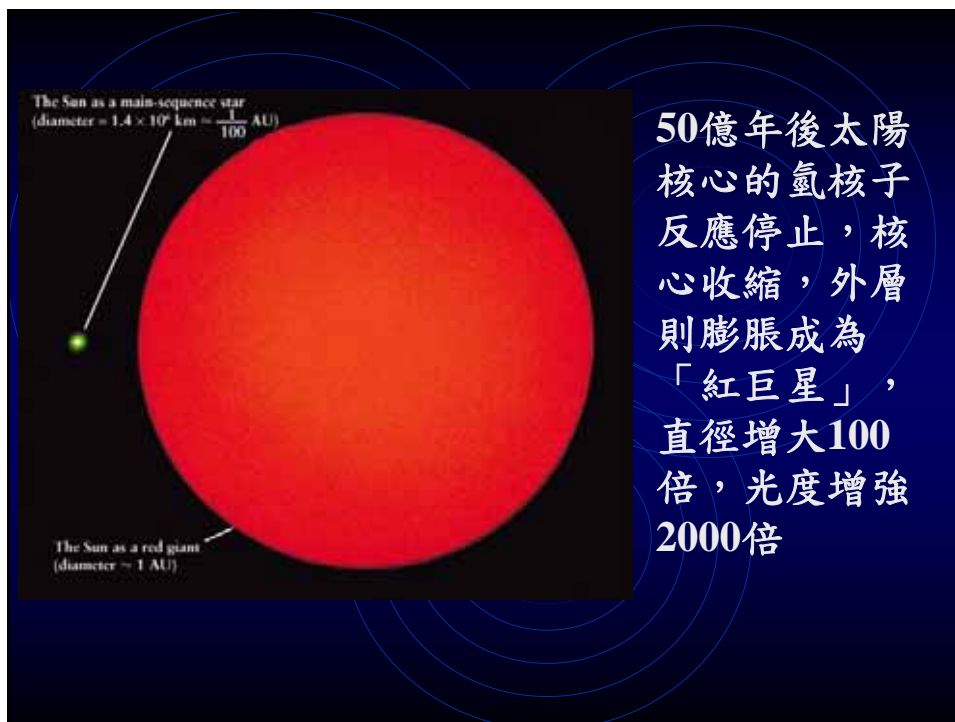


恆星的生老病死

- 核心無法承受萬有引力 → 收縮
- 收縮的核心溫度上升 → 點燃氦核反應
核心再度達到平衡狀態
→ 外層向外膨脹，溫度下降
- 我們看到外層變大、變冷（變紅）
→ 紅巨星
- 這時期星球結構不穩，收縮、膨脹
→ 脈動變星，例如**造父變星 (Cepheid variables)**



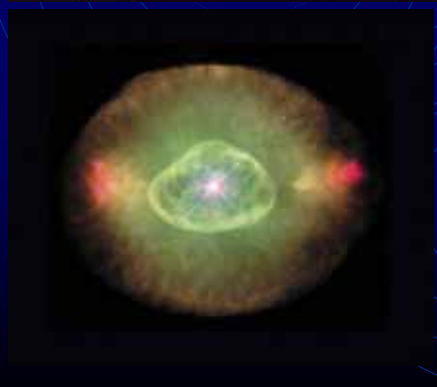
太陽步向晚年

- 核心氦用完 → 再收縮 → 再升溫
→ 點燃碳核子反應？
核心碳用完 ...
當再沒有下一級核反應 → 不再有能量來源
原子原來空蕩蕩（原子核很小），被擠壓
後可以撐住（不能再擠了，否則...）
熾熱的核心 → 白矮星 → 冷卻成黑矮星
- 外層向外擴散，逐漸與星際物質混合
→ 行星狀星雲 (planetary nebulae)
- 雲消霧散後，露出中央的白矮星

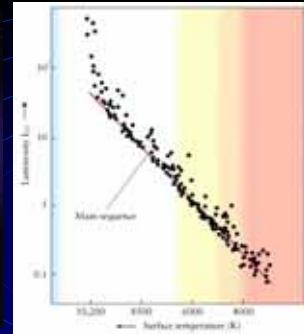


恆星演化晚期噴發出外層大氣，形成各種形狀的「行星狀星雲」

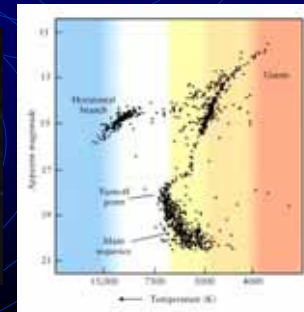
外觀成雲氣狀而稱之，實際上與行星無關



- **年輕星團：**
有各種質量成員星，分佈在赫羅圖主序上



- **年老星團：**
大質量恆星首先衰亡，然後輪到中等質量恆星，接著依照質量陸續離開主序



- 主序星的質量與光度關係 (mass-luminosity relation; **質光關係**)

Roughly $L \sim M^{3.5}$

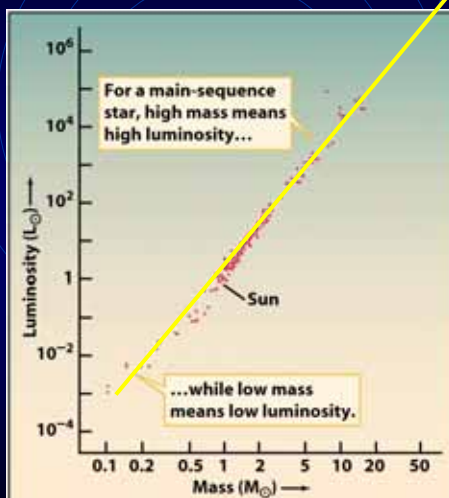


Figure 11-12a
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2000 W. H. Freeman and Company

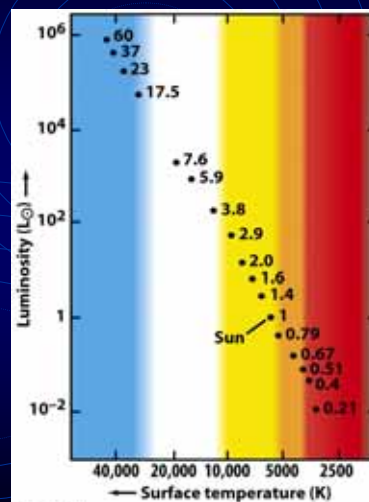


Figure 11-12b
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2000 W. H. Freeman and Company

恆星的壽命（主序年齡）

- 大質量恆星非常明亮 $L \sim M^{3.5}$
- 恆星光度 L [ergs/s] = 消耗能量的速率
- 恆星質量 $M \rightarrow$ 可用的核能
 \rightarrow 主序年齡 $\sim M/L \sim M^{-2.5}$

主序星的壽命 \propto (恆星質量) $^{-2.5}$

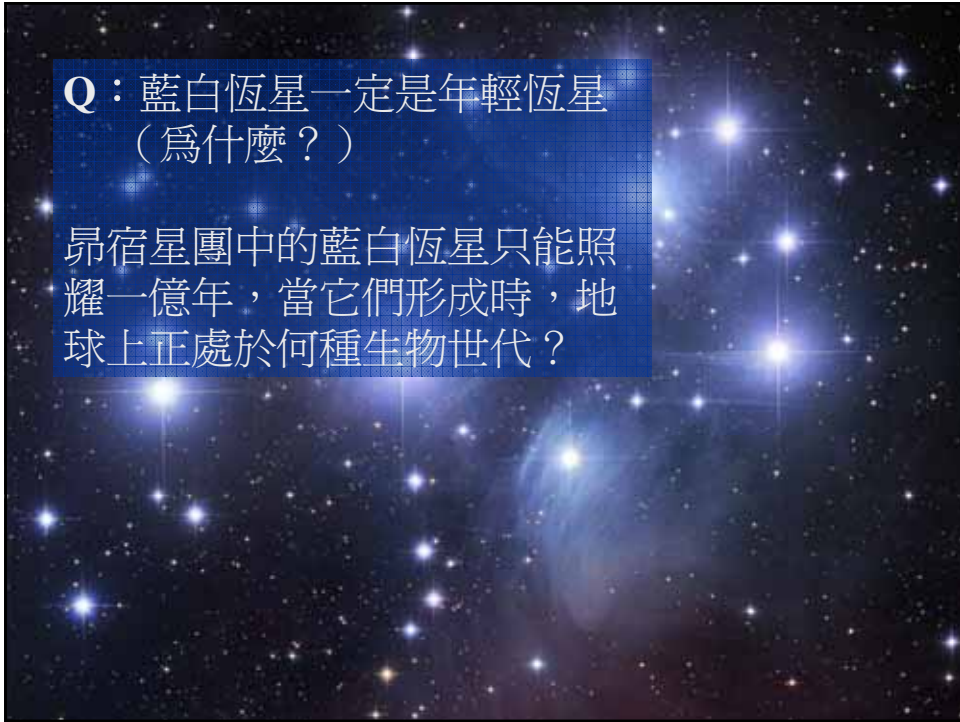
- 這表示質量越大的恆星，其主序的壽命越短（得多），例如質量為太陽10倍的恆星 ($10 M_{\odot}$) 其主序壽命只有太陽（100億年）的0.3%，也就是只有數千萬年。

Table 10-1 Main-Sequence Lifetimes

Mass (M_{\odot})	Surface temperature (K)	Luminosity (L_{\odot})	Time on main sequence (10^6 yrs)	Spectral class
25	35,000	80,000	3	O
15	30,000	10,000	15	B
3	11,000	60	500	A
1.5	7000	5	3,000	F
1.0 (Sun)	6000	1	10,000	G
0.75	5000	0.5	15,000	K
0.50	4000	0.03	200,000	M

Q：藍白恆星一定是年輕恆星
（為什麼？）

昴宿星團中的藍白恆星只能照耀一億年，當它們形成時，地球上正處於何種生物世代？



Q：為什麼反光雲氣看起來呈藍色？

q：為什麼晴天的天空是藍色？為什麼夕陽是紅色？

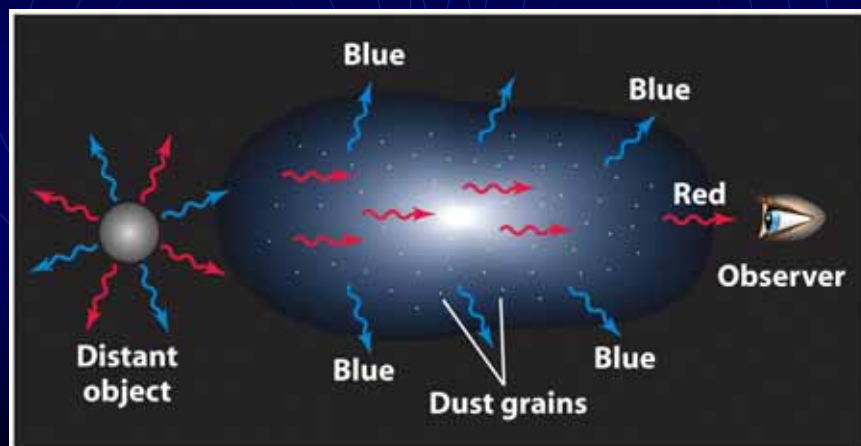


http://www.techspot.com/gallery/data/504/medium/13880Blue_Sky.jpg



http://www.edenpics.com/main_details.phtml?l=en&m=g&t=d&pic=003-005

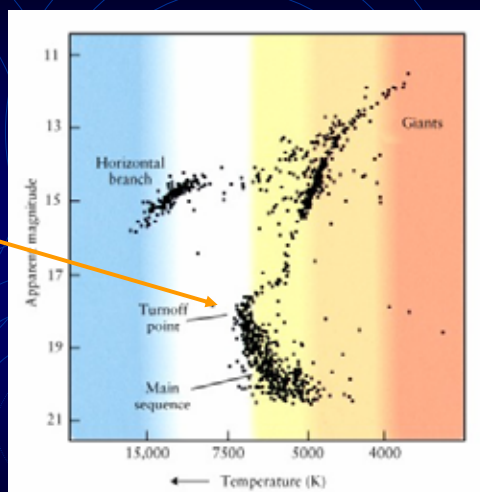
A：紅光波長較長，比較容易「超越障礙」，穿越而出



星團中的恆星同時、從
同一團雲氣形成
→ 年齡、距離、
成分都相同

質量比**轉折點 (turnoff point)** 大的主序星已經
衰亡，成為紅巨星

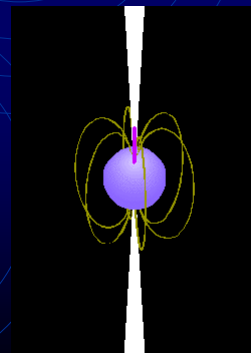
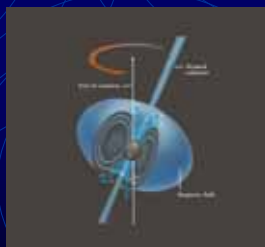
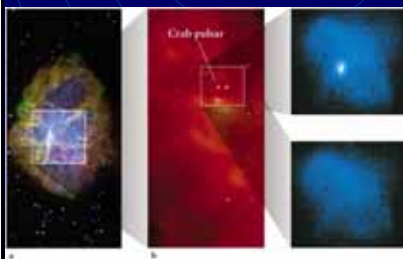
→ 轉折點的恆星壽命，
就是該星團的年齡



中質量恆星晚年

- 核心消耗速度快，收縮快，點燃下一級核反應劇烈
- 核心萬有引力強，連擠壓原子的力量都撐不住 → 原來貼靠在原子核外面的電子被擠進原子核，結合成中子
→ **中子星 (neutron star)**
- 劇烈收縮造成強力反彈，把外層爆發開
→ **超新星爆發 (supernova explosion)**
- 爆發期間，比整個銀河系還要明亮

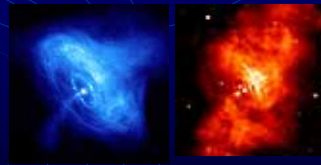
- 中子星比白矮星還小得多。太陽核心成爲白矮星，大小約與地球相當
- 中子星大小只有10公里左右，與中壢市相當
- 磁場巨大，同時旋轉快速 → **脈衝星 (pulsar)**
每秒數百到數千次脈衝（燈塔效應）



http://www.amherst.edu/~gsgreenstein/progs/animations/pulsar_beacon/

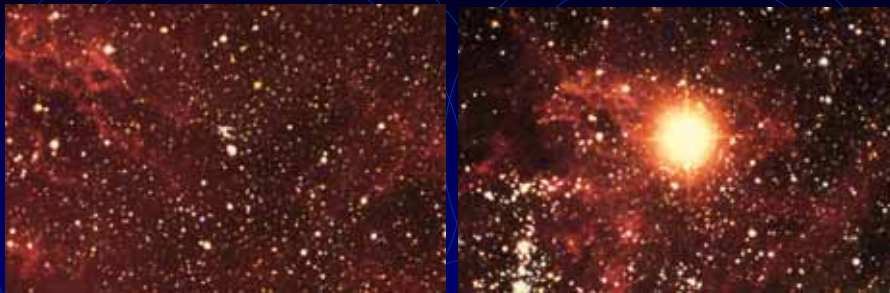
© 2004 The Trustees of Amherst College. www.amherst.edu/~gsgreenstein/progs/animations/pulsar_beacon/

位於金牛座方向的蟹狀星雲 (Crab Nebula)，距離我們 6500 光年，源於 AD1054 年超新星爆發（當時中國天官記錄有詳細記載，故稱為「中國超新星」。星雲本身的大小約 6 光年乘以 4 光年，以每秒 1000 公里速率向外膨脹

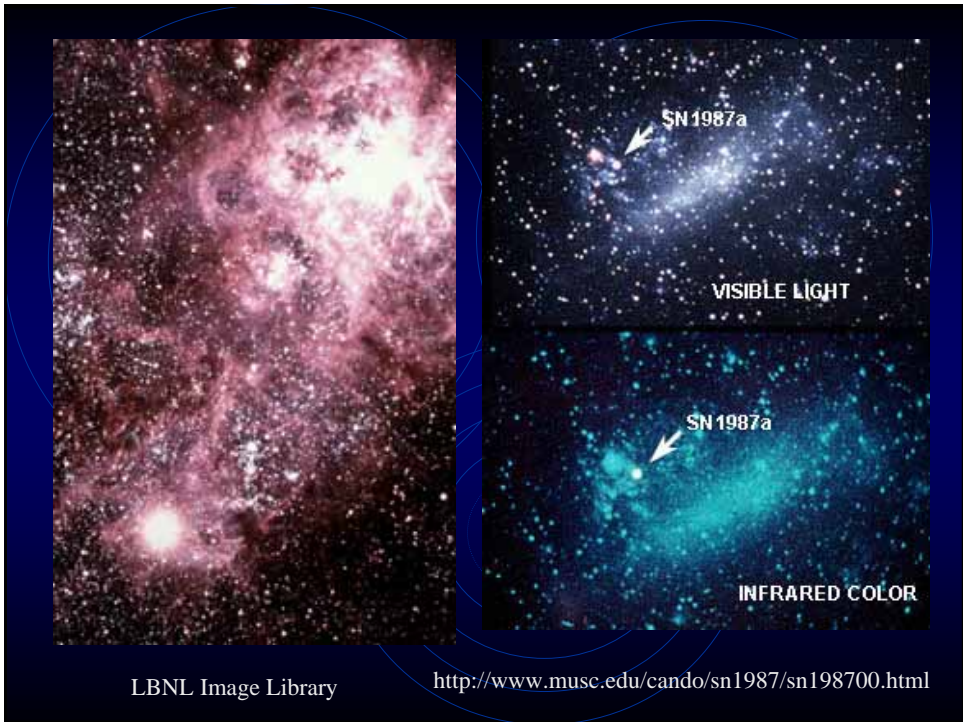


Chandra and HST pulsar wind

<http://chandra.harvard.edu/resources/animations/pulsar3.html>

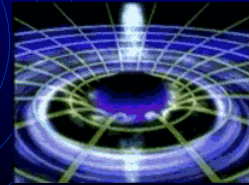


SN 1987A 位於銀河系鄰近的星系 Large Magellanic Cloud 當中，原來是不起眼的星體，於1987年2月爆發時耀眼異常



大質量恆星晚年

- 例如質量大於太陽8倍
- 連形成中子（原子核本身的支撐力量）都抵擋不住巨大的萬有引力
→ 星體塌縮
- 強大的萬有引力連光線都跑不出來
→ **黑洞 (black hole)**
- 黑洞是種物質狀態，其「表面」的逃脫速度等於光速



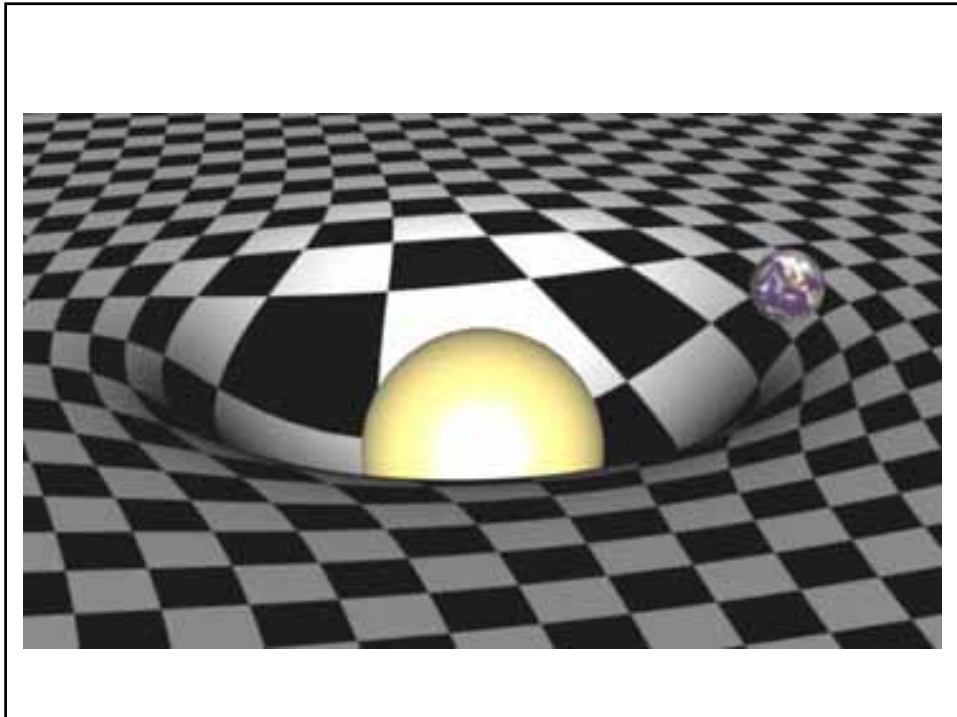
逃脫速度 (escape velocity)

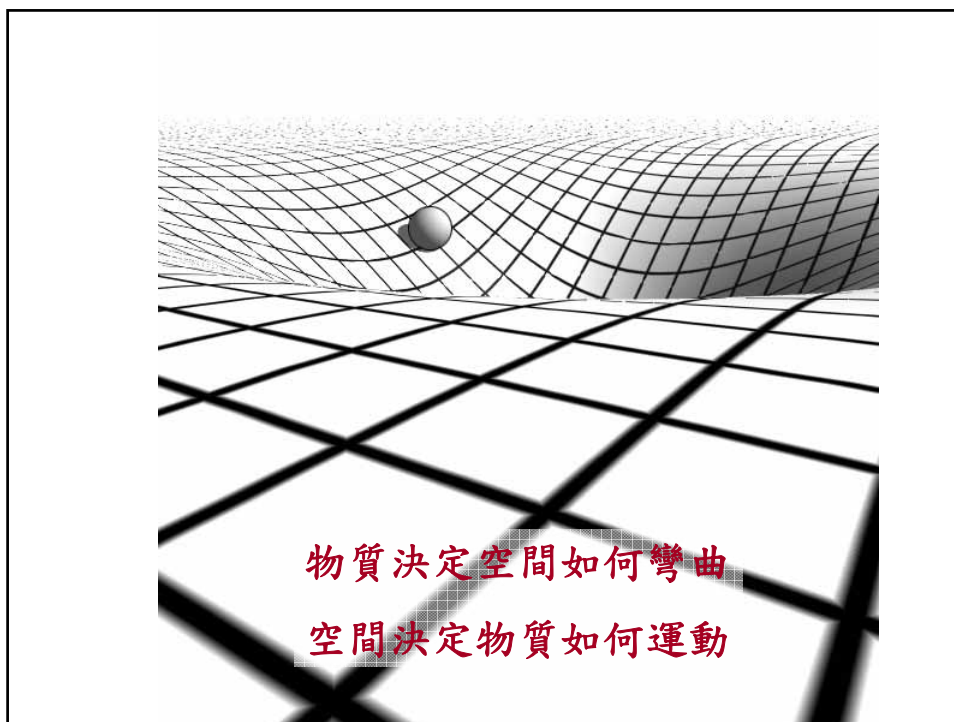
- 拋個銅板向上...銅板向上飛，達到最高點後停止，接著向下飛
- 如果用力拋個銅板向上...
- 但是如果真的很用力（夠快），越高處離地心越遠，引力越弱，便無法讓銅板停止
- 這個開始拋速度稱做「逃脫速度」
- 地球的 escape velocity 為 40,200 km/h 或 11 km/s；大於這個速度毋須額外力量就可脫離地球



**Q：如果太陽塌縮成了黑洞，
對地球有何影響？**

- 會被吸進去嗎？
- 不再有春、夏、秋、冬？
- 從此適合天文觀測？

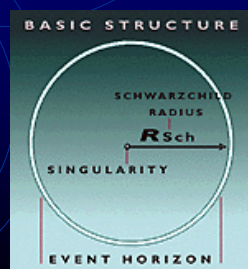




- 決定某個天體逃脫速度的因素包括它的質量以及大小（直徑）

$$V_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- 若某天體相對於體積，質量很大，逃脫速度等於光速 → 黑洞
- 該半徑稱為 **Schwarzschild radius**（史瓦茲半徑），該球面稱為 **事件地平面 (event horizon)** 其內的訊息跑不出來



史瓦茲半徑有多大？

- $R_{\text{Sch}} \sim 3 (M/M_{\odot}) \text{ [km]}$

其中 M 代表黑洞的質量， M_{\odot} 為太陽質量

- 如果太陽成為黑洞，半徑約為 3 公里
- 如果地球成為黑洞，半徑約為 1 公分
- 質量為太陽質量 1 億倍的黑洞，其大小為...

這相當於多大？（和地日距離比）
密度呢？

質量為太陽質量 ($2 \times 10^{30} \text{ kg}$) 1 倍的黑洞，
其大小為 $R_{\text{Sch}} \sim 3 \text{ km}$

$$\text{密度} \sim M/R^3 \sim 2 \times 10^{19} \text{ kg/m}^3$$

水的密度為 1000 kg/m^3

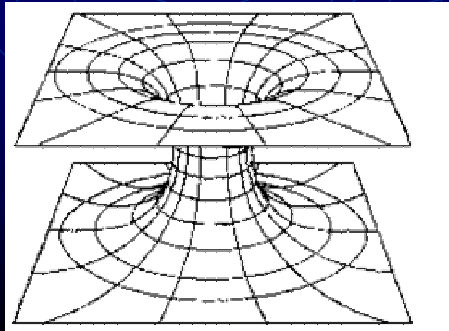
質量為太陽質量 1 億倍的黑洞，其大小
為 $R_{\text{Sch}} \sim 3 \times 10^8 \text{ km}$

與地日距離 = $1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 相當

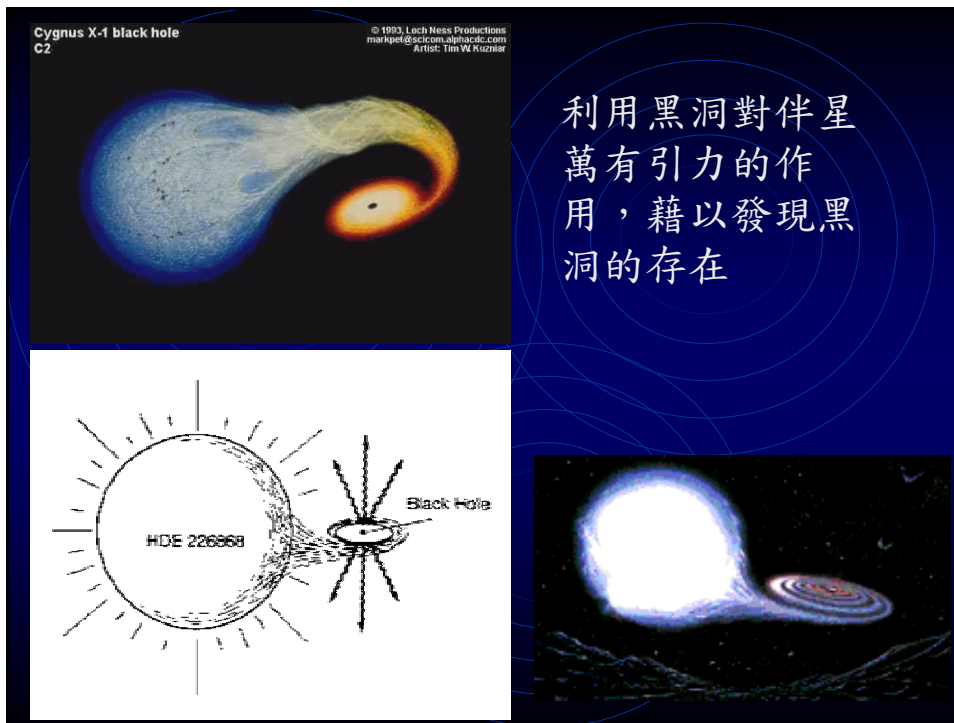
密度 $\sim 2000 \text{ kg/m}^3$ 與水的密度相當！

時空扭曲，
可以成為
「捷徑」，
通往宇宙其
他角落？

時空旅行？



Q: 既然看不見黑洞，那怎麼
知道黑洞存在呢？



恆星的質量範圍

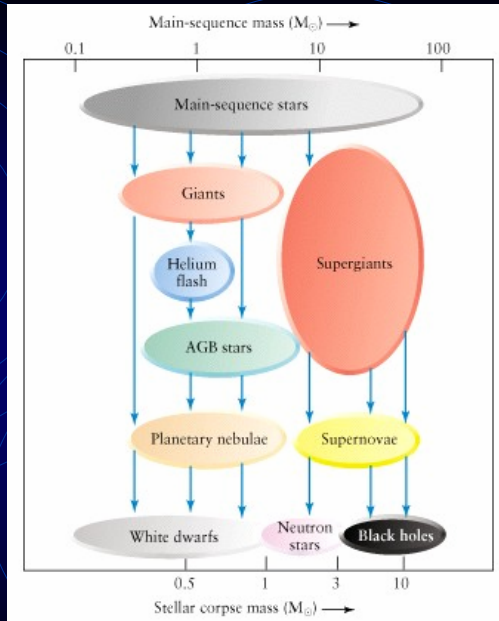
- 質量太小 ($< 0.08 M_{\odot}$) 的星體，中央溫度不足以點燃氫核反應
- 質量太大 ($> 150 M_{\odot}$ ，不很確定) 的星體，核反應太劇烈，萬有引力無法平衡強大的輻射壓力，星體結構不穩定

→ 恆星的質量範圍約在 $0.08 \sim 150 M_{\odot}$ 之間

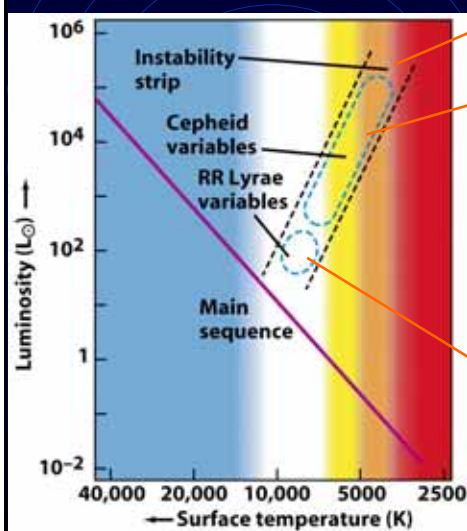
恆星在主序時的質量

質量流失

恆星死亡時的質量



變星 (Variable Stars)



不穩定帶 → 星球脈動

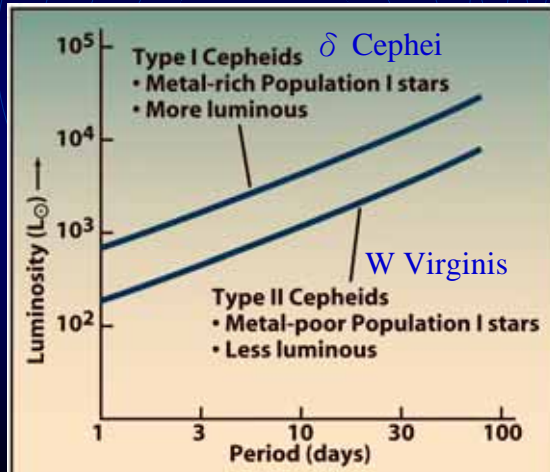
位於不穩定帶中的大質量星球，稱為 Cepheid variables (造父變星) 或簡稱 Cepheids。P > 1 d

位於不穩定帶中的低質量星球稱為 RR Lyrae variables (天琴座 RR 變星)。它們的週期 < 1 d

Figure 12-28
Discovering the Universe, Seventh Edition
© 2006 W. H. Freeman and Company

體積越大（光度大）的 Cepheids，脈動得越慢

Period-luminosity relation (週光關係)



Cepheids 光度大，即使遙遠星系當中亦可觀測

週期 → 光度 → 變星與其宿主星系 (hosting galaxy) 的距離

造父變星是**測量宇宙距離**的重要工具

一些星系的核​​心可能也有超大質量黑洞

