

MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO ÓPTICO DE UN INSTRUMENTO DE POLARIZACIÓN PARA EL TELESCOPIO NBT

Estudiante

Varas González, Roberto

Director/Directora

Devaney, Nicholas y Oleaga, Alberto

Departamento

Física aplicada

Curso académico

2021/2022

Bilbao, 18 de febrero de 2022

Me gustaría dedicar este trabajo a mi querido abuelo

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar al Doctor Nicholas Devaney toda la ayuda, apoyo y conocimiento que me ha ofrecido a lo largo de este largo pero divertido tiempo que hemos pasado desarrollando el Trabajo de Fin de Máster. He tenido la oportunidad de aprender grandes cosas acerca de la óptica que me han marcado tanto personal como profesionalmente.

También agradecer a mi otro tutor, Alberto Oleaga, su apoyo y ayuda, que han sido de incalculable valor para el documento que se presenta a continuación. Asimismo, muchas gracias por la oportunidad que me ha brindado la Universidad del País Vasco (EHU), junto con los profesores, profesoras, compañeros y compañeras del Máster en Ciencia y Tecnología Espacial, donde he aprendido mucho y compartido grandes momentos, y que me ha abierto puertas hacia una carrera profesional entorno al campo que tanto apasiona, la astrofísica.

Aprovechando esta oportunidad, gracias, muchísimas gracias a mi familia y amigos, especialmente a mi madre y mi padre, y en particular a mi pareja, por todo su apoyo, cariño y ayuda que me han ofrecido siempre, tanto en mis estudios, como en cualquiera de mis decisiones personales, gracias, de verdad.

Resumen

The GLIP polarimeter is being designed by a collaboration of astronomers from the Centre for Astronomy of the NUIG, and the Astrophysics Research Institute (ARI) of LJMU. It is a new polarimeter concept that would perform simultaneous circular and linear polarimetry in three colour bands. For each band the beam is divided into four, and via fixed polarising elements the beams are re-directed to form four images of the field on each of three detectors (one for each colour band). The four images allow determination of the Stokes Polarisation parameters. The chosen detectors allow for high-speed data collection. The instrument will be unique in providing simultaneous full Stokes polarisation measurements at three wavebands. The no-moving-parts design paradigm maintains basic calibration through the instrument lifetime and makes detailed on-sky calibration a routine task.

The main task that has been carried out through this project and associated document, is the optical design using the commercial software OpticStudio[®] from Zemax. The work is described from the scientific requirements to the results obtained, such as the spot diagram, with the selected lenses and optic elements.

El polarímetro GLIP está siendo diseñado por una colaboración de astrónomos del Centro de Astronomía de la NUIG, y del Astrophysics Research Institute (ARI) de la LJMU. Es un nuevo concepto de polarímetro que permitirá determinar de forma simultánea la polarización circular y lineal en tres bandas del espectro. En cada banda el haz es dividido en cuatro, y mediante elementos polarizadores los haces son redirigidos para formar cuatro imágenes en el campo de cada uno de los tres detectores (uno en cada banda del espectro). Las cuatro imágenes permiten determinar los parámetros de polarización de Stokes. Los detectores elegidos permiten una recolección de datos de alta velocidad. El instrumento será único proveyendo mediciones simultáneas y completas de la polarización de Stokes en tres anchos de banda. El paradigma de diseño sin partes móviles mantiene una calibración básica a lo largo de la vida útil del instrumento y hace que las calibraciones en detalle en el cielo sean una tarea rutinaria.

La principal tarea que ha sido llevada a cabo a lo largo del proyecto y documento asociado, es el diseño óptico utilizando el software comercial OpticStudio[®] de Zemax. El trabajo es descrito desde los requisitos científicos hasta los resultados obtenidos, como el diagrama de puntos, con las lentes y elementos ópticos seleccionados.

GLIP polarimetroa NUIGeko Astronomia Zentroko astronomoen eta LJMUko Astrophysics Research Instituteko (ARI) astronomoen lankidetzak batek diseinatzen du. Polarimetroaren kontzeptu berri bat da, espektroaren hiru bandatan polarizazio zirkularra eta lineala aldi berean zehaztea ahal egingo lukeena. Banda bakoitza lautan banatzen da, eta elementu polarizatzaileen bidez sortak birbideratzen dira hiru detektagailu bakoitzaren eremuan (bana espektroko banda bakoitzari) lau irudi osatzeko. Lau irudiek Stokes polarizatzeko parametroak zehazteko aukera ematen dute. Aukeratutako detektagailuak abiadura handiko datuak bil ditzakete. Stokeses polarizazioan hiru banda-zabaleratan neurketa guztiak aldi berean egingo dituen tresna bakarra izango da. Zati mugikorrik gabeko diseinuaren paradigmatik oinarritzeko kalibrazioa mantentzen du instrumentuaren bizitza baliagarria zehar, eta zeruko kalibrazio xeheak ohiko zeregin bihurtzen ditu.

Proiektuan zehar gauzatu den, eta dokumentuekin lotu den zeregin nagusia, diseinu optikoa da, Zemaxen OpticStudio[®] software komertziala erabiliz. Lana ondorio zientifikoetatik lortutako emaitzetaraino deskribatzen da, puntu-diagrama bezala, hautatutako lente eta elementu optikoekin.

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XV
1. Introducción	1
1.1. El instrumento GLIP o <i>Galway Liverpool Imaging Polarimeter</i>	1
1.2. La polarimetría	2
1.2.1. Naturaleza de la luz polarizada	2
1.2.2. Situaciones astronómicas que llevan a la polarización	3
1.2.3. Formalismos matemáticos y métodos computacionales	3
2. Estado de la cuestión	7
2.1. Moduladores	7
2.2. Analizadores	9
2.2.1. Placa de calcita plano-paralela (<i>plane-parallel calcite plate</i>)	10
2.2.2. Placa Savart (<i>Savart plate</i>)	10
2.2.3. Prisma de Wollaston (<i>Wollaston prism</i>)	10
2.3. Detectores	11
2.3.1. Cámaras CCD o <i>Charge Coupled Devices</i>	11
2.3.2. Tubos fotomultiplicadores o PMT	12
2.3.3. Fotodiodos de avalancha o APD	12
2.4. Polarimetría de imagen: instrumentos	12
2.4.1. Polarímetros de doble imagen mediante CCD	13

Índice general

2.4.2. Polarímetros de doble imagen de alta precisión con moduladores de alta frecuencia	13
2.4.3. Polarímetros de alta velocidad y banda ancha	14
2.4.4. Polarimetría de imagen con Polaroid	15
2.4.5. Polarimetría de imagen con un analizador de doble haz y máscara de enfoque	15
2.4.6. Polarimetría de imagen con moduladores de alta frecuencia y CCD de rápida lectura	15
2.5. Calibración en la polarimetría	16
3. Metodología	17
3.1. Descripción inicial del GLIP	17
3.2. Requisitos	19
3.3. Análisis de primer orden	20
3.4. Características de los elementos y proceso de diseño	21
3.4.1. Colimador	22
3.4.2. NPBS, QWP, divisores de haz dicróicos y prisma Wollaston	22
3.4.3. Lentes de re-imagen	22
3.5. Trazado de rayos	23
3.6. Interfaz de OpticStudio	26
3.6.1. Diseño de lentes	26
3.6.2. Configuraciones	26
3.6.3. Función de mérito y optimización	28
3.6.4. Visualización de resultados	30
3.6.5. Otros	32
3.7. Principales problemas y elementos críticos	33
4. Resultados	35
4.1. Descripción general del sistema óptico	35
4.2. Descripción detallada del sistema óptico	36
4.2.1. Colimador	36

4.2.2. Elementos de división y polarización	37
4.2.3. Lentes de re-imagen	38
4.3. Resultados y análisis	39
4.3.1. Diagrama de puntos	39
4.3.2. Aberraciones	44
4.3.3. Detector	44
5. Conclusiones	47
Bibliografía	51
Apéndice A. Historia de la polarimetría	55
Apéndice B. Ángulos en la medición de la polarización con HWP y QWP	57
Apéndice C. Función de mérito	59
Apéndice D. <i>Lens Data</i>	61

Índice de figuras

1.1. Elipse de polarización	4
2.1. Prisma de Wollaston	11
2.2. Diagrama óptico GASP	14
3.1. Esquema propuesto GLIP	17
3.2. División del detector del GLIP	18
3.3. Esquema trazado de rayos	23
3.4. Esquema de la ley de Snell	24
3.5. Rayos marginal y principal	24
3.6. Invariante de Lagrange	25
3.7. Pestaña <i>Lens Data</i>	27
3.8. Superficies variables (<i>Lens Data</i>)	27
3.9. <i>Multi-Configuration Editor</i>	28
3.10. <i>Optimization Wizard</i>	29
3.11. Diagramas de puntos	31
3.12. Esquema 3D	31
3.13. Diagrama de Seidel	32
3.14. <i>Fields Data Editor</i>	32
4.1. Esquema óptico del GLIP	35
4.2. Esquema óptico del GLIP y NRT	36
4.3. Esquema óptico del colimador	37

Índice de figuras

4.4. Esquema óptico de las lentes de re-imagen filtros i y r	38
4.5. Esquema óptico de las lentes de re-imagen filtro g	39
4.6. Diagrama de puntos del filtro i	41
4.7. Diagrama de puntos del filtro r	42
4.8. Diagrama de puntos del filtro g	43
4.9. Diagrama de Seidel del filtro r	44
4.10. Distribución de imágenes en el detector	45
4.11. Área de división de imagen en el detector	45
C.1. Función de mérito	59
C.2. <i>Optimization Wizard</i>	60
D.1. <i>Lens Data</i> obtenido	61

Índice de tablas

1.1. Ejemplos de estados de polarización	4
3.1. Pasos de banda GLIP	18
4.1. Lentes del colimador	37
4.2. NPBS, QWP y Prisma de Wollaston	37
4.3. Lentes de re-imagen de los filtro i y r	38
4.4. Lentes de re-imagen del filtro g	39

Capítulo 1

Introducción

1.1. El instrumento GLIP o *Galway Liverpool Imaging Polarimeter*

La necesidad de conocer cómo funciona el universo es una característica innata en el ser humano. Es por ello, que durante siglos la ciencia ha ido creciendo, tanto en complejidad teórica como técnica. En el caso de la astronomía son los telescopios las herramientas que permiten mirar más allá del cielo. No obstante, existen varios conceptos que hacen a los telescopios tan importantes para la astronomía, y que no siempre son suficientemente reconocidos. Se trata de los instrumentos que estos albergan y qué información ofrecen de los distintos objetos estelares.

Las formas de observar son muy diversas, pudiendo variar en qué ventana del espectro se centra uno, qué quiere verse y cómo se procesa la luz que llega desde el objeto. Para poder obtener diferentes combinaciones de estos se desarrollan instrumentos específicos. Por ejemplo, uno puede querer simplemente analizar la cantidad de luz que llega de una cierta región del espacio y como se distribuye. Sin embargo, el dispositivo utilizado e incluso el propio telescopio, tendrán un diseño distinto en función de en qué rango del espectro se observe. Si se hace en el visible, con un telescopio típico será suficiente. Igual para el infrarrojo, pero esta vez habrá que enfriar el instrumento para minimizar el ruido. Si se quiere observar en radio, la tipología de telescopio varía significativamente, siendo el diseño más similar a una antena de grandes dimensiones.

Todo esto no es nada nuevo, tan solo lo que a uno se le viene a la cabeza cuando piensa en astronomía y telescopios. No obstante, existen muchas otras técnicas, como es la polarimetría. Tratando adecuadamente la luz procedente del cielo y recogida en el telescopio, es posible medir distintas propiedades de la luz como es la polarización. El grado o porcentaje de luz polarizada y qué tipo de polarización presenta el objeto (o

Introducción

los objetos) observado ofrecen información verdaderamente valiosa que de otra forma no podría obtenerse.

Por esto mismo, es necesario el diseño de dispositivos, cada vez más sofisticados, que permitan medir de forma sencilla y precisa la polarización de la luz. Actualmente existen diferentes tecnologías que consiguen hacerlo, pero todas tienen en común una baja estabilidad en la obtención de imágenes. Esto se debe bien por el uso de elementos móviles en el instrumento, o bien por el uso de más de un detector para recoger los fotones¹. Así, se torna necesario el diseñar un polarímetro que utilice un solo detector para los cuatro parámetros que determinan el estado de polarización, así como la eliminación de partes móviles. Es aquí donde nace el concepto del Polarímetro de Imagen Galway Liverpool (GLIP). Este instrumento, junto al Nuevo Telescopio Robótico (NRT), que será instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en La Palma, permitirán obtener una estabilidad sin precedentes así como una elevada precisión en la determinación del grado de polarización de objetos astronómicos.

1.2. La polarimetría

La primera medida de polarización en el rango del visible se realizó en la primera mitad del siglo XIX, aunque no se convirtió en un método ampliamente utilizado hasta finales de la década de 1960. Esto se debe a la necesidad de desarrollar tecnologías con suficiente relación señal a ruido (S/N), puesto que el nivel de polarización en objetos astronómicos suele ser reducido (aunque no siempre es así). En este caso, son tanto los tubos fotomultiplicadores como las CCD los que permitieron medir la polarización incluso en objetos poco luminosos. Con estos nuevos detectores, se comenzaron a desarrollar múltiples técnicas e instrumentos de medida de la polarización de la luz en el espectro óptico. Hoy en día, se trata de una disciplina bien asentada, que permite observar objetos grandes y pequeños en busca de una gran variedad de información astronómica. La tabla del Apéndice A muestra las fechas e hitos más importantes en esta rama científico-tecnológica.

1.2.1. Naturaleza de la luz polarizada

Se dice que la luz está polarizada cuando las oscilaciones o variaciones de la dirección del campo eléctrico están definidas, es decir, cuando no son aleatorias. Por el contrario, cuando la dirección del campo eléctrico varía temporalmente de forma aleatoria, la luz no está polarizada. La mayor parte de la información reside en la dependencia del grado de polarización con la longitud de onda o el tiempo.

¹Nótese que son necesarias cuatro imágenes distintas para medir correctamente la polarización, como a continuación se verá.

La polarización puede ser lineal, circular o elíptica, además de parcial o total.

1.2.2. Situaciones astronómicas que llevan a la polarización

Son varios los mecanismos que pueden generar polarización circular y/o lineal en el entorno astronómico. Estas se pueden enumerar:

- Reflexión de la luz en una superficie sólida (un planeta o asteroide, por ejemplo).
- Dispersión de la luz en electrones libres, átomos, moléculas o partículas de polvo.
- Propagación de la luz en un campo magnético (efectos Zeeman y Paschen).
- Radiaciones de ciclotrón y sincrotrón de electrones libres moviéndose en un campo magnético.
- Polarización interestelar de estrellas lejanas debido al dichroísmo óptico del polvo interestelar (no esférico) alienado por el campo magnético galáctico.

El análisis de la polarización puede ofrecer información acerca de las asimetrías y anisotropías del objeto observado o el medio que se interpone entre este y el observador. En el caso de la materia, se puede determinar su distribución espacial, densidad, composición y tamaño. En cuanto a objetos tipo estelar, brinda la oportunidad de conocer los campos magnéticos (fuerza del campo y geometría), pudiendo así obtenerse información acerca de su interior.

Analizando la polarización en diferentes zonas del espectro electromagnético, pueden detectarse asimetrías en diferentes partes del objeto observado.

1.2.3. Formalismos matemáticos y métodos computacionales

De forma sencilla y general, puede decirse que para estudiar la polarización es necesario conocer 4 valores o parámetros, como pueden ser los parámetros normalizados de Stokes así como la intensidad recibida. Estos se pueden escribir como:

$$q = Q/I, \quad u = U/I, \quad v = V/I, \quad (1.1)$$

donde Q, U y V son los parámetros absolutos de Stokes:

$$Q = I_p \cos 2\psi \cos 2\chi, \quad U = I_p \sin 2\psi \cos 2\chi, \quad V = I_p \sin 2\chi, \quad (1.2)$$

además, I es la intensidad de la luz parcialmente polarizada e I_p es la fracción elípticamente polarizada. El ángulo ψ (también conocido como θ o *polarisation angle* PA)

Introducción

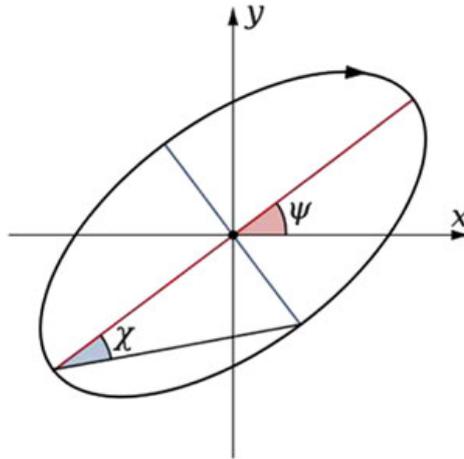


Figura 1.1 Esquema de la elipse de polarización [1]

es el ángulo azimutal de la elipse de polarización (véase la Figura 1.1). El valor de χ representa la excentricidad de esta, por lo que su tangente es la relación entre los semiejes. El grado de polarización total p , el grado y dirección de polarización lineal P_L y χ , respectivamente, así como el grado de polarización circular P_C , pueden escribirse como:

$$p = \sqrt{q^2 + u^2 + v^2}, \quad P_L = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad \chi = \frac{1}{2} \arctan \frac{u}{q}, \quad P_C = v. \quad (1.3)$$

La siguiente tabla muestra una serie de casos que sirven como ejemplo para comprender mejor el significado de los parámetros.

L/C/E/U (d/i)	ψ	$\tan \chi$	I,Q,U,V
L	0°	0	1, 1, 0, 0
L	90°	0	1, -1, 0, 0
L	45°	0	1, 0, 1, 0
L	-45°	0	1, 0, -1, 0
L	Cualquiera	0	1, $\cos 2\psi$, $\sin 2\psi$, 0
C, d	-	1	1, 0, 0, 1
C, i	-	1	1, 0, 0, -1
E, d	0°	0.5	1, 0.6, 0, 0.8
E, i	0°	-2	1, -0.6, 0, -0.8
E, d	90°	2	1, -0.6, 0, 0.8
E, d	Cualquiera	$\tan \chi$	1, 0, $\cos 2\psi$, $\sin 2\psi$
U	-	-	1, 0, 0, 0

Tabla 1.1 Esta tabla recoge los valores de los parámetros que definen un estado de polarización, ya sea lineal (L), circular (C), elíptica (E) o sin polarizar (U). Además, puede estar polarizada en el sentido de las agujas del reloj (d) o en el contrario (i). Una elipse se define a través de ψ y $\tan \chi$ o de la amplitud y la fase. La última fila representa los parámetros de Stokes normalizados [2].

1.2 La polarimetría

En realidad, la polarización requiere un fuerte análisis matemático. Además, físicamente, una vez generada, puede ser modificada e incluso eliminada, por ejemplo, por culpa del promedio en el tiempo. Por esto último, los formalismos son relevantes en este campo. Se trata de una técnica de medición relativa entre dos componentes de la señal recibida. El análisis matemático y computacional debe realizarse mediante matrices, existiendo, por ejemplo, múltiples cambios de base.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

Es conveniente realizar una pequeña contextualización del estado de la polarimetría, qué técnicas son las más utilizadas y cómo funcionan los polarímetros más extendidos.

Como cualquier otra técnica de observación astronómica, la polarimetría puede trabajar en diversas partes del espectro electromagnético, pero aquí se hablará del rango óptico o visible, pues el GLIP, el polarímetro desarrollado, trabaja en estas longitudes de onda.

Cabe destacar que la polarimetría posee una gran ventaja y es que las medidas están basadas en la comparación relativa de la intensidad de dos componentes ortogonalmente polarizadas de la luz, en vez de la intensidad total que es medida, como se hace en la fotometría. Esta ventaja se debe a que al realizar medidas comparativas, los posibles errores o fuentes de aberración, como es la atmósfera, se eliminan, mientras que si el valor absoluto es el importante esto no ocurre.

La mayoría de los polarímetros emplean un modulador (*modulator*) para modular el estado de la polarización de la luz entrante, un analizador (*analyser*) para separar las componentes ortogonales de la luz polarizada, y un detector, donde se recoge y analiza la intensidad del haz de trabajo.

2.1. Moduladores

Aunque existen varios tipos de modulador, aquí se va a hacer hincapié en los retardadores con desplazamiento de fase constante (*Retarders with Constant Phase Shift*), también llamados placas de onda (*wave plates*), pues son los considerados para el GLIP.

Estado de la cuestión

El principio físico de funcionamiento de estos elementos es la birrefringencia. Esta es una propiedad óptica de los materiales que se caracteriza por la existencia de dos índices de refracción para los haces ortogonalmente polarizados. De esta forma, uno de ellos se moverá más rápidamente a través de la placa que el otro. Se diferencian los rayos extraordinario (polarizado en la dirección del eje principal del cristal de calcita) y ordinario (polarizado en la dirección perpendicular). También se denominan eje rápido (aquel con mínimo índice de refracción) y eje lento (máximo índice de refracción). Como resultado de este comportamiento, se obtiene un desfase o retardo τ entre componentes ortogonales del haz entrante, que se escribe tal que [3]:

$$\tau = 2\pi\Delta/\lambda, \quad (2.1)$$

$$\Delta = (n_e - n_o)s, \quad (2.2)$$

donde s es el espesor de la placa, λ es la longitud de onda de trabajo, n_e y n_o son los índices de refracción de las componentes paralela y perpendicular de la luz polarizada respecto al eje óptico de la placa, respectivamente, y Δ es la diferencia de camino óptico.

Se pueden diferenciar dos tipos de láminas de onda en función del valor del desfase. Si este es igual a $\pi/2$ se trata de un *quarter wave plate* o QWP, mientras que si el retraso es de π se habla de un *half wave plate* o HWP. El primero permite transformar la luz polarizada de forma circular en lineal, mientras que el segundo, rota el plano de la polarización del haz linealmente polarizado.

Para poder tener buenos resultados, se busca que la diferencia de retraso en función de la longitud de onda sea mínima. Hoy en día, se pueden encontrar placas de onda superacromáticas, teniendo un efecto sobre las aberraciones muy pequeño en el rango comprendido entre los 350 nm y los 1100 nm. Están fabricadas principalmente en cuarzo y fluoruro de magnesio.

En cuanto a su uso, es habitual disponer QWP en polarímetros y mediante giros de 90° se mide la polarización circular v , o de 22.5° (véase el Apéndice B para una explicación más extensa) si son HWP para medir las componentes lineales q y u . Las QWP pueden usarse para medir todas las componentes con giros de 22.5° , pero no es conveniente por la baja eficiencia (pérdida de intensidad).

Existen otros tipos de moduladores, donde el desplazamiento de la fase es variable. Se pueden distinguir dos clases, los Moduladores Piezoeléctricos o Fotoelásticos (PEM) y los Cristales Líquidos Ferro-elásticos (FLC).

Los PEM [4] permiten medir tanto la polarización circular como la lineal si se modifica la frecuencia de excitación. No obstante, es necesario realizar un giro de 45° para poder medir correctamente q y u . Presentan ventajas cuando se requiere una gran precisión. Se trata de un material sin birrefringencia, sometido a un esfuerzo mediante un material piezoeléctrico.

En cuanto a los FLC [5], se componen de un cristal líquido introducido entre dos placas de vidrio. Por defecto, introducen un desfase de $\lambda/2$, pudiendo modificar la orientación mediante una diferencia de potencial. De esta forma, miden de forma directa la polarización lineal. Son más eficientes que los PEM. Son sensibles a la temperatura y requieren una calibración muy precisa.

Los moduladores variables tienen una mayor sensibilidad y permiten mayor precisión, en general. No obstante, se tratan de elementos con un estrecho ancho de banda. Por ello, para aplicaciones donde se quiere observar un amplio rango del espectro complican la observación y no serán utilizados (caso del GLIP).

2.2. Analizadores

Los analizadores se dividen en dos grupos, aquellos que funcionan con un haz y los que lo hacen con dos. En el primero de los casos, el elemento más simple que puede utilizarse es un polaroid. Su funcionamiento reside en el dichroísmo, propiedad por la cual la luz es absorbida de forma muy intensa cuando esta linealmente polarizada de forma paralela al eje de orientación del vidrio¹. No obstante, son sistemas poco eficientes, pues se pierde gran parte de la intensidad, y hoy en día su uso solo está justificado cuando se observan objetos muy luminosos.

Por otro lado, existen elementos que permiten dividir el haz entrante desde el telescopio en dos nuevos polarizados de forma ortogonal entre sí. Son los analizadores de doble haz, también conocidos como divisores de haz o *beam-splitters*. La principal ventaja que ofrecen es que ambos haces pueden ser analizados de forma simultánea.

Aunque existen varios tipos de divisores de haz ampliamente utilizados en los polarímetros, se van a desarrollar brevemente tres de ellos, especialmente el que se pondrá en el GLIP.

¹Esto es una propiedad intrínseca de la polarización. Se pueden dar dos ejemplos, una lente con rendijas paralelas o una Polaroid, que funciona de forma similar pero con microcristales de herapatita (compuesto químico dicróico). Cuando el campo eléctrico es paralelo a los microcristales o las rendijas existe una absorción que deriva de que los electrones son excitados en esta dirección. Es por esto que solo la componente perpendicularmente polarizada a las rendijas (o cristales) pasa a través de estos elementos.

2.2.1. Placa de calcita plano-paralela (*plane-parallel calcite plate*)

La placa de calcita plano-paralela [6] es el más simple de los analizadores de doble haz. Este elemento separa el haz en dos produciendo un desplazamiento en el rayo extraordinario, sin perturbar el ordinario. Para ello, basta con cortar la calcita de tal forma que el eje principal forme un ángulo de 45° con la superficie normal de incidencia. La separación entre los haces depende del espesor de la placa. No obstante, aunque este analizador presenta ventajas de sencillez y coste, posee grandes desventajas. La más notable se debe a la diferencia de camino óptico existente entre los rayos ordinario y extraordinario, que hace difícil enfocar ambas imágenes en el mismo plano. Son usados siempre y cuando la calidad de imagen no sea crítica.

2.2.2. Placa Savart (*Savart plate*)

La placa Savart [7] es una mejora del anterior elemento. Se fabrica uniendo dos vidrios de calcita paralelos, asegurándose de que sus ejes principales forman un ángulo de 45° respecto al plano normal a la superficie y girados 90° entre sí. Aunque resultan una solución verdaderamente buena, presentan diversos problemas que solo son solucionables si se disponen elementos que permitan girar el dispositivo, o bien máscaras y elementos ópticos de re-imagen.

2.2.3. Prisma de Wollaston (*Wollaston prism*)

El prisma de Wollaston [8] será utilizado en el futuro GLIP. El porqué es fácil de entender. Gracias a su construcción, estos elementos ópticos permiten grandes separaciones en la salida de los haces, de hasta 20° en un amplio rango del espectro y con gran calidad óptica. Se compone de dos cuñas cementadas (si se trata de calcitas) o con contacto óptico (si es cuarzo o fluoruro de magnesio), de tal forma que los ejes ópticos se mantienen perpendiculares entre sí y a su vez perpendiculares a la dirección de propagación del haz entrante. La separación angular entre los rayos ordinario y extraordinario depende básicamente del número de cuñas N (que en general es de 2, y rara vez 3), el ángulo de construcción de estas A y de la birrefringencia del material utilizado:

$$\alpha \approx 2 \arctan [(N - 1) |n_o - n_e| \tan A]. \quad (2.3)$$

Se trata de un elemento más complejo y delicado, pero con grandes ventajas. También conviene mencionar que la calcita permite separar en mayor medida (un orden de magnitud de diferencia) los haces que el fluoruro de magnesio o el cuarzo, pero en función del rango del espectro de trabajo puede tornarse necesario el uso de es-

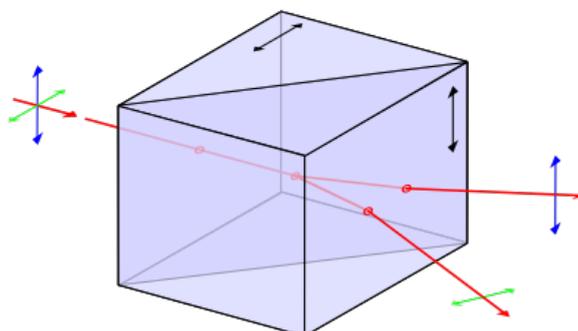


Figura 2.1 Esta figura muestra un esquema de un prisma de Wollaston típico de dos cuñas. El haz entrante se divide en dos polarizados ortogonalmente formando un determinado ángulo [1].

tos últimos. Una representación de un Wollaston típico, compuesto de dos cuñas, se muestra en la Figura 2.1.

2.3. Detectores

Para comprender mejor el polarímetro es conveniente hacer una breve mención a los detectores, parte indispensable de un instrumento. Aunque existen varios tipos, se prestará especial atención a las CCD, las más utilizadas, incluyendo el caso del GLIP. Además de estos, existen los PMT y los APD. Hoy en día se desarrollan nuevos detectores especialmente para el infrarrojo cercano (NIR).

2.3.1. Cámaras CCD o *Charge Coupled Devices*

En el óptico los detectores tipo CCD son claramente los más ampliamente utilizados, especialmente hablando de fotometría y espectroscopía. Se pueden destacar tres principales ventajas, que son la alta eficiencia cuántica ($QE > 90\%$), su gran versatilidad (amplio rango espectral) y la conveniencia en la adquisición de datos. Gracias a que se componen de un conjunto elevado de píxeles, se pueden obtener varias imágenes en el mismo detector, por lo que hace a estas cámaras perfectas para la polarimetría de doble haz, eliminando efectos como la variación atmosférica o ganancia del detector. De hecho, los fotones provenientes del fondo del cielo se capturan automáticamente sobre los píxeles, no haciendo falta recolectarlos aparte. De esta forma, es una herramienta muy potente para la imagen directa. En cuanto a la reducción de los datos, en imagen de banda ancha (*Broadband*), se hace mediante la fotometría de apertura (*aperture photometry* [9]).

Algunos inconvenientes son la rápida saturación de los píxeles en imágenes de objetos brillantes y la poca eficiencia en la descarga de las imágenes de exposición corta. Una forma de mitigar esto es utilizando cámaras de rápida transferencia de fotogra-

Estado de la cuestión

ma (*fast frame transfer* [10]), que incluyen una segunda área de recolección aparte de la tradicional, que funciona como un almacenamiento temporal de las imágenes. También se puede hablar de las EMCCD (*Electron Multiplication CCD* [11]) en las cuales existe un registro a la salida con un elevado voltaje entre cada píxel, provocando un efecto de avalancha al acelerar los electrones. Esto aumenta significativamente la señal, haciendo casi despreciable el ruido en la lectura.

2.3.2. Tubos fotomultiplicadores o PMT

El siguiente tipo son los tubos fotomultiplicadores o PMT [12]. Aunque son cada vez menos habituales, existen ciertas aplicaciones que justifican el uso de los PMT. Las ventajas son la elevada velocidad de lectura, un amplio rango dinámico y la capacidad del pozo, es decir, son más difíciles de saturar, capturando mayor número de fotones. Como la polarimetría necesita de gran cantidad de fotones, en objetos muy brillantes será de gran interés recolectar el mayor número de estos sin saturar el sistema. La precisión de la técnica es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de cuentas y directamente proporcional a la eficiencia del sistema. En polarimetría es típico necesitar una precisión de 10^{-6} (o partes por millón, ppm). Los polarímetros más precisos usan PMT por estos motivos. No obstante, su baja eficiencia cuántica (20-30 %) provoca que no sean competencia para las CCD en cuanto a objetos poco brillantes, junto con la necesidad de obtener imágenes de distintos objetos y el cielo de fondo de forma separada y moviendo el telescopio.

2.3.3. Fotodiodos de avalancha o APD

Los fotodiodos de avalancha (APD) son el equivalente de un PMT pero en forma de un semiconductor. Gracias a esto, una elevada diferencia de potencial (*bias voltaje*) acelera los fotoelectrones, que mediante choques excitan nuevos electrones, generando un efecto avalancha. No obstante, solo presentan ventajas en el infrarrojo, pues la eficiencia cuántica es superior a la de los PMT (hasta el 80 %), pero en el visible y óptico no ofrecen mejoras, además de ser más ruidosos y de área de recolección reducida. Su uso es marginal y parece estar decreciendo. No obstante, sí que existe un nuevo intento de utilizarlos por su potencial, queriendo mitigarse los problemas mediante el desarrollo de una matriz de detectores o *array* ([13-15]).

2.4. Polarimetría de imagen: instrumentos

En la polarimetría óptica pueden diferenciarse dos técnicas. Son la polarimetría de imagen (banda ancha o banda estrecha) y la espectropolarimetría [16, 17]. Cada una de estas formas de trabajar permiten obtener información diferente. Sin embargo, para

2.4 Polarimetría de imagen: instrumentos

el caso que aquí se presenta, el GLIP, la técnica de interés es la polarimetría de imagen. Se presentarán los precedentes de instrumentos de esta técnica.

La polarimetría de imagen se caracteriza por el uso de filtros o divisores de haz dicróicos a la hora de realizar observaciones.

2.4.1. Polarímetros de doble imagen mediante CCD

El esquema del polarímetro óptico de banda ancha más típico se compone de una rueda de filtros, una lámina de onda (QWP o HWP), un analizador de doble haz (prisma de Wollaston, placa Savart, ...) y un detector (en este orden, empezando por la parte más próxima al telescopio). En estos sistemas se necesita girar el QWP o HWP y se suele hacer mediante un motor paso a paso de gran precisión. Estos instrumentos pueden medir de forma separada la polarización lineal y circular. El primer caso se realiza mediante cuatro imágenes con diferente posición del HWP cada 22.5° y la comparación de la intensidad entre dos ondas con polarización ortogonal. Para el caso de la polarización circular, se necesitan dos imágenes con el QWP girado 90° (45° y 135° por ejemplo). De esta forma se obtienen los parámetros de Stokes y la polarización es determinada. Se trata de una solución sencilla y eficiente para observaciones que no requieren gran resolución temporal, pero sí un ancho espectro de observación. Se utiliza en instrumentos como ALFOSC [18] en el NOT (ORM, La Palma) o en EFOSC [19] y FORS2 [20] en el VLT UT1 de la ESO (Chile). Una vez se tiene este modelo, existen varias posibles mejoras. Un ejemplo es el uso de separadores de haz dicróicos (*dichroic beam-splitters*) en lugar de una rueda de filtros, obteniendo varias imágenes en distintos rangos del espectro en CCD diferentes. Es el caso del polarímetro DiPol-2 [21].

2.4.2. Polarímetros de doble imagen de alta precisión con moduladores de alta frecuencia

Son numerosos los ejemplos de instrumentos que utilizan la modulación rápida. Es el caso del TurPol [22, 23]. Dispone tanto de un HWP como un QWP, pudiendo medir tanto la polarización circular como lineal de objetos estelares en cinco bandas de forma simultánea (UBVRI). En aplicaciones donde objetos con periodos orbitales de horas tienen una rápida variabilidad (segundos o minutos) esto último resulta imprescindible para analizar estos fenómenos. Un segundo ejemplo es PlanetPol [24]. Utiliza un PEM como modulador, un prisma de Wollaston triple como analizador y un APD como detector, por ser un instrumento de gran precisión. Al funcionar el PEM con un desfase de $\lambda/2$, el instrumento debe ser rotado 45° para medir la polarización lineal. En este caso, se dispone de dos canales independientes para la observación de la estrella

Estado de la cuestión

y el cielo de forma simultánea. Los resultados obtenidos en el WHT de 4.2 m en el ORM (La Palma) son muy precisos, de pocas ppm [25]. Para conseguir precisiones tan elevadas como los instrumentos con moduladores rápidos aquí presentados, es necesario realizar una calibración muy minuciosa, así como observar estrellas u objetos muy brillantes con telescopios de apertura superior a los 3 m. Esta es la principal limitación de los polarímetros de alta precisión.

2.4.3. Polarímetros de alta velocidad y banda ancha

Es un verdadero reto medir la polarización en el óptico con resolución temporal inferior a un segundo. Deben determinarse los parámetros de Stokes con un corto tiempo de exposición, pero obtenerse suficiente intensidad lumínica. Esto se suele realizar mediante el giro de la lámina de onda o la polaroid con frecuencias inferiores a los 10 Hz. HIPPO es un perfecto ejemplo de la medición de la polarización para objetos altamente variables en el tiempo, con una resolución temporal de 0,1 s [26]. RINGO3 [27] y su sucesor MOPTOP [28], son otro ejemplo, haciendo uso del telescopio robótico de Liverpool de 2 m en La Palma (ORM). Utiliza una polaroid que gira, colocada tras un colimador. Después, la luz se separa en tres haces de distinta longitud de onda y se recogen en sendas EMCCD. Inicialmente, la frecuencia de rotación era de 1 Hz. Actualmente es de 0.4 Hz.

De gran importancia es para este proyecto el caso del GASP [29, 30] pues se supone como predecesor del GLIP. En la Figura 2.2 se muestra el diagrama óptico de este instrumento.

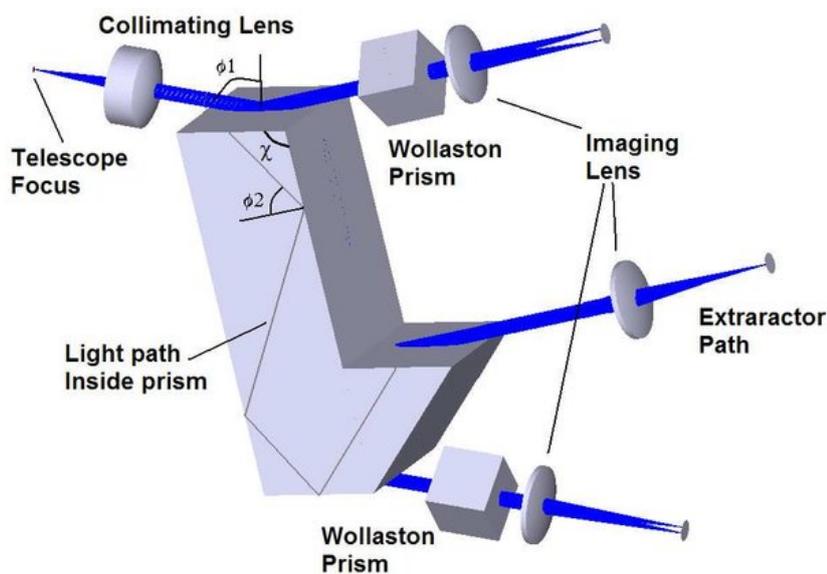


Figura 2.2 Diagrama óptico del polarímetro GASP [29].

Se trata de un polarímetro de división de amplitud (DOAP) que usa dos EMCCD con una resolución temporal de 500 μ s. La importancia de este instrumento es que mide de forma simultánea tanto la polarización circular como la lineal sin ninguna parte móvil. Esto último es lo que hace relevante el GASP así como el GLIP, la ausencia de partes móviles. La principal diferencia que se quiere conseguir en el nuevo polarímetro, como se verá, es una mayor resolución y el uso de una sola CCD por cada banda del espectro, en lugar de dos, como se hace en GASP. Debe notarse que tanto HIPPO como GASP, a pesar de tener resolución temporal inferior a 0,1 s, tienen problemas con la relación señal a ruido (S/N), por lo que se requieren largos tiempos de integración para acumular suficientes cuentas (sobre los 10 s).

2.4.4. Polarimetría de imagen con Polaroid

La forma más simple de analizar la polarización lineal mediante esta técnica es tomando cuatro imágenes para cuatro posiciones de la polaroid, con un giro de 45 ° entre cada una². No obstante, cada imagen se toma por separado y las variaciones en la atmósfera u objeto introducen señales espurias. Es por esto que se usa solo cuando se hacen observaciones estrictamente fotométricas. Este método ha sido usado con el ALFOSC instalado en el NOT del ORM [32, 31].

2.4.5. Polarimetría de imagen con un analizador de doble haz y máscara de enfoque

Utilizando un analizador de doble haz y una máscara de enfoque (*Stripe mask*) se puede solucionar la mayoría de los problemas asociados a una polaroid. Gracias a la máscara de enfoque, se evita el solapamiento de las componentes ortogonales de los dos haces salientes del Wollaston. De esta forma, se puede hacer polarimetría de imagen de objetos extensos. Este es el caso del polarímetro FORS2 [20, 33], instalado en el UT1 del VLT de la ESO (Chile). No obstante, en este instrumento la polarización lineal fuera del eje presenta una gran dependencia del campo, limitando seriamente las observaciones.

2.4.6. Polarimetría de imagen con moduladores de alta frecuencia y CCD de rápida lectura

Un ejemplo del uso de moduladores de alta frecuencia y CCD de lectura rápida es el GPP (*GREGOR Planet Polarimeter* [34]), instalado en el telescopio solar GREGOR del OT (Tenerife), que permite obtener de forma simultánea las imágenes ortogonalmen-

²Aunque para analizar la polarización lineal es suficiente con tomar dos imágenes en dos posiciones de la polaroid, se realizan un total de cuatro para poder determinar los errores asociados [31].

te polarizadas. Utiliza dos EMCCD y moduladores FLC. Utilizando una o dos cámaras, este instrumento, permite determinar todos los parámetros de Stokes. No obstante, requiere un proceso de calibración muy preciso.

2.5. Calibración en la polarimetría

Como se mencionaba al principio, la polarimetría se basa en una comparación relativa de componentes ortogonales de la luz polarizada. Sin embargo, la luz de objetos astronómicos suele estar poco polarizada, por lo que la calibración del sistema resulta imprescindible para poder realizar observaciones de forma correcta [35, 36]. En función del sistema, la técnica utilizada puede variar, pero como en general se dice que la sensibilidad de detección debe ser del orden de ppm (10^{-6}), resulta evidente la importancia de este proceso.

Son cuatro los factores a considerar. Por un lado, la escala de polarización (respuesta proporcionada por el instrumento ante la polarización de la luz incidente), que se realiza mediante un polarizador de alta calidad, como un prisma de Glan, situado frente al polarímetro. Además, se debe calibrar el ángulo, orientando el polarizador de alta calidad en un ángulo conocido a través de fotogramas de referencia. Los prismas de calcita y Wollaston facilitan especialmente este trabajo. También debe considerarse la polarización del propio instrumento, que se puede eliminar mediante giros de 45° de todo el conjunto a lo largo de una vuelta completa. Finalmente, debe eliminarse la polarización espuria generada por el telescopio. Para poder realizarse de forma correcta, debe observarse un conjunto de entre 5 y 20 estrellas (con polarización conocida³) y obtener los parámetros de Stokes que ofrece el telescopio como la media de las medidas (así se elimina incluso la leve polarización introducida por el medio interestelar). Existen pequeñas diferencias entre usar monturas altazimutales y ecuatoriales. Estas últimas ofrecen mejores resultados, en concreto la estación focal Cassegrain es la mejor por evitar los efectos de la reflexión.

Salvo en casos particulares, es suficiente con realizar la calibración con la polarización lineal, puesto que la influencia de la circular es inferior. No obstante, la posible transformación entre polarización lineal y circular en el proceso de recolección de luz puede ser relevante y debe analizarse con cuidado.

Finalmente, las recomendaciones de la ESO se suelen actualizar en talleres de calibración de la instrumentación [37], recogiendo los puntos más importantes en documentos.

³Esto se debe a que estrellas que emitan luz no polarizada son poco probables que existan, puesto que la actividad de la cromosfera ya induce suficiente polarización (intrínseca y variable) como para ser detectable incluso en estrellas normales (estrellas tipo A-G de la secuencia principal.)

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo se va a proceder a describir la metodología seguida durante el proceso de desarrollo del sistema óptico que compone el GLIP. Para realizar el diseño que posteriormente se presentará en los resultados, se ha hecho uso del software comercial OpticStudio® (Zemax).

3.1. Descripción inicial del GLIP

El polarímetro que en este documento se desarrolla se basa en el paradigma del polarímetro de división de amplitud, y el esquema preliminar se muestra en la Figura 3.1. Este instrumento se pretende instalar en el *New Robotic Telescope* o NRT que se está diseñando para ser posteriormente situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en La Palma.

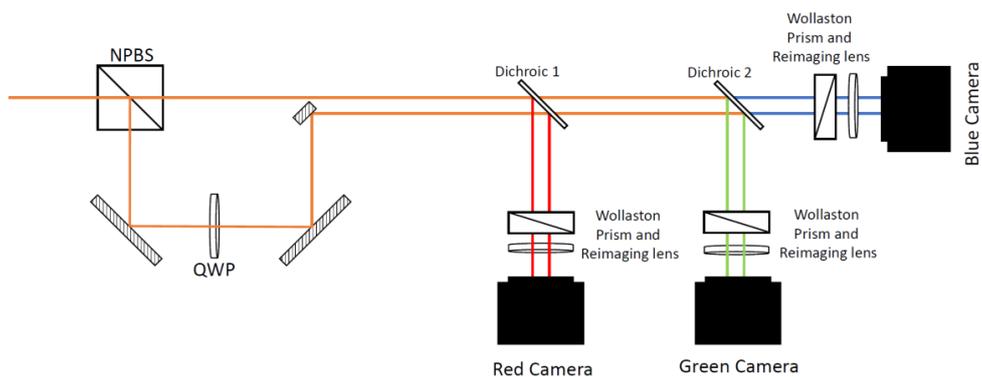


Figura 3.1 Esquema óptico propuesto para el nuevo polarímetro GLIP.

La luz incidente desde el telescopio es primeramente colimada, consiguiendo un haz de unos 8 mm de diámetro. Tras esto, se separa haciendo uso de un divisor de haz

Metodología

no polarizante 50:50 (NPBS). El haz que es desviado de la trayectoria se redirige hacia un QWP (*Quarter Wave Plate*) super-acromático, el cual se encarga de transformar cualquier luz polarizada circularmente en una polarizada de forma lineal. Este camino es después llevado a través de una serie de espejos próximo al haz no desviado.

Estos dos haces colimados ahora pasan a través de los divisores de haz dicróicos que actúan a modo de filtro, desviando solo ciertas longitudes de onda y dejando pasar a través de sí el resto. De esta forma se puede observar en tres bandas ópticas de forma simultánea. La Tabla 3.1 muestra los valores de los anchos de banda utilizados.

Filtro (LSST)	Límite inferior paso bajo (nm)	Límite superior paso bajo (nm)
g	400	552
r	552	691
i	691	818

Tabla 3.1 Los valores de los diferentes pasos de banda de los filtros dicróicos se muestran en esta tabla.

Seguidamente, todos los caminos siguen un mismo proceso. El siguiente paso es utilizar un prisma de Wollaston para conseguir un total de cuatro haces, puesto que los dos incidentes se subdividen a su vez en otros dos. Con un total de 4 haces en cada una de las tres ramas, puede medirse la intensidad de estas y así conseguir determinar de forma precisa y completa el estado de polarización del objeto o los objetos observados.

Las cuatro imágenes son todas recogidas en un mismo detector (con un total de tres) tras pasar por las lentes de re-imagen (*reimaging lens*). En este caso se trata de un CCD del modelo Andor Marana 4.2B-11 - 2048 x 2048 (con diagonal de 32 mm)¹. Esto permite obtener cuatro FOVs (*Field Of View*) de 10 mm o 7.5 minutos de arco en el mismo detector (véase la Figura 3.2). La escala conseguida es entonces de 0,494 arcsec/pix en el detector.

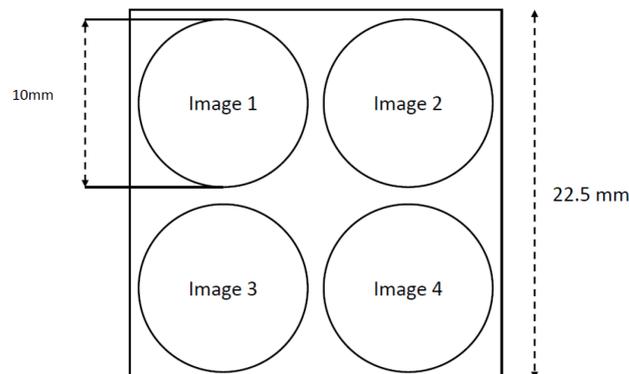


Figura 3.2 Distribución del detector en cuatro áreas, para cada una de las imágenes.

¹<https://andor.oxinst.com/products/scmos-camera-series/marana-scmos>

Las principales ventajas de esta configuración son dos. Por un lado, frente al instrumento predecesor, el GASP, se consiguen las 4 imágenes en un mismo detector, lo cual supone un gran beneficio de cara a analizar las imágenes obtenidas (ahorrándose los problemas de las fluctuaciones en la ganancia de cada detector por separado, por ejemplo). Por otro lado, y la principal ventaja, es el evitar partes móviles en el sistema, que otras tecnologías utilizan. Esto permite conseguir una gran estabilidad (a corto y largo plazo) en las observaciones.

3.2. Requisitos

El objetivo de un instrumento es ser instalado en un telescopio con el fin de obtener mediciones y resultados de carácter científico. Es por ello, que existen ciertos requisitos que deben cumplirse en su desempeño. En este caso, teniéndose en cuenta que se trata de un diseño óptico, los requisitos impuestos son los siguientes:

- **Resolución:** Debe conseguirse una resolución tal que se este limitado por seeing, y no por la óptica, siempre que el valor de este parámetro sea superior a 0,7 segundos de arco, donde este valor es la anchura a media altura o $FWHM^2$.
- **Diámetro del haz:** El haz colimado que entra en el sistema debe tener un diámetro de 8 mm.
- **Campo:** El campo abarcado por el instrumento debe ser de 7,5' (minutos de arco). La distancia focal vendrá impuesta por este valor, así como por la relación entre el diámetro del telescopio y del haz colimado.
- **Número de imágenes:** Deben formarse cuatro imágenes, por lo que el sistema ha de ofrecer un total de 4 haces que acaben focalizando allí donde se posicione el detector.
- **Pasos de banda o passbands:** Se trabaja con un total de 3 regiones del espectro, descritas en la Tabla 3.1. Las imágenes en cada uno de estos filtros debe cumplir con los requisitos anteriores.

Esta lista recoge el conjunto de datos y parámetros que han de conseguirse con el sistema óptico seleccionado finalmente.

No obstante, una vez se trabaja en el diseño óptico, se van observando ciertas limitaciones y es posible que varios de los requisitos no puedan cumplirse, bien por la

²Es una forma de definir la anchura de una función, como aquella en la cual el valor de la amplitud es la mitad del máximo que alcanza.

complejidad o incluso la imposibilidad física. Es el caso del campo. Para ello, se procede a realizar un breve análisis matemático que plantea la relación entre los parámetros básicos que definen un sistema óptico.

3.3. Análisis de primer orden

El instrumento se pretende utilizar en el NRT, que será construido e instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en La Palma. Se trata de un telescopio con unos 4 m de diámetro del espejo primario. Como el haz se colima a 8 mm justo antes de entrar al instrumento, los ángulos se verán incrementados en una magnitud de 500 (4000 mm / 8 mm) dentro del polarímetro (respecto al telescopio).

Por otro lado, el detector se compone de aproximadamente 4 áreas de 1024 x 1024 píxeles, cada uno de 11 micras de tamaño. Si además se tiene en cuenta que el campo requerido es de 7,5', se puede obtener la escala de imagen, tanto en minutos de arco por mm como por píxel. Para ello, se divide el campo entre el número de píxeles, resultando unos 0,44 arcsec/pix, y si se divide por el tamaño de cada píxel, 39,95 arcsec/mm.

La focal por tanto se calcula con la clásica ecuación:

$$f = \frac{206265}{39,95 \cdot 500} = 10,33mm, \quad (3.1)$$

siendo 39,95 la escala de imagen y 500 la relación entre haz de entrada y colimado.

El valor de la focal es verdaderamente pequeño, por lo que será difícil cumplir con este valor. El número f ($f/\#$) define la cantidad de luz que puede entrar al sistema, representando el ángulo del cono máximo incidente. Cuanto menor sea, más complejo será de diseñar, y se dice que el sistema es rápido (pues es más luminoso). En este caso, se tiene $f/1,2$, verdaderamente pequeño.

Para continuar con el análisis, se acude a la ecuación del prisma de Wollaston, en la ecuación 2.3.

En el caso de la calcita, que ofrece el mayor ángulo de separación a la salida, tiene unos índices de refracción $n_o = 1,66$ y $n_e = 1,49$, y con un ángulo de construcción de 45° se tiene que la separación entre los haces, la cual es la máxima que puede conseguirse, es tal que $\alpha = 19,5^\circ$.

Con este valor, se puede obtener la separación entre las dos imágenes obtenidas a partir del haz incidente en el prisma de Wollaston. Para ello, basta con multiplicar la distancia focal por el seno de la mitad del ángulo de separación, $f \cdot \text{sen}(\alpha/2) = 10,33$

3.4 Características de los elementos y proceso de diseño

· $\text{sen}(19,5/2^\circ) = 3,54$ mm. Se observa que este valor es muy pequeño si se quiere conseguir la distribución de la Figura 3.2, donde la separación es superior a 11 mm.

Finalmente, puede volverse a calcular el campo realmente conseguido con esta configuración de parámetros. Debe tenerse en cuenta que este campo está limitado por la distribución de las cuatro áreas en el detector, de tal forma que el campo de cada una de las cuatro imágenes no debe invadir ninguno de los demás. En este sentido, es suficiente con multiplicar la separación entre las imágenes por la escala de imagen. De esta forma, el campo es de $2,36'$ ($3,54 \cdot 39,95/60$).

Si uno realiza un ejercicio de reflexión o varía los parámetros en una tabla de cálculo, se acaba dando cuenta que el campo está geoméricamente limitado. Esto quiere decir que cualquiera que sea la distancia focal, el campo obtenido será siempre el mismo, de $2,36'$.

Por este fenómeno se adelantaba que el campo exigido en los requisitos no puede cumplirse, puesto que está impuesto en $2,36'$, dejando de ser un valor seleccionable. Sin embargo, esto en parte es positivo, ya que el valor tan reducido obtenido anteriormente para la focal (de 10,33 mm) se verá modificado, facilitando así el cumplimiento del resto de requisitos.

Por último, debe plantearse el requisito de resolución. Dependiendo de la focal, para un mismo valor del seeing, el tamaño de la imagen resultante de una fuente puntual se ve modificado. Se calcula tal que dividiendo el valor del seeing (0,7 segundos de arco según el requisito) entre la escala de imagen. Así pues, el tamaño máximo de la imagen para cumplir este requisito es función de la distancia focal (la cual determina la escala de imagen).

Finalmente, cabe añadir qué valor se ha escogido para la distancia focal. Para poder obtener la distribución de imágenes de la Figura 3.2, y teniendo en cuenta que el haz se divide usando un prisma de Wollaston con ángulo máximo entre haces de $19,5^\circ$, el valor de la focal también vendrá dado por los requisitos. Mediante trigonometría simple (la distancia de la imagen entre la focal es el seno de la mitad del ángulo de salida del prisma de Wollaston), y teniendo en cuenta que la distancia del centro de la imagen respecto al centro del detector es $\sqrt{2} \cdot 5,625$ mm (donde 5,625 mm son los 22,5 mm del detector dividido entre 4), se obtiene que la focal debe estar en torno a los 50 mm.

3.4. Características de los elementos y proceso de diseño

Aunque cada uno de los elementos ópticos del sistema (véase la Figura 3.1) tienen diferentes características, la metodología general de diseño sigue un esquema común.

Esto es, empezar con parte de la óptica e ir optimizando a medida que se añaden cada vez más superficies ópticas, hasta obtener el conjunto final.

La optimización se realiza mediante el uso de funciones de mérito definidas por múltiples operandos incluidos en el programa. Las condiciones y definiciones pueden variar ligeramente para cada una de las tres configuraciones existentes, debido a la diferente región del espectro de cada una. El uso de estos operandos debe ir orientado a cumplir con los requisitos impuestos.

3.4.1. Colimador

El diseño del colimador es relativamente sencillo, pues son dos los parámetros fundamentales que deben tenerse en cuenta. Por un lado, tener el menos número de lentes y que el efecto en las aberraciones sea mínimo. Por otro, el conjunto de estos vidrios debe resultar en un haz colimado de unos 8 mm de diámetro. Además, para ahorrar en costes, las lentes deben ser preferentemente comerciales.

3.4.2. NPBS, QWP, divisores de haz dicróicos y prisma Wollaston

Elementos como el QWP, el NPBS o el prisma de Wollaston, al igual que las lentes del colimador, deben ser comerciales. En este caso, no se trata de un conjunto de lentes, sino de una pieza que directamente es suministrada por un proveedor lista para utilizar y con el número de elementos ópticos necesarios. Por ello, es suficiente con ir a los catálogos y seleccionarlos acorde con los parámetros del sistema (longitud de onda, tamaño del haz, aberraciones, coste, ...).

Por esto mismo, en este punto solo se especifican los datos de los elementos que influyen en la explicación subsiguiente. Los elementos seleccionados y sus listas de propiedades se disponen en el Capítulo 4.

El QWP, por ejemplo, se exige que sea súper-acromático.

En cuanto al prisma de Wollaston, se escoge uno cuyos elementos son de calcita, logrando un ángulo de aproximadamente 20° entre los haces de salida. Como es el máximo que puede conseguirse, la distancia focal se escoge de tal forma que las imágenes obtenidas en el detector estén separadas por la distancia necesaria.

3.4.3. Lentes de re-imagen

Este es quizá el punto más crítico del diseño. Se debe conseguir un conjunto de lentes que permitan obtener la resolución requerida. Así mismo, ha de tenerse en cuenta que son cuatro haces los que pasan a través de este sistema óptico, lo que complica aún más el diseño, puesto que no es algo habitual. Las lentes de re-imagen pueden

ser distintas para cada una de las tres ramas (o regiones del espectro seleccionadas), pero en la medida de lo posible deben ser comerciales y minimizar las posibles aberraciones.

Respecto a las aberraciones, mencionar que las más importantes serán la distorsión y la aberración cromática transversal, puesto que los haces no entran de forma paralela al eje óptico sino con un determinado ángulo, como se verá más adelante.

3.5. Trazado de rayos

Antes de comenzar a analizar el diseño y los parámetros que definen el sistema, es conveniente realizar una pequeña introducción o resumen al trazado de rayos. A continuación, se mencionan y desarrollan brevemente los parámetros y características más importantes en esta técnica de la óptica.

Una imagen genérica, donde se muestran las dimensiones principales y valores más importantes del trazado de rayos con una superficie, se muestra en la Figura 3.3.

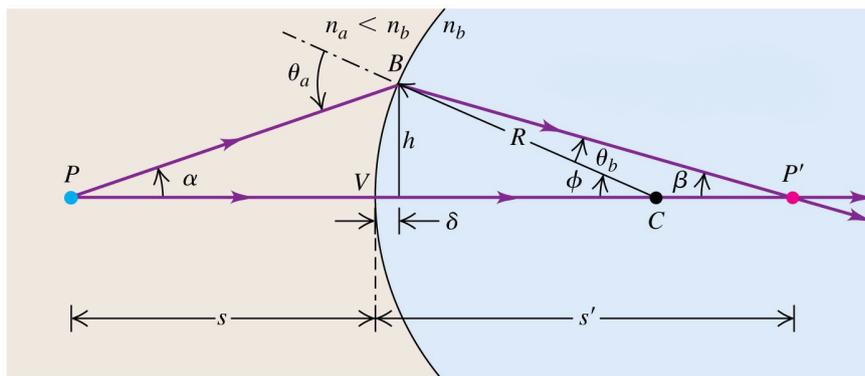


Figura 3.3 Esta imagen muestra la disposición típica de un esquema de trazado de rayos, donde se muestran los parámetros más importantes, partiendo del objeto P y llegando a su imagen P'. El valor de s y s' serán las distancias del objeto y la imagen al vértice de la superficie óptica, respectivamente. Debe tenerse cuidado y prestar especial atención a lo signos de estos parámetros.

En el software comercial que se utiliza para el diseño del polarímetro GLIP, se considera que un radio de curvatura es positivo siempre que el centro de curvatura esté situado a la derecha del vértice de la superficie (convexa en el sentido del movimiento de la luz), como en la Figura 3.3.

En cuanto a la formulación matemática de esta técnica, se basa en la ley de Snell:

$$\sin \Theta_1 \cdot n_1 = \sin \Theta_2 \cdot n_2, \tag{3.2}$$

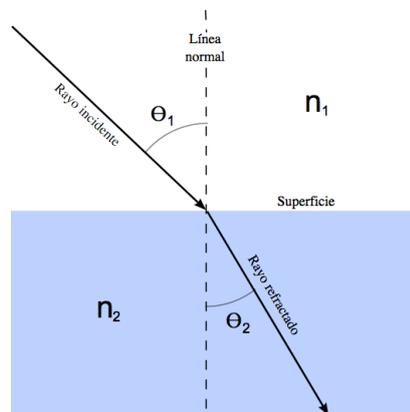


Figura 3.4 Esquema de la ley de Snell, donde se muestra la desviación del rayo incidente al pasar por la superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción.

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios a través de los que pasa el rayo y θ_1 y θ_2 los ángulos de incidencia respecto a la línea normal a la superficie de separación de estos medios. Un esquema de esta configuración se muestra en la Figura 3.4.

Básicamente, el trazado de rayos, podría describirse como la emisión de rayos en forma de líneas hacia la pupila de entrada, normalmente muestréandola de forma uniforme, propagando estos rayos mediante la aplicación de la ecuación de Snell (o una aproximación paraxial de esta) cuando estos atraviesan las superficies ópticas³, y en línea entre cada superficie, hasta llegar al plano focal (o hasta donde se desee llegar). Si se considera una aproximación paraxial, estos rayos focalizarán todos en el mismo punto, mientras que si se consideran aberraciones se obtiene una gráfica denominada diagrama de puntos o *spot diagram*.

También son de gran interés los rayos marginal y principal. El rayo principal (*chief ray*) será aquel que partiendo del extremo del objeto pasa por el centro de la pupila de entrada, mientras que el marginal parte del pie del objeto y pasa por el borde superior de la pupila de entrada. En la Figura 3.5 se muestra un esquema.

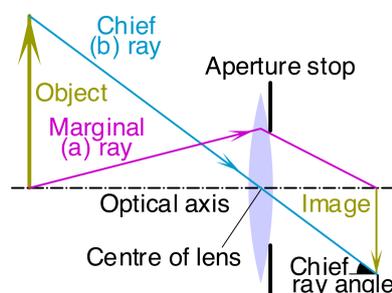


Figura 3.5 Esquema de una lente y un objeto mostrando los rayos principal y marginal.

³Las superficies que separan medios con distinto índice de refracción.

3.5 Trazado de rayos

Los diafragmas y pupilas son parámetros fundamentales en un sistema óptico. El diafragma de apertura es la dimensión del objeto limitante en cuanto al ángulo de entrada de los rayos provenientes desde una fuente puntual situada en el eje óptico (normalmente, depende de la posición del objeto). Por otro lado, la pupila de entrada sería la imagen de la apertura (*stop*) mirada desde el lado del objeto. Finalmente, la pupila de salida es la imagen de la apertura vista desde el lado de la imagen. Por ello, las pupilas de entrada y salida son conjugadas. Si una es objeto, la otra es su imagen.

El diafragma de campo es otro concepto fundamental en el trazado de rayos. Se trata del componente que limita el campo de visión del sistema. Puede ser el propio detector o una apertura situada en el camino óptico.

Además, el valor de la apertura numérica (NA) y el número f ($f/\#$) son parámetros adimensionales que describen el sistema. Estos valores tienen una relación entre sí, tal que $f/\# = 1/2 \cdot NA$.

Otro parámetro útil para describir un sistema óptico es la magnificación, existiendo tres: la transversal, la longitudinal y la angular. La transversal y angular son la inversa la una de la otra.

También se tiene el invariante de Lagrange:

$$y\alpha n = y'\alpha' n', \quad (3.3)$$

donde los parámetros se describen en la Figura 3.6. Esta relación es constante a través de cualquier sistema óptico.

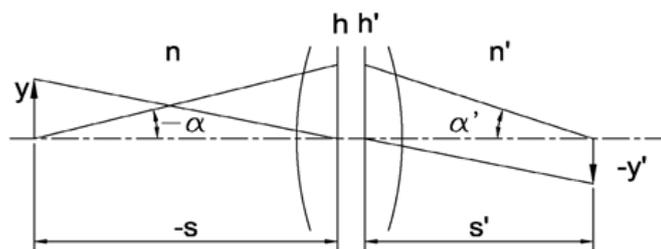


Figura 3.6 Esquema de una lente y un objeto mostrando el invariante de Lagrange.

Más conceptos relevantes pueden ser los espejos cóncavos o los esféricos, con ciertas peculiaridades o reglas especiales. También los sistemas afocales. Estos últimos son aquellos en los que se forma una imagen en el infinito de un objeto en el infinito (típico en prismáticos o telescopios de observación directa).

Finalmente, pueden describirse los puntos y planos cardinales. Un sistema genérico estará descrito por seis puntos cardinales⁴ (2 principales, 2 focales y 2 nodales⁵). Los planos son aquellos que pasan por estos puntos y son perpendiculares al eje óptico, siendo los planos principales, focales y nodales, respectivamente.

3.6. Interfaz de OpticStudio

El programa de diseño óptico OpticStudio[®] de Zemax ofrece múltiples herramientas que permiten desarrollar y optimizar el sistema deseado. En este caso, se pasan a describir los puntos más relevantes utilizados a lo largo del diseño del polarímetro.

3.6.1. Diseño de lentes

Una de las pestañas, llamada *Lens Data*, recoge los valores de los parámetros fundamentales que definen una superficie óptica, como el radio de curvatura. La siguiente columna, por ejemplo, recoge el material de una lente (compuesta por dos superficies ópticas). La Figura 3.7 muestra una imagen de esta pestaña en forma de tabla. Los valores de los parámetros son modificables, e incluso existen diferentes funciones/denominaciones para cada elemento (como puede ser superficie *Standard*, *Paraxial* o *Birefringent*, entre otras), además de un menú desplegable que incluye un mayor número de parámetros que pueden definirse (como pueden ser el giro y descentrado, la apertura, ... Aunque muchos de los parámetros son accesibles también desde la pestaña general).

Además, existe la posibilidad de escoger el estado de un parámetro entre varias opciones. Bien se pueden definir como fijos (no se modificarán por las funciones de mérito y los optimizadores) o bien variables (en este caso, al optimizar serán ajustados por el programa)⁶. Por ejemplo, en la Figura 3.8, la superficie 44 tiene el radio y espesor variables, mientras que la 46 los tiene fijos.

Gracias a esta pestaña, pueden conocerse y definirse los elementos ópticos, por lo que juega un papel indispensable en el diseño del sistema.

3.6.2. Configuraciones

El programa comercial utilizado incluye además el concepto de configuraciones. Gracias a esto, se puede trabajar con más de una de forma simultánea. Un sistema de multi-configuración permite variar valores de los elementos entre configuraciones, incluso añadir, eliminar, modificar o ignorar superficies, giros, materiales, ... En este caso,

⁴De hecho, en un sistema paraxial, basta con los puntos focales y principales para describir el sistema.

⁵En el aire, los puntos nodales y los principales coinciden.

⁶En realidad, la variedad de estados es más extensa, pero con conocer estas dos opciones es suficiente.

3.6 Interfaz de OpticStudio

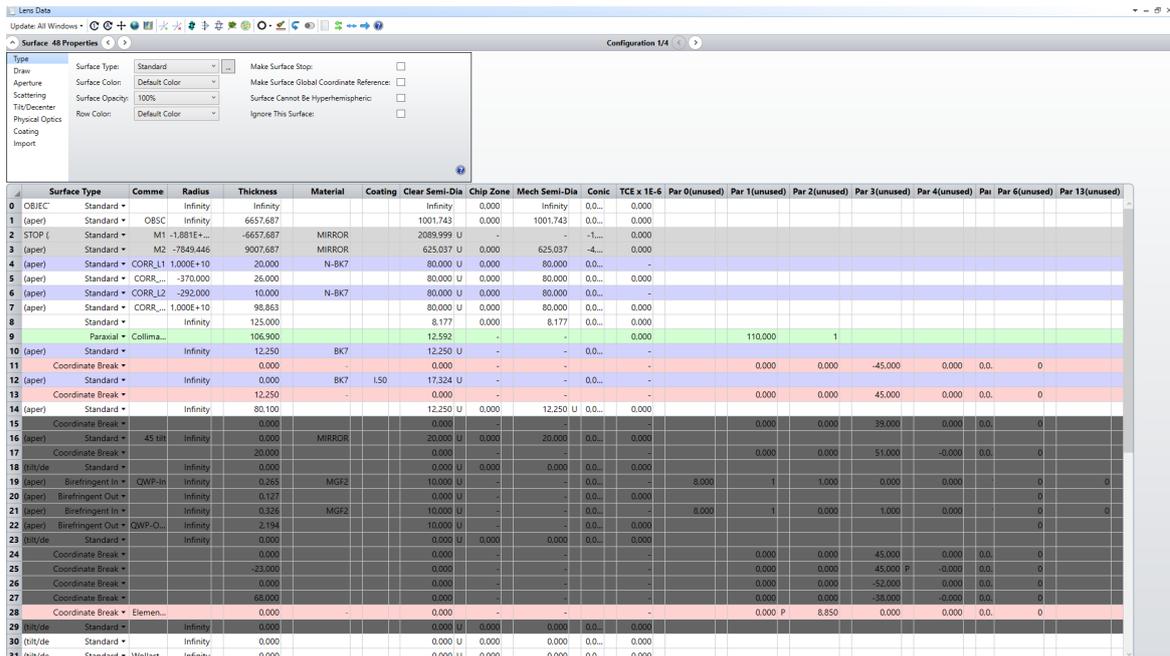


Figura 3.7 Esta imagen muestra la pestaña en forma de tabla donde se recoge la información de las superficies ópticas definidas. En ella se ven un elevado número de parámetros, como el material o el espesor. En función del tipo de superficie, las variables que aparecen serán diferentes. Permite ver los diferentes tipos de superficie, el menú desplegable, superficies ignoradas (en gris oscuro), ... Además, en la parte superior, se observa que se está visualizando la configuración 1 de 4.

	Surface Type	Comme	Radius	Thickness
44 (aper)	Standard ▾	LENS1	108,000 V	10,001 V
45 (aper)	Standard ▾		-143,000 V	15,829 V
46 (aper)	Standard ▾	LENS2	150,000	8,000
47 (aper)	Standard ▾		Infinity V	9,714 V
48 (aper)	Standard ▾	LENS3	50,000 V	10,002 V

Figura 3.8 Visualización del radio y espesor, destacando la ausencia o presencia de la V en el radio y espesor de las superficies. V indica que esta parámetros puede variar en la optimización.

una configuración se considera a cada uno de los cuatro caminos ópticos posibles (los cuatro haces que formarán las imágenes en el detector).

Existen dos puntos de división en cada brazo (i.e. cada uno de los tres filtros). El primero en el NPBS, donde un haz continua su camino sin ser perturbado mientras que el otro es desviado 90°. Este segundo es después redirigido mediante una serie de espejos, pasando así ambos haces a través de un prisma de Wollaston, que dividirá cada uno en dos. Pues bien, cada uno de estos cuatro caminos posibles se define a través de una configuración dentro del programa.

Al igual que las funciones de mérito, la multi-configuración de OpticStudio funciona mediante operandos. La Imagen 3.9 muestra los necesarios para definir al sistema.

The screenshot shows the 'Multi-Configuration Editor' window. At the top, there is a toolbar with various icons and a status bar indicating 'Update: All Windows'. Below the toolbar, there are navigation buttons for 'Operand 2 Properties' and 'Configuration 1/4'. The main area contains a table with the following data:

	Active : 1/4		Config 1*	Config 2	Config 3	Config 4
1	GLSS ▾ 12		BK7	BK7	MIRROR	MIRROR
2	THIC ▾ 13		12,250	12,250	-12,250	-12,250
3	THIC ▾ 14		80,100	80,100 P	-12,000	-12,000 P
4	PRAM ▾ 13/3		45,000	45,000	-45,000	-45,000
5	IGNM ▾ 15/2		1	1	0	0
6	IGNR ▾ 29		1	1	0	0
7	IGNR ▾ 30		0	0	1	1
8	PRAM ▾ 33/1		1,000	0,000	1,000	0,000
9	PRAM ▾ 36/1		0,000	1,000	0,000	1,000

Figura 3.9 La pestaña *Multi-Configurator Editor* permite trabajar de forma simultánea con varias configuraciones. En este caso, cada configuración es uno de los cuatro caminos ópticos de cada una de las cuatro imágenes.

3.6.3. Función de mérito y optimización

La optimización es el centro del proceso de diseño. Gracias a la definición de una función de mérito, se puede hacer entender al programa que es aquello que se desea minimizar o maximizar. En este caso, se deben utilizar una serie de operandos acordes con los requisitos previamente explicados.

Como se ha venido adelantando, se trabaja con cuatro configuraciones y tres regiones del espectro: azul (400-552 nm), verde (552-691 nm) y rojo (691-818 nm).

Debe aclararse que inicialmente se ha trabajado con tres archivos distintos, uno por cada intervalo de longitudes de onda, con el fin de facilitar la optimización. Por ello, faltará incluir los divisores de haz dicróicos. Entre cada brazo (filtro), solo se modifican las longitudes de onda y las lentes utilizadas, pero los demás parámetros permanecen constantes (la focal inclusive).

La lista de operandos de la que dispone OpticStudio es verdaderamente extensa, por ello se mencionan aquí los más relevantes y en el Apéndice C se incluye la función de mérito utilizada al completo.

Para poder optimizar adecuadamente debe diferenciarse cada configuración mediante el comando CONF. Dentro de cada una se definen las longitudes de onda extremas de cada filtro. Esto se hace dentro de los operandos pertinentes en la columna *Wave*. Para minimizar la aberración cromática transversal o *lateral color* se utiliza el comando LACL. Otro control interesante es RSCE, que trata de minimizar el radio del diagrama de puntos de la imagen resultante para la longitud de onda seleccionada. Imprescindible será el operando EFLX, que permite fijar la longitud focal efectiva en la

dirección axial del sistema, que se desea de unos 50 mm para obtener la separación adecuada entre las cuatro imágenes.

Serán de ayuda los operandos MXCG, MNCG, MXCA y MNCA, que imponen un límite máximo (MX-) o mínimo (MN-) al espesor de las superficies, sean estas de vidrio (-G) o de aire (-A).

Como alternativa a RSCE se pueden utilizar los comandos TRCX y TRCY, que en las dos direcciones del plano tratan de minimizar la aberración cromática respecto al centroide de los rayos en el plano imagen.

Además de poder definir de forma individual los operandos de la función de mérito, existe una alternativa: utilizar la opción de *Optimization Wizard*. Esta herramienta ayuda a definir los operandos a través de un menú de múltiples opciones, más sencillo que buscar en una lista muy extensa. La Figura 3.10 muestra el menú con las opciones a rellenar. Una vez seleccionadas las diferentes opciones, genera los operandos asociados a esos objetivos. Esta herramienta y la alternativa manual pueden combinarse para obtenerse la función de mérito deseada.

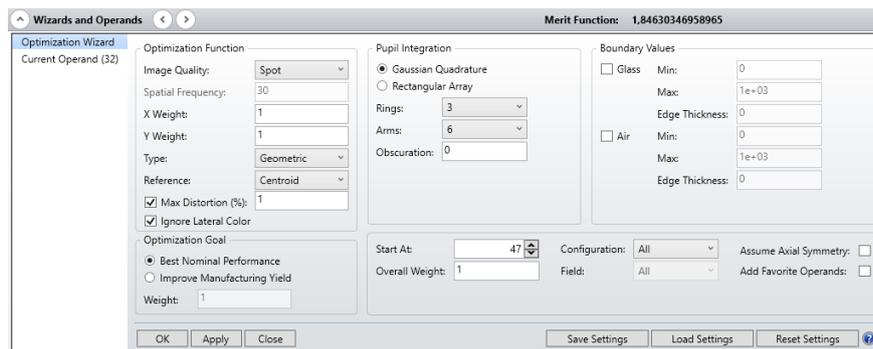


Figura 3.10 La herramienta *Optimization Wizard* ofrece una opción más sencilla de definir los operandos de la función de mérito.

Una vez definida la función de mérito y con las superficies definidas en la pestaña *Lens Data* pasa a optimizarse el sistema. Para ello se dispone de varias herramientas, descritas a continuación de forma breve.

- **Optimize!**: Realiza una optimización rápida y sencilla del sistema. Su ventaja es la rapidez de los resultados, a cambio de una optimización menos refinada y sin modificar todos los parámetros (por ejemplo, no modifica el material).
- **Hammer Current**: Optimiza el sistema de forma más severa. Se parte de un sistema algo optimizado y refina los resultados. En este caso sí se obtiene una optimización de los materiales. A cambio exige mayores potencia y tiempo de computación.

- **Global Search:** Esta herramienta realiza una optimización más exhaustiva. Mediante la minimización de la función de mérito, busca una serie de alternativas que consigan unos resultados óptimos. Es la más exigente de las tres, computacionalmente hablando.
- **Otros:** Existen más herramientas que ayudan a realizar una optimización. Es el caso del *Quick Focus* o enfoque rápido, el *Stock Lens Matching* que ayuda a encontrar lentes comerciales (o combinación de estas) que den unos resultados parecidos dentro de unas tolerancias, y muchas otras, aunque de menor interés en este caso.

El uso de una herramienta u otra (o combinación de estas) depende esencialmente de en qué etapa del proceso de diseño se encuentre uno o de la optimización deseada, así como de la complejidad del sistema. Además, pueden definirse los parámetros de las superficies (radio, espesor, material, ...) como variables o no. En este caso, se combina el uso de una optimización rápida con *Hammer Current* y la búsqueda de lentes comerciales.

3.6.4. Visualización de resultados

De igual forma, el programa utilizado dispone de un gran número de herramientas que permiten analizar los resultados obtenidos con el sistema diseñado. A continuación se proceden a mostrar las utilizadas en el trabajo aquí presentado y qué información ofrecen.

- **Diagramas de puntos:** En realidad es un grupo de herramientas con dos tipos de interfaz, un diagrama propiamente dicho y un archivo de texto asociado, donde dan información del radio geométrico y RMS que circunscribe la imagen conseguida. Todas ellas permiten una personalización en cuanto a la información mostrada, como las longitudes de onda o campos visualizados. En el análisis del grupo de elementos ópticos que componen el polarímetro son tres de estas herramientas las que interesan: *Spot Diagram*, *Footprint Diagram* y *Full Field Spot Diagram*. La Figura 3.11 muestra los tres diagramas a forma de ejemplo. El primer caso permite visualizar la imagen obtenida para cada campo utilizado en el análisis y para varias longitudes de onda (aquí los dos extremos de cada filtro). El segundo muestra las cuatro imágenes sobre el detector y para todo el campo seleccionado. Así, se puede comparar el resultado con la Figura 3.2. Finalmente, el *Full Field Spot Diagram* permite analizar cada una de las cuatro configuraciones/imágenes, pudiendo analizarse el campo real aprovechado y qué tamaño tiene este en el detector.

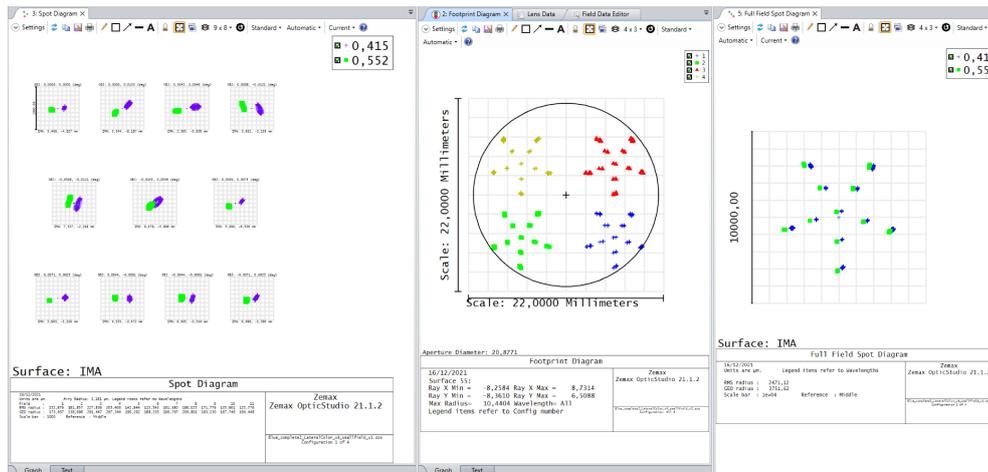


Figura 3.11 Las herramientas aquí mostradas permiten analizar de formas distintas el diagrama de puntos del sistema diseñado.

- **3D Layout:** Esta herramienta muestra en un esquema en tres dimensiones las superficies y elementos ópticos del diseño utilizado, junto con las configuraciones, longitudes de onda, campos, ... Permite, de nuevo, una amplia configuración sobre los elementos a visualizar y cómo se hace. En la Figura 3.12 se muestra un ejemplo.

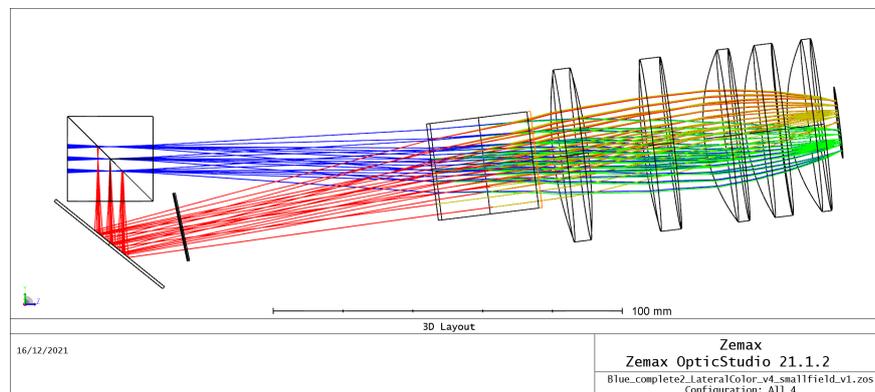


Figura 3.12 Esta herramienta permite visualizar el esquema 3D del conjunto de lentes escogido. En este caso, se muestra un ejemplo visto sobre el plano Y-Z.

- **Aberraciones:** De nuevo, se trata de un conjunto de herramientas que analizan las aberraciones presentes en el sistema. Mediante una serie de diagramas uno puede visualizar qué aberraciones son más importantes, así como cuánto y cómo influyen. En el caso del diagrama de Seidel (*Seidel Diagram*, en la Figura 3.13) se visualiza en un diagrama de barras el valor de cada aberración en cada uno de los elementos ópticos, así como del conjunto. De esta forma, puede visualizarse rápidamente en qué punto se encuentra el diseño en cuanto a aberraciones, así como las lentes que más influyen.

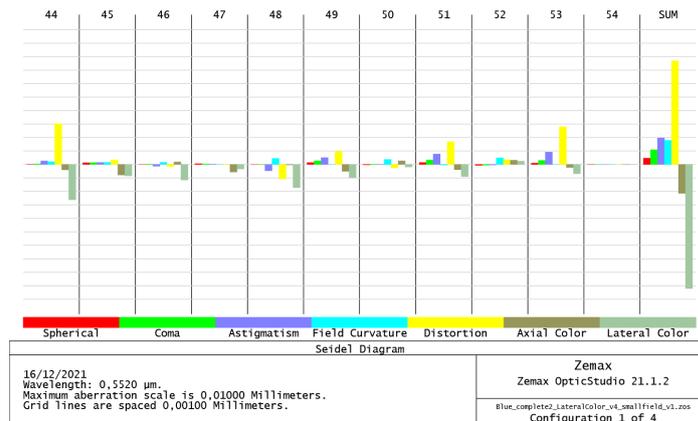


Figura 3.13 El diagrama de Seidel permite visualizar de forma rápida el valor de las diferentes aberraciones tanto en el sistema en su conjunto como el efecto de cada superficie.

3.6.5. Otros

Finalmente, existe un elevado número de herramientas y pestañas que ofrecen información adicional o permiten definir parámetros del sistema. Es el caso del *Field Data Editor*, mostrado en la Figura 3.14. Esta pestaña permite editar el campo utilizado y la forma de visualizarlo.

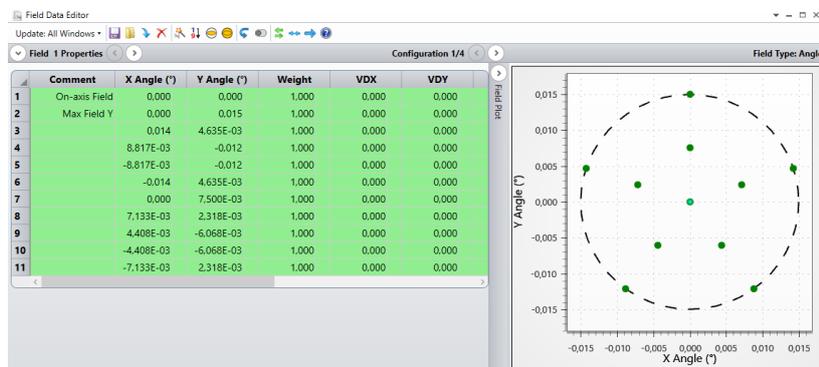


Figura 3.14 Esta herramienta permite definir el campo del sistema así como la forma de visualizarlo y analizarlo. Esta imagen muestra un ejemplo.

La sección de polarización también será imprescindible siempre que se quiera visualizar el efecto de la óptica en este parámetro o el estado de polarización de la luz que compone cada una de las imágenes. Dispone de varias herramientas, donde se puede escoger qué quiere visualizarse y cómo.

También hay pestañas dedicadas a las longitudes de onda (los extremos en cada filtro), la apertura o haz de entrada al sistema, los catálogos de materiales utilizados, ... Siempre útiles para definir adecuadamente el diseño.

3.7. Principales problemas y elementos críticos

Se ha decidido dedicar un breve apartado a remarcar aquellos puntos, elementos o partes más importantes y críticas que se han encontrado en el sistema, antes de mostrar y desarrollar el diseño final y los resultados obtenidos.

La principal dificultad que presenta la configuración mostrada es el hecho de tener cuatro haces diferentes que deben pasar por un mismo grupo de lentes y formar cuatro imágenes distintas. Esto se suma a los exigentes requisitos de calidad, complicando el diseño acorde a estas características. Esta problemática se intensifica notablemente en el rango del espectro que se ha denominado como azul, aquel con menor longitud de onda. Esto se debe a que las mayores aberraciones presentes son la distorsión y la cromática transversal.

El resto de elementos ópticos tienen cierto grado de dificultad, pues deben distorsionar mínimamente los haces con aberraciones despreciables. No obstante, su impacto es significativamente menor, puesto que en el resto del sistema se trata de un solo haz que pasa de forma paralela (e incluso coincidente) al eje óptico de la superficie.

De esta forma, el diseño es especialmente complicado en el azul y debe centrarse en lograr atravesar el grupo de lentes lo más simétricamente posible en los cuatro haces, tratando de minimizar tanto la distorsión como la aberración cromática transversal.

También puede añadirse que el primer desvío y reconducción del haz inferior del sistema, aquel que pasa a través del QWP y una serie de espejos, puede diseñarse de múltiples formas. Una opción es el uso clásico de 3 espejos a 45° o tan solo el uso de uno tras pasar por el NPBS. El uso de uno u otro dependerá del espacio disponible y las aberraciones asociadas. En este caso se ha optado por la segunda opción, que permite compactar el sistema y simplificarlo.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo está destinado a recoger el diseño finalmente alcanzado. Se describirán los parámetros geométricos y ópticos que lo definen (el *Lens Data* obtenido se recoge en el Apéndice D), así como los resultados que ofrece, pudiendo valorar la bondad del sistema.

4.1. Descripción general del sistema óptico

El esquema general del sistema ya se adelantaba previamente. No obstante, el diseño realizado mediante OpticStudio ha de ser más detallado y realista, incluyéndose, por ejemplo, un colimador o los elementos ópticos del telescopio en el que quiere incluirse, el futuro NRT. Todo esto se introduce en el programa utilizado para el diseño de todos los elementos del polarímetro.

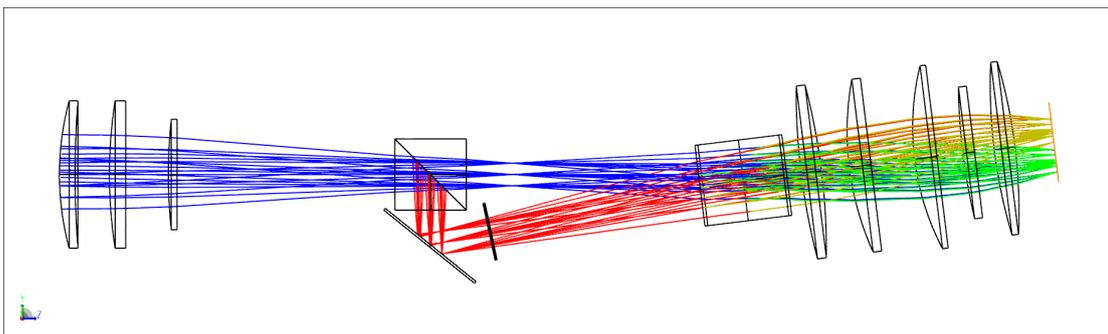


Figura 4.1 Esquema óptico del sistema completo diseñado para el GLIP, desde el colimador (a la izquierda) hasta el detector (a la derecha) para el filtro r . A fin de facilitar la comprensión del recorrido de la luz por el instrumento, se incluye una serie de rayos. Los colores son según las 4 configuraciones.

La Figura 4.1, incluye una imagen del conjunto final para una de las longitudes de onda omitiendo el telescopio (por claridad). Sin embargo, en la Figura 4.2 sí se incluye el diseño del telescopio.

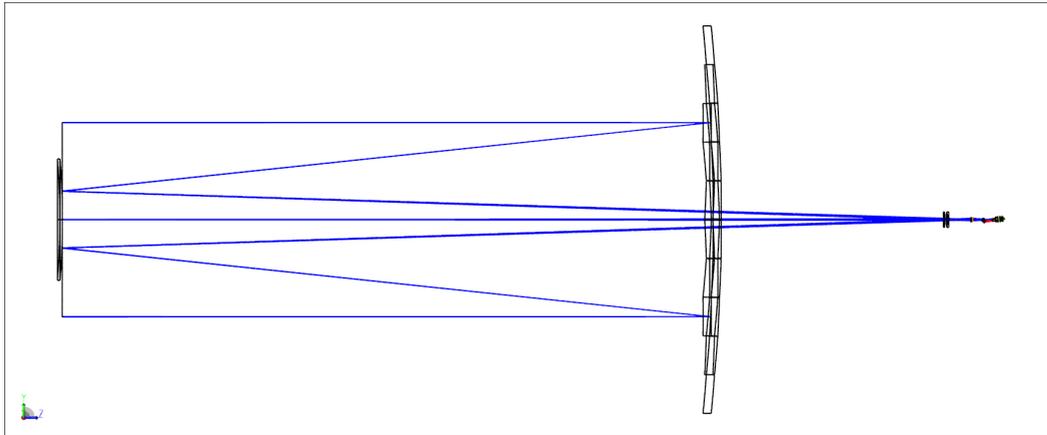


Figura 4.2 Esquema óptico del conjunto instrumento GLIP más telescopio NRT. Se incluyen algunos rayos para comprender el recorrido que estos realizan a través de la óptica.

4.2. Descripción detallada del sistema óptico

En este documento, se ha optado por trabajar con tres archivos diferentes, uno para cada longitud de onda. Es decir, no se incluyen los divisores de haz dicróicos, a fin de facilitar la optimización que debe realizar el software. Además, estos elementos no introducen grandes efectos de aberración en los sistemas, al estar situados en el espacio colimado.

4.2.1. Colimador

El colimador será un grupo de lentes que han de generar un haz colimado del diámetro deseado (8mm) en base al que proviene del telescopio, con el mínimo efecto en las aberraciones. Por ello, la selección de radios de curvatura moderados, lentes relativamente delgadas y el menor número de superficies serán algunas de las decisiones que marquen el diseño final de este elemento. Este elemento será común para todas las longitudes de onda, pues los divisores de haz dicróicos se situarán en el espacio colimado (tras estas lentes).

El proceso es sencillo. Basta con situar dos o tres lentes inicialmente en el programa, tras los elementos ópticos del telescopio, y con la función de mérito adecuada lograr este haz colimado. Una vez se está satisfecho con el resultado obtenido (materiales, radios de curvatura, número de elementos mínimo posible, ...) se utiliza la herramienta de búsqueda de lentes en catálogos y se obtienen las más adecuadas. El resultado se muestra tanto en la Figura 4.3 como en la Tabla 4.1.

4.2 Descripción detallada del sistema óptico

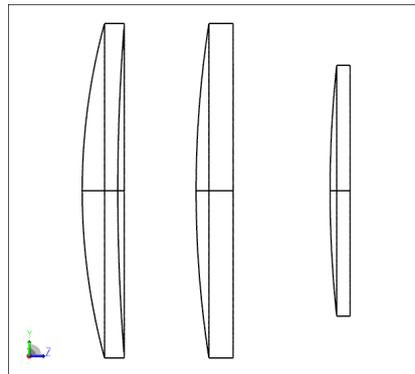


Figura 4.3 Esquema óptico de las lentes que componen el colimador del sistema, visto de perfil.

Nombre lente	Radios de curvatura (mm)	Espesor y separación (mm)	Material
LE4984	97,61/327,59	5,36 y 11,8	F_SILICA
110-5524E	167,3/Plana	5,6 y 14,6	CAF2
110-0421E	181,6/Plana	3 y 74,7	N-BK7

Tabla 4.1 Esta tabla recoge las lentes comerciales dispuestas en la Figura 4.3. De arriba abajo en la tabla corresponde de izquierda a derecha en la figura. El nombre comercial es la primera columna, seguida de los radios de curvatura de entrada y salida (plana se corresponde a radio infinito), respectivamente, en tercer lugar el espesor de la lente y el espacio detrás de esta hasta la siguiente, y finalmente el material.

4.2.2. Elementos de división y polarización

Todos los componentes (de momento excluyendo las lentes de re-imagen) han de ser comerciales. Por ello, no se utiliza la optimización ni diseño de lentes, si no que se acude a los catálogos de los fabricantes buscando aquellos elementos ópticos que cumplan los requisitos establecidos. Serán el NPBS, el QWP y el Wollaston. La Tabla 4.2 recoge estos elementos.

Elemento	NPBS	QWP	Prisma de Wollaston
Denominación y proveedor	BS013 BS014 (Thorlabs)	AQWP10M-580 (Thorlabs)	PWK 20.25 (B-Halle)
Longitudes de onda	400-700 nm 700-1100 nm	350-850 nm	300-2200 nm
Dimensiones	Apertura 25,4 mm	Apertura superior a 22 mm	20° de separación 24,5 mm de apertura
Materiales	N-BK7	Zafiro, cuarzo, ...	Calcita

Tabla 4.2 Esta tabla recoge los valores más relevantes del NPBS, el QWP y el Wollaston. En cada uno de los brazos (correspondientes a los 3 anchos de banda) se dispondrá uno de cada. En el caso del NPBS, existirán dos tipos, el BS013 irá en los filtros g y r, mientras que el BS014 será para el filtro i. Esto se debe a longitudes de onda compatibles.

Resultados

4.2.3. Lentes de re-imagen

El grupo de lentes que antecede al detector es la parte más crítica y exigente del polarímetro. Como se adelantaba, su función es focalizar los cuatro haces, previamente divididos, en el detector, respetando tanto cada una de las áreas marcadas inicialmente, como los requisitos de resolución y de campo. Por ello, se torna necesario utilizar varias herramientas de optimización (previamente descritas). El número de superficies ópticas, los materiales, espesores y demás parámetros, deben estar optimizados para cada uno de los tres anchos de banda, por lo que existirán tres grupos de lentes distintos. Las lentes deben ser preferentemente comerciales.

Procediendo de la forma descrita, se obtienen los resultados de la Tabla 4.3 y la Figura 4.4 para los filtros i (691 a 818 nm) y r (552 a 691 nm). La única diferencia entre estos filtros es la distancia entre la última superficie óptica y el detector, para acomodar la imagen en el foco de forma adecuada. Por otro lado, la Tabla 4.4 y la Figura 4.5 recoge la descripción del tren de lentes para el filtro g (de 400 a 552 nm).

La focal es de 50,75 mm para verde y rojo, mientras que son 49,6 mm para el azul.

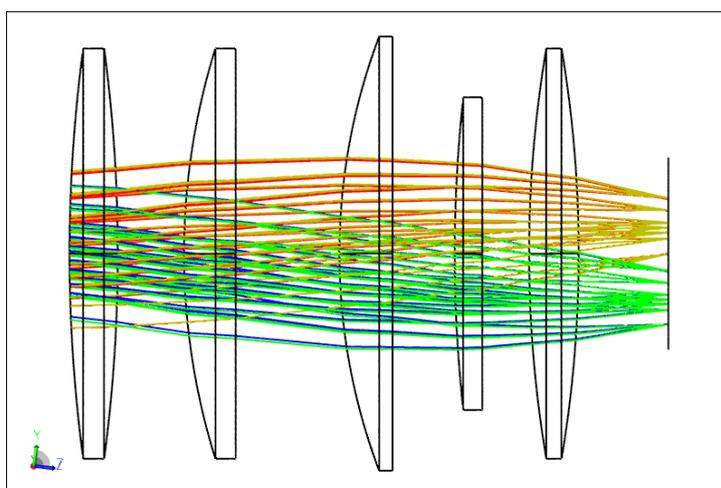


Figura 4.4 Esquema óptico de las lentes de re-imagen en el caso del filtro i y del filtro r. La última superficie, vertical y plana, se corresponde con el detector.

Nombre lente	Radios de curvatura (mm)	Espesor y separación (mm)	Material
SLB-60B-220P	228,36/-228,36	7 y 9,63	S-BSL7
SLSQ-60-220P	101,200/Plana	7,5 y 15	SILICA
L-PCX336	90,319/Plana	7,7 y 9	N-BK7
39540	210,4/Plana	4 y 6,8	ZNSE
L-BCX249	181,818/-181,818	7,2 y 14/13,4	B270

Tabla 4.3 Esta tabla recoge las lentes comerciales dispuestas en la Figura 4.4, de arriba abajo en la tabla corresponde de izquierda a derecha en la figura. Nótese que en la última lente, la separación es hasta el detector, y posee dos valores, uno para el filtro i y otro para el r, respectivamente.

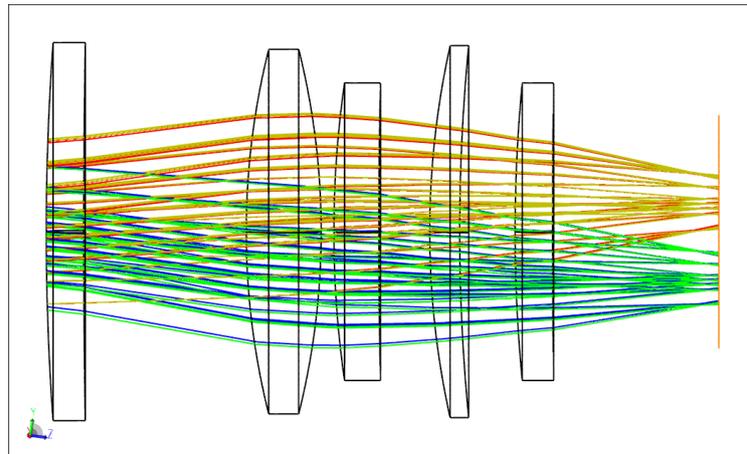


Figura 4.5 Esquema óptico de las lentes de re-imagen en el caso del filtro g. La última superficie, vertical y plana, se corresponde con el detector.

Nombre lente	Radios de curvatura (mm)	Espesor y separación (mm)	Material
LE4822	356,69/1580,24	5 y 21,7	F_SILICA
32980	101,63/-101,63	10 y 1,7	N-BK7
OBF_4_200	141,25/875,36	6 y 6,8	SFL57
43-3847	116/261,2	4 y 7,4	BK7
OBF_4_300	211,35/1314	5 y 22,2	SFL57

Tabla 4.4 Esta tabla recoge las lentes comerciales dispuestas en la Figura 4.5, de arriba abajo en la tabla corresponde de izquierda a derecha en la figura. Los radios de curvatura se corresponden con los de entrada y salida, respectivamente. En la última lente, la separación es hasta el detector.

Al tratarse todo de elementos comerciales, puede acudir a los catálogos o contactar con los proveedores y hacer un presupuesto. El total, sumando el precio de todas las lentes y elementos ópticos de las tres ramas, asciende a 16.700 € (aproximadamente).

4.3. Resultados y análisis

Para comprender correctamente los resultados y el análisis que se procede a realizar, es imprescindible comprender que se tienen tres detectores, uno por cada longitud de onda (denominadas de forma fácil como azul, verde y rojo), y cada uno recoge cuatro imágenes, cada una de las configuraciones descritas. De esta forma, se torna necesario, con el objetivo de comprender adecuadamente el sistema, analizar cada una de las situaciones mencionadas.

4.3.1. Diagrama de puntos

El diagrama de puntos permite analizar cuan buena es la óptica utilizada en el polarímetro. Idealmente, es decir, un telescopio y un instrumento perfectos, focalizarían

Resultados

el haz al completo en un solo punto. Sin embargo, existe una cierta dispersión y la imagen tendrá un cierto tamaño y geometría. A través de los requisitos, puede establecerse el máximo tamaño que debería tener este diagrama de puntos. Al imponerse que el sistema no esté limitado por la óptica cuando el seeing sea superior (es decir, peores condiciones del cielo) a 0,7 segundos de arco, y realizando los cálculos se llega a un resultado tal que el radio de una circunferencia que abarque la imagen al completo debe ser como máximo de $43 \mu\text{m}$, cuando la focal es de unos 50 mm.

Filtro i: de 691 a 818 nm

Se comienza analizando el filtro o ancho de banda menos energético, denominado como rojo. Tanto en esta ocasión como para el resto de casos que se verán posteriormente, se distinguen dos grupos de configuraciones. De las cuatro existentes (los cuatro haces conseguidos desde el original), dos se comportarán peor¹, es decir, la imagen ofrecida tendrá peor resolución. Serán las que marquen la bondad del sistema, mientras que las dos mejores configuraciones siempre cumplirán cuando las anteriores lo hagan. Se explicarán brevemente debido a su interés, pero se valorará el sistema según las dos peores imágenes de las cuatro obtenidas.

Antes de entrar en detalle, también es conveniente mencionar cómo se representa el campo. Este se hace mediante sendos puntos a diferentes ángulos. Se realiza a través de la herramienta explicada en el punto 3.6.5. En forma de estrella de cinco puntas y con dos filas de puntos, se introduce el campo máximo. Resulta como se muestra en la Figura 3.14, con un campo máximo de algo más de 2 minutos de arco ($0 \pm 0,017^\circ$, del máximo geométrico explicado anteriormente de $\pm 0,019^\circ$ o 2,36 minutos de arco). Será así en todos los casos, no solo en el filtro rojo.

Ahora sí, puede observarse en la Figura 4.6 el resultado para la peor de las configuraciones y para los distintos puntos del campo observado. Prestando atención al primer punto, el central (será la referencia y por lo general el mejor punto²) se observa que el radio RMS es de unas 39 micras³, cifra que se corresponde con apenas 0,64 segundos de arco⁴. Por ello, se admite el requisito como cumplido para esta configuración. La mejor ofrece una mancha de 32 micras de radio o 0,52 segundos de arco. En los extremos del campo (puntos del 2 al 6), no obstante, se llega a valores de hasta 77 micras (aproximadamente 1,25 segundos de arco), fuera del requisito. Sin embargo,

¹Las dos peores configuraciones serán siempre la 1 y 3, mientras que las mejores la 2 y la 4. En cada grupo, no habrá mucha diferencia de una configuración a otra.

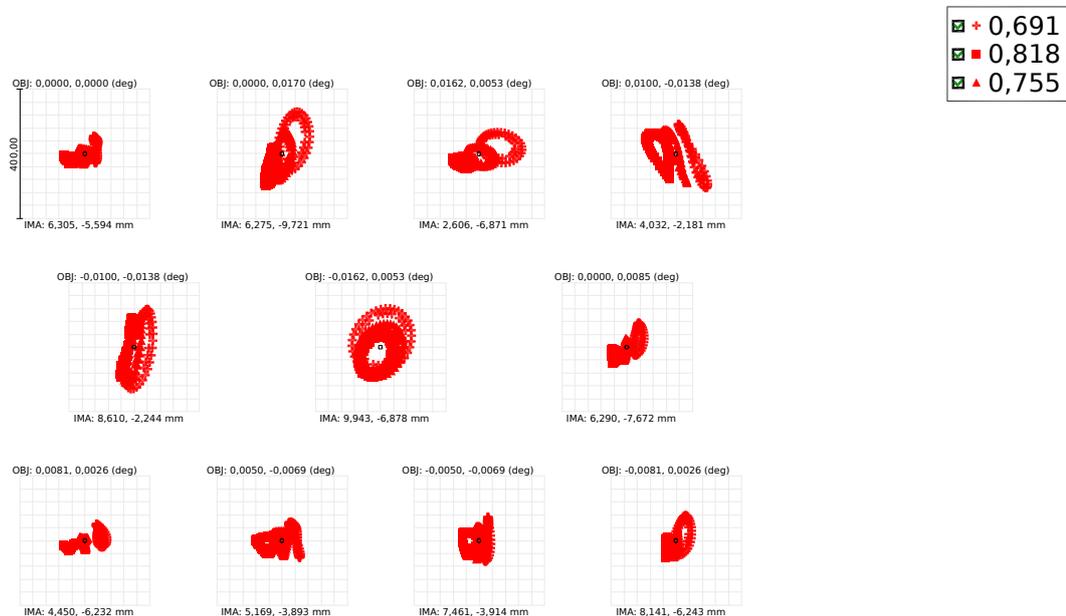
²Se dice por lo general ya que otros puntos del campo pueden dar mejor resultado debido a que los haces llevan cierto ángulo respecto al eje óptico del sistema.

³Hay varias formas de definir el radio RMS en Zemax, en este caso se hace como la distancia al centroide.

⁴Para pasar de tamaño lineal a angular se utiliza la escala de placa y se hace mediante el diámetro, mientras que el dato del diagrama de puntos es el radio. Debe tenerse cuidado con esto.

4.3 Resultados y análisis

este valor no es excesivamente elevado si uno tiene en cuenta que se está en el límite del campo, al borde del detector. En la parte central (punto 1), incluso la segunda fila (del punto 7 al 11) de puntos, se cumple con los resultados.



Surface: IMA

Spot Diagram	
18/02/2022 Units are μm . Airy Radius: 5,727 μm . Legend items refer to Wavelengths Field : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 RMS radius : 39,033 69,624 63,615 73,122 75,700 76,780 43,639 44,326 47,255 43,745 40,848 GEO radius : 63,839 140,040 133,724 141,679 129,910 125,318 84,314 68,583 77,219 77,984 84,223 Scale bar : 400 Reference : Centroid	Zemax Zemax OpticStudio 21.1.2
Red_complete2_LateralColor_5_SLM_SLM.ZOS Configuration 1 of 4	

Figura 4.6 Diagrama de puntos para los puntos del campo definidos, en el filtro i. Arriba a la izquierda se sitúa el punto central. Se muestran tres grupos de manchas, las longitudes de onda de los extremos del filtro, así como la central, representadas en la leyenda. En el pie de la figura se ofrecen valores, donde destaca el *RMS radius*.

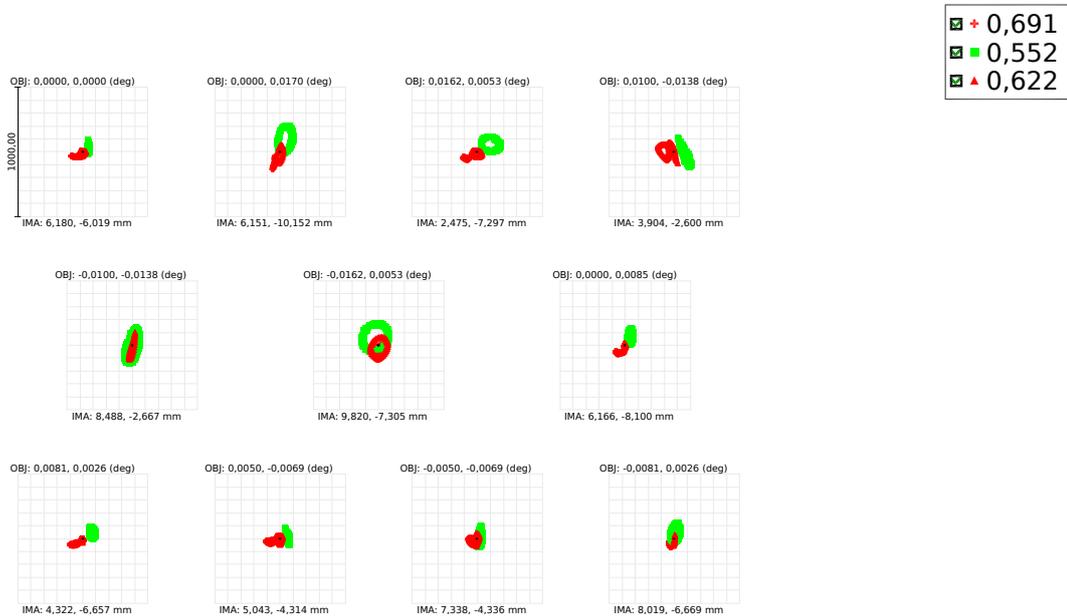
Filtro r: de 552 a 691 nm

El análisis a realizar para el ancho de banda intermedio (filtro r o verde) es exactamente el mismo. De esta forma, se puede acudir directamente a la Figura 4.7.

Se observa como, para el punto del campo central, el radio máximo es de 57 micras o 0,93 segundos de arco, fuera del límite establecido para la peor configuración. En los extremos del campo, se llega hasta las 100 micras (1,63 segundos de arco). La mejor de las configuraciones tendrá un diagrama de puntos de 49 micras, es decir 0,8 segundos de arco, un resultado aceptable.

Resultados

Con un pequeño giro del tren de lentes de 1° , se puede homogeneizar el resultado entre configuraciones, obteniéndose valores del radio RMS de entre 52 y 55 micras y de 0,85 a 0,9 segundos de arco. Esto mejora ligeramente el sistema.



Surface: IMA

Spot Diagram	
18/02/2022 Units are μm . Airy Radius: 5,727 μm . Legend items refer to Wavelengths Field : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 RMS radius : 57,067 100,460 99,246 90,317 79,130 91,008 70,282 72,819 64,155 51,024 55,931 GEO radius : 101,303 211,115 196,466 179,020 151,449 170,617 138,487 117,640 109,231 104,509 124,619 Scale bar : 1000 Reference : Centroid	Zemax Zemax OpticStudio 21.1.2 Configuration 1 of 4

Figura 4.7 Diagrama de puntos del filtro verde para los puntos del campo definidos. Arriba a la izquierda se sitúa el punto central. Se muestran tres grupos de manchas, para las longitudes de onda central y extremas del filtro. En el pie de la figura se ofrecen valores, donde destaca el *RMS radius*.

Filtro g: de 400 a 552 nm

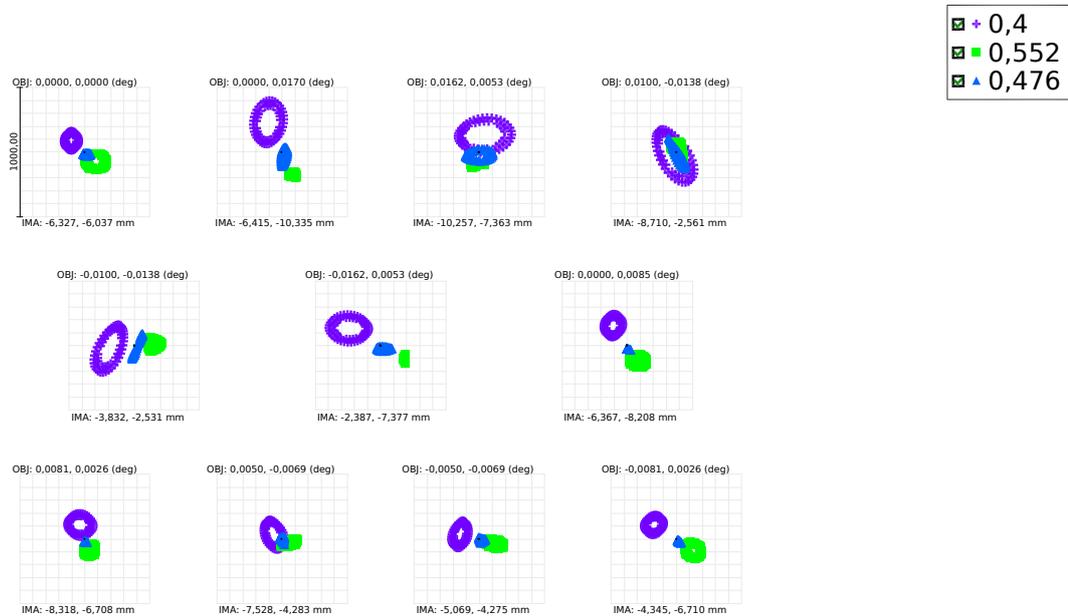
Finalmente, este mismo proceso que permite determinar la bondad del sistema, se realiza para el rango de frecuencias más energéticas, el denominado filtro g o azul.

Si se hace para el tren de lentes en línea con el prisma de Wollaston (sin ángulo, como el caso inicial), en la peor de las configuraciones se alcanza un radio en el centro del campo de hasta 136 micras, claramente fuera de los requisitos. Este resultado se traduce en un sistema que estará limitado por difracción siempre que el seeing sea mejor de 2,2 segundos de arco (un mejor seeing significa un menor ángulo).

En la mejor de las configuraciones, este efecto se ve claramente mitigado. El radio RMS del diagrama de puntos en el centro del campo es de 102 micras o 1,66 segundos

4.3 Resultados y análisis

de arco. Está fuera del requisito, pero se trata de un resultado significativamente mejor. Por otro lado, si se gira un ángulo de $2,5^\circ$ el tren de lentes situado tras el prisma, puede homogeneizarse el resultado entre configuraciones. De esta forma, se obtiene el diagrama de puntos de la Figura 4.8.



Surface: IMA

Spot Diagram	
18/02/2022 Units are μm . Airy Radius: 3,519 μm . Legend items refer to Wavelengths Field : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 RMS radius : 119,118 204,327 145,745 115,925 168,839 215,366 150,735 105,734 85,690 126,998 160,203 GEO radius : 199,348 411,955 305,713 247,467 343,634 422,515 266,828 204,839 178,934 209,650 270,754 Scale bar : 1000 Reference : Centroid	Zemax Zemax OpticStudio 21.1.2 Blue_comple2_LateralColor_5_SLM_SLM.ZOS Configuration 2 of 4

Figura 4.8 Esta figura representa el diagrama de puntos para el campo definido en el filtro g. Arriba a la izquierda se sitúa el punto central del campo. Los tres colores de las manchas representan las longitudes de onda extremas y central del filtro. En el pie de la figura se presentan los resultados, como el valor del *RMS radius*.

Sin más que visualizar los resultados, se observan unos valores de unas 120 micras en el centro del campo para las cuatro imágenes, es decir, 1,96 segundos de arco. En el límite del campo, el valor del radio RMS asciende a 215 micras, lo que se traduce en una mancha de 3,5 segundos de arco.

Aunque se sigue estando lejos del requisito, el efecto del giro es notable y se obtiene un resultado claramente más positivo. De hecho, en algunos puntos del campo, se desciende hasta 1,4 segundos de arco (86 micras de radio RMS).

Puede realizarse un análisis más profundo si se superponen las curvas de transmisión del filtro y la eficiencia cuántica del detector. En general, estas curvas se comportan peor en los extremos. En la zona de los 400 nm, ambas se solapan. Esto quiere decir

Resultados

que, hasta aproximadamente los 420 nm, la combinación de ambos valores no supera el 60 %. Esto se traduce en que solo 60 electrones serán excitados de cada 100 fotones incidentes. Si se establece la frontera de sensibilidad admisible del sistema en este porcentaje, basta con analizar el diagrama de puntos entre 420 y 552 nm, pues por debajo de 420 nm hay una respuesta insuficiente por parte del detector. En este caso, el diagrama de puntos pasa a tener un tamaño angular de 1,56 (en vez de 1,96) segundos de arco, un resultado mucho más positivo.

4.3.2. Aberraciones

Para analizar las aberraciones se representa en la Figura 4.9 el diagrama de Seidel. Puede apreciarse que la mayor fuente de aberraciones son la distorsión y la aberración cromática transversal (también conocida como *lateral color* en inglés). Teniendo esto en cuenta, puede mejorarse el sistema minimizando estas aberraciones.

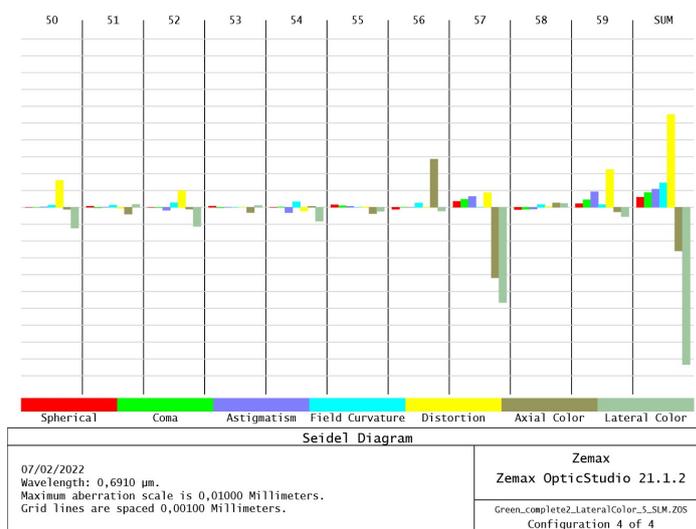


Figura 4.9 Diagrama de Seidel para las superficies (entrada y salida) de las lentes de re-imagen del filtro r. El orden es igual que en las tablas y los esquemas ópticos, de izquierda a derecha avanza la luz y se dirige hacia el detector. Mediante un diagrama de barras pueden compararse las distintas aberraciones, tanto en el conjunto como en cada superficie óptica.

Para los otros dos anchos de banda, las aberraciones más significativas son las mismas, aunque la distribución de estas a lo largo de las superficies, así como la suma total, no serán iguales⁵.

4.3.3. Detector

Finalmente, será conveniente comprobar que las imágenes y regiones del detector se cumplen tal y como se exigía en los requisitos. Esto se muestra en la Figura 4.10.

⁵Ni si quiera serán las mismas aberraciones para los filtros i y r, puesto que estas aberraciones dependen de la longitud de onda, variando incluso dentro de un mismo filtro.

4.3 Resultados y análisis

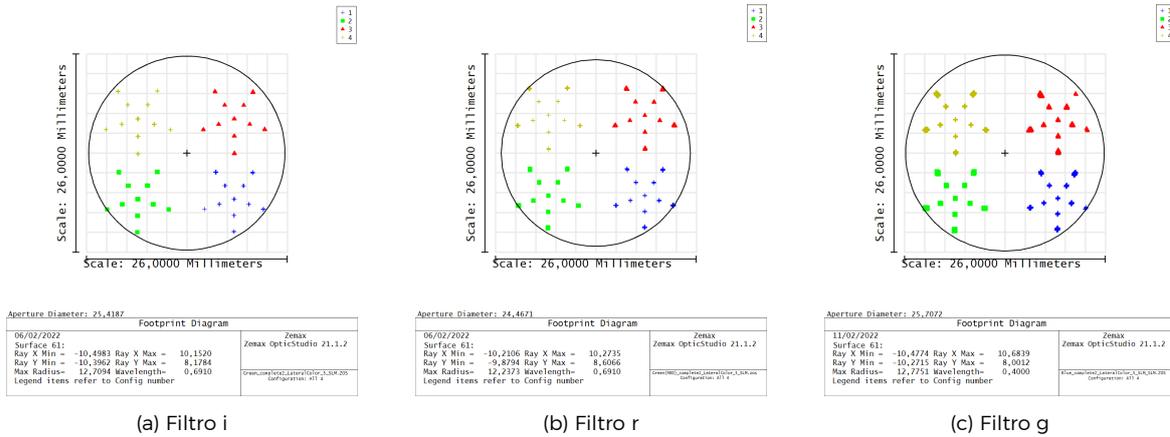
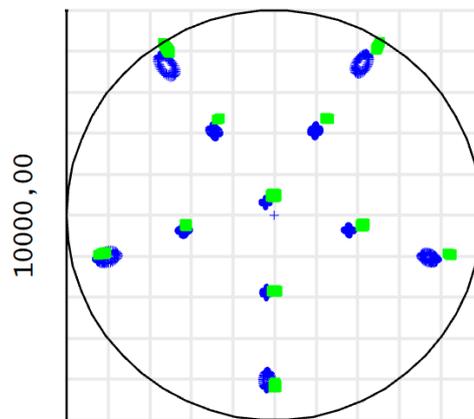


Figura 4.10 Diagrama de puntos de todas las configuraciones y todos los puntos del campo para cada uno de los tres filtros. Permite apreciar las cuatro regiones de imagen necesarias en el detector, las cuales permitirán determinar la polarización del objeto observado.

Se observa que el ancho y alto del detector se respeta, obteniéndose cuatro imágenes en cuatro regiones del detector. Visualizando cada una de estas cuatro áreas (en la Figura 4.11), puede observarse que su diámetro es de 9,97 milímetros, muy cerca del requisito de los 10 mm exigidos para cada área. Es decir, se cumple con bastante fidelidad la distribución de las imágenes en el detector para cada configuración.



Surface: IMA

Full Field Spot Diagram	
11/02/2022	Zemax
Units are μm .	Legend items refer to Wavelengths
RMS radius : 3299,50	Zemax OpticStudio 21.1.2
GEO radius : 4987,04	
Circle diam: 1e+04	Reference : Middle
Blue_complete_LateralColor_3_SLM_SLM_Z05 Configuration 4 of 4	

Figura 4.11 Se escoge tan solo una de las cuatro configuraciones de las mostradas en la Figura 4.10, y se analiza la distribución y aprovechamiento del campo.

Capítulo 5

Conclusiones

En este documento se ha desarrollado el diseño del nuevo polarímetro GLIP, donde se comenzaban analizando los requisitos y esquema inicial, prosiguiéndose con el diseño de la óptica mediante el software comercial OpticStudio[®] de Zemax, y terminando con el análisis de los resultados una vez seleccionados los elementos ópticos.

La principal complejidad de este instrumento es conseguir enfocar cuatro haces distintos (ángulos de incidencia respecto al eje óptico y una cierta distancia, es decir, pasan próximos al borde de las lentes) en un mismo detector, respetando cuatro áreas de división que se han realizado. El objetivo de esto es poder medir de forma simultánea los parámetros de Stokes que definen el estado de polarización de la luz.

Los requisitos más importantes, además de la distribución de las imágenes en el detector y el uso de 3 filtros y 4 haces en cada uno, han sido el campo del instrumento y la resolución. El primero de ellos se ha visto que depende del ángulo máximo de separación que es capaz de dar el prisma de Wollaston junto con la distribución de las cuatro imágenes en el detector. De esta forma, el campo es siempre el mismo, 2,36 minutos de arco. Esto mismo obligaba a tener una focal de aproximadamente 50 mm. El requisito de resolución era tal que el instrumento debe estar limitado por la óptica solo cuando el seeing sea inferior a 0,7 segundos de arco. Este valor indica las condiciones atmosféricas existentes en la región de observación, en general medido apuntando al zenit. Mediante simples cálculos, principalmente geométricos, esto se traducía en un determinado tamaño del diagrama de puntos (radio de unas 43 micras). Este valor ha sido el utilizado para determinar la bondad del sistema.

La selección de elementos polarizadores y divisores de haz ha sido de carácter comercial y en base a requisitos sencillos, como aberraciones o tamaños. El colimador ha requerido una pequeña optimización y cálculo de la focal, que ha resultado en un conjunto de tres lentes comerciales.

Conclusiones

Se ha separado el análisis en tres apartados, para cada uno de los filtros: i (rojo) de 691 a 818 nm, r (verde) de 552 a 691 nm y g (azul) de 400 a 552 nm. En el caso del filtro rojo ha sido posible cumplir el requisito, con resultados aceptables incluso en el borde del campo. De hecho, se ha realizado sin problemas mediante lentes comerciales, estando el sistema limitado por óptica cuando el valor del seeing es inferior a 0,64 segundos de arco. Estas mismas lentes se han dispuesto para el filtro verde, que ha dado un resultado fuera de requisito, pues la óptica limita siempre que el seeing sea inferior a 0,93 segundos de arco en la peor configuración. Con un pequeño giro de las lentes de re-imagen, puede obtenerse un sistema más homogéneo en este aspecto y se establece el límite de resolución en un seeing de 0,9 segundo de arco. Finalmente, el filtro g ha dado muchos más problemas. Conseguir cumplir los requisitos ha resultado imposible en este diseño, más aún con lentes comerciales. Sin embargo, se ha presentado un diseño comercial que limita el sistema cuando el seeing es mejor (inferior) a 1,96 segundos de arco, realizando el giro del tren de lentes. Si se tienen en cuenta las curvas de eficiencia cuántica del detector y transmisión del filtro, y estableciendo un valor mínimo de respuesta del sistema (electrones excitados por fotones incidentes) del 60 %, el filtro azul se consideraba a partir de los 420 nm y el límite está por debajo de 1,56 segundos de arco.

Si se consiguen minimizar los efectos que producen unos resultados tan distintos entre configuraciones, puede obtenerse un sistema óptico que cumpla (o esté cerca de hacerlo) con los requisitos para las cuatro imágenes de cada uno de los tres detectores dispuestos. El elemento causante de este fenómeno parece ser el prisma de Wollaston. Aunque divide un haz en otros dos con determinado ángulo, este no es simétrico (respecto al original), un haz estará más desviado que el otro. Para mitigar este efecto, se ha visto que es efectivo rotar ligeramente el tren de lentes situado tras el prisma, especialmente en los filtro verde y azul.

Por tanto, estos resultados son relativamente positivos. Por un lado, en la región del espectro menos energética se cumplen los requisitos utilizando elementos comerciales, lo que permite reducir el presupuesto sensiblemente. Además, en la banda intermedia los resultados pueden llegar a ser aceptables. Al mismo tiempo, la tercera región, comprendida entre 400 y 552 nm, no cumple con el requisito por un factor elevado. No obstante, se cree que existe aún margen de mejora en la disposición propuesta para el sistema óptico. Una de las opciones es considerar alguna de las lentes utilizadas en alguno de los filtros como fabricada a medida, en lugar de comercial, si está suficientemente justificado.

Teniendo en cuenta los resultados, puede concluirse que el futuro del instrumento GLIP es esperanzador, sobre todo teniendo en cuenta las ventajas en estabilidad y mantenimiento que un polarímetro de esta tipología ofrece respecto a los instrumen-

tos existentes. Los siguientes pasos a seguir deben ser una segunda revisión y optimización de los filtros r y (especialmente) g, así como ensayos de laboratorio seguidos de observaciones en telescopio, antes de terminar siendo instalado en el NRT una vez este sea construido.

Bibliografía

- [1] Andrei Berdyugin, Vilppu Piirola, and Juri Poutanen. *Astronomical Polarisation from the Infrared to Gamma Rays, Chapter 3: Optical Polarimetry: Methods, Instruments and Calibration Techniques*, pages 33–65. Springer, 2019.
- [2] Jaap Tinbergen. *Astronomical Polarimetry*. Cambridge University Press, 1996.
- [3] K. Serkowski. 8. polarization techniques. *Methods in Experimental Physics*, 12, Part A:361–414, 1974.
- [4] Baoliang Wang and Jennifer List. Basic optical properties of the photoelastic modulator part I: useful aperture and acceptance angle. In Joseph A. Shaw and J. Scott Tyo, editors, *Polarization Science and Remote Sensing II*, volume 5888, pages 436 – 443. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2005.
- [5] Kipp Andon Bauchert, Steven A. Serati, and Alex Furman. Advances in liquid crystal spatial light modulators. In David P. Casasent and Tien-Hsin Chao, editors, *Optical Pattern Recognition XIII*, volume 4734, pages 35 – 43. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2002.
- [6] M. Avenda no Alejo. Analysis of the refraction of the extraordinary ray in a plane-parallel uniaxial plate with an arbitrary orientation of the optical axis. *Opt. Express*, 13(7):2549–2555, Apr 2005.
- [7] Kazuhiko Oka and Naooki Saito. Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates. In Eustace L. Dereniak and Robert E. Sampson, editors, *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VIII*, volume 6295, pages 43 – 49. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2006.
- [8] John D. Perreault. Triple wollaston-prism complete-stokes imaging polarimeter. *Opt. Lett.*, 38(19):3874–3877, Oct 2013.
- [9] G. S. Da Costa. Basic Photometry Techniques. In Steve B. Howell, editor, *Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques*, volume 23 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 90, January 1992.
- [10] T. Goji ETOH, Cuong VO LE, Yuichi HASHISHIN, Nao OTSUKA, Kohsei TAKEHARA, Hiroshi OHTAKE, Tetsuya HAYASHIDA, and Hirotaka MARUYAMA. Evolution of ultra-high-speed ccd imagers. *Plasma and Fusion Research*, 2:S1021–S1021, 2007.
- [11] Olivier Daigle, Pierre-Olivier Quirion, and Simon Lessard. The darkest EMCCD ever. In Andrew D. Holland and David A. Dorn, editors, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IV*, volume 7742, pages 28 – 38. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010.

Bibliografía

- [12] Feng-Jiao Luo, Yue-Kun Heng, Zhi-Min Wang, Pei-Liang Wang, Zhong-Hua Qin, Mei-Hang Xu, Dong-Hao Liao, Hai-Qiong Zhang, Yong-Bo Huang, Xiang-Cui Lei, Sen Qian, Shu-Lin Liu, Yuan-Bo Chen, and Yi-Fang Wang. PMT overshoot study for the JUNO prototype detector. *Chinese Physics C*, 40(9):096002, sep 2016.
- [13] Dani Atkinson, Donald Hall, Christoph Baranec, Ian Baker, Shane Jacobson, and Reed Riddle. Observatory deployment and characterization of SAPHIRA HgCdTe APD arrays. In Andrew D. Holland and James Beletic, editors, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI*, volume 9154, pages 405 – 416. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2014.
- [14] K.S. Shah, R. Farrell, R. Grazioso, R. Myers, and L. Cirignano. Large-area apds and monolithic apd arrays. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 48(6):2352–2356, 2001.
- [15] Y. Shao, R.W. Silverman, R. Farrell, L. Cirignano, R. Grazioso, K.S. Shah, G. Vissel, M. Clajus, T.O. Tumer, and S.R. Cherry. Design studies of a high resolution pet detector using apd arrays. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 47(3):1051–1057, 2000.
- [16] Jose Carlos del Toro Iniesta. *Introduction to Spectropolarimetry*. Cambridge University Press, 2003.
- [17] Lifan Wang and J. Craig Wheeler. Spectropolarimetry of supernovae. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 46(1):433–474, 2008.
- [18] E. Hadjiyska, D. Rabinowitz, C. Baltay, N. Ellman, R. McKinnon, U. Feindt, P. Nugent, E. Hsiao, M. Phillips, N. Morrell, M. Stritzinger, and F. Taddia. NOT (ALFOSC) spectroscopic classification of LSQ12blp. *The Astronomer's Telegram*, 4036:1, April 2012.
- [19] Henk Dekker and Sandro D'odorico. Ccd field polarimetry with efosc. *NASA Astrophysics Data System*, 1986.
- [20] González-Gaitán, S., Mourão, A. M., Patat, F., Anderson, J. P., Cikota, A., Wiersema, K., Higgins, A. B., and Silva, K. Tips and tricks in linear imaging polarimetry of extended sources with fors2 at the vlt. *A&A*, 634:A70, 2020.
- [21] V. Piirola, A. Berdyugin, and Svetlana Berdyugina. DIPOL-2: a double image high precision polarimeter. In Suzanne K. Ramsay, Ian S. McLean, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, volume 9147, pages 2719 – 2727. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2014.
- [22] Vilppu Piirola. A double image chopping polarimeter. *Astronomy and Astrophysics*, 27:383–388, 08 1973.
- [23] Vilppu Piirola. *Simultaneous five-colour (UBVRI) photopolarimeter.*, pages 735–746. University of Arizona Press, 1988.
- [24] J. H. Hough, P. W. Lucas, J. A. Bailey, M. Tamura, E. Hirst, D. Harrison, and M. Bartholomew-Biggs. Planetpol: A very high sensitivity polarimeter. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 118(847):1302–1318, 2006.

- [25] Jeremy Bailey, P. W. Lucas, and J. H. Hough. The linear polarization of nearby bright stars measured at the parts per million level. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(4):2570–2578, 07 2010.
- [26] Stephen B. Potter, David A. H. Buckley, Darragh O’Donoghue, Encarni Romero-Colmenero, James O’Connor, Piet Fourie, Geoff Evans, Craig Sass, Lisa Crause, Martin Still, and et al. Polarized qpos from the integral polar igrj14536-5522 (=swift j1453.4-5524). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402(2):1161–1170, Feb 2010.
- [27] D. M. Arnold, I. A. Steele, S. D. Bates, C. J. Mottram, and R. J. Smith. RINGO3: a multi-colour fast response polarimeter. In Ian S. McLean, Suzanne K. Ramsay, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 8446, pages 907 – 914. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.
- [28] Helen Jermak, Iain A. Steele, and Robert J. Smith. Moptop: Multi-colour optimised optical polarimeter. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(S324):357–358, 2016.
- [29] Patrick P. Collins, Brendan Shehan, Michael Redfern, and Andrew Shearer. Gasp - galway astronomical stokes polarimeter, 2009.
- [30] Patrick Collins, R. Micheal Redfern, and Brendan Sheehan. Design, construction and calibration of the galway astronomical stokes polarimeter (gasp). *AIP Conference Proceedings*, 984(1):241–246, 2008.
- [31] P. Harjunpää, Anlaug Amanda Djupvik, P. Carlqvist, and G. Gahm. Linear polarization and molecular filamentary clouds. *Astronomy and Astrophysics*, 349:912–926, 08 1999.
- [32] V Piirola, F Scaltriti, and G Coyne. Circumstellar disks deduced from sub-arcsecond polarization observations of two young stars. *Nature*, 359:399–401, 1992.
- [33] Vanzella, E., Fontana, A., Pentericci, L., Castellano, M., Grazian, A., Giavalisco, M., Nonino, M., Cristiani, S., Zamorani, G., and Vignali, C. A 52 hours vlt/fors2 spectrum of a bright z = 7 hubble deep field galaxy: no ly-alpha emission. *A&A*, 569:A78, 2014.
- [34] Daniel Gisler, Thomas Berkefeld, and Svetlana Berdyugina. Planet imaging polarimetry with the solar telescope GREGOR. In Helen J. Hall, Roberto Gilmozzi, and Heather K. Marshall, editors, *Ground-based and Airborne Telescopes VI*, volume 9906, pages 1877 – 1883. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016.
- [35] A. Skumanich, B. W. Lites, V. Martinez Pillet, and P. Seagraves. The calibration of the advanced stokes polarimeter. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 110(2):357–380, jun 1997.
- [36] S. Bear Powell and Viktor Gruev. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters. *Opt. Express*, 21(18):21039–21055, Sep 2013.
- [37] Andreas Kaufer and Florian Kerber. *The 2007 ESO Instrument Calibration Workshop*. ESO, 2007.

Apéndice A

Historia de la polarimetría

Año	Hito
1669	Bartholinus descubre la doble refracción en la calcita
1670	Christiaan Huygens interpreta esto como un frente de onda esférico y elíptico, descubriendo la extinción por polarizadores cruzados
1672	Newton plantea el magnetismo como analogía en la interacción entre la luz y un vidrio, introduciendo así el concepto de polarización.
1852	Stokes estudia la superposición incoherente de haces de luz polarizados, y describe la polarización parcial mediante 4 parámetros.
1923	Lyot realiza medidas polarimétricas de la luz solar dispersada por Venus, comenzando aquí la polarimetría como una técnica astronómica efectiva.
1942	El Instituto de Ingenieros de Radio (antes IRE y hoy IEEE) define de forma clara y sin ambigüedades los conceptos y signos de la polarimetría, siendo adoptado por los astrónomos.
1946	Chandrasekhar introduce los parámetros de Stokes en la astronomía, prediciendo la polarización lineal de la luz estelar dispersada por los electrones, detectada en binarias eclipsadas.
1949	Hiltner y Hall verifican la predicción de Chandrasekhar, midiendo así polarización interestelar.
1953	Shklovskii propone como la principal fuente de emisión polarizada en radio y el continuo de la nebulosa del cangrejo la radiación de sincrotrón. Dombrowsky detecta polarización en el visible en este objeto.
1957	Primera medición de ondas de radio polarizadas (en la nebulosa del Cangrejo y de forma marginal en el continuo galáctico).
1972	También en la nebulosa del cangrejo se detecta emisión de rayos X polarizada por un equipo de la universidad de Columbia.
1973	La Unión Astronómica Internacional (IAU) respalda la definición de la polarización elíptica propuesta por el IEEE.
1974	Primera publicación de un libro de referencia para la polarización astronómica (Gehrels 1974)
c. 1990	Avances teóricos, así como técnicos (polarímetros más accesibles) permiten a la polarimetría convertirse en una técnica observacional madura.
2002	En la conferencia internacional ofrecida los organismos IAU, OSA e IEEE " <i>Stokes parameters; the first 150 years</i> " se insta a utilizar los estándares y convenciones, evitando así el caos en la técnica, permitiendo que esta florezca.

Apéndice B

Ángulos en la medición de la polarización con HWP y QWP

Cuando se quiere medir la polarización lineal de la luz, una opción es obtener sendas imágenes para cuatro posiciones de un HWP, a 0° , 22.5° , 45° y 67.5° . Además, se debe obtener la ratio Q entre las intensidades de dos componentes ortogonalmente polarizadas. De esta forma, los parámetros normalizados de Stokes se pueden escribir como:

$$Q_m = Q_0 + Q_{22,5} + Q_{45} + Q_{67,5}, \quad (\text{B.1})$$

$$q = (Q_0 - Q_{45})/Q_m, \quad (\text{B.2})$$

$$u = (Q_{22,5} - Q_{67,5})/Q_m \quad (\text{B.3})$$

Por otro lado, la polarización circular se puede medir usando un QWP y mediante dos imágenes a 45° y 135° (o -45° y 45°). De esta forma, el grado de polarización circular v (o PC) se define como:

$$Q_m = Q_{45} + Q_{135}, \quad (\text{B.4})$$

$$v = (Q_{45} - Q_{135}) / 2Q_m \quad (\text{B.5})$$

Apéndice C

Función de mérito

	Type	Wave	Hx	Hy	Px	Py		Target	Weight	Value	% Contrib
1	CONF	1									
2	EFLX	48	59					50,000	1,000	50,730	2,066
3	MXCG	9	10					6,000	1,000	6,000	0,000
4	MNCG	9	10					2,000	1,000	2,000	0,000
5	MXCG	11	12					6,000	1,000	6,000	0,000
6	MNCG	11	12					2,000	1,000	2,000	0,000
7	MXCG	13	14					6,000	1,000	6,000	0,000
8	MNCG	13	14					2,000	1,000	2,000	0,000
9	MNCA	10	11					1,000	1,000	1,000	0,000
10	MNCA	12	13					1,000	1,000	1,000	0,000
11	MNCA	14	15					1,000	1,000	1,000	0,000
12	EFLX	9	14					123,000	1,000	123,001	5,329E-06
13	TTHI	9	14					116,433	1,000	116,433	3,405E-07
14	MXCG	48	49					10,000	1,000	10,000	0,000
15	MXCG	50	51					10,000	1,000	10,000	0,000
16	MXCG	52	53					10,000	1,000	10,000	0,000
17	MXCG	54	55					10,000	1,000	10,000	0,000
18	MXCG	56	57					10,000	1,000	10,000	0,000
19	MNCG	48	49					3,000	1,000	3,000	0,000
20	MNCG	50	51					3,000	1,000	3,000	0,000
21	MNCG	52	53					3,000	1,000	3,000	0,000
22	MNCG	54	55					3,000	1,000	3,000	0,000
23	MNCG	56	57					3,000	1,000	3,000	0,000
24	MXCA	49	50					35,000	1,000	35,000	0,000
25	MXCA	51	52					35,000	1,000	35,000	0,000
26	MXCA	53	54					35,000	1,000	35,000	0,000
27	MXCA	55	56					35,000	1,000	35,000	0,000
28	MXCA	57	58					35,000	1,000	35,000	0,000
29	MNCA	49	50					1,000	1,000	1,000	0,000
30	MNCA	51	52					1,000	1,000	1,000	0,000
31	MNCA	53	54					1,000	1,000	1,000	0,000
32	MNCA	55	56					1,000	1,000	1,000	0,000
33	MNCA	57	58					5,000	1,000	0,000	96,812
34	CONF	2									
35	EFLX	48	59					51,000	1,000	50,730	0,282
36	CONF	3									
37	EFLX	48	59					51,000	1,000	50,730	0,282
38	CONF	4									
39	EFLX	48	59					51,000	1,000	50,730	0,282
40	DMFS										

Figura C.1 Función de mérito utilizada para el diseño óptico.

Función de mérito

The screenshot displays a software interface for defining merit function operands. It is organized into several panels:

- Optimization Function:** Includes dropdowns for Image Quality (Spot), Spatial Frequency (30), X Weight (1), Y Weight (1), Type (Geometric), and Reference (Centroid). It also features a checked checkbox for Max Distortion (%) (1) and an unchecked checkbox for Ignore Lateral Color.
- Pupil Integration:** Features radio buttons for Gaussian Quadrature (selected) and Rectangular Array. It includes dropdowns for Rings (3) and Arms (6), and a text input for Obscuration (0).
- Boundary Values:** Contains checkboxes for Glass and Air. For each, there are input fields for Min, Max, and Edge Thickness. The values shown are Min: 0, Max: 1e+03, and Edge Thickness: 0.
- Optimization Goal:** Includes radio buttons for Best Nominal Performance (selected) and Improve Manufacturing Yield, along with a Weight input field set to 1.
- Start At:** A spinner control set to 50.
- Configuration:** A dropdown menu set to All.
- Field:** A dropdown menu set to All.
- Assume Axial Symmetry:** An unchecked checkbox.
- Add Favorite Operands:** An unchecked checkbox.

At the bottom, there are buttons for OK, Apply, Close, Save Settings, Load Settings, and Reset Settings.

Figura C.2 Herramienta que permite definir el resto de operandos de la función de mérito, con las opciones utilizadas. Destacar que la casilla de *Ignore Lateral Color* no está marcada.

Apéndice D

Lens Data

Surface	Surface Type	Comment	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Sems.Dl.	Chp Zone	Mach Sems.Dl.	Contc	TCE x 1E-6	Par 0(Unused)	Par 1(Unused)	Par 2(Unused)	Par 3(Unused)	Par 4(Unused)	Par 5(Unused)	Par 6(Unused)	Par 7(Unused)
OBJECT	Standard		Infinity	Infinity			Infinity	0.000	Infinity	0.000	0.000								
1(aper)	Standard	OBSO	Infinity	6657.687			1001.975	0.000	1001.975	0.000	0.000								
2(STOP(aper)	Standard	M1	-1.881E+04	-6657.687	MIRROR		2089.999	U	-	-	-1.074	0.000							
3(aper)	Standard	M2	-7849.446	9007.687	MIRROR		625.037	U	0.000	625.037	-4.199	0.000							
4(aper)	Standard	CORR_L1	1.000E+10	20.000	N-BK7		80.000	U	0.000	80.000	0.000	-							
5(aper)	Standard	CORR_L1_1	-370.000	26.000			80.000	U	0.000	80.000	0.000	0.000							
6(aper)	Standard	CORR_L1_2	-292.000	19.000	N-BK7		80.000	U	0.000	80.000	0.000	-							
7(aper)	Standard	CORR_L2	1.000E+10	98.883			80.000	U	0.000	80.000	0.000	0.000							
8	Standard		Infinity	125.000			9.268	0.000	9.268	0.000	0.000								
9(aper)	Standard	LE4984	97.610	5.269	F_SILICA		25.400	U	0.000	25.400	0.000	-							
10(aper)	Standard	Collimator	327.590	11.800			25.400	U	0.000	25.400	0.000	0.000							
11(aper)	Standard	110-5524E	167.390	3.000	CAF2		25.400	U	0.000	25.400	0.000	-							
12(aper)	Standard	Collimator	Infinity	14.000			25.400	U	0.000	25.400	0.000	0.000							
13(aper)	Standard	110-0421E	181.680	3.000	N-BK7		19.050	U	0.000	19.050	0.000	-							
14(aper)	Standard	Collimator	Infinity	74.700			19.050	U	0.000	19.050	0.000	0.000							
15(aper)	Standard		Infinity	12.250	BK7		12.250	U	-	-	0.000	-							
16	Coordinate Break		0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	-45.000	0.000	0.000	0.000	0	
17(aper)	Standard		Infinity	0.000	BK7	I.50	17.324	U	-	-	0.000	-							
18	Coordinate Break		12.250	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	45.000	0.000	0.000	0.000	0	
19(aper)	Standard		Infinity	80.100			12.250	U	0.000	12.250	U	0.000	0.000	-					
20	Coordinate Break		0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	39.000	0.000	0.000	0.000	0	
21(aper)	Standard	45 tilt	Infinity	0.000	MIRROR		20.000	U	0.000	20.000	0.000	0.000							
22	Coordinate Break		20.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	51.000	-0.000	0.000	0.000	0	
23(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
24(aper)	Birefringent In	QWP-In	Infinity	0.000	MGF2		10.000	U	-	-	0.000	-	8.000	1	1.000	0.000	0.000	1	0
25(aper)	Birefringent Out		Infinity	0.127			0.000	U	-	-	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	0
26(aper)	Birefringent In		Infinity	0.326	MGF2		10.000	U	-	-	0.000	-	8.000	1	0.000	1.000	0.000	1	0
27(aper)	Birefringent Out	QWP-Out	Infinity	2.194			10.000	U	-	-	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	0
28(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
29	Coordinate Break		0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	45.000	0.000	0.000	0.000	0	
30	Coordinate Break		-22.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	45.000	P	-0.000	0.000	0	
31	Coordinate Break		0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	-52.000	0.000	0.000	0.000	0	
32	Coordinate Break		68.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	-38.000	-0.000	0.000	0.000	0	
33	Coordinate Break	Element Tilt	0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	P	8.850	0.000	0.000	0.000	0	
34(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
35(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
36(ilt/dec)	Standard	Wollasto dist conf2	Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
37	Coordinate Break	WOLL 2rot 045	0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	
38(aper)	Birefringent In	WOLL IN AP	Infinity	15.000	CALCITE		25.000	U	-	-	0.000	-	0.000	1	1.000	0.000	0.000	0	0
39	Coordinate Break	WOLL	0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	45.000	0.000	0.000	0.000	0	
40(aper)	Birefringent Out	WOLL	Infinity	0.000	CALCITE		25.000	U	-	-	0.000	-	0.000	0	0.000	1.000	0.000	0	0
41(aper)	Birefringent In	WOLL	Infinity	0.000	CALCITE		25.000	U	-	-	0.000	-	0.000	0	0.000	1.000	0.000	0	0
42	Coordinate Break	WOLL	15.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	-45.000	P	0.000	0.000	0	
43(aper)	Birefringent Out	WOLL OUT AP	Infinity	0.000			25.000	U	-	-	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-	0
44	Coordinate Break	WOLL 2rot m45	0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-80.000	P	0
45	Coordinate Break	Element Tilt return	0.000	-			0.000	-	-	-	-	0.000	P	-8.850	P	0.000	P	0.000	1
46	Standard	Dummy	Infinity	0.000			25.000	U	0.000	25.000	0.000	0.000							
47(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			0.000	U	0.000	0.000	0.000	0.000							
48(aper)	Standard	SLB-608-220P	228.360	7.000	S-BSL7		30.000	U	0.000	30.000	0.000	-							
49(aper)	Standard		-228.360	9.630			30.000	U	0.000	30.000	0.000	0.000							
50(aper)	Standard	SLSQ-60-220P	181.290	7.500	SILICA		30.000	U	0.000	30.000	0.000	-							
51(aper)	Standard		Infinity	15.060			30.000	U	0.000	30.000	0.000	0.000							
52(aper)	Standard	L-PCX336	90.139	7.700	N-BK7		31.750	U	0.000	31.750	0.000	-							
53(aper)	Standard		Infinity	9.000			31.750	U	0.000	31.750	0.000	0.000							
54(aper)	Standard	99540	210.400	4.000	ZNS		22.860	U	0.000	22.860	0.000	-							
55(aper)	Standard		Infinity	6.000			22.860	U	0.000	22.860	0.000	0.000							
56(aper)	Standard	L-BCX249	181.818	7.200	B270		30.000	U	0.000	30.000	0.000	-							
57(aper)	Standard		-181.818	13.390			30.000	U	0.000	30.000	0.000	0.000							
58(ilt/dec)	Standard		Infinity	0.000			13.968	0.000	13.968	0.000	0.000	0.000							
59(MAGE)	Standard		Infinity	-			12.314	0.000	12.314	0.000	0.000	0.000							

Figura D.1 Valores obtenidos en la tabla del *Lens Data*, donde se definen las superficies ópticas y todos los elementos del sistema.

