

## 研究

## 120 インチ 3 鏡面天体望遠鏡とその主焦点 補正レンズの光学設計

Harland W. EPPS\*・武田 光夫\*\*

\*カリフォルニア大学ロサンゼルス校天文学科 Los Angeles, California 90024, U. S. A.

\*\*電気通信大学共通講座 〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1

(1984年6月16日受理)

### Optical Designs for Three-Mirror 120-inch Telescopes and Their Prime Focus Corrector

Harland W. EPPS\* and Mitsuo TAKEDA\*\*

\*Department of Astronomy, University of California,  
Los Angeles, California 90024, U. S. A.\*\*Inter-Departmental Faculty, University of Electrocommunications,  
1-5-1, Chofugaoka, Chofu 182

Three-mirror 120-inch F/2 to F/4 “pop-through” telescopes with hyperbolic primary and 0.3-inch-thick window near focus are designed. Rays from the tertiary mirror are made to pop through the secondary and form a final focus about 6-14 inches beyond its vertex so that the rays are not blocked by observation instruments as in the classical Paul-Baker telescope with final focus between the secondary and the tertiary. Several models are optimized in the broad wavelength range 3,400-8,500 Å. One model with quasi-parallel ray bundles exiting the secondary has a conic constant  $A_2 = -1.07510$  (strongly hyperbolic) for the primary; 22% light loss (caused by vignetting at the tertiary) and a 30-arcmin field diameter. The RMS image diameter is 3 microns in the median color and 8.9 microns (0.15 arcsec) averaged over all field angles and colors. The “pop-through” distance is about 10.1 inches. Similar models optimized for larger field diameters (40 and 60 arcmin) have the same image qualities but increased light losses (26% and 34%, respectively). Other models with converging light exiting the secondary mirror are also studied which have a smaller tertiary, nearer the prime focus than in previous models. A three-element prime focus refracting corrector is designed for a strongly hyperbolic 120-inch F/2 primary mirror. The corrector has three BK 7 elements with one mild aspheric on the concave surface of the central element. This corrector is optimized over a 30-arcmin flat-field diameter at a final F-ratio of F/2.27 for the F/2 primary with  $A_2 = -1.07510$ . The wavelength range of optimization is 3,650-8,521 Å. The RMS image diameter is 2.6 microns in the median color and 8.1 microns (0.24 arcsec) overall.

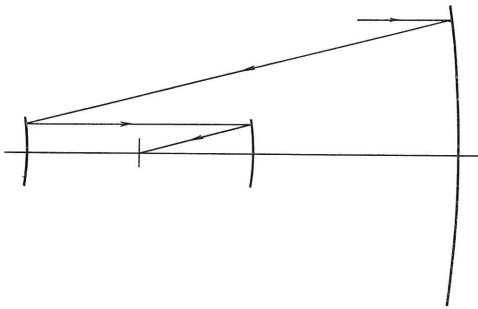
#### 1. ま え が き

天体望遠鏡の最も本質的で重要な機能は、いうまでもなく、天体からの光をできるだけ多く集めて鮮鋭な星像を得ることにある。したがって、宇宙のより彼方のより暗い天体の観測を目指してこの機能を追求すれば、それは必然的に望遠鏡の大口径化を要求する。一方、架台や望遠鏡を収容するドームを含めた建設費用は、従来技術

を踏襲した場合、口径の2.6乗に比例して文字どおり天文学的に増大するといわれ<sup>1)</sup>、望遠鏡のコンパクト化は経済的実現のための最重要条件である。

これらの互いに矛盾し合う要求を満足させるために光学設計でとりうるおそらく唯一<sup>\*1)</sup>の手段は、口径を維持した上で主鏡を F/1.5~F/2.0 とできるだけ明るくして

\*1) 本研究は狭義の光学設計の問題を論じており、開口合成や超解像などは検討の対象としていない。



**Fig. 1** Classical Paul-Baker telescope.

Despite its excellent image, this model has a problem that the focus is internal to the collimated beam between the secondary and tertiary.

鏡筒長を短縮するという縦方向の圧縮によるコンパクト化であろう。しかし、このことはたんに主鏡の製作技術のみならず、光学設計にも従来技術を超えた新たな問題を提起する。たとえば、コマ収差による星像のひろがり  $\Delta\theta$  と画角  $\theta$  との比は、主鏡の口径比を  $F$  として 3 次収差の範囲で、 $\Delta\theta/\theta=3/(16F^2)$  で与えられ<sup>2)</sup>、主鏡の明るさの 2 乗で増加する。そこで、仮に目標とする分解能を大気のゆらぎによる限界とされる  $1''$  (秒角) とすると、 $F/1.5$  の場合、とりうる画角は  $\theta=12''$  となり、主鏡のみによる星像に対しては画角はまったくなきに等しい状態となる。しかも、主鏡の有効径自体が絞りをかねるので、主鏡の非球面形状で補正するのは球面収差のみである。ところが、最近は大口径望遠鏡に対しても  $30' \sim 1^\circ$  程度の広画角が要求される。したがって、主鏡を明るくすることにより発生するこの膨大なコマ収差をはじめとする軸外収差をどのように補正するかが光学設計上の大きな問題となる。

この問題を解決した一つの設計例が **Fig. 1** の Paul-Baker 望遠鏡である<sup>3,4)</sup>。主鏡と第 2 鏡を放物面鏡とし共焦点位置に配置すると球面収差とコマ収差と非点収差のない平行光束が得られる。第 3 鏡を曲率半径が全系のベッツヴァール和をゼロにするような球面鏡とし、その曲率中心が第 2 鏡の面頂点に一致するような位置に置き、第 3 鏡で発生する球面収差を補正するための非球面項を第 2 鏡の放物面に付加する。したがって、全系は共焦点放物鏡からなる前段と、球面鏡の曲率中心のある第 2 鏡面上に位相補正板に相当する非球面項を乗せた後段のシュミット・カメラを連結したものととして解釈することができる。この光学系は 3 次収差の領域で、球面収差、コマ収差、非点収差、ベッツヴァール和のすべてを

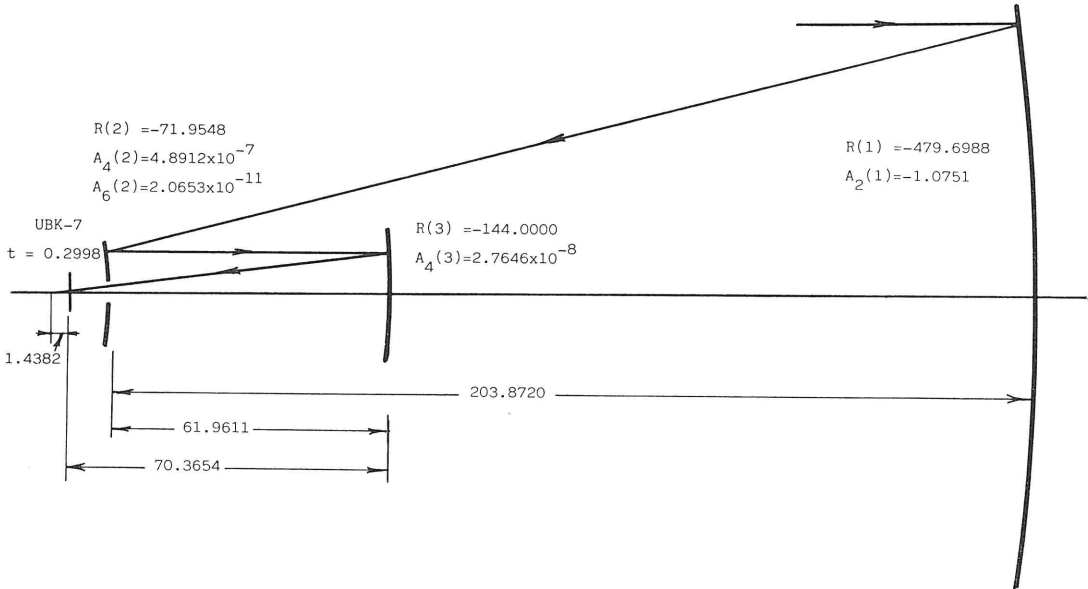
ゼロにするというすぐれた性質をもち、この原理にもとづく望遠鏡の製作が現在アリゾナ大学で進められている<sup>5,6)</sup>。しかし、Paul-Baker 望遠鏡は **Fig. 1** に示すように最終像面を第 2 鏡と第 3 鏡の中央に結ぶのでそこに置く観測機器により有効光束が大きく遮ぎられるという実用上の大きな問題を残している。

このような背景のもとに、今回われわれは Paul-Baker 望遠鏡のもつ上記問題点を解決した 120 インチ 3 鏡面天体望遠鏡を設計し、直径  $30'$  の広画角に対し平均スポット径が  $0.15''$  と回折限界に近い性能を得た。また、主鏡の主焦点を利用するための補正レンズを設計し、同じ画角に対し平均スポット径  $0.24''$  の性能を得た。

## 2. F/2 to F/4 pop-through telescopes

前述の Paul-Baker 望遠鏡の問題点を解決するために、本設計では最終像面が第 2 鏡の前方向約 10 インチの位置になるようにした。この場合、第 3 鏡から最終像面へ向かう光束が第 2 鏡の中心部にあけた丸穴をひよいとすりぬける (pop through) ことから標記の名称を与えた。このような pop-through 型式は、Meinel<sup>7)</sup> らがわれわれと独立に提案しており、また Yamashita ら<sup>8)</sup> が類似の型式について 3 次収差論に基づく有用な検討を行っているが、いずれも構想設計の段階にとどまっておらず、具体的な設計値と光線追跡に基づく性能評価は行なわれておらず、この形式によって終局的にどの程度の性能が達成しうるかは未検討の課題である。

主鏡の有効径は 120 インチであるので前述のコンパクト化のために主鏡の口径比を  $F/2.0$  とし、最終像面における口径比は後述のイメージセンサの分解能を考慮して  $F/4.0$  とした。したがって、第 2 鏡と第 3 鏡は収差補正とフォーカルエクスペンダーの両方を兼ねている。最終像を  $F/4.0$  としたのは、全系の焦点距離を 480 インチとすれば大気ゆらぎによる分解能の限界の目安と考えられる  $1''$  の画角<sup>1,2)</sup> が像面上の  $59\mu\text{m}$  に相当するので、素子間隔が  $15 \sim 30\mu\text{m}$  程度のイメージセンサーで標本化定理を満たした検出が可能となるからである。鏡面系のみからなる望遠鏡自体の色収差はもちろん皆無であるが、実際の使用状態に近い条件で設計し、性能評価するために像面の近傍に検出器窓を想定した  $0.3$  インチ厚の UBK 7 の平面ガラス板を入れ、それによる色収差を考慮し、 $\lambda=0.34 \sim 0.85\mu\text{m}$  の広波長域で最適化した。設計にあたり半径 100 インチ程度の非常に弱い像面湾曲は許す方針をとった。これは、この程度の像面湾曲はイメージセンサー面を微小湾曲させることにより対応しう



**Fig. 2** Three-mirror 120-inch F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope with hyperbolic primary, curved field, flat 0.3-inch-thick window near focus, and collimated beam exiting the secondary mirror. Field angle diameter is 30 arcmin.

**Table 1** Construction parameters (in inches) of F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope (depicted in Fig. 2).

No.	R	D	N	Aspheric coeff.	Dia.
1	-479.6988	-203.8720	AIR	$A_2 = -1.0751$	120.0
2	-71.9548	61.9611	AIR	$A_4 = 4.8912 \times 10^{-7}, A_6 = 2.0653 \times 10^{-11}$	19.9
3	-144.0000	-70.3654	AIR	$A_4 = 2.7646 \times 10^{-8}$	23.4
4	Flat	-0.2998	UBK-7		4.6
5	Flat	-1.4382	AIR		4.6

$R_c = 98.4739, \Delta f = 0.1111 \times 10^{-3}$ .

$R_c$  denotes radius of the image surface and  $\Delta f$  is best-focus distance of the vertex of this image surface measured from the paraxial focus.

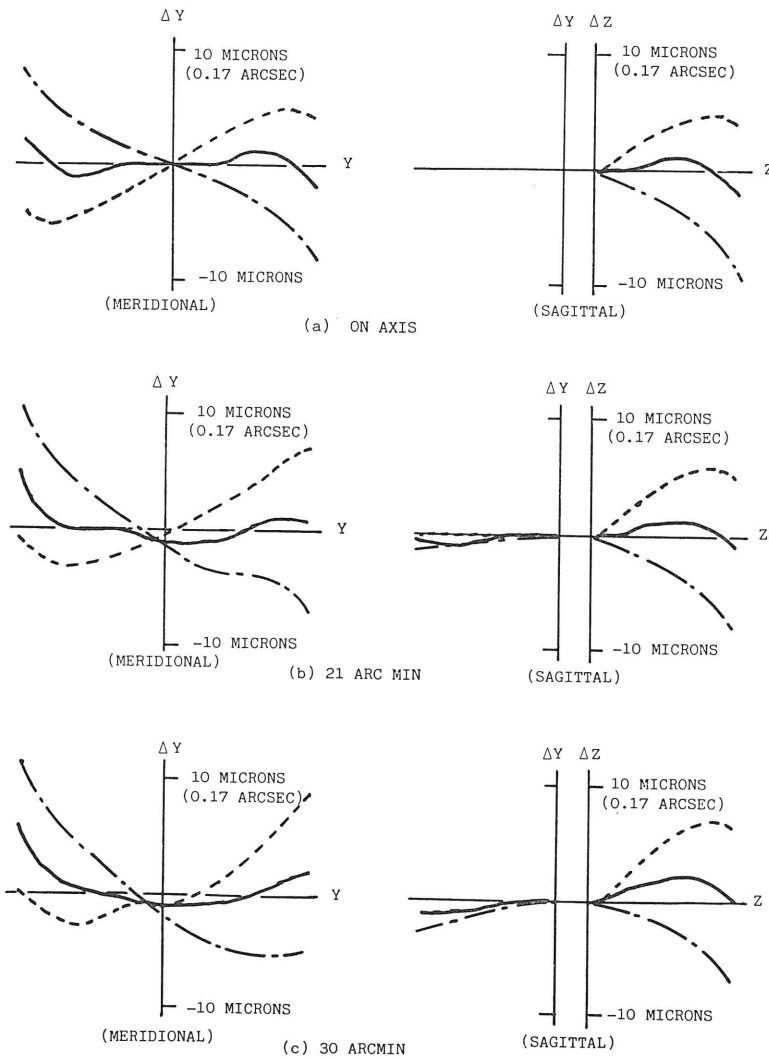
る<sup>5)</sup>という考えに基づくものである。したがって後述の性能評価はこの湾曲した像面(球面)上で行なっている。自動設計プログラムはEppsにより開発され、カリフォルニア大学ロサンゼルス校のIBM 3033上に収録されているOARSAを用いた<sup>9)</sup>。

**2.1 第2鏡から第3鏡への平行光束をもつ設計例**

本設計は大気分散の影響を補正する可能性を考慮してなされたもので、第2鏡から第3鏡への光束が平行光束となるようにし、この平行光束中に分散補正系を挿入できるようにした。Fig. 2とTable 1に光学系の略図と各部の諸元を示す。鏡面の主曲率半径Rや面間隔などの長さを表す物理量はインチを単位とし、非球面係数 $A_2, A_4, A_6$ は

$$\text{“sag”} = cy^2 / \{1 + \sqrt{1 - c^2y^2(1 + A_2)}\} + A_4y^4 + A_6y^6 + \dots$$

で定義される。ここで、 $y$ は光軸から鏡面上の1点までの距離、“sag”は鏡面上の面頂点における接平面から測った鏡面上のその点までの高さ、 $c$ は曲率( $1/R$ )である。したがって、 $A_4, A_6, \dots = 0$ の場合は $A_2$ の範囲により次の円錐曲面を表す。 $A_2 < -1$ (双曲面),  $A_2 = -1$ (放物面),  $-1 < A_2 < 0$ (長軸に回転対称な楕円面),  $A_2 = 0$ (球面),  $A_2 > 0$ (短軸に回転対称な楕円面)。図中の $t$ は検出器窓の厚みを表す。前述のようにこの窓は色差を生じるので $\lambda_H = 0.34 \mu\text{m}, \lambda_M = 0.43 \mu\text{m}, \lambda_L = 0.85 \mu\text{m}$ の3波長を評価に用いた。画角については、軸上と最大画角 $30'$ (直径)およびその70%の3点を用いた。弱い



**Fig. 3** Lateral aberrations  $\Delta y$  and  $\Delta z$  of F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope.  $y$ - and  $z$ -axes lie in the meridional and the sagittal planes, respectively. (a) on-axis, (b) 21 arcmin diafield angle and (c) 30 arcmin diafield angle;  $\lambda_M=434.8\text{ nm}$  (—),  $\lambda_L=850.0\text{ nm}$  (- -) and  $\lambda_H=340.0\text{ nm}$  (- · -).

**Table 2** RMS image sizes of F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope (depicted in Fig. 2).

Field angle (arcmin)	Image sizes (microns/arcsec)		
	$\lambda_M=434.8\text{ nm}$	$\lambda_L=850.0\text{ nm}$	$\lambda_H=340.0\text{ nm}$
0	2.0/0.03	12.4/0.21	8.5/0.14
21	2.5/0.04	11.8/0.20	9.4/0.16
30	3.6/0.06	11.3/0.19	10.5/0.18
Average	8.9/0.15		

像面湾曲は許すという設計方針の結果、像面は主鏡側に曲率中心をもつ半径  $r=98.4739$  インチの球面となった。性能評価の方法としては、全波長と全画角に対して等しい重みを置く方針をとった。すなわち、波長と画角の組合せによって生じる9種の条件に対応するスポット全体の rms 値が最小となる位置をもって最良像点とした。したがって Fig. 1 の例では、 $\lambda_M=0.4348 \mu\text{m}$  に対する

近軸像点から主像側に  $\Delta f=0.1111 \times 10^{-3}$  インチ移動した点に面頂点をもつ半径  $r=98.4739$  インチの球面上における結像性能を評価の対象とする。

Fig. 3 と Table 2 にそれぞれ画角と波長に対する横収差曲線とスポットダイアグラムの rms 径を示す。収差曲線の形状からはコマ収差の残存が見られるが、その量自体は小さい。波長と画角で平均したスポットの rms

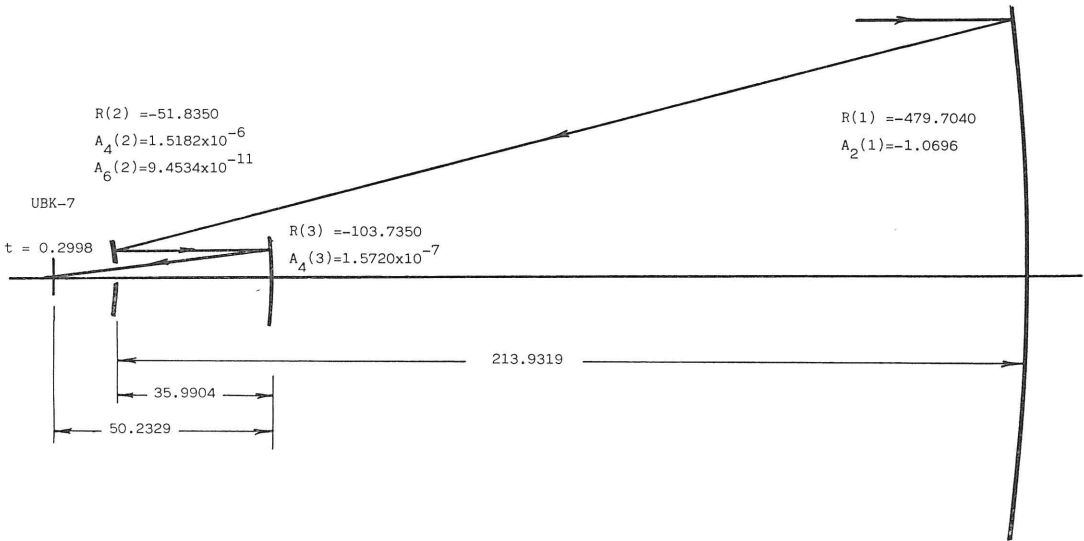


Fig. 4 F/2.0 to F/4.0 "pop-through" telescope with smaller two-mirror corrector and collimated beam exiting the secondary mirror.

Table 3 Construction parameters (in inches) of F/2.0 to F/4.0 "pop-through" telescope (depicted in Fig. 4).

No.	$R$	$D$	$N$	Aspheric coeff.	Dia.
1	-479.7040	-213.9319	AIR	$A_2 = -1.0696$	120.0
2	-51.8350	35.9904	AIR	$A_4 = 1.5182 \times 10^{-6}$ , $A_6 = 9.4534 \times 10^{-11}$	15.0
3	-103.7350	-50.2329	AIR	$A_4 = 1.5720 \times 10^{-7}$	17.8
4	Flat	-0.2998	UBK-7		4.6
5	Flat	-1.4382	AIR		4.6

$R_c = 66.9234$ ,  $\Delta f = -0.8561 \times 10^{-3}$ .

$R_c$  denotes radius of the image surface and  $\Delta f$  is best-focus distance of the vertex of this image surface measured from the paraxial focus.

Table 4 RMS image sizes of F/2.0 to F/4.0 "pop-through" telescope (depicted in Fig. 4).

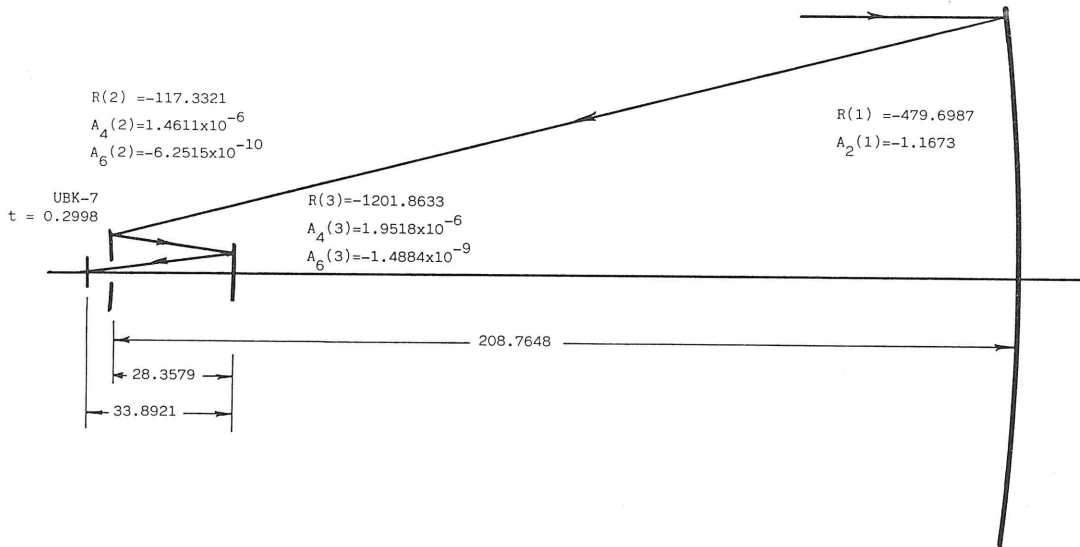
Field angle (arcmin)	Image sizes (microns/arcsec)		
	$\lambda_M = 434.8 \text{ nm}$	$\lambda_L = 850.0 \text{ nm}$	$\lambda_H = 340.0 \text{ nm}$
0	1.0/0.02	11.8/0.20	8.7/0.15
21	1.4/0.02	11.7/0.20	8.9/0.15
30	2.2/0.04	11.8/0.20	9.0/0.15
Average	8.5/0.14		

径は  $8.9\mu\text{m}$  で、これは  $0.15''$  の分解能に相当する。 $F/4$  のエアリーディスク径は中心波長に対して  $4.2\mu\text{m}$  であるので、全体として回折限界にかなり近い性能が達成されていることがわかる。

いまの場合、紫外から赤外までの広波長域を同一像面で評価しているが、観測波長域ごとに区分して最良像点を選べば表の中心波長の性能以上の回折限界の性能が得

られる。Paul-Baker 型のように観測機器による有効光束のケラレはなく、有効光束の損失は鏡自身の光束遮断によるもののみであるが、**Fig. 2** の例では第 3 鏡の有効光束遮断による光量損失が 22.1% ある。

上述の光学と同じ構成で画角のみを直径  $40'$  と  $1^\circ$  に増し、第 2 鏡と第 3 鏡の非球面係数のみを変えてそれぞれの画角に対して最適化を行なった。その結果、 $30'$  の



**Fig. 5** F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope with smaller two-mirror corrector and converging beam exiting the secondary.

**Table 5** Construction parameters (in inches) of F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope (depicted in Fig. 5).

No.	R	D	N	Aspheric coeff.	Dia.
1	-479.6987	-208.7648	AIR	$A_2 = -1.1673$	120.0
2	-117.3321	28.3579	AIR	$A_4 = 1.4611 \times 10^{-6}$ , $A_6 = -6.2515 \times 10^{-10}$	17.7
3	-1201.8633	-33.8921	AIR	$A_4 = 1.9518 \times 10^{-6}$ , $A_6 = -1.4884 \times 10^{-9}$	11.9
4	Flat	-0.2998	UBK-7		4.5
5	Flat	-1.4382	AIR		4.5

$$R_c = 91.4304, \quad \Delta f = -0.2259 \times 10^{-2}.$$

$R_c$  denotes radius of the image surface and  $\Delta f$  is best-focus distance of the vertex of this image surface measured from the paraxial focus.

**Table 6** RMS image sizes of F/2.0 to F/4.0 “pop-through” telescope (depicted in Fig. 5).

Field angle (arcmin)	Image sizes (microns/arcsec)		
	$\lambda_M = 434.8 \text{ nm}$	$\lambda_L = 850.0 \text{ nm}$	$\lambda_H = 340.0 \text{ nm}$
0	2.0/0.03	11.9/0.20	8.8/0.15
21	3.4/0.06	12.1/0.21	9.8/0.17
30	4.1/0.07	12.8/0.22	9.4/0.16
Average	9.1/0.15		

場合とほとんど同じ性能が得られ、結像性能の上ではさらに広画面角化が可能であることが確かめられた。しかし、鏡による有効光束のケラレが増加し、画面角  $40'$  の場合は第3鏡により 25.6% の損失が生じ、画面角  $1^\circ$  の場合は第2鏡の中心穴が原因となり 34.6% の光量損が生じる。以上に述べた設計において、主鏡はすべて双曲面で、 $A_2 = -1.0751$  と従来の Ritchey-Chrétien 系<sup>10)</sup> よりもかなり強い双曲面となっている。このような強い双曲面鏡の主焦点の利用の可能性については次節で論じる。

## 2.2 第2鏡と第3鏡からなる補正系のコンパクト化

補正系兼フォーカルエクスペンダー部をどこまで小型化できるかを検討することを目的とする設計を行なった。基本方針は第2鏡を主焦点に近づけてその有効径を小さくすると同時に第3鏡を第2鏡に接近させてコンパクト化を図るという点にある。Fig. 4 と Table 3 は最大画面角  $30'$  (直径) に対する設計例である。Fig. 2 の設計例に比べて有効径が第2鏡で 31%、第3鏡で 38% 小さくなり、鏡間距離は 42% 短縮された上で、波長・画面角平均の性能は Table 2 のものを上まわり、平均スポット径は  $8.5 \mu\text{m}$  ( $0.14''$ ) となった (Table 4)。ただし、この場合に次の2点が問題となる。(1) 第3鏡を主焦点側に近づけたため第3鏡の遮光による光量損が 33% となり、Fig. 2 の設計例の場合の 22% よりかなり増大する。(2) 像面の曲率半径が 66.9234 インチと 35% 小さくなり像面の湾曲が強くなる。これは、第2鏡から第3鏡への平行光を維持するために第2鏡のパワーを増した結果、ベッツヴァール和が増加したことによる。

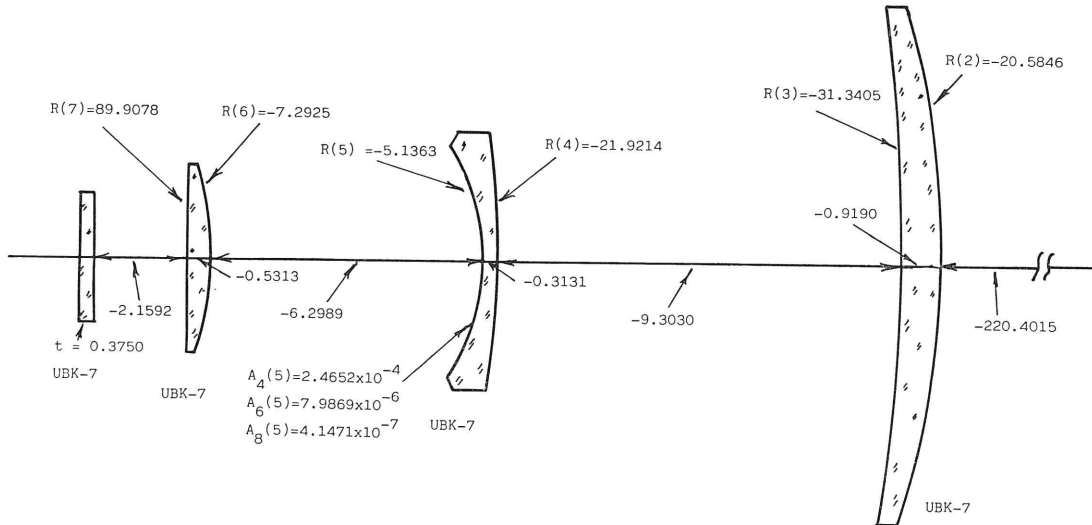
上記の問題を解決するために、第2鏡のパワーを減らしベッツヴァール和を改善すると同時に、第2鏡から第3鏡へ向かう光束を収斂光として、遮光の原因となる第3鏡の有効径を小さくした設計例を Fig. 5 と Table 5 に示す。この場合 Table 6 のように、平均スポット径  $9.1 \mu\text{m}$  ( $0.15''$ ) と性能をほぼ維持した上で、Fig. 5 のように補正系がさらにコンパクト化され、光量損失は第3鏡による 16% と減し、そのうえ像面の曲率半径が 91.4304 インチに改善される。以上のメリットの代償として、①大気分散補正板を挿入するための平行光束がなくなる、②主鏡がさらに強い双曲面 ( $A_2 = -1.1673$ ) になるという二つの問題が生じた。とくに②については、第2鏡から第3鏡への光束の収斂の弱い場合についても設計を行ってみた結果、光束の収斂度を強くするに従って主鏡が強い双曲面となっていく傾向が認められた。

## 3. 主焦点補正レンズ系

前節で設計した pop-through telescope の主鏡の非球面係数は  $A_2 = -1.0751 \sim -1.1673$  と従来の Ritchey-Chrétien 系<sup>10)</sup> の主鏡よりかなり強い双曲面となっている。そこで、 $F/2.0$  と明るく、しかもこのような強い双曲面をもつ主鏡であってもその主焦点を利用する観測が可能であることを保証するために主焦点レンズを設計した。これまでの主焦点補正レンズは Ritchey-Chrétien 系のように弱い双曲面の主鏡を対象とするものが多く、Meinel<sup>7)</sup> や Richardson<sup>11)</sup> らによるテキサス大学の 300 インチ  $F/2$  の主焦点補正系の設計では  $A_2 = -1.0074 \sim -1.0256$  であり、Epps<sup>12)</sup> によるカリフォルニア大学の 400 インチ  $F/1.75$  の主鏡の主焦点補正系の設計例でも  $A_2 = -1.0038$  であり、いずれも前節の3鏡面の主鏡に比べて弱い双曲面を対象とした設計である。

Richardson<sup>11)</sup> らはアングロ・オーストラリア 4m 望遠鏡の主鏡の  $A_2 = -1.1717$  という強い双曲面に対する主焦点補正レンズ系を発表しているが、この主鏡は  $F/3.25$  とやや暗いため双曲面による過剰補正球面収差を星像ひろがりで見ると約  $7.8''$  程度であり、前節の3鏡面望遠鏡の主鏡 ( $A_2 = -1.0751$ ,  $F/2.0$ ) の場合の約  $15.2''$  の星像ひろりに比べれば補正すべき球面収差量は約  $1/2$  にすぎない。ちなみに、テキサス大学 400 インチ ( $A_2 = -1.0075$ ,  $F/2.0$ ) 主鏡のもつ球面収差は今回補正すべき量の  $1/10$  以下である。

Fig. 6 と Table 7 に設計例を示す。主鏡の非球面係数は  $A_2 = -1.0751$  で、これは Fig. 2 の3鏡面望遠鏡のための主焦点補正レンズを想定している。UBK-7 のみを使用した3群のレンズ系で、中央の凹レンズの負の強いパワーをもつ面に高次の非球面を導入した。これは、Richardson によるテキサス大学 300 インチ  $F/2$  の主焦点補正レンズをもとに設計したものであるが、このタイプの3群補正系は歴史的には Wynne<sup>13)</sup> までさかのぼることができる。補正系全体は弱い負のパワーをもち、補正系通過後の主焦点における口径比は  $F/2.27$  である。したがって、主鏡と補正系の合成焦点距離は 272.4 インチで、 $1''$  の画面角は像面上  $33.5 \mu\text{m}$  に相当する。本設計においても像面近傍に検出器窓を想定した UBK-7 のガラス平面板を挿入した。波長は  $\lambda_H = 0.365 \mu\text{m}$  から  $\lambda_L = 0.852 \mu\text{m}$  までとし、 $\lambda_M = 0.466 \mu\text{m}$  を中心波長とした。今回は、像面湾曲をとり除き、像面を平面とした。色球面収差を考慮した最良像平面は中心波長の近軸像点から  $0.1322 \times 10^{-3}$  インチ主鏡側にあり、こ



**Fig. 6** Three-element prime focus refracting corrector for a strongly hyperbolic 120-inch F/2.0 primary mirror. Field is flat over 30 arcmin (diameter) field angle.

**Table 7** Construction parameters (in inches) of three-element prime focus refracting corrector (depicted in Fig. 6).

No.	R	D	N	Aspheric coeff.	Dia.
1	-479.6988	-220.4015	AIR	$A_2 = -1.0751$	120.0
2	-20.5846	-0.9190	UBK-7		11.5
3	-31.3405	-9.3030	AIR		11.2
4	-21.9214	-0.3131	UBK-7		5.7
5	-5.1363	-6.2989	AIR	$A_4 = 2.4652 \times 10^{-4}$ , $A_6 = 7.9869 \times 10^{-6}$ $A_8 = 4.1471 \times 10^{-7}$	5.3
6	-7.2925	-0.5313	UBK-7		4.3
7	89.9078	-2.1592	AIR		4.2
8	Flat	-0.3750	UBK-7		3.0
9	Flat	-1.0000	AIR		2.9

$\Delta f = 0.1322 \times 10^{-3}$  (Flat image surface).

$\Delta f$  is best-focus distance of the image plane measured from the paraxial focus.

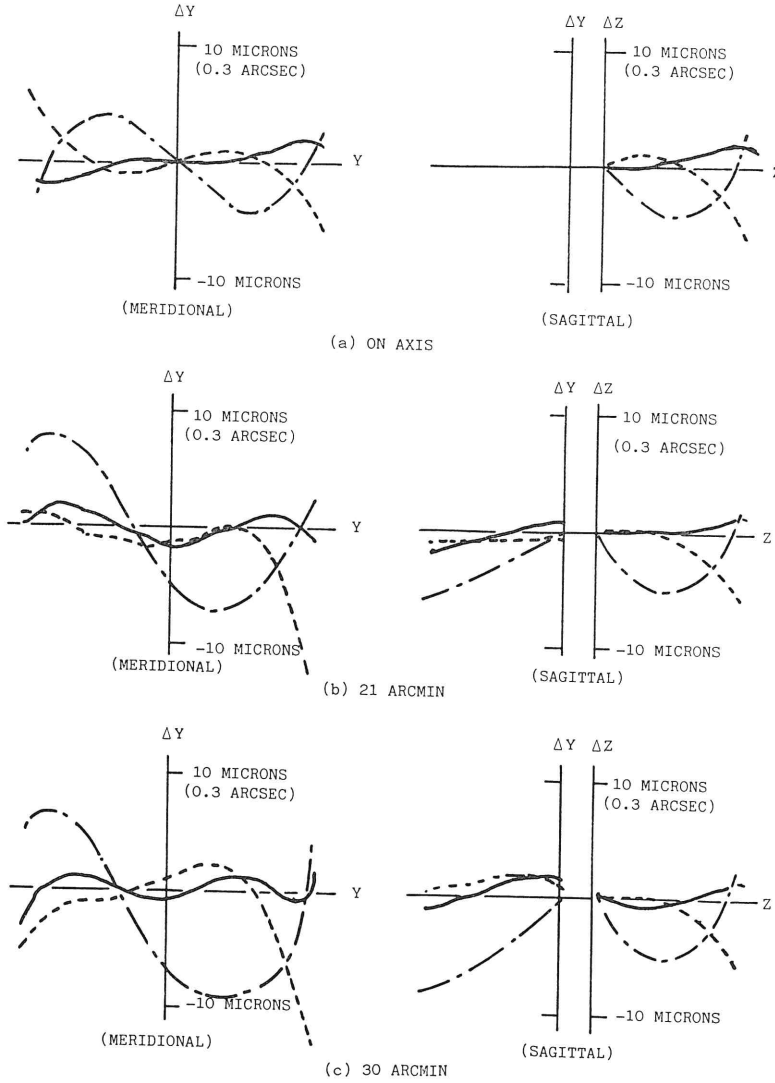
の像面上における収差曲線とスポットダイアグラム径をそれぞれ **Fig. 7** と **Table 8** に示す。直径 30' の画角に対して、スポット直径は波長・画角平均で  $8.1 \mu\text{m}$  ( $0.24''$ ) となった。中心波長に対するエアリーディスク直径は、F/2.27 の場合、 $2.6 \mu\text{m}$  であるので回折限界には達しないが、空気ゆらぎによる分解能の限界とされる  $1''$  より十分高い性能が得られた。

#### 4. ま と め

120 インチ F/2.0 の主鏡をもつ 3 鏡面望遠鏡とその主焦点補正レンズを設計した。口径比 F/4 の最終像面が第 2 鏡の前方約 10 インチとなる pop-through 型式とす

ることにより、観測機器による有効光束遮断という Paul-Baker 型のもつ問題点を解決した。検出器用ガラス窓を挿入した状態で  $0.34 \sim 0.85 \mu\text{m}$  の広波長、30' の広画角に対し、rms スポット径  $8.9 \mu\text{m}$  ( $0.15''$ ) の回折限界に近い性能を得た。画角をさらに  $1^\circ$  まで拡げるか、補正鏡部を小型化しても、この結像性能は十分保持するが、その場合、補正鏡部によるケラレのための有効光束の損失が問題となり、結局このタイプの望遠鏡の実用上の画角を決定するのは結像性能ではなく補正鏡自身による有効光束のケラレにあることが明らかになった。これは、共軸鏡面系のいわば宿命ともいえるべき問題ではあるが、**Fig. 5** の設計例のように第 2 鏡から第 3 鏡へ





**Fig. 7** Lateral aberrations  $\Delta y$  and  $\Delta z$  of three-element prime focus refracting corrector.  $y$ - and  $z$ -axes lie in the meridional and the sagittal planes, respectively. (a) on-axis, (b) 21 arcmin diafield angle and (c) 30 arcmin diafield angle;  $\lambda_M=466.2$  nm (—),  $\lambda_L=852.1$  nm (-·-) and  $\lambda_H=365.0$  nm (- - -).

**Table 8** RMS image sizes of three-element prime focus refracting corrector (depicted in Fig. 6).

Field angle (arcmin)	Image sizes (microns/arcsec)		
	$\lambda_M=466.2$ nm	$\lambda_L=852.1$ nm	$\lambda_H=365.0$ nm
0	3.2/0.10	7.0/0.21	6.6/0.20
21	2.3/0.07	11.0/0.33	9.1/0.27
30	2.3/0.07	12.4/0.37	8.7/0.26
Average	8.1/0.24		

の光束を収斂光とすれば、光量損は 16% まで下げることができ、現在多く使用されているカセグレン型の光量損と同程度になる。残存収差量は少なく、回折限界に近いが、それでも完全な回折限界の性能には到達していない。これは紫外から赤外までの広波長域での検出器窓の色収差がおもな原因である。事実、Yamashita<sup>8)</sup>らの解析解を初期値にわれわれが行なった検出器窓のない設計例<sup>14)</sup>では 30' の画角に対し平均スポット径  $0.6\mu\text{m}$  (0.01"), 波面収差  $0.05\lambda$  以下と全画面にわたって完全に回折限界の性能を達成している。色収差を発生しない鏡面系のメリットは逆に、検出器窓のもつ色収差を補正するすべがないという皮肉な側面をもつわけであるが、今回想定した 0.3 インチの窓厚は現実のものよりかなり大きいので、色収差についてはワーストケースデザインとなっている。

ここで設計した主焦点補正レンズはその形状自体にはとくに新規性はないが、明るく、しかも強い双曲面をもつという新しいタイプの主鏡に対して、その主焦点を 30' の平坦な画面全体で利用可能であるということ新たに保証する目的を果たしている。今回の設計は光学設計上の可能性と限界を明らかにすることを目的として行なわれたものであり、試作を目指したものではない。そのため、①公差をはじめとする製作技術上の問題、②画角外の物体より第 3 鏡に直接入射し、反射されてくる迷光を防ぐための遮光バツフル形状の検討や鏡筒構造上の問題、などの重要な問題は未検討である。これらは今後の課題と考えている。

本研究は東京大学創立百年記念学術研究奨励資金国際共同研究「超大型天体望遠鏡用新型鏡の研究」の一部として、カリフォルニア大学ロサンゼルス校で行なわれたものである。本研究を御支援いただいた東京天文台の方とアリゾナ大学ステュワート天文台の Angel 教授に厚く御礼申し上げる。

## 文 献

- 1) 磯部秀三：自然, **37**, 8 (1982) 27; 9 (1982) 84.
- 2) C. G. Wynne: Prog. Opt., **10** (1972) 137.
- 3) M. Paul: Rev. Opt., **14** (1935) 169.
- 4) J. G. Baker: IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., **AES-5** (1969) 261.
- 5) J. R. P. Angel, N. J. Woolf and H. W. Epps: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **332** (1982) 16.
- 6) J. T. McGraw, H. S. Stockman, J. R. P. Angel, H. W. Epps and J. T. Williams: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **331** (1982) 25.
- 7) A. B. Meinel and M. P. Meinel: Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., **332** (1982) 21.
- 8) Y. Yamashita and K. Nariai: Ann. Tokyo Astron. Obs., **19** (1983) 375.
- 9) 武田光夫：光学, **12** (1983) 317.
- 10) H. Chrétien: Rev. Opt., **1** (1922) 13, 49.
- 11) E. H. Richardson, C. F. W. Harmer and W. A. Grundmann: Mon. Not. R. Astron. Soc., **206** (1984) 47.
- 12) H. W. Epps, J. R. P. Angel and E. Anderson: Very large telescopes, their instrumentation and programs. *I. A. U. Colloquium No. 79*, Garching, West Germany (1984).
- 13) C. G. Wynne: Astrophys. J., **152** (1968) 675.
- 14) H. W. Epps and M. Takeda: Ann. Tokyo Astoron. Obs., **19** (1983) 401.