

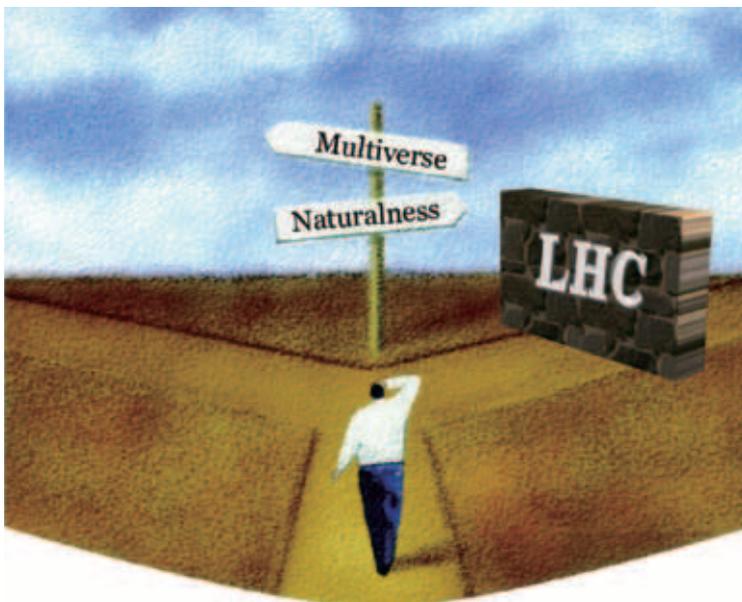
# 大自然，不自然？

近來實驗顯示宇宙可能沒有什麼道理

作者：渥秋華 Natalie Wolchover 譯者：戴守煌

作者簡介：渥秋華是 *Quanta* 的物理科學類專職撰稿人。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。

在某個陰暗的四月天午後，一群物理學教授與學生擠在哥倫比亞大學一間木質壁板的演講廳裡，聆聽阿卡尼-哈密德 (Nima Arkani-Hamed) 的演講。他是來自附近普林斯頓高等研究院的知名理論物理學家。披著一頭及肩深色頭髮的阿卡尼-哈密德，所報告的是歐洲大型



宇宙具有自然性嗎？或者我們其實住在多重宇宙中某個背離常態的泡泡裡？大型強子對撞機近期的實驗結果迫使一干物理學家面對後者的挑戰。(Giovanni Villadoro 繪，Quanta 提供)

強子對撞機 (Large Hadron Collider, 簡稱 LHC) 近期實驗得出兩個看似彼此矛盾的推論。

「宇宙循序而生，」他宣稱：「宇宙毫無道理。」

2012 年 7 月，希格斯玻色子 (Higgs boson) 的發現造成舉世轟動。一個存在將近五十年之久、關

於基本粒子如何獲得質量的理論終於獲得證實。質量可使粒子形成大尺度的結構，例如星系或人。「我們在跟預期質量差不多的地方發現了希格斯玻色子，這是實驗的勝利，是理論的勝利，也是物理確實有用的明證。」阿卡尼-哈密德告訴聽眾。

不過，為了合理

解釋希格斯玻色子的質量 (亦可稱之為能量)，LHC 還需要找到一大群其他種類的粒子，可是卻連一個也沒出現。

由於只找到一種粒子，LHC 實驗反而加深了一個在物理學上已經醞釀數十年的深奧問題。現代方



*Quanta* 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。本文出自：<https://www.quantamagazine.org/20130524-is-nature-unnatural/>

本刊感謝 *Quanta* 同意翻譯轉載，翻譯之文責由本刊自負。

程式似乎能夠描述真實世界到令人嘆為觀止的精確程度，準確預測許多自然界常數的數值，以及希格斯等粒子的存在。但還是有少數幾個常數（包括希格斯質量在內）不是經由上述的可靠定律算出來的，而且一旦數值變動，生命就不會出現，除非宇宙的形成是透過無法解釋的精密調整，剛好將過程產生的發散完美消除。

處境岌岌可危的，是名為自然性（naturalness）的概念。愛因斯坦的夢想是，自然定律應該具有天籟般的美妙、秩序與自洽。少了自然性，物理學家將面臨「物理定律只是時空隨機擾動下雜亂無章的產物」的窘境。

LHC 已在 2015 年重新開始進行質子對撞，為尋找答案進行最後一搏。不過在各種研究論文、演講與採訪中，阿卡尼-哈密德及許多頂尖物理學家已經開始正視宇宙沒有自然性的可能。（但是學界對如何證明這件事還有相當大的歧見。）

「10 或 20 年前，我是自然性的堅定信仰者。」高等研究院理論物理學家賽伯格（Nathan Seiberg）說。愛因斯坦從 1933 年到 1955 年過世為止一直在這裡任教。「現在我倒不那麼確定了。我希望還有些地方是我們沒想到的，例如某些能夠解釋這些現象的機制。可是我不知道那是什麼。」

物理學家推測，如果宇宙缺乏自然性，也就是說基本物理常數落在容許生命形成的大小範圍裡機率微乎其微，那麼就得先存在為數眾多的宇宙，才有可能出現我們這個極其希罕的個案。不然我們怎麼可能運氣這麼好呢？非自然性（unnaturalness）大大提高了多重宇宙假說的可信度。這個假說認為我們的宇宙只是一片無窮無盡且無法測知的泡沫裡的一顆小泡泡。知名但評價兩極的弦論（string theory）認為，多重宇宙中可能冒出的宇宙泡泡種類高達  $10^{500}$  種。其中有幾個泡泡可能出現巧合的抵消，產生我們所觀察到的怪異常數值。

在這個模型中，宇宙的一切並非都是循序而生

的，這使得宇宙變得不可預測。高等研究院的弦論學家韋頓（Edward Witten）在電子郵件中說：「如果多重宇宙闡釋是錯的，我個人將會感到開心，部分出於它可能會限制我們理解物理定律的能力。可惜宇宙在創生時並沒有徵詢過我們的意見。」

曾經協助發展多重宇宙理論的加州大學柏克萊分校物理學家布索（Raphael Bousso）說：「有些人痛恨它，不過我不認為我們可以感情用事。在 LHC 的實驗結果無法證實自然性的情況下，這是一種日漸受到支持的邏輯可能性。」

不論 LHC 在下一輪的運轉中有沒有發現什麼，都將對下列這兩種可能性之一提供進一步的支持：我們住在一個獨一無二但複雜程度卻超乎我們理解的宇宙，或者住在多重宇宙中某個背離常態的泡泡裡。「在從現在開始的五到十年後，LHC 會讓我們變得更睿智，」賽伯格說：「這一點令人振奮，而且指日可待。」

## 巧合的宇宙

愛因斯坦曾經寫道，對於科學家而言「自然定律的和諧所帶來的那種欣喜若狂的驚異感，有如宗教感受一般。」而且「這種感受是科學家生活與工作的指導原則。」的確，在整個二十世紀期間，「自然定律是和諧的」這種根深蒂固的概念（也就是對「自然性」的信念）確實成為發現真理的可靠指引。

「『自然性』有過輝煌的紀錄，」阿卡尼-哈密德在訪談中說。從實際的觀點來看，它要求物理常數直接來自於物理定律，而非由罕見的巧合相消產生。每當一個常數看起來是經過精密調整產生（也就是初始值貌似被精心設定過，以便抵消其他效應帶來的變化），物理學家便懷疑他們的模型不夠周全。他們會去尋找遺落的部分，最終總是會發現某些粒子或特性設定了該常數的數值，避免精密調整相消的情形。

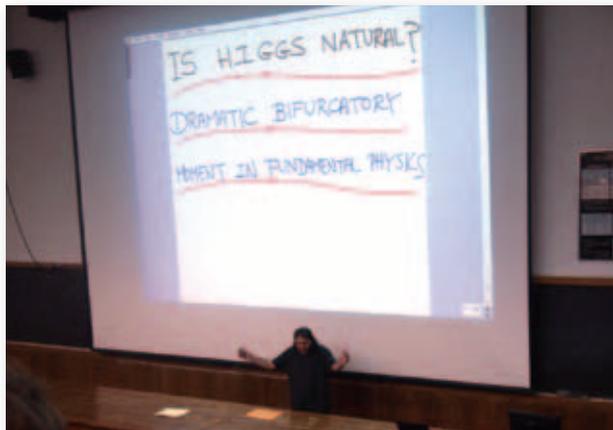
這一次，宇宙自我療癒的能力似乎失效了。

希格斯玻色子的質量是  $126\text{GeV}$  (giga eV) <sup>1</sup>，但它與其他已知粒子的交互作用會額外產生  $10,000,000,000,000,000,000\text{GeV}$  的質量。這意謂希格斯粒子的裸質量 (bare mass, 亦即受到其他粒子影響前的質量) 必須剛好等於上述天文數字的負值，才會在近乎完美的相消之後產生我們測得的希格斯質量： $126\text{GeV}$ 。

物理學家已經透過三個世代的粒子加速器來尋找某種新粒子，超對稱 (supersymmetry) 理論預測了這些新粒子的存在。這些粒子所減少的希格斯玻色子質量剛好跟其他已知粒子所增加的一樣。但是至今物理學家仍一無所獲。

升級後的 LHC 在下一輪的運轉中，將探索更高能量尺度，但就算真的發現新粒子，幾乎可以確定它們因為過重而無法對希格斯粒子質量產生正確的效應。希格斯粒子可能還是比該有的質量輕了 10 到 100 倍。對於具有自然性的單一宇宙中這個結果是否可被接受，物理學家的意見不一。哈佛大學教授蘭朵 (Lisa Randall) 說：「也許碰巧會發生一點點的精密調整。」不過阿卡尼 - 哈密德的看法則是：「些微精密調整就像些微懷孕一樣，是不存在的現象。」

如果新粒子沒有出現，希格斯粒子質量依然得經過天文數字般的精密調整，那麼多重宇宙假說就會



41 歲的高等研究院物理學家阿卡尼 - 哈密德在哥倫比亞大學的演講中說：「宇宙毫無道理。」 (Natalie Wolchover 攝 / 《西蒙斯科學新聞》提供)



2013 年布魯克海文論壇：石溪大學博士後研究員柯爾廷 (David Curtin, 圖左) 與義大利國立核子物理研究所 (National Institute for Nuclear Physics) 的史楚米亞正在討論後者的「修正自然性」構想。此一構想質疑希格斯玻色子質量自然值在計算上的長久假設。(Thomas Lin 攝 / 《西蒙斯科學新聞》提供)

粉墨登場。「這並不表示它一定是正確的，」身為多重宇宙模型長期支持者的布索說：「這意謂它是我們僅有的選擇。」

少數幾位物理學家則相信第三種看法，包括美國伊利諾州巴達維亞費米國家加速器實驗室的利肯 (Joe Lykken)、義大利比薩大學的史楚米亞 (Alessandro Strumia) 等。他們認為物理學家或許錯估了其他粒子對希格斯質量的效應，一旦採用不同的計算方法，就會得到正確的質量。可惜如果加入未知的暗物質之類的額外粒子，這種修正自然性 (modified naturalness) 便會站不住腳；不過這種非正規方法也有可能激盪出其他構想。「我不想大力鼓吹，只想討論結果。」史楚米亞於 2013 年 5 月在布魯克海文國家實驗室 (Brookhaven National Laboratory) 的一場演講中提到。

然而，修正自然性並不能解決物理學裡更大的自然性問題——宇宙在大霹靂之後為什麼沒有立刻被自身能量湮滅？

### 宇宙常數的兩難

真空中內建的能量 (稱為真空能量、暗能量或宇宙常數) 大小只有計算所得自然值的



在多重宇宙模型中，為數浩瀚性質各異的宇宙泡泡會在更大的真空中不斷產生。只有一小部份的宇宙具有容許生命產生的特性。

一兆兆兆兆兆兆兆兆分之一。這令人難以理解，雖然這個自然值會帶來自我毀滅的效果。目前沒有任何理論能夠解決這個巨大的差異。不過宇宙常數必須獲得巨大的精密調整，宇宙才能避免快速爆炸或坍縮；它也得經過精密調整，生命才有機會存在。這點是無庸置疑的。

為了解釋這種荒唐的好運，多重宇宙構想過去幾十年來在宇宙學的領域裡日漸成為主流。1987年時，諾貝爾物理獎得主溫伯格（Steven Weinberg，現為德州大學奧斯汀分校教授）算出，我們的宇宙常數會在多重宇宙模型中出現，使得多重宇宙的可信度大幅提高。在容許生命出現的宇宙（也就是可供生命觀測與研究的宇宙）中，我們的宇宙屬於精密調整程度最輕微的一群。「如果宇宙常數比觀測結果大上許多，比方說 10 倍好了，就不會有星系了。」塔夫斯大學（Tufts University）宇宙學家兼多重宇宙論者維蘭金（Alexander Vilenkin）解釋

道：「很難想像生命在這種宇宙中怎麼生存。」

針對宇宙常數問題，大多數粒子物理學家希望能找到一種可供驗證的解釋。可惜並沒有。物理學家說，希格斯粒子的非自然性更凸顯了宇宙常數的非自然性。阿卡尼-哈密德認為兩者甚至可能彼此相關。他說：「我們並不了解宇宙中這種不可思議的現象。這個問題很重要，而且意涵深遠。」

2000 年時，布索與波欽斯基（Joe Polchinski，加州大學聖塔巴巴拉分校理論物理教授）發現一種產生平行多重宇宙的方法，多重宇宙自此不再是個口說無憑的論點。弦論是一種假想性的「萬有理論」（theory of everything），它將各種粒子解釋為各種不可見的極微小的弦，並且認為時空有 10 維。在人類所及的尺度上，我們只感受得到三維空

❶ 譯註：eV 為電子伏特，giga eV 縮寫為 GeV，相當於  $10^9$  eV。

間與一維時間。不過弦論學家說，在四維真實時空結構的每一點上，都有額外的六維緊密纏紮著。布索與波欽斯基算出，這額外的六維總共有大約  $10^{500}$  種不同的纏紮方式，各自帶有不同的能量，因此可以產生為數龐大的不同宇宙。換句話說，自然性並不是必須的；而且沒有獨特、必然、完美的單一宇宙。

「對我來說，這其實是『啊哈』的一刻。」布索說。可是這篇論文卻引起眾怒。

「粒子物理學家，特別是弦論學家，都抱著一種夢想，認為所有自然界常數的值都能被獨一無二地預測出來。」布索解釋：「所有東西應該都要由數學啊、 $\pi$  啊、2 啊等等得出。然後我們出現了，告訴大家『瞧，這是不可能發生的，而且有個很好的理由。我們大家的想法都錯了。』」

### 多重宇宙裡的生命

在布索一波欽斯基的模型裡，大霹靂是一種擾動。真實時空某一點上的六維緻密纏紮突然產生形變，釋出能量導致生成時空泡泡。這個新宇宙的特性是由隨機擾動釋出的能量所決定。絕大多數這麼冒出來的宇宙帶有過高的能量密度；它們擴張或坍縮過快，以致於生命來不及形成。但是在某些背離常態的宇宙中，極為罕見的相消導致極為微小的宇宙常數，遂產生了我們這樣的宇宙。

在 2013 年 4 月上傳到物理預印本論文網站 arXiv.org 的一篇論文裡，布索與柏克萊的同事霍爾（Lawrence Hall）指出，希格斯粒子質量在多重宇宙模型中也能合理解釋。他們發現具有足夠可見物質（相較於暗物質而言）可以支持生命的宇宙泡泡，幾乎都有超過 LHC 能量範圍的超對稱粒子，以及一個精密調整過的希格斯玻色子。1997 年時，也有其他物理學家指出，如果希格斯粒子的質量變成五倍，除了氫以外的原子的形成將受到抑制，換句話說，將導致毫無生命的宇宙。

雖然有這些看似成功的解釋，許多物理學家擔心，採用多重宇宙世界觀的好處其實並不多。我們無法驗證平行宇宙，更糟的是，非自然的宇宙還令人無法了解。「沒有自然性，我們將失去尋找新物理的動機。」高等研究院的物理學家布魯姆（Kfir Blum）說：「我們知道它是存在的，但是沒有嚴謹的論點說服我們為什麼要尋找它。」這種感傷獲得廣大的迴響——「我比較想要具有自然性的宇宙。」蘭朵說。

理論是依著物理學家而生的。花了超過十年時間設法適應多重宇宙之後，阿卡尼 - 哈米德如今終於認為它合理，而且是一個理解我們世界運作的可行之道。「就我來說，美妙的地方在於，任何 LHC 的實驗結果都會化為程度不一的動力，驅使我們從這些岔路中擇一而行。」他說：「這種選擇非常、非常重要。」

自然性或許終將度過難關。又或許這只是多重宇宙中某個奇怪又舒適的角落裡一個不切實際的願望。

就像阿卡尼 - 哈米德告訴哥倫比亞大學的聽眾一樣：「請繼續看下去。」

#### 本文出處

*Quanta* May 24, 2013.

#### 譯者簡介

戴守煌畢業於台大物理系，英國德倫大學（Durham University）基本粒子博士，現為台大梁次震中心博士後研究員。

#### 延伸閱讀

► Byrne, Peter “Waiting for the Revolution: An interview with the Nobel Prize-winning physicist David J. Gross.” 這是另一篇 *Quanta* 文章，是關於格羅斯（David J. Gross）對於高能物理現況及未來走向看法的訪談。

<https://www.quantamagazine.org/20130524-waiting-for-the-revolution/>

► Arkani-Hamed, Nima “The Inevitability of Physical Laws: Why the Higgs Has to Exist” Video Lecture, (2012), IAS. 這是阿卡尼 - 哈米德在剛發現希格斯粒子後，在普林斯頓高等研究院做的錄影演講，與本文主題相關。

<https://video.ias.edu/arkani-hamed-lecture-10-12>