

2022 臺灣天文聯合觀測網 | 觀測員訓練

# 天文攝影的基本概念

What is astrophotography?

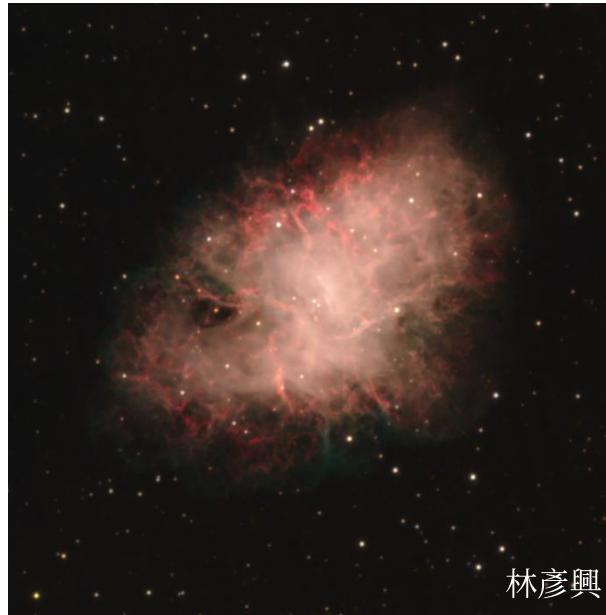
# 什麼是天文攝影？

以科學研究或藝術欣賞為主要目的，紀錄天體資訊的攝影技術



徐安廷

固定攝影



林彥興

深空攝影



NASA, ESA, and A. Simon  
(Goddard Space Flight Center)

行星攝影

Basic workflow

# 天文攝影的基本流程

下一堂課

事前規劃

儀器架設

實際拍攝

處理後製

目標、儀器選擇

與儀器奮戰

順利：思考人生

偏壓平場暗電流

地點、天氣狀況

不順利：戰儀器

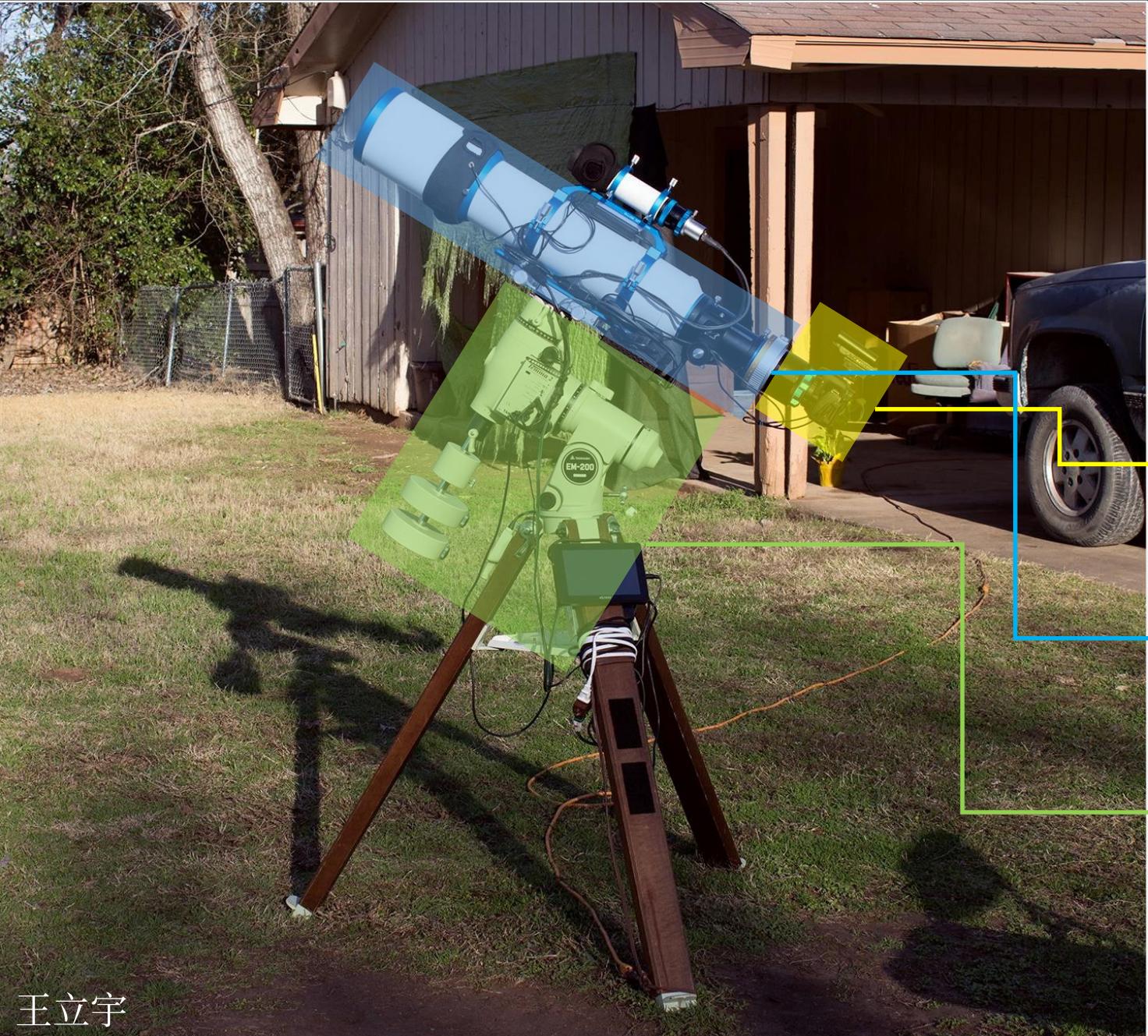
曲線擴張色平衡

這次課程的目標：這三點的原則

銳利模糊去雜訊

.....

# 天文攝影設備



儀器系統 (Instrument)  
接收與紀錄光子

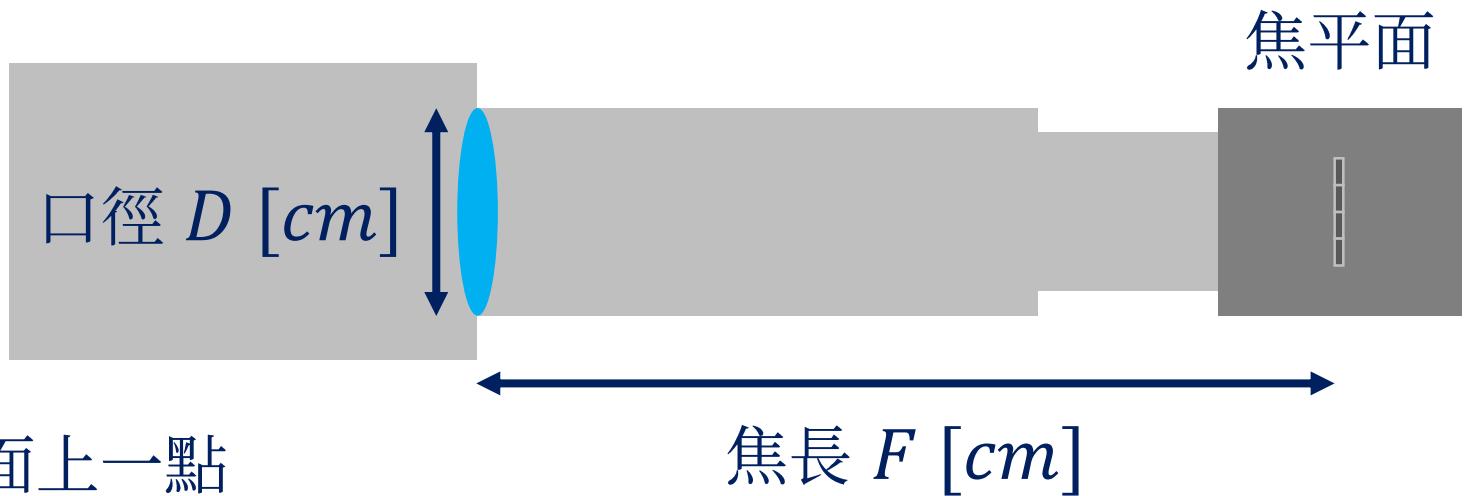
光學系統 (Telescope)  
蒐集並聚焦光子

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。 $f = F/D$



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

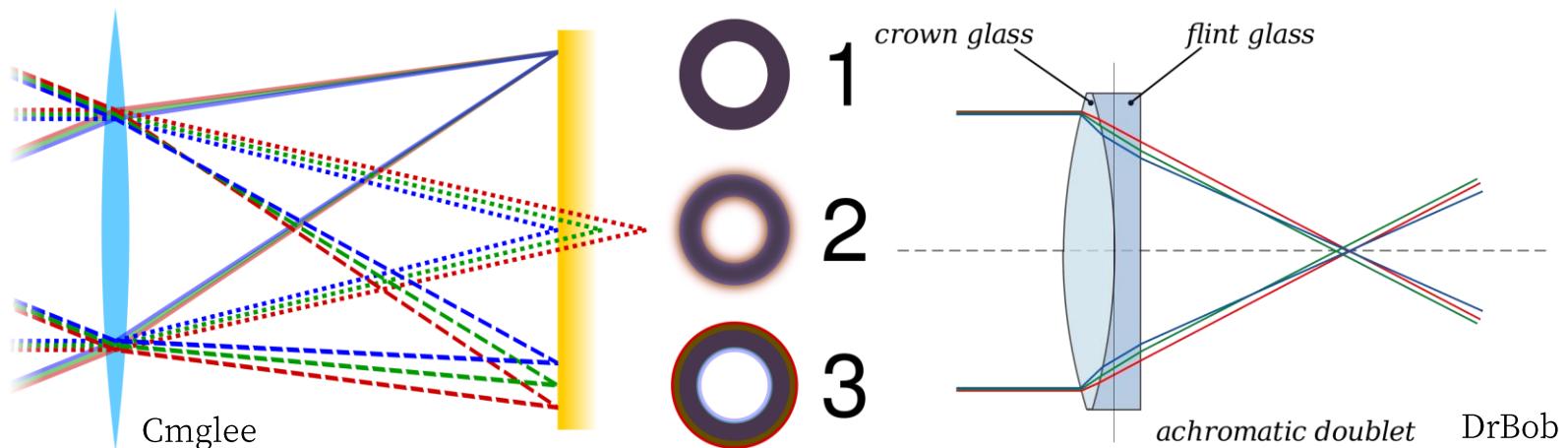


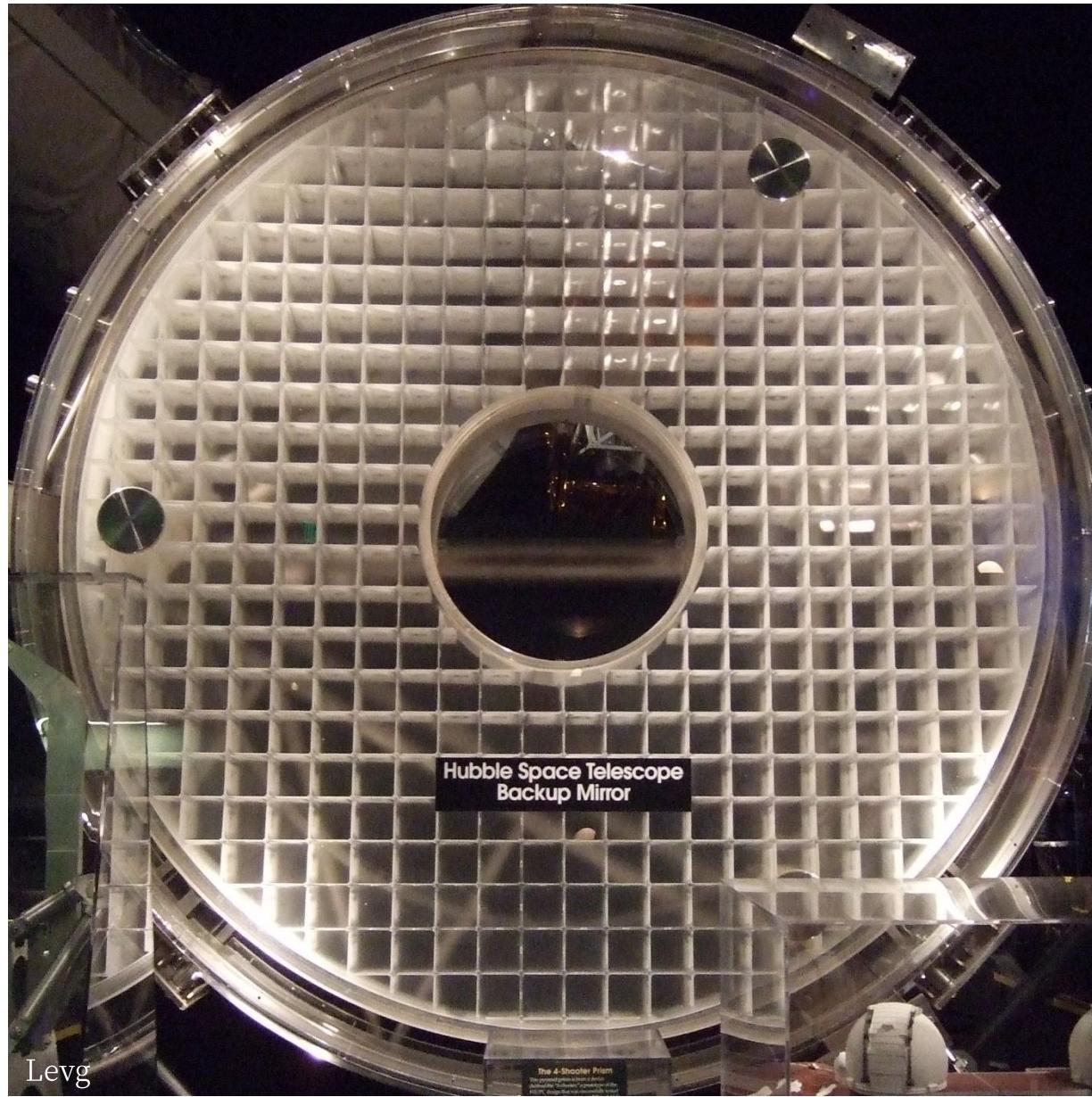
Celestron



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

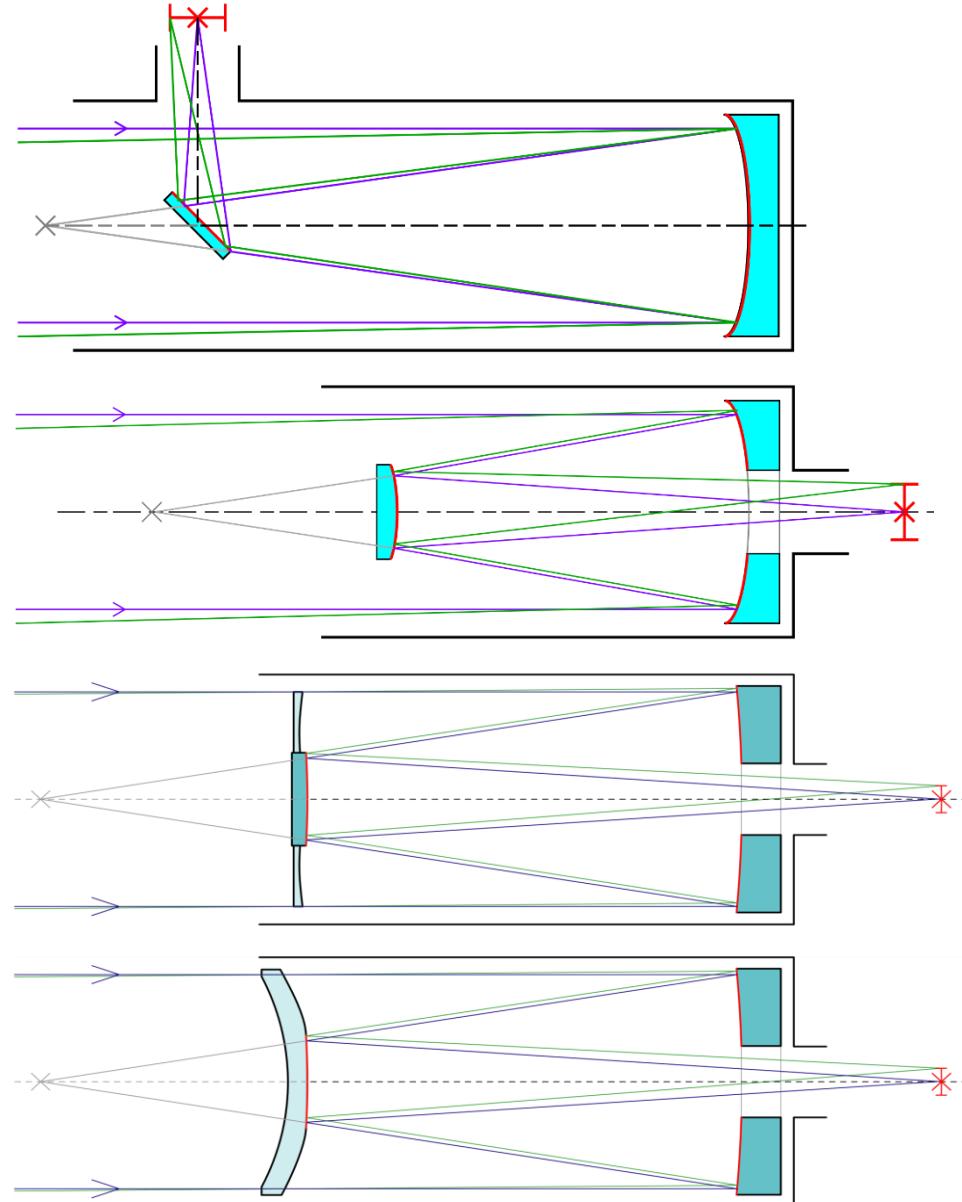


Chris Gunn

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

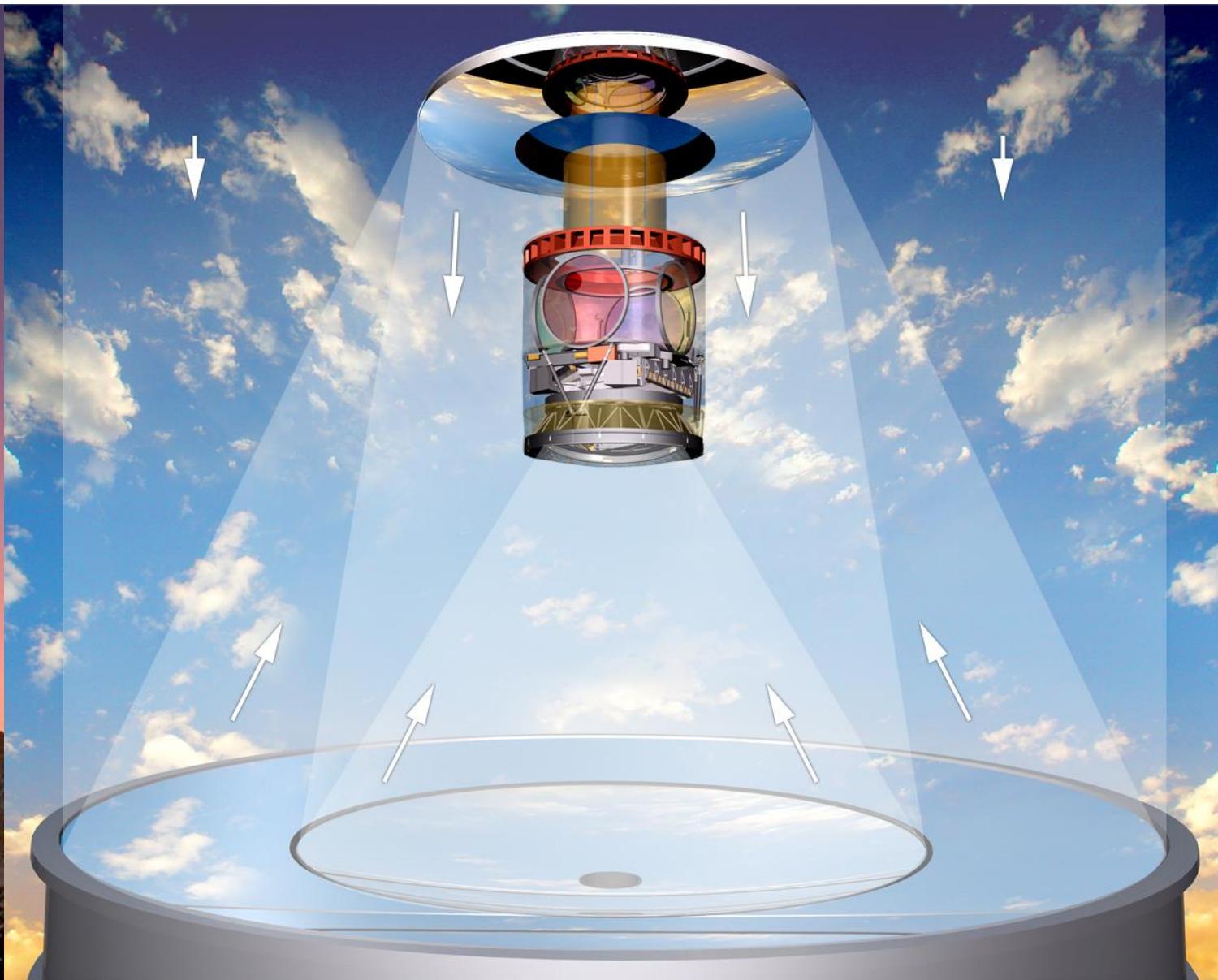


# 望遠鏡：終

- 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

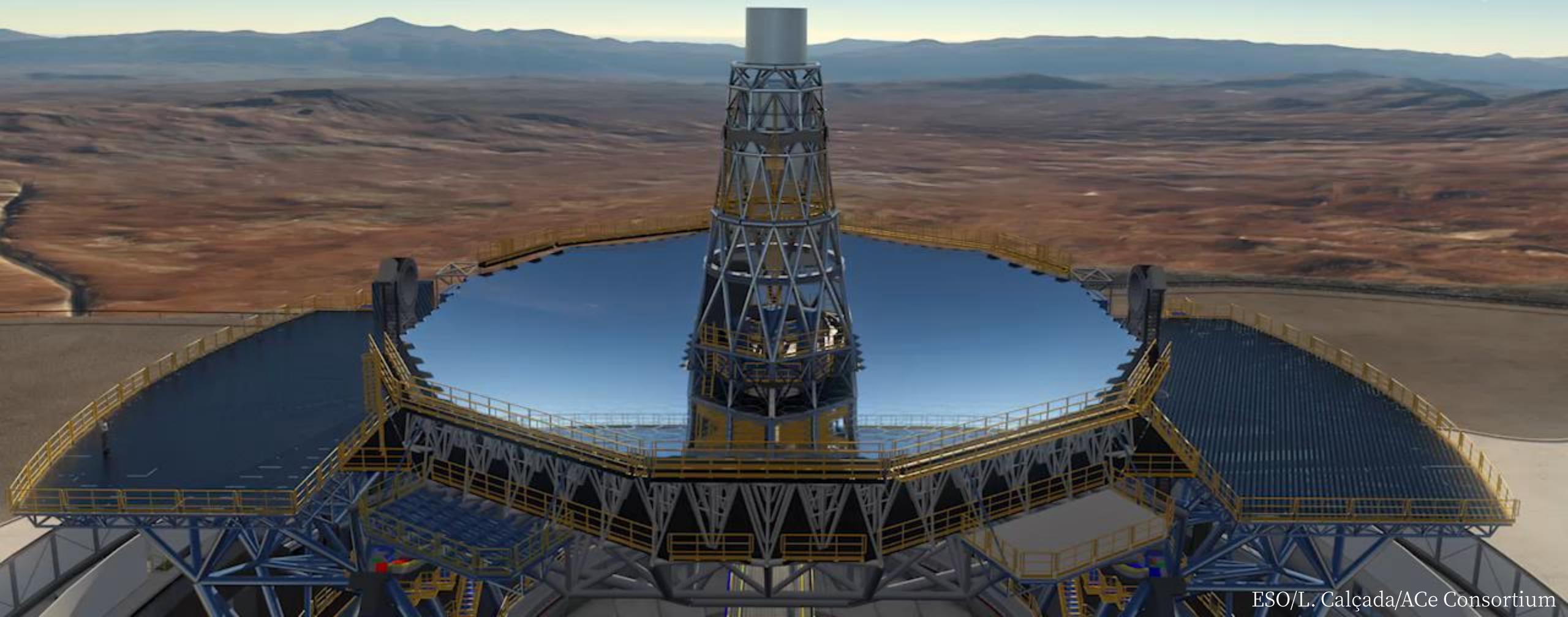
Rubin/LSST

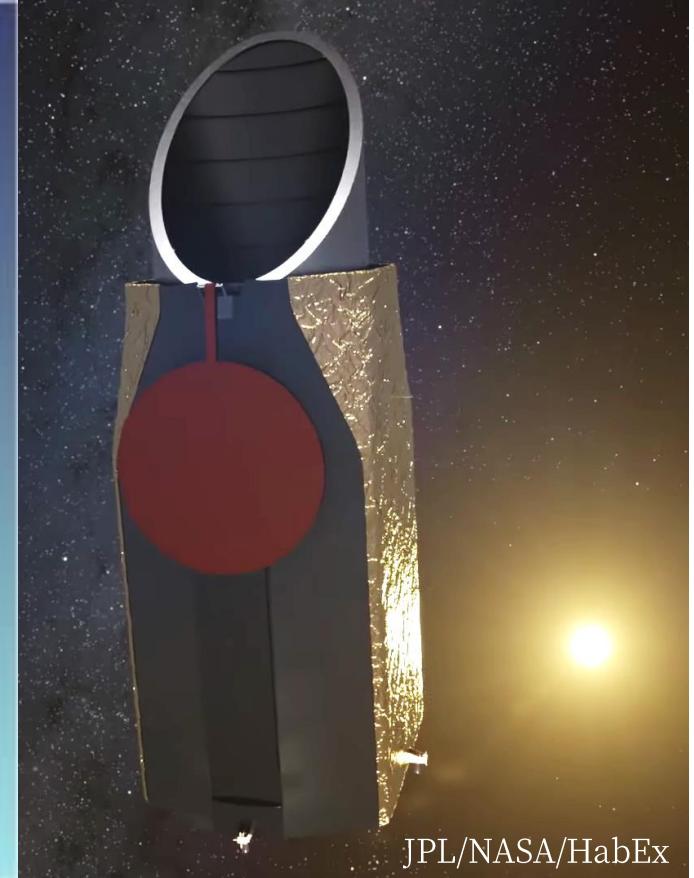
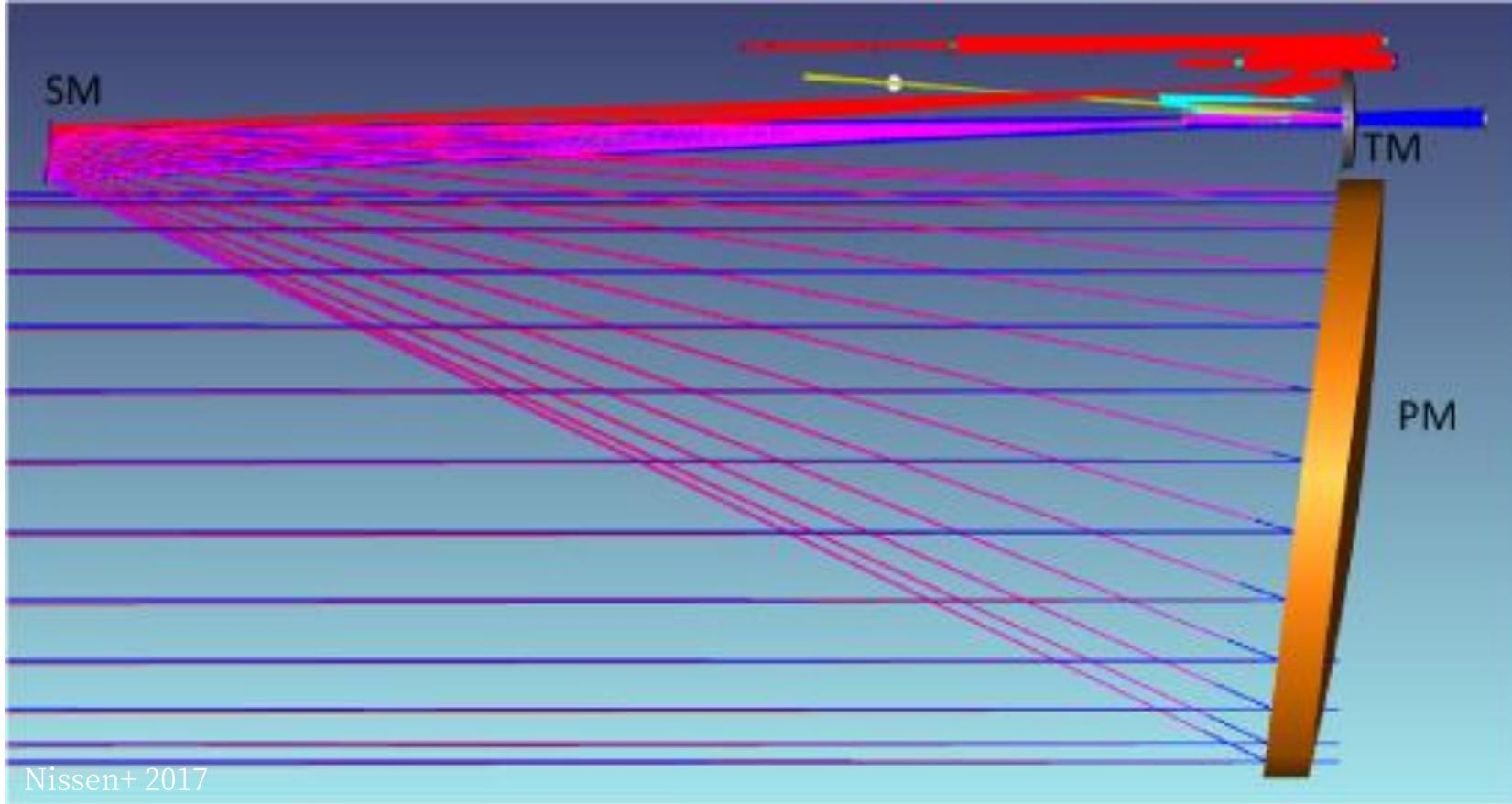
# 魯賓天文台



EELT

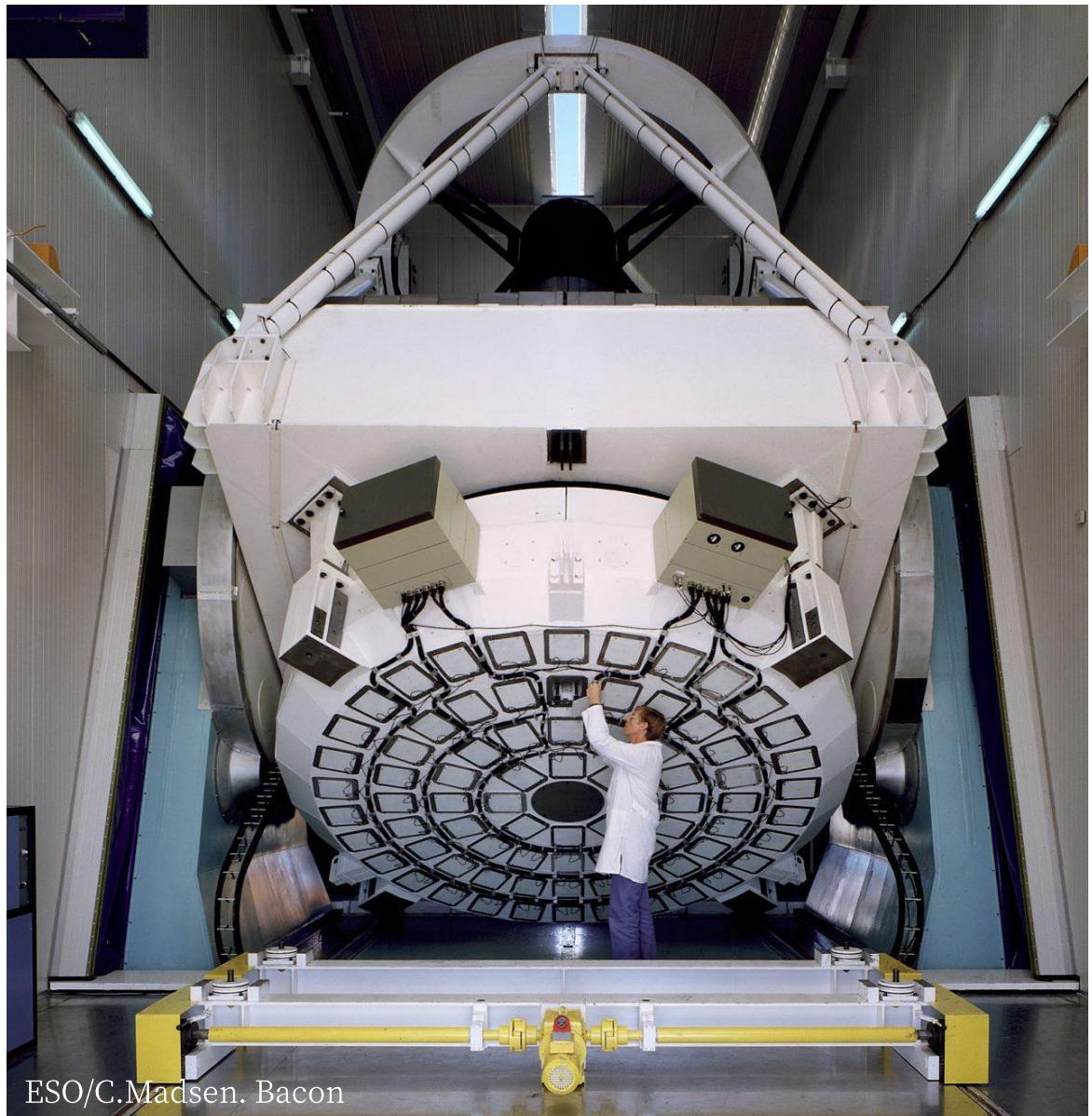
# 歐洲極大望遠鏡





HabEx

離軸光學望遠鏡 Off-axis design

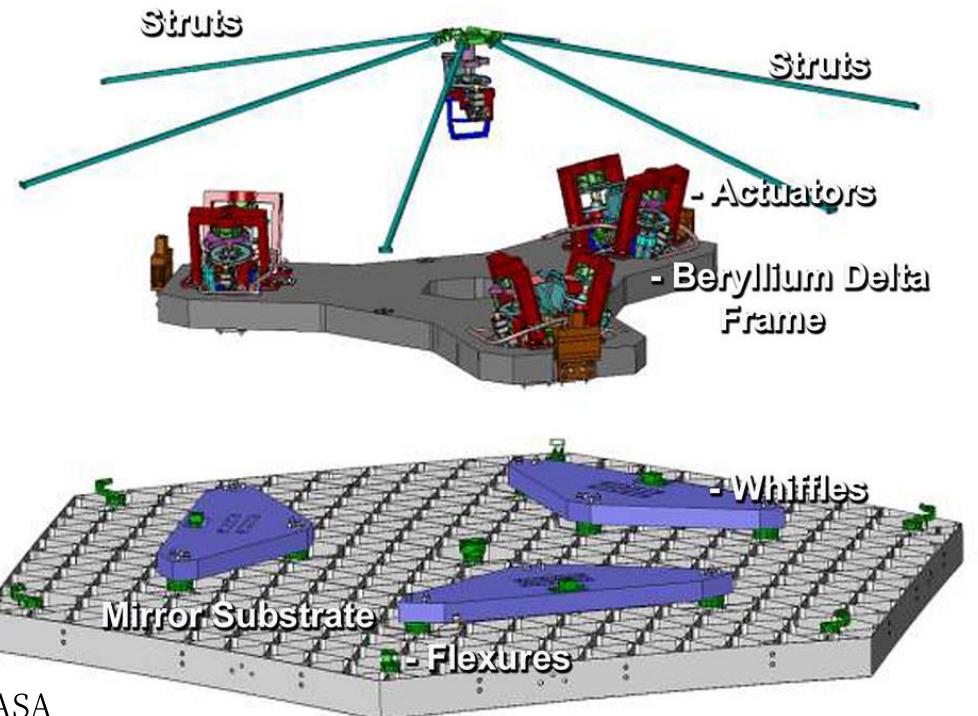


ESO/C.Madsen, Bacon

Active Optics

# 主動光學系統

直接以機械結構控制/微調鏡片形狀

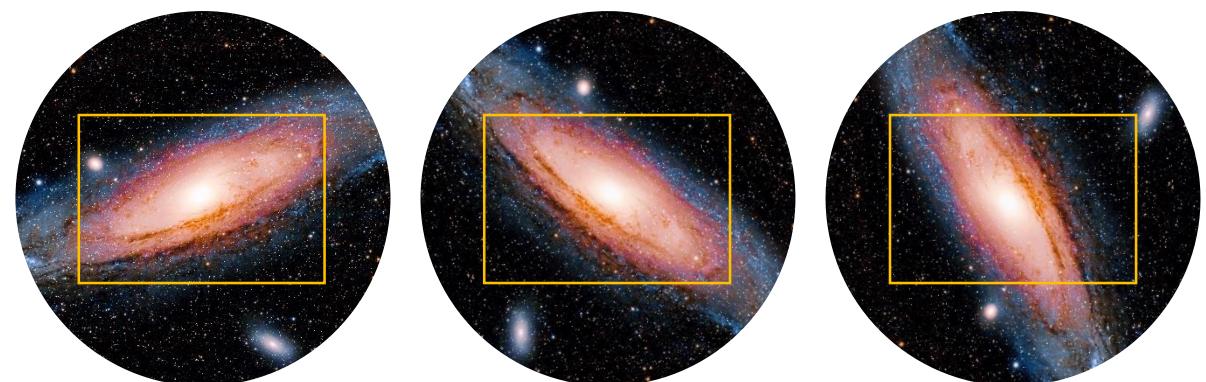


ASU/NASA

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

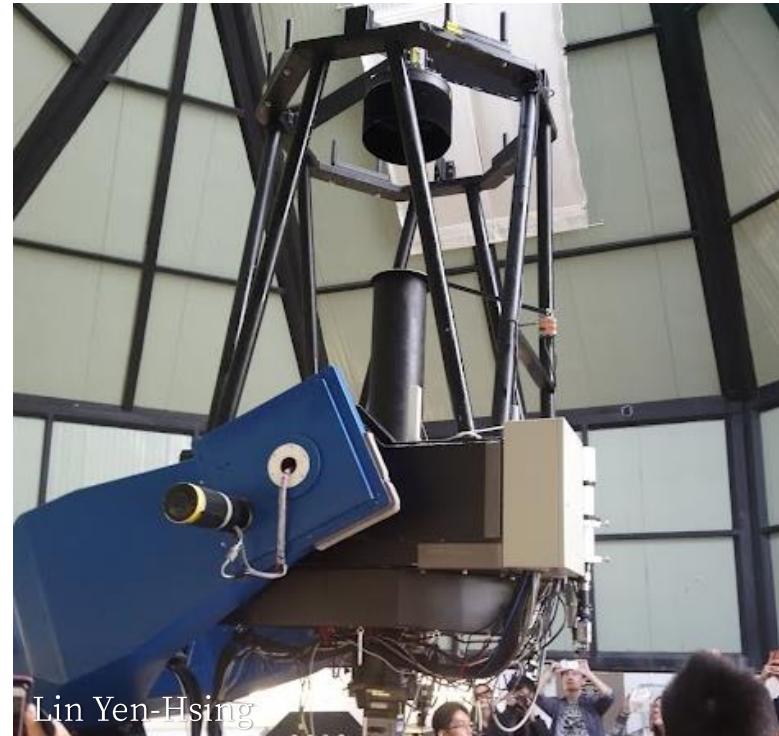


Types of equatorial mounts

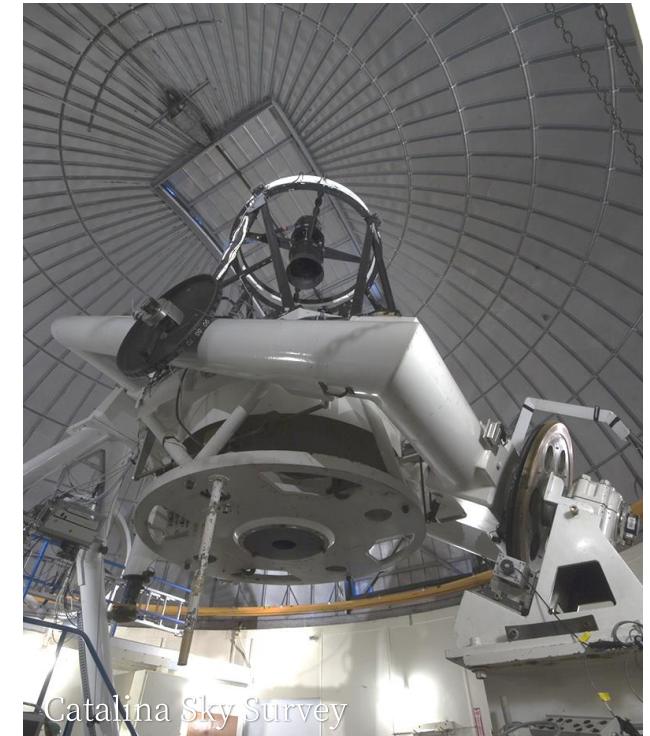
# 赤道儀的種類



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

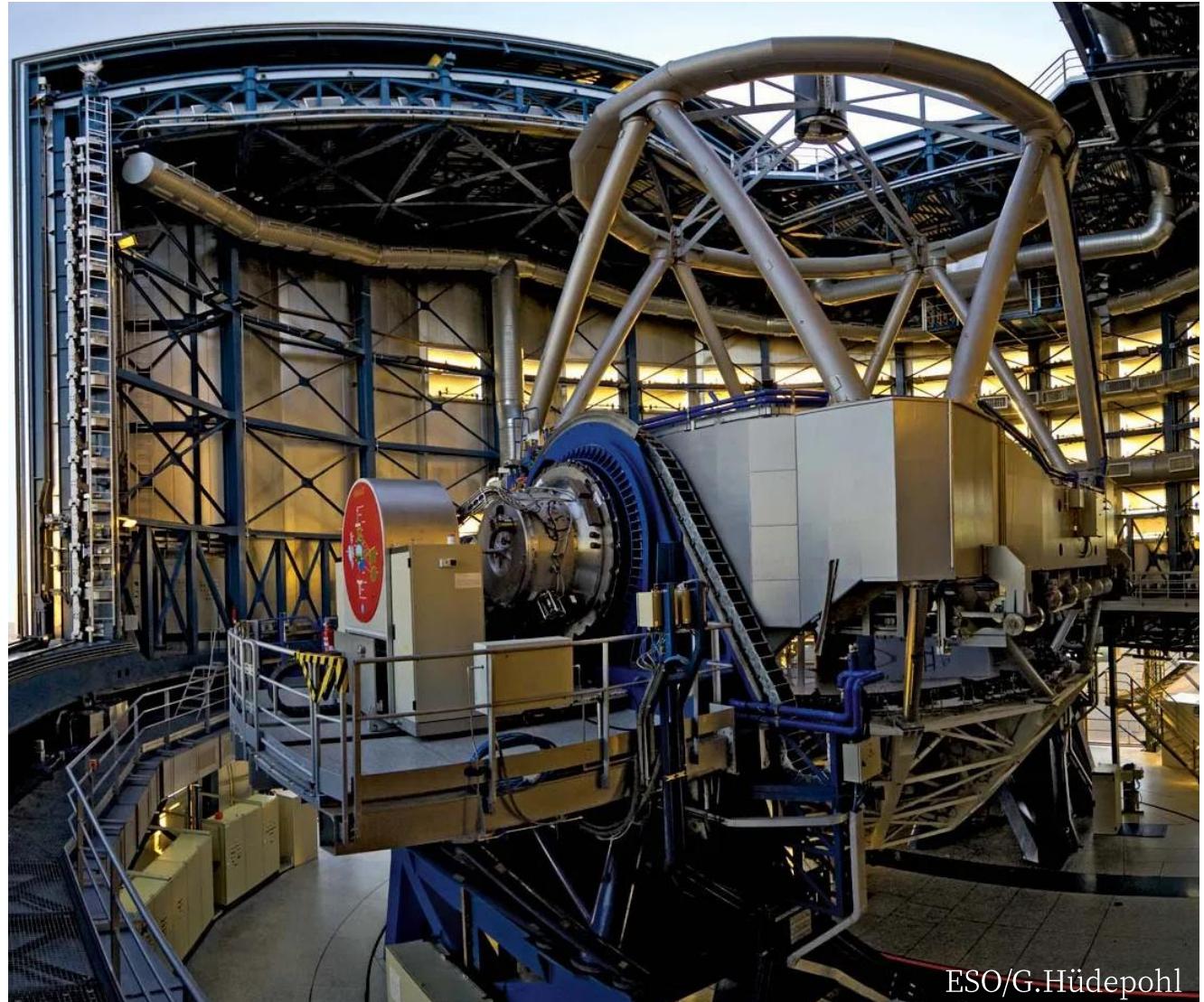
望遠鏡使用的赤道儀系統

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

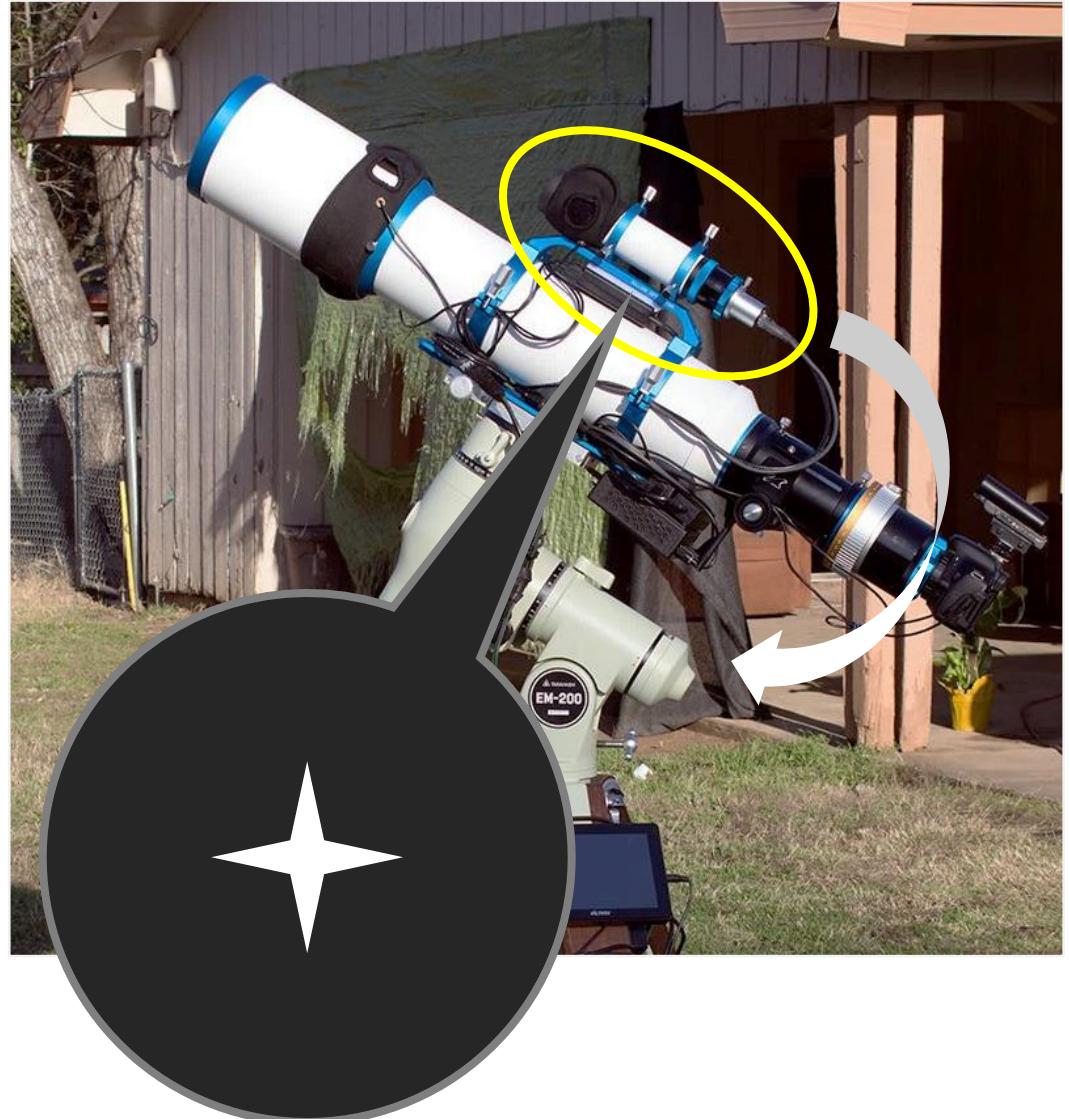


: ESO/G. Hüdepohl

Guiding

# 導星

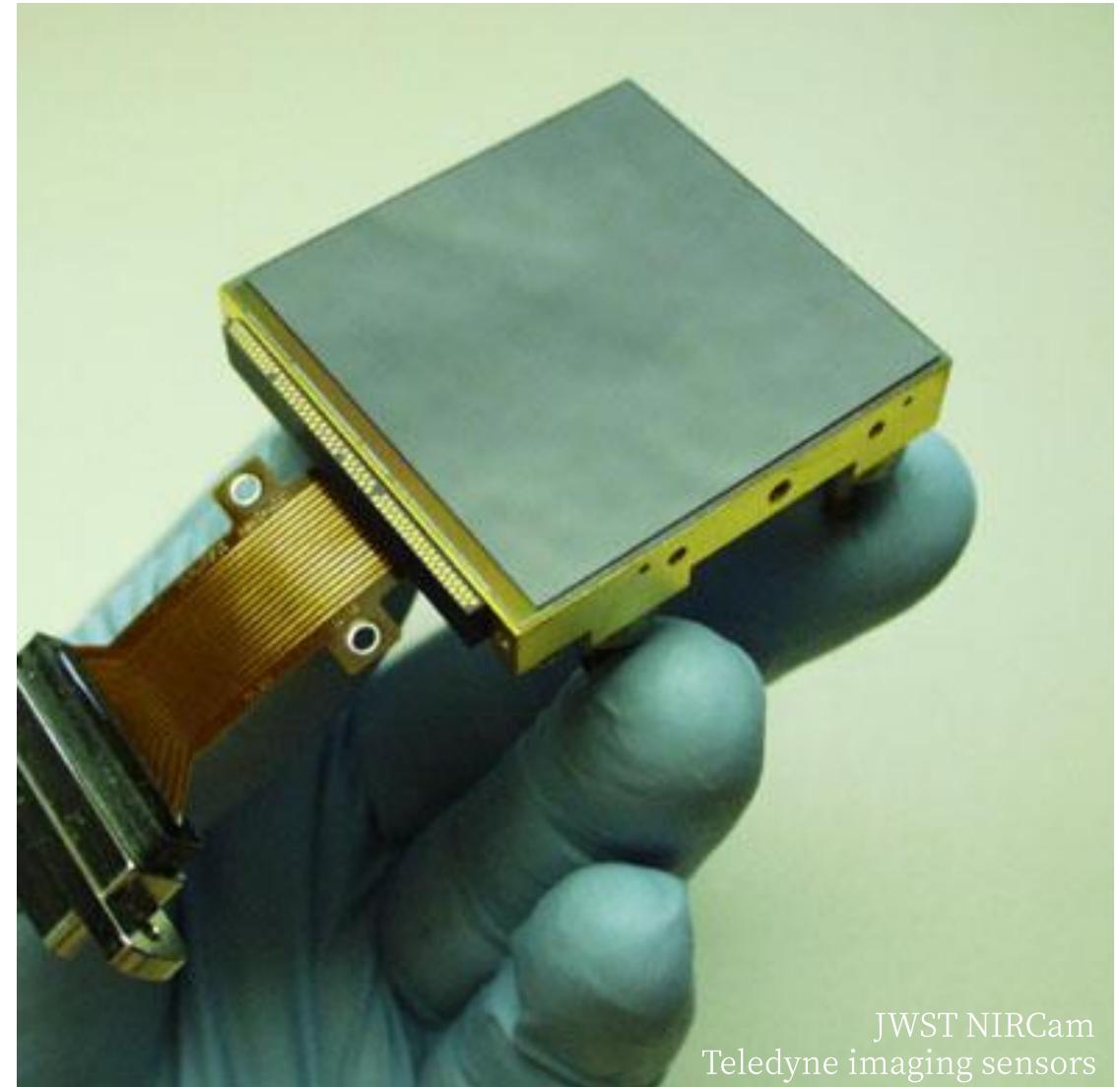
- 無論是赤道或經緯儀，都很難完美追蹤  
影響因素包括：
  - 齒輪、馬達等機械結構的瑕疵
  - 重力形變、大氣折射等
- 怎麼辦呢？
- 為求長時間精確追蹤曝光，需要即時監測星點的位移並修正，即是導星。



## Instruments

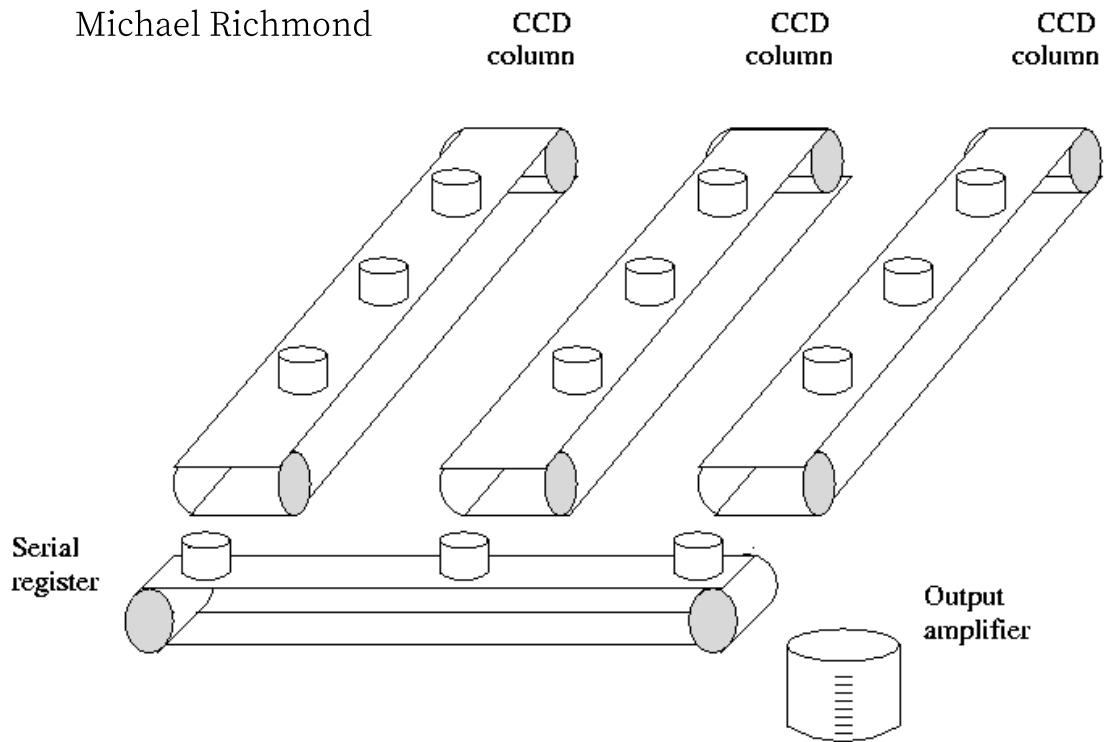
# 儀器系統

- 存在意義：紀錄望遠鏡所收集的光子
- 天文上使用「instrument」這個字的時候常特指相機而非整套設備
- 重要參數：
  - 片幅（感光元件的大小）： $L$
  - 單像素大小： $\ell$
  - 像素數量： $n = (L/\ell)^2$



# 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
- 兩種主要的感光元件類型
  - CCD：古老、高量子效率、低讀出速度
  - CMOS：當今多數相機使用，高讀出速度
- 常用於天文攝影的相機種類
  - 單眼相機（DSLR）
  - 冷卻相機：專為取得高品質影像使用



Sony

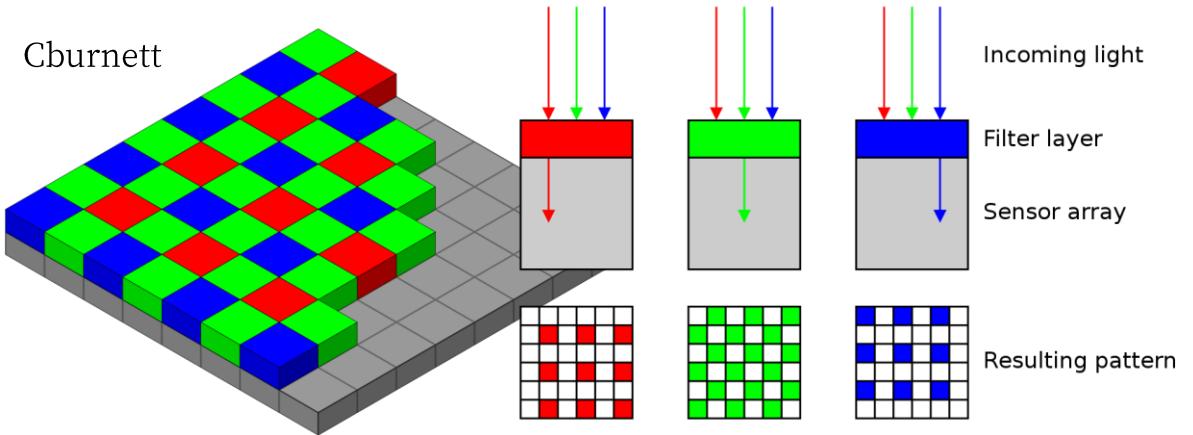


鴻宇光學

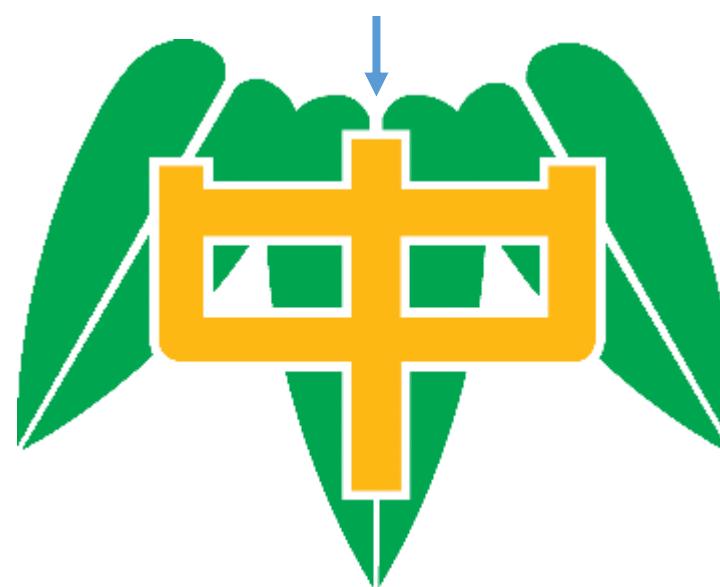
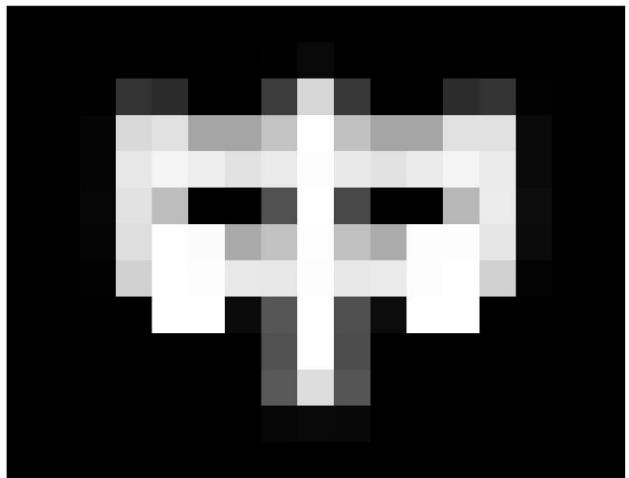
Instruments

# 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.



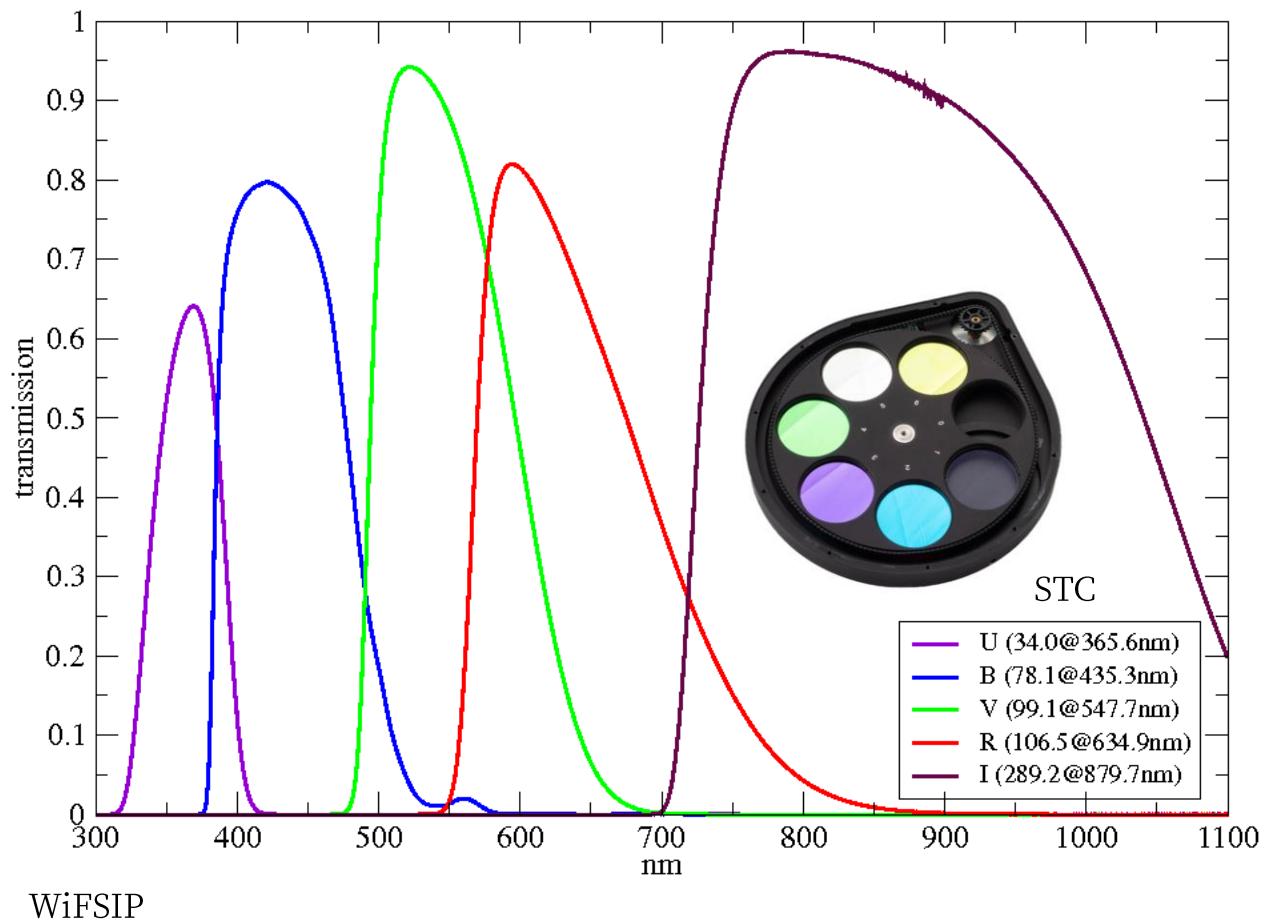
0	0	30	102	83	10	0	0	0	0	6	78	93	23	0	0	
0	8	92	108	78	90	66	64	38	65	62	84	80	109	87	5	0
0	49	112	126	104	105	104	142	192	139	104	105	102	129	113	43	0
5	89	115	192	193	170	169	182	193	181	169	170	191	194	118	85	3
30	107	101	179	195	183	187	192	189	192	187	184	193	183	107	106	27
61	107	89	190	164	27	98	148	199	145	97	31	164	190	91	108	58
86	93	104	195	180	136	169	184	192	183	169	136	179	197	104	94	84
95	93	99	143	173	177	184	193	189	193	184	177	172	150	104	91	94
94	83	21	0	8	8	57	153	199	150	54	8	8	1	28	89	95
43	7	0	0	0	0	18	144	201	140	16	0	0	0	0	12	51
0	0	0	0	0	0	0	119	199	115	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	43	104	40	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	6	56	5	0	0	0	0	0	0	0

影像的本質就是一個數字的陣列

## Filters

# 濾鏡

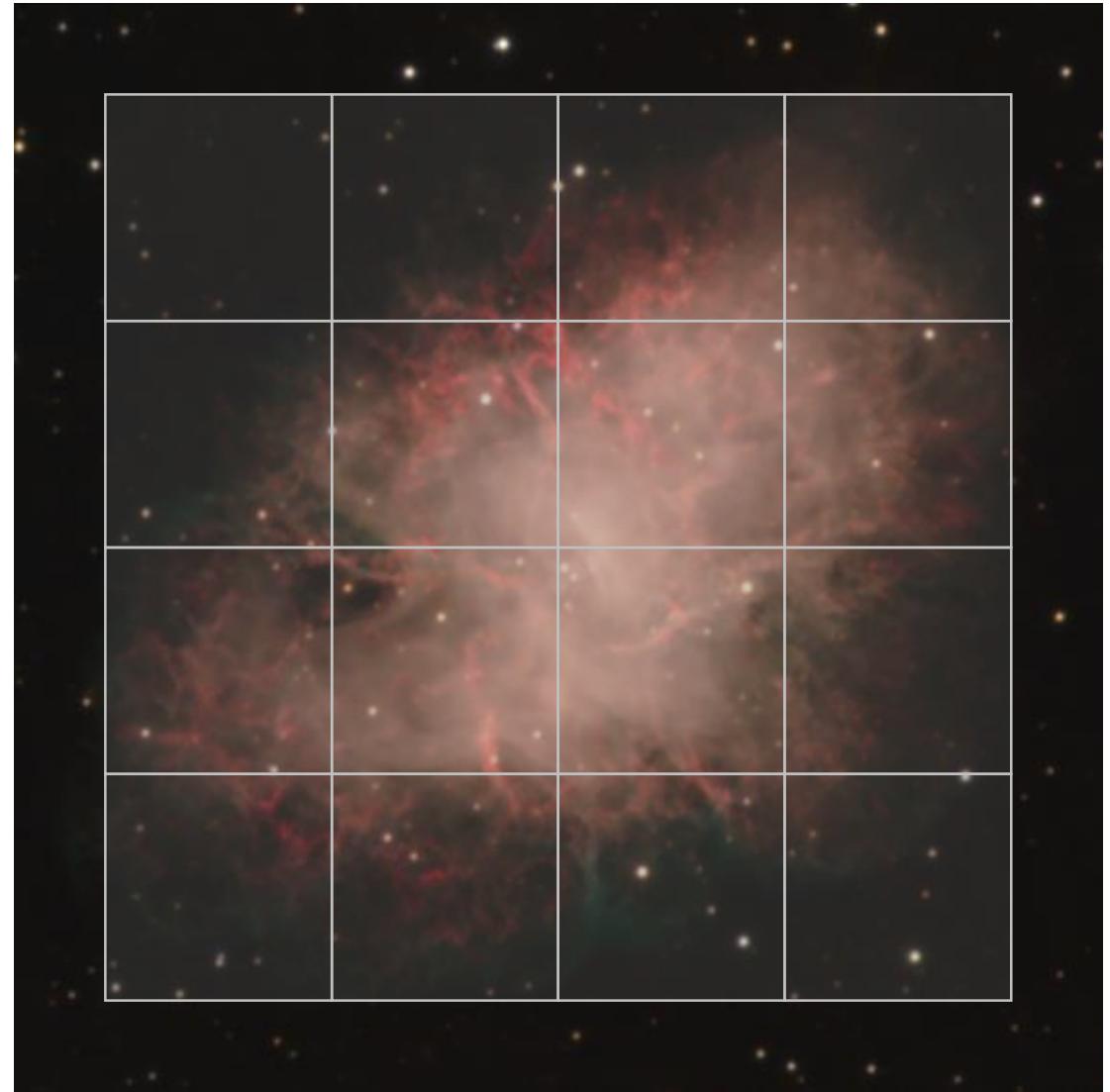
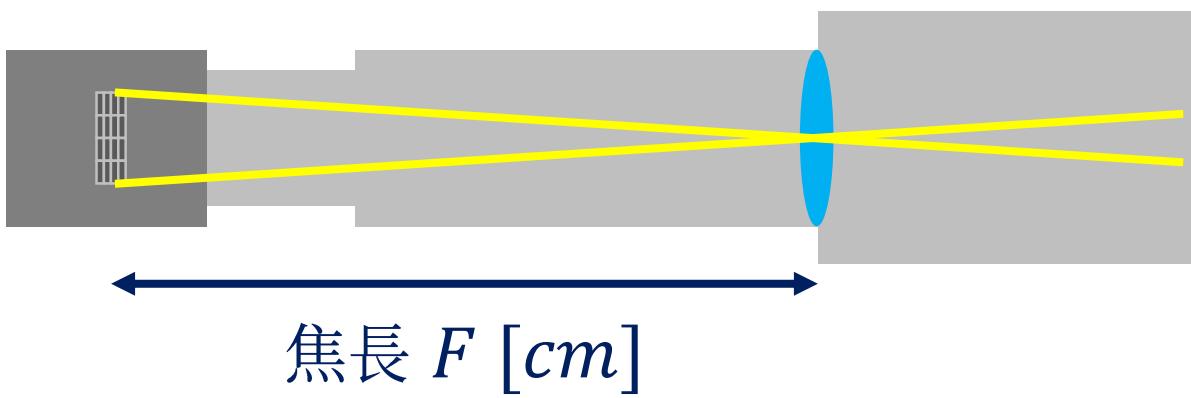
- 只讓特定波長的光線通過的材料
- 安裝於相機前，通常以濾鏡盤切換
- 濾鏡的種類
  - 寬帶濾鏡 Broad Band Filters  
E.g. UBVRI, LRGB
  - 窄帶濾鏡 Narrow Band Filters  
E.g. H-alpha, SII, OIII
  - 特殊濾鏡 e.g. 光害濾鏡



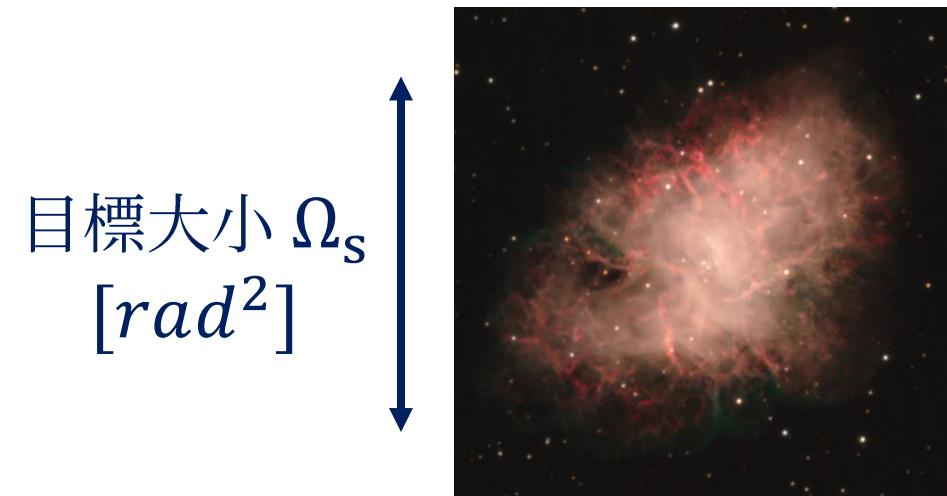
Instruments

# 儀器系統・改二

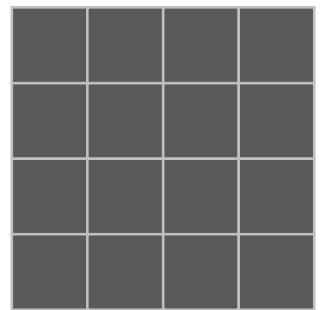
- 同時考慮望遠鏡與儀器  
則可得到兩樣重要的參數：
  - 視野 Field of View, FOV :  $L/F$
  - 單像素視野 :  $\ell/F$



Credit: 許淵明



片幅  $L [cm]$



↔ 像素大小  $\ell [cm]$

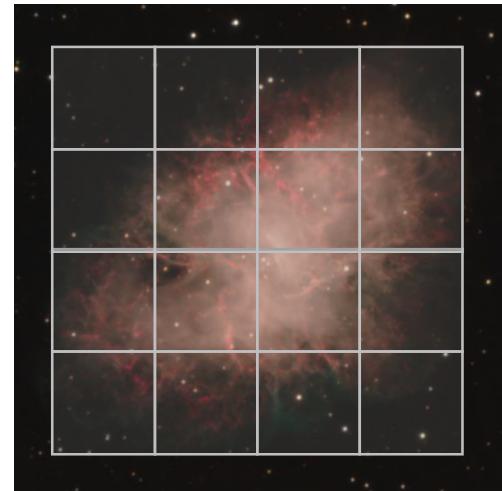
## 導出參數

像素數量 :  $n = (L/\ell)^2$

焦比 :  $f = F/D$

視野 :  $FOV = (L/F)^2$

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



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

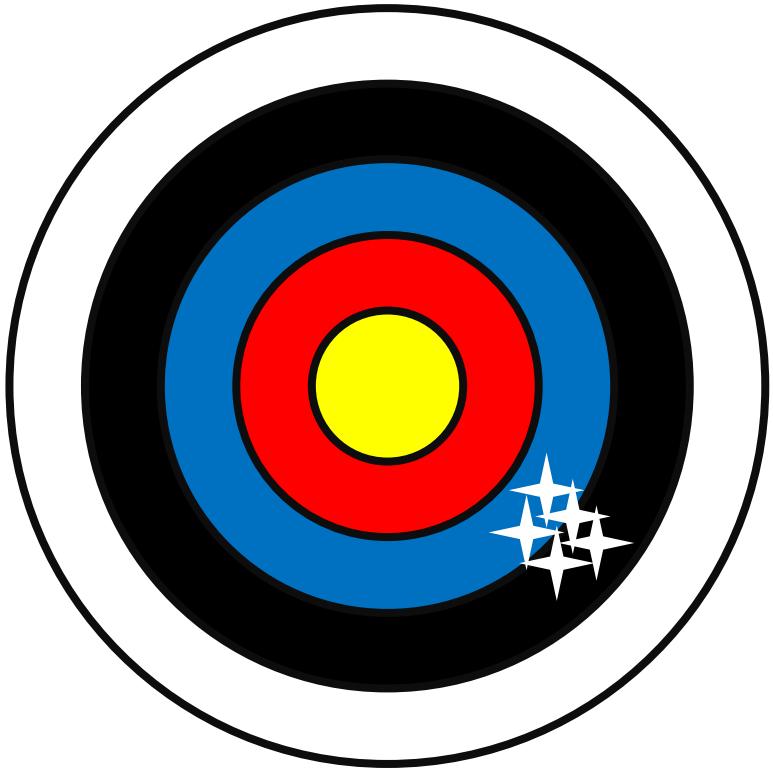
像素  
數量

像素  
視野

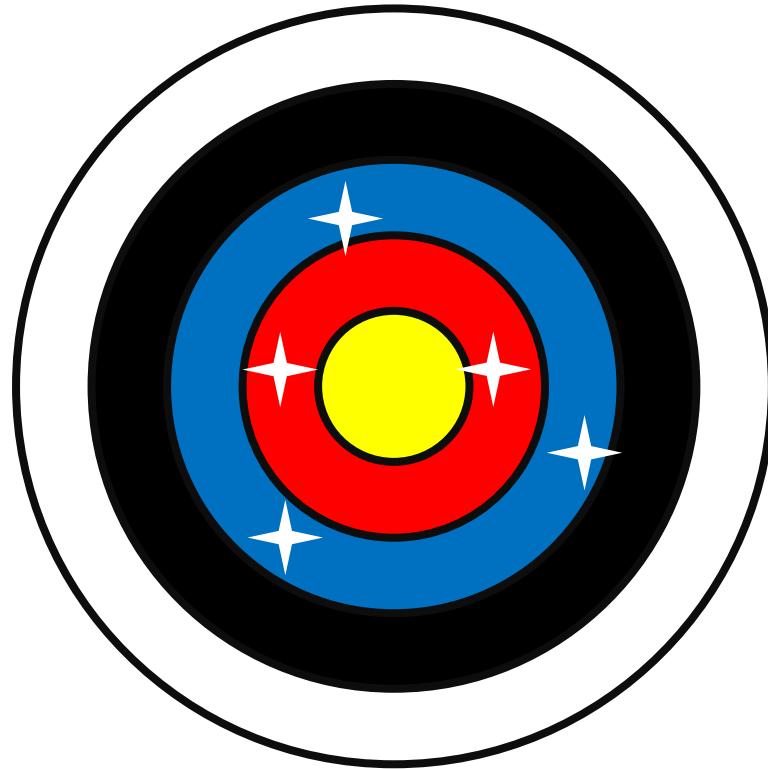
無因次量

Ch2. Bias, Noise and statistics

# 偏差、雜訊與統計



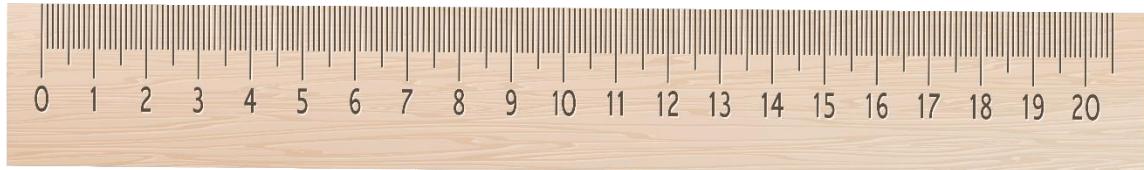
高精度，低準度  
High Precision, Low Accuracy.



低精度，高準度  
Low Precision, High Accuracy.

Noise and uncertainty

# 雜訊與不確定性



M1	M2	M3	M4	Result
18.5	18.2	18.3	18.1	$18.3 \pm 0.1$

期望值 (Signal) : 18.3

標準差 (Noise) : 0.1

相對標準差 :  $0.1 / 18.3 \sim 0.5\%$



Photon / Shot / Poisson noise

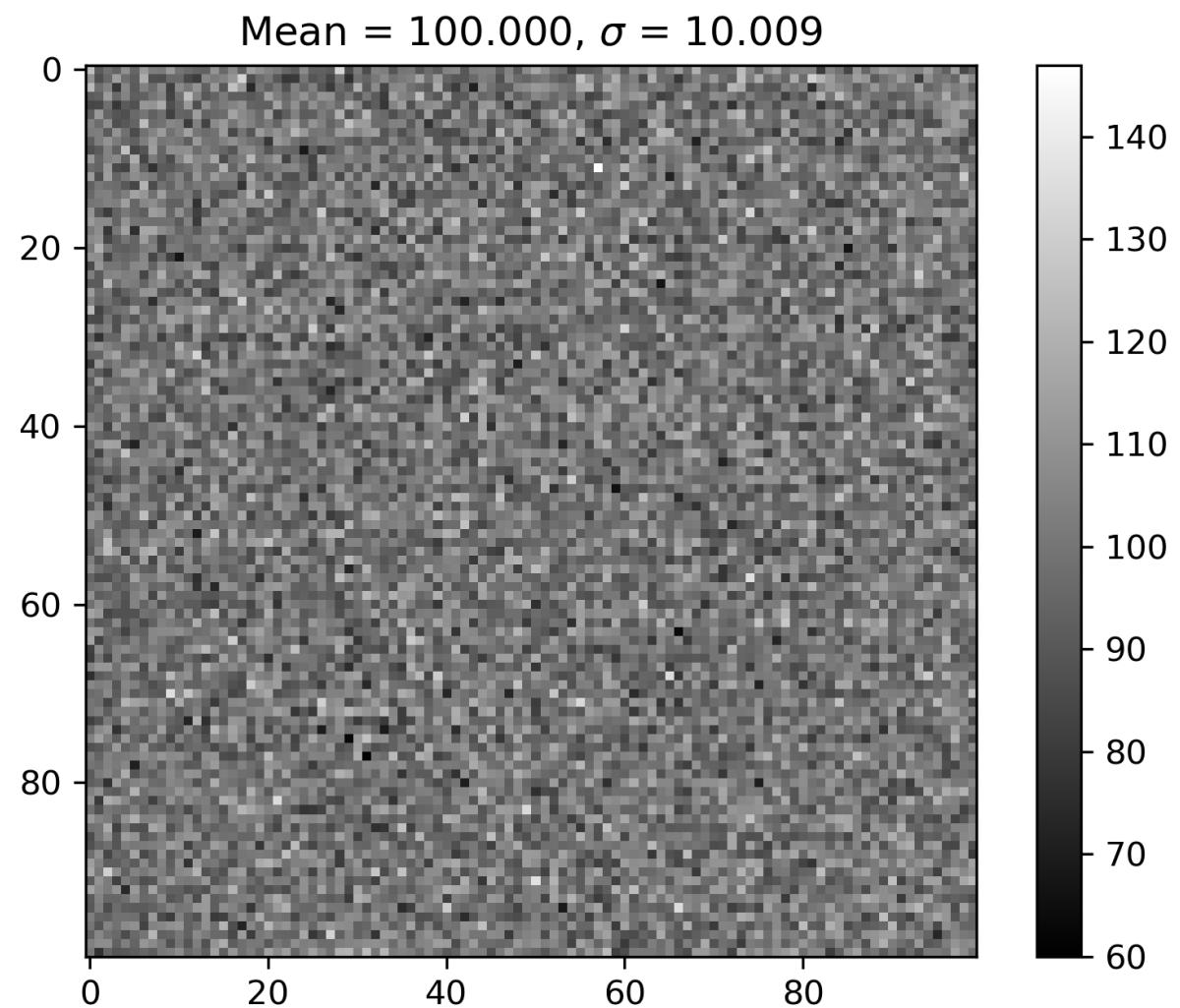
# 光子/散粒/普松雜訊

光源發射光子的隨機性帶來的內秉雜訊

其強度與光源強度開根號成正比：

$$N = \sqrt{S}$$

換言之，若拍攝一個亮度 100 的  
均勻光源（比如天空）拍攝 1 秒  
統計每個像素的數值後  
應當會得到像素之間的標準差為 10



Signal to Noise Ratio (SNR)

# 訊噪比

如何衡量影像品質的好壞 / 受雜訊影響的程度？

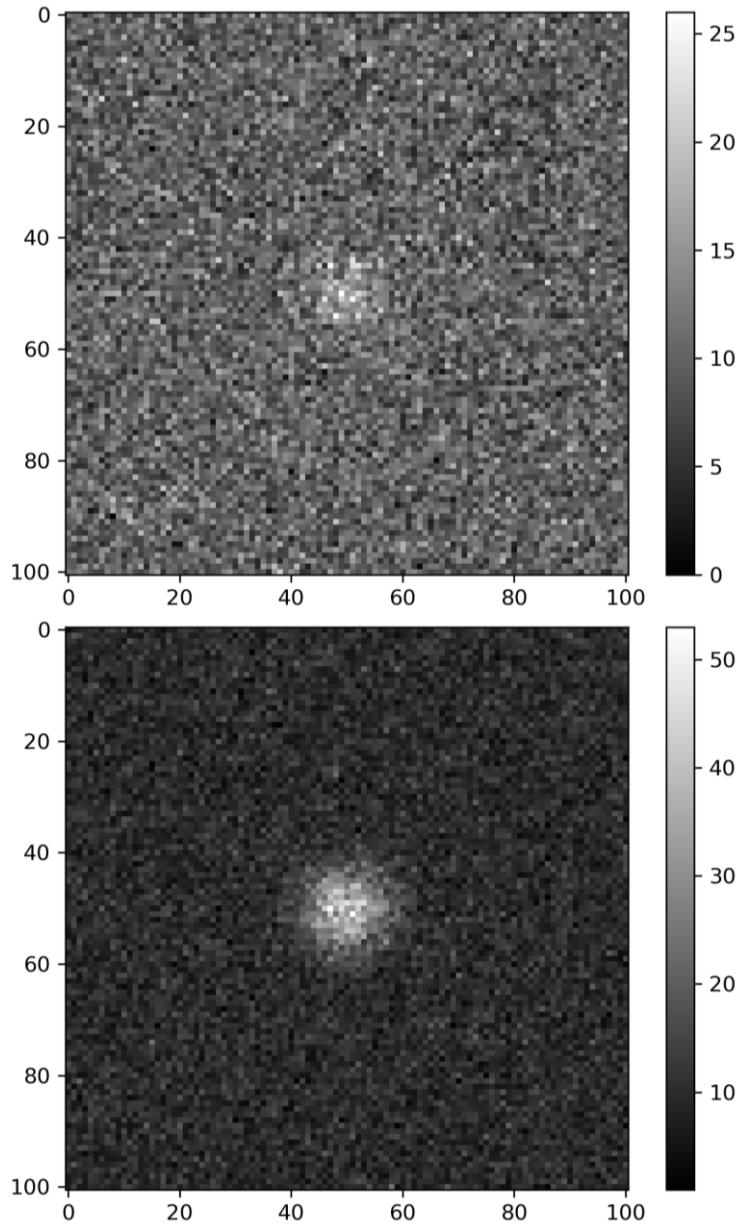
定義訊噪比 Signal to Noise Ratio :

$$\text{SNR} = \frac{S}{N}$$

對於一個由光子雜訊主導的影像，訊噪比是

$$\text{SNR} = \frac{S}{N} = \frac{S}{\sqrt{S}} = \frac{I_s t}{\sqrt{(I_s)t}} = \sqrt{(I_s)t}$$

想要得到兩倍的訊噪比，需要投入四倍的時間。



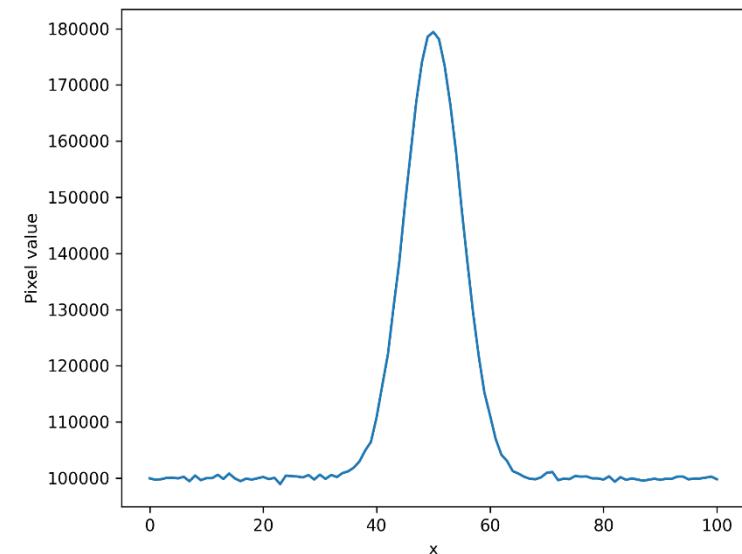
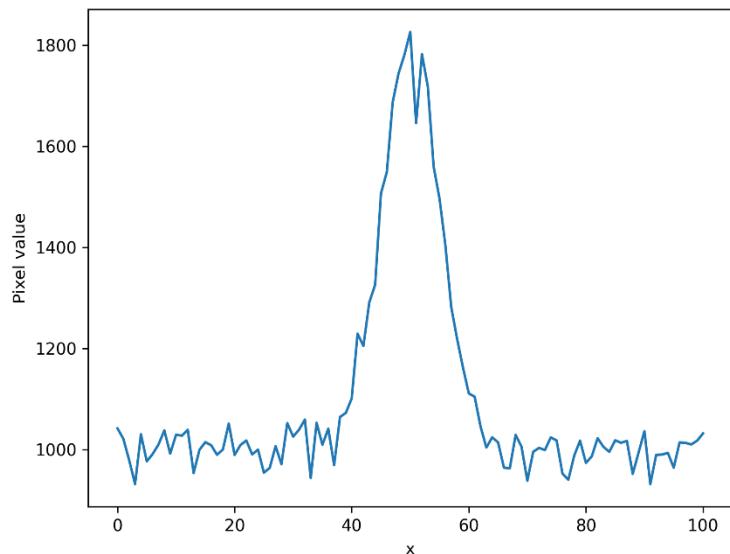
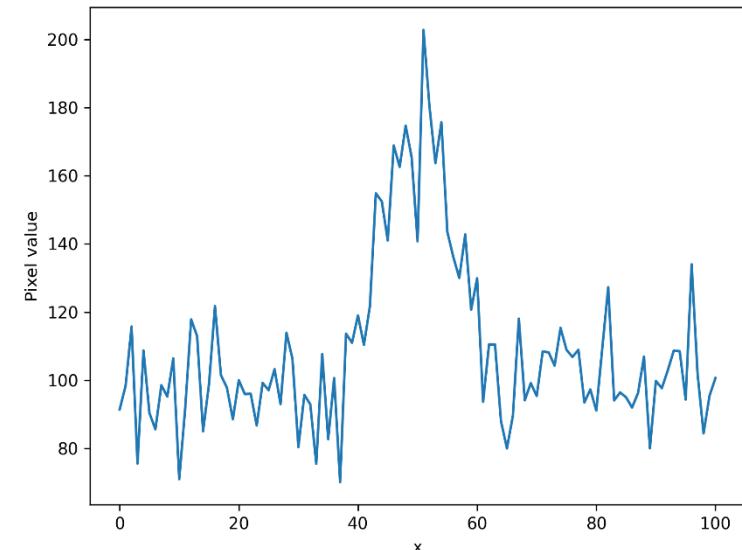
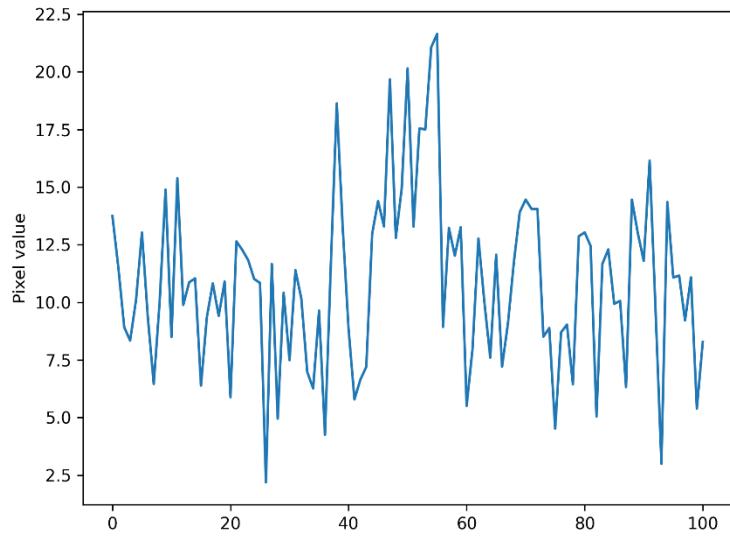
Signal to Noise Ratio (SNR)

# 訊噪比・改

疊圖的功能：

- 單張影像有 S 和 N
- 100 張影像有 100S 和 10N
- $\text{SNR}_{100}/\text{SNR}_1 = 10$

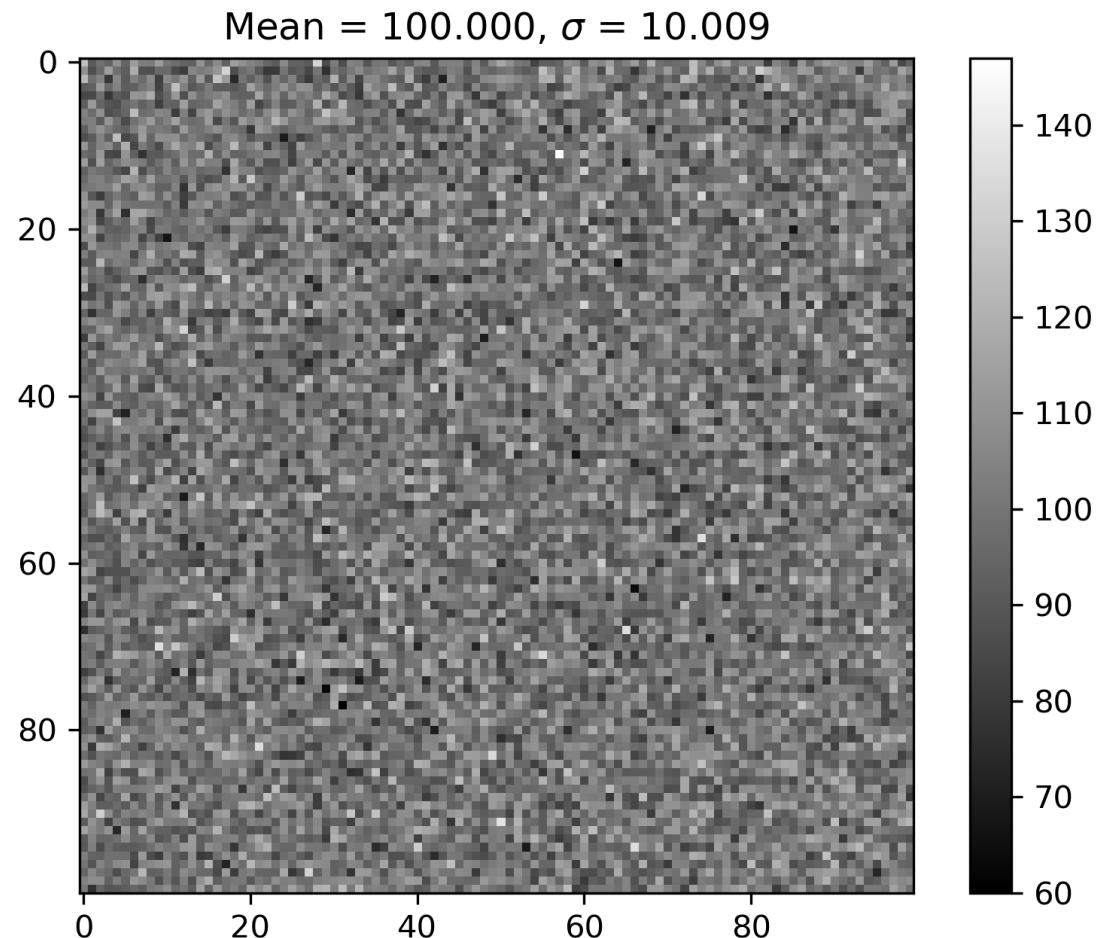
本質上，拉長拍攝時間或是拍攝張數，即是在增加測量天體亮度的次數。



## Section Summary

# 雜訊與統計小結

- 光子雜訊是訊號源內秉的不確定性  
常是主要的雜訊來源，且強度  $N = S^{0.5}$ .
- 衡量影像品質的好壞：訊噪比  $SNR = S/N$   
對於一個由光子雜訊主導的影像，訊噪比
$$SNR = \frac{S}{N} = \sqrt{(I_s)t}$$
- 疊圖 / 增加曝光時間可以換得更高的 SNR



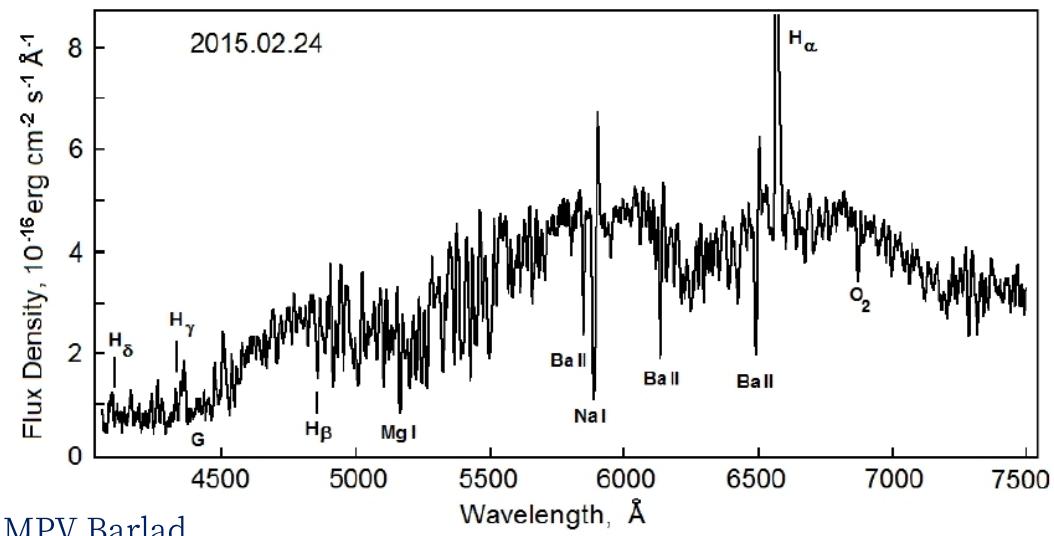
Ch3. Properties of Objects

天體的性質

Types of targets

# 天體的種類： 連續光譜

恆星、星系、反射星雲



MPV Barlad



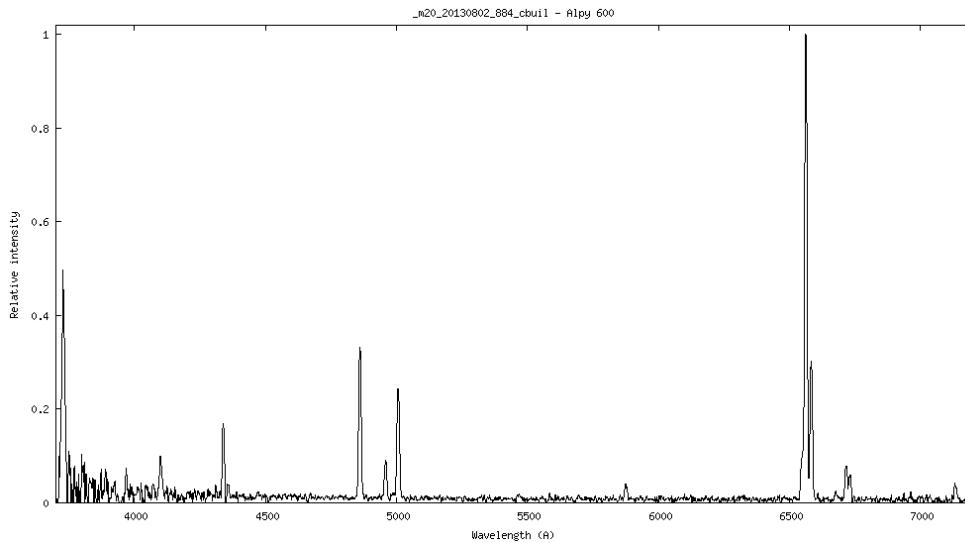
NASA, ESA, K. Kuntz, F. Bresolin, J. Trauger, J. Mould, Y.-H. Chu, and STScI

Types of targets

# 天體的種類： 發射光譜

發射星雲、活躍星系

Christian Buil



Robert Gendler / Subaru Telescope (NAOJ) / Hubble Space Telescope / Martin Pugh

Final Summary

# 總結：天文攝影的基本概念

- 流程：規劃 > 架設 > 拍攝 > 處理。
- 三大系統：望遠鏡、追蹤、儀器系統；收集、指向與紀錄光子。
  - 望遠鏡、濾鏡、相機、赤道儀、導星。
- 凡是測量必有偏差與雜訊，偏差可以修正，雜訊不能消除，但 SNR 可以提高。
- 對於光子雜訊， $N = S^{0.5}$ ， $SNR = (S*t)^{0.5}$ 。
- Intensity 是天文常用來描述光強度的物理量，因次是  $[J\ m^{-2}\ sr^{-1}\ s^{-1}\ Hz^{-1}]$ 。
- 天體大概有兩種：連續光譜／發射光譜的天體。

# 描述一個攝影系統需要多少參數？

