

開弦場論和 D-膜簡介

文/陳斌

摘要

本文介紹了開弦場論及其在非微擾弦理論研究中的應用。

二十世紀物理學的两个最重大的發現，是世紀初相對論的建立及其後不久量子論的發現，兩者徹底改變了人們對客觀物質世界的看法。廣義相對論是關於時空的理論，它成功地把時空的性質與萬有引力聯繫起來，顛覆了傳統的牛頓引力中絕對時間和絕對空間的觀念，而量子論是描述微觀世界的理論。至今為止，基於規範對稱性的量子場論近乎完美地描述了主導微觀世界的三種相互作用：電磁、弱和強相互作用。長期以來，人們試圖尋找一個把引力和量子論統一起來的理論，這並不僅僅出於唯美的目的。在時空尺度非常小時，比如早期宇宙或黑洞視界附近，引力的量子效應可以很重要而不能忽略。非常遺憾，儘管經過長期的努力，人們仍然未能建立一個自治的廣為接受的量子引力理論，弦理論的出現讓人們看到了曙光。

作為一個量子引力的理論，弦理論被寄以厚望[1]，人們相信它可以幫助回答物理學中的一些基本問題：自然界的潛在對稱性，黑洞的量子行爲，超對稱的存在性及其破缺，時空奇點的量子處理等。甚至，人們也希望藉由對它的研究可以對更深奧的問題，如量子力學及時空的本性，提供線索。

簡而言之，弦理論是基於這樣一個出發點：所有的基本粒子，包括傳播引力相互作用的引力子，實際上都不是通常量子場論中的點粒子，而是一維的物體，弦，弦非常微小，只有在普朗克尺度下才有望與點粒子區分開來。正如點粒子在時空運動如一根曲線，弦在時空運動時掃出一個曲面(常稱爲世介面)，與粒子理論不同，弦理論中相互作用，超對稱，規範群的選擇都是嚴格地受到限制。已知的基本粒子都在弦的振動譜中出現，而弦間的相互作用可以直觀地從幾何上理解爲弦的分裂和聯結。

弦有兩種，一種是開弦，有兩個端點；另一種是閉弦，是一根封閉的弦。很容易想象：開弦的兩個端點接在一起就得到閉弦，這暗示著兩種弦的物理是緊密相聯的。開弦的振動激發譜中包含無質量的規範粒子，而閉弦的振動激發譜中包含無質量的引力子。在某些特定背景下，開弦和閉弦的對偶關係表現爲規範理論和量子引力的對應。一個著名的例子是數年前發現的 AdS/CFT 對應[2]。

弦理論發展至今，經歷了兩次重大的突破，或者稱爲革命。第一次弦革命發生在上世紀八十年代

中期，微擾弦理論研究突飛猛進。如通常量子場論一樣，微擾理論是對相互作用做漸進展開，只不過弦理論的微擾費曼圖是二維黎曼面。人們發現有五種相互獨立的自治的弦理論，它們的基本性質，如世介面的幾何，規範群，超對稱等，都截然不同。

第二次弦革命發生於上世紀九十年代中期，通過對非微擾弦理論的研究，人們對弦理論的結構，內部自治性等有了更深刻的理解，這中間起著決定作用的是弦對偶的概念。通過各種對偶關係，五種相互獨立的微擾弦理論可以聯繫起來，並可以被看作一個統一理論在不同的背景下的展開。非微擾物理指的是不能通過微擾展開來研究的效應。在通常的量子場論中，非微擾效應如孤立子，瞬子等已被證明對理論的研究非常重要。同樣，在弦理論中一個被稱為 D-膜的非微擾孤立子也是理解弦理論本質的關鍵[3]。

D-膜是第二次弦革命的一個非常重要的發現，它的存在說明了弦理論中不僅只有弦，也有各種更高維的物體。一個 D-膜可以看作是時空中開弦端點開始和結束的地方。Dp-膜是一個(p+1)維的世介面(p 維空間加 1 維時間)，開弦端點在其上可以自由地移動。實際上，對開弦的研究發現，它的端點必須在 D-膜上。端點在 D-膜上的開弦的無質量激發描述 D-膜的振動，所以 D-膜的開弦描述在低能下是一個有效規範場論。

上面的討論中我們忽視了一個重要的事實，即膜位形可能是不穩定的。不穩定的膜位形在弦理論中大量存在，而且過去幾年對不穩定的膜位形的研究被證明是極有價值的，大大拓寬了我們對 D-膜和非微擾弦理論的認識。不穩定的膜位形指的是其振動譜中包含有質量平方為負的快子，快子的存在

說明位形是不穩定的。快子凝聚使不穩定的膜位形衰變到一個穩定的位形，通常是一個穩定的膜位形。描述不穩定的膜位元形物理的一個有效而重要的工具就是開弦場論。

另一方面，儘管人們認識到在五種微擾弦理論背後存在著一個統一的理論，但對其知之甚微。僅僅瞭解理論在不同背景下的微擾性質是遠遠不夠的，要定義一個完整的理論，我們需要知道非微擾的物理，況且為了瞭解我們所處的世界，我們需要對這個統一理論的動力學有一個完整的知識，解決問題的一個可能是每一個微擾弦理論都有一個弦場論，從而有了一個非微擾的定義，不同的弦對偶對應於一個理論通過變數變換到另一個理論。

那麼，什麼是弦場論呢？

在人們熟知的從量子力學到量子場論中，量子力學是粒子運動路徑的積分，常稱為一次量子化描述。而在量子場論中，是對定義在時空點上的場做路徑積分，即二次量子化。當然，量子場的微擾理論是可以通過引進明顯的相互作用頂角用一次量子化的形式來描寫，但如前所述，非常重要的非微擾效應必須求助於量子場論，對稱性原理如規範不變性和廣義座標不變性等決定了理論的形式，類似地，由定義在弦上的場，即弦場，加以對稱性原理，我們可以定義弦場論。

由於弦場是定義在弦上，而弦的振動激發譜有無窮多個態，所以弦場形式上是與這些激發相聯的無窮多個時空場的和。換言之，弦場論不是通常的擁有有限個場量的量子場論，而是一個同時描述無窮多個量子場的理論。另一方面，弦場論的對稱性原理是弦理論的 BRST 不變。弦的二維世介面上有共形不變性，它是一個經典對稱性。經過量子化

後，我們希望共形不變性仍然保持，這就給出了弦理論的 BRST 不變性。BRST 不變性在弦理論中被人們認為是必不可少的，它決定了各種弦理論的自洽維度：玻色弦只能在 26 維(25 個空間維度加 1 個時間維度)中自洽存在，而超對稱弦只能在 10 維(9 個空間維度加 1 個時間維度)中自洽存在，它也決定了微擾弦振動譜中什麼樣的態是物理態。加在弦場上的 BRST 不變性自然地包含了各時空場上的對稱性，如無質量規範場上的規範對稱性。

在上世紀八十年代，對弦場論曾經有大量的研究。人們構造了關於玻色開，閉弦及超對稱開，閉弦的弦場論。對於閉弦，有光錐閉弦場論，光錐閉弦場論損失了理論的協變性，但仍然是一個很重要的工具。近年來，它被用於討論在某些特定背景下的閉弦理論，進而檢驗規範理論和量子引力的對應關係。而各種超對稱弦場論，由於理論的複雜性，還未得到足夠的重視和研究。

本文重點介紹的是過去幾年受到廣泛重視和研究的開玻色弦場論，更準確地說，是 E.Witten[4] 提出的開弦場論模型(Open String Field Theory, 簡稱爲 OSFT)及其衍生模型。

OSFT 是 E.Witten 在 1986 年構造[4]，它有一個非常簡單的作用量形式：

$$S(Y) = \langle Y, QY \rangle + 2/3 \langle Y, Y * Y \rangle$$

這兒 Y 是弦場，Q 是 BRST 運算元， \langle, \rangle 是態空間上的內積，* 是弦場間的乘積。這個作用量的第一項描述自由場的傳播，第二項是相互作用項，如果沒有相互作用項，運動方程告訴我們

$$QY = 0$$

這正是弦場上的 BRST 不變性條件，弦場間的相互作用由相互作用項決定，它是一個非常簡單的三弦

相互作用，即兩根弦相撞產生第三根弦。

由於弦的相互作用是非局域的，弦場間的乘積需要小心定義。爲了保持乘積的結合律，Witten 提出了中點相互作用的原則：一根開弦可由中點分成左右兩半，一根弦的左半部分與另一根弦的右半部分重疊而誘導相互作用，剩下的兩個半邊正好組成第三根弦。這樣定義的相互作用保證了乘積的結合性，但仍破壞了乘積的對易性。這是非對易幾何在弦理論中出現的著名例子。由三弦相互作用可以輕易地定義多於三根弦的相互作用。

儘管 OSFT 的形式異常簡潔，但實際計算卻非常複雜。在八十年代中後期，有大量關於 OSFT 的研究，然而對它的深入研究和應用卻是在九十年代中後期，對開弦快子凝聚問題的探索給予它新的生命力。

前面提到，快子出現在不穩定膜位形的振動譜中。而實際上開弦快子首先出現在玻色開弦的譜中，表明這個理論的微擾真空是不穩定的，這個不穩定真空的命運如何長期以來困擾著人們。1999 年，印度物理學家 A. Sen[5] 注意到玻色開弦理論實際上描述的是在一個充滿 26 維時空的 D25-膜上的開弦，開弦快子代表著這個 D25-膜的不穩定性，進一步地，他提出以下三個猜測：

1. 不穩定真空將衰變到一個穩定真空，兩個真空的能量密度差正等於 D25-膜的張力強度，這樣，在最終的穩定真空中，D25-膜不存在；
2. 弦理論中各種低維 D-膜是在 D25-膜背景下的 OSFT 的孤立子解，這意味著不同的 D-膜位形可以從同一個 OSFT 得到；
3. 最終的穩定真空是一個閉弦真空。

同時，Sen 也提出 OSFT 是檢驗以上猜測的當

然工具，他指出定義在不穩定真空處的 OSFT 應精確地給出 D25-膜的張力強度，而由包含相互作用項的作用量得到的運動方程應給出各種孤立子解，對應到不同的 D-膜位形。

確實，利用數值方法，人們發現 OSFT 很好地驗證了前兩個猜測。這並不能使人們滿意，人們希望利用解析方法來檢驗上面三個猜測。Sen 及其合作者進一步發展了 OSFT 並提出了真空弦場論 (Vacuum String Field Theory, 簡稱為 VSFT) 的概念。

在討論 VSFT 之前，讓我們更仔細地瞭解一下穩定真空。猜測 3 告訴我們經典穩定的快子真空是個閉弦真空，沒有任何 D-膜存在。如果有微擾態存在的話，也只能是閉弦態。這個快子真空非常特殊，它應該是任何不穩定 D-膜位形衰變的最終目的地。這是由於在玻色弦理論中，所有的膜位形都是不穩定的。可以假定，在快子真空處定義的理論與快子凝聚前不穩定 D-膜位形的 OSFT 無關。這是因為這些不穩定 D-膜位形的 OSFT 在穩定真空附近應該可以通過場的重定義互相等價。如果這個假定成立，則說明在真空處存在一個普適的理論，稱為真空弦場論，描寫快子真空的物理。

VSFT 是一個非常誘人的想法。Rastelli, Sen 和 Zwiebach(RSZ)[6]提出了一個非常簡單的 VSFT 構造。在這個 RSZ 理論中，VSFT 與 OSFT 有相同的形式，但 BRST 運算元有更簡單的構造，從而使弦場分解成兩部分，運動方程也回應地分解。弦場的一部分及其運動方程的解是普適的；而弦場的另一部分則滿足一個投影子方程，它是解析可解的，不同的解給出不同的 D-膜位形。而且，這些孤立子解的能量密度之比與已知的不同維數 D-膜間的

張力強度之比完全一致。儘管 RSZ 理論有一些非常美妙的性質，但遺憾地是它是一個有奇異性的理論。實際上，RSZ 理論中每個孤立子解的能量密度都是零，只有能量密度間的比是有限的。

Sen 關於開弦快子凝聚，快子真空的猜測至今已廣為人所接受。而通過開弦場論對其猜測的檢驗也獲得了很大程度上的成功。其中一個重要的結果是：OSFT 可成功地描述具有不同幾何性質的真空。換句話說，不同的開弦幾何背景可以由一個運動方程的不同解給出。這些開弦幾何背景間互不相干，比如說它們的維數不同，不可能在微擾弦理論的框架中討論。

有人甚至認為作為弦理論的一個非微擾定義，OSFT 也許可以包含所有的弦背景。這可能過於樂觀。一個簡單的問題是：OSFT 如何描寫閉弦背景？這個問題至今仍懸而未決。對於 OSFT 而言，還有其他的一些相當困難的問題，如：

1. 快子真空的解析解。在尋找快子真空的解方面，數值方法取得了極大的成功。但一個解析解似乎仍遙不可及。解析解可以幫助我們加深對理論的瞭解並帶來新的進展。
2. 正則的，而非奇異的 VSFT。由於 RSZ 理論的成功，人們希望其奇異性可以得到改善。但至今進展甚微。
3. 超對稱 OSFT。這是一個重要的問題，因為經驗告訴我們通常超對稱的理論擁有更好的性質。也許超對稱 OSFT 可以帶來驚喜。但人們發現至少對於 VSFT，其超對稱化有本質困難。

總之，開弦場論作為弦理論的非微擾定義，在

描述開弦快子凝聚的問題上取得了相當大的成功，使我們對非微擾弦理論有了更深刻的認識。但它的成功同時也提出了新的課題，對開弦場論及其相關的非微擾弦理論問題的研究才剛剛起步，雄關漫漫，更待後生。

參考資料：

- [1] M. Green *et al.*, Superstring Theory (1987).
- [2] J. Maldacena *et al.*, Phys. Rept. **112**, 183 (2000).
- [3] J. Polchinski, String Theory (1998).
- [4] E. Witten, Nucl. Phys. **B 264**, 513 (1986).
- [5] A. Sen, JHEP **9912**, 027 (1999).
- [6] L. Rastelli *et al.*, Adv. Theor. Math. Phys. **5**, 353 (2002).

作者簡介

陳斌於 1992 年從中國科技大學近代物理系畢業，於 1997 年從中國科學院理論物理所獲得理論物理學博士。接著並於日本大阪大學物理系，國際理論物理中心從事博士後研究，於 2003 年到中國科學院理論科學交叉中心服務，任固定期副研究員。專長為量子場論和數學物理，研究主題為弦理論，非對易幾何，量子引力。

Email: bchen@itp.ac.cn

