

# 2012 / 2013 學年教學設計獎勵計劃

萬有引力定律

參選編號：C017

學科名稱：物理

適合程度：高一

## 簡介

萬有引力是自然界中四種基本力的一種，大至天體，小至日常生活中所看到的事物，無不受萬有引力的影響。然而，萬有引力的發現及其所表達的深深刻意義，在中學物理學教育中卻少有提及，許多中學生甚至成年人對萬有引力定律和牛頓的認識還停留在童話故事書中——牛頓被蘋果砸中頭，於是發現萬有引力定律。本教案試圖以科學史和當今科學發展前沿問題為框架來引入和講解萬有引力定律，既增加學生對相關科學家的了解，使他們感受科學發現真理的曲折，又能讓學生從中學習到萬有引力定律的相關知識、建立對天文學概念的基礎認識。

教案的第一節主要講解開普勒對行星軌道的研究，利用開普勒和第谷的故事來激勵學生求真和奮發向上的精神。第二節介紹胡克和牛頓對萬有引力發現權的爭奪和他們之間的鬥爭，從爭論問題的核心中讓學生認識萬有引力定律的突破性究竟在甚麼地方。第三節向學生介紹英國史上著名的怪人卡文迪許，希望學生能夠體會卡文迪許這個怪人的生活 and 思想，既學習他的實驗思路，也學會卡文迪許的工作態度。第四節我們應用萬有引力定律在天文學上，計算未知天體的質量，並對天文學關於太陽系外行星的前沿研究作出介紹。第五節通過衛星繞地球轉動和拋體運動的等價性來說明牛頓為甚麼是偉大的物理學家。第六節將介紹宇宙大爆炸及宇宙加速膨脹等中學階段少有機會接觸的宇宙學內容。<sup>1</sup>

本教案所使用的教科書是 2002 年審查通過的人教版全日制普通高級中學教科書（必修）的第一冊物理學教材，每一節的時間是 45 分鐘。

---

<sup>1</sup> 第六節實際上是課外內容，可以不講。

## 目錄

簡介.....	1
萬有引力定律 教案.....	3
第一節 行星的運動.....	3
第二節 萬有引力定律.....	8
第三節 引力常量的測定.....	12
第四節 萬有引力定律在天文學上的應用.....	16
第五節 人造衛星 宇宙速度.....	20
第六節 行星、恆星、星系和宇宙.....	25
試教日程表.....	30
反思與建議.....	31
參考資料.....	32

# 萬有引力定律 教案

## 第一節 行星的運動

### 設計思路

學生對行星繞太陽轉動這一「真理」已習以為常，而且在以前關於參照系的學習時已經討論過「日心說」和「地心說」的異同和歷史問題，所以本節不再重點提哥白尼的日心說。相反，我們針對學生關於行星運動的前概念——行星繞太陽以圓形軌道運動，向學生介紹第谷和開普勒的故事，帶出科學求真的精神和開普勒三定律這些令人意想不到的結果。

### 教學重點

開普勒第一和第三定律

### 教學難點

開普勒第三定律的物理意義

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 知道行星繞太陽以橢圓軌道運行，即開普勒第一定律
  - 知道開普勒第三定律的數學表達式
2. 過程與方法
  - 通過已知實驗數據，驗證開普勒第三定律，培養學生分析數據的能力。
3. 情感態度與價值觀
  - 體驗第谷和開普勒的科學求真精神和對科學探究所作出的不懈努力

### 教具

圖片、PhET 模擬軟件、NAAP (The Nebraska Astronomy Applet Project)、<sup>2</sup>維基百科中的天文學數據

### 教學活動

#### 一、 引入

教師活動	學生活動
1. 課程簡介：在前面幾章中，同學們已經學習過力、運動、力和運	聆聽

<sup>2</sup> 由 University of Nebraska-Lincoln 的天文學教育小組製作。

動的關係、直線和曲線運動等內容。這些知識的出現源自於科學家們對大自然一個重要現象的探索過程.....<sup>3</sup>

2. 首先通過幾個步驟引入哥白尼的日心說。
3. 古希臘哲學家托勒密等人認為地球是宇宙中心，宇宙中的其他天體都繞地球轉動。托勒密的這種思想實際上源於人本身不自覺地以地球為參考系，從而使人誤以為天體都繞地球轉動。
4. 當以地球為參考系時，火星將會發生逆行（retrograde）的現象，即從地球上會觀察到火星有如圖 1 的運行軌跡。



圖 1 火星逆行

5. 為了解釋這種逆行現象，地心說模型中必須加入所謂的「本輪」：火星在均輪中繞地球轉動的同時，其自身繞圓心在均輪中的本輪轉動。（打開 marsorbit.swf 作電腦模擬演示，以圖 2 所示）

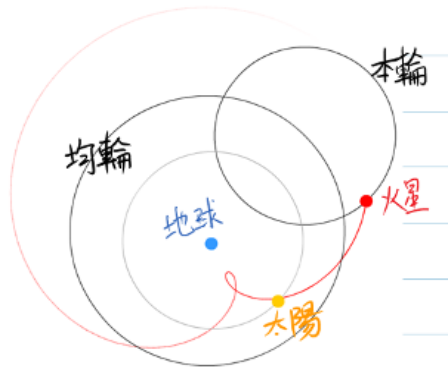
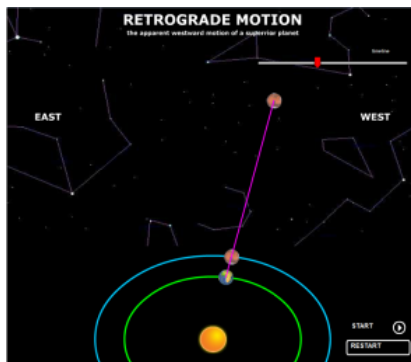


圖 2 地心說對火星逆行的解釋

6. 然而，如果站在哥白尼日心說的角度上看，火星逆行的原因能夠得到更簡單的解釋。（打開 retrograde.swf，如圖 3 所示）



聆聽  
聆聽  
觀察

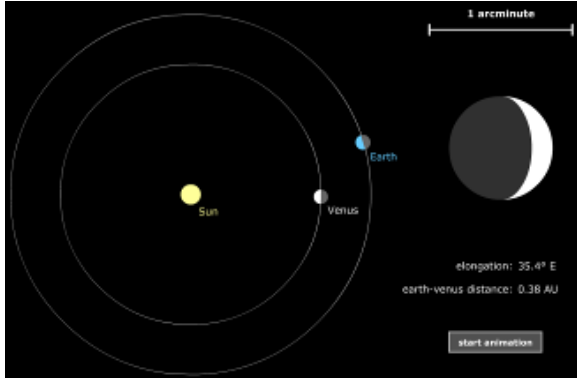
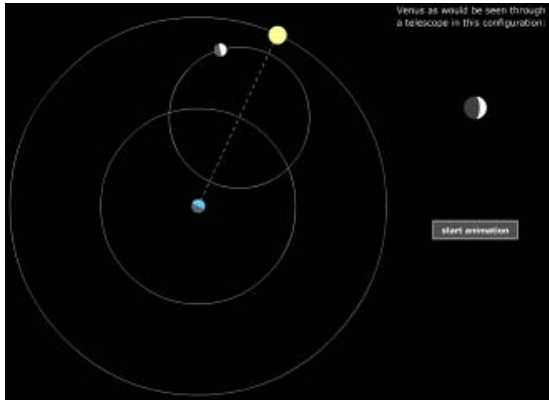
觀察、思考

觀察、思考

<sup>3</sup> 點出這章的知識和前面的學習內容是息息相關的。

<p>圖 3 日心說時的火星逆行演示</p> <p>7. 提問：既然日心說和地心說都可以解釋火星逆行現象，你認為那一種學說更接近真實？</p>	<p>思考、回答</p>
---	--------------

二、 課堂主要內容

教師活動	學生活動
<p>1. 儘管地心說模型能夠解釋火星逆行現象，它對金星相位問題卻不能作出解釋。伽利略通過自製的望遠鏡發現金星和月球一樣可以產生全部的相位，日心說可以對此作出完美解釋。（打開 venusphases.swf，如圖 4 所示）</p>  <p>圖 4 日心說對金星相位的解釋</p> <p>但由於地心說模型中，金星軌道只能處於地球和太陽之間或太陽軌道之外，軌道之間不能交錯，所以模型預測金星只能產生部份的相位，而這顯然和現實不符。（打開 ptolemaic.swf，如圖 5 所示）</p>  <p>圖 5 地心說對金星相位的解釋</p> <p>2. 到這裏，我們知道了在歷史上證明地心說錯誤的主要方法，但這是否就表明了日心說是完全正確的？</p> <p>3. 提問：哥白尼日心說中認為行星以怎樣的形式繞太陽運動？<sup>4</sup></p>	<p>觀察、聆聽</p> <p>思考</p> <p>回答</p> <p>聆聽</p> <p>聆聽</p> <p>聆聽、思考</p> <p>思考、回答</p> <p>聆聽</p> <p>理解</p>

<sup>4</sup> 因為上一章剛介紹了勻速圓周運動，正常來說學生應回答這個答案，但由於地理課中已經提早一步告訴學生行星以橢圓軌道繞太陽運行，所以這個問題可提可不提。

4. 介紹第谷 (Tycho Brahe) 的生平及主要工作。
5. 總結第谷的工作：第谷 20 年的精確測量和對慧星的觀測給他的助手開普勒 (Johannes Kepler) 提供了豐富的數據，為開普勒發現「開普勒三大定律」鋪平道路。「開普勒三大定律」對教會所堅持的「地心說」形成強烈的挑戰。
6. 介紹開普勒的工作：開普勒發現第谷的火星軌道數據和哥白尼的理論 (行星是繞太陽作勻速率圓周運動) 的預測存在 8' 誤差之巨。<sup>5</sup>因為當時公認第谷的測量最多只有 2' 誤差，那麼這 8' 的誤差的存在便十分令人困惑。
7. 提問：如果你是開普勒，你會怎樣做？得過且過？還是認真考慮出現誤差的原因？
8. 開普勒對火星軌道進行了大量的數學計算後發現，火星繞日軌道原來是自己一直忽略了、認為是簡單到不可能的橢圓軌道！哥白尼日心說中勻速圓周運動的假設是完全錯誤的。
9. 簡單介紹橢圓長軸、短軸和焦點等基礎知識。
10. 使用 PhET 軟件 (my-solar-system\_en.jar) 模擬行星繞日的橢圓軌道，如圖 6。<sup>6</sup>

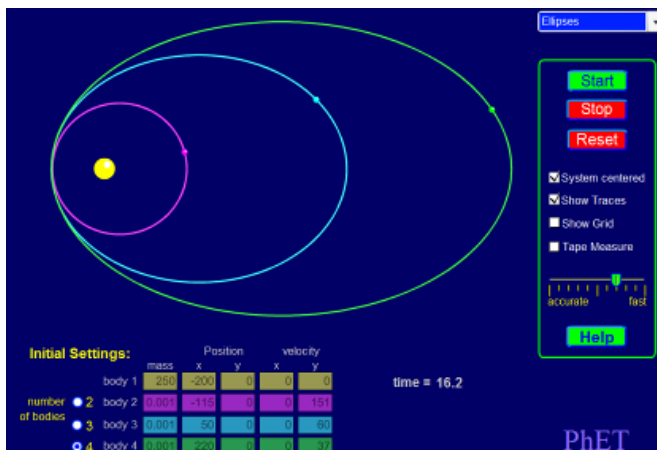


圖 6 行星軌道模擬

11. 改變軟件中的參數，使行星繞日的橢圓軌道發生不同的變化。

觀察  
觀察  
理解

聆聽

計算、分  
析

理解

回答

<sup>5</sup> 8' 相當於 2/15 度。

<sup>6</sup> 對於兩體系統，body1 的質量取 250，body2 的質量取 0.001，body1 的位置取  $x = 0, y = 0$ ，body2 的位置取  $x = 150, y = 0$ ，令 body1 不動，body2 的速度為 129 時，可令 body2 繞 body1 作近圓形軌道運動 (勻速率圓周運動時，行星只有向心加速度，則有  $v^2/R = GM/R^2$ ，即有  $v = (GM/R)^{1/2}$ ，軟件中默認取  $G = 10000$ ，則當  $M = 250, R = 150$  時，計算可知  $v$  約為 129)。改變 body2 的速度，即可令 body2 繞 body1 作橢圓軌道運動，且 body1 處於橢圓的其中一個焦點上。

<sup>7</sup> 一般情況下，平均距離 (mean distance) 等似於半長軸的數值。

<sup>8</sup> 也可算繞木星和繞土星的天體，木星和土星也有眾多的衛星，它們繞木星和土星的運動也必定要遵守開普勒的定律。

<sup>9</sup> 對於繞日天體，可取距離的單位為 AU，時間的單位為年。因為地日距離為 1AU，地球繞日周期為 1 年，則對於地球，有  $R^3/T^2 = 1$ 。所以當使用這兩個單位進行計算時，所有天體繞太陽的  $k$  都可以算出近似於 1。

- |   |  |
|---|--|
| <p>12. 總結開普勒第一定律：所有的行星圍繞太陽運動的軌道都是橢圓，太陽處在橢圓的一個焦點上。</p> <p>13. 令 <math>R</math> 代表橢圓軌道的長半軸、<math>T</math> 代表公轉周期，開普勒發現，如果 <math>R</math> 越大，<math>T</math> 也越大，但 <math>R</math> 和 <math>T</math> 之間卻不是簡單的正比關係。經過仔細分析，開普勒終於找出 <math>R</math> 和 <math>T</math> 之間的關係：<math>T^2 \propto R^3</math>，令 <math>k</math> 為一和行星無關的常量，即有 <math>T^2 = kR^3</math>。</p> <p>14. 為了驗證這一點，從維基中打開「List of gravitationally rounded objects of the Solar System」頁面（打開 List of gravitationally rounded objects of the Solar System - Wikipedia, the free encyclopedia.htm），裏面有八大行星、矮行星等天體的長半軸（semi-major axis）<sup>7</sup>和周期（orbital period）等數據。將這些數據在課堂中直接複製到 Excel 中，一次過將八大行星及矮行星<sup>8</sup>的半長軸三次方和周期二次方之比計算出來，看看它們在同時繞太陽作橢圓軌道運動的情況下，<math>R^3</math> 和 <math>T^2</math> 之比是否為常數。<sup>9</sup></p> <p>15. 總結開普勒第三定律：所有行星的軌道的半長軸的三次方跟公轉周期的二次方的比值都相等。</p> <p>16. 提問：開普勒三定律能夠解釋為甚麼行星會繞其中心天體轉動嗎？</p> |  |
|---|--|

### 三、 總結

1. 開普勒從第谷繁雜的數據中，經常多年的努力，總結出行星運動的三個定律。<sup>10</sup>
2. 開普勒敢於面對困難，不忽略誤差的存在，能夠根據真實的實驗數據挑戰傳統理論，成功找出行星運動的規律。
3. 可惜，開普勒的定律只能描述行星的運動規律，卻不能解釋行星的運動規律，這個任務將會由誰來負責呢？

### 試教評估

如果單純為了要學生學會開普勒第一和第三定律是並不困難的，但要把它們放在當時的歷史框架來引入卻不是一件容易的事，這會令人多走了彎路，但卻未必能夠達到目的地。然而，所謂的學習並不是學幾個離散的知識點就夠了，而應該整體全面地理解所學的問題，本教案的設計正是為了達到這個目的。

在本節中，我們使用日心說和地心說的爭論來引起學生的學習主動性，學生普遍對所展示的電腦模擬感到有趣，但他們對於為甚麼地心說不能得出金星有全相位感到有一些疑惑，但能夠接受電腦模擬給出的結果。對於開普勒第三定律的表達式，有許多同學未能馬上掌握。我認為可以佈置作業，讓學生回家上網尋找各天體的半長軸和周期數據，然後自己驗證開普勒第三定律，這樣的效果可能會

<sup>10</sup> 第二定律不教。



比較好。

## 第二節 萬有引力定律

### 設計思路

受兒童故事書的影響，人們對牛頓發現萬有引力定律的認識只停留在牛頓被蘋果砸中的故事中。這個故事不止沒有起到科學啟蒙、激發兒童對科學產生熱情的作用，還讓他們對牛頓產生鄙視的情緒，認為牛頓的工作沒有甚麼了不起之處。據此，本節課試圖糾正這種錯誤的概念，用牛頓和胡克之間的故事來激發學生對瞭解牛頓和胡克這種偉大科學家的興趣，進而認真學習萬有引力定律。

### 教學重點

萬有引力定律

### 教學難點

萬有引力定律是平方反比定律

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 掌握萬有引力定律的文字表述及公式
2. 過程與方法
  - 引導學生利用勻速率圓周運動情況來考慮地日之間吸引力的表達式
3. 情感態度與價值觀
  - 體驗科學發現過程的曲折
  - 領會牛頓的科學觀

### 教具

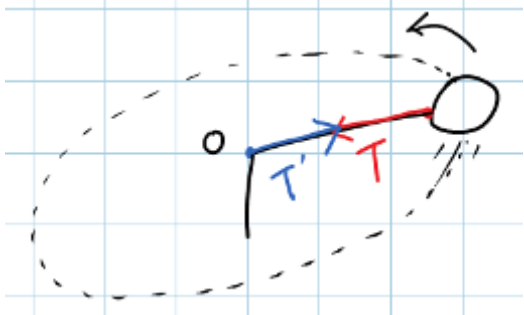
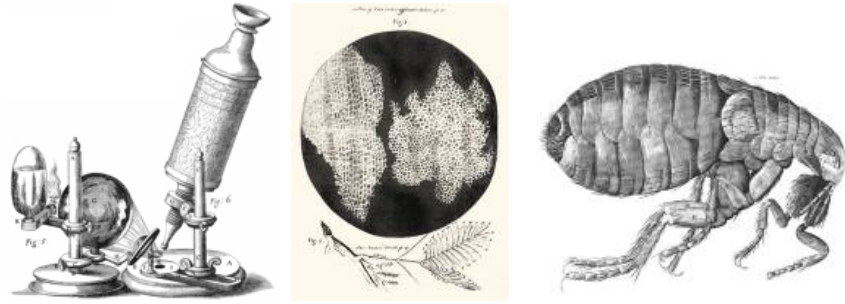
圖片、繩和小球

### 教學活動

#### 一、 引入

教師活動	學生活動
1. 以提問方式複習開普勒行星三定律。	回答
2. 開普勒總結出行星如何運動，卻不能解釋為何行星會如此運動。	聆聽
3. 提問：你認為在科學研究中，對現象出現的規律進行總結重要些，還是對現象出現的原因進行解釋重要些？為甚麼？	思考、回答

二、 課堂主要內容

教師活動	學生活動
<p>1. 以繩帶動小球旋轉，如圖 7 所示：(力可先不用畫出來)</p>  <p>圖 7 圓周運動</p> <p>2. 提問：為甚麼球能夠繞 O 點作圓周運動？(受繩給的拉力 T)</p> <p>3. 提問：如果突然剪斷繩，球將如何運動？(勻速直線運動)</p> <p>4. 提問：當球繞 O 點作圓周運動時，手在 O 點抓著繩，手是否有受力？(受繩給的拉力 T')<sup>11</sup></p> <p>5. 提問：地球繞太陽運動，地球是否要受力？(要)</p> <p>6. 提問：那太陽是否也要受力？(要)</p> <p>7. 提問：但太陽和地球之間沒有繩連著，地球和太陽又如何能受力？</p> <p>8. 提問：如果你是牛頓時代的古人，該如何思考上述問題？</p> <p>9. 簡介胡克 (Robert Hooke) 生平及成就。胡克是牛頓時代的英國科學家，在多方面作出突破性發現：發明顯微鏡、發現細胞壁、闡述光的波動學說、發現彈性定律和對重力進行研究等，是牛頓在科研上的強大競爭對手。圖 8 是胡克的顯微鏡、他所繪畫的細胞壁和跳蚤。</p>  <p>圖 8 胡克的工作</p> <p>10. 簡介牛頓的生平及成就。牛頓是英國人，未出生時便失去父親，</p>	<p>觀察</p> <p>回答</p> <p>回答</p> <p>回答</p> <p>思考、回答</p> <p>回答</p> <p>思考、回答</p> <p>回答</p> <p>思考</p> <p>思考</p> <p>聆聽、觀察</p>

<sup>11</sup> 這幾個問題都相當簡單，學生在之前的學習中都已多次回答過。

<sup>12</sup> 憑常識可以回答。

<sup>13</sup> 短時間內要讓他們自己「探究」出這個方法是幾乎不可能的，老師應作出提示。

<sup>14</sup> 引導學生回想這段推理的前提條件。

<sup>15</sup> 學生會不加思索地回答「存在」，老師可留下懸念，讓學生課後思考驗證方法。

幼年時又被改嫁的母親拋棄，由祖母撫養，後來回到母親身邊和繼父一起生活，對繼父充滿仇恨。牛頓性格自卑，幾乎沒有朋友，終身沒有結婚，亦未有和女性交往的證據。但牛頓對其醉心的學問卻有無與倫比的專注力，可以極長時間高度集中地去想同一個問題，直至得到答案。牛頓對力學、光學、數學均有極為傑出的貢獻。圖 9 分別是牛頓的畫像、其所發明的反射式望遠鏡及其巨著《自然哲學的數學原理》。



圖 9 牛頓的工作

11. 胡克和牛頓皆是當時英國首屈一指的大科學家，但他們之間對萬有引力、光學的問題的發現權產生了爭議，彼此互相攻擊。牛頓給胡克的信曾寫道：「如果說我看的比別人更遠，那是因為我站在巨人的肩膀上。」有學者認為，這句話並不是牛頓謙虛的表現，而是在諷刺胡克，因為胡克出了名長得矮，所以牛頓自己的科學成就與胡克無關。
12. 簡介胡克和牛頓關於萬有引力定律發現權的爭議：
13. 當時科學家假定地球和太陽之間存在看不見的「吸引力」，使地球繞太陽運動，就如同繩子的拉力拉著球轉動一樣。但問題是，這個力的大小究竟和甚麼因素有關呢？
14. 提問：假定地球和太陽間存在「吸引力」 $F$ ，兩星體間距離為  $R$ ，當  $R$  增大時， $F$  是否會改變？又會如何改變？（ $F$  會減小）<sup>12</sup>
15. 假定地球要繞太陽勻速圓周運動，地球質量為  $m$ ，太陽質量為  $M$ ，地球的線速度為  $v$ ，那麼地球應如何受力？（受向心力  $F = mv^2/R$ ）
16. 提問：那麼這是否表明  $F \propto \frac{1}{R}$ ？即地球和太陽間的吸引力和它們之間的距離成反比？（否，因為  $v$  可能隨  $R$  變化而變化，即  $v$  和  $R$  有關。實際上，我們有  $v = 2\pi R/T$ ， $T$  為圓周運動中的周期）
17. 將  $v = 2\pi R/T$  代入  $F$ ，得  $F = 4m\pi^2 R^2/(T^2 R)$ 。提問：對  $F$  化簡後，

聆聽

聆聽

聆聽  
聆聽、思考

思考、回答

回答

思考

<p>得 <math>F = 4m\pi^2 R/T^2</math>，這是否表明 <math>F \propto R</math>？（否，因為周期 <math>T</math> 也可能和 <math>R</math> 有關）</p>	<p>思考、回答</p>
<p>18. 提問：是否記得在開普勒定律中，我們有辦法可以將 <math>T</math> 和 <math>R</math> 聯繫起來，令它們變成一個和 <math>F</math> 無關的常數？<sup>13</sup>（開普勒第三定律中，有 <math>R^3/T^2 = k</math>，<math>k</math> 是常量）</p>	<p>回憶、回答</p>
<p>19. 那麼，整理 <math>F</math>，得 <math>F = 4m\pi^2 R^2/(T^2 R) = 4m\pi^2 R^3/(T^2 R^2) = 4m\pi^2 k/R^2</math>，</p> <p style="text-align: center;"><math>F \propto \frac{1}{R^2}</math></p> <p>因為 <math>m</math>、<math>\pi</math>、<math>k</math> 皆為常量，則有</p>	<p>分析</p> <p>思考</p>
<p>20. 提問，既然 <math>F</math> 和地球的質量 <math>m</math> 有關，那麼它和太陽的質量是否也有關？（有關，根據牛頓第三定律，太陽對地球的引力應等於地球對太陽的吸引力，既然太陽對地球的引力和地球質量有關，那麼應也和太陽質量有關，所以 <math>F</math> 可以寫為 <math>F \propto \frac{mM}{R^2} = G \frac{mM}{R^2}</math>，其中 <math>G</math> 是一常量）</p>	<p>回答</p>
<p>21. 提問：這是否表明地球和太陽之間的吸引力必為 <math>F \propto \frac{1}{R^2}</math>？（否，根據開普勒第一定律，地球繞太陽作橢圓軌道運動，而這個結果來自勻速率圓周運動）<sup>14</sup></p>	<p>聆聽</p>
<p>22. 牛頓和胡克的爭論正源於此。胡克曾明確提到這個「平方反比」關係，而此關係適用於橢圓軌道時的情況。然而，牛頓卻認為這個「平方反比」關係在更早以前已有人提出過，而且自己早就能夠證明在勻速率圓周運動中這個關係成立。更可況，牛頓可以利用微積分證明如果地球和太陽之間的吸引力是「平方反比」關係，那麼地球將以橢圓繞太陽運動！胡克雖然比牛頓早提出「平方反比」關係且認為其適用於地日橢圓軌道中，但胡克無法給出證據！</p>	<p>思考</p>
<p>23. 提問：胡克比牛頓早提出「平方反比」關係適用於地日橢圓軌道中，但無法證明，只能猜測，而牛頓卻用數學給出證明。你認為誰在這個問題上有更大更重要的貢獻？如果世界缺了胡克，牛頓是否就無法做到這個證明？如果世界缺了牛頓，僅靠胡克的猜測，是否能令人確信地球和太陽間的吸引力是「平方反比」關係？</p>	<p>思考、回答</p>
<p>24. 提問：既然地日之間存在吸引力 <math>F = G \frac{mM}{R^2}</math>，那火星和太陽之間、地球和火星之間、地球和月球之間、地球和人之間、人和人之間等等是否存在符合這個表達式的吸引力？是否有辦法去驗證呢？<sup>15</sup>（存在，所以這個吸引力是「萬有」的，兩物體之間的吸引力稱為萬有引力）</p>	<p>理解</p>
<p>25. 總結：牛頓最後給出萬有引力定律的表述：自然界中任何兩個物</p>	

體都是相互吸引的，引力的 <i>大小</i> 跟這兩個物體的質量的乘積成正比，跟它們之間的距離的二次方成反比。	
---	--

### 三、 總結

1. 牛頓和胡克都對萬有引力定律的發現作出貢獻，但牛頓給出具體證明，使世界不得不服萬有引力定律的平方反比關係。
2. 任意兩物體之間都存在萬有引力，其大小符合公式  $F=G \frac{mM}{R^2}$ 。

### 試教評估

本節的教學主要是兩個部份。第一部份介紹牛頓和胡克的故事，屬於科學史的問題，學生理解不成問題。如有必要，老師也可以加插更多相關的故事，牛頓和胡克都不是甚麼光明磊落的人物，特別是牛頓作為「偉人」一事人所皆知，但其人性的缺陷大家卻知之甚少，讓學生知道大科學家本身的局限性也未嘗不可。第二部份是假設地球繞太陽勻速率圓周運動，從向心力公式和開普勒第三定律得出萬有引力定律。這種方法是教材推行的標準方法，屬於學生探究活動的一種。從實踐中，這種方法能夠使學生清楚知道萬有引力是令地球繞太陽運行的向心力，但其平方反比關係的推導中，我認為對高一學生來說，還是稍微過於複雜，他們看來並不能很好地掌握這種推導方法。

## 第三節 引力常量的測定

### 設計思路

學生對物理學的公式基本上停留在接受的階段，從沒懷疑過公式的可靠性，亦不會理會公式使用時存在的問題，對公式給出的答案的可靠性也不去理會。本節課從這個問題出發，先用牛頓的月—地檢驗使學生真心信服萬有引力定律，繼而用卡文迪許測量萬有引力常數  $G$  的故事告訴他們萬有引力定律公式在使用上存在的困難，讓學生能理解公式背後的真正意義，並且學習卡文迪許的科學精神。

**教學重點** 引力常量的測定

**教學難點** 引力常量測定的思路

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 知道月—地檢驗
  - 知道引力常量的測定方法
  -
2. 過程與方法

- 通過分析卡文迪許的實驗裝置培養學生在設計實驗方面的能力
3. 情感態度與價值觀
- 從卡文迪許實驗的學習中養成嚴謹思考、仔細論證的科學態度

### 教具

多媒體圖片和影片

### 教學活動

#### 一、 引入


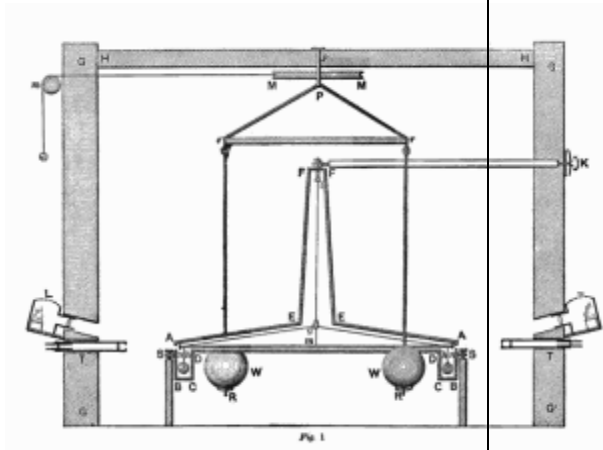
教師活動	學生活動
1. 以提問的方式複習開普勒行星三定律和萬有引力定律。	回答
2. 牛頓給出萬有引力 $F \propto \frac{mM}{R^2} = G \frac{mM}{R^2}$ ，但其比例常量 $G$ 的數值卻不得而知。提問：是甚麼原因使牛頓無法知道 $G$ ？ <sup>16</sup> （因為不知道地球的質量 $M$ ）	思考、討論
3. 提問：牛頓連 $G$ 的數值是甚麼都不知道，又是如何說服人們相信他的萬有引力是「萬有」，即不止適用於天體，也適用於地球上的其他物體呢？如果萬有引力是萬有的，那麼可以預料物體在地球表面所受的「重力」必定是萬有引力。水往下流，蘋果往下掉的原因是由於地球和物體之間萬有引力的吸引所導致的。所以，已知重力 $F_G = mg$ 時，必有 $mg = GMm/R^2$ ，即重力和萬有引力是同一種力。	思考
4. 為了解決這個問題，牛頓假設月球（質量為 $m$ ）繞地球（質量為 $M$ ）作圓周運動且其向心力由萬有引力這種和距離成平方反比的力提供，那麼，因為地球半徑 $R_{地} = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ，地月距離為 $R =$	聆聽、思考
3.84 $\times 10^8 \text{ m}$ ，即 $R = 60 R_{地}$ ，應有月球繞地球做圓周運動的重力加速度是地球表面重力加速度的 $1/3600$ 。 <sup>17</sup>	聆聽、思考
5. 已知任何物體在地球表面的重力加速度皆為 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，月球繞日周期 $T = 27.3 \text{ 日}$ ，有月球繞地球作勻速圓周運動時的向心力為 $F_1 = mv^2/R = 4\pi^2 mR/T^2$ ，在地球表面附近所受的重力為 $F_2 = mg$ ，	聆聽、思考

<sup>16</sup> 應展開討論，猜想在牛頓的年代，萬有引力定律公式中有甚麼量是知道的，有甚麼是不知道的。

<sup>17</sup> 想象將月球拿到地球表面，其所受的重力應為  $F = GMm/R_{地}^2$ 。

則有 $F_1/F_2 = 4\pi^2 R/(T^2 g) = 1/3594$ ，其結果在合理的誤差範圍內，所以牛頓的猜想得到驗證。 <sup>18</sup>	
---	--

二、 課堂主要內容

教師活動	學生活動
<p>1. 可是，萬有引力定律中的常量 <math>G</math> 一天無法確定，儘管我們知道萬有引力定律是正確的，卻無法將其應用在更廣泛的地方。之前說到，因為我們不知道地球的質量 <math>M</math>，所以無法算出 <math>G</math>，那我們為甚麼不能直接拿兩個已知質量的物體，測量它們之間的萬有引力，然後算出 <math>G</math>？<sup>19</sup></p>	聆聽、回答
<p>2. <math>G</math> 的確定由英國歷史上非常著名的「怪人」卡文迪許（Henry Cavendish）做出，以下介紹卡文迪許的故事。</p>	聆聽
<p>3. 卡文迪許之怪，在於他幾乎沒有和他人當面口語交流的膽量：他極之害羞，無法面對眾人。要和他「交談」，比較可行的方法是在他常出現的地方寫下問題，之後卡文迪許再進行回覆。卡文迪許由於太過害羞，不太喜歡將自己的科學發現寫成論文發表，這使他的許多重大的科學發現在自己的筆記本中沉睡了幾十年。可惜的是，卡文迪許筆記本中這些未發表的內容有些日後被其他科學家重複發現，使他失去了首先發現該成果的榮耀。</p>	聆聽
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>圖 10 卡文迪許</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>圖 11 卡文迪許的實驗裝置</p> </div> </div>	
<p>4. 卡文迪許雖然孤獨害羞，但不代表他不會思考。相反，卡文迪許</p>	

<sup>18</sup> 此處的推導不用太過詳細，盡量講清概念即可。

<sup>19</sup> 因為它們之間的引力太小，測量十分困難。

<sup>20</sup> 然後告訴學生卡文迪許是在他快七十歲時完成這個實驗。

<sup>21</sup> 提問學生為甚麼  $G$  的單位是  $N^2 \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$ ，此常量不用背誦，但應知道這個值非常非常小。

<sup>22</sup> 應提及  $50 \text{ kg}$  相當於一個身材中等， $1.6$  米左右的學生，這個例題可以應用在課室中的同學之間。

思維嚴密，能考慮到實驗中各種不同的變數，這使他能做出了多個重要的發現，如發現氫氣和計算出地球的密度（即能夠測量出  $G$ ）。圖 10 是卡文迪許。

- 介紹卡文迪許測量  $G$  的方法。圖 11 是卡文迪許測量  $G$  的實驗裝置圖，稱為扭秤。其中，兩個相連的小鉛球被細線從中懸掛起來，其旁對稱放兩個質量極大的鉛球。因為小鉛球和大鉛球被彼此之間的萬有引力所吸引，令大小鉛球互相接近，使懸掛著小鉛球的細線扭轉，如圖 12 所示。因為大小鉛球之間的萬有引力極小，細線只會扭轉非常小的角度，其扭轉所產生的彈力會和萬有引力之間互相平衡。但因為慣性，兩個小球不斷來回擺動。如果能夠測出細線扭轉所產生的彈力，大小鉛球之間的萬有引力便能知道。如果細線扭動的角度可以測量出來，我們便有辦法知道它的彈力，那我們該如何測量出其扭轉的角度呢？

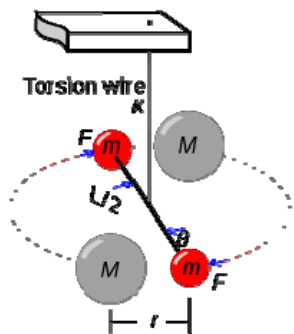


圖 12 卡文迪許實驗示意圖

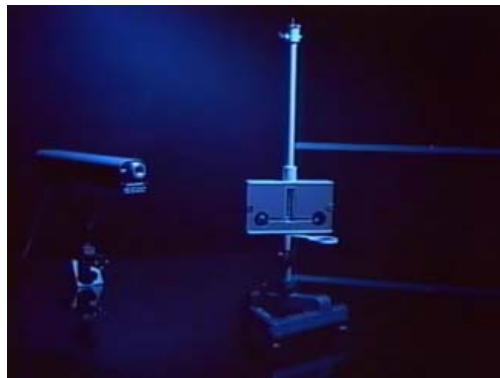


圖 13 卡文迪許實驗影片

- 提問：如果細線扭轉的角度極小，我們該如何才能測出此微小的變化？（在細線上貼上鏡子，將光入射到鏡中，讓反射光射到較遠的尺子中，即可放大細線的微小扭轉）
- 提問：實驗裝置該如何放置？（因為大小鉛球之間的萬有引力極小，任何風吹草動都可能會對實驗結果帶來影響，所以實驗裝置應該放在非常密閉可靠之處）
- 提問：實驗操作者是否會對實驗的結果帶來影響？（實驗操作者在實驗裝置旁的走動可能會影響實驗的進行，因為人和鉛球之間亦存在萬有引力，所以實驗操作者應遠離實驗裝置）
- 提問：那實驗操作者如何測量數據？（使用望遠鏡在遠處測量）
- 提問：做這個實驗是否很麻煩，很辛苦？是否佩服卡文迪許的工作態度？<sup>20</sup>
- 觀看影片「Demo 4 7 Universal Gravitation Cavendish Experiment.flv」，了解實驗的具體過程。圖 13 是影片中的截圖。
- 最後，我們知道萬有引力常數  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ ，<sup>21</sup>並對這個數值的大小略作討論。

聆聽

聆聽、思考

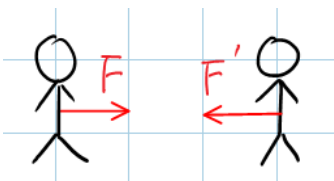
思考、討論

思考、討論

思考、討論

思考、討論



<p>13. 例：兩距離為 1 m，質量皆為 50 kg 的人的引力為多少？<sup>22</sup></p> <p>解：如圖 14 所示，兩人之間的萬有引力分別為 F 和 F'，它們大小相等，方向相反。</p> <p>根據萬有引力定律，有：</p> $F = F' = G \frac{mM}{R^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{50 \times 50}{1^2} = 1.7 \times 10^{-7} \text{ N}$  <p>圖 14 兩人之間的萬有引力</p>	<p>回答 觀察 理解 分析、計算</p>
---	-----------------------------------

### 三、 總結

1. 月—地檢驗證實天體之間的萬有引力和物體在地球表面所受的重力是同一種力。
2. 卡文迪許通過精心設計的扭秤實驗測出萬有引力常數 G。
3. 作業：教材 p.100 第 2、3 題。

### 試教評估

澳門學生一般都只會被動接受知識，老師說甚麼就信甚麼。本來物理學的學習是希望培養學生的理性思維，希望他們能夠用科學方法去解釋自然現象，但目前卻演化成培養學生背公式、套公式的能力。在教授完萬有引力定律後，我們不應急於立即應用它來解題，而應對它所產生的問題進行逐一討論：它為甚麼是萬有的？公式中的哪一個物理量容易測量？G 的數值的大小代表了甚麼？學生未必都能夠從這種討論中領悟到太多的東西，但這種學習的態度應該要堅持，要把公式背後的道理想得清楚明白。從本節課的學習中，許多學生都不能完全領悟月—地檢驗的必要性，也未能體會到卡文迪許實驗背後精妙之處，但他們至少明白到公式不是一拿來就可以隨便用的，而應該從實際情況出發去考慮公式究竟該如何運用。

## 第四節 萬有引力定律在天文學上的應用

### 設計思路

萬有引力定律在天文學上有廣泛的應用，本節除了介紹教材中提到的測量天體質量和發現未知天體外，我們還引入一些天文學前沿的研究作為例子來說明問題，既開拓學生的視野，又能提高他們的學習興趣。

### 教學重點

## 中心天體質量的計算

### 教學難點

中心天體質量公式

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 掌握中心天體質量的計算方法
  - 知道萬有引力定律在天文學上有重要的應用
2. 過程與方法
  - 觀察電腦模擬進一步了解萬有引力定律在天文學上的應用
3. 情感態度與價值觀
  - 用天文學前沿研究激發學生對科學和天文現象的興趣

### 教具

NAAP、多媒體圖片和影片

### 教學活動

#### 一、 引入

教師活動	學生活動
1. 以提問的方式複習開普勒行星三定律和萬有引力定律。	回答
2. 對於天文學問題，因為天體離地球極遠，不能接觸，所以一般情況下，只能通過觀察的方法去研究。提問：通過觀察，你能得到哪些關於天體的數據？ <sup>23</sup>	思考、回答
3. 提問：物體的運動和哪些物理量有關？（位移、速度、加速度）	回答
4. 提問：物體的加速度又和哪些物理量有關？（質量、力）	回答
5. 提問：當天體做勻速圓周運動時，其加速度是甚麼？（為向心加速度，其等於 $a_{\text{心}} = m\frac{v^2}{R} = mR\omega^2$ ）	回答
6. 提問：此向心力由哪種力提供？（萬有引力）	回答
7. 提問：萬有引力的表達式是甚麼？（ $F = G\frac{mM}{R^2}$ ）	回答

#### 二、 課堂主要內容

<sup>23</sup> 可在黑板把學生的回答寫出來，最後它們都可以歸成兩類，即運動和光。

教師活動	學生活動
<p>1. 設質量為 <math>m</math> 的天體繞質量為 <math>M</math> 的中心天體以 <math>\omega</math> 的角速度勻速圓周運動，<sup>24</sup>它們的距離為 <math>R</math>，則 <math>m</math> 所受的向心力為</p> $F_{\text{心}} = mR\omega^2$ <p><math>m</math> 所受的萬有引力為</p> $F = G\frac{mM}{R^2}$ <p>因為 <math>F_{\text{心}} = F</math>，有</p> $mR\omega^2 = G\frac{mM}{R^2}$ <p>因為 <math>\omega = \frac{2\pi}{T}</math>，所以有</p> $mR\frac{4\pi^2}{T^2} = G\frac{mM}{R^2}$ ，整理後得 $M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$ ，此即為中心天體質量公式。	<p>聆聽、理解</p>
<p>2. 觀察上式，提問：要求出中心天體質量 <math>M</math>，是否需要知道圓周運動中的天體的質量 <math>m</math>？（不需要）</p>	<p>回答</p>
<p>3. 提問：公式中的哪些量是常量？它們各等於多少？（<math>\pi = 3.1415926\dots</math>、<math>G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}</math>）</p>	<p>回答</p>
<p>4. 提問：所以，要求出中心天體質量，只需要測量哪兩個物理量？（天體間的距離 <math>R</math>、圓周運動的周期 <math>T</math>）</p>	<p>回答</p>
<p>5. 提問：中心天體質量公式中的 <math>R^3/T^2</math> 曾經在哪裏見過？（開普勒第三定律）</p>	<p>回答</p>
<p>6. 提問：所以，開普勒第三定律的常量 <math>k</math> 的表達式是甚麼？（<math>k = \frac{MG}{4\pi^2}</math>）<sup>25</sup></p>	<p>回答 計算、回答</p>
<p>7. 提問：對於月球繞地球運動的情況，<math>T</math> 為多少？（<math>T = 27.3 \text{ 日} = 27.3 \times 24 \times 3600 = 2358720 \text{ s}</math>）<sup>26</sup></p>	<p>回答</p>
<p>8. 提問：對於上述情況，<math>R</math> 為多少？（<math>R = 3.84 \times 10^8 \text{ m}</math>）<sup>27</sup></p>	<p>回答</p>
<p>9. 提問：此時中心天體是誰？（地球）</p>	<p>回答</p>
<p>10. 堂課：試計算地球質量。<sup>28</sup></p>	<p>回答</p>

<sup>24</sup> 如果給出的是線速度  $v$ ，下方的推導方法是完全適用的。

<sup>25</sup> 這不奇怪，當初就是假設勻速圓周運動的情況下用開普勒第三定律推導出萬有引力定律。

<sup>26</sup> 務必和他們強調公式中的物理量必須使用國際單位。

<sup>27</sup> 即約三十八萬公里。許多學生早已忘記這些地理課中早已學過的基本數據。此處可提醒學生，因為光速約為每秒三十萬公里，所以光由地球傳播到月球只需約 1.3 秒。將光速和地月距離聯繫在一起有助於學生理解地月間的距離有多遠。此外，如有學生問這個距離如何測量（ $T$  的測量方法是顯然的），可告訴學生古希臘時人類已經能夠用幾何方法測量出地月距離了（通過影長測出地球直徑，再通過日食測出月球直徑，最後用相似三角形的方法測出地月距離）。

<sup>28</sup> 請學生作堂上練習，特別是要親自用計算器計算。

<p>解：<math>M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times (3.84 \times 10^8)^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (2358720)^2} = 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}</math></p>	<p>回答 計算</p>
<p>11. 提問：這個計算結果是否和地理課本中給出的數據允合？是否還記得太陽的質量是多少？</p>	
<p>12. 堂課：已知地日距離為一億五千萬公里，<sup>29</sup>求太陽質量。<sup>30</sup> 解：<math>R = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}</math>，<math>T = 365.25 \text{ 日} = 365.25 \times 24 \times 3600 = 31557600 \text{ s}</math> 則太陽質量為<math>M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times (1.5 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (31557600)^2} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}</math></p>	<p>回答 計算</p>
<p>13. 萬有引力定律除了可以用於計算天體質量外，還可以發現未知天體。天體運動受萬有引力支配，提問：如果天體的運動和萬有引力定律所預測的結果有明顯偏差，你認為可能的原因有哪些？（可能是萬有引力定律錯誤，也可能是測量結果錯誤，但更可能是存在未觀測到的天體，其引力影響了其他天體的運動）</p>	<p>思考、回 答</p>
<p>14. 介紹海王星發現的科學史。<sup>31</sup></p>	
<p>15. 宇宙中的行星明顯不止八個，在太陽系外肯定存在數之不盡的行星，但它們太暗，又在明亮的恒星旁，使科學家無法直接觀測到它們。由於行星和恒星之間存在萬有引力的作用，恒星本身的運動也會受到行星的輕微影響，所以通過觀測恒星的運動，天文學家可以推測出該恒星旁是否存在行星。（打開 ca_extrasolarplanets_starwobble.swf，如圖 15 所示）</p>	<p>聆聽、討 論 觀察、思 考</p>
	
<p>圖 15 行星萬有引力對恒星的影響</p>	
<p>16. 這個電腦模擬表明，如果太陽周圍存在行星（特別是大質量的木星和土星）時，太陽自身也會受到引力的影響而運動。據此，只要觀測太陽系外恒星的運動軌跡，天文學家便有可能推算出它們周圍是否存在行星。<sup>32</sup></p>	
<p>17. 利用萬有引力定律，天文學家預測銀河系將會在數十億年後和目前在 250 萬光年以外的仙女座星系碰撞並合而為一。（打開影片 Milky Way Versus Andromeda As Seen from Earth.flv，圖 16 是影片的截圖）<sup>33</sup></p>	<p>理解</p>

<sup>29</sup> 提醒學生 1 億 =  $10^8$ 。

<sup>30</sup> 讓學生自己給出周期，可以取  $T = 365 \text{ 日}$ ，也可取  $T = 365.25 \text{ 日}$ 。

<sup>31</sup> 可請學生課外閱讀此文章：方舟子，《科學史上的著名公案——誰是海王星的真正發現者》，<http://www.xys.org/xys/netters/Fang-Zhouzi/jingji/neptune.txt>

<sup>32</sup> 亦可向學生介紹到目前為止，天文學家大概已經發現了甚麼類型的太陽系外行星。

<sup>33</sup> 學生對於這些天文學前沿問題都比較感興趣，可和學生適當討論相關的問題。



圖 16 銀河系和仙女座星系相遇

觀察、討  
論

### 三、 總結

1. 中心天體公式為 $M = \frac{4\pi^2 R^3}{GT^2}$ ，知道繞中心天體勻速圓周運動的物體和中心天體的距離  $R$  及周期  $T$ ，即可算出中心天體的質量。
2. 為了使上式得出國際單位  $kg$ ，要注意  $R$  及  $T$  的單位必須轉換成國際單位  $m$  及  $s$ 。
3. 小至行星之間，大至星系之間的天體都受萬有引力的影響。

### 試教評估

本節課的教學效果較好，前半部份用複習及提問的方式得出中心天體質量公式，堂課的計算結果和地理科學過的內容有關，所以學生比較能夠專心聽講、回答問題及做練習。後半部份基本上是簡單介紹一些天文學知識，有故事、電腦模擬和影片等內容，課堂氣氛輕鬆。比較要注意的是學生的單位換算及計算器的使用問題。雖然已經是高一年級，但許多學生還不懂一小時有多少秒；他們使用計算器的能力也有些問題，經常算出錯誤的結果。

## 第五節 人造衛星 宇宙速度

### 設計思路

許多人都有以下的疑惑：「月球受地球的萬有引力，為甚麼月球不掉到地球上，反而會繞地球運動？」只要明白了這一點，宇宙速度的概念就會自然形成。本節課的內容將由物體平拋運動出發，令學生最後明白萬有引力是作為物體繞中心天體圓周運動的向心力。為了增加學生的學習興趣，本節課中亦介紹了一些比較新的天文學研究進展。

**教學重點** 人造衛星、宇宙速度

**教學難點** 物體繞中心天體運動的速度公式的推導和理解

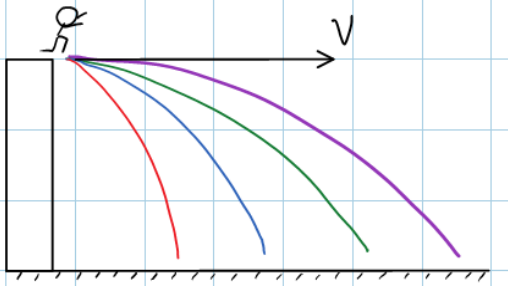
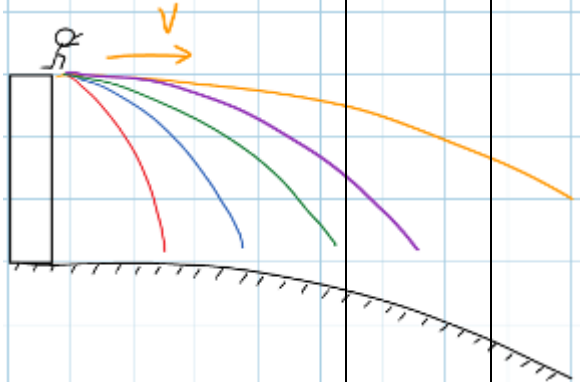
### 教學目標

1. 知識與技能
  - 掌握物體繞中心天體運動的速度公式
  - 知道三個宇宙速度的概念
2. 過程與方法
  - 通過平拋運動的例子體會物體繞中心天體運動的本質
3. 情感態度與價值觀
  - 通過對衛星和宇宙速度的理解，使學生對科學解釋自然現象的能力充滿信心

教具 PhET、多媒體圖片

### 教學活動

#### 一、 引入

教師活動	學生活動
<p>1. 以提問的方式複習開普勒行星三定律和萬有引力定律。</p> <p>2. 提問：月球受地球的萬有引力，為甚麼月球不掉到地球上，反而會繞地球運動？<sup>34</sup></p> <p>3. 如圖 17 所示，一人從高處以平行於地面的初速度 <math>v</math> 躍下。提問：如果不存在重力，人的運動軌跡是甚麼？（勻速直線運動）</p> <div style="text-align: center;">  <p>圖 17 人從高處往平地跳</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>圖 18 人從高處往向下彎曲的地面跳</p> </div> <p>4. 圖 17 的紅、藍、綠、紫線表示人以不同的初速度躍下時，其落點不同。顯然，如果速度較大，人將於更遠處落地。不過，無論速度多大，人始速都會掉到地上，只不過速度大的時候人能夠跳得更遠。</p>	<p>回答</p> <p>思考、回答</p> <p>回答</p>
<p>4. 圖 17 的紅、藍、綠、紫線表示人以不同的初速度躍下時，其落點不同。顯然，如果速度較大，人將於更遠處落地。不過，無論速度多大，人始速都會掉到地上，只不過速度大的時候人能夠跳得更遠。</p>	<p>理解</p> <p>理解</p>

<sup>34</sup> 這是大多數學生心中所想，我們以此問題引起學生的共鳴。

<sup>35</sup> 物體不停往下跌，正是令物體產生所謂「失重」現象的原因。例如人背著書包從樓梯級跳下來途中，會感覺到書包不再壓著肩，這是因為人和書包同時往下跌，它們的下跌速度一樣，所以兩者之間不存在壓力和支持力。人造衛星繞地球轉動也是一種不停往下跌的過程，所以人造衛星內部任何物體都處於「失重」的狀態。

5. 可是，因為地球表面並不是平的，而是彎的，所以當人的初速度達到某個大小時，人盡管不停往下掉，卻永不能掉到地上，如圖 18 的橙色線所示。
6. 人不停往下掉，卻永不能掉到地面上，這正是牛頓當年在《System of the World》中所提到的人造衛星的基本概念。如圖 19 所示，山頂上一石塊被平拋出去後，如果平拋的初速度達到一定大小( 橙色線)，石塊將永不能掉到地上，而是繞地球作圓周運動。一段時間後，石塊將回到起點。<sup>35</sup>

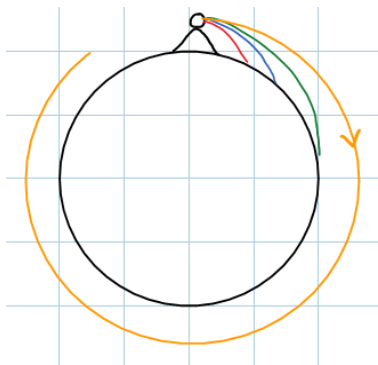


圖 19 成為人造衛星

理解

## 二、 課堂主要內容

教師活動	學生活動
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 那麼，究竟石塊要以甚麼初速度拋出，它才能夠永遠不跌落到地上，而是變成繞地球運動的人造衛星呢？</li> <li>2. 設石塊的質量為 <math>m</math>，地球的質量為 <math>M</math>，石塊離地球中心的距離為 <math>R</math>，石塊被平拋出去的初速度為 <math>v</math>。 設石塊永不掉到地上，而是繞地球勻速圓周運動，那麼石塊必受所心力 <math>F_{心}</math>，而向心力由石塊所受的萬有引力 <math>F</math> 提供，<sup>36</sup>則 <math>F_{心} = F</math> <math>m\frac{v^2}{R} = G\frac{mM}{R^2}</math>，整理得 <math display="block">v = \sqrt{\frac{GM}{R}}</math></li> <li>3. 設地球質量 <math>M = 6 \times 10^{24}</math> kg，石塊近地球表面，即有 <math>R =</math> 地球半徑 <math>= 6.4 \times 10^6</math> m，代入上式得 <math>v = 7.9 \times 10^3</math> m/s <math>= 7.9</math> km/s。這個速度稱為第一宇宙速度，代表物體要成為近地人造衛星繞地球作勻速圓周運動所要具有的速度。</li> <li>4. 提問：相同體積的鉛球和木球，它們的第一宇宙速度是否相同？</li> </ol>	<p>思考</p> <p>聆聽、理解</p> <p>計算</p> <p>回答</p>

(相同，因為第一宇宙速度和物體質量無關)

5. 提問：衛星離中心天體越遠，它的速度將如何變化？（減小）
6. 當物體的速度大於 7.9 km/s，小於 11.2 km/s 時，它繞地球的運動軌跡將不是圓形，而是橢圓形。當它的速度達到 11.2 km/s 時，它便可以脫離地球，但仍受太陽引力束縛，我們將 11.2 km/s 這個速度稱為第二宇宙速度或脫離速度。<sup>37</sup>為了脫離太陽引力束縛，物體需要達到 16.7 km/s，<sup>38</sup>這個速度稱為第三宇宙速度。<sup>39</sup>
7. 打開 my-solar-system\_en.jar，選擇「Sun, planet, moon」的模版，改動 body3 的 y 方向 velocity，演示月球如何受太陽引力束縛和脫離太陽，<sup>40</sup>如圖 20 所示。

回答  
聆聽、理解

觀察

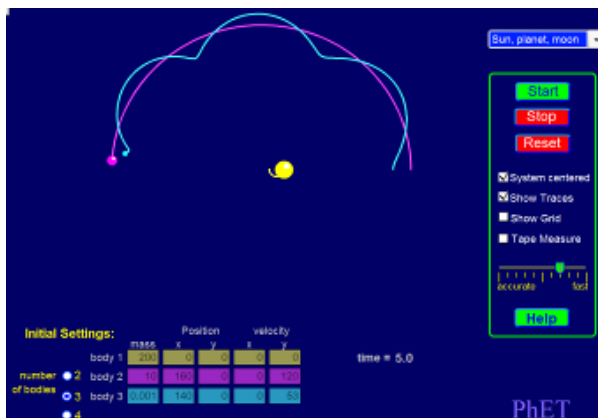


圖 20 日、地、月三體運動

8. 如果要發射飛船脫離地球引力束縛飛向深空，直接在地球發射時就讓飛船加速超過 11.2 km/s 是不切實際的。現實上，科學家利用飛船經過行星時的引力輔助來加速飛船，以達到節省燃料和降低發射技術難度的目的。使用上述的模擬的「Slingshot」模版可以演示這種效果，如圖 21 所示。圖 22 是當年發射卡西尼號飛去土星時所用的引力輔助路徑，可見卡西尼號利用了包括金星、地球和木星的多次的引力輔助。

觀察

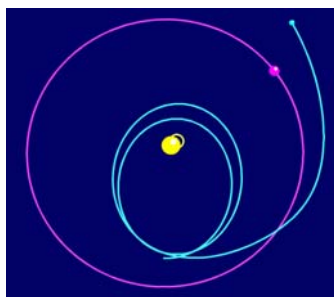


圖 21 引力輔助模擬

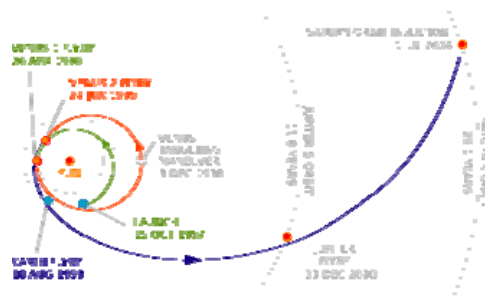


圖 22 卡西尼號所受的行星引力輔助

9. 提問：如果中心天體的質量越大，半徑越小，那麼要脫離該天體，物體所需的的速度要如何變化？（增大）
10. 提問：如果該中心天體的質量極大、半徑極小，使物體脫離該天

回答



- 體的速度要大於  $3 \times 10^8$  m/s 時，該中心天體稱為甚麼？（黑洞）
11. 研究表明，星系中心一般存在特大質量黑洞，銀河系中心亦然。（打開影片 Tracking Stars Orbiting the Milky Way\_s Central Black Hole.flv，圖 23 是影片中的截圖）天文學家通過十多年的觀測，發現銀河系中心的恆星以異乎尋常的速度繞一全黑的、甚麼都沒有的空間運動。通過計算，只有該處存在一質量超過 400 萬倍太陽質量的天體才可能使周圍的恆星如此運動。任何恆星的質量都不可能達到太陽質量的 400 萬倍，所以該處的天體必然是一個特大質量黑洞。

回答  
觀察

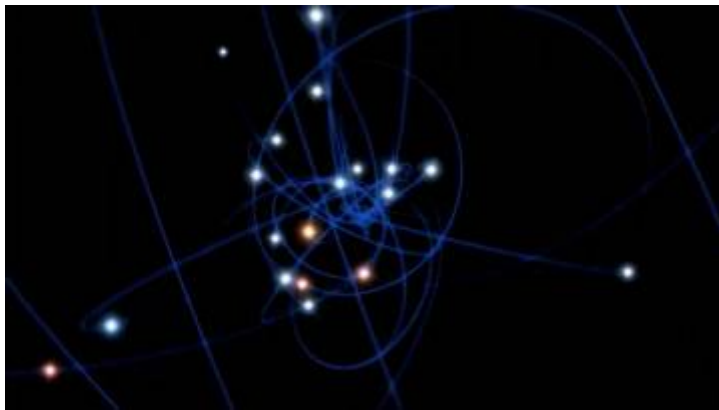


圖 23 銀河系中心的恆星運動軌跡

### 三、 總結

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

1. 當物體繞中心天體勻速圓周運動時，其速度為  $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ 。
2. 第一宇宙速度為 7.9 km/s，代表物體在近地軌道繞地球做勻速圓周運動時所要有的速度。
3. 第二宇宙速度為 11.2 km/s，代表物體剛好能脫離地球引力束縛的速度。
4. 第三宇宙速度為 16.7 km/s，代表物體剛好能脫離太陽引力束縛的速度。
5. 作業：教材 p.103 第 1、2、7 題。

### 試教評估

本節課內容比較簡單，學習難度不大。一般來說，學生主要的問題是將公式

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

和萬有引力定律或向心力的公式混淆，導致公式錯誤。學生對本節課的引入手法抱有高度的興趣，也能認真聽講引力輔助加速和黑洞等課外問題。

## 第六節 行星、恆星、星系和宇宙

### 設計思路

根據教材的內容，本節課應從尺度的層次上，為學生依次介紹行星、恆星、星團、星系和宇宙。然而，這些內容其實在地理課中已經學過，在知識的層次上也只是一些名詞的堆砌，對學生理解大自然並無太大的作用。因為在中學階段中，學生較少有機會接觸宇宙學的內容，特別是宇宙大爆炸和宇宙膨脹等宇宙學重要知識，所以借此機會，本節課改為主講宇宙大爆炸，為學生科普宇宙的起源問題。

### 教學重點

宇宙大爆炸

### 教學難點

宇宙背景微波輻射

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 知道宇宙正在膨脹
  - 知道宇宙誕生於宇宙大爆炸
  - 知道宇宙大爆炸中的「爆炸」代表空間膨脹
2. 過程與方法
  - 觀察哈勃極深空圖片
  - 通過學習空間膨脹的概念，理解宇宙起源於宇宙大爆炸
3. 情感態度與價值觀
  - 感悟宇宙大爆炸背後的深刻科學意義
  - 通過學習宇宙學，思考人類未來的前途

### 教具

NAAP，多媒體圖片

### 教學活動

#### 一、 引入

教師活動	學生活動
1. 出示哈勃極深空的圖片（打開 XDF-Hubble.jpg，圖 24）。哈勃極深空是天文學家使用哈勃望遠鏡對天空的一小部份位置（打開	聆聽、觀察

XDF-scale.jpg，即圖 25 所標的「XDF」的位置）進行長時曝光所拍攝得到。使用超過一個月的曝光時間，原來漆黑一遍的天空中竟然被拍攝出超過 5000 個星系。



圖 24 宇宙極深空

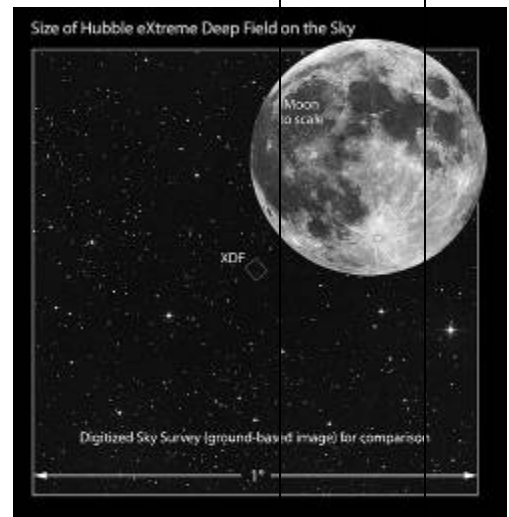


圖 25 宇宙極深空所拍攝的天空大小

2. 在哈勃極深空中，每一個點都是一個星系，總數超過 5000 個。假設宇宙是均勻的（即無論從那個方向看，都能看到差不多數目的星系），<sup>41</sup>可計算出全宇宙的星系數目超過千億個。
3. 越往遠看，看到的星系便越年輕、越簡單。<sup>42</sup>天文學家發現，當遠看到一定程度時，將無法看到宇宙中有任何星系存在。這表明星系有其自身的演化過程，從無到有。很多年前，宇宙中曾經不存在著任何星系。然而，在這個漆黑一遍的天空中卻隱隱透著亮光——無論從那個方向看，天空中都有一股極其微弱的微波輻射。這些微波輻射無處不在，極其均勻。它們不由任何行星、恆星和星系發出。科學家已經將這些微波輻射進行了精確測量（打開 CMBR2.jpg），如圖 26 所示，這稱為宇宙微波背景輻射（Cosmic Microwave Background Radiation）。因為微波無法用肉眼看見，所以科學家用可見的顏色來表示其對應的溫度。<sup>43</sup>

聆聽

聆聽

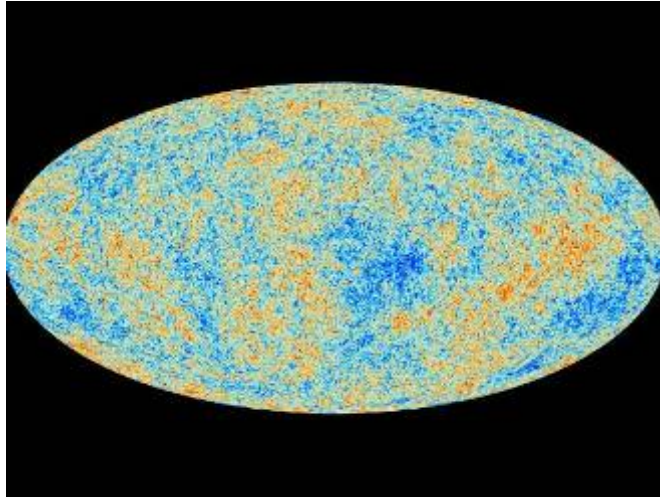


圖 26 宇宙微波背景輻射

4. 為甚麼宇宙存在這種極其微弱的背景輻射？它的存在暗示了甚麼？

思考

二、 課堂主要內容

教師活動	學生活動
<p>1. 近百年前，天文學家哈勃發現，銀河系外的大部份其他星系的光譜皆存在「紅移」的現象。所謂的「紅移」，即是星系所發出的光的波長被不同尋常地「拉長」了。紅光和橙光兩者比較中，紅光的波長較長。例如某星系應該發出橙色光，但在地球測量時，發現其竟然變成了紅色光，那麼我們便說該星系的光譜發生了紅移。</p> <p>2. 紅移發生的原因科學家早已經清楚。如救護車離去時，我們會發現其發出的聲音的音調變低，說明聲波的波長增加，頻率降低，這稱為多普勒效應。當星系遠離地球時，其發出的光在空間的傳播過程中，光的波長會增加，頻率會降低，這便是光的多普勒效應。哈勃發現星系光譜紅移，說明銀河系外的星系正遠離銀河系。哈勃亦發現，如果該星系離銀河系越遠，其紅移得越多，說明該星系遠離銀河系的速度越快，如圖 27 所示。</p>	<p>聆聽、理解</p> <p>聆聽、理解</p>

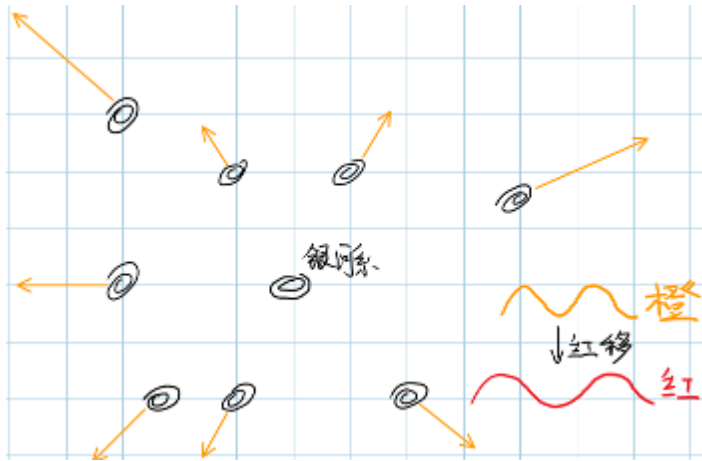


圖 27 宇宙膨脹

3. 為甚麼差不多所有星系都會同時遠離銀河系，而且距離越遠的星系遠離銀河系的速度越快？打開電腦模擬（Balloon Universe.swf，如圖 28 所示），當氣球被吹脹時，氣球表面的點將會互相遠離。無論以那一個點為參考系，都會發現其他點正同時遠離而去。星系也是一樣，因為它們之間的空間在膨脹，所以星系之間必定互相遠離。無論在那個星系中觀察，都會發現其他星系正在遠離而去。



圖 28 宇宙膨脹模擬

4. 如圖 29 所示的兩種不同距離的星系中，距離較近的星系之間的空間較少，膨脹後的空間比較少。只要兩星系之間的距離越遠，它們之間互相遠離的速度就越快，因為它們之間的空間多，膨脹後的空間也更多。

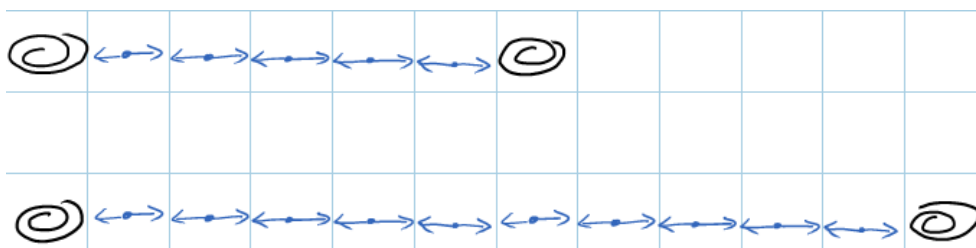


圖 29 星系退行速度和星系距離的關係

5. 提問：既然空間在膨脹，為甚麼銀河系和仙女座星系在未來會發生碰撞？課室中的空間也會膨脹嗎？為甚麼同學之間不會互相遠離？（因為

觀  
察、  
理解

觀  
察、  
理解

思  
考、  
回答

<p>銀河系和仙女座星系較近，它們之間引力較強、空間較少，空間膨脹的結果不足以抵消引力將它們互相拉近的結果。空間膨脹的速度很慢，大概每三百萬光年的空間每秒只會膨脹 70 公里，相當於每 1 米空間每秒約膨脹 <math>2 \times 10^{-18}</math> m，<sup>44</sup>要經過 1 億秒（約 3 年），1 米的空間才會膨脹了一個原子大小的距離，所以同學之間是不可能感知到空間膨脹造成的互相遠離。）<sup>45</sup></p>	<p>討論</p>
<p>6. 提問：宇宙既然正在膨脹，這暗示了宇宙的過去是怎樣的？（過去的宇宙比現在的宇宙小）</p>	<p>聆聽、</p>
<p>7. 將時間倒流，宇宙必定不斷縮小，直到宇宙誕生之初。科學家將宇宙誕生的事件稱為「宇宙大爆炸」（Big Bang），其所謂的爆炸並不是日常生活中所見到的化學爆炸，而是代表空間膨脹。<sup>46</sup></p>	<p>理解</p>
<p>8. 宇宙誕生之初，宇宙中必定不存在任何恆星和星系。因為當時宇宙很小，溫度必定比現在高得多。當溫度太高時，質子不足以束縛電子，<sup>47</sup>最簡單的氫原子都不能形成。此時的宇宙由光輻射、中子和質子電子等離子體組成，光輻射被中子、質子電子等離子體不斷吸收和發出，所以該等離子體是不透明的、像霧一般，會阻擋光直接通過。隨著宇宙不斷膨脹，空間增加，溫度便會降低。直到溫度降低至 3000 K 左右時，質子終於能夠將電子束縛，形成氫原子，此時宇宙的密度大大降低，光輻射基本上不再被阻擋，能夠一直自由傳播，直到抵達百億年後我們的望遠鏡中。</p>	<p>聆聽、 理解</p>
<p>9. 據此預測，我們能夠估計，宇宙之中必定存在一背景輻射，此輻射不由任何恆星和星系發出，而是來源於宇宙溫度降低至 3000 K 時的光輻射，此乃宇宙大爆炸的「餘光」。從物理學基本常識可知，溫度為 3000 K 的宇宙將輻射橙紅色光，<sup>48</sup>但隨著宇宙膨脹，這種波長的光會被紅移至紅外和微波波段。我們之前提到的宇宙微波背景輻射正是宇宙大爆炸的餘光。通過測量宇宙微波背景輻射，我們可推算得知宇宙年齡約為 138 億年，宇宙微波背景輻射源自宇宙大爆炸後的約 37 萬年。<sup>49</sup></p>	<p>聆聽、 理解</p>
<p>10. 宇宙微波背景輻射是證明宇宙大爆炸理論正確的重要證據，宇宙大爆炸理論是科學界廣泛認同的科學理論。</p>	<p>聆聽</p>
<p>11. 課堂討論：宇宙的未來會怎樣？<sup>50</sup></p>	<p>討論</p>

### 三、 總結

1. 宇宙中的空間不斷膨脹，使星系之間互相遠離。
2. 宇宙超源於宇宙大爆炸，「爆炸」代表空間膨脹。
3. 宇宙微波背景輻射是宇宙大爆炸的「餘光」，本來這些光是橙紅色的，但隨著空間膨脹而紅移至微波波段。宇宙微波背景輻射是證明宇宙大爆炸曾經發生的重要證據。

4. 宇宙起源於約 138 億年前。

**試教評估**

學生比較容易接受空間膨脹和宇宙大爆炸的概念，但對於宇宙微波背景輻射如何作為宇宙大爆炸的重要證據的理解上還有所欠缺。課堂的氣氛基本上比較好，但有部份學生知道本節課屬於課外內容，於是無心聽課，甚至在課堂上睡覺。

## 試教日程表

日期	主題	地點
2013年2月27日	行星的運動	高一戊
2013年2月28日	萬有引力定律	高一戊
2013年3月4日	習題課 <sup>51</sup>	高一戊
2013年3月5日	引力常量的測定	高一戊
2013年3月6日	萬有引力定律在天文學上的應用	高一戊
2013年3月7日	習題課	高一戊
2013年3月11日	人造衛星 宇宙速度	高一戊
2013年3月12日	行星、恆星、星系和宇宙	高一戊
2013年3月13日	習題課	高一戊
2013年3月14日	習題課	高一戊



## 反思與建議

許多學生是為了學習而學習，學完後都不知道為甚麼要學、學了些甚麼？「萬有引力定律」這章書的內容缺乏實驗演示，如果只是簡單地教授書本內容，學生最後只會被動地接受了知識，卻不能對知識進化自我的消化、總結和昇華。我的解決方法可歸納為如下四點：

- 一、 引入科學史內容，讓學生瞭解天文學的起源；
- 二、 使用 PhET 和 NAAP 軟件模擬天體的運行情況，讓學生能夠直觀地觀察到天體運動的結果；
- 三、 在維基百科中查找數據驗證天文學公式，證實公式廣泛的適用性；
- 四、 介紹天文學相關課外問題，引起學生興趣。

其中，我認為第二點的功用最大。通過觀察電腦模擬，學生往往能夠快速領悟課本中所提到的知識，而且能夠提出很多問題，要求老師改變電腦模擬中的一些參數去測試模擬結果。對於第一點所提到的科學史內容，學生普遍能夠認真聽講和參與討論，但他們大多關心科學家的個人瑣事，對科學史背後所反映的道理卻不太感興趣。

第三點是從維基百科查找資料驗證開普勒第三定律，能夠讓學生深刻認識開普勒第三定律的廣泛適用性和威力。美中不足的是，這些驗證都是老師實行的，學生沒有親自計算過，如果能夠以作業的形式讓學生親自計算一遍，我認為效果應該會更好。

最後一點是本教案的特色之一。本教案中所引入的幾個課外問題，如星系碰撞、銀河系中心特大質量黑洞、太陽系外行星檢測、引力輔助和宇宙大爆炸等，都是學生很感興趣的課題。這些課題大大提高了學生的學習興趣和課堂參與積極性，引起了很多的討論。

通過以上一系列的方法，學生在學習「萬有引力定律」時，對定律的起源、發展及相關課題都有了一個初步的，但有系統的瞭解。學生知道了「萬有引力定律」不是和他們距離很遠的、死板的知識，而是和生活密切相關，能夠解釋許多大自然奧秘的重要規律。

將天文學知識引入普通物理學課程中是我長期以來一直的努力方向。我在教學中發現，只要提起天文現象，學生總是充滿興趣的，就算平時表現很差的學生也能夠參與到課堂討論之中。「萬有引力定律」一章正好為我提供了為學生介紹了天文學知識的機會，所以整章課的教學都比較順利。最後建議，如果時間許可，老師也可以借此章的機會為學生介紹恒星的演化過程，讓學生知道恒星通過核反應合成出重元素，特別是當一些大質量恒星死亡，發生超新星爆發時，會合成出大量重元素、如金。<sup>52</sup>日常生活中所見的一切物質（包括人）的組成元素，基本上都是恒星演化和死亡時所合成而來。<sup>53</sup>

## 參考資料

1. PhET Interactive Simulations, University of Colorado, <http://phet.colorado.edu>.
2. The Nebraska Astronomy Applet Project, University of Nebraska-Lincoln, <http://astro.unl.edu/naap/>.
3. Paul G. Hewitt, *Conceptual Physics*, tenth edition, (Pearson, 2006).
4. Edward Harrison, *Cosmology: The Science of the Universe*, second edition, (Cambridge University Press, 2000).
5. 漆安慎，杜嬋英，*力學*，(高等教育出版社，1997)。
6. 張三慧，*大學物理學*，第三版，(清華大學出版社，2009)。
7. Paul M. Fishbane, Stephen Gasiorowicz, Stephen T. Thornton, *Physics for Scientists and Engineers*, third edition, (Pearson, 2005).