

第三章 宇宙學

UGEB2341

朱明中

人類自古就對宇宙充滿好奇和幻想。宇宙從何而來？往何而去？廣義而言，宇宙學涉及的範圍極廣，如神學、哲學、科學等都和宇宙學有關。宇宙學的眾多範疇內，在二十世紀有最突破性發展的，應算**物理宇宙學(physical cosmology)**[Haw98,Lid99,Pee93,Roo97,Sil97]。物理宇宙學所關心的是宇宙的物理性質，如時空的幾何、質能的分佈和流動等。天文學家憑藉大型望遠鏡，在二十世紀開始對宇宙作深空觀測。在短短幾十年內，這些觀測的結果徹底地改變了人類對物理宇宙的認知：原來宇宙生於一個大爆炸，並不斷在膨脹，而我們看得見的、發光的物質遠少於不發光不知名的物質...這些僅是開始。踏入二十一世紀，物理宇宙學正以前所未有的速度邁進；新一代的天文物理學家挾著現代精密的儀器，延續著對宇宙認知的革命。

3.1 宇宙學的基本假設-宇宙學原理

地球相對於宇宙，自是微不足道，人類就更渺小了。而我們以此微末之身，卻去研究偉大的宇宙，是否既自大，又有點「以有涯隨無涯」的危險？具體而言，若果地球位處宇宙特殊一角，則我們對宇宙的觀察便可能以偏蓋全，而建基於這些觀測結果的宇宙論亦或失去其普遍性。我們不能忘記瞎子摸象的故事。所以，物理宇宙學的討論，均建基於**均勻性及各向同性**—統稱為**宇宙學原理(Cosmological Principle)**—這兩個假設之上：

- **均勻性 (homogeneity):** 宇宙物質在極大尺度下的分佈是均勻的。
- **各向同性 (isotropy):** 在極大尺度下觀測，宇宙在各個方向的性質相同。

大家可能覺得這宇宙學原理明顯和事實相違：我們看到的恆星、星系等，分佈顯然並不均勻，從地球外望，各方向亦有很大分別。問題的關鍵，就在觀測的尺度上。大家現在呼吸著的空氣，正好提供一個好例子。在人類感官的尺度下，地面的空氣是均勻的。但若我們用一個可以放大千萬倍的顯微鏡去觀察附近的空氣，我們將看到空氣份子像很多小球在空間不斷互相碰撞。不過在這個尺度下，物質的分佈就很不均勻了，有份子佔據的空間，密度就很高，份子與份子之間卻是真空，密度等於零。想像我們縮小到和空氣中的份子大小相若，這時從任意一個份子外望，不同方向的景觀就可能有分別。所以宇宙學的觀測，都要有「大而化之」的精神。在以十億光年為基本尺度來看，宇宙物質的分佈趨於均勻。

涉及大尺度觀測時，我們亦要小心時間的影響。愈遠的星光，需要愈長的時間才來到地球。所以我們觀察到幾十億光年外的星系，是其幾十億年前的狀態。宇宙的很多性質，如密度、溫度等，幾十億年前和現在自有很大分別。所以應用宇宙學原理時，我們亦要剔除宇宙演化的影響。

簡單而言，我們假設經演化的修正後，在宇宙中任何地方的觀測者將看到相同的宇宙性質及物理定律。從大尺度來看，宇宙中所有地方都一樣，沒有邊界，也沒有中心。唯其如此，我們從地球觀測宇宙，才有機會捕捉到有普遍性的法則。

宇宙學原理並不是唯心的假設；原則上，它是可以用觀測否證的。現有的宇宙學觀測結果，如宇宙微波背景輻射的均勻性等[Ben96,Ber00,Haw98, Ker96,Lid99,Lin96,Pee93,Roo97, Sar96,Sil97]，都支持它的真確。不過我們不排除宇宙學原理會被未來更精密的觀測所修正。唯其如此，物理宇宙學才可不斷進步。

3.2 哈勃的發現

哈勃(Edwin Hubble)是二十世紀最偉大的天文學家之一。他的兩個發現－「**島宇宙**」和**宇宙的膨脹**－徹底改變了人類對宇宙的認知。

我們的太陽系原來只是一個叫「**銀河**」(圖3-1)的星系之一份子，太陽是銀河系千億恆星中的一顆。上世紀的天文學家普遍以為銀河系已包含全宇宙的星星了。哈勃在觀測「**仙女座大星雲**」(圖3-2)時卻發現這個所謂星雲，卻原來是由很多很多恆星組成，而且離開太陽系都很遠(約二百二十萬光年)。於是哈勃大膽的提出仙女座大星雲其實是銀河系外的另一個星系，而宇宙還有很多其他的星系。這就是島宇宙的說法:若每個星系是一個島，那麼宇宙便由很多個島組成。經過天文學家多年努力觀測，他的看法已被證實了。今天我們知道，可見宇宙約有一千億個星系，每個星系平均有一千億顆恆星。換句話說，我們每一刻都被一千億乘以一千億個太陽所照耀！而這個島宇宙的大結構，則仍是很多天文物理學家的研究課題。

哈勃的另一個驚世發現，就是遠方的各星系都以高速飛離銀河系，而且愈遠的星系飛離速度愈快！這就是**宇宙的膨脹** [Bra93,Hub29]。

哈勃這個發現建基於**星系光譜的紅移現象 (redshifts in the spectra of galaxies)**: 觀測發現所有遙遠星系的光譜皆呈現紅移，換言之，光譜線都向低頻即紅光部份平移。從**多普勒效應 (Doppler effect)** 的原理可知，星系正以高速遠離我們 (圖3-3)。哈勃更發現，一個星系的光譜紅移，和該星系的距離有一個簡單關係。從此哈勃推論出著名的**哈勃定律 (Hubble law)**: 一個遙遠星系遠離我們的速度和它的距離成正比 [Bra93,Hub29] (圖3-4)，星系距離我們越遠，它的後退速度越大！配合上宇宙學原理，可知宇宙正均勻地膨脹，每一個星系都以高速遠離其他星系，但宇宙並沒有膨脹的中心 (圖3-5)。

宇宙膨脹，其實並不是一個容易理解的概念。很多人會把宇宙想像成一個氣球，而宇宙的膨脹就像在充氣球脹大一樣(圖3-6)。不過這想法有兩個問題。首先這樣的宇宙就有中心又有邊緣了。從而衍生出第二個問題是宇宙邊緣外又有甚麼？這便陷入邏輯矛盾，因宇宙應無所不包，根本不會有宇宙以外。一個比較好的宇宙模型，是想像氣球的表面，這個二維的空間既無中心，亦無邊緣，球面每一點都有同等地位，都可說是中心。當氣球膨脹時，球面的空間亦均勻地脹大。若果我們在球面畫上斑點，這些斑點相互之間的距離亦會逐漸拉長，而這拉長的速度，亦正比於它們之間的距離。情況就像哈勃見到星系相互飛離一樣。不過這始終是一個二維的模型，而我們的宇宙卻是四維的，包括時間和空間。要描述時空的膨脹，則非要用數學工具不可，不是人們可以憑空想像的了。



圖3-1 銀河系。圖片由美國太空總署(NASA)提供。



圖3-2 仙女座大星系。圖片由美國太空總署(NASA)提供。

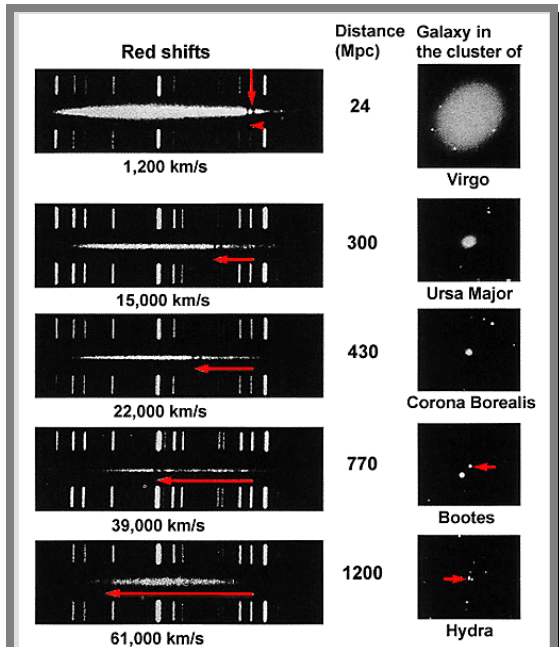


圖 3-3 遙遠星系光譜的紅移。光譜中的吸收線（如圖中藍色箭咀顯示的兩條黑色線）提供標記讓我們很容易量度紅移。紅移的程度與星系的距離成正比，由上至下增加。

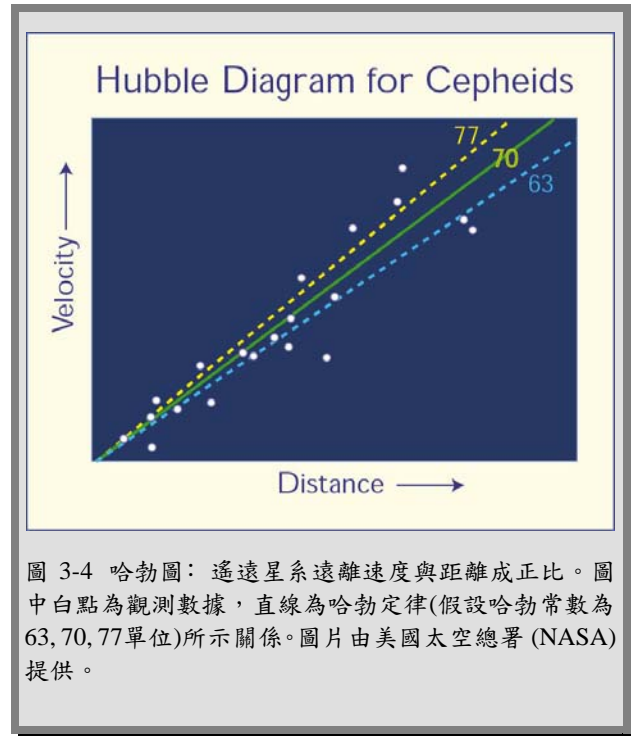


圖 3-4 哈勃圖：遙遠星系遠離速度與距離成正比。圖中白點為觀測數據，直線為哈勃定律(假設哈勃常數為63, 70, 77單位)所示關係。圖片由美國太空總署 (NASA) 提供。

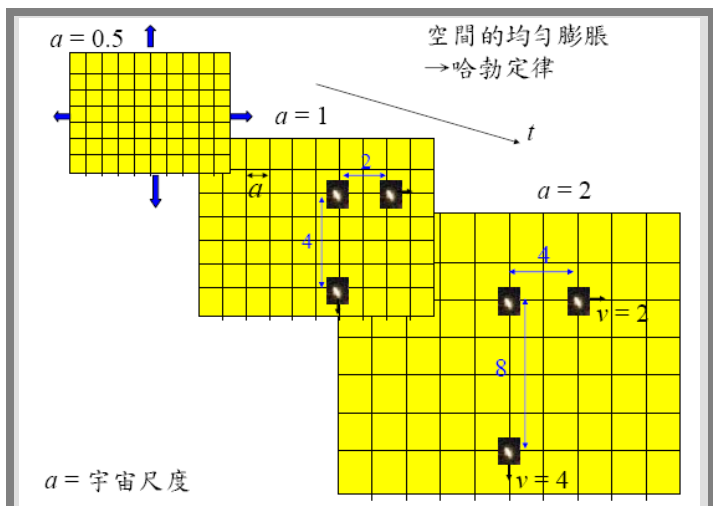


圖 3-5 二維宇宙的均勻膨脹。想像在空間劃上刻度標誌尺度 (a)。空間尺度隨着時間增大，做成宇宙膨脹。兩個相鄰的星系分開得較慢，但兩個本來已經相距得較遠的星系便以較高的速度分開。在任向一個星系上看，其他星系都在飛離，後退的速度和距離成正比（哈勃定律）。

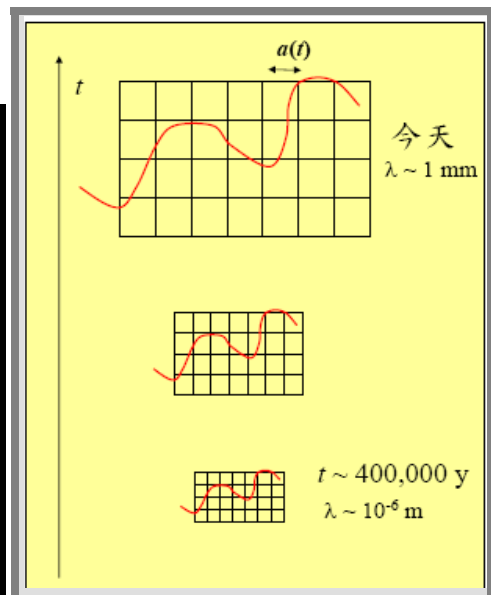


圖3-6 廣義相對論解釋了為何宇宙背景輻射的波長會改變成今天的數值。背景輻射在膨脹中的空間運動，就好比在一個正在膨脹的氣球表面上的標記一樣。標記被橡皮的膨脹拉長，同樣背景輻射的波長亦會因宇宙空間的膨脹變大。

3.3 大爆炸 (The Big Bang)

宇宙的膨脹並不單止是今天才發生的事。天文學家憑藉巨型望遠鏡，得知遠至二十億光年外的星系亦遵守哈勃定律。那就是說，宇宙已膨脹了起碼二十億年。若我們讓時光倒流，往遠古追索，那根據哈勃定律，宇宙在愈久以前，便愈細小。所以很久以前（讓我們把這一刻稱為 $t=0$ ，宇宙的伊始），宇宙所有物質都集中在一個極細的時空－稱為**原始火球 (primordial fireball)**－之內。今天的宇宙，就由那個極熱極密的原始火球膨脹而成。這就是著名的**大爆炸理論 (The Big Bang Theory)** [Haw88, Kol90, Sil89, Wei88]。

根據大爆炸理論的推算，宇宙簡史 [Haw88, Kol90, Sil89, Wei88] 就如圖3-7 所示。在 $t=0.0001$ 秒時，宇宙溫度約為攝氏一萬億度，充滿著能量極高的輻射，而其密度約為 10^{13} g/cc，即約為水密度的十萬億倍。

這時開始了一個**輻射主導 (radiation-dominated)** 的宇宙，高能的輻射不斷與物質產生相互作用。能量根據愛因斯坦的質能互換方程式， $E=mc^2$ ，轉化成物質，產生**粒子-反粒子對 (particle-antiparticle pairs)**；在最初的幾秒鐘產生了**質子 (protons)**，**中子 (neutrons)** 和**電子 (electrons)**。粒子碰上反粒子會煙滅，質量又變回能量。由於密度極高，輻射和物質之間不斷發生相互作用，所以這時的宇宙對於輻射是不透明的。宇宙的膨脹，使溫度不斷下降，粒子的能量和速度亦隨之減低。當粒子降溫至一定程度，它們便可藉核反應開始組織成為較重的核子。大約在 $t=3$ 秒以前，最輕的幾種元素，主要是**氫 (Hydrogen)**、**重氫 (Deuterium)**、和**氦 (Helium)** 開始形成。這過程持續至大約 $t=30$ 分鐘時，宇宙已冷卻至不能維持核反應，停止製造元素，這時的物質大約四份三為氫四份一為氦。當宇宙達到約一百萬年老時，宇宙溫度約為攝氏三千度，原子核開始和電子結合成**原子 (atoms)**。因為原子沒有電荷，相對來說，原子較少和輻射產生相互作用。宇宙變得**透明**，並且以**物質主導 (matter-dominated)**。隨著物質和輻射相互作用的減弱，宇宙便趨於一個物質和輻射分離的狀態。這個關鍵時刻，叫作**去耦時間 (decoupling time)**，標誌著宇宙由輻射主導轉化成物質主導，即今天我們觀察到的狀態。

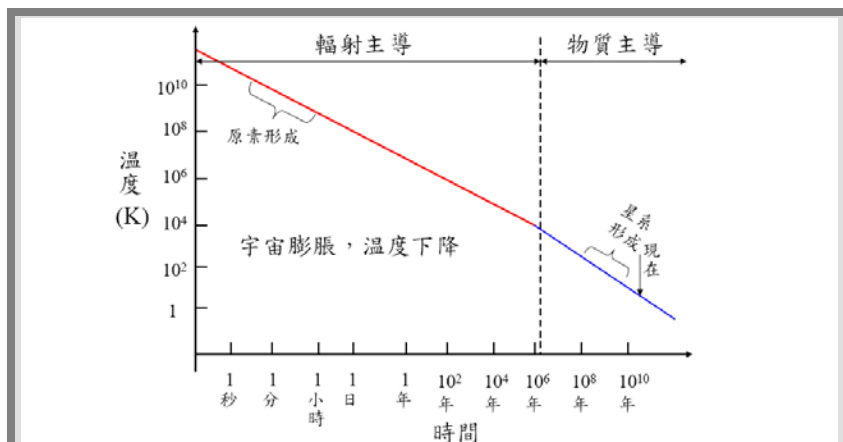
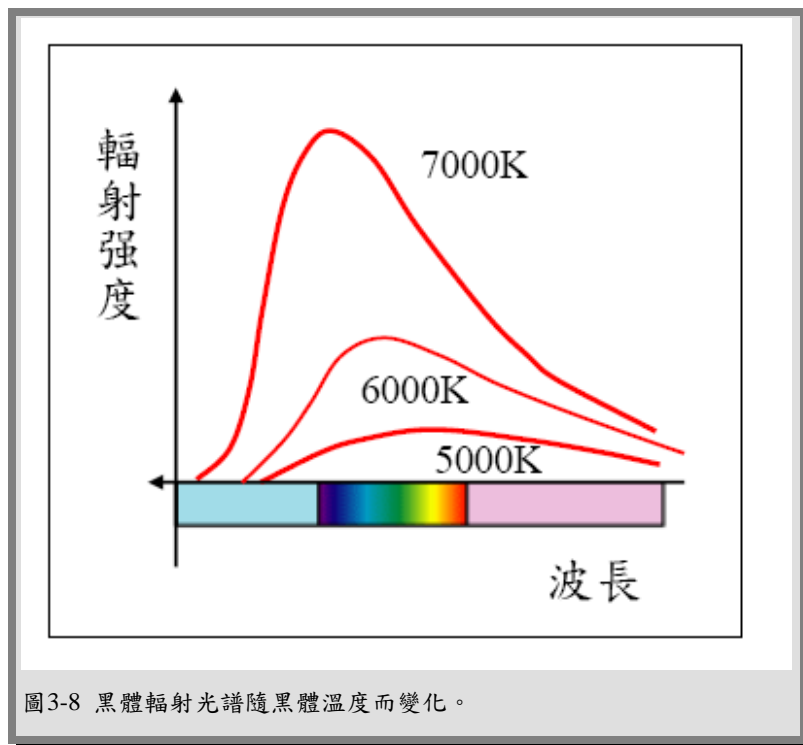


圖3-7 大爆炸後宇宙不斷在膨脹中冷卻。在大爆炸後最初的幾分鐘，有些氫核子（即質子）變成重氫和氦核子。後來當宇宙變成物質主導時，在恆星內部的核反應才聚合更重的原素。

大爆炸理論並不是唯一的物理宇宙論。著名的天文學家海爾(Fred Hoyle)等就曾提出一個名為穩態宇宙(Steady State Universe)的模型[Bur63,Hoy48]，描述一個沒有開始沒有終結，永遠處在一個不變狀態的宇宙。這理論的宇宙並不膨脹，星系雖然各自飛離(因此仍有紅移現象)，新的物質卻不斷產生以作補充，使宇宙的密度不變。情況就像一個噴水池，池中心的噴泉把水噴出，補充不停往池邊流去的水。水池的水雖然都在流動，整個水池卻處在一個穩定不變的狀態。不過，宇宙學的觀測結果似乎都支持大爆炸理論。除了宇宙的膨脹，大爆炸理論主要的觀測證據有三個：宇宙背景輻射[Haw88,Kol90,Sil89,Wei88]，輕元素份量[Alp48, Haw88,Kol90,Sch91,Sil89,Wei88]，及宇宙年齡[Haw88,Kol90,Sil89, Van90,Wei88]等。

若果宇宙的確如大爆炸理論所言，所有物質曾擠壓在極小極熱的火球內，那麼年輕的宇宙應發出大量熱輻射，如同燒熱的碳會發光一樣。在輻射主導的時期，宇宙雖然有大量輻射，但它們和物質相互作用太強，分不開，輻射跑不出來。所以我們預期可以觀測到的是轉化成物質主導後的宇宙輻射。據大爆炸理論推算，宇宙在去偶時間的溫度應約為攝氏二千七百度，發出相應的黑體輻射。因為宇宙的不斷膨脹，當時的輻射波長也被拉長了約一千倍(圖 3-6)，到今天便成為波長約 1 厘米的微波(microwave)，看起來好像是從一個溫度為僅比絕對零度(即攝氏零下二百七十三度)高 2.73 度的物體發射出來一樣(圖 3-8)。這就是我們今天觀測到的宇宙微波背景輻射(cosmic microwave background radiation, 簡稱CMB) [Ber00,Pee93]。宇宙微波背景輻射的存在告訴我們宇宙曾經很熱，這點跟大爆炸理論相符，卻與穩態宇宙論相悖。首先在六十年代意外發現宇宙微波輻射的兩位科學家，威爾遜(Robert Wilson)及賓西亞斯(Arno Penzias)亦因此而贏得一九七八年的諾貝爾物理學獎[Pen65]。到近年，科學家用精密儀器，對宇宙背景輻射作出非常準確的度量[Ben96, Ber00, Ker96,Lin96,Sar96]。最新的資料顯示(圖 3-9)，背景輻射大致上是各向同性(isotropic)的，而其些微的不均勻(約 10^{-5} K)，卻藏著早期宇宙狀況，如物質分佈等的資料。



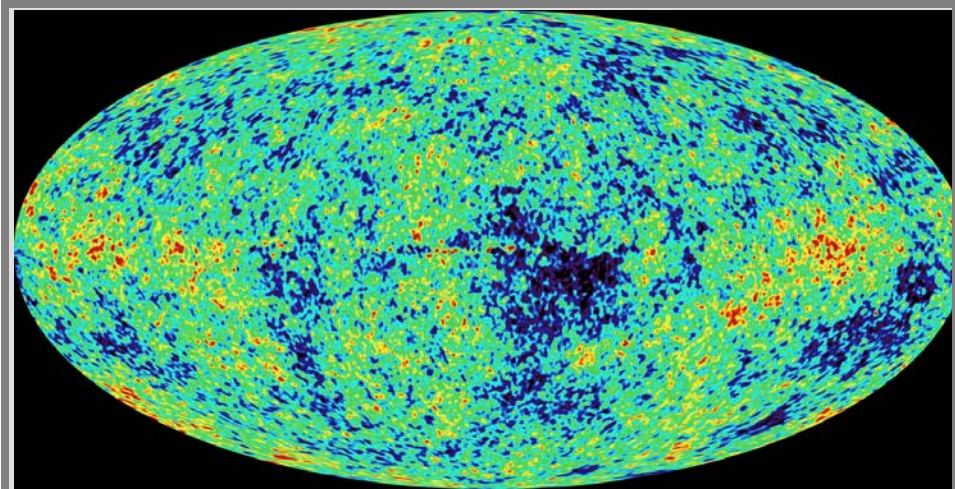


圖3-9 由WMAP太空船量度到的宇宙微波背景輻射溫度與平均值(2.725K)之偏差分佈(全天域投影)。圖中紅色及黃色部份較熱，而藍色部份較冷，最大偏差約 10^{-5} K。銀河系及太陽系之影響已被減去。圖片由美國太空總署(NASA)提供。

第二個支持大爆炸理論的證據，就是宇宙的輕元素含量。如上所述，宇宙誕生之後幾秒開始，至約三十分鐘止，溫度和密度都適合進行熱核反應，由氫製造出幾種輕元素：重氫、氦及鋰等。根據大爆炸理論，我們可以推算這些輕元素的份量，例如氦應佔總質量百分之二十三等，而這些都與觀測的結果相符[Haw98,Kol90,Lid99,Pee93,Roo97,Sch91,Sil89,Sil97]。

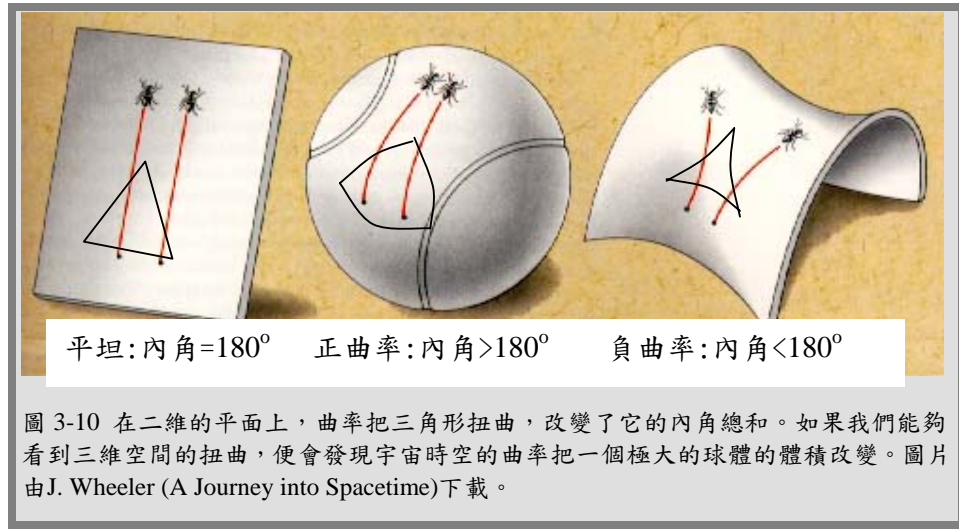
大爆炸理論與穩態宇宙論一個重大分歧，就是宇宙究竟是恆常不變，還是有個轟烈的誕生？若宇宙正如大爆炸理論所言，誕生於遠古某一刻，則憑藉哈勃定律，我們可估計宇宙的年齡約為一百四十億年。天文物理學家亦努力探尋其他量度宇宙年齡的方法，以驗證大爆炸論之真確。例如，方法之一是比較宇宙間一些放射性元素的份量，就如同考古學家以碳十四含量推算古物年齡一樣。值得注意的是，這方法是獨立於宇宙膨脹的。科學家發現，以放射性元素方法得出之宇宙年齡，基本上和大爆炸理論一樣[Haw98,Kol90,Lid99,Pee93,Roo97,Sch91,Sil89,Sil97, Van90]。

現今大部份天文物理學家都相信大爆炸理論基本正確。但這並不代表此理論是完整無缺的。物理宇宙學仍有很多問題，是大爆炸理論未能解釋的。譬如說，為甚麼有大爆炸？為甚麼宇宙曲率那麼接近零（見下文）？宇宙的大結構何來？宇宙既有始，是否亦有終？諸如此類的問題，都是天文物理學家正在努力研究的課題。

3.4 廣義相對論與宇宙膨脹

發現宇宙膨脹的歷史，背後有個有趣的故事。原來在哈勃發現宇宙膨脹以前，愛因斯坦已經從他的廣義相對論方程式看到宇宙很可能會膨脹或收縮 [Lid99, Mis73,Pee93,Roo97,Wei72]。簡單來說，廣義相對論描述質能和時空的相互影響：質能扭曲時空，時空的幾何則決定物質的流動[Mis73,Wei72]。在這理論裏，宇宙的物質和時空是不能維持一個靜態平衡的。這本來應該是廣義相對論的一個輝煌勝利：在觀測之前預言宇宙的膨脹！但是這結果實在大異於人類幾千年來的迷悟，以至於聰明如愛因斯坦，也懷疑起自己的理論來。為了使廣義相對論符合人們誤解中的靜止宇宙，愛因斯坦在方程式中加進一個新項，以抵消宇宙的膨脹。物理上

而言，這個新項就代表著一種新的力，對抗著物質的重力而使宇宙穩定。這種力的強度取決於一個叫宇宙常數的數值，而這個常數的正負號，就代表著這種新力是斥力或引力。最特別的是，宇宙常數這新項，是跟物質密度無關的，換句話說，即使在毫無物質、真空狀態下這



種力亦存在；這跟我們認識的其他物理力截然不同。我們姑且稱這種力為**真空力(vacuum force)**。到今天我們對真空力所知極少。雖然原則上真空力的存在並不違反任何已知的物理定律或實驗結果，幾十年來物理學家都不大相信確有這種神秘的力。當愛因斯坦得悉宇宙的確在膨脹後，他曾說過引入真空力是他一生最大的錯誤。不過，在二十世紀最後的幾年，新的觀測結果似乎告訴我們真空斥力確實存在，令宇宙的膨脹在加速[Gar98,Per98,Liv00]！愛因斯坦的最大錯誤，可能反而是以為引入宇宙常數是一個錯誤！

廣義相對論預期質量會使時空扭曲。宇宙時空的幾何 (geometry of space-time) 受物質的分佈支配- 物質越多，時空被扭曲得越嚴重。物質的密度，直接影響時空的曲率(圖3-10)。若宇宙常數等於零，則密度越高，曲率越大於零；密度越低，曲率越小而甚至小於零。正或負的時空曲率造就兩種不同的宇宙：正曲率對應**閉合的宇宙 (closed universe)**，擁有**有限**的時空，而負曲率對應**開放的宇宙 (open universe)**，時空無限。密度達到某一特定值，稱為**臨界密度 (critical density)**時，時空曲率剛好等於零，形成一個**平直的宇宙 (flat universe)**，擁有**無限**的時空。值得注意的是，無論是開放、平直、或閉合的宇宙，都沒有邊界。例如閉合的宇宙，可說是有限而無邊的。一個好的譬如，是球面的二維空間。它固然面積有限，但也沒有邊界- 在球面上沒有內外之分。當然在三維空間這個球有邊界、有內外之分。

但若我們的世界只有球面的二維空間，那我們的宇宙便有限而無界。另一點要留意的是，說宇宙的時空無限並不同於說在某一時間，宇宙有無限空間。即使是開放的宇宙，在任意的時刻，其空間也有限。它的無限，是要綜合時間和空間來看的。

傳統上，天文物理學家亦根據這個沒有真空力的宇宙模型來討論宇宙未來的命運 (圖3-11)。因為物質的重力是吸引力，所以宇宙膨脹的速度隨時間減慢。問題是，這引力是否足夠大以至停止或甚至扭轉宇宙的膨脹？重力的強弱視乎物質的密度。若平均密度大於臨界密度，即約 4×10^{-30} g/cc，則宇宙的膨脹終會被扭轉，以至變成宇宙收縮，或稱**大塌縮 (The Big Crunch)**。所有物質和能量最終將被壓縮成密度極高的狀態，重返宇宙初生時之狀態。相反而言，若平均密度小於臨界密度，則宇宙膨脹速度雖然逐漸減慢，膨脹卻永不停止。所有星系最終變成宇宙中黑暗的孤島。開放與閉合宇宙之間的分界，就是平直宇宙。平均密度剛好等於臨界密度，而經過一段極長的時間後，膨脹的速度漸趨向零。

不過，這樣簡單的三分模式，卻未必適用於有真空力的宇宙。譬如說，即使宇宙密度大於臨界密度，若有很強的真空斥力，也可能阻止宇宙的塌縮。事實上，最新的資料顯示，我們的宇宙似乎是平直的，但宇宙的膨脹卻在加速[Gar98,Per98,Liv00]！

3.5 新發現與新問題

憑藉著新一代的精確測量儀器，天文學家近年在物理宇宙論得到很多突破性成果。

例如利用遙遠IA類超新星以量度速度與距離關係的工作，大大擴展了哈勃圖的範圍。哈勃當年發現宇宙膨脹的觀測，只包括七百萬光年內的範圍。今天的哈勃圖，卻延伸至二十億光年！我們因此而可以比較今天和二十億年前哈勃常數的數值。兩個獨立研究組於一九九八年分別發現宇宙膨脹的速度愈來愈快[Gar98,Per98,Liv00]！這意味著確有真空斥力的存在。不過科學家目前對這神祕的力瞭解極少。對真空斥力的研究才剛起步，而它對物理及宇宙論將有深遠的影響。

人類自古都主要通過電磁波譜中可見光的一小部份來觀測宇宙。近年來，科學家不但大大加強了可見光及無線電波望遠鏡的精準度，亦大量發展其他波段的望遠鏡。例如，美國科學家以氣球環繞南極上空觀測宇宙微波背景[Ber00]，從而得知時空是平直的。所以，宇宙所有物質的密度加起來很接近臨界密度。這結果與暴漲宇宙論(inflationary universe)[Gut81,Gut00,Lin90]的預測相符，支持著宇宙在大爆炸之前經過一個暴漲階段的猜想。又例如，美國太空總署於一九九九年送上太空的陳德拉X光望遠鏡(Chandra X-ray Telescope)，已送回很多新的資料。藉著這類資料，科學家現在知道恆星只佔宇宙質量約二百份之一，在星際的熱氣體質量為恆星的九倍，而二者加起來，都只佔總質量的一百份之五。換言之，宇宙有百份之九十五的物質，是我們用光學望遠鏡看不見的。這些包括行星、黑暗星雲、以及可能尚未發現的物質等。科學家把它們統稱為**黑暗物質 (dark matter)** [Pee93,Rio91,Sci93,Smi36,Zwi33]。我們只靠著黑暗物質的引力對星系自旋及星系團運動構成的影響而推算出它們的質量。我們仍然不知道究竟有幾多種黑暗物質。最近發現**中微子(neutrinos)**可能有微小的質量，若然屬實，則中微子亦為黑暗物質之一種[Pee93,Rio91,Sci93]。科學家正努力探尋其他未知的黑暗物質。

科學的進程，不斷在重複著新技術 - 新發現 - 新問題的循環，而每一循環之後回望，都驚覺

人類無知！物理宇宙論於二十世紀有突破性的進展。觀測上有哈勃的兩個重大發現 - 島宇宙及宇宙膨脹，理論上有愛因斯坦的相對論，揭示宇宙中時空與質能之互動。至二十世紀末，新發現湧現。原來宇宙大部份的物質，我們不知是何物；原來時空有斥力，以至宇宙膨脹愈來愈快。而我們明白的、知道的、竟是那麼少！但這正是科學研究樂趣之一。宇宙有無盡的精采，等待我們去探索！

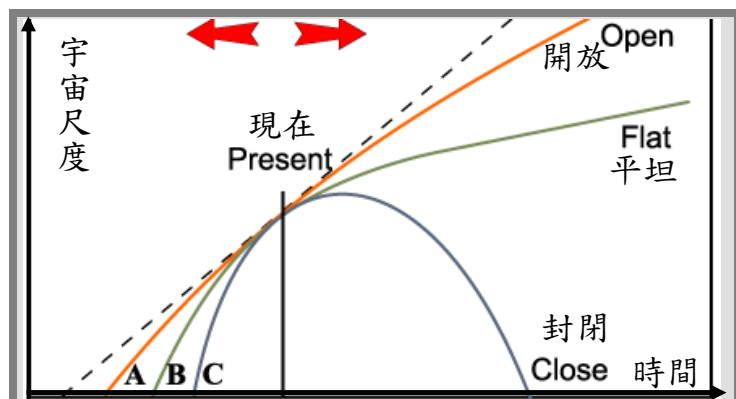


圖3-11 宇宙尺度隨時間演化的示意圖。一個開放的宇宙無止境地膨脹 (A)，但一個封閉的宇宙 (C) 最後卻會經歷一次巨大的塌縮，而平坦的宇宙 (B) 是這兩種宇宙的交界。注意使用不同的宇宙模型會估計出不同的宇宙年齡。

參考書目

- [Alp48] R. A. Alpher, H. A. Bethe, and G. Gamow, *Phys. Rev.* **73**, 803 (1948).
- [Ben96] C. L. Bennett *et al.*, *ApJ. Letts.* **464**, L1 (1996).
- [Ber00] P. de Bernardis *et al.*, *Nature* **404**, 955 (2000).
- [Bra93] R. S. Brashear, D. E. Osterbrock, and J. A. Gwinn, *Scientific American*, **269**, No. 1, July 1993.
- [Bur63] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, and F. Hoyle, *Ap. J.* **138**, 873 (1963).
- [Gar98] P. M. Garnavich *et al.*, *Astrophys.J.* 493 (1998) L53-57.
- [Gut81] A. H. Guth, *Phys. Rev. D* **23**, 347 (1981).
- [Gut00] A. H. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for A New Theory of Cosmic Origins* (Addison Wesley, New York, 2000).
- [Haw88] S. Hawking, *A Brief History of Time* (Bantam Books, Toronto, 1988).
- [Haw98] J. F. Hawley and K. A. Holcomb, *Foundations of modern cosmology* (Oxford, Oxford, 1998).
- [Hoy48] F. Hoyle, *M.N.R.A.S.* **108**, 372 (1948).
- [Hub29] E. Hubble, *Proc. N.A.S.* **15**, 168 (1929).
- [Ker96] P. J. Kernan and S. Sarkar, *Phys. Rev. D* **54**, R3681 (1996).
- [Kol90] E. W. Kolb and M. S. Turner, *The Early Universe* (Addison-Wesley, Reading, 1990).
- [Lid99] A. Liddle, *An introduction to modern cosmology* (Wiley, New York, 1999).
- [Lin90] A. Linde, *Particle Physics and Inflationary Cosmology* (Harwood, London, 1990).
- [Lin96] C. H. Lineweaver *et al.*, *ApJ.* **470**, 38 (1996).
- [Liv00] M. Livio, *The Accelerating Universe: Infinite Expansion, the Cosmological Constant, and the Beauty of the Cosmos* (Wiley, New York, 2000).
- [Mis73] C. W. Misner, K. S. Thorne, and J. A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973).
- [Pee93] P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, 1993).
- [Pen65] A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Ap. J.* **142**, 419 (1965).
- [Per98] S. Perlmutter *et al.*, *Nature*, 1 January 1998.
- [Rio91] M. Riordan and D. N. Schramm, *The shadows of creation: dark matter and the structure of the universe* (Freeman, New York, 1991).
- [Roo97] Matts Roos, *Introduction to Cosmology* (Wiley, Chichester, 1997).
- [Sar96] S. Sarkar, *Rep. Prog. Phys.* **59**, 1493 (1996).
- [Sch91] D. N. Schramm, *Physica Scripta* **T36**, 22 (1991).
- [Sci93] D. W. Sciama, *Modern cosmology and the dark matter problem* (Cambridge, Cambridge, 1993).
- [Sil89] J. Silk, *The Big Bang* (Freeman, New York, 1989).
- [Sil97] J. Silk, *A short history of the universe* (Scientific American Library, New York, 1997).
- [Smi36] S. Smith, *Ap. J.* **83**, 23 (1936).
- [Van90] E. Vangioni-Flam *et al.*, eds. *Astrophysical Ages and Dating Methods*, Gif-sur-Yvette, France: Editions Frontieres, 1990.
- [Wei72] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology* (Wiley, New York, 1972).
- [Wei88] S. Weinberg, *The First Three Minutes* (Basic Books, New York, 1988).
- [Zwi33] F. Zwicky, *Helv. Phys. Acta* **6**, 110 (1933).