

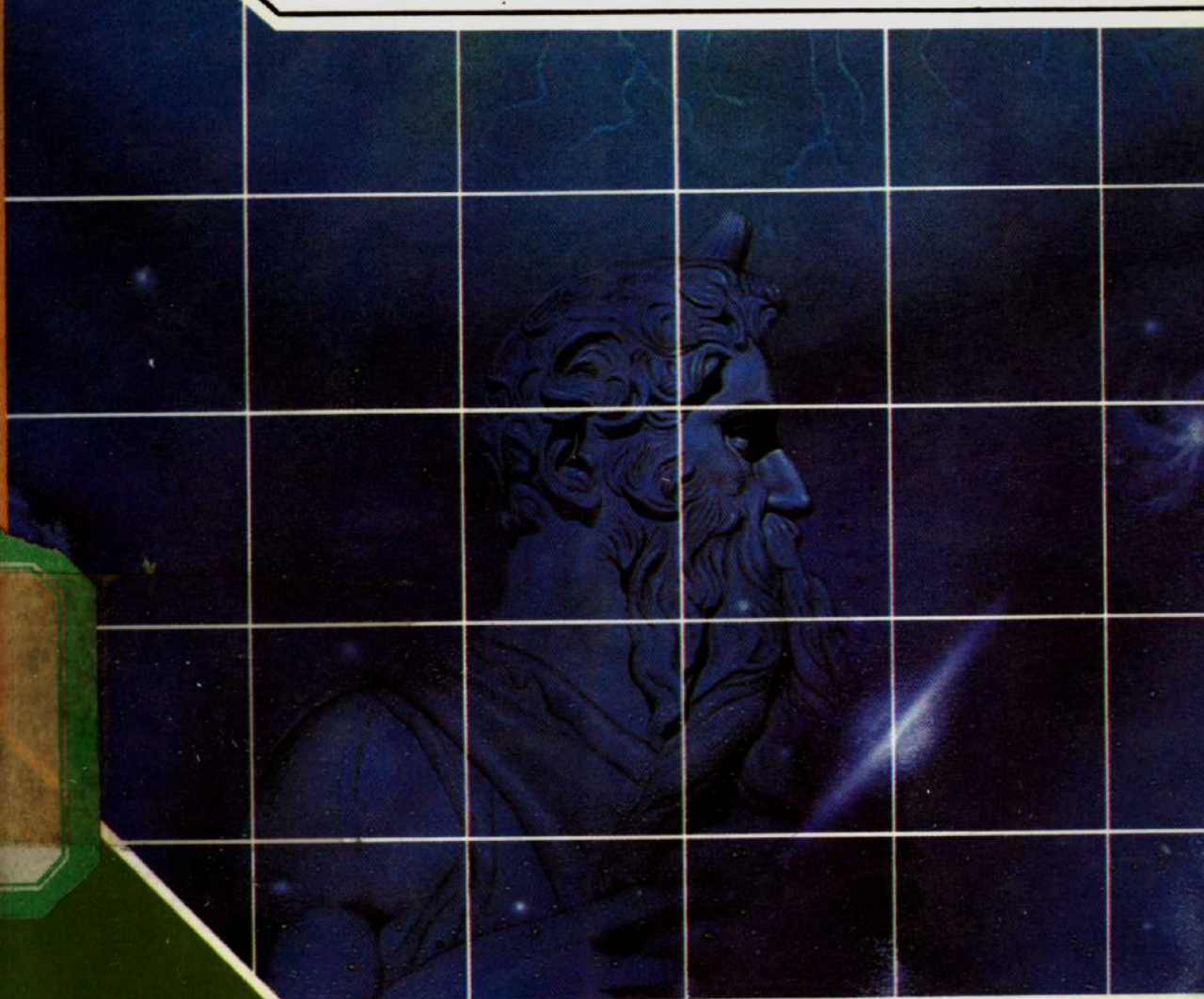
新世紀叢書

宇宙及物質是如何誕生的

宇宙的起源

譯者：曾煥華

審定者：周東川



銀禾文化事業有限公司



062

新世紀叢書

宇宙的起源

銀禾文化事業公司印行



新世紀

062

新世紀叢書

宇宙的起源

主 編：新世紀編輯小組

審定者：周東川

譯 者：曾煥華

出版者：銀禾文化事業有限公司

發行人：陳俊安

地 址：台北市和平東路2段96
巷3-1號

電 話：7005420·7005421

郵 撥：0736622-3

定 價：新台幣80元

新聞局登記證局版台業字第3292號

1986年4月初版

■版權所有·不准翻印■

目 錄

第一章	火團宇宙(大爆炸)論的確立	1
第二章	火團宇宙的構造及進化	13
第三章	銀河及銀河團的形成	27
第四章	在初期宇宙的元素之生成	51
第五章	在初期宇宙的重子生成	81
第六章	宇宙膨脹的開始 ——宇宙的特異點——	137
第七章	在初期宇宙的粒子生成 及其反作用效果	147

第一章

火團宇宙(大爆炸)論 的確立

1. 膨脹宇宙模型的發現 及其驗證

愛因斯坦在一九〇五年提出光的量子論（光量子說）及布朗運動（液體內粒子的不規則運動）的理論並且倡導特殊相對論，充分地發揮了他的天才。乍見之下，使我們對於時間、空間的概念矛盾的這個理論，是建立在對於羅倫茲變化的光速之不變性以及馬克士威的電磁場方程式之對等性（物理定律主要依據張量定律隨座標變換而變換的性質）上，如今已經成爲記述組成物質的基本粒子之「場」時不可缺少的理論。

其後十年之間，則埋頭研究重力的問題——即是，保留牛頓的萬有引力理論的優點，而欲變更它爲不與特殊相對論矛盾的形式。成爲特殊相對論之基礎的羅倫茲變換是結合慣性系與其他慣性系的座標變換，而愛因斯坦發覺了，在時間及空間被融合的四次元時空的一點的周圍（這叫做「局部的」），無法區別像太陽附近之重力場的「本質上的重力場」與在對慣性系具有加速度的系所產生的「外觀上的重力場」。把它加以精密化的，即是物理定律的形式不因任意的座標變化而變化的「一

般對等性原理」，及可以選擇任何重力場都在四次元時空的某一點消失的局部座標系的「等價原理」。除了這些原理之外，根據本質上的重力場存在的四次元時空為黎曼所主張的彎曲的時空這種認識建立的，就是一般相對論（一九一六年）。

根據這個理論，記述一般重力場所用的量為四次元時空的計量用張量 $g_{\mu\nu}$ 。即是，彼此僅相隔了微小距離的兩點間的四次元間隔 ds^2 可以用此 $g_{\mu\nu}$ 表示之。無論選取四次元時空的任何座標系， ds^2 都保持一定的值；但此與在三次元空間的距離間隔不同，其值可為零或負如圖 1.1 所示。若有重力場，則通常 $g_{\mu\nu}$ 會成為位置或時間的函數；而特別在沒有重力場亦即特殊相對論成立的世界則變的簡單，除了 g_{00} 等於 -1 、 g_{11} 及 g_{22} 及 g_{33} 等於 $+1$ 之外，其他的都等於零。若依等價原理，在黎曼的四次元時空內具有質量的物質粒子的運動是以具有時間性的（ $ds^2 < 0$ ）測地線表示（圖 1.1 中附箭頭的線），光子的運動則以光圓錐上（ $ds^2 = 0$ ）的測地線（零測地線）表示之。

又，計量用張量 $g_{\mu\nu}$ 所依據的方程式，即是愛因斯坦所導出之著名的重力場方程式。尤其對於像星際間沒有物質分布的領域而言，著名的是以對成球對稱時空的修瓦茲希特解；對於成軸對稱旋轉天體之旋轉的卡解及

4 宇宙的起源

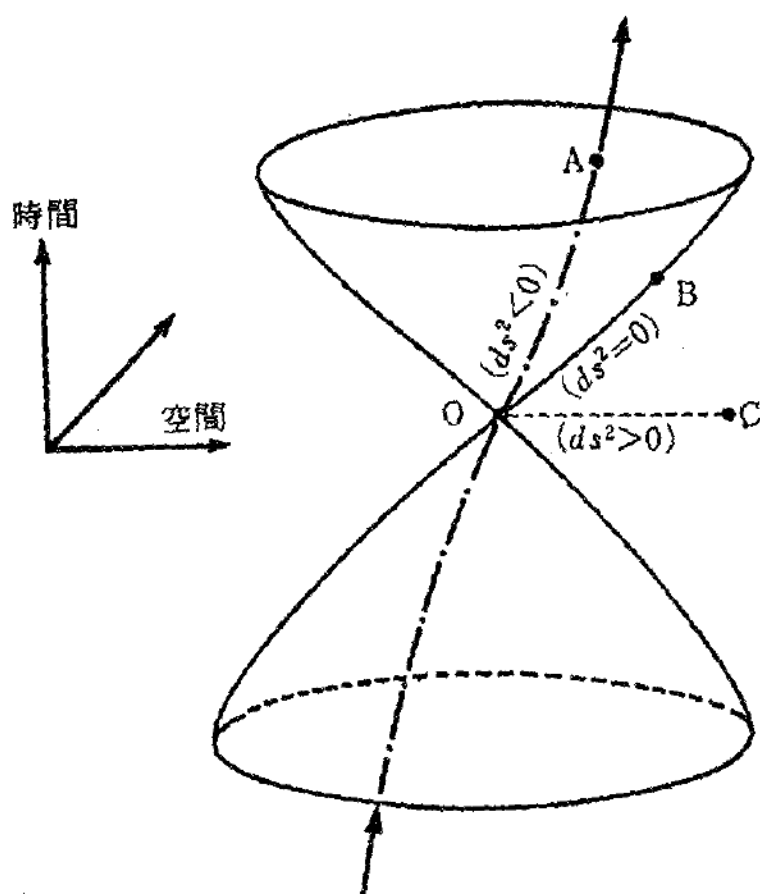


圖 1.1 在四次元時空內只相距微小距離的兩點 O 與 A、B、C 之間的四次元間隔。

$$\begin{aligned}
 ds^2 &< 0 \quad (O \text{ 與 } A : \text{時間上的}) \\
 ds^2 &= 0 \quad (O \text{ 與 } B : \text{在光圓錐上}) \\
 ds^2 &> 0 \quad (O \text{ 與 } C : \text{空間上的})
 \end{aligned}$$

(但是空間係描寫在二次元)

富山·佐藤解；對於平面重力波的竹野解等。就一般相對論的實驗性測試而言，有關於修瓦茲希特時空的光線的屈折（愛因斯坦效應）；在重力場的光譜線的紅方變位（因有時間的延遲）及水星的近日點移動，其中唯有

最後的效應保證了一般相對論的妥當性。但是，由於赫畢修發現了旋轉中子星（脈冲電波星一波霎），泰勒等指出了連星波霎發射重力波，對於一般相對論的信賴度日益增加中。

一九一七年，愛因斯坦有意根據他在其前一年親自定式化的一般相對論究明當做一個統一體的宇宙之時空結構。他爲了對整個宇宙適用這個理論，定了兩個假設：(1)宇宙不會隨時間變化，(2)其空間部分是均勻的、各方同性的（滿足「宇宙論原理」）。又，他覺得考慮密度在比某處遠的地方會變成零的物質分布是不怎麼自然的事，故假定空間部分是封閉的，藉此避免了邊界條件的問題。但是，若欲使這樣的宇宙靜止，則當初的重力場方程式不能勝任，而不得不把宇宙常數 Λ 帶入這個方程式內。雖然他期待這個 Λ 項可以反映馬赫的想法——排除沒有物質分布的世界；但由於多·茲達從含 Λ 項的重力場方程式發現了沒有物質分布的非靜止的「真空」模式，他的夢想很快的就破碎了。就在這一段時期，福里特曼發現了，不論有沒有宇宙常數，愛因斯坦的重力場方程式容許均勻的、各方同性的膨脹（或收縮）的宇宙模式。這個方向的研究，與愛因斯坦的靜態宇宙模式的穩定性纏在一起，而由路美特及赫丁頓繼承之。

一九二九年，哈布根據關於諸多銀河的空間分布及

6 宇宙的起源

運動狀態的觀測研究，發現它們是以與銀河間距離成比例的速度彼此遠離——這就是哈布的膨脹律。此比例常數 H （哈布的膨脹係數）的倒數為與宇宙年齡有密切關係的量，其值為大約 10^{10} 年（一百億年）。一九五〇年，巴特指出了 H 的推算法有錯誤，結果宇宙的年齡增加至原來的約兩倍，這是著名的一件事。在巴洛馬山上的五百公分反射鏡完成之後，哈布的研究由桑迪希等人益加發展中。

2. 伽莫的火團宇宙進化論及 2.7°k宇宙黑體輻射的檢測

以上所述的，是從一般相對論及以此為基礎的宇宙論之創始開始，經過福里特曼對於宇宙膨脹之理論上的研究及哈布在觀測上的研究，而至第二次大戰終了時為止大約三十年之間，我們對於宇宙之全般結構所具有知識的概要。

總之，在從大局著眼的宇宙，組成它的物質之分布在空間上保持均勻、各方同性，而依據哈布定律繼續膨脹。但是，不可因而判斷在觀測上已經證實了膨脹宇宙模式的妥當性。相反的，在一九四八年同時出現了以關於宇宙進化的完全不同之描像為基礎的兩個宇宙論——凡希、歌爾特及赫伊爾所主張的「定常宇宙論」及伽莫所主張的「火團宇宙進化論」。的確，僅就宇宙的運動學來看——例如就宇宙在進行哈布膨脹，就其內部的質點及光子的世界線可以用時間性測地線及零測地線表示而言，兩者是共通的（在歐幾里得空間，唯有兩點合一時此兩點間的距離為零；但在珉可夫斯基空間，則光圓

錐上兩點間的距離爲零。此性質稱爲「零性」)。所不同的是宇宙膨脹的力學面，尤其宇宙進化的情況。

定常宇宙論

首先來看凡希—歌爾特的定常宇宙論。依他們的學說，因爲不僅「物體的慣性質量」(例如，質子的質量 m_p) 且諸多自然常數(光速 c 、普朗克常數 h 、電子的單元電荷、重力常數 G 等)及它們出現的物理定律(馬克士威的電磁場方程式或狄拉克的電子場方程式等)在宇宙內的任何地方或任何瞬間都一樣，故從大局所看的宇宙必須滿足「完全宇宙論原理」。所謂「完全宇宙論原理」，除了宇宙論原理——從大局看的宇宙在空間上是一樣、等方的——之外，還包括一個假設——它在時間上也是定常的——。他們的這種想法，可以說是把馬哈關於物體慣性的思想——慣性系是由宇宙的整個構造決定的——擴張至最大限度的。

與此種要求調和的黎曼時空，包括成爲特殊相對論之舞台的珉可夫斯基時空；對應於閉鎖的靜態宇宙模式的愛因斯坦時空；以及對應於非靜止的「真空」宇宙模式的多·茲達時空的三種，但其中唯有多·茲達時空能與哈布的膨脹律並存。此時，哈布常數必須名副其實的在時間上不變。多·茲達的模式本身雖是「真空」的宇

宙模式，但實際的宇宙却有物質存在。他們主張，「根據完全宇宙論原理及馬赫的要求，宇宙內之物質的平均密度 ρ 在時間上也應該是一定的」。若想在伴隨宇宙膨脹的多·茲多時空內保持一定的密度 ρ ，則必須依每隔大致一百億年在一公升內含一個質子的比例，連續的產生基本粒子。這點明顯的與成爲一般相對論之基礎的愛因斯坦的重力場方程式矛盾。況且，在這種定常的宇宙，也必然因銀河間的物質的凝集而不斷的形成銀河。因此，在所予某一個空間領域內的銀河之年齡各有不同，其年齡分布無論在空間上或時間上都應該是一定的。

依他們的宇宙論，由於獲得完全宇宙論原理的助力，不需借用如愛因斯坦的重力場方程式的關於「場」的方程式。他們爲了解釋其論據而這樣的主張：「就一般的物理學來說，跟「場」的方程式一樣重要的事，是“場”必須遵從的境界或初期條件，且這些條件可以配合問題任意選擇。但是，整個宇宙在本質上是唯一的，故認爲其構造及進化由（場的方程式）+（境界或初期條件）的方式予以規定的想法不能令人理解。」不過，赫伊爾却與他們不同；他有意藉變更愛因斯坦的方程式去獲得定常宇宙的模式。

火團宇宙進化論

採取與凡希、歌爾特的定常宇宙論完全對立的立場的，是提倡火團宇宙進化論的伽莫。伽莫確信可以把一般相對論適用於看得見的宇宙領域，而不像前者那樣賣弄完全宇宙論原理此種深遠的哲理（？）。據觀測的結果，在其宇宙領域，從大局所看的能量或運動量的空間分佈可視為一樣、等方的。另一方面，正如諸多天體係由物質及輻射組成，把物質分佈的局部不規則性軋平的被理想化的宇宙也可視為由此兩者組成的罷！果真如此，則在哈布的膨脹律成立的那種一樣、等方膨脹宇宙，物質的密度 ρ_m 及輻射的密度 ρ_r 會變化如下述。即是，若用因宇宙膨脹而隨時間增加的銀河間距離予以特徵化的比例因數 $a(t)$ 表示，則 ρ_m 與 $a(t)$ 之倒數的立方成比例，而 ρ_r 則與 $a(t)$ 之倒數的四乘方成比例。根據這個推論，在宇宙進化的很早時期，由於 $a(t)$ 的值接近於零，以致物質、輻射的密度都很高；又在某一時期以前則輻射密度可能高於物質密度。同時，在如此高密度狀態下，輻射可視為黑體輻射，故 ρ_r 與輻射溫度 T_r 的四乘方成比例的「斯蒂芬——波爾茲定律」會成立。因此，輻射的溫度很高，且與輻射處於熱平衡關係的物質也必然處於非常高溫的狀態。伽莫如此的產生了宇宙膨脹是從火團狀態開始的描像，據此申論了化學元素的起源。

令人覺得奇怪的是，同樣在一九四八年發表的這兩個宇宙論，後來一直尖銳的對立。在本書的兩位共同著者之中只有年紀較大且一直支持伽莫立場的成相秀直接經驗了此事，但一般的來說，情況未必是如此的。其原因在於，在從事重力物理以外的基礎物理學的研究者之間，不相信當做重力理論的一般相對論——何況它對於整個宇宙的應用——的人不少。相反的，覺得主張簡單而一意的宇宙描象的定常宇宙論有魅力的人多——尤其包括歌爾特在內的宇宙線研究者之間——是不得已的事。

一九四六年（實際發表是在其第二年），賓希阿史與威爾遜在檢查宇宙電波在微波領域的雜音時，發現了從宇宙各向同性地輻射而來的 2.7° 黑體輻射。從此，此種情況不再存在。迪克等人根據化學元素起源的研究，指出這就是伽莫曾經預言為 5°K 的在宇宙初期之火團的遺痕。根據後來的觀測及理論上研究的結果知道，不僅這些觀測值在溫度 2.7°K 的普朗克熱輻射曲線上，且定常宇宙論者所主張的組成銀河的諸星所發出之光聚集的學說不成立。

如此，兩派的對立終因火團宇宙進化論的勝利而結束。我們還記得清楚，賓希阿史與威爾遜由於發現了這個宇宙黑體輻射而於一九七八年獲得了諾貝爾物理學獎。不過，其預言者伽莫可惜地已經去世了。



第二章

火團宇宙的構造及進化

