# 第十五章　反射折射式光學系統

## ( Catadioptric Optical System )

反射鏡實質上具有比同焦距的透鏡少的球差。另外，正反射鏡的球差如同負透鏡為正號。因此，有幾個人（例如; Maksutov, 1994; Bouwers, 1950）曾提議以負透鏡來替代凹面鏡。Schmidt（參見 Hodges, 1953）主張將微非面修正器置於球面反射鏡的曲率中心。

在 Cassegrain 系統，需要兩個平面鏡。主平面鏡內有小孔，且較小的第二平面鏡與前端修正器透鏡之一相接觸（或者實際上為部分之一）。由於漸暈，視野通常限制在大約 15°。

電腦程式必須有著如下的特徵。

1. 表面半徑，材質，以及厚度必須能被約束或與另一面設為相等。
2. 從一面到另一面的軸上距離必須能夠被限制。
3. 第二反射鏡上的光束直徑要被限制。
4. 刪除主光線的追蹤。

圖 15-1 顯示一個主要與第二反射鏡相距 T，成像離第二面距離 B 的 Cassegrain 反射鏡系統。假定 T 與 B 的符號為正且 $R_p$ 與 $R_s$ 為負，所以

$$\frac{F - R_P R_S}{2R_P - 2R_S + 4T} = \text{等效焦距長}(EFL)$$

令 H 為第二反射鏡上軸向光線高對於第一面上高的比例。如果物體位在無限遠處，則

$$H = \frac{R_P 2T}{R_P} \text{以及} B = \frac{2R_S T + R_S R_P}{4T - 2R_S + 2R_P} = HF$$

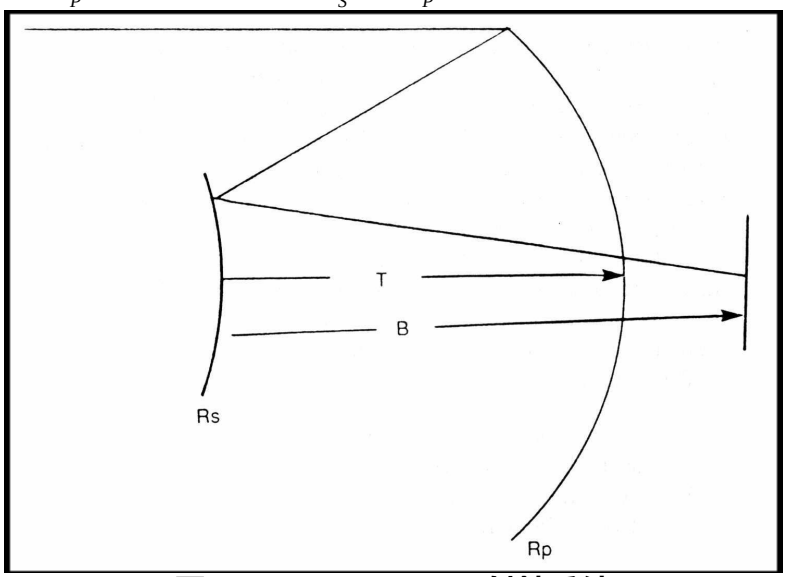



圖 15-1　Cassegrain 反射鏡系統

大部分實用的系統需要 B 至少和 T 一樣大（影像位在主面鏡之外）。同時，第二面的遮蔽必須最小。指定 H 的適當值為 0.3 以焦距（F）為 100，我們得到表 15-1 所到的值。（對於這個表的所有值來說 B 皆為 30）。

如只使用二個反射鏡，則對於平面場而言（Petzval 總和為零），$R_P = R_S = -140$，及 T=49。然而，為了修正其他的像差，必須增加如下例子所示的反射元件。表 15-1 在開始求解時是有用的。

在評估影像時必須考慮遮蔽的較應。績射，遮蔽的結果之一，在損耗中央亮度之下會增加影像外圍部分的能量。這減低了低空間頻率的 MTF 響應以及增加較高空間頻率的響應（Mahajan, 1977）。

圖 15-2 顯示一個焦距 15 吋，$f/3.333$ 覆蓋光譜範圍 3.2~4.2 μm 的透鏡。其具有 3.2° 視野。表 15-2 給出這個透鏡的資料。

| SRF | RADIUS | | THICKNESS | | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | | 1.0000e+20 | | 2.0074e+18 | | AIR | |
| AST | 43.461400 | | 0.380000 | | 2.300000 | A | ZNS | C |
| 2 | 0.000000 | | 4.000000 | | 2.300000 | | AIR | |
| 3 | -9.795200 | | 0.550000 | | 2.080000 | | ZNS | C |
| 4 | -11.908100 | | 0.000000 | | 2.190000 | | REFL_HATCH | |
| 5 | -11.908100 | | -0.550000 | | 2.190000 | | ZNS | C |
| 6 | -9.795200 | | -3.820000 | | 2.080000 | | AIR | |
| 7 | -6.381800 | | 3.979000 | | 0.725000 | | REFL_HATCH | |
| IMS | 0.000000 | | 0.000000 | | 0.307353 | S | | |

表 15-2　Csaaegrain 透鏡組

第一鏡面到像距為 4.539。畸變為 0.7%（針孔）。入射光瞳與第一鏡面相接觸。（參見附錄 J 程式 MIRROR）。

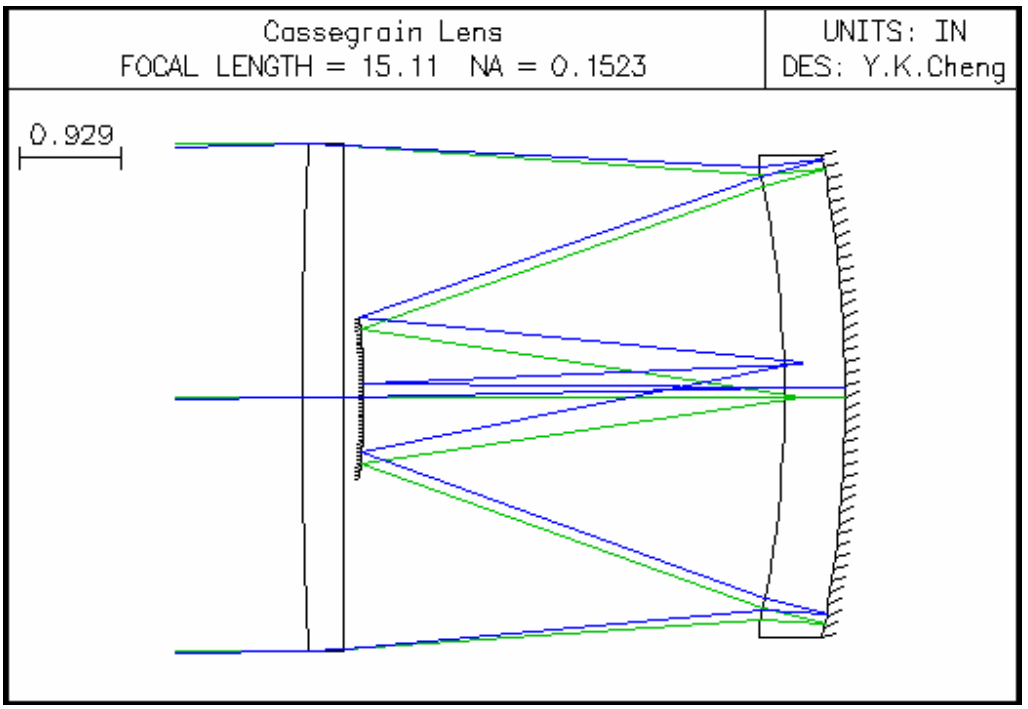
你將注意到在圖 15-2 所示系統，光線可以穿過前端修正器且直接到達影像。為了預防這點發生，需要阻隔。這由一個置於鏡片前方的透鏡擴增管加上位於在第一反射鏡孔渦上如同第二反射鏡防護板的管所達成。

放置阻隔來防上這些不想要的光線是一件複雜的工作。

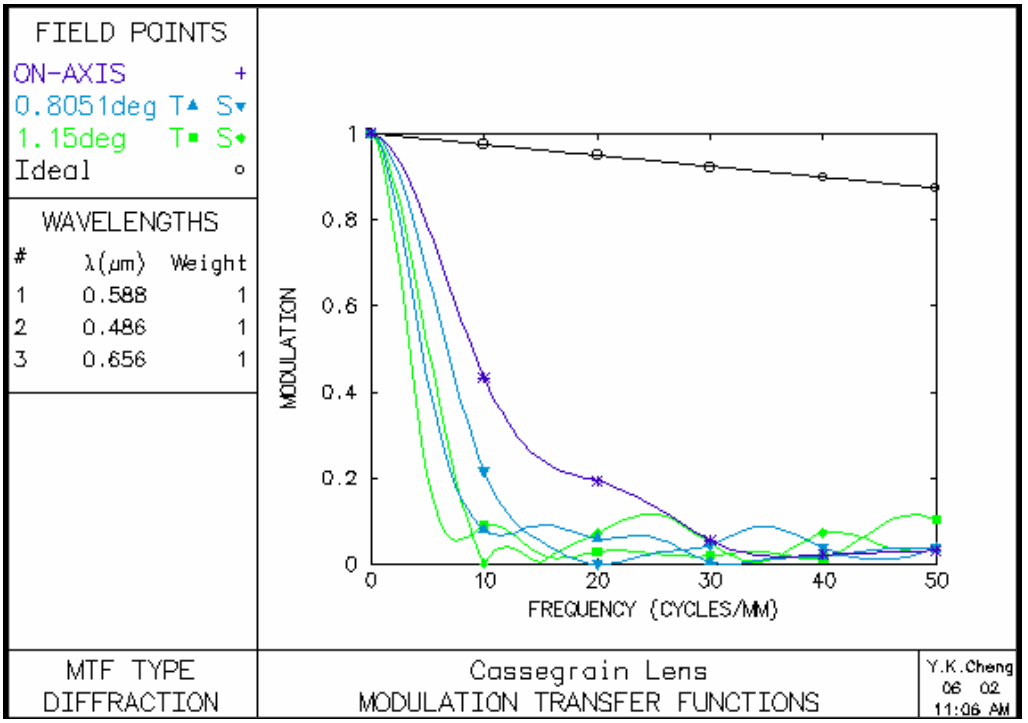
雖然手邊有電腦程式幫助設計者處理這樣特殊的工作，一個簡單的方法為製作大量且僅慎顯示被限制統線的布局。然後追蹤穿過系統時在第一與第二反射面不會反射的光線。從這個布局，可以決定所需要的阻隔。

同時注意到前端透鏡是正的。然而，在作為共軛面的 Mangin 第一鏡面上，折射元件具有負的倍率。

圖 15-3 顯示一個焦距 4 吋，$f/1.57$ 具有可見光範圍 15° 視角的 Cassegrain 透鏡。前端的修正器為常用的負形式。注意到第二反射鏡具有與前端折射面相同的半徑。這是製造上的方便，由於有遮蔽，反射鍍膜首先應用在內部直徑上（與第二反射鏡相符），抗反射鍍膜應用在整個表面，然後鏡面以黑漆加以防護。




(a)




(b)

**圖** 15-2　(a) Csaaegrain **透鏡組**　(b) **系統** MTF

由於其緊密的形式與低 f 數值，這個設計的變異被廣泛的使用在韓戰的夜視裝置上。在波長 0.85 μm 可得到良好的影像。使用影像增感管與目鏡，該裝置搭配萊福槍使士兵在夜晚星光下能執行任務。這個設計的資料給在表 15-3。

| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE RADIUS | GLASS |
|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | 1.0000e+20 | 1.3165e+19 | AIR |
| AST | 0.000000 | -2.056000 | 1.270000 A | AIR |
| 2 | -9.696000 | 0.275000 | 1.375000 | BK7 C |
| 3 | -12.894300 | 1.366000 | 1.425000 | AIR |
| 4 | -6.509500 | -1.366000 | 1.400000 | REFL_HATCH |
| 5 | -12.894300 | -0.275000 | 1.425000 | BK7 C |
| 6 | -9.696000 | 0.275000 | 0.760000 | REFL_HATCH |
| 7 | -12.894300 | 1.366000 | 1.425000 | AIR |
| 8 | -40.575800 | 0.231000 | 0.810000 | SF2 C |
| 9 | 1.470000 | 0.510000 | 0.810000 | LAKN7 C |
| 10 | -3.223500 | 0.119000 | 0.810000 | AIR |
| 11 | 1.251300 | 0.183000 | 0.740000 | SK16 C |
| 12 | 1.682600 | 0.585000 | 0.670000 | AIR |
| IMS | 0.000000 | 0.000000 | 0.532108 S | |

表 15-3　星光夜視鏡

第一鏡面到像距為 3.269。在離軸 7.5 ° 的畸變為 0.6%（針孔）。同時有些許漸暈（入射統瞳的軸上切線分量為 0.85）。相對照度為 0.8。

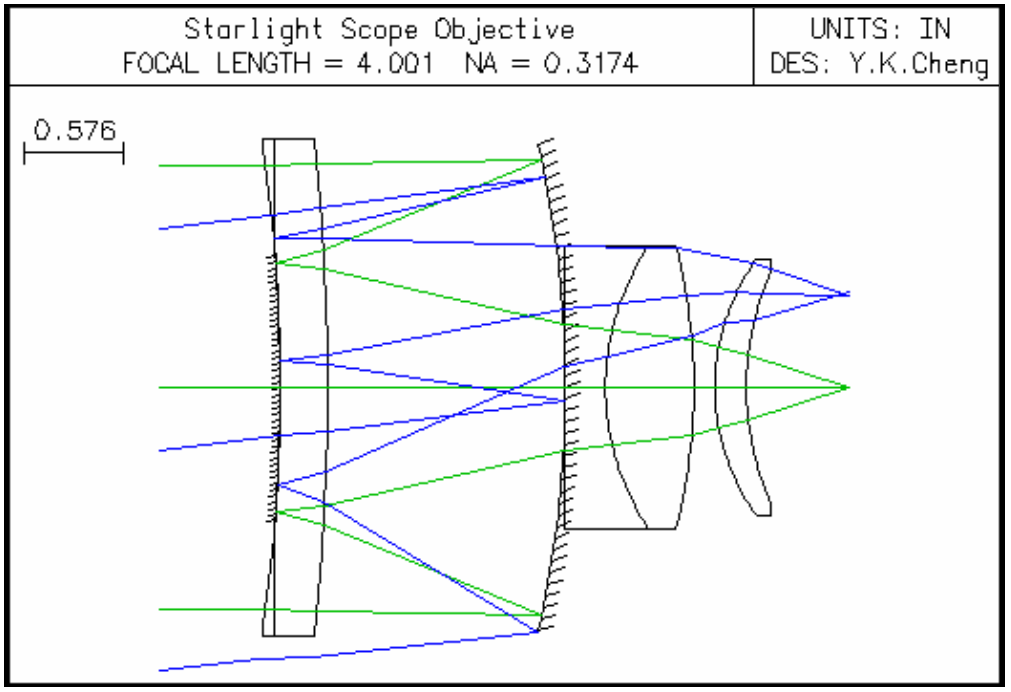
圖 15-4 顯示一個焦距 1000mm，$f/11$ 使用在反射式單透鏡相機（可見光範圍，影像對角長 43mm）的 Cassegrain 鏡組。為了減少其直徑，第二反射鏡設為光柵。畸變少於 0.1%。圖 15-4 的資料給在表 15-4。

| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE RADIUS | GLASS |
|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | 1.0000e+20 | 2.1645e+18 | AIR |
| AST | 0.000000 | -34.217000 | 1.790000 A | AIR |
| 2 | -5.162500 | 0.452000 | 2.625000 | BK7 C |
| 3 | -5.417800 | 8.552000 | 2.640000 | AIR |
| 4 | -22.427400 | -8.159000 | 2.460000 | REFL_HATCH |
| 5 | -9.882800 | 7.942000 | 0.540000 | REFL_HATCH |
| 6 | -4.026100 | 0.139000 | 0.700000 | BK7 C |
| 7 | 21.050000 | 0.018000 | 0.750000 | AIR |
| 8 | 3.380100 | 0.395000 | 0.750000 | SF1 C |
| 9 | 4.096900 | 1.817000 | 0.700000 | AIR |
| IMS | 0.000000 | 0.000000 | 0.851266 S | |

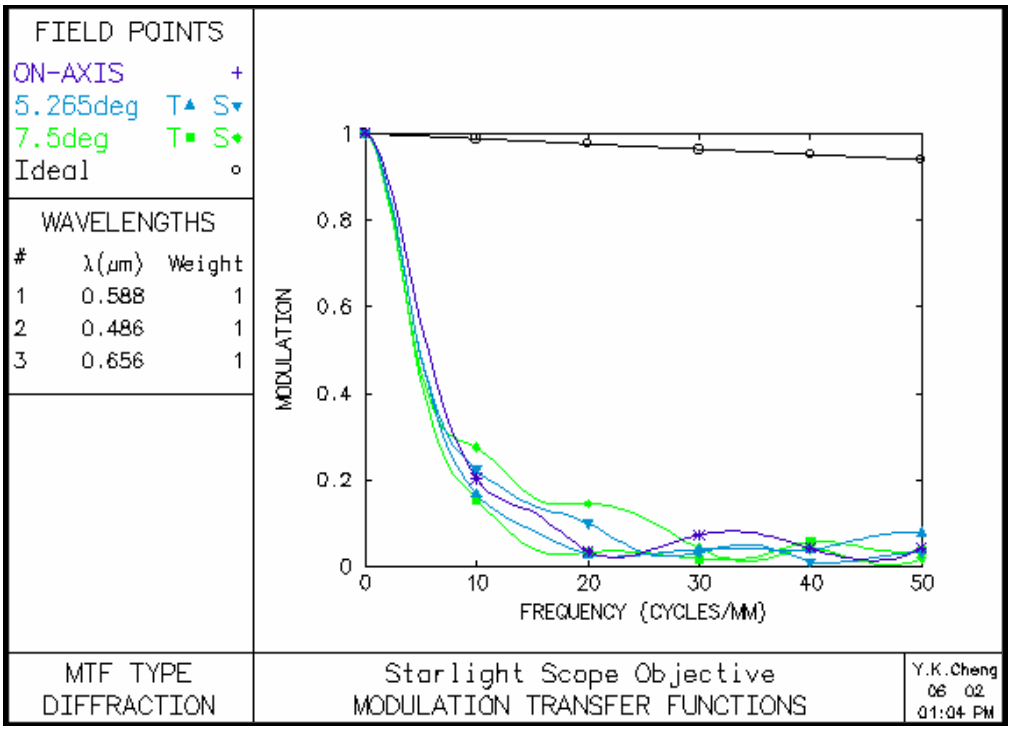
表 15-4　Csaaegrain 照相鏡組

第一鏡面到像距為 11.156。雖然顯示的系統無漸暈，在引進第一面鏡內後端透鏡所需的管狀阻隔後會有小量漸暈的存在。

圖 15-5 顯示一個焦距長 50 吋的 Cassegrain 望遠物鏡。其為 $f/14$ 具有 2 ° 的視角。這是非常容易買到的 SLR 電影術與業餘天文學望遠物鏡的一個修正。資料給在表 15-5。

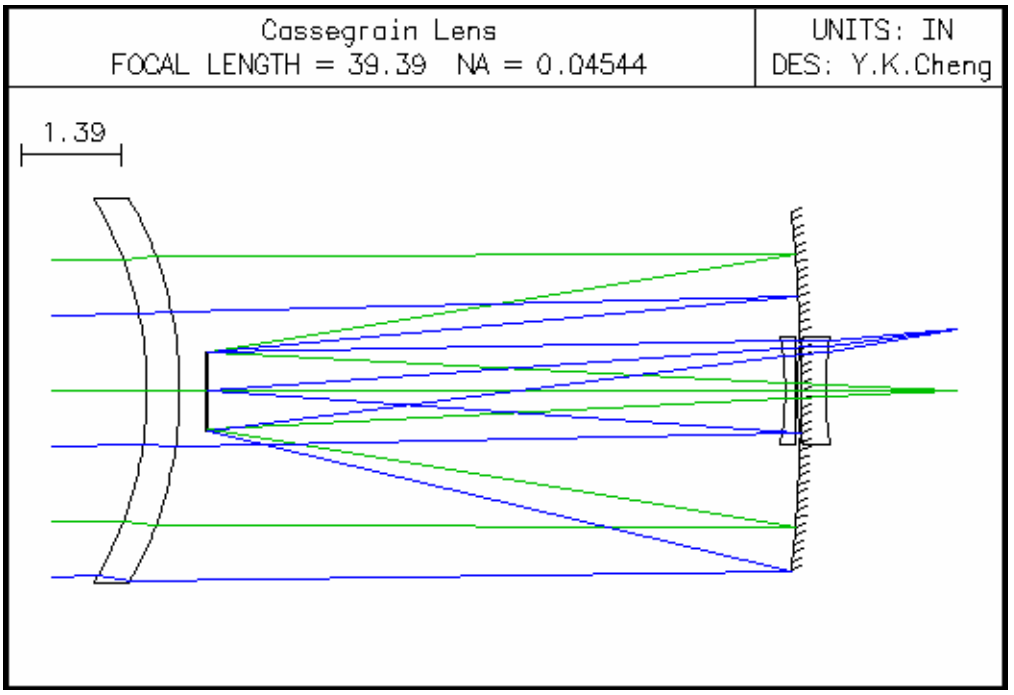



(a)

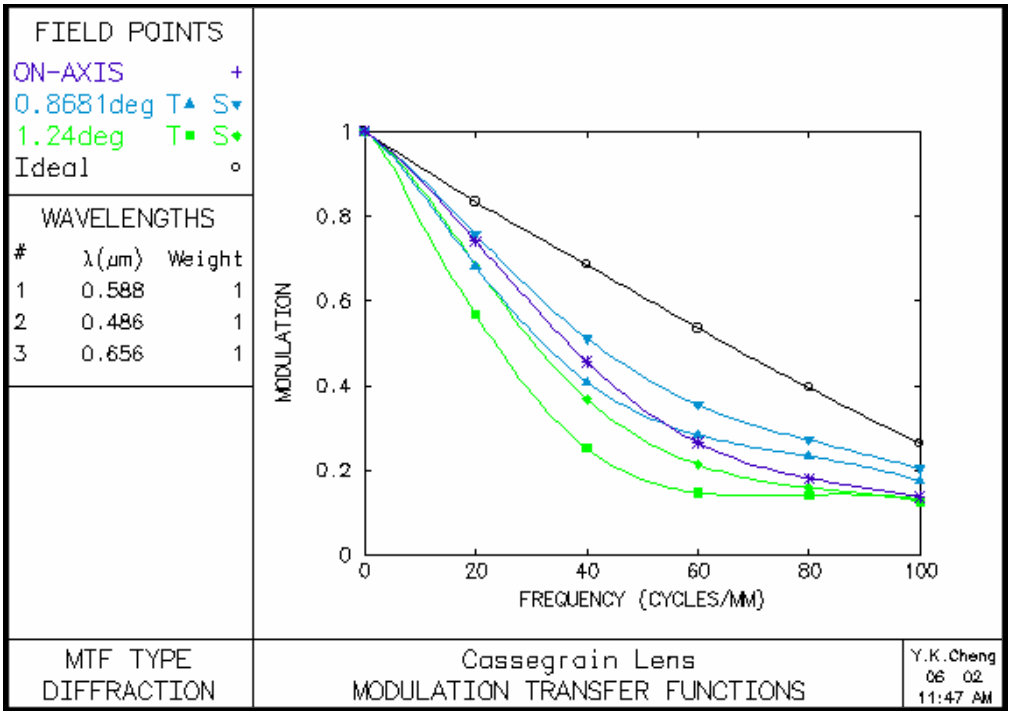



(b)

**圖** 15-3　(a) **星光夜視鏡**　(b) **系統** MTF




(a)




(b)

**圖** 15-4　(a) Csaaegrain **照相鏡組**　(b) **系統** MTF

| SRF | RADIUS | | THICKNESS | | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | | 1.0000e+20 | | 1.7455e+18 | | AIR | |
| AST | -13.695400 | | 0.600000 | | 2.625000 | A | QUARTZ | C |
| 2 | -13.884600 | | 10.999000 | | 2.700000 | | AIR | |
| 3 | -32.615900 | | -10.999000 | | 2.510000 | | REFL_HATCH | |
| 4 | -13.884600 | | -0.600000 | | 0.610000 | | QUARTZ | C |
| 5 | -13.695400 | | 0.600000 | | 0.520000 | | REFL_HATCH | |
| 6 | -13.884600 | | 10.499000 | | 0.535000 | | AIR | |
| 7 | 10.018400 | | 0.193000 | | 0.850000 | | BK7 | C |
| 8 | 21.854300 | | 1.029000 | | 0.850000 | | AIR | |
| 9 | -7.290900 | | 0.193000 | | 0.850000 | | SF1 | C |
| 10 | -9.452800 | | 3.536000 | | 0.850000 | | AIR | |
| IMS | 0.000000 | | 0.000000 | | 0.874234 | S | | |

**表** 15-5　Csaaegrain **望遠物鏡**

**第一鏡面到像距為** 16.049。

**表** 15-5 **的星號標示如下關係的非球面：**

$$X = \frac{0.0730172Y^2}{1.0+\sqrt{1.0-0.0057659Y^2}} - 1.02289\times10^{-5}Y^4 + 3.91550\times10^{-8}Y^6$$

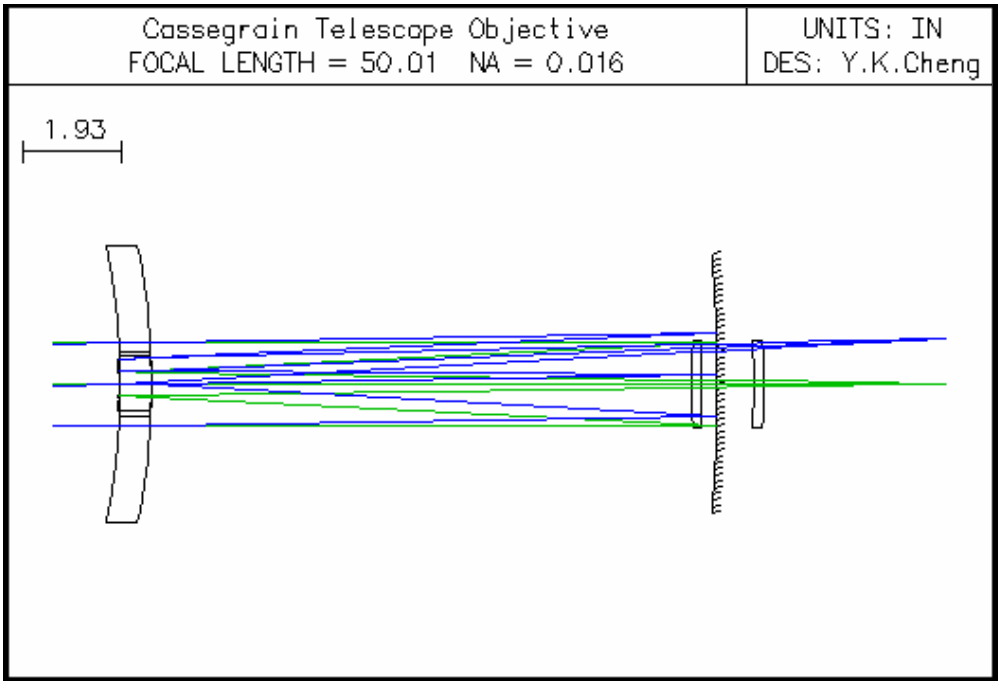
**這表示一個與光軸垂直的橢圓輕微偏離的表面。畸變為** 0.4%（針孔）。

**圖** 15-6 **顯示一個焦距** 10 **吋，** $f/_{1.23}$ **的** Cassegrain **鏡組。這個設計值得注意的是只用了一種材質，但其色差仍然極。雖然設計為可見波段，其可使用在廣範的波長範圍。（參見** Shenker, 1966）。**圖** 15-6 **的資料提供在表** 15-6。

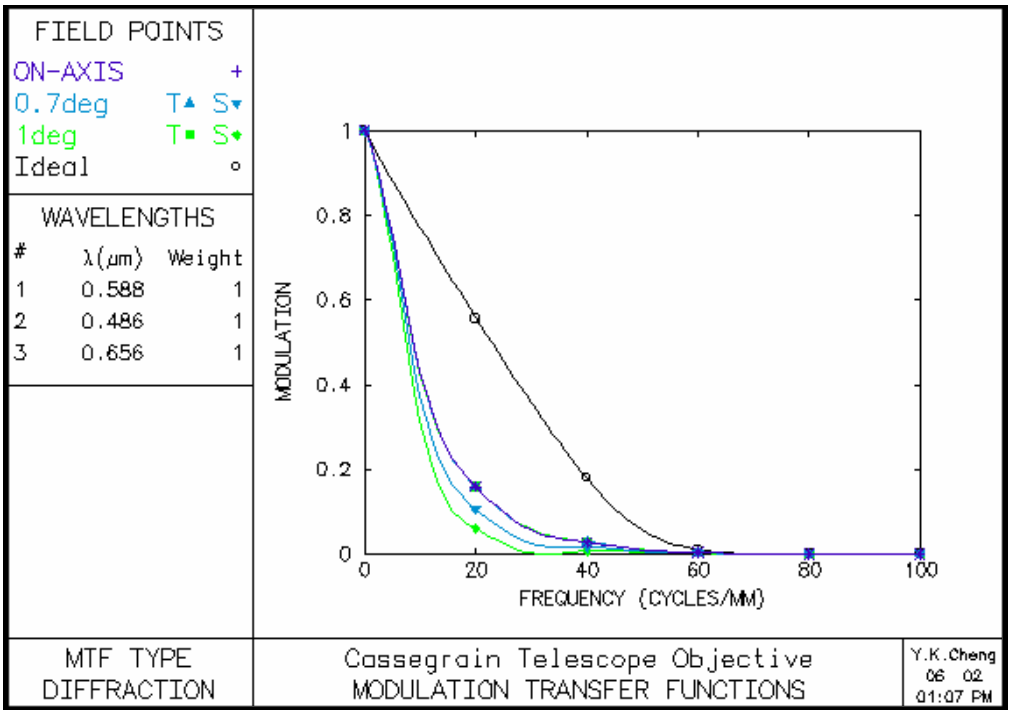
| SRF | RADIUS | | THICKNESS | | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | | 1.0000e+20 | | 7.8702e+18 | | AIR | |
| AST | 0.000000 | | 0.225000 | | 4.065000 | A | AIR | |
| 2 | 19.686900 | | 0.541000 | | 4.125000 | | BK7 | C |
| 3 | 0.000000 | | 2.194000 | | 4.125000 | | AIR | |
| 4 | -13.007200 | | 0.351000 | | 3.900000 | | BK7 | C |
| 5 | -18.930600 | | 1.812000 | | 3.850000 | | AIR | |
| 6 | -10.385400 | | 0.399000 | | 3.650000 | | BK7 | C |
| 7 | -15.042700 | | 3.792000 | | 3.850000 | | AIR | |
| 8 | -12.976500 | | -3.792000 | | 4.000000 | | REFL_HATCH | |
| 9 | -15.042700 | | 3.293000 | | 1.830000 | | REFL_HATCH | |
| 10 | -24.658700 | | 0.159000 | | 1.080000 | | BK7 | C |
| 11 | -10.222800 | | 0.020000 | | 1.080000 | | AIR | |
| 12 | 2.183100 | | 0.364000 | | 0.990000 | | BK7 | C |
| 13 | 2.282300 | | 0.356000 | | 0.850000 | | AIR | |
| IMS | 0.000000 | | 0.000000 | | 0.788735 | S | | |

**表** 15-6　Csaaegrain **透鏡組**

**第一鏡面到像距為** 9.488。**阻隔可由圍繞在二後端透鏡的圓銓以及一個短的鏡蓋來達成。還有一些漸暈。**

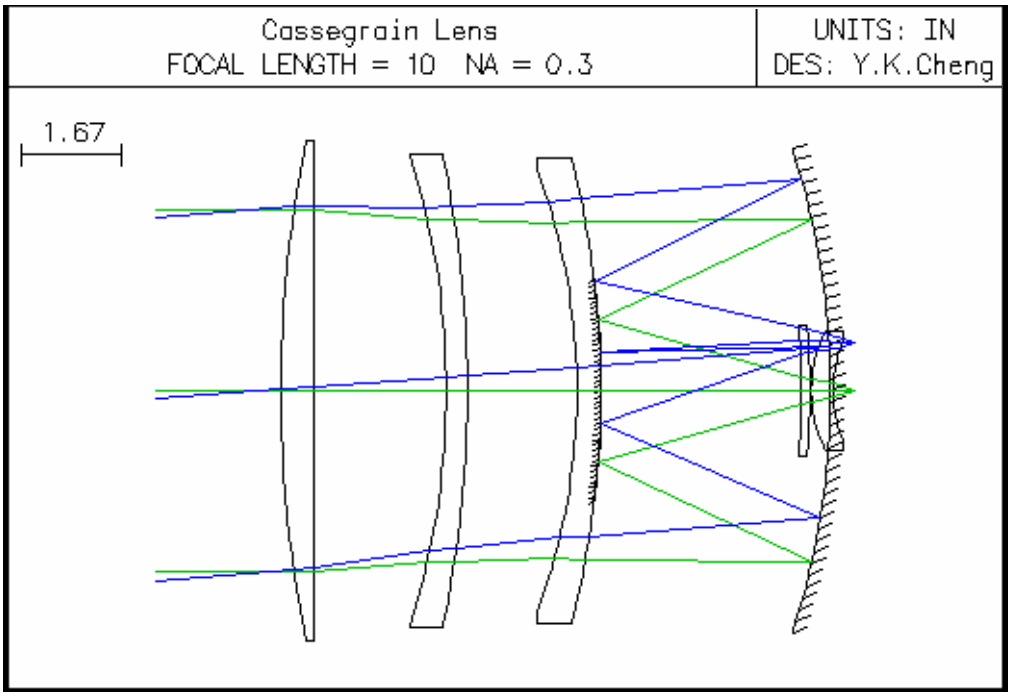



(a)

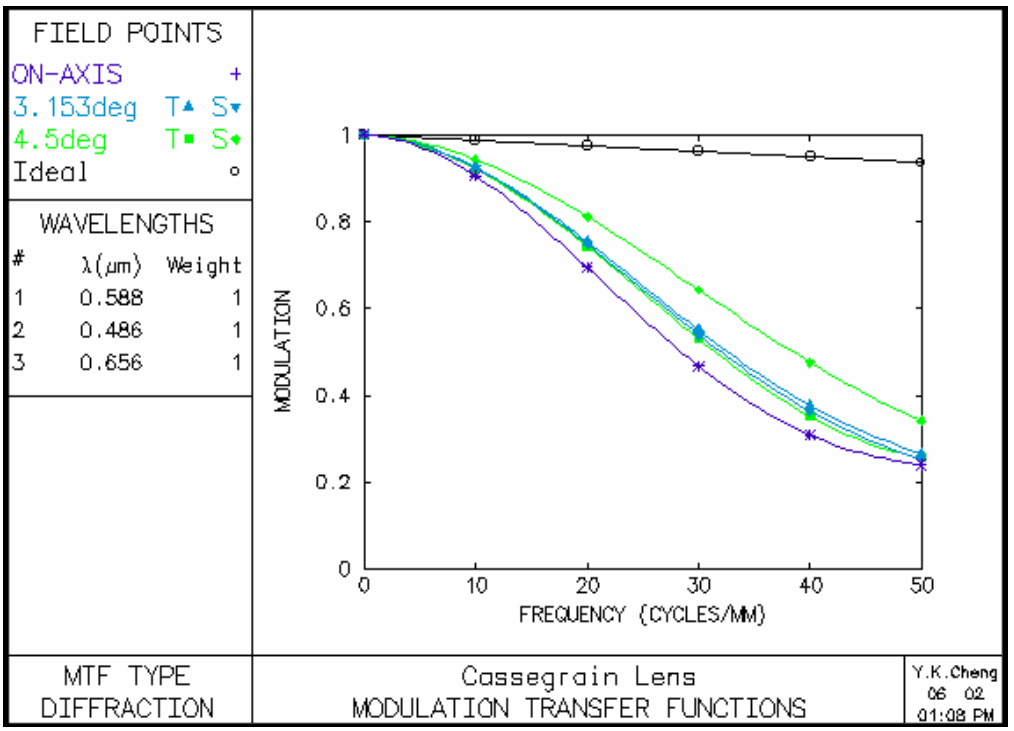



(b)

**圖** 15-5　(a) Csaaegrain **望遠物鏡**　(b) **系統** MTF




(a)




(b)

**圖** 15-6　(a) Csaaegrain **透鏡組**　(b) **系統** MTF

2.25° 瞳孔切線分量=0.92 軸上

5. 5° 瞳孔切線分量＝0.72 軸上

畸變少於 0.1%

在 1930 年 Bernard Schmidt 完成他著名的相機。在球面反射鏡的曲率中心，他放置了一個平坦面面向鏡子的非球面。其為影像在修正器與反射鏡之間半途形成的共心系統。像面為球面及半徑與焦距相同。Schmidt 由計算被已知直徑的環所固定平版的彈性形變來製作他的修正器平版。使用真空幫浦，他讓這個平版變形一個適當的量，將一面磨平，然後釋放真空，讓平版得到合適的非球形狀。

Palomar 山天文台有二具 Schmidt 相機，一具有 18 吋孔徑而另一具為 48 吋孔徑。其用來觀測整個北半球的夜空。

圖 15-7 顯示一個 $f/1.8$ 覆蓋視角 7° 的 Schmidt 物鏡。其焦距長為 10。透鏡資料如下。

| SRF | RADIUS | | THICKNESS | | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | | 1.0000e+20 | | 6.1163e+18 | | AIR | |
| AST | 0.000000 | | -0.205000 | | 2.775000 | A | AIR | |
| 2 | 0.000000 | | 0.300000 | | 2.800000 | | QUARTZ | C |
| 3 | 0.000000 | | 20.000000 | | 2.800000 | | AIR | |
| 4 | -20.000000 | | -10.000000 | S | 4.025000 | | REFL_HATCH | |
| IMS | 0.000000 | | 0.000000 | | 0.611626 | S | | |

表 15-7　Schmidt 物鏡

像面是半徑-10 的球面。孔徑光柵與第二面相接觸。第一面的方程式為：

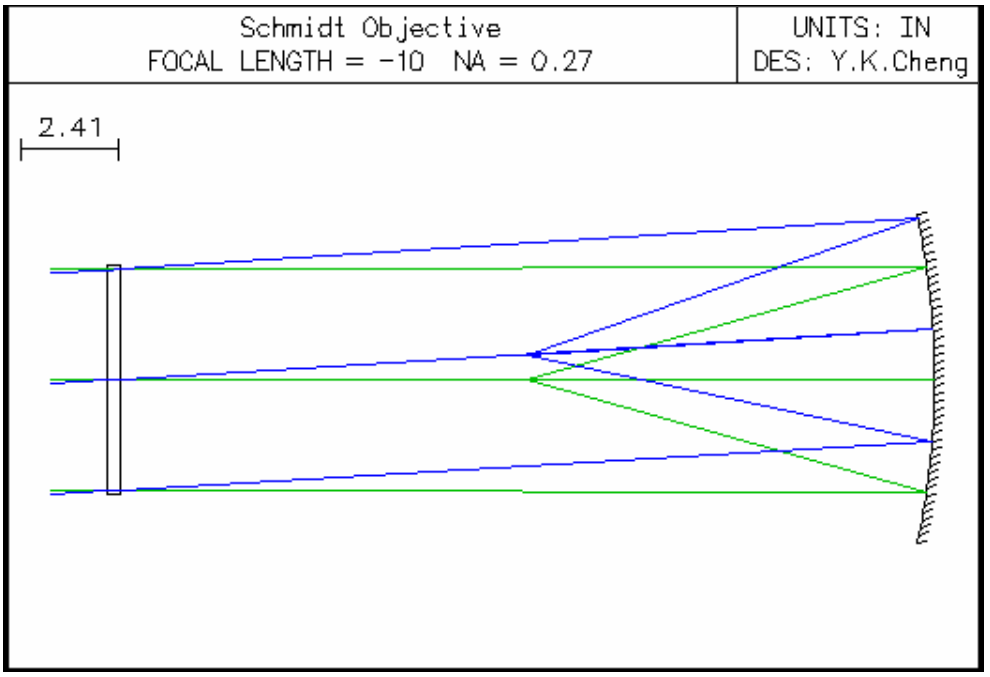
$$X = 1.024119\times10^{-5}Y^4 - 1.804486\times10^{-5}Y^6 + 1.831413\times10^{-6}Y^8 - 6.879236\times10^{-8}Y^{10}$$

這個系統的缺點為影像的位置帶物鏡之內以及其曲率。其優點在構造簡單且在大的波長範圍與視野下可以得到良好的解析度。Cassegrain 的說法由 Baker（1940）提出。這需要非球形的第一面鏡與形第二面鏡。半徑相同，所以我們在平面場之下有零 Petzval 總和。然而，我對於這個修正的經驗是失望的。我發現使用上述所給的全球面系統遠遠來地較好。

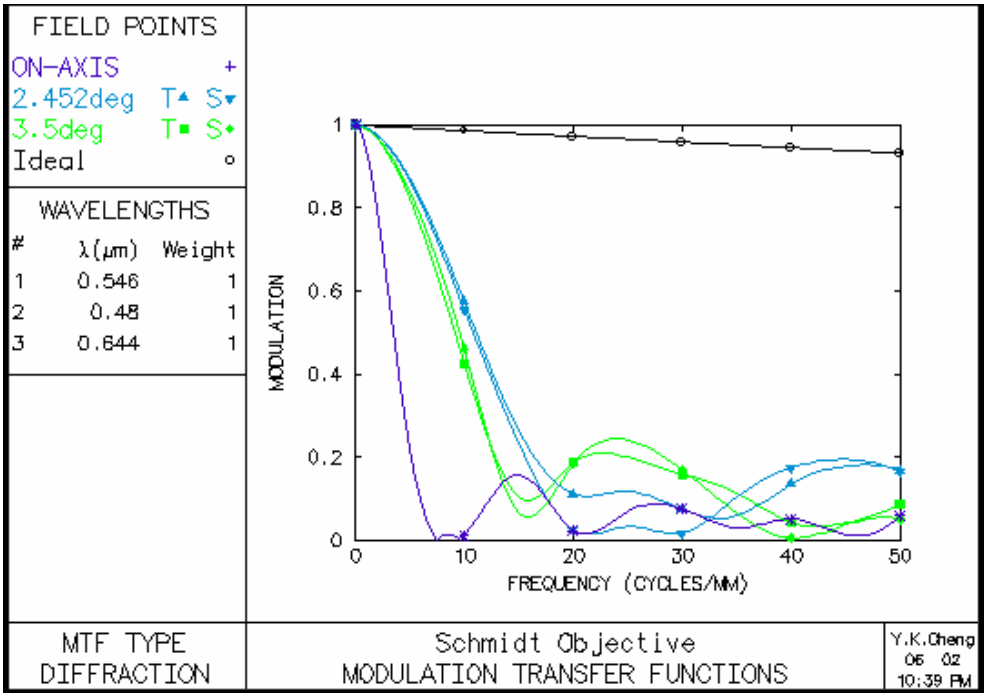
所有上述系統（或許除了 Schmidt 系統）為望遠透鏡。也就是說，鏡組全長比等效焦距長小的多。其也有著相對短的（為其焦距的分數）後焦長。由顛倒第一與第二面鏡的作用，我們可得到這種設計的倒置型式。在這裏全長將實質上大於等效焦距長，且後焦大於等效焦距長。這是一個當需要長工作距離時有著相對短焦距透鏡的常用系統。

這樣的一個倒置望遠型設計顯示在圖 15-8。其為 $f/2.5$ 且具有直徑 0.2 的影像。表 15-8 列出這個透鏡的資料。

大的反射鏡面（R=3.6384）到鏡面為 5.605。畸變可以忽略。




(a)




(b)

**圖** 15-7　(a) Schmidt **物鏡**　(b)　**系統** MTF

| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | 1.0000e+20 | 1.7633e+19 | | AIR | |
| AST | 0.000000 | 0.000000 | 0.400000 | A | AIR | |
| 2 | 1.891500 | -1.795000 | 0.400000 | | REFL_HATCH | |
| 3 | 3.638400 | 1.795000 | 1.275000 | | REFL_HATCH | |
| 4 | 1.891500 | 0.319000 | 0.900000 | | BK7 | C |
| 5 | 1.496700 | 0.341000 | 0.800000 | | AIR | |
| 6 | 4.413900 | 0.300000 | 0.760000 | | SF1 | C |
| 7 | 4.535700 | 2.849000 | 0.680000 | | AIR | |
| IMS | 0.000000 | 0.000000 | 0.352723 | S | | |

**表** 15-8　**倒置望遠鏡**

**這個透鏡具有需考慮的內向場曲。最佳離軸影像在最佳軸上像面內** 30 μm **可獲得。在** $100\,{}^{lp}\!/_{mm}$**，其在視野邊緣的** MTF **會變成縱向** 33% **及橫向** 15%**。**

**設計者使用的電腦程式必須有能力束縛佳反射鏡面上的像高。由於在大反射鏡上有孔洞，第一反射鏡面必須有足夠的彎曲以使外緣光線達到大反射鏡上孔洞的外面。這個透鏡會變成一個理想長工作距離的顯微物鏡（參見** 11 **章)。**

**在圖** 15-9 **顯示一個長等效焦距（**250 **吋）** ${}^{f}\!/_{10}$ **的物鏡。影像大小為** 1.703**，因此其適用於** 35mmSLR **相機。二面反射鏡皆為雙曲面。鏡組資料幾在表** 15-9**。**

| SRF | RADIUS | THICKNESS | APERTURE RADIUS | | GLASS | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| OBJ | 0.000000 | 1.0000e+20 | 3.4907e+17 | | AIR | |
| AST | 0.000000 | 37.297000 | 12.500000 | A | AIR | |
| 2 | -101.991200 | -37.297000 | 12.675000 | | REFL_HATCH | |
| 3 | -36.675000 | 47.415000 | 3.550000 | | REFL_HATCH | |
| 4 | 18.082200 | 0.250000 | 1.085000 | | SK16 | C |
| 5 | 10.427400 | 0.360000 | 1.085000 | | LF5 | C |
| 6 | 51.268900 | 1.103000 | 1.085000 | | AIR | |
| 7 | -9.459400 | 0.250000 | 0.980000 | | LLF1 | C |
| 8 | 2.802200 | 0.500000 | 0.980000 | | LF5 | C |
| 9 | 27.650200 | 5.695000 | 0.980000 | | AIR | |
| IMS | 0.000000 | 0.000000 | 0.873017 | S | | |

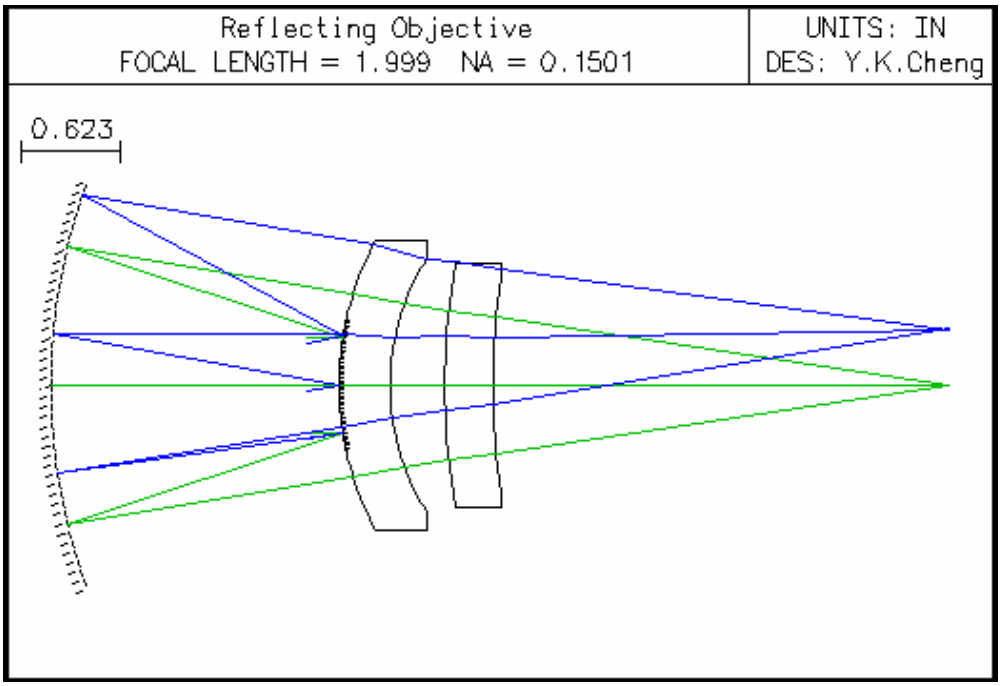
**表** 15-9　Csaaegrain **物鏡**

**圖** 15-9 **鏡面的圓錐係數為（**$A_2$ **給在第一章的非球面方程式中）**

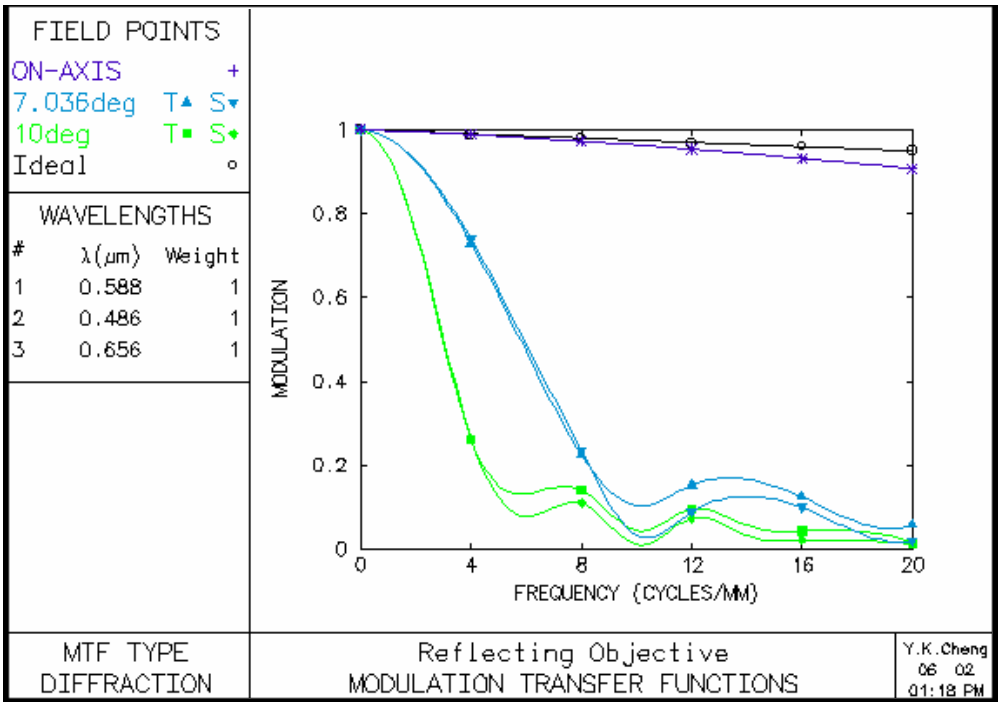
-1.10533　**第一反射鏡**

-3.77539　**第二反射鏡**

**注意到入射光瞳與第二反射鏡相接觸。這個反射鏡到像距為** 55.572 **吋。當三角架機構將第二反射鏡固定時需要考慮阻隔。圖** 15-9b **顯示的** MTF **圖不考慮這個鏡組的繞射效應。**

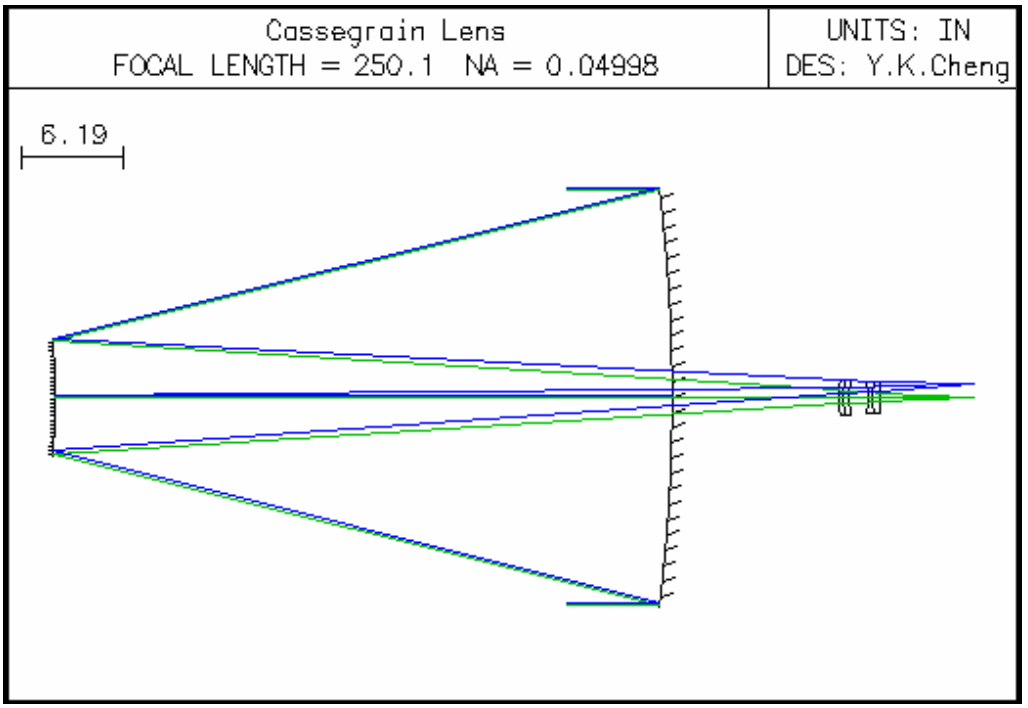



(a)

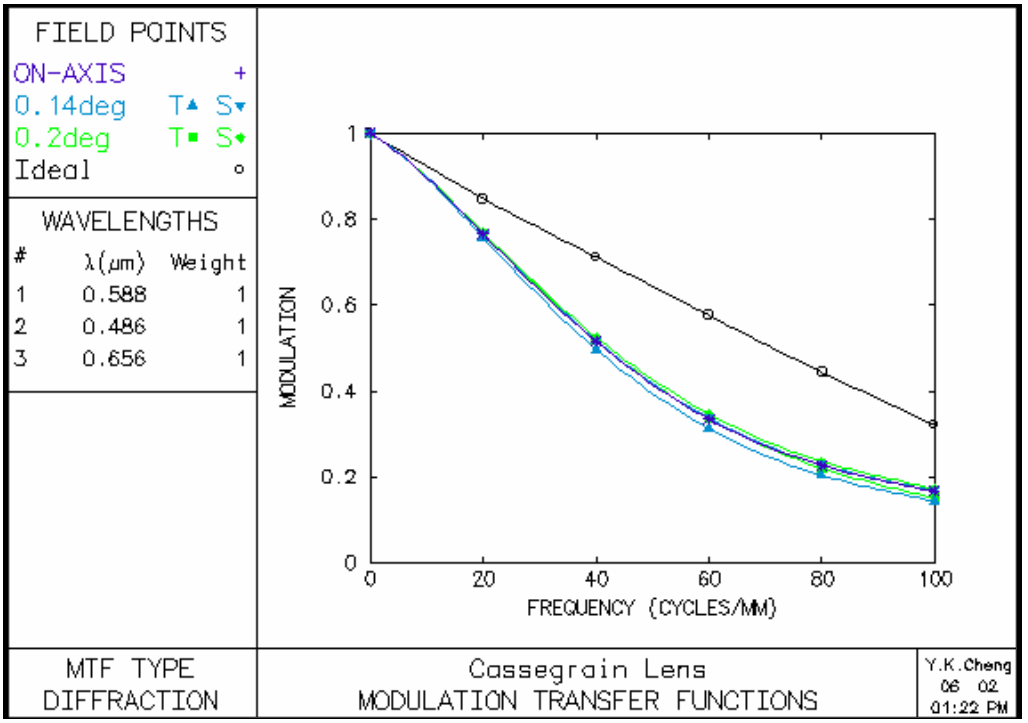



(b)

**圖** 15-8　(a) **倒置望遠鏡**　(b) **系統** MTF




(a)




(b)

**圖** 15-9　(a) Csaaegrain **物鏡**　(b) **系統** MTF

## 參考文獻

Abel, I. R. (1983). Compact optical system, U.S. patent 4411499.

Amon, M. (1973). Large catadioptric objective, U.S. Patent 3711184.

Amon, M., Rosen, S., and Jackson, B. (1917). Large objective for night vision, Appl. Opt., 10:490.

Baker, J. G. (1940). A family of flat field cameras, equivalent in performance to the Schmidt camera, Proc. Am. Phil. Soc., 82:339.

Barnes, W. J. (1979). Optical materials－reflective in Applied Optics and Optical Engineering, Vol. 7, (R. Shannon and J. Wyant, eds.) Academic, New york, Chap. 4.

Bouwers, A. (1950). Achievements in Optics, Elsevier, New York.

Bowen, I. S. (1960). Schmidt cameras, in Telescopes, G. P. Kuiper and B. M. Middlehurst (Eds.), Univ. Chicago Press, Chicago, Chap. 4.

Bruggemann, H. P. (1968). Conic Mirrors, Focal Press, New York.

Hodges, P. C. (1953). Bernard Schmidt and his reflector camera, in Amateur Telescope Making, Vol. 3, (A. Ingalls, ed.), Scientific American, New York, p. 365.

Korsch, D. (1991). Reflective Optics, Academic, New York.

Lucy, F. A. (1941). Exact and approximate computation and Schmidt cameras, JOSA, 31:358.

Lurie, R. (1975). Anastigmatic catadioptric telescope, JOSA, 65:261.

Mahajan, V. N. (1977). Imaging with obscured pupils, Opt. Lett., 1:128.

Maksutov, D. D. (1944). New catadioptric meniscus system, JOSA, 34:270.

Maxwell, J. (1971). Catadioptric Imaging Systems, American Elsevier, New York.

Powell, J. (1988). Design of a 300 mm focal length $f/3.6$ spectrographic objective, Opt. Eng., 27:1042.

Rayces, J. L. (1975). All spherical solid catadioptric system, U.S. Patent 3926505.

Shenker, M. (1966). High speed catadioptric objective, U.S. Patent 3252373.

Shimizu, Y. (1972). Catadioptric telephoto objective lens, U.S. Patent 3632190.

Stephens, R. E. (1948). Reduction of sphero-chromatic aberration in catadioptric systems, J. Res. NBS, 40:467.