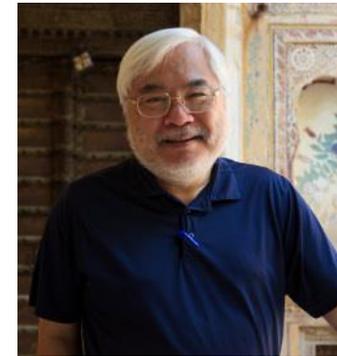


恆星種種



- 星際物質與恆星形成
- 恆星本質與觀測性質
- 恆星演化與衰亡



陳文屏

中央大學 天文所、物理系

2022.07.12 中學教師 online lectures

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

結論

- ◆ 太空並非真空。星際物質有各種狀態
冷、熱；疏、密；氣體（原子、分子、離子）、固體
- ◆ 有些物質聚集形成了恆星 旁邊形成了行星？；銀河系不斷誕生成群的恆星；各自恆星老化、衰亡，而星團也逐漸瓦解
- ◆ 恆星內部進行核融合，維持穩定狀態 發光發熱 + 製造複雜元素
- ◆ 核燃料用罄，結構不再穩定；恆星衰亡 生、老、病、死
- ◆ 物質回歸星際 太空中的新陳代謝

恆星的生老病死

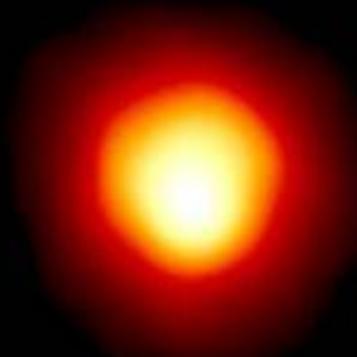
星際
雲氣



恆星



紅巨星



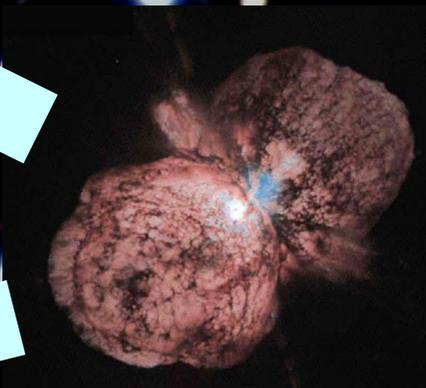
恆星在濃密分子
雲核中成群誕生

於此同時，行星
在年輕環星盤中
誕生

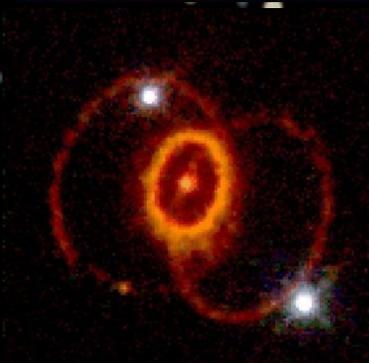
行星狀星雲



星球爆發



超新星



何謂恆星？行星？

星際物質與恆星形成

星際物質

星星之間極其寬廣，但太空並非真空，
而有星際物質



日常空氣每cc約含 10^{19} 個氣體分子
星際太空每cc約含 1 個氣體粒子

這些包含氣體與灰塵的雲氣彼此之間互相吸引
(萬有引力)，使得雲氣聚集，濃密的灰塵會擋住後面
發光的氣體或星球

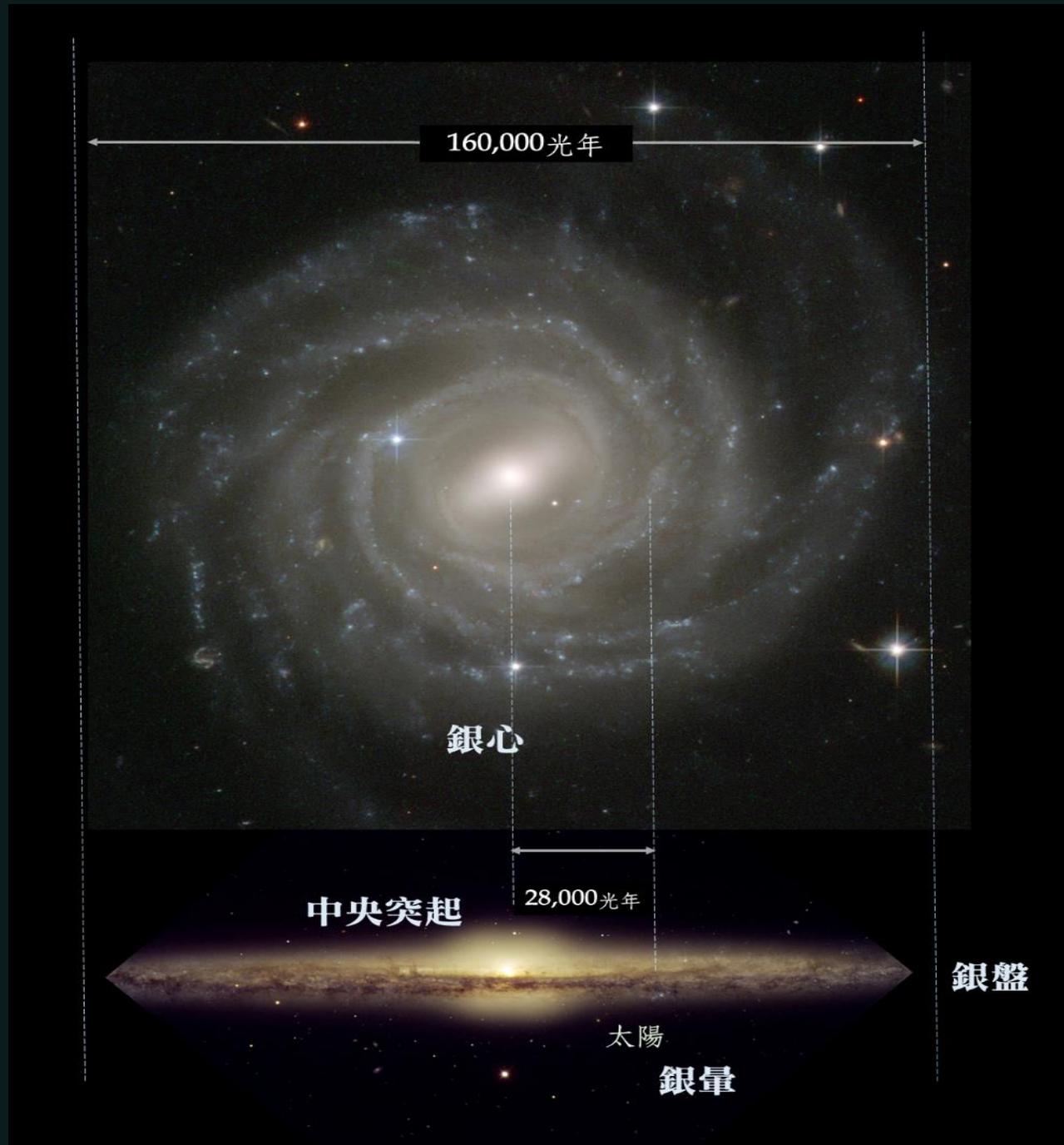
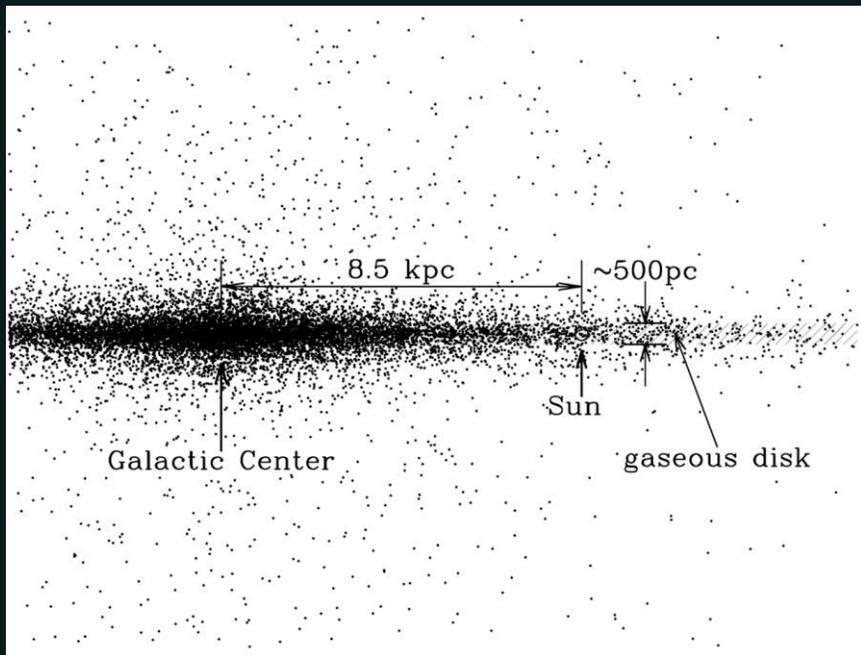
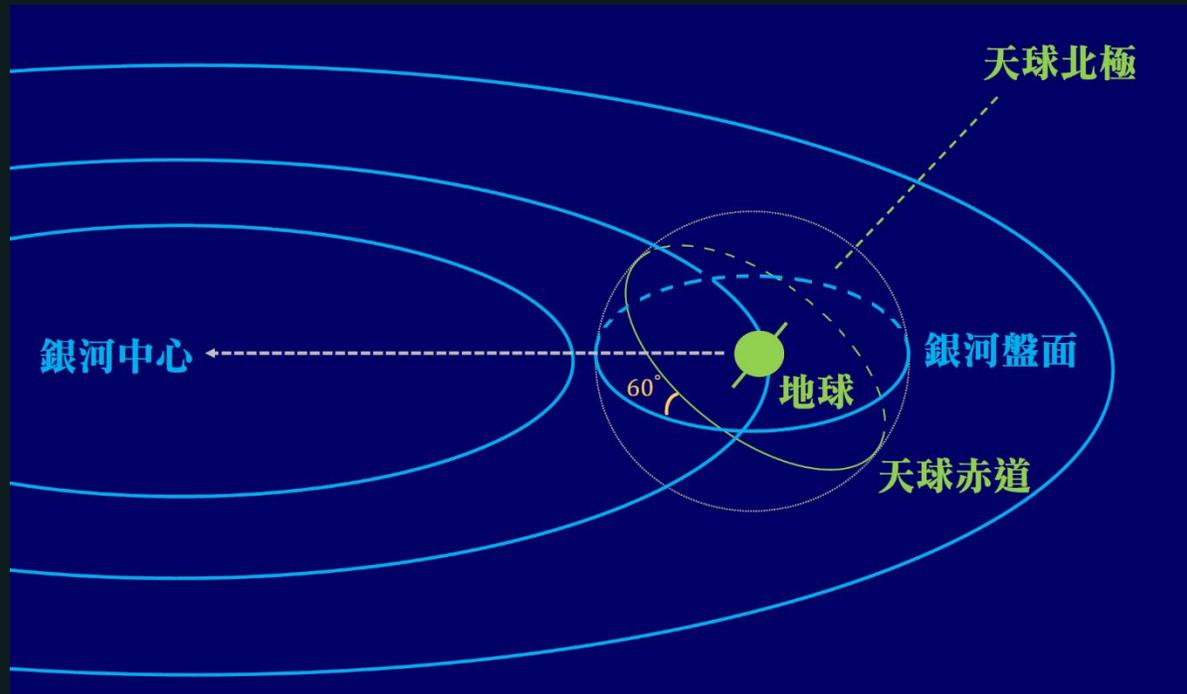
這些「星際暗雲」密度高 (每cc超過數萬個分子)、溫度低
(攝氏零下260幾度)

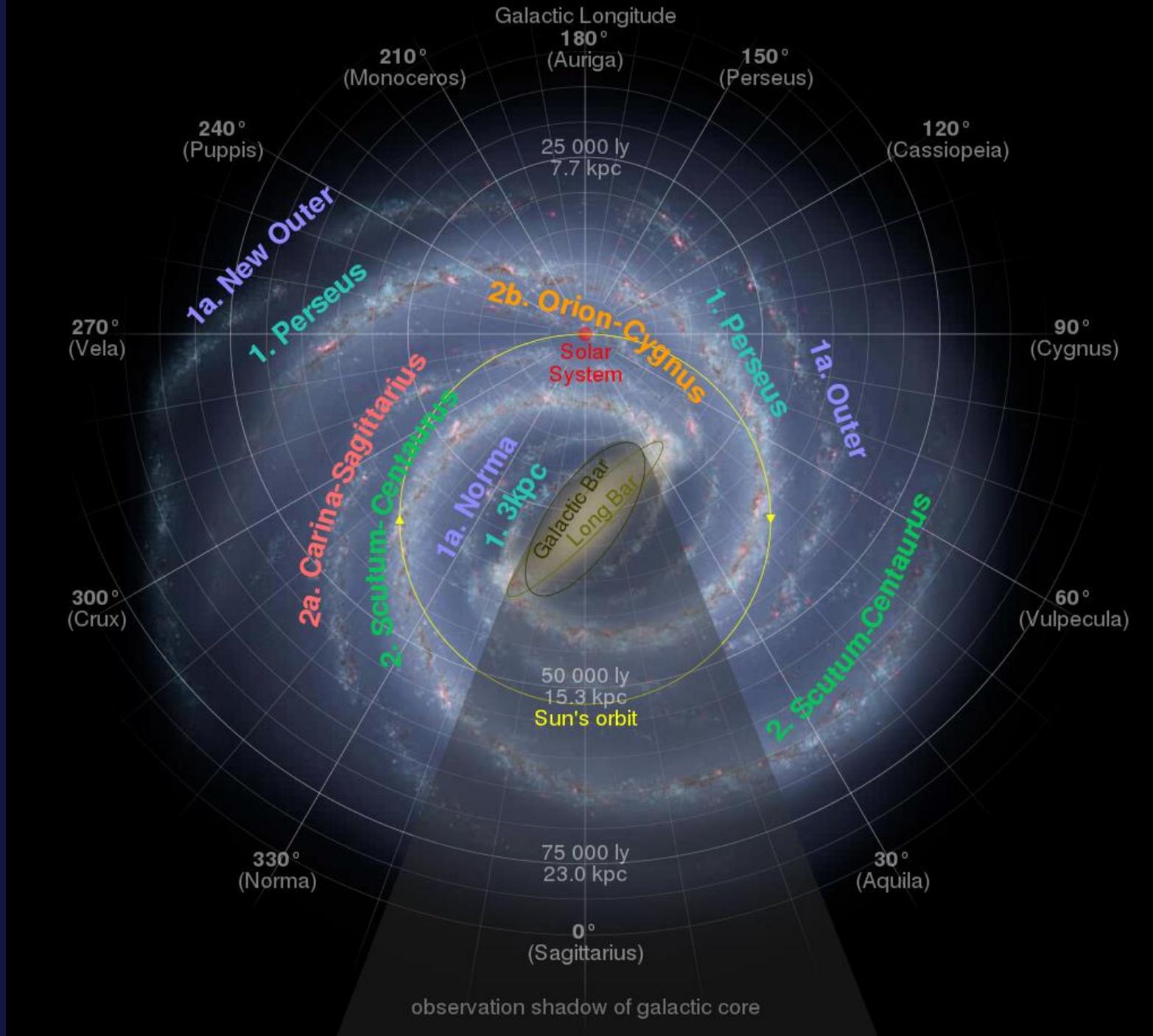
- 地球海平面 (STP) 空氣密度 = 1.225 kg/m^3 ; \approx 水的千分之一
- 星際物質為氣態或固態（雲氣 = 氣體 + 塵埃），因為太空壓力低，沒有液態
- 氣體可以是中性（原子或分子），或是游離態（離子 + 電子 = 電漿 **plasma**）
- 氣體多半透明
- 塵埃則會擋住光線 \rightarrow 消光 (**extinction**)
- 短波的光線擋光尤其明顯 \rightarrow 紅化 (**reddening**)
- ISM 影響光線（能量）傳遞，也影響觀測結果

- 銀河系組成：恆星、行星、衛星、彗星（小行星）、星際物質、輻射、宇宙射線（高速帶電粒子）、磁場、暗物質…
- [恆星之間的距離] / [恆星本身直徑] $\sim 1 \text{ pc} / 10^{11} \text{ cm}$
 $\sim 3 \times 10^7 : 1$ 以體積（空間）來說 $\sim 10^{22}$ 倍
 - 星際空間極其空曠
- 以質量來說 ISM $\sim 10\%$ 銀河系全部可見物質
ISM本身 $\sim 99\%$ 為氣體；1% 為塵埃
- 氣體當中 $\sim 90\%$ 為H；10% 為He（就是整個宇宙的比例）
- 主要是氫原子 (H I; atomic)，另外是氫離子 (H II; ionized)，與氫分子 (H_2 ; molecular)

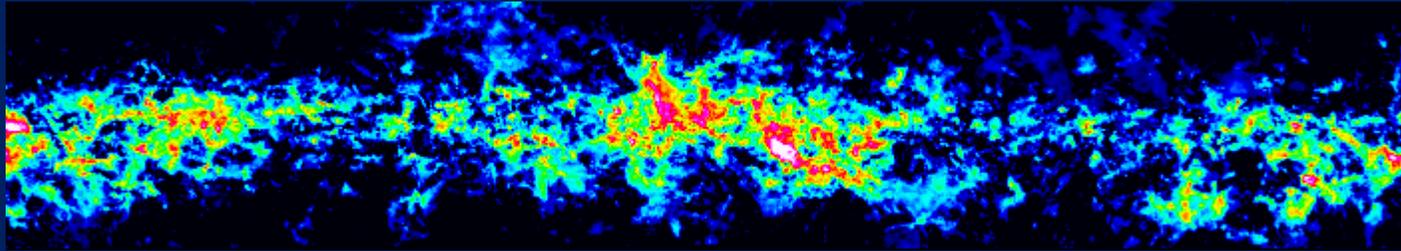
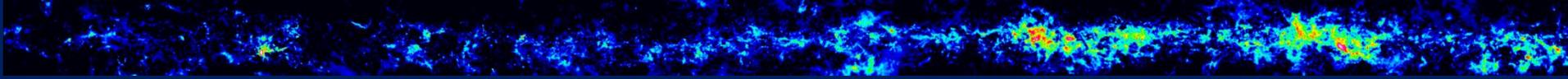
ISM (Interstellar Medium) 密度不均勻

- 一般**原子雲**；平均密度 $1/\text{cc}$ ；溫度 100 K
 - ✓ 沒有激發，都處於最低能階 → 無法以原子光譜探測
 - ✓ 但即使在最低能階，與原子核自旋相同或不同，
能量稍異，一旦改變狀態 → 波長為 21 公分 的輻射
 - ✓ 以電波望遠鏡觀測 → 原子雲位置、大小、質量、溫度、運動
- 冷 (20 K)、密 ($\approx 10^4/\text{cc}$) 原子 → 分子，成為**分子雲**
 - ✓ 分子會震盪、擺動、旋轉，改變狀態 → 發出長波輻射
 - ✓ 向內引力大、向外熱壓力弱，這些分子雲容易塌縮形成恆星
- 高溫恆星周圍，氫氣被游離 (10^4 K)，成為**游離區**
(H II region；氫二區)





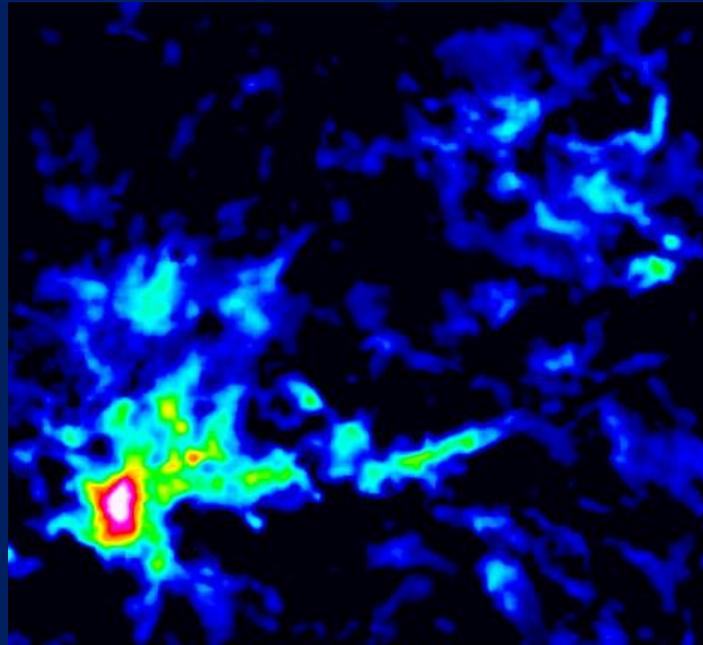
銀河系（盤面）中的分子雲



絲片狀
碎形結構

巨型分子雲

$D \approx 20 \sim 100 \text{ pc}$
 $n \approx 10 \sim 300 \text{ cm}^{-3}$
 $M \approx 10^5 \sim 10^6 M_{\odot}$
 $T \approx 10 \sim 30 \text{ K}$
 $\Delta v \approx 5 \sim 15 \text{ km}^{-1}$



分子雲團塊

$D \approx 5 \text{ pc}$
 $n \approx 10^3 \text{ cm}^{-3}$
 $M \approx 10^3 M_{\odot}$

緻密分子雲核

$D \approx 0.1 \text{ pc}$
 $n \gtrsim 10^4 \text{ cm}^{-3}$
 $M \approx 1 \sim 2 M_{\odot}$

東西看得到：

發光、反光、擋光

發光有不同機制——
因為熱、受激發，...

星際雲氣

氣體與塵埃

- **發射星雲 (emission nebula)**
氣體受激發（星光照射、碰撞）
自己發光。Balmer alpha → 紅色
- **反射星雲 (reflection nebula)**
氣體反光（散射）→ 藍色
- **黑暗星雲 (dark nebula)**
塵埃遮住背景光線
（星光或發射星雲）→ 黑色



日光燈、LED 燈、火焰



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



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

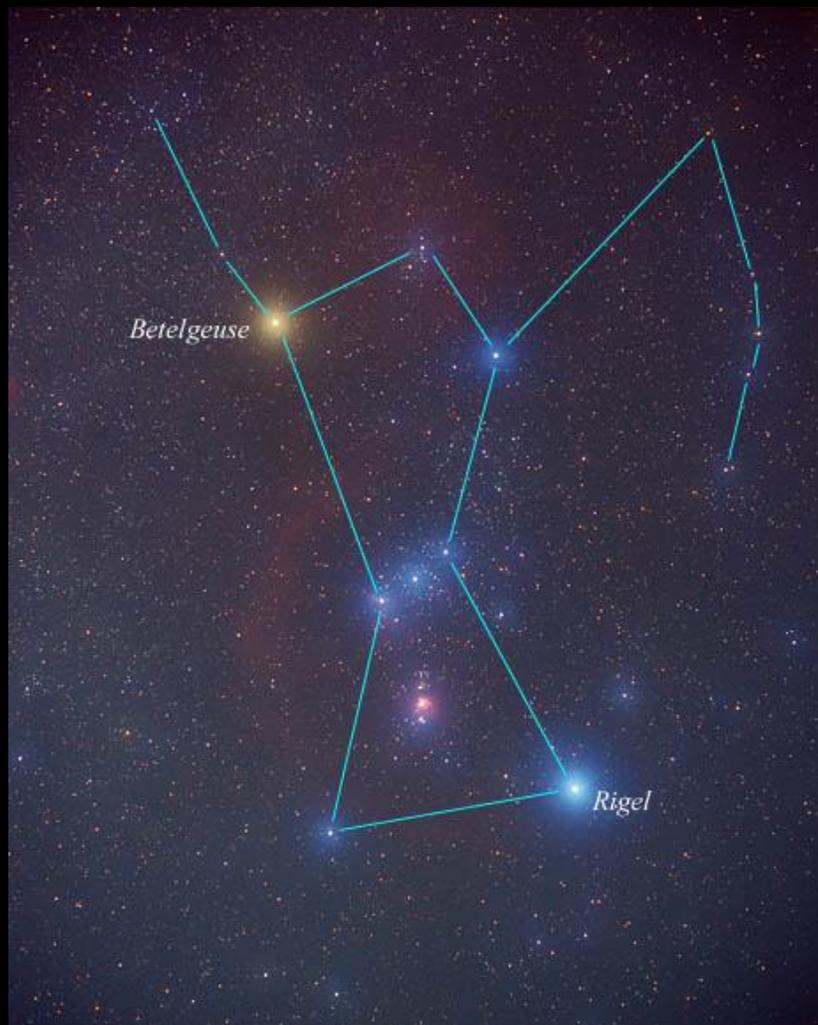
Horsehead Nebula



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



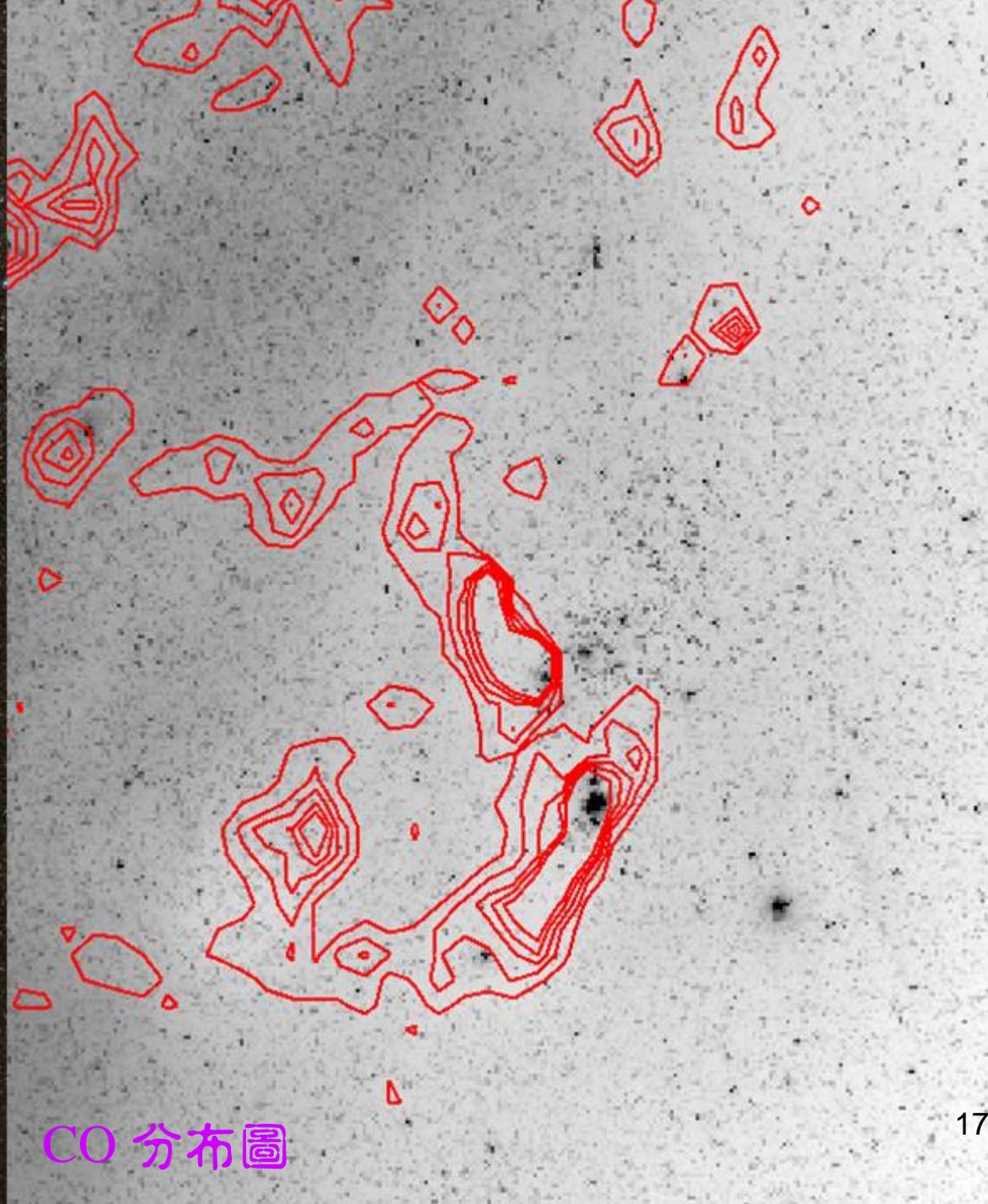
... 一氧化碳分子的分布



獵戶



可見光照片



CO 分布圖

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」



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



加進紅外波段的「光」

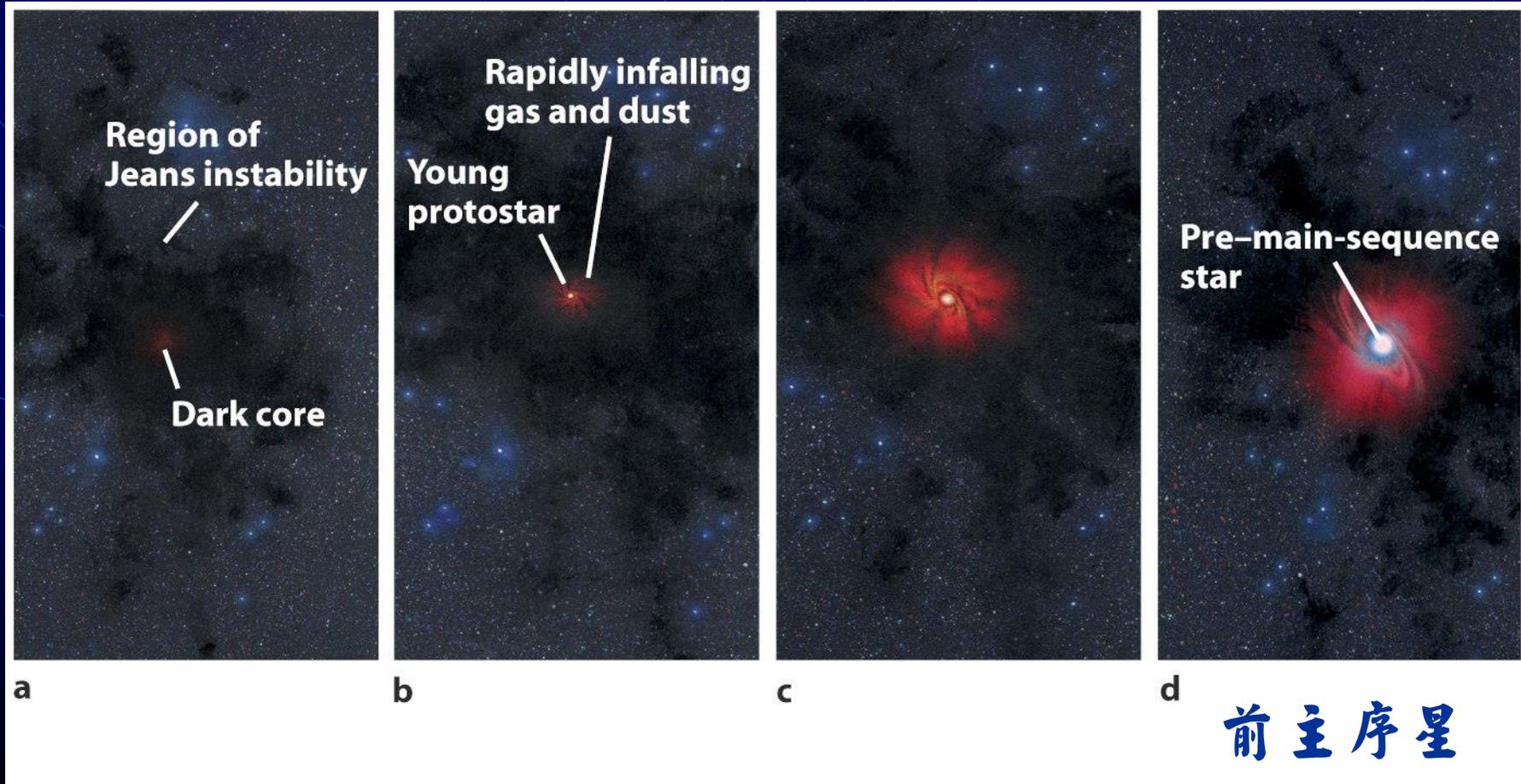


Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)



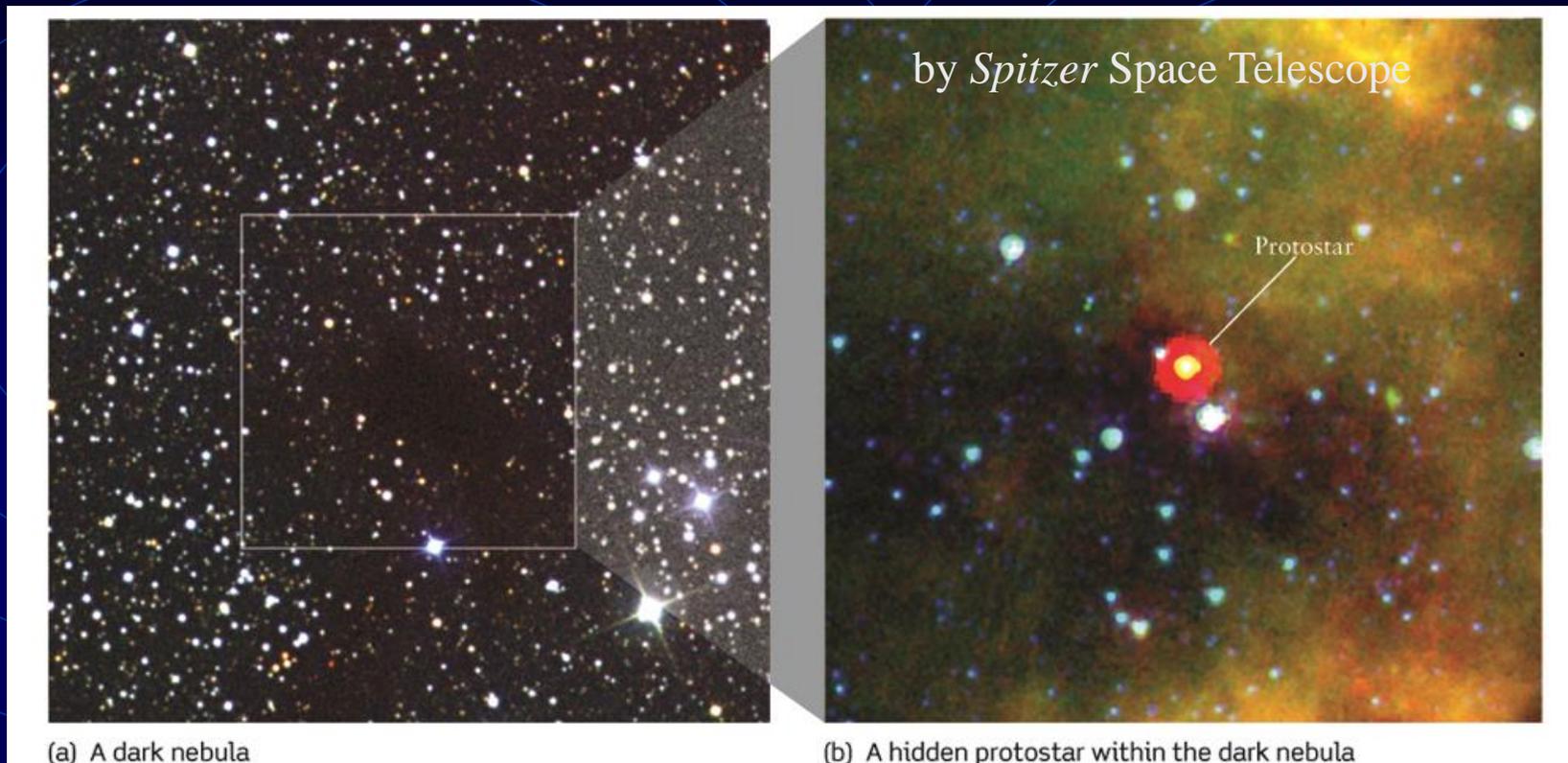
恆星源於分子雲核收縮

分子雲核要是密度高（因此萬有引力強）、溫度低（因此熱壓力弱）→ 引發重力塌縮形成**原恆星**



原恆星仍被濃密的雲氣包圍

短波
看不到



毫米波有可能

可見光影像顯示在
暗雲中沒有恆星

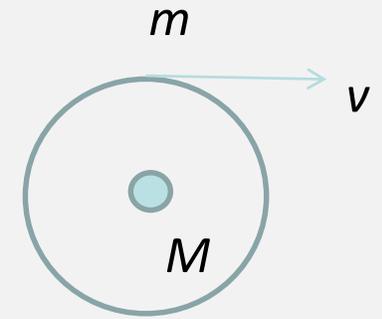
紅外光影像顯示在
暗雲中存在原恆星

位於天鵝座方向的暗雲 L1014

- 滿足臨界條件（溫度、密度→質量 Jeans mass 金氏臨界質量）的分子雲核能夠塌縮，中央形成恆星，周邊形成環星盤
- 環星盤當中有濃密塵埃，遮住恆星的可見光，長波的星光比較有機會透射出來（紅外觀測）
- 塵埃受熱後自己也發熱 → 長波輻射（遠紅外、次／毫米波）
但是長波解析力不好，需要特殊技術，例如干涉術 (SMA, ALMA)
- 環星盤裡面的塵埃繼續增長，有機會形成行星

若分子雲持續收縮，溫度可以上升到引發核融合反應

□ 維力定理 (Virial theorem) --- 重力穩定



$$2E_K + E_P = 0$$

$$2 \left(\frac{1}{2} \right) m v^2 = GmM/r$$

$$\frac{GmM}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

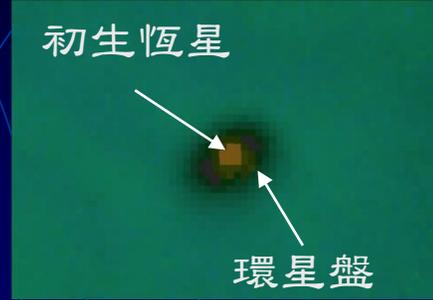
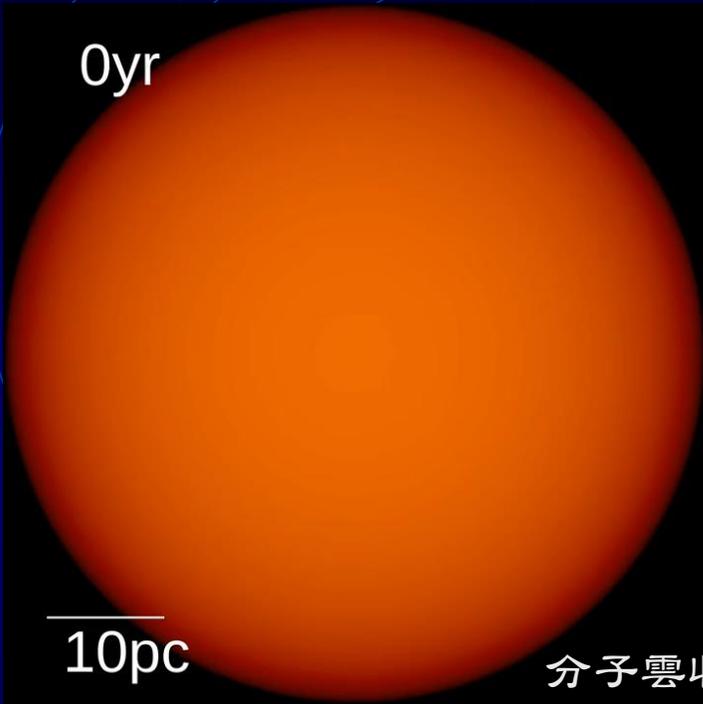
穩定的條件：2 倍動能等於位能

$$2 \cdot \frac{3}{2} \frac{M}{\mu m_H} kT - \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = 0$$

$$M_J = \left(\frac{\pi kT}{4\mu m_H G} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{1}{\rho}} \sim \frac{T^{3/2}}{\rho^{1/2}}$$

給定雲氣的溫度與密度，有個臨界質量，要是雲氣質量比較大，就會塌縮

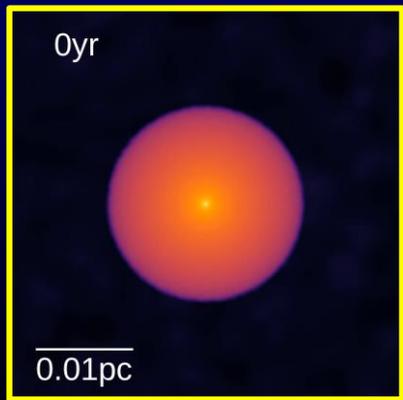
行星源於年輕恆星周圍的盤狀雲氣



星際暗雲 $\xrightarrow[\text{旋轉}]{\text{收縮}}$ 初生星球 + 扁盤 + 剩下的塵氣

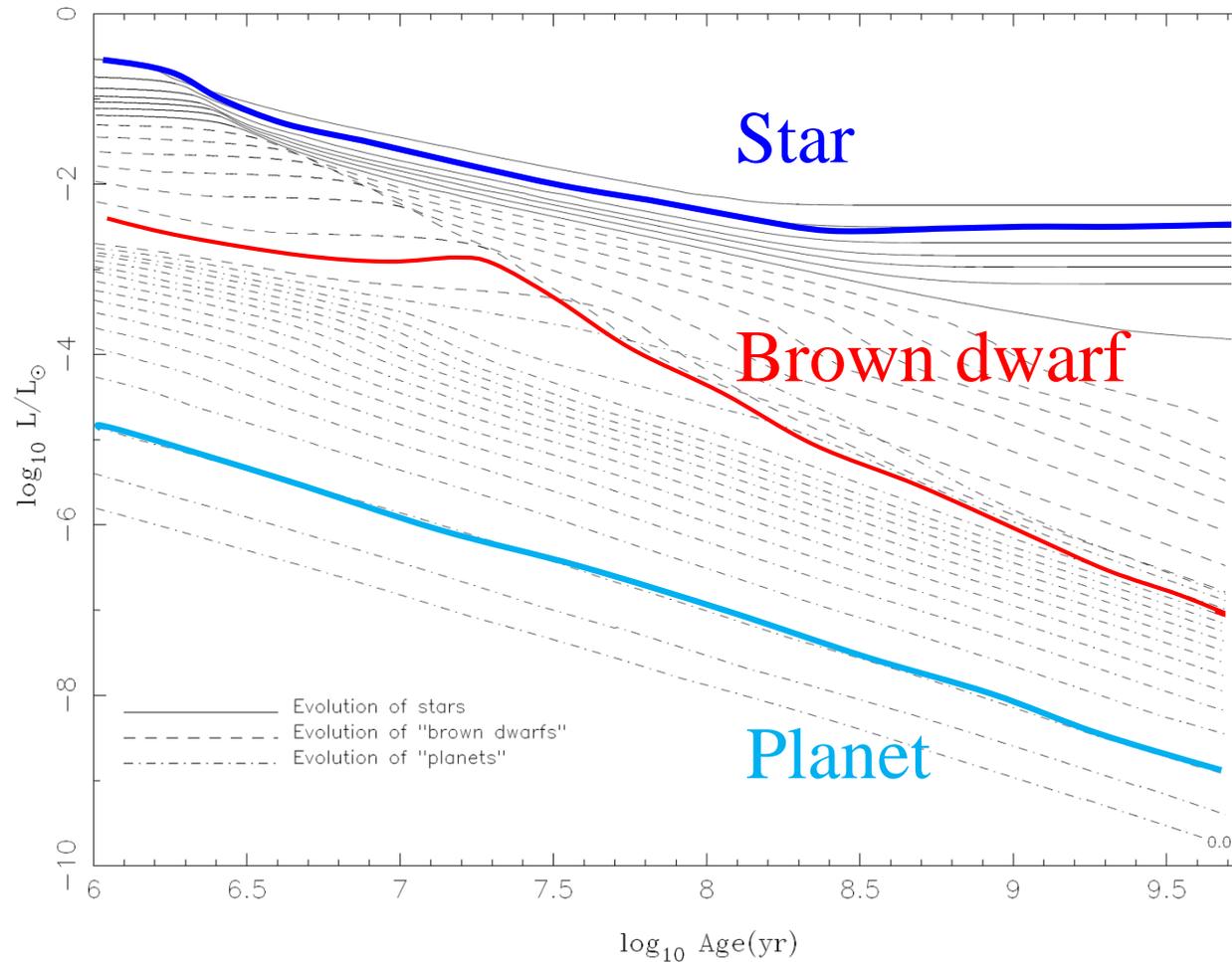
溫度上升、塵消氣散

年輕太陽 + 盤狀物質



StarForge

塵埃 \rightarrow 塵塊 \rightarrow 小行星 \rightarrow 行星



恆星

$\mathcal{M}/M_{\odot} \gtrsim 0.08$ ($80 M_J$), core H fusion
Spectral types O, B, A, F, G, K, M

棕矮星

$\mathcal{M}/M_{\odot} = 0.065 \sim 0.080$, core Li fusion
 $\mathcal{M}/M_{\odot} = 0.013 \sim 0.065$, core D fusion
Spectral types M6.5–9, L, T, Y

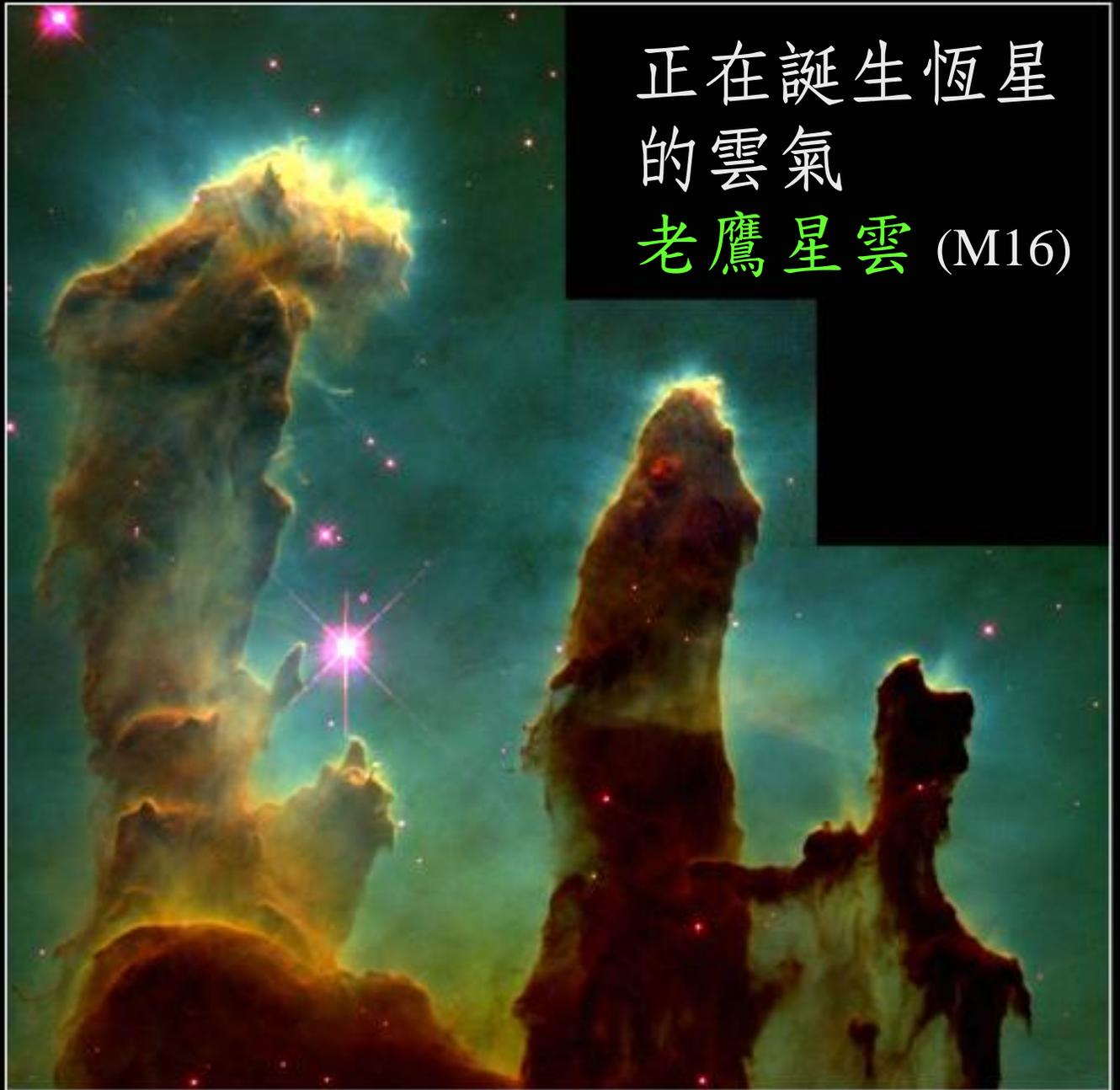
行星質量天體

$\mathcal{M}/M_{\odot} \lesssim 0.013$, no fusion ever

FIG. 7.—Evolution of the luminosity (in L_{\odot}) of solar-metallicity M dwarfs and substellar objects vs. time (in yr) after formation. The stars, “brown dwarfs” and “planets” are shown as solid, dashed, and dot-dashed curves, respectively. In this figure, we arbitrarily designate as “brown dwarfs” those objects that burn deuterium, while we designate those that do not as “planets.” The masses (in M_{\odot}) label most of the curves, with the lowest three corresponding to the mass of Saturn, half the mass of Jupiter, and the mass of Jupiter.

恆星風、輻射
與周圍雲氣交
互作用

正在誕生恆星
的雲氣
老鷹星雲 (M16)

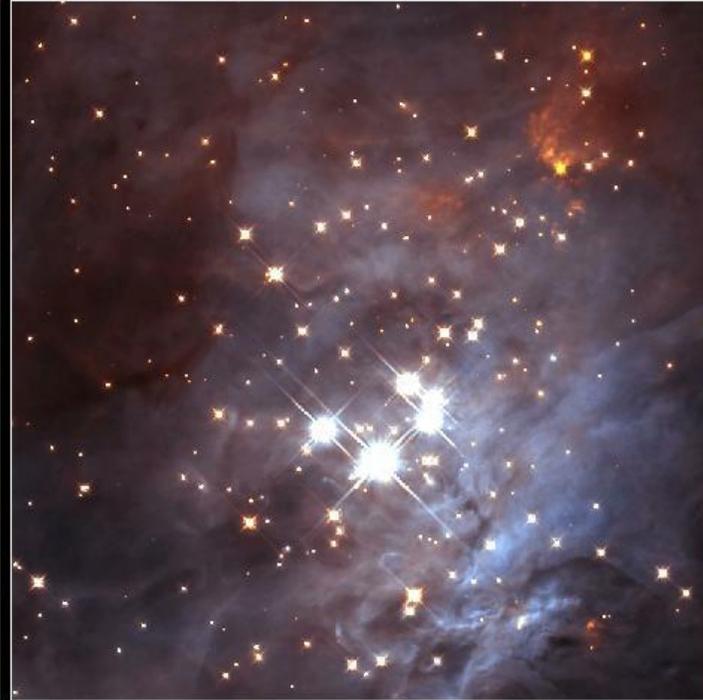


大質量恆星形成區 ---- OB 星協 associations

Visible • WFPC2



Infrared • NICMOS



Trapezium Cluster • Orion Nebula
WFPC2 • Hubble Space Telescope • NICMOS

NASA and K. Luhman (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) • STScI-PRC00-19

(Bok) Globules 雲核是單一
(或兩顆) 恆星形成之處

濃厚雲核之處背景恆星
數量少

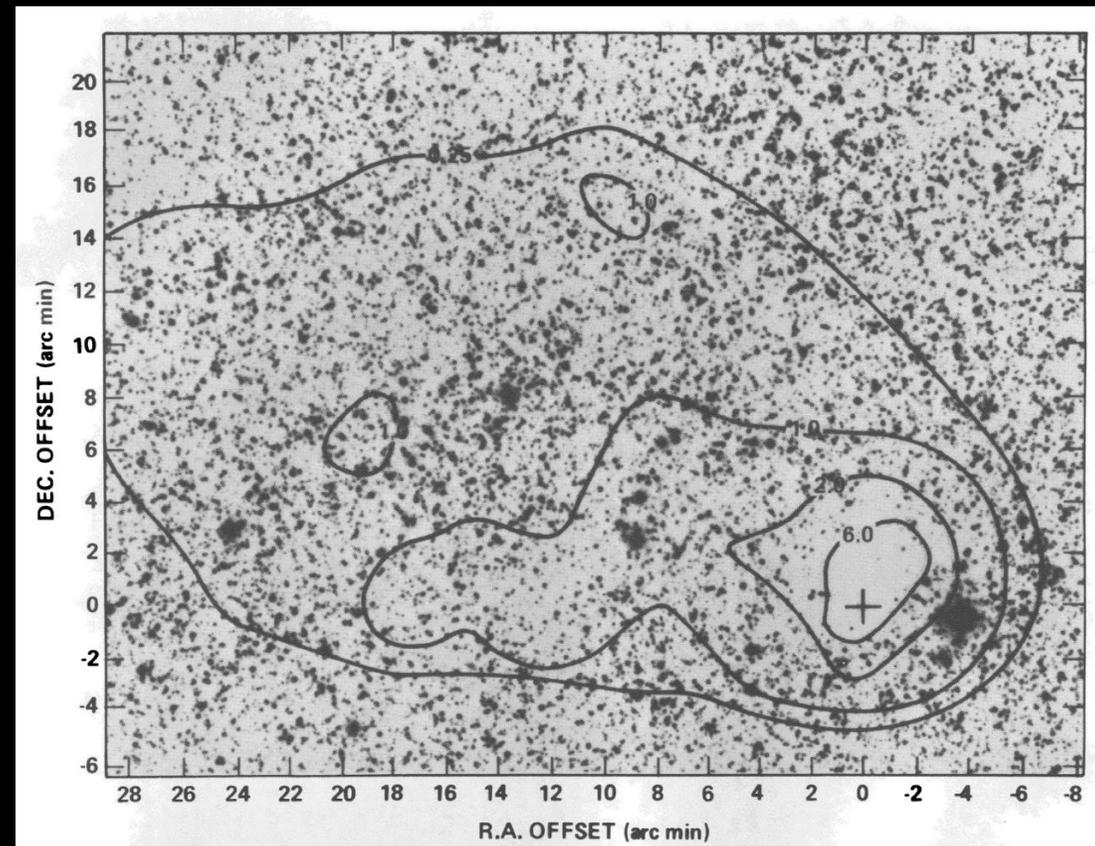
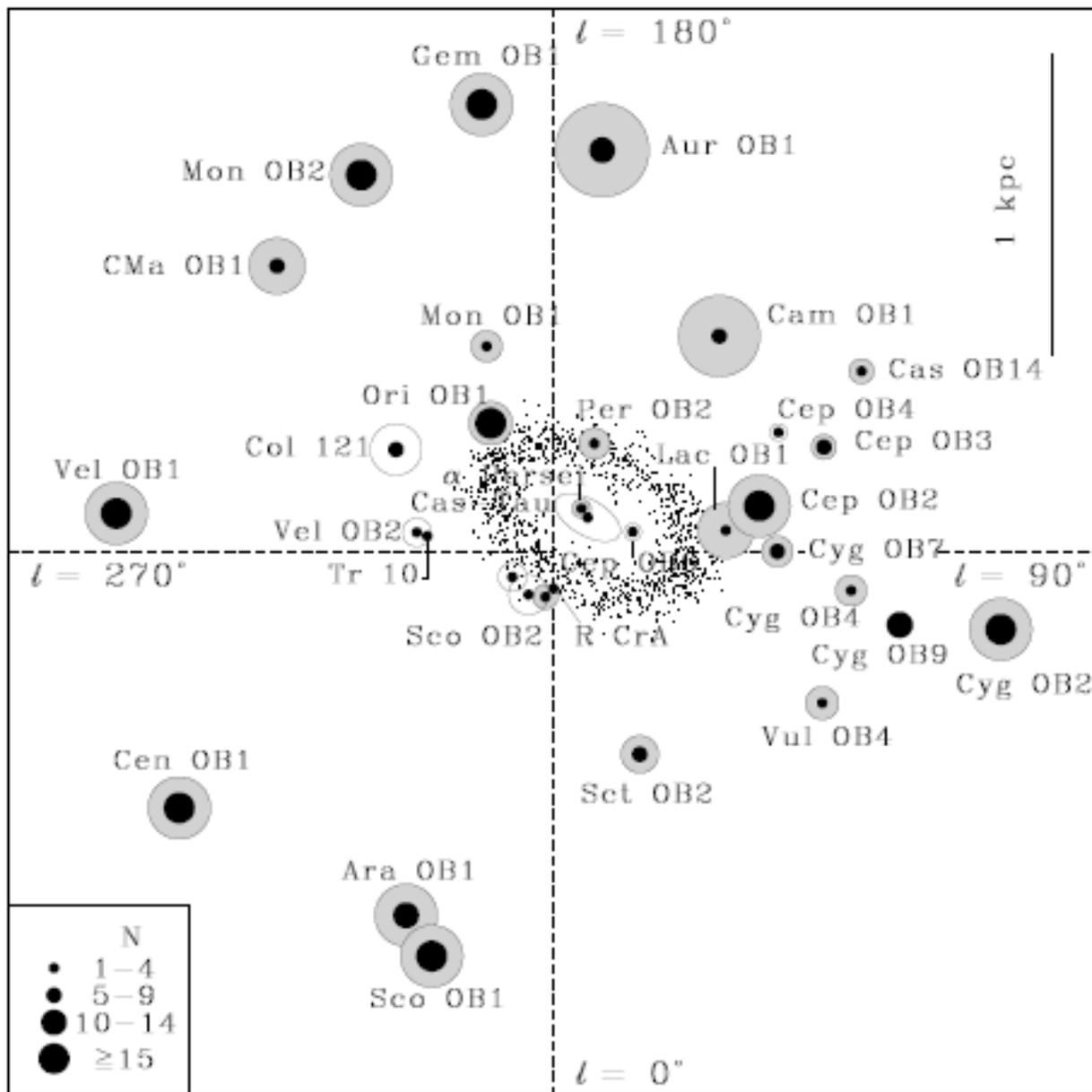


FIG. 1.—The optical image of B335 on the blue POSS print. Superposed on it are the $M(\text{H}_2)$ contours in units of 10^{21} cm^{-2} ; the derivation of $M(\text{H}_2)$ is discussed in § IIIa(i). In the SW corner there is a highly obscured core region $\sim 2' \times 3'$ surrounded by an extended envelope covering $\sim 34' \times 20'$.



太陽周圍的OB星協

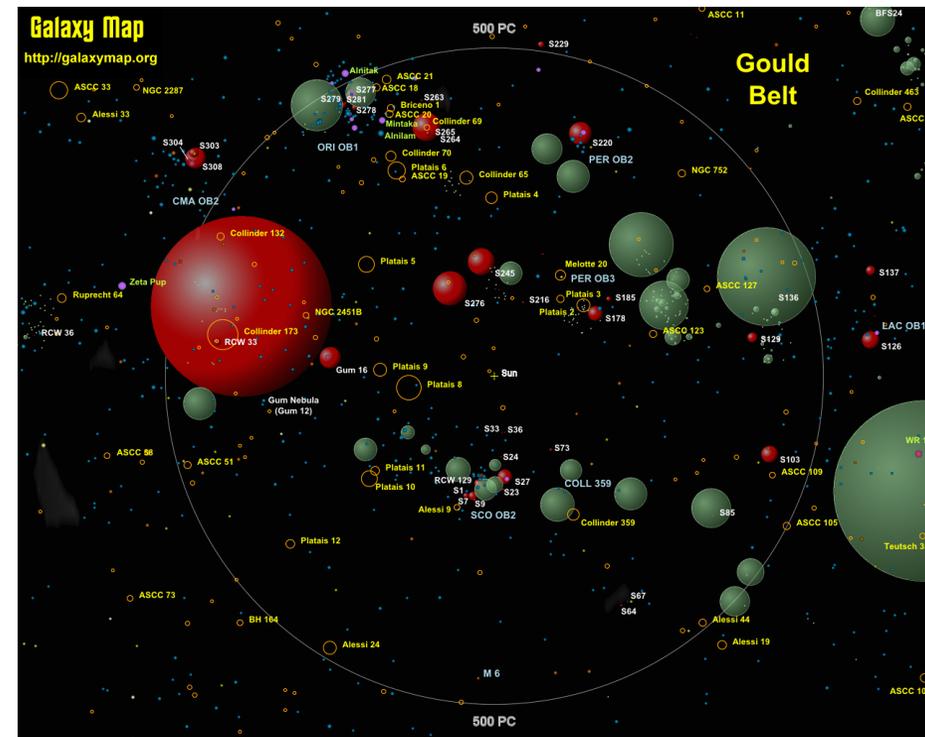


http://hera.ph1.uni-koeln.de/~heintzma/All/OB_stars.htm

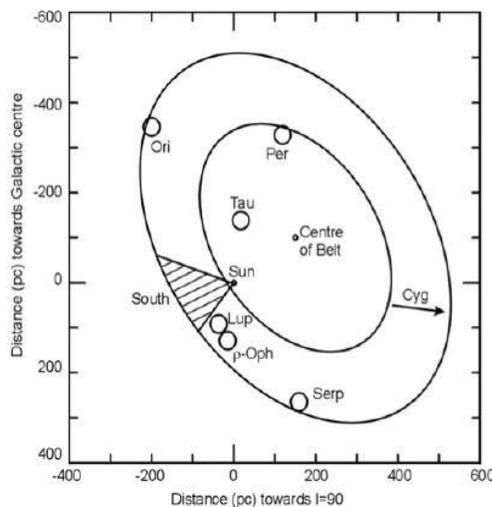
古德帶 (the Gould Belt)：由OB星及恆星形成分子雲在天球上的環狀結構

跨距~1 kpc, 中心離太陽~100 pc, 與銀盤傾斜~20度 = local spiral arm

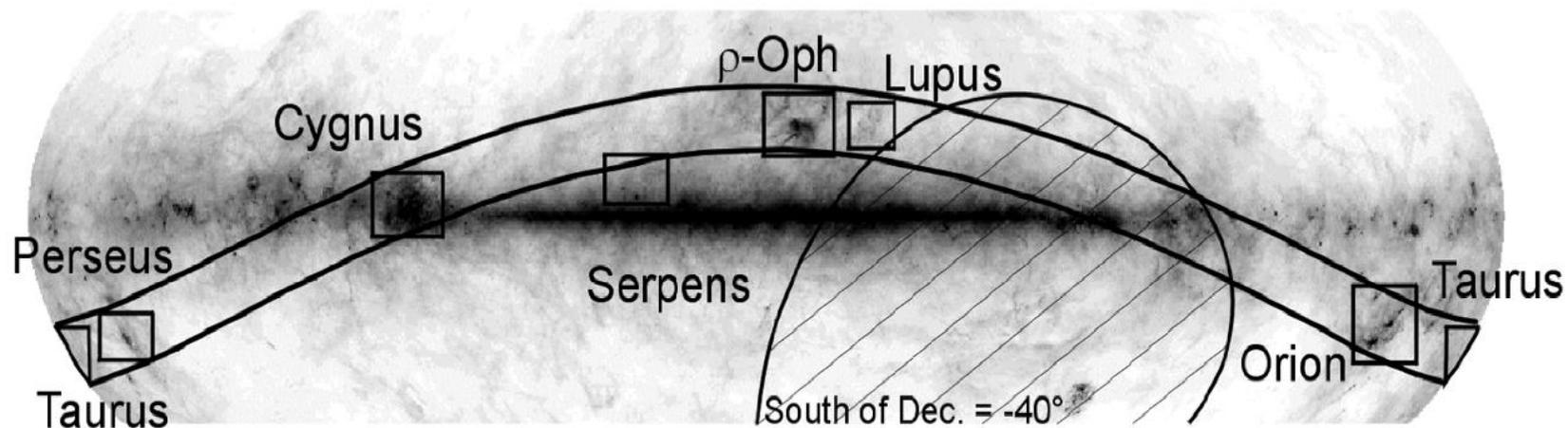
起因未知 (暗物質引發恆星誕生?)



http://galaxymap.org/detail_maps/download_maps/gould.png

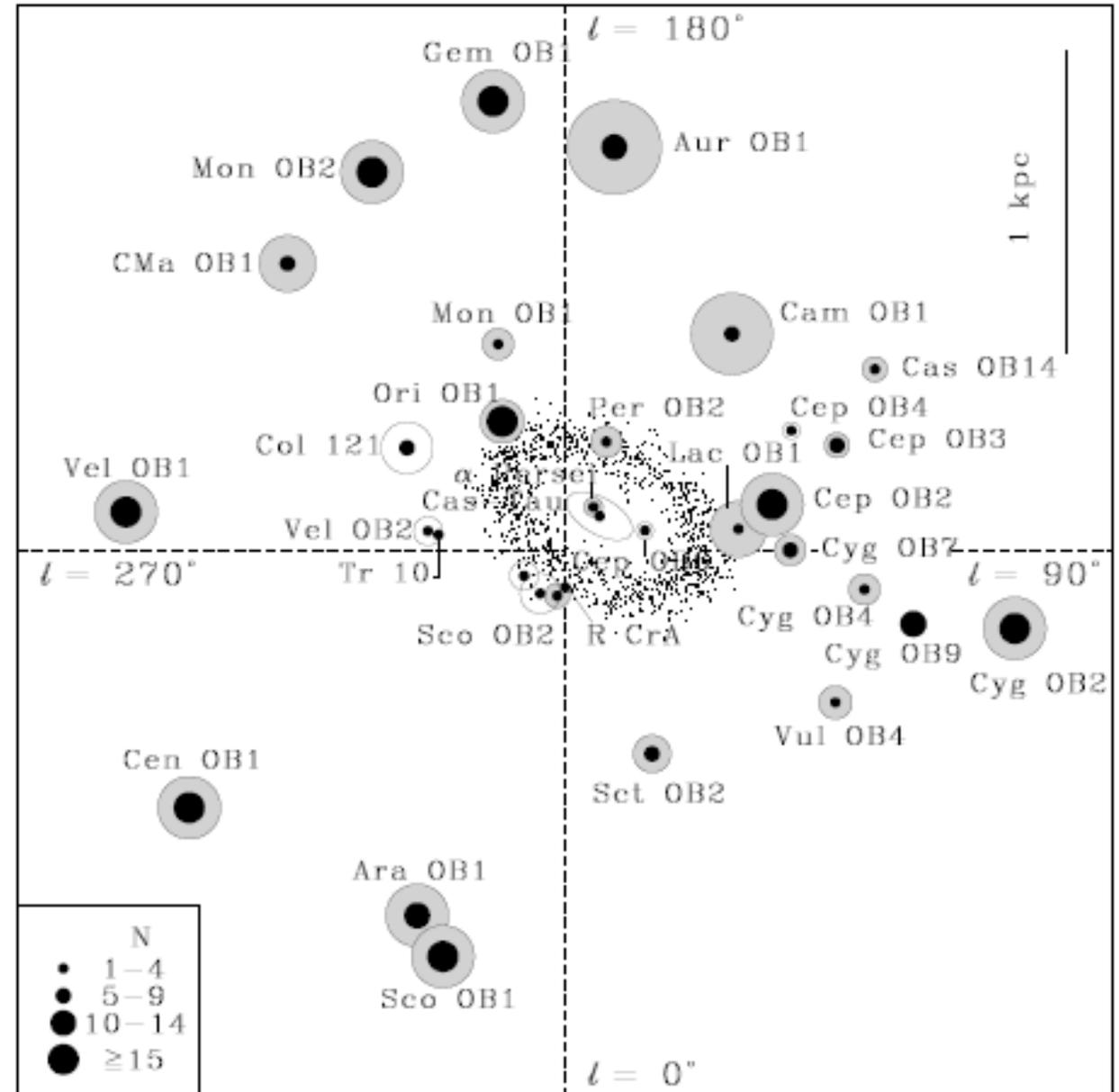
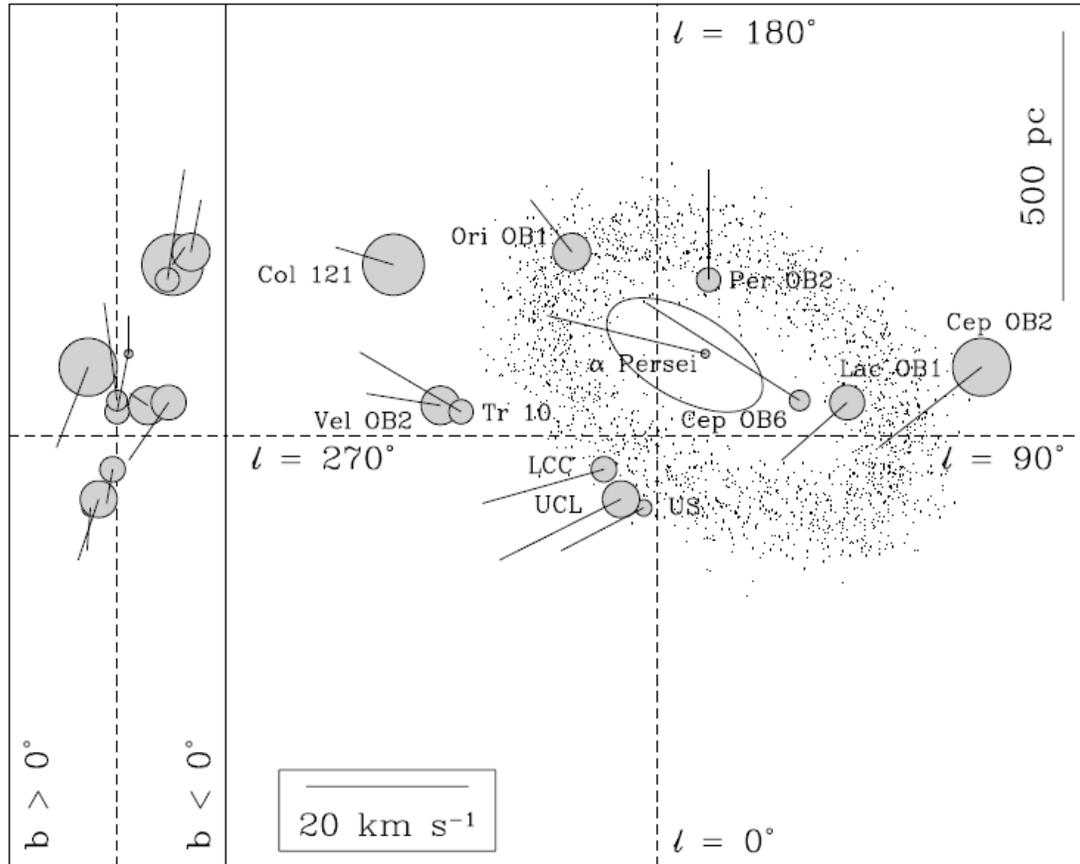


<http://www.jach.hawaii.edu/JCMT/surveys/gb/>



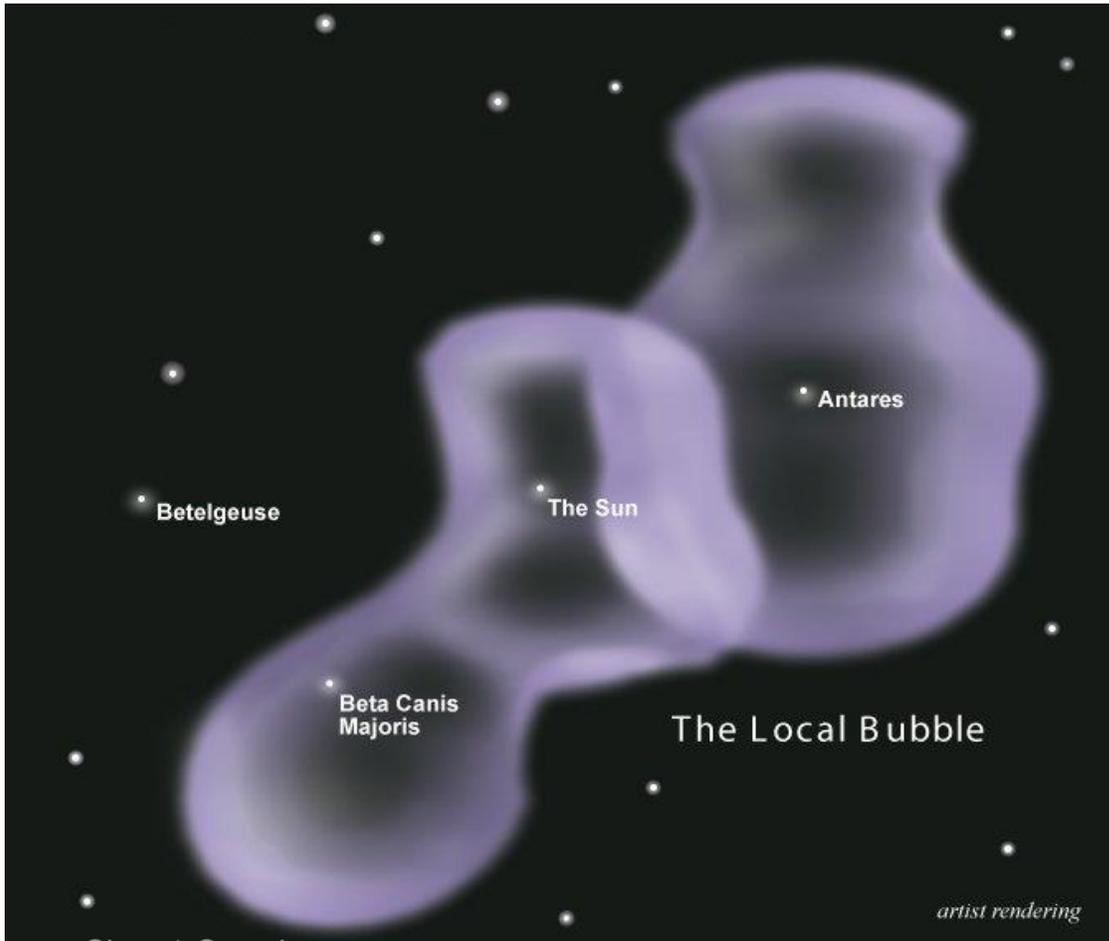
Gould's Belt superimposed on to an IRAS 100 micron emission map

OB associations and the Gould Belt

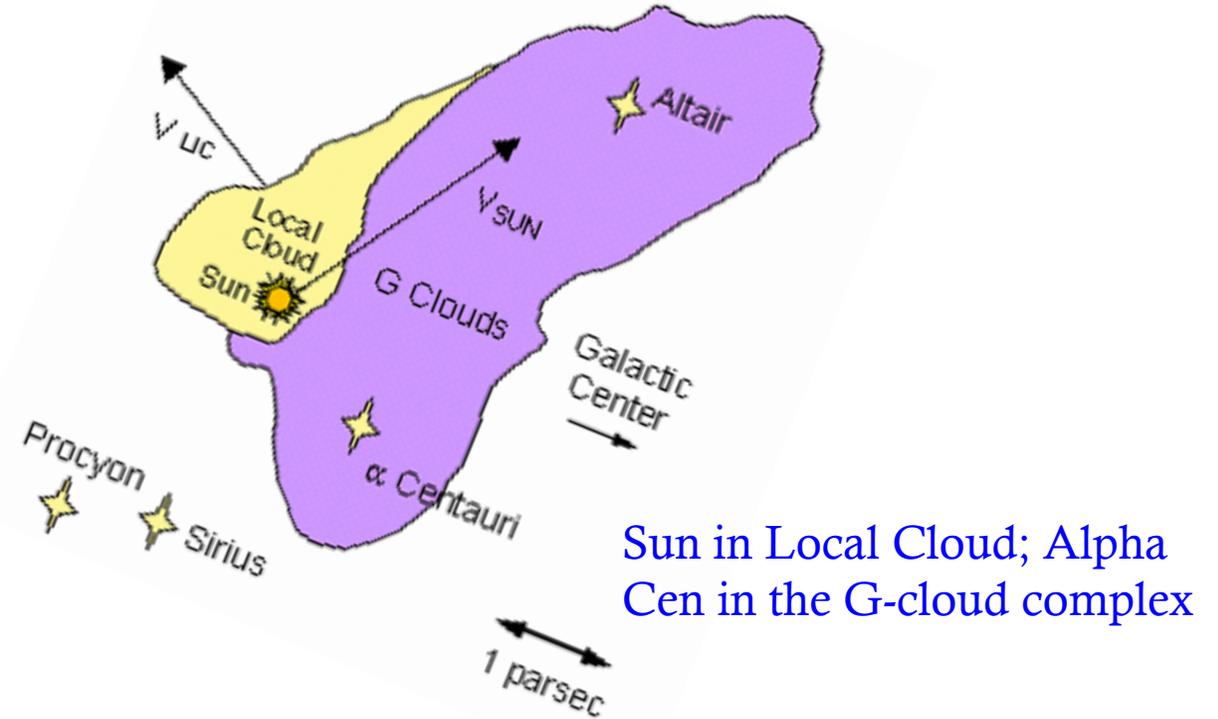


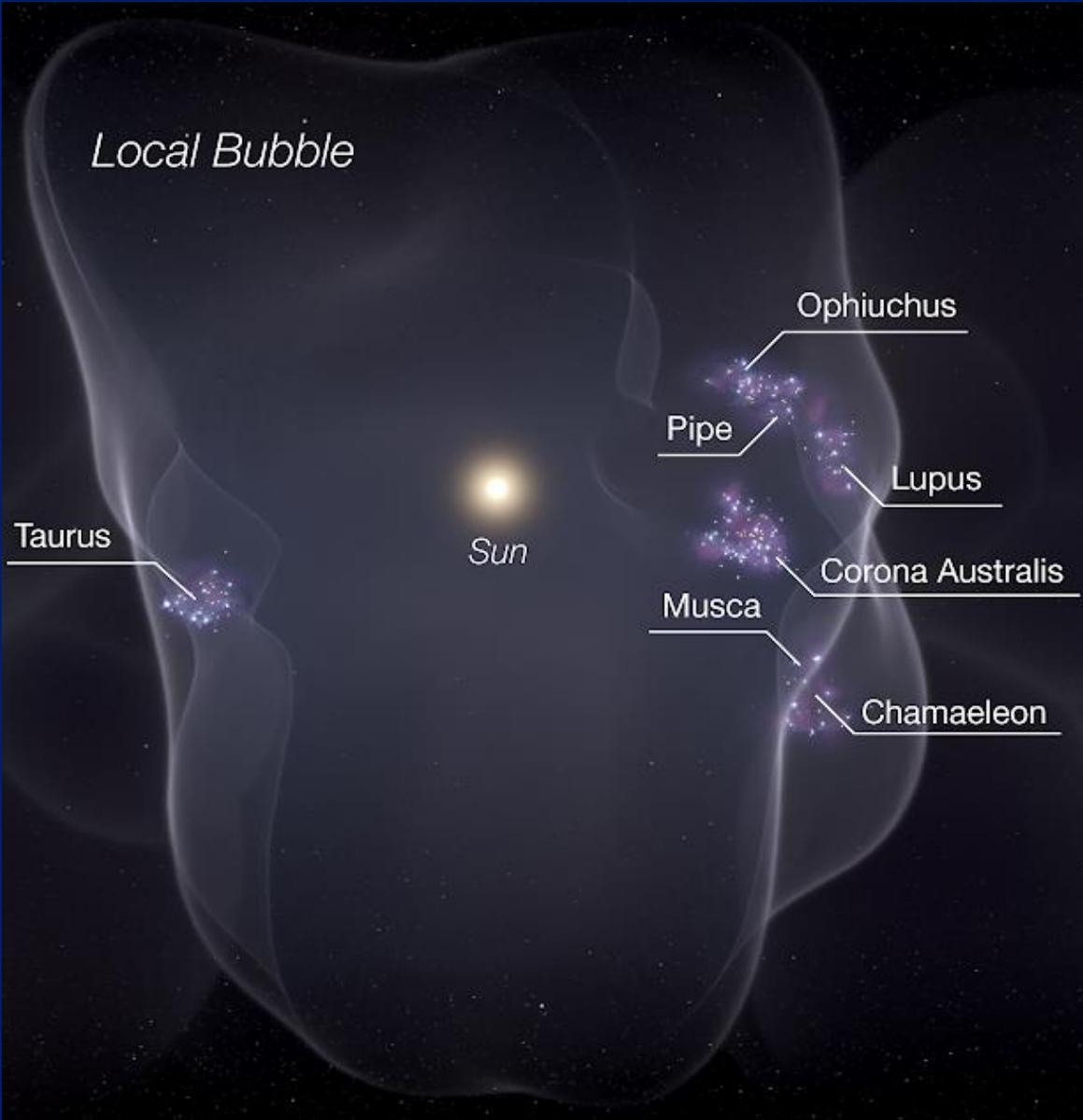
de Zeeuw+99

本地星際泡 (the Local Bubble) : 獵戶旋臂中，太陽所在的局部高溫、稀鬆的星際物質空腔，跨距 ~ 100 pc、 $n \sim 0.05 \text{ cm}^{-3}$ 為一般ISM的10%；成因可能是 10—30 Myr前 SN explosions

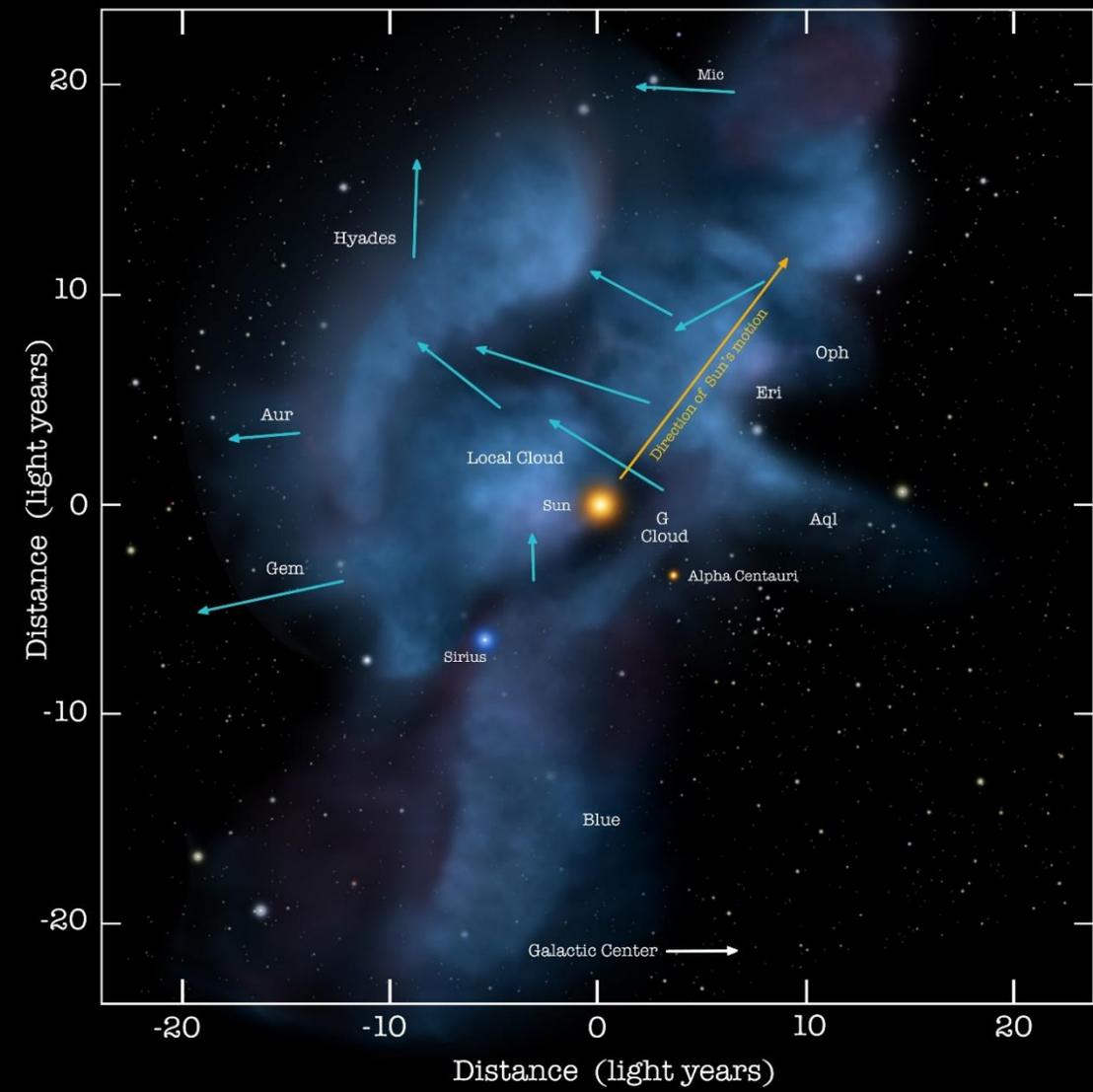


Where is the supernova (remnant)?
c.f. the Orion-Eridanus **Superbubble**

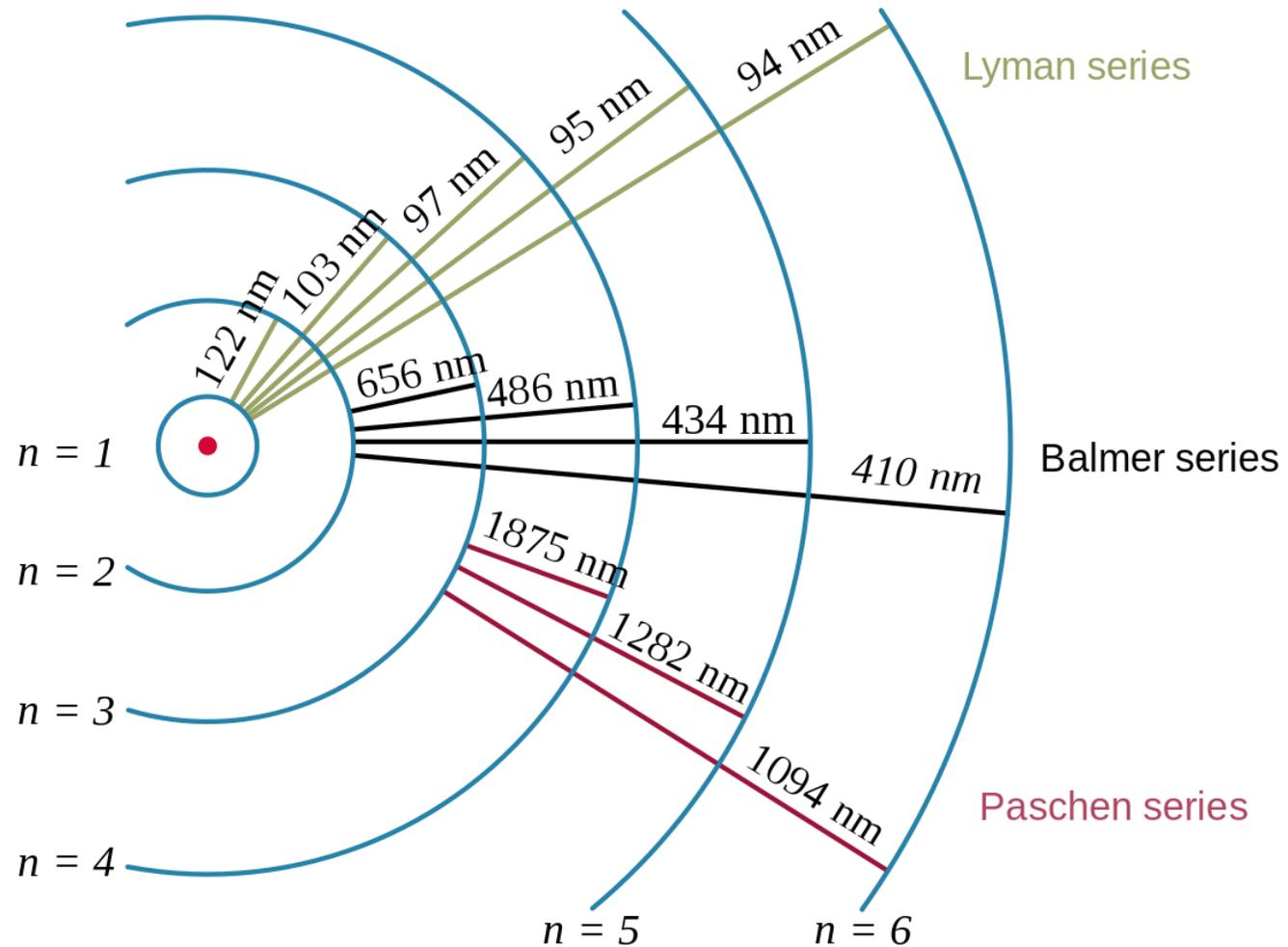




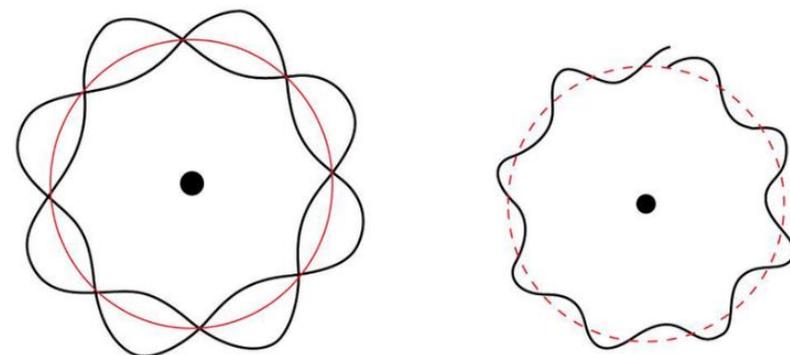
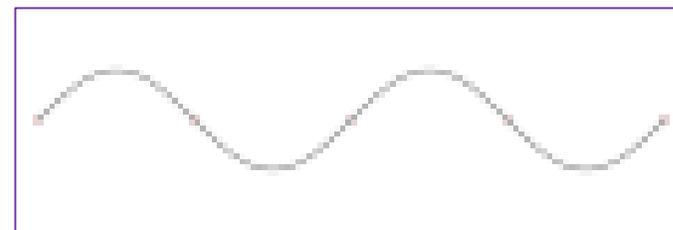
https://en.wikipedia.org/wiki/Local_Interstellar_Cloud



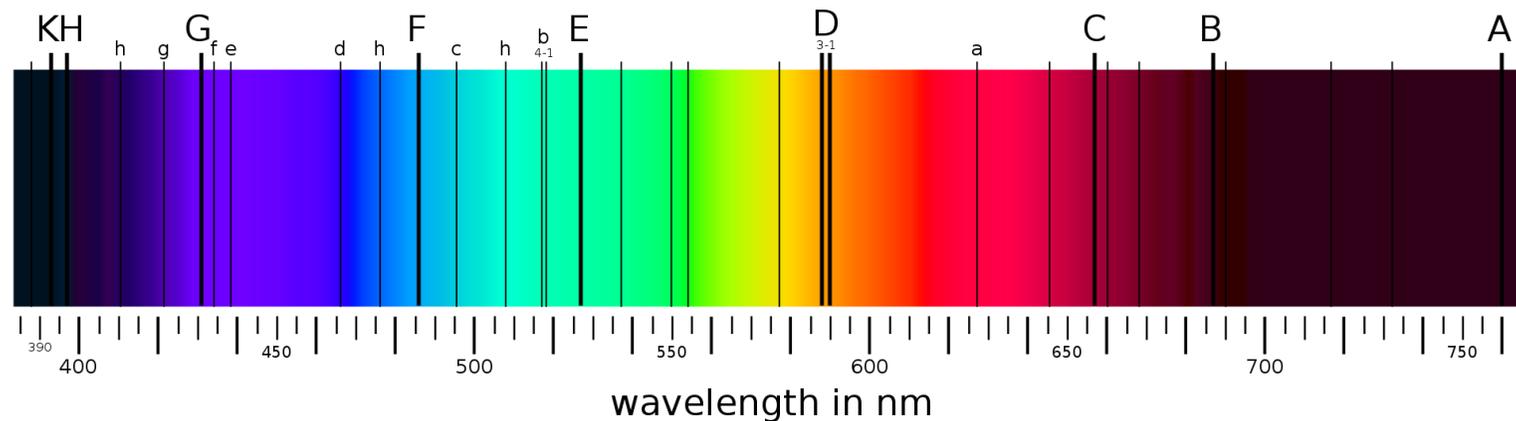
譜線是怎麼回事？



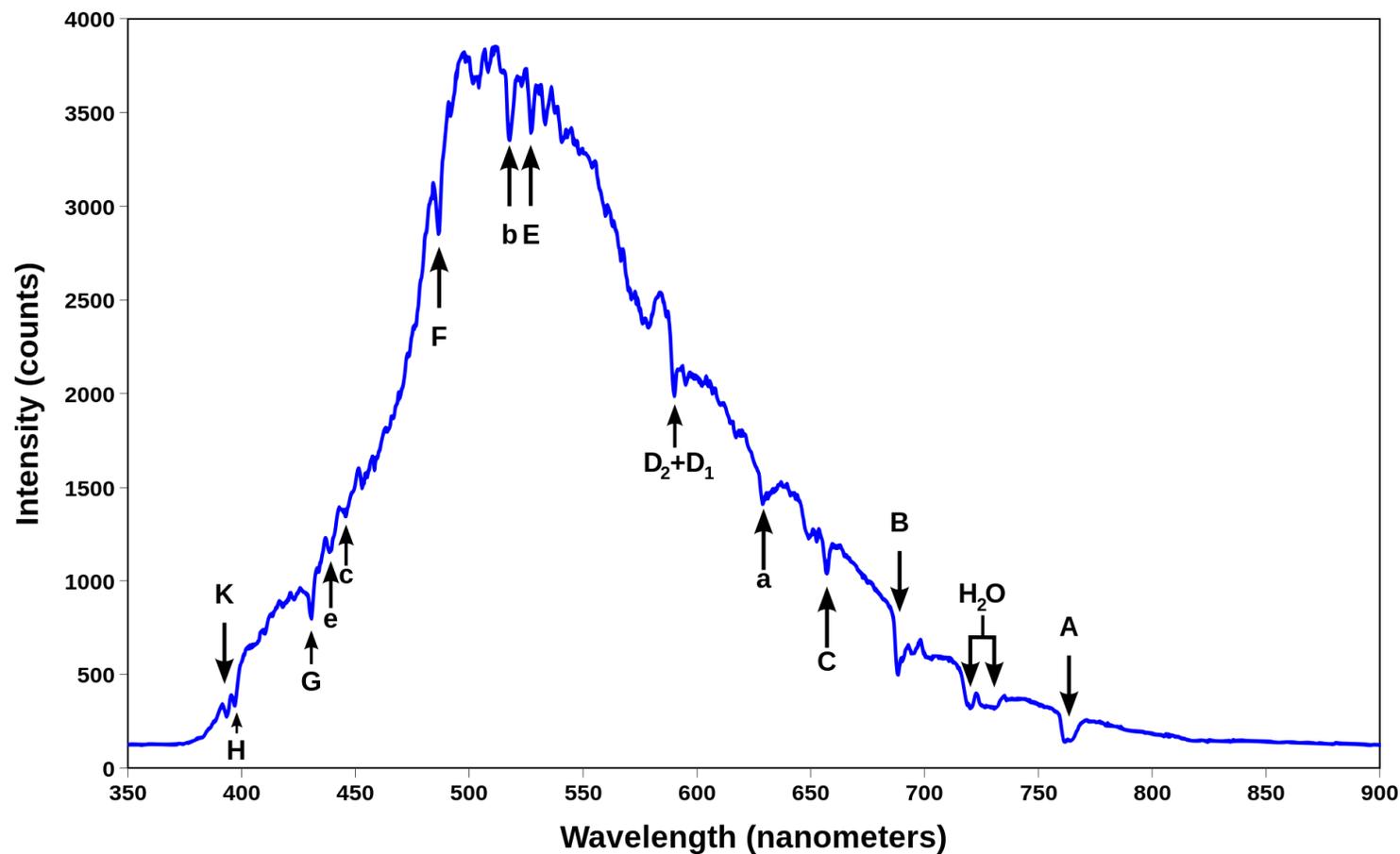
- ✓ 物質波
- ✓ 駐波



顏色：
不同波長強度的比例



- ◆ 紅綠燈的顏色
- ◆ 衣服、牆壁的顏色
- ◆ 恆星的顏色



恆星的性質

看到的 vs 實際的

光度 實際上發光能力 = 功率

恆星 \leftrightarrow 表面溫度、總表面積 \leftarrow 內部核反應
 \leftarrow 恆星質量

$$L_{\odot} = 3.828 \times 10^{26} \text{ W} = 3.75 \times 10^{28} \text{ lm}$$

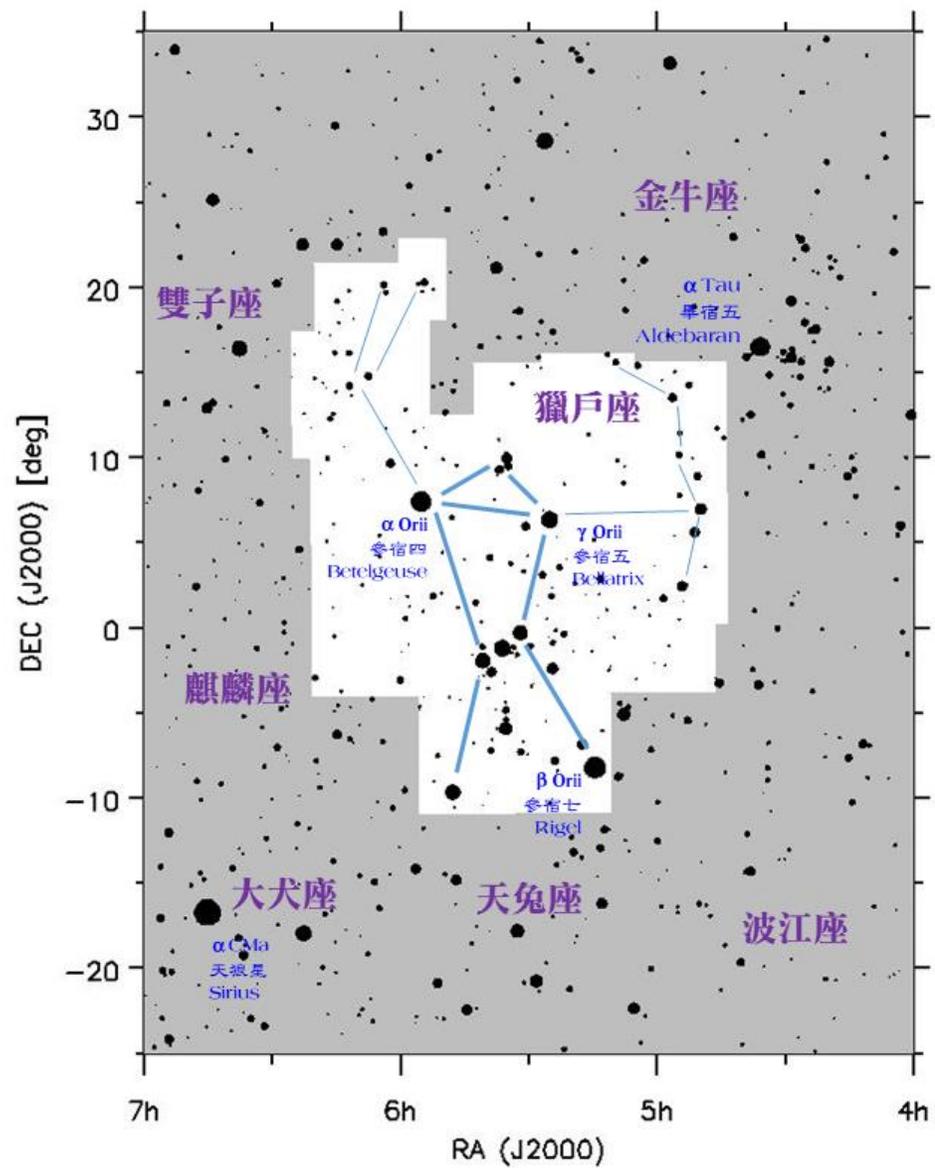
亮度 看起來多明亮 \leftrightarrow 光度、距離、是否遮擋

太陽常數（平均值） = $1.361 \text{ kW/m}^2 @ 1 \text{ au}$

星球亮度等級：最亮恆星 = 0等、-1等
肉眼極限 = 6等

天體	視星等
太陽	-26.7
天狼星	-1.5
織女星	0.0
參宿四	0.4

最亮：木星 -2.9 mag；金星 -4.9 mag；月球 -12.74
太陽 $m_V = -26.74$



Orion from +7.0 to 2.0 mag sky



使用雙筒望遠鏡，
集光面積比瞳孔大，
可以看到10等星，
全天空約10,000顆

光線的強度 (luminous intensity) 單位之一是「**燭光**」，拉丁文 candela (cd)，是單位立體角 (sr) 內接收的功率。差不多就是一根普通蠟燭的發光強度，把半邊遮住，在沒有遮擋的那邊還是發射1燭光。

發光度 (luminous flux) 單位為**流明** (lumen，1 lm = 1 cd·sr。1燭光向四周 (4π) 均勻發光相當於 12.61 流明；一般LED燈泡約 500 lm；教室的投影機亮度約 3000 lm。

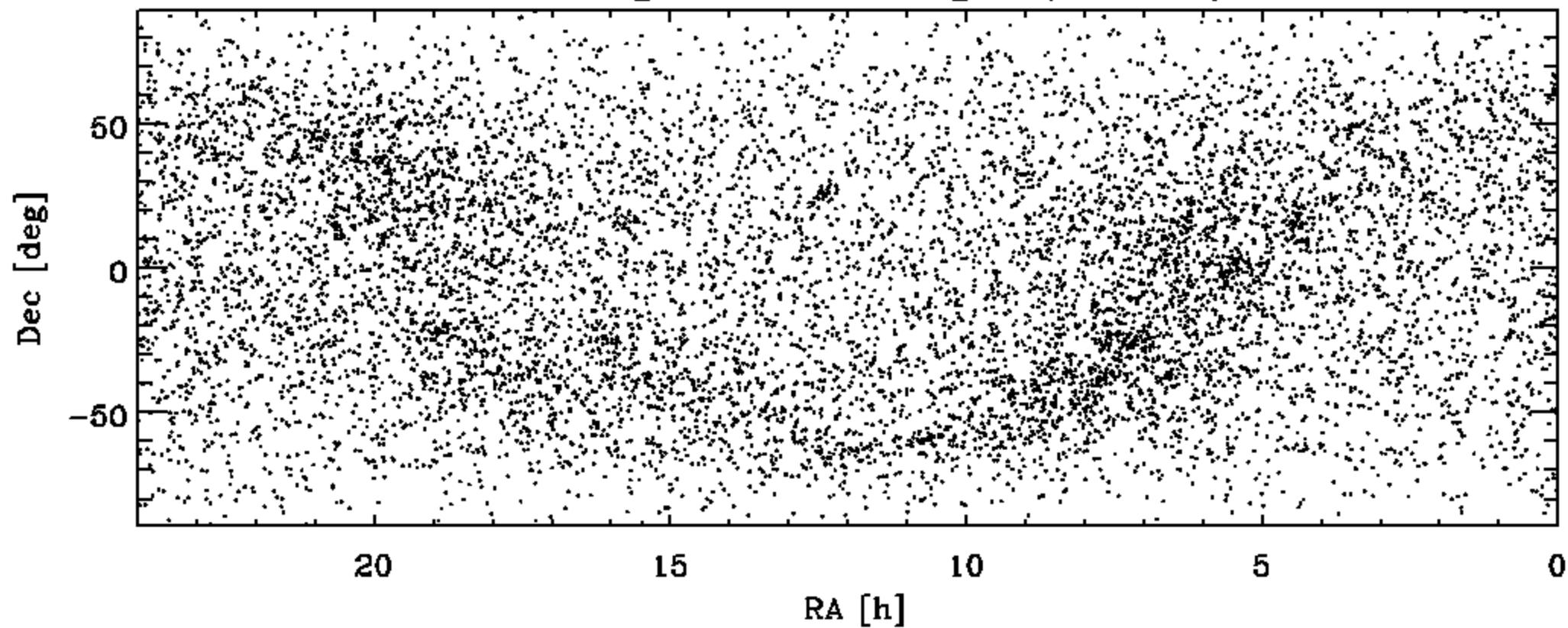
照度 (illuminance) 單位為**勒克斯** ($\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$ ；**福透** phot)，就是我們平常說的亮度。1 lux是1燭光照亮1平方米的明亮。

以 lux 為單位，晴朗白天約1萬；辦公室500；清晨魚肚白 10（差不多普通手機相機的靈敏度）；滿月夜 0.1（好的監視器）；無月晴夜 0.001。

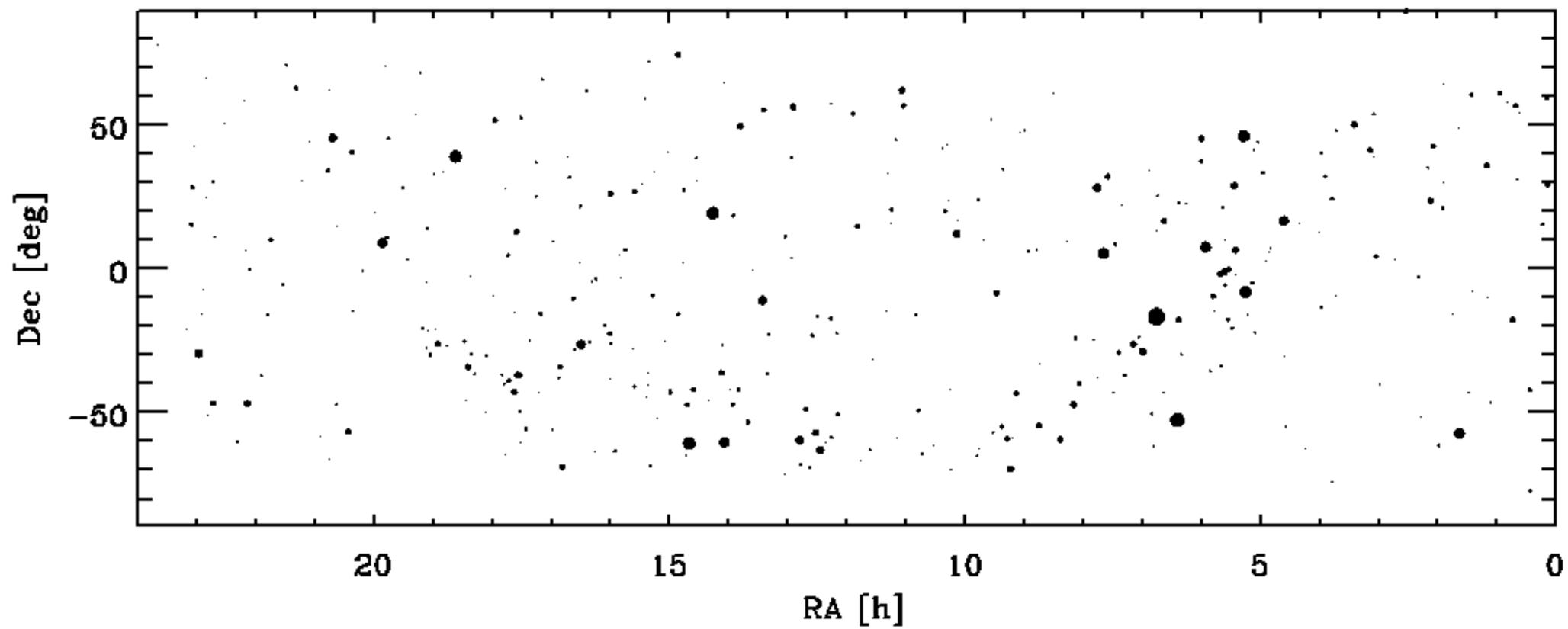
天文學家則以**視星等**描述天體「看起來」的亮度，例如零等星約 $2.08 \mu\text{lux}$ ；視力極限的6等約為 8 nlux。

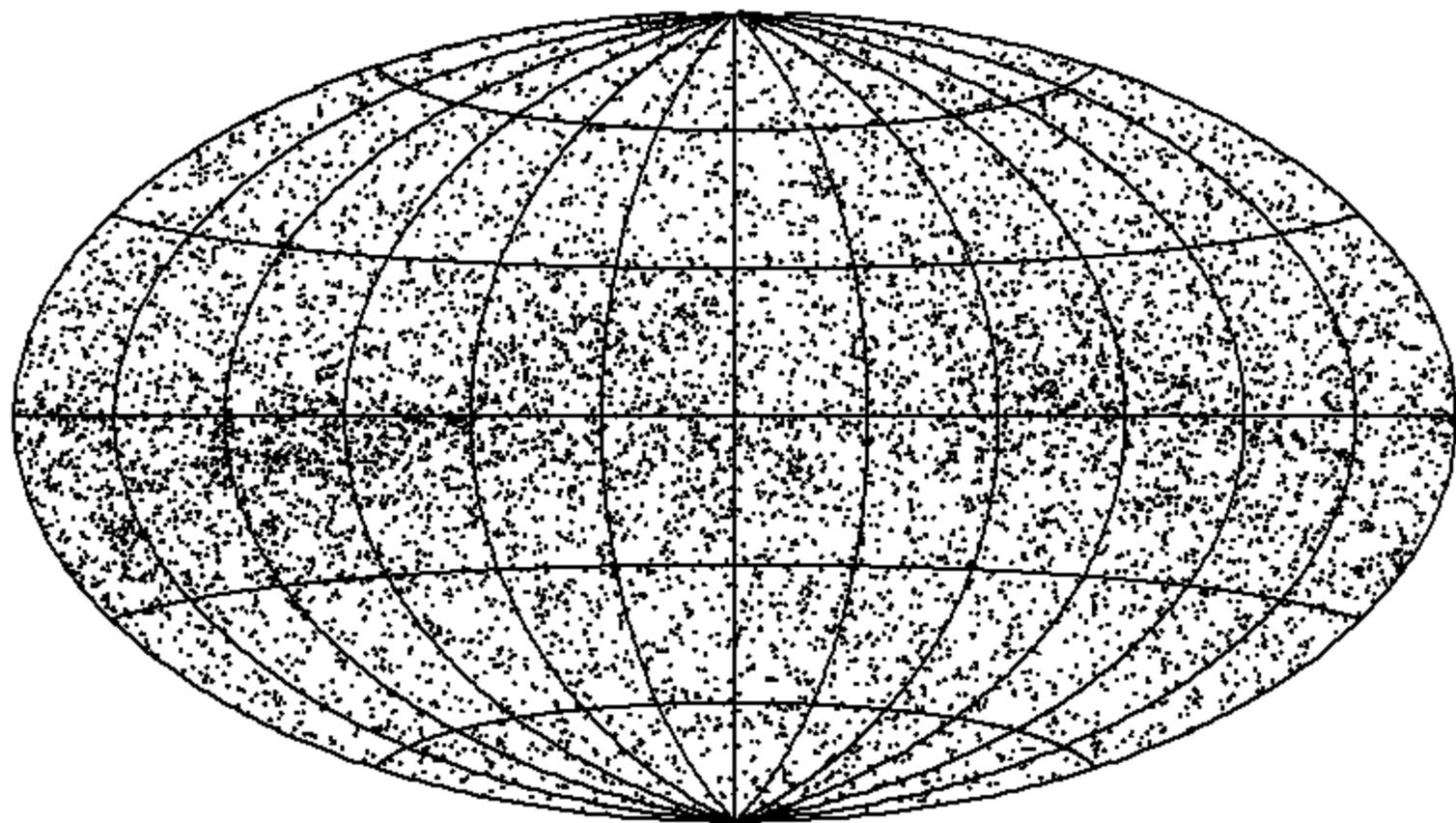
工程上對於照度（照射到表面的光線總量）與亮度（反射到人眼），或是irradiance（輻照度；光強）又各有定義。跨領域之難，首先是專有名詞這關。

Yale Bright Star Catalogue (N=9096)

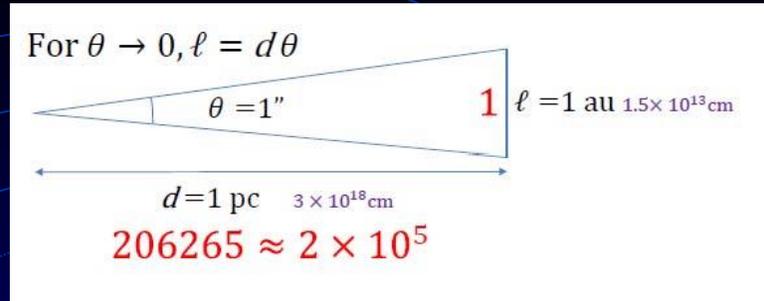


$mV < 4.0$





絕對星等：恆星若位於10 pc 的視星等



視星等 與 絕對星等

$$m_{\lambda} - M_{\lambda} = 5 \log d_{\text{pc}} - 5 + A_{\lambda}(d)$$

- ◆ 秒差距 (parsec; pc) : 1 au 張角為 $1''$ 的所在距離 ;
 $1 \text{ pc} \approx 3.26$ 光年 ; $d_{\text{pc}} = 1/p$; $\delta d = \delta \left(\frac{1}{p} \right) = \frac{\delta p}{p^2}$
- ◆ A_{λ} : 消光 (星球變暗 ; 視星等數值增加)
- ◆ 兩波段的消光差別 = 色差 \rightarrow 紅化現象

$$\mathcal{L} = 4 \pi \mathcal{R}^2 \sigma T^4$$

恆星光度

表面積

單位面積輻射功率

主序星 (main-sequence star)

- 中央進行核融合；恆星質量的序列
 - 主序星質量越大，半徑稍大，但光度強很多 **質光關係**
 - 大質量恆星 → 核反應快（得多） → $\mathcal{L} \uparrow \uparrow \uparrow$
→ 大量能量通過表面 $4 \pi \mathcal{R}^2$ → $T \uparrow$
 - 小質量恆星 → 核反應相對較慢 → luminous $\mathcal{L} \downarrow$ → $T \downarrow$
- HR 左上到右下「穩定恆星」構成的帶狀結構（主序）

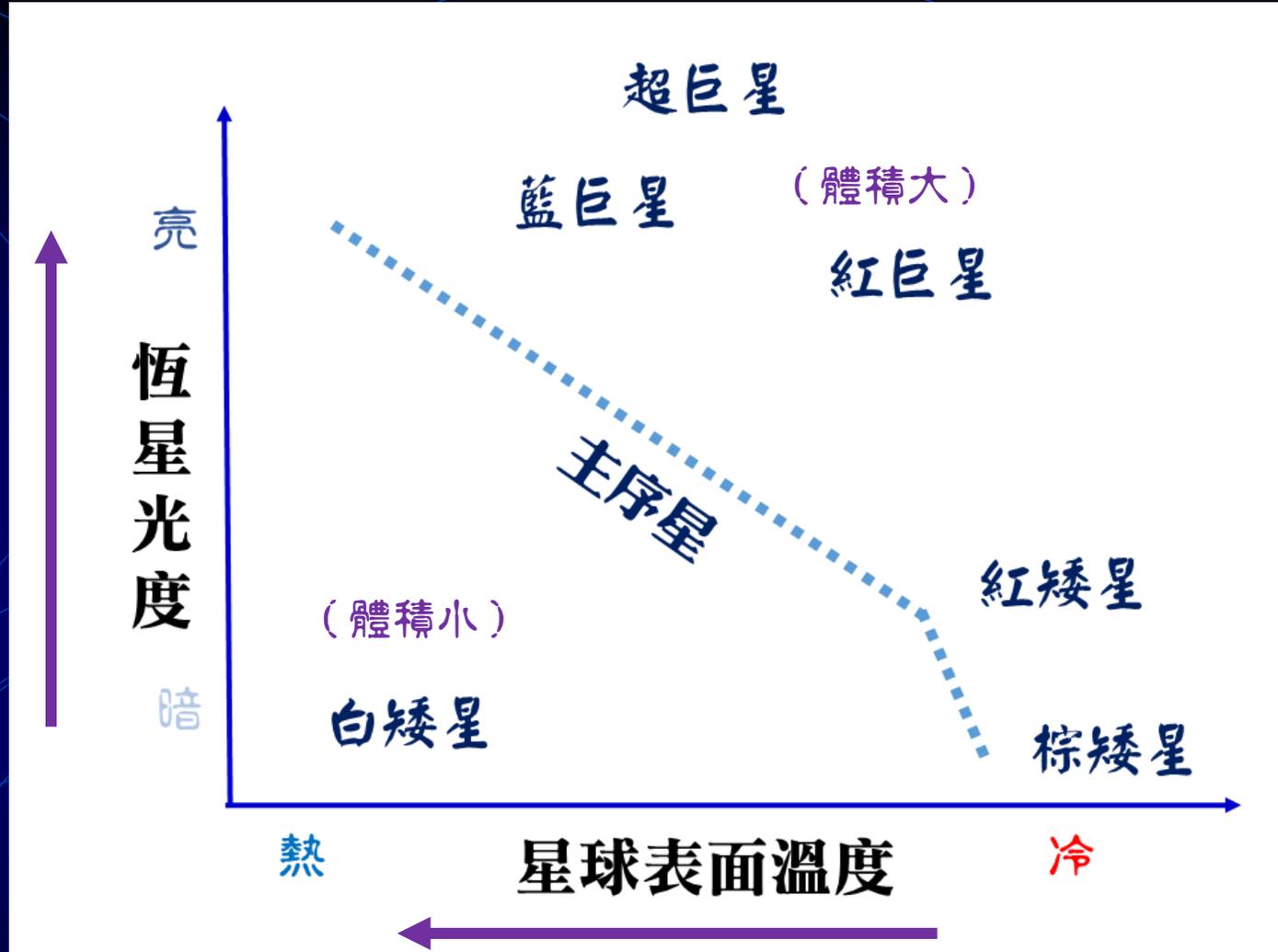
赫羅圖 右上：冷、亮；左下：熱、暗

量星工具 —— 赫羅圖

Ejnar Hertzsprung (1911)
及 Henry Norris Russell
(1913) 提出

HRD 可以是
光譜型態 versus 絕對星等
表面溫度 vs 光度
顏色 vs (視星等)

兩個可觀測的恆星物理量，
例如「顏色」與「星等」
color-magnitude diagram (CMD)

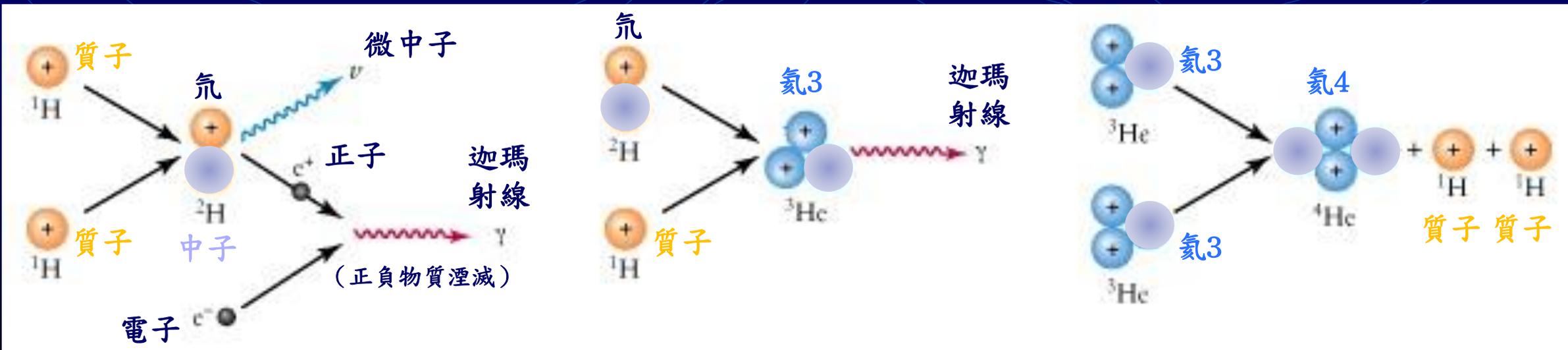


習慣上橫軸溫度向左增加；
縱軸光度向上增加

太陽內部的核反應



(4個) 氫原子核 (質子) 融合 $\xrightarrow{\text{鍊索反應}}$ (1個) 氦原子核
 \rightarrow 放出能量 (γ 射線、X射線、光)、維持結構穩定



怎麼樣能進行核反應呢？

原子核帶正電，彼此排斥；越接近，靜電排斥力越強

但要是幾乎靠著了，原子核強作用力遠強於靜電力，而且是吸引力 所以原子核當中很多質子可以靠在一起

→ 原子核互相吸引（融合），放出束縛能（核子能）

怎麼樣可以靠得很近呢？ 高溫！還需要量子效應

質子、質子之間 > 500萬度（太陽中央1/4半徑以內）

其他可能： ^3He 與 ^4He 之間； ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 與 ^1H 之間 ...

（溫度需更高）

恆星的生老病死就是（不同）核反應的結果

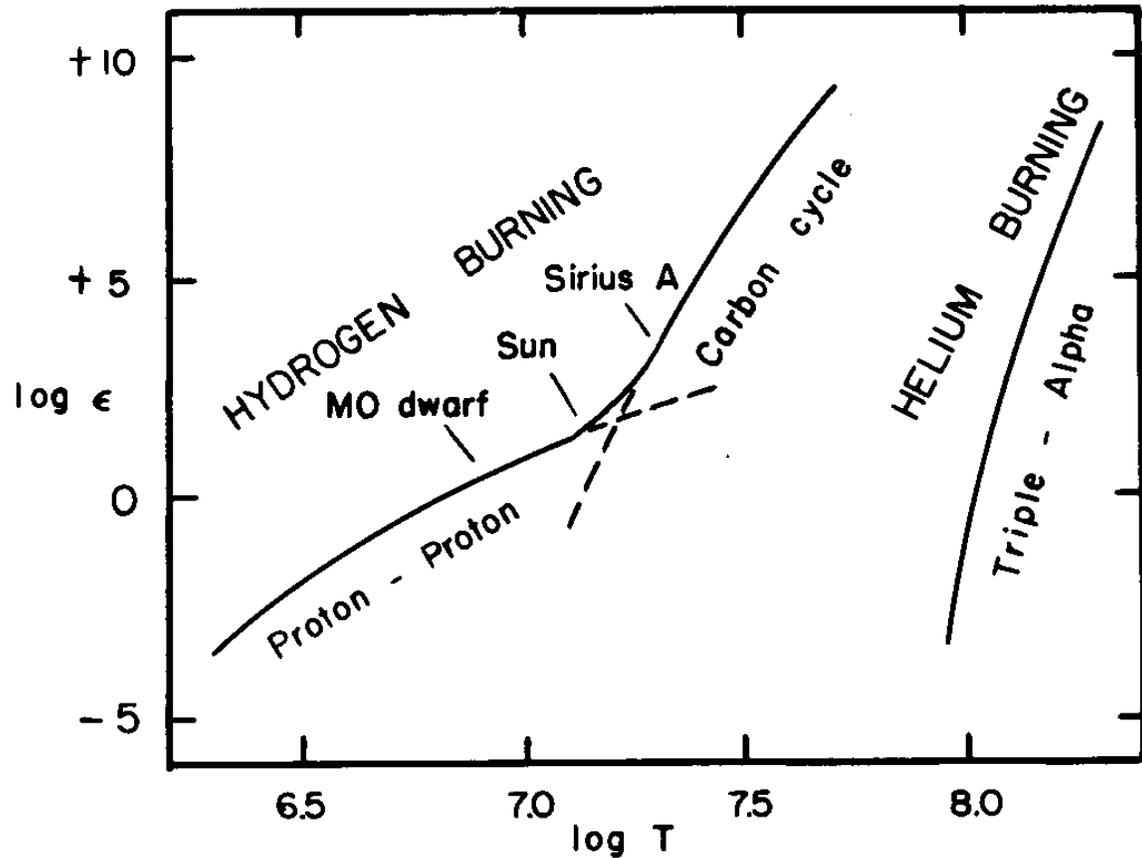


Fig. 10.1. Nuclear energy generation as a function of temperature (with $\rho X^2 = 100$ and $X_{\text{CN}} = 0.005X$ for the proton-proton reaction and the carbon cycle, but $\rho^2 Y^3 = 10^8$ for the triple-alpha process).

Schwarzschild

- 太陽核心 $q_{\text{CNO}}/q_{\text{pp}} \approx 0.1$
- 大於 $1.2 M_{\odot}$ ，也就是光譜型態早於F7的主序星，CNO為主要核反應
 - 光度大
 - 內部對流區
- 以此區分上、下主序

✓ CN cycle takes over the PP chains near $T_6 = 18$

✓ Triple $\alpha \sim 10^8$ K; C burning $T_8 = 5$ ($15-30 M_{\odot}$); O burning T_9 ($15-30 M_{\odot}$)

太陽的主序壽命

Energy Gained in a PP Chain

- $4\text{H} \rightarrow 1\text{He} + \text{neutrinos} + \text{energy}$
- Mass of 4 H = 6.693×10^{-27} kg
- Mass of 1 He = 6.645×10^{-27} kg

Mass deficit $\rightarrow 0.048 \times 10^{-27}$ kg = 0.7% 質子-質子核反應的質能轉換效率

$$M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33} \text{ [g]}$$

$$L_{\odot} \approx 4 \times 10^{33} \text{ [ergs/s]}$$

原子核物理

恆星物理

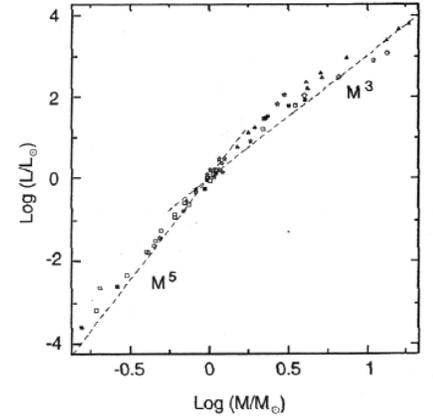
$$\tau_{\odot}^{\text{MS}} \approx M_{\odot} \frac{(0.007)(0.1) c^2}{L_{\odot}} = 3.15 \times 10^{17} \text{ [s]} = 10^{10} \text{ [yr]}$$

100億年

質光關係依質量範圍而定 $\mathcal{L} \propto \mathcal{M}^{3\sim 5}$

這表示主序星質量越大，光度越強

\mathcal{L}



取 $\mathcal{L}_{\text{MS}}/L_{\odot} \approx (\mathcal{M}/M_{\odot})^{3.5}$

主序壽命 \propto [燃料量]/[消耗率] $\propto \mathcal{M}/\mathcal{L} \propto \mathcal{M}^{-2.5}$

\mathcal{M}

這表示主序星質量越大，壽命越短

$\tau^{\text{MS}} \approx 10^{10} (M_{\odot}/\mathcal{M})^{2.5} \text{ [yr]}$



Ex: 昴星團中的藍巨星，質量為太陽6倍， $\tau^{\text{MS}} \approx 1$ 億年

Structure Equations 恆星結構方程

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad \text{Mass continuity (distribution)}$$

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{gm(r)\rho(r)}{r^2} \quad \text{Hydrostatic equilibrium}$$

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) q(r) \quad \text{Energy conservation}$$

$$\frac{dT(r)}{dr} = -\frac{3\kappa\rho L(r)}{4ac\,4\pi r^2 T^3} \quad \left. \begin{array}{l} \text{by radiation} \\ \text{Energy transport} \end{array} \right\}$$
$$\frac{dT(r)}{dr} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{P} \frac{dP(r)}{dr} \quad \left. \begin{array}{l} \text{by convection} \end{array} \right\}$$

$$P = P(\rho, T, \mu)$$

Equation of state

$$\kappa = \kappa(\rho, T, \mu)$$

Opacity

$$q = q(\rho, T, \mu)$$

Nuclear reaction rate

Boundary conditions: $m(r) \rightarrow 0$ and $L(r) \rightarrow 0$ as $r \rightarrow 0$

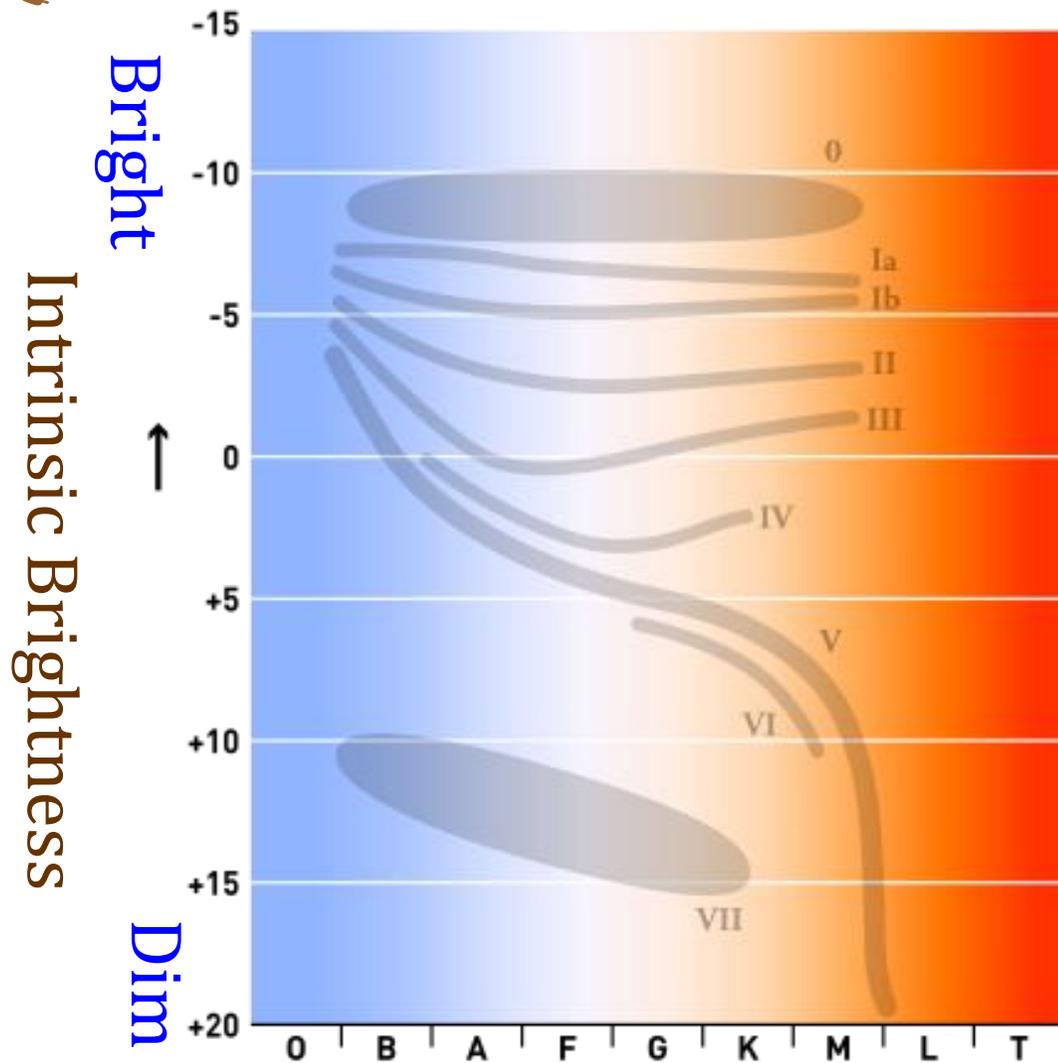
$T(r) \rightarrow 0$, $P(r) \rightarrow 0$, and $\rho(r) \rightarrow 0$ as $r \rightarrow R_*$

恆星結構

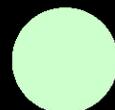
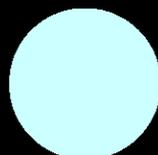
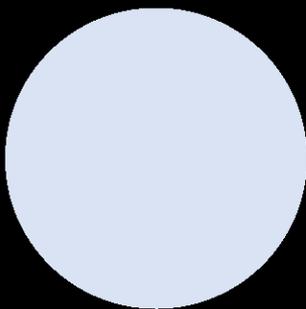
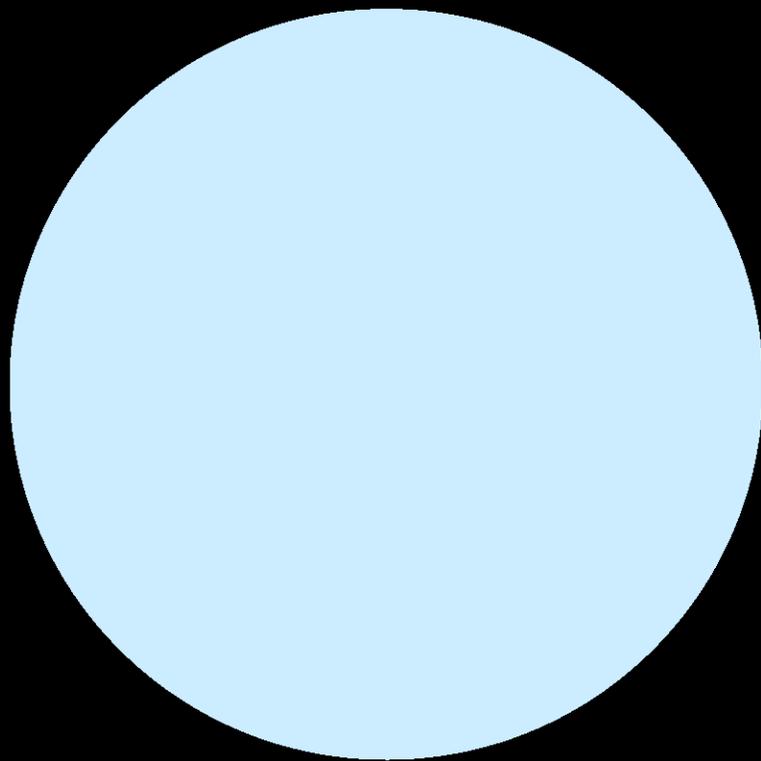
- ✓ 恆星在核心進行核融合產生能量
 - ✓ 氣體快速碰撞，產生膨脹向外的熱壓力（梯度） \leftrightarrow 向內的引力
 - 恆星各部分達到**靜力平衡**

 - ✓ 只要核心仍然有核燃料（氫）
 - 結構穩定 亮而熱 或 暗而冷
 - = 「正常」恆星
- 赫羅圖上的主序星

表面溫度 → Hot Cold



光譜型態 → O-B-A-F-G-K-M-L-T-Y



光譜型態

O

B

A

F

G

K

M

相對質量

40

6

2

1.4

1

0.7

0.2

相對直徑

10

4

2

1.4

1

0.7

0.3

相對光度

300,000

800

15

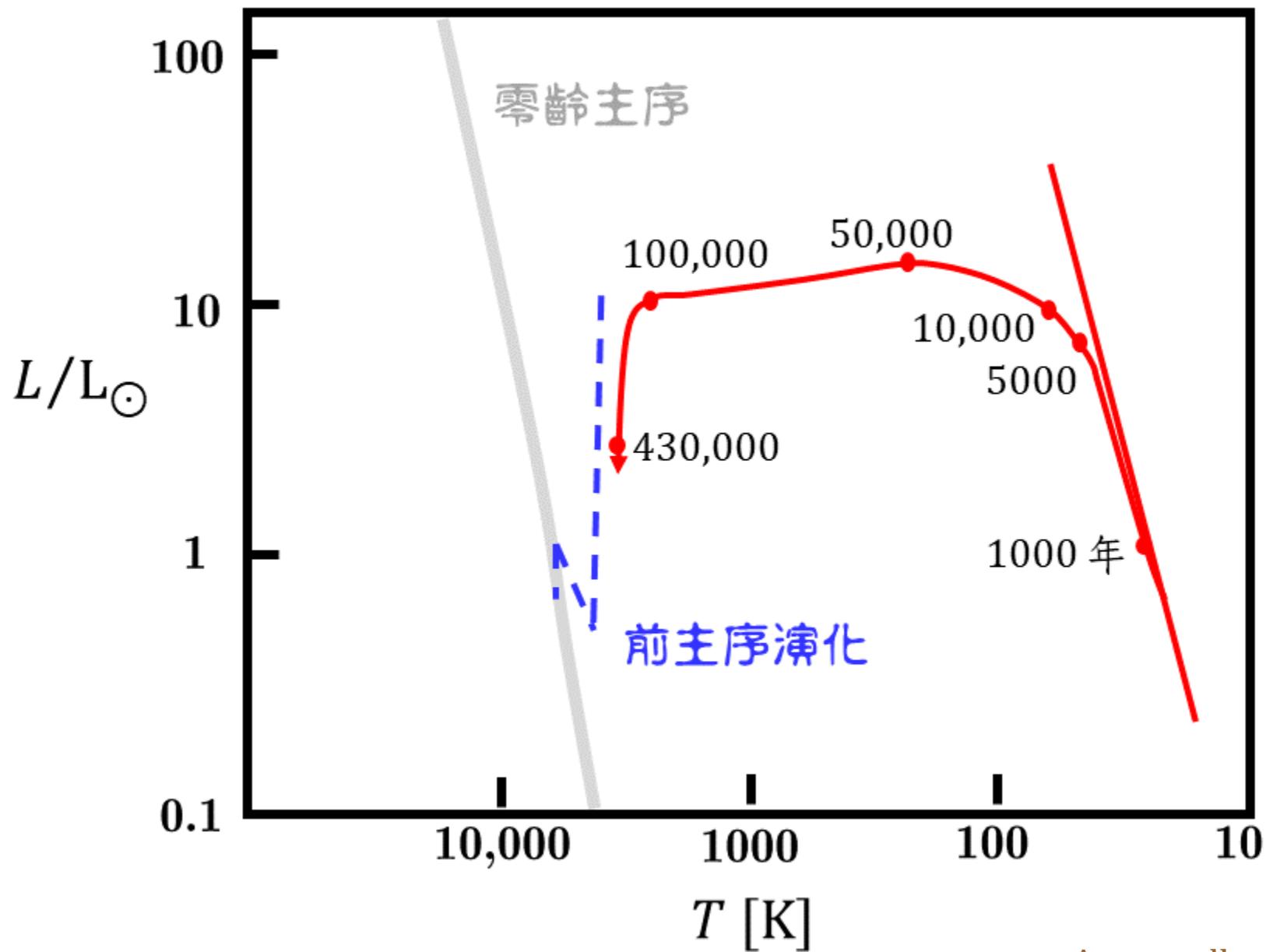
3

1

0.2

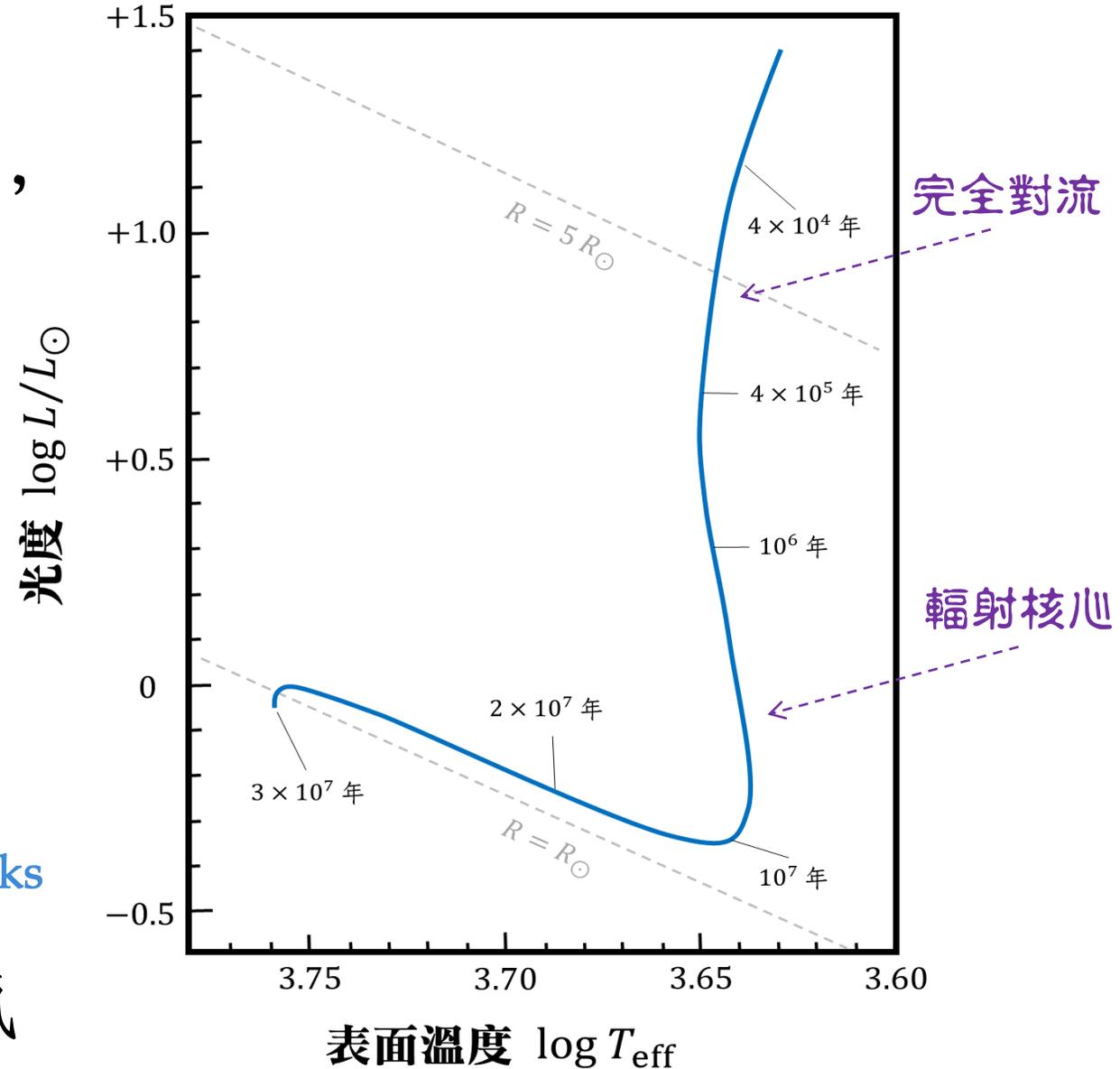
0.01

原恆星演化



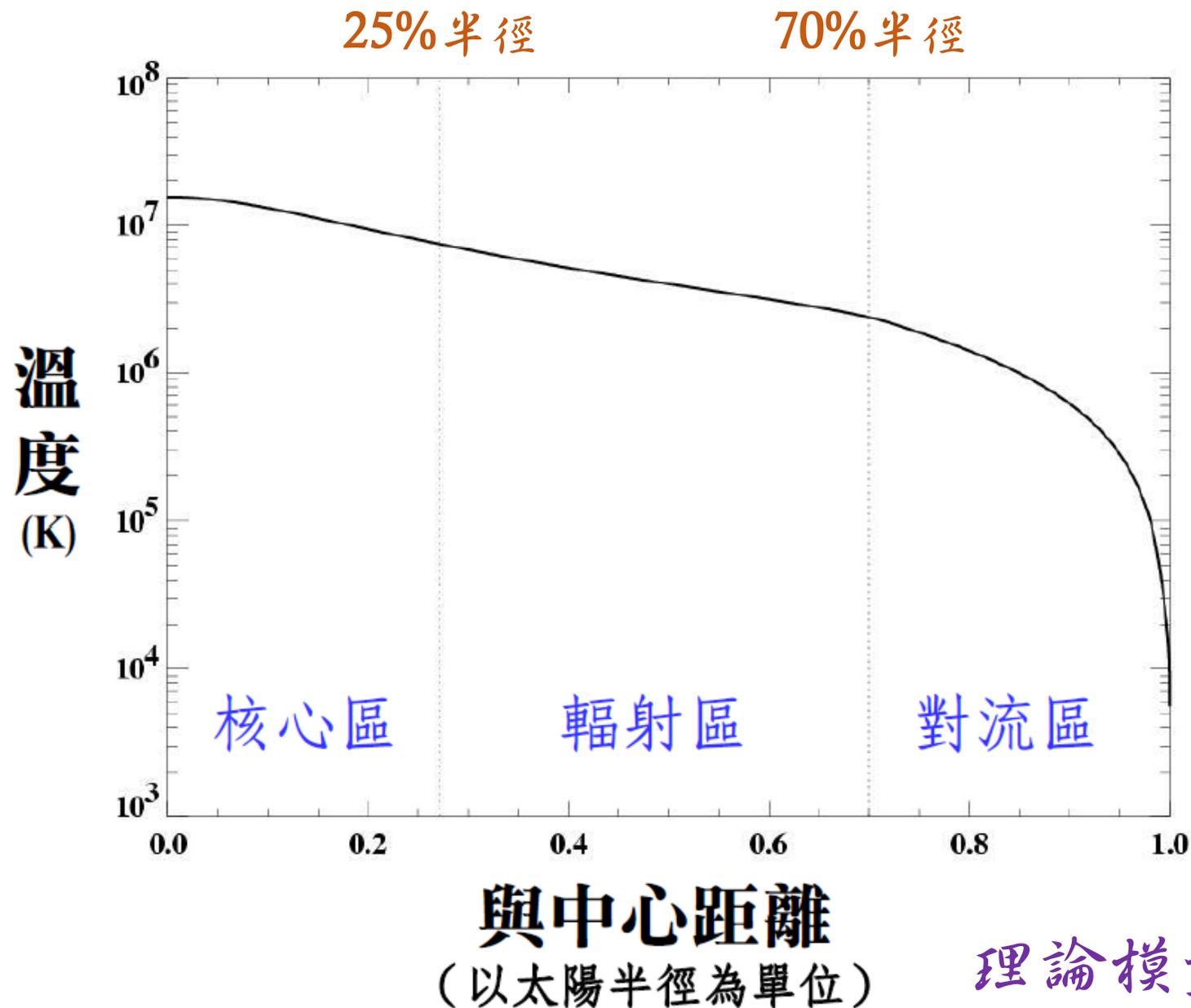
太陽早期演化 (胎教時期)

- 雲核 (動態) 塌縮，吸積發熱，然後
 - 原恆星靜態收縮，直徑縮小，釋放重力位能
 - 能量用於內部氣體游離，因此表面溫度幾乎不變 (4000K)；光度下降 (HRD 垂直下降) Hayashi tracks
- 約3千萬年後進入主序 (穩定氫融合反應) (5800 K; G2 V)



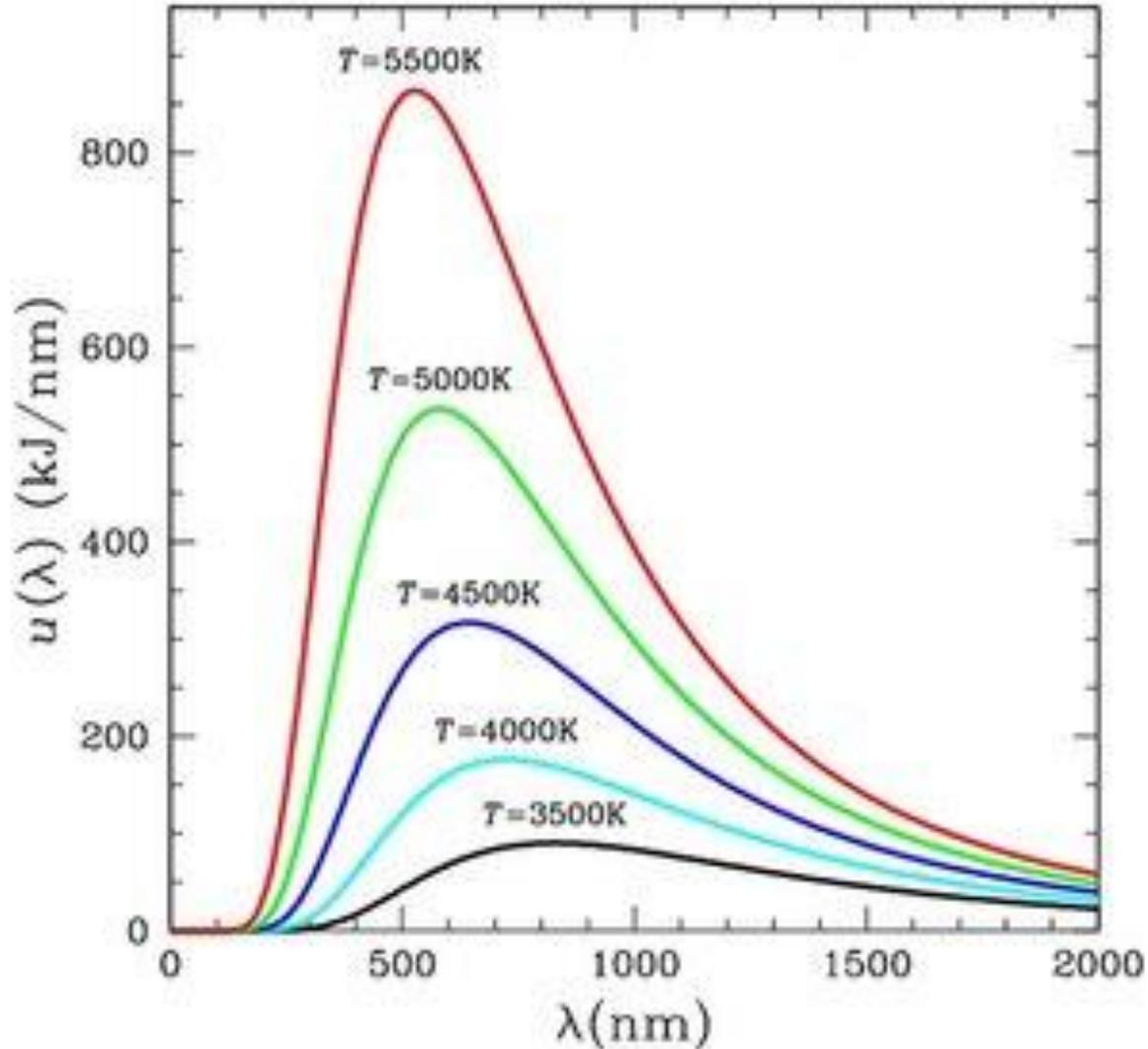
太陽結構

(成年時期)



理論模型怎麼驗證呢？

黑體輻射

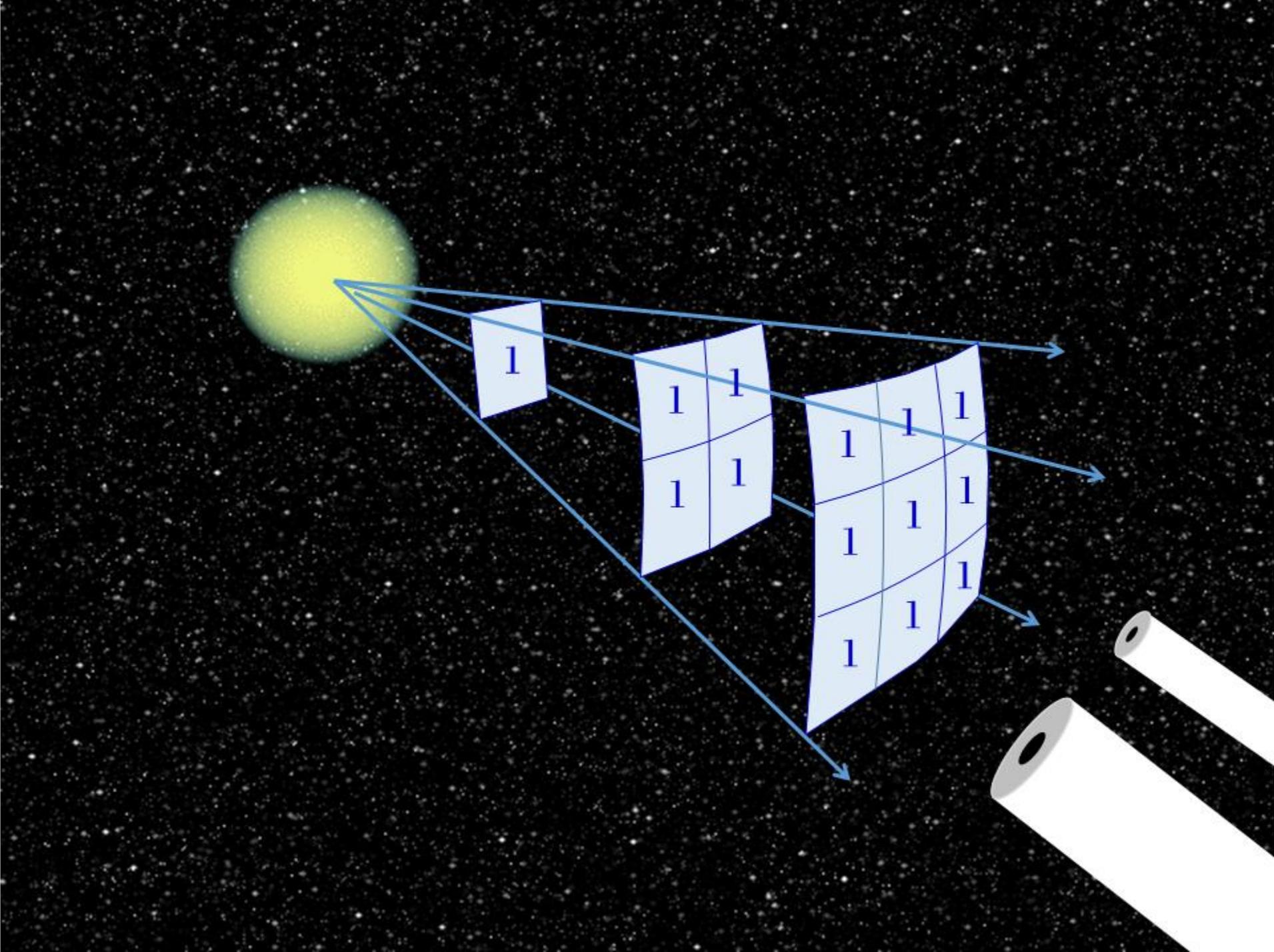


- 溫度 \rightarrow 原子、分子運動
(加速) \rightarrow 輻射
- 各個波段 (能量) 都有
(連續譜)
- 溫度高 \rightarrow 比較多高能量
(頻率高、波長短) 的輻射
 \rightarrow 頻譜最強處，出現在短波

高溫的輻射體 \rightarrow 顏色偏藍白

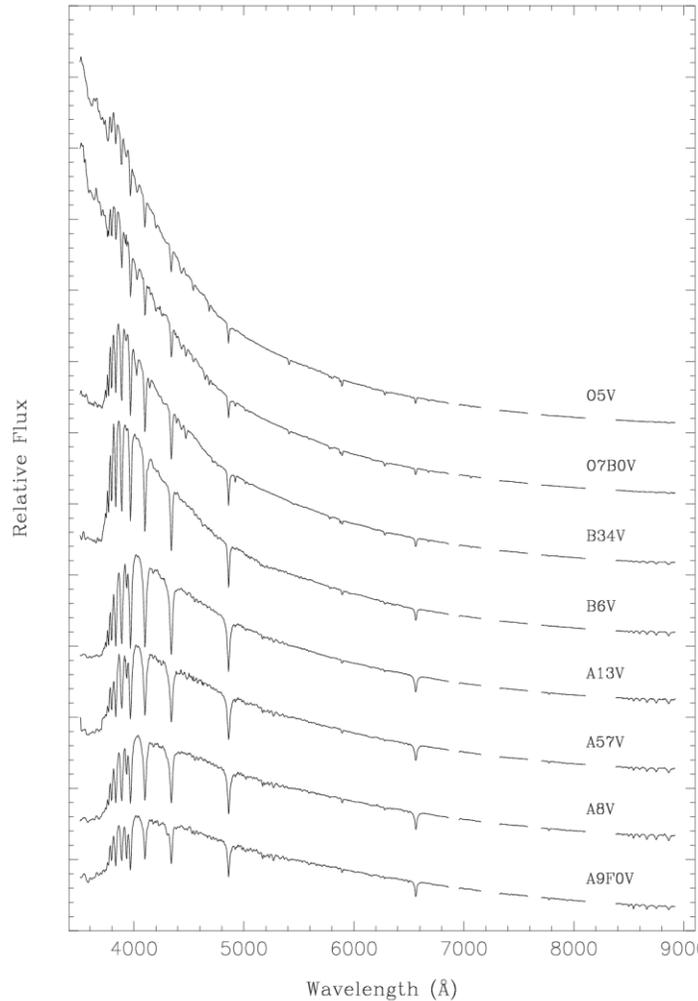
只有輻射體如此，反射不算，
不是連續譜 (日光燈、LED)
也不算

距離越遠，強度越弱 平方反比

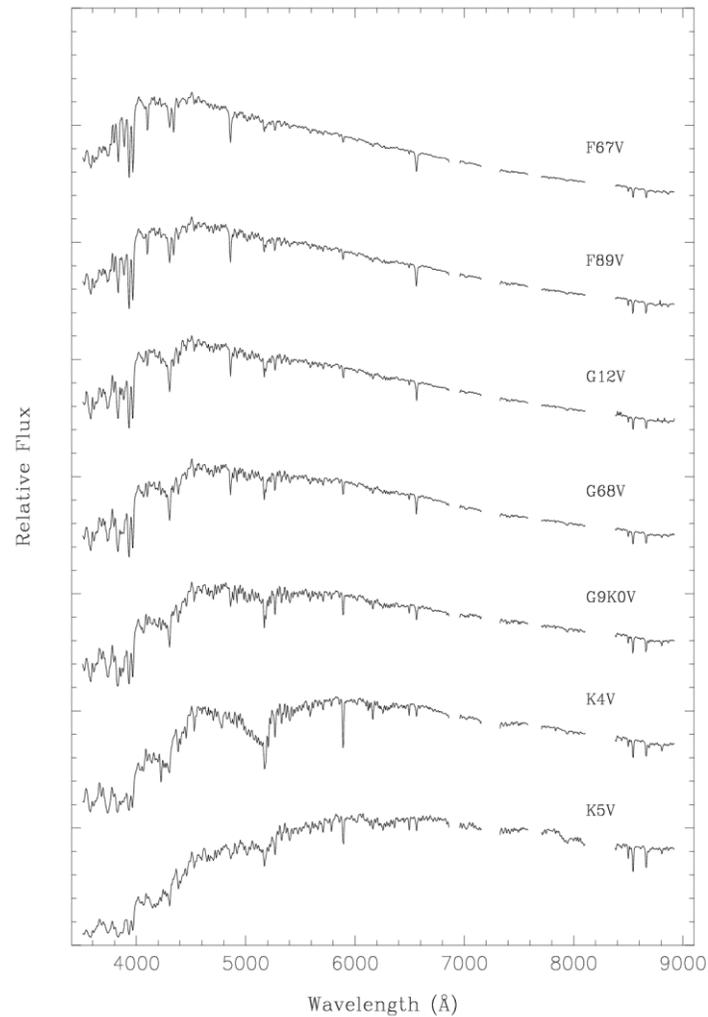


用大口徑望遠鏡集光

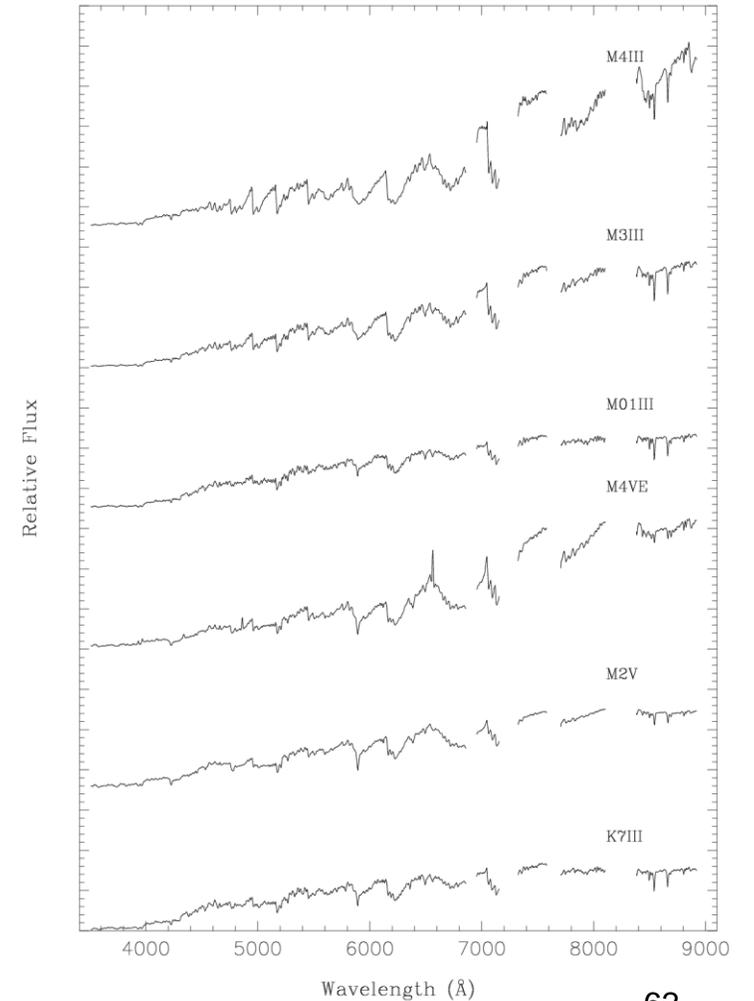
Hot stars --- peaked at short wavelengths (UV); mainly He lines, some H lines

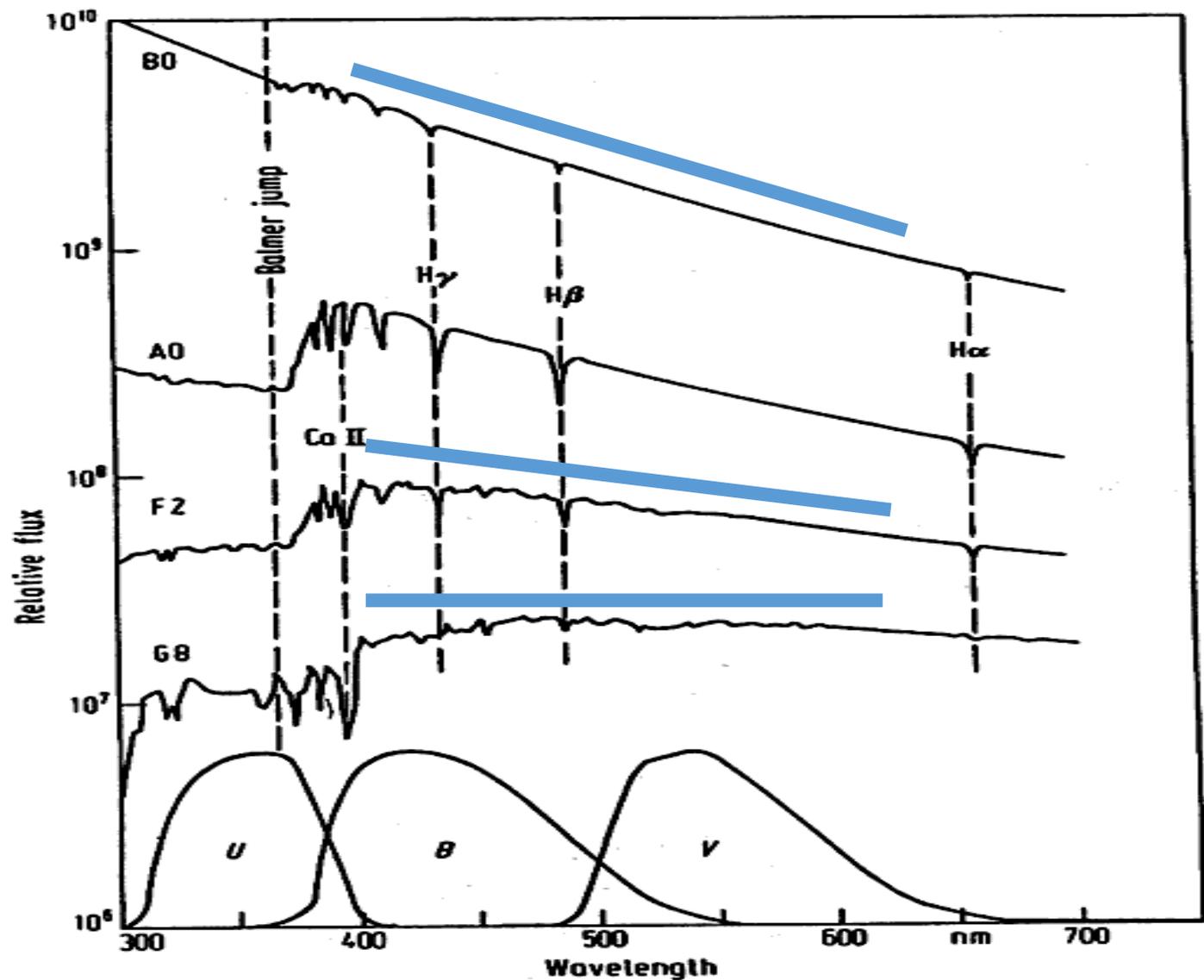


Warm stars --- peaked in the visible wavelengths; H lines prominent



Cool stars --- peaked at long wavelengths (IR); molecular lines/bands





兩波段輻射強度比 = 星等差

B 波段跟 V 波段測量能量分布
「連續」的部分

→ 以 (B-V) 色指數 估計溫度
數值越大，溫度越冷

沒有紅化的 O 型星

$$(B - V) = -0.3$$

太陽 G2 V

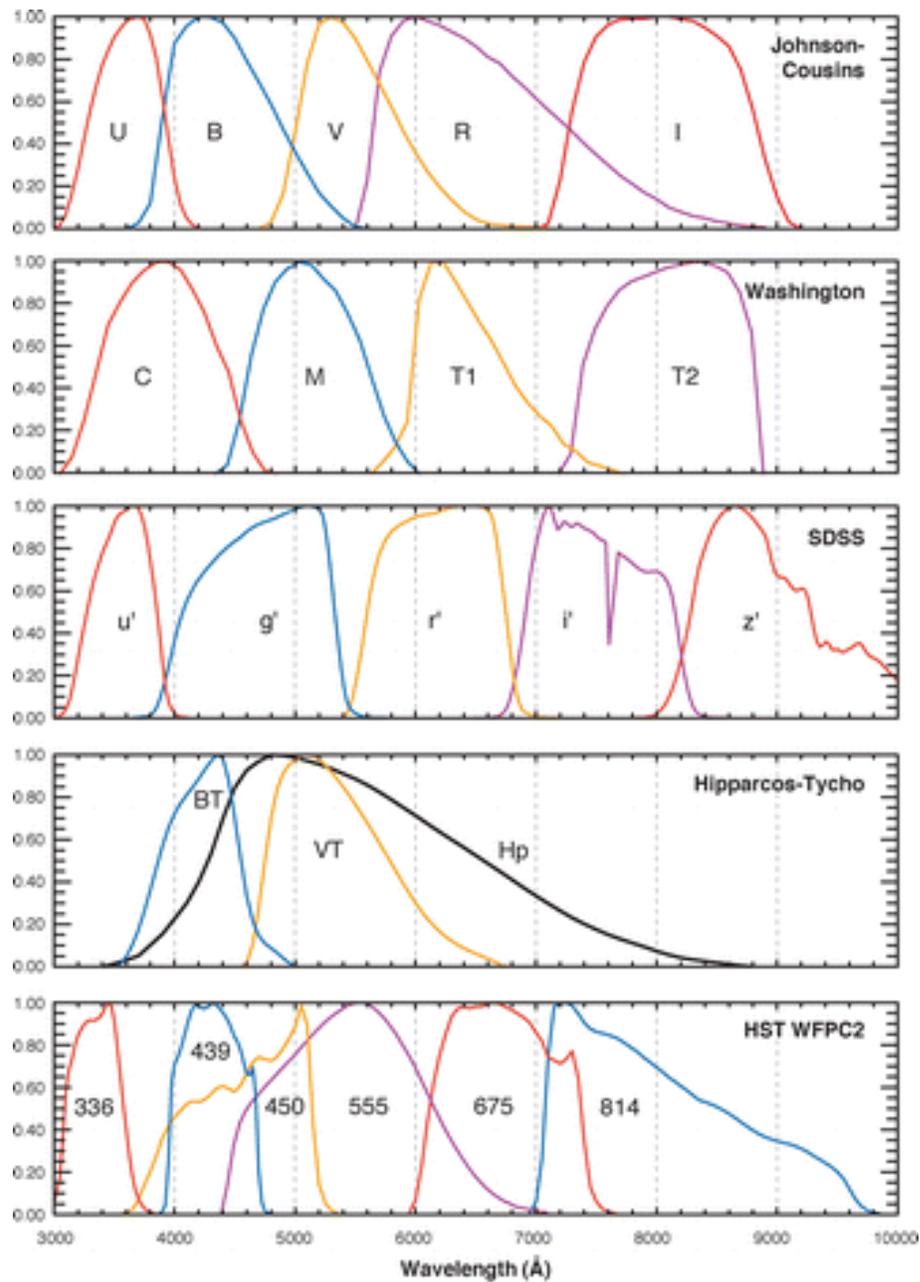
$$(B - V)_{\odot} = +0.656 \pm 0.005$$

「晚型」M-type star

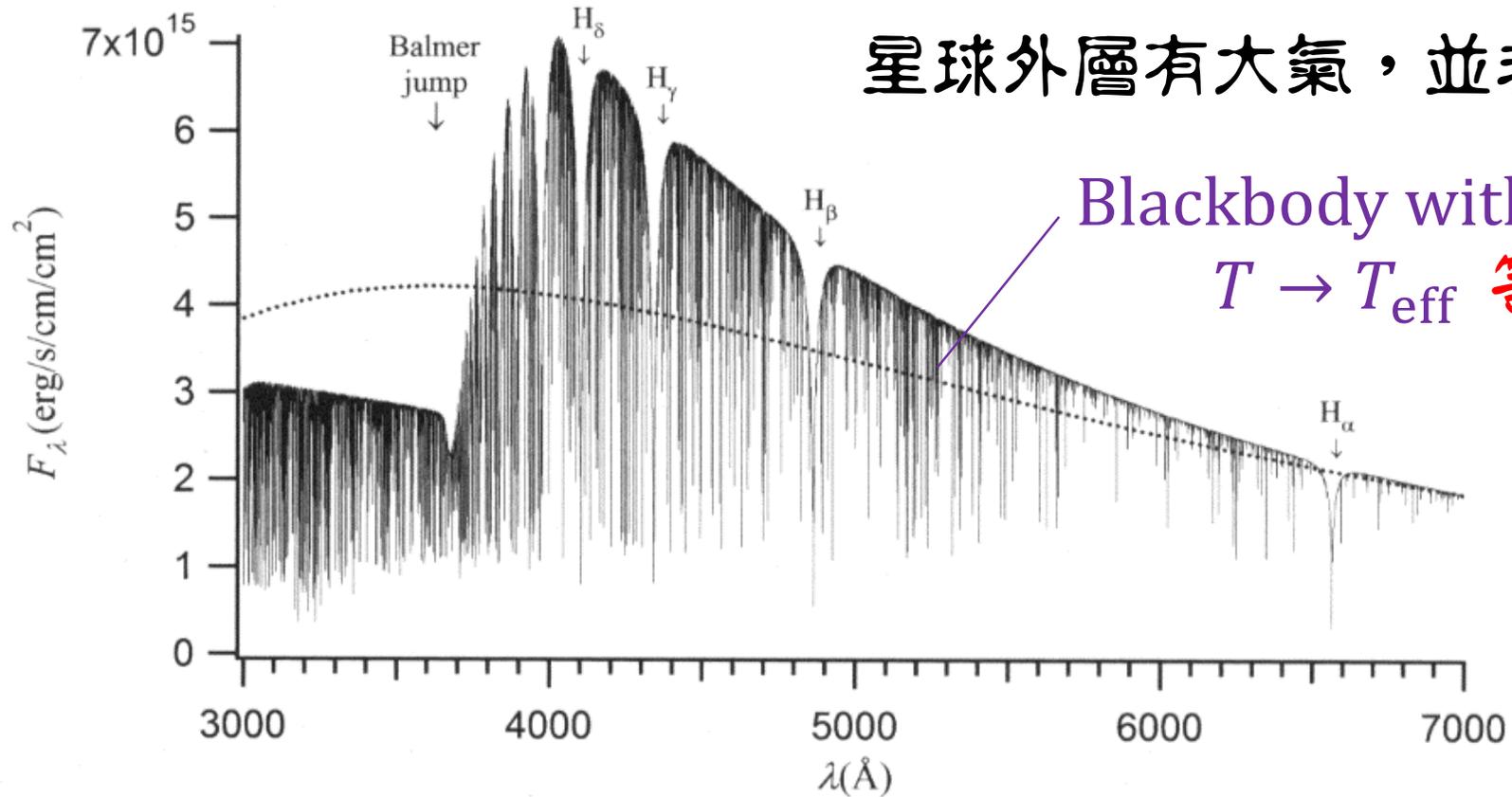
$$(B - V) = +1.65$$

例如：UBV 是常用的（寬帶）濾光片

濾光片依照科學需求，種類繁多



星球外層有大氣，並非完美黑體



Apparent Magnitude $m = -2.5 \log (\text{Flux}) + \text{ZeroPoint}$

✓ The Vega system: 0.0 mag (latest ~ 0.3 mag) at every Johnson band

✓ The AB system: $\text{ABmag} = -2.5 \log_{10}(f_\nu [\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}]) - 48.6$

$$m_{\text{AB}} - m_{\text{Vega}} = -0.09 @\text{B}, 0.02 @\text{V}, 1.85 @\text{K}_s$$

Alcyone

other query modes :

- Identifier query
- Coordinate query
- Criteria query
- Reference query
- Basic query
- Script submission
- TAP
- Output options
- Help

Query : Alcyone

昴宿六

Basic data :

* eta Tau -- Be Star

Other object types:

Be* (), * (*,AG,...), ** (**,BDS,...), IR (IRAS,IRC,...), Em* (EM*), PM* (2018yCat), X (1E), UV (CEL)

ICRS coord. (ep=J2000) : 03 47 29.0765529 +24 06 18.488347 (Optical) [0.39 0.25 90] A 2007A&A...474..653V

FK4 coord. (ep=B1950 eq=1950) : 03 44 30.4243985 +23 57 07.529070 [0.39 0.25 90]

Gal coord. (ep=J2000) : 166.6682570446 -23.4552145963 [0.39 0.25 90]

Proper motions mas/yr : 19.34 -43.67 [0.39 0.33 90] A 2007A&A...474..653V

Radial velocity / Redshift / cz : V(km/s) 5.40 [1.2] / z(~) 0.000018 [0.000004] / cz 5.40 [1.20]
 B 2006AstL...32..759G

Parallaxes (mas): 8.09 [0.42] A 2007A&A...474..653V

Spectral type: B7III c ~

Fluxes (9) : U 2.44 [~] C 2002yCat.2237....0D

B 2.78 [~] C 2002yCat.2237....0D

V 2.87 [~] C 2002yCat.2237....0D

R 2.84 [~] C 2002yCat.2237....0D

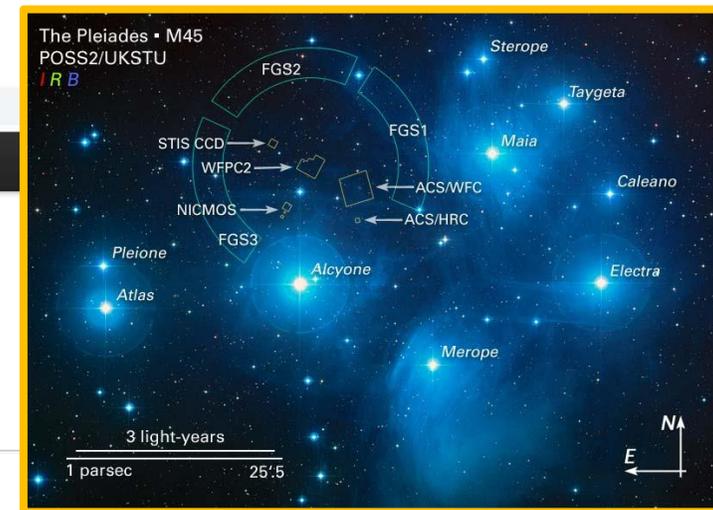
G 2.7730 [0.0052] C 2018yCat.1345....0G

I 2.88 [~] C 2002yCat.2237....0D

J 2.94 [~] C 2002yCat.2237....0D

H 2.97 [~] C 2002yCat.2237....0D

K 2.94 [~] C 2002yCat.2237....0D



SIMBAD Query around within 2 arc

03 47 29.077 +24 06 18.49

Aladin

FoV: 23.58'

2MASS DSS SDSS

All CDS (CDSPortal)

Send to Aladin

<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=Alcyone>

SIMBAD

M 79 -- Globular Cluster

Other object types: * (CD,CPD,...), G1C (2013A&A,G1C), X (1E,[V2001]), C1* (C,[KPS2012])

ICRS coord. (*ep=J2000*): 05 24 10.59 -24 31 27.3 [] D 2006MNRAS.365.1357D

FK4 coord. (*ep=B1950 eq=1950*): 05 22 06.97 -24 34 07.8 []

Gal coord. (*ep=J2000*): 227.22915 -29.35152 []

Proper motions *mas/yr*: 2.47 -1.59 [0.01 0.02 90] C 2019MNRAS.482.5138B

Radial velocity / Redshift / cz : V(km/s) 205.84 [0.19] / z(~) 0.000687 [0.000001] / cz 205.91 [0.19]
(Opt) A 2019MNRAS.482.5138B

Parallaxes (*mas*): 0.037 [0.0031] ~ 2019MNRAS.489.3093S

Angular size (*arcmin*): 1.6000 1.6000 0 (~) D 2008MNRAS.389.1924F

Fluxes (7) :
B 9.21 [~] E ~
V 8.16 [~] D 2012AJ....144..126D
K 5.67 [~] D 2008MNRAS.389.1924F
g (AB) 9.006 [0.030] C 2014MNRAS.437.1725V
r (AB) 8.570 [0.044] C 2014MNRAS.437.1725V
i (AB) 8.351 [0.044] C 2014MNRAS.437.1725V
z (AB) 8.178 [0.044] C 2014MNRAS.437.1725V

https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/wp_chen/index.htm

如何測量（估計）恆星的光度、運動、距離、大小、溫度、光度、質量、表面重力場、成分、年齡 …

<https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/Courses/StellarStr/01.properties.pdf>

- W. P. Chen (陳文屏), Chair Professor of Astronomy
- PhD, Astronomy, [State University of New York at Stony Brook](#), 1990
 - Carnegie Fellow, Carnegie Institution of Washington, Department of Terrestrial Magnetism, 1990-1992
 - Visiting Astronomer, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 1996
 - Joined NCU since 1992.08
 - [Research Specialties \(最新研究方向\)](#)
Observational Astronomy; Star Formation
 - [Publications \(研究論文\)](#)
[ADS](#), [ADS New](#), [Google Scholar](#), [ResearchGate](#)
 - [Reports and Articles \(科普作品\)](#)
 - Teaching Activities:
 - ✚ [普通天文學 \(General Astronomy\)](#)
 - ✚ [恆星大氣與結構 \(Stellar Atmosphere and Structure\)](#)
 - ✚ [恆星形成與演化 \(Stellar Formation and Evolution\)](#)
 - ✚ [尋找外星生命 \(Search for Extraterrestrial Life\)](#)
 - ✚ [天文觀測 \(Astronomical Observation\)](#)
 - ✚ [天文學導論 \(Introductory Astronomy\)](#)
 - ✚ [星際物質 \(Interstellar Medium\)](#)
 - ✚ [科學寫作 \(Scientific Writing\)](#)
 - [Students and Postdocs](#)
 - Slides for Public Talks (通俗演講投影片)
 - [Projects](#) I am currently involved
 - [My frequently-visited web sites](#)

恆星演化與衰亡

太陽始於太空中一團收縮的雲氣，由於質量夠大，而持續收縮，費時3千萬年，終於核心溫度夠高，「點燃」氫元素的熱核反應

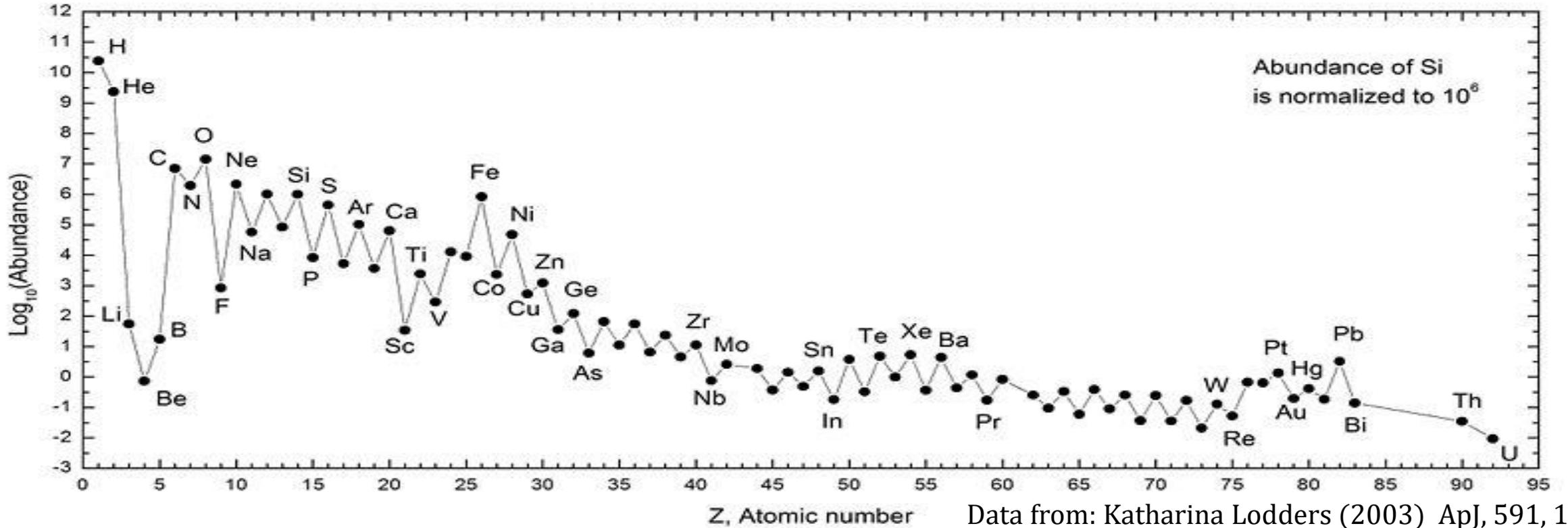
所產生的能量傳播到各部分，讓氣體高速運動，彼此碰撞的熱壓，平衡了向內的引力

熱融合不斷將氫原子核轉換成氦原子核 $E = \Delta mc^2$

太陽如此發光、發熱已經約46億年，預計還可以存活50~70億年，直到中央不再有核反應（到鐵元素為止）

怎麼知道的？

太陽（宇宙）成分



✓ X, Y, Z = mass fraction of H, He and all other elements (“metals”) Z : *metallicity*

✓ $X + Y + Z = 1$

✓ 太陽豐度 $X_{\odot} = 0.747$; $Y_{\odot} = 0.236$; $Z_{\odot} = 0.017$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\text{star}} - \log_{10} \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot}$$

$$\log \left(\frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right)_{\odot} = -4.33$$

i.e., 1 iron atom per 20,000 H atoms

恆星演化

$$\mathcal{L} \propto \mathcal{M}^{3.5}$$

$$\tau \propto \mathcal{M} / \mathcal{L} \propto \mathcal{M}^{-2.5}$$

- 大質量恆星 → 核反應快速↑↑↑ → 熱而亮 \mathcal{L} ↑↑↑
→ 核燃料多，但用得快 → 壽命短 τ ↓↓

小質量恆星 → 不耀眼 → 壽命長 τ ↑

- 當核心氫氣用完（～約10%的總質量；變成氦了）
→ 不再平衡，核心收縮、溫度上升
→ 原來恰好在外圍（殼層）的氫點燃、恆星外層膨脹、
溫度下降（變大、變紅 → 「紅巨星」）

□ 核心不夠大，無法升溫足以點燃氦（一億度）

→ 持續冷卻，成為「**黑矮星**」

核心夠大 → 點燃氦融合（原來的核廢料變成燃料）

結構再度平衡，但燃料少、消耗快 → 為時短暫

→ 核心更大可以點燃碳、氧 … 硫、鐵？

□ 再也沒有核反應，核心終究塌縮

質量越大，縮得越小

Chandrasekhar limit

錢氏極限

✓ 被簡併態電子壓力撐住：**白矮星** 極限：核心 $< 1.4 M_{\odot}$

下道防線：被簡併態中子壓力撐住：**中子星**（有些是脈衝星）

✓ 還是不行：成為時空奇異點：**黑洞**

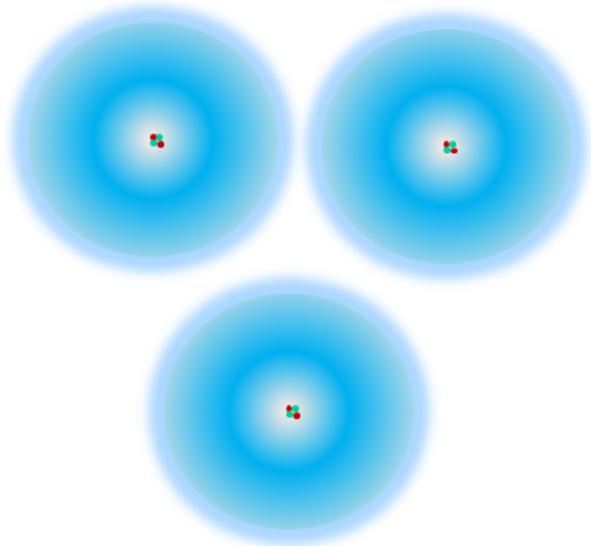
□ 強烈壓縮核心後反彈，外層以和緩（**行星狀星雲** 跟行星無關）

或爆發（**超新星** 不是「星」，也不「新」）方式推出

(理想) 氣體，溫度高、密度高
→ 彼此碰撞 → 熱壓強

簡併氣體，壓強不靠碰撞，而
來自不相容原理 (鳩佔鵲巢)
→ 壓強只跟密度有關

正常物質

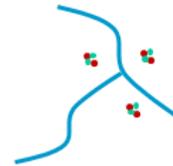


電子以波動機率，分布在
原子核之外特定的軌域內

土壤密度： $3 \times 10^{-3} \text{ kg/cc}$

空氣密度： 10^{-6} kg/cc

電子簡併態 (白矮星)



強大引力將原子核
緊密排列，自由電
子則交錯分布

物質密度： 1000 kg/cm^3

中子簡併態 (中子星)



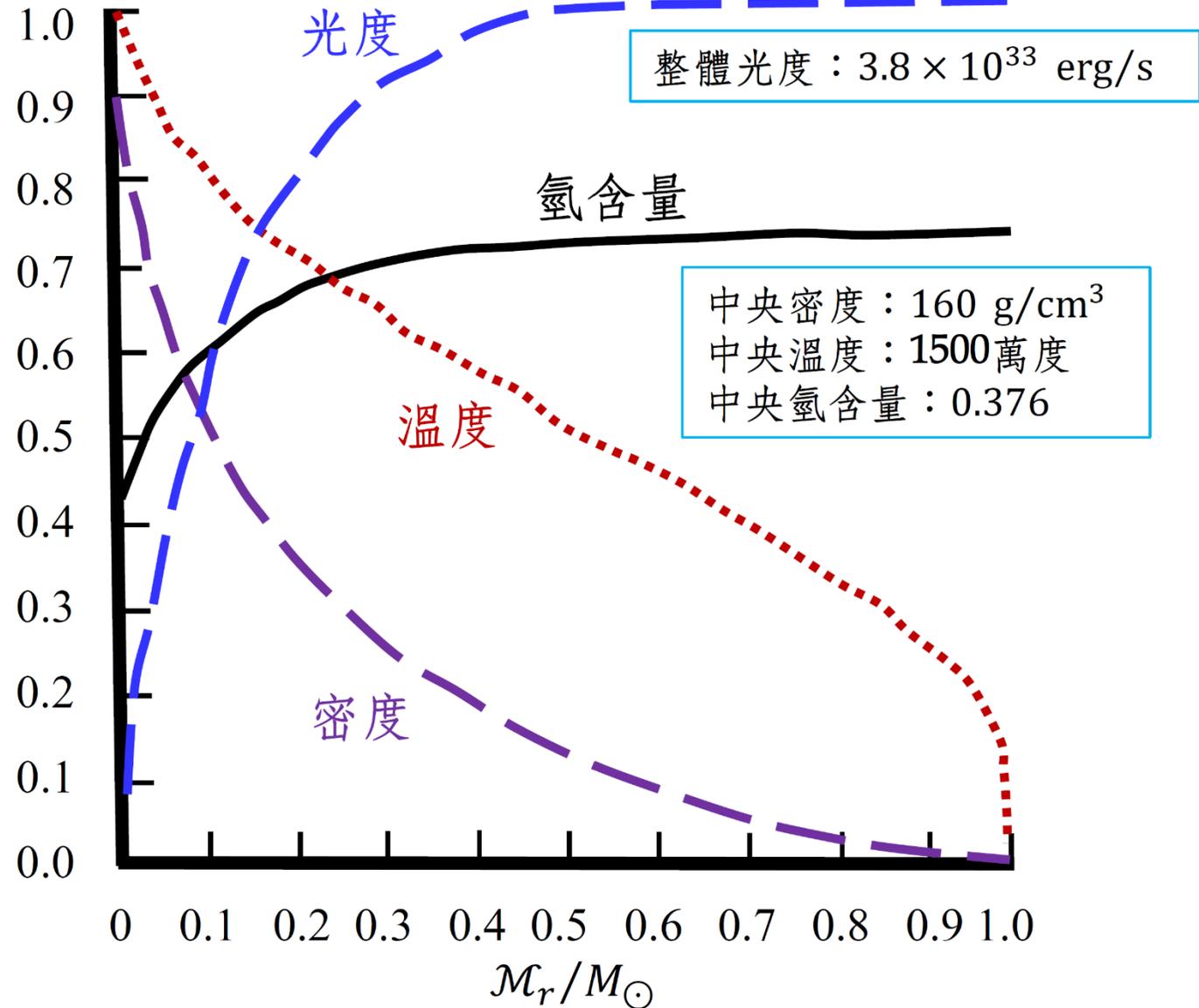
電子與質子結合成為中子

物質密度： $5 \times 10^{11} \text{ kg/cm}^3$

每cc重達5億公噸

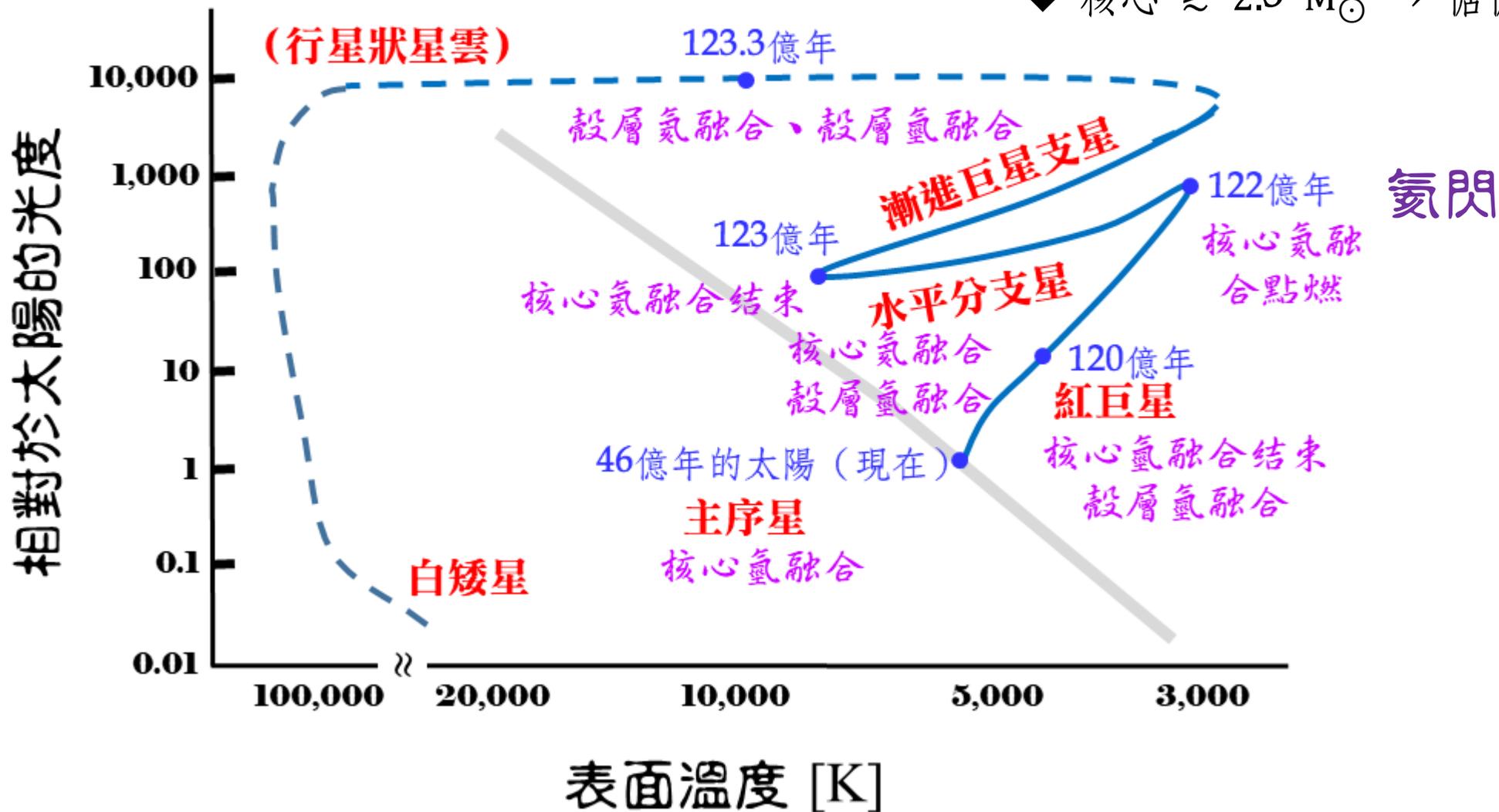
(此為示意圖，未照比例繪製)

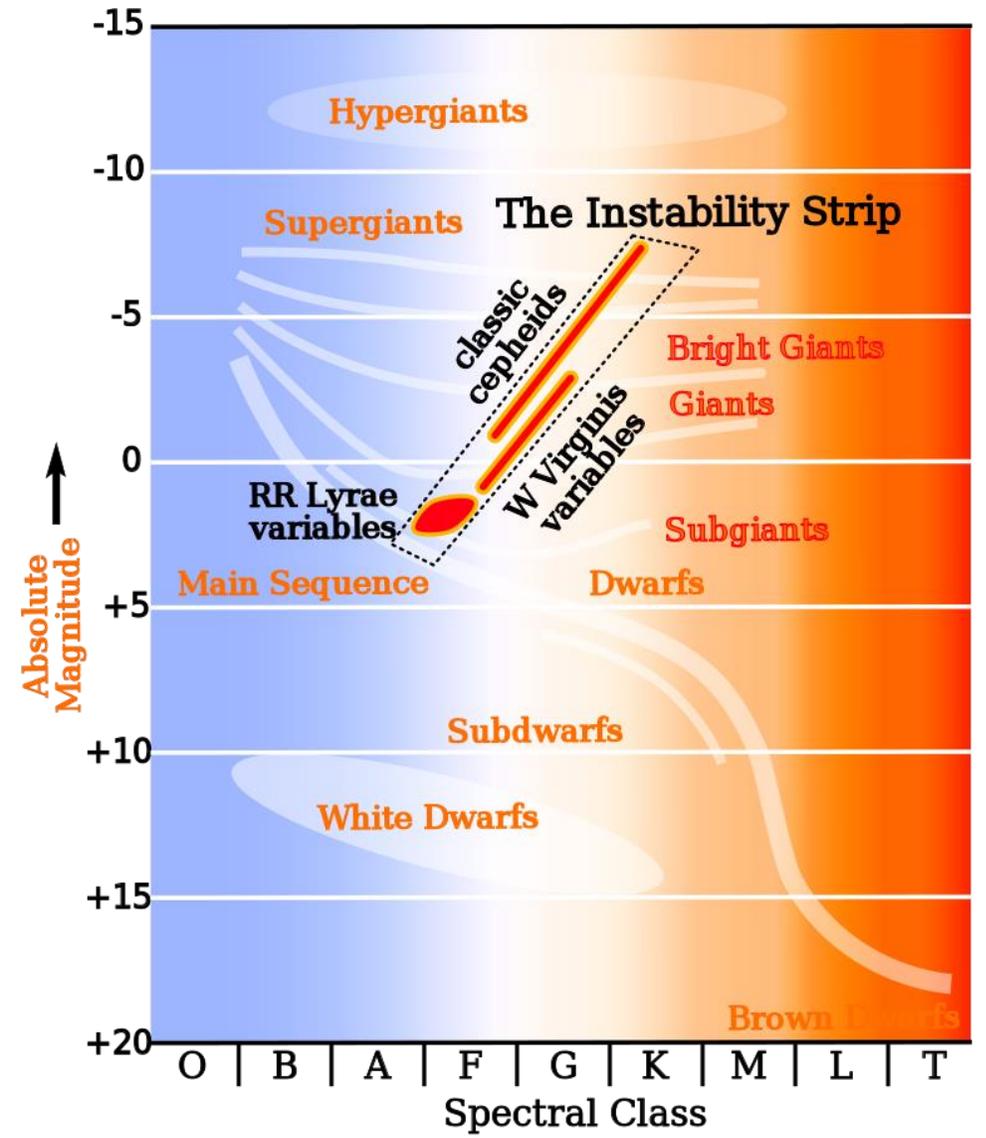
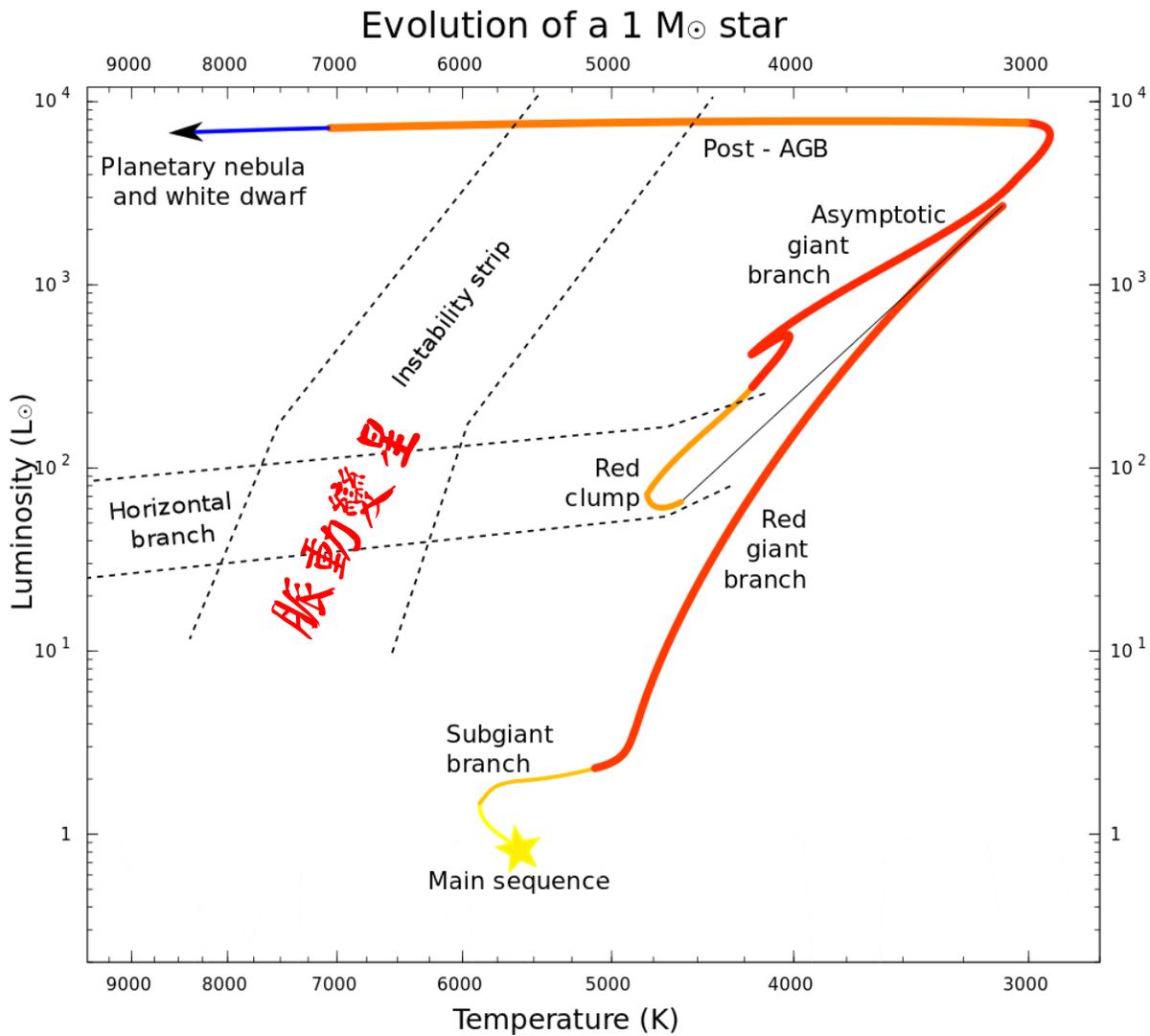
年齡46億年（當今）的太陽數值模型



太陽的演化

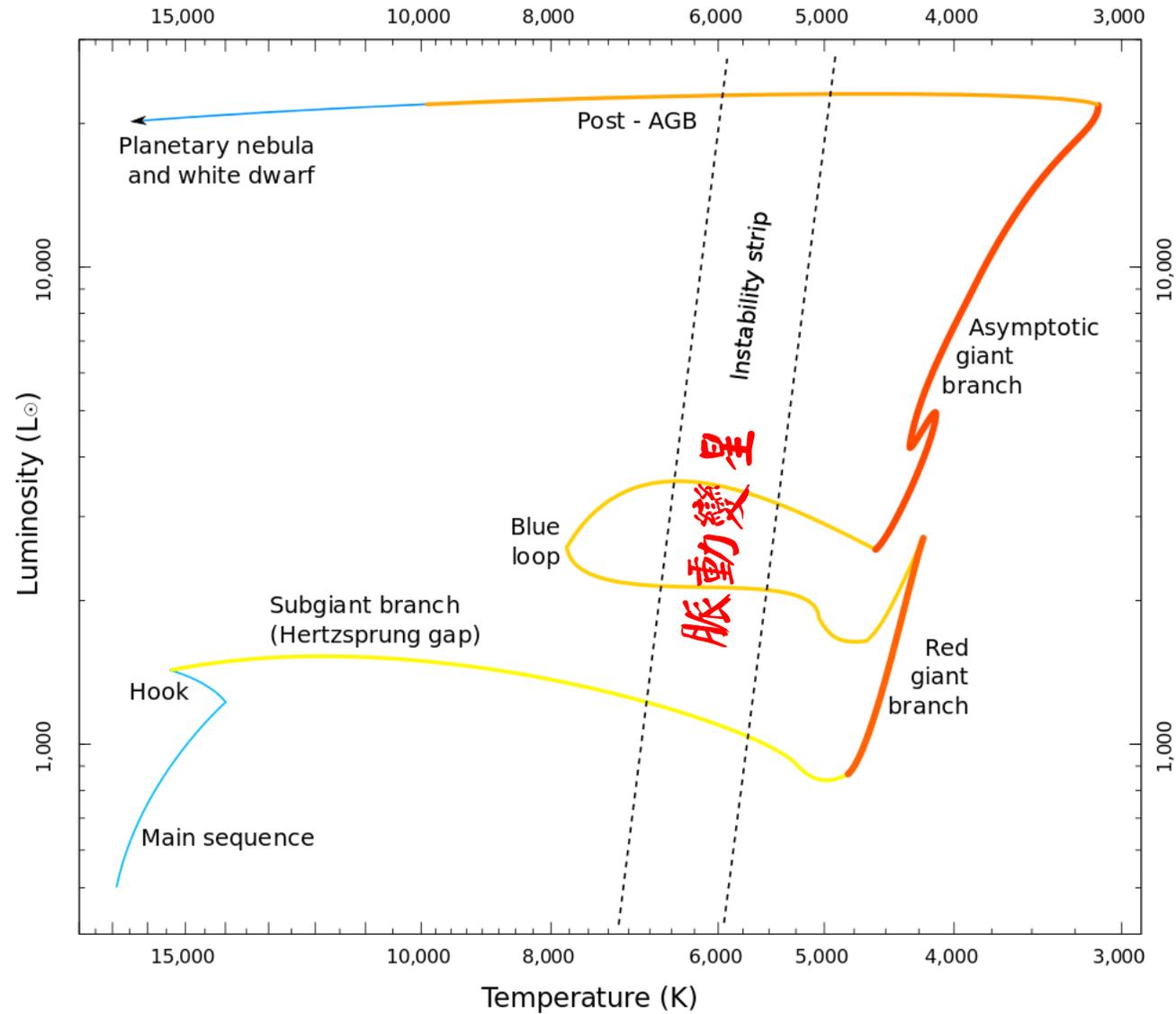
- ◆ 核心 $\lesssim 0.5 M_{\odot}$ → 點不燃 He
- ◆ 核心 $0.5 - 2.3 M_{\odot}$ → 密度高，處於電子簡併態，點燃 He 一發不可收拾 → 氦閃
- ◆ 核心 $\gtrsim 2.3 M_{\odot}$ → 恹恹點燃 He 核



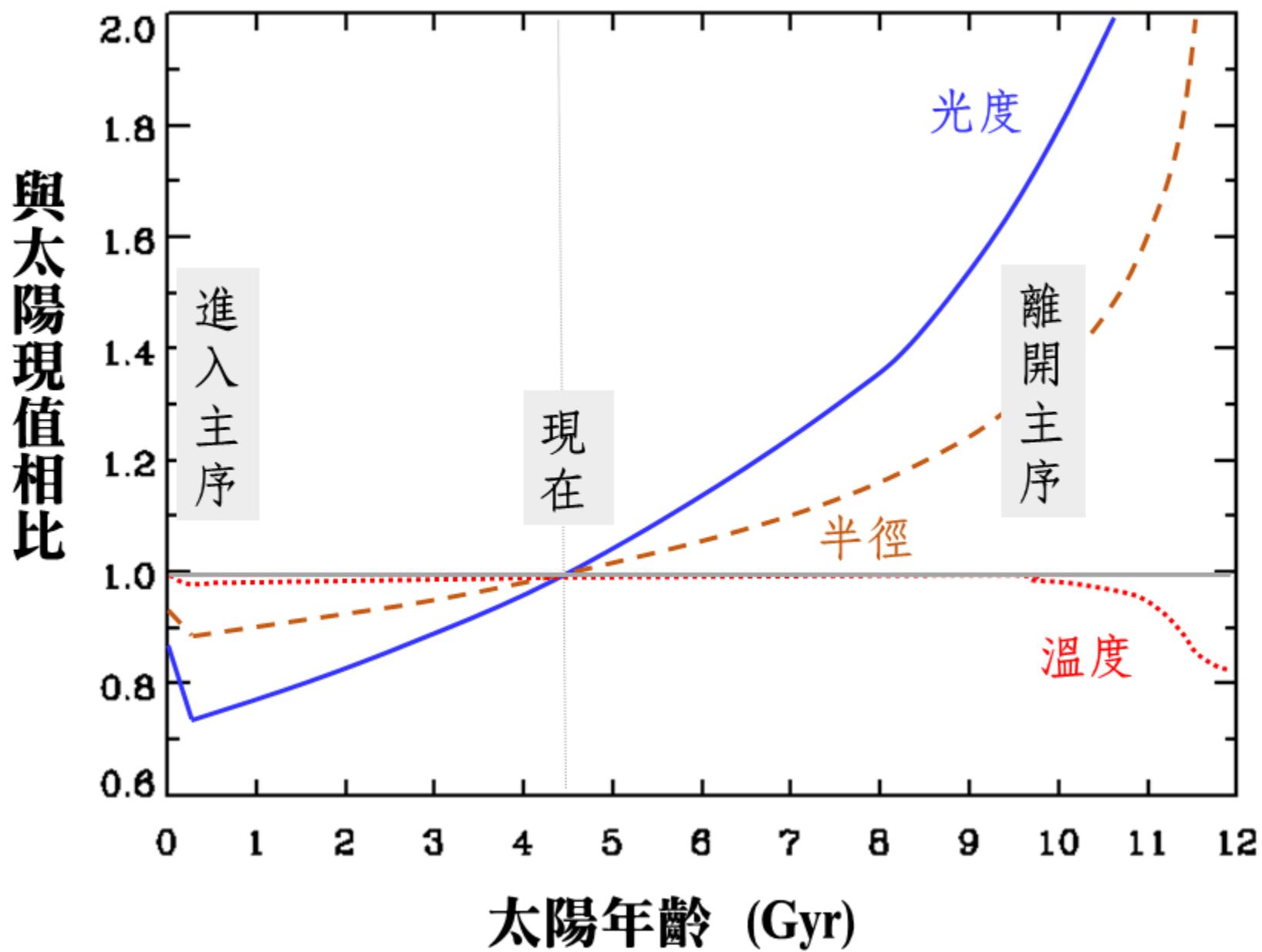


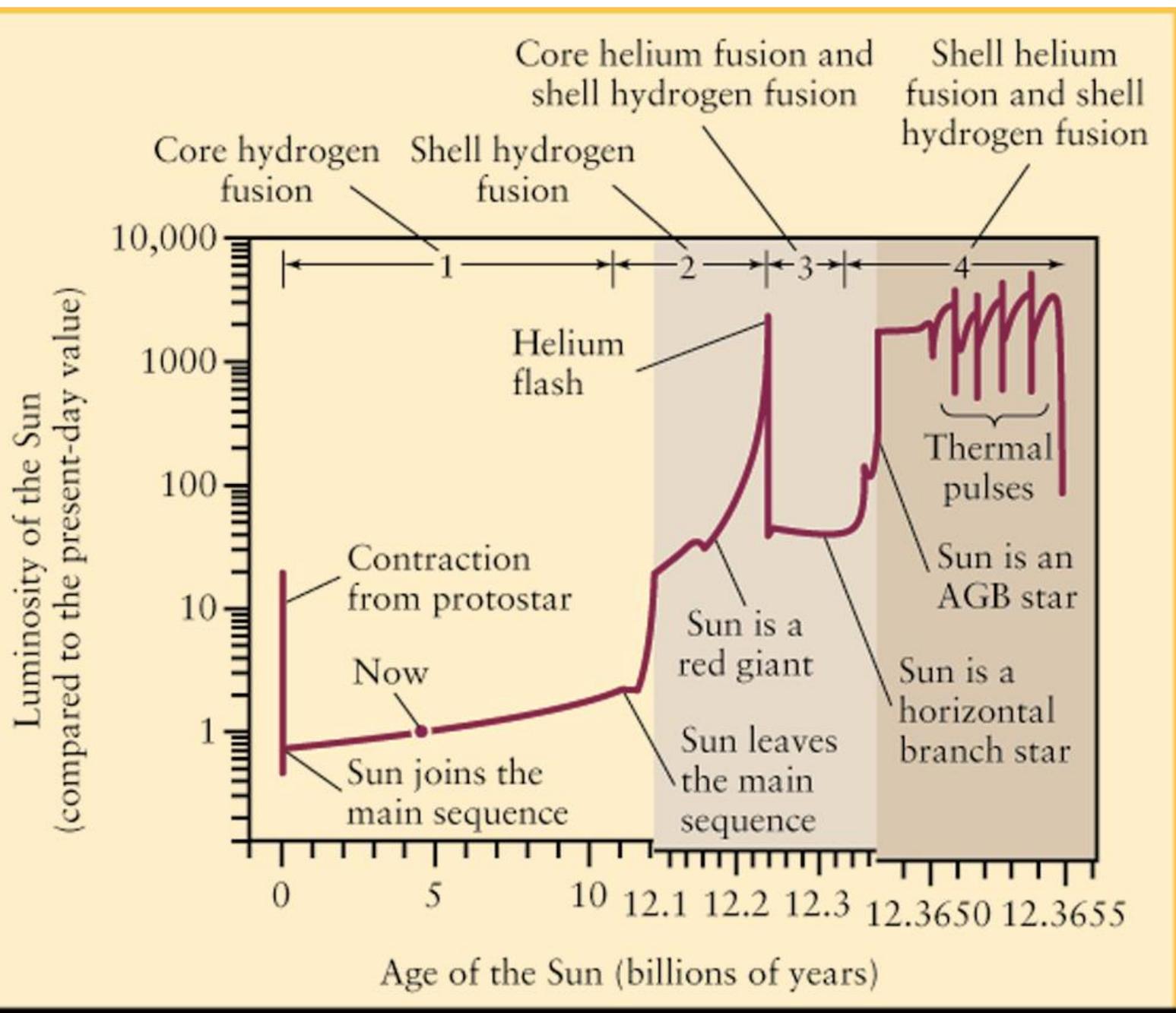
https://en.wikipedia.org/wiki/Horizontal_branch

Evolution of a 5 M_⊙ star

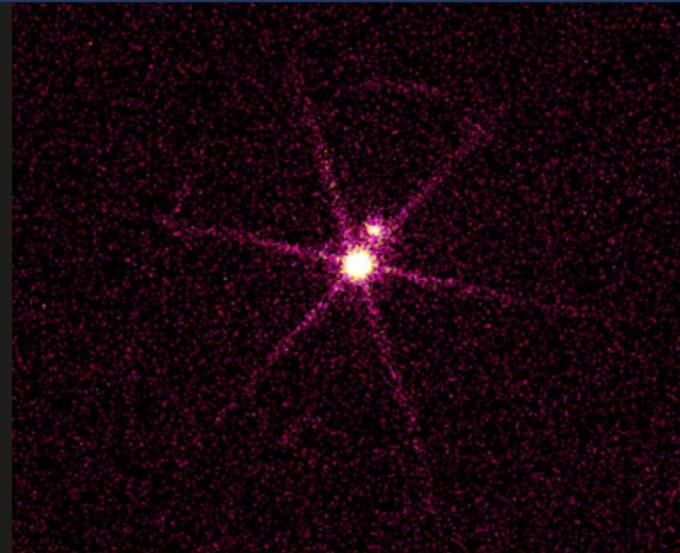
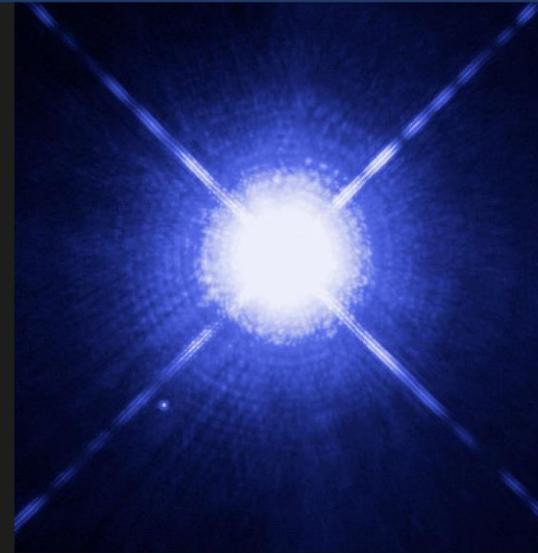


https://en.wikipedia.org/wiki/Blue_loop





天狼星是夜空中最明亮的恆星，有顆白矮星伴星



■ 這張可見光影像中央的亮星是天狼星 A，是顆 A 型主序星。影像中的星芒與光環為望遠鏡光學的效應。在左下方的光點則是天狼星伴星，稱為天狼星 B，是顆白矮星，已經演化到恆星生命後期。（影像來源／NASA/ESA/HST, H. Bond (STScI), and M. Barstow (University of Leicester)）

■ 在 X 光影像中，中央比較明亮的是天狼星 B，溫度低得多的天狼星 A 反而顯得黯淡。星芒與光環為望遠鏡光學的效應。天狼星系統離我們 8.6 光年，雙星彼此繞行一圈約 50 年，跟左圖相比，兩顆星的相對位置已經改變。（影像來源／NASA/SAO/CXC）

■（左圖）照片的右方為獵戶座的亮星，構成獵人圖樣，其中紅黃色那顆是參宿四，是獵戶座主星。沿著腰帶三顆亮星往左（向東），位於中央下方的藍白亮星，稱為「天狼星」，為大犬座主星，是夜空中最明亮的恆星。照片左上的亮星則是「南河三」，是小犬座主星。這三顆亮星構成「冬季大三角」。（影像來源／Akira Fujii）

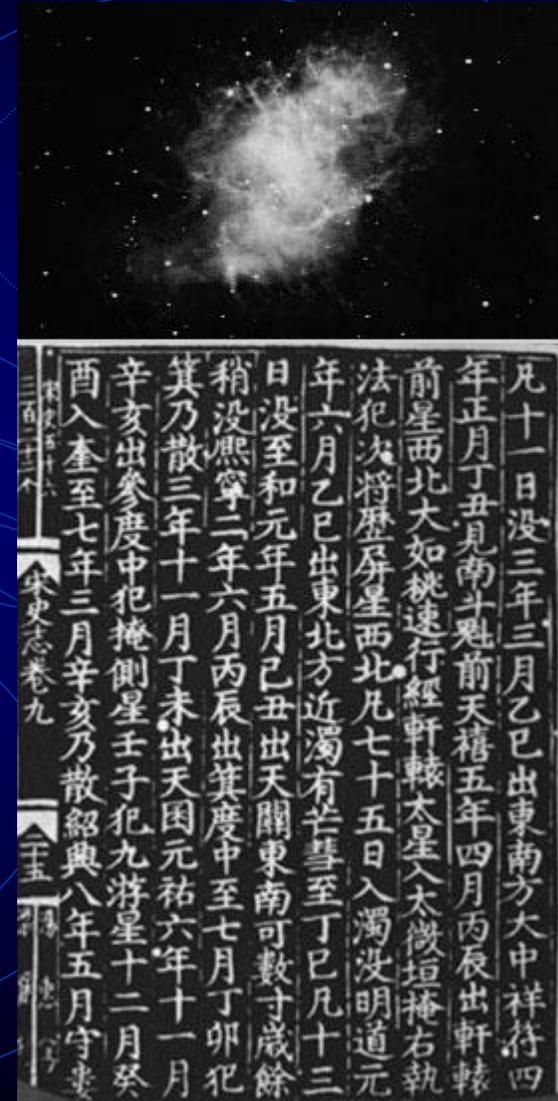
Sirius A, $m_V = -1.46$, $T_{\text{eff}} = 9940 \text{ K}$, 可見光明亮
Sirius B, $m_V = -8.44$, $T_{\text{eff}} = 25000 \text{ K}$, X射線明亮

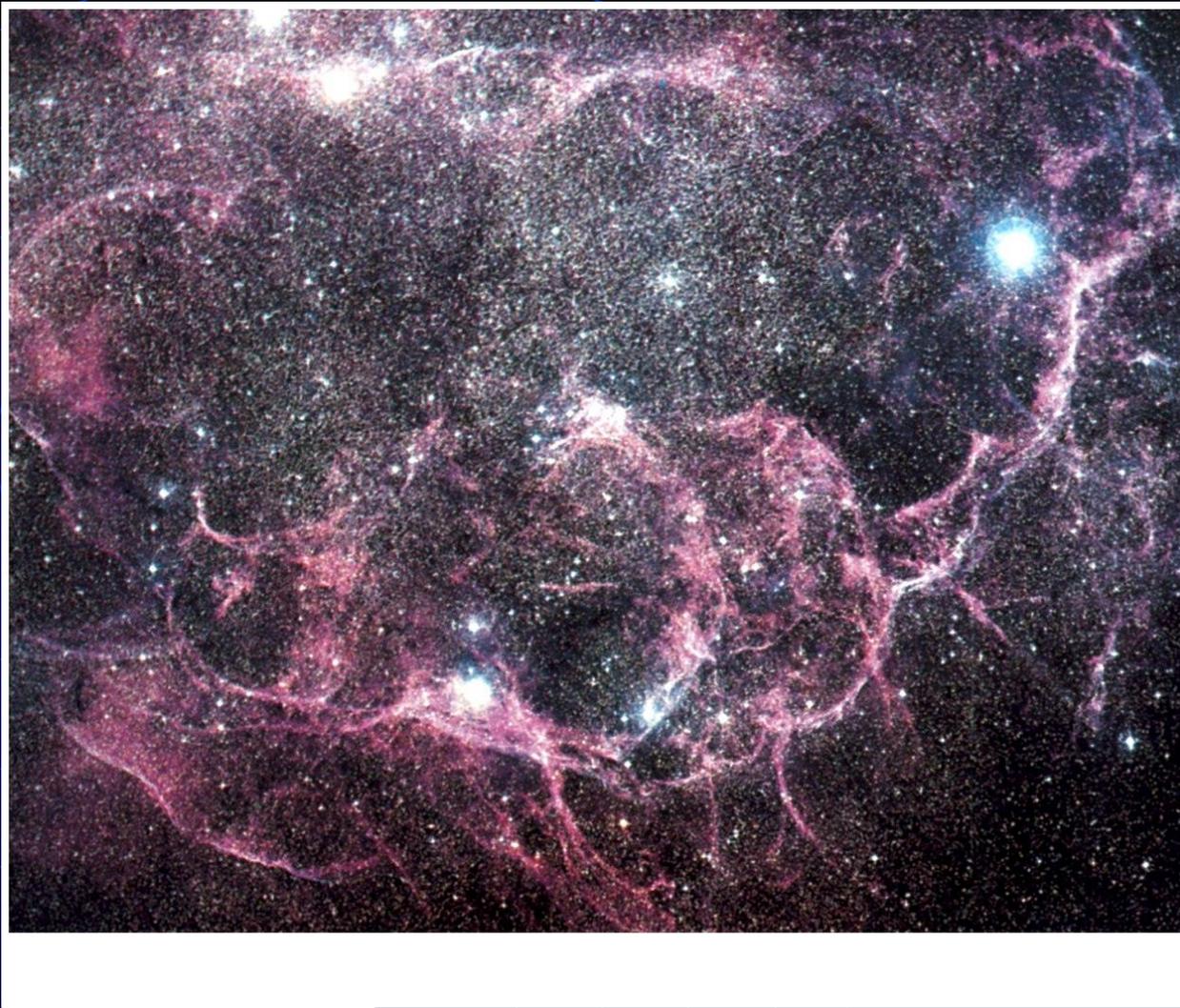
位於金牛座方向的蟹狀星雲 (Crab Nebula)，距離我們 6000 光年，源於 AD1054 年超新星爆發（當時中國天官記錄有詳細記載，故稱「中國超新星」。

星雲本身大小約 7 光年 × 10 光年，以每秒 1500 公里速率向外膨脹



西元 1054 年七月（宋仁宗至和元年五月）金牛座超新星爆炸，據記載最明亮時相當於太白（金星）的光芒，長達 23 天在白天可見，直到 1056 年四月（宋嘉祐元年三月）肉眼才看不見。
天關客星

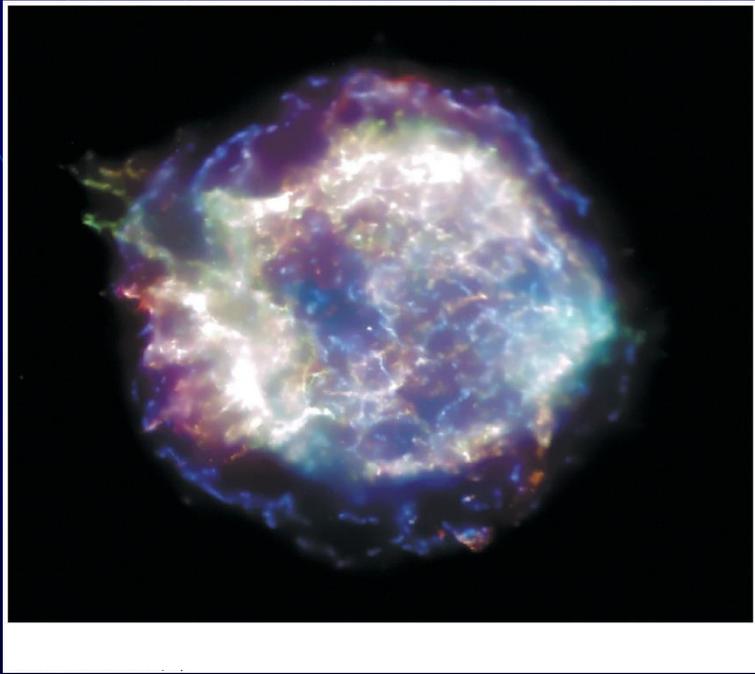




Gum Nebula 是全天空最大的超新星遺骸，來自 11,000 年前的超新星爆發。

Gum Nebula 直徑超過 2300 光年，跨越天空 60 度，離我們最近的部分只有 300 光年

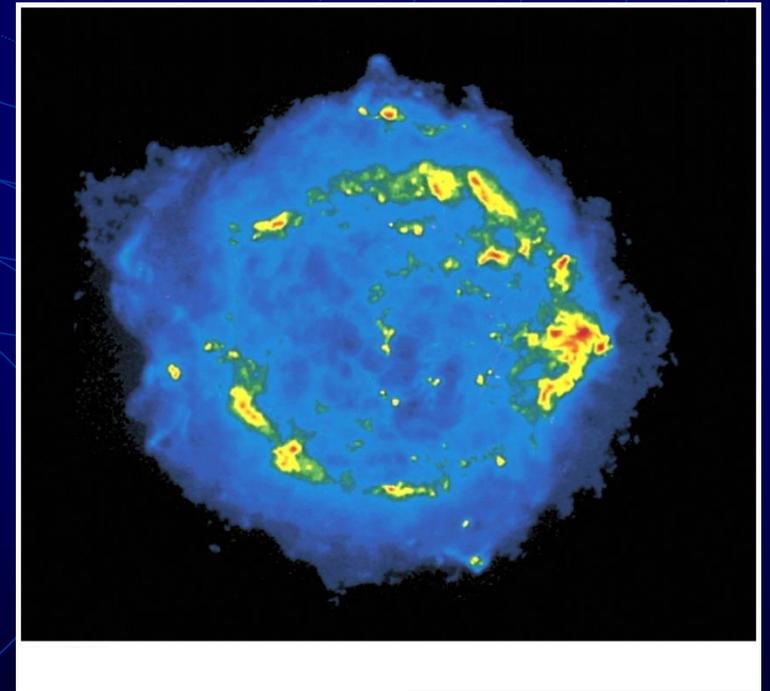
Cassiopeia A 超新星遺骸，離我們10,000光年。地球應該於300年前偵測到爆發事件，但歷史並無記載



X rays



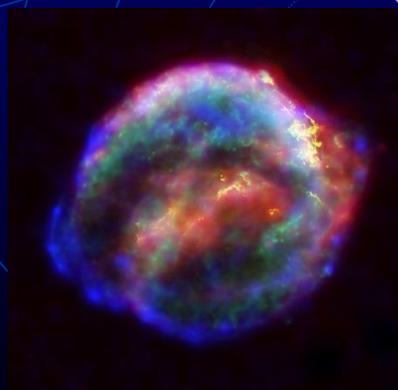
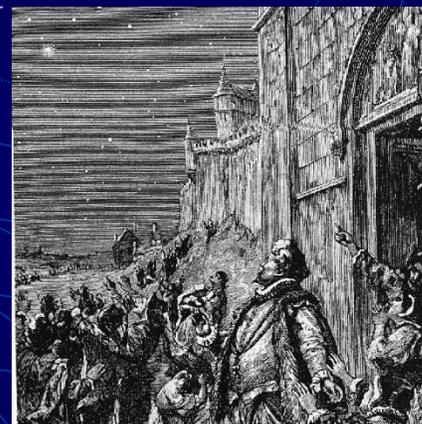
Visible
(HST)



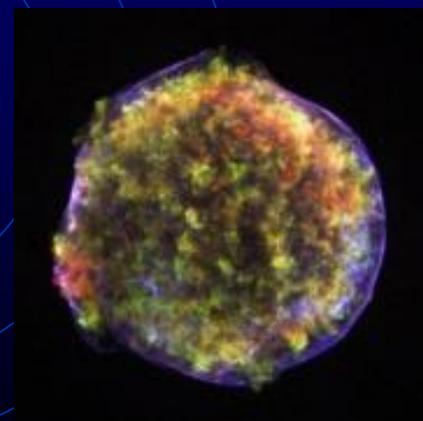
Radio

歷史記載的超新星（銀河系內）

- (OB association in Scorpius-Centaurus 在2百萬年前距離地球 < 150 光年，曾發生超新星爆發)
- 1054 AD 中國超新星
- 1572 Tycho supernova
- 1604 Kepler supernova
- 下一個？



Chandra SN1604



Chandra SN1572



銀河系鄰近的星系 Large Magellanic Cloud 當中，原來不起眼的某顆星，於1987年2月在地球上看到其爆發，耀眼異常，稱為 **SN1987A**



09/1994

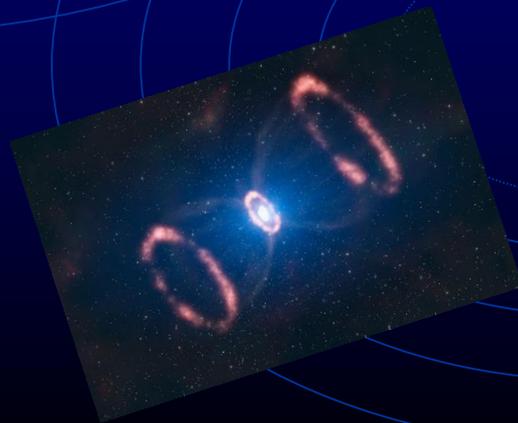




Image and text copyright © Akira Fujii

王為豪 拍攝

<http://www.astrographics.com/GalleryPrintsIndex/GP1614.html>

The Expanding Crab Nebula

1973 to 2001



超新星的種類

- 單一大質量恆星衰亡後，核心變成超新星

→ Type II supernovae

- 光譜裡有明顯氫線
- 最亮時達絕對星等 -17 等，光度變暗有急緩

- Semi-detached 雙星系統中白矮星可能藉由吸積伴星物質，造成核心碳融合，而引發超新星爆發

→ Type Ia supernovae

- 光譜裡沒有氫線
- 最亮達 $M \sim -19$ 等，之後緩緩（1 年）變暗

$M \lesssim 0.1 M_{\odot}$ 質量太小，無法點燃核反應（**棕矮星**），有如行星，形成後持續變冷、變暗 **恆星質量下限**

$M \lesssim 0.4 M_{\odot}$ 最低質量恆星（**紅矮星**），結構上大規模對流
→ 離開主序時，氫元素幾乎全部用罄，不會演化成巨星
→ 星體冷卻，成為黑矮星
這種恆星壽命比宇宙年齡還長，黑矮星都還沒死！

$0.4 \sim 8 M_{\odot}$ 低質量水平分支的巨星，其核心溫度約2億 K，不足以點燃需要6億 K 的碳與氧的融合反應 → 剩下碳氧核心

→ 氦殼層融合 → 星體再次膨脹。由於有兩層融合反應，這次體積變得更大，演化進入 **asymptotic giant branch (AGB) 漸近巨星支**

- 8 倍太陽質量的 AGB 星其半徑達火星軌道，光度達 $10^4 L_{\odot}$
- AGB 階段之後，成為 supergiant（**超巨星**）

8~25 M_{\odot} 核心消耗速度快，收縮快，以劇烈方式點燃下級核反應
 (越來越快) 核心萬有引力強，連擠壓原子的力量都撐不住
 → 貼在原子核外面的電子被擠進原子核，結合成中子 → 中子星
 劇烈收縮造成強力反彈，把外層爆發開 → 超新星 亮度媲美整個星系

$M \geq 150 M_{\odot}$ 實際數字不詳；核反應極快，引力無法平衡強大輻射壓，
 沒有穩定結構 恆星質量上限

TABLE 13-1 Evolutionary Stages of a 25- M_{\odot} Star

Stage	Central temperature (K)	Central density (kg/m ³)	Duration of stage
Hydrogen fusion	4×10^7	5×10^3	7×10^6 yr
Helium fusion	2×10^8	7×10^5	5×10^5 yr
Carbon fusion	6×10^8	2×10^8	600 yr
Neon fusion	1.2×10^9	4×10^9	1 yr
Oxygen fusion	1.5×10^9	1×10^{10}	6 mo
Silicon fusion	2.7×10^9	3×10^{10}	1 d
Core collapse	5.4×10^9	3×10^{12}	0.2 s
Core bounce	2.3×10^{10}	4×10^{17}	milliseconds
Supernova explosion	about 10^9	varies	hours

據估計太陽還可以繼續存活50~70億年。一旦核心的核子燃料（氫、氦...）用完，核心收縮成「白矮星」（靠電子彼此推擠抵擋引力）

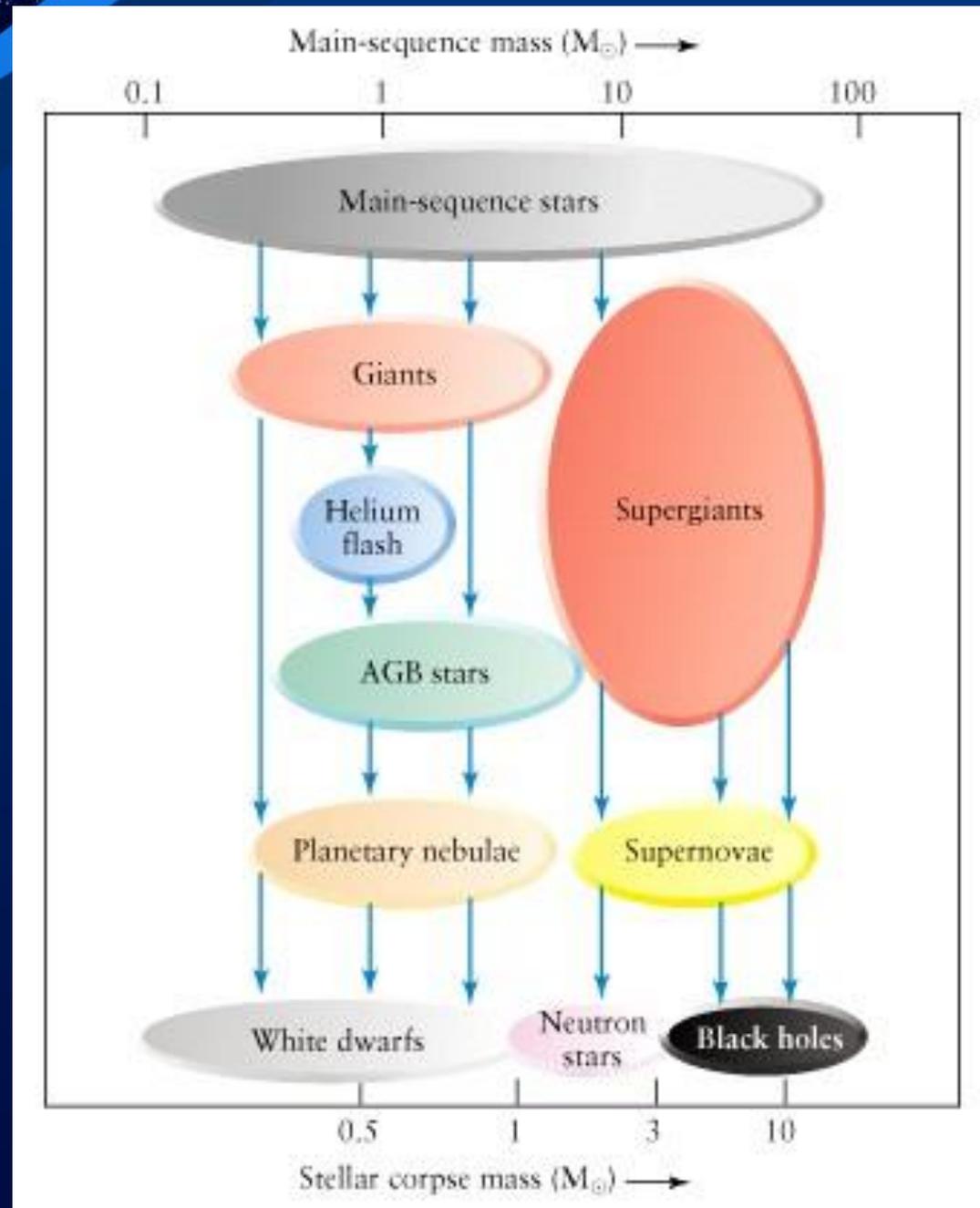
比太陽質量更大的恆星，一旦核心燃料用完，收縮成「中子星」（靠中子彼此推擠抵擋引力）

質量超過差不多太陽八倍的恆星，一旦核心燃料用完，就收縮成「黑洞」（連中子彼此推擠也抵擋不住引力）

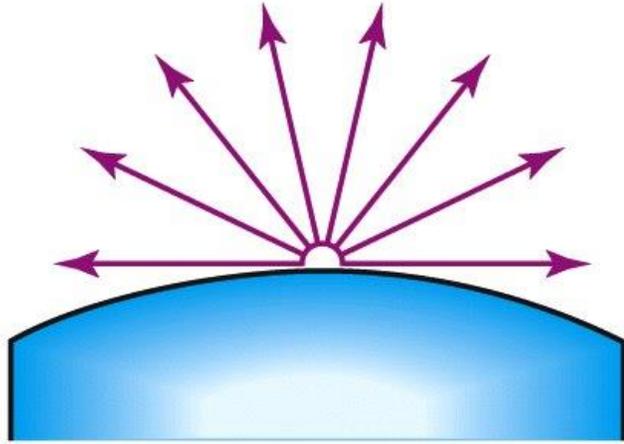
恆星在主序時的質量

質量流失

恆星死亡時（核心）的質量

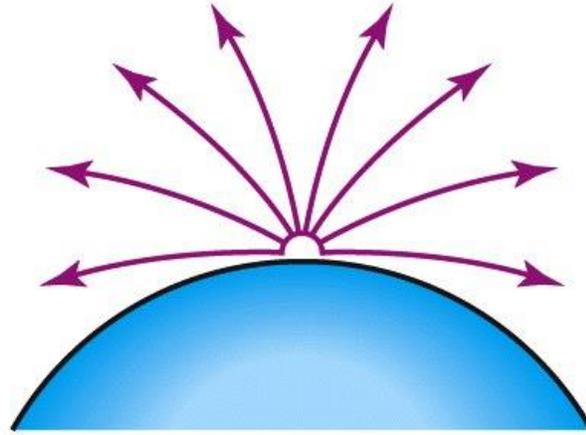


一般恆星引力小，發出的光線幾乎不受影響



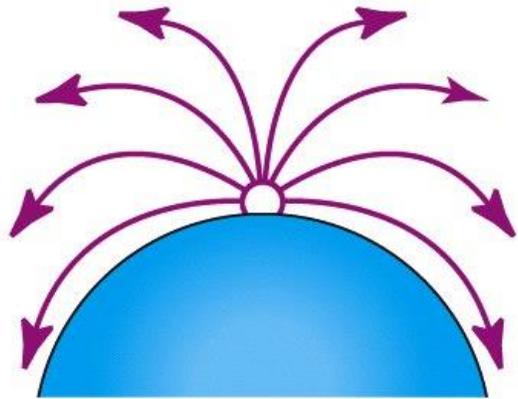
(a)

白矮星引力大，發出的光線稍許彎曲



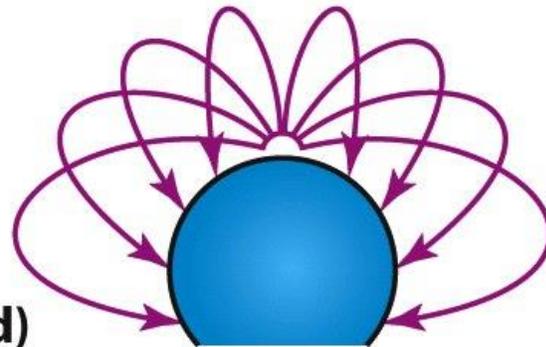
(b)

中子星引力非常大，發出的光線明顯彎曲



(c)

黑洞引力極大，發出的光線彎曲回去



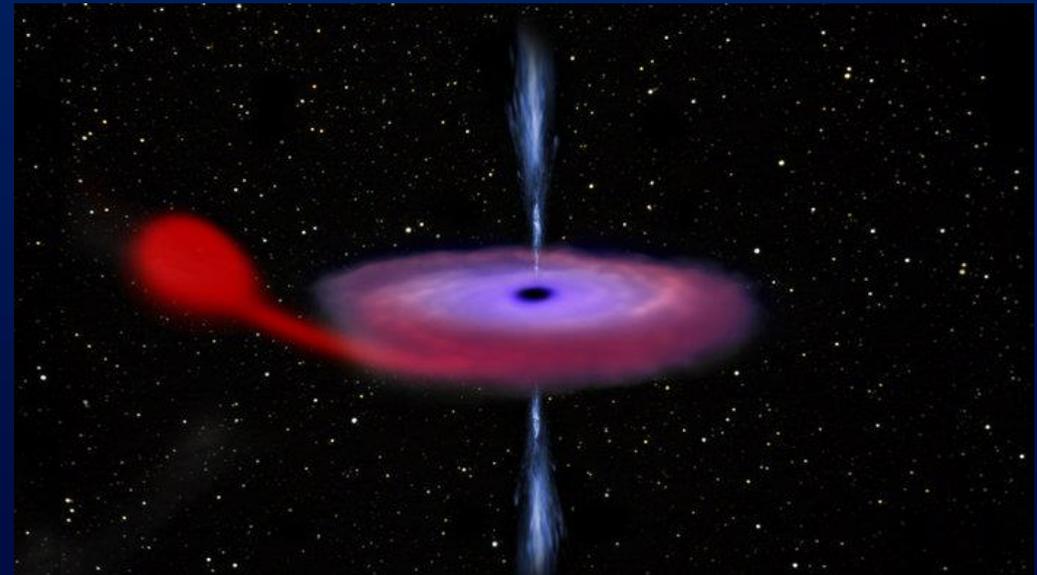
(d)

利用黑洞對伴星的引力作用，藉以發現黑洞

黑洞不發光，那怎麼觀察？

1. 引力對周遭物體的影響
2. 擋住光線
3. 吸積盤（阻力）、噴流
4. 重力波

黑洞周圍可以非常明亮



恆星級黑洞

例如與其他星球互繞、合併



中等質量黑洞

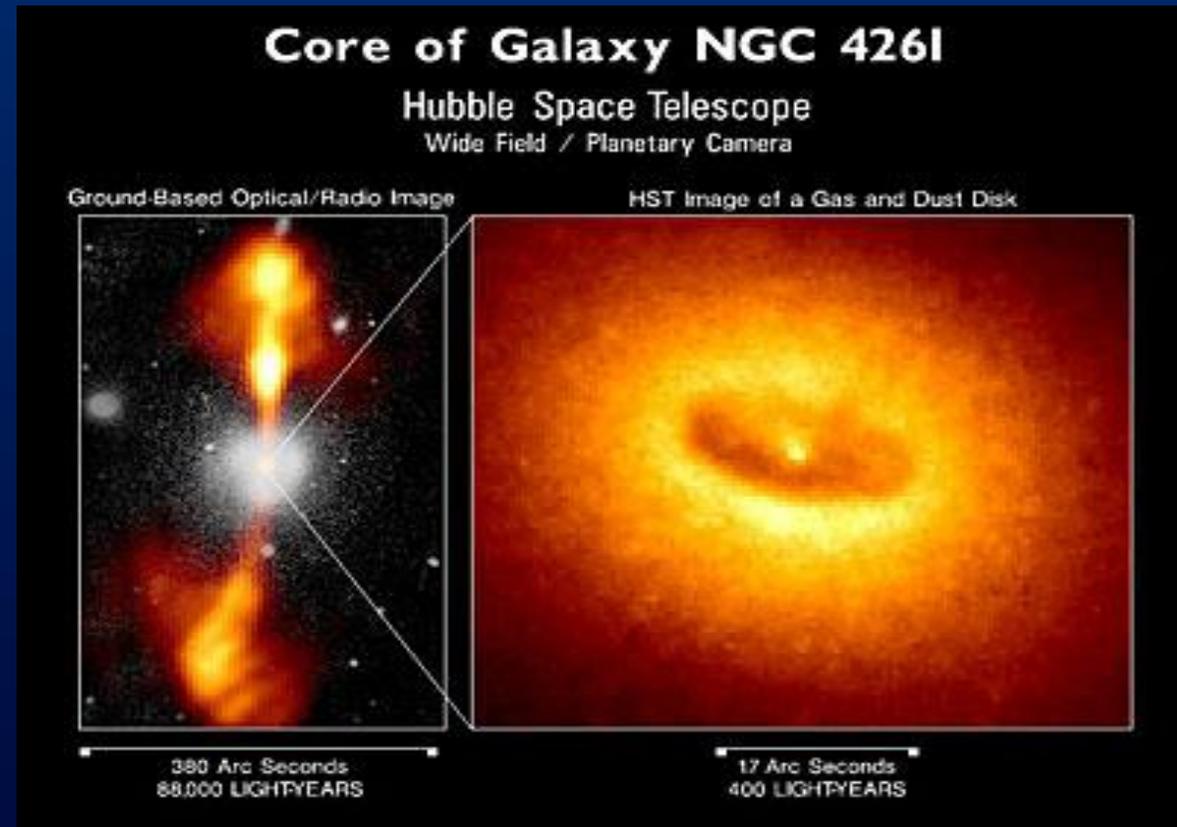
某地區存在「很多」恆星、很明亮
例如球狀星團中心的黑洞

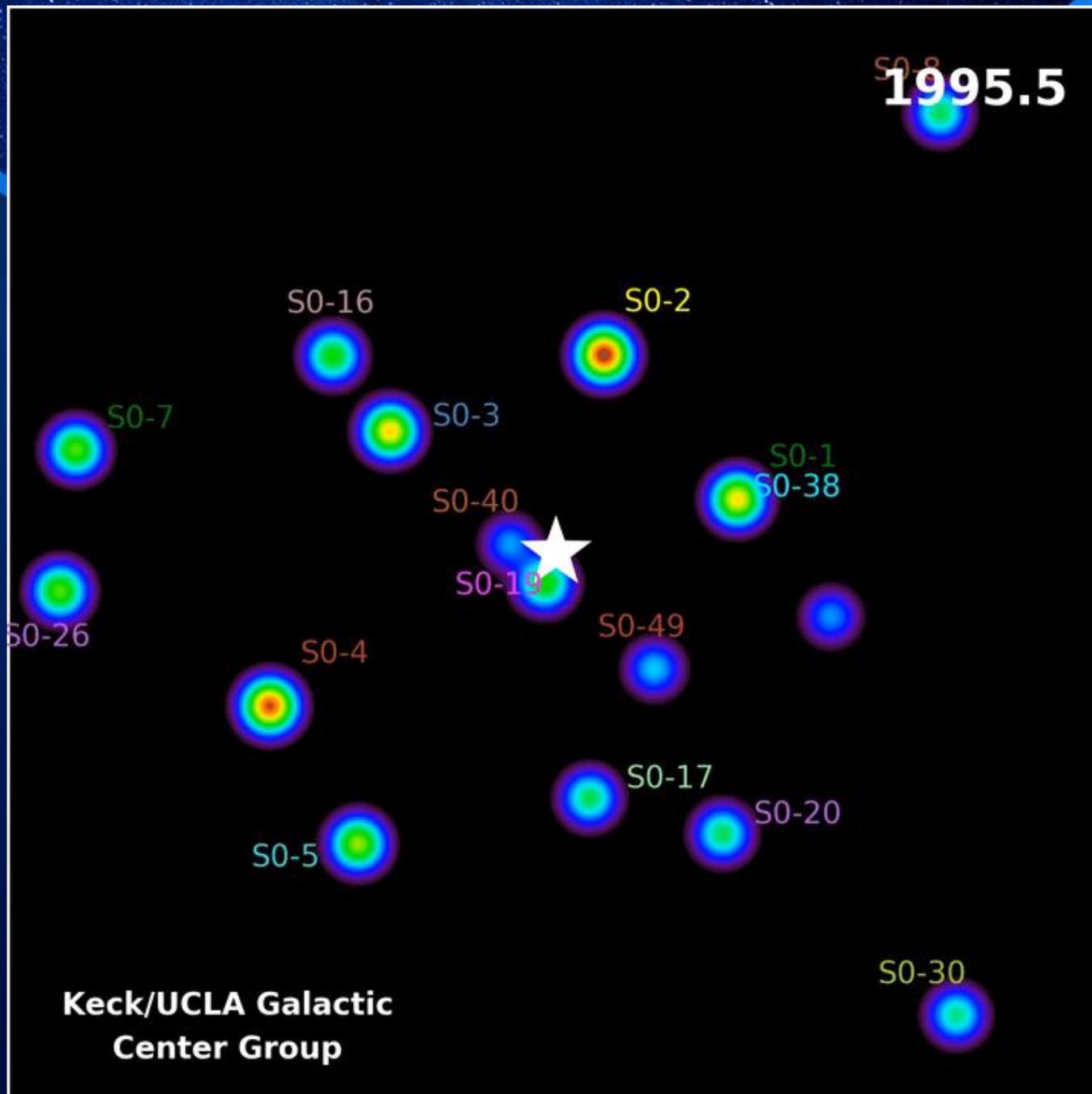
超大質量黑洞

某地區沒看到東西，但是周遭天體
(恆星、氣體) 動得很快

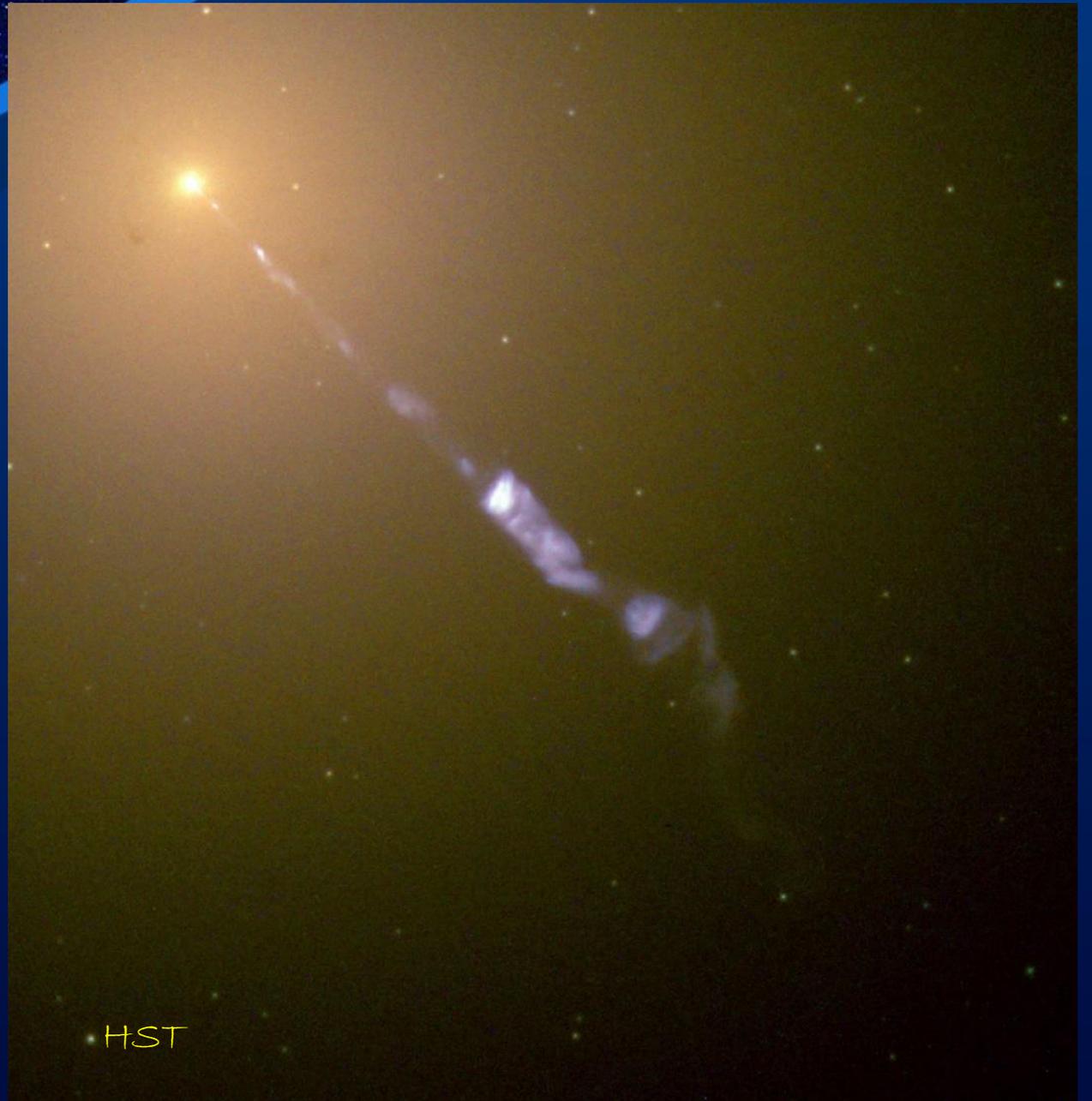
例如銀河系中心4百萬倍
太陽質量的黑洞

某些星系核心有數億倍
太陽質量的黑洞

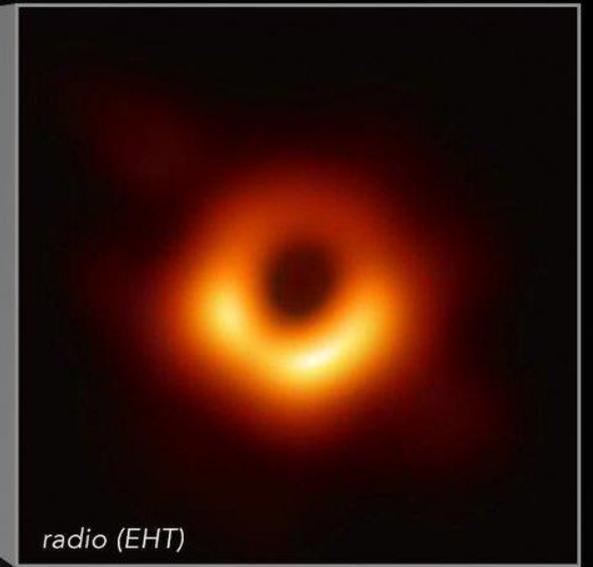
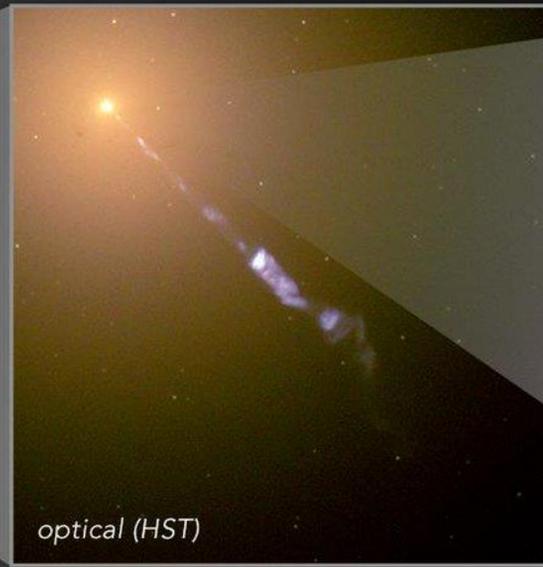
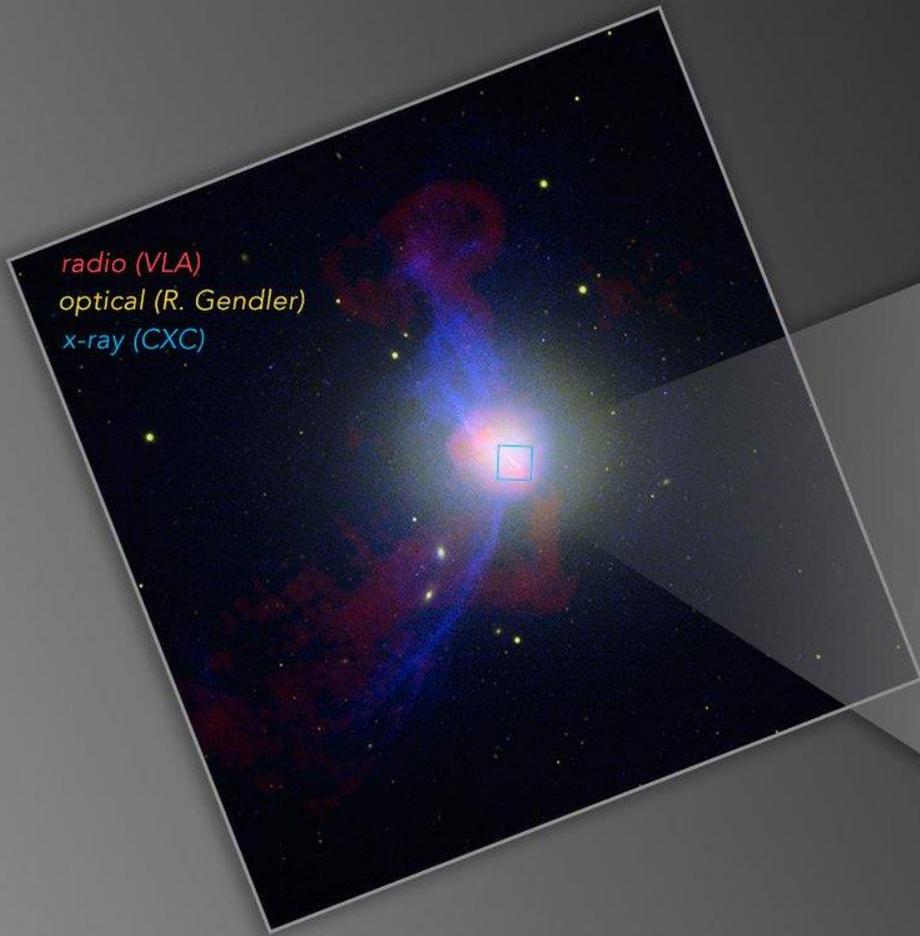




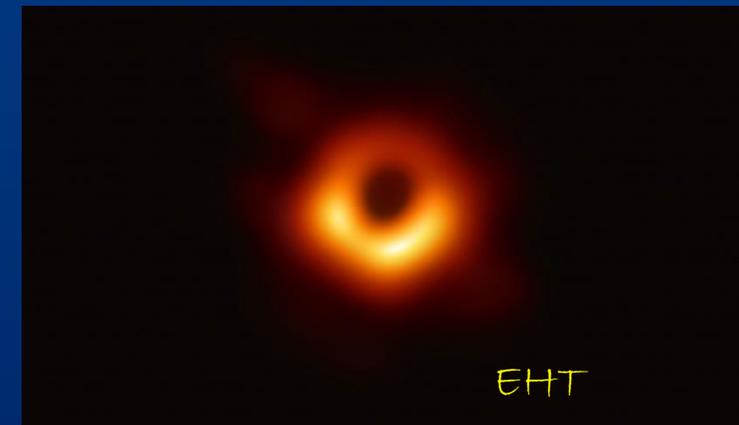
銀河系中心恆星的運動顯示有個大質量、但看不到影像的物體



M87's Black Hole in Context

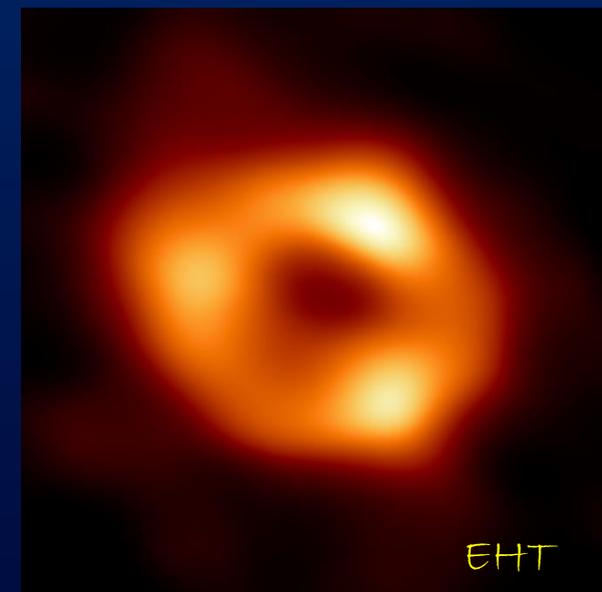


2017年「事件視界望遠鏡」(Event Horizon Telescope) 取得M87星系核心「超大質量黑洞」(相當於8億個太陽質量，大小38億公里) 的剪影



光線來自電子同步輻射，一邊比較亮是因為黑洞自轉造成的都卜勒效應

2022年公布銀河系中心 Sgr A* 超大質量黑洞的影像



黑洞成為觀測科學！

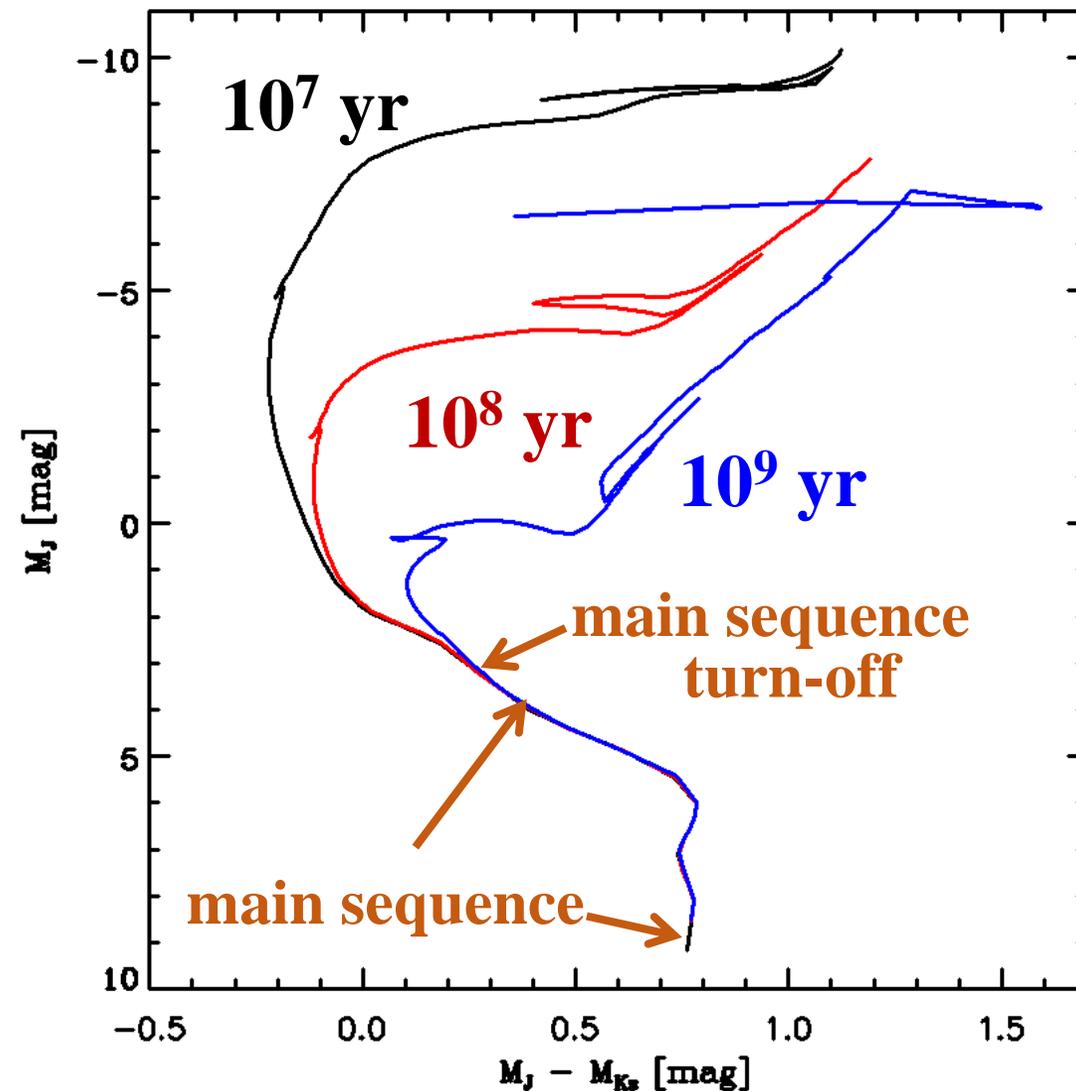
宇宙本身就是個黑洞？

10^{53} kg, $R_s = 1.3 \times 10^{26}$ m (137 ly)

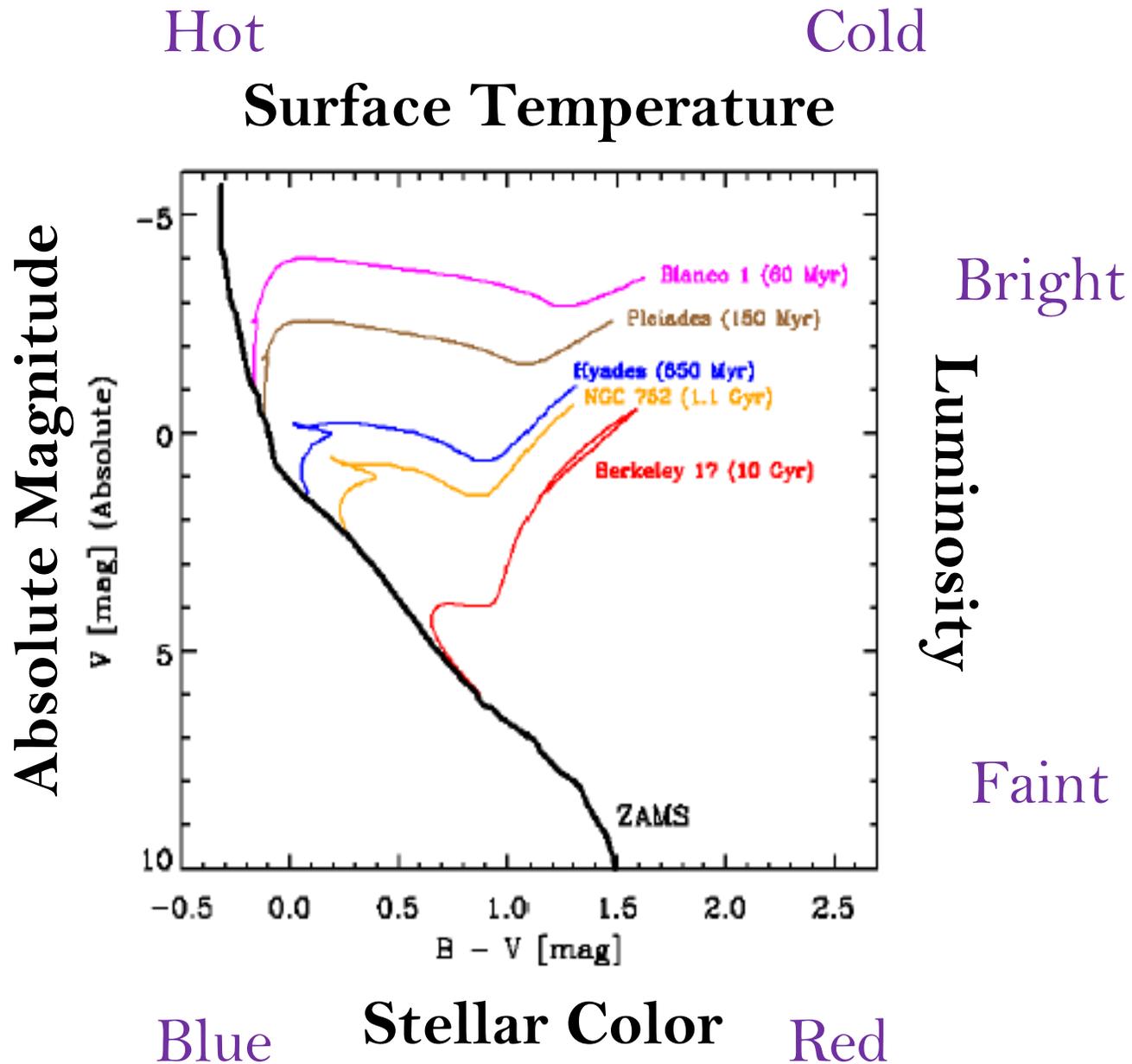
所以光線跑不出去；外面另有洞天？

宇宙原始黑洞？

- 星團當中的成員源於相同分子雲
- 距離、運動、成分、年齡相同，但不同質量成員星各自演化
- 星團的 CMD (顏色星等圖) 可以用來估計距離與年齡
- 研究恆星演化的有用工具



觀測到的星團 CMDs



結論：所謂「恆星」種種 …

- 太空中 … 氣體 … 自我引力 … 核反應 … 靜力平衡 …
穩定發光發熱
- 提供地球生命（及宇宙）重要的能量來源
- 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）
- 壽命百萬年到百億年
- 源於塵土、歸於塵土
- 星團、雙星、系外行星 …