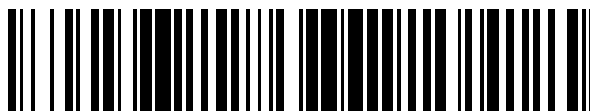


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 765 998**

51 Int. Cl.:

G02B 17/06 (2006.01)

G02B 23/06 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.05.2018 E 18172268 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.10.2019 EP 3404463**

54 Título: **Telescopio anastigmático bifocal con cinco espejos**

30 Prioridad:

18.05.2017 FR 1700525

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

11.06.2020

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**TETAZ, NICOLAS y
RUILIER, CYRIL**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 765 998 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Telescopio anastigmático bifocal con cinco espejos

Campo de la invención

5 El campo de la invención es el de los telescopios, en concreto el de los telescopios de observación embarcados en satélites. De manera más precisa, el campo de la invención se refiere a los sistemas catóptricos con grandes distancias focales, más particularmente bifocales.

Estado de la técnica

10 Los telescopios espaciales actuales son de distancia focal única. Un tipo de telescopio conocido es el telescopio de tipo Korsch con 3 espejos tal como se ilustra en la figura 1. El telescopio de tipo Korsch, también llamado TMA (acrónimo de la expresión anglosajona "Three Mirrors Anastigmat") es un telescopio monofocal anastigmático con tres espejos esféricos (Cóncavo-Convexo-Cóncavo) que comprende al menos un primer espejo M1 cóncavo, un segundo espejo M2 convexo y un tercer espejo M3 cóncavo. Los primer, segundo y tercer espejos M1, M2 y M3 son esféricos, de formas fijas, caracterizándose cada espejo por al menos dos parámetros, un radio de curvatura R y una sección cónica c.

15 Los tres espejos M1, M2 y M3 están dispuestos de modo que el primer espejo y el segundo espejo formen a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia dispuesta en un plano intermedio P_{F1} situado entre el segundo espejo M2 y el tercer espejo M3, formando el tercer espejo a partir de esta imagen intermedia una imagen final en el plano focal del telescopio P_F , en el que está colocado un detector D. Un espejo de reenvío M0 permite doblar el haz para disminuir el volumen. La imagen final en el plano P_F no está invertida. El telescopio presenta de manera convencional una pupila de entrada P_E y una pupila de salida P_S .

20 Mediante aplicación de las ecuaciones de Korsch bien conocidas por el experto en la materia se calculan fácilmente las posiciones y parámetros respectivos de los tres espejos. La solución teórica es de muy buena calidad en un campo relativamente grande, y compacto, lo que centra todo el interés de este tipo de telescopio, particularmente bien adaptado para realizar sistemas con distancia focal larga (>5000 mm) y pupila grande (>300 mm).

25 Por otro lado, puede ser interesante poder cambiar la distancia focal en vuelo. En efecto, cambiar la distancia focal en vuelo permite cambiar el campo de visión y/o la resolución de la imagen con un solo y mismo instrumento. Una solución bifocal ya es interesante.

Las ecuaciones de Korsch con 3 espejos no permiten obtener una solución acromática y anastigmática para dos distancias focales diferentes a partir de una misma combinación de espejos M1/M2/M3.

30 Existen varios tipos de instrumentos bifocales. Un primer tipo se basa en la separación de una vía común en dos vías de distancia focal diferente mediante un componente separador 20 como se ilustra en la figura 2. Cada vía tiene entonces un detector dedicado, en el ejemplo, D1 para la distancia focal corta y D2 para la distancia focal larga.

35 La separación se puede realizar de manera espectral, por ejemplo visible e IR, el componente 20 es entonces una lámina dicróica. La separación también puede realizarse para un mismo campo de longitud de onda, mediante una lámina separadora (por ejemplo 50/50).

Este primer tipo de sistema presenta la ventaja de tener las dos distancias focales simultáneamente y un campo común de observación. Sin embargo, se deben añadir componentes específicos en cada vía, incluyendo los detectores, y para una vía dada, una parte del flujo se pierde.

40 Un segundo tipo efectúa una separación en el campo de visión, como se ilustra en la figura 3. Se trata de una solución bifocal simultánea pero las dos vías no tienen, por lo tanto, el mismo campo de visión y hay que añadir componentes ópticos en cada vía, un espejo de reenvío M0(1), M0(2), un tercer espejo M3(1), M3(2) y un detector D1, D2.

45 Un tercer tipo de sistema descrito en el documento US6084727 permite cambiar la distancia focal por inserción en la trayectoria óptica de elementos reflectantes. Se tiene entonces un solo detector y las dos vías tienen un campo común, pero hay que añadir 3 espejos específicos a una de las vías, pudiendo tener, algunos, dimensiones muy grandes. Además, la función bifocal no es simultánea

50 Un cuarto tipo de sistema consiste en realizar una distancia focal variable por desplazamiento de un espejo, tal como se describe en el documento US6333811. Este documento se basa en un telescopio de tipo Cassegrain con recuperación de imagen. En una arquitectura de tipo Korsch convendría añadir un espejo adicional de corrección para cada distancia focal, así como medios de desplazamiento del detector o medios de variación de la trayectoria óptica en una de las distancias focales. Sin embargo, esta solución presenta la desventaja de necesitar el desplazamiento del espejo de gran dimensión M3 para hacer variar la distancia focal.

El documento US9354116 describe un espectrómetro que presenta una arquitectura óptica de tipo 5MA monofocal.

55 Un objetivo de la presente invención es paliar los inconvenientes mencionados anteriormente proponiendo un telescopio que permita conservar las ventajas de una arquitectura de tipo Korsch convencional TMA (aplanetismo y astigmatismo en un gran campo, compacidad, mono-detector) y que presente una función bifocal obtenida sin desplazamiento de uno de los espejos que forman parte de la combinación óptica del sistema de imagenología.

Descripción de la invención

La presente invención tiene por objeto un telescopio anastigmático bifocal con cinco espejos esféricos, que comprende:

- 5 - un primer espejo cóncavo, un segundo espejo convexo, un tercer espejo cóncavo y un primer detector, comunes a una primera y una segunda distancia focal del telescopio,
- un primer cuarto espejo y un primer quinto espejo asociados a la primera distancia focal, y un segundo cuarto espejo y un segundo quinto espejo asociados a la segunda distancia focal, siendo el cuarto y el quinto espejo asociados a una distancia focal retráctiles, para estar dispuestos en una trayectoria óptica de un haz correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio funciona con dicha distancia focal, y fuera de la trayectoria óptica de un haz correspondiente a la otra distancia focal cuando el telescopio funciona con la otra distancia focal,
- 10 - estando el primer espejo y el segundo espejo dispuestos para formar, a partir de un objeto en el infinito, una imagen intermedia situada entre el segundo espejo y el tercer espejo,
- y para cada distancia focal:
 - 15 * estando el tercer espejo así como el cuarto y el quinto espejo asociados a dicha distancia focal configurados para formar a partir de esta imagen intermedia una imagen final en un primer plano focal del telescopio común a las dos distancias focales y en el que está colocado el primer detector,
 - * estando las formas y posiciones fijas de cada espejo determinadas a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, con la restricción del primer, segundo y tercer espejo y del primer plano focal comunes a las dos distancias focales, y para optimizar la calidad de imagen en el primer plano focal del telescopio según un criterio predeterminado.
- 20

Según una realización, los primer y segundo cuartos espejos están dispuestos sustancialmente en una misma posición, y/o los primer y segundo quintos espejos están dispuestos sustancialmente en una misma posición. Preferentemente en esta realización, los primer y segundo cuartos espejos están montados sobre un primer soporte único, realizándose la conmutación por rotación alrededor de un primer eje, y/o los primer y segundo quintos espejos están montados sobre un segundo soporte único, realizándose la conmutación por rotación alrededor de un segundo eje.

Ventajosamente, el primer cuarto espejo y el segundo cuarto espejo presentan un radio de curvatura superior a 1000 mm.

30 Ventajosamente, el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda.

Según una realización, dichos primer y segundo cuartos espejos retráctiles están montados sobre un soporte único, comprendiendo dicho soporte además una posición para la cual ninguno de los cuartos espejos retráctiles figura en la trayectoria óptica del haz incidente sobre dicho soporte, pasando el haz entonces a través del soporte según una trayectoria óptica secundaria, comprendiendo el telescopio además:

- 35 - un dispositivo óptico dispuesto en la trayectoria óptica secundaria, estando el dispositivo óptico configurado para formar a partir de dicha imagen intermedia, en combinación con el tercer espejo, una imagen final en un segundo plano focal del telescopio correspondiente a una distancia focal seleccionada y para optimizar la calidad de imagen en el segundo plano focal según dicho criterio predeterminado,
- 40 - y comprendiendo además un segundo detector dispuesto en el segundo plano focal del telescopio, y sensible en una segunda banda espectral diferente de una primera banda espectral de sensibilidad del primer detector.

Preferentemente, el dispositivo óptico funciona en transmisión en la segunda banda espectral. Ventajosamente la primera banda espectral está comprendida en el visible y la segunda banda espectral está comprendida en el infrarrojo.

Ventajosamente, la distancia focal seleccionada presenta un valor inferior a las primera y segunda distancias focales.

45 Según otro aspecto, la invención se refiere a un procedimiento de determinación de combinaciones ópticas de un telescopio bifocal anastigmático con cinco espejos esféricos, comprendiendo el telescopio:

- un primer espejo, un segundo espejo y un tercer espejo y un primer detector dispuesto en un primer plano focal comunes a una primera y una segunda distancia focal del telescopio,
- 50 - un primer cuarto espejo y un primer quinto espejo asociados a la primera distancia focal, formando las formas y posiciones respectivas de los primer, segundo, tercer, primer cuarto y primer quinto espejos una primera combinación óptica asociada a la primera distancia focal,
- un segundo cuarto espejo y un segundo quinto espejo asociados a una segunda distancia focal, formando las formas y posiciones respectivas de los primer, segundo, tercer, segundo cuarto y segundo quinto espejos una segunda combinación óptica asociada a la segunda distancia focal, comprendiendo el procedimiento las etapas que consisten en:
- 55

- A determinar, a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una primera combinación óptica inicial para la primera distancia focal, siendo el primer espejo cóncavo, siendo el segundo espejo convexo, siendo el tercer espejo cóncavo, estando el primer y el segundo espejos configurados de modo que formen a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia situada entre el segundo espejo y el tercer espejo,
5 estando el tercer, el primer cuarto y el primer quinto espejos configurados para formar a partir de dicha imagen intermedia una imagen en un primer plano focal inicial del telescopio optimizando la calidad de imagen en dicho primer plano focal inicial según un criterio predeterminado,
- B determinar, a partir de la primera combinación óptica inicial y de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una segunda combinación óptica inicial para la segunda distancia focal, modificando las formas y/o las posiciones de dichos tercer, primer cuarto y primer quinto espejos determinadas en la etapa A, para formar a partir de dicha imagen intermedia una imagen en un segundo plano focal inicial del telescopio optimizando la calidad de imagen en dicho segundo plano focal inicial según dicho criterio predeterminado,
10
- C determinar, a partir de las primera y segunda combinaciones ópticas iniciales, una primera y una segunda combinación óptica final mediante un bucle de optimización, con la restricción del primer, segundo y tercer espejos y del primer plano focal comunes a las dos distancias focales, y para optimizar la calidad de imagen en dicho primer plano focal del telescopio según un criterio predeterminado.
15

Preferentemente, las formas respectivas del primer cuarto y del primer quinto espejo determinadas en la etapa A son esféricas por imposición.

20 Ventajosamente, la primera distancia focal es la distancia focal más larga.

Preferentemente, una forma de espejo está definida por, al menos, un radio de curvatura y una sección cónica, y las modificaciones de la etapa B consisten, para el tercer espejo, en la modificación de su sección cónica únicamente, es decir sin modificar su radio de curvatura ni su posición.

25 Según una variante la etapa C se efectúa con la restricción adicional de las posiciones de los primer y segundo cuarto espejos iguales, y de las posiciones de los primer y segundo quinto espejos iguales.

Ventajosamente, el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda.

Otras características, objetivos y ventajas de la presente invención serán evidentes con la lectura de la descripción detallada a continuación y en relación con los dibujos adjuntos dados a modo de ejemplos no limitantes y en los que:

- 30 La figura 1 citada anteriormente ilustra una arquitectura de tipo Korsch con 3 espejos convencionales.
La figura 2 citada anteriormente describe un primer tipo de sistema bifocal según el estado de la técnica con ayuda de un componente óptico separador y que presenta dos detectores.
La figura 3 citada anteriormente ilustra un segundo tipo de sistema bifocal según el estado de la técnica con separación mediante el campo.
La figura 4 ilustra un telescopio según la invención.
- 35 La figura 5 ilustra otra realización de un telescopio según la invención en la que el espejo de reenvío está dispuesto de forma diferente.
La figura 6 ilustra una variante del telescopio según la invención que comprende una vía adicional que funciona en un intervalo de longitud de onda diferente del intervalo de funcionamiento de la vía principal del telescopio.
La figura 7 ilustra un soporte único para los primer y segundo cuartos espejos retráctiles, adaptada a la variante del telescopio de la figura 6.
La figura 8 ilustra el procedimiento de cálculo de combinaciones ópticas de telescopio según la invención.
La figura 9 ilustra la primera combinación inicial obtenida de la etapa A del procedimiento según la invención.
La figura 10 ilustra la segunda combinación inicial obtenida de la etapa B del procedimiento según la invención.
La figura 11 ilustra un ejemplo de los valores calculados para las primera y segunda combinaciones iniciales de un telescopio obtenidas respectivamente de la etapa A y de la etapa B del procedimiento según la invención.
45 La figura 12 ilustra un ejemplo de combinación final de un telescopio según la invención obtenido del procedimiento según la invención.
La figura 13 ilustra valores calculados para las primera y segunda combinaciones finales a partir de los valores de las combinaciones CO1i y CO2i de la figura 11.

50 **Descripción detallada de la invención**

Un telescopio anastigmático bifocal 10 con cinco espejos según la invención se ilustra en la figura 4. Presenta una primera distancia focal f_1 y una segunda distancia focal f_2 y comprende un primer espejo M1 cóncavo, un segundo espejo M2 convexo, un tercer espejo M3 cóncavo y un primer detector D, comunes a f_1 y f_2 . Los espejos M1 y M2 que forman a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia lint situada entre M2 y M3.

55 M1 y M2 están dispuestos según la configuración de un Korsch con 3 espejos tal como se describe en el estado de la técnica, y la forma del espejo M3 está ligeramente modificada con respecto al Korsch con 3 espejos correspondiente como se describe más adelante.

El telescopio 10 comprende también un primer cuarto espejo M4₁ y un primer quinto espejo M5₁ asociados a f_1 , y un

segundo cuarto espejo $M4_2$ y un segundo quinto espejo $M5_2$ asociados a f_2 .

El cuarto espejo y el quinto espejo asociados a una distancia focal (f_1 o f_2) son retráctiles, para estar dispuestos en la trayectoria óptica del haz luminoso correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio funciona con dicha distancia focal, y fuera de la trayectoria óptica de un haz correspondiente a la otra distancia focal cuando el telescopio funciona con la otra distancia focal. El primer haz luminoso LF1 que corresponde a la utilización con f_1 y el segundo haz luminoso LF2 que corresponde a la utilización con f_2 distancias focales comparten de este modo sustancialmente una misma trayectoria óptica como se ilustra en la figura 4.

En otras palabras, el telescopio presenta una primera combinación óptica OC1 para la distancia focal f_1 constituida por formas y posiciones respectivas de $M1/M2/M3/M4_1/M5_1$ y una segunda combinación óptica OC2: $M1/M2/M3/M4_2/M5_2$ para la distancia focal f_2 . Se pasa de OC1 a OC2 retrayendo los espejos M4 y M5 de la distancia focal no utilizada y situando los espejos M4 y M5 de la distancia focal utilizada en la trayectoria del haz luminoso incidente.

Además para cada distancia focal el tercer espejo M3 así como el cuarto y el quinto espejo asociados a dicha distancia focal están configurados para formar a partir de esta imagen intermedia lint una imagen final en un primer plano focal P_F del telescopio común a las dos distancias focales f_1 y f_2 y en el que está colocado el primer detector D.

La forma y la posición de cada espejo están fijadas. Estas se determinan a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos con la restricción de $M1$, $M2$, $M3$ y P_F comunes a las dos distancias focales, y para optimizar la calidad de imagen en P_F única del telescopio según un criterio predeterminado. Se denomina esta arquitectura 5MA de "5 Mirrors Anastigmat" en inglés. Normalmente el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda WFE.

Las ecuaciones de Korsch permiten para una distancia focal dada encontrar una solución aplanética y anastigmática calculando la posición y la forma de los espejos $M1$, $M2$ y $M3$. El cálculo es riguroso en el centro del campo, pero promediando una optimización la calidad de imagen puede ser excelente en el campo (generalmente campo $< 3^\circ \times 0,5^\circ$). Para una solución monofocal, 3 espejos son necesarios y suficientes para suprimir la aberración esférica de 1er orden, el astigmatismo, el coma y la curvatura de campo.

Sin embargo, para una solución multifocal, no es posible resolver las ecuaciones, ni siquiera desplazando el espejo M3.

La idea general es obtener un telescopio según la invención cuyo conjunto de espejos son fijos (incluyendo el M3 que podría constituir un medio para cambiar la distancia focal). Para poder congelar la posición del M3, así como la del detector D, al tiempo que se conserva una buena calidad de imagen para f_1 y f_2 , es necesario entonces añadir dos espejos suplementarios $M4$ y $M5$ a la combinación óptica, de ahí la arquitectura 5MA.

Se pasa entonces de una distancia focal a otra cambiando que los espejos $M4$ y $M5$ retrayéndolos de/situándolos en la trayectoria óptica en función de la distancia focal deseada. Las combinaciones ópticas se hacen más complejas (5 espejos esféricos en lugar de 3) para simplificar drásticamente el mecanismo de cambio de distancia focal.

El cálculo de las combinaciones ópticas del telescopio según la invención se obtiene de la aplicación de las ecuaciones de Korsch generalizadas con n espejos con $n=5$. En su obra "Reflective Optics" D. Korsch presenta un protocolo matemático que permite, en sistemas multiespejo expresar las principales aberraciones ópticas (Aberración esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo) en función de parámetros simples tales como la distancia entre los espejos, la distancia de los objetos y de las imágenes y la proporción de las alturas de los radios. Este protocolo simple y eficaz permite encontrar sistemas multiespejo aplanéticos y anastigmáticos resolviendo algunas ecuaciones.

Mediante aplicaciones de estas ecuaciones se determinan combinaciones OC1 y OC2 que verifican las propiedades citadas anteriormente. La imagen final no está invertida y el diámetro de la pupila de entrada es constante para las 2 distancias focales.

Un ejemplo de procedimiento de determinación de las formas y posiciones de los 7 espejos del telescopio 10 se da más adelante.

Normalmente, se tiene $M1$ cóncavo/ $M2$ convexo/ $M3$ cóncavo/ $M4$ convexo o cóncavo y casi plano (radio de curvatura grande)/ $M5$ convexo o cóncavo.

El telescopio según la invención presenta de este modo la propiedad notable de poder cambiar de distancia focal sin desplazamiento de espejo (tal como una traslación), por simple permutación entre $M4_1$ y $M4_2$, y entre $M5_1$ y $M5_2$, permaneciendo los otros espejos $M1/M2/M3$ fijos.

Además, presenta una longitud óptica (hasta el detector) igual para las dos distancias focales.

El telescopio 10 presenta también para las 2 distancias focales las ventajas convencionales de un Korsch: compacidad, buena calidad de imagen, campo de visión accesible bastante grande...

Además este tipo de telescopio de arquitectura 100 % reflectante presenta la ventaja de un funcionamiento independiente de la longitud de onda, no presentando los espejos cromatismo. La banda espectral de funcionamiento se determina entonces por la naturaleza del material reflectante de los espejos y la banda espectral de sensibilidad del primer detector.

Se obtiene un telescopio de relación al menos igual a 2,5, y las distancias focales accesibles son normalmente superiores a 5 m (generalmente alrededor de 20 m para la distancia focal larga) una pupila superior a 300 mm y un campo de visión lineal hasta $5^\circ \times 1^\circ$.

- 5 Para una facilidad de implementación, los primer y segundo cuartos espejos M_{4_1} , M_{4_2} se calculan para estar dispuestos sustancialmente en una misma posición. Lo mismo ocurre para los primer y segundo quintos espejos M_{5_1} , M_{5_2} . En esta configuración, según una realización preferida M_{4_1} y M_{4_2} están montados sobre un primer soporte único y/o M_{5_1} y M_{5_2} están montados sobre un segundo soporte único. Preferentemente, la conmutación se realiza por rotación alrededor de un eje del soporte según un mecanismo denominado "flip/flop".
- Preferentemente, el primer cuarto espejo M_{4_1} y el segundo cuarto espejo M_{4_2} presentan un radio de curvatura superior a 1000 mm como se explica más adelante.
- Para restricciones de compacidad, según una realización el telescopio 10 según la invención comprende un espejo de reenvío M_R .
- 10 La figura 5 ilustra otra realización en la que el espejo de reenvío M_R está dispuesto de forma diferente.
- Según una variante, el telescopio 10 comprende una vía adicional que funciona en un intervalo de longitud de onda diferente del intervalo de funcionamiento de la vía principal del telescopio, un ejemplo de cuya arquitectura se ilustra en la figura 6.
- 15 La vía principal bifocal funciona en un primer intervalo de longitud de onda SB_1 , normalmente el visible entre 400 y 800 nm, y el primer detector D presenta una sensibilidad adaptada a SB_1 . La vía adicional funciona para una segunda banda espectral SB_2 diferente de SB_1 , normalmente comprendida en la banda infrarroja.
- 20 El primer cuarto espejo M_{4_1} y el segundo cuarto espejo M_{4_2} retráctiles están montados sobre un soporte único 40 un ejemplo del cual se da en la figura 7. Este soporte presenta además una posición neutra para la cual ninguno de los cuartos espejos retráctiles M_{4_1} y M_{4_2} figura en la trayectoria óptica del haz óptico incidente sobre el soporte (simple agujero sin función óptica). El haz pasa entonces a través de soporte 40 para formar un haz luminoso LF_3 según una trayectoria óptica secundaria 80, siendo la trayectoria óptica primaria la seguida por la vía visible.
- 25 Según el ejemplo de la figura 7, el soporte 40 comprende tres posiciones, respectivamente obtenidas por pivote alrededor de un eje de rotación 45, estando los dos espejos esféricos M_{4_1} y M_{4_2} montados alrededor de una estructura hueca. En una primera posición es M_{4_1} el que refleja el haz incidente, en una segunda posición es M_{4_2} el que refleja el haz incidente, y en una tercera posición neutra el haz incidente pasa a través del soporte. Por supuesto, otros diseños son posibles, como una rueda de tambor.
- Este telescopio 10 multivía comprende además un dispositivo óptico 85 dispuesto en la trayectoria óptica secundaria 80 y configurado para formar la imagen intermedia l_{int} , en combinación con el tercer espejo M_3 , una imagen final en un segundo plano focal P'_F del telescopio que corresponde a una distancia focal seleccionada f'
- 30 El dispositivo óptico 85 funciona preferentemente en transmisión en la segunda banda SB_2 , para ser compatible con un valor de distancia focal seleccionado f' muy inferior a f_1 y f_2 .
- El dispositivo 85 está configurado además para corregir las aberraciones compensables del telescopio y para optimizar la calidad de imagen en el segundo plano focal del telescopio P'_F según el criterio predeterminado.
- 35 Cumple la misma función compensatoria que los espejos esféricos M_{4_1}/M_{5_1} , M_{4_2}/M_{5_2} . Se trata normalmente de un objetivo dióptrico compuesto por varias lentes. Debido a la flexibilidad de diseño, las lentes pueden ser esféricas al tiempo que realicen la función de compensación.
- Un segundo detector D' está dispuesto en el segundo plano focal del telescopio P'_F , y presenta una sensibilidad en la segunda banda espectral SB_2 . Un filtro espectral F está preferentemente dispuesto en la trayectoria óptica secundaria, entre el soporte 40 y el segundo detector D' para seleccionar la banda espectral SB_2 y reflejar la luz fuera de SB_2 , para evitar luces parásitas.
- 40 De este modo, se realiza una vía adicional con una complejificación mecánica escasa.
- Para el ejemplo de un telescopio 10 que presenta una vía principal bifocal en el visible y una vía adicional infrarroja monofocal embarcado en un satélite, se busca obtener una vía infrarroja de menor resolución que la vía visible, pero de mayor campo, lo que se obtiene con una distancia focal f' más pequeña, normalmente de un factor 10, con respecto a la distancia focal más corta entre f_1 y f_2 . Por ejemplo una distancia focal en el visible del orden de la decena de metros y una distancia focal IR del orden del metro.
- 45 Al ser la posición del espejo M_3 para el funcionamiento en infrarrojo idéntica, para una de las distancias focales visibles f_1 o f_2 es posible una medida simultánea visible/IR.
- Según otro aspecto, la invención se refiere a un procedimiento 100 de determinación de combinaciones ópticas de un telescopio bifocal anastigmático con cinco espejos esféricos, comprendiendo el telescopio un primer espejo M_1 , un segundo espejo M_2 y un tercer espejo M_3 y un primer detector D dispuesto en un primer plano focal P_F comunes a una primera distancia focal f_1 y una segunda distancia focal f_2 del telescopio.
- 50 El telescopio comprende además un primer cuarto espejo M_{4_1} y un primer quinto espejo M_{5_1} asociados a f_1 , y un segundo cuarto espejo M_{4_2} y un segundo quinto espejo M_{5_2} asociados a f_2 .
- 55 Las formas y posiciones respectivas de los primer, segundo, tercer, primer cuarto y primer quinto espejos forman una primera combinación óptica asociada a la primera distancia focal: $M_1/M_2/M_3/M_{4_1}/M_{5_1}$
- Las formas y posiciones respectivas de los primer, segundo, tercer, segundo cuarto, y segundo quinto espejos forman una segunda combinación óptica asociada a la segunda distancia focal: $M_1/M_2/M_3/M_{4_2}/M_{5_2}$. Estos espejos son

asféricos.

El procedimiento 100 según la invención permite determinar la primera combinación óptica OC1 y la segunda combinación óptica OC2 asociadas respectivamente a f_1 y f_2 del telescopio 5MA, que presenta los tres primeros espejos M1/M2/M3 idénticos, y un plano focal común P_F .

- 5 Según una variante preferida, las posiciones respectivas de M_{4_1} y M_{4_2} son idénticas, así como las posiciones respectivas de M_{5_1} y M_{5_2} . Esto permite, como se ha visto anteriormente, efectuar el cambio de distancia focal por inclinación de un soporte único para cada cuarto y quinto espejo.

El procedimiento 100 ilustrado en la figura 8 presenta una primera etapa A que consiste en determinar, a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una primera combinación óptica inicial OC1i para la primera distancia focal f_1 :

OC1i: $M_{1_i} / M_{2_i} / M_{3_{1i}} / M_{4_{1i}} / M_{5_{1i}}$

El primer espejo M_{1_i} es cóncavo, el segundo espejo M_{2_i} es convexo, el tercer espejo $M_{3_{1i}}$ es cóncavo. El primer y el segundo espejo están configurados de modo que formen a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia lint situada entre el segundo espejo y el tercer espejo.

- 15 El tercer $M_{3_{1i}}$, el primer cuarto $M_{4_{1i}}$ y el primer quinto $M_{5_{1i}}$ espejos están configurados para formar a partir de dicha imagen intermedia lint una imagen en un primer plano focal inicial $P_{F_{1i}}$ del telescopio optimizando la calidad de imagen en este primer plano focal inicial $P_{F_{1i}}$ según un criterio predeterminado. Preferentemente, el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda WFE. Un ejemplo de esta primera combinación óptica inicial se ilustra en la figura 9.

- 20 Hay una pupila intermedia real cercana a $M_{4_{1i}}$. En efecto, para corregir eficazmente las aberraciones constantes en el campo, el espejo $M_{4_{1i}}$ debe colocarse cercano a la pupila intermedia (es decir, la imagen de la pupila de entrada por M1 M2 y M3)

Un espejo asférico se caracteriza por al menos un radio de curvatura (componente esférico) y una conicidad o uno o varios coeficientes de asfericidad (componente asférico). Cuando el espejo se acerca a un espejo plano (radio de curvatura muy grande) se muestra más eficaz caracterizarlo por el coeficiente de asfericidad A mejor que por una conicidad. Preferentemente, para acelerar los cálculos la conicidad de los espejos $M_{4_{1i}}$ y $M_{5_{1i}}$ (o su coeficiente de asfericidad) se fija a 0, es decir que son espejos esféricos. En efecto una asfericidad de estos espejos no es necesaria para que la primera distancia focal f_1 sea aplanética y anastigmática. Preferentemente, la etapa A se implementa para la distancia focal más larga, es este caso f_1 .

- 30 En una etapa B se determina, a partir de la primera combinación óptica inicial OC1i y de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una segunda combinación óptica inicial OC2i para la segunda distancia focal f_2 .

El cálculo se efectúa partiendo de OC1i y modificando las formas y/o las posiciones de los tercer, primer cuarto y primer quinto espejos de OC1i determinados en la etapa A para formar a partir de la imagen intermedia lint una imagen en un segundo plano focal inicial $P_{F_{2i}}$ del telescopio optimizando la calidad de imagen en este plano $P_{F_{2i}}$ según el criterio predeterminado, con un funcionamiento con una distancia focal f_2 . Las posiciones y formas de M_{1i} y M_{2i} se conservan idénticas.

OC2i: $M_{1_i} / M_{2_i} / M_{3_{2i}} / M_{4_{2i}} / M_{5_{2i}}$.

El plano focal $P_{F_{2i}}$ es una consecuencia del cálculo por las ecuaciones de Korsch para la obtención de una imagen aplanética y anastigmática sin curvatura de campo. Las variables de la optimización son los parámetros de los espejos mencionados anteriormente. Un ejemplo de segunda combinación inicial OC2i se ilustra en la figura 10.

- 35 Preferentemente en esta etapa B, las modificaciones consisten, para el tercer espejo, en la modificación de su sección cónica únicamente, es decir no de su radio de curvatura ni de su posición. Se busca en efecto, a la larga, obtener un espejo M3 único para las 2 distancias focales, se prevé por lo tanto una posición y un radio de curvatura idénticos a la distancia focal f_1 , la conicidad se determina, por su parte, por las ecuaciones de Korsch

- 45 La figura 11 da un ejemplo de cálculo de valores de OC1i y OC2i para un telescopio bifocal que presenta una pupila de entrada de 500 mm, una primera distancia focal f_1 de 10 m (larga) y una segunda distancia focal f_2 de 6,7 m. La distancia en la línea de un espejo se lee como siendo la distancia entre este espejo y el siguiente.

Este cálculo corresponde a la variante para la cual solamente se modifica la conicidad de M3 que pasa de -0,4 para OC1i a -0,39 para OC2i, permaneciendo el radio de curvatura y la posición (con respecto a M2) idénticas. El cálculo se inicia con $M_{4_{1i}}$ y $M_{5_{1i}}$ esféricos.

- 50 Los elementos que varían, por lo tanto, entre OC1i y OC2i son la conicidad del tercer espejo, los radios de curvatura de los cuartos y quintos espejos así como su forma, que se vuelve asférica, y la posición del quinto espejo que se modifica ligeramente. Se selecciona el coeficiente de asfericidad A para caracterizar la asfericidad de $M_{4_{2i}}$ y $M_{5_{2i}}$.

- 55 Finalmente, en una etapa C se determina, a partir de la primera combinación óptica inicial OC1i y de la segunda combinación óptica inicial OC2i, una primera combinación óptica final OC1f y una segunda combinación óptica final OC2f mediante un bucle de optimización, con la restricción del primer, segundo y tercer espejos (M_1 , M_2 , M_3) y del primer plano focal (P_F) comunes a las dos distancias focales (f_1, f_2), y para optimizar la calidad de imagen en dicho primer plano focal (P_F) del telescopio según un criterio predeterminado. En la optimización las formas y posiciones de

todos los espejos pueden variar con respecto a los puntos de partida OC1i y OC2i. Preferentemente, ya que esto no es útil, las posiciones de M1 y M2 no se modifican.

El ángulo de campo (off axis) está adaptado para cada distancia focal para poder organizar los haces ópticos LF1 y LF2.

5 Un ejemplo de combinación final de un telescopio 10 según la invención obtenida del procedimiento 100 según la invención se da en la figura 12.

Preferentemente como se ilustra en la figura 12, la optimización se realiza con la restricción adicional de las posiciones de M4₁ y M4₂ idénticas, y las posiciones de M5₁ y M5₂ idénticas, para facilitar el cambio de distancia focal, por simple inclinación del cuarto espejo entre M4₁ y M4₂ y del quinto espejo entre M5₁ y M5₂, por rotación alrededor de un eje ("flip/flop").

10 En este caso se trata, utilizando como punto de partida las dos combinaciones iniciales CO1i y CO2i, de determinar por optimización, las combinaciones finales OC1f y OC2f que presentan la mejor calidad de imagen al tiempo que comparten un plano focal común P_F en el que está situado el primer detector D. Esta optimización se efectúa con un software de cálculo óptico convencional de tipo CodeV o Zemax que permite minimizar la función de error de la macro de optimización creada.

15 Según una realización, el radio de curvatura de M4₁ asociado a la distancia focal más larga es superior o igual a 10000 mm.

La figura 13 ilustra valores calculados para las combinaciones CO1f y CO2f a partir de ejemplos de valores de las combinaciones CO1i y CO2i de la figura 11.

20 Se constata que las conicidades de los espejos M1 y M2 han evolucionado muy ligeramente con respecto a los valores de M1i y M2i.

Más generalmente también se habría podido tener una ligera variación de los radios de curvatura de M1 y M2 y de la posición de M3.

La conicidad de M3 se ha establecido en -0,39. Más generalmente habría podido evolucionar más claramente.

25 Las formas y posiciones de M4₁, M4₂, M5₁ y M5₂ también han evolucionado, habiéndose igualado las posiciones de M4₁ y M4₂ durante la optimización para ser compatibles con un soporte único, lo mismo ocurre para las posiciones de M5₁ y M5₂.

REIVINDICACIONES

1. Telescopio anastigmático bifocal (10) con cinco espejos esféricos que comprende:

- un primer espejo (M1) cóncavo, un segundo espejo (M2) convexo, un tercer espejo (M3) cóncavo y un primer detector (D), comunes a una primera (f_1) y una segunda (f_2) distancia focal del telescopio,
- un primer cuarto espejo (M4₁) y un primer quinto espejo (M5₁) asociados a la primera distancia focal (f_1), y un segundo cuarto espejo (M4₂) y un segundo quinto espejo (M5₂) asociados a la segunda distancia focal (f_2),

estando el cuarto y el quinto espejo asociados a una distancia focal retráctiles, para estar dispuestos en una trayectoria óptica de un haz correspondiente a dicha distancia focal asociada cuando el telescopio funciona con dicha distancia focal, y fuera de la trayectoria óptica de un haz correspondiente a la otra distancia focal cuando el telescopio funciona con la otra distancia focal,

- estando el primer espejo (M1) y el segundo espejo (M2) dispuestos para formar, a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia (lint) situada entre el segundo espejo (M2) y el tercer espejo (M3),
- y para cada distancia focal:

- * estando el tercer espejo así como el cuarto y el quinto espejo asociados a dicha distancia focal configurados para formar a partir de esta imagen intermedia una imagen final en un primer plano focal (P_F) del telescopio común a las dos distancias focales y en el que está colocado el primer detector (D),

- * estando las formas y posiciones fijas de cada espejo determinadas a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, con la restricción del primer, segundo y tercer espejo (M1, M2, M3) y del primer plano focal (P_F) comunes a las dos distancias focales, y para optimizar la calidad de imagen en el primer plano focal (P_F) del telescopio según un criterio predeterminado.

2. Telescopio según la reivindicación 1, en el que los primer y segundo cuartos espejos (M4₁, M4₂) están dispuestos sustancialmente en una misma posición, y/o en el que los primer y segundo quintos espejos (M5₁, M5₂) están dispuestos sustancialmente en una misma posición.

3. Telescopio según la reivindicación 2, en el que los primer y segundo cuartos espejos (M4₁, M4₂) están montados sobre un primer soporte único, operándose la conmutación por rotación alrededor de un primer eje, y/o en el que los primer y segundo quintos espejos (M5₁, M5₂) están montados sobre un segundo soporte único, realizándose la conmutación por rotación alrededor de un segundo eje.

4. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores, en el que el primer cuarto espejo (M4₁) y el segundo cuarto espejo (M4₂) presentan un radio de curvatura superior a 1000 mm.

5. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda (WFE).

6. Telescopio según una de las reivindicaciones anteriores en el que dichos primer y segundo cuartos espejos retráctiles (M4₁, M4₂) están montados sobre un soporte único (40), comprendiendo dicho soporte además una posición para la cual ninguno de los cuartos espejos retráctiles figura en la trayectoria óptica del haz incidente sobre dicho soporte, pasando el haz entonces a través del soporte según una trayectoria óptica secundaria (80), comprendiendo el telescopio además:

- un dispositivo óptico (85) dispuesto en la trayectoria óptica secundaria (80), estando el dispositivo óptico (85) configurado para formar a partir de dicha imagen intermedia, en combinación con el tercer espejo (M3), una imagen final en un segundo plano focal (P'_F) del telescopio que corresponde a una distancia focal seleccionada (f') y para optimizar la calidad de imagen en el segundo plano focal (P'_F) según dicho criterio predeterminado,
- y que comprende además un segundo detector (D') dispuesto en el segundo plano focal del telescopio (P'_F), y sensible en una segunda banda espectral (SB2) diferente de una primera banda espectral de sensibilidad (SB1) del primer detector.

7. Telescopio según la reivindicación 6, en el que el dispositivo óptico (85) funciona en transmisión en la segunda banda espectral (SB2).

8. Telescopio según las reivindicaciones 6 o 7 en el que la primera banda espectral (SB1) está comprendida en el visible y la segunda banda espectral (SB2) está comprendida en el infrarrojo.

9. Telescopio según una de las reivindicaciones 6 a 8, en el que la distancia focal seleccionada (f) presenta un valor inferior a las primera y segunda distancias focales.

10. Procedimiento de determinación de combinaciones ópticas de un telescopio bifocal anastigmático con cinco espejos esféricos, comprendiendo el telescopio:

- un primer espejo (M1), un segundo espejo (M2) y un tercer espejo (M3) y un primer detector (D) dispuesto en un primer plano focal (P_F) comunes a una primera (f_1) y una segunda (f_2) distancia focal del telescopio,

- un primer cuarto espejo (M_{4_1}) y un primer quinto espejo (M_{5_1}) asociados a la primera distancia focal (f_1), siendo las formas y posiciones respectivas de los primer (M_1), segundo (M_2), tercer (M_3), primer cuarto (M_{4_1}) y primer quinto (M_{5_1}) espejos fijas y formando una primera combinación óptica asociada a la primera distancia focal,
- un segundo cuarto espejo (M_{4_2}) y un segundo quinto espejo (M_{5_2}) asociados a una segunda distancia focal (f_2), siendo las formas y posiciones respectivas de los primer (M_1), segundo (M_2), tercer (M_3), segundo cuarto (M_{4_2}) y segundo quinto (M_{5_2}) espejos fijas y formando una segunda combinación óptica (OC_{2f}) asociada a la segunda distancia focal,

comprendiendo el procedimiento las etapas que consisten en:

- A determinar, a partir de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una primera combinación óptica inicial (OC_{1i}) para la primera distancia focal (f_1), siendo el primer espejo ($M_{1_{1i}}$) cóncavo, siendo el segundo espejo ($M_{2_{1i}}$) convexo, siendo el tercer espejo ($M_{3_{1i}}$) cóncavo, estando el primer (M_1) y el segundo (M_2) espejos configurados de modo que formen a partir de un objeto en el infinito una imagen intermedia (lint) situada entre el segundo espejo y el tercer espejo, estando el tercer ($M_{3_{1i}}$), el primer cuarto ($M_{4_{1i}}$) y el primer quinto ($M_{5_{1i}}$) espejos configurados para formar a partir de dicha imagen intermedia (lint) una imagen en un primer plano focal inicial ($P_{F_{1i}}$) del telescopio optimizando la calidad de imagen en dicho primer plano focal inicial ($P_{F_{1i}}$) según un criterio predeterminado,
- B determinar, a partir de la primera combinación óptica inicial (OC_{1i}) y de las ecuaciones de Korsch generalizadas con 5 espejos, una segunda combinación óptica inicial (OC_{2i}) para la segunda distancia focal (f_2), modificando las formas y/o las posiciones de dichos tercer, primer cuarto y primer quinto espejos determinadas en la etapa A, para formar a partir de dicha imagen intermedia (lint) una imagen en un segundo plano focal inicial ($P_{F_{2i}}$) del telescopio optimizando la calidad de imagen en dicho segundo plano focal inicial ($P_{F_{2i}}$) según dicho criterio predeterminado,
- C determinar, a partir de las primera (OC_{1i}) y segunda (OC_{2i}) combinaciones ópticas iniciales, una primera (OC_{1f}) y una segunda (OC_{2f}) combinación óptica final mediante un bucle de optimización, con la restricción del primer, segundo y tercer espejos (M_1 , M_2 , M_3) y del primer plano focal (P_F) comunes a las dos distancias focales (f_1 , f_2), y para optimizar la calidad de imagen en dicho primer plano focal (P_F) del telescopio según un criterio predeterminado.

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que las formas respectivas del primer cuarto ($M_{4_{1i}}$) y del primer quinto ($M_{5_{1i}}$) espejos determinados en la etapa A se imponen esféricas.

12. Procedimiento según las reivindicaciones 10 u 11, en el que la primera focal es la focal más larga.

- 13. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 12, en el que una forma de espejo está definida por, al menos, un radio de curvatura y una cónica, y en el que las modificaciones de la etapa B consisten, para el tercer espejo, en la modificación de su cónica únicamente, es decir sin modificar su radio de curvatura ni su posición.

- 14. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 13 en el que la etapa C se efectúa con la restricción adicional de las posiciones de los primer (M_{4_1}) y segundo (M_{4_2}) cuartos espejos iguales, y de las posiciones de los primer (M_{5_1}) y segundo (M_{5_2}) quintos espejos iguales.

15. Procedimiento según una de las reivindicaciones 10 a 14, en el que el criterio predeterminado consiste en minimizar un error de forma de onda (WFE).

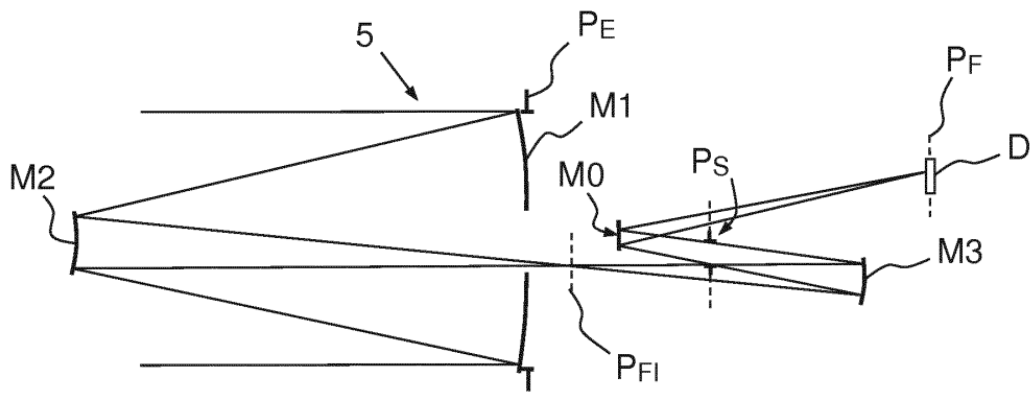


FIG.1

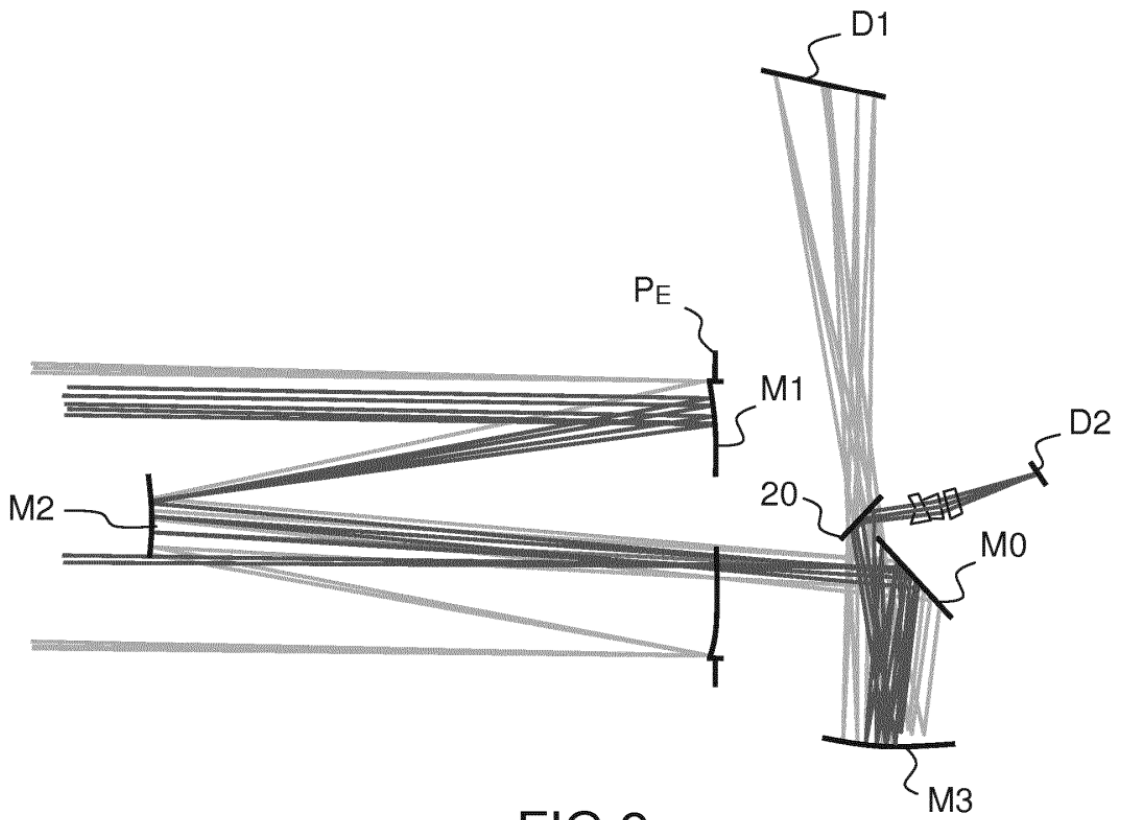
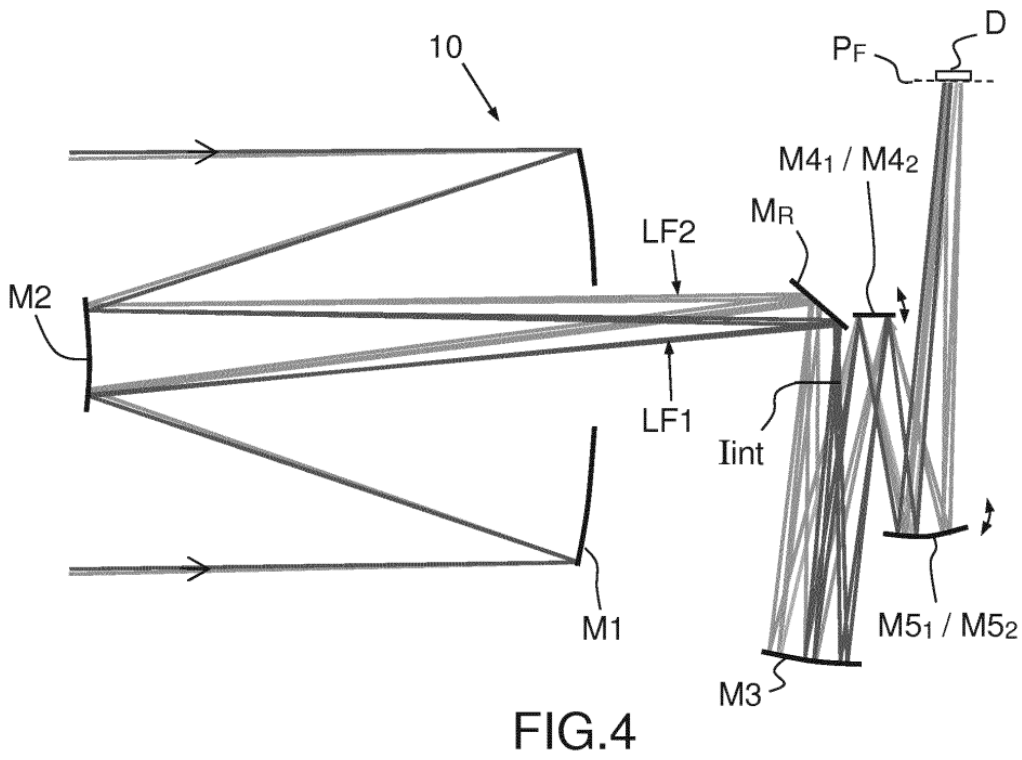
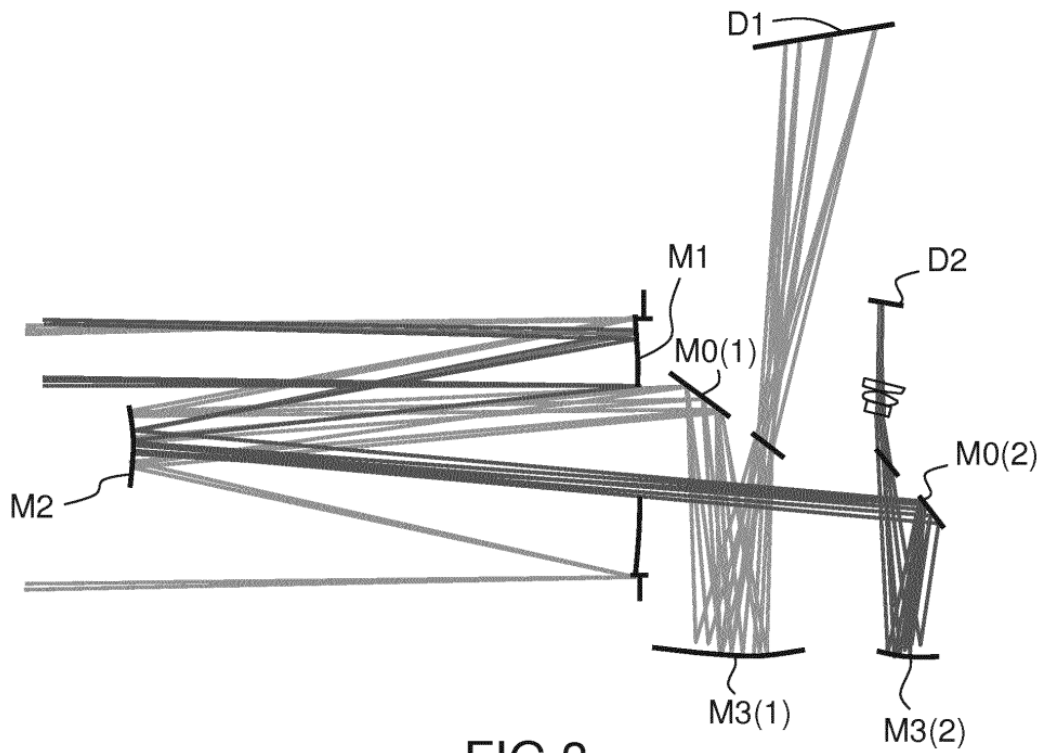


FIG.2



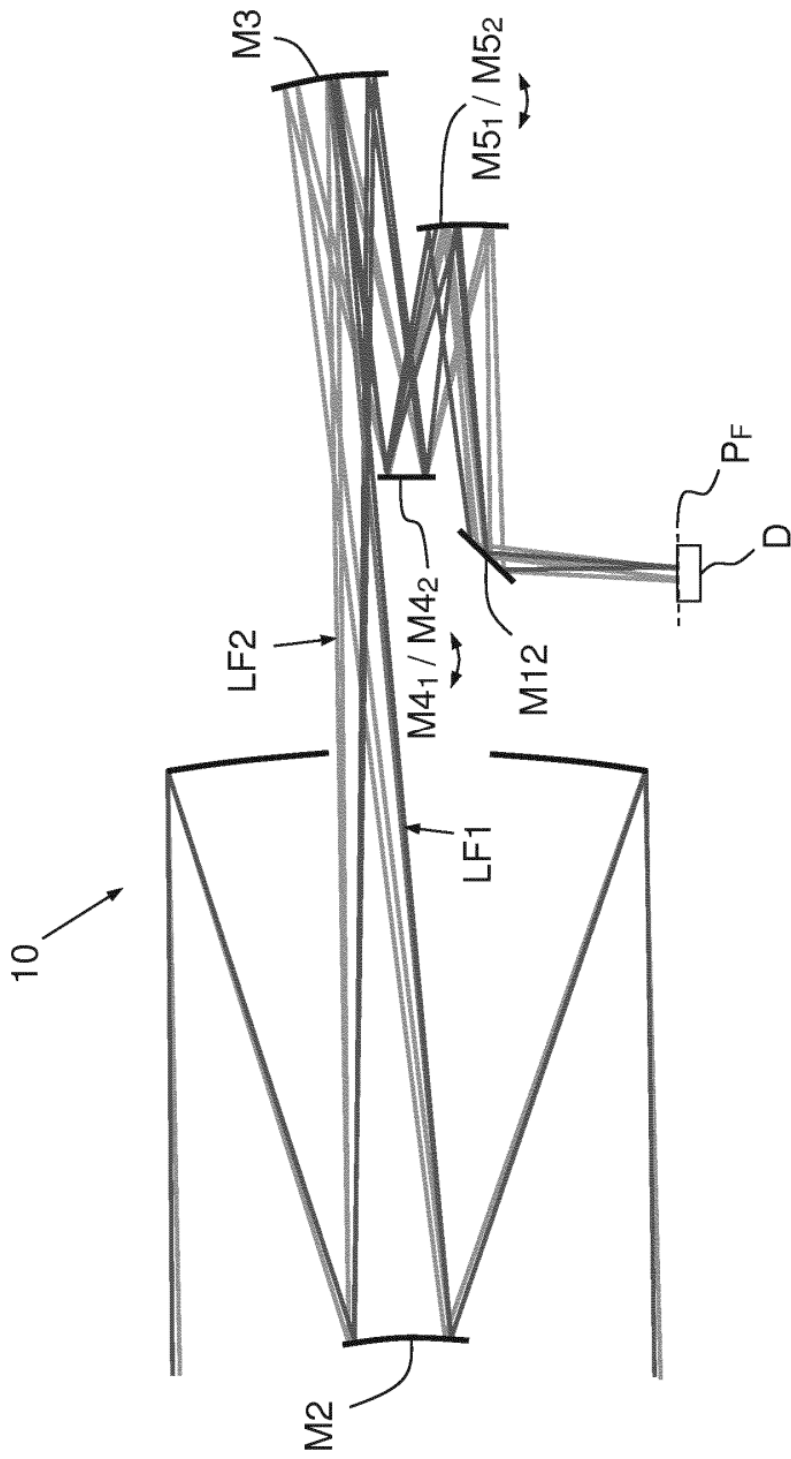


FIG.5

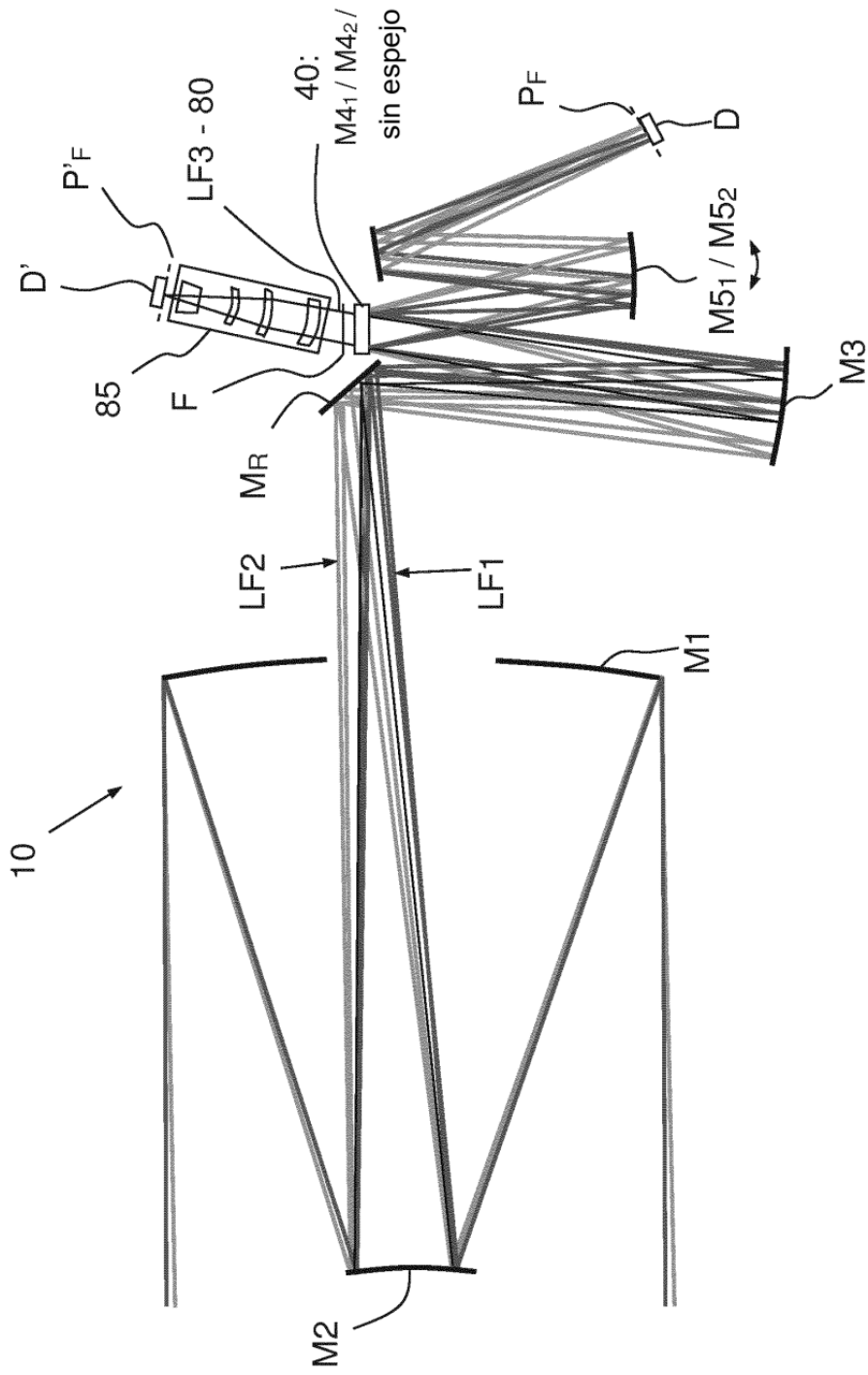


FIG.6

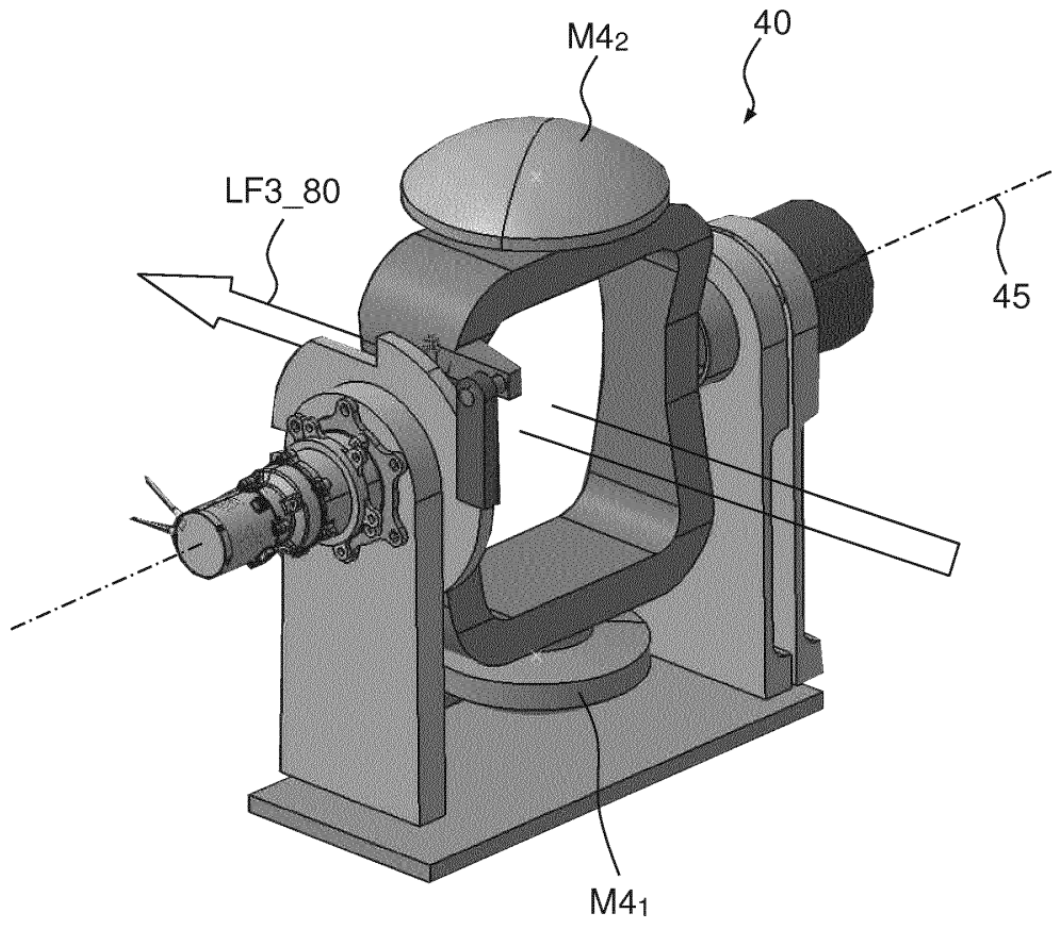


FIG.7

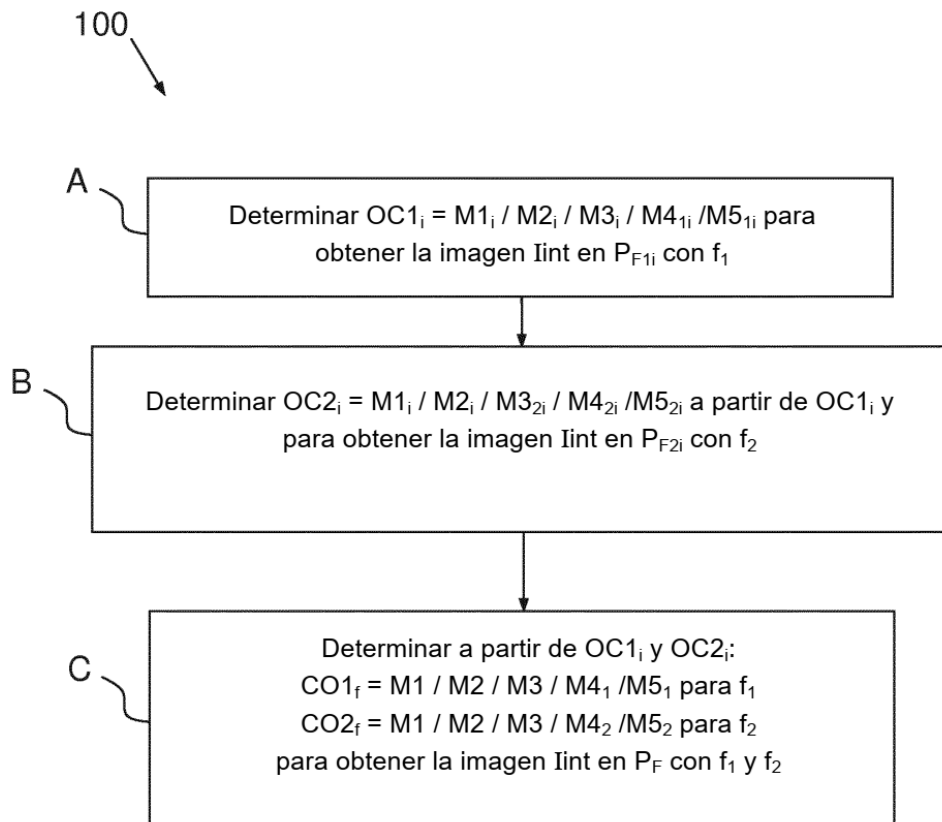


FIG.8

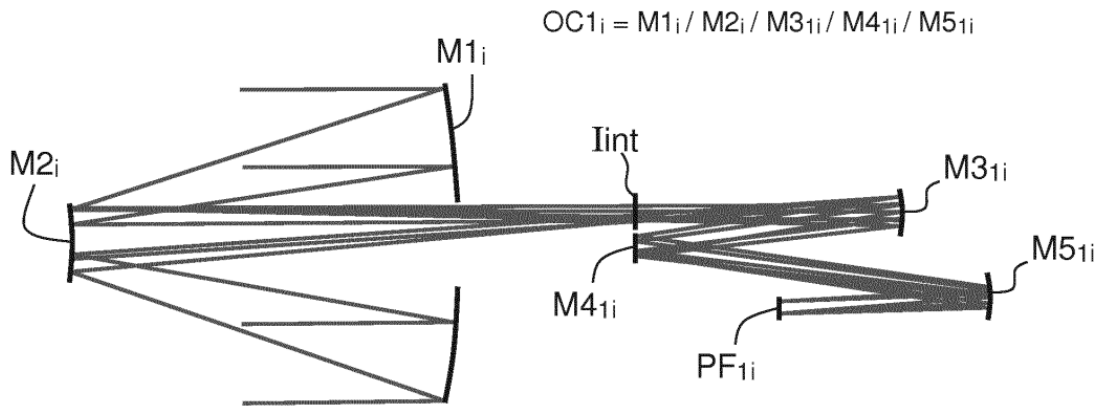


FIG.9

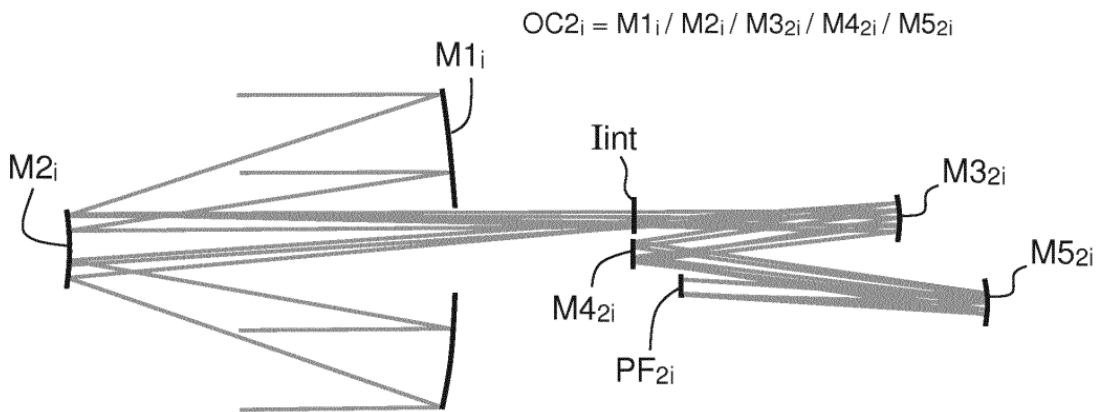


FIG.10

	Espejo	Forma	Radio (mm)	Conicidad	Coef. de asfericidad A	Distancia (mm)
OC1_i	M1_i	Cóncavo	-4000	-1,02	x	1500
	M2_i	Convexo	-1364	-3,19	x	3000
	M3_{1i}	Cóncavo	-1756	-0,40	x	1200
	M4_{1i}	Convexo	-1673	x	0	900
	M5_{1i}	Cóncavo	-1955	x	0	1840
OC2_i	M1_i	Cóncavo	-4000	-1,02	x	1300
	M2_i	Convexo	-1364	-3,19	x	2800
	M3_{2i}	Cóncavo	-1756	-0,39	x	900
	M4_{2i}	Convexo	-1381	x	-7,46E-11	1200
	M5_{2i}	Cóncavo	-1568	x	-4,78E-12	1040

FIG.11

$OC1_f = M1 / M2 / M3 / M4_1 / M5_2$
 $OC2_f = M1 / M2 / M3 / M4_2 / M5_2$

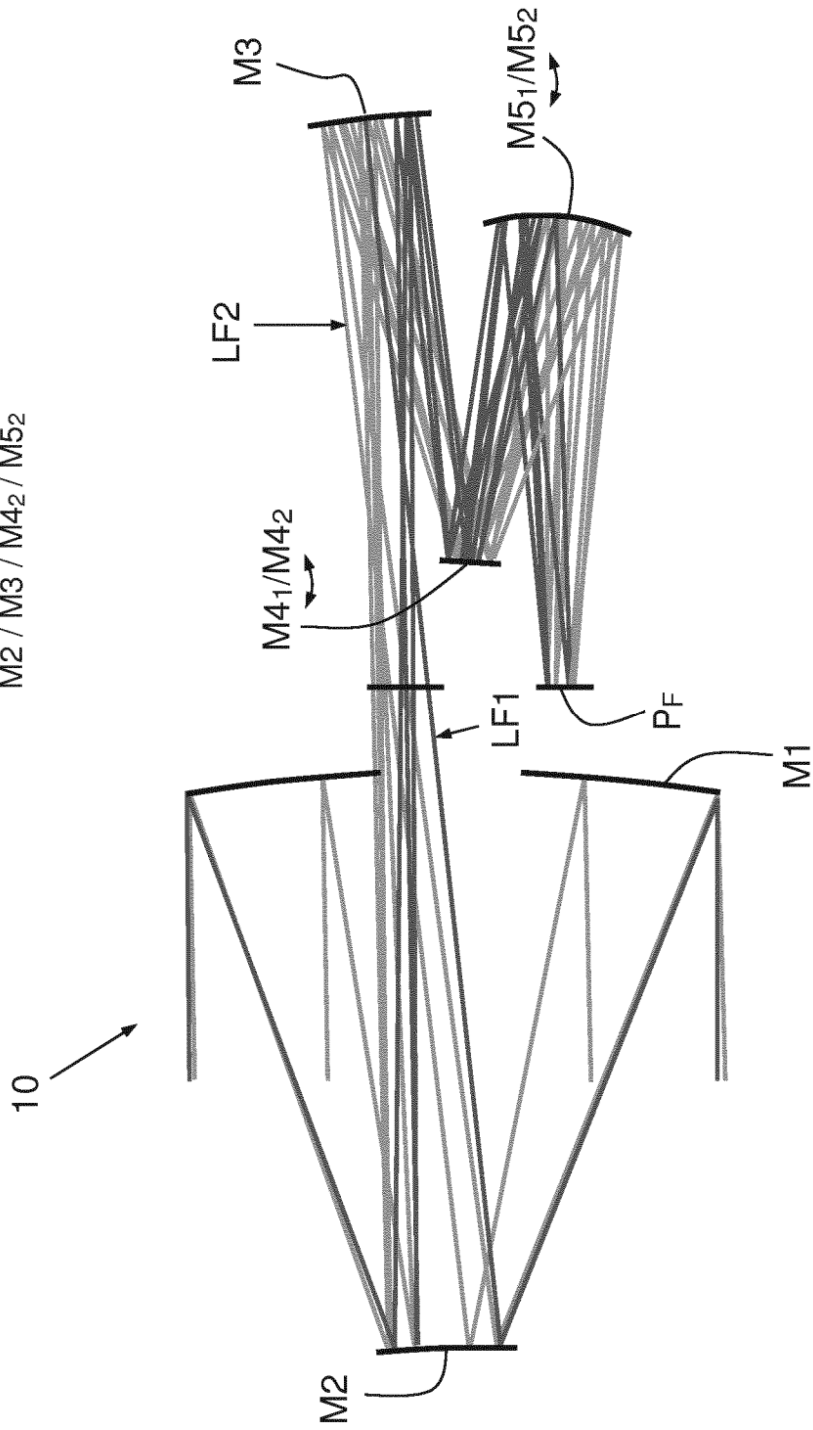


FIG.12

	Espejo	Forma	Radio (mm)	Conicidad	Coef. de asfericidad A	Distancia (mm)
OC1_f	M1	Cóncavo	-4000	-1,03	0	1500
	M2	Convexo	-1364	-3,08	0	3000
	M3	Cóncavo	-1756	-0,39	0	1200
	M4₁	Convexo	-2255	0	3,79E-10	900
	M5₁	Cóncavo	-2008	0	-1,32E-13	1550
OC2_f	M1	Cóncavo	-4000	-1,03	0	1500
	M2	Convexo	-1364	-3,08	0	3000
	M3	Cóncavo	-1756	-0,39	0	1200
	M4₂	Convexo	-1177	0	3,05E-10	900
	M5₂	Cóncavo	-1614	0	-4,20E-12	1550

FIG.13