

1. Publicação nº <i>INPE-2439-PRE/140</i>	2. Versão <i>2ª</i>	3. Data <i>Junho, 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DAS</i>	Programa <i>DAE/FUVE</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>DESENHO DE TELESCÓPIO RADIÇÃO ULTRAVIOLETA</i>			
7. C.D.U.: <i>523.03</i>			
8. Título <i>UM TELESCÓPIO PARA FOTOMETRIA ULTRAVIOLETA</i>		10. Páginas: <i>23</i>	
		11. Última página: <i>22</i>	
		12. Revisada por <i>J. Marques da Costa</i>	
9. Autoria <i>Kalvala Ramanuja Rao Clóvis Monteiro do Espírito Santo</i>		13. Autorizada por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
Assinatura responsável <i>K. Ramanuja Rao</i>			
14. Resumo/Notas <p><i>Apresenta-se o desenho de um telescópio de 45 cm, que voará a bordo de um balão estratosférico, a fim de estudar a radiação ultravioleta proveniente de estrelas localizada no Hemisfério Sul. Um sistema Cassegrain e um Newtoniano são considerados. O sistema Cassegrain considerado é constituído por dois espelhos parabólicos e o Newtoniano é formado por um espelho parabólico (primário) e um espelho plano (secundário). Utilizando-se o método "Ray Tracing", construíram-se diagramas de pontos ("spot diagrams") para ambos os sistemas. O "spot diagrams" foi construído para raios incidentes ao longo do eixo do telescópio e fora deste eixo. Os resultados obtidos através deste procedimento indicam que os sistemas de telescópios considerados apresentam uma boa resolução angular, sendo, portanto, ideais para as finalidades do INPE. Para o sistema Newtoniano faz-se também o cálculo das aberrações produzidas.</i></p> <p><i>Versão Revisada em Março de 1983.</i></p>			
15. Observações <i>Este trabalho foi parcialmente financiado pelo fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), através do convênio FINEP CT 537. Este trabalho será submetido para publicação na revista Ciência e Cultura.</i>			

UM TELESCÓPIO PARA FOTOMETRIA ULTRAVIOLETA*

KALVALA RAMANUJA RAO E CLÓVIS MONTEIRO DO ESPÍRITO SANTO, Instituto de Pesquisas Es
paciais, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

ABSTRACT. A design of a 45 cm telescope is presented, which will be flown on a stratospheric balloon to study Southern Hemisphere stars in ultraviolet radiation. A Cassegrain and a Newtonian system are considered. The Cassegrain system consists of two parabolic mirrors and the Newtonian system is made of a parabolic mirror (primary) and a plane (secondary). Using the Ray Tracing method, the spot diagrams are constructed for both systems and the incident rays are considered along and away from the optical axis. The results of the analysis indicate that both systems considered present a good angular resolution. However, for the purpose of construction of the telescope at INPE, the aberrations produced in the Newtonian system alone have been calculated.

RESUMO. Apresenta-se o projeto de um telescópio de 45 cm, que voará a bordo de um balão estratosférico, a fim de estudar a radiação ultravioleta proveniente de estrelas localizadas no Hemisfério Sul. Um sistema Cassegrain e um Newtoniano são considerados. O sistema Cassegrain considerado é constituído por dois espelhos parabólicos e o Newtoniano é formado por um espelho parabólico (primário) e um espelho plano (secundário). Utilizando-se o método "Ray Tracing", construíram-se diagramas de pontos ("spot diagrams") para ambos os sistemas. O "spot

* Trabalho parcialmente financiado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), através do convênio FINEP CT 537.

diagram" foi construído para raios incidentes ao longo do eixo do telescópio e fora deste eixo. Os resultados obtidos através deste procedimento indicam que os sistemas de telescópios considerados apresentam uma boa resolução angular, sendo, portanto, ideais para as finalidades do INPE. Para o sistema Newtoniano faz-se também o cálculo das aberrações produzidas.

INTRODUÇÃO

Sabe-se atualmente que muitos processos astrofísicos importantes ocorrem na faixa ultravioleta do espectro eletromagnético. Do espectro eletromagnético que chega de fora da Terra, a radiação com comprimento de onda inferior a 3000 \AA é totalmente absorvida pelos H_2O , O_2 , CO_2 e O_3 existentes na atmosfera. A única maneira de se obter informações sobre objetos astronômicos, nesta faixa de energia, é colocar detectores acima da atmosfera.

Analogamente aos detectores de raio-X e gama, os detectores ultravioleta podem, atualmente, ser colocados acima da atmosfera por intermédio de quatro veículos, a saber: balões estratosféricos de grande volume, foguetes, satélites e estações orbitais.

Com o telescópio em balões, pode-se observar a radiação ultravioleta com comprimento de onda até 2000 \AA . O telescópio deve ser projetado para "ver" um fluxo de fótons que, na região do ultravioleta, atinge valores da ordem de $10^{-13} \text{ erg. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$. Dependendo do objeto celeste observado, a intensidade da radiação ultravioleta detectada poderá ser de duas a três ordens de grandeza superior ao valor dado acima.

TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO

Como mencionado anteriormente, pode-se estender até os 2000 Å a faixa de observação com o uso de balões. Nesta região, pode-se fazer estudos espectrais com sistemas ópticos dispersivos ou medidas fotométricas, usando-se filtros. Com estes filtros, pode-se também utilizar os métodos fotográficos convencionais.

Os métodos espectral e fotométrico, que utilizam redes e óptica associada, fornecem alta resolução espectral. Mas esses métodos exigem um ótimo sistema de direcionalidade para o telescópio e, conseqüentemente, a gôndola deve ser bastante estável. Já o método espectrofotométrico pode ser usado com uma tolerância maior na precisão da orientação do telescópio.

Fotometria ultravioleta com uma banda de resolução bastante larga (100 Å - 500 Å) pode ser usada para estudo de galáxias próximas, com grande diâmetro angular e diferentes regiões do meio interestelar de nossa galáxia. Neste caso, não é necessário um sistema muito preciso para direcionar o telescópio. Este método também é importante em observações do ruído de fundo celeste, a fim de determinar as componentes estelares e não-estelares existentes na região do ultravioleta. O resultado de uma componente estelar isotrópica fortalecerá a idéia da existência de um gás interestelar quente.

O método espectrofotométrico pode também utilizar o sistema de telemetria para coletar os dados, digitalizando-os imediatamente. Este método é bem mais simples do que o fotográfico, que exige a utilização de um microdensitômetro para a análise das fotos.

O TELESCÓPIO CASSEGRAIN

Para uma etapa posterior do desenvolvimento deste projeto, pretende-se utilizar um telescópio Cassegrain. Um telescópio deste tipo é constituído por um espelho primário parabólico e um secundário hiperbólico. O sistema Cassegrain apresenta muitas vantagens sobre o Newtoniano, sendo considerado um sistema ideal (Hurwitz and Tschunko, 1968). Para o projeto que se tem em mente, utilizar-se-á o espelho primário parabólico já disponível, cujo diâmetro é de 45 cm, e cuja razão focal é de 5,3. O diâmetro do orifício central neste espelho é de 8 cm. A seguir, calcular-se-ão as características do espelho hiperbólico secundário, compatíveis com o espelho primário adotado, de forma que o telescópio apresente razão focal igual a 8 (Bottema and Woodruff, 1971).

1. Espelho primário parabólico

diâmetro: $D_p = 45$ cm

distância focal: $F_p = 240$ cm

orifício central: $D_c = 8$ cm

razão focal: $f = 5,3$

2. Espelho parabólico e espelho hiperbólico

razão focal: $F = 8$

distância focal equivalente: $F'_p = 8 \times 45 = 360$ cm

ampliação: $A = \frac{F'_p}{F_p} = 1,5$

posição do foco: $B = -40$ cm

distância do foco do espelho primário ao foco do telescópio:

$$L = F_p - B = 280 \text{ cm}$$

excentricidade: $e_s = \frac{A + 1}{A - 1} = 5,0$

distância do centro do espelho hiperbólico ao vértice: $a = \frac{L}{2e_s} = 28 \text{ cm}$

distância do centro do espelho hiperbólico ao foco: $c = a e_s = 140 \text{ cm}$

raio de curvatura do espelho hiperbólico no vértice:

$$r_s = a | 1 - e_s^2 | = 672 \text{ cm}$$

foco do espelho hiperbólico secundário: $F_s = c - a = 112 \text{ cm}$ ou

$$F_s = L - \frac{r_s}{1 + e_s} = 168 \text{ cm}$$

diâmetro do espelho secundário: $D_s = D_p \frac{(L - F_s)}{F_p} = 31,5 \text{ cm}$

distâncias entre os espelhos: $d = F_p - F_s = 128 \text{ cm}$

Portanto, o espelho secundário hiperbólico apresenta as seguintes características:

$$D_s = 31,5 \text{ cm}$$

$$F_s = 112 \text{ cm} \text{ ou } F_s = 168 \text{ cm}$$

$$r_s = 672 \text{ cm}$$

Em virtude das dificuldades para a construção de tal espelho no Brasil, do custo elevado em caso de importação, e do fato de se antecipar a data do início do projeto, optou-se por um telescópio do tipo Newtoniano, e substituiu-se o espelho secundário hiperbólico por um plano. Como o sistema Cassegrain é irrelevante para a primeira etapa do projeto, considerar-se-á, a seguir, somente o telescópio Newtoniano.

O TELESCÓPIO NEWTONIANO

Num primeiro estágio do desenvolvimento de um sistema para observações no ultravioleta, escolheu-se um telescópio que apresenta vários filtros nas faixas intermediárias de interesse e uma fotomultiplicadora colocada no seu foco. O telescópio é constituído de um espelho primário parabólico, com 45 cm de diâmetro ($f/5,3$), e de um espelho secundário plano, com 25 cm de diâmetro.

A fim de reduzir as dimensões do telescópio, colocou-se o espelho plano secundário a uma distância de 1,0 m de primário, com seu eixo inclinado 7° em relação ao eixo principal do espelho parabólico. Desta forma, o foco do sistema ficou atrás do espelho primário, a uma distância de, aproximadamente, 40 cm do mesmo.

A Figura 1 mostra a configuração do telescópio projetado.

Fig. 1.

A seguir apresentam-se as características gerais do telescópio Newtoniano proposto.

- a) diâmetro do espelho parabólico primário = 45 cm
- b) razão focal = 5,3
- c) razão de obscuridade máxima = 0,58
- d) distância focal efetiva = 240 cm
- e) distância entre os espelhos primário e secundário = 100 cm
- f) diâmetro do campo de visão = 2 cm
- g) cobertura da superfície de ambos os espelhos = alumínio
- h) diâmetro do espelho plano secundário = 25 cm

O MÉTODO "RAY TRACING"

Este método consiste na determinação das coordenadas da imagem, formada por um sistema óptico, conhecendo-se a direção e o ponto de incidência sobre o sistema de cada raio de luz proveniente de um objeto. Em resumo, este método acompanha o raio de luz por todo sistema, obedecendo as leis de reflexão (espelhos) e refração (lentes).

1. Convenções adotadas e cálculos matemáticos

Considere-se um raio de luz incidente sobre uma superfície em um ponto P (x_0, y_0, z_0). O versor \hat{u}_i associado a este raio pode ser escrito em termos de suas coordenadas:

$$\hat{u}_i = \cos \alpha_i \hat{e}_1 + \cos \beta_i \hat{e}_2 + \cos \gamma_i \hat{e}_3 \quad (1)$$

onde, $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \hat{e}_3$ são versores ortogonais nas direções x, y e z, respectivamente e as coordenadas do versor \hat{u}_i são os cossenos diretores do raio incidente.

Analogamente, o versor \hat{u}_e associado ao raio refletido pela superfície e o versor \hat{u}_n normal à superfície no ponto de incidência podem ser escritos em termos de suas coordenadas, que são os cossenos diretores das direções consideradas:

$$\hat{u}_e = \cos \alpha_e \hat{e}_1 + \cos \beta_e \hat{e}_2 + \cos \gamma_e \hat{e}_3 \quad (2)$$

$$\hat{u}_n = \cos \alpha_n \hat{e}_1 + \cos \beta_n \hat{e}_2 + \cos \gamma_n \hat{e}_3 \quad (3)$$

A relação matemática entre esses três versores pode ser deduzida facilmente, considerando-se que o ângulo de incidência, formado pelos versores \hat{u}_i e \hat{u}_n , é

igual ao ângulo de reflexão r , formado pelos versores \hat{u}_e e \hat{u}_n . Assim, pode-se es
crever:

$$\hat{u}_i \times \hat{u}_n = \hat{u}_e \times \hat{u}_n \quad (4)$$

À Equação 4 associa-se a condição de \hat{u}_e ser um versor, ou seja:

$$\cos^2 \alpha_e + \cos^2 \beta_e + \cos^2 \gamma_e = 1 \quad (5)$$

A solução para $\cos \gamma_e$ do sistema de Equações 4 e 5, com os versores escritos de acordo com as Expressões 1, 2 e 3, é dada pela equação de segundo grau:

$$a \cos^2 \gamma_e + b \cos \gamma_e + c = 0 \quad (6)$$

onde:

$$a = \frac{1}{\cos^2 \gamma_n}$$

$$b = 2 \left(\frac{\cos \alpha_i \cos \alpha_n + \cos \beta_i \cos \beta_n}{\cos \gamma_n} - \frac{(1 - \cos^2 \gamma_n) \cos \gamma_i}{\cos^2 \gamma_n} \right)$$

$$c = \frac{(1 - 2\cos^2 \gamma_n) \cos^2 \gamma_i - 2\cos \gamma_i \cos \gamma_n (\cos \alpha_i \cos \alpha_n + \cos \beta_i \cos \beta_n)}{\cos^2 \gamma_n}$$

e:

$$\cos \alpha_e = \cos \alpha_i - \frac{\cos \alpha_n}{\cos \gamma_n} (\cos \gamma_i - \cos \gamma_e) \quad (7)$$

$$\cos \beta_e = \cos \beta_i - \frac{\cos \beta_n}{\cos \gamma_n} (\cos \gamma_i - \cos \gamma_e) \quad (8)$$

Desta forma, dada uma superfície refletora, a direção do raio refletido pode ser calculada, utilizando-se as expressões acima, desde que se conheça a direção e a posição de incidência do raio sobre a superfície, e a direção da normal à superfície neste ponto. Resta ainda dar um procedimento para a determinação desta última direção.

Seja uma superfície qualquer no espaço definido pela equação $f(x, y, z) = 0$. O vetor normal a esta superfície no ponto $P(x_0, y_0, z_0)$ é dado pelo gradiente da curva, calculada no ponto P , ou seja:

$$\vec{u}_n = \nabla f(x, y, z) \Big|_{x_0, y_0, z_0} \quad (9)$$

Conseqüentemente, o versor \hat{u}_n é dado por:

$$\hat{u}_n = \frac{1}{|\vec{u}_n|} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \hat{e}_1 + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{e}_2 + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{e}_3 \right) \quad (10)$$

onde:

$$|\vec{u}_n| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Portanto, as coordenadas do versor \hat{u}_n são dadas por:

$$\cos \alpha_n = \frac{1}{|\vec{u}_n|} \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_0, y_0, z_0}$$

$$\cos \beta_n = \frac{1}{|\vec{u}_n|} \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{x_0, y_0, z_0}$$

$$\cos \gamma_n = \frac{1}{|\vec{u}_n|} \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_{x_0, y_0, z_0}$$

2. Aplicação do método "Ray Tracing" para o cálculo do diagrama de pontos

O diagrama de pontos apresenta a forma geométrica, bem como as dimensões da imagem obtida de um dado objeto, pelo sistema óptico. Para a construção do diagrama de pontos, considera-se um raio de luz varrendo o espelho primário em vários círculos concêntricos (Figura 2).

Fig. 2

Para cada ponto $P(r,x)$ tem-se um ponto correspondente no plano focal. A esta sequência de pontos obtidos no plano focal dá-se o nome de diagrama de pontos.

Para cada ponto P , são conhecidas as suas coordenadas, a direção de incidência do raio e a direção da normal à superfície especular. Utilizando-se as Equações 6, 7 e 8, obtém-se a direção do raio refletido pelo espelho parabólico. Os cossenos diretores do raio refletido no espelho primário serão, por sua vez, os cossenos diretores do raio incidente no espelho secundário. Seja $Q(x_1, y_1, z_1)$ o ponto no qual o raio refletido no espelho primário intercepta o secundário. Pela definição de cossenos diretores, pode-se escrever:

$$\frac{x_1 - x_0}{\cos \alpha_e} = \frac{y_1 - y_0}{\cos \beta_e} = \frac{z_1 - z_0}{\cos \gamma_e} \quad (12)$$

A direção do raio incidente no espelho secundário é igual à direção do raio refletido no espelho primário e, conseqüentemente, pode-se escrever:

$$\hat{u}_{i2} = \hat{u}_{e1} \quad (13)$$

onde os índices 1 e 2 referem-se aos espelhos primário e secundário, respectivamente.

Novamente, utilizando-se as Equações 6, 7 e 8 determina-se a direção do raio emergente do espelho secundário. Seja \hat{u}_{e2} o versor correspondente a esta direção então, tem-se:

$$\hat{u}_{e2} = \cos \alpha_{e2} \hat{e}_1 + \cos \beta_{e2} \hat{e}_2 + \cos \gamma_{e2} \hat{e}_3 \quad (14)$$

Seja também $P'(x, y, z)$ o ponto de interseção deste raio com o plano focal. Analogamente à Equação 12, pode-se escrever:

$$\frac{x - x_1}{\cos \alpha_{e2}} = \frac{y - y_1}{\cos \beta_{e2}} = \frac{z - z_1}{\cos \gamma_{e2}} \quad (15)$$

Assim, cada ponto $P(x_0, y_0, z_0)$ terá sua imagem no ponto $P'(x, y, z)$. Fixando-se o plano focal na coordenada z , a sequência de ponto $P'(x, y, z)$ dará o diagrama de pontos para o sistema óptico.

Desenvolveu-se um programa de computador a fim de obter o diagrama de pontos para feixes incidentes no telescópio sob vários ângulos. Caso seja conveniente, o programa permite fazer os cálculos para diferentes inclinações do espelho secundário.

As Figuras de 3 a 7 mostram os diagramas de pontos obtidos para várias inclinações de feixe incidente com relação ao eixo principal do espelho primário.

Destas figuras, constata-se que uma variação de inclinação de $0,5^\circ$ no feixe incidente acarreta uma mudança da ordem de 2 cm na posição da imagem formada pelo telescópio. A janela da fotomultiplicadora é de aproximadamente 2 cm de diâmetro e, conseqüentemente, um deslocamento de 2 cm na posição da imagem fará com que ela seja formada fora da fotomultiplicadora. Considerando-se este fato, conclui-se que o campo visual do telescópio é de no máximo $0,5^\circ$.

ABERRAÇÕES PRODUZIDAS PELO TELESCÓPIO

Geralmente, a teoria de aberrações de terceira ordem é suficiente para o cálculo das aberrações produzidas pelos instrumentos ópticos empregados em Astrono

mia. Estas aberrações, ou aberrações Seidel, podem ser de cinco tipos: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção.

As aberrações do tipo coma, astigmatismo e curvatura de campo dependem diretamente da inclinação do feixe incidente com relação ao eixo do espelho. Baseado em Jenkins and White (1965), os cálculos mostram que estas aberrações são desprezíveis para o telescópio considerado, já que os ângulos de incidência do feixe de luz são no máximo $0,5^\circ$. De acordo com esses cálculos, a coma apresentará um círculo comático máximo de ordem de 10^{-3} cm, e alguns resultados acerca do astigmatismo são apresentados na Tabela 1. Nesta tabela, ϕ é o ângulo de inclinação do feixe incidente com relação ao eixo do telescópio, e S_s e S_t são as posições dos planos sagital e tangencial. O astigmatismo é medido pela distância entre esses dois planos.

TABELA 1

A aberração esférica mostrou-se também desprezível, já que ela produz um deslocamento longitudinal na imagem, da ordem de 10^{-7} cm. A distorção independe da posição do objeto com relação ao sistema óptico, mas produz uma imagem cujas dimensões com relação ao eixo não são proporcionais às do objeto. Este tipo de aberração, quando importante, pode ser eliminada posteriormente de uma maneira algébrica.

CONCLUSÕES

De acordo com o diagrama de pontos construído para o telescópio Newtoniano proposto, vê-se que o telescópio tem capacidade de produzir uma imagem numa região reduzida do espaço ($\sim 1\text{mm}$), e também apresenta uma boa resolução angular ($<30'$) para a observação de um objeto.

As possíveis aberrações consideradas são praticamente desprezíveis, principalmente quando se leva em conta que o telescópio não será utilizado para obtenção de fotografias, mas apenas para fotometria.

O fato de poder desprezar as aberrações Seidel, mais o pequeno campo visual do telescópio, indica que o telescópio Newtoniano proposto é excelente para as funções que se tem em mente.

1. Bottema, M.; Woodruff, R.A. Third order aberrations in Cassegrain-type telescopes and coma correction in Servo-Stabilized images. *Applied optics* 10(2):300-303, Feb. 1971.
2. Hurwitz, M.G.; Tschunko, H.F.A. *Mathematical Determination of Geometrical Image Aberrations in Single and Double-Mirror Systems*. Washington, DC, NASA, 1968. 23 p. (NASA TN D - 4692).
3. Jenkins, F.A.; White, H.E. *Fundamentals of Optics*. Tokyo, Mac Graw-Hill Kogakusha, C 1976. 746 p.

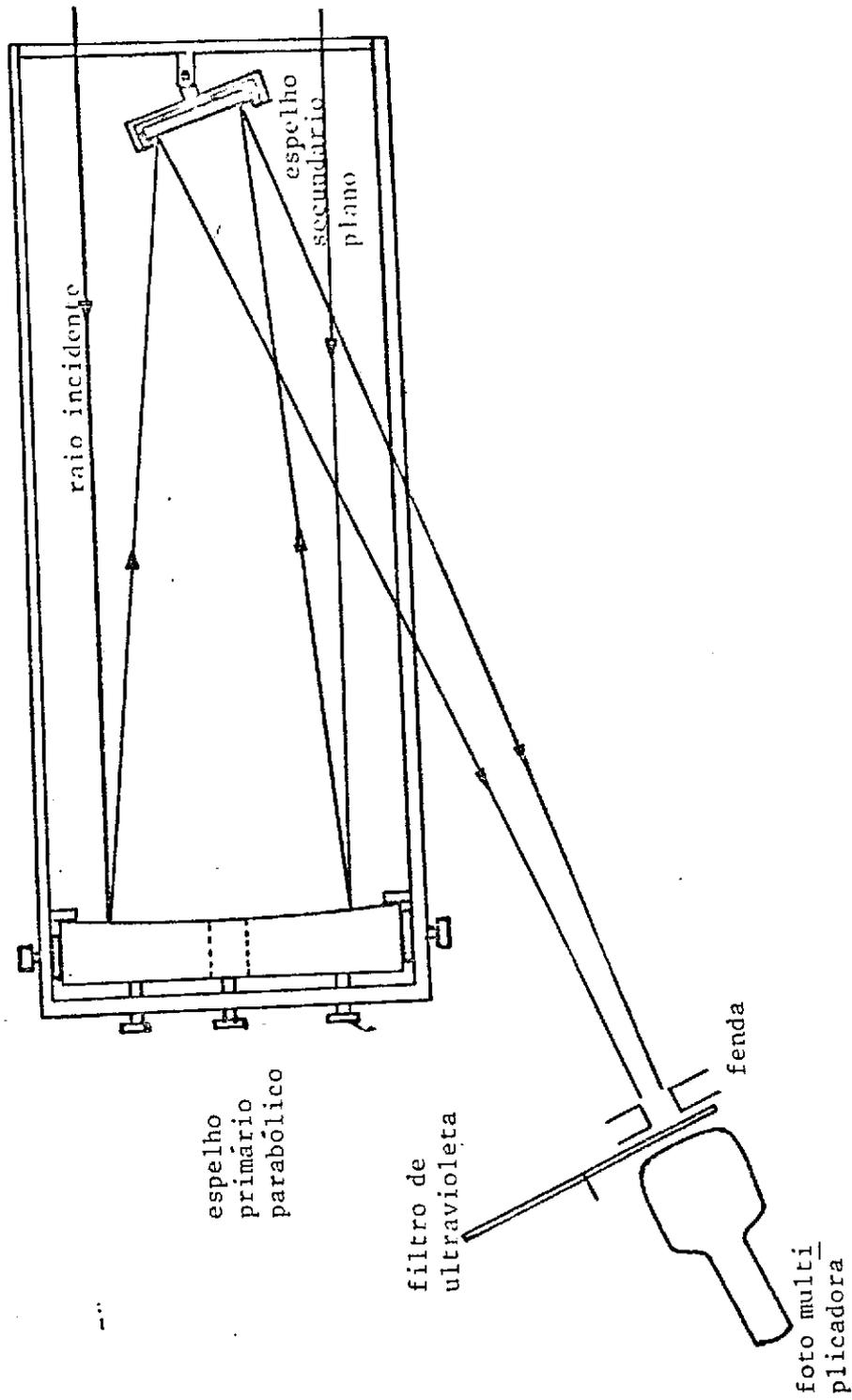


Fig. 1 - Esquema simplificado do telescópio newtoniano projetado.

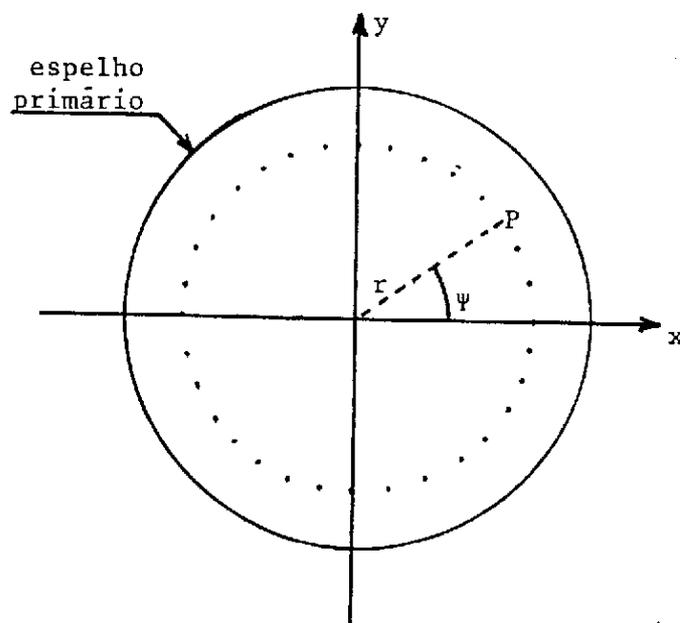


Fig. 2 - Espelho primário mostrando a seqüência dos pontos de incidência do raio de luz.

- Para cada ponto $P(r, \psi)$ tem-se um ponto correspondente no plano focal. A esta seqüência de pontos obtidos no plano focal dá-se o nome de diagrama de pontos.

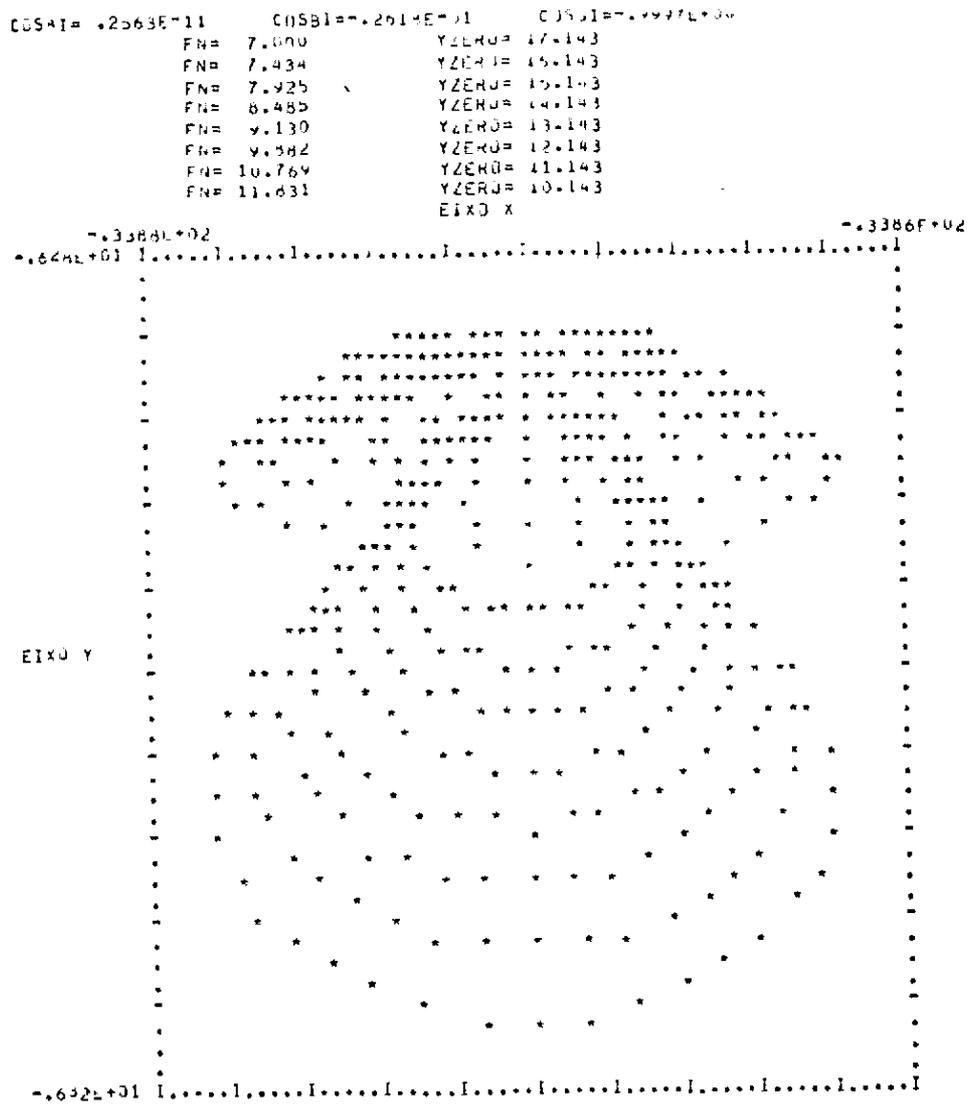


Fig. 6 - Diagrama de pontos para um feixe incidente no plano y-z, e inclinado $1,5^\circ$ com relação ao eixo do telescópio.

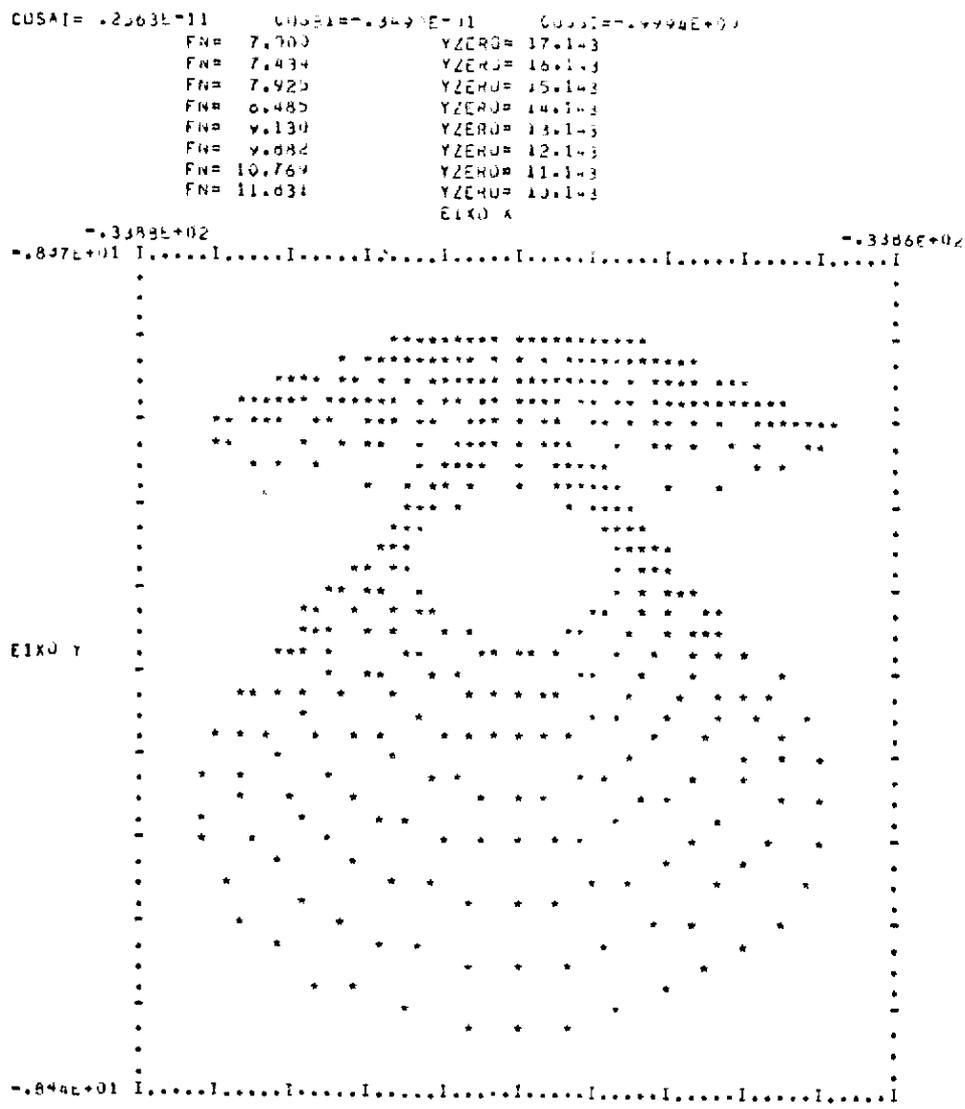


Fig. 7 - Diagrama de pontos para um feixe incidente no plano y-z, e inclinado 2,0° com relação ao eixo do telescópio.

TABELA 1

RESULTADOS DOS CÁLCULOS DE ASTIGMATISMO

PARA O ESPELHO CONSIDERADO

$\phi(\circ)$	S_s (cm)	S_T (cm)	ΔS (cm)
0,0	240,0	240,0	0,0
0,2	240,0015	239,9985	0,0030
0,5	240,0091	239,9909	0,0192
1,0	240,0366	239,9634	0,0732
1,5	240,0823	239,9178	0,1645
2,0	240,1463	239,8538	0,2925