

如何利用貝里珠 測量太陽視直徑¹

簡介

在恆星演化的理論中，處於主序帶（Main sequence）上的恆星，它的直徑會被本身的重力與氣體壓力所調節。當氣體壓力稍微變小的時候，恆星本身的重力會將恆星的直徑稍微壓縮變小。這時，恆星內部的溫度會因為壓縮而稍微變高，增加核融合反應，因而增加了恆星的溫度，溫度增加了，氣體壓力也就增加了，並將恆星的直徑推回原來的大小。所以主序帶上的恆星就是處於這樣的平衡狀態。我們的太陽也就是處於這樣的平衡狀態，未來的數十億年，它的直徑都不會有太大的變化。

但是，太陽的直徑（正相關於太陽輻射，Sofia, O' Keefe et al. 1979）即便是微小的變化，對於地球的長期或是短期的氣候變化可能扮演著舉足輕重的角色！氣候學家在 1960 年代發現，當地球的溫度來到了極端的轉折點（tipping point）情況下，地球的氣候可能會產生不可逆的冰-反照率失控（Runaway Ice-albedo）。當太陽輻射出的能量減少，地表的溫度隨之降低，冰雪

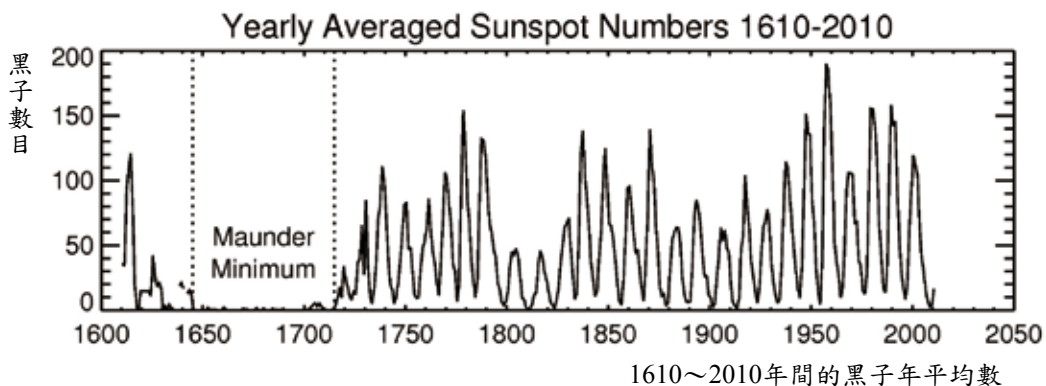
增加覆蓋更多地表，進而反射更多的太陽輻射進入太空。這類的正回饋（溫度降低導致溫度持續降的更低）將使地表的溫度越降越低，直到冰雪覆蓋整個地球。反之，如果太陽的輻射增加，地表溫度隨之增加使得冰雪融化，吸收更多的太陽輻射，進而使溫度越升越高，直到所有的冰雪融化，水分蒸發殆盡。天文學家認為，金星的大氣層可能曾經發生過這類極端的失控現象。

大約在西元十七世紀中葉，歐洲歷經了氣候學家所謂的小冰河時期（Little Ice Age），而天文學家也發現在西元 1645-1715 年，太陽表面的黑子數目有明顯的減少（蒙德極小期，Maunder Minimum，圖一），因而推論太陽表面的活動與地球的氣候有明顯的對應關係。那太陽直徑的微小變化是否也會影響地球的氣候呢？蒙德極小期是否對應到比較大的太陽直徑呢？

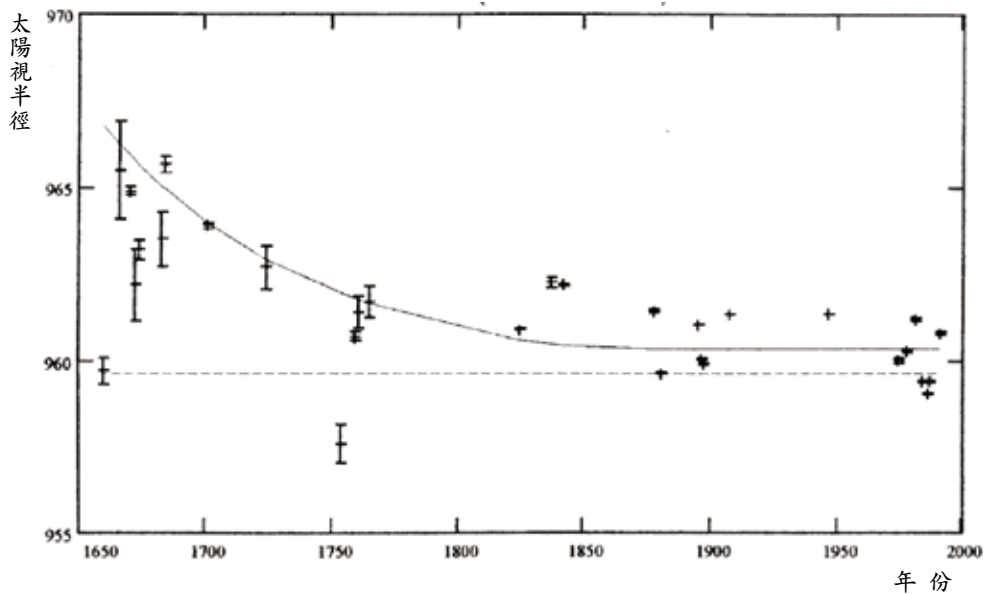
注1. $(\text{太陽直徑}) / (\text{太陽到地球之間距離})$ ，

太陽視直徑測量的歷史

遠在古希臘時期，天文學家已經嘗試對太陽



圖一. 太陽黑子數有非常顯著的 11 年週期。但是在西元 1645-1715 年之間，黑子數目變得非常稀少，天文學家稱為蒙德極小期。



圖二. 文獻中所蒐集到的太陽視直徑。圖中的虛線是 Auwers (1891) 所提出的標準太陽半徑 959.63 角秒 (直徑 1919.26 角秒)。取自 Toulmonde, 1997。

視直徑做測量，圖二（取自 Toulmonde, 1997）繪出了由文獻中所蒐集到的測量值。不過早期的量測結果受限於所使用儀器，普遍缺乏一致的參考體目標以及對大氣視寧度影響的修正。Toulmonde (1997) 將過去三百年有關於太陽視直徑的觀測，重新整理後得到了一個結論，蒙德極小期的太陽視直徑比現今的太陽視直徑大了約 16 角秒。不過，由於過去的觀測存在著太多系統誤差無法適當地修正，多數天文學家都抱持著懷疑的態度。但是，Morrison, Stephenson 與 Parkinson (1988) 利用西元 1715 年在英國倫敦所觀測到的日全食推測出當年的太陽視直徑卻與目前的公認值非常接近。除此之外，在地球表面上觀測，太陽的視直徑會隨著地球在橢圓公轉軌道的不同位置上而有所不同。當地球位於近日點（一月）的時候太陽視直徑最大。反之，當地球位於遠日點（七月）的時候，太陽的視直徑最小。因此，觀測時就必須將繞日橢圓軌道的效應除去，才能得到真實的太陽視直徑。平均的真實太陽視直徑就稱為標準太陽直徑 (Standard solar diameter)，定義為觀測者在距離太陽一個天文單位所測量到的太陽視直徑。

如果直接觀測視直徑，不論是在地面還是太空中所作的測量，(例如 SOHO 與 PICARD)，但是其缺點就是沒有適當的參考體來進行內部校正，不容易得到一致性的觀測結果²。因此，不

直接觀測視直徑而以測量時間差的方法，例如水星與金星凌日以及日食貝里珠 (Baily's beads) 的觀測，便可以提供我們高精度且一致性良好的測量值。

注2. SOHO 衛星曾經利用西元 2003 年水星凌日的觀測結果來校正其它的太陽視直徑觀測值。

如何利用日食與貝里珠測量太陽視直徑

由於太陽與月球距離地球的比例和太陽與月球的直徑比都剛好落在 400:1 左右，因此我們在地球上可以看到日食的天文現象。而且月球是固態球體，因此在發生日食的時候，可以利用它作為參考體，對太陽這個沒有固定邊界的氣態球體進行視直徑的測量。

利用日全食或日環食來測量太陽視直徑的方法可以追溯到西元 1715 年(表一)，英國天文學家哈雷 (Edmund Halley) 協同其他皇家學院的成員在倫敦一起觀測日全食，並利用日食本影南北極限之間的距離來估計太陽視直徑。其後，又有一些天文學家陸續地利用觀測日食來測量太陽視直徑。

由於月球表面與地球表面一樣有高低不同的地形起伏。因此當發生日全食 (食既、生光³) 或是日環食 (環食始、環食終) 時，太陽光透

過月球表面邊緣低窪區域而射向地球時，地球上的觀測者可以看到間歇性的光點產生，這些光點就稱為貝里珠。這個現象首先於西元 1836 年由英國天文學家貝里（Francis Baily）提出正確的解釋，並命名為貝里珠。早期的太陽視直徑測量精度除了受限於無法掌握地球與月球的精確軌道外，月球邊緣高低起伏的山脈與坑谷也是主要的誤差來源。因此 Newcomb 於西元 1870 年即提出，由於無法掌握月球邊緣的山脈走勢，利用日食來測量太陽視直徑不可能達到實用的精度。因此，想要達到非常高的測量精度就必需要有精確的月球邊緣的地勢圖以及太陽—月球—地球的相對位置。

一直到了70年代前後，Watts（1963）的月球地勢圖（Lunar profile）以及 JPL 的 DE200/LE200 太陽系星曆公布之後，利用日食來精確測量太陽視直徑的構想才得以實現。自從西元 1950 年代開始，美國海軍天文台的 Watts 對月球表面在不同月相與秤動角度的情況下進行攝影觀測，目的是要對月球的山脈進行高度測量。Watts 利用這數千張照片建構出月球地勢圖之後，Morrison 與 Appleby（1981）接著利用 66,000 筆月球掠掩（grazing occultation）恆星的資料來進一步修正 Watts 的月球地勢圖。國際掩星計時協會（International Occultation Timing Association）也持續地利用月球掠掩恆星的觀測來修正月球地勢圖，不過掠掩恆星多發生於月球的南北兩極附近，因此月球邊緣地勢圖的修正大多落於月球南北兩極的 $\pm 30^\circ$ 的離散區域之內。更全面性的高精度月面地勢圖來自於

日期	食象	觀測次數	$\Delta R ['']$
1715 May 3	Total	3	$+0.48 \pm 0.20$
1925 Jan. 24	Total	8	$+0.51 \pm 0.08$
1966 May 20 ⁰	Hybrid	20	-0.22 ± 0.20
1970 Mar. 7 ¹	Total	300	$+0.11 \pm 0.008$
1973 June 30 ¹	Total	85	$+0.21 \pm 0.015$
1976 Oct. 25	Total	43	$+0.04 \pm 0.07$
1979 Feb. 26	Total	47	-0.11 ± 0.05
1980 Feb. 16	Total	232	-0.03 ± 0.03
1980 Feb. 16 ¹	Total	135	$+0.21 \pm 0.012$
1981 Feb. 4	Annular	153	-0.02 ± 0.03
1983 June 11	Total	201	$+0.09 \pm 0.02$
1984 May 30 ²	Hybrid	51	$+0.29 \pm 0.04$
1984 May 30 ³	Hybrid	51	$+0.09 \pm 0.04$
1987 Sep. 23 ⁴	Annular	123	-0.11 ± 0.03
1991 July 11	Total	59	0.09 ± 0.10
1991 July 11 ¹	Total	300	0.25 ± 0.008
1994 May 10	Annular	53	-0.27 ± 0.02
1995 Oct. 24	Total	92	$+0.14 \pm 0.03$
1998 Feb. 26	Total	76	$+0.16 \pm 0.05$
1999 Aug. 11	Total	58	-0.06 ± 0.06
2002 Dec. 04	Total	58	-0.21 ± 0.05
2006 Mar. 29 ⁵	Total	35	-0.41 ± 0.04
2006 Sep. 22 ⁶	Annular	13	-0.06 ± 0.06

表一：由西元 1715 – 2006 年之間發生的日食所推算出了的太陽視半徑變化。這裡所採用的標準太陽（視）半徑為 959.63 角秒⁵。取自 Kilcik et al., 2009。

西元 2007 年發射的日本探月軌道船—輝夜號⁴（Araki et al., 2008）。利用輝夜號上的雷射高度儀，天文學家已經可以重新建構出毫角秒（mas）等級的高精度且連續性的月球地勢圖。

利用月球邊緣的地勢圖以及月球與地球相對於太陽的精確位置並考慮月球的秤動，天文學家可以事先預測，在日食發生時，月球邊緣的哪些山脈會在哪個時刻形成貝里珠（圖三）。而利用貝里珠發生與消失的時間與觀測者在地面的精確位置，我們就可以計算出太陽的視直徑，其精確度可以達到 0.01 角秒左右（Sigismondi and Oliva, 2006）。

注3. 月球陰影第一次內切於太陽盤面時稱為食既，第二次內切於太陽盤面時稱為生光

注4. 衛星開發期間的名稱為 SELENE（月亮女神），發射成功後的正式名稱為 Kaguya

注5. Auwers, 1891

儀器設備與資料分析

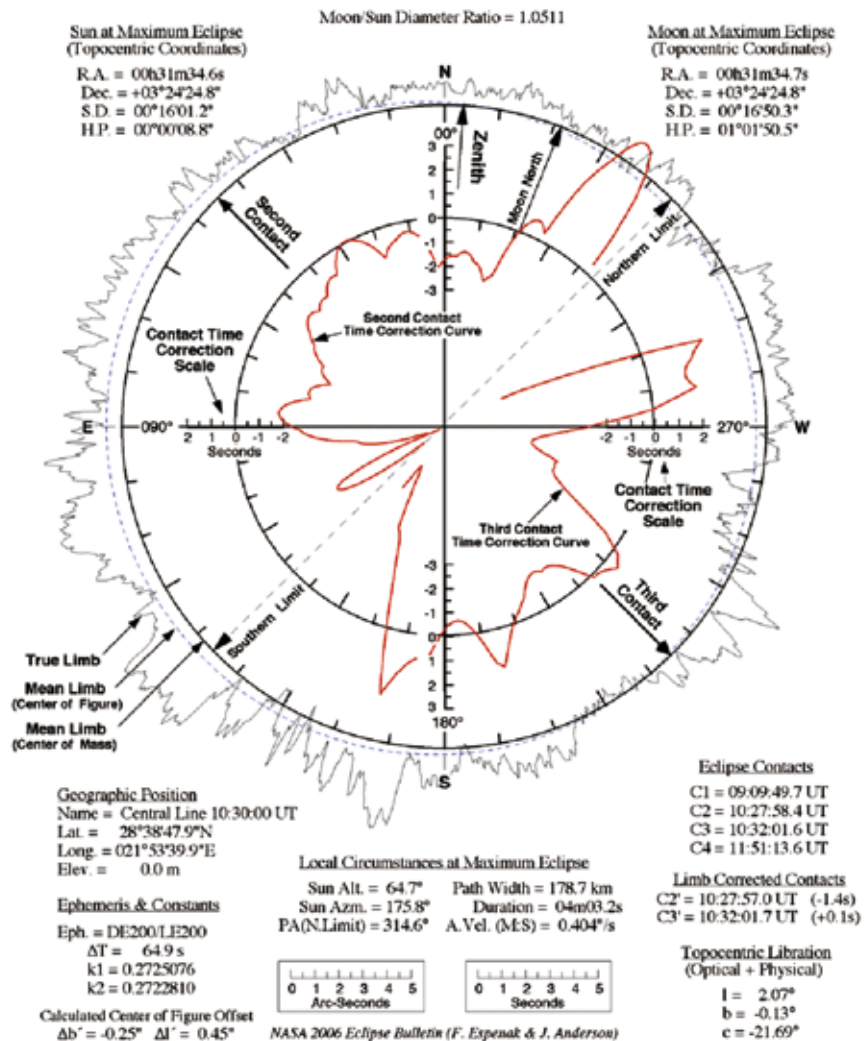
除了一般的日食觀測設備，例如望遠鏡，太陽濾光鏡之

外，還必須要有一個 GPS 接收機同時提供觀測位置座標與標準世界時，以及高速的錄影設備（可以提供 ~30Hz 的採樣）。由於需要精確地紀錄貝里珠發生與消失的時間，因此最好可以將時間訊號嵌入影像中，或是在高速採樣時，將精確的時間（小數點下第 3 位）寫入每一幅影像的檔頭(header)。使用 GPS 請注意附近不要有遮蔽物（大樓、樹林、山壁），並於開始接收到衛星訊號後 15 分鐘取多次數據（觀測者經、緯度）平均到小數點下第 4 位。

觀測者可以利用 David Herald 的掩星預測程式 Occult 4⁶ 來預測特定位置可以看到的貝里珠數目與發生/消失的時間。假設已知的條件為太陽—月球—地球的相對位置以及月球地勢圖，在觀測完畢後利用各個貝里珠實際的發生/消失的時間、位置角（由月球北極往順時針方向計算）與日食陰影速度，便可以擬合 (fitting) 出一個太陽視直徑最為符合所有觀測到的貝里珠，而視直徑的測量精度與實際觀測到的貝里珠數目 N 的平方根 (\sqrt{N}) 成正比。一般而言，如果以高速採樣 (100 Hz)， $N \sim 50$ 可以達到的太陽視直徑測量精確度約為 0.04 角秒。

注6.目前的版本為 4.1.0，下載網址 <http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>

FIGURE 20 - LUNAR LIMB PROFILE FOR MAR 29 AT 10:30 UT
Total Solar Eclipse of 2006 Mar 29



圖三：西元 2006 年 3 月 29 日的日全食月面地勢圖，取自 NASA

結論

無論在地面或是太空中進行直接太陽視直徑觀測，雖然可以得到最密集的觀測資料，但是其缺點就是沒有適當的參考體來進行內部校正。利用行星凌日與日食的貝里珠觀測，可以將視直徑的測量轉換為時間的測量，因此可以達到非常高的精確度，問題在於這些現象的發生頻率無法讓我們天天觀測。最好的情況下，一年也只有三次日食，一世紀也只有幾次的凌日事件。由日食所測量到的太陽視直徑由於測量的頻率不高，因此無法用於偵測短週期的太陽視直徑變化，從太空

觀測則適用於短週期相對視直徑變化的測量。因此利用日食的觀測還是目前唯一適用於太陽視直徑的長期監測。西元 2020 年 6 月 21 日，將會有一次日環食通過台灣中南部，只要適當地在日食本影的南北極限設立一些觀測點，利用這次地利之便，相信一定可以測量到高精度的太陽視直徑。

參考文獻

Araki et al., 2008

Auwers, 1891

IOTA manual Chapter 10

Kilcik et. al, 2009

Morrison & Appleby, 1981

Newcomb, 1870

Sofia, O' Keefe et al. 1979

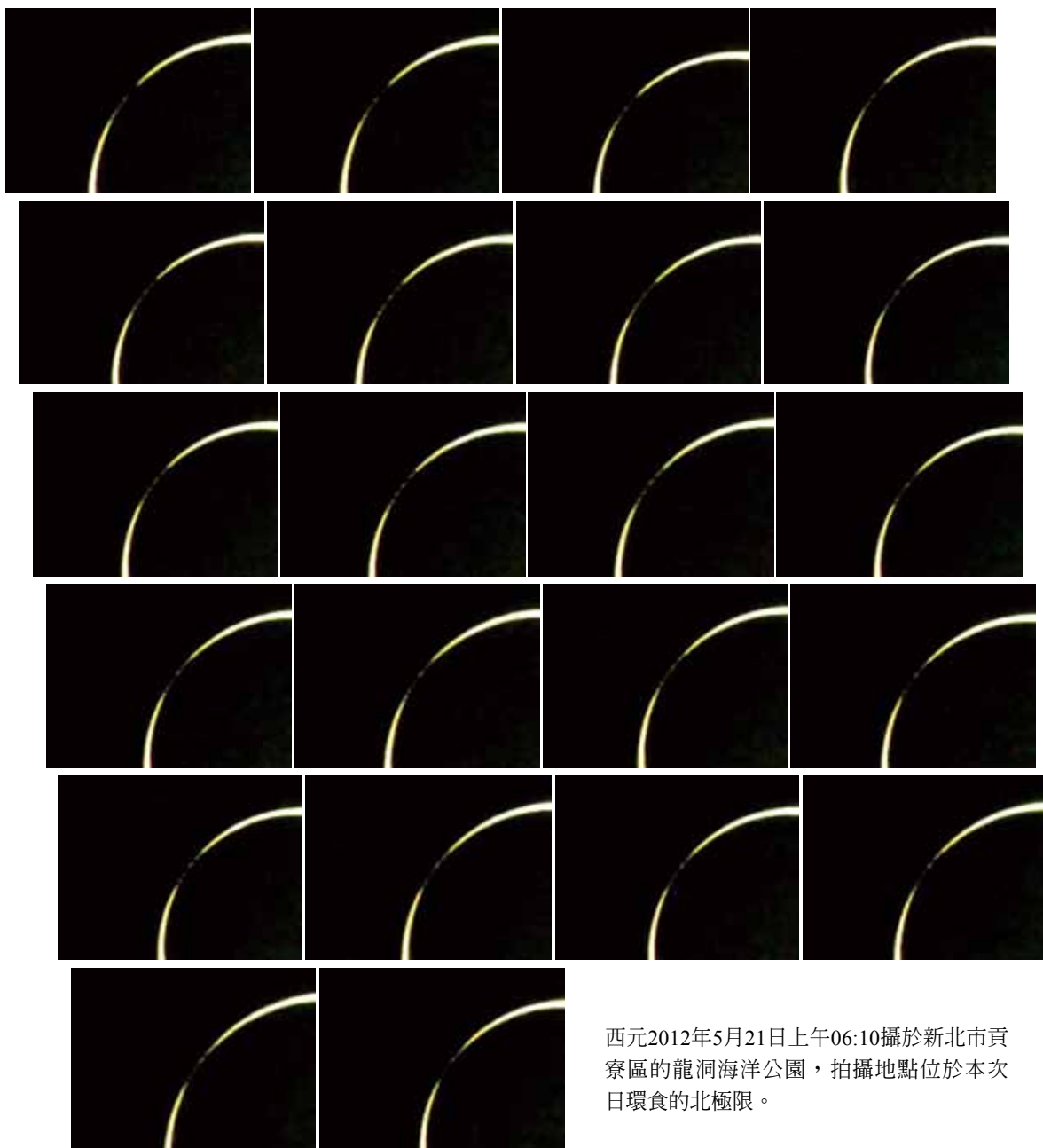
Sigismondi 2006

Sigismondi and Oliva, 2006

Toulmonde 1997

Watts, 1963

汪仁鴻：中央研究院天文及天文物理所研究
助技師



西元2012年5月21日上午06:10攝於新北市貢寮區的龍洞海洋公園，拍攝地點位於本次日環食的北極限。