

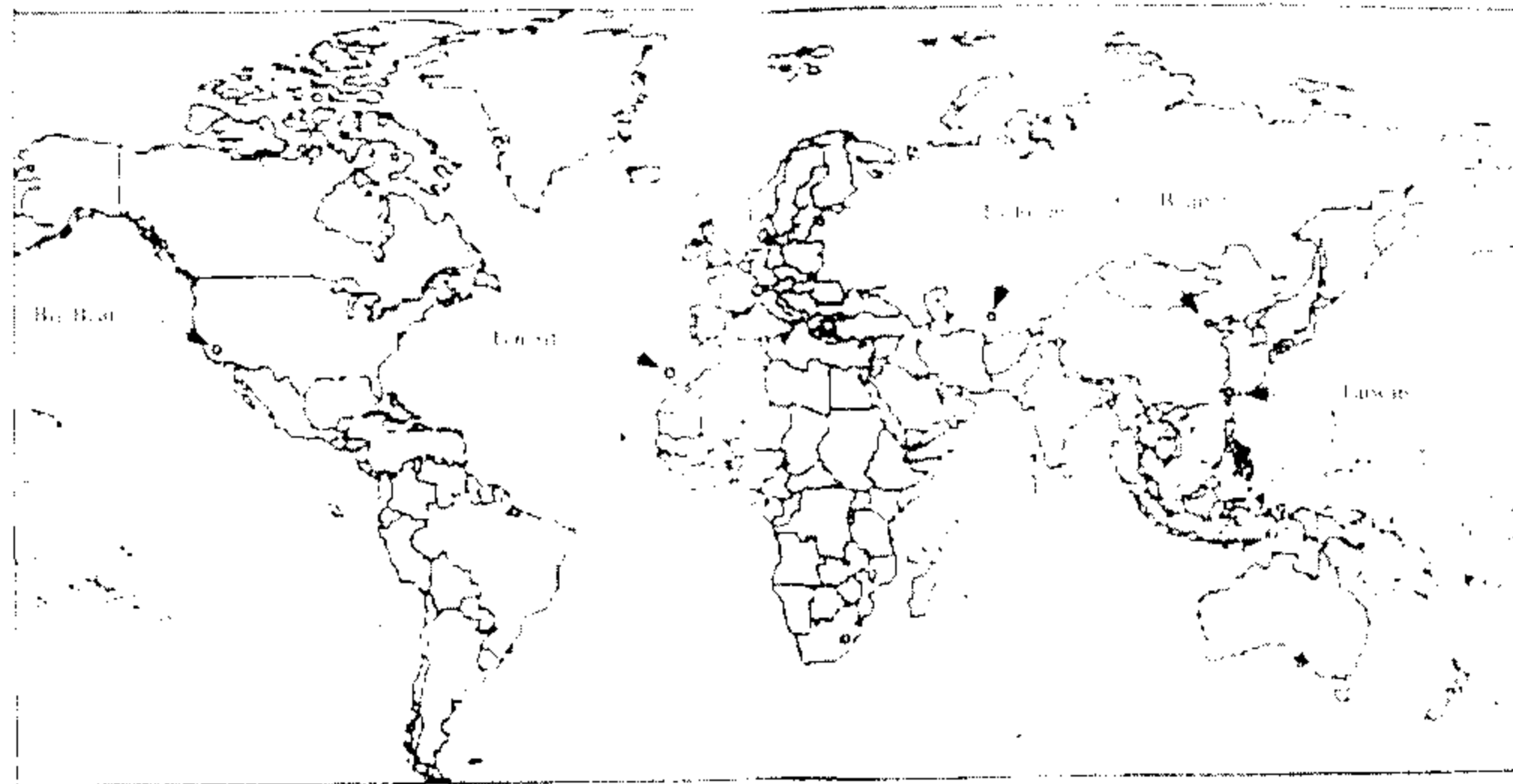
# 台灣日震觀測網

## (Taiwan Oscillation Network)

周定一教授

### 一、背景簡介

了解星球內部結構是天文學家長久以來的夢想。過去我們對星球內部結構的了解，大多都是由理論推測而得。但於七十年代興起的日震學(Heliology)，提供了天文學家一個相當準確的方法來了解太陽內部的結構，如聲速、自轉速度、磁場、化學組成、對流運動.....等。顧名思義，日震學這個名詞係由地震學引申而來。地震學是利用地震或其他原因造成的震波來了解地球內部的結構。日震學則是利用太陽表面觀測所得的震波來了解太陽內部的結構。不同的是，對地球震波，我們可知其波源的位置。而對太陽震波來說，太陽上每個點都是震波的波源。而且任何時刻、任何地點太陽震波都存在。因此日震學必須



(圖一)

發展不同的方法，利用太陽表面的震波資料來推測內部的結構。

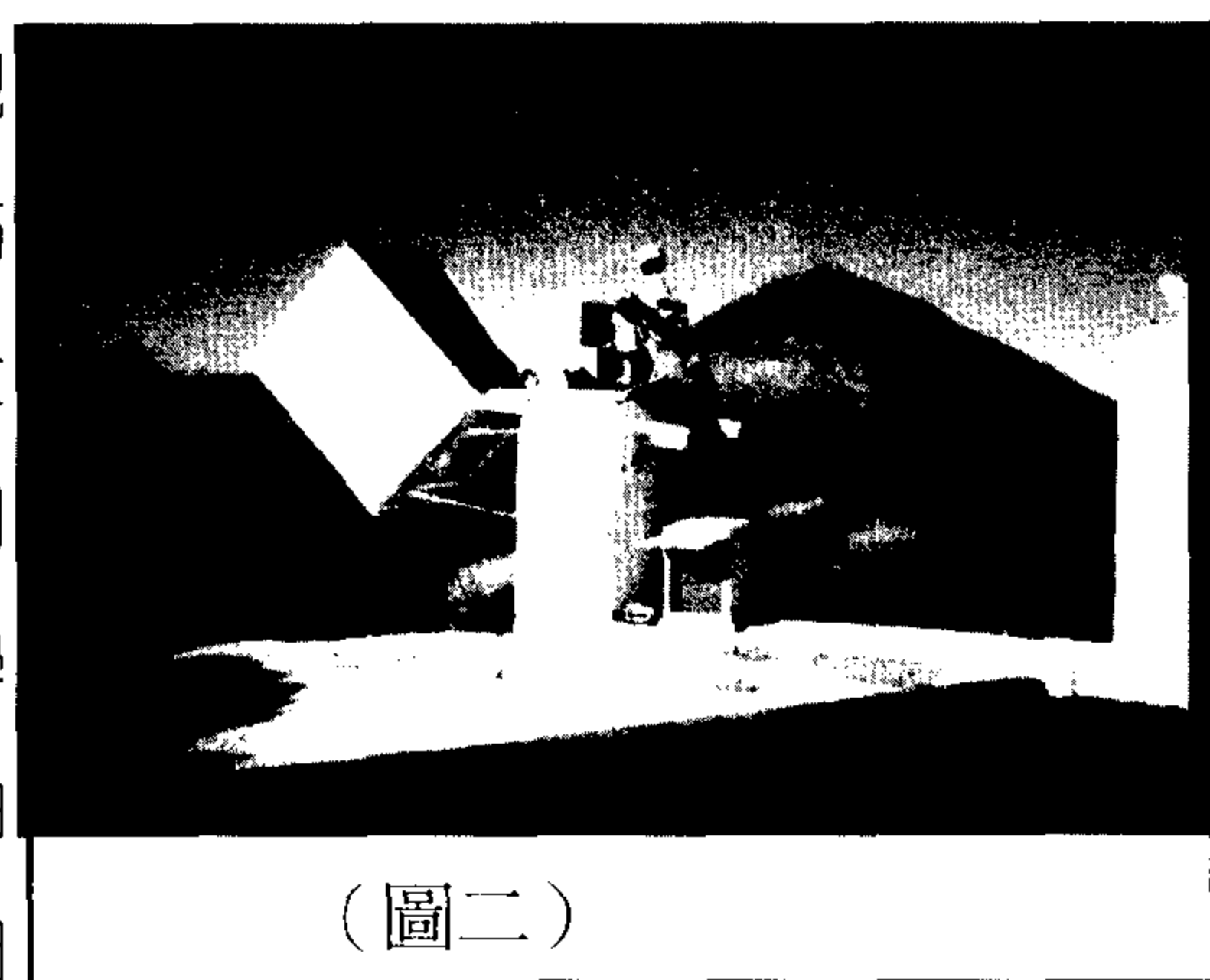
常用的方法之一是由震波的色散關係 (dispersion relation) 來反推太陽內部的結構。色散關係為波長與頻率的關係。波

的色散關係反應了波所存在區域的物理性質。不同模式的波，存在的區域不同。因此不同模式的波反應不同區域的物理性質。經由比較不同模式的色散關係，原則上我們可推得太陽內部的物理性質。波的色散關係可由太陽表面震波的傅利葉分析(含空間與時間)而得。為了獲得準確的色散關係，須要有長時間且連續的數據。因為數據的時間愈長，頻率的解析度愈好。但是地球自轉造成的日出日落，使得同一觀測站無法取得連續的數據。天文學家解決此問題的方法有三。最佳的辦法是將望遠鏡放在太空中適當的地點。歐美合作的SOHO衛星，於1996年底發射至太陽與地球之間的 Lagrangian point。獲得連續性相當好、且不受大氣影響的數據。但此種方法所需經費龐大、壽命短、且冒險性大(SOHO曾多次故障，目前已無堪用的陀螺儀)。另外一種方法是在南北極觀測。但其缺點是南北極天氣不

好，太陽太接近水平面，且一年中僅有數個月的觀測時間，所需經費也相當龐大。最後一個也是目前最普及的辦法，是在全球適當的經度上放置相同的望遠鏡，使太陽不下山，以連續觀測。目前全世界有數個觀測網。台灣日震觀測網(Taiwan Oscillation Network, 簡稱 TON) 為主要的觀測網之一。

## 二、 台灣日震觀測網[1]

台灣日震觀測網由國科會支助，從1991年起由清華大學物理系執行。很快地於1993-1994年在西班牙、美國、及中國大陸設立了三個觀測站。並於1996年在烏茲別克增設了第四個觀測站(圖一)。台灣日震觀測網的儀器觀測CaII K-line全日面影像，影像大小為1024x1024 pixels。是目前空間解析度最好的觀測網。所有儀器都在清華大學設計、製造、測試，然後運送至各觀測站裝設，由當地合作者負責操作觀測。儀器為一半自動系統(圖



二)。每天早上由觀測者將望遠鏡打開，指向太陽，輸入一些電腦指令。整個系統即會自動追蹤太陽，攝取影像，並將數據存入高容量磁帶中。儲存數據的磁帶，定期寄回台灣。

日震學的數據分析工作相當繁雜龐大。大致上可分為初步分析與個別課題分析。為節省資源，初步分析的工作集中於清華大學物理系進行。經過初步分析的數據，可提供不同的研究課題使用。台灣日震觀測網的數據，除了提供台灣的研究人員外，也提供國外研究人員使用。由於台灣日震觀測網的數據的特性為高空間解析度，適合用於研究需要高L模式(對應於短波長的震波)的研究課題，如局部日震學。因此目前國內的研究，主要集中於局部日震學。局部日震學為日震學的一個子領域，專門研究太陽局部區域的物理性質，如太陽黑子及其表層以下的物理性質、局部對流運動...等。

## 三、 聲波成像法 (Acoustic Imaging)

日震學的傳統分析方法為簡正模式分解法(normal mode decomposition)，將時空的數據分解為不同的簡正模式的組合。由這些模式的性質，可反推太陽內部的某些物理性質。局部日震學中的Ring diagram及Hankel decomposition 都屬於此類的傳統分析方法。Duvall 等人於1993年首先發展出一種新的分析方法：時距分析法 (Time-distance Analysis

) [2]。此方法不使用傳統的簡正模式分解法，而直接在時空座標中分析數據。雖然時距分析法早已為地震學所使用，但是因為地震學中的波源較為簡單，時距分析較為單純。太陽上每個點都是震波的波源，使得日震學的時距分析變得相當複雜。

目前所能觀測到的太陽震波為 P 波 (pressure waves)。P 波存在於太陽表層與某一深度之間，稱之為模式腔 (mode cavity)。不同模式的 P 波有不同的模式腔。由表面發出的震波向下傳遞至模式腔的底部，然後折返太陽表面。在太陽表面反射後，又向下傳遞。如此在模式腔內反覆振盪，直到耗損消失為止。不同模式的波折返太陽表面的距離與時間不同。折返太陽表面的距離與時間之間的關係稱為 侖 Z 關係 (Time-distance relation)。此一時距關係與色散關係一樣，反映了太陽內部介質的物理性質。但是時距關係較適合用來研究太陽局部區域的物理性質。

清華大學物理系的研究小組利用震波的時距關係，於 1997 年發展出一種全新的方法：聲波成像法 (Acoustic Imaging) 來研究太陽內部的性質 [3]。聲波成像法的構想來自海洋學中的一項新技術：背景雜訊成像術 (Imaging with ambient noise) [3]。海洋中的聲波背景雜訊有點像一般屋內空氣中的散射光，雖不是特定的波源，但仍可用來“照亮”物體。利用放置於海面下的拋物面形聲波反射鏡，收集受到目標物擾動的聲波背景雜訊。並利用放置於焦點的聲波陣列接收器接收訊號，即可形成目標物的影像。此種方法與日常生活中利用屋內散射光及透鏡來成像類似。對太陽來說，我們可把太陽內部的震波當成背景雜訊，利用它來“照亮”太陽內部的目標物 (不均勻介質區，如磁場區)。與海洋學或日常生活不同的是：太陽內部震波的軌跡不是直線，而且我們不能在太陽內部放置一個拋物面形聲波反射鏡或透鏡，來收集震波。因此我們必須設計一個“計算上的聲波透鏡” (computational acoustic lens)，用來收集震波，以便成像。時距關係正好提供了一個設計“聲波透鏡”的工具。一般光學透鏡的聚焦原理，是使從點光源發射出來，但經由不同路徑的光線到達焦點時有相同的相位。由太陽內部某一點所發射出來的震波，含有許多不同的模式。不同模式的波抵達太陽表面的距離與時間不同。利用震波的時距關係，我們可知如何收集太陽表面具有相同相位的震波訊號。經由這種同相位收集 (in-phase collection)，我們可重建 (reconstruct) 位於太陽內部此一點的震波訊號。“計算上的聲波透鏡”可由下列的數學式子來描述：

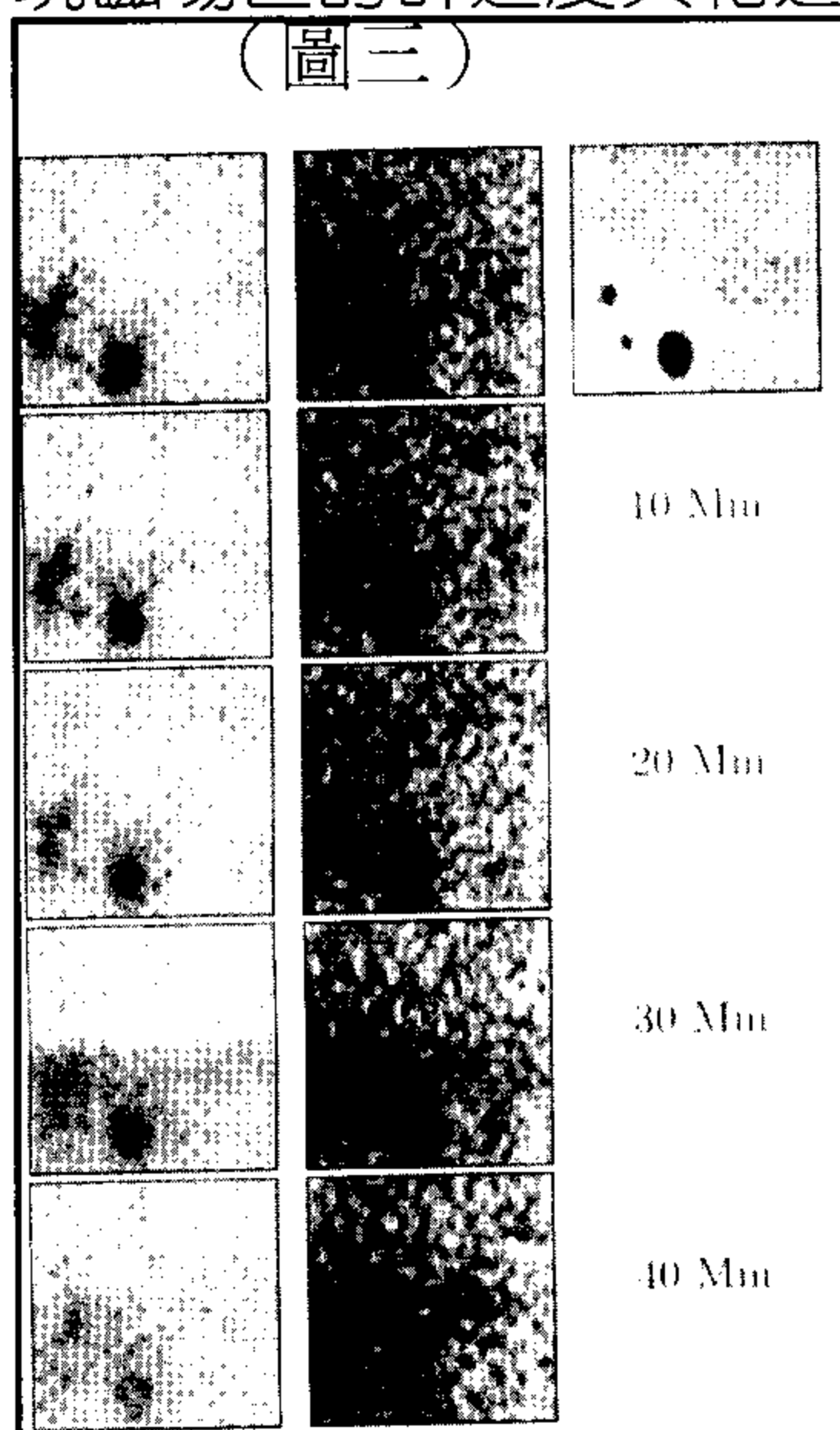
$$\Psi_c(t) = \sum W(\tau, \theta) \cdot \Psi(t + \tau, \theta)$$

$\Psi_c(t)$  為位於目標點、時間  $t$  的重建訊號； $\Psi(t + \tau, \theta)$  為位於離目標點角距離  $\theta$ 、時間  $t + \tau$ ，所觀測得的訊號； $W(\tau, \theta)$  為比重函數，可由理論獲得； $\tau$  與  $\theta$  符合時距關係。由於我們僅能夠觀測到太陽表面的震波，時距分析法僅能夠獲得表面至表面的時距關係。對於太陽內部某一目標點至太陽表面的時距關係，則需由理論模型計算而得。

上述利用震波的時距關係及表面所觀測的震波訊號，來重建太陽內部某一點的震波訊號的方法，我們稱之為“聲波成像法”(Acoustic Imaging)。將重建訊號 $\psi_c(t)$ 的振幅平方，然後對時間平均，可獲得位於這一點的聲波強度(acoustic intensity)。重複不同的點，可獲得二維的聲波強度圖。我們利用聲波成像法分析台灣日震觀測網位的數據，獲得一個黑子區在太陽內部不同深度的聲波強度圖[4]。這是人類第一次“看見”太陽內部的影像(聲波影像)。圖三顯示某一黑子區周遭不同深度的聲波強度圖[5]。明顯可見黑子內的聲波強度較弱。此一現象隨著深度而減弱。

上述的重建訊號 $\psi_c(t)$ 係利用從目標點向外傳遞的震波來重建。我們也可以利用從外圍區域向目標點傳遞的震波來重建。上述的數學式子仍適用，只需將其中的 $t+\tau$ 改為 $t-\tau$ 。如此重建的聲波強度圖中看不到黑子的特徵。原因是，在外圍區域向目標點傳遞的震波尚未受到目標點(黑子)的影響。利用從目標點向外傳遞的震波來重建的訊號，稱之為 $\psi_{out}(t)$ ；利用從外圍區域向目標點傳遞的震波來重建的訊號，稱之為 $\psi_{in}(t)$ 。

重建訊號 $\psi_{out}(t)$ 與 $\psi_{in}(t)$ 除了含有振幅的訊息外，它也含有相位的訊息[5]。相位的訊息可由 $\psi_{out}(t)$ 與 $\psi_{in}(t)$ 之間的交互相關函數(cross-correlation function)獲得。如果使用的數據經由高斯濾波函數(Gaussian Filter)， $\psi_{out}(t)$ 與 $\psi_{in}(t)$ 之間的交互相關函數可由高斯函數乘以正弦波描述。此高斯函數的位置反映了波包傳遞的時間，與沿著波路徑上波包的群速度有關。正弦波的相位與沿著波路徑上波包的相速度有關。我們發現磁場區的群速度與相速度比非磁場區小。它可提供磁場強度的資料。圖三顯示黑子區在



不同深度的相位圖。

我們也發現一個有趣的現象，黑子內部波包傳遞時間的變化量與相位的變化量不同。相位與波包傳遞的時間提供不同的訊息。波在經過不連續介面時，其相位會有變化。因此相位變化除了與沿著波路徑上波包的相速度變化有關外，它與模式腔邊界或黑子邊界的物理狀態變化有關。我們所測得的黑子內部波包傳遞時間的變化量與相位的變化量，對黑子表層以下的模型提供了重要的訊息。

聲波成像法仍在發展初期，其許多性質有待更進一步的研究，如垂直與水平解析度、收集區域大小與解析度之關係...等[6]。雖然我們利用聲波成像法可得到太陽內部不同

深度的聲波強度圖與相位圖，如何闡釋這些三維圖，以了解太陽內部的結構，仍需要不少努力。我們也希望利用聲波成像法來研究更多的問題，如尚未浮現至表面的磁場、太陽背面的黑子、震波波源的位置、模式腔的上邊界的物理狀態變...等。

#### 四、 未來展望

台灣日震觀測網可提供高連續性、高解析度的 CaII K-line 太陽影像。這些高解析度的 CaII K-line 太陽影像，除了用於日震學的研究外，也可用於研究其他的太陽物理課題（已有某些國外研究人員，利用台灣日震觀測網的數據進行日震學以外的研究）。除了繼續聲波成像法的研究外，我們也正在努力尋找、發展新的方法來分析台灣日震觀測網的數據，以對太陽內部能有更進一步的了解。儀器方面，我們除了繼續維持其正常運作外，將會不斷的改進。希望能夠持續觀測超過一個太陽週期（約十一年），以研究太陽內部的變化。

#### 參考文獻

- [1] Chou, D.-Y., Sun, M.-T., Huang, T.-Y. et al., Solar Phys., 160, 237 (1995).
- [2] Duvall, T.L. Jr., Jefferies, S.M., Harvey, J.W., and Pomerantz, M.A., Nature , 362, 430 (1993).
- [3] Buckingham, H.J., Berkhout, B.V., and Glegg, S.A., Nature, 356, 327 (1992).
- [4] Chang, H.-K., Chou, D.-Y., LaBonte, B., and the TON Team, Nature, 389, 835 (1997).
- [5] Chen, H.-R., Chou, D.-Y., Chang, H.-K., Sun, M.-T., Yeh, S.-J., LaBonte, B., and the TON Team, Astrophys. Journal , 501, L139 (1998).
- [6] Chou, D.-Y., Chang, H.-K., Sun, M.-T., LaBonte, L., Chen, H.-R., Yeh, S.-J., and the TON Team, Astrophys. Journal, 514, 979 (1999).

圖一：台灣日震觀測網目前四個觀測站的位置：美國的 Big Bear、西班牙的 Tenerife、烏茲別克的 Tashkent、及中國大陸的 Beijing。

圖二：台灣日震觀測網位於西班牙 Tenerife 的望遠鏡。

圖三：利用聲波成像法分析台灣日震觀測網位的數據，所獲得某一個黑子區在不同深度的聲波相位圖（第一行）與聲波強度圖（第二行）。右上角為對應的平均 CaII K-line 影像 [5]