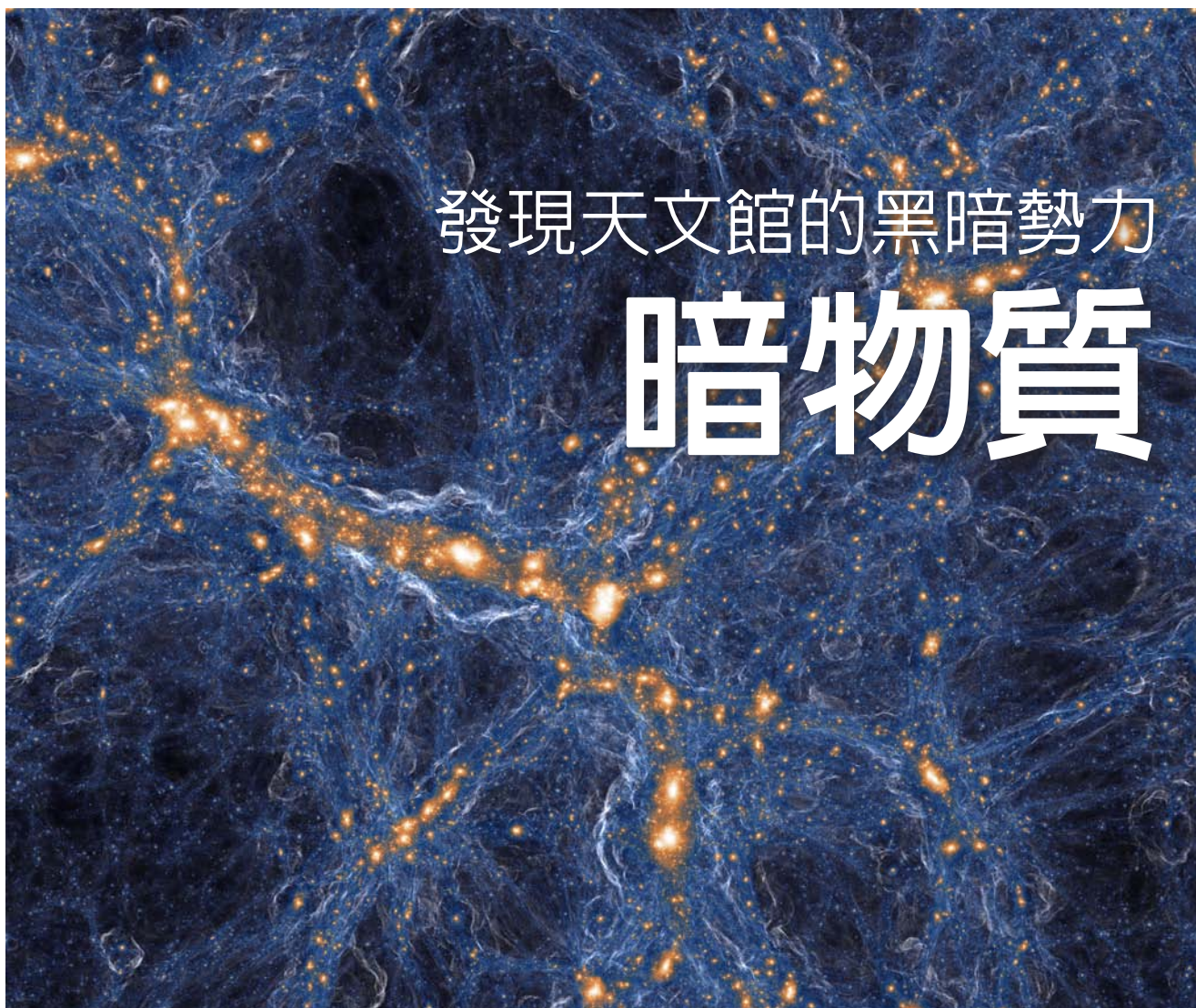


文/ 陳姝蓉

仰望夜空點點繁星時，您是否曾凝視黑夜猜想裡頭的秘密呢？黑洞這個奇異天體，可能是第一個浮出腦海的答案。但如小王子說「重要的東西，用眼睛是看不見的」，宇宙還存在更多看不見的物質和能量喔！

在展示場3樓宇宙區的「宇宙的質量與能量」分布圖上顯示著一般物質僅佔宇宙的5%，代表著組成生命的有機物、呼吸的空氣、喝的水、腳下的土地、天上的繁星等…都是宇宙中珍稀的資源。而佔宇宙大部分的是暗物質（27%）和暗能量（68%）這兩股黑暗勢力，今天就帶大家「join the dark side」尋找窺伏在展示場中的暗物質。

首先，先來看看懸賞單上暗物質的特性：1.不會吸收、反射或發射光線（至少尚未偵測到）、2.是一種物質、3.暗物質與物質（包含暗物質）的交互作用力非常微弱（與弱作用力相當或更低）。暗物質和黑洞雖然都有黑、暗的字眼，但兩者與光的作用非常不同，分別朝向黑洞和暗物質發射光



電腦模擬的宇宙大尺度結構（邊長約3.26億光年），橘/白色為暗物質聚集處、藍色來自氣體產生的震波。credit: TNG Simulations

線，光會掉入黑洞中，而光卻會穿透暗物質彷彿它是透明般。

暗物質的發現

既然看不到，為什麼天文學家普遍認為暗物質存在呢？主要是因為透過暗物質的萬有引力，可以簡單解釋許多觀測（將在下方介紹）。1930年代第一個暗物質存在的線索被發現，而直到1980年代暗物質存在星系與星系團中的概念才普遍被接受。

星系團由數千到數百個星系因彼此引力所組成，藉由星系的運動速度，搭配牛頓定律可以估算星系團內的質量（越快的速度需要越多的質量來抓住）。1937年Fritz Zwicky發現后髮座星系團內星系的運動速度，超過觀測到的質量所能維持的，因此認為星系團裡有看不見的“dunkle materic”暗物質。

星系旋轉曲線

70、80年代的天文學家藉由精良的光譜儀器和電波望遠鏡，意外發現螺旋星系外側的恆星、甚至是離中心更遠的盤面氣體皆以相同的速度繞轉（如圖1）。這個發現之所以讓科學家感到困擾，是因為牛頓定律告訴我們，恆星與氣體的繞轉速度與軌道內部的質量相關。如展示場3樓星系區的「螺旋星系的旋轉速度」展項所示，太陽系的行星繞太陽轉，離越遠的行星繞轉速度越低（克卜勒運動）。同理，因星系亮度隨離中心的距離下降，星系外圍繞轉速度照理會隨之下降。但觀測卻發現繞轉速度趨近定速，藉此天文學家發現星系中看不見的暗物質，且其分佈超過目前的觀測邊界。



展示場三樓星系區—星系的結構

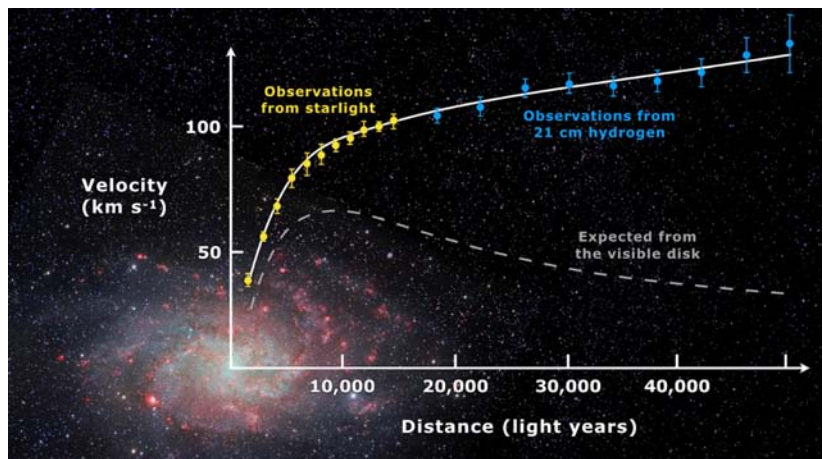
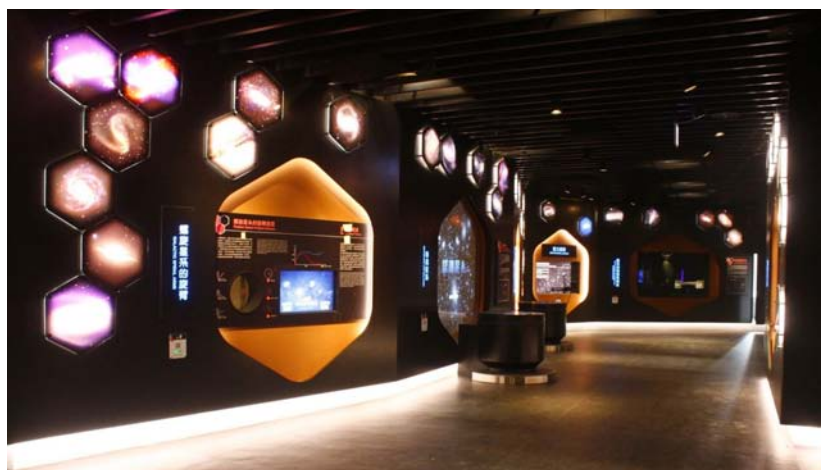


圖1. 圖上顯示的是M33星系的旋轉速度（縱軸；單位：公里/秒）隨離星系中心距離（橫軸；單位：光年）的變化。黃色與藍色分別是來自恆星與氣體（氫原子的21cm譜線）的觀測數據，而下方虛線是僅考慮恆星、氣體提供重力所計算出的繞轉速度，兩者的差異顯示暗物質的存在。



螺旋星系的旋轉速度

星系團中的氣體

天文學家測量星系團內氣體發出的X射線，可估計氣體（大部分是游離的氫）的溫度和密度。再利用氣體所受重力和壓力間的平衡，來計算星系團內部的質量。藉此天文學家發現星系團內恆星和氣體僅占總質量約15%，大部分的質量都是由看不見的暗物質所組成。

重力透鏡效應

根據愛因斯坦的廣義相對論，質量會使時空彎曲，我們感受到的重力其實是時空彎曲的結果。天文學家曾在日全食時觀測到，太陽背後恆星的光線因太陽造成的時空彎曲而偏折，使恆星的視角偏移數角秒。時空彎曲程度會受質量和距離影響，分析光線偏折的程度可以反推透鏡的質量。由觀測遠方星系、類星體，經過星系團所造成的扭曲、拉長影像，天文學家推測星系團的質量，意外發現遠超過恆星和氣體的質量和，因此推測有許多看不見的暗物質存在。

如在展示場3樓星系區的「暗物質」看板中，哈伯望遠鏡拍攝的是位於雙魚座的CL0024+17星系團（圖2，上），中央有許多黃色的星系皆是星系團的成員。星系團中心附近，有些扭曲拉長或重複（例如圖上的紅圈）出現的星系，這是遠方星系因星系團的重力透鏡效應所造成。分析影像可反推星系團的質量分布（圖2，下），意外發現與星系分布有些差距，暗示暗物質的存在（特殊的環狀分布推測來自星系團碰撞）。

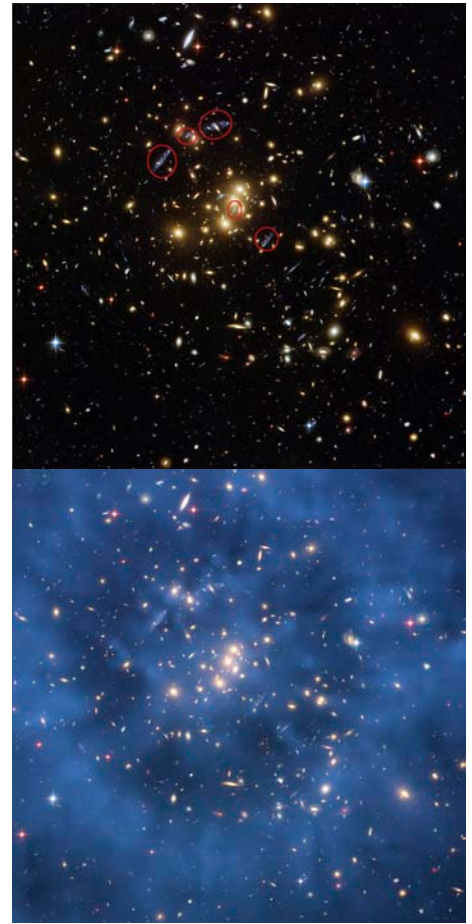


圖2. 「暗物質」展品中的圖片，上圖是哈伯望遠鏡拍攝的CL0024+17星系團（紅圈為遠方星系的重複影像），推估星系團質量分布如下圖，與星系分布有些差距，顯示暗物質的存在。



圖3. 重力透鏡的展項，利用透鏡來模擬星系造成時空彎曲的效果。移動透鏡可見到背景星系，呈現彎曲拉長和多重影像，如環狀的愛因斯坦環、雙重影像(如右圖)。



圖4. 移動透鏡模擬重力透鏡效應，可以呈現如下方真實望遠鏡看到的影像。左下圖是哈伯望遠鏡拍攝的亮紅星系LRG3-757，遠方的藍色星系因其重力影響而產生「愛因斯坦環」，右下圖是哈伯望遠鏡拍攝的SDSS J120540.43+491029.3，遠方星系呈現雙重影像。

子彈星系

子彈星系團（圖5）因其氣體（紅色）影像如同子彈而得名，是暗物質存在的強力證據。觀測見到兩星系團高速對撞，而其氣體分佈（佔星系團一般物質的85%）落後於星系群聚的位置，天文學家認為這是了解暗物質的好機會。星系和氣體的運動，除了受物質分布變化（重力改變）影響外，還需考慮成員彼此的交互作用。星系，因恆星間距離遙遠（如太陽是彈珠大，毗鄰星約在500公里外），幾乎不會撞在一起，星系可以自由穿越；氣體穿越時，因彼此的電磁力（摩擦力）影響使移動變慢。天文學家推算星系團的質量分佈（藍色；重力透鏡效應），發現其與大多數的一般物質（氣體）不同，而是與星系分佈相同，然而星系僅貢獻當中1%的質量，顯示暗物質存在且其作用力（如同星系間）非常微弱。

宇宙微波背景輻射與大尺度結構

另一個暗示暗物質存在的展項是，位於展示場3樓宇宙區來

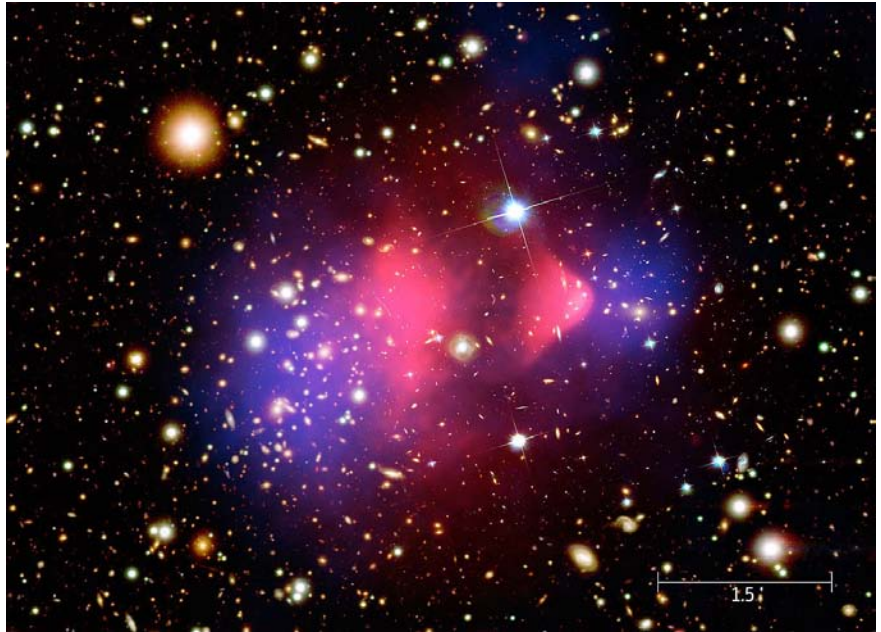
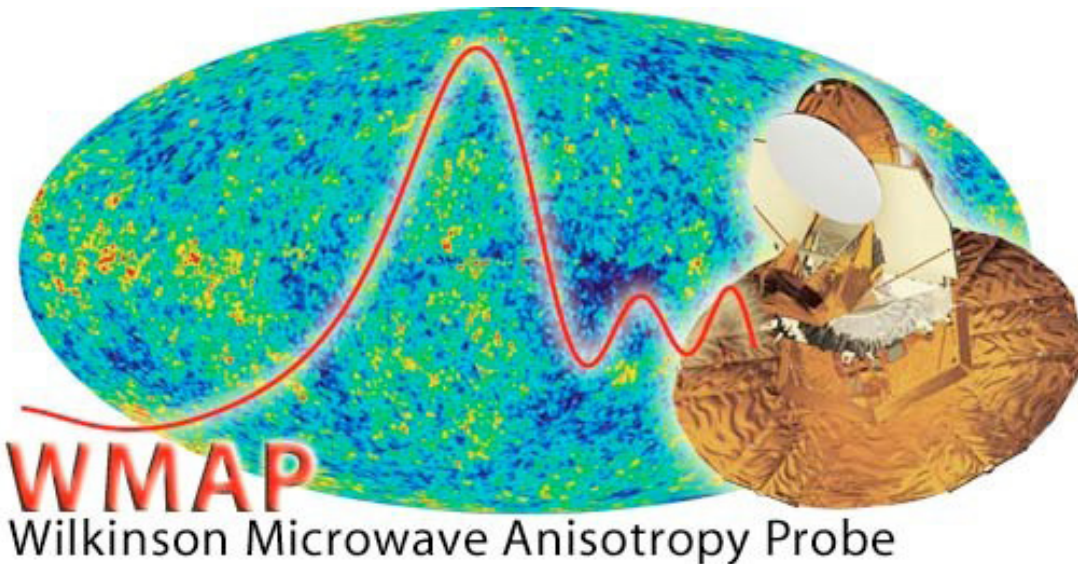


圖5. 較小的子彈星系團高速穿越另一個較大的星系團。紅色是錢卓拉的X射線觀測，顯示星系團的熱氣體，藍色區域為利用重力透鏡效應推算的質量分布，背景可見光影像來自麥哲倫和哈伯太空望遠鏡。第一次看見一般物質與暗物質分布有明顯分離。

自大霹靂餘暉的「宇宙微波背景輻射」。隨著COBE、WMAP、PLANCK衛星的升空，對宇宙微波背景輻射的觀測解析度大幅提升。天文學家發現，宇宙早期的光在四面八方均勻的2.73K溫度中，有十萬分之一的冷熱差異（來自不均勻的物質分佈）。藉著分析在不同天區大小的溫度變化，天文學家發現需要暗物質才

能解釋，大小不同區塊間溫度變化的比例，並進一步得出暗物質與一般物質在宇宙中的佔比。

隨著宇宙不斷膨脹降溫，物質較多的區域會藉由重力吸引更多物質聚集，成為星系分佈的基礎。因一般物質聚集時，需要抗衡因彼此間的作用力所產生的壓力（如擠壓空氣壓力上升），使得較大的質量才能聚集。而為了

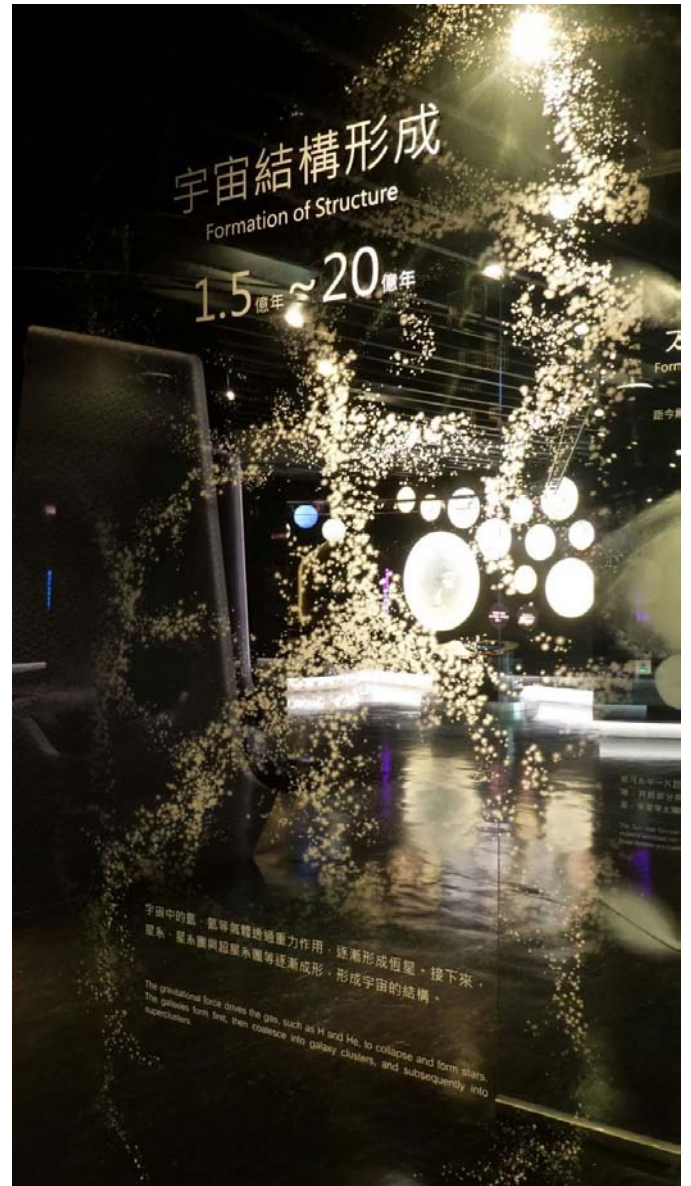


WMAP拍攝到宇宙微波背景輻射中萬分之一的溫度差異，紅色曲線顯示的是大小不同區塊中溫度變化的程度。

解釋星系或星系團的存在，並符合背景輻射中的溫度變化，天文學家認為需要暗物質來提供額外的重力，幫助結構生成，因此展示場3樓宇宙區「宇宙簡史」中的「宇宙結構形成」與星系區中「星系的群聚」裡的長城結構也隱藏著暗物質。

雖然目前尚未觀測到暗物質粒子，但因其能簡單解釋上述種種現象，天文學家普遍接受暗物質的存在。可能的暗物質候選有：1.大質量緻密暈體（MACHO）：例如棕矮星、白矮星、黑洞，因亮度低不易看見。天文學家觀測遠方恆星因MACHO而產生的亮度變化（重力透鏡效應），估計其僅能解釋1~2成左右的暗物質含量。2.微中子：熱/溫暗物質的候選，作用力非常微弱，但缺點是其速度趨近光速，故很快就擴散跑掉，難以維持聚集形成目前的星系結構。3.大質量弱交互作用粒子（WIMPs）：是目前最熱門的冷暗物質候選。然而它也面臨不少挑戰。例如，其預測星系核心密度極為陡峭，與觀測顯示密度幾乎為常數不符，再者，其預測銀河系中矮星系的數量和中心平均密度都較觀測高。也有其他不同性質的暗物質候選，例如軸子（Axion）、極輕玻色子、強自相互作用暗物質（Self-interacting dark matter）等。也有天文學家嘗試修改目前的重力理論（MOND）等…，不依靠暗物質來解釋。關於暗物質的本質天文學家還在持續努力中，有機會不妨來天文館，一探這個黑暗勢力主宰的角落。

陳姝蓉：臺北市立天文科學教育館



YouTube相關影片：



尋找暗物質，以及我們目前的發現
<https://reurl.cc/1Y3yVW>



Dark Matter's Not Enough - with Andrew Pontzen
<https://www.youtube.com/watch?v=GFxPMMkhHuA>



哈伯之音 -- 第70集：窺視宇宙的角落
<https://www.youtube.com/watch?v=98thJ0rwAiY>