

日全食食暨前的明暗影帶現象

高中組地球科學科第三名

高雄市左營高中

作者：蔡曜隆、梁成德、楊漢威

指導教師：林明良、徐德耀

一、研究動機

自從去年 10 月 24 日學校的日食觀察活動後，我們對日食現象感到好奇，進而查閱有關日食的資料；在牛頓雜誌第 149 期中報導：1994 年 11 月 3 日在南美洲的日全食時「地面上有如同游泳池底可見的明暗條紋狀『影帶』(Shadow band)流動」，為什麼會產生影帶？我們並未在其他有關的資料再發現影帶的描述，是因為大家都忽略了這個現象，還是影帶只在特殊的條件下產生？

二、研究目的

- (一)探討日全食時「影帶」形成的原因。
- (二)探討「影帶」形成的時機。
- (三)探討影響「影帶」的變因。
- (四)探討「影帶」掃掠的頻率。

三、研究儀器與設備

01. He-Ne 氣體雷射(= 7500 埃)	11. 腳架
02. 定滑輪	12. 遊戲搖桿
03. 砝碼及掛碼	13. 遊戲介面卡
04. Nikon FM-2 相機	14. 減光濾鏡和濾光片
05. 光敏電阻	15. 三用電表
06. C 型夾	16. 電源供應器
07. 電腦 386DX-33	17. 米尺
08. 光電計時器	18. 滑車
09. 光學平台	19. 紙屏
10. 馬達	

四、實驗探討

- (一)可能形成影帶的原因：

光經過物體邊緣時會產生邊緣繞射，而日全食時，陽光通過月亮邊緣，產生明暗相間的繞射條紋，投射在地面上，有可能造成影帶的現象嗎？

1. 模擬實驗一：以模擬實驗觀察日全食現象

(1) 實驗設計：

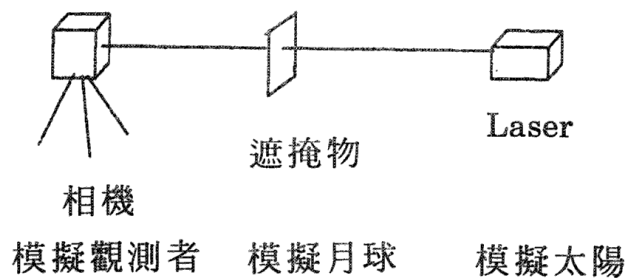
a. 太陽與月亮的模擬

陽光射至地球時可視為平行光，因此我們以雷射光模擬太陽，以刮鬍刀片（用於實驗一、二、三）或圓形墊圈（用於模擬實驗一、二、三）模擬月球。為了精確控制遮掩面積，我們將遮掩物固定在游標尺上。

b. 觀測裝置：

利用 Nikon FM-2 相機，將其鏡頭拆下來，把經過遮掩物產生的影像直接投影於底片上，如此所得呈現於底片上的像即與實際相同。

(2) 實驗裝置圖（圖一）



圖一：雷射光經過遮掩物邊緣產生邊緣繞射，繞射條紋投射在相機像屏上，在底片上曝光記錄。遮掩物可以移動，以不同比例遮光。

(3) 實驗過程：

a. 以圓形墊圈遮掩雷射光於不同位置，影像記錄於底片上。

(4) 實驗結果：（如圖二）



圖二：雷射光因為圓形墊圈遮掩而產生的繞射情形

(5)實驗分析：

- a. 雷射光被遮掩後在底片上留下明暗相間的條紋。
- b. 遮掩物移動時明暗條紋亦隨之移動。
- c. 遮掩部份越多時，明暗條紋越明顯，食既與生光時最顯著。
- d. 上述現象與牛頓雜誌描述吻合。
- e. 如果影帶現象是邊緣繞射，則影響影帶的變因有哪些？

(二)探討影響明暗影帶的變因：

1. 變因探討：

(1)由單狹縫繞射的理論得知，其繞射條紋（亮紋）間の間隔公式如下：

$$\Delta y = r \lambda / d$$

其中

Δy 為繞射條紋中亮紋至亮紋的距離或暗紋至暗紋的距離。

r 為狹縫至光屏間的距離， λ 為光源的波長， d 為狹縫的寬度。

(2)邊緣繞射的情形和單狹縫繞射相似，有差異的是：其繞射條紋間的寬度並非是等距的，而是逐漸的縮短。

(3)日食現象發生時，被遮掩的太陽並不是點光源，而是一盤面。其繞射條紋的亮紋與暗紋的強度比應該會有所不同。因此我們在模擬實驗中將探討光源視直徑的比，比較其強度比值以求得一數學關係。

(4)由於光源非點光源，因此光源被遮掩面積大小也會影響繞射條紋。

(5)由以上的討論，我們知道影響繞射條紋的變因有：

- a. 光源的波長。
- b. 遮掩物至光屏的距離。
- c. 光源被遮掩的面積。
- d. 光源與遮掩物的視直徑（大小）。

(6)其中除了光源波長部分因受限於只有氦氖雷射而無法討論，其餘的變因中，以控制變因法來操作模擬實驗。

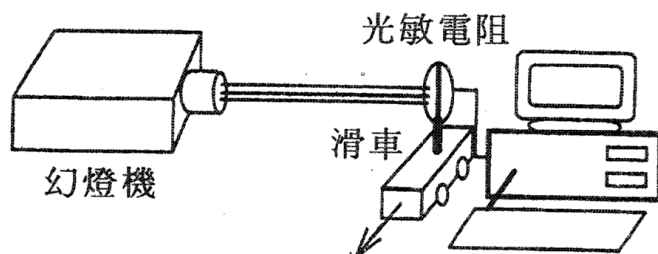
2. 實驗設計：

(1)數據讀取：

- a. 將圖一所拍得的底片裝上片夾，以幻燈機投影，繞射條紋可成一定比例放大。
- b. 將一滑車軌道架於成像處，滑車上架設一個光敏電阻，並以黑膠帶貼成感光隙縫，以測量繞射條紋像的照度。
- c. 以小馬達帶動滑車等速運動。利用光電計時器測量滑車速度。

- d. 將光敏電阻取代電腦遊戲搖桿的可變電阻，以連接電腦遊戲界面，再以程式等時距讀取搖桿值，此值隨照度而變，由此可得繞射條紋的照度與位置關係。電腦並同時記錄數據。
- e. 利用程式測量繞射條紋亮暗紋的間隔，並統計歸納變因的數學關係。

(2) 實驗裝置圖 (圖三)

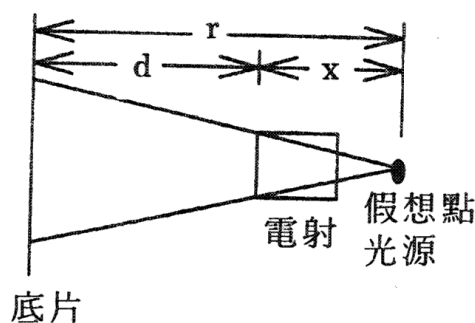


圖三：光敏電阻等速移動，記錄繞射條紋位置與照度的關係。

(3) 前置實驗：建立搖桿值與照度對照表

- a. 如圖四，假設光源為一點光源，由雷射光成像面積與位置的關係外插求出點光源的位置，距雷射光口 x ；再依光直進原理求出理論照度 $I = k/(r^2)$ ，

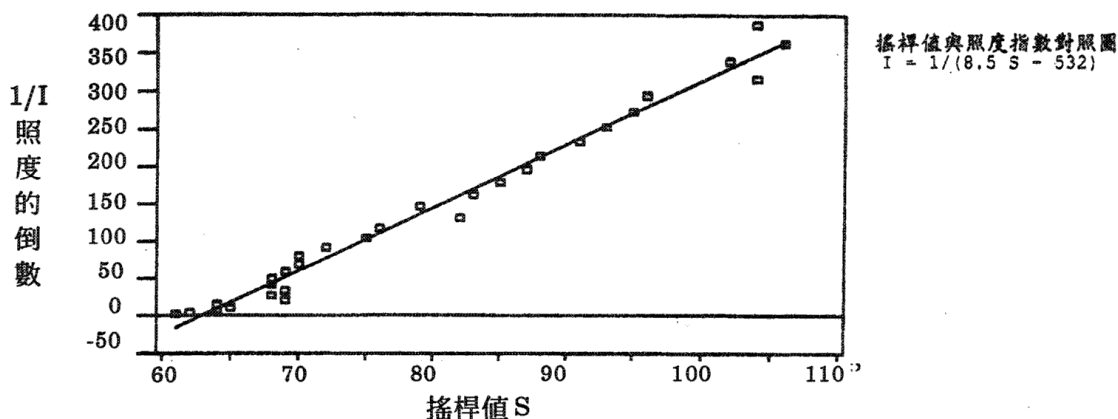
其中 k 為常數， r 為距假想點光源的距離， $r = d + x$ ， d 為相機距雷射光口的距離。



圖四：底片上的照度與 r^2 成反比

- b. 以相機曝光，沖出底片後裝上幻裝片夾，再由幻燈機投影至固定距離，以光敏電阻讀出搖桿值。
- c. 結果：

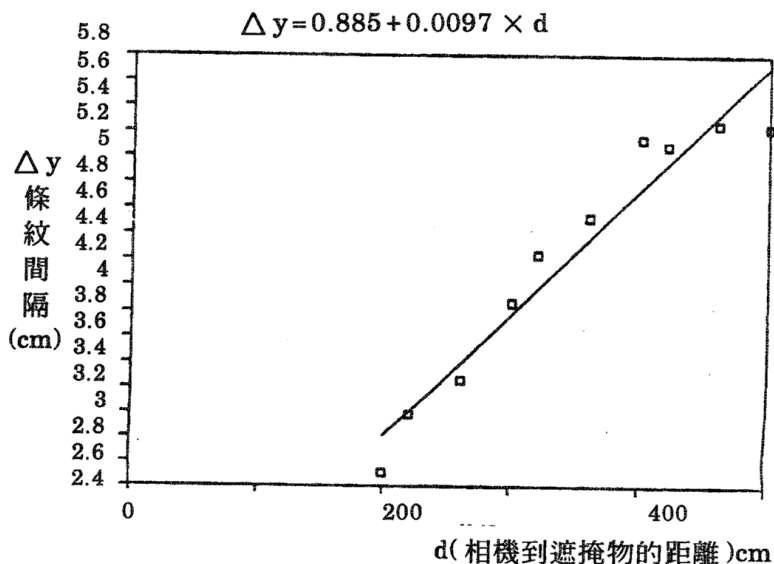
搖桿值對照度的關係函數為 $I = 1/(8.5S - 532)$ ，關係圖如圖五：



圖五：搖桿值與照度指數對照圖 $I = 1/(8.5 S - 532)$

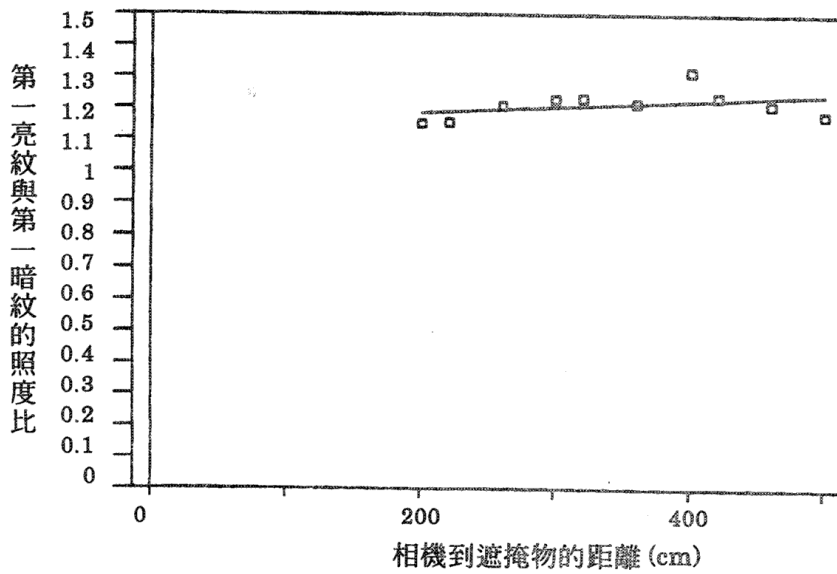
(4)實驗一：改變相機到遮掩物的距離

- 波長 $\lambda = 7500$ 埃，光源直徑 = 0.3350cm，固定遮掩物遮掩雷射光面積。
- 將相機放置於十五個不同的位置上，其間距為 20cm，分別將不同遮掩面積的繞射條紋拍攝下來。
- 相機至遮掩物距離 d 不同時的第一、二亮紋間隔 Δy_b 關係圖如圖六：



圖六：相機到遮掩物的距離對繞射條紋間距的影響

距離 d 與第一亮紋對第一暗紋的照度比的關係圖如圖七。



圖七：亮暗紋照度比與相機到遮掩物距離的關係

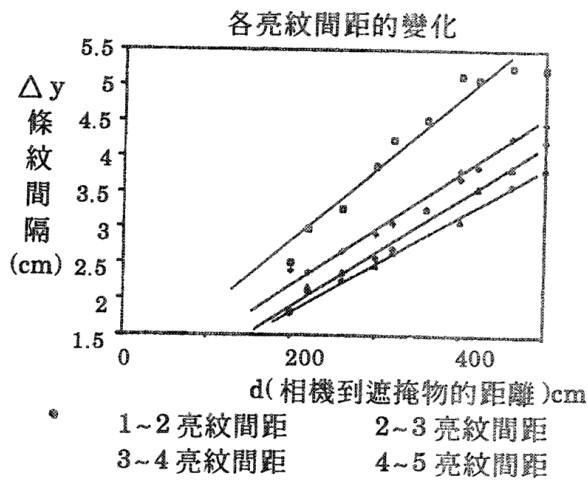
d. 分析：

(a) 由上述可知，距離愈大，繞射條紋間隔也會變大，而且呈線性關係。

關係式為

$$\Delta y = k_1 + k_2 d, \text{ 其中 } k_1, k_2 \text{ 為常數。}$$

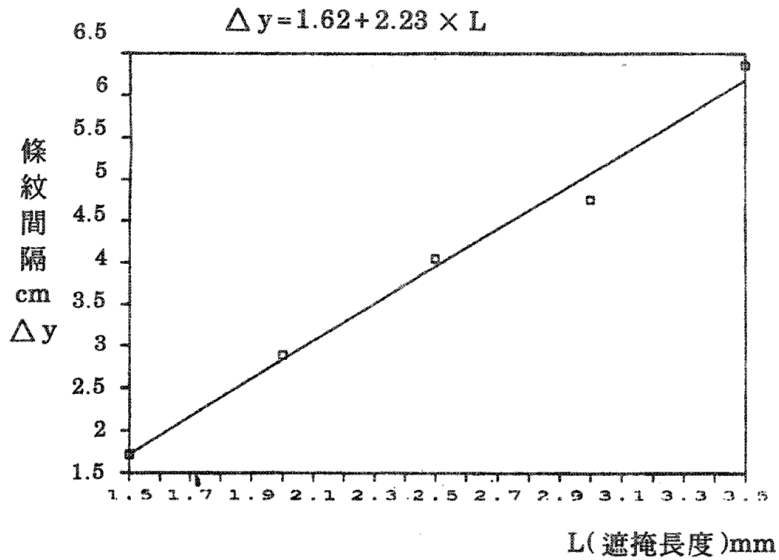
(b) 再針對其他亮紋間隔探討，發現亮紋間距越來越小。



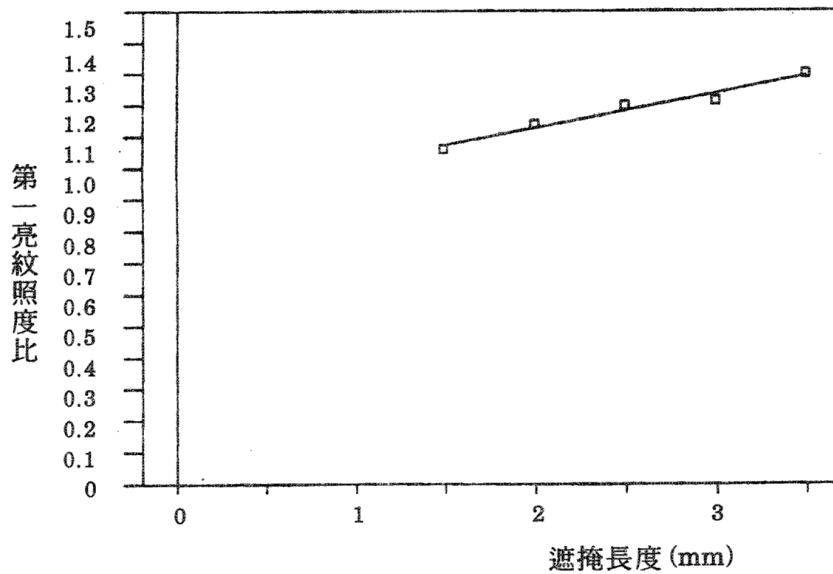
圖八：各亮紋間距的變化

(5)實驗二：改變遮掩雷射光面積

- a. 波長 $\lambda = 7500$ 埃，光源直徑 $= 0.3350\text{cm}$ ，固定遮掩物到相機距離。
- b. 將遮掩物固定於游標尺上，旋轉游標尺，改變遮掩物遮掩光源面積的大小。
- c. 結果：
不同的遮掩面積影響繞射條紋情形如圖九：
對照度比的影響如圖十。



圖九：遮掩物深度對繞射條紋間距的影響



圖十：亮暗紋照度比與遮掩長度的關係

d. 分析：

由上述可知遮掩光源的比例愈大，繞射條紋間隔愈大，照度比增大。

(6) 實驗三：改變遮掩物到光源的距離（間接改變光源與遮掩物視直徑比）

a. 波長 $\lambda = 7500$ 埃 被掩面積 = 光源直徑^{1/2}。

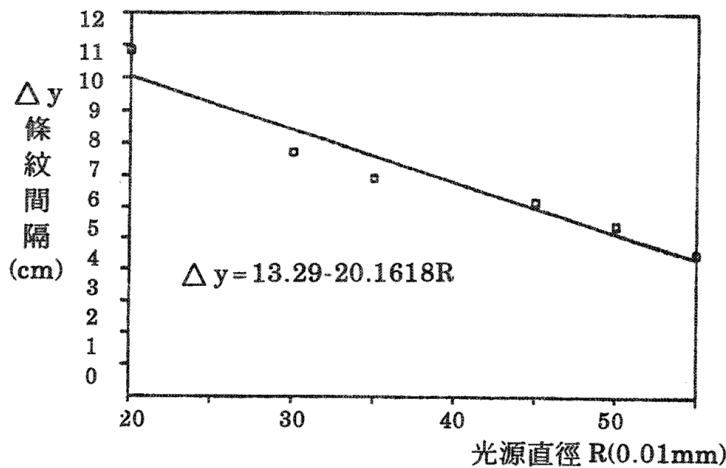
b. 因雷射為微發散的光源，故改變遮掩物到雷射光機的距離即可改變光源的照射直徑，亦即改變光源與遮掩物視直徑的比。

c. 結果：

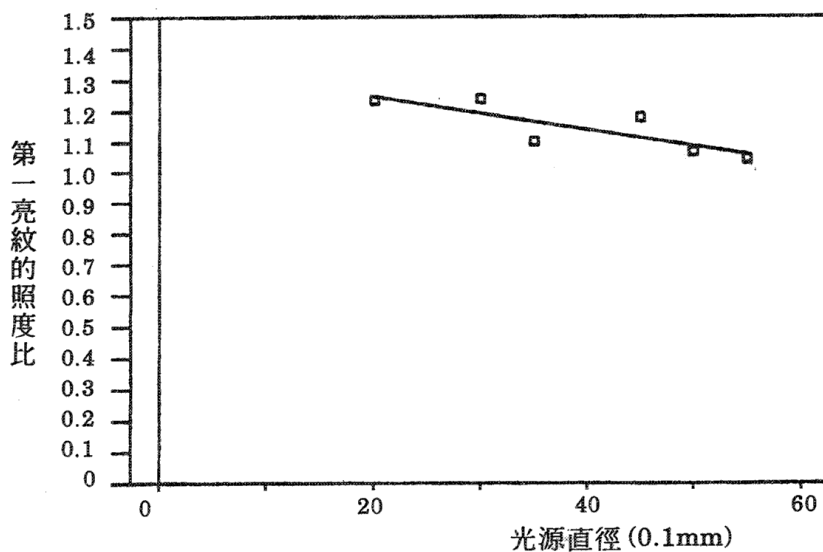
不同的光源直徑影響繞射條紋情形如圖十一，對照度比的影響如圖十二。

d. 分析：

視直徑比越接近時，條紋間隔愈大，照度比愈大，亦即愈明顯。



圖十一：光源直徑比對繞射條紋間距的影響



圖十二：亮暗紋照度比與光源直徑的關係

(五)歷年來日全食時，日月視半徑統計表：（如表 5-5-1）

表 5-5-1：歷年日全（環）食，日月視半徑統計表。

年	月	日	食	太陽視半徑	月球視半後	備 註
1990	1	27	環	16'14.53"	15'37.79"	
1990	7	22	全	15'44.50"	16'11.37"	
1991	1	15	環	16'15.51"	14'53.13"	
1991	7	11	全	15'43.94"	16'42.16"	
1992	1	5	環	16'15.90"	14'43.64"	
1992	6	30	環	15'43.86"	16'28.95"	
1994	5	10	環	15'50.22"	14'44.09"	
1994	11	3	全	16' 7.43"	16'43.08"	有影帶報告
1995	10	24	全	16' 4.68"	16'10.13"	

1. 分析：

- a. 1994 年 1 月 3 日之日全食時，太陽與月球之視半徑相當，有影帶現象的報告。
- b. 其餘除 1995 年 10 月 24 日外，視半徑相差較大，依據前面的討論知，影帶不明顯，實際亦無影帶報告。
- c. 在 1995 年 10 月 24 日之日全食，查得類似報告。

五、理論推論

實驗雖告一段落，我們仍然在思索「影帶」的問題：

1. 就我們查到的資料，中國古代的天文記錄未發現有關影帶現象的記載；而牛頓雜誌的報導中提到此現象的只有一篇。
2. 同樣是牛頓雜誌對 1994 年 11 月 3 日南美日全食的二篇報導中，只有一篇提到此種現象。

我們不得不懷疑目測影帶現象是否不是那麼容易？不像鑽石環、貝里珠、日冕那麼必然！可惜的是：我們無福前往日全食的現場進行觀測，因此我們僅能就所蒐集的資料再進行理論探討，希望能解開心中的疑惑。

當日月第二次接觸前短瞬間，若日月視半徑相當，則太陽可視為一個弧線光源，因此我們將以線光源模式計算出繞射條紋間距，並算出條紋掃掠的頻率。

- (一)地面所見繞射條紋的間距：（理論推導部分省略）
- (二)地面上月球本影移動速率：（理論推導部分省略）
- (三)地面上月球本影的半徑：（理論推導部分省略）
- (四)地面上影帶掃掠的頻率

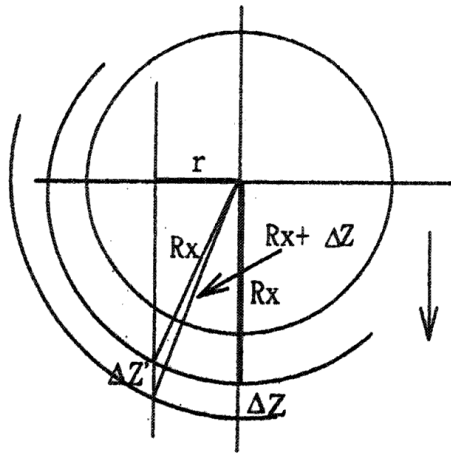
箭頭表示地面上月球本影前進的方向， r 為觀測點到本影中心路徑的距離，則在本影前進路線上測得的繞射條紋間距

$$\Delta z' = \sqrt{(R_x + \Delta z)^2 - r^2} - \sqrt{R_x^2 - r^2}$$

地面上影帶掃掠的頻率

$$f = V / \Delta z'$$

即觀測點離本影中心路徑越遠，掃掠頻率越低；緯度越高，頻率也越低。又因為越近本影時，繞射條紋間距越大，所以掃掠頻率越低。

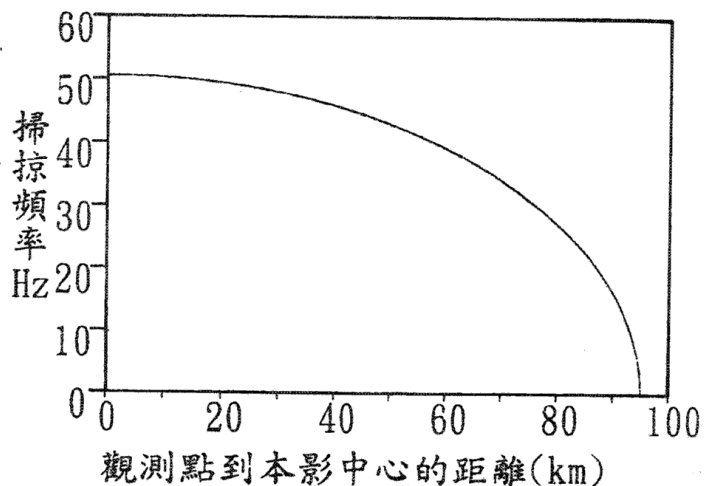


圖十三

(五) 1994 年 11 月 3 日日全食觀測報告

下表為依據上述推導計算所得 1994 年 11 月 3 日日全食資料：

θ_s	16' 7.43"
θ_m	16' 43.08"
b	3.778×10^8 m
Rx	95km
DZ ₁	11.5
DZ' _{max}	1478.21 m
DZ' _{min}	11.5m
V	570.76m/s
f _{max}	49.63 Hz
f _{min}	0.38 Hz



圖十四：1994年11月3日
影帶掃掠頻率對位置關係

由表可知，在本影中心線上的影帶掃掠頻率很高，肉眼無法觀測，但在本影邊緣地區掃掠頻率已降低至可觀測的範圍。

難道牛頓雜誌的兩篇報導，正是因為位置的關係？

圖 27.28 為 NASA 公佈在網際網路的資料，Putre 在本影中心路徑上，此地的報導未提到影帶現象；Asuncian 在本影邊緣，正是報導影帶現象的地方。

六、結 論

1. 日全食時產生的繞射圖形，地面上的觀測者看到的是：明暗條紋掃過地面，此種現象與掩星時星光的繞射類似，依據計算，條紋間距約 11 米。
2. 實驗中發現，遮掩物離觀測者愈遠，繞射條紋愈寬，但會使亮度變小，遮掩物到觀測者愈近，條紋間隔變小；條紋間隔與遮掩物到觀測者的距離成線性關係。由於實驗室中的遮掩物相對於觀測者靜止，條紋不致於掃動，觀測不至於困難。但實際日食現象，月亮相對於地球上的觀測者作快速運動，繞射條紋掃過地球的速度很快。
3. 太陽視半徑比月球大，繞射條紋間隔及亮度比較不明顯；被遮掩的面積比例愈大，繞射效果愈強，被遮掩愈少，亮紋間距越小，兩者呈線性關係。
4. 綜合上述，影帶現象是陽光通過月球邊緣的繞射現象，在食既及生光時，繞射條紋明暗對比最強，間距最大，日月視半徑相當時，影帶現象最明顯。

5. 肉眼觀測影帶現象受限於視覺暫留的 0.1 秒，因此影帶掃掠頻率影響觀測。愈近本影中心掃掠頻率愈高，使得肉眼無法觀測，愈近本影邊緣，掃掠頻率降低至肉眼可辨識的範圍。
6. 我們查閱了許多資料，影帶現象鮮少提及，也沒有深入的探討，畢竟它不如天上的鑽石環、貝里珠、日冕那麼耀眼，何況也不是每次日全食整個本影區掃過的區域均可以肉眼輕易觀察，根據上述的討論，我們發現：
 - (1) 日月視半徑越接近越容易觀測；
 - (2) 越近本影帶邊緣越容易觀測；
 - (3) 緯度越高越容易觀測。
7. 雖然肉眼不易觀察，但是光電器材可以記錄快速的明暗變化，我們在本實驗中所使用的簡單裝置即可記錄到日光燈 120Hz 的閃爍，所以也可以作為影帶現象的簡易觀測裝置。

七、參考資料

1. 陳培 (1995)，〔智利日全〕〔食牛頓雜誌〕 1995 年 10 月份 (149 期)。
2. 日江井榮二郎 (1995) 南美日全蝕 牛頓雜誌 1995 年 10 月份 (149 期)。
3. 古慶順等 (1995) 掩星 高雄市 35 年屆中小學科展優勝作品。
4. 陳文屏 (1994) 月掩星的觀測與應用 天文通訊 圓山天文台 (pp7 ~ pp12)。
5. 傅學海 (1994) 月掩星 科學月刊 24 卷第三期 pp190 ~ pp196。
6. 天文年鑑 (1991 ~ 1996) 台北市立天文台員工消費合作社。

評語

用實驗方法產生光的繞射現象，並能數位化測量繞射的條紋，應用繞射原理及日食的資料探討日全食前的明暗影帶現象，頗有發展潛力。