

2022 NTHU AstroRead

---

# Observation I

Lin Yen-Hsing (NTHU) | 2022.10.04

Basic workflow of astrophysics

# 天文物理的基本結構



Theorist

Observer

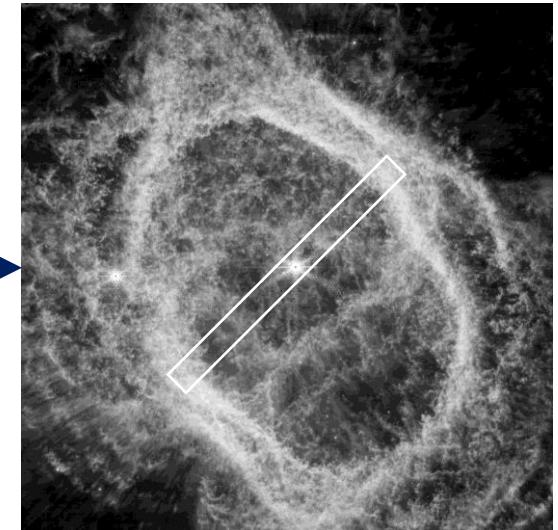
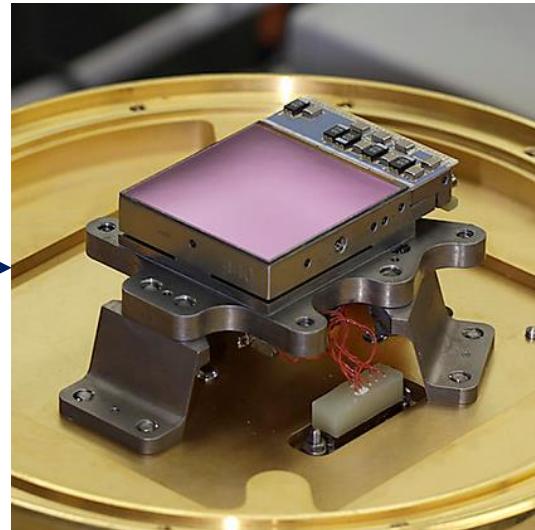
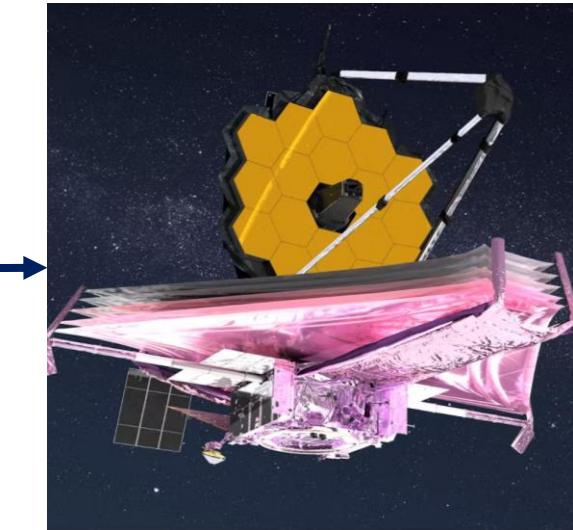
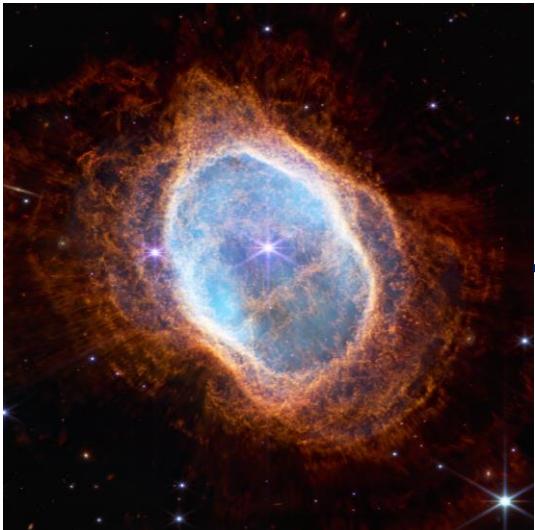
理論學家為觀測學家提供預測、動機、目標與理解觀測結果的模型

觀測學家則為理論學家提供對模型的檢驗、否證與拓展已知現象的版圖

What is observation ?

# 什麼是天文觀測？

紀錄、分析與理解天體資訊的過程



天體

NASA, ESA, CSA, STScI

望遠鏡

NASA GSFC/CIL/  
Adriana Manrique Gutierrez

感測器

University of Arizona/NASA

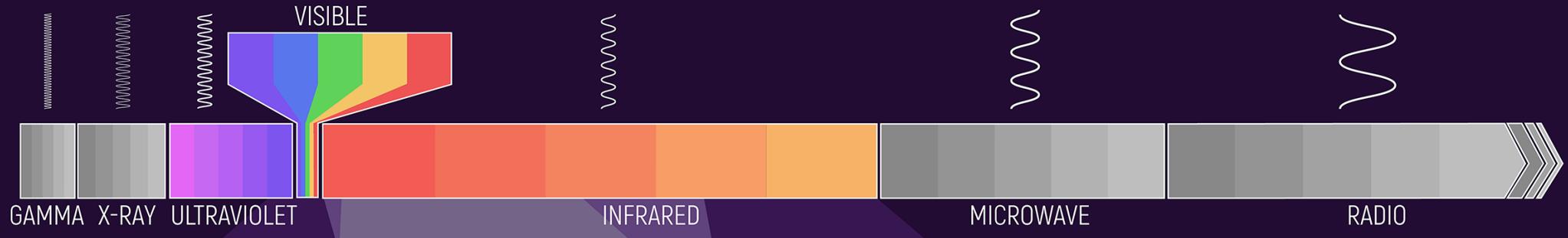
分析

JWST ERO  
Pontoppidan, Klaus M.

Messengers in astronomy

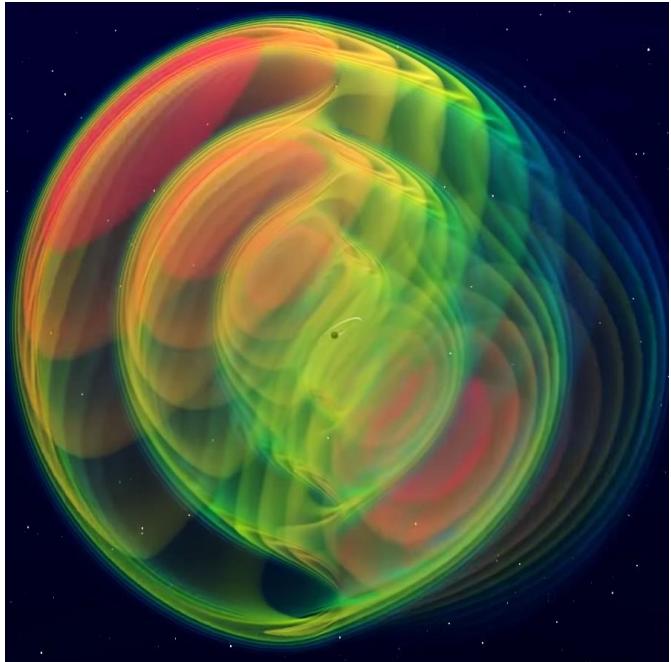
# 天文中的資訊信使

## ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

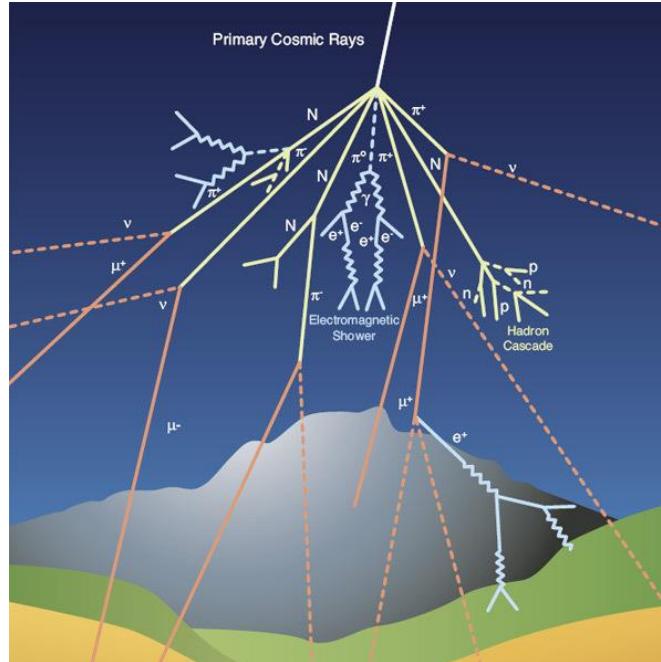


Messengers in astronomy

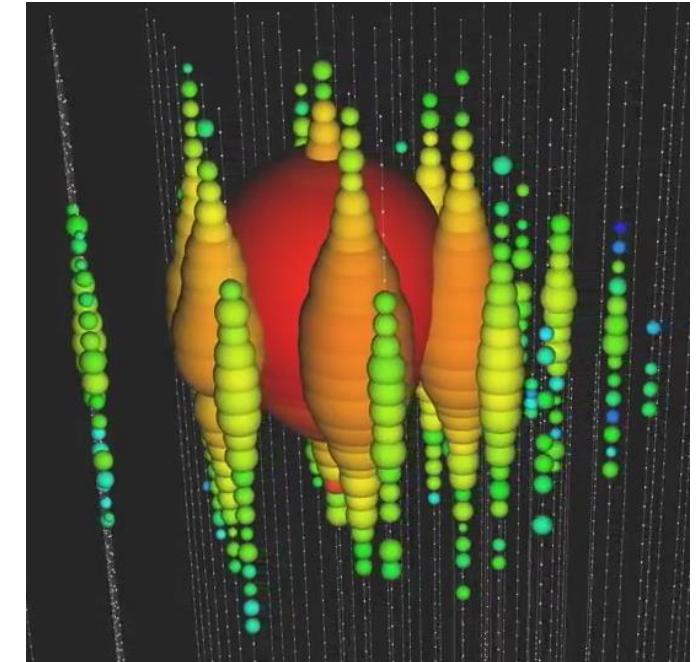
# 天文中的資訊信使



Gravitational wave  
重力波



Cosmic-rays  
宇宙射線



Neutrinos  
微中子

Messengers in astronomy

# 天文中的資訊信使

多波段觀測

Multi-wavelength Observation

EM Wave  
電磁波

$\gamma$ -ray  
X-ray  
UV  
Vis

IR  
Submm  
Radio

GW  
重力波

CR  
宇宙射線

Neutrino  
微中子

多信使觀測 Multi-messenger Observation

Outline

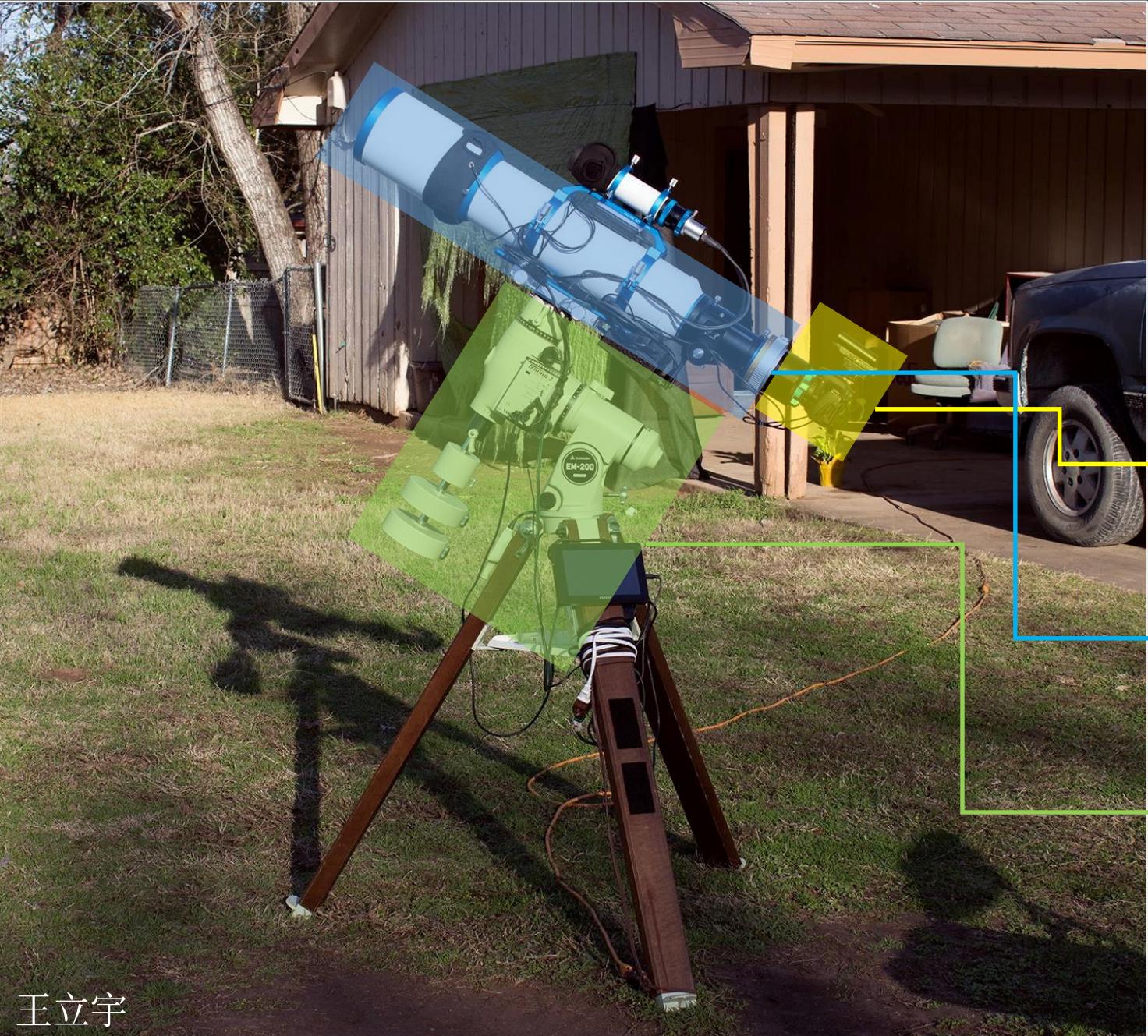
# 大綱

以可見光光學攝影為主軸，介紹以下觀念。

(電波與高能的觀測方法迥異，通常有獨立的課程；光譜下堂再說)

- 觀測所需的三大系統：追蹤、光學與儀器
- 光學觀測的簡化模型：串起各部件的重要參數
- 常見分析方法：如何從影像中找出物理

# 天文觀測設備



**儀器系統 (Instrument)**  
接收與紀錄光子

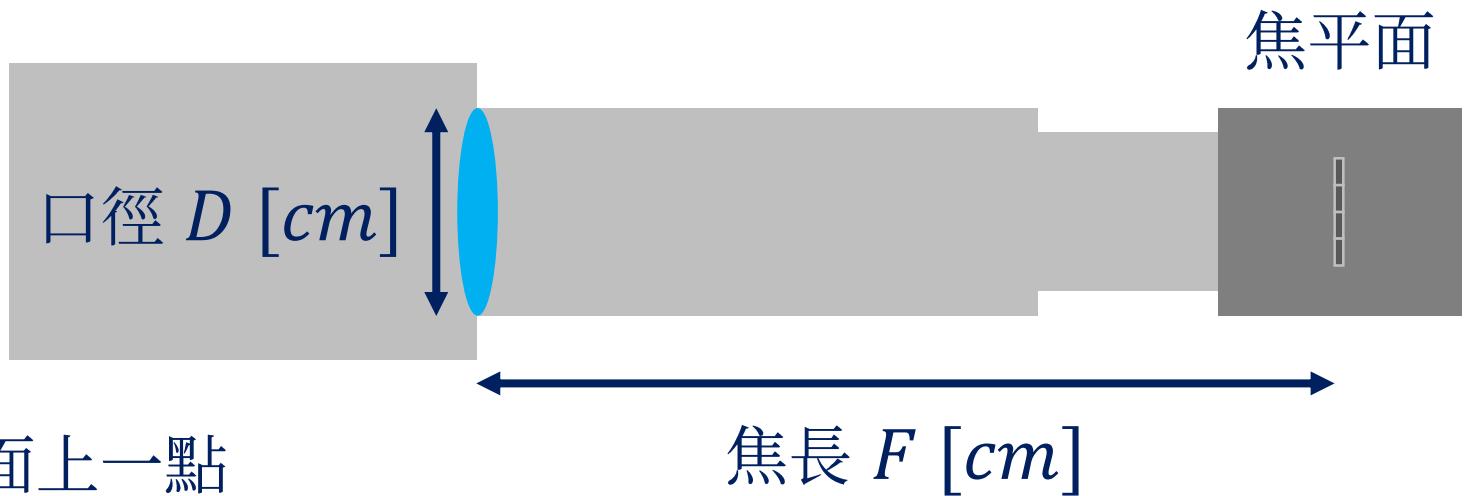
**光學系統 (Telescope)**  
蒐集並聚焦光子

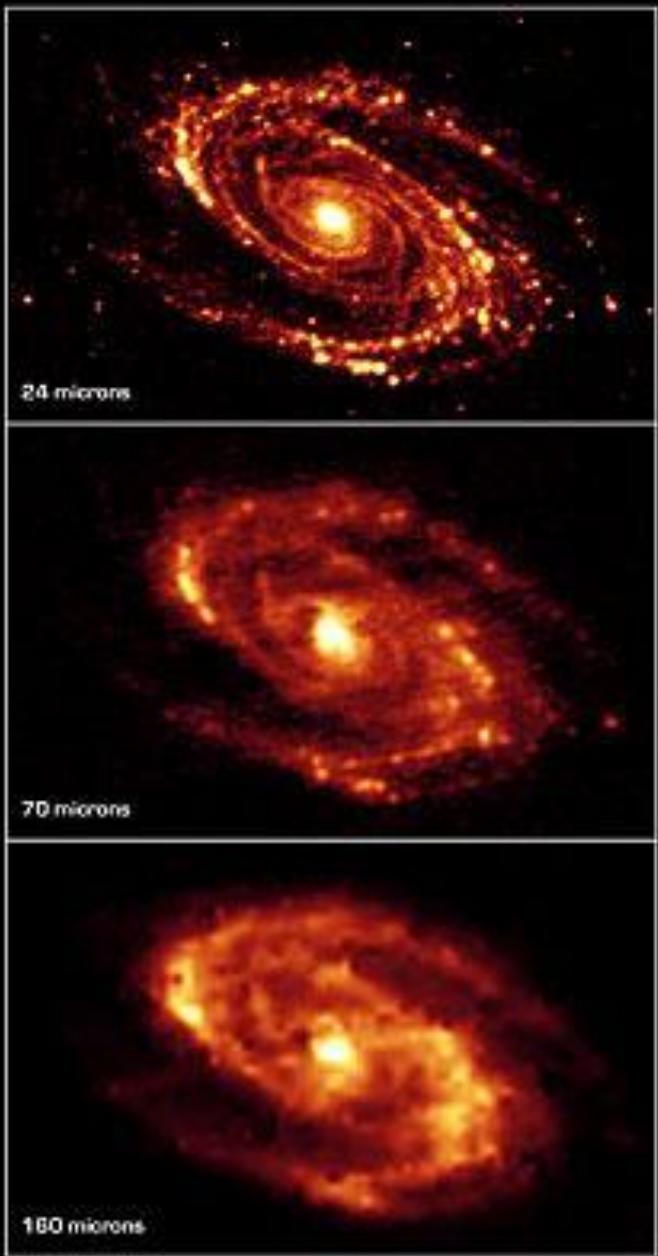
**追蹤系統 (Tracking)**  
確保追蹤穩定

Telescopes

# 望遠鏡：序

- 存在意義：  
把平行入射的光聚焦到焦平面上一點
- 口徑 Aperture Diameter (D)
  - 理論角解析度 Angular Resolution :  $\alpha = 1.22\lambda/D$
  - 集光力 Light-gathering power :  $P = (D/D_p)^2$
- 焦長 Focal Length (F) : 主鏡到焦平面的距離。
- 焦比 Focal Ratio (f) : 口徑與焦長的比例，決定影像的亮度。 $f = F/D$





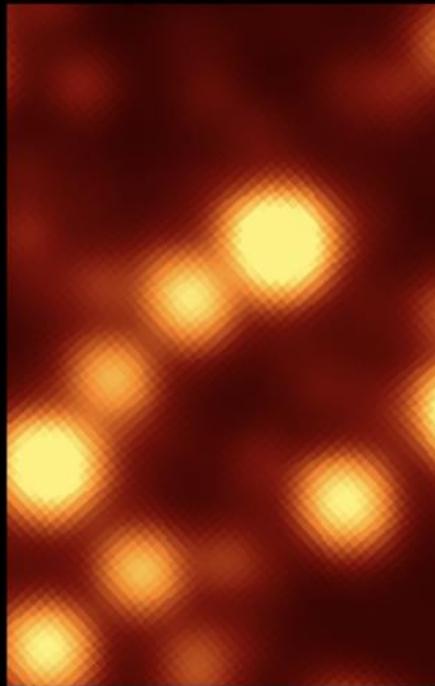
Spiral Galaxy M81

NASA / JPL-Caltech / K. Gordon (University of Arizona)

Spitzer Space Telescope • MIPS

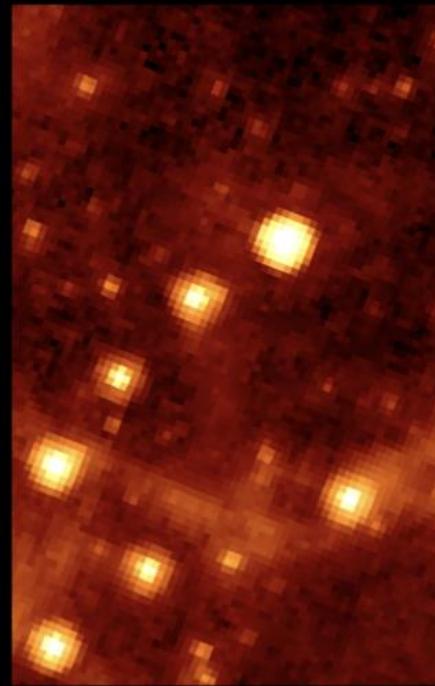
sac2003-06a

## The Evolution of Infrared Space Telescopes



WISE W2 4.6  $\mu\text{m}$

D = 0.4 m



Spitzer/IRAC 8.6  $\mu\text{m}$

D = 0.85 m



JWST/MIRI 7.7  $\mu\text{m}$

D = 6.5 m

Diffraction and theoretical angular resolution  
繞射與理論解析度

Telescopes

# 望遠鏡：破

- 根據偏折光線的物理原理，可以分為
  - **折射式** (Refracting telescope)  
使用透鏡折射光線。結構簡單易使用、維護。  
結構問題難以做大。色差、像差都有。
  - **反射式** (Reflecting telescope)  
使用面鏡反射光線，無色差。專業天文望遠鏡主力。
  - **折反射式** (Catadioptric telescope)  
主反射鏡 + 修正透鏡。業餘大口徑望遠鏡常見。



鴻宇光學



鴻宇光學

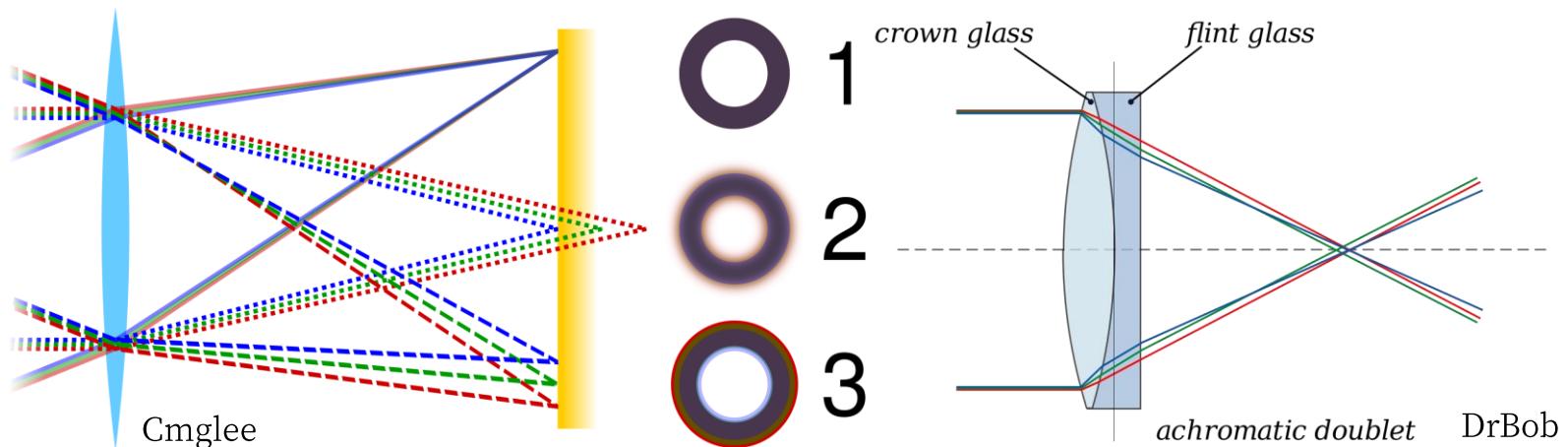


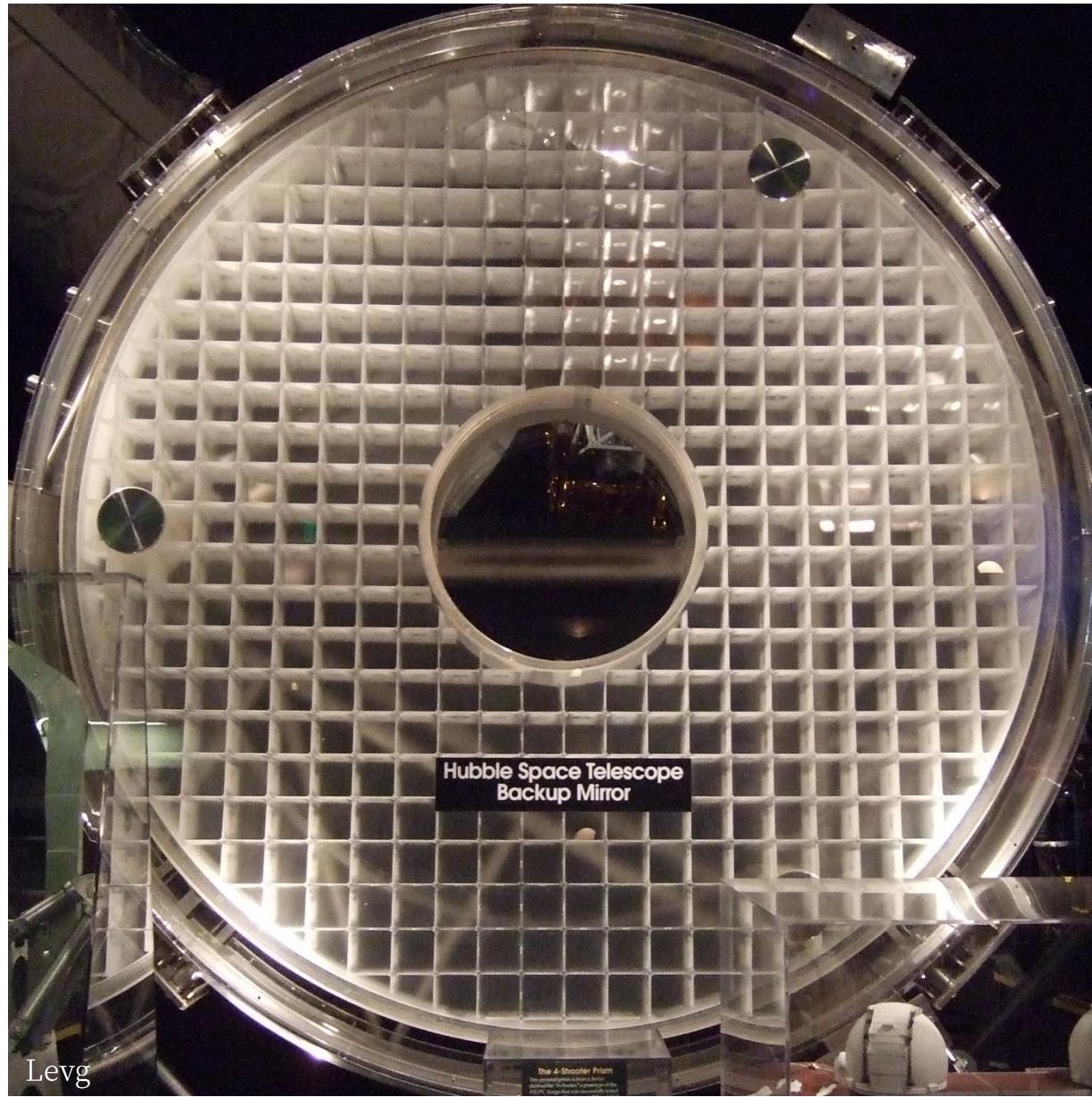
Celestron



S&T Archive

- 世界最大的折射式望遠鏡：  
葉凱士天文台 Yerkes Observatory (102 cm 主鏡)
- 台灣最大的折射式望遠鏡：  
清大天文台 NTHU Observatory (25 cm 主鏡)
- 色差 / 色像差 Chromatic aberration  
鏡片材質對不同頻率的光折射率不同，以多鏡片修正





Levg

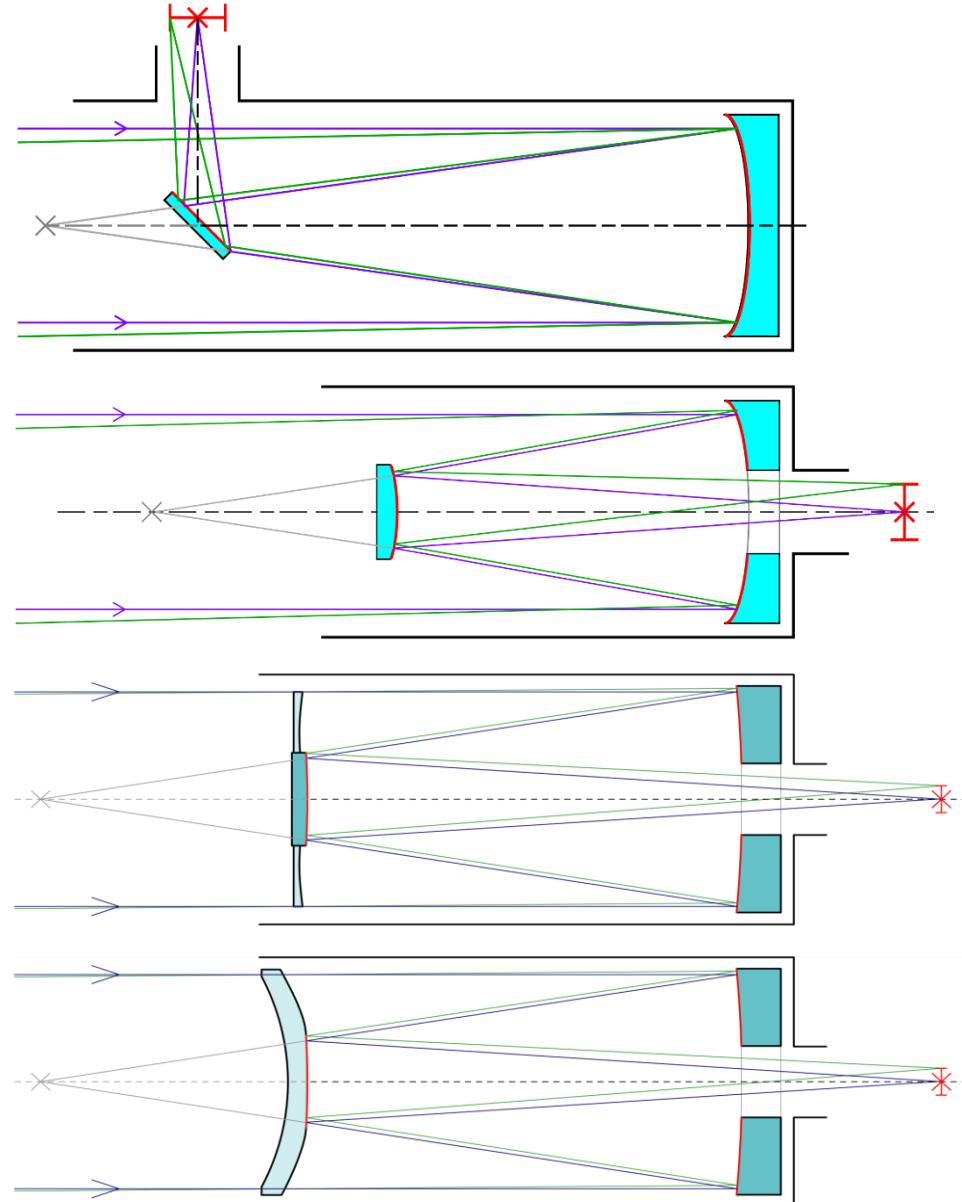


Chris Gunn

Telescopes

# 望遠鏡：Q

- 根據使用的光學路徑：
  - 牛頓 Newtonian  
焦長 ~ 鏡身長，視線與光軸不同軸。
  - 蓋賽格林 Cassegrain  
焦長 ~ 2 倍鏡身，視線與光軸同軸。
- 根據使用的修正鏡
  - 施密特 Schmidt
  - 馬可士托夫 Maksutov

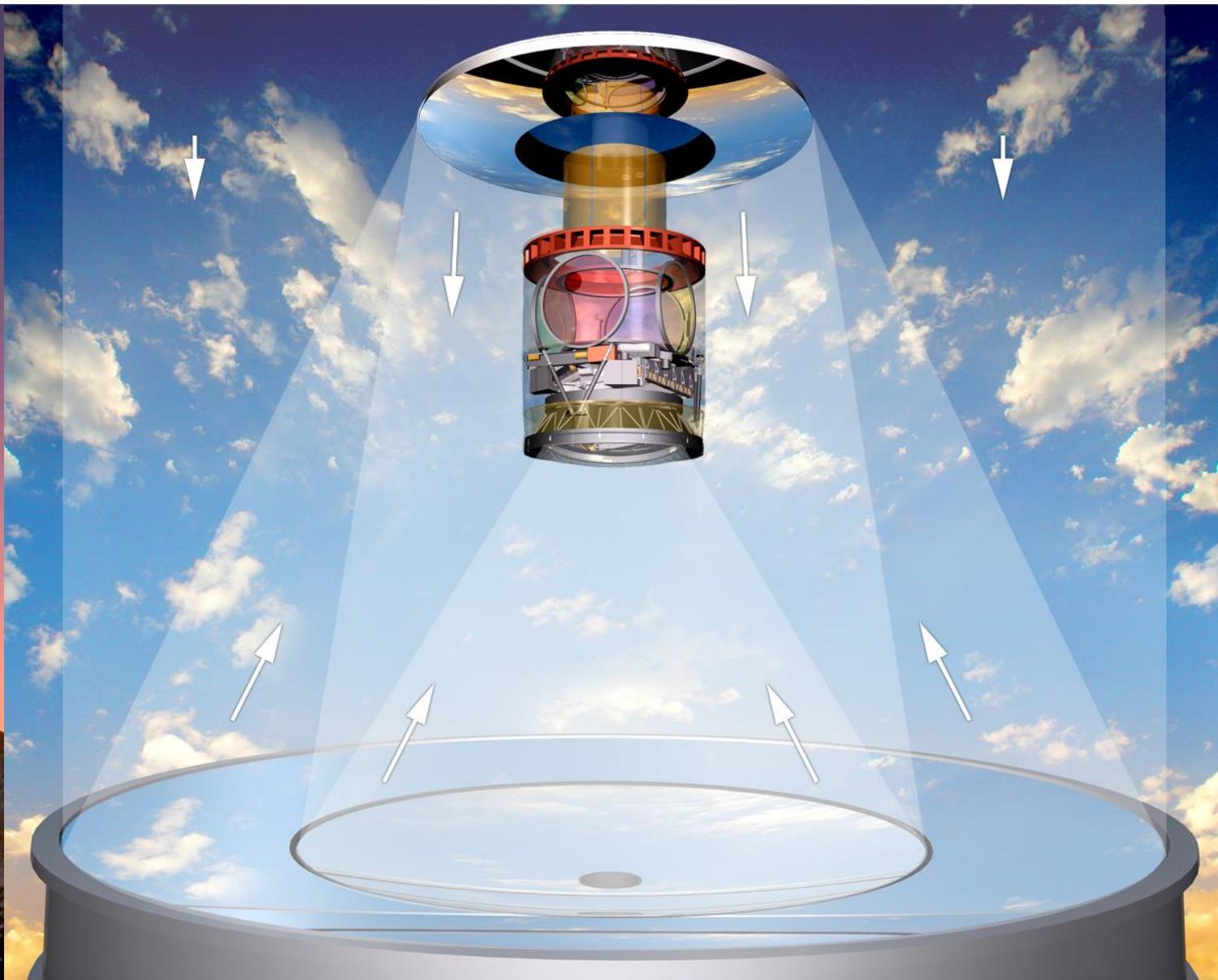


# 望遠鏡：終

- 組合各種光路與修正鏡的設計，就可以得到施密特 - 蓋賽格林、馬可士托夫 - 蓋賽格林等常見的設計。
- 沒有哪一種設計完美無缺  
    望遠鏡的設計總在成像品質與製造工藝之間設法取得平衡
- 其他望遠鏡類型：內氏-卡塞格林、里奇-克萊琴、杜布森、沃爾特  
    命名系統其實頗為混亂且沒有很嚴謹，重點是知道每個詞代表的意義
- 頂尖的望遠鏡當然更複雜

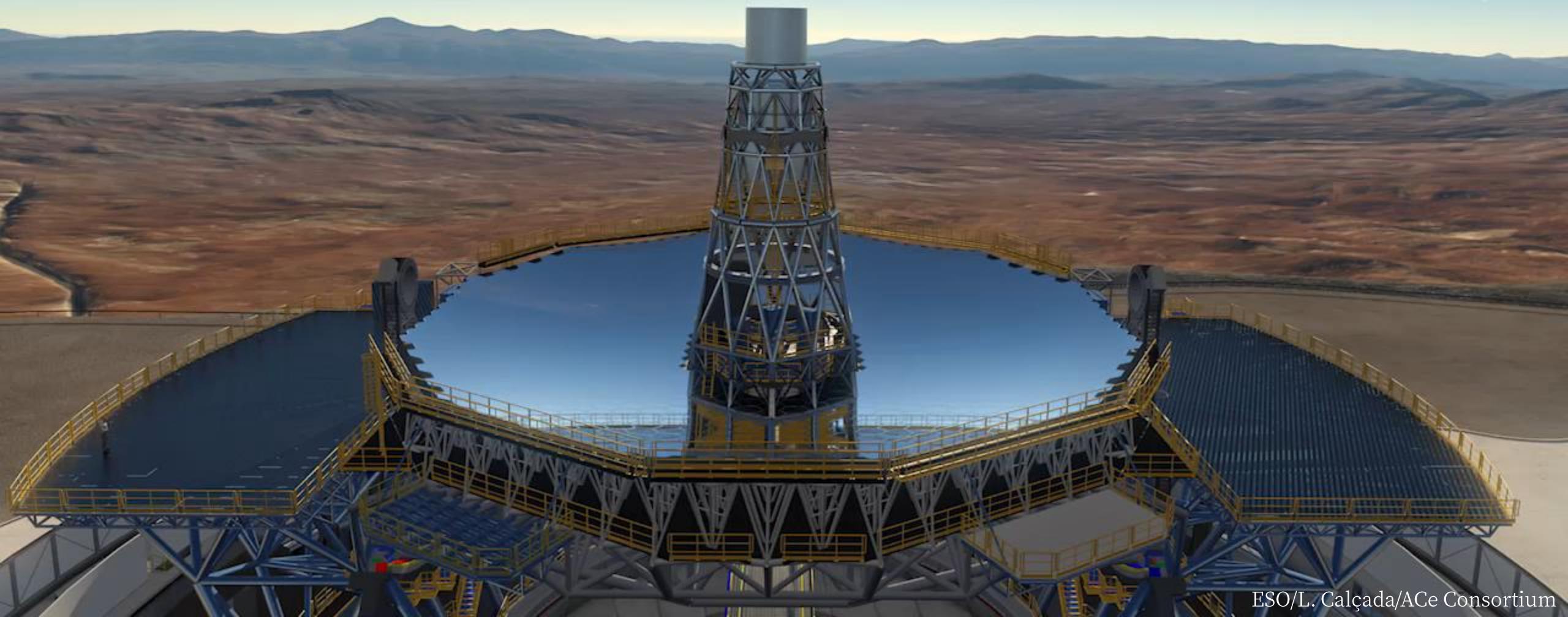
Rubin/LSST

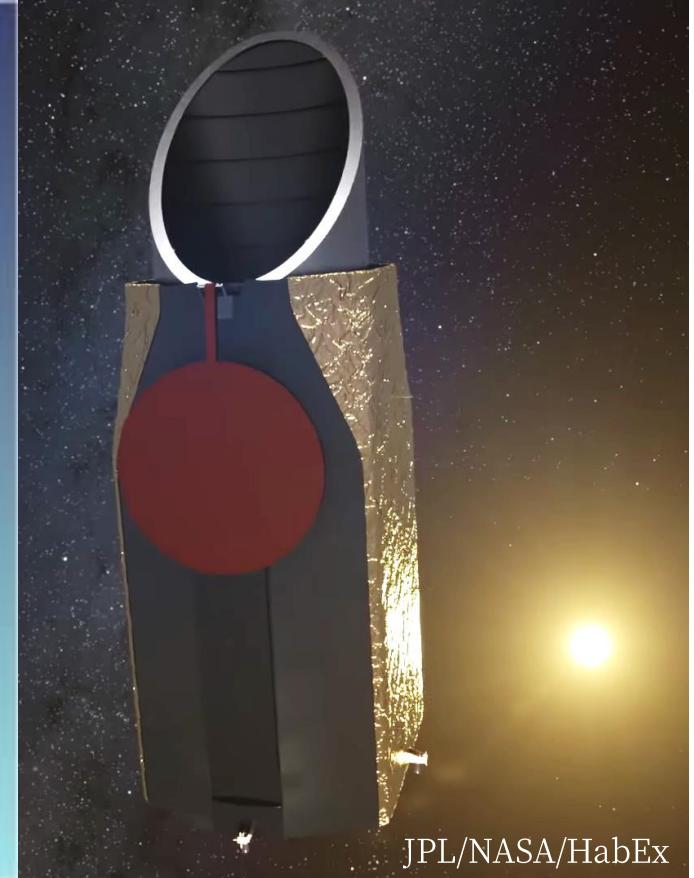
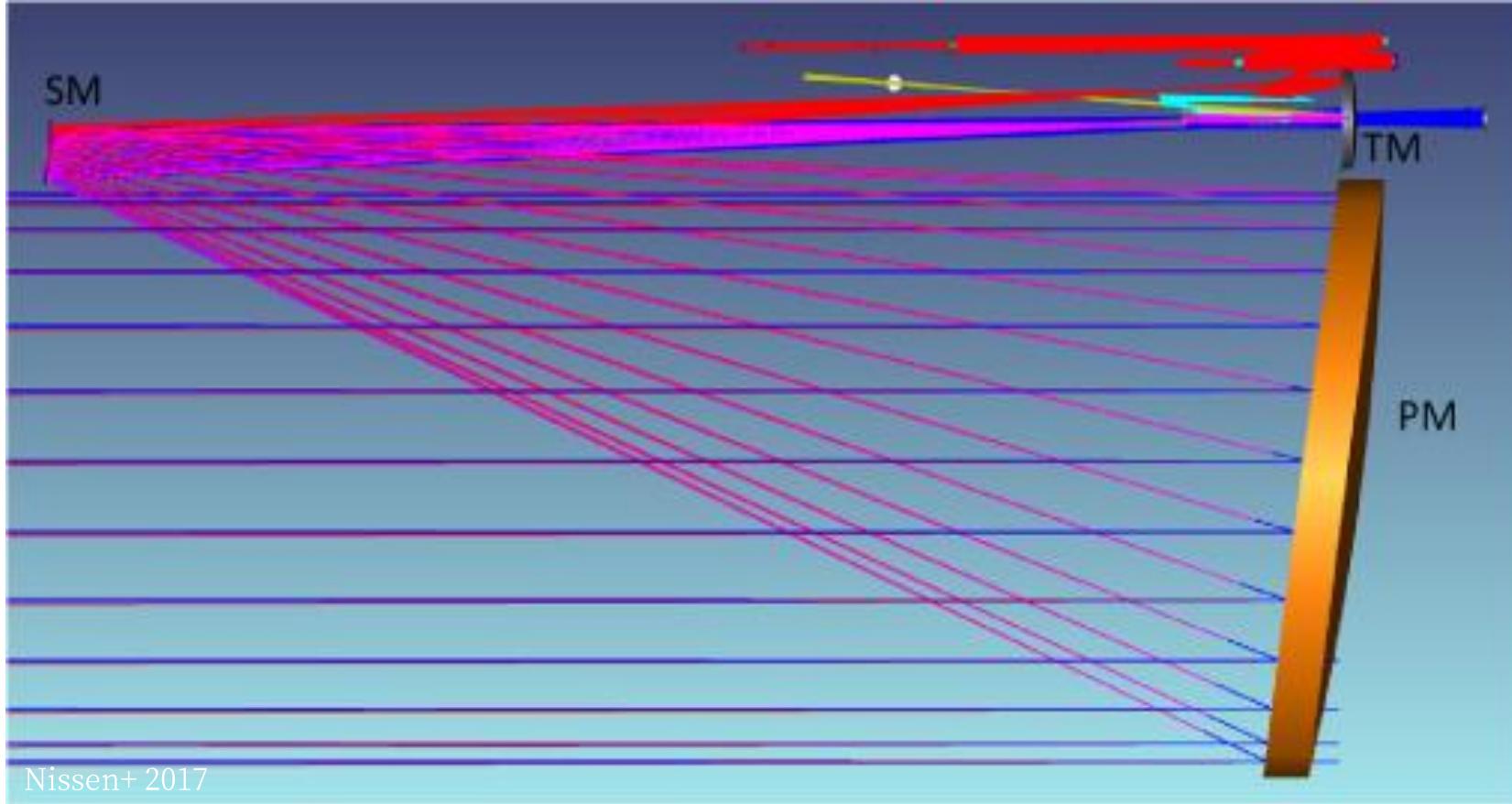
# 魯賓天文台



EELT

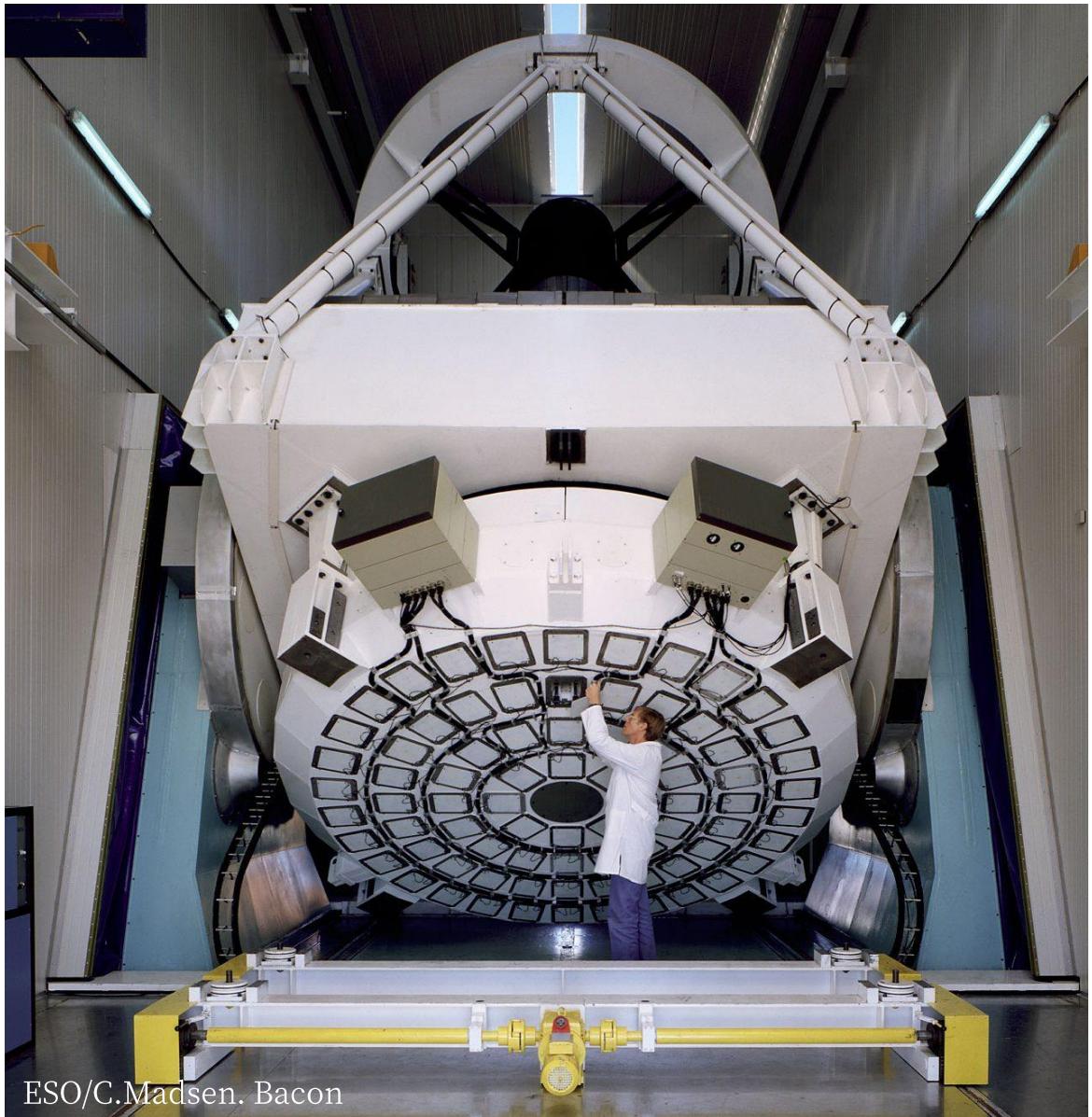
# 歐洲極大望遠鏡





HabEx

離軸光學望遠鏡 Off-axis design

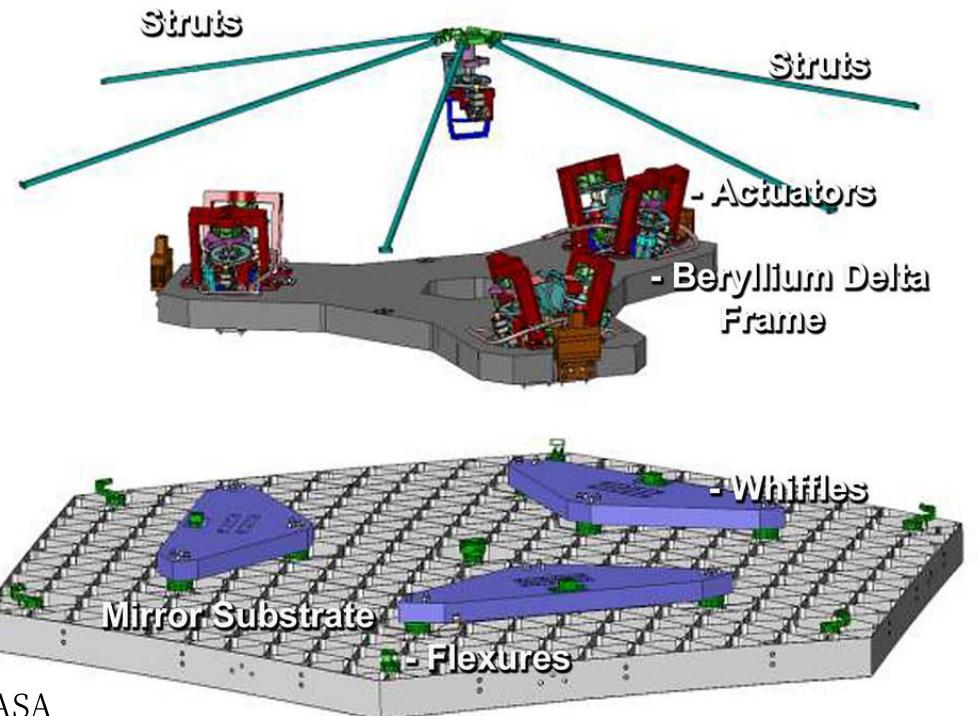


ESO/C.Madsen, Bacon

Active Optics

# 主動光學系統

直接以機械結構控制/微調鏡片形狀



ASU/NASA

A photograph of a large astronomical telescope at night. The telescope's structure is illuminated by yellow lights, and several bright yellow laser beams are visible, pointing upwards through the dark sky filled with stars.

Adaptive Optics (A.O.)

# 自適應 / 調適光學系統

偵測星點在大氣擾動下的變形，

校正大氣擾動造成的波前扭曲。

必要時會以雷射創造人工星點

ASU/NASA

ESO/F. Kamphues

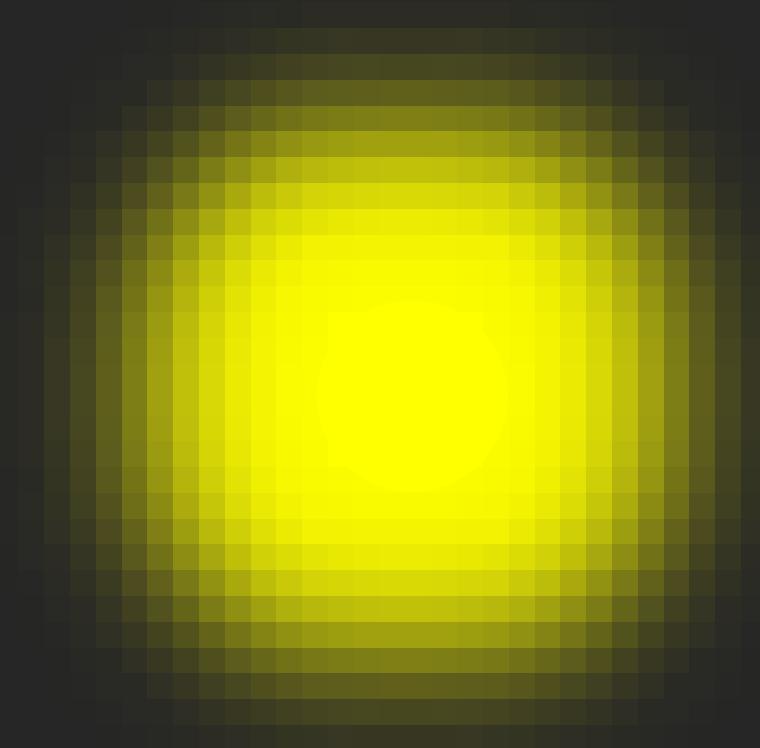
Seeing  
視寧度



Credit: Damian Peach



長期曝光



perturbed wavefront



FW1

FW1

TT

BS

science

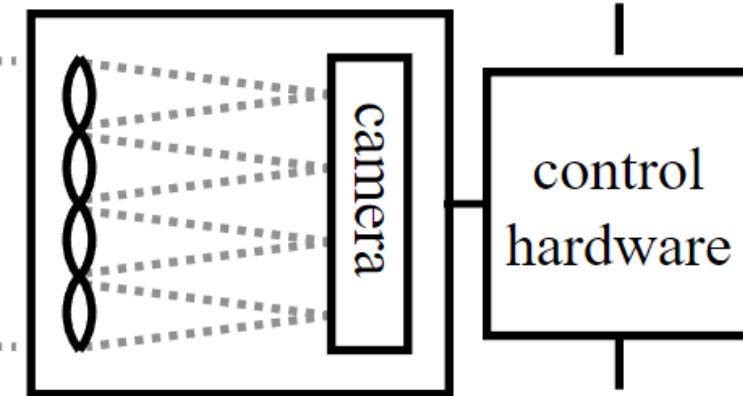
DM

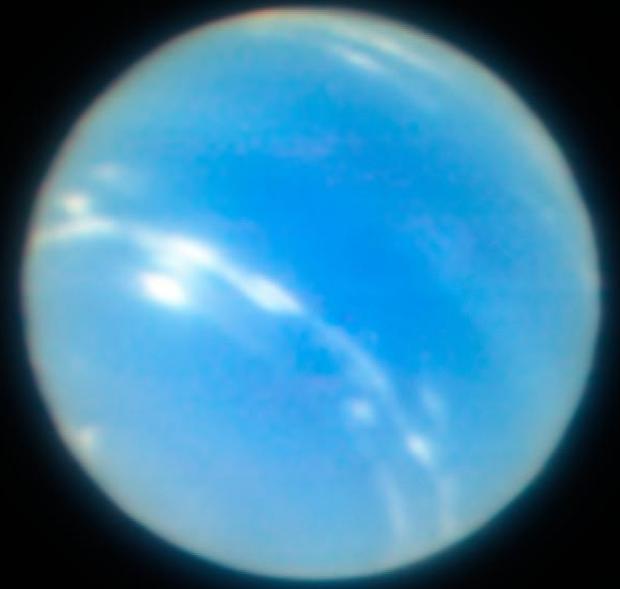
FW2

wavefront sensor

camera

control  
hardware





Adaptive optics

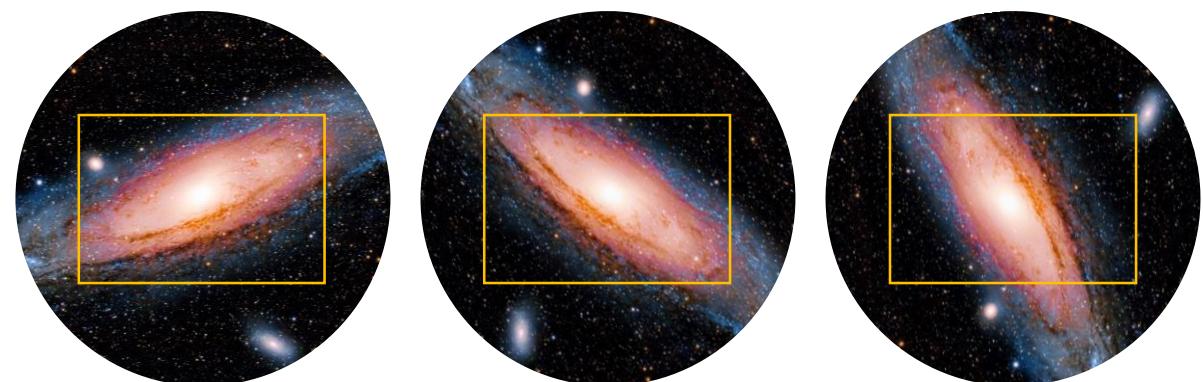


No Adaptive optics

Tracking System

# 追蹤系統

- 存在意義：讓望遠鏡穩定指向目標  
追蹤的三個自由度：
  - 赤經 (R.A.) 、赤緯 (Dec.)
  - 方位 (Azimuth) 仰角 (Altitude)
  - 旋轉角 (Position angle)
- 兩大追蹤系統
  - 經緯儀 Altazimuth mount
  - 赤道儀 Equatorial Mount

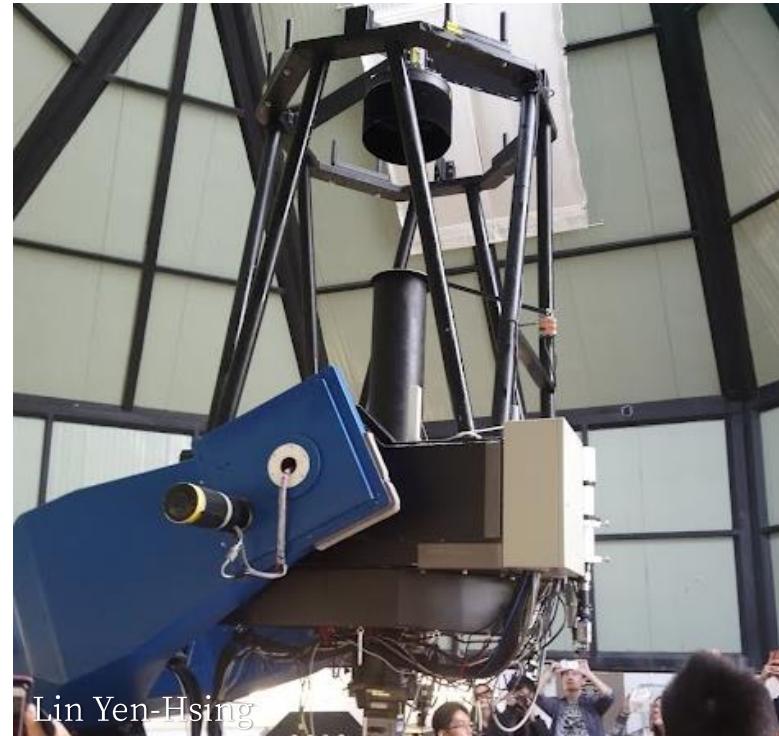


Types of equatorial mounts

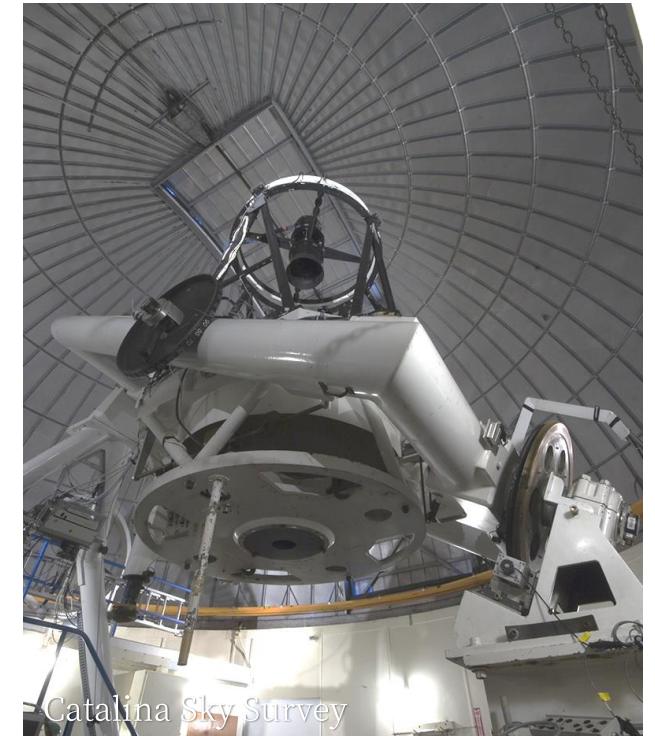
# 赤道儀的種類



德式 German



叉式 Fork



英式 English

Alt-az mount on large telescopes

# 大型天文台的 經緯儀

難以建造提供大型 ( $\sim 5\text{ m} +$ )

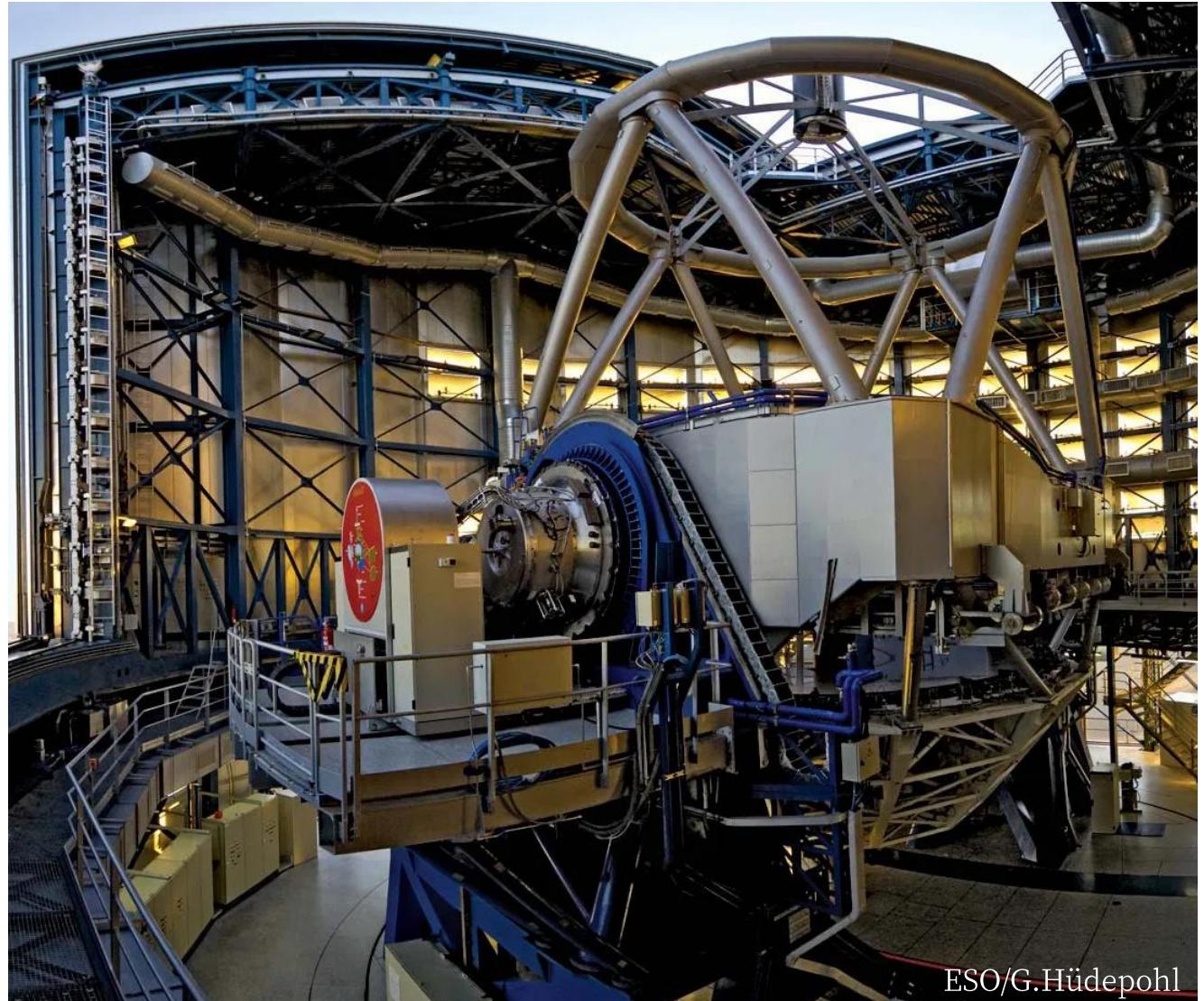
望遠鏡使用的赤道儀系統

因此大型天文台皆使用經緯儀

那像旋怎麼辦？

再一軸：旋轉相機 (de-rotator)

抵銷像旋的影響

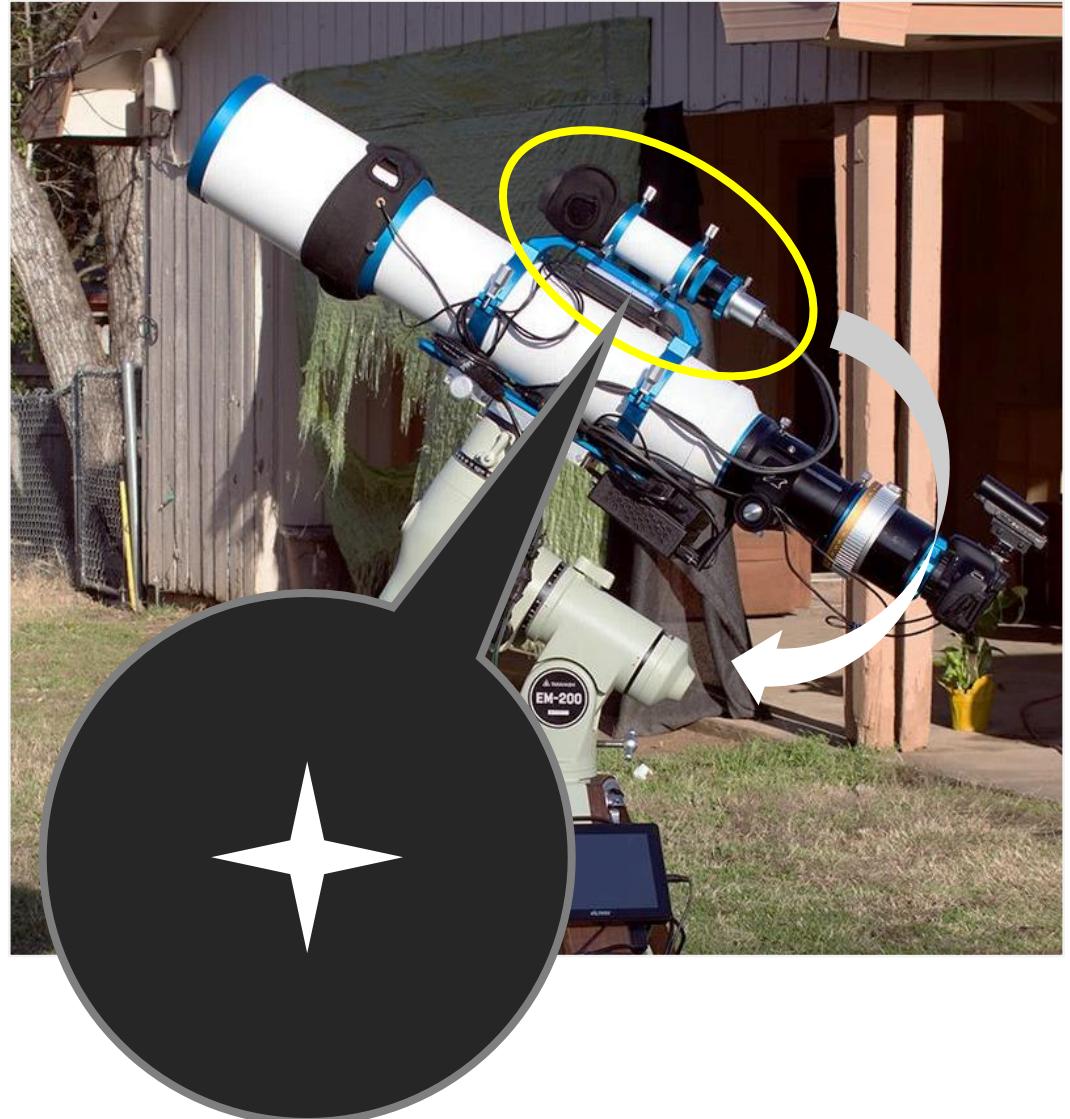


: ESO/G. Hüdepohl

Guiding

# 導星

- 無論是赤道或經緯儀，都很難完美追蹤  
影響因素包括：
  - 齒輪、馬達等機械結構的瑕疵
  - 重力形變、大氣折射等
- 怎麼辦呢？
- 為求長時間精確追蹤曝光，需要即時監測星點的位移並修正，即是導星。

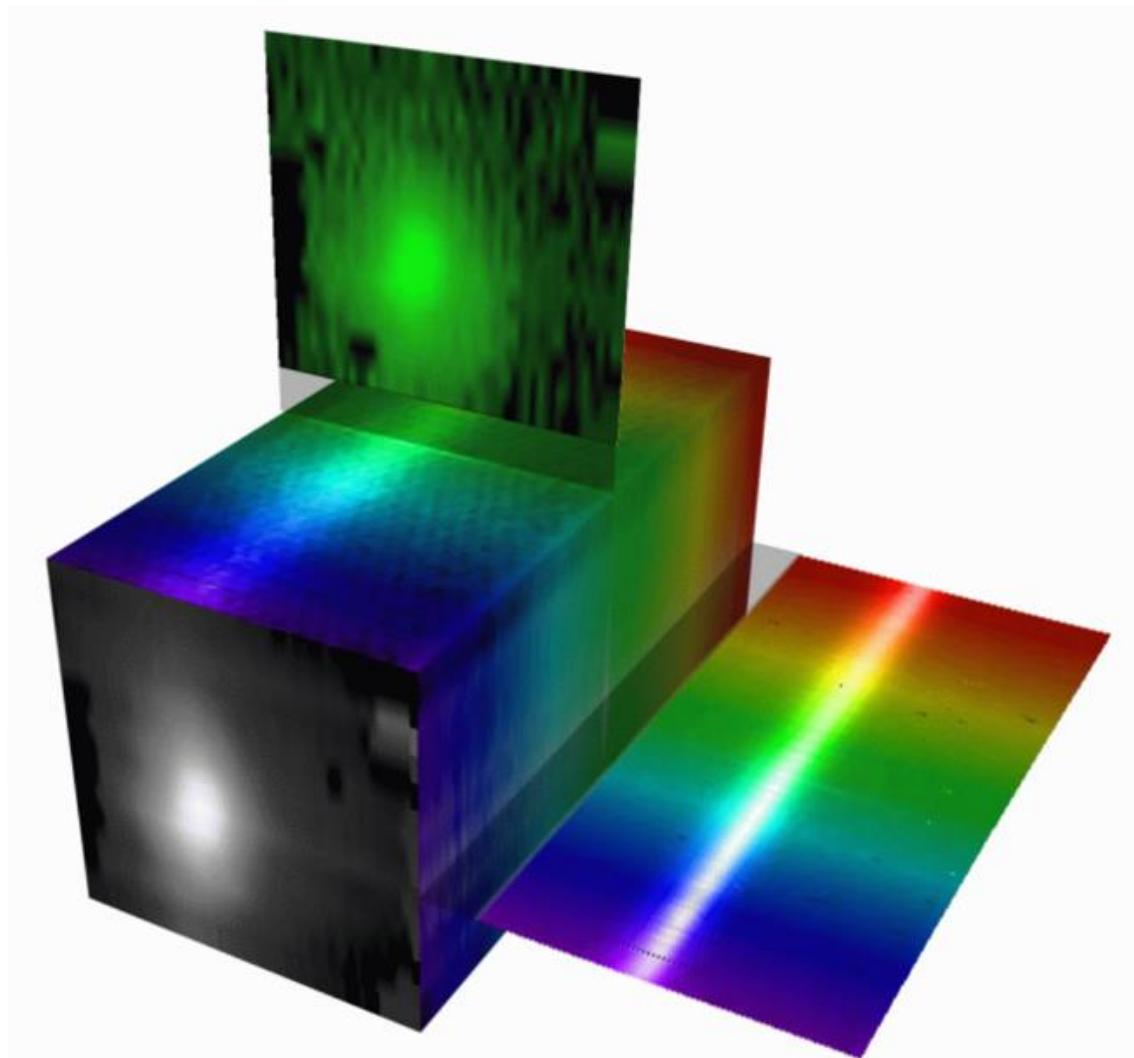


## Instruments

# 儀器系統

- 存在意義：紀錄望遠鏡所收集的光子
- 天文上使用「instrument」時  
特指相機而非整套觀測設備
- 怎麼紀錄？紀錄什麼？
  - 紀錄光子來的方向：相機 Imager/Camera
  - 紀錄光子帶的能量：光譜儀 Spectrometer
  - 結合兩者：集成視場攝譜儀 IFU

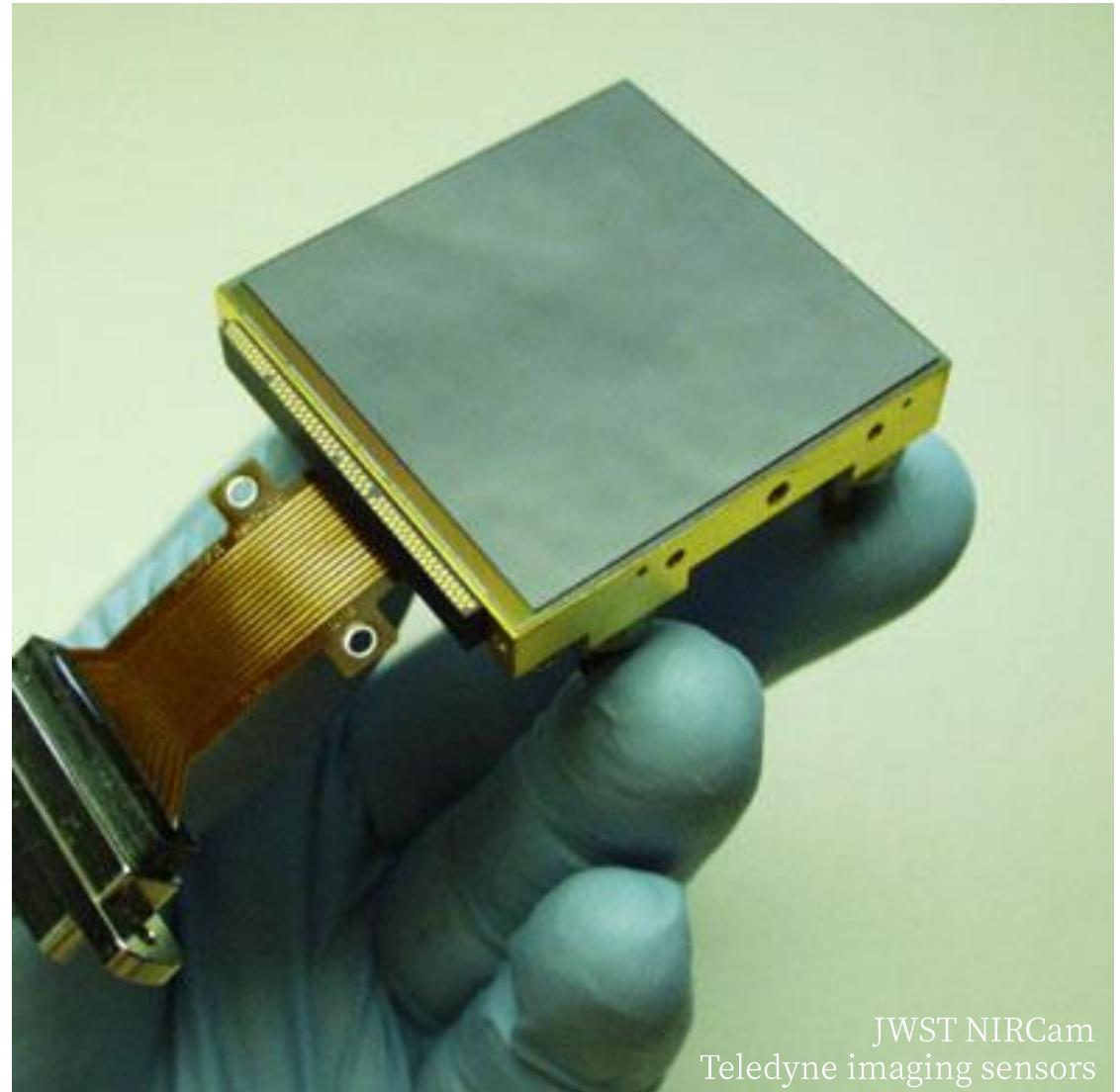
Credit: Stephen Todd (ROE) and Douglas Pierce-Price (JAC)



## Instruments

# 儀器系統・再

- 感光元件的物理原理：光電效應
  - 光子 -> 電子 -> 讀出 -> 數位訊號
- 紀錄由特定方向入射的光子數量
- 重要參數：
  - 片幅（感光元件的大小）： $L$
  - 單像素大小： $\ell$
  - 像素數量： $n = (L/\ell)^2$

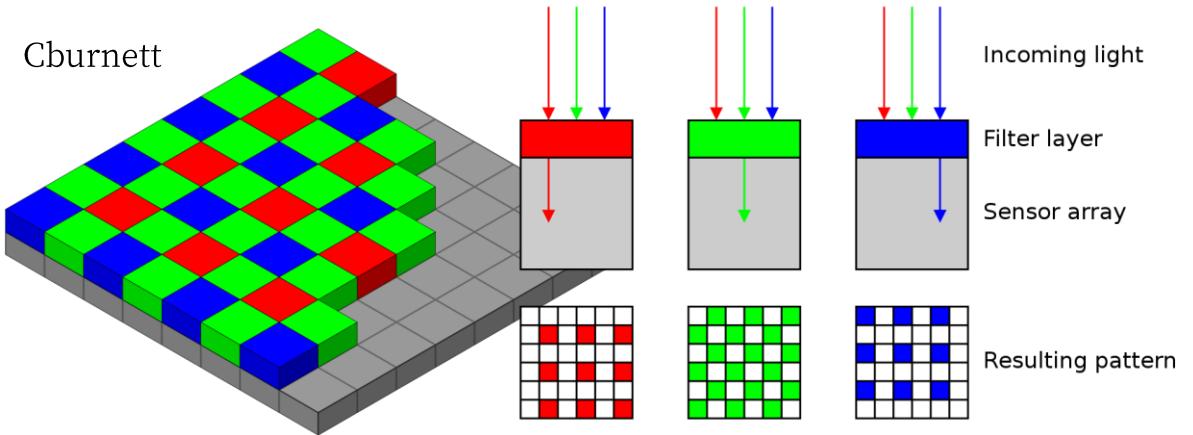


JWST NIRCam  
Teledyne imaging sensors

Instruments

# 儀器系統・改

- 影像的顏色怎麼來的？  
如果一顆光子就是打出一顆電子，  
相機怎麼知道進來的光是什麼顏色？
- DSLR：拜爾濾色鏡 Bayer filter  
微型濾鏡陣列 + 事後內插
- CCD：濾鏡系統 Filter systems  
分別取得單色影像後進行三色合成

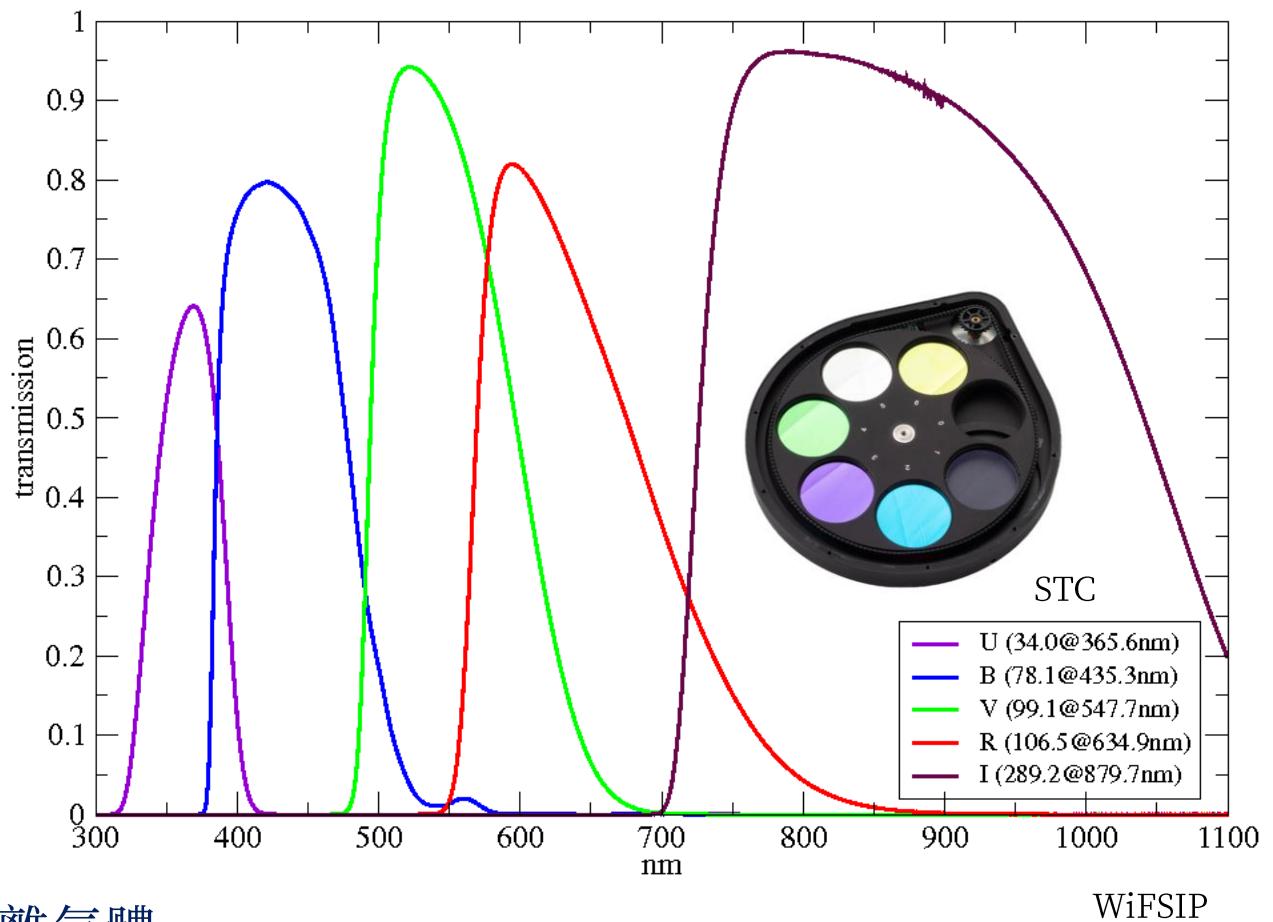


Garry McLeod.

## Filters

# 濾鏡

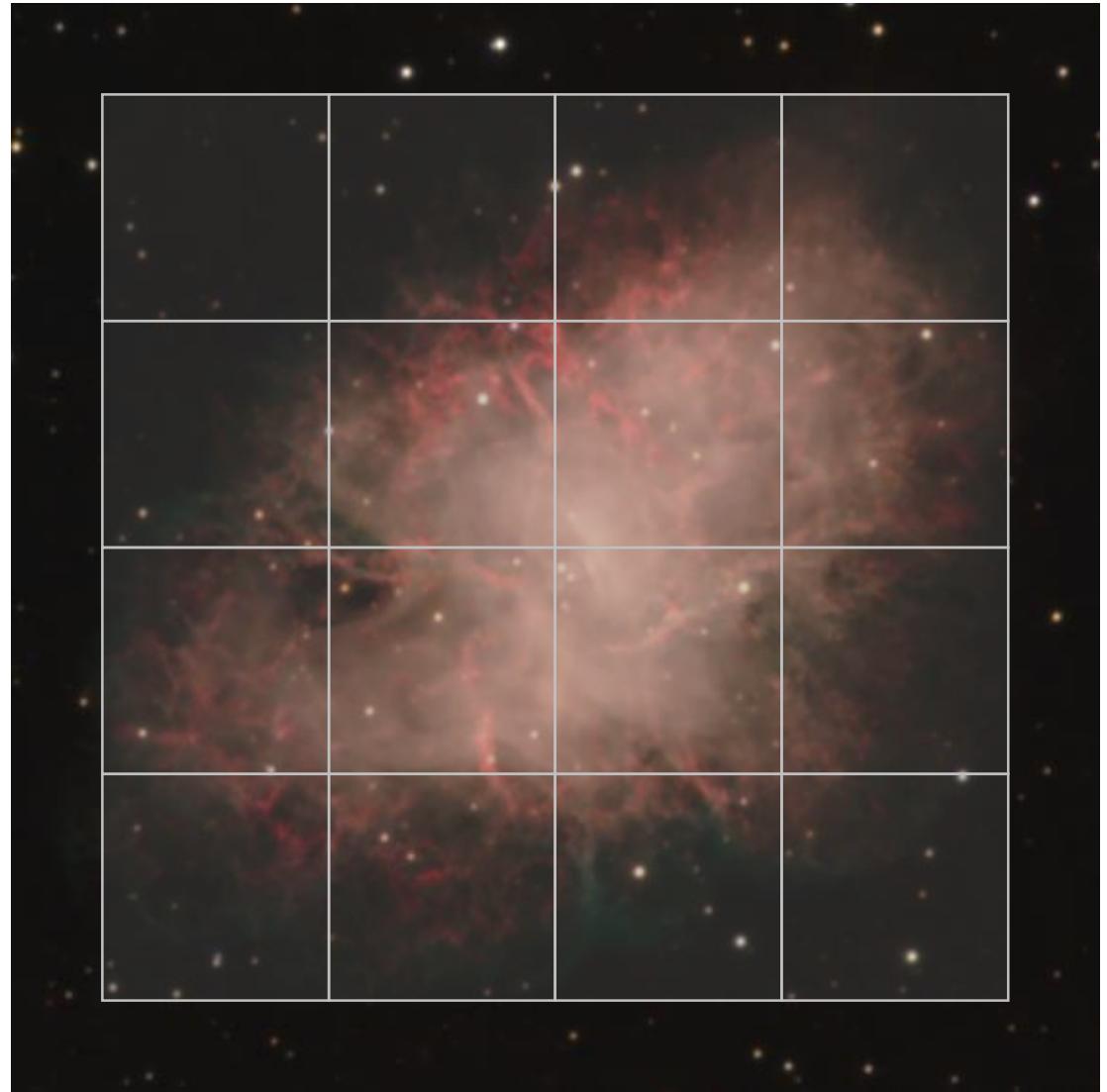
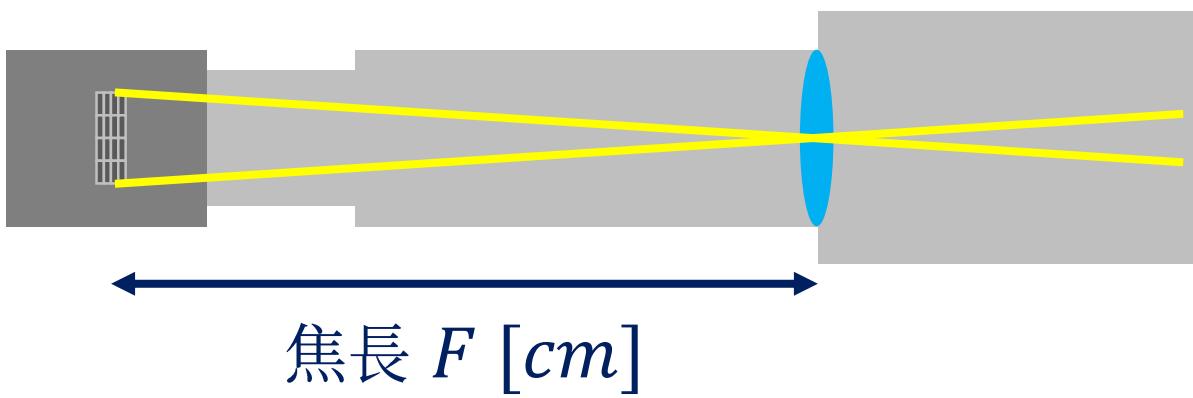
- 只讓特定波長的光線通過的材料
- 安裝於相機前，通常以濾鏡盤切換
- 濾鏡的種類
  - 寬帶濾鏡 Broad Band Filters  
E.g. Johnson UBVRI  
恆星等發出連續譜的天體。
  - 窄帶濾鏡 Narrow Band Filters  
E.g. H-alpha, SII, OIII，發射星雲等游離氣體。



Instruments

# 儀器系統・改二

- 同時考慮望遠鏡與儀器  
則可得到兩樣重要的參數：
  - 視野 Field of View, FOV :  $L/F$
  - 單像素視野 :  $\ell/F$



Ch2. Simplified model of telescope/instrument systems

# 望遠鏡與儀器系統的簡化模型

What makes an astro-photo?

# 一張照片的組成



天體

點光源／面光源／變化／偏振／光子雜訊

大氣

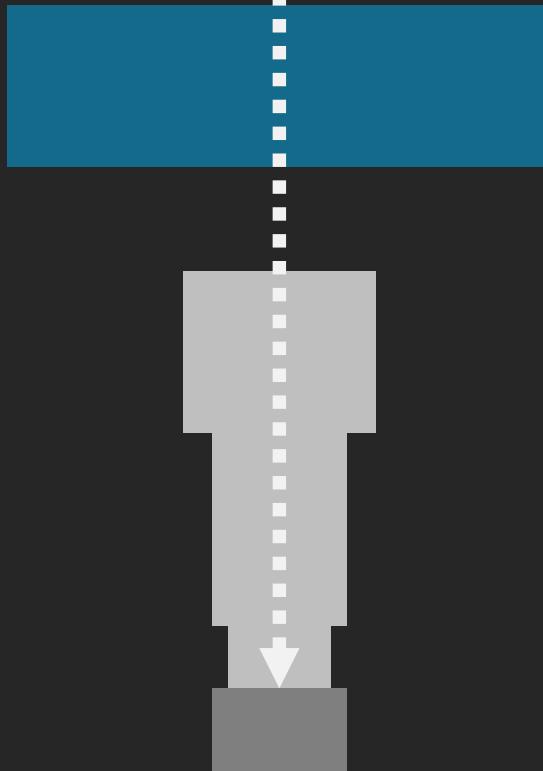
大氣擾動／光害／散射光／飛機衛星

望遠鏡

繞射 (PSF) ／近軸離軸  
像差／色差／平場

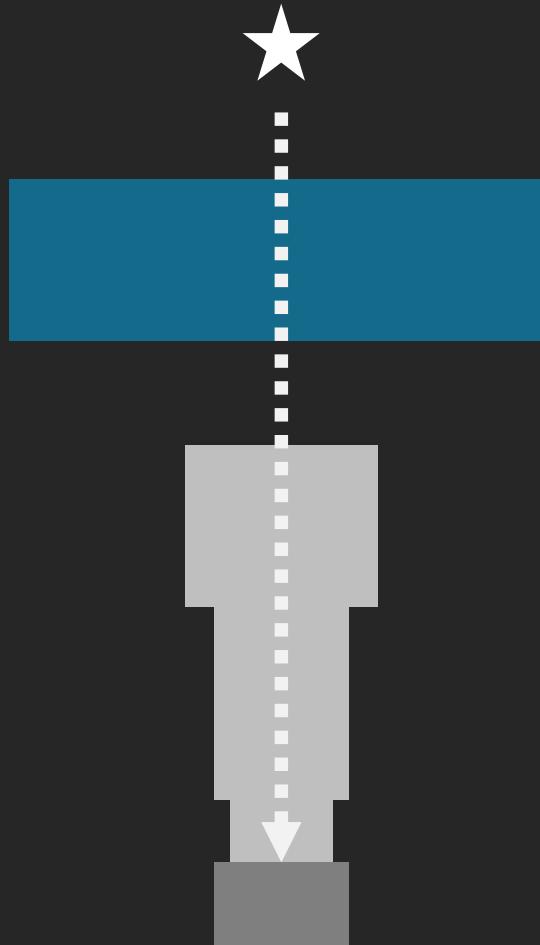
儀器

讀出雜訊、熱雜訊、偏壓、壞像素、量子效率、ISO



What makes an astro-photo?

# 一張照片的組成（簡化）



天體：穩定面光源

大氣：不存在

望遠鏡：理想望遠鏡  
所有同方向的光都匯聚到一點

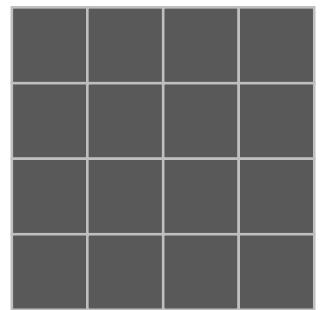
儀器：理想儀器  
無讀出雜訊、熱雜訊、偏壓、壞像素  
正方形， $QE=1$

這一合理想望遠鏡  
應當由哪些參數描述？

Credit: 許淵明



片幅  $L$  [cm]



## 導出參數

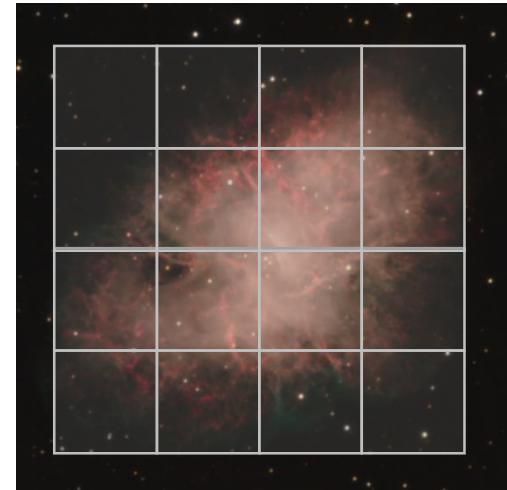
像素數量 :  $n = (L/\ell)^2$

焦比 :  $f = F/D$

視野 :  $\text{FOV} = (L/F)^2$

單像素視野 (空間解析度) :  $\Omega_p = (\ell/F)^2 = \text{FOV}/n$

目標大小  $\Omega_s$   
[rad<sup>2</sup>]



Exercise

# 描述一個攝影系統需要多少參數？

口徑

焦距

片幅

像素  
大小

有因次量

?

焦比

總視野

像素  
數量

像素  
視野

無因次量

Examples

## 應用實例

1. Why we see brighter image in telescopes with small focal ratio?

$$B \propto \Omega_p D^2 = \frac{\ell^2}{F^2} D^2 = \frac{\ell^2}{f^2}$$

2. How to increase angular resolution?

$$\Omega_p = \frac{\text{FOV}}{n} = \frac{\ell^2}{F^2} = \frac{L^2}{nF^2}$$

Ch3. Common method of image analysis

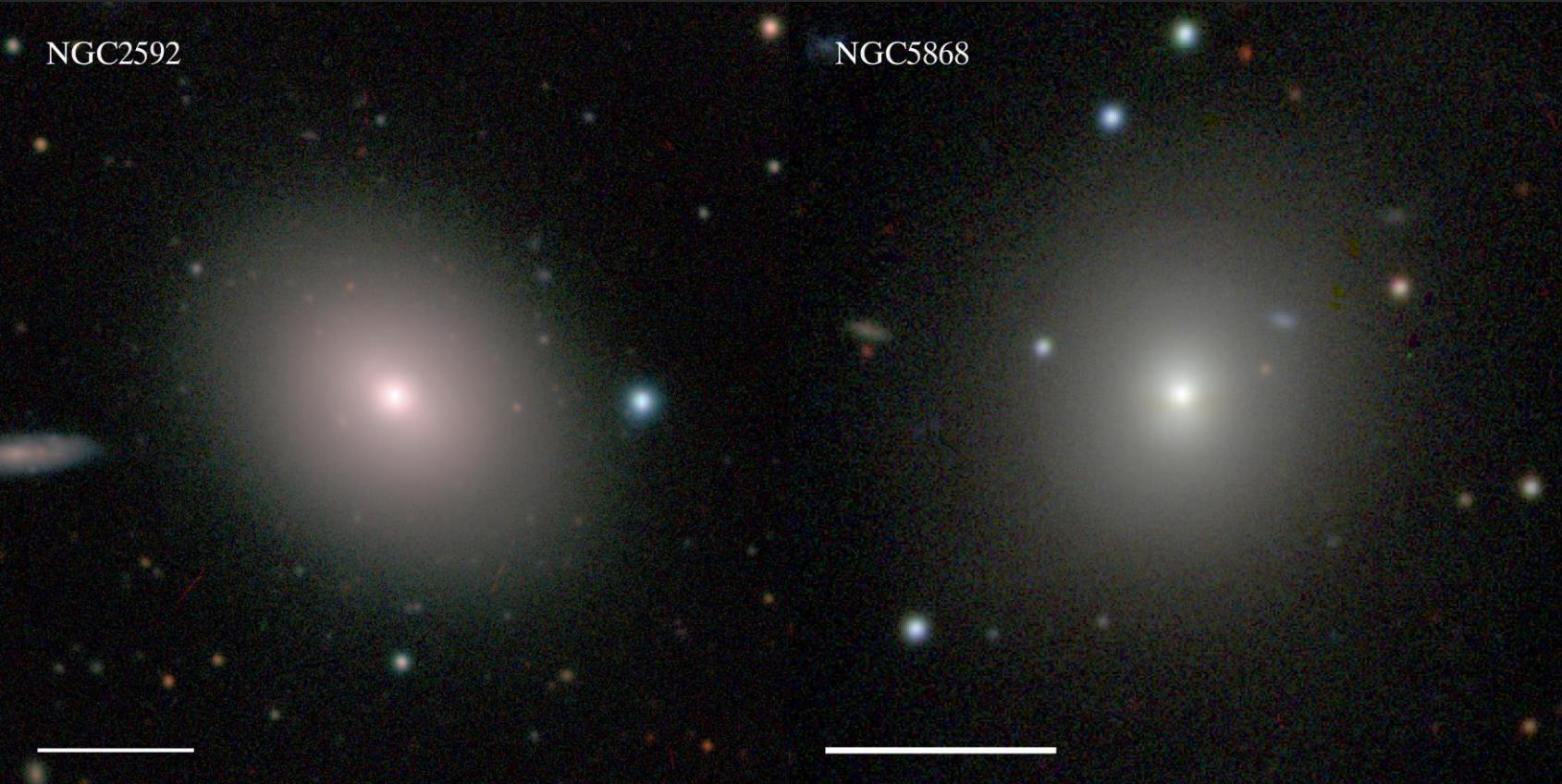
# 常見分析方法



What do you see?  
你看到了什麼？

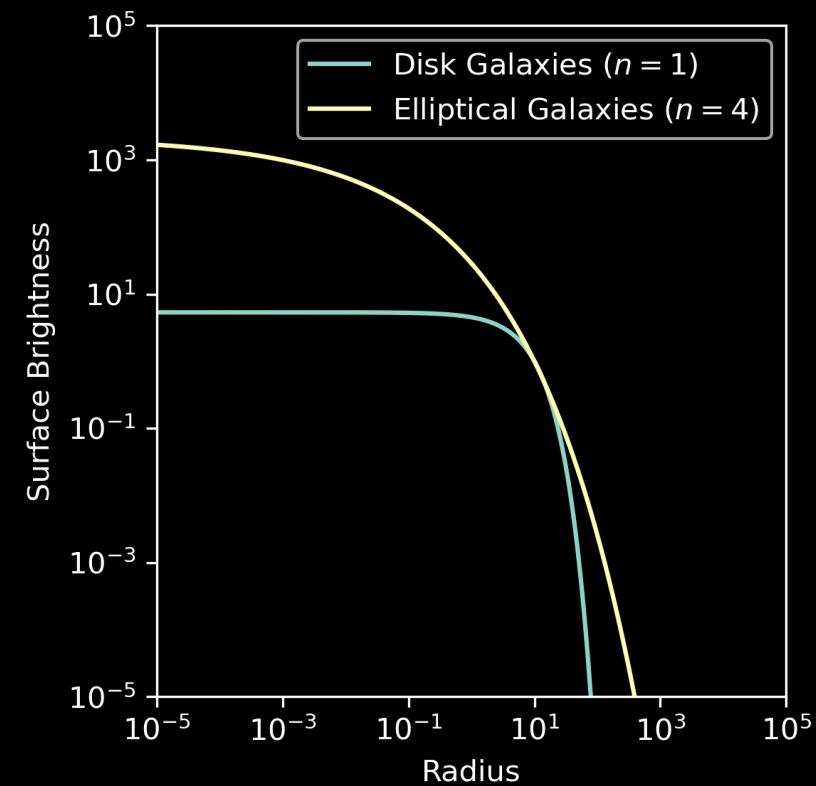
單張單色影像能做的事：

- 測量位置：Astrometry
- 中心位置 (R.A./Dec.)
- 角直徑、面積等 ( $\text{arcsec}^2$ )
- 形狀 Morphology
- 測量亮度：Photometry
  - 整體亮度 (mag)
  - 表面亮度 (mag/ $\text{arcsec}^2$ )



Elliptical Galaxy  
椭圓星系

Spiral Galaxy  
螺旋星系

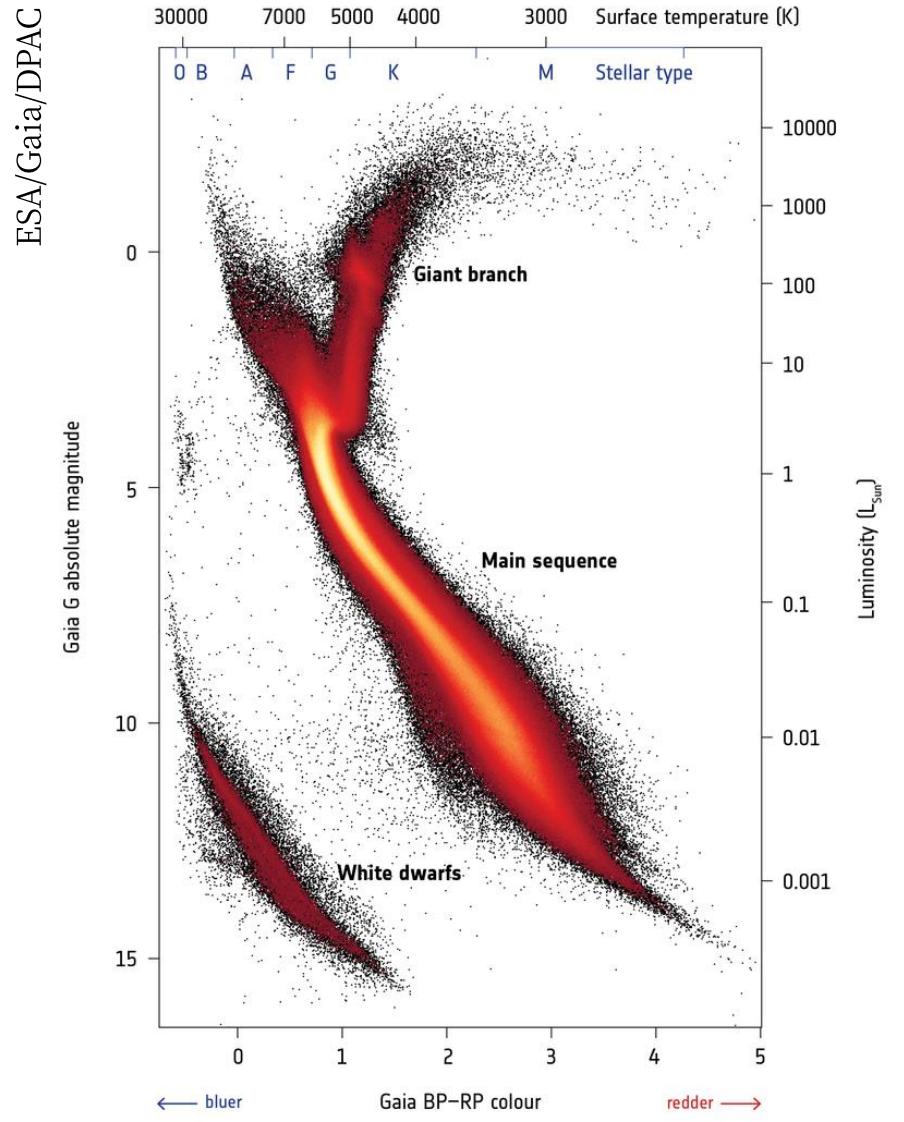


Surface brightness profile  
表面亮度剖面

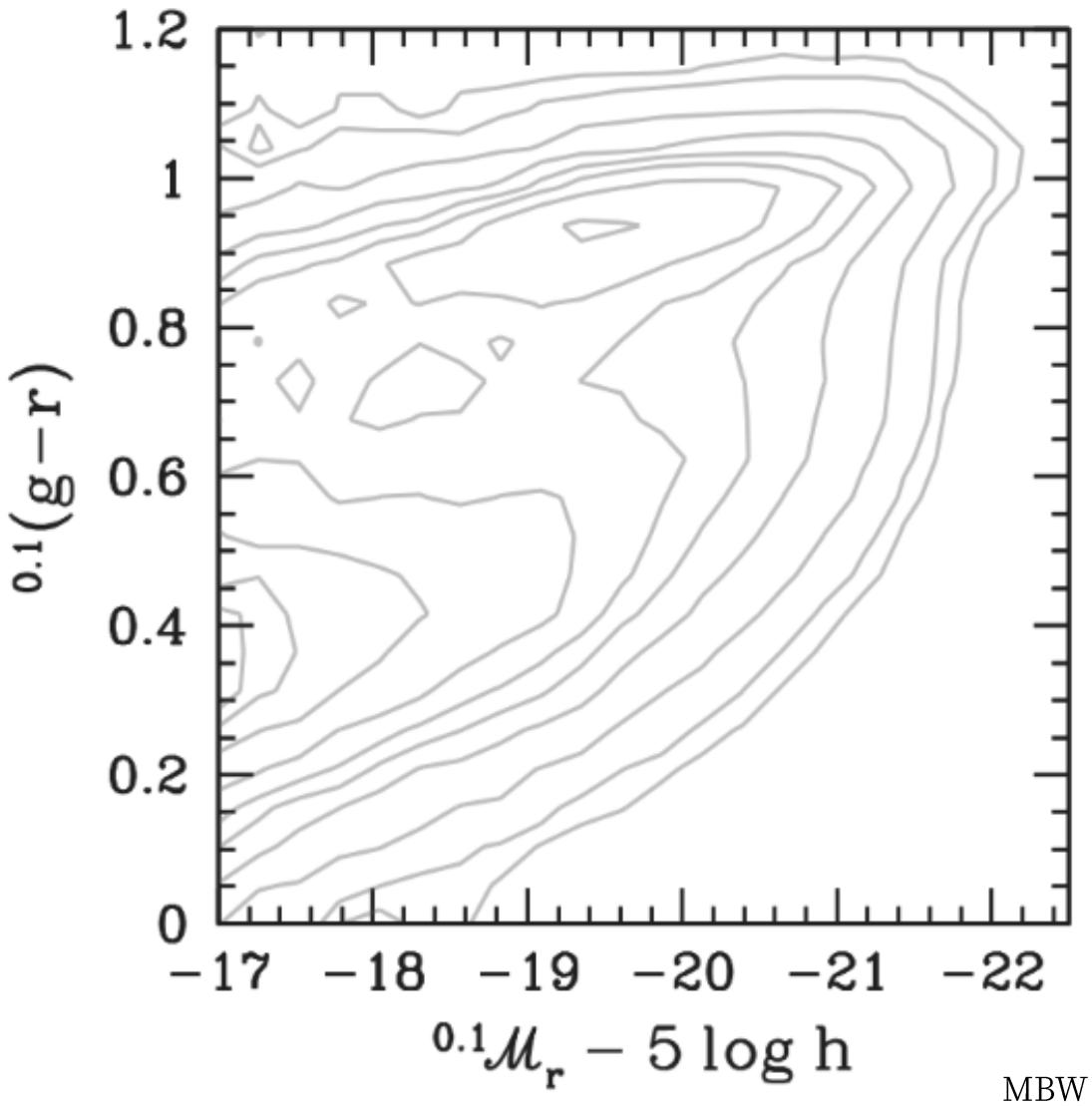


多張不同波段的單色影像  
測量顏色：Color  
星等的差、亮度的比值

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2}$$



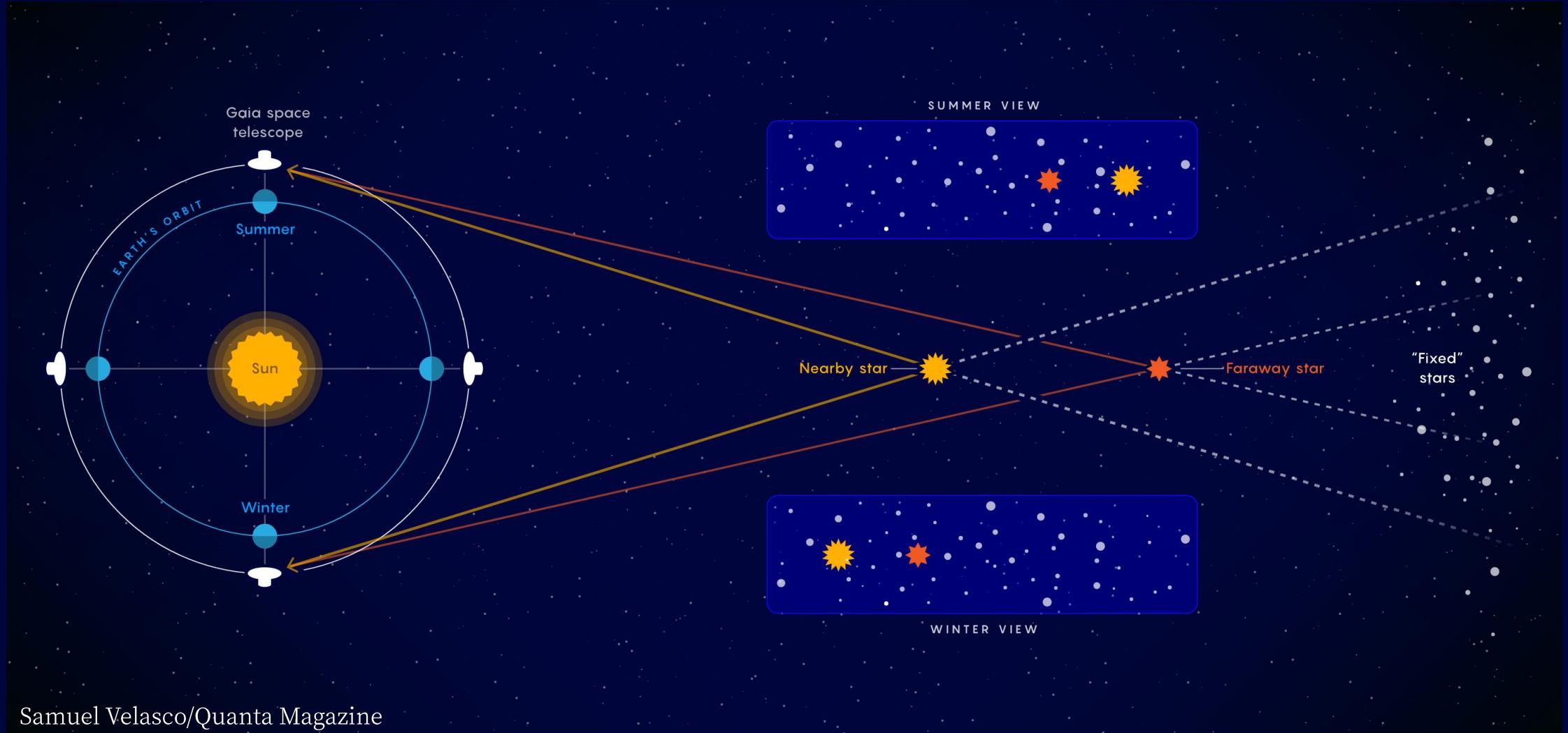
H-R diagram  
赫羅圖



Color-magnitude diagram (galaxy)  
星系顏色星等圖

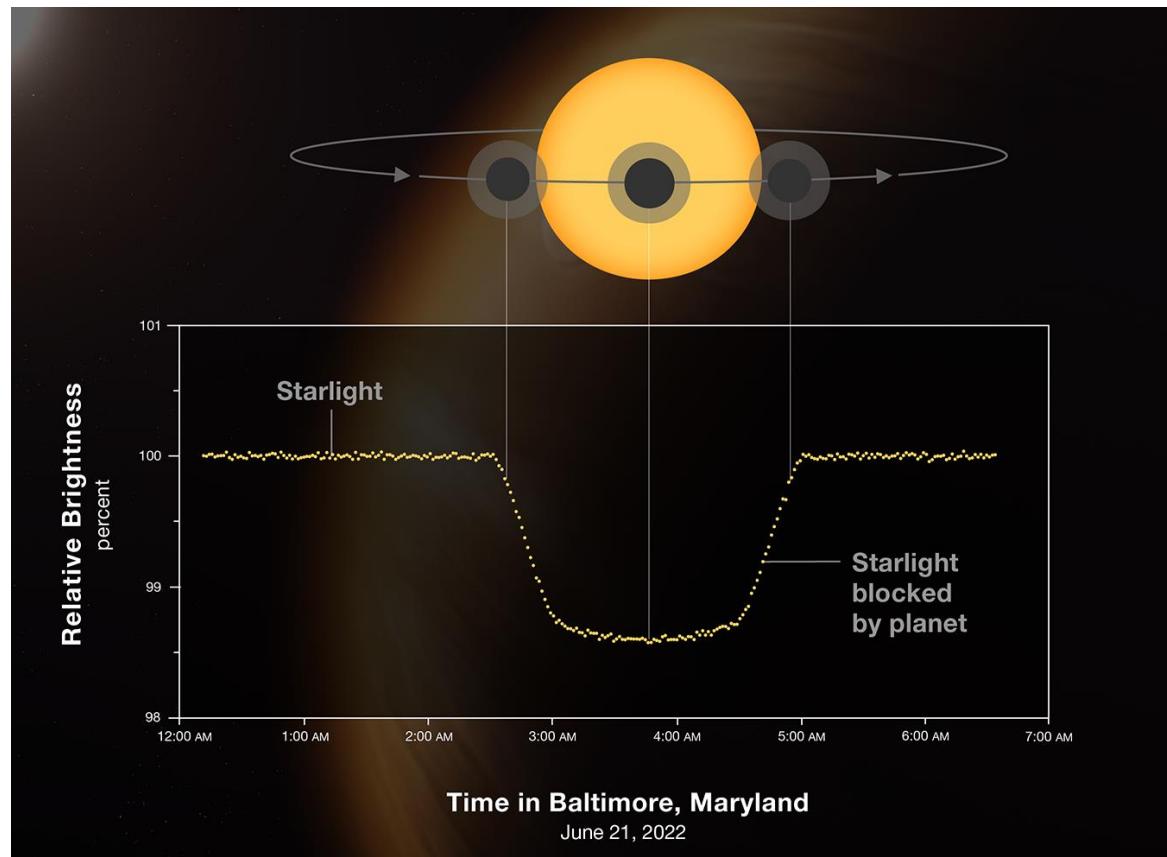
不同時間拍攝的單色影像：

➤ 自行 (Proper Motion) 與視差 (Parallax)：位置隨時間的變化



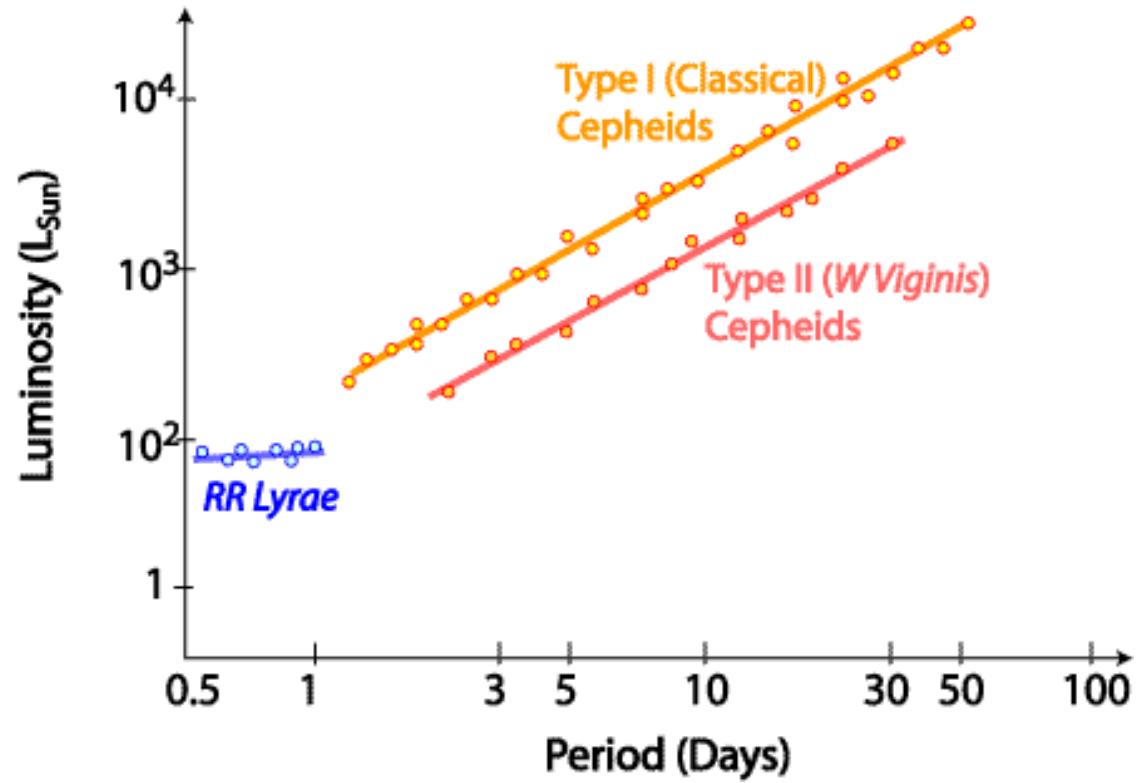
不同時間拍攝的單色影像：

➤ 光變曲線 (Light Curve)：亮度隨時間的變化

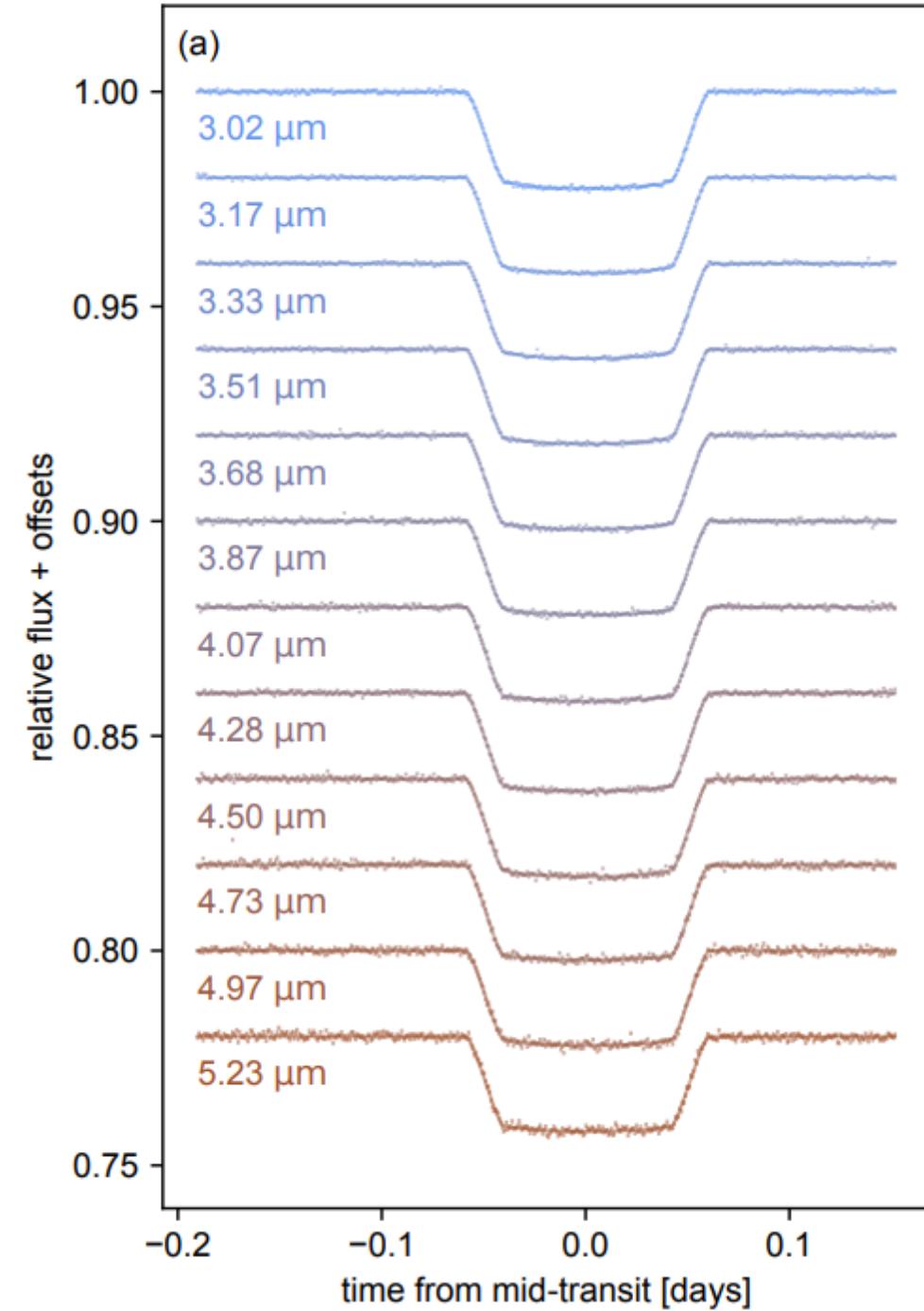


NASA, ESA, CSA, STScI

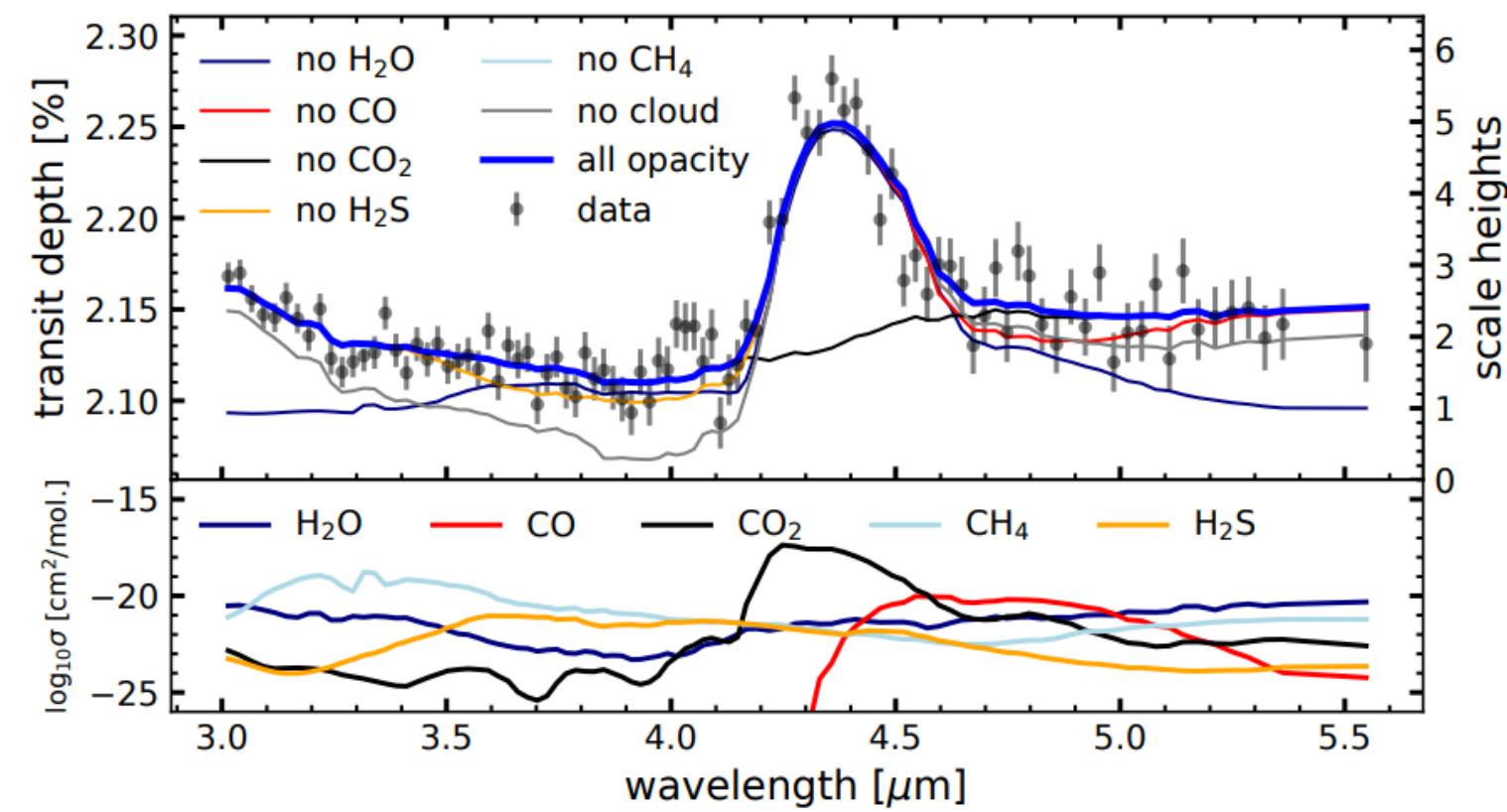
PERIOD - LUMINOSITY RELATIONSHIP



AUSTRALIA TELESCOPE NATIONAL FACILITY



不同時間拍攝的多色影像：  
多波段光變曲線，顏色隨時間的變化



Summary

# 總結

- 天文觀測紀錄、分析與理解天體資訊的過程。
- 觀測所需的設備可分成追蹤、光學與儀器系統。
- 觀測系統的性質由光學和儀器系統互相交織而成。
- 常見的分析方法所能得到的資訊：
  - 位置、亮度、顏色、自行、光變曲線等。
  - 佐以物理模型，資料才能成為物理知識（未來兩個學期的課程）。
- 建議各位在未來的課程中，時刻反思某項知識該如何以觀測取得。