

# 宇宙 是怎麼來的？

## 我們又是怎麼知道的？

**作者簡介：**郭兆林畢業於臺大物理系，加州大學柏克萊分校天文物理博士，美國航太總署噴射推進實驗室與加州理工學院博士後研究，現於史丹福大學物理系任副教授（終身職），BICEP3 計畫總主持人。

**大**千世界怎麼來的？這個涉及起源與存在的重大問題，人類當然一直想知道答案。中西哲學家 and 宗教家對這個問題已經思辯了幾千年，不過以科學方法探討這個問題則是最近的事。儘管以前有盤古開天闢地等各種宇宙起源的說法，但並沒有任何哲學或是宗教的圖像，可以像物理學一般預測早期宇宙氦、重氫等含量，微波或重力波背景等定量現象，然後用實驗方法加以檢驗。由於宇宙微波背景（Cosmic Microwave Background, 簡稱 CMB）與

星系大尺度結構方面研究的大幅進展，物理學家現在知道，只要給定宇宙誕生一微秒時之初始條件，根據物理定律便可以演化成現在所見的宇宙。這初始條件是一種類似雜訊的密度微擾，一開始渺小的密度微擾在萬有引力吸聚下放大對比，形成現在所見星系、恆星等結構（圖 1）。現在宇宙學研究的重心，已經追溯到一微秒前到底發生什麼事，大霹靂本身的物理機制。而 CMB 在這方面的研究更將扮演極其獨特的角色。

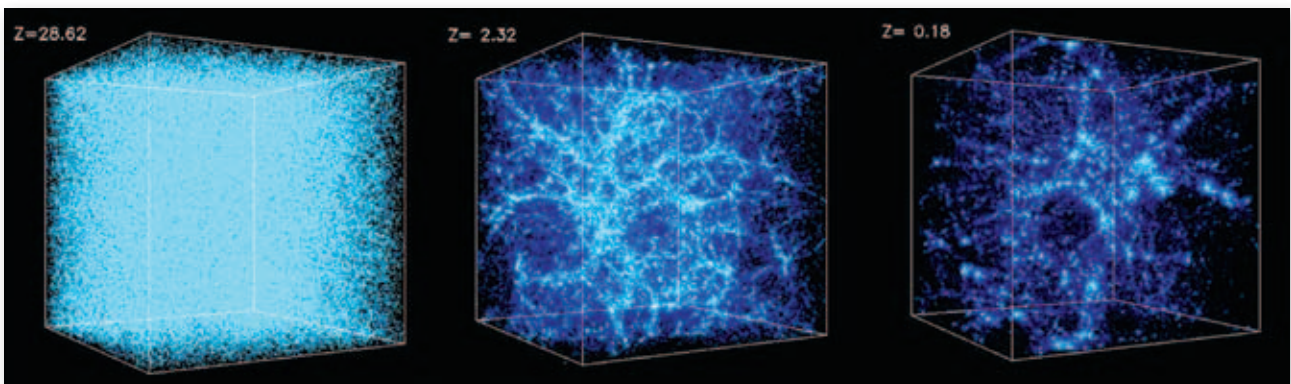


圖 1 朋友們，宇宙就是這麼來的：萬有引力放大一開始很微小像雜訊般的密度微擾（左圖），最後吸聚成星系與星系團等，變成我們現在看到的宇宙結構。現代宇宙學最重要的課題，是研究初始微擾本身又是怎麼來的。宇宙背景輻射（CMB）是回答這問題的最佳工具。（University of Chicago 提供）

## 四面八方的火牆：宇宙微波背景

哈伯（Edwin Hubble）在 1929 年從星系光譜的紅移觀測發現宇宙正擴張中。換句話說，越久之前星系之間距離越近，這樣一來必定推論出宇宙始於高溫的壓縮狀態，這就是熱霹靂。了解空間擴張通常是把宇宙想像成一個膨脹中的氣球，上面的點就是各個銀河系。本銀河系旁邊一點遠離我們的速度不會太大，但是比較遠的一點，因為中間有很多空間的關係，相離速度就越大，這種均勻擴張很自然的滿足哈伯定律。

由於宇宙一開始比較小，處於壓縮態；所以宇宙早期是屬於高熱狀態，熱到所有的原子都游離，像太陽表面一樣處於電漿狀態，對於光來說是不透明的。這層不透明的牆就是宇宙微波背景：CMB。

CMB 是在 1965 年由兩位貝爾實驗室的天文學家彭齊亞斯（Arno Penzias）和威爾森（Robert Wilson）所發現。他們把靈敏的微波望遠鏡往天上指，發現各個方向都有同樣的熱輻射。一開始他們以為是儀器的雜訊，甚至懷疑是天線裡有鴿子糞便所造成的干擾。但是後來他們排除這些可能，發現不管往哪邊看，都是同樣強度的訊號：這雜訊本身就是 CMB 的熱輻射。彭齊亞斯與威爾森意外發現 CMB 的過程，以及鄰近普林斯頓大學宇宙學家迪可（Robert Dicke）得知被搶先後的失望，是廿世紀科學史上非常膾炙人口的故事，可與 DNA 雙螺旋結構的發現相提並論。

若 CMB 源自宇宙起源的高溫，則它將會是近於完美的黑體輻射。這一點在 1990 年已由 COBE 人造衛星上的 FIRAS 儀器精確證實。然而，幾十年來擴張宇宙模型雖然完善解釋種種觀測，但當人們追根究柢，就遭遇一些觀念上的困難。最著名的就是由迪可提出來的「視界難題」與「平坦難題」。

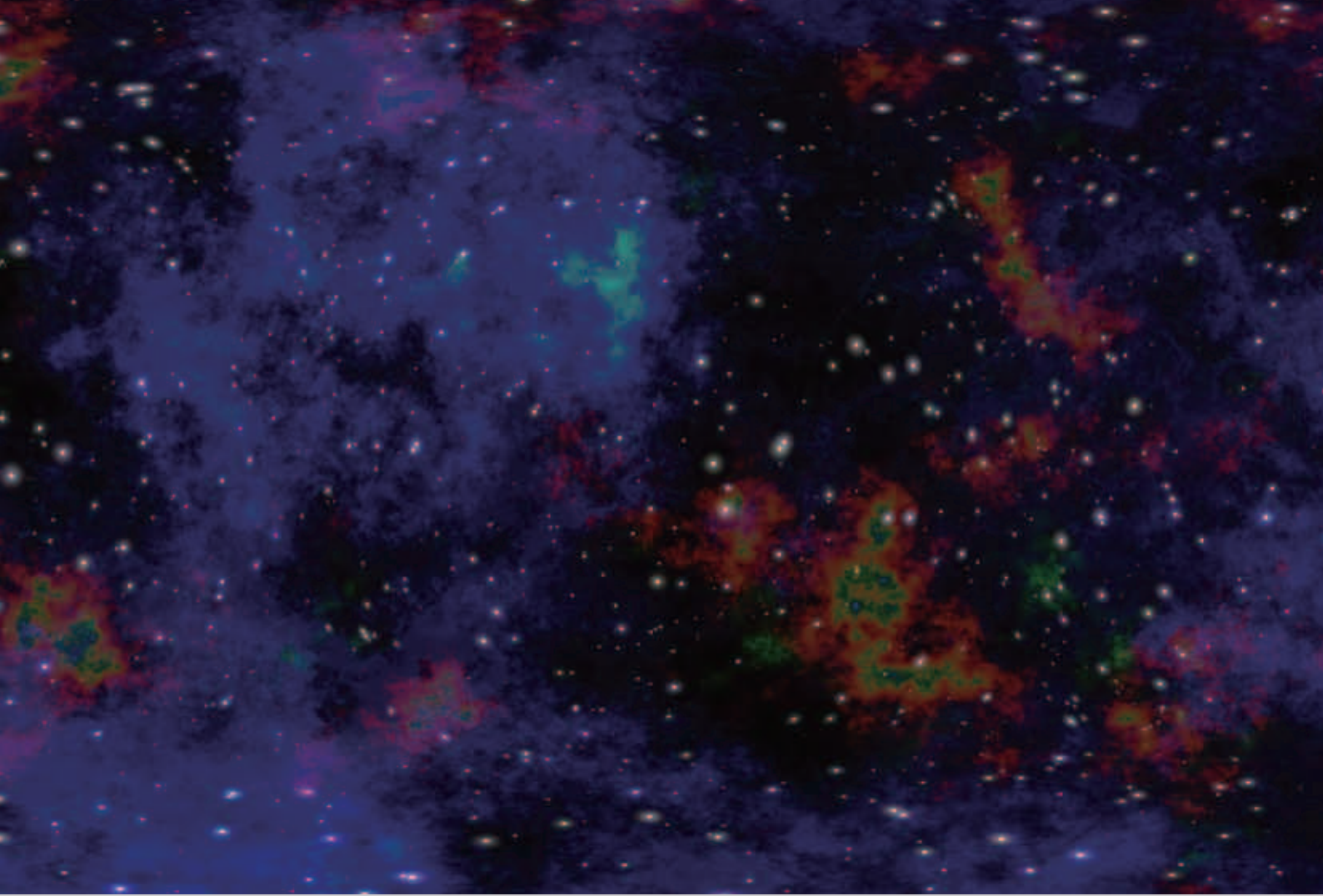
**視界難題：**在擴張宇宙模型中，宇宙所有區域都互相遠離。然而 CMB 似乎各個方向都是 2.7K，

這個均向性帶來了個大問題。通常兩個物體溫度相同的原因，是在於它們曾經進行熱交換達成等溫。然而，由於光速有限，在天空上兩個完全不同方向的 CMB，是由兩個不可能進行任何熱交換的早期宇宙區域所發出，用相對論的說法，兩個區域是在彼此的視界（horizon）外。那麼，它們的溫度為什麼會這麼接近？似乎許多無法互相影響的區域，雖然沒有機會抹平任何的不均勻，卻以不可思議的「默契」具有同樣溫度均勻向外擴張！

**平坦難題：**當我們向外太空發射一枚砲彈時，那顆砲彈最後是否會再墜回地面，與它當初離開砲口時的速度有關；同樣的，宇宙的命運，在大霹靂時就決定了。今天，我們可以從宇宙的擴張速度計算出臨界密度  $\rho_c$ ——若宇宙現在的密度  $\rho$  小於  $\rho_c$ ，宇宙就會永無止境的擴張下去；反之如果  $\rho$  大於  $\rho_c$  的話，重力會阻止宇宙的擴張，而使宇宙在達到最大之後開始收縮，最後在「大塌縮」中毀滅。但  $\rho = \rho_c$  是不穩定的解；亦即初始條件的微小差異會以極快的速度擴大，使  $\rho$  大幅偏離  $\rho_c$ 。不管有沒有暗能量，我們現在所看到的  $\rho$  已經夠接近  $\rho_c$  了；要使  $\rho$  落在現在看到的這個範圍內，宇宙當初爆炸的速度必須準確到  $10^{-55}$  以內！對一個典型的開放型宇宙來說，其密度  $\rho$  應該在  $5 \times 10^{-44}$  秒左右（普朗克時間）就減低到遠小於  $\rho_c$  的程度；而典型的封閉型宇宙在這個時間就會毀在大塌縮中。因此一個很自然的問題就形成了：為何我們的宇宙這麼接近臨界？

## 暴脹理論

部分物理學家雙手一攤，認為宇宙一出生就是這副德性。然而迪可相信，這其中大有文章，暗示我們宇宙起源的奧秘。1980 年一位年輕的理論家古斯（Alan Guth）在聽了迪可給的演講之後，想出一個解決方法。古斯假設早期宇宙歷經一段暴脹（inflation）時期，由於在這段時期宇宙的擴張超



越光速，現在兩個看似遙遠的區域其實在暴脹之前是鄰居，處於熱平衡。不過古斯的暴脹理論有個明顯的技術難題，無法讓宇宙脫離暴脹狀態。這個難題被當時在蘇聯的林德（Andrei Linde）圓滿解決。

暴脹的物理機制為何呢？若空間中存在某個勞侖茲（Lorentz）不變的場，也就是在各個等速運動的慣性座標看起來都一樣的場，根據相對論它的重力效應就像是負壓力，會使空間呈現指數擴張（exponential expansion）。古斯突然頓悟，宇宙誕生之際的指數擴張竟是解決視界與平坦難題的藥方：超光速空間膨脹把一開始處於熱平衡的區域扯開，「放」到彼此視界之外；而這也代表真正宇宙空間遠大於可見宇宙，讓空間看似平坦。

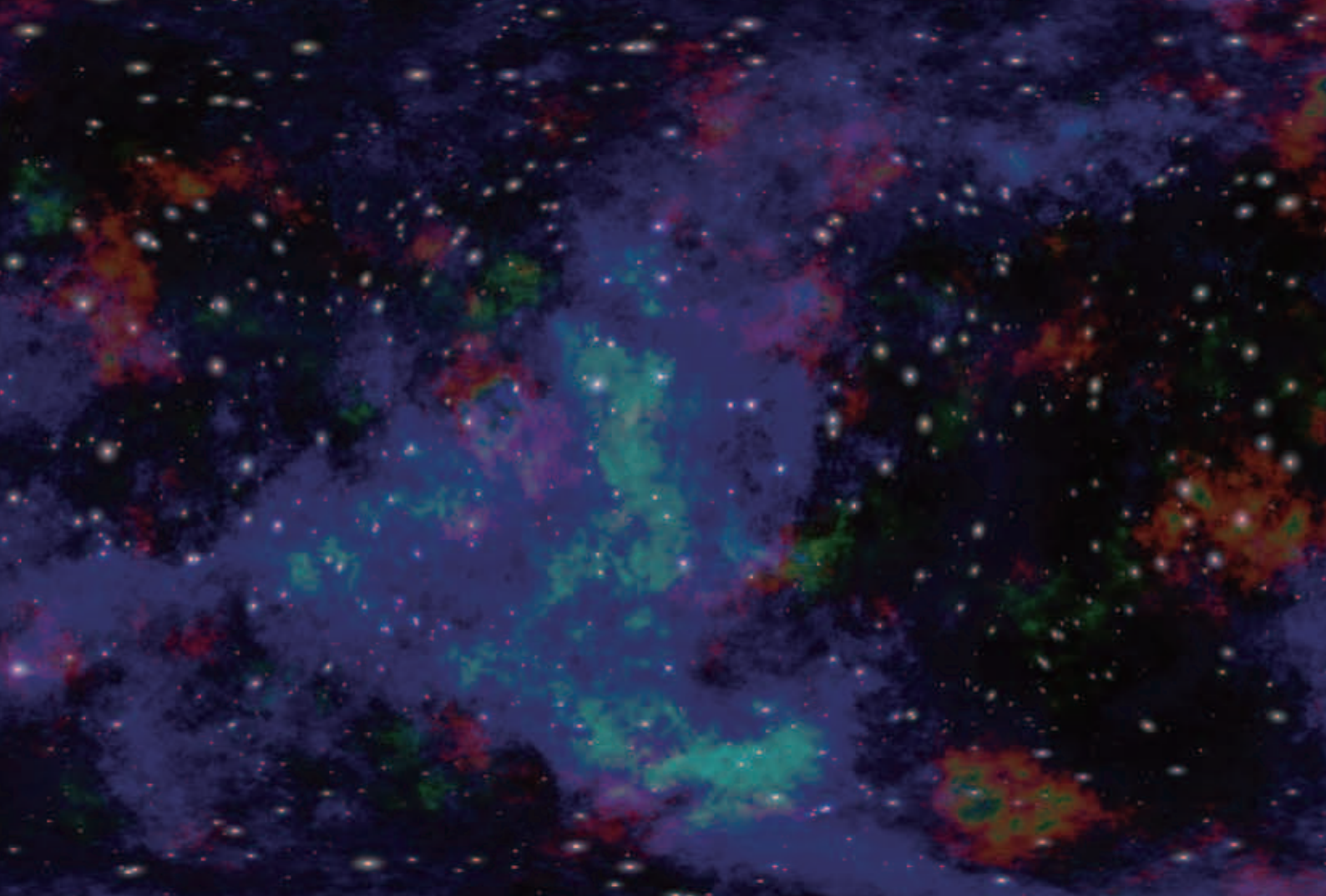
在粒子物理理論中這種純量場俯拾皆是，例如最近發現的希格斯粒子就是個純量場。更廣義來看，所有現在已知場的真空態都必然是勞侖茲不變，因

為我們相信不同慣性座標的觀測者都會看到一樣「真空」。若真空態零點能像其他能量一般參與重力，它就會讓宇宙暴脹。由於暴脹理論十分成功的解釋宇宙學問題，而且與粒子物理緊密結合，於是很快成為早期宇宙理論的正宗。

### 宇宙結構的種子：暴脹與初始微擾

暴脹理論不只讓大家對宇宙擴張的經典難題感到安心而已，它還有個驚人的副作用。根據量子力學的測不準原理，在真空中的一個場，它的期望值不會是零，會具有量子起伏；暴脹場本身的量子起伏，會在暴脹過程中形成初始密度微擾（primordial density perturbations）。

我們前面說到給定宇宙在誕生之後一微秒的初始條件，在物理定律演化下就可決定了現代宇宙之貌。而具有特定性質的「初始微擾」，正是造成



百億年後的可見宇宙所必要的神奇 DNA。因此暴脹提供了我們現在看到所有結構的種子，如果沒有這個種子的話，這個宇宙就只有均勻分布的中性氫、氦原子，而不會有孕育恆星、行星的眾多星系了。量子微擾在預測宇宙結構上的成功令人驚駭，是人類智力對自然分析的巔峰產物。生在現代的我們，有幸知道這個連牛頓、愛因斯坦、波耳等智者都不知道的科學事實，苦思宇宙真理的柏拉圖或康德更是做夢也夢不到了。

### 暴脹與暗能量

許多讀者知道現在宇宙正進行著另一次指數加速擴張。造成這擴張的能量被稱為暗能量，基本上就像是真空能量的重力表現，在古典上就是愛因斯坦的宇宙常數。暗能量可能就是所有量子場真空能量的總和表現，不過這個解釋的最大問題是，已知場

（如電磁場）的真空能量已經比觀測到的暗能量大上一百個數量級（不是「一百倍」），所以除非我們不知道的場具有幾乎剛好相反的零點能，暗能量應該老早就把宇宙扯散了。有些物理學家認為這代表真空能量不參與重力，所以它不是暗能量。他們認為觀測到的宇宙加速現象是廣義相對論在大尺度的修正所致。

由於暴脹的成功，現在這種想法已經很難成立。零點能必須參與重力，因為這樣它才會帶來早期宇宙的暴脹，解釋所見宇宙的大尺度平均，並植入初始微擾。物理學家溫伯格（Steven Weinberg）強調宇宙常數的難題，不在於「是否」或「為什麼」有這東西存在，而在於它的值為何這麼小。暴脹讓我們必須正視零點能的重力作用，不能像其他量子場論的無限大一樣掃到地毯底下就好。

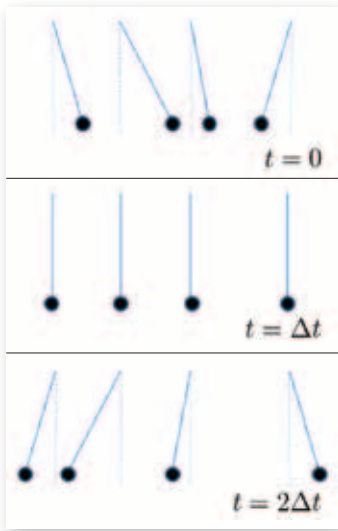


圖 2 同步的絕熱微擾示意圖。在宇宙誕生之際，微擾就要印在密度當中，然後開始同步演化。密度微擾各個不同波長的傅立葉分量（Fourier components）可看作獨立的簡諧振子（simple harmonic oscillators）。同步絕熱微擾就像圖中所有振子都對時同步從靜止態開始振盪。CMB 觀測發現這些振子的振幅雖是呈常態分佈的亂數（上），但其相位完全相同（中）。最簡單的單場暴脹理論（single field inflation）完美預測此獨特現象。若有第二個暴脹場存在，將在  $t = 0$  時除了位移微擾之外加上速度微擾。

### 暴脹理論的預測

物理是自然科學中最精確的學門，一旦徹底了解一個現象，往往可以預測它的值到極佳的準確度。暴脹理論也有一系列明確的定量預測：（1）可見宇宙的空間幾何非常平坦，曲率  $\Omega_k$  小於  $10^{-4}$ ；（2）暴脹的量子起伏會造成初始微擾，其頻譜指數  $n_s$ （spectral index）接近但略小於 1；（3）初始微擾為絕熱（adiabatic）微擾；（4）初始微擾必須滿足高斯

統計，也就是密度這類物理量應呈常態分布；（5）初始微擾包括純量與張量兩個部分，其中張量微擾

（也就是重力波）的大小直接與暴脹場能量相關。

這些預測都有很簡單的直觀解釋。（1）由於暴脹大幅擴張空間，真正的宇宙比可見宇宙大得多，因此就像局限在一小塊空地測量地球表面曲率一樣，空間會貌似平坦。（2）若暴脹場維持恆定，宇宙會呈指數擴張，微擾的生成將與尺度無關， $n_s$  將等於 1。然而暴脹場畢竟要衰變結束，宇宙才能進入正常擴張態，因此  $n_s$  必須略小於 1。（3）在最簡單的暴脹理論中，暴脹是由單一純量場造成。因此每個時空點的初始微擾都只有一個自由度，而這就是絕熱微擾（見圖 2、圖 3）。（4）初始微擾是真空量子基態（ground state）起伏在空間擴張拉扯下造成，量子場基態的波函數呈高斯分布，所以初始微擾也要滿足高斯統計。（5）最後，暴脹場真空起伏形成了初始密度微擾，而重力場本身的量子起伏，則會在暴脹擴張下變成重力波背景，也就是所謂張量微擾。

CMB 的測量印證了以上（1）至（4）項（圖 3），而且正積極準備測試第（5）項。這是本文後半部的重點。

### CMB 與重力波

宇宙微波背景可以用電磁波看到宇宙最早的模

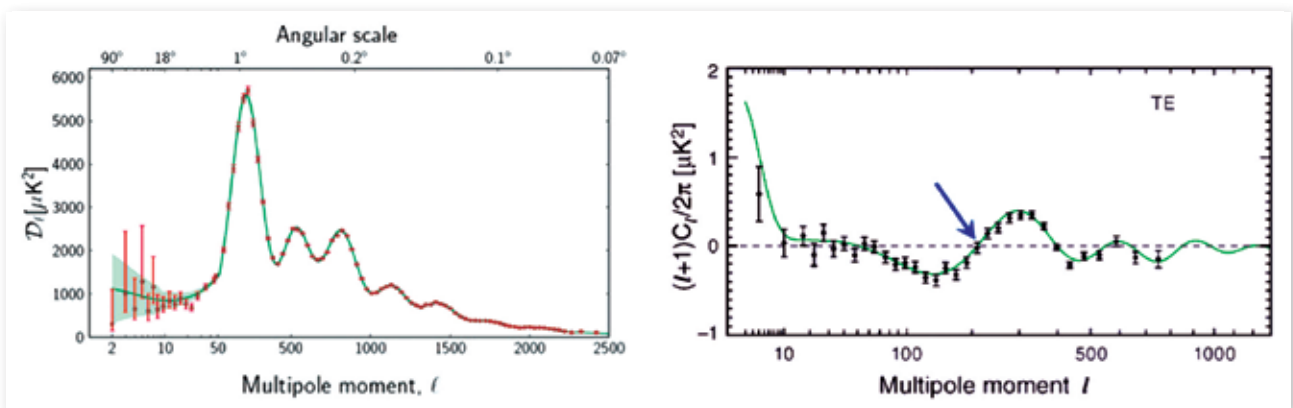


圖 3 左圖是普朗克衛星在 2013 年測到的 CMB 角功率譜。現有宇宙學理論預測曲線（綠線）完美描述實驗的數據（紅點），包括一系列振盪的形式與尺度。右圖是 WMAP 衛星所偵測的偏極與溫度相關頻譜。這項量測證明宇宙早期密度微擾是同步絕熱的形式，如圖 2 所示意。箭頭之處相關度降為零，與圖 2（中）單擺的相位同時歸零的現象類似。

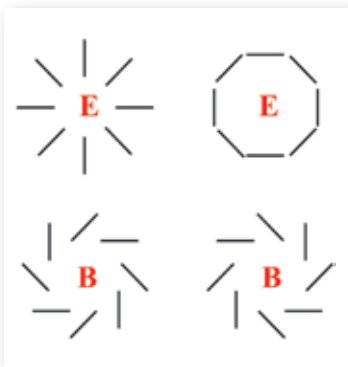


圖 4 CMB 偏極圖樣可以線性分解為具有偶對稱的 E 型與漩渦狀具有奇對稱的 B 型。



圖 5 藍天的偏極會繞著散射源（太陽）形成純粹 E 型（左圖），而不會形成如右圖的漩渦狀 B 型。E 型的任意線性疊加仍然是純 E 型。同樣道理，任意密度微擾散射 CMB 形成的偏極也會是純粹的 E 型。因此，測到原始 B 型等於是測到重力波。

樣。但是要研究暴脹本身的話，它還不夠早。因為 CMB 也是一面高熱不透明的火牆，把宇宙早期光的訊息都擋住了。宇宙微波背景的圖像，距離宇宙誕生已經 40 萬年，光靠宇宙微波背景，沒有辦法直接了解宇宙誕生一瞬間發生的暴脹過程。所以我們就必須透過重力波做媒介。重力波和物質的交互作用非常微弱，因此不管當初的密度再高，再不透明，重力波還是可以完全穿過它。也就是說在暴脹產生的重力波，理論上可以穿過高溫高壓高密度的物質，被我們偵測到。

早在 1979 年，蘇聯物理學家史塔羅賓斯基（Alexei Starobinsky）就提出指數膨脹的空間會將重力子（graviton）零點起伏轉變為重力波背景。不過，一開始人們將重點放在用光學干涉儀直接偵測時空度規（metric，或譯度量）因重力波所造成的微小擾動，也就是現在 LIGO 等實驗的方法。直到 1990 年代末，幾個年輕的理論學家發現偏極圖樣可以線性分解為 E 型與 B 型兩種型態，E 型像是放射狀或圓圈，而 B 型則像是漩渦狀（如圖 4）。他們更發現，依據數學對稱原理，純量微擾完全不會造成任何的 B 型偏極。換句話說，要是觀測到 B 型偏極，等於是看到了張量微擾，也就是宇宙重力波背景。這是在天文物理上少數的嚴密定理。

重力波會形成 B 型，而純量微擾（如時空中的

密度起伏）卻不會，其原因也可以很直觀的加以了解。照過風景照的人都知道藍天具有相當高的偏極度。要讓照片中的藍天白雲有顯著對比，最簡單的做法就是加個偏光片，讓藍天看起來更深藍一些。晴空的藍光是空氣分子將原來不具偏極的太陽光進行瑞立散射（Rayleigh scattering）的結果。進一步想，由於對稱性關係，藍天的偏極方向必定繞著太陽方向形成圓圈（圖 5），換句話說，這是純粹的 E 型偏極。

CMB 的偏極是由與瑞立散射類似的湯姆生散射（Thomson scattering）而形成，其成因和藍天的偏極很類似。雖然散射源從空氣分子換為自由電子，不過基本上散射光的偏極方向卻相同，一點光源經湯姆生散射形成的偏極圖案當然也具有圓形對稱。現在進一步想像，所有可能的溫度起伏所造成的 CMB 溫度非均向都可以由具不同亮度的點光源線性疊加（linear superposition）而成，因此散射的偏極圖樣也是線性疊加（類似電磁學中的格林函數），結果還是具有偶對稱的 E 型圖案。想像圖 5 有九個不同亮度的太陽，還是無法造成漩渦狀的 B 型偏極。另一方面，重力波造成的 CMB 溫度非均向則不受此限，而可以產生 E 型與 B 型。在這個

① 註：普朗克衛星計畫後文簡稱 Planck。

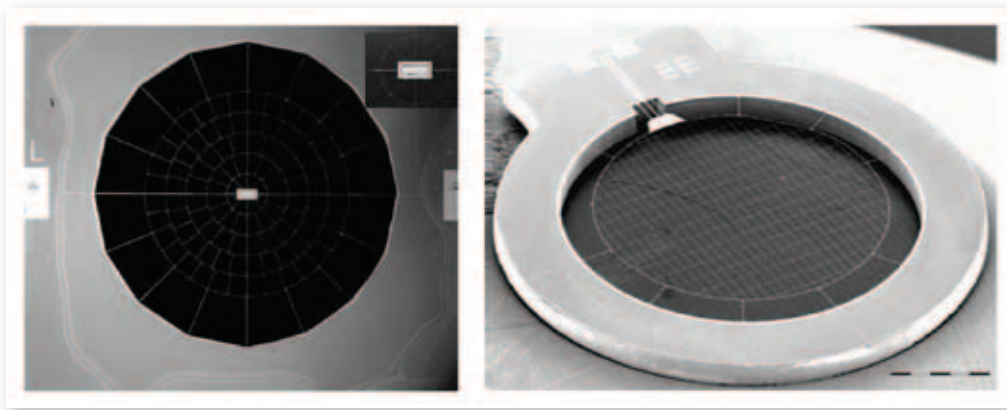


圖 6 左圖是蜘蛛網式 CMB 偵測器 (ACBAR、BOOMERanG、MAXIMA) 對兩種線性偏極的微波有同樣吸收率。右圖是電蚊拍式偵測器 (BICEP、Planck) 則能分別偵測兩種線性偏極。這種偵測器雖靈敏，卻不能大量生產製造。

音量相當大。其中最著名的要屬數學家潘洛斯 (Roger Penrose) 與物理學家史坦哈特 (Paul Steinhardt)。簡言之，由於物理學家並不全然了解暴脹之前的初始態，批評者便認為暴脹論並沒有真正解決平坦與視界問題，只

理論提出來後，人們了解到 CMB 偏極，尤其是 B 型偏極的重要性，於是爭相投入這個領域。

### 量子重力

在暴脹理論中，張量微擾直接與暴脹的速率相關，而純量微擾的大小則與暴脹場的衰變率有關。因此，張量微擾的大小直接告訴我們暴脹場的能量，而其角頻譜更可告訴我們暴脹場如何衰變。多數物理學家同意，傳統粒子對撞機已經接近極限，許多未知的高能物理只能由宇宙學方法研究。一般咸信暴脹場的能量更是遠超過粒子加速器能量，而 B 型是唯一研究這個能量的方法。

除了暴脹之外，由於初始 B 型是由重力子基態的起伏放大而來，測到它等於是重力量子化的直接證據。研究弦論的物理學家也很關心 B 型，因為重力波強度與暴脹場值變化量由所謂的李思 (Lyth) 關係式連結，知道原始重力波強度得以一窺量子統一場論的可能面貌。物理學家胡夫特 (Gerard 't Hooft) 曾很悲觀的把 LHC (歐洲大強子對撞機) 的能量到普朗克能量間的物理比喻為沙漠中的高速公路：一路上什麼都沒有。借用同樣的譬喻，B 型可就是沙漠中的綠洲了。

暴脹也有一些批評者。這些人雖然是少數，但

是把表面問題往前推，宇宙是否自然 (naturalness) 問題只是被藏在暴脹之前而已，有點像「鋸箭法」一樣。溫伯格在他 2008 年的教科書《宇宙學》(Cosmology) 中，有討論到一些暴脹初始態的難題。另一方面，史坦哈特聲稱他的彈跳宇宙論 (cyclic cosmology) 在收縮時也會產生與觀測性質吻合的密度微擾，這一類理論的問題在於沒人知道究竟在反彈一瞬間的奇異點會出甚麼問題，反彈後微擾到底還在不在。

現在，絕大多數物理學家承認暴脹初始態確實有未解之謎，不過它的簡潔與預測初始微擾方面的應用上十分成功，所以仍然是領先的理論。這像是量子力學主流的哥本哈根詮釋在哲學基礎方面雖有若干問題 (波函數的崩塌明顯違反薛丁格方程式)，在應用上卻獲得大成功。有些物理學家 (如溫伯格與費曼) 甚至認為最好是不要去想太多。據稱費曼還戲謔的提出量子力學的所謂「閉嘴快算」詮釋 (Shut Up And Calculate)，這和他一貫強調靈活的歸納與實證、而非堅持推理演繹到死的科學態度一致。所幸，關於暴脹理論的爭議不是形而上學，史坦哈特的彈跳理論並不會造成重力波。若接下來 BICEP3 等實驗能確實肯定重力波的存在，將能為暴脹理論提供進一步證據。

## 實驗現況

在 1990 年代中期，人們已經知道 CMB 溫度異向性 (anisotropy) 是很重要的宇宙學工具，可以用來研究大尺度幾何、結構、重子與暗物質比例等問題，當時已有 BOOMERanG、MAXIMA、DASI 等實驗蓄勢待發，準備尋找 CMB 角功率譜 (angular power spectrum，圖 3 就是 Planck 測得的角功率譜) 的振盪。

理論學家在 1997 年發現 B 型定理，人們更認知到偏極的重要，紛紛開始思索新的實驗方法。電波干涉儀 (radio interferometers) 在這方面拔得頭籌，2002 年 DASI 實驗率先發現密度微擾造成的 E 型偏極，後來 CBI 也清楚測得小尺度的 E 型。另一種 CMB 偵測器「熱度計」(bolometer) 雖然比電波接收機靈敏，不過第一個課題，就是要把先前的熱度計改成偏極偵測器。

在幾年的研究後，BOOMERanG 與 MAXIMA 使用的「蜘蛛網」式偵測器在 2002 年被改造為可測到偏極的「電蚊拍」式偵測器 (圖 6)。當時已經進入建造階段的 Planck 衛星計畫立即改採用這種偵測器，冀望對偏極做出貢獻。也大約在同時，位於南極點 (South Pole) 的 BICEP 計畫開始進行，也採用這種偵測器，專門尋找原始重力波訊號。

為什麼要到南極呢？因為這是水氣最低、最適合微波與毫米波觀測的地點。筆者自 1998 年到 2002 年博士班期間，參與也是在南極點的 ACBAR 實驗



圖 7 左圖：和積體電路類似，以光學蝕刻法大量製造的超導 CMB 偏極偵測器 (影像由 JPL 提供)。過去八年來 JPL 製造了超過 100 片 4 吋矽晶方的偵測器陣列，使 BICEP/Keck 與 SPIDER 團隊在 B 型研究領先世界。右圖：偵測器放大影像可清楚見到兩組互相垂直的微天線 (排成風車圖樣)，區分兩種線性偏極態。此偵測器在 0.25K 的低溫下才能運作。

設計、建造、與分析，在小尺度 CMB 角功率譜的測量上做出很好的結果。接下來，我在 2003 年到噴射推進實驗室 (JPL) 擔任博士後研究員，加入採用「電蚊拍」偵測器的第一代 BICEP 計畫。經過三年的建造，BICEP 在 2006 年開始為期三年的觀測。

CMB 量測除了偵測器要靈敏，觀測條件要好外，還要用偵測器的「數量」取勝。BICEP 與 Planck 的偵測器雖佳，不過其生產方式近似「家庭手工」，而無法大量製造。因此早在 2003 年，我們就已經開始研發下一代 CMB 偏極偵測器了。在努力四年後，筆者有幸在 2007 年研發出能夠大量製造的新型超導偏極偵測器 (圖 7)，立刻被用在 BICEP2、Keck Array、SPIDER、以及最新的 BICEP3 上面。這個 CMB 偏極偵測器的「積體電路化」，完全改變這個重要領域的風貌。目前，其他團隊還是處於追趕狀態。唯一在大尺度 (幾度視角) B 型量測的其他實驗 (QUIET 計畫) 靈敏度落後 BICEP2 二十倍以上。



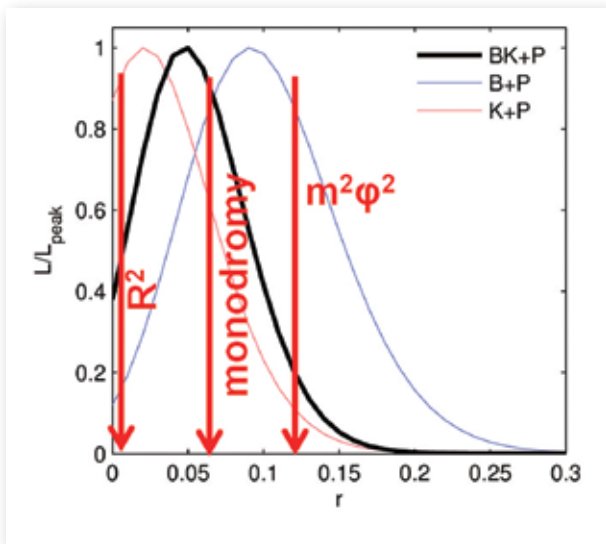


圖 8 BICEP2/Keck (150GHz) 與 Planck (主要為 353GHz) 共同分析的結論是  $r$  的似然度曲線 (粗實線)，與三個重要的暴脹模型預測做比較。BICEP3 與 Keck 將在這一、二年內進行 95GHz 觀測，迅速縮小曲線的寬度 (誤差)。軸子單延拓模型與  $m^2\phi^2$  模型預測  $r$  在 0.1 左右，若此為真，BICEP3 將輕易測到重力波。反之，若接下來幾年 BICEP3 與 Keck 仍然測不到  $r$ ，意味著以  $R^2$  為代表的小場暴脹理論 (small field inflation) 將佔上風。不論最後結果為何，都將是極為重要的宇宙學結果。(改寫自 PRL 114, 101301。)

### 科學前線的槍林彈雨

BICEP 系列實驗的第二個實驗 BICEP2，在 2014 年 3 月在 150GHz 的波段清楚的測到了疑似初始重力波造成的 B 型。此量測本身已經過重複檢驗證實，不過在 Planck 衛星公布初步結果後，學界現在對於星際塵埃能否造成類似 BICEP2 的訊號正進行著十分激烈的討論。不論如何，學界咸認本系列實驗在測量靈敏度與方法上處於絕對的領先地位。寫這篇文章的時候筆者正在南極點，帶領由四校 (史丹福、哈佛、加州理工、明尼蘇達大學) 組成的團隊進行最新一代儀器 BICEP3 的觀測。BICEP3 不僅能迅速超越 BICEP2 的靈敏度，而且它將在較低頻波段的 95GHz 進行觀測，這是一個相當不受星際塵埃影響的頻率。在接下來一年可望對於塵埃 / 重力波的爭論做出確切答案。

### 結語

CMB 像是大英博物館展覽室躺著那塊著名的羅塞塔石 (The Rosetta Stone)。這塊黑黝黝的西元前二世紀石碑不但刻著早期的密碼：詰屈難解的埃及象形文，還附上解碼的鑰匙：現代人還看得懂的希臘文。CMB 的 B 型偏極就像是那把鑰匙，讓我們得以解讀帶著宇宙誕生奧秘的初始重力波。超導偵測器物理、南極研究軼事，以及科學生涯的驚呼與喟嘆，都是很有趣的題材。不過限於篇幅，只能以後再向大家介紹。BICEP2 看到的 B 型扣除星際塵埃污染後還剩下多少重力波，我們也只能繼續提供更多更好的數據，才能對這個科學問題做出最後答案。

### 後記

今年 1 月 29 日，我在南極州的南極點完成本文。完稿到 4 月初《數理人文》出版之間，筆者共同領導的 BICEP/Keck 系列計畫有些重要發展，在此向讀者簡短報告。

首先，BICEP/Keck 與 Planck 兩團隊於 2 月 2 日正式公布共同分析結果，論文並於 3 月 18 日在《物理評論通訊》(Physical Review Letters, PRL) 發表。這項合作自去年 6 月起正式開始，重點在於比較 BICEP2 的 B 型圖樣與 Planck 塵埃圖樣有多少共同成分，藉此推論是否存在與塵埃不相關的重力波。亦即，我們可把 BICEP2 圖與 Planck 塵埃圖相減，而將殘餘的 B 型詮釋為重力波的貢獻。

共同分析最重要的結論是 PRL 論文中的圖 6 (複製於本文圖 8)，描述重力波強度的參數「張純量比  $r = T/S$ 」的似然度曲線 (likelihood curve)。我們發現最新、更靈敏的 Keck 陣列數據完全與 BICEP2 數據一致，在 150GHz 的頻率測到了約略同樣強度的 B 型。這證明了 BICEP2 所見訊號確實來自天上，而非儀器本身造成。不過，將 Planck



本文作者攝於南極。

的塵埃資料減去後，降低了重力波的可能強度，表示 BICEP2/Keck 訊號中的確有來自塵埃的貢獻。這並不代表 BICEP2/Keck 的 B 型訊號完全沒有重力波成分，不過我們不再能夠根據現有數據肯定它確實存在。這結論當然與 BICEP2 最初看到訊號的興奮氣氛相比已經退了一步，不過身為實驗家的我們，唯一的選擇是堅持科學精神，不摻入個人喜好成分，而根據現有的最新數據隨時修正科學詮釋。

很值得一提的是， $r$  的似然度曲線完全受限於 Planck 塵埃量測的誤差，而幾個最重要、最受矚目的暴脹模型（ $m^2\varphi^2$ 、軸子單延拓模型（axion monodromy）、 $R^2$ ）仍然被資料所允許。因此只要能避開塵埃影響在較低頻率觀測，將可運用同樣實驗策略大幅減低誤差。令人期待的是，在我們團隊幾年的努力後，正文中所提的 BICEP3 實驗（低

頻 95GHz）已於二月份正式於南極開始觀測，並在短短幾小時內清清楚楚的看見 CMB 溫度起伏。預計在一、二年觀測後將可以確切分辨圖 8 中的三個重要的暴脹模型，若老天合作（ $r > 0.05$ ）BICEP3 更可能成為第一個偵測到重力波、為暴脹提供直接證據的實驗。即便 BICEP2 結果不像一開始所認為的是滿貫全壘打，所幸我們團隊仍處於滿壘狀況，現在正由 BICEP3 上場打擊！∞

#### 延伸閱讀

► Aftershock: The Hunt for Gravitational Waves, *BBC Horizon*, 2015. 英國國家廣播公司知名科普節目《地平線》的報導，本片還專程到南極拍攝 BICEP3。

► A. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins* (1997), Basic Books. 古斯夫子自道他發現暴脹理論的故事。