

大型望远镜的光学设计

1. 导 言

本文打算对我们在奥伯科亨(Oberkochen)卡尔蔡司厂工作的最后几年中,在望远镜的光学设计工作方面作一概要的说明。

首先对在天文仪器工业方面工作的光学设计者的任务先做一简单的说明。他的地位,不同于一般的光学设计者,同时也是一个天文学家。许多这样的天文学家,是在最擅长于光学设计专业的行列之中,这种地位使他们能够幸运地评价那种光学系统的研制对于天文学的发展是有意义的和合乎需要的。而我们在工业方面工作的人,必须受天文学家给我们提出的问题所支配,但是,我们希望根据自己工作经验能指出将来可能发展的方向。

我们曾经从事过的那些研制工作主要是根据博文(Bowen)所提出的关于 $f/3$, $f/8$, $f/15-35$ 的几何学和根据R. C. (Ritchey—Chretien)或准R.C设计。我们认识到有一派认为使用具有2个反射镜的消球差望远镜是浪费一个光学设计工作者的时间,而应集中力量致力于施密特(Schmidt)型系统上。然而,现在研制的大部分望远镜不论是大的,或者中等的和较小的都是R.C或准R.C型,这一事实,说明它代表了天文学家对目前望远镜设计看法的主流。

我们的工作过去主要受ESO3.5米工程的影响,为维也纳(目前已经完成)设计了1.52米望远镜,首先是为海德尔贝格(Heidelberg)马克思—普朗克(Max-Planck)研究所设计了1.23米,2.2米,和3.5米的仪器。我们感谢所有有关这些设计的天文学家给予

这些工程的建议和协作。

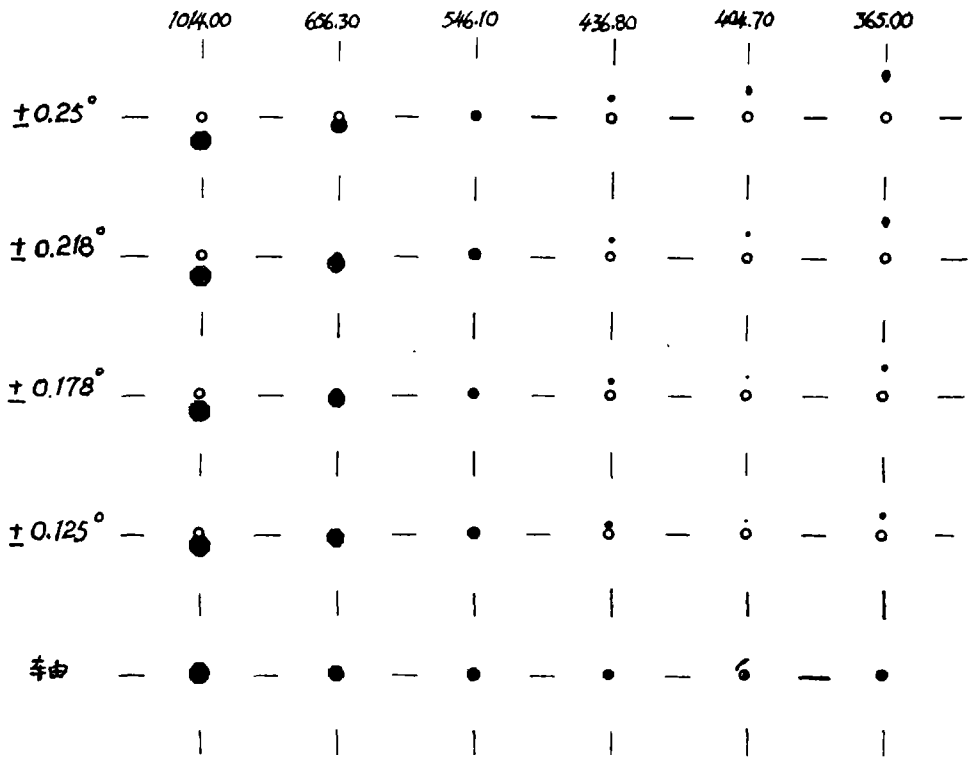
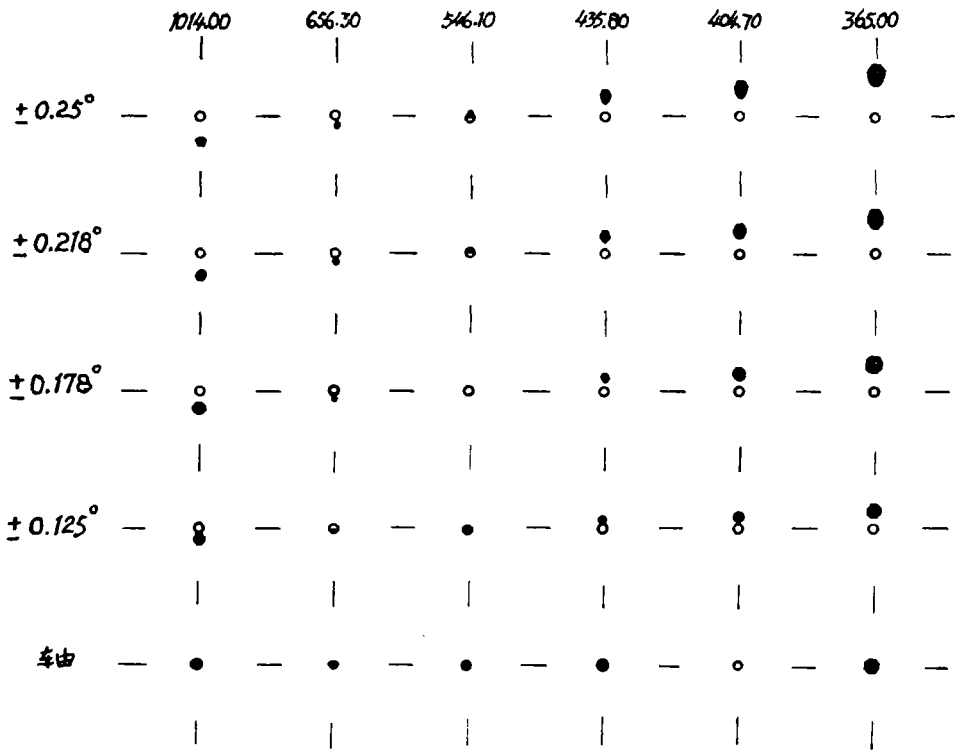
因为折轴焦点只有轴向校正,没有光学设计方面的问题,我们的工作基本上是关于第二焦点。主焦点和用缩焦器来代替主焦的可能性。由于第二焦点($\sim f/8$)通常被认为是最重要的观察站,我们的大部分工作与此有关,我将开始对这种焦点的校正器进行讨论。

2. 第二焦点($\sim f/8$)

2.1 RC或准RC

因为照相底板尺寸一定,用大的望远镜比用中等的望远镜或较小的望远镜所得的视场角要小。所以,一米的望远镜可能有 $\pm 0.75^\circ$ 或更大的视场。3.5米仪器通常不使用大于30厘米 \times 30厘米相当于 $\pm 0.43^\circ$ 视场的底片。因此,校正器的类型对大的望远镜完全适合,而对小的望远镜也许是不适合的。

校正器的最老形式是使视场变平的透镜,目的是避免用弯曲照相底片。这样,未经校正的像散是限制视场的像差。克勒(Köhler)指出,在象面内侧使透镜移动一个短距离,不仅可以校正珀兹伐(Petzval)曲率而且能校正像散。这种解决问题的办法是对3.5米ESO望远镜提出的,特定的视场是 $\pm 0.25^\circ$ 。图1(a,b,c)所示,是一个波长等于546nm,405nm和1014nm最佳焦点的这种系统的点列图。圆为25 μ 或0.18弧秒。完全未经校正的色差是这种系统最严重的缺陷,特别是横向色差。对适当光谱区域纵向像差能够完全聚焦。但是,横向色差在1014nm和365nm之间大约2弧秒。在紫外区域某些色彗差变得显著了。在另一方面,这种办法仅有一个鬼象比双透镜校正器有六个像要优



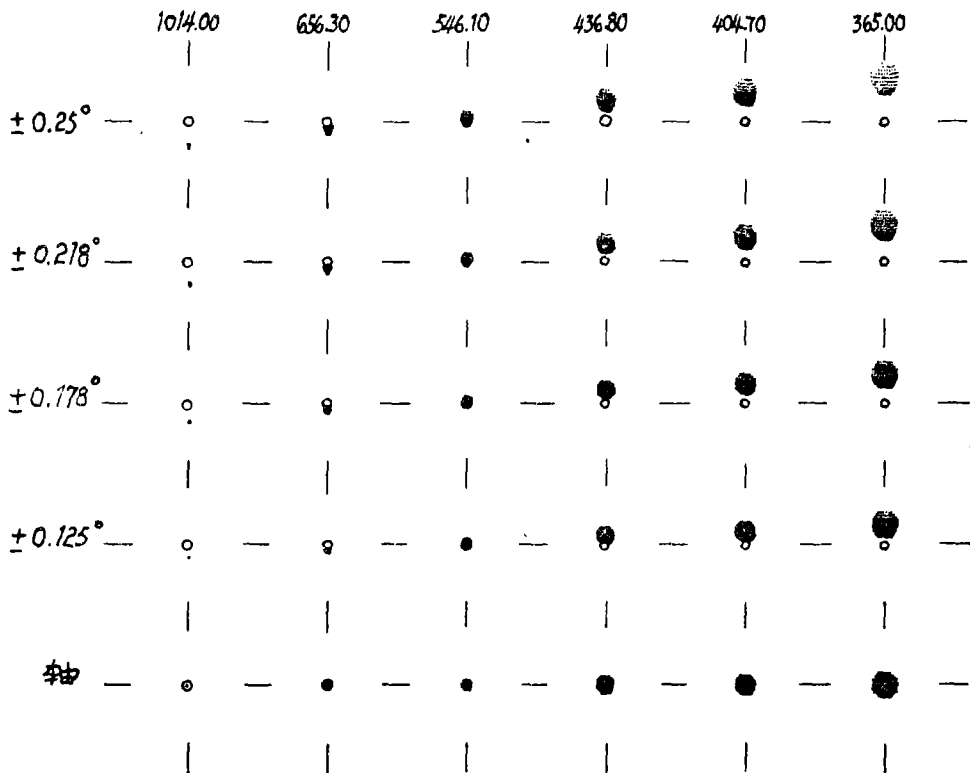


图1 为ESO设计的3.5米望远镜。准R-C焦点。视场 $\pm 0.25^\circ$ ，单片校正器。点列图为：
 a) 波长为546nm的最佳焦点 (圆 = 0.18 弧秒 = 25μ) (b) 波长为405nm的最佳焦点 (圆 = 0.18弧秒 = 25μ) (c) 波长为1014nm的最佳焦点 (圆 = 0.18弧秒 = 25μ)

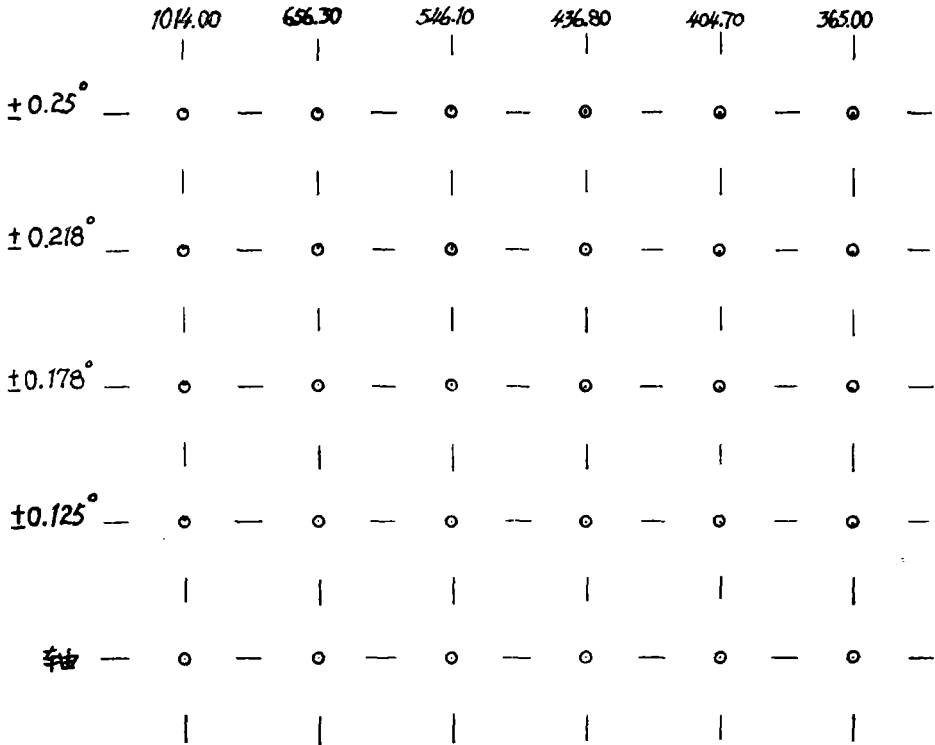


图2 ESO用的3.5米望远镜。准R-C焦点。视场 $\pm 0.25^\circ$ ，双片校正器。点列图的标度与图1相同。
 (圆 = 0.18 弧秒 = 25μ)

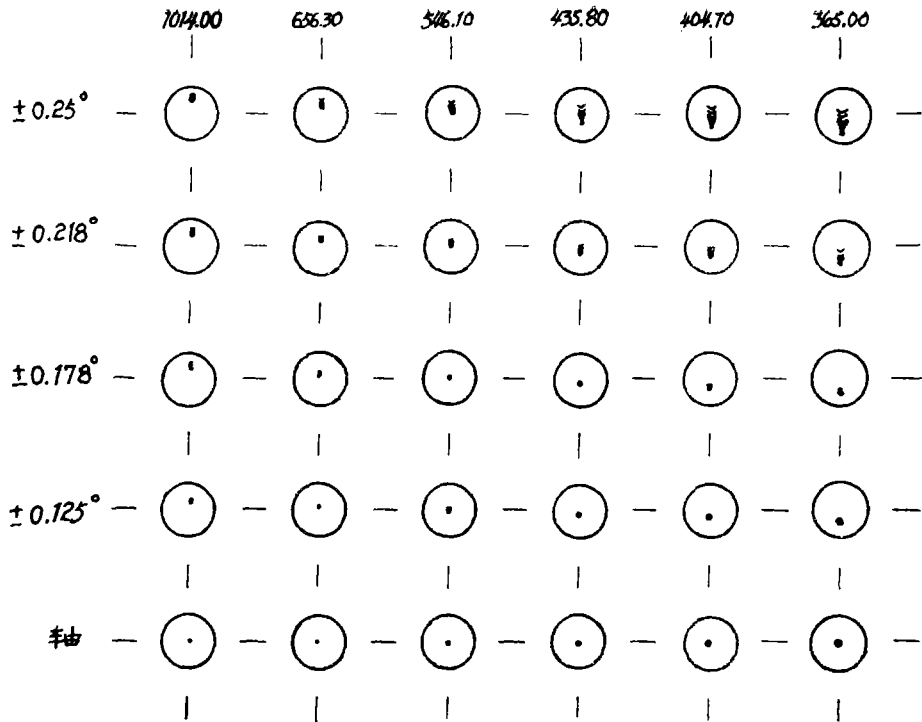


图3 ESO的3.5米望远镜。准R-C焦点。视场 $\pm 0.25^\circ$ ，双片校正器。点列图的放大标度如图2。(圆 $= 0.18$ 弧秒 $= 25\mu$)

越。(这样就排除了乳剂表面和透镜表面之间反射产生的鬼象。有二个透镜校正器的维也纳望远镜对昴星团的试验照相未能显示乳胶反射造成的鬼象的任何痕迹，虽则透镜表面之间的反射引起的所有六个鬼象都可以识别)。对于一定光谱范围，它的性能在原规定的 0.5 弧秒以内。

注意，横向色差的增加与视场至少是线性的关系，对视场角比较大的小望远镜来说，这个办法是不适用的。这就是维也纳望远镜选择双透镜校正器的主要理由。根据这些经验，对预定的ESO3.5米望远镜主镜安装双透镜校正器。所用的校正器大致是无限远焦的，且由凹面相互对着的弯月形透镜组成。图2显示的点列图与图1有完全相同的比例。图3在较大比例上指出同样的点列图(圆为 25μ 或 0.18 弧秒)。用双透镜比用单透镜有显著的改进。

必须强调，为ESO3.5米望远镜设计的单片和双片解法以及维也纳1.52米望远镜用

的双片校正器是准R、C解，而不是精确的R、C解。反射镜的非球面常数在求最佳条件时是作为自由改变的参数考虑的。(对于ESO双片校正器，主反射镜事实上是预定的，但第二反射镜的非球面常数是自由改变的)。对于精确的R、C解的这种变动的重要性对一种材料(例如石英)的双片校正器和较小的望远镜的典型视场(大约 $\pm 0.5^\circ$ 或更多)变得突出了。这一点被建立维也纳望远镜的两种解法所证明。图4表示出一种玻璃型号的双片校正器和要求视场为 $\pm 0.5^\circ$ 的一个精确R、C反射镜系统的点列图(圆为 0.33 弧秒)。色差、像散和色差仅仅能够校正到一定程度，并且在波长 $= 546\text{nm}$ 处选取最佳焦点的极端的波长处点列图的扩大达到约为 1 弧秒。图5按照同样的比例给出同一玻璃型号的双片校正器和一个准R、C反射镜系统等值的点列图。唯一值得注意的剩余像差是不可能校正的色像散，但对于整个光谱范围的一个焦点最坏的点列图在 0.33 弧秒之内。最好采用准R、C解

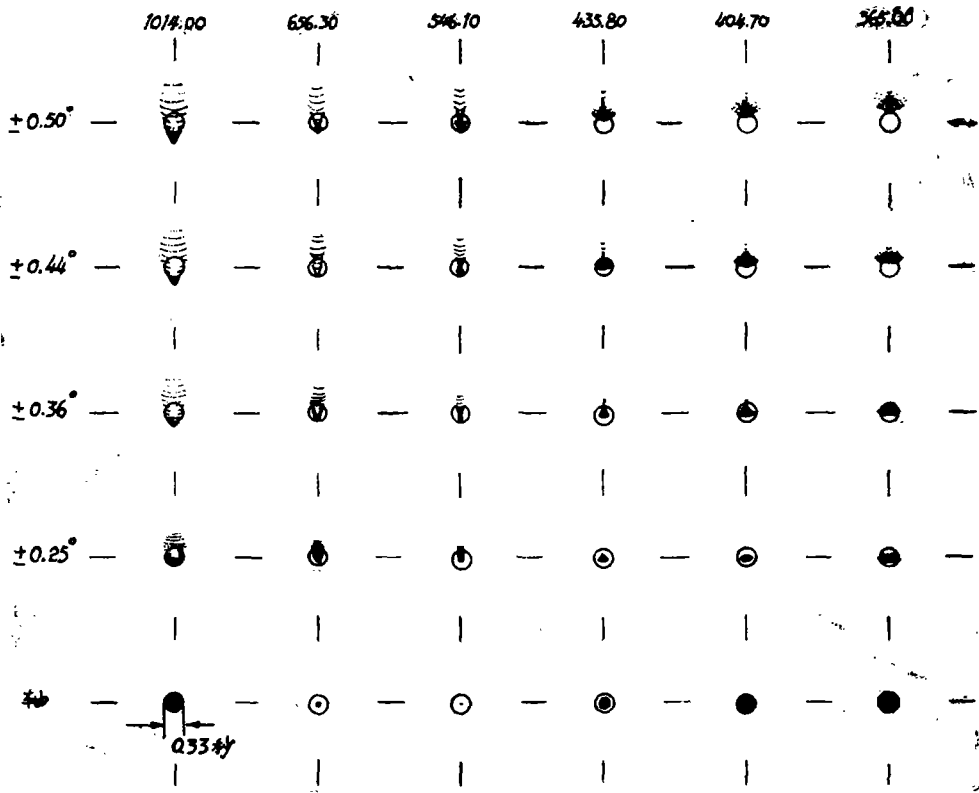


图4 具有精确的R-C反射镜常数和一种材料的双片校正器的1.52米望远镜。
视场 $\pm 0.5^\circ$ ，最佳焦点为546nm。(圆=0.33弧秒=20 μ)。

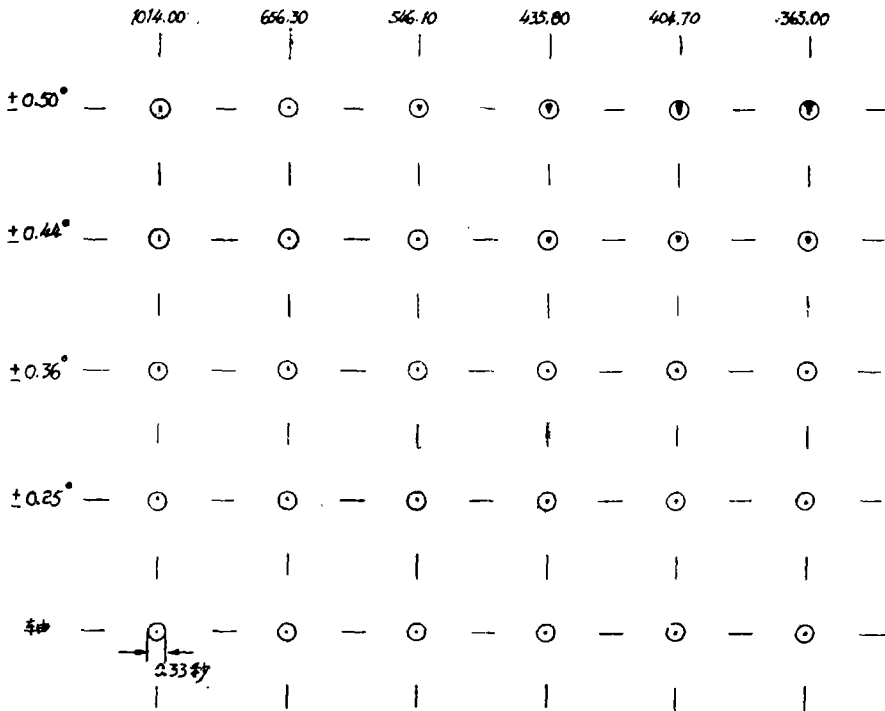


图5 维也纳1.52米望远镜，具有准R-C反射镜常数和一种材料的双片校正器。
视场 $\pm 0.5^\circ$ 。点列图(圆=0.33弧秒=20 μ)

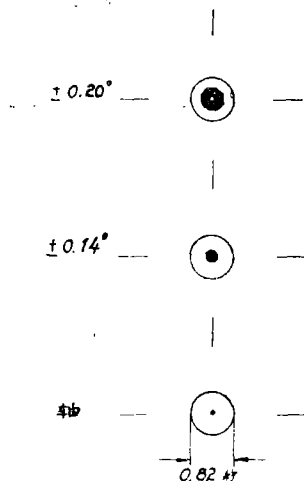


图6 具有精确的R-C反射镜常数的1.52米望远镜(如图4)。没有校正器。具有曲率半径为1410毫米的最佳弯曲象面的点列图(圆=0.82弧秒=50 μ)。

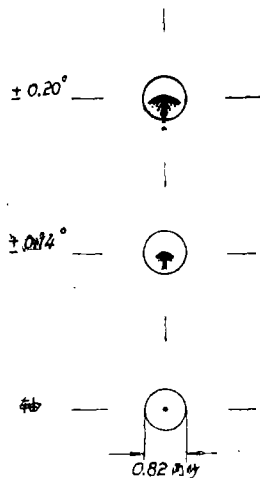


图7 具有准R-C反射镜常数的维也纳1.52米望远镜(如图5)。没有校正器。具有曲率半径为1371毫米的最佳弯曲象面的点列图(圆=0.82弧秒=50 μ)。

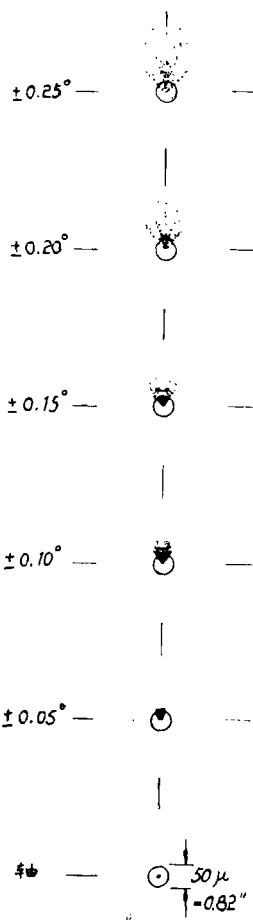


图8 具有经典反射镜形状的1.52米望远镜(抛物面,双曲面),没有校正器。几何形状如图6和图7。具有曲率半径为1539mm的最佳弯曲象面的点列图。(圆=0.82弧秒=50 μ)。

类似系统的设计数据在参考(7)中给出。

如果移开透镜,上面提到的准R、C解在球差上显示出很小的改变。另一方面,彗差是小的,但不能忽视。在没有透镜和具有最佳弯曲照相底板的两种情况下,维也纳望远镜的精确R、C解和准R、C解的比较,如与图4和图5相对应的图6和图7所示(圆

0.82弧秒)。因为彗差随视场线性增加,而像散则按平方增加,对于大视场,彗差相对地变得不太重要了。在 ± 12 弧分,精确的R、C给出大约0.40弧秒的对称点列图,准R、C给出大约0.63弧秒非对称的点列图。图8表示等效的典型望远镜的点列图,用最佳弯曲板(圆为0.82弧秒)。点列图(彗差很大)在 ± 12 弧分时大约为1.94弧秒。

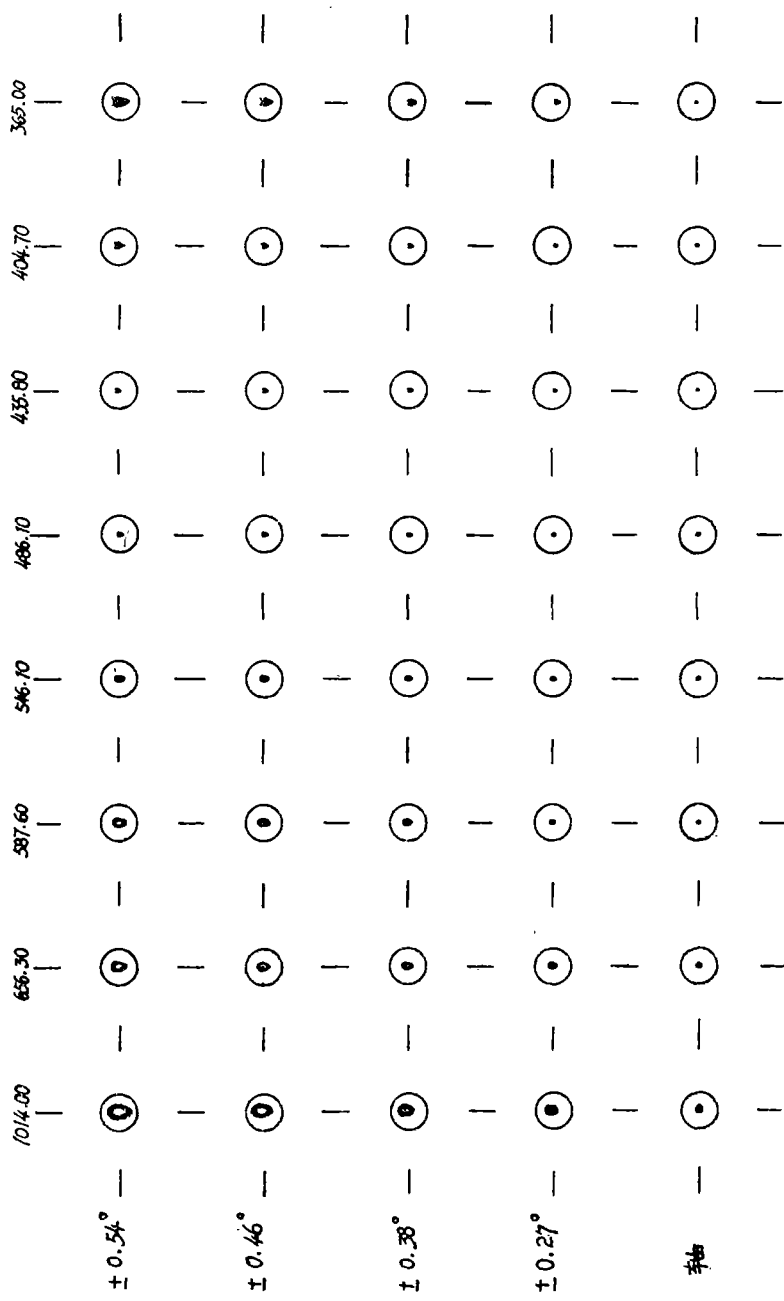


图9 具有准R-反射镜的一种材料双片校正器的2.2米望远镜。视场为 $\pm 0.54^\circ$ ，点列图（圆=0.47 弧秒=40 μ ）

具有准 RC 反射镜常数和一种材料双片校正器的 2.2 米望远镜设计数据。对蓝光最优化，视场为 $\pm 0.54^\circ$ ，设计相当于图 9 的点列图。

曲率半径(mm)	间隔(mm)	玻璃	n_c	$n_{656.3}$	$n_{404.7}$	n_{365}
-13200 a(自由直径) 2200			1			
-6816. b	-4469.18		-1			
973.9	5290.45		1			
1667.2	44.0	石英	1.46013	1.45640	1.46968	1.47465
-2035.8	127.88		1			
2643.1	35.0	石英	1.46013	1.45640	1.46968	1.47465
(后焦点)	194.95					

a) 非球面 $P = h^2/2r + (8.959638 \times 10^{-15})h^4$

b) 非球面 $P = h^2/2r + (2.3393291 \times 10^{-12})h^4 - (1.3722965 \times 10^{-19})h^6$

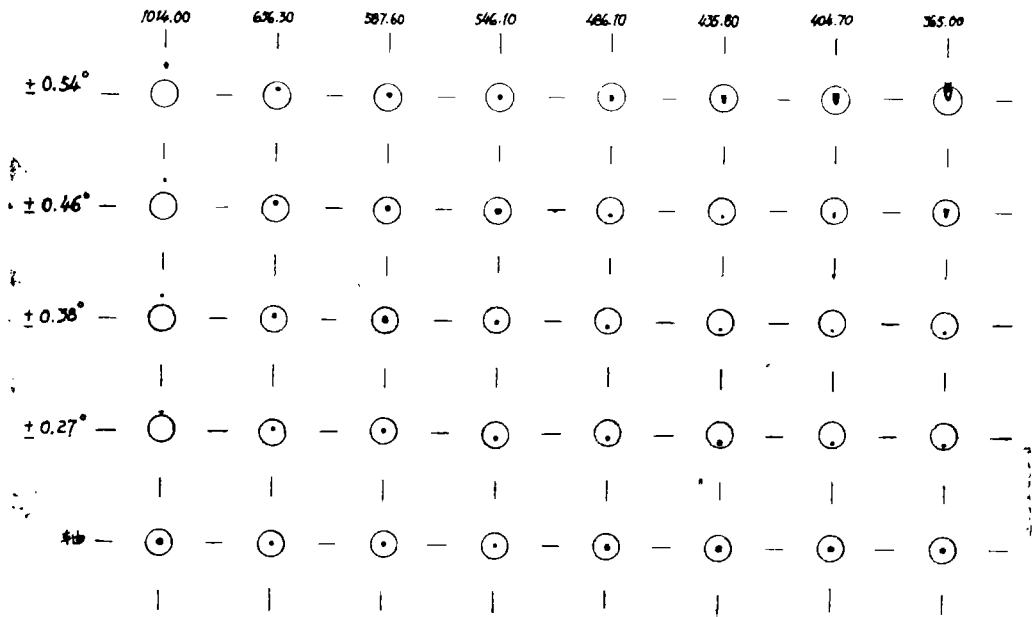


图10 具有精确RC反射镜常数和两种不同玻璃(PK50和B.F₃)的双片校正器的普朗克研究所 2.2 米望远镜。视场 $\pm 0.54^\circ$ ，点列图 (圆 = 0.48 弧秒 = 40 μ)。

表 2

具有精确R-C反射镜常数和两种不同玻璃(PK50和B_aF₃)的双片校正器的普朗克研究所2.2米望远镜的设计数据。视场±0.54°,设计相当于图10的点列图。

曲率半径 (mm)	间隔 (mm)	玻璃	ne	n656.3	n404.7	n365
-3200 ^a (自由直径) 2200			1			
-6816 ^b	-4469.18		-1			
1994	5324.86		1			
25140	37.98	PK50	1.52232	1.51824	1.53294	1.53846
999	205.55		1			
-5065	27.81	B _a F ₃	1.58565	1.57893	1.60460	1.61524
(后焦点)	89.07		1			

a) 非球面 $P = h^2/2r + (7.306787 \times 10^{-15})h^4$

b) 非球面 $P = h^2/2r + (2.1860958 \times 10^{-12})h^4 - (1.2105)92 \times 10^{-19}h^6$

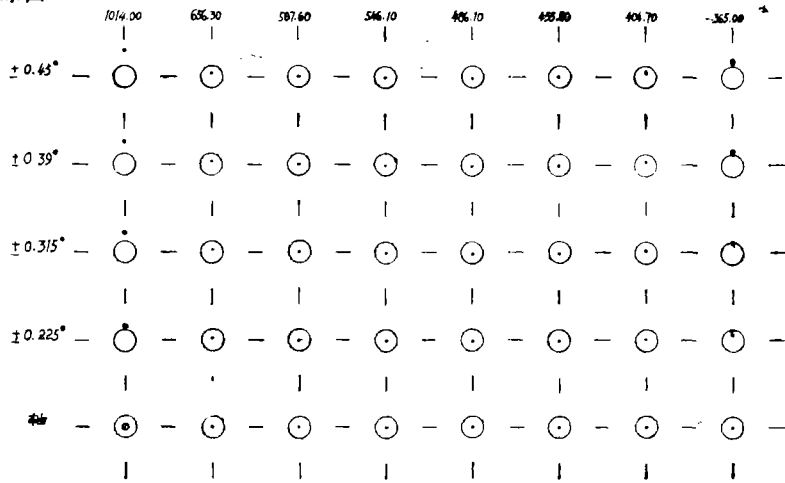


图11 具有精密R-C反射镜常数和两种不同材料(石英和LLF₁)的双片校正器的3.5米望远镜。视场±0.45°,点列图(圆=0.49弧秒=64μ)。

表 3

具有精密R-C反射镜常数和表3两种不同材料(石英和LLF₁)的双片校正器的2.2米望远镜设计数据。视场±0.45°,设计相当于图11的点列图。(在图11中点列图(64μ)的线性圆大小表示与3.5米望远镜具有相同的几何形状的按比例放大的设计。)

曲率半径 (mm)	间隔	玻璃	ne	n656,3	n407.7	n365
-13200 ^a (自由直径) 2200			1			
-6816 ^b	-4469.18		-1			
814.11	5423.45		1			
15169.46	29.32	石 英	1.46015	1.45645	1.46972	1.47469
-2284.64	94.10		1			
1049.33	23.03	LLF ₁	1.55099	1.54457	1.56910	1.57931
(后焦点)	110.14		1			

a) 非球面 $P = h^2/2r + (7.306787 \times 10^{-15})h^4$

b) 非球面 $P = h^2/2r + (2.1860958 \times 10^{-12})h^4 - (1.2105792 \times 10^{-19})h^6$

图7所示这样的准R.C解不用校正器的色差残余对天文来说是否重要看来是有争论的。对马克思—普朗克研究所1.23米望远镜选用的类似解法,具有透镜的视场对 $\pm 0.75^\circ$ 很好地得到了校正。采罗—托罗乐(Cerro-Tololo)1.52米望远镜贾斯各聂(Gascoigne)和舒尔脱(Schulte)的解(用非球面板和视场整平器)也是准R.C的,具有对 $\pm 0.75^\circ$ 视场质量优异的校正器。

如果对于精确R.C相仿校正法是可能的,显然更可取。如上所述,对于大型望远镜的较小角视场,问题不这样尖锐,温教授(Wynne)为基特峰3.8米望远镜设计了很好的石英双透镜校正器,而维持精确的R.C常数。可是如图4所示,这类解法对大角视场应用存在困难。

加上第三个(非球面)校正器元件提供一个有益的改进,但“两种校正透镜用相同材料制成”这一条件放松便更为有利。维也纳望远镜的视场要求我们采用这种解法。

这引起了巴纳(Bahner)博士的注意,对2.2米望远镜(普朗克研究所)搞了一个解法,这望远镜现在正在制造中。实际有两种解法作比较:一个准R.C具有两个石英校正透镜(“维也纳”型—图9—圆=0.47弧秒)而一个精确R.C具有两个不同玻璃制的校正透镜(“两玻璃型”—图10—圆0.48弧秒)。这种望远镜对象差残余的平衡在可见到紫外区最优。复盖视场是 $\pm 0.54^\circ$ 。除二级光谱和横向色差的带误差外,甚至比准R.C好。二次光谱导致点列图的重心处于一曲线上。因为两种玻璃解法要求两玻璃在折射率—色散图上具有某种相对位置,这二级光谱只能用一种偏离“正常”色散的短火石玻璃使其进一步减少。不幸的是这样的短火石玻璃比玻璃图同区内的其它玻璃具有高得相当多的紫外吸收率。肖特(Schott)磷冕玻璃(PK50)使二次光谱下降了些并具有可以接受的吸收率。适当的火石玻璃是 B_aF_3 ,表1和2各为图9和10所示系统给出的数据。

感谢巴纳博士指出,即使对小的天顶距的大气散射和这系统的横向色差可相比。大气散射常用的公式:

$$\delta\varphi = \delta n \cdot \tan Z$$

我们对空气质量1和 $\tan Z = 0.1$ 在365nm和1014nm之间有横向色差 $\delta\varphi 0.224$ 弧秒,几乎是图10的点列图极大值的半数。除了横向色差外,唯一可注意的象差是不可校正的色差珀兹伐(Petzval)和。把图10(视场 $\pm 0.54^\circ$)和图4(视场 $\pm 0.50^\circ$)对比很有启发,图4是等效的精确R.C,具有同材料的两个校正透镜。

上面两玻璃解法的唯一不利处看来是紫外吸收率,这在330nm以下很强烈。如果玻璃PK50用石英代替,并用适当的火石玻璃例如 LLF_1 与石英配合,结果校正在各方面都可相比,但横向色差却是更坏。可是因为对于3.5米望远镜我们只要视场 $\pm 0.43^\circ$,横向色差比视场 $\pm 0.54^\circ$ 所用上述PK50- B_aF_3 的并不更坏。图11(圆=0.49弧秒)显示视场 $\pm 0.45^\circ$ 的石英 LLF_1 精确R.C的点列图在表3列出数据。除了横向色差外,它在整个谱区和整个视场内全是衍射限制的。再则,紫外透过区扩延到310nm。看来这是对大型望远镜特别有意义的解答。虽然氟化钙和K10的组合在原理上更有吸引力,但实际上找不到为大型望远镜所需直径的氟化钙毛坯。再则紫外透过甚至会更好,而氟化钙偏离“正常”色散将补偿(可能过补偿)横向色差的二次光谱。氟化钙和石英的组合初看很有吸引力,因为紫外透过好,但是色散差太小使校正质量不可相比,再则横向色的二次光谱相当当地校正过头。

图11例示用两透镜校正器和严格的R-C解可以将大型望远镜的点列图在全视场和光谱区内降到0.1弧秒或更好。因为可得到的最好可见度被认为是0.3弧秒左右,可以提出疑问,这样的几何光学质量是否重要?如果剩余象差是望远镜中的唯一误差来源,那么可能不是如此。但是有许多因素影响象质。

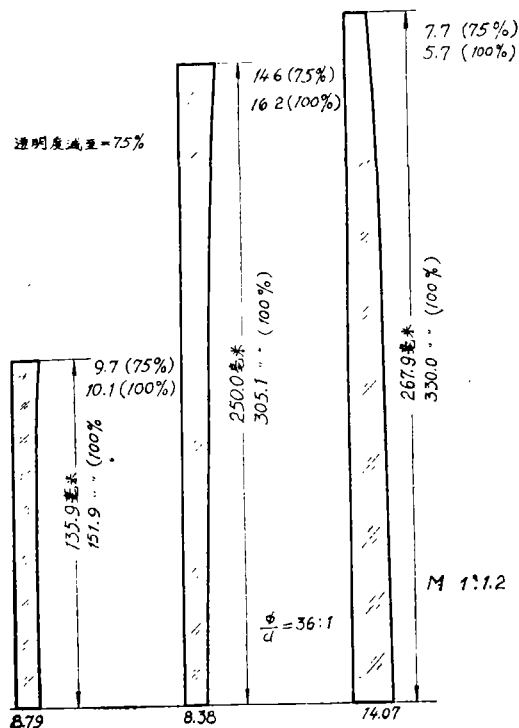


图16 ESO3.5米望远镜。主焦的修正板 状校正器,在板内具有重要的折射光焦度 (通过系统的切面)。

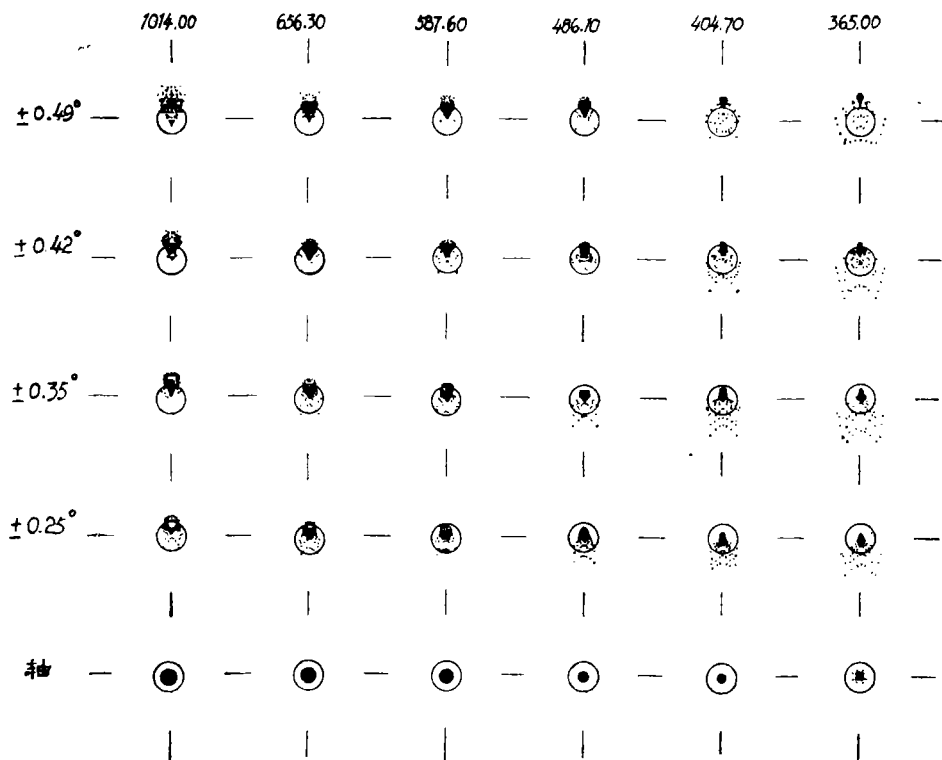


图17 ESO3.5米望远镜, 具有主焦用修正的板状校正器, 如图16所示。视场 $\pm 0.49^\circ$ (无渐晕)。点列图 (圆 = 0.50弧秒 = 25μ)。

从这些点列图显然可见三种象差对象的弥散起主要作用：高斯误差，色彗差和带象散。这校正器的纵向色可以忽略不计。初看这性质非常有利，但是由于没有可能存在对高斯误差有最佳的平衡，事实并不如此。这就是为什么温教授所给的这类透镜解答虽然纵向色差是比较大得多，所给点列图的弥散却比较小的理由。

较高级的色差只有在校正板内引入折射率才能改进。几年前我们决定探索这个可能性。经过大量最优化之后所得板状如图16所示，新系统的点列图见图17（比例尺与图15同，圆0.5弧秒），新系统不再有渐晕；最大板直径为660毫米。改进是很明显的。将这质量与ESO主镜温教授的最优秀的3透镜设计作比较是十分有趣的。图18显示温教授系统的点列图，比例尺也和图15与17相同。这些点列图与温教授发表的图十分相符。

温的三透镜系统与修正板系统质量之间很少差异。最优化不再进行，研究板制造的结果并不鼓舞人心。按照例行的施密脱板在真空鼓内生产板的方式，将需要应力高达25公斤/毫米²，而石英的破坏极限是5公斤/毫米²左右。几个非球面的存在往往导致强烈的非球性，这是由于补偿所引起。

虽然板系统似乎还可进一步改进，但由于制造的困难，没有做进一步的最优化。鉴于此，以及四元件的必要性必须与温教授解答的三元件相比较，没有疑问后者更为可取。板系统必须大量改进才能证明就是制造困难些也是值得的。

头两块板（正、负从最大板算起）的光焦度分配看来是重要的。这和下面所论温系统或乍纳非尔德-克勒（Sonnerfeld-Köhler）系统的光焦度分配是相同的。这种光焦度分配有利于横向色差的校正。

近来其它工作报导了描述引入折射光焦度来尝试改进板校正器的性能。

乍纳非尔德-克勒（Sonnerfeld-Köhler）系统包括具有上述光焦度分布的大致无限远

焦的双透镜和一个非球面视场平整透镜。在原始设计中引入非球面来校正畸变，对望远镜校正器没有特殊意义。双透镜位置（对于小得多的反射镜来说）是从象到反射镜距离的很大一部分，对3.5米望远镜来说给出一个等值双透镜直径约1450毫米。这样的直径在实施中是不现实的。但色差的校正说明在任何情况下透镜可用较小的。实际上最优化使系统转变为与温式校正器设计中的形式和尺寸都很相似。进一步缩小尺寸使单色象差变劣，特别是彗差。限制象差的是色彗。

完全可能，由于调节厚度使对非球面透镜适当，ESO 3板系统的进一步最优化可以导致广义的非球面4透镜解答，它与非球面温或乍纳非尔德-克勒（Sonnerfeld-Köhler）系统属于同一基本类型。

巴拉纳（Baranne）的系统是从保尔（Paul）建议的双透镜型推导出来的。这双透镜元件的光焦度分布（如在Ross校正器中那样）是与乍纳非尔德双透镜相反。我们对巴拉纳（Baranne）型校正器的有限经验是象散和横向色差比温型更难校正。

除非准备用两种玻璃双透镜来代替透镜校正器的一个或几个透镜元件来改进高级色差，看来具有 $f/3$ 的R.C主镜的透镜校正器进一步改进的可能性是很小了。损失紫外透过率和增大反射率耗损都是重大的代价。某些工程已采取决定用两种或更多种为不同波长设计的全石英系统看来是完全有理由的。

4. 缩焦器

缩焦器（简称F.R.）引起了天文学家之间强烈的反响，有赞成有反对。某些光学元件是不可避免的，而天文学家通常对光学元件是敏感的，特别是对透镜。海德爾貝格（Heidelberg）的马克思-普朗格（Max-Planck）天文学研究所建议探讨这个问题，主要是作为普朗克研究所的3.5米望远镜研究工作的一部分进行的。我们十分感谢与艾尔西赛（Elsässer）教授和巴纳（Bahner）博

士的很多鼓舞性的讨论。

看来列出理想的缩焦器可能具备的性质是有用的：

a) 它应从光学上代替主焦，提供在全光谱区具有类似质量的类似视场。

b) 它应采用 R.C 二次反射镜。将仅有 R.C 和折轴二次镜，后者可以用简单的触发器更换。

c) 它将提供最终焦点一个方便的位置。

d) 最终焦点的安排应使接收象的仪器使用位置不致于造成不能接受的遮拦。

e) 它不应造成结构问题，例如长叉悬臂。

f) 它应使长度和重量尽可能地小，减少搬运等问题。

g) 它应使光学元件尽可能少。

h) 它应只包括紫外透过元件。

要满足所有这些条件是很困难的问题，必须做某种折中，而最后所得的结果很大程度上决定于放松那些要求。

例如，放松了对于角视场需与主焦校正器具有同样作用的要求，立即使透镜解答感

到可喜；因为系统的直径和长度由视场尺寸所规定。与此类似，如果在全光谱范围内具有良好的校正，这个条件放松了，用了窄带滤光片这种想法，也使透镜解答引人入胜。但是由于有高级色差这不能得出结论这谱带是可变的。一个可变的窄带滤光片只对纵向和横向色差情况有所好转。

在另一方面，如果条件 a) 严格遵照，缩焦器的基本光焦度几乎一定来自一个反射镜，折射元件的作用是某种或别种形式的基本上是无限远焦的校正器。这样克服了色差这个基本问题但导致遮拦问题。特别是 d) 摆下了一个主要问题。再则满足 a) 加上 e) 和 f) 一起，可能对 g) 和 h) 是相矛盾的。

贝克(Baker)或梅耐尔(meinel)和谢克(shack)建议的三反射镜解答看来非常吸引人。贝克博士在上次国际天文会议上给我看的一个系统似乎满足所有上述条件，除 b)，c)，和 d) 外满足得都非常好。但对大多数天文学家条件 e) 看来占的权重很大。

为了研究普朗克研究所的 3.5 米望远镜

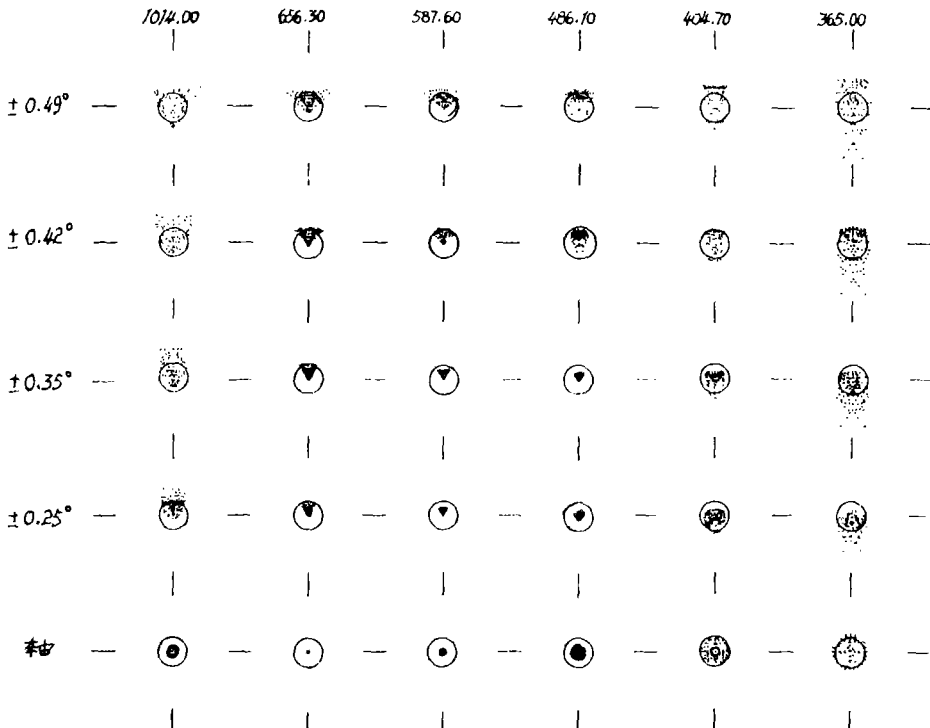


图18 ESO3.5米望远镜。温氏三透镜主焦校正器。视场 $\pm 0.49^\circ$ (无渐晕)。点列图 (圆 = 0.49 弧秒 = 26 μ)。

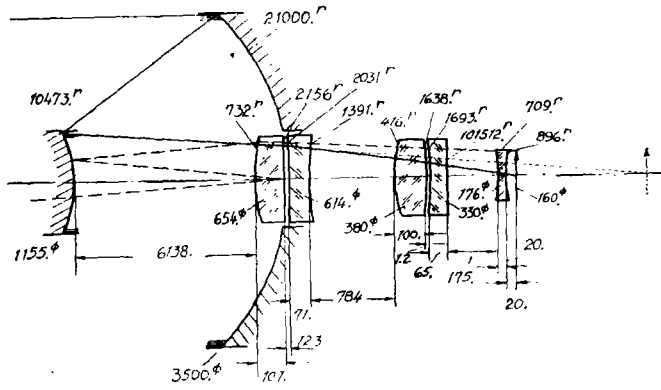


图19 3.5米望远镜的缩焦器。没有中间象的透镜系统。视场 $\pm 0.45^\circ$ ，通过系统的切面（简图）。

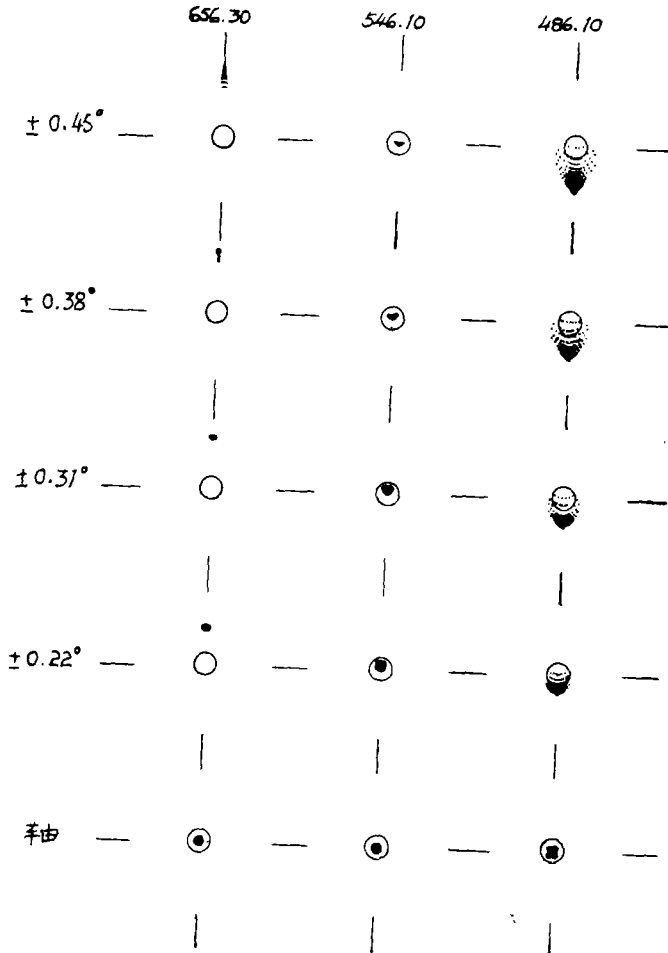


图20 3.5米望远镜的缩焦器。没有中间象的透镜系统。视场 $\pm 0.45^\circ$ 。点列图(圆 = 0.98 弧秒 = 50μ)。缩焦 $f/8$ 到 $f/3$ 。

我们尝试答复了下面的问题：用一个透镜或反射镜解答能满足上述条件到什么程度？我们探讨了三类系统：一个没有中间象的透镜系统，一个具有中间象的透镜系统，一个反射镜系统。在篇幅限制下，本文只能简单谈谈某些结果。更详细的叙述将不久在光学杂志上发表。

4.1 没有中间象的透镜系统

图19所示是通过5透镜的切面，这系统为从 $f/8$ 到 $f/3$ 缩焦给出十分令人感兴趣的结果。这个途径的基本问题是前面透镜必须比虚象大些，对于视场 $\pm 0.45^\circ$ 导致直径达650毫米。为容许单色象差的合理校正，系统必须相对地长。入射瞳在系统前面很长距离，因而系统操作几乎是远心地。图20所示点列图(圆0.98弧秒)。显然单色校正是在0.5弧秒以内，但是较高级色差很严重，甚至离中心波长50nm也很严重。为了改进这点，缩焦器的焦距必须减短，这使单色校正变得较难，这样这个系统只对固定窄带滤光片是满意的。解答对条件b), c), d), e)十分满意，

长度只有1300毫米。

4.2 具有中间象的透镜系统

这容许用一个场透镜，但与没有中间象的透镜系统相比不利的是缩焦器的折射光焦度几乎要加倍(缩焦从 $-f/8$ 到 $+f/3$ ，而不是从 $+f/8$ 到 $+f/3$)。探讨了一个七透镜系统(视场 $\pm 0.45^\circ$)，中间象到最终象的总长约4米(图21)，最大的透镜直径424毫米。虽然多含两片透镜，但质量(图22)无论单色或多色方面次于没有中间象的系统，这类透镜系统不适用于这类大象的减缩。它最好根本放松视场的要求。这是梅耐尔(meinel)和威尔柯逊(Wilkerson)的基本途径。他们的解答包括十一片透镜(一个厚场镜，4片“自准”透镜，六片“SummiCron”双高斯型照相机物镜，后者包括具有高紫外吸收率的重燧玻璃)。场($\pm 0.229^\circ$)和质量(在656nm与405nm之间约2弧秒)与一个主焦校正器不能相比。这说明问题的困难，因为这设计无疑地是非常良好的：对于约500毫米长度的给定的系统要改进它是困难的。

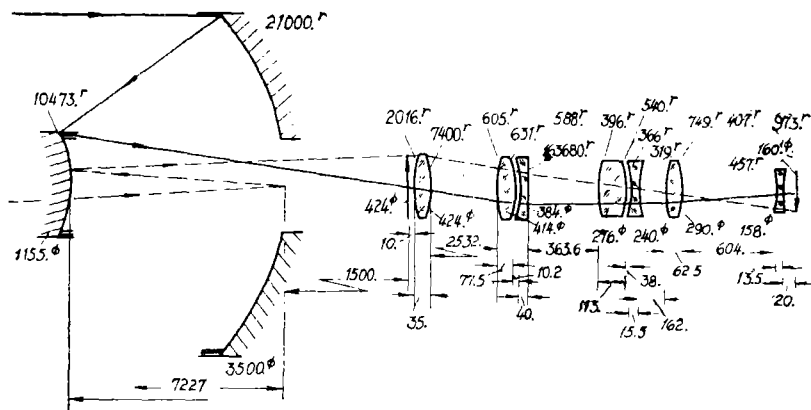


图21 3.5米望远镜的缩焦器。具有中间象的透镜系统，视场 $\pm 0.45^\circ$ 。通过系统的切面(简图)。

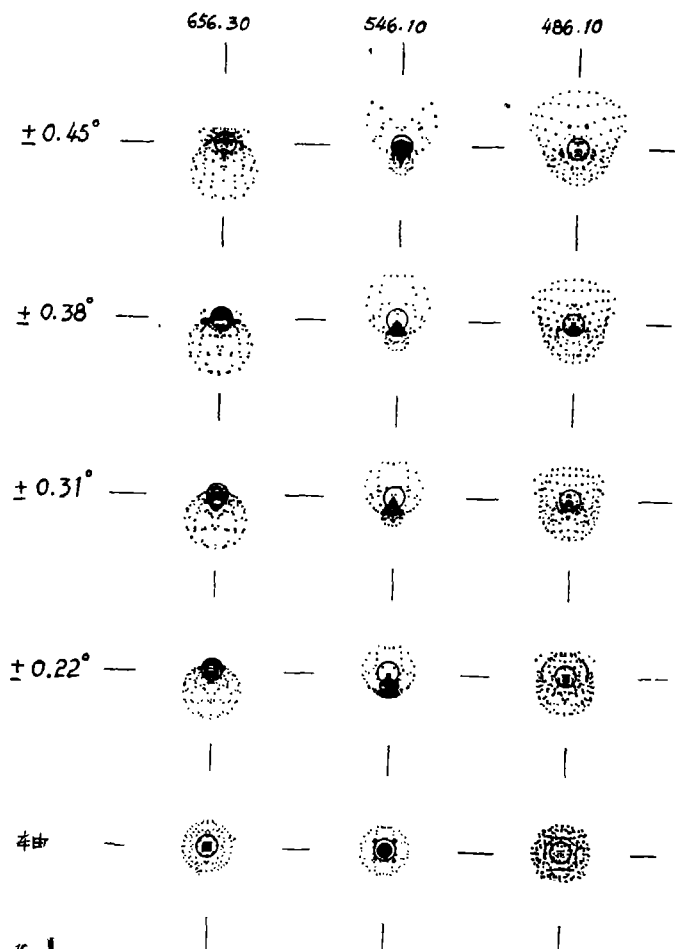


图22 3.5米望远镜的缩焦器。具有中间象的透镜系统。视场 $\pm 0.45^\circ$ ，点列图（圆 = 0.98 弧秒 = 50μ ）。缩焦 $f/8$ 到 $f/3$ 。

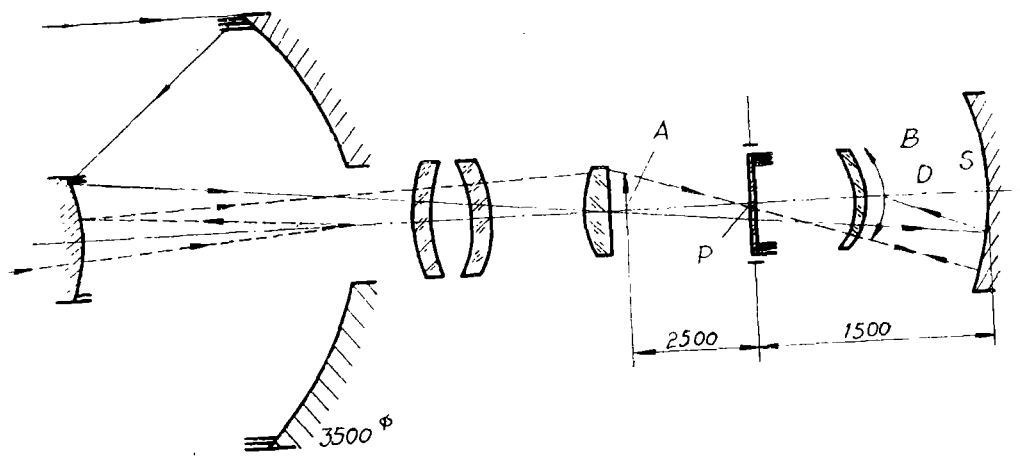


图23 3.5米望远镜的缩焦器。具有中间象的反射镜系统。视场 $\pm 0.5^\circ$ ，一个典型解答的几何学(简图)。缩焦 $f/8$ 到 $f/1.7$ 。

4.3 反射镜解答

谷代 (Courte's) 为主焦和次焦建议用反射镜解答，报导了主焦用缩焦器的鼓午人心的实用结果。如果要满足基本条件a)，这看来是最有希望的途径。主要困难是接收器的遮拦。(条件d)。

在对这个问题的分析中我们得出结论：对列出条件的有利几何学可以缩焦从 $f/8$ 到

$f/1.7$ 。缩焦到 $f/3$ 对光学校正更为有利但是导致照片盒遮拦问题，除非选择中间象到缩焦反射镜的距离大于4米。图23所示(简图)这样一个反射镜缩焦的切面。所示缩焦用的校正元件具有基本同一几何形状，但变换着给出多种解答，对孔径 $f/8$ ，视场 $\pm 0.5^\circ$ 的3.5米望远镜，中间象具有直径490毫米，(参考主焦校正器)。缩焦到 $f/1.7$ 最后象约为107

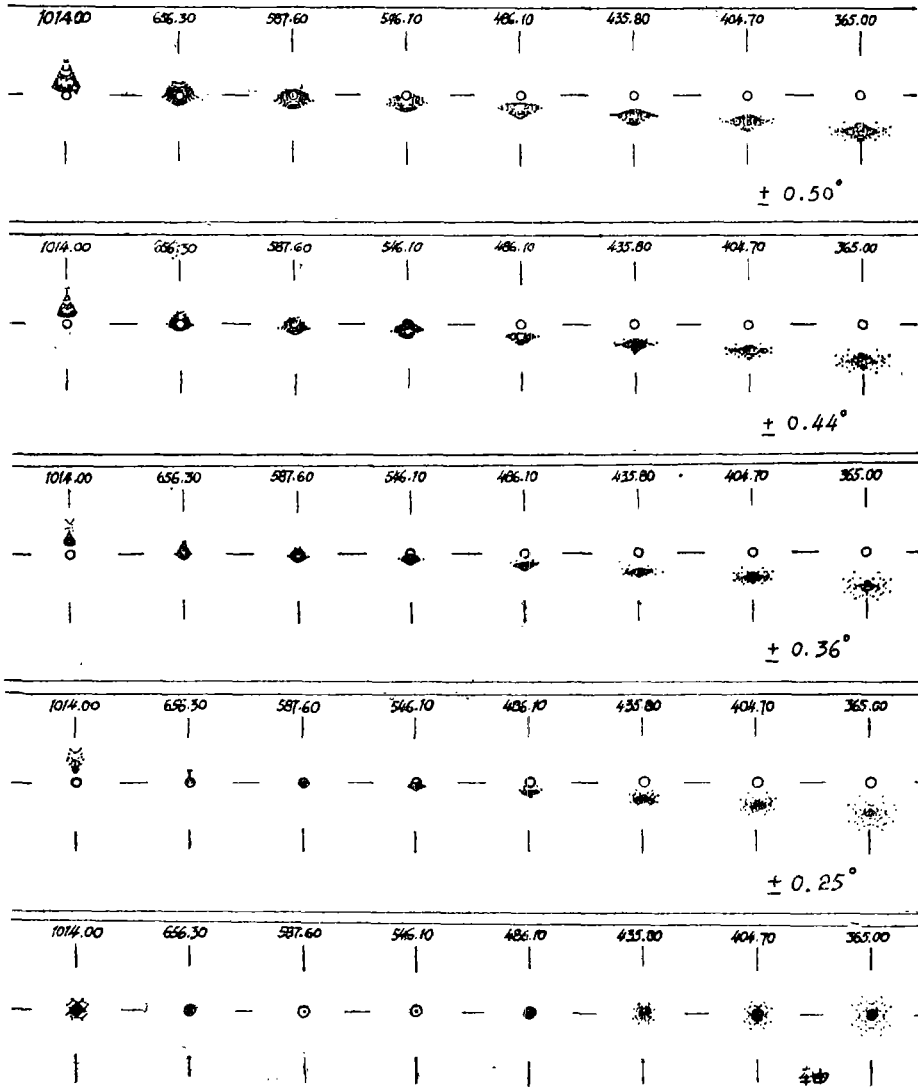


图24 3.5米望远镜的缩焦器。场透镜和具有移位瞳孔的史密脱照相机。点列图(圆 = 0.50 弧秒 = 14 μ) 缩焦 $f/8$ 到 $f/1.7$ ，图象半径 = 1221 毫米。

毫米。照相机反射镜直径约为 800 毫米。照相机视场约为 $\pm 5^\circ$ 。

校正的原理，方法和谷代 (Courtés) 的有所不同。我们保留了在中间象前放一个校正器，因为它对象散和横向色差给与独立控制，不会严重地影响孔径象差。这导致特别好的解答模型。另一方法，把校正器可看作固定的，意味着中间象是校正过的，当用 R.C 焦点而不用缩焦器时，校正器可在望远镜内保持位置，而缩焦器 (包括一个场透镜

和照相机) 用照片盒代替。在另一方面，中间象校正器可以看作缩焦器的一部分，在这种情况下中间象的校正是不重要的。在 R.C 焦点摄影时，缩焦器可以去掉，另一个校正器 (正常对大型望远镜用较小的视场) 校正器引进。

把一个具有图 23 基本几何学的反射镜型的缩焦器配到 3.5 米望远镜的装置中去的可能结构布置，在普朗克研究所的研究中已经分析过。将在另一文章中加以讨论。我现在

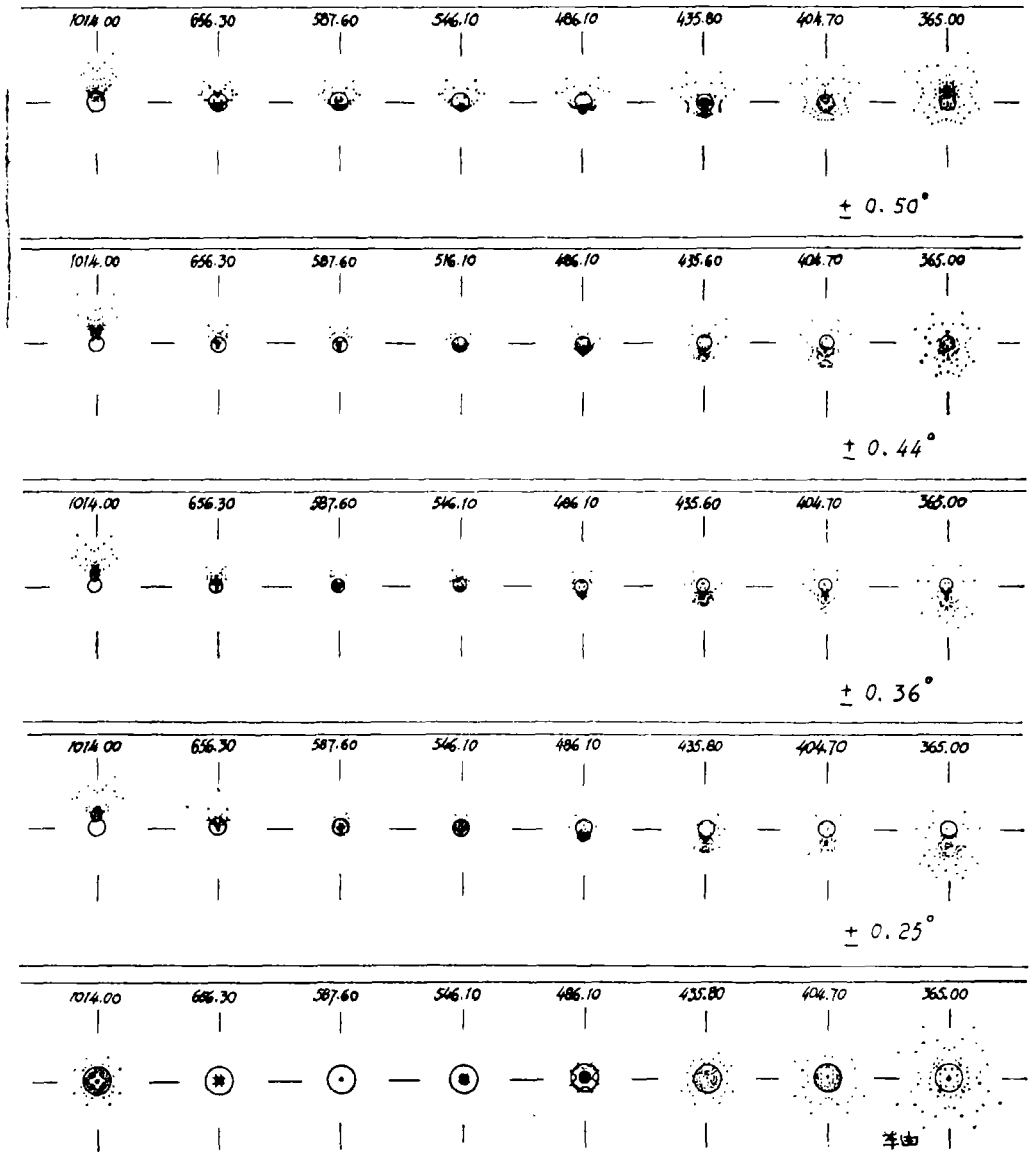


图 25 3.5 米望远镜的缩焦器。双透镜校正器 (不校正中间象), 场透镜和具有移位瞳孔的史密脱照相机。点列图 (圆 = 0.50 弧秒 = 14μ) 缩焦 $f/8$ 到 $f/1.7$, 图象半径 = 1060 毫米。

的目的是显示若干不同解答的点列图，希望能提供缩焦器反射镜解答进一步发展的基础。所有解答均用视场 $\pm 0.5^\circ$ ，点列图圆大小为0.5弧秒。

4.3.1 场镜和简单史密脱照相机

不校正的中间象具有象散约2.6弧秒。照相机的未校正高斯误差和场镜造成的光瞳象差给出的性能与主焦校正器无法比拟。一个

有用的参数是相对于史密脱板的瞳孔位置。横向色差量计合几个弧秒。但可以通过放松象散使其稍稍减轻。图24显示看来是可以提供合理折中的一种解答的点列图。

4.3.2 双透镜校正器，场透镜和简单史密脱照相机

这种情况下校正器是为普朗克研究所的2.2米望远镜设计的2透镜校正器(见§2.1)，

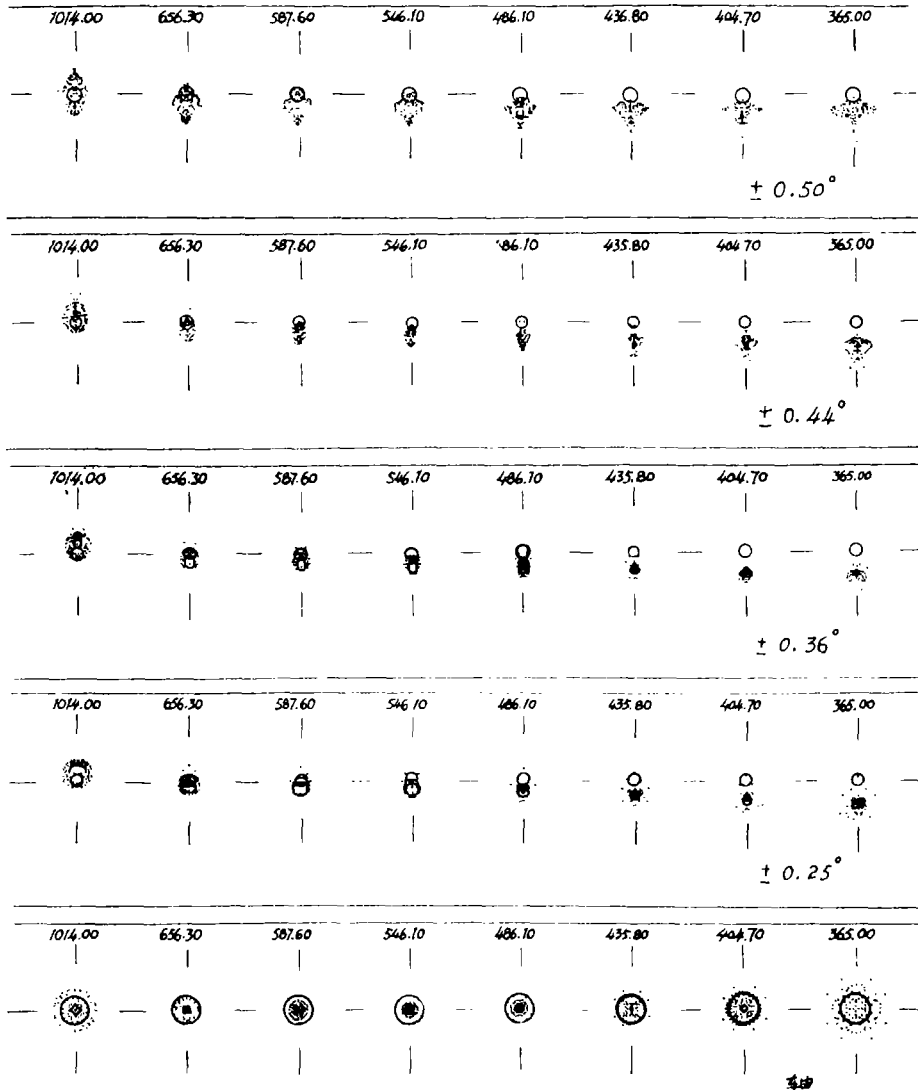


图26 3.5米望远镜的缩焦器。双透镜校正器（不校正中间象），场透镜和鲍沃斯马克苏托夫(Bouwers-Maksutov)照相机。点列图。(圆 = 0.50弧秒 = 14 μ)。缩焦f/8到f/1.7。图象半径 = 1066毫米

但其它型的校正器同样可用。这里重要之点是在最优化中透镜允许改变。用了这些参数加上一个可变瞳孔位置导致与图 24 相比较大为改进的解答 (图25)。象散和横向色差与史密脱照相机的高斯误差和大部由简单场透镜造成的色差比较起来基本上是可以忽略的。

4.3.3 鲍沃斯—马克苏托夫 (Bouwers-Maksutov) 照相机

这种照相机包括一个马克苏托夫 (Mak-

sutov) 型弯月形加一个板, 以便校正带球差。存在着一个校正器, 但这情况下它是不变的, 即中间象是被校正的。图26显示了这样一个系统的点列图。如果把校正透镜改为自由的, 必然可以进一步改进。

4.3.4 霍金斯—林富特 (Hawkins-Linfoot) 照相机

这种照相机作了很大的改进, 在瞳孔处加一块弱无焦双透镜来校正同心弯月形的色差。这元件还包括非球面来校正带象差。图

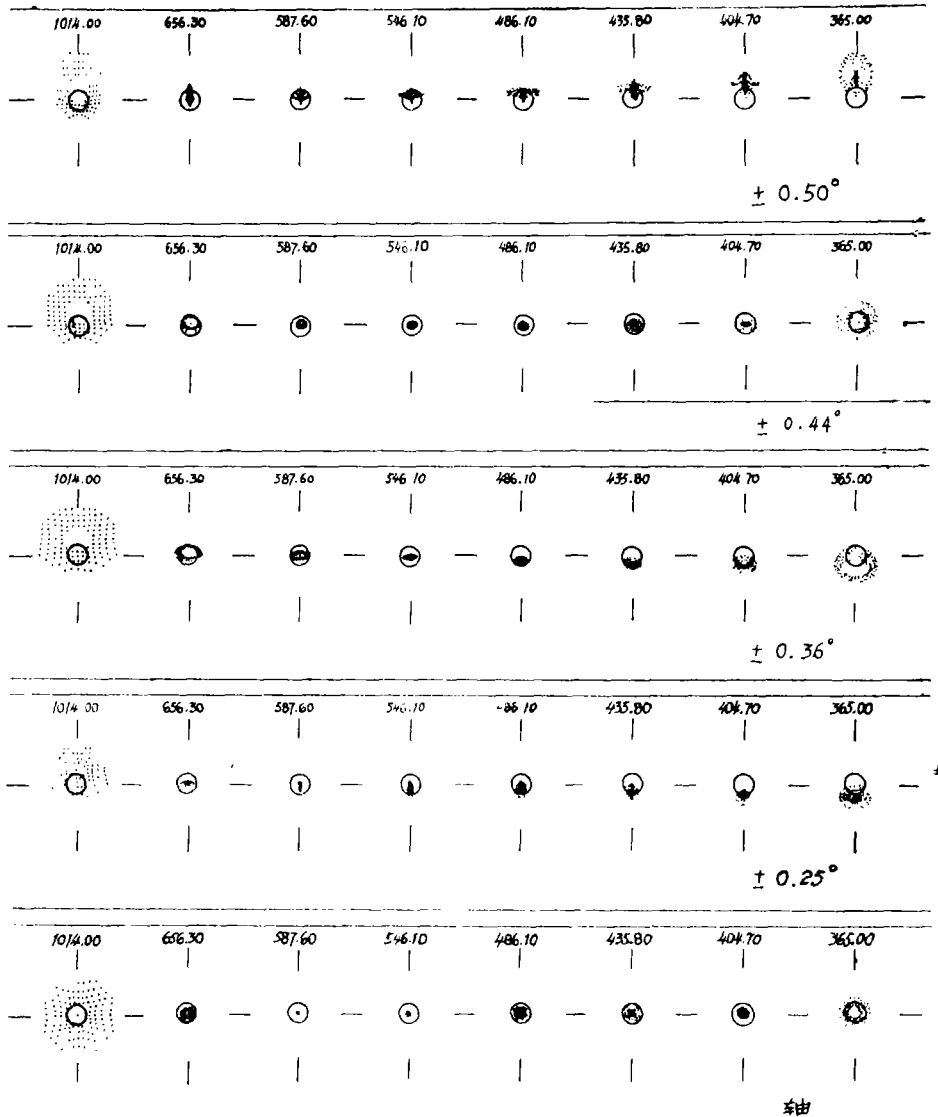


图27 3.5米望远镜的缩焦器。双透镜校正器 (校正中间象), 场透镜和霍金斯—林富特 (Hawkins-Linfoot) 照相机。点列图。(圆 = 0.50 弧秒 = 14 μ)。缩焦 f/8 到 f/1.7。图象半径 = 1031 毫米。

27显示这样一个系统,与一个“固定”的校正器结合的点列图。单色性能是很好的,但是从双透镜的不同玻璃的小色散差引起的二级光谱在边缘视场点列图的曲率线中,在对波长1014nm的高斯误差和二级光谱的附加作用中可见到是很显著的。这些效应不能通过改变校正透镜来消除,但在别方面特别是横向色差方面的改进是可能的。如图28点列图所示。

4.3.5 贝克-2弯月形一板型照相机
这种系统在瞳孔每边有一个弯月形,包

括为校正带象差的非球面板。所有三元件可用石英制成,可校正色差,没有二次光谱。图29显示这样一个系统的点列图。这里校正透镜是可变参数。因为这种系统对光瞳象差更敏感,场透镜分裂成两。在图29中轴上点的圆圈没有画出,因为它比绘场大得多。甚至在波长365nm的轴上点的点列图,对极端点也只有8 μ 即约外直径0.3弧秒。横向色差的二次光谱来自中间象前面的两玻璃校正器。

4.3.6 贝克(BaKer)照相机和 § 4.3.5 一样,

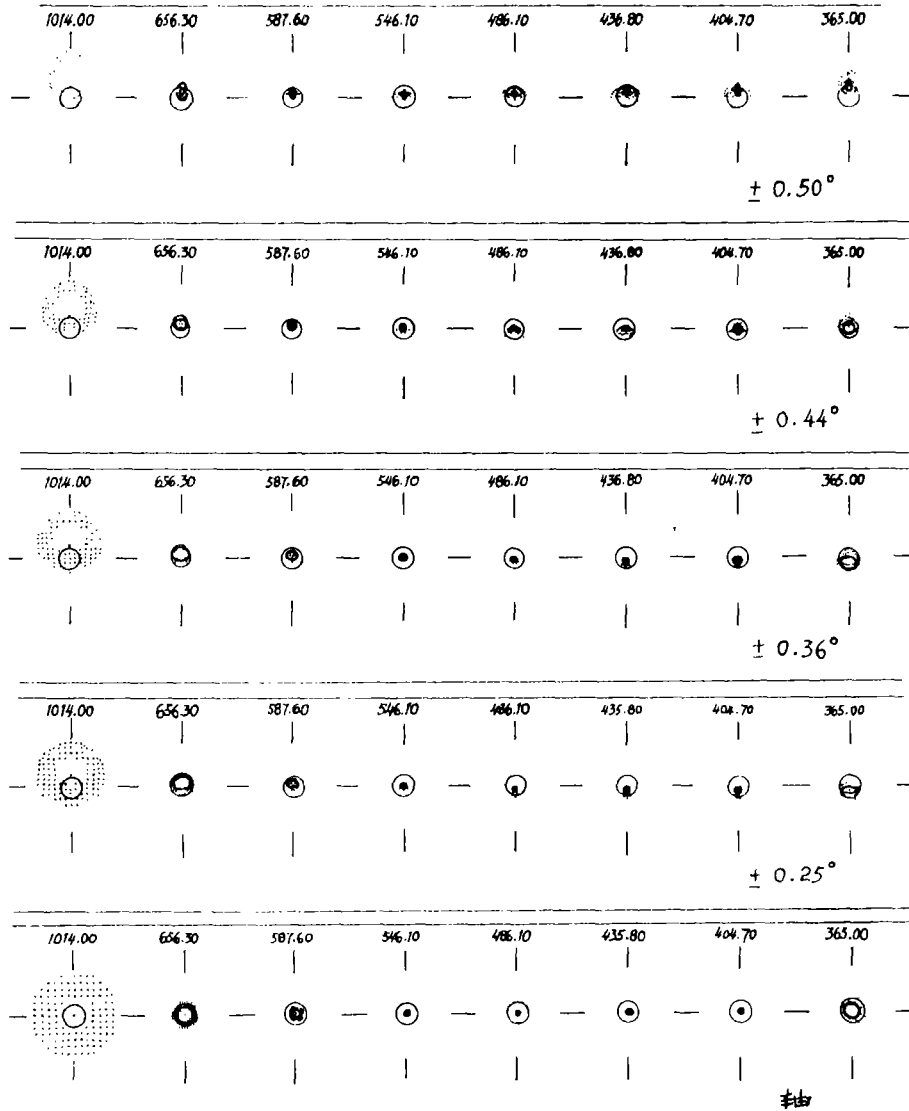


图28 3.5米望远镜的缩焦器。双透镜校正器(不校正中间象),场透镜和霍金斯-林福特(HawKins-Linfoot)照相机。点列图。(圆=0.50弧秒=14 μ)。缩焦f/8到f/1.7。图象半径=964毫米。

但用一个场反射镜代替二个场透镜。

一个场反射镜带来进一步的改进，因为它完全无色差和改进的球差（图30）。最大的轴上点点列图对1014nm又是约0.3弧秒。对这种波长，视场外圈的点列图有些超过0.5弧秒，但用较有利的聚焦可以缩小。带横向色差和二次光谱完全来自校正器。

这系统的建立主要为了估计场反射镜的校正优点。它的实现将给出很紧凑的解答，但存在严重的遮拦问题。场反射镜具有关于照相机的珀兹伐（Petzval）和是相加性的缺

点，因场透镜是相减性的，因此对所有上述用场透镜的解答最后象半径约1050毫米，而用场反射镜约530毫米。

4.4 结论

上面的例子说明用某些任意选择的几何学，引入较多元件可带来质量的改进，再搞些可变因数是可行的：例如，在中间象前面加一个贾斯各聂（Gascoigne）型板而不用二透镜校正器。可以理解，和图25所示相仿的校正器可以采用，它是含有二块校正板，一个场透镜和一个球面反射镜的缩焦器。偏离

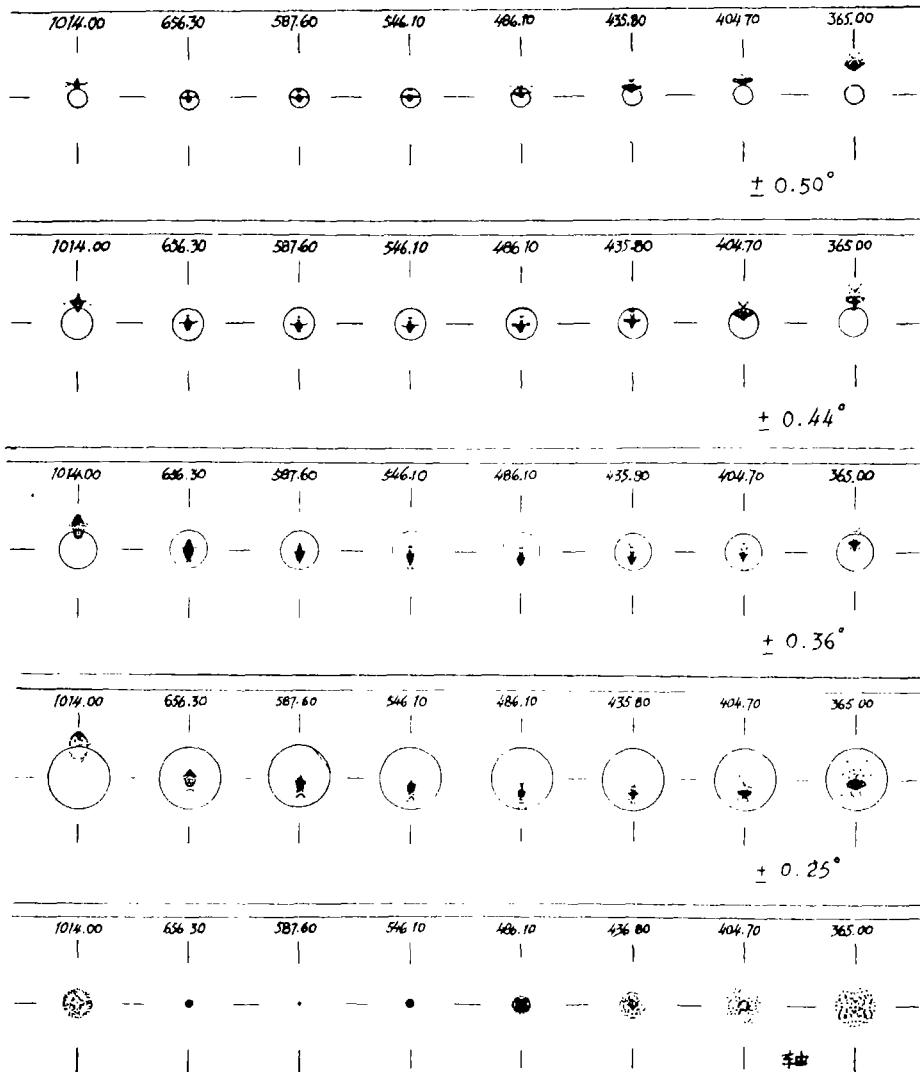


图29 3.5米望远镜的缩焦器。双透镜校正器（不校正中间象），2场镜和具有2个弯月片和1平板的贝克（BaKer）型照相机。点列图。（圆 = 0.50弧秒 = 14 μ ）。缩焦f/8到f/1.7。图象半径 = 1052毫米（轴向点列图的绘场 = 10 μ ）。

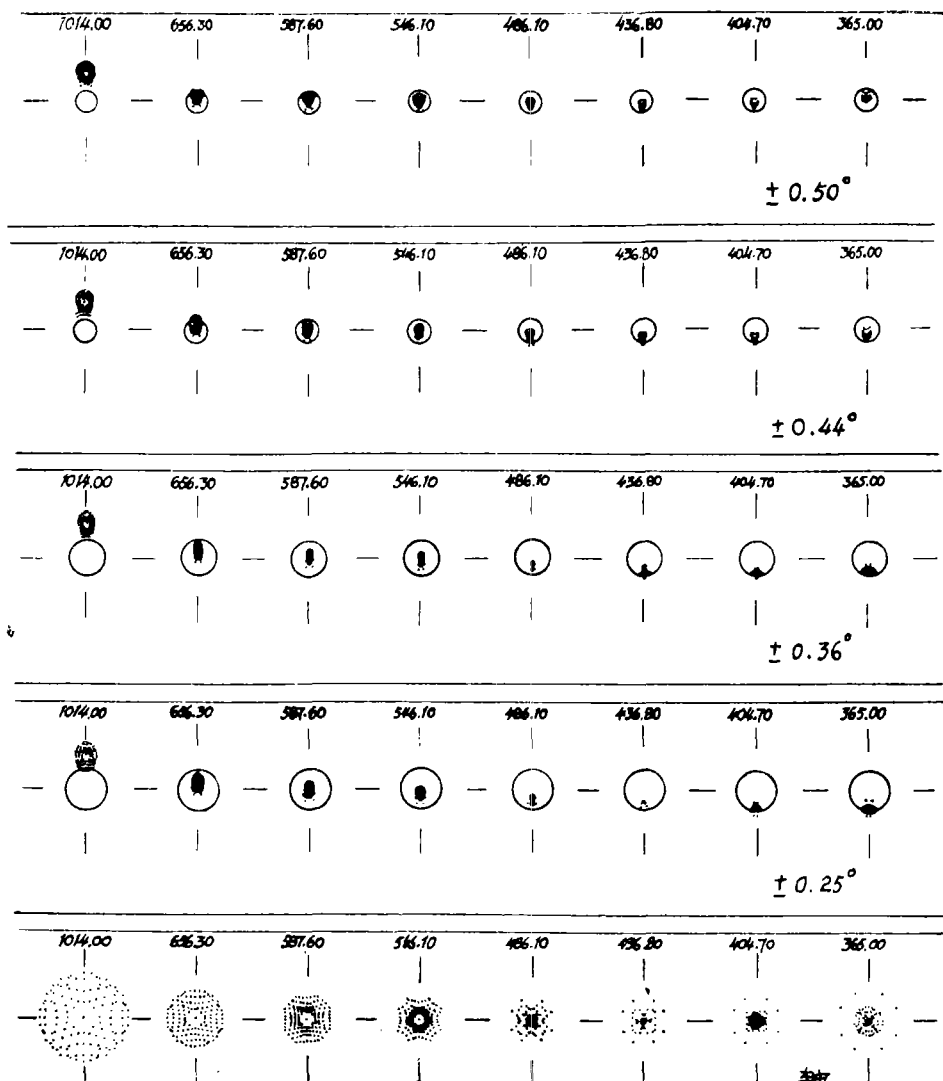


图30 3.5米望远镜的缩焦器。双透镜校正器(不校正中间象),场反射镜和具有2个弯月形和1平板贝克(BaKer)型照相机。点列图(圆 = 0.50弧秒 = 14 μ), 缩焦f/8到f/1.7°图象半径 = 528毫米,轴向点列图的绘场 = 12 μ 。

了球面的反射镜亦可能带来优点;巴纳(Bahner)提到在苏联用这种解答的有意义工作。最后史密脱的或弯月形—卡赛格林解答可以提供沿着使条件d)得到满足的方向引出光线的有意义的可能性。

实践中缩焦器的现实性依赖于天文学家准备接受的元件的数目,我非常欢迎有关这点的讨论。从抗反射镀膜的可能性观点看,广泛的顾虑是否有根据?艾尔泽塞尔(Elsässer)教授最近对我说,和光谱仪一样,缩焦器也应作为次焦的附属设备。这看来是一个最恰当的比较,对缩焦器的合理元件个数有较好的透澈的看法。没有人会期望光谱仪没有光学

元件而进行工作。一个低f数的典型卡赛格林(Cassegrain)光谱仪可以包括一个场透镜,两个自准反射镜,一个照相反射镜,两个校正器元件。但它所接收的象是一个宽度可忽略,长度可能是40毫米的窄缝,从这个观点看,给出优异象的缩焦器(可与主焦校正器相比或较优,并具有较高的孔径比),具有例如五个校正元件,一个场透镜,一个反射镜,并不算特别复杂,只要记着所传递的象儿乎有半米直径的话。

本文为R.N.Wilson(Carl Zeiss,oberKochen)在ESO/CERN1971年三月1—5日日内瓦召开的“大型望远镜设计会”上的报告。

(吴学茵、陈翔宇译、匡裕光校)