

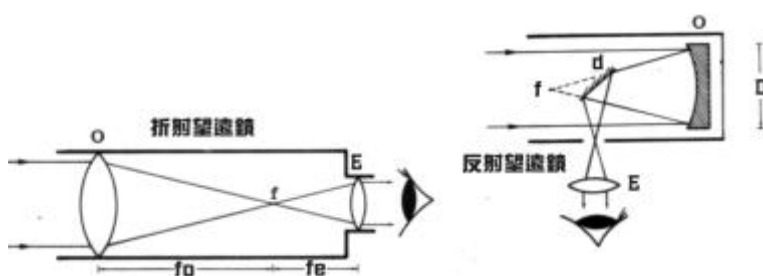
自制天文望远镜

第一章 望远镜基本原理

黄 隆

1.1 天文望远镜光学原理

望远镜由物镜和目镜组成，接近景物的凸形透镜或凹形反射镜叫做物镜，靠近眼睛那块叫做目镜。远景物的光源视作平行光，根据光学原理，平行光经过透镜或球面凹形反射镜便会聚焦在一点上，这就是焦点。焦点与物镜距离就是焦距。再利用一块比物镜焦距短的凸透镜或目镜就可以把成像放大，这时观察者觉得远处景物被拉近，看得特别清楚。



折射镜是由一组透镜组成，反射式则包括一块镀了反光金属面的凹形球面镜和把光源作90度反射的平面镜。两者的吸光率大致相同。折射和反射镜各有优点，现分别讨论。

O=物镜

E=目镜

f =焦点

fo=物镜焦距

fe=目镜焦距

D=物镜口径

d =斜镜

1.2 折射和反射望远镜的选择

折射望远镜的优点

1. 影像稳定

折射式望远镜镜筒密封，避免了空气对流现象。

2. 彗像差矫正

利用不同的透镜组合来矫正彗像差 (Coma)。

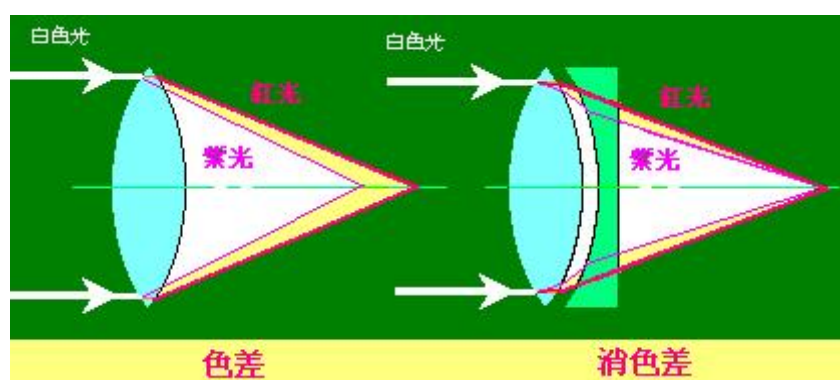
3. 保 养

主镜密封，不会被污浊空气侵蚀，基本上不用保养。

折射望远镜的缺点

1. 色 差

不同波长光波成像在焦点附近，所以望远镜出现彩色光环围绕成像。矫正色差时要增加一块不同折射率的透镜，但矫正大口径镜就不容易。



2. 镜 筒 长

为了消除色差，设计望远镜时就要把焦距尽量增长，约主镜口径的十五倍，以六吋口径计算，便是七呎半长，而且用起来又不方便，业余制镜者要造一座这样长而稳定度高的脚架很是困难的一回事。

3. 价 钱 贵

光线要穿过透镜关系，所以要采用清晰度高，质地优良的玻璃，这样价钱就贵许多。全部完成后的价钱也比同一口径的反射镜贵数倍至十数倍。

反射望远镜的优点

1. 消 色 差



任何可见光均聚焦于一点。

2. 镜 筒 短

通常镜筒长度只有主镜直径八倍，所以比折射镜筒约短两倍。短的镜筒操作力便，又容易制造稳定性高的脚架。

3. 价钱便宜

光线只在主镜表面反射，制镜者可以购买较经济的普通玻璃去制造反射镜的主要部份。

反射望远镜缺点

1. 遮 光

对角镜放置在主镜前，把部份入射光线遮掉，而对角镜支架又产生绕射，三支架或四支架的便形成六条或四条由光星发射出来的光线。可以利用焦比八至十的设计减低遮光率。

2. 影像不稳定

开放式的镜筒往往产生对流现象，很难完满地解决问题。所以在高倍看行星表面精细部份时便显出不容易了。

3. 主镜变形

温度变化和机械因素，使主镜变形，焦点也跟 改变，形成球面差，球面差就是主镜旁边缘和近光轴的平行光线聚焦于不同地方，但小口径镜不成问题。

4. 保养

镀上主镜表面的铝或银，受空气污染影响，要半年再镀一次。不过一块良好的真空电镀镜面可维持数年之久。

折射望远镜由二块透镜组成，总共要磨四边光学面，反射望远镜只需要磨一边光学面，所以制造反射式望远镜花费较少时间。技术精良的话，一副自制的六吋口径反射望远镜质素随时超过市面出售的三吋折射望远镜。

至于选择何种类形的望远镜则视乎个别天文爱好者的需要和喜爱而定。通常一枝四吋以下的折射望远镜已足够作普通观测研究的用途。若果兴趣是观察行星或双星，便应该设计八



吋口径而放大倍数高的反射望远镜，因为如此大口径的折射镜十分难制造，价钱非常昂贵，而且又非常笨重。

从经济和难度考虑，初学者最适宜自制反射式望远镜。

1.3 反射望远镜的设计

反射望远镜有数种设计，现在只谈谈结构简单的牛顿式。

牛顿式望远镜最主要的结构是一块镀上反射物质的球面或抛物面玻璃。球面镜作用是把星星来的平行光反射聚焦一点，然后靠一块细小光学平面镜放置于焦点前，把光作 90 度角的反射至望远镜筒的边缘，再由一块凸透镜将形像放大，便获得普通望远镜应有之效果。不过球面镜中心和旁边的反射角不同，故此成像并不完全聚焦于同一点上，而形成**球面差**；但**抛物面** 则可矫正这缺点，使离开光轴较远的光线也可以同时聚于焦点上，因此实际上牛顿式望远镜主镜乃抛物线面。

放 大 倍 数

望远镜的放大倍数是物镜和目镜焦距之比。即物镜焦距愈长，放大倍率愈高；目镜焦距愈短，放大倍率愈高。放大率亦可以量度入射瞳孔 and 出射瞳孔的直径求得，入射瞳孔通常即望远镜物镜直径。

放大倍数愈低，影像愈清晰，最宜观测暗星云。放大率高则可用来查看行星表面的微细结构，但光度很弱。每枝望远镜的最高有效放大倍数是物镜直径的 50 倍。例如六吋口径望远镜便可放大到 300 倍。

虽然天文望远镜的物镜焦距是不能改变的，但望远镜放大倍数则不是固定的，它可以通过变换目镜焦距的方式而获得不同的倍率。但目镜制造困难，多数购自光学商店，业余制镜者只自制主镜部份。

$$1 \text{ 吋} = 25.4 \text{ 毫米 (mm)}$$

焦比(Focal Ratio)

望远镜放大倍数不能无限制的增加，即目镜不能太短；最短约四毫米，主镜焦距亦不能太长，究竟焦距长度如何决定呢？通常焦距和物镜直径的比例不能超过一个数值，它们的比值称为焦比，焦比是用来表示望远镜的特性的指针，焦比即照相机上的光圈，焦比值多数定于 2.5 和 1 1 之间。例如六吋望远镜焦距最长可达 66 吋，最短是 15 吋。

焦比的限制是和望远镜的曲率有关，焦比大，球面和抛物面值相差不远，主镜磨成球面便行。但焦比太大，镜筒便会很长，搬运不方便，脚架制作也不容易。焦比短，球面主镜便不能把平行光聚于一点，形成球面差，那时要将球面修改成抛物面就颇费功夫。

另一方面，照相曝光时间和焦比的平方成正比，所以焦比值越小曝光时间越短，拍摄暗星体时便很有用，故多用作观测或拍摄星云、星团。焦比大，焦距长度增加，放大倍率高，故此多用作观测行星。

$$\text{焦比} = \frac{\text{焦距}}{\text{物镜直径}}$$

焦比通常会写成 **f/** 或称 **f** 值

集光本领(Light Gathering Power)

望远镜口径愈大，集光力愈强，可以看见星星的数目亦增加，集光力是望远镜收集光线比眼睛强多少倍的意思。集光本领乃望远镜物镜直径平方和瞳孔直径平方之比。人的瞳孔，日间受光影响，故收缩，晚上则尽量扩大，直径伸缩由四毫米至八毫米，平均值是七毫米。

望远镜比肉眼大上许多倍，以一枝 150 毫米即六吋口径反射镜来计算，就比肉眼看东西明亮 495 倍。当然望远镜口径大还可以观察到更加暗的星星，口径和星等的关系如右。

人的瞳孔是固定的，所以要增加集光本领就唯有向物镜直径打主意，造一枝大口径望远镜。但大口径镜的球面和抛物面值相差颇大，一定要磨成抛物面，初学者未掌握好磨镜技术的话，应该以小口径开始。另外大口径望远镜又必须做一座重型精密、稳定性高的脚架，否则在调校光轴，对准星体时就会出现困难。而机械制作所花的时间可能远比磨镜还多，这样可令至初学者兴趣慢慢减低。而搬运如此重的装备往郊外观测也很成问题。经历数次辛劳后，望远镜可能被放置在屋角去渡其晚年。

分辨本领 (Resolving Power)

集光本领，放大倍数并不能表达望远镜的质素，望远镜质地取决于它的分辨本领，它就是分开两颗很相近的双星的最高能力。分辨力高，星像清晰的六吋镜会远比只得集光力强的大口径十吋镜实用得多。天文观察要求光学质素最高，若大口径镜只看见模糊的星像，用处就不大，只可用来看看风景吧！

英国业余天文学家杜氏(Dawes)根据观测双星的经验，计算出望远镜口径的最高分辨能力，这就是著名的杜氏极限(Dawes' Limit)。

六吋口径望远镜，分辨本领最高是 0.76 弧秒，虽然因星空观察受大气流动影响，而会使分辨本领降至一弧秒，但已经比肉眼只可分辨两颗距离一弧分以上双星的能力要大上六十倍。

以天文爱好者的需要和能力来决定，初学者最适宜自制一枝六吋口径，48 吋焦距，焦比是八的牛顿式望远镜，因为主镜只需要磨成一个球面，镜筒短，脚架制造比较容易。若喜欢轻巧和方便携带的可造一枝 120 毫米口径，720 毫米焦距，即 **f/6** 的望远镜。

直径	直径	分辨本领
吋	毫米	弧秒
2.5	63	1.82
3	76	1.52
4	100	1.14
6	150	0.76
8	200	0.57
10	250	0.46
12	300	0.38
14	350	0.33
16	400	0.29
18	450	0.25
20	500	0.23

$$\begin{aligned}\text{分辨本领} &= \frac{116}{D_{\text{mm}}} \text{ (弧秒)} \\ &= \frac{4.56}{D_{\text{in}}} \text{ (弧秒)}\end{aligned}$$

D_{mm} = 物鏡直径 (毫米)

D_{in} = 物鏡直径 (吋)

第二章 磨镜材料与工具

2.1 应用材料

a. 厚玻璃两块

主镜和工具板厚玻璃板两块。标准主镜厚度大约是直径的六分之一，工具板比较薄，约八分之一。但为了经济原因和容易购买，主镜厚度会减低至直径之八分之一。以六吋主镜来说，我只用 3/4 吋厚的玻璃，而工具板则用半吋厚便算了。厚身玻璃可以防止主镜镜面因温度改变而影响曲率半径。主镜最好选用优质而膨胀系数少的派勒斯(Pyrex) 玻璃，膨胀系数就是物质因温度改变而影响其长度的数值。系数愈小，温度变化对玻璃影响则愈细。派勒斯玻璃另一优点就是已经过热软化而令其内部应力减少，避免了玻璃因温度改变而变形。派勒斯玻璃要向外国订购，价钱昂贵，普通天文爱好者多采购自拆旧船窗门的玻璃，虽然膨胀系数大一些，但都已受热软化处理。最方便的就是往玻璃店购买，普通未经热软化处理的蓝色玻璃。

一块 8 吋直径六分厚的普通蓝玻璃约港币 100 元（2000 年）。

b. 磨砂

磨砂主要有两种，黑色的碳化硅(Silicon Carbide)和白色的氧化铝(Aluminum Oxide)。碳化硅即常用的金钢砂(Carborundum)，体积大小依编号排列，号数小颗粒粗，编号表示每一时可排列金钢砂粒之数目，例如 80 号即一时内可并排 80 颗金钢砂。不过 220 号以上的已成粉末状，要利用其浮在水中时间长短的方法分辨。普通多选用六种金钢砂，80、120、220、320、600 和 1200 号等。当金钢砂缺少某一编号存货时，可以用别一号代替。

c. 抛光粉

抛光粉有红色的氧化铁，俗称光学红粉，和白色的氧化铈(CeriumOxide)。磨砂和抛光粉可往专出售光学磨料的商店采购，份量约六安士。

（ 一磅 = 16 安士或 454 克 ）

d. 沥青

沥青一磅，五金店有售。沥青有两种类，一种是水沥青，室温下呈液体状，是用来修补屋顶，另一种在室温下呈固态，这种沥青才合用。

e. 松节油

松节油和松香少量，约四安士。五金店或化工原料行有售。以上材料，美国天文仪器公司有套装出售，六吋直径玻璃连磨镜材料约港币三百元（1982 年）。

2.2 工具

a. 工作台

工作台是用来固定玻璃，要找一张结实而高度适合磨镜者的台或高椅子，或用万能角铁自制，工作台下半部还要加上重物避免大力工作时产生震荡而摇摆不定。

b. 面盆一只。

c. 磨刀石。

f. 放大镜

普通短焦距的小型放大镜，或望远镜目镜，例如篮斯登（Ramsden）和凯尔纳式（Kellner）才合用。

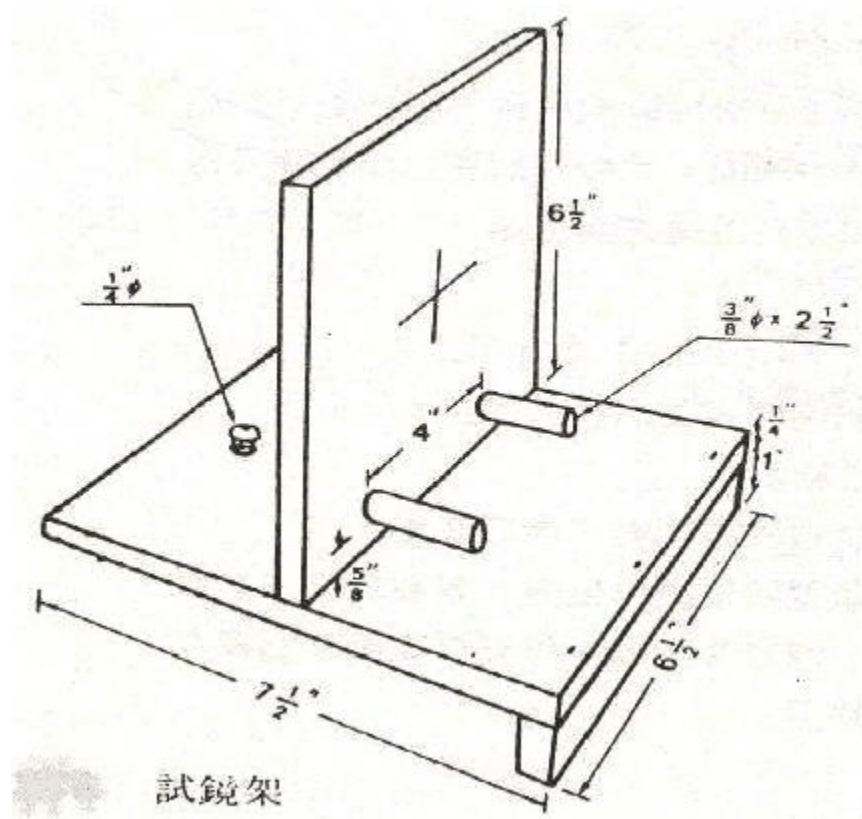
2.3 测焦距工具

佛科试镜器结构很简单，包括一个灯箱和一个可以作两个方向移动的刀片座。灯箱由一颗电灯泡供应光源，光线从灯箱中间小孔透射出来。刀片架附设有一块刀片，该架设计至可前后移动，并且可以微调至 1/100 吋。再说回来，光源箱的孔宽 1/250 吋，可利用针刺孔于簿铝纸上，随后用胶纸贴在已开了 1/8 吋孔的灯箱前。除点光源外，还有裂隙光源，光度比较强。制造裂隙方法是用两片刀片并列于灯箱孔前，孔的直径阔 3/8 吋，裂隙相距 1/50 吋。若果光源用光身灯泡的便要用一块磨砂腊纸盖者灯箱孔，以便产生均匀的散射光线。

主镜直径 (吋)	主镜厚度 (吋)	工具板厚度 (吋)
4	2/3	1/2
6	1	5/8
8	1 3/8	1
10	1 3/4	1 1/4
12	2	1 1/4

编号	代用编号	份量(磅)
80	60	1/2
120	100	1/4
220	280	1/4
320	300	1/8
600	400	1/8
1200	-----	1/16

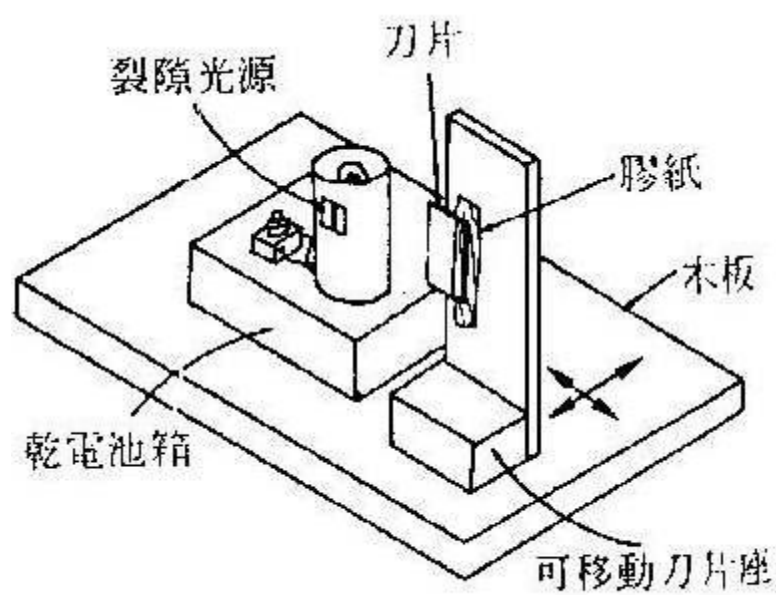
第二章 磨镜材料与工具



简单的灯箱电源，由两颗 1.5V 干电池，配上 2.2V 的小电灯泡组成，再加上按钮式开关掣。

精密的佛科试镜器可以参考其它书籍。

简单佛科试镜器



第三章 磨鏡基本方法

3.1 磨鏡手法

主鏡在工具板上移動的方式有數種，各有不同的用途，最常用的有下列四款。

弦線手法 (Chordal Stroke)

方法：主鏡中心以弦線軌跡在工具板邊移動。

用途：粗磨時用。

優點：很容易把主鏡中心玻璃磨去。適合有經驗的磨鏡者用於要磨去大量玻璃的粗磨階段。

缺點：弦線太短時，磨去的位置會產生一個又小又深的洞，主鏡會產生雙曲面現象，主鏡和工具板都互不吻合。所以在粗磨成形後階段必需逐步把弦線移向工具板中心，主鏡的洞才漸漸擴散至邊緣。初學者應避免用弦線手法，免得日後又要花時間修正鏡面。

正心手法 (Diametral Stroke)

方法：主鏡中心在工具板直徑上成直線運動。

用途：粗磨或幼磨時用。

優點：較平均地磨去表面的玻璃，磨製出比較可靠的球面形鏡。最適合初學者，因為正心手法是最安全的磨鏡方法，並不會造成嚴重的錯誤。延長或縮短主鏡運動的距離，可分別達至加深或減少彎曲率的功效。

缺點：長時間採用正心磨法，鏡面會產生環形區 (Zones) 現象。磨去玻璃的速度比弦線手法慢很多。

3.2 磨程

磨程就是主鏡中心在工具板上移動的總距離和主鏡直徑之比。

$$\begin{aligned}\text{磨程} &= \frac{\text{主鏡中心移動距離}}{\text{主鏡直徑}} \\ &= L/D\end{aligned}$$

a. 全磨

主鏡走的距離是主鏡的直徑。

用途：粗磨時用。能把主鏡迅速磨成所需的曲率。

$$L / D = 1$$

b. 半磨

主鏡走的距離是主鏡的半徑。

用途：幼磨時用。

$$L / D = 1/2$$

c. 1/3 磨

主鏡走的距離是主鏡直徑的三分之一。

$$L / D = 1/3$$

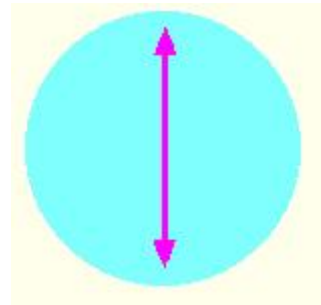
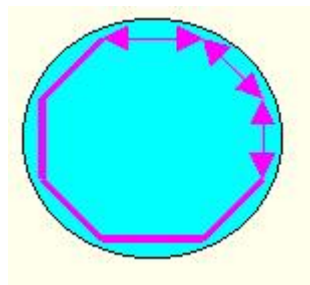
用途：幼磨後階段用。

祇有限度地改變曲面深度，但鏡面非常接近球面。是最理想的磨程。

例如：六吋鏡 1/3 磨程：

$$\begin{aligned}\text{磨程 (L)} &= 1/3 \times 6 \text{ 吋} \\ &= 2 \text{ 吋}\end{aligned}$$

這樣磨鏡時，主鏡便是向前推動一吋，跟 再向後推動一吋。



離心手法 (W Stroke)

方法：主鏡中心不常常經過工具版中心，而以 W 字形移動。

用途：幼磨和拋光時用。

優點：比正心手法更快的磨鏡方法，磨出更良好而沒有散光的球面。改變 W 形在中央和邊緣部份的頻率便可改變鏡面曲率。

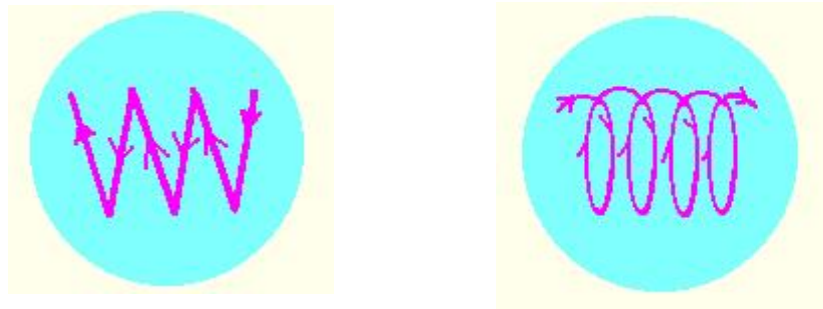
圓形手法 (Elliptical Stroke)

方法：主鏡以 圓形或蛋形軌跡移動。

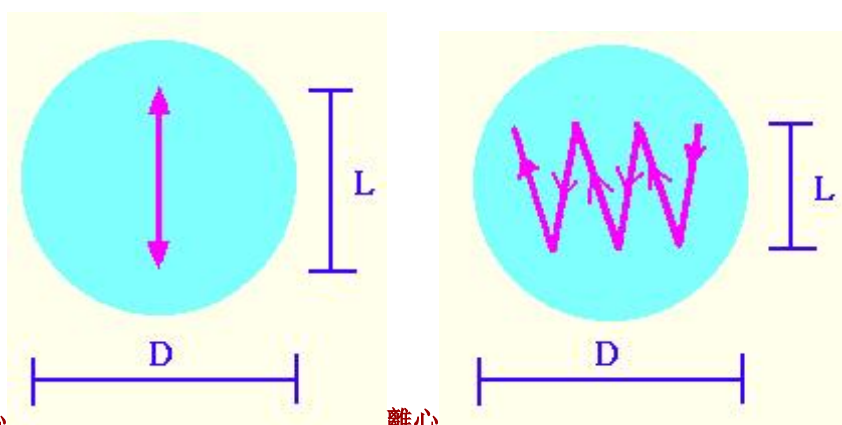
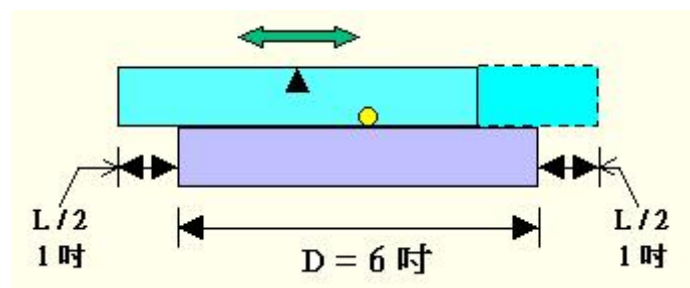
用途：拋光矯正時用。

優點：磨去不規則的玻璃面，環形區等。

缺點：不容易學習和掌握的技術。若在粗磨或幼磨階段用，則容易產生不規則形鏡面，初學者最好不採用。



六吋鏡 1/3 磨程



正心

離心

磨程和鏡面彎度關係：

短磨程：

以正常磨法，主鏡在上，工具板在下，主鏡邊緣磨去的玻璃便快些，但鏡面曲率變更卻很少。

長磨程：

主鏡中心部份磨蝕力強，加深鏡面彎曲度。

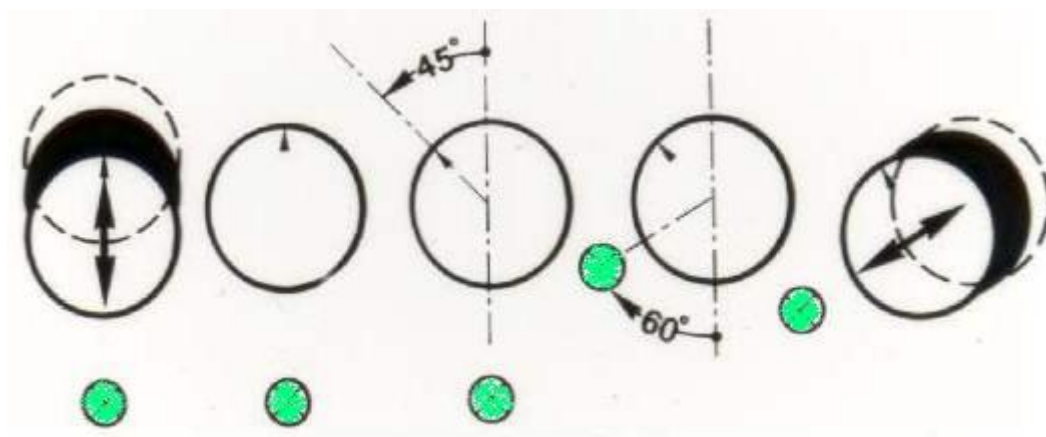
3.3 基本磨鏡動作

鏡面能磨成球面形狀完全繫於《平均定理》即鏡面每一部份都有機會磨去同等份量的玻璃。為了要保持鏡面的對稱以避免散光現象，主鏡要經常轉動，工具板或磨鏡者亦要作相對的運動。

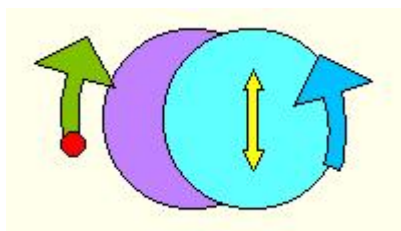
基本磨鏡動作三步驟

磨鏡運動週期

主鏡轉動八次(45 度)，磨鏡者行走六次(60 度)



● 磨鏡 移動方向



主鏡和磨鏡者轉動**方向是相反的**，即主鏡逆時針方向轉動一角度，磨鏡者朝順時針方向繞行一定角度。兩者移動的角度是不相同的。主鏡約前後磨動十次便轉動一下。通常主鏡轉動六次(60 度)，磨鏡者行走八次(45 度)。那麼鏡板和轉動者要經過 24 次才會重新和原來起點會合。經過數次會合後可轉動工具板至另一方向，以滿足平均原則。

工作檯繪上等距線

主鏡起點地方可用膠布或塗改液畫一粗線作記號。等距線可繪在工作檯上，分別代表主鏡和磨鏡者移動角度。

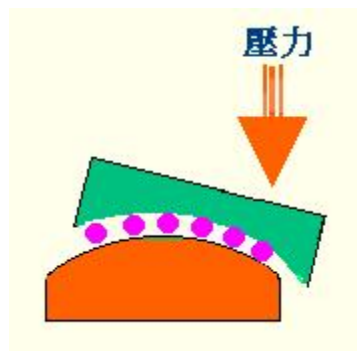
工作檯畫上等距線只是輔助初學者而已，一旦工作展開，每人便有自己的工作習慣，磨鏡形式，墨守成法者磨出的鏡面可能有散光現象。磨程略有長短，角度稍有大細，主鏡和工具板相隔一定時間上下更換位置，根據平均原理，經過數百次的磨動後，磨成的鏡面更近似球面。

3.4 玻璃曲面是怎樣形成的

為什麼兩塊玻璃互相摩擦一段時間後，便變成一塊凹一塊凸的呢？這是基於兩個因素，壓力和接觸時間。

a. 壓力

在磨製時，主鏡放在上面，工具板放在下面，中間放置金鋼砂。這樣金鋼砂又硬又尖銳的角就可以磨去接觸面的玻璃。在每一個磨程的盡頭，金鋼砂的磨蝕力便增加，因為在上面的主鏡部份離開工具板邊成懸空狀態，主鏡中央部份和工具板邊旁的壓力便相應增加。所以經過一段時間，主鏡中心玻璃和工具板邊玻璃磨蝕較快，上面的主鏡便形成凹面形，下面的工具板則成凸面形。



b. 接觸時間

其次就是主鏡中央部份（C）經常和工具板接觸，因此中心磨去玻璃的量較邊緣多。

向前移動時，C和B經常接觸工具板

向後移動時，C和A經常接觸工具板

3.5 磨鏡前的準備工作

a. 磨邊

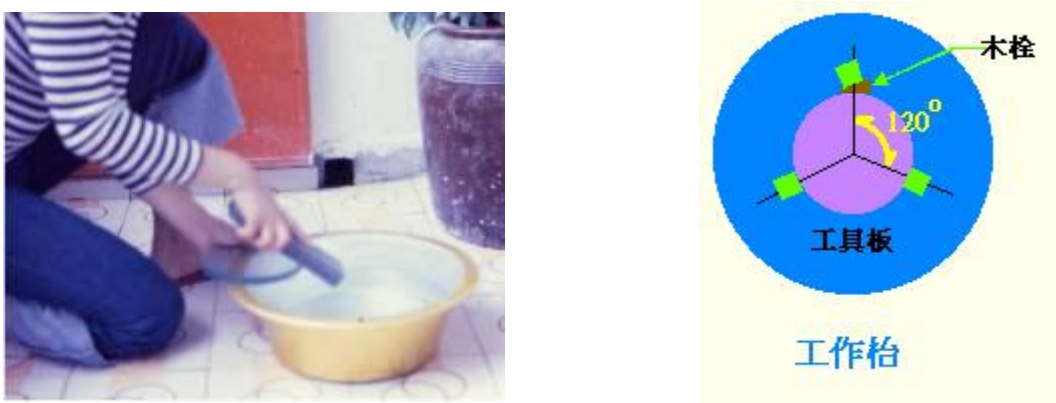
未正式動工前，先用磨刀石把

主鏡和工具板邊緣磨成闊約 1/8

吋 (3mm) 的 45 度斜角，避免磨
鏡時玻璃屑脫落而磨花主鏡，
而且尖銳的玻璃邊更會把手指割損。

b. 固定工具板

利用三角形木栓把工具板固定在工作 上。固定玻璃的三塊小木各相距 120 度，木塊要比玻璃
塊矮。



金鋼砂	磨鏡手法	磨程	時間	測距方法	焦距	備註	日期	磨鏡
80 號	弦線 壓力=最大	全	3 小時	曲率深度 ——>鐵尺	S=0.065"	邊 1/4"未磨 *要改用正心磨法	6/11/77	黃隆
120 號	正心 壓力 = 最大	1/2	20 分	電筒加生油	R=56"	邊 1/8"未磨	6/11/77	黃隆
"	"	1/3	"	燈箱加生油	R=45"	邊 3/32"未磨, 工具板, 主鏡不吻合, 焦距太短 *掉換上下位置, 減少壓力	6/11/77	黃隆

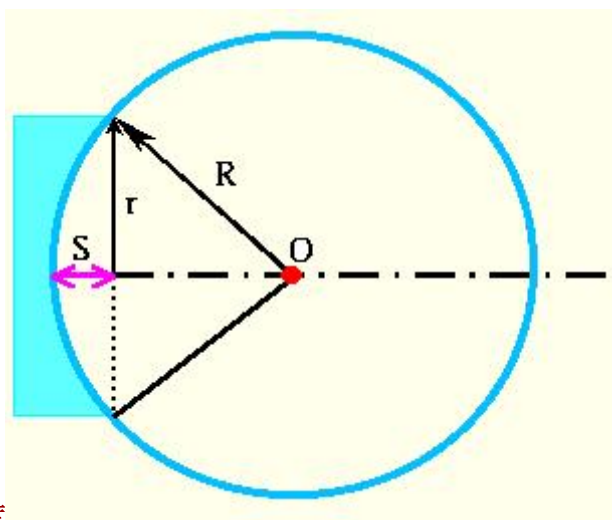
d. 磨鏡計劃

磨製望遠鏡分粗磨幼磨和拋光等三個階段，每種步驟所採用的金鋼砂份量，主鏡推動頻率，磨鏡
手法和磨程長短亦有很大分別，現列表說明。此表祇為初學者而設，在掌握到技術後，便應該創
立自己的一套。

	金鋼砂編號	每次份量	每次磨時間(分鐘)	加砂次數	磨鏡手法	磨程	推動頻率	磨鏡時間(小時)
粗磨	80 成形	半茶匙	1--->2	20--->30	正心	全	80	2
	80 均勻	半茶匙	3--->4	15--->30	正心	1/2	80	2
幼磨	120	1/2	5	12--->15	正心	1/3	60--->80	1
	220	1/4	5	8--->12	正心,W	1/3	60	1
	320	1/4	5--->10	6--->12	W	1/3	60	1
	600	1/16	5--->10	6--->10	W	1/3	60	1
	1200	1/20	5--->10	6--->10	W	1/3	60	1
拋光	拋光粉	適量	30--->60	60--->80	W	1/6	40--->50	5

e. 磨量

未開始動手磨鏡時先計算好每一號砂應該要磨至的焦距，列表後，這樣在磨製過程中可省卻很多時間，養成一種好習慣，就是每逢做一件事都有計劃。焦距和鏡面深度(Sagitta)可由下列公式求得。



鏡面深度

$$\text{鏡面深度} = \frac{\text{主鏡半徑}^2}{2 \times \text{曲率半徑}}$$

$$S = \frac{r^2}{2R}$$

預計磨量表

*程式由廖俊偉設計

磨量表 A (6 吋主鏡, 48 吋焦距)

金鋼砂編號	曲率半徑		代入公式	深度(吋)	相差值(吋)
	由	至	$\frac{r^2}{2R}$		
80	∞	132	9/264	0.0341	1/30
120	132	110	9/220	0.0409	1/125
220	110	100	9/200	0.0450	1/250
320	100	98	9/196	0.0459	1/1000
600	98	97	9/194	0.0464	1/2000
1200	97	96	9/192	0.0469	1/2000

磨量表 B (12cm 主鏡, 72cm 焦距)

金鋼砂編號	曲率半徑		代入公式	深度(cm)	相差值(cm)
	由	至	$\frac{r^2}{2R}$		
80	∞	198	36/396	0.091	0.091
120	198	165	36/330	0.109	0.018
220	165	150	36/300	0.120	0.011
320	150	147	36/294	0.122	0.002
600	147	145.5	36/291	0.124	0.002
1200	145.5	144	36/288	0.125	0.001

磨量表 B 由謝育群計算

第四章 主鏡的磨製：粗磨

4.1 磨製凹面

粗磨分兩個工作程序：

1. 主鏡磨至預計深度（成形）；

2. 主鏡磨成球面（均勻）。

粗磨目的就是儘可能以最快的力法把不要的玻璃磨掉，要把平面玻璃很快磨成凹形，首先要掌握磨蝕鏡面幾個因素：

1. 壓力要大。
2. 磨程要長。
3. 推動頻率要快。
4. 換砂頻率要密。
5. 磨鏡手法。



跟 前後推動主鏡，前後來回作一次計，頻率每分鐘 60 次，每十次左右，磨鏡者和主鏡便要作相反方向轉動一次。

開始時，會聽見金鋼砂和玻璃互相摩擦而發出刺耳聲音，約 1 至 2 分鐘後，那些聲音便漸漸沉靜下來，這時便要更換一批新的砂了。現在只要輕輕的把主鏡推於一旁，便很容易的使兩者分離，將主鏡和工具板舊而又磨成很碎的砂粒洗理掉，用手輕輕的抹掉舊砂便可，大量碎砂便要用水洗清了。舊的砂會減弱新砂的磨蝕力，所以**每次都要清理乾淨**。清潔完後，工具板放回原處，用木栓重新固定，再重覆加新砂。落足夠份量的砂便可，如此才可以令每粒砂都可以在工具板和主鏡間移動；太多砂時，砂與砂之間便會互相摩擦至泥漿狀而直接減低磨鏡速度。每次加砂，最好先把工具板抹乾才落金鋼砂。加水不可太多，也不能過少，工具板太乾，金鋼砂分佈便不均勻，容易形成泥漿狀而減低磨鏡效率。磨鏡者只要留心傾聽磨鏡時所發出的聲音便可判斷鏡面濕度是否適中。

粗磨開始時，多數的砂會被推至工具板邊而浪費掉，不過一旦中央有凹陷，大部份的砂粒就會保存 而令到磨玻璃速度增快起來。通常經過約半小時的辛勤工作，主鏡就呈現淺淺的凹形，這時可用樣片對 光來量度。

4.3 磨製球面

經過二小時後當主鏡和樣片吻合，磨程便要縮短至半磨或三分一磨，直至主鏡和工具板吻合為止。現階段要做的工作就是要將鏡磨成一個球面，主鏡是否磨成球面，可量度兩塊玻璃是否吻合。

現介紹兩種測試鏡面吻合度的方法：

a. 氣泡方法

吻合度可觀察在兩者之間加水後的氣泡而鑑定。若果鏡面彎度太深，主鏡中間

和工具板可見一大個的氣泡停留在中心位置。

如果沒有氣泡，或 氣泡大小一致，而經幾次磨動後能均勻地散佈在工具板面，這兩塊玻璃便算是吻合。因為只有平面和球面才容許氣泡在兩者之自由移動，所以主鏡應該是一個球面。用這方法試鏡時，玻璃面不能加多水，稀薄的一層已足夠，否則很難分辨實際的均勻氣泡形狀。



4.2 測度鏡面彎度的方法

主鏡彎曲面只是圓球的一部份，圓球半徑愈大主鏡彎度愈小，圓球半徑愈小主鏡面彎度愈深。圓球半徑距離 **MO** 在光學上叫曲率半徑 (Radius of Curvature) **R**，若果在球面中心放置一點光源，光線將會被弦線形鏡面 (Arc) **MN** 反射回曲率中心 (Centre of Curvature) **O** 位置，即球面的圓心。如果光源移離主鏡很遠的地方而變成像星光一樣的平行光線，光線便聚於鏡前一點，光學上稱為焦點 (Focus) **F**，其距離是曲率半徑的一半，這就是焦距。



主鏡要磨成一個弧面形，就要

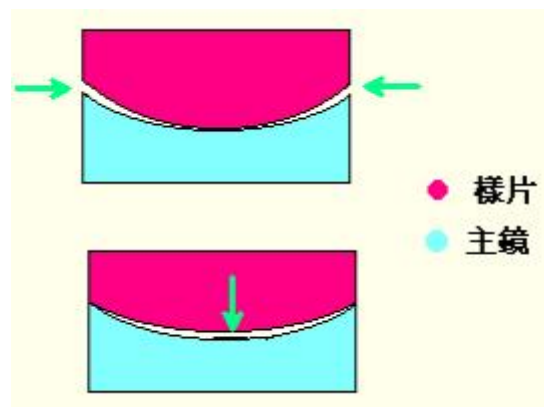
把平面至弧面 **MANB** 的玻璃磨

掉，彎曲面的中心深度 **AB** 稱

為鏡面深度，它們的關係由第

三章鏡面深度公式 (**S**) 中已清

楚表達出來，很明顯，主鏡彎



度和曲率半徑成反比。

粗磨正式開始，先落半茶匙 80 號金鋼砂，加幾滴水在工具板上，再用手指撥均勻，金鋼砂不能加太多，否則會在開始數次磨動便把金鋼砂帶去工具板邊浪費掉。隨後慢慢地把主鏡放在工具板上作圓圈形轉動數週，作用是把金鋼砂平均帶動至工具板表面。

跟看雙手放在主鏡上，用正心磨法，磨程用全磨，距離是鏡的直徑，六吋直徑計算，便是推動主鏡離工具板前三吋後三吋。施加 15 至 40 磅的壓力。壓力大小以鏡面不至於在工具板上滑走為

準。粗磨時，太過長的磨程和太大的壓力很容易把邊緣玻璃磨崩而割花主鏡，切忌心急。但壓力也不能太小，否則要花費較長時間才完成。

磨鏡者和工作檯

工作檯要比磨鏡者的腰部矮，磨鏡者傾斜一定角度，磨鏡時便可借助上身的重量以增加壓力。而且手臂和上肢是一齊前後移動的。

彎度不足夠，樣片兩邊透光，應繼續用長磨程；

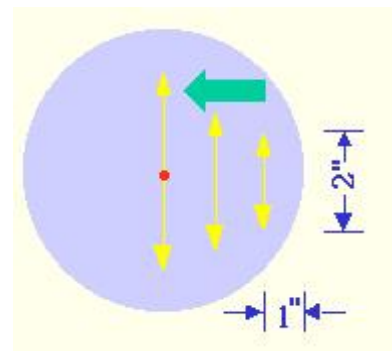
樣片中心透光便是彎度太深，可把主鏡和工具板的上下位置倒放，即主鏡固定在工作檯上，以工具板用三分一磨程繼續粗磨，原理可參考 3.4 章玻璃曲面是怎樣形成的。

當彎度減淺到預定的曲率半徑後，便再轉用主鏡在上的正常磨鏡力法。

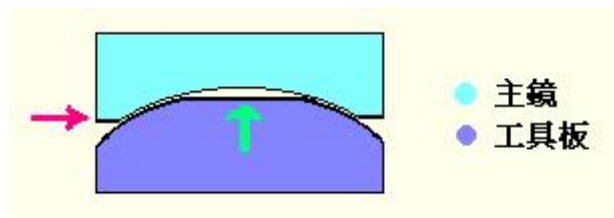
正心磨法用較長的時間才磨至預計彎度，但可獲得一個平均的圓球面。當製鏡者第二次造鏡時候，粗磨階段可採用效率較高之三分一**弦線磨法**，主鏡中心離工具板邊約一吋，所經過軌跡是二吋。

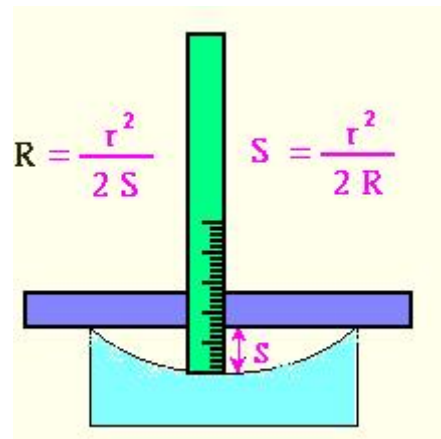
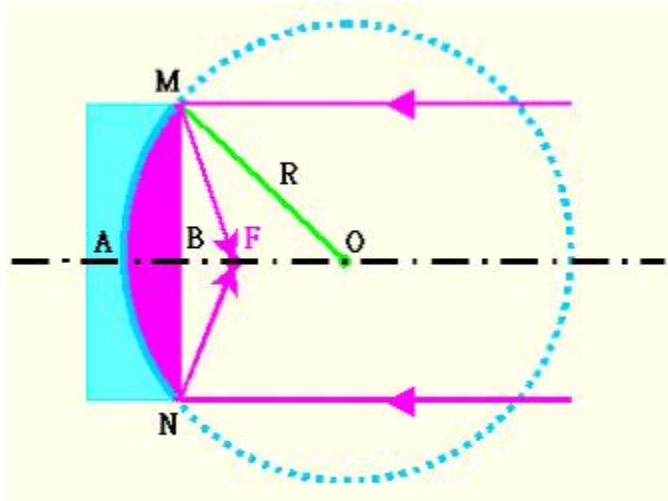
磨平邊

雖然弦線手法磨得很快，但主鏡會呈現和工具板不吻合現象，主鏡邊緣可能會完全未磨到，留下 1/8 至 1/16 吋的平邊；工具板中心則因磨不到而會形成平頂現象。不過這是正常的，在幼磨時便會逐漸磨到。



若果彎度和樣片差不多吻合，便可以逐漸把主鏡中心移向工具板中心。主鏡和磨鏡者一樣要相隔一定時間互相移動。





a. 深度測度法

粗磨時除了用樣片直接測彎度，更可以間接用量度深度方法求出鏡面的曲率半徑。工具就是兩把尺。一把平放於主鏡面上，另一把垂直量度主鏡中心至平放尺邊的距離，代入[深度公式（S）](#)中便可求得鏡面的曲率半徑，這種方法可省卻製造樣片工作，不過要預先計算粗磨時鏡面的深度，當深度不夠時便只需要繼續磨便可。最適用於正心手法，因為凹面半徑約等於主鏡半徑，那麼便不用每次都要代入公式。粗磨時要磨到

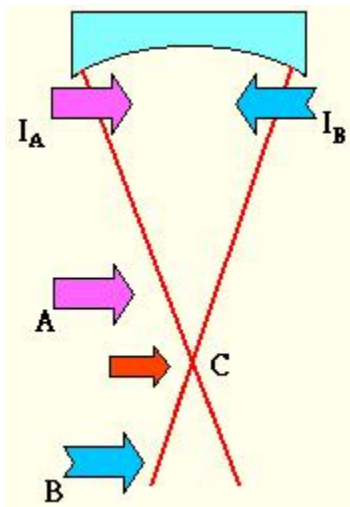
b. 洋燭測距法

這是量度鏡面曲率半徑方法，選擇在黑暗的地方測試。首先把鏡洗乾淨，用噴水壺噴水在鏡面上，而鏡則垂直的放在地面或試鏡台上，手持洋燭，先移近鏡面直至能用眼睛清楚的看見鏡裏面洋燭的影像，隨後慢慢地把洋燭移離鏡面，同時手中洋燭亦不斷左右緩緩移動，雙眼要留意鏡面反射影像運動方向，若洋燭在曲率中心 **C** 之前，位置 **A** 近鏡那邊，影像會順洋燭運動方向移動，即洋燭移向左，洋燭像亦跟隨向左方，如圖中的 **IA**。若洋燭在曲率中心之後，位置 **B** 時，影像便會作相反方向運動，如圖中的 **IB**。當洋燭在兩者之間位置 **C** 時便幾乎看不見洋燭移動，洋燭的影像也看不見，只見鏡面完全被一層強而又耀眼的光佔據，看來像一個滿月，這就是曲率中心。量度洋燭與鏡面的距離便可求得此鏡的曲率半徑，即焦距兩倍。

c. 陽光測距法

這是測量鏡面焦距的方法。粗磨初期可用尺量度法，但深度差不多時，就要改用比較準確之陽光或洋燭法測度。作者極力推荐用陽光，因陽光方法非常容易。只需要把鏡沖洗乾淨，用水壺不斷噴水在鏡面上或塗上甘油做成一層較佳的反光面，油質可以保持鏡面反射陽光時間數分鐘。

鏡面對陽光，然後把反射光源聚焦於黑暗而淺色的牆上，前後移動主鏡找尋最光亮最圓的一點，跟量度光點和鏡面的距離便求得主鏡的焦距。粗磨時，光點只呈現出一團鬆散形像，直至幼磨時光點便又光亮又細又圓，幼磨 600 號至 1200 號時，光點上還可看見太陽表面雲層經過呢！



粗磨時，鏡面的反射率極低，試鏡時，鏡面反射率降低了便要再噴水。除了用水，更可以用油質，例如用甘油去增加反射率。另外還可以在試鏡前把主鏡用 320 號金鋼砂，用三分一磨程研磨五分鐘以加強反射強度。點光源除洋燭外，現在大多數的磨鏡 都選用手電筒代替洋燭。但電筒呈圓形，不易觀察影像在鏡面上移動方向，洋燭呈長形，由鏡面反射回來的像較清楚，較易於辨認方向，不過電筒光源卻 得多，亦不像洋燭般那麼容易被風弄熄。

b. 鉛筆線條方法

用鉛筆在已抹得完全乾的主鏡面上沿直徑畫上數條粗的直線，然後把主鏡放在乾的工具板上乾磨十數次，看看線條在主鏡邊和中心被磨去的速度是否一致。若果鉛筆線留在中心，表示鏡面彎度太深，要耐心地繼續用正心 80 號，1/3 或更短磨程修正， 或間中掉換工具板和主鏡位置，直至二者吻合為止。

雖然第一次磨鏡可能花比預定時間多，但能夠在開始便做到吻合的鏡面肯定是值得的，因為在幼磨階段可以省回許多時間。

粗磨後六吋鏡，焦比 $f/8$ 的焦距應該是 66 吋。

或 120mm 主鏡，焦比 $f/6$ 、焦距 760mm ，粗磨後，鏡面的深度大約是 1mm。

右圖中可見粗磨後的鏡面，像磨砂玻璃，僅可隱約看見鏡後地面的黑線。

大玻璃是十二吋主鏡，小的兩塊分別是六吋和八吋工具板。

十二吋玻璃乃坐井會杜蘇望遠鏡的主鏡，由坐井會磨鏡組研製，由作 做組長，前後共花了三年時間，於 1981 年完成。

[十二吋望遠鏡磨製過程](#)

[坐井會的 12" 杜蘇望遠鏡](#)



如果氣泡大小不一致，

又不是均勻地散佈在工

具板面，只聚在中間，

這兩塊玻璃只可算是頗

接近吻合吧。



工具板平頂

主鏡平邊

用弦線磨法磨出來的主鏡厚度基本上不變，而正心磨法則令到主鏡損失約一分厚的玻璃，原來是六分厚的，粗磨後便只剩下五分。

陽光測距在任何磨製過程中都是最方便省時的方法。而陽光比洋燭方法較準確。沒有陽光時，粗磨階段最簡便就是採用尺量度深度方法。當磨完一段時間，量度一下深度，小於 $1/30$ 吋的便繼續，直至約 $1/32$ 吋便可改用陽光或洋燭法。

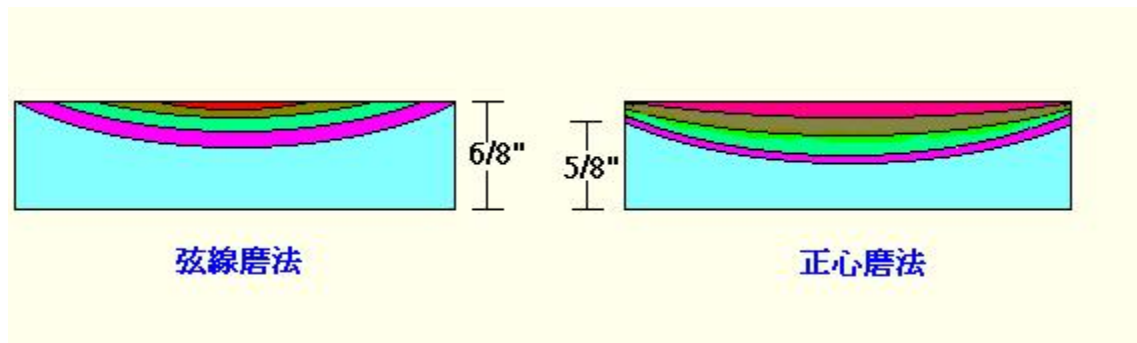
以上各種測距方法精密度低，陽光法的誤差為加減半吋，洋燭方法為三吋，所以在粗磨時測得的焦距大約比預計相差一至二吋就可以停止，待幼磨時用佛科試鏡器量度出較精確的焦距才再修正。





曲率半徑 132 吋，主鏡便由平面磨低了 $\frac{1}{30}$ 吋。鏡面深度除了用尺量度，還可以用不同直徑的銅線或鐵線放在尺下面測量。





第五章 主鏡的磨製：幼磨

5.1 幼磨

幼磨目的有三：

1. 就是把粗磨時遺留下來的的小孔逐步磨至光滑，恢復原來的反光度。
2. 鏡面和工具板磨至互相吻合。
3. 每一號砂磨到預定焦距。

注意，開始時一定要把所有的工具洗乾淨，同時用刷子把工作 上對上一號的舊金鋼砂完全洗掉，兩塊玻璃和水桶也要徹底清潔。單一粒金鋼砂也會做成災害，一條條深的坑紋，可足足要花費一、二 小時才能磨走。

幼磨時，用較短的三分一磨程和較輕的壓力。600 號和 1200 號要用更短的四分一離心磨法，短磨程更能夠把主鏡磨成球面。頻率不能太快，約每分鐘 60 至 80 次。再次加砂磨五分鐘左右，大約七、八次便完成一個磨程，聽見磨砂聲音減低或全部磨碎後，可加新砂。未加新砂前應洗掉碎了的舊砂，以免減少新砂的磨蝕力。因為舊砂的粉末會把新砂墊起，減少鏡和工具板接觸機會。一堆堆的舊砂有時會變成像粗砂的特性而會使鏡面產生一瞬間的阻力，跟 就刮花主鏡。另外由鏡邊緣脫落的玻璃碎和混有雜質的金鋼砂也會把鏡面刮花。

磨 120 號時，看看砂眼是否一樣大小，小孔若減小到每方吋一、二個的話便符合標準。檢查砂眼，先抹乾主鏡面的水份，用短焦距的放大鏡或望遠鏡目鏡（惠更斯式不合用），在燈光或強光下觀看，600 號後光源可以從鏡背後透射出來。

當每號磨砂的砂眼平均直徑一樣大小便要測試焦距，焦距要測試多幾次，可用陽光或燭光方法，免磨得鏡面彎度太深，因 120 號磨蝕力也頗強。鏡面的吻合度要常常用氣泡法或鉛筆法測試，幼磨後階段（600 和 1200）鏡面均勻度可用反射角方法檢查。120 號用正心三分一磨法，壓力比粗磨時略小，磨一小時便完成這階段。每階段所花費時間因磨鏡者的手法和技術而有很大的差別，總括來說，每一號砂能夠滿足幼磨的三個目的便成。

1) 吻合度 2) 砂眼平均 3) 磨到預定焦距

當幼磨至 220 號時，玻璃的斜邊又變得尖銳起來，這時便要再用磨刀石銼邊一次，斜角闊約 1/8 吋。這工作要在 600 號之前做妥，因幼磨最後階段的 600 號和 1200 號是不適宜銼邊的，否則從佛科測試中便可以看見鏡面邊緣呈現一條條的花痕，這是因為磨刀石本身是一塊粗金鋼砂磚。若要消除花痕的話，便要由頭從 220 號開始再翻磨過。

另一點要再提醒的，就是磨程和轉動角度不要十分準確地每次都對著同一條線，否則鏡面會產生對稱性的散光現象。轉動時「差不多」踏正預先繪好線已足夠，不著意的改變磨程和角度，經過一段長時間，「平均定理」自然產生作用，把鏡面引導成球面。幼磨主要磨滑鏡面，焦距變更不多，每階段掉換主鏡和工具板上下位置兩次左右，會令到主鏡邊緣部份亦有同等機會研磨，令鏡面更趨向球形。

幼磨後階段

600 號和 1200 號正式把鏡面打磨光滑，磨砂和水份量要適中，粉末狀的金鋼砂可預先用水調成糊狀應用，至於濃度可由實踐中找尋。

5.2 檢查均勻度——反射角方法

反射角方法乃量度磨光程度和鏡面瑕疵最好方法之一，可用此方法測量鏡面均勻度。鏡面愈光滑反射角愈大，幼磨後，反射角大約 30 度至 45 度左右。

用幼金鋼砂時，兩塊玻璃容易黏在一起，所以當水份將近蒸發乾時便要重新加幾滴水才繼續工作。注意鏡子不要停止磨動，停止數秒鐘也可能令兩塊玻璃黏在一起。一旦幼磨後階段開始，在每次加新砂之間便不能隨便歇息。假若真是黏在一起，可用木塊或木槌輕輕敲打鏡邊，或放在溫水或熱水中浸片刻，再輕輕地把玻璃垂直敲擊木板。但切勿用鐵槌敲擊玻璃，或把玻璃垂直用邊緣大力撞擊石地面，這樣做很容易把玻璃弄碎，緩緩來小心點。

用 1200 號時，一定要把以前留下的小孔完全磨掉。延長每次磨砂時間會令到金鋼砂更微細，光滑效果更理想，大約每次十二分鐘。水份蒸發乾了，用手指再加水小量，加水時主鏡和工具板不用完全離開。用 1/4 離心法打磨，手和玻璃的重量已提供了足夠的壓力。若焦距已達到，可採用等距離心法，彎度太淺則 W 形在工具板旁邊頻密一些，太深則在中心位置多磨數次。這種方法可以減少掉換工具板次數。熟習這種方法在拋光階段很有用，因為拋光時已不宜把已加瀝青的工具板放在主鏡上面打光。



幼磨前階段（120 至 320），以 3 或 4 倍的放大鏡，用反射光驗砂眼。



幼磨後階段（600 和 1200），以 6 至 8 倍的放大鏡，用透射光驗砂眼。



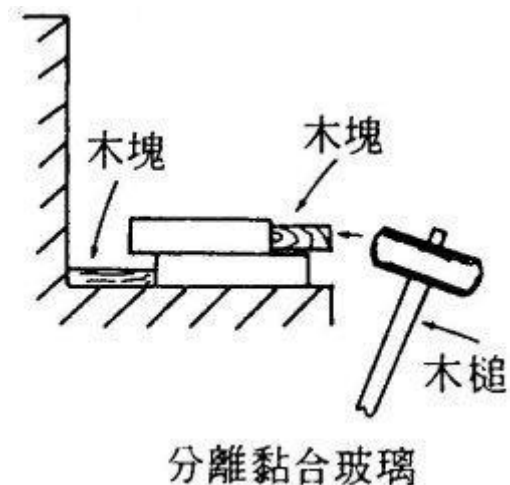
洗淨鏡和工具板後，用手輕輕放在鏡面上揩抹，看看有沒有塵粒留下，跟著倒金鋼砂落工具板，加小量水或直接加金鋼砂水溶液，用手指將金鋼砂很均勻的塗在工具板表面上，用手指另一目的是感覺金鋼砂隱藏著的雜質。

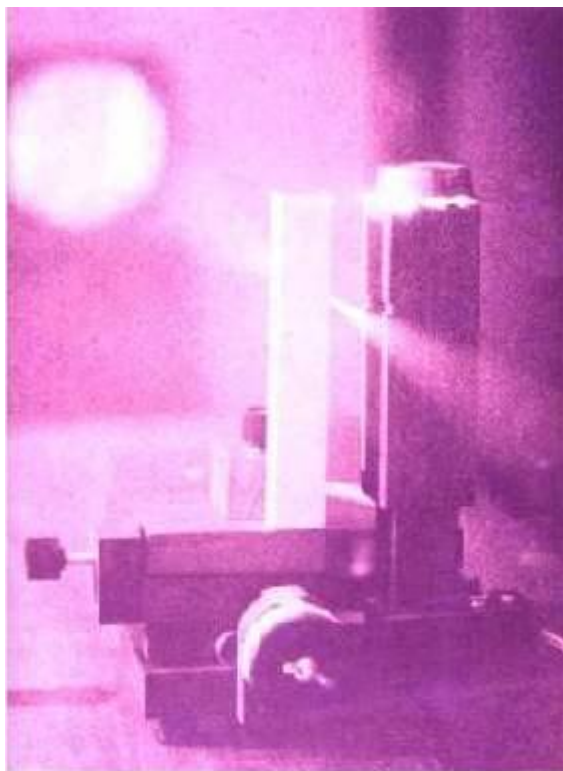
再多說一下，水份太多時，金鋼砂一下子就給推去鏡邊流走，水份太小，金鋼砂成一堆堆的濃漿，不到一刻間便很難再推得動主鏡分毫，通常用手指加幾滴水在金鋼砂上便足夠。小心，金鋼砂分佈不均勻易產生局部地區性壓力而把鏡面刮花，若加上適量的潤滑劑，如 2% 洗潔精，可防止砂堆積在一起，還令它們更均勻地分散開。

好的光滑鏡面操縱於砂的質量和砂的應用技術。間中掉換主鏡和工具板上下位置亦有幫助，不過要注意玻璃邊斜角應當一早就銼平。

磨至 600 號至 1200 號，鏡面和工具板之間很容易產生氣泡，加水和砂後，把鏡輕輕的推出工具板面，不要完全離開，同時要轉動鏡子，務求把氣泡完全趕出玻璃之間，那時才可繼續工作，否則主鏡面便不能均勻地和工具板接觸。

跟著主鏡放在工具板上，放下時用力輕輕的把主鏡托著，只讓部份玻璃重量壓在金鋼砂上，照平常的磨動數次，把砂平均分散開來，這時候，耳朵貼近玻璃，細心聽聽是否有尖銳的雜聲產生，若果有的話，就要立刻停止推動，拿起主鏡，洗乾淨後，檢查鏡面後才可繼續。若每次都有可怕的怪聲，應該考慮到金鋼砂是不純淨。要首先把砂沉澱半分鐘，倒出上層溶液應用，餘下來的切不可用，寧枉勿縱，小心為原則。





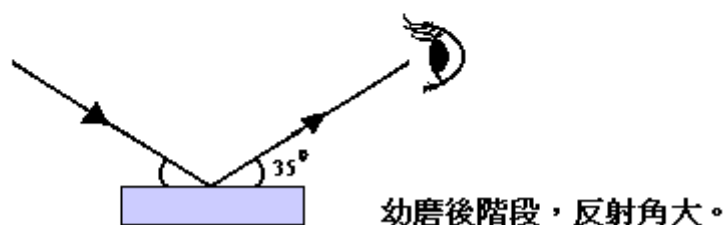
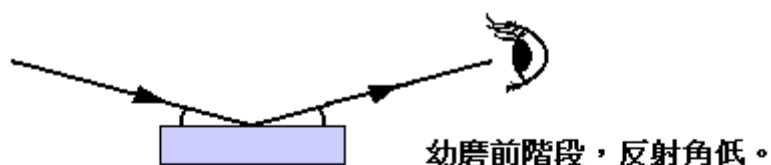
600 號金鋼砂磨出來的面已頗
為光滑，可試用佛科試鏡器量

度焦距。

若果方法不正確，磨完 1200 號後只能夠把鏡中心完全打光，其餘部份則薄濛濛一片，任何方法，譬如掉換主鏡和工具板位置，加長每次磨砂時間也不能矯正的話，便不要再花時間去幼磨 1200 號了，因為玻璃磨破玻璃始終也難於改善的，應該著手製造一個軟面的瀝青工具板，去拋光可也。不過你應該明白的就是不完全磨光的鏡面是不理想的鏡面，通常情形下是不會發生的，只是無法可想時才用瀝青模方法提前拋光矯正鏡面。

經過四、五小時的辛勤工作，1200 號完成後，鏡面呈半透明或透明狀，透過主鏡可閱讀幾吋後的文字。

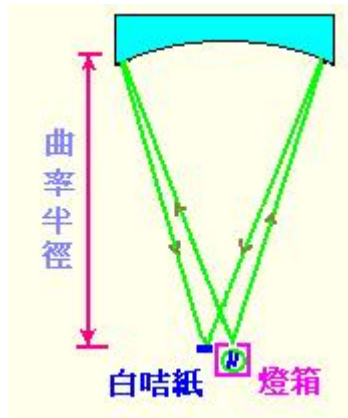
把主鏡放在試鏡架上，用刀片觀看反射回來的影像，眼要靠近刀片，刀片口略為前後左右移動使刀片能沿光軸垂直地切入影像。影像和刀片口移動方向有如洋燭方法一樣。當刀片口在曲率中心 **C** 位置時，反射光會立刻給遮擋著，鏡面呈現淺灰色，這表示鏡面是一個完整的球面。刀片在曲率中心之前 **a** 位置時鏡面便沿著刀片口移動方向暗下來。當鏡面黑影移動方向和刀片口相反時，便是在曲率半徑之後 **b**。粗略知道位置後，慢慢移動試鏡器找尋準確距離，量度後除一半便是焦距。



先用紙把鏡抹乾，雙手持鏡在電燈泡下，降低或升高鏡面，觀看反射光。可採用任何亮度燈泡，持鏡距離奶白燈泡約五、六呎，普通燈泡一呎，電光管也可用。傾斜主鏡，使反射暗紅燈光沿著鏡面由邊緣移向另一邊。當反射光源忽然光亮時顯示鏡面凸起；光源減弱，則這部份凹下。再轉動主鏡，檢查另一部份，程序和先前描述一樣。球面形的主鏡，將會看見反射光亮度在中心和邊緣地區很平均。反射光在某部份有顯著改變時，表示該區有嚴重凹凸情形，需要轉換粗砂重新再磨。通常鏡面邊緣反射光比較弱，因為每一次新磨砂開始都是先磨去中心的舊砂眼，只要繼續打磨，在每一號砂的最後階段時暗邊現象便會消失。幼磨完成後，反射角檢查法應看見橙紅色的燈泡像。



檢查均勻度



燈箱方法

比較簡單的方法就是用燈箱量度曲率半徑，只需要找出反射回來燈箱旁邊最清晰的影像，燈箱上開一個 3/8 吋，約一厘米大的小孔便可。

幼磨前階段，只可隱約的看見到鏡後的文字。圖中主鏡上用鉛筆畫了個一吋圓圈，內裏圈了兩粒砂眼。

第六章 主鏡的磨製：拋光

6.1 瀝青模

硬碰硬，玻璃磨玻璃，很難造成光滑面。所以用以柔制剛方法，先做塊比玻璃質地軟的工具板瀝青模去打光鏡面，把所有砂眼磨走，回復玻璃原來的光滑。

原料和用具

瀝青、松香、松節油、蜂蠟、紙條、木筷子、肥皂水、拋光粉和布等。

鑄模方法

選擇乾淨而沒有砂粒的瀝青，砸成小塊放在洗乾淨的罐裏，用火水爐或電爐煮溶。煮瀝青時要不斷用竹筷子或小棒攪拌，不要讓它滾起來。溫度過高，可以降低火力，以避免瀝青飛濺出來弄髒地方，濺出來的瀝青可用火水抹掉。而且瀝青是惹火物質，要小心處理，火爐旁邊預備濕布以備罐子裏的瀝青著火時用。防止著火方法就是火力不太猛烈，尤其是用火水爐和天然氣的更加要注意安全。

拋光時，瀝青模的軟硬要適中，檢驗硬度方法，可先把已煮溶瀝青倒少許在報紙上，待冷卻後用手指甲按它一下，看不見或用很大力才看見指甲痕的就是太硬；不用力就能按下的便是太軟了。

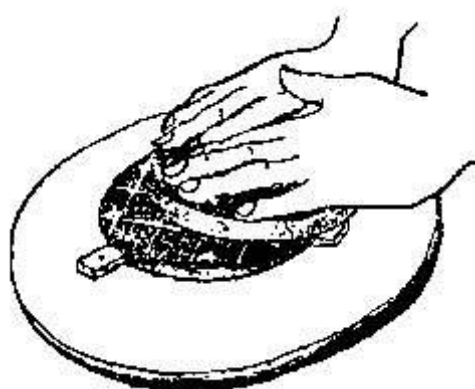
太硬的模會把主鏡刮花和造成扁球面。太軟的模則容易做成雙曲面和磨低邊。

6.2 拋光

拋光就是把幼磨時留在鏡面上的砂眼磨掉。工作時雙手放在鏡中心區域，注意手指勿握在鏡的邊緣，如果太接近鏡面，熱力會令該區玻璃膨脹，打磨出來的鏡就會在受熱地方出現小孔。

許多磨鏡者加木柄在主鏡背後拋光，以防止熱力的傳導。但木柄卻會產生很多弊病，例如在磨程中途會令到鏡前端撞入瀝青模內，或在磨程末段時主鏡脫離瀝青模邊，因此而出現另一些麻煩，所以不主張採用木柄方法。

磨程同幼磨一樣，採用 1/3 W 形離心磨法。磨程 不要太長，否則會產生雙曲面或磨低邊現象，磨低邊鏡面很難修正。長度最好以鏡邊緣和中心區差不多以同樣速度打光為準。磨鏡頻率每分鐘五十次至六十次。至於壓力方面，手掌本身的重量加上小小壓力已經足夠，當然直徑大的鏡另外有計算每吋玻璃應該加上多少壓力的方法。主鏡和磨鏡者轉動的方式和幼磨時相同，每推動十次使轉換位置，但不要在前後推動時旋轉主鏡。



圖中的磨鏡 是雙手交 在鏡背的，其實雙手也可平放在鏡背上的，分別在於當主鏡直徑夠大的時候，約六吋以上，平放在鏡背上好處是可達到壓力均勻分佈。細口徑鏡用雙手交 式可避免手掌壓力大多壓向鏡邊緣，比較適合五吋以下直徑採用。

拋光前，先洗淨工作 和一切應用工具，再看看瀝青模是否已割切了 1/16 吋的斜邊。跟著把拋光粉調成溶液，倒約一茶匙在模面，這時用雙手挑輕放在模上，跟若用手輕輕托著主鏡，繼而推動主鏡數次，小心聽聽是否有刺耳聲音，若果一切平靜，便可以依正常程序施工，反之便要把模和主鏡再清洗一次。若果連續數次都有砂粒聲，便要考慮到拋光粉是否有雜質。最好的習慣就是把拋光粉用「沉澱法」洗淨。沉澱洗淨方法很簡單，將同等份量的拋光粉和水攪拌半分鐘，再讓其沉澱半分鐘，傾倒出上層的拋光粉溶液在另一盛器內以便日後應用，在底的雜質就不用了。上層溶液應該沒有顆粒硬物，這時可以用小瓶盛載，用時搖勻便可。至於每次加拋光粉的份量應該是多少，很難明確指定。這基於主鏡大小，瀝青模方格大小等等。通常最初用濃的溶液，以使瀝青模完全佈滿拋光粉為止，以後僅加足夠份量使可。濃的粉可以增加打光能力，不過稀的粉卻可以磨出完滑的鏡面。所以在拋光後階段便逐漸用一比二的溶液了，而開始則用大約一比一左右，隔五至十五分鐘加粉一次。

拋光時先轉動主鏡十數次以便把拋光粉平均分佈於瀝青模上，其後主鏡加上重物冷壓十分鐘，目的就是肯定模和主鏡都互相吻合，每次工作前都一定要重新用「冷壓法」處理瀝青模，若模不大合稱可改用「熱壓法」。每次工作完畢先在模上塗滿一層厚拋光粉溶液，主鏡放在上面，用濕毛巾蓋好以減低水份蒸發，不用加重物壓，這樣可保持一兩天時間免至兩塊玻璃黏在一起，同時儘量避免沙塵吹在模上。

打光最初目的就是把砂眼磨掉，所以在開始階段只要不斷打光，停下來只是為了重新加粉，加粉時主鏡亦不需要完全離開瀝青模，僅僅把主鏡推往一邊，粉溶液加在邊緣的方格便可。每次加拋光粉磨 5 至 15 分鐘，直至差不多乾為止，因為拋光粉在這時才發揮它最大的打光功能，但又不能完全磨乾水！否則便黏在一起。每次拋光最少工作半小時，以便主鏡和模有時間互相吻合起來。但不能連續超過一小時，因為瀝青模受熱會變軟，造成雙曲面或磨低邊現象，最好稍稍休息一下，冷壓模十分鐘。

開始時，我們會發覺模和鏡並不十分吻合，瀝青模有時會把主鏡吮著不放，有時又讓主鏡滑向某一方向，總之就是不順暢。不要擔心，在最初一段時間內所有新模都是這樣。

半小時後，便要檢查鏡面，洗淨和抹乾主鏡，主鏡表面應全部呈現半透明，這樣你便可以安心繼續打光。假若鏡面並不是很平均的打光，暫時也不用灰心。例如，鏡中央部份光比邊緣打光也是正常，因為模邊方格容易被中心的壓低，同時鏡中央區域常常和模接觸亦有關。若果模硬度適中，經過一段時間打光，磨光位置便擴展至鏡邊緣。驗鏡後要冷壓十分鐘然後才可以再開始。

一小時後，瀝青方格應該表現出一致的啡黑色，若果主鏡與模吻合的話，每次推動時會感覺到有一種順滑而平均的吸吮力，活像有一層潤滑液在兩者之間。若果你這時仍然感覺有吮著或纏著情形便要重新壓模。有時拋光粉份量太小，工作環境太冷，瀝青模太硬亦有同樣情況出現。另外還要看主鏡的邊緣是否又尖銳起來，需要時便要用幼磨刀銼一下，避免被璃碎跌落刮花主鏡。

兩三小時後，主鏡應該呈現透明狀，但當用一吋短焦距的放大鏡利用反射光細看時，你會發覺還有很多細小的孔留下，近邊緣的中央多。這時候我們還要繼續努力，直至所有小孔完全打掉為準。另外要注意，槽坑是否已經被擠在一堆，或瀝青模被壓出邊緣，有的話便要用小刀再修一修。模邊要常保持比主鏡直徑細 1/16 吋，以避免主鏡在打光時碰在隆起的部份而造成「磨低邊」現象。

五、六小時後，應該看見一個完全透明的主鏡，用放大鏡看，光源由從鏡後照射，若沒有小孔，拋光程序便算完成了。較精細檢查鏡面的打光效果方法是用 500 瓦燈泡，傾斜 45 度角，用肉眼檢查鏡面瑕疵，至於霞氣花痕便會無所遁形。完全打光後，主鏡看來比新購回來時的玻璃還要光滑。

以上講述某段時間將會出現的情形，只是提供一幅普通工作進展的圖畫。每一個磨鏡者都有自己的工作特色，有的同好兩小時便完全拋光了，另外一些同好打光整個月也見鏡中心有霞氣一團。只要你瞭解整個打光過程，掌握其中修正技術便很足夠了。

經過數小時的辛勞工作後，有時卻沒有這樣幸運，你仍然會發覺中央或邊緣始終有一區域完全不打光，慢慢來不用心急，先研究成因再用不同技術去矯正。暫時，我們只靠肉眼觀看反射光源，檢查鏡面的反光程度表現的特徵而進行修正。

好彩的是，若幼磨跟著建議的方法一步步做，很難會發現畸型鏡面的。

正常情形下，六吋鏡需要拋光六小時，八吋鏡的約十五小時。

當你拋光完畢，鏡面的小孔、花痕、灰色霞氣等，若果不是太多太大的的是不會影響鏡的質素。長焦比望遠鏡，6 吋 $f/8$ ，只要求一塊球面主鏡，原則上，你正確地跟著步驟做的話，你可以說完成了，一塊已拋光的鏡便是一塊完成了的主鏡。對於一個初學者，嘗試磨製第一塊鏡時，我們

是不能要求太高，先把它鑲在筒裏，看看自己的成果，有興趣才再改良，相信更引起初學者的趣味。

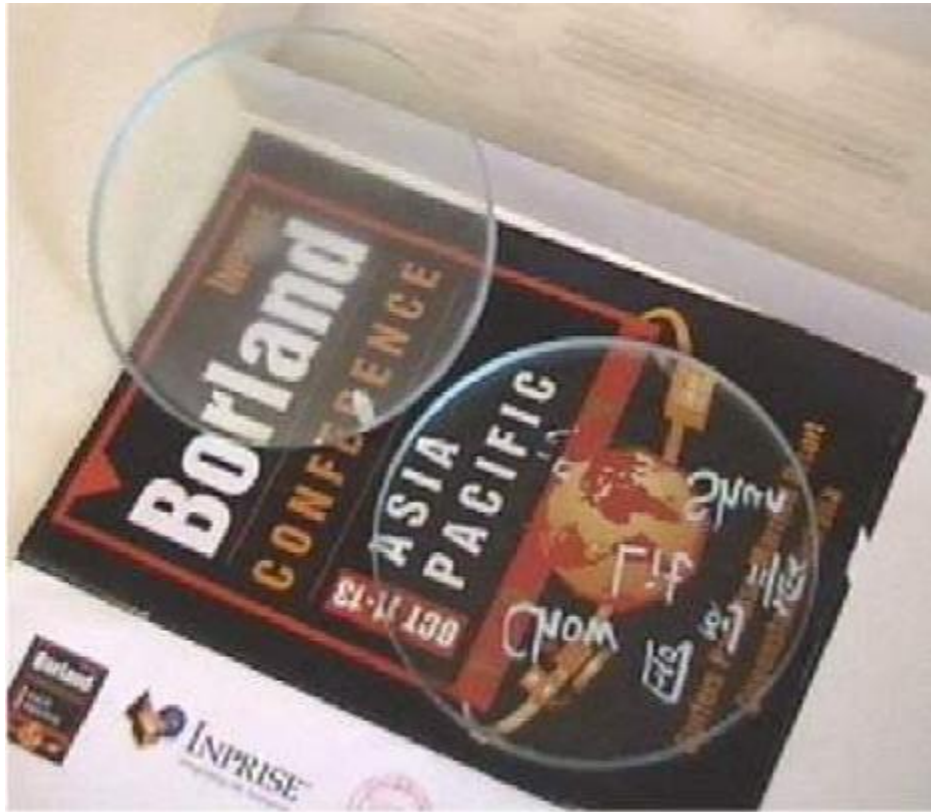


拋光足夠的主鏡面



拋光未足夠的主鏡面，整塊鏡面 呈現灰色霞氣，
可以見到中央區的電光管現暗紅色，反光率比邊緣區弱。

左上的主鏡面拋光未足夠，觀看鏡後的字體時顯得朦朦朧朧。



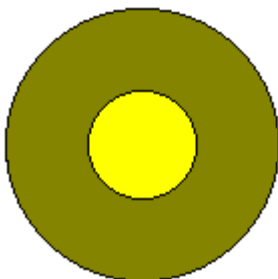
右下的主鏡拋光足，鏡後的字體非常清晰。

實際上，主鏡應該是拋物面，但磨製這類鏡面並不容易，不能單靠運氣，而是要很多時間和多次光學測試去矯正才能夠完成。當然，如果我們要磨製第二塊時，便一定要向光學測試和鏡面矯正這一關挑戰。

鏡面未完全拋光時出現的問題和解決方法

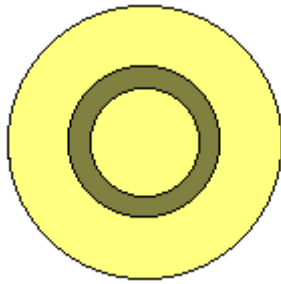
1. 中央部份打光

正常情形，可以繼續。



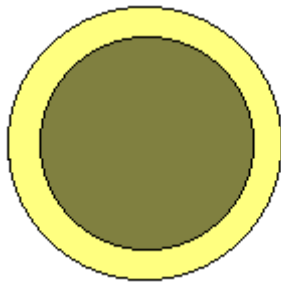
2. 環形區不打光

瀝青模和主鏡不吻合，用熱壓法處理後再打光。



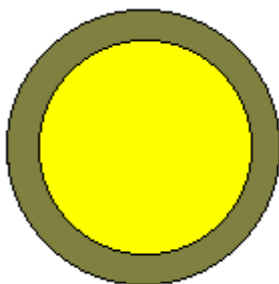
3. 邊緣打光

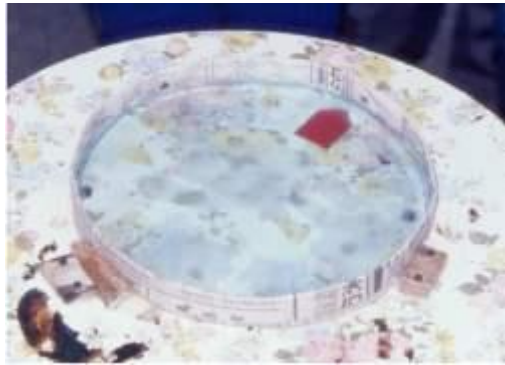
模中央低陷，用熱壓法或重做瀝青模。另外主鏡可能是雙曲面，若果瀝青模吻合的話，便要考慮是否要重返幼磨，留意每一號砂都要做到主鏡和工具板吻合。



4. 邊緣不打光

這是磨平邊現象，大多數是幼磨時邊緣的砂眼未完全磨走，便換新砂。繼續打光，沒有改善的話，便一定要重回幼磨，由 120 號砂開始，每次轉換新砂前，都要詳細驗查鏡邊的砂眼，符合每方吋一至二粒砂眼才可換砂。





在這段時間裏同時要準備一張硬紙條或薄鋁紙，用舊報紙摺幾重也可以。它的闊度比工具板大 1/4 吋。注意，工具板厚度應該比開始時略為薄了，紙條總高度要略調整一下。紙條的長度以能夠把工具板圍成一週為準，大約是鏡直徑的三倍半。

太厚的瀝青模，吻合困難；太薄的瀝青模則難製造。通常瀝青模的厚度是 1/4 吋至 1/16 吋，約 6 mm。

刻槽前，預先在瀝青模用筆繪上方格。造完坑紋後，把工具板和主鏡重新放在熱水中浸，瀝青軟了後，拿出來再加上一層一比四的拋光粉溶液，又加上重物熱壓五分鐘，壓完後部份坑紋可能會消失，用刀仔重新修槽，以水作潤滑劑，不過一定要等待瀝青模溫度降低後才進行，可以用和室內溫度相同的自來水凍之。主鏡和瀝青模切忌用猛火燒軟，這樣瀝青模便因接受不均的熱力而變形。可放在約 110 度 C 的焗爐內，直至看見瀝青模面光亮或軟化便可拿出來。正常情形下，經過三次翻修，假若模和鏡面完全的吻合便大功告成。最後一兩次修模可用「冷壓法」，即是省卻熱水浸步驟而直接用重物壓，重量可增加至二十磅，壓二十分鐘。

其它的壓槽方法就是用一塊壓槽膠模（Rubber mat），或壓槽機。還有用鐵棒，燒紅後直接在瀝青模上造出槽坑，做好一排後，再轉 90 度做另一排。

鑄瀝青模時出現的問題和解決方法

a. 氣泡

佈滿氣泡的瀝青模出現是煮瀝青的火力太猛，氣泡又沒有足夠的時間讓它們完全離開便倒瀝青在工具板上。應該用慢火煮，火力要適中，既要使之溶化，但又不能讓之滾起。



b. 低陷區域

瀝青模有部份地方陷下，可能是洗潔精的大氣泡的傑作。加溶液前便不要攪動得太厲害，放重物前把所有氣泡趕掉。有時旋轉主鏡，由工具板邊逐漸向中心推進亦可避免大氣泡。

亦有可能是瀝青不足夠，這現象多數出現在工具板邊緣區域。補救方法就是用匙倒適量瀝青溶液在這些地方，重新再壓。瀝青不宜過多，否則很難修平模面多餘部份。

主鏡猝然的平放在半凝固狀態的瀝青面也會圍困著大氣泡。用輕輕力放下，然後慢慢轉動主鏡便可解決。瀝青模面小小陷落部份可以用普通的蠟填補後再冷壓。



氣泡

c. 軟模

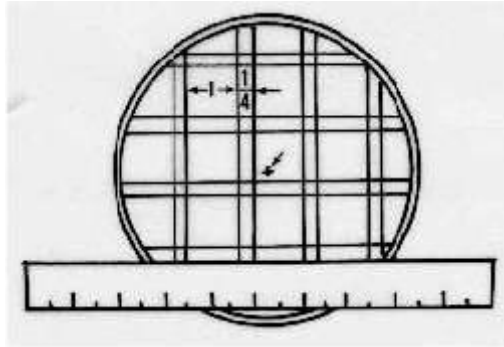
主鏡在最初推動時，黏起瀝青，可能是瀝青未硬化或太軟。重新嘗試找尋最適當凝固時刻才放上主鏡。通常在氣溫 30 度 C 以下，四分鐘便已足夠，太久瀝青模會變得頗為硬，沒有足夠時間壓出吻合面。炎熱夏暑的中午時間最不宜鑄模，加上成斤松香也沒法改變得硬一些，靜候陰涼寧靜的晚上再試一趟。

瀝青塊模（Pitch Squares）

塊模最宜於製造彎度深和直徑大的拋光模，基本原料仍然用瀝青，不過並不是整塊一次鑄成。首先做批瀝青塊，然後一塊一塊的黏合在工具板上，跟著像普通壓模程序，用熱壓法把模成形。預

製瀝青工作手續比較多，但卻可獲得吻合度最好的模，著名製鏡者卡拉卡（Clark）和域士（Ritchey）都是採用這種方法。

拋光模還有用布造的和紙造的，分別為眼鏡片商和早期製鏡者所採用，拋光後都遺留下像檸檬皮一樣的瑕疵。雖然拋光模有許多種，但大家都要清楚一件事，就是所有價錢貴，質素高的光學製品全部都是用瀝青模拋光的。



6 吋鏡一吋方格，1/4 吋闊槽坑。

再在主鏡背上加上約十五磅或七千克的重物，為了避免壓壞主鏡，最好在鏡背上先放上木板或厚紙。熱水浸後壓主鏡的叫「熱壓法」，每次約壓五至十五分鐘，不要壓得太久，否則玻璃和瀝青模會黏在一。

壓鏡時，要注意是否有充足肥皂水。肥皂水，洗潔精溶液，或拋光粉溶液有潤滑作用，使主鏡和瀝青不會黏在一起。另外，看看工具板是否放在水平位置上，否則完成後的模便有厚薄，還可能在壓模中途主鏡滑下來，這樣不均勻的模在拋光時會造成不便。

這時部份瀝青會被壓出工具板邊緣，暫時可以不加理會。待壓模完成時後，用鋒利的小刀把鏡邊溢出來的多餘瀝青切掉。其後拿開主鏡，在模上用小刀或木鑿在模刻上 1/4 吋約 6mm 闊的 V 形槽坑便完成整個鑄模手續。

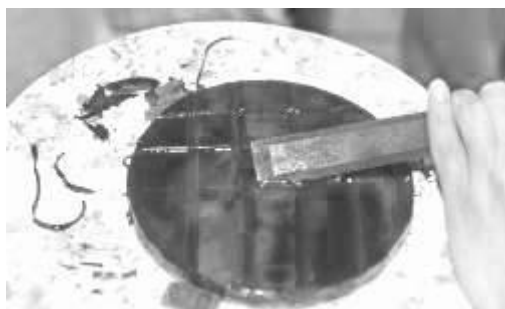


當瀝青溶化，軟硬度亦檢驗之後，便從熱水中拿出工具板，抹乾後，用紙條沿邊緣圍成一圈，用膠紙貼好後，固定在工作 上。跟著熄火，用鐵鉗把罐子拿下來，待瀝青不再滾或氣泡消失後，大約數分鐘，才慢慢地將瀝青倒在工具板上，由中間開始。

注意不要立刻倒熱瀝青在工具板上，否則太熱的瀝青會把玻璃弄裂的。

約二至四分鐘，瀝青模便在半凝固狀態中，這時主鏡和瀝青模表面均塗上肥皂水或 1% 清潔精溶液或拋光粉溶液 。

拿起主鏡，再加上適量肥皂水，放回主鏡時要趕掉氣泡。





硬的瀝青模可加上一兩滴松節油，用竹筷子調勻再煮，軟模可把瀝青猛火煮多一段時間，作用是把多餘的瀝青溶液蒸發掉，猛火煮瀝青時，你將會發覺黃白色的煙冒出，小心避免著起火來。另一方法就是加少量松香在瀝青裏一起煮。選購工業用的瀝青做模的要留意，通常瀝青裏的溶液比較多，瀝青比光學瀝青軟很多，加松香效果不顯著，最好用猛火煮數分鐘後才試軟硬度，若果倒出瀝青後要十多分鐘才在半凝固狀況的，瀝青大多數是太軟，應該再猛火煮多一段時間後，再試硬度才可做模。可能的話，在瀝青裏加進 5 至 10% 蜂蠟，蜂蠟瀝青模特別爽滑，又不會動手，刻槽紋時容易很多。

煮瀝青時，可把主鏡和工具板放在熱不燙手的水中，約攝氏 50 度。因瀝青在凍的表面凝結得很快，沒有足夠時間壓成和鏡面吻合的曲面。熱的玻璃則延長鑄模時間，而製造出接觸優良的瀝青模。

槽坑

瀝青模上刻槽坑的原因有三：

1. 使拋光粉和水有地方貯存和流動。
2. 槽坑引進空氣，防止玻璃互相吸吮。
3. 最重要的就是讓瀝青在被壓時能夠有地方舒展，避免瀝青擠向模邊緣。

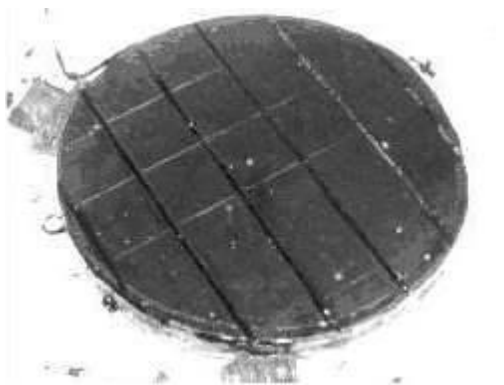
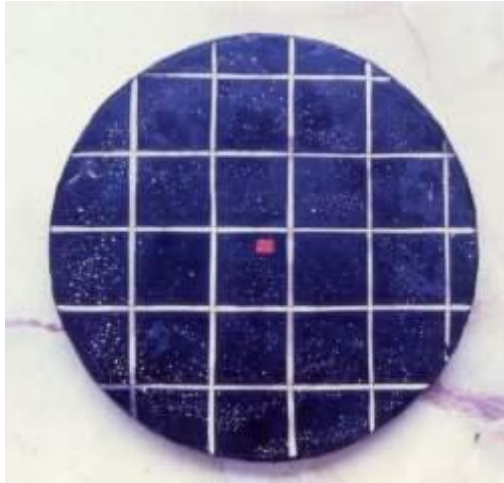
這塊 120 mm 直徑的瀝青模刻上了 20mm 大的方格

瀝青模用了有氣泡的瀝青鑄成，完成的模上留下一個個的小孔。





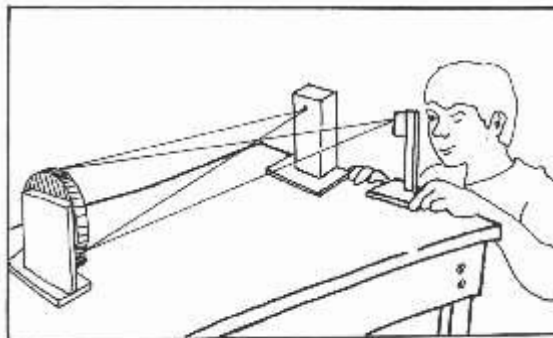
然後主鏡輕輕地放在瀝青模上，用力壓一會兒，隨後以平常磨鏡方法推磨十數次，直至瀝青開始硬化為止，磨程不能超過二分一，以免壓掉邊緣的瀝青。



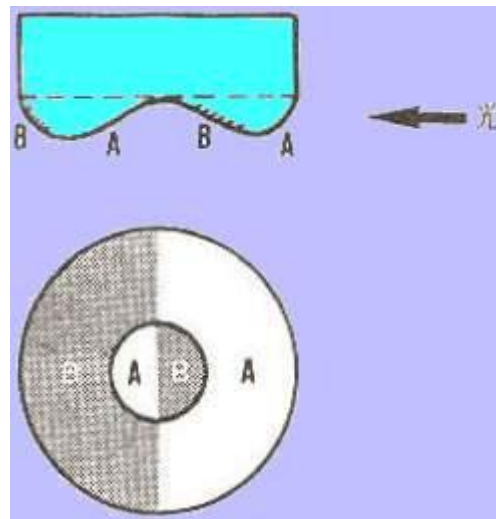
注意，槽坑不得經過鏡心，鏡中心也不能在四方格子的中心，應在格子的角，鏡中心約離槽邊 1/4 個格子闊度，因為對稱的槽紋在拋光時會產生對稱環形面。格子大小視鏡直徑而定，6 吋至 8 吋直徑的可用一吋方格，10 吋至 12 吋鏡工具板的格子約闊一吋半便足夠，太大的格子又會產生環形後果。通常我們避免拋光時磨低邊，都會在修模時把模邊緣切成 45 度，闊 1/16 吋的斜角。

第七章 主鏡面的測試和修正

7.1 測試鏡面

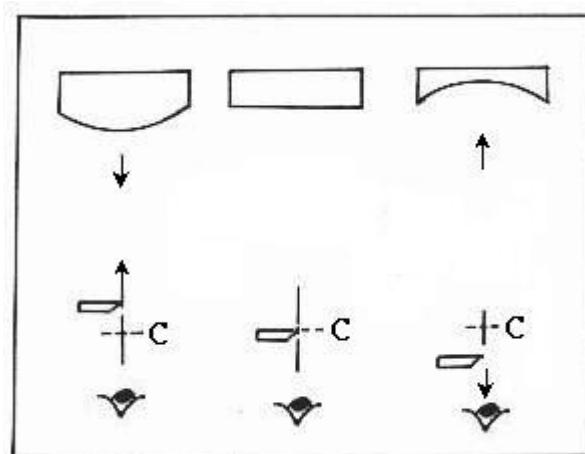


首先把**佛科試鏡器**放在主鏡曲率半徑位置，把反射回來的光源自左切入，觀看鏡面影像濃淡變化，有如光線自鏡右面斜斜地照到物體上產生影子，隆起的地方被照亮，沉落下去的就暗下來，活像山 和峽谷。



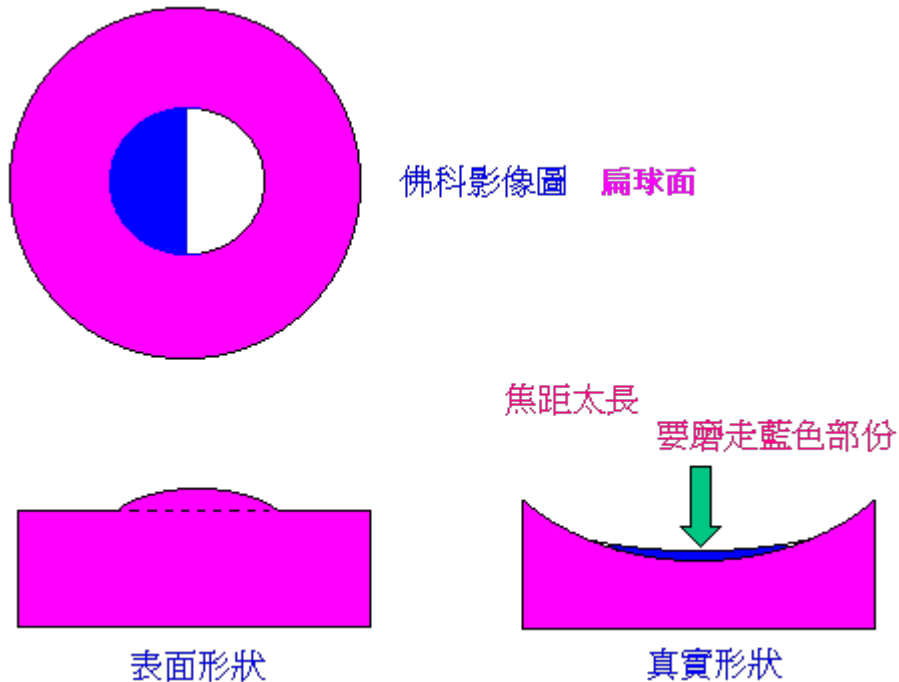
其實是射回來的光源因應鏡面的不規則形狀或傾斜角度而向不同方向反射。刀片把一部份光源完全擋著而另外的則順利通過，所以鏡面有部份地區呈現黑色，其它的呈現淺灰色或完全光亮的情形。佛科試鏡器只放大縱方面的缺點，橫方面的完全和主鏡大小闊度相同。微小缺點已能夠產生很大的反射誤差，差距愈大，放大程度愈明顯，黑暗區愈分明。

跟著研究鏡面出現的形狀，這時我們要把它們看成是立體的東西。你將會發覺到刀片移動向鏡子時，鏡面會隆向刀片，移後時鏡面便慢慢凹下。一塊相同的鏡面，當刀片移在不同位置時會產生不同的形狀。例如看扁球面，近看時隆起，移離時看見中心地區下陷，那時用何種手法修正便無從決定。所以我們一定要清楚各類形鏡面出現的原因，以便掌握正確矯正方法。



還有一點要提醒一下的，就是佛科像並不是鏡「真實形狀」，只是一種「表面形狀」而已。我們利用這些「表面形狀」去繪出 構想圖，於是修正鏡面便有正確的參考資料。當然，大家最好能夠對鏡面的真實形狀有透徹的認識。

扁球面



試鏡要點

1. 放置主鏡的架要穩妥，以免測試途中主鏡掉落地。
2. 預先量度曲率半徑距離，並在測試抬上作記號。
3. 試鏡地點不要全黑，有小量光源會產生更佳的反差效果。
4. 眼睛要盡量貼近刀片，離得太遠時你只看到蝴蝶形狀的影像。
5. 用點光源的試鏡機有時會看見自己眼球內液體流動情景，試鏡時產生很大困擾，可能把這種生理現象誤會為粗糙鏡面。所以測試時，眼睛離刀片不多於半吋。戴眼鏡的朋友，可以改用裂隙光源，以抵消這種反射情況。若配戴隱形眼鏡的朋友常常檢驗不出鏡面的準確形狀，便要檢查一下是否鏡片屈光度數不對。
6. 試鏡機的刀片和主鏡光軸要在同一平面，方法之一 就是把試鏡機推近鏡面，看看光源在鏡裏的位置， 隨後緩緩移動試鏡機以保持光源在鏡中間。光源離開刀片口的，便要稍稍調節主鏡的反射角度。
7. 影像光暗區域是有層次的，即由光逐漸至暗。明顯劃分光暗區的，表示鏡面缺點很顯著，要立刻停止原來磨鏡方式，想辦法矯正。
8. 分析鏡面形狀，最好察看不同刀片口位置影像。但許多時只要看看每種面的特性陰影像便可知曉，通常是指在平均焦距 c 位置的影像，圖中用方框圍的像。

9. 扁球面和雙曲面影像圖非常相似，不過位置不同而已，要小心測多幾次。拋光時，各位將會發覺到的就是鏡面缺點許多時會一併出現，山 內又會出現小洞，凹凸環也可以在同一鏡面產生，簡直令你難以置信，而修鏡最重要是試鏡所提供的正確資料。

最後要補充的，就是為了表示各類形鏡面的差別，曲率半徑的誤差值是極度誇張的，實際上的數字是以毫米計算。

7.2 修正鏡面

「釐清先於修正」乃矯正鏡面最重要的步驟，所以一定要先認識清楚鏡面真正缺點的成因。指導你的老師就是你自己的「普通常識」，若果你常去想想磨鏡手法和瀝青模對於鏡面的影響，那麼你因修鏡而引起的煩惱便自動減少。在修正過程中，要常常想像把鏡面修為刀片口顯示出的「平面」現象。例如，似凸出來的山丘，中央區應該比其它區磨去玻璃的份量多。修正時候，更要考慮好幾個因素：壓力、拋光時間、磨程、工具模表面的形狀、工具模的大小和拋光速度。每種因素並不是獨立的，是互相關連的，互相影響的。所以要視乎鏡面的形狀，而採用不同的技術。

1. 磨低邊

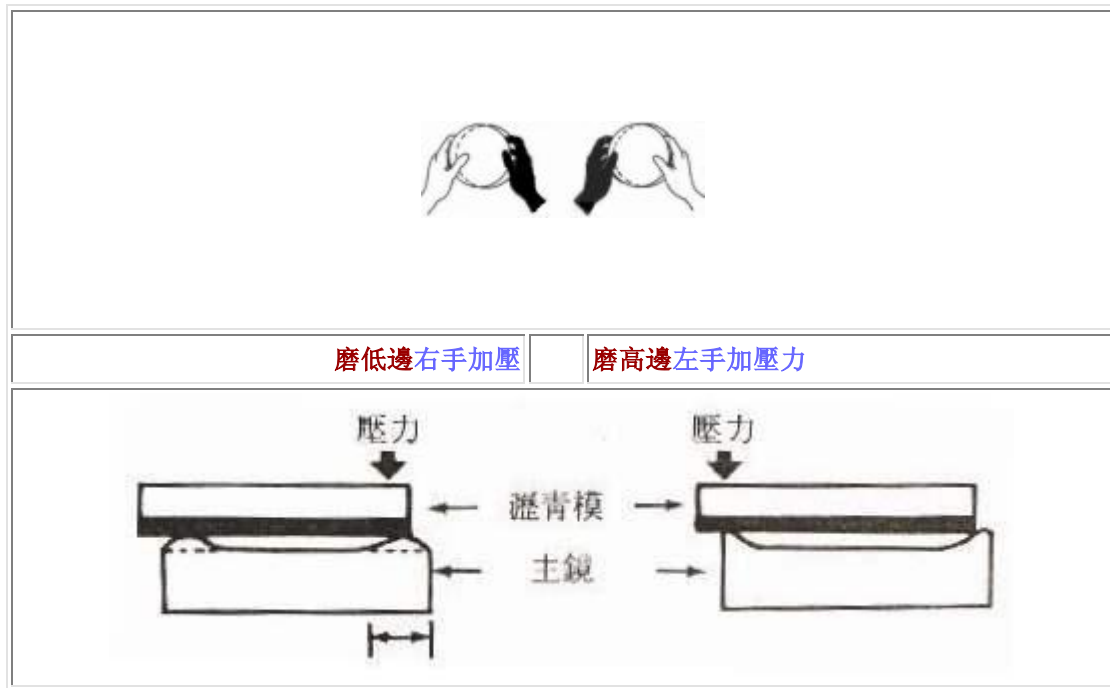
低邊是鏡邊緣的焦距比中央區長，其成因有許多，主要的如下：

- a. 在鏡兩邊加壓不平均。
- b. 磨程太長。
- c. 模太軟。
- d. 幼磨不小心做成。

若果由開始便採用 1/3 磨程的，很少會出現低邊問題，基本上是由幼磨階段粗心所致，未詳細檢驗鏡邊緣的大砂眼便跳入下一號砂。可以持續用 1/3 正心磨法，每次十分鐘便測試，有進展時便改為五分鐘週期，直至完全修正為止。亦可用短磨程配合硬模，以窄 1/4 “w” 形磨法，每次五分鐘，冷壓後再重覆三次。若果經過長時間也沒有改善，便要返回幼磨。

模上鏡下方法：

模在上，利用模邊作工具，右手加壓，左手扶持和轉動瀝青模但不需要加壓力，以 1/4 弦線手法磨鏡。磨鏡者繞工作台轉兩圈才轉動主鏡 90 度。



2. 磨高邊

很少有嚴重高邊出現，而且也比較容易矯正。用長磨程，每次週期約二分鐘，經過幾次後還沒有改善的便停止以避免鏡中央又磨出小洞來。

模上鏡下方法：

左手加壓力，右手轉動主鏡，小心點，因為此種方法很容易做成磨低邊的。

3. 扁球面

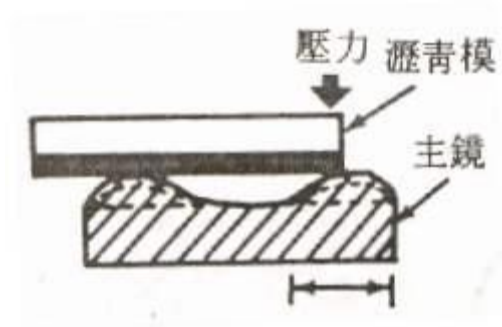
磨程太短，長期採用正心磨法，模太硬等都是做成扁球面的原因。用 $1/2$ 或 $3/4$ 寬 W 形手法，磨五分鐘，冷壓五分鐘，重覆三次後試鏡。若果有小洞時便要縮短磨程。

4. 雙曲面

長磨程和軟模是雙曲面形成的主要原因，用 $1/4$ 短磨程矯正。

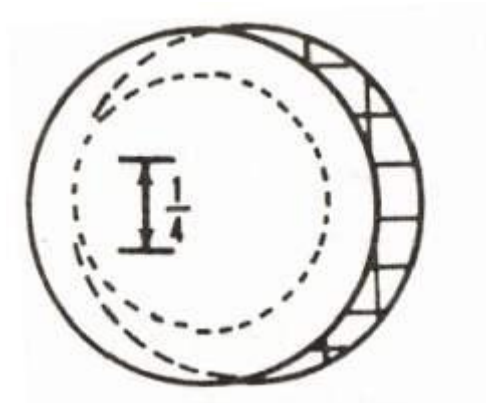
模上鏡下方法：

用 $1/4$ W 形手法磨雙曲面的「 \cup 」，右手加壓於頂，左手轉動主鏡，若果曲度平滑的話，可直接磨成拋物面，否則便要先修正為球面。模上鏡下而施加壓力於模上局部區域的方法，我們稱之為「定位打光器」方法。



5. 環形區

主要是瀝青模產生問題。凸環由低陷的方格引起，凹環則由於方格昇高。亦可能是某方格加多了一層其它不清潔的雜質，諸如塵埃或拋光粉等。修理瀝青模當然是最貼切方法，用熱壓法或長時間的冷壓法處理，然而開始便發覺有環形區，便要考慮方格中心是否太接近模中心。

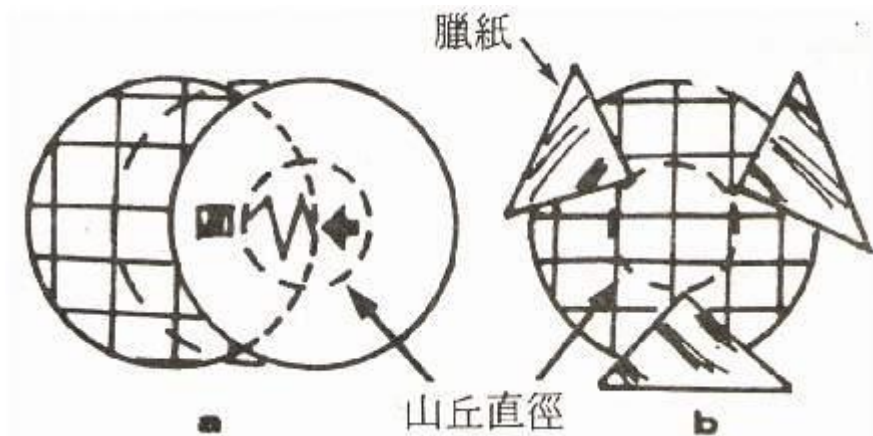


細模方法：

凸環易消除，正當地用把凸環區放在模邊上用 $1/4$ 磨程便可，頑固的凹環則要用細模方法，模的直徑為原來的三分二，模上鏡下，加壓於模邊，以磨去圍繞環狀的高起地區，有改進時，便立刻改用大模。

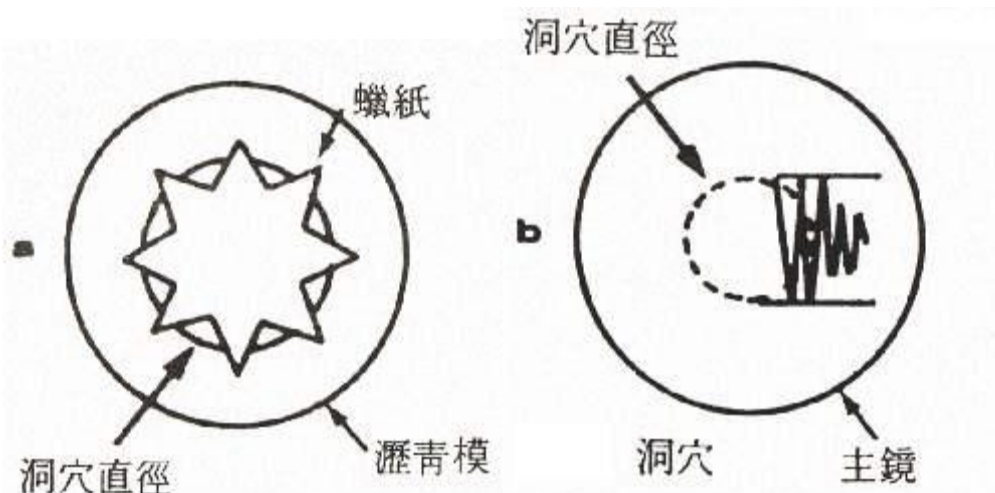
6. 山丘

用 W 形手法磨程為山丘的半徑。用意是使山丘直接在模邊磨動，玻璃本身重量提供的壓力已足夠。冷壓五分鐘磨三分鐘，注意主鏡每次一定要完成一週的轉動，通常經過兩週後，山丘便會被削平 (a)。另外可用三角形蠟紙把模邊壓低，以減少該區的接觸面，用 $1/3$ 磨程，這樣中央區被磨去的玻璃便比邊緣多 (b)。



7. 洞穴

把模中央部份壓低，以減少該區的接觸乃矯正洞穴的基本概念。用剪成星形的蠟紙放在熱模上，加壓冷卻後拿開星形紙，用 $1/3$ 正心磨法，磨動十五分鐘，以便把大量玻璃磨掉，以便保持原來的焦距。因修山丘過度而形成的洞可用正常模配 $1/3$ 正心法矯正 (a)。



細模方法

模上鏡下圍繞洞穴在高起的地方磨動，以橢圓形手法的效果最理想，最後亦要改用大模處理 (b)。

8. 粗糙面

鏡面不平均多數起因於磨動太快和模不吻合，或模溫度未降至室溫便開始磨鏡等等。而每次磨鏡週期太長造成模變形，使部份方格受熱膨脹也可以令鏡面磨得不均勻。冷壓模，減慢磨動速度後再試鏡。太深的研磨痕，無可避免的要重回幼磨的工序了。

修鏡要點

1. 常常試鏡。

2. 每次修鏡時間要短，約三至十五分鐘。
3. 每次工作時，主鏡或磨鏡者要完成全週期繞動。 必要時，可以用膠布貼在鏡背作為起點。
4. 熱壓後，冷卻二十分鐘以上才可開始工作。
5. 小心運用瀝青模。壓力大小，磨鏡手法，模方格大小和形狀等都會改變它的脾氣。
6. 「定位打光器」方法祇適合經驗比較豐富的磨鏡者，不善用的話，會令鏡面產生更複雜的問題。 所以對於初學者，最安全夠步驟就是簡單地改變磨程或延長拋光時間。

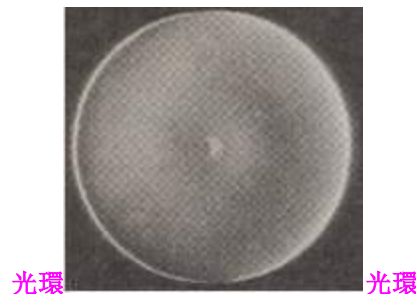
經驗乃治療鏡病的最佳藥物，所以磨鏡者都必須擁有自己的修鏡記錄，記下鏡面的形狀，修鏡時用的方法。磨程、壓力、磨鏡時間等等。事實上翻查研究記錄乃磨鏡者成功的秘方。

佛科像圖解

磨低邊（Turned-down Edge）

每次測試我們都會看見干涉光環圍繞鏡邊，當刀片自左切入時，左半邊光環消失，右邊仍然強烈地照耀的話，便是磨低邊現象。如果切入時鏡邊緣仍然有一個光環，此鏡便沒有低邊象。

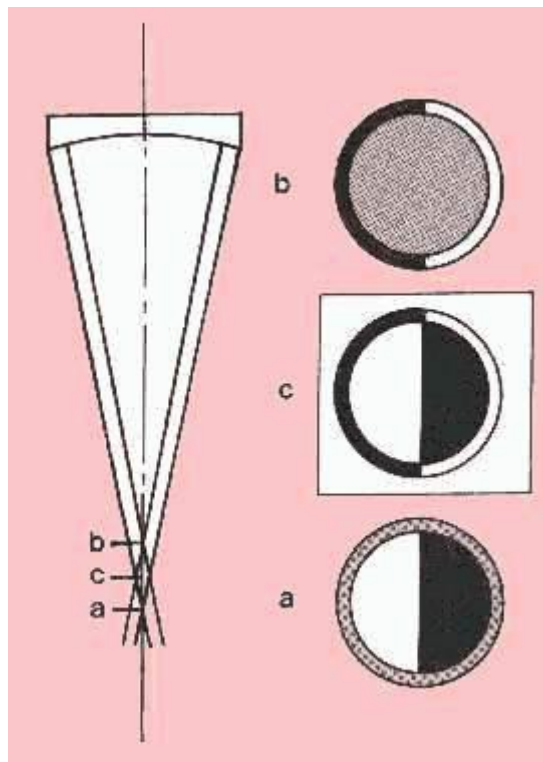
佛科影像



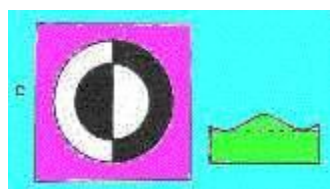
干涉光環圍繞整塊鏡邊



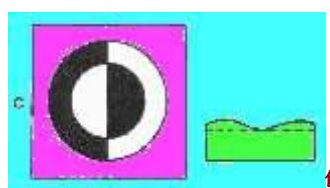
磨低邊中央區有研磨痕



眼睛要盡量貼近刀片

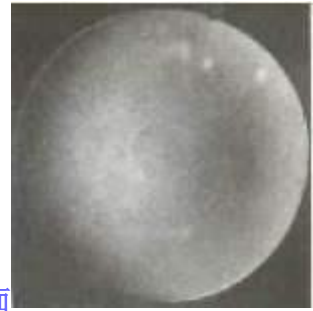


扁球面



雙曲面

佛科影像圖集*



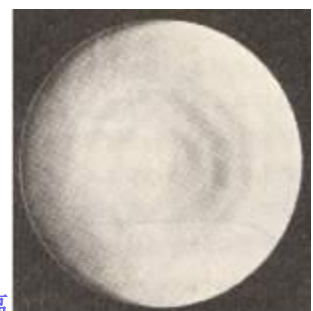
拋物面



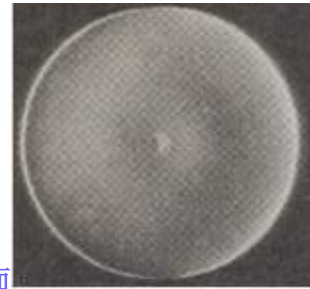
扁球面



洞穴, C 位置



凹環形區



拋物面

中央有山丘



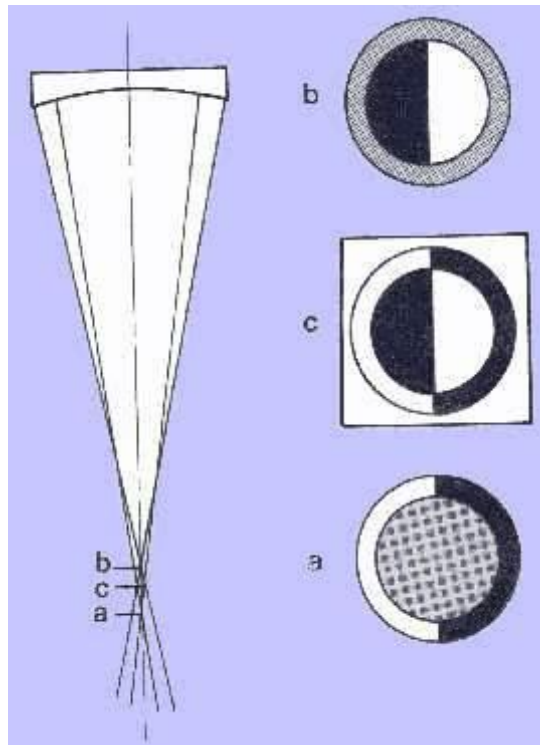
粗糙面

注意：以上的佛科像是以刀子自左切入的，若果光線來自鏡左面，刀子則是自右切入，那麼佛科像便左右相反了。

*取材自 ATM, Handbook for telescope making, How to make a telescope, 天體望遠鏡 e 工作百科(日文).

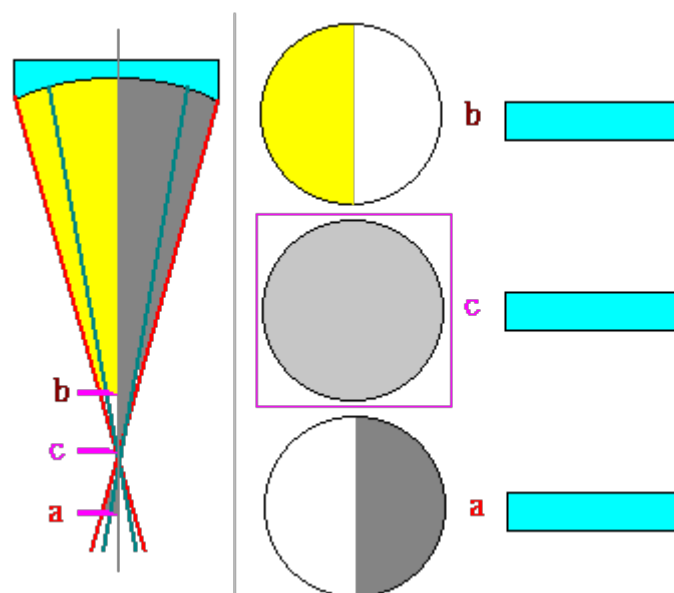
磨高邊 (Turned-up Edge)

就是鏡邊緣的焦距變得短少。刀片切入，光輪左強右弱，與低邊剛巧相反。



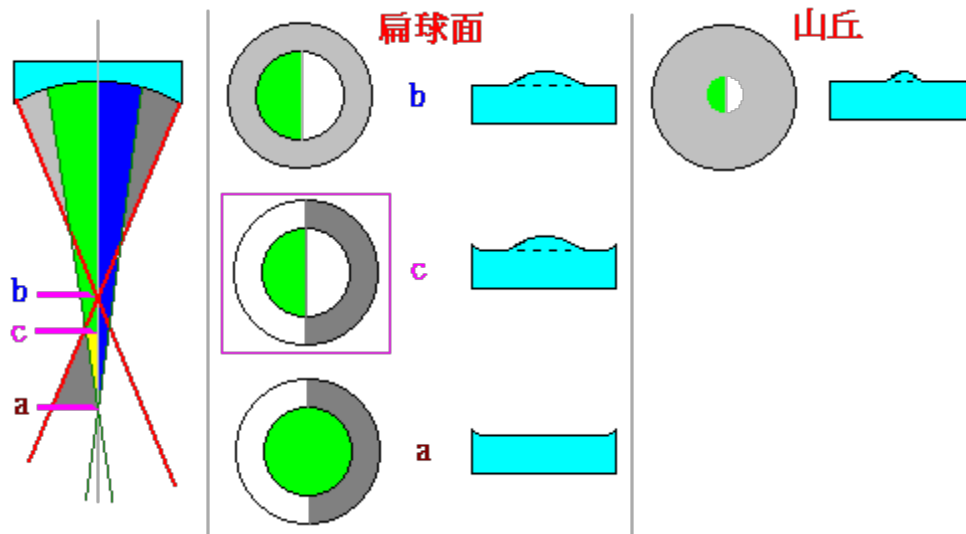
球面

光源垂直照射在鏡面，再反射結集成一點，即使用小刀片切入，亦不會做到有濃淡的現象，鏡面呈現均勻的淡灰色，看上去活像一塊平面刀片橫切入曲率半徑時出現正邊現象。



扁球面 (Oblate Spheroid)

鏡中央區焦距長，影像與磨高邊現象頗相似，不過磨高邊的光邊只有數毫米，而扁球面則闊數厘米以上。扁球面又稱二重球面。

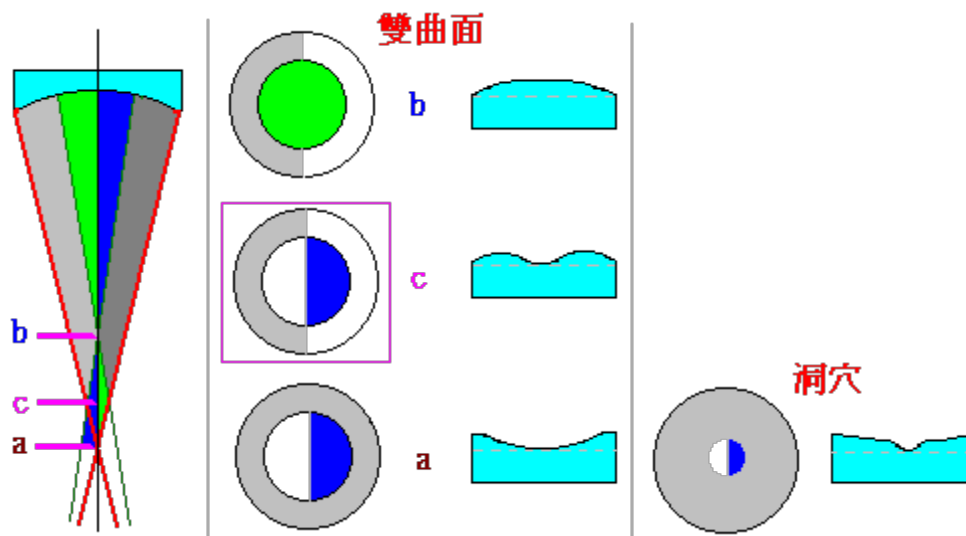


山丘

影像和扁球面相似，但只有中央區特別突出，該區有著明顯的光暗部份。刀片口切在外區焦點位置 **b** 時較容易分辨。

雙曲面 (Hyperboloid)

扁球面和雙曲面很相似。分辨兩者方法主要在觀看平均焦距像的位置 **c**，光暗面剛剛相反，像鏡子的倒影，雙曲面外區左暗右光，中央區左光右暗。當然，移動刀片位置，小心察看不同位置形狀時，將會更加容易判斷扁球和雙曲面。



洞穴

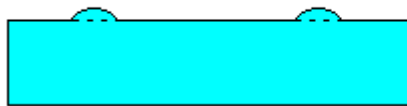
扁球面和雙曲面若果是一對，那麼山丘和洞穴亦可以說是兄弟。他們也有鏡子倒影的特性，洞穴影像是左光右暗，最易是觀看焦點 **a** 地區。分辨這對兄弟要特別小心，弄錯的話，修改鏡面便愈搞愈糟的。

拋物面（Paraboloid）

拋物面和雙曲面的影像圖一樣，只不過雙曲面光暗區比拋物面明顯而已。

環形區

環形有凹或凸的，闊度很窄。輕微情況的很難在陰影像中分辨凹凸。



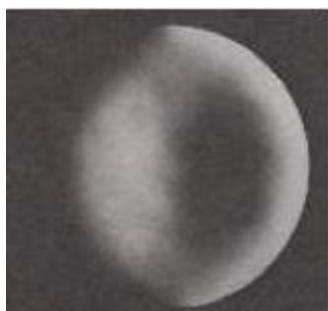
凸環形區



凹環形區

粗糙面（Dog Biscuit）

鏡面佈滿不平均的暗淡區，以其形似狗吃的餅乾，故俗稱狗餅形。有時候鏡面還會出現車輪狀或放射狀的研磨痕，或像流星雨似的花痕等。



雙曲面



扁球面

中央有洞穴



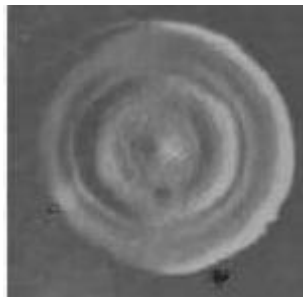
磨低邊

中央有洞穴和研磨痕



凹環形區

中央有洞穴

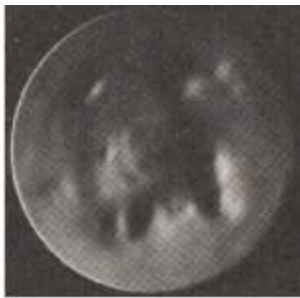


凸環形區

中央有山丘

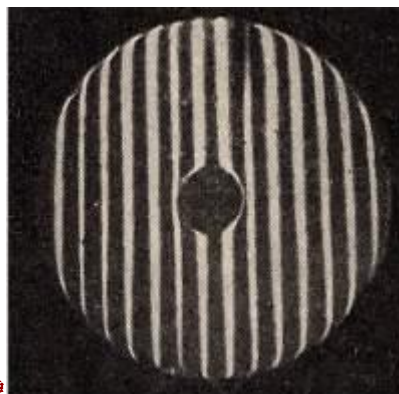


研磨痕

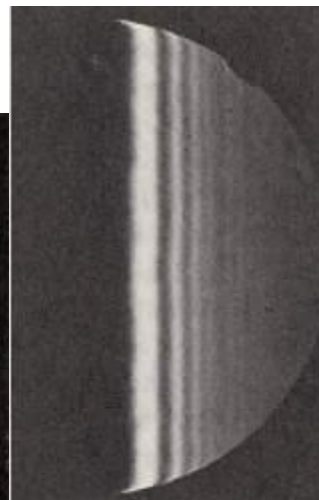


研磨痕

但佛科試法最敏感是測度平均鏡面，即鏡邊的三分一地區，所以觀看低邊並不很容易。因此，很多時會採用另一種改良的「羅基方法」或「光柵法」(Ronchi Test)。用裂隙光源，把刀片移入曲率中心一時，橫切入鏡面，觀看刀片邊干涉線條彎曲形狀，向鏡中心內彎便是磨低邊，線條垂直而伸張至邊的表示無高低邊現象。



低邊光柵像



干涉線條

低邊其名稱由來，就是這些線條在鏡邊彎曲。磨低邊就是鏡邊數毫米地區焦距比中央長，實際上就是鏡的角被磨平了。

佛科攝影像

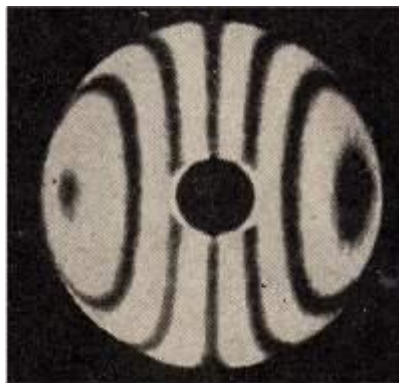
主鏡 12 吋 f/4

照相機焦距 135mm f/4

曝光 3 分鐘

菲林柯達 Trix

攝影：黃隆



眼睛太遠刀片時看到蝴蝶形的影像

第八章 主鏡的磨製：拋物線化

8.1 磨製拋物面

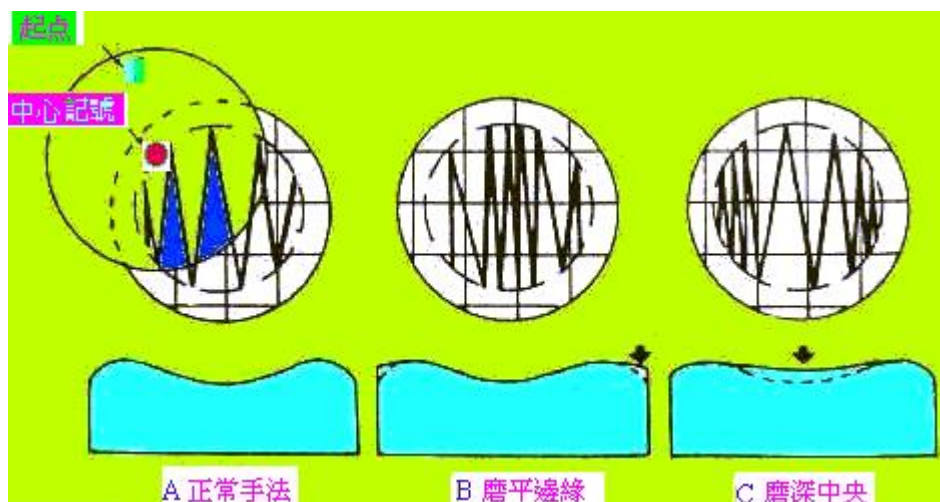
磨製拋物面和拋光差不多，拋物線化只不過採用長磨程的 W 形手法。有經驗的磨鏡者，順利的話，用五分鐘便可完成拋物線面！

長磨程可以縮短拋物線化時間，但很容易做成雙曲面，折衷辦法就是應用不太長的磨程，以大約十分鐘時間完成整個程序。理想情形下，主鏡磨兩週後便可以測試到拋物面的特徵——山和峽谷。正常的拋物面出現的話，你便可以繼續拋物線化，假若相差太遠的話，便要再把鏡面修正回復球面，矯正方法可參考第七章。

拋物線化最重要的是經常保持瀝青模和主鏡面吻合，所以先加重物二十公斤，熱壓瀝青模五分鐘，跟著拿開重物讓其散熱十五分鐘，肯定冷卻後才磨鏡。拋物線化時，兩手緊握著鏡邊，母指放在

鏡中心，盡量避免身體熱力傳導至主鏡。用一比二的拋光粉，以每分鐘 40 次的 W 形手法，磨動兩週後便試鏡，每次主鏡返回中心時就轉動一角度，當轉動一週後，便需要將瀝青模向相反方向移動某一角度，以避免產生散光現象。試鏡後，要再冷壓瀝青模十分鐘才可繼續工作。

在瀝青模面平均磨動 A，是正常拋物線化方法；修正鏡面時，只要在瀝青模邊緣磨動多幾次 C，就可以把主鏡中心區磨深一些；在瀝青模中心磨動多幾次 B，就可以把主鏡邊緣磨平。



通常舊瀝青模經長時間工作後便會變硬，而長磨程和硬模會在鏡中心產生小洞。實際上，理想拋物線化工作最好方法就是在舊模面上重新鋪上一層新瀝青，調校瀝青至適中的軟硬度，模軟度要視乎磨鏡者的實際需要而定，很難下一個標準。太硬的模可加數滴松節油在瀝青溶液裏一起煮，雖然時間和工夫都將會花費不少，但是值得的。

粗幼磨和拋光等可以跟著指示一步步做，但拋物線化卻極度依靠磨鏡 的技巧和手藝。正如磨鏡專家伊力遜 (William F.A. Ellison) 所說：

粗磨拋光乃機械過程，任何人在短時間內便可以學會。磨製拋物面的人卻是位藝術家，並不是技術員；藝術家乃天生的，非造出來的。

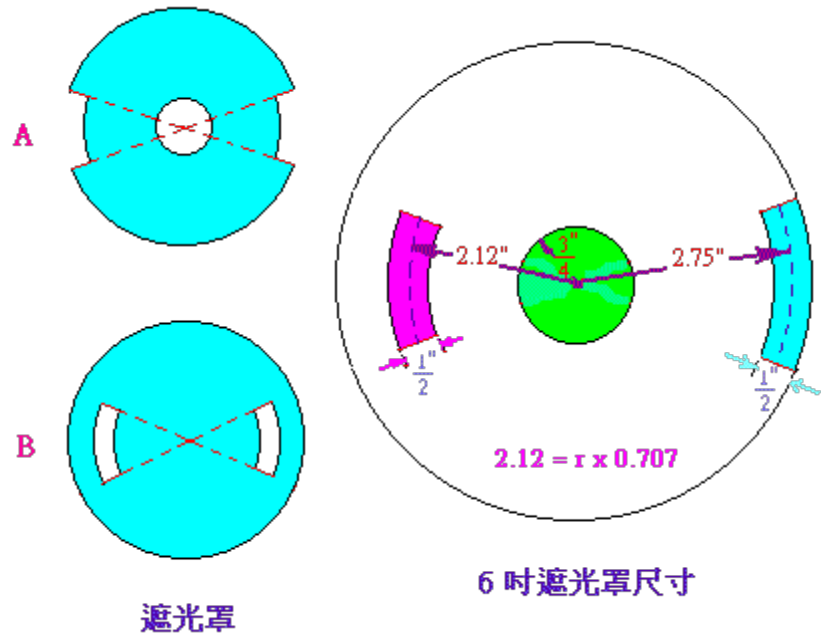
8.2 測試拋物面

拋物面其實也是塊有缺點的鏡面，當觀看近景物時，顯示出球面差現象，假若該物件放於曲率中心位置時，我們便很方便地用佛科刀片法找尋它的球面誤差值。這些特殊的誤差值就叫做「鏡面修正值」 (Mirror Correction)。但主鏡刻意地磨成拋物面後，觀看遠景物時卻完全沒有球面差現象，遙遠的平行星光 聚焦於一點上。

測試時要注意，因為磨鏡會產生熱力，所以主鏡必須放在室溫下散熱十五分鐘，主鏡才可測試，否則，測度熱鏡而所得數據就不可信賴，尤其是最後 一次試鏡更應等待主鏡散熱一、二小時從才可進行。

我們祇測試鏡面三點：中心區，70% 區和邊緣區。

測試前，先預製兩張薄咭紙遮光罩，在遮光罩 A 的中心剪掉一個直徑僅大於對角平面副鏡小軸的孔。例如，六吋口徑鏡的便要裁一吋半直徑的孔。另外兩邊相對的位置上再剪兩個像圖中的缺口，另剪一個 70% 區孔的遮光罩 B。假若焦距長的話，咭紙缺口要寬一些，因為距離加長了，光源便相應減少。孔徑的尺寸可參考附表，而它們的距離可參考遮光罩圖。



遮光罩孔徑大小 (吋)

主鏡直徑	中心區	70% 區	邊緣區
4	5/8	1/2	1/2
6	3/4	1/2	1/2
8	7/8	5/8	5/8

8.4 鏡面精確度

當我們把鏡面磨至預定的拋物面修正值時，主鏡必然是一塊理想鏡面。若果我們把主鏡不同區域磨到某一數值時，那麼它與標準拋物面又相差多少呢？主鏡又是否一定要研磨到標準修正值呢？究竟有沒有最低標準值的呢？

為了要一一解決上述的疑問，就必須要了解一下怎樣才可以成為一塊理想的天文望遠鏡鏡面。首先要介紹一下光的性質，光原是一種以波動形式運行的粒子，所以它並不可能聚焦於理論上的一點之上，而只可能聚焦於一定範圍之內。而且，普通可見光由七種不同波長顏色所組成，以紅光波長最長，紫光最短。通常我們選取兩者之間的波長距離作為光波波長的標準，亦即是黃綠光的長度，波長是 0.000022 吋，或一百萬份之廿十二吋。根據英國的物理學家惠萊 (Rayleigh)

理論，若果一塊反射鏡面能夠把光線反射而聚焦於不超過 $1/4$ 波長範圍的，便是塊理想鏡面。因為光線經過反射才成像，所以要聚焦在 $1/4$ 波長距離內便要把鏡面準確地拋物線化至 $1/8$ 波長。

然而鏡面要磨到光線能夠聚焦於 $1/4$ 波長區域內，反射光便要聚焦在 0.0000055 吋地方裏，即是千萬份之五十五吋範圍之內！現在你可能會給這些天文數字嚇怕了，不過實際上你只要把鏡面磨到預定的拋物面修正值，便可達到這標準有餘。

事實上，惠萊標準 (Rayleigh Criterion) 容許我們有 $1/4$ 波長的上下限誤差，這就是鏡面的「容許誤差修正值」。所以主鏡面拋物線化至 $1/4$ 波長已符合理論上的數值。而實際經驗告訴我們 $1/4$ 波長的拋物線化鏡面表現已非常理想，分辨力已達到第一繞射光環 (Airy disk) $d1$ 闊度。

λ = 波長

f = 主鏡焦距

D = 主鏡直徑

$d1$ = 第一繞射光環

84% 光源聚於第一繞射光環

16% 光源分散於 $d2, d3 \dots$ 光環中

$$d1 = 1.22 \lambda f / D$$

8.3 拋物鏡面修正值

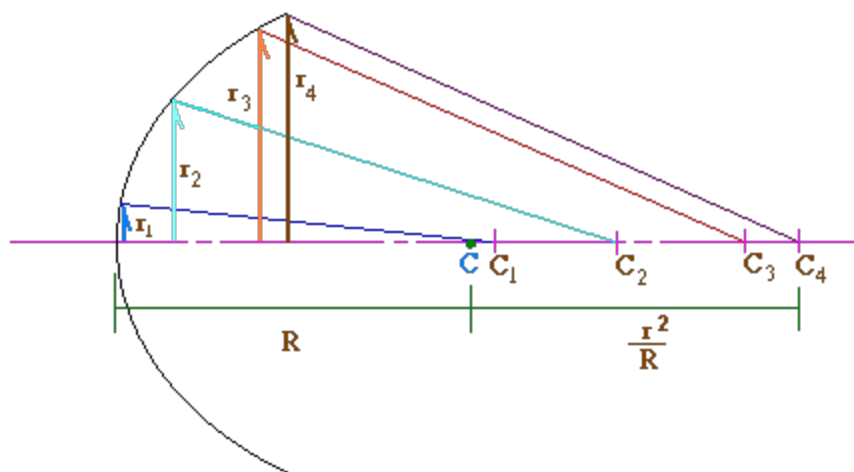
拋物面是個對稱旋轉曲面，它和球面最顯著不同的地方是拋物面的曲率跟隨著曲面的位置而改變，而球面卻只有一個曲率。

但是，運用簡單的公式 $\frac{r^2}{R}$ 就可以計算鏡面任何一區相對於球面的誤差值，即是拋物面修正值。細 r 代表鏡面任何一區半徑，而大 R 則代表曲率半徑。修正值公式和鏡面深度公式很相似，不過，現在是計算反射光源的景物深度而不是主鏡曲面的物理深度，所以公式中便沒有了數字 (2)，亦即數值大了兩倍。若果你的試鏡機光源和刀片是一齊移動的，便要改用另一組公式 $\frac{r^2}{2R}$ 去。通常，試鏡機光源是固定的，祇是刀片移動，公式應該是 $\frac{r^2}{R}$ 。

檢查區的數目可隨意選定，它主要用意是選取一系列可以表達鏡面特性的區域。但參考區不能太多，否則測試和修改都會感到困難。通常，六吋直徑主鏡祇選取三區：中心區、70% 區和邊緣區，大口徑鏡則量度多幾區。

實際上，測量鏡面用的遮光罩中心孔開得很細，它的誤差值大約有 0.001 吋，所以被當作為零 (C1)。另外要注意的是邊緣區不可能測到最盡邊的誤差值 (C4)，因為我們需要在遮光罩上剪出約半吋的闊度作反射光源用，所以誤差值是由孔的中心位置算。

誇大了的鏡面修正值示意圖



主鏡直徑 = 6 吋 半徑 $r = 3$ 吋 焦距 = 48 吋 曲率半徑 $R = 96$ 吋	
固定光源鏡面修正值(吋)	
中心區 $r_1 = 0.37$	$C_1 = \frac{r_1^2}{R} = \frac{0.37^2}{96} = 0.001$
70%區 $r_2 = 2.12$	$C_2 = \frac{r_2^2}{R} = \frac{2.12^2}{96} = 0.047$
邊緣區 $r_3 = 2.75$	$C_3 = \frac{r_3^2}{R} = \frac{2.75^2}{96} = 0.079$
100%區 $r_4 = 3$	$C_4 = \frac{r_4^2}{R} = \frac{3^2}{96} = 0.094$

相信必定有同好會追問，為什麼要選取 70% 區呢？回答這問題就要看看每一區域的鏡面修正值和鏡半徑關係。70% 區原來是量度修正值總數值的 50% 距離，即是鏡總面積的二分之一，而拋物面的山 便出現在這區域，因此當刀片切入這地區的光源時，主鏡面便呈現明顯的山 峽谷佛科像，當你觀看它的影像時就立刻可以辨別出它是否拋物面。還要說清楚一下，就是 70% 區的距離是主鏡的正圓半徑乘 0.707 的積。

鏡面修正值和鏡半徑及修正總值的關係

距離鏡中心		修正值 $\frac{r^2}{R}$	
吋	該區與半徑之百分比	吋	與修正總值之百分比
0	0	0	0%
2.12	70.7%	0.047	50%
2.75	91.7%	0.079	84%
3	100%	0.094	100%

拋物鏡面修正值表

4"	焦比	f/7	f/8	f/10	f/12
	焦距	28	32	40	48
	曲率半徑	56	64	80	96
70%區	r=1.41	0.035	0.031	0.025	0.021
邊緣區	r=1.75	0.055	0.048	0.038	0.032
球面誤差* (波長)		1/2	1/3	1/6	1/10

6"	焦比	f/4	f/5	f/6	f/7	f/8	f/9	f/10
	焦距	24	30	36	42	48	54	60
	曲率半徑	48	60	72	84	96	108	120
70%區	r = 2.12	0.094	0.075	0.062	0.054	0.047	0.042	0.037
邊緣區	r = 2.75	0.158	0.126	0.105	0.090	0.079	0.070	0.063
球面誤差* (波長)		4 1/6	2 1/8	1 1/4	4/5	1/2	1/3	1/4

	焦比	f/4	f/5	f/6	f/7	f/8	f/9	f/10
8"	焦距	32	40	48	56	64	72	80
	曲率半徑	64	80	96	112	128	144	160
70%區	r = 2.83	0.125	0.100	0.083	0.072	0.063	0.056	0.050
邊緣區	r = 3.69	0.213	0.170	0.142	0.122	0.106	0.095	0.083
球面誤差* (波長)		5 1/2	2 5/6	1 1/3	1	5/7	1/2	1/3

r = 鏡中心至光罩中心距離

*球面誤差 = 主鏡磨製成球面時與拋物面之誤差值

計算鏡面精確度

現在我們又要回頭看看開初所提出的第一個問題，就是當主鏡拋物線化至高低修正值範圍時，和標準拋物鏡面相差多少，換句專門術語便是「鏡面精確度」。量度鏡面的精確度是以「波長」為單位。計算時要把各區佛科試鏡器讀數分別處理，然後再取其平均值。另外還可以用別一種方法計算後早把數據以圖表的形式繪出來，再找出鏡面的波長精確度。

現在有一塊 6 吋直徑的 $f/8$ 主鏡，拋物線化後各區經佛科試鏡器量度後的讀數分別是

70% 是 0.042 吋，邊緣區是 0.095 吋，求主鏡的拋物線化程度？

由上表中查得 6 吋 $f/8$ 在各區的 $1/4$ 波長容許修正值

容許誤差修正值

表中的「容許誤差修正值」高低相差是正負 $1/4$ 波長。要說明的一點就是只要把每區各自磨至高低限範圍內便是好鏡，不過鏡面本身必須光滑和沒有環形區等瑕疵，否則拋物線化後也沒有意思。

由表中可以看出焦比愈長的容許誤差愈大，但口徑愈大容許誤差卻愈小。而最後一欄球面誤差值裏顯示誤差小於 $1/4$ 波長的主鏡，例如六吋 $f/10$ ，可直接磨成球面而不用拋物線化也達到拋物面的功用，不過焦比小而口徑大的就必須拋物線化了。

計算球面誤差公式

主鏡深度

$$d = \frac{r^4}{8 R^3} = \frac{D^4}{1024 f^3}$$

$$D = 6''$$

$$f = 48''$$

$$d = 1.144 \times 10^{-5}$$

$$\lambda = 0.000022''$$

$$1/4 \lambda = 0.0000055''$$

$$\text{球面波長誤差} = \frac{1.144 \times 10^{-5}}{2.2 \times 10^{-5}} = 0.52 \approx 1/2 \lambda$$

$$1/4 \lambda \text{ 誤差} = \frac{5.5 \times 10^{-6}}{1.14 \times 10^{-5}} = 0.48$$

低、標準和高修正值

$$52\% \sim 148\% \begin{bmatrix} 0.024 \\ 0.047 \\ 0.069 \end{bmatrix}$$

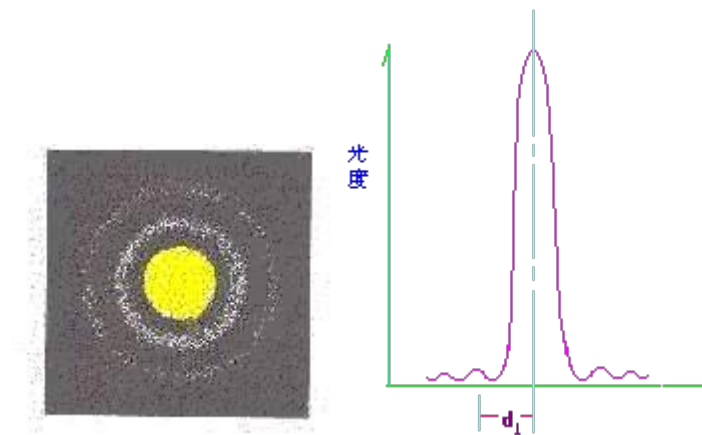
容許誤差修正值表（吋）

直徑 = 4	r = 1.41			r = 1.75			球面誤差 (波長)
焦比	低修正值	標準修正值	高修正值	低修正值	標準修正值	高修正值	
f/7	0.018	0.036	0.053	0.028	0.055	0.081	1/2
f/8	0.009	0.031	0.054	0.013	0.048	0.082	1/3
f/9	-0.001	0.028	0.056	-0.001	0.043	0.086	1/4
f/10	-0.010	0.025	0.060	-0.016	0.038	0.092	1/6
f/11	-0.020	0.023	0.065	-0.030	0.035	0.100	1/8
f/12	-0.030	0.021	0.071	-0.046	0.032	0.110	1/10

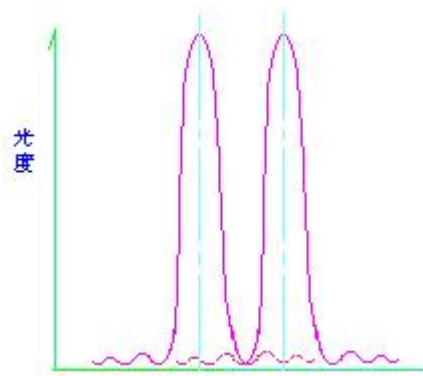
直徑 = 6	r = 2.12			r = 2.75			球面誤差 (波長)
焦比	低修正值	標準修正值	高修正值	低修正值	標準修正值	高修正值	
f/4	0.088	0.094	0.099	0.148	0.158	0.167	4 1/6
f/5	0.066	0.075	0.084	0.111	0.126	0.141	2 1/8
f/6	0.050	0.062	0.075	0.084	0.105	0.126	1 1/4
f/7	0.036	0.054	0.071	0.061	0.090	0.119	4/5

f/8	0.024	0.047	0.069	0.041	0.079	0.117	1/2
f/9	0.013	0.042	0.070	0.022	0.070	0.118	1/3
f/10	0.002	0.037	0.073	0.004	0.063	0.122	1/4

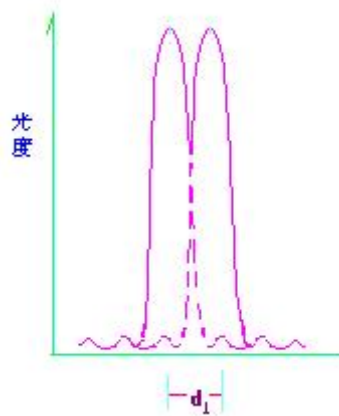
直徑 =8	r =2.83			r = 3.69			球面誤差 (波長)
焦比	低修正值	標準修正值	高修正值	低修正值	標準修正值	高修正值	
f/4	0.120	0.125	0.131	0.203	0.213	0.222	5 1/2
f/5	0.091	0.100	0.109	0.155	0.170	0.185	2 5/6
f/6	0.071	0.083	0.096	0.120	0.142	0.163	1 2/3
f/7	0.054	0.072	0.089	0.092	0.122	0.151	1
f/8	0.040	0.063	0.085	0.068	0.106	0.145	5/7
f/9	0.027	0.056	0.084	0.046	0.095	0.143	1/2
f/10	0.015	0.050	0.085	0.025	0.085	0.145	1/3
f/11	0.003	0.046	0.088	0.005	0.077	0.150	1/4
f/12	-0.009	0.042	0.092	-0.015	0.071	0.157	1/5



繞射光環



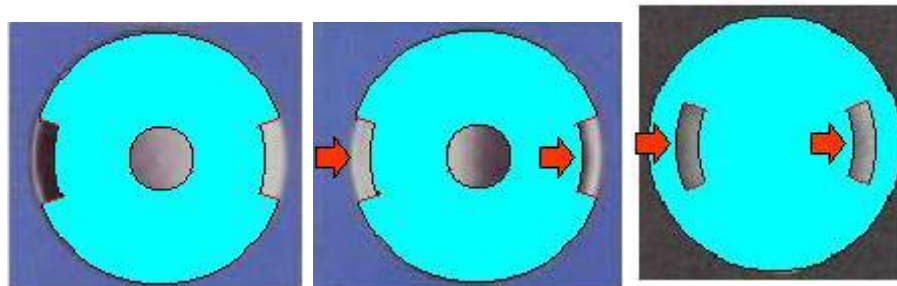
完全分解的雙星



惠萊標準

B) 陰影同時移動方法

另一種比較觀察「同時暗淡」的方法容易的，就是細心留意刀片口切入光源所引起陰影在兩個缺口「同時向右移動」的現象。因為刀片口不是在正確的 70% 區或邊緣區位置的話，陰影祇會順著次序跟隨刀片口逐步向右移動，首先在左邊的缺口出現，其後才是右邊的缺口，祇有刀片口在 70% 和邊緣時才出現陰影在兩邊缺口同時移動的情形。



中心區

邊緣區

70% 區



在每次更換遮光罩時，還要認識主鏡在每一特定區域的整體影像，尤其是要辨認 70% 區，因為它最擁有拋物面的特徵。最初拋物線化時，這區祇呈現很淺的谷陰影像，一旦達到鏡面修正值，便會顯示出強烈的高反差陰暗區。

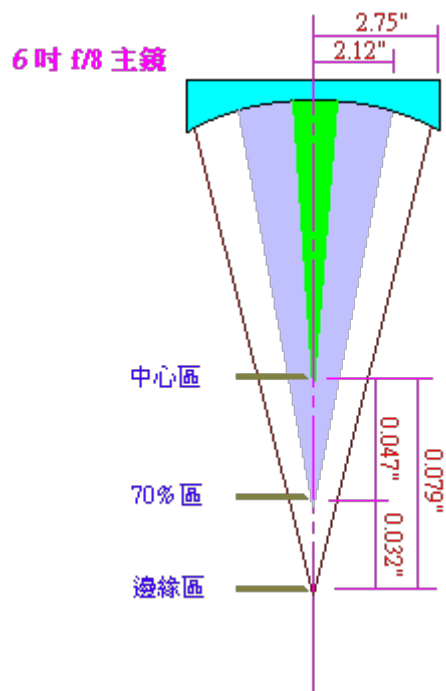
一些有經驗的磨鏡者，可不需要遮光罩，祇要觀看 70% 區就立刻知道拋物線化的程度。若果你不斷努力，將來你亦一定會達到老前輩的境界。

佛科試鏡

A) 同時出現暗淡方法

現在開始利用遮光罩和佛科試鏡器量度每一區域的差別，或者可以說是它們的球面誤差值。首先測量中心區，試鏡時遮光罩 A 放在鏡面前，移動試鏡器，找尋到某一位置當刀片口切入後，中心圓圈部份便立即整體地暗淡下來，這就是中心區。記下這數值後，向後移刀片直至它切入光源時兩旁的彎月形缺口「同時出現暗淡」下來的現象，這就是邊緣區，記下數值後便換過遮光罩 B，以同樣方法量度 70% 區。

注意，轉換光罩時勿移動主鏡或試鏡器。用自製佛科機，試鏡時，螺絲應該祇向一個方向旋轉，盡量避免螺絲間的虛位產生誤差。然而試鏡機設備必須能夠讀到 0.01 吋的距離。初學者，最初量度同一區域都會有 0.03 吋的差別，不過實習多幾次後便可以把誤差降為 0.015 吋。這時再在同一區域試多三、四次，取其平均值，如此誤差便可以減少為 0.01 吋。



磨鏡 夢寐以求的
拋物面主鏡

70% 區 標準修正值

= 0.047 吋

1/4 波長誤差

= 標準值 - 低或高修正值

= 0.047 - 0.024

= 0.023 吋

所以，一個波長

邊緣區 標準修正值

= 0.079 吋

1/4 波長誤差

= 標準值 - 低或高修正值

= 0.079 - 0.041

= 0.038 吋

一個波長

$$= 0.023 \times 4$$

$$= 0.092 \text{ 吋}$$

佛科讀數

$$= 0.042 \text{ 吋}$$

誤差

$$= 0.042 \pm 0.047$$

$$= 0.005 \text{ 吋}$$

精確度

$$= 0.005/0.092 = 1/18 \text{ 波長}$$

平均精確度

$$= (1/18 + 1/10) / 2$$

$$= 1/13 \text{ 波長}$$

$$= 0.038 \times 4$$

$$= 0.152 \text{ 吋}$$

佛科讀數

$$= 0.095 \text{ 吋}$$

誤差

$$= 0.095 \pm 0.079$$

$$= 0.016 \text{ 吋}$$

精確度

$$= 0.016/0.152 = 1/10 \text{ 波長}$$

第九章 主鏡鍍鋁

玻璃的反射率祇有百分之五，因此要在它的表面鍍上一層高反射率的金屬鋁或銀以提高反射效果。

銀的反射率為 93%，比鋁的高十分一。不過一塊鍍銀的鏡面很容易受都市的硫磺化合物（H₂S）侵蝕變為一點點的黑色，經過一、二年從便要再重新鍍上一層。為什麼家中用的鏡子卻可保持這麼久呢？它們最大分別就是家庭用人像鏡的銀膜鍍在鏡子的背部（Second Surface Mirror），而且又在膜面加塗一層防止硫化的紅色漆油，因此，它可保持非常長的時間。但天文望遠鏡鍍銀於正面（First Surface Mirror），所以便不可以模仿人像鏡般塗上防硫化漆油來增長壽命。

真空鍍鏡面每次可使用五至十年，因此很多人已採用這種技術。真空電鍍方法是把鋁絲放置在高度真空盛器內，通電蒸發鋁絲，一層層薄薄的鋁氣體便會沉積在鏡面。鍍鋁不獨耐用而且它的表面會自動產生一層透明的氧化鋁保護鏡面。當鋁面佈滿塵時，又可以用水沖洗乾淨，很是方便。清洗時切勿用麂皮抹鏡，否則會打磨出一條條花痕和引起散射光源等不良後果。

有些同好更喜歡在鏡面加多一層保護膜，例如石英（Quartz）、氧化矽（Silicon Monoxide）或氟化鎂（Magnesium fluoride）等。近年，美國流行把鏡鍍上一層鋁—鈹合金（Alluminum Beryllium alloy），又名 Beral，它的耐用時間比鋁還要長。

用化學沉澱方法鍍銀可以自己動手做，最適宜在學校的實驗室進行。真空鍍鋁設備較複雜，價錢亦很昂貴，一般同好都拿去工廠代勞，在香港電鍍一塊六吋鏡約花費五十多元（1999年）。

祇有乾淨的鏡面才能鍍上一層平均厚度的金屬膜，反射效果才會達到最高標準。

所以鍍鏡前要把鏡面清洗乾淨，其主要作用是除去鏡面上的油污。我們通常用濃硝酸液(Nitric acid)，以筷子纏上脫脂棉花，沾上溶液後塗抹鏡面。小心，硝酸是一種腐蝕性很強的液體，工作時最好戴上膠手套。用棉花沾溶液擦洗表面數次，直至棉花揩抹鏡面任何一區時也有一種順滑而伴有吱吱聲的阻力感覺。每次擦洗後，用普通的自來水沖洗一下，最後一次更要肯定已洗掉所有多餘的硝酸。可能的話，最好再用“**蒸溜水**”沖洗主鏡多幾次，切勿錯用“**礦泉水**”，否則鏡面會留下一條條由礦物形成的水痕。跟把鏡面側放在一旁沒有塵埃吹到的地方讓水份流往鏡邊自然地風乾。切勿心急用風扇吹乾，否則鏡面會佈滿毛屑，那時又要多費時間再沖洗一番。需要時可以用吸水紙放在鏡下邊緣緩緩地吸走流出來的水份。記，勿用紙抹鏡面的水份。乾後也不得用手指接觸鏡面，因為手掌經常佈滿油脂的。已洗淨的鏡面，由水裏拿出來時，水份應該完全蓋著整塊鏡的表面。當鏡面乾起來時候呈現一小區一小區的便表示有油漬，應該要用硝酸重新再洗。另外一個比較簡單的方法，就是把主鏡面浸在稀的洗潔精溶液十多分鐘，當然最後也要把洗潔精沖洗乾淨。



真空電鍍後鏡面，可以很清楚的看見
由洗潔精上的護理皮膚化學品而做成的一幅幅水痕。

要留意現在市面出售的洗潔精，多數加有護理皮膚用的化學藥物，令電鍍後的鏡面呈現一幅幅的水痕，應選擇沒有加添劑的純洗潔精。一些工業用而價錢又便宜的最合清洗鏡用，另外有些專門用作清洗廚房油污的清潔劑也適合我們磨鏡用。



拋光足夠的主鏡面，
電鍍後鏡面反差高，即影像黑白差很明顯。

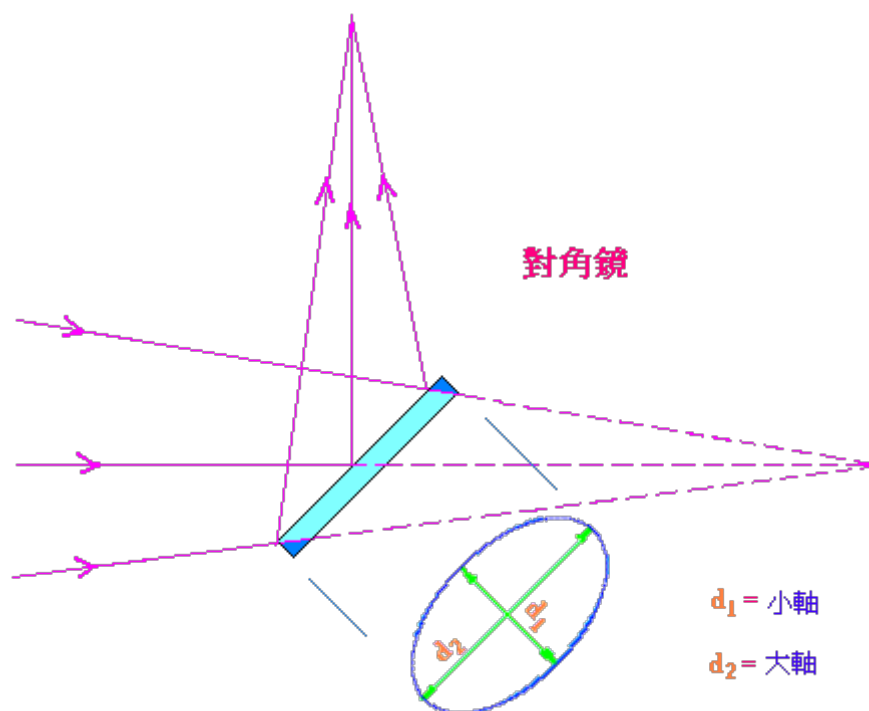
第十章 副鏡

10.1 對角鏡

牛頓天文望遠鏡主要組合有主鏡和副鏡（Secondary Mirror）。副鏡功用是把反射光源再折射往鏡筒邊緣以方便觀察。副鏡是一塊平面小鏡子，放置於主鏡前面近焦點的地方。傾斜 45° ，所以又稱對角鏡（Diagonal）。幾經辛苦才磨製成的拋物面主鏡一定要配合優良光學平面的對角鏡才能顯示出望遠鏡的質素，否則便功虧一簣。對角鏡是塊光學平面，但磨製一塊平面鏡而又符合標準的卻不容易，工作過程頗複雜，用於檢查該自製平面鏡的標準光學平面鏡價錢也很貴，所以大多數天文愛好者都購買製成品，而希望花費多些時間和精力在望遠鏡腳架和配件的製造上。不過，對角鏡的大小，和裝置方位一定要配合主鏡的焦距和望遠鏡實際用途。

b. 平面對角鏡

對角鏡是一塊光學平面，鋁膜鍍在第一表面上，光源在表面反射。金屬鍍在底的平面小鏡子不合天文用，因為第二反射會產生多重折射現象。對角鏡通常切割成橢圓形，大軸的兩端還磨成斜角以配合入射光束經過的路線。溫度會引起對角鏡膨脹或收縮，因而影響它的精確度，所以市面售的對角鏡有三分厚和採用膨脹系數低而高品質的玻璃，一來避免溫度的影響，二是防止對角鏡變形。市面出售的對角鏡，小軸寬度愈大價錢愈貴，表面精確度愈高售價亦高。1.25 吋精度 $1/10$ 波長的派力士玻璃對角鏡售價約美金十元，精度高至 $1/20$ 波長的石英（Fused quartz）對角鏡則售二十五美元（1982 年）。



橢圓形對角鏡

比較經濟而簡單的自製品，可以用照相機的大濾色鏡片，找眼鏡店代 成橢圓形，濾色鏡片要先貼上橢圓形紙，鍍鋁的一面預先蓋上蠟或紙以防止刮花表面， 完後，洗去封面蠟質，再拿去和主鏡一起鍍鋁。自己磨製平面鏡可參考其它書籍。



10.2 對角鏡寬度

對角鏡放在主鏡前面，所以必定遮蓋著部份入射光源，所以它的形狀不能太大，否則主鏡的集光本領便減低。通常對角鏡的寬度是主鏡的四分一，或它的投影面積在主鏡上只阻擋少於 6% 的光源。因為對角鏡是承受一束圓錐形光線，所以它的形狀實際上是橢圓形的。但對角鏡可以用長方形或橢圓形，不過阻光會超過 6% 光源，而且它的尖角會產生繞射現象。雖然長方形比橢圓形玻璃容易切割，但製鏡者都將對角鏡造成擋光少的橢圓形。

另外，光線折射出鏡筒邊時要預定足夠距離去裝置目鏡座，長度大約是主鏡半徑加上四吋（1）。由圖中可以知道對角鏡小軸（Minor axis）可由簡單的相似三角關係式中找出來。

對角鏡偏移

另外，從幾何光線圖中，我們看見一種很奇怪的情形，就是近目鏡座缺口那邊的對角鏡實際上是短一些（ $d_1 < d_2$ ），即是對角鏡不是平均的放在主鏡光軸中心，而對角鏡中心是略為偏離中央少許。由於這種情況，我們可以選用比實用對角鏡較細些小的尺寸。不過，長焦距即 $f/6$ 或以上的望遠鏡的對角鏡縮短尺寸並不顯著，只有在短焦距， $f/4$ 或 $f/5$ 的情形下才值得考慮採用短一些的對角鏡。

最小實用對角鏡寬度

選擇對角鏡的原則就是小勝於大。威廉彼得士還特別計算出阻光最小的實用對角鏡寬度。六吋 f / 8 望遠鏡的對角鏡小軸寬度只有 1.16 吋，其視場邊緣的星體比中心暗 0.5 光等。不過大家可以採用這些比普通實用對角鏡小一些，遮光少一些而價錢又平一些的對角鏡，即表中的第二欄。

焦比	主鏡直徑(吋)											
	41/2		6		8		10		121/2		16	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2

f/4	2.13	1.53	2.37	1.75	2.66	2.00	2.93	2.25	3.26	2.56	3.71	3.00
5	1.88	1.22	2.07	1.40	2.30	1.60	2.52	1.80	2.78	2.05	3.14	2.40
6	1.71	1.15	1.87	1.26	2.06	1.37	2.24	1.50	2.46	1.71	2.77	2.00
7	1.59	1.10	1.73	1.20	1.89	1.29	2.04	1.38	2.24	1.48	2.50	1.71
8	1.50	1.08	1.62	1.16	1.77	1.23	1.90	1.30	2.07	1.39	2.29	1.52
9	1.43	1.06	1.54	1.13	1.67	1.19	1.79	1.26	1.93	1.33	2.14	1.44
10	1.39	1.04	1.47	1.11	1.59	1.16	1.70	1.22	1.83	1.28	2.01	1.37
12	1.29	1.03	1.37	1.08	1.47	1.12	1.56	1.16	1.67	1.22	1.82	1.29

實用對角鏡小軸寬度，由公式二算出，視場 0.875 吋。
 最小實用對角鏡小軸寬度，由威廉氏算出，視場 1 吋。

相關網站：

[巨眼之門－自組天文望遠鏡](#)（湯大同）

光軸的調整之**斜鏡的偏移**

11.1 目鏡的認識



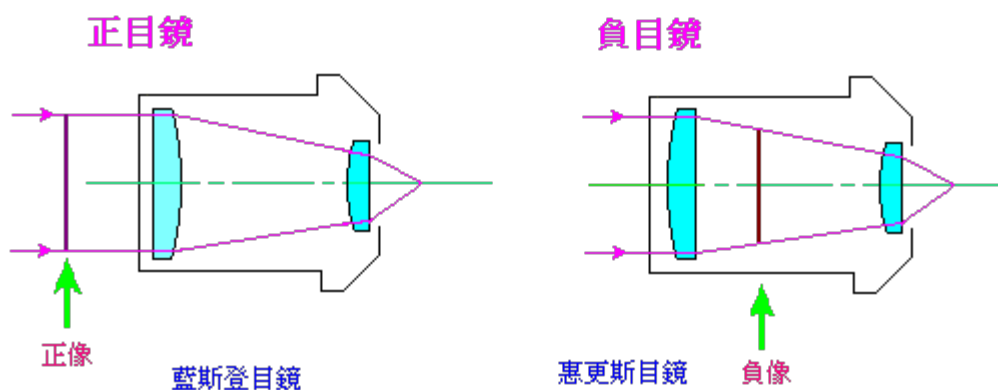
目鏡的作用是把望遠鏡主鏡的影像放大，雖然一塊透鏡也可以造成目鏡，但為了達至最佳效果，大多數的目鏡都是由二塊或者多至七塊透鏡組成。

目鏡主要由兩組透鏡合成，對著主鏡，接收著主鏡光束的透鏡稱為視場透鏡(field lens)，接近眼睛的透鏡是目透鏡(eye lens)。



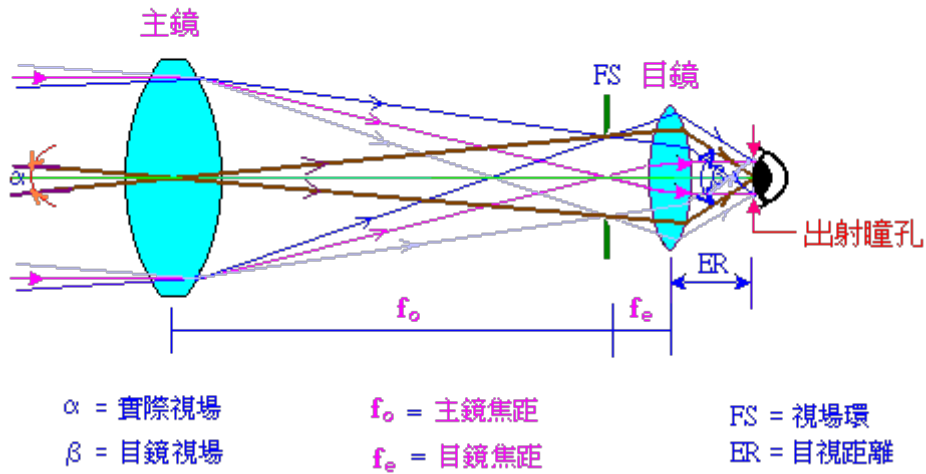
正目鏡和負目鏡

目鏡可分為正目鏡和負目鏡，正目鏡表示望遠鏡成形的實像（real image）在目鏡之外；負目鏡則表示望遠鏡的的虛像（virtual image）出現於目鏡內。所以正目鏡可當普通放大鏡用，把擺放在目鏡前的物體放大，負目鏡則不可以。



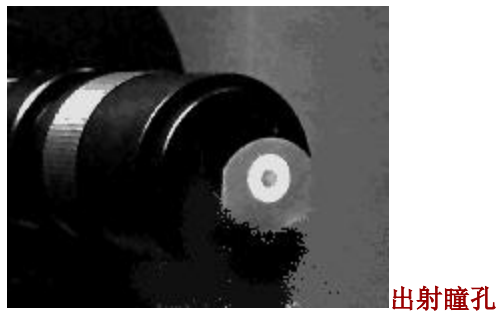
a. 出射瞳孔（Exit pupil）

望遠鏡的成像



由主鏡射進來目鏡的光束，再離開目鏡的目透鏡成為細小光束的橫切直徑，就是出射瞳孔，或稱作藍斯登環（Ramsden disk）。出射瞳孔愈大，影像愈光亮。

出射瞳孔最好能夠配合人的瞳孔在晚間的寬度，約 5mm 至 9mm，這樣在黑夜觀看暗星体最恰當。應該要說清楚一點，出射瞳孔是要比我們的瞳孔細一些，否則進入不到眼睛的多餘光，便給浪費了。



出射瞳孔的直徑由入射瞳孔光束的大小所限制，入射瞳孔即望遠鏡的口徑，它們的關係在第一章中已列出。至於量度出射瞳孔的直徑，我們可以用一張白紙或磨砂玻璃放在目鏡後，量度最清晰的光環。得到它的直徑後，我們還可以用下列公式求出不知目鏡焦距的值。

$$\text{放大倍數} = \frac{\text{主鏡直徑}}{\text{出射瞳孔}}$$

例：望遠鏡直徑 8 吋， 焦距 56 吋，由望遠鏡系統量度到的出射瞳孔直徑是 1/14 吋， 求自製目鏡的焦距。

代入上述公式，

$$\text{放大倍數} = \frac{8}{1/14} = 112$$

主鏡直徑 = 8 吋
出射瞳孔 = 1/14 吋

但由第一章公式的

$$\text{放大倍數} = \frac{\text{主鏡焦距}}{\text{目鏡焦距}}$$

所以，

$$\text{目鏡焦距} = \frac{\text{主鏡焦距}}{\text{放大倍數}}$$

現在，

$$\text{主鏡焦距} = 56 \text{ 吋}$$

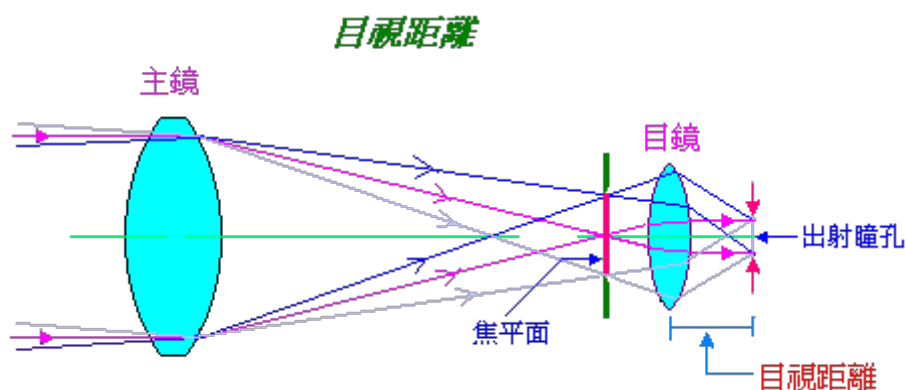
$$\text{目鏡焦距} = \frac{56 \text{ 吋}}{112} = \underline{\underline{0.5 \text{ 吋}}}$$

第十一章 目鏡

出射瞳孔直徑和觀察用途

倍率	出射瞳孔直徑	每吋放大倍數	觀察對象
十分低倍	4~7 mm	3~6 x	寬視野深空星體。
低倍	2~4 mm	6~12 x	常用倍率，找尋星星和觀看深空星體。
中倍	1~2 mm	12~25 x	月亮，行星，細小深空星體，寬視角雙星。
高倍	0.7~1.0 mm	25~35 x	月亮，在大氣穩定下觀看行星，雙星，星團。
十分高倍	0.5~0.7 mm	35~50 x	大氣穩定下觀看行星和窄視角雙星。

b. 目視距離 (Eye relief)



目視距離就是眼睛離開目鏡，而又可完全觀看整個視野的寬度。由量度出射瞳孔與目鏡間的距離便可得到它的數值。配戴眼鏡的朋友，需要最少 15mm 至 20mm 的目視距離。若然寬度太短，視野外圍就會被避擋，形成鎖匙孔現象。傳統設計目鏡的目視距離和焦距成正比。即焦距短，目視距離小；焦距長，目視距離大。不過，新近設計的目鏡無論焦距長短，目視距離也很長，對戴眼鏡的同好來說是一個喜訊。

而且 Vixen 的 Lanthanum LX 系列，Tele Vue 的 Radian 型和 Pentax SMC XL 型目鏡更特別，不同焦距目鏡的目視距離也是 20mm 長，這是因為它們應用了巴羅鏡設計去增加目視距離。



Orion 牌 Lanthanum 型目鏡

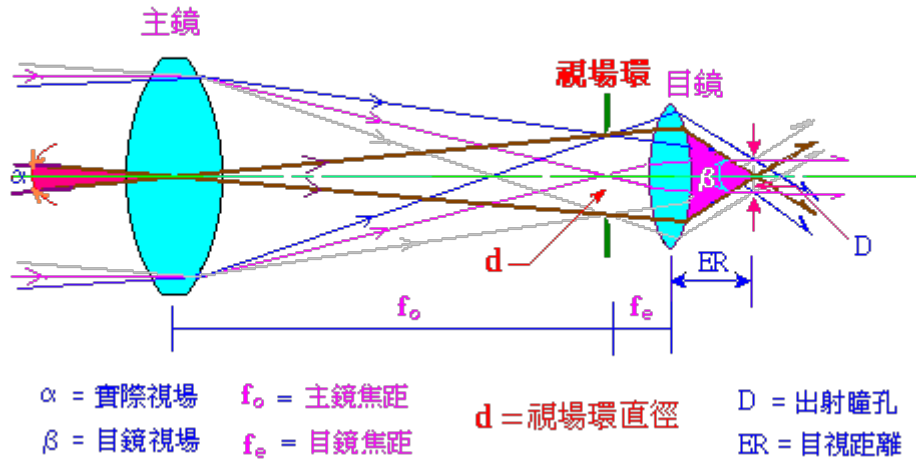
c. 視場 (Field of view)

天文望遠鏡的視野就是可看見景物的視角 (angular field of view)，以孤角表示。

觀看地面風景的望遠鏡視野 (linear field of view) 則以平面距離表示，例如我們可以用一個雙筒鏡觀看離開自己 1000 碼，而寬度可達至 373 呎的風景，視角便是 7.1 度了。你只要把視角來乘 52.5 便可以用視場計回平面視距離寬度。例如視角 8 度的雙筒鏡，它的平面視野便是 420 呎了。

視角愈大，可看見的面積愈大。視場和放大率成反比，放大倍數大，則視場狹窄。

望遠鏡的視場



視場分為實際視場（real field）和目鏡視場（apparent field）。透過望遠鏡可見的那片天空稱為實際視場 α ，在目鏡內可看見的天空稱作目鏡視場 β 。

目鏡的視場規限於視場環（field stop）的直徑大小（ d ）。

例：一個 25mm 焦距，20mm 直徑視場環的目鏡，求它的目鏡視場。

$$\begin{aligned}
 \text{目鏡視場} &= \frac{360^\circ}{2\pi} \times \frac{d}{f_e} \\
 &\approx 57.3 \times \frac{20}{25} \\
 &\approx \underline{\underline{46^\circ}}
 \end{aligned}$$

例：一枝 8 吋口徑 f/10 的望遠鏡，應用上述的目鏡，其視場環是 20mm，求望遠鏡的實際視場。

$$\begin{aligned}
 \text{實際視場} &= \frac{360^\circ}{2\pi} \times \frac{d}{f_o} \\
 &\approx 57.3 \times \frac{20}{2032} \quad f_o = 80 \text{ 吋} = 2032 \text{ mm} \\
 &\approx \underline{\underline{0.56^\circ}}
 \end{aligned}$$

由上圖可見，望遠鏡的放大倍數可用入射主鏡光線的夾角（ α ）和目鏡的夾角（ β ）之比來求出。

$$\text{放大倍數} = \frac{\beta}{\alpha}$$

若果角度是非常小, $\alpha \approx \tan \alpha$

$$\text{那麼, 放大倍數} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}$$

$$= - \frac{f_o}{f_e} \quad \begin{array}{l} \rightarrow \text{主鏡焦距} \\ \rightarrow \text{目鏡焦距} \end{array}$$

- 負符號表示影像是倒轉的。

放大數倍也可以用視場方式表達。

$$\text{放大倍數} = \frac{\text{目鏡視場}}{\text{實際視場}}$$

所以,

$$\text{實際視場} = \frac{\text{目鏡視場}}{\text{放大倍數}}$$

由上面公式, 可知要廣寬視野就要低倍率, 亦即是說放大倍率低的目的鏡便擁有廣大視場。

例: 一枝 8 吋口徑 Schmidt-Cassegrain 望遠鏡, 焦距 2000mm, 目鏡焦距 20mm, 目鏡視場 50°, 求望遠鏡的實際視場。

$$\text{放大倍數} = \frac{\text{主鏡焦距}}{\text{目鏡焦距}}$$

$$= \frac{2000}{20}$$

$$= 100 \times$$

代入視場公式,

所以,

$$\text{實際視場} = \frac{\text{目鏡視場}}{\text{放大倍數}}$$

$$= \frac{50}{100} = \underline{\underline{0.5^\circ}}$$

0.5° 約是滿月的直徑。

11.2 目鏡的種類

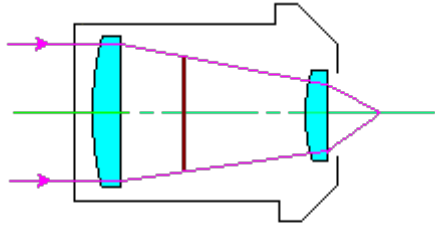
公元 1703 年，Christian Huygens 發明的第一隻利用兩塊透鏡片組合式的目鏡，經過三百年，很多新款由電腦輔助設計的目鏡也相繼出現，同時也應用了現代高質素的玻璃，成像質量已遠超越原形設計的目鏡。其不單擁有大視場，也大大改進了近透鏡片邊緣像的清晰度。

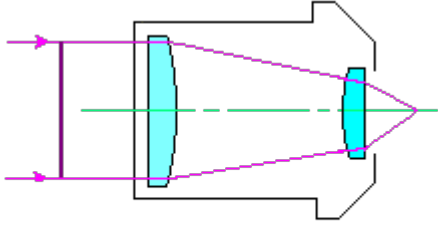
以往大多數的目鏡都會以發明者命名，而且會把一或兩個大草英文字和數目字刻在旁邊，表示它們所屬類形和焦距。例如 R12 即藍斯登型 12mm 焦距目鏡。

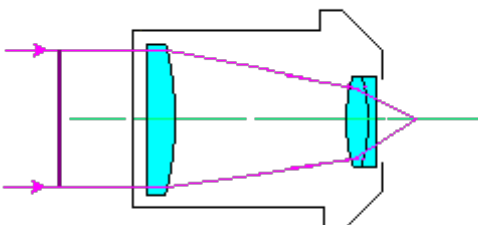
普通目鏡框外直徑 (O.D. outside diameter) 有三種規格：

a.	日本	0.95”	24.5mm	常用平價品
b.	美國	1.25”	31.75mm	天文常用款式
c.	美國	2”	50.8mm	特大口徑的高價產品廣角目鏡

a. 各種類形目鏡構造和用途

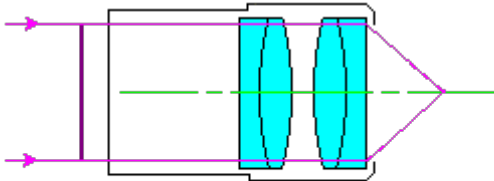
目鏡構造	目視距離	視場	特點
<div></div> <div>H 惠更斯目鏡 Huygenian</div>	短 5~10 mm	32°	H 型乃經典目鏡。 是第一隻利用二片透鏡組合成的目鏡，它矯正了單透鏡目鏡旁邊緣出現的彩色現象。但焦平面在鏡內，所以 能加十字線。 因為有場曲缺點，只應用在長焦比如 f /8 以上望遠鏡。 H 型現在有多種款式， AH (消色差 H achromatic Huygens)， 和 HM (改良形 H)。
1703 年			用途:
焦距: 8mm ~ 25mm			H 型目鏡多數用於焦比為 f/15 的折射望遠鏡上。 因為目視距離短，較適合用於低倍放大觀察。

目鏡構造	目視距離	視場	特點
 <p>R 藍斯登目鏡 Ramsden</p>	短 ~5 mm	28°~40°	<p>R 型也是兩片設計，但凸面相對，而且焦平面在外，可以方便加十字線。</p> <p>場曲誤差比 H 型少，但亦存有色差和目視距離短問題。</p> <p>R 型的改良形稱為 SR (對稱式 R)。</p>
1783 年			用途:
焦距: 4mm ~ 30mm			<p>R 與 H 型一樣只有短目視距離，只宜用於中長焦距上。</p> <p>因為價錢便宜，現多應用在平價的望遠鏡，而 R 型也用於非常高焦比的顯微鏡中。</p>

目鏡構造	目視距離	視場	特點
 <p>K 凱爾納目鏡 Kellner</p>	短 4~14 mm	40°~52°	<p>K 型乃 R 型的改良形，為了要減低色差和場曲，目透鏡給一塊兩片組合式消色差鏡片所取代。</p> <p>K 型有 MA (modified achromat), SMA 和 RKE 款式。</p>
1849 年			用途:
焦距: 6mm ~ 25mm			<p>K 型目鏡仍然只適合用於焦比大過 f/6 的望遠鏡。</p>



Edmund Scientific 牌 RKE 型目鏡 ---- 12 mm 焦距，目視距離 10.7 mm，視場 45°。

目鏡構造	目視距離	視場	特點
 <p>PL 普洛雪爾目鏡 Plossl</p>	長 5~46 mm	42°~52°	<p>Plossl 又名 Symmetrical 由兩塊兩片消色差透鏡片所組合，最新設計的還在中間加上了第五塊透鏡去減少誤差和增加目視距離長度。</p> <p>Plossl 式在任何倍數上也表現很好，在短焦比的望遠鏡上表現也比 Or 出色，光學變形也完全改正了。</p> <p>視野寬、目視距離又長、價錢不算貴、質素又高，Plossl 是天文界最流行最受歡迎的目鏡。</p>
1860 年			用途:
焦距: 3mm ~ 55mm			適宜觀看任何目標。

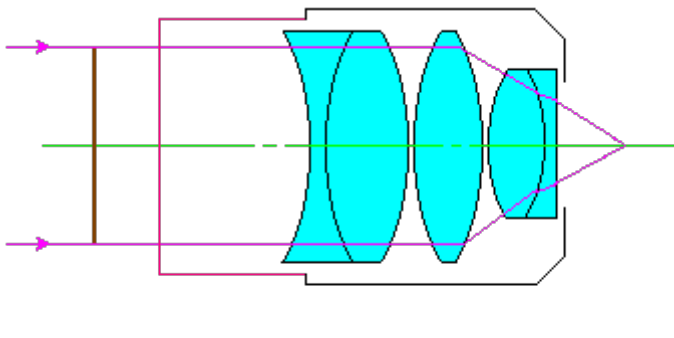


Vixen 牌 Plossl 型目鏡 ---- 7.3, 9.5, 13, 26mm，目鏡的焦距愈長它的尺寸愈長，焦距愈短目鏡愈

短，目鏡長度是和焦距成正比的。

目鏡構造	目視距離	視場	特點
 <p>Or 阿貝目鏡 Orthoscopic</p>	中 ~ 長 5~27 mm	40°~45°	<p>Or 又名 Abbe 由十九世紀至今也很流行。 Or 是四片式設計，它的三片組合式消 色差鏡片，完全改正了光學的變形。實 際上 orthoscopic 字義即 "改正變形" 的意思。它不單有寬視場，而且也擁有 長目視距離。</p>
1880 年			用途:
焦距: 4mm ~ 34mm			最適合觀看行星。
			
Edmund Scientific 牌日本製造的 Or 型目鏡 ---- 12.5 mm 焦距，目視距離 10.41 mm，視場 44°。			

廣角目鏡構造	目視距離	視場	特點
--------	------	----	----

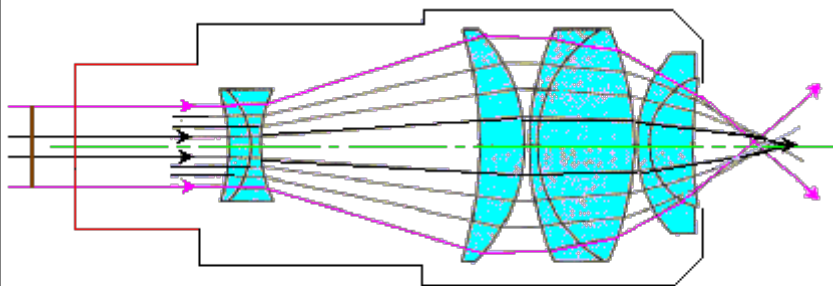

	長 ~15 mm	<p>Er 型是擁有寬視場的廣角目鏡。視場有 70 度之多，當用於深空低倍觀察，會令你印象難忘，很多時配合高質素的天文雙筒鏡，而 K 款式則配普通雙筒鏡用。</p> <p>在高倍放大時目鏡的視場邊緣會出現散光影像，購買時要打聽清楚每隻牌子目鏡的實際表現。</p> <p>改良了的超廣角目鏡的視場可去到 85 °（Meade 牌子的 UWA），使用者更要前後左右移動眼睛才可看到全景，它和 Televue Nagler 超廣角目鏡很相似。</p>
1917 年		用途：
焦距: 16mm ~ 40mm		廣角型目鏡最適宜用於觀看星雲星團等深空天體。

目鏡框外直徑: 1.25" 或 2"



Vixen 牌 Super-wide LVW 型廣角目鏡 ---- 3.5, 5, 8, 13, 17, 22mm，目鏡框外直徑是 1.25"，目視距離全部 是 20mm 長，這種設計令到它和普通目鏡外型有明顯的分別 ----- 焦距愈長目鏡尺寸愈短，焦距愈短目鏡身愈長。

廣角目鏡構造	目視距離	視場	特點
--------	------	----	----

 <p data-bbox="469 658 604 692">拿格勒目鏡</p> <p data-bbox="888 658 956 692">Nagler</p>	<p data-bbox="1096 524 1147 669">中~長 10~18 mm</p>	<p data-bbox="1216 206 1347 647">Nagler 型是擁有寬視場七片透鏡組合成的超廣角目鏡。視場有 82°，是較早出現的設計。現已有第五代——Nagler V，目視距離也增長了很多。</p>		
<p data-bbox="611 837 708 871">20 世紀</p>		<p data-bbox="1216 703 1347 810">使用者亦要前後移動眼睛才可看到全景。</p>		
<p data-bbox="541 927 780 960">焦距: 4.8mm ~ 31mm</p>				
<p data-bbox="644 1016 948 1050">目鏡框外直徑: 1.25" 或 2"</p>				
				
<p data-bbox="708 1628 884 1659">第 4 代 Nagler</p>				

b. 免重調焦目鏡（Parfocal eyepiece）

當目鏡廠商宣稱它們的目鏡是 Parfocal 的，這即是說當我們轉換不同焦距目鏡時也不用重新對焦。這是因為它們的目鏡焦平面與目鏡肩托是相隔同一位置的。通常用同一目鏡牌子的同一系列

目鏡也有這種特式，但購買時要先查看清楚說明介紹，但不同廠商的產品則多數要重新再調校焦點了。



Meade 牌 plossl 型目鏡 ---- 5, 6.7, 9.5, 16, 25mm 是 parfocal, 最右面 40mm 目鏡除外。很明顯左方五個目鏡的框至肩托之長度是相同的。

11.3 目鏡的選擇

普通的目鏡焦距有 6mm 至 40mm，我們應採用目鏡外口徑 1.25" 和目視距離長的款式，經濟的可採用 0.95" 的目鏡。

磨鏡者自製的望遠鏡質素若果不是很高的話，作者提議首先應選購一隻低倍的 25mm 焦距目鏡，其後再買隻中倍目鏡，這時可考慮 12.5mm 的 K 或 Or 式，再高倍的目鏡便要 6mm plossl 式或 Or 式了。

理論上目鏡最短可用到焦距除以 2 的焦距，即 $f/8$ 最高可用到 4mm 焦距。但短焦高倍目鏡要求高的鏡面質素才能全面發揮功能，否則磨鏡者只能看見白濛濛一片的影像。磨鏡者選購高倍目鏡時認真要檢定一下自己的主鏡質素，看看是否可以承受這樣高倍的放大。

相關網站：

自製目鏡可參考

[巨眼之門—自組天文望遠鏡](#)（湯大同）

第十二章 望遠鏡的配件和組裝 關耀平 黃隆

12.1 光學部份的機械配件

主鏡完成後，下一步是製造光學部份的機械的配件。在望遠鏡光學系統的整體結構圖中，除主鏡和副鏡外，需要的配件是主鏡座、副鏡架、目鏡座、鏡筒和尋星鏡。這些配件部份可往儀器社購買廠製成品，但自製比較便宜和有實踐意義，以下一一介紹各種配件的製造方法。

1) 鏡筒

望遠鏡鏡筒是用來支撐光學配件的框架，要確定它是否堅固，是否有足夠的強度去承托主鏡、副鏡和目鏡座，絕不可以彎曲變形或斷裂，但重量又不應太大，以免在設計腳架時要相對地增加重量。鏡管更要防止不必要的光線進入目鏡，和可以附上尋星鏡。

理想的鏡管應該是一枝既擁有足夠強度而又輕巧的框架，塑膠、玻璃纖維、木、紙和鋁都是最普通的材料。

鏡筒主要分封閉式(closed tube) 和開放式 (open framework"truss tube") 兩種。



開放式鏡筒



封閉式鏡筒

通常我們都會先考慮封閉式鏡筒，開放式鏡架多應用在大口徑主鏡，以減低整體望遠鏡的重量。

a) 鏡筒的長度

大概的標準就是鏡筒的長度相等於焦距，可以再加 50mm 至 100mm (2~4 吋)。這樣鏡筒前端便會預留有約 50mm 遮光罩，鏡筒底部也有足夠空間放置主鏡座。

而最短的長度基本上沒有什麼限制，不過你要儘量避免光線經過鏡筒前端走進入目鏡座。

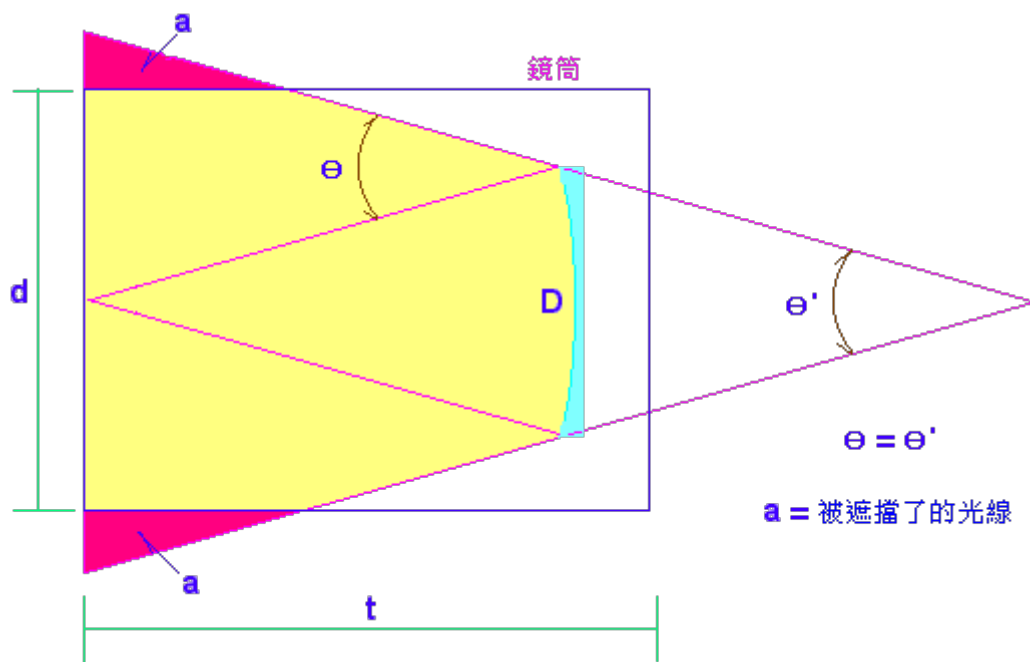
至於鏡筒的最大長度，應該是以鏡筒不會妨礙有用的光線進入主鏡為準(vignetting)。

b) 鏡筒的直徑

鏡筒的直徑大約是主鏡直徑加上 25 mm 至 100 mm (1~4 吋)。

鏡筒的直徑必須要比主鏡直徑大一些，以便主鏡座放置在鏡筒內。因為主鏡座通常都比主鏡大，原因是它有三塊鏡匣抓主鏡，避免主鏡在轉動時掉下來。

鏡筒太窄，或鏡筒前端遮光罩太長，就會把部份入射光線(a)切斷。



鏡筒直徑、主鏡直徑和鏡筒長度的相關公式如下

$$d = D + t \times \tan \theta$$

d = 鏡筒直徑

D = 主鏡直徑

t = 鏡筒長度

theta = 入射角設定值

很多時鏡筒的直徑是以光的入射角度 θ 計算出來。通常 $f / 8$ 的入射角度定為一度，而 $f / 6$ 的為二度。而 $\tan 1^\circ = 0.018$, $\tan 2^\circ = 0.035$ 。

例：主鏡直徑 = 120mm，鏡筒長度 = 焦距 = 720 mm

焦比 $f / = 720 / 120 = f / 6$

這樣入射角度 $\theta = 2^\circ$, 那麼 $\tan 2^\circ = 0.035$

代入公式

$$\begin{aligned}\text{鏡筒直徑} &= 120 + 720 \times 0.035 \\ &= 145.2\text{mm}\end{aligned}$$

計算結果鏡管是 145.2mm，鏡管直徑比主鏡直徑大 25.2mm，即段落開始時鏡管直徑大約的數值。

很多時，市面現成的材料，例如膠水喉管的直徑尺寸是固定的，所以我們只可計算鏡管的長度。

捲造鋁片鏡管可以找五金店舖的師傅代勞，鋁片厚度約 1.2mm。鏡管口兩端要加上鐵匣，以增加鏡管強度。

c) 鏡筒的內部

鏡筒做好了，就要把鏡筒內壁塗上一層不反光的黑色油漆(黑板油)或貼上絨紙，以避免光線在內部反射。反光的鏡筒，反差低，成像劣，背景白濛濛一片。而開放式鏡筒設計便只可以在外面圍上遮光物料了。



d) 鏡筒的表面

表面多數會塗上一層保護油漆。有些製鏡者則喜歡用自黏貼膠牆紙裝飾。它的顏色鮮艷，款式眾多，實用美觀，又容易貼上。貼這些膠牆紙時，可先用噴壺噴上一層水在鏡筒表面上，這樣貼膠紙時會容易一些趕走氣泡，貼膠牆紙時平面可用膠片和布幫助，彎曲面則用布抹擦去趕走氣泡。

e) 鏡筒的底部

至於鏡筒的底部，通常我們都讓它留有空間，以加快主鏡適應外間的溫度。有一點要注意的就是別讓背底的光線透過空隙走進副鏡範圍，影響成像。

第十三章 望遠鏡腳座

13.1 赤道儀腳座



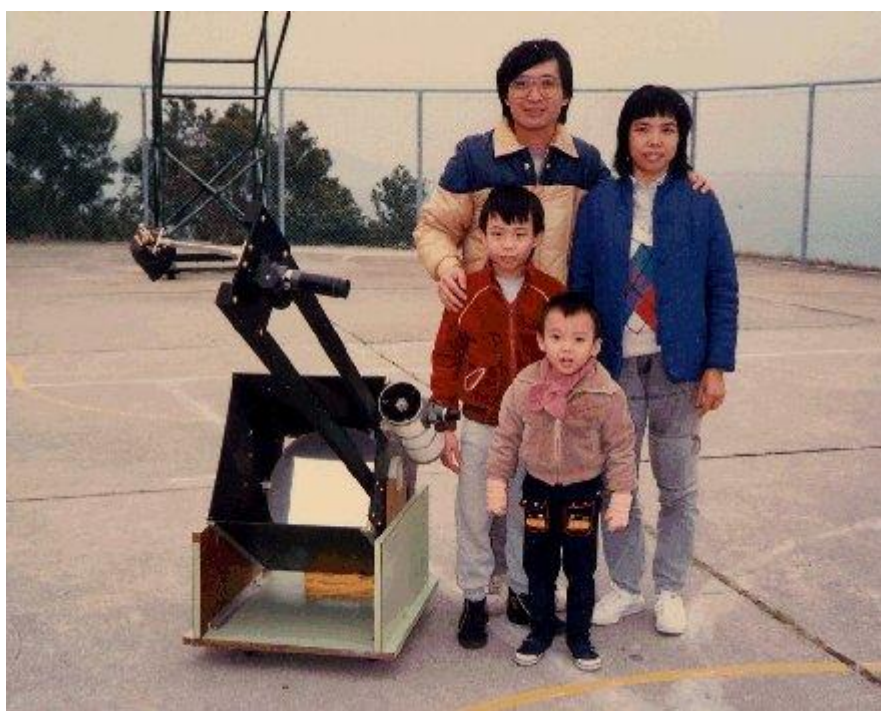
黃隆 6" f/5 牛頓卡氏式望遠鏡赤道儀腳座



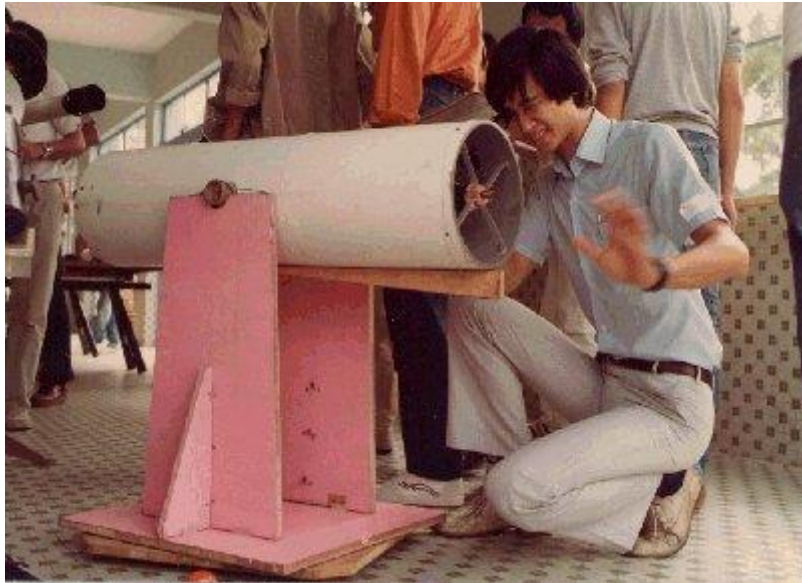
13.2 杜蘇氏腳座



坐井會 12" f/4 杜蘇氏式望遠鏡



蔡坤安 16 吋 杜蘇氏式望遠鏡



卜挺志和 8 吋 杜蘇氏式望遠鏡



霍志文兄弟和自製的 14 吋 杜蘇氏望遠鏡合照

