

宇宙學十大不可思議

文/顧哲安

有好幾次，跟非物理科系的朋友提到我在從事宇宙學研究時，他們的反應是：宇宙學？好玄啊！那是像哲學的東西嗎？這或許就是許多社會大眾對宇宙學的認識（或是不認識）。其實早從上個世紀 1920 年代，Edwin Hubble 由觀測許多星系能譜的紅移現象而提出宇宙膨脹的 Hubble 定律開始，宇宙學就已經脫離「數千年走來始終如一」的哲學很遠很遠。我們的哲學思想比起兩千多年前的孔子進步多少？然而，人類對浩瀚宇宙的認識，這一百年來進展之大，實在不可以道里計。

一百年前，人類不知道宇宙有多大，甚至懷疑我們所在的銀河系就是整個宇宙；也不知道宇宙是靜止不動、從古至今都長這樣的，還是會演化的。當時有不少人喜歡永恆不變的宇宙，覺得這樣比較「美」，像偉大的 Albert Einstein 就是其中之一。（不過歷史顯示造物者不需要討如 Einstein 之偉大人類的歡心。）上述二問題均已由 1920 年代對眾多星系能譜紅移的觀測得到答案：(1) 宇宙中有非常多星系，我們的銀河系只是其中一個；(2) 宇宙正在膨脹中。後來 Arno Penzias 與 Robert Wilson（兩位 1978 年諾貝爾獎得主）在 1965 年所發現的宇宙微波背景輻射（Cosmic Microwave Background Radiation），以及其它測量宇宙中輕元素含量（Light-Element Abundance）的天文觀測結果，確立了大霹靂宇宙學（Big Bang Cosmology）的地位，使大霹靂宇宙學終於 KO 其它宇宙學模型，成爲主流宇宙學說。

大霹靂宇宙學的地位確立後，在 1990 年代之前，由於天文觀測所能提供的宇宙學資訊不多，宇宙學的進展便慢了下來。不過值得一提的是，1980 年代初期 Alan Guth 等人提出的暴脹（Inflation）模型，成功地

解釋了宇宙的平坦與均勻性；更神奇的是，在暴脹的過程中，量子擾動會被拉長爲古典擾動，提供宇宙的初始能量密度微擾，而後成爲宇宙豐富結構的種子。

得利於科技的長足進步，在 1992 年 COBE 衛星第一次發現宇宙背景輻射溫度的微小擾動後，這十幾年來天文觀測提供了許多精確的宇宙學資訊，尤其是最近 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) 對宇宙背景輻射溫度的精密測量，使得宇宙學的一些參數可以被決定到 10% 或甚至更精確的地步，也讓我們正式進入「精密宇宙學」（Precision Cosmology）的時代。

什麼是宇宙學？（大哉問！）宇宙生成、演化、組成、結構形成，皆是宇宙學要探討的議題。以下簡述當前宇宙學的瞭解：在很久很久很久以前（約 137 億年前），由於龐大真空能量（或宇宙常數）之反重力（排斥重力）的驅使，宇宙經歷了一次極爲猛烈的加速膨脹，稱爲暴脹（Inflation）。暴脹毀壞一切結構，將宇宙中本來極小的區域拉大至少 10 的 26 次方倍而成爲極大的區域，使得我們看到的宇宙在大尺度上相當平坦而均勻。在暴脹的大毀壞過程中，量子擾動變爲古典擾動，形成宇宙初始微擾。暴脹結束，宇宙減速膨脹，真空能量轉換成提供「萬有引力」（雖然現在已知道重力之吸引性質並非萬有）的一般物質，使宇宙再度熱起來（Reheating），開始正常的熱霹靂（Hot Big Bang）膨脹，並在這太古洪爐中提煉出構成星體和我們身體的主要成份，如：質子、中子等粒子。暴脹時產生的初始微擾亦在暴脹結束後轉化爲宇宙豐富結構形成所需的太古能量密度微擾。當宇宙洪爐還夠熱的時候，各種粒子彼此碰撞頻繁。而隨著宇宙膨脹、溫度下降、粒子數密度變小，漸漸地粒子之間的碰撞

會越來越沒有效率而「退耦」(Decoupling)。譬如：光子和電子質子等帶電粒子在宇宙溫度約 3000K 時退耦，之後大部份光子鮮少與其它粒子發生碰撞，退耦時留下來的光子可直接到達我們這裡，宇宙從此變得透明，而這些光子便是我們所觀測到的宇宙背景輻射。除此之外，退耦之後，質子中子所組成的物質脫離了與光子交互作用的妨礙，其能量密度微小擾動開始可以藉由重力不穩定性而隨時間增長，進行各種宇宙結構的形成，包括星系、星系團、巨牆 (Great Wall) 與空洞 (Void) 等等。另外，觀測結果顯示，宇宙現在的能量密度組成似乎有 95 % 是來自看不到的東西，一種是提供額外吸引重力的「暗物質」(Dark Matter)，可幫助宇宙結構形成；另一種是提供排斥重力的「暗能量」(Dark Energy)，用以驅動現階段宇宙加速膨脹。

暴脹 (Inflation) · 大滅絕 · 大毀壞 · Reset the Game

暴脹 (Inflation) 是極為猛烈的加速膨脹，可能是由龐大的真空能量或宇宙常數所驅使。暴脹時，宇宙空間大小以指數方式隨時間增加，進而毀壞所有結構，將粒子數量 (密度)、熵 Entropy / 亂度 (密度) 等物理量歸零。可以想像，暴脹是造物者放一個狂暴的空間炸彈，使空間以猛烈的加速方式爆開，藉以毀滅一切，將一切歸零。這感覺似曾相識，就像是玩電腦遊戲玩壞了，reset 重玩。

然而，在大滅絕 reset 之後，宇宙要如何重新出發，重新長出結構呢？這就是困難而巧妙的地方了！一方面，要有小小擾動伴隨著暴脹大毀壞產生；另一方面，大滅絕毀壞夠了後，暴脹必須巧妙地結束，使得許多粒子生成，讓宇宙再度熱起來，並使暴脹時產生的微小紛擾轉換成物質能量密度的擾動，伺機成長茁壯，形成宇宙結構。這讓人想到聖經中的上帝，用大洪水毀壞世界，僅留下一丁點兒生命於諾亞方舟之中，等待洪水退去，再次繁衍眾多、迅速蔓延。看來造物者都還蠻喜歡用這一招 (招式不同，招意相同)。

暴脹大滅絕，紛擾暗生，結構潛藏

根據目前的物理知識，我們知道「量子」(Quantum) 是這個世界的基本性質，就算在看似「本來無一物」的虛空之中，亦會因量子擾動而到處「惹塵埃」。在暴脹大毀壞時，量子擾動會因為宇宙猛烈的加速膨脹而被拉長成古典 (物理量) 的擾動，這些擾動後來便成為宇宙結構的來源。也就是說，宇宙非常大尺度的結構竟是源自於極小尺度的量子擾動。這使得極大尺度的古典現象與極小尺度的量子物理連結起來，真是太神奇了！

另外，由觀測我們知道這個擾動的振幅很小，大概比背景物理量小了五個數量級。我們必須精巧地調整暴脹模型才能得到這麼小的擾動。要如何才能自然地產生這麼小的擾動呢？這對建構暴脹模型是個很大的挑戰。

浴火重生

在足夠的大毀壞之後，暴脹以巧妙的方式結束，之後宇宙以減速方式繼續膨脹。暴脹結束伴隨著真空能量轉換成粒子，使得之前被暴脹過冷 (supercooling) 過程弄得了無生氣 (但紛擾暗生) 的宇宙變得生氣蓬勃。而暴脹時產生的小小擾動亦轉為粒子能量密度擾動，潛伏於早期宇宙，伺機成長茁壯。此過程人稱 Reheating 「再加熱」。Reheating 使宇宙變為一個極高溫的爐子，可以煮出、提煉出各種物質，包括組成我們身體的質子、中子、電子，以及瀰漫宇宙的光子和微中子 (Neutrino)，宇宙於焉浴火重生！

在此溫度極高的宇宙洪爐，我們可以很容易知道被提煉出來的各種物質的含量。就如高中化學所述，如果已知化學物質所參與的各種化學反應的反應速率，以及一開始所準備的各個化學物質的量，我們便可以算出，達到化學平衡之後，各種化學物質的含量。同樣地，對於宇宙中的各種粒子，如：夸克 (組成質子、中子)、輕子 (含電子)、光子等，它們之間的交互作用是由上個世紀物理學家的偉大成就 — 粒子物

理標準模型 — 所描述 (除了暗物質粒子)。知道這些交互作用的大小, 我們便可推得不同溫度時, 在熱平衡狀態下, 宇宙洪爐中各種粒子的含量比例。再由觀測得知現在宇宙背景輻射的能量密度, 便可回推各種粒子在早期宇宙時的含量。

但暴脹要如何結束, Reheating 要如何發生呢? 有許多模型試圖描述之, 但總不令人滿意。直覺上, 這一切都太巧妙了。先是放入龐大的真空能量產生暴脹大毀壞, 使宇宙重新來過, 並同時由量子擾動產生振幅夠小的古典擾動; 然後要有一退場機制, 使暴脹結束, 並使真空能量轉為粒子, 造成 Reheating, 產生宇宙洪爐, 提煉出需要的各種物質。這設計之精巧, 令人嘆為觀止! 造物者的神妙還不只如此, 在接下來的介紹中, 我們還會繼續看到造物者創造宇宙的精巧與周密。

均勻、均向、平坦

宇宙大尺度結構與宇宙背景輻射的觀測結果顯示宇宙的均勻均向性以及空間上的平坦性。如此高度的對稱性使得宇宙的描述變得容易許多。

「均勻均向」是說, 不論我們站在宇宙中的哪一個位置, 往哪一個方向看, 宇宙看起來都差不多。在處於熱平衡的小區域中, 溫度和能量密度到處相似並不令人意外。然而, 連相距很遠、看似無法互通聲息的兩個區域也長得像像的, 具有相似的能量密度或溫度, 就有點奇怪了。這表示宇宙在很早期或是剛創生的時候, 宇宙各處的物理性質必須被很精密地互相校對過。另外, 在減速膨脹宇宙中, 空間曲率對宇宙演化的影響會越來越大。然而, 觀測數據卻顯示空間曲率對當前宇宙演化的影響很小。這表示, 在宇宙開始減速膨脹的時候, 宇宙應顯得極端平坦。

這兩個問題屬於「微調」(fine-tuning) 問題。微調問題是一種你在乎就有, 不在乎就沒有問題。若不在乎, 只要把上述問題推給萬能的天神 — 說造物者就是給了這麼特別的初始條件 — 即可。但渺小人

類總是希望能減輕造物者的負擔 (或是想扮演造物者的角色), 希望能找到方法自然地產生這種特別的狀態。而「暴脹」(Inflation) 理論的提出一開始便是為了解決這些微調問題。

暴脹將很小的區域在一瞬間被拉成很大的區域。這使得現在兩個相距很遠、看似無關聯的區域在暴脹前可以是緊密關聯的, 因而具有相似的物理性質。另外, 空間曲率的影響力會隨著加速膨脹越來越小。因此, 在暴脹這個猛烈的加速膨脹後 (亦即宇宙減速膨脹開始時), 空間曲率對宇宙演化的影響力會被抑制到極小, 宇宙會顯得極為平坦。

退耦 (Decoupling)

隨著宇宙膨脹、溫度下降、粒子數密度變小, 粒子之間的交互作用會越來越沒有效率, 使得粒子們在低於某個溫度後便幾乎不再碰撞, 此現象稱作「退耦」(Decoupling)。當某種粒子與其它粒子退耦, 或是之間的交互作用不再涉及粒子數量改變後, 該種粒子的數量便固定不變了。

對於粒子反粒子對的湮滅與生成, 當宇宙溫度小於粒子對質量時, 湮滅可持續下去, 但生成則幾乎停止。於是之後此種粒子反粒子的數量會急速減少, 直到退耦。舉例來說, 若質子與反質子的數量在早期宇宙是完全相同的, 那麼它們的數量在溫度小於質子反質子對的質量 ($\sim 2\text{ GeV}$) 後會急速減少, 直到溫度降至 22 MeV 時, 退耦發生, 也就是質子反質子停止湮滅後, 其數量才會停止減少。在這種情況之下, 殘存的質子與反質子的數量極少, 其數量密度比光子數密度小了約 19 個數量級, 這與我們看到的宇宙樣貌有所不同。

重子不對稱 (Baryon Asymmetry)

宇宙中大部份的重子是質子和中子。我們看到許多質子中子組成的結構 (包括地球人), 但沒有看到由反質子反中子組成的結構。另外, 觀測顯示, 宇宙中

重子數密度比光子小了約 10 個數量級，這比之前所說，在重子數與反重子數相同的情況下，所得到的重子數與反重子數的密度要大得多。所以，重子數必須在很早期的時候就已經比反重子數多（重子與反重子的數量差應比重子數和反重子數小了約 8 個數量級），這被稱作「重子不對稱」(Baryon Asymmetry)。

要如何產生重子不對稱呢？我們可以不負責任地把事情推給造物者，認為造物者在創造宇宙時，就是放進了這樣大小的重子不對稱。然而，若宇宙真是經過暴脹 reset 後，由 Reheating 產生宇宙洪爐提煉出各種物質，那麼宇宙洪爐必不能平等對待重子與反重子。（此外，重子不對稱的產生還必須有「非平衡過程」以及「電荷—宇稱不守恒」兩個條件。）粒子物理標準模型無法滿足此條件，所以，眾多解釋重子不對稱的理論均牽涉到尚未被驗證的物理，因而眾說紛紜，莫衷一是。

結構形成 VS. 熱力學第二定律

根據熱力學第二定律，宇宙中的「亂度／熵」會保持不變或越來越大，也就是說，宇宙會傾向由有序變為無序，宇宙中的結構會傾向要毀壞。這樣一來，宇宙如何能由亂糟糟的熱洪爐產生有序的結構，使人類得以生存呢？甚至有人因著熱力學第二定律而擔心宇宙遲早會熱寂而完蛋。然而，這個威脅對造物者而言只是小菜一碟，造物者用一招「宇宙膨脹」就輕鬆解決了：隨著宇宙膨脹，就算宇宙中的總亂度越來越大，一個固定（物理）體積中的亂度還是可以越來越小（也就是亂度密度越來越小），溫度也越來越低，不會有熱寂的問題。

另外，只要宇宙溫度夠低，就算宇宙不膨脹，結構還是可以形成。就像一團雲氣如何形成星系或太陽系，它們只要把亂度以光子或微中子的形式排放到其它地方即可，反正太空（ $\chi \times \Delta$ ）實在太空（ $\chi \times \Delta$ 、 χ ）了。

這一招地球人多年來一直在用。你看地球上一些

地方，譬如人類居住的城市，有越來越多建築物，看似越來越有序，那亂度跑到哪兒去了呢？還不就是被丟到沒有人或比較少人住的地方——埋到地下、排到海中假裝看不到，或是燒掉排到大氣中假裝聞不到——如此而已。

神祕暗物質，暗助結構形成

說到結構，通常是指我們看得到的結構，如：人類、地球、星系等。這些結構的組成成份含有與光有交互作用的物質（如：質子、電子）。這種結構是人類需要的，因為若與光無作用，不要說文明，連生命都不會產生。然而，在早期宇宙中，與光密切而頻繁的反應會使這些物質的能量密度擾動無法成長。必須等到與光退耦之後，這些物質的結構才能開始形成。但是這樣太晚了，這樣晚才開始形成的結構不會如我們所見到的豐富。

這怎麼辦呢？不用怕，造物者祕技萬萬多。除了與光有交互作用的物質，造物者還放入了與光沒有交互作用或交互作用極小的物質，人稱「暗物質」(Dark Matter)。由於暗物質與光的交互作用極弱，其退耦的發生可以比質子電子早很多，使得暗物質的擾動可以較早開始成長，產生結構以及重力位勢的不均勻性（亦即位能井），等待看得到的物質與光退耦後掉進這些位能井中，幫助這些看得到的物質形成結構。

暗物質的提出一開始不是為了幫助結構形成，而是為了保持結構的樣貌。最早是在 1930 年代，Fritz Zwicky 觀測 Coma 星系團中星系的運動速率，發現星系運動過快，非星系團中星系們的質量所提供的重力所能束縛，需要額外的吸引重力。而後又在各個尺度的天文現象上看到這種額外引力的需求，像是星系中的旋轉曲線（galactic rotation curves），星系團的重力透鏡（gravitational lensing）效應等等。

暗物質是什麼？目前沒有人知道。儘管粒子物理標準模型中的粒子無法解釋暗物質，基於偉大粒子物理本位主義，許多人仍預期或希望暗物質是某個粒子

物理標準模型之上的理論所描述的粒子（譬如：超對稱理論中最輕的中性穩定粒子）。但是，究竟暗物質是以粒子的形式，還是以其它形式（如：場）存在，沒有人知道。甚至，連暗物質是不是「物質」，我們也不確定。有可能造物者根本沒有放入暗物質，而是重力理論 — Einstein 的廣義相對論 — 必須被修正。

黑暗降臨

除了暗物質，宇宙學家還引入另外一種看不到的、提供反重力（互斥的重力）的能量源，用以解釋現階段的宇宙加速膨脹。這個令人驚訝不已的發現是在 1998 年由兩個觀測超新星爆炸的團隊 — Supernova Cosmology Project 和 High-Z Supernova Search — 所發表。雖然把難以理解的現象訴諸看不到的東西實在不是英雄的作為（就像古代人動不動就把不了解的事情歸因於萬能天神的神奇力量），但反重力實在太奇怪，一般物質提供的重力均是吸引力（所以才被前人稱做「萬有引力」），技窮的宇宙學家只好借用 Einstein 畢生最大的錯誤 — 宇宙常數 — 或與之有類似性質的其他能量來源（如：量子場的真真空能量、古典純量場的位能）來勉強掩飾一下人類的無知。這些能量源統稱「暗能量」（Dark Energy）。

最近的天文觀測顯示，若造物者真的採用暗能量與（非重子）暗物質這個劇本來建構宇宙，那麼它們現在應分別佔了宇宙總能量密度的 73 % 和 22 % 左右。這對於 — 在上個世紀建構出粒子物理標準模型，號稱（原則上）可以描述世界萬物，並因此合理相信人類正在通往最終理論的康莊大道上快速前進的 — 超強物理學家而言，真是前所未有的困窘。宇宙中有 95 % 的能量密度是我們看不見的、不了解的。而且，這兩個黑暗勢力所提供的功能是剛好相反的，一個是排斥重力，另一個是吸引重力。也就是說，我們在某些地方需要有排斥重力存在，而在某些地方卻需要更多的吸引重力，這聽起來真是弔詭！

造物者為何要放入如此詭異的暗能量，使現階段宇宙加速膨脹？看起來暗能量沒有什麼建設性，甚至

有潛在的破壞性。如果加速膨脹一直持續下去，許多星系將漸漸無法被我們看到。若暗能量密度保持不變，我們在宇宙中將越來越孤單，雖然太陽系還不致被破壞。但若暗能量密度會隨時間增大，譬如最近被提出來的「魅影暗能量」（Phantom Dark Energy），那麼宇宙結構（包括地球、太陽系）將會被撕毀，宇宙又再一次地大滅絕。或許造物者放入暗能量的用意正是以備不時之需，當這個宇宙作壞了，可以隨時 reset，重新再造一個宇宙。

對於現階段宇宙加速膨脹的解釋，除了暗能量，還有重力理論在大尺度的修正、額外維度的存在、以及宇宙學原理（Cosmological Principle，即：宇宙的均勻均向性）的違反等等。目前的觀測數據還不足以分辨這許多模型的優劣。我們需要更多更精確的天文觀測，如：超新星爆炸觀測，來提供更多的資訊，以勾勒出宇宙演化的詳細樣貌，甚至藉此推斷宇宙未來的命運。

=====

筆者說故事也差不多該到了尾聲（廢話太多會對不起地球的森林）。讓我們回顧一下造物者的祕奧義。不知道造物者是怎麼捏壞了上一個宇宙，逼得它使出殺手鐮，用極暴力的暴脹大滅絕來 reset 宇宙。不過，這一次造物者可厲害了，祕技層出不窮：

1. 先放入龐大真空能量產生暴脹大滅絕，reset 宇宙，讓一切重新來過。
2. 同時，在暴脹大毀壞中，結構源暗生自量子擾動，使極大尺度的現象與極小尺度的物理連結起來。
3. 用巧妙的手法讓這些初始擾動的振幅被調控至相當小。
4. 暴脹還使宇宙大致均勻均向且平坦，使宇宙易於描述。
5. 暴脹結束後，驅使暴脹的真空能量轉成粒子，造成 Reheating，產生宇宙洪爐，以提煉出各種需要的物質。
6. 產生夠大的重子不對稱，使殘存下來的質子和中子足夠多，得以構成現在宇宙豐富的結構。

7. 暴脹後浴火重生的宇宙以減速方式繼續膨脹，輕描淡寫地解決熱力學第二定律的威脅，使宇宙結構得以形成。
8. 另外，擔心一般物質的結構形成得太慢，於是放入神祕暗物質（~ 22%）來幫助結構形成。
9. 還放入詭異的暗能量（~ 73%）驅使現階段宇宙加速膨脹。放入暗能量究竟是何用意？難道是再次大滅絕的暗示？真是天意難測、天威難犯！

咦？不是說有十大不可思議嗎？怎麼上面只提到了九個呢？這這這... 施主凡事不可太執著。好吧，那就讓筆者再提一個神妙之處。

道？可道！

宇宙廣大無涯，我們這些渺小的地球人竟然可以瞭解、描述到這個地步，雖然目前還有許多待解的謎團（譬如：佔宇宙組成 95% 的暗物質與暗能量），但我們至少知道了這些謎團的存在，達到了孔子所說的「知之為知之，不知為不知」的境界（不至於連我們知道什麼、不知道什麼都搞不清楚）；不但使宇宙學成

為一個實驗或經驗科學，甚至還宣稱「精密宇宙學」的時代已經來臨，這真是太神奇了！

請不要以為筆者是在湊足十個不可思議。筆者認為，這才是宇宙學中最大的不可思議。就像一隻狗看人類下棋看久了，有一天突然跟你說：「汪汪汪汪汪，汪汪汪汪。」（筆者譯：「我看懂下棋的規則了，我們來下盤棋吧。」）在想到可以送牠上電視賺錢之前，你的第一個反應應該是驚訝到嘴巴合不攏來吧。

人類，真是超強井底蛙！

作者簡介

顧哲安

台灣大學物理系

E-mail: jagu@phys.ntu.edu.tw