

第 23 太陽週期之前半期大尺度日珥暗紋之研究

A study of solar prominences/filaments during the raising period of solar cycle 23

呂凌霄、鄭麗香

Lyu, Ling-Hsiao and Cheng, Li-Hsiang

中央大學太空科學所

摘要

日珥(暗紋)是太陽表面 H α 影像中的一種特殊現象。直到目前為止,日珥的形成原因一直都還沒有定論。在本論文研究中,我們由全球資訊網(WWW)取得了 1998 年與 1999 年的地面觀測之 H α 影像資料以及衛星觀測之 MDI(Michelson Doppler Imager) EIT(Extreme Ultraviolet Imaging Telescope) SXT(Soft X-ray Telescope)等影像資料。我們根據 H α 影像資料決定日珥在太陽全球的分佈情形與形貌特徵。並根據日珥的緯度分佈與形貌特徵加以分類。我們再配合 MDI、EIT、SXT 等影像資料,分析各類型日珥的上方日冕結構與背景磁場強度。我們由資料分析的結果推論:除了 Radiative cooling instability 可形成日珥外, Kelvin-Helmholtz instability、magnetic buoyancy instability 和 Rayleigh-Taylor instability 等三種機制在日珥的形成過程中,應該也扮演著重要的角色。

一、介紹

日珥是太陽表面上一種特殊的現象。長久以來,許多科學家試圖想瞭解日珥的形成機制。Kippenhahn and Schlüter (1957) 曾提出模式來描述日珥的結構,他們認為日珥是跨在磁力線上,而且與磁力線方向是垂直的。此外, Priest et al. (1989) 提出 twisted-flux-tube 的模式來解釋日珥的形成,他們認為日珥要穩定的跨在磁力線上,必須要抵抗重力的影響,所以磁場線的兩個足點 (footpoints) 有渦流,使磁場線扭纏,造成磁力增加,使磁力足以托住跨在磁場線上的日珥。本論文中,我們利用 1998-1999 年太陽的 H α 影像資料來觀察日珥的緯度分佈與形貌特徵。並利用 MDI, EIT, 與 SXT 影像資料來觀察日珥的背景磁場強度分佈與它上方的日珥結構。最後,我們從觀測資料中探討日珥的可能形成原因。

二、資料分析

(一) 背景介紹

我們利用 H α 的光波(波長 656.3nm)來觀察太陽時,會發現太陽表面有黑色的條紋,此現象稱之為暗紋(filaments),也就是日珥(prominences)。在本論文中所用的影像資料包括 H α 影像圖、MDI (Michelson Doppler Imager) 影像圖、EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) 影像圖與 SXT (Soft X-ray Telescope) 影像圖。H α 影像資料來自於法國地面觀測站 Meudon Observatory 和美國地面觀測站 Big Bear Solar Observatory。而 MDI, EIT 影像資料來自於人造衛星 SoHO 與 TRACE。其中 MDI 影像主要觀測波段是 676.78nm, 它可以觀察太陽表面 line-of-sight 磁場強度。EIT 影像分別由四個波段來觀察太陽: 17.1nm、19.5nm、28.4nm 與 30.4nm, 可以觀察較低層的日冕。SXT 影像是來自人造衛星 Yohkoh, 觀測波段在 0.3_6nm, 可看

(二) 日珥的分類

我們根據 1998-1999 年的 H 影像圖上日珥出現的緯度位置與它的形狀，將日珥分類成兩種：一種是出現在緯度 50_ 60 度，形狀比較寬粗，且尺度較大的斷續狀日珥；另一種是出現在緯度 15_ 40 度，形狀較細且尺度較小的細條狀日珥。

1. 斷續狀日珥

根據 1998 年與 1999 年日珥統計資料，可明顯觀測到這一類的日珥有 41 個。圖 1 是 '98 年 7 月 5 日斷續狀日珥的例子。(a) 是斷續狀日珥的 H 影像圖，(b) 是背景磁場強度分佈圖 (MDI 影像圖)，(c) 是 EIT-17.1nm 光譜影像圖，(d) 是 SXT 影像圖。

(a) 圖紅色箭頭處為斷續狀日珥，它的形狀呈現波浪狀，延伸弧度可達 40 度以上。(b) 圖紅色箭頭位置是斷續狀日珥的背景磁場，其磁場強度約在 10~ -10Gauss 之間。而 (b) 圖的右邊藍線所標示的緯度位置，此緯度區域很明顯的看到 line-of-sight 磁場相當活躍。由此可知，斷續狀日珥背景磁場的強度相當不明顯。(c) 圖中，紅色箭頭處的日珥呈現黑暗暗紋，其日冕是均勻向外輻射的，似日冕洞一般。從邊緣的角度 黃色箭頭處 去看日珥的上方日冕，發現有黑色突起物質。(d) 圖中藍色箭頭是斷續狀日珥的位置，此處並沒有很強的 X-ray 輻射，看起來類似日冕洞的結構。藍線標示位置可以看到有一連串的 coronal loops，這裡可以與 (b) 圖中藍線標線處相互對照。

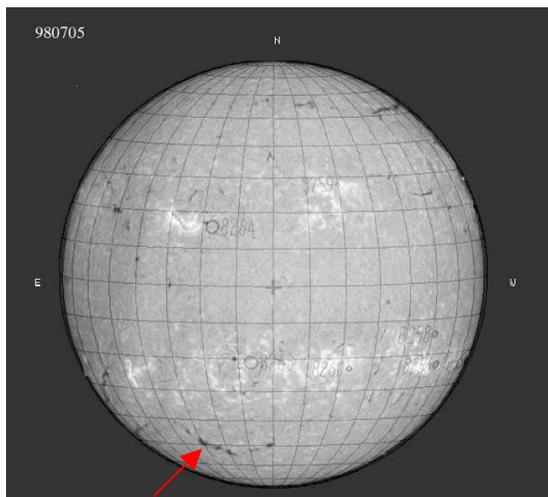


圖 1 (a): H 影像圖。左下方箭頭處就是斷續狀日珥。

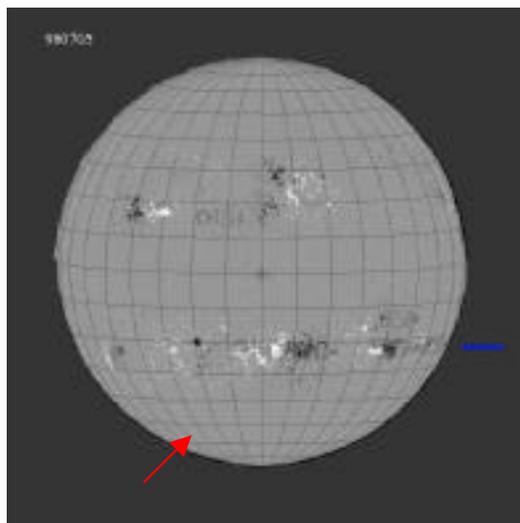


圖 1 (b): MDI 影像圖。白色部分磁場強度約正 250Gauss 以上，黑色部分磁場強度約負 250Gauss 以上，而灰色部分磁場強度約在正負 20Gauss 之間。箭頭處為斷續狀日珥所在位置，右邊藍線標示的緯度範圍可看到磁場較活躍。

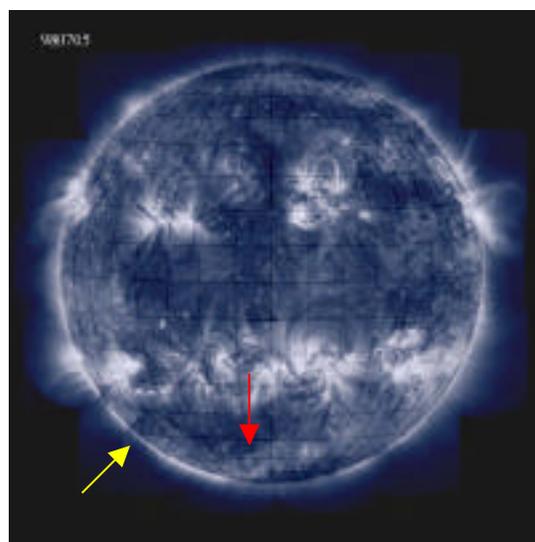


圖 1 (c): EIT-17.1nm 影像圖。箭頭處可看到呈現波狀的暗塊區。

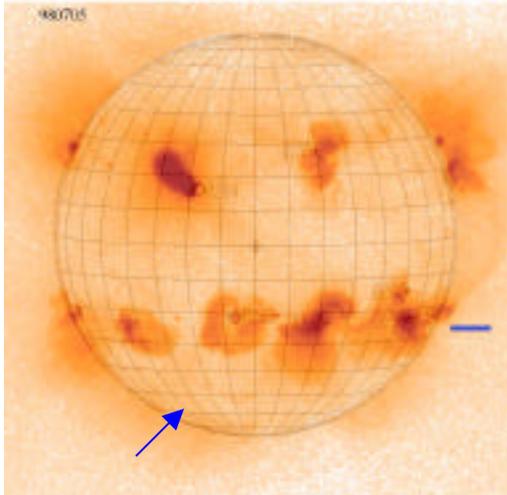


圖 1 (d): SXT 影像圖。箭頭處為斷續狀日珥位置。

右邊藍線位置可以看見 coronal loops。

周圍的日冕很亮，這是由於觀測的穿透厚度所致，在兩側的穿透度比中央的穿透度厚，所以周圍日冕較亮。(e) 圖藍色箭頭處可以明顯看到日冕的管狀結構。

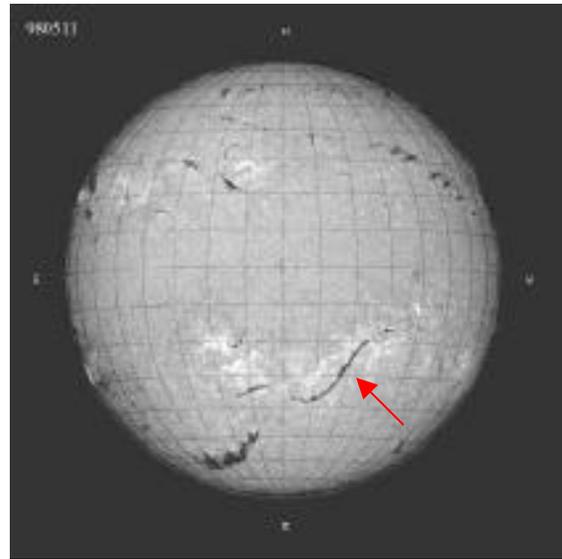


圖 2 (a): H 影像圖。箭頭處為細條狀日珥。

2. 細條狀日珥

圖 2 是'98 年 5 月 11 日細條狀日珥的代表例子。(a) 是 H 影像圖，(b) 是 MDI 影像圖，(c) 是 EIT-17.1nm 影像圖，(d) 是 EIT-19.5nm 影像圖，(e) 是 SXT 影像圖。

(a) 圖紅色箭頭處是強磁區日珥，這一類日珥都是出現在緯度 20~40 度的範圍，而此區域也是太陽差動自轉的主要區域，因此磁場強度也較強。這種日珥形狀都屬於細條狀，不像高緯區的日珥這麼寬粗，其延伸尺度一般約在 10_ 20 弧度，而'98 年 5 月 11 日的細條狀日珥長度超過 20 弧度則是比較特殊的例子。(b) 圖紅色箭頭附近的磁場強度約 200_ 300Gauss，在箭頭的左方可以看到有一黑子，其強度比起細條狀日珥更強，黑子的磁場強度可達上千 Gauss。這一類細條狀日珥的背景磁場比較強，故又稱為強磁區日珥。(c) 與 (d) 圖中，紅色箭頭處為日珥，它在 EIT 影像圖中是呈暗紋狀，其

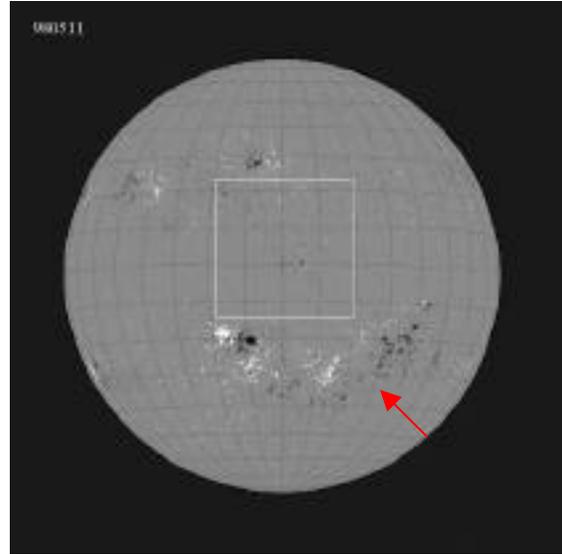


圖 2 (b): MDI 影像圖。箭頭處為日珥附近的磁場強度分佈，大約介於正負 200_ 300Gauss 之間。由於這一類日珥的背景磁場環境較強，所以又稱為強磁區日珥。

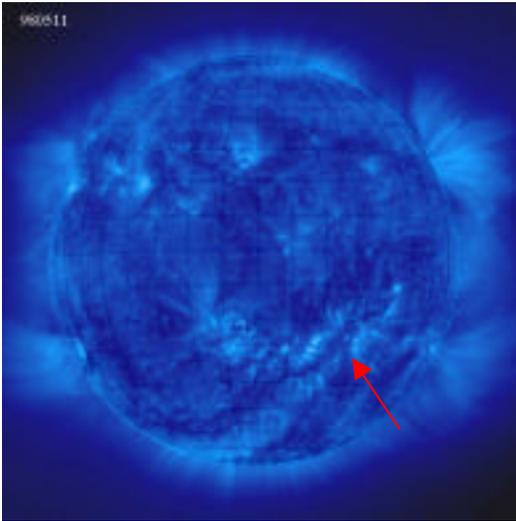


圖 2 (c): EIT-17.1nm 影像圖。箭頭處為日珥，其周圍的日冕結構很亮。

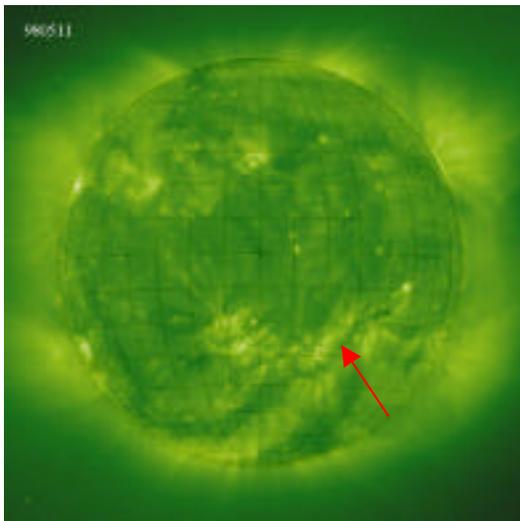


圖 2 (d): EIT-19.5nm 影像圖。箭頭處為日珥，與 (c) 圖一樣可觀察日珥上方日冕的情形。

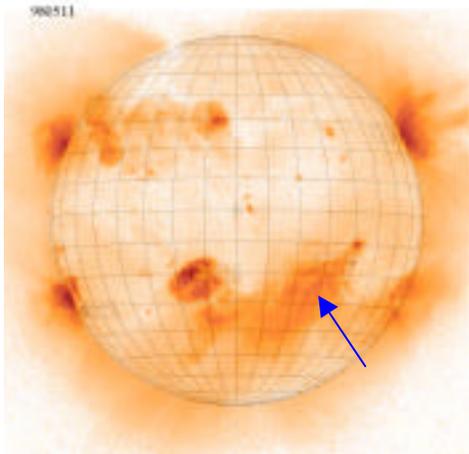


圖 2 (e): SXT 影像圖。箭頭處為日珥位置，可以看

'98 年 5 月 11 日位在太陽盤面的日珥在 5 月 15 日時轉到太陽邊緣，圖 3 是 '98 年 7 月 15 日的影像圖。(a) 是 EIT-17.1nm 影像圖，(b) 是 EIT-19.5nm 影像圖。

(a) 與 (b) 圖紅色箭頭標示處可以很清楚的看到日珥上方的日冕是成排的 coronal loops。當細條狀日珥在太陽盤面上時，SXT 影像圖可以觀察到它上方日冕的 loops 結構，而 EIT 影像圖則無法清楚觀察到；而當日珥在太陽邊緣時，EIT 影像圖可以清楚觀察到 coronal loops。

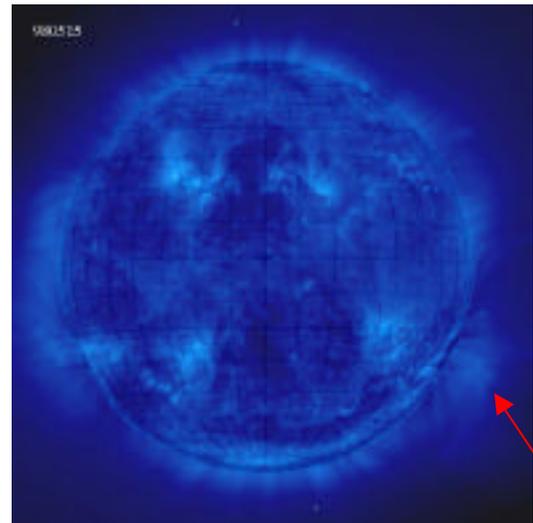


圖 3 (a): EIT-17.1nm 影像圖。箭頭處可看到日珥上方日冕呈現 loops 結構。

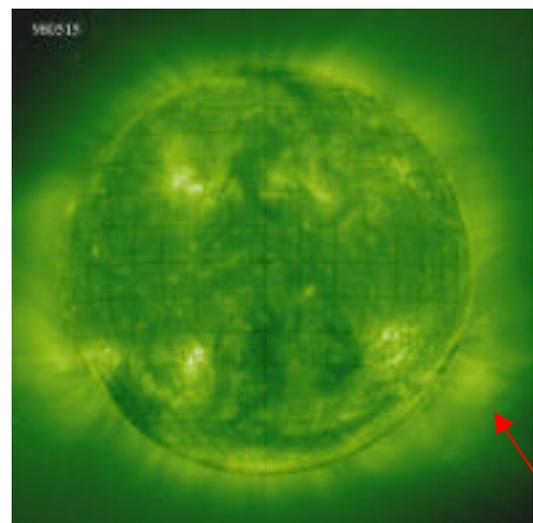


圖 3 (b): EIT-19.5nm 影像圖。箭頭處為日珥上方之

三、日珥形成理論

對於日珥的形成，有科學家認為是由於管狀磁場的 footpoints 有渦流，使管狀磁場扭纏起來，然後在磁場頂端位置有 radiative instability 發生，形成冷電漿掛在磁場上 (Priest et al., 1989)。而近幾年有科學家認為在太陽對流層接近表面區域裡的磁場被扭纏後，磁場會從對流區浮起至太陽外部大氣層，由於外部大氣層氣體密度遠低於對流區氣體密度，所以磁場浮起後體積會膨脹，最後與外部大氣層達到平衡狀態 (Fan, 2001)。從前一節的資料分析結果來看，我們認為形成日珥的機制除了 radiative cooling instability 外，Kelvin-Helmholtz instability 與 Rayleigh-Taylor instability 應該也是形成日珥的原因之一。

(一) radiative 不穩定

圖 4 是溫度與輻射耗散量的關係圖，溫度 10^6K 是輻射耗散量最大的位置，溫度 10^7K 是輻射耗散量相對最小的位置，在溫度 $10^5 - 10^7\text{K}$ 之間，溫度越高，輻射耗散量越小，因此科學家認為在日冕區域中的管狀磁場受到太陽表面渦流的影響，會使管狀磁場扭纏起來，而在管狀磁場頂端位置的電漿溫度若為 10^6K 的話，熱能輻射率會達最大值，造成電漿冷卻後掛在磁場上，形成日珥。

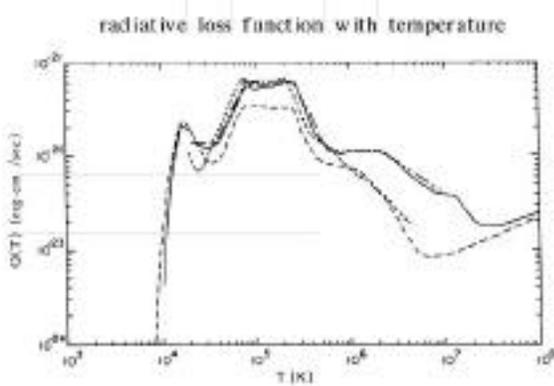


圖 4：輻射耗散率與溫度之關係圖。溫度 10^6K 的輻射耗散率是最大值，若物質處在此溫度下，熱量輻射耗散強，會使物質快速冷卻。(Rosner et al., 1978)

(二) Kelvin-Helmholtz 不穩定

太陽的內部差動自轉會產生有許多速度切，在這些速度切之間，若其磁場方向與速度切的夾角越接近 90 度，在速度切上就更有磁場的擾動就使得磁場扭

成 Kelvin-Helmholtz 不穩定現象，形成渦流 (林敏德，1996)。根據 frozen-in-flux，電漿會使磁場隨差動自轉而變形，但是磁場的張力會抗拒此變形趨勢。因此在太陽內部對流區接近太陽表面的部份應該存在著與光球層類似的部分游離化的氣體。當中性氣體流動時，它會帶動其中的電漿流，使磁場變形扭纏，由於中性氣體不會受到磁場的張力影響，所以磁場會持續性變形，扭纏在一起，使磁場強度增加，磁壓增強，於是根據 magnetic buoyancy instability，磁場就會從對流區浮起，形成日珥。

關於 magnetic buoyancy instability，我們可以藉著分析垂直方向是否達到力平衡來了解它。在考慮太陽表面的力平衡狀態時，可以用下式表示：

$$\vec{J} \times \vec{B} - \nabla p + \rho \vec{g} = 0 \quad (3.1)$$

其中 $\vec{J} \times \vec{B}$ 是磁力， $-\nabla p$ 是壓力梯度力， $\rho \vec{g}$ 是重力。若只考慮水平方向的力平衡，3.1 式可以寫成

$$\vec{J} \times \vec{B} - \nabla p = 0 \quad (3.2)$$

其中 $\vec{J} \times \vec{B} = \frac{(\nabla \cdot \vec{B}) \vec{B}}{\mu_0} - \left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right) \nabla$ ， $\frac{(\nabla \cdot \vec{B}) \vec{B}}{\mu_0}$ 代表磁

力線的張力， $\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)$ 代表磁壓作用力，如果磁場張

力的影響可忽略不計，3.2 式可以寫成

$$\left(\frac{B^2}{2\mu_0} + p\right) = 0 \quad (3.3)$$

(3.3)

被扭纏的磁場，磁壓增加。如果水平方向達到力平衡，則其磁壓與熱壓的總和必須與周圍的磁壓與熱壓的總

和相等 $\frac{B_0^2}{2\mu_0} + p_0 = \frac{B_1^2}{2\mu_0} + p_1$ ，其中下標為 1 的代表被扭

纏磁場的物理量，下標為 0 代表其周圍環境的物理量。因此被扭纏磁場中磁壓增加，熱壓就會降低。由於 $p = \rho RT$ ，如果在熱壓降低的過程中，除了氣體溫度降低外，氣體密度也減少，則被扭纏磁場中的氣體密度就會比周圍的氣體密度低。因此在考慮垂直方向力平衡時，這些低密度的氣體所受的重力，就無法與垂直向上的熱壓力梯度力相抗衡，於是日珥就有機會向上浮起。

(三) Rayleigh-Taylor 不穩定

首先是帶電離子密度必須有一個區域是隨著高度遞減，其次是當地的磁場最好是沿著水平方向（或接近水平方向）。圖 5 是氣體密度、氫原子與其帶電離子比例，與高度的關係圖。我們將圖 5 的氣體密度分佈曲線的值與（氫原子密度）/（氫離子密度）比例曲線的值相乘，算出氫離子密度隨高度的分佈情形（如圖 6），在色球層與日冕層底部範圍的區域（離太陽表面約 500_ 1000km 的高度），其離子密度有增加的趨勢。如圖 7 所示，若在此電漿中有一擾動波（ \vec{k}_i ）產生，而磁場方向（出紙面）與擾動波垂直。在太陽重力與磁場的作用下，正電離子子與電子運動方向相反，正電離子會向擾動面的左方移動，電子往擾動面的右方移動，由於電漿密度不均勻，在同一擾動面附近，區域 1（電漿密度高）的負（正）電荷數高於區域 2（電漿密度低）的正（負）電荷數，因此在擾動面附近會產生電場，此電場與磁場作用，會使擾動更不穩定，於是色球層（約 500 公里高位置）較冷的低密度電漿隨 $\vec{E} \times \vec{B}$ 上升，當電漿上升至密度相當的位置後，便會沿著磁場飄移，形成日珥。我們認為此日珥的形成高度在色球層較高的區域，而它所依附的磁場，有可能是前面所談過由太陽內部浮起來、扭纏過的磁場。

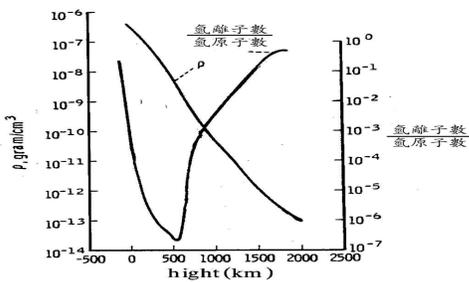


圖 5：太陽外部大氣密度與離子比例隨高度變化圖。(Priest, 1943)

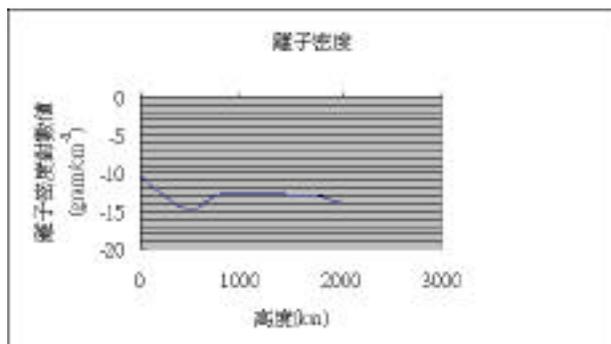


圖 6：太陽外部大氣離子密度分佈圖。

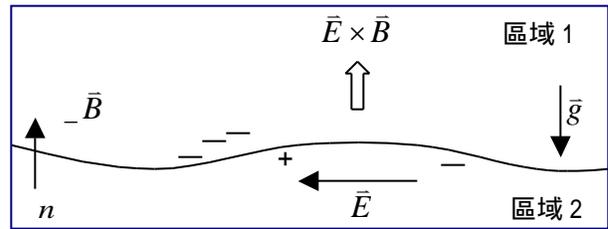


圖 7：R-T instability 示意圖。

四、結論

在資料分析方面，我們發現在寬粗狀日珥的周圍 line-of-sight 磁場並不強，約正負 10G，而從 EIT, SXT 影像圖可以看出日珥的上方日冕類似日冕洞結構。細條狀日珥的周圍 line-of-sight 磁場強度在正負 100_ 300G，且日珥上方的日冕呈現 loops 結構，所以細條狀日珥的背景磁場強度比斷續狀日珥強。

日珥的形成原因可能是由於 Radiative instability，造成部份日冕電漿冷卻，掛在磁場上，形成日珥。這是一種由日冕氣體形成日珥的機制。日珥的形成原因也可能是由於太陽內部對流區和表面的物質流因為差動自轉效應產生速度切，引發 Kelvin-Helmholtz instability，磁場因此形成捲扭狀，進而使磁壓增加，熱壓減低。如果熱壓減少的過程中，氣體密度也減少了，那麼就會造成 magnetic buoyancy instability，於是這些低密度電漿，就會向上浮起，形成日珥。這是一種由從太陽內部形成日珥的機制。日珥的形成也可能是由於 Rayleigh-Taylor instability 所造成的。Rayleigh-Taylor instability 所產生的電場與背景磁場，可抬升低溫低密度的色球層電漿，直到此低密度電漿升至環境密度相當的高度，電場就會消失，於是這些電漿就只能沿著磁場方向飄移，形成日珥。這是一種由色球層底部冷電漿直接形成日珥的機制。

從影像資料分析的結果看來，我們認為日珥形成的原因很有可能是由太陽內部浮起來的。因為當內部日珥浮起時，若太陽表面的磁場是平貼在太陽表面的話，則日珥必須要有足夠的浮力，才能挑起表面的磁場，並使上方日冕的磁場結構呈現 loops 狀。反之，若太陽表面的磁場與太陽表面垂直(如日冕洞區域)，則日珥與四周氣體密度，相差不必太大，就可以有足夠的浮力，浮出太陽表面了。這也許可以用來解釋高緯地區與中低緯地區，日珥結構外觀上之不同吧。

參考文獻

林敏德，1996：“日側磁層頂之 Kelvin-Helmholtz 不穩定性之研究”。碩士論文，國立中央大學。
 Fan, Y., 2001：“The emergence of a twisted γ -tube into the solar atmosphere”. *Astrophys. J.*, 554, L111-L114.
 Kippenhahn, R., and A. Schlüter, 1957：“Eine Theorie der solaren Filamente”. *Z. Astrophys.*, 43, 36-62.

J., 344, 1010-1025.

Priest, E. R., 1943 : Solar magneto-hydrodynamics.

Chapter 1, D.Reidel Publishing Co., Dordrecht, 25.

Rosner, R., W. H. Tucker, and G. S. Vaiana, 1978 :

“ Dynamics of the quiescent solar corona ” .

Astrophys. J., 220, 643-665