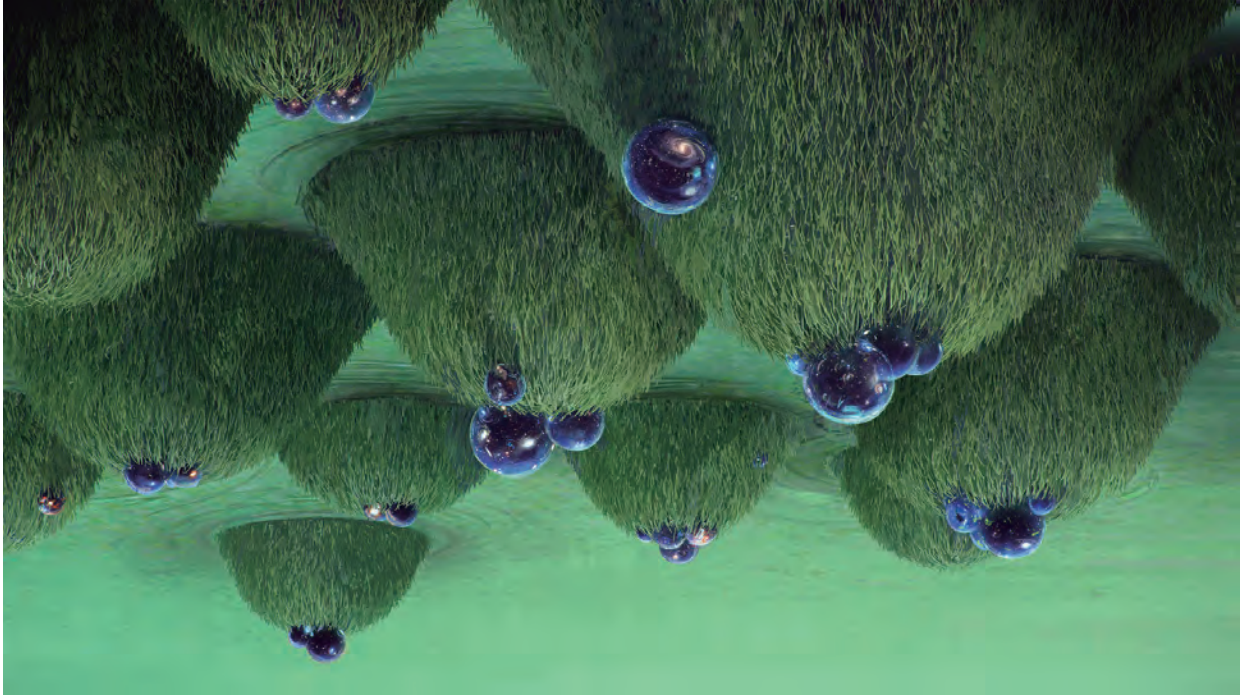


# 弦論是否有暗能量的容身之處？

一篇有爭議的新論文認為，像我們這種暗能量型態的宇宙，並不存在於弦論所容許的宇宙「地景」中。

作者：渥秋華（Natalie Wolchover）譯者：戴守煌

作者簡介：渥秋華是 Quanta 的物理科學類資深撰稿人。她是塔夫斯大學物理學學士，曾於柏克萊大學攻讀研究所，並為多本雜誌撰稿。



（Maciej Rebisz for Quanta Magazine 繪製）

弦論裡有一幅由可能宇宙構成的「地景」，周圍環繞著不合邏輯的「沼地」。物理學家研究過的所有簡單可行的弦論宇宙中，暗能量密度不是一直減少，就是具有一個穩定的負值，跟我們帶有穩定正能量的宇宙不同。

6月25日，瑞斯（Timm Wrase）在維也納剛從睡夢中醒來，睡眠惺忪地瀏覽著線上文獻庫最新發表的物理論文。有個驚悚的標題令他睡意全消。

這篇由哈佛大學知名物理學家瓦法（Cumrun Vafa）與同僚合著的論文，根據弦論理論架構推敲出一條簡潔的方程式，決定哪些宇宙可以存在，哪些不被允許。弦論是結合重力與量子物理之「萬有理論」（Theory of Everything）的首選，它將一切物質與力定義為一縷縷微小能量的各種振動模式。

這個理論允許  $10^{500}$  種不同的解——即為由各種可能宇宙所構成，一幅巨大而變化萬千的「地景」（landscape）。多年來，瑞斯與瓦法等弦論學者一直致力確認我們這個特殊宇宙在可能性地景中的落腳之處。

但如今瓦法與同僚卻猜測，我們的宇宙（或像我們這樣的宇宙）並不存在於弦論地景之中。瑞斯與其他弦論學者隨即明白，如果這個猜想正確，要不是宇宙跟我們原本的理解截然不同，就是弦論錯了。



Quanta Magazine 是西蒙斯基金會（Simons Foundation）出版但編輯獨立之網路科普雜誌（<http://www.quantamagazine.org/>），希望能提高數學、物理與生命科學前沿研究進展的公眾能見度。本文譯自：

<https://www.quantamagazine.org/dark-energy-may-be-incompatible-with-string-theory-20180809/>

本刊感謝 Quanta magazine 與主編 Thomas Lin 同意翻譯轉載，翻譯之文責由本刊自負。

當天早上送小孩上幼兒園之後，瑞斯前往工作地點維也納工業大學，那裡的同事也在聊這篇論文。同一天，瓦法在沖繩舉行的 2018 年弦論研討會中發表這個猜想，物理學家們將他演講的串流到全世界。場內場外都爆發了論戰。「有人立刻說：『這一定不對』，還有人說：『喔，這個我已經講好幾年了』，還有各種介於兩種極端之間的意見。」瑞斯說。他還說，場面顯得無所適從，「不過，當然也引發了巨大的振奮感。因為如果猜想是正確的，將會對宇宙論帶來許多意義深遠的影響。」

研究人員已經開始著手驗證這個猜想，並探討其意含。瑞斯已撰寫兩篇論文，其中一篇或許能改進這個猜想。這兩篇論文大部分是在跟家人一起渡假時完成的。回憶當時他是這麼想的：「這實在太興奮了，我非得進一步研究清楚不可。」

這個猜想的方程式是在 6 月 25 日由瓦法、歐比德（Georges Obied）、大栗博司（Hiroshi Ooguri）與史波迪奈科（Lev Spodyneiko）合著的論文中提出，並在兩天後由瓦法、歐比德、阿格拉瓦爾（Prateek Agrawal）與史坦哈特（Paul Steinhardt）合作發表的論文中深入探討。它傳達的概念很簡單：宇宙擴張時，真空能量密度的遞減率必須高於某個特定值。這個法則對所有基於弦論的簡易宇宙模型都成立。但它違背了真實宇宙兩大廣為人知的信念，導致兩者都不可能實現。它們分別是：受到公認的宇宙現階段擴張，以及主流模型描述的宇宙暴脹式誕生。

## 倍受質疑的暗能量

1998 年以來，望遠鏡觀測結果顯示，宇宙擴張的速度隨著時間逐漸加快，意謂宇宙真空必然充斥著一種反重力的「暗能量」（dark energy）。除此之外，真空暗能量看起來是恆定的，不隨時間改變（據我們目前所知）。不過這個新猜想宣稱，宇宙的真空能量必須隨時間遞減。

瓦法與同僚主張，真空能量為恆定正值的宇宙（稱為「德西特宇宙」，〔de Sitter universe〕）不可能存在於弦論當中。自 1998 年暗能量被發現以來，弦論學者就卯足了勁，想建立具有公信力的穩定德西特宇宙弦論模型。但如果瓦法是對的，這些努力的下場註定淪為不合邏輯；德西特宇宙並非位於地景中，而是落在「沼地」（swampland）裡。「看起來合乎邏輯但其實不合邏輯的解，我稱之為『沼地』，」他在最近解釋道：「它們看起來幾乎跟地景一樣，你可能會被騙。你以為它們建構得起來，但其實不行。」

根據這個「德西特沼地猜想」，所有可能、合理宇宙的真空能量，若不是像球從斜坡上滾下來那樣逐漸減少，就是具有一個穩定的負值（稱為「反德西特宇宙」〔anti-de Sitter universe〕，具有穩定的負真空能量，在弦論中很容易建立）。

如果這個猜想為真，就意謂我們宇宙中的暗能量密度不可能是常數，而是以名為「第五元素」（quintessence）的形式存在，這是一種幾十億年來逐漸減弱的能量源。目前有好幾組望遠鏡正在進行觀測，希望更精確測量宇宙的擴張是否為等加速度（也就是新空間的誕生會產生等比例的新暗能量）；還是宇宙加速度像第五元素模型預測的，正在逐漸改變。如果發現第五元素，基礎物理和宇宙學都將



瓦法是哈佛大學知名的弦論學者，已經發掘不可能宇宙的「沼地」禁地長達 13 年。（維基·Sahecho 攝）

發生革命性的劇變，包括宇宙的歷史與未來也將重新改寫。第五元素宇宙的擴張會逐漸減慢；在多數模型裡，宇宙最終將停止擴張並開始縮小，直到大崩墜（Big Crunch）或大反彈（Big Bounce）為止，而不是終結於大撕裂（Big Rip）。

瓦法的論文合作者之一，普林斯頓大學宇宙學家史坦哈特說，在未來幾年內，「全世界都將關注」暗能量巡天（Dark Energy Survey, DES）、廣域紅外巡天望遠鏡（Wide Field Infrared Survey Telescope, WFIRST）與歐幾里得望遠鏡的觀測成果，也就是暗能量密度是否會變化。「如果發現它不符合第五元素的特性，」史坦哈特說：「那就意謂沼地的想法錯了，或者弦論錯了，或者兩者都錯，或者……有某個東西錯了。」

## 四面楚歌的宇宙暴脹

更要緊的是，這個新的沼地猜想也質疑了廣為世人相信的宇宙誕生故事：以宇宙暴脹為名的大霹靂理論（Big Bang Theory）。根據這個理論，一個充能量的微小時空區域迅速暴脹成我們居住的巨觀宇宙。這個理論構想一部份是為了解釋我們宇宙如何演變成如此巨大，如此均勻，又如此平坦。

但是這個驅使宇宙暴脹的假想性能量「暴脹子」場（inflaton field），在瓦法的方程式中並非穩定不變。他與其他學者解釋道，為了遵循這條方程式，暴脹子場的能量很可能必須銳減，才能形成一個夠均勻、夠平坦的宇宙。因此這個猜想並不認同眾多熱門的宇宙暴脹模型。未來數年內，西蒙斯天文台（Simons Observatory）等望遠鏡將尋找宇宙暴脹

的確切訊號，讓弦論與競爭對手理論一決高下。

在此同時，經常並肩站在聯合陣線的弦論學者卻不認同這個猜想。史丹佛大學物理學教授席維爾斯坦（Eva Silverstein）是致力建構弦論宇宙暴脹模型方面的頂尖專家，她就認為它很可能是錯的。她的先生史丹佛教授卡克魯（Shamit Kachru）也這麼想。卡克魯就是 KKL<sup>T</sup> 的第一個 K —— 這是 2003 年一篇知名期刊論文的四位作者開頭字母縮寫，該論文提出一批可用於建構德西特宇宙的弦論素材。瓦法的方程式指出，席維爾斯坦和卡克魯的建構方式都不會成功。「我們家裡被這些猜想圍攻，」席維爾斯坦開玩笑地說。不過在她的觀點看來，相較於往昔，由於新論文的出現，加速擴張模型已不再不受青睞。「他們基本上就只猜測了這些東西不會存在，引用的是非常有限甚至十分可疑的分析。」她說。

紐約大學弦論學者兼宇宙學家克雷本（Matthew Kleban）也在研究暴脹的弦論模型。他強調，這個新的沼地猜想具有高度臆測性，而且還犯了「路燈推理」的毛病，因為弦論地景大多還沒被探索過。不過他也同意，若只根據已知的證據，這個猜想很有可能成立。「它在弦論裡頭可能是對的，但也許弦論無法描述這個世界，」克雷本說。「（也許）暗能量已經將弦論否定了。這顯然會非常有趣。」

## 發掘沼地

究竟德西特沼地猜想以及未來實驗是否足以否定弦論，仍然沒有定數。弦論在公元 2000 年代早期被發現擁有多達  $10^{500}$  個解，粉碎了它終將對我們這個宇宙的性質提供獨到預測的夢想。該理論幾乎

可以為任何觀測結果提供支持，因而非常難以用實驗來驗證或否定。

瓦法在 2005 年和一群合作者開始思考如何降低可能解的數目，方法是找出自然界非成立不可的基本特性。例如他們的「弱重力猜想」宣稱，在任何合乎邏輯的宇宙中，重力一定是最微弱的力。不符合這種要求的假想宇宙，就會被移出地景，置入沼地中。這些沼地猜想有許多在質疑聲中屹立不搖而聲名大噪，其中一些如今已「具有非常堅實的理論基礎，」加州理工學院理論物理學家大栗博司說道；他是瓦法最初的沼地合作者之一。舉例來說，弱重力猜想累積的證據已經多到令大家開始猜測這個性質具有普遍性，與弦論是否為量子重力的正確理論無關。

「地景結束、沼地開始」的直覺，源自於數十年來投注在建構弦論宇宙模型的諸多心力。這個計畫的主要挑戰在於，弦論預測時空有 10 維，遠超出我們宇宙中可見的 4 維。弦論學者假定額外的 6 維空間必定很微小，緊密捲縮在 4 維時空的每一點上。這些額外維度的不同組態造就了地景。不過雖然可能組態的數量十分龐大，瓦法等人已經找出一些通則。比如說，重力會使捲曲起來的維度內縮，而電磁之類的場則會將一切外推。在簡單的穩定組態中，這些效應該透過攜帶負真空能量來達到平衡，因此產生反德西特宇宙。真空能量很難轉變為正。「在物理學裡頭，我們通常會有足以說明普遍現象的簡單範例，」瓦法說：「德西特宇宙不屬於這種。」

KKLT 論文（作者為卡克魯、卡洛許〔Renata Kallosh〕、林德〔Andrei Linde〕、崔韋第〔Sandip Trivedi〕）指出，有些弦捕集組態，例如通量（flux）、瞬子（instanton）、反 D 膜（anti-D-brane）

等，具有用來產生恆定正真空能量的潛力。然而這些組態建構方式相當複雜，而且近年來也發現了一些可能存在的不穩定性。儘管卡克魯說他並沒有「任何重大疑慮」，但許多學者已經開始懷疑，KKLT 的方法並不會產生德西特宇宙。

瓦法認為，同心協力尋找穩定德西特宇宙模型的行動早已過去。他的猜想最重要的用途在於炒熱這個議題。在他的觀點中，弦論學者並未感受到足夠的動機來確認弦論是否真能描述我們的世界；相反地，他們採取的態度是，因為弦論地景如此龐大，裡頭一定有我們棲身之所，即便沒有人知道在哪裡。「弦論社群大多數成員依然站在德西特宇宙存在的那一邊，」他說：「因為他們的信仰就是：『你看，我們住在具有正能量的德西特宇宙中，所以我們得有這種類型的例子。』」

他的猜想促使整個社群開始回應，像瑞斯這樣的學者開始尋找穩定德西特宇宙的反例，而其他人則動手探究少有人研究的第五元素宇宙弦論模型。「我對於知道這個猜想是真是偽，興致同等高昂，」瓦法說：「我們該做的就是提出問題，並且找出支持或否定的證據——這就是我們進步的方式。」

## 本文出處

*Quanta Magazine* August 9, 2018。

## 譯者簡介

戴守煌畢業於臺大物理系，英國德倫大學（Durham University）基本粒子理論博士，現為南臺科技大學助理教授。

## 延伸閱讀

►見本刊第 4 期「21 世紀物理學」和第 6 期「廣義相對論百年」專題的相關文章，與本刊第 8 期的〈動力波終於現身！〉和〈重力嗶啞一聲定音〉。