

太陽與日地關係（文）

太陽的形成與在銀河中的位置

整個宇宙是由許多發光的星系及一些暗物質所組成的。這裡所謂的「發光的星系」就是俗稱的「銀河」。太陽系所在的銀河，又稱做「本銀河」。本銀河與宇宙中大多數銀河一樣，為一「碟型的旋渦狀星系」。

圖一為典型的旋渦狀星系正視圖(M51)以及側視圖(M104、M31)。

圖二說明旋渦狀星系之形成過程。原來整個旋渦狀星系中央有一個球狀星團，這可由旋渦星系的側視圖看出來（見圖一中 M104 與 M31 星系）。可能是受到磁場作用的影響，星團外圍的物質（部份游離的電漿）逐漸集中在一個碟型的區域（這裡的磁場強度最弱，因此電漿密度最高，很像我們磁尾的電漿片。只是它的分布範圍，四面對稱，所以不像尾巴，反而像碟子）。這個碟型氣體並非固定不動，而是一直旋轉。此時如果碟型氣體受到四周其他星系的重力場擾動，就會在盤面上造成密度波動。科學家發現，「旋轉的碟型氣體」上的密度波，將逐漸變形為旋渦臂的形狀。根據物理學中非線性聲波的原理，大振幅的密度波 (Density Wave) 會逐漸陡峭成【激震波】 (Shock Wave)。於是碟型氣體中的物質，在穿過此旋渦臂形狀的【激震波】時，就被快速的壓縮，形成高密度的雲氣。因為密度高，它們可以擋住背後的星光，形成【暗星雲】。也因為密度高，加速了重力收縮，所以逐漸形成巨大的恆星。銀河示意圖中的「暗帶」，就是高密度的【暗星雲】。相鄰發光的「明帶」，就是巨大恆星形成的區域。

天文學家研究結果顯示**質量愈大的星球，生命期愈短**。這些星球在其死後，會發生超新星爆炸，爆炸所產生的【激震波】，又可以快速壓縮四周的氣體，形成一連串的【暗星雲】，或【反射星雲】。

反射星雲的成因：如果高密度氣體的**附近**——與觀測者同一側——有別的發光星球，則高密度氣體中的粒子，會藉著吸收此星球所發出的光，使自己暫時處在不穩定的高能階狀態，過一會兒再把所吸收的光放出來，重回低能階狀態。只是放出的光，波長固定，隨高密度氣體組成的成份不同而不同 < 也就是說，與最初發光星球所發出來的光波波長無關 >，而且波的前進方向也改變了，於是造成散射。這就好像天空是藍的道理是一樣的。因此隨著高密度氣體的組成成份不同，【反射星雲】的顏色也可以有多樣的變化。事實上，與其稱這種星雲為【反射星雲】，不如稱它為【散射星雲】還貼切些！

最有名的【反射星雲】與【暗星雲】的例子就是獵戶座腰帶下方匕首處，有一個獵戶座大星雲（圖三 A），它是超新星爆炸的殘骸（一種【散射星雲】？！）。它的附近有個著名的馬頭星雲（圖三 B），是一個【暗星雲】，馬頭星雲附近，有很多正在形成恆星的【原恆星】。它們都是目前天文學家所感興趣的研究對象。

我們的太陽也是如此形成的。我們的太陽就位在本銀河的一條旋渦臂的外緣，是附近旋渦臂中某一個超新星爆炸的殘骸，與其四周的氣體結合起來，所形成的一種質量較小的星球。所以生命期比較長！

註：旋渦臂中的星球多為高亮度、大質量的 O B 型星球。什麼是 O B 型星球？原來科學家把正在進行核融合反應，且重力收縮與熱膨脹達到平衡的「穩定星球」，依其質量大小，分為 O B A F G K M 等七型星球（可用口訣 Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me! 來幫助記憶）。太陽屬於 G 型星球。圖四為「穩定星球」的質量與亮度分布之【主星序列圖】（中央白色帶狀區）。至於剛出生，不穩定的【原恆星】、死亡過程中的紅巨星、或已經死亡的白矮星、中子星，都位在白色帶狀區以外的區域！

太陽的內部與外部結構

因為太陽表面擾動所產生的聲波，向內部傳播時，會被太陽內部高溫與高密度氣體偏折反射回到太陽表面（這與儀隊轉彎前進時，隊伍會彎向走得慢的那一側，原理相同）。於是太陽物理學家可以藉著觀測分析太陽表面聲波所造成的亮度或速度（都卜勒頻移）上的變化與分布，反過來推算太陽內部結構。因為它的原理與地球物理學家利用地震波來探測地球內部結構（地震學，Seismology）的原理相似，因此這種觀測方法被稱為【日震學】(Solar Seismology)。

圖五為根據早期【日震學】觀測結果所繪出的太陽內部結構示意圖：

太陽內部的中央為核心(Nucleus)約位在 0-0.25 太陽半徑。密度約為水的 158 倍；溫度約為攝氏一千五百萬度。在如此高溫高密度的環境下，可發生核融合反應(Nucleus Fusion)。（事實上，這個高溫環境，最初是因為重力收縮所造成的。可是等它點燃了核融合反應以後，這個高溫環境，就靠核融合反應來維持了！）

太陽核心之外為太陽輻射層(Solar Radiative Zone)，約位在 0.25-0.86 太陽半徑【目前最新的觀測資料，已經將這項數據更正為 0.25-0.75 太陽半

徑】。其底部密度約為水的 20 倍，溫度約為攝氏八百萬度；其上部密度約為水的 0.01 倍，溫度約為攝氏五十萬度。

太陽核心所發生的核融合反應，可能是氫-氫鏈反應，以及碳循環鏈反應。這些核融合鏈反應可放出巨大能量（光子，Photon）以及微中子(Neutrino)。其中光子須經約兩百萬年的時間，才能慢慢藉著碰撞與再輻射的方式穿過緻密的太陽輻射層到達太陽表面，而微中子則不會與太陽內部物質碰撞作用，因此可以自由的穿過太陽內部高密度區到達太陽表面。科學家們希望藉著測量到達地表的微中子數量，來確定理論上太陽內部核融合反應方程式的正確性。但是到目前為止，測量到地表的微中子數量仍少於理論上所預測的數值。科學家到目前還不知道，究竟是恆星內部核融合的反應模式不正確？還是我們對微中子的描述模式需要修改？不論哪一種說法成立，都將對目前的量子物理界造成很大的衝擊！

值得一提的是，發生核融合反應是決定一個星球為恆星的必要條件。至於小學教科書上教小學生，以星球自己發光與否來區分恆星(Star)與行星(Planet)，嚴格說來是不正確的。因為行星在生命初期，自己也會發光。巨大行星如木星，它目前所放出來的能量，還是超過它所吸收之太陽能。另外一種說法，認為恆星是不動的星星，而行星是會運行的星星，這也是不正確的。以太陽為例，太陽就是繞著本銀河中心，旋轉運行。而本銀河在宇宙中的位置也一直在改變。

太陽輻射層之外為太陽對流層(Solar Convection Zone)約位在 0.86-1 個太陽半徑【目前最新的觀測資料，已經將這項數據更正為 0.75-1 太陽半徑】。其底部密度約為水的 0.01 倍，溫度約為攝氏五十萬度；其上部密度約為水的 0.000004 倍，溫度約為攝氏六千三百多度。因為此區域，密度低而溫度向上遞減得又相當快，因此會發生對流的現象。太陽內部能量也就藉著此對流過程快速的傳遞到太陽表面。

太陽對流層上方表面依次為：光球層(Photosphere)及色球層(Chromosphere)。色球層之外是日冕(Solar Corona)。太陽之光球層與色球層的電漿溫度約為攝氏五千五百度至攝氏四千二百多度，日冕的電漿溫度則可高達攝氏一百萬度。圖六為此三區之電漿溫度隨高度變化的曲線示意圖。有關日冕區增溫過程的物理機制，目前仍是科學家所盡力研究的課題。

太陽觀測的歷史與發展

歷史上望遠鏡的發明，提供了一個觀測太陽的好工具。月亮擋住太陽所造成的日蝕，也提供了一個觀測太陽大氣的好時機。

利用望遠鏡，科學家發現太陽表面並不是光潔無瑕，有時會出現許多黑點。科學家稱這些黑點為太陽黑子（sunspots）。圖七為歷年黑子數目的觀測記錄。

一般觀測黑子，都是將天文望遠鏡對準太陽，再投影於白紙上，而不是直接用眼睛觀測。黑子的計算方式為，單獨出現的黑子算一點，一團黑子出現算十點。為了統一全球的觀測記錄，規定用四吋折光式望遠鏡來測量所得的記錄為準。為了要清楚正確的計算與記錄黑子的個數，最好的觀測時間是夕陽西下的時候，因為正午時，太陽光太強，眼睛容易被白紙上強烈的光，照花了眼，因此可能看不清一些單獨出現的黑子。而早晨時，大氣中水汽太多，因此也不太適合觀測。中大附近的崙坪台，是台灣的一個正式的太陽黑子觀測站。所提供的觀測資料，與全球平均值相當接近，是一個頗受國際好評的觀測站。

科學家把歷年太陽黑子的出現情形畫出來，發現太陽黑子的出現情形呈現十一年的週期（如圖七）。科學家進一步發現當太陽黑子多的時候，地磁擾動（磁暴與磁副暴）的情形也比較頻繁，極光的活動增多。因此科學家把黑子多的時期稱為太陽活動極大期，黑子少的時期稱為太陽活動極小期。因此太陽活動也是呈現十一年的變化。（不過後來科學家又發現，相鄰的兩個太陽活動週期中，南北半球的前導黑子的極性恰巧相反，因此認定太陽週期應該為二十二年。詳細的物理過程，各位可參考太空教室網頁中學習資料庫的【太空中的太陽】一文。）

隨著太陽週期的發現，科學家接著發現，日蝕時所看到的太陽外圍大氣，日冕（corona），它的分布也會隨著太陽週期的變化而改變。圖八是日蝕時所拍攝到的日冕。其中圖八 A 是太陽活動極大期時所拍攝到的日冕，圖八 D 是太陽活動極小期時所拍攝到的日冕，圖八 B、C 是太陽活動介於極大期與極小期之間時所拍攝到的日冕。明顯的，只有在太陽活動極大期時，日冕才會均勻分布於太陽四周。否則總會有一些區域，沒有日冕。科學家就稱這些沒有日冕的區域為日冕洞（corona hole）。為了要了解日冕洞在整個太陽圓盤上的分布情形，科學家想到了一個聰明的辦法，也就是利用 X 光來觀測一百萬度以上的日冕區（corona）。結果果然成功了。只是地表所接收的影像，不夠清晰。因為電離層會吸收 X 光。於是科學家就把 X 光望遠鏡放到人造衛星上，在西元 1973 年，成功的發

射了一枚【太空實驗室】（Skylab）人造衛星，在電離層外的空中，用 X 光觀測太陽與宇宙中其他的 X 光源（例如：中子星以及黑洞），獲得了非常豐碩的成果。這顆人造衛星，雖然只存活了一年，但是卻開啟了日後將望遠鏡放在人造衛星上，去觀測太陽與其他星體的序幕（如：哈伯望遠鏡以及 Yohkoh（陽光）、SoHO、與 TRACE 等太陽觀測站。）

事實上，科學家已經知道如何利用圖六中的溫度曲線，來觀測不同高度的太陽大氣。根據物理學的定律，在不同溫度下，物質會散射出不同的光譜。於是科學家鎖定 X 光來觀測一百萬度的日冕區（見圖九 A、B），鎖定超紫外線（EUV）來觀測數十萬度的過渡區(transition zone)（見圖九 C-1），或觀測數千度到數萬度的色球層與低空的過渡區（見圖九 C-2），鎖定可見光波段的氫 - 阿法光譜來觀測光球層以及色球層（見圖九 D、E）。

圖九 D 用可見光波段的氫-阿法光譜所拍到的光球層。中央的大黑點就是太陽黑子。黑子是對流下沉區，磁場集中，溫度比較低。黑子附近特別亮的部份，是白斑區(Faculae)，是對流上升區，溫度比較高。一條條的黑色紋路，就是日珥（Prominences），也稱做暗紋（Filaments）。

圖九 E 用同樣的光譜（氫-阿法光譜）觀測太陽邊緣的日珥，卻呈現明亮的結構。原因是因為，日珥中有不少中性的氫原子。太陽光球層所發出來的氫阿法光，會被這些中性的氫原子所吸收，再放出來。由於放出來的方向與當初光球層所發出來的光線方向不一定相同，因此正面看它時，一部份的光被散射到別的方向，因此光度較四周暗，呈現暗紋的結構。但是由側面看它時，剛好可以收到它散射出來的光，因此在漆黑的背景襯托下，顯得非常明亮。

當日珥噴發時，相對應的暗紋會突然消失，由側面看，日珥噴發時會向外拋出很多日冕電漿。因此又稱為【日冕物質拋射】。圖十就是利用可見光所拍到的一個日冕物質拋射的鏡頭。這是一張合成照片。內部的圓形圖片是遮掉兩個太陽半徑後所拍到的日冕物質拋射景象。外面的圖片是遮掉三個太陽半徑後所拍到的日冕物質拋射景象。這是美國科學家放在 SoHO 人造衛星上專門用來研究日冕物質拋射的儀器（LASCO C1, C2, C3）所拍到的照片，各位感興趣的話，可以上網找到更多相關的圖片與影片。

圖十中，外側的電漿，明顯的被一個看不見的東西所偏折了行進方向。這個看不見的東西很可能就是磁雲。磁雲是行星際空間中常觀測到的一個磁場很強，電漿溫度比較低的區域。

在日冕物質拋射的同時，噴發的日珥也會向下（朝向太陽表面）打入很多電漿。就像地球上的極光一樣，這些打入的電漿會造成太陽表面突然發光，我們稱它為太陽閃焰（Solar Flare），大陸翻譯作耀斑。太陽閃焰

多發生在黑子群聚的地方，如圖十一所示。但是也有許多強烈的太陽閃焰，是發生在日冕洞與日冕的邊界區。要了解太陽閃焰或者日冕物質拋射，就先要了解日珥的形成機制。這也是目前太陽物理學家所研究的一個熱門課題。

太陽的輻射

光波隨著能量增加，波長變短，頻率變高。太陽的核心，溫度很高，因此製造出來的全是波長很短的 X 光與伽瑪射線，這些高能輻射，幾乎完全被太陽核心外圍的輻射層擋了下來，並且不斷被部份吸收，再散射為能量較低的光子。於是歷經兩百萬年，能夠穿過太陽輻射層的光子，多已經轉變為可見光、紅外線、紫外線等低能量的光子。雖然仍有一些殘存的 X 光與伽瑪射線，但是總量微乎其微。可是當太陽表面發生太陽閃焰時，也會產生大量的短波輻射，這些短波的 X 光與伽瑪射線，完全沒有東西阻擋，因此可以任意的向外傳播。我們地球上的人類，受到電離層與大氣層保護，健康上的影響不算大，只有通訊上會受到一些影響。至於太空人所受到的保護，可就太單薄了（因為一般的太空衣，只能擋住一般劑量的輻射）。因此太空人在太空中停留時間太久，除了會發生骨質疏鬆症外，也可能會受到嚴重的輻射傷害。

當星球死亡的時候，會發生新星爆炸（Nova）或超新星爆炸（SuperNova）。爆炸時所產生的高能宇宙射線，也幾乎沒有任何的阻擋。因此我們地球上，也可以收到其他星球爆炸時所產生的高能宇宙射線。它們大部份，被束縛在內范愛倫輻射帶。很少的數量，能夠到達地表，為物理學家提供天然的高能粒子，是發現許多基本粒子的主要工具。對近代物理的發展，貢獻良多。

太陽大氣的邊界與太陽週期對地球上氣候變化的影響

太陽風是由太陽表面吹出來的一種高速電漿流。太陽風可說是日冕的延伸。這些電漿流的運動受到太陽磁場的影響，而太陽的主要磁偶極場也因這些電漿流的運動所產生的電流而變形。

圖十二為變形後之太陽與各行星的磁場結構在子午面上的示意圖。

圖十三為變形後之太陽磁場結構在黃道面上的示意圖。

太陽風大約在距離太陽不到 0.1AU 處（理論估計約在 3-30 個太陽半徑處）就已經加速成為超磁音速的電漿流，因此當太陽風吹過各個行星時，會在行星的向陽面形成一激震波。由於此激震波的形式與船在水中

前進所產生的船頭波（Bow Wave）很相似，故又稱之為（Bow Shock），可譯做船激震波。

銀河中央向外也吹出電漿流，我們可以稱它為星際風。星際風與日磁層的邊界為日磁層頂。日磁層頂一邊靠近太陽，距太陽約 100-150AU，相反的一側，也就是日磁尾側的日磁層頂，科學家估計其距離太陽最遠可達約 10,000AU。

由於太陽風到達日磁層頂時，速度幾乎為零，因此在日磁層頂內側，會有一個區域：太陽風由超磁音速減速到次磁音速，這個區域我們稱它為終止激震波（Termination Shock），也就是圖十三中虛線的位置。所有的日冕物質拋射所丟出來的電漿與磁雲（見圖十的說明），都會集中在此終止激震波處。超新星爆炸時所產生的高能帶電粒子（宇宙射線），會受到終止激震波處這些大振幅擾動磁場的影響，被阻隔在外，難以進入日磁層內部。反之，如果太陽表面活動少，丟出來的磁雲少，就有許多高能宇宙射線，可以長驅直入，進入我們的大氣。因此地表觀測到宇宙射線量往往與太陽黑子量的分布相反。（見圖十四）

由於宇宙射線進入地球大氣層，可提供下雨所須的凝結核。因此黑子數目長期減少的時期，凝結核多，成雲下雨、下雪的機會愈大，天氣愈冷。事實上只要雲層多，就會反射陽光，進入地表的陽光就會減少，使天氣更冷。

由前面圖七中，黑子數目多年來的記錄圖顯示，在十七世紀中，曾經有一段很長的時期，黑子數目一直很少。這就是所謂的 Maunder Minimum 時期。這種現象也曾藉著分析樹木年輪中，碳十四的含量，做了進一步的研究驗證與確認。（註：黑子數目少，宇宙射線多，放射性元素碳十四的含量就比較豐富。藉著分析樹木年輪中碳十四的含量，科學家還發現在第四、第七、第十四世紀、以及西元前 1500 年也曾發生過類似的現象。）目前科學家懷疑，十七世紀歐洲歷史上所記載的小冰河時期，可能就與這段長時間缺乏黑子的現象有密切的關係。

可見太陽黑子週期對地球氣候的影響，不是由於太陽發出的光與熱的改變所造成的，而是透過磁雲、宇宙射線、凝結核、以及雲層反射陽光等複雜關係與物理過程所造成的。