

弦論與宇宙學

文/賀培銘

摘要

本文簡介近來宇宙學理論發展中與弦論有關的一些想法。

一、前言

弦論 (string theory) [1]的發展在物理學中是比較奇特的。發展弦論的主要目標，是要建立一個重力的量子理論。除了弦論之外，另一個比較出名的量子重力理論是 Ashtecker 的 loop gravity。而弦論和其他理論不同之處，是它也要去統一所有其他已知的物理。

需要考慮重力場的量子力學的現象其實不多，目前也沒有直接可以與量子重力理論比較的實驗結果。所以弦論的發展並不像傳統物理的發展，通常是先有現象觀測或實驗結果，才試圖建立理論。至今弦論的發展，主要是理論上的需要。

目前在地球上進行的高能實驗，雖然都是量子現象，但因能量還不夠高，重力作用的影響太小，還量不到。真的需要量子重力學(如弦論)的現象，最主要的例子有兩個，即黑洞和早期的宇宙。隨著天文觀測的進展，我們希望很快可以直接檢驗這些量子重力理論。

過去的弦論研究中，有關黑洞的討論很多，最近才開始有越來越多有關早期宇宙的研究。這個

現象一方面是因為早期宇宙的研究比黑洞更複雜，另一方面也因為宇宙學的知識一直到近來才有大量的天文觀測的數據支持，因而有比較好的基礎。

對弦論來說，如前所述，很難在地球上實驗驗證；但如果能從弦論中推出早期宇宙的模型，可能是弦論被驗證最好的機會。相對地，宇宙學的理论，如果不是被包含於高能理論與量子重力理論之內，而是獨立於其他物理之外，則很難完全被物理學家接受。因此我們也希望弦論可以為宇宙模型提供理論上的基礎。

二、與弦論有關的宇宙學問題

宇宙學中的標準模型，可以用已知的粒子物理學為基礎，解釋 nucleosynthesis 及之後所發生的大多現象；nucleosynthesis 時的宇宙狀態大致是確定的。前面所說的“早期宇宙”，指的是 nucleosynthesis 之前的宇宙。

有關早期宇宙的模型，目前最受歡迎的是 inflation。Inflation 指的是宇宙以大於零的加速度膨脹極大的倍數。在這類模型之中，inflation 之後宇

宙才進入 nucleosynthesis 的狀態。而 inflation 之前的宇宙是什麼樣子，則是眾說紛紛。Inflation 還不算完全被驗證接受的理論，但已有不少觀測上的證據。

Inflation 的模型，及其他的早期宇宙模型，通常是用廣義相對論及量子場論作基礎的。雖然嚴格來說，廣義相對論（古典的重力理論）與量子場論並不相容，應該用弦論或其他量子重力理論才對；但是一些簡單的估算似乎並不需要完整的理論，而是可以靠物理直觀，在適當的情形中運用適當的理論就可以了。這就是為什麼這些模型可以不依賴量子重力理論而直接與天文觀測比較。（最後一節會提到可能的例外情況。）

當然，也有一些問題是需要完整的量子重力理論才能回答的，這時弦論就應該可以派上用場了。例如，為什麼會有 inflation？發生 inflation 的可能性有多大？inflation 之前的宇宙是什麼樣子（初始條件）？但可惜我們目前對弦論的了解還不夠，還不能清楚的指出弦論中的宇宙到底長什麼樣子。近幾年弦論研究的主流，就是朝這個方向努力。

另一方面，如果弦論是對的，一個完整的宇宙學模型還必須包括許多新的內容，例如：多出來的空間維度如何隨時間演變或如何保持穩定？會不會有弦或 D-brane 在宇宙早期被產生之後留下蹤跡？直到目前，弦論引入宇宙的問題比它解決的問題多的多——不過這些問題也是對宇宙有一個完整的了解之前所必須回答的問題。畢竟物理的不同領域不可能被視為完全獨立的。

三、弦論中和宇宙學有關的想法

雖然我們還不能從弦論中讀出早期宇宙的秘

密，但是弦論的一些基本性質，已經影響了物理學家建構宇宙模型時的思考方向。以下我們舉幾個比較重要的例子。

1. Extra dimensions

超弦理論需要 9 維空間和 1 維時間，雖然違反了常識，但不是不可能，而且有不只一種可能。第一類可能性屬於 Kaluza-Klein 理論。Kaluza-Klein 理論指的是超過三維空間的理論，其中多出來的空間維度，因為縮的太小了，我們感覺不到。通常我們感覺到的空間維度，似乎是無限延伸到無限遠的直線（其實也沒人知道是不是真的無限），如何能縮的很小呢？多出來的空間必須是 compact space，才能縮的很小。例如一個圓圈，和直線一樣是一維空間，但是可以縮的很小，小到看起來幾乎像是一個點（零維空間）。在弦論中，所有空間的形狀及大小都是物理變數，需要由理論（及初始條件）決定他們隨時間變化的情形。根據 Brandenberger 和 Vafa 的說法[2]，如果假設宇宙早期每一個空間維度都是一個圓圈，弦論中因為有弦，宇宙膨脹之後最可能的狀態，就是只有三維大的（看起來像直線的）空間。另一種可能必須要等到下面介紹了 D-brane 之後才能解釋。

2. Extended objects

弦論中的弦是具有一維空間的東西。弦論中除了弦，還有各種不同維度的 D-brane。空間上有 p 維的 D-brane 被稱作 Dp-brane。D-brane 的特徵是它的表面上可以附著一種弦，這些弦（線段）的端點離不開 D-brane，只能在 D-brane 上滑動。這些弦的其他部分可以離開 D-brane，但是因為弦的張力很大，大部分的時候這些弦看起來都像 D-brane 上的粒子。我們還沒看到多出來的六維空間的另一

種可能，就是我們世界裡大部分的東西（如光，電子，夸克等）都是由 D3-brane 上的這種弦所構成，所以所有的運動都被限制在三維空間中。唯一一定可以離開 D-brane 的東西是重力作用（時空的彎曲），但是重力作用很弱，實驗上的限制較小。前面所說的 Kaluza-Klein 理論中縮的很小的空間，他們的大小必須小於 $1/\text{TeV}$ 才能不被所有的已知實驗探測到。但是如果只有重力可以被用來探測這些維度，則其大小只需比厘米小一兩個數量級而已 [3]。事實上，多出來的維度甚至有可能是無限延伸的，我們需要的是空間在它們延伸的方向上適當的彎曲，使 D-brane 附近的重力場擾動不容易傳太遠。

3. Large moduli space

弦論的一個特色是變數極多 [4]。前面提到它九維空間的形狀大小都是完全由弦論中的變數控制。除此之外，弦論中弦的交互作用強度大小，及各種規範場的背景值，都是理論中的變數。宇宙演化時，這些變數也可能一同演變。最大的問題是，他們的初始條件是什麼？根據我們現在對弦論的了解，看不出有什麼原因宇宙的初始條件是唯一的；事實上看起來有無限多的可能。弦論因此似乎無法唯一地決定為何我們的宇宙長這個樣子。有人因此開始採取不同的態度看這個問題。比如，有些人試著計算各種宇宙狀態出現的機率，希望看起來和我們的宇宙相像的宇宙出現的機率比較大。另一些人試著引入弦論以外的原理，如人擇原理（anthropic principle）等 [5]。

4. Singularity

廣義相對論中的時空常有奇點。如果把膨脹中的宇宙推回到時間的上游，會碰到一個奇點。古典

理論中時空的奇點代表理論失效的地方，但並不代表量子重力理論也會失效。弦論中常發生的情形是，古典的時空描述有奇點，但弦論本身在奇點處仍保持有效。一個有趣的例子是圓圈的 T-duality。假設有一維空間是一個圓圈，半徑為 R 。（重點並不是它是圓的，而是它的周期性邊界條件。）一根弦在圓圈上的基本狀態可以有兩種：一種是弦纏繞在圓圈上，纏 n 圈；另一種是它繞著圓圈跑，動量為 p 。如果弦的張力為 T ，纏 n 圈對能量的貢獻為 $2\pi nRT$ 。而根據量子力學， $p = m/R$ ，其中 m 為整數。如果交換這兩種狀態（ $m \longleftrightarrow n$ ），並同時將半徑改為 $1/2\pi TR$ ，整個理論看起來不變。在古典的描述中，當 R 趨近為零時，空間是一奇點；但在弦論中這顯然不是奇點，因為根據上面的說法， R 趨近零等同於 R 趨近於無限大！

四、結論

雖然弦論十分複雜，使我們還很難從它得到關於宇宙學（或其他較容易觀測到的物理現象）的確實描述（就好像我們很難從量子色動力學中推出核子物理的性質），但是弦論已經提供了許多新的想法，刺激了宇宙學的發展。

然而，除了刺激新的宇宙模型的建立之外，如果希望弦論真的在宇宙學方面有實質上重要的影響，我們還需要對弦論及宇宙學同時多下些苦工才行。特別是如果我們希望弦論（或任何新的理論）對 inflation 的理論能有不久之後就可以測量到的影響，是很困難的，因為 inflation 的一個性質就是它對許多細節不太敏感（這也是許多人喜歡它的原因之一）。一般來說，不管是不是弦論，現在看起來比較容易觀察到新的物理理論的影響的辦法，是

去測量宇宙背景輻射（cosmic microwave background radiation）中非高斯分布的程度（non-Gaussianity）。

另一種較特別的可能，是新的理論像弦論一樣，有所謂的 UV-IR connection，這是指理論中極大尺度的物理和極小尺度的物理之間有一種特殊的關係。所以不只高能量，小尺度的物理被新的理論修正，連低能量，大尺度的物理也同時有所改變。不過我們還不太清楚弦論這個性質在一般時空中的具體描述；事實上，目前我們對一般的隨時間變化的空間中的弦論了解極少，這是把弦論運用在宇宙學上最大的阻礙。宇宙學對弦論發展的影響，就是它使弦論學家近幾年以來，將如何描述隨時間變化的背景中的弦論，視為最主要的問題之一。弦論和宇宙論都屬於還未定型前的發展階段，雙方的發展方向應該是要試著建立關係，近幾年來弦論學家和宇宙學家的對話越來越多，這種努力應該也會對兩者分別的發展都有所幫助。

參考資料：

- [1] Superstring Theory, Green, Schwarz, Witten (Cambridge); String Theory, Polchinski (Cambridge).
- [2] SUPERSTRINGS IN THE EARLY UNIVERSE, Brandenberger, Vafa, Nucl. Phys. B **316**, 391 (1989).
- [3] THE HIERARCHY PROBLEM AND NEW DIMENSIONS AT A MILLIMETER, Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali, Phys. Lett. B **429**, 263-272 (1998).
- [4] Susskind's talk at String Cosmology Conference

at KITP, Santa Barbara,

http://online.kitp.ucsb.edu/online/strings_c03/.

[5] Dimopoulos's and Vilenkin's talks at String

Cosmology Conference at KITP, Santa Barbara,

http://online.kitp.ucsb.edu/online/strings_03/.

作者簡介

賀培銘於 1989 年從台大電機系畢業，於 1996 年從美國加州大學柏克萊分校物理系獲得博士學位。接著在美國猶他大學從事博士後研究，於 1997 年赴普林斯頓大學訪問，並於 1998 年到台大物理系服務，於 2001 年升任副教授至今。專長為弦論、數學物理。

Email: pmho@phys.ntu.edu.tw