

探天的奇幻冒險

—— 談研究宇宙天體的科技創意

陳文屏

中央大學 天文所、物理系

展望系列演講 2018.12.21

物理——「東西的道理」 運動、能量、力量

化學——「東西的本質」 物質組成、結構、變化

生物——「某種特殊東西」的結構、功能、演化

歷史——「事情的來龍去脈」 過往的紀錄

地理——「周遭的環境」 地形、地貌、居住者

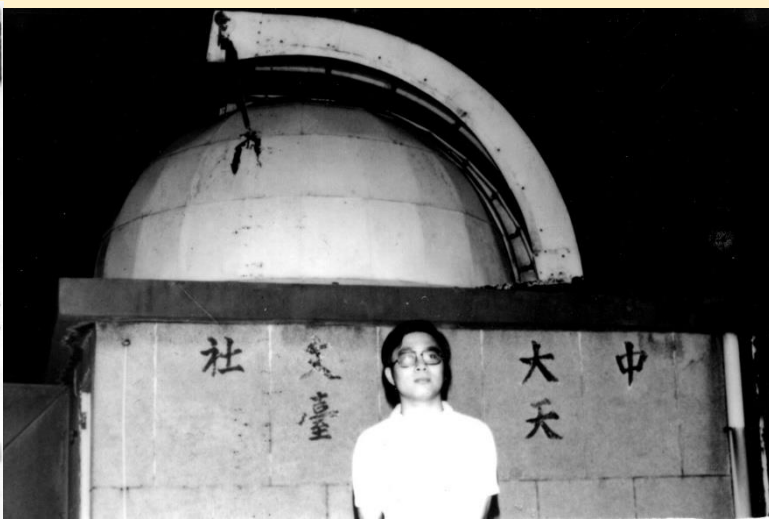
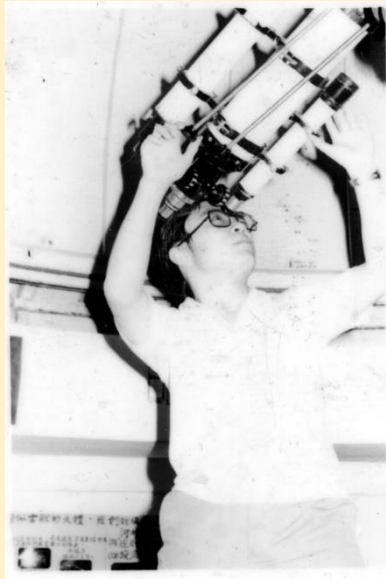
對象是宇宙、天體 → **天文學**

問天大的問題

窮其一生問問題，找答案

- ♠ 科學家問完問題，由自己證明是對的
狂想者問完問題，等別人證明是錯的
- ♥ 他人沒被說服，可能因為還沒說服自己
- ♦ 不一定能做喜歡的事情，但要喜歡做的事情
- ♣ 選個讓自己快樂、有成就感的職業





太陽系家族之「戶口名簿」

— 恆星

靠內部的行星
(水、金、地、火)
體積小、岩石質

靠外部的行星
(木、土、天王、海王)
體積大、氣體、冰體

— 行星

八顆

— 矮行星

五顆

— 衛星

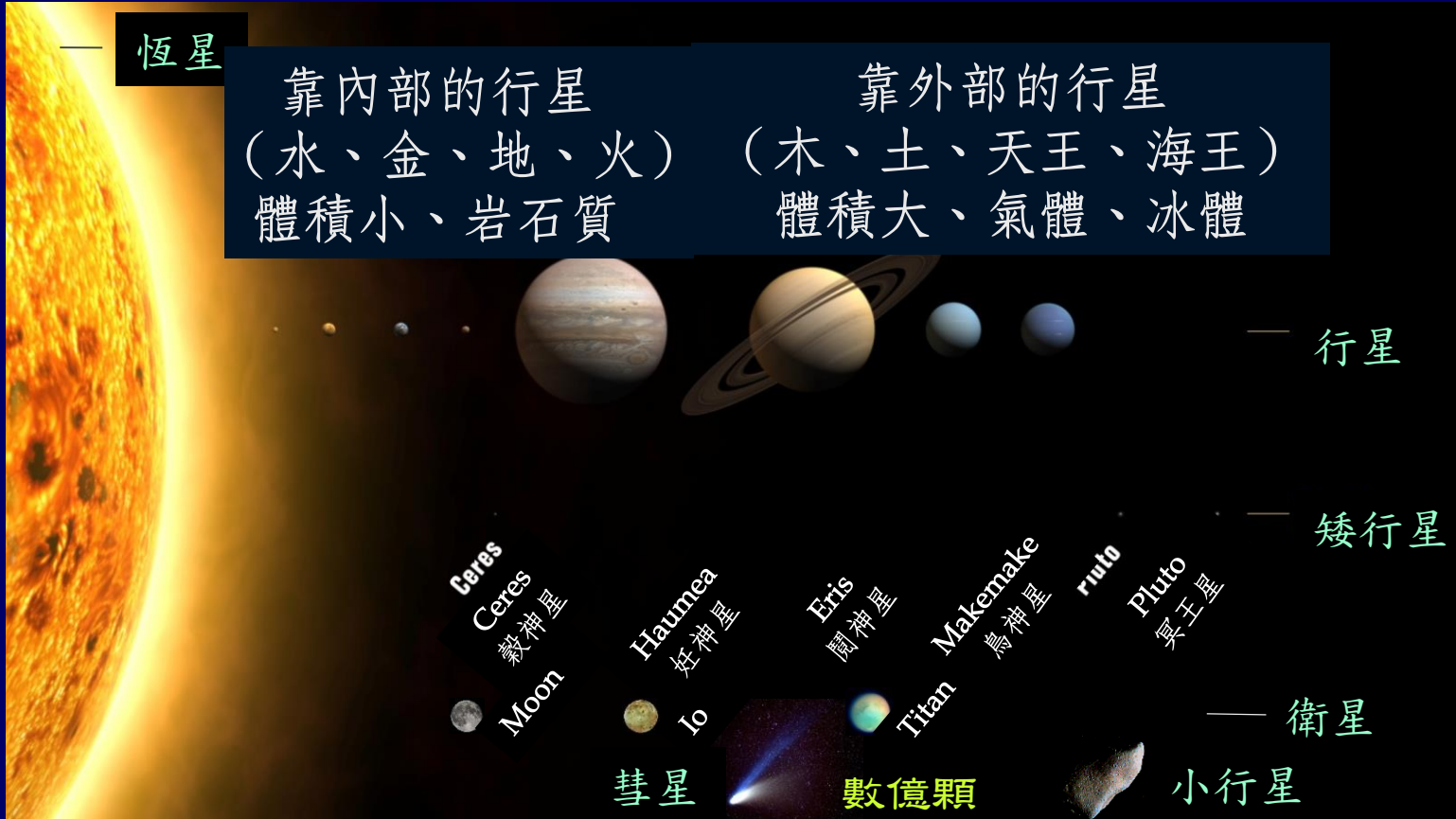
百來顆

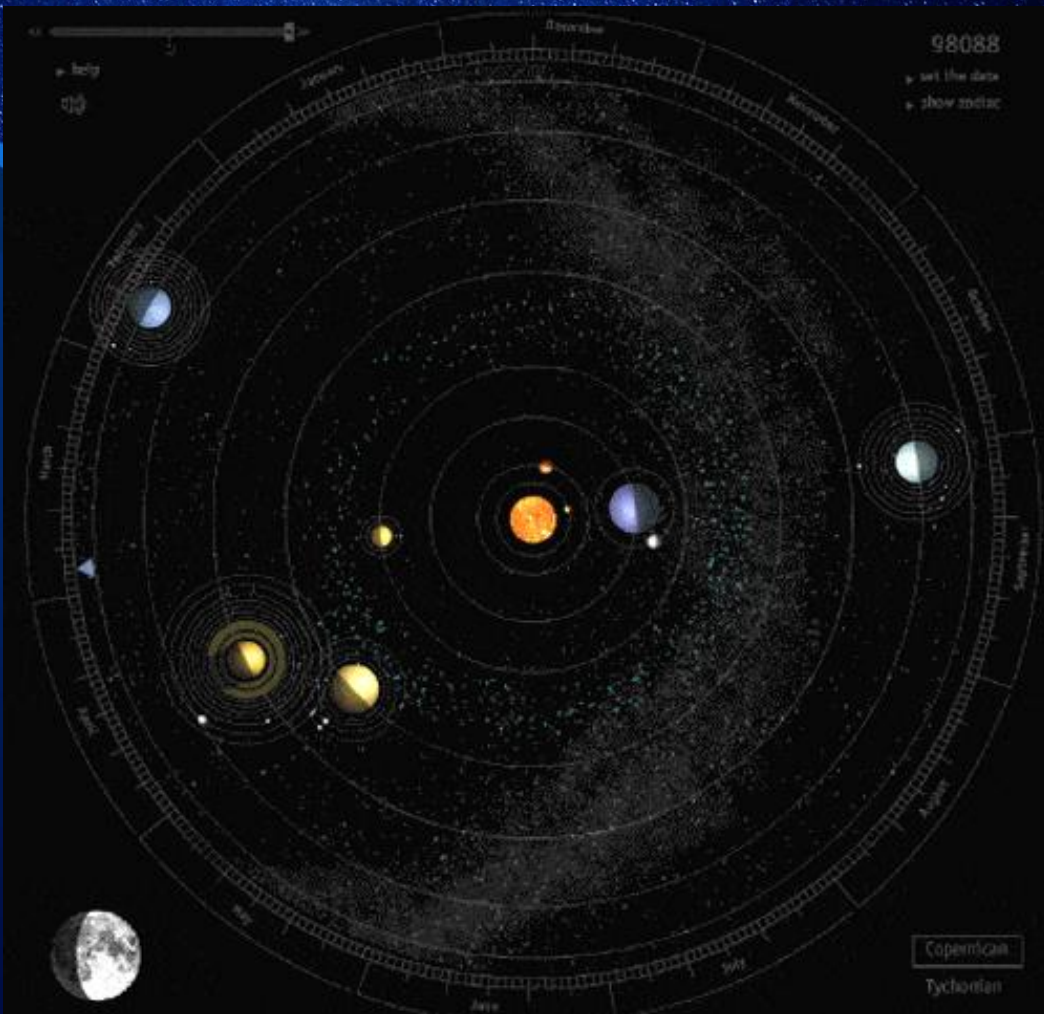
彗星

數億顆

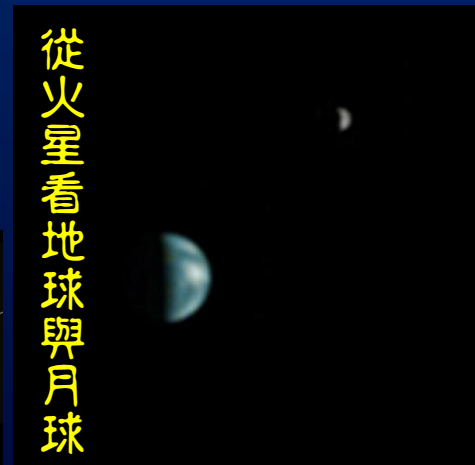
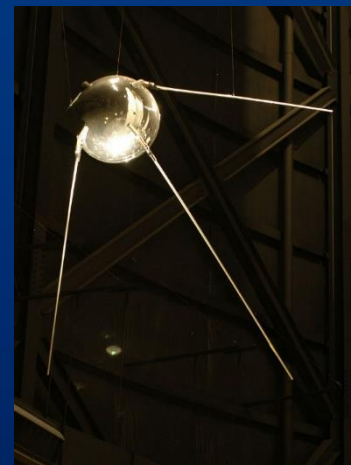
小行星

百萬顆





第一個人造
衛星 Sputnik 1
直徑 58 cm
1957年10月4日
升空



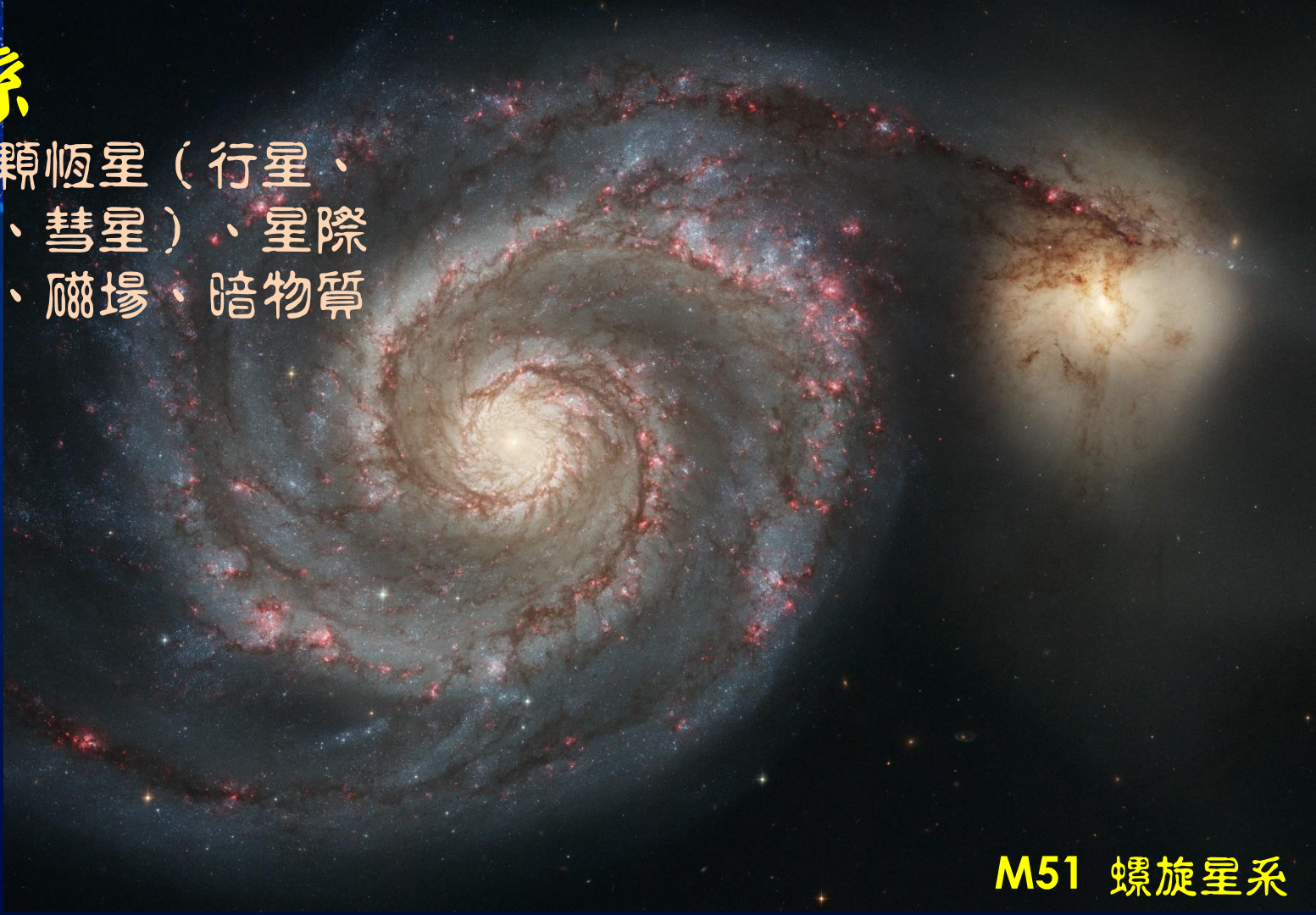
從火星看地球與月球



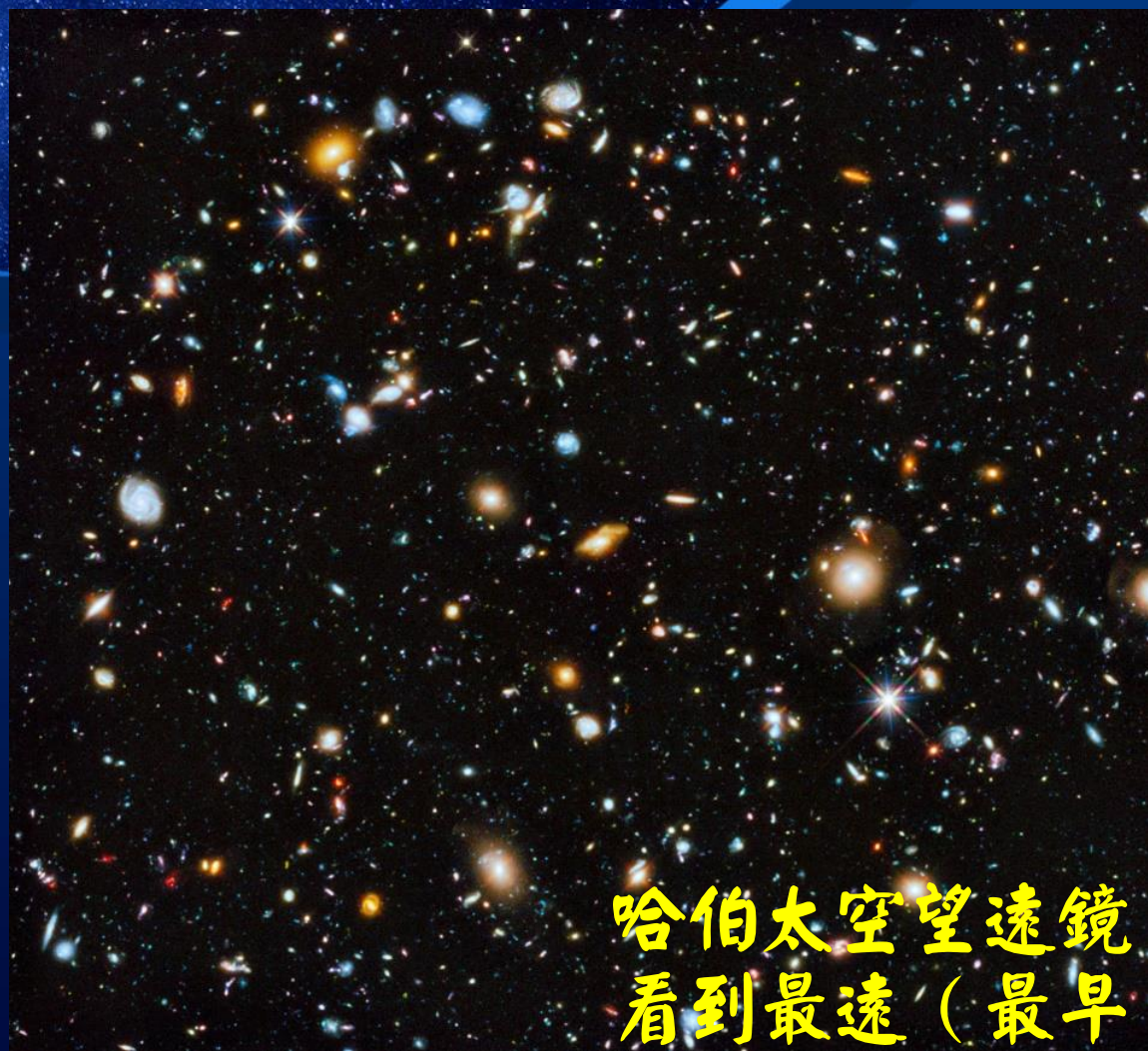
Cosmic Art Photography@Switzerland

星系

千億顆恆星（行星、
衛星、彗星）、星際
物質、磁場、暗物質



M51 螺旋星系



某些紅色小星
系誕生於大霹
靂之後8億年

哈伯太空望遠鏡 (目前)
看到最遠 (最早) 的宇宙

目前知道

- 太陽與地球於約**50**億年前從一團星際雲氣中誕生，
太陽還可以存活**50~70**億年
- 太陽系有八顆行星，其中只有地球有生命存在
- 銀河系當中有超過千億顆恆星
- 太陽周圍已知數千顆恆星旁邊也有行星，
更遠的仍待偵測
- 宇宙創生於**137**億年前，當中有千億個星系
- … 以上這些怎麼知道的？宇宙將來會怎樣？其他地方有沒有生命？有沒有另個宇宙？如何得知？

- 天文學研究宇宙天體的本質，包括其生老病死的過程
- 極少數天體可以前往探索或落在地球上，其他極遙遠
- 只能以遙測手段偵測天體發出（各種波段）的**電磁波**、重力波，或是所發出的物質（宇宙射線、微中子）
- 以高科技收集這些訊息；以數學方法分析這些訊號

→ 望遠鏡 + 偵測器 + 電腦



- 以物理、化學知識解讀天體性質

→ 亮度、偏振（如何隨位置、波長改變）

→ 溫度 … 成分

看得更暗
看得更遠
看得更清楚

如何隨時間改變 —— **時域天文學** **靈敏度與解析力**

探天的目的： 瞭解宇宙天體的本質與來龍去脈

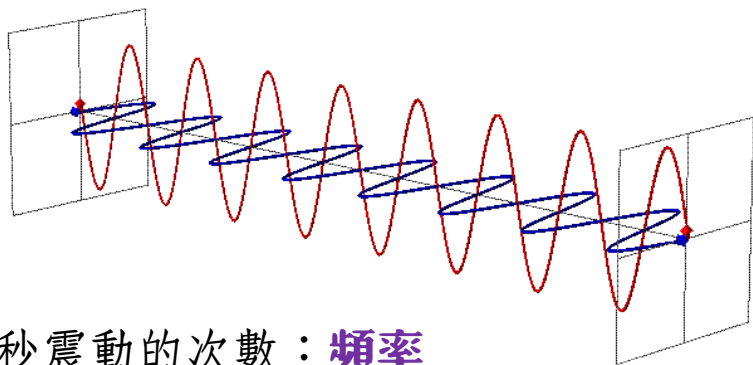
- 從收到的光線（電磁波）推敲發光天體的性質
- 電磁波與物質的交互作用
- 收集（望遠鏡）、記錄（偵測器：成像、光譜、偏振）、儲存（電腦）、分析（數學）、解讀（物理、化學）
- 科學與技術

電荷 → 電場 電荷流動 → 電流 → 磁場

電場改變 → 磁場 (安培定律)

磁場改變 → 電場 (法拉利定律)

電場、磁場交互變 → 電磁波



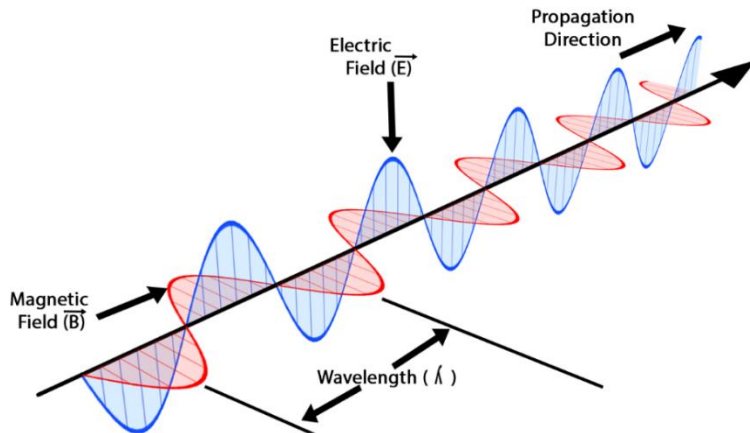
每秒震動的次數：**頻率**

每次震動行走的長度：**波長**

光速 恆定 = 頻率 × 波長

光的頻率越快 (藍光 > 紅光) 能量越強

Electromagnetic Wave



伽瑪射線

X射線

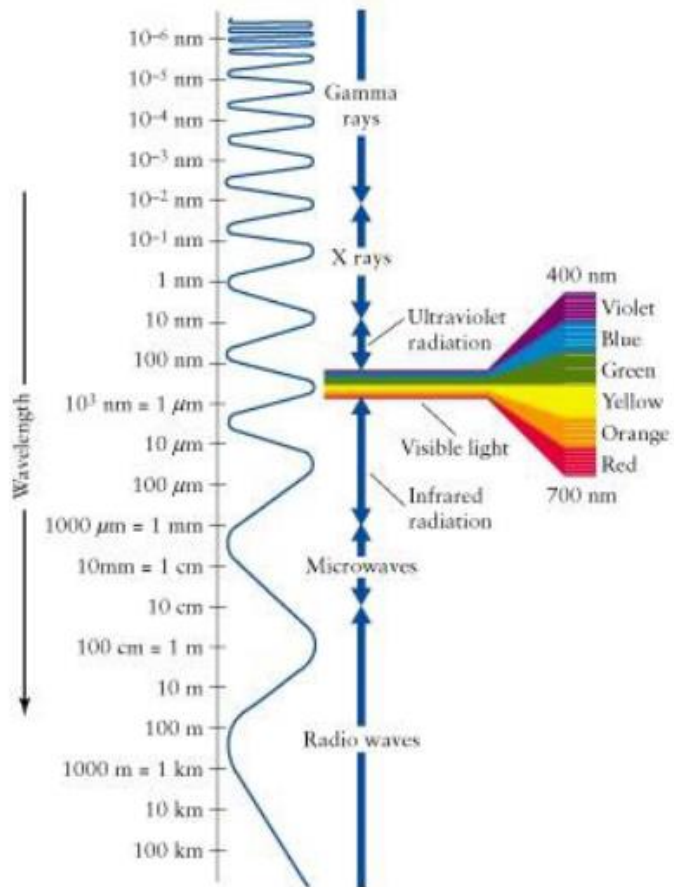
紫外線

可見光

紅外線

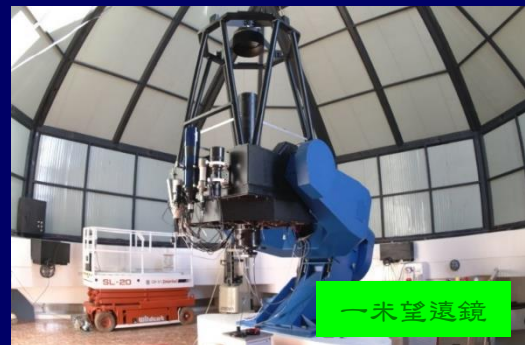
微波

(無線) 電波





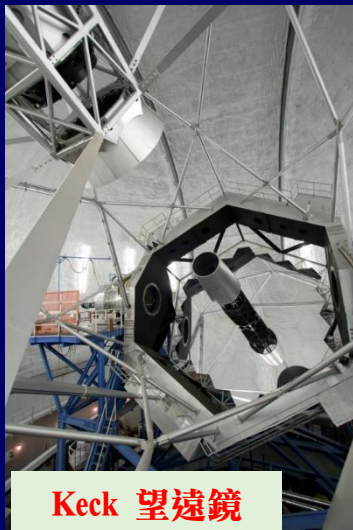
中央大學
鹿林天文台



一米望遠鏡



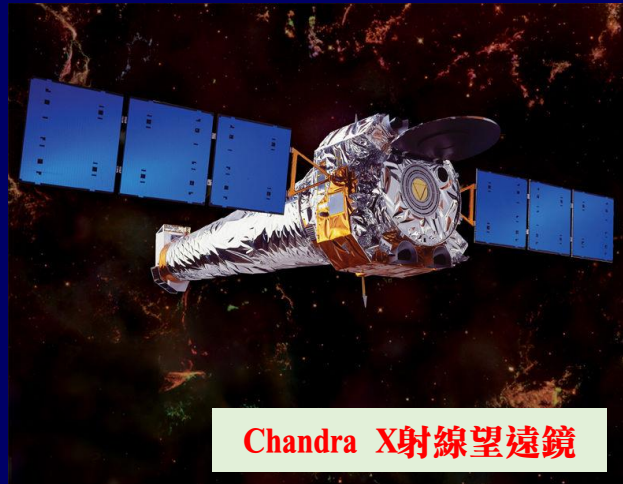
兩米望遠鏡



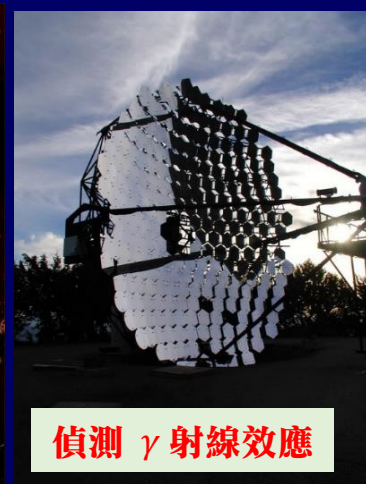
Keck 望遠鏡



JWST 太空望遠鏡



Chandra X射線望遠鏡



偵測 γ 射線效應



ALMA 電波望遠鏡陣列



Super-Kamiokande
微中子偵測器



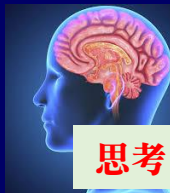
LIGO 重力波偵測儀



計算



實驗



思考

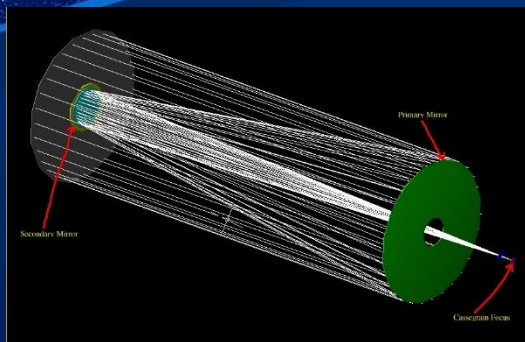
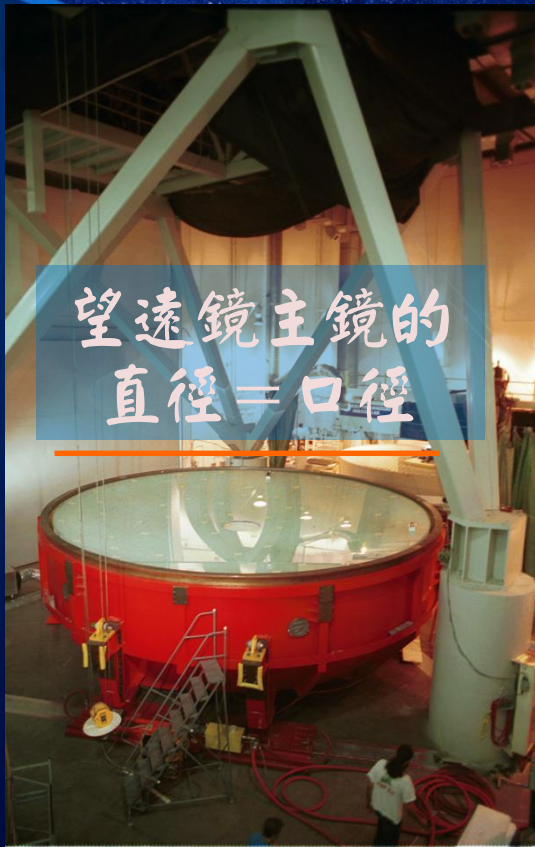


知識

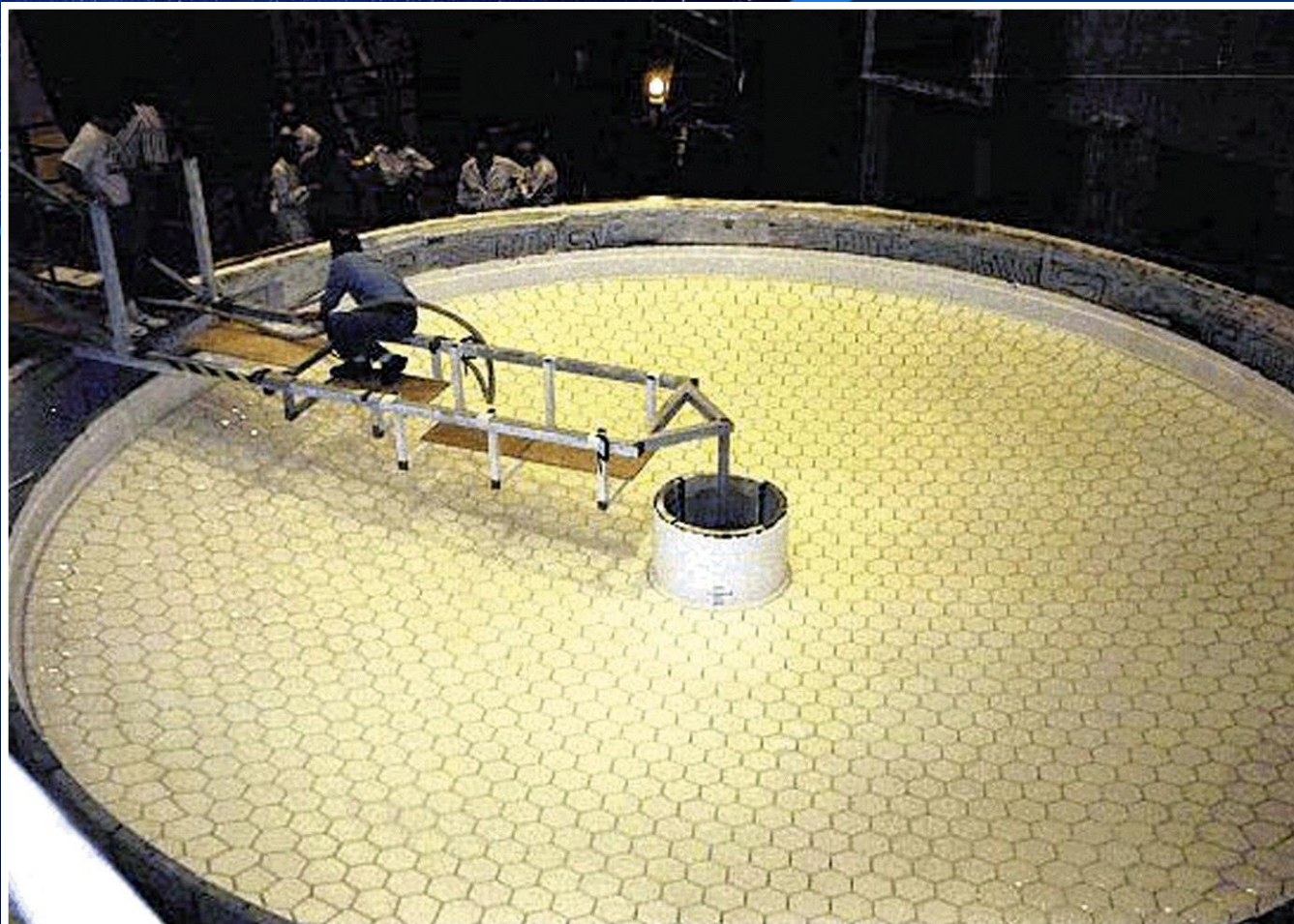
The background of the slide is a deep blue gradient. In the upper left corner, there is a curved section showing a starry night sky with numerous small white stars. The rest of the background is a solid, dark blue color.

望遠鏡的技術

望遠鏡利用折射、反射 集光、成像







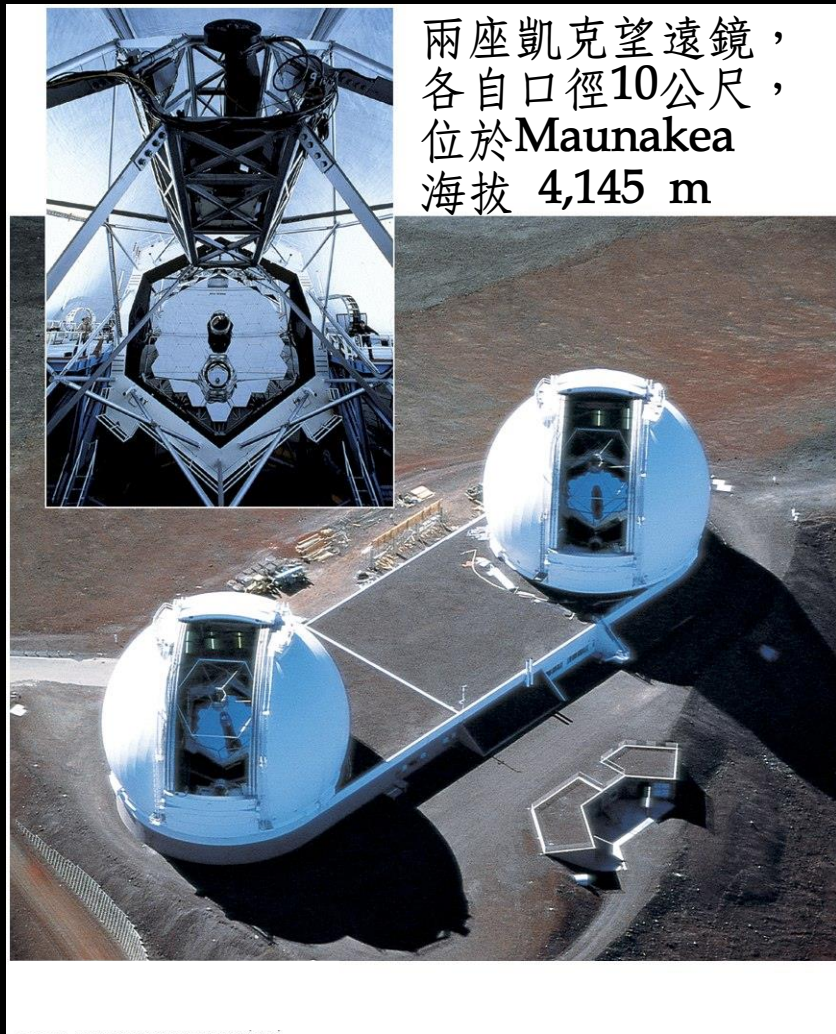
Segmented mirror



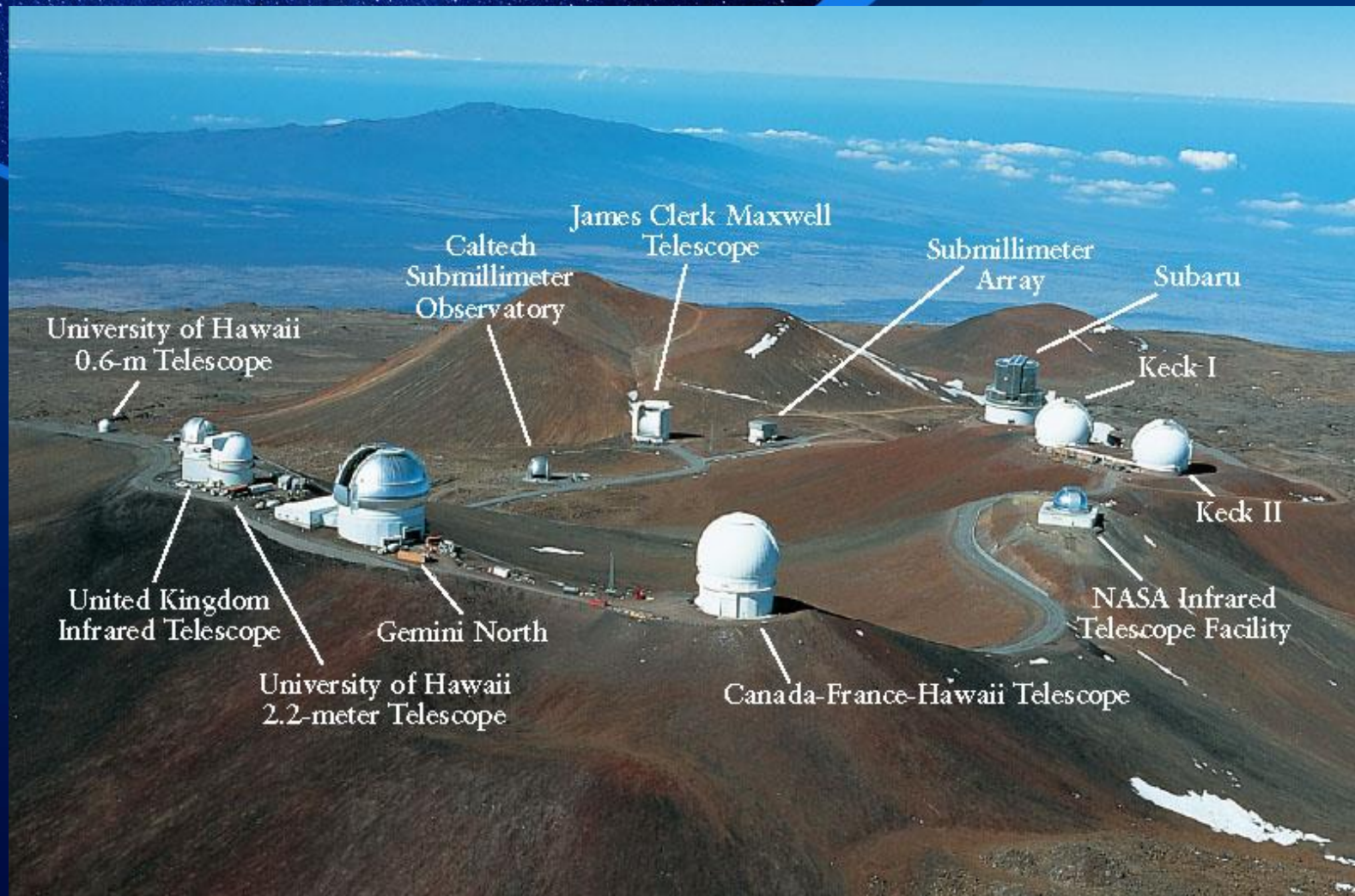
SALT :
南非10公尺
光學望遠鏡，
專用於光譜
觀測



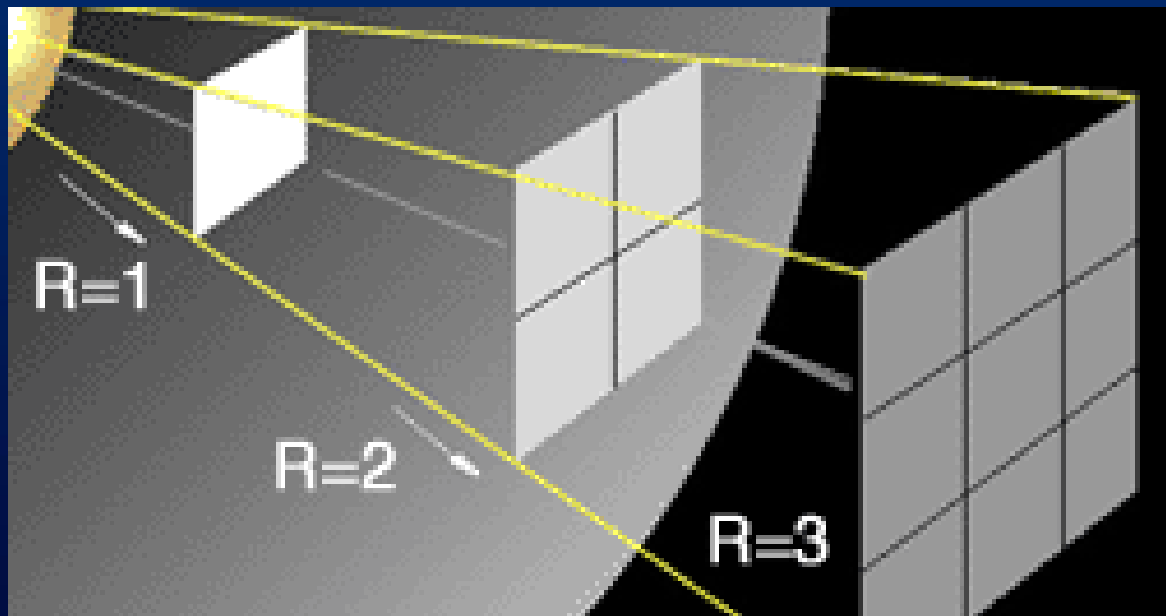
JWST :
NASA 下
一代太空
望遠鏡，
18片拼接
鏡片，相
當於6.5公
尺口徑



兩座凱克望遠鏡，
各自口徑10公尺，
位於Maunakea
海拔 4,145 m

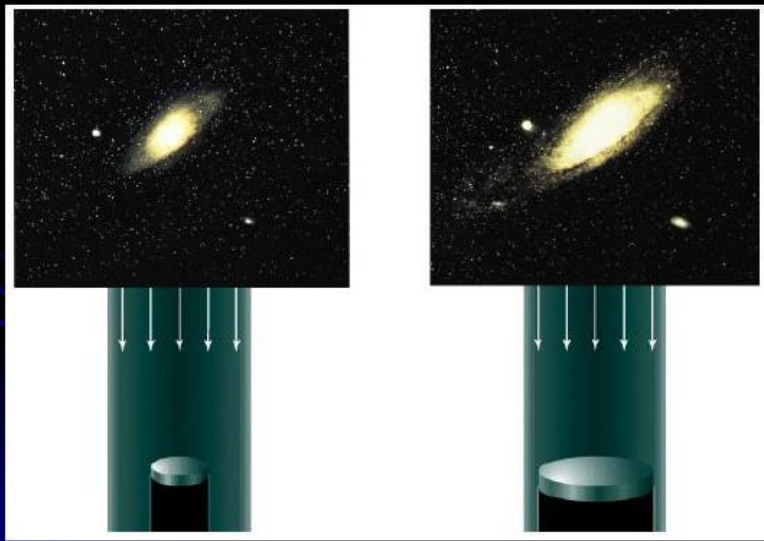


天體發出的輻射向四面八方傳播，分布在球面上，隨時間（距離）而擴展。某地收到的強度，與距離平方成反比



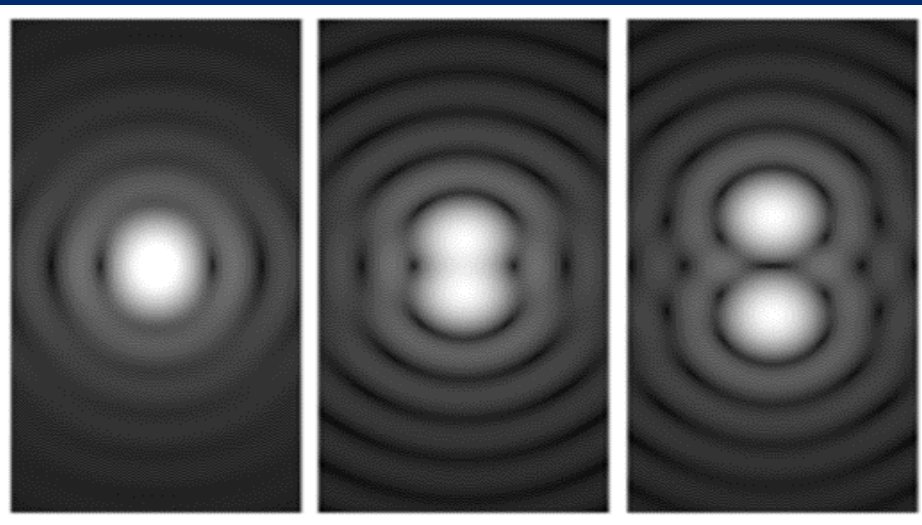
望遠鏡口徑越大，收集光線的能力越強，能看到越暗的天體

$$\text{集光力} \propto \text{集光面積} \propto [\text{口徑}]^2$$



望遠鏡口徑越大，角度分辨能力越強，能看到越清楚的細節

$$\text{解析力} \propto \text{最大的「不同視角」} \propto \text{口徑}$$



圓周360度 1度=60角分；1角分=60角秒

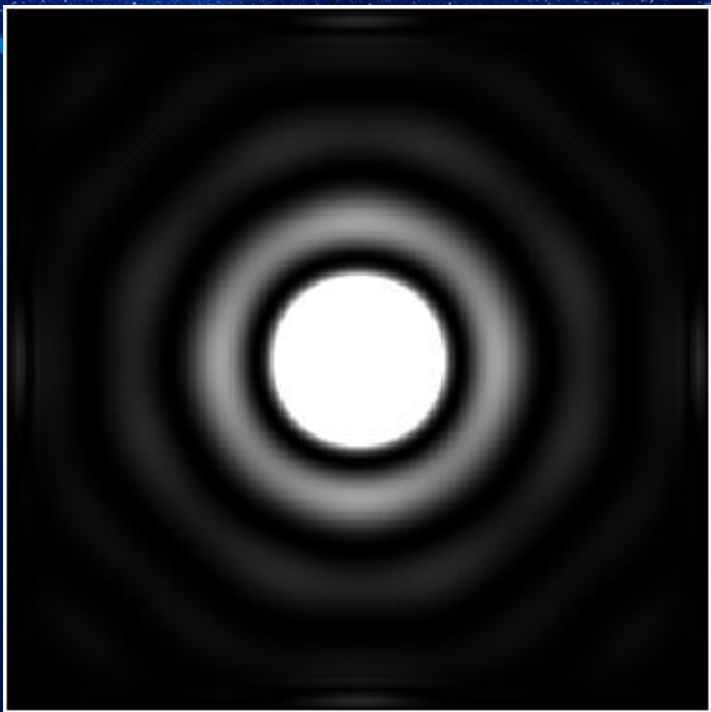
1角秒=在5公里之外（台大應力所到饒河夜市）看10元硬幣（2.5公分）的張角

$$\theta \approx 1.22 \lambda / D \approx \lambda_{\mu\text{m}} / 4 D_{\text{m}} ["]$$

哈伯太空望遠鏡

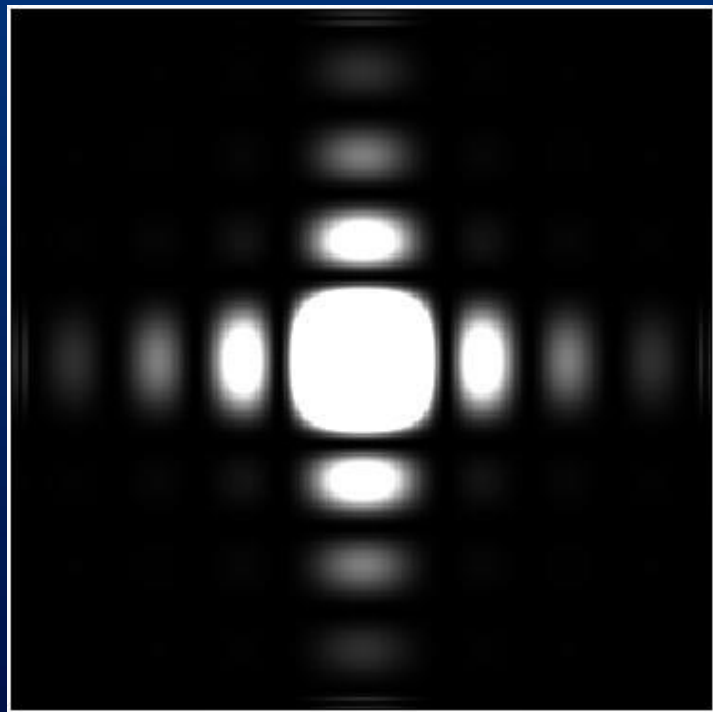
$D=2.4 \text{ m}$, $\lambda=500 \text{ nm}$, $\theta = 0.05 \text{ 角秒}$

圓形孔徑的繞射圖形



點彌散函數 (Point Spread Function; PSF)
--- 光學系統所呈現點光源的影像

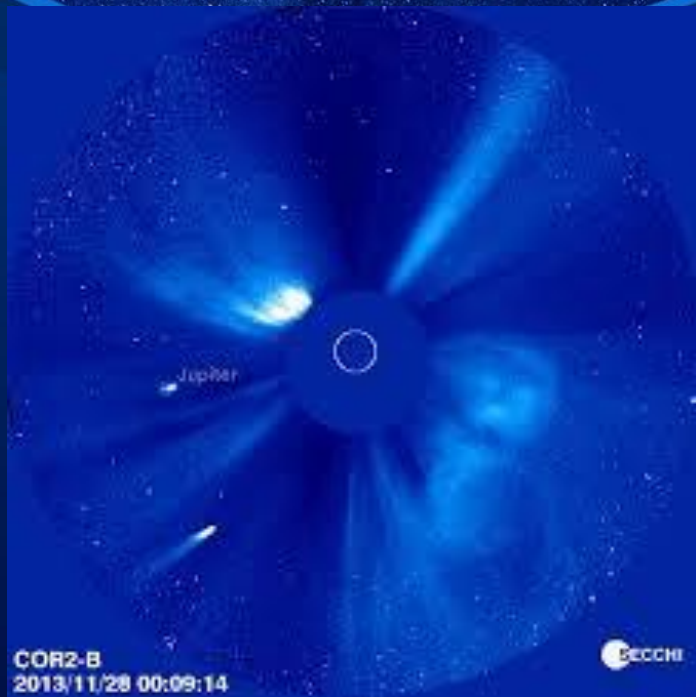
長方形孔徑的繞射圖形



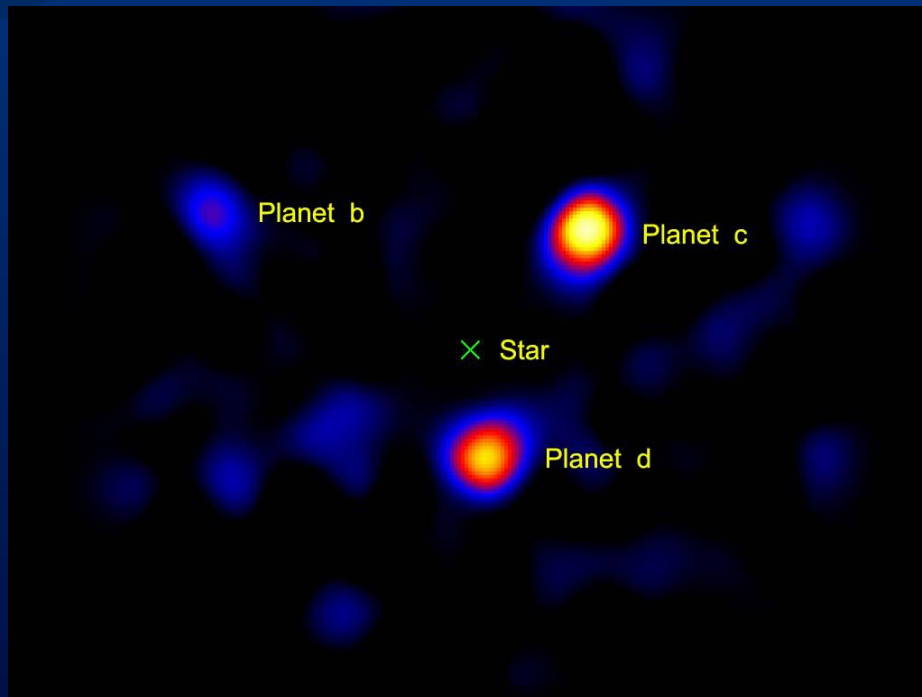
例如 *Gaia* 太空望遠鏡
1.45 m × 0.5 m

日冕儀 (Coronagraph)

把鄰近太亮的天體擋住



太陽衛星拍攝的太陽影像 + 彗星

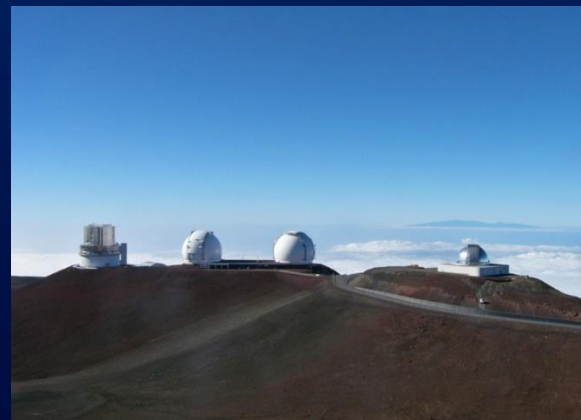


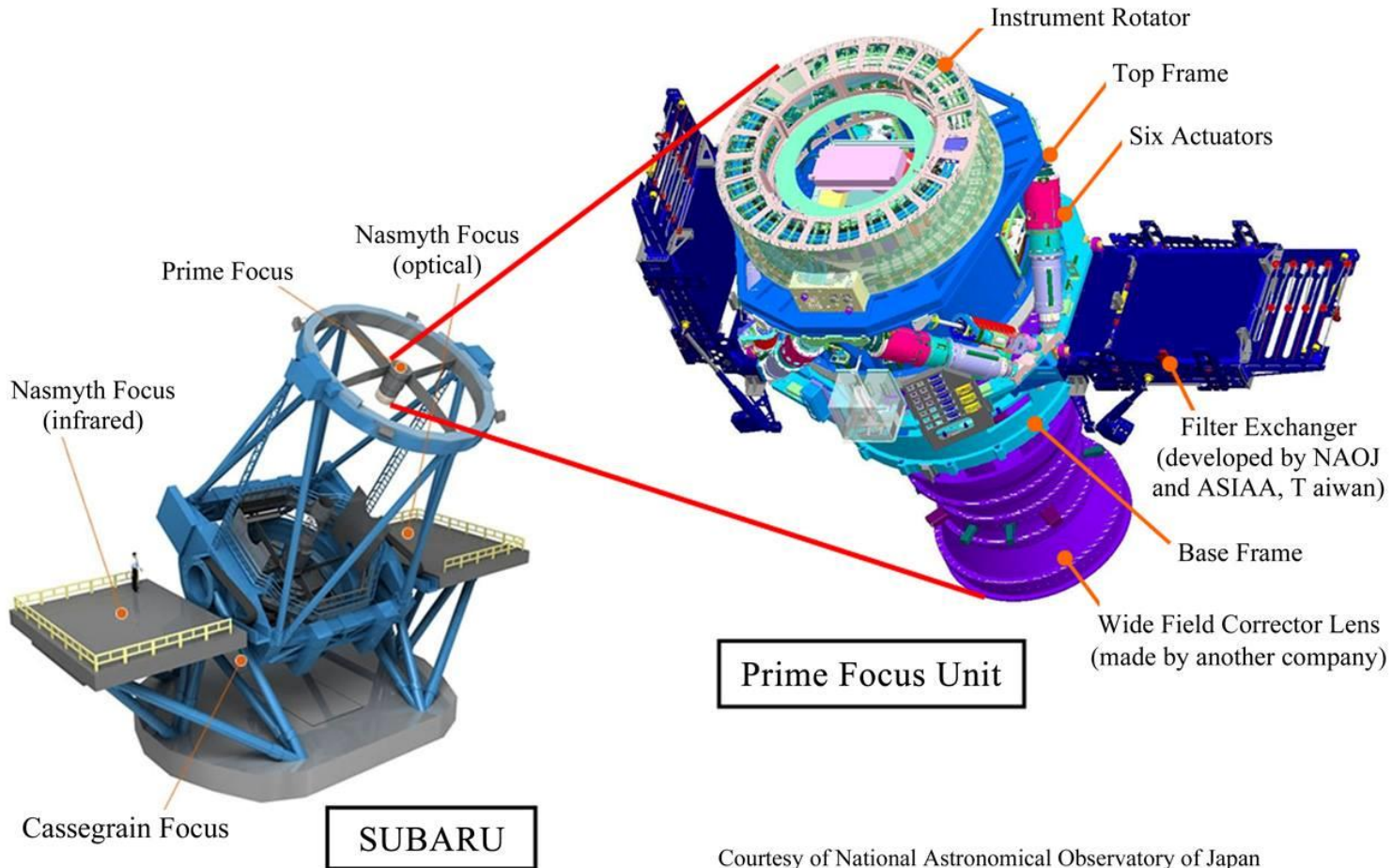
派洛瑪天文台 5.1 公尺望遠鏡，使用其中 1.5 m 部分口徑，加裝日冕儀拍攝 HR5799 周圍的行星

Subaru Telescope

美國夏威夷
Maunakea

屬於日本國家天文台
口徑8.2米





Courtesy of National Astronomical Observatory of Japan

Very Large Telescope (VLT)

智利 Paranal,
Atacama Desert



屬於歐洲南方天文台
(European Southern
Observatory; ESO)

四座8.2米望遠鏡 +
四座1.8米望遠鏡
(構成干涉陣列)

| 望遠鏡 | 口徑 (m) | 集光面積 (m ²) | 開光日 |
|---|------------|---------------------------|---------------|
| Extremely Large Telescope (ELT) | 39.3 | 978 | 2024 |
| Thirty Meter Telescope (TMT) | 30 | 655 | 2027? |
| Giant Magellan Telescope (GMT) | 24.5 | 368 | 2022 |
| Southern African Large Telescope (SALT) | 11.1 × 9.8 | 79 | 2005 |
| Keck Telescopes | 10.0 | 76 | 1990, 1996 |
| Gran Telescopio Canarias (GTC) | 10.4 | 74 | 2007 |
| Very Large Telescope (VLT) | 8.2 | | 1998-2000 |

Thirty Meter Telescope (TMT)

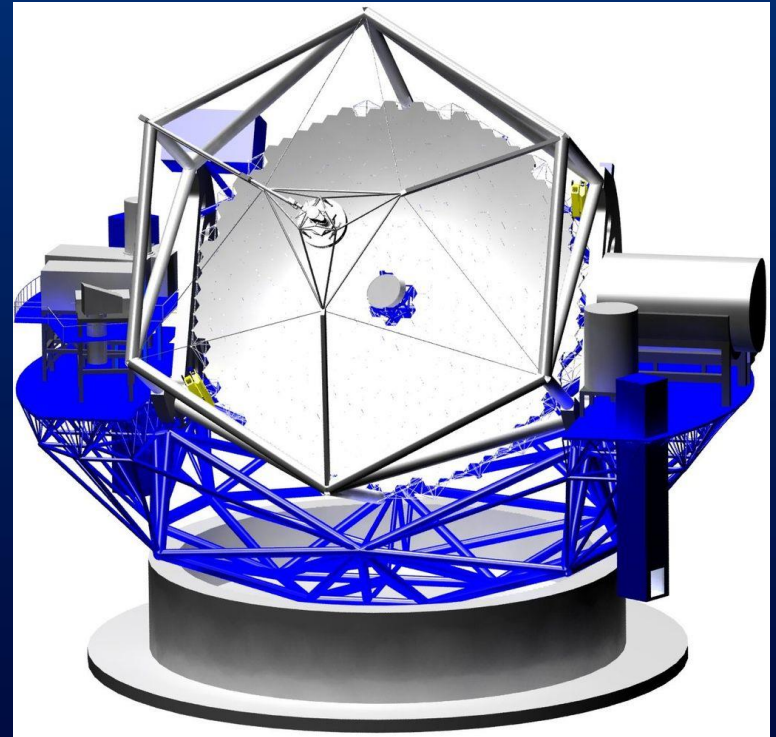
30公尺望遠鏡

The TMT International Observatory (TIO)



美國夏威夷
Maunakea?

492 × 1.4 m hexagonal mirrors



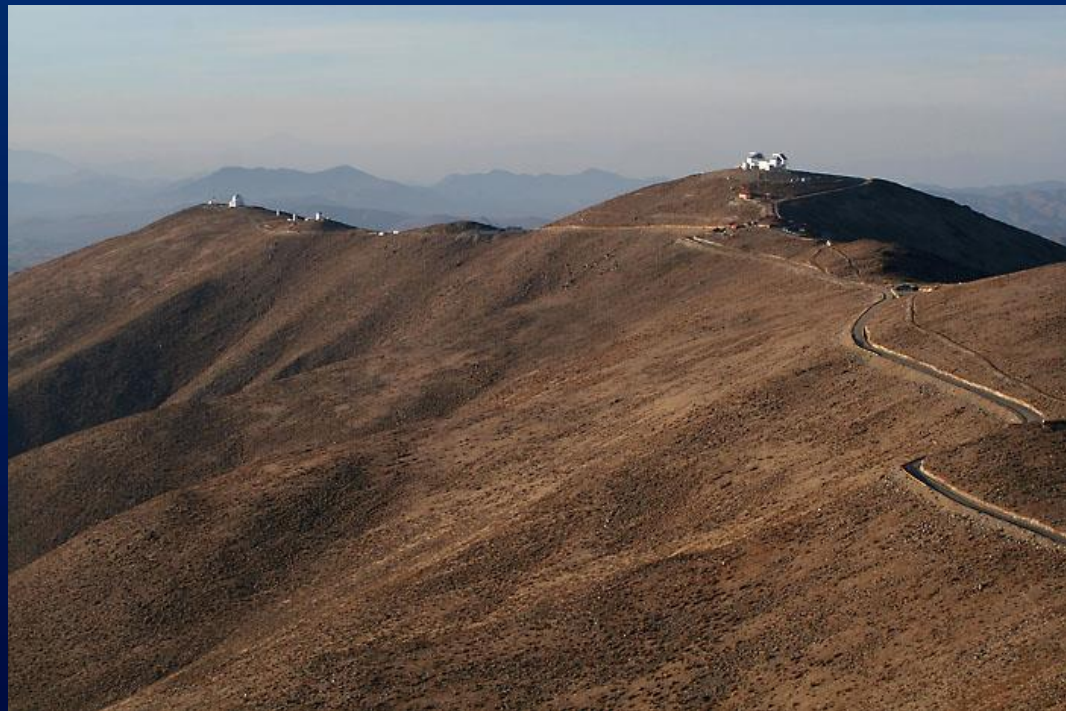
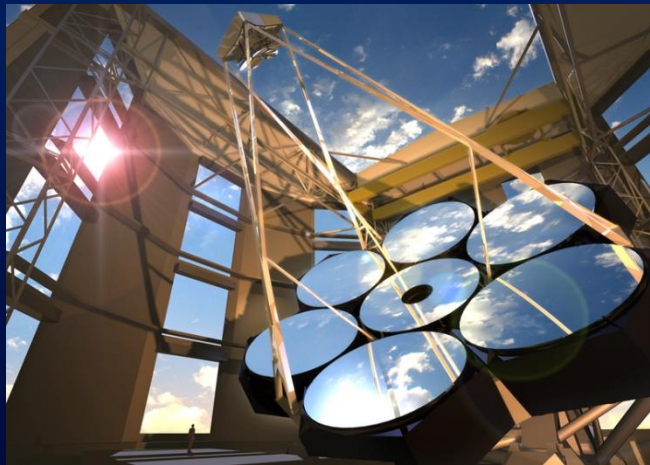


Giant Magellan Telescope (GMT) 智利 Las Campanas

巨型麥哲倫望遠鏡

(2023)

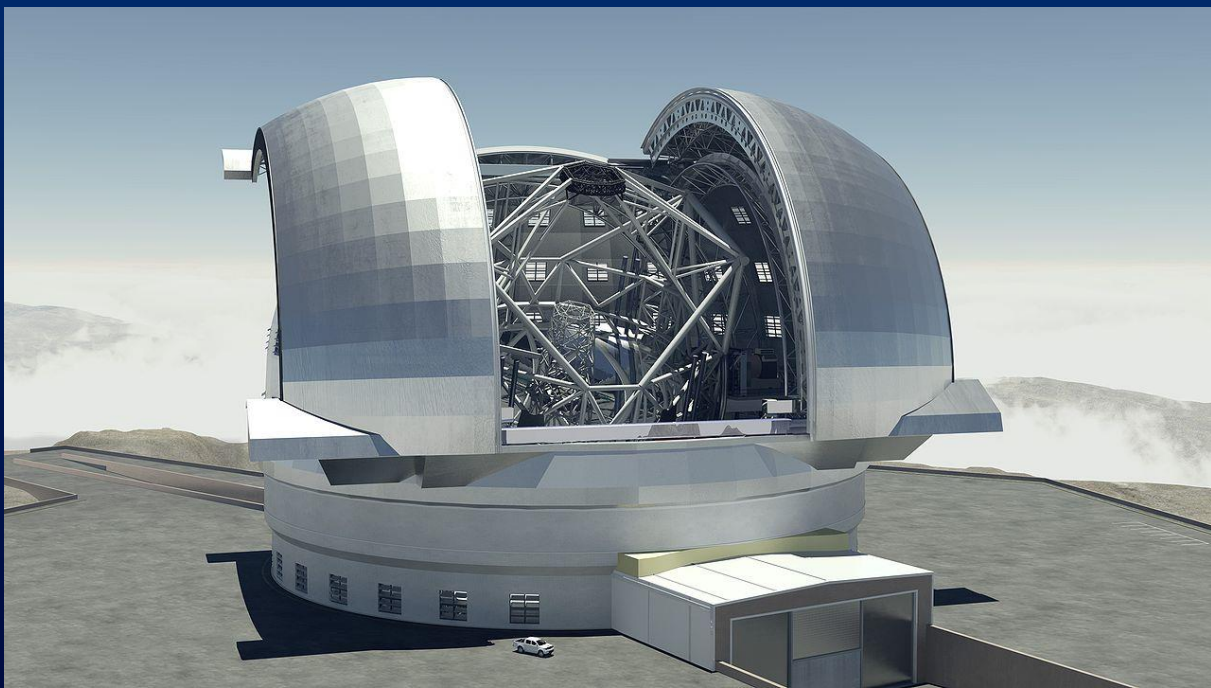
8.4 m x 7 → 24.5 m



European Extremely Large Telescope (E-ELT)

(歐洲) 超大望遠鏡

智利 Cerro Armazones
(2024)



Great Paris Exhibition Telescope
(lens at the same scale)
Paris, France (1900)

Yerkes Observatory
(40" refractor lens at the same scale)
Williams Bay, Wisconsin (1893)

Hooker (100")
Mt Wilson, California (1917)



Multi Mirror Telescope
Mount Hopkins, Arizona (1979-1998)



BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia (1975)



Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada (2003)



Gala
Earth-Sun L2 point (2014)

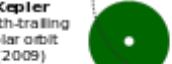


James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point (planned 2018)

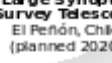
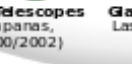
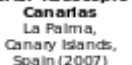


Tennis court at the same scale

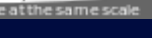
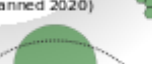
Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China (2009)



Gran Telescopio Canarias
La Palma, Canary Islands, Spain (2007)



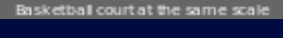
Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)



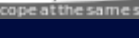
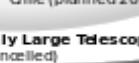
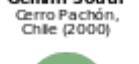
Subaru Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1999)



Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)



Gemini North
Mauna Kea, Hawaii (1999)



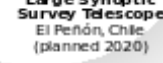
Gemini South
Cerro Pachón, Chile (2000)



Large Binocular Telescope
Mount Graham, Arizona (2005)



Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile (planned 2020)



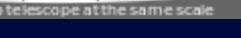
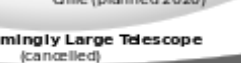
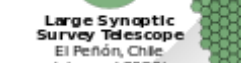
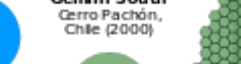
Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)



Magellan Telescopes
Las Campanas, Chile (2000/2002)



Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)



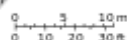
Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)

Arecibo radio telescope at the same scale

European Extremely Large Telescope
Cerro Armazones, Chile (planned 2022)



Human at the same scale



Basketball court at the same scale

大不大又怎樣？

陳文屏

中央大學天文所、物理系
2018.05.27@台北市立圖書館

天文望遠鏡口徑越大

□ 集光能力越強 $\propto D^2$

□ 解析能力越好 $\propto D$

□ 造價越高 $\propto D^{2.5\sim 2.8}$

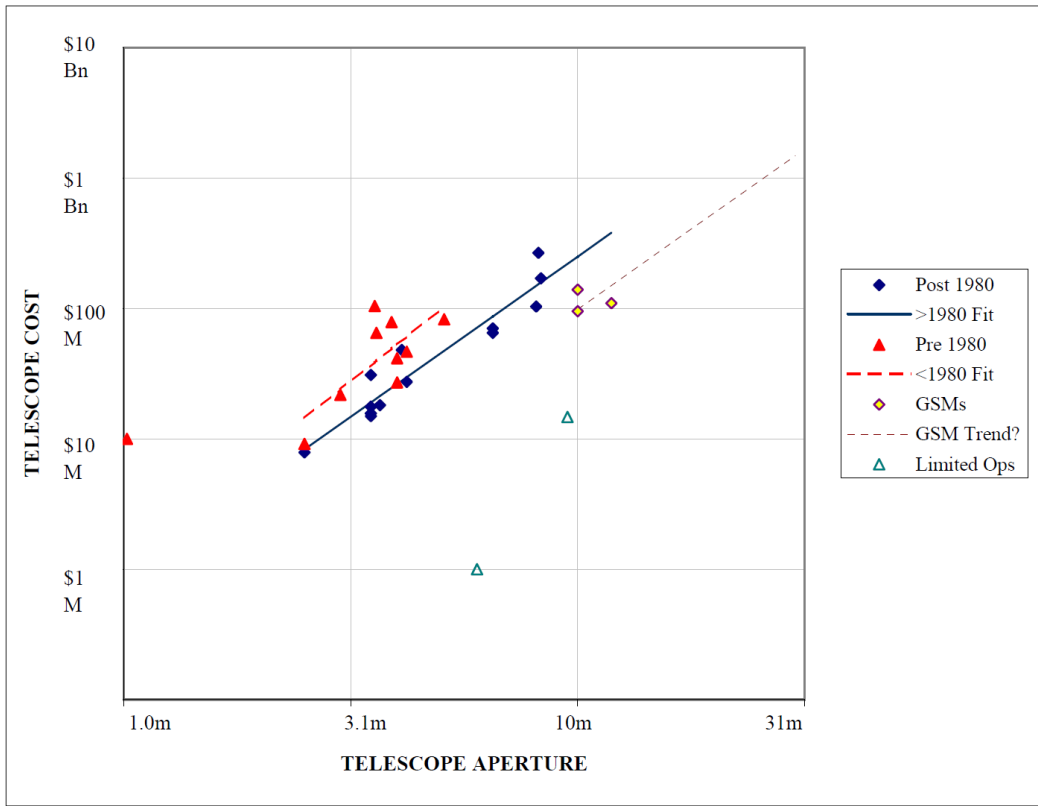


Fig. 1.— Cost versus aperture diameter for optical telescopes built before and after 1980. For the pre-1980 fit, $\text{cost} \propto D^{2.77}$, and for the post-1980 fit (exclusive of the giant segmented mirrors), $\text{cost} \propto D^{2.45}$. The two limited operations telescopes plotted are the UBC 6-m liquid mercury telescope and the 9-m (effective) HET.



北太平洋


- Siding Spring, Australia, 3.9 m
- Devasthal, India, 3.6 m
- Gaomeigu, China 2.4 m
- Doi Inthanon, Thailand 2.4 m
- Xinglong, China, 2.16 m
- Hanle, India 2.0 m
- Okayama, Japan, 1.88 m
- Bohyunsan, Korea, 1.8 m
- Mt John, New Zealand, 1.8 m




Devasthal Observatory

El=2450 m
Seeing 0.6''

Site
aerial
video



The 3.6 m telescope,
the largest in Asia
(for now)

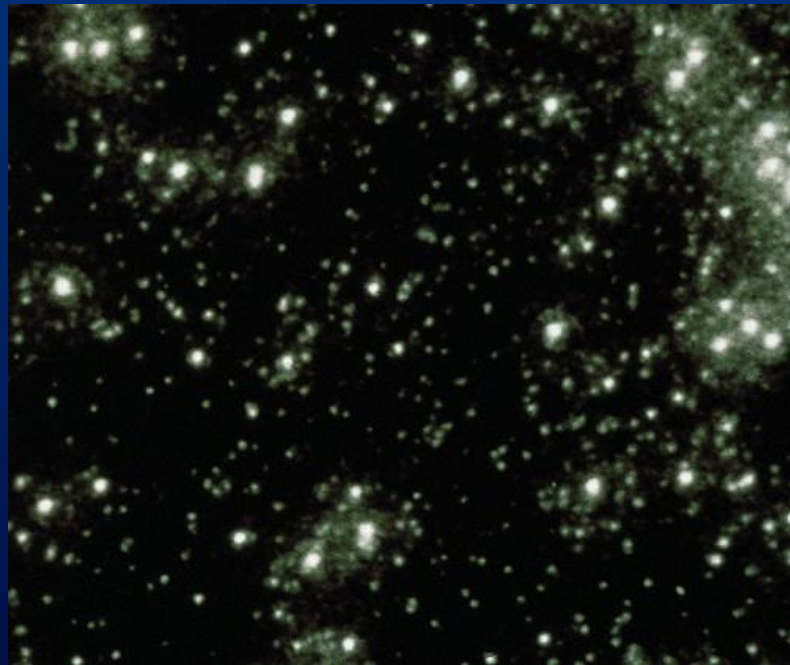
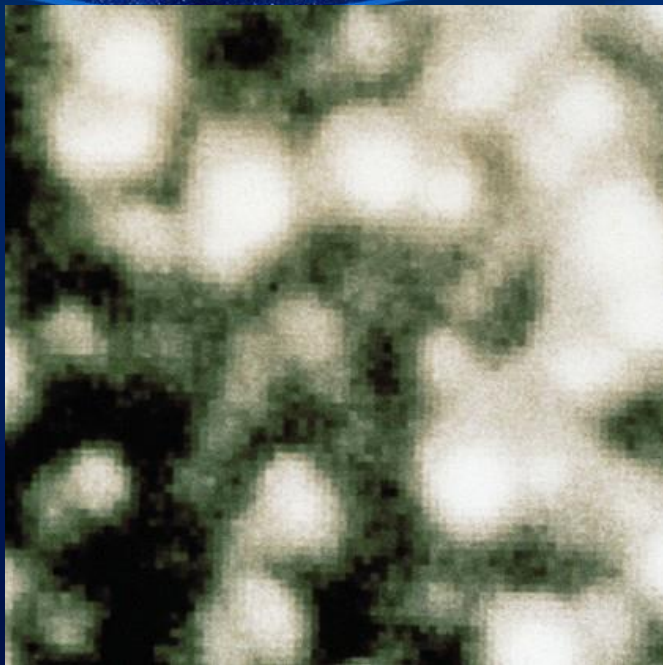


4 m liquid
mirror



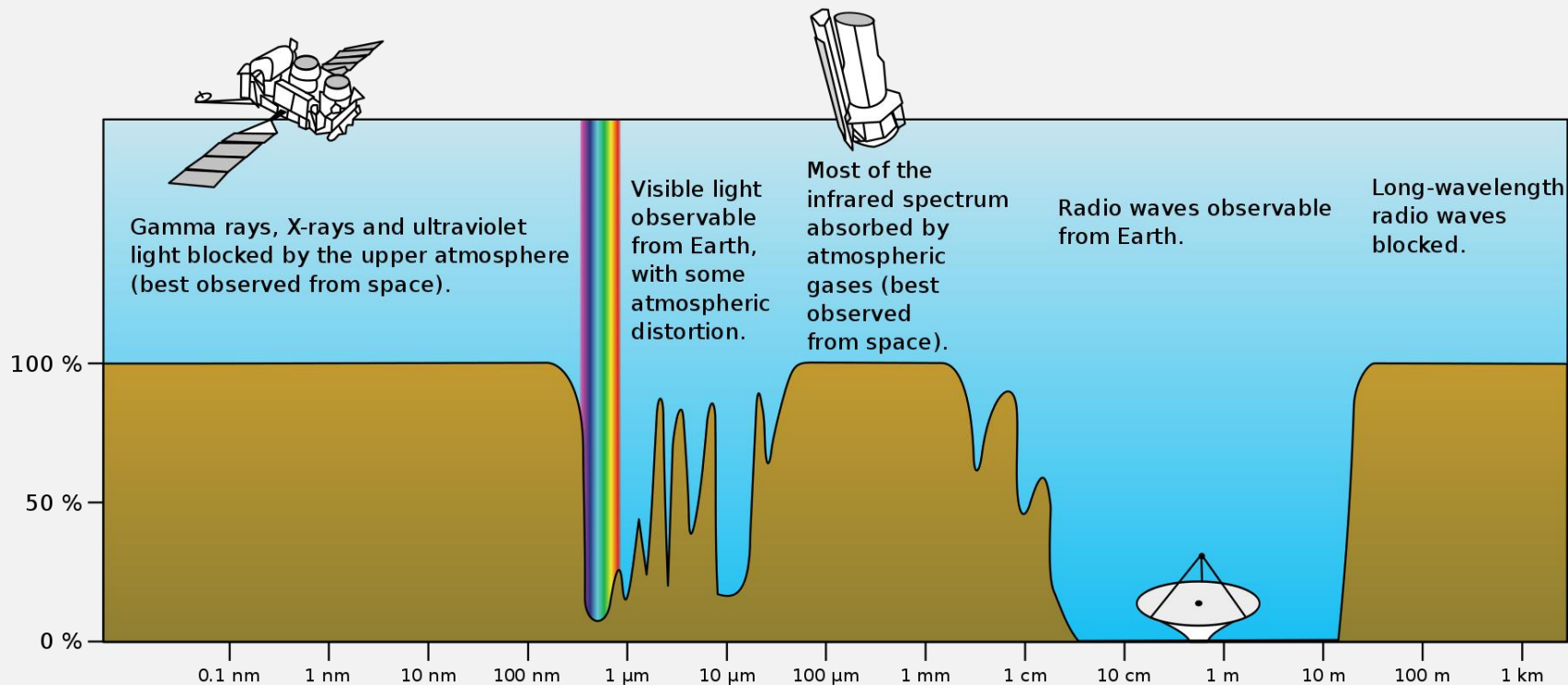
1.3 m DFM

空氣不斷流動，使得星星影像閃爍晃動，
分子也吸收了大部分波長的電磁波



在太空觀測則沒有大氣干擾

大氣不透明度



γ 射線、X射線
無法穿透大氣

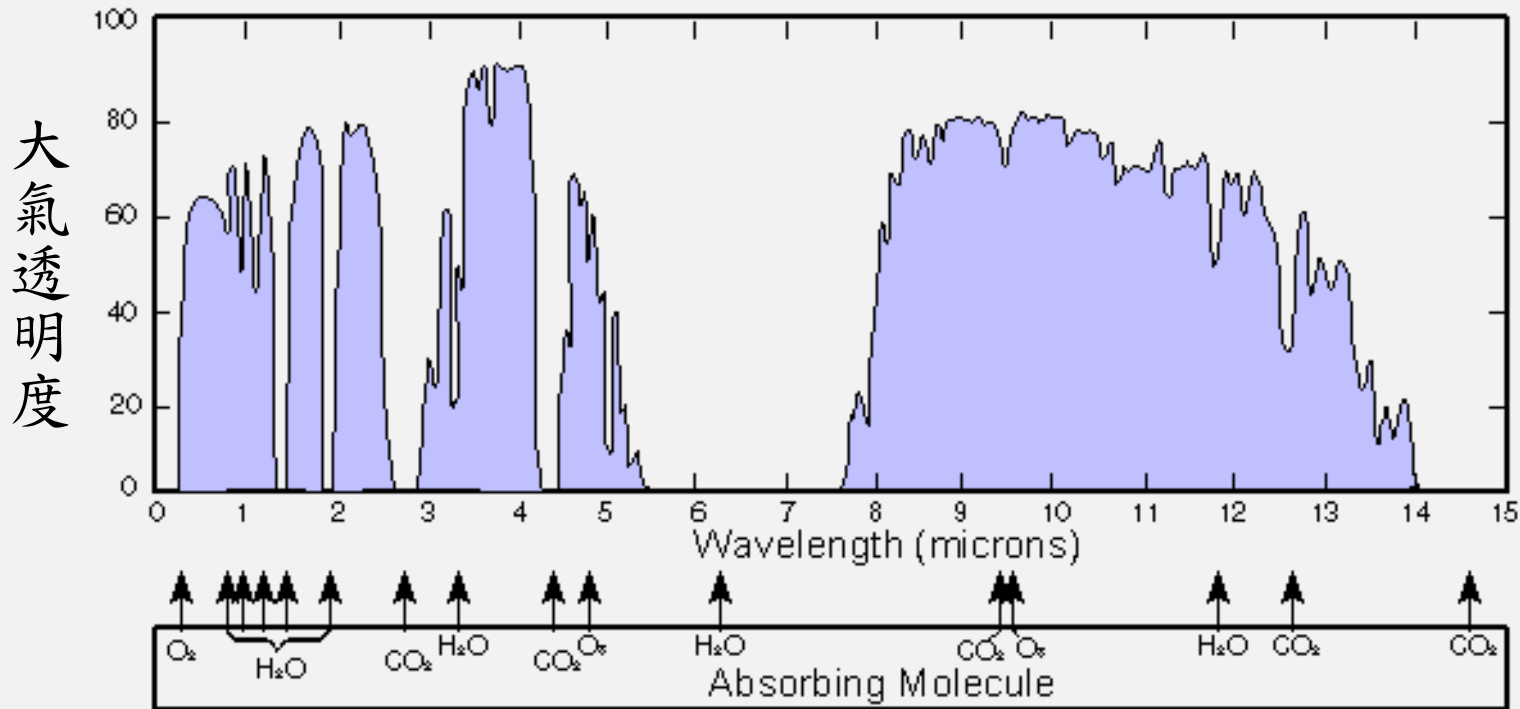
Wavelength

大部分紅外波段
無法穿透大氣

大氣窗口

長波無線電波
無法穿透大氣

大氣分子紅外吸收



光害（月光、照明、懸浮粒子）影響天文觀測



Time-Domain Astronomy (時域巡天先驅)

Panoramic Survey Telescope
And Rapid Response System
(Pan-STARRS) 泛星

美國夏威夷
Maui 島

1.8米望遠鏡
14億畫素相機

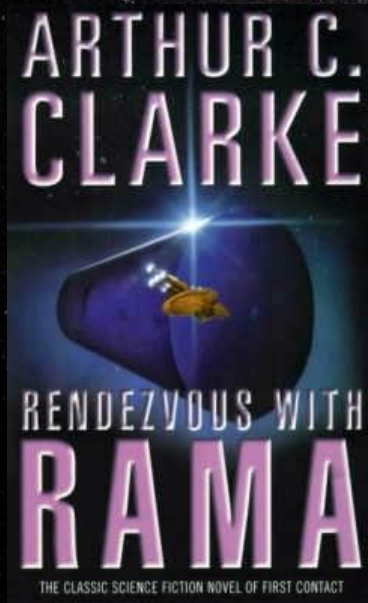
PS1 + PS2

廣角+解析力

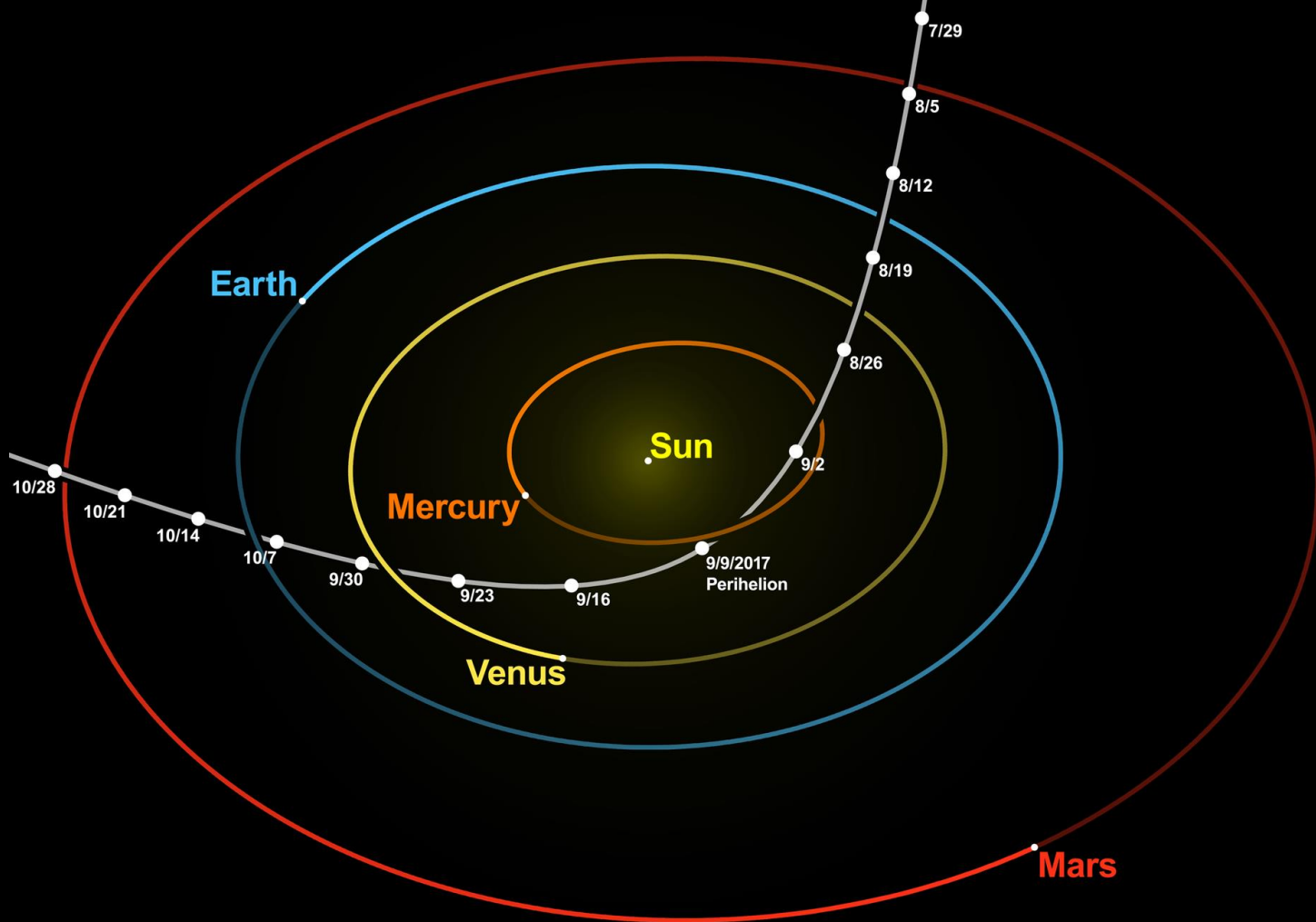


C/2017 U1 → A/2017 U1 → **1I/2017 U1 ('Oumuamua)**

(Hawaiian “scout”, first distant messenger)



2017/10/19 found by PS1, at first classified as a comet, then, with a hyperbolic trajectory, as an interstellar object, the first of its kind

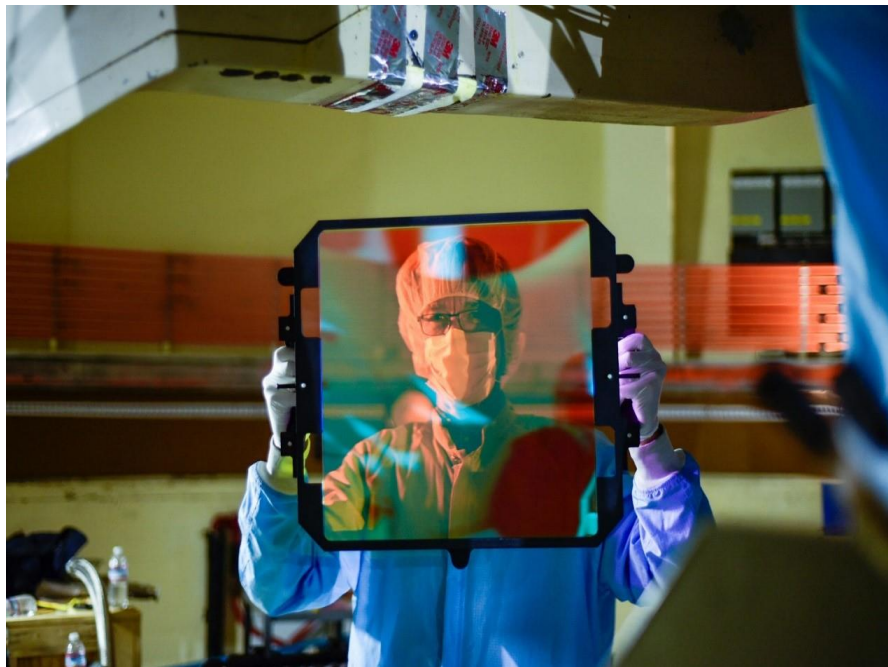


Zwicky Transient Facility (ZTF)

美國加州

Palomar Observatory

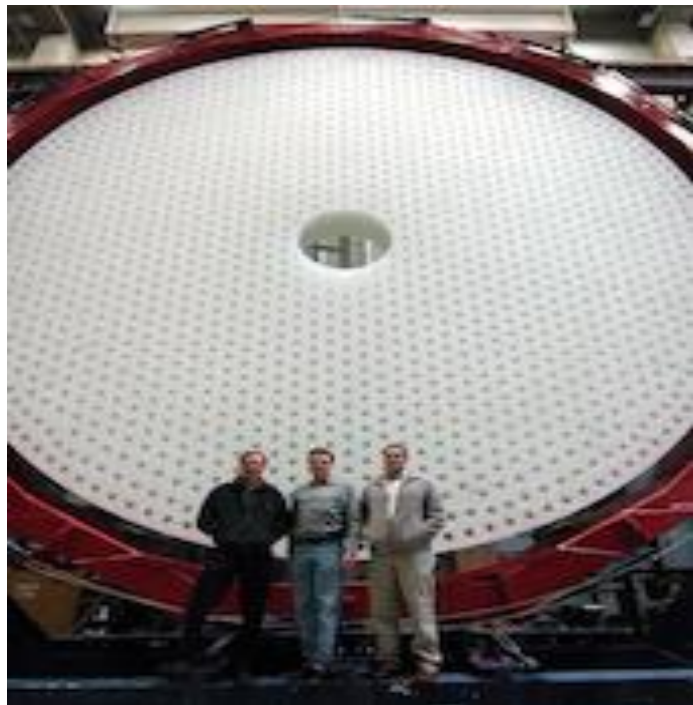
48" (1.2 m) 巡天 47 平方度
60" (1.5 m) 述性分類 SEDM
200" (5 m) 光譜



Large Synoptic Survey Telescope (LSST)

智利

Cerro Pachón (2022)



8.2米口徑

32億畫素相機

每週巡天兩次

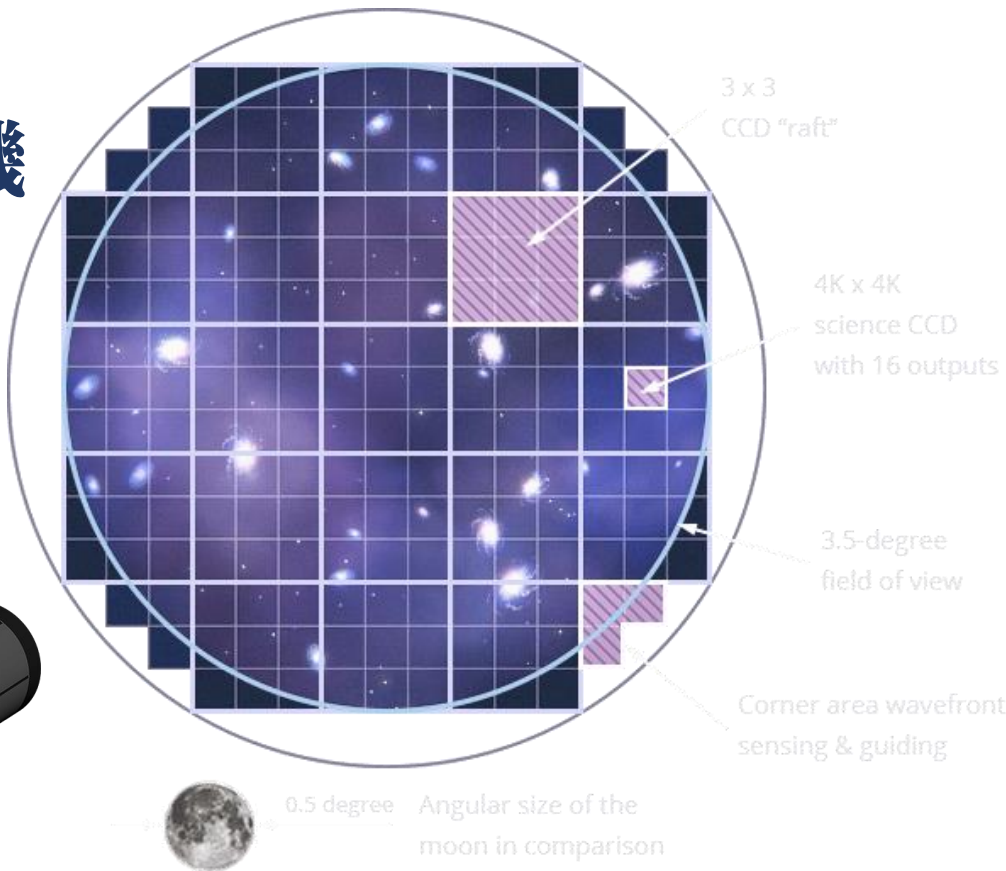
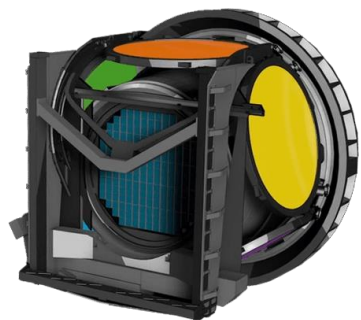
每隔20秒曝光

15秒

10年內每天區

觀測1000次

LSST 的電子相機



64 cm
相當於
3.5度張角

21 (3 × 3) = 189 顆 CCD 感光晶片 ; 3.2 Gpix ; 冷卻到攝氏 -100 度

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

智利 阿塔卡馬沙漠



海拔5000公尺

包含66座12米與7米的天線構成的干涉陣列

世界上長波靈敏度最高、解析力最強大的望遠鏡

Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST)



中國 貴州

天眼 (Tianyan)

直徑 500公尺

世界上最大單天線
電波望遠鏡

依照自然地形建造

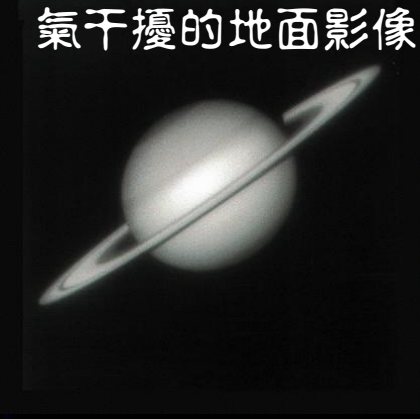
自適應光學 Adaptive Optics



一般地面影像



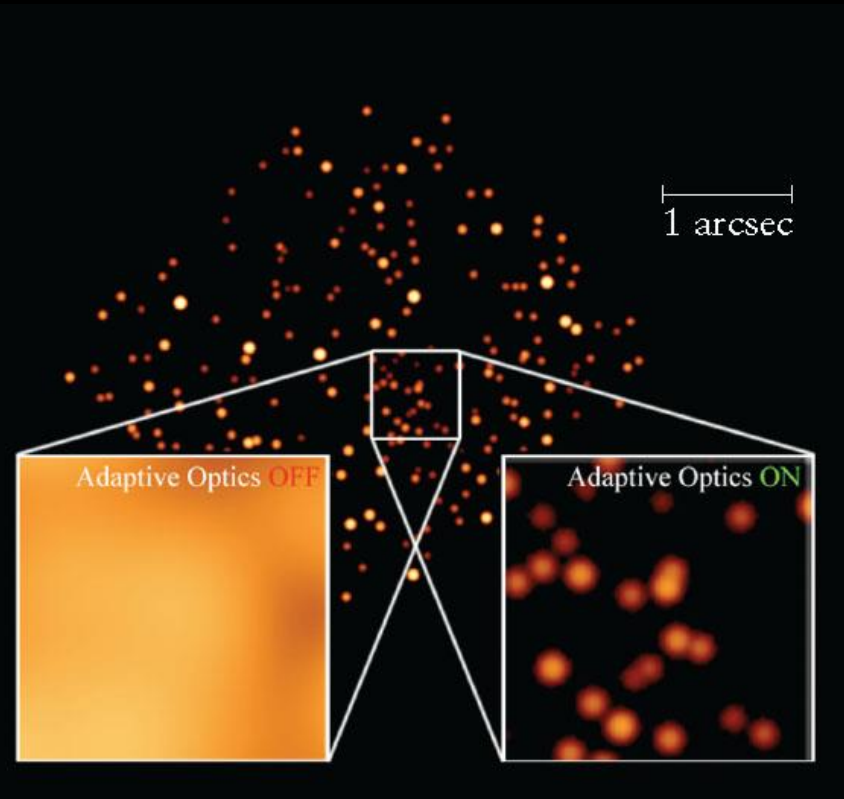
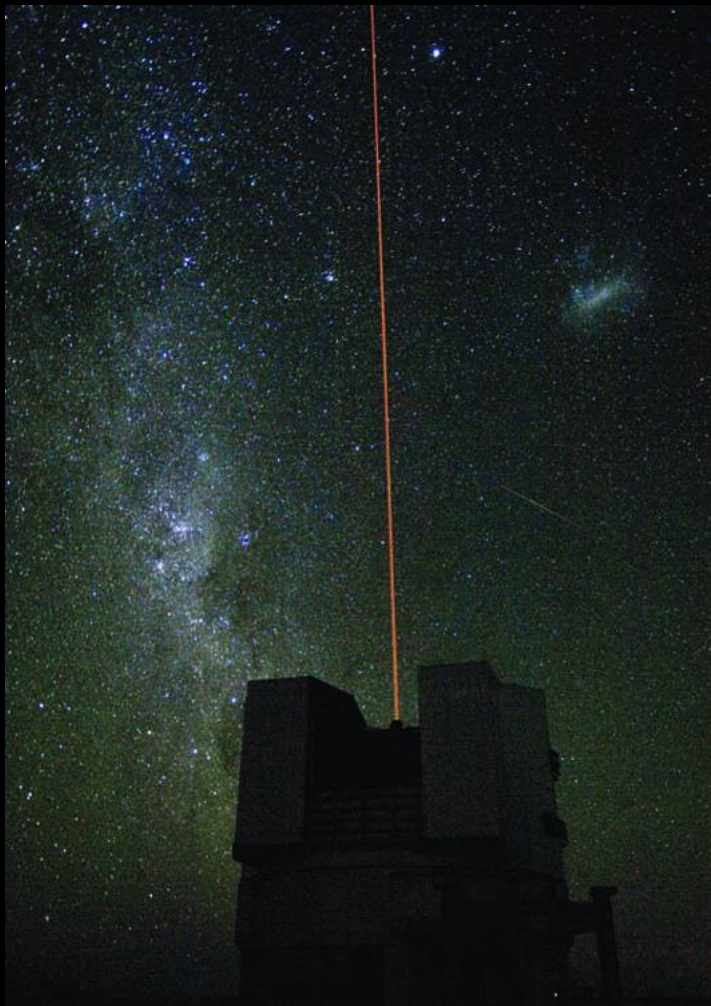
利用特殊技術減少大氣干擾的地面影像



582E5638 1897:02:19 07:07:00

太空中拍攝的影像





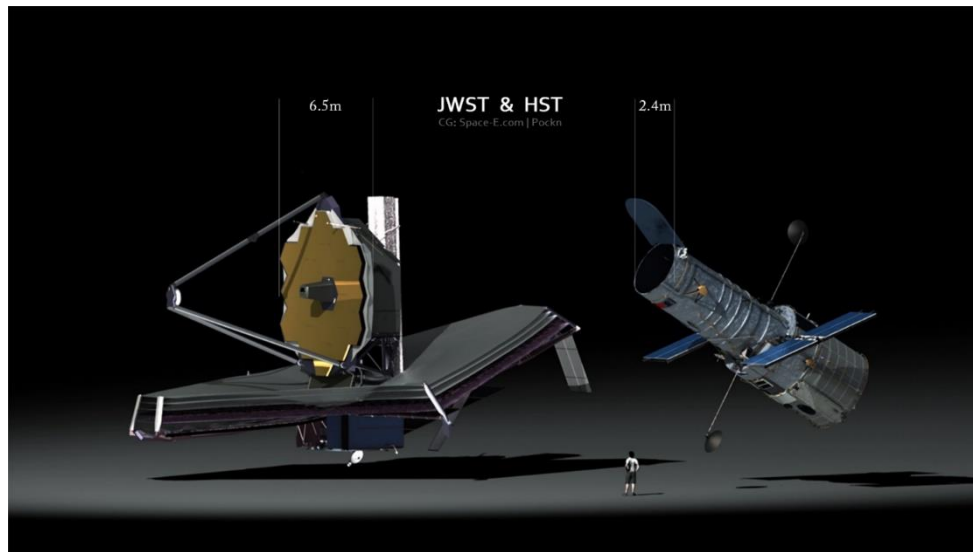
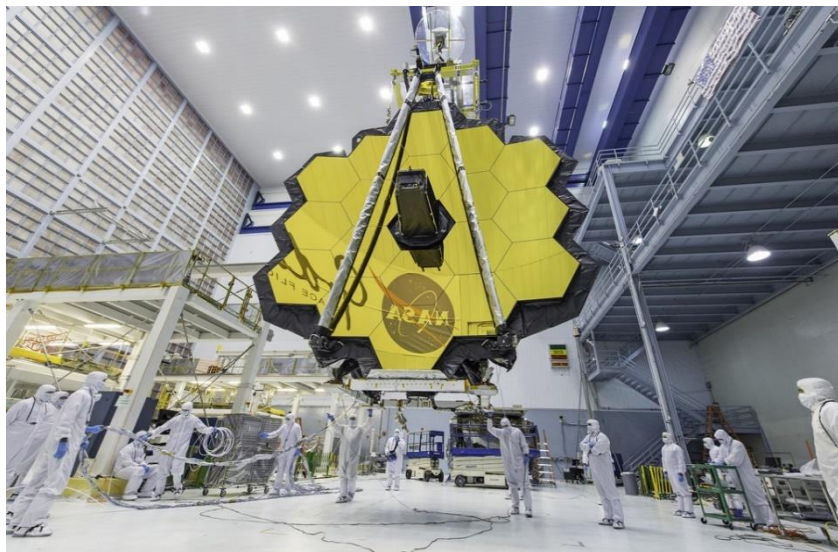
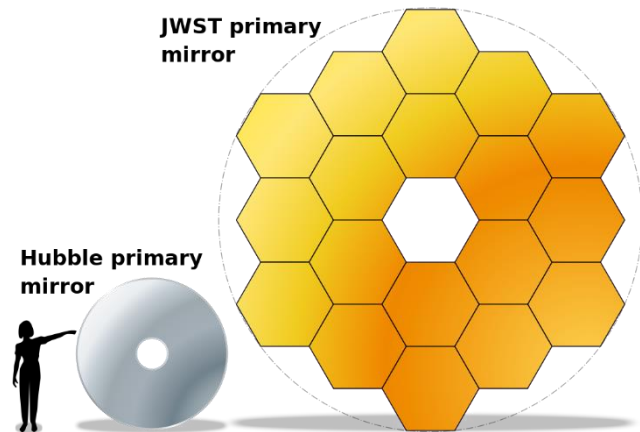
AO and SPHERE
animation

James Webb Space Telescope (JWST)

6.5米紅外太空望遠鏡

日地L2軌道

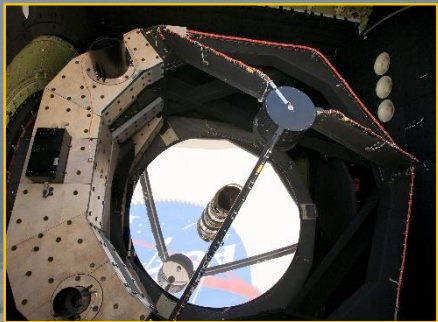
2019?



Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA)



2.5 公尺望遠鏡搭載於改裝後的波音 747SP 客機，工作波長 $0.3 \mu\text{m}$ 與 1.6 mm 成像與光譜觀測，尤其是大氣無法穿透的 $30\sim 300 \mu\text{m}$ 波段。飛行高度 $12\sim 14 \text{ km}$ ，避開 $> 99.8\%$ 的大氣水汽



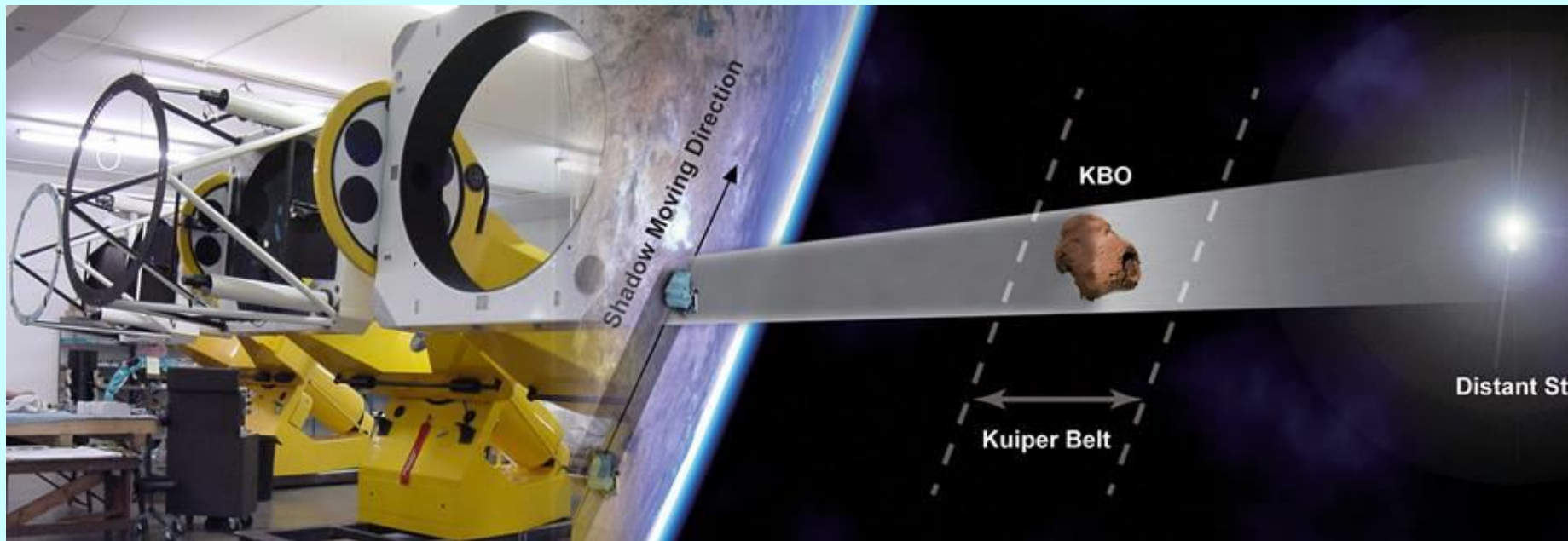
TAOS

捕捉古伯帶天體遮掩恆星的事件，藉以估計太陽系外圍冰冷小天體的數量

墨西哥

San Pedro Mártir

$3 \times 1.3 \text{ m}$; CMOS 偵測器，高速測光 $> 20 \text{ Hz}$



TAOS/BEST

中國 新疆
墨西哥





新疆奇台觀測站

奇台哈萨克族民房



哈薩克族叼羊比賽



TAOS/BEST

Bright-stars Exoplanet Survey by Transits (BEST) – A Progress Report

Wen-Ping CHEN 陳文屏
(中央大學 天文所)
以及
BEST 團隊



Installation of TAOS Telescopes

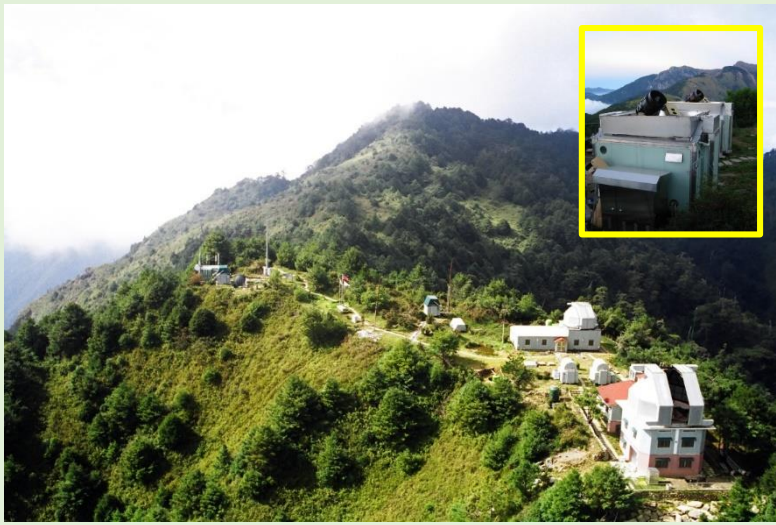


Disassembly of TAOS Telescopes

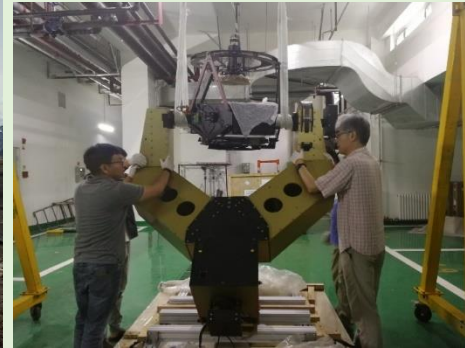


TAOS 1

From
Lulin
to
Qitai



In the ASIAA basement



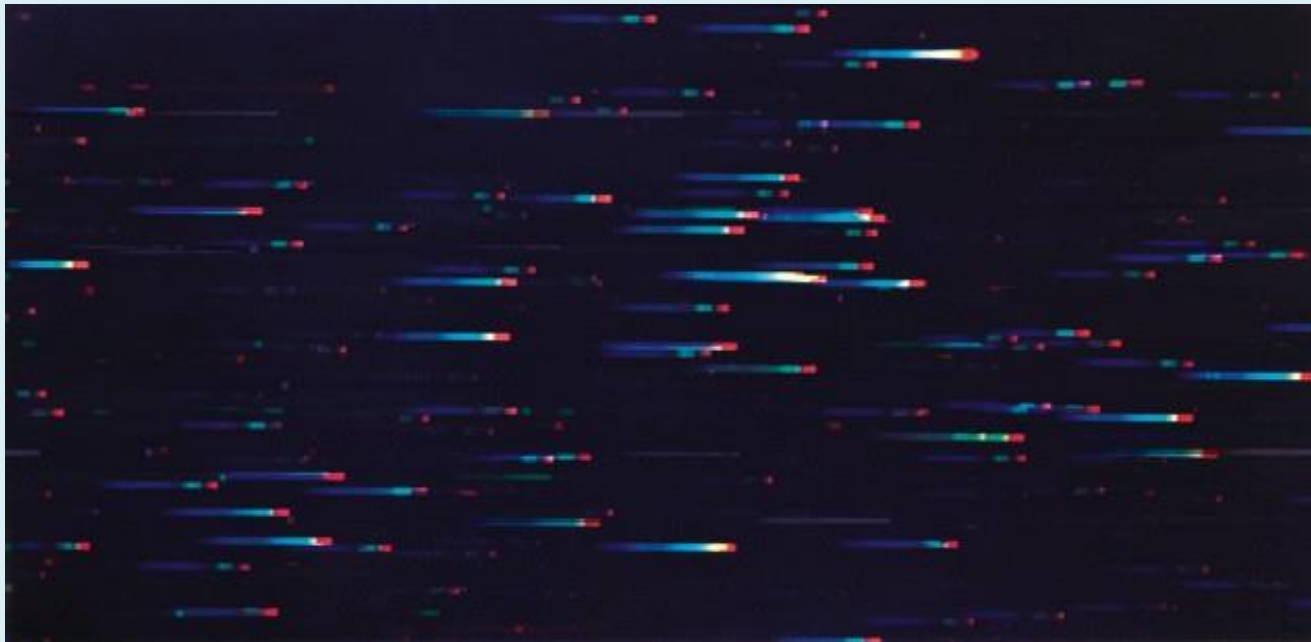
In the XAO basement





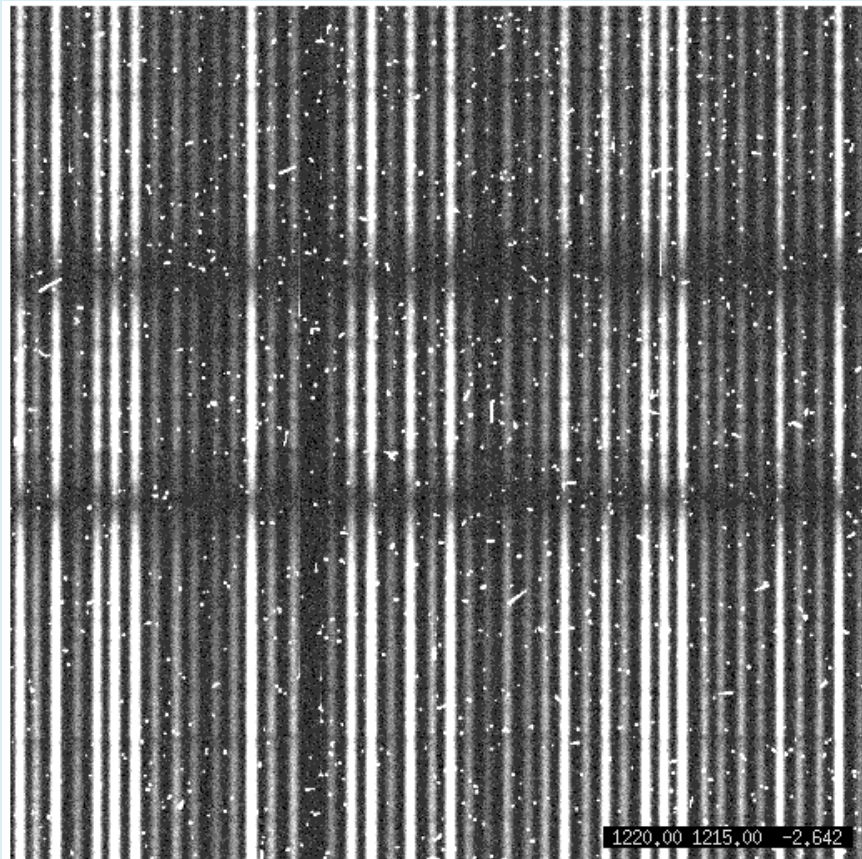
儀器的技術

Objective Prism (物端稜鏡)

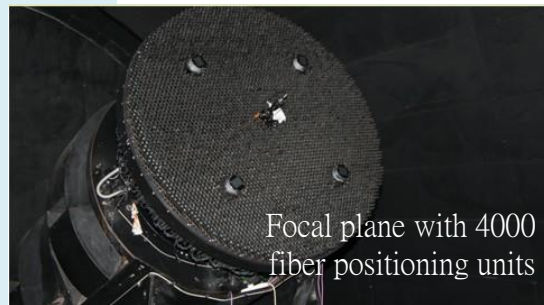


在物鏡前放置稜鏡 → 整個視野中的
每個天體都被分光 → 低色散光譜

Multi-Fiber Spectroscopy 多光纖光譜

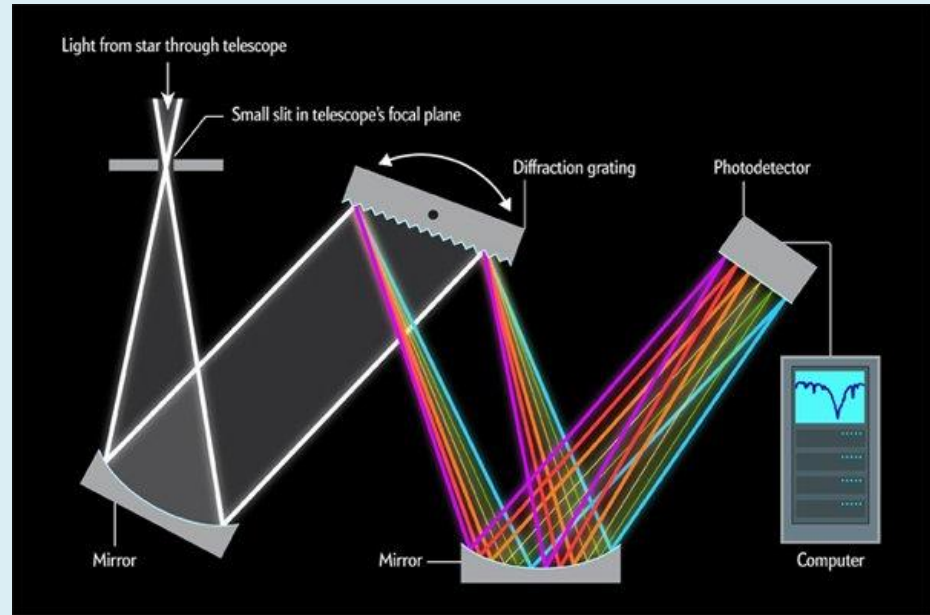
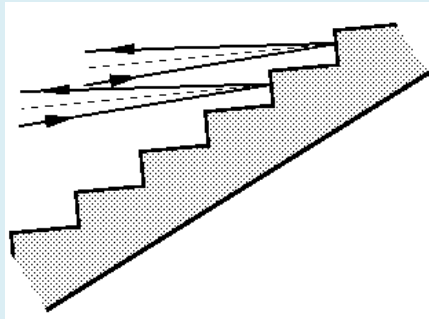


LAMOST 郭守敬望遠鏡@北京



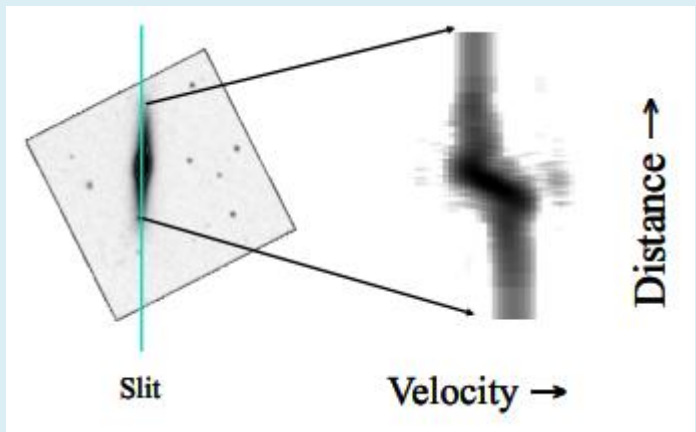
Echelle Spectrograph

- 傳統分光元件：稜鏡或繞射光柵（透射或反射）
- 階梯光柵：斜射到高階（10~100）→ 高色散光譜儀



Integral Field Spectrograph

集成視場光譜儀



傳統長狹縫光譜儀，色散垂直於狹縫，要觀測面源，必須移動狹縫取得不同位置的光譜資訊

現改在焦平面使用image slider
或小透鏡陣列 lenslet array

利用 IFU (integral field unit) 建造光譜儀
→ 成像與光譜兼具；每個位置有亮度也有光譜資訊；應用於天文、醫學及地球科學



Two dimensional original on-sky image



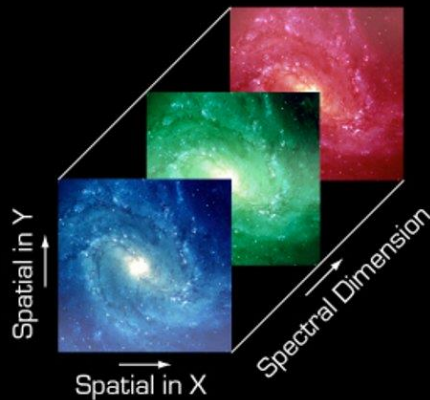
Optical slicing of the on-sky image



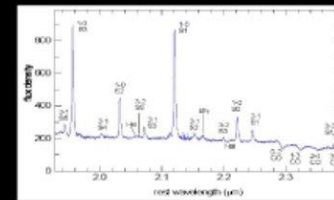
Spectral dispersion of the sliced image



Computer reconstruction of the 3D data cube

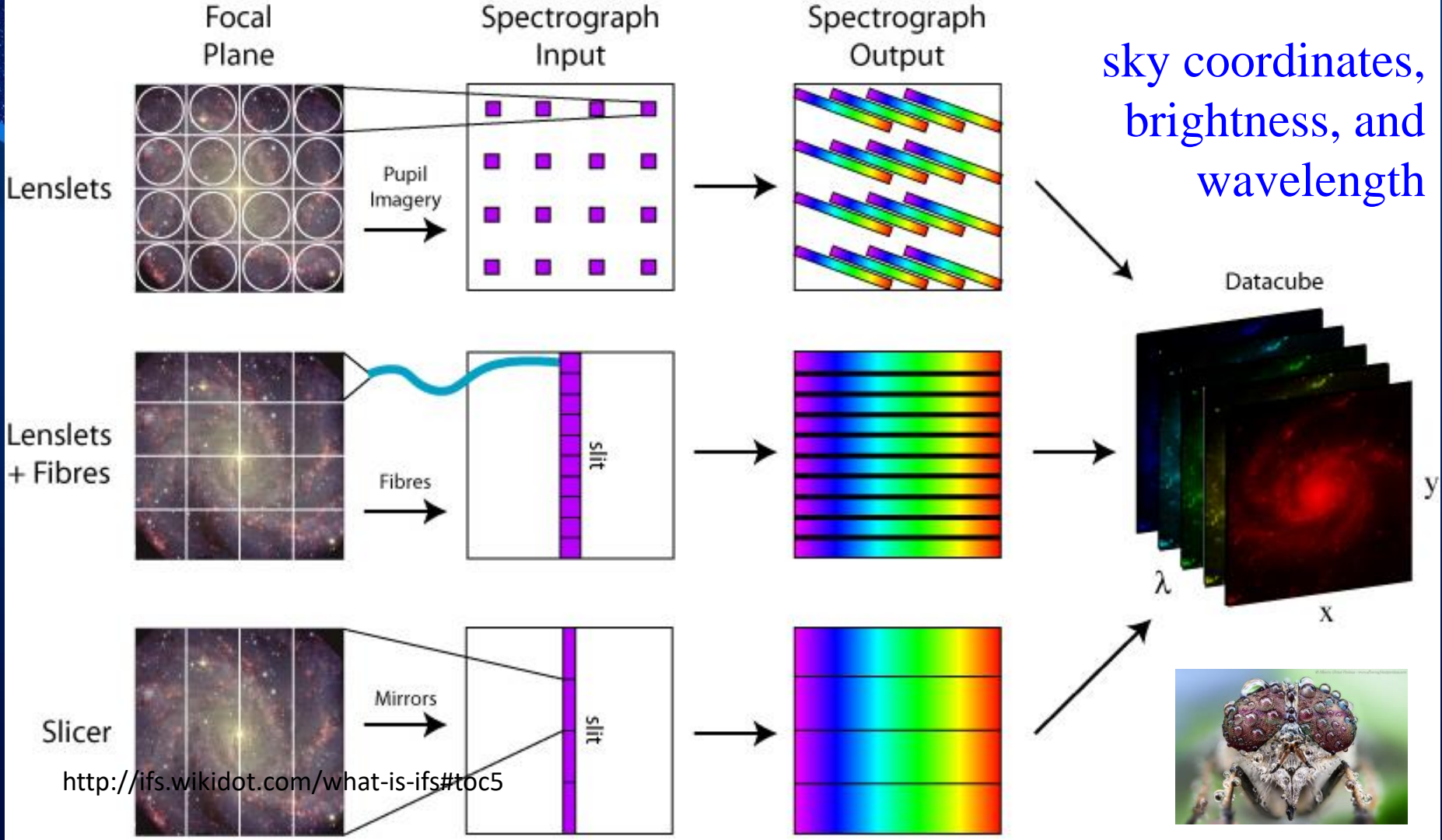


Spectrum of each 2D pixel



Computer reconstructed image

<https://www.eso.org/public/australia/images/eso0426i/>



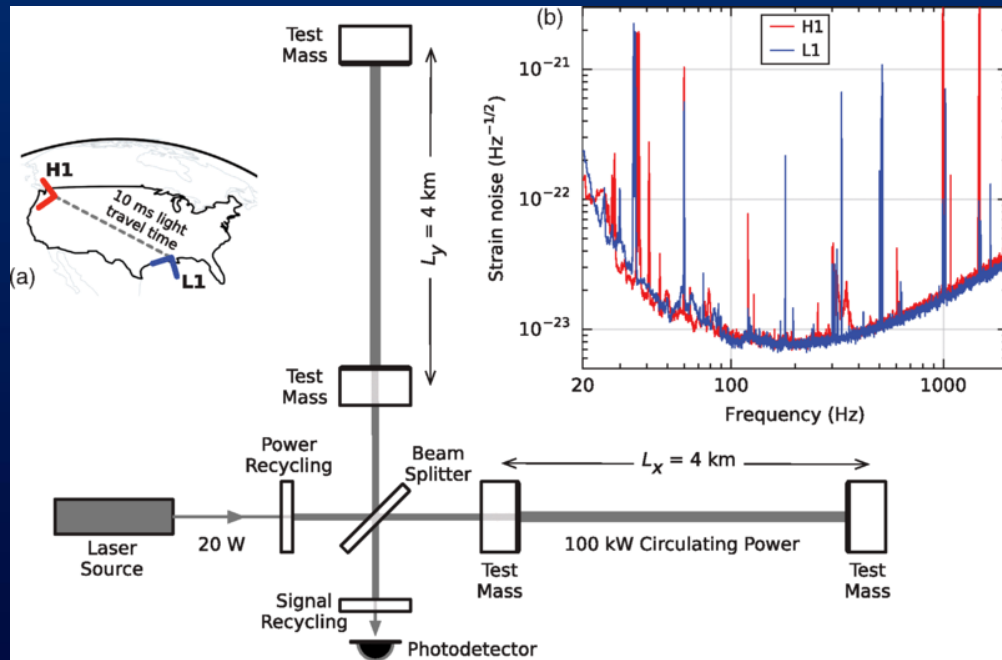
除了電磁波以外
宇宙射線、微中子、重力波

Multi-Messenger Astronomy (多元訊息天文學)

Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)

美國

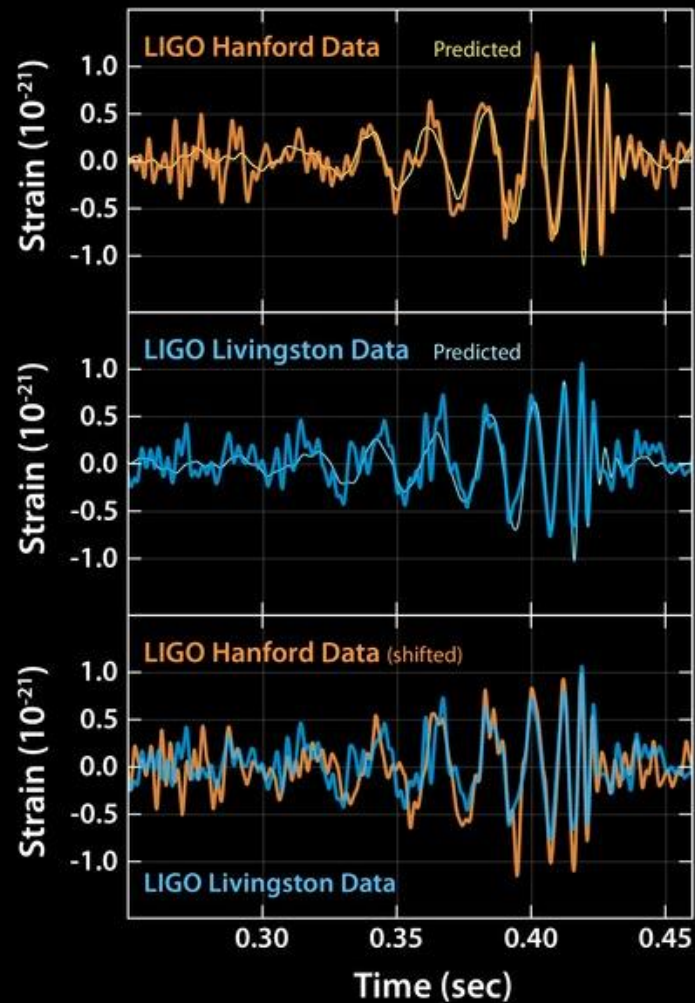
2002 → Advanced
LIGO (2015)





偵測重力波

100年前愛因斯坦廣義
相對論就已經預測存在
質量決定空間如何彎曲
空間決定質量如何運動



"For the greatest benefit to mankind"
après Nobel

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the

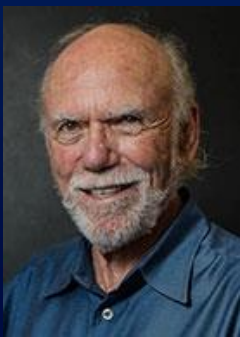
2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Illustrations: Mikael Embrechts, Nobel Prize Media, © 2017 The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engström

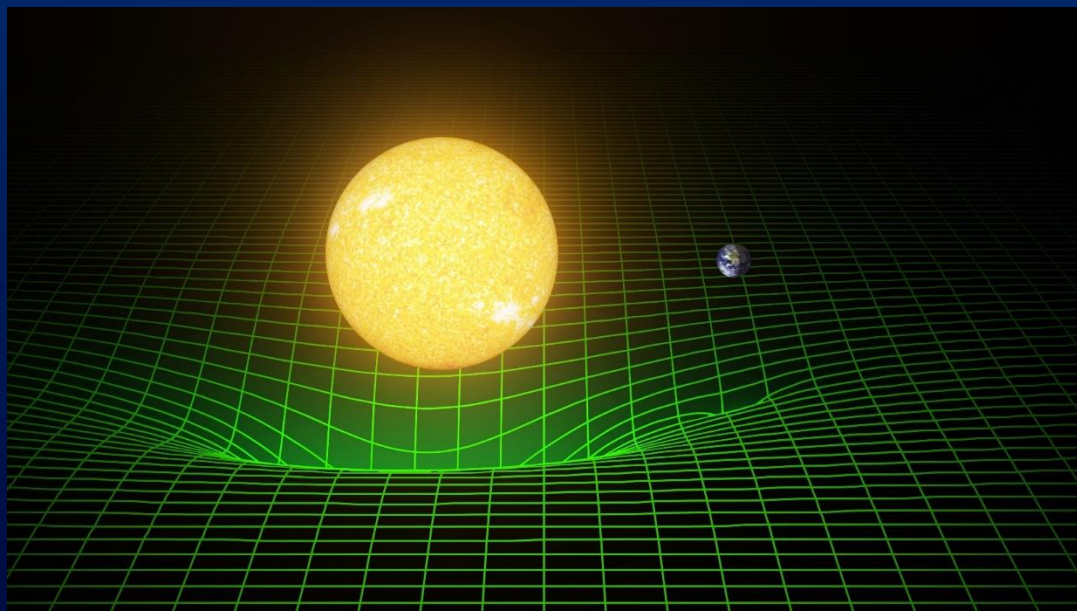


Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

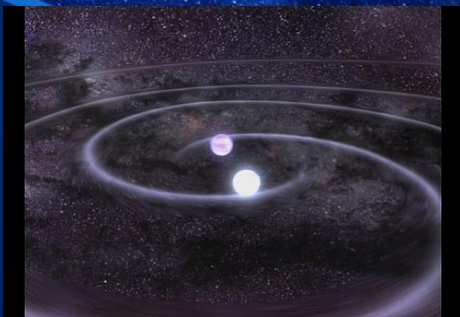
"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"



重力波訊號極微弱，很難偵測
只有極端變化，例如緻密的黑
洞或中子星合併訊號才夠強



Virgo interferometer



歐洲
(2007)

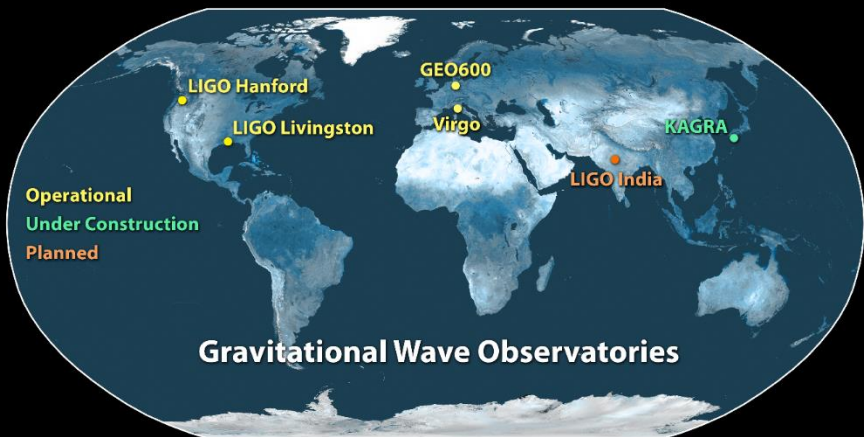
Las Campanas Observatory, Carnegie Institution for Science



Discovery Image
August 17, 2017

4 Days Later
August 21, 2017

© 1M2H Collaboration/UC Santa Cruz/Carnegie Observatories



Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA)

日本
(2018?)



觀察天空看起來多麼地順理成章。當耀眼的陽光與雲彩褪去，明暗交錯的光點自古以來引發了多少好奇：它們怎麼動呢？也有生老病死嗎？它們會影響我們，還是我們影響它們？

拜現代天文學進步之賜，這些居然都有了初步答案！但是我們是怎麼知道的呢？科學知識與儀器技術如雙足交替，文明加速快跑，這過程當中工程創新是亮麗研究成果背後的功臣。天文觀測的要求「更暗、更小、更遠、更快」，聽起來像是奧運口號，但要如何在望遠鏡、偵測器、計算機、分析技術、遮罩設計、克服大氣擾動等各方面落實？又怎樣看得更清楚，更有效率，甚至不僅止於電磁波而利用多元訊息來瞭解天體呢？讓我們一起認識並欣賞挑戰極限問題的力與美。

爸媽以為我在幹啥

What mom and dad

thought I was doing ...



孩子以為我在幹啥



老婆以為我在幹啥



學生以為我在幹啥



我希望在幹啥



實際上我在幹啥

What Mom and Dad thought I was doing ...



What my kids thought ...



What my wife thought ...



What my students thought ...

What I wish I were doing ...

What I am really doing ...