

# 星光的秘密與利器



- 何謂恆星：生老病死
- 怎麼知道它們的性質
- 然後呢，怎麼利用這些性質？



中央大學

陳文屏  
天文所

2022.09.24@台北天文館 「女孩玩天文」天文營

<https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/Courses/StellarEvo/starLightGirls.pdf>

# 結論：來自星光的訊息 …

- 太空中極冷的環境，誕生出極熱的東西 … 自我引力 … 核反應 … 靜力平衡 … 穩定發光發熱
- 恆星提供地球生命（及宇宙）重要的能量來源，壽命百萬年到百億年，製造複雜元素。我們這種生命以天體演化的時間尺度發展出來
- 我們藉星光了解大半的宇宙（總有暗勢力）：如何發光、這些光線如何受到影響。依據觀測推敲光源的性質
- 恆星互繞、聚集成星團、星系 …、黑洞、暗物質、暗能量

**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
- ♥ 沒能說服他人，可能因為還沒說服自己
- ♦ 不總能做喜歡的事情，但要喜歡做的事情
- ♣ 選個讓自己快樂、有成就感的職業

可不可以就說說故事，不講道理？



當然可以～但那該多無趣 😊

# 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
- 宇宙將來會怎樣？其他地方有沒有生命？有沒有另個宇宙？
- … 以上這些**怎麼知道的**？



Cosmic Art Photography@Switzerland

- 天文學研究宇宙天體的本質，包括其生老病死的過程
- 除了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來自天體的訊息，包括各種波段的**電磁波**、重力波，或是所放出的物質（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**

# 恆星的生老病死

星際  
雲氣



恆星



紅巨星



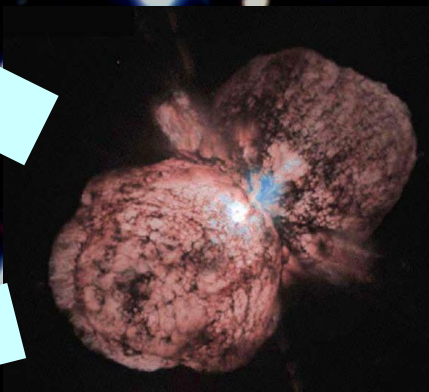
恆星在濃密分子  
雲核中成群誕生

於此同時，行星  
在年輕環星盤中  
誕生

行星狀星雲



星球爆發



超新星



何謂恆星？行星？



# 星際物質

星星之間極其寬廣，但太空並非真空，  
而存在星際物質



日常空氣每cc約含 $10^{19}$ 個氣體粒（分）子  
星際太空每cc約含 1 個氣體粒（原）子

這些包含氣體與灰塵的**雲氣**彼此之間引力  
互相吸引，使得雲氣聚集，氣體（原子結合成分子）仍然透明，  
但濃密的灰塵擋住後面發光的氣體或星球

這些「**星際暗雲**」密度高（每cc內超過數萬個分子）、溫度低  
（攝氏零下260幾度）支撐的力量 < 收縮的力量 → 越來越小（密）



## 獵戶座恆星形成區

充斥了剛誕生的恆星，受激發氫氣的輻射，以及遮擋光線的塵埃

Star Shadows Remote Observatory

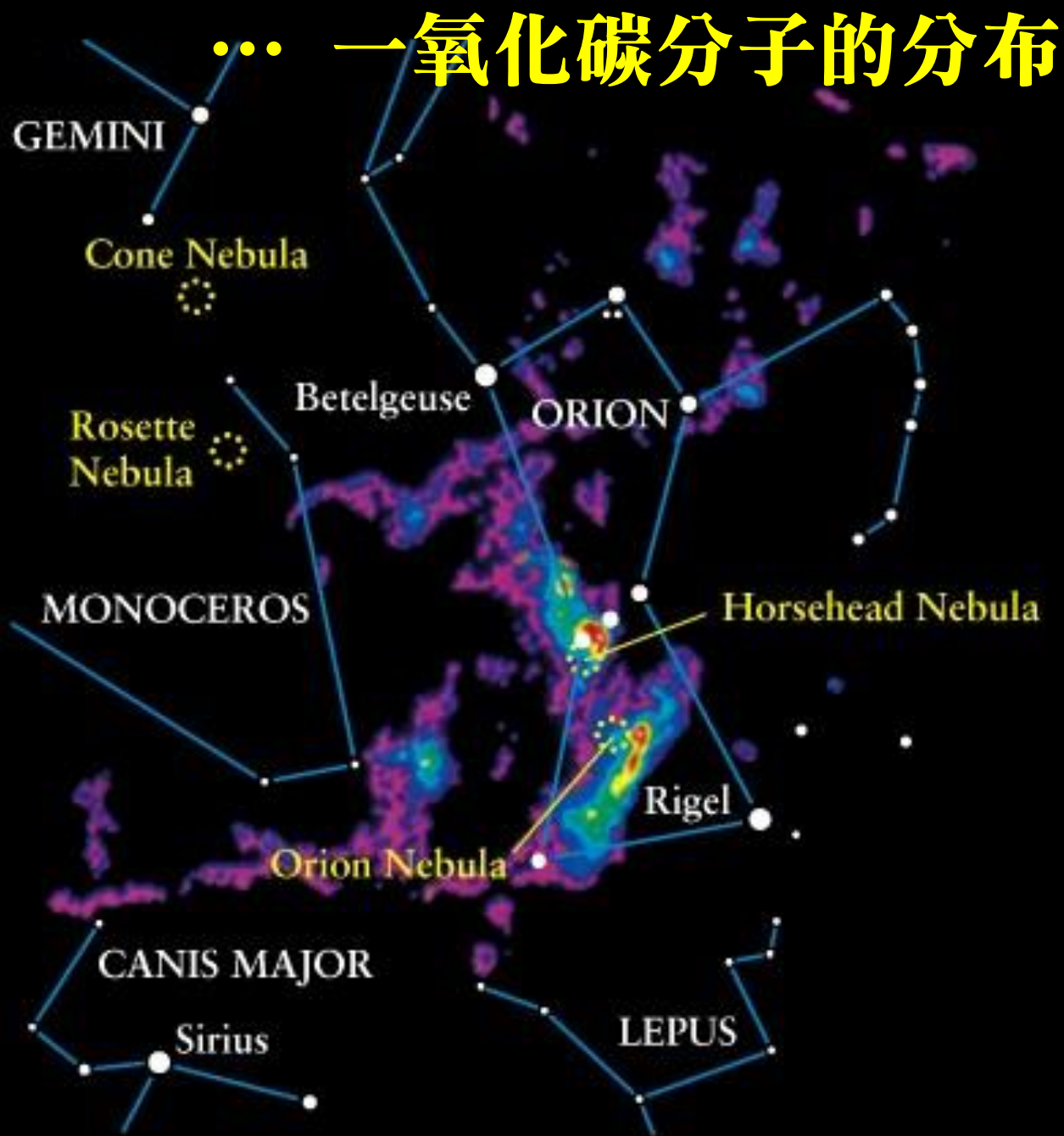
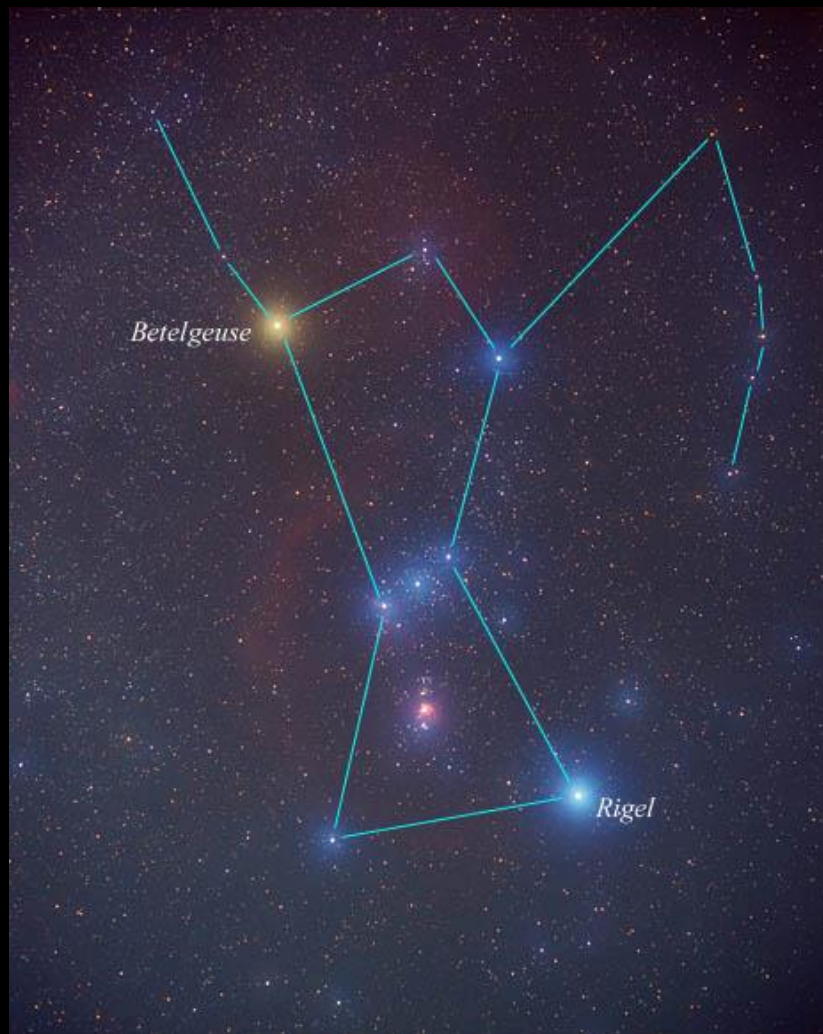
Horsehead Nebula



Hubble  
Heritage

NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-12

# 可見光看到的獵戶座



# 蛇夫座當中的星際暗雲

<http://www.robgendlerastropics.com/B72JMM.jpg>



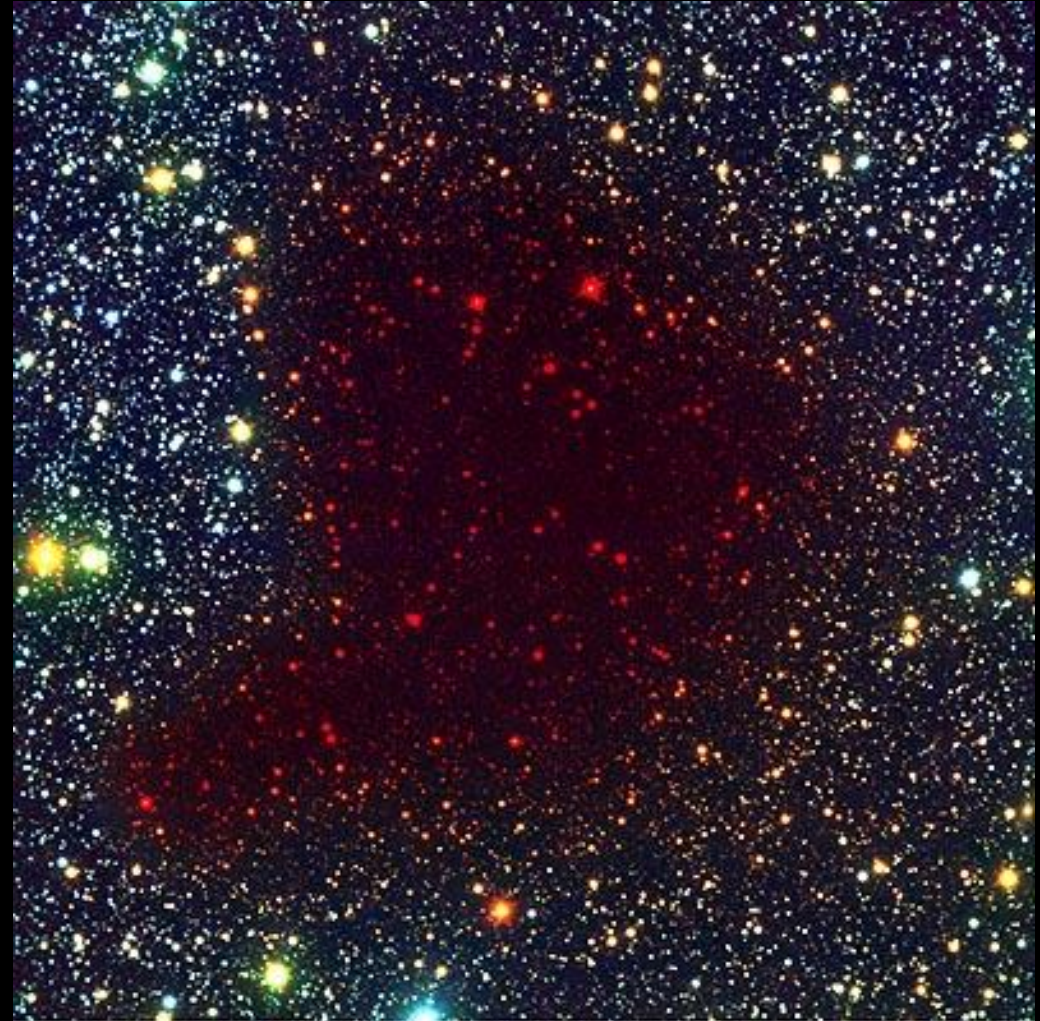
Barnard 72

可見光三色合成「照片」

加進紅外波段的「光」



Pre-Collapse Black Cloud B68 (visual view)  
(VLT ANTU + FORS 1)



Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68  
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)



# 天文學家的挑戰 ——

怎麼知道這些天體的性質：

距離、大小、質量、成分、溫度、壓力 …

來源、演化、衰亡

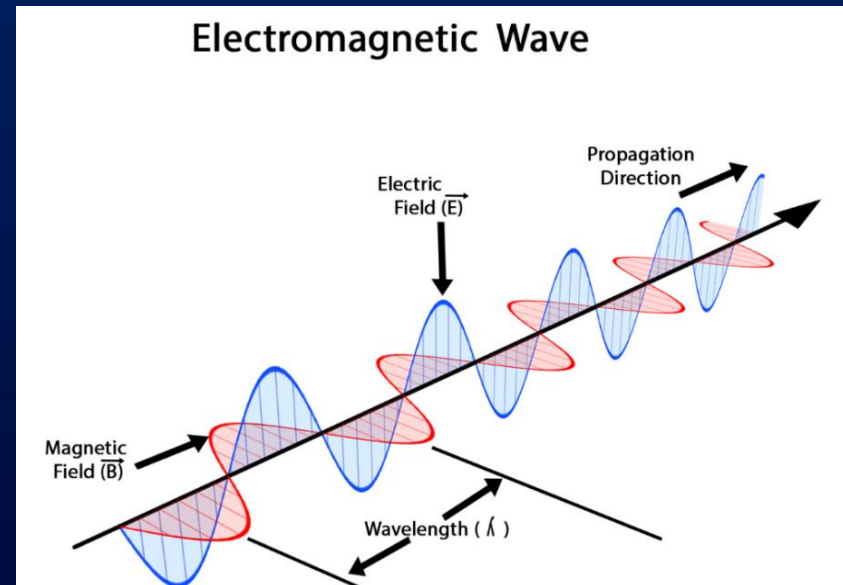
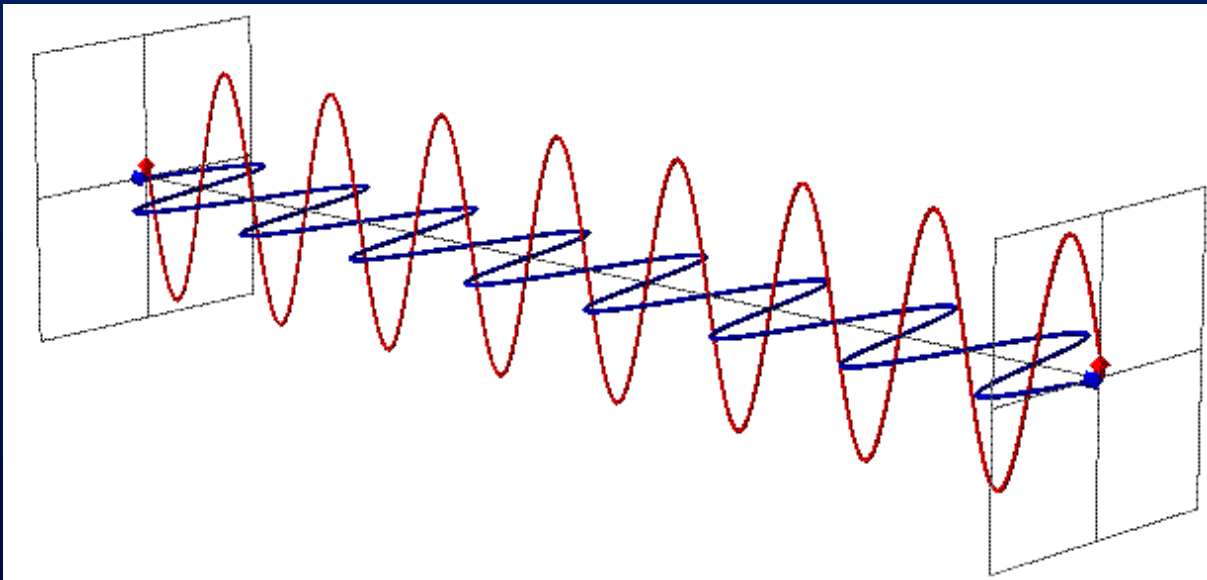
# 何謂電磁波

電荷  $\rightarrow$  電場    電荷流動  $\rightarrow$  電流  $\rightarrow$  磁場

電場改變  $\rightarrow$  磁場 (安培定律)

磁場改變  $\rightarrow$  電場 (法拉利定律)

電場、磁場交互變  $\rightarrow$  電磁波



伽瑪射線

X射線

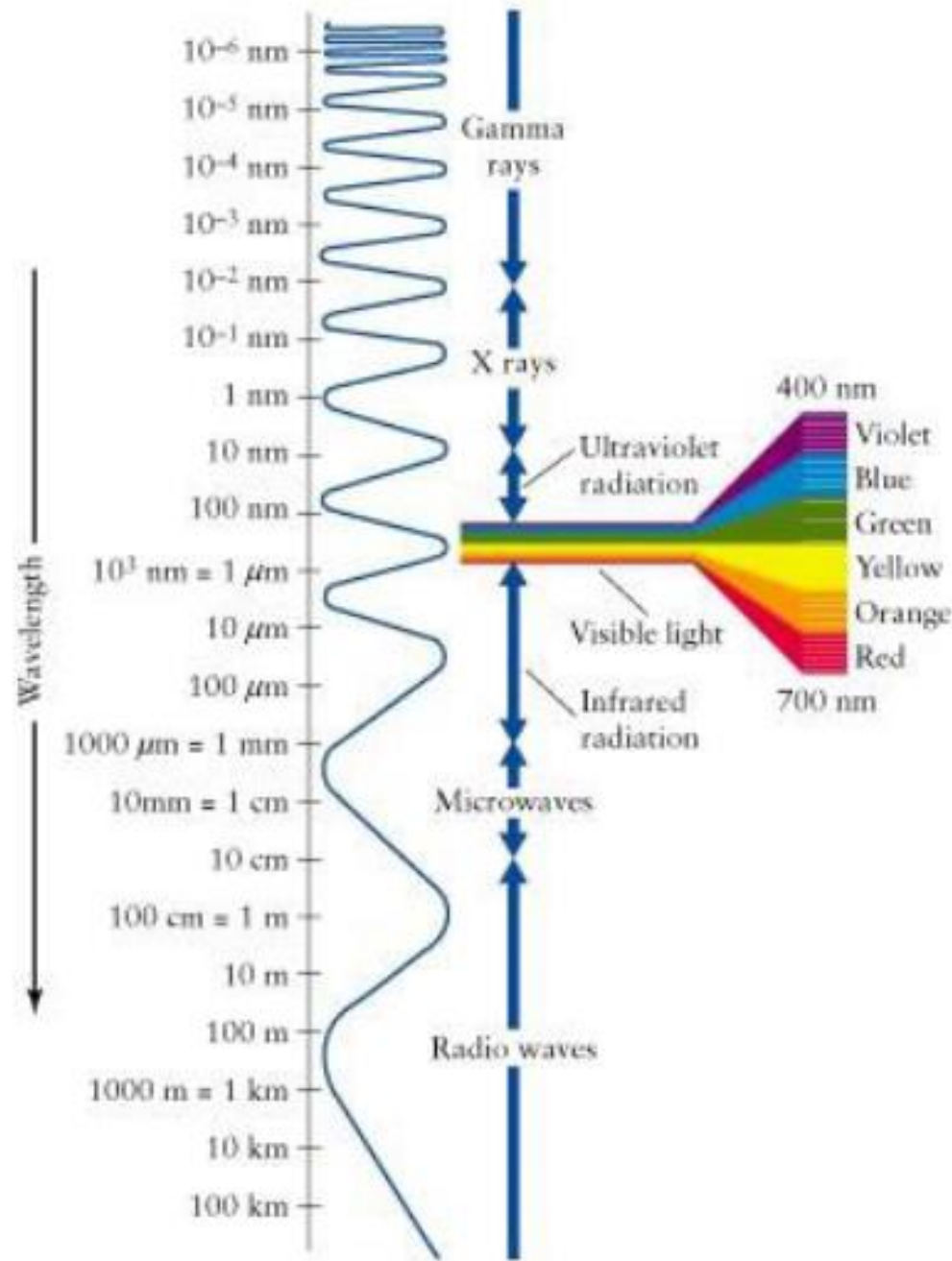
紫外線

可見光

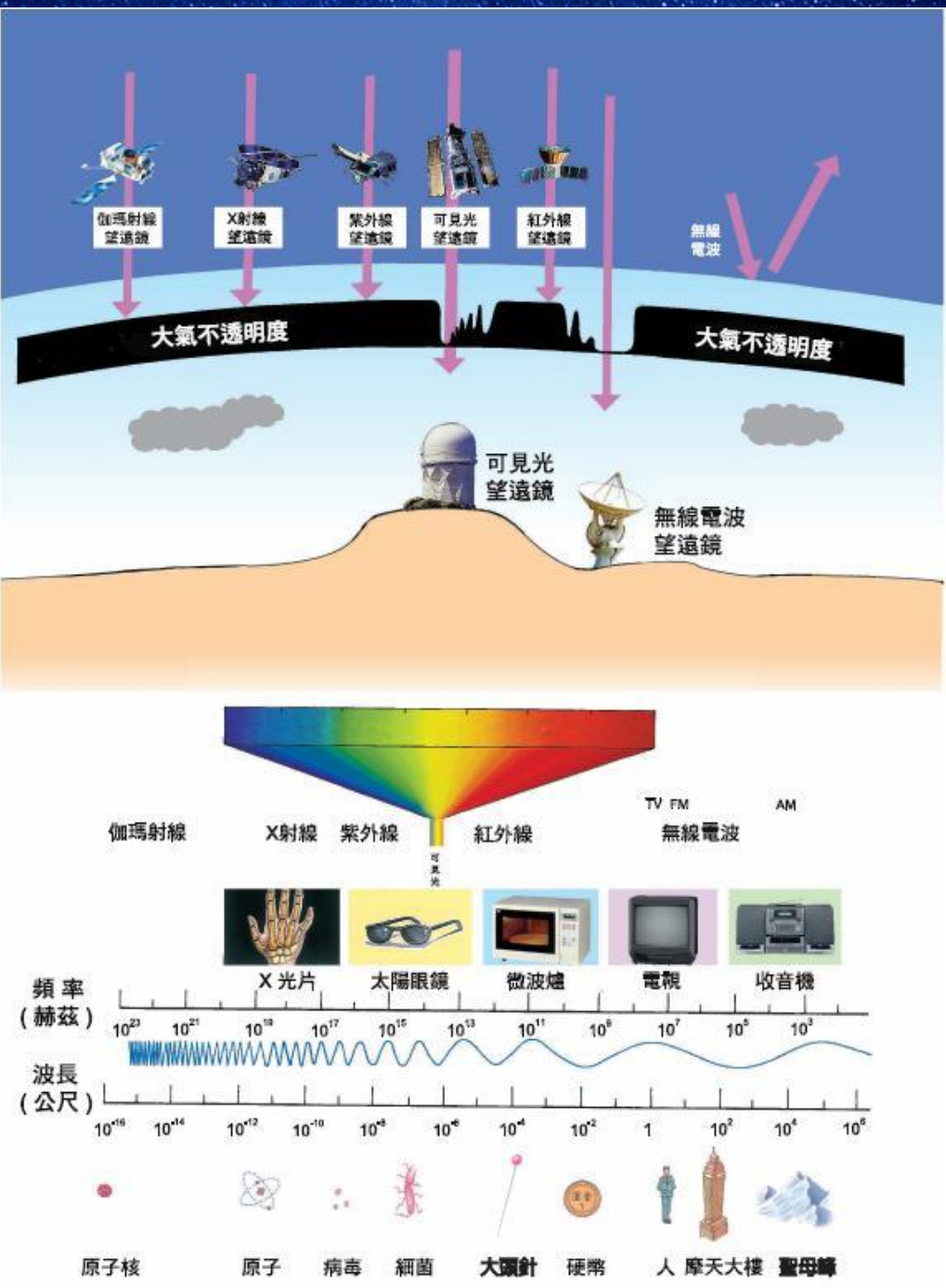
紅外線

微波

(無線) 電波







每秒震動的次數：頻率  
 震動間隔的時間：週期  
 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）  
 波長越長、能量越強

地球大氣（分子）吸收紫外與長波輻射，讓可見光、（無線）電波，及少數紅外波段通過，以致地面可以觀測

# 天文觀測

- ◆從收到的光線（電磁波）推敲發光天體的性質
- ◆必須了解電磁波如何與物質交互作用
- ◆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）光線
- ◆科學與技術的結合

# 研究宇宙最重要的工具？

- ✓ 紙、筆（知識）
- ✓ 電腦
- ✓ 望遠鏡
- ✓ ...

多半問題沒有「標準」答案

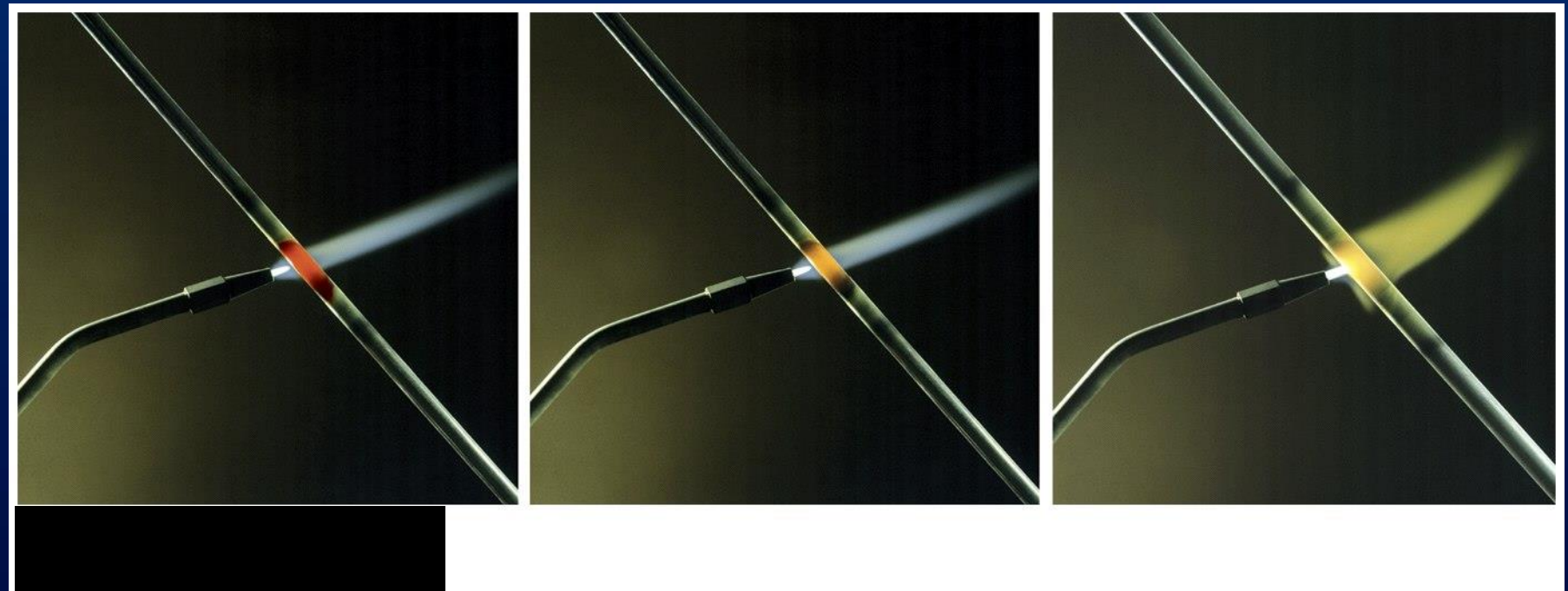
# 天體輻射 (來源)

輻射體——靠自己熱度發光  
越熱 → 越明亮、顏色越白熾

溫度低



溫度高



紅橙

黃綠

藍白

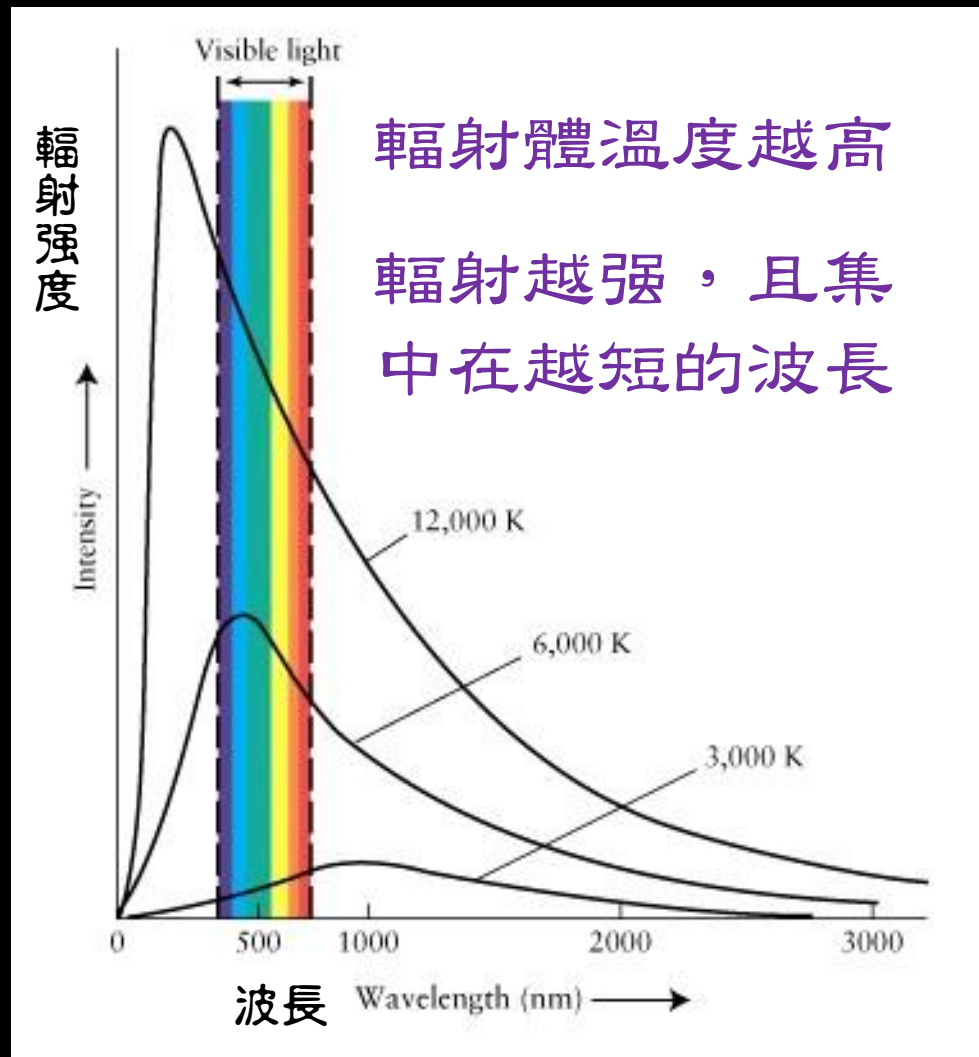
**黑體** (blackbody)：（理想中的）完美輻射體

完全吸收所有照射上去的輻射（沒有反射）；  
本身則依照溫度在各波段發出輻射

Merriam-Webster dictionary

“That’s important, said John Mather, an astrophysicist at NASA Goddard who won a Nobel Prize in 2006 for measuring the CMB’s *blackbody* spectrum with COBE.”

— *Quanta Magazine*, 30 June 2015



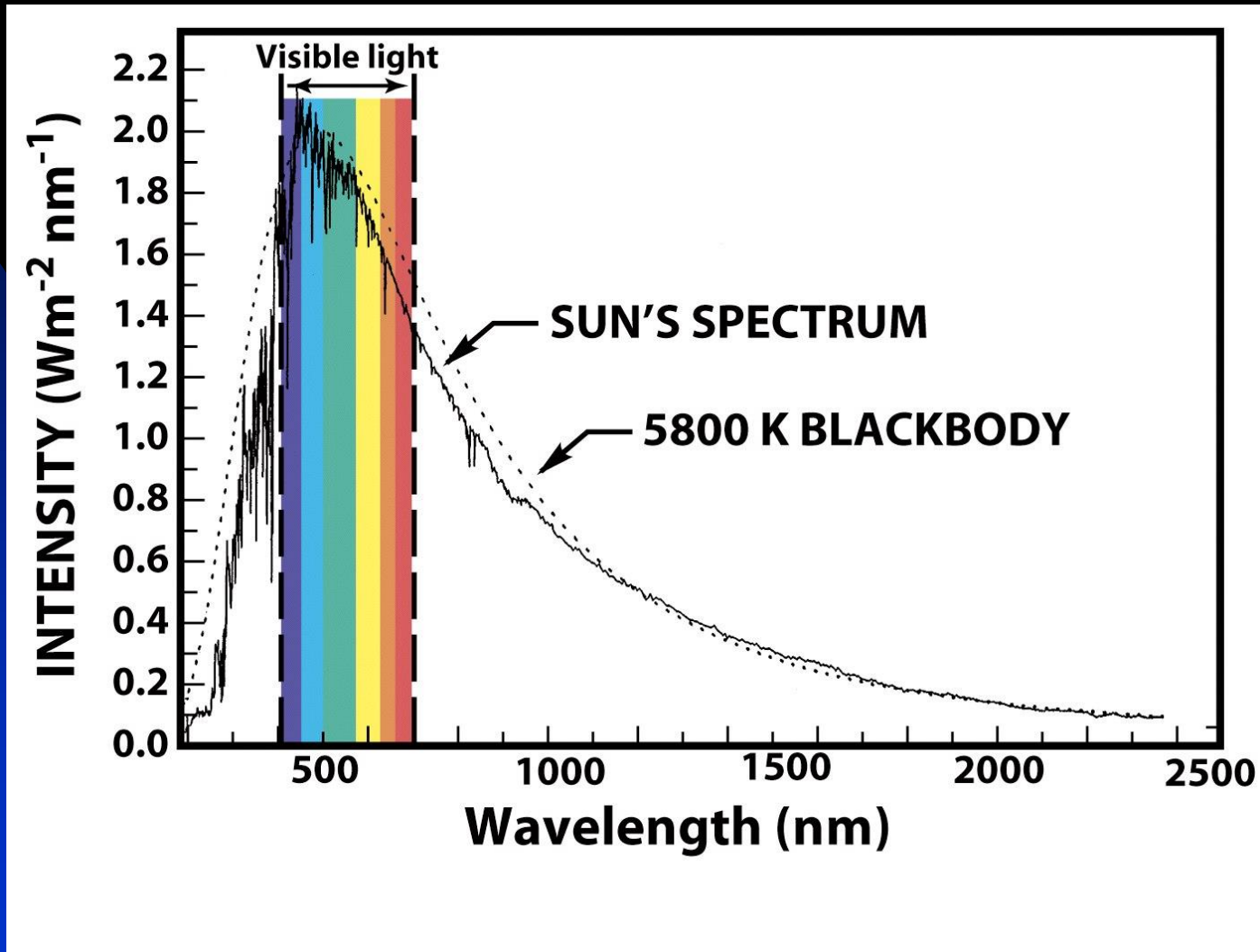
從恆星的顏色可以估計恆星表面溫度

表面溫度高 → 藍白

表面溫度低 → 紅黃

恆星（自行發光）

太陽是顆黃綠色的恆星 表面溫度大約為5800K



$$T \approx 5800\text{K}, \lambda_{\text{max}} \approx 0.5\mu\text{m} = 5000\text{\AA}$$

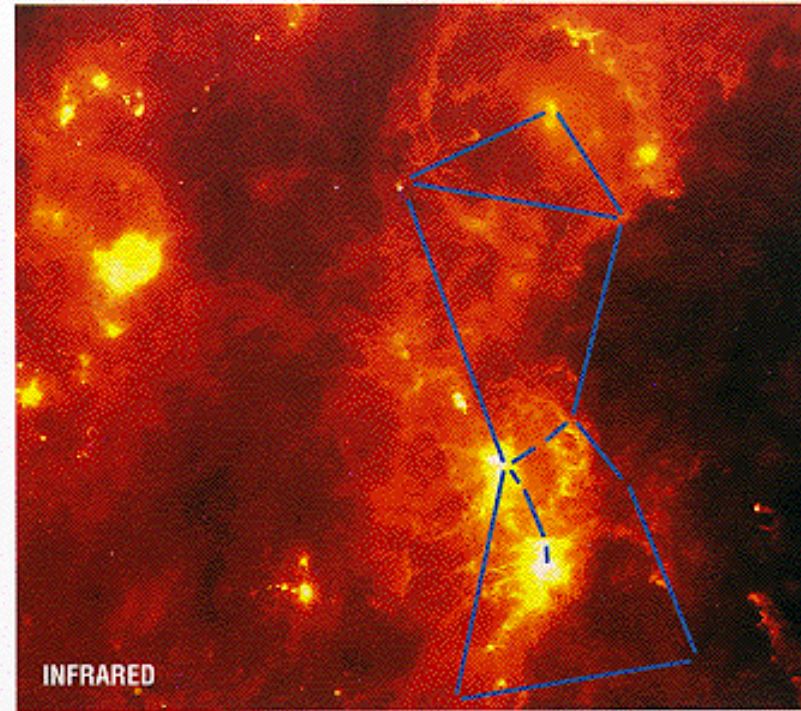
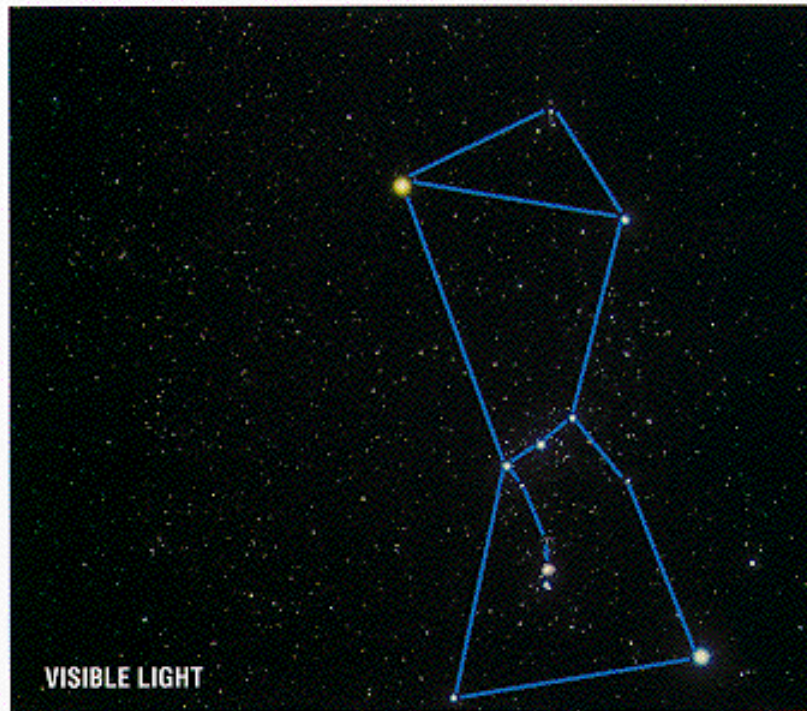


$$T \approx 300\text{K}, \lambda_{\text{max}} \approx 10\mu\text{m}$$

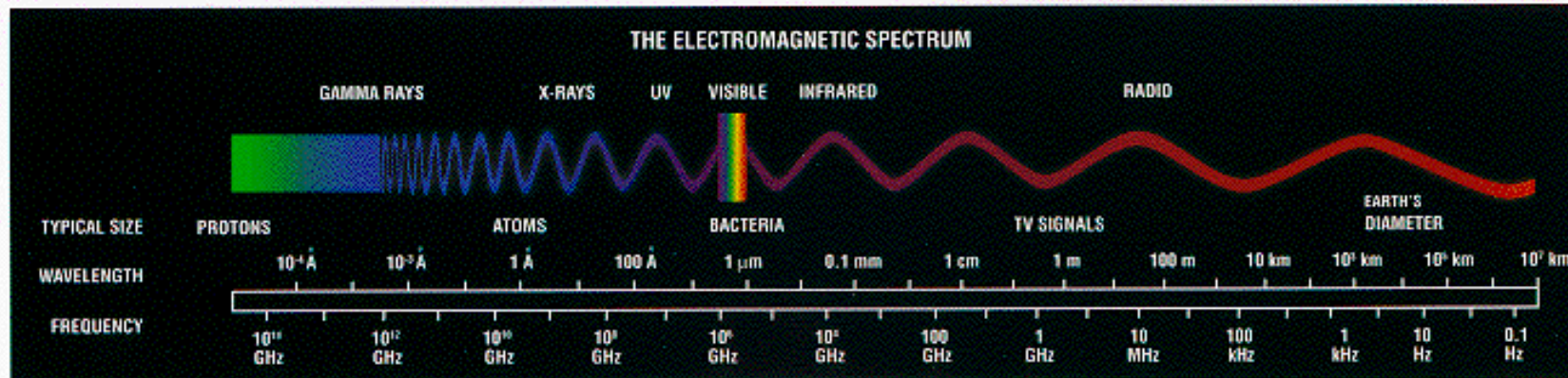




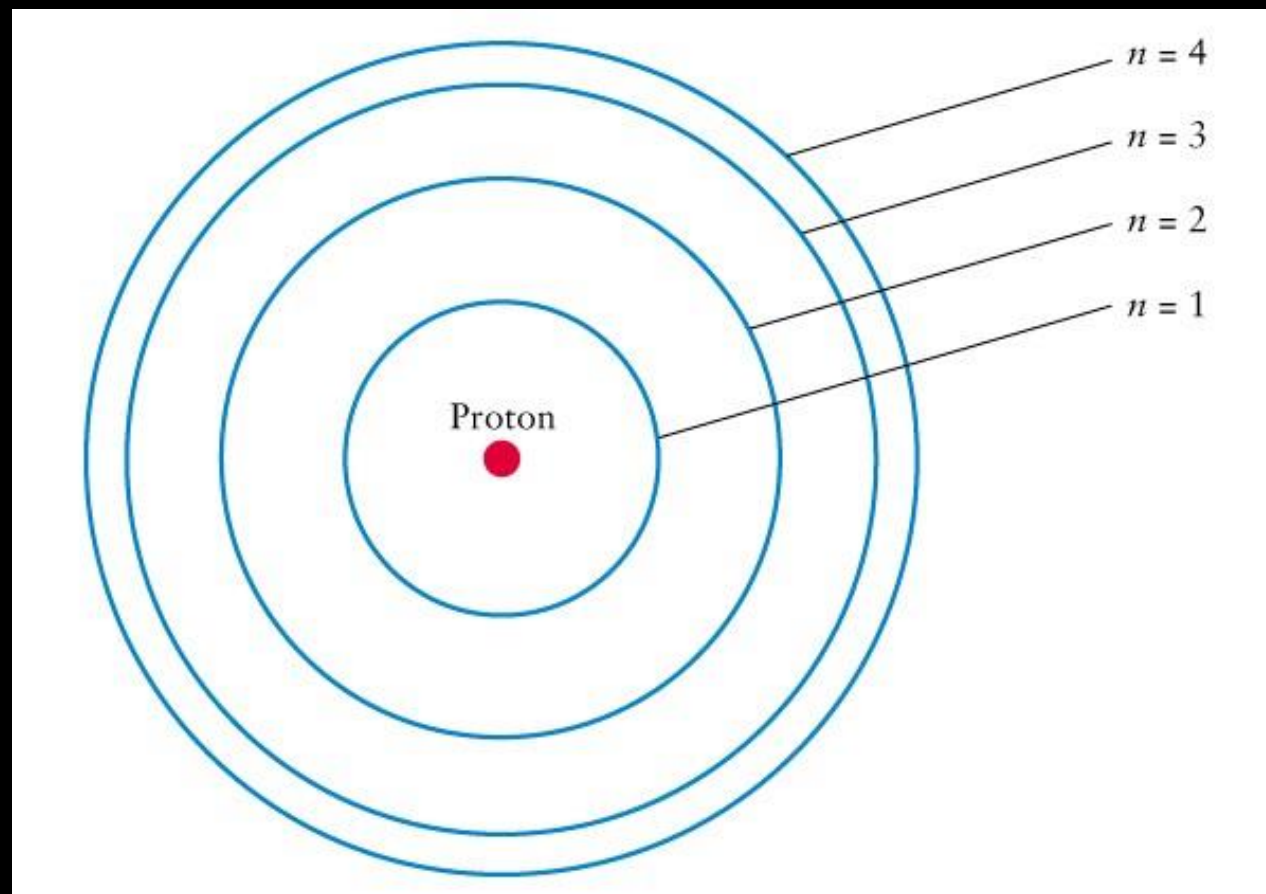
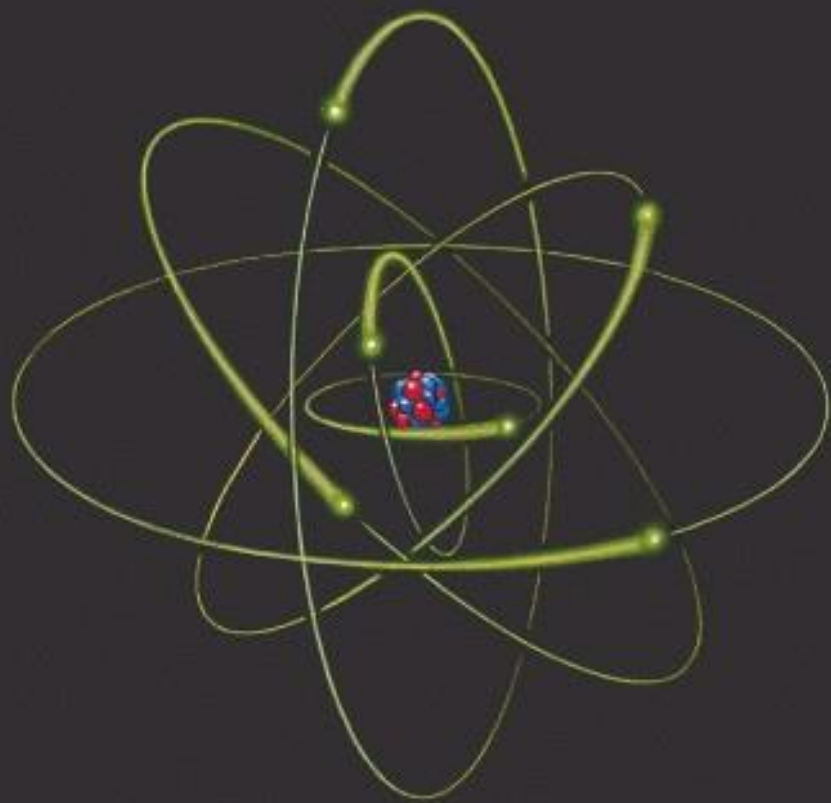
## Infrared Astronomy: More than Our Eyes Can See



*These views of the constellation Orion dramatically illustrate the difference between the familiar, visible-light view and the richness of the universe that is invisible to our eyes, though accessible in other parts of the electromagnetic spectrum.*



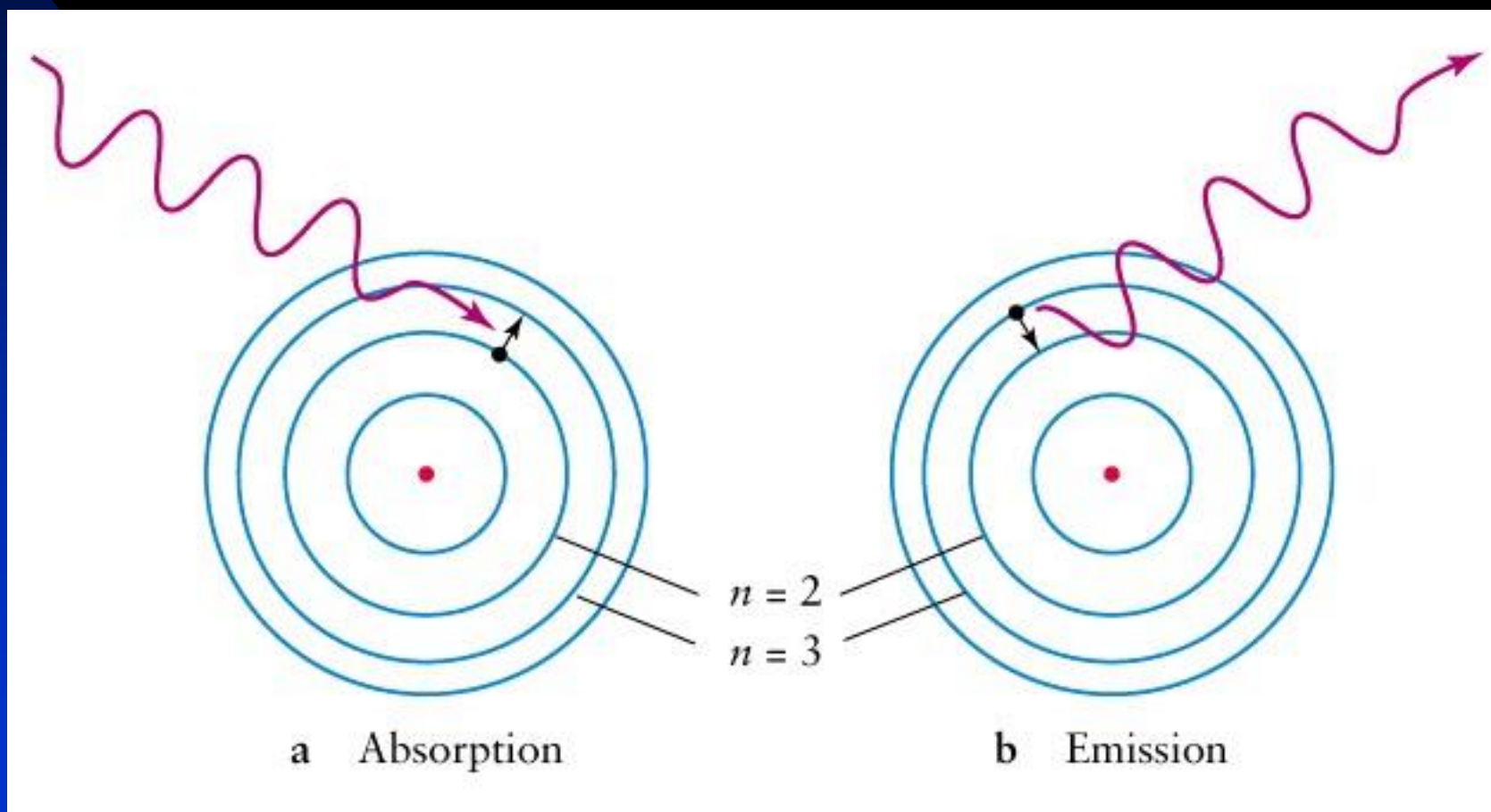
電子繞著原子核，在一定的軌道區域運行，每個軌道能量不同。電子只能從一個軌道「躍遷」到另外一個，不能停在中間



變換軌道 → 能量改變

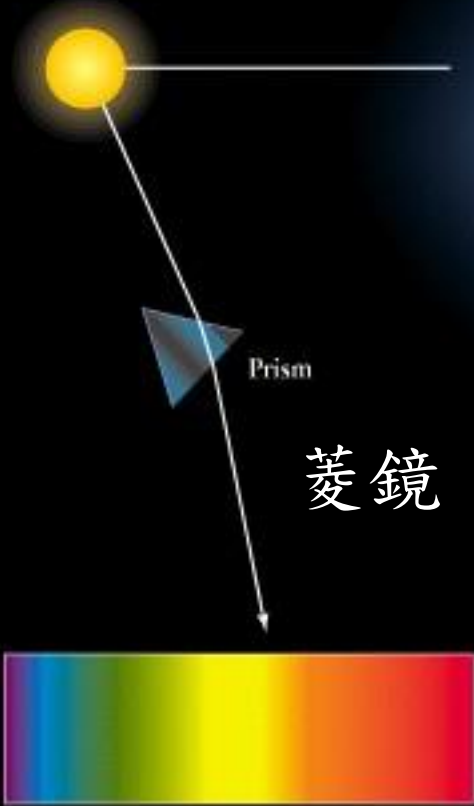
低 → 高能量軌道 → 吸收能量

高 → 低能量軌道 → 放出能量



# 熱輻射體

Hot blackbody

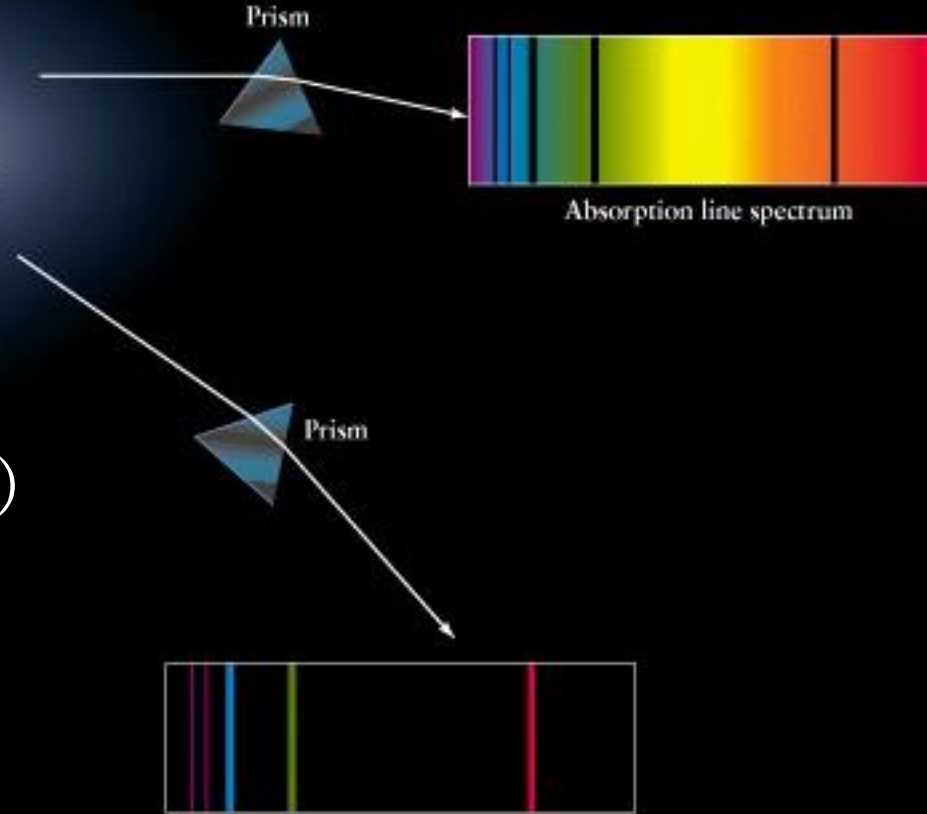


Continuous spectrum

這裡看到如彩虹般連續譜

# 低溫氣體

Cloud of cooler gas



Emission line spectrum

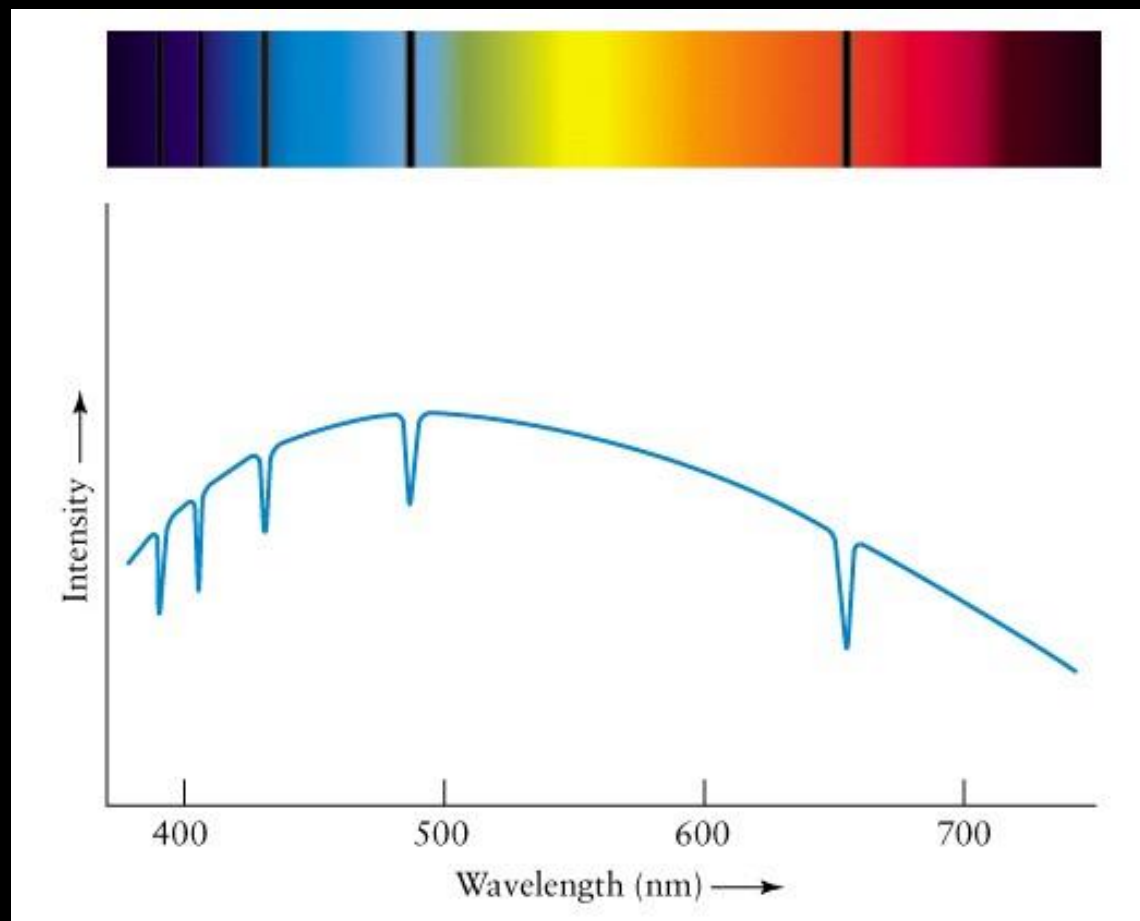
這裡看到個別發射亮線

這裡看到連續譜加上個別吸收暗線

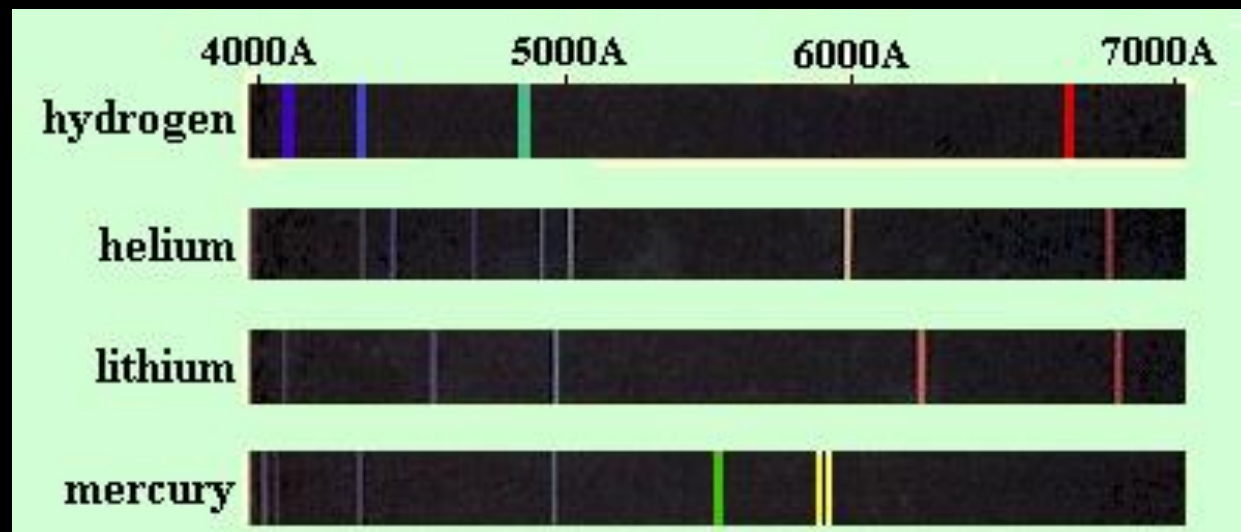


Absorption line spectrum

原來各個能量（波長）都有的輻射，要是某個能量的光被吸收，便產生吸收（暗）線



不同元素有不同躍遷  
→ 不同譜線

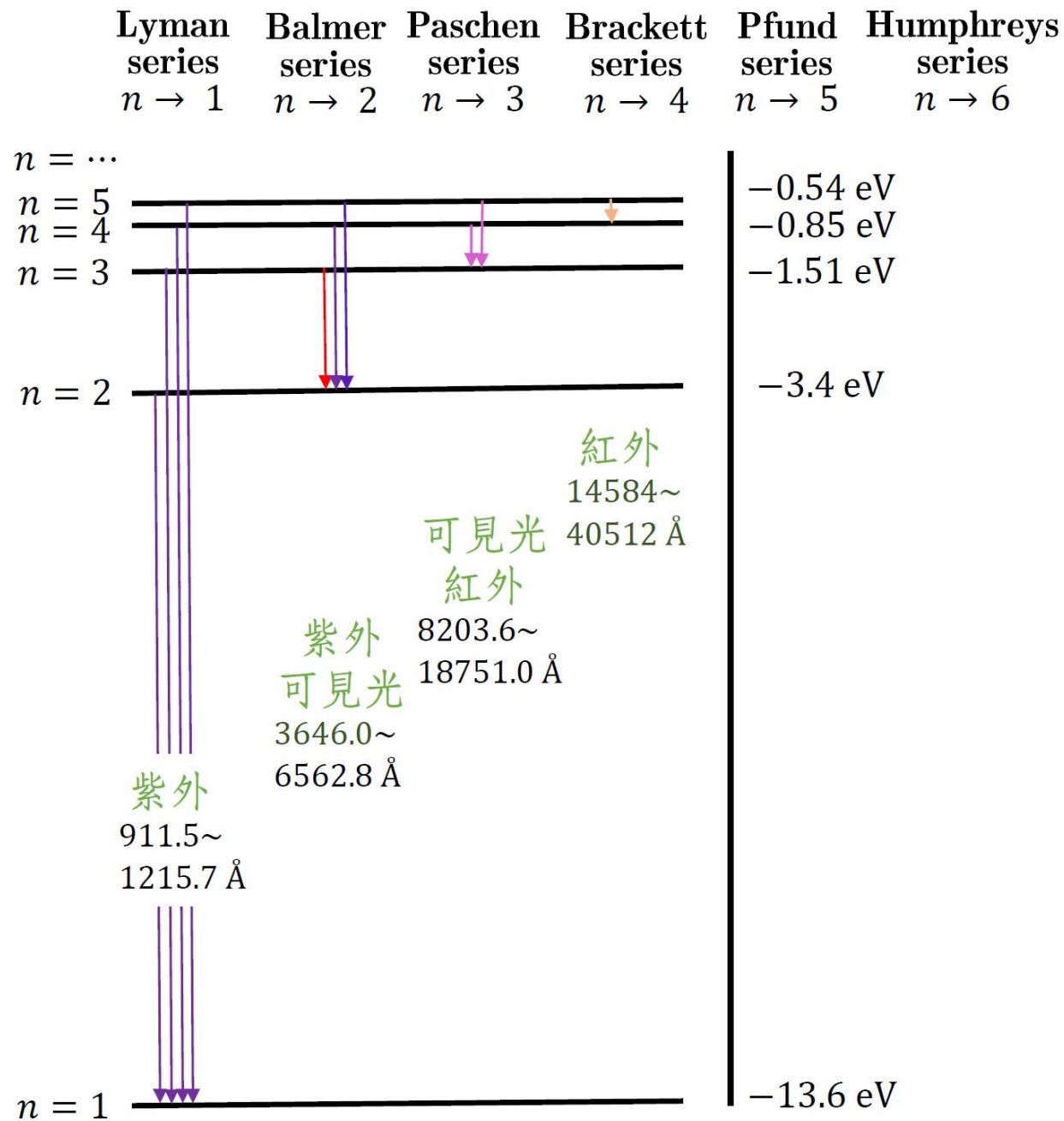


氫、氦、鋰、汞等元素的光譜  
[web.fccj.org/~ethall/thallium/spectra.gif](http://web.fccj.org/~ethall/thallium/spectra.gif)



太陽內部很熱（核心1500萬度），發出高能量的光，  
經過較冷的外層氣體，部分能量被吸收

光譜中有很多吸收線

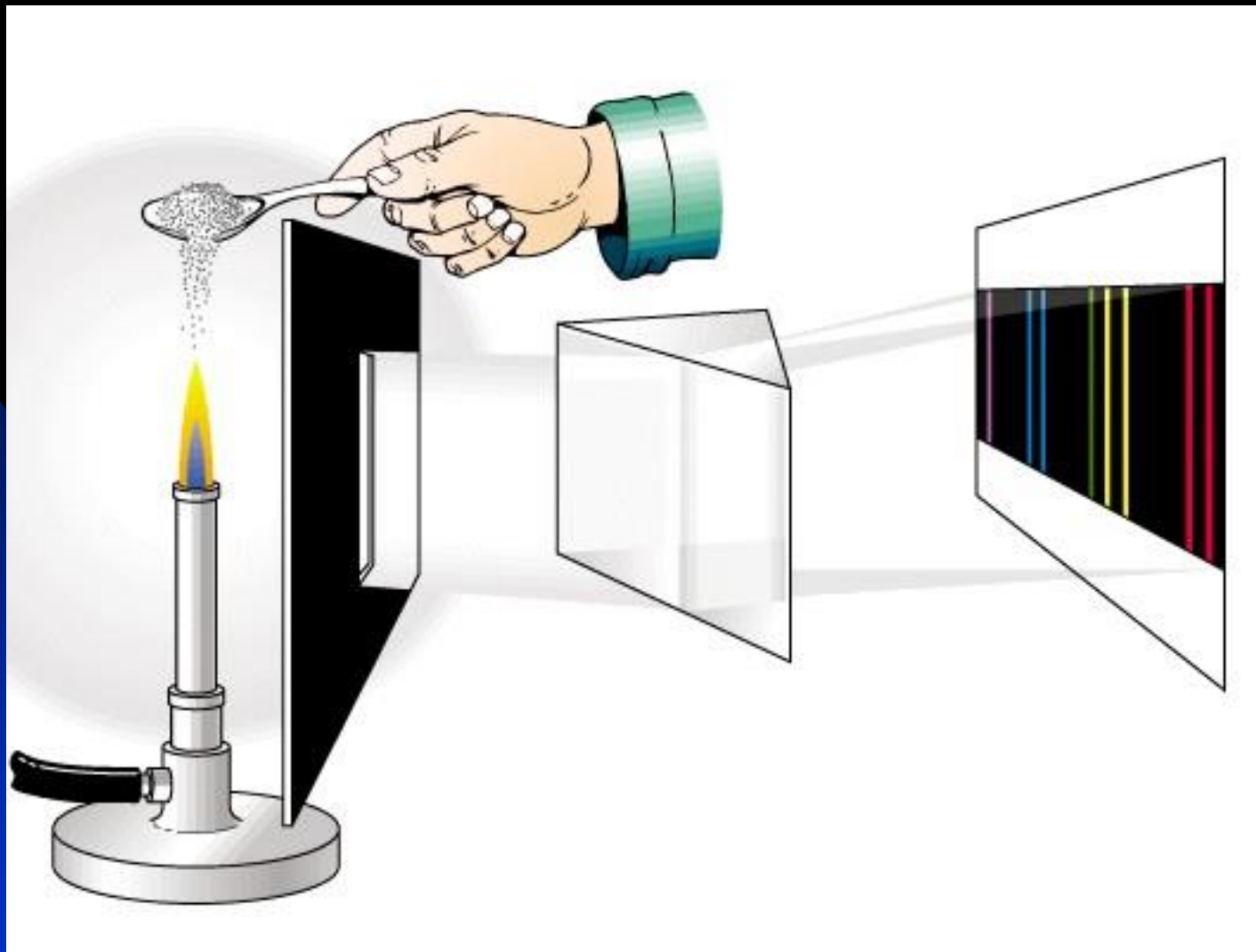


從高能階  $m$  躍遷到  $n$ ，放出一個光子（固定能量／波長），也就是一個量子，產生發射線

$$|m - n| = 1 (\alpha), 2 (\beta), 3, \dots$$

當不同能量光子入射，氫氣「取一瓢飲」，只吸收掉特定能量（在特定波長）的光，產生吸收線

巴爾曼系列在可見光明顯，因此也稱為 H 系列  
 $n = 3 \rightarrow n = 2$  稱為  $H_\alpha$



# 焰色試驗法

Robert Bunsen and Gustav Kirchhoff in the 19<sup>th</sup> century  
Emission spectra of heated elements → chemical analysis



## 發射星雲

氣體受激發（星光照射、碰撞）  
自己發光 → （可見光）紅色

## 黑暗星雲

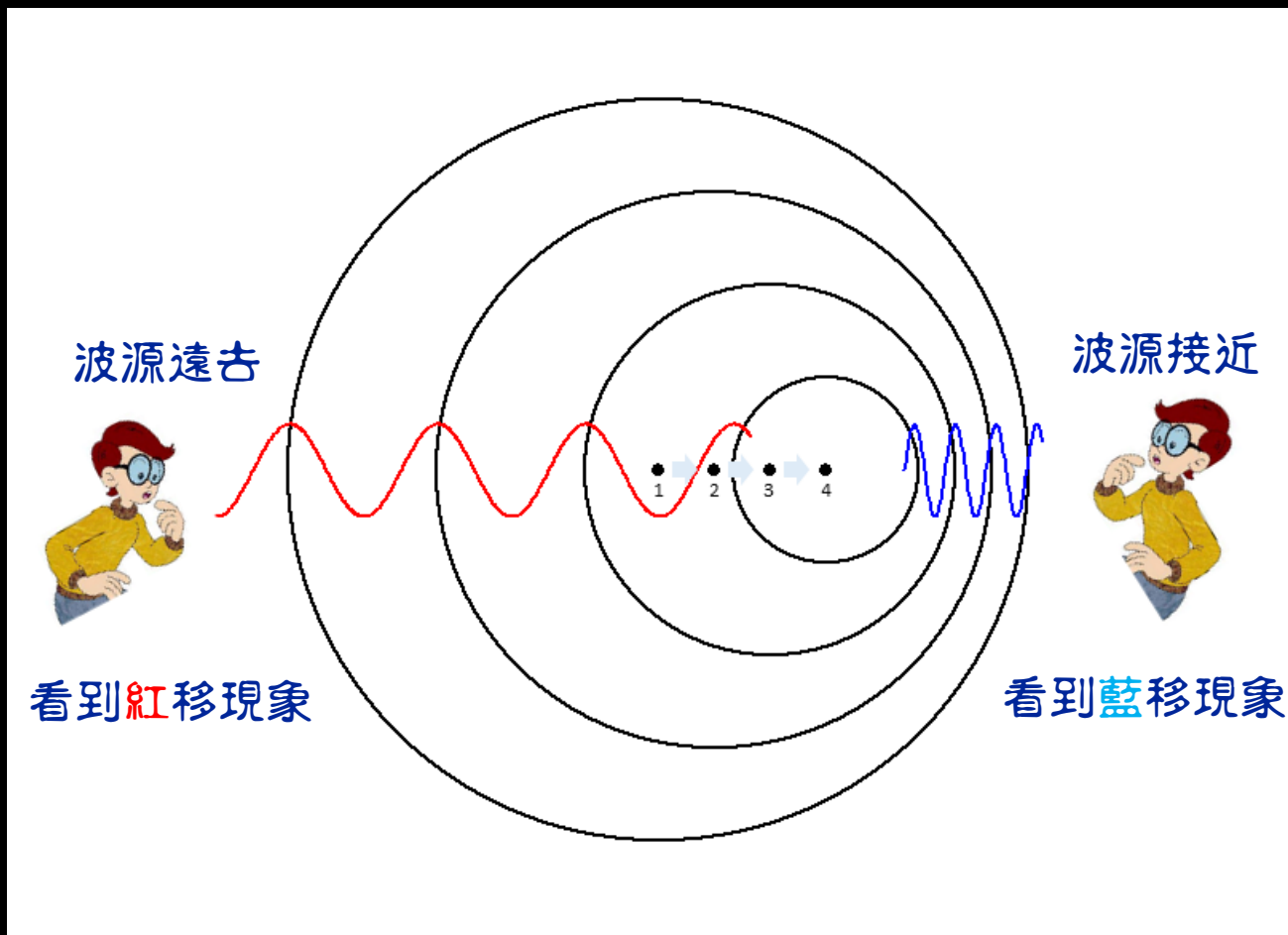
塵埃遮住背景光線  
（星光或發射星雲） → 黑色

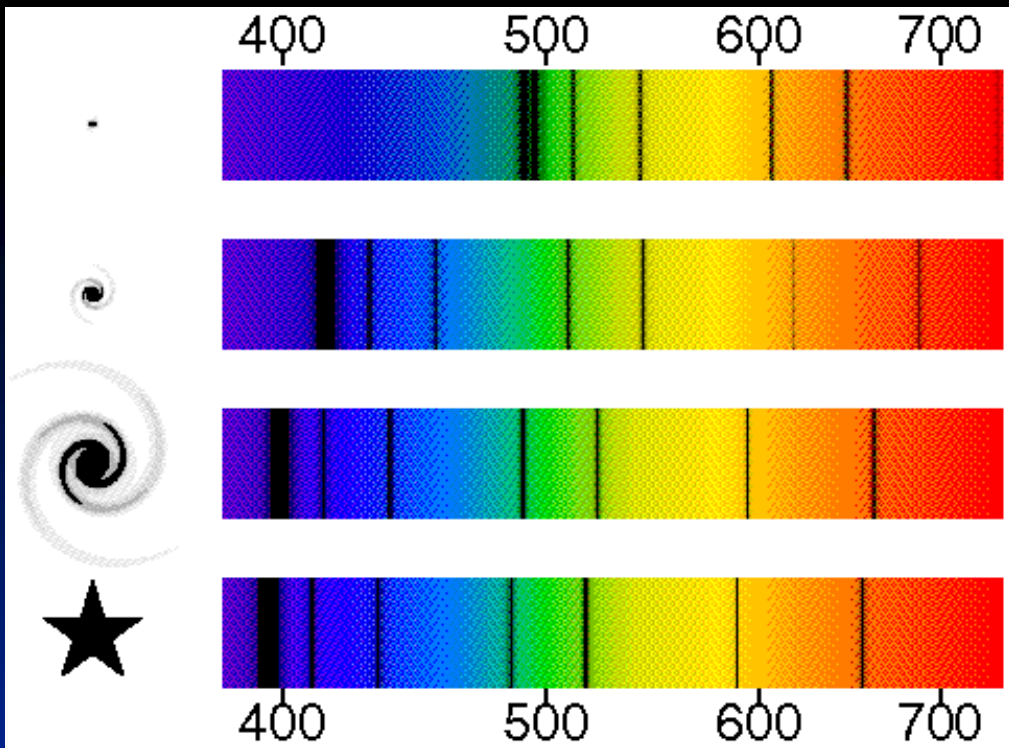
## 反射星雲

氣體反光（散射） → 藍色

# 都卜勒效應

測量波動頻率（振動快慢）的改變，可以知道我們和波源之間的速度





<http://www.astro.ucla.edu/~wright/doppler.htm>

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$v$  : 波源在視線方向的相對速度

$c$  : 真空中的光速 =  $3 \times 10^5$  km/s

跟光速的比例等於波長移動的比例

利用都卜勒效應

★ 觀察心臟跳動情形

★ 判斷高速公路上的車速

★ 測知天體沿視線方向的運動

→ 太陽表面震盪

→ 恆星中運動情形

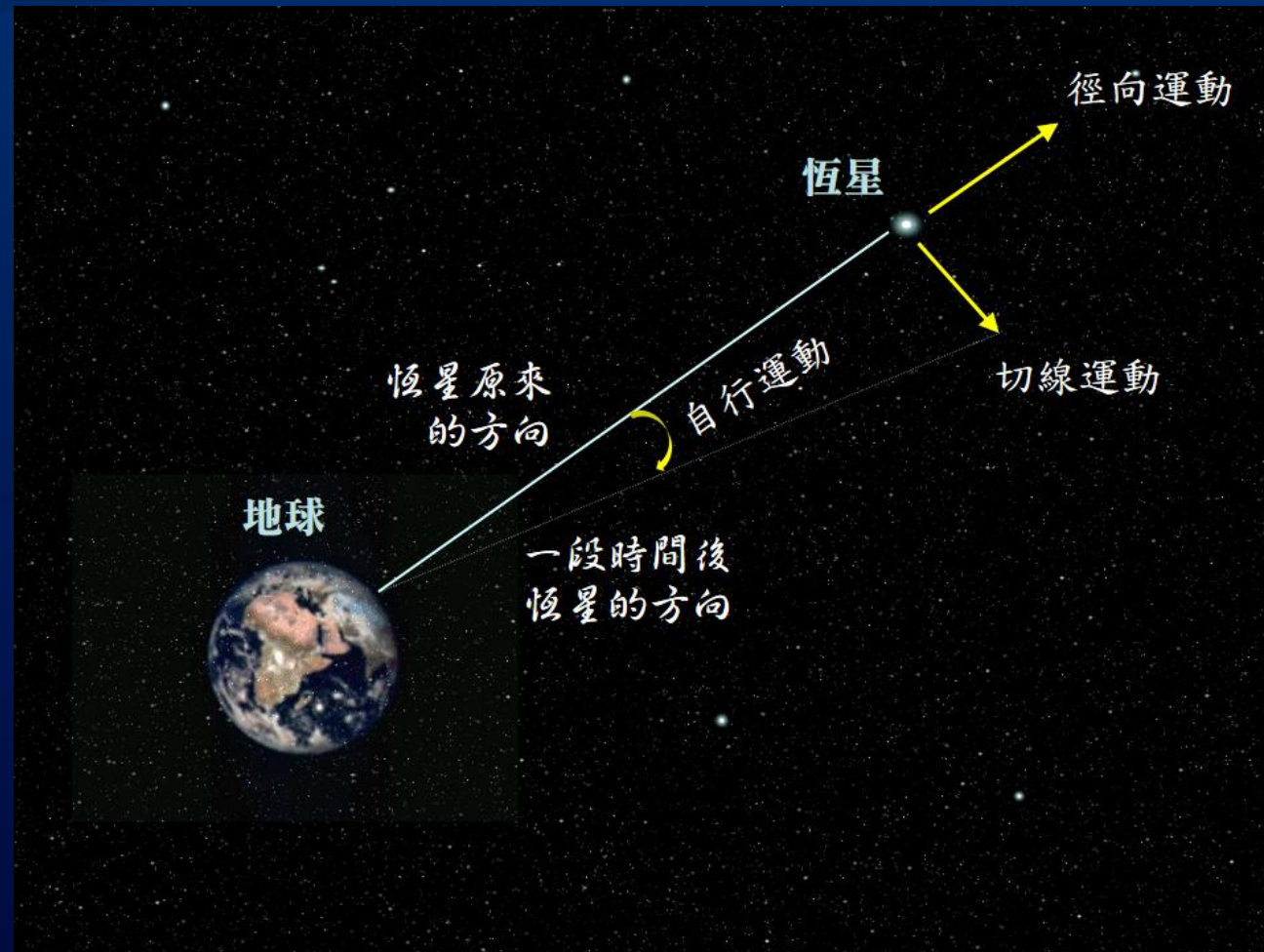
→ 雙星互繞

→ 繞行恆星的行星

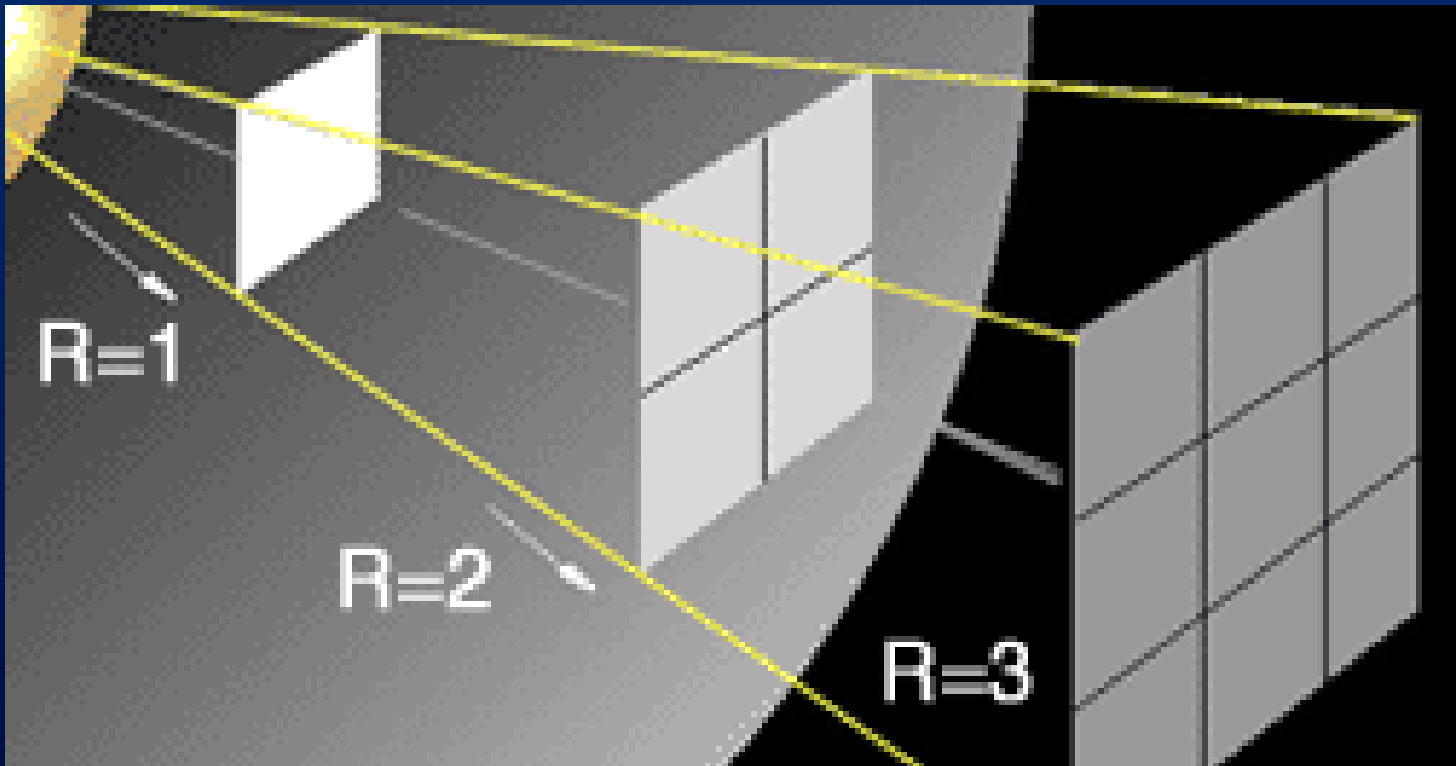
→ 星系運動 (宇宙膨脹)

→ ...

天體在太空的運動可以分成 (1) 投影在天球上的  
**自行運動** (proper motion)，以及 (2) 為垂直於視  
線的**徑向運動** (radial velocity)



# 天體輻射 (接收)



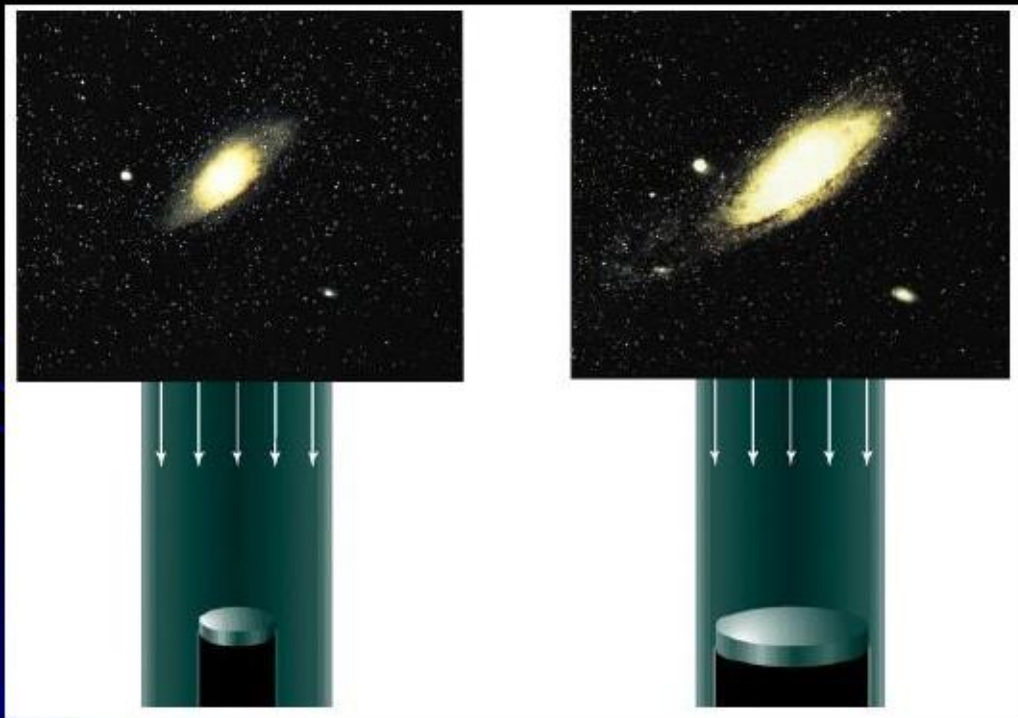
天體發出的輻射向四面八方傳播，分布在球面上，隨時間（距離）擴展

某地收到的強度，與距離平方成反比；越遠越暗

大面積望遠鏡「攔截」較多光線

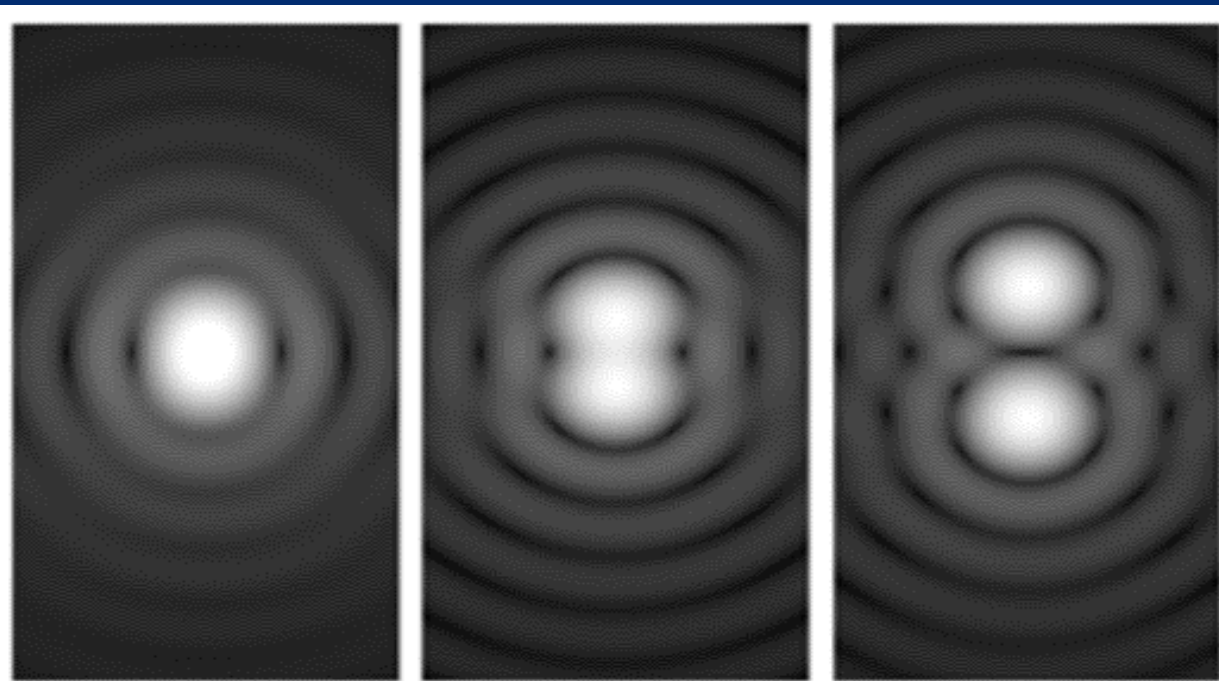
望遠鏡口徑越大，收集光線的能力越強，能看到越暗的天體

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



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（天文館到台北車站）看  
10元硬幣（2.5公分）的張角

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

韋伯太空望遠鏡

$$D=6.5 \text{ m}, \lambda=500 \text{ nm}, \theta = 0.02 \text{ 角秒}$$

**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**  
(1979-1998)  
Mount Hopkins, Arizona



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



**Large Zenith Telescope**  
British Columbia, Canada (2003)



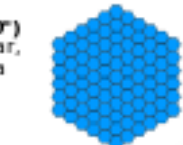
**Gala**  
Earth-Sun L2 point (2014)

**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)



**Hobby-Eberly Telescope**  
Davis Mountains, Texas (1996)



**Large Binocular Telescope**  
Mount Graham, Arizona (2005)



**Kepler**  
Earth-trailing solar orbit (2009)



**Hubble Space Telescope**  
Low Earth Orbit (1990)



Magellan Telescopes  
Las Campanas, Chile (2000/2002)



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



**Southern African Large Telescope**  
Sutherland, South Africa (2005)



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



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



**Overwhelmingly Large Telescope**  
(cancelled)

Arecibo radio telescope at the same scale



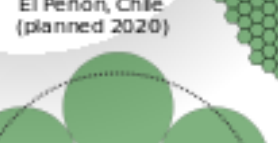
**Keck Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)



**Gemini North**  
Mauna Kea, Hawaii (1999)



**Gemini South**  
Cerro Pachón, Chile (2000)

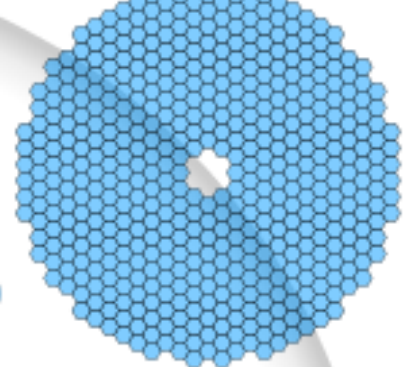


**Large Synoptic Survey Telescope**  
El Peñón, Chile (planned 2020)

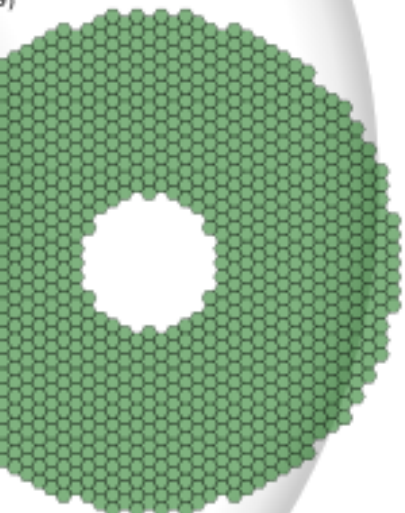


**European Extremely Large Telescope**  
Cerro Armazones, Chile (planned 2022)

Human at the same scale



**Thirty Meter Telescope**  
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)



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

0 5 10m  
0 10 20 30ft

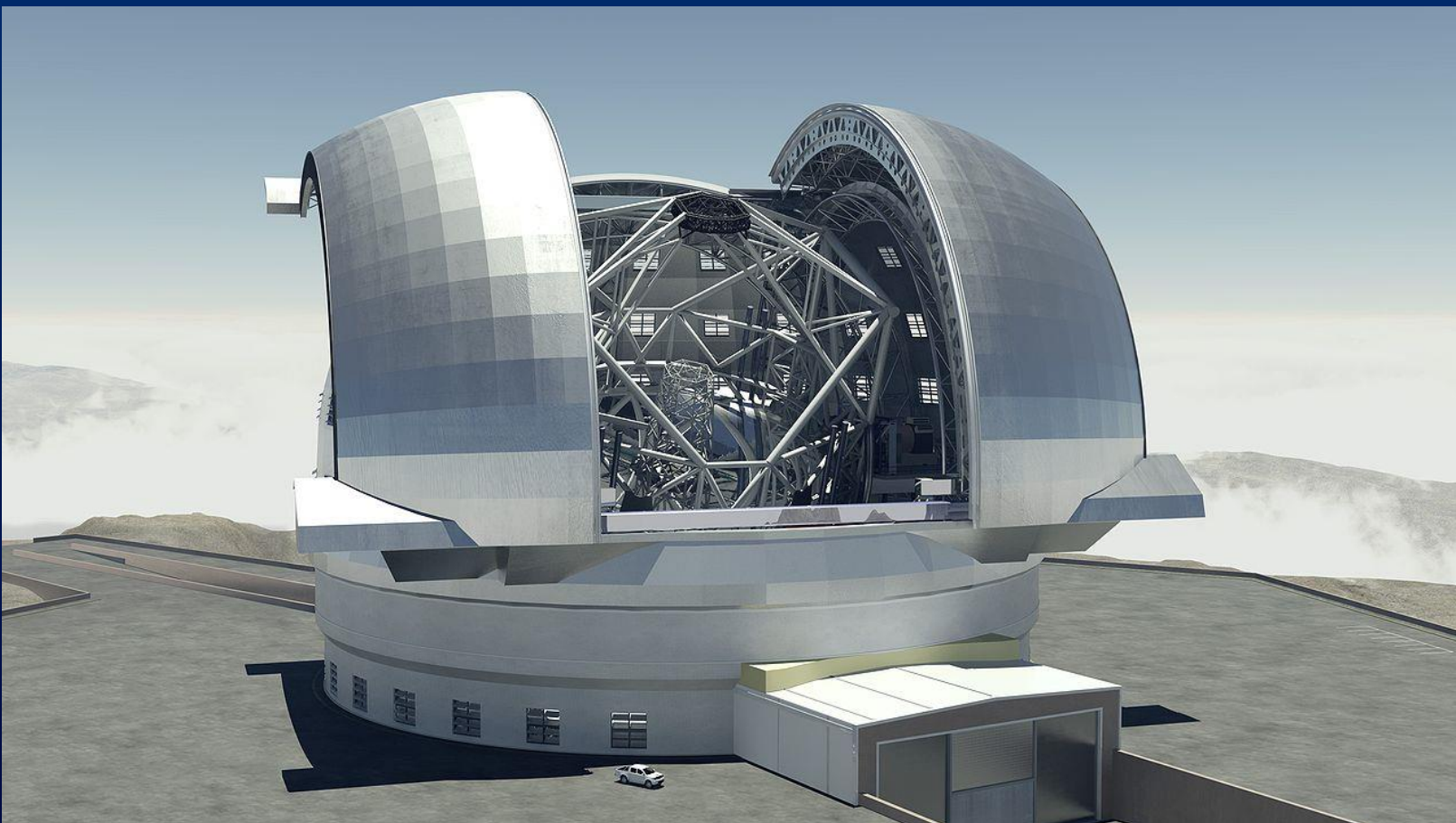


Basketball court at the same scale

# European Extremely Large Telescope (E-ELT)

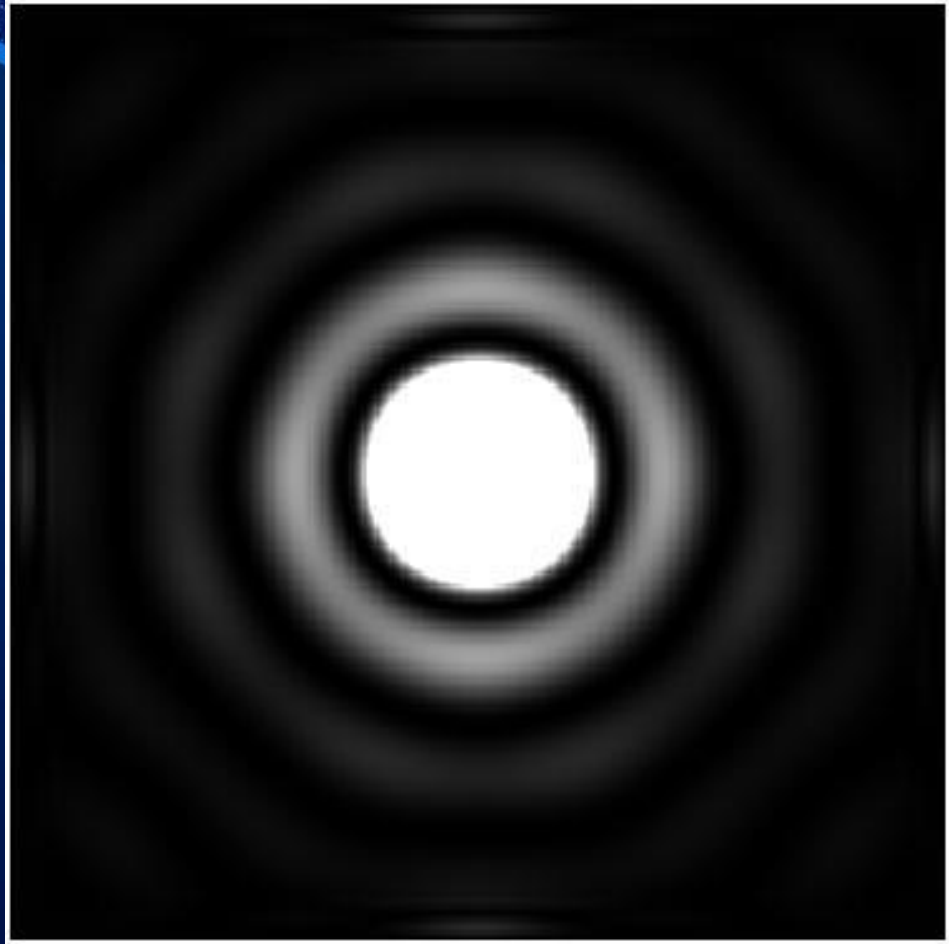
(歐洲) 超大望遠鏡

智利 Cerro Armazones  
(2024)



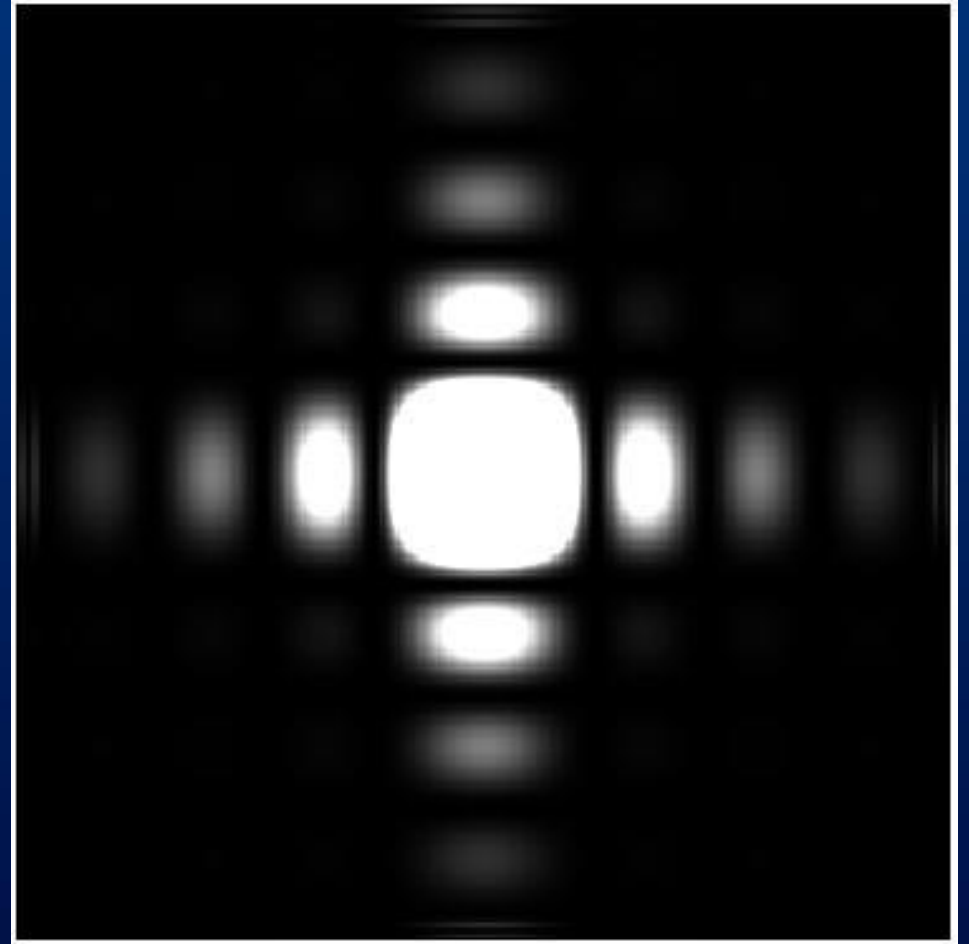


## 圓形孔徑的繞射圖形



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

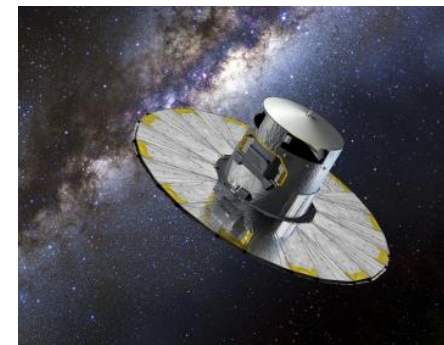
## 長方形孔徑的繞射圖形



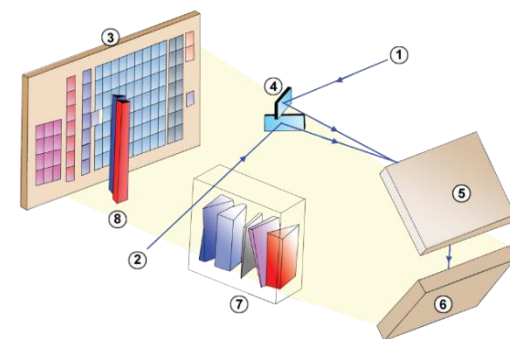
例如 *Gaia* 太空望遠鏡  
1.45 m × 0.5 m

# 蓋婭太空望遠鏡

(Gaia)



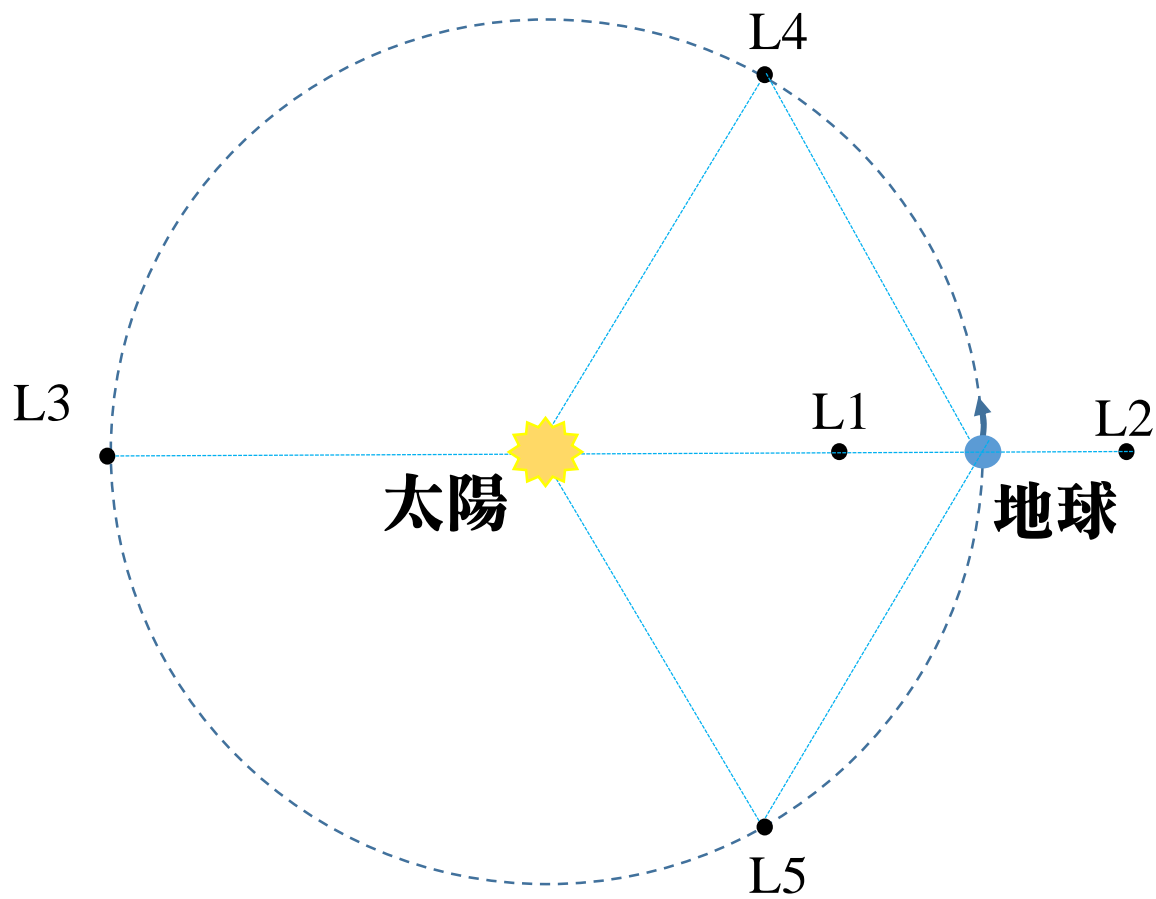
- ◆ 歐洲太空總署 (ESA) 的任務
- ◆ 2013~2022 (?); 位於日地L2區
- ◆ 精確測量恆星 位置 百萬分之一角秒 → 距離 週年視差角、  
運動 自行運動 自行運動 (角度/年) × 距離 → 空間速度
- 銀河系1%的恆星 (+ 河外天體 + 太陽系內的天體)
- 每顆測量數十次
- ◆ 銀河系3D結構與動力狀態



# 拉格朗日點

(Lagrangian point)

第三個小天體在兩個天體間維持不變的相對位置



□ 日地 L2 區域：除了繞太陽原來軌道，還多了地球引力

→ 與地球公轉週期相同，一直被地球遮住，背對太陽。距離地

球  $\approx \sqrt[3]{\frac{M_{\oplus}}{3M_{\odot}}}$  [au]，約150萬公里

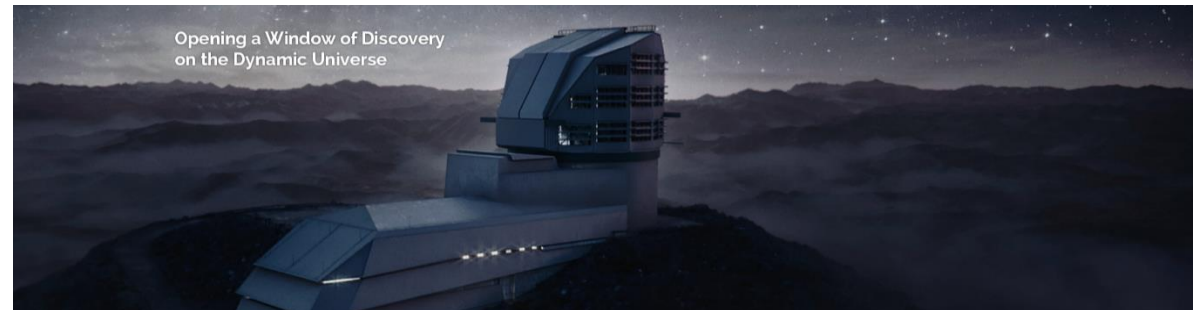
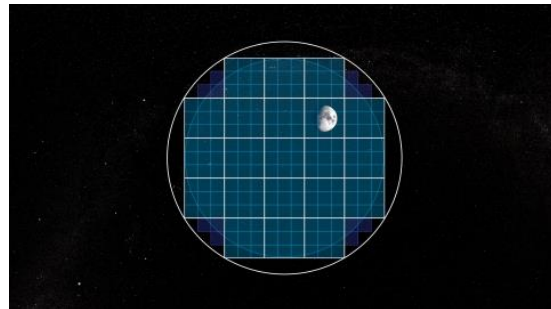
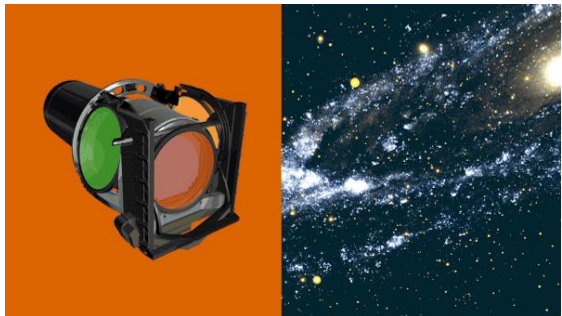
適合放望遠鏡（無法維修；通訊容易，但太陽能板怎麼辦？）：WMAP, Planck, Herschel, Gaia, JWST ...

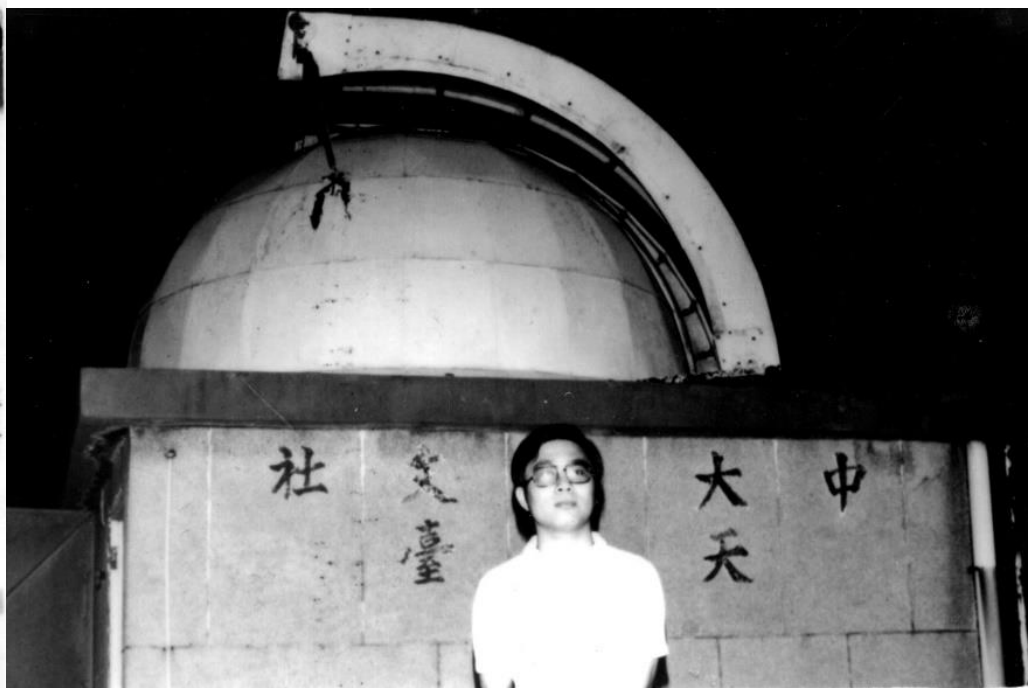
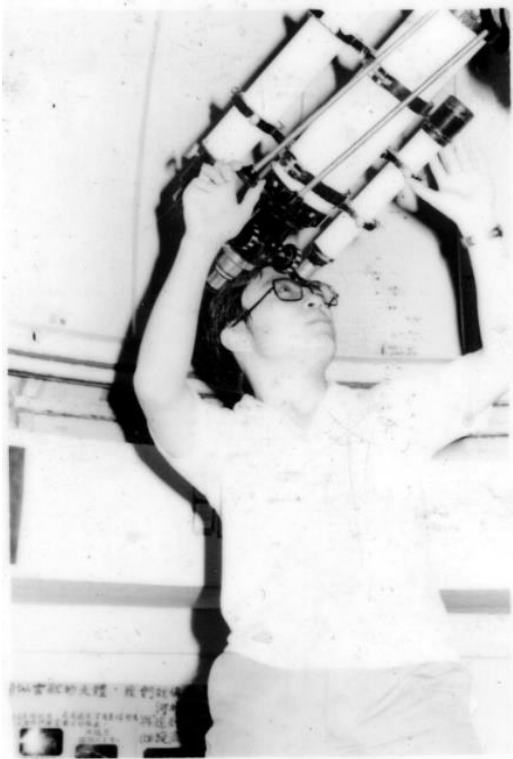
□ L1適合放觀察太陽的望遠鏡

# The Vera C. Rubin Observatory

## Legacy Survey of Space and Time (LSST)

- 位於北智利 Cerro Pachón (El=2715 m)；大氣穩定而乾燥
- 主鏡 8.4 m; 相機 3200 megapixels
- 重複測量 37 billion stars and galaxies 的位置與亮度
- 每晚 10 million alerts, 1000 pairs of exposures, 20 TB 數據
- 2024年起將為天空拍攝 10 年的動畫，探索**動態的宇宙**





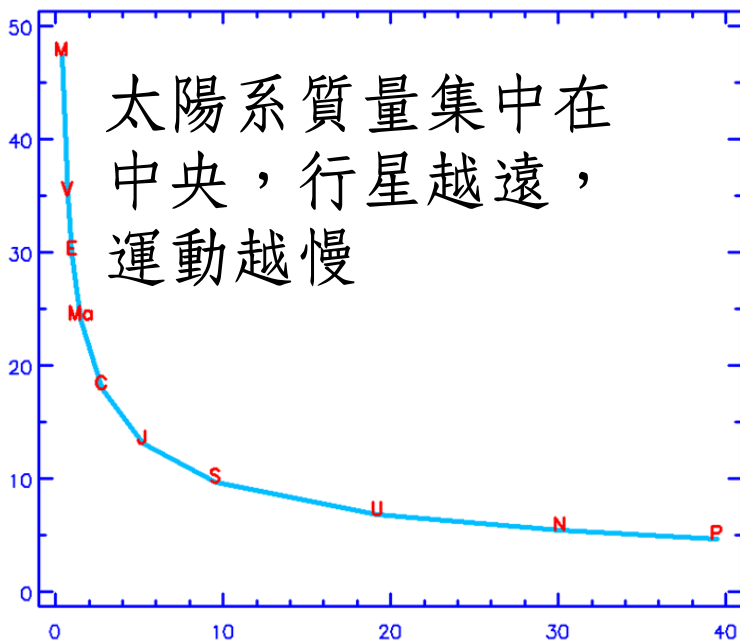
# Vera Rubin (1928—2016)

首先觀測到星系的旋轉曲線與理論預期不合，導致「暗物質」發現，深遠影響了我們對宇宙組程的認知

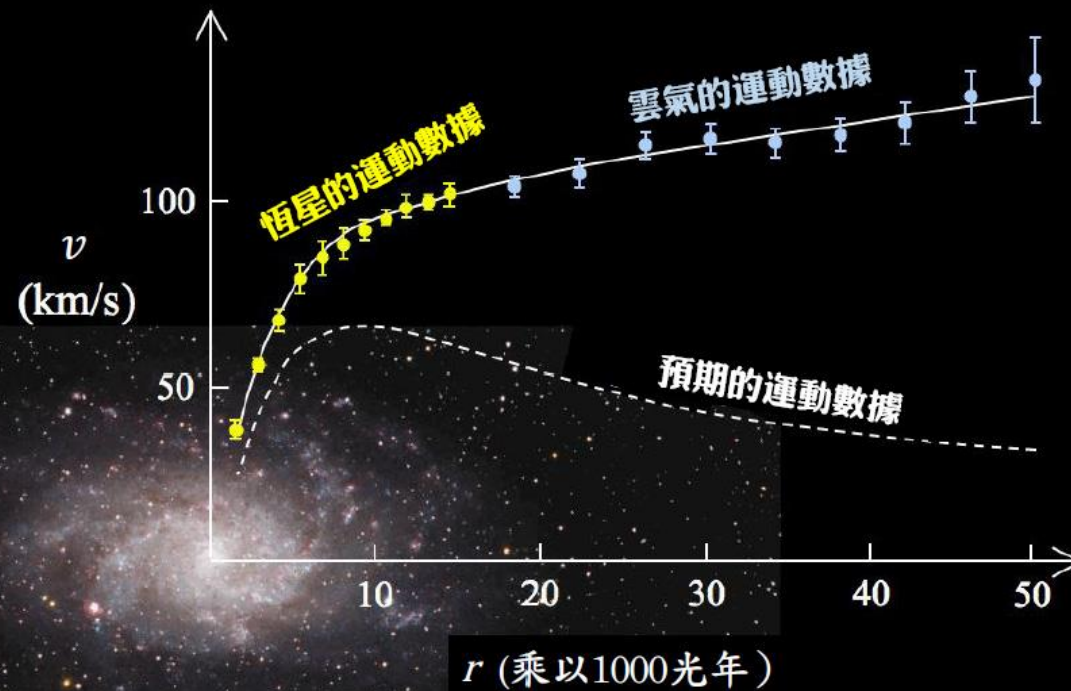
Rubin Observatory (Large Survey of Space and Time; LSST)



行星軌道平均速率 (km/s)

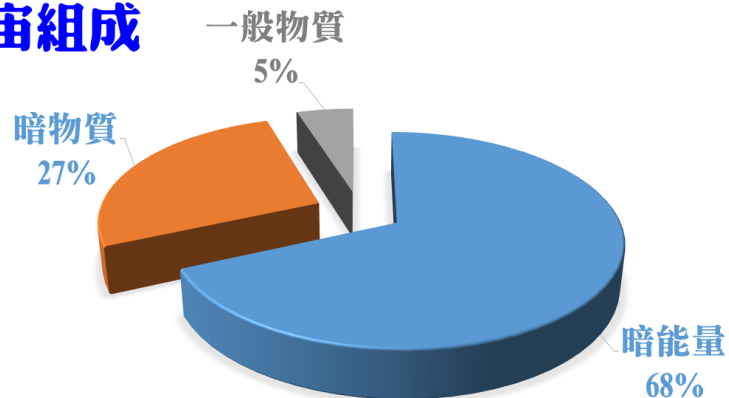


行星與太陽平均距離 (AU)



Stefania.deluca

### 宇宙組成



銀河系（星系）當中恆星運動，無論離中心距離多少，運動快慢幾乎相同

平坦的旋轉曲線表明有看不到（暗）的物質，其重力影響發光的天體運動



Carnegie Evening event in 1988. From left to right: Unknown, Vera Rubin, Wendy Freedman, Sandy Faber, Allison Campbell, Nancy Roman.





# 結論：來自星光的訊息 …

- 太空中極冷的環境，誕生出極熱的東西 … 自我引力 … 核反應 … 靜力平衡 … 穩定發光發熱
- 恆星提供地球生命（及宇宙）重要的能量來源，壽命百萬年到百億年，製造複雜元素。我們這種生命以天體演化的時間尺度發展出來
- 我們藉星光了解大半的宇宙（總有暗勢力）：如何發光、這些光線如何受到影響。依據觀測推敲光源的性質
- 恆星互繞、聚集成星團、星系 …、黑洞、暗物質、暗能量