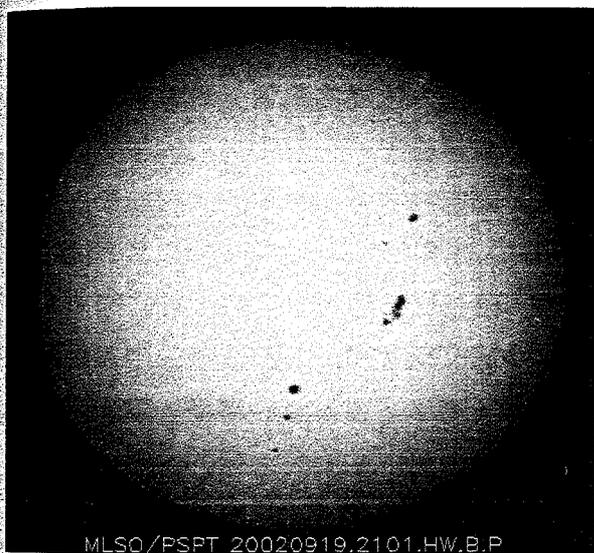


太陽自轉與爆發日珥

傳學海

國立臺灣師範大學 地球科學系

在日常生活中，一般人對太陽的印象大都停留在熾熱的發光圓盤，供給我們光與熱。再不就是，太陽每天東昇西降，日復一日、年復一年的運行不已。但是實際上，太陽並不是如此單調，它遠比一般人所想的還要複雜而且多彩多姿。



太陽，從古代便是眾所矚目的對象，也是網路上最多資源的天體。美國、法國、日本、義大利…各與太陽有關的大天文台都將數十年來的觀測影像數位化，並且放在專屬的網頁中；而環繞地球的太陽軌道觀測衛星像蘇活號（SOHO）、翠絲號（TRACE）……也將觀測的影像掛入專屬的網站。有關太陽的觀測波段，從可見光、紫外線、X光、無

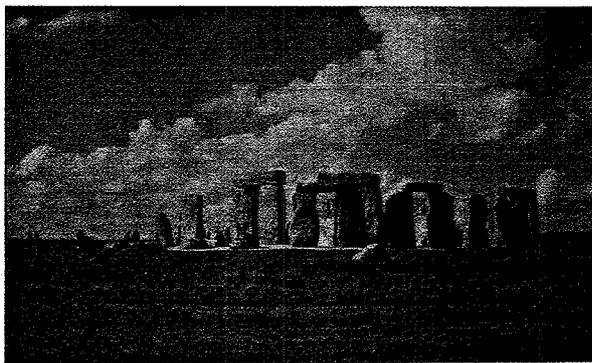
線電波…，在網路上一應俱全。

「太陽自轉與爆發日珥」單元便是利用網路上豐富的影像資源，介紹太陽的多重面貌，並利用太陽黑子來推算太陽表面自轉的情形，以及利用爆發日珥的動態影像探討爆發的速率。

太陽：由神祇降為恆星

太陽，提供我們光與熱的星球，自古以來常是人們膜拜的對象。我國古時便認為太陽代表天子，甚至有「天無二日，民無二君」的法天論點。

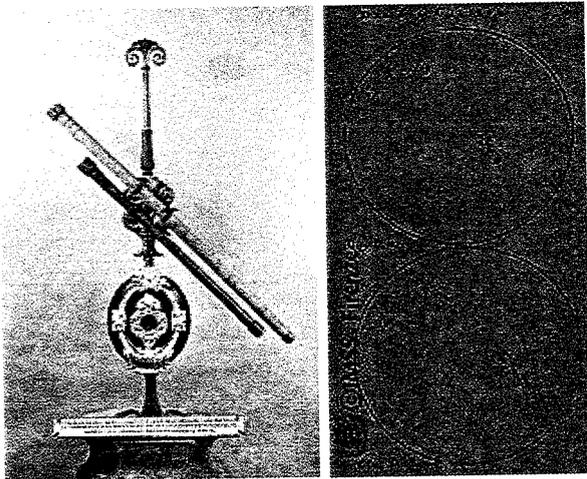
人類觀測太陽的歷史源頭已無從考究。由早期的巨石遺跡及出土的記載（例如巴比倫古文明的楔形文字），可以知道至少在四、五千年以前，人類已經知道太陽在天上的運行軌跡與季節之間的關聯。



有數千年之久，人類一直認為太陽與夜

晚閃爍的恆星不一樣，而將天體分為日、月、星。直到歐洲文藝復興以後，經過哥白尼、伽利略…等人的宣揚，地球繞太陽運行的觀念被世人普遍接受以後，太陽才被當作眾多的恆星之一。

當伽利略在 1610 年用自製的望遠鏡觀察太陽時，發現太陽表面有許多暗點、暗斑，稱為「太陽黑子」。伽利略觀察黑子的移動情形，認為黑子位於太陽盤面上，因此否定了亞里斯多德學派認為「太陽是完美無瑕」的理念。伽利略也由黑子的移動估計出太陽自轉一周約須一個月的時間。



伽利略自製望遠鏡

伽利略手繪黑子

從此以後，太陽被當作觀測研究的對象，持續的被觀測著。當無線電波、紅外線；紫外線、X 光…等觀測技術被發展後，也被用來觀測太陽。如今，太陽是天文網路資源中最豐富的。

太陽黑子

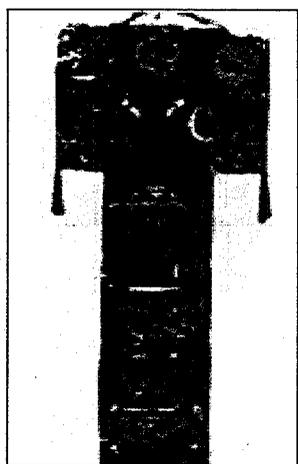
在人類文明發展的數千年中，由於太陽在天空中的運行與季節關係密切，所以一直

是太陽觀測的重心。另一方面，在望遠鏡發明以前，對太陽本身的觀測，卻祇有片斷、少數的記錄，這主要是太陽本身明亮刺眼，無法直接觀測。通常只能趁著清晨或黃昏陽光比較弱時，觀察太陽。即使進入二十一世紀，觀測太陽與太陽黑子仍然是十分有趣的，且能從中獲得太陽自轉、黑子演化、太陽活動…等訊息。

我國古代將太陽視為天子的象徵，因此非常注重觀察太陽，如果太陽盤面上出現黑色斑點，則視為聖德有虧，必須頒布減稅之類的德政以為彌補。《晉書·天文志·七曜》中清楚的表達了這種想法：「日為太陽之精，主生養恩德，人君之象也。人君有瑕，必露其以告示焉。……日中烏見，主不明，為政亂，國有白衣會，將軍出，旌旗舉。日中有黑仔、黑氣、黑雲，乍三乍五，臣廢其主。日蝕，陰侵陽，臣掩君之象，有亡國。」

中國文明起源於黃河流域的中原地區，屬於黃土高原，常常黃砂瀰漫，陽光比較不那麼刺眼，可以觀察到大型的太陽黑子。而在清晨日出，或是黃昏日落的時候，陽光比較柔和，可以稍微仔細的觀察太陽盤面，可以輕易的看到超大型的黑子。

我國古代將太陽稱為「金烏」或三足烏，認為三隻腳的烏鴉住在太陽盤面上。在馬王堆出土（註一）的帛衣上，在左胸部位便畫有一幅呈紅色的太陽，中間一隻烏鴉（註二）。《晉書·天文志》中也提到三足烏：「穆帝永和八年（西元 352 年）日暴赤如火，中有三足烏，形見分明，五日乃止」，表示出現一個連續五天都可以看見的巨型黑子。



馬王堆帛衣

馬王堆帛衣

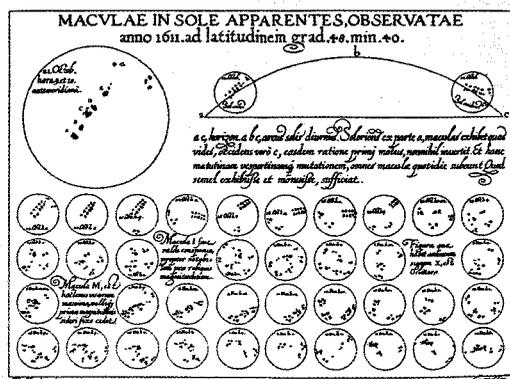
西漢史書《漢書·五行志》記載：「河平元年（公元前二十八年）三月乙未，日出黃，有黑氣大如錢，居日中央。」是世界上公認太陽黑子的最早記載。此後一千多年間，有一百多次與黑子有關的紀載，大都紀為黑氣、黑子…，形狀則以李、桃、錢、卵、人、鳥…來描述。例如《魏書·天象志》：「孝文帝太和二十三年（西元 500 年）十二月甲申，日中有黑氣，大如桃。」。又如《宋史》中紀載：「高宗紹興六年十月（西元 1136 年）壬戌，日中有黑子如李大，至十一月丙寅始消」。

西方在兩千多年前古希臘文明的黃金時代，亞里斯多德學派認為太陽是完美無暇的天體，不可能有黑子之類的瑕疵。如果有黑影出現在太陽盤面上，也是水星之類的行星從太陽前面經過所照成的。

伽利略在 1610 年用自製的望遠鏡看到太陽黑子，他每天觀察黑子在太陽盤面上的

移動與變化，認為黑子確實存在於太陽表面，打破了太陽是完美無暇的論調。繼而由黑子每天的移動，確定了太陽本身具有自轉的現象，藉此量出太陽表面自轉的週期大約是三十天。從此以後，太陽黑子觀測被持續而廣泛的進行著，分析太陽黑子的數量變化、形狀與面積的演變，出現與消失的週期、藉由黑子計算太陽不同緯度的自轉週期……等等。希望能了解太陽的本質與結構。

在伽利略觀測太陽的同時期，也有許多人使用望遠鏡觀察太陽黑子。除了伽利略以外，在史書上至少有兩個人：德國的湘耐爾（Christopher Scheiner）與荷蘭的法雷克斯（Johann Fabricius），宣稱是他們發現太陽黑子的。伽利略冒著眼睛瞎掉的危險，直接用眼睛觀察太陽；由於他最早所製作的望遠鏡，口徑很小、放大倍率也低，因此眼睛沒有受到重大傷害，但是伽利略的眼睛在晚年時確實呈現半盲情形。而湘耐爾卻是使用將太陽影像投影到幕上來觀察的安全方法，這也是後來數百年所使用的投影法。



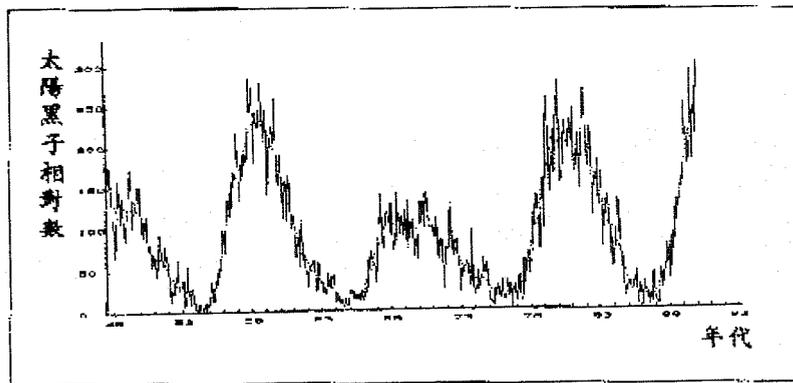
手繪黑子移動圖

在二十世紀以前，對太陽的觀測幾乎都

集中在描繪黑子的形狀與分佈，經過長期累積的觀測，了解黑子的形狀與數量時時在變動中，也發現了黑子常成群出現，超過百分之六十的黑子是成對的。德國業餘天文家史瓦伯(Heinrich Schwabe, 1789-1875)在 1826 年開始觀測太陽黑子，經過十八年的觀測，在 1843 年提出兩項重要的發現：

(一) 黑子數量的多寡不是隨意的，而是有十年週期性的循環，後來經過許多人

進一步驗證，証實黑子數確實有平均十一年左右的週期性變化。最少時，可能一個月都看不到一個黑子，稱為「極小期」或「低潮期」；最多時，可達上百個黑子，稱為「極大期」或「高潮期」。後來的觀測也發現太陽各種活動都與這個周期相關，因此稱為「太陽活動週期」。

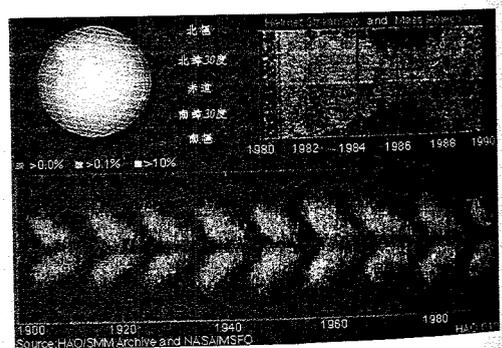


台北市立圓山天文台從 1948-1989 年共四十一年間，太陽黑子 Wolf 相對數變化圖。(—表 Wolf 相對數曲線；...表平滑曲線)

(二) 黑子出現的位置也有規律性，在黑子極小期時，黑子出現在南、北緯約 35 度處，一年年過去，黑子數量漸多，所在位置也逐漸向移向赤道，在十一年週期的尾聲，黑子在赤道附近出現，循環不已。把黑子所在的緯度與對應的時間所作的圖形，外觀有如蝴蝶，因此這種黑子由高緯向低緯偏移的圖像，又稱為「蝴蝶圖」。

但是只獲得少數人的注意，隨後德國天文學家(Alexander von Humboldt)在 1851 年出版的《宇宙》(Kosmos)一書，將史瓦伯有關黑子數量變化週期的結果刊載其中，

而使得太陽黑子數量有十年週期一事廣為人知，書中的紀錄也擴張到 1850 年。



黑子蝴蝶圖

史瓦伯在 1843 年的發表，吸引了吳爾夫(Rudolf Wolf, 1816-1893)的注意，促使他在 1847 年開始觀測太陽黑子。為了要有效估算黑子的數量，吳爾夫在 1848 年提出了稱為

蘇黎士黑子數 (Zürich sunspot number) 的計算方式，現在一般稱為「吳爾夫相對數」，一直到今天仍在使用。

吳爾夫相對數

在每幅太陽影像中，所有看到的黑子總數為 f ，以及黑子群數 g ，則黑子相對數為

$$R = k (10g + f),$$

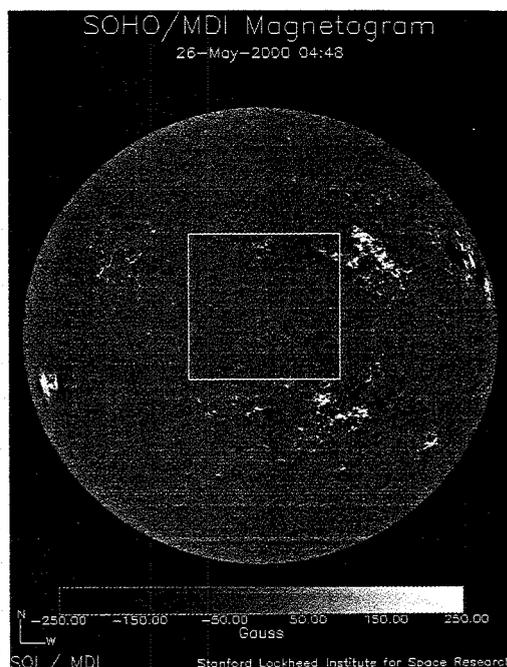
其中 k 代表校正參數。校正參數隨觀測者、望遠鏡及其他觀測條件而不同。國際上公認瑞士蘇黎士天文台的 k 值為 1。

在十九世紀末與二十世紀初期，美國天文家海爾 (George Ellery Hale, 1868-1938) 發明許多儀器來觀測太陽，其中最主要的成就是在 1908 年提出太陽黑子具有很強的磁性。隨著觀犯的觀測，發現太陽表面與黑子都具有磁性，而且南、北兩半球的成對黑子的磁性相反，也就是說，如果一對黑子位於北半球，其前導黑子與尾隨黑子的磁性為南—北磁極，則南半球的成對黑子磁性則為北—南磁極。長期觀測顯示黑子對的磁性約十一年後反轉，所以配合黑子的磁性，太陽黑子週期約為二十二年。

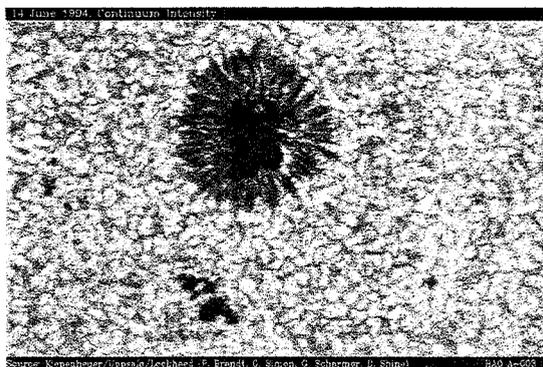
太陽表面大氣：光球、色球與日冕

在一般人的印象裡，太陽如同火球，是個明亮耀眼的圓盤；清晨、黃昏時太陽，帶著明亮的火紅，常是詩人詠歎的對象，「夕陽無限好，祇是近黃昏」更是膾炙人口的名句。這個平常所看到的太陽圓盤，天文家稱為「光球」，是太陽的表面大氣之一，溫度約為攝氏 6000°C ，厚約四百公里。

我國古時以太陽代表天子，所以非常注意觀察太陽的表面，在日出、日落時分，或是沙塵瀰漫的時節，可以直接用眼睛觀察太陽，有時會看到太陽盤面上有狀如桃、李或不規則形狀的黑點或黑斑，也就是黑子。一千多年來，史書上有兩百多次有關黑子的記載；1610 年伽利略用自製的望遠鏡觀察太陽，發現太陽表面有黑子，了解黑子在太陽盤面上是很平常的，而肉眼祇能看見巨型的黑子群。經過三百多年的觀察，對黑子群的分類，演化與各種性質已相當了解。



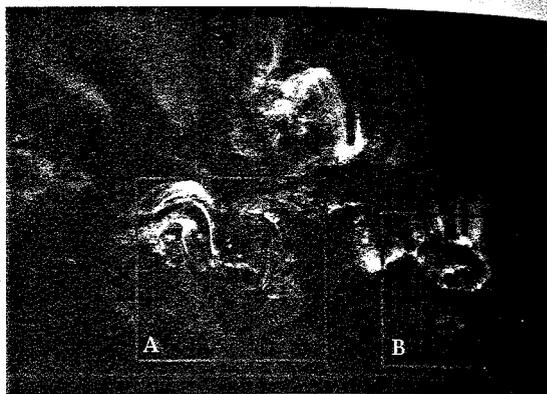
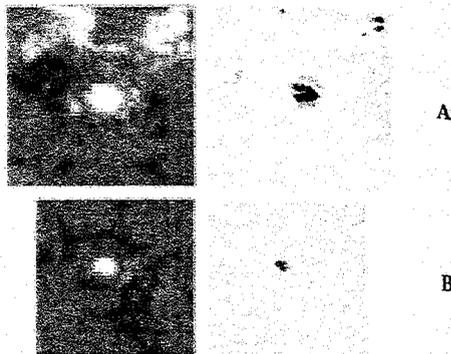
黑子磁性圖



黑子本影與半影、米粒組織

許多黑子中央有很黑的「本影」，周圍環著較淡的「半影」。黑子溫度約 4000°C ，應該十分明亮，但是在 6000°C 的光球襯托下，看起來較暗而成爲「黑子」。物理學家知道物體的光譜譜線在磁場下會分裂爲兩條或三條，磁場越強分裂的程度越大，1908 年美國天文學家海爾（Hale）利用這原理觀察太陽黑子的光譜，發現黑子具有磁性，有些黑子的磁場強度可達 3000 高斯。由於黑子區的磁場很強，迫使氣體沿著磁力線移動而不擴散，這須要耗掉一些能量，所以黑子區的溫度比周圍沒有磁場的區域低很多。

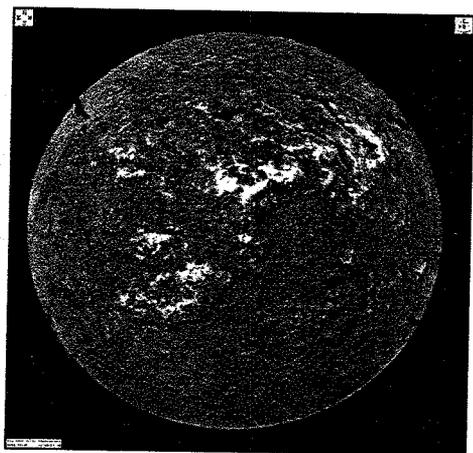
黑子常成對出現，而一對黑子中，彼此的磁極剛好相反。黑子的數量、大小與太陽表面的磁場變化有密切的關連。小黑子祇有幾天的壽命，典型黑子的生命期約有數週，而巨型黑子的生命期可達七十幾天。典型的黑子剛出現時是個小點，幾天後面積擴大、顆數變多，外形也趨向複雜，一週左右進入成熟期，持續幾天或幾週再逐漸變化成爲小點或數個小點，而後消失。



光球上除了太陽黑子外，還遍佈呈顆粒狀的「米粒組織」，看來有如沸騰的水面起伏擾動不已。光球之下是對流層，在對流層產生的對流胞浮到光球就形成米粒組織，直徑約爲一千公里；米粒組織的中心亮區比邊界暗區高 300°C 。在持續拍攝的照片中，可以看見米粒組織在幾分鐘內形成、消失、再形成循環擾動不已。任何時刻，太陽表面隨時都存在百萬個米粒組織。由於米粒組織太小，在地面上觀測受到地球大氣的擾動，很難得到米粒組織的清晰影像；天文學家大多利用高空氣球或人造衛星來觀測。

在日全食過程中，月球遮住整個明亮光球的短短幾分鐘內，太陽的邊緣呈現一圈淡淡的紅色，由光譜等測知，這厚約三千公里的大氣層與光球不同，稱爲「色球」。色球的

總亮度祇有光球的千分之一，所以平常無法看見。色球的溫度由底層的 4200°C 上升到頂層的 8200°C ，在這環境下，氫原子發出很強（稱為 $\text{H}\alpha$ 譜線）的紅光，天文學家常用祇讓 $\text{H}\alpha$ 光通過的濾鏡來觀測色球上的現象，而不需要再等到日全食的時候。



色球與絲狀體

色球盤面上有許多暗長條的「絲狀體」，邊緣則有許多火炎般的突出物—日珥。絲狀體其實就是日珥，在盤面較明亮的背景襯托下呈現暗條狀，但在邊緣日珥突出到較暗的天空背景中，便呈現出火炎般的明亮。日珥是溫度較低的電漿，常浮在磁場兩極區域間的上空，或沿著磁力線浮在色球上。日珥中的物質，有的從色球上升，也有從日冕下沉而來，在連續拍攝的影片中，可見日珥中的物質沿著弧線或呈波狀上升或下降。

日珥一般分為寧靜日珥與活動日珥兩大類：

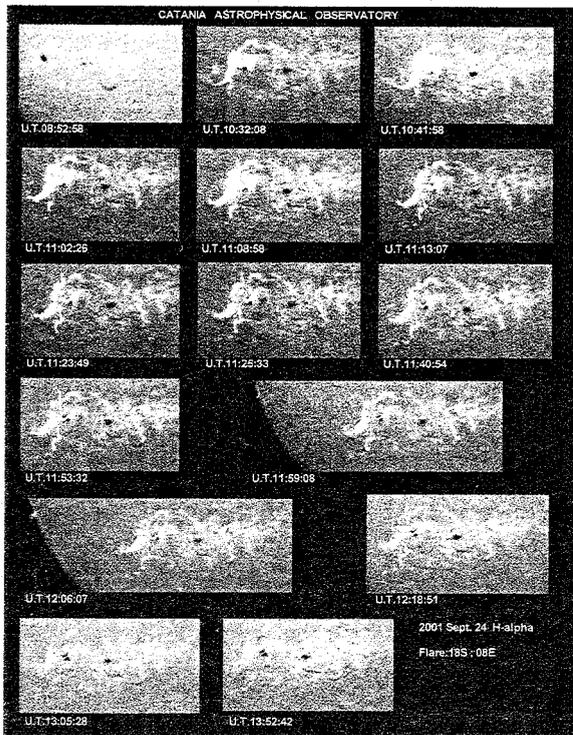
寧靜日珥：多為絲狀體之類，像巨大的拱橋連綿幾十萬公里，外觀結構比較安定，變化和緩，有些拱橋結構可以持續幾十天。

活動日珥：幾天內已有明顯變化，有些「爆發日珥」從發生到結束不過幾十分鐘到幾小時，爆發的速度可達每秒幾百公里。



寧靜日珥

另外，多數巨型而結構複雜的黑子群中，常出現短暫而劇烈的閃光現象，稱為「閃焰」(flare)。發生閃焰的瞬間溫度可高達攝氏一億度，過程非常類似氫彈爆炸的現象。磁能儲存在磁場中，經由目前還不完全明瞭的過程，被繃緊的磁場突然鬆弛而釋放巨量的能量，便發生閃焰。一次大閃焰在幾秒鐘內釋放出來的能量，相當於十億顆百萬噸級的氫彈爆炸。在此劇變中，部分能量灑落在光球上，也向行星際空間中噴射出多至百億噸的物質。



閃焰

用 $H\alpha$ 濾鏡拍攝的色球照片中，矗立著許多草叢般的暗條紋一針狀體，是太陽表面噴射一般上升的氣體。典型的針狀體以每秒二十公里的速率上升，到達七千公里的高度後崩潰，在幾分鐘內消散。針狀體一般侷限在「超米粒組織」的界限間，超米粒組織直徑約三萬公里，含有幾百個普通的米粒組織。超米粒組織是太陽內部較深處所形成較大的對流胞，升起到色球層後冷卻再水平輻散移向邊界，再沉入太陽內部；在這些邊界，底下的磁力線得以竄出形成針狀體。

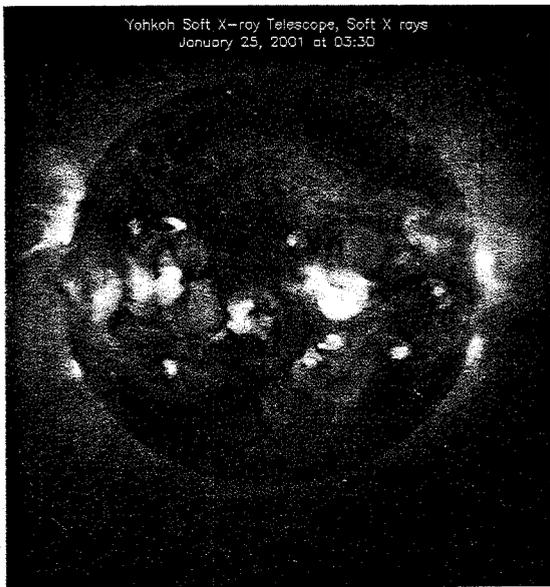
溫度比 8200°C 更高時，氫原子成為游離狀態，不再發射紅光，氣體溫度在很窄的高度範圍內（稱為過渡層，transition zone）陡地上升到攝氏百萬度以上，而進入日冕的區

域。

日全食時，天空暗下來像晚上一樣，在太陽四周呈現一圈珍珠般的白色光芒，向外伸展幾百萬公里，稱為「日冕」；在高品質的照片中，可見許多日冕流如輻射條紋般向外伸張遠達六個太陽半徑處。日冕是太陽的最外層大氣，密度非常稀薄，還不及地球海平面大氣的百萬分之一。和色球一樣，平常看不見，除了在日全食的短短幾分鐘來觀測外，天文學家也用日冕儀在高山上觀測，或用人造衛星在地球大氣層外觀測。

在日冕的光譜中發現許多明亮的譜線，是高度游離化的元素所發出的譜線，如 $O\text{III}$ （氧游離兩個電子）、 Fe X （鐵游離九個電子）等譜線，表示其溫度約為攝氏一百萬度～攝氏三百萬度。溫度雖高，但由於密度非常稀薄，所以亮度非常低，祇有光球的百萬分之一。色球與日冕的溫度遠比光球高，是光球上的磁場與擾流的作用往上加熱的結果，但是太陽物理學家仍然不清楚其中的過程。

美國利用太空實驗室或環繞地球的「X光軌道天文台」來觀測太陽的內層日冕，太陽的X光影像佈滿許多亮區與亮點，都是內層日冕高溫區，常在黑子上方；而明亮的弧線則反映了磁力線的分佈。另外還有一長條不發出X光的黑暗區域，稱為日冕洞，是太陽磁力線開放處，也就是說，磁力線由日冕洞向太空延伸，並不會再回到太陽本身；電子、質子等帶電粒子就由日冕洞以每秒六百公里的高速流出，形成太陽風。



日冕洞

註一：馬王堆西漢古墓

湖南省博物館與中國科學院考古研究所大陸考在一九七二年挖掘「馬王堆」一號古墓，兩年間陸續出土二號與三號古墓。位在長沙東郊五公里的這處古墓，經證實是漢初長沙國丞相車侯利蒼家族所有，其中一號墓所葬的利蒼夫人，經過兩千多年還保存完好，成為轟動國際的重要考古發現。

此外，出土的還有帛畫、竹簡、木牘、地圖、帛書、漆木器、絲麻織物、兵器、樂器、木俑、穀物、水果、草藥等三千多件實物。

其中長沙馬王堆一號漢墓出土 T 字形「非衣」，係馭侯利倉之妻蓋棺的吉祥物。畫面分天朝、人間、地府三段，左胸部位為金鳥。

參考文獻

1. Idmeier (1955 年), *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung*, Leipzig, p50.
2. Ithasar and Wöhl (1980 年), *Differential Rotation and Meridional Motions of Sunspots in the Years 1940-1968*, *Astron. Astrophys.* 92, 111.
3. *cerpts from Solar Observations During 1843 by Heinrich Schwabe*, (*Astronomische Nachrichten*, vol. 20., no. 495, 1843)
4. n Humboldt, A. 1850, *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*, Stuttgart [199X reprint of english trans., XXX]
5. le, G.E., 1908, "On The Probable Existence of a Magetic Field in Sun-Spots", *Astrophysical Journal* 28, 315
6. ward, R., 1985, "Eight Decades of Solar Research at Mount Wilson", *Solar Physics*, 100, 171