

量子引力與宇宙論:從玄想到物理學

文/林豐利

侏儒與巨人的婚禮

二十世紀物理學最重要的兩大成就應當是量子力學與廣義相對論。前者的應用,尤其是在原分子與半導體領域,已經普及到我們的日常生活中,徹底的改變了人類文明的面貌。而由其延伸而來的量子場論及基本粒子物理則深化了我們對自然界最小構成單位的理解。至於後者則打破了自牛頓以來近三百年間人類對時間與空間的既定成見,奠基其上,除了有助於我們對天體物理的理解,更勾勒出完整的宇宙演化圖像。宇宙大爆炸理論的提出與驗證則是某種程度上結合量子力學與相對論所取得的重大成就。這些成就不斷的激起當代物理學家想將兩個理論徹徹底底結合在一起的雄心壯志。在正文中所提到的超弦理論(superstring theory) 與迴圈量子引力(loop quantum gravity) 則是兩種最廣為人知的企圖嘗試。

有趣的是量子力學與廣義相對論分別適用在不同的尺度上,前者適用在如原分子,甚至夸克,後者則用在天體,兩者尺度之間的差別是真正所謂天文數字的量級。因此想將量子力學與廣義相對論「統一」起來的想法就好像企圖舉辦一場侏儒與巨人的婚禮,其難度是可想而知。除了技術層面的考量以外,我們不禁要問:這樣一個「量子引力」的理論如果真的實現是否有實際上的用途,因為如此一來才可以檢證理論的正確性,再決定是要把物理學家的玄想與創造性

的產物當作是普適的定律或者直接丟進字紙簍中。

一種最直接的想法來檢證量子引力理論就是建造巨大能量的加速器,因為根據愛因斯坦的廣義相對論,能量的累積會造成時空的彎曲,所以只要能量夠大就有可能觀測到量子重力效應。不過由於引力的大小是如此微弱,造成量子引力效應所需要的能量比世界上目前能量最高的加速器所能產生的還要高出十六個數量級。在可預見3的未來,以人類的能力無論如何是無法製造出如此巨大的加速器,因為它的長度需要環繞地球好幾圈。

宇宙是最後的裁判

物理學家是不甘於坐以待斃的,既然用人力無法達成,只好向自然界去找。如此一來很快就會發現宇宙學是最理想的實驗室。根據大爆炸理論,宇宙一直處於膨脹狀態,所以往前回溯,宇宙的大小可以極小,也就是時空是極度彎曲的,如此一來早期宇宙就相當於是一部能量很高的加速器。就好比說巨人在年紀很小的時候也曾經是侏儒般大小,而這就是它與真正的侏儒在尺寸上很登對的時候。同理,我們因此可以推算出在宇宙「誕生」後大約一秒的四十個數量級分之一左右,量子力學與廣義相對論在尺度上是相匹配的,所以量子引力的效用會很明顯。這麼短有如滄海之一粟的時間聽起來有如天方夜譚,然而利用粒子物理

與廣義相對論,目前宇宙學家對宇宙背景輻射的觀測已經可以精確的描述宇宙從「誕生」後大約一秒的三十個數量級分之一左右直到今天的演化過程。雖然這離真正量子引力起作用的時間還有約幾個數量級之遙,但已經讓人們感到很激動,大部分的宇宙學家都相信下一代的宇宙背景輻射探測器在未來的十五年內將縮短這個差距,使得背景輻射的物理成為通往量子引力的窗口。

現代宇宙學所以能夠取得如此大的成就主要歸因於大爆炸理論,宇宙背景輻射的發現以及精確測量,還有暴漲模型。暴漲模型之所以被提出是用來彌補大爆炸理論的不足,其中詳細的緣由在正文中已有說明,在此從略。暴漲模型除了能夠彌補大爆炸理論的不足,它所預測的由早期宇宙中量子效應所引起的能量密度不勻稱(inhomogeneity)與目前所觀測到的宇宙大尺度結構(large scale structure)相吻合,換言之,早期宇宙中極微小的密度不勻稱會隨著宇宙的演化以及重力塌縮(gravitational collapse)的效應而演化成今天所看到的星系、星團等大尺度結構。同理,早期宇宙的背景輻射溫度的勻稱性也會因為這些密度的不勻稱而遭破壞,從而在觀測上產生約負五個數量級大小的溫度各向異性(anisotropy)(見附圖一)。由各向異性的大小以及暴漲模型可以推算出暴漲時期的能量尺度約比量子引力的能量尺度低約三個數量級,可以說量子引力的效應在宇宙背景輻射溫度的各向異性上已經呼之欲出。更進一步的是對各向異性結構的精確測量將告訴我們背景輻射的能譜如何偏離尺度不變性(scale invariance),這些微小的偏差將隱含著暴漲之前的量子引力效應。這就好比是想從湖面上漣漪的形狀讀出早先產生它的波原的特性,雖然困難,

但不是不可能。

未生之時,誰是我?

暴漲模型雖然成功卻教人感到不足,因為它只告訴我們宇宙的初始條件應當如何如何才能與目前的觀測吻合,但對於為何要有這樣的初始條件卻沒有提供任何線索。同樣的,暴漲模型也無法回答在暴漲之前宇宙的狀態是什麼?宇宙是否「誕生」於某一個確切的時刻?如果是,那麼宇宙誕生之前是否有時空的存在?雖然這些問題很像是佛陀所問的「未生之時,誰是我?」這種形而上的問題,卻是任何量子引力理論所致力回答的問題。與神學不同的是,這些問題的答案終將因為理論與觀測的相互印證而獲得解答並且成為普適性的定律。當然,我們目前離這最終的目的還有一大段距離。

兩種願景

因為這些可預見的遠景,許許多多研究量子引力的物理學家慢慢地往宇宙學靠攏,這其中包括迴圈量子引力學家與弦理論學家。這兩派物理學家是採取完全不同的觀點來處理量子引力與宇宙論的問題。前者是以廣義相對論為本,然而強調在量子的過程中需要引進非點粒子的迴圈結構,進而推廣到非點粒子的幾何結構,因此有希望解決大爆炸宇宙起點的問題。後者則是比較革命性的,一開始就完全推翻點粒子的概念,假設物質的基本結構是一根弦,這一來就完全推翻愛因斯坦的時空概念。然而就像用低倍數的望遠鏡看遠方的恆星,只能看到一個發光的點而看不出是一個圓球,在能量尺度很低的情況下,一根弦近似成一個點,因此廣義相對論是弦理論在低能時的近似。只有在能量很高,比如接近宇宙起點時,弦的非

點粒子特性才會顯現出來,更確切的說就是正文中所提到的T對偶。這個特性告訴我們弦理論的長度尺度存在一個不為零的最小值,所以直覺上不會產生一個宇宙大小為零的時間起點。此外弦理論也預測了許多高維的基本結構,膜(brane)的存在,這是構成膜世界的(brane world)這類新的宇宙觀的重要元素,也就是說我們的宇宙只是高維時空中的一層三維的膜。這樣的宇宙觀在一九九九年被提出來之前是無法想像的。

從瞎子摸象到柳暗花明

就像正文中所提到的,到目前為止,所有的量子引力理論都無法完整與精確的解釋「宇宙起點」附近的物理,不過這更激起物理學家前仆後繼的雄心。當然,到目前為止這些嘗試與企圖都是不完整的,只採用理論中必要與有用的部分,而關鍵中的細節部分往往付之闕如。這是所有學科發展典型的必經過程:瞎子摸象。在這些企圖中最著名的就是pre-big-bang scenario 與 cyclic Universe。正文的作者Veneziano教授是pre-big-bang的原創者,過去十五年來他對這個理論的推廣可以說是不遺餘力。Pre-big-bang,顧名思義,就是在大爆炸之前;也就是說不存在一個宇宙大小為零的起點,並且宇宙的初始條件可以是很平緩的。如此一來宇宙的演化可以是由大變小再由小變大,這在術語上叫做「反彈」(bounce)。甚且pre-big-bang預測量子修正在宇宙變小時變大,所以有可能阻止宇宙的大小變為零。然而這個假設也隱含著該理論的致命傷:因為量子效應大到無法做可靠的計算,以致於無從證實是否存在「反彈」的假設。

Cyclic Universe 則是針對解決上述問題所提出的另一個模型:在此,「反彈」是由兩個三維的膜的碰撞

所造成的。此外,與pre-big-bang不同的是量子效應隨著膜宇宙的尺度變小而變小,因此可以做可靠的計算,不過所得到的結果是會產生一個宇宙大小為零的「反彈」,而這正是量子引力所要避免的結果。此外,這個理論認為我們目前所處的宇宙是無數次「反彈」的結果,也就是資源回收,所以這是一個有「環保概念的宇宙論」。

雖然這兩個模型或多或少都有些技術上的弱點,不過它們所提供的物理圖像比暴漲模型要清楚多了。與暴漲模型一樣,它們也都得面對實驗的檢證,也就是說它們所預測的宇宙背景輻射的溫度各向異性的尺度不變性是否與觀測吻合。到目前為止,這個議題仍然是有爭議的。儘管在計算的處理上有些微妙之處,這兩個模型的原創者認為他們的預測與觀測的結果吻合。然而,反對的人也大有人在,其中之一是布朗大學著名的宇宙學家Brandenberger教授。趁今年四月Brandenberger教授來台講學之便,我與他當面談及此事,他很感慨的說他的反對的聲音並沒有受到宇宙學社群足夠多的重視,並且含蓄的說想寫一篇有關宇宙學社群的社會學文章。不過就我所知,大部分弦理論學家基於與Brandenberger教授所持相同的理由,對這兩個模型的原創者所得到的結果產生質疑。這也是目前一部分弦理論學家傾向人擇原理(anthropic principle)的原因,她/他們認為合理的宇宙初始條件必須保證在演化中能產生人類,否則我們也不可能存在來進行宇宙學的研究。某種意義上來說,這是學說進展受困時的一種反挫(backlash)。

不過懷疑就是進步的開始。相信在未來的幾年內,上述的兩個「非」暴漲模型會激盪出更新、更好的想法,也許因而解決它們自身的問題也說不定。科學的發展與人類文明的進程一樣,從來都是柳暗花明

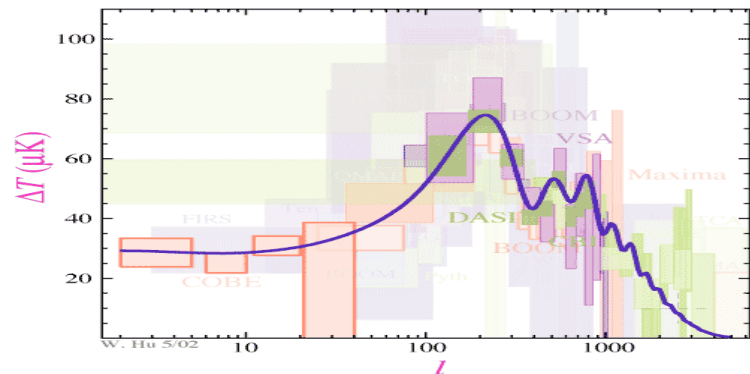
又一村的。想當初二十幾年前暴漲模型剛被提出的時候,有很多不同的版本,眾說紛紜,也沒有人想到它有一天能夠精密的預測出觀測的結果而被寫進宇宙學的教科書裡。然而經過兩代人的集體努力,這一切已經成真,並且成為上個後半世紀最重要的物理學成就之一。還記得,十幾年前的宇宙學教科書裡,暴漲模型是放在終章有關展望的部分,而如今的教科書已經把它放在中間的主力部分。我們目前所做的,就像牛頓所說的:站在巨人的肩膀上,想辦法看清楚更早、更早的宇宙是一個什麼樣子。

作者簡介:林豐利

猶他大學物理博士,主要從事弦理論研究

目前擔任國家理論中心物理組博士后

八月以後將到台灣師大任教



此圖是幾個不同的探測器所測量到的宇宙背景輻射溫度的各向異性,縱軸是溫度擾動的大小,與早期宇宙的量子效應有關,橫軸是擾動的尺度大小,越靠近原點尺度越大。此圖顯示大尺度的擾動幾乎是尺度不變的,也就是說,不同尺度的擾動強度是約略相同的。更精確的測量這極微小的尺度不變性的偏差將有助於解讀早期宇宙的量子引力效應。

附圖一

