

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 ?

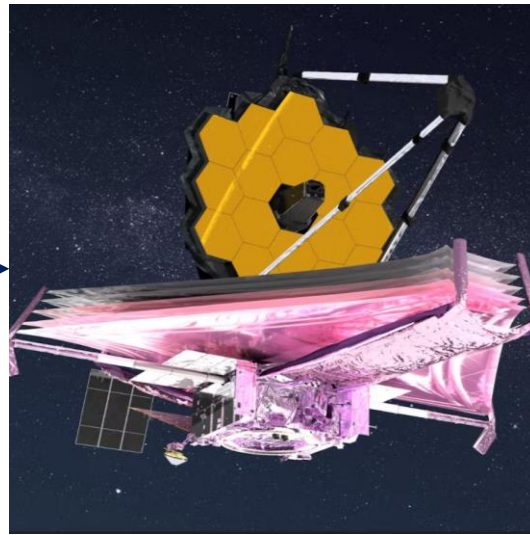
什麼是天文觀測？

紀錄、分析與理解天體資訊的過程



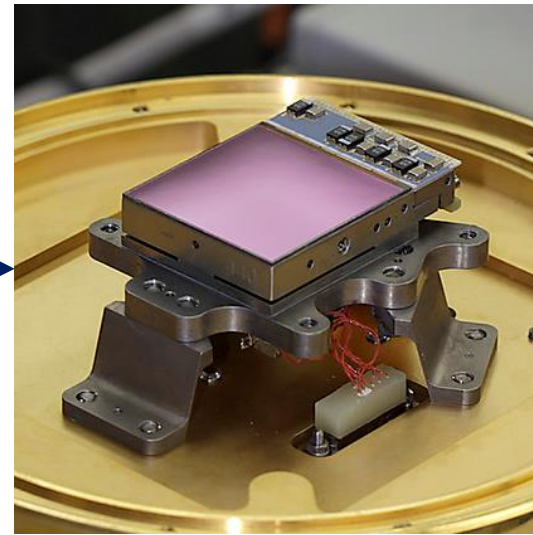
天體

NASA, ESA, CSA, STScI



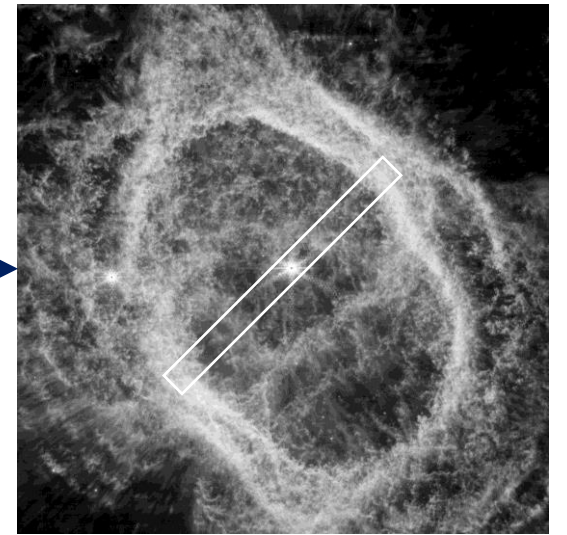
望遠鏡

NASA GSFC/CIL/
Adriana Manrique Gutierrez



感測器

University of Arizona/NASA



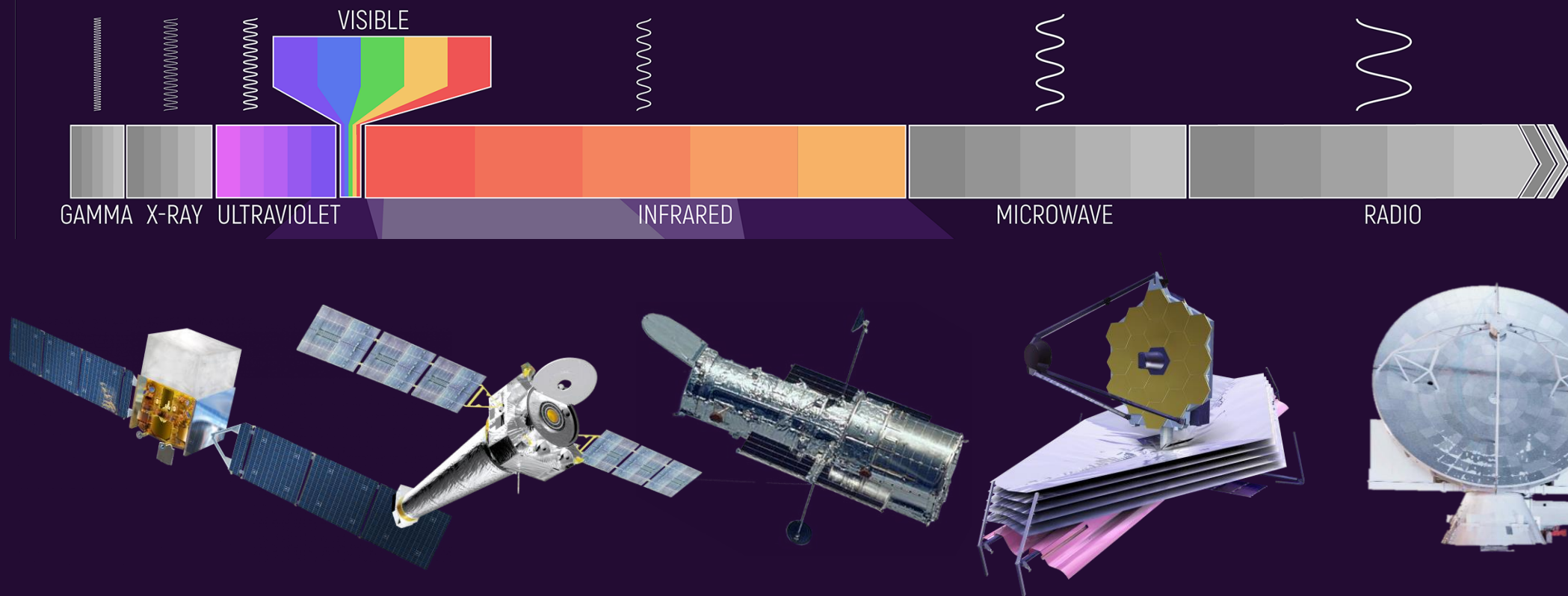
分析

JWST ERO
Pontoppidan, Klaus M.

Messengers in astronomy

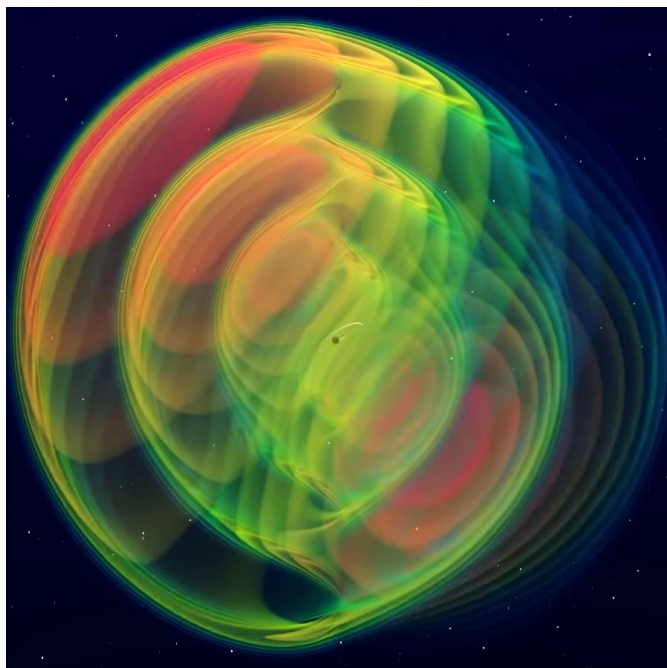
天文中的資訊信使

ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

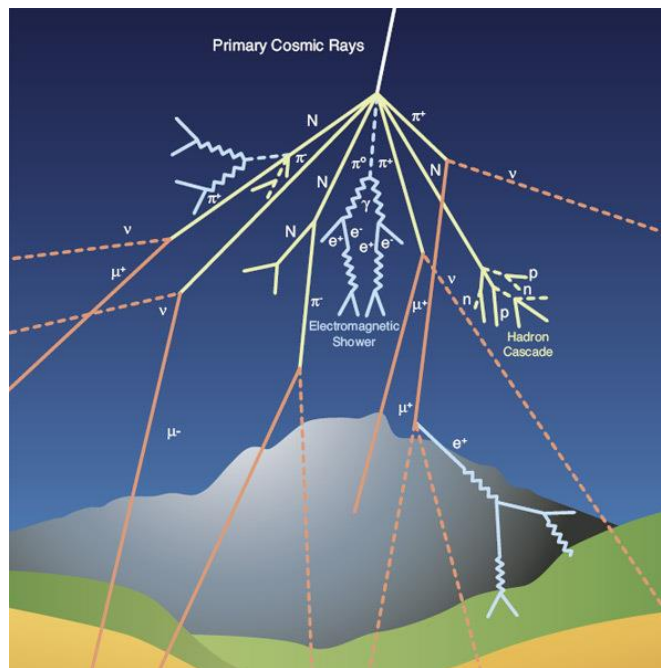


Messengers in astronomy

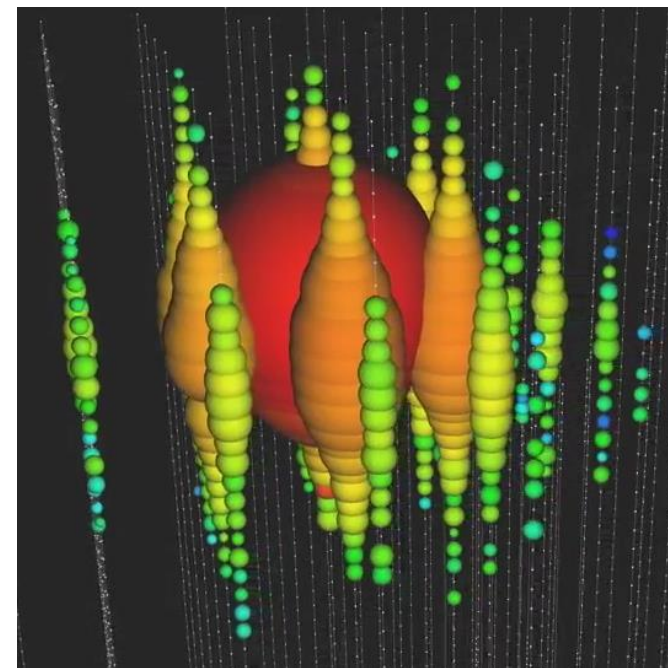
天文中的資訊信使



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

γ -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

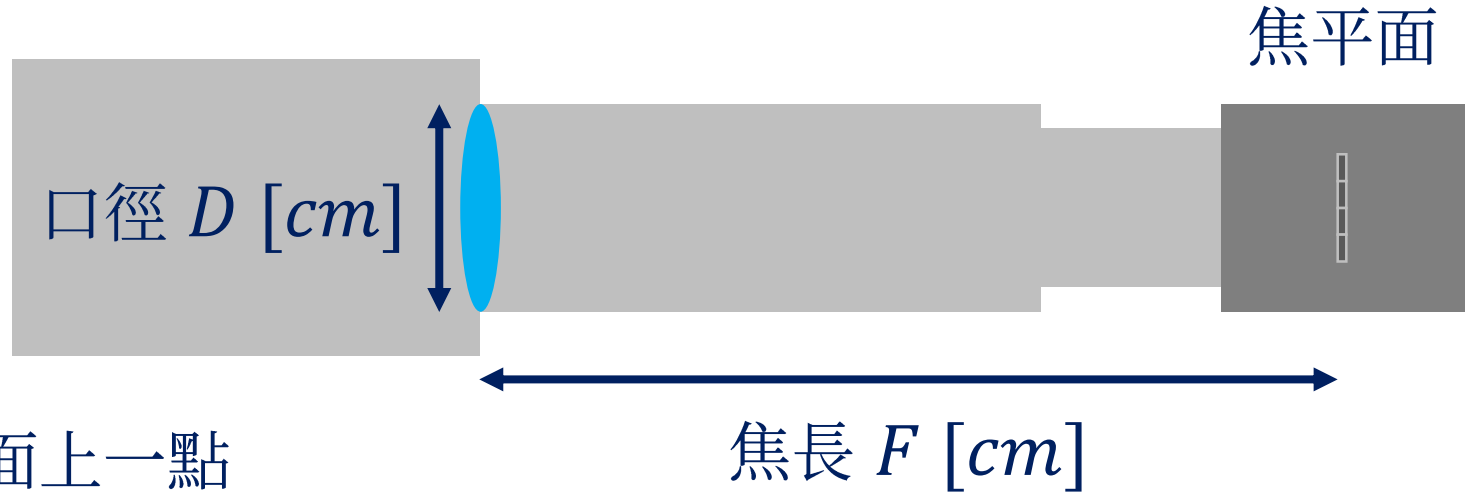
光學系統 (Telescope)
蒐集並聚焦光子

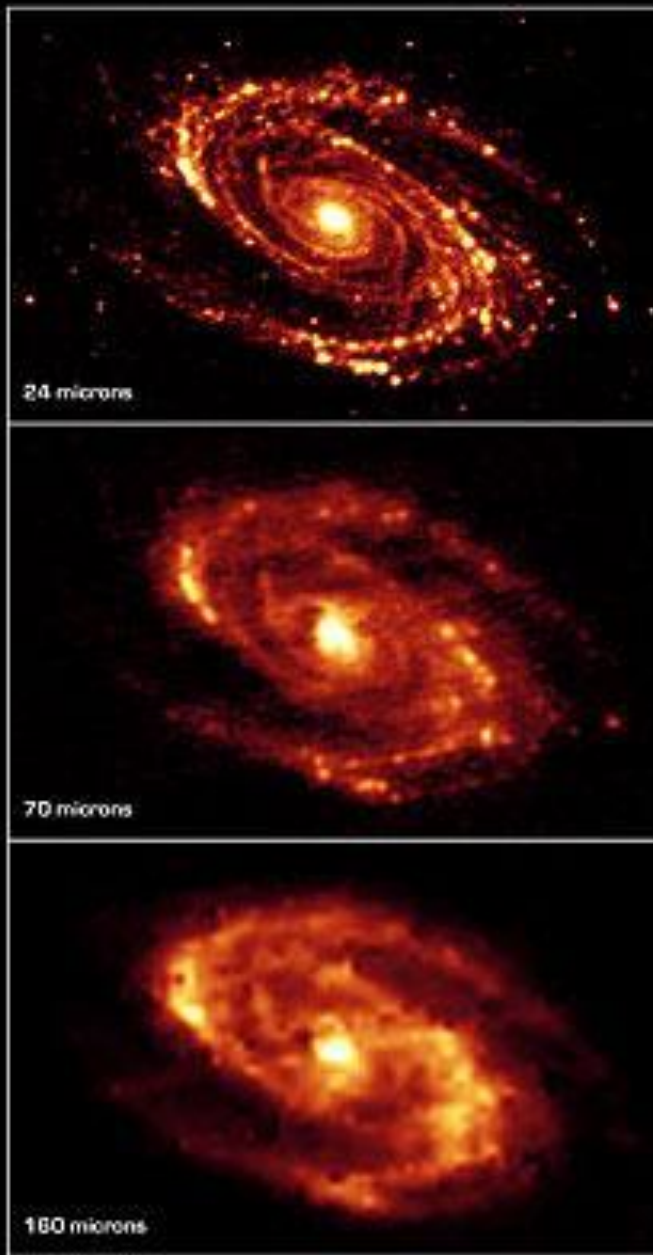
追蹤系統 (Tracking)
確保追蹤穩定

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。 $f = F/D$

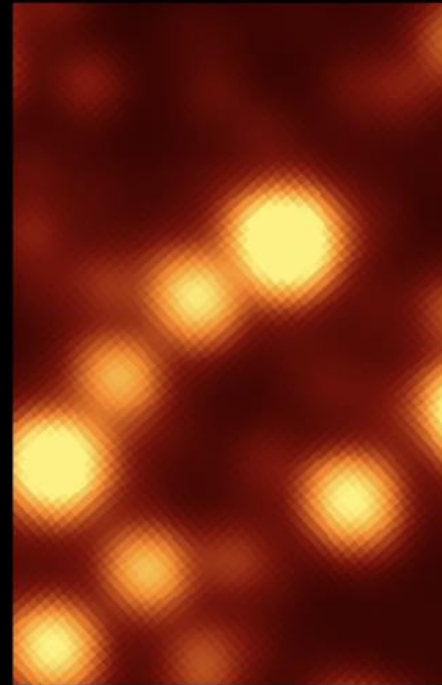




Spiral Galaxy M81

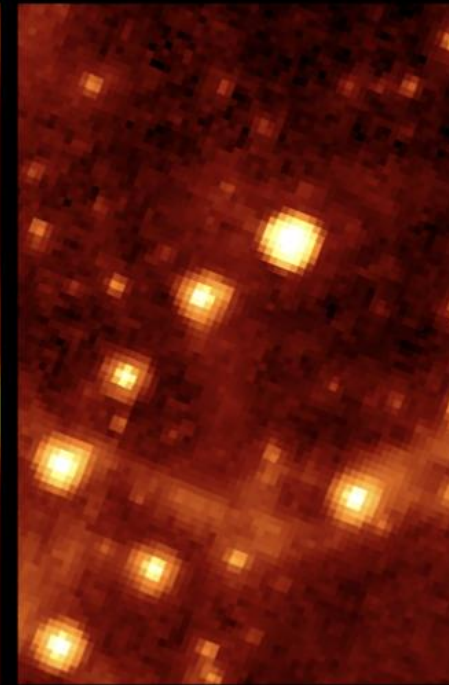
Spitzer Space Telescope • MIPS

The Evolution of Infrared Space Telescopes



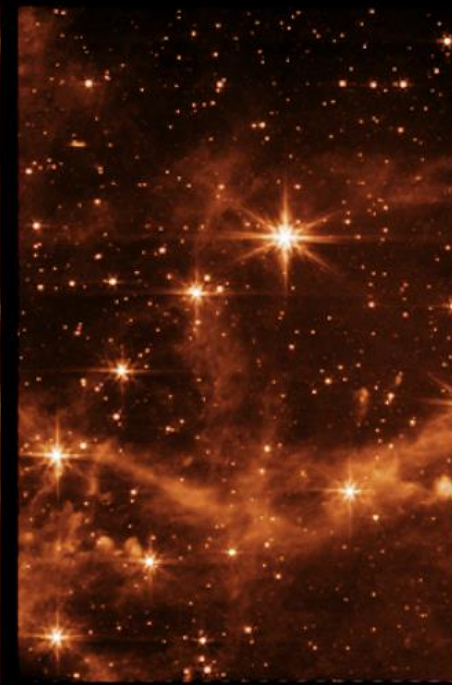
WISE W2 4.6 μm

$D = 0.4 \text{ m}$



Spitzer/IRAC 8.6 μm

$D = 0.85 \text{ m}$



JWST/MIRI 7.7 μm

$D = 6.5 \text{ m}$

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



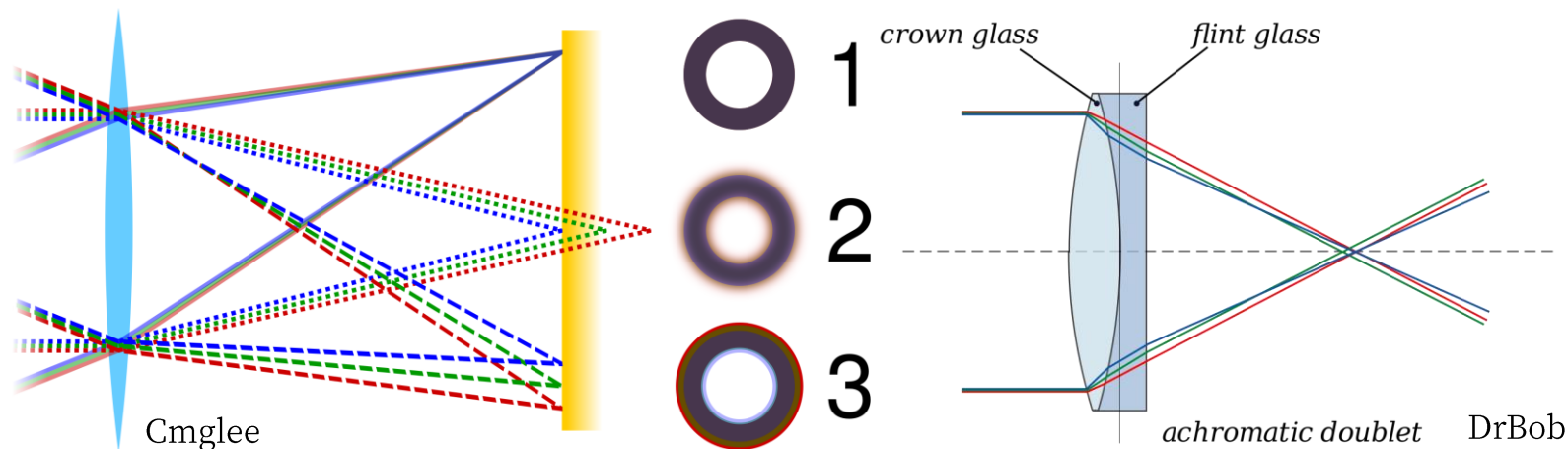
鴻宇光學

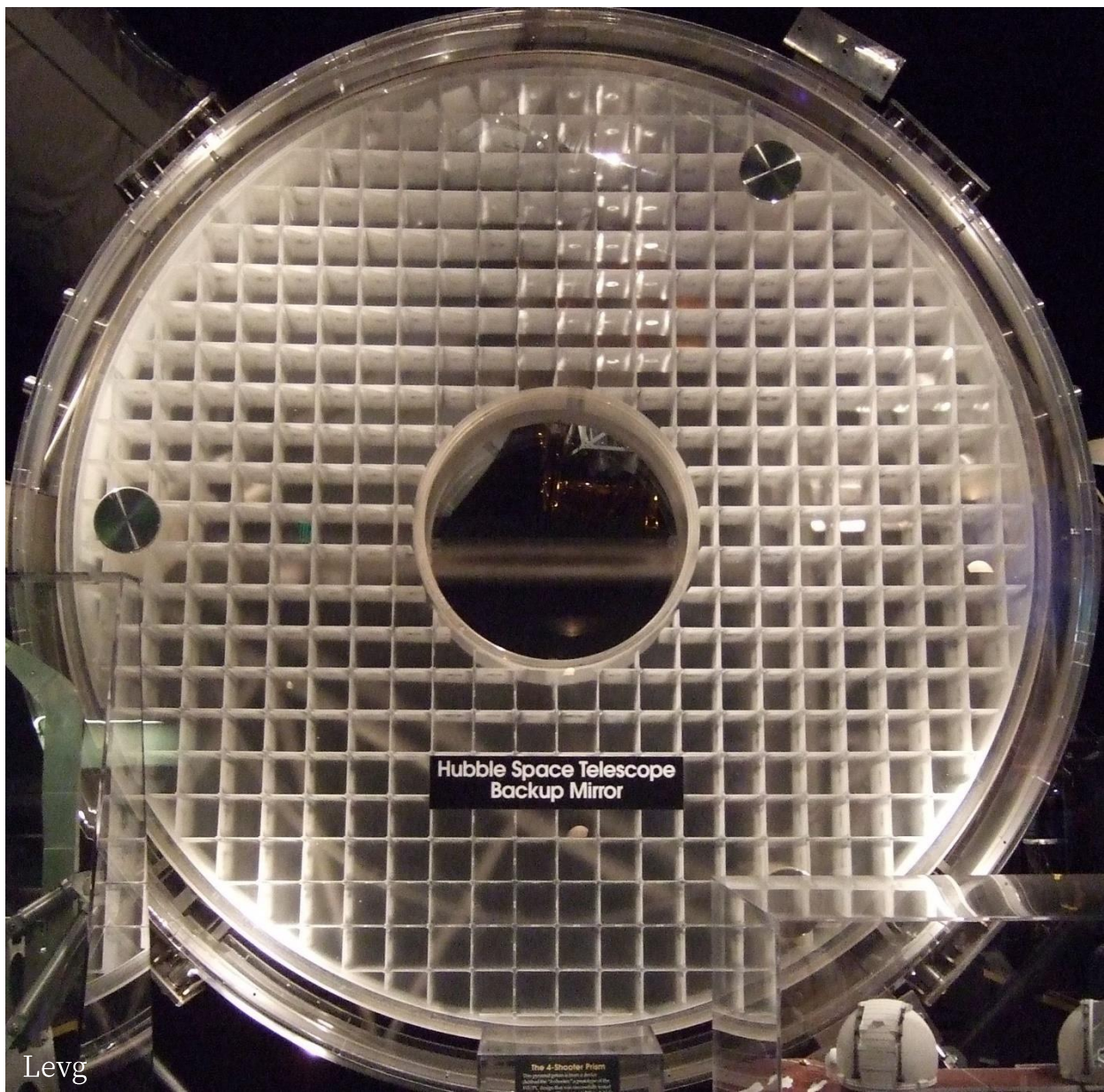


Celestron



- 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

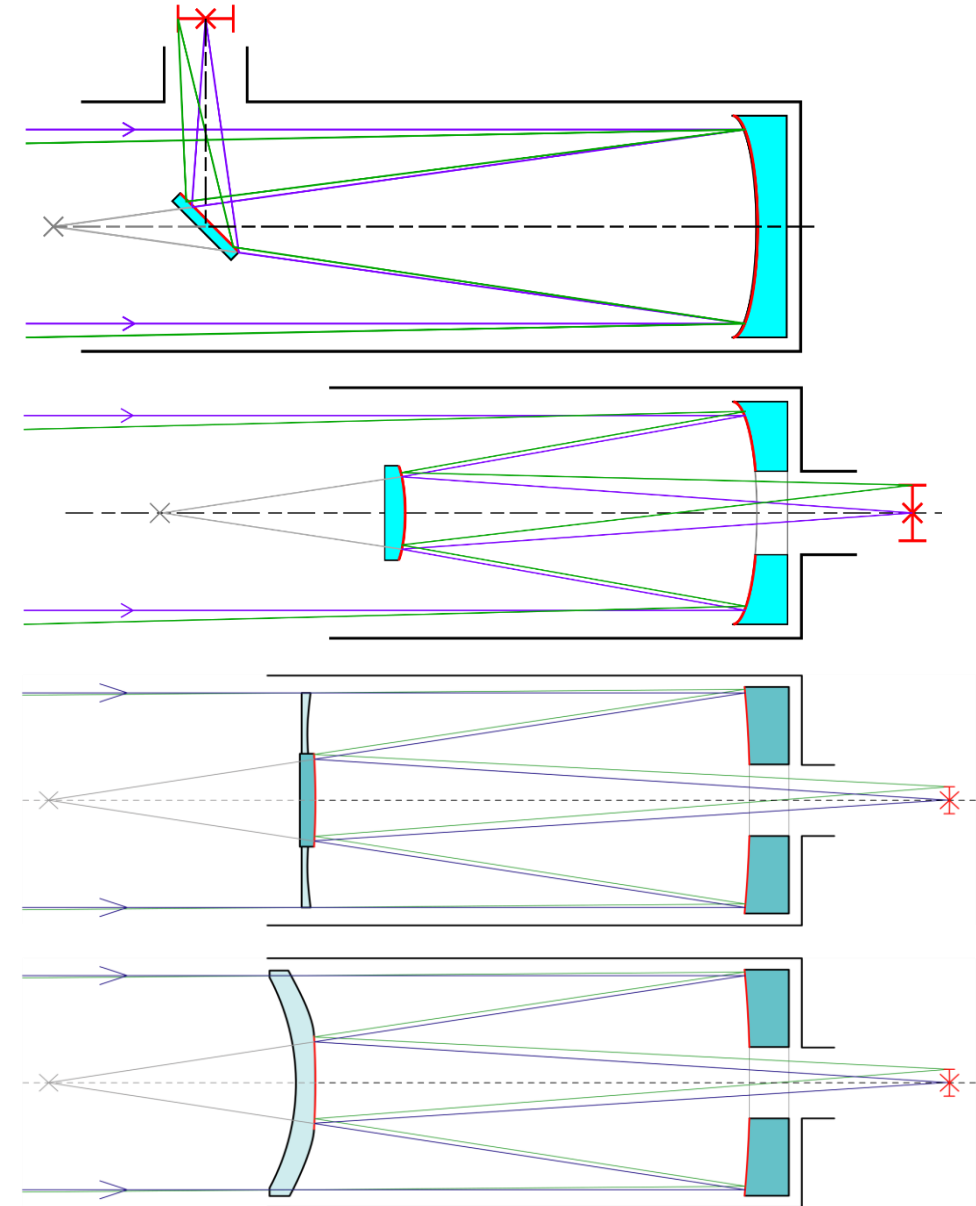


Chris Gunn

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



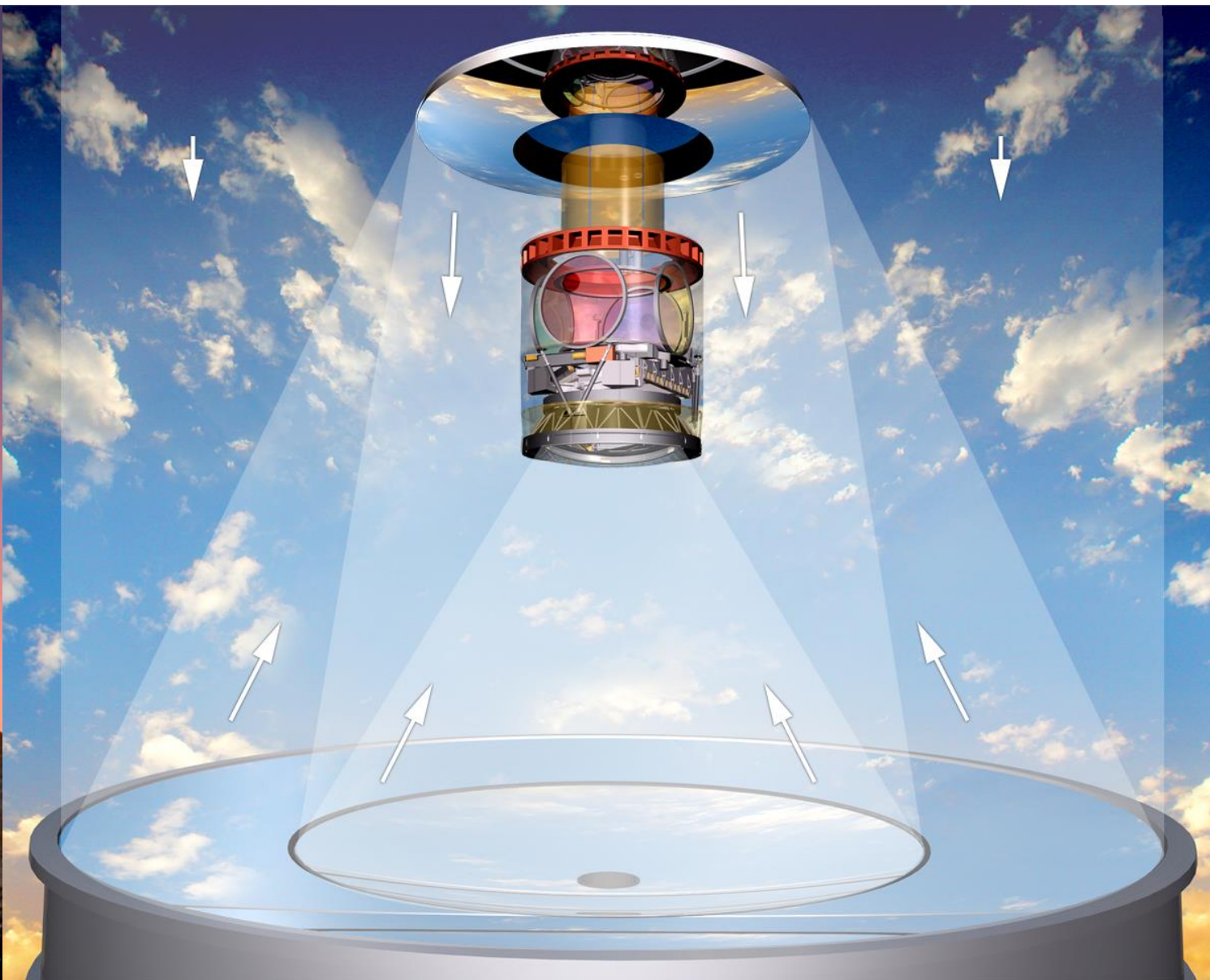
Telescopes

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

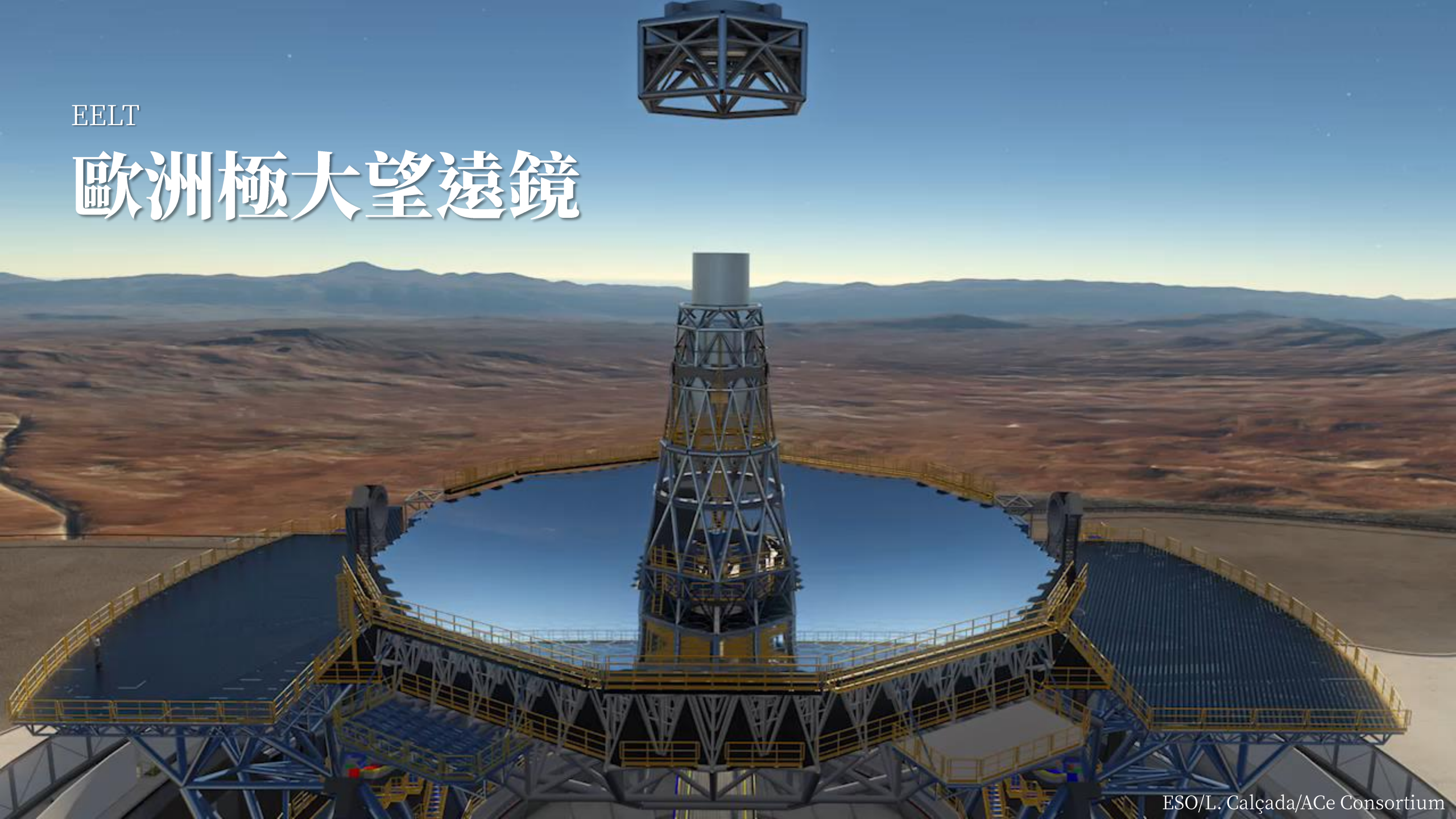
Rubin/LSST

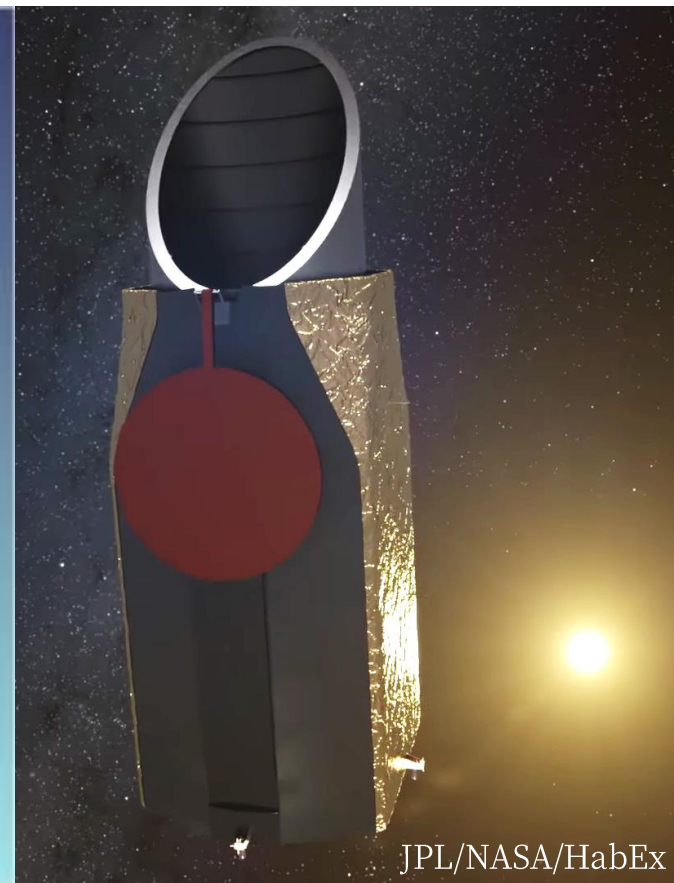
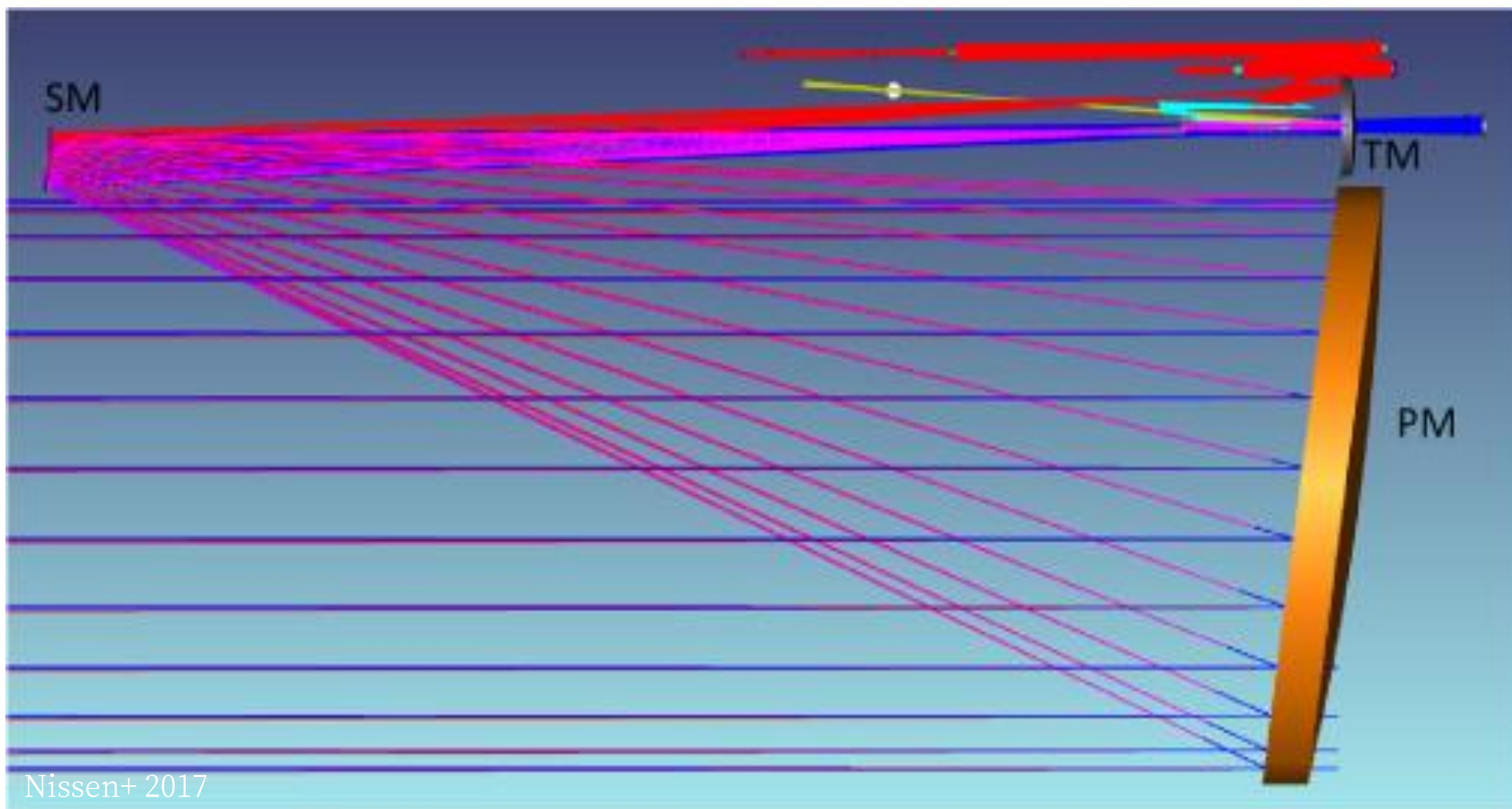
魯賓天文台



EELT

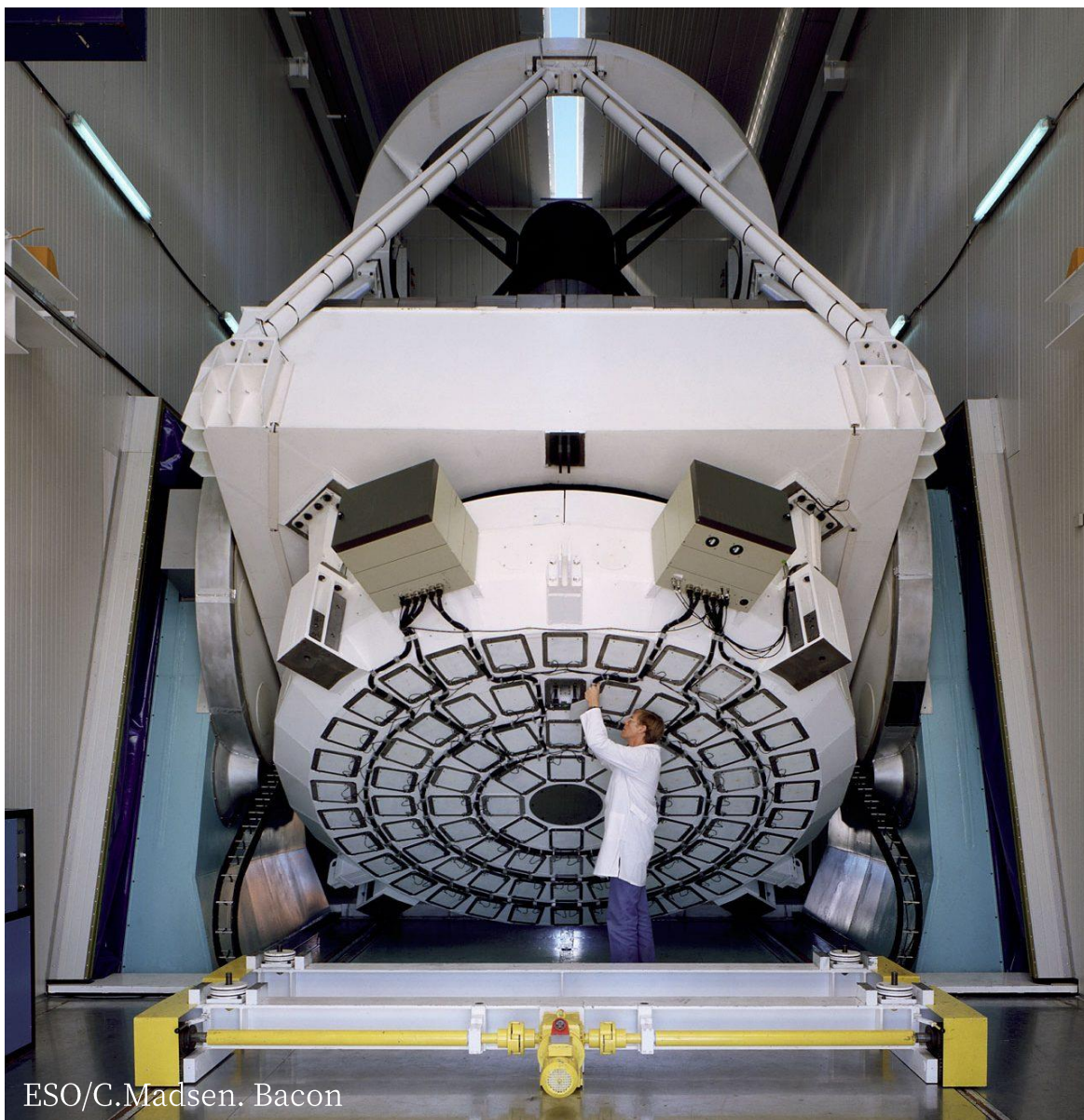
歐洲極大望遠鏡





HabEx

離軸光學望遠鏡 Off-axis design

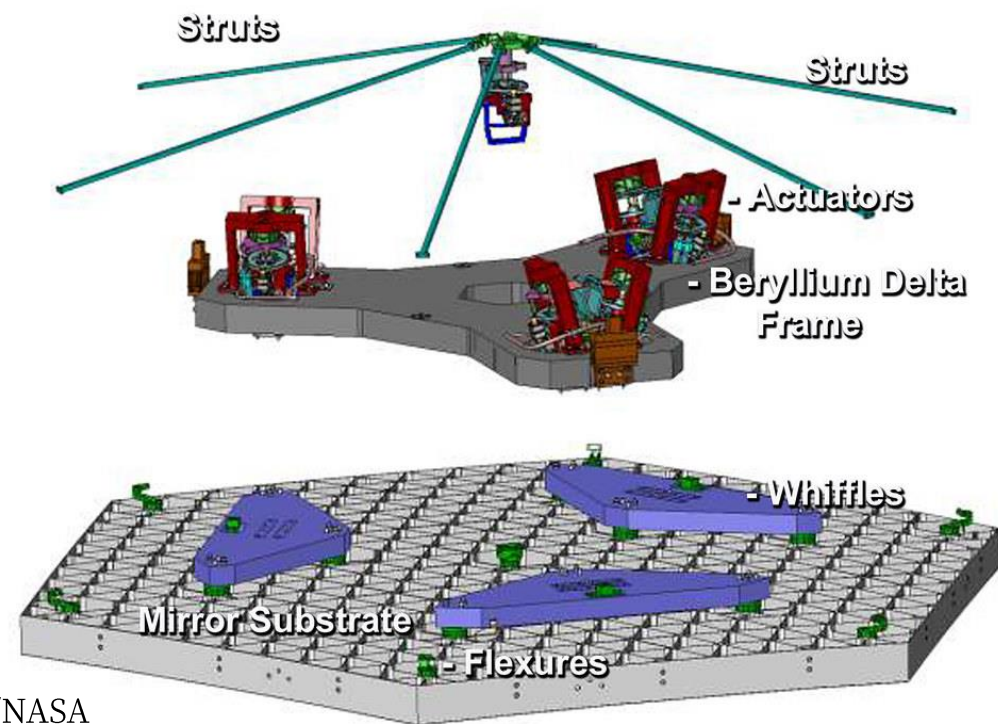


ESO/C.Madsen. Bacon

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 low-angle, upward-looking shot of a large astronomical telescope's structure against a starry night sky. Several bright, golden-yellow laser beams originate from the telescope's complex metal framework and converge towards a single point in the distance, illustrating the adaptive optics system in operation. The structure is dark and industrial, with various pipes, ladders, and support beams visible.

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

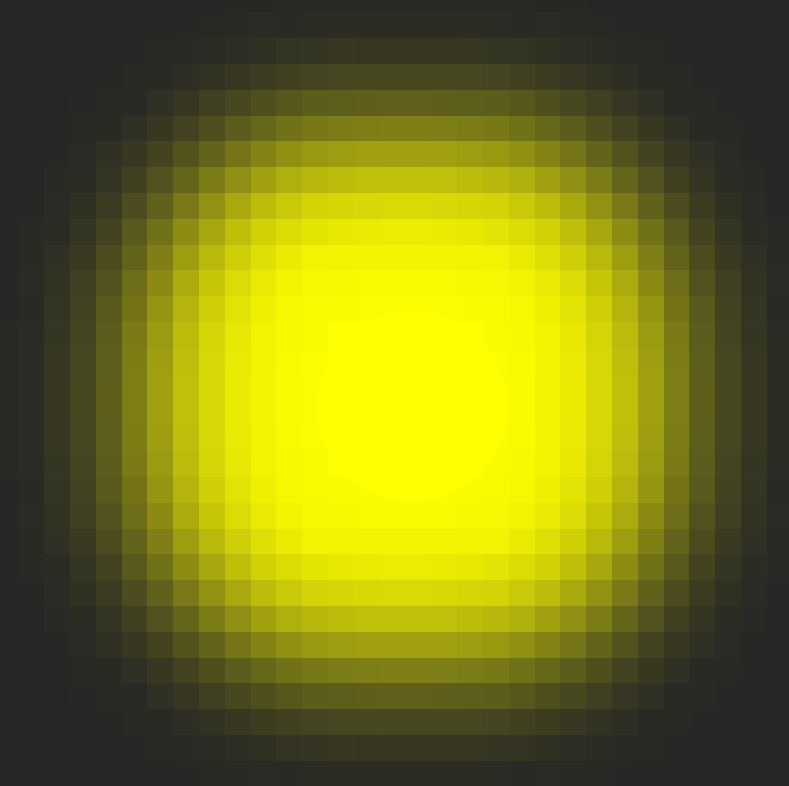


Seeing
視寧度

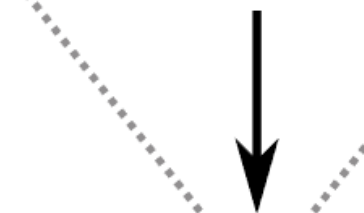
Credit: Damian Peach



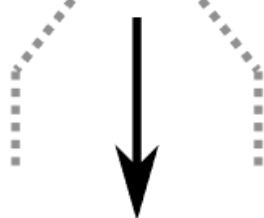
長期曝光



perturbed wavefront



FW1



TT



DM



BS

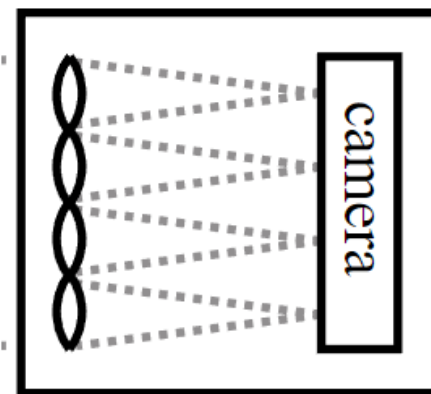


science



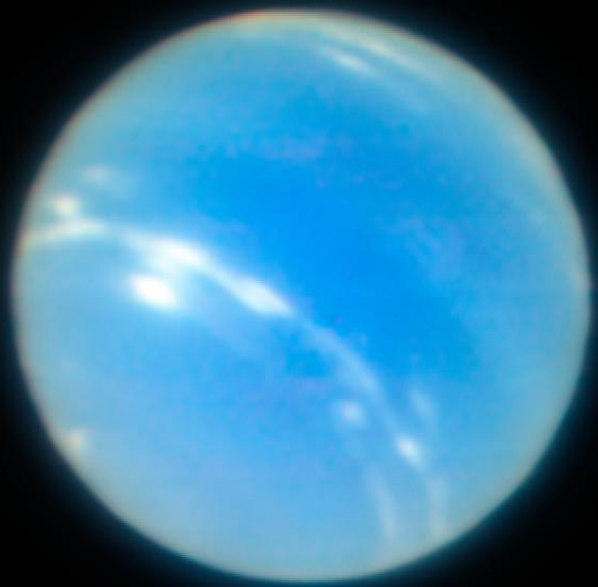
FW2

wavefront sensor

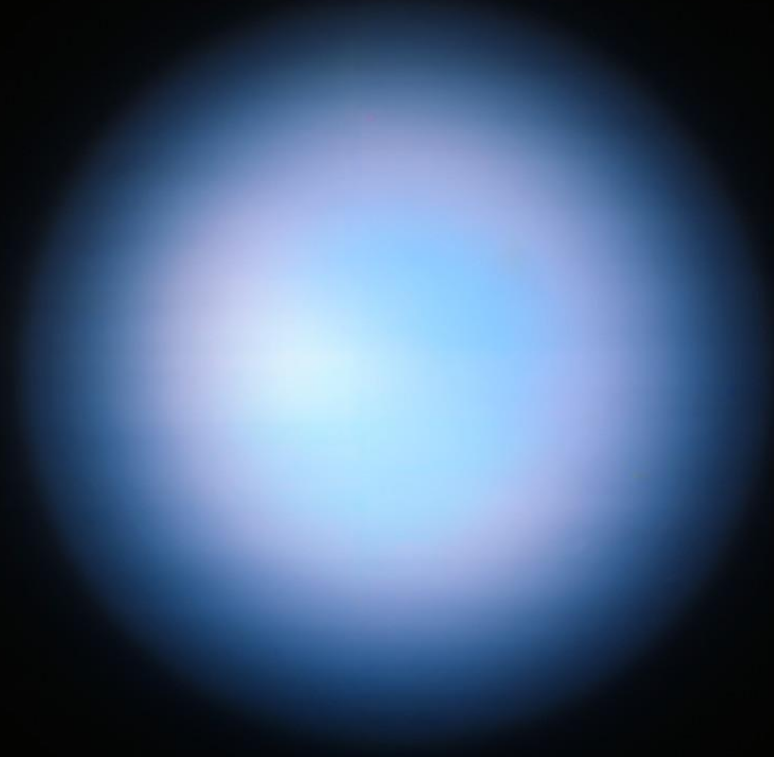


camera

control hardware



Adaptive optics

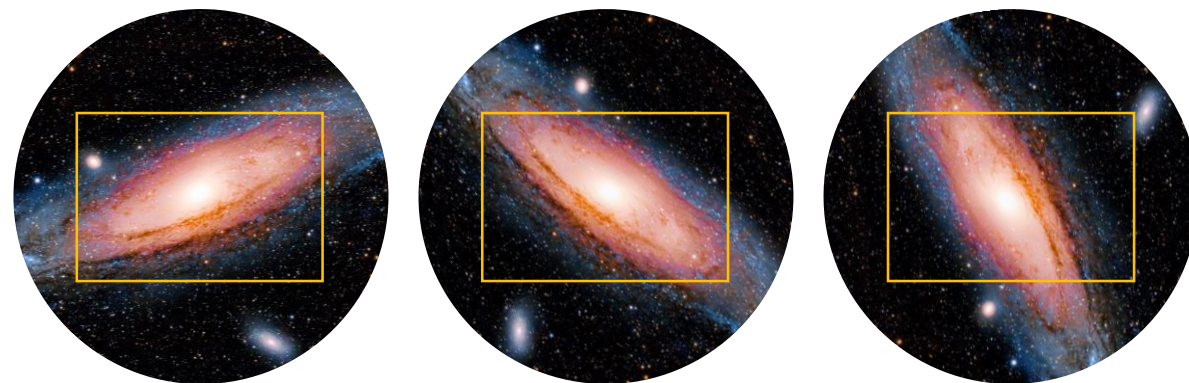


No Adaptive optics

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

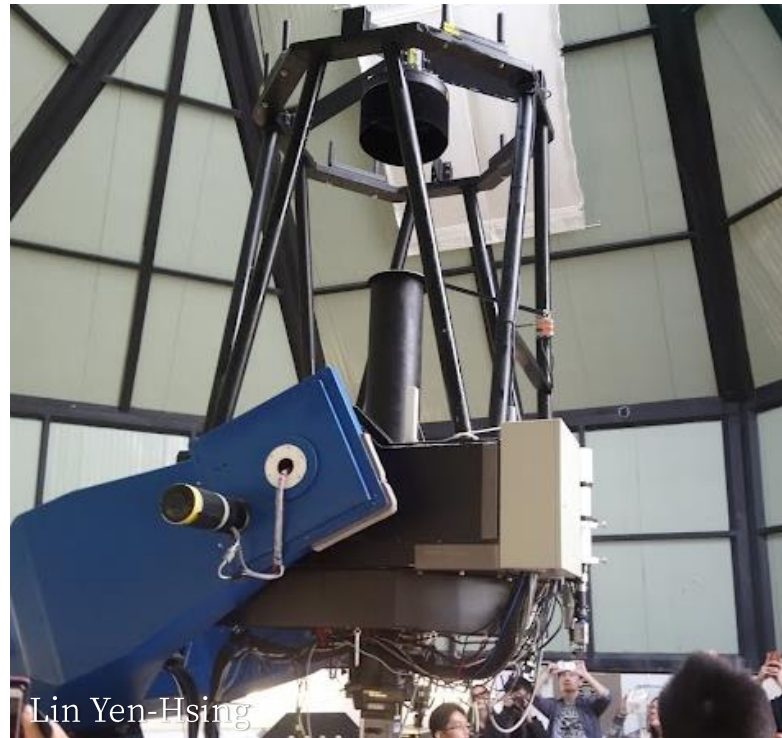


Types of equatorial mounts

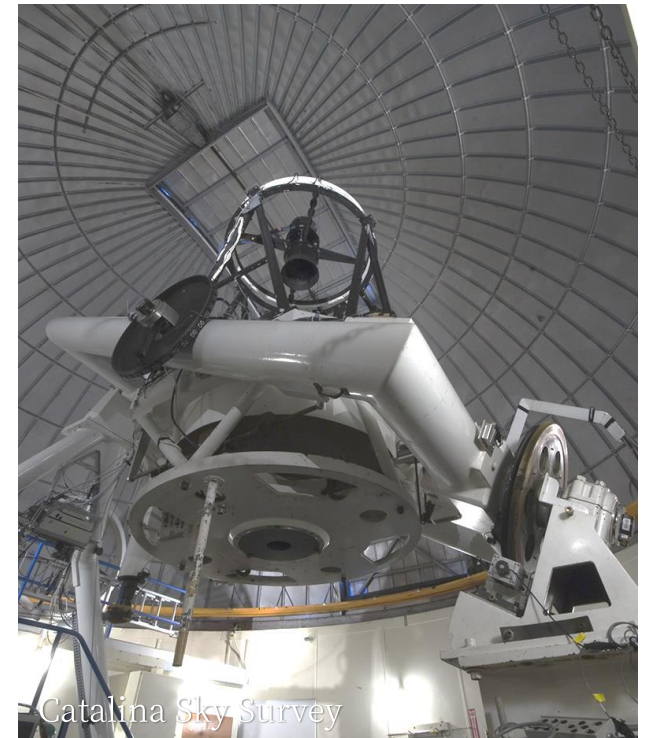
赤道儀的種類



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 ($\sim 5\text{ m} +$)

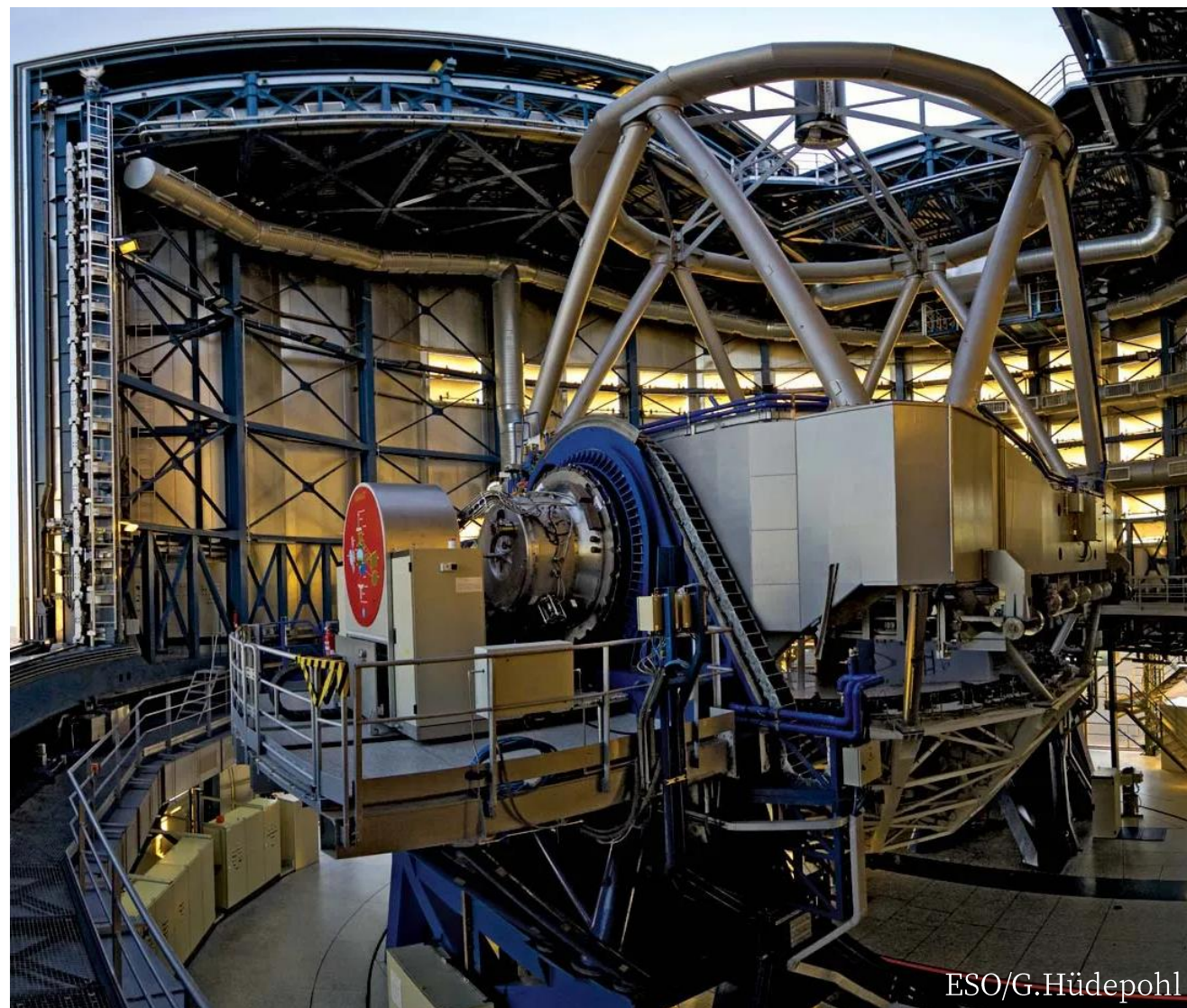
望遠鏡使用的赤道儀系統

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



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。

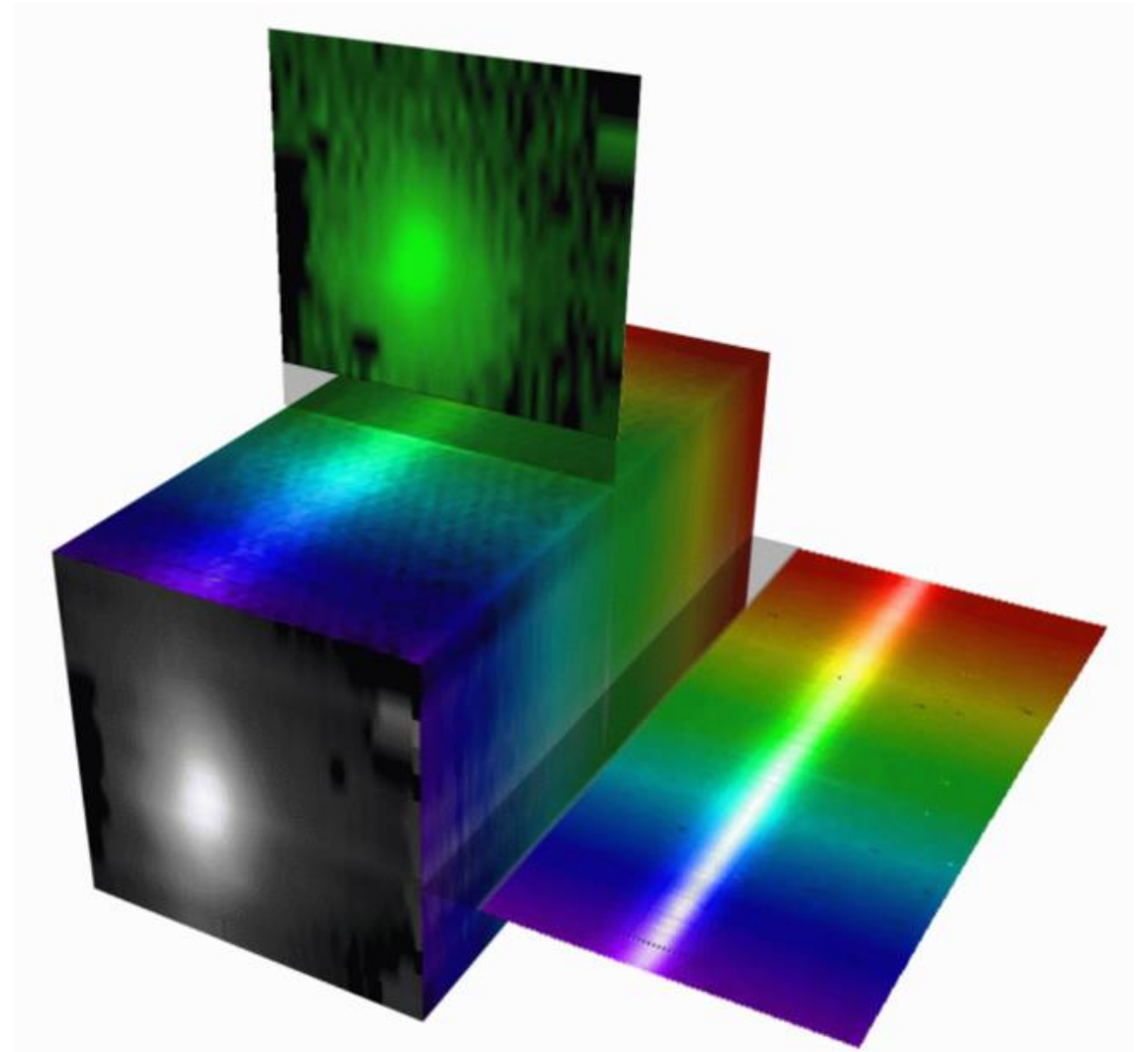


Instruments

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

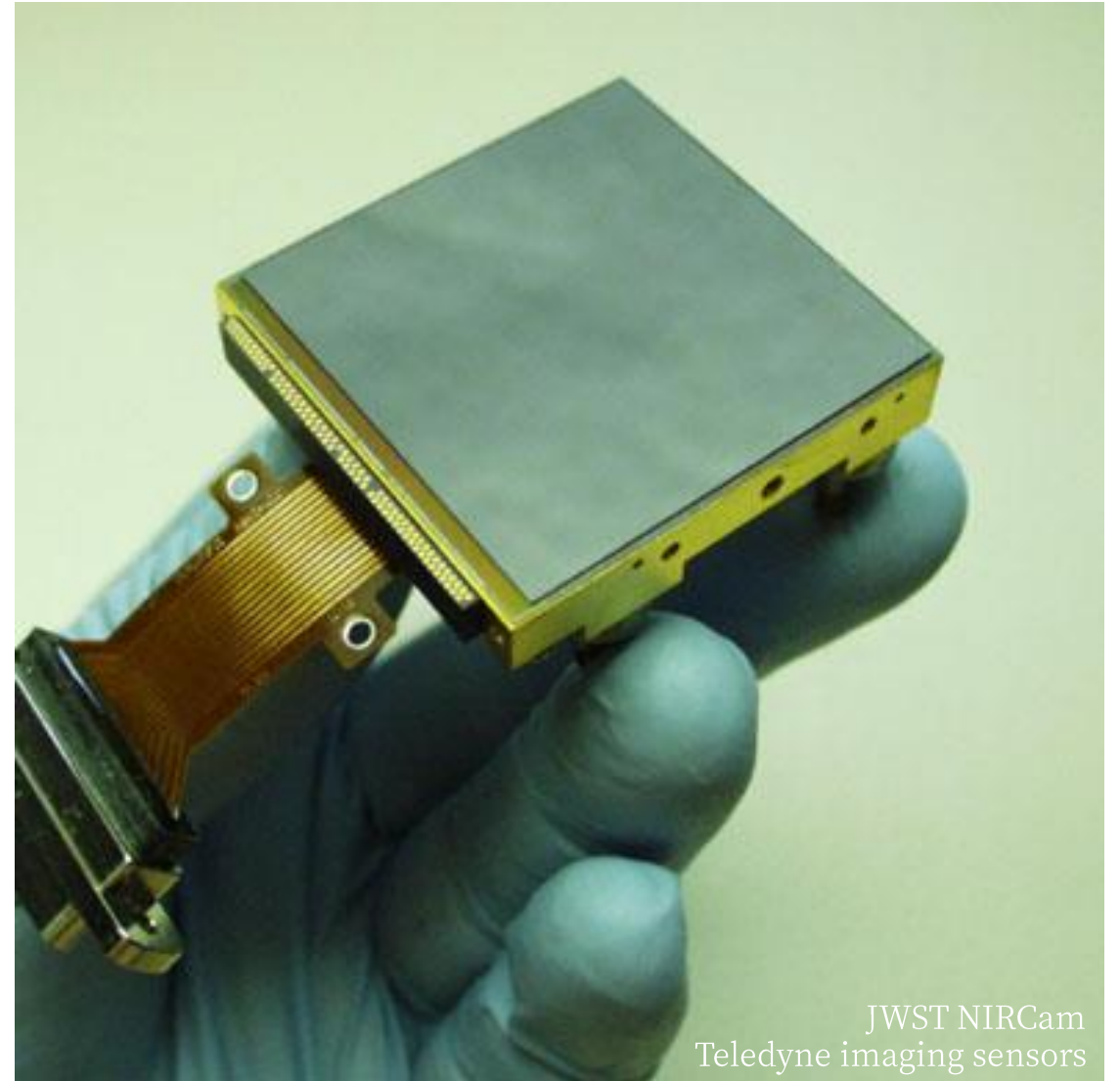
Credit: Stephen Todd (ROE) and Douglas Pierce-Price (JAC)



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： ℓ
 - 像素數量： $n = (L/\ell)^2$

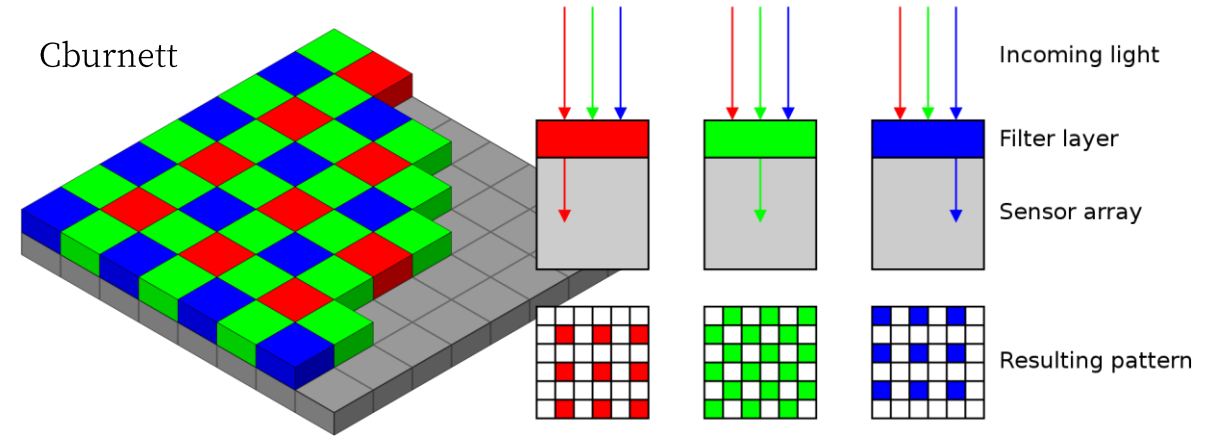


JWST NIRCam
Teledyne imaging sensors

Instruments

儀器系統・改

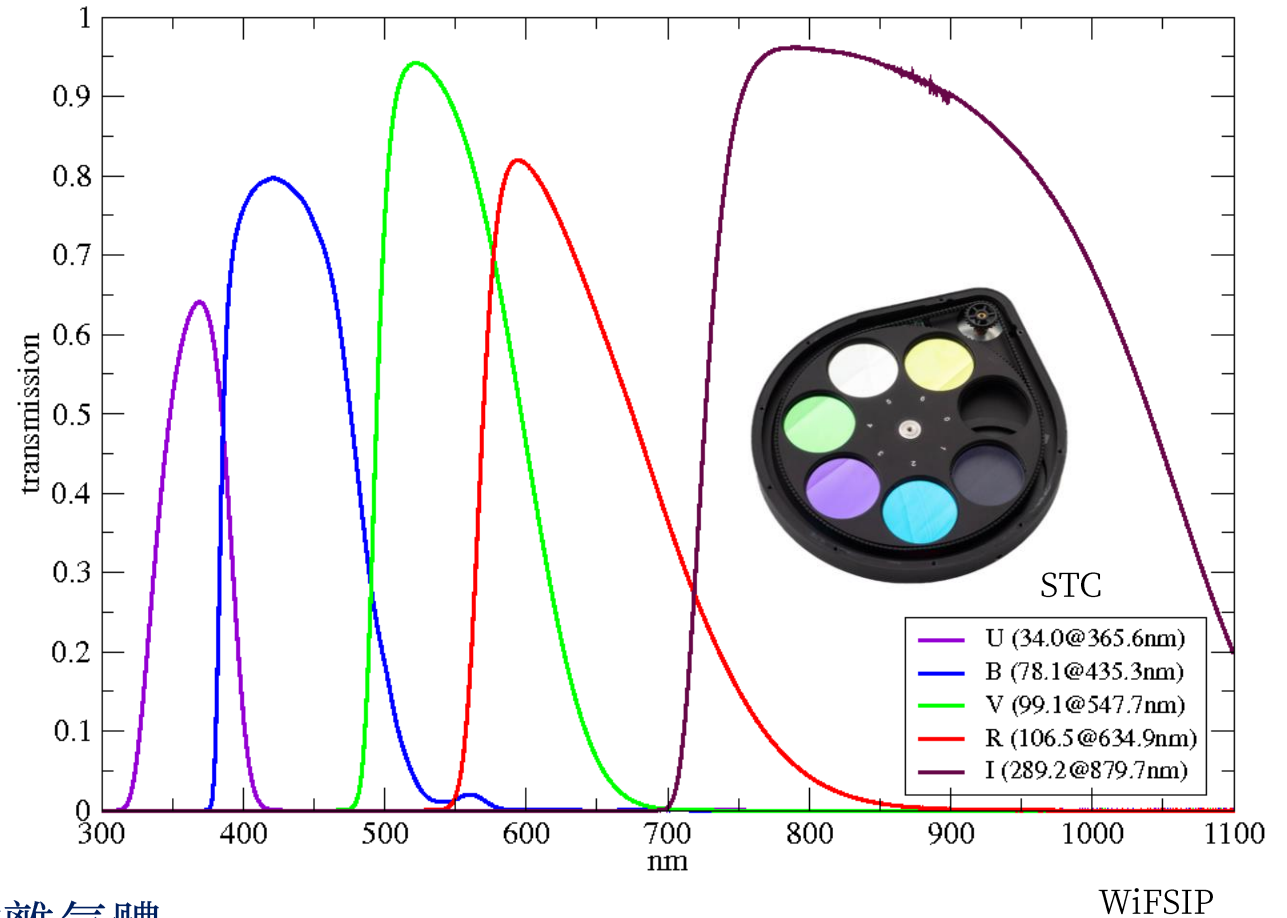
- 影像的顏色怎麼來的？
如果一顆光子就是打出一顆電子，
相機怎麼知道進來的光是什麼顏色？
- DSLR：拜爾濾色鏡 Bayer filter
微型濾鏡陣列 + 事後內插
- CCD：濾鏡系統 Filter systems
分別取得單色影像後進行三色合成



Filters

濾鏡

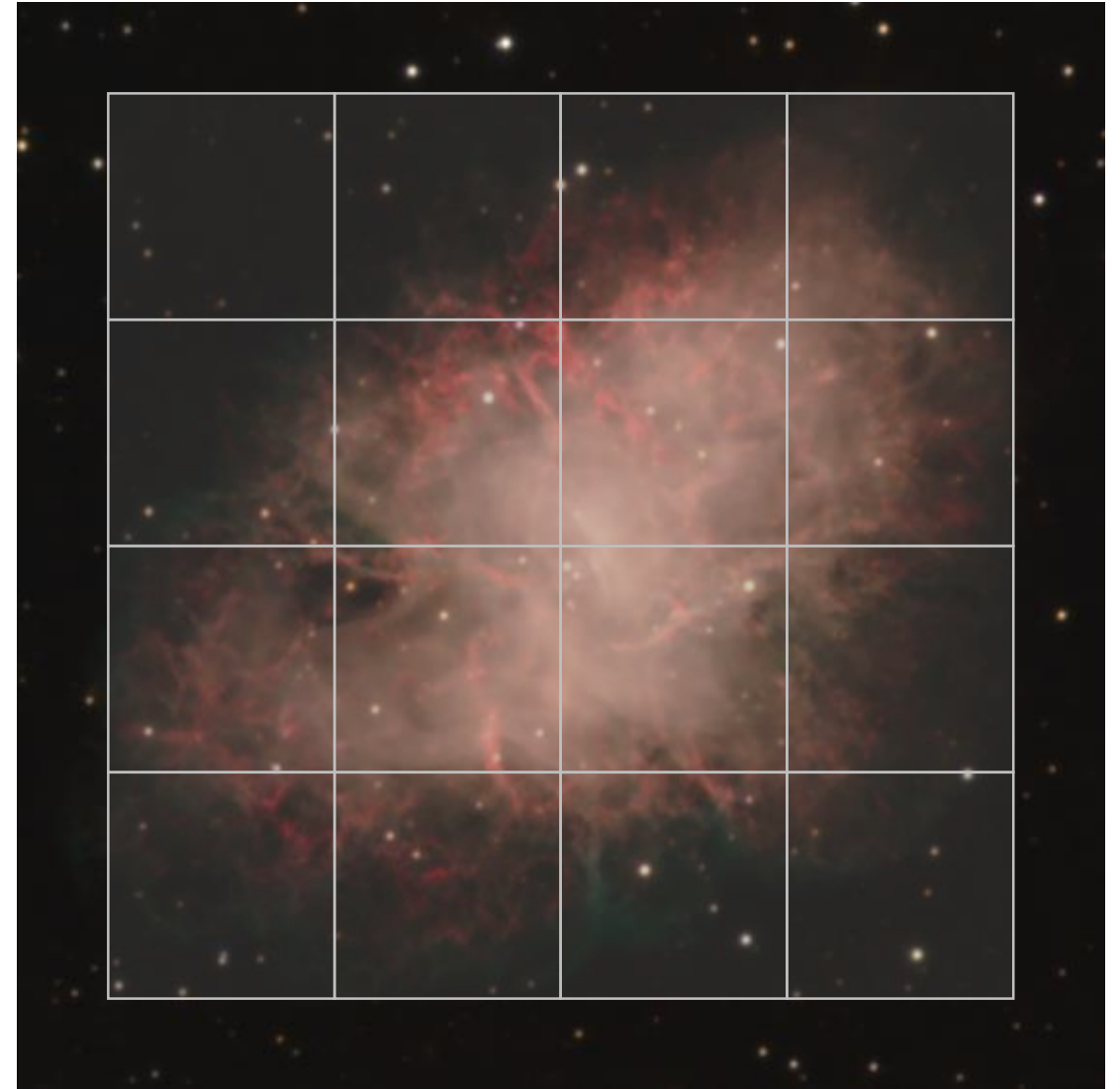
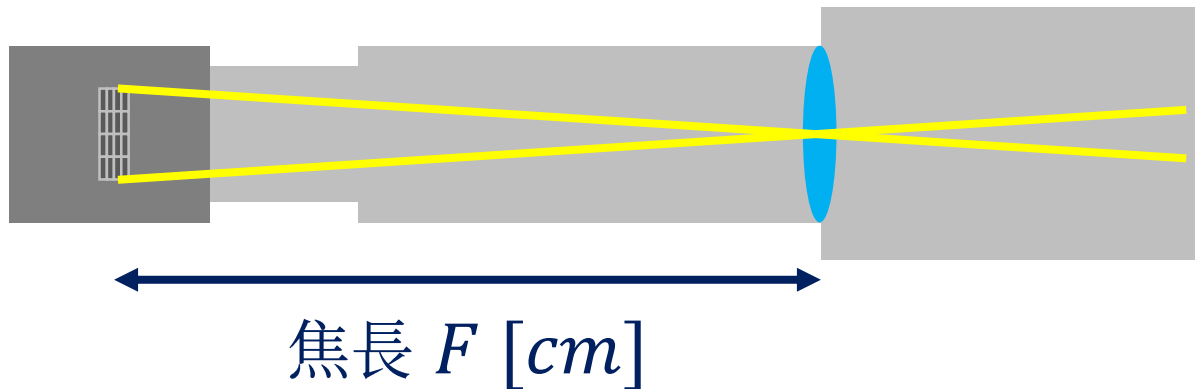
- 只讓特定波長的光線通過的材料
- 安裝於相機前，通常以濾鏡盤切換
- 濾鏡的種類
 - 寬帶濾鏡 Broad Band Filters
E.g. Johnson UBVRI
恆星等發出連續譜的天體。
 - 窄帶濾鏡 Narrow Band Filters
E.g. H-alpha, SII, OIII，發射星雲等游離氣體。



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 : ℓ/F

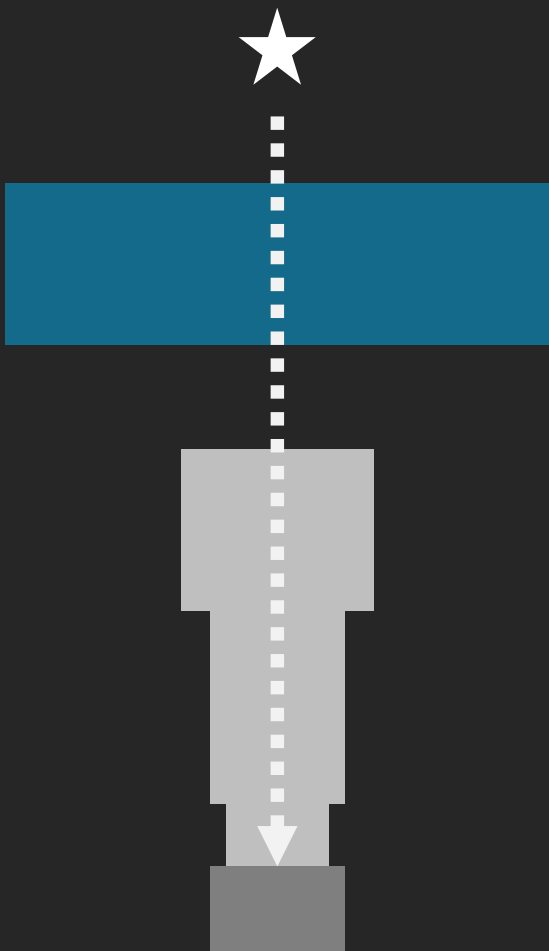


Ch2. Simplified model of telescope/instrument systems

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

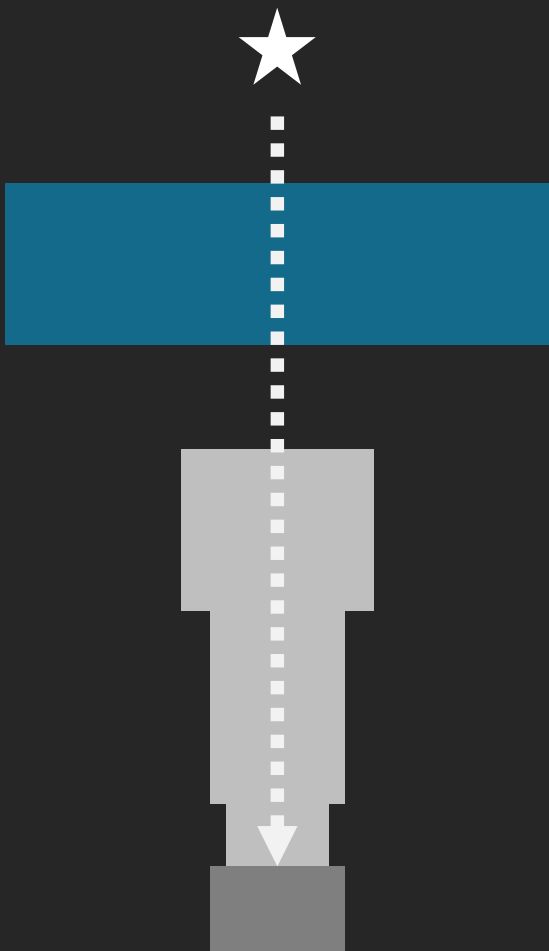
繞射 (PSF) ／近軸離軸
像差／色差／平場

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

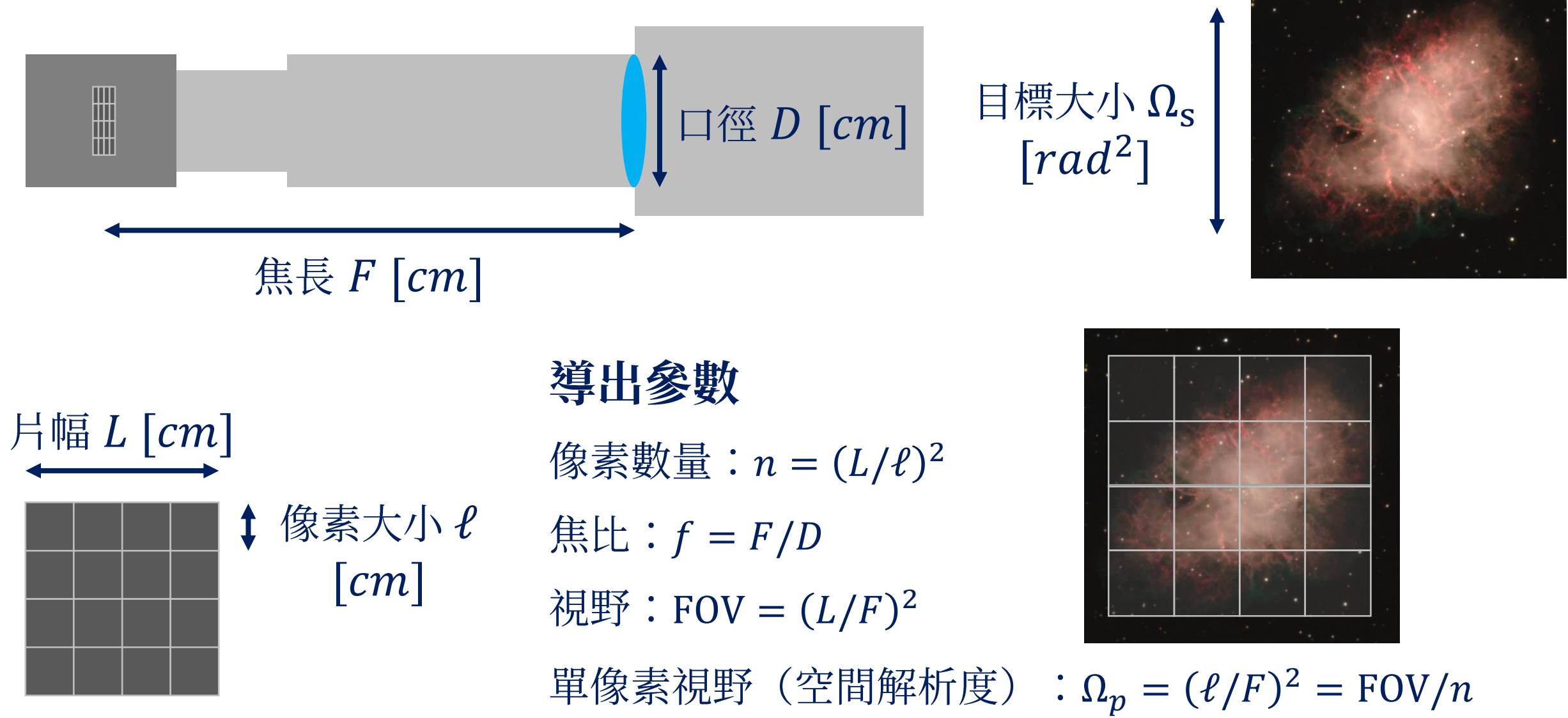
儀器：理想儀器

無讀出雜訊、熱雜訊、偏壓、壞像素

正方形，QE=1

這一台理想望遠鏡
應當由哪些參數描述？

Credit: 許淵明



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

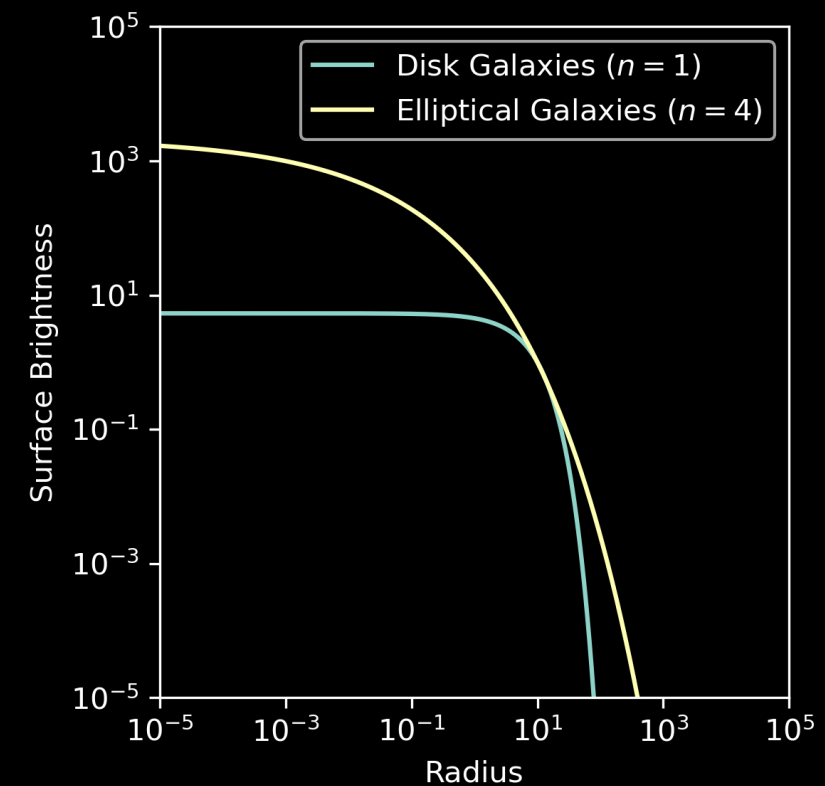
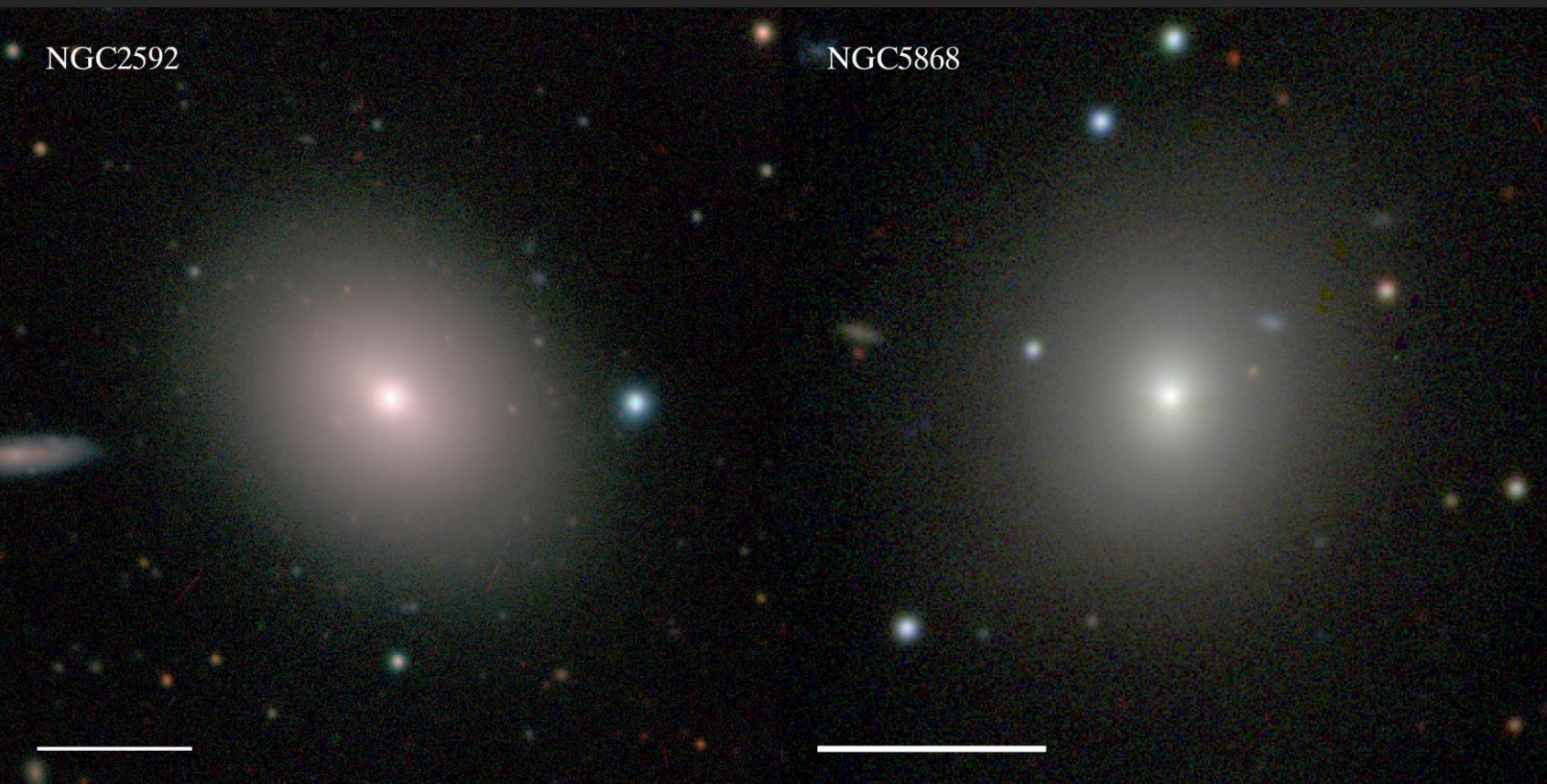


What do you see?

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 (arcsec^2)
 - 形狀 Morphology
- 測量亮度：Photometry
 - 整體亮度 (mag)
 - 表面亮度 (mag/arcsec^2)



Elliptical Galaxy
橢圓星系

Spiral Galaxy
螺旋星系

Surface brightness profile
表面亮度剖面

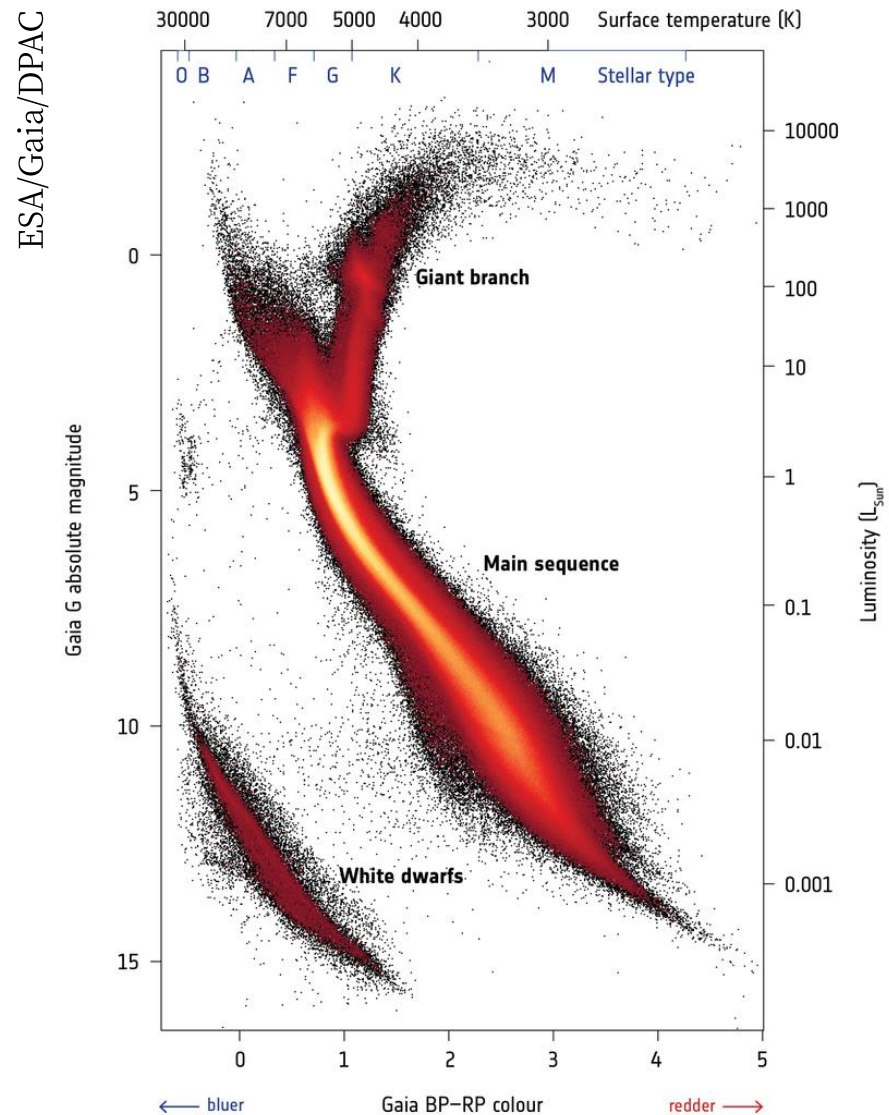


多張不同波段的單色影像

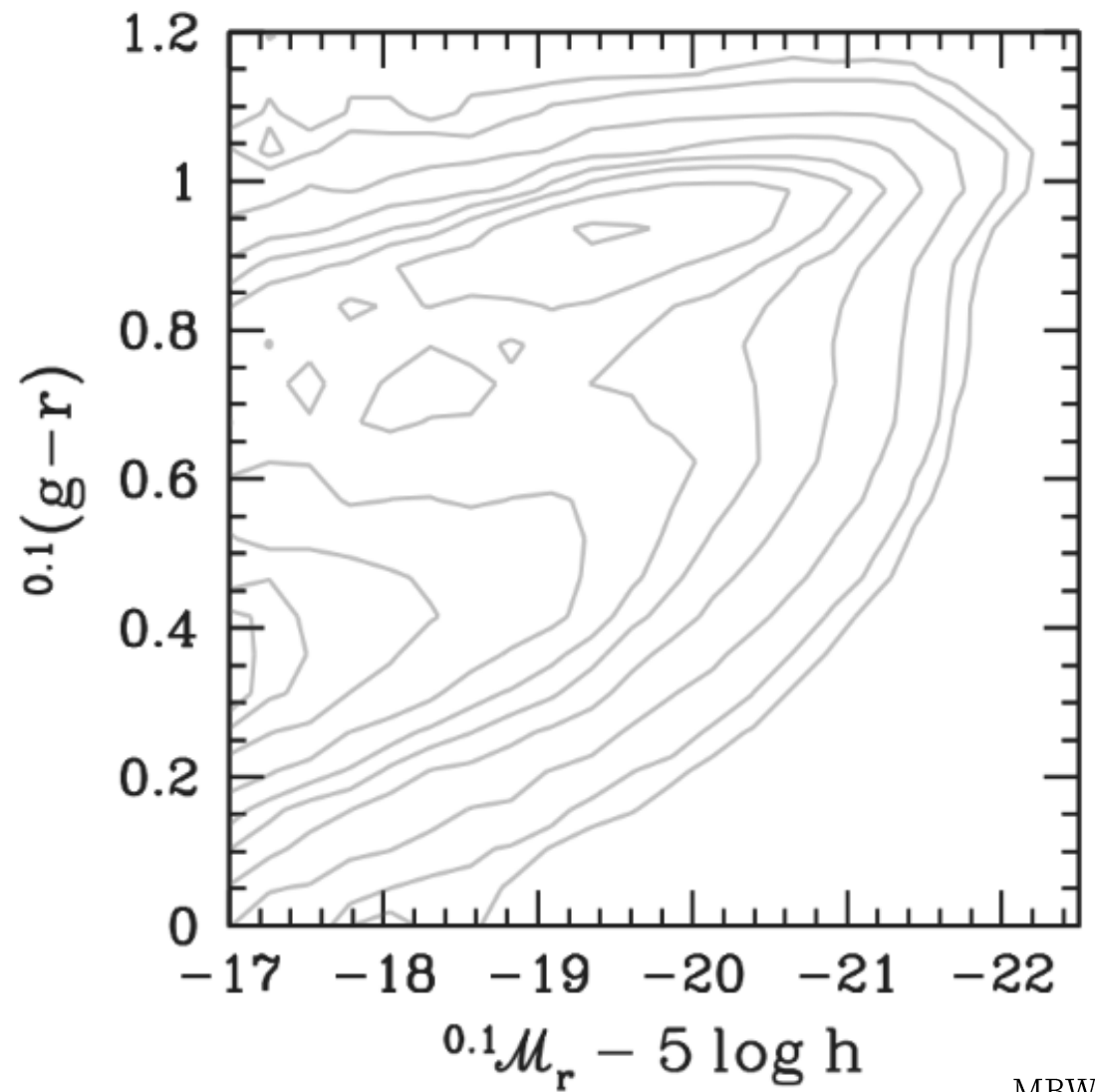
測量顏色：Color

星等的差、亮度的比值

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



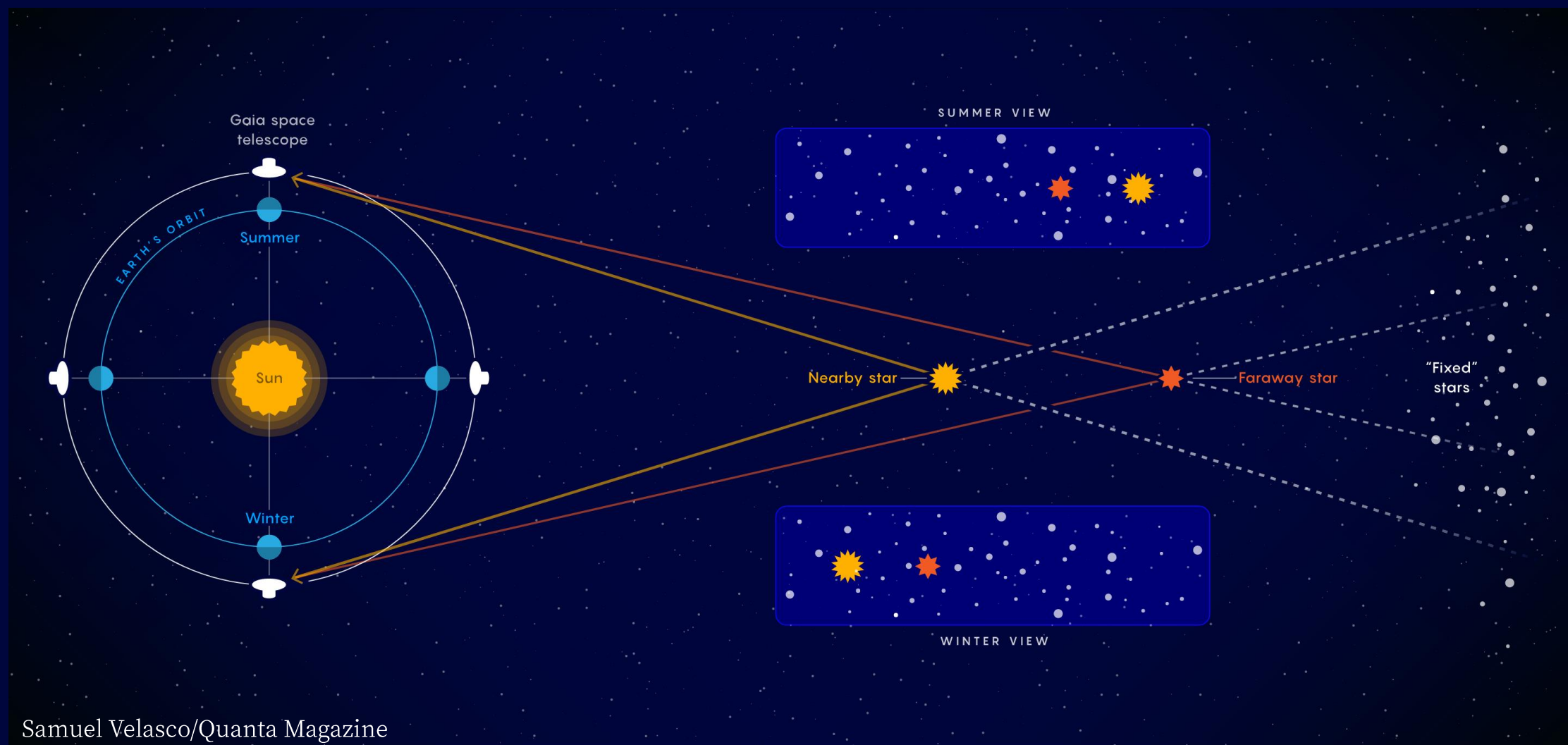
H-R diagram
赫羅圖



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

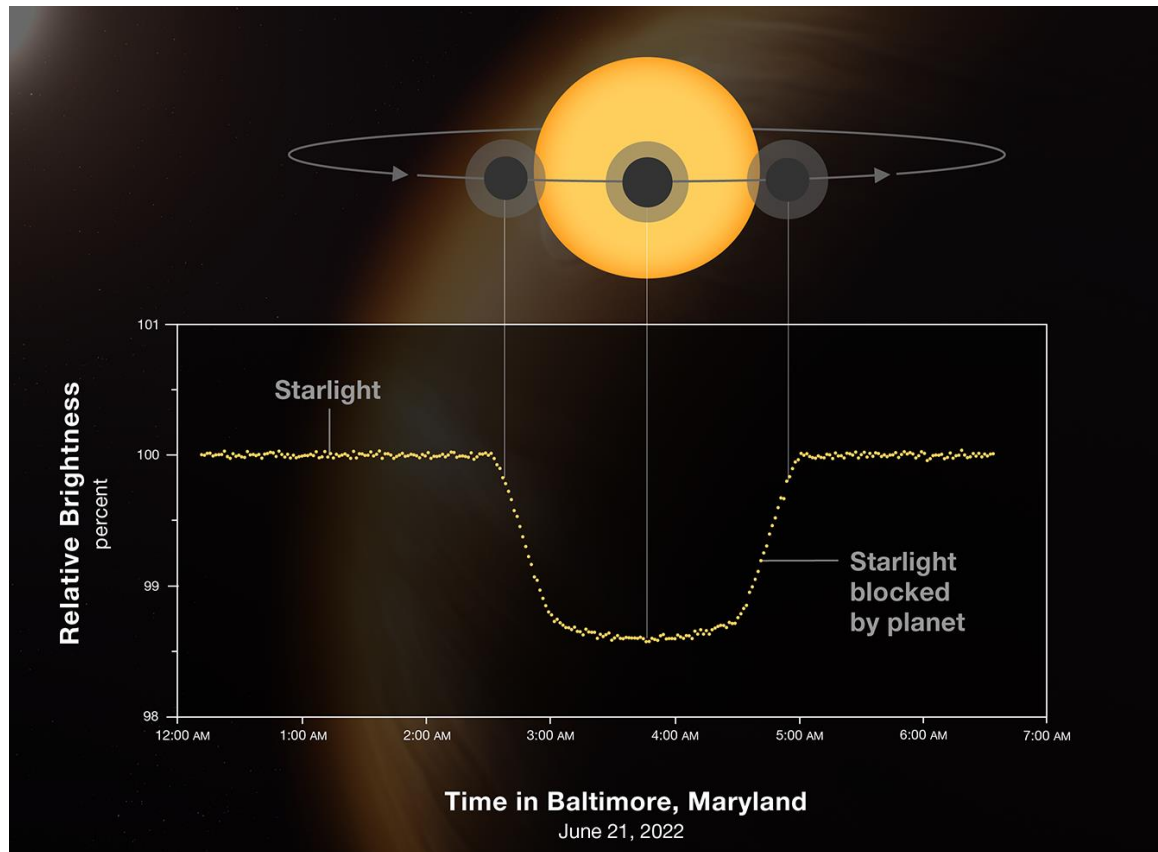
不同時間拍攝的單色影像：

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

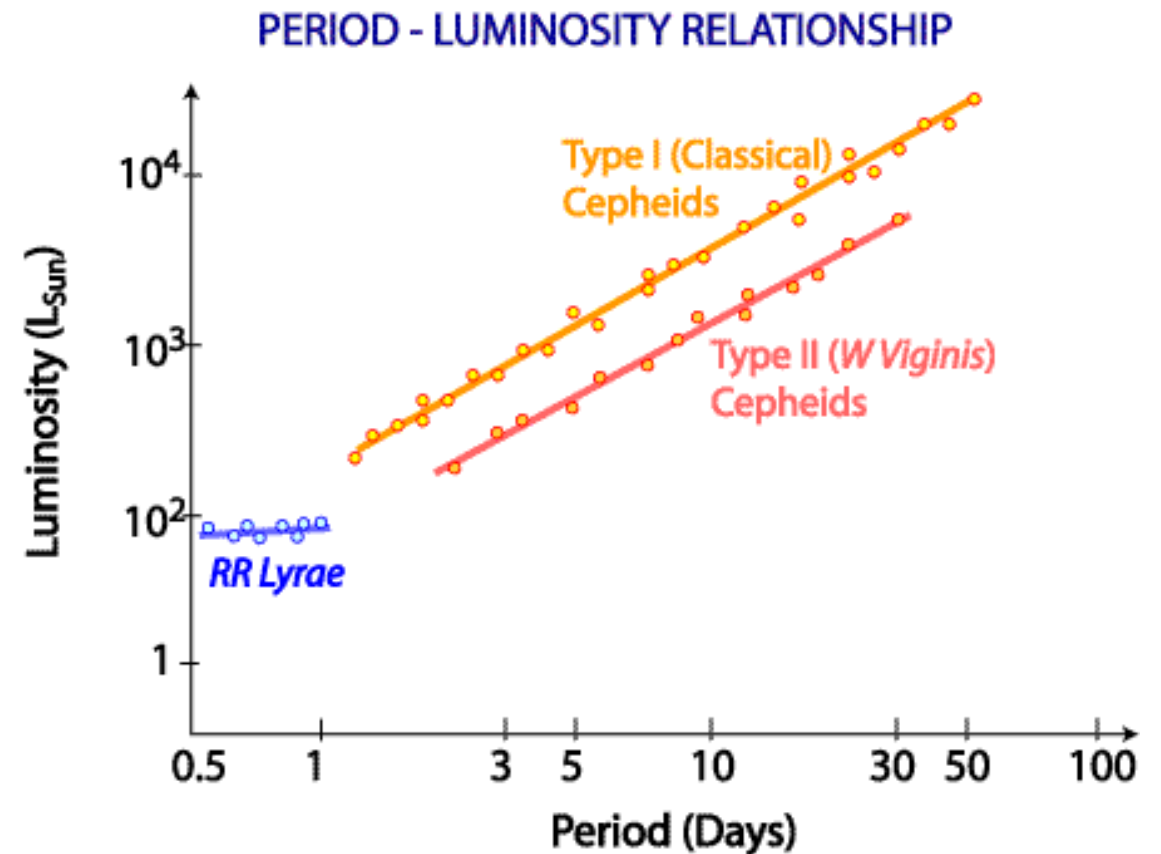


不同時間拍攝的單色影像：

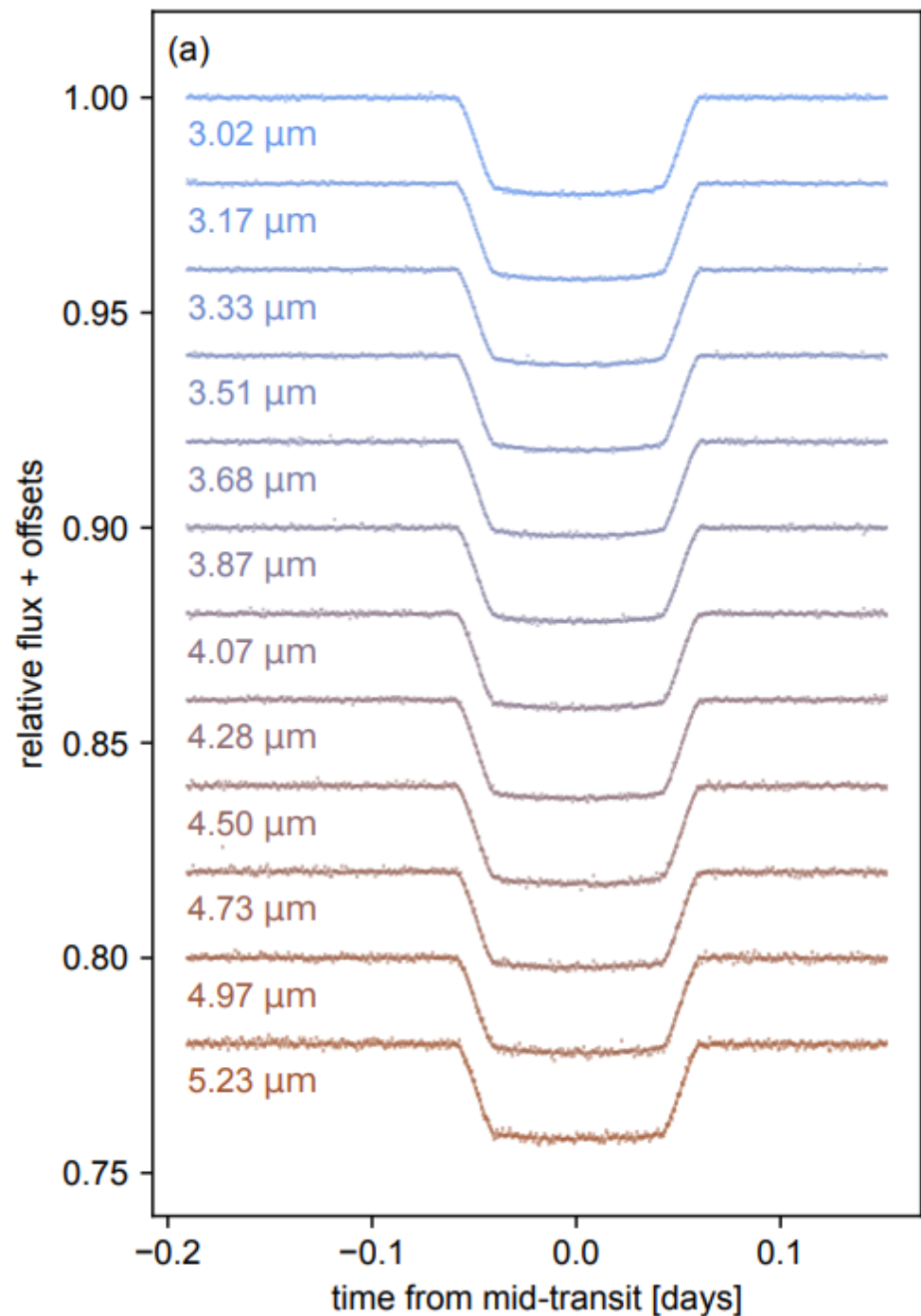
➤ 光變曲線 (Light Curve)：亮度隨時間的變化



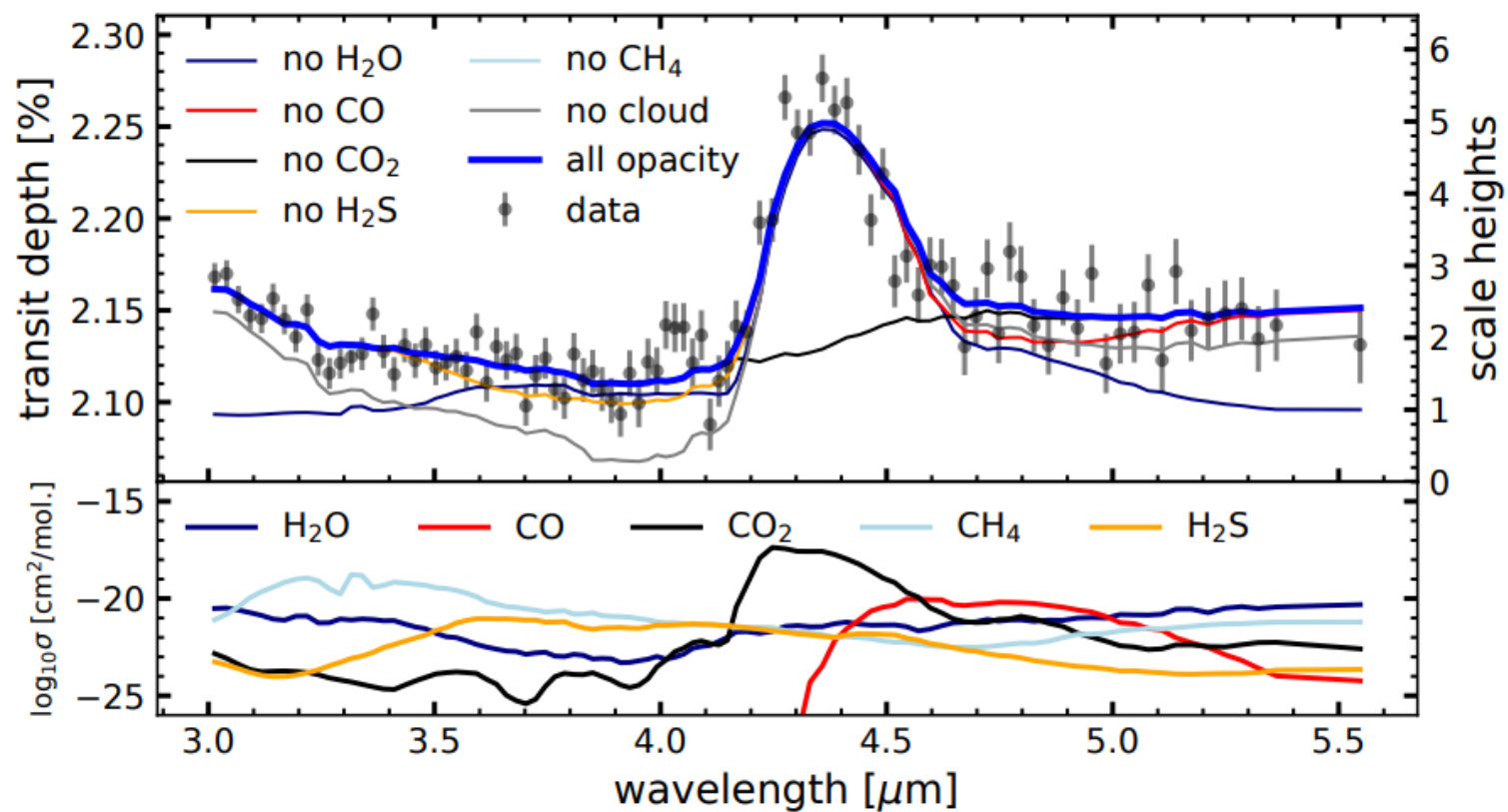
NASA, ESA, CSA, STScI



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。