

Instituto de astronomía

Publicaciones Técnicas



“Reporte Técnico”

RT-2010-01

**OPTIMIZACIÓN DEL "STOP DE LYOT" PARA LA CÁMARA CAMILA EN EL
TELESCOPIO 2.1m EN SU CONFIGURACIÓN F/13 CON DOBLETE.**

J. Herrera, L. Salas, E. Luna.

Mayo de 2010

Optimización del “stop de Lyot” para la cámara CAMILA en el telescopio 2.1 *m* en su configuración F/13 con doblete.

J. Herrera, L. Salas, E. Luna

Resumen

En septiembre del 2008 se realizaron ajustes al telescopio de 2.1 *m* del OAN en San Pedro Mártir. En dichos trabajos se sustituyó la óptica de CAMALEON con un doblete como reductor focal, proporcionándole imagen directa a CAMILA. Debido a las dimensiones internas de CAMILA, el “stop de Lyot” no pudo ser colocado en la posición óptima para su funcionamiento.

Anteriormente, el doblete utilizado se encontraba en un soporte cuyas dimensiones producían una pupila de 7 *mm* de diámetro; dicho diámetro varió al adaptar el sistema a CAMALEON.

En este trabajo se realiza un análisis del funcionamiento del “Stop de Lyot”, con lo cual, se obtiene la posición y su diámetro óptimos. Además, se realiza un estudio de la magnitud de la radiación térmica indeseada que es obstruida por esta pupila fría, así como del viñeteo producido de la radiación que deseamos detectar.

1. Introducción

Para comprender la forma en que la luz es viñeteada por los elementos del sistema óptico, es necesario calcular la trayectoria de la luz desde que llega al telescopio hasta que es detectada. Hay que tener en cuenta que el detector no puede discernir entre

la luz que llega de una estrella y la luz de un objeto en el edificio del telescopio, por lo que es importante conocer la naturaleza de estas dos radiaciones.

Durante este trabajo llamaremos como radiación térmica indeseada a la radiación producida por los objetos cercanos al telescopio tales como la cúpula, celda, etc; que emiten en el infrarrojo por encontrarse a temperatura ambiente.

Para efectuar este estudio necesitamos conocer cuál es el flujo de energía que el telescopio recibe de alguna estrella. Asimismo, debemos conocer tanto la procedencia como el flujo de la radiación térmica indeseada sobre el detector. Para conocer dichos flujos se realizaron simulaciones considerando la temperatura de los objetos cuya radiación llega al detector y el intervalo espectral en que el mismo trabaja.

En este estudio nos valeremos de una herramienta conocida como trazo de rayos no secuencial. En el trazo de rayos tradicional los elementos de un sistema óptico están colocados sobre el eje óptico y los rayos atraviesan al sistema de principio a fin, interceptando a los elementos en una sola ocasión, incluso cuando un elemento envía la luz de nuevo hacia un elemento por el que ya ha pasado. En el trazo de rayos no secuencial, un rayo se refleja hacia cualquier elemento sin importar el orden que éstos tengan, tal y como ocurre en la realidad, originando dobles reflexiones, luz extraviada, etc.

A continuación se describen algunos conceptos básicos que el lector debe tener en consideración durante la lectura de este trabajo.

El viñeteo es la acción de obstruir la luz que atraviesa un sistema óptico. Existen aspectos positivos y negativos del viñeteo: el positivo es cuando obstruimos la luz indeseable como la radiación generada por los objetos dentro de la cúpula y el negativo es cuando disminuimos la cantidad de luz que vemos de una estrella.

El elemento de un sistema óptico que limita la cantidad de luz que lo atraviesa es conocido como pupila de entrada. La imagen de la pupila de entrada producida por el sistema óptico es conocida como la pupila de salida.

Un “stop de Lyot” es una obstrucción física cuya posición y diámetro son los mismos que los de la pupila de salida. La finalidad del “stop de Lyot” es obstruir la luz dispersa que pudiese llegar al detector. Esta pupila óptica recibe su nombre de su inventor el astrónomo francés Bernard Lyot (1891-1952). En la cámara CAMILA el “stop de Lyot” es enfriado con nitrógeno líquido para evitar la generación de radiación térmica.

Para el mejor entendimiento de este reporte se utilizarán además, algunos conceptos como la radiación del cuerpo negro y la ley de Planck. Estos conceptos no serán explicados por lo cual se recomienda al lector dirigirse a [1].

2. Diámetro del “stop de Lyot”

Para obtener la posición y el diámetro de la pupila de salida es necesario generar dos rayos a través de la pupila de entrada: un rayo principal y un rayo marginal. Un rayo principal es el que atraviesa el centro de la pupila de entrada con un ángulo de inclinación igual al ángulo de visión del instrumento; un rayo marginal atraviesa la pupila de entrada en uno de sus bordes paralelo al eje óptico.

El rayo principal corta al eje óptico antes de llegar al plano imagen definiendo la posición de la pupila de salida. La altura del rayo marginal nos indica el radio de la pupila.

La figura 1 muestra el trazo de rayos a partir del doblete reductor. En esta figura se puede ver la pupila en su posición actual (B), donde la luz enfocada es viñeteada y en su posición óptima (C) donde la luz no sufre viñeteo.

En la figura 1 la pupila “B” se encuentra a una distancia de 5.8 mm de la ventana de la cámara; el diámetro de esta pupila es de 7 mm . La pupila “C” está desplazada una distancia “A”= 24 mm desde la posición de la pupila “B” y su diámetro óptimo es de 6.32 mm .

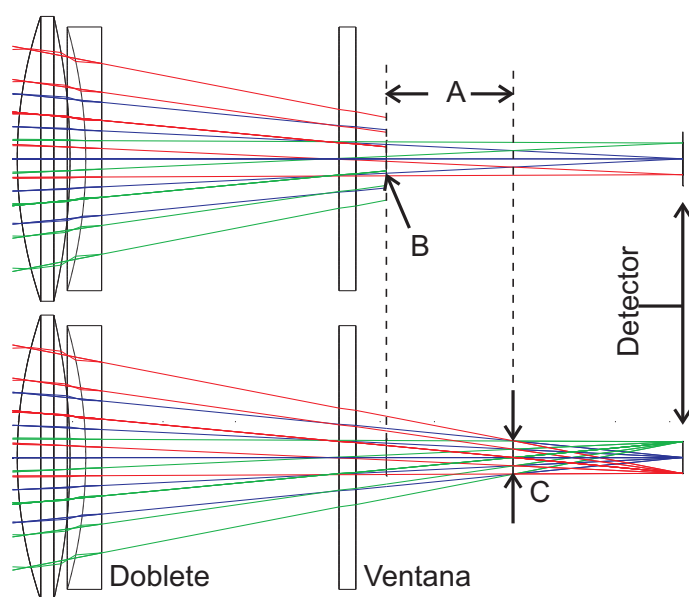


Figura 1: Viñeteo de la pupila por el “stop de Lyot” desplazado en el eje óptico (Superior). “Stop de Lyot” en posición correcta (Inferior)

Al momento de realizar el ajuste de la posición del “stop de Lyot” no se contaba con un reemplazo para éste con un diámetro adecuado, por tal motivo, sólo se ajustó su posición en el eje óptico. Es importante conocer si la calidad de imagen es afectada por el hecho de utilizar un “stop de Lyot” de 7 mm y no de 6.32 mm que es su diámetro óptimo.

Para conocer la cantidad de energía que llega al detector de CAMILA hemos utilizado el software de diseño óptico ZEMAX, donde podemos simular la energía proveniente de una estrella.

El software de diseño óptico ZEMAX nos permite programar fuentes de luz con las características deseadas; también podemos utilizar planos como detectores donde podemos definir cierta resolución. Dichas superficies son de mucha utilidad porque pueden disponerse en áreas donde queramos saber si existe luz dispersa o, como se mostrará posteriormente, saber si hay luz en el detector de CAMILA proveniente del suelo.

Dentro del edificio del telescopio, todos los objetos a temperatura ambiente se

encuentran emitiendo en el infrarrojo. Esta luz puede llegar al detector y formar parte de la imagen de manera indeseada.

Podemos entonces, trazar rayos desde todos los cuerpos en el edificio y hacia todas direcciones, y ver cuántos de ellos entran al telescopio (sistema óptico). Tal tarea requeriría mucho tiempo de cómputo dada la cantidad de rayos que habría que trazar.

Para obtener los mismos resultados podemos simular una fuente luminosa plana, rectangular y que emita luz de manera homogénea y en todas direcciones. Dicha fuente se coloca en la posición del detector de la cámara CAMILA. Posteriormente se coloca en la simulación un plano detector con un diámetro de 6 *m* debajo del telescopio y a una distancia de 4 *m* desde el primario.

En la simulación, la luz realizará un recorrido inverso al funcionamiento habitual del telescopio y una gran cantidad de la luz saldrá hacia el cielo. Una pequeña parte de la energía reflejada por el espejo secundario no irá al espejo primario sino a nuestro plano detector colocado bajo el primario.

Con la fuente rectangular antes mencionada, se realiza el trazado de una gran cantidad de rayos cuya posición y ángulo de salida son aleatorios. Guardando una base de datos con la información de estos rayos podemos eliminar los que han salido hacia el cielo y quedarnos sólo con los que incidieron en el detector colocado bajo el telescopio. Esta simulación arrojó un resultado muy obvio pero importante, el cual se describe a continuación.

La zona del piso que el detector puede ver corresponde a un anillo en el suelo de la cúpula o, en nuestro caso, al borde de la celda del espejo primario. Este anillo comprende un radio externo de 1145 *mm* y un radio interno de 1065 *mm*, al nivel del vértice del espejo primario. Lo anterior quiere decir, que un anillo con esas dimensiones emitiendo en infrarrojo es visto por el detector. La energía que este anillo irradia pasa primero por el espejo secundario y llega al detector sin reflejarse nunca en el espejo primario. La figura 2 nos puede dar una idea más clara de lo que está ocurriendo.

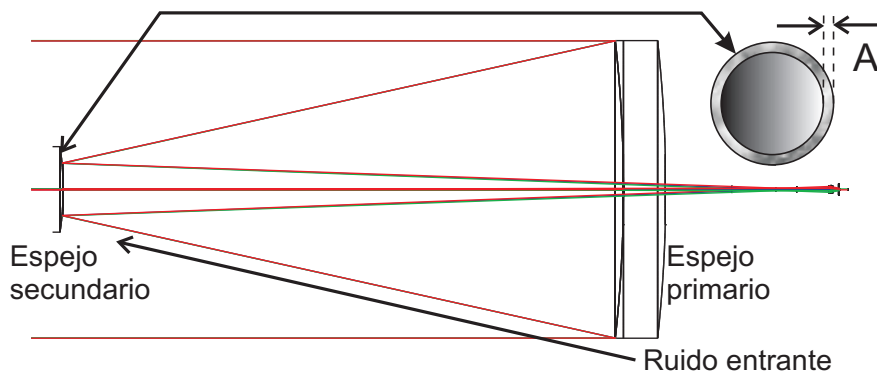


Figura 2: Radiación térmica indeseada

En la figura 2, se muestra un esquema del telescopio de 2.1 m donde puede verse la dirección con la que llega la luz no deseada al espejo secundario, en el cual existe un anillo delimitado por el diámetro óptico y el diámetro físico del mismo. Si se coloca un “stop de Lyot” más grande que el óptimo, entonces la radiación que pase por el anillo del espejo secundario pasará por el espacio dejado entre el “stop de Lyot” óptimo y el que se ha colocado.

La luz que llega de las estrellas y que entra al telescopio puede ser simulada por medio de una fuente circular colocada frente al telescopio y poniendo un detector en el plano imagen de CAMILA.

Podemos entonces, medir la energía entrante al telescopio y la obtenida en el detector tanto para la luz de las estrellas como para la radiación térmica indeseada. La figura 3 muestra el resultado de realizar un barrido variando el radio del “stop de Lyot”. Nótese que los flujos detectados tanto de la radiación térmica indeseada como de la estrella se muestran en una escala del 0 % al 100 %. Esto se hace porque no conocemos la magnitud real de cada uno de los flujos, pero sí sabemos cuál es el porcentaje de los mismos con respecto a su valor neto [2], pag. 207. Más adelante (sec 4) se estudian las magnitudes reales.

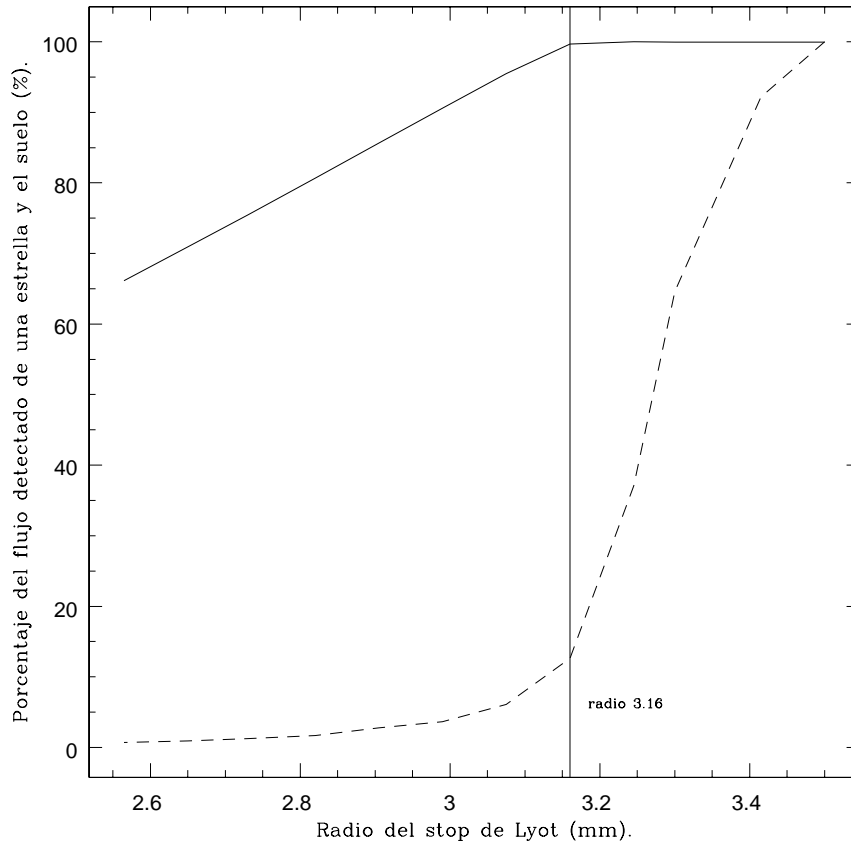


Figura 3: Relación entre el flujo proveniente del suelo (línea discontinua) y el flujo de la estrella (línea continua) con respecto al radio del “stop de Lyot”

3. Comportamiento de la radiación térmica indeseada

Como se mencionó en la sección anterior, la radiación térmica indeseada llega al detector a través del espacio dejado entre la pupila de salida ideal y la colocada de manera física, pero la zona anular de la celda del espejo primario que el detector puede ver no forma realmente una imagen, sino que la luz es distribuida sobre todo el detector. El que el telescopio vea la celda y no el piso de la cúpula tiene la ventaja de que la radiación térmica indeseada no depende de la orientación del telescopio.

Podemos entonces, realizar un muestreo del flujo de energía proveniente del suelo y que atraviesa una pupila física sobredimensionada para varias posiciones desde el plano de la pupila hasta el plano imagen, con lo que se comprueba que la distribución de la radiación térmica indeseada no depende de su posición en el anillo antes mencionado. Este muestreo es mostrado en la figura 4.

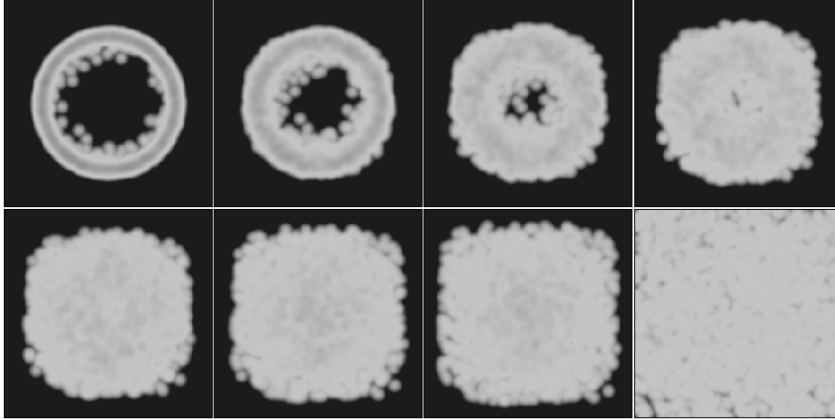


Figura 4: Deformación del anillo con un flujo de energía proveniente del suelo mostrado en planos sucesivos que van desde la pupila de salida (stop de Lyot) hasta el plano imagen (detector CAMILA).

4. Energías reales

Para determinar la magnitud de las energías mostradas en la figura 3 de la sección 2 necesitamos utilizar la Ley de Planck; la cual nos dice que la radiación emitida por un cuerpo negro tiene una intensidad dependiente de su temperatura T . Dicha intensidad está dada por la ecuación:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (1)$$

en donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz en el vacío, k la constante de Boltzman y ν corresponde a la frecuencia del espectro en la cual se

está irradiando. Las unidades de $I(\nu, T)$ son $ergs\ s^{-1}cm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}$.

Podemos integrar la ecuación (1) para conocer el flujo de un cuerpo negro en un intervalo espectral $\Delta\nu$ por unidad de ángulo sólido Ω^1 como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S(T) = \int \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{exp^{(h\nu/kT)} - 1} \cos\theta d\nu d\Omega. \quad (2)$$

La integral mostrada en la ecuación (2) puede ser fácilmente resuelta como se muestra en [3].

En base a esta ecuación, podemos obtener el flujo en $ergs\ s^{-1}cm^{-2}$, o en W/cm^2 , que incide sobre el telescopio conociendo la temperatura del cuerpo que la produce. Para este trabajo se consideraron objetos similares al sol cuya temperatura superficial es de aproximadamente $5600K$.

En este análisis, hemos utilizado el filtro espectral “K” de la cámara CAMILA, cuya longitud de onda central es $\lambda = 2.125\mu m$ con un ancho espectral de $\Delta\lambda = 0.35\mu m$. Además, hemos supuesto que la temperatura promedio durante la noche dentro de la cúpula del telescopio es de aproximadamente $275.6K$.

En la sección 3, hemos explicado la manera en que se determinó la zona de la celda del espejo primario que el detector puede ver. Esto nos sirve para proponer una fuente anular de luz que irradie en todas direcciones. Realizando un trazado de rayos podemos conocer la fracción energía que llega al detector, es decir, si realizamos un conteo de los rayos que logran incidir sobre el detector en relación a los que salen de la fuente, obtenemos que el flujo de energía que llega al detector corresponde a 22.9×10^{-8} de la energía irradiada por dicha fuente anular. Otra forma de calcular la cantidad de energía de la fuente anular que llega al detector se muestra en la Figura 5. Si colocamos una fuente puntual sobre el anillo de tal forma que esta emita rayos de manera esférica hacia el secundario, podemos medir el área del espejo secundario por

¹El valor de θ corresponde al ángulo que subtiende el ángulo solido Ω desde la normal.

donde pasan los rayos luz que sí llegan al detector. Calculada dicha área, podemos conocer la fracción de ésta con respecto a la esfera subtendida por la fuente y el secundario.

El área del espejo secundario mencionada es de $24mm^2$ y el área de la semiesfera en la que emite dicha fuente es $10.87 \times 10^7 mm^2$. El área de la sección del espejo secundario corresponde a 22.9×10^{-8} del área de la esfera y por consiguiente esto se aplica también a la energía que sale de la fuente y además a todos los puntos sobre la fuente anular.

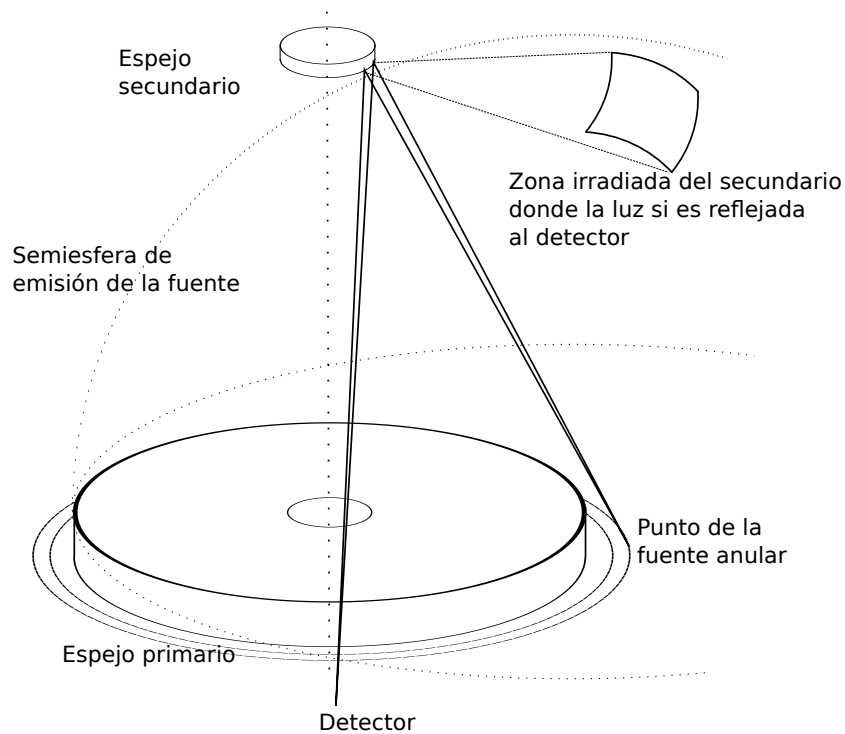


Figura 5: Calculo de la fracción del flujo de la fuente anular que llega al detector.

Podemos entonces, calcular el flujo real de la fuente anular por medio de la integral del cuerpo negro (Ec. 2) y por lo tanto conocer el flujo neto sobre el detector. Para corroborar que la integral del cuerpo negro este arrojando los

resultados correctos, realizamos el calculo del flujo por medio de la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$S(T) = \sigma T_e^4. \quad (3)$$

Para una temperatura ambiente al interior de la cúpula de $275.6K$ se tiene un flujo de $327.115W/m^2$. La fuente anular tiene un radio interno y externo de 1075 mm y 1145 mm respectivamente. Por lo tanto, el área del anillo es de $0.488m^2$ y el flujo irradiado será $159.86W$. De los valores calculados anteriormente se obtiene que el flujo que logra llegar al detector es de $3.66^{-5}W$.

Los valores mostrados en el párrafo anterior corresponden a todo el espectro electromagnético, repitiendo las operaciones para el filtro K obtenemos que el flujo en dicho intervalo espectral y a la misma temperatura es de $9.101 \times 10^{-5}W/m^2$. El flujo total del anillo es $4.44^{-5}W$ y por lo tanto, la energía que llega al detector es $1.017 \times 10^{-11}W$. Dicha energía distribuida sobre el detector con un área de $1.53cm^2$ nos da un flujo de $6.64 \times 10^{-12}W/cm^2$.

Para calcular el flujo que llega de una estrella, simplificamos el problema suponiendo que las estrellas que se desean observar son de la misma categoría que el Sol, con su misma temperatura, es decir, su misma magnitud absoluta M .

La magnitud absoluta es el brillo que tendría una estrella si estuviera a una distancia de $10pc$. Integrando la ecuación de Planck (2) encontramos el flujo emitido por el sol para el intervalo espectral que deseemos. Conocemos la distancia al Sol y su tamaño angular por lo que podemos calcular el flujo que recibimos en la Tierra.

El flujo bolométrico recibido del Sol en la Tierra es de $1363.24W/m^2$ y su magnitud aparente $m = -26$; si fuera observado con el filtro “K” mediríamos un flujo de $29.6927W/m^2$.

Si el Sol se encontrara a una distancia tal que la magnitud de éste ya no fuera -26.74 sino -1.5 como la estrella Cirio, el flujo que obtendríamos del Sol

sería de $2.38 \times 10^{-9} W/m^2$, esto, utilizando la ecuación (4). Considerando este flujo de entrada al telescopio obtenemos un flujo sobre el detector de $1.225 W/m^2$, lo anterior es resultado de multiplicar el flujo de entrada por 5.1477^8 que es el factor de concentración del telescopio obtenido con las simulaciones.

$$m_2 = 2.5 \log(F_o/F_2) + m_o \quad (4)$$

La magnitud aparente m corresponde al brillo de la estrella visto en su posición real desde la Tierra.

Contamos entonces, con el flujo sobre el telescopio para estrellas de cualquier magnitud e intervalo espectral. Con esta información generamos una fuente de luz sobre el telescopio obteniendo a su vez la imagen de una estrella sobre el detector de CAMILA donde podemos medir el flujo de energía.

La figura 3 puede ser entonces modificada con valores obtenidos de estas simulaciones donde podemos comparar cuál es la proporción real entre el flujo de la estrella y el flujo del suelo sobre el detector. La figura 6 muestra estos resultados para estrellas de diferentes magnitudes.

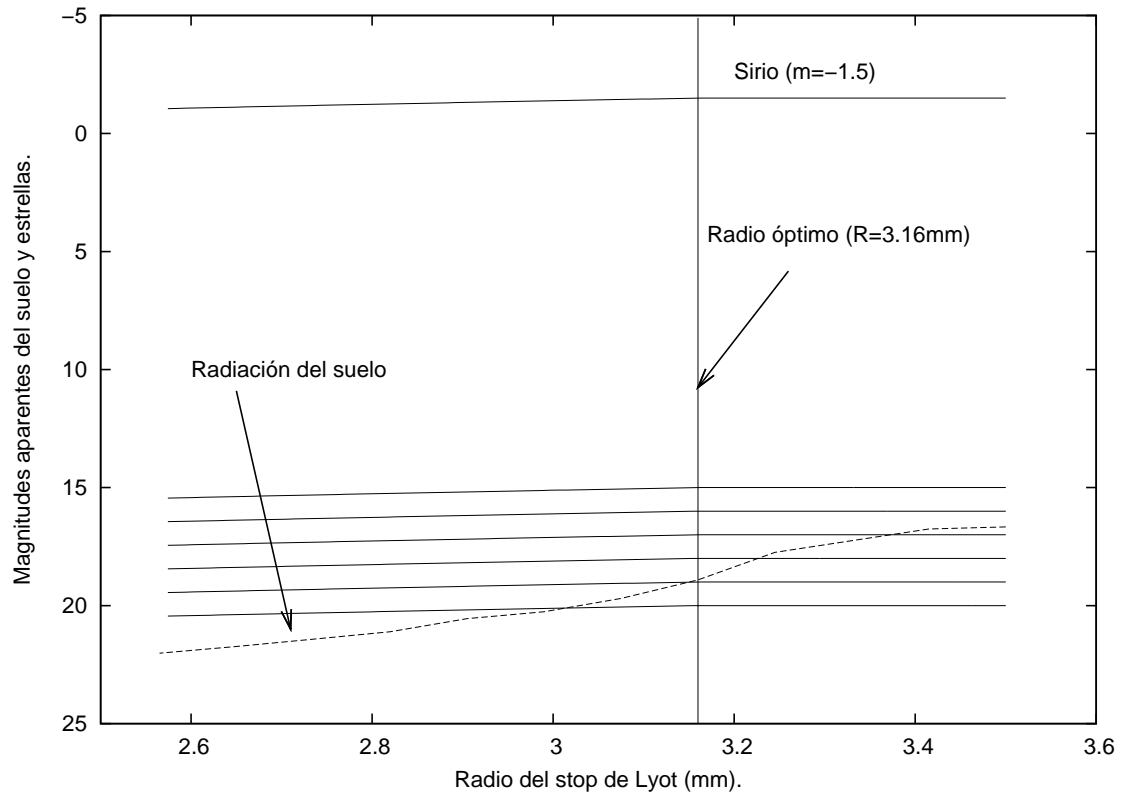


Figura 6: Flujos del suelo (línea discontinua) y de la estrella (líneas continuas) representados como magnitudes con respecto al radio del “stop de Lyot”.

En la figura 6 vemos que para un diámetro de stop de Lyot óptimo de 6.32 mm , los flujos que observaríamos del suelo y de una estrella de magnitud aparente 19 son iguales. Por tal motivo no existiría un buen contraste entre ambos para poder discernir entre ellos.

Si disminuimos el radio del “stop de Lyot” por debajo de su tamaño ideal realizamos un viñeteo en la imagen; sin embargo, la cantidad del flujo eliminado proveniente del suelo es mayor, por lo que puede decirse que una pequeña cantidad de viñeteo provocaría que pudiésemos detectar estrellas de magnitudes mayores. Por ejemplo, para una estrella de magnitud 20 es conveniente tener un “stop de Lyot” de 5.6 cm de diámetro y no el óptimo de 6.32 mm obtenido de la figura 3.

5. Conclusiones

Se obtuvo un diámetro óptimo para el “stop de Lyot” de 6.32 mm colocado a 32.17 mm del plano focal. Este valor del diámetro del “stop de Lyot” difiere de los 7 mm calculados para su montura original.

Se determinó que la radiación térmica indeseada observada por el telescopio proviene de un anillo con un radio interno de 1075 mm y un radio externo de 1145 mm . Dicho anillo se encuentra en la celda del espejo primario por lo que dicha radiación no debe variar con la orientación del telescopio.

Se determinó también, que dicha radiación no obstruida debido al sobredimensionado del “stop de Lyot” no se encontraba en una zona específica del detector sino que se distribuye sobre él sin formar imagen.

La radiación térmica indeseada que se obtiene con el “stop de Lyot” óptimo ($D = 6.32 \text{ mm}$) nos permitiría ver estrellas sin viñeteo cercanas a magnitud 18 (Figura 5).

El diámetro del “stop de Lyot”, de 7 mm , correspondiente a la configuración anterior, ocasiona una pérdida de dos magnitudes en el límite observable.

Referencias

- [1] Link Carroll, Bradley W. An introduction to modern astrophysics. Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie LinkReading, Massachusetts: Addison-Wesley, c1996
- [2] Fundamentals of astronomy. H. Karttunen 4th ed. LinkBerlin: Springer, c2003
- [3] Thomas E. Michels, Planck functions and integrals methods of computation. NASA TN D-4446, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D. C. March 1968



**Comité Editorial de Publicaciones Técnicas
Instituto de Astronomía
UNAM**

**M.C. Urania Ceseña
Dr. Carlos Chavarria
M.C. Francisco Murillo**

**Observatorio Astronómico Nacional
Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada
22860 Ensenada B.C.
editorial@astrosen.unam.mx**