



當天文學遇上物理

曾耀寰

中央研究院 天文及天文物理研究所

摘要：天文物理學的主要目的是要瞭解宇宙發生的事，想要以科學的方法追尋原因。本文藉由天文物理學想要解決的問題，簡述所需的物理學知識，並佐以歷史演進的脈絡，介紹天文物理學的發展過程以及與物理學之間的關連。

關鍵詞：天文學、天文物理學

壹、前言

2009 年是全球天文年，爲了紀念四百年前伽利略首次將望遠鏡應用到天文學。天文學是非常古老的學問，主要的研究對象是天上的星體，傳說在英格蘭西南方威爾特郡的巨石陣(Stonehenge)就是和天象有關(圖 1)。巨石陣是由數十塊巨石圍成一個大圓圈，有些巨石的高度可達六公尺，估計巨石陣大約矗立了四千到六千年之久。據信巨石的排列和太陽在夏至冬至的升落位置有關，可算是原始的天文台。



圖 1：17 世紀有關巨石陣的描繪

四百多年以前，天文學家的主要工作是紀錄天象的變化，就像巨石陣一樣，日復一日地紀錄星體在天空中的軌跡。一年四季以及日升日落的星象變化並不是隨意的，它們是有規則的，天文學家透過天象的規律變化，可以掌握四季的變化，這對人類的生存有極大的影響。游牧民族可以依照季節變化，知道狩獵的方式，農業社會則是知道何時該春耕夏耘秋收冬藏。在中國的各個朝代，特別設立「天官」的職務給天文學家，天官的工作除了詳細記載天象，還要制訂曆法，爲皇帝服務。西方社會的天文學家也是作著類似的工作，一直到伽利略的時代，才開始透過各種觀測儀器的協助，嘗試解釋天象變化的原因。而現代的天文物理學有著相同的目的，想要用物理學的知識瞭解宇宙的運作，天文學家不再滿足於天象位置的變化，還要知道背後的原理。

貳、望遠鏡之前

我們現在知道星星離地球有遠近的區別，但在沒有望遠鏡之前，所有的星星在夜空的垂掛下，完全分不出彼此的遠近，我們看到夜空的閃爍星星都像是鑲在一個天球上的光點。在北半球看到的星星都會繞著北極星轉圈圈，星星也像太陽一樣，從東邊升起，西方落下地平面。但在一年當中，太陽每日

從地平面升起與落下的位置會有所改變，使得一年四季的晝夜長度不同，北半球的夏天有較長的白晝，到了冬天會有較長的夜晚，這是一年的週期變化。另外，行星在天球上的位置變化則是更加有趣，行星的軌道位置和星星不同，每日雖也有東昇西落，但相對於其他背景星星，行星的位置更是捉摸不定。行星的英文為 planet，來自於希臘文的 wanderer 漫遊者，日文稱做惑星，字面上都顯示行星的行為和恆星不同。

在望遠鏡使用之前，天文學家對於天上星星的主要工作就是記錄位置，所用的觀測工具都是以量測天體位置為主要目的。為了清楚地標示星星在天球上的位置，首先要訂出合適的天球座標，因應不同的使用目的，有了常用的地平座標、赤道座標、黃道座標和白道座標等。天文學家使用適當的儀器，將星體在天球上的兩個座標值量測出來，清楚地標示出星星的位置，例如地平座標的方位角和地平高度。

測量位置的工具大致可分成兩類，一種是測量兩顆星星之間的相對位置，也就是之間的視夾角，這可以用十字儀或六分儀。另一種則是測量相對於某一座標體系的位置，例如四分儀可以測量地平座標的方位角和地平高度。為了增加測量的精確度，天文學家設計和改良出各種觀測儀器，丹麥的第谷 (Tycho Brahe, 1546~1601) 是當時的佼佼者。第谷自行改良並製造自己用的觀測儀器，例如四分儀。這些儀器可以精確地測量星體在天球上的角度，為了有較精確的角度測量，第谷將四分儀做的很大 (圖 2)，於是就有較大的空間劃分更多的角度刻度，第谷甚至設計出曲折的刻度，增加精確度。

這些測量的結果可以刻畫在一個大銅球上，就像地球儀般，標示出天球上所有星星的位置 (圖 3)，就像現在的星座盤，藉由機

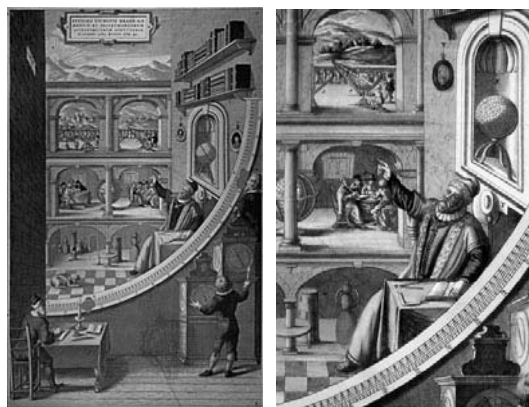


圖 2：第谷使用的四分儀，右圖是局部放大圖，可以看到曲折刻度的設計

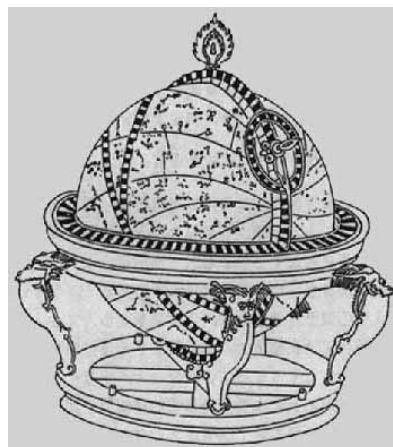


圖 3：清代依張儀所留圖樣製作之渾象

械式的轉動，可以瞭解天球上，星星不同時間的位置，甚至可以預測星星的運行軌道。

參、推動星星的天體力學

有了第谷的精確測量，才有克卜勒 (Johannes Kepler, 1571~1630) 的行星三大運動定律。十七世紀初，德國天文學家克卜勒從第谷的觀測資料找到了三條規律，這在天文學的發展上，起了重要的分水嶺。要知道，克卜勒的年代是天文學和星象學混雜的年代 (圖 4)，克卜勒自己都利用天文學的知識做



圖 4：2002 年歐元紀念幣背面

起星象算命的生意。但克卜勒真正的研究目標是要將數學和天文學連結起來，認為唯有透過數學才能瞭解上帝的旨意，因為他深信上帝透過數學的方式操控著宇宙萬物的運行。有趣的是，克卜勒找到第一條行星運動定律的時間也是伽利略首次使用望遠鏡的那一年(1609 年)。

但行星運動定律也只是描述行星規律運動的數學式，它的背後是否有更深一層的意義？是什麼樣的原因造成這樣的規律？要瞭解真正的原因，得多等將近 80 個年頭，答案終於出現在牛頓的《自然哲學的數學原理》一書(以下簡稱原理)。牛頓的萬有引力定律首次出現在《原理》，但他研究這個問題很久了，我們現在都認定萬有引力的平方反比定律是牛頓的偉大傑作，這個定律將地球上的自由落體現象和月亮繞行地球的現象聯繫起來，地球上的物理定律可以延伸應用到地球以外的宇宙。其實當時還有其他人研究這樣的問題，當中包括著名的哈雷(Edmond Halley, 1656~1742)、虎克(Robert Hooke, 1635~1703)以及雷恩(Christopher Wren, 1632~1723)，但他們都無法用數學證明，唯有牛頓將平方反比定律的證明寫在《原理》，《原理》可算是第一本天文物理專書，透過

萬有引力定律，便可以解釋克卜勒發現的行星三大運動定律。

牛頓提出萬有引力定律後，哈雷得以算出哈雷彗星的軌道週期，預測將在 1758 年底到隔年年初回歸。萬有引力定律另一項重要成就是預測出新的行星，1821 年布瓦(Alexis Bouvard, 1767~1843)出版天王星的軌道表，之後發現這個軌道表和實際觀測有些出入，1843 年亞當斯(John Couch Adams, 1819~1892)認為天王星軌道的差異是由另一顆未知行星的萬有引力造成的，亞當斯進而算出這顆未知行星的軌道，並在 1846 年由其他天文學家觀測發現了這顆新行星，也就是海王星。萬有引力定律為天文學家計算彗星、行星甚至系外星體運動提供重要的理論基礎以及方法。

肆、透視星星的本質-光譜學

若說元素氦的首次發現來自太陽，一定令人驚訝。元素氦的原文(Helium)代表了太陽元素，1868 年印度發生一次日全食，法國天文學家詹森(Pierre Janssen, 1824~1907)在太陽表面意外觀測到新元素，因此名之為 Helium。

天文學家如何在千里之外得知看到的氦是一種未曾見過的元素，他們所憑藉的是光譜觀測。1814 年，德國科學家夫朗和斐(Joseph von Fraunhofer, 1787~1826)將三稜鏡放在望遠鏡後頭，從太陽光譜中發現許許多多的暗線(圖 5)，由於他持續系統地研究，從太陽光譜中辨識出大約 750 條的暗線，並發現其他行星以及恆星都有類似的光譜暗線，由於他的研究，正式開啓了天文學家利用光譜研究遙不可及的天體。

由於後續化學家的參與，我們現在知道

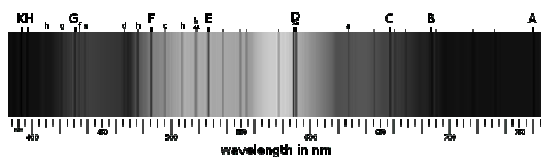


圖 5：太陽光譜內的夫朗和斐線

這些光譜線就像是人的指紋，可以分辨出來自哪種物質。不同的元素或分子會有不同的光譜線，有了這項工具，天文學家便可以望聞問切出各個天體的奧秘。

除此之外，光譜線也可以獲得許多額外的物理資訊。十九世紀末，德國物理學家克希何夫(Gustav Kirchhoff, 1824~1887)和本生(Robert Bunsen, 1811~1899)從物質的光譜現象，歸納出三種不同類型的光譜：連續光譜、發射譜線和吸收譜線，現在稱之為克希何夫光譜三大定律，分別說明在不同狀態下如何產生這三種光譜。首先，只要是高溫且不透明的固體、液體或高密度氣體都會發射各種不同波長的電磁波，稱之為連續光譜，這種光譜是和溫度有關，也就是黑體輻射。如果是稀薄的高溫氣體，則會出現一條條明亮的發射譜線，但如果是稀薄的低溫氣體，並且在它後頭有發光源，則在發光源的連續光譜中會出現一條條的黑線條，此為吸收譜線。當時歸納出來的三大定律都是經驗歸納出來的，詳細的物理機制必須等到量子物理的發展，才得以解釋。

由於量子物理的解釋，天文學家能夠透過星體的光譜，獲知進一步的資訊，例如發光源的溫度、密度、組成比例，甚至知道運動速度的快慢。1929年，美國天文學家哈柏(Edwin Powell Hubble, 1889~1953)發現系外星系都是遠離我們，並且遠離我們的退行速度和星系的距離成正比，此一觀測結果稱為哈柏定律。當時哈柏利用都卜勒效應測量星

系的退行速度，都卜勒效應也可以適用在光譜線上。當星系遠離我們，根據都卜勒效應，星系的光譜線會向長波的方向偏移，稱之為紅移，反之稱為藍移，而紅移的多寡和退行速度的快慢成正比。由於哈柏定律說明了宇宙的持續膨脹，徹底改變人類對宇宙的根本認識，影響程度可和哥白尼的日心說相提並論。

伍、恆星結構及演化

我們能夠觀測的星光都只是來自星球的表面，對於星球內部的結構則是全然不知。研究恆星結構及演化的理論可追溯到熱力學第一定律，十九世紀50年代初，物理學家建立了兩條熱力學定律，簡單地說就是能量守恆以及熵的概念，十九世紀末德國物理學家亥姆霍茲(Hermann von Helmholtz, 1821~1894)和卡耳文(Lord Kelvin, 1824~1907)認為太陽發光的能量源自於太陽自身收縮時所釋放出來的重力位能，並據以估計太陽的年齡。為了更進一步的瞭解太陽，美國物理學家連恩(J. Homer Lane, 1819~1880)首先假設太陽上的物質是氣體，在流體靜力平衡以及質量守恆的條件下，計算太陽內部密度、溫度和壓力隨著半徑的變化狀況，他還發現如果太陽因為表面輻射而損失能量，則太陽會收縮，造成自身的重力位能變得更負，內部的熱能升高，自身的溫度反而上升。

說到恆星結構，就不得不提及英國物理學家愛丁頓(Sir Arthur Stanley Eddington, 1882~1944)。愛丁頓在1926年寫了《恆星的內部結構》(The Internal Constitution of the Stars)一書，詳細描述他對恆星內部結構的瞭解，建立了相關的理論基礎，這包括了恆星如何透過內部的輻射壓力，和本身的萬有引

力相抗衡，以達到現今的穩定狀態。輻射壓的來源就是核心的核反應，愛丁頓堅信恆星發光的能量來源是核心的核融合反應。當時的核物理認為核心的溫度不足以產生核融合，而他的回答則是：請他們指出一個更熱的地方。後來證實量子穿隧效應可以讓氫在比較低溫的狀況下進行核融合反應，反應產生的能量以光子的形式向外傳遞。在傳遞的過程中，光子會和周圍的氣體相碰撞，因此在輻射壓和萬有引力相互平衡的過程中，光子的不透明度佔有重要地位。愛丁頓將恆星內部的結構寫成一系列的方程式，描述各個物理量的分佈狀況。

天上繁星點點，仔細觀察會發現並不是所有的恆星都是一樣的，丹麥天文學家赫茲普隆(Ejnar Hertzsprung, 1873~1967)以研究恆星的光度為基礎，於1911年發表了昴宿星團和畢宿星團的光度-顏色圖，在這些圖中出現明顯且連續分佈的恆星序列，他稱之為主序星。英國天文學家羅素(Henry Norris Russell, 1877~1957)則是採取不同的研究方式，他在1914年發表了星團的光度-光譜型星圖，我們現在知道恆星的顏色是和恆星表

面溫度有關，而表面溫度則是影響恆星光譜的重要因素，所以光度-顏色圖和光度-光譜型星圖是相同的，只是描述的方式不同，現今統稱為赫羅圖(HR diagram, 圖6)。

赫羅圖不僅是很好的恆星分類方式，也是研究恆星演化的重要工具。在赫羅圖中，可以清楚分辨出主序星、巨星、超巨星以及白矮星等，這些星體分佈在赫羅圖不同的位置，例如巨星和超巨星是表面溫度很低但很亮的恆星，而白矮星則是很暗但表面溫度很高的星體。除此之外，根據史特凡-波茲曼定律(Stefan-Boltzmann law)可以知道恆星表面的亮度是和表面溫度的四次方成正比，而表面亮度也和恆星光度和大小有關。如果恆星光度固定，則表面溫度越低、恆星的體積越大。在赫羅圖右上方的恆星，代表光度高和表面溫度低，因此可推知這類恆星的體積很大，因此又稱為巨星、超巨星。

赫羅圖不僅表示出恆星的表面溫度和光度，也可以顯示恆星的體積大小和質量。在赫羅圖的右上方屬於體積較大的恆星，左下方則是體積較小的恆星。而主序帶的左上方則是質量較大的主序星，右下方則是質量較小的恆星，質量較大的恆星會有較強的光度以及較高的表面溫度，粗略地說，這是因為質量大的恆星有較強的自身萬有引力，使得核心溫度較高，加速核融合反應，產生較多的能量。同時因為反應速率較快，也使得質量大的主序星有較短的壽命。為了更深入瞭解恆星的結構以及演化過程，天文學家必須更深入研究恆星物質的不透明度以及能量的產生速率，這些都必須知道恆星內部物質的分佈狀況，以及物質與光子相互作用的現象，因此量子物理的發展對恆星結構與演化是非常重要的，現今的天文學家可以根據較為詳細的方程式描述恆星內部結構分佈以及演化狀況，進而瞭解恆星的一生，瞭解如何

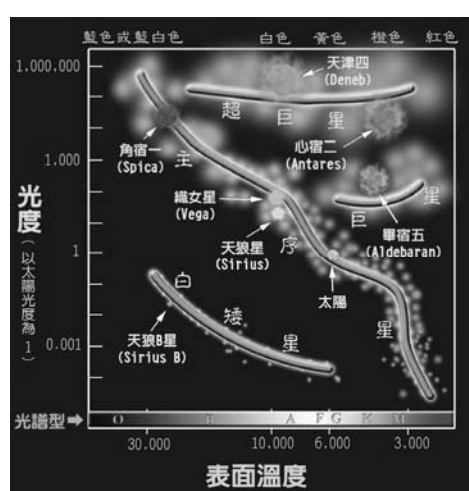


圖 6：赫羅圖(credit:中研院天文所)

從主序星變成紅巨星、行星狀星雲、白矮星、中子星，甚至黑洞。

雖然二十世紀 20 和 30 年代對主序星的瞭解有了長足的進展，但對紅巨星如何造成的原因仍存有很大的不解，更何遑其他擁有奇特性質的白矮星、中子星和黑洞。1938 年愛沙尼亞天文學家歐匹克 (Ernst Opik, 1893~1985) 認為紅巨星是恆星演化的後期。當主序星將核心氫燃燒殆盡，核心大多由氦核所構成，由於溫度不足以產生進一步的核融合反應，核心開始塌縮，並釋放出重力位能，氦核的外殼仍是氫，這時氫殼可以進行核融合反應，所釋放出來的能量使得恆星外圍開始膨脹而冷卻，由於紅巨星核反應的速率是主序星的數千倍，所以紅巨星在赫羅圖上呈現出高光度但低表面溫度的特徵。

白矮星和中子星都是成分特殊的星體，1910 年，羅素將波江座 α 的伴星標示在赫羅圖，發現它屬於光譜型態 A 型星，但其光度是主序星 A 型星的十萬分之一，愛丁頓意識到這樣的星體會有很高的密度，並且表面溫度很高。要瞭解白矮星必須用到量子統計理論。根據一般的常識，如果質量增加，物質的體積也會增加，但對白矮星而言，質量越大，體積反而越小。主序星可以維持體積固定的原因，是因為內部的輻射壓力有效平衡了自身的萬有引力，但白矮星沒有核心的核反應，沒有輻射壓力與萬有引力抗衡，因此所有的物質會向中心塌縮，密度隨之不斷地增加。但到了某種密度，電子之間的距離太過靠近，根據量子物理的泡立不相容原理，太靠近的電子，之間會出現電子簡併壓力抵抗萬有引力的塌縮。

在白矮星的情形下，質量越大，白矮星的體積越小，但這是有個極限，當質量超過 1.46 倍太陽質量，自身的萬有引力超過電子的簡併壓力，白矮星會繼續塌縮成中子星或

黑洞。而這個質量極限又稱做錢卓極限，是由印裔美國天文物理學家錢卓 (Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910~1995) 算出來的，通常一顆白矮星的質量不超過錢卓極限，但大小卻和地球相若。

質量更大的恆星會演化成中子星或黑洞，但天文學家並不是從觀測中發現中子星和黑洞。1932 年，英國物理學家查兌克 (James Chadwick, 1891~1974) 發現中子，1934 年德國天文學家巴德 (Walter Baade, 1893~1960) 和瑞士天文學家茲維齊 (Fritz Zwicky, 1898~1974) 首次預言中子星的存在。中子星是一種比白矮星更緻密的天體，一般的半徑只有 10~20 公里，大約是一個城市的大小。1967 年美國天文物理學家帕西尼 (Franco Pacini, 1939~) 認為中子星會因為磁軸與自轉軸方向不同，有可能在電波波段觀察到中子星，同年，英國電波天文學家休伊什 (Antony Hewish, 1924~) 意外發現了脈衝星，脈衝星就是一顆快速自轉的中子星，他所看到的脈衝週期只有 1.33 秒。中子星是靠中子簡併壓力抵抗萬有引力，中子星內部的超流體狀態、快速自轉以及強磁場現象都需要量子物理以及狹義相對論的解釋，中子星四周的強重力場則需要廣義相對論的處理，這些都是天文物理學家研究的課題。

陸、星際介質

夜晚抬頭仰望，漆黑的夜空就像是一張墨黑的大布幕，一閃閃的星光，像是大布幕上的小破洞，透露出更高層天域的光明。除了閃爍的星光外，星光之間好似沒有其他東西存在，好似空無一物，但真實的宇宙並不是如此，星星和星星之間是存在著其他物質，現在的天文學家透過各種不同波段的望遠鏡，發現了星星之間的物質，我們稱之為

星際介質。

星際介質的主要成分是氣體和星塵，氣體的主要成分是氫，星塵的主要成分是碳、矽以及相關的化合物，例如 CO 和 HCN 等，而星塵大約佔氣體質量的 1%。這些星際介質是星星形成的主要材料，我們瞭解了星際介質，可以幫助我們瞭解恆星以及行星是如何形成。

星際介質並不是均勻分佈，總是有一些區域的密度較高，有些區域的密度較低，而研究星際介質的兩個重要參數就是溫度和數量密度(number density)，數量密度是指單位體積內的粒子數，例如有些較為稀薄區域的數量密度只有每立方公尺 100 顆粒子。這樣低密度的星際介質是不容易觀察到，但有些區域的星際介質有較高的數量密度，對業餘天文學家來說是可以觀測得到的，我們稱之為星雲(nebulae)。

在可見光望遠鏡還不成熟的階段，天文學家經常看到夜空中有一團團模糊的雲氣，當時都將之稱為星雲。有些星雲其實是千億顆恆星所構成的星系，只不過以當時的觀測工具是無法辨識出來，直到哈柏測量仙女座星雲，發現距離遠大於銀河系的尺寸，這才瞭解到這些當時稱做星雲，其實是星系。另外，還有一種稱做行星狀星雲，也是因為觀測的限制，誤認為是一顆巨大的行星，其實行星狀星雲是恆星演化末期的一個階段，當恆星演化成紅巨星，外圍氣體向外擴張，當中的熱核心照射出來的紫外線加熱外圍的氣體，產生多采多姿的雲氣構造。

還有一些雲氣是真正的氣體和星塵所構成的，這些星雲通常可以分成發光的發射星雲，不會發光、甚至會遮背景光的黑暗星雲，以及反射星雲。雖然都稱做星雲，但與四周環境有不同的交互關係，造成不同的觀測結果。被 O 型或 B 型星（質量是太陽的一

百倍到一萬倍左右）的紫外線照射後而自己發熱、發光，便是發射星雲，若星雲擋到後頭的星光，便成了黑暗星雲，假若星雲內的星塵分佈不很集中，經過四周的星光照射，會出現散射現象而呈現藍色，這就是反射星雲（雖然稱做散射星雲較為合適）。這些雲氣受到亮星的紫外線照射，會出現光致游離(photoionization)，產生許多發射譜線，隨後又會出現質子電子的復合(recombination)。另外在瀰散的星雲內，原子的碰撞機會大大降低，於是出現了一些實驗室未曾看過的禁譜線(forbidden line)，例如 OIII 禁制躍遷造成 500.7nm 禁譜線。隨著觀測技術的成熟以及量子物理對譜線的解釋，星際介質豐富的複雜性才能完整地呈現，為人所瞭解。

還有一種星雲稱做分子雲，由於溫度較低（大約絕對溫度 10~30 度），主要成分都是以分子形式存在，例如 CO、氫分子和水。一般分子雲的總質量約十萬到百萬倍太陽質量，直徑約 40 光年到 350 光年，密度大約是每立方公分 200~300 顆氫分子，天文學家認為分子雲是一般恆星形成的溫床，由於自身萬有引力，分子雲密度較高的區域將會塌縮，進而產生恆星。

恆星形成理論一直是當今天文物理學中的重要課題，由於分子雲需要塌縮成恆星，我們不能假定恆星處於準靜態平衡。1902 年，英國物理學家金斯(James Jeans, 1877~1946)提出萬有引力塌縮的條件，即著名的金斯塌縮判別準則，也就是說萬有引力必須大於雲氣中反抗塌縮的氣體壓力。但在塌縮的過程中，雲氣會因體積縮小而被加熱，如果雲氣還是光學薄(optical thin)，它就會因輻射而冷卻，一旦雲氣因密度上升而變成光學厚(optical thick)，雲氣便開始加熱生溫，進而改變相互抗衡的狀態。如果有磁場的加入，甚至雲氣有自轉的情況，會讓塌縮

的過程更加複雜，整個問題需要從磁流體力學的方向入手，塌縮的細節更須依靠電腦的數值計算。

柒、宇宙中的星系

之前提到部分星雲其實是處在銀河系外的星系，星系看起來是橫跨數千光年以上的巨大發光體，單一一個星系包含百萬到千億顆恆星，這些恆星靠著相互之間的萬有引力束縛在一起，無法自由地任意移動，星系內的恆星自成一個體系。

我們今日所見恆星的年齡、化學組成、恆星運動以及整體的外觀形狀，都透露了每個星系的演化史。星系是宇宙構成的主要基石，哈柏另一項重要的天文研究是從星系的外觀做出分類，他將觀測到的星系依照外型分成橢圓外型的橢圓星系、有螺旋臂的螺旋星系、中心有棒形結構的棒旋星系以及沒有規則可言的不規則星系(圖 7)，哈柏原先想從星系的分類研究相互間的演化順序，但實際的演化過程更加複雜。

離我們最近的星系就是銀河，在晴朗夜空，四周沒有光害的情形下，我們可以清楚地用肉眼看到一道白色的帶狀發光體橫跨天際。希臘神話將銀河當成宙斯老婆西拉潑灑天際的乳汁，澳洲土著則是認為銀河是造物者就寢營火的煙，美洲土著則說那是勇敢戰士前往天堂的路，雖是神話，但也都鮮明地描述銀河的樣貌。

我們的太陽系位在銀河當中，銀河的外型像是兩碟相互對扣的扁平形狀(如圖 8)，1750 年英國天文學家賴特(Thomas Wright, 1711~1786)提出一個銀河模型，當時所認識的銀河就是整個宇宙，所以銀河模型也是宇宙模型。賴特的銀河模型是一個空心狀的球殼體，太陽和所有的恆星都分佈在球殼上。

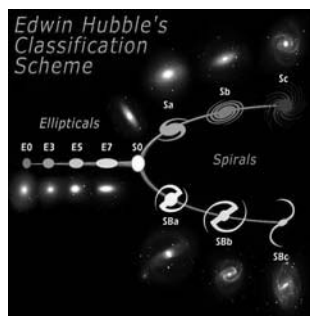


圖 7：哈柏星系分類音叉圖



圖 8：螺旋星系 M81，很類似銀河的長相，此圖結合了哈柏太空望遠鏡、史匹哲太空望遠鏡和銀河演化探測衛星的觀測資料 (credit: NASA/Spitzer/GALEX)



圖 9：赫歇耳手繪的銀河系

1755 年德國哲學家康德 (Immanuel Kant, 1724~1804) 誤解了賴特模型，將銀河看成一個群星聚集的扁平圓盤。

這些都只是理論模型，1785 年，英國天文學家赫歇耳(William Herschel, 1738~1822) 用自製的望遠鏡細數天上的星星，發現銀河的確呈現扁平的盤子形狀(如圖 9)，盤子的大小是厚度四倍，由於星塵的消光作用，當時的觀測認為太陽位在銀河的中心。

我們現在知道銀河在哈柏分類當中屬於

棒旋星系 (SBc)，直徑約十萬光年，厚度約一千光年，內含千億到四千億顆恆星，太陽離銀河中心約二萬六千光年，以每秒 220 公里的速度繞著中心公轉，週期約二億五千萬年。

透過觀測發現，銀河中心有一個超大質量黑洞，藉由黑洞周圍恆星的公轉週期與位置，再加上克卜勒行星運動定律，估算出質量大約是太陽的四百萬倍。同樣利用克卜勒行星運動定律也可以發現螺旋星系四周包覆著大量看不見的暗物質，原先從螺旋星系的亮度空間分佈可以猜測大部分質量集中在中心，照理說螺旋星系外圍的公轉速度應該遵循克卜勒式運動，速度是和距離的平方根成反比，也就是說離中心越遠，公轉速度越慢。但實際觀測發現外圍的速度幾乎維持不變，表示外圍公轉速度比預期的快，推論有更多看不見的暗物質存在，現在相信絕大多數的星系都有暗物質存在，包括我們的銀河。

銀河另一個壯觀特徵是巨大的螺旋臂，就像梵谷星夜當中的螺旋狀星雲。哈柏分類當中的螺旋星系依照螺旋臂纏繞鬆緊程度區分出 Sa, Sb 和 Sc, Sa 的螺旋臂纏繞最緊，Sc 纏繞最鬆。通常螺旋星系有兩條螺旋臂，是氣體、星塵和年輕 OB 型恆星聚集的地方，由於這些恆星質量較大、也比較亮，所以使得螺旋臂特別明顯。

雖然天文學家很早就知道有螺旋臂，在還沒有照相機之前，就有天文學家用紙筆畫下螺旋星系的模樣 (圖 10)，但直到 1942 年瑞典天文學家林達博 (Bertil Lindblad, 1895~1965) 才提出密度波概念嘗試解釋螺旋臂的成因。1964 年華裔數學家林家翹 (1916~) 和學生徐遐生 (兩位現在都是中央研究院院士) 共同提出林-徐密度波理論，他們從流體力學的角度，引入準靜態平衡的密度波概念，想要解釋長期存在的螺旋臂形狀。根據



圖 10：羅斯動爵手繪的星系 M51

密度波的說法，螺旋臂是星系盤面上密度較高的區域，這些區域的雲氣因為萬有引力塌縮而形成較亮的 OB 型星，這個螺旋形狀的密度波就像聲音一樣在星系盤面上傳播。

我們也可以透過各個星系的分佈瞭解整個宇宙的結構，澳洲天文台從 1997 年開始進行紅移巡天觀測 (2dF Galaxy Redshift Survey)，他們朝向宇宙兩個特定區域，藉由測量星系的紅移，得到各個星系的距離。直到今日紅移巡天觀測已經得到 24 萬多個天體距離，當中絕大多數是星系 (圖 11)，從分佈圖來看，星系的大尺度結構清晰可見。星系不是均勻地分佈在整個宇宙空間，而是呈現長條狀或絲狀結構，或稱為長城般結構，通常的尺寸是長五億光年、寬一億光年、厚一千五百萬光年，但有些區域則是鮮有星系，呈現空洞的情況，空洞的直徑可達數千萬光年。這樣的大尺度結構和宇宙的形成和演化有密切的關連，屬於宇宙學的範圍。

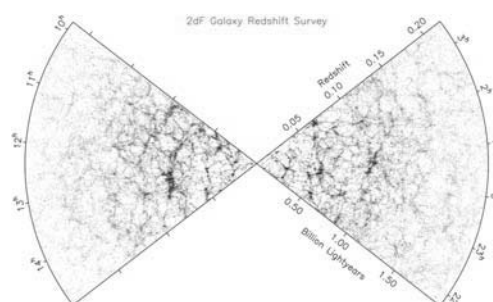


圖 11：紅移巡天觀測所繪製的星系分佈圖

捌、宇宙學

二千三百多年前，中國詩人屈原在他著名的詩篇《楚辭天問》中，提出一連串的問題，這些問題主要是想知道天地是如何開始的，宇宙是怎樣構成，而誰是天地宇宙的開闢者。遠古人們藉由神話的方式回答這些問題，神話通常是靠擬人化的手法，將無生命的自然賦予生命，原始西方世界也是以類似的手法嘗試瞭解宇宙，直到希臘哲人之後，理性的科學精神逐漸成爲人類探索宇宙的主要工具，而研究宇宙的學問稱做宇宙學。

宇宙學的科學理論基礎始於英國物理學家牛頓，牛頓在重要著作《原理》證明了平方反比的萬有引力定律，傳說牛頓是在蘋果樹下頓悟出地上的蘋果和天上的月亮遵循了相同的定律，著名數學家高斯就不相信這一套，他曾憤怒地說：這是講給白癡聽的故事，因爲只有白癡會相信一點靈感就會帶來如此偉大的貢獻。比較可信的說法，這個故事是來自牛頓晚年重要的助手，也是他的外甥女婿康度克(John Conduitt, 1688~1737)。

所有的物質都受到萬有引力的長距離作用，牛頓也體會到這對宇宙大尺度質量分佈具有重要的影響，在 1692~1693 年間，牛頓在私人信件中提到了宇宙學的問題：雜亂分佈於宇宙各個角落的恆星之所以被約束而動彈不得，肇因於相互間吸引抵銷了彼此間的作用力，只要知道宇宙間所有的物質的分佈情況，宇宙就像倫敦西敏寺的機械鐘，分秒不差的運行。

機械式的宇宙觀在熱力學第三定律與歐伯斯謬論(Olbers' paradox)的撼動之下，逐漸顯露其矛盾及不足，機械式宇宙觀終將下台。現代宇宙學的重要理論是 1915 年愛因斯坦所發表的廣義相對論。牛頓將兩物體相互吸引靠近的原因認定爲萬有引力，而愛因斯

坦則當成物體與空間之間的交互作用，美國理論物理學家惠勒(John Archibald Wheeler, 1911~2008)曾說：時空告訴物質如何運動，物質告訴時空如何彎曲。現在對宇宙演化的詳細研究都得靠廣義相對論。

1917 年愛因斯坦根據廣義相對論發表了一篇著名論文，提出靜態宇宙的模型，與牛頓最大不同的概念在於捨棄萬有引力的概念。從愛因斯坦的標準場方程式顯示，廣義相對論的全部內容只有在黎曼幾何架構下，才有意義，並且可以整體地描述宇宙。不過爲了維持有限密度的靜態封閉宇宙模型，愛因斯坦引入了宇宙常數，1929 年，哈柏觀測星系距離和退行速度，得到了哈柏定律：星系距離和退行速度成正比，被解釋成宇宙膨脹的重要證據，爲了維持靜態宇宙的宇宙常數，後來被視爲愛因斯坦最大的錯誤。

在愛因斯坦發表第一篇宇宙學論文之後的第五年(1922)，俄國數學家弗里得曼(Alexander Friedmann, 1888~1925)在宇宙學原理的假設下，得到了宇宙膨脹的三種理論數學解，並預測了宇宙演化的三種情形，分別是開放宇宙、封閉宇宙和平坦宇宙。在哈柏定律發現之前，靜態宇宙是大家所認識的宇宙，愛因斯坦爲了滿足靜態宇宙而人爲加入宇宙常數，而弗里得曼服膺純粹的數學理論結果，反而得到較爲適當的宇宙模型，當中過程值得玩味。

二十世紀 70 年代初期，標準熱大霹靂理論(hot big bang)的成功，使得熱大霹靂理論成爲最令人滿意的宇宙學研究框架，絕大多數天文學家和天文物理學家都相信宇宙是在 137 億年前誕生，一個高溫高壓的奇異點瞬間展開了宇宙的時空，相繼出現的觀測證據顯示一個不斷膨脹的宇宙是正確的，天文物理學家所要做的只是將大霹靂理論再擦亮一點。

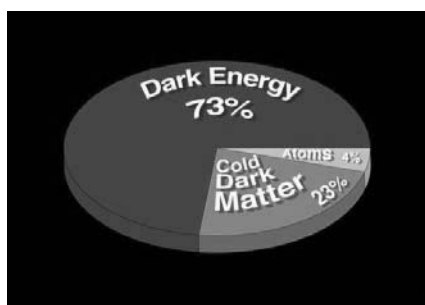


圖 12：宇宙質能比例圖

由於天文觀測的進步，許多宇宙學的參數一一加以確定，哈柏常數、減速參數、空間曲率、宇宙物質平均密度、氦的含量以及宇宙微波背景輻射，宇宙學已經從純理論想像、純理論計算，進展到高度精密的天文觀測。除了得到更精確的觀測結果，天文學家也發現到許多以往想像不到的現象，根據威爾金森微波背景輻射各向異性探測衛星（WMAP）累積七年的觀測結果，宇宙質能分佈中，我們所熟悉的一般物質只佔了全部的4%，暗物質佔了23%，暗能量佔了73%（圖 12），而暗物質和暗能量的本質至今不明。除此之外，熱大霹靂理論只說明了宇宙現今膨脹的過程，造成宇宙膨脹的原因很可能是所謂的暴脹理論(inflation)，我們對於宇宙如何產生、產生之前的理論都尚待研究，這些都是宇宙學未來重要的研究課題。

玖、結語

可見光天文望遠鏡的使用若從伽利略開始算起，已有四百年，利用其他波段望遠鏡探索宇宙也不過一百多年的事。1933年美國工程師央斯基（Karl Jansky, 1905~1950）首次測量到銀河中心的電波訊號，第二次世界大戰之後，由於軍用雷達技術的提供，電波望遠鏡才有快速進展，大型電波望遠鏡、綜合孔徑以及電波干涉技術的發明，使得電波

觀測的解析度和靈敏度大幅提昇，奠定了電波天文學的基礎。十九世紀末，美國天文學家蘭利（Samuel Pierpoint Langley, 1834~1906）將輻射熱計應用在紅外波段的天文光譜，並測量到太陽 5.3 微米的吸收光譜線。與其他天文觀測領域一樣，紅外線天文學也得益於軍事需求的發展，特別是熱導引飛彈所帶來的技術，以及太空技術。由於地球大氣吸收的影響，地面觀測無法看到來自宇宙的遠紅外線波段訊息。二十世紀 70 年代使用高空飛機和氣球做為觀測載具，可以在十多公里的高空上，進行八小時左右的連續紅外觀測。1983 年由荷蘭、美國和英國合建的紅外天文衛星（IRAS）發射升空，紅外線天文觀測正式進入太空時代，之後哈柏太空望遠鏡的近紅外照相機和多目標分光鏡（NICMOS）和史匹哲太空望遠鏡都是紅外線天文學重要的觀測工具。

觀測波長更短的紫外線、X 射線和 γ 射線都有類似的發展。由於這些波段的天文訊號很容易受到地球大氣的吸收，造成所有波長短於 300~310 奈米的輻射不透明，也就是說來自外太空的這些波長訊號都沒辦法到達地表。因此這些波段的天文觀測都是先從火箭、高空氣球和高空飛機開始，最理想的觀測方式是將觀測儀器放到外太空的衛星，例如紫外線的銀河演化探測船（GALEX）、X 射線的錢卓太空望遠鏡、 γ 射線的費米太空望遠鏡（又稱做 GLAST）等。

這些波段的望遠鏡都是接收來自宇宙極端條件下的發射源，例如星系中心的超大質量黑洞、年輕的電波脈衝星、緻密雙星系統、超新星爆炸及其遺骸、緻密雙星的碰撞、類星體、星系團內的高溫氣體、活躍星系核以及一些星際介質的衝擊波都會產生高能的光子，由於這些資料的接收，可以幫助天文學家認識宇宙中其他的特殊天體，通常都需要

廣義相對論、狹義相對論以及輻射理論加以解釋。

除此之外，對於宇宙重金屬元素的形成，無論是在恆星內部所融合而成，或是在超新星爆炸過程中所產生的，都是需要核物理理論的協助。在大霹靂開始的前幾秒鐘，宇宙所有的物質都已底定，各種基本粒子和各種基本作用力的形成也都是物理理論所要探索的重要課題。甚至想要回答大霹靂之前的事，或者是多維度空間以及平行宇宙等議題，也隨著觀測儀器以及觀測方法的不斷更新而有了解答的可能性。

天文物理學的主要目的是要瞭解宇宙發生的事，想要以科學的方法追尋原因。天文物理學家所採用的工具很多，古典物理（力學、電磁學、熱學）、統計力學、量子物理、相對論以及場論。而研究的對象包含了整個宇宙，從最小的基本粒子、各種元素的形成，到行星、恆星、星系，甚至整個宇宙的形成以及演化，只要是人可以想像的問題，人可以觀測到的現象，都吸引了天文物理學家的目光。限於篇幅的限制，本文只簡單介紹部分的天文物理學，天文物理學的發展雖不超過二百年，而全波段的電磁波觀測不超過一百年，在這短短的時間，已有了驚人的進展，相信在未來會有令人讚嘆的發現和成就。

參考文獻

1. 曾耀寰(2006)：科學雞的故事-錢卓雞為什麼過馬路？科學月刊，37 卷 1 期
2. 曾耀寰(2005)：科學雞的故事-愛丁頓雞為什麼過馬路？科學月刊，36 卷 9 期
3. 曾耀寰(2005)：科學雞的故事-茲維齊雞為什麼過馬路？科學月刊，36 卷 5 期
4. Inglis, Mike (2007). *Astrophysics is Easy*, Springer-Verlag London.

5. Sparke, L., Gallagher, J., (2007). *Galaxies in the Universe: An Introduction*, Cambridge University Press
6. Longair, Malcolm (2006). *The Cosmic Century*, Cambridge University Press

When Astronomy met Physics

Yao-Huan Tseng
Academia Sinica

Abstract

The purpose of studying astrophysics is to understand the universe and try to uncover the truth with scientific methods. I will explain the astrophysical problems which astronomers are interested in and the relative physics. I also introduce the development of astrophysics in the historical way and describe the relationship between astronomy and physics.

Key words: Astronomy 、Astrophysics、Physics