

超弦發展史

■ B86 朱炳瀚

—賀培銘老師 修訂—

“String theory has been described as part of the physics of the 21st century that fell by accident into the 20th century said Edward Witten.”

1921 克魯札—克萊因(Kaluza-Klein)

1926，愛因斯坦(Albert Einstein)的同事克魯札(Theodore Kaluza)率先發表一篇論文，之後波爾(Niels Bohr)的同事克萊因(Oscar Klein)加以改進，形成了所謂的克魯札—克萊因理論(Kaluza-Klein theory)，這是個五次元的理論，試圖結合馬克思威爾(James Clerk Maxwell)的電磁學方程式，和愛因斯坦重力方程式，可說是超弦理論的先聲。在這個理論中，克魯札、克萊因兩人將原本愛因斯坦重力方程式中 4×4 度規(metric)矩陣，進一步擴充成 5×5 矩陣，至於多出來的空間，剛好可擺上馬克思威爾的電磁學方程式。僅僅多加一個次元，就巧妙的結合重力與光，就連當時的愛因斯坦也不免大為震驚。

然而，第五度空間是如此的小，甚至可能僅僅藏於普朗克尺度(Planck length)之下，換句話說，只有 10^{-33} 公分。若要探測此尺度，所需的普朗克能量(Planck energy)，相當於 10^{20} 億電子伏特(10^{19} billion electron volts)，遠遠超過在人類往後數百年間在加速器中所能產生的能量。過去一般的物理學家對於高次元的理論有先天上的偏見，對於無法在近期內做實驗觀測的理論不抱太多興趣。另一方面，當時量子理論的誕生，引發世界的潮流，克魯札—克萊因理論的五次元理論終於胎死腹中。

1970 弦的誕生

1968，當時還在魏斯曼科學研究院(Weizmann Institute of Science)的一名義大利的物理學家維那亞多(Gabriel Veneziano)試圖瞭解強作用力時發表了一篇文章，用數學式來表示瑞吉軌道(Regge trajectory)。他意外發現十九世紀的數學家尤拉

(Leonhard Euler)所完成的尤拉貝他函數(Euler beta function)，幾乎符合所有基本粒子強相互作用所需要的特質。

一年後，另外一群以芝加哥大學的南部(Yoichiro Nambu)和日本大學(Nihon University)的後藤 Tetsuo Goto 為首的物理學家注意到，根據這個方程式，粒子可視為具有某特定的空間延伸量，也就是可以為一段線段，或一段弦。

根據維那亞多模型(Veneziano-Nambu model)，這些弦由兩個反方向的作用力保持微妙的平衡，一是張力，使弦的兩端拉近，另一為使弦兩端分離的加速力。弦就好像飛機的螺旋槳，隨時隨地都在轉動，所謂的離心力使得弦的兩端向外拉，而弦本身內收的張力，恰好與之平衡，此一內收的張力非常強勁，每根弦上約十三噸左右。

這種將次原子粒子描繪成像弦一般的構想，對理論物理而言是極端新奇的。以前，粒子理論學家一直將基本粒子視為沒有大小，不佔空間的點，儘管如此，將粒子延伸於空間中，確實有幾個長處，第一、它合理地解釋了瑞吉軌道；第二：弦的假說為夸克拘禁(quark confinement)現象提供了一套可以接受的模型，圓滿地解釋了為什麼科學家從來不會在加速器上看到夸克，而只看到夸克組合而成的較大粒子。

一時之間，弦模型吸引了各方的矚目，至少是好一陣子。然而，最後物理學家終於明白，那些研究沒有一篇符合事實。因為物理學家發現：處在基態的弦不只是無質量，事實上還應該具有「虛質量」(質量平方為負數)才對。具有虛質量的超光子(tachyons)，可以跑得比光速還快，雖然這仍符合相對論的說法，附加的結果卻很不受歡迎，例如時光的倒流、違反因果律等等。

此外還有多維數的問題，基於某些數學上的原因，弦論必須有二十六維才行，即使對慣於玩弄

古怪假說空間的理論物理學家而言，也會對二十六維的宇宙感到難以捉摸。

另一方面，量子色動力學QCD的問世，也如秋風掃落葉一般，完整而成功地解釋強交互作用，成就了弦論的初衷。一時之間，弦論失去了戰場，被物理學家再次冰凍起來。

1971 超對稱理論(Supersymmetry)

最早的超對稱理論是由威斯(Julius Wess)和蘇米諾(Bruno Zumino)所提出。之後，越來越多的各種超對稱理論被相繼提出。在超對稱理論裡的所有粒子都有超伴子(super partners)，稱為超粒子(sparticles)。每一種玻色子有一個費米伴子(fermionic partner)，而每一種費米子也有一個玻色伴子(bosonic partner)。

在克魯札-克萊因理論蟄伏了近六十年，物理學家又多認識了兩種力，強作用力和弱作用力。物理學家希望將四種力統一起來，在搜尋了各種統一的可能途徑後，這個理論又被人重新提出，物理學家開始克服對高次元空間的歧視偏見，將希望寄託在更高的次元當中，並且嘗試將超對稱併入。

1974 重力子(Graviton)

一開始，弦論只能用來描述包括膠子的玻色子，而且也很快地被夸克模型所取代，但是它的內涵卻仍被繼續發展。在1970，史瓦茲(John Schwarz)和他的同事南夫(Andre Neveu)發現可以描述費米子的弦論。1974，就在量子色動力學(QCD, quantum chromodynamics)能夠將強子描述得很完備的同時，Schwarz和其他同事，發現弦論與重力之間的關係。

這個描述費米子的弦論令人困惑的是，它產生了一些實驗上發現不到的粒子，它在數學上自動地引進一種無質量、自旋2的粒子。但實驗上卻沒

有任何強子可以符合這個數學架構，同時理論學家也在思考，如何擺脫這個不希望產生的粒子。後來，他們瞭解到這是對重力子(gravitons)的描述。重力子是想像中描述量子重力場論的媒介，由於這個特性，弦論當仁不讓的成為量子重力理論的候選人。

1976 超重力(Supergravity)

1976年，紐約石溪分校(State University of New York at Stony Brook)的費禮曼(Daniel Freedman)，斐拉(Sergio Ferrara)和馮紐文惠仁(Peter van Nieuwenhuizen)寫下他們超對稱重力理論的版本。然而，物理學家逐漸看到此理論的問題，經過密集的尋找，並沒有在實驗室裡發現超粒子。物理學家也無法順利的將SUGRA重整化，

1980 超弦(Superstrings)

第一個超弦理論模型在1980由史瓦茲和格林(Michael Green)所發展，處理在十維空間裡的開弦振盪，彼此間能夠連結或斷裂。它並不是Nambu模型的縮小版，事實上，它更進一步，包括了所有已知的粒子和場，和所有費米子和玻色子的對稱和超對稱關係。

1984 The Big Year 第一次革命

在1984，史瓦茲和格林發現存在著一種對稱，SO(32)，可消除所有的畸變和無限大。他們找到了萬有理論的候選人，這使得其他物理學家再一次開始注意起弦論。

同時，普林斯頓大學(Princeton University)成立了一個小組。格羅斯(David Gross)和三名他的同事(Emil Martinec、Jeffrey Harvey和Ryan Rohm，人稱「弦樂四重奏」)試圖再一次回到環圈

的想法，利用不同的數學方式寫下。他們的成果豐碩，涉及到費米子在十維空間振動，但是玻色子的振動仍由當初南部的第一個弦論版本所描述著，而且必須發生在二十六次元的空間內。格羅斯和他的同事發現一個利用單環圈混和兩種振動的方法，十維振動用一種方式繞著環圈，二十六維振動用另一種方式繞著環圈。這個版本的弦論被稱為混合弦(或譯雜弦，heterotic string)。

1991 第二次革命(The Duality Revolution)

在第二次革命前，共有五種不同的弦論版本，它們分別是 $E8 \times E8$ heterotic， $SO(32)$ heterotic， $SO(32)$ Type I，Type II 和 Type IIB。雖然弦論的成功，給萬有理論帶來一線曙光，但依然有著幾個重要疑問：第一，我們無法用傳統方式去證明弦論的對錯，人造的加速器無論無何都無法達到弦論所需的能量，我們需要新的技術和方法。第二，為什麼會有五個弦論的版本？如果它真是我們所期待的萬有理論，五個不同的理論似乎太多了點。第三，如果超對稱允許十一維，為什麼超弦只有十維？最後，如果我們可以將點狀粒子當作弦的振動，那麼似乎沒有理由不能是由二維的膜，三維的方塊，或是更高維的物理的振動。

到了九零年代，物理學家開始了解到各版本間的對偶性(duality)。最重要的突破是在1995年，由當時在南加州大學(University of Southern California)的維敦(Edward Witten)所完成，他將迄今所知的各種對偶性統一在十一維的M理論²之下。

1996 黑洞的熵

1974年劍橋大學(University of Cambridge)的霍金(Stephen W. Hawking)認為黑洞並非完全的黑而是會有輻射能量的放射，由這個角度，黑洞必須擁有熵。哈佛大學(Harvard University)的史卓明勒(Strominger)和法發(Cumrun Vafa)發現由M理論所計算出的黑洞的熵符合霍金所預測的值。

最近羅格斯大學(Rutgers University)的本克(Thomas Banks)和雪克(Stephen H. Shenker)、德州大學(University of Texas)的壘斯勒(Willy Fishler)和史丹佛大學(Stanford University)的薩斯坎(Leonard Susskind)的矩陣理論指出我們的時空幾何可能是非交換的，即 XY 不等於 YX 。這顯示著我們時空的結構可能遠比我們所想的還要複雜。

1 重子有一種特性，就是其角動量對質量平方作圖，會得到一條相當直的線，這些曲線就稱為瑞吉軌道，以紀念其發明人瑞吉(Tullio Regge)

2 M-theory, M表示mother, mystery, membrane，視你所看的角度而定，這是由維敦所命名。筆者在此喜歡稱M-theory為膜理論，讀者可以想像一個二維的膜的振動，取代一維的弦的振動。