

這是一個大問題

- 我們的太陽有幾歲了？
- 他還可以再燃燒多久呢？

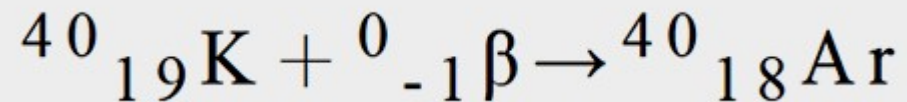
太陽存在了大約50億年
還可以再燃燒50億年

太陽有幾歲了？千歲、萬歲、萬萬歲！

放射性定年法

利用測定被測定物中某些放射性元素與其衰變產物的比率，之後應用這種放射性元素半衰期計算年代的方法，亦被稱為絕對定年法。

- 鉀氬定年法 - 鉀-40衰變為氬-40。

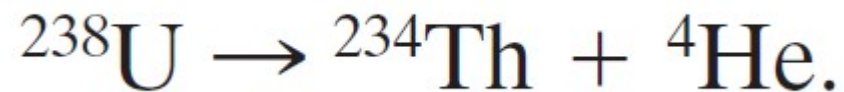


- 氬氣在石頭為液體（岩漿或熔岩）時會自由逃逸
- 鉀-40不穩定，半衰期=12.48億年

放射性衰變提供了第一個證據，即掌控次原子世界的法則是**機率性的**。例如，考慮**1mg**的鈾金屬樣品，它包含 **2.5×10^{18}** 原子，它們是非常長壽命的放射性核素 ^{238}U 。這些特殊原子的原子核已經存在而且沒有衰變，因為它們是在太陽系形成之前產生的。在任何給定的**1秒**內，在**1mg**樣本中只有大約**12**個原子核會通過放射 **α** 粒子而發生衰變，從而將自身轉化為 ^{234}Th 的原子核。我們完全沒有辦法預測放射性樣品中的任何給特定原子核是否會在下一秒內衰變，所有的原子核都有相同的機率。



鈾-**238**的半衰期為**44.7**億年約是地球的年齡



如果樣品含有 N 個放射性原子核，那麼原子核

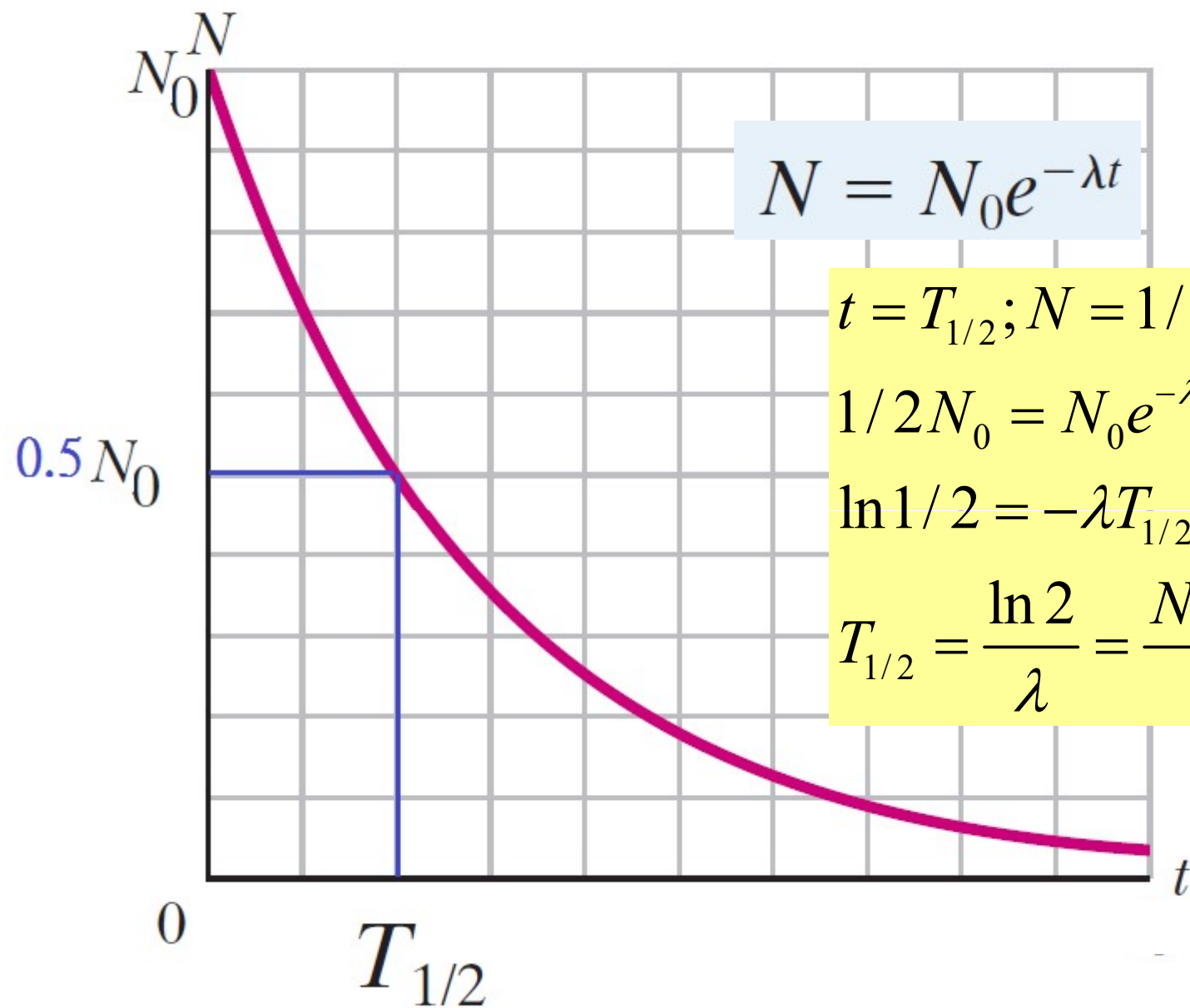
衰變的速率 ($= -dN/dt$) 與 N 成正比：**the decay rate R ($-dN/dt$)**

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt,$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{t_0}^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$
$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda(t - t_0).$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$



衰變率the decay rate R ($=-dN/dt$)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \longrightarrow \quad R = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

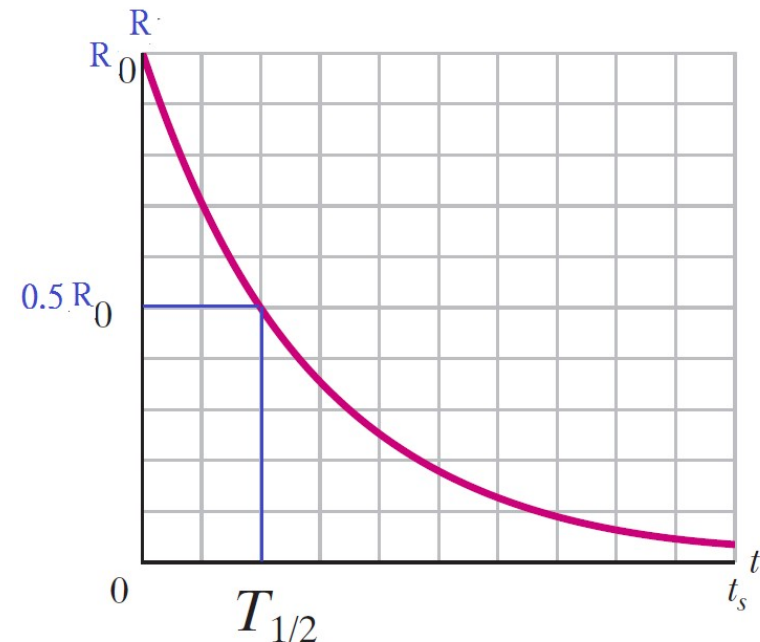
$$R = \lambda N,$$

R_0 is the decay rate at time $t=0$

1 becquerel = 1 Bq = 1 decay per second.

貝可

例如半衰期為一小時的原子，一小時後其未衰變的原子會剩下原來的 $1/2$ ，兩小時後會是 $1/4$ ，三小時後會是 $1/8$ 。從衰變率的觀點，在第一個小時發生衰變的原子核數量是原本的 $1/2$ ，但是在第二個1小時之內卻只有 $1/4$ 的數量會發生衰變，第三個1小時之內只有原本的八分之一的原子核發生衰變。衰變率也是隨著時間呈現指數衰減。



發現來自化學庫房的**2.71g KCl**樣品具有放射性，並且以**4490Bq**的恆定速率衰變。衰變可以追溯到元素鉀，特別是同位素⁴⁰K，它佔有正常鉀的**1.17%**。計算這種核元素的半衰期。

$$\text{KCl}=39.102+35.453=74.555$$

$$N_{\text{KCl}} = \frac{(2.71 \text{ g})(6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})}{74.555 \text{ g/mol}} = 2.188 \times 10^{22}$$

$$\begin{aligned} N &= 0.0117N_{\text{K}} = (0.0117)(2.188 \times 10^{22}) \\ &= 2.560 \times 10^{20}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= \frac{N \ln 2}{R}, & T_{1/2} &= \frac{(2.560 \times 10^{20}) \ln 2}{4490 \text{ s}^{-1}} \\ & & &= 3.95 \times 10^{16} \text{ s} = 1.25 \times 10^9 \text{ y}. \end{aligned}$$

對月球岩石樣品中的鉀原子和氬原子的質譜分析表明，（穩定的） ^{40}Ar 原子數量與（放射性） ^{40}K 原子數量之比為**10.3**。假設所有的氬原子都是由鉀原子衰變產生的，半衰期為 **1.25×10^9** 年。岩石的年齡多大了？

(1)如果在從熔融形式凝固岩石時存在 N_0 鉀原子，則分析時剩餘的鉀原子數為 N_K ，

$$N_K = N_0 e^{-\lambda t},$$

其中 t 是岩石的年齡。

(2)每個衰變的鉀原子都會產生一個氬原子。因此，分析時存在的氬原子的數量 N_{Ar} 是

$$N_{\text{Ar}} = N_0 - N_K.$$

$$\lambda t = \ln \left(1 + \frac{N_{\text{Ar}}}{N_K} \right),$$

$$N_{\text{Ar}} = N_0 - N_K = N_0 - N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_{\text{Ar}} = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

$$e^{-\lambda t} = 1 - \frac{N_{\text{Ar}}}{N_0}$$

$$\lambda t = \ln \left(1 + \frac{N_{\text{Ar}}}{N_0} \right)$$

N_{Ar}/N_K can be measured **=10.3**

$$\lambda t = \ln \left(1 + \frac{N_{\text{Ar}}}{N_{\text{K}}} \right),$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \text{半衰期}$$

$$t = T_{1/2}; N = 1/2 N_0$$

$$1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln 1/2 = -\lambda T_{1/2} = -\ln 2$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{N \ln 2}{R}$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_{1/2} \ln(1 + N_{\text{Ar}}/N_{\text{K}})}{\ln 2} \\ &= \frac{(1.25 \times 10^9 \text{ y})[\ln(1 + 10.3)]}{\ln 2} \\ &= 4.37 \times 10^9 \text{ y}. \end{aligned}$$

其他月球或陸地岩石樣品可以找到較小的年齡，但沒有更大的年齡。因此，太陽系形成後不久就形成了最古老的岩石，太陽系必然有約**40**億年的歷史。

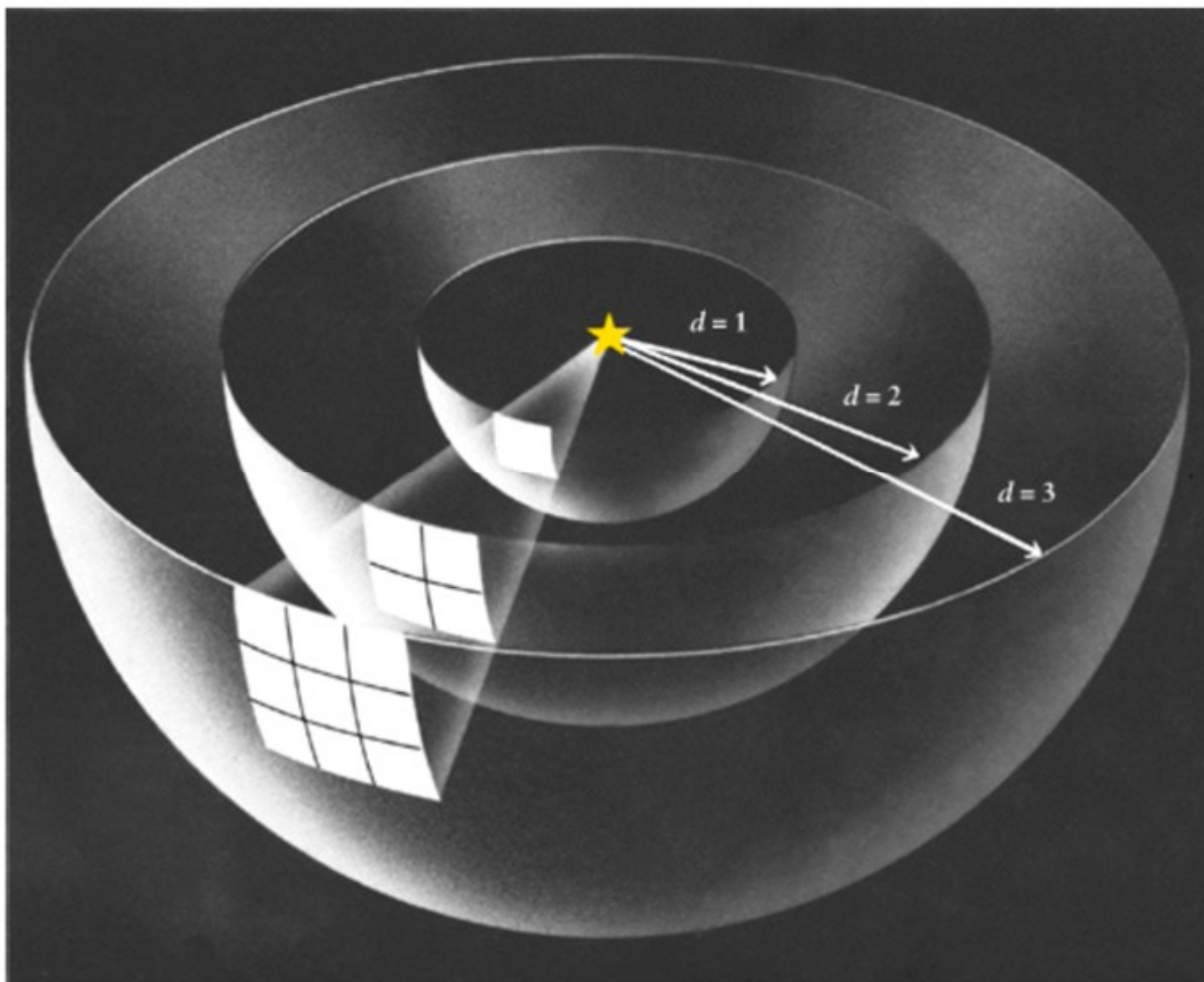
要計算太陽就進能夠燃燒多久我們就必須先知道下面幾項數據：

- 太陽燃燒的機制到底是什麼？是一般的化學燃燒還是核融合反應？

$$E=mc^2$$

- 每單位時間太陽放射出的能量有多少？
 - ✓ 每單位時間打在地球每平方公尺的能量=？
 - ✓ 地球與太陽之間的距離=？
- 太陽的質量有多大？
克卜勒行星運動第三定律以及牛頓的重力定律

$$M = 4 \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \frac{r^3}{G}$$



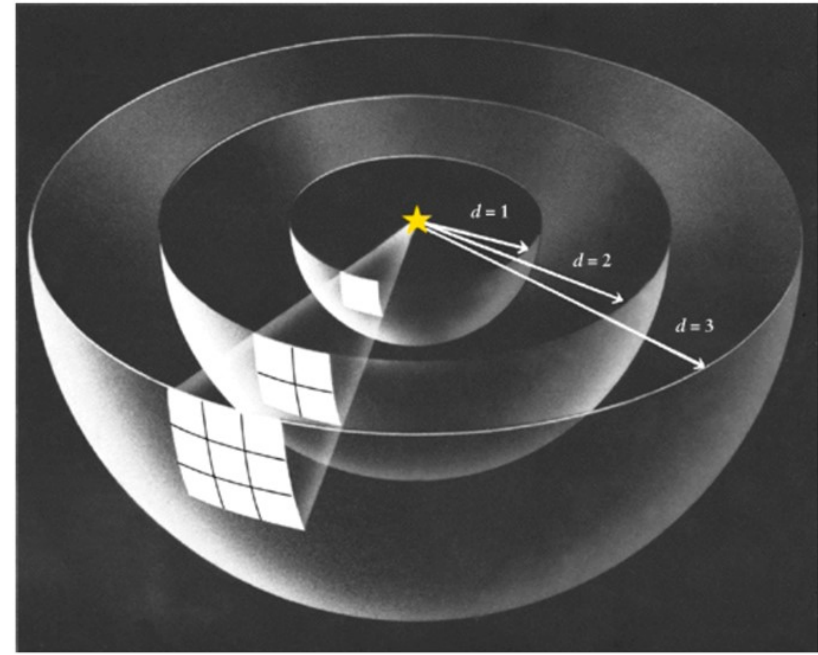
表觀亮度
(每單位面積的功率) b 。

b 與距離 d 的平方反比

$$b = \frac{L}{4\pi d^2}$$
$$d = \sqrt{\frac{L}{4\pi b}}$$

恆星的光度和亮度

恆星或星系的一個有用參數是其內在的**光度(luminosity)**, L ，輻射的總功率，以瓦特(W)為單位。同樣重要的是，表觀**亮度(apparent brightness)** b ，定義為在地球表面上垂直於光的行進方向單位面積上所接收到光的功率(W/m^2)。考慮到能量守恆，並且忽略太空中的任何吸收，當與恆星距離 d 時，總發射功率 L 將分佈在表面積 $4\pi d^2$ 的球體上，則 L 必須等於 b （地球每單位面積接收的功率）乘以球（半徑 d ）的表面積 $4\pi d^2$ ：



$$L = 4\pi d^2 b$$

由人造衛星測出
 $b = 1.361 \text{ kW}/\text{m}^2$ 。

地球與太陽之間的距離
稱為天文單位，
 $d = 1.5 \times 10^{11} \text{ km}$

太陽常數是太陽電磁輻射的通量，也就是距離太陽一天文單位處（約為地球離日平均距離），單位面積受到垂直入射的平均太陽輻射強度。太陽常數包括所有形式的太陽輻射，不是只有可見光。由人造衛星測出約**1.361 kW/m²**。

$$b = \frac{L}{4\pi d^2} \quad L = 4\pi d^2 b$$

由人造衛星測出
 $b=1.361 \text{ kW/m}^2$ 。

地球與太陽之間的距離
稱為天文單位，
 $d=1.5 \times 10^{11} \text{ km}$

$$\begin{aligned} L &= 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 (1.36 \times 10^3) \\ &= 3.845 \times 10^{26} \text{ W} \end{aligned}$$

要計算太陽就進能夠燃燒多久我們就必須先知道下面幾項數據：

- 太陽燃燒的機制到底是什麼？是一般的化學燃燒還是核融合反應？

$$E=mc^2 \quad L = 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$$

- 每單位時間太陽放射出的能量有多少？
 - ✓ 每單位時間打在地球每平方公尺的能量=？
 - ✓ 地球與太陽之間的距離=？
- 太陽的質量有多大？
克卜勒行星運動第三定律以及牛頓的重力定律

要計算太陽就進能夠燃燒多久我們就必須先知道下面幾項數據：

- 太陽燃燒的機制到底是什麼？是一般的化學燃燒還是核融合反應？

$$E=mc^2$$

- 每單位時間太陽放射出的能量有多少？
 - ✓ 每單位時間打在地球每平方公尺的能量=？
 - ✓ 地球與太陽之間的距離=？
- 太陽的質量有多大？
克卜勒行星運動第三定律以及牛頓的重力定律

$$M = 4 \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \frac{r^3}{G}$$

$$M = 4\left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \frac{r^3}{G}$$

其中 M =太陽的質量， T =行星轉動週期， r =軌道半徑，從公式我們可以計算太陽的質量 M 。

我們可以從地球繞日的軌道運動推出太陽的質量

$$r_{\text{Earth}} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$T_{\text{Earth}} = 365.25 \text{ days}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{Sun}} &= \frac{4\pi^2 r_{\text{Earth}}^3}{GT_{\text{Earth}}^2} \\ &= \frac{4\pi^2 (1.5 \times 10^{11})^3}{(6.67 \times 10^{-11})(365.25 \times 86400)^2} \\ &= 2.01 \times 10^{30} \text{ kg} \end{aligned}$$

要計算太陽就進能夠燃燒多久我們就必須先知道下面幾項數據：

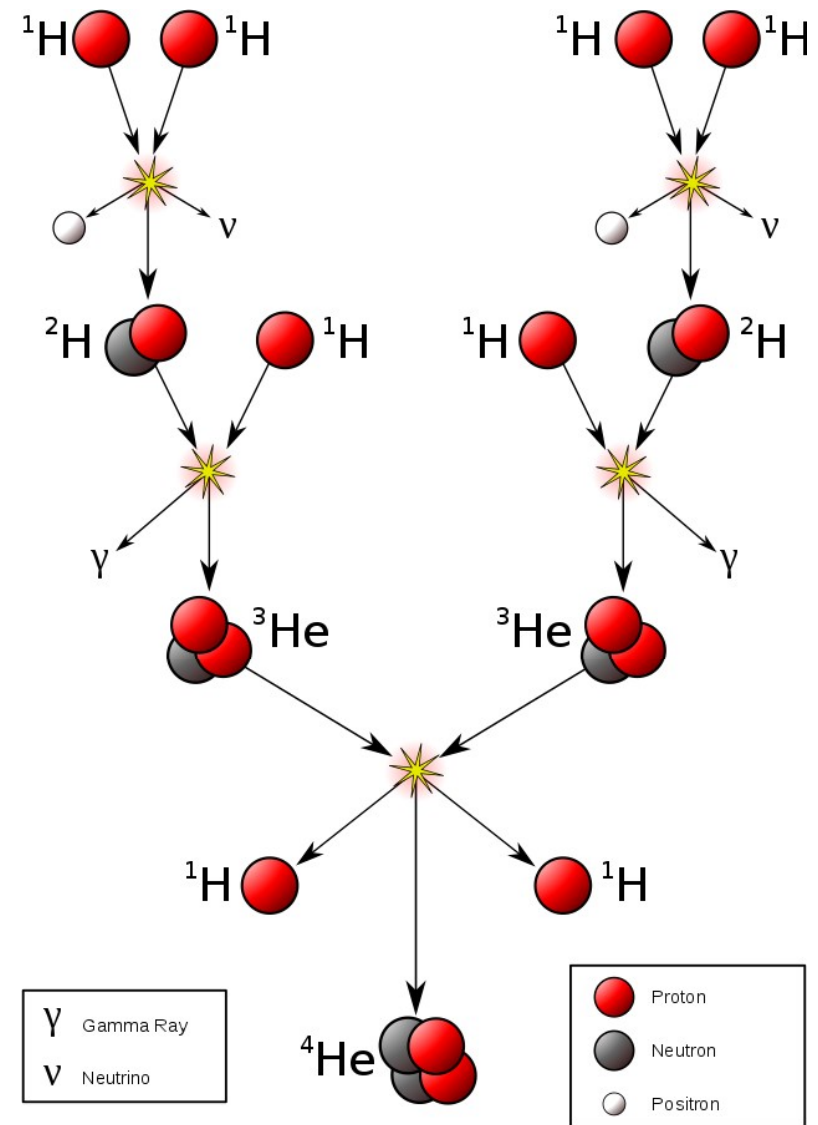
- 太陽燃燒的機制到底是什麼？是一般的化學燃燒還是核融合反應？

$$E=mc^2$$

- 每單位時間太陽放射出的能量有多少？
 - ✓ 每單位時間打在地球每平方公尺的能量=？
 - ✓ 地球與太陽之間的距離=？
- 太陽的質量有多大？
克卜勒行星運動第三定律以及牛頓的重力定律

核融合將諸如氫原子核一類的較輕的原子核結合形成較重的原子核。原子核帶正電，故庫侖力會阻礙原子核的結合。克服庫侖勢壘需要大量的能量。輕核所帶的電荷少，因此它們聚變時需要克服的勢壘越小，釋放出的能量就越多。隨著原子核質量的增加到一個臨界點時，融合反應所需克服的位能大於反應放出的能量，即沒有淨能量產生。這一臨界點是鐵-56。

太陽形成後的大部分的時間裡，核融合的能量是經過一系列被稱為質子-質子鏈反應的過程產生的；這個過程將氫變成氦，只有1.7%的氦是經由碳氮氧循環產生的。

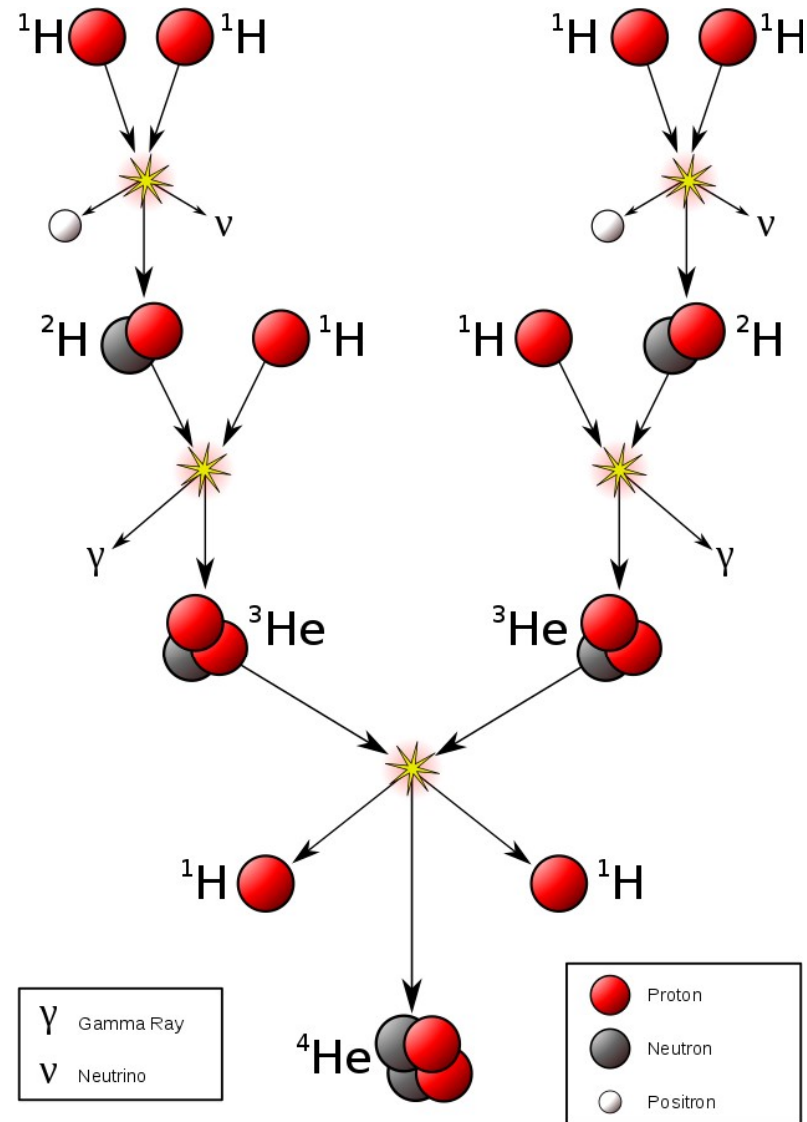
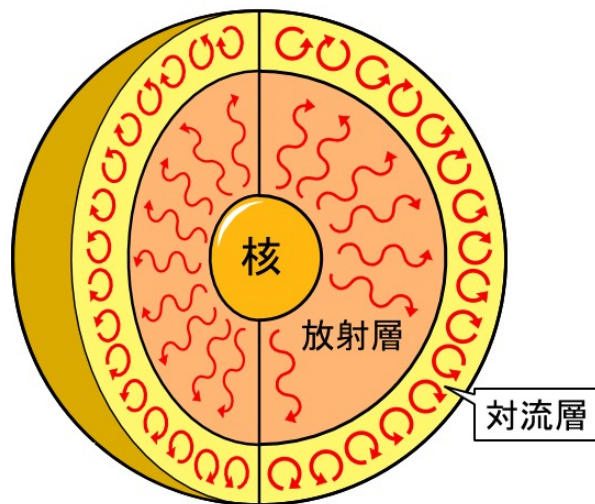


$$1.00794 \times 4 - 4.0026 = 0.02916$$
$$0.02916 / (1.0079 \times 4) = 0.723\%$$

比較最後產生的氦-4和4個質子的質量，顯示少了**0.7%**的質量。這些質量被轉換成了能量，在各自的反應中以 γ 射線和微中子的形式釋放出去。在一個完整的反應鏈可以得到26.73MeV的能量。

$$1.00794 \times 4 - 4.0026 = 0.02916$$

$$0.02916 / (1.0079 \times 4) = 0.723\%$$



在太陽發光發熱的一生當中有**10%**的質量會進行核融合反應

$$1.00794 \times 4 - 4.0026 = 0.02916$$

$$0.02916 / (1.0079 \times 4) = 0.723\%$$

$$L = 4\pi(1.5 \times 10^{11})^2 (1.36 \times 10^3)$$

$$= 3.845 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$\frac{0.7\% \times 10\% \times 2 \times 10^{30} \times (3 \times 10^8)^2}{3.8 \times 10^{26}} = \frac{1.26 \times 10^{44}}{3.8 \times 10^{26}}$$

$$= 1.05 \times 10^{10} (s) \simeq 100 \text{ 億年}$$

在太陽發光發熱的一生當中有**10%**的
質量會進行核融合反應

太陽存在了大約**50**億年
還可以再燃燒**50**億年

太陽的生命期可長達
100億年

在核融合反應中，氫原子融合成氦原子的過程當中有**0.7 %**的質量轉變成為能量，在太陽發光發熱的一生當中有**10%**的質量會進行核融合反應，以太陽的質量為 **2×10^{30}** 公斤，再加上太陽常數，也就是太陽平均每秒鐘所發出來的能量，以及愛因斯坦著名的質能互換公式，我們可以計算太陽可以發光發熱的時間總共有多長：

$$\frac{0.7\% \times 10\% \times 2 \times 10^{30} \times (3 \times 10^8)^2}{3.8 \times 10^{26}} = \frac{1.26 \times 10^{44}}{3.8 \times 10^{26}} \\ = 1.05 \times 10^{10}(s) \simeq 100\text{億年}$$

End of the *Age* of Sun

碳十四定年法的原理是：生物體在活著的時候會因呼吸、進食等不斷的從外界攝入碳十四，最終體內碳十四與碳十二的比值會達到與環境一致（該比值基本不變），當生物體死亡時，碳十四的攝入停止，之後因遺體中碳十四的衰變而使遺體中的碳十四與碳十二的比值發生變化，通過測定碳十四與碳十二的比值就可以測定該生物的死亡年代。不過因為碳十四的半衰期比較短(**5730年**)，碳十四定年法的應用局限於**5到6萬年**。

近數十萬年來地球大氣層碳十四與非放射性碳的比例大體上可視為固定。生物活著的時候，會藉著生理作用與大氣直接或間接不斷作碳同位素的交換，因此衰變掉的碳十四可經常獲得補充，達到與大氣平衡。然而當生物死亡而停止與大氣碳的交換，生物遺骸就成一封閉系統，遺骸中的碳十四含量就隨著時間而逐漸減少。利用這一點，以未受人類大量化石燃料污染的「現代碳」的碳十四濃度（或放射性強度）作為起始的碳十四濃度標準，與欲測樣本中殘餘的碳十四濃度相比較，可推算出生物死亡或樣本與大氣碳十四停止交換至今所經過的年代。

如果你知道給定放射性核素的半衰期，那麼原則上可以使用該放射性核素的衰變作為測量時間間隔的時鐘。例如，可以使用壽命很長的核素的衰變來測量岩石 - 也就是自成立以來所經歷的時間。來自地球和月球的岩石以及隕石的這種測量結果所得到最大的年齡都是一致的，那就是**45億年**，

對月球岩石樣品中的鉀原子和氬原子的質譜分析表明，（穩定的） ^{40}Ar 原子數量與（放射性） ^{40}K 原子數量之比為**10.3**。假設所有的氬原子都是由鉀原子衰變產生的，半衰期為 **1.25×10^9** 年。岩石的年齡多大了？

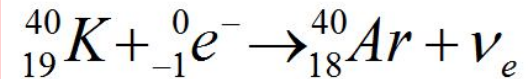
(1)如果在從熔融形式凝固岩石時存在 N_0 鉀原子，則分析時剩餘的鉀原子數為 N_K ，

$$N_K = N_0 e^{-\lambda t}$$

其中 t 是岩石的年齡。

(2)每個衰變的鉀原子都會產生一個氬原子。因此，分析時存在的氬原子的數量 N_{Ar} 是

$$N_{\text{Ar}} = N_0 - N_K.$$



$$N_{\text{Ar}} = N_0 - N_K = N_0 - N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N_{\text{Ar}} = N_0 (1 - e^{-\lambda t})$$

$$e^{-\lambda t} = 1 - \frac{N_{\text{Ar}}}{N_0} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$\lambda t = \ln\left(1 + \frac{N_{\text{Ar}}}{N_0}\right) \quad T_{1/2} = \text{半衰期}$$

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_{1/2} \ln(1 + N_{\text{Ar}}/N_K)}{\ln 2} \\ &= \frac{(1.25 \times 10^9 \text{ y}) [\ln(1 + 10.3)]}{\ln 2} \\ &= 4.37 \times 10^9 \text{ y.} \end{aligned}$$

其他月球或陸地岩石樣品可以找到較小的年齡，但沒有更大的年齡。因此，太陽系形成後不久就形成了最古老的岩石，太陽系必然有約**40億年**的歷史。

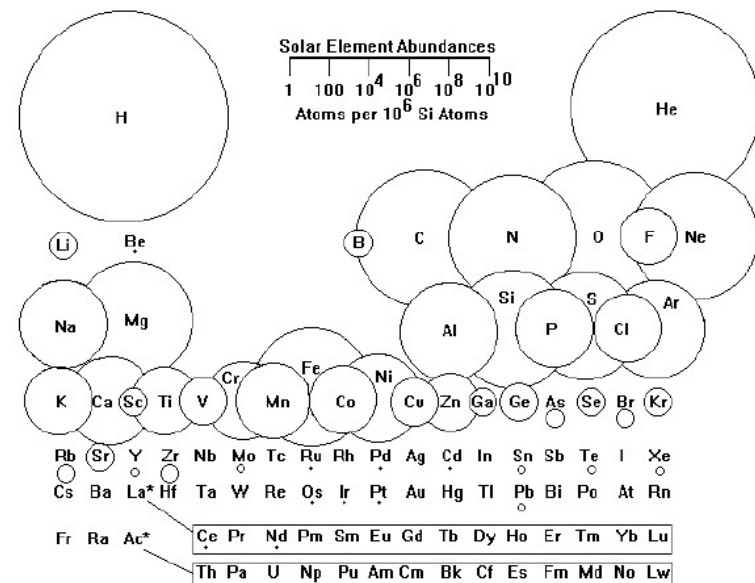
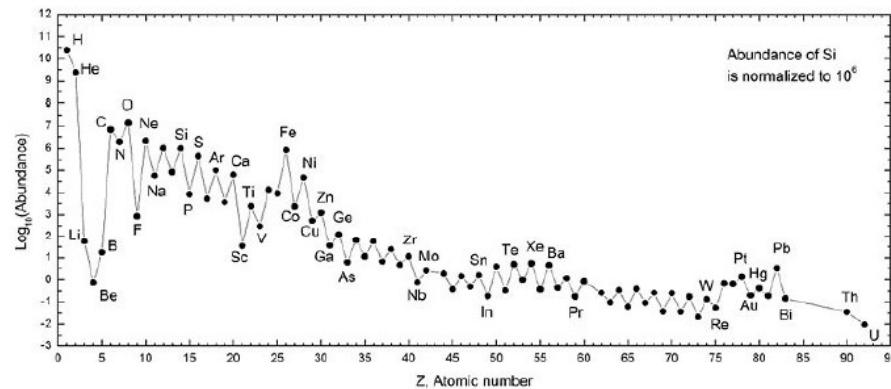
What makes the Sun Shine

- Luminosity of Sun measured to be:
 - $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ (from measured flux W m^{-2} and distance)
- Gravitational contraction (Kelvin-Helmholtz):
 - Grav. Energy is $u = M \cdot GM/R = 4 \times 10^{41} \text{ J}$ (if all mass placed at surface)
 - Sufficient to fuel sun for 33 million years
 - Oldest rocks dated to be ~4 billion years
- Chemical reactions:
 - Burning Coal releases: 10^{-19} J per atom
 - Luminosity implies a mass loss of $2 \times 10^{26} \text{ kg}$ per year
 - Sufficient for sun to last 10 thousand years
- Nuclear Fusion (Einstein):
 - $E = mc^2$ implies $E = 1.8 \times 10^{47} \text{ J}$
 - Sufficient to fuel sun for 15,010 billion years



Stellar Nucleosynthesis

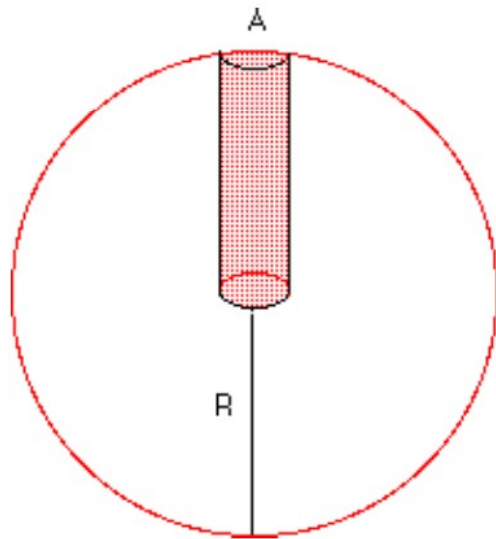
Base fuel is hydrogen (and some helium with traces of CNO)



- Three key reaction chains:
 - Proton-proton chain
 - Carbon-Nitrogen-Oxygen cycle
 - Triple-Alpha process
- But fusion requires high temperatures...

Core Temperature of Sun

- Assuming the Sun is in **hydrostatic equilibrium** the thermal pressure is sufficient to resist gravitational contraction
- Crudely, consider the mass (m) pressing on the core:



$$m = \rho AR$$

$$F = \frac{GmM}{R^2} = \frac{G\rho AM}{R}$$

$$P_c = \frac{F}{A} = \frac{\rho GM}{R}$$

$$P_c \cancel{V} = nkT_c = \frac{\rho GM}{R}$$

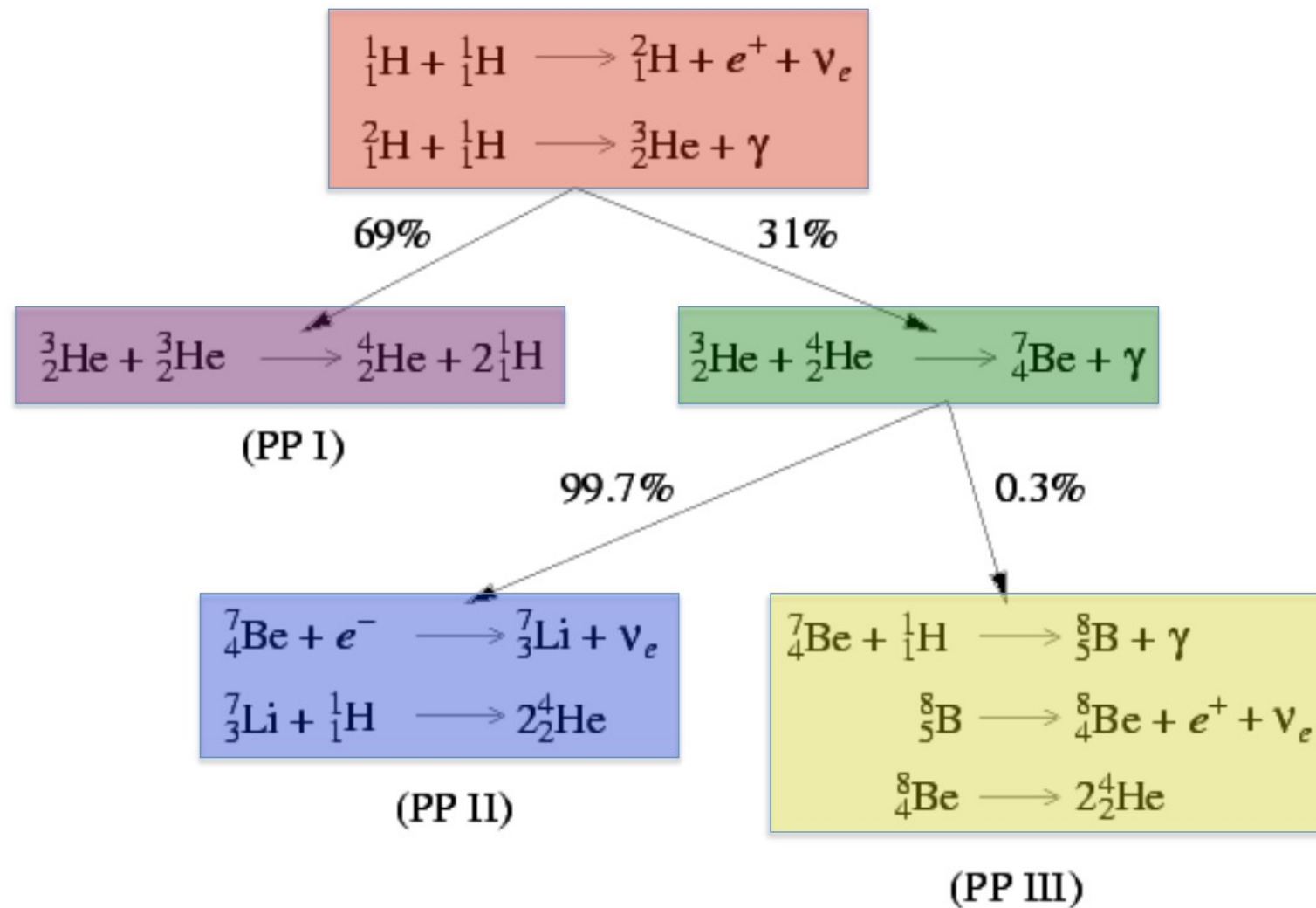
$$T_c = \frac{nm_p GM}{nkR} = \frac{m_p GM}{kR}$$

$$T_c = 23 \text{ million } K$$

Assumes constant density so not quite right but true answer based on more precise equations which incorporate the density variation is close:
15 million K

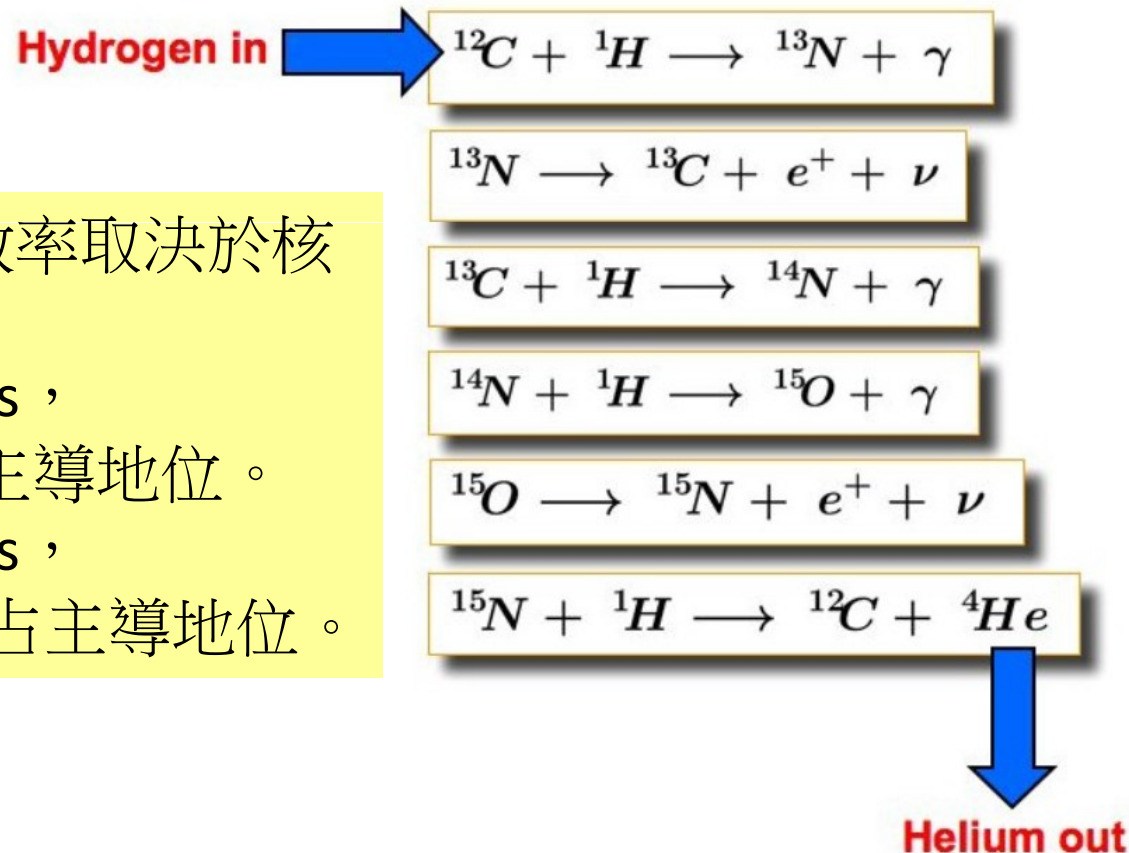
Enough to overcome the Coulomb Force to allow Fusion to occur

The p-p chain



CNO cycle

- Another way to progress Hydrogen to Helium
- Requires Carbon to be present which acts as a catalyst



核合成反應效率取決於核心的溫度

對於 $M < 1.3M_{\odot}$,

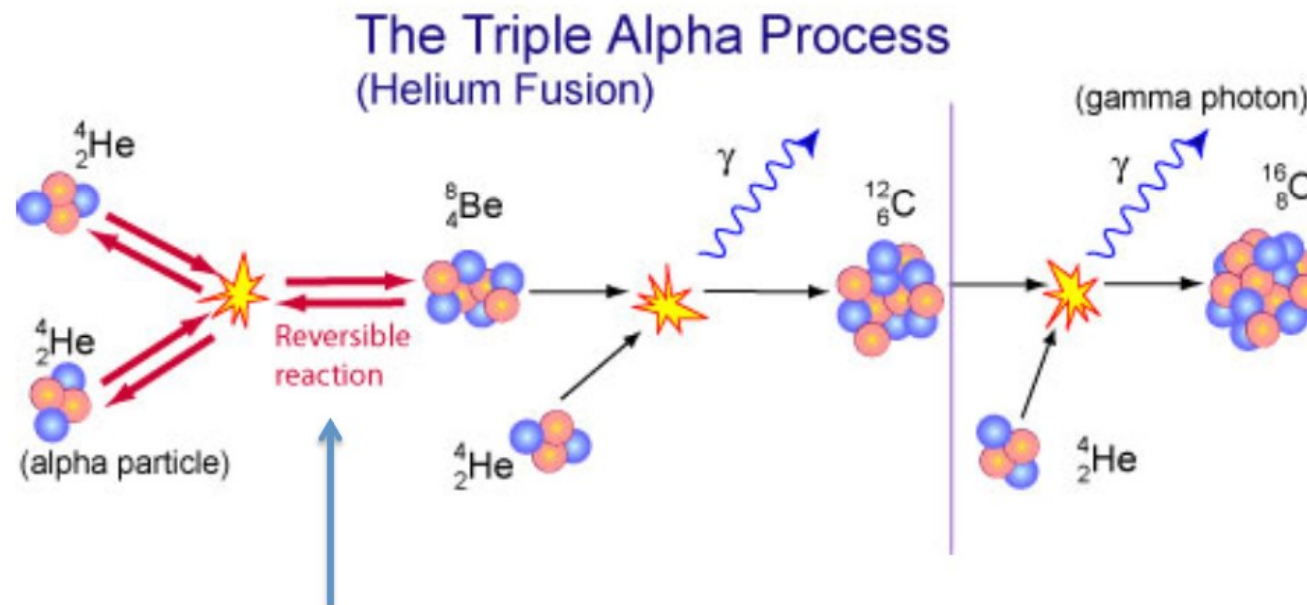
pp 占主導地位。

對於 $M > 1.3M_{\odot}$,

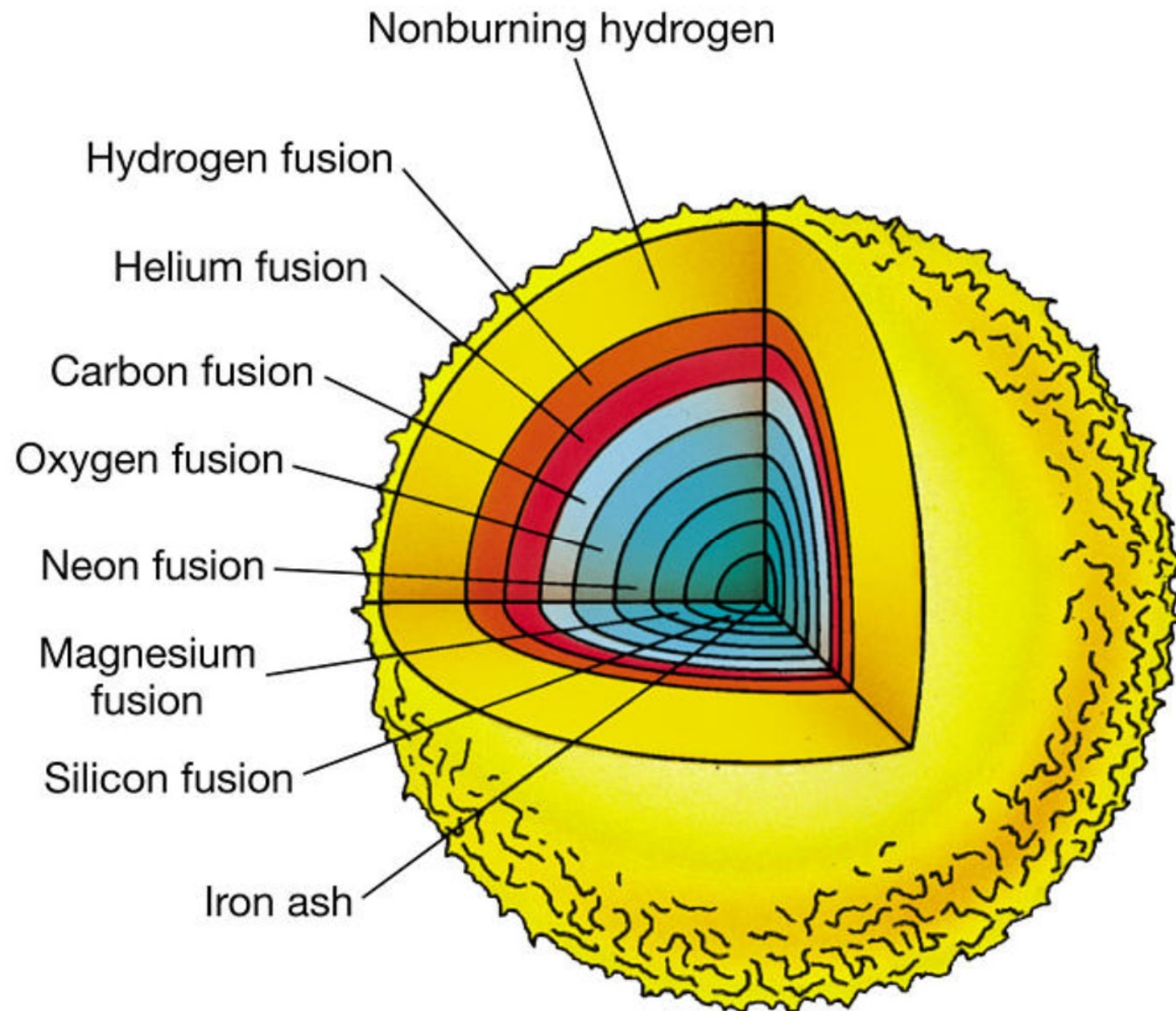
CNO 將占主導地位。

Beyond Helium: Triple alpha

- Major bottle neck due to instability (low binding energy) of elements with atomic numbers 5-8



Progression depends on reversible reaction.
High density and abundant energy required
For triple-alpha to occur = High mass stars only



Stellar spectra

- Stars are hot gas balls and behave like any hot gas:

- Black body spectrum

- Intensity

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^{h\nu/kT} - 1)$$

in $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{ster}^{-1}$

- Energy density

$$u(\nu, T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu, T)$$

in $\text{Wm}^{-3}\text{Hz}^{-1}$

- Wien's displacement Law

$$\lambda_{\text{MAX}} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{T}$$

- Stephan-Boltzmann Law

- From integrating the energy density

$$\varepsilon = \sigma AT^4 = \int_0^{\infty} u(\nu, T) d\nu$$

- or for spherically symmetrical systems:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Surface Temp of Sun

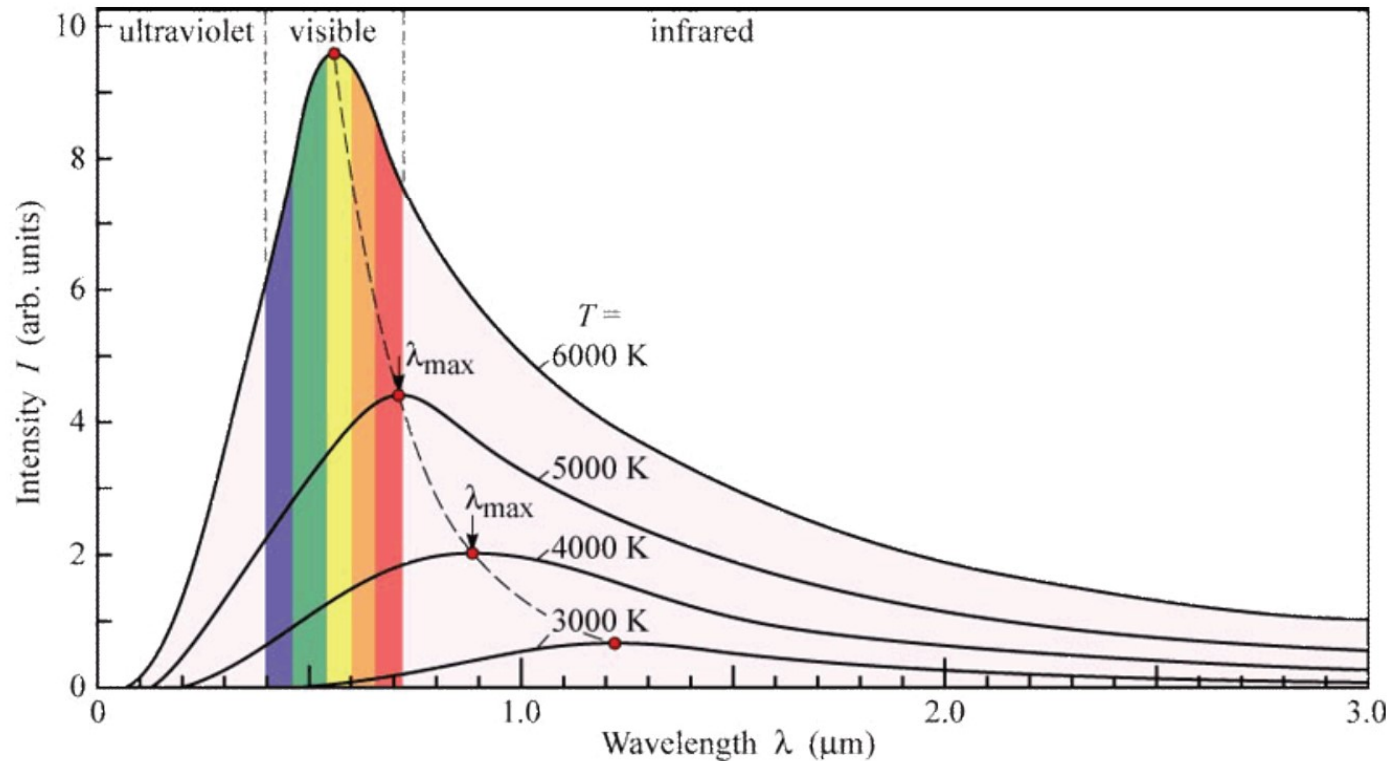
- The Sun's black body spectrum peaks at 500nm use Wein's Law to get temperature?

$$T_{\text{Surface}} = \frac{2.9 \times 10^{-3}}{500 \times 10^{-9}} = 5800 K$$

- Surface temperature is 5800K
- Core temperature is 15 million K
- Nuclo-synthesis only occurs in the solar core
 - Core radius ~20-25% of the Solar Radius

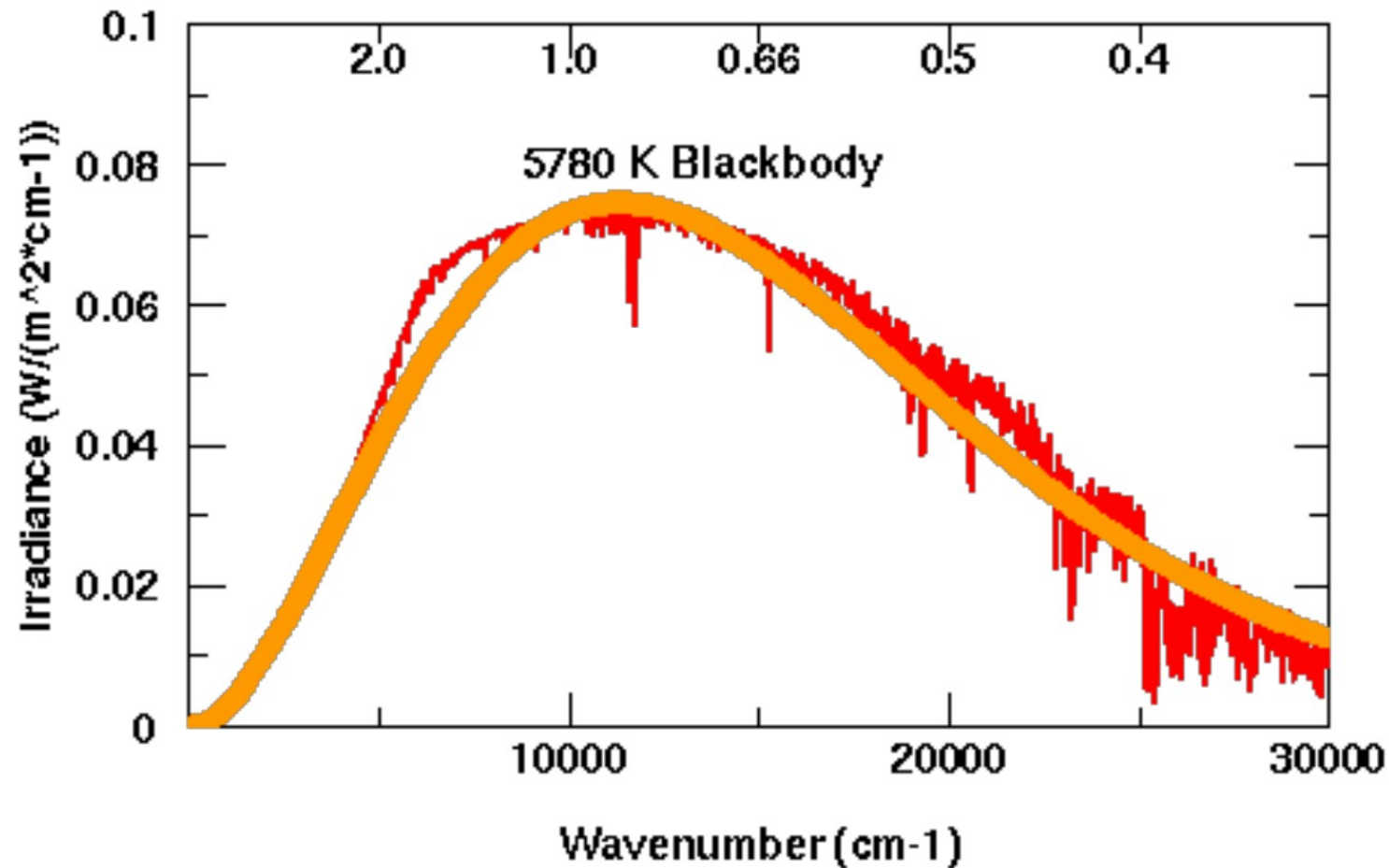
Black body spectrum

- Hotter star spectra peak at bluer wavelengths = BLUE
- Colder star spectra peak at red or near-IR wavelengths= RED
- Overall a hotter objects gives off more energy (integral under curve)



Solar spectrum v Black Body

General **continuum** shape OK but lots of **lines** on top, why?

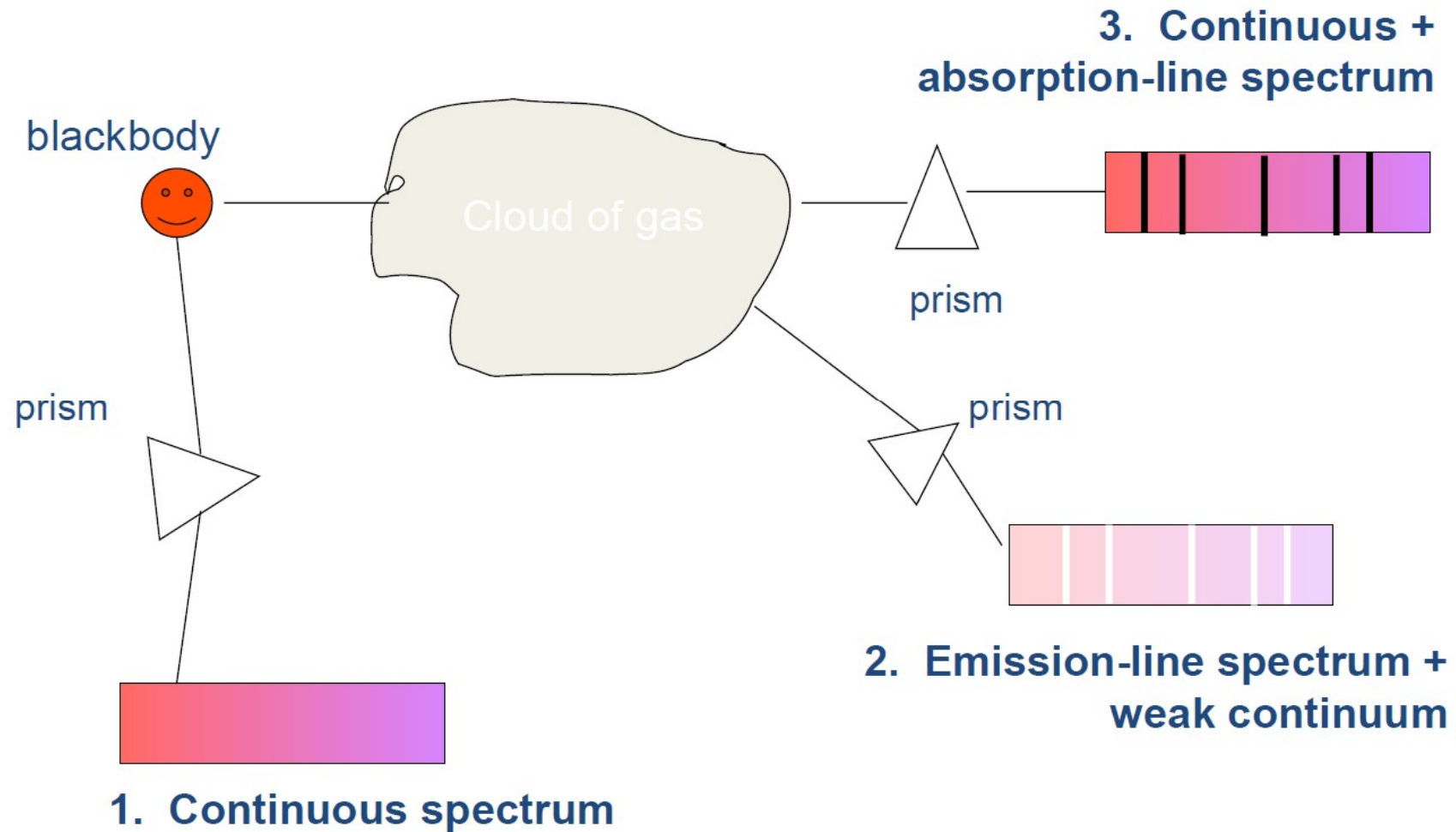


Kirchhoff's laws

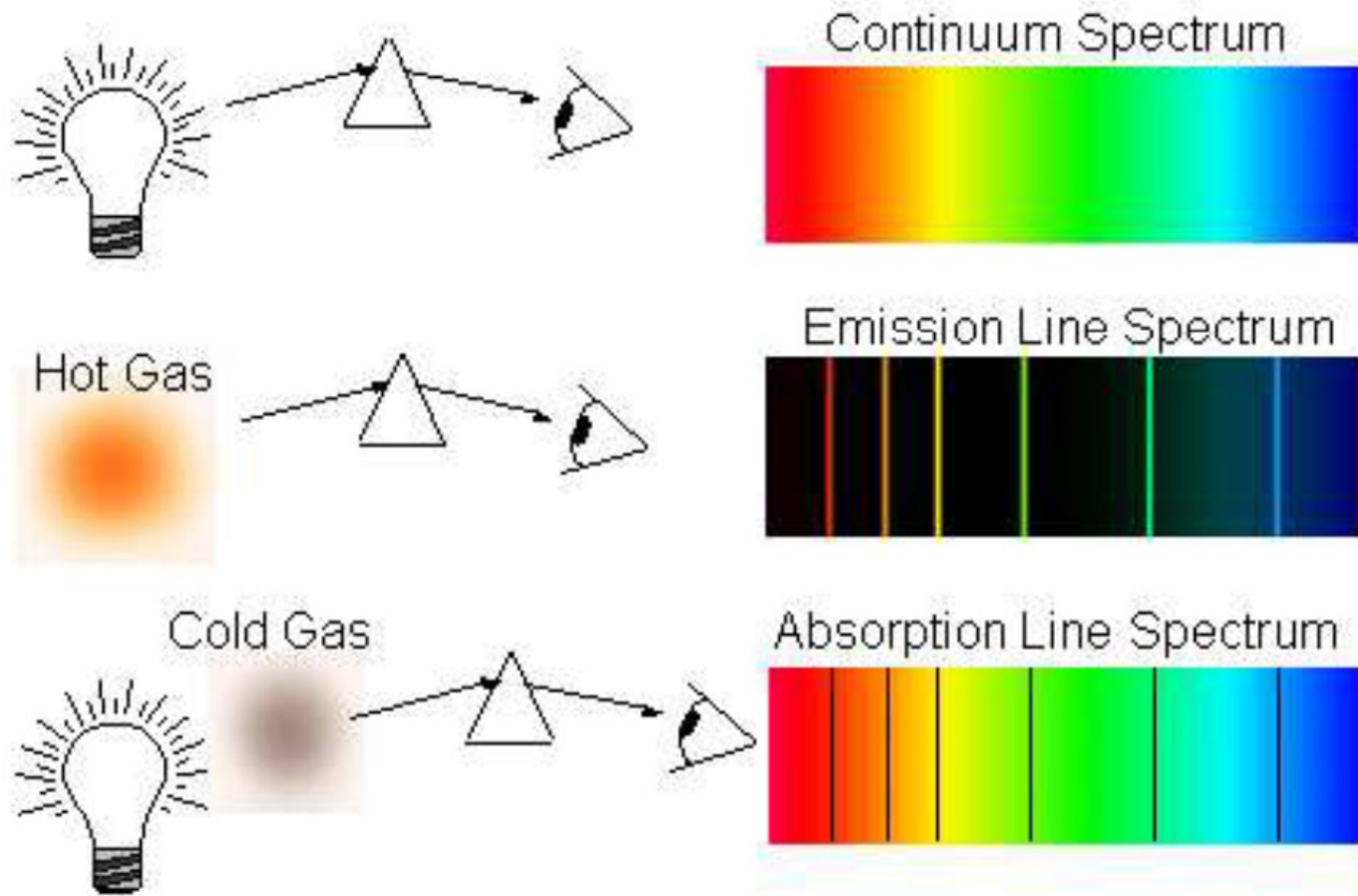
Spectral analysis shows us:

- 1) A *hot opaque* body, such as a hot dense gas, emits light at all wavelengths
- i.e. it produces a continuous 'blackbody' spectrum
- 2) A *hot transparent* gas emits an emission-line spectrum
- a series of bright spectral lines, plus a faint superimposed continuous spectrum.
- 3) A *cool transparent* gas in front of a continuous-spectrum source produces an absorption-line spectrum
- a series of dark spectral lines superimposed upon the continuous spectrum.

Kirchhoff's laws of spectral analysis

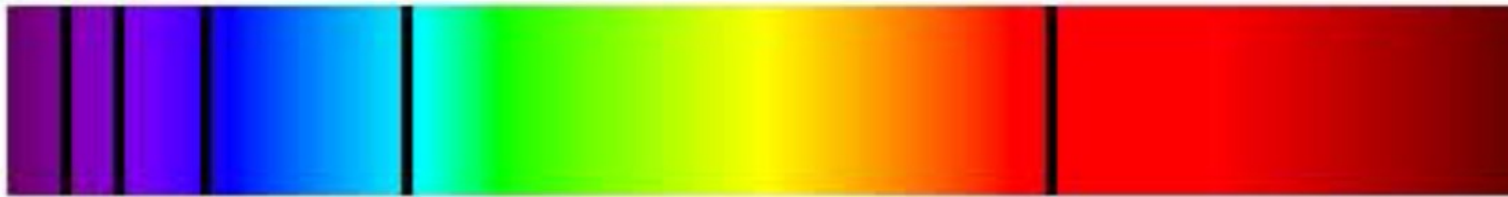


Absorption and Emission Lines

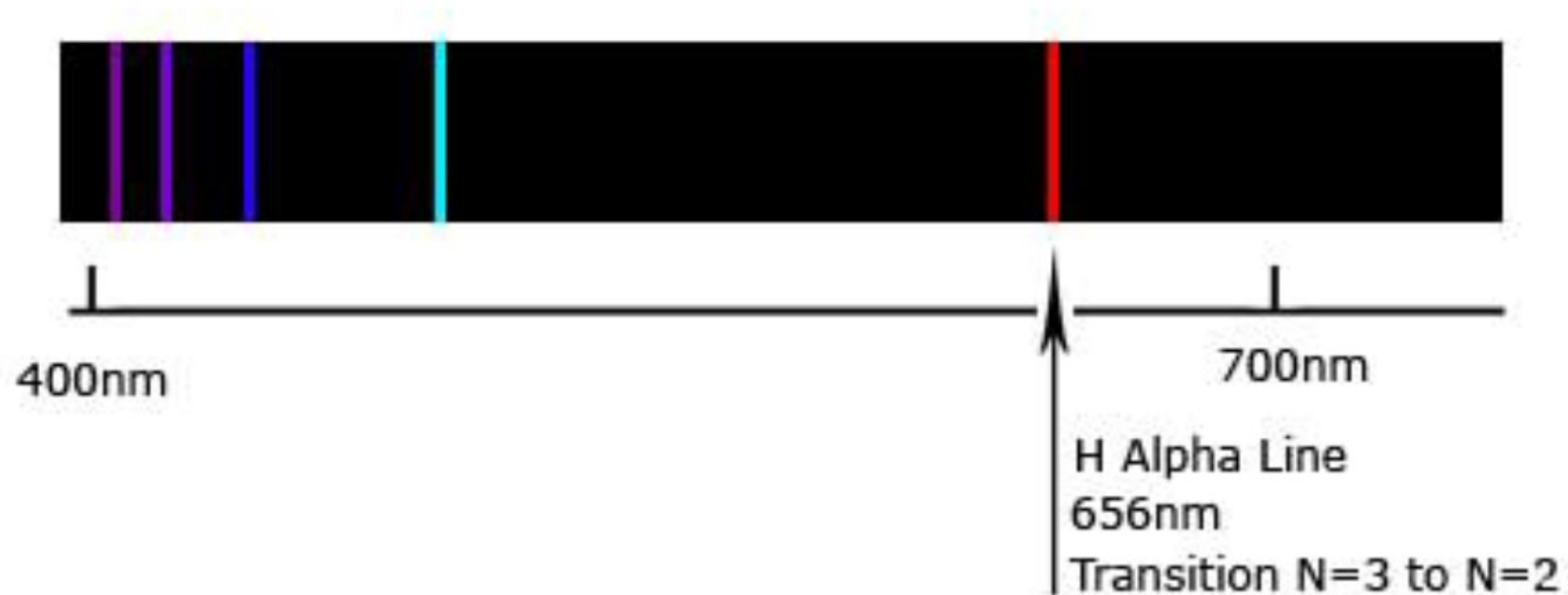


Hydrogen often seen in both emission and absorption.

Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum



Q：太陽的光和熱是如何而來？

A：利用核融合反應把氫融合成氦並釋放出巨大的能量

當兩個氫原子以非常高的速度彼此靠近，當兩原子核接觸時會發生融合的現象，融合後得到氦原子。氦原子的質量比碰撞前兩個氫原子的質量還小，失去的質量轉換成為能量，其中運用到的公式就是愛因斯坦在狹義相對論，著名的質能互換公式， $E=mc^2$ 。

Q:我們骨骼中的鈣、呼吸的氧是從何而來？

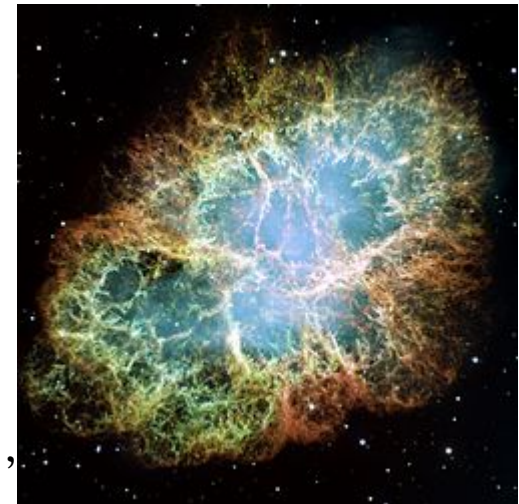
A:恆星內部的核融合反應

在氫原子融合完之後，恆星內部持續進行核融合反應，融合出更多高原子序的原子，我們呼吸的氧和骨骼中的鈣原子，都是在恆星內部的核融合反應所造就出來。而巨大質量的恆星，在恆星的晚年當核融合反應即將熄火的時候，會發生超新星爆炸。這些高原子序的原子在超新星爆炸的過程當中，又重新的被拋射到外太空，經過長久的歲月之後這些原子又藉由重力重新凝聚，最後才又再形成新一代的恆星系統。前一代恆星所融合的高原子序的原子就已經存在於新一代的恆星系統之中，我們的太陽系就是這樣一個典型的例子。我們能在地球上呼吸，生活所需要的所有物資，都是在前一代的巨大恆星的何心中為我們融合，並且經由超新星爆炸之後才能夠為我們所用。所以我們都是超新星的子民。

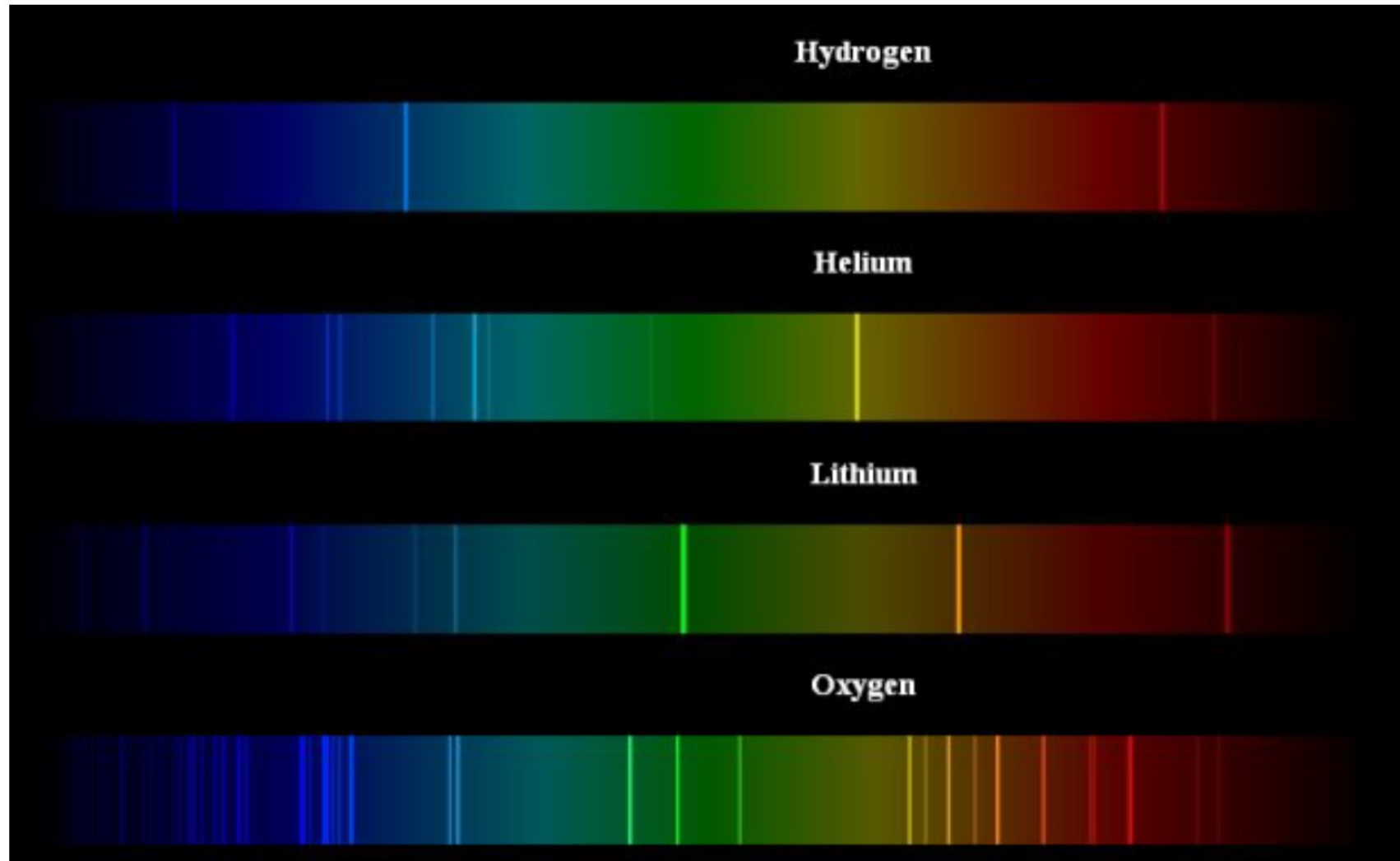
恆星結束融合反應之後，將膨脹成為一顆紅巨星。如果紅巨星沒有足夠的質量產生能夠讓碳燃燒的更高溫度，碳和氧就會在核心堆積起來。在散發出外面數層的氣體成為行星狀星雲之後，留下來的只有核心的部份，這個殘骸最終將成為**白矮星**。白矮星的密度極高，一顆質量與太陽相當的白矮星體積只有地球一般的大小。夜空中最明亮的恆星，天狼星也有一顆伴星，稱為天狼星**B星**(或小狼)，被發現是一顆白矮星。我們的太陽**50億**年後，也將變為一個白矮星。

中子星是巨大恆星演化到末期，經由重力坍縮發生超新星爆炸之後，可能成為的少數終點之一。恆星在核心的氫、氦、碳等元素於核融合反應中耗盡，當它們最終轉變成鐵元素時便無法從核融合中獲得能量。失去熱輻射壓力支撐的外圍物質受重力牽引會急速向核心墜落，有可能導致**外殼**的動能轉化為熱能向外爆發產生超新星爆炸，或者根據恆星質量的不同，**恆星的內部**區域被壓縮成白矮星、中子星或黑洞。白矮星被壓縮成中子星的過程中恆星遭受劇烈的壓縮使其組成物質中的電子併入質子轉化成中子，直徑大約只有十餘公里，且旋轉速度極快。由於其磁軸和自轉軸並不重合，磁場旋轉時所產生的無線電波等各種輻射可能會以一明一滅的方式傳到地球，有如人眨眼，此時稱作**脈衝星**。一顆典型的中子星質量介於太陽質量的**1.35到2.1倍**，半徑則在**10至20公里**之間。**1969年**，在**1054年**超新星爆發的殘骸蟹狀星雲中，發現了一顆無線電脈衝星（中子星），證明了脈衝星、中子星和超新星之間的關係。

中子星的脫離速度
約為光速的**2/3**



Each element has a characteristic spectral pattern



Examples of stellar spectra

Cold, low-mass, red

Hot, high-mass, Blue

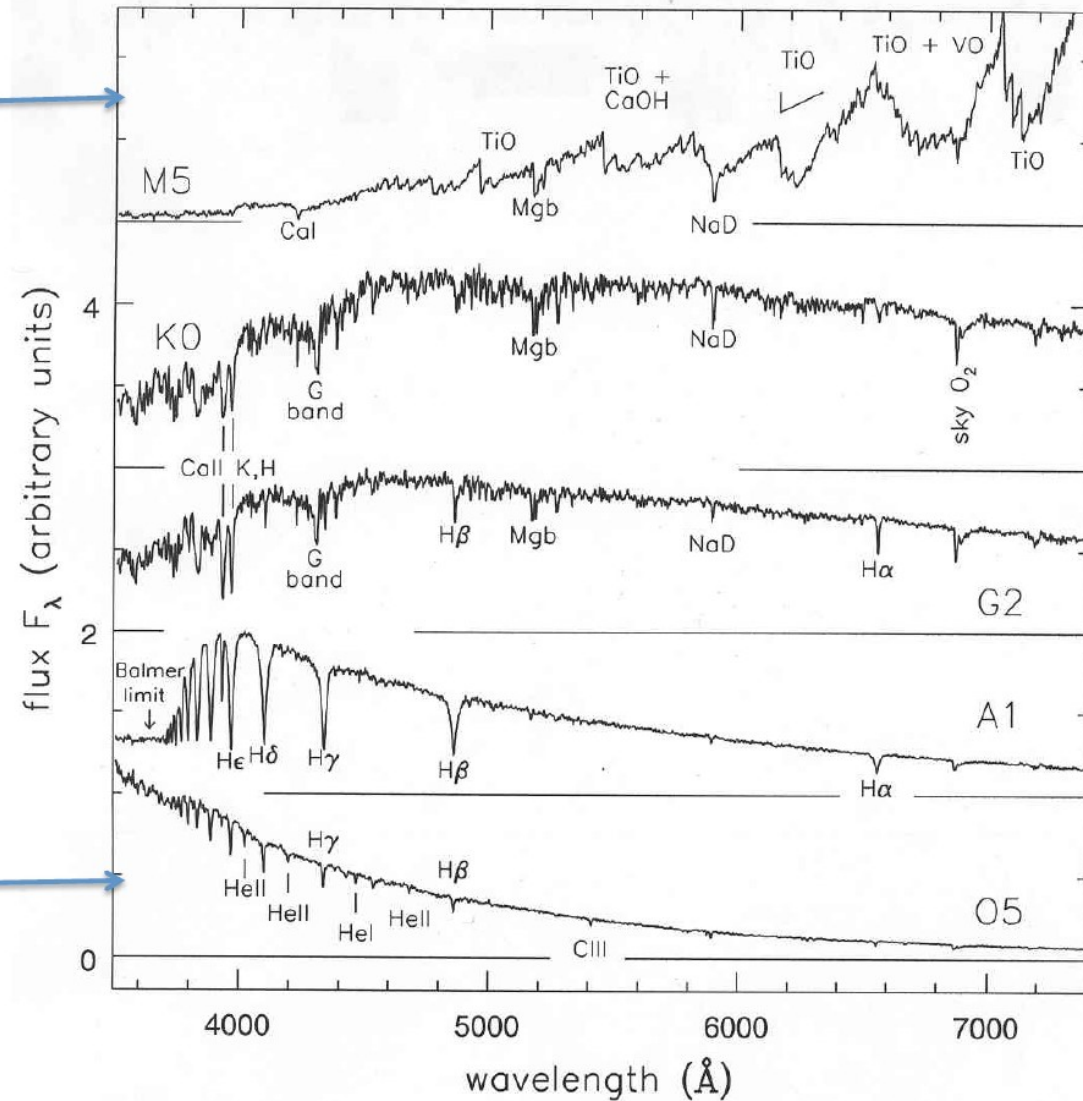


Figure 1.1 Optical spectra of main-sequence stars with roughly the solar chemical composition. From the top in order of increasing surface temperature, the stars have spectral classes M5, K0, G2, A1, and O5 – G. Jacoby *et al.*, spectral library.

以下內容為補充教材：

期末考試不考

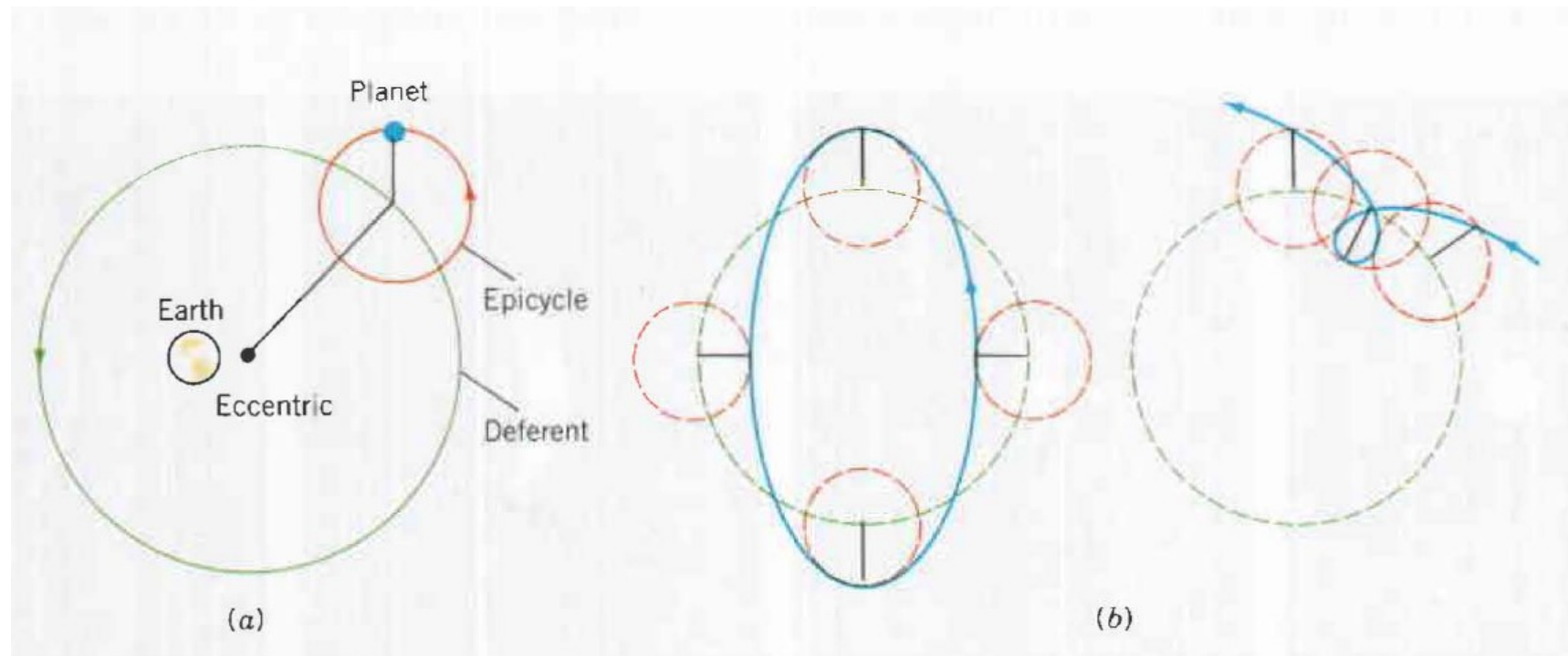
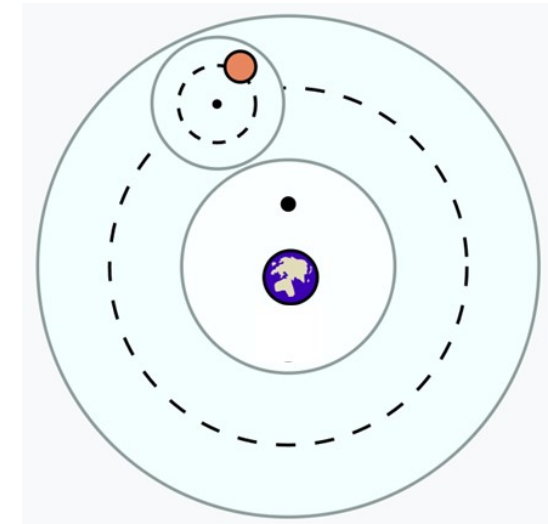
16世紀的科學革命

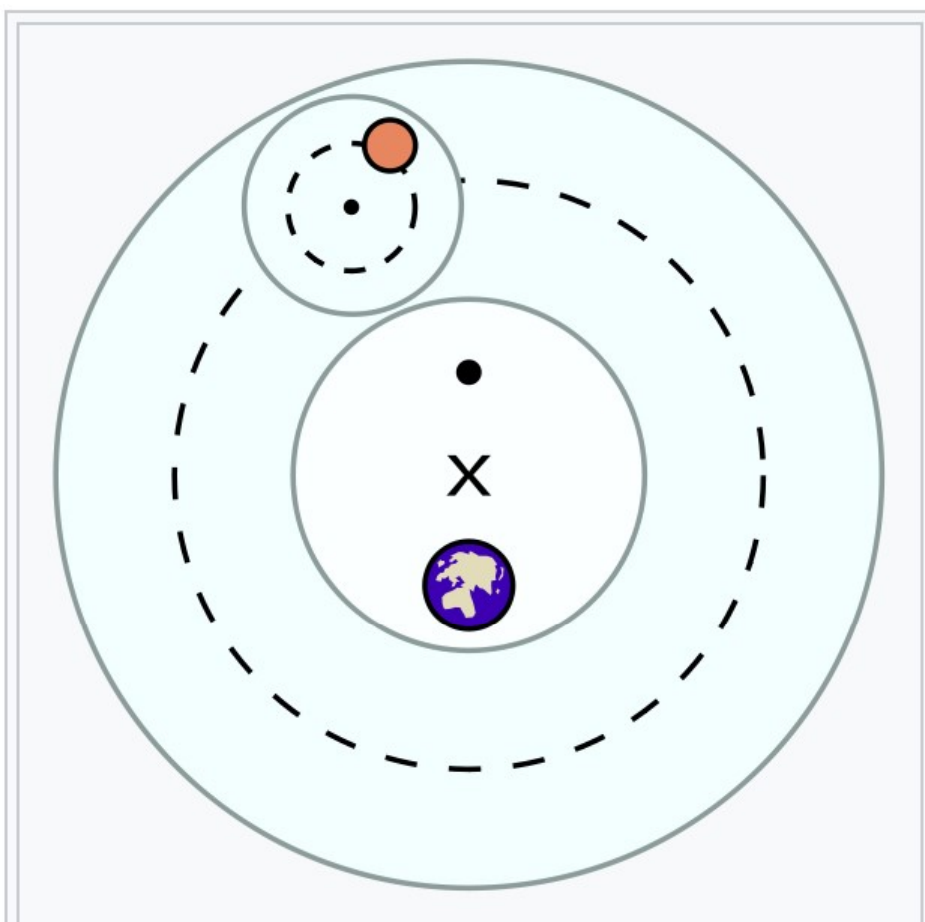
我們今天所知道的物理學的起源可以追溯到地球在宇宙中的兩種觀點的對抗。地心說認為地球處於宇宙的中心，太陽，行星和星星圍繞它旋轉。日心說認為地球和行星圍繞太陽運行。在這個偉大的辯論中，雙方的倡導者提出巧妙的論點，加深了我們對自然及其機制的理解。

希臘哲學家柏拉圖（ca 400 B.C）主張地心說。他相信天體（星星和行星）是“完美的”。對他來說，這意味著他們的自然運動必須是一圈一圈（穩定）的運動。然而，行星有時似乎暫時扭轉了它們的運動，顯然，單一的勻速圓周運動不能解釋這種逆行。柏拉圖還認為，我們的感官並不能感知到“真實”的世界，所以只有通過推理才能獲得真理。亞里士多德從根本上不同意柏拉圖的觀點。他覺得，通過觀察自然而不是純粹的推理，人們可以獲得對世界的認識。

阿里斯塔克（Aristarchus）（約公元前310年）提出了一個日心說，把地球正確地定位為太陽的第三顆行星。由於地球得繞日軌道運動應該導致在軌道過程中恆星的明顯位置改變，但是這種所謂的恆星視差並沒有被看到。

為了解釋一些行星表面亮度，速度和大小的變化，希帕克斯（**Hipparchus**，約公元前**150**年）發明了一種新的均勻圓周運動系統，它們並不全是與地球同心的。如圖**a**所示，一顆行星的路徑是由均輪與本輪運動軌跡疊加而成的。不同的旋轉速度可以產生不同的路徑，如圖**b**所示。為了改善與觀察的一致性，托勒密（**ca A.D. 130**）增加了其他改進。例如，他把傳播的中心從地球轉移到另一個叫做偏心的地方。托勒密系統被天文學家使用了許多個世紀。





托勒密天文學的基本元素，顯示一顆行星在本輪上（小的虛線圓）、一個均輪（大的虛線圓）、偏心（X）和等徑（大的黑點）。

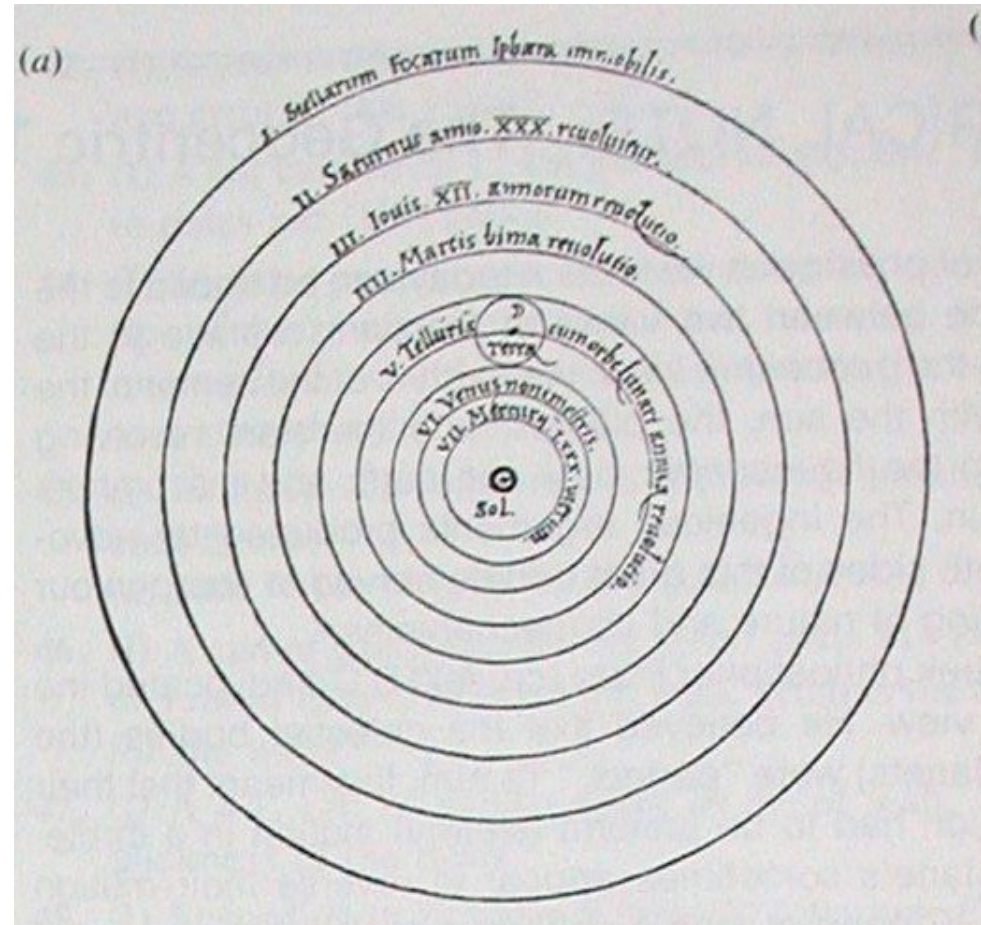
地心說的托勒密系統(A.D. 130)：行星被假定在一個被稱為本輪(epicycle)的小圓圈內運動，它繞著一個被稱為均輪(deferent)的大圓。這兩個圓都在大致平行於太陽的軌道平面（黃道）上以順時針方向運動。儘管這個系統被認為是以地球為中心的地心說，但地球不在行星運動的中心，而是偏向一側，稱為離心。

THE COPERNICAN REVOLUTION



Nicholas Copernicus

(1473–1543).



Heliocentric Theory

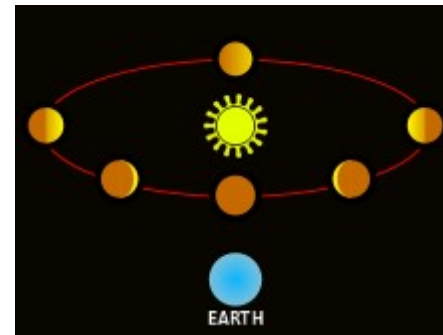
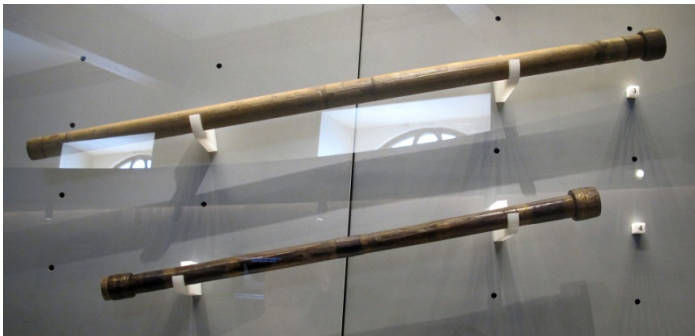
published in 1543,

哥白尼革命

哥白尼於**1496**年離開了他的本國波蘭，在意大利文藝復興的光芒中沐浴。他覺得用本輪與均輪的托勒密系統，在直觀上並不自然。他覺得，阿里斯塔克（**Aristarchus**）以太陽為中心的體系在概念上比較簡單。哥白尼很清楚地看出，太陽在地球周圍的圓周運動可以用地球每天的自轉運動來解釋。他仍然堅持柏拉圖統一的圓周運動規則，他發明了日心說，就在他死前**1543**年出版。

哥白尼的日心說可以很容易地解釋，行星的逆行運動、行星亮度和行星大小的明顯變化。但是為了與觀察結果達成一致，他被迫使用了本輪與均輪的工具。人們也意識到，如果哥白尼的模型是正確的，那麼金星應該顯示出**相位**：它的外觀應該從新月到全圓，就像我們觀察月球看到的那樣新月、半月和滿月。金星的這些相位在沒有望遠鏡的情況下是無法觀察到的。哥白尼體系的最終形式既不像托勒密體系那麼簡單，也不準確。哥白尼的日心說雖然能夠成功的解釋行星逆行運動的現象但是這個優點卻完全被其他的缺點(恆星視差和金星階段明顯不存在的)所掩蓋了。儘管如此，哥白尼已經證明，日心系統也可以用來預測行星的位置。

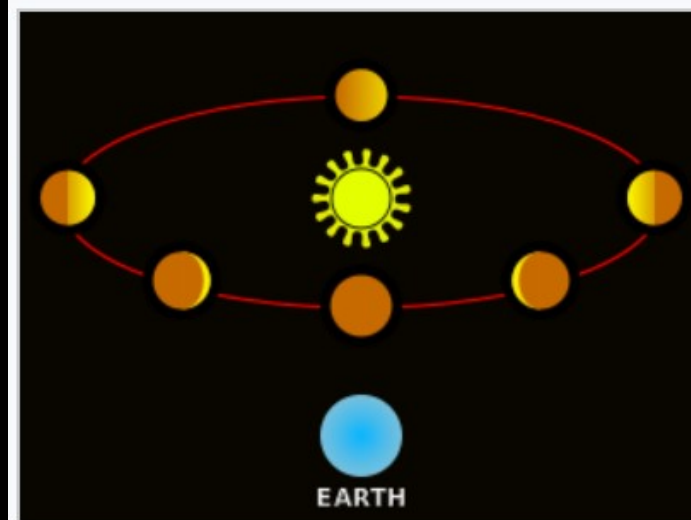
70年後，伽利略在**1610**年**9**月通過觀測發現金星所呈現的所有相位與月球十分相似。



人們並不急於接受日心說並不足為奇，因為地球移動的說法是違背日常經驗的：

- 地球在大氣層中轉動時，人們並沒有感受到強風。哥白尼回應說，地球拖曳著大氣而行。
- 他正確地解釋了恆星視差的缺失，指出恆星離觀測者的距離太遠而無法察覺，但當時這不是一個令人信服的論據。
- 對地球移動這個觀點的另一個重要反對意見是基於這樣一個事實：即一個垂直上拋的石頭必然落回到射出點。人們直覺地認為如果地球在運動的話，應該掉落在後方。哥白尼無法回應這種反對觀點。

哥白尼之後，兩位科學巨人繼承了日心說，並發揚光大：伽利略與克卜勒。



金星在軌道上的位置相對於地球的圖。

哥白尼發表日心說後
70年，伽利略在1610
年9月通過觀測發現金
星所呈現的所有相位
與月球十分相似。

1609年，克卜勒出版《新天文學》，提出行星繞太陽運行的橢圓律：行星繞日的軌道是橢圓，太陽位居橢圓的一個焦點；以及面積律：行星與太陽的連線段在等長的時間內掃過等同的面積。**1618**年，克卜勒又出版《世界的和諧》並提出週期律：行星繞太陽一周所需的時間**T**和行星軌道的半長軸**a**，滿足 a^3/T^2 為定值，與個別行星無關。

在克卜勒提出三大行星運動定律近**70**年之後，牛頓於**1687**年出版《自然哲學的數學原理》，詳細說明了如何以數學論證，從三大行星運動定律得出萬有引力定律。

1676年，丹麥天文學家羅麥第一次提出了有效的光速測量方法。他在觀測木星的衛星的隱食周期時發現：在一年的不同時期，它們的周期有所不同；在地球處於太陽和木星之間時的周期與太陽處於地球和木星之間時的周期相差十四五天。他認為這種現象是由於光具有速度造成的，而且他還推斷出光跨越地球軌道所需要的時間是22分鐘。1676年9月，羅麥預言預計11月9日上午5點25分45秒發生的木衛食將推遲10分鐘。巴黎天文臺的科學家們懷著將信將疑的態度，觀測並最終證實了羅麥的預言。

羅麥的理論沒有馬上被法國科學院接受，但得到了著名科學家惠更斯的贊同。惠更斯根據他提出的資料和地球的半徑第一次計算出了光的傳播速度：214000千米/秒。雖然這個數值與目前測得的最精確的資料相差甚遠，但他啟發了惠更斯對波動說的研究；更重要的是這個結果的錯誤不在於方法的錯誤，只是源于羅麥對光跨越地球的時間的錯誤推測，現代用羅麥的方法經過各種校正後得出的結果是298000千米/秒，很接近于現代實驗室所測定的精確數值。

1725年，英國天文學家布萊德雷發現了恒星的“光行差”現象，以意外方式證實了羅麥的理論。剛開始時，他無法解釋這一現象，直到1728年，他在坐船時受到風向與船航向的相對關係的啟發，認識到光的傳播速度與地球公轉共同引起了“光行差”的現象。他用地球公轉的速度與光速的比例估算出了太陽光到達地球需要8分13秒。這個數值較羅麥法測定的要精確一些。布萊德雷測定值證明了羅麥有關光速有限性的說法。

光速的測定，成了十七世紀以來所展開的關於光的本性的爭論的重要依據。但是，由於受當時實驗環境的局限，科學家們只能以天文方法測定光在真空中的傳播速度，還不能解決光受傳播介質影響的問題，所以關於這一問題的爭論始終懸而未決。

十八世紀，科學界是沈悶的，光學的發展幾乎處於停滯的狀態。繼布萊德雷之後，經過一個多世紀的醞釀，到了十九世紀中期，才出現了新的科學家和新的方法來測量光速。

1849年，法國人菲索第一次在地面上設計實驗裝置來測定光速。他的方法原理與伽利略的相類似。他將一個點光源放在透鏡的焦點處，在透鏡與光源之間放一個齒輪，在透鏡的另一側較遠處依次放置另一個透鏡和一個平面鏡，平面鏡位於第二個透鏡的焦點處。點光源發出的光經過齒輪和透鏡後變成平行光，平行光經過第二個透鏡後又在平面鏡上聚於一點，在平面鏡上反射後按原路返回。由於齒輪有齒隙和齒，當光通過齒隙時觀察者就可以看到返回的光，當光恰好遇到齒時就會被遮住。從開始到返回的光第一次消失的時間就是光往返一次所用的時間，根據齒輪的轉速，這個時間不難求出。通過這種方法，菲索測得的光速是315000千米/秒。由於齒輪有一定的寬度，用這種方法很難精確的測出光速。

1850年，法國物理學家傅科改進了菲索的方法，他只用一個透鏡、一面旋轉的平面鏡和一個凹面鏡。平行光通過旋轉的平面鏡彙聚到凹面鏡的圓心上，同樣用平面鏡的轉速可以求出時間。傅科用這種方法測出的光速是298000千米/秒。另外傅科還測出了光在水中的傳播速度，通過與光在空氣中傳播速度的比較，他測出了光由空氣中射入水中的折射率。這個實驗在微粒說已被波動說推翻之後，又一次對微粒說做出了判決，給光的微粒理論帶了最後的衝擊。