

恆星的生老病死



- 之於生：星際物質與恆星形成
- 之於老：恆星演化（平衡）
- 之於病：結構不穩
- 之於死：衰亡與再生



中央大學

陳文屏
天文所

2022.06.10@成功大學 宇宙的漣漪：科學藝術相對論

<https://www.astro.ncu.edu.tw/~wchen/Courses/StellarEvo/starLife.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



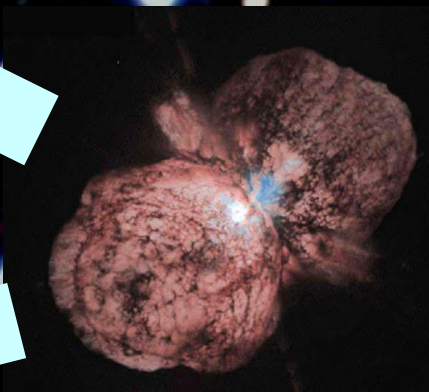
恆星在濃密分子
雲核中成群誕生

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

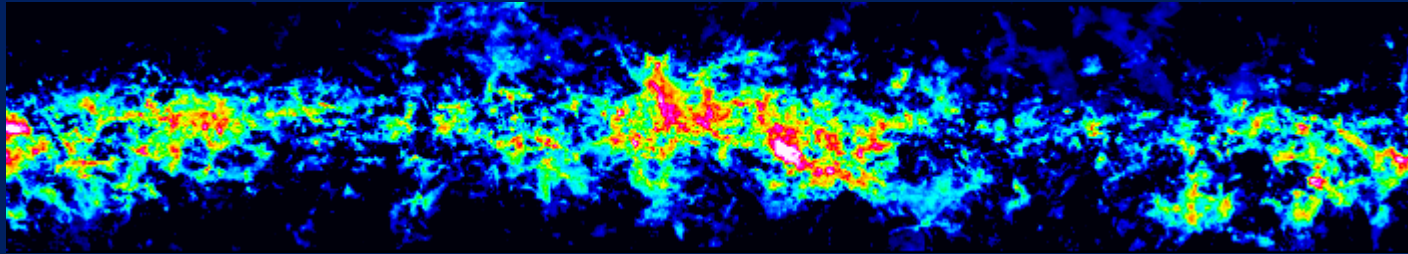
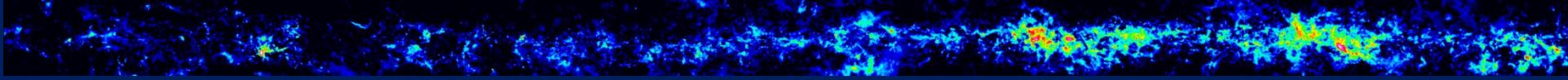


日常空氣每cc約含 10^{19} 個氣體粒（分）子
星際太空每cc約含 1 個氣體粒（原）子

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）

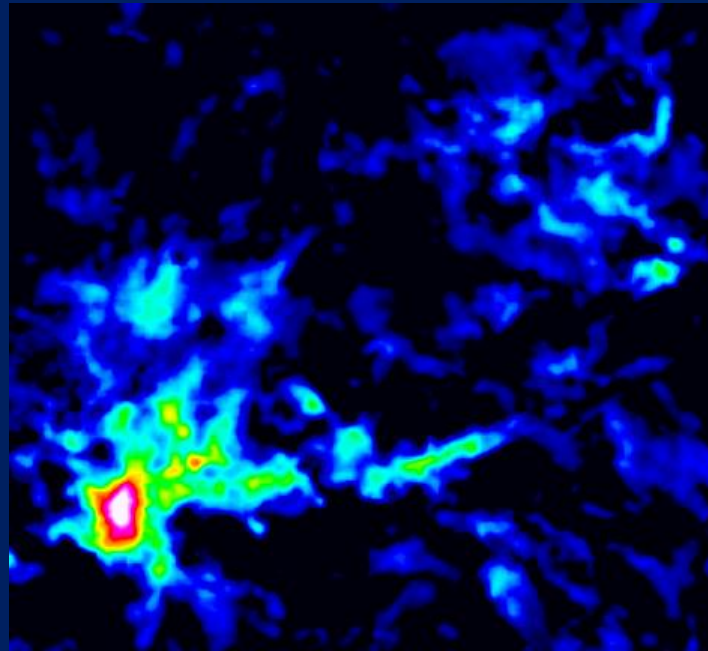
銀河系（盤面）中的分子雲



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

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



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

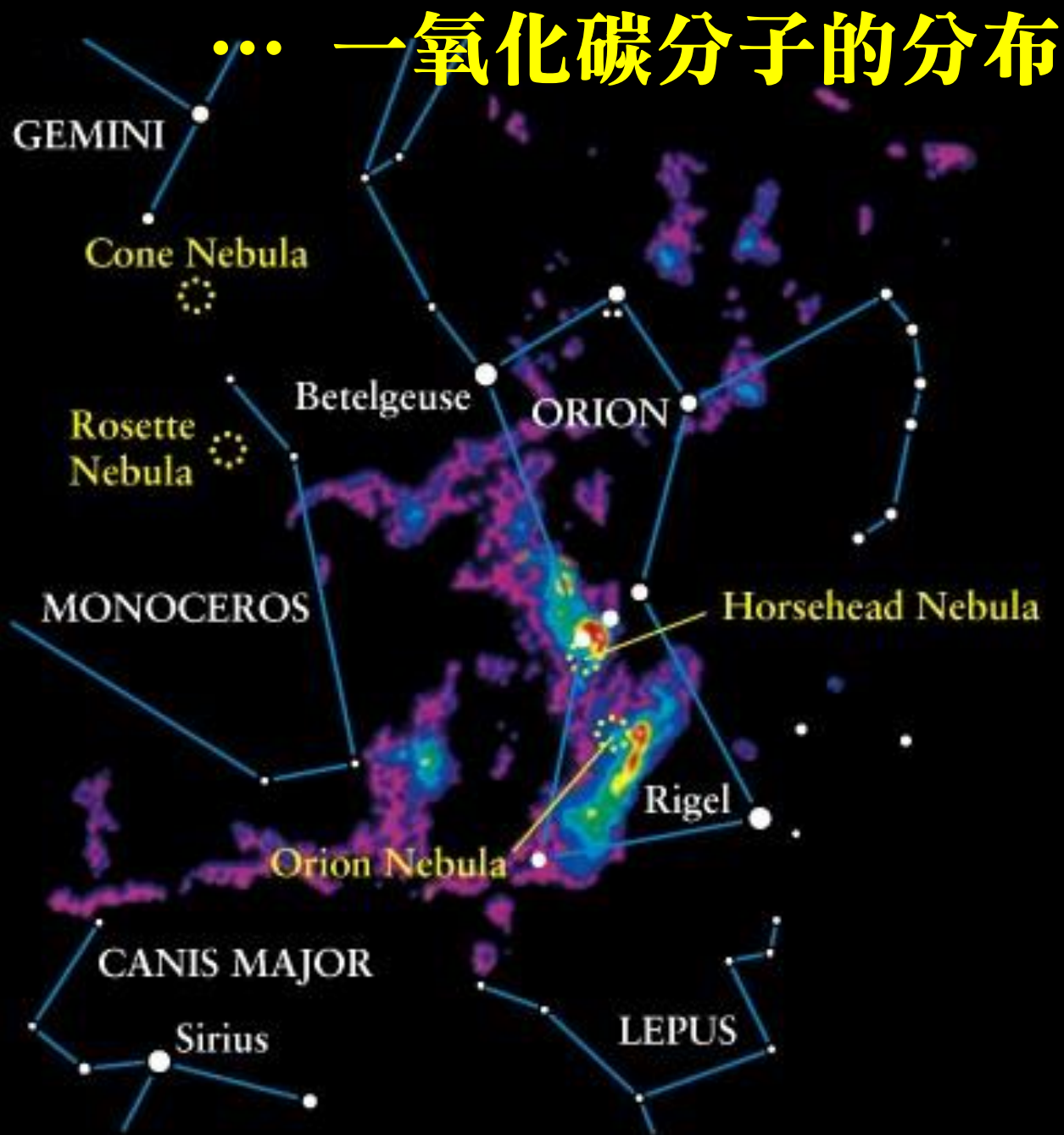
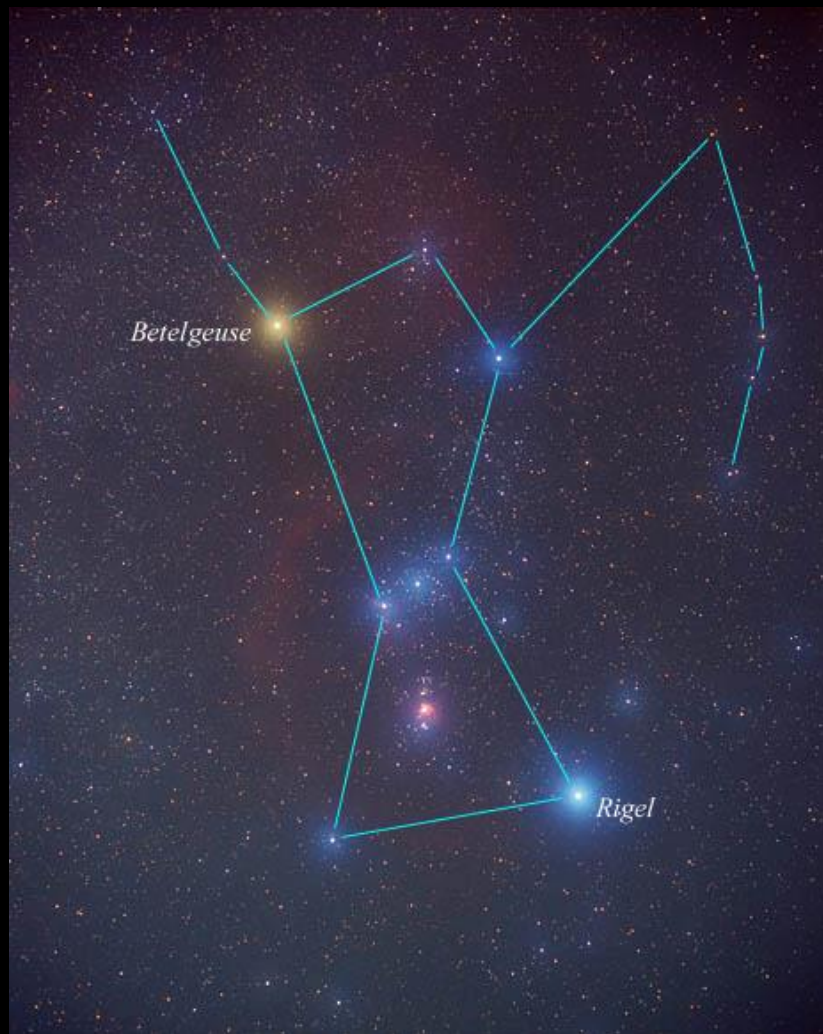
Horsehead Nebula



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>



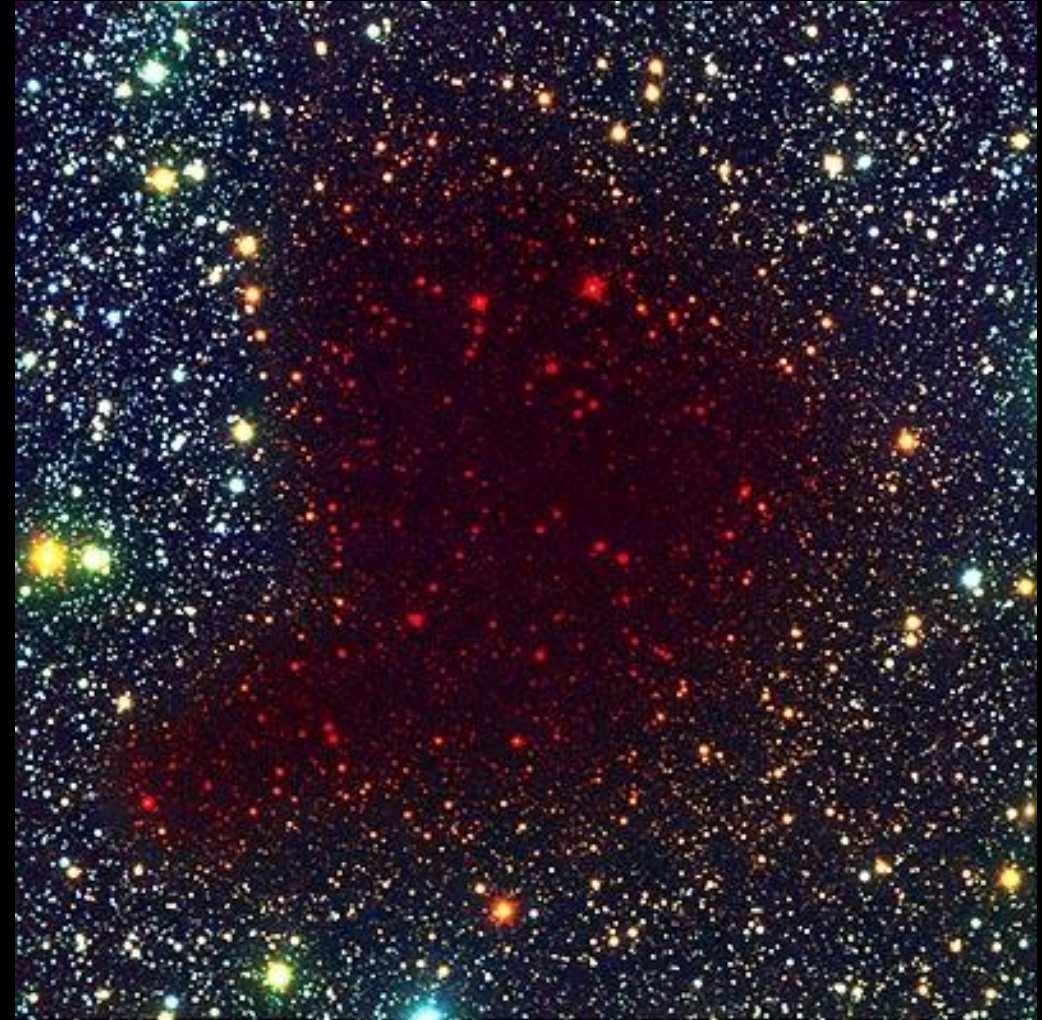
Barnard 72

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)

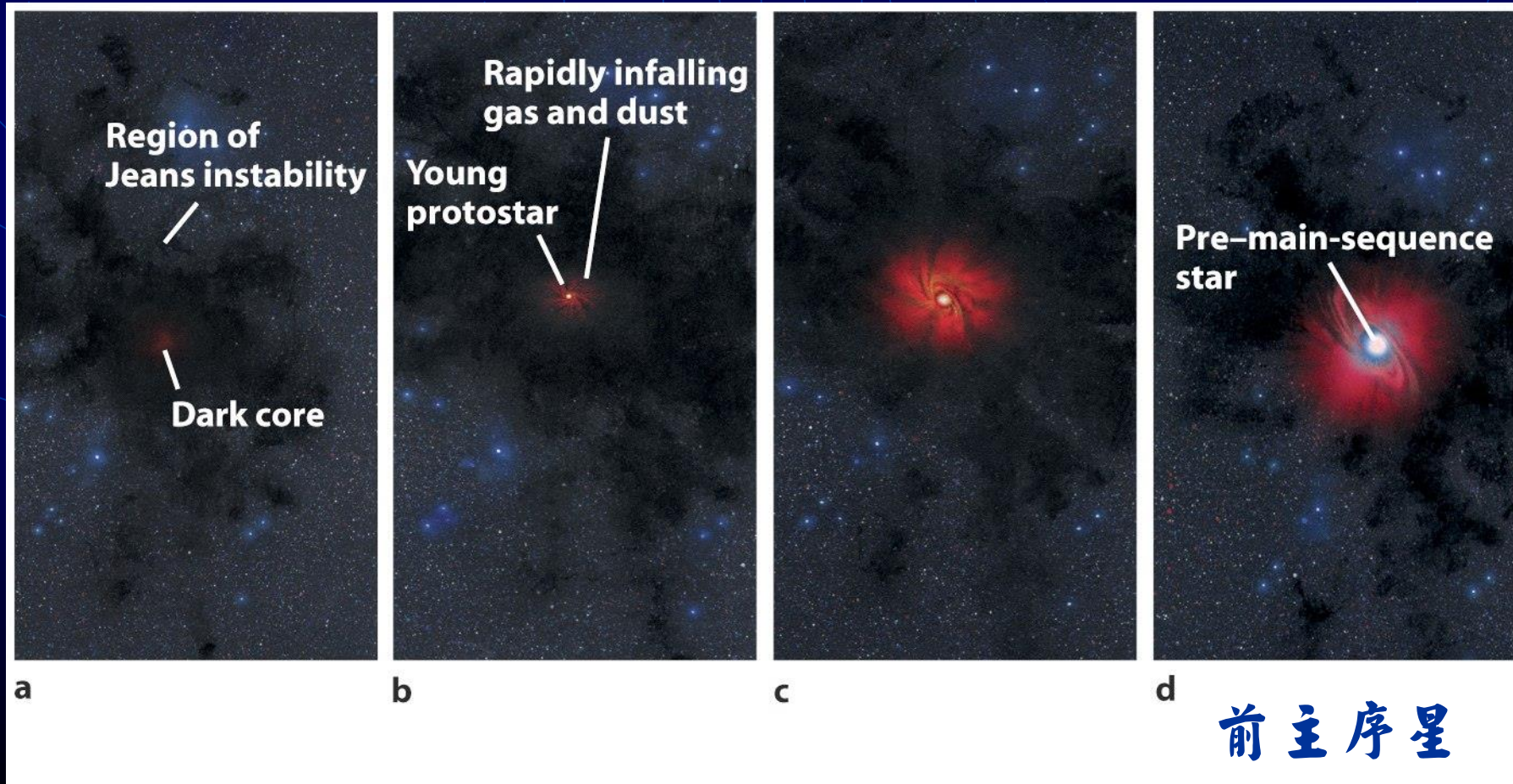


Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)



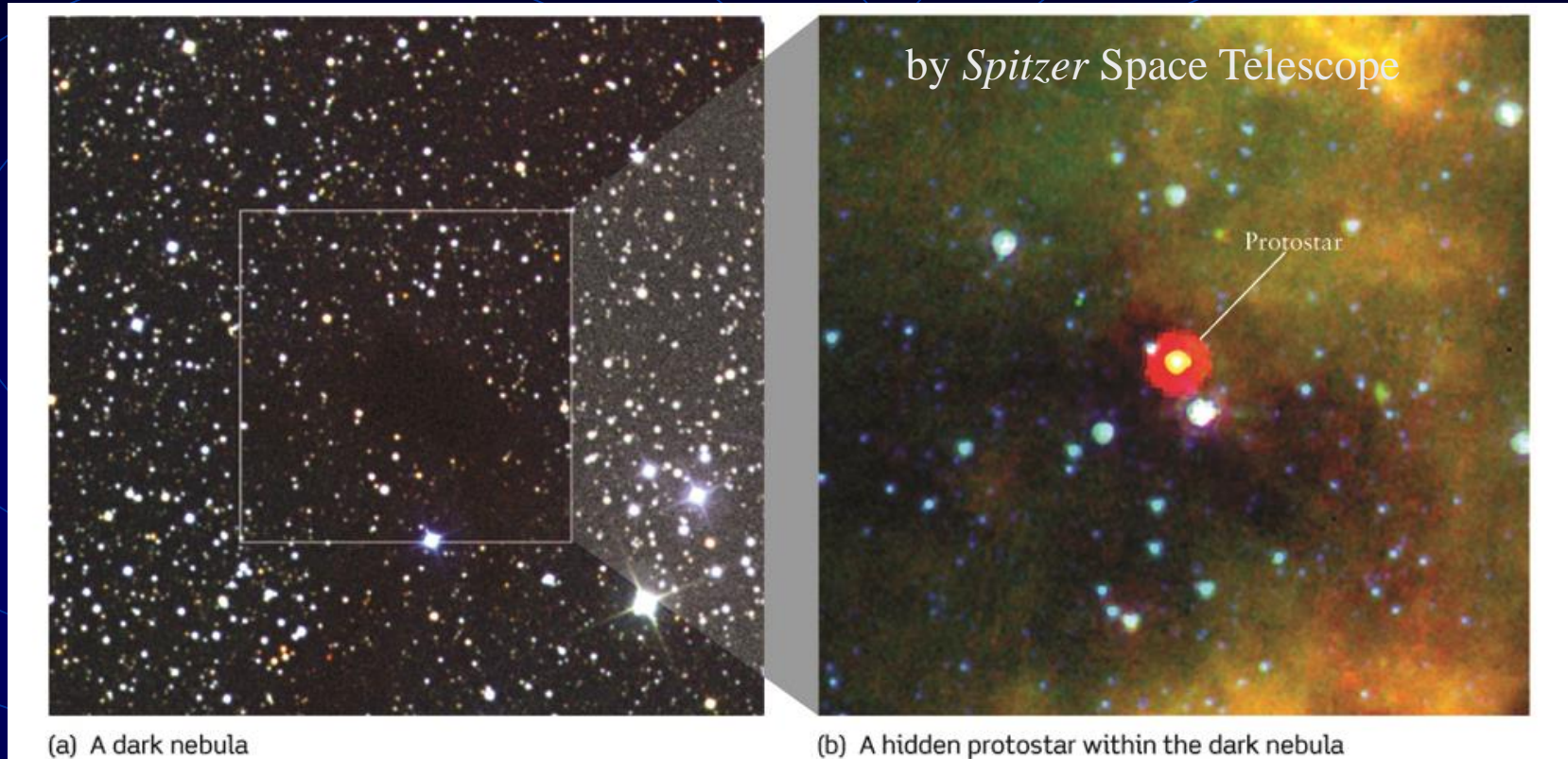
恆星源於分子雲核收縮

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

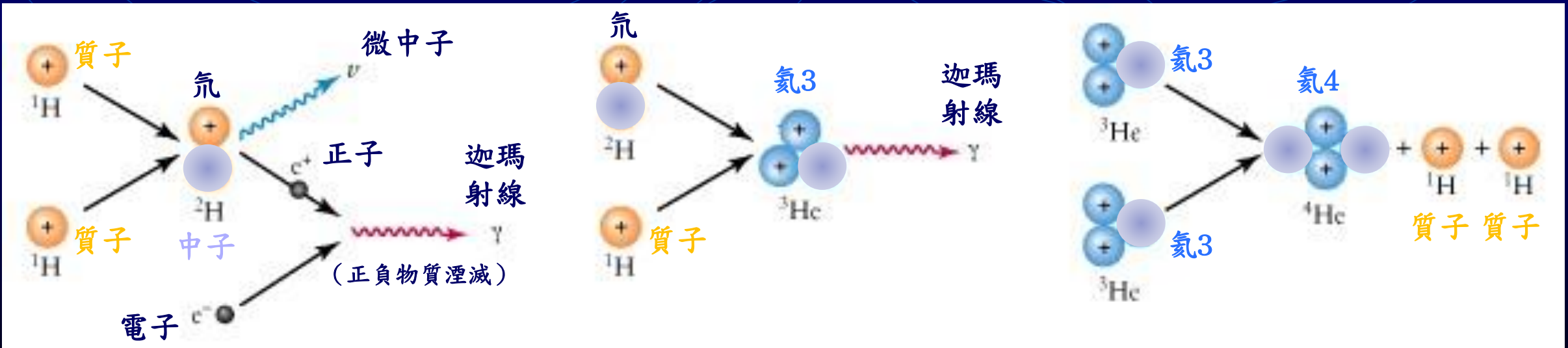
- 滿足臨界條件（溫度、密度→質量 Jeans mass）
的分子雲核能夠塌縮，中央形成恆星，周邊形成環星盤
- 環星盤當中有濃密塵埃，遮住恆星的可見光，長波的星光比較有機會透射出來（紅外觀測）
- 塵埃受熱後自己也發熱 → 長波輻射（遠紅外、次／毫米波）
但是長波解析力不好，需要特殊技術，例如干涉術
(SMA, ALMA)
- 環星盤裡面的塵埃繼續增長，有機會形成行星

若分子雲持續收縮，溫度上升到引發核融合反應？

太陽內部主要的核反應



(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 ...

熱核反應對溫度極敏感，也就是溫度稍高一點，核反應會快很多
恆星的生老病死就是（不同）核反應的結果

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

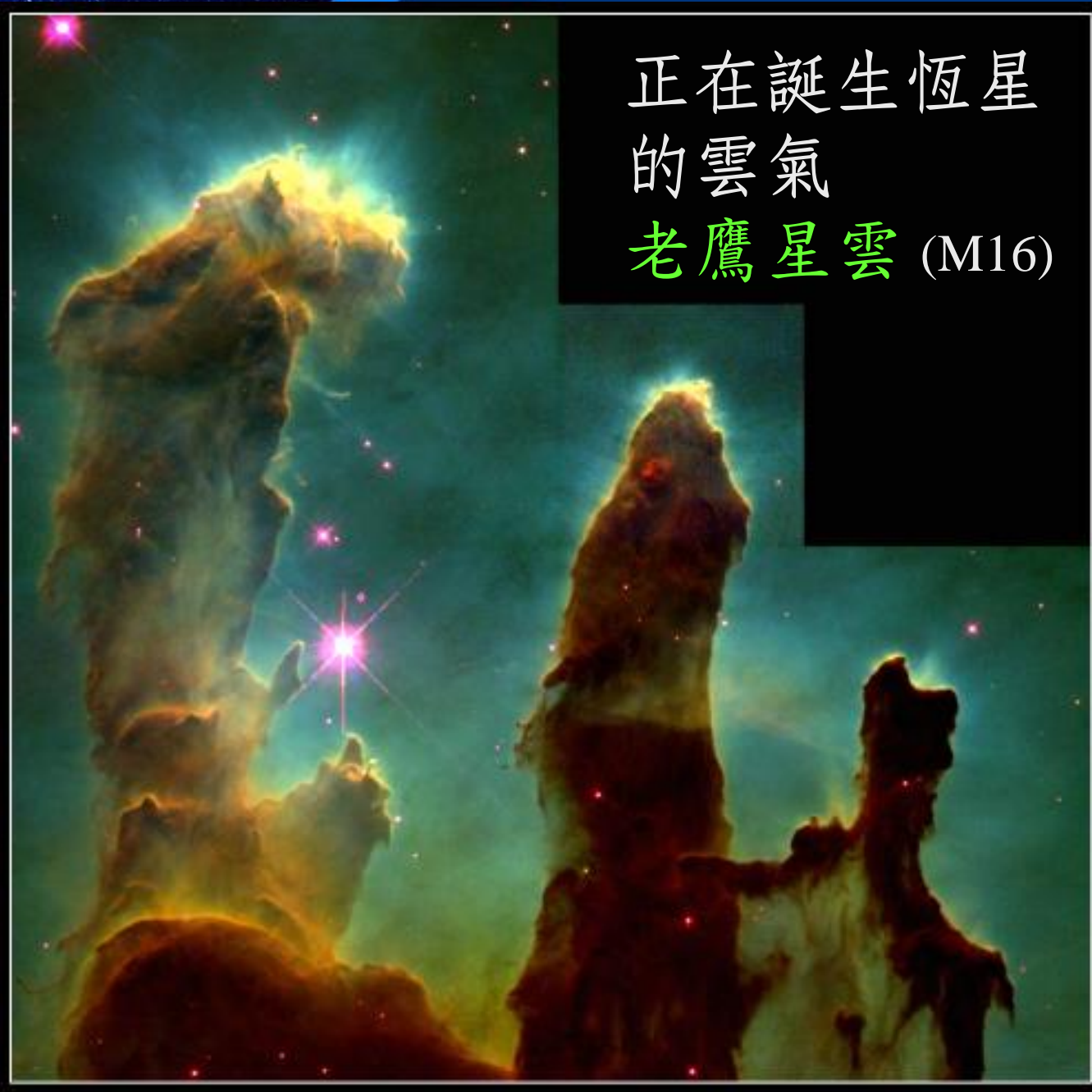
塵埃遮住背景光線
（星光或發射星雲） → 黑色

反射星雲

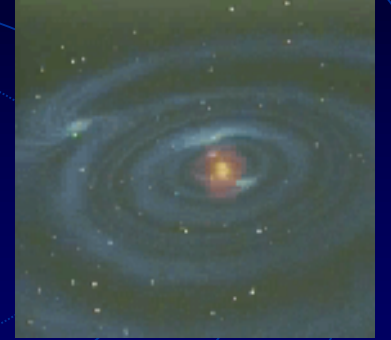
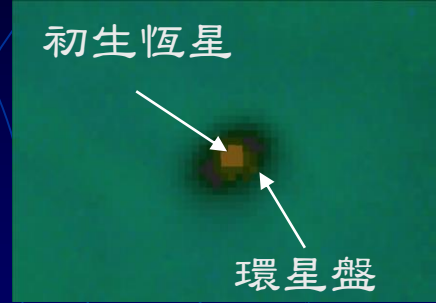
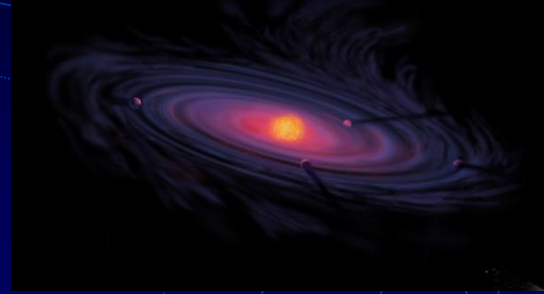
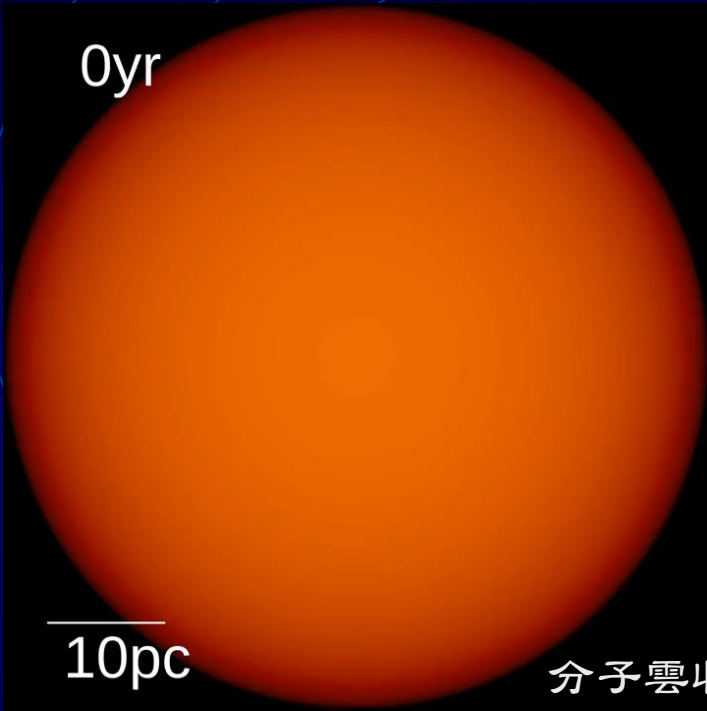
氣體反光（散射） → 藍色

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)



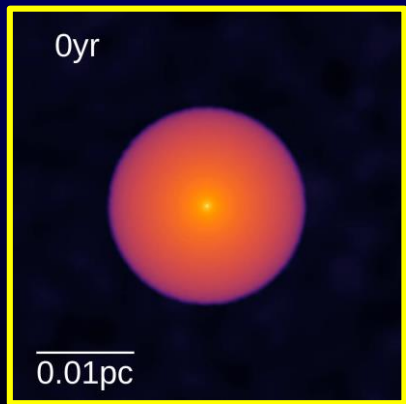
行星源於年輕恆星周圍的盤狀雲氣



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

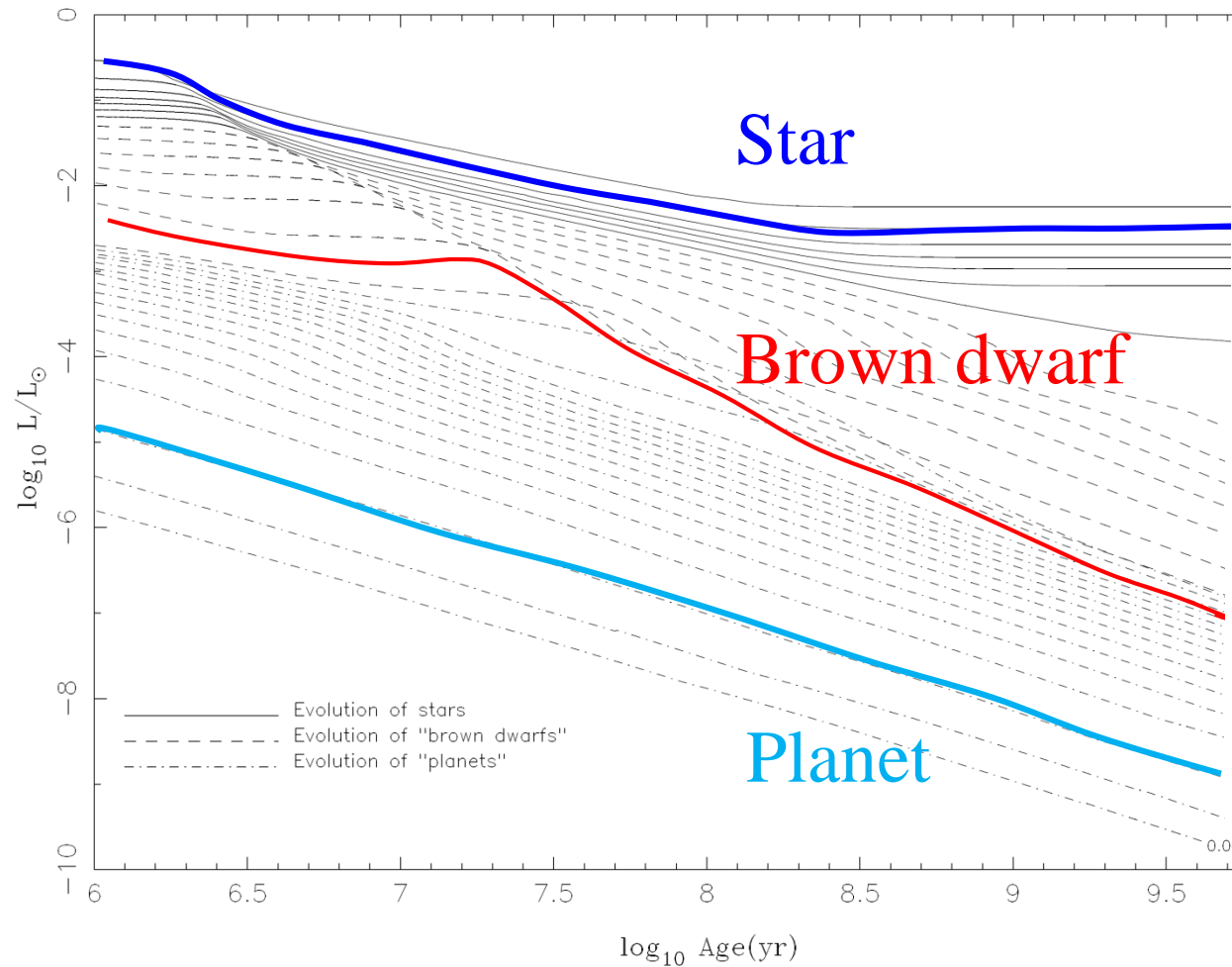
溫度上升、塵消氣散

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

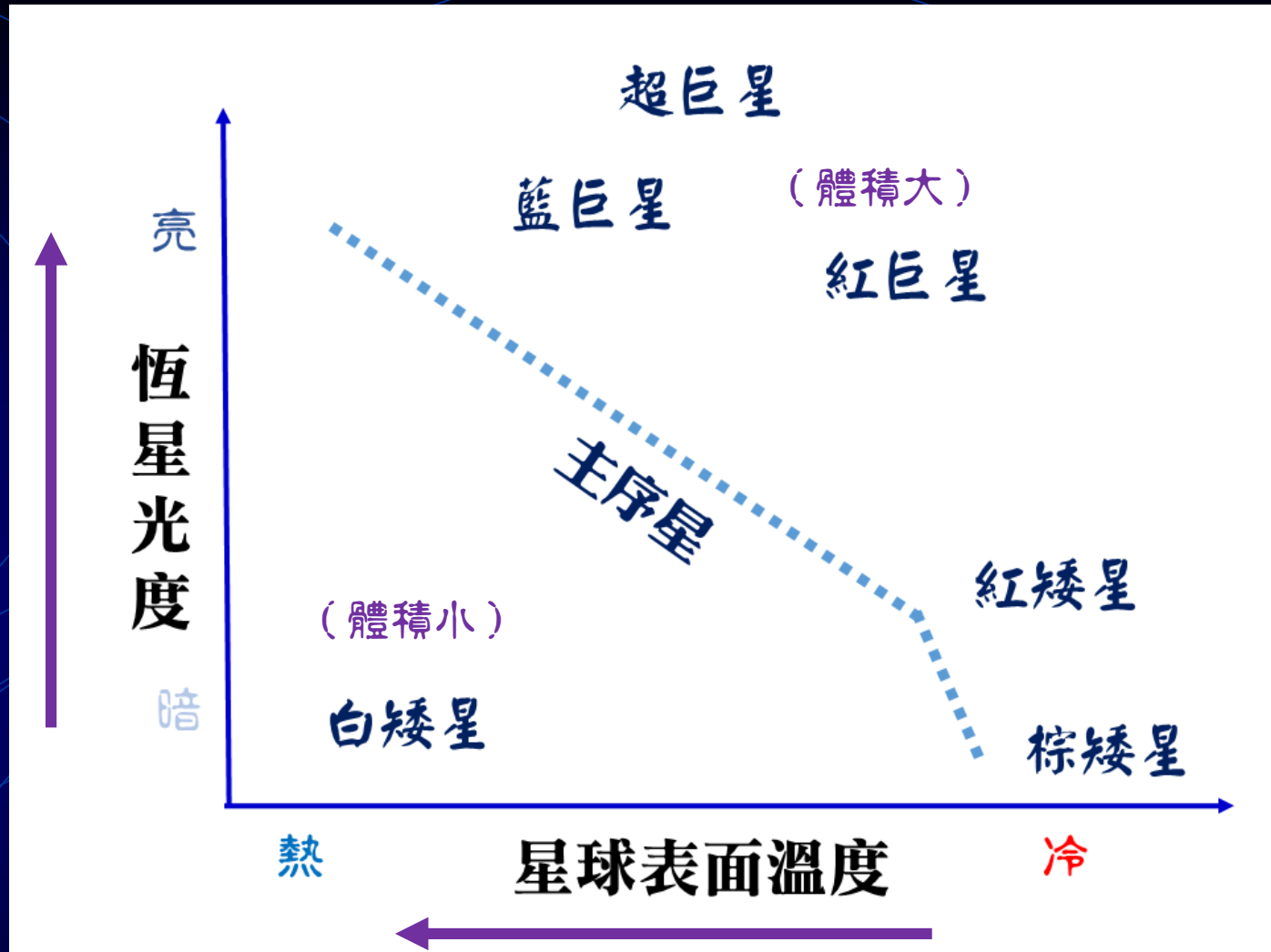
FIG. 7.—Evolution of the luminosity (in L_{\odot}) of solar-metallicity M dwarfs and substellar objects vs. time (in yr) after formation. The stars, “brown dwarfs” and “planets” are shown as solid, dashed, and dot-dashed curves, respectively. In this figure, we arbitrarily designate as “brown dwarfs” 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.

量星工具 —— 赫羅圖

Ejnar Hertzsprung 及
Henry Norris Russell
(~1910)

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

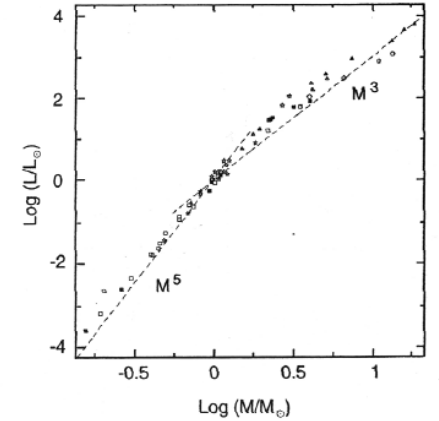
$$\mathcal{L} = 4 \pi \mathcal{R}^2 \sigma T^4$$

恆星光度

表面積

單位面積輻射功率

\mathcal{L}



主序星

$$\mathcal{L} \propto \mathcal{M}^{3 \sim 5}$$

\mathcal{M}

質光關係

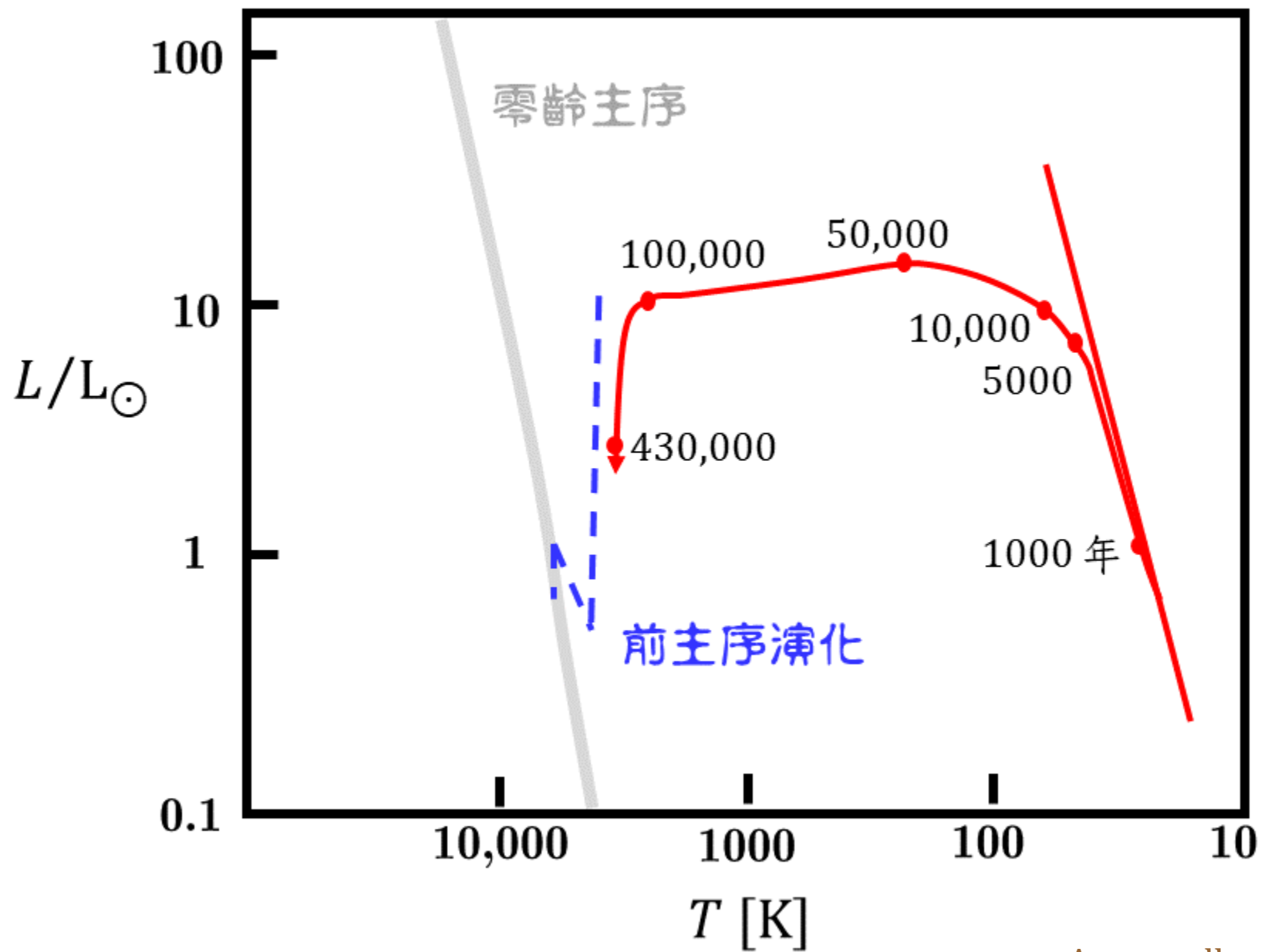
- 中央進行核融合；恆星質量的序列
- 主序星質量越大，半徑稍大，但差別不大；光度差別分常大
- 大質量恆星 → 核反應快（得多） → $\mathcal{L} \uparrow \uparrow \uparrow$
→ 大量能量通過表面 $4 \pi \mathcal{R}^2$ → $T \uparrow$

小質量恆星 → 核反應相對較慢 → luminous $\mathcal{L} \downarrow$ → $T \downarrow$

→ HR 圖上左上到右下「穩定恆星」構成的「主序」帶狀結構

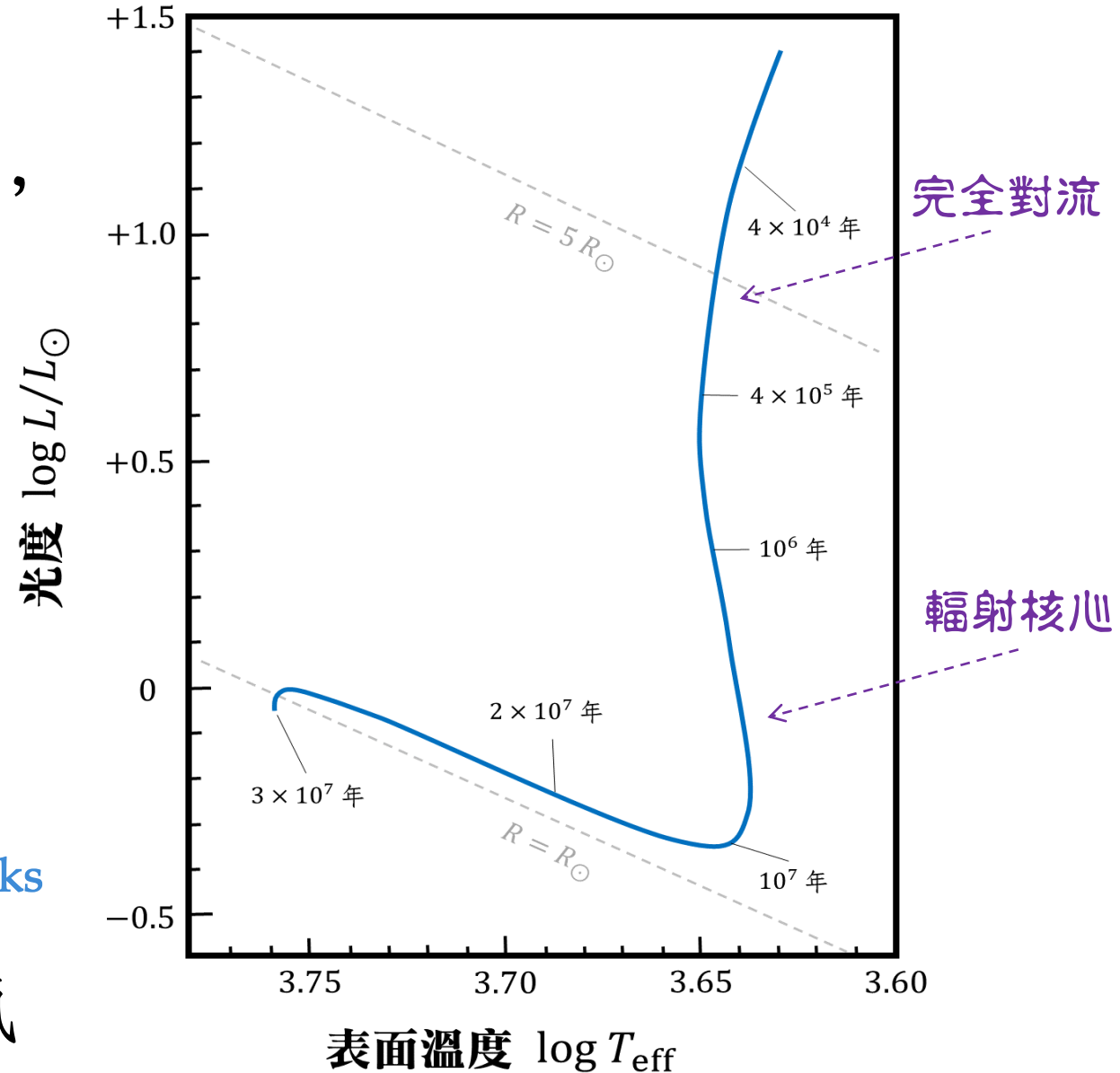
赫羅圖 右上：冷、亮；左下：熱、暗（主序：質量的順序）

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)



太陽由氣體組成，核心密度為水的150倍，
溫度達 1500萬 K

鐵的密度是水的8倍

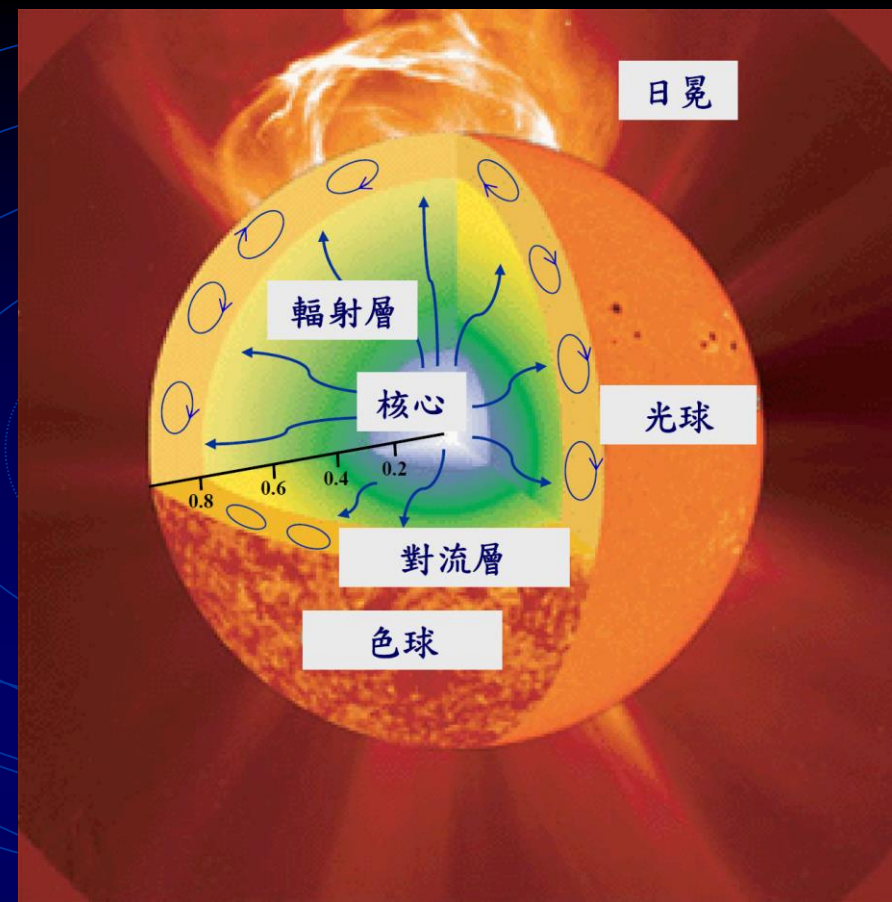
核心高溫、高壓，進行核融合反應

(大約是整體半徑的四分之一以內)，所產生的能量以**輻射**方式向外傳送 這些能量讓氣體快速運動 → 互相推擠 → 氣體壓力

向外氣體壓力 (梯度) = 向內萬有引力
→ **靜力平衡**

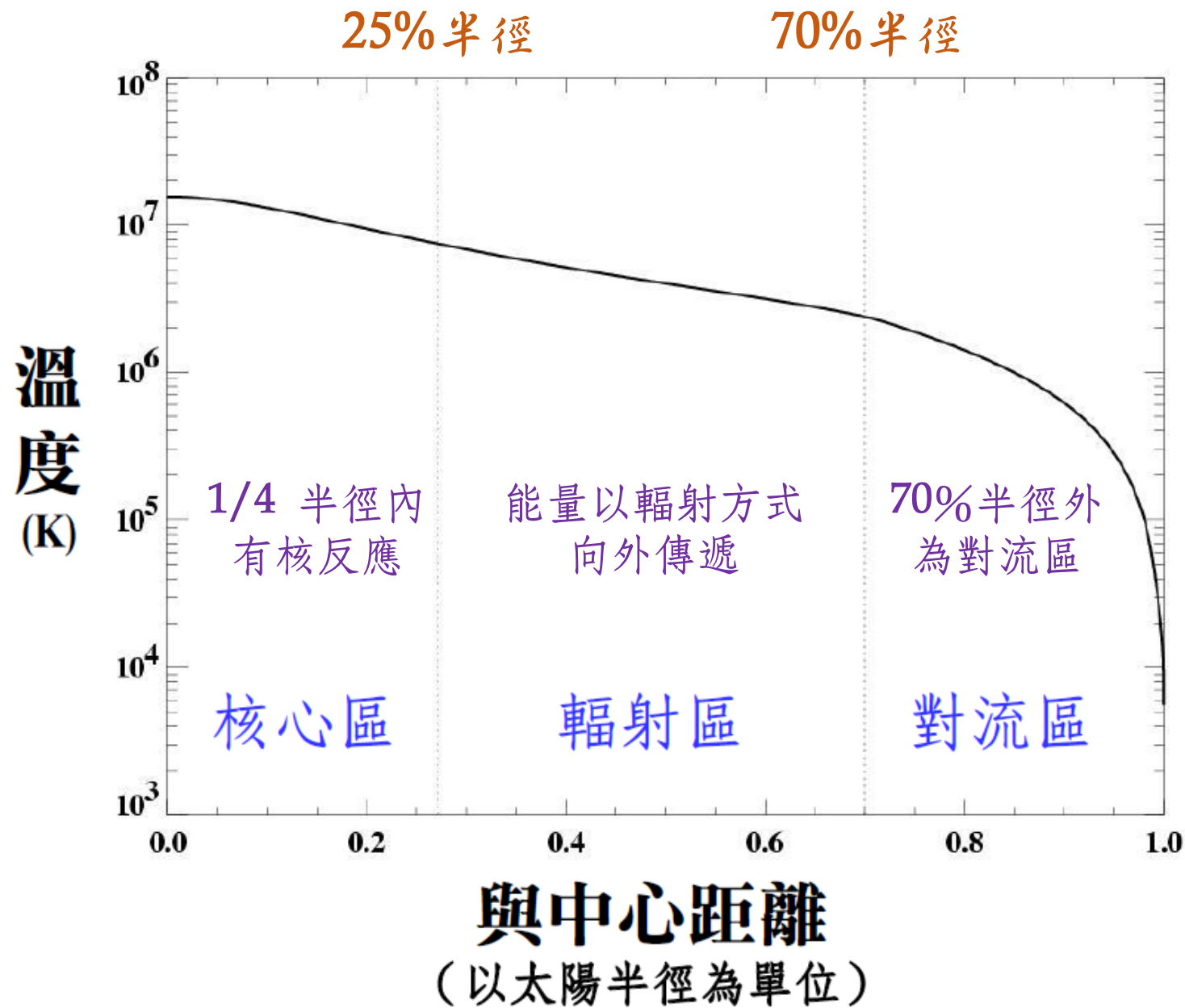
越向外溫度越低，直到輻射冷卻效率不足，不足以維持平衡

(大約是整體半徑75%以外) 改以**對流**方式傳送能量，太陽表面為翻騰的氣體，溫度約攝氏5500度 (5800K)，最後能量從光球輻射到太空



(成年時期)

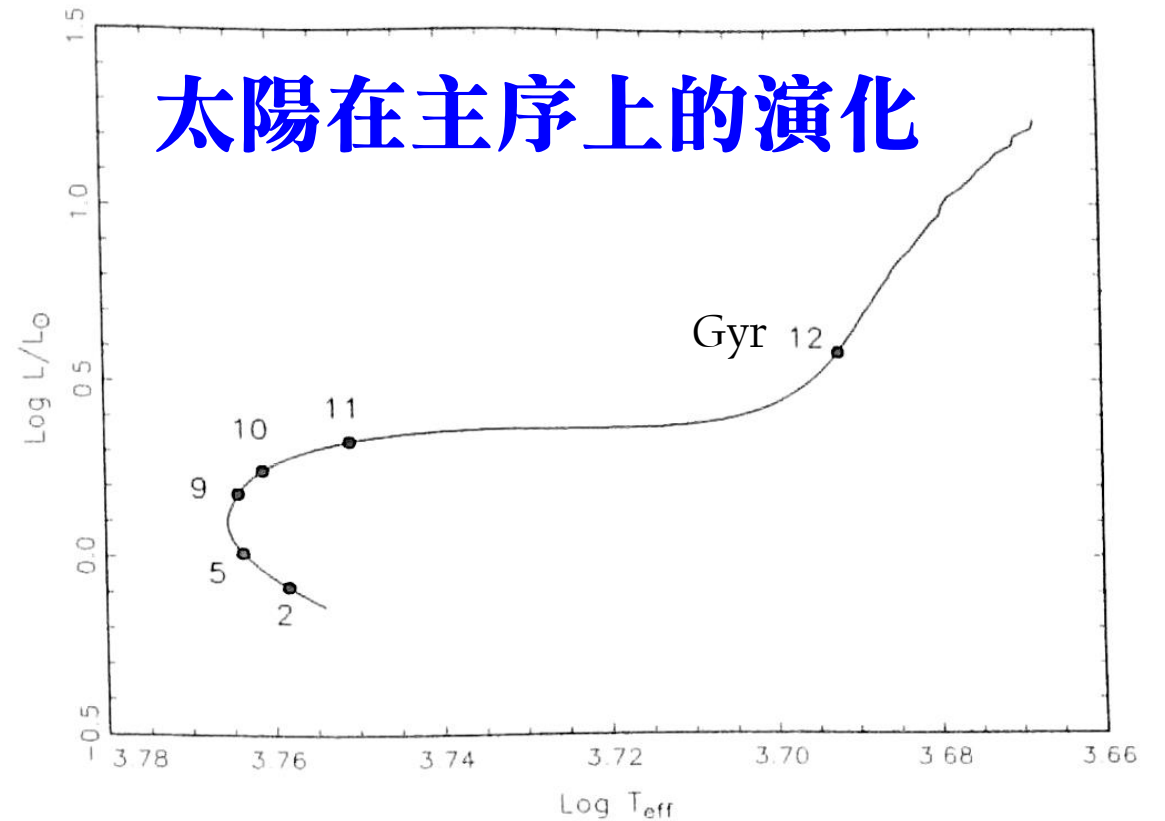
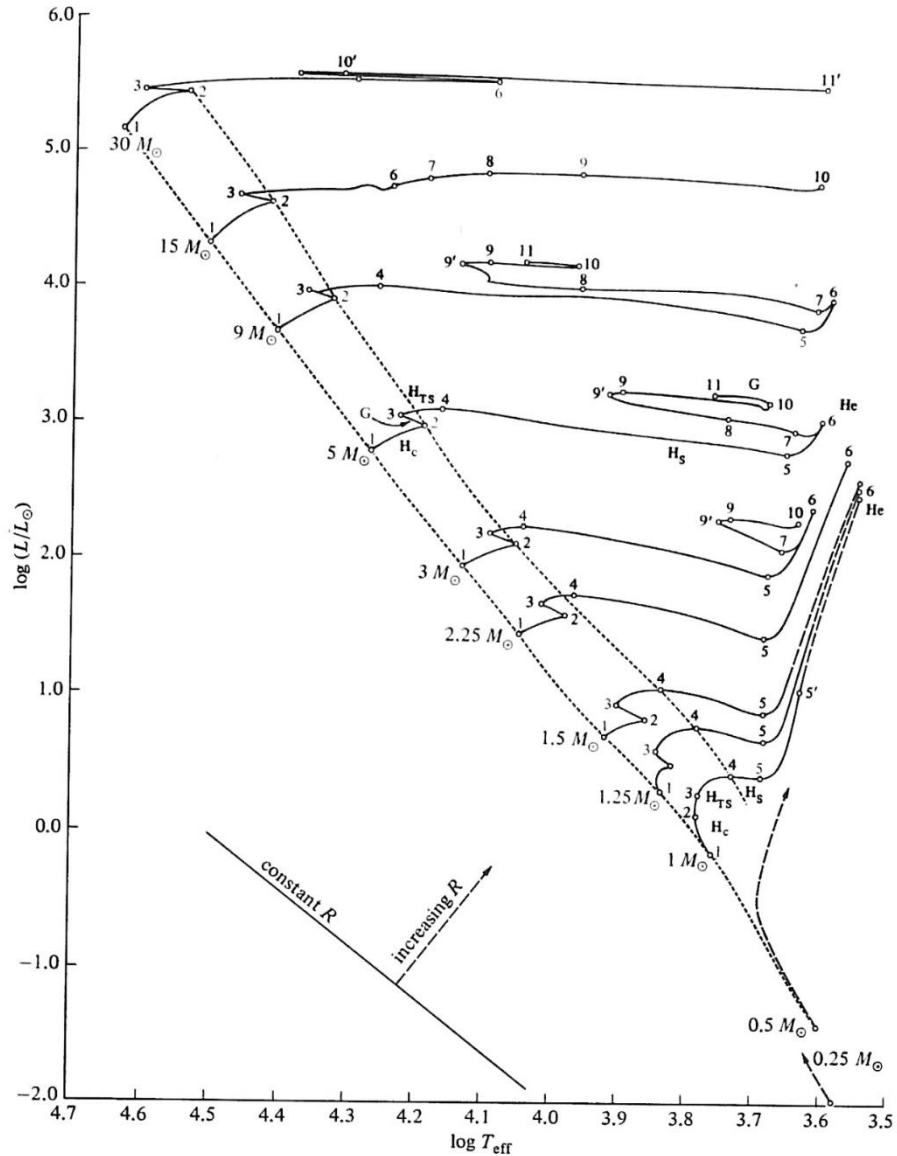
太陽結構



這是理論模型，
怎麼驗證呢？

恆星演化與衰亡

On and off the main sequence



- ✓ 理想氣體 $P = nk_B T$
- ✓ 主序太陽 $H \rightarrow He$, $n \searrow$, $P \searrow$
- ✓ 核心收縮, $T \nearrow$, $\mathcal{L} \nearrow \nearrow$
- 過去數十億年, 光度持續增強?
- *Faint young Sun paradox*

恆星演化

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

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

主序壽命：燃料數量 / 消耗率

- 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、星球外層膨脹、
溫度下降（變大、變紅 → 「紅巨星」）

- 若核心不夠大，無法升溫足以點燃氦（需要一億度）
→ 持續冷卻，成為「**黑矮星**」

若核心夠大 → 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

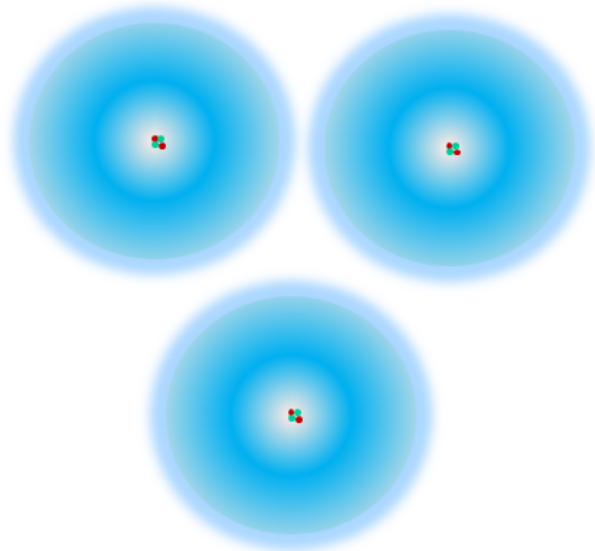
- ✓ 被簡併態電子壓力撐住：**白矮星** 極限：核心 $< 1.4 M_{\odot}$
下道防線：被簡併態中子壓力撐住：**中子星**（有些是脈衝星）
- ✓ 還是不行：成為時空奇異點：**黑洞**

- 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

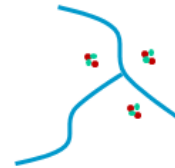


電子以波動機率，分布在
原子核之外特定的軌域內

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)



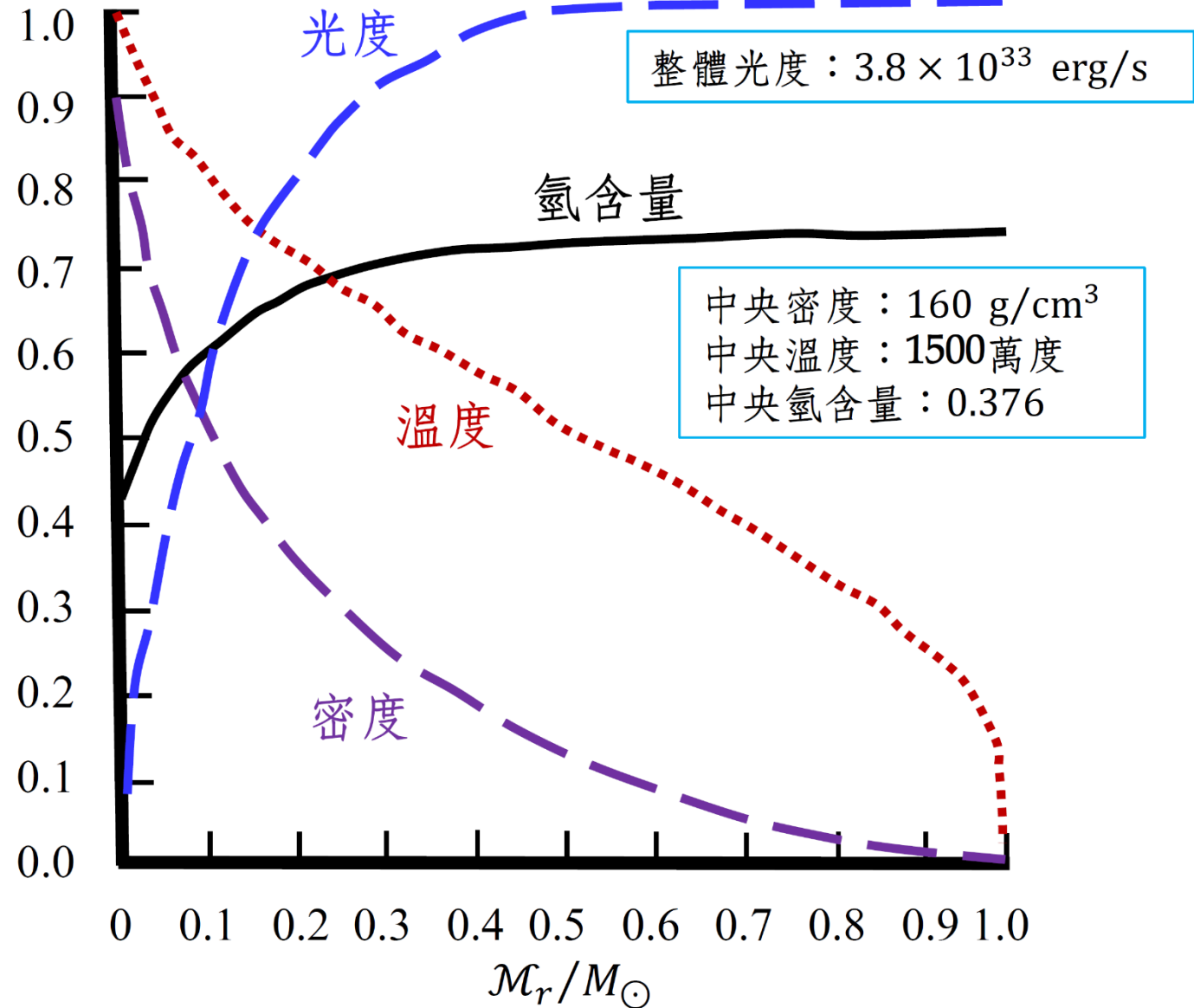
電子與質子結合成為中子

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

每cc重達5億公噸

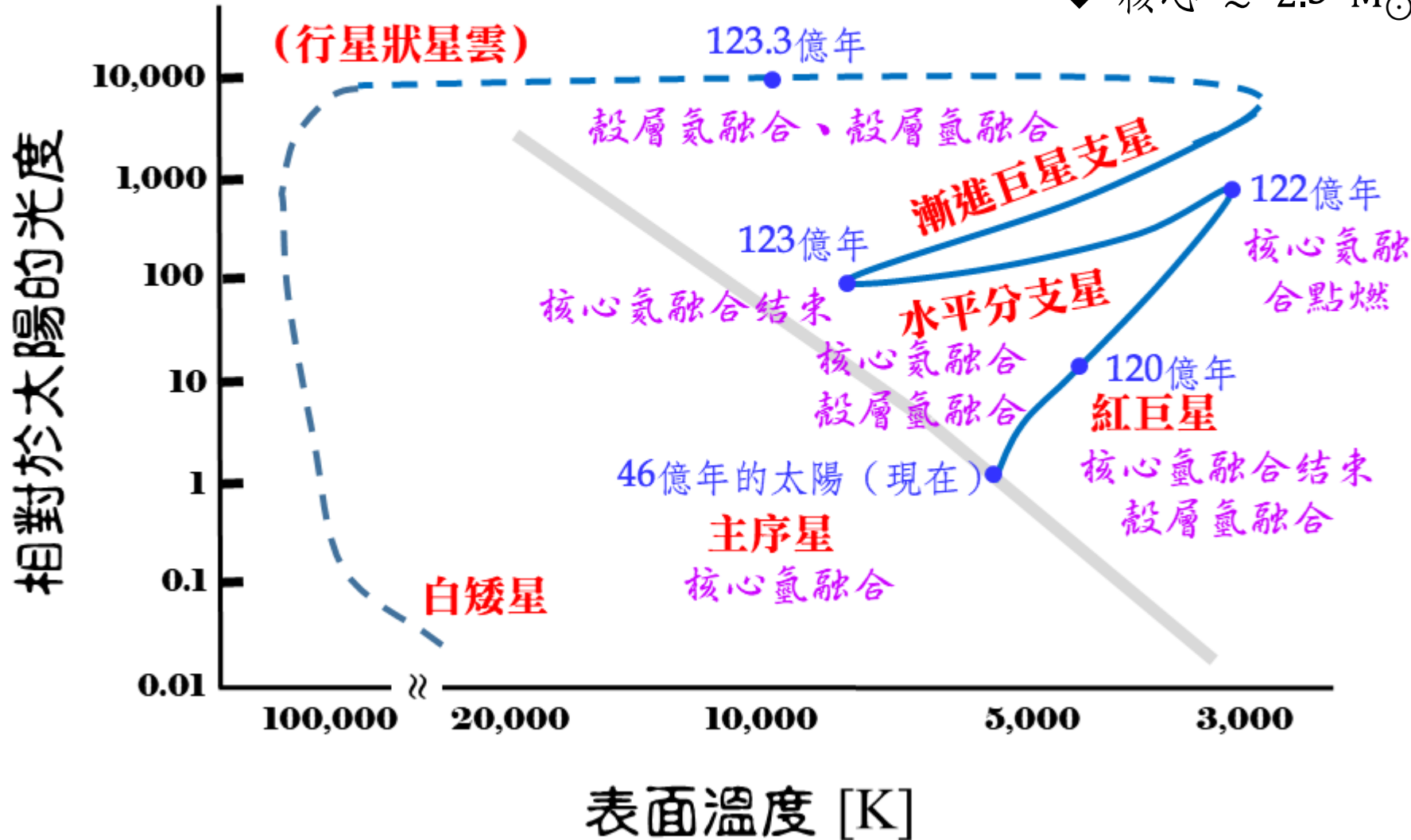
(此為示意圖，未照比例繪製)

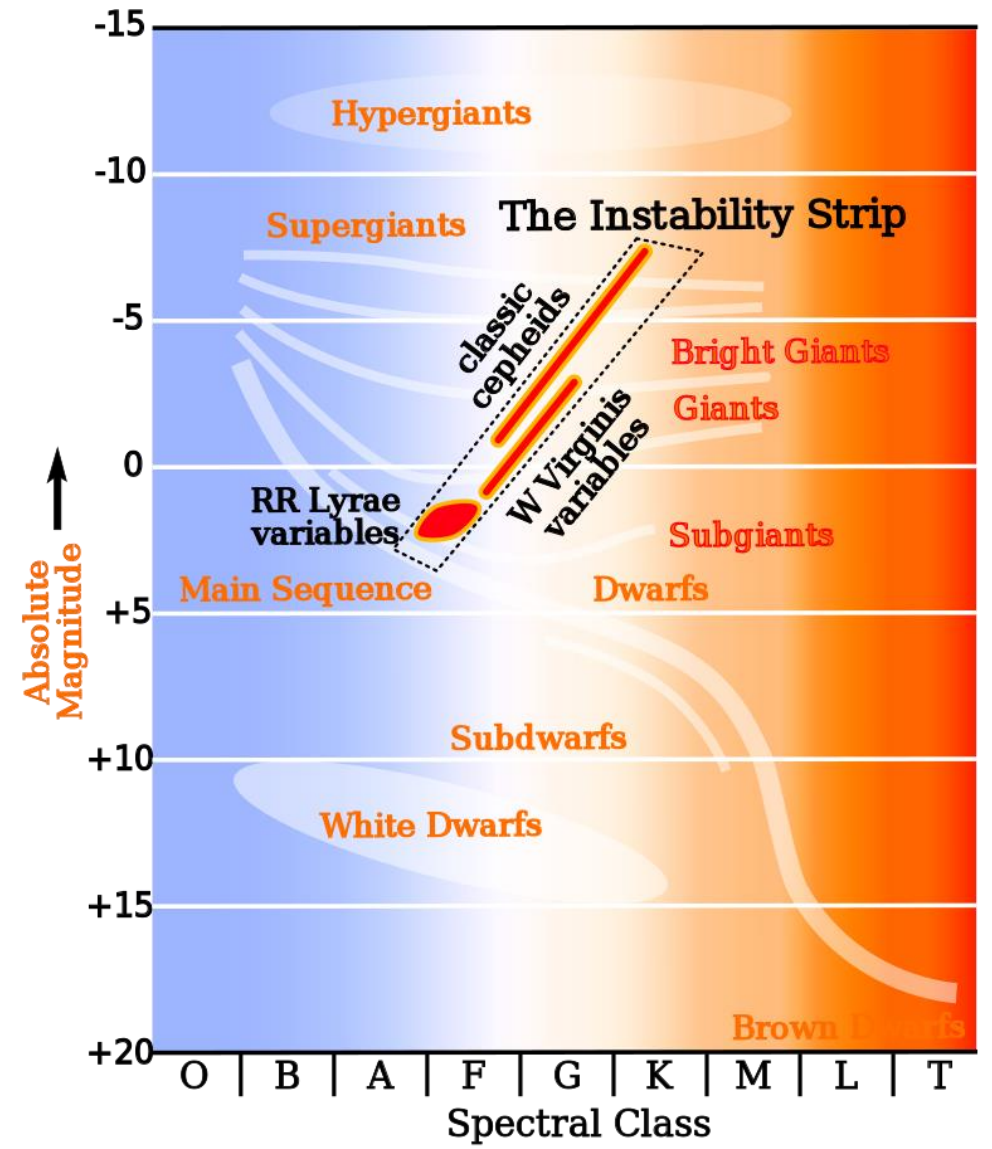
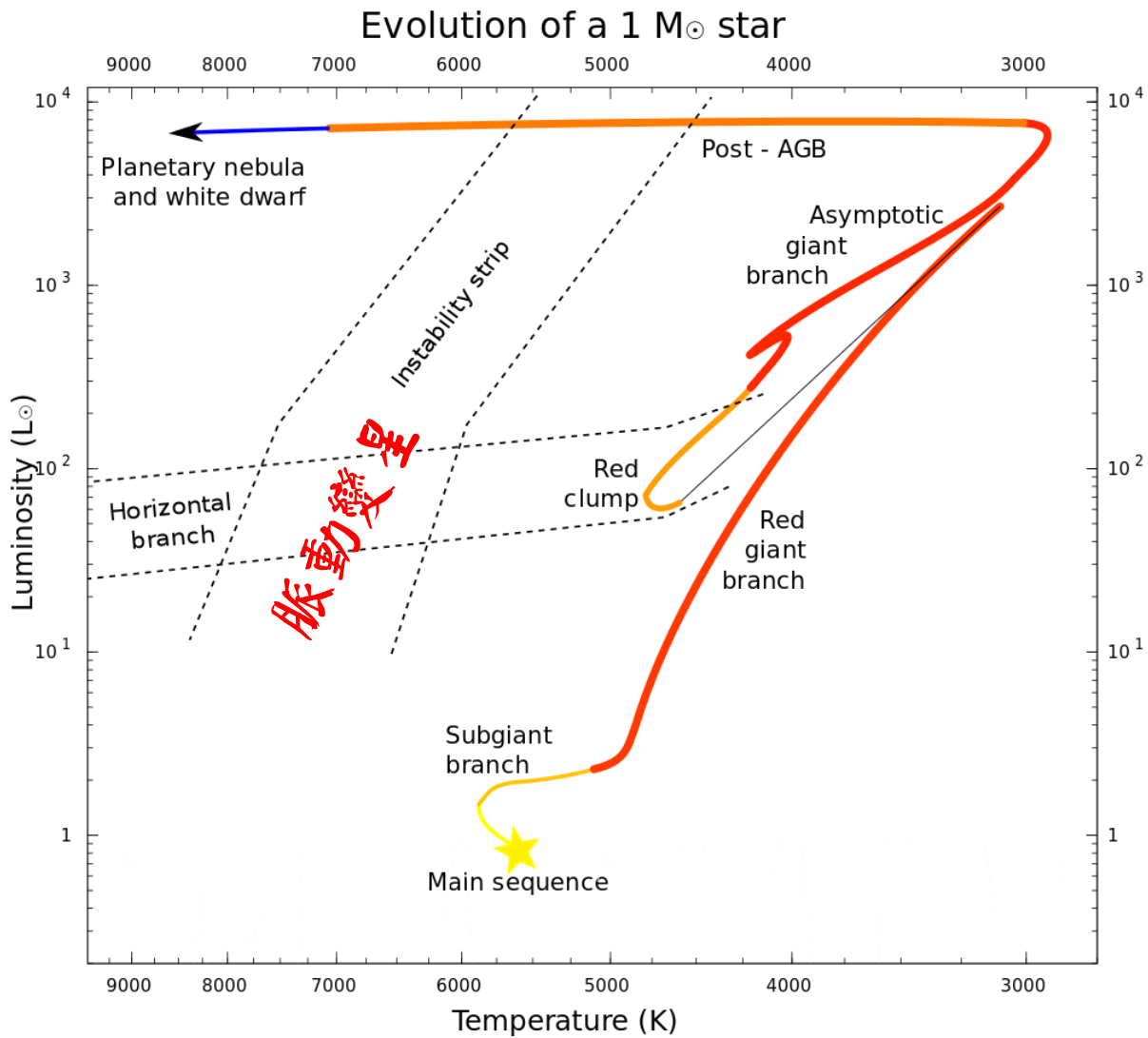
年齡46億年（當今）的太陽數值模型



太陽的演化

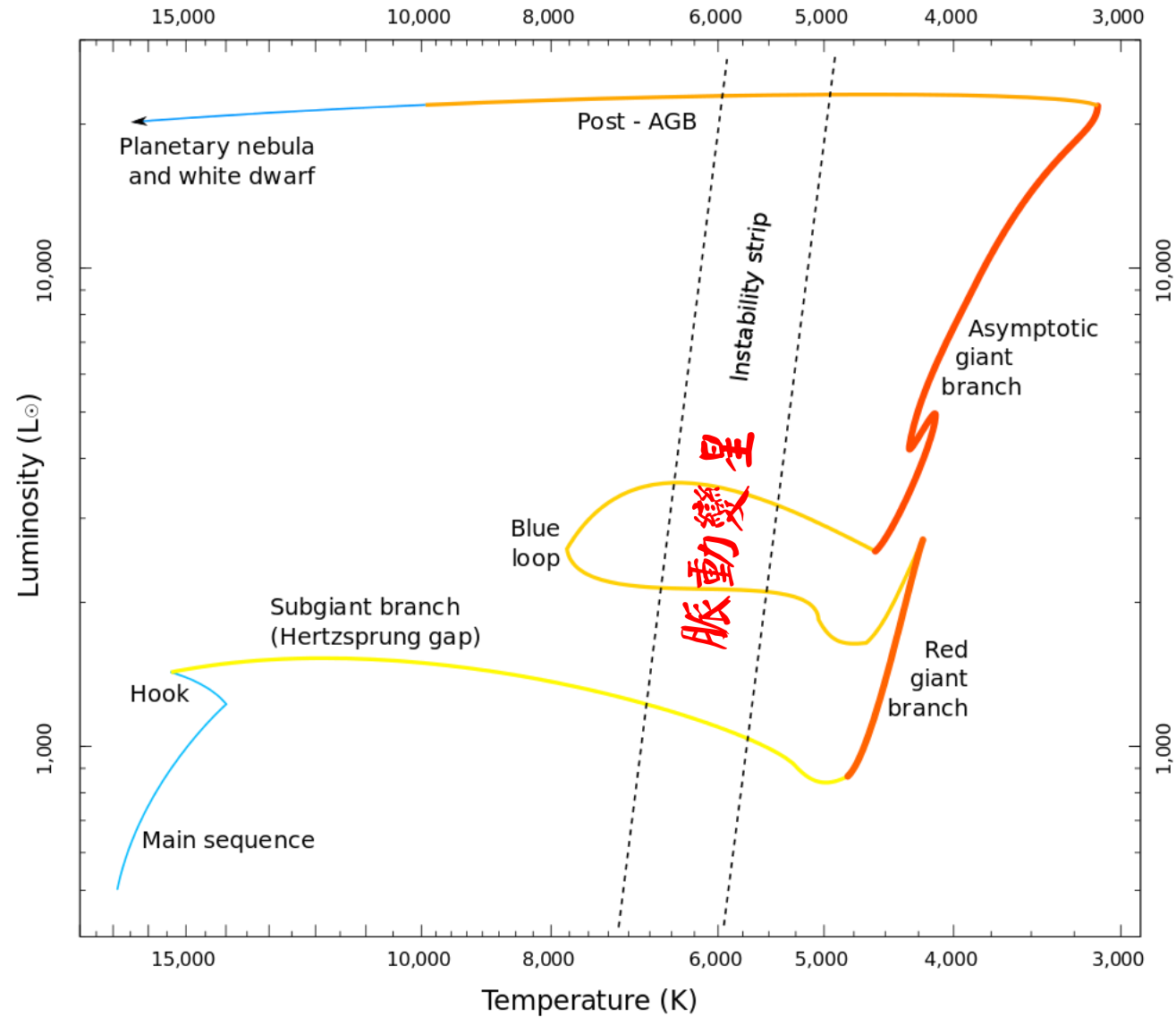
- ◆ 核心 $\lesssim 0.5 M_{\odot}$ → 點不燃 He
- ◆ 核心 $0.5 - 2.3 M_{\odot}$ → 密度高，處於電子簡併態，點燃 He 一發不可收拾 → 氦閃
- ◆ 核心 $\gtrsim 2.3 M_{\odot}$ → 恹恹點燃 He 核



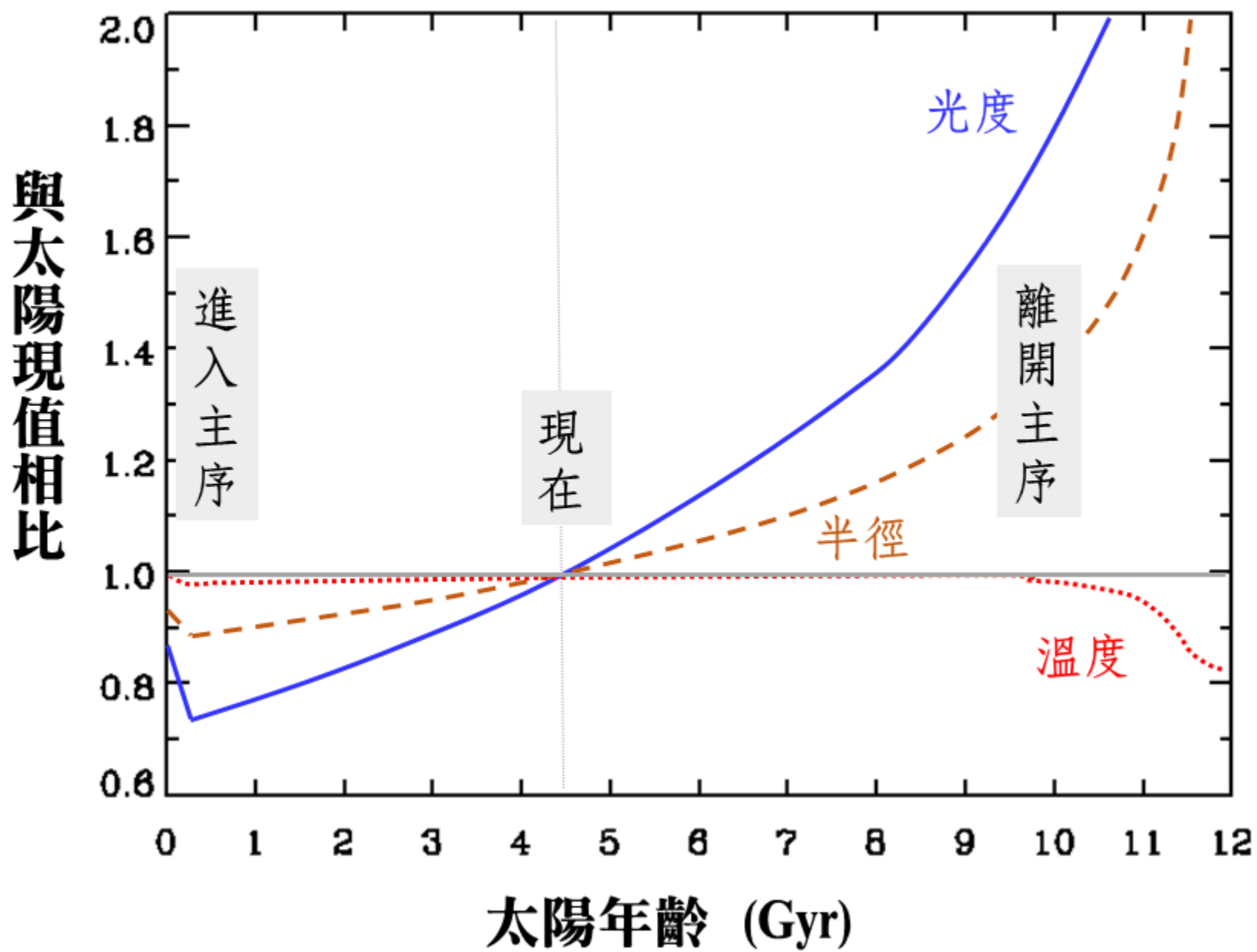


https://en.wikipedia.org/wiki/Horizontal_branch

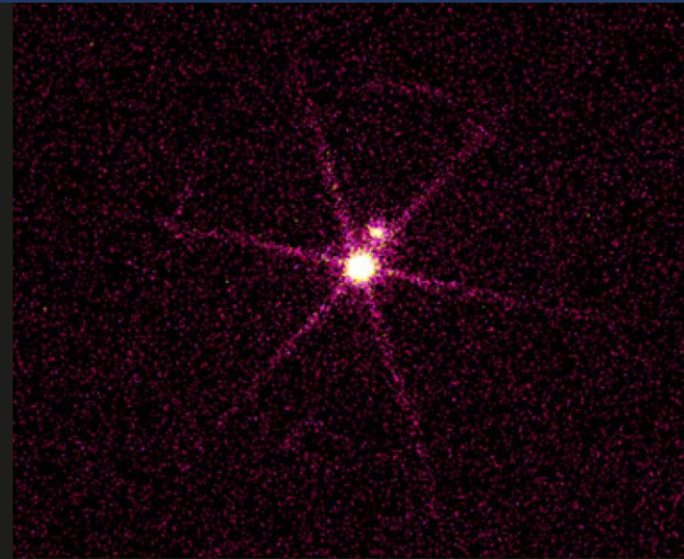
Evolution of a 5 M_⊙ star



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

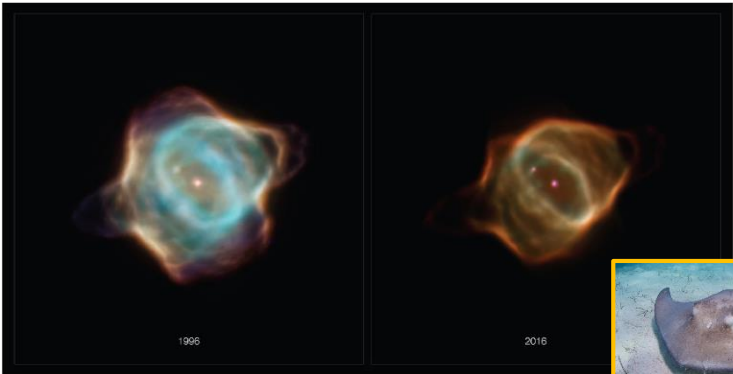


■ 這張可見光影像中央的亮星是天狼星 A，是顆 A 型主序星。影像中的星芒與光環為望遠鏡光學的效應。在左下方的光點則是天狼星伴星，稱為天狼星 B，是顆白矮星，已經演化到恆星生命後期。（影像來源／NASA/ESA/HST, H. Bond (STScI), and M. Barstow (University of Leicester)）

■ 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）

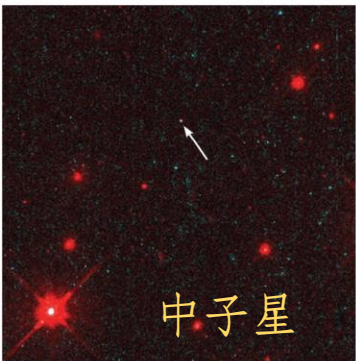
Sirius A, $m_V = -1.46$, $T_{\text{eff}} = 9940 \text{ K}$, 可見光明亮
Sirius B, $m_V = -8.44$, $T_{\text{eff}} = 25000 \text{ K}$, X射線明亮



■外型類似「刺魷」的星雲 (Hen 3-1357) 是個行星狀星雲，是類似太陽的恆星演化到晚期，中央核心塌縮成白矮星，而將外層氣體推出的結果。刺魷星雲距離我們約 18000 光年，比其他已知行星狀星雲來得小，也來得年輕。無論是中央白矮星或是周圍雲氣，都有明顯亮暗變化。上圖是 1996 年與 2016 年外觀顯著不同。(影像來源 / NASA, ESA, B. Balick (U of Washington), M. Guerrero (Instituto de Astrofísica de Andalucía), and G. Ramos-Larios (U de Guadalajara))

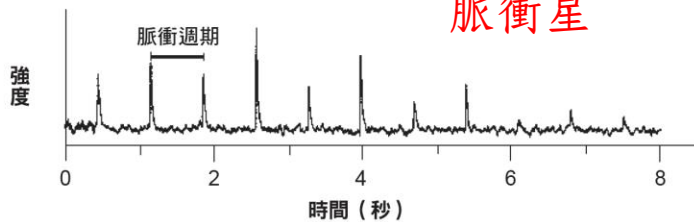


(年輕的) 行星狀星雲



中子星

■(左) 大質量恆星死亡後，核心受到強大引力而塌縮成為中子星。雖然溫度高而發射 X 射線，但直徑只約 10 公里，在可見光非常黯淡。這類 X 射線源在可見光勉強可見。(影像來源 / NASA/STScI/Fred Walter (SUNY-Stony Brook))。(下) 當帶電粒子受到中子星強大磁場加速，便放出同步輻射，由於中子星快速自轉，我們偵測到「脈衝」訊號，這些稱為「脈衝星」。(影像來源 / Manchester, R.N. & Taylor, J.H., Pulsars, Freeman, 1977.)

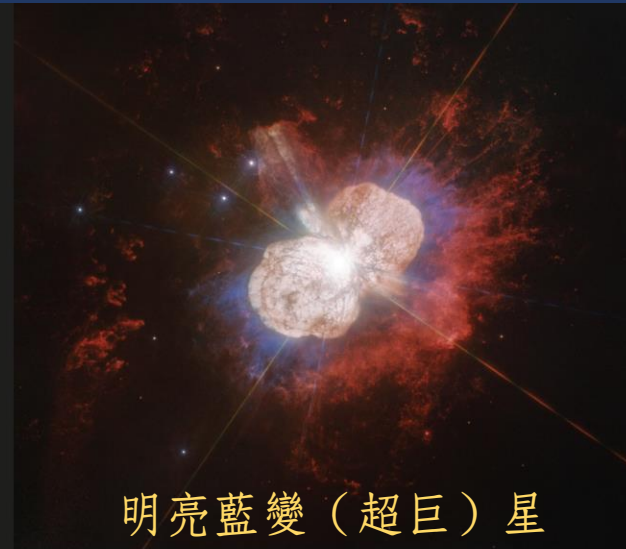


脈衝星



■ Wolf-Rayet 這種星球是瀕臨死亡的大質量恆星，正在大量流失物質，以致於外層氣體被吹走，而裸露出高溫的恆星內部。這類名為 WR31a 就是這樣的星球，距離我們 3 萬光年，藍色氣泡來自於時速 22 萬公里的高速恆星風，撞擊到之前流失的氫氣所形成。預計不久之後，這類星將爆發成為超新星。(影像來源 / ESA/Hubble & NASA/Judy Schmidt)

Wolf-Rayet 星



明亮藍變 (超巨) 星

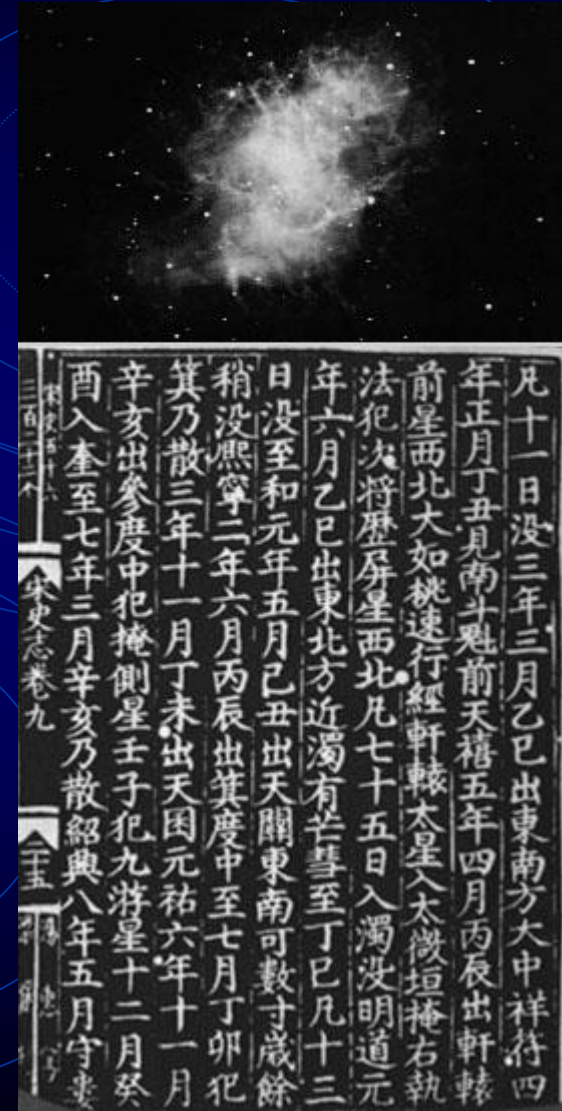
■獵戶座的參宿四以及天蠍座的心宿二，都是紅超巨星，是恆星演化晚期的天體，日後將以超新星爆發結束一生。還有一類超巨星更稀奇，主要發藍光，表示它們巨大而熾熱，稱為明亮藍變星 (luminous blue variable)，有可能已經經歷過 Wolf-Rayet 星球階段。位於船底座的「海山二」星 (Eta Carinae) 就是有名的例子，星球質量可能高達太陽 150 倍。它在 17 世紀末約為 4 等星，18 世紀初變得非常明亮，到了世紀末又變暗，到了 1843 年成為全天空第二明亮的恆星，僅次於天狼星。這類奇特的星還有多次爆發的紀錄，顯示內部結構極不穩定。(影像來源 / NASA/ESA/Hubble/Judy Schmidt)

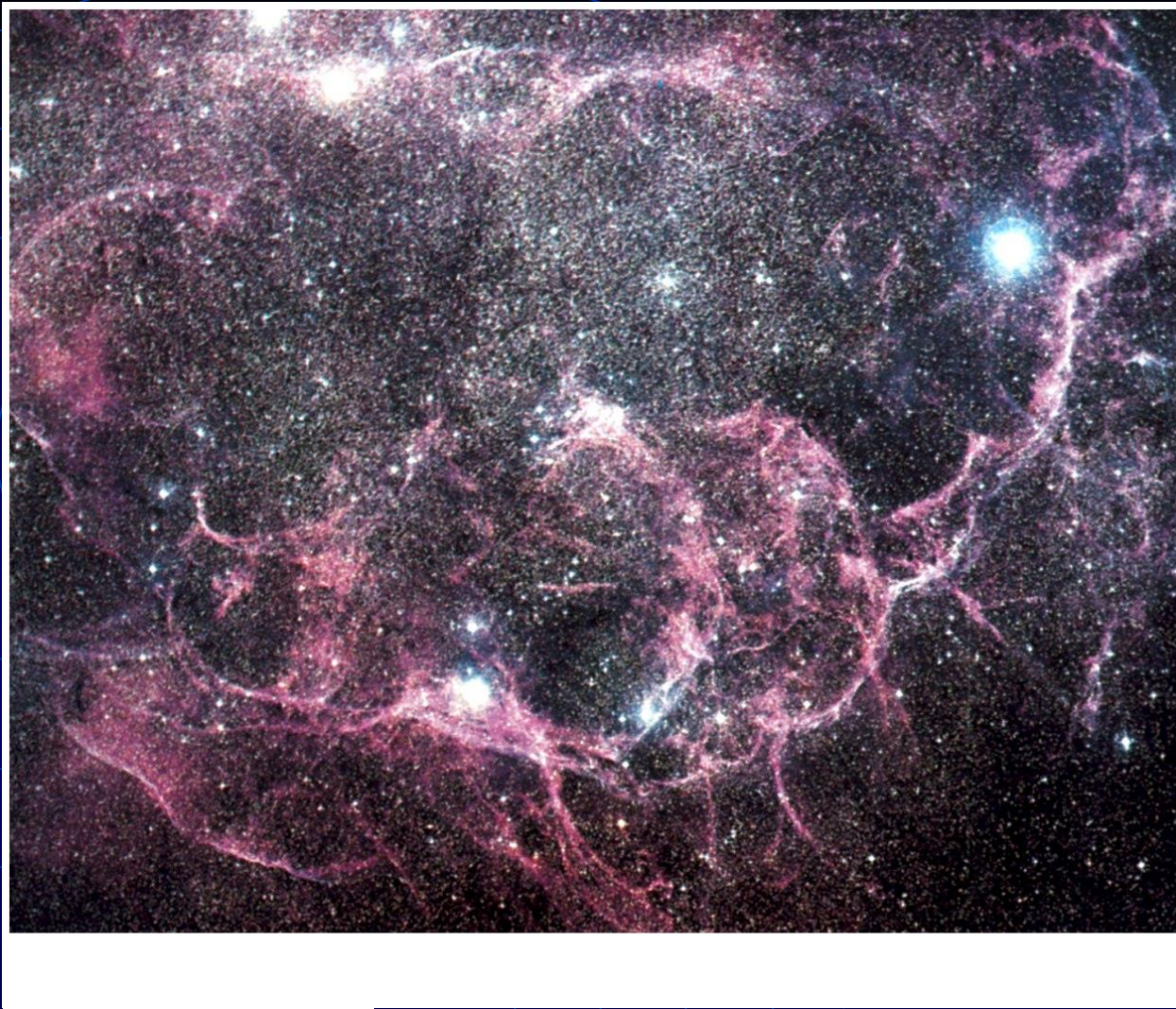
位於金牛座方向的蟹狀星雲 (Crab Nebula)，距離我們 6000 光年，源於 AD1054 年超新星爆發（當時中國天官記錄有詳細記載，故稱「中國超新星」。

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

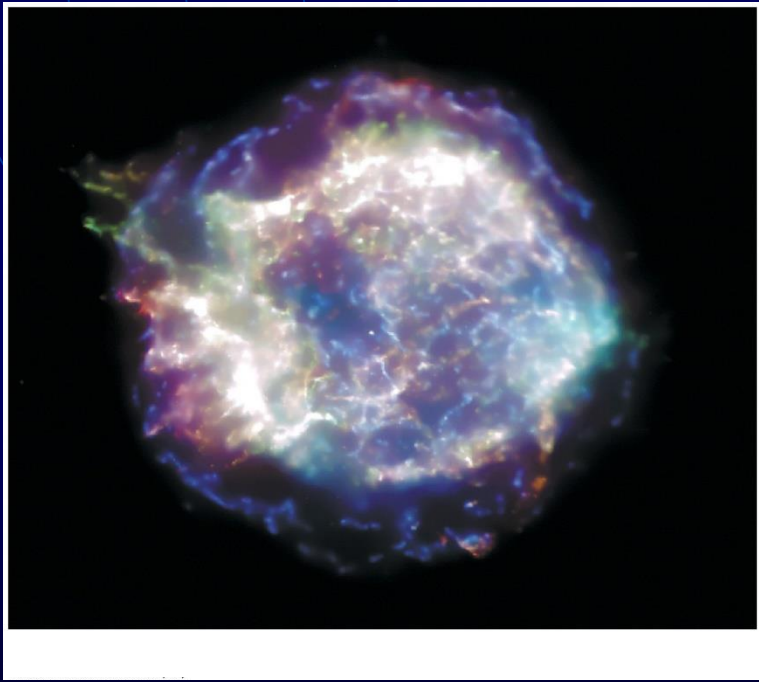




Gum Nebula 是全天空最大的超新星遺骸，來自 11,000 年前的超新星爆發。

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

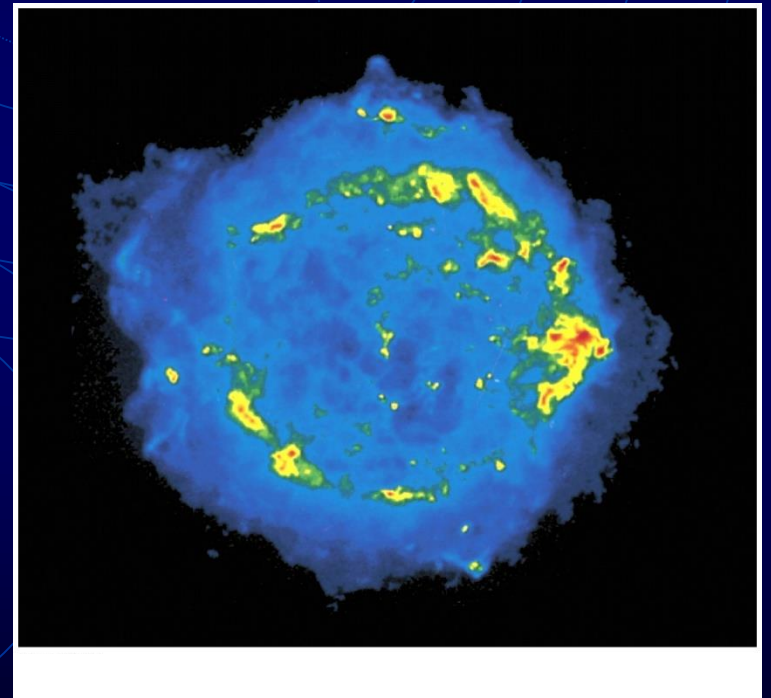
Cassiopeia A 超新星遺骸，離我們11,000光年。地球應該於西元~1690年偵測到爆發事件，但歷史並無記載



X rays



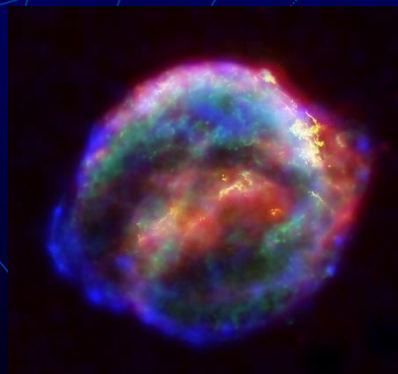
Visible
(HST)



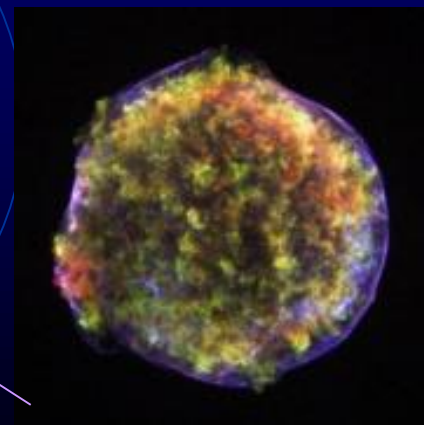
Radio

歷史記載的超新星（銀河系內）

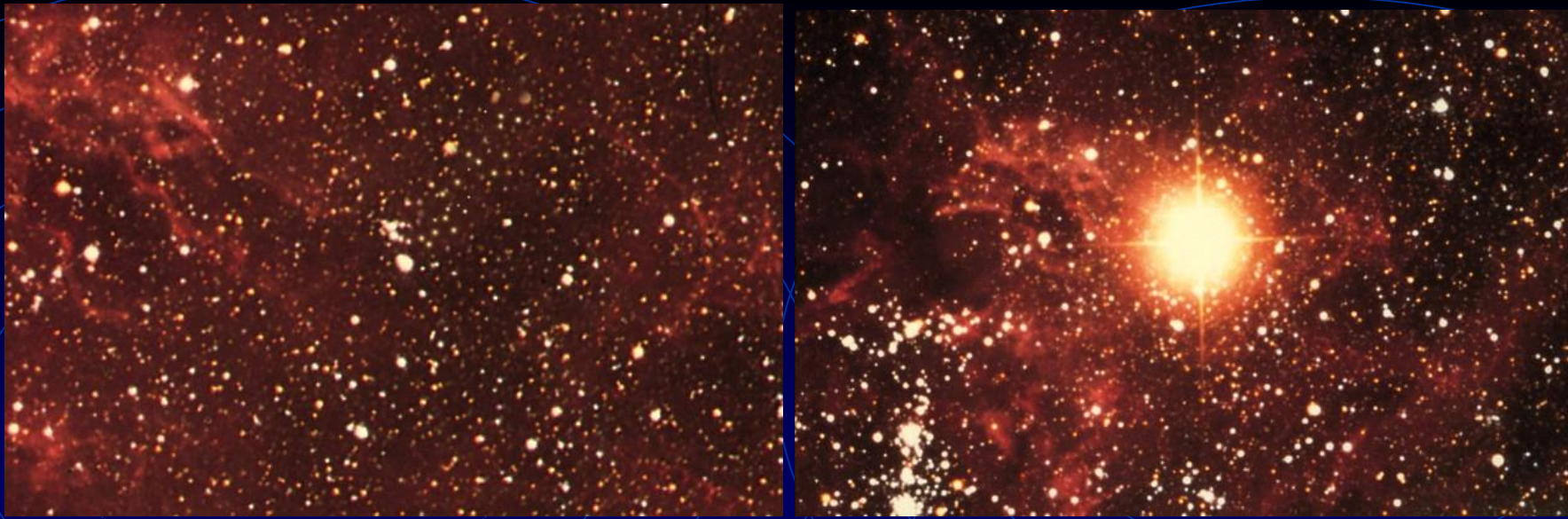
- (OB association in Scorpius-Centaurus 在2百萬年前距離地球 < 150 光年，曾發生超新星爆發)
- 1054 AD 中國超新星
- 1572 Tycho supernova
- 1604 Kepler supernova
- 下一個？



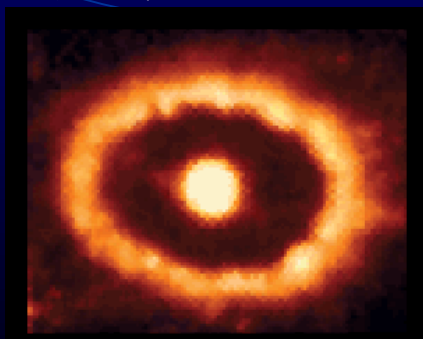
Chandra SN1604



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





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）

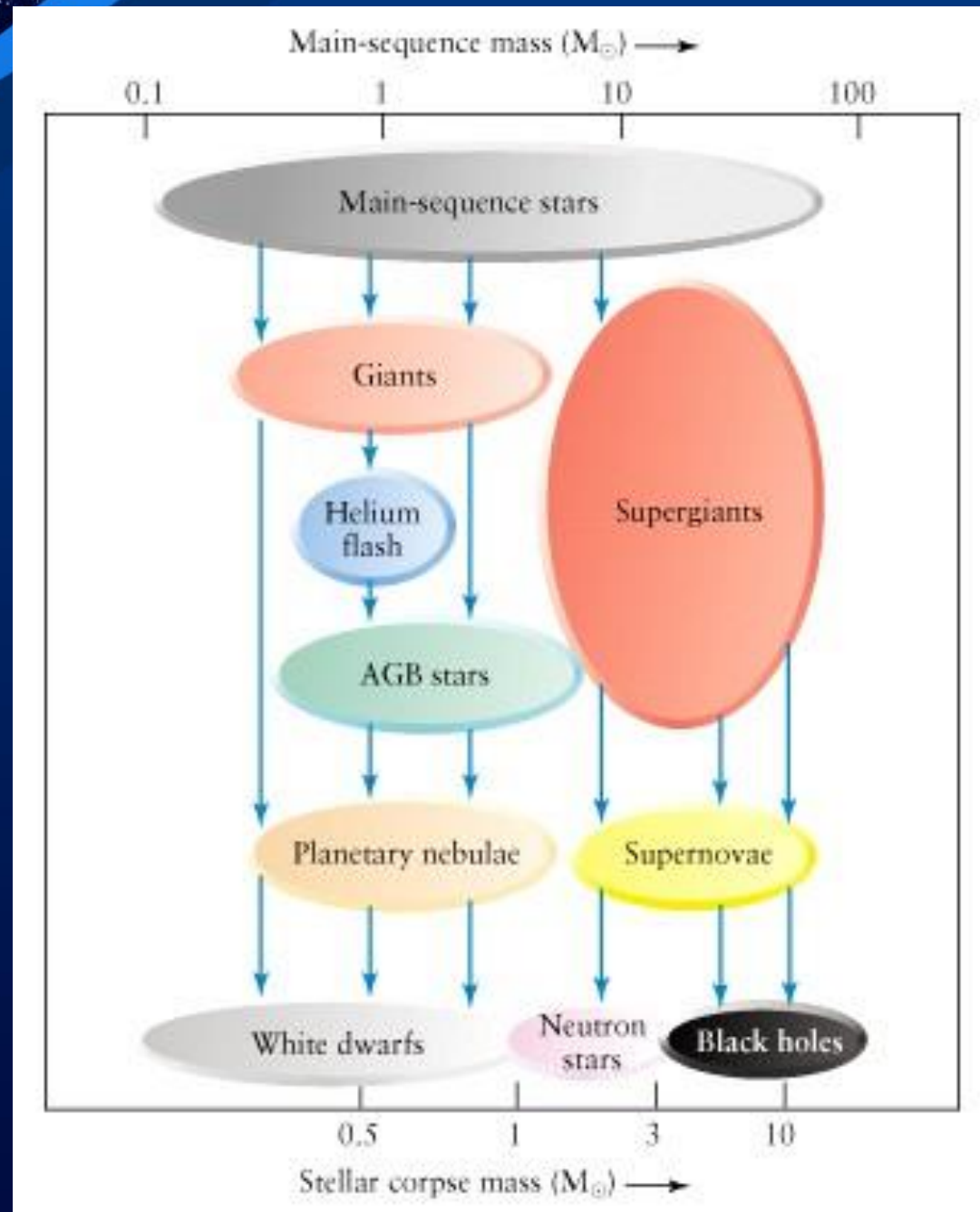
比太陽質量更大的恆星，一旦核心燃料用完，收縮成「中子星」（靠中子彼此推擠抵擋引力）

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）

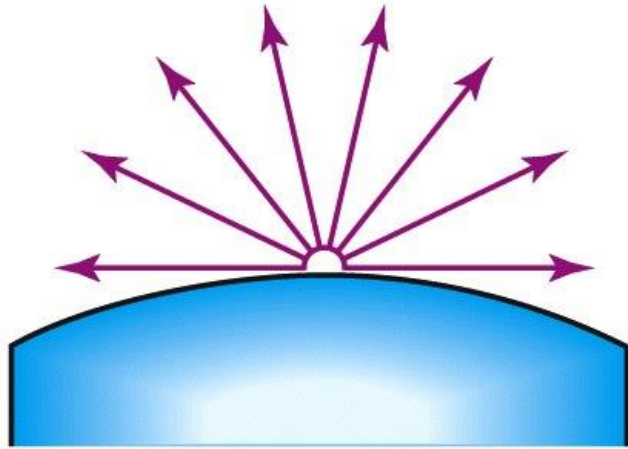
恆星在主序時的質量

質量流失

恆星死亡時（核心）的質量

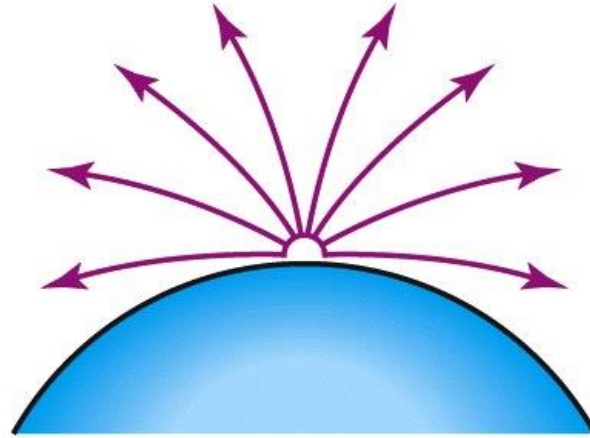


一般恆星引力小，發出的光線幾乎不受影響



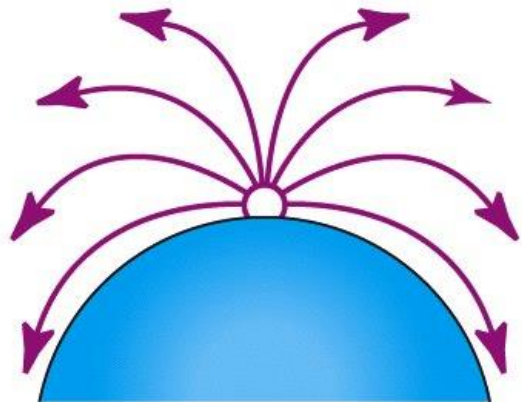
(a)

白矮星引力大，發出的光線稍許彎曲



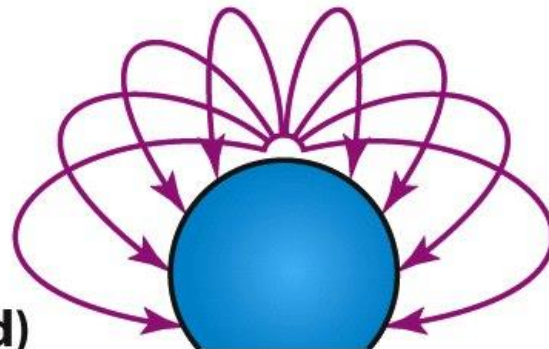
(b)

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



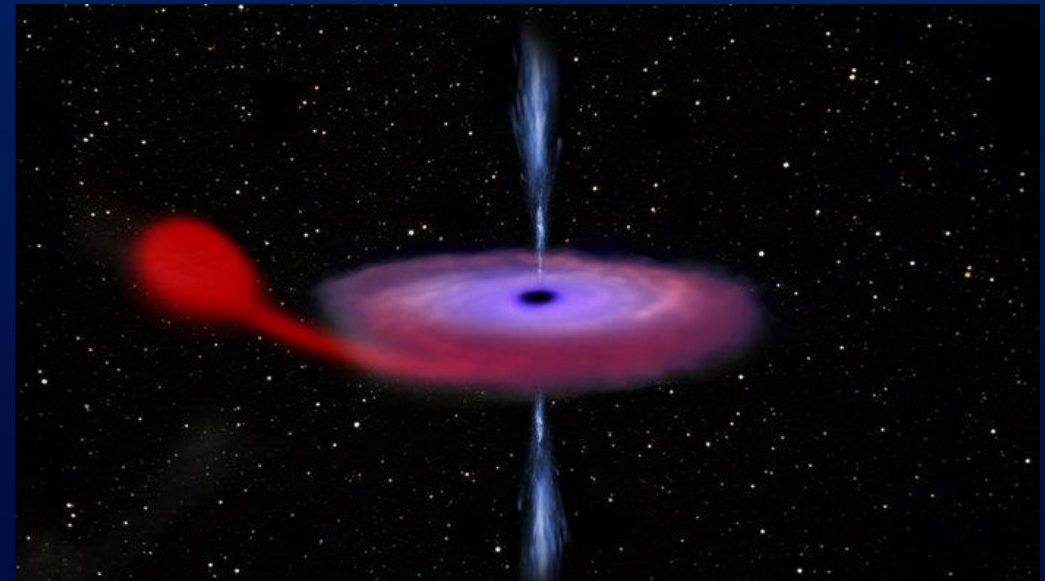
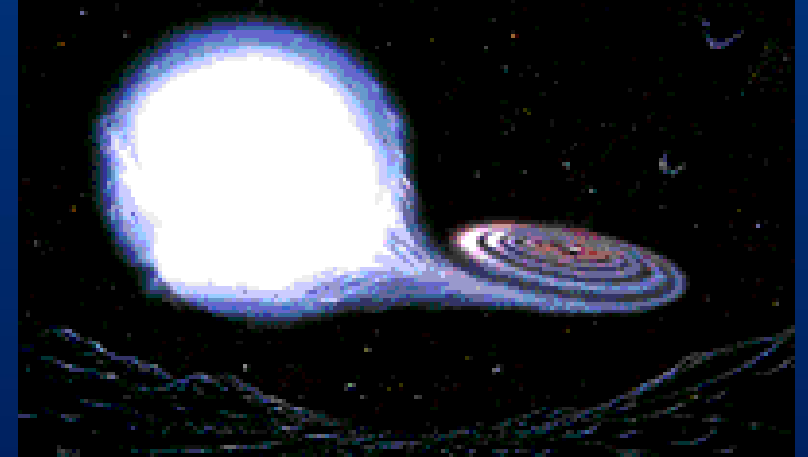
(d)

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

電影 星際效應
當中的黑洞特效

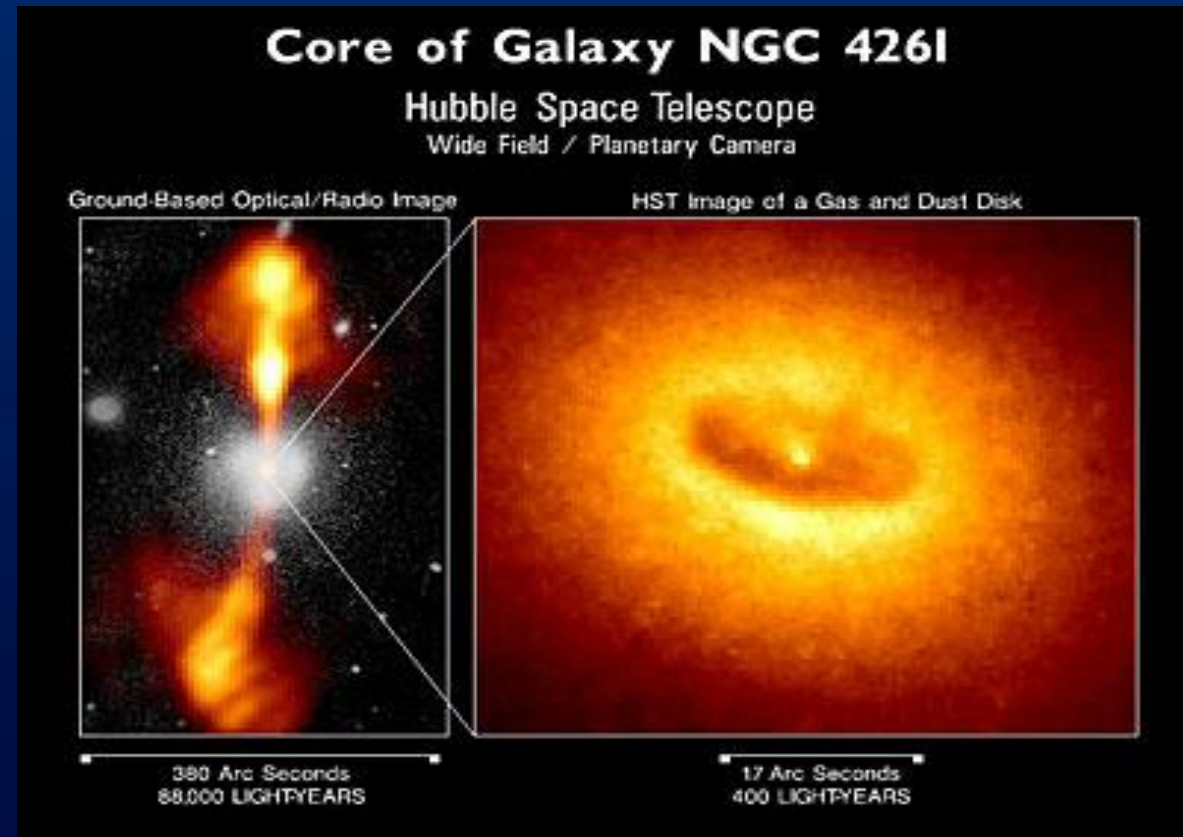


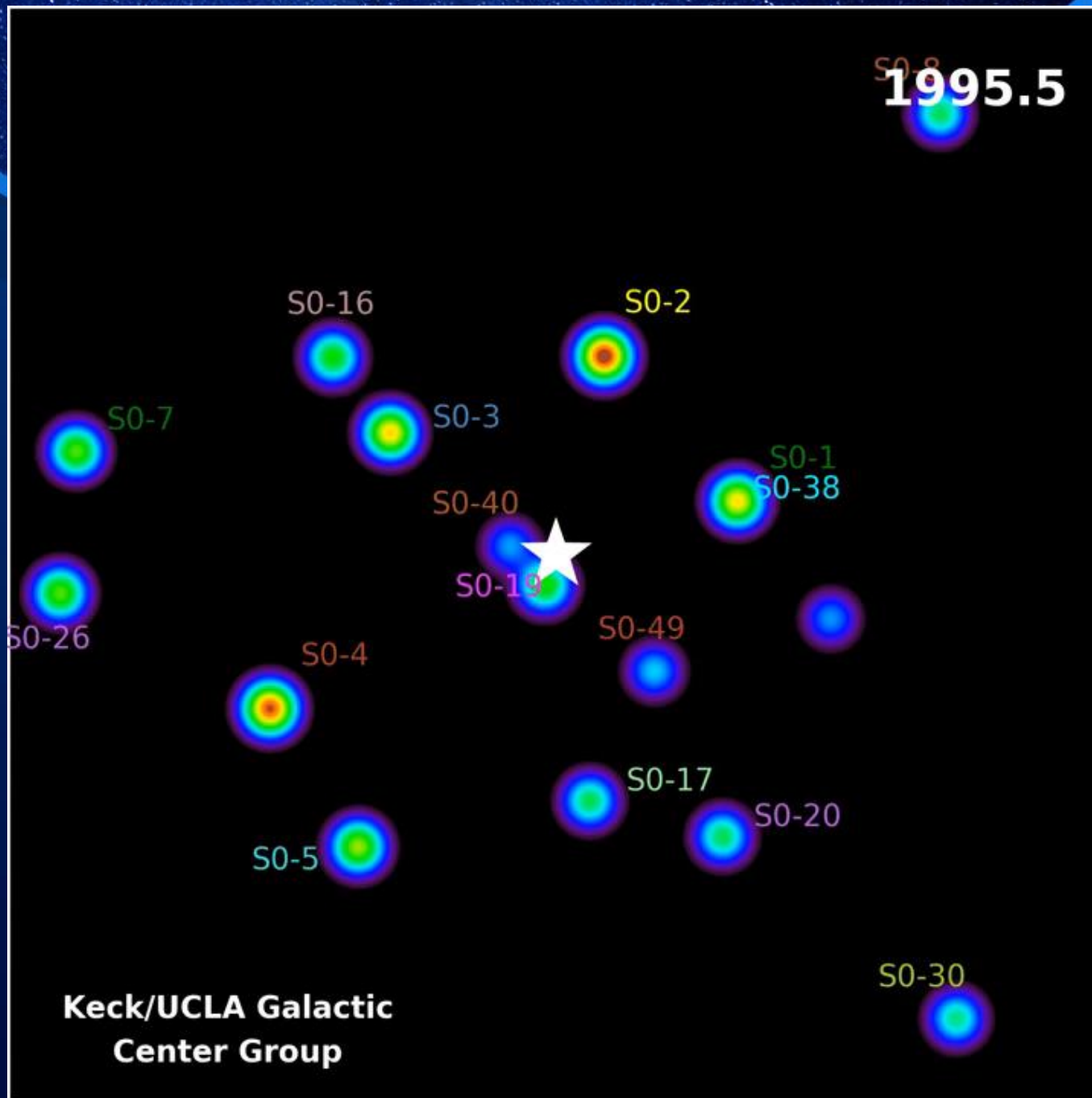
超大質量黑洞

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

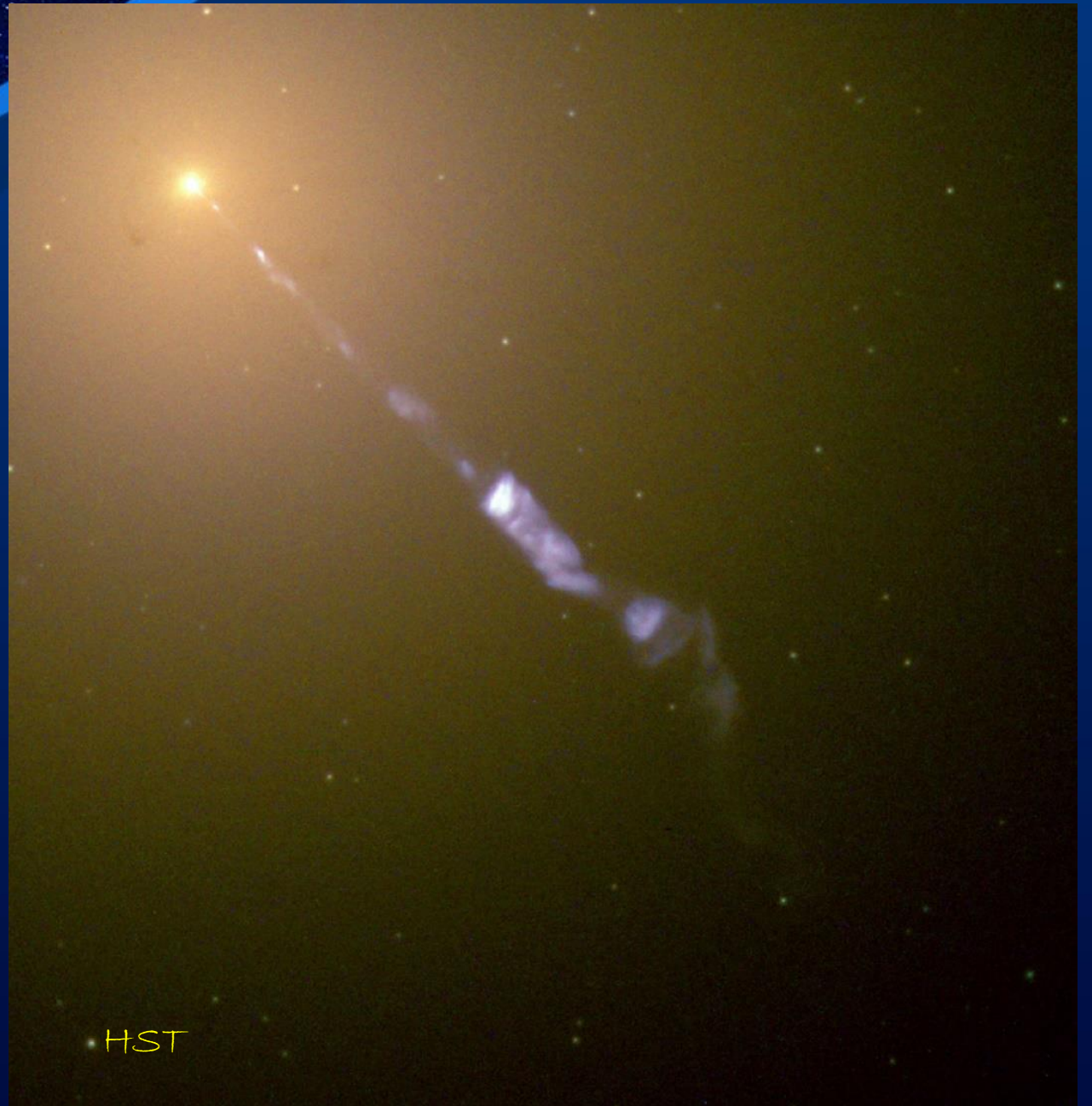




銀河系中心恆星的運動顯示有個大質量、但看不到影像的物體

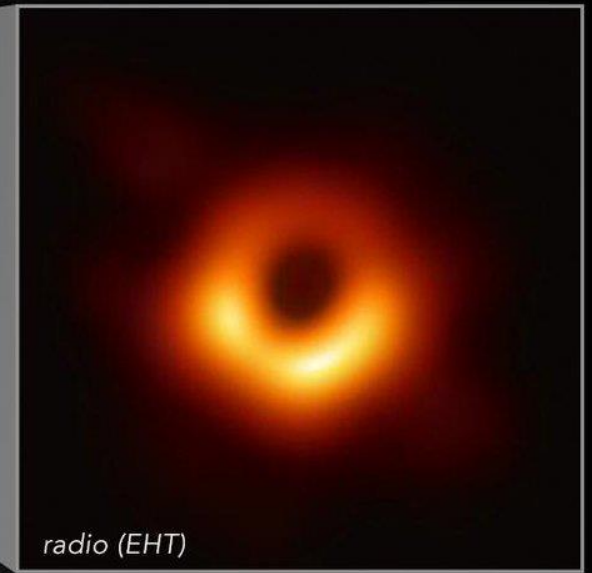
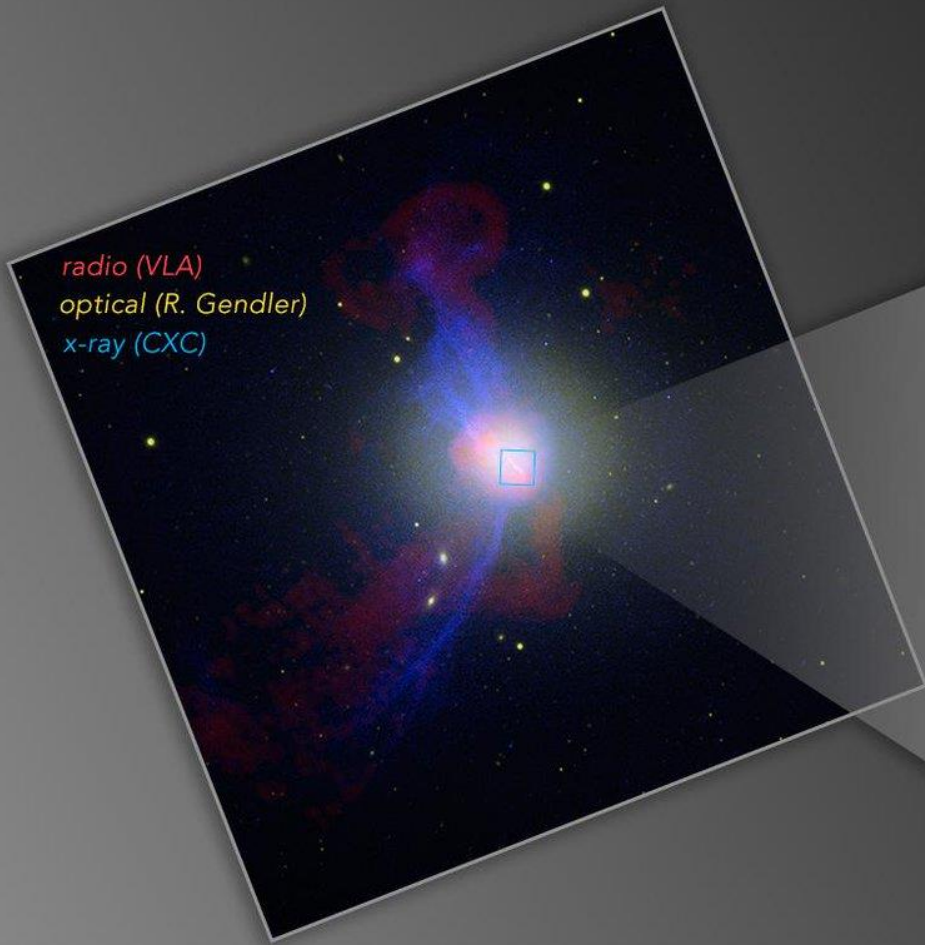


CFHT



HST

M87's Black Hole in Context

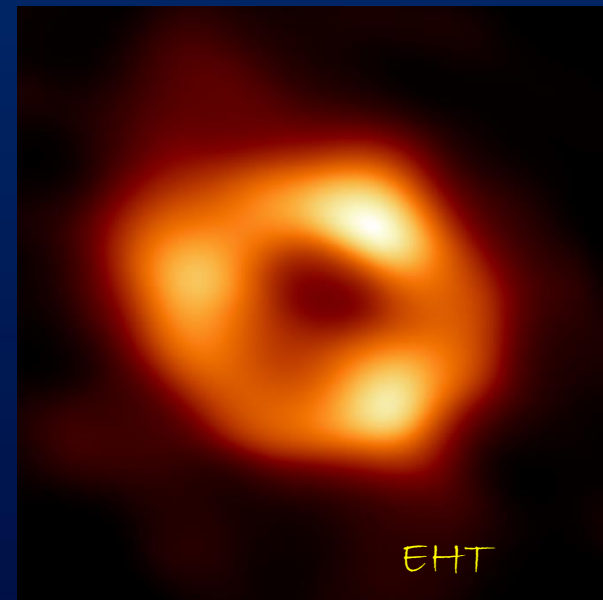
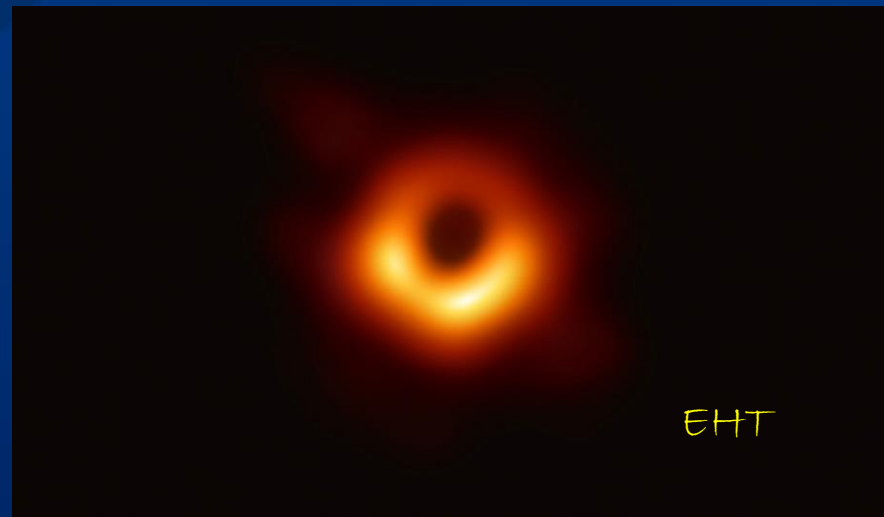


2017年「事件視界望遠鏡」(Event Horizon Telescope) 取得M87星系核心「超大質量黑洞」(相當於8億個太陽質量，大小38億公里)的剪影

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？

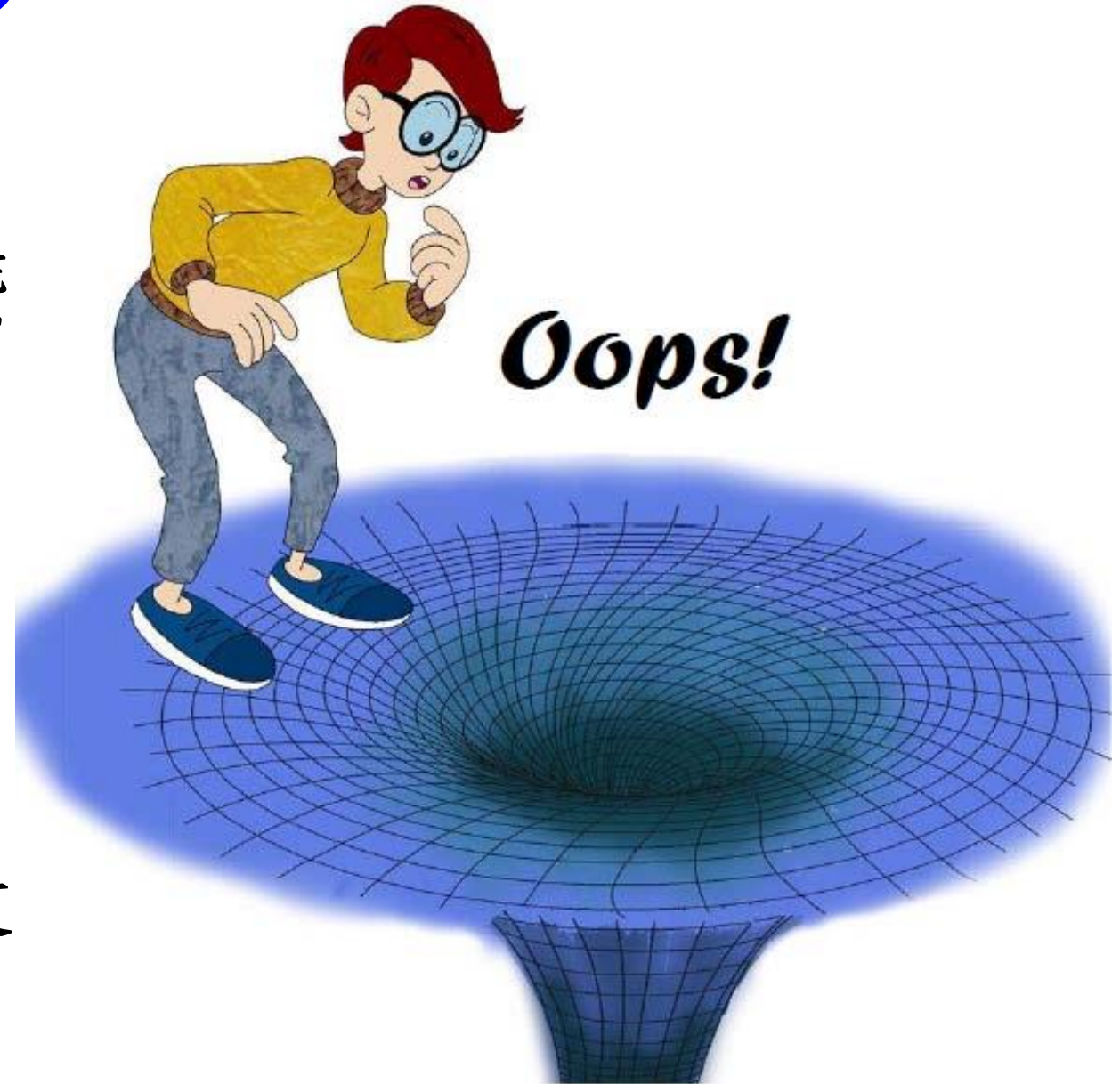
10^{53} kg, $R_s = 1.3 \times 10^{26}$ m (137 ly)

所以光線跑不出去；外面另有洞天？

宇宙原始黑洞？

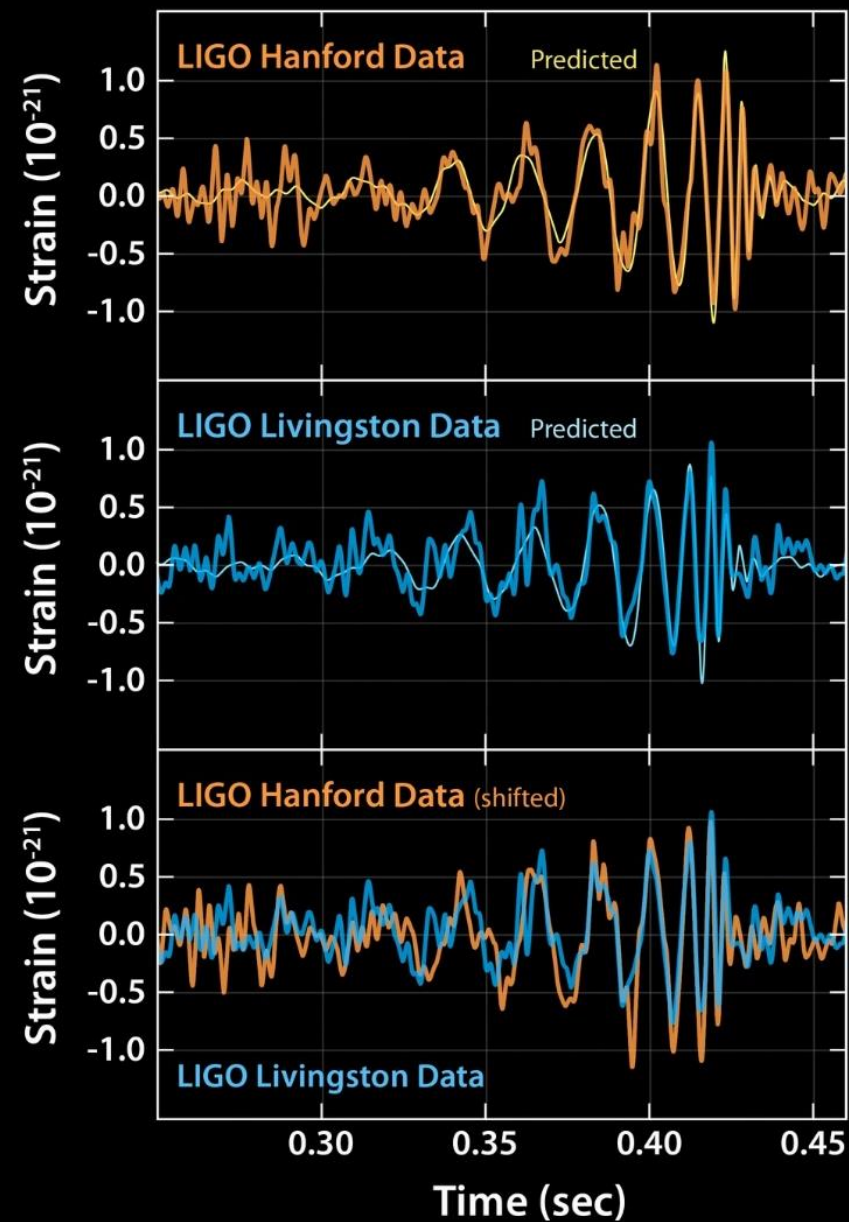
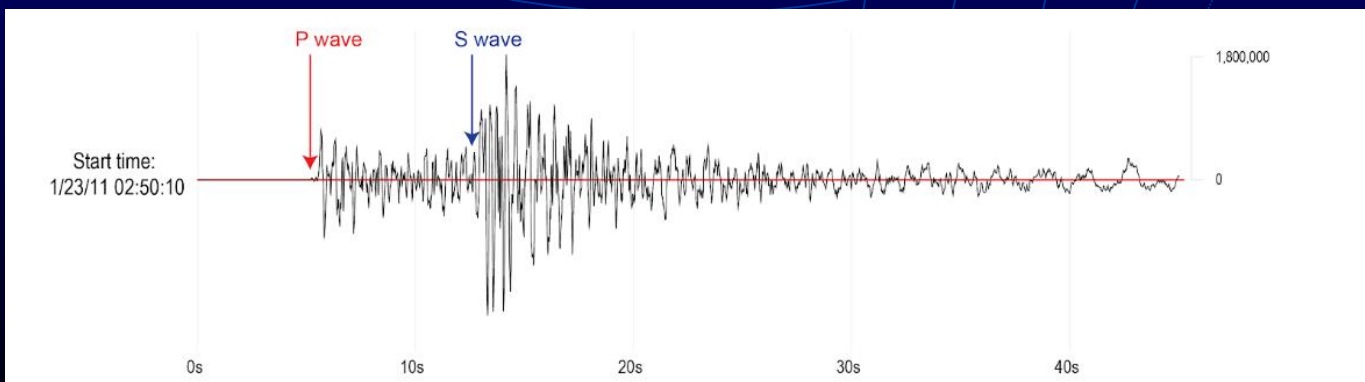
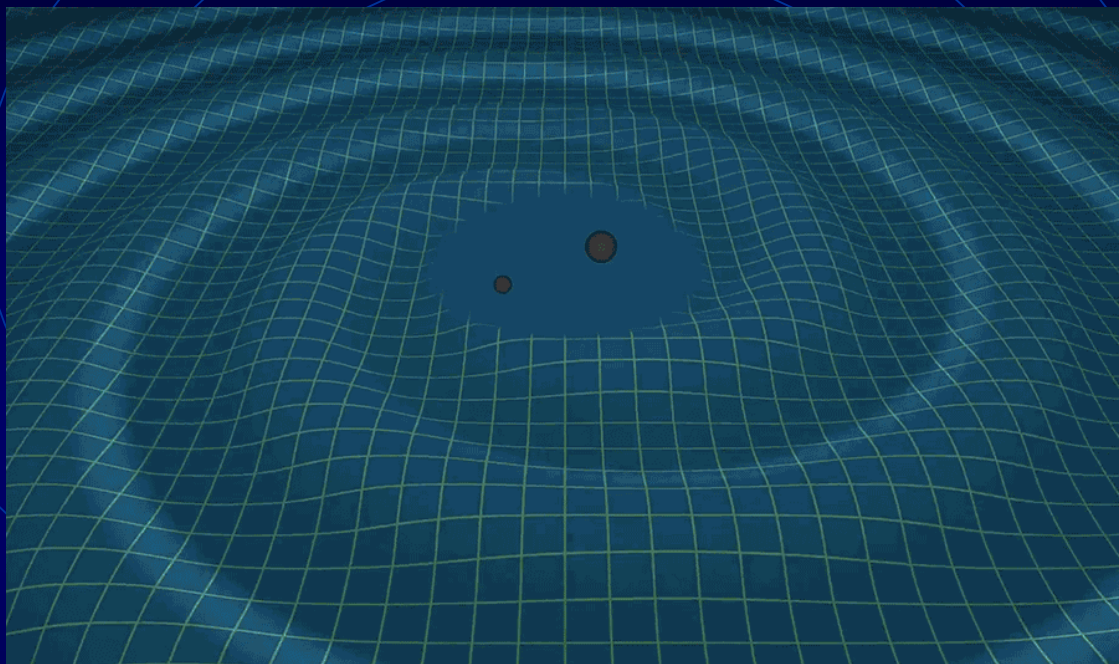
所以，掉進黑洞怎麼辦？

- ✓ 看是誰掉進去
- ✓ 不要驚慌，先判斷是什麼樣的黑洞？爬出來？
- ✓ 決定長高還是長胖
- ✓ 會變紅
- ✓ 會老得慢
- ✓ 可能出現在宇宙其他角落但是回不來



- ◆ 但以上沒有考慮恆星自轉、磁場
- ◆ 也沒有考慮群聚：星團、雙（多）星
- ✓ 恆星多成群形成（交互作用）
- ✓ 恆星多為雙星，尤其大質量恆星；互擾、拉扯、質量交換、再生、合併 ...
- ✓ 中子星、黑洞彼此合併，重力場瞬間改變 → 重力波

2016 年偵測到兩個黑洞合併引發的重力波



結論：所謂「恆星」種種 …

- 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
- 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
- 壽命百萬年到百億年，製造複雜元素
- 我們藉星光了解大半的宇宙（總有暗勢力）
- 源於塵土、歸於塵土