

# 2015/2016 學年教學設計獎勵計劃

宇宙學和人

參選編號：G018

學科名稱：物理

適合程度：初三至高三

## 簡介

本單元的主題是宇宙學，屬於物理學的前沿研究分支。學生在中學階段甚少有機會學習宇宙學，對此基本一無所知，為了增加初中奧林匹克物理小組對物理學前沿知識的認識和學習科學的興趣，所以專門安排四節課共八個小時為他們介紹這方面的初步內容。

在教學目標上，本單元教案最根本的設計思路不是要學生掌握甚麼知識或技能，而是希望能夠讓學生瞭解自己和大自然之間存在深刻聯繫，體會到學習自然科學其實也是在瞭解自己的本質。

這個單元教案的教學內容的是經過精心設計的。首先介紹失重，這個現象有趣且能夠進行一些演示和實驗。學習失重後，學生就能夠理解人造衛星和月球為甚麼會繞地球轉而不掉落地球，而且明白太空站中的太空人為甚麼可以漂浮。學生的興趣被調動起後，我們便會討論未來人類在太空的探索方面的大概計劃，同時讓學生理解其中存在的重大困難，即宇宙非常大。宇宙非常大，究竟有多大？它是否永遠一樣大？這又聯繫到宇宙的演化過程。為了理解宇宙的演化過程，便有必要理解恒星的演化過程。最後，宇宙大爆炸、超新星爆發等貌似距離我們很遙遠的主題會和我們人類聯繫起來。最後，我們將能夠解答這個遠古而又恒久的問題：我們來自哪裏？

本單元教案屬於宇宙學最初級的課程，數學少、概念比較易懂，適合初三至高三程度的學生學習。<sup>1</sup>本單元教案有四節課，每節課兩個小時，期間有兩次十分鐘的休息時間。

本單元的教學目標是：

1. 知識與技能
  - 知道失重現象產生的原因和條件
  - 能夠說出元素週期表中的元素從何而來
  - 知道宇宙大爆炸理論的基礎概念和相關支援宇宙大爆炸理論的觀測結果
2. 過程與方法
  - 通過實驗、按比例模擬和電腦模擬來學習失重、宇宙尺度和宇宙膨脹等概念
  - 通過交流和討論讓學生思考、解決疑難並定性地理解宇宙學基礎知識
3. 情感態度與價值觀

---

<sup>1</sup> 本教案在初三畢業生中試教。由於高中學生一般未接觸過宇宙學，所以本教案的教學內容對他們也適用。

- 通過宇宙學的學習，體會到人和宇宙之間的深刻聯繫：人從宇宙來，也會回到宇宙去
- 感受到科學的力量，體驗科學是如何令人信服地解釋宇宙的本質問題。

本教案沒有配套的教學書，教學內容由教師根據參考材料自己設計。教案的核心思想源自美國物理學家 Lawrence Krauss 關於宇宙學的演講。[1]

## 目錄

簡介 .....	1
宇宙學和人 教案 .....	4
第一節 失重 .....	4
第二節 宇宙的尺度 .....	10
第三節 超新星爆發 .....	15
第四節 宇宙大爆炸 .....	23
試教評估 .....	30
反思與建議 .....	31
試教日程表 .....	33

# 宇宙學和人 教案

## 第一節 失重

### 設計思路

人在地球中進化而來，一切生理功能都是為了使人適應環境而存在，所以人的思想境界往往會受到約束，以為自己生活的地方就是世界上的一切。實際上，人和宇宙之間存在深刻的聯繫，組成人的物質其實來源於宇宙演化的各個階段。為了使學生明白到這一點，我們先從一個比較接近「日常生活」的現象——失重——出發，既能調動起學生對宇宙學的興趣，也能從中學習到一些萬有引力的基礎知識，為之後學習「超新星爆發」的概念打下基礎。

### 教學重點

失重、萬有引力、人造地球衛星和月球繞地球轉動的原因

### 教學難點

日常生活中的失重現象

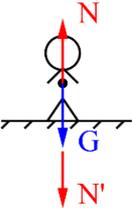
### 教學目標

1. 知識與技能
  - 能說出日常生活中「磅的讀數」代表那一個力的數值
  - 能夠解釋失重現象的成因
  - 能夠解釋人造地球衛星和月球繞地球運動的原因
2. 過程與方法
  - 通過壓力計測量人體的重量，知道人可處於超重和失重狀態
  - 通過跳躍體驗完全失重現象
3. 情感態度與價值觀
  - 體會和理解失重現象，激發起學習科學和宇宙學的興趣
  - 感受科學科是如何利用合理的邏輯思考、推理和實證來解釋自然問題

### 教學順序



## 教學活動

教師活動	學生活動
<p>一、復習力學基礎知識</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 重力（萬有引力）、支持力（法向力）、壓力的基本概念。</li> <li>2. 牛頓第一定律和受力平衡的概念，並作受力分析圖。</li> <li>3. 牛頓第三定律，地面給物體的支持力和物體給地面的壓力屬於相互作用力。如圖 1 所示，人站在水準地面上，受到地球給的重力 <math>G</math>、地面給的支持力 <math>N</math>，人對地面的壓力是 <math>N'</math>，根據牛頓第三定律，<math>N</math> 和 <math>N'</math> 屬於相互作用力，它們大小相同方向相反。</li> </ol> <div style="text-align: center;">  <p>圖 1</p> </div>	<p>聆聽</p>
<p>二、表觀重量的概念</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 通過集體討論回答問題：人站在磅上，為甚麼磅會有讀數？ 討論中用到的提示：人給磅甚麼力？磅的原理。</li> <li>2. 討論：磅的讀數代表圖 1 中那些力的數值？</li> <li>3. 討論：人站在磅上後，有甚麼辦法能夠改變磅的讀數？ 提示：想像自己站在床上。</li> <li>4. 討論：為甚麼人在磅上「運動」時會磅的讀數會改變？<sup>2</sup> 提示：人在甚麼情況下受力平衡？甚麼時候受力不平衡？人受力不平衡時，是受到的支持力還是重力發生改變？還是它們兩者同時改變？</li> <li>5. 小結：             <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 人站在磅上，給磅壓力，磅給人支持力，它們兩者屬於相互作用力，大小相同方向相反。</li> <li>(2) 磅的讀數代表人的「表觀重量」，反映人所受到的支持力的數值。</li> <li>(3) 只有當人靜止（或勻速直線運動）地站在磅上，因為二力平衡，支持力等於人的重力，所以磅的讀數就等於人的重力。</li> <li>(4) 如果人在磅上做變速運動，如剛下蹲和快下蹲完時，<sup>3</sup>因為人不</li> </ol> </li> </ol>	<p>討論、聆聽</p>

<sup>2</sup> 嚴格來說是做變速運動，如剛蹲下時，磅的讀數才會發生改變。

<sup>3</sup> 下蹲的過程中可以處於勻速直線運動。

是靜止和勻速直線運動，<sup>4</sup>所以受力不平衡， $G \neq N$ 。因為人的重力  $G$  不變，所以  $N$  必定發生改變。

### 三、使用壓力計測量表觀重量

1. 使用 Pasco Force Platform (PS-2141, 圖 2) 這個壓力計測量幾個同學靜止時的表觀重量。
2. 根據公式  $G = mg$ ,  $g$  取  $9.8 \text{ N/kg}$ , 計算自己的質量。
3. 讓同學站在壓力計上探究改變壓力計讀數的方法和總結其規律。  
提示：可以下蹲，下蹲後站起，舉手放下手。
4. 對圖 3 進行討論。圖 3 顯示一個體重約為  $600 \text{ N}$  的同學首先靜止地站在壓力計上，然後他突然蹲下，接著再站起來。
  - (1) 圖 3 中那個地方顯示同學剛剛開始蹲下？
  - (2) 那個地方顯示同學剛剛下蹲完畢？<sup>5</sup>
  - (3) 那個地方顯示同學下蹲完不動？
  - (4) 那個地方顯示同學剛剛開始站起來？
  - (5) 那個地方顯示同學剛剛站直了？



圖 2

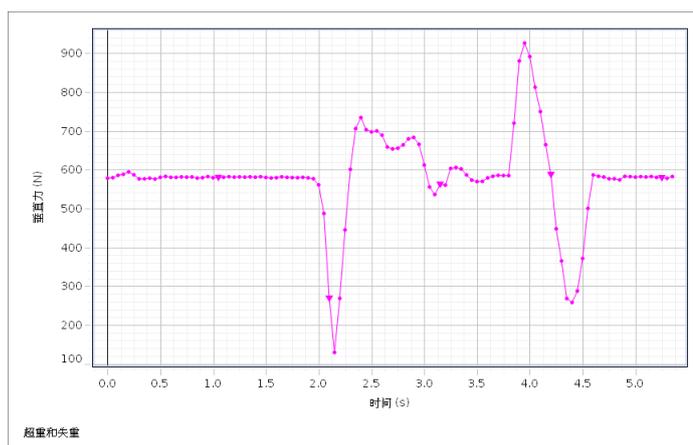


圖 3

### 5. 小結：

- (1) 當人向下加速時（剛下蹲、剛站直，剛放下已經舉起的手），人所受的重力  $G$  大於支持力  $N$ ，即  $N < G$ ，人處於失重狀態。
- (2) 類似地，當人向上加速時（剛下蹲完，剛站起，剛舉手）， $N > G$ ，人處於超重狀態。
- (3) 圖 3 中 3.6 秒左右的時候，人下蹲完不動，處於靜止狀態，所以受力平衡，有  $N = G$ 。

實驗、計  
算、討  
論、聆聽

<sup>4</sup> 如果對高中學生，可能直接用「加速」一詞更好。對於初三學生，他們還未接觸過「加速」的概念，要先用提問（既然不是靜止又不是勻速直線運動，那人是甚麼運動？）引入加速的概念。

<sup>5</sup> 要理解這一點不容易。此時人減速，即加速度的方向向上。為了令學生理解這一點，可以舉一些如刹車的例子，幫助學生理解此時人所受的支持力要大於重力，才能使人減速。

#### 四、體驗完全失重現象

1. 讓同學從壓力計中垂直跳起，觀察壓力計的讀數。
2. 當同學跳起後，壓力計的讀數變為零，為甚麼？
3. 讓同學背起書包，討論：書包是否有表觀重量？你是如何知道它有表觀重量？  
提示：甚麼「儀器」正在「測量」書包的表觀重量？這個「儀器」是如何對書包的表觀重量進行「測量」？<sup>6</sup>
4. 實驗：背著背包垂直跳起，肩膀是否感受到書包給的壓力？<sup>7</sup>
5. 討論：為甚麼人背著背包跳起到達空中時，書包不會給人壓力？  
提示：人和書包誰上升得快？下降得快？還是一樣快？
6. 討論：如果人站在磅上，和磅一起從高處墮下，磅是否有讀數？人的表觀重量是多少？
7. 回答：如圖 4 所示，人站在升降機內，但升降機的吊纜突然斷掉，人的表觀重量是多少？
8. 小結：
  - (1) 人背著書包跳起時，人和書包的速度變化得一樣快，所以人不托著書包，書包也不壓著人，書包的表觀重量為零，處於完全失重狀態。
  - (2) 人和磅一起從高處墮下時，人不壓著磅，磅不托著人，人處於完全失重狀態。
  - (3) 物體在空中互相不壓著對方，所以物體此時只受重力作用。據此，我們知道，當物體只受重力作用時，便會處於完全失重狀態。我們日常生活裏感受到的重量其實是支持力導致的。

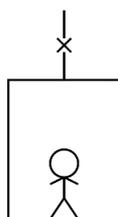


圖 4

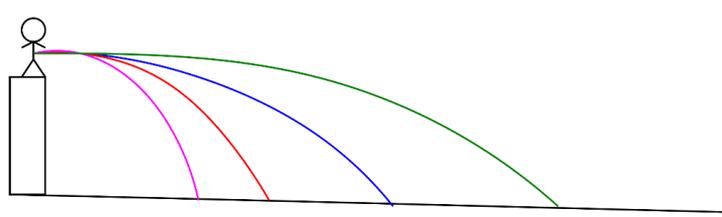


圖 5

9. 討論：如何延長處於完全失重狀態的時間？

#### 五、人造衛星繞地球轉動的原因

1. 如圖 5 所示的人從高處跳下（畫圖中粉紅色的線），此時人的表觀重量是多少？<sup>8</sup>
2. 如果人以更快的速度跳出，人會以怎樣的軌跡運動？（學生繪圖，

實驗、討論、聆聽

討論、作圖、聆聽

<sup>6</sup> 「儀器」是指人的肩膀。

<sup>7</sup> 建議反復跳多次，一次的時間太短，可能感覺得不清楚。也可以用手托住重物來跳，通過手掌的感覺來判斷重物的表觀重量。

<sup>8</sup> 線要逐條畫，不要一次過全部畫出。

畫出圖中紅線)

3. 類似地，當人以越來越快的速度跳出，其落地的位置會更遠，落地前處於完全失重狀態。<sup>9</sup>
4. 提問：地球是圓的還是方的？
5. 討論：如果人跳得足夠快，快得其下落軌跡和地球的彎曲程度相同，會有甚麼後果？  
提示：給出圖 6。

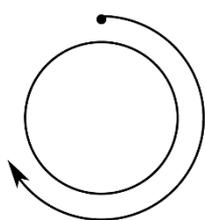


圖 6

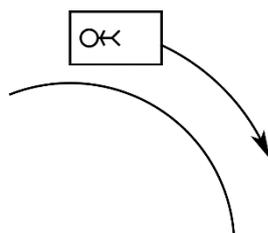


圖 7

6. 討論：如果人在一個密閉的倉內繞地球轉動，成為繞地球的衛星，人的表觀重量是多少？
7. 小結：
  - (1) 將物體以一個極快的速度 ( $7.9 \text{ km s}^{-1}$ ) 水準拋出時，物體變成繞地球勻速圓周運動的人造衛星。
  - (2) 人造衛星繞地球轉動時，同時也不斷「跌落」地球，只是因為它「跌落」的同時，地球的地面也不斷「向下」彎曲，所以它永遠跌不落地面。
  - (3) 人在太空船中繞地球運動，因為人不斷「跌落」地球，所以人一直處於完全失重狀態，這也解釋了為甚麼國際太空站裏的太空人會完全失重。
8. 討論：月球受到地球的萬有引力，月球為甚麼不跌落到地球上？  
提示：國際太空站離地球表面 400 km，地球同步衛星離地球表面 35800 km，它們為甚麼都不跌落到地面上？月球離地球平均距離為  $3.84 \times 10^5 \text{ km}$ 。

## 六、總結

1. 用甚麼儀器測量物體的表觀重量？
2. 物體的表觀重量反映了物體所受的哪一個力？
3. 物體的表觀重量能不能變化？
4. 人站在水準地面上時，如何令表觀重量增加或減小？
5. 如何才能處於完全失重狀態？

回答

<sup>9</sup> 注意，跳得更遠不代表下落時間更長，請參考平拋運動的相關知識。

- |  |  |
|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"><li>6. 物體處於完全失重狀態時，其表觀重量是多少？</li><li>7. 當物體處於完全失重狀態時，只受到哪一個力的作用？</li><li>8. 有甚麼方法能讓物體一直處於完全失重狀態？</li><li>9. 為甚麼人造衛星和月球受到萬有引力時能繞地球轉動，但卻不跌落到地球上？</li></ol> |  |
|--|--|

## 第二節 宇宙的尺度

### 設計思路

在學習宇宙學之前，有必要對宇宙的空間和時間尺度有所瞭解。宇宙非常大，而且很古老。要描述宇宙的大和古老，往往需要用到一些大數字，但人對大數字的理解能力又很差。<sup>10</sup>為了幫助學生感受宇宙的這兩個維度，我們使用了按比例縮小並建立模型的方法。先按比例建立太陽系的模型：如果太陽的體積和籃球一樣大，地球又有多大？距離太陽又有多遠？這個方法可以比較直觀地讓學生感受到太陽系的大小。同理，我們再將這個模型擴展到銀河系、本星系群和更大的空間尺度。體驗了宇宙空間尺度後，就可以利用真空中光速不變的事實，引入「望到過去」的概念，讓學生知道宇宙不止大，而且非常古老。最後，我們引用 Carl Sagan 對 Pale Blue Dot 照片的啟示，讓學生反思人和宇宙之間的關係。

### 教學重點

宇宙的空間和時間尺度

### 教學難點

按比例縮小空間尺度時所遇到的數學計算問題

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 能使用天文單位（AU）、光年（ly）等長度單位進行計算
  - 知道觀察越遠的宇宙，就代表看到越古老的宇宙
2. 過程與方法
  - 使用按比例縮小的方法計算出太陽系的大小
  - 參與建立太陽系模型的活動，體驗宇宙之大
  - 通過閱讀 Carl Sagan 對“Pale Blue Dot”的文章，瞭解人和宇宙之間的關係
3. 情感態度與價值觀
  - 體驗宇宙之大、人之渺小，宇宙之老、生命之短暫。領悟到人類在宇宙

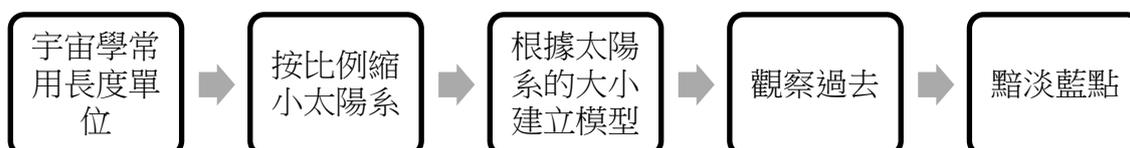
---

<sup>10</sup> George Dvorsky, How to Comprehend Incomprehensibly Large Numbers: <http://io9.gizmodo.com/how-to-comprehend-incomprehensibly-large-numbers-1531604757>

中的定位：盡管人類身體在宇宙中微不足道，但人類思維卻可以包括整個宇宙

教具：剪刀、直尺、卷尺、籃球、紙

### 教學順序



### 教學活動

教師活動	學生活動
一、宇宙學常用長度單位 1. 人類成功製造出人造地球衛星之後，人類便開始了對地球以外天體的探索。提問：人類的飛行器飛越或登陸過哪些地球以外的天體？ 2. 提問：按離太陽的距離從近至遠的順序列出太陽系的八大行星。 3. 提問：試估計人類飛行器飛抵這些天體的大概時間。 <sup>11</sup> 4. 討論：美國太空總署（NASA）和美國私人火箭發射公司 SpaceX 都聲稱要派人登陸火星，這個任務存在甚麼顯著的困難？ 5. 小結： (1) 太陽系很大，人類要登陸火星，其中存在的一個主要困難是旅途時間太長（半年以上）。 (2) 地月球平均距離約為 $3.84 \times 10^8$ m，地日平均距離約為 $1.5 \times 10^{11}$ m。 (3) 為了更方便地描述宇宙空間的大小，宇宙學中新定義了兩個長度單位：天文單位（AU）和光年（ly）。 <sup>12</sup> (4) $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^{11}$ m，約為地日的平均距離。 <sup>13</sup> (5) $1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15}$ m，代表光在真空中傳播一年所通過的距離。 <sup>14</sup>	討論、聆聽
二、按比例縮小太陽系	聆聽、

<sup>11</sup> 事實上，因為地球和這些目標天體之間的相對位置不同和不同的飛行軌道設計（發射時火箭的推力不同和是否使用了引力助推），飛行器飛抵這些天體的時間會有所不同。

<sup>12</sup> 實際上秒差距（parsec）才是宇宙學中的常用長度單位，但為了簡單，本教案中不使用。

<sup>13</sup> 標準的定義為  $1 \text{ AU} = 149597870700 \text{ m}$ ，本教案為了簡單不使用這個標準定義。

<sup>14</sup> 這裏所說的一年是指 365.25 日。

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 從 Wikipedia 找出八大行星和太陽的平均距離 (AU) 和直徑 (地球的多少倍)。<sup>15</sup></li> <li>2. 已知太陽的直徑約為地球的 109 倍。假設太陽直徑和籃球相同(0.25 m)，分組 (3-4 人) 計算按比例縮小之後八大行星的直徑 (cm)。例：地球直徑只有太陽的 1/109，當太陽直徑和籃球相同時，地球的直徑應為 <math>0.25/109 = 2.29 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.229 \text{ cm}</math> (取 3 位有效數字)。參考 Wikipedia，因為木星直徑為地球的 11.209 倍，則木星的直徑為 <math>11.209 \times 2.29 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.57 \times 10^{-2} \text{ m}</math>。</li> <li>3. 已知太陽的的直徑約為 <math>1.39 \times 10^9 \text{ m}</math>，假設太陽直徑和籃球相同(0.25 m)，分組計算按比例縮小之後八大行星和太陽之間的距離。例：我們按比例將太陽縮小了 <math>1.39 \times 10^9 / 0.25 = 5.56 \times 10^9</math> 倍，則地球和太陽之間的距離為 <math>1 \text{ AU} / 5.56 \times 10^9 = 1.5 \times 10^{11} \text{ m} / 5.56 \times 10^9 = 27.0 \text{ m}</math></li> <li>4. 使用 Excel 計算出參考答案供學生核對。</li> </ol>	計算																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>水星</th> <th>金星</th> <th>地球</th> <th>火星</th> <th>木星</th> <th>土星</th> <th>天王星</th> <th>海王星</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>距離太陽 (AU)</td> <td>0.387099</td> <td>0.723332</td> <td>1</td> <td>1.523662</td> <td>5.203363</td> <td>9.53707</td> <td>19.191264</td> <td>30.068963</td> </tr> <tr> <td>按比例縮小後 (m)</td> <td>10.44332</td> <td>19.51435</td> <td>26.97842</td> <td>41.106</td> <td>140.3785</td> <td>257.2951</td> <td>517.2201</td> <td>792.6175</td> </tr> <tr> <td>直徑 (地球的多少倍)</td> <td>0.3825</td> <td>0.9488</td> <td>1</td> <td>0.5326</td> <td>11.209</td> <td>9.449</td> <td>4.2928</td> <td>3.8993</td> </tr> <tr> <td>按比例縮小後 (cm)</td> <td>0.087729</td> <td>0.217615</td> <td>0.229358</td> <td>0.122156</td> <td>2.570872</td> <td>2.167202</td> <td>0.927708</td> <td>0.857708</td> </tr> </tbody> </table>		水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	距離太陽 (AU)	0.387099	0.723332	1	1.523662	5.203363	9.53707	19.191264	30.068963	按比例縮小後 (m)	10.44332	19.51435	26.97842	41.106	140.3785	257.2951	517.2201	792.6175	直徑 (地球的多少倍)	0.3825	0.9488	1	0.5326	11.209	9.449	4.2928	3.8993	按比例縮小後 (cm)	0.087729	0.217615	0.229358	0.122156	2.570872	2.167202	0.927708	0.857708	
	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星																																						
距離太陽 (AU)	0.387099	0.723332	1	1.523662	5.203363	9.53707	19.191264	30.068963																																						
按比例縮小後 (m)	10.44332	19.51435	26.97842	41.106	140.3785	257.2951	517.2201	792.6175																																						
直徑 (地球的多少倍)	0.3825	0.9488	1	0.5326	11.209	9.449	4.2928	3.8993																																						
按比例縮小後 (cm)	0.087729	0.217615	0.229358	0.122156	2.570872	2.167202	0.927708	0.857708																																						

<p>三、根據太陽系的大小建立模型</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 拿出直尺、剪刀和 A4 紙，根據上表的結果分組裁剪出八大行星。<sup>16</sup></li> <li>2. 令九個學生分別代表太陽和八大行星，手持籃球和剪紙，由大至小排列，比較太陽和八大行星之間的大小區別。</li> <li>3. 離開課室到走廊 (圖 8)，拿出卷尺測量走廊的長度。令代表太陽的同學站在走廊盡頭，然後分別令代表水星、金星、地球和火星的同學站在離代表太陽的同學 10.4 m、19.5 m、27.0 m 和 41.1 m 的地方。<sup>17</sup></li> <li>4. 學校竟然這麼小，就算將太陽縮小到籃球大小，仍然放不下太陽系中的八大行星。回到教室、提問：木星、土星、天王星和海王星離太陽 (140 m、257 m、517 m、811 m) 究竟有多遠？<sup>18</sup></li> <li>5. 打開 Google Earth，使用其「測量距離」的功能，找出上述的距離究竟有多遠。如圖 9 所示，關閘距離三角花園的距離約為 517 m，</li> </ol>	測量、 計算、 聆聽、 思考
--	-------------------------

<sup>15</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_gravitationally\\_rounded\\_objects\\_of\\_the\\_Solar\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitationally_rounded_objects_of_the_Solar_System)

<sup>16</sup> 裁剪出大概的形狀即可。水星直徑只有 0.0877 cm，但仍可勉強剪出來。

<sup>17</sup> 本校走廊約長 40 m。

<sup>18</sup> 要他們舉一些例子，例如木星和太陽的距離為 140 m，那麼代表木星的同學大概應該站在那裏？對面街的超市？還是遠處的某間銀行？

所以如果太陽位於關閘，代表天王星同學應該站在三角花園附近。



圖 8

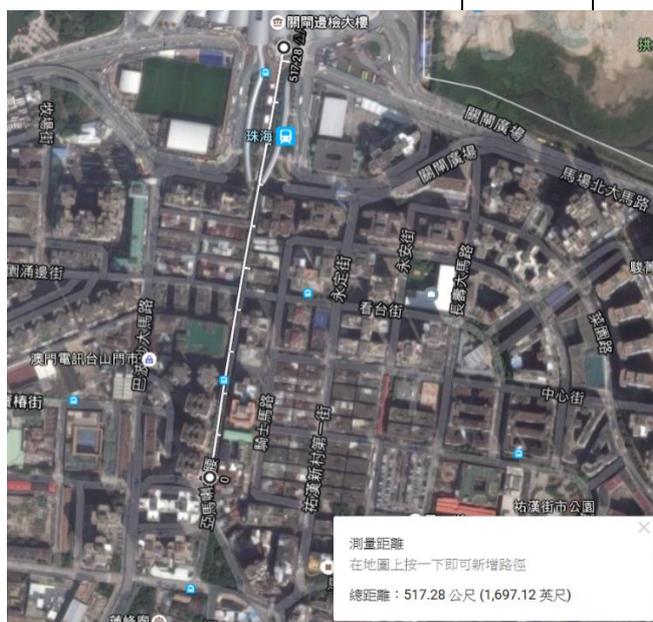


圖 9

6. 地日間距離為 1 AU，我們將 1 AU 按比例縮小至 27.0 m。因為  $1 \text{ ly} = 9.46 \times 10^{15} \text{ m} = 63100 \text{ AU}$ ，所以 1 ly 按比例縮小後應為  $63100 \times 27.0 = 1700 \text{ km}$ 。
7. 最接近太陽的另一個恆星是比鄰星，距太陽 4.2 ly，則按比例縮小後，它距離太陽多遠？
8. 銀河系直徑為 10 萬光年，則按比例縮小後，銀河系直徑是多少？（超過地日距離）
9. 離銀河系最近的另一個大型星系仙女座星系距離銀河系 250 萬光年，則按比例縮小後，仙女座星系離銀河系有多遠？（到海王星那麼遠了）
10. 提問：知道宇宙中有多少個星系嗎？（千億個）

#### 四、觀察過去

1. 提問：為甚麼我們能觀察到月球？月球會發光嗎？
2. 計算：從月球表面反射到地球的太陽光要用多久才到達地球？
3. 討論：我們現在看到的月球，它是不是「現在」的月球？  
提示：我們要隔多久才能看到「現在」的月球？
4. 討論並計算：我們現在看到的太陽是多久之前的太陽？  
提示：地日距離是  $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ ，光速是  $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ 。
5. 提問：天狼星距地球 10 ly，我們看到的天狼星是多久之前的天狼星？
6. 提問：仙女座星系距離地球 250 萬光年，我們看到的仙女座星系是多久之前的仙女座星系？

討論、  
計算、  
聆聽

7. 討論：有人說，我們不能回到過去，但卻能看到過去，怎麼理解這種說法？
8. 2012 年發表的哈勃極深空（Hubble eXtreme Deep Field, XDF，圖 10）照片中，距離我們最遠的星系約 130 億光年（圖 10 中小圖）<sup>19</sup>，那麼宇宙的年齡至少是多少？<sup>20</sup>

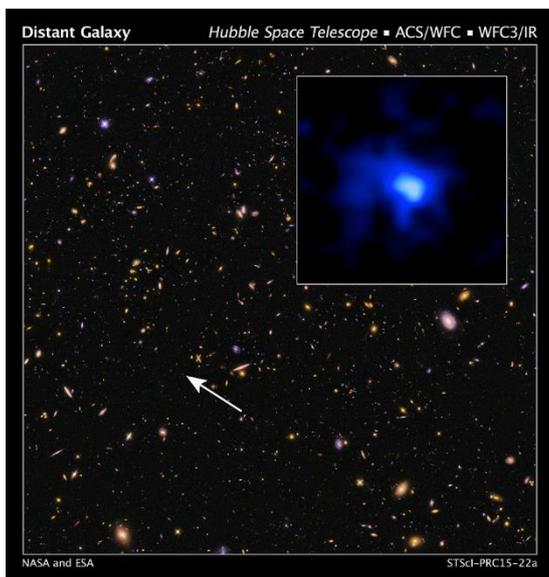


圖 10

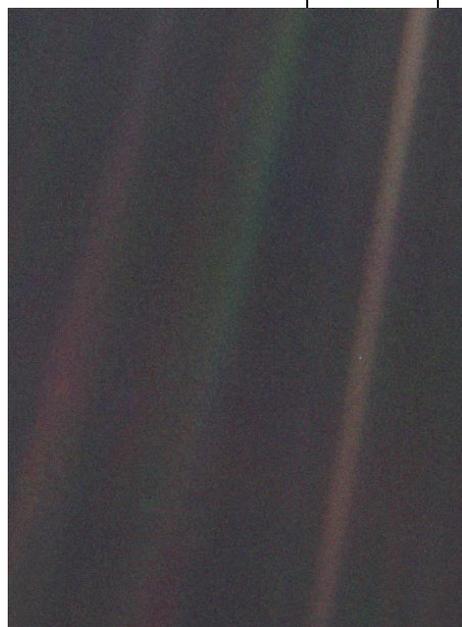


圖 11

9. 小結：
  - (1) 因為光速有限，我們可以通過觀察星空望到宇宙的過去。
  - (2) 宇宙的年齡至少有 130 億年。

#### 六、黯淡藍點（Pale Blue Dot）

1. 觀看旅行者一號在 1990 年在距離地球 40.5 AU 時拍下的地球照片（Pale Blue Dot，圖 11）。
2. 閱讀 Carl Sagan 對 Pale Blue Dot 有感而發的深刻啟示。<sup>21</sup>
3. Carl Sagan 是美國著名的天文學家、科普作家，其關於 Pale Blue Dot 的深刻啟示發人深省，意境高遠，是非常值得細閱的文章。
4. 聆聽 Carl Sagan 本人親自讀出 Pale Blue Dot 的文章。<sup>22</sup>
5. 向學生推薦科普影片《Cosmos: A Personal Voyage》和《Cosmos: A Spacetime Odyssey》。

閱讀、  
聆聽

<sup>19</sup> <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2015/22/full/>

<sup>20</sup> 現在不對 XDF 作詳細解釋，最後一節會再提到。

<sup>21</sup> <http://www.planetary.org/explore/space-topics/earth/pale-blue-dot.html>

<sup>22</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=4PN5JJDh78I>

## 第三節 超新星爆發<sup>23</sup>

### 設計思路

超新星爆發是大質量恒星的在整個「生命」週期中的最後階段。當核反應原料用完，大質量恒星無法再通過核聚變產生能量時，萬有引力會使大質量恒星坍塌，恒星將會發生驚天動地的超級爆炸，稱為超新星爆發。我們日常生活見到的物體皆由原子組成，除了氫原子外，其他原子都是在恒的各個演化階段中被合成出來的。學習恒星的演化，實際上就是理解自己是怎麼來的。

學習恒星演化主要有幾個要點：(1) 為甚麼質子帶正電，原子核卻不會因為電斥力而散開？(2) 不同元素之間有何本質不同？(3) 在甚麼環境下，才能由輕的元素合成出重的元素？只要理解這幾點，我們就不難理解整個恒星的演化過程。本節教案的設計思路就是圍繞這幾個要點出發，一步步帶領學生領悟大自然的其中一個奧秘：組成我們的物質從何來？

### 教學重點

原子結構、核聚變、恒星演化過程

### 教學難點

核聚變發生的條件、恒星的各種演化階段

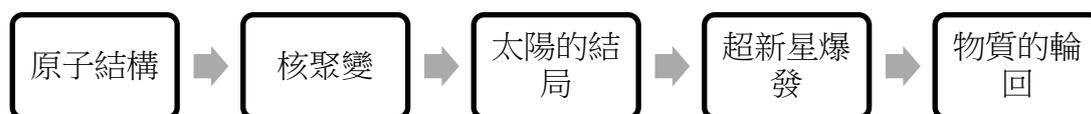
### 教學目標

1. 知識與技能
  - 知道核子之間存在強核力
  - 理解核聚變會放出能量的原因
  - 知道恒星的演化過程
2. 過程與方法
  - 通過學習原子結構，理解合成重元素的方法及其存在的困難
  - 通過真實圖片，瞭解超新星爆發的威力
3. 情感態度與價值觀
  - 體會到人和萬物的存在印證了恒星的演化、瀕死掙紮和壯烈犧牲
  - 領悟到人是宇宙的一部份。人從宇宙來，最後也會回到宇宙中去

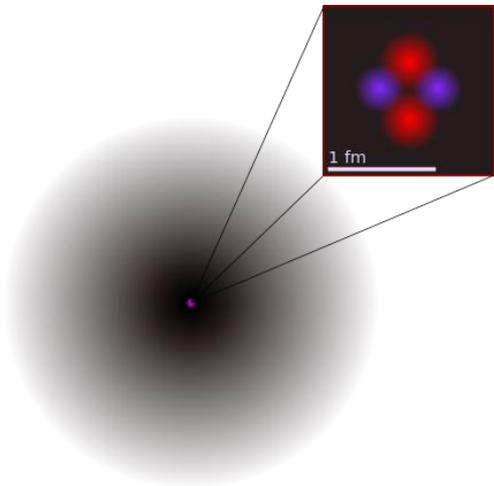
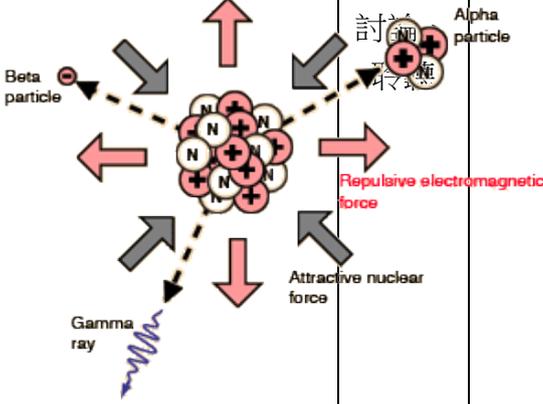
---

<sup>23</sup> 本節教學的一些物理思想來自參考資料[2]。

## 教學順序



## 教學活動

教師活動	學生活動
<p>一、原子結構</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>討論：古代的煉金術士，例如牛頓，夢想將鉛等比較便宜的金屬煉成金這種貴金屬，為甚麼他們無法成功？ 提示：化學方程式一邊沒有一種元素，另一邊有可能出現這種元素嗎？</li> <li>提問：原子由那些更基本的粒子組成？不同原子序數的元素有何本質不同？</li> <li>討論：試猜猜原子有多大。原子中的原子核又有多大。</li> <li>一般來說，如圖 12 所示的氦原子中，<sup>24</sup>原子的直徑約為 <math>1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}</math>，原子核的直徑約為 <math>1 \text{ fm} = 10^{-6} \text{ nm}</math>，圖中原子核外的黑色部份為電子雲。</li> </ol> <div style="text-align: center;">  <p><math>1 \text{ \AA} = 100,000 \text{ fm}</math></p> <p>圖 12</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>圖 13</p> </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>假設原子和原子核為球體，原子和原子核的體積比為 <math>0.1^3 : (10^{-6})^3 = 10^{15} : 1</math>。<sup>25</sup>那就是說原子之中有 99.99999999999999% 是真空。<sup>26</sup></li> </ol>	<p>回答、討論</p>

<sup>24</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Atom>

<sup>25</sup> 使用球體體積公式  $4\pi r^3/3$ 。

<p>6. 我們日常生活所見到的物體皆由原子組成，這說明這些物體基本上都是真空。</p> <p>7. 討論：既然物體的體積大部份都是真空，為甚麼我們好像不能輕易將大石壓成沙子般的大小？是甚麼原因？ 提示：質子、中子和電子分別帶甚麼電？</p> <p>8. 討論：為甚麼原子核中的質子都帶正電，中子不帶電，但原子核卻可以集中在 <math>10^{-6}\text{nm}</math> 的空間中而不因為電斥力而分開？<sup>27</sup></p>	
<p>二、核聚變</p> <p>1. 原子核中的質子帶正電卻不被電斥力拆開，原因必定是核子之間（質子、中子）存在一種吸引力，這種吸引力非常強，足以克服電斥力，而且只在近距離時才顯著，這種核子之間的吸引力稱為強核力，如圖 13 所示。<sup>28</sup></p> <p>2. 為了使核子之間「融合」在一起，就要以巨大的能量，克服核子之間的電斥力，讓它們足夠接近，直至核子間的強核力將它們吸引在一起。<sup>29</sup>兩個輕的原子核合而為一，變成一個比較重的原子核，同時有能量放出，這個過程稱為核聚變。</p> <p>3. 討論：宇宙中那些較重的元素是從何而來的呢？<sup>30</sup></p> <p>4. 討論：通過核聚變合成碳元素難一點，還是合成矽元素難一點？ 提示：誰的原子序數較大？原子序數大代表甚麼？</p> <p>5. （5-8 點選教<sup>31</sup>）核聚變為甚麼有能量放出呢？討論：如圖 14 所示，兩塊磁性很強，但重量很輕的磁鐵被限制在一條木管內（重力遠小於它們接近時所受的磁斥力），此時如果讓上方的磁鐵自由下落，會有甚麼結果？ 提示：磁鐵很輕，但磁性很強，那麼它們最後會發生碰撞嗎？它們如何受力？</p>	聆聽、討論

<sup>26</sup> 電子雲中電子的體積可忽略不計。

<sup>27</sup> 有趣的是，學生雖然都學過同種電荷相斥的道理，卻從來沒有同學思考過這個問題。

<sup>28</sup> <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/stem.html>

<sup>29</sup> 實際的過程比較複雜。儘管核子的能量不夠，但通過量子隧穿，有極少部份核子還是能夠融合在一起。

<sup>30</sup> 剛教完核聚變就這樣發問，學生很容易就能夠聯想到重的元素必定由輕的元素通過核聚變合成而來。

<sup>31</sup> 本教案中沒教，但有條件的教師可以選教這部份內容。



圖 14

6. 討論：如果圖 14 中的磁鐵磁性強，而且非常重，其重力遠遠大於它們接近時所受到的磁斥力，那麼當上方的磁鐵自由下落時，會發生甚麼結果？
7. 上述討論的問題中，兩塊磁鐵很重，最後會碰撞在一起。碰撞會產生大量的聲和熱，說明這個過程中有能量放出。正是因為這個系統中的磁鐵受到的重力大於磁鐵之間的磁斥力，它們「結合」時才會放出能量。
8. 類似地，兩個核子之間有電斥力，但它們接近時，更大的強核力使它們合在一起，也會放出能量。

### 三、太陽的結局

1. 提問：宇宙中有甚麼地方，足以使輕的原子核擁有足夠的能量，使它們之間發生核聚變而結合在一起，變成較重的元素呢？
2. 由於萬有引力的作用，宇宙中的一些星雲逐漸向中心坍塌。這個過程中，物質的重力勢能轉化為星雲的內能，使其溫度越來越高。當星雲中心溫度和密度達到一定水準的時候，氫元素之間的核聚變開始發生，形成恒星。
3. 觀看行星系統形成的電腦模擬。<sup>32</sup>
4. 如圖 15 所示，恒星中心的核反應產生的外向壓力（圖中藍色箭頭）和恒星本身向內的萬有引力（圖中紅色箭頭）達到了一個平衡，恒星的體積便基本上確定了。
5. 如太陽為例。太陽主要由氫和氦組成，其核心溫度達到 1500 萬 K 左右，氫元素之間會產生一種名為質子-質子鏈反應的核聚變，<sup>33</sup>合成出氦元素（圖 16）。<sup>34</sup>

回答、  
聆聽、  
討論

<sup>32</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=3YmeajE-TT8>

<sup>33</sup> 核聚變並不是隨便拿兩個質子放在一起就可以。現實上，兩個質子就算迎面碰在一起後，還需要弱相互作用，通過吸收能量，使其中一個質子變成中子，形成氫的同位素氘，才能穩定下來。這個過程中會同時放出正電子和中微子，以達到電荷和能量守恒。太陽核心進行質子-質子鏈反應所放出的中微子在地球上可以檢測得到。

<sup>34</sup> 可觀看 University of Nebraska-Lincoln 天文學教育的電腦模擬：

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/sunsolarenergy/fusion01.html>

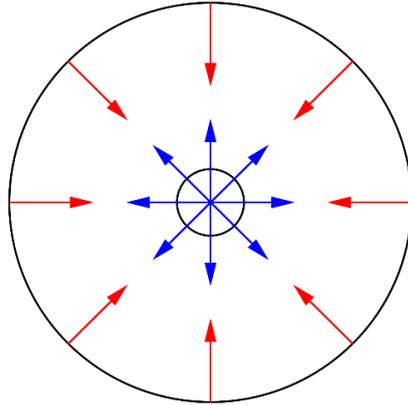


圖 15

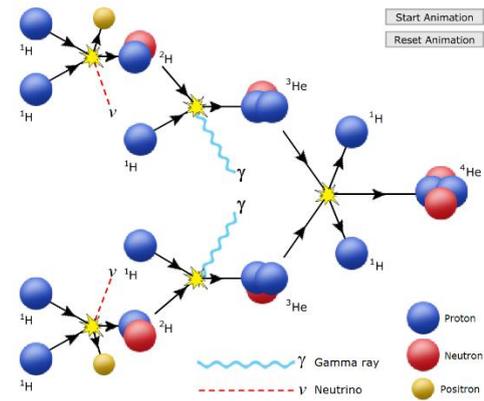


圖 16

6. 討論：如果太陽中心的氫元素耗盡時，太陽中心還能進行核反應嗎？太陽會怎樣變化？  
提示：此時太陽有沒有受到萬有引力？
7. 提問：如果太陽中心坍塌，其溫度和壓強會怎樣變化？
8. 提問：當太陽中心的溫度變得更高時，太陽中心的氦元素會發生甚麼反應？
9. 當太陽中心的氫元素耗盡時，核反應停止，核心收縮，溫度升高，使得核心外的殼層溫度升高至可以發生核反應（核心外面的是氫）。因為核心外殼層發生核反應，太陽更外層地方就會吸收其所釋放的能量，發生大規模的膨脹，使太陽變成紅巨星。

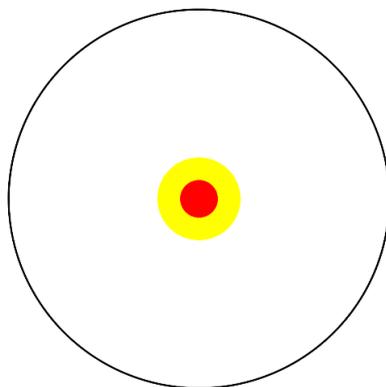


圖 17

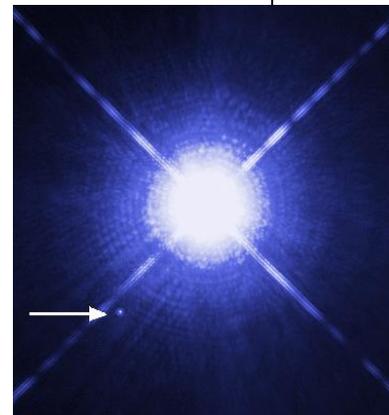


圖 18

10. 如圖 17 所示，紅色部份是太陽的氦核，黃色部份就是核外發生核反應的含氫殼層，更外面就是太陽變成紅巨星時所膨脹的部份。
11. 太陽所膨脹成的紅巨星十分巨大，足以達到現在地球的軌道。
12. 太陽中心的溫度達到一億 K 時，氦之間也可以發生核反應，合成出碳和氧元素。<sup>35</sup>
13. 最後，太陽核心中的氦亦耗盡，核心再次發生坍塌，但因為太陽質

<sup>35</sup> 稱為 3 氦過程。

量太小，核心溫度不足以進一步升高，所以太陽最後會坍塌成為一個被稱為白矮星的天體，這就是太陽的結局。

14. 圖 18 所示的就是最近地球的白矮星：天狼星 B，其體積和地球相若。白矮星的密度十分高，相當於將一頭大象壓縮到茶杯般的大小。<sup>36</sup>

#### 四、超新星爆發

1. 太陽質量太小，不足以使碳氧核心進一步發生核聚變。提問：如何才能令恒星的碳氧核心進一步發生核聚變？
2. 對於質量足夠大的恒星，其核心的核聚變會一直以這個循環發生：[核心因引力坍塌→核心升溫→核聚變發生→核聚變產生的向外壓力與引力平衡→核聚變原料耗盡]→[核心因引力坍塌→核心升溫→核聚變發生→核聚變產生的向外壓力與引力平衡→核聚變原料耗盡]→[核心因引力坍塌→…
3. 每一次核聚變原料耗盡，核心的坍塌會令到核心進一步升溫，新一輪核反應於是得以進行，更重的元素被合成出來。

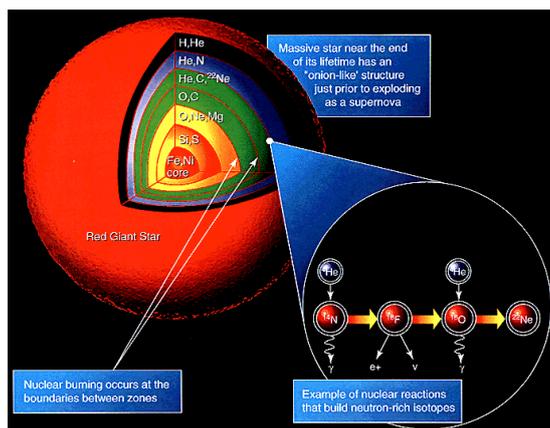


圖 19

4. 討論：觀察圖 19，<sup>37</sup>解釋氦、碳、氧、氖、鎂、矽、磷、硫、鐵和鎳等殼層是如何合成出來的？
5. 合成至鐵和鎳核後（鎳會衰變成鐵），要用鐵核聚變合成更重的元素，就不會能量輸出，所以恒星的核聚變在此時便會停止。<sup>38</sup>

討論、  
聆聽

<sup>36</sup> 這個說法來自天文學家 Meghan Gray 的 Youtube 影片：<https://www.youtube.com/watch?v=yE2QFJlBrko>。

<sup>37</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar\\_nucleosynthesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_nucleosynthesis)

<sup>38</sup> 要用通俗的語言講解這一點很不容易，有能力的老師可以選講以下內容：原子核中的核子之間有強核力，但質子之間又有電斥力。一般來說，如核子數較少，那麼高能量核子克服電斥力接近時，強核力會將它們緊緊地束縛在一起，放出能量（如同將物體丟到地上的過程中會有能量放出一樣）。核子越多的原子核，強核力會越大，核子就會更「緊」地被束縛在一起，合成這些原子核時，釋放的能量就越大。然而，當核子數多到一種程度後，因為核子太多，核子之間的「距離」增加，反而會導致強核力減小。同時，核子越多，質子之間的電斥力就越大。一減一增，導致要合成這些重原子核時，不單沒有能量輸出，反而要輸入能量。鐵和鎳的原子核就「剛剛好」，核子多卻又不太多，其核子能最緊密地束縛在一起。

6. 此時此刻，恒星的「生命」已經到了盡頭。恒星核心的核反應停止後，恒星再無法抵擋自身龐大的萬有引力，以天崩地裂之勢向中心坍塌。這些向中心坍塌的物質反彈，和恒星外層的物質發生超高速碰撞，<sup>39</sup>恒星爆炸了，稱為超新星爆發。在十多秒的時間裏，碰撞區域的溫度上升至千億 K，比鐵更重的許多元素，如金，便在此時刻被合成出來。



圖 20

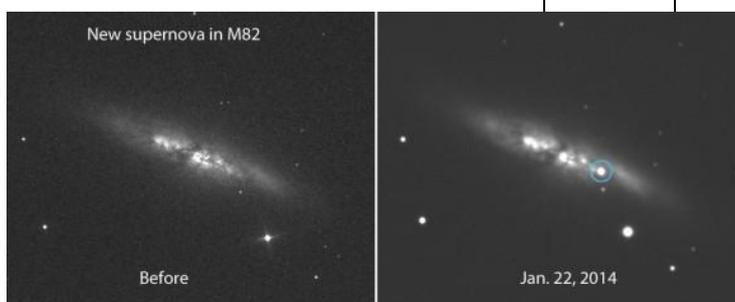
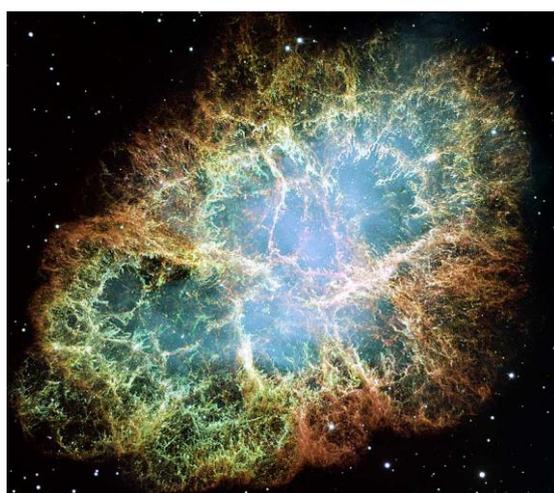


圖 21

7. 超新星爆發是宇宙中最驚天動地的事件之一，超新星的亮度相當於整個星系之和。如圖 20，<sup>40</sup>NGC 4526 星系發生超新星爆發，超新星的亮度可以和星系核心相提並論。M82 在 2014 年 1 月中發生超新星爆發，圖 21 顯示了爆發前後的對比。

### 五、物質的輪回

1. 1054 年初，在金牛座 ζ 附近，距地球 6500 光年的地方發生了超新星爆發。按中國史書的記載，這個超新星在白天都可看到。1000 年後的今天，我們再觀察當年發生超新星爆發的區域，結果如圖 22 所示。圖 22 這個超新星爆發遺址被稱為蟹狀星雲。



聆聽

<sup>39</sup> 想像在高處將一大堆籃球同時往地面扔的場景。

<sup>40</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/SN\\_1994D](https://en.wikipedia.org/wiki/SN_1994D)

圖 22

2. 組成我們身體的物質，曾幾何時，也是這種星雲的一部份，它們都是從恒星中來，它們的存在見證了恒星的垂死掙紮和壯烈犧牲。
3. 看看自己的左手和右手，組成它們的物質說不定來源於不同的恒星。
4. 我們從大自然中來，最後也會回到大自然中去。組成我們身體的物質，以後可能變成其他生物的一部份，也可能回到太空之中，成為星際之間的塵埃。

## 第四節 宇宙大爆炸

### 設計思路

學習宇宙大爆炸，首先就要知道宇宙大爆炸不是一種爆炸，而是空間膨脹。因為宇宙大爆炸這個詞有點滑稽，聽上去就不像個科學理論，所以學習宇宙大爆炸時，必須以證據說服學生。宇宙大爆炸之所以是目前解釋宇宙起源的科學界主流理論，是由於宇宙大爆炸理論能夠和觀測結果互相印證。我們以理服人，在本節課中分別介紹三個支持宇宙大爆炸理論的關鍵證據：空間膨脹、宇宙微波背景輻射和太初核合成。與上一節課類似，宇宙大爆炸中有許多技術結節的問題，非常複雜。例如，宇宙在不同時期的膨脹速度是不一樣的，宇宙微波背景非常均勻和太初核合成中存在的問題等。為了簡單，這些問題我們不會討論。

### 教學重點

宇宙大爆炸

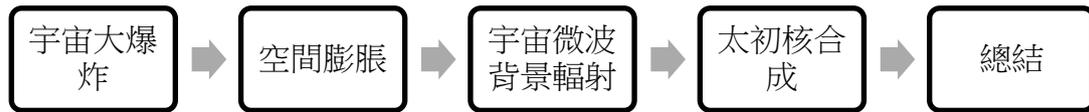
### 教學難點

宇宙大爆炸的證據

### 教學目標

1. 知識與技能
  - 知道宇宙起源於宇宙大爆炸
  - 知道宇宙大爆炸中的「爆炸」代表空間膨脹
  - 知道支援宇宙大爆炸理論的三個關鍵證據
2. 過程與方法
  - 通過學習空間膨脹、宇宙微波背景輻射和太初核合成，明白宇宙大爆炸理論是科學理論
  - 使用電腦模擬和視頻理解形星系遠離和空間膨脹之間的關係
3. 情感態度與價值觀
  - 體會科學對真理的追求。通過觀察和邏輯推理，人類可以理解大自然最本質的問題

### 教學順序



## 教學活動

教師活動	學生活動
<p>一、宇宙大爆炸</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 中國人的古代神話故事中，認為盤古在初期混沌的宇宙中開天闢地，以其身軀化作萬物；猶太人認為上帝在六天內創造了天地萬物。不同的民族有不同的創世神話，但這些創世神話可信嗎？<sup>41</sup></li> <li>2. 現代科學界解釋宇宙起源的主流理論是宇宙大爆炸理論。</li> <li>3. 簡單來說，宇宙大爆炸理論就是認為宇宙有起源，其所謂的「爆炸」指的是空間膨脹。宇宙初期無窮密、溫度無窮高，但隨著宇宙空間的膨脹，宇宙漸漸冷卻，物質、恆星和星系逐步形成。</li> </ol>	<p>討論、聆聽</p>
<p>二、空間膨脹</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 二十世紀初，美國天文學家哈勃（Edwin Hubble）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。</li> <li>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。</li> <li>3. 使用電腦模擬解釋多普勒效應，如圖 23 所示。<sup>42</sup></li> </ol>	<p>聆聽、觀察、討論</p>

<sup>41</sup> 其他創世故事見參考資料[2]。

<sup>42</sup> <http://astro.unl.edu/classaction/animations/light/dopplershift.html>

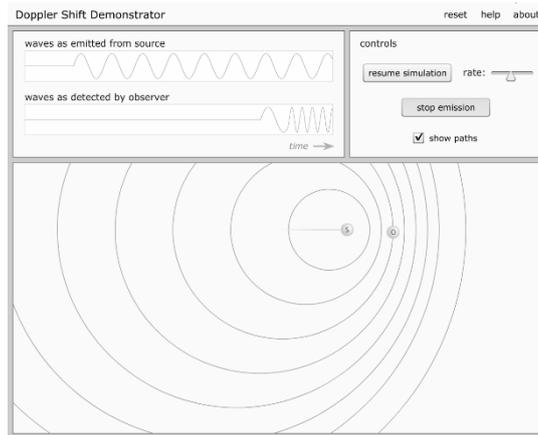


圖 23

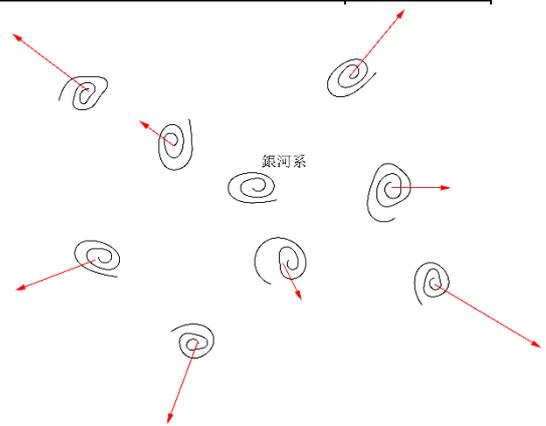


圖 24

4. 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。
5. 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，其紅移得就越多，說明該星系遠離銀河系的速度就越快，如圖 24 所示。
6. 打開電腦模擬，如圖 25，<sup>43</sup>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。
7. 討論：如何理解銀河系以外的星系都在遠離銀河系，而且離銀河系越遠的星系遠離銀河系就越快？  
提示：剛才的電腦模擬中，氣球上的點實際上有沒有移動？如果它們沒有移動，為甚麼它們會互相遠離？
8. 這只有一種解釋：銀河系外星系都在遠離銀河系，主要原因不是星系自己移動，而是星系之間的空間在膨脹。所以，無論在那個星系中觀察，都會發現其他星系正在遠離自己而去。

<sup>43</sup> <http://astro.unl.edu/classaction/animations/cosmology/balloon.html>

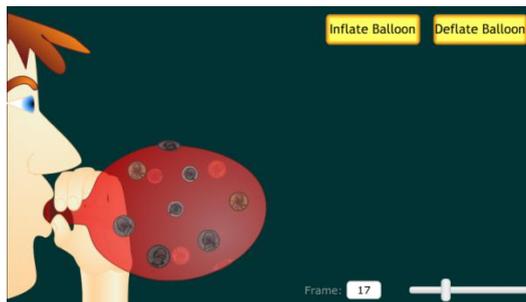


圖 25



圖 26

9. 討論：觀看 Alexei Filippenko 的演示視頻(圖 26)，<sup>44</sup>Alexei Filippenko 手持一個串了五個小球的橡皮筋，當他拉長橡皮筋時，小球之間互相遠離。試用這個影片解釋：為甚麼距離銀河系越遠的星系，遠離銀河系的速度就越快。
10. 討論：課室中的空間也會膨脹嗎？為甚麼同學之間不會互相遠離？  
提示：地球中的空間和宇宙中的空間是否會有本質的不同？如果沒有，還有甚麼方法可以解釋這一點？
11. 因為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，<sup>45</sup>相當於每 1 米空間每秒約膨脹  $2 \times 10^{-18}$  m，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>46</sup>
12. 提問：宇宙既然正在膨脹，這暗示了宇宙的過去是怎樣的？
13. 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>47</sup>

### 三、宇宙微波背景輻射

觀察、討

<sup>44</sup> Alexei Filippenko 在 Nobel Conference 49 的演講 (23:14 開始)：

<https://www.youtube.com/watch?v=RO7EMxdddavk>

<sup>45</sup> 這就是所謂的哈勃常數  $H_0$ 。最新的研究結果 (2016 年) 表示， $H_0 = 73.00 \pm 1.75$  (km/s)/Mpc，1 Mpc 約三百萬光年。

<sup>46</sup> 實際上，宇宙正在加速膨脹。宇宙加速膨脹是近十多年才發現的最新宇宙學成果，發現者獲得了 2011 年諾貝爾物理學獎。如時間許可，老師也可介紹這些內容。

<sup>47</sup> 這是一般人常有的誤解，有必要向學生強調。如學生提問宇宙大爆炸之前有甚麼或為甚麼會宇宙大爆炸，要注意回答方法。首先，宇宙大爆炸是時間的起點，所以宇宙大爆炸沒有「之前」。而為甚麼會宇宙大爆炸，目前還停留在猜測假設的地步（如多重宇宙、量子漲落等），並沒有證據證明。

1. 出示哈勃極深空（XDF）的圖片（圖 27）。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進行長時曝光拍攝得到的。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。<sup>48</sup>

論、聆聽

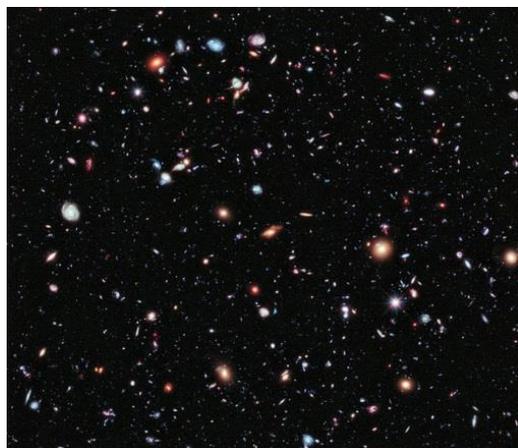


圖 27

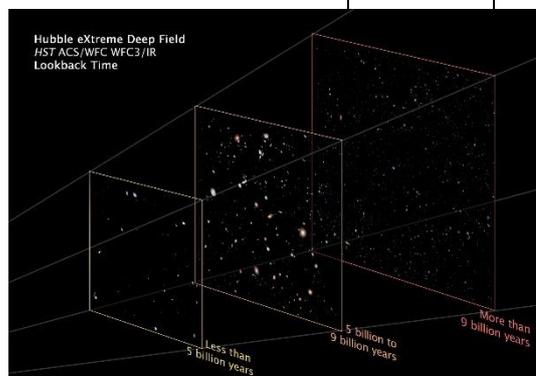


圖 28

2. 在 XDF 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>49</sup>可計算出全宇宙的星系數目超過千億個。
3. XDF 中的星系外形各不相同，但科學家從 XDF 中發現，越年輕的星系，其形狀就越不規則（圖 28）。
4. 討論：星系是否從宇宙大爆炸那一刻就存在？為甚麼？
5. 討論：宇宙之中是否存在一個時期，全宇宙之中都沒有一個星系？如果用望遠鏡觀察這個時期的宇宙，我們會望到甚麼？
6. 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>50</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。
7. 隨著宇宙不斷膨脹，空間增加，溫度降低。當宇宙溫度降低至 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。
8. 據此，科學家估計，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

<sup>48</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=odprMkzOst8>

<sup>49</sup> 這是宇宙學原理（cosmological principle）不嚴謹的描述。

<sup>50</sup> 可以想像，當原子形成後，高能量的光輻射能夠將原子打散，使質子和電子分開。

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>51</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。

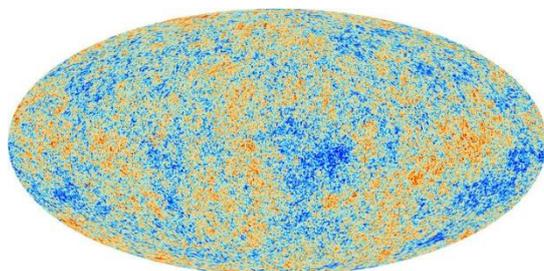


圖 29

9. 正如所料，天空之中除了恆星和星系發出的亮光之外，還隱隱地透著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。
10. 科學家已經對這些微波輻射進行了精確測量，如圖 29 所示，稱為宇宙微波背景輻射（Cosmic Microwave Background Radiation）。<sup>52</sup>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。
11. 通過測量宇宙微波背景輻射，科學家計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約 37 萬年。<sup>53</sup>
12. 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，如果宇宙大爆炸不曾發生，宇宙沒有經過一個收小至大、由密至疏、由熱至冷的過程，那就不可能存在宇宙微波背景輻射。

#### 四、太初核合成

1. 我們在上一節課中提到，恆星中心溫度極高，足以使輕的元素通過核聚變合成出重的元素。討論：如果宇宙大爆炸為真，宇宙是否曾經也像恆星核心般高溫？
2. 宇宙初期既然類似於恆星核心，自然也會發生核聚變，稱為太初核合成。討論：宇宙膨脹會如何影響太初核合成？
3. 因為宇宙膨脹，宇宙的溫度降低，太初核合成很快就會停止。科學家預測，太初核合成的結果是氫約佔宇宙全部元素質量的 75%，氦約佔 25%。
4. 宇宙之中的化學元素分佈確是如此。例如佔太陽系質量 99.86% 的太陽中，氫元素佔 73.46%，氦元素佔 24.85%。如果只靠恆星內部合成氦，宇宙中的氦就不會這麼多，這說明瞭宇宙必定經過一個

討論、聆聽

<sup>51</sup> 實際上是一系列的光，以橙、紅和近紅外光為主。

<sup>52</sup> [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck\\_CMB](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_CMB)

<sup>53</sup> 這是 Planck 衛星在 2013 年 3 月才測出的最新、最準確的數據，這和舊的數據有輕微差別。

<p>高溫高密的狀態，再次證明瞭宇宙大爆炸曾經發生…</p>	
<p>五、總結</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 宇宙起源於宇宙大爆炸。</li> <li>2. 宇宙大爆炸指空間膨脹。</li> <li>3. 宇宙目前仍然在膨脹之中。</li> <li>4. 宇宙大爆炸是解釋宇宙起源的主流理論，有多個觀測證據支持。</li> <li>5. 宇宙膨脹時，恆星和星系逐漸形成。</li> <li>6. 恆星在自身的演化過程中用輕的元素逐步合成出重的元素。</li> <li>7. 大質量恆星在最後的演化階段中會發生超新星爆發，大量重元素被合成出來。</li> <li>8. 組成人的各種元素，有些來自太初核合成，有些來自恆星的核心，有些來自超新星爆發。</li> <li>9. 宇宙非常大，而且非常古老。</li> <li>10. 宇宙有千億個星系，其中一個叫銀河系。銀河系有千億個恆星，其中一個叫太陽，太陽系中的其中一個行星叫地球。我們全人類都生活在地球，這個人類唯一的家。</li> <li>11. 反思與自由討論。</li> </ol>	<p>聆聽、討論</p>

## 試教評估

本單元教案的對像是初三成績中上的奧林匹克物理小組成員。經過一整年對初中物理知識的加強學習後，我希望在最後四堂課中能讓他們學習一些大自然的本質問題。教學的目標不在於要他們掌握甚麼知識和技能，而是讓他們開闊視野、增廣見聞，知道大自然一些最本質的道理。

據我所見，學生在每一節課都能認真聽講和討論，學習的認真程度遠勝於之前的其他課堂。有學生甚至說她很期待下一節課，認為這類型的課堂很好，比那些加強練習物理習題的課堂要有意義得多。對於課堂中的活動，例如測量超重和失重、體驗失重，建立太陽系模型等，學生都能積極參與。

最後，本教學單元不設任何形式的考核和測評。學生能夠參與宇宙學問題的討論，想必能夠領悟了一些人生和大自然的根本道理。我認為這就是一個很寶貴的經歷，經過這幾堂課，他們的學問和思想境界肯定會有所提高。

## 反思與建議

宇宙學屬於天體物體學的前沿分支，要用到很多高深的物理知識，如核子物理學、廣義相對論等。宇宙的起源和演化過程又非常複雜，新的觀測和實驗結果層出不窮，其中又存在一些不確定性。因為現在的對象是中學生，那我們就要將課程設計得盡可能簡單，而且通俗易懂。我本人的做法是先引起學生對宇宙的興趣（失重），讓學生知道宇宙很大又很古老，再為學生介紹宇宙學兩個最重要的知識：超新星爆發和宇宙大爆炸。

要在兩節課中說清楚超新星爆發和宇宙大爆炸是甚麼是很不容易的。超新星爆發是恒星演化的最後階段，要明白超新星爆發，就要介紹恒星演化。然而，恒星演化的過程是非常複雜的。恒星核心中的物理極之艱深，有許多不同種類的核反應，有電磁、強和弱相互作用，還要用到量子力學的許多概念。在這種情況下，令我產生一種感覺：說得深了學生聽不懂，說得淺了又不能自圓其說。

例如教案中提到的太陽核心中發生核聚變，氫元素會融合成氦元素。當初設計教案的時候考慮到，因為氦有兩個質子兩個中子，質量約為氫原子核的四倍。如果講兩個氫原子核通過核聚變成成了氦元素就顯得不合邏輯了，據此我們才介紹了「質子—質子鏈反應」。其實回想起來，為甚麼要把問題講得這麼複雜呢？我們究竟要求學生學習到甚麼？此處學生要知道的應該是核聚變的基礎概念（克服原子核間的電斥力，它們之間的強核力就能將它們束縛在一起，同時放出能量），至於裏面的技術細節，如氫怎樣變成氦，是怎樣放出正電子和中微子等，是不重要的，學生在中學階段是不需要知道這些的。總結來說，對於中學階段的宇宙學教學，我們應該放棄一些技術細節的嚴謹，盡量以最簡單的方法讓學生明白最基本的道理。

最後，我建議其他物理教師試講宇宙學這個主題。<sup>54</sup>許多人中學畢業，甚至高中選讀文科後就一輩子都不再接觸科學知識了，更不會去瞭解宇宙是如何起源、恒星又是如何演化的。作為人類，擁有如此之高的智慧，如果不知道自己和大自然之間竟然存在如此緊密的聯繫，那就太可惜了。

---

<sup>54</sup> 如果對這個主題不瞭解，除了看宇宙學相關的書籍外，還可以看參考資料[3]的教學錄像。

## 參考資料

1. Lawrence Krauss, Cosmic Connections (演講), Conway Hall, London Sunday 16th Oct. 2011: [https://www.youtube.com/watch?v=FjAqcV\\_w3mc](https://www.youtube.com/watch?v=FjAqcV_w3mc)
2. Edward Harrison, Cosmology: The Science of The Universe, 2<sup>nd</sup> ed, Cambridge University Press, 2000.
3. Mark Whittle, Cosmology: The History and Nature of Our Universe(收費教學錄像), The Great Courses, 2008.

## 試教日程表

日期	時間	地點	課時	主題
2015/7/10	14:00 至 16:00	物理 B 室	2	失重是甚麼？為甚麼人造衛星能繞天體轉動？
2015/7/13	14:00 至 16:00	物理 B 室	2	宇宙的尺度及基本知識
2015/7/16	14:00 至 16:00	物理 B 室	2	超新星爆發
2015/7/17	14:00 至 16:00	物理 B 室	2	宇宙大爆炸