) 視星等愈低，恆星的光度愈高。

- A 只有 (2)**
- B 只有 (1) 和 (3)
- C 只有 (2) 和 (3)
- D (1)、(2) 和 (3)



4.1★ 10 恆星 X 和地球相距 2 pc。圖 a 顯示二月時恆星 X 相對於背景恆星的位置，圖 b 顯示二月時地球、太陽和恆星 X 的相對位置。從地球觀察，恆星 X 在八月時最有可能在圖 a 中哪個位置出現？



圖 a

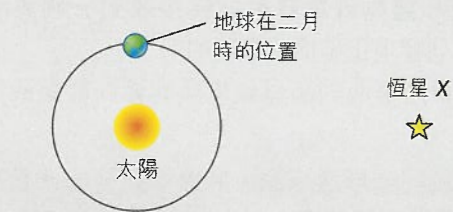


圖 b

- A P                      B Q  
C R                      D S

4.3★ 11 圖 c 顯示恆星 W、X、Y 和 Z 在赫羅圖上的位置。圖中，光度和表面溫度分別以太陽光度和太陽的表面溫度為單位。哪顆恆星比太陽大？

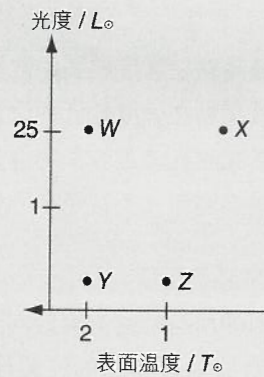
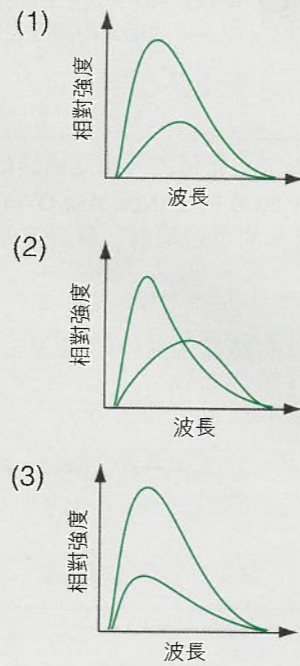


圖 c

- A 只有 X  
B 只有 W 和 X  
C 只有 W 和 Z  
D 只有 Y 和 Z

4.3★ 12 下列哪組曲線顯示同一黑體在不同表面溫度下的黑體輻射曲線？



- A 只有 (1)  
B 只有 (3)  
C 只有 (1) 和 (3)  
D (1)、(2) 和 (3)

(第 13 至 14 題) 圖 d 顯示恆星 P、Q 和 R 在強度對距離線圖上的位置。在同一曲線上的恆星有相同的光度。

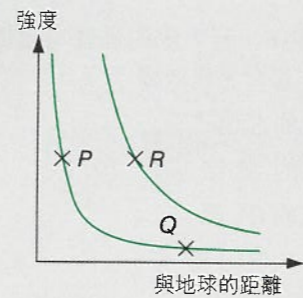


圖 d

- 4.2★ 13 哪顆恆星的視星等最大？  
A Q                      B R  
C P 和 R                D P 和 Q

參看 p.95-97

- 4.1★ 14 哪顆恆星的絕對星等最小？  
A Q                      B R  
C P 和 R                D P 和 Q

參看 p.95-97

4.1★ 15 俊明分別在一月和三月拍攝恆星 P 的照片。圖 e 顯示地球在這兩個月份的位置。俊明打算憑這兩幅照片找出恆星 P 和地球之間的距離。

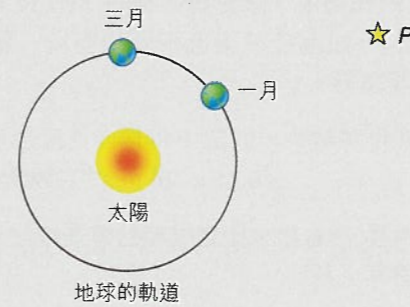


圖 e

根據照片，恆星 P 在上述兩個月份的角距離是 0.15"。下列哪項敘述是正確的？

- (1) 如果照片是在四月和十月左右拍攝的，量度結果會較準確。  
(2) 恆星 P 的距離是 13.3 pc。  
(3) 如果照片在一月和七月拍攝，恆星 P 在照片中兩個位置的角距離便會較大。

- A 只有 (1)  
B 只有 (1) 和 (2)  
C 只有 (2) 和 (3)  
D (1)、(2) 和 (3)

參看 p.91-93

4.2 16 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.6

參考下列資料，哪些有關恆星 X 和 Y 的敘述是正確的？

	絕對星等	視星等
恆星 X	2.8	4.7
恆星 Y	5.4	3.2

- (1) 恆星 X 比恆星 Y 距地球更遠。  
(2) 恆星 Y 比恆星 X 距地球更遠。  
(3) 恆星 X 和 Y 與地球的距離可以利用上列資料測定。

- A 只有 (1)  
B 只有 (2)  
C 只有 (1) 和 (3) (36%)  
D 只有 (2) 和 (3)

(第 17 至 18 題) 下圖顯示恆星 W、X、Y 和 Z 的資料。

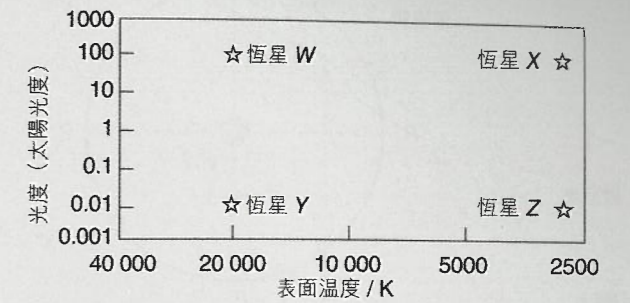


圖 f

4.3 17 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.7

下列哪些敘述是正確的？

- (1) 就恆星 X 而言，紅光的強度較其他顏色的光高。  
(2) 就恆星 W 而言，藍光的強度較其他顏色的光高。  
(3) 恆星 Z 與恆星 Y 相比，其紅光的強度跟其他顏色光的強度的比率較高。

- A 只有 (1) 和 (2)  
B 只有 (1) 和 (3)  
C 只有 (2) 和 (3)  
D (1)、(2) 和 (3) (44%)

4.3 18 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q1.8

恆星 X 的吸收光譜可找到氫吸收譜線。這有甚麼結論可以得到？

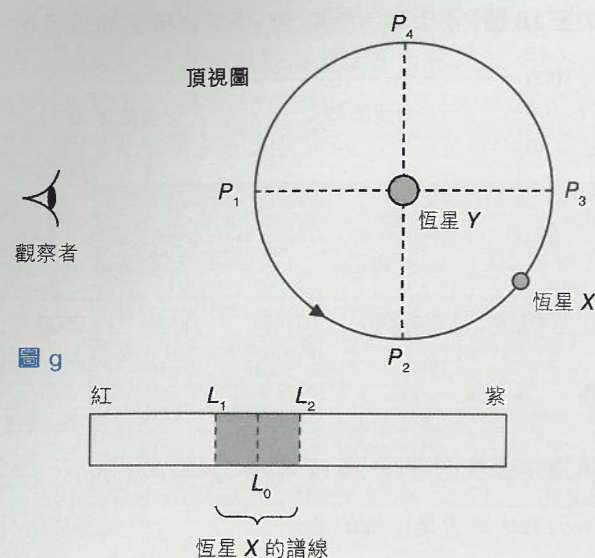
- (1) 恆星 X 主要成分為氫氣。  
(2) 在恆星 X 的外大氣層有氫氣。  
(3) 與其他溫度相同的恆星相比，恆星 X 的氫氣豐度較低。

- A 只有 (1)  
B 只有 (2) (59%)  
C 只有 (1) 和 (3)  
D 只有 (2) 和 (3)

4.4 19 香港中學文憑考試 2013 年卷二 Q1.3

恆星 X 於近乎圓形的軌道上繞恆星 Y 運動。在地球上觀察者觀察來自 X 的一條譜線，發現其波長於界限  $L_1$  和  $L_2$  之間變動， $L_0$  為該譜線在實驗室觀測得的波長。



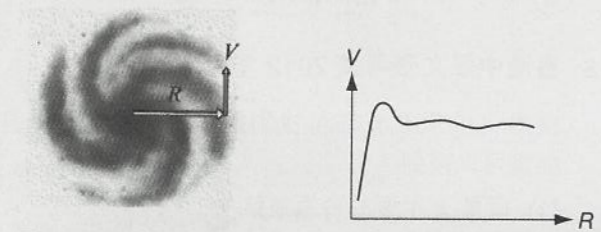


g 恆星 X 的譜線

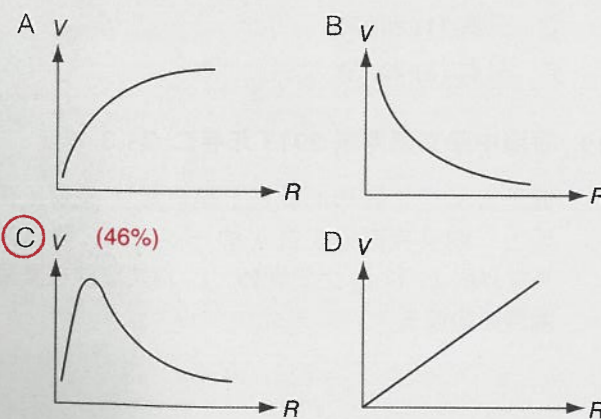
h 哪些波長對應於恆星 X 的位置  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ ?

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
(A)	$L_0$	$L_1$	$L_0$	$L_2$ (44%)
B	$L_1$	$L_0$	$L_2$	$L_0$
C	$L_0$	$L_2$	$L_0$	$L_1$
D	$L_2$	$L_0$	$L_1$	$L_0$

4.4 20 香港中學文憑考試 2013 年卷二 Q1.8



i 圖 i 展示一星系的頂視圖，以及觀測所得的旋轉速率  $V$  跟離星系中心的半徑  $R$  的變化，而該曲線揭示了暗物質的存在。倘若暗物質並不存在，則以下哪個應為預期的旋轉曲線？



(C) (46%)

問答題

4.4 21 鐵的一條光譜線在波長 525 nm 的位置出現。在恆星 P 的光譜中，該光譜線卻在 525.17 nm 的位置出現。已知恆星 P 沿圓形軌道圍繞一顆質量極高的恆星運行。

- (a) 在地球觀察，恆星 P 的徑向速度是多少？  
 $9.71 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$  (移離地球) (2分)
- (b) 恆星 P 看起來比實際較熱還是較冷？解釋你的答案。較冷 (2分)

綜合題 22 恆星 A 和 B 的光度相同，但恆星 B 的強度是恆星 A 的 1 000 000 倍。

- (a) 求恆星 A 與地球的距離：恆星 B 與地球的距離。1000 : 1 (2分)
- (b) 恆星 B 的視差是  $0.08''$ 。求恆星 A 和恆星 B 兩者與地球的距離。12 500 pc, 12.5 pc (3分)
- (c) 假設恆星 A 和 B 的半徑相等，由此可推導出甚麼與兩者表面溫度相關的結果？解釋你的答案。兩者相等 (2分)

★ 23 綜合題 用哈勃望遠鏡 (圖 j) 觀察一顆與太陽光度相同的恆星時，恆星的最大距離  $D$  只能是 100 000 pc，否則便觀察不到。取太陽光度為  $3.84 \times 10^{26} \text{ W}$ 。

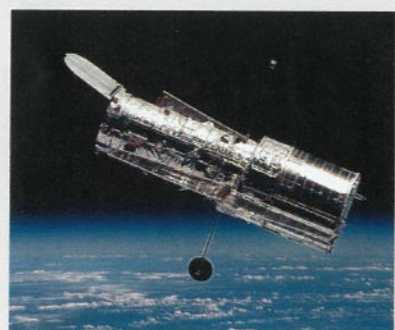


圖 j

- (a) 使用哈勃望遠鏡觀察時，恆星的最小強度是多少？ $3.20 \times 10^{-16} \text{ W m}^{-2}$  (2分)
- (b) 某恆星與地球的距離是  $D$ 。試計算它的視差。 $0.000 01''$  (2分)

★ 24 綜合題 在地球量度，太陽的強度是  $1361 \text{ W m}^{-2}$ 。

- (a) 太陽的光度是多少？ $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$  (2分)
- (b) 太陽的光譜顯示太陽的表面溫度為 5800 K。太陽的半徑是多少？ $6.91 \times 10^8 \text{ m}$  (2分)

(c) 試以太陽的半徑  $R$ 、太陽和地球之間的距離  $d$  和太陽的表面溫度  $T$ ，來表達太陽的強度  $I$ ，並由此估計，如果太陽的表面溫度增加 20% 而  $R$  保持不變，太陽強度升幅的百分比是多少。  
 $\frac{\sigma R^2 T^4}{d^2} \cdot 107\%$  (2分)

(d) 如果太陽的半徑增加而光度不變，它的表面溫度會怎樣改變？由此，指出太陽在赫羅圖上的位置變化。(2分)

4.3 ★ 25 (a) 試完成表 a。表中的各個物理量都以太陽單位量度。(2分)

恆星	光度 $L$	表面溫度 $T$	半徑 $R$
天狼星 A	23	1.6	1.9
織女星	51	1.6	2.8

表 a

(b) 在以下的赫羅圖中標示天狼星 A 與織女星的相對位置。(2分)

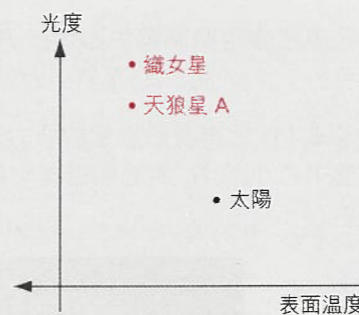


圖 k

(c) 已知天狼星 A 和織女星的外層氣體有不同豐度的化學元素。指出它們的光譜中，一項相同和一項不同之處。解釋你的答案。(4分)

綜合題 ★ 26 恆星 X 和 Y 的半徑相等，它們的絕對星等分別是 -3.55 和 2.21。

- (a) 哪顆恆星的表面溫度較高？試簡單解釋。X (3分)
- (b) 草繪赫羅圖，並標示 X 和 Y 的相對位置。(2分)
- (c) X 和 Y 的視星等分別是 2.5 和 -1。
  - (i) 哪顆恆星較接近地球？解釋你的答案。Y (2分)
  - (ii) 由此，推斷哪顆恆星的視差較大。Y (2分)

★ 27 圖 l 展示一幅視星等  $m$  對絕對星等  $M$  的線圖，虛線的斜率是 1。Y 和 Z 代表兩顆恆星。

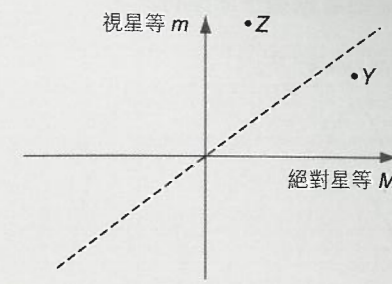


圖 l

- (a) 位於虛線的恆星與地球的距離是多少？試解釋原因。10 pc (2分)
- (b) Z 與地球的距離比 (a) 部所提及的距離較大還是較小？試解釋原因。較大 (2分)
- (c) 據此，比較 Y 和 Z 兩顆恆星與地球之間的距離。Y < Z (1分)

★ 28 4.4 (a) 哈勃定律可用數式表達成  $v = Hd$ ，其中  $H$  是比例常數，稱為哈勃常數。 $v$  和  $d$  代表甚麼？  
 $v$ ：星系移離地球的速度 (2分)

(b) 圖 m 顯示遙遠星系的波長百分改變  $\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right)$  怎樣隨星系與地球之間的距離 ( $d$ ) 而變化。

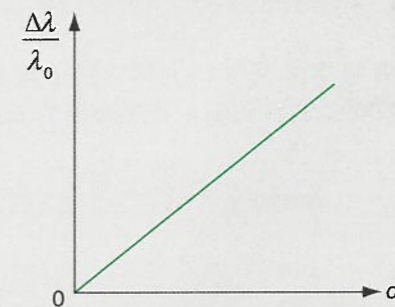
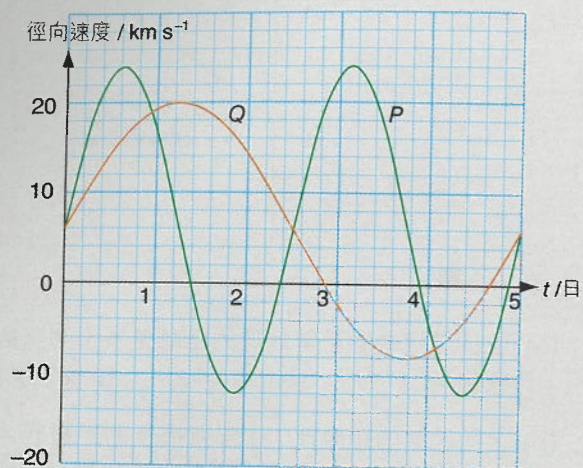


圖 m

- (i) 以  $H$  和  $c$  表達線圖的斜率。 $\frac{H}{c}$  (2分)
- (ii) 某星系的光譜有一條位於波長 659.58 nm 的光譜線。如果用實驗室的靜止光源量度，這條線應位於波長 656.30 nm 的位置。試以 Mpc 為單位，找出該星系和地球之間的距離。取  $H = 74.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 。  
20.2 Mpc (2分)

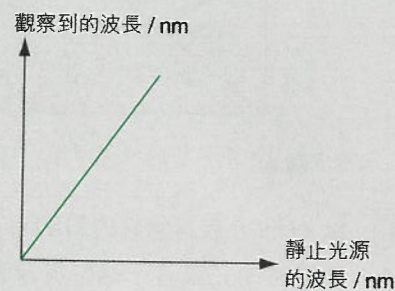


★ 29 圖 n 顯示兩顆恆星 P 和 Q 的徑向速度曲線。兩顆恆星都在同一平面上沿圓周軌道運行。假設所有觀察都是沿着軌道平面進行的。



- 綜合題
- (a) 每顆恆星的最大和最小徑向速度的量值並不相同。試舉出一個原因。(1分)
- (b) 兩顆恆星的軌道之內有一顆質量很大的恆星 R。  
 (i) 求 P 和 Q 的角速度。 $2.91 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ ,  $1.45 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$  (2分)  
 (ii) 求 P 和 Q 的軌道半徑。 $6.19 \times 10^8 \text{ m}$ ,  $9.63 \times 10^8 \text{ m}$  (5分)  
 (iii) 據此，估算恆星 R 的質量，答案準確至一位有效數字。 $3 \times 10^{27} \text{ kg}$  (2分)

4.4 ★ 30 浩揚觀察星系 X 的光譜，然後繪畫線圖，記錄觀察到的波長和靜止光源發出的波長之間的關係(圖 o)。



- 綜合題
- (a) 圖線斜率的值 (i) 大於 1、(ii) 等於 1、(iii) 小於 1，各有甚麼物理意義？(3分)
- (b) 假設圖線的斜率為 1.001。計算星系 X 的徑向速率。 $3.00 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$  (3分)
- (c) 寫出一項在 (b) 部所作的假設。(1分)

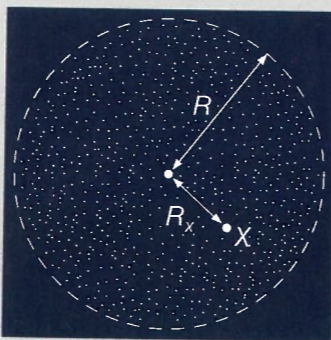
★ 31 一艘太空船沿半徑為 85 000 km 的圓周軌道，圍繞一顆遙遠行星運行。置身在地球並太空船的軌道平面觀察時，會發現太空船發出的無線電訊號的波長，在 3.999 58 m 和 4.000 42 m 之間呈週期性變化。假設太空船發出固定波長的無線電訊號，而且行星相對觀察者的徑向速度可略去不計。

- 綜合題
- (a) 如果太空船相對觀察者靜止不動，觀察者接收到無線電訊號的波長是多少？ $4.000 00 \text{ m}$  (1分)
- (b) 計算太空船的運行速率。 $3.15 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$  (2分)
- (c) 求太空船的週期和角速度。 $1.70 \times 10^4 \text{ s}$ ,  $3.71 \times 10^{-4} \text{ rad s}^{-1}$  (4分)
- (d) 估算行星的質量。 $1.26 \times 10^{27} \text{ kg}$  (2分)

▶ 參看 p.117

★ 32 以下是一個簡單的星系模型：N 顆恆星(每顆質量為 m) 平均分佈在半徑為 R 的圓形薄盤上。每顆恆星在其他恆星的引力影響下，圍繞圓盤的中心運行。設恆星 X 與圓盤中心的距離為  $R_x$ (圖 p)。以下是找出作用於該恆星的淨力的方法：

- (1) 只須考慮距離圓盤中心小於  $R_x$  的恆星所作的引力：大於  $R_x$  的恆星對引力沒有影響；
- (2) 考慮 (1) 所提及的恆星的引力時，可把距離圓盤中心小於  $R_x$  的恆星視作全部集中在圓盤的中心。



- 綜合題
- (a) 根據以上資料，求恆星與圓盤中心的距離是 (i)  $\frac{R}{2}$ 、(ii)  $R$ 、(iii)  $2R$  時，恆星的運行速率。(3分)
- (b) 根據以上結果，繪畫星系模型的旋轉曲線。(3分)
- (c) 甚麼是暗物質？(2分)
- (d) 假如 R 內外都有暗物質，旋轉曲線會有甚麼變化？試畫出旋轉曲線，並解釋原因。(2分)

▶ 參看 p.119

★ 33 HD 70642 是一顆恆星，並有一顆太陽系外行星圍繞它運行。圖 q 顯示該恆星的徑向速度曲線。假設我們沿着恆星和行星的軌道平面觀察。

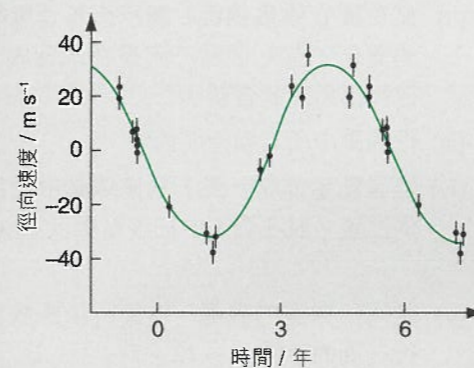


圖 q

- (a) 試解釋為甚麼恆星的徑向速度呈週期性變化。(1分)
- (b) 軌道呈圓形還是橢圓形？為甚麼？圓形 (2分)
- (c) 該恆星的運行速率、週期和角速度是多少？ $30 \text{ m s}^{-1}$ , 6年,  $3.32 \times 10^{-8} \text{ rad s}^{-1}$  (3分)
- (d) 試找出行星的角速度。 $3.32 \times 10^{-8} \text{ rad s}^{-1}$  (1分)
- (e) 已知 HD 70642 的質量是  $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，行星的質量是  $3.79 \times 10^{27} \text{ kg}$ 。試計算行星的軌道半徑和運行速率。 $4.95 \times 10^{11} \text{ m}$ ,  $1.64 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$  (4分)
- ▶ 參看 p.117

☆ Paper 2  
4.4 34 CCEA GCSE Jun 2005 Higher Tier Q5

- (a) 地球上的鈣原子受熱至極高溫度時，所放出的光會產生含有亮線的光譜。每條線的顏色各有不同，每種顏色對應特定的波長。

如果觀看在其他星系的鈣原子所放出的光，會發現光譜線的圖樣和在地球時的相似，但光譜線會分佈在不同的位置，這證明波長出現了變化。

圖 r 展示，在地球和三個不同星系的鈣原子所放出的光的光譜線。

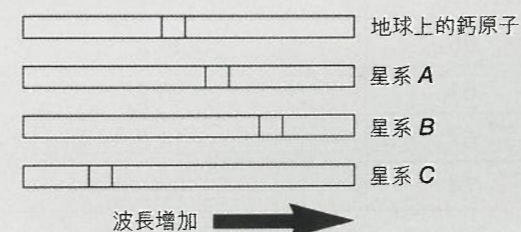


圖 r

- (i) 上述哪些星系正在遠離地球(如有的話)? 試解釋你的答案。A、B (2分)
- (ii) 題 (i) 的答案所展示的效應稱為甚麼？紅移 / 多普勒效應 (1分)
- (iii) 太陽系所屬的星系稱為甚麼？銀河系 (1分)

(b) 支持大爆炸理論的證據，來自哈勃對其他星系的移動速率和它們與地球的距離的觀測結果。表 b 顯示了哈勃部分的觀測數據。

星系	星系與地球的距離 / 百萬光年	速率 / $\text{km s}^{-1}$
A	50	1000
B	400	8000
C	500	10 000
D	600	12 000

表 b

- (i) 試在圖 s 畫出線圖，顯示速率(以  $\text{km s}^{-1}$  為單位)隨距離(以百萬光年為單位)的變化。(3分)

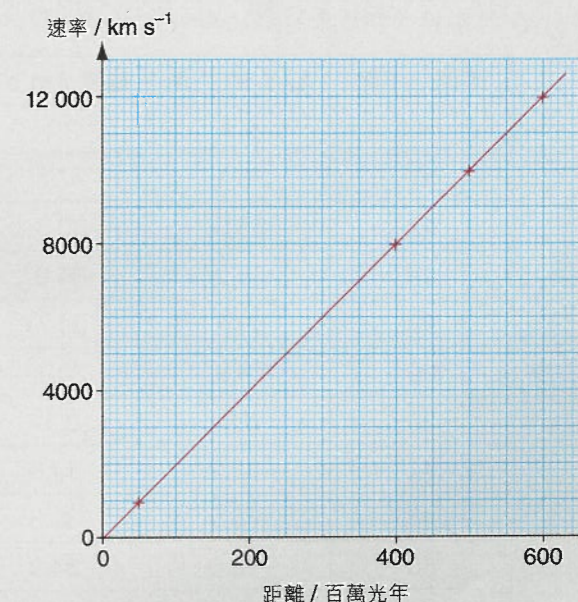


圖 s

- (ii) 從以上線圖，怎樣得知這些星系的速率和它們與地球的距離成正比？(1分)



綜合題 35 OCR GCE Jun 2005 Q2 ☆ Physics A Unit 2825/01

- (a) 寫出各條開普勒行星運動定律。(3分)
- (b) 天文學家正在尋找圍繞遙遠恆星運行的行星。這些行星無法從地球看得到，但由於恆星運動會導致它所釋出的星光的波長偏移，天文學家可以透過觀察這種現象，找出上述行星。

圖 t 顯示一顆巨大的行星 P 圍繞恆星 S 運行。恆星和行星都圍繞共同質心 C 轉動。

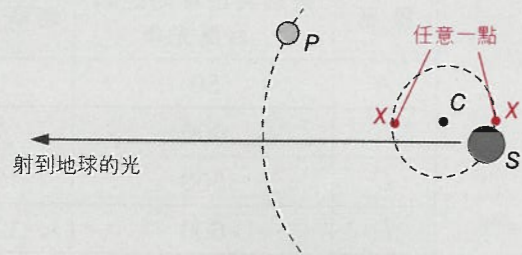


圖 t

用實驗室的靜止光源，可錄得光譜線在波長  $\lambda$  為 656.3 nm 的位置出現。天文學家觀察恆星 S 的光超過 74 小時，把同一條光譜線的波長變化  $\Delta\lambda$  記錄在表 c 內，並計算出對應的速度。

時間 / 小時	$\Delta\lambda / 10^{-15} \text{ m}$	速度 / $\text{m s}^{-1}$
1	6.7	3.1
6	38.1	17.5
12	66.0	30.3
19	76.0	34.9
23	69.1	31.7
29	43.8	20.1
35	6.8	3.1
41	-32.2	-14.8
48	-66.0	-30.3
55	-76.0	-34.9
61	-62.5	-28.7
67	-32.2	-14.8
74		6.1

表 c

- (i) 利用多普勒有關  $\Delta\lambda$  和速度  $v$  的公式，計算最後一項資料中，速度為  $6.1 \text{ m s}^{-1}$  時的波長變化。  $13.3 \times 10^{-15} \text{ m}$  (3分)
- (ii) 試在圖 u 繪畫線圖，顯示恆星速度隨時間的變化。首七個點已經畫在線圖內。表 d 已列出所需的資料。(2分)
- (iii) 把線圖中所有點連成曲線。(1分)
- (iv) 恆星軌道的哪一點，對應線圖中速度為零的位置？試在圖 t 中把該點標示為 X。(1分)
- (v) 利用所繪畫的線圖，估算行星圍繞恆星運行一周的時間  $T$ 。  $72 \text{ 小時}$  (1分)
- (vi) 恆星的質量  $M$  為  $4 \times 10^{30} \text{ kg}$ 。利用下列關係式，計算行星軌道的半徑。  $7.69 \times 10^9 \text{ m}$

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} \quad (2 \text{ 分})$$

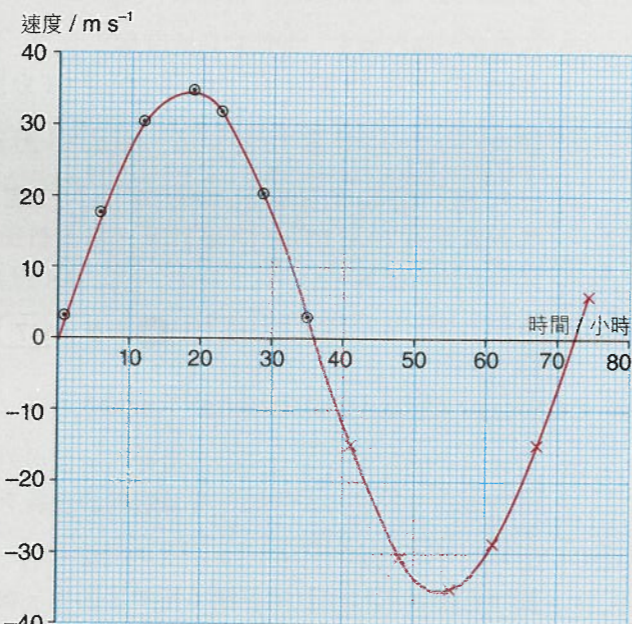


圖 u

時間 / 小時	速度 / $\text{m s}^{-1}$
41	-14.8
48	-30.3
55	-34.9
61	-28.7
67	-14.8
74	6.1

表 d

☆ New specification, 略去 (c) 部  
□ 考試報告見 p.140。

綜合題 36 WJEC GCE Summer 2009 PH2 Q7

- (a) 某恆星的連續光譜和黑體的光譜相似。黑體是甚麼意思？(1分)
- (b) 天狼星和地球之間的距離估計是  $8.1 \times 10^{16} \text{ m}$ 。天狼星放出的電磁輻射到達地球時，錄得的強度為  $1.2 \times 10^{-7} \text{ W m}^{-2}$ 。

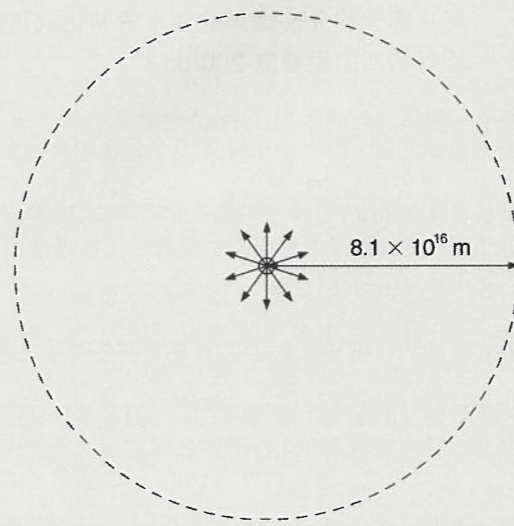


圖 v

- (i) 天狼星沿所有方向均勻地放射輻射。根據以上的數據，證明天狼星表面放出輻射的功率為  $9.9 \times 10^{27} \text{ W}$ 。(2分)
- (ii) 試解釋為甚麼天狼星實際的功率會比上述數值大。(1分)
- (iii) 天狼星的表面溫度是 9900 K。運用斯特藩定律，估算天狼星的半徑。  $1.2 \times 10^9 \text{ m}$  (3分)
- (iv) 以下是天狼星的連續光譜。試在圖上草繪太陽的光譜。已知太陽的表面溫度是 5800 K。(假設太陽和天狼星的表面面積大致相等。)(2分)

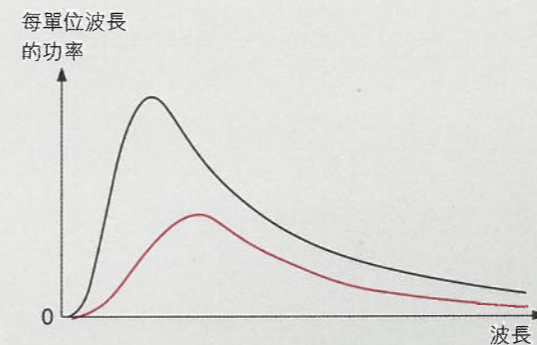


圖 w

☆ 略去原題 (a)(ii) 部和 (c) 部

37 WJEC GCE Winter 2011 PH2 Q8

綜合題

- (a) 在距離太陽中心  $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$  的位置量度，太陽所放出的電磁輻射強度為  $1.36 \text{ kW m}^{-2}$ 。

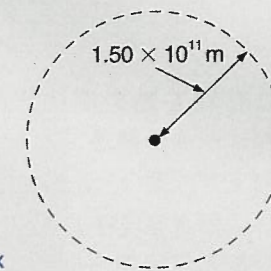


圖 x

- 證明太陽釋出的功率約為  $4 \times 10^{26} \text{ W}$ ，並以三個有效數字表達答案。  $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$  (2分)
- (b) 太陽表面的溫度為 5780 K。
- (i) 運用斯特藩定律，計算太陽的表面面積。  $6.08 \times 10^{18} \text{ m}^2$  (2分)
- (ii) 運用光學的方法，可以量得太陽的直徑為  $1.4 \times 10^9 \text{ m}$ 。試清楚證明你在 (b)(i) 部的答案與這數據是否一致。(2分)

□ 考試報告見 p.136。

38 香港中學文憑考試練習卷 2012 年卷二 Q.1

綜合題

- (a) 我們觀察一星系 X，如圖 y 所示。X 相對地球的速度可以忽略。A 點和 B 點皆距離中心 10 kpc。在 A 點和 B 點氫氣 H-alpha 線的波長分別是 656.83 nm 和 655.73 nm，而實驗室中測得 H-alpha 線的波長為 656.28 nm。

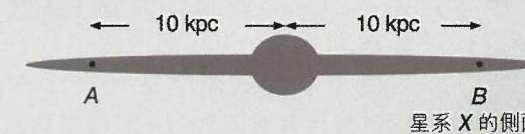


圖 y

- (i) 求在 A 點氫氣沿着地球上觀察者視線方向的速率。  $2.51 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$  (1分)
- (ii) 簡單解釋在哪一點 (A 或 B) 的氫氣正向着地球運動。 B (2分)
- (iii) 假設 A 點和 B 點的氫氣繞着 X 的中心作圓周運動，而 X 的質量集中於其中心。估算 X 的質量。  $2.92 \times 10^{41} \text{ kg}$  (2分)



(b) 如圖 z 所示，對另一星系 Y 作出觀測。



圖 z

(i) C 點和 E 點之間的張角為  $1.6^\circ$ 。已知 Y 和地球的距離是 950 kpc，以 kpc 表出 C 和 E 的間距。 **26.5 kpc** (2 分)

(ii) 詳細觀測發現在 D 點和 E 點氫氣沿着地球上觀察者視線方向的速度相若。據此，對 Y 的質量分佈可作甚麼推斷？假設 D 點和 E 點的氫氣繞着 Y 的中心作圓周運動。

(1 分)

(c) 簡單解釋如何透過分析一恆星的輻射以估算其表面溫度。 (2 分)

### 綜合題 39 香港中學文憑考試 2012 年卷二 Q.1

(a) 設  $R_s$ 、 $T_s$  和  $L_s$  為太陽的半徑、表面溫度和光度，而  $R$ 、 $T$  和  $L$  為某恆星的半徑、表面溫度和光度。

(i) 證明  $R = \left(\frac{T_s}{T}\right)^2 \left(\frac{L}{L_s}\right)^{\frac{1}{2}} R_s$ 。 (2 分)

(ii) 獵戶座參宿四是一顆恆星，它的表面溫度為 3650 K，而其光度是太陽的 126 000 倍。求參宿四的半徑，以  $R_s$  表達。取太陽的表面溫度為 5780 K。 (2 分)

(b) (i) 參宿四的距離據估算為 197 pc，而該距離對應於 (a)(ii) 部所提供的光度。於 2008 年其距離測定為  $197 \pm 45$  pc。無須計算出其實際數值，解釋當取該測定距離的上限時，在 (a)(ii) 求得的參宿四半徑會怎樣改變。參宿四於這距離可當作點光源，並向各方均勻地發光。 (2 分)

(ii) 提出一個原因說明為何難以用視差法準確量度參宿四的距離。 (1 分)

(c) 2011 年，有媒體報道當參宿四發生超新星爆炸時（即完成其恆星生命歷程），在數星期內參宿四在天空上會好像「第二個太陽」。參考下述資料，將參宿四的超新星爆炸與太陽兩者的亮度相比較，解釋這現象會否成真。 (3 分)

一顆與參宿四質量相約的恆星經歷超新星爆炸時，在同一時段內能放出比太陽強  $10^9$  倍的光度，而大約 1% 爆炸的功率會轉化成可見光。取參宿四的距離為 200 pc。

□ Q38 考試報告：有些考生在 (a)(i) 部計算時代入在 A 點和 B 點氫氣線的波長，而不是比較 A 點的波長與實驗室數據的分別。有些考生在 (a)(iii) 部忽略了單位 kpc 所代表的 1000 倍。有些考生在 (b)(i) 部中應用弧長公式時忘記把角度的單位轉換為弧度。在 (c) 部，有些考生沒有指出恆星放出的輻射可看成是黑體放出的輻射。

□ Q39 考試報告：表現未能令人滿意。很多考生在 (a)(i) 部沒有正確寫出斯特藩定律  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$ ，或由  $\frac{L_s}{L} = \frac{T_s^4 R_s^2}{T^4 R^2}$  開始導出結果。考生在 (a)(ii) 部的表現理想，只有少數考生未能找到  $R$  的量值，因他們誤用 (a)(i) 部的關係式或代入錯誤數據。有些考生在 (b)(i) 部誤用方程  $d = \frac{1}{\rho}$  去估算半徑的變化，極少考生能明確地應用亮度  $= \frac{L}{4\pi d^2}$  來解說在相同亮度下光度會隨距離增加而增強。有些則混淆了光度與亮度。(b)(ii) 部答得不錯。考生在 (c) 部的表現差劣，考生多嘗試利用  $d = \frac{1}{\rho}$  或  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  來比較太陽與超新星爆炸的亮度。

## 物理文章分析

★ 40 閱讀以下一段有關偵察遙遠行星的文章，並回答隨後的問題。

綜合題

### 宇宙中只有我們嗎？

天文學家為了解答這條老掉牙的問題，一直都在尋找太陽系外行星。2005 年，天文學家利用斯必澤太空望遠鏡 (Spitzer Space Telescope)，首次直接觀察到來自兩顆太陽系外行星的紅外輻射。因為恆星較行星明亮得多，所以遙遠行星放出的可見光難以拍攝得到，但恆星和行星所放射的紅外輻射對比較小 (圖 aa)，因此較易探測到行星的紅外輻射。

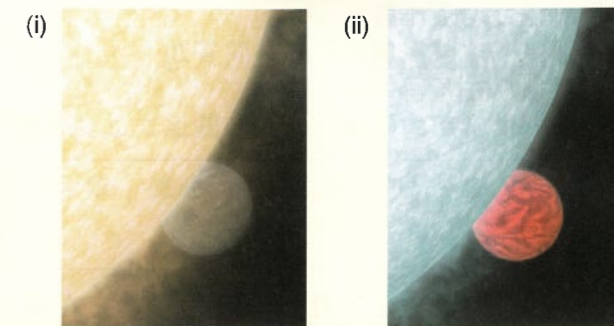


圖 aa 拍攝恆星和行星系統的構想圖 (i) 可見光影像 (ii) 紅外輻射影像

天文學家利用一個巧妙方法，錄得來自行星的輻射。在每個軌道週期中的某個時段，太陽系外行星可能被恆星遮蔽。那時候，紅外輻射只來自恆星，強度因而變得較弱 (圖 ab)。恆星或行星都沒有給遮蔽時，它們的總放射強度減去遮蔽行星時的紅外輻射強度，就是行星釋出的紅外輻射強度。天文學家根據這個結果，發現兩顆行星的軌道都是圓形，表面溫度約為  $1000^\circ\text{C}$ 。

(鳴謝：香港中文大學朱明中教授)

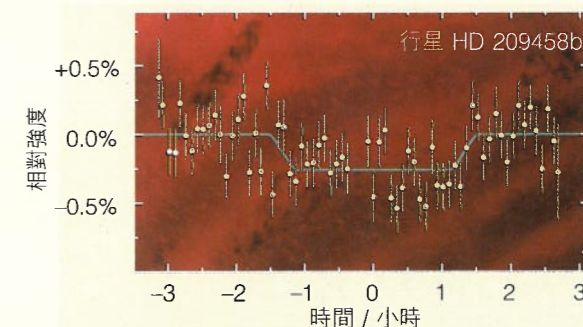


圖 ab 太陽系外行星給遮蔽時，紅外輻射的強度會下降

(a) 參考圖 ab。試估計由太陽系外行星 HD 209458b 放射的紅外輻射與恆星放射的紅外輻射之比。 **0.0025 : 1** (3 分)

(b) 根據圖 ab，可以計算出太陽系外行星 HD 209458b 與恆星的直徑比。假設行星的軌道平面與恆星的赤道平面重疊。

(i) 試解釋在  $t = -1.5$  小時至  $t = +1.5$  小時期間的強度變化，並輔以顯示恆星和行星 HD 的相對位置的草圖。 (4 分)

(ii) 根據以上結果，找出行星 HD 的直徑  $D_p$  和恆星直徑  $D_s$  之比。 **1 : 5** (3 分)

(c) 為甚麼恆星和行星所放射的可見光的對比（即強度比），較兩者放射的紅外輻射的對比大？ (3 分)

(d) 簡單解釋天文學家怎樣估算太陽系外行星的表面溫度。 (3 分)



# 自我評核 4

時間：25 分鐘 總分：13 分

## 答題須知

- 全部題目均須作答。
- 甲部為多項選擇題，乙部為問答題。
- 答案須寫在預留的空位內。
- 附錄提供常用的數據、公式和關係式以供參考。

## 甲部

4.1 1 圖 a 顯示恆星 P 在二月和八月的位置。在這段期間，恆星在天上的位置變化是一年中最大的。估算恆星 P 和地球的距離。

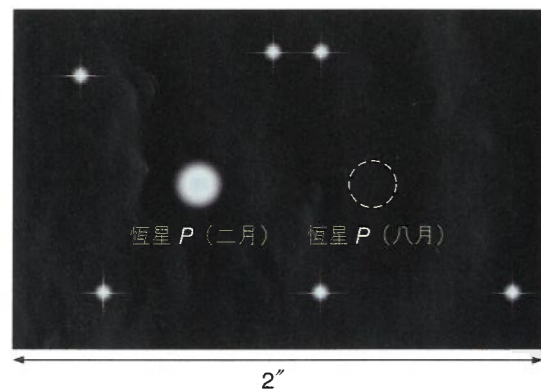


圖 a

- A 1.5 pc
- B 2.0 pc
- C 3.0 pc
- D 4.0 pc

**C**

4.4 2 從以下哪項可以推斷出宇宙正在膨脹？

- 渦狀星系的光譜出現紅移
- 哈勃定律
- 仙女座星系的光譜出現藍移

- A 只有 (1)
- B 只有 (2)
- C 只有 (1) 和 (3)
- D 只有 (2) 和 (3)

**B**

4.3 3 表 a 列出 W、X、Y、Z 四顆恆星的資料。

恆星	半徑	光度
W	$74R_{\odot}$	$117\,000L_{\odot}$
X	$44R_{\odot}$	$518L_{\odot}$
Y	$0.008R_{\odot}$	$0.03L_{\odot}$
Z	$0.2R_{\odot}$	$0.004L_{\odot}$

表 a

哪顆恆星的表面溫度最高？

- A W
- B X
- C Y
- D Z

**C**

4.2 4 圖 b 的線圖顯示恆星 X 和 Y 的視星等和絕對星等。

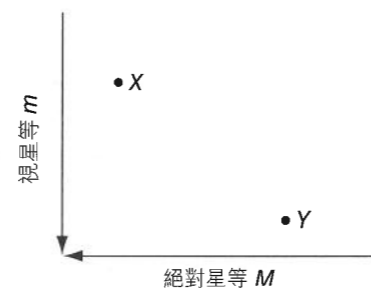


圖 b

哪顆恆星較接近地球？

- A X
- B Y
- C 兩顆星與地球的距離相同
- D 無法從上述資料判斷

**A**

## 乙部

綜合題 5 北極星的光譜型是 F，太陽的光譜型是 G。

(a) 試比較北極星和太陽的表面溫度。 (1 分)

北極星 > 太陽

(b) 北極星與地球相距 430 光年。試以秒差距表達這距離。據此，計算北極星的視差。 (3 分)

132 pc · 0.007 58"

(c) 哪顆恆星的視星等較小？ (1 分)

太陽

(d) 太陽和北極星的絕對星等分別為 4.77 和 -3.63。試在下方的赫羅圖上 (圖 c)，草繪兩顆恆星的位置。 (2 分)

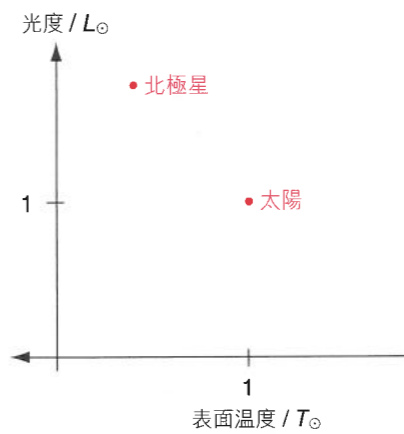


圖 c

(e) 北極星的徑向速度是  $-17 \text{ km s}^{-1}$  (移向地球)。實驗室量度到某條光譜線的波長是 656.28 nm。如果北極星的光譜都有這條光譜線，這條光譜線會在什麼波長出現？ (2 分)

656.24 nm

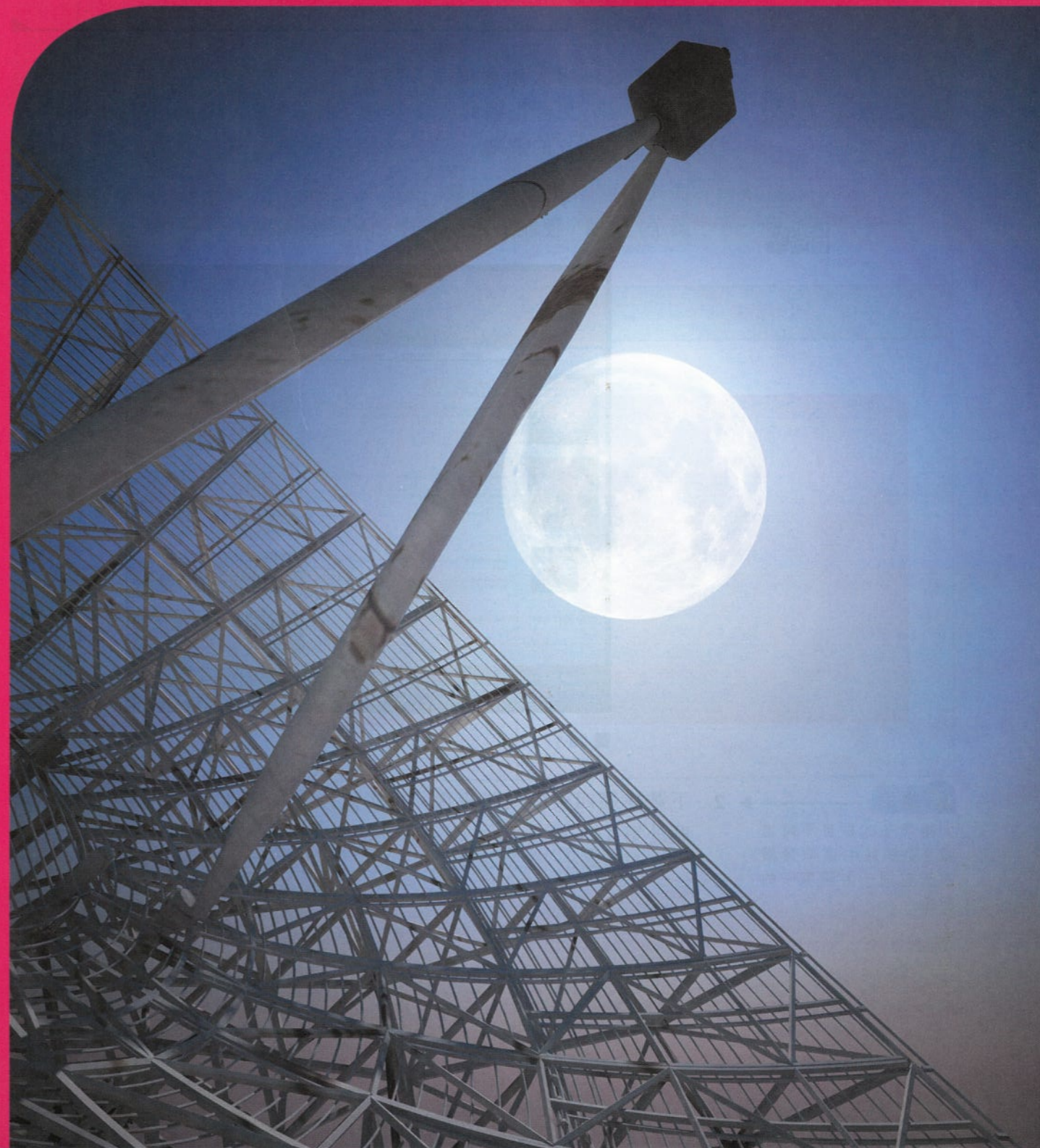


□ Q36 考試報告：

- (a) 考生要得分，只須指出黑體會吸收所有照射它的電磁輻射，但只有約半數考生回答正確。許多考生的答案含糊，只提及黑體會吸收所有波長的電磁輻射，但這個答案卻不能導出黑體會把每一種波長的電磁輻射都完全吸收。
- (b) (i) 只有少數考生能根據天狼星在  $8.1 \times 10^{16}$  m 距離外的強度，正確計算出該星體放出輻射的功率。一如所料，考生計算球體表面面積時出錯。最叫人憂慮的是題目沒有提供天狼星的表面溫度，但許多考生仍試圖應用斯特藩定律來解題。
- (iv) 考生一般都能畫出較低溫的普朗克曲線。然而，正確答案應能顯示新加曲線在任何波長都比原來的曲線低，而且最高點移向右側，但許多考生所畫的曲線與原來曲線的分別卻微乎其微。

# 實驗

- 2a 太陽黑子與太陽自轉
- 4a 驗證強度的平方反比定律
- 4b 觀察光譜
- 4c 聲音的多普勒效應





# 2a

## 太陽黑子與太陽自轉

### 實驗目的

透過觀察太陽黑子的移動，分析太陽的運動。

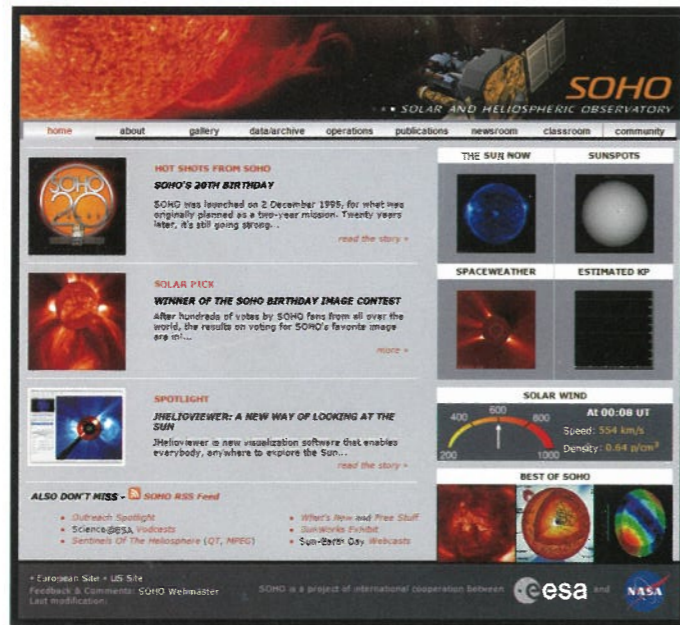
### 實驗步驟

直接以肉眼觀察太陽會嚴重損害視力。要安全和簡易地觀測太陽，可以利用由天文台拍攝的太陽影像。例如，在 Solar and Heliospheric Observatory 設立的網站，可以找到許多太陽的影像。

透過太陽眼鏡、有色玻璃、鏡面或任何反光表面觀察太陽，均可導致視力永久受損。



- 1 進入網站 <http://sohowww.nascom.nasa.gov>，點選「SUNSPOTS」(太陽黑子)一欄，便能找到最新的太陽影像(圖 2a-1)。



2a-1



- 提示 2 下載連續四天的太陽影像。把影像以同一尺寸打印出來，並順時序貼於第 143 頁表 2a-1 內。寫下每個影像的拍攝日期。

## 實驗結果及分析

- 1 連續四天的太陽影像：

日期： 17/3/2016	日期： 18/3/2016
日期： 19/3/2016	日期： 20/3/2016

表 2a-1

- 2 太陽黑子的位置 每天改變 (每天改變/不變)。



## 討論

### 關於結果

1 太陽是怎樣運動的？

太陽在自轉。

## 結論

太陽黑子的位置 每天改變 (每天改變/不變)。根據這個結果，我們可以推斷太陽沿某個軸在 自轉。

## 4a

## 驗證強度的平方反比定律

### 實驗目的

驗證於某點探測到的光強度，跟該點與光源的距離的平方成反比。

#### 實驗器材

- 100 W 磨砂燈泡 (連可接駁電源的插座)
- 測光儀
- 捲尺

### 實驗步驟

#### 注意

- 1 把實驗室的窗簾半掩。
- 2 在桌面鋪上黑毛氈等不反光的物料，減少桌面的反光。

1 把測光儀放在距離白熾燈  $d$  的位置。確保測光儀的接收器與燈泡在相同高度，並正面對着燈泡 (圖 4a-1)。

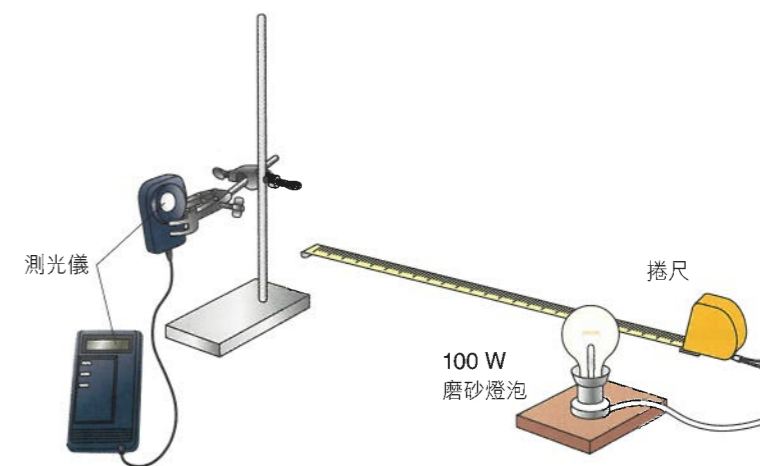


圖 4a-1

2 設定  $d$  為 0.6 m。點亮燈泡，開測光儀。

#### 注意

測光儀實際測量的不是光的強度，而是照明度 (單位為 lux)。於本實驗中，我們不會區分這兩個物理量。

3 (a) 測光儀的讀數  $R$  顯示於那一點測得的光強度，把結果記錄在第 146 頁表 4a-1。

(b) 增加測光儀與燈泡的距離，重複步驟 (a)，並完成表 4a-1。



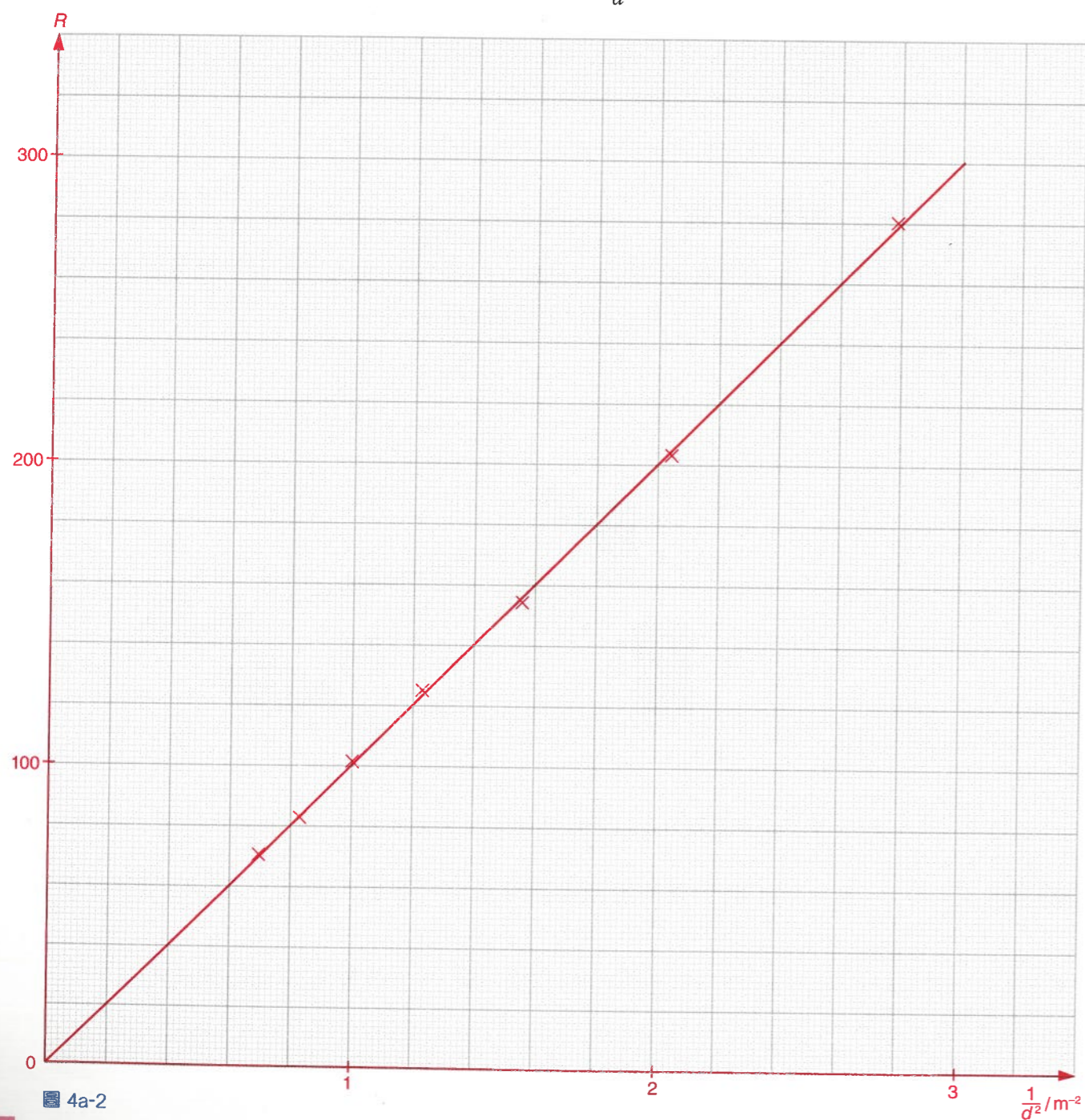
## 實驗結果及分析

- 1 把實驗結果記入下表。求  $\frac{1}{d^2}$  的值，並完成下表。

$d / \text{m}$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$\frac{1}{d^2} / \text{m}^{-2}$	2.78	2.04	1.56	1.23	1.00	0.83	0.69
$R$	280	203	154	125	101	83	70

表 4a-1

- 2 在圖 4a-2 中，繪畫  $R$  對  $\frac{1}{d^2}$  的關係線圖。



4a-2

## 討論

### 關於結果

- 1 在第 146 頁圖 4a-2 中找出  $y$  截距，由此推論  $I$  和  $d$  的關係。假設  $I \propto R$ 。試簡單解釋。

$y$  截距 = 0

圖線是一條穿過原點的直線，因此  $R \propto I \propto \frac{1}{d^2}$ 。

### 思考題

- 2 我們不會取太接近燈泡位置 (如 0.5 m 內) 的數據。試舉出一個原因。

量度距離時會有誤差。如果測光儀與燈泡之間的距離很小，這個誤差相對來說便變得

很大。

## 結論

測光儀檢測到的光強度遵從 平方反比 定律。



# 4b

## 觀察光譜

### 實驗目的

利用平面透射光柵，觀察幾種低密度氣體的發射光譜和碘的吸收光譜。

### A 發射光譜

實驗器材

- 氫放電管
- 氖放電管
- 汞(水銀)放電管
- 細紋平面透射光柵(每毫米刻有 300 條線)
- 超高壓電源

### 實驗步驟

1 如圖 4b-1 所示裝置氫放電管。

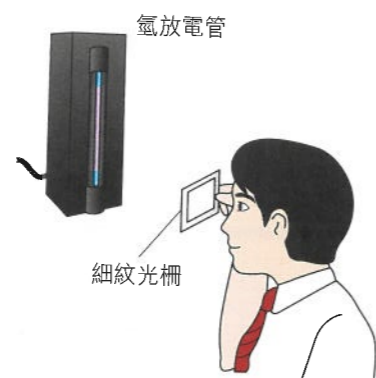


圖 4b-1

- 2 (a) 在氫放電管約 1 m 外的位置，透過細紋平面透射光柵觀察放電管。  
(b) 在第 150 頁圖 4b-3 繪畫觀察到的光譜。
- 3 (a) 以載有其他氣體(例如氖和汞)的放電管來重數複步驟 2(a)。  
(b) 在第 150 頁圖 4b-4(i) 和 (ii) 繪畫觀察到的光譜。

### B 吸收光譜

實驗器材

- 細紋平面透射光柵(每毫米刻有 300 條線)
- 附水松塞的大試管
- 碘晶體
- 燈箱
- 低壓電源
- 本生燈
- 鐵支架連夾鉗

### 實驗步驟

- 4 把一至兩粒碘晶體放進大試管。把管口輕輕塞蓋。在管底慢慢加熱，直至碘汽化，令試管呈現深色。
- 5 (a) 把燈箱放在大試管後方，然後站在大試管前方，以細紋平面透射光柵透過碘蒸氣觀察燈絲(圖 4b-2)，會觀察到碘的吸收光譜。

**!** 碘晶體有腐蝕性，碘蒸氣則具刺激性。因此，處理碘晶體和碘蒸氣時應儘量小心。

燈絲和衍射光柵的柵紋都應垂直。

要觀察吸收光譜，碘蒸氣的濃度是關鍵。如果濃度太高，通過光柵的光就很少；如果濃度太低，背景和吸收譜線的對比就不清晰。最好的做法是先把碘加熱，令大試管充滿蒸氣，接着讓它冷卻，並等候最適合觀察的一刻。如果錯過了這一刻，就要重新把碘加熱。

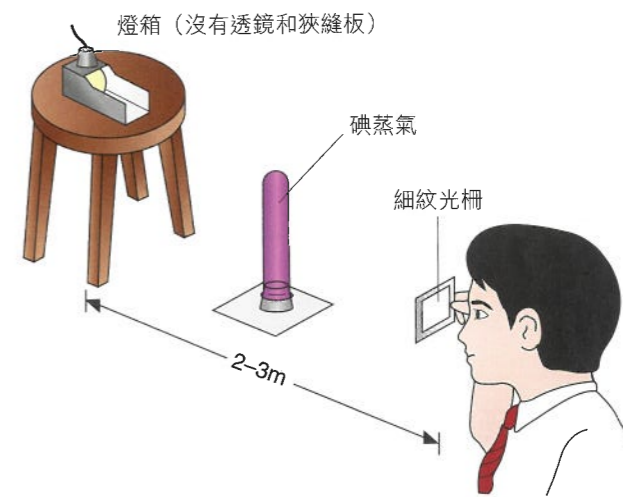


圖 4b-2

(b) 在第 151 頁圖 4b-5 繪畫觀察到的光譜。



## 實驗結果及分析

### A 發射光譜

1 (a) 氫的發射光譜：

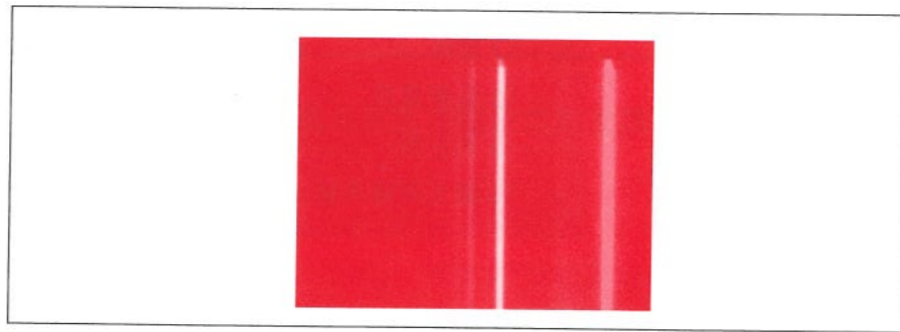
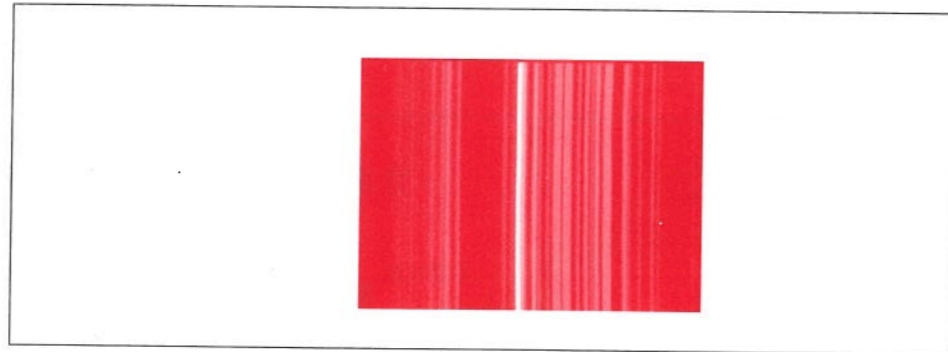


圖 4b-3

(b) 觀察到 \_\_\_\_\_ **亮線** \_\_\_\_\_。這種光譜稱為氫的**發射光譜**。

2 氦和汞的發射光譜：

(i) 氦



(ii) 汞

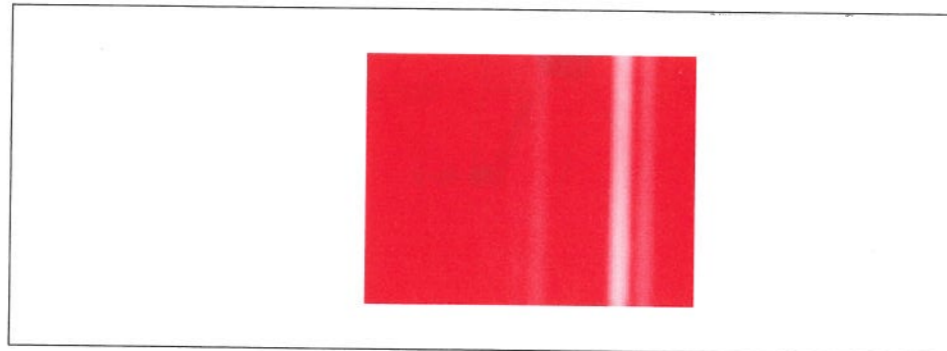


圖 4b-4

### B 吸收光譜

3 (a) 碘的吸收光譜：

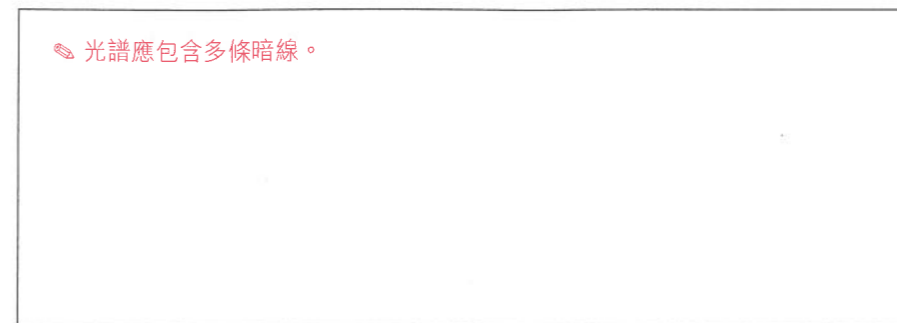


圖 4b-5

(b) 描述碘的吸收光譜。

該光譜包含了多條暗線。

## 討論

### 關於結果

1 不同元素是否各自有獨特的發射光譜？

是

## 結論

- 發射光譜包含若干 \_\_\_\_\_ **亮線** \_\_\_\_\_。
- 把低密度的氫氣加熱時，氣體會發射 \_\_\_\_\_ **某些特定** \_\_\_\_\_  
(某些特定/所有) 波長的光。不同的元素有 \_\_\_\_\_ **各自獨特** \_\_\_\_\_  
(相同/各自獨特) 的發射光譜。
- 碘的吸收光譜背景 \_\_\_\_\_ **光亮** \_\_\_\_\_，帶有若干  
\_\_\_\_\_ **暗線** \_\_\_\_\_。



## 4c

## 聲音的多普勒效應

## 實驗目的

利用單頻發聲器，展示聲音的多普勒效應。

## 實驗器材

- 單頻發聲器
- 膠紙
- 不可延伸的繩子 (約 50 cm 長)

## 實驗步驟

- 1 用一根不可延伸的繩子妥當地繫住單頻發聲器。
- 2 開動單頻發聲器。
- 3 請組員站在前面，並打圈轉動發聲器 (圖 4c-1)。留心聆聽，找出發聲器轉動一圈時，音調有沒有轉變，並記錄結果。

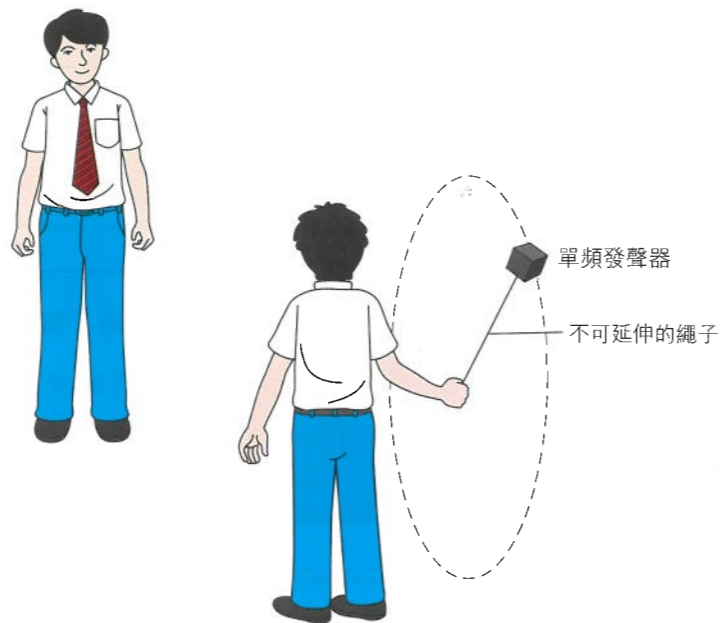


圖 4c-1

## 實驗結果及分析

- 1 試描述單頻發聲器轉動一圈時，你聽到的聲音。

發聲器轉動半個圈，聲音的音調上升；餘下的半個圈，音調下降。

## 討論

## 思考題

- 1 以上實驗也可使用聲音感應器和數據收集器來完成。試設計實驗步驟。

- 1 把數據收集器與聲音感應器連接，啟動數據記錄程式。
- 2 啟動發聲器，把它固定在聲音感應器前方。
- 3 開始記錄數據。程式會記錄發聲器固定時，聲音的頻率。
- 4 在聲音感應器前方打圈轉動發聲器。比較這次所得的頻率，與步驟3所得的有甚麼分別。

## 結論

聲源移向我們時，聲音的音調會略為變 高 (高/低)；  
相反，聲源逐漸遠離我們時，聲音的音調會略為變 低  
(高/低)。這個現象稱為 多普勒效應。



# 答案

## 1 不同空間標度下的宇宙面貌

### 進度評估 1 (p.7)

- 1 C      2 B  
 3 1 AU =  $1.50 \times 10^{11}$  m  
 1 ly =  $9.46 \times 10^{15}$  m  
 1 pc =  $3.09 \times 10^{16}$  m  
 4 (a) (i)  $2.50 \times 10^{-4}$  rad    (ii) 51.6"  
 (b)  $2.04 \times 10^{-4}$  rad  
 5 (a) (i) 相等      (ii) 太陽, 太陽  
 (iii) 零  
 (b) 太陽 > 月球

### 進度評估 2 (p.12)

- 1 B  
 2 地球  
 地球與月球的距離  
 地球與太陽的距離  
 太陽系  
 星團  
 銀河系

### 習題與思考 1.1 (p.14)

- 1 B      2 D      3 B      4 B  
 5 B      6 II, IV, I, VI, V, III  
 7 0.698 pc  
 9 (a) (i)  $2.28 \times 10^{11}$  m, 12.7 光分  
 (ii) 12.7 分鐘  
 (b) (i) 75 000 年      (ii) 23 000 pc

### 複習 1

#### 概念重溫 (p.17)

- 1 F

#### 多項選擇題 (p.17)

- 2 A      3 D      4 A      5 A  
 6 B

#### 問答題 (p.17)

- 7 (a) 衛星  
 8 (a) (i)  $2.58 \times 10^9$  m  
 (ii)  $1.08 \times 10^8$  m  
 (iii)  $2.99 \times 10^4$  m  
 (b)  $1.99 \times 10^{-7}$  rad s<sup>-1</sup>

- 9 (a) (i)  $7.57 \times 10^{20}$  m 至  $9.46 \times 10^{20}$  m  
 (ii) 24 500 pc 至 30 700 pc  
 (b) 0.3  
 (c) 本星系羣, 太陽系  
 (d) pc / ly, AU  
 10 (b) 391  
 (c) (i)  $6.54 \times 10^8$  m  
 (ii) 158 pc  
 11 (b)  $3.78 \times 10^{13}$  km  
 (c) 63 000 年

## 2 天文學的發展史

### 進度評估 1 (p.27)

- 1 C      2 A, C      3 C

### 進度評估 2 (p.32)

- 1 錯      2 錯  
 3 地球, 太陽      4 A

### 習題與思考 2.1 (p.33)

- 1 D      2 A  
 4 (a) 地心模型  
 (b) 均輪  
 (c) 本輪  
 7 (b) (i) 逆行  
 (ii) 順行  
 8 (a) 金星  
 (b) (i) 兩者都會  
 (ii) 金星會, 火星不會

### 進度評估 3 (p.38)

- 1 D      2 C

### 習題與思考 2.2 (p.38)

- 1 B      2 A  
 7 (b) 滿相  
 (c) (i) 新相 / 月牙形  
 (ii) 滿相

### 進度評估 4 (p.44)

- 1 錯  
 3 A: 0.125  
 C: 2.92  
 D: 14.7

### 習題與思考 2.3 (p.44)

- 1 D      2 B      3 C  
 4 (a) 0.6 AU, 5.4 AU  
 (b) 3 AU  
 6  $7.77 \times 10^{11}$  m  
 7  $35.2 \text{ km s}^{-1}$

### 複習 2

#### 概念重溫 (p.47)

- 1 F      2 F

#### 多項選擇題 (p.47)

- 3 C      4 D      5 B      6 C  
 7 C      8 A      9 B      10 C  
 11 B      12 D

#### 問答題 (p.48)

- 13 (a) 橢圓形      (b) 11.9 地球年  
 18 (a) 托勒密  
 19 (a) P  
 (b) (i)  $a = 2r$       (ii)  $T_Y = 2\sqrt{2} T_X$   
 (d) X  
 20 (a) 太陽黑子, 伽利略      (c) 24 天  
 21 (a) 順行  
 (d) 地球, 不可以  
 (e) 3

## 3 重力下的軌道運動

### 進度評估 1 (p.59)

- 1 (a)  $1.67 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$   
 (b) 不變  
 (c) 沿橢圓軌道運行

### 進度評估 2 (p.62)

- 1 B, C  
 2  $6.02 \times 10^{24}$  kg

### 進度評估 3 (p.63)

- 1 真正的無重狀態: (i)  
 表觀的無重狀態: (iii), (iv), (v)

### 進度評估 4 (p.64)

- 1 錯      2 錯      3 錯  
 4 (a)  $25.9 \text{ m s}^{-2}$   
 (b) 是

### 習題與思考 3.1 (p.65)

- 1 B      2 B  
 3 30.3 小時  
 4 (a)  $1.92 \times 10^{-3}$  rad s<sup>-1</sup>  
 (b) 0.909 小時      (c)  $30.3 \text{ m s}^{-2}$   
 5  $5.62 \times 10^{26}$  kg  
 6  $0.192 T_M$   
 7 (b)  $5.69 \times 10^{26}$  kg  
 8 (a)  $\frac{GM}{r^2}$       (b) 是

### 進度評估 5 (p.69)

- 1 錯      2 錯      3  $-1.69 \times 10^8$  J

### 進度評估 6 (p.75)

- 1 錯      2 等於  
 3 1 : -2 : -1      4  $-3.19 \times 10^{11}$  J

### 習題與思考 3.2 (p.75)

- 1 A      2 C      3 B      4 A  
 5 A  
 6 (a) 地球:  $-6.25 \times 10^7$  J  
 火星:  $-1.26 \times 10^7$  J  
 木星:  $-1.77 \times 10^9$  J  
 (b) 木星 > 地球 > 火星  
 7 (a)  $3.32 \times 10^{10}$  J      (b)  $6.64 \times 10^9$  J  
 8  $1.44 \times 10^6$  m  
 9  $5.95 \text{ km s}^{-1}$   
 10 (a)  $-2.11 \times 10^6$  J  
 (b) 增加 (較接近零)  
 11 (a) (i)  $-3.125 58 \times 10^9$  J  
 (ii)  $-3.125 53 \times 10^9$  J  
 (b) 49 100 J  
 12 (a) 減少      (b) 增加  
 (c) 增加 (較接近零)      (d) 減少  
 (e) 增加 (較接近零)  
 13 (a) 1.52 小時      (b) 是  
 (c)  $-2.96 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$       (d)  $2.96 \times 10^7 \text{ J kg}^{-1}$   
 (e) 41.4%

### 複習 3

#### 概念重溫 (p.78)

- 1 F      2 F

#### 多項選擇題 (p.78)

- 3 C      4 C      5 B      6 C  
 7 B      8 D      9 C      10 A  
 11 D      12 C      13 B      14 D



問答題 (p.80)

- 15 (a)  $-131\,000\text{ N}$   
 (b)  $9.55 \times 10^{11}\text{ J}$
- 16 (b)  $5.87 \times 10^{24}\text{ kg}$
- 17 (a) (i)  $2.98 \times 10^6\text{ m}$   
 (b) (ii)  $81.3^\circ$
- 18 (a)  $9.14\text{ m s}^{-1}$  (b)  $3.05 \times 10^{-6}\text{ m s}^{-2}$   
 (c)  $2.93 \times 10^{-2}\text{ N}$  (d)  $3.43 \times 10^{19}\text{ kg}$   
 (e)  $2.93 \times 10^{-2}\text{ N}$ , 0
- 19 (a)  $2030\text{ m s}^{-1}$  (或  $2.03\text{ km s}^{-1}$ )  
 (b)  $4.83 \times 10^{22}\text{ kg}$   
 (c)  $5.23 \times 10^5\text{ m}$
- 20 (a)  $8530\text{ m s}^{-1}$   
 (b) (i)  $-2.69 \times 10^8\text{ J}$  (ii)  $5.38 \times 10^8\text{ J}$   
 (iii)  $2.69 \times 10^8\text{ J}$   
 (c)  $41.4\%$
- 21 (a) 真正無重狀態  
 (b) (i)  $3.27 \times 10^{-5}\text{ m s}^{-1}$   
 (ii)  $6.53 \times 10^{-6}\text{ rad s}^{-1}$   
 (iii)  $11.1\text{ 日}$   
 (c)  $4.62 \times 10^{-5}\text{ m s}^{-1}$
- 22 (a) (i) 零  
 (b) (i) 正數 (ii) 負數  
 (iii) 減少了 (iv) 相等
- 23 (a)  $T^2$  (以地球年為單位) =  $a^3$  (以 AU 為單位)  
 (b) 海王星 (c)  $9.65\text{ AU}$   
 (d) (i)  $2.10 \times 10^{-7}\text{ N}$   
 (ii)  $608\text{ N}$ , 零
- 24 (b) (ii)  $\frac{H}{2}$   
 (iii)  $\sqrt{\frac{\pi^2 H^3}{2GM}}$   
 (iv)  $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi^2 H^3}{2GM}}$   
 (v) 不可以
- 25 (c) 橢圓軌道 > 圓周軌道
- 26 (b) (iii)  $3.2 \times 10^3\text{ m s}^{-1}$
- 27 (b) (i)  $-1.19 \times 10^{14}\text{ J}$
- 28 (b) (ii)  $9.96\text{ km s}^{-1}$  (c)  $7.16\text{ km s}^{-1}$
- 29 (b)  $7727\text{ m s}^{-1}$   
 (c) (ii)  $5.03 \times 10^{10}\text{ J}$   
 (iii)  $19\,107\text{ s}$  (5.3 小時)

物理文章分析 (p.85)

- 30 (a)  $1 \times 10^7\text{ m}$ ,  $2 \times 10^7\text{ m}$   
 (b)  $1.5 \times 10^7\text{ m}$   
 (c)  $9150\text{ s}$  (或  $2.54\text{ 小時}$ )  
 (d)  $4.98 \times 10^{10}\text{ J}$   
 (e)  $5.44\text{ MW}$

4 恆星和宇宙

進度評估 1 (p.93)

- 1  $5\text{ pc}$  2  $0.0250''$   
 3 天狼星 A:  $2.64$ ,  $5.44 \times 10^5$   
 牛郎星:  $0.195$ ,  $5.14$   
 織女星:  $0.125$ ,  $1.65 \times 10^6$

習題與思考 4.1 (p.94)

- 1 A 2 D  
 3 (a) X (b)  $10\text{ pc}$   
 4  $2.5\text{ pc}$   
 5  $413\text{ pc}$ ,  $7.21\text{ pc}$   
 6 (a)  $83.3\text{ pc}$  (b)  $0.361''$   
 8  $43.5\text{ 年}$   
 9  $0.005''$   
 10 (a)  $20\text{ pc}$  (b)  $0.0205''$   
 (c)  $2.44$

進度評估 2 (p.96)

- 1 錯 2 錯 3  $5.18 \times 10^{31}\text{ W}$

進度評估 3 (p.98)

- 1 Z 2 X 3 X

習題與思考 4.2 (p.101)

- 1 A 2 D 3 B 4 A  
 5 A  
 6 (a) X (b) B  
 7 恆星 A  
 8 (a) X (b) P  
 10 (b) 大於  $10\text{ pc}$  (c) 老人星

進度評估 4 (p.105)

- 1 錯 2 藍色 / 藍白色  
 3  $7.48 \times 10^{31}\text{ W}$   
 4 (a) A (b) A

進度評估 5 (p.109)

- 1 對 2 C 3 C 4 B1  
 5 紅巨星, 主序星, 白矮星

進度評估 6 (p.111)

- 1 對 2 錯 3 錯

習題與思考 4.3 (p.111)

- 1 B 2 C 3 A 4 C  
 5 D 6 B 7 B 8 D  
 9 A

- 10 (a) A: 紫外輻射; B: 紅光  
 (b) A
- 11 (b)  $7.37$  太陽半徑
- 12 (a)  $6.25$  倍
- 13 (a) Q (b)  $50.0$  太陽半徑
- 14 (a) 16 (b) 400
- 15 (a)  $4.5 \times 10^3\text{ W}$ ,  $480\text{ K}$   
 (b) 不是
- 16 (a)  $96.2\text{ pc}$  (b)  $15\,100L_\odot$   
 (c)  $75.6R_\odot$

進度評估 7 (p.115)

- 1 B 2  $2.47 \times 10^4\text{ m s}^{-1}$  (移向地球)

進度評估 8 (p.119)

- 1 A 2 C

進度評估 9 (p.122)

- 1 B 2 C

習題與思考 4.4 (p.122)

- 1 D 2 B 3 A  
 4  $3 \times 10^6\text{ m s}^{-1}$   
 5  $499.96\text{ nm}$   
 6  $658.5\text{ nm}$   
 8 (a)  $70\,100\text{ m s}^{-1}$ ,  $129\,900\text{ m s}^{-1}$   
 (b)  $699.7\text{ nm}$ ,  $699.8\text{ nm}$   
 9 (a) R (b) P 和 R  
 (c) (ii)  $192\text{ km s}^{-1}$  (移向地球)

時間 / 小時	$\Delta\lambda / 10^{-15}\text{ m}$	徑向速度 / $\text{m s}^{-1}$
76	-114	-52.1
85	-77.9	-35.6
94	-15.4	-7.04
100	30.6	14.0

- (c) 96 小時

複習 4

概念重溫 (p.127)

- 1 F 2 F

多項選擇題 (p.127)

- 3 D 4 C 5 D 6 D  
 7 A 8 D 9 A 10 B  
 11 B 12 A 13 A 14 B  
 15 A 16 C 17 D 18 B  
 19 A 20 C

問答題 (p.130)

- 21 (a)  $9.71 \times 10^4\text{ m s}^{-1}$  (移離地球)  
 (b) 較冷
- 22 (a)  $1000 : 1$   
 (b)  $12\,500\text{ pc}$ ,  $12.5\text{ pc}$   
 (c) 兩者相等
- 23 (a)  $3.20 \times 10^{-18}\text{ W m}^{-2}$   
 (b)  $0.000\,01''$
- 24 (a)  $3.85 \times 10^{26}\text{ W}$  (b)  $6.91 \times 10^8\text{ m}$   
 (c)  $\frac{\sigma R^2 T^4}{d^2}$ ,  $107\%$
- 25 (a) 天狼星 A:  $1.6$   
 織女星:  $51$
- 26 (a) X  
 (c) (i) Y (ii) Y
- 27 (a)  $10\text{ pc}$  (b) 較大
- 28 (a)  $v$ : 星系移離地球的速度  
 $d$ : 星系與地球的距離  
 (b) (i)  $\frac{H}{c}$  (ii)  $20.2\text{ Mpc}$
- 29 (b) (i)  $2.91 \times 10^{-5}\text{ rad s}^{-1}$ ,  $1.45 \times 10^{-5}\text{ rad s}^{-1}$   
 (ii)  $6.19 \times 10^8\text{ m}$ ,  $9.63 \times 10^8\text{ m}$   
 (iii)  $3 \times 10^{27}\text{ kg}$
- 30 (b)  $3.00 \times 10^5\text{ m s}^{-1}$
- 31 (a)  $4.000\,00\text{ m}$   
 (b)  $3.15 \times 10^4\text{ m s}^{-1}$   
 (c)  $1.70 \times 10^4\text{ s}$ ,  $3.71 \times 10^{-4}\text{ rad s}^{-1}$   
 (d)  $1.26 \times 10^{27}\text{ kg}$
- 33 (b) 圓形  
 (c)  $30\text{ m s}^{-1}$ , 6 年,  $3.32 \times 10^{-8}\text{ rad s}^{-1}$   
 (d)  $3.32 \times 10^{-8}\text{ rad s}^{-1}$   
 (e)  $4.95 \times 10^{11}\text{ m}$ ,  $1.64 \times 10^4\text{ m s}^{-1}$
- 34 (a) (i) A, B  
 (ii) 紅移 / 多普勒效應  
 (iii) 銀河系
- 35 (b) (i)  $13.3 \times 10^{-15}\text{ m}$   
 (v)  $72\text{ 小時}$   
 (vi)  $7.69 \times 10^9\text{ m}$
- 36 (b) (iii)  $1.2 \times 10^9\text{ m}$
- 37 (a)  $3.85 \times 10^{26}\text{ W}$   
 (b) (i)  $6.08 \times 10^{18}\text{ m}^2$
- 38 (a) (i)  $2.51 \times 10^5\text{ m s}^{-1}$   
 (ii) B  
 (iii)  $2.92 \times 10^{41}\text{ kg}$   
 (b) (i)  $26.5\text{ kpc}$
- 39 (a) (ii)  $890R_S$

物理文章分析 (p.137)

- 40 (a)  $0.0025 : 1$   
 (b) (ii)  $1 : 5$



# 自我評核題解

## 自我評核 1

1 D      2 D

3 (a) 星系      1A

(b) 星系團 (或超星系團)      1A

(c)  $61 \times 10^6$  年      1A

(d) 根據  $s = r\theta$ ,      1M

$$\theta = \frac{s}{r}$$

$$= \frac{110\,000}{61 \times 10^6}$$

$$= 1.80 \times 10^{-3} \text{ rad} \quad 1A$$

## 自我評核 2

1 A      2 B

3 (a) 半長軸  $a$       1M

$$= 2 + 1.5$$

$$= 3.5 \text{ AU}$$

根據開普勒第三定律,

$$\frac{T_p^2}{T_E^2} = \frac{a_p^3}{a_E^3}$$

$$\frac{T_p^2}{(1 \text{ 地球年})^2} = \frac{3.5^3}{1^3}$$

$$T_p = 6.55 \text{ 地球年} \quad 1A$$

(b) AB      1A

根據開普勒第二定律, 彗星接近太陽時會移動得較快。      1A

## 自我評核 3

1 D      2 A      3 C      4 B

5 (a)  $U = -\frac{GMm}{r}$       1A

根據線圖,  $U$  在行星表面 ( $r = 1.0 \times 10^6 \text{ m}$ ) 的值是  $-4.0 \times 10^6 \text{ J}$ 。      1A

(b) 根據 (a) 的結果,

$$U = -\frac{GMm}{r}$$

$$M = -\frac{rU}{Gm}$$

$$= -\frac{(1.0 \times 10^6) \times (-4.0 \times 10^6)}{(6.67 \times 10^{-11}) \times 2}$$

$$= 3.00 \times 10^{22} \text{ kg} \quad 1M$$

1A

(c) 物體運行至與行星表面最近的位置時, 軌道速率最高。      1M

$$= \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11}) \times (3.00 \times 10^{22})}{1.0 \times 10^6}}$$

$$= 1414 \text{ m s}^{-1}$$

$$\approx 1410 \text{ m s}^{-1} \quad 1A$$

(d) 最短的軌道週期      1M

$$= \frac{2\pi r}{v}$$

$$= \frac{2\pi \times (1.0 \times 10^6)}{1414}$$

$$= 4440 \text{ s} \quad 1A$$

(e) 逃逸速度      1M

$$= \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times (6.67 \times 10^{-11}) \times (3.00 \times 10^{22})}{1.0 \times 10^6}}$$

$$= 2000 \text{ m s}^{-1} \quad 1A$$

## 自我評核 4

1 C

2 B

3 C

4 A

5 (a) 北極星的表面溫度較高。      1A

(b) 北極星的距離 (以秒差距表達)

$$= \frac{430}{3.26}$$

$$= 132 \text{ pc} \quad 1A$$

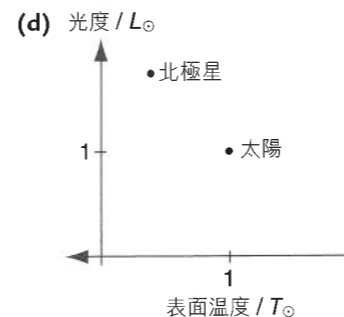
恆星視差

$$= \frac{1}{d}$$

$$= \frac{1}{132}$$

$$= 0.00758'' \quad 1A$$

(c) 太陽      1A



(太陽的位置正確)      1A

(北極星相對太陽的位置正確)      1A

(e) 根據  $\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx \frac{v_r}{c}$ ,      1M

$$\lambda - \lambda_0 \approx \left(\frac{v_r}{c}\right)\lambda_0$$

$$\lambda \approx \left(1 + \frac{v_r}{c}\right)\lambda_0$$

$$= \left(1 + \frac{-17 \times 10^3}{3.00 \times 10^8}\right) \times 656.28$$

$$= 656.24 \text{ nm} \quad 1A$$