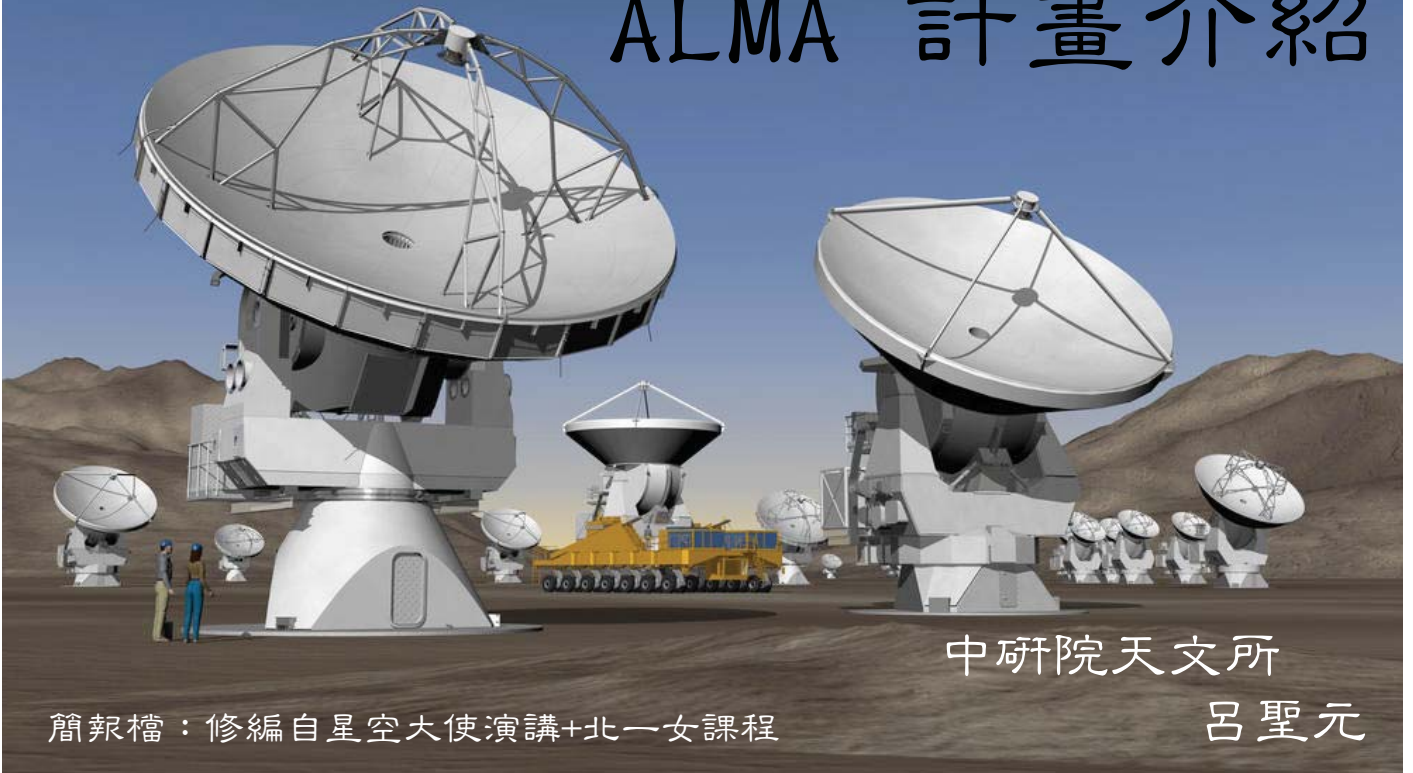


# 無線電望遠鏡、 無線電天文學與 ALMA 計畫介紹



中研院天文所

呂聖元

簡報檔：修編自星空大使演講+北一女課程

## 關鍵字

- 觀測 (observations)
- 電磁波 (EM wave)
- 無線電 (radio)
- 次毫米波 (submillimeter)
- 望遠鏡 (telescope)
- 干涉儀/陣列 (interferometry/array)
- 高解析度 (high-angular resolution)
- 次毫米波陣列 (Submillimeter Array, SMA)
- ALMA
- 原恆星 (protoplanets)
- 早期宇宙 (early Universe)

# 日常生活中的無線電

- 收音機 (AM) : 中廣新聞網 AM 648
- 收音機 (FM) : 台北愛樂電台 FM 99.7
- 2G/3G 手機
- 無線網路

# 日常生活中的無線電

- 收音機 (AM) : 中廣新聞網 AM 648 KHz
- 收音機 (FM) : 台北愛樂電台 FM 99.7 MHz
- 2G/3G 手機 : 900/1800MHz; 2100 MHz
- 無線網路 : 2.4 GHz

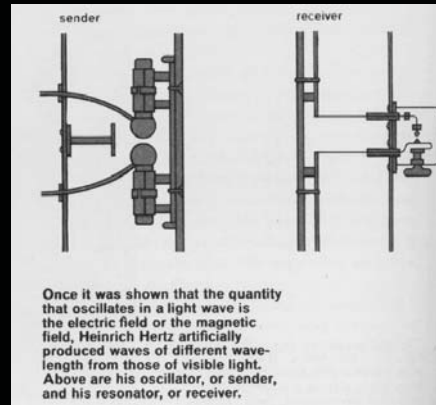
Hz = Hertz = 赫茲 ; 波動頻率的單位

1 Hz  
= 1 赫茲  
= 1/sec  
= 每秒一次

kHz = 1000 Hz  
MHz = 1000000 Hz  
GHz = 1000000000 Hz

# 赫茲 (Hertz)

- 赫茲 Heinrich Hertz (1857-1894)
  - 在 1888 年製作出約 5 米長的電波發射器 (transmitter)，由實驗證明馬克斯威爾之電磁波理論的預測。



- 馬克斯威爾 James Clerk Maxwell (1831-1879)
  - 在 1860s-1870 年間 結合當時電學與磁學的知識，提出馬克斯威爾方程式 (Maxwell's Equations)，認為光是電磁波的一種，進而預測長波長電磁波 (無線電波) 的存在



## 波動

$$\text{波速} = \text{波長} \times \text{頻率}$$

$$\begin{aligned} \text{光速} &= 3 \times 10^5 \text{ km/s} \\ &= 300000 \text{ km/s} \\ &= 300000000 \text{ m/s} \\ &= 300000000000 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

$$\text{波長} = \text{波速} / \text{頻率}$$

# 日常生活中的無線電

計算看看這些“光”波的波長

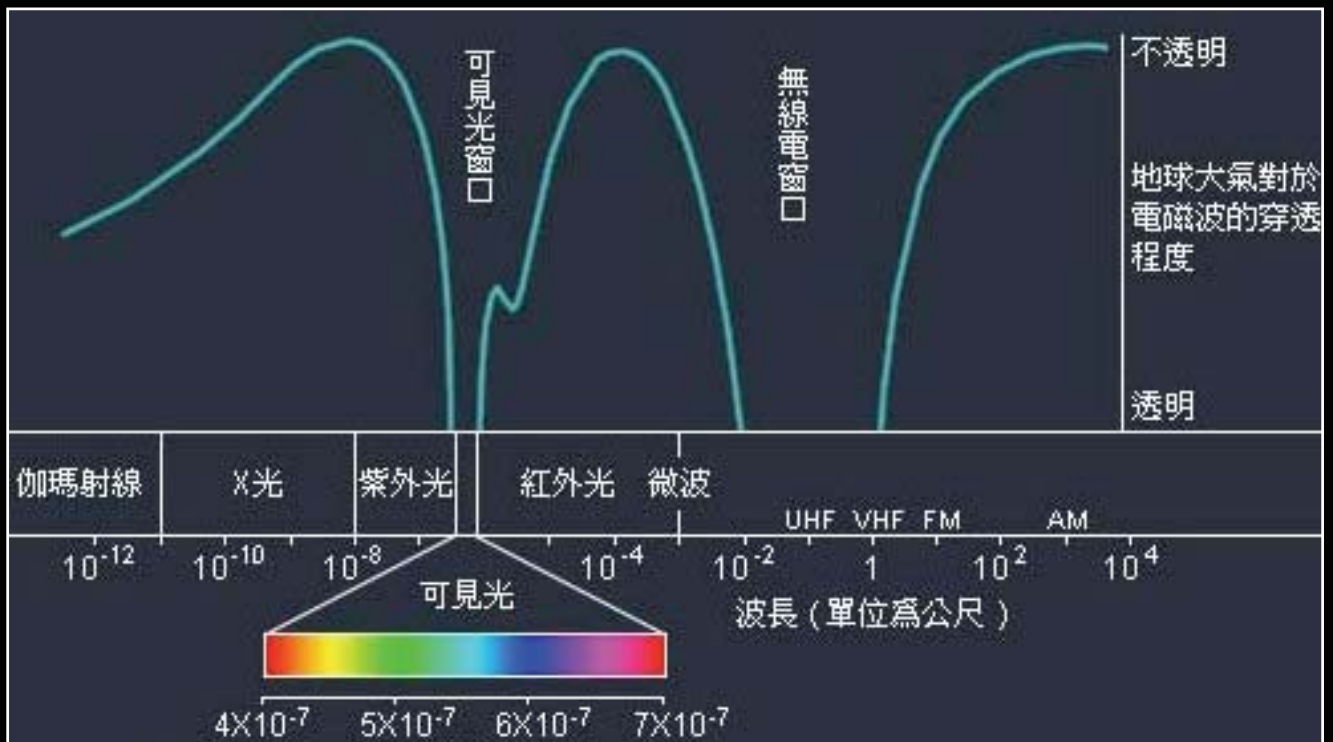
- 收音機 (AM) : 中廣新聞網 AM 648 KHz
- 收音機 (FM) : 台北愛樂電台 FM 99.7 MHz
- 2G/3G 手機 : 900/1800MHz; 2100 MHz
- 無線網路 : 2.4 GHz

# 日常生活中的無線電

計算看看這些“光”波的波長

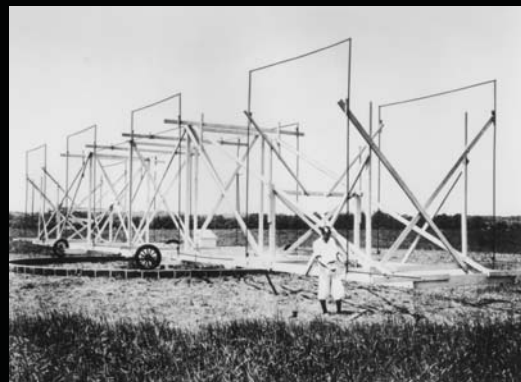
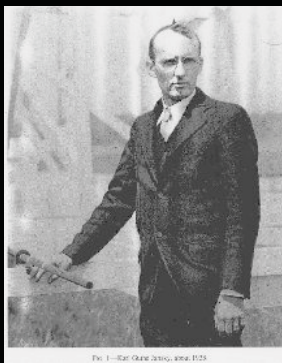
- 收音機 (AM) : 中廣新聞網 AM 648 KHz  
波長 : 463 m
- 收音機 (FM) : 台北愛樂電台 FM 99.7 MHz  
波長 : 3 m
- 2G/3G 手機 : 900/1800MHz; 2100 MHz  
波長 : 0.14 m
- 無線網路 : 2.4 GHz  
波長 : 0.125 m

# 電磁波頻譜



## 無線電望遠鏡的濫觴

- Karl Jansky (1905–1950)
  - 1928 年加入貝爾實驗室 Bell Telephone Lab 工作，從事跨大西洋無線電電話服務的雜訊研究。
  - Jansky 的 14.5 米 (20.5 MHz) 天線到了三種雜訊
    - 鄰近的雷電 (nearby thunderstorms)，遠方的雷電 (distant thunderstorms)，以及不知名的微弱訊號源 (faint steady hiss of unknown origin)
    - ➔ 持續但以近乎一日之週期變化
    - ➔ 銀河系中心的無線電波訊號!!!



# 無線電望遠鏡的濫觴

Green Bank, West Virginia, USA



## 天文學—觀測的學問

- 觀測對象：天體
- 觀測媒介：電磁波；基本粒子（宇宙射線、微中子、離子、星際塵埃）；重力波
- 觀測地點
  - 地面
    - 考量：便宜與便利，大氣與人類活動的影響
  - 太空
    - 考量：完美理想但昂貴
- 研究流程：偵測 (detection) / 校準 (calibration) / 成像 (imaging) / 分析 (analysis) / 科學詮釋 (interpretation) / 成果發表 (publication)

# 無線電望遠鏡的發展

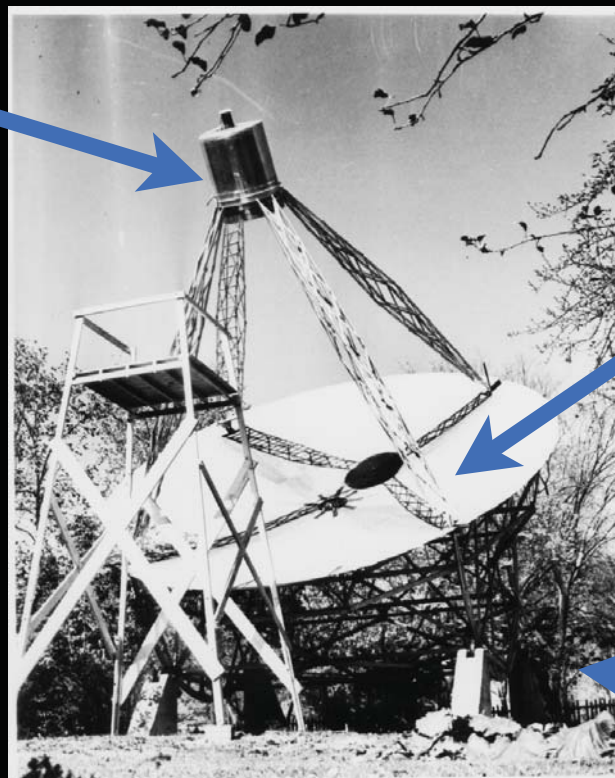
- Grote Reber (1911-2002)

- 火腿一族
- 申請貝爾實驗室工作遭拒，決定一切自己動手作
- 在自家後院蓋了一座約10米 (31.4 ft.) 的望遠鏡
- 使用了與光學望遠鏡相同原理的拋物面鏡面
- 於 1938 至 1943 年進行了 巡天的觀測



## (無線電) 望遠鏡的基本構造

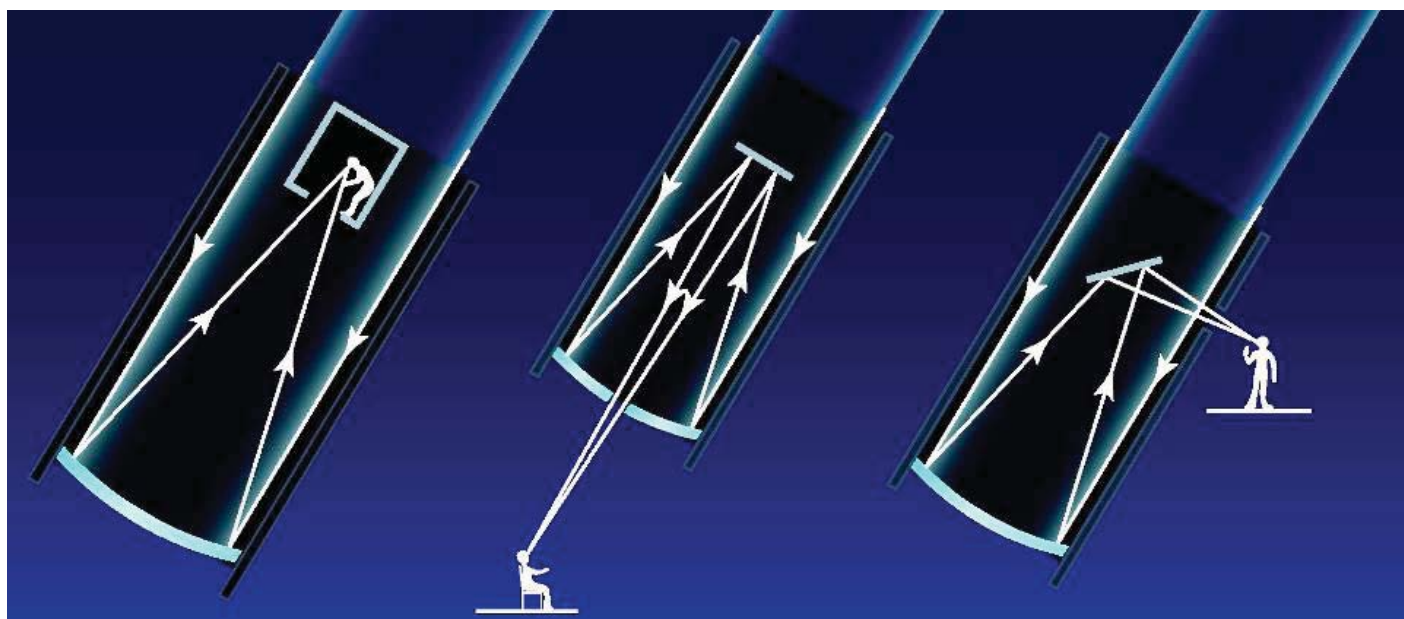
接收機



主反射鏡

控制台

# 比較： 不同形式的反射式（光學）望遠



## 各式各樣的望遠鏡

- 美國俄亥俄州 (Ohio) 的“大耳朵”
  - 主反射面 110公尺寬，33公尺高
  - 次反射面 120公尺寬，23公尺高
  - 地面佔地 120公尺寬，166公尺長





# 各式各樣的望遠鏡

- 單天線



(西班牙)  
IRAM 30m



(美國)  
JCMT 15m

(美國)  
Arizona U. 12m



# 各式各樣的望遠鏡

- 單天線



(德國)  
Effelsberg  
(100m)



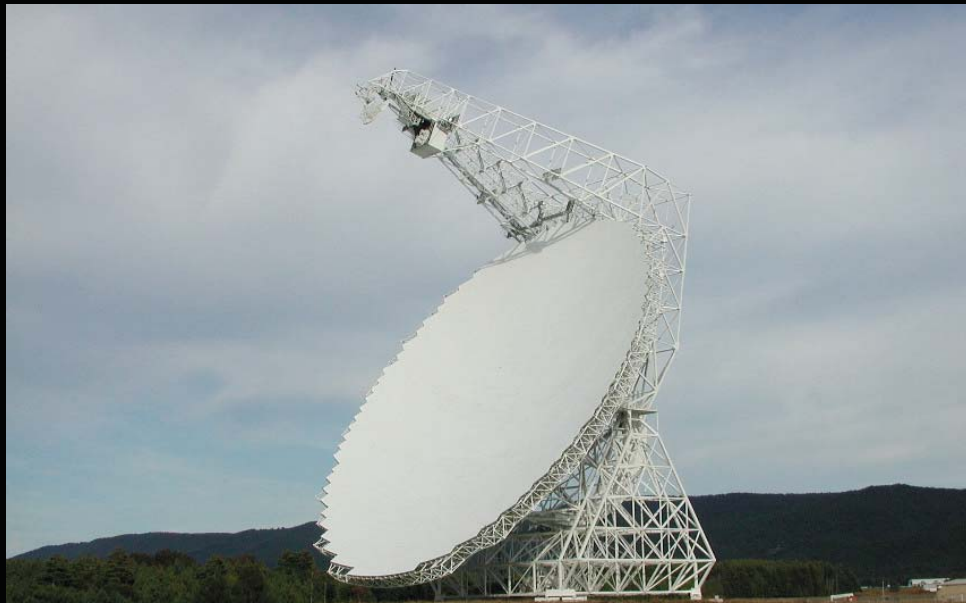
(澳洲)  
Parkes  
(64m)

(英國)  
Jodrell Bank  
(76m)



# 各式各樣的望遠鏡

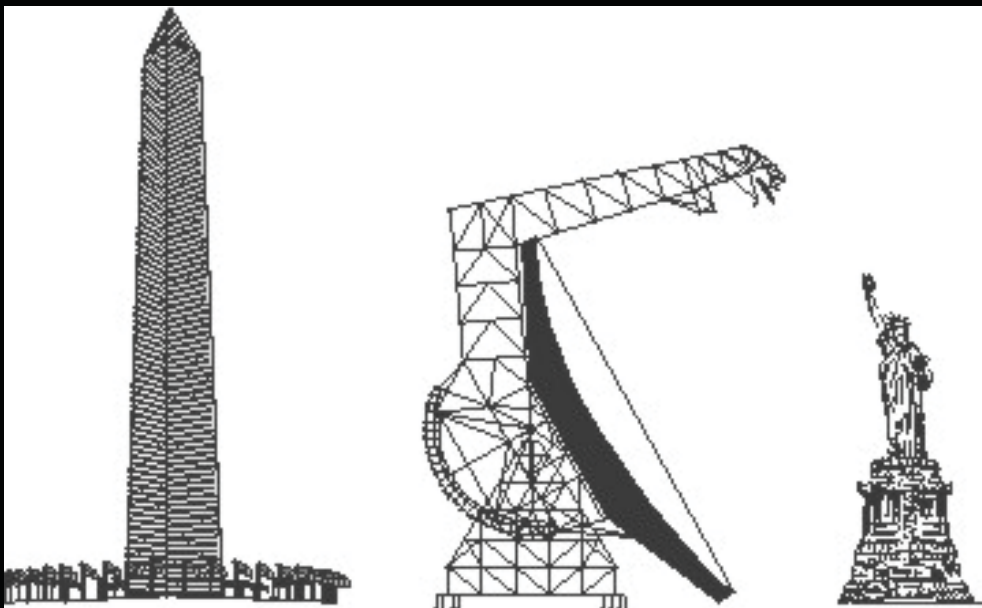
- 單天線



Green Bank Telescope (110m)  
目前世界上最大口徑之全動無線電波望遠鏡

# 各式各樣的望遠鏡

- 單天線



Green Bank Telescope (110m)  
目前世界上最大口徑之全動無線電波望遠鏡

回顧：

## 望遠鏡比人眼厲害的地方(二):

2. 因為口徑比人眼瞳孔大，所以可以增加  
解析力

口徑越大，可解析角越小，也就是解析度越高，例如:不同可解析角度的仙女座星系

## 望遠鏡的解析度

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

$\theta$  : 解析角 (觀測細微圖像的能力)

$\lambda$  : 波長

$D$  : 鏡面直徑

# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做大 Aricebo 波多黎各 305公尺



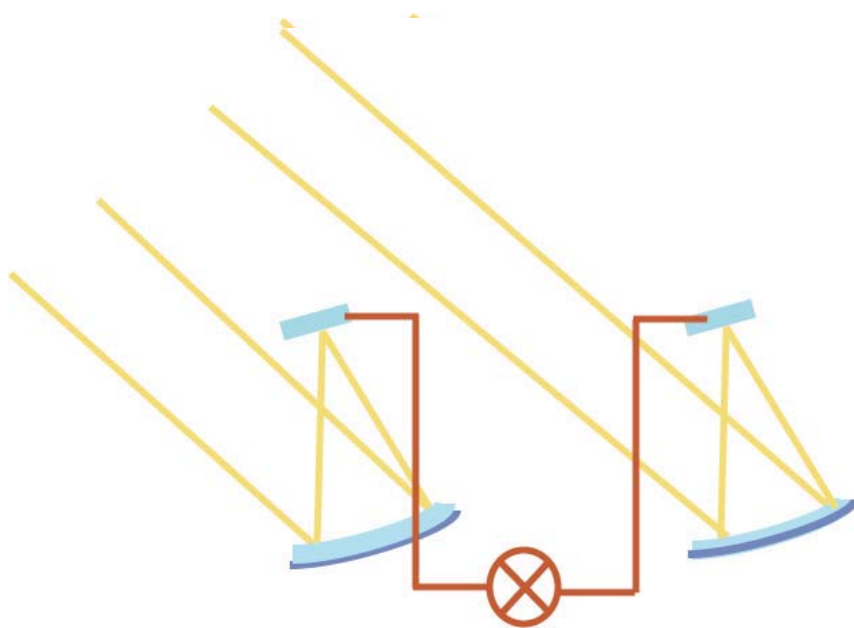
# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做多：
  - ➔ 干涉儀 (interferometer) (= 2 座天線)
  - ➔ 望遠鏡陣列 (array) ( $\geq 3$  座天線)
- 將多座天線相連結使用來達到一座大口徑望遠鏡的效果！

# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做多：
  - ➔ 干涉儀 (interferometer) (= 2 座天線)
  - ➔ 望遠鏡陣列 (array) ( $\geq 3$  座天線)
- 將多座天線相連結使用來達到一座大口徑望遠鏡的效果！

# 各式各樣的望遠鏡



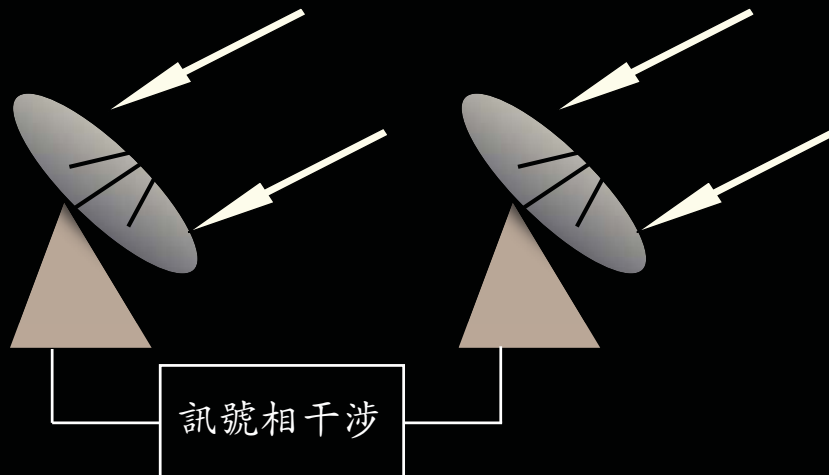
# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做多：
  - ➔ 干涉儀 (interferometer) (= 2 座天線)
  - ➔ 望遠鏡陣列 (array) ( $\geq 3$  座天線)



# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做多：
  - ➔ 干涉儀 (interferometer) (= 2 座天線)
  - ➔ 望遠鏡陣列 (array) ( $\geq 3$  座天線)



什麼是“基線”？

基線是每兩座望遠鏡配對所形成連結，基線的長度即由兩望遠鏡間的距離所決定。基線愈長，觀測時的解析度就愈好。

# 各式各樣的望遠鏡

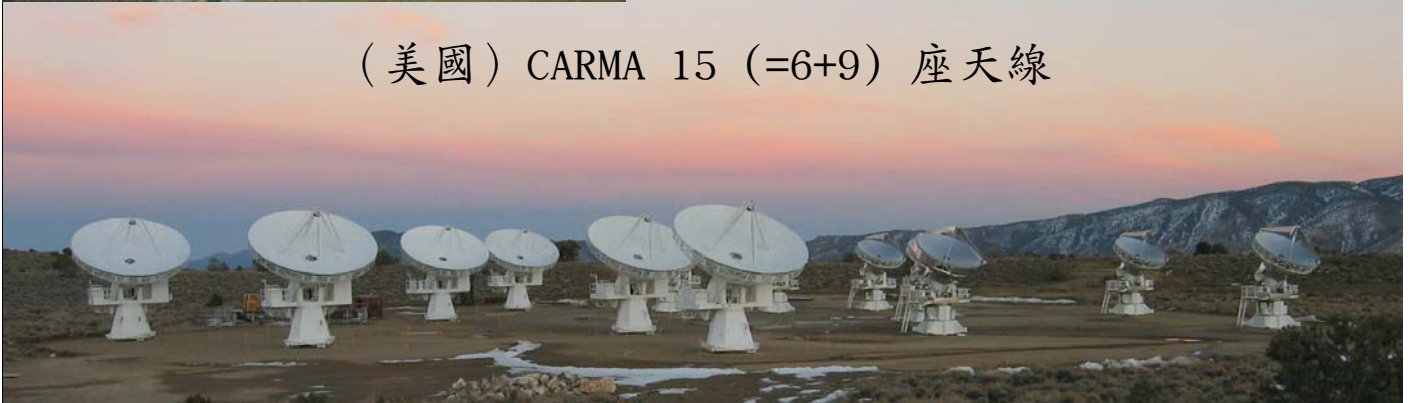
- 增加解析度 天線做多 :



(美國) VLA 27 座天線



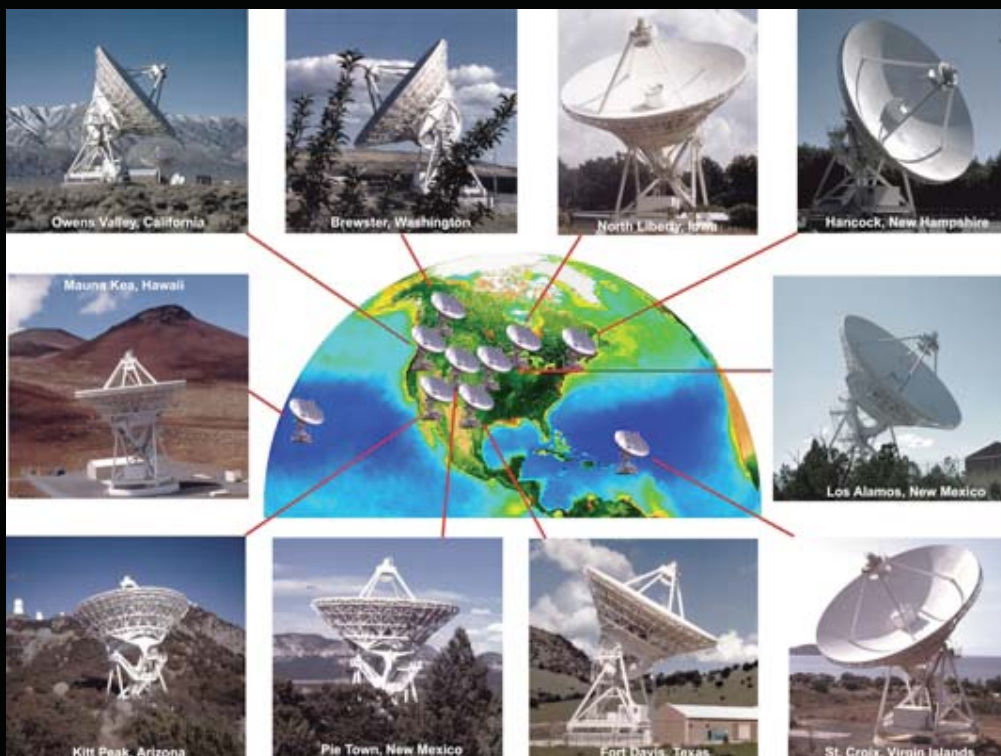
(法國) PdBI 6 座天線



(美國) CARMA 15 (=6+9) 座天線

# 各式各樣的望遠鏡

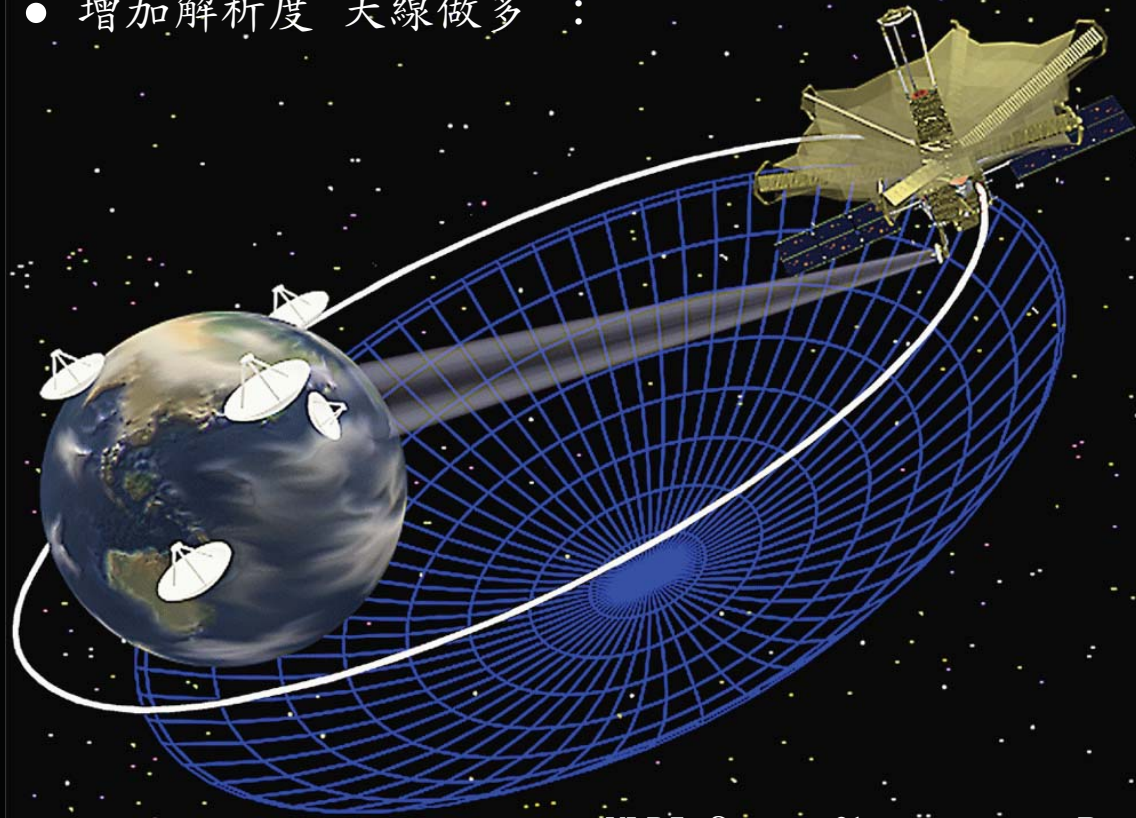
- 增加解析度 天線做多 :



Very Long Baseline Array 10 座天線

# 各式各樣的望遠鏡

- 增加解析度 天線做多 :



VLBI Space Observatory Programme

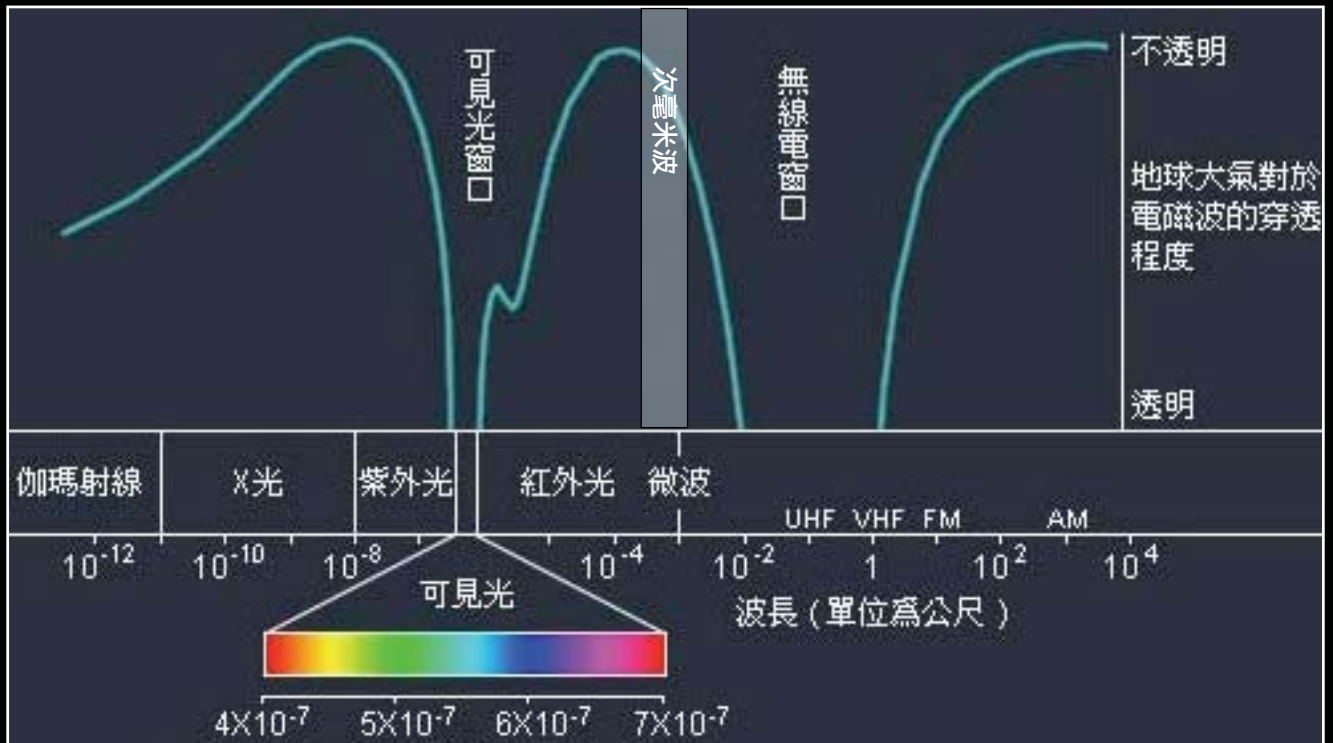
## 我們的大耳朵— 次毫米波望遠鏡陣列 (The Submillimeter Array)





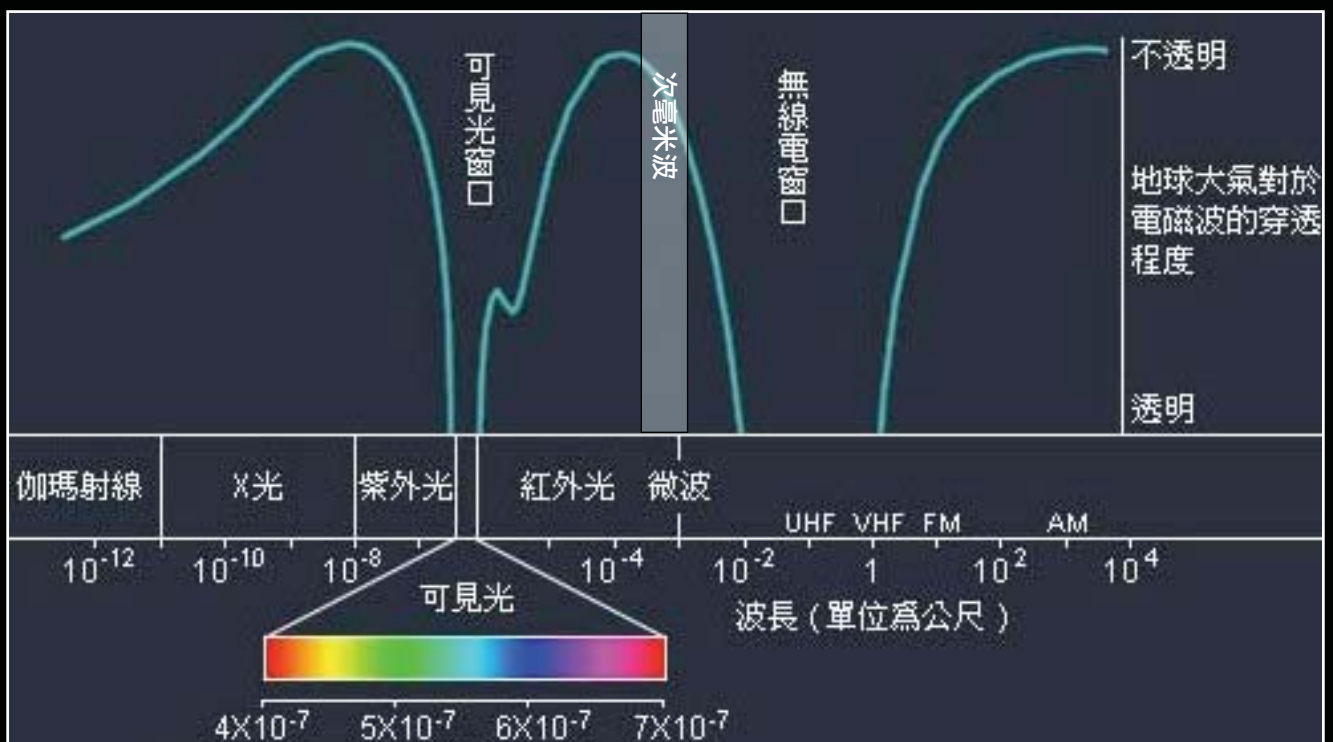
# 電磁頻譜中的次毫米波

廣義的無線電延伸至微波與（次）毫米波



# 電磁頻譜中的次毫米波

水氣的吸收使得大氣不透明



夏威夷 (Hawaii) 大島 (Big Island)  
毛納基 (Mauna Kea) 上的次毫米陣列 (SMA)



夏威夷 (Hawaii) 大島 (Big Island)  
毛納基 (Mauna Kea) 上的次毫米陣列 (SMA)



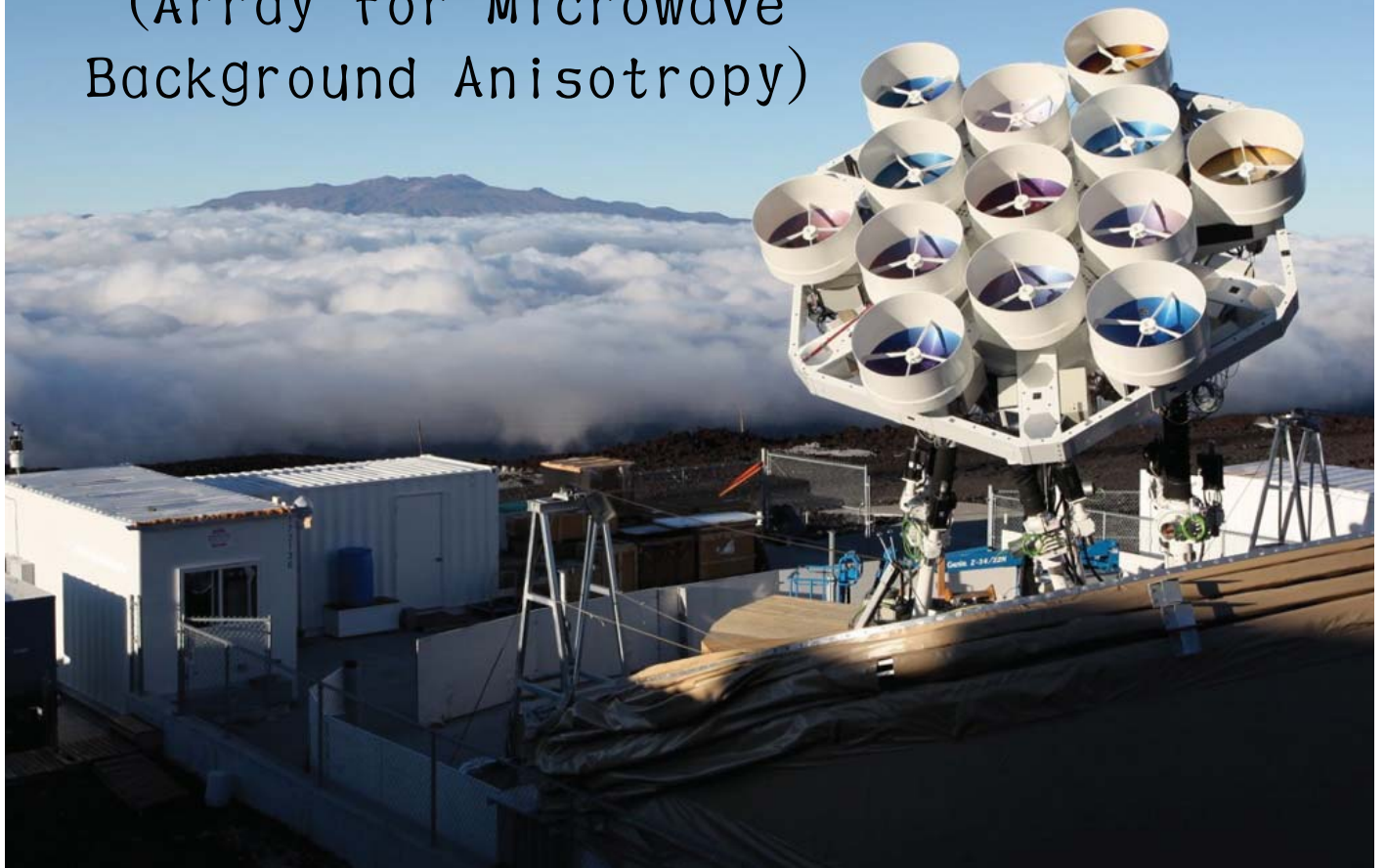
# SMA 基本資料

地點： 夏威夷大島毛納基峰  
海拔： 4080公尺  
天線數目： 8 座  
天線直徑： 6 公尺  
天線重量： 42910公斤  
基線數目： 28條  
工作波長： 0.3 ~ 1.7 毫米  
接收機  
工作溫度： 4K (零下269度)  
解析度： 0.1 ~ 0.5 角秒  
(1角秒= 1/3600度)

0.1角秒的解析度到底有多好？

0.1角秒的角度，相當於將新台幣一元銅板置於約40公里(台北101與桃園機場之距離) 遠處所看見的大小。相較於2004年8月底時大接近的火星，0.1角秒的角度，可是僅有其兩百五十分之一！

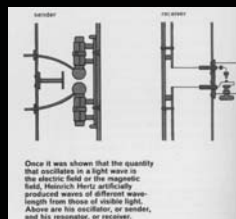
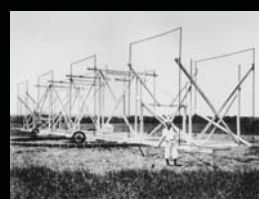
我們的小耳朵—李遠哲陣列  
(Array for Microwave  
Background Anisotropy)



# 再想一想：

無線電在日常生活與在天文上應用的異同？

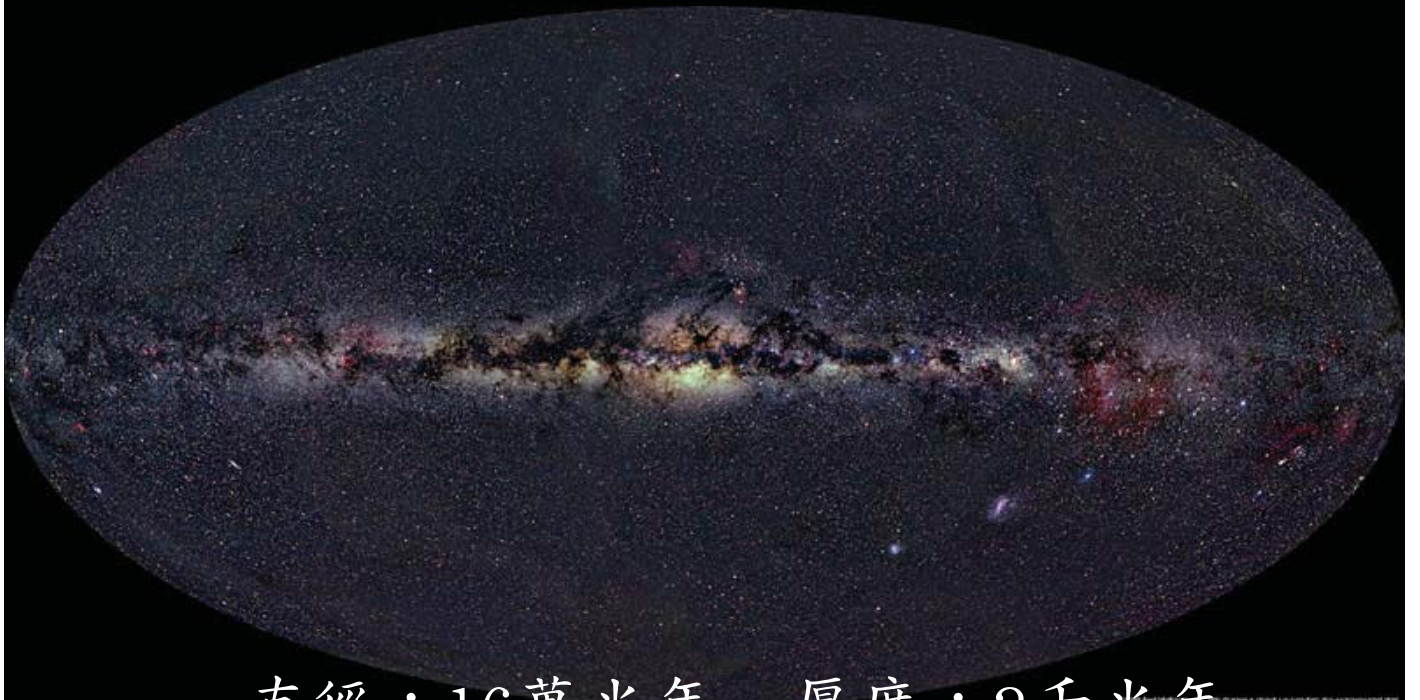
無線電與光學望遠鏡的異同？



# 無線電的天空



# 銀河 (Milky Way)



直徑：16萬光年 厚度：2千光年

## 銀河：可見光



# 銀河：無線電波



Jodrell Bank  
(76公尺)



Effelsberg  
(100公尺)



Parkes  
(64公尺)



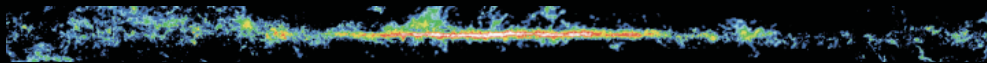
408兆赫(MHz)

爲什麼要用到三座望遠鏡來觀測呢？

# 多波段下的銀河



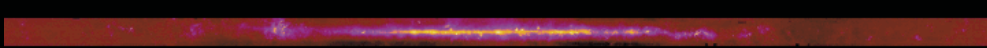
無線電



CO 譜線



近紅外線



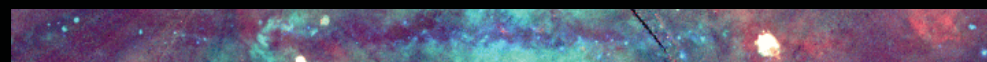
中紅外線



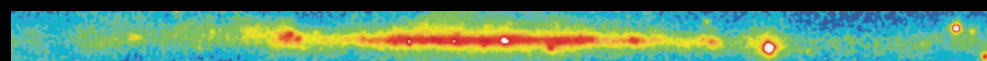
遠紅外線



可見光



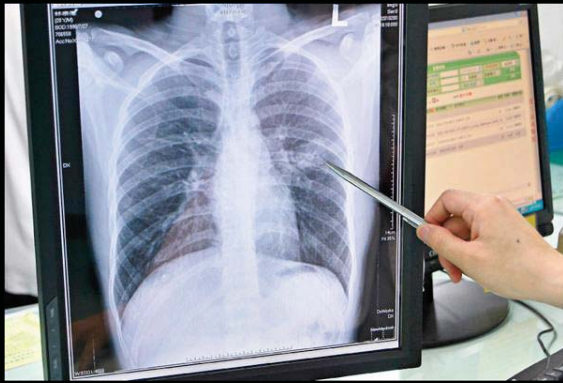
X 射線



伽瑪射線

# 為什麼要建造無線電望遠鏡呢？

X-射線

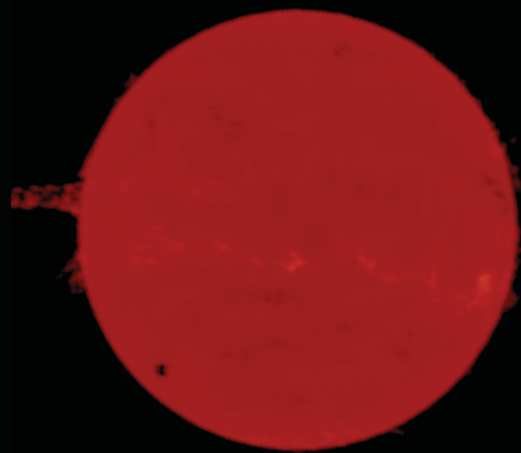


紅外線



透過天文學家的“大耳朵”，也就是無線電波望遠鏡，天文學家也接收到來自太空的無線電波訊號。利用無線電波 天文學家可以看到並分析在可見光或是其他光波可能看不到的現象。

## 無線電的天空（太陽）

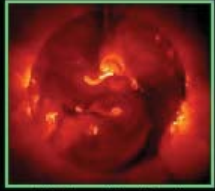


NoRH 17GHz

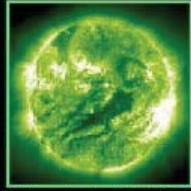
2004-06-08 05:50:03

無線電波下的金星凌日

# 無線電的天空 (太陽系內)



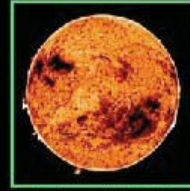
X-Ray (Yohkoh)



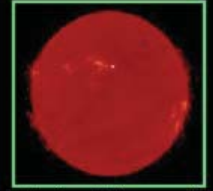
Ultraviolet (SOHO)



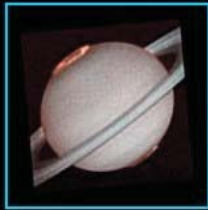
Visible (BBSO)



Infrared (NSO)



Radio (Nobeyama)



Ultraviolet  
J. Trauger JPL/NASA



Visible  
NASA/JPL/Voyager



Infrared  
E. Karkoschka UA/HST/NASA



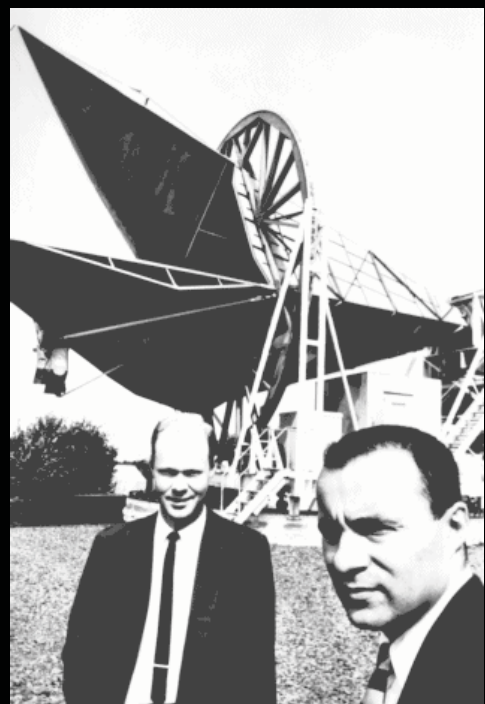
Radio  
NRAO

# 無線電天文的重大貢獻 (宇宙微波背景輻射)

- Arno Penzias (1933-) and Robert Wilson (1936-)
  - 1965年發現宇宙背景輻射
  - 1978年因上述發現而獲得諾貝爾獎

	New Throat		Old Throat
He Temp.	4.22	4.22	
Calculated Contribution from Cold Load Waveguide Attenuator Setting for Balance	.38	.70 ± 0.2	
	<u>2.73</u>	<u>2.40 ± 0.1</u>	
Total C.L.	7.33	7.32 ± 0.3	6.7 ± 0.3
Atmosphere	2.3 ± 0.3	2.3 ± 0.3	
Waveguide and Antenna loss	1.8 ± 0.3	.9 ± 0.3	
Back lobes	<u>.1 ± 0.1</u>	<u>.1 ± 0.1</u>	
Total Ant.	4.2 ± 0.7	3.3 ± 0.7	
Background	3.1 ± 1	3.4 ± 1	

Fig. 10 Results of our 3965 measurements of the microwave background. "Old Throat" and "New Throat" refer to the original and a replacement throat section for the 20 foot horn-reflector.





# 無線電天文的重大貢獻 (宇宙微波背景輻射)

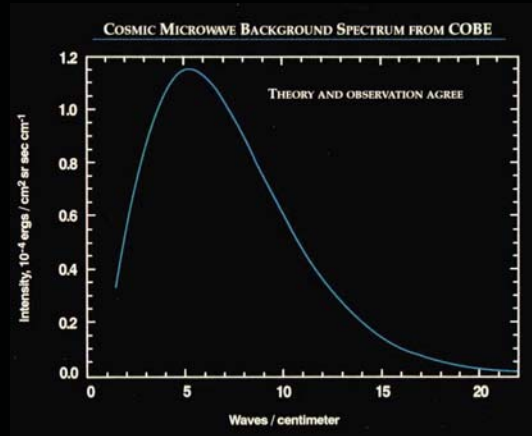
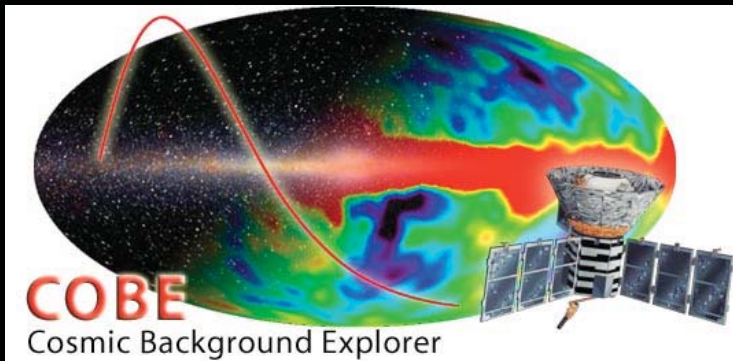
- John Mather (1946-) and George Smoot (1945-)
  - 1989年以COBE發現宇宙背景輻射之黑體輻射形式與非均向性 (anisotropy)
  - 2006年因上述發現而獲得諾貝爾獎



John Mather

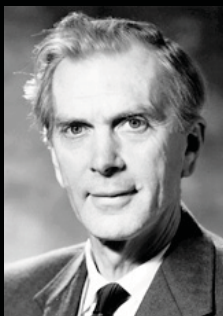


George Smoot

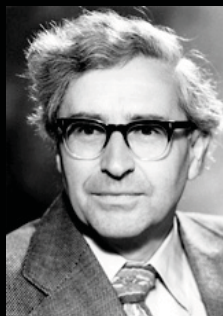


# 無線電天文的重大貢獻 (波霎 Pulsar)

- Jocelyn Bell-Burnell (1943-) and Antony Hewish (1924-)
  - 1967年發現恆星演化學說所預測之無線電波霎
  - 1974年 Antony Hewish 與 Sir Martin Ryle 因上述發現而獲得諾貝爾獎



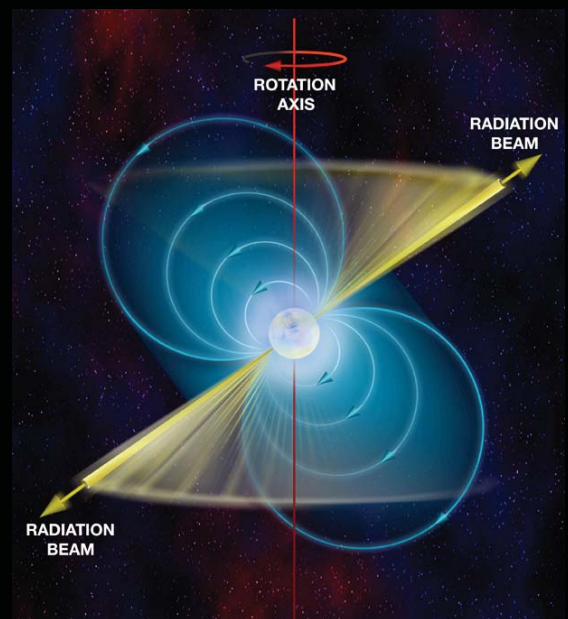
Sir Martin Ryle



Antony Hewish



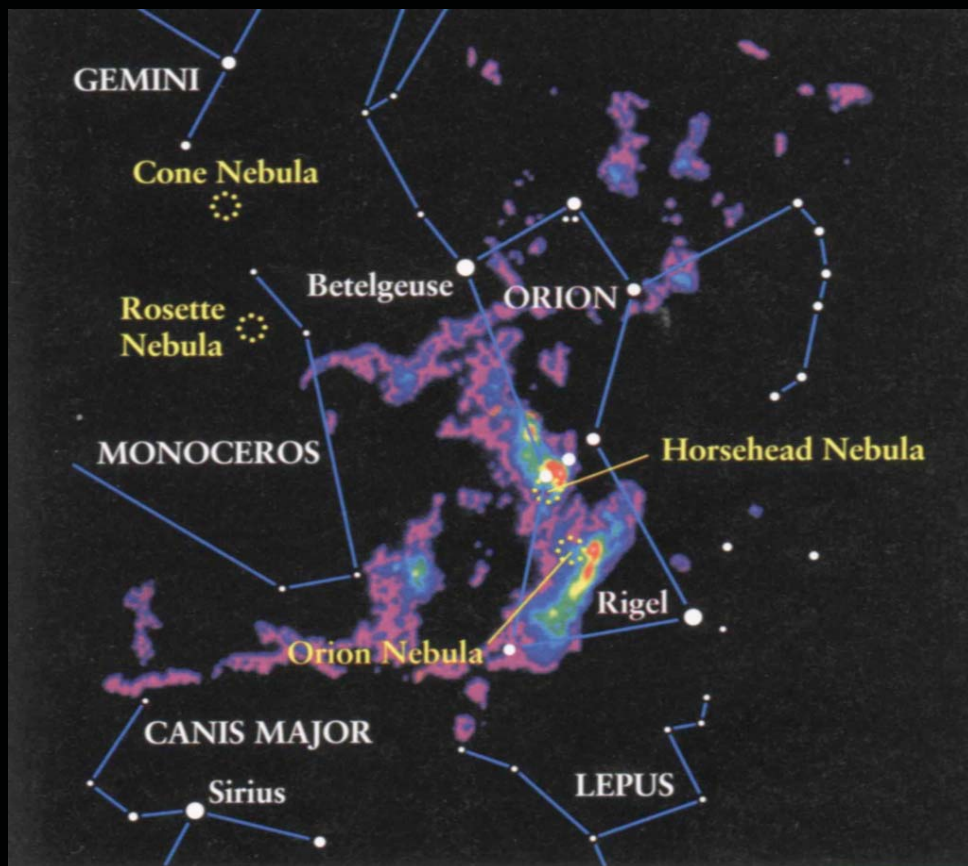
Jocelyn Bell Burnell



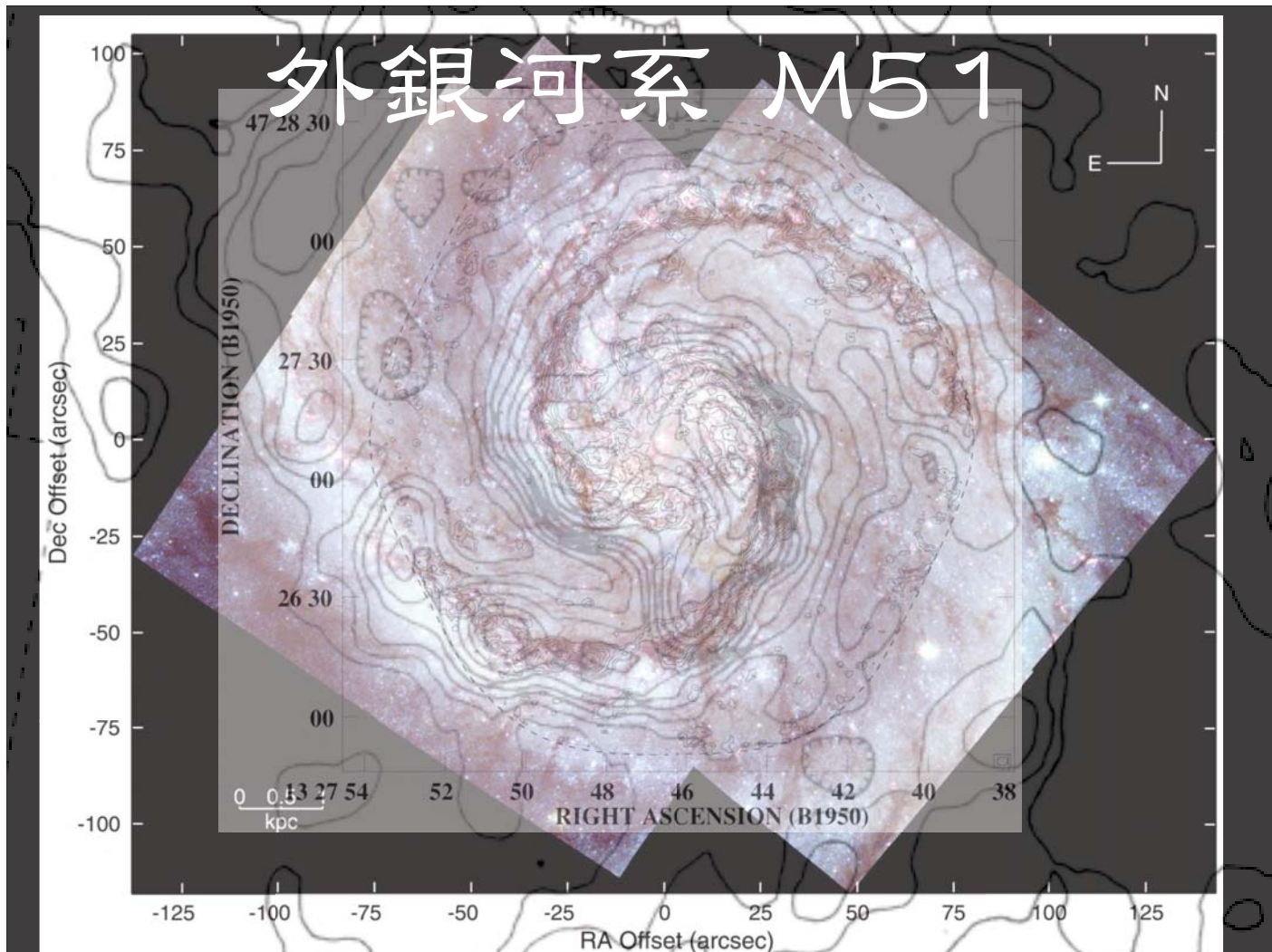
# (次) 毫米波的重要性 與天文科學成就

在1970年代無線電波望遠鏡技術快速發展下，  
偵測到星際空間中的分子譜線，發現了分子雲氣的存在，  
更讓天文學家得以對恆星形成有進一步的瞭解

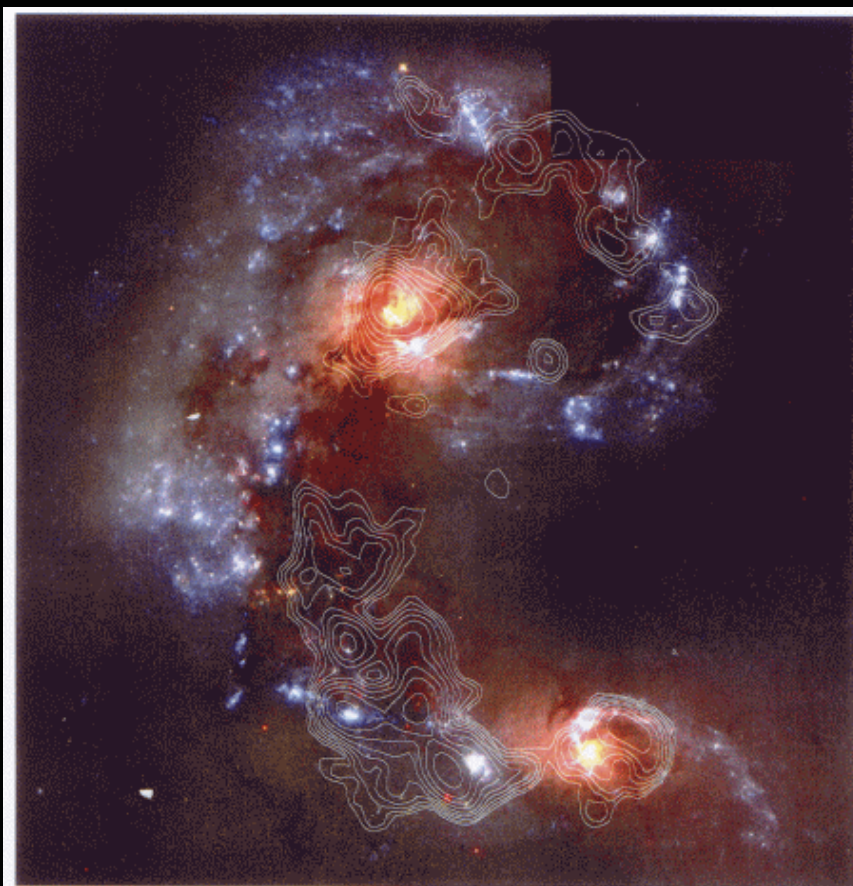
## 獵戶座巨型分子雲



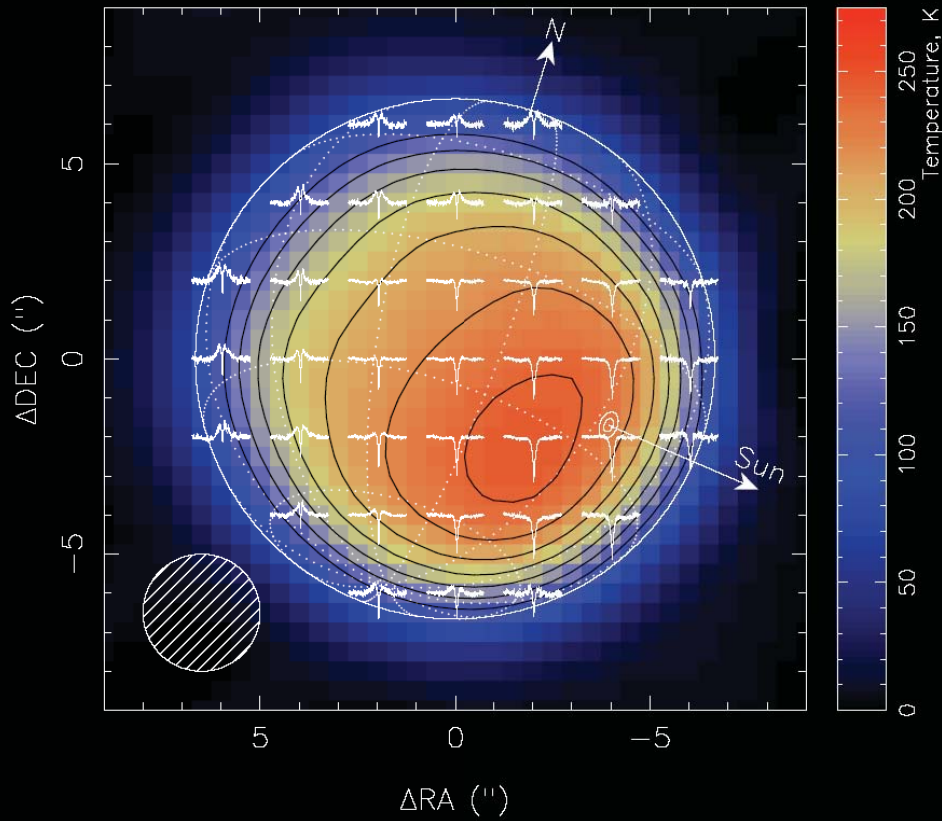
# 外銀河系 M51



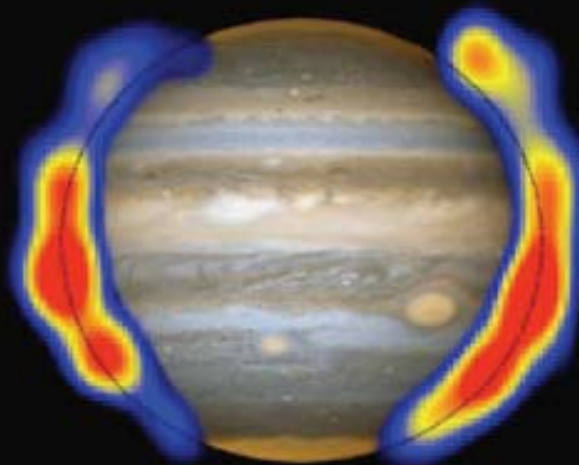
## 星系的碰撞與交互作用



# 火星與其大氣



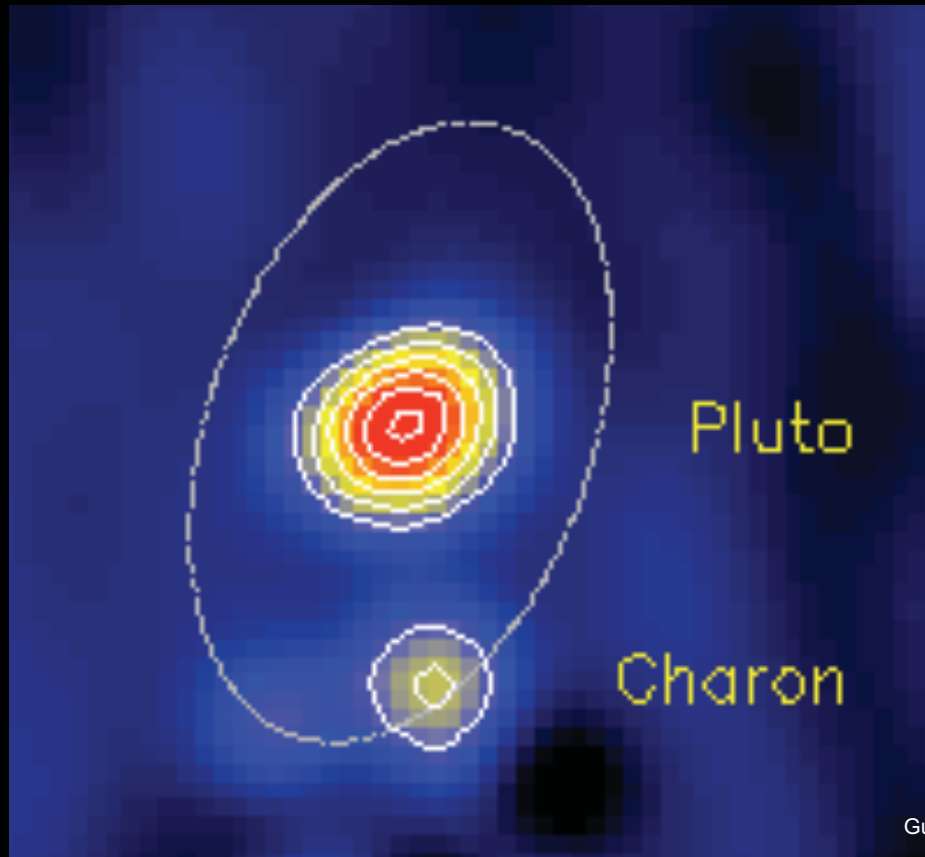
# 木星大氣平流層的 HCN分子氣體



Remnant HCN on Jupiter from  
Comet P/Shoemaker-Levy Impacts

Gurwell (2007); SMA

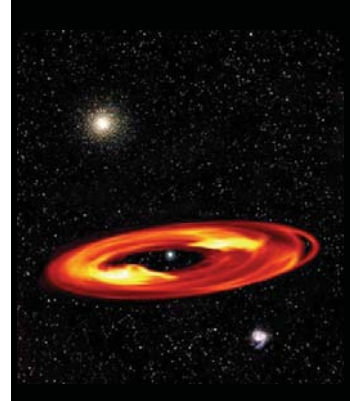
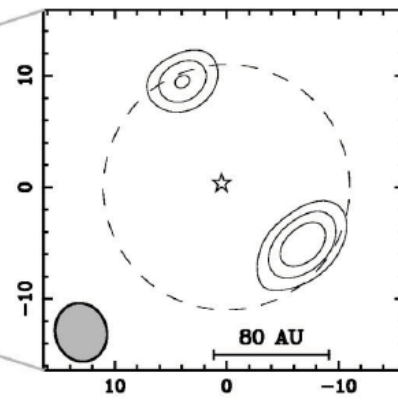
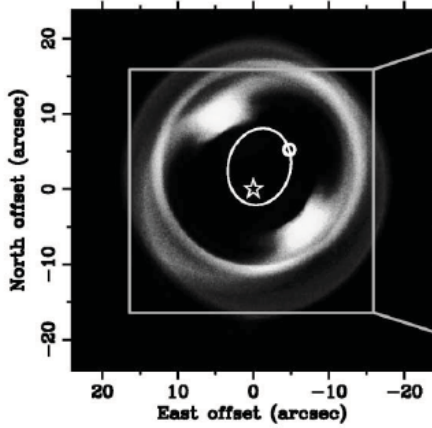
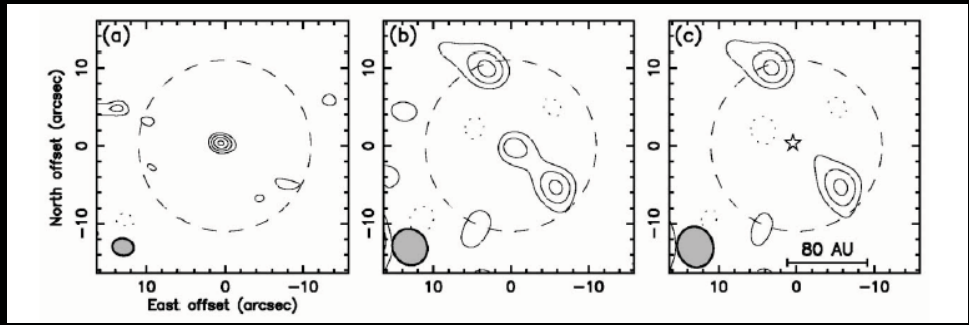
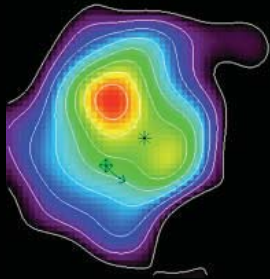
# 冥王星與冥衛一（凱倫）



## 新世代的望遠鏡

追求更好的解析度與更好的靈敏度

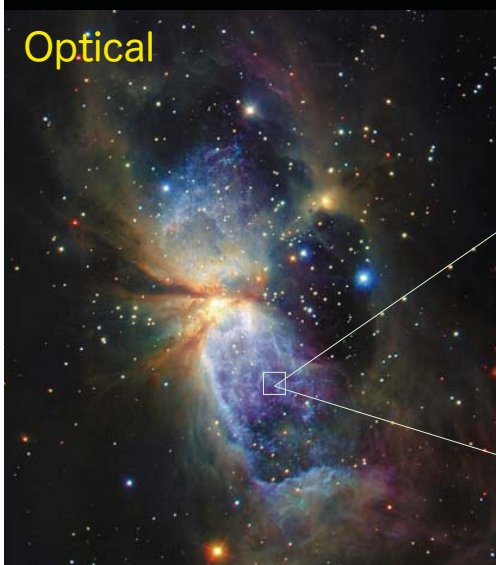
# 環繞織女星的碎屑盤 (debris disk)



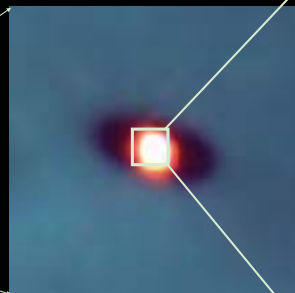
Wilner et al. (2002)

# 從恆星到行星的形成

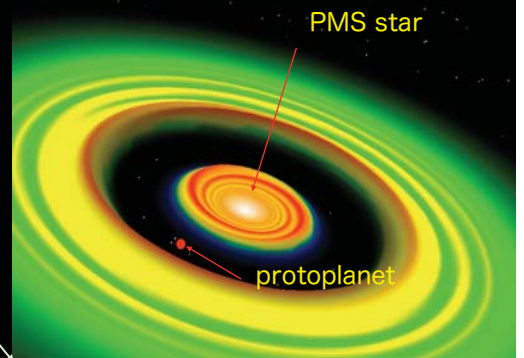
Optical



Disk seen as "silhouette"

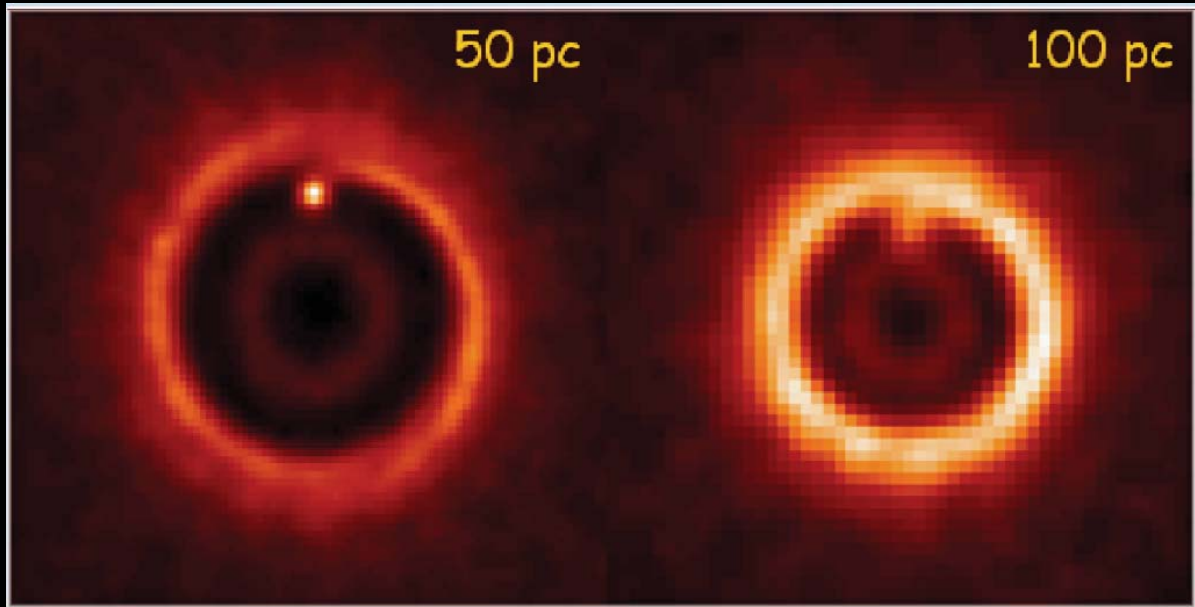


ALMA



# 新生恆星的拱星盤

- 模擬觀測類似木星之原行星環繞著其太陽的天體系統



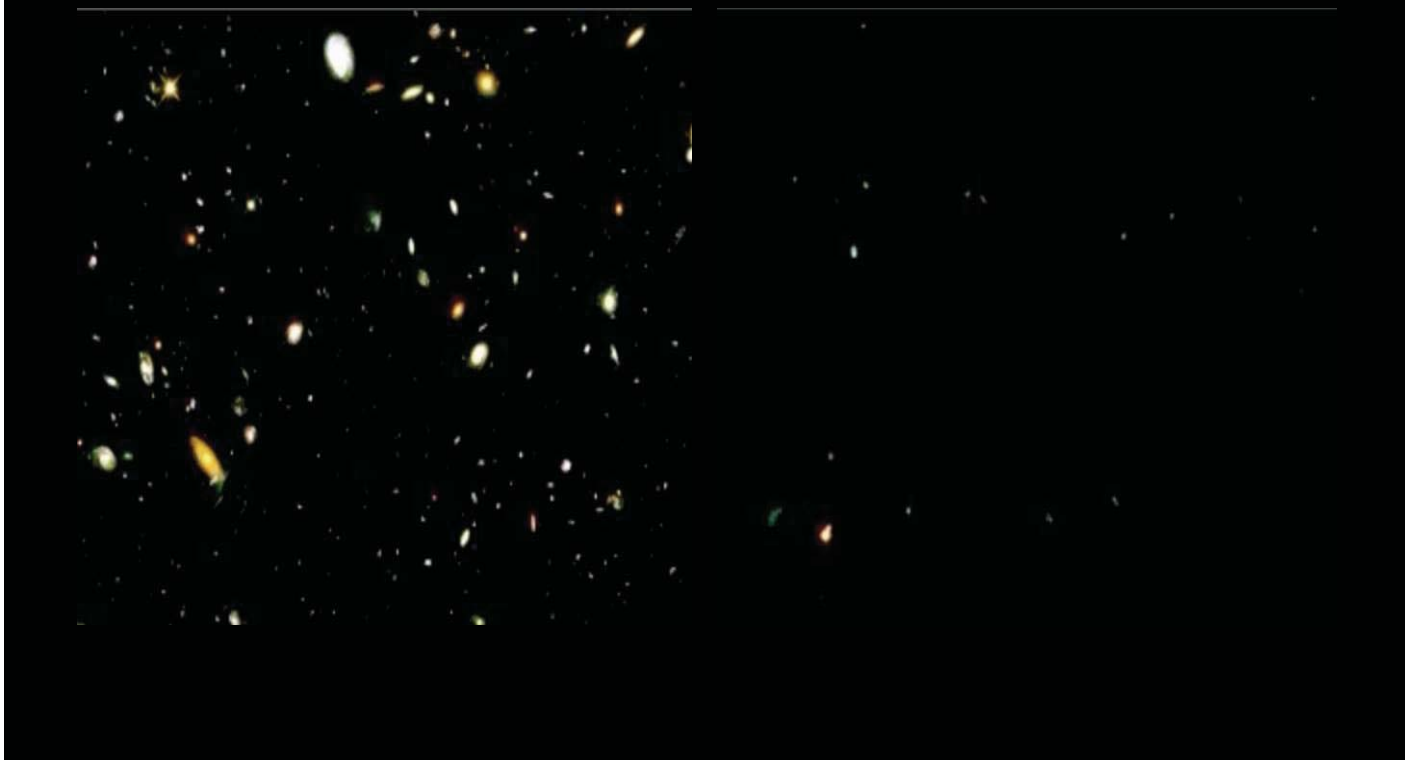
Wolf & D'Angelo (2005)

# Hubble Deep Field

Rich in Nearby Galaxies, Poor in Distant Galaxies



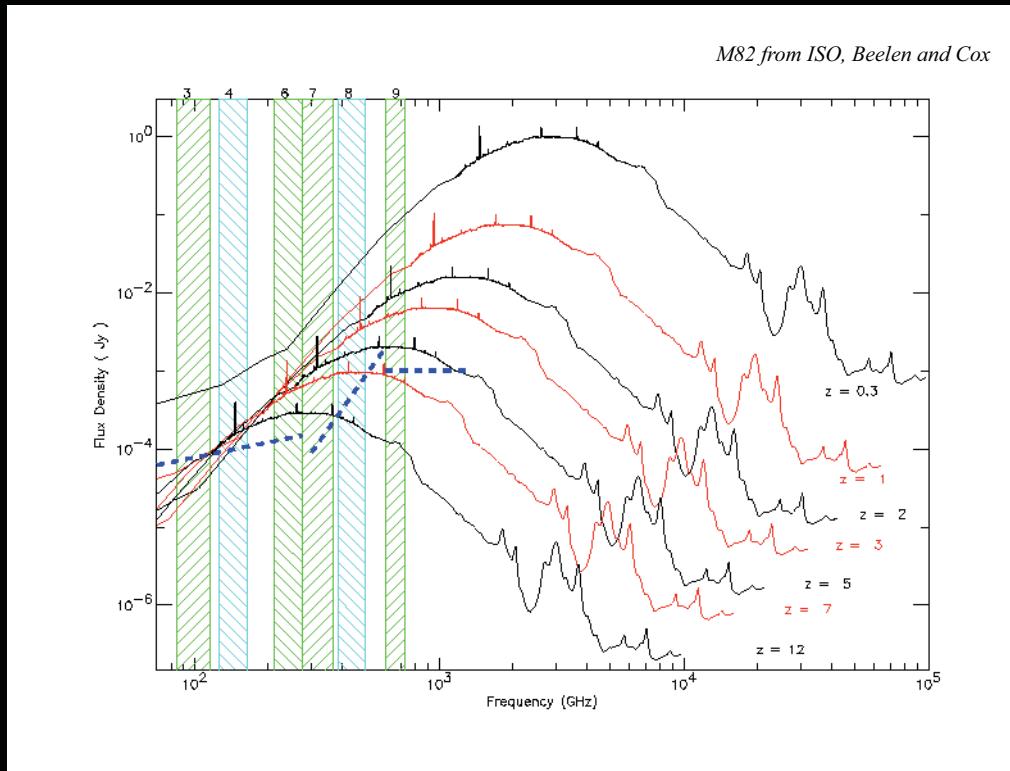
Source: K. Lanzetta, SUNY-SB



# 紅移的星系能譜



- (次) 毫米波段最適合觀測位於早期宇宙的高紅移星系

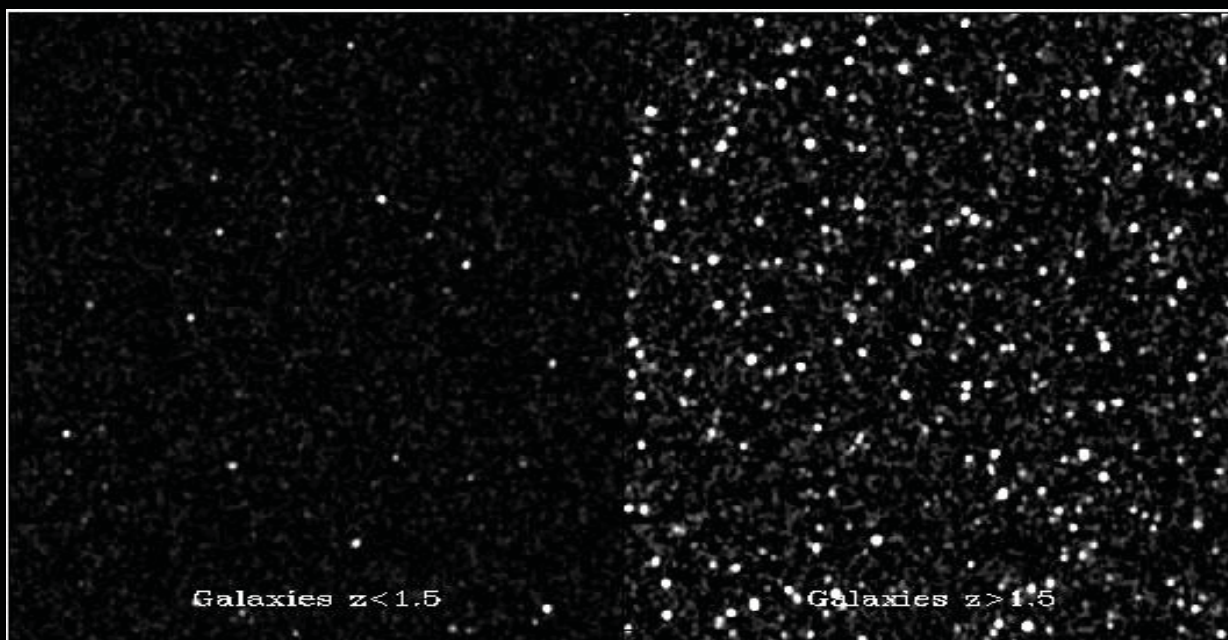


# “ALMA” Deep Field



Poor in Nearby Galaxies, Rich in Distant Galaxies

Source: Wootten and Gallimore, NRAO





# ALMA 的主要科學目標



- Key science goal includes
  - Image protoplanetary disks to detect tidal gaps created by planets undergoing formation in the disks;
  - Image normal galaxies like the Milky Way (in CO or CII line, for example) out to  $Z=3$
  - Precision imaging at high angular resolution ( $0.1''$ )

## ALMA 的一般科學目標 — 通用目的之望遠鏡



### General Science Requirements, from ALMA Project Plan v2.0:

- “ALMA should provide astronomers with a general purpose telescope which they can use to study at a range of angular resolutions millimeter and submillimeter wavelength emission from all kinds of astronomical sources. ALMA will be an appropriate successor to the present generation of millimeter wave interferometric arrays and will allow astronomers to:
- Image the redshifted dust continuum emission from evolving galaxies at epochs of formation as early as  $z=10$ ;
  - Trace through molecular and atomic spectroscopic observations the chemical composition of star-forming gas in galaxies throughout the history of the Universe;
  - Reveal the kinematics of obscured galactic nuclei and Quasi-Stellar Objects on spatial scales smaller than 300 light years;
  - Image gas rich, heavily obscured regions that are spawning protostars, protoplanets and pre-planetary disks;
  - Reveal the crucial isotopic and chemical gradients within circumstellar shells that reflect the chronology of invisible stellar nuclear processing;
  - Obtain unobscured, sub-arcsecond images of cometary nuclei, hundreds of asteroids, Centaurs, and Kuiper Belt Objects in the solar system along with images of the planets and their satellites;
  - Image solar active regions and investigate the physics of particle acceleration on the surface of the sun.

# ALMA 的一般科學目標

## – 通用目的之望遠鏡



### General Science Requirements, from ALMA Project Plan v2.0:

“ALMA should provide astronomers with a general purpose telescope which they can use to study at a range of angular resolutions millimeter and submillimeter wavelength emission from all kinds of astronomical sources. ALMA will be an appropriate successor to the present generation of radio telescopes.”

- Image formation
- Track comets
- Reveal scales
- Image precision
- Reveal the crucial isotopic and chemical gradients within circumstellar shells that reflect the chronology of invisible stellar nuclear processing;
- Obtain unobscured, sub-arcsecond images of cometary nuclei, hundreds of asteroids, Centaurs, and Kuiper Belt Objects in the solar system along with images of the planets and their satellites;
- Image solar active regions and investigate the physics of particle acceleration on the surface of the sun.

– 透過毫米次毫米波觀測以研究了解宇宙，包含了星系、恆星，與類似太陽系的行星系統之起源及演化

## 新世代的望遠鏡

追求更好的解析度與更好的靈敏度



越大（口徑/集光面積）與越精密

# ALMA 的構想



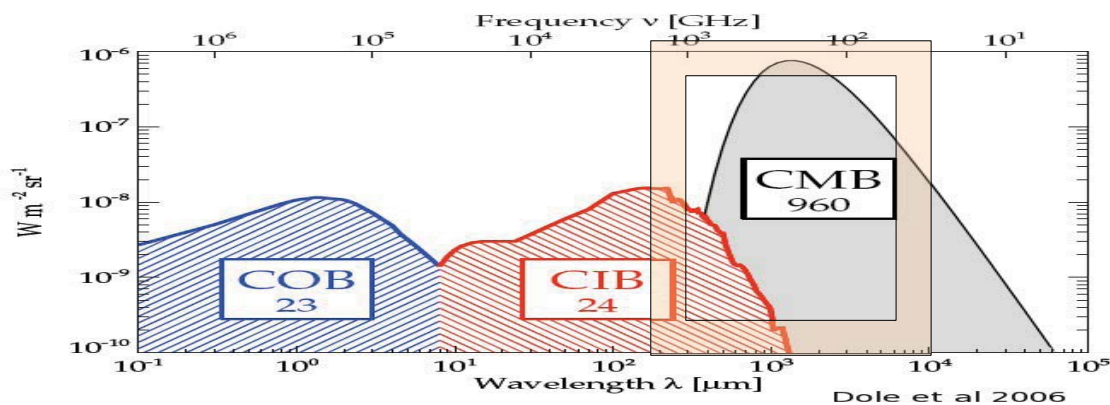
- Millimeter Array (MMA) of NRAO
  - envisioned in the 1980' s as a new frontier after the VLA
  - top priority ground-based radio facility in U.S.
  - search of international partners started in 1995
- Large Millimeter Array (LSA) of ESO
  - envisioned in 1991 for complementing VLA, HST
  - collaboration established in 1995 between ESO, IRAM, OSO, NFRA top
- Large Millimeter and Submillimeter Array (LMSA) of NAOJ
  - envisioned after the completion of Nobeyama MMA and site survey started in 1990
  - a high sensitivity corresponding to a 70m dish
  - top priority ground-based facility in Japan



## The mm/submm Spectrum: Focus of ALMA



slide by Al Wooten



- Millimeter/submillimeter photons are the most abundant photons in the cosmic background, and in the spectrum of the Milky Way and most spiral galaxies.
- ALMA range--wavelengths from 1cm to ~0.3 mm, covers both components to the extent the atmosphere of the Earth allows.



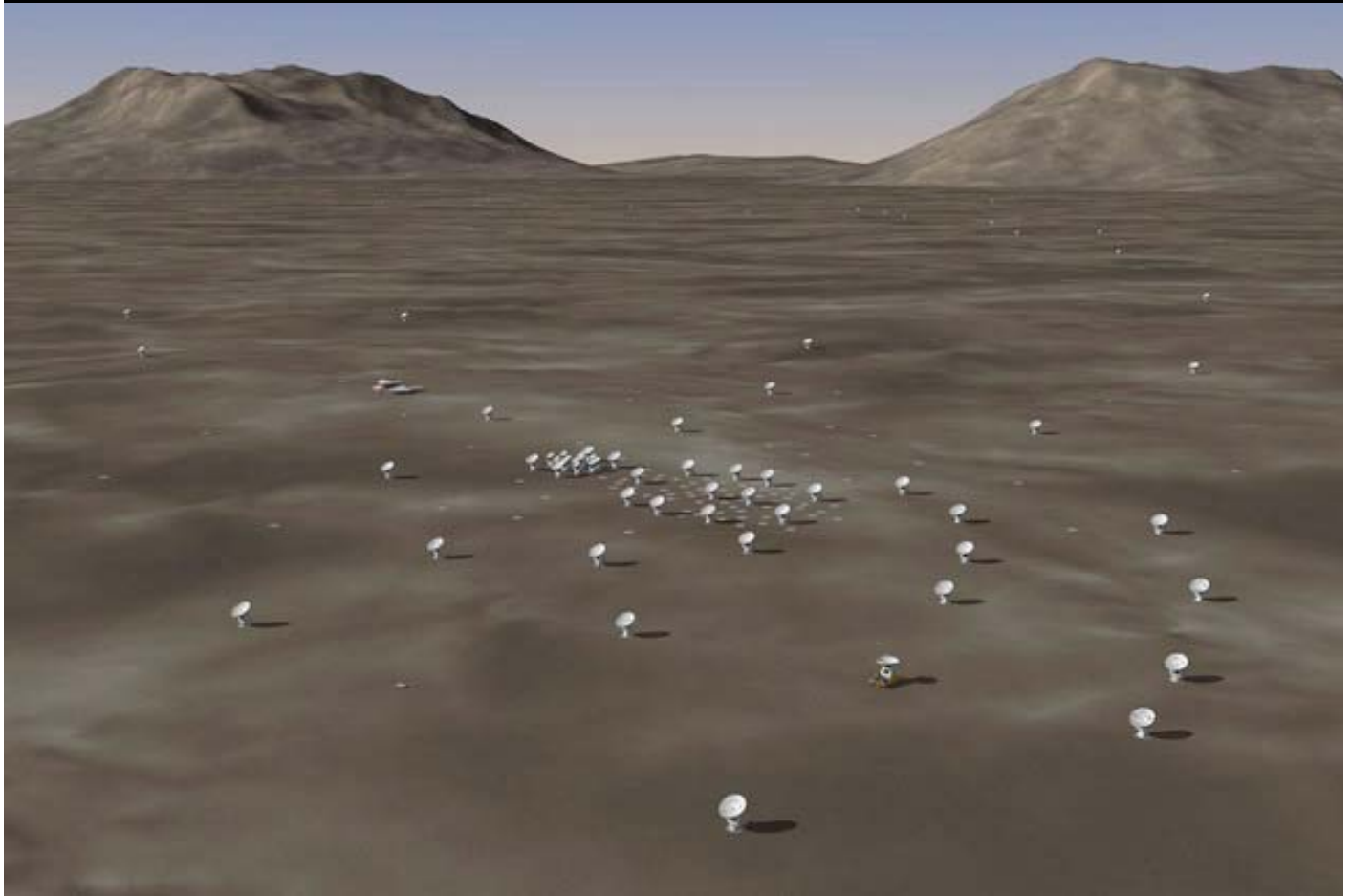
# 新世代的望遠鏡



## 什麼是 ALMA ?

- ALMA 代表 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
- 此計畫是由歐洲 (ESO), 東亞 (NINS+AS) 北美 (NSF+NRC+NSC) 以及智利共同合作, 乃是有史以來最大的地面望遠鏡建構計畫。
- 主陣列包括了至少 50 座 12米的天線。
- 密陣列 (Atacama Compact Array) 則包含了 12 座 7米的天線以及 4 座 12米的天線。
- 所有天線可以密集排列於 150 公尺之內到分散至 15 公里之廣的腹地。

# 天線分散於 15 公里腹地的 ALMA



## ALMA 設在哪裡？



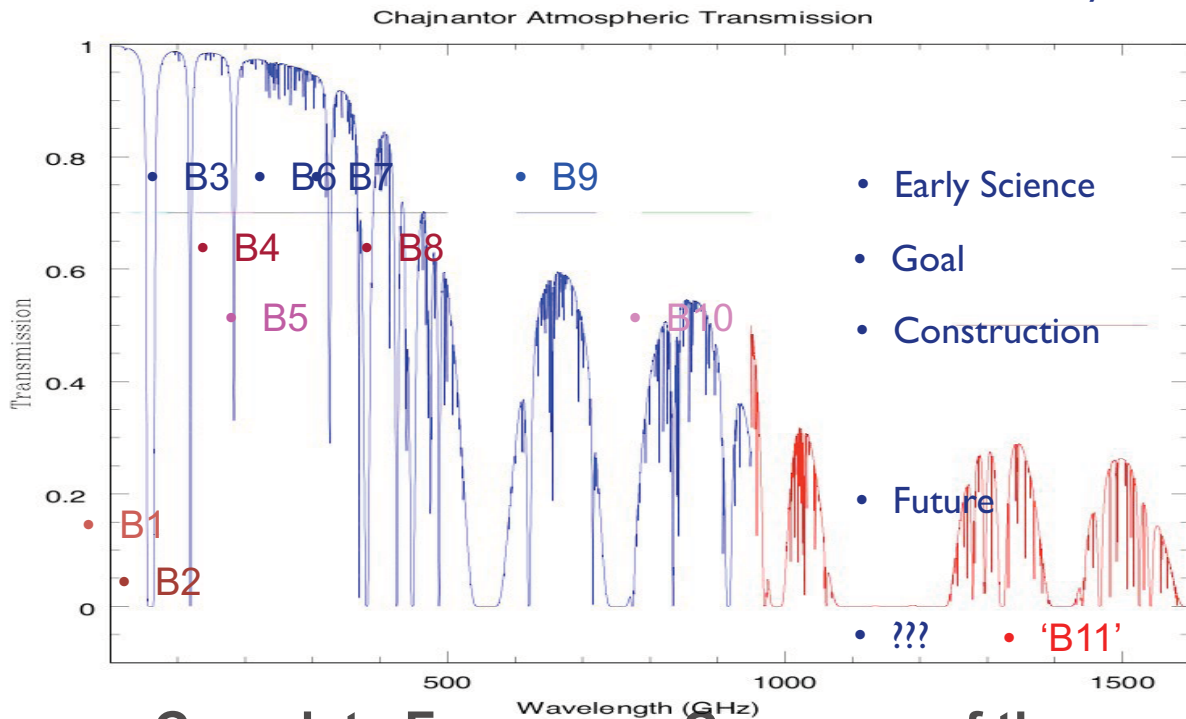
Para  
La S  
Sant

The ALMA site:  
Chajnantor, Chile  
Altitude 5000m



# ALMA 建址的大氣透明度

slide by Al Wootten



## Complete Frequency Coverage of the mm/submm atmospheric window

Early Science



### 位居海拔 2900 公尺的後勤支援中心



## 四、五百位建築工程人員的宿舍



位居海拔 2900 公尺的後勤支援中心

## ALMA 天線運輸車



# ALMA運輸車首次裝載天線



# ALMA 天線運輸車 向5000公尺基地移動





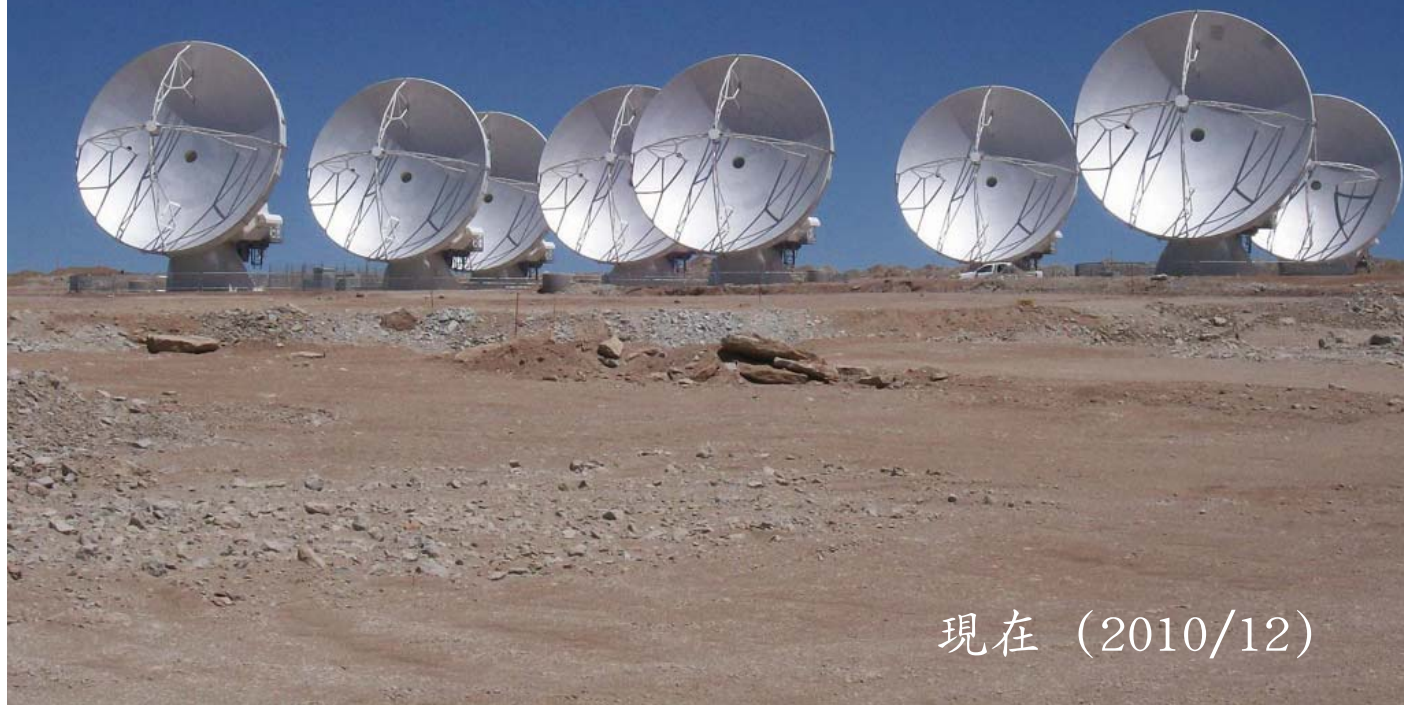


位海拔 5000 公尺的天線陣列運轉中心

位於海拔 5000 公尺  
正在施工中的天線基座

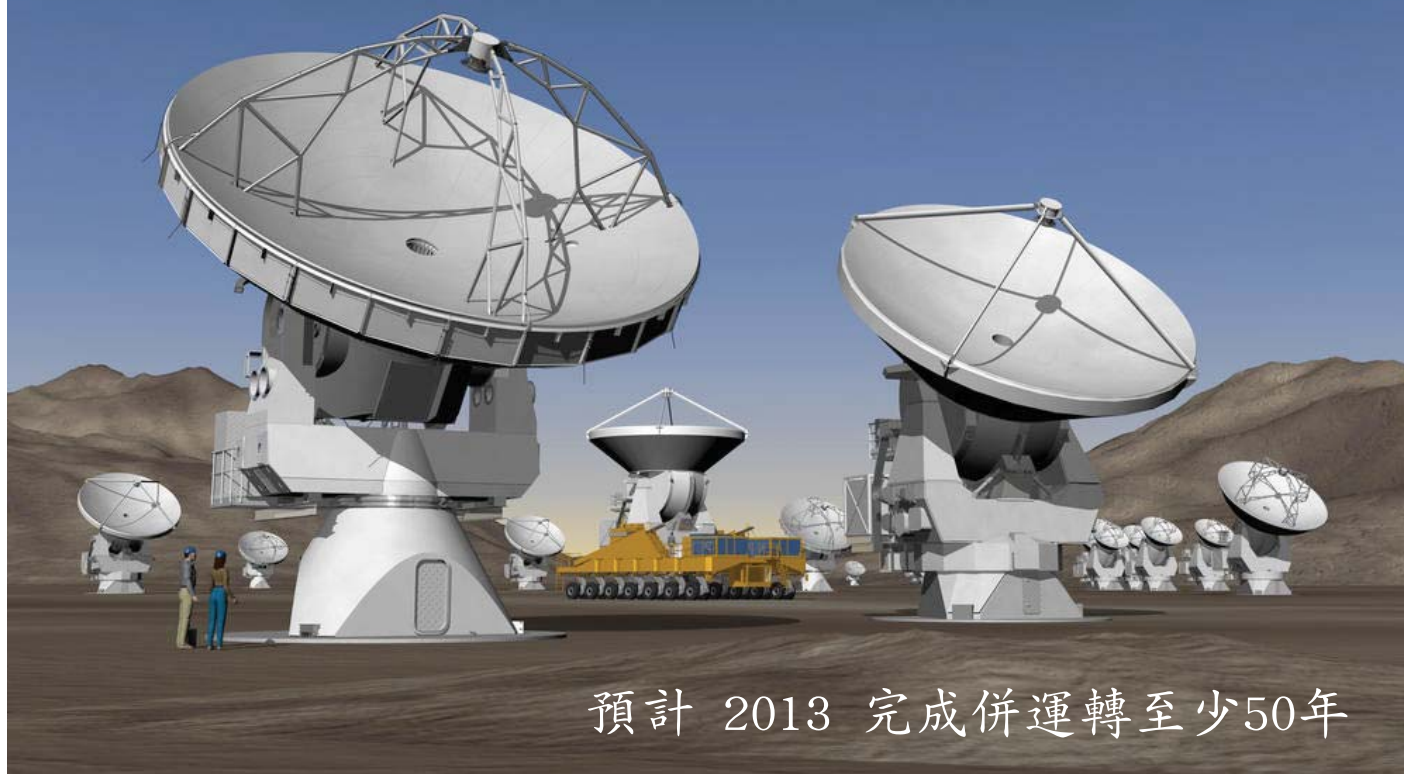


# 建置中的ALMA



現在 (2010/12)

# 完成後的ALMA



預計 2013 完成併運轉至少50年

# 台灣的參與



- 台灣採取了”雙管齊下”的策略，同時
  - 與日本合作，參與了 ALMA-東亞 計畫
  - 以及與美國合作，參與了 ALMA-北美 計畫
- 國內的參與的學術機構包括了
  - 中央研究院
  - 國立台灣大學
  - 國立師範大學
  - 私立淡江大學
  - 國立清華大學
  - 國立中央大學
  - 國立成功大學

## Comparign the power of (sub)mm telescopes



	ATCA	CARMA	SMA	PdBI	ALMA ES	ALMA full
Antennas	6	15	8	6	16	66
Freq range	20, 100	100, 230	230, 345, 690	100, 230	100, 230, 345, 650	+ 150, 450, 800
collecting area	2280	772	226	1060	> 1350	6500
max resolution	0.4"	0.4"	0.15"	0.5"	0.15"	0.01"
Tsys (freq)	350 K (100)	200 K (230)	140 K, 2640 K (230) (650)	200 K (230)	30 K, 70 K, 430 K (100) (230) (650)	

# 關鍵字

- 觀測 (observations)
- 電磁波 (EM wave)
- 無線電 (radio)
- 次毫米波 (submillimeter)
- 望遠鏡 (telescope)
- 干涉儀/陣列 (interferometry/array)
- 高解析度 (high-angular resolution)
- 次毫米波陣列 (Submillimeter Array, SMA)
- ALMA
- 原恆星 (protoplanets)
- 早期宇宙 (early Universe)