

愛因斯坦的最大錯誤——宇宙論常數

賴昭正

你相信在科技如此發達的今日，宇宙中尚有大量我們看不到、摸不到、感不到、量不到的「怪東西」嗎？如果你相信今年三位諾貝爾物理獎得主所觀測到的結論，那你似乎只有相信愛因斯坦的宇宙論常數這「怪東西」了！

你知道愛因斯坦一生中所犯的最大錯誤是什麼嗎？湊答案！在完成創世巨著「廣義相對論」(General Theory of Relativity)後不久，他發現由該理論所導出的宇宙觀竟然與當時物理學家（包括他自己）所接受的不同；於是他人為地在他的方程式裡加了一項常數，使其結果能符合當時之宇宙觀！沒想到十二年後，天文學家發現當時的宇宙觀根本就是錯的！愛因斯坦非常後悔地悄悄將那常數從其筆記本上擦去，謂這是他一生中所犯的最大錯誤！可是該常數卻是陰魂不散，在愛因斯坦去逝後四分之一世紀，又重新登上舞台，成了今日探討宇宙歷史的主要工具。

廿世紀前的宇宙觀

宇宙的起源、歷史、與結構，在十六世紀以前，一直被認為是屬於宗教與哲學的範圍；因此哥白尼（N. Copernicus, 1473-1543）只敢在去逝前才出版其地球繞日的理論書，粉碎了地球為宇宙中心的幻想，開創了近代天文的研究。約百年後，伽利略（G. Galilei, 1564-1642）改進了望遠鏡，並將其鏡頭轉向天空，開啓了觀測天文（observational astronomy）之門，並大力支持哥白尼之地球繞日的理論（晚年被羅馬天主教強迫收回，並被軟禁在家）。為了紀念伽利略首次使用望遠鏡進行天文觀測 400 週年，國際天文學聯合會及聯合國科教文組織，共同訂西元 2009 年為「全球天文年」；科月也發行元月號專輯，共襄盛舉（註一）。

四百多年來——尤其是廿世紀後，科學家在了解宇宙的性質與演化上已有非常快速的進展！有關創世紀或盤古開天闢地到底是什麼時候發生、或如何發生的問題，科學家已不再須要依靠信仰來解決，現在已是可以用科學儀器去「看」宇宙像什麼樣子及如何演化。像這類大哲學的問題已不再是信仰的爭論，而是證據與理論的問題——正如其他科學訓練一樣。

哥白尼粉碎了地球為宇宙中心的幻想後，慢慢地，天文學家也了解到了太陽也不可能是宇宙的中心。以人為主的宇宙觀一旦破滅，科學家再沒有任何理由認為我們所處在的地方在宇宙中佔了一個很獨特的地位；同樣地，我們所處在的時刻也沒理由是個很特殊的時刻。顯然地，宇宙永遠就是那樣地存在，它沒有開始，也不會有終結——因為如果有開始，那顯然就應有創造者，這不是太宗教了嗎？



圖一：1919年愛丁頓到西非觀測日全食並拍攝此照片，觀測結果證實愛因斯坦廣義相對論。太陽正後方的星光行經太陽，受到太陽四周時空的影響，產生偏折現象。

廣義相對論

愛因斯坦在 1905 年所發表的狹義相對論 (Special Theory of Relativity) 雖然震撼物理界，完全改變了物理學家對時間 (space) 及空間 (time) 的觀念；但很遺憾地不能用於牛頓的萬有引力 (重力)。經過十年的苦思與奮鬥，他終於於 1915 年完成了他的廣義相對論，彌補了此一缺失。愛因斯坦完成此一理論後，立即用它來計算水星繞日的軌跡，解決了牛頓重力理論無法解釋的「為何水星繞日軌跡慢慢變化」的困惑。他更用其廣義相對論，預測了光線在經過太陽附近時，會因該處時空變形 (因太陽重力的關係) 而彎曲。在 1919 年的日蝕裡，英國的愛丁頓爵士 (Sir A. Eddington) 測得了星光經太陽附近後的彎曲，發現其值與愛因斯坦理論所計算出來的完全符合 (註二)！瞬間，全世界報紙競登此一理論，愛因斯坦也隔夜成了全世界家喻戶曉之名字！

讓我們還是將時間倒回到 1915 年吧。愛因斯坦的廣義相對論闡釋了物體如何改變其周遭的時空幾何 (geometry of spacetime)、及後者又如何反過來決定物體該如何運動。因宇宙充滿了物體，因此廣義相對論立即成為探討宇宙的工具。1916 年年初 (廣義相對論的最後形式是愛因斯坦於 1915 年十一月二十五日演講時提出的)，史瓦斯德 (K. Schwarzschild) 不但更嚴格的用此理論證明了水星軌跡的位移，並預測了「黑洞」(black hole) 的存在 (愛因斯坦一直不相信黑洞可能真的存在)。

愛因斯坦當然也在思考著宇宙的問題。一個充滿著星球的無限宇宙在邏輯上是有問題的：任何一點均應感受到無限大的重力、及天空不應是黑暗的 (註三)。可是一個懸掛在「空間」的有限宇宙也是有問題的：宇宙外的「空間」又是什麼呢？左思右想，愛因斯坦於 1917 年二月提出了一個他自己都認為可能被關到「瘋人院」的第三個宇宙結構：沒有邊界的有限宇宙。這確是一個非常奇怪的想法：有限的空間怎麼會沒有邊界呢？愛因斯坦舉的例子就是生活在二度球面上的怪人：它們生活的球面是有限的，但卻沒有邊界 (上下對它們來說是沒有意義的，註四)。這種宇宙觀雖然奇怪，但是符合邏輯，在數學上也是完全可能的！但他的方程式卻說這樣的宇宙只能膨脹或縮收，這與當時大部份科學家所認為的靜態宇宙觀相衝突！沒想到推翻了深植物理學家心中達兩百多年之久的牛頓時空觀念的革命壯士，竟然在這裡屈伏了：為了符合當時的想法，他在其宇宙論裡做了「少許修改」——加入了一個具有排斥力的「宇宙論常數」(cosmological constant)——來平衡萬有引力，使他的宇宙能保持靜態！

膨脹中的宇宙

1929 年，美國天文學家哈柏 (E. Hubble) 發表了一些有關從遙遠星群傳來之光譜的測量結果，分析其頻率顯示其光譜線很有系統地向紅色方向位移。哈柏發現此一所謂的紅色位移 (red shift)，其值隨星球距離之增加而加大。顯然地，

遙遠星群是依一定的規則在遠離我們：距離我們越遠，後退速率越快。這無可避免的結論是：宇宙正處於一種正在膨脹中的狀態！此一完全出乎意外的發現，改變了宇宙論這一研究的整個面貌！如果愛因斯坦在 1917 年時不追隨風尚，硬是相信其相對論的結果，再次大膽地做宇宙膨脹（或縮收）的預測，其大名相信將又再次在全世界各大報章雜誌出現！可惜，怪不得他自嘆謂那是他一生中所犯的最大錯誤（biggest blunder）！

一個膨脹的宇宙是一個在改變的宇宙，因此應該具有生命的歷史——甚至可能有出生與死亡。事實上早在 1922 年，俄國數學家佛里曼（A. Friedman）就已用廣義相對論去建造膨脹宇宙之各種數學模型：他當年靜靜地發表了他的研究結果（註四）；這些模型到現在還是一直被用來做為討論宇宙論的基本理論架構。這些模型的兩個重要特徵是(1)膨脹率隨時間縮小；(2)雖然現在我們所觀察到的星群均相互越離越遠，但它們過去一定曾經非常接近過。依現在廣為大部份科學家所接受的「標準大霹靂宇宙論」（standard cosmological Big Bang model），現在的宇宙年齡大約是 140 億年。

我們雖然對 140 億年前的宇宙結構細節非常不清楚，但大部份的科學家均認為宇宙是由「一個時空特異點」突然大爆炸而出現的——雖然物理學家尚不知道可用於該特異點的理論。爆炸前的宇宙是處於一個高度均勻、非常高溫、及高輻射能密度的狀態；它快速地膨脹而冷卻，於是基本粒子、氫、氦、離子電漿、冷氣體、星群、恆星、太陽及地球相繼出現，形成我們今日所看到的宇宙。大約在大爆炸後 38 萬年時，輻射能的能量因宇宙膨脹而降低到不再足以使氫原子離子化（註四），因此成了孤魂野鬼地遊蕩在太空中。此一所謂的「微波輻射背景」（microwave background radiation）果然在 1964 年被發現，成為支持宇宙大霹靂論的最有力實驗證據！

標準大霹靂的幾個謎題

我們在前面曾提到大霹靂前的宇宙是均勻的；事實上，微波背景的數據顯示，現今的宇宙不但也是均勻，其均勻度更高達萬分之一。這均勻性當然是從大尺度來看的——正如桌面在顯微鏡下雖然凹凸不平，但在肉眼下卻是平滑一樣。可是為什麼這麼均勻呢？最簡單與合理的解釋當然是大霹靂後的瞬間即是如此。可是問題出來了：如果宇宙的生命只有 140 億年，而其直徑卻至少在 9300 億光年以上，那相距在 140 億光年以上的兩個不同



圖二：如果宇宙的生命只有 140 億年，而其直徑卻至少在 9300 億光年以上，那相距在 140 億光年以上的兩個不同區域，如何能互通信息與能量而達到平衡（均勻）狀態呢？

區域，如何能互通信息與能量而達到平衡（均勻）狀態呢？當然，宇宙在大霹靂之初並沒有這麼大；可是我們前面提過，弗里曼之宇宙模型的一個特色是膨脹速率越來越慢，因此如果現在不可能互通信息，那以前（大霹靂後不久之時）更不可能了（註五）！

第二個問題是為什麼我們的宇宙，其空間幾何（geometry）是這麼的「平」（flat, 註六）呢？依廣義相對論，空間幾何的曲度（curvature）是取決於質量密度（單位體積內的質量和能量總和）；因此如果大霹靂前的質量密度正好就是造成曲度為零之空間所須之值，那大霹靂後其曲度還是會保持在零值的。問題是：如果霹靂後的質量密度為臨界值的 99.99%（誤差千分之一），則依大霹靂理論推算，現在的宇宙質量密度應只有臨界值的千億分之一！測量宇宙之質量密度當然不是一件簡單的工作；但所有的數據均顯示現在之宇宙的質量密度誤差絕對沒有那麼大的！這意謂著大霹靂後的質量密度非常非常準確地正是造成「平」空間所須之臨界值——但怎麼那樣巧呢？

還有，到底是什麼促成了大霹靂呢？

宇宙論常數

1979 年十二月，美國基本粒子研究者古士（A. Guth）突然心血來潮，懷疑他的研究——超冷（supercooled, 註七）的喜格斯場（Higgs field）——或許也適用於宇宙論。進一步探討的結果，他發現其超冷喜格斯場所具有的能量及負壓（negative pressure）比，正是與愛因斯所強行加入其宇宙論的宇宙論常數一樣！我們前面提過此常數是愛因斯坦用來平衡重力相吸的人為常數，本來應該沒有什麼物理意義的！但從其在數學式子中所佔的位置，拉麥崔（G. Lemaitre，比利時牧師及天文學家，大霹靂論的創始者）看到了其所代表的物理意義：均勻地分佈於空間的一種奇怪能量。愛因斯坦並未提出此一能量的可能來源，但分析顯示它決不是我們所熟悉之電子、質子、或輻射能等。

在牛頓力學裡，重力的來源只是質量；愛因斯坦的狹義相對論告訴我們，能量也是一種質量，因此在廣義相對論裡，能量也會產生物質相吸的重力效應。事實上不只如此，廣義相對論裡還有第三種重力來源：壓力！更奇怪的是，如果壓力為正（類似容器內之氣體壓力），則可造成相吸的重力效應；如果為負，則可造成相斥的重力效應。後者這負內壓正是愛因斯用來平衡相吸之重力，而達到靜態宇宙觀的方法！

急脹宇宙論

古士的研究顯示，如果當初宇宙充滿了稱為急脹子（inflaton）的喜格斯場（註八），則在慢慢膨脹而冷卻下來時，這急脹子可能被困在一能量不為零的非常不穩定之超冷狀態。此狀態的急脹子因具負內壓，可以提供非常強大的排斥力（註九），促成瞬間非常巨大的膨脹（「大霹靂」的原因）。但因此一狀態非常不穩定，因此急脹只維持了大約 10^{-35} 秒之久；但在這期間宇宙膨脹率隨著時間而

急速加快的！此一巨大迅速加速膨脹不但能解釋為何現今的宇宙是如此的均勻；它甚至還告訴了我們現今我們所觀測到的宇宙，事實上只是整個宇宙中非常小的一部份！這正又說明了為什麼我們現今觀測到的宇宙是平的——正如大球表面上的一個小面積看起來是平的一樣。哇！此一偶然發現一下子解決了宇宙大霹靂論的三大謎題！

在宇宙大霹靂論裡，因為只有重力相吸的關係，認為除了大霹靂那瞬間外，宇宙的膨脹率一直都是隨時間而減緩的。古士的研究則認為大霹靂不是瞬間的，而是持續了大約 10^{-35} 秒；不僅如此，他也認為在大霹靂的過程中，膨脹率是隨時間而急速越來越大的（圖三 a），因此宇宙變得非常、非常巨大！在大約 10^{-35} 秒後，此一大霹靂才停止，急脹子才放出其多餘的超冷能量，產生我們現今所看到的一般物質與能量。在此之後，宇宙的膨脹率才因重力的關係又恢復到其越來越小的正常狀態（圖三 b）！

科學家稱此一改良的「標準大霹靂宇宙論」為「急脹宇宙論」（inflationary cosmology），為現今大部分科學家所接受的宇宙論。

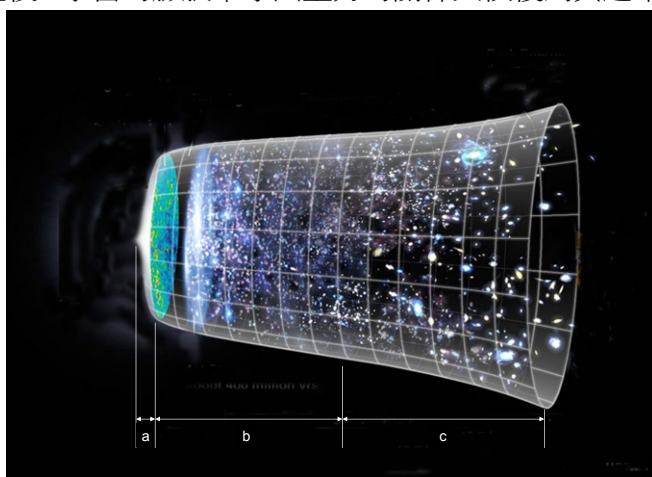
不止如此，急脹宇宙論還解決了標準大霹靂宇宙論裡的一個大頭痛問題，即前面提過之霹靂後的質量密度必須非常準確地接近一臨界值，否則今日可觀測

到的宇宙之曲度便不可能為零。急脹宇宙論不但沒有這個要求，事實上它還預測了今日的宇宙質量密度應該非常接近此一臨界值！可是各種數據顯示我們今日所觀測到的宇宙，其質量密度大概只有膨脹宇宙論所預測之值的百分之五(5%)而已！

早在 30 年代，就有美國加州理工學院科學家朱偉基 (F. Zwicky) 從星群的運動中，懷疑到宇宙中尚存在有其他看不到的「暗物體」(dark matter)！科學家也像世俗人一樣喜歡追風隨俗，一旦有人提出「暗物體」，其存在的證據便開始排山倒海的出現，只是到現在還沒有人知道它到底是什麼「東西」！據估計，這些看不見的暗物體大約可以提供臨界質量密度的百分之二十五 (25%)；加上可看到之 5% 的已知物體，顯然我們還差百分之七十 (70%)，才可解釋為何我們的宇宙空間幾何是平的問題！

宇宙中的暗物體與暗能量

1998 年美國加州大學伯克來分校(University of California, Berkeley)的波米特兒 (S. Perlmutter) 及澳洲國家大學(Australia National University)的思密特 (B.P.



圖三：宇宙的主要演進。(a) 10^{-35} 秒之「大霹靂」(膨脹率越來越大)；(b) 「標準大霹靂」理論之大霹靂後的演進(膨脹率越來越小)；(c) 加速膨脹期(大霹靂後約70 億年開始)。

Schmidt) 相繼宣佈超級新星 Ia 型的數據顯示，在大霹靂後的 70 億年，宇宙的膨脹率又再次加速了(圖三 c)！美國約漢哈普斯金大學(Johns Hopkins University)的雷斯(A. G. Riess)於 2006 年再次肯定了這些觀查結果。此一發現再次重寫了人類對宇宙演化的看法，因此諾貝爾獎委員會決定將 2011 年的物理獎發給這三位「大膽」的科學家。但牛頓重力只有相吸的作用，因此要解釋此一加速膨脹，看來又得求助於愛因斯坦的宇宙論常數了(註十)！

不錯，波米特兒及思密特思考著：在大霹靂(急脹)後，宇宙靠大霹靂時的衝力(物理學上稱為慣性)而繼續膨脹，但因萬有引力的關係，膨脹速率將越來越慢；可是如果真有「愛因斯坦的宇宙論常數」，則因其排斥強度不會隨宇宙膨脹而降低(萬有引力則會因宇宙膨脹而降低)，它總有一天它會強過萬有引力，使宇宙的膨脹率由減速再次變成加速！這一天顯然就發生在他們所發現之大霹靂後約 70 億年時！詳細分析加速資料顯示，他們所須之宇宙論常數之值所代表的質量密度正好是——信不信由你——急脹宇宙論所在尋找的那百分之七十(70%)！看來愛因斯坦的「宇宙論常數」是真的存在、而不是愛因斯坦所犯之最大錯誤了？！

可是如果真的存在，這現今被稱為「暗能量」(dark energy)的「愛因斯坦宇宙論常數」到底是啥「東西」呢？拭目以待吧，物理學家及天文學家正在努力地在尋找此一充滿了宇宙、及必須具有負內壓的怪物呢(註十一)。

結論：

為了符合當時的靜狀宇宙觀，愛因斯坦於 1917 年強行地於其廣義相對論導出之宇宙觀中加入一稱為「宇宙論常數」的人為常數。1929 年，新數據顯示宇宙不是靜態，而是在膨脹中；愛因斯坦因而後悔當初為何不相信自己的推論，稱他那人為常數為他一生中所犯之最大錯誤。80 年代末，「急脹宇宙論」卻藉助了宇宙論常數解釋了當時廣為科學家所接受之「標準大霹靂宇宙論」中的三個謎題。90 年代末期，新的發現顯示現在宇宙的膨脹速率不是在隨時間減小、而是加大；宇宙論常數又再次提供了解釋膨脹率加快所須之排斥力的來源——雖然我們還不知道那所謂的「暗能量」是啥！當然，我們也不知道愛因斯坦在天之靈是否還認為宇宙論常數是他一生中所犯的最大錯誤？

(註一)陳俊郎及林琦峰文「伽利略與異想世界—全球天文年開幕」，科學月刊，2009 年元月號。

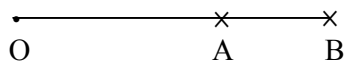
(註二)因 $E=mc^2$ 及質量會受重力之吸引，事實上愛因斯坦早在 1911 年時就已預測光會受重力場彎曲；但其「彎曲值」只有廣義相對論之計算值的一半。

(註三)稱為「歐博斯謎題」，詳見註四。

(註四)賴昭正譯「近代宇宙觀中的空間與時間」，新出市國興出版社，1982 年。

(註五)我們可以用底下的例子來說明。A 為膨脹一秒後的原點，B 為膨脹兩秒

後的原點；如果從 O 點發出的光正好於兩秒後抵達 B 點，因為光速為一定值，而 $OB < 2OA$ （膨脹速率越來越慢），所以在一秒時，兩點間的距離雖然已為 OA ，到光線卻無法由 O 達到 A。



（註六）即我們中學所學的所謂「歐氏幾何」（Euclidean geometry）。在三度空間裡，我們很難感覺到「平」的意義。在二度空間，平面的幾何就是「平」的；而球面雖也是二度空間，但其幾何不「平」；其三角形之內角和不等於 180° ！

（註七）像在攝氏零下的水，本應結成冰，但也可能存在於不穩定之超冷水狀態。

（註八）此一喜格斯場是不同於在自發性對稱破壞時使基本粒子取得質量之喜格斯場（詳見賴昭正文「量子的故事」，第二版，新出市凡異出版社，2005年）。

（註九）為當初愛因斯坦用來「平衡宇宙」之常數的 10^{100} 倍！

（註十）宇宙膨脹加速的理論當然不止愛因斯坦宇宙論常數一種——但它無疑地是較廣為接受的。另一認為暗能量是一種第五類物質的 quintessence 理論則認為暗能量密度不為定值（常數）。

（註十一）美國能源部、國家太空總署、及國家科學委員會已於 2005 年成立「黑能量特別小組」來負責此一工作。我們都知道牛頓萬有引力及愛因斯坦相對論的成功，因此如果真有暗能量存在，那我們不是得改寫此二理論嗎？幸運的是：由暗能量所造成的排斥力是與體積成正比的，在像我們太陽系這樣「小」的體積下，暗能量的效應是完全可以忽略不計的。