

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

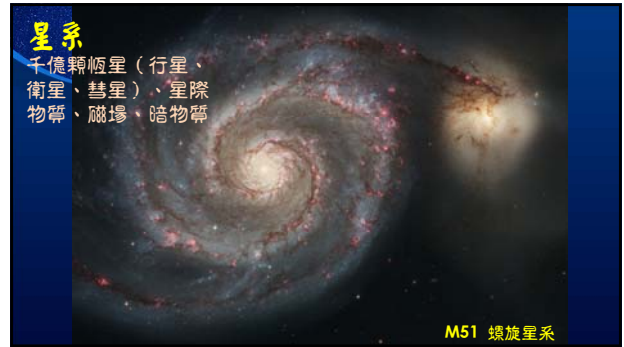


太陽系家族之「戶口名簿」

<p>恆星</p> <p>靠內部的行星 (水、金、地、火) 體積小、岩石質</p> <p>靠外部的行星 (木、土、天王、海王) 體積大、氣體、冰體</p>	<p>行星 八顆</p> <p>矮行星 五顆</p> <p>衛星 百來顆</p> <p>彗星 數億顆</p> <p>小行星 百萬顆</p>
---	---

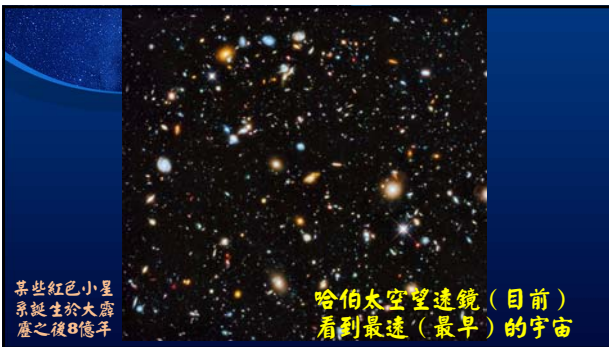
第一個人造衛星 Sputnik 1
直徑 58 cm
1957年10月4日
升空

從火星看地球與月球



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？有沒有另一個宇宙？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**

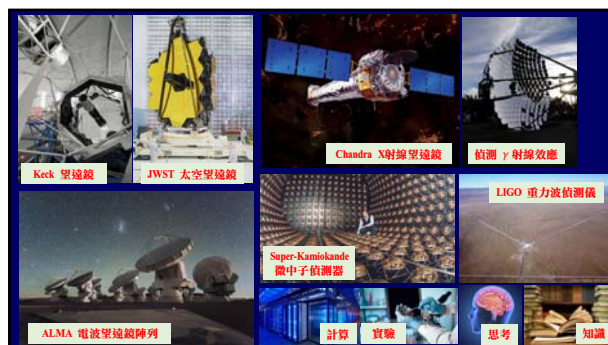
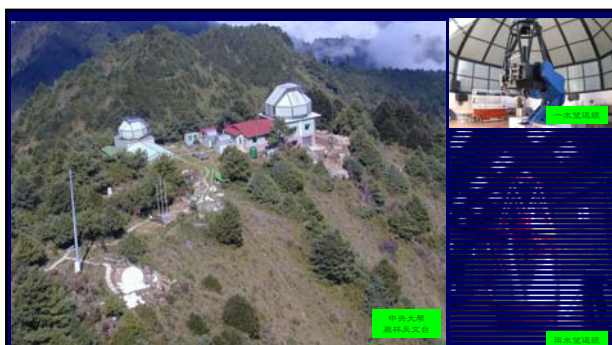
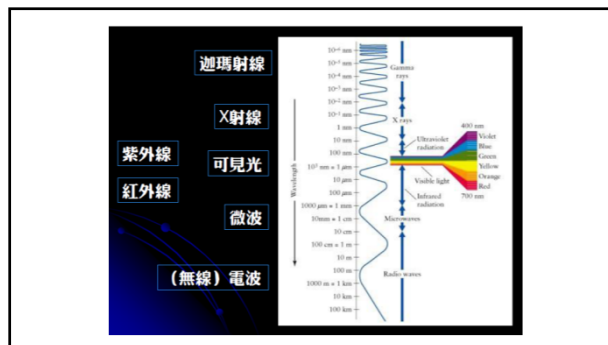
**探天的目的：
瞭解宇宙天體的本質與來龍去脈**

- 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

Electromagnetic Wave

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



望遠鏡的技術

望遠鏡利用折射、反射 集光、成像

望遠鏡主鏡的直徑 = 口径

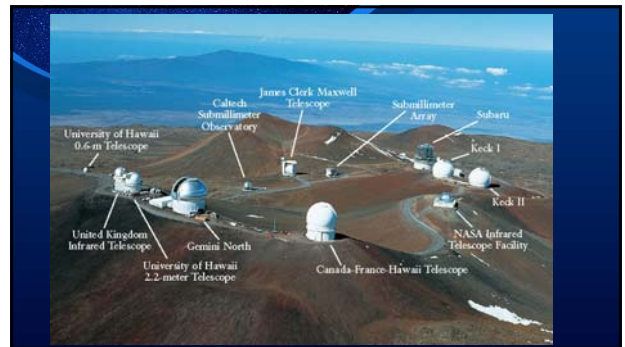


Segmented mirror

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

集光力 \propto 集光面積 \propto [口徑]²

望遠鏡口徑越大，角度分辨力越強，能看到越清楚的細節

解析力 \propto 最大的「不同視角」 \propto 口徑

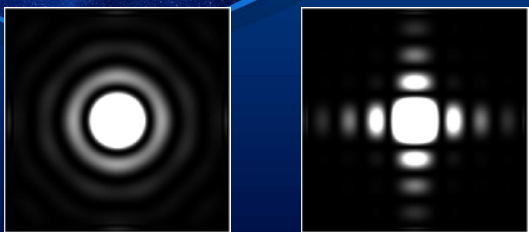
圓周360度 1度=60角分；1角分=60角秒

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

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

哈伯太空望遠鏡
D=24 m, $\lambda=500 \text{ nm}$, $\theta = 0.05 \text{ 角秒}$

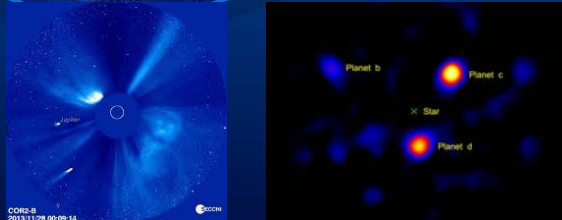
圓形孔徑的繞射圖形 **長方形孔徑的繞射圖形**



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

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

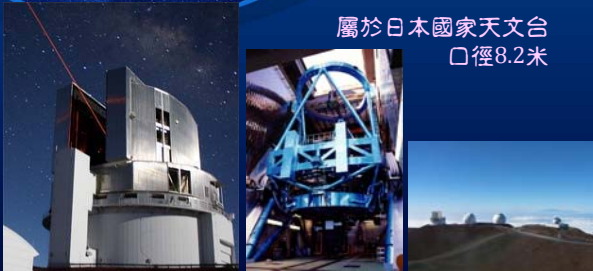
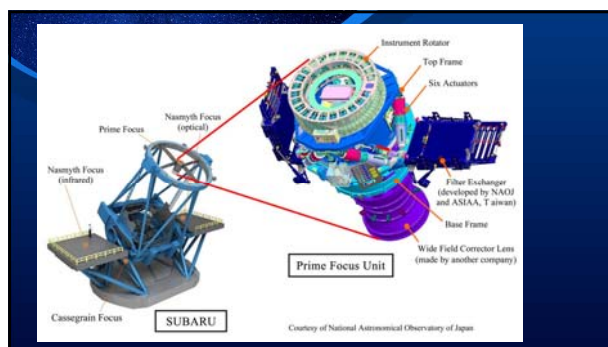


太陽衛星拍攝的太陽影像 + 日冕星

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

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) 美國夏威夷
30公尺望遠鏡 Maunakea?

The TMT International Observatory (TIO)

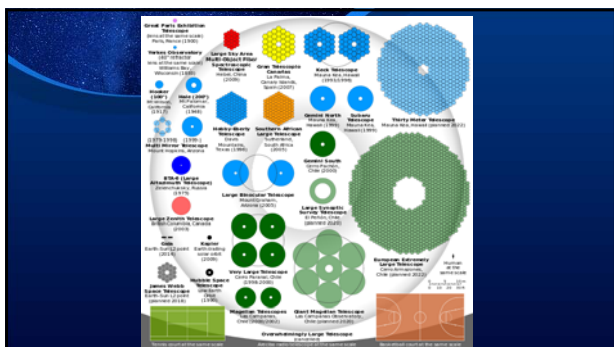
492 x 1.4 m hexagonal mirrors



Giant Magellan Telescope (GMT) 智利 Las Campanas
巨型麥哲倫望遠鏡 (2023)

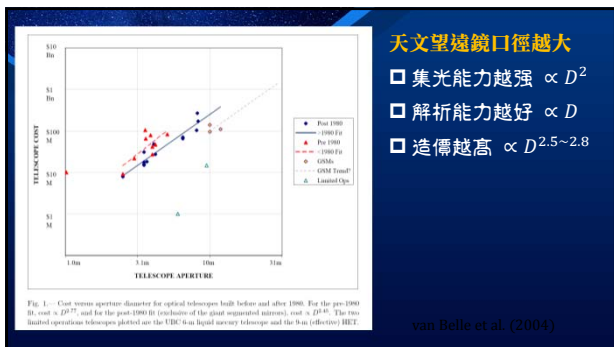
8.4 m x 7 → 24.5 m

European Extremely Large Telescope (E-ELT) 智利 Cerro Armazones
(歐洲) 超大望遠鏡 (2024)



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



Devasthal Observatory

El=2450 m
Seeing 0.6"

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

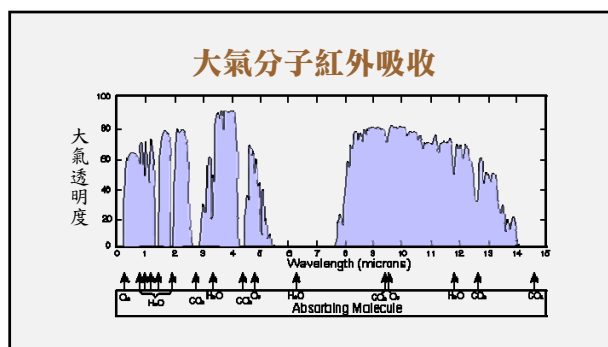
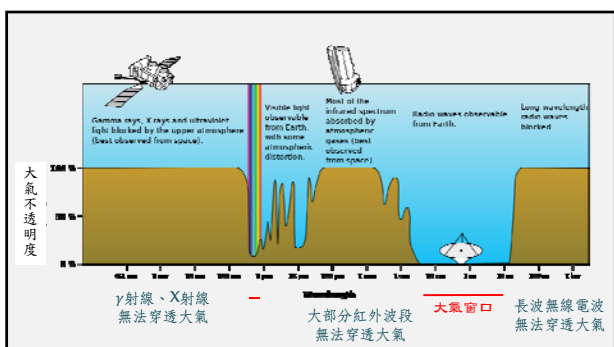
Site aerial video

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



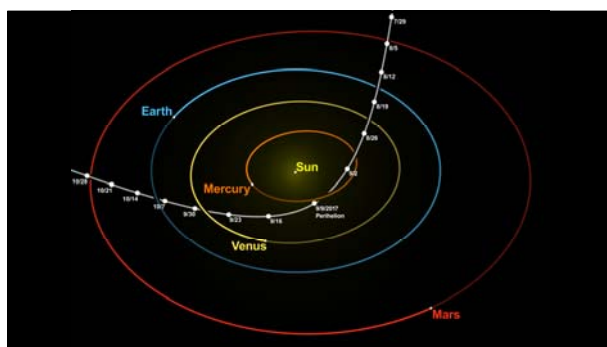


Time-Domain Astronomy (時域巡天先驅)
Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System (Pan-STARRS) 泛星 美國夏威夷 1.8米望遠鏡
 Maui 島 14億畫素相機
 PS1 + PS2 廣角+解析力

C/2017 U1 → A/2017 U1 → 1I/2017 U1 ('Oumuamua)
 (Hawaiian "scout", first distant messenger)

ARTHUR C. CLARKE
 RENDEZVOUS WITH RAMA

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) 48" (1.2 m) 巡天 47 平方度
 美國加州 60" (1.5 m) 變性分類 SEDM
 Palomar Observatory 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

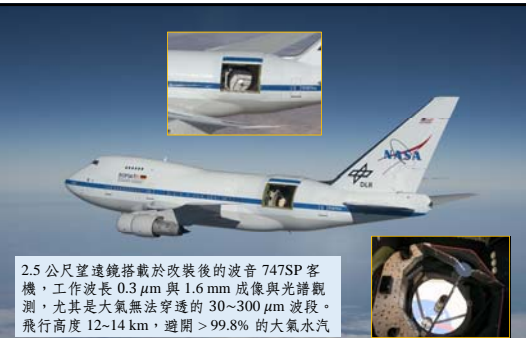
一般地面影像
利用特殊技術減少大氣干擾的地面影像
太空中拍攝的影像

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)



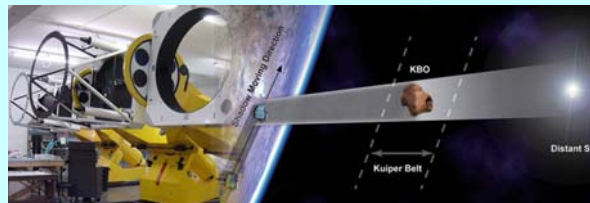
2.5 公尺望遠鏡搭載於改裝後的波音 747SP 客機，工作波長 $0.3\ \mu\text{m}$ 與 $1.6\ \text{mm}$ 成像與光譜觀測，尤其是大氣無法穿透的 $30\sim 300\ \mu\text{m}$ 波段。飛行高度 12~14 km，避開 > 99.8% 的大氣水汽

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 Matir

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



TAOS/BEST

中國 新疆
墨西哥



新疆奇台觀測站



奇台哈薩克族民房



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
Institution of TAOS Telescopes
University of TAOS Telescopes

TAOS 1

From Lulin to Qitai

In the ASIAA basement
In the XAO basement

儀器的技術

特定物質在特定能量（波長或頻率）發光或吸光

望遠鏡收集到的光線，由光譜儀分成不同能量的光

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

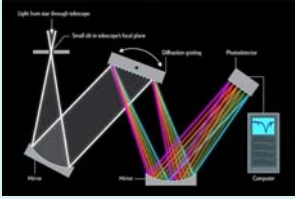
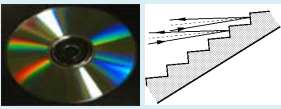
Multi-Fiber Spectroscopy 多光纖光譜

LAMOST 郭守敬望遠鏡@北京

Focal plane with 4000 fiber positioning units
Fiber positioning units

Echelle Spectrograph

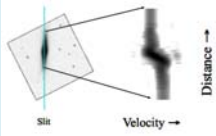
- ▷ 傳統分光元件：稜鏡或繞射光柵（透射或反射）
- ▷ 階梯光柵：斜射到高階（10~100）→ 高色散光譜儀


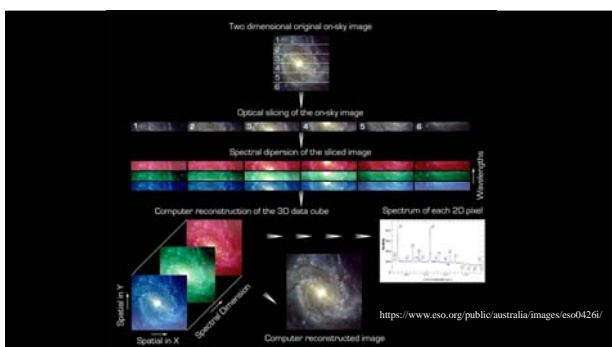
Integral Field Spectrograph

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

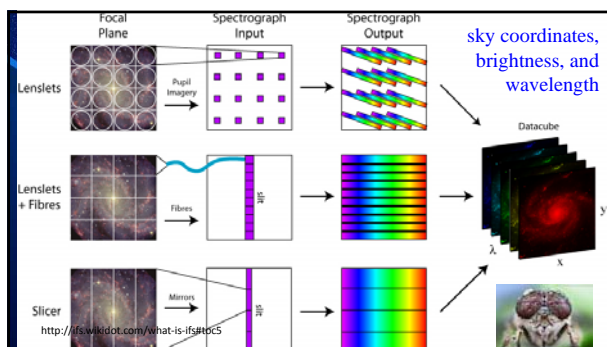


利用 IFU (integral field unit) 建造光譜儀
 → 成像與光譜兼具；每個位置有亮度也有光譜資訊；應用於天文、醫學及地球科學

Two dimensional original onsky image
 Optical slicing of the onsky 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/es0426/>



Focal Plane Spectrograph Input Spectrograph Output

Lenslets Pupil Imagery sky coordinates, brightness, and wavelength

Lenslets + Fibres Fibres Datacube

Slicer Mirrors

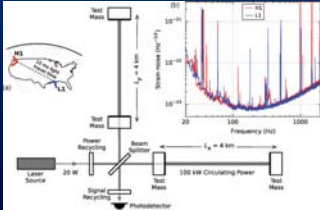
<http://ifs.wikiidot.com/what-is-ifs#PCS>

除了電磁波以外
 宇宙射線、微中子、重力波

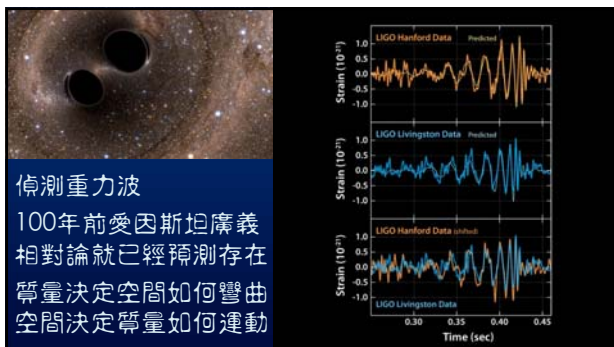
Multi-Messenger Astronomy (多元訊息天文學)

Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)

美國
 2002 → Advanced LIGO (2015)

Power Recycling
 Beam Splitter
 Signal Recycling
 20 W
 100 kW Circulating Power
 4 km



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

Strain (10^{-21})

LIGO Hanford Data Predicted

LIGO Livingston Data Predicted

LIGO Hanford Data Actual

LIGO Livingston Data Actual

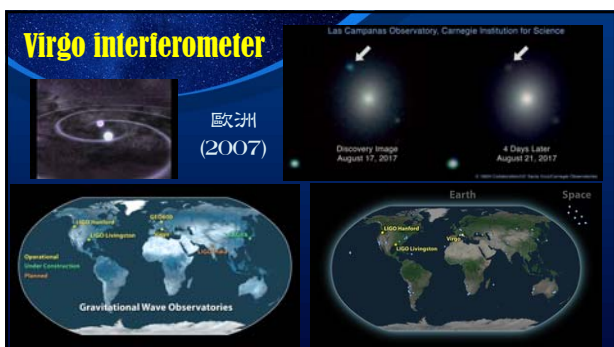
Time (sec)



2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

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

Gravitational Wave Observatories



Kamioka Gravitational Wave Detector (KAGRA)

日本 (2018?)

岐阜

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。



爸孺以為我在幹啥
What men 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

