

宏轟？穩態？

宇宙起源的大爭論**

陳天機 王永雄 彭金滿*

香港中文大學

一、大問題，大爭論

我們的宇宙有沒有起源？現在的宇宙是怎樣的？將來的宇宙又會怎樣演變呢？

宏轟理論（The Big Bang Theory）認為宇宙源自太初突發的膨脹，密度日漸低降。穩態理論（The Steady-State Theory）也認為宇宙膨脹，但氫原子到處悄然介入，平均密度得以維持，宇宙自古如此，沒有（可以偵知的）起源。爭論自1948年開始，延續了近三十年，產生了兩項諾貝爾獎，以宏轟理論全勝告終。

難以想像的是，「宇宙」這最大的題目竟然會是科學家研究的對象，竟然得到今天公認的細節答案，且倘若沒有這轟天動地、劍拔弩

* 陳天機，香港中文大學大學通識教育部榮休講座教授。
王永雄，香港中文大學大學通識教育部通識教育基礎課程副主任。
彭金滿，香港中文大學物理系導師。

** 部分摘自陳天機（2006）。〈最大的大自然〉。載於陳天機（著），《大自然與文化》（頁3-28）。香港：中文大學出版社。討論大爭論最完整的書相信是Kragh, H. (1996). *Cosmology and controversy: The historical and development of two theories of the universe*. NJ: Princeton University Press; Singh, S. (2004). *Big Bang: The origin of the universe*. New York: Fourth Estate。它們也是通俗闡述宇宙起源的暢銷書。

張的論爭，答案肯定會姍姍來遲，甚或遙遙無期。這三十年的論爭也提供了罕有的機會，讓我們看到理論與技術的交錯發展，潮流取向的消長，更讓我們看到科學家和科學團體人性的一面。「前事不忘，後事之師」，有不少地方值得參考，作為殷鑒。

二、科學宇宙論的前奏

1905年，愛因斯坦（A. Einstein）提出（狹義）相對論，認為在宇宙中光速最大，任何相對速度都不可能超過光速。1915年，他更提出廣義相對論，認為重力扭曲了時空。1919年，他自然地應用相對論，將整個宇宙作為研究的物件，但初步結果使他大吃一驚——宇宙間所有物質不住地互相拉近，整個宇宙最終可能自動崩潰。愛因斯坦當時想像宇宙應該是靜態的，因此他在方程式裏插入一個名為「宇宙常數」（cosmological constant）的東西，代表一種斥力，讓所有物質互相排斥，使宇宙達到一個靜態的平衡（Singh, 2004, pp. 153–160）。從今天的眼光來看，愛因斯坦的「宇宙常數」就像上古時托勒密（Claudius Ptolemy）的周轉圓一樣，¹是「只此一次，下不為例」（*ad hoc*）的，也是一廂情願信仰靜態宇宙的表現。

1922年，弗里德曼（A. A. Friedman）修正了愛因斯坦理論的一個錯誤，²指出愛因斯坦的宇宙其實可以不住收縮，也可以不住膨脹。比利時神父勒梅特（Father Georges-Henri Lemaître）³在1927年提出，我們的宇宙從最早的「太初原子」（primeval atom）開始，正在不住膨脹。⁴

1 托勒密（約85–165），古羅馬希臘裔天文學家。

2 弗里德曼（1888–1925），蘇聯物理學家、氣象學家。愛因斯坦將一個方程式兩邊用除法消掉一個數，但這數可能是0。

3 勒梅特（1894–1966）。

4 他有時也用「宇宙卵」（cosmic egg），有點中國傳說中「盤古開天闢地」的味道。

勒梅特是一位兼顧科學、宗教的奇才。他與天文學界接觸緊密，顯然得到啟發（見第三節），在1927年，勒梅特早已從自己的「太初原子」理論推出了兩年後震撼天文學界的「哈勃定律」（Hubble's law），但自1933年後在宇宙論研究方面便沒有作進一步的貢獻。這位淡泊名利的君子後來也備受榮寵，做了教宗科學院的院長（1960–1966）（Kragh, 1996, pp. 58–59）。⁵

三、宇宙膨脹的觀測證據

（一）光學杜普勒效應（Doppler effect）

天文學家利用光譜學（spectroscopy）可以推論出星體與地球的相對速度。假如我們知道某一條（地面）光譜線的實際波長 λ ，而觀察到星體放出的同一條光譜線的波長卻是不同的 λ' ，則星體與地球的相對速度是：

$$v = c(\lambda' - \lambda) / \lambda, c = \text{光速}$$

$v > 0$ ：星體離開我們（星體光譜有效波長增大：俗稱「紅移」）

$v < 0$ ：星體趨近我們（星體光譜有效波長縮短：俗稱「藍移」）⁶

這現象叫做「杜普勒效應」。⁷

5 教廷科學研究院（Pontifical Academy of Sciences）是羅馬天主教廷轄下的科學院。

6 嚴格來說，用「紅移」的字眼代表「離棄」，只應限於波長低於「紅光」的光；用「藍移」的字眼代表「趨近」，只應限於波長大於「藍光」的光。

7 「杜普勒效應」發現者是杜普勒（J. C. A. Doppler, 1803–1853），他是一名奧地利物理學家。杜普勒所發現的是聲波效應〔他是火車的常客，發現火車經過時汽笛聲音由高（頻率高，波長小）變低（頻率低，波長大）〕。在杜普勒的聲波公式裏， c 是聲音的速度。光波通常遵守同一公式，只需將光速代入 c ；但如光源速度 v 接近 c ，則應根據相對論改為 $v = c [(\lambda'/\lambda)^2 - 1] / [(\lambda'/\lambda)^2 + 1] \approx c [(\lambda' - \lambda) / \lambda] [1 - 1/2(\lambda' - \lambda) / \lambda]$ 。詳情可參考Wikipedia (2009). *Relativistic Doppler shift*. From http://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_Doppler_effect.

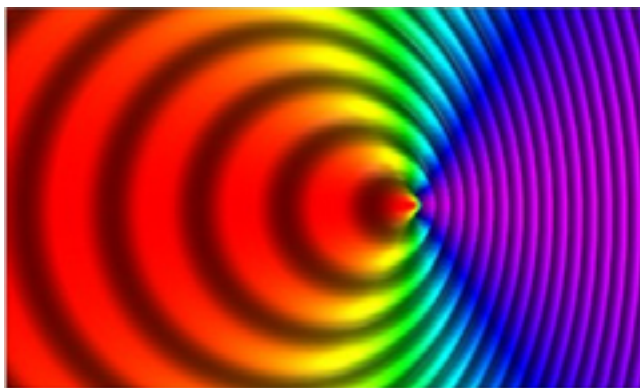


圖3-1 以 $0.7c$ 速度向右移動的光源引起的杜普勒效應。
光源放的綠光，在圖左的觀察者看出來卻是紅色的。⁸

(二) 史來弗 (V. M. Slipher)⁹與哈勃定律

最早研究星系光譜的天文學家是史來弗。1912年，他發現仙女座大星系M31顯出藍移，但這譜線的藍移原來是例外。1915年，他已得到15個星系的光譜，其中顯出紅移的竟有12個。1925年，他取得45個星系的光譜，其中41個顯出紅移，看來都在離開我們。

1929年，哈勃 (E. P. Hubble)¹⁰將星體的紅移和已知的距離放在一起，公佈了哈勃定律：

$v = H_0 d$ ，星系離地球的距離 (d) 與星系離開地球的速度 (v) 成正比。

定律裏的比率 H_0 現在叫做哈勃常數 (Hubble constant)。

⁸ 詳情可參考注7。

⁹ 史來弗 (1875–1969)，美國亞利桑那州洛威爾天文台 (Lowell Observatory) 台長。詳情可參考Wikipedia. (2009). *Vesto Slipher*. From http://en.wikipedia.org/wiki/Vesto_Slipher.

¹⁰ 哈勃 (1889–1953)，美國著名天文學家。

哈勃並不是最早提出正比定律的人。遠在1923年，德國天文學家維茨（C. Wirtz）根據史來弗的資料，他假設所有有關的星系都是大小相同，已提出了正比定律的關係。¹¹上節也講過，在1927年，勒梅特也從他的宇宙理論推出正比定律。

哈勃融會了「紅移」數據與天文學公認的觀測距離。¹²他當時所掌握的數據只限於近距離（ ≤ 6.52 百萬光年）的星系，正比定律只是斗膽的猜測，而且這些星系在他的速度／距離圖上分佈散落，並不太依循直線。但後來他和休瑪遜（M. L. Humason）¹³在1931年公佈的數據包括遠達97.8百萬光年的星系，直線關係便非常清晰。

利用最近的數據推算出來的哈勃常數數值是：¹⁴

$$H_0 = 21.7 \pm 0.5(\text{km/s})/\text{百萬光年}。$$

根據哈勃定律，大星系幾乎都在避開我們：距離我們愈遠，走得愈快。離地球10億（ 10^9 ）光年的星系，拋離地球的速度是每秒鐘21,700公里。

我們是否這樣面目可憎，引致幾乎所有星系都要「避之則吉」呢？非也！它們根本不知道我們的存在。惟一可能的結論是：整個宇宙正在膨脹！讓我們想像時光倒流。假如哈勃常數大致不變的話，以往有一天，整個可見宇宙的物質都集中在一點上，這是乾坤巨爆理論的一個論證。

11 維茨（1876–1939），德國天文學家；參見Webb, S. (pp. 240–241).

12 1908年，天文學家勒維特（H. S. Leavitt）發現從「造父變星」（Cepheid variables）的亮度（brightness）的變化週期可以算出它的平均光度（luminosity），與它的亮度比較，便可以推出變星的距離。就此可以量出星系的距離。

13 休瑪遜（1891–1972）。這位傳奇天文學家只受過中學教育，當初只是一位送貨上美國威爾遜山天文台的驛夫。

14 詳情參見Hinshaw, G. F.

(三) 數字遊戲

假設星系的遠離速度 v 不因時而變，根據哈勃定律，從它開始離開我們直到遠離我們 d 所需的時間是 $d/v = 1/H_0$ 。

根據哈勃定律，遠離速度 v 達到光速（ $c \approx 300,000$ 公里/秒）的星體，距離地球 $d = 13.68 \times 10^9$ 光年（136.8億光年），這是「可見宇宙」的半徑。半徑外的星體我們根本無法觀測。

$1/H_0$ 的單位可以簡化為「年」：

$$1/H_0 = 13.772 \times 10^9 \text{年} = 137.72 \text{億年}$$

這也是宇宙歲數相當可靠的估計。¹⁵

四、二次大戰後的科學界

(一) 理論

二次大戰後科學界普遍接受了相對論、哈勃的宇宙膨脹定律和基礎量子力學。科學界也接受了早期的粒子理論，常態的粒子包括：

光子（ γ ）、電子（ e 或 e^- ）、正子（ e^+ ）、質子（ p 或 p^+ ）、中子（ n ）。

後二者通稱核子（nucleon），是組成原子核的原料。¹⁶中子不帶電荷（呈中性）；電子帶負電荷；正子和質子都帶同樣的正電荷：質子的電荷 = 正子的電荷 = -（電子的電荷）。

元素的原子核由質子與中子組成。重要的數字是：

¹⁵ 2003年美國NASA的人造衛星WMAP觀測所得宇宙年齡是 $(13.7 \pm 0.2) \times 10^9$ 年。

¹⁶ 質子質量 = 1,836 電子質量 = $(1/1.0014)$ 中子質量 = 1.6726×10^{-27} kg；正子質量 = 電子質量。

原子序 (atomic number) $\equiv Z =$ 原子核內質子的數目

原子本身呈中性，由原子核和核外足夠的電子組成：

原子核外的電子數 = 原子核裏的質子數 = 原子序 Z 。

另外一個重要的數字是：

質量數 (mass number) $\equiv A =$ 原子核內核子的數目 = 原子核內的
(質子數 + 中子數)。

通常原子核質量數 A 和原子序 Z 都寫在元素符號的左上角和左下角。例如 ${}^4_2\text{He}$ 代表質量數 $A = 4$ 、原子序 $Z = 2$ 的氦 (helium) 元素、氦原子或氦原子核。

(二) 技術的新水準

1948年，美國帕洛馬山 (Mount Palomar) 天文台的200吋望遠鏡開始運作，「可見光」的天文觀測技術已充分成熟，產生了前所未有的精確數據。

當時遠距的天文尺規和宇宙年齡的估計都帶有嚴重誤差。今天看來，遠距的星體應該比上世紀四十年代估計的距離遠兩倍（仙女座大星系的距離應該是254萬光年，不是1百萬光年）。更重要的是，宇宙的歲數應該是137億年，約略八倍於早期估計的18億年。¹⁷

1933年，在美國貝爾電話研究所 (Bell Telephone Laboratories) 贊斯基 (K. G. Jansky) 安裝的14.6米口徑無線電天線收到了銀河星系

17 18億年少於估計地球的歲數45億年，在宏轟初期被穩態派引為笑柄。

傳來的電磁波，這是電射天文學（radio astronomy）的開始。¹⁸二次大戰時雙方利用雷達探測敵方物理目標，戰後自然將探測目標轉移到發射電波的星體。英國、美國和澳洲很快都興建了強大的電射天文學望遠鏡。電射天文學產生了觀測天文學的革命，它開闢了觀測的新蹊徑，大大擴充了天文學家的「眼界」，所處理的電波多數以雷達技術所用的微波（波長約在30cm到1mm之間）為主。可見光會被星體間的塵雲吸收，微波卻大致能穿過無阻。微波訊號的擴大、整理，更是可見光不能企及。

科學家更利用太空技術，將觀察站從地面轉移到地球大氣層外的太空。1990年，哈勃太空望遠鏡升空，帶來了空前精確的星體彩色圖片。

（三）宇宙大爭論和六位主角人物

宇宙大爭論從1948年開始。科學家分成兩個壁壘，各有三位主角人物。

宏轟（Big Bang，簡稱BB）派認為宇宙出於高溫大爆炸，仍在不住膨脹，平均密度不住下降。這一派的主腦是俄國出生的美國物理學教授甘莫夫（G. Gamow）、¹⁹他的學生阿而復（R. A. Alpher），²⁰及後來加入的赫爾曼（R. Herman）。²¹

穩態（Steady-State，簡稱SS）派同樣認為無限的宇宙在不住膨脹，但氫原子悄然進入，恰好補償以光速離開的星體，使宇宙互古的平均密度與星體分佈都大致不變。穩態派的主要人物是一

18 贊斯基（1905–1950），美國貝爾電話公司（Bell Operating Companies）無線電工程師。

19 甘莫夫（1904–1968），曾於喬治華盛頓大學（The George Washington University）任物理學教授，後來轉到科羅拉多州立大學（Colorado State University）任教。

20 阿而復（1921–2007）。

21 赫爾曼（1914–1997），普林斯頓大學（Princeton University）物理學博士。他和阿而復兩位都進入了工業界，服務多年後又都回到大學任教授。

戰時在英國從事雷達研究的三位同事：班地（Sir H. Bondi）、²²戈德（T. Gold）²³和劍橋大學天文學教授霍伊爾（Sir F. Hoyle），²⁴霍伊爾是穩態派最雄辯的發言人。

五、較量

（一）第0個回合（1948年）：三字母經

天地為爐兮，造化為工；陰陽為炭兮，萬物為銅。

——（漢）賈誼《鵬鳥賦》

遠在1948年，甘莫夫、阿而復和赫爾曼已經提出了劃時代的宏轟理論，首次採用核子物理學的新角度來討論宇宙初期低質量元素的合成。

這不能算是大爭論的交鋒，因為他們當時可能根本不知道有打對台鼓的穩態理論。我們且當它是對壘的第0個回合罷。

阿而復在甘莫夫指導下完成了博士論文，預定聯名發表。但甘莫夫覺得文章仍有不妥之處：兩位作者的名字合念起來不夠順口。愛開玩笑的甘莫夫在中間嵌上了物理學家貝特（H. Bethe）的名字²⁵，好讓這討論宇宙起源的文章的作者名字Alpher, Bethe, Gamow讀起來活像希臘文開頭的三個字母 α, β, γ （alpha, beta, gamma）。這部探討宇宙創始的經典之作——《化學元素的起源》——在1948年4月面世，從此便被昵稱為「 $\alpha\beta\gamma$ 理論」（Alpher, Bethe, & Gamow, 1948, pp. 803–804）。

22 班地（1919–2005），奧地利出生的英國公民，戰後歷任英國政府科學官員。

23 戈德（1920–2004），奧地利出生，1959年起在美國康奈爾大學（Cornell University）任教授至退休。

24 霍伊爾（1915–2001），劍橋大學天文學教授。

25 他名字裏的“h”字母是不發音的。

他們認為太初時宇宙突然爆炸，²⁶無論方向的定義是怎樣，宇宙的上下、左右、前後都在急速膨脹。這爆炸並沒有「排山倒海，驚天動地」（當時還未有山可排，海可倒，天可驚，地可動）；有的是高熱（在年齡= 10^{-43} 秒時，溫度= 10^{32} K）。²⁷

$\alpha\beta\gamma$ 理論說，宇宙在大爆炸初期，只有不帶電荷的中子，一部分中子蛻變出帶正電荷的質子（ p ，即氫原子核）和帶負電荷的電子（ e ）（Weinberg, 1993, p. 124）。質子逐步接受中子或其他質子，間或分裂，形成低質量元素的原子核。²⁸這時宇宙的年齡只有區區幾分鐘（宇宙的溫度早已從 10^{-43} 秒時的 10^{32} °C急降到 10^9 °C了）。

宇宙愈變愈大，溫度繼續下降。帶有負電荷的電子，自然地繞著帶正電荷的原子核運行，形成中性的原子，這工作要再花三十八萬年左右才能完成。阿而復解了二百多條微分方程式，成功地詮釋了低質量元素（氫的三種同位素： ^1_1H , ^2_1H , ^3_1H ；氦的兩種同位素： ^3_2He , ^4_2He ）的形成，以及原子數量的相互比例。

甘莫夫不久更在英國的《自然》（*Nature*）雜誌發表文章。阿而復和赫爾曼在同一刊物增加修正和詮釋，竟然預料了十多年後的微波天文觀測（Gamow, 1948, pp. 680–682; Alpher & Herman, 1948, pp. 774–775）（見「第3個回合：（1965年）『背景輻射』的背景」一節）。

我們給第0個回合的評語是：甘莫夫、阿而復和赫爾曼遠在1948年竟然寫出了壯麗的「未完成的交響樂」。他們「開天」成功了，惜乎未能「闢地」：他們的理論無法解釋中、重量元素的形成。中國傳說中太初時盤古舞動巨斧，開天闢地，姑勿論巨斧從何而來，「闢地」所需要的，會不會是另外一把板斧呢？

26 「技術的新水準」一節講過，在1948年，宇宙的年齡被誤認為18億年。

27 本文括弧中所用的是新數值，與半世紀前的數值很有出入。

28 氫，重氫（deuterium, D或 ^2H ）、氦（helium, He）、鋰（lithium, Li）、微量的鈹（beryllium, Be）和硼（boron, B）。高質量原子核的產生見「第一個回合（1953–67年）：霍伊爾策劃的實驗」一節。

（二）第0.5個回合（1950年代）：霍伊爾演說，聽眾動容

穩態理論初時只限於三位主角的相互討論。他們看過一齣電影，²⁹電影裏第一幕與結局竟然完全相同，看來中間的情節只為「回到開端」埋下伏機（Kragh, 1996, p.173–174; Singh, 2004, p.343–345）！戈德最先得得到啟示，並於某天下午向班地和霍伊爾提出了自己的構思。起初他們並不接受，更揚言在晚餐前便會想出反駁的理據。但他們不但無法反對，更發現戈德的構思符合當時的天文觀察，三個人於是合力建立了穩態宇宙的理論。

理論到1948年才現身在科學書刊，在1949年逐漸受人注意（Bondi & Gold, 1948; Hoyle, 1948）。英國廣播公司（British Broadcast Corporation, 簡稱BBC）第三台³⁰邀請霍伊爾教授作一套為期五週、每週45分鐘關於宇宙論的演講——「萬物的本質」（The Nature of Things），大受歡迎。演講後來更在擁有十倍聽眾的「家庭服務節目」（Home Service Programme）重播，講詞印成小書，半年內賣了六萬本，後來又在《企鵝叢書》名下重印（Hoyle, 1950）。

霍伊爾在書的最後兩章裏主觀地發揮穩態宇宙理論，宣稱這是唯一合理的學說。他批判宏轟理論說：

就科學根據來說，這宏轟（Big Bang）是兩個假設中最難下咽的一個。因為它的過程不合理，不能用科學字眼來解釋。

有兩點在此值得一提。第一點，霍伊爾在廣播裏用“Big Bang”³¹這雙聲名詞來譏諷對方，不料弄巧成拙，Big Bang竟變成對方響噹噹的金字

29 這套電影的名字是《夜之亡者》（*Dead of Night*）。

30 第三台是BBC名下學術氣味最濃的一台，擁有聽眾30萬。

31 勉強譯為疊韻的「宏轟」；在此以前，甘莫夫的理论一般稱為「動力演化模型」（the dynamic evolving model）。

招牌，反過來說，穩態派始終沒有為自己發展出一個嘹亮動聽的口號（Singh, 2004, p. 352）。

第二點，霍伊爾固然認為宏轟不合理，別人同樣會認為「氫原子處處悄然進入」的過程不能用已知的科學定律來解釋。平心而論，宏轟宇宙的起源和穩態宇宙氫原子的進入，兩者都越過了當時公認科學的界限。

在1949年，雙方已經壁壘分明。雖然霍伊爾所用的武器不是「硬科學」的刀槍，我們可以說他的演講是大爭辯的第0.5個回合。他自己的雄辯在宣傳、推廣方面打贏了漂亮的一仗，引起了群眾對科學的好奇、嚮往，以及對穩態宇宙的認識、甚至信仰。

話說回頭，不少科學家認為穩態宇宙在英國較受歡迎，因為「維持全球權力平衡」多年來正是大英帝國的外交傳統。我們在這裏也順便討論一下這兩套理論與宗教的關係。許多人認為穩態宇宙更接近基督教教義，但天主教顯然認為宏轟解釋了《舊約》的〈創世紀〉。甘莫夫曾開玩笑地將宏轟文章寄給羅馬教皇，但甘莫夫本人沒有接受任何正式宗教；霍伊爾更在廣播裏公開了自己的反宗教立場。

我們給第0.5個回合的評語是：霍伊爾普及了尖端科學，功不可沒；但雄辯究竟應該勝於事實嗎？

（三）第1個回合（1953–67年）：霍伊爾策劃的實驗

在第0個回合，三字母經所描繪的逐步合成的工作無法闖過兩重大關：原來世上根本沒有 $A=5$ 或 $A=8$ 的穩定原子（Kragh, 1996, pp. 128–130）！³²穩態宇宙理論卻自然地供應了另外一種元素合成的環境。假

32 貝特在1939年早已指出這缺陷。

如重元素在星體熾熱高壓的內部產生，穩態宇宙派認為大自然總有辦法將它們重新循環到別的星體。

在那個非常尷尬的時候，甘莫夫教授在美國作巡迴公開演講（Singh, 2004, p. 399）。³³他回溯 $\alpha\beta\gamma$ 理論的出現、成功和不足之處，然後講了一個笑話：

上帝創造萬物。

祂命令：「質量數=1的原子，出現罷！」質量數=1的原子便頓然出現了；

「質量數=2的原子，出現罷！」質量數=2的原子便頓然出現了；

「質量數=3的原子，出現罷！」質量數=3的原子便頓然出現了；

「質量數=4的原子，出現罷！」質量數=4的原子便頓然出現了；

但質量數更大的原子怎麼辦呢？黔驢技窮的上帝於是命令，「霍伊爾教授，出現罷！」

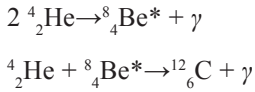
當時看來只有霍伊爾的理論能夠解釋高質量數原子的出現，但是甘莫夫教授其實根本不必自嘲認輸。宏轟理論也一樣容許重元素在星球內形成，然後散佈到星際空間。我們只須了解，恆星的死灰可以復燃，變成含有較重元素的下一代恆星。

穩態派主角霍伊爾早於1946年已提出星體內部元素合成的概念（Hoyle, 1946）。1952年，中立偏「穩」的薩彼得（E. E. Salpeter）³⁴指出兩顆 α 粒子（通常的氦原子核： ${}^4_2\text{He}$ ）可以合成極不穩定、質量

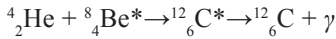
33 印度裔英國作家辛氏（Simon Lehna Singh, 1964–現在）也提及過甘莫夫這個笑話，當時陳天機是聽眾之一。

34 薩彼得（1924–2008），美國康奈爾大學物理學教授。

數 $A=8$ 的鈹原子核 ${}^8_4\text{Be}^*$ ，這原子核在 2.6×10^{-16} 秒內便會蛻變，但在高溫、高壓的恆星內部，總有一些能夠捕捉第三顆 α 粒子，產生碳原子核 ${}^{12}_6\text{C}$ (Salpeter, 1952)：³⁵



霍伊爾認為薩彼得理論中的第二部分應該改寫成激發的碳原子核(${}^{12}_6\text{C}^*$)，隨即放出 γ 射線，變成常態的碳原子核 ${}^{12}_6\text{C}$ ，³⁶即



「激發態」(excited state) 碳原子核 ${}^{12}_6\text{C}^*$ 的存在，令反應的速率增加幾個數量級，也是解釋氦、碳和氧的宇宙豐度 (cosmic abundance) 的關鍵。霍伊爾當時在加州理工學院 (California Institute of Technology) 訪問，向佛敖勒 (W. A. Fowler) 和威靈 (W. Whaling) 詳述了這一要點，³⁷後者的實驗結果驗證了激發態碳原子核的存在，並與霍伊爾的預測值幾乎完全吻合 (Fowler, 1983)。³⁸佛敖勒對天文物理作了巨大的貢獻，他量度了在低能量下多種核反應的效率，解釋了星體釋放能量的過程，為這方面元素產生的定量研究奠定堅實的基礎 (Unsöld & Baschek, 2002, p. 292)。

35 γ 代表電磁輻射，而「*」是「激發態」的標誌，意指處於激發態的原子核擁有過量的能。

36 質量數=12，原子序=6，激發的碳原子核。需要放光 (γ 射線) 才可以變成正常的 ${}^{12}_6\text{C}$ 原子核。

37 佛敖勒 (1911–1995)，美國核子天體物理學家，獲頒1983年諾貝爾物理學獎。威靈 (1923–現在)，1949年在加州理工學院任研究員 (research fellow)。

38 激發態碳原子核比常態的能量高7.654MeV。1MeV (百萬電子伏特) = 1.6×10^{-13} 焦耳。

在1957年，四位作者——布別治（G. Burbidge）夫婦、³⁹佛勃勒和霍伊爾合寫了經典之作 B^2FH （姓氏的縮寫），將中量、重量原子的產生與恆星的生命歷程緊密配合起來，奠定了恆星中心「核合成」（nucleosynthesis）理論（Burbidge, Burbidge, Fowler, & Hoyle, 1957）。同年，卡麥隆（A. G. W. Cameron）也獨立提出了恆星內部產生元素的理論。⁴⁰大部分恆星演化至最後階段，就會成為巨星。在發生超新星爆炸前，質量大的巨星核心已合成了各種中量、重量原子（見圖5-1），爆炸時的內爆（implosion）和震波（shock wave）更產生了質量數大於鐵的原子。

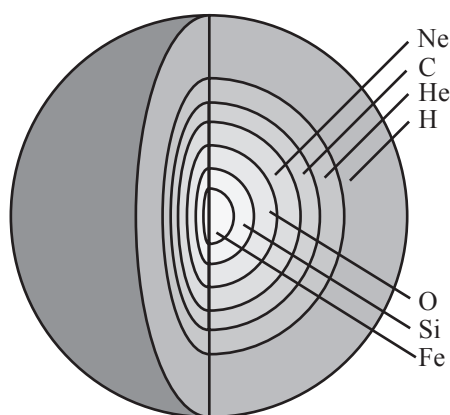


圖5-1 恆星內部元素產生示意圖（不按比例）

恆星誕生、放光、衰退、死亡，殘骸又成為新恆星的原料，迴圈不息。巨型恆星產生中量、重量原子，以「超新星」（supernova）的形式爆炸，更是新恆星中量、重量原子的來源。

39 布別治（1925–2010）及其太太Margaret Burbidge（1919–現在），同是英國出生的美國天體物理學家。

40 卡麥隆（1925–2005），加拿大天文物理學家。Cameron, A. G. W. (1957). "Nuclear reactions in stars and nucleogenesis," *The Astronomical Society of the Pacific*, 69 (408), 201–222.

論戰的第一個正式回合是由穩態派發起的。事實上，起初佛敖勒對霍伊爾的實驗建議並不感興趣，後來才被霍伊爾說服完成這個實驗（Kragh, 1996, p. 299）。假使穩態派不認為恆星內部原子產生的實驗非做不可，這實驗便會拖後，甚至無限延擱。1983年，佛敖勒獲頒發諾貝爾物理學獎。同時，他也公開表揚霍伊爾不可磨滅的貢獻。

穩態派取得了好幾年的宣傳勝利。筆者之一⁴¹在1960年左右聽過霍伊爾的演講，很佩服他的分析、他的詞鋒。宏轟派當時卻韜光養晦，一言不發，沉默了十年，難道他們已經認輸了？

早在1953年，宏轟派三位主要人物已轉向其他工作：甘莫夫投入DNA的研究；阿而復成為通用電氣公司（General Electric，簡稱為“GE”，音譯為「奇異」）的研究員；赫爾曼加入通用汽車公司研究所（General Motors Research Laboratories）（Singh, 2004, p. 336）。穩態派則沾沾自喜。著名的索爾維會議（Solvay Congress）在1958年舉行，⁴²預定的題目是「宇宙的結構和演變」。宏轟派列席的只有「先知」勒梅特神父，他在會上重複了1933年的論據，了無新意。甘莫夫和阿而復竟然不在被邀參加之列。

但平心而論，第1個回合的結果只能說是穩態派「先勝後和」。原來穩態派發現的中、重量原子產生的理論—— B^2FH 的內容，全部可以一字不易，用來支援宏轟理論。甘莫夫自嘲的笑話講起霍伊爾教授的出現，原來霍伊爾不自覺地助了宏轟派一臂之力。

後來霍伊爾與其他人合著三篇文章，正式承認宏轟理論也可以在恆星內部產生中量和重量原子。他在與泰來（R. J. Tayler）合作的文章中也承認，宇宙中的氦元素不可能完全從恆星中產生（Hoyle &

41 陳天機。

42 由比利時化學工業家索爾維（E. Solvay）創立的國際物理學會議，每三年舉行一次。題目各有不同。

Taylor, 1964; Wagoner, Fowler, & Hoyle, 1966; Wagoner, Fowler, & Hoyle, 1967)。⁴³在那三篇文章中，兩篇的第一作者是物理學新秀華共納 (R. V. Wagoner)，他在1973年寫了一篇重要的文章，提出假如輕量原子只在恆星內部產生，相互比例便不符現實；若要符合現實，我們需要假設另外一個奇大、奇熱的環境。這正是宏轟理論所說的宇宙開始時的幾分鐘。穩態理論要產生這環境，卻需要全面性的修改 (Wagoner, 1973)。

(四) 第2個回合 (1961年)：古史今讀

愛因斯坦的宇宙理論採用了一個假設：我們的宇宙在構造上是大致均勻的。這假設現在叫做「宇宙原理」(the Cosmological Principle, 1933)。⁴⁴最簡單的講法是：

無論 (想像中) 觀察者在空間任何地點，宇宙看來必須是一樣的
(The world must appear the same to all observers, irrespective of
their positions) (Kragh, 1996, p. 92)。

在上古、中古時代，人們認為地球是唯一的宇宙中心，享受群星的拱衛。但科學後來說明，星空的旋轉只是坐標系統選擇下的假像；地球固然不是宇宙的中心，宇宙也未必有中心。宇宙原理正是這種思維的自然推論，使我們能夠將在地球觀察到的現象，推論到宇宙任何一處地方。其實在「史萊弗與哈勃定律」一節中，我們從哈勃定律推論到「宇宙膨脹」，已經暗中動用了宇宙原理。

43 泰來 (1929–1997)，英國天文學家。

44 比較準確，但書卷氣的講法是：On large spatial scales, the universe is homogeneous (均勻的) and isotropic (各向同性的)。

穩態理論派的主要支柱是更進一步的「完善宇宙原理」(the Perfect Cosmological Principle)，認為宇宙不但在空間上的構造大致均勻，且在時間上也大致不變。這看法迎合許多科學家的理想：穩態宇宙可能正是「善」和「美」的典範。但這典範果然是「真」的嗎？

仙女座大星系M31放出的光，要花整整254萬年才走到地球，更有不少星系的光走到地球要花整整十億年。我們看不到這些星系的現況，只能「憑弔」它們十億年前的「陳跡」。根據宇宙原理，同一時期宇宙的星系，到處、大致都是差不多的。因此看著遼遠星系現在供應我們眼簾的古跡，我們可以推想出過去整個宇宙的面貌了。

古跡既然是現況的前身，宏轟理論斷言它們與現況應該很有差異。但根據穩態理論的完善宇宙原理，上下、古今，都可以一概而論；這古跡與現況大致相同，不看也罷了。

劍橋大學教授賴爾(M. Ryle)是穩態理論的死對頭。⁴⁵1961年，他宣佈第3期「放射無線電的天體」[*The Third Cambridge Catalogue of Radio Sources (3C)*]分佈情況是「遠多、近少；遠強、近弱」，並不符合完善宇宙原理。穩態理論派初時反駁，認為賴爾的數據太少、過於粗糙，而且與澳洲電射天文學的數據很有出入，不足以得出斬釘截鐵的結論。但後來積聚的數據愈來愈多，愈來愈精確，而且資料的來源包括英國、美國和澳洲，「遠多、近少；遠強、近弱」的現實愈來愈鮮明。

更令穩態派頭痛的是絕對亮度幾百倍於普通星系的類星體(quasar)。它們的分佈狀況竟然是「遠有、近無」！從1962年開始，天文學家發現，從地球觀察，光度最強的類星體3C 273離地球24.4億

45 賴爾(1918-1984)是電射天文學先驅。他曾經認為50顆無線電天體「位在銀河星系」；戈德卻公開指出，它們其實離地球奇遠，而且每顆本身已自成星系。賴爾被迫認輸，但從此與穩態理論為敵。

光年。類星體離地球至少7.8億光年，最遠的達到130億光年，很可能是古時星系形成初期中心的巨黑洞。

第2個回合的結論是：宇宙星體的分佈並不均勻，古今有別。BB勝；班地因而宣告放棄穩態理論，但總的來說SS還未肯認輸。

（五）第3個回合（1965年）：「背景輻射」的背景

早在1948年，阿而復與赫爾曼合作，在英國的權威雜誌《自然》上討論膨脹中的宇宙現狀，他們的結論是：宇宙現在的溫度大概是5 K (-268.15°C)。⁴⁶當宇宙年齡約是380,000歲，溫度降至3,000 K時，原子核和電子結合成為中性原子。因此輻射得以自由地在宇宙中傳播。由於宇宙膨脹，輻射的波長也照應增加，按他們的估計，這些輻射相當於今天5 K的「黑體輻射」。所以，量度得這5 K「背景輻射」便是宏轟理論的重要證據，但宏轟派無法找到天文學家來量度這背景輻射。阿而復回憶當時道（Singh, 2004, p. 334）：

我們花了九牛二虎之力宣講這工作。但沒有人願意上釣；沒有人說這可以量出來。⁴⁷

1964年彭齊亞斯（A. Penzias）和威爾遜（R. Wilson）完成了一部強力的微波望遠鏡。⁴⁸他們向太空深處瞭望，出乎意料地竟然探出微波輻射來。他們認為這輻射是由於儀器不潔引起的，但將望遠鏡清洗，倒出兩隻鴿子後，仍然到處看到微波輻射。他們不得不向物

46 K是「絕對溫度」（absolute temperature）的單位。 x K約等於 $(x - 273.15)$ °C。

47 原文為“*We expended a hell of a lot of energy giving talks about the work. Nobody bit; nobody said it could be measured*”。

48 彭齊亞斯（1933–現在）和威爾遜（1936–現在）都是美國貝爾電話實驗室電射天文學家。

理學家狄克（R. H. Dicke）求助。⁴⁹狄克立即告訴他們，這神秘的輻射正是自己夢寐以求、尋找了好幾年的宇宙微波背景（Cosmological Microwave Background，簡稱CMB）。

原來熱的物體會自然放光，光最強的部分，波長可以顯示物體的溫度，較低溫的物體放出的波長較大。微波也是光的一種，波長約數厘米。宇宙到處放出的微波相當於絕對溫度約3.5 K（最新值：2.725 K）的物體所放出的輻射，這正是阿而復和赫爾曼預測的宇宙背景輻射。⁵⁰但穩態宇宙理論不容許有認得出的「過去」，若不作大規模的修改，便無法解釋這輻射。

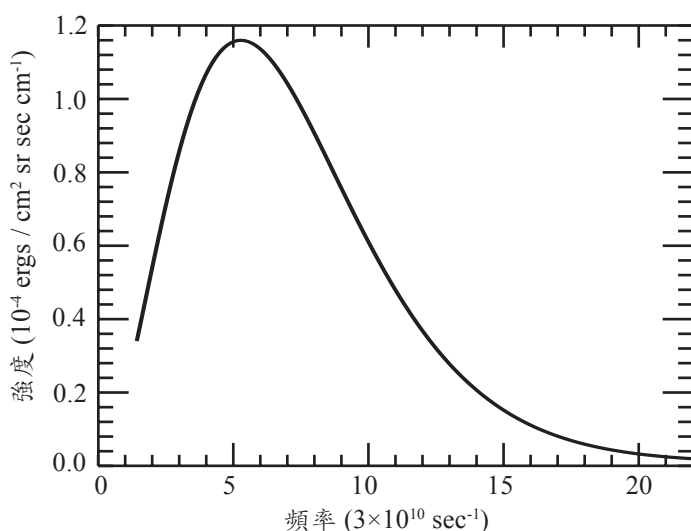


圖5-2 由COBE衛星測量所得的宇宙微波背景輻射頻譜⁵¹

彭齊亞斯和威爾遜榮獲1978年的諾貝爾獎。其實同在美國貝爾電話實驗室的歐姆（E. A. Ohm）早在1961年已找出這微波輻射了。阿而

49 狄克（1916–1997）是美國實驗物理學家，普林斯頓大學教授。

50 阿而復和赫爾曼所用的宇宙模型較為粗疏，因此他們對宇宙微波背景輻射溫度的估值（5K）與真正值（2.725K）略有差異。這差異只牽涉模型的細節，完全不否定這個模型的基本假設及概念。

51 摘自http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Firas_spectrum.jpg，略有修改。

復和赫爾曼當時甚麼都拿不到，但他們的功績和遠見現在已得到物理學界的普遍承認。

無論如何，這背景輻射替宏轟理論取得決定性的勝利。多年的死敵——穩態理論——兵敗如山倒，從此一蹶不振、翻身無期。2000年，霍伊爾、布別治和拿爾力卡（J. V. Narlikar）⁵²出版了一本書，講述他們的半穩態理論（quasi-steady state model）（Hoyle, Burbidge, & Narlikar, 2000）；但他們被迫放棄了穩態理論裏最具有魅力的完善宇宙原理。

第3個回合的結論是：宇宙的確擁有太古時產生的微波背景輻射（1965年）。BB大勝，SS則潰不成軍。

六、事後孔明：宏轟的教訓

大爭論從1948年開始，到彭齊亞斯和威爾遜取得1978年諾貝爾物理學獎、獲得世界公認為止，足足持續了30年。我們可以扮事後孔明，汲取教訓。

（一）宏轟理論貢獻太多、為時過早，但經歷十年荒廢、後繼無人

宏轟理論當初旗開得勝，物理學耳目為之一新，但舉手支持者多，當真插手貢獻者少。不過，當然也有例外。符林（J. W. Follin, Jr.）加入了阿而復和赫爾曼的研究，在1953年合寫了一篇重要的論文（Alpher, Follin, & Herman, 1953）。著名理論物理學家如費米（E. Fermi）和維格納（E. P. Wigner）都花了好幾個月，仍然沒法超越 $A=5,8$ 兩重難關。⁵³更令人惋歎的是，宏轟理論在1953年之後，經

52 拿爾力卡（1938–現在）。

53 費米（1901–1954，獲1938年諾貝爾物理獎）與化學家土耳其維契（Anthony Turkevich）在芝加哥大學（University of Chicago）合作；維格納（1902–1995，獲1963年諾貝爾物理獎）在普林斯頓大學都嘗試超越 $A=5,8$ 的鴻溝，卻都失敗了。

歷了整整十年的荒廢，不但後繼無人，而且始作俑者也都移情別往：甘莫夫對DNA發生了興趣，阿而復和赫爾曼進入了工業研究機構，都已不能全力兼顧宏轟理論了。

（二）宏轟理論支持者墨守「逐步合成」成見

宏轟主角墨守成見，誤以為「逐步合成」是產生重原子核的唯一辦法，但既然攻關不遂，何不另闢蹊徑？會不會當事者那時未能掌握「恆星生命歷程」的認識？

（三）穩態理論簡潔、陣營鼎盛、聲勢浩大

穩態理論裏面的「完善宇宙原理」本身具有簡潔之美。穩態陣營更有霍伊爾的雄辯，和非常成功的 B^2FH 元素合成文章，一時聲勢浩大，有萬夫莫當之勢。而宏轟理論竟然沒有作出正面、有條理的反駁。

（四）幸虧「理據勝於雄辯」

幸虧「理據勝於雄辯」，後來理性的邏輯和科學觀察挽救了宏轟，同時葬送了穩態理論。參與這一系列新研究的根本沒有早期宏轟理論的主角，而是實驗電射天文學家和新出身的科學家〔例如華共納（R. V. Wagoner）〕，更有穩態派科學家（例如霍伊爾本人）。

（五）工作與獎賞

阿而復和赫爾曼1948年在知名的《自然》雜誌發表文章，最先提出「宇宙背景輻射」（Alpher & Herman, 1948）。但在1964年彭齊亞斯和威爾遜固然不知道這文章，物理界——包括狄克教授——也「貴人善忘」。在彭齊亞斯和威爾遜公佈「宇宙背景輻射」後，阿而復曾經與狄克交談，企圖討個公道，但很不得要領。倘使狄克肯助他一臂之

力，阿而復便不會被科學界繼續遺忘了。原來在這件事上，狄克跟阿而復、赫爾曼兩人曾經有些過節。狄克報導「宇宙背景輻射」的一篇文章因為沒有引用阿而復、赫爾曼在1948年的預測，曾被兩人否決。雖然未出版的科學文章的評審人是匿名的，但作者往往可以猜出評審人是誰。⁵⁴另一方面，溫伯格（S. Weinberg）⁵⁵卻指出他們從未正確預測背景輻射對應的溫度（Weinberg, 1993, pp. 124–125）。

當時的理論天文物理學界固然缺乏整理舊賬、察出端倪的「炒冷飯」人才，也沒有今天全球性的互聯網搜尋器，例如谷歌（Google），讓學者查詢過往文獻。阿而復和赫爾曼忍受了他們認為不公平的待遇十多年後，科學界終於公開承認兩位的劃時代貢獻，他們獲得了一連串的國際獎，只是與諾貝爾獎無緣。

霍伊爾也沒有得到諾貝爾獎。許多人認為單就他對元素合成理論的貢獻已值得這榮譽。他認為宇宙間碳的成份很高，而且所有生物都含碳，因此他想像含「激發態碳（ $^{12}_6\text{C}^*$ ）」的反應必然會成功。他因此預言碳原子的能階（energy level），竟然猜中了。顯然他用自己的計算，證明了薩彼得理論的可行性，說服了佛敖勒做關鍵的實驗，佛敖勒因而取得了諾貝爾獎。而且佛敖勒絕不含糊，一直都公開讚揚霍伊爾的貢獻。霍伊爾果然是一位偉大的科學家，那末他為甚麼拿不到諾貝爾獎呢？

1974年，休維殊（A. Hewish）以脈衝星（pulsar）研究取得了諾貝爾物理獎。⁵⁶霍伊爾那時公開宣稱諾貝爾委員會張冠李戴，應得獎的其實是休維殊的女研究生貝爾（J. Bell），有人說他因此冒犯了諾貝

54 D' Agnese, J. (1999, July). The last Big Bang man left standing—physicist Ralph Alpher devised Big Bang Theory of universe. *Discover* (online version); 達德利天文台（Dudley Observatory）收藏了三卷訪問狄克的錄音帶及文字記錄，他在訪問中曾評論阿而復、甘莫夫、赫爾曼三人。

55 溫伯格（1933–現在），美國物理學家，獲得1979年諾貝爾物理學獎。

56 休維殊（1924–現在），英國劍橋大學電射天文學教授。

爾委員會（“Nobel”，2009）。霍伊爾喜歡大鳴大放，意氣用事，得罪他人在所不計；他仗義執言，為的卻未必是自己。其實戈德和霍伊爾（1968）最先指出脈衝星是急速旋轉的中子星，這話本身已經是「諾貝爾級」的貢獻了。

1972年，劍橋大學當局準備將他放在死對頭電射天文學家賴爾教授之下，他憤而公開辭職。辭職後他繼續不倦研究、創作，直到2001年去世為止。1974年，賴爾以電射天文學設計的貢獻，與休維殊同獲諾貝爾物理獎，但霍伊爾公私分明，對此並沒有任何異議。

七、加速的膨脹

兩組學者研究「Ia型超新星」的性質和它們在可見宇宙的分佈，⁵⁷在1998年發表驚人的成果。他們根據遙遠超新星的觀察亮度，發現宇宙不單在膨脹，而且膨脹速度正在增加！這就是說，在極遼遠的將來，我們現在看得到的億萬個星系將會超越「可見距離」，而點綴著黑夜的只有包括我們的銀河星系的「室女座系」超星系群。

2006年，率領以上兩個研究組的三位天文學家普密特（S. Perlmutter）、⁵⁸利斯（A. Riess）⁵⁹和施米茲（B. P. Schmidt）⁶⁰

57 天文學家按超新星的光譜（spectrum）性質來分成不同類型。Ia型超新星來自雙星系統，當中一顆白矮星不斷地從它的巨型伴星吸收物質，直至它的質量到達某個關鍵的極限時，白矮星便會塌縮，塌縮過程可以把剩下的碳和氧原子融合，產生巨大能量。超新星爆炸時會產生震波，而釋出的能量使亮度突然增加。

58 普密特（1959–現在），美國加州大學柏克萊分校（University of California, Berkeley）物理學教授和勞倫斯柏克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory）高級科學家，主持「超新星宇宙學計劃」（Supernov Cosmology Project）。

59 利斯（1969–現在），美國巴爾提摩太空望遠鏡研究所天文學家，約翰霍普金斯大學（The Johns Hopkins University）教授，「高紅移超新星搜尋團隊」（High-Z SN Search Team）要員。

60 施米茲（1967–現在），澳洲國立大學（Australian National University）教授，主持「高紅移超新星搜尋團隊」。

由於「發現宇宙膨脹的速度在增加，顯示即使沒有物質與任何輻射，空間的能量密度仍然大於零」，⁶¹榮獲邵逸夫天文學獎。「此發現將會革新我們對物理世界的瞭解，與對宇宙未來的預測。」⁶²

加速膨脹的通常解釋是宇宙「暗能量」（dark energy）的存在。近年的觀察指出，宇宙內可見物質只是宇宙內所有物質的一小部分，而宇宙內所有物質只是宇宙內所有「質能」的一小部分。⁶³根據美國太空總署的估計，宇宙只有4%是可見物質，23%是看不見、但受重力影響的「暗物質」（dark matter），而73%竟然是暗能量（Hinshaw, 2009）！

一個可能性很高的簡單解釋是由愛因斯坦提出但後來又收回的宇宙常數 Λ 。⁶⁴這常數可以寫成 $8\pi\rho$ ，其中 ρ 是一種隱蔽的暗能量的密度。這能量是宇宙構造整體的一部分，它的存在竟然與宇宙所含的物質沒有關係！假如這能量密度是不變的，在宇宙膨脹時，能量總量便不斷增加（“Dark”, 2009）。

八、總結

宇宙學過去半個世紀的大爭論，以宏轟取得全勝。發現宇宙加速膨脹後，宏轟理論如虎添翼，更將穩態理論的「完善宇宙原理」遠遠拋離。宇宙學研究的主力已轉移到對加速的解釋，以及背後暗能量的性質了。

但當時若沒有大爭論，很可能便沒有今日的突破。穩態學者對宏轟理論的貢獻，有目共睹，他們雖敗猶榮。

61 可參考邵逸夫獎網頁：<http://www.shawprize.org>。

62 同上注。

63 宇宙內由「物質」和「能量」兩部分組成，「物質」可透過 $E=mc^2$ 以能量的單位來表示，宇宙內所有「質能」就是指「所有物質+所有能量」。

64 見「科學宇宙論的前奏」一節。他說過這常數可能是他一生最大的錯誤。

宇宙學的歷史是曠古難逢的偉大偵探傳奇，也是人類睿智罕有的集體表現。它告訴我們：今天在小小地球上找出來的物理定律，竟然通行在遼遠的地方、廣闊無垠的空間、百多億年的過去、（也許）極長遠的將來。

附錄I. 宏轟與穩態宇宙爭論時間表

	宏轟理論 (The Big Bang Theory, BB)	穩態理論 (The Steady-State Theory, SS)
代表人物	甘莫夫 (G. Gamow) 阿而復 (R. Alpher) 赫爾曼 (R. Herman)	班地 (Sir H. Bondi) 戈德 (T. Gold) 霍伊爾 (Sir F. Hoyle)
理論重點	宇宙出於宏轟； 不住膨脹； 平均密度不住下降。	宇宙亙古大致不變 (完善宇宙原理)； 不住膨脹； 平均密度不變 (氫原子悄然進入)。
爭論過程	1948年： 輕量原子 ($M \leq 4$) 的產生。 BB勝。 惜「開天」後未能「闢地」。	1949年： 霍伊爾的BBC廣播演講， SS取得宣傳勝利。 1953–57年： 中、重量原子在星內產生。 SS先勝後和：難道BB宇宙沒有 星星嗎？

(續)	宏轟理論 (The Big Bang Theory, BB)	穩態理論 (The Steady-State Theory, SS)
<p>爭論過程</p>	<p>1961年： 觀察：宇宙星體的分佈，古今有別。BB勝。</p> <p>1965年： 宇宙微波背景輻射。BB大勝。</p> <p>1978年： 彭齊亞斯和威爾遜取得諾貝爾獎。宇宙微波背景輻射爭論塵埃落定。宏轟成為主流理論。</p>	<p>SS派不肯認輸，但班地退出了。</p> <p>(SS需要放棄「完善宇宙原理」方能解釋。)</p>

參考書目

中文參考書目

1. 陳天機 (2006)。《大自然與文化》。香港：香港中文大學出版社。

外文參考書目

1. Alpher, R. A., Bethe, H., & Gamow, G. (1948). The origin of the chemical elements. *Physical Review*, 73, 803–804.
2. Alpher, R. A., Follin, J. W., & Herman, R. C. (1953). Physical conditions in the initial stages of the expanding universe. *Physical Reviews*, 92 (6), 1347–1361.
3. Alpher, R. A., & Herman, R. C. (1948). Evolution of the universe. *Nature*, 162, 774–775.
4. Bondi, H., & Gold, T. (1948). The Steady-State theory of the expanding universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, 252–270.

5. Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the elements in stars. *Reviews of Modern Physics*, 29 (4), 547–650.
6. Cameron, A. G. W. (1957). “Nuclear reactions in stars and nucleogenesis,” *The Astronomical Society of the Pacific*, 69 (408), 201–222.
7. D' Agnese, J. (1999, July). The last Big Bang man left standing—physicist Ralph Alpher devised Big Bang Theory of universe. *Discover* (online version).
8. Fowler, W. A. (1983). Experimental and theoretical nuclear astrophysics; the quest for the origin of the elements. *Nobel Lecture*. Retrieved November 5, 2009, from http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1983/fowler-lecture.html.
9. Gamow, G. (1948). The evolution of the universe. *Nature*, 162, 680–682.
10. Hinshaw, G. F. (2008). *How fast is the universe expanding*. Retrieved November 18, 2009, from http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni/uni_101expand.html.
11. Hinshaw, G. F. (2009). *Five year results on the oldest light in the universe*. Retrieved November 13, 2009, from http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html.
12. Hoyle, F. (1946). The synthesis of the elements from hydrogen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 106, 343–383.
13. Hoyle, F. (1948). A new model for the expanding universe. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 108, 372–382.

14. Hoyle, F. (1950). *The nature of the universe*. Oxford: Blackwell.
15. Hoyle, F., & Tayler, R. J. (1964). The mystery of the cosmic helium abundance. *Nature*, 203 (4950), 1108–1110.
16. Hoyle, F., Burbidge, G., & Narlikar, J. V. (2000). *A different approach to cosmology: From a static universe through the Big Bang towards reality*. Cambridge: Cambridge University Press.
17. Kragh, H. (1996). *Cosmology and controversy: The historical and development of two theories of the universe*. NJ: Princeton University Press.
18. Salpeter, E. E. (1952). Nuclear reactions in stars without hydrogen. *Astrophysical Journal*, 115, 326–328.
19. Singh, S. (2004). *Big Bang: The origin of the universe*. New York: Fourth Estate.
20. Unsöld, A., & Baschek, B. (2002) *The New cosmos: An introduction to astronomy and astronomy*. New York: Springer.
21. Wagoner, R. V. (1973). Big Bang nucleosynthesis revised. *Astrophysical Journal*, 179, 343–360.
22. Wagoner, R. V., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1966). Nucleosynthesis in the early stages of an expanding universe. *Science*, 152 (3722), 677.
23. Wagoner, R. V., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1967). On the synthesis of elements at very high temperatures. *Astrophysical Journal*, 148, 3–49.
24. Webb, S. (1999). *Measuring the universe: The cosmological distance ladder*. London: Springer.
25. Weinberg, S. (1993). *The first three minutes: A modern view of the origin of the universe*. New York: Basic Books.

26. Wikipedia. (2009). *Relativistic Doppler shift*. Retrieved October 18, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_Doppler_effect.
27. Wikipedia. (2009). *Dark energy*. Retrieved October 21, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy.
28. Wikipedia. (2009). *Nobel prize controversial*. Retrieved November 4, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Nobel_Prize_controversies.
29. Wikipedia. (2009). *Vesto Slipher*. Retrieved September 21, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Vesto_Slipher.

建議閱讀書目

1. Alpher, R., & Herman, R. (2001). *Genesis of the Big Bang*. Oxford: Oxford University Press.
(兩位宏轟理論被遺忘的要角的回憶錄。)
2. Kragh, H. (1996). *Cosmology and controversy: The historical and development of two theories of the universe*. NJ: Princeton University Press.
(最完備、500頁的「大爭論史」。)
3. Mitton, S. (2005). *Conflict in the cosmos: Fred Hoyle's life in science*. Washington, D.C.: Joseph Henry Press.
(穩態理論發言人的翔實傳記。)
4. Silk, J. (1994). *A short history of the universe*. New York: Scientific American Library.
(圖文並茂的短冊。)
5. Singh, S. (2004). *Big Bang: The origin of the universe*. New York: Fourth Estate.
(最暢銷的科普著作。)

6. Weinberg, S. (1993). *The first three minutes: A modern view of the origin of the universe*. New York : Basic Books.

(理論物理學家的半普及科學演講。)

