



中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>

天聞

中華民國 110 年
夏季號

天文中的

磁場

SOFIA望遠鏡偵測到M51星系的磁場(以流線表示)，與哈伯太空望遠鏡觀測到的可見光影像合成圖。©NASA, the SOFIA science team, A. Borlaff; NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

恆星與星際間的磁場

作者／王嘉璋

現代物理學發現，物質除了常見的固態、液態、氣態以外，還存在著第四種狀態：電漿態。氣體在高溫或高能的環境中，原子或分子內部帶有的電子有機會被強大的能量所游離，轉變成一種帶有等量的正電荷與負電荷的離子化氣體，稱為電漿。電漿由於是由帶電的粒子組成，所以與電場和磁場間有著很強的交互作用，使得電漿會被「綁」在磁力線上；也就是說，電漿移動的時候，磁場也會跟著一起移動，而若磁場固定不動的話，電漿就只能沿著磁力線移動。

近一個世紀的天文研究證實了，電漿是宇宙中最普遍的物質狀態：從地球高層的大氣，以至太陽、星際介質、甚至緻密天體如脈衝星、星系核等等，皆是處於電漿態。電漿物理學的先驅阿耳芬 (H. Alfvén) 預言了：「如果宇宙充斥著電漿，這些物質就會產生電流，從而產生星系尺度上的磁場」。在他得到諾貝爾物理學獎後，又預測了：「太空中布滿了縱橫交錯的電流網絡，能夠在大尺度乃至非常大尺度上傳遞能量和動量。這些電流往往會縮成絲狀或表面電流，後者很有可能使太空——星際和星系際空間——形成胞狀結構」。這些理論告訴了我們，電磁力在宇宙各種天體間扮演了非常重要的角色，想要真正理解宇宙天體的由來和演化，我們必須了解電磁場的資訊。然而，電磁場並不像物質那樣能被望遠鏡「看」到，要測量宇宙和天體中的電磁場非常困難，在大部分的情況下，天文學家僅能使用間接的方式

推測磁場的樣貌，如何測量各種天體的磁場仍然是目前天文研究中的一大挑戰。

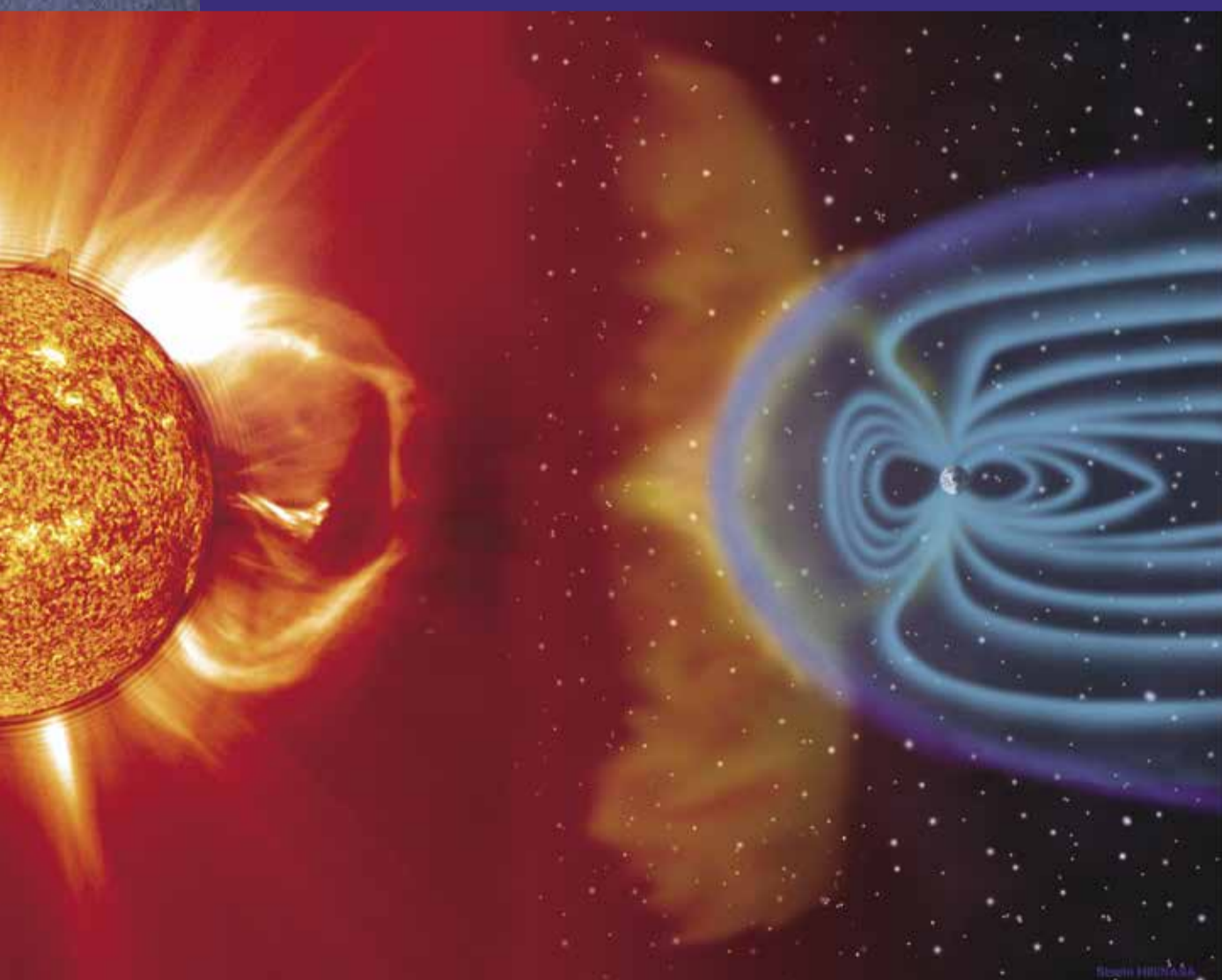
太陽的磁場

太陽是離我們最近的恆星，也是我們較了解其磁場結構的天體。由於太陽光譜的譜線會被磁場透過「則曼效應」(Zeeman Effect) 所影響，因此天文學家可以藉由分析太陽的光譜推測出太陽磁場的結構。研究發現，太陽上的磁場並不像地球磁場這麼穩定，由於太陽的高速轉動，構成太陽的電漿會牽動磁場一起旋轉拉扯，而在磁場被扭曲至極限的區域，電漿會隨著被扯開的磁場一口氣噴發出來，形成我們能觀測到的太陽閃焰。這些噴發出的電漿，有機會脫離太陽的重力，成為被稱作「太陽風」的高能電漿流衝向地球。不過幸好這些電漿粒子絕大多數在撞上地球的磁場以後，都會被綁在磁力線上，形成一環稱為「范艾倫輻射帶」的護罩，保護地球上的生物免於這些高能粒子的威脅。

磁場與恆星的形成

至於太陽中的磁場又是怎麼來的呢？天文學家除了透過光譜以外，也能透過觀測被磁場排列的塵埃粒子所吸收或輻射出的電磁波，推測出磁場的結構。藉由目前最先進的電波干涉望遠鏡如 ALMA、SMA、VLA 等，天文學家成功的解析出遠方年輕恆星附近的磁場，發現在原始恆星的形成階段，磁場就已經存在，並且還有可能控制著恆星的成長過程。在恆星形成前的星際介質中，多多少少都會帶有一些旋轉的運動。由於角動量守恆，這些一開始可能

NASA SOHO 衛星觀測到衝擊地球的太陽風暴和閃焰，受到地球磁場的抵禦後，形成范艾倫輻射帶（藍色）的示意圖。©NASA/SOHO





藝術家繪製，ALMA 解析到的巨蛇座 Ser-emb 8 原恆星附近的複雜磁場。

©D. Berry, NRAO/AUI/NSF

不太起眼的旋轉運動，也會隨著原始恆星的形成與收縮，越轉越快，甚至可能快到連重力都抵銷不了離心力的程度，如果只是如此的話，這些物質最終就無法收縮形成一個新的恆星。幸好，由於形成恆星的星際介質也是處於電漿態，被綁在這些物質上的磁場也會跟著收縮，同時也跟著旋轉。當然，要扭曲磁場必然需要能量，因此磁場變形的過程中，會逐步吸收轉動的動能，發揮相當於剎車的效果，把這些物質的角動量煞停，因此恆星才得以形成。

星際介質中的磁場

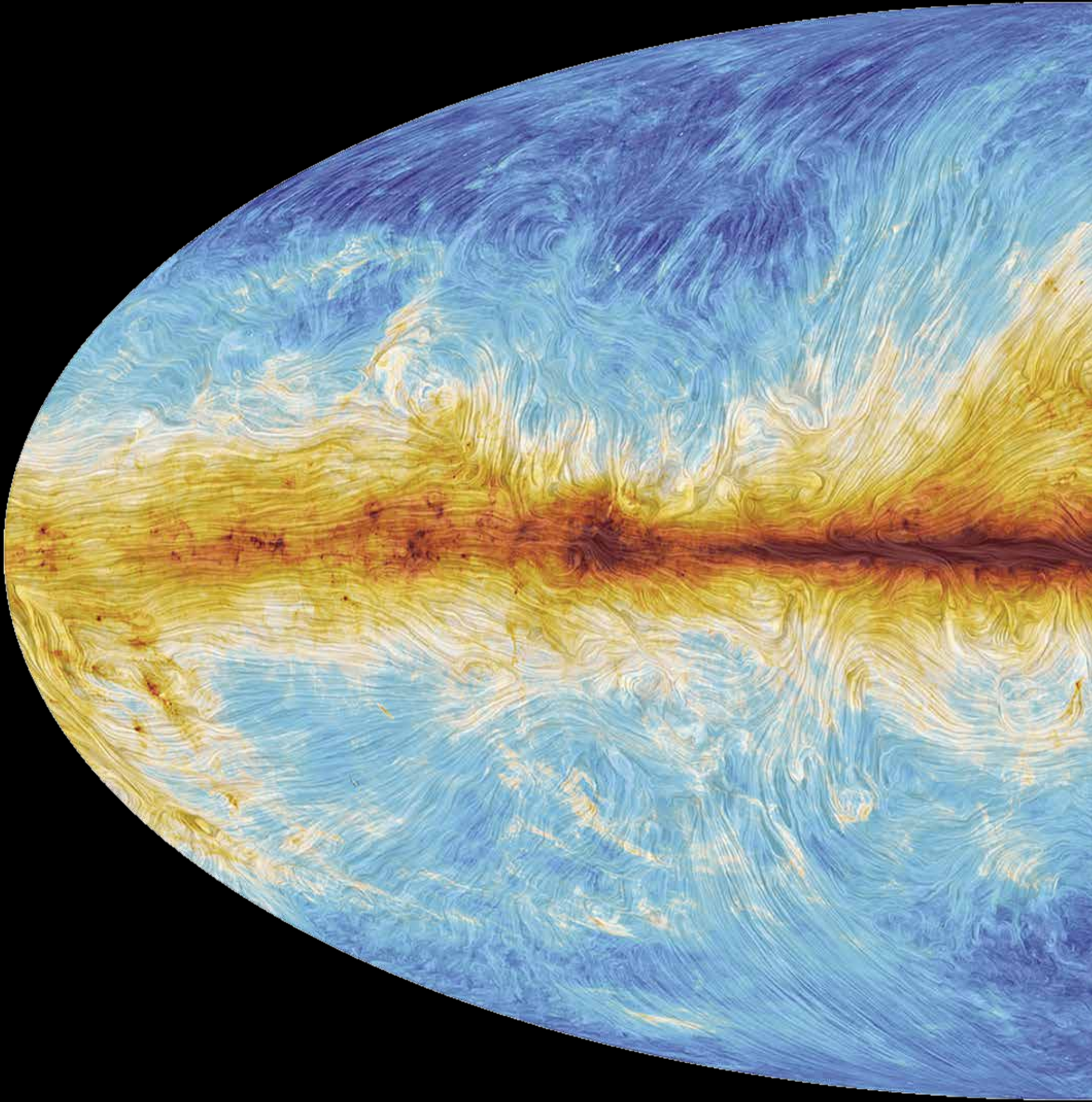
在更大的星雲尺度，天文學家發現了大部分的星際雲氣都呈現出絲狀的結構，而這些絲狀結構常常會匯聚於大質量的黑暗星雲，從中孕育出新生的恆星團。近十年的天文觀測發現，這些絲狀結構往往與觀測到的磁場的方向平行，而都卜勒紅移的測量，也發現這些絲狀結構正在沿著磁場的方向加速。因此，目前天文學家推測，這些觀測到的絲狀結構很可能是比較稀薄的電漿流，正在沿著磁場的導引，如同小溪匯聚成河流，河流進入大海一般，將廣大空間的物質，逐步運輸送入高密度的黑暗星雲，提供足以形成新恆星團的質量。在這過程中，磁場扮演著導引並且穩定電漿流的重要角色，如果沒有磁場的話，這些電漿流可能會在局部區域碎裂，並形成四處散落的小質量恆星，而無法匯合成大質量的恆星或星團。

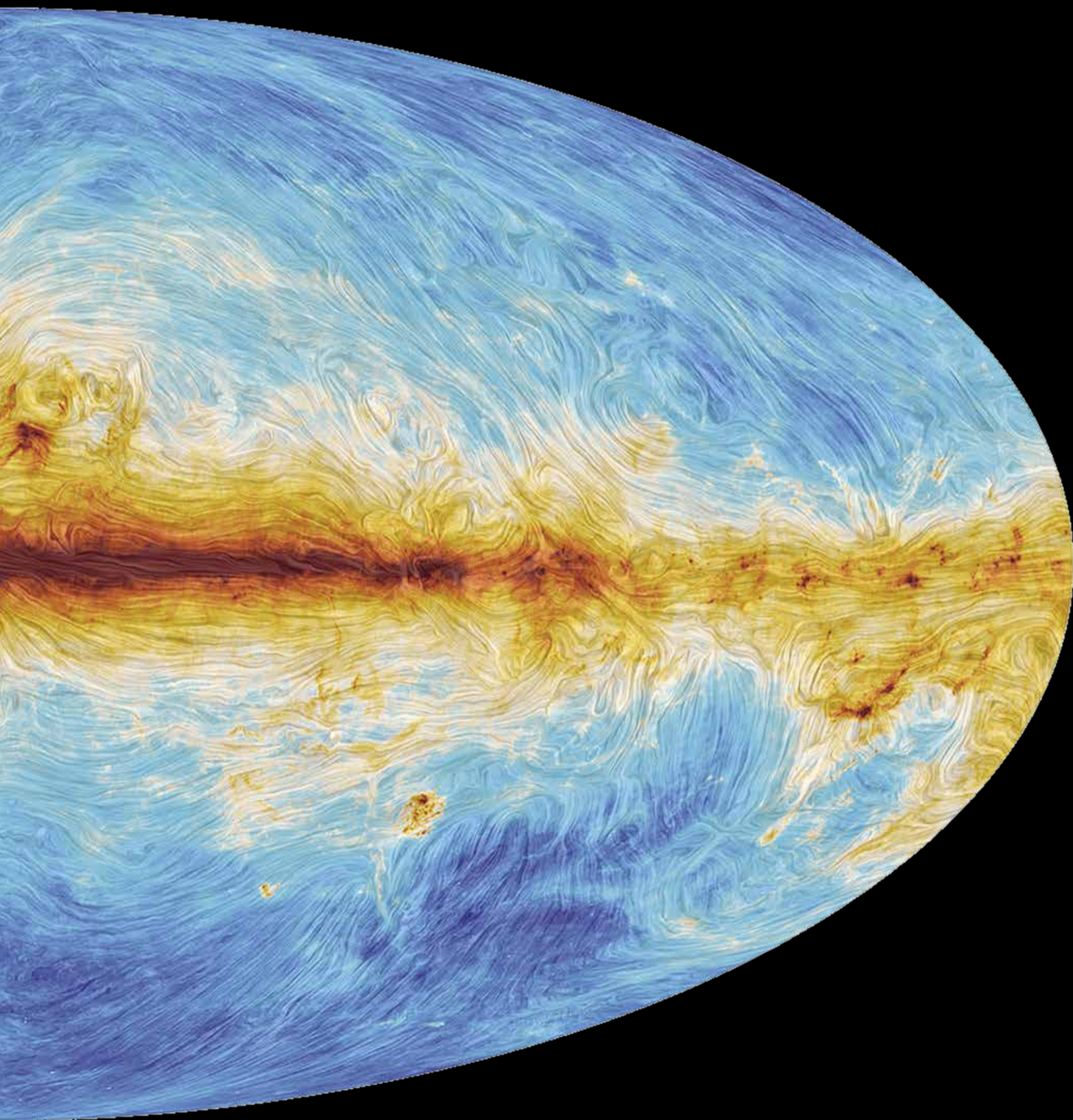
結語

重力和電磁力是在天文尺度下最重要的兩種基本作用力，星際磁場的研究自然是理解天體演化的重要一步，但是由於觀測上的困難，我們對星際磁場的理解還是頗為不足。不過在近十餘年來，新型的天文儀器和觀測方法讓天文學家能更全面地進行磁場的觀測，所以星際磁場的研究想必在未來會有更豐富成果。



SOFIA 望遠鏡觀測到的南巨蛇座 (Serpens South) 年輕星團附近的磁場 (流線)，背景是史匹哲 (Spitzer) 太空望遠鏡拍攝到的近紅外線影像。影像中從左下延伸至中央的黑色絲狀結構，是沿著磁場逐漸匯流至恆星形成區的星際雲氣。這些物質會持續提供質量至中央的星雲，作為產生新恆星的材料。©NASA/SOFIA/T. Pillai/JPL-Caltech/L. Allen





卜朗克衛星觀測到的銀河系磁場結構。©ESA and the Planck Collaboration

星系磁場

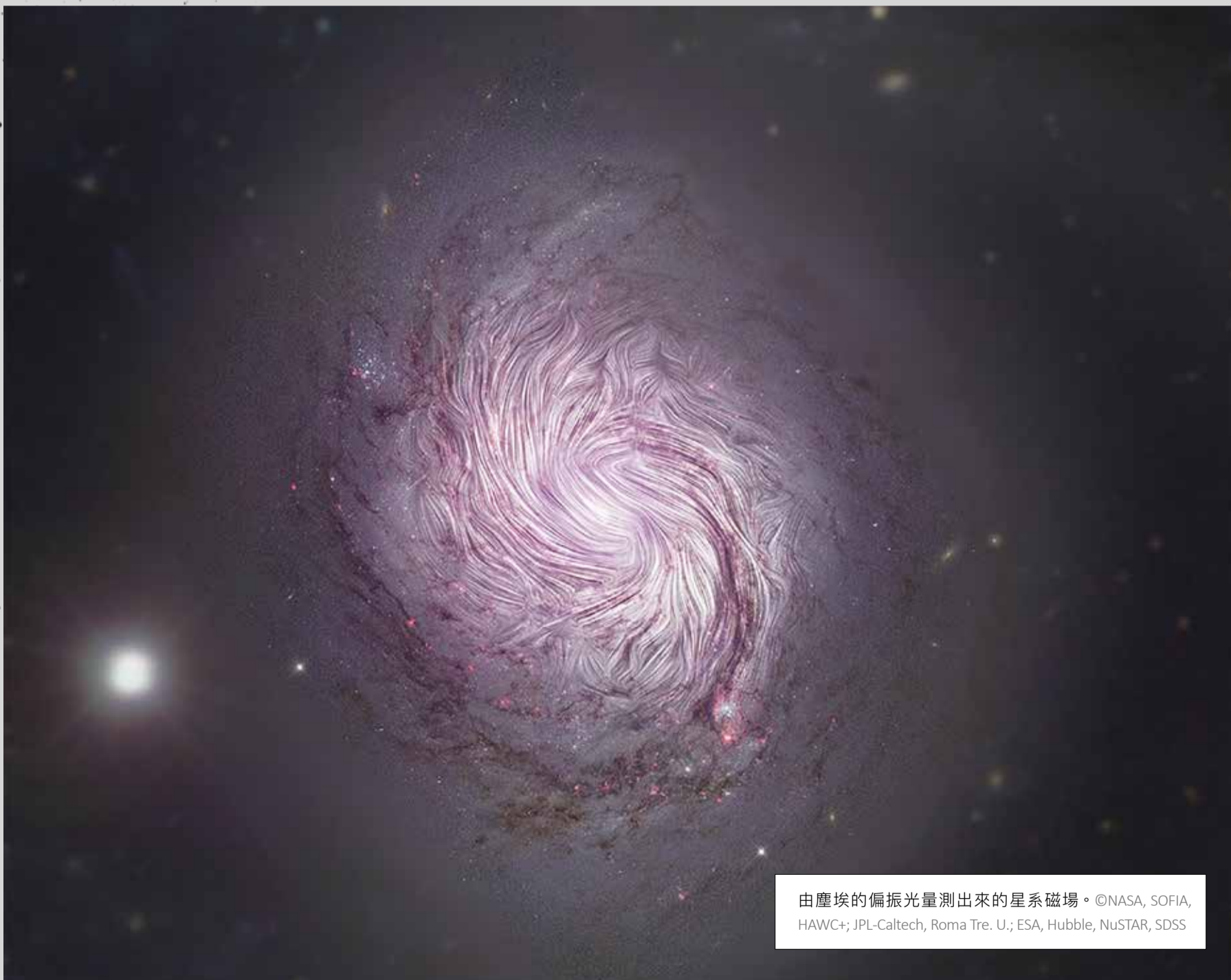
作者 / Miikka Väisälä 翻譯 / 周美吟

磁場存在於宇宙中的各種尺度，包括星系。目前對星系磁場的計算顯示，星系中的大範圍磁場通常與星系的螺旋臂同方向。但是，這種想法似乎太過簡化 -- 因為星系磁場的存在是基於無秩序的混沌狀態，即使從混沌中可以顯露出某些性質，但通常無法直接進行測量。

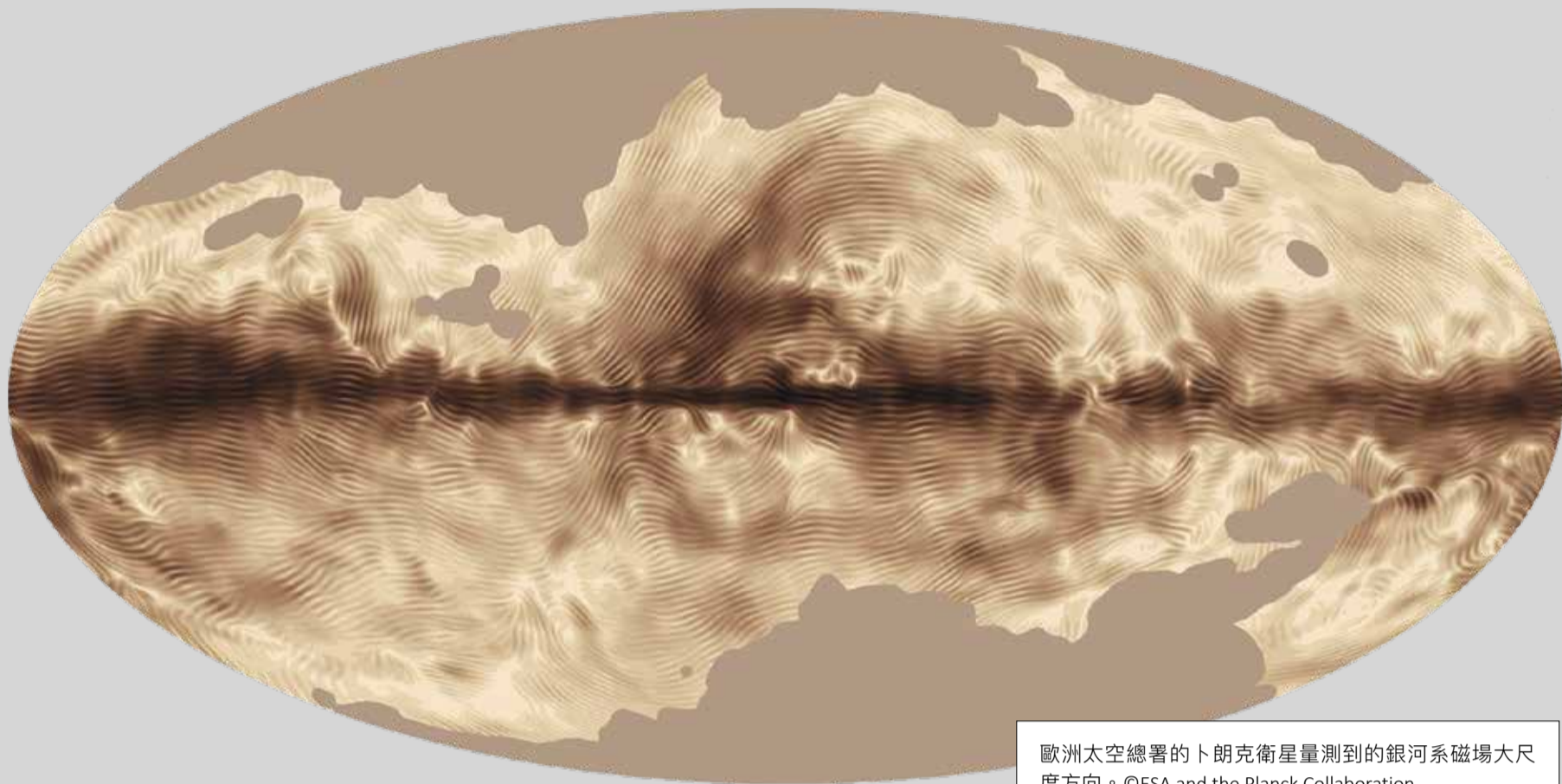
最根本的問題是，怎麼會有磁場？在一個實際的系統中，磁能將逐漸消散。如果一個星系沒有產生磁場，那麼它極可能不會出現其他重要的結構。因此，要在星系和恆星中都具有強磁場，就需要發生一些會產生磁場的契機。

目前認為的磁場產生方式就像“發電機”，是將動能轉化為電磁能的過程。雖然這裡在討論宇宙的現象，但日常生活就會看到簡單的機械發電過程。例如，許多自行車都有發電機為警示燈供電：一個小發電機觸到車輪的邊緣，車輪帶動內部的磁鐵並感應出電能，就能為警示燈供電。宇宙發電機則發生在更複雜和不可預測的情況下。宇宙發電機需要一些基本要素：一個（電）磁場及自由帶電粒子。那些電磁場和混沌運動的粒子及粒子間的差異自轉（differential rotation）為整個機制提供了動力。

星系的時間尺度對於人類生命來說太長了，這使得星系的發電機無法在運轉時被觀測到。發電機實驗也很難在實驗室中進行。但是，太陽也遵循相似的原理，可以說我們隔壁就有一個自然界的電漿物理實驗室。



由塵埃的偏振光量測出來的星系磁場。©NASA, SOFIA, HAWC+, JPL-Caltech, Roma Tre. U.; ESA, Hubble, NuSTAR, SDSS



歐洲太空總署的卜朗克衛星量測到的銀河系磁場大尺度方向。©ESA and the Planck Collaboration

只需 3 個簡單步驟即可產生磁場

星際介質 (Interstellar Medium, 簡稱 ISM) 中存在大量帶電粒子。尤其是高溫狀態的 ISM, 雖然密度小, 但卻是星系發電機的主要成員。以下將用我們的太陽來類比說明, 因為太陽也是由高溫電漿組成。

混沌運動很容易發生。星系常充斥著超新星爆炸事件, 而恆星風和複雜的反饋現象助長了這些混亂。天空看起來如此安靜的唯一原因是, 這些運動發生的時間尺度大多比人類的生命更長。但是, 雖然在人類的視野中看起來很安靜, 天空其實正在進行一場宇宙的煙火比賽。相較之下, 太陽在熱對流中不斷冒泡, 它的混沌運動每秒都能看到。

超新星會先在大尺度產生衝擊波, 然後往越來越小的尺度傳遞形成混沌運動。在帶電粒子的電漿中, 這些傳遞的流動會引起剪應力運動, 撕裂並纏繞著磁場, 從而增強磁場強度。在我們的銀河系和太陽中也是如此。

單靠湍流產生的磁場很小且混亂。要將小範圍的磁場變大, 需要有差異自轉。隨著差異自轉, 能量將隨尺度增加, 而且能看

到諸如看似有序的大型磁化螺旋臂之類的現象。我們知道太陽磁場有規律性的周期活動, 但是我們無法直接觀察到在星系中的磁場變化。然而, 這無法阻止我們嘗試觀測星系的磁場。

觀測星系磁場造成的現象

觀測星系磁場具有挑戰性, 但並非不可能。有兩種主流方法: 一個是同步輻射, 另一個是宇宙塵埃粒子的發射和吸收。

同步輻射是由相對論性的帶電宇宙射線粒子, 在磁場內進行旋轉運動產生的。同步輻射的偏振可以告訴我們讓這些宇宙射線粒子在其中運動的磁場方向。如果可以從同步輻射中推斷出有法拉第旋轉, 則甚至可以計算出電磁場的三維方向。這可以用厘米電波望遠鏡觀測到。

觀測其他星系磁場的同步輻射比觀測銀河系的更容易, 但只能給出大範圍的特徵, 因為紊亂的湍流會明顯減弱觀測到的偏振。因此, 它不是了解小範圍區域性現象的理想工具。

在不久的將來, 我們期待同步輻射觀測能獲得令人興奮的新結果。平方公里陣列

(Square Kilometre Array, 簡稱 SKA) 運行後, 將可以在厘米波段觀測到來自星系磁場的同步輻射, 增進我們對星系磁場的理解。

另一種偏振測量來自星際塵埃。塵埃粒子在太空中的排列通常被認為與周圍的磁場方向對齊。因此, 觀測塵埃對背景星光的影響或塵埃在遠紅外線 / 次毫米波段的輻射, 就可以推斷出天球切面的電磁場方向。雖然這種方式得到的訊息不夠完整, 但是更容易探測局部和近距離的天體, 例如分子雲和恆星形成核。

不幸的是, 偏振的塵埃發射訊號可能很微弱, 因此, 偏振觀測大多聚焦於小範圍的現象。但近年來, 由歐洲太空總署卜朗克衛星進行的全天探測提供我們銀河系中星際塵埃的全面圖像。卜朗克衛星是為觀測宇宙微波背景而建造的, 也需要對星系前景輻射做詳細觀測。雖然星系前景輻射對於宇宙學家來說是雜訊, 但對天文學家來說是珍貴資訊, 我們也因此能得到銀河系的詳盡磁場分布圖。

基於觀測上的困難和概念上的挑戰, 星系磁場這個新領域, 未來還大有可為!

探索黑洞更進一步！EHT 公布 M87 星系偏振光影像

本所參與的「事件視界望遠鏡 (Event Horizon Telescope, EHT)」國際合作計畫，繼拍攝出人類史上第一張黑洞照片後，首度公布 M87 星系中心最新的偏振光影像，有助於了解黑洞磁場特有的行為，以及 M87 星系的黑洞噴流如何從核心向外噴射至星系之外。「偏振」像是磁場留下的指紋，EHT 所觀測到的輻射為黑洞周圍電子繞行磁場運動所造成，可進一步解析黑洞周圍的磁場結構。因為電子繞行磁場時具有特定的運動方向，讓所發出的電磁波具有可分辨的特性，日常生活中的太陽眼鏡就是一種能分辨（並擋住）具偏振性的炫光之範例，讓我們看東西變得比較清楚。

M87 星系距地球有 5 千 5 百萬光年之遙，由其核心所噴出的黑洞噴流，不僅延伸長達 5 千光年，也是該星系最神秘、最活躍的特徵之一，目前已知此噴流與黑洞周圍的強力磁場有關。物質如何掉入黑洞以及黑洞噴流的產生是當前天文物理學界最感興趣的課題之一，最新發表的偏振影像，對於了解黑洞附近的磁場如何使黑洞吞噬周圍物質，並噴出明亮的高能噴流之過程，提供關鍵證據。

黑洞的周圍即為「事件視界」，物質和能量皆因強大的重力而無法逃脫，多數物質在靠近黑洞的邊境區域時即掉入其中；部分粒子卻在遭黑洞攔獲的最後一刻逃逸，以噴流之姿吹入遙遠太空。本次觀測結果發現，黑洞邊緣的磁場強大到能將熱氣體向後推，抵抗了重力拉力，只有穿過磁場的氣體才能盤旋落入事件視界。EHT 團隊也認為，唯有建

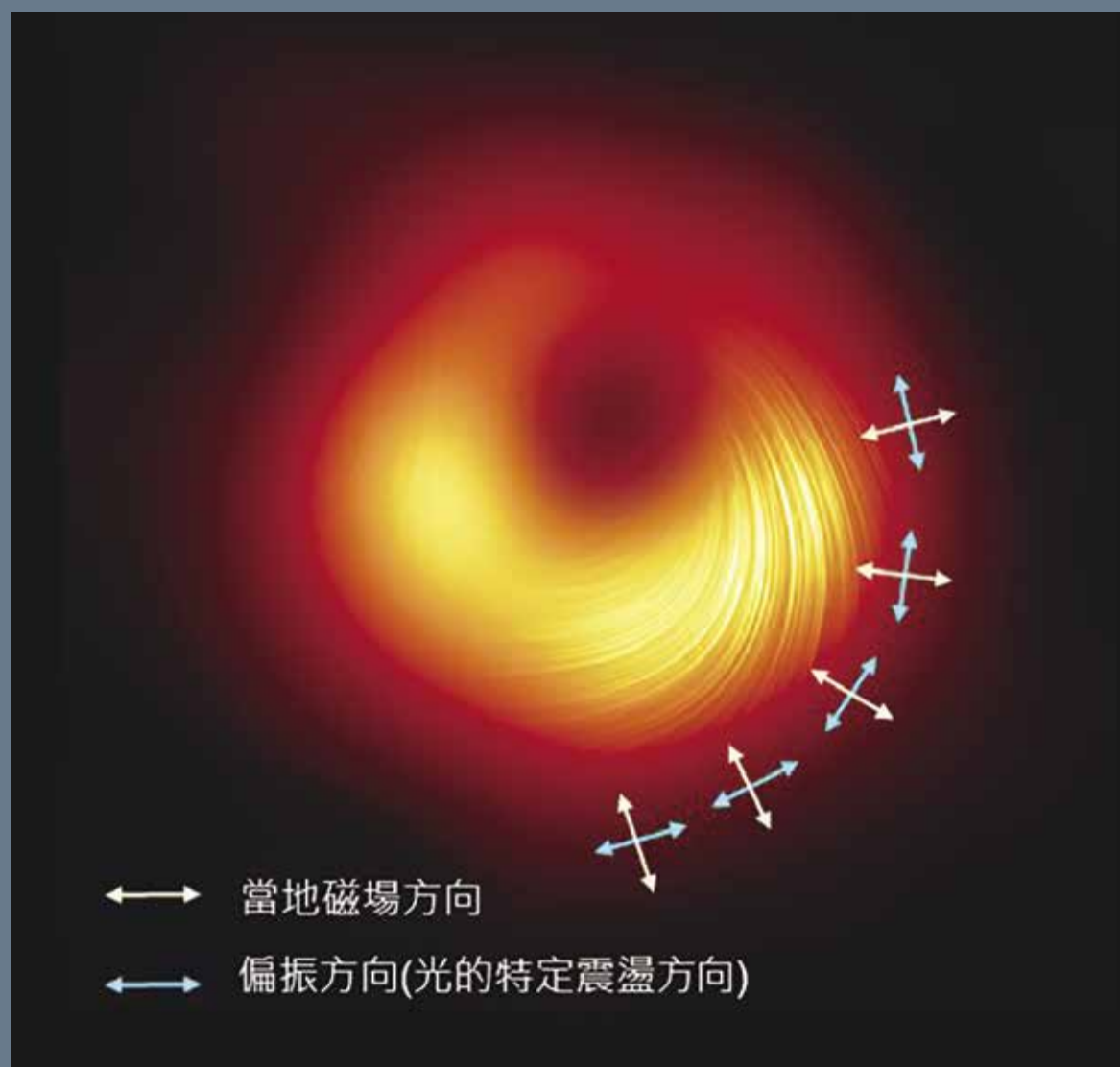
立以強烈磁化氣體為主的理論模型，才能進一步解釋黑洞的事件視界區域。

本所於 2017 年加入 EHT 計畫，連結全球 8 座望遠鏡共同觀測，包含本所支援的次毫米波陣列望遠鏡 (SMA)、阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列望遠鏡 (ALMA) 和馬克斯威望遠鏡 (JCMT)，創建一個「口徑如一個地球大的望遠鏡」，其解析力之高，足以測量月球上一張信用卡的長寬。因為有如此高的解析力，研究團隊才

能直接觀測到黑洞陰影與其周圍亮環，並於最新發表的偏振光圖像中，清楚地看到亮環如何被磁化。

本所東亞核心觀測聯盟朴鍾浩 (Jongho Park) 博士為此發現下了結論：「EHT 進展快速，除了網路技術升級以外，也有新的觀測成員加入。我們預期未來 EHT 觀測能更精確呈現黑洞周圍磁場結構，也能告訴我們該區域的熱氣體物理。」

(節錄自本所新聞稿)



M87 星系中心的偏振光影像，亮環上的線條顯示光的偏振方向。由於磁場與偏振光的方向垂直，可推測出黑洞周圍磁場呈輻射狀。©EHT Collaboration

天聞季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天聞季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天聞季報上刊登喔！



發行人 | 王祥宇 執行主編 | 周美吟 美術編輯 | 王韻青、楊翔伊 執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆、蔣龍毅

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所 天聞季報版權所有 | 中研院天文所 ISSN | 2311-7281 GPN | 2009905151

地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 (臺北市羅斯福路四段 1 號) 電話 | (02) 2366-5415 電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw