

大地之母 太陽

陶蕃麟

太陽是我們最熟悉的天體，每個晴朗的日子都能看見太陽東昇西沒，形成了日夜的變化，年復一年規律的南北移動則造成四季的改變。我們的祖先早就認識到他們的生命依靠太陽來維繫，因此以真誠敬畏之心來看待太陽。

我們為何要研究太陽？

太陽的光與熱是地球的生命之源，我們認識到太陽的重要，企圖理解它是如何工作，為什麼它會改變，並且如何影響我們在地球上的生活。太陽在數十億年的歲月是如何變化，這些變化中的又是如何會影響我們的氣候，都是我們想瞭解但尚不確定是如何造成的。

進入了太空時代以後，更發現人造衛星與太空船的運行也受到太陽的影響，來自太陽的氣流，以每秒超過 500 公里的速度吹過地球，造成太空中的氣候變化。這種『太空氣象』能夠改變衛星的軌道和縮短任務生命。當我們越依賴太空中的衛星時，我們也將越感受到太空氣象變化對我們的影響，並且需要預測他。

太陽是一顆恆星，在瞭解宇宙的天文學中太陽扮演了重要的角色，他是唯一近到我們能仔細觀察表面細節的恆星。沒

有太陽，我們就不能那麼容易的推測其他恆星也有黑子，和外圍有炙熱的大氣層。

太陽是瞭解其他恆星的鑰匙：我們要知道太陽的年齡、半徑、質量、和發光度(亮度)，以及他內部和大氣詳細的資訊。這些資訊是我們瞭解其他恆星是如何發展的支柱。許多在宇宙中其他地方發生的物理過程，能夠透過對太陽仔細的觀察而獲得確認。經由這種方法，太陽天文學家教導我們許多有關恆星、行星系、星系、和這個宇宙本身的知識。

太陽更是物理實驗室，太陽經由核融合產生能量：四個氫核融合成一個氦核。這種過程是理論物理學家夢寐以求的乾淨能源。在這些領域和許多其他的領域中，都還有許多相互的關聯性等待著太陽天文學家和科學去瞭解。

這些就是我們要研究太陽的主要理由：瞭解太陽與氣候的關聯、瞭解並企圖預測太空氣象、瞭解太陽來研究恆星、把

太陽當成實驗室。

太陽內部的構造

依理論天文學家的推論，太陽的內部結構可以分為核心、輻射層、接合層、對流層四部份。核心是太陽能量產生的場所，以氫原子核融合成氦原子核的方式放出巨大的能量，輻射層以輻射的方式將能量傳送出去，對流層則藉著對流作用將能量送到光球，成為我們看見的陽光。接合層是這幾年新發現而增加的，用來解釋太陽磁場的形成。

核心 (The Core)

太陽的核心位於中心，是氫原子熔合成氦原子的區域，這種反應放出的能量最後會成為離開太陽表面的可見光。單獨的氫原子核必須有足夠的能量才有可能對抗兩個正電荷之間的電磁排斥力而結合在一起。在非常接近太陽中心的地區，溫度大約在 15,000,000 °C，密度大約是 150g/cc (大約十倍於金或鉛的密度)。當由中心向太陽表面移動時，溫度和密度同時都會降低。由於核反應對溫度和密度非常敏感，原子核的燃燒在核心的邊緣幾乎完全停止 (大約在至表面 25% 或離中心 175,000 公里之處)，核心邊緣的溫度只有中心的一半，同時密度也降至大約 20g/cc (與黃金的密度近似)。在氫原子融合成氦原子的過程中，核反應同時也製造出稱為微中子的粒子。這種難以捕捉的粒子能夠穿透太陽的每一層，但經由一些努力可以在地球上偵測到。

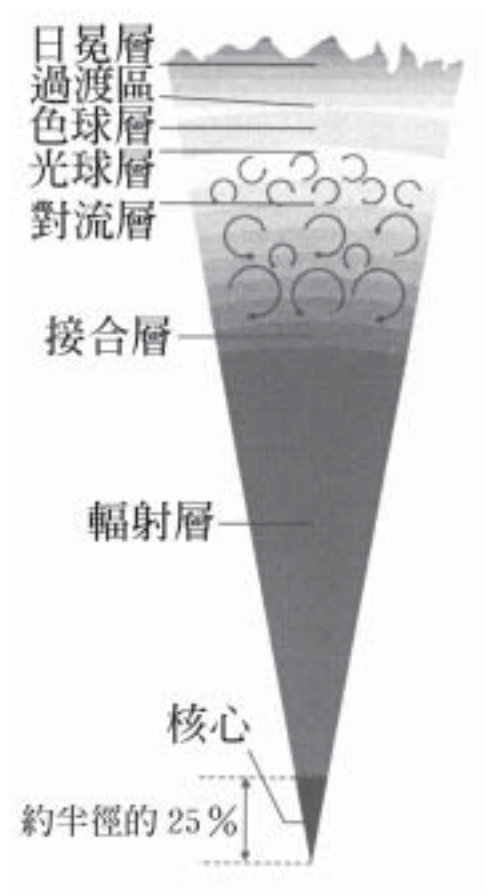
輻射層 (The Radiative Zone)

輻射層從太陽核心的外緣延伸至對

流層底部的接合層 (由離中心 25% 至 70% 的範圍)，輻射層是依能量傳送的方式命名的，在核心產生的能量由光子攜帶出去，雖然光子以光速移動，但光子在如此濃密的物質中，只能經由碰撞從一個質點傳給另一個質點，大約要經過一百萬年和無數次的碰撞，一個光子才能到達接合層。核心外緣的密度約為 20g/cc，至輻射層頂的密度則只有 0.2g/cc，遠小於地球上水的密度，在相同的距離中溫度亦從 7,000,000 °C 降至 2,000,000 °C。

接合層 (The Interface Layer)

位在輻射層和對流層之間是薄薄的接合層，在對流層中發現的流體運動從這層的頂部向底部逐漸減慢，同時與輻射層



太陽內部結構圖

的情況越來越相似。在更多的細節被發現後，這幾年來這個薄層變得非常引人注意。現在這一層被認為是產生太陽磁場的磁發電機，流體在橫越過這一層時流動速度的改變，能夠擴展磁力線的力量並且增強磁場，同時在經過這一層之後，化學成分好像也突然改變了。

對流層 (The Convection Zone)

對流層是太陽內部的最外層，由可見的表面向下延伸約 200,000 公里。在對流層底部的溫度大約是 2,000,000 °C，這已經冷得足夠讓較重的離子（如碳、氮、氧、鈣和鐵）能捕捉住一些電子，使得物質變得更不透明，因此輻射線變得更難以穿透。伴隨著輻射線被阻擋的熱能，最後終將使流體被加熱然後沸騰，或說是產生

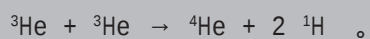
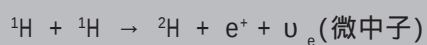
對流。對流運動能迅速的將熱量帶至表面，同時流體在上昇的過程中膨脹和冷卻，到達可見的表面時，溫度已經降至 5,700 °C，密度則僅僅只有 0.0000002g/cc(大約是海平面空氣密度的萬分之一)。對流運動本身在表面形成可見的米粒斑和超米粒斑。

太陽的表面

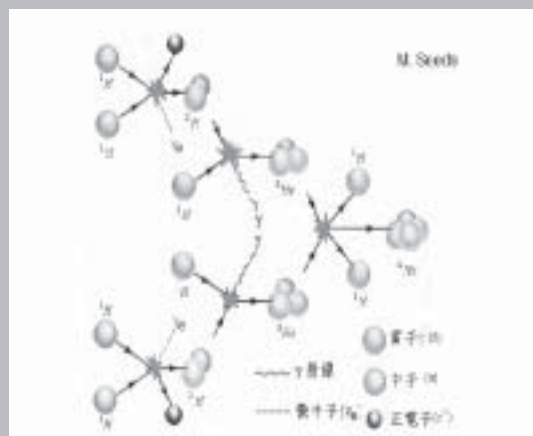
以肉眼觀察所見的太陽，是一個視直徑約半度的明亮球體，我們稱之為光球。以望遠鏡觀看光球，則能見到表面有許多明亮或黑暗的區域。黑的稱為黑子，有些巨大的黑子裸眼就能見到；亮的稱為白斑，出現在光球的邊緣時較易見到。而在日全食的全食階段，出現在黑暗太陽四

■ 天文小辭典 — 太陽的能量

太陽一秒鐘可以產生 3.826×10^{26} 瓦的能量。而現在的天文學家經由種種觀測的證明以及理論上的推測，終於瞭解太陽以核融合方式產生能量。融合主要是在太陽的核心進行，以四個氫原子融合為一個氦原子後，因質量減少而以質能互換 ($E=MC^2$) 來產生能量。可不要以為反應過程就只是四個氫原子剛好碰在一起就發生了，要恰好四個原子碰撞的機率太小！太陽主要以以質子-質子鏈 (proton-proton chain) 分別經由幾個步驟而完成反應



而能量（光子）的形式通常為高能的 γ 或 X 射線。以目前的太陽理論模型推測，質子-質子鏈佔太陽的能源 90%，而另外 10% 是以碳氮氧循環 (CNO cycle)。



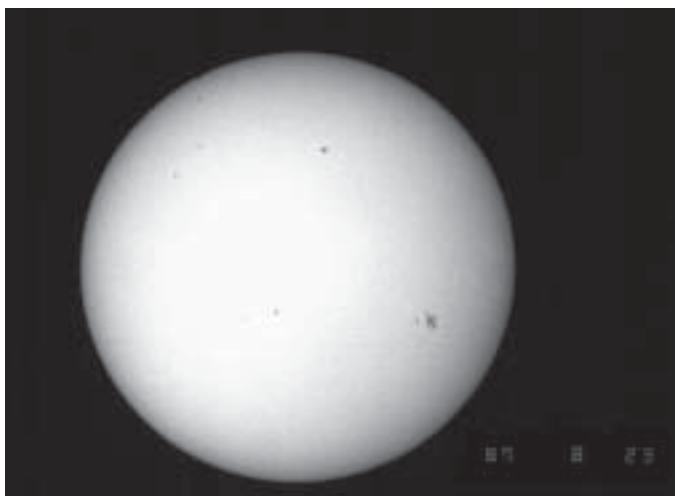
週的微光物體稱為日冕，偶爾還能在日冕中見到赤紅色如火燄的物體，則稱為日珥。

光球 (Photosphere)

光球是太陽可見的表面，也是我們最熟悉的部分。雖然太陽是一個氣體球，沒有固體的表面，但是這一層確實的厚度仍然有100公里左右（與太陽其餘的各部分比較仍是非常的薄）。當我們注視太陽盤面的中心時，我們是直接看見太陽上比較熱和比較亮的區域；當我們觀察太陽盤面的邊緣時，我們看見的陽光是斜斜的穿過這一層，所以只看得見較上面較冷且較暗的部分，這就是所謂的『臨邊黑暗』現象，使得太陽盤面的邊緣部分看起來比較暗。使用簡單的望遠鏡（必須有良好的濾光鏡減弱陽光保護觀測者的安全），可以看見光球上的一些特徵。這些特徵包括黑暗的太陽黑子、明亮的白斑（光斑）和小顆粒。我們也可以利用都卜勒效應測量物質在光球上的流動，這些測量洩漏了更多表面的特徵，如大尺度流動的超米粒斑和震動波的形態。

色球 (Chromosphere)

色球是在光球之上但不規則的一層，溫度可以上升至20,000 K，在這種溫度下氫原子發射的光線使這一層成為紅色，在日全食的時刻就能看到這種色彩，所以這一層被稱為色球。在使用光譜儀或是濾色片觀察的發射線時會看見更多的特徵，這些特徵包括色球中磁場的網路，圍繞著黑子的明亮斑點，橫越過太陽盤面黑



光球層是太陽可見的表面，可以看見黑子。

暗的絲狀體，還有浮現在邊緣之上的日珥，在幾分鐘的觀察中就能看出變化。

過渡區 (Transition Region)

過渡區是非常薄而且不規則的一層太陽大氣，他將高熱的日冕與非常冷的色球層分隔開來。熱流由日冕進入色球層時，在這薄層之中進行的程序使溫度由1,000,000 K快速的降至20,000 K。在這種溫度下，氫原子仍然是游離的（電子被剝離），因此很難看見。在過渡區中主要由游離的碳、氧等離子和鐵與矽的原子核取代了氫原子，但太陽光譜中由鐵原子發射出的紫外線，因為不能穿透地球的大氣層，只能在太空中觀測。包括太陽極限任務(SMM)、太陽日球觀測任務(SOHO)、以及過渡區和日冕探測任務(TRACE)在內的太空船，都對過渡區的結構和動力機制積極的搜集資料。

日冕 (Corona)

日冕是太陽最外面的大氣層，在日全食的時候像鑲著珍珠的白色王冠環繞著太陽，日冕呈現的特徵有噴射的、羽毛狀的、和環狀的氣流。這些日冕中所有的特



日全食時所看到的日冕，日冕層是太陽最外層的大氣，溫度可達絕對溫度數百萬度。

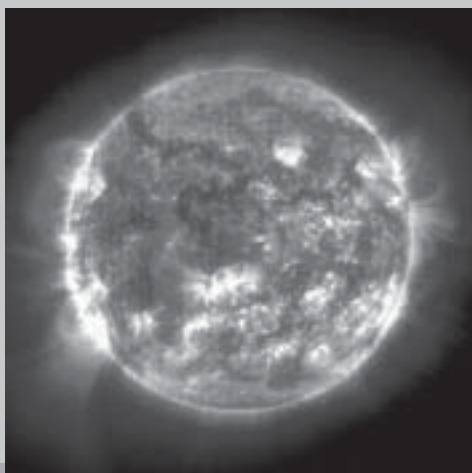
徵隨著太陽週期的循環在每一次的日全食中出現。在日全食短暫進行的數分鐘內，也會觀察到這些特徵的變化。

在測量出日冕是溫度超過 1,000,000 的超高溫氣體前，日冕的本質一直是個謎。在如此的高溫下，氫原子和氦原子這兩種主要元素的電子都完全被剝離了，甚至連碳、氮、氧等次要的原子也都完全喪失了電子，只有少數較重的原子，像鐵和鈣還能在如此的高溫下保留一些電子。這些被高度游離的原子所發射出來的譜線，像鬼魅般的迷惑著早期的天文學家。早期的觀察者在日冕可見光的譜線中發現到不能與當時所知的物質對應的明亮譜線，使得天文學家建議「日冕體」是日冕

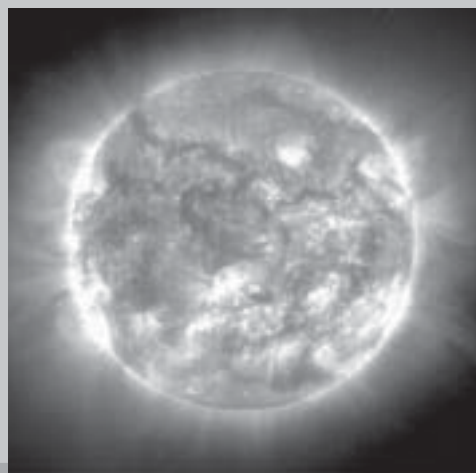
中主要的氣體物質。現在我們每天都能使用日冕儀製造人工日食，將太陽的盤面遮掉並使用濾色片過濾掉不須要的光線，只讓日冕中離子的譜線被看見；同時也知道所謂的日冕體只是沒有電子環繞的氦原子核。

由於高溫的緣故，日冕在 X 射線波段中最為明亮。換句話說，「冷」的太陽光球發射的 X 射線非常少，這使得我們用可見光觀察太陽時，能看透橫越過太陽盤面的日冕。而要觀察日冕則要設計一架可以看見 X 射線的望遠鏡，並且將他安置在地球大氣層之上。在 70 年代的早期，天空實驗室攜帶了一架觀察 X 射線的望遠鏡，首度看見了日冕洞和明亮的斑

171 埃



195 埃



■ 觀測太陽

天文學家為了觀測太陽種種面貌，利用不同儀器觀測太陽在不同波段與溫度下的影像，

這些觀測包含從低能量電波到高能 X 射線。你可以在 SDAC 網站上觀察每日太陽的在不同波段的影像。

網址：<http://unbra.nasa.gov/>

點。今天我們有 Yohkoh、SOHO、TRACE 等人造衛星提供最新和令人興奮的日冕特徵觀測。

太陽風 (The solar wind)

太陽風由太陽的表面以每秒鐘 400 公里 (大約每小時一百萬英里) 的高速向四周吹送, 他的來源是高熱的日冕, 因為極端的高溫使太陽的重力不再能捕捉住這些質點。雖然我們知道太陽風是如何產生的, 但我們並不知道日冕中的氣體是如何被加速到這種高速度, 這個問題被認為與日冕的高溫有關。

太陽風中的物質有來自日冕中的粒子、游離的原子、和個別的磁場, 當太陽以約 27 天的週期自轉時, 隨著太陽風傳送的磁場會環繞成螺旋狀, 太陽磁場的變化也會隨著太陽風傳送至太陽系的各處。

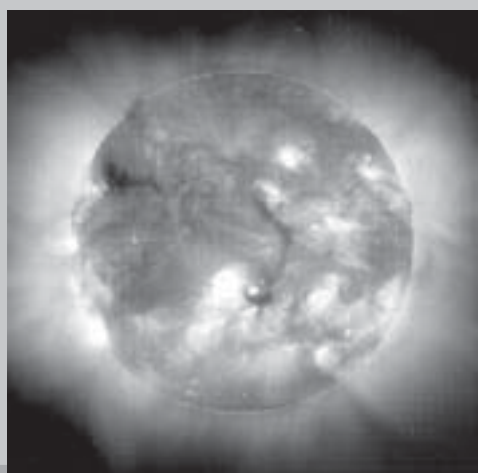
太陽風雖然永遠是朝離開太陽的方向運動, 但他是不均勻的, 速度和隨伴而行的磁氣雲的密度都會改變, 當高速運動的部分追上運動較慢的部分時, 就會產生交互作用, 使結構發生變化。來自日冕洞的太陽風速度最高可達每秒鐘 800 公里, 在日冕流中的速度則只有每秒 300 公里。這些高速和低速的氣流彼此間不斷的作用

著, 並隨著太陽的自轉交替的穿過地球。不同速度的太陽風不斷的轟擊著地球的磁場, 造成地球磁場的磁爆。尤里西斯太空船於 1995 年完成環繞太陽一週的任務, 在他飛越太陽的南極和北極地區時, 測量了當地太陽風的速度和磁場的強度、方向與結構, 使我們對太陽風有了新的認識。

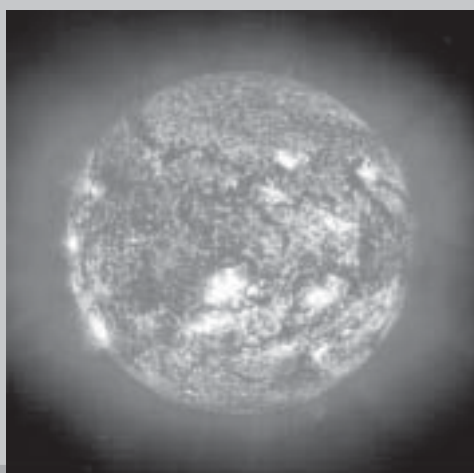
日球 (The Heliosphere)

日球是由太陽風形成的氣泡, 雖然來自星際空間的帶電粒子能夠滲透進入這個氣泡, 但日球中的物質基本上都是太陽本身散發出來的。以每秒數百公里的速度離開太陽向四處吹送的太陽風, 在離開太陽一段距離後, 至少在越過冥王星軌道之後, 這個超音速的氣流會因為遭遇到星際空間的氣體而減速。首先他會與前緣的粒子產生撞擊, 最後的衝擊使他成為次音速的氣流, 然後隨著周遭的物質緩緩的改變方向, 在太陽運動的後方形成像彗尾的形狀。這以次音速流動的區域稱為日鞘 (helio-sheath), 日鞘的外圍就是日球與星際物質遭遇之處, 也就是太陽的邊界, 再往外就是星際空間了。

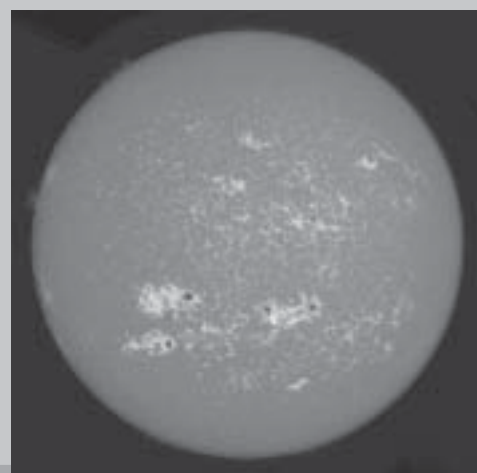
284 埃

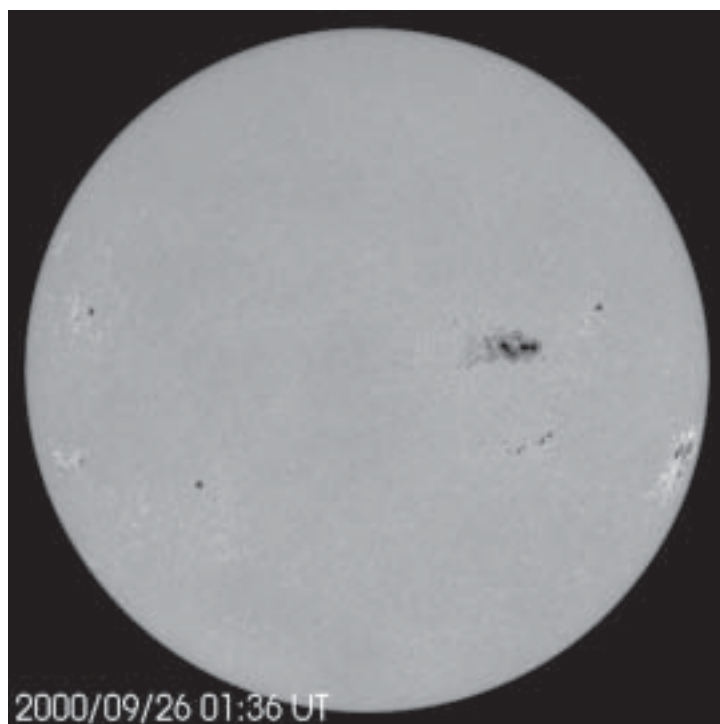


304 埃



K-line





白斑 (Faculae)

白斑是太陽面上明亮的區域，通常在太陽圓盤面的邊緣很容易看見。他也是太陽磁場較強的地區，但比起黑子仍是弱了許多。太陽黑子使太陽表面的亮度下降，白斑可以使太陽表面的亮度增加，在黑子循環的週期中，當太陽黑子到達極大期時，白斑仍比黑子還要多，所以會使太陽的亮度比黑子極小期時還要亮些（大約 0.1%）。

太陽表面的特徵

太陽表面的各種特徵主要出現在光球、色球與日冕之中，在光球上有太陽黑子、白斑、米粒斑和超米粒斑。

太陽黑子 (Sunspots)

太陽黑子是出現在太陽表面的黑色斑點，典型的生命期約為數天，但有些大的黑子可以出現好幾個星期。太陽黑子是太陽表面上磁場最強的地區，通常比地球的磁場強上數千倍。太陽黑子常成群出現，並分成兩個部分。如果其中一個部分的磁性是磁北極（正極），另一個部分就會是磁南極（負極）。磁場最強的區域是黑子黑色的部分，稱為本影，灰色的是磁場較弱的區域，看來比較平坦也明亮些，稱為半影。

米粒斑 (Granules)

米粒斑是太陽上的小細胞組織，直徑大約在 1,000 公里左右，覆蓋著整個的太陽表面，只有黑子存在的區域才沒有米粒斑。米粒斑出現在對流細胞的最上層，熱的物質由明亮的部分昇上來擴散至表面，冷卻後沿著黑暗的小路沈陷下降，個別的米粒斑最多只能存在 20 分鐘（通常只有 5 分鐘）。米粒斑是不停的發展著的，新生成的會將舊有的向旁邊推擠，米粒斑內物質流動的速度能超過音速，達到每秒 7 公里以上的速度，因此會造成音爆以及各種的噪音，在太陽表面上形成各種的波動。

超米粒斑 (Supergranules)

超米粒斑是很大的米粒斑，通常直徑都超過 35,000 公里，要利用都卜勒位移的現象，將向上朝向我們的運動以藍色

來表示，向下遠離的運動以紅色來表示，才能作良好的觀察。此一特徵出現在整個的太陽表面，並且是持續的發展的。個別的超米粒斑大約能存在一或二天，流動的速度大約是每秒 0.5 公里。對超米粒斑中流體的觀察認為被邊緣約束的磁場造成了色球中的網路。

在光球之上的色球中我們也能看見一些特徵，包括色球網路、譜斑、絲狀體、日珥和針狀體。不過因為色球發射出譜現而呈紅色，所以色球上的特徵在使用濾鏡時看得最清楚。

色球網路(The Chromospheric Network)

色球網路很像全球資訊網一樣在太

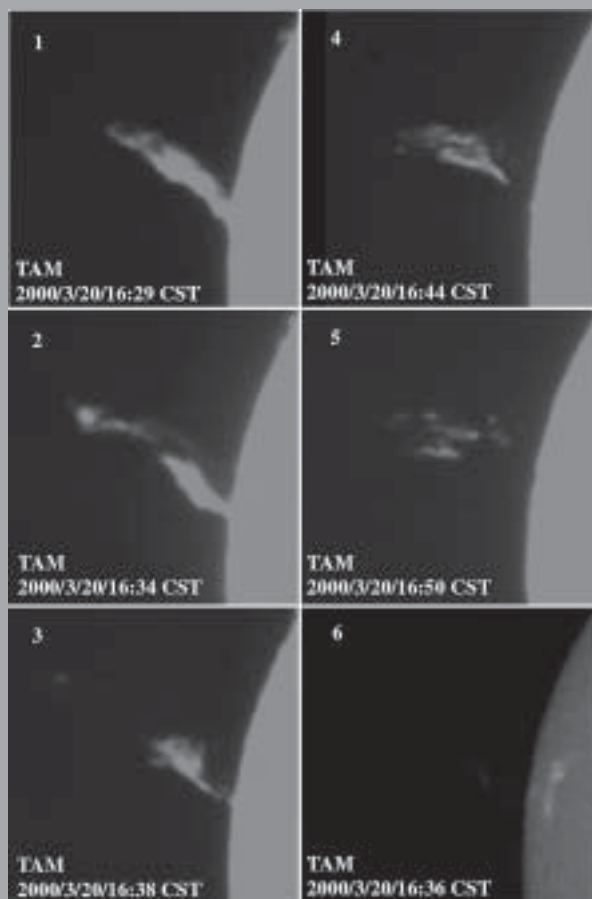
陽表面上串連在一起，這些網路環繞在每個超米粒組織的邊緣，約束著超米粒組織中的太陽磁場，使被壓縮的磁場跟隨著物質一起運動。

譜斑(Plage)

譜斑是圍繞在太陽黑子四週明亮的斑塊，在色球網路上構成較為明亮的部份，成為色球上明亮的特徵。

絲狀體(Filaments)

絲狀體看起來是像絲線的黑暗條紋，他們是在環形的磁場支撐下，懸浮在太陽表面上較稠密但溫度較低的雲狀物體。



太陽爆發日珥變化過程

2000 年 3 月 20 日 (CST 中原標準時間) GOTO 折射鏡 (D=80mm, F/15) + DayStar University Ha 0.7 埃 太陽濾鏡 + 1.4 倍鏡 + Nikon F3 Kodak 400X 正片 攝影地點：台北市立天文科學教育館

本圖為太陽邊緣爆發日珥的連續照片。由圖 1 至圖 5 可見到在短短的 20 分鐘內，爆發日珥就已由極盛到快消失；而以圖 1 而言，物質噴出的高度約為 20 萬公里，相當於十六個地球直徑。這種爆發的威力非常驚人！圖六則為同一區域內發生大規模閃焰（白色亮區）的現象。

日珥(Prominences)

日珥是由環形磁場支撐懸浮在太陽表面之上較稠密的氣體，與絲狀體其實是一樣的東西，唯一不同的是日珥突出於太陽的邊緣。日珥和絲狀體都能在太陽表面上看似靜止不動數天或幾個星期。但是當支撐的環形磁場緩慢的變化時，日珥和絲狀體會在數分鐘或幾小時內爆發成為耀斑（Flare）並飛離太陽的表面。

針狀體(Spicules)

針狀體是由色球網路噴發出的細小突出物，呈現較黑暗的短條紋並且遍及整個色球網路。針狀體最後會在數分鐘內，以每秒 20 至 30 公里的速度離開太陽的表面進入高溫的日冕之中。

日冕之中充滿了高溫的離子，受到太陽風的影響，在日冕中可以看見盔狀噴流、極羽、日冕環和日冕洞。

盔狀噴流(Helmet Streamers)

盔狀噴流有長長的高峰，是像頭盔的大型日冕構造，通常出現在太陽黑子等活動區的上方，我們經常會在這型日冕的基礎位置上看見日珥或絲狀體。盔狀噴流是由與太陽黑子在活動區相連結的環形磁場構成的，協助著磁場的支撐讓日珥中的物質能浮在太陽表面之上。封閉的磁場約束了日冕中帶電的粒子，使這一區的密度比周圍要高些，尖聳的高峰則是由吹離太陽的太陽風造成的。

極羽 (Polar Plumes)

極羽呈現長而薄的流線型，只出現在太陽的南極與北極，我們經常會在極羽的根部看見明亮的區域，這些特徵都與太

陽表面小塊的磁區有關聯。這些特徵出現在極區磁場開放的區域，極羽和盔狀噴流一樣是由太陽風的吹送造成的。

日冕環(Coronal Loops)

日冕環出現在太陽黑子等活動區的周圍，這種結構與封閉的磁場有關，並與太陽表面的磁場相結合。許多日冕環可以存在數天或幾個星期，然而與耀斑有關的日冕環週期會短許多。日冕環中物質的密度也比周圍的環境要高。日冕環在三度空間的結構和動力學是目前研究的熱門題目。

日冕洞 (Coronal Holes)

日冕洞是日冕上黑暗的區域，在 X 射線望遠鏡被放置在大氣層之上後，首先被發現的特徵，透露出橫過太陽盤面的日冕構造。日冕洞與太陽表面上開放的磁場有關，也能在極區出現。高速的太陽風都是起源於日冕洞。

太陽之謎

雖然太陽是最容易，也是被觀測得最仔細的一顆恆星，但仍有許多未能解決的問題等待著我們去處理。這些問題包括黑子循環週期的起源、耀斑的本質、日冕的加熱過程和遺失的微中子。

黑子循環週期的起源

在太陽上看得見的黑子，以大約 11 年的數量週期，從幾乎為 0 增加到 100 以上，然後減少到再接近 0 時，新的循環又再開始。黑子循環的成因和本質是太陽天文學最大的謎題之一，儘管我們已經知道黑子循環的許多細節，不只是知道一些過

程，也知道一些產生的關鍵原因，但是仍然無法建立一個模型，可以利用基本的物理定律來正確的預測黑子的數量。這個問題有點像要準確的預報明年冬天或夏天的天氣一樣的困難。

耀斑的本質

在太陽上靠近黑子的區域經常會出現耀斑，在短短幾秒的時間中，數十億噸數百萬度高溫的物質被噴發至太空中。耀斑正確的成因和如何被觸發是太陽的另一個大謎題，在這兒我們也知道許多耀斑的細節和瞭解基本的機制，但仍有些細節不清楚。這問題與預測龍捲風類似，我們依然不能正確的預測何時和何處會產生耀斑，以及會有多大的規模。

日冕的加熱過程

太陽外層大氣(日冕)的溫度超過100萬度，而我們能看見的表面只有5,700度，如何將日冕加熱並維持這麼高的溫度，是太陽的第三個大秘密。此區的粒子密度則低至每立方公分內僅有1-10個原子，由光譜的觀查得知日冕底層的溫度已達10萬度，最外層的溫度可高達350萬度。通常當離開熱源越遠溫度便越低，從太陽的內部到可見的表面也確實是這樣的情形，但是在相對於太陽是很短的距離中，溫度突然升高至極端的高溫。已經有些機制被提出來解釋熱量的來源，但尚不知道那一個是正確的，或許要將這些機制結合在一起才是正確的成因。

日冕如何會有如此高的溫度已經困擾了科學家近半個世紀，近日雖然由SOHO的觀測證實根植於太陽光球層的『磁氈』發出的磁力線，在日冕的範圍內引發的短路電流放出的能量確能使日冕被

加熱。但是典型的小『磁氈』生命期只有四十小時左右，而且是由何種機制形成磁氈，仍然是科學家要尋求答案的新問題。

遺失的微中子

太陽所放射出的微中子應該兩倍於我們觀測到的數量，這如鬼魅般的次原子粒子是在太陽核心的核反應產生的，他們能夠直接穿透太陽進入太空之中。雖然微中子是很難偵測到的，但幾個獨立的實驗都一致的指出：在地球上只測量到理論值三分之一的微中子。太陽天文學家已經在嘗試修改太陽的模型，使太陽在過去45億年的演化過程中只產生少量的微中子，但這些企圖都已經被證實是失敗的，不過也使科學家們更了解微中子本身的問題。這最後的謎題被解決時，可能會震撼到物理學本身的基礎。

作者：現任職於台北市立天文科學教育館