

[研究新領域報導]

日冕加熱新機制

國立成功大學物理系 李羅權、吳伯翰

(一) 前言

地球的大氣溫度僅有 300 K，受地球的重力束縛在地表附近，越高越稀薄。太陽大氣與地球大氣不同，它不是靜止的，而是向外連續噴射。太陽溫度由太陽核心往外遞減，到達太陽表面的光球層，其溫度約 6000 K，再向外到了色球層才回升。色球層之上就是稀薄的太陽大氣，在望遠鏡發明以前人類便可在日蝕的時候看到這一圈如同皇冠上冠冕形狀的物質（日暈），便將之稱為日冕（corona）。日冕溫度約為三百萬度（ 3×10^6 K），其組成主要是質子（ H^+ ），但也包括少數的其他離子，如氦離子（ He^{2+} ）及氧離子（ O^{5+} ）。這些粒子具有極大的動能，以至於太陽重力無法將之吸引住，高能量的氣體粒子以 8 倍音速以上的高速向外噴射，並將太陽表面的磁場帶出來而布滿整個太陽系空間，一般將這些已遠離太陽的日冕大氣稱之太陽風（solar wind）。由太陽赤道面附近吹出的太陽風的速度較低約 400 公里/秒；在高緯區的弱磁場日冕洞吹出者速度約可達 800 公里/秒（如圖一所示）。

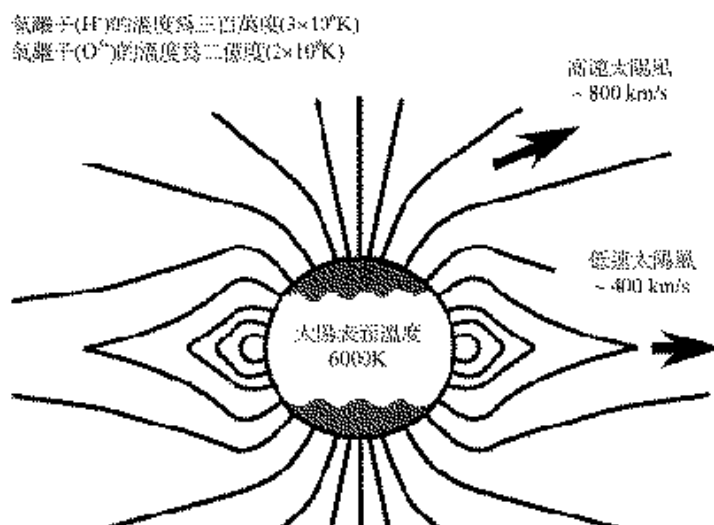
為什麼太陽表面溫度只有 6000 度而日冕

（太陽大氣）的溫度可達三百萬度？日冕的加熱問題已在太陽物理學界高懸四十餘年仍無法解決。傳統的日冕加熱機制主要是應用波對粒子的作用，將能量傳遞給氣體粒子，或是靠著電流片把磁能轉換成動熱，但是這些機制沒有得到太陽物理學界的普遍認同。

(二) SOHO 衛星的新觀測結果

SOHO 衛星是由歐洲太空總署（ESA）及美國太空總署（NASA）共同製造的太陽觀測衛星。1998-2000 年最新發表的日冕加熱觀測報告，是由哈佛大學 Dr. John Kohl 所領導的團隊所提出的 SOHO 衛星觀測資料。他們根據 SOHO 衛星上紫外日冕圖表光譜儀（Ultraviolet Coronagraph Spectrometer, UVCS）的數據，提供了對日冕粒子加熱過程中幾個極為重要的資訊[1]：

(1) 在距離為三個太陽半徑處，即離太陽中心二百萬公里處，氫離子（即質子）的溫度約為三百萬度（ 3×10^6 K），其對應的熱速度約為每秒 225 公里（ $v_{th} \approx 225 \text{ km/s}$ ）；而氧離子的溫度卻高達二億度（ 2×10^8 K），其熱速度約為每秒 450 公里（ $v_{th} \approx 450 \text{ km/s}$ ）。



圖一 高溫的太陽大氣導致高速太陽風的形成

(2) 在同一高度，氧離子在垂直於磁場方向的溫度 ($T_{\perp}$) 為平行方向溫度 ($T_{\parallel}$) 的 50 倍，即 $T_{\perp}/T_{\parallel} \approx 50$ 。但質子溫度在平行於磁場方向與垂直方向上，只具有些微的不等向性，即 $T_{\perp}/T_{\parallel} \approx 1 - 1.5$ 。

(3) 同時，氧離子的徑向外流速度 ($u \sim 450$ km/s) 幾乎等於兩倍質子的外流速度 ($u \sim 250$ km/s)。

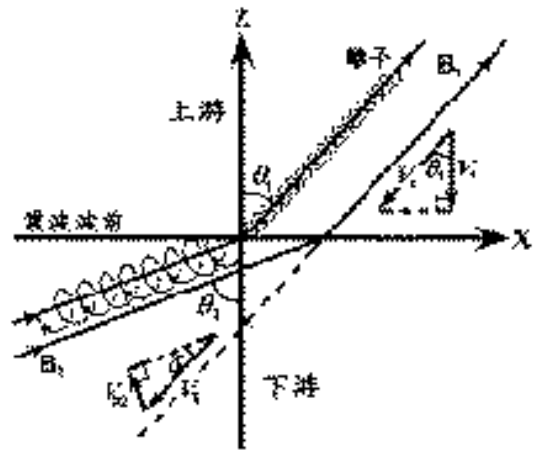
SOHO 的觀測結果，對那些尚未被認同的傳統的日冕加熱理論，無疑是雪上加霜。傳統的日冕加熱機制不論是靠 Alfvén 波對粒子的共振加熱[2]，或是靠著電流片的轉換能量，皆不能解釋高速太陽風的特性以及在 SOHO 對日冕底部的最新觀測。

(三) 快震波對粒子的加熱機制

成功大學物理系的李羅權教授及吳伯翰博士在 2000 年提出了一個全新的日冕加熱理論[3]。利用微日焰(microflares)發生時磁場重聯後所產生的快震波，來對日冕大氣中的離子加熱。若正離子帶的電荷為 Qe ，其質量為 Mm_p (此處 e 為質子的電荷， m_p 為質子的質量)，由於不同粒子的荷質比 ($Q/M = 1/1(H^+)$, $2/4(He^{++})$, $5/16(O^{5+})$, $9/24(Mg^{9+})$) 會導致不同的加速結果，這個機制可以同時解釋以上 SOHO 的三個新觀測結果。簡單描述此機制如下：

在日冕洞的大尺度磁場都是開放性的磁力線空間，並且與行星際的磁場連接。當磁重聯發生時，會改變磁場的型態並使磁能轉換為動能，之後一個球狀的快震波便會產生，並向外傳播。在磁場極強的日冕洞區域，快震波的球面各點會以近乎相同的速率向外傳播，準平行震波沿著靠近磁重聯區上方延伸出的磁力線形成，而準垂直震波則是沿著遠離噴出區的磁力線形成。

在震波面座標上觀察粒子從震波面的上游進入下游，上下游磁場的大小與方向不相同，使得粒子顯示不同的運動行為。由於帶電粒子必須繞著磁力線打轉，在電漿物理學中磁場的空間分佈就成了影響粒子運動行為最有效的一項因素。如圖二所示，震波上游的粒子大致沿著上游磁場 (B_1) 滑行，因為熱速度小，它繞著上游磁場的迴旋半徑也很小。由於快震波下游的切向磁場分量增強，下游磁場 (B_2) 便不再與上游磁場平行，而會往震波面方向傾斜。當粒子剛進入下游時，其流速與下游磁場形成



圖二 震波上游磁場 B_1 和下游磁場 B_2 成一個夾角 δ 。當離子沿上游磁場滑行，剛進入下游地區時，其滑行速度 v_s 與下游磁場也形成一個夾角 α ，導至粒子迴旋半徑增大，因而增加其垂直方向的熱速度，達到加熱效果。

一個夾角，導致下游迴旋速度 (v_{g2}) 加大，迴旋半徑也增大，因而增加其垂直方向的熱速度，而達到加熱效果。

在瞭解其中的物理因素後，數學模式可以簡單地藉著震波上下游粒子的能量守恆而得出，其中的位能項則是源自於震波面電位差 ($\Delta\phi$)，這電位差使從震波波前衝過來的粒子減低其速度。對固定震波而言，不同粒子的動能與電位能隨其電荷與質量而定，對帶有 Qe 電荷，質量 Mm_p 的粒子而言，每單位質量 (m_p) 減少的動能為 $Qe\Delta\phi/M$ ，因此離子的 Q/M 越小，其動能減得越少，下游的速度就越大。因此氧離子 ($Q/M = 5/16$) 會比質子 ($Q/M = 1$) 擁有更高的迴旋速度。換句話說，在速度分佈上，氧離子就比質子擁有較高的垂直溫度與熱速度。

利用電漿粒子數值程式，我們用計算機模擬不同的帶電粒子穿過快震波的運動行為。數值實驗證實了我們提出的理論是正確而有效的，重離子的運動完全遵循著我們所得出的數學式，數據的分析結果更是符合 SOHO 的量測。

我們的模擬結果發現快震波的強度決定離子加熱後下游溫度的大小。而快震波的強度由震波的 Alfvén 馬赫數 (M_A) 來決定。我們發現若快震波的 $M_A \approx 1.3$ ($1.1 \leq M_A \leq 1.5$)，則氧離子 (O^{5+}) 可以加熱到 $T \approx 2 \times 10^6 K$ ，熱速度

$v_{th} \approx 480$ km/s, 外流速度 $u = 480$ km/s, 溫度比 $T_{\perp}/T_{\parallel} \approx 50$ 。而氫離子 (H^+) 則加熱到 $T \approx 3 \times 10^8$ K, 熱速度 $v_{th} \approx 240$ km/s, 外流速度 $u = 240$ km/s, 溫度比 $T_{\perp}/T_{\parallel} \approx 1.2$ 。這些數值可以同時解釋 SOHO 衛星的最新觀測結果。

(四) 展 望

這個以快震波加速粒子來解釋日冕加熱的最新理論, 已發表在 2000 年六月號的美國天文物理期刊 (Astrophysical Journal), 太空科學評論 (Space Science Reviews) 的總編輯也邀請李教授介紹他們的理論。李羅權教授已分別在五個國際會議上提出報告, 並獲得一致的肯定, 認為這是解釋日冕加熱及 SOHO 衛星觀測結果的最佳理論。

快震波加熱的機制, 只需調整一個參數, 即 Alfvén 馬赫數在 $M_A \approx 1.3$ 附近, 便可解釋前面所列 SOHO 衛星的各項觀測結果。但要完全確認這個機制, 還需進行以下工作:

(1) 要從觀測上證實在日冕洞有 $M_A \approx 1.3$ 左右的快震波存在。馬赫數在 $M_A \approx 1.3$ 的快震波是屬於弱震波。因為微日焰的磁場重聯區域比大型的日焰或日冕拋射物體 (coronal mass ejection) 小得很, 其產生的快震波強度及覆蓋範圍也因而小很多, 不容易被衛星觀測到。下一代的太陽衛星應可提高其觀測解析度來證實弱的快震波之存在。

(2) 在不均勻的磁場中, 磁場重聯如何導至快震波的產生, 還要從理論上或用模擬來作

有系統的研究。Choe and Lee [4] 只研究過在某些特殊情況下, 磁場重聯可產生快震波。此外若有許多微日焰在不同地點、不同時間發生, 其產生的震波群的分佈及對粒子的加熱均需研究。

(3) 不同離子被加熱後, 所得到的不同熱速度, 不同流速及不同的溫度比 ($T_{\perp}/T_{\parallel}$) 會產生各種電漿不穩定性, 經由波粒交互作用會影響不同離子的速度分佈, 因而改變離子最後的熱速度、流速及溫度比, 這些都是急需研究的課題。

我們的宇宙中約有五百億 (5×10^{10}) 個星系 (galaxy), 包括我們太陽所在的銀河系。而每個星系約有一千億個像太陽般的恆星 (star), 即全宇宙約有 5×10^{21} 個恆星, 而我們的太陽是目前唯一可以仔細觀察的恆星。我們提出的日冕加熱機制, 也可應用到宇宙中無數恆星的大氣加熱或“星冕”加熱。

參考文獻

- [1] S. R. Cranmer, G. B. Field and J. L. Kohl, *Astrophys. J.*, **511**, 481 (1999).
- [2] E. N. Parker, *Astrophys. J.*, **372**, 719 (1991).
- [3] L. C. Lee, and B. H. Wu, *Astrophys. J.*, **535**, 1014 (2000).
- [4] G. S. Choe and L. C. Lee, *Astrophys. J.*, **472**, 360 (1996).