

水星與金星凌日時的黑滴現象理論模擬

林省文

國立中央大學天文研究所

摘要

黑滴現象 (Black drop effect) 是當水星或金星凌日時發生的現象，使得行星的黑影與太陽邊緣不易區分而造成測量內行星凌日時間的誤差。我們用光學的方式計算黑滴現象，發現黑滴現象主要成因是觀測儀器的點瀾散函數 (PSF) 造成，其他的因素包括太陽的邊緣變暗，只是增強了黑滴現象的效果。所以黑滴現象是一個光學現象，取決於觀測儀器的鑑別率，鑑別率差，或者說 PSF 的標準差小則黑滴現象不明顯，反之容易觀察到黑滴現象。由於所有儀器都無法避免黑滴現象，所以我們在觀測時應該注意黑滴現象可能造成的影響。

A Theoretical Simulation of Black Drop Effect: Transit of Mercury and Venus

Lin Hsing-Wen

Institute of Astronomy, National Central University

Abstract

Black drop effect is a phenomenon which happens at the transit of Mercury or Venus. It makes us difficult to resolute the shadow of inner planet and solar limb, so we can't measure the duration time of the transit exactly. An optical theoretical simulation is applied to calculate the black drop effect, and we discover the major cause of black drop effect is Point-spread function (PSF) of the telescope. The other factors that may affect the black drop phenomenon, including solar limb darkening, enhance the effect. Now, we know that the black drop effect is an optical effect, which depends on the resolution of the telescopes. If the telescope has high resolution, in other words the PSF of the telescope is sharp, the black drop effect would be unobvious. Otherwise, the black drop would be notable. Because all of the telescopes can not avoid the black drop effect, we must pay attention to its influence on observations.

關鍵字 (Key words): 黑滴現象 (Black drop effect)、點瀾散函數 (PSF, point-spread function)、金星凌日 (transit of Venus)、食既 (Contact II)、生光 (Contact III)、太陽邊緣變暗 (Solar limb darkening)

1 前言

當水星或金星通過太陽表面，我們稱之為凌日，那我們觀測太陽就會發現一個行星遮擋陽光照成的黑影，如圖一。

1716年，著名天文學家Edmond Halley建議在不同的兩地觀測金星凌日，並準確的測量凌日的時間，這樣可以算出金星與地球間的距離。然而在各地觀測1761年金星凌日的探險家們卻回報觀測到了黑滴現象（black drop effect），如圖二（Pasachoff et al. 2004）。

黑滴現象是指在金星或水星凌日時的食既（Contact II）、生光（Contact III）兩個時期，水星或金星的黑影與太陽邊緣會產生一條黑橋連接起來，使水星或金星的黑影變形成類似水滴狀，而凌日的時間就沒辦法準確的測量，如圖三。

黑滴現象的成因眾說紛紜。目前廣為流傳的說法有地球大氣的擾動、凌日行星的大氣影響以及望遠鏡鑑別度造成。其中地球大氣的擾動與凌日行星的大氣影響已經被否定，因為美國太空總署 TRACE（Transition Region and Coronal Explorer）計畫的太空船拍攝到凌日時的黑滴現象（圖四），而且水星沒有顯著的大氣，但是水星凌日時也觀察到黑滴現象（Schneider et al. 2001）。

目前認為黑滴現象的成因為望遠鏡點瀰散函數（PSF, point-spread function）的影響加上太陽邊緣變暗所形成（Schneider et al. 2004）。

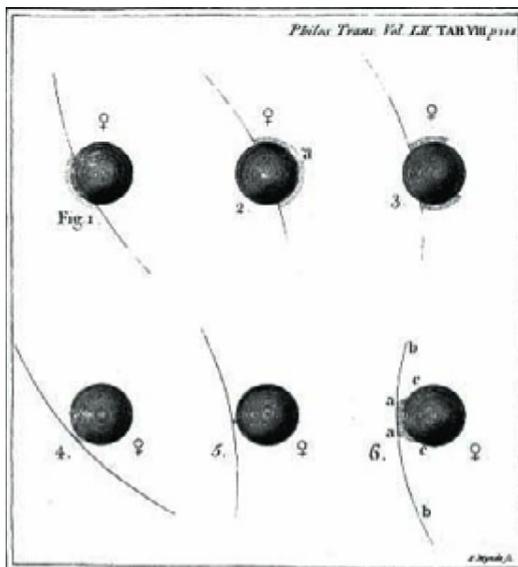
本研究的目的是希望以理論計算來模擬黑滴現象，以進一步了解黑滴現象的主要成因。

2 方法

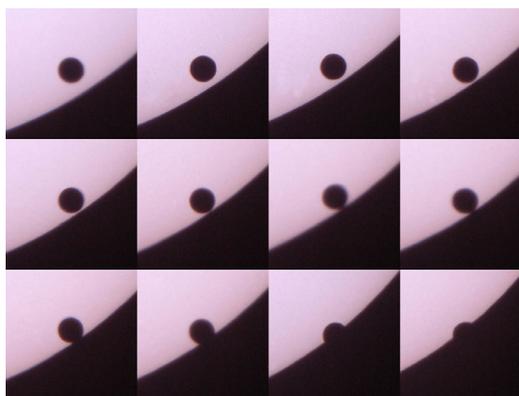
當我們觀測一個點光源，例如遙遠的恆星，經過望遠鏡或是相機鏡頭的聚焦，理論上我們預期會得到一個無限小的亮點。實際上這



圖一：2003 Mercury transit by SOHO



圖二：T. Bergman 觀測 1761 年金星凌日描繪的黑滴現象 (1761) ©Royal Society

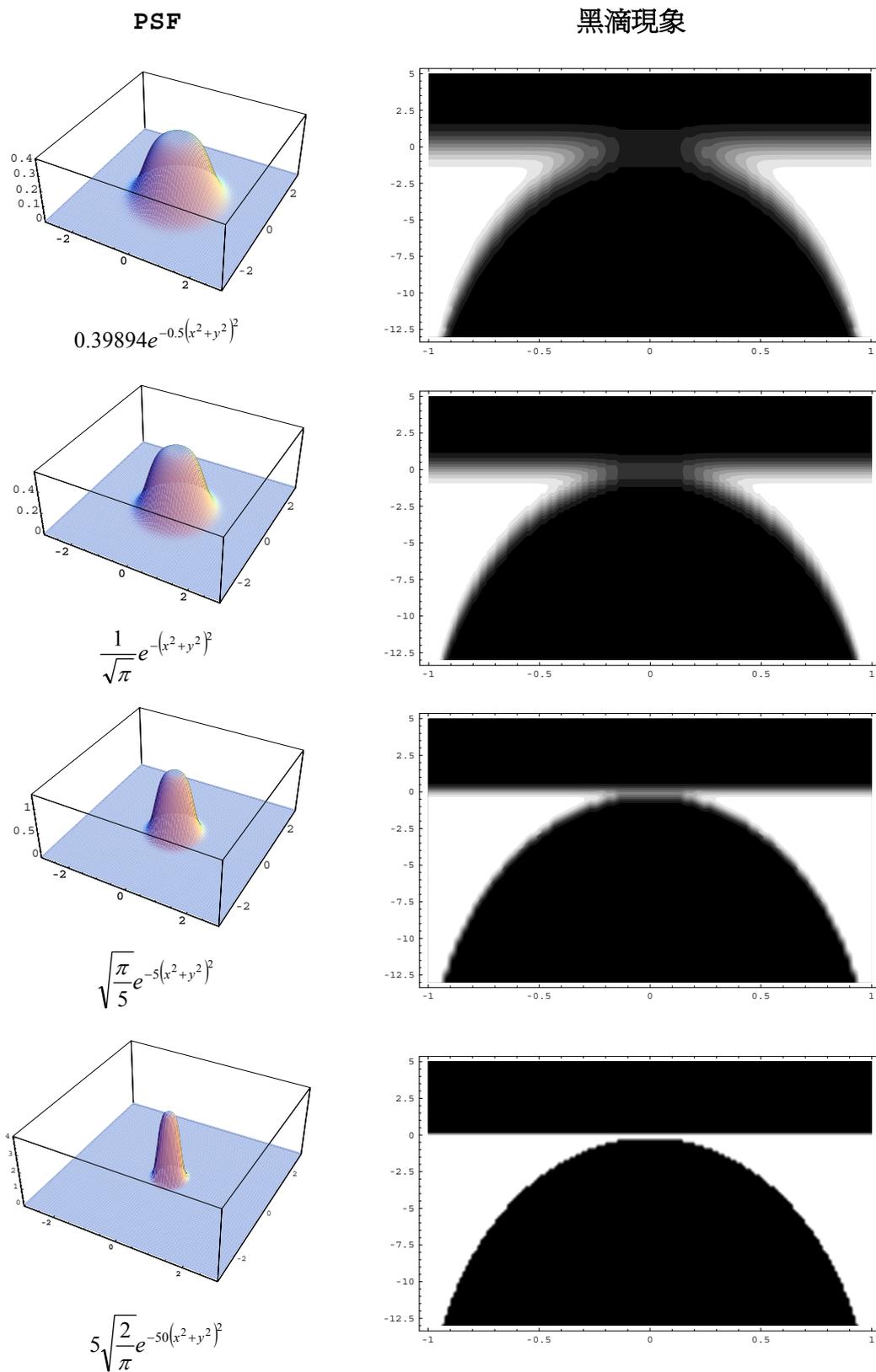


圖三：2004 Venus transit by Elio Daniele, Gruppo Astrofili O.R.S.A. Apochrom. refractor Tele Vue NP101, 550mm - f/5.4 with AstroSolar filter, Nikon D100 Camera, June 8, 2004, Palermo, Italy



圖四：1999 Mercury transit by TRACE “White Light” band, Nov 15, 1999.

不可能，因為光學條件不完美，包括透鏡的像差、反光鏡不是完美的拋物線、望遠鏡鏡架產生的繞射等等因素，我們會觀測到一個小圓盤，這個小圓盤的光度分布就是這個望遠鏡或照相機的point-spread function。



圖五：不同鑑別率對黑滴現象的影響，左邊是 PSF 的函數圖形，Z 軸代表 Intensity，右邊是模擬出來的黑滴現象，其 Y 軸 0 點代表太陽的邊緣。黑滴現象隨著 PSF 的標準差減小而變的不明顯。

所以PSF代表了望遠鏡或鏡頭鑑別率的好壞。如果一台望遠鏡的PSF標準差很大，那鄰近的兩個點光源經過聚焦產生的光點很可能就會有部分重疊，而分不清楚這兩個點光源實際的距離。如果另一台望遠鏡的PSF標準差很小，那他就能分辨距離比較近的點光源，也就有較高的鑑別率。

所以計算黑滴現象的方法很簡單，我們把太陽想像成非常多點光源組成的圓盤，在太陽光球層以外以及被凌日行星遮擋的地方就沒有點光源，望遠鏡或照相機的成像把這些點光源都按照光該走的路徑在底片或CCD或視網膜上排好。

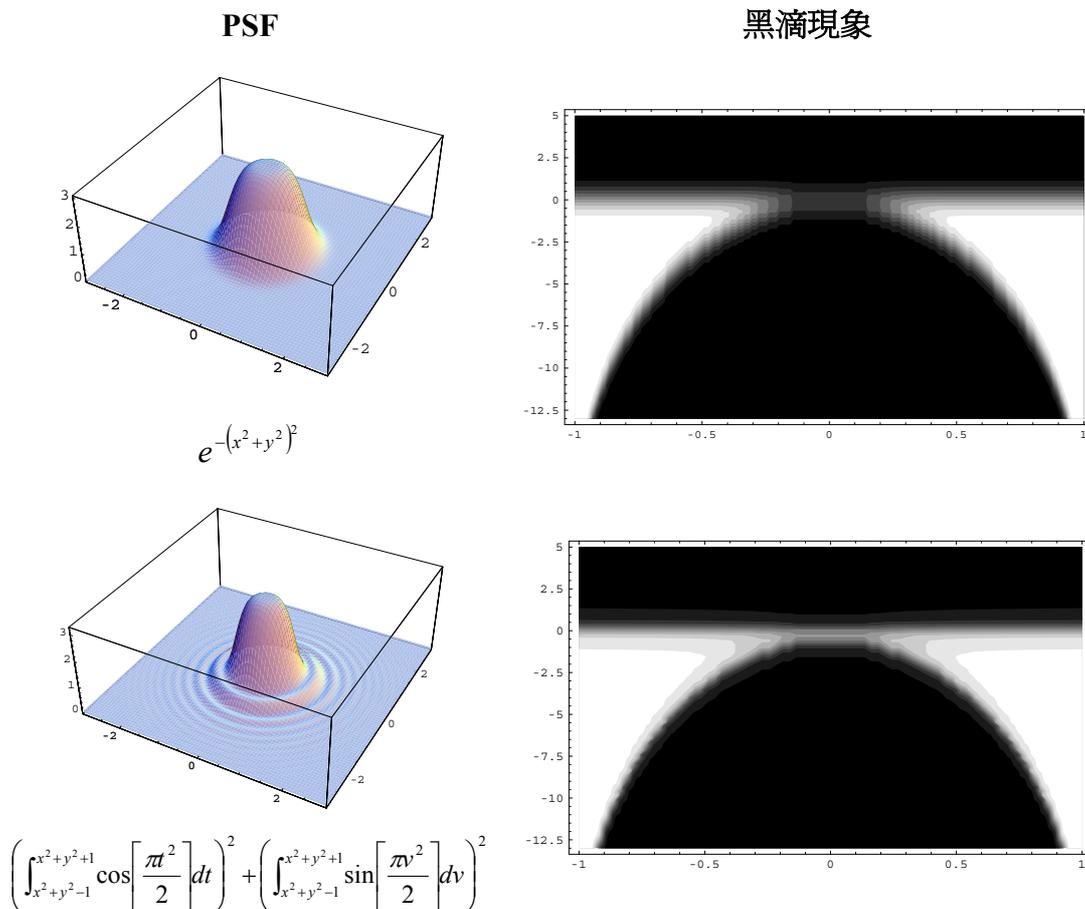
由於每個點光源經過望遠鏡或照相機都會

因為PSF而擴散，所以望遠鏡成的像不是由很多點構成，而是很多小圓盤組成。我們假設沒有任何的大氣影響，PSF是個完美的高斯分佈。以下還會討論其他不同PSF的影響。

3 結果

3.1 不同鑑別率與黑滴現象

我們使用四個不同標準差的高斯函數模擬鑑別率好與鑑別率差的望遠鏡。這些望遠鏡都有一樣的口徑，也就是對於相同的光源會接收到一樣多的光子，數學上就是這些高斯函數都歸一化（normalize）過了。很清楚的，使用我們的計算方法出現黑滴現象，而且鑑別率越差的望遠鏡產生的黑滴現象越明顯，如圖五。



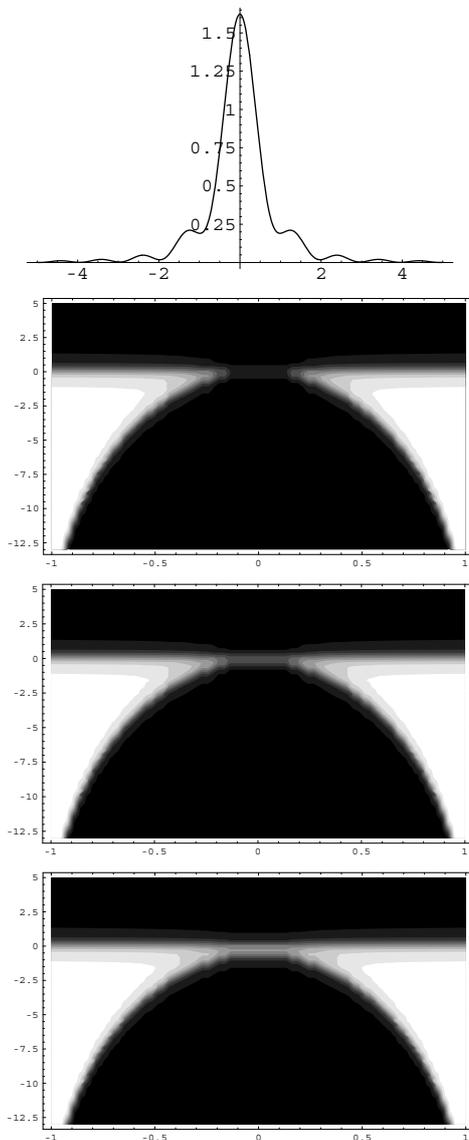
圖六：不同 PSF 對黑滴現象的影響。雖然亮度分布的不太一樣，但是不影響黑滴現象的產生。

3.2 不同 PSF 對於黑滴現象的影響

我們可以推論，如果函數是個 Dirac Delta function，那將不會有黑滴現象。不同 PSF 對於黑滴現象的影響

由於 PSF 不見得要是高斯分佈，我們拿一個 Fresnel Diffraction 的函數試試看，並與高斯分佈比較。

不同的 PSF 在明暗的分布上會造成一些差別，如圖六，但是對黑滴現象的產生不會有太大的影響。

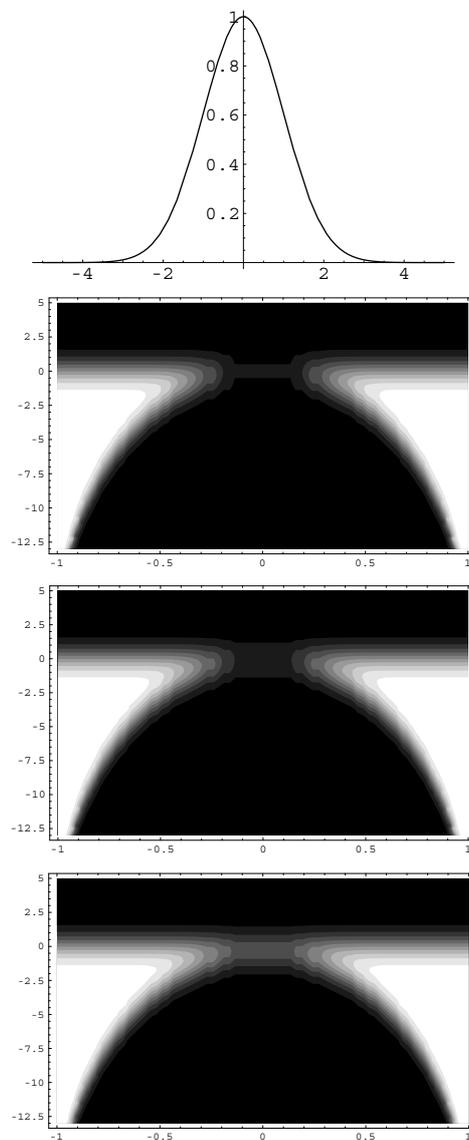


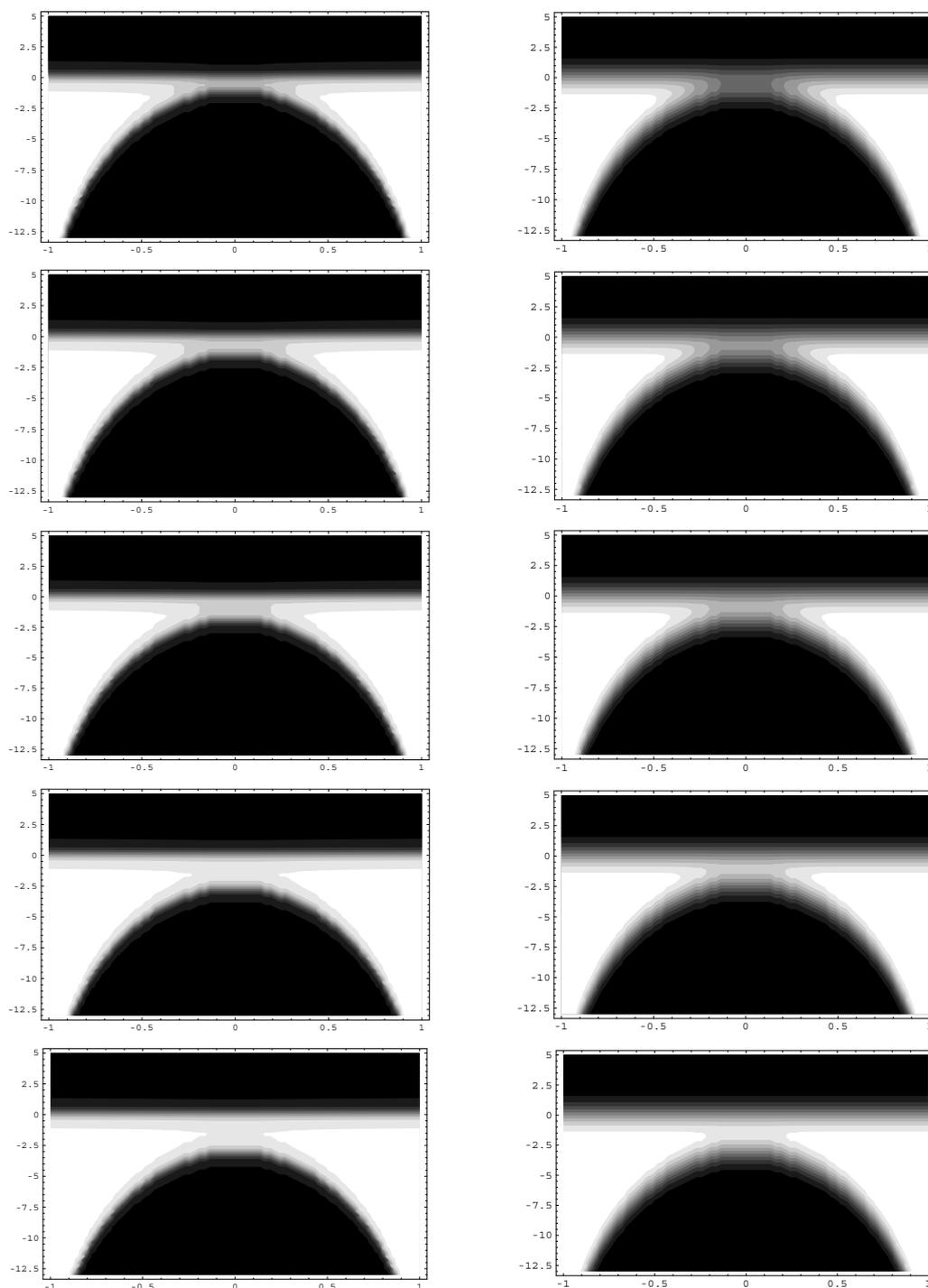
3.3 凌日時的黑滴現象

現在我們來模擬真實的狀況，行星的凌日。我們有興趣的是黑滴現象，所以我們把焦點集中在在食既或生光 (Contact II or Contact III) 附近的變化。

不管是用高斯分佈或是用 Fresnel Diffraction 當作望遠鏡的 PSF，都可以得到與實際觀測凌日時的黑滴現象相似的結果，如圖七。

值得注意的，這個模擬沒有加入太陽邊緣變暗的函數。看起來不需要考慮太陽邊緣變暗就能夠產生黑滴現象。





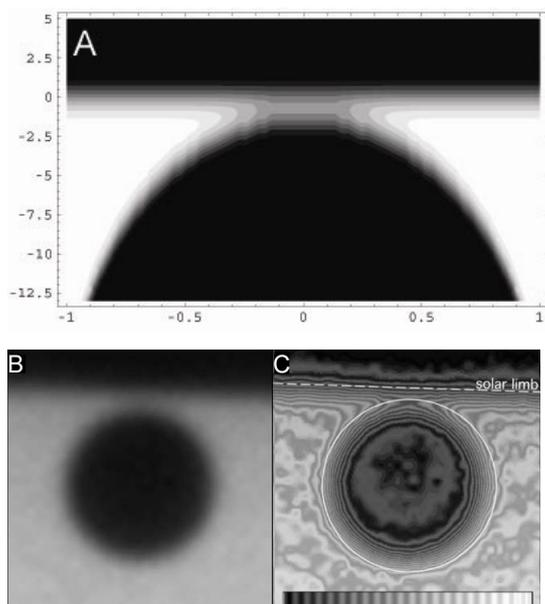
圖七：兩個不同 PSF 產生的黑滴現象，Y 軸 0 點表示太陽邊緣，我們可以發現到隨著距離的增加黑滴現象逐漸消失。

4 討論

4.1 比較

我們來比較計算結果與實際觀測的結果，發現模擬的黑滴現象與實際黑滴現象的等亮度線很相似，如圖八。

所以黑滴現象的主要成因，來自於觀測儀器本身，也就是黑滴現象主要是一個光學的現象，其他的因素，例如太陽邊緣變暗只是加強了黑滴現象。



圖八：計算結果(A)與觀測結果(B,C)的比較，觀測照片由 TRACE 拍攝 (Schneider et al., 2004)，注意等亮度線的分布。

4.2 太陽邊緣變暗的影響

在Schneider et al. (2004) 這篇文章中提到太陽邊緣變暗 (Solar limb darkening) 是黑滴現象的主要成因，然而我們計算的結果發現不需要加入太陽邊緣變暗的函數，就能產生黑滴現象。

但是加入了太陽邊緣變暗的函數，計算結果會跟觀測更接近，且黑滴現象會更明顯，如圖九。

5 結論

黑滴現象主要是一個光學的現象，跟觀測儀器的點瀾散函數有關。如果 PSF 的標準差越大，黑滴現象越明顯，反之越不明顯。其他的因素只要會影響儀器 PSF 的就會影響黑滴現象，包括儀器失焦。

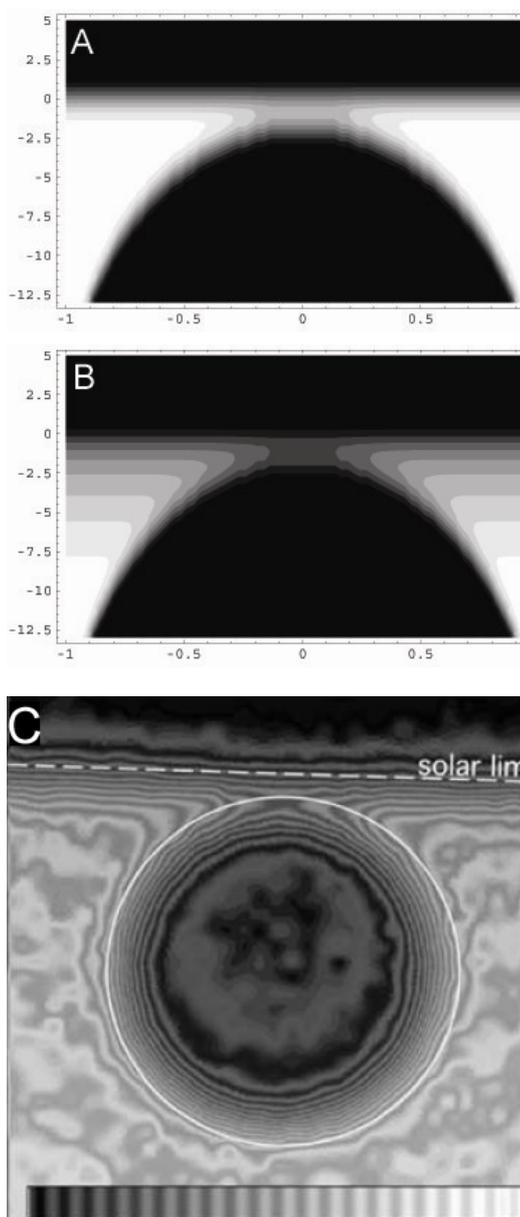
而太陽邊緣變暗並不是黑滴現象的主要成因，所以也不是必要的條件，但是太陽邊緣變暗會加強黑滴現象而更容易被觀察到。

所以不只是凌日現象，很多天文觀測都會

受到黑滴現象的影響，包括掩星的觀測、行星與它的衛星的觀測，甚至是系外行星的觀測。我們應該要注意儀器的鑑別率，避免因黑滴現象造成觀測上的誤差。

誌謝

感謝國立清華大學資工所吳牧恩提供數學計算上的諮詢。



圖九：未加入 limb darkening(A)與加入 limb darkening (B)的比較，(C)為經過等亮度處理的觀測照片 (Schneider et al., 2004)。

參考文獻

- Licchelli, D., 2005, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement*, 6, 17
- Pasachoff, J.M., Schneider, G., Golub, L., 2004, *Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy*, Edited by D.W. Kurtz., Cambridge University Press, p.242-253
- Schneider, G., Pasachoff, J.M., Golub, L., 2001, *Bull. Am. Astron. Soc.*, 33, 1037.
[http://nicmosis.as.arizona.edu:8000/POSTER S/TOM1999.jpg](http://nicmosis.as.arizona.edu:8000/POSTER_S/TOM1999.jpg) , and
<http://www.transitofvenus.info>
- Schneider, G., Pasachoff, J.M., Golub, L., 2004, *Icarus*, 168, 249.