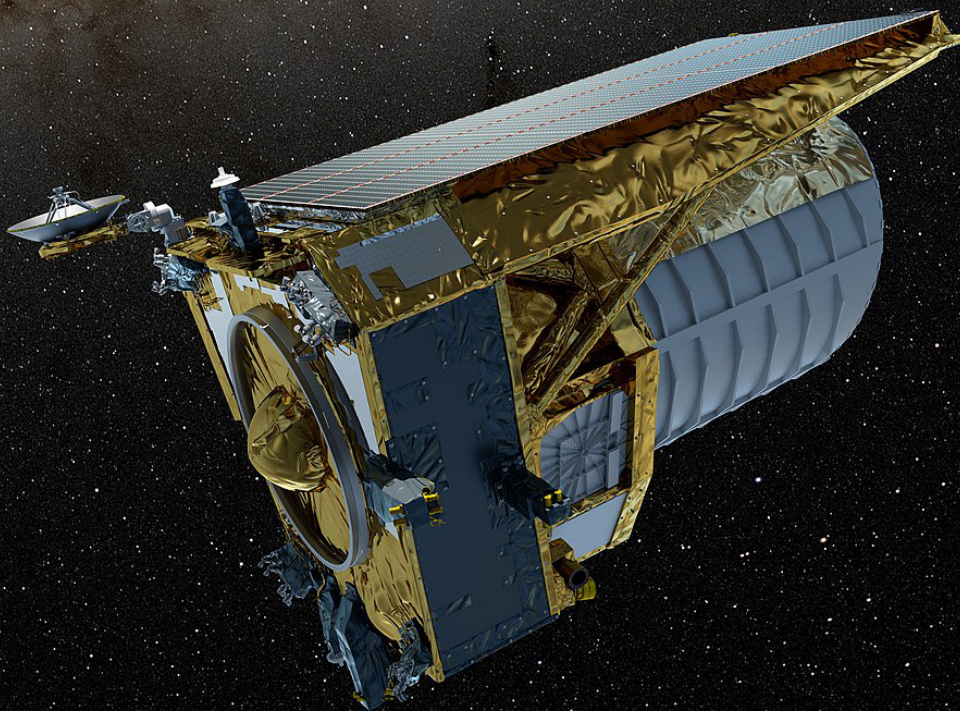


文/ 徐麗婷

歐幾里得太空望遠鏡 (Euclid space telescope) 是由歐洲太空總署所研發的望遠鏡，其主要任務是要揭開宇宙暗物質和暗能量之謎，並且探索宇宙大尺度結構的演化。歐幾里得望遠鏡於今年7月1日，由獵鷹9號火箭搭載升空，成功的到達距離地球150萬公里的拉格朗日點 L2 (見圖1)

# 太空望遠鏡 歐幾里得



## EUCLID'S JOURNEY TO L2

Euclid will orbit the second Lagrange point (L2), 1.5 million kilometres from Earth in the opposite direction from the Sun. L2 is an equilibrium point of the Sun-Earth system that follows the Earth around the Sun. In its orbit at L2, Euclid's sunshield can always block the light from the Sun, Earth and Moon while pointing its telescope towards deep space, ensuring a high level of stability for its instruments.

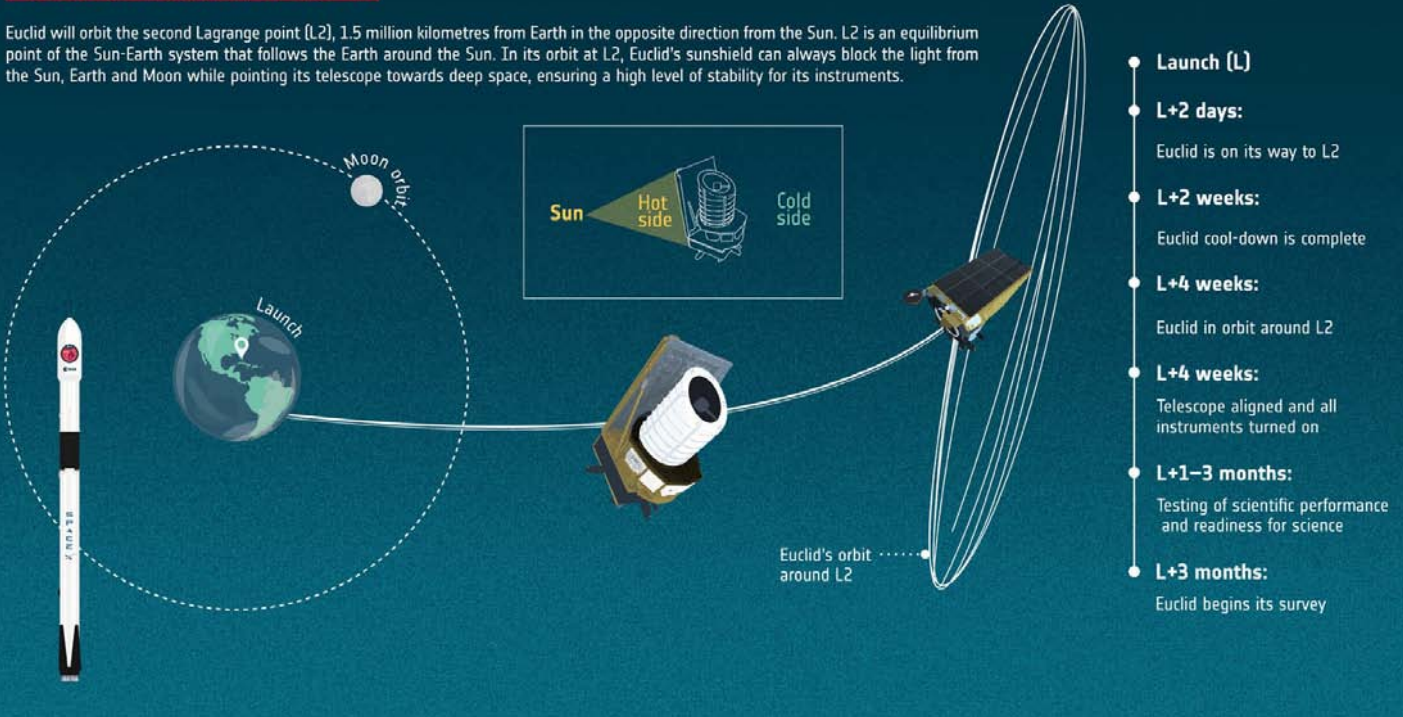


圖1. 歐幾里得太空望遠鏡從地球出發到拉格朗日點L2的旅程。

歐幾里得原本規劃由俄羅斯的聯合號火箭 (Soyuz) 搭載升空，但是2022年2月烏俄戰爭爆發，俄羅斯因為入侵烏克蘭而受到的國際制裁，俄方因不滿制裁而撤回了發射裝置，歐洲太空總署於是轉而尋求SpaceX的獵鷹9號火箭 (Falcon 9) 來執行這個發射任務。

歐幾里得升空後，預計在未來6年內，對銀河以外的夜空作廣域巡天觀測 (wide field survey)，觀測範圍涵蓋大約三分之一的天空，預估可以偵測到數十億個星系。

## 歐幾里得的科學目標

歐幾里得的主要科學目

標是要研究暗物質、暗能量與宇宙大尺度結構的演化。我們的宇宙主要是由三個部分所組成：物質 (matter)、暗物質 (dark matter)、暗能量 (dark energy)。「物質」由基本粒子所構成，包含地球上的生命、所有的行星、恆星、星雲、星際介質和星系等可觀測到的天體。我們曾經以為這些物質就是宇宙的全部，然而，眼見不一定為憑。科學家經由探測宇宙微波背景輻射，推測出這些普通物質所占的比例，竟然不到宇宙的5%。其他超過95%的宇宙都是由暗物質和暗能量所組成。

「暗物質」不帶電，也幾乎不會與其他物質產生交互作用，我們只能通過其重力現象來作間

接觀測。第一個發現暗物質存在的科學家，是瑞士的天文學家茲威基 (Fritz Zwicky)，他在1930年代觀測后髮座星系團時，發現星系團中的星系運動速率異常的高 (高於星系團的脫離速率)。換句話說，這些成員星系以這樣的高速運動，應該會往四面八方奔離后髮座星系團，然而，它們全都好好的待在星系團當中。科學家推測一定有我們看不見的質量存在星系團裡面，這些質量就是我們如今所說的「暗物質」。

目前沒有任何電磁波段的望遠鏡可以直接觀測到暗物質，包括可見光、紅外線、電波或X光都沒辦法偵測到。我們只能藉由暗物質所造成的重力現象，間接的推測它的存在，其中「子彈星

系團」(bullet cluster)就是非常著名的間接證據之一。圖2中的子彈星系團是由兩個高速碰撞的星系團所造成的，圖中的背景圖片是由哈伯太空望遠鏡與麥哲倫地面望遠鏡所合成的可見光影像；粉紅色是X光影像（由錢卓太空望遠鏡所拍攝），是由兩個星系團碰撞後產生的高溫氣體所發出；藍色是由重力透鏡效應所計算出來的物質重力分布（主要物質為暗物質）。氣體因為碰撞產生交互作用而減速（粉紅色），但是暗物質不會與其他普通物質交互作用，所以在碰撞之後，依舊持續高速向前移動（藍色），因此我們可以看見星系團中暗物質與物質分離的現象，這也是目前證明暗物質存在的最佳證據。

宇宙中除了看不見的暗物質之外，還存在「看不見的能量」。科學家們一開始認為，因為宇宙中物質產生的巨大重力，宇宙的膨脹速度應該會愈來愈慢。但是在1998年，天文學家在觀測Ia型超新星（可用來精確測量天體距離）時，發現這些超新星的真正距離，比依據宇宙模型

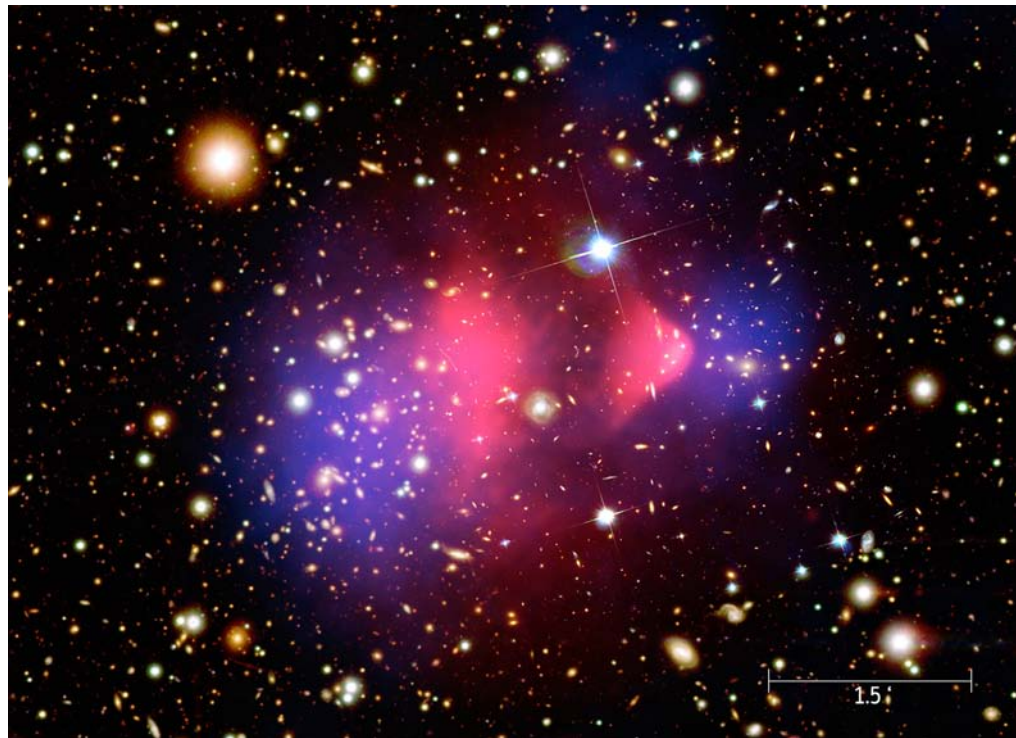


圖2. 子彈星系團。背景是可見光影像，粉紅色是X光影像（主要是熱氣體），藍色是物質的重力分布（主要物質為暗物質）。我們可以在圖中看見碰撞的星系團中暗物質與普通物質分離的現象。

推算出來的還要再遠上15%。經過反覆驗證，才確認宇宙正在加速膨脹中，宇宙中確實存在一個與重力作用方向相反的能量，讓所有的星系都加速地遠離彼此。這個看不到的能量，我們稱之為「暗能量」。根據普朗克衛星(Planck)所測得的最新數據，

宇宙中的暗物質占26.8%，暗能量占68.3%。

暗能量主導了宇宙的加速膨脹，而暗物質的分布則是影響了宇宙大尺度結構的形成演化。宇宙誕生初期，環境極其炎熱且密度極高，物質看似均勻分布，

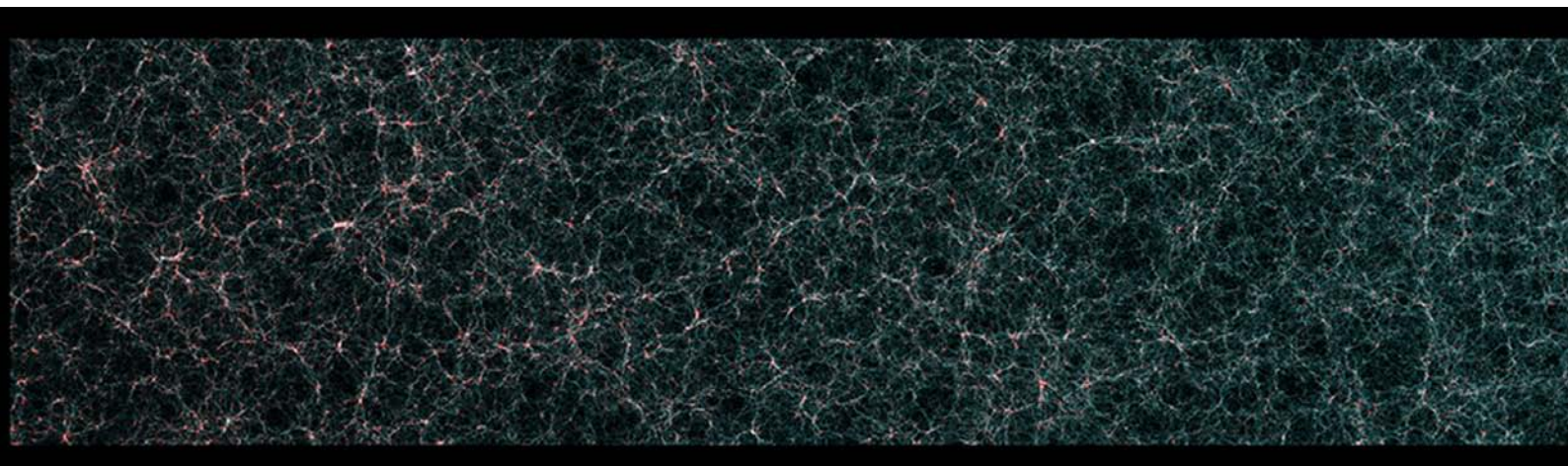


圖3. 網狀的宇宙大尺度結構。

但其實密度分布有著極微小的差異。隨著宇宙膨脹，這些微小的密度差異逐漸被放大，在密度較高的地方形成星系團，在密度較低的地方形成空洞。逐漸地，微小密度差異造成的物質分布，形成了網狀的宇宙大尺度結構（Large Scale Structure）如圖3。

歐幾里得望遠鏡預計在未來6年內，對銀河以外的夜空作巡天觀測，觀測範圍涵蓋大約三分之一的天空（面積約15,000平方度），預估可以偵測到距離地球100億光年內超過15億個星系。科學家希望可以藉由歐幾里得的大

量光譜數據，來測量更精確的星系距離，進而重建宇宙真實的3D地圖。由宇宙星系的3D分布，科學家得以更精確地分析暗物質、暗能量的分布，並且更了解宇宙大尺度結構的演化過程。

## 歐幾里得的儀器與觀測天區

歐幾里得上設置了一個直徑1.2公尺的望遠鏡，以及2個科學儀器：包括一個可見光相機（Visible instrument, VIS）和一個近紅外線相機及光譜儀

（Near Infrared Spectrometer and Photometer, NISP）。VIS的觀測視野為0.57平方度，大約是3個月亮的大小，角解析度為0.1角秒，觀測的波段為 $I_E$ ：530-920 nm，廣域觀測中可偵測到最暗的亮度為 $I_E=26.2$ （圖4中的紫色波段）。NISP的角解析度約為0.3角秒，有3個觀測波段： $Y_E$ ：949.6-1212.3nm、 $J_E$ ：1167.6-1567.0nm、 $H_E$ ：1521.5-2021.4nm，廣域觀測中可偵測到最暗的亮度分別為 $Y_E=24.3$ 、 $J_E=24.5$ 和 $H_E=24.4$ （在圖4中，依序為藍色、綠色、橘色波段）。

歐幾里得的巡天觀測計畫主

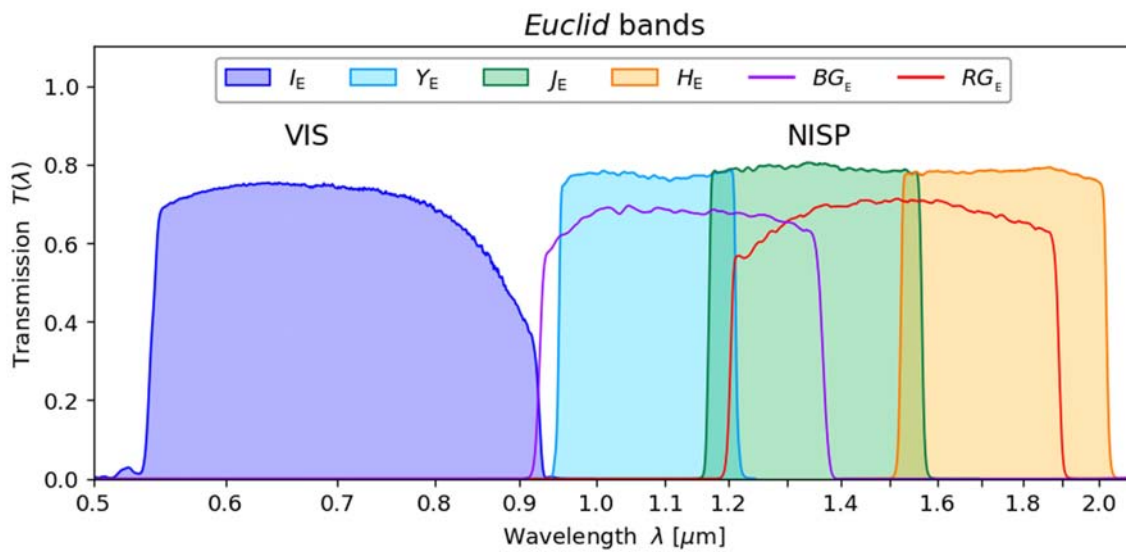
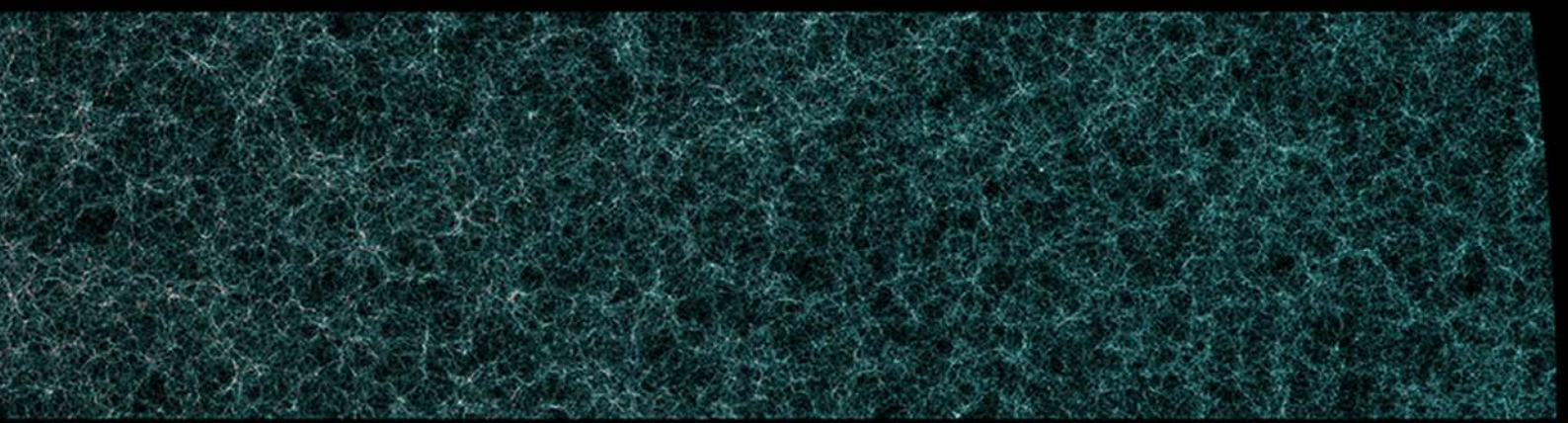


圖4. 歐幾里得望遠鏡觀測的濾鏡波段分布。



要包含3個天區（圖5）：

### 1. 歐幾里得廣域巡天觀測 (Euclid Wide Survey)

廣域觀測的天區位於銀河以外的天空，就是在圖5中以藍色實線圍起來的區域，面積一共有15,000平方度。

### 2. 歐幾里得深空觀測 (Euclid Deep Survey)

深空觀測的天區位在圖5中黃色的區域，面積大約53平方度。

### 3. 歐幾里得輔助觀測 (Euclid Auxiliary Fields)

輔助觀測區位於圖5中紅色菱形的區域，這個區域的觀測數據是用來校準光度紅移的量測，面積大約有6.5平方度。

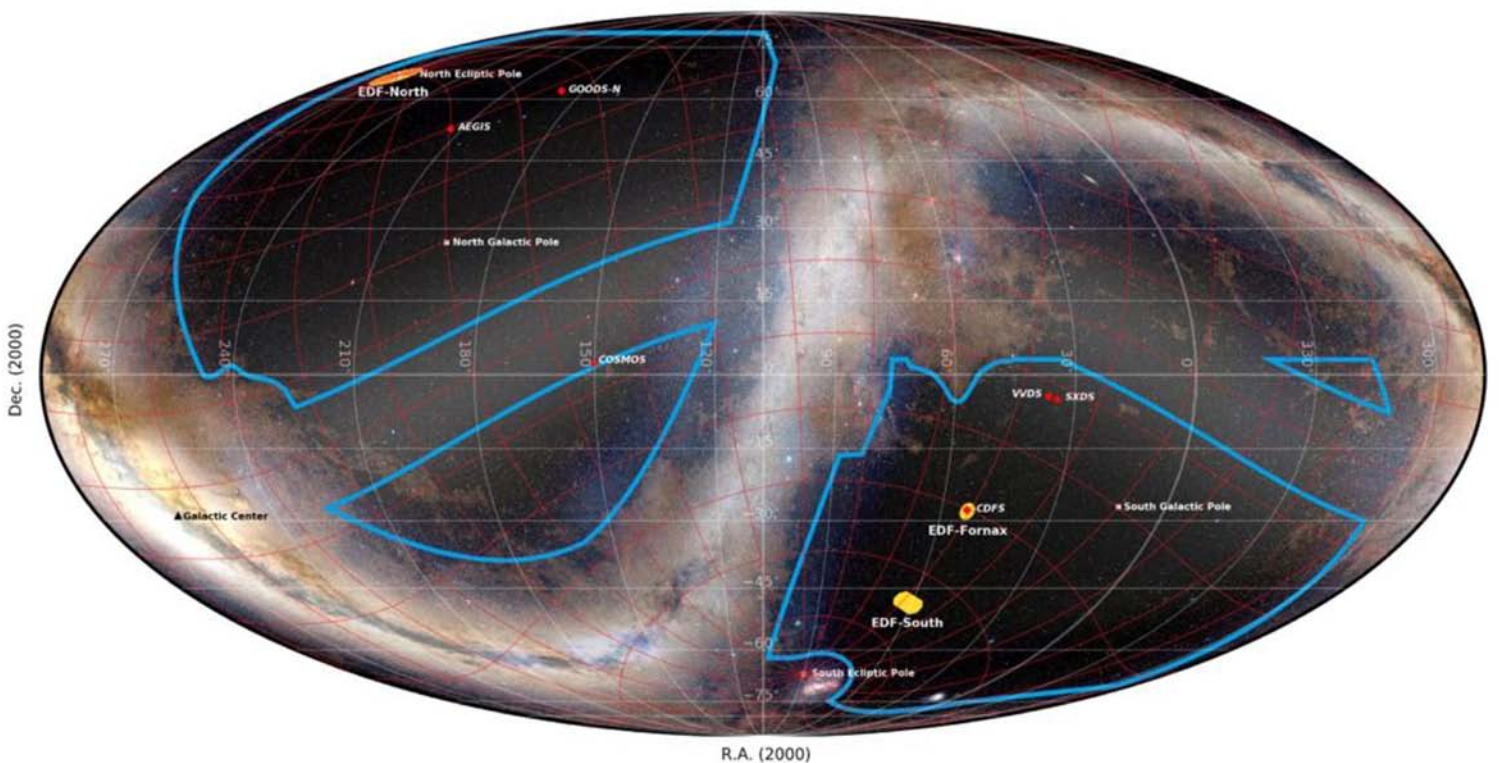
## 科學測量方法

藉由歐幾里得所觀測到的數據，科學家主要會用以下3種測量方式來研究暗物質、暗能量、與宇宙大尺度結構的演化：

### 弱重力透鏡效應 (weak gravitational lensing)

根據廣義相對論，當背景光源發出的光線經過具有強大重力

場的前景光源，光線會像通過透鏡一樣發生彎曲，稱之為重力透鏡效應 (gravitational lensing)。一般來說，根據重力場的強弱，可以分為強重力透鏡效應 (Strong lensing) 和弱重力透鏡效應 (Weak lensing)。在強重力透鏡效應下，背景天體的影像會發生明顯的扭曲；而弱重力透鏡效應造成的影像變形程度就比強重力透鏡效應輕微許多 (如圖6所示)。經由背景影像扭曲程度，可以推測出前景天體的質量。子彈星系團 (圖2) 中的藍色影像，就是由弱重力透鏡效應推測出的星系團重力分布。而這種弱重力透鏡效應是目前科學家用來量測暗物質最重要的方法。



The 15,000 deg.<sup>2</sup> Euclid Wide Survey, the 53 deg.<sup>2</sup> Euclid Deep Survey, and the 6 deep auxiliary fields (6.5 deg.<sup>2</sup>) [Mollweide Celestial]

- Euclid Wide Survey region of interest : 16 Kdeg.<sup>2</sup> compliant with a 15 Kdeg.<sup>2</sup> survey
- Euclid Deep Fields : North=20 deg.<sup>2</sup>, Fornax=10 deg.<sup>2</sup>, South=23 deg.<sup>2</sup>
- Euclid deep auxiliary fields (GOODSN=0.5, AEGIS=1, COSMOS=2, VVDs=0.5, SXDS=2, CDfs=0.5 deg.<sup>2</sup>)



Background image: Euclid Consortium / Planck Collaboration / A. Mellinger

圖5. 歐幾里得巡天觀測計畫的主要3個天區：廣域巡天觀測（藍色實線）、深空觀測（黃色）、輔助觀測（紅色菱形）。

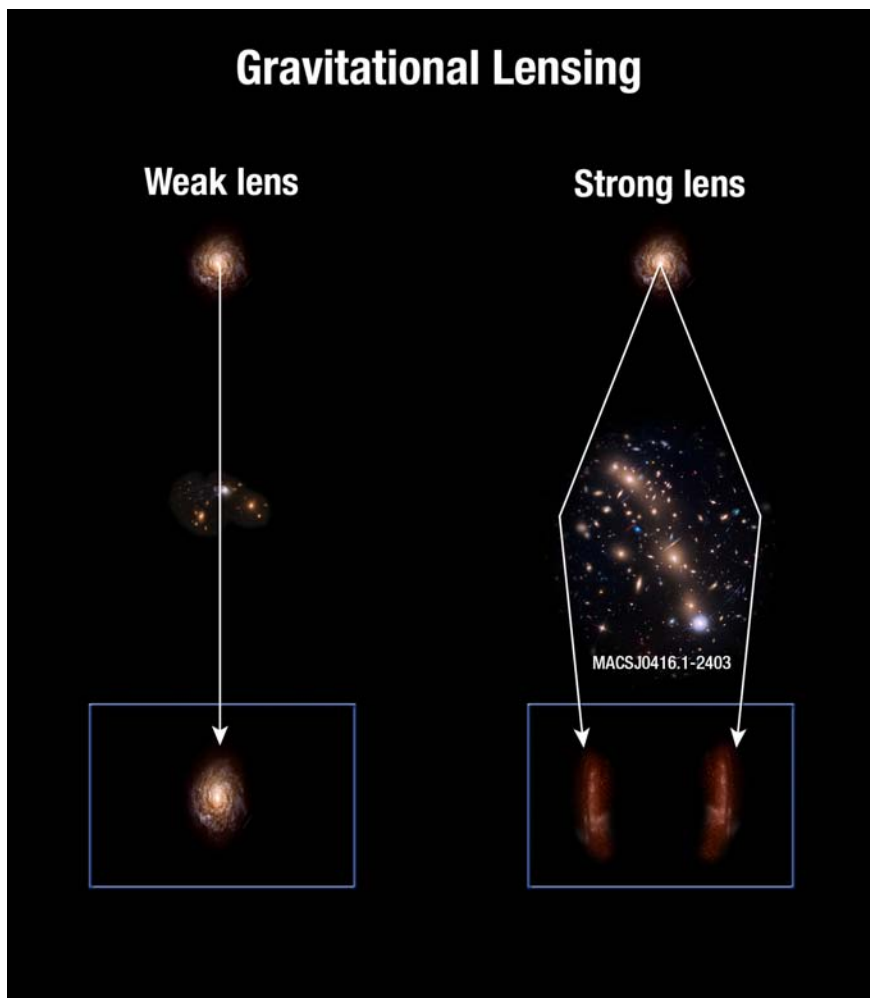


圖6. 強重力透鏡效應和弱重力透鏡效應的比較。弱重力透鏡效應（左）的星系變形程度比強重力透鏡（右）輕微。

## 測量紅移以獲得星系的距離

為了重建宇宙真實的3D分布，測量星系的距離非常重要，藉由測量天體的紅移可以推算出星系的距離。由於宇宙的膨脹，幾乎所有的星系都在遠離我們，而星系的光譜也會因為遠離產生的都卜勒效應，其光譜特徵都會往較長波長的方向位移（若發生在可見光就是往紅光的方向移動，所以稱為「紅移」）。紅移的量測為科學家提供了一個絕佳計算星系距離的方法。歐幾里得將對3,500萬個天體進行光譜觀測，再藉由測量光譜紅移（spectroscopic redshift）來獲得星系的距離，這樣就可以建構出更加精確的宇宙3D地圖。

## 第一張測試影像

歐幾里得的兩臺儀器於今年7月31日公布了它們的第一張測試影像。雖然還要再經過幾個月的校正，歐幾里得才能正式開始觀測，但是從VIS和NISIP的測試影像（圖7和圖8）中顯示，望遠鏡和儀器的運作非常良好。而影像中傳遞出豐富的科學訊息，也讓科學家對未來的觀測更加充滿信心。

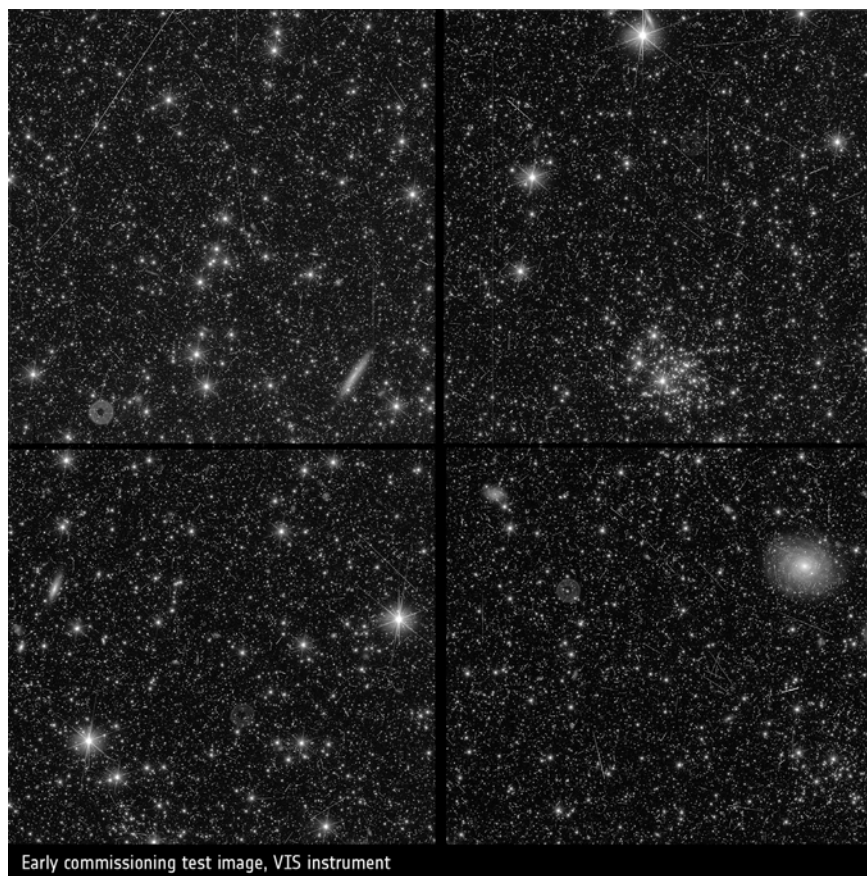
## 重子聲學振盪

（baryon acoustic oscillations, BAO）

宇宙誕生之初，由於處於極度高溫與高密度的環境，所有重子物質都是解離的電漿態（Plasma）。重子聲學振盪就是由這些重子物質的密度波動所引起的聲波振盪。當宇宙逐漸膨脹，溫度冷卻到可以形成中性原子，重子電漿中的密度波就會停止傳播，這樣的物質密度分布就被「凍結」在空間當中，成為現今所觀測到的宇宙大尺度結構。科學家藉由測試BAO可以更加的了解暗能量的本質，以及暗能量如何導致宇宙加速膨脹（請參考影片3）。

參考資訊：

1. [Euclid for Scientists: overview](#)
2. [The Euclid Surveys](#)
3. [Euclid Core science: cosmology](#)
4. [Euclid test images tease of riches to come](#)



徐麗婷：政大應用物理所兼任助理教授

←圖7. 可見光儀器VIS的第一張測試影像。

✓圖8. 紅外線儀器NISP的第一張測試影像。

YouTube相關影片：



What is Euclid? 歐幾里得是什麼？

[https://youtu.be/](https://youtu.be/Fwalv0fzkNo?si=awpcqHiob-yKGGN9)

[Fwalv0fzkNo?si=awpcqHiob-yKGGN9](https://youtu.be/Fwalv0fzkNo?si=awpcqHiob-yKGGN9)



Euclid First Light Images 歐幾里得的第一張測試影像

<https://youtu.be/7zdIdAVNyUE?si=8Hgvo>

[wnMZ44PwHAt](https://youtu.be/7zdIdAVNyUE?si=8Hgvo)



Baryon Acoustic Oscillations 重子聲學振盪

[https://www.youtube.com/](https://www.youtube.com/watch?v=IjgZuOO45iw)

[watch?v=IjgZuOO45iw](https://www.youtube.com/watch?v=IjgZuOO45iw)