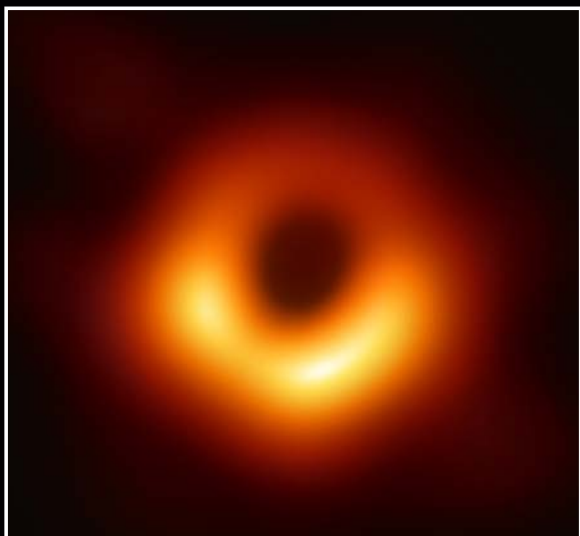


文/卜宏毅



左圖：經由分析2017年的觀測數據，2019年EHT團隊公布了位於M87星系中心的超大質量黑洞近照，此黑洞也是大尺度噴流結構的源頭。

下圖：經由分析2017年觀測數據所攜帶的偏極化資訊，EHT團隊在今年三月進一步公布了M87黑洞的偏極化影像。圖中將黑洞的偏極化特性（方向與強度）以視覺化呈現。

Credit：EHT團隊

首張 黑洞偏極化影像

繼2019年公布史上第一張黑洞近照後，事件視界望遠鏡（Event Horizon Telescope; 簡稱EHT）團隊在2021年三月公布了首張黑洞的「偏極化」影像，透露了位於M87星系中心超大質量黑洞的進一步資訊。這張影像是根據光線所帶有的偏極化特性，將偏極化向量的大小和方向進一步視覺化而得到。這些偏極化特性是由黑洞附近的磁場所產生，也因此間接告訴了我們黑洞附近的磁場環境。這張照片究竟是如何分析出來的？包含哪些資訊？又如何幫助了對黑洞系統的理論了解呢？

這是「第二張」黑洞近照嗎？

不是！這張偏極化影像的主角與EHT在2019年公布的黑洞影像的主角一樣，都是位於M87星系中心（距離我們約五千五百萬光年）的超大質量黑洞，其質量約有六十五億個太陽質量。

EHT結合分布全球的電波望遠鏡同時觀測目標天體（圖1），可解析大約有二十個微角秒的角解析度。電波望遠鏡並非接收天體的「影像」，而是接收「電波訊號」，並利用干涉儀的原理在「visibility domain」（其為image domain的傅立葉轉換）處理資料並根據適當假設得到分析影像。在2017年的EHT觀測資料中，4個晚上（4月5日、6日、10日、11日）對M87黑洞的觀測包含了偏極化的資訊。在2019年EHT團隊公布的結果尚未包含偏極化的資料分析，對偏極化數據的分析結果則在這次公布。也因此相關的兩篇論文成為系列論文的第七篇與第八篇論文（Paper VII 與 Paper VIII; 請參考延伸資訊；EHT團隊公布的八篇相關論文）：

Paper I：Overview 簡介

Paper II：Array 望遠鏡陣列

Paper III：Data數據

Paper IV：Image影像處理

Paper V：Theory理論

Paper VI：Feature extraction
影像特徵分析

（以上於2019年4月發表，有興趣的讀者可以參考臺北星空69期的相關專文：[人類史上第一張黑洞近照](#)）

Paper VII：Polarization 偏極化分析

Paper VIII：Magnetic field structure
磁場結構的理論分析

（Paper VII 與 Paper VIII於2021年3月發表）

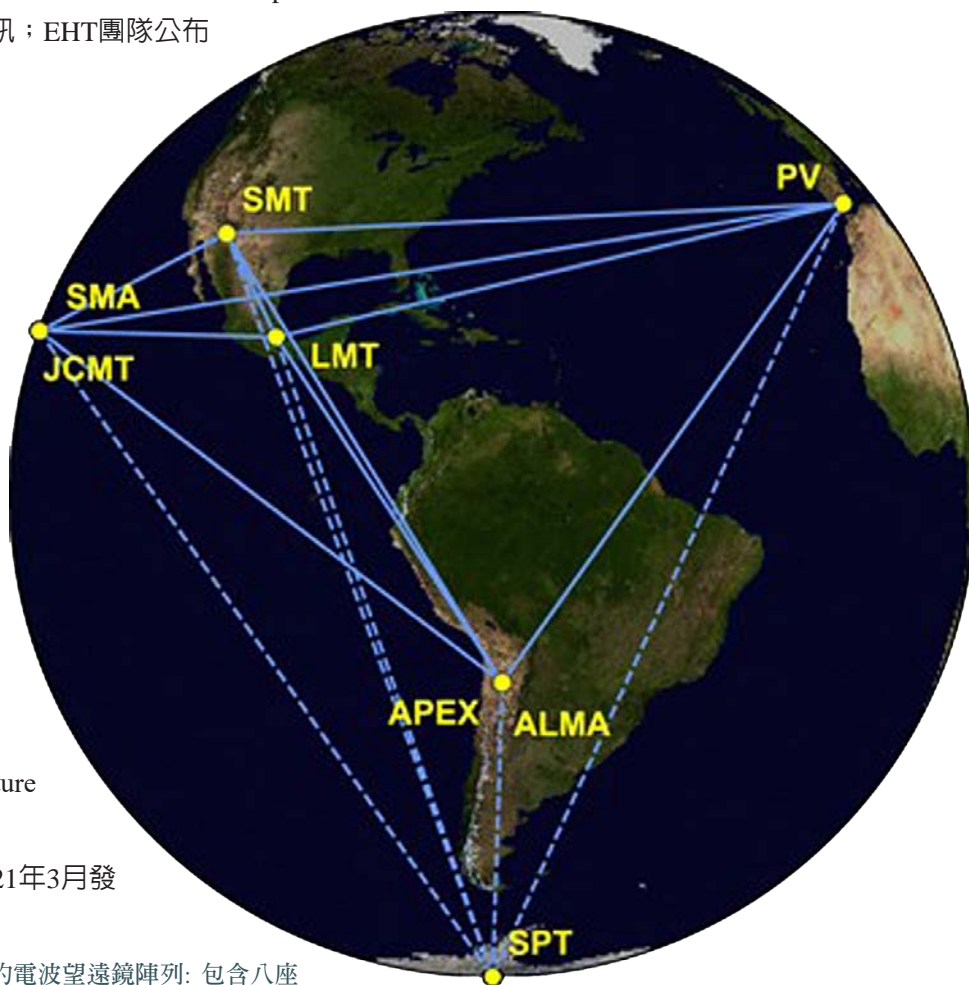


圖1. 參與EHT團隊於2017觀測的電波望遠鏡陣列: 包含八座望遠鏡並蓋六個不同的地體位置，其中位於南極的SPT (South Pole Telescope) 因為地理位置未能共同觀測位於北半天球的M87。藉由利用甚大干涉儀(Very Long Baseline Interferometry)技術，這些電波望遠鏡的共同合作就像組成了有如地球般大小的(虛擬)望遠鏡。Credit: EHT團隊 Paper I

偏極化是什麼？

光是電磁波，電磁波是電磁場的波動。若此波動在傳遞過程中電場具有特定的震盪方向，我們就可稱為此電磁波帶有偏振性，或是此電磁波帶有偏極化 (polarization)。日常生活中當原本沒有偏極化的陽光在天空被微小粒子散射 (scattering) 或是被水面反射 (reflection) 時，都會帶有偏極化；我們常用的電腦螢幕所發出的光也具有偏極化特性。太陽眼鏡的原理就是利用偏振片將具有特定偏極化方向的光線過濾，用以降低這些被偏極化的光線進入眼睛以降低眩光。(請參考相關影片：[What is Polarization?](#))

在黑洞的附近 是什麼造成光的偏極化？

是磁場與同步輻射！圖2左圖所示的是M87星系中心黑洞系統理論示意圖，包含黑洞，環繞黑洞

運行並逐漸掉落黑洞的吸積流，以及噴流結構。注意磁場在黑洞-吸積流-噴流系統中所形成的特徵結構。在電波波段，EHT所觀測到黑洞附近的電磁波訊號主要是由高速的電子集體繞著磁場所做的加速度運動所放出的輻射，稱為同步輻射 (synchrotron radiation)。如圖2右圖所示，因為這些電子運動有特定的方向 (大約是垂直磁場方向)，因此這些電子加速度運動所造成的電磁波也帶有特定的特徵 (偏極化)。偏極化又可分為線偏極化 (linear polarization) 與圓偏極化 (circular polarization)，對應到電磁波的電場所表現的震盪模式在空間上是呈現線性或是旋轉的圓型，可以想像，電子繞行磁場所發出的電波輻射就像是系統磁場環境的「指紋」。

EHT團隊在Paper VII 與 Paper VIII 中討論了線性偏極化的分析。相較於2019年的Paper III - Paper VI，當時只對影像的整體亮度 (包含所有帶有偏振性與不帶有偏振性的光) 做出分析。對黑洞影像以及光線在黑洞周圍的軌跡有興趣的讀者可以參考臺北星空92期的相關專文：[光的奧德賽](#)。

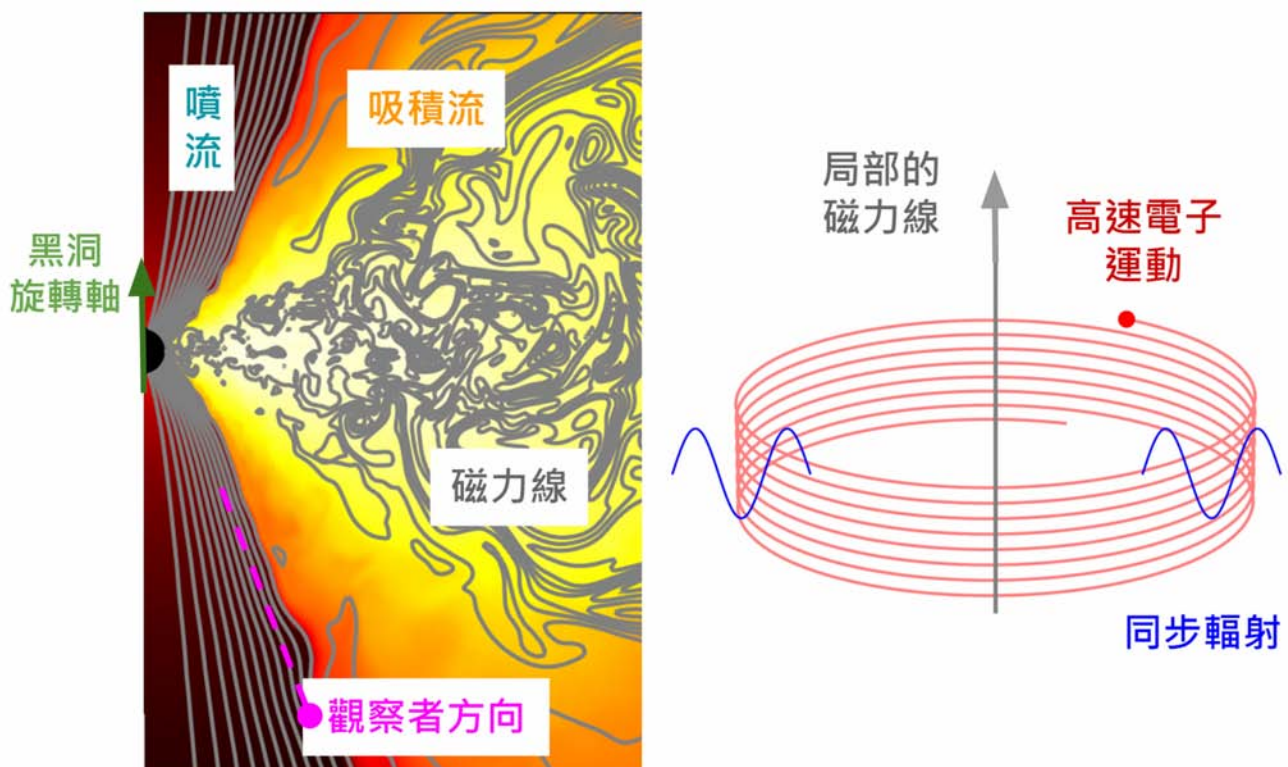


圖2. M87黑洞系統與同步輻射機制的示意圖。電子繞行磁場所發出的同步輻射所帶有的偏極化訊息間接的透露出磁場的結構與強度，以及整體系統的環境。根據之前(Paper V)的推論，黑洞的旋轉軸方向是指向遠離觀察者的方向。
Credit: 卜宏毅

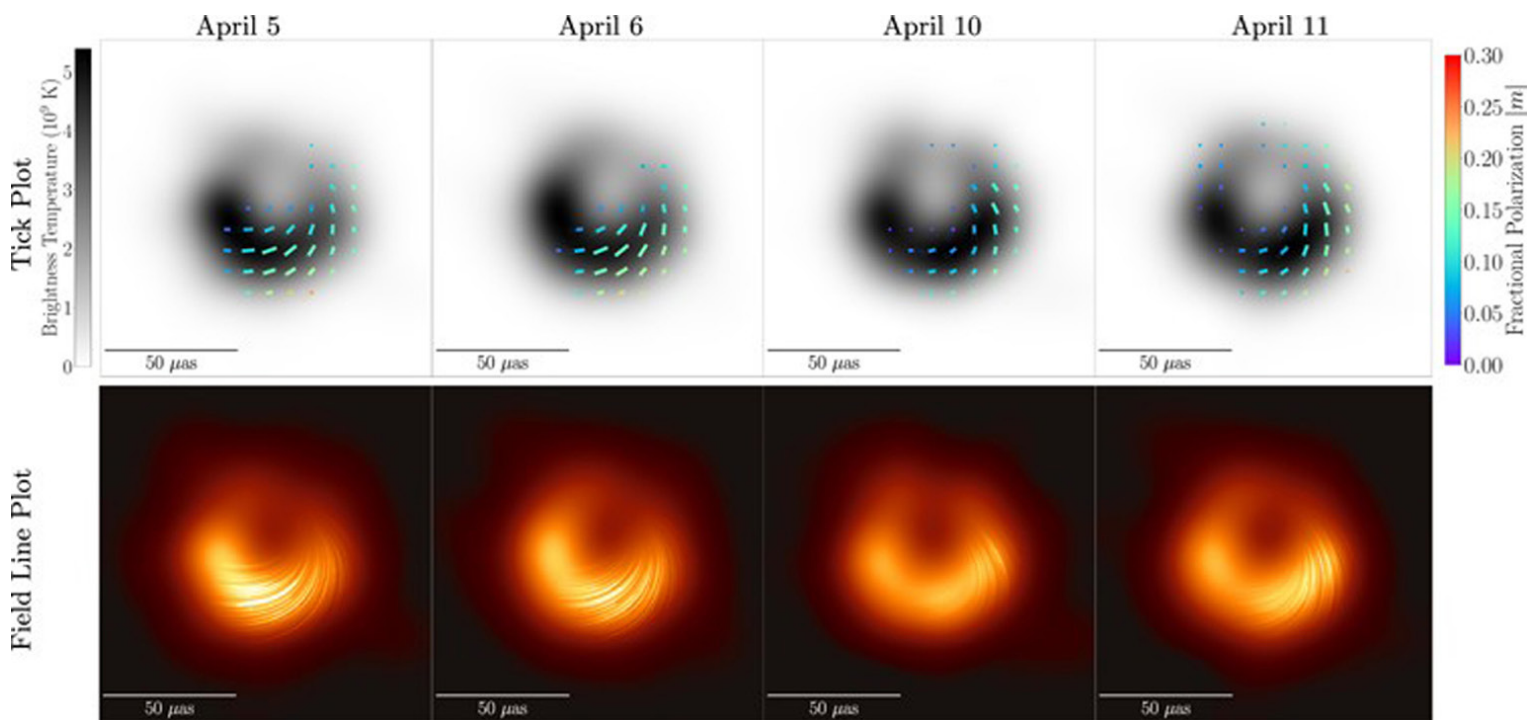


圖3. 將不同分析方法所得到的(線性)偏極化特性平均後的結果以及兩種不同的圖示方法。在上方圖中，背景灰色調圖像是影像的整體亮度（對應2019年公布的黑洞影像），包含了偏極化與非偏極化光線的的總亮度。灰色調圖像上方的線段方向則表示了局部偏極化的方向（Electric-Vector Position Angle 簡稱EVPA; EVPA的方向大約垂直當地磁場的方向），線段長度則代表局部具有偏極化光的多少，而顏色則表示局部偏極化與非偏極化輻射的比例(紅色代表局部的偏極化程度最高)。下方圖則是將上方圖偏極化向量的資訊用更為視覺化的方式(line integral convolution)呈現，表現在線條的方向，長度，與不透明度上。 Credit: EHT paper VII

為什麼花了很久分析？

為了記錄偏極化訊號，每個電波望遠鏡都將收到的電波訊號進一步分成兩種獨立且特定（電場震盪）的資訊分開紀錄，再用以干涉儀的分析。然而，電波望遠鏡本身並非完美，例如訊號在區分為兩種獨立的偏極化模式時，訊號可能「漏出」而錯誤的對另一種模式造成貢獻，稱為「polarization leakage」。在電波天文學中，這些不確定性由「D term」描述。對這些不確定的了解是數據分析的關鍵。如論文中所描述，EHT團隊發展了數種不同方法分析每個望遠鏡的D term以及對這些方法的各種測試，比對結果，最後得以確認天體本身的線性偏極化特性。

圖3是M87黑洞在2017年4個不同的晚上的（線性）偏極化影像，由EHT團隊用不同分析方法所得到的結果所平均而得到。這些偏極化的方向，大致上就是垂直當地磁場的方向。

如何解讀這些偏極化圖片？

影響黑洞系統偏極化特性的因素非常繁雜，與天體周圍的（離子化）吸積流的運動，吸積流氣體的空間與能量分布，磁場強度與幾何等都有密切關係。這些影像對以上物理環境的理解提供了莫大的助益！

EHT團隊利用在Paper V和Paper VI所建立的廣義相對論性磁流體力學的數值模擬資料庫，建立了超過7萬2千張的線性偏極化的影像資料庫（圖4），並更進一步比較出M87黑洞周圍可能的磁場環境，進而對吸積流與噴流的狀態更加了解（圖5；以及請參考相關影片：[How Magnetic Fields Affect Black Hole Images?](#)）。EHT團隊發現與觀測相符合的模型都具有相對較大的磁場（即圖4所介紹具有較強磁場環境的「MAD」狀態），並需要系統中有許多特定方向（垂直於旋轉軸赤道面）的磁場分布。這些發現將在未來更多EHT對M87中心黑洞的觀測測試，也佐證了人們對黑洞-吸積流-噴流系統中磁場扮演重要角色的認識（圖6與圖2）！

延伸資訊

EHT團隊公布的八篇論文

https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_EHT

EHT網站關於偏極化影像的報導與參考資料

<https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-image-magnetic-fields-edge-m87s-black-hole>

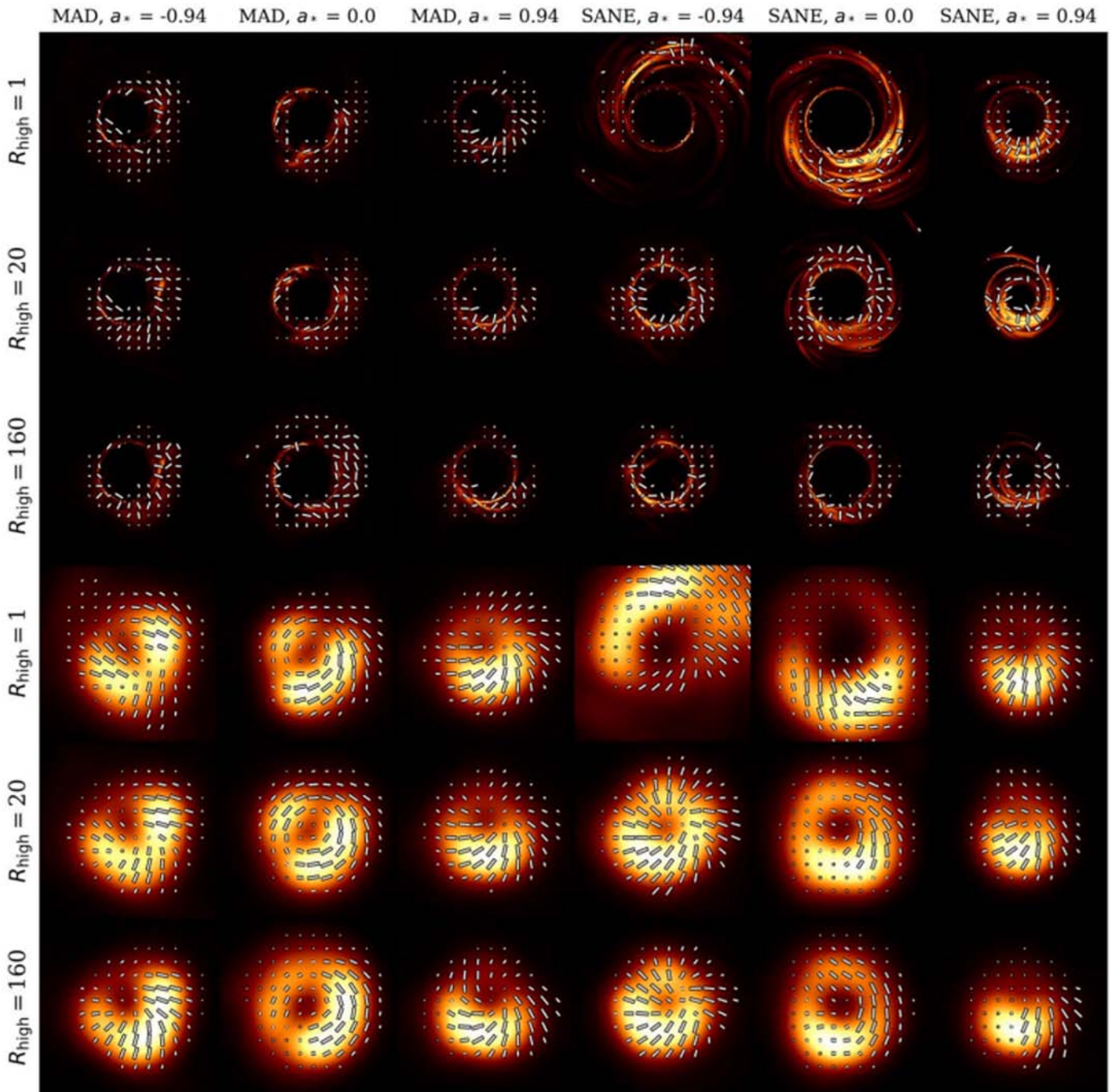


圖4. EHT團隊所準備的線性偏極化影像庫範例，根據廣義相對論性磁流體力學的數值模擬，所進一步考慮電子放出的電磁輻射所計算得到（上半部：影像庫資料；下半部：進一步模擬觀測時，因為對天體的角解析度有限，所對應到較為模糊的影像）。範例中黑洞自旋方向都是朝向左方。上方標示的MAD (Magnetically Arrested Disk) 和SANE (Standard And Normal Evolution) 代表兩大類不同的黑洞吸積環境:相較於SANE狀態，MAD狀態時吸積環境帶有足夠多的磁場累積於黑洞周圍，並能影響黑洞吸積流的運動以及提高將黑洞轉動能量轉換成噴流能量的效率。左方所標示的 R_{high} 則表示對黑洞周圍環境電子溫度描述的不同參數值。透過影像庫與觀測結果(圖3)的比較，可以幫助我們更好的認識M87黑洞的特性。

Credit: EHT團隊 Ppaper VIII

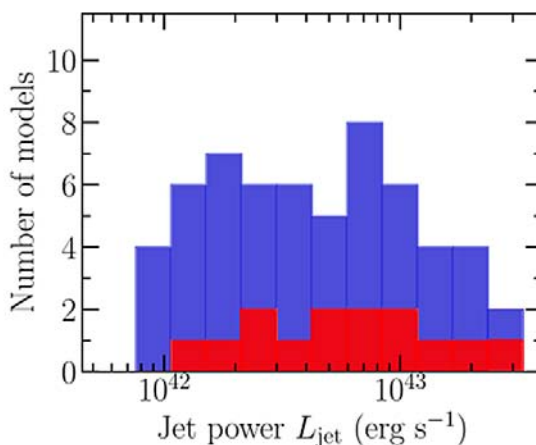
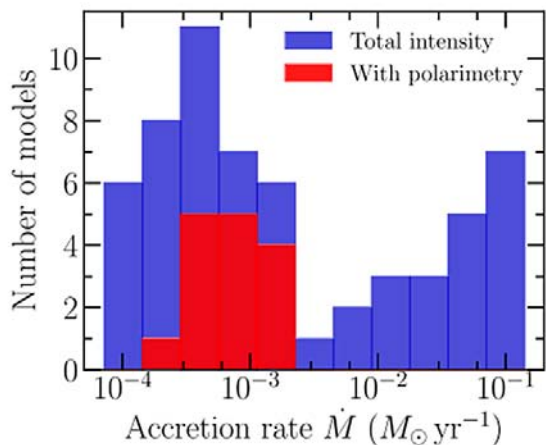


圖5. 相較於之前未區分偏極化的黑洞影像觀測結果（圖中藍色區域），偏極化的觀測結果（圖中紅色區域）帶有更多資訊可以幫助我們對M87黑洞系統有更進一步的約束。圖中顯示影像庫中能與觀測相符的模型所具有的吸積（左圖）與噴流（右圖）表現的分布。
Credit : EHT團隊 Paper VIII

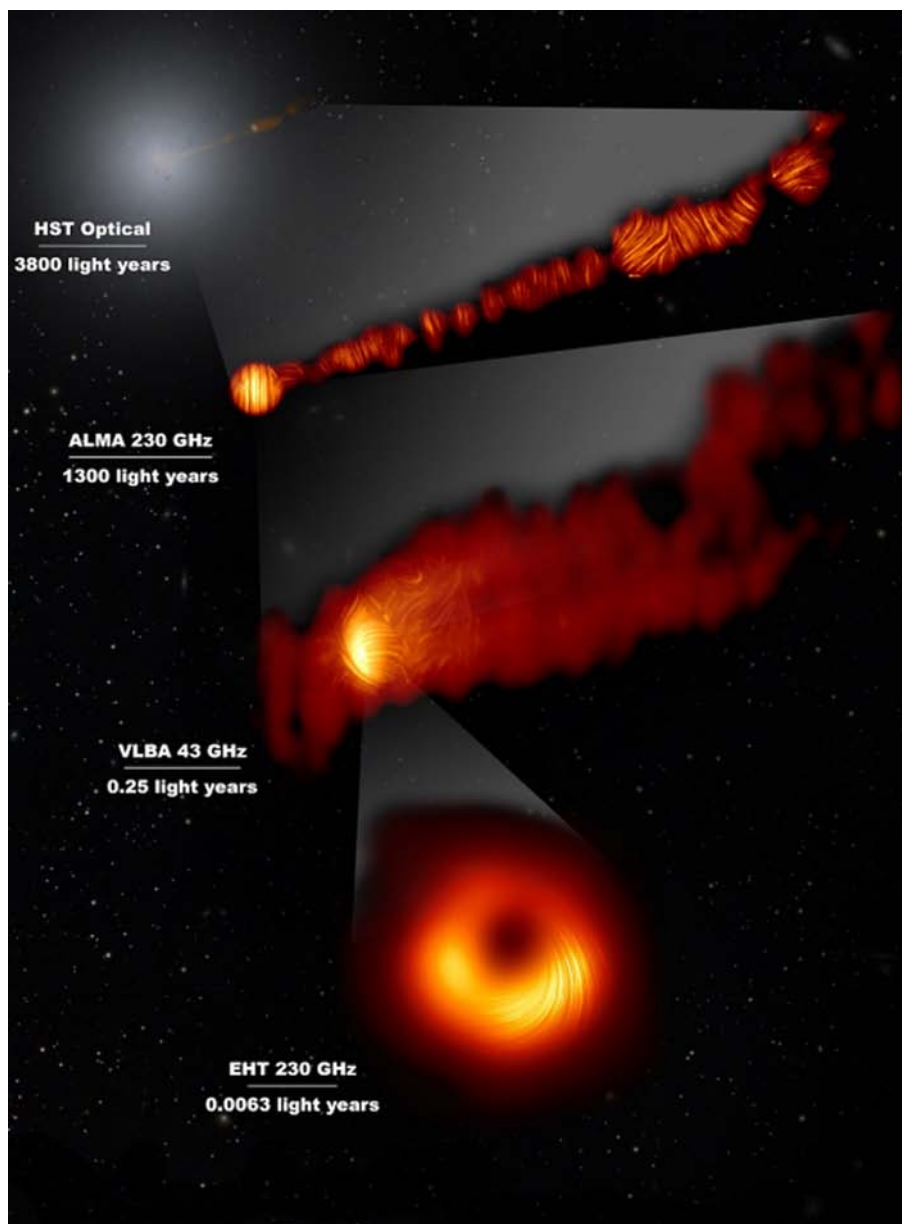
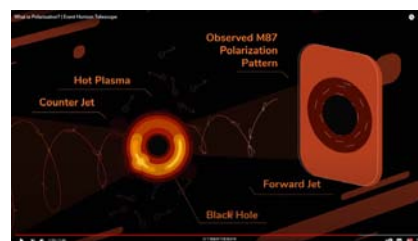


圖6. M87噴流在不同尺度下觀測到的偏極化結果，暗示了磁場在黑洞噴流的產生機制中佔有重要的角色，首張黑洞周圍偏極化的影像在最下方。有趣的是，觀測上只有相對少數部分的黑洞系統具有噴流結構。

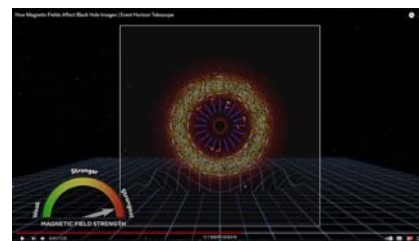
Credit : EHT團隊, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Goddi et al.; VLBA (NRAO), Kravchenko et al.; J.C. Algaba, I. Martí-Vidal

YouTube相關影片：



What is Polarization? (有中文字幕)

<https://www.youtube.com/watch?v=Un-9fbqIIKo>



How Magnetic Fields Affect Black Hole Images? (有中文字幕)

<https://www.youtube.com/watch?v=6xrJoPjfJGQ>

卜宏毅：臺灣師範大學物理系助理教授
中研院天文所訪問學者
事件視界望遠鏡團隊成員