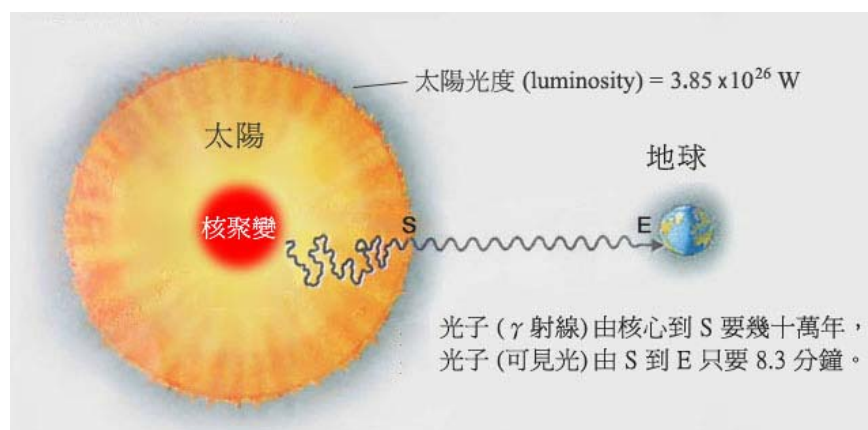


## 太陽

(稿源：義工天文培訓班 --- 第 9 講)

太陽是太陽系的主宰，離地球 1.5 億公里，直徑是地球的 109 倍或 1.4 百萬公里，質量佔整個太陽系的 99.86 %。太陽基本上由氫氣集積而成，集積使氣團核心的壓力和溫度越升越高，到了一千五百萬度左右，核聚變開始，氫聚合成氦（氫燃燒），同時釋出光和熱，總功率達  $3.85 \times 10^{26}$  W，但在核心以外的氫，由於溫度不足，沒有核聚變。太陽輻射源自氫燃燒時產生的光子，不過光子被體內無數的游離粒子散射，要迂迴路轉走了幾十萬年才從太陽表面釋放出來。

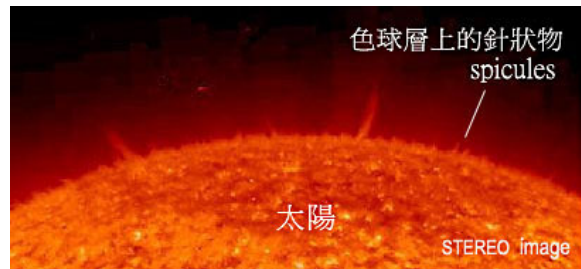


### 基本結構

太陽內部分為核心，輻射區、對流區、光球層和色球層，平均密度 1.4 g/cc。光球層是我們日常見到的輪廓，厚度只有 500 公里，平均溫度 5800 K，我們可以看見光球層，原因是它的氣體密度剛剛好，在它之下的氣體密度太大，光線不能通過；在它之上的氣體則足夠稀薄，能讓光球層發出的光線順利通過，所以光球層界定了太陽的視覺面，也是“太陽黑子”出沒的地方。光球層上是單色的色球層，要經特定波長的濾鏡觀測。色球層之外是日冕，它的溫度甚高，但密度奇低，幾乎成真空，因此熱量和亮度也少，要待日全食或用日冕儀 (coronagraph) 才能看見。

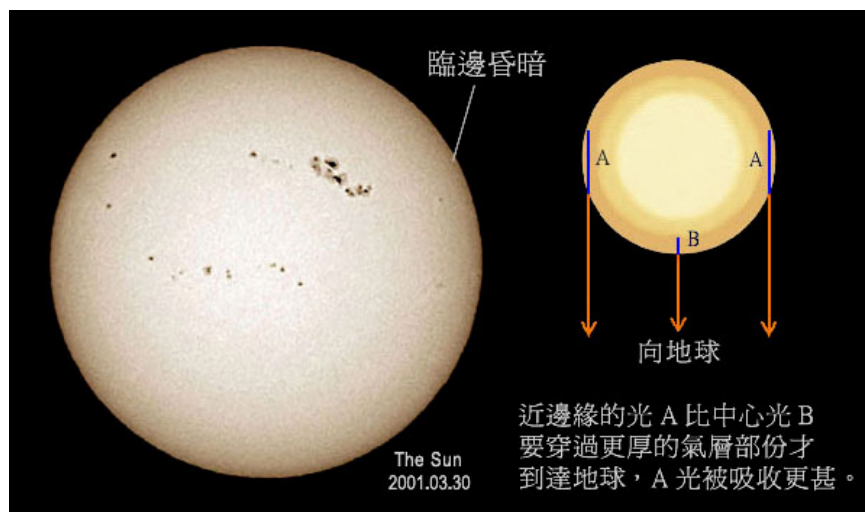
太陽結構	大小	作用 / 特性
核心 Core ( $\sim 1.5 \times 10^7$ K)	0.2 太陽半徑	進行核聚變 (氫燃燒)，溫度約 $1.5 \times 10^7$ K，密度比水大百餘倍。
輻射區 Radiative zone	0.2 ~ 0.7 太陽半徑	氫燃燒產生的能量經此區以輻射轉移的方式向外傳輸
對流區 Convective zone	0.7 ~ 1.0 太陽半徑	以對流方式向外傳輸能量
光球層 (5800 K) Photosphere	500 km 厚	可見光的一層，平均溫度 5800 K。
色球層 Chromosphere	3000 km 厚	要用 H- $\alpha$ (656.3 nm) 濾鏡、Ca II - H (396.9 nm) 濾鏡或 Ca II - K (393.4 nm) 濾鏡才見到，平均溫度 4500 K。
日冕 Corona ( $\sim 2 \times 10^6$ K)	約兩個 太陽半徑	溫度約 $2 \times 10^6$ K，但密度奇低 ( $10^{-15}$ g/cc)。

光球層和色球層有最多可見的特徵，包括米粒、黑子、光斑 / 譜斑、耀斑、日珥、像右圖的針狀物等。針狀物是在色球層上的密集小噴流，寬僅幾百公里，但向上延展可達一萬公里，壽命為 5 ~ 10 分鐘。



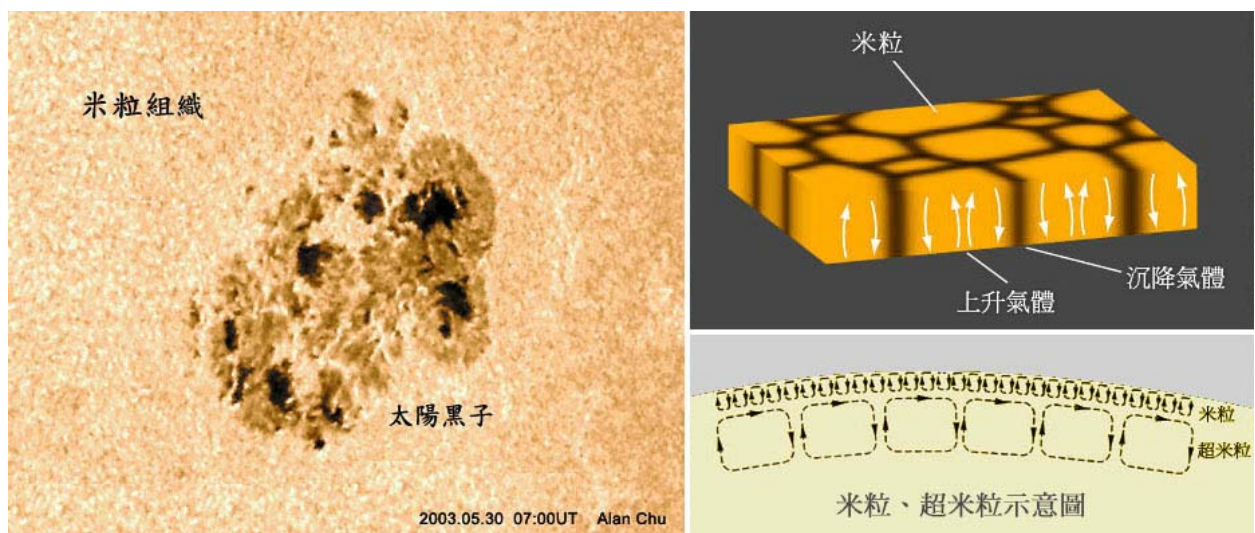
### 臨邊昏暗現象

觀測表明，太陽的亮度從中心到邊緣逐漸減弱，因為近邊緣的光要通過較厚的氣層部份才釋放出來，這現象稱為“臨邊昏暗”(limb darkening)。



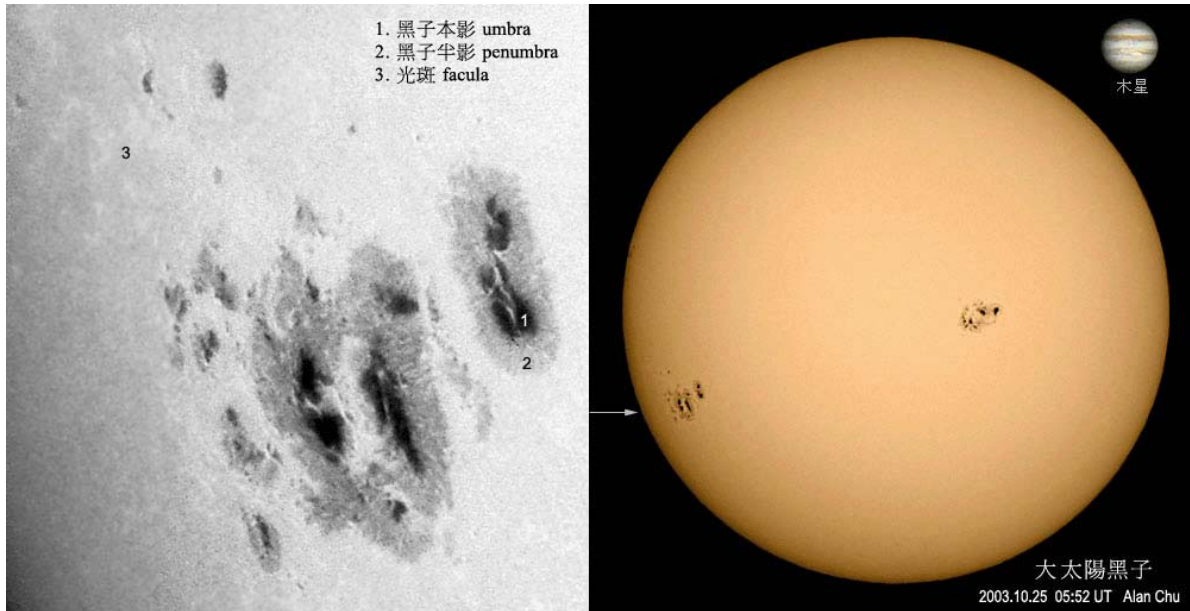
### 米粒組織

在大氣穩定時用望遠鏡觀測，光球層上遍佈密密麻麻的小亮點，稱為米粒 (granule)，大小只有地球的十份之一或 2 角秒。米粒是一種因對流作用從太陽內部冒上來的氣體，約十分鐘後降溫便跟隨對流下沉而破碎，對流過程有點像煲滾的粥。米粒可以不斷地生長和消失，其下還有超米粒 (supergranule) 作橫向和直向流動，活動範圍比米粒大十倍以上，持續時間可長達一天。

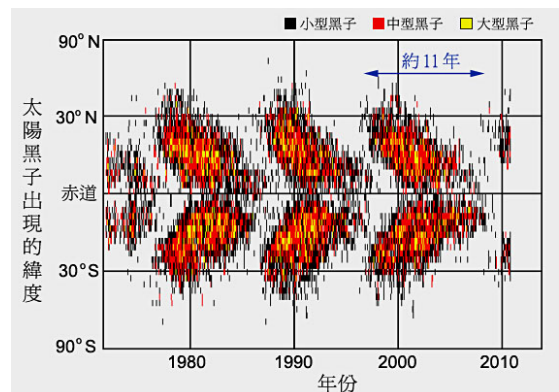


## 太陽黑子、光斑

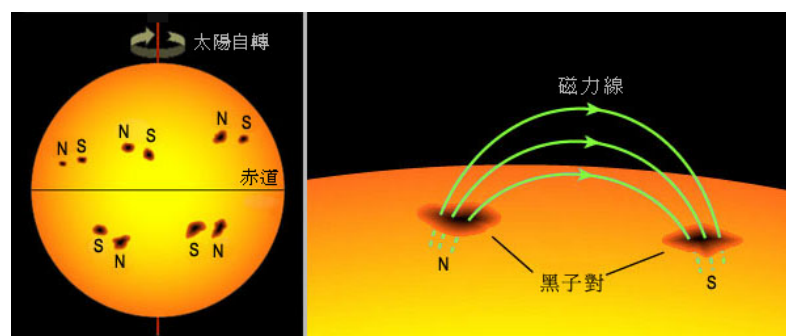
太陽黑子是光球層上的黑斑，中國古籍稱「日中有烏」(烏鳥)，但在歐洲有了望遠鏡後才被記錄。黑子的平均溫度只及光球層的六、七成，因此相對地冷，看起來亦較黑暗。最大的黑子可以和木星直徑 (140,000 km) 相比。



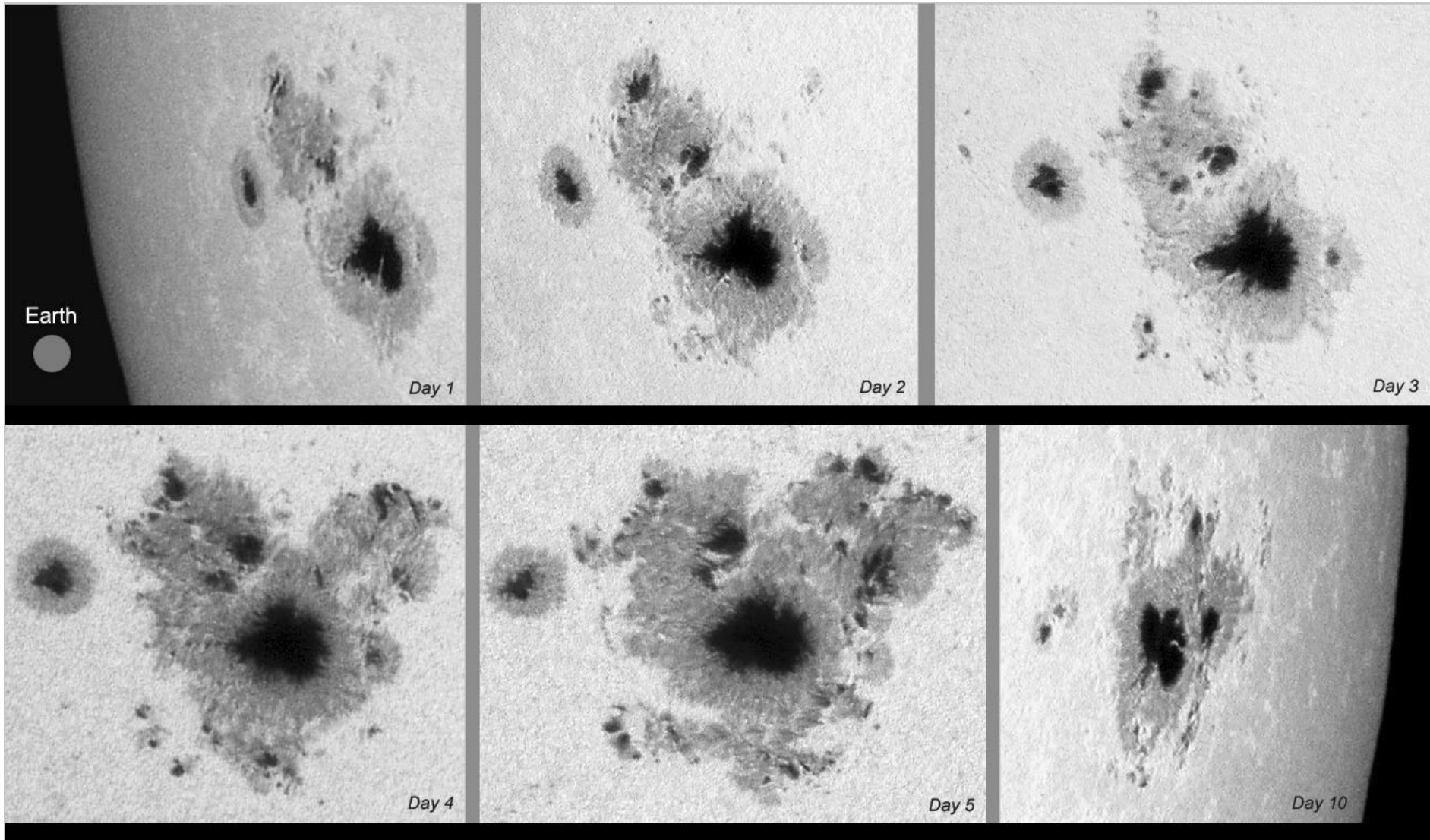
黑子跟隨太陽自轉旋轉，壽命由數天至三星期不等，數目多寡的週期一般為十一年，在週期之初，黑子基本上出現在較高緯度的地方，往後黑子數目不斷增多，並且向赤道靠攏。如果我們統計黑子出現的緯度與時間的關係，便會得出一幅像蝴蝶的圖。



利用光譜分析，科學家得知太陽黑子的磁場相當強，比太陽平均磁場強上千倍 (見前講義《星光的秘密》)。黑子經常成雙成對出現，每對皆由極性相反的黑子組成，若一個為磁北，另一個必為磁南，由此我們估計每對黑子皆由磁力線所連繫，強大的磁場牽制著光球層上的氣體，並阻止了下來較熾熱的氣體上升至黑子範圍，結果黑子溫度比太陽表面其他地方低，最黑的本影部份 (umbra) 溫度約 4200 K，半黑的部份叫半影 (penumbra)，外觀呈纖維狀，有 5000 K。通常黑子成群後，不久附近亦出現光斑 (facula)，黑子群消失後幾天，光斑才陸續散去。

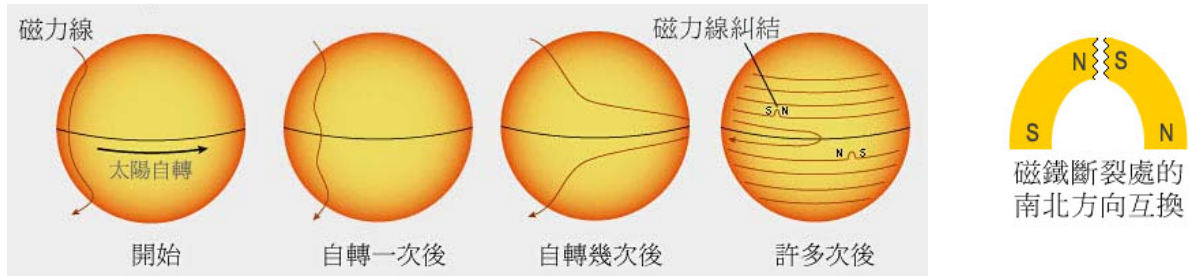


太陽自轉時黑子 (#69) 橫過日面的記錄

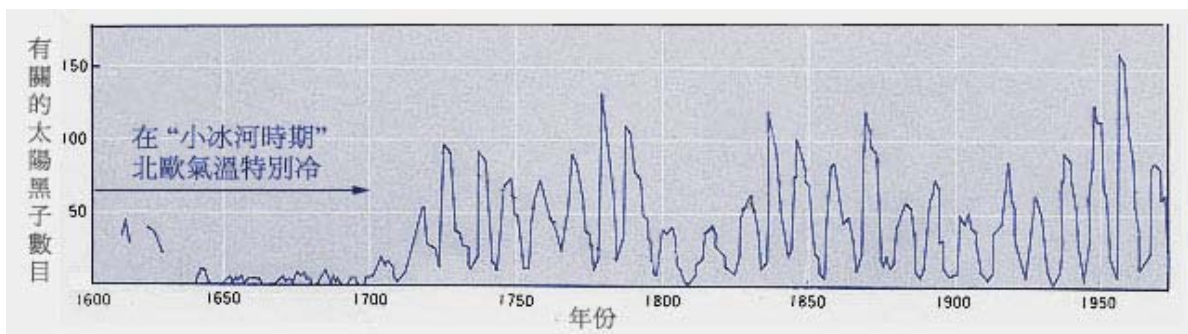


**Sunspot Active Region #69** Sequence showing its apparent shape when crossing the Sun disk. The relative size of the Earth is given for comparison. All images were taken in Hong Kong with FS102 (4-inch f/8) refractor + Baader solar filter + LE12.5mm eyepiece + CP990 digital camera at 3X zoom f/4 ISO100 2048x1536 pixels. Processed by Photoshop, cropped without resize. *Day 1* : 2002 August 13 11:22am when the sunspot emerged from the Sun's eastern limb, shutter speed 1/250 sec. *Day 2* : Aug 14 3:05pm, 1/163 sec. *Day 3* : Aug 15 1:37pm, 1/143 sec. *Day 4* : Aug 16 3:36pm, 1/92 sec. *Day 5* : Aug 17 3:58pm, 1/225 sec. *Day 6 to Day 9* : bad weather, no image. *Day 10* : Aug 22 3:42pm when the sunspot was approaching the Sun's western limb, 1/102 sec. The sunspot looks slimmest on Day 1 & Day 10 due to perspective near the limb. *Alan Chu*

太陽黑子的成因仍未完全明朗，理論則說：太陽赤道區的自轉週期約 25 天，南北極區的自轉週期約 34 天，自轉速度的差異使磁力線糾結，太陽內部的擾流將這些糾結部分浮出表面而形成所謂的黑子。磁力線的糾結，從高緯度開始，到了低緯度已是糾纏得很厲害，結果磁力線斷裂，磁場南北極性互換，再開始另一次的太陽黑子週期。

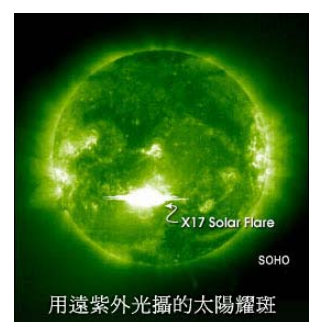
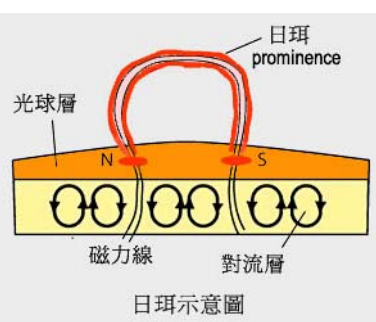
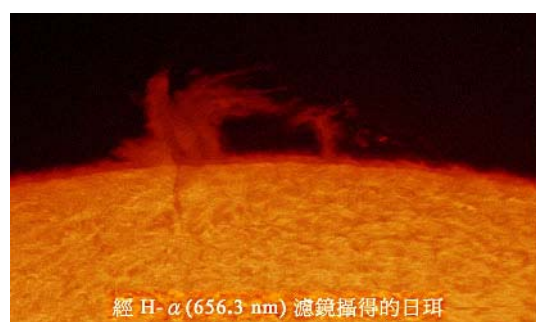


黑子的數目和地球的氣候有微妙的關係，研究顯示約在 1450 - 1550 及 1645 - 1715 年間，出現的太陽黑子反常地少，北歐在 1550 至 1700 年間的氣溫也特別冷，史稱小冰河時期，見下圖。除此之外，黑子的多寡也可以從樹木內的碳-14 和樹輪得到佐証，因為太陽磁場是阻止宇宙射線入侵的有效屏蔽，當太陽不活躍 (磁場減弱) 時，宇宙射線的強度會增強，大氣中的氮受到宇宙射線的撞擊後，會產生具有放射性的碳-14 而被樹木吸收，分析樹木的碳-14 濃度變化、樹輪的疏密便可推斷當年的太陽活躍程度。



### 日珥、耀斑、譜斑

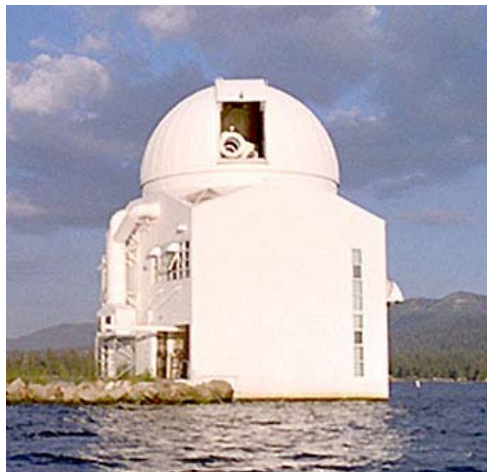
日珥 (prominence) 是被太陽磁場拖曳著的表面氣體爆發，變化可持續幾小時到幾個月不等，活躍時往往成弓狀噴高至木星大小的高度，日珥在太陽表面的投影叫暗條 (filament)。耀斑 (solar flare) 是突發的氣體爆炸現象，遠較日珥激烈，僅僅數分鐘可釋放相當於百萬個氫彈的能量，足以干擾地球通訊，不過爆發一兩小時後就消失了，耀斑的輻射很廣，由  $\gamma$ -射線、X-射線、紫外光到射電都有，也會發出高速帶電粒子，是造成地球極光的原因之一。日珥和耀斑都明顯地和太陽的磁場有關，但形成的詳細機制仍有待進一步研究。



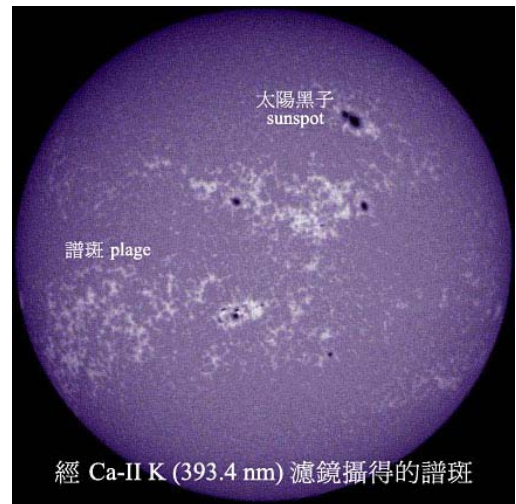
譜斑 (plage) 是在色球層強磁場區出現的亮斑，要用 Hydrogen- $\alpha$  (656.3 nm) 或 Calcium II - K (393.4 nm) 濾鏡才見到。譜斑和在光球層的光斑 (facula) 其實是同一特徵，只是出現在不同的太陽層面。

世界上有專業天文台和太空探測器長期監測太陽活動對地球的影響，業餘者也可用 Hydrogen- $\alpha$  和 Calcium II - K 濾鏡進行觀測，這網頁簡介各種業餘觀測太陽的設備

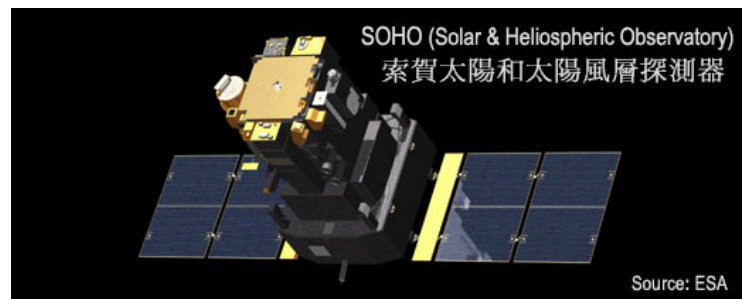
<http://www.universetoday.com/18152/solar-telescope/>



在海拔 2070 m 湖面上的 Big Bear Solar Observatory，1969 年啓用，主力儀器是 65 cm 和 20 cm 口徑的真空反射鏡，望遠鏡的真空處理和湖面的寧視環境有助減輕太陽熱力對鏡像的干擾。



經 Ca-II K (393.4 nm) 濾鏡攝得的譜斑



## 日冕

日冕 (corona) 在色球層之外，在日全食出現在太陽四周的一片淡白色暈，這就是日冕。日冕的物質濃度極低，比人造真空還要稀薄億倍，最寬的日冕比光球直徑大三倍，溫度非常高，平均約 2 百萬度，如此高的溫度，可能是經由儲存在太陽磁場中的能量加熱而成的。日冕的光譜頗複雜，有自由電子被光球輻射的直接散射 (scattering)，有高速電子在磁場運動時產生的同步加速輻射 (synchrotron radiation)，亦有金屬原子被電離所產生的發射線，例如有失去 9 至 13 個電子的鐵離子，鐵原子失去 9 個電子要 1.3 百萬度高溫，失去 13 個電子要 2.3 百萬度，從失去的電子數目便可估計日冕的溫度。最活躍時日冕可令鈣原子失去 14 個電子，相當於 3.6 百萬度高溫。

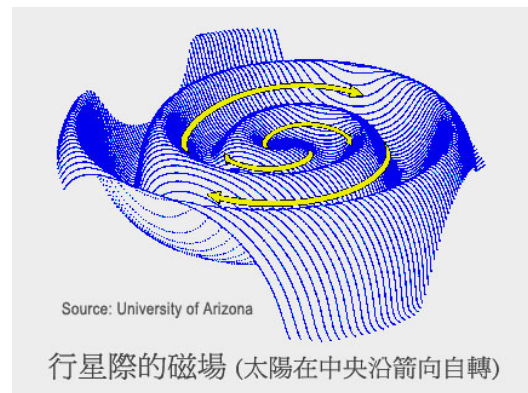
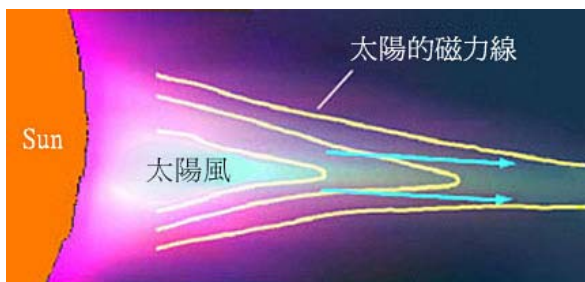


## 太陽風

太陽風 (solar wind) 是從日面釋吹出來的高溫等離子體 (plasma)，主要由帶正電的質子、帶負電的自由電子和小量氦原子核組成，但總帶電量仍是中性。

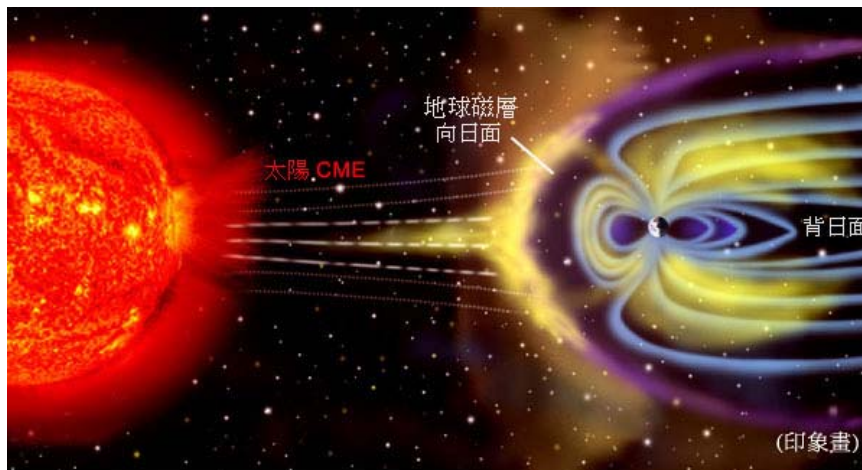
日冕的溫度高達百萬度以上，因此日冕內粒子的熱運動速度都非常快，不難脫離太陽而形成太陽風。太陽風所造成的質量流失每年約有  $10^{10}$  kg，但與太陽的總質量相比，仍然微不足道。太陽風的傳播速度約為 450 - 750 公里/秒，當它吹襲地球時，大部份的高能粒子被阻隔在地球磁場之外，少部份沿地球極區進入高層大氣引起極光。太陽風對人體有害，因此宇航員都要到有屏蔽的地方迴避。

由於電磁作用，太陽風向外傳播時也帶着太陽的磁力線向外延展 (下圖左)，同時太陽正在自轉，結果在行星際的空間出現了旋渦狀的磁場 (下圖右)，範圍遠至冥王星軌道以外。

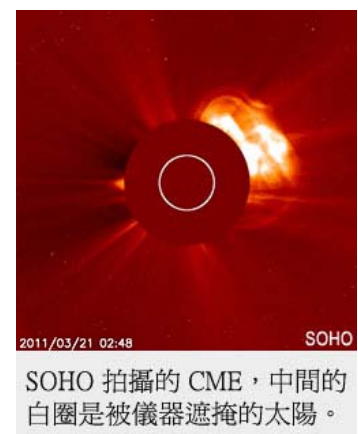


## 日冕物質拋射

日冕物質拋射 (CME, coronal mass ejection) 是一團突然從日冕拋射出來的等離子體，成份與太陽風相似，但夾雜少量的重元素 (氧、鐵等)，拋射質量亦大得多 ( $\sim 10^{12}$  kg)。CME 可以用日冕儀在白天下觀察到，當拋射物抵達地球時便會擾亂地球的磁層，磁層的向日面被壓縮，背日面被拉展成尾狀，當背日面磁層重組時，它便產生龐大能量傾入地球極區，區內的高層空氣分子被高能粒子碰撞而電離，激發特強的極光。CME 會破壞電訊和電力輸送，也曾間接引起加拿大在 1989 年的大停電。

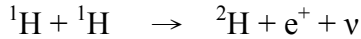


CME 抵達地球的磁層時，磁層的向日面被壓縮，背日面被拉展成尾狀。當背日面磁層重組時，它便產生龐大的能量傾入地球極區引起特強的極光。

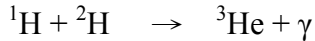


## 太陽內的核聚變

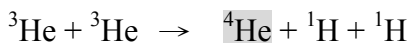
在太陽核心的核聚變由“氫燃燒”主導，即是氫在  $1.5 \times 10^7$  K 高溫下變成氦。氫原子由一個質子 (代號  $^1\text{H}$ ) ① 和一個電子組成，在高溫下電子已脫離原子只剩下其核，因此在太陽核心的質子都擠在一起，當兩個質子聚合時便產生一連串的反應，過程如下：



兩個質子 ( $^1\text{H}$ ) 聚合為 1 個氘核 ( $^2\text{H}$ ) 並放出一個正電子 ( $e^+$ ) 和一個中微子 ( $\nu$ )

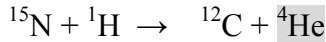
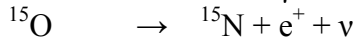
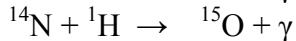
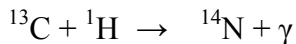
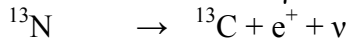
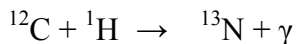


一個質子和一個氘核聚合為一個氦同位素 ( $^3\text{He}$ ) 並放一個  $\gamma$  光子



兩個氦同位素聚合為氦 ( $^4\text{He}$ ) 並放出兩個質子

以上過程稱為質子 - 質子反應鏈 (proton-proton chain)。在太陽核心內，氫主要經由質子 - 質子反應鏈變成氦，不過亦有小部份 (約 2%) 氫是靠另一種反應鏈 CNO (carbon-nitrogen-oxygen cycle) 才變成氦的。CNO 須要較高溫度 ( $\sim 1.8 \times 10^7$  K) 才會進行，反應由太陽內的碳吸收質子開始：



C = Carbon 碳

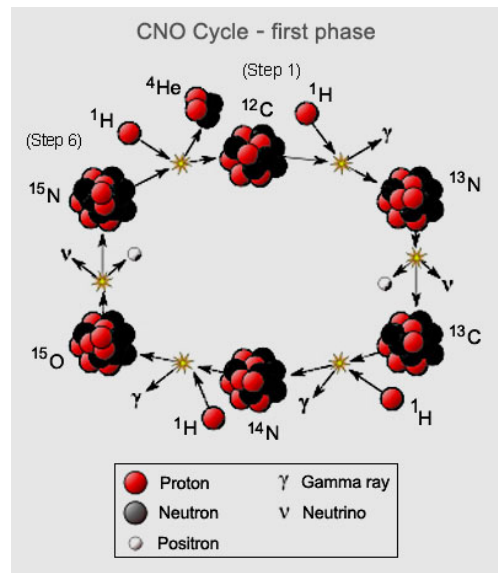
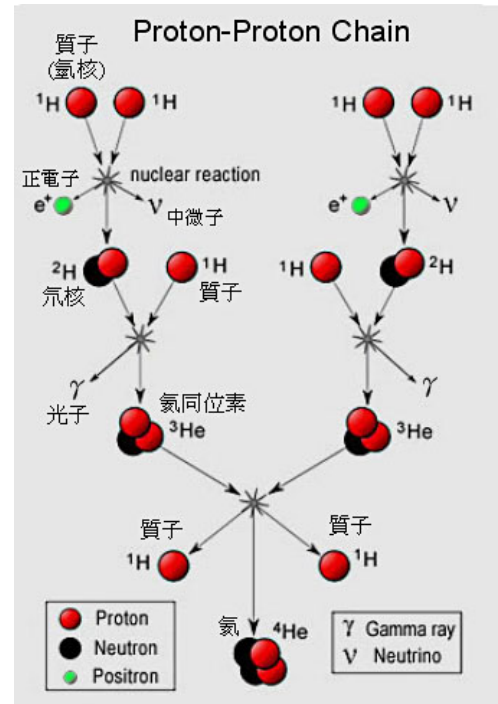
N = Nitrogen 氮

O = Oxygen 氧

H = Hydrogen 氫

He = Helium 氦

請留意在氫變氦時也會釋放正電子 (positron)、 $\gamma$  光子和中微子 (neutrino)。正電子是帶正電的粒子但質量與普通帶負電的電子相同，一對正負電子相遇便會湮滅，並且釋放  $\gamma$  光子。中微子又譯為微中子，它是一種幾乎不具質量的基本粒子，不帶電荷，但有自旋和能量，從星體內的核聚變到超新星爆炸都會釋放中微子，因此研究中微子有助了解天體的演化。



註 ① 原子核的代號是 [ $^N$ 元素]， $N$  是原子核內的質子及中子總數，例如

$^1\text{H}$  表示核內只有 1 個質子，即是氫原子核。

$^2\text{H}$  表示核內有 1 個質子和 1 個中子，稱 deuterium，中譯“氘”或“重氫”。

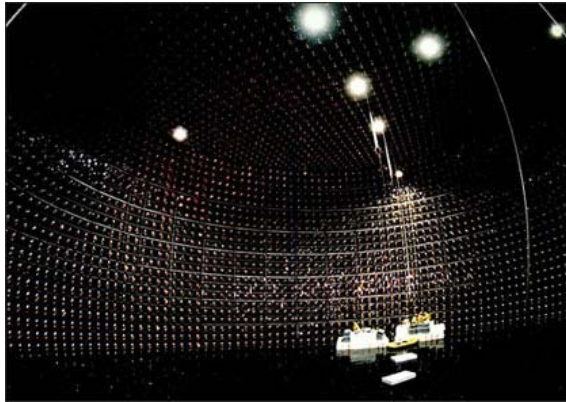
$^3\text{He}$  表示核內有 2 個質子和 1 個中子，稱“氦同位素”。

$^4\text{He}$  表示核內有 2 個質子和 2 個中子，稱“氦”(一個正常不帶電荷的氦核)。



## 太陽中微子之謎

要研究太陽內部的情況，最佳辦法是探測立即飛離太陽核心的中微子。自 1960 年代有了探測設備之後，天文學家偵查到的太陽中微子數目，不及理論預測的一半，此即為著名的太陽中微子之謎，其原因還未清楚，有說現在的太陽模型不完善（理論高估了太陽核心的溫度），有說中微子與物質反應速率不如理論預測高，真相仍在研究中。



### 中微子實驗室

建於 1980 年代的日本神岡實驗室，位於地底 1 公里深，利用 680 公噸純水捕捉中微子，1998 年發現了中微子振盪現象，即一種中微子能夠轉換為另一種中微子。這間接證明了中微子具有微小的質量。此後，這一結果得到了許多實驗的証實。中微子振盪尚未研究清楚，它不僅在微觀世界的規律中起著重要作用，而且與宇宙的起源與演化有關，例如宇宙中物質與反物質的不對稱很有可能是由中微子造成。

(圖片來源 ICCR / Japan)

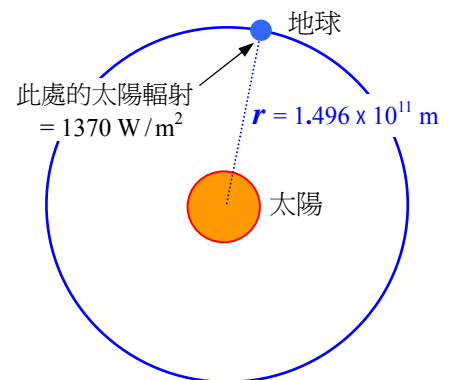
## 太陽的光度

太陽的光度（輻射的總功率）可以從實驗求得，原理如下：

人造衛星在地球上空收集到的太陽輻射  
 $= 1370 \text{ W/m}^2$ （這是全年平均量，稱 solar constant）

以日地平均距離為半徑的球面面積  
 $= 4\pi r^2 = 2.812 \times 10^{23} \text{ m}^2$

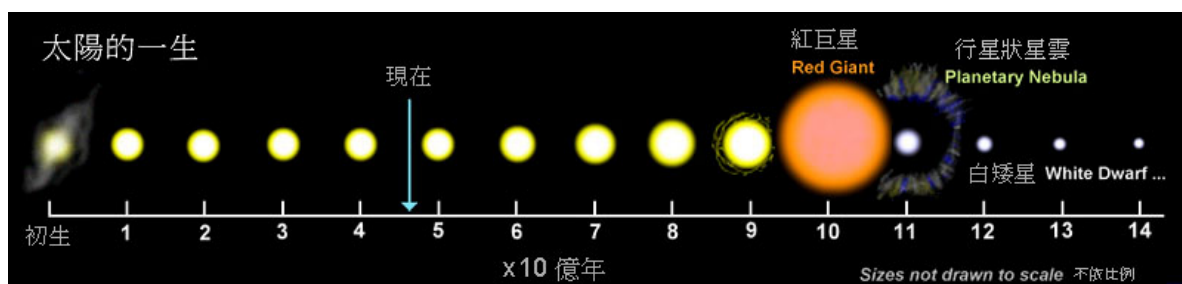
在球面上分佈的太陽輻射總量  
 $= 1370 \times (2.812 \times 10^{23}) = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$



基於能量衡守原理，太陽光度也是  $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$ 。知道太陽光度後，我們可用史提分-玻耳茲曼定律算出太陽的表面溫度 = 5780 K，見前講義《星空的秘密》。

## 太陽的壽命

太陽的光度為  $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$ ，根據質能公式  $E = mc^2$ ，這相當於每秒燃燒  $6 \times 10^{11} \text{ kg}$  的氫（詳見本篇 Q&A 第 15 題），太陽約有  $2 \times 10^{30} \text{ kg}$  的氫，因此太陽的氫燃燒可持續  $2 \times 10^{30} / 6 \times 10^{11} = 3.3 \times 10^{18}$  秒或一百億年。太陽約在五十億年前形成，現正值“中年”，氫燃燒仍然穩定，再過五十億年，氫燃燒迅速減慢，太陽將會膨脹為半徑  $\sim 1 \text{ AU}$  的紅巨星，最後塌縮為一顆小如地球的白矮星。在《星的演化》講座時會再談。



## 附錄 太陽數據

日地平均距離： $1.496 \times 10^8$  km  
視星等： $-26.7$   
絕對星等： $+4.8$   
光度： $3.85 \times 10^{26}$  W

直徑： $1.392 \times 10^6$  km  
相對地球直徑：109 倍  
質量： $1.989 \times 10^{30}$  kg  
相對地球質量：333 400 倍  
平均密度： $1.41$  g/cc  
表面重力加速度： $274$  m/s<sup>2</sup>  
表面逃逸速度： $618$  km/s

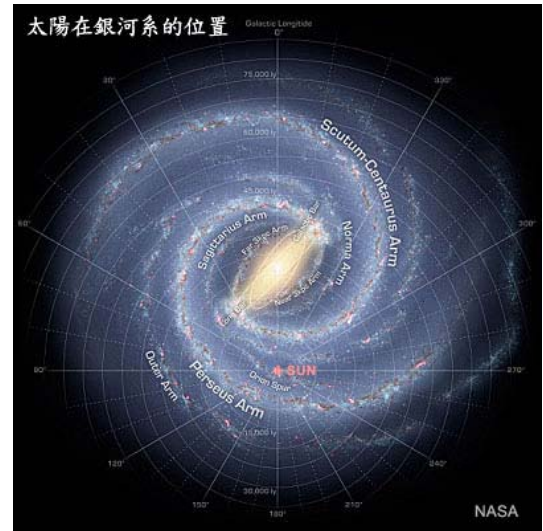
表面溫度： $5780$  K  
中心：溫度  $\sim 1.5 \times 10^7$  K  
密度  $\sim 160$  g/cc  
光球層：溫度  $\sim 5800$  K  
密度  $\sim 2 \times 10^{-7}$  g/cc  
色球層：溫度  $\sim 4500$  K  
密度  $\sim 5 \times 10^{-9}$  g/cc  
日冕：溫度  $\sim 2 \times 10^6$  K  
密度  $\sim 1 \times 10^{-15}$  g/cc

自轉週期： $\sim 25$  天 (赤道區)，  
 $\sim 34$  天 (極區)  
赤道-黃度交角： $7.25^\circ$   
到銀河中心距離： $26000$  光年  
繞銀河系中心週期： $2.2 \times 10^8$  年

光譜型： $G2V$

### 光球層成分 (質量比)

氫： $73.46\%$   
氦： $24.85\%$   
氧： $0.77\%$   
碳： $0.29\%$   
鐵： $0.16\%$   
硫： $0.12\%$   
氖： $0.12\%$   
氮： $0.09\%$   
矽： $0.07\%$   
鎂： $0.05\%$



## Q&A

1. 太陽直徑有多少 AU？
2. 為什麼太陽不會像原子彈般爆炸？ 為什麼太陽有臨邊昏暗但月球沒有？
3. 為什麼平時我們只見到光球層的圓面，但見不到比光球層高溫得多的日冕？
4. 科學家怎樣知道日冕有百萬度高溫？
5. 米粒和超米粒有什麼分別？
6. 為什麼太陽有磁場？
7. 今天在望遠鏡見到的太陽黑子位置與昨天所見不同，何解？
8. 太陽黑子盛衰週期 = 11 年，但科學家說真正週期是 22 年，何解？
9. 光斑和譜斑有什麼分別？
10. 太陽內的“氫燃燒”和火爐的炭燒有甚麼本質上的分別？
11. 陽光怎樣產生？
12. 中子和中微子有甚麼分別？
13. 已知太陽光度 =  $3.85 \times 10^{26}$  W，絕對星等 = 4.8。A 星的絕對星等 = 2.4，問 A 星光度？
14. 試用 Stefan-Boltzmann law 算出太陽的有效溫度 T。
15. 在每一秒內，太陽把體內多少的氫燒成氦？

答案：

1. 太陽直徑  $\approx 1.4 \times 10^6 \text{ km} = 0.0093 \text{ AU}$  (約 1% AU)
2. 因為核聚變的外張力被上層物質的重量抵消了，見右圖。  
因為月球沒有大氣層，月光沒有臨邊昏暗現象。
3. 雖然日冕很高溫 (二百萬度)，但內裡幾乎是真空，因此含熱量和亮度遠遠不及密度較大的光球層。平時光球層的強光把日冕的光掩蓋了。
4. 從金屬原子失去電子的數目便可估計日冕的溫度。
5. 米粒的對流範圍細小，超米粒的對流範圍很大。
6. 凡有帶電粒子流動，在粒子附近的空間就有磁場，太陽高溫使體內無數的原子電離，帶電的粒子到處移動便造成磁場。
7. 因為黑子隨太陽自轉而移動
8. 因為每隔 11 年南北半球的黑子磁場 (N <> S) 也逆轉一次，以磁場計是 22 年週期。
9. 兩者都是同一物，前者在白光濾鏡可見，後者要用特定波長的濾鏡才見得到。
10. 氫燃燒依靠原子核的聚合而釋放能量，其間氫損失的質量即是釋放的能量 ( $E = mc^2$ )。火爐的炭依靠化學反應而生光熱，其中參與化學反應的元素種類和總質量都沒有改變。
11. 陽光源自太陽內核聚變所生的光子，光子脫離太陽後就是我們見到的陽光及其他輻射。
12. 中子的質量遠遠大過中微子，通常與質子構成原子核存在物質中；中微子來自核變過程，速度甚高，質量微不可測 (實際質量未知)，也不會與其他粒子起作用，因此釋放後中微子可以穿過任何物體，包括星體內部及地球岩層 (以目前理論而言)。
13. 在相同距離下，A 星比太陽亮  $(4.8 - 2.4)^{2.512} = 9$  倍，因此 A 星光度 = 9 倍太陽光度或  $3.5 \times 10^{27} \text{ W}$ 。
14. 太陽光度  $L = 3.85 \times 10^{26} \text{ W}$ ，太陽半徑  $R = 696\,000 \text{ km}$ ， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  公制單位  
 $T^4 = L / (4\pi \sigma R^2) = 3.85 \times 10^{26} / [4\pi (5.67 \times 10^{-8}) (6.96 \times 10^8)^2] = 1.11545 \times 10^{15}$   
 $T = 5780$  度
15. 在述及“質子-質子反應鏈”時，我們知道每燃燒 4 個氫原子就變出一個氦原子。查原子數據表得知

$$\begin{aligned} 4 \text{ 個 氫原子質量} &= 4 \times (1.6735 \times 10^{-27}) \text{ kg} = 6.6940 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ 1 \text{ 個 氦原子質量} &= 1 \times (6.6464 \times 10^{-27}) \text{ kg} = \underline{6.6464 \times 10^{-27} \text{ kg}} \\ \text{質量損失} &= 0.0476 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 0.71 \% \text{ 四個氫原子的質量} \end{aligned}$$

換言之，在每 kg 氫的燃燒中，就有 0.9929 kg 轉變成氦，其餘的 0.0071 kg 變成輻射能量  $E$ 。根據愛因斯坦的質量-能量互換公式  $E = mc^2$  ( $c$  是光速  $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )，

$$E = (0.0071)(3 \times 10^8)^2 = 6.4 \times 10^{14} \text{ joules}$$

我們已知太陽的總輻射量 (光度)  $= 3.85 \times 10^{26} \text{ W} = 3.85 \times 10^{26} \text{ joules /sec}$ ，因此太陽每秒燃燒了  $(3.85 \times 10^{26}) / (6.4 \times 10^{14}) = 6 \times 10^{11} \text{ kg}$  的氫，從這個燃燒速度就可以估計太陽可持續燒氫一百億年。燒氫的持續時間稱為“主序壽命” (main-sequence life time)，核心有氫燃燒的星，包括太陽，都屬於“主序星”類。

