

第二十八章 Color 透镜

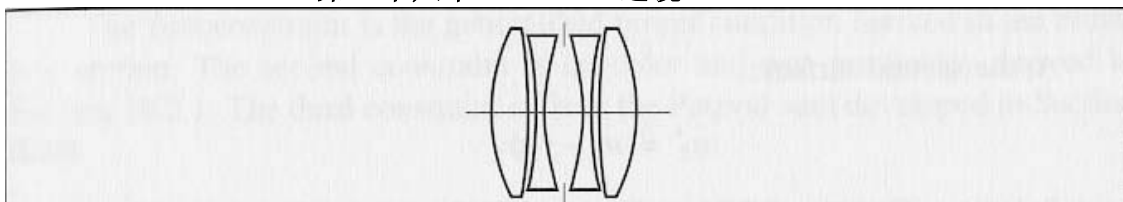


图 28.1 Celor 透镜

28.1 说明

在第二十五章，我们讨论了一种被称为“消色差潜望镜”或者“对称式 FrenchLandscape”的透镜设计。在这一章里我们将讨论另外一种对称式透镜---Celor 透镜。如图 28.1 所示。它是分离式对称结构，透镜的空气间隔为设计提供了一个新的自由度。

由于有了空气间隔，则透镜的色彩校正应能更好。同样采用该方法可以减小 Petzval 值。按照常规，这种透镜的设计总是从一个后半部分开始，后半部分共有五个自由度：两个透射的焦距，两个透镜的曲率以及一个空气间隔。这些常用来确定系统的焦距，色差的校正，减小 Prtzval 值，控制球差和象散。当两部分合而为一时，由于对称原因，则透镜慧差、场曲和轴外色差也能得到减少。

28.2 推广趋势

在讨论这个设计之前，我们先看看透镜后半部分的不同表述。

在 4.6.2 节我们得出两个透镜组成的系统（见图 28.2）可以表示为：

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - t\Phi_1\Phi_2 \quad (28.1)$$

但是，我们需要更具体的表达式。我们可以从第一个曲面开始。

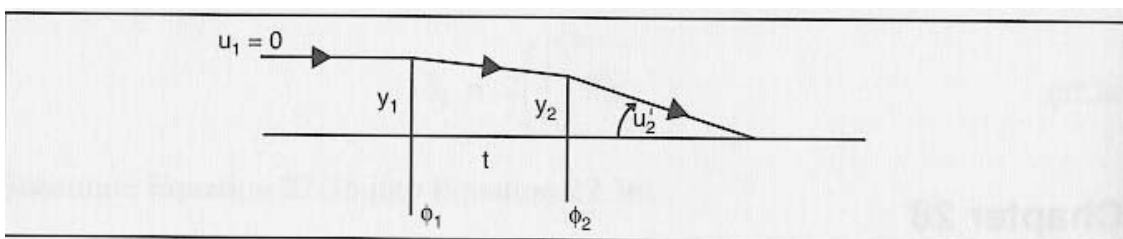


Fig. 28.2 Two element system.

$$u_1' = -y_1\Phi_1 = u_2 \quad (28.2)$$

到第二面：

$$u_2' = u_2 - y_2\Phi_2 \quad (28.3)$$

将式 (28.2) 代入式 (28.2)：

$$u_2' = -y_1\Phi_1 - y_2\Phi_2 \quad (28.4)$$

又

$$u_2' = \frac{-y_1}{\text{EFL}} = -y_1\phi \quad (28.5)$$

将式 (28.5) 带入式 (28.4), 得:

$$-y_1\phi = -y_1\phi_1 - y_2\phi_2$$

或

$$\phi = \left(\frac{1}{y_1}\right)[y_1\phi_1 + y_2\phi_2] \quad (28.6)$$

所以:

$$\phi = \left(\frac{1}{y_1}\right)\sum_i y_i\phi_i \quad (28.7)$$

2.8.3 Celor 透镜的约束:

在进行透镜设计时的约束条件如下:

$$\left. \begin{array}{l} 1. \quad \phi = \left(\frac{1}{y_a}\right)(y_a\phi_a + y_b\phi_b) \\ 2. \quad \frac{y_a^2}{v_a}\phi_a + \frac{y_b^2}{v_b}\phi_b = 0 \\ 3. \quad \frac{\phi_a}{n_a} + \frac{\phi_b}{n_b} = \phi_P \end{array} \right\} \quad (28.8)$$

第一个约束我们刚刚推导的;

第二个约束在 19.2.1 节从色差方面推导而得到的;

第三个约束在 14.4 节 Petzval 值所要求的。

28.4 推导 Celor 公式

我们现在从三个约束条件起限制作用的方程式开始

第一个约束方程, 我们有:

$$y_b = \frac{(\phi - \phi_a)y_a}{\phi_b} \quad (28.9)$$

将之代入第二个约束方程方程中:

$$\frac{y_a^2}{v_a} \phi_a + \frac{\phi_b}{v_b} \left[\frac{(\phi - \phi_a) y_a}{\phi_b} \right]^2 = 0 \quad (28.10)$$

$$\frac{y_a^2}{v_a} \phi_a + \left[\frac{(\phi - \phi_a)^2 y_a^2}{v_b \phi_b} \right] = 0$$

$$\frac{y_a^2}{v_a} \phi_a + \left(\frac{y_a^2}{v_b \phi_b} \right) (\phi^2 - 2\phi\phi_a + \phi_a^2) = 0$$

$$\frac{y_a^2}{v_b \phi_b} \phi_a^2 + \left(\frac{y_a^2}{v_a} - \frac{2y_a^2 \phi}{v_b \phi_b} \right) \phi_a + \frac{y_a^2 \phi^2}{v_b \phi_b} = 0$$

两边同乘 ϕ_b ，得：

$$\frac{y_a^2}{v_b} \phi_a^2 + \left(\frac{y_a^2 \phi_b}{v_a} - \frac{2y_a^2 \phi}{v_b} \right) \phi_a + \frac{y_a^2 \phi^2}{v_b} = 0$$

两边同除 y_a^2 ，得

$$\frac{1}{v_b} \phi_a^2 + \left(\frac{\phi_b}{v_a} - \frac{2\phi}{v_b} \right) \phi_a + \frac{\phi^2}{v_b} = 0 \quad (28.11)$$

从第三个约束方程，知：

$$\phi_b = \left(\phi_P - \frac{\phi_a}{n_a} \right) n_b \quad (28.12)$$

将式 (28.12) 代入到式 (28.11) 中，得：

$$\frac{1}{v_b} \phi_a^2 + \left[\frac{\left(\phi_P - \frac{\phi_a}{n_a} \right) n_b}{v_a} - \frac{2\phi}{v_b} \right] \phi_a + \frac{\phi^2}{v_b} = 0$$

$$\frac{1}{v_b} \phi_a^2 + \frac{\phi_P n_b}{v_a} \phi_a - \frac{n_b}{n_a v_a} \phi_a^2 - \frac{2\phi}{v_b} \phi_a + \frac{\phi^2}{v_b} = 0$$

$$\left(\frac{1}{v_b} - \frac{n_b}{n_a v_a} \right) \phi_a^2 + \left(\frac{\phi_P n_b}{v_a} - \frac{2\phi}{v_b} \right) \phi_a + \frac{\phi^2}{v_b} = 0$$

将上式乘以 $v_a v_b$

$$\left(v_a - \frac{n_b v_b}{n_a} \right) \phi_a^2 + (\phi_P n_b v_b - 2\phi v_a) \phi_a + v_a \phi^2 = 0 \quad (28.13)$$

这就是 coler 透镜的方程式。

28.5 Coler 半边透镜的研究:

这个二元方程常用来计算 ϕ_a

$$\phi_a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (28.14)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} a &= v_a - \frac{n_b}{n_a} v_b \\ b &= \phi_P n_b v_b - 2\phi v_a \\ c &= v_a \phi^2 \end{aligned} \right\} \quad (28.15)$$

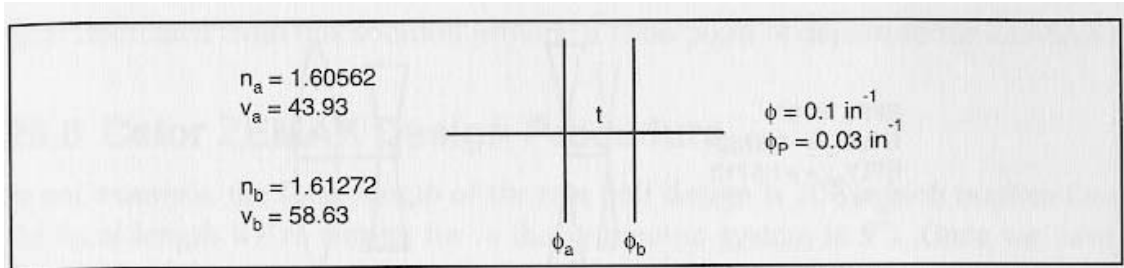


Fig. 28.3 Celor paraxial thin lens rear half.

这样有两种求 ϕ_a 的方法。精选否定的解决办法，将之代入到约束方程 3 即可解得 ϕ_b 值，然后，运用式 (28.1) 去求两个透镜的间隔部分。

让我们来举个例子，如式 (28.3) 所示（薄透镜的一半部分）

将值查表代入可以求出系统的曲率和 Petzval 值。

由方程式 (28.15)

$$a = \left[43.93 - \left(\frac{1.61272}{1.60562} \right) (58.63) \right] = -14.96$$

$$b = 1.61272(58.63)(0.03) - 2(43.93)(0.1) = -5.95$$

$$c = 43.93(0.01)^2 = 0.4393$$

将这些参数代入式 (28.14) 得 $\phi_{a+} = -0.4614$ and $\phi_{a-} = 0.0636$ 。从挑出否定因素 ϕ_{a+} ，将这些参数带入到第三个约束条件得 $\phi_{b+} = 0.5118$ ，运用这些参数我们就能解决分离的每部分了。

$$t = \frac{\phi_{a+} + \phi_{b+} - \phi}{\phi_{a+}\phi_{b+}}$$

$$t = \frac{-0.4614 + 0.5118 - 0.1}{(-0.4614)(0.5118)}$$

$$t = 0.21''$$

在 ZEMAX 中，从第一个面开始，先假设负透镜的凹面和正透镜的凸面半径相等。从式 (4.22) 或在 ZEMAX 将参数变成 “variable” 就能把半径计算出来。

如果我们观察式 (28.15) 的 b，因为可以知道 $\phi_P n_b v_b$ 总是比 $2\phi v_a$ 差了很多，

因为我们通常想希望 Petzval 总和少一点。所以没有理由解释不能让 Φ_P 从零开始。应用这些例子：

$$\phi_{a+} = -0.6336 (f_{a+} = -1.5783); \phi_{b+} = 0.6364 (f_{b+} = 1.5713); t = 0.241'$$

这个半径可以从这些方法提供的有效值算出来

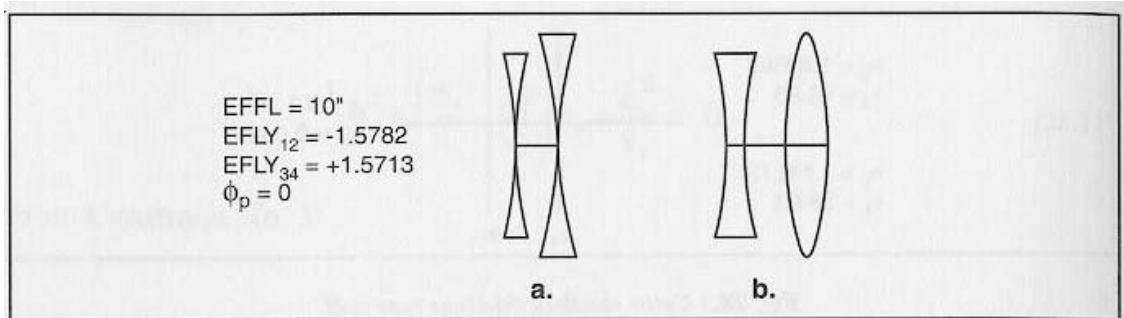


Fig. 28.4 Celor lens rear half: (a) thin lenses; (b) thick lenses.

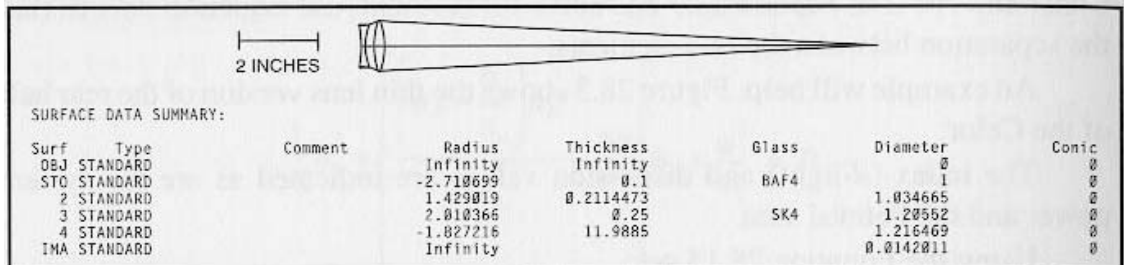


Fig. 28.5 Layout of CELO1o2a.

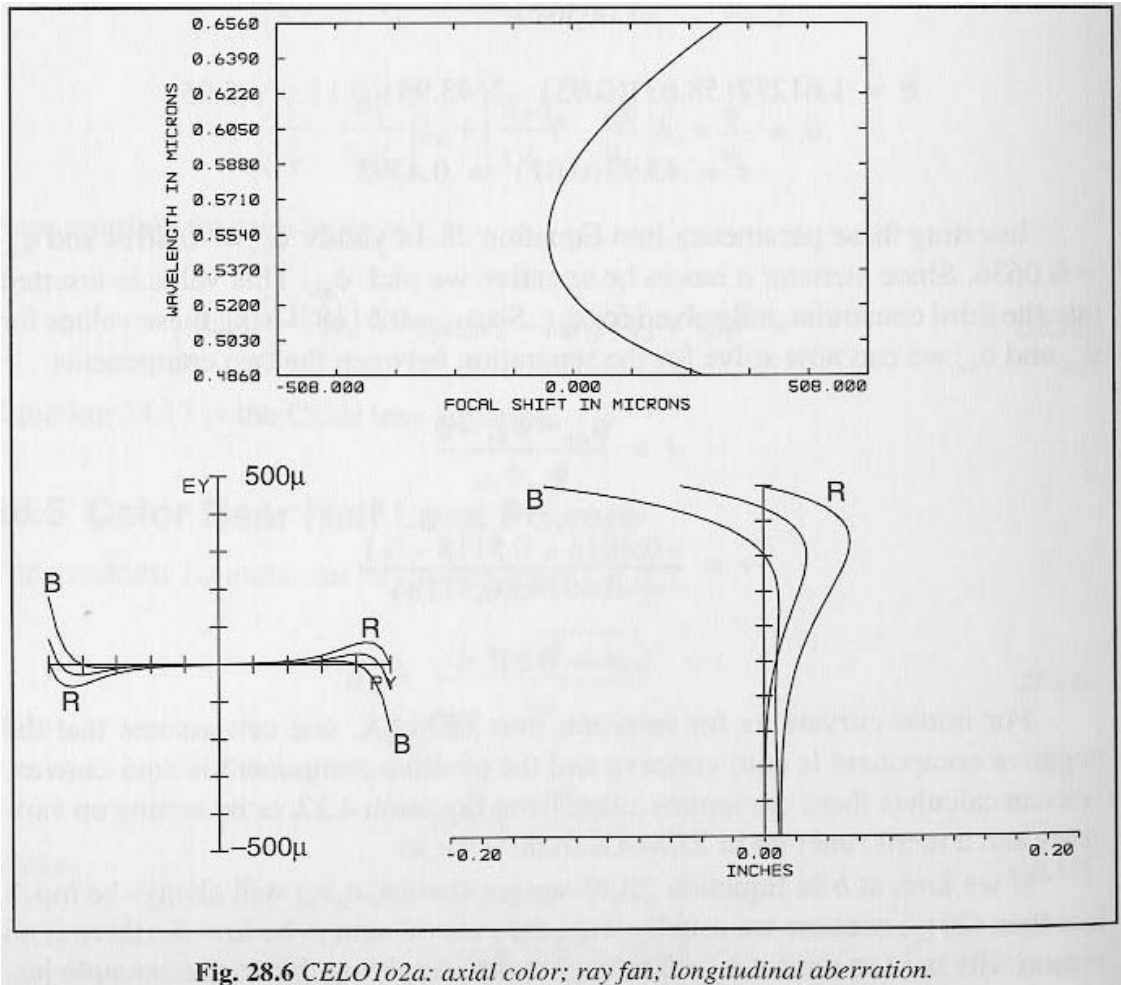


Fig. 28.6 CELO1o2a: axial color; ray fan; longitudinal aberration.

28.6. celor ZEMAX 设计程序

在我们的举例中，半边透镜部分的焦距设计为 10，这也就暗示着我们在对称的系统中朝着焦距为 5 的目标努力。我们把先前的设计薄的透镜运用到 celor 上，我们可以在 ZEMAX 里计算出半径和厚度。我们能得出 EPD=1 的结论，这种薄透镜的设计举例见图 28.4a，你也可以运用 EFL 和 EFLY 在 MFE 里查出系统和单独透镜的焦距。这种布置将玻璃厚度合理的设计为 0.1 和 0.25 见图 28.4。

当被要求增加厚度我们就必须返回到 EFL 和色彩修复的目标上来，这样在 MFE 里设置 EFL=10, AXCL=0。变化的量被设置在第一个和第三个表面的半径上，半径从第一个和第三个表面上分别的提取到第二个和第四个表面上来。这样就能产生凹凸的积极和消极因素。经过最佳化的设置，新的参数设置为:EFLY12=-1.53; EFLY34=1.6032.

CELO1o1b → Optimize → CELO1o1a

我们必须让透镜成像弯曲让球面像差达到 107,所有表面半径都是被允许变化的.但是个别的透镜将被联系在他们当前的 EFLY 参数上,这个空气间隔也是被允许变化的.因此 EFLY 的宽度也会被变化,就如 SPHA 被归为零.

CELO1o2b → Optimize → CELO1o2a

在经过最佳化的设计后,见图 28.5 的描述,中心轴的色彩,光线的追随曲线,垂轴像差见图 28.6

在此之前我们没有垂轴像差情节,这个在轴上,提供了另外一种方法来观察球面像差.再回到图 7.6 的上半部分,0.33 的光线比 0.66 光线能不同部分的穿过光轴位置.

我们现在增加一些领域,我们放置一个小孔在双透镜前面,增加 COMA 和 ASTI 到 MFE 即 7.6λ 的 COMA 和 6.7λ 的散光。我们在轴的停止位置有强烈的冲击,但对我们帮助不大,事实上,我们拥有很大的自由度在透镜上冲抵散光。这便有两种方法可以实施。所有需求的变量在半径和透镜的空气间隔上。我们将 EFLYS 调节到零在 MFE 里。第一种方法:将 ASTI=0, 确保 COMA 下降。第二钟方法, ASTI 随着 COMA 的下降而下降,但是 FCGT 将有所上升。

CELO1o3b → Optimize → CELO1o3a

即使最佳化设置之后, AXCL,SPHA,和 ASTI 都急剧的下降。但是 COMA 却增加了 -33λ , 系统地对称最终也弥补这些,这两种法见图 28.7

下面到了将系统对称的组合起来了, CELO1O4b 见图 28.8。系统的 EFL 将达到 $6.8''$,即使在 5 度的视场角,由于系统地对称,coma 也将下降到规定的大小程度.然而散光也微弱的增加到 34λ .

我们将系统第一次最佳化设置使只能达到 EFL 为 $5''$ 的目标并且恢复色彩校正. 可变的因素也将出现在半边透镜的半径和空气间隔里.

CELO1o4b → Optimize → CELO1o4a

接下来在 MFE 里影响 TRAC,这些可变化量在消极的因素前被去除,留下了可用的半径和空气间隔,(如果不消除消极的半径,TRAC 由于消极与积极因素而变化见图 28.9a,如果我们让空气间隔消失所能引起的所有半边透镜半径的变化,这种分离将成倍的出现在前面和后面两等份之间,并且透镜间隔不受影响见图 28.9b) 另外,我们也能调节关闭的间隔使之多样化,这样就能帮助降低暗光和散光进一步的改善视场平面.RMS 的位置大小也被改善. 做了这些,我们必须保证在最佳化调整后他们有足够的空间在被关闭的间隔里,不仅能消除变化而且能提高机制. 例如,我们能保证在两部分之间最少留有 0.4 寸.

CELO1o5b → Optimize → CELO1o5a

假定我们想要得视场为 15 度,最安全的步骤将其工作在 CELO105a 为 10 度,然后慢慢的提升到 15 度(CELO107a), 在改变视场时要及时更新 TRAC.在每一次调整后,仔细检查确保其精确性见图 28.10 所示从 CELO105a 到 CELO107a 的变化顺序,但是在 15 度会匆忙出错,图 28.11 表明了光线的切线和位置.,注意在光线左边的陡峭的变化情况,当然,这两等份紧密地向相连以至于没有空间给激励的机制.

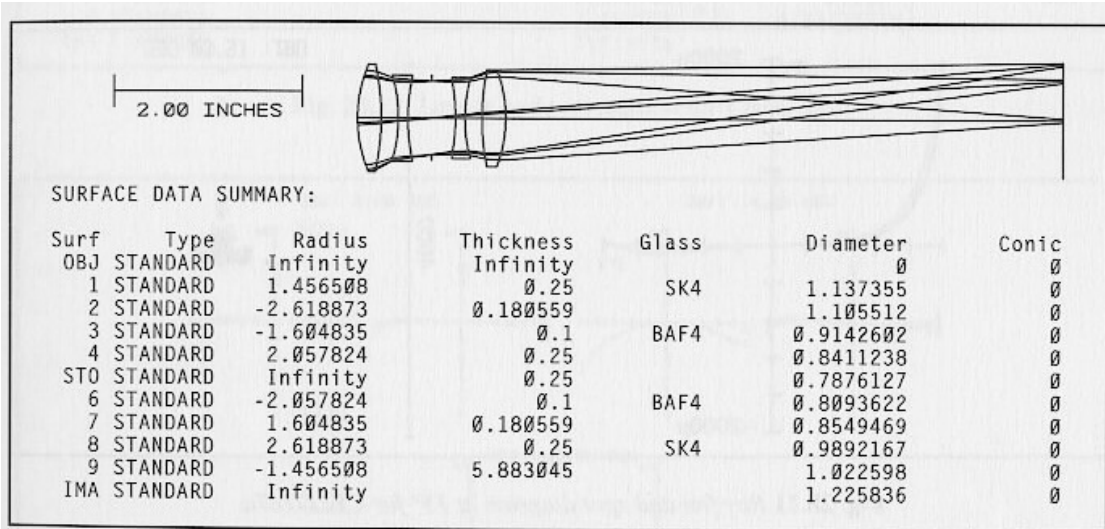


Fig. 28.8 CELO1o4b: symmetrized version of CELO1o3a.

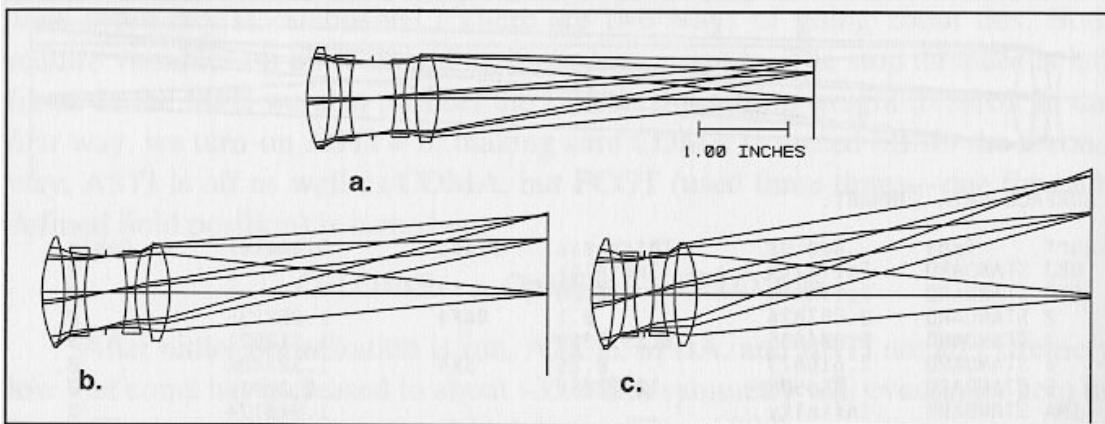


Fig. 28.10 Layouts for optimized results from CELO1o5a to CELO1o7a.

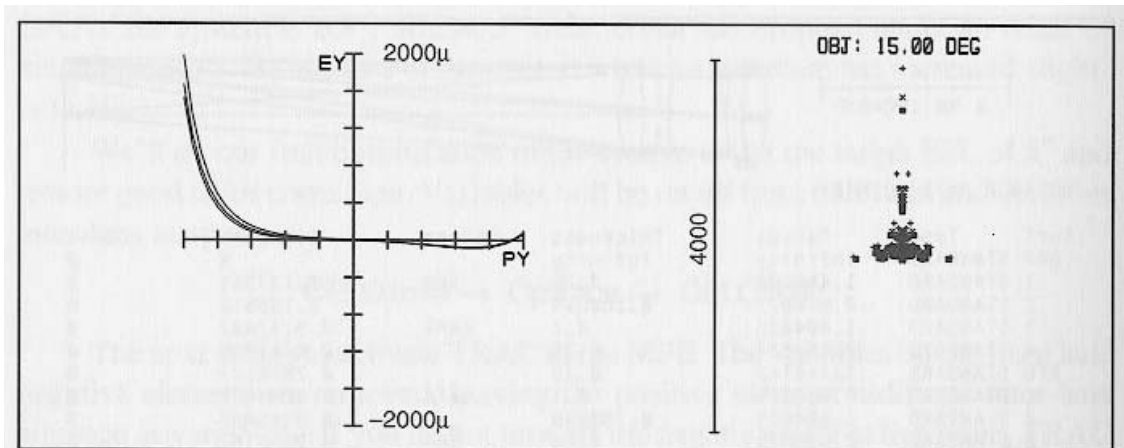


Fig. 28.11 Ray fan and spot diagram at 15° for CELO1o7a.

正是由于这一点,我们回到图 CELO107b 看看下面的变化:在半边封闭的间隔达到 0.2”并且允许所有半径和间隔能够变化,详细见图 28.12

CELO1o8b → Optimize → CELO1o8a

CELO108a 有着很好的色彩校正能力.,和非常平坦的视场,还有较低的弯曲.光线散射见图 28.13,散光不是太厉害.

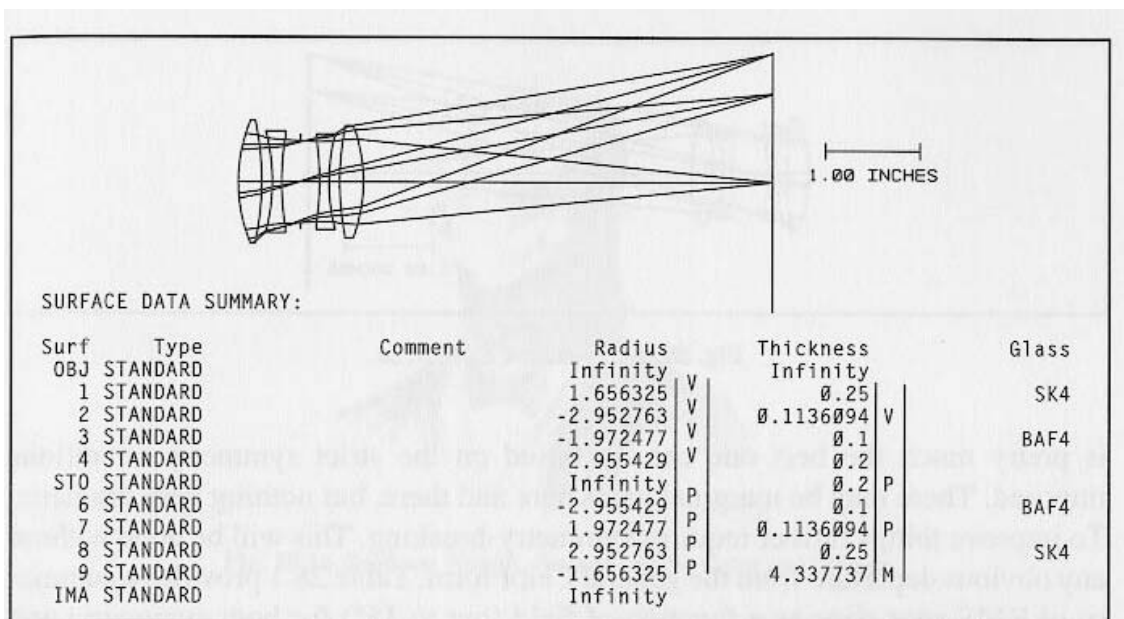


Fig. 28.12 Layout and prescription for CELO1o8a.

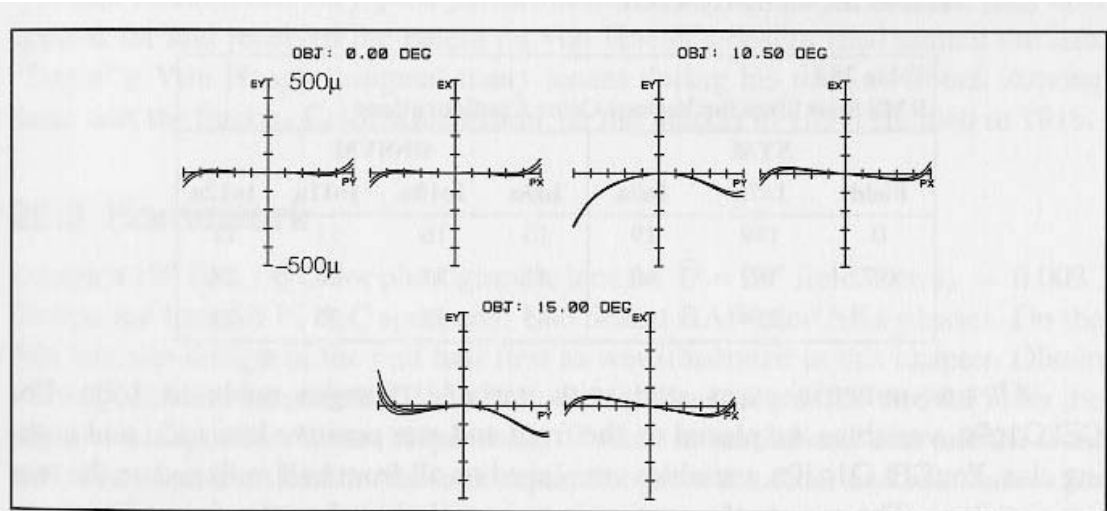


Fig. 28.13 Ray fan and spot diagram at 15° for CELO108a.

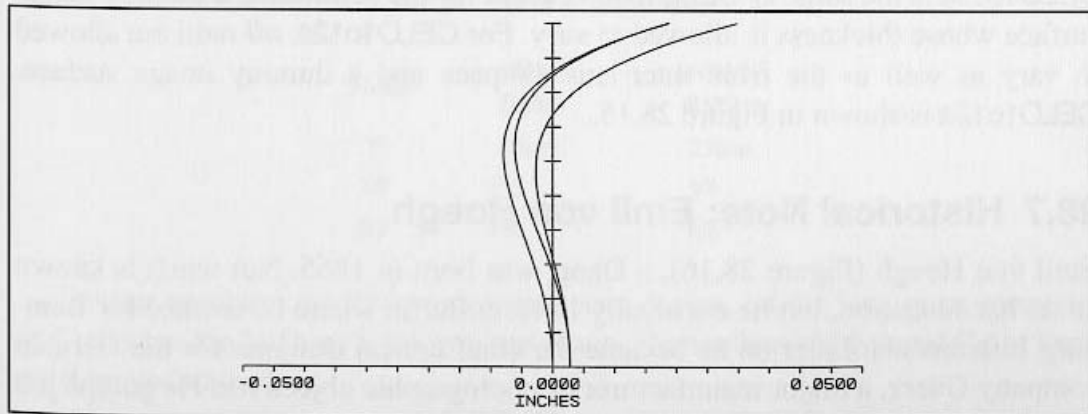


Fig. 28.14 Longitudinal aberration for CELO108a.

从图 28.14 中可以看出垂轴的球面像差很低,当 F 光和 C 光线被取代移动时注意 D 的高度在横坐标的零位置上.色彩在正确的测量中级的光谱中分离.CELO108a 依靠强加在严格的对称条件下表现得很出色.这样产生了很多的边缘效应,但不是什么戏剧性的.为了改善边缘效应需要进一步的加强对称破坏.,表格 28.1 给出了一系列在对称和非对称情况下 CELO107a 的 RMS 的范围大小对视场的功能影响.

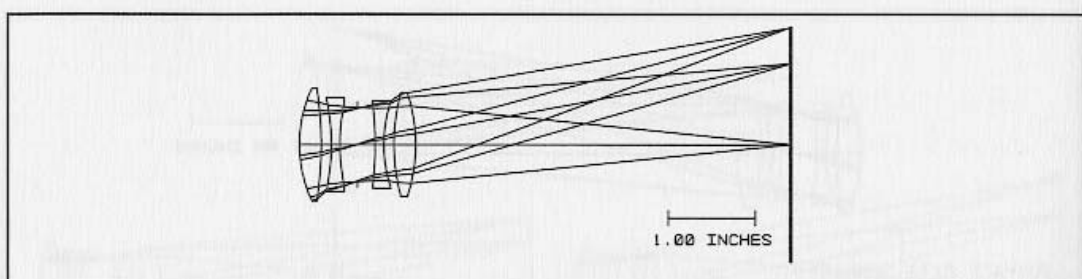
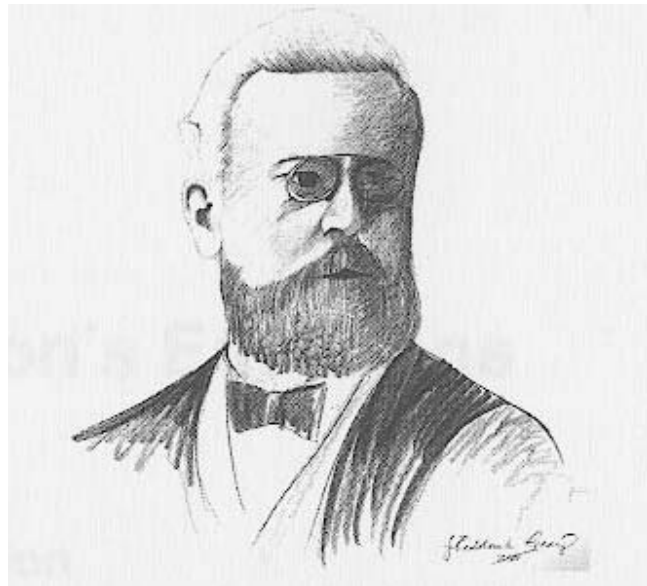


Fig. 28.15 Layout of CELO1012a.

Field	SYM		UNSYM			
	1o7a	1o8a	1o9a	1o10a	1o11a	1o12a
0	189	19	15	16	11	11
0.7	169	65	41	35	28	28
1	254	63	45	32	27	23

在 108a 中所有非对称的情况出现了很多变化,在 109a,变化出现在透镜半径的有效部分,在 CELO1010a,变化发生在所有前面半边透镜的半径上,半边透镜的消极部分继续存在.



历史记载:

Emil von Hoegh

Emil Von Hoegh 出生在 1865 年,没有人知道他的受教育程度,但他最终生活在柏林他工作的地方.后来他成为德国 GOERZ 公司的一名主要光学设计者,一名照相业的主要制造者.他的工作是用一生时间研究设计了一种六元素对称的无收差透镜.然而他的工作细节是生动的.有这样的形容:”这里有我的无收差透镜,建立一个模型,如果透镜不出色,你可以卖了透镜即使你付了租金给我.”Goerz 接受了挑战,他们建立了模型并且发现其有出色的表现,Goerz 雇佣了他,Goerz 接受了和运用了他的很多设计.Von Hoegh 在Goerz 公司设计了好多种透镜,在这里面最出名的是在 1899 年市场上出现的 celor 透镜.他于 1915 年逝世.