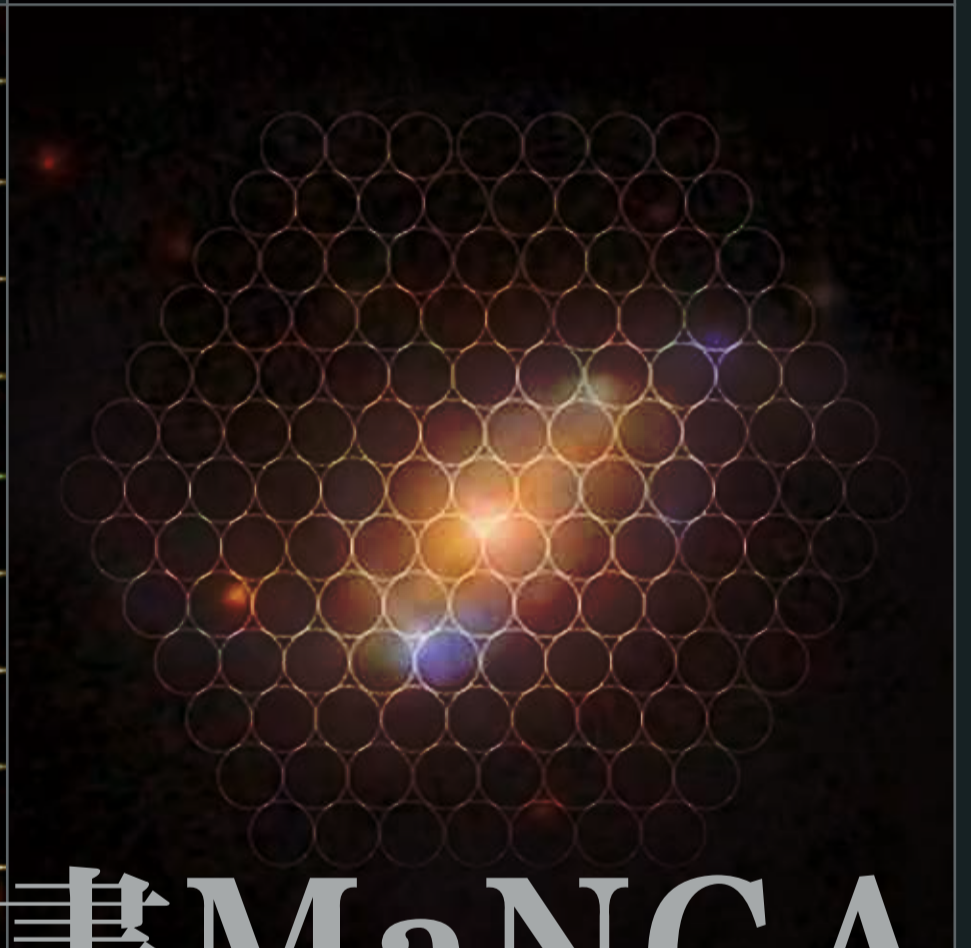
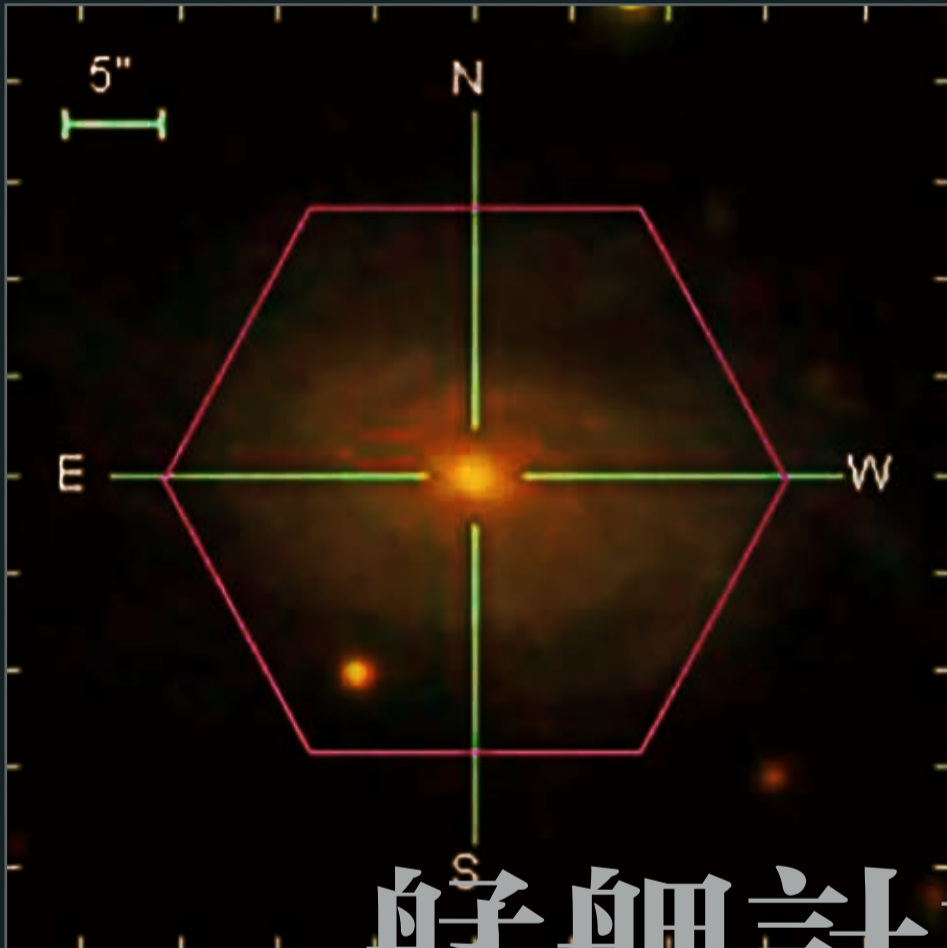
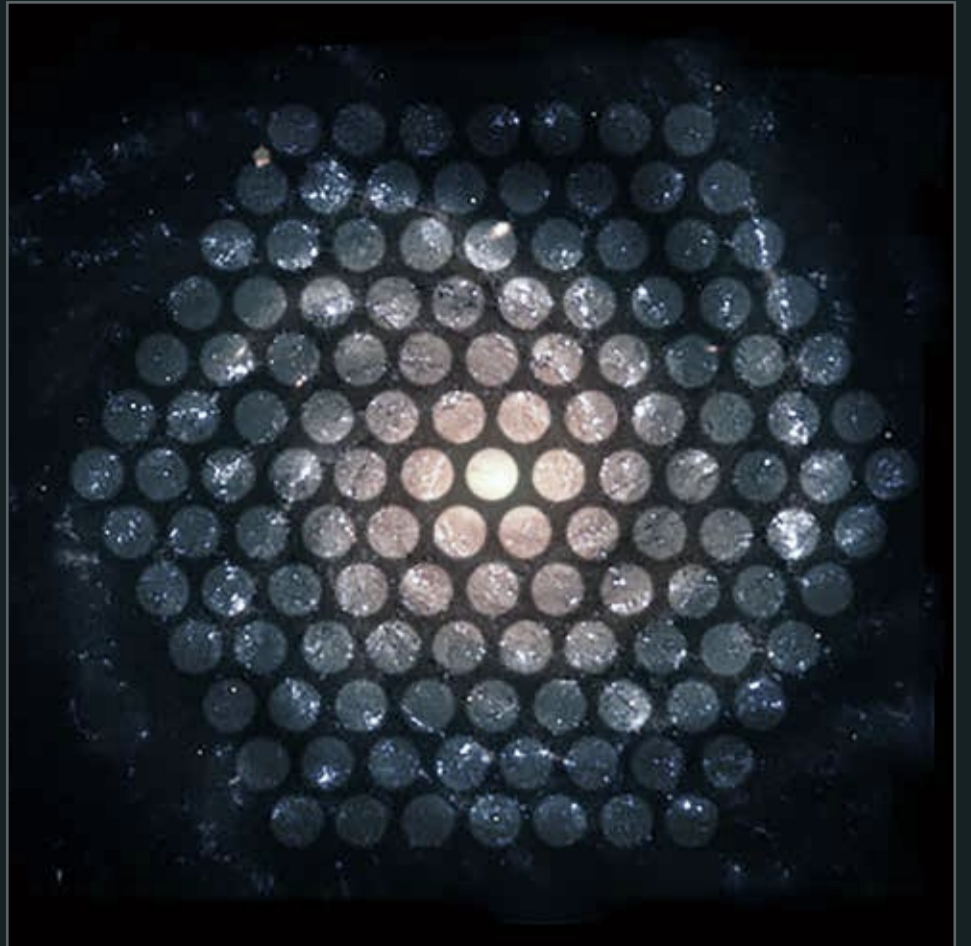
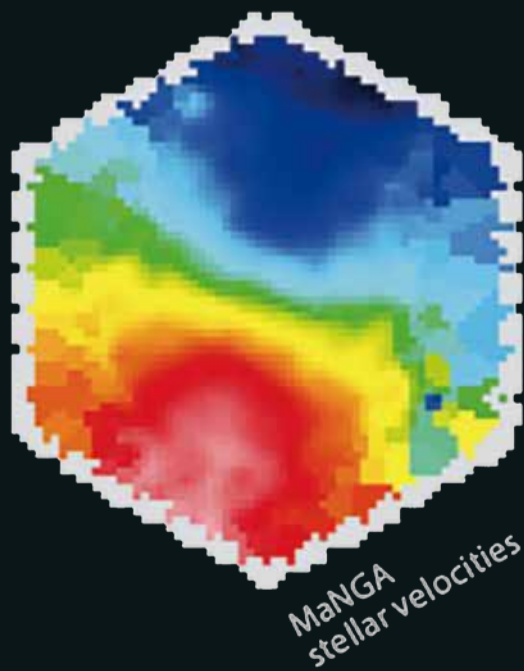




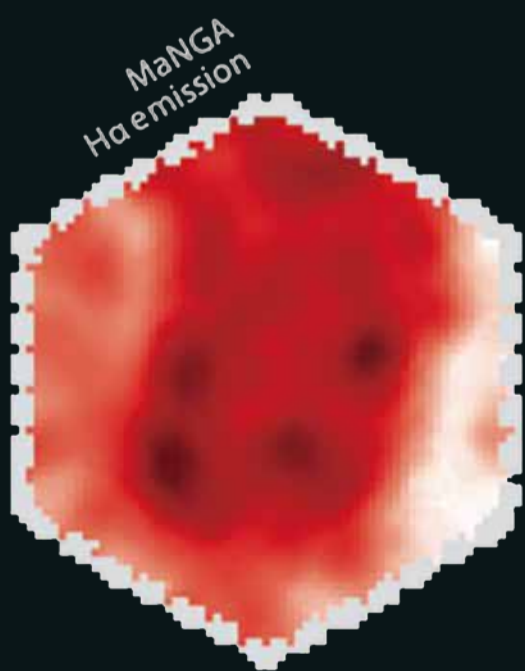
天聞



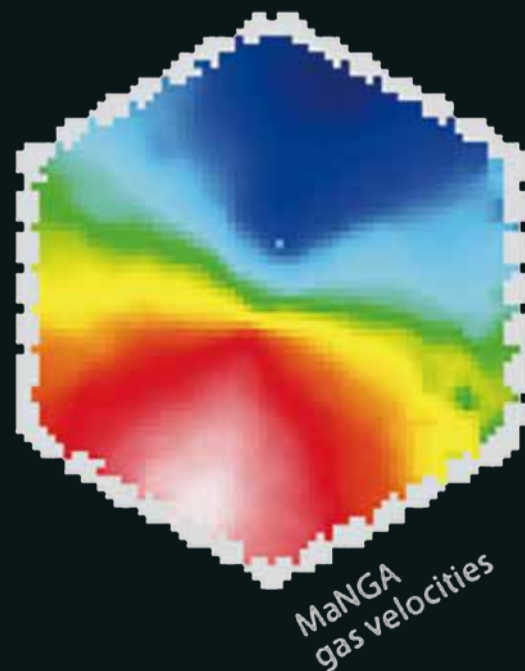
鯨鯨計畫MaNGA



MaNGA stellar velocities



MaNGA H α emission



MaNGA gas velocities

看 MaNGA 學宇宙

作者 / 林彥廷

鯨鯨計畫 (Mapping Nearby Galaxies at APO, 簡稱 MaNGA, 同日文「漫畫」發音) 是近年來最具雄心的集成視場單元 (Integral Field Unit, 簡稱 IFU) 計畫, 也是本所星系研究團隊的重點計畫之一。本文簡述星系研究的基本方法, 論述為何如 MaNGA 這種大型 IFU 計畫對了解星系形成是絕對必要的。

星系是什麼? 簡單來說, 他們是由百萬到上兆顆星所組成的集團, 可以說是宇宙組成的基本單位。星系的演化與宇宙的歷史息息相關, 也因此, 了解星系的形成與演化, 是天文學中的一個重要挑戰, 有助於加深我們對宇宙的認識。

讓我們以常見的螺旋星系為例 (如仙女座大星系 M31), 來了解星系的結構。他們擁有一個由恆星及氣體構成的盤面, 其上可能有數條旋臂以及棒狀結構。整個星盤繞中心有秩序地轉動。另外, 在許多星系

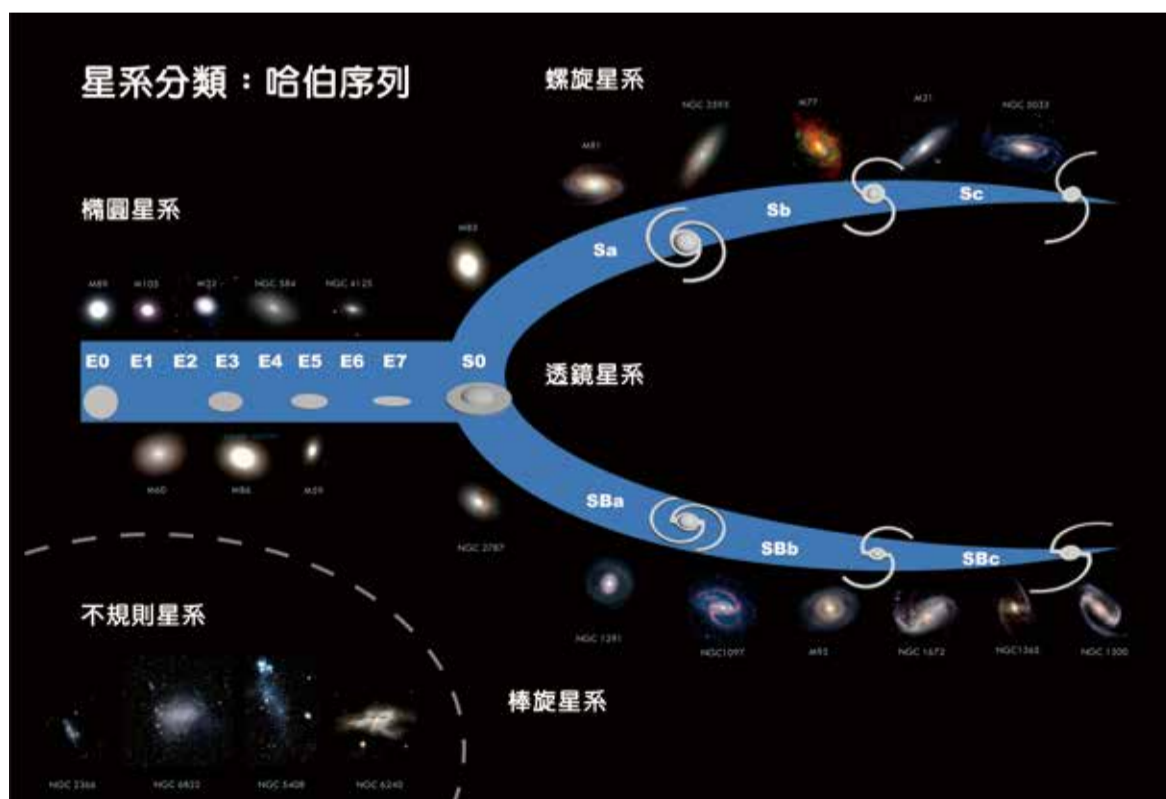
中心, 有由年老恆星組成的核球。早期天文學家認為核球是不轉動的; 核球中的恆星運動方式不規則, 而正是這種紊亂的運動讓核球不致因本身的重力而塌縮。

除了螺旋星系, 星系大致還歸屬於其他兩類: 橢圓星系以及不規則星系。這個分類概念最早是哈伯在 1930 年代所提出。他將星系以外型排序: 圖左的序列為橢圓星系, 右邊的兩支為具棒狀結構及無棒狀結構的螺旋星系, 不規則星系另外列在左下方。由於星系在圖上的分佈猶如音叉, 因而這個分類法也稱為哈伯音叉圖。簡單而言, 星系在音叉圖上的位置, 大致反應了星系結構中的兩個主要部分 (星盤及核球) 的相對比例。在最左邊的 E0 橢圓星系, 基本上只有核球; 到了音叉分叉處的 S0 透鏡星系, 核球與星盤都相當明顯; 但在音叉右邊的 Sc/SBc 星系, 核球已經相當不明顯; 不規則星系通常沒有核球。我們可以說, 在哈伯音叉圖中的星系, 大致上可想成是由不同比例的星盤及核球所組成。

簡單而言, 研究星系有兩種做法: 我們可以幫它們拍照, 並進一步由它們的外觀 (諸如核球跟星盤的相對大小比例, 或是亮度隨中心距離的變化) 推敲它們的性質; 另一個方法, 是取得它們的光譜, 由其中的發射及吸收譜線來測量它們的紅移、所含星族的年齡、金屬豐度、以及運動性質 (轉動速率、速度彌散大小)。由於拍照比較容易, 因而能用來建構超大星系樣本, 但對單一星系所能獲得的資訊有限。相反的, 光譜取得比較費功夫, 但我們能藉此得到相當豐富的資訊。因而一個常被天文學家採用的策略便是: 透過對一片天區的影像觀測, 建構出一個星系樣本; 之後從中選出一些有代表性 (或特別) 的星系, 用光譜儀進一步觀測。

史隆數位巡天計畫 (Sloan Digital Sky Survey 簡稱 SDSS) 是有史以來最成功的天文計畫之一。他們採取的便是前述的策略, 先以一個超廣角相機快速取得天空 1/3 區域的五色影像, 再從這區域內四億個天體中選出四百萬個測量光譜。史隆量測光譜的方式, 是將星系的光透過一條條的光纖, 導入光譜儀中再進行分光。每個星系以一個光纖觀測, 而每個光纖直徑是三角秒; 對於遙遠星系來說, 一個光纖能夠涵蓋整個星系, 但對鄰近星系而言, 通常只有星系中心的光能進到光纖中。

初代的史隆計畫量測了一百萬個星系的光譜, 真正開創了星系統計研究的領域; 天文學家利用史隆的資料發現了星系許多有趣的統計性質。不過, 史隆單一光纖光譜並不能讓我們透徹的了解星系的形成。一方面是因為我們知道星系由性質迥異的星盤及核球構成; 對於鄰近螺旋星系, 由於史隆光纖僅涵蓋中心 (核球) 的部



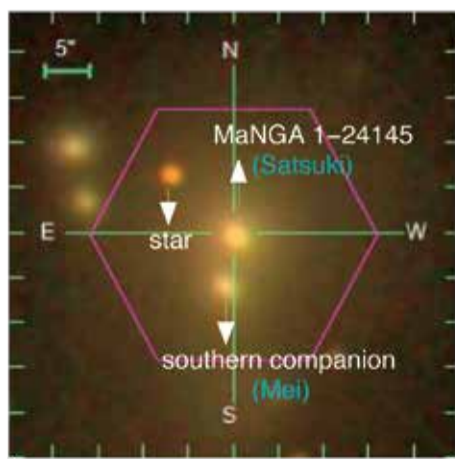
哈伯音叉圖。© 中研院天文所

位，所量到的性質會偏向核球的。另一方面，我們相信星系的形成大致是由內而外（inside-out），因此星族的性質如年齡、金屬豐度等將隨離中心距離而改變；這些變化很難由單一光纖光譜量得。

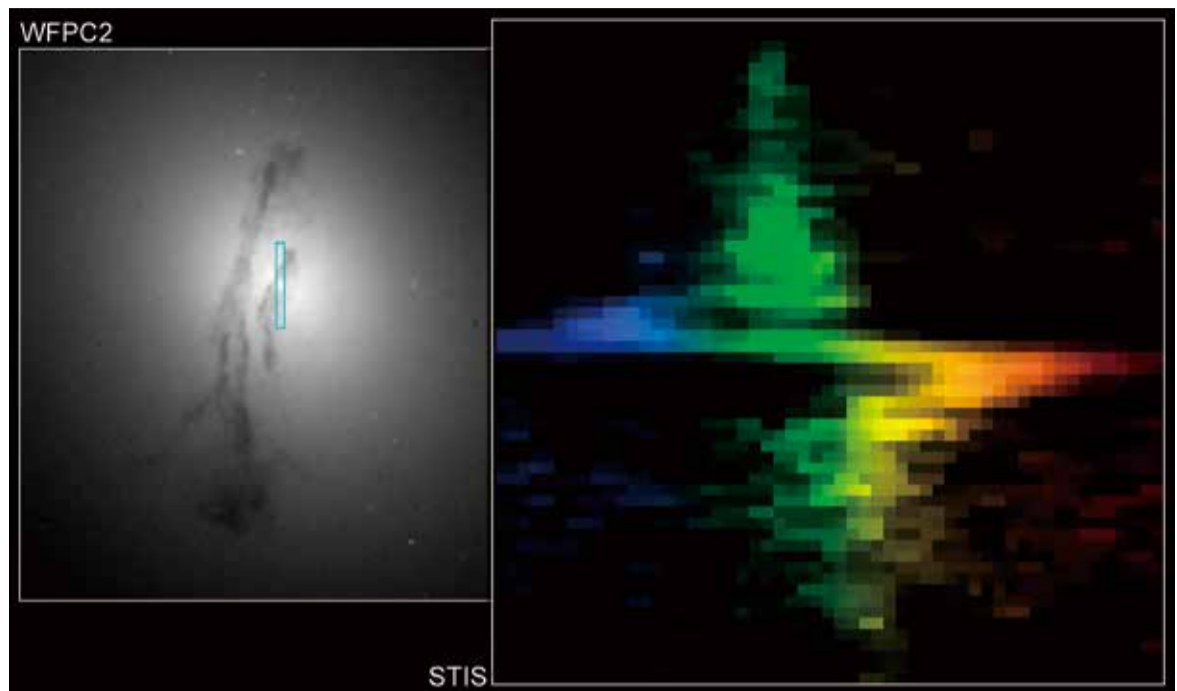
要克服這個困難，一般的做法是用狹縫（slit）來作為分光的第一步：以一條狹縫穿過星系，便可取得狹縫涵蓋部位的光譜。若要獲得星系其他部位的光譜，則需重複實驗，將狹縫擺在星系其他部位。這個方法，要得到精確的量測會非常耗時。90 年代起，實驗學家開始發展 IFU，得以用來有效率地取得空間解析光譜（也就是被 IFU 涵蓋的地方都能得到光譜）。早期最成功的計畫為 SAURON 及後繼的 ATLAS^{3D}。這兩個計畫的樣本是非常鄰近的 300 個橢圓星系及透鏡星系。研究人員發現，早期星系（除了最巨大的橢圓星系外），多數的核球仍有相當的旋轉，顛覆了傳統的想法。

受 SAURON 及 ATLAS^{3D} 成功影響，IFU 巡天計畫相繼而起；具代表性的有 CALIFA、SAMI 等。不過，影響力最大、星系樣本數最多、資料品質最好的，仍是非 MaNGA 莫屬。

MaNGA 是史隆巡天計畫第四代（SDSS-IV）中的其中一個核心計畫，目標在取得鄰近



左圖呈現 SDSS 的彩色影像，圖中央箭頭所指兩星系是以動畫「龍貓」中的兩姊妹命名的 Satsuki 與 Mei 兩個橢圓星系。右圖則為在同一天區中從 MaNGA 取得的光譜所分析出氫原子 H α 發射線的分佈。我們可以看到除了在 Satsuki 有 H α 以外，在視野右上方還有很大的 H α 團塊（H α blob），這在左圖影像中完全看不到。多虧了 MaNGA IFU 的觀測，我們才能發現這種少見的現象。可能的成因包括黑暗星系、活躍星系核所拋出的氣體、或是熱氣體冷卻的結果。由於此 H α 團塊的由來仍是個謎，我們將之命名為 Totoro（龍貓）©Lin et al. 2017, *Apl*, 837, 32



左圖示意將狹縫擺在 M84 星系核心部位；分光後，將會得到狹縫上每個位置的光譜。右圖是取得光譜後，所得出狹縫區域中星體運動的情況：紅色區塊為遠離我們，藍色則為靠近我們；據此天文學家得到該星系中心存有超巨大黑洞的證據。©NASA

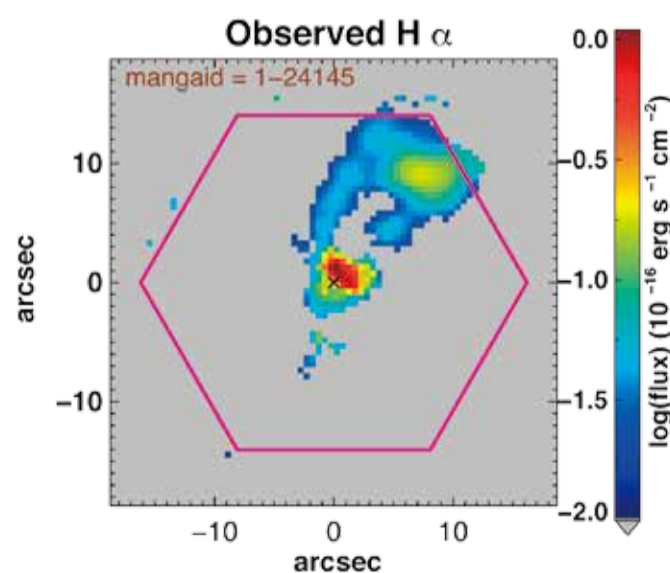
宇宙中 10000 個具代表性的星系的空間解析光譜。MaNGA 團隊製造了大小不一 17 個光纖束（fiber bundle）用以觀測視直徑大小不同的星系。除了星系樣本的選取頗費巧思，以期能在星系環境、質量分佈、大小、顏色等性質間達成平衡外，MaNGA 的觀測方式、個別光纖束涵蓋星系大小的比例、以及光譜寬廣的波長範圍，也都是其他 IFU 計畫難以望其項背的。

為何要觀測 10000 個星系？前代史隆計畫的經驗告訴我們：許多星系的特性都是相關的（例如星系質量與恆星形成率）。所以若要

評估兩個物理量之間的相關性（例如星系亮度和顏色），我們必須將其它的物理量（如環境、速度彌散等）設為控制變因。很快地我們能用的樣本數就會急遽變少。因而，星系的母樣本數要夠大才行。另外，宇宙中永遠有新鮮事，只要我們願意去找；有了 10000 個星系，肯定會有些讓人意外的現象（例如林俐暉副研究員所發現的 Totoro）。

目前 MaNGA 觀測穩定進行中，預計 2020 年能得到 10000 個星系的資料。根據史隆優良的傳統，該計畫的資料都會定期向全世界公開；SDSS-IV 也不例外。以目前公開的樣本（4700 個星系）來說，MaNGA 無疑提供了目前最大的 IFU 資料庫。由於樣本數大，MaNGA 團隊得以探討環境對星系演化的影響；這是利用其他計畫資料所無法達成的。至今該團隊已經發表了 62 篇期刊論文。

第四代史隆巡天計畫將於明年觀測完成，而第五代的史隆計畫（SDSS-V）將接續進行。SDSS-V 將進行全地球的觀測，以求了解銀河系、本星系群、以及宇宙中超大黑洞的形成。其中的 Local Volume Mapper 將用配置在大小不同的望遠鏡中的 IFU 完整測繪（mapping）銀河以及它的鄰居（仙女座大星系、大小麥哲倫雲等衛星星系）。







仙女座大星系 M31。© 中研院天文所 / 王為豪

MaNGA 新發現

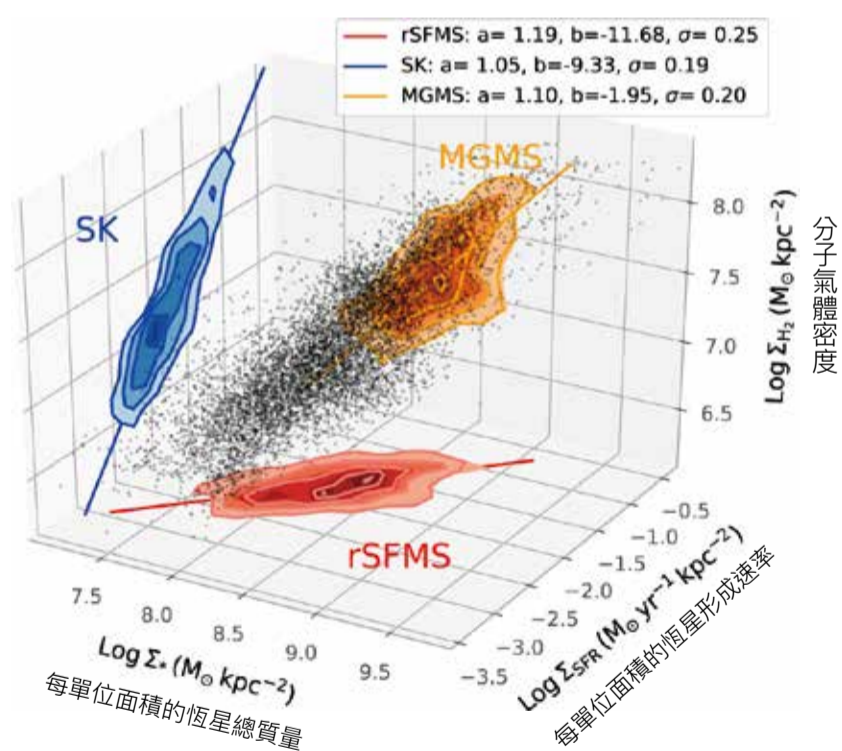
恆星生成速率跟氣體的關聯性

作者 / 林俐暉

我們都知道恆星是在分子雲（Molecular Cloud）塌縮後形成，天文學家很早就發現恆星形成速率跟分子氣體密度有著正相關，稱之為 Schmidt-Kennicutt Relation（簡稱 SK 關係）。而最近幾年，我們團隊利用 MaNGA 資料，也發現每單位面積的恆星形成速率跟每單位面積的恆星總質量也呈現顯著的相關性，通常被稱作為『空間解析的恆星形成主序帶』（Spatially Resolved Star-Forming Main Sequence; rSFMS）關係。然而不若 SK 關係可以直覺解釋為

恆星形成速率取決於分子氣體總量，空間解析的主序帶關係的存在令人困惑，為什麼現在的恆星形成速率需要跟過去所有形成的恆星質量有關？

為了回答這個問題，我們分析阿塔卡瑪大型毫米及次毫米波陣列（簡稱 ALMA）以及 MaNGA 的資料中 14 個正在形成恆星的星系，前者觀測提供了每單位面積的分子氣體質量，後者則提供了每單位面積的恆星形成速率與整體恆星質量，結合這兩種觀測，我們可以一次了解分子氣體質量、恆星形成速率、整體恆星質量的相互關係。圖一呈現了我們數據的三維空間分佈圖以及分別在二維平面上的投影，我們可以清楚地看出這三個數量在對數軸上兩兩之間均呈現線性關係，除了已熟知的 SK 及主序星帶關係之外，我們也第一次明確地發現分子氣體質量與整體恆星質量也有正比關係，被我們稱之為『分子主序帶』（Molecular Gas Main Sequence; MGMS）關係。這兩者的聯繫很可能是因為整體恆星質量決定了在星系盤面上的重力場，進而決定分子氣體的空間分佈。



MaNGA 星系在每單位面積的恆星形成速率、恆星質量、分子氣體質量的三維空間中形成兩兩正相關的分佈。在三個關係式中，SK 以及分子氣體主序帶（MGMS）兩者的標準差均較空間解析的恆星形成主序帶（rSFMS）為小，代表後者很可能是前兩者關係式的必然結果。©Lin et al. 2019, ApJ, 884, 33

接著下一個問題是在這三個兩兩關係裡，到底哪（幾）個是最基本的並有其物理意義呢？我們分析了此三個關係各自的標準差以及兩變數之間的相關係數，發現恆星形成速率與整體恆星質量的關係有較大的標準差以及較小的相關係數。換句話說，SK 與分子主序帶關係很可能才是比較基本的物理關係，而兩者自然而然造成恆星形成速率與整體恆星質量的正相關性。

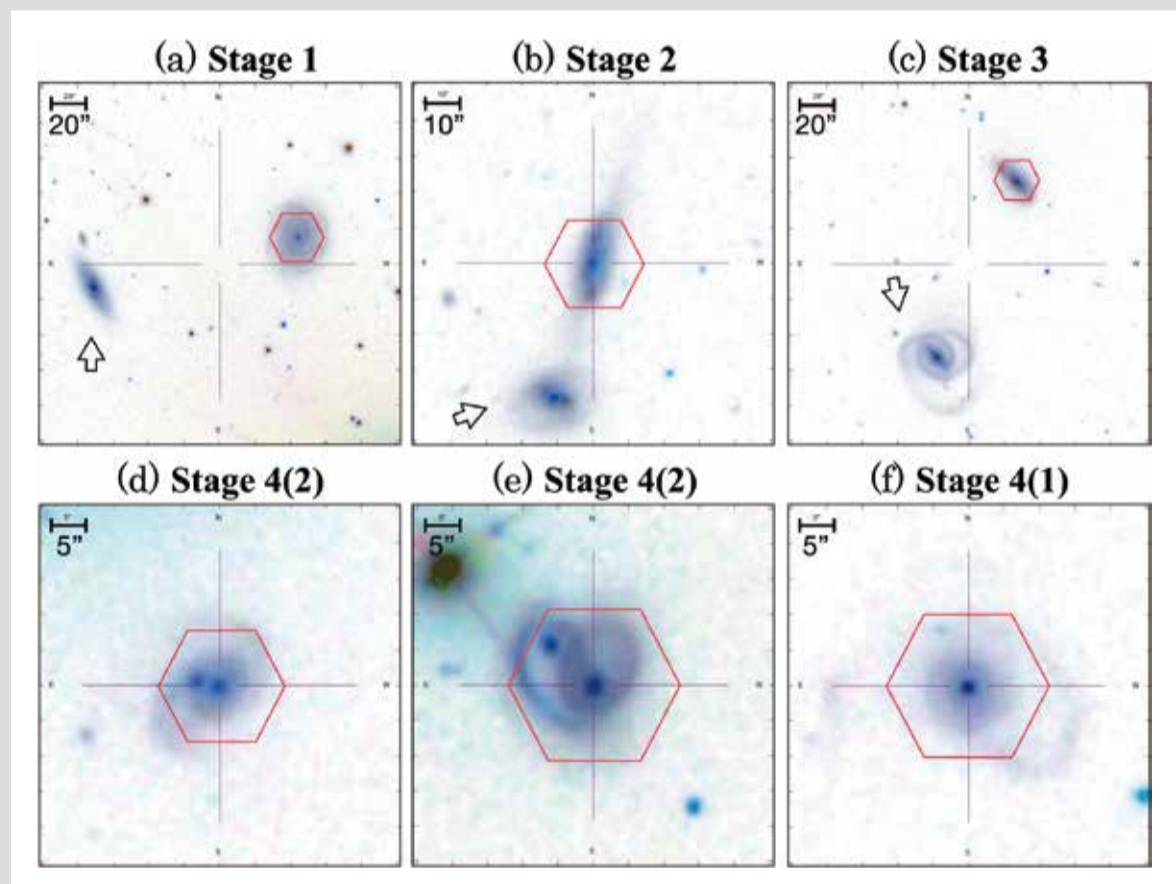
星系碰撞會發生什麼事？

作者 / 林俐暉

星系碰撞過程中，受到潮汐力的影響，星系的氣體與恆星會重新分布。透過星系碰撞的理論模擬，一般預測在兩個螺旋星系第一次交會之後，大量氣體會往星系中心集中，促使新的恆星形成進而引發星暴甚至是星系中心活躍星系核的活動。在碰撞結束之後，兩個星系會合而為一，形成一個較大的橢圓星系。

然而過去的觀測受限於光譜儀範圍，我們對於在星系碰撞過程中恆星形成速率的了解侷限在星系中心，而沒有全面的認識。SDSS-MaNGA 大範圍的觀測提供我們機會全面探索星系碰撞的影響：是在哪些階段以及哪個區域，恆星會大量的形成？

從 MaNGA 前半期取得的數據中，我們團隊找出將近一千個星系正在處於星系碰撞的過程中，利用其相對距離、速度、以及星系形狀的變化度將這些交互作用的星系共分為四個碰撞階段（如圖二所示）：第一階段：兩個星系正首次往彼此逐漸接近當中，此時星系外觀上尚未有顯著的改變；第二階段：兩個星系剛通過彼此，有著明顯的形變，兩星系之間有類似『橋樑』的結構，在外側也拖著長長的『尾巴』；第三階段：兩個星系通過彼此之後相互分離，還保有一些形變，但沒有第二階段那麼的明顯；第四



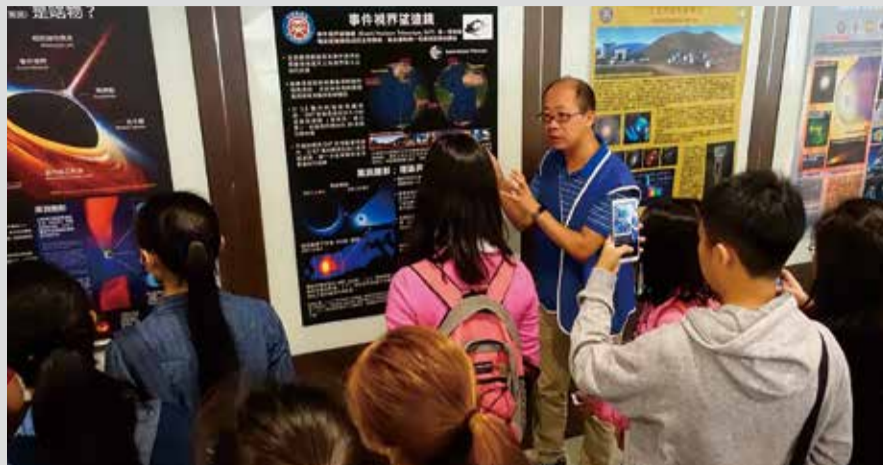
幾個 MaNGA 資料中所找到星系在不同碰撞階段的例子，上排圖中箭頭所示為目標星系的交互作用星系。

©Pan et al. 2019, ApJ, 881, 119

階段：由於重力的關係兩個星系再度靠近而碰撞，最後合而為一。

正在交互作用中的星系分好類之後，我們進一步選取約 200 個樣本來研究恆星形成速率在各個階段的強度，以及在星系裡的分佈。除了在剛開始的階段外，其他時期恆星形成速率從星系由裡到外相較於對照組都有明顯的增加，尤其以靠近中心部分的增加量更為顯著，印證

了理論與模擬的預測。而有趣的是，在第二階段我們看到在星系外緣，恆星形成速率似乎有比對照組還低的現象，這個現象可以被解釋成是因為大量氣體被帶往中心，造成外圍氣體密度降低而抑制了恆星的形成。為了證實這個猜想，我們團隊申請到 ALMA 的觀測時間用來觀測數個正在碰撞的星系的氣體分布，不久的將來我們能藉由取得的數據來進一步了解整個星系碰撞過程中恆星形成或是被抑制的物理機制。



今年本院院區開放日，本所活動攤位的盛況。© 中研院天文所



本所黑洞研究團隊，榮獲 2019 年中技社科學暨技術貢獻獎，本院廖院長與得獎團隊合照。© 中研院天文所

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 | 朱有花 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