

Diseño y desarrollo prototipo de un coronógrafo digital adaptativo de vórtices ópticos

Juan José Cadavid Muñoz

Director:

Ph.D. René Restrepo Gómez

Co director:

Ph.D. Edgar Rueda Muñoz

DF0727 - TRABAJO DE GRADO

Maestría en Física Aplicada

2019

Contenido temático

[1] Parte Introductoria:

- **Aspectos formales del trabajo**
 - Planteamiento y Objetivos
 - Metodología

[2] Parte Conceptual y Metodológica

- **El sistema coronográfico**
 - El coronógrafo de vórtices ópticos
 - El Diseño prototipo y Metodología de análisis

[3] Parte de Resultados Coronográficos

- **Análisis de la Simulación**
 - Planos de la PSF
 - Iluminación gaussiana
- **Análisis del experimento**
 - Planos de la PSF del PLUTO y LC2002
 - Sistema telescópico
- **Conclusiones**
- **Referencias**

[1] Parte Introdutoria





"Looking for life in all the right places"

NASA - EXOPLANET EXPLORATION



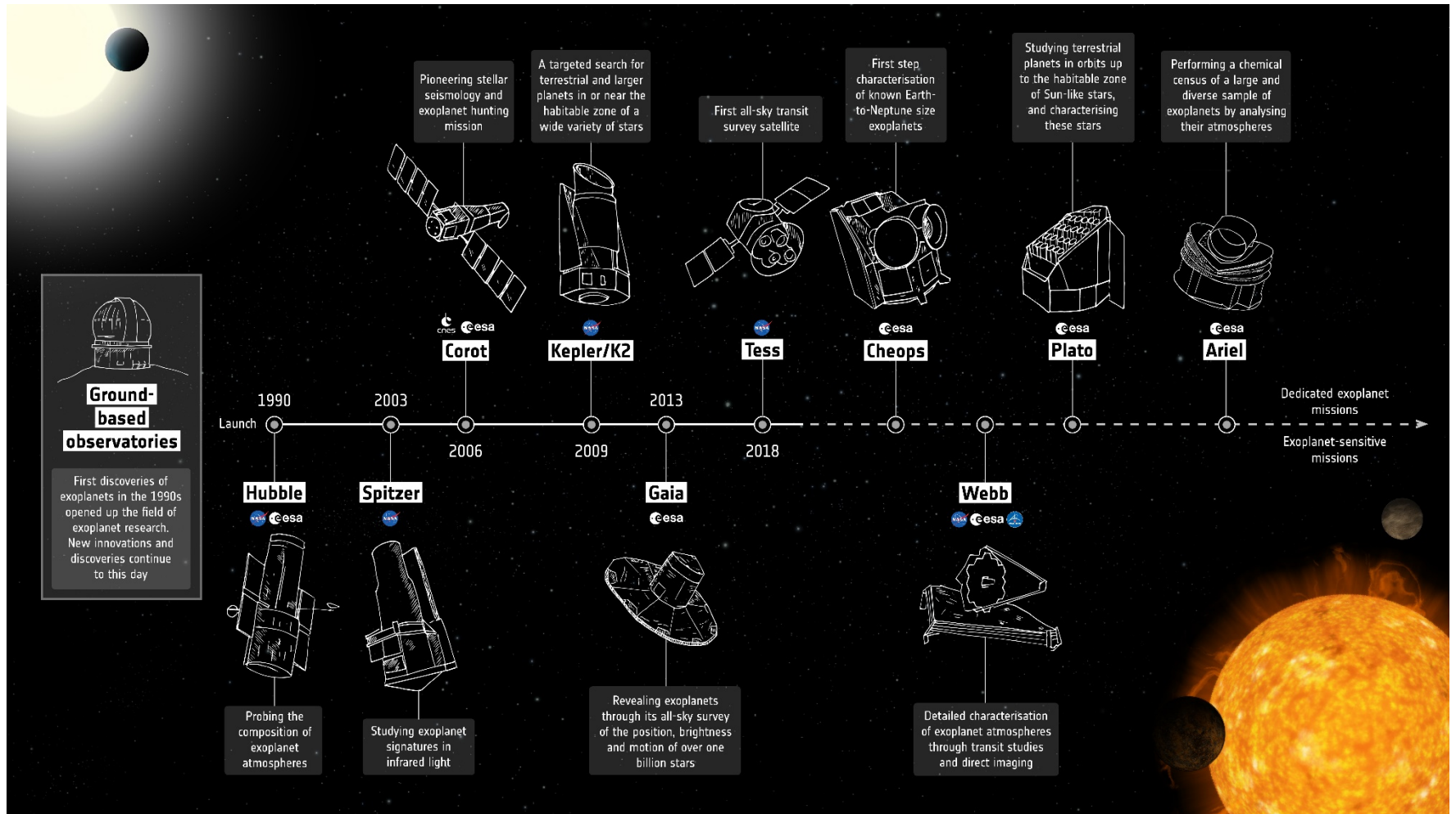
Inspira Crea Transforma •

Imagen tomada de:

NASA - EXOPLANET EXPLORATION. "The search for life - Life Signs". <https://exoplanets.nasa.gov/4the-search-for-life/life-signs/>

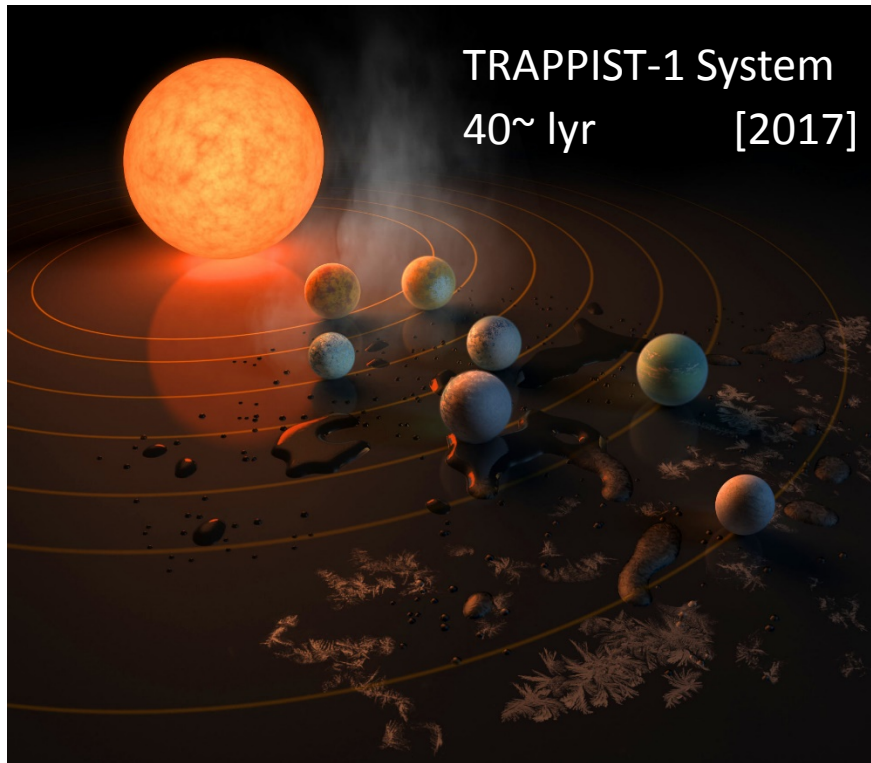
UNIVERSIDAD
EAFIT[®]

La búsqueda de planetas extrasolares



¿Cómo encontrar objetos 10^{10} veces más tenues?

Conocer planetas habitables ha sido uno de los intereses científicos y sociales que ha planteado el reto de encontrar vida extrasolar en diferentes partes del universo.



WFIRST / AFTA Coronagraph

Direct Imaging of our Nearest Exoplanet Neighbors

Coronagraph Instrument

- Imaging and spectral channels
- 0.4 – 1 μm bandpass
- $\leq 10^{-9}$ detection contrast
- 100 mas inner working angle at 0.4 μm
- R ~ 70

Coronagraph Science

- Imaging and spectroscopy of exoplanet atmospheres down to a few Earth masses
- Study populations of debris disks

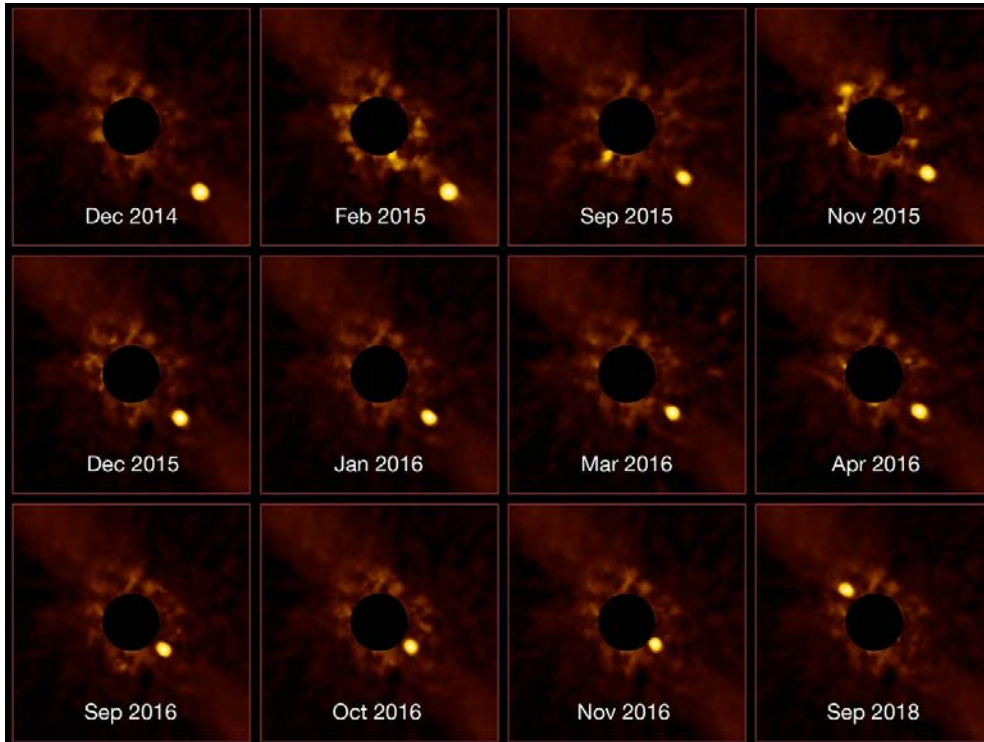
No Mask **With Mask** **With Mask and Deformable Mirrors**

The diagram shows three stages of coronagraph technology. The first stage, 'No Mask', shows a bright star with a large, multi-lobed diffraction pattern. The second stage, 'With Mask', shows the star with a smaller, more circular diffraction pattern. The third stage, 'With Mask and Deformable Mirrors', shows the star with a very small, well-defined diffraction pattern, allowing for the detection of nearby exoplanets.

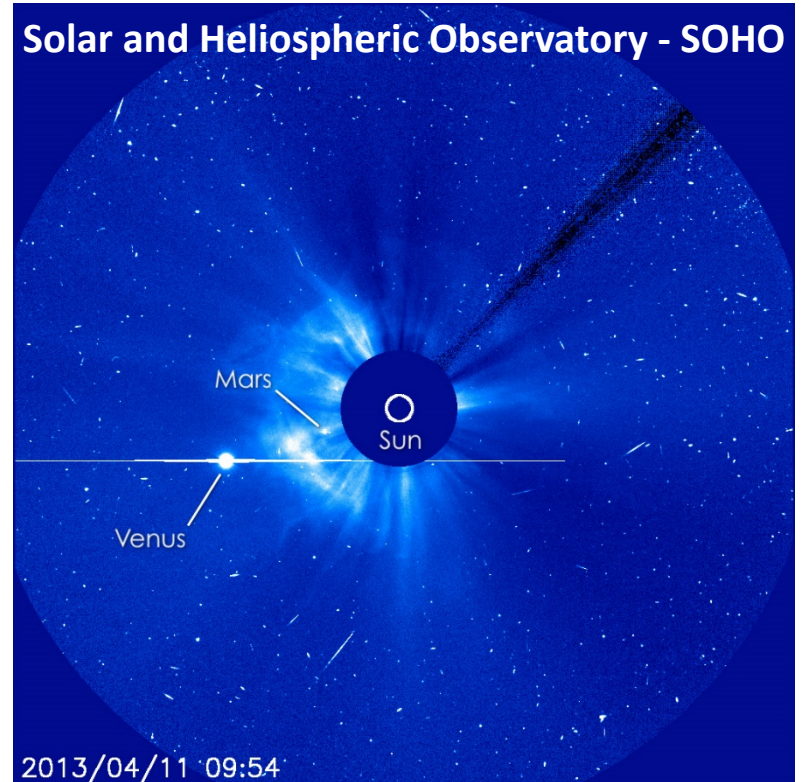
Coronagraph will develop the technologies for New Worlds Telescope mission

La coronografía en la exploración

La coronografía es una técnica de formación de imagen de alto contraste, que busca reducir la luminosidad relativa de un cuerpo central para explorar sus alrededores.

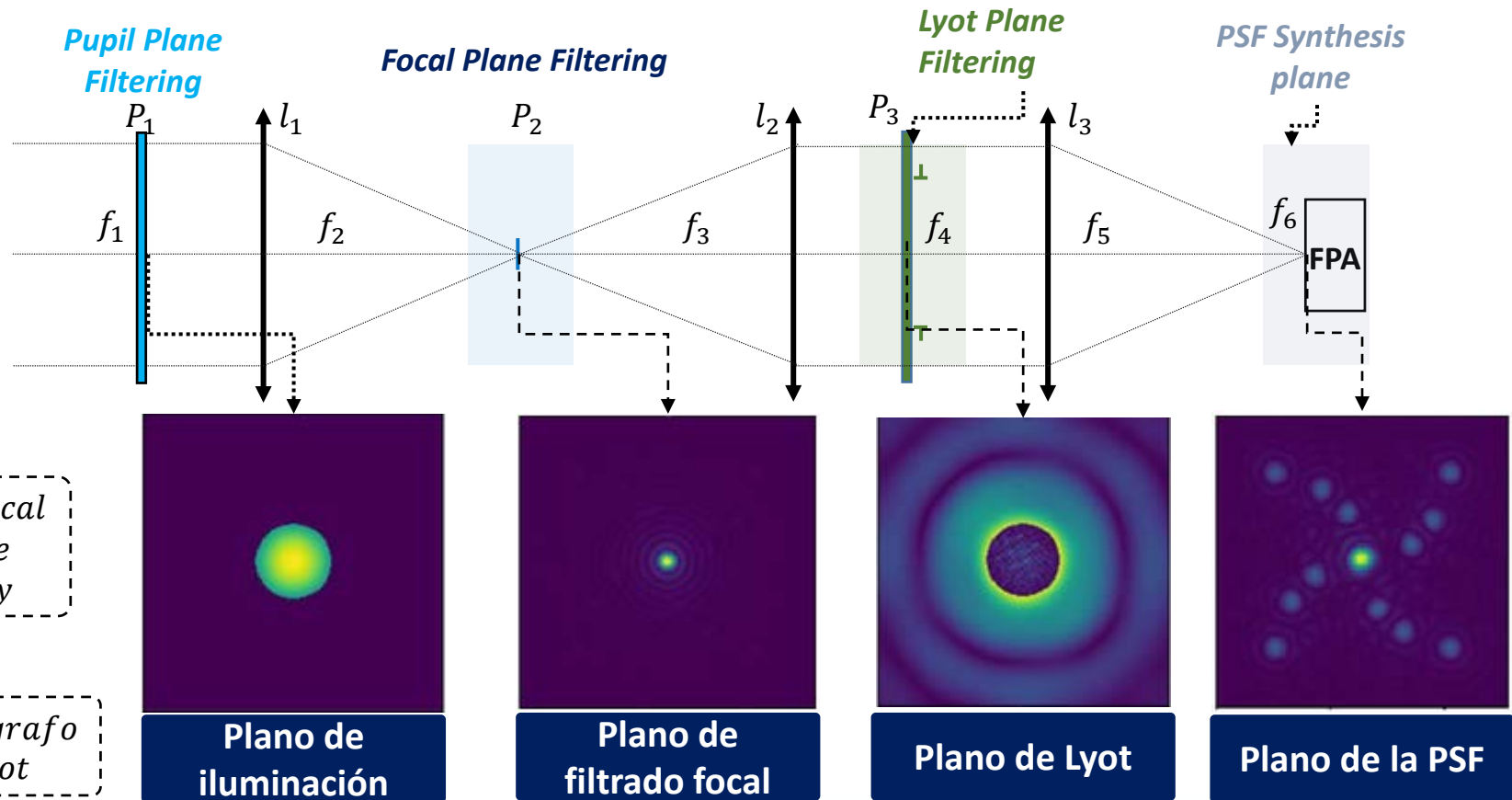


β - Pictoris b – SPHERE/Very Large Telescope VLP



Descripción general de un coronógrafo

Un coronógrafo es un procesador óptico 4F de alto contraste que modifica el campo, para atenuar la intensidad máxima incidente y extender el rango dinámico de detección.



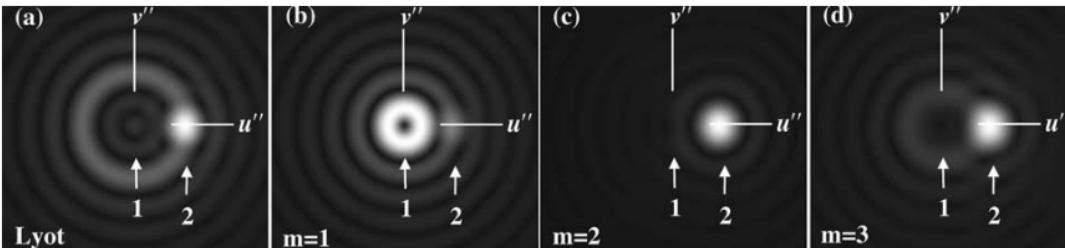
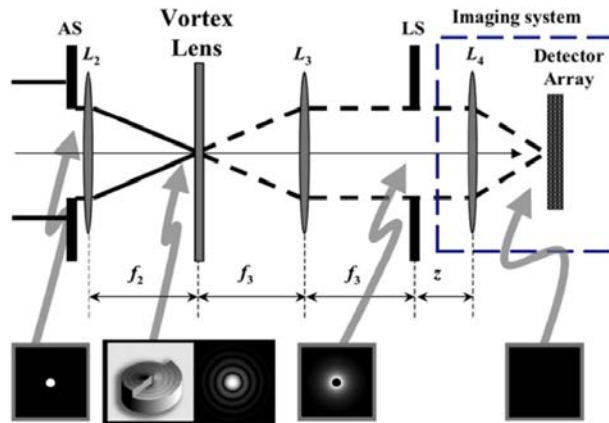
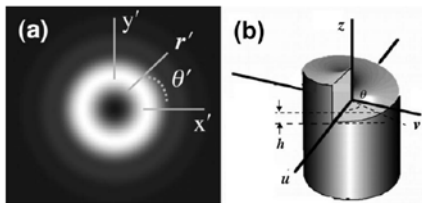
Aspectos formales del trabajo



El coronógrafo de vórtices ópticos

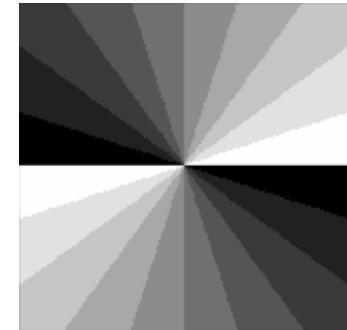
The optical vortex coronagraph - Grover A Swartzlander Jr

Primer concepto con vórtices escalares – 2005



- Lyot Stop (LS)
- Aperture Stop (AS)

El sistema utiliza un filtro focal de fase, que es descrito por una máscara espiral



La carga topológica 2 supone tener el mejor contraste

Primeros acercamientos a la coronografía

En el 2018 el grupo de Óptica Aplicada de EAFIT, en conjunto con unos trabajos preliminares del astrónomo Andrés Izquierdo de la universidad de Antioquia, inicia un estudio instrumental

Formalización del trabajo investigativo

ESTUDIO EVALUATIVO DE UN CORONÓGRAFO DIGITAL EXPERIMENTAL CON UN MODULADOR ESPACIAL DE LUZ DE REFLEXIÓN

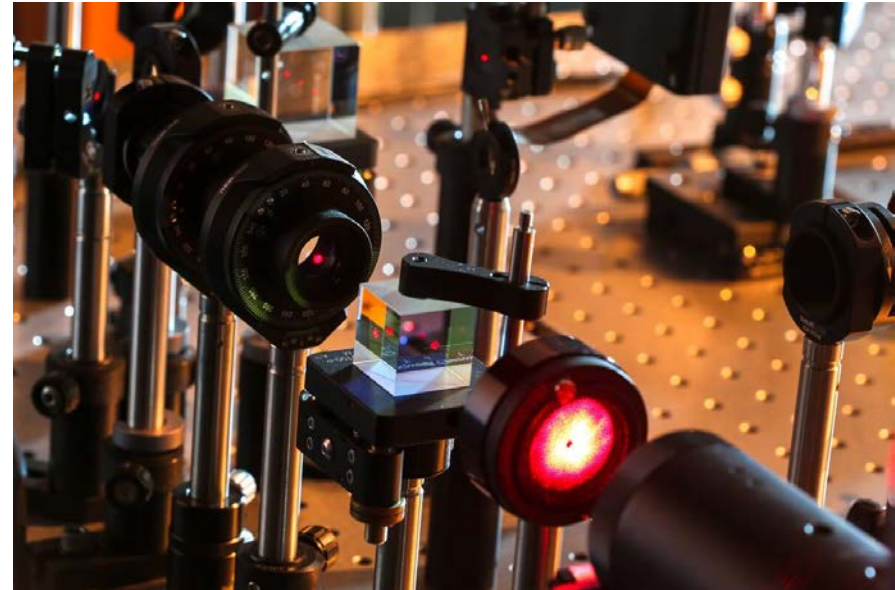
Presentado por: Samuel Plazas Escudero

Director: Ing. Juan José Cadavid Muñoz

Co-Director: PhD. René Restrepo Gómez

Coordinador del curso: PhD. Juan Manuel Jaramillo Ocampo

Trabajo de Grado
Grupo de Óptica Aplicada
Ingeniería Física
Departamento de Ciencias Físicas
Escuela de Ciencias
Universidad EAFIT



La primera aproximación buscó entender las capacidades de contraste con fuente binaria.

Planteamiento del problema

Pregunta de investigación: ¿Cómo es afectada la eficiencia de extinción con la discretización de la fase en diversas cargas topológicas para los sistemas de modulación a reflexión y transmisión?

Con el estudio se busca:

- Analizar el filtrado del cuerpo central
- Establecer métricas cuantitativas
- Definir los parámetros de mejor rendimiento coronográfico

El trabajo se plantea en tres frentes:

Experimental

Simulación

Instrumental

Preguntas generadoras: ¿Por qué una carga topológica de segundo orden? ¿Cómo es su desempeño en un sistema digital?

Objetivos de la propuesta

Objetivo General

Diseñar y desarrollar un **prototipo** de coronógrafo **digital adaptativo de vórtices ópticos** a partir de la evaluación **comparativa de tecnologías de modulación basadas en cristal líquido** y el estudio de la **discretización de la fase**.

Objetivos de la propuesta

Objetivos Específicos:

Frente de Diseño e Instrumentación Óptica

- **Simular un coronógrafo de plano focal** a través de las herramientas computacionales.
- **Diseñar un sistema coronográfico de vórtice óptico** a nivel de laboratorio utilizando el diseño computacional en OpticStudio.
- **Instrumentar un procesador coronográfico adaptativo** que permita el uso de diferentes fuentes de iluminación y dos sistemas de modulación.

Objetivos de la propuesta

Objetivos Específicos:

Frentes de análisis computacional y experimental

- **Crear un banco de datos experimentales y simulados** en ambos sistemas de modulación, a partir del registro de intensidades de los planos de Lyot y PSF*
- **Establecer la métrica de análisis** a partir del comportamiento identificado en el banco de datos para determinar el tipo de estudio que se realizará sobre las mediciones.
- **Analizar las características de extinción de luz** a partir del estudio propuesto para la cuantificación de los resultados que permita establecer la configuración de mejor rendimiento.
- **Integrar un sistema telescópico** a partir de sistemas *relay* para el estudio del funcionamiento del procesador coronográfico.

La instrumentación – Los moduladores



Pioneers in Photonic Technology

PLUTO – VIS-014 Reflective Phase Only SLM

DAC: Digital Adaptive Coronagraphy



LC 2002 Transmissive SLM – 8Bits (256)

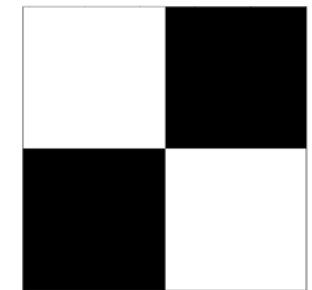
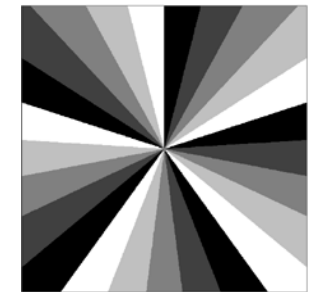
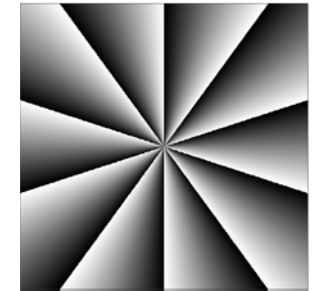
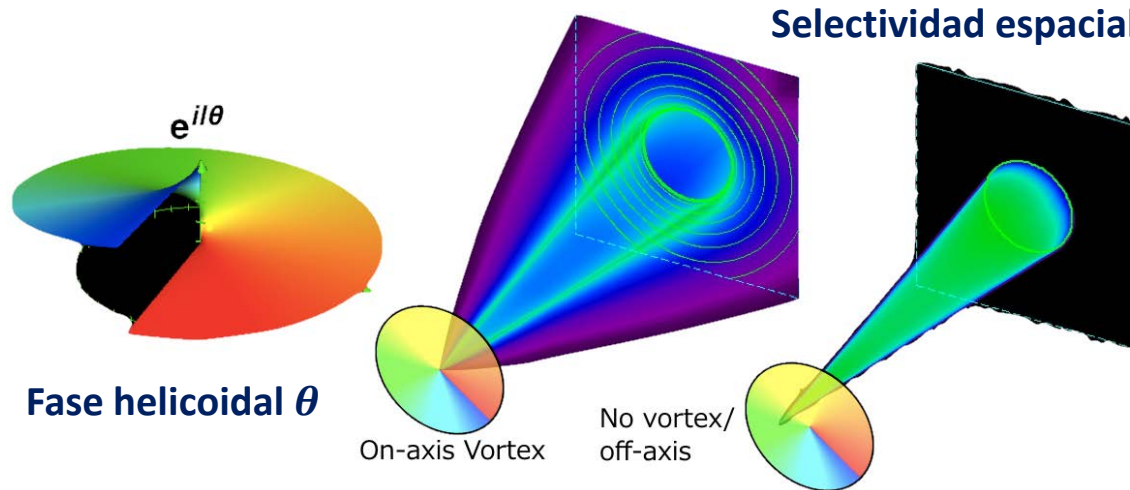
Con el estudio se busca plantear una métrica comparativa bajo las pertinentes condiciones de la modulación en consideración, para proponer los alcances de ambas tecnologías en el campo coronográfico de DAC de Vórtices

[2] Parte Conceptual y Metodológica



El coronógrafo de vórtices ópticos

Este sistema hace parte del grupo de los coronógrafos de Lyot, en donde se incorpora una transición helicoidal de fase en el plano focal.



La estructura define la técnica

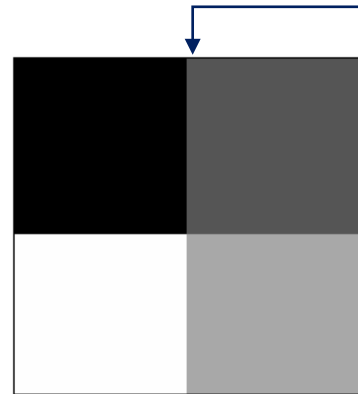
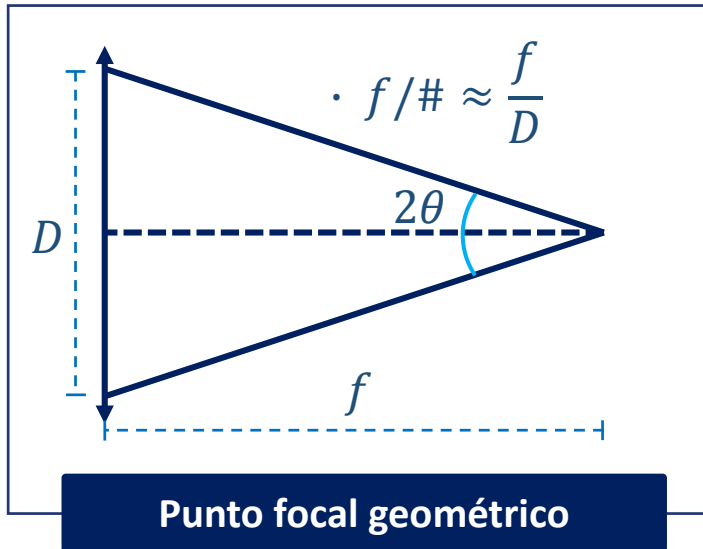
Este filtro produce una circulación de energía fuera de eje, al inducir un momento orbital angular con alta direccionalidad espacial.

$$l = \frac{1}{2\pi} \oint \nabla \phi ds$$

Número de transiciones singulares de fase

Muestreo de la máscara digital

El muestreo depende del tamaño focal y la resolución del modulador



Para generar un vórtice de primer orden, se requieren 4 píxeles

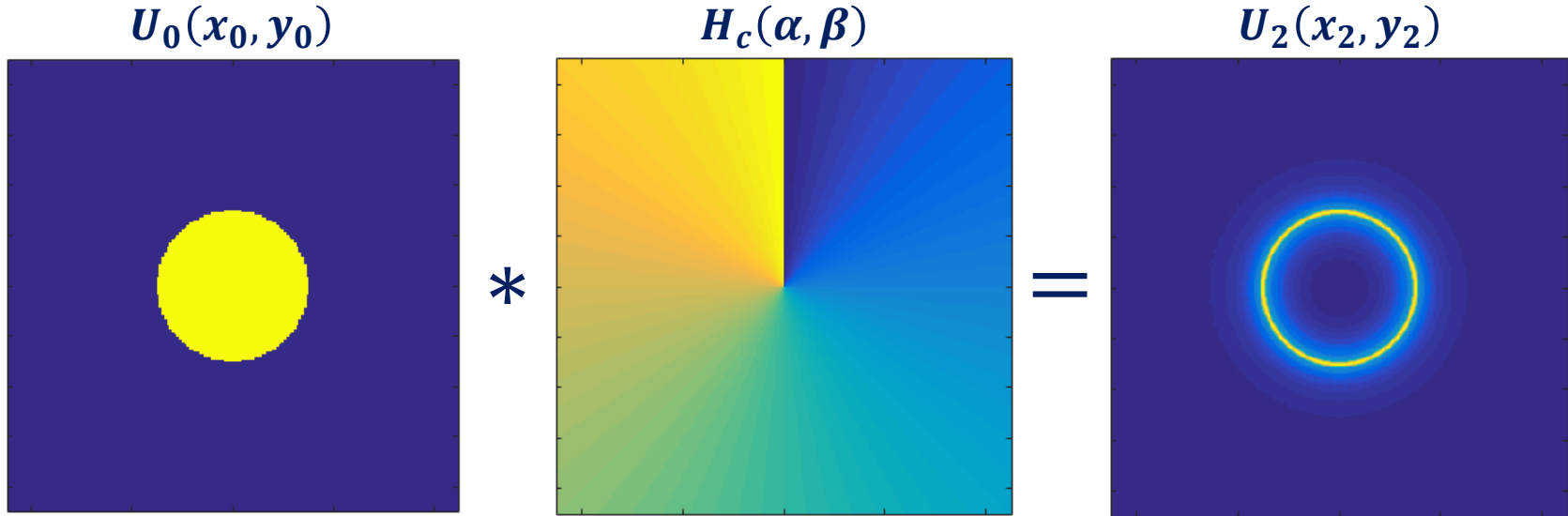
Se compensa con corrimientos focales Δf

Se deduce el criterio

$$\Delta f \approx \begin{cases} 0 & | \quad 1.22\lambda \cdot F/\# > 2l \cdot PP \\ 2l \cdot PP \cdot \frac{\sqrt{1 - NA^2}}{NA} & | \quad 1.22\lambda \cdot F/\# < 2l \cdot PP \end{cases}$$

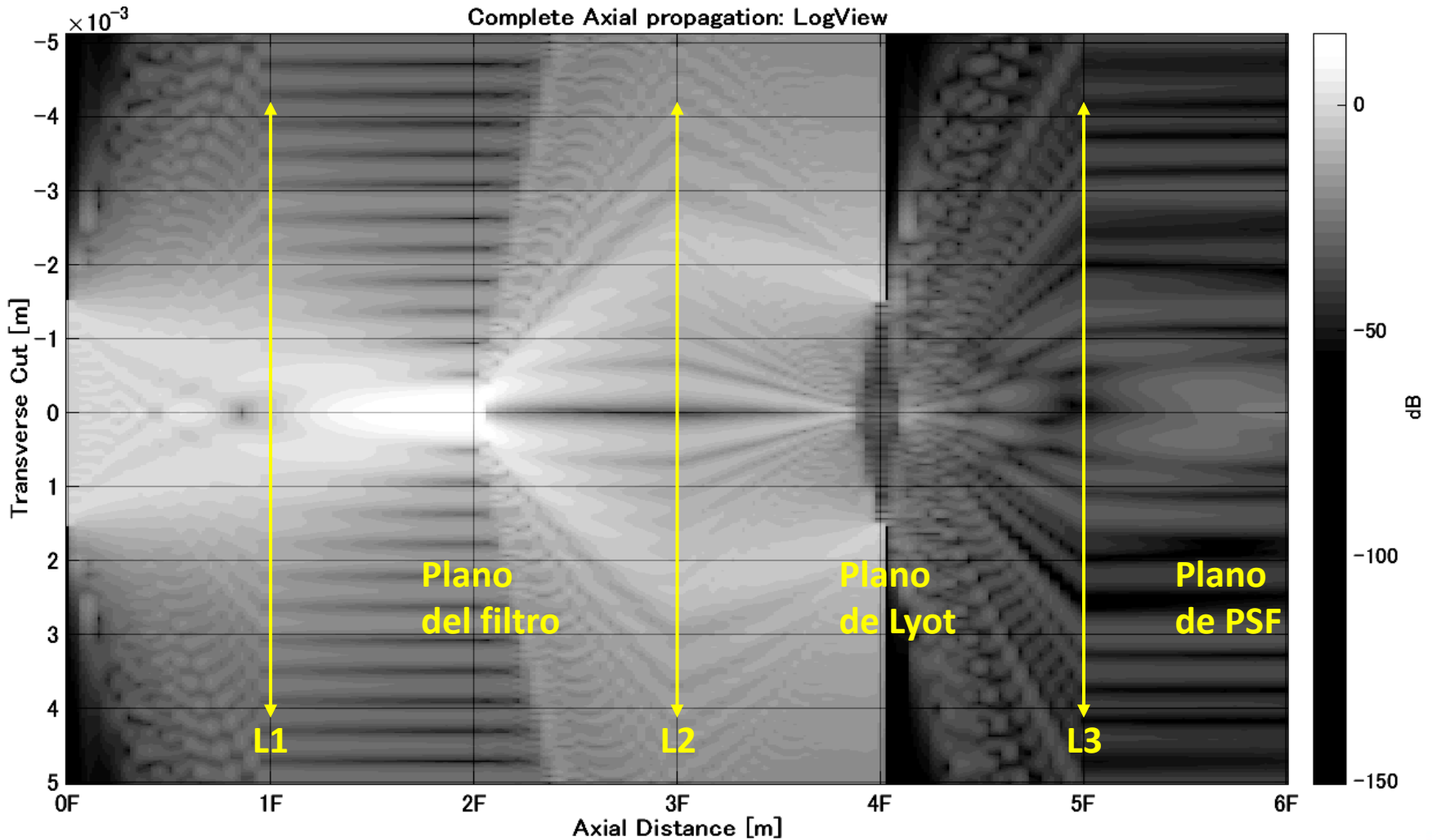
PP: Pixel Pitch del SLM; *NA*: Apertura numérica de la lente; *l*: Orden azimutal del vórtice

La convolución coronográfica



- Campo incidente: $U_0(x_0, y_0) = \text{circ}(x, y)$, \longrightarrow **Función de iluminación**
- Campo focal: $U_1(x_1, y_1) \approx \frac{2J_1(k \cdot \rho \cdot NA)}{k \cdot \rho \cdot NA} \cdot H_c(\alpha, \beta)$
- Campo de Lyot: $U_2(x_2, y_2) = \mathcal{F}\{U_1(x_1, y_1)\} \cdot \text{circ}(x_1, y_1) \longrightarrow$ **Función de truncamiento**
- Campo de la PSF: $\left(\frac{2J_1(k \cdot \rho \cdot NA)}{k \cdot \rho \cdot NA} \cdot H_c(\alpha, \beta) \right) * \left(\frac{2J_1(k \cdot \rho_L \cdot NA_L)}{k \cdot \rho_L \cdot NA_L} \right)$

La distribución axial de energía

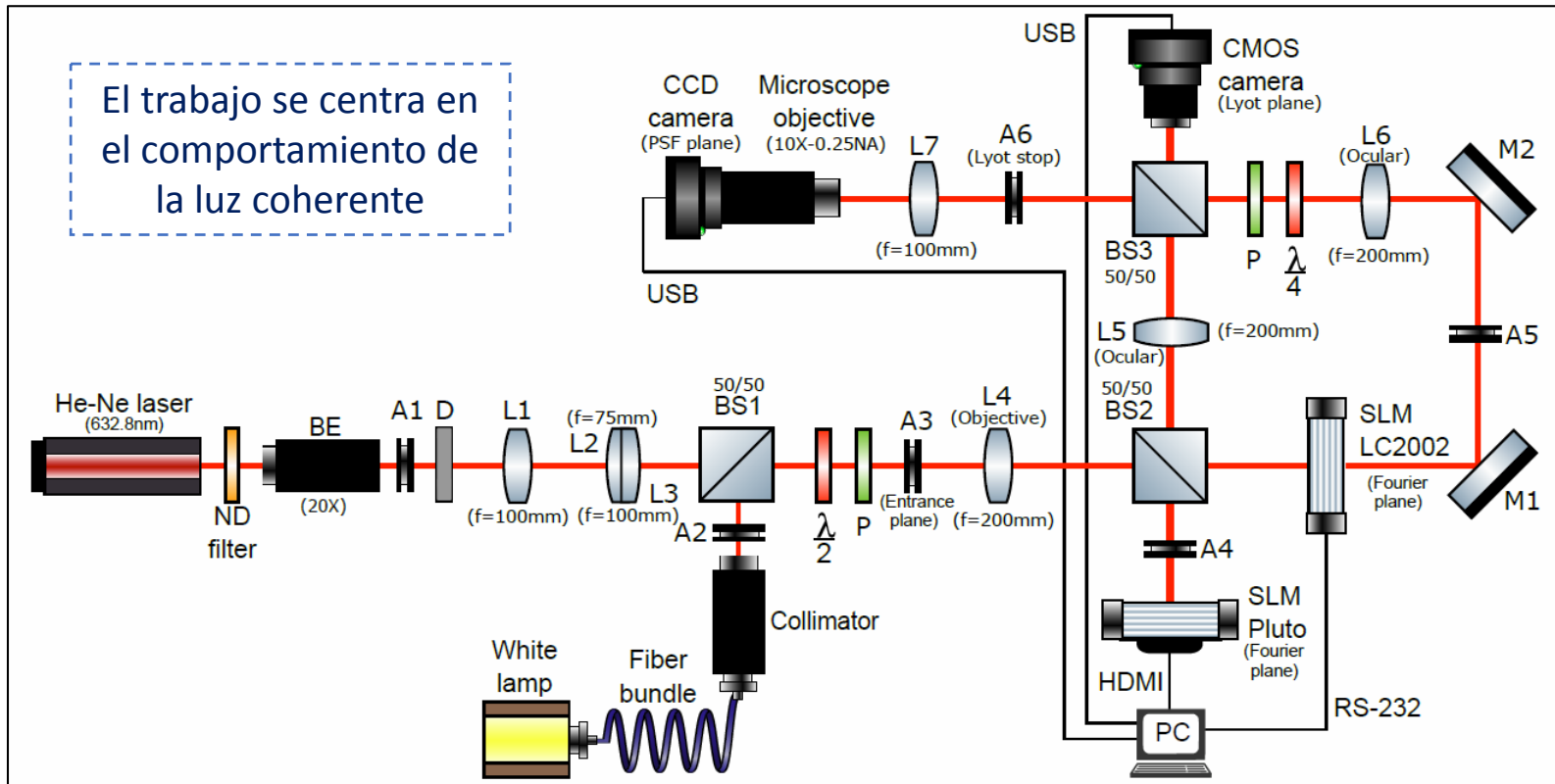


El diseño prototipo



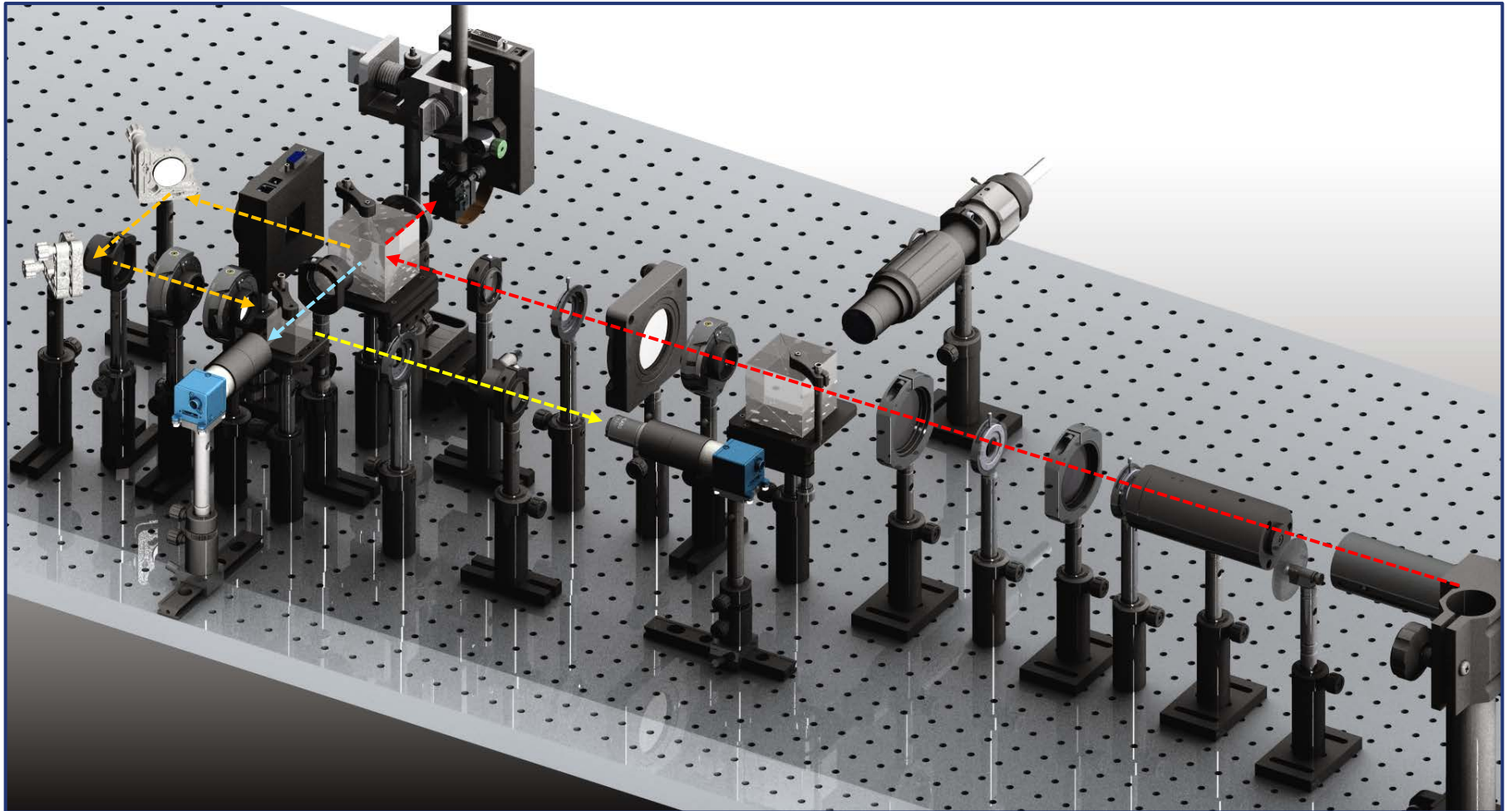
Configuración instrumental

El trabajo se centra en el comportamiento de la luz coherente

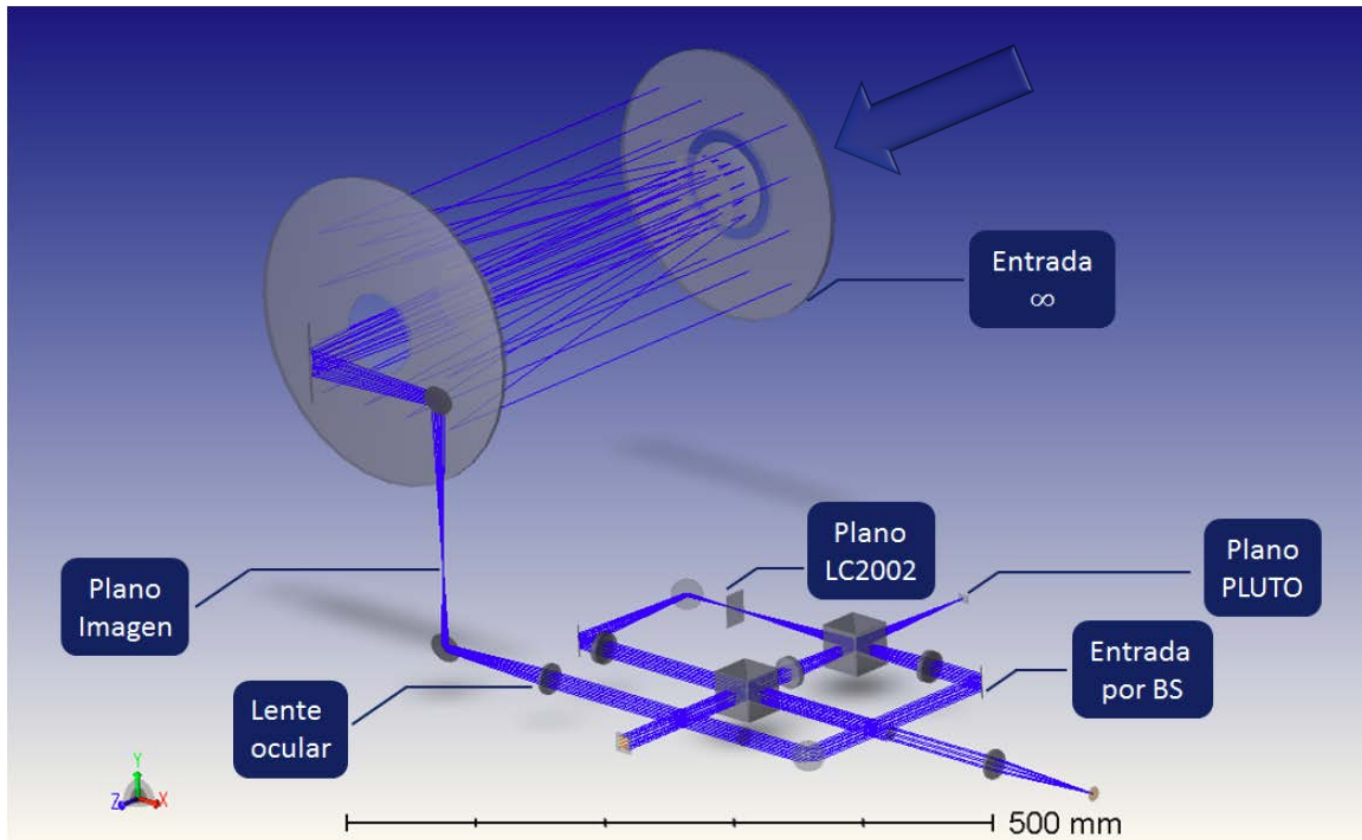


ND: Filtro de densidad neutra, **BE:** Expansor de haz, **A:** Apertura, $\lambda/2$: Retardador de media onda, **P:** Polarizador, **BS:** Cubo divisor 50-50, **L:** Lente, **SLM:** Modulador espacial de luz, **M:** Espejo, $\lambda/4$: Retardador de cuarto de onda.

Vista CAD del montaje ensamblado



Diseño del sistema de integración



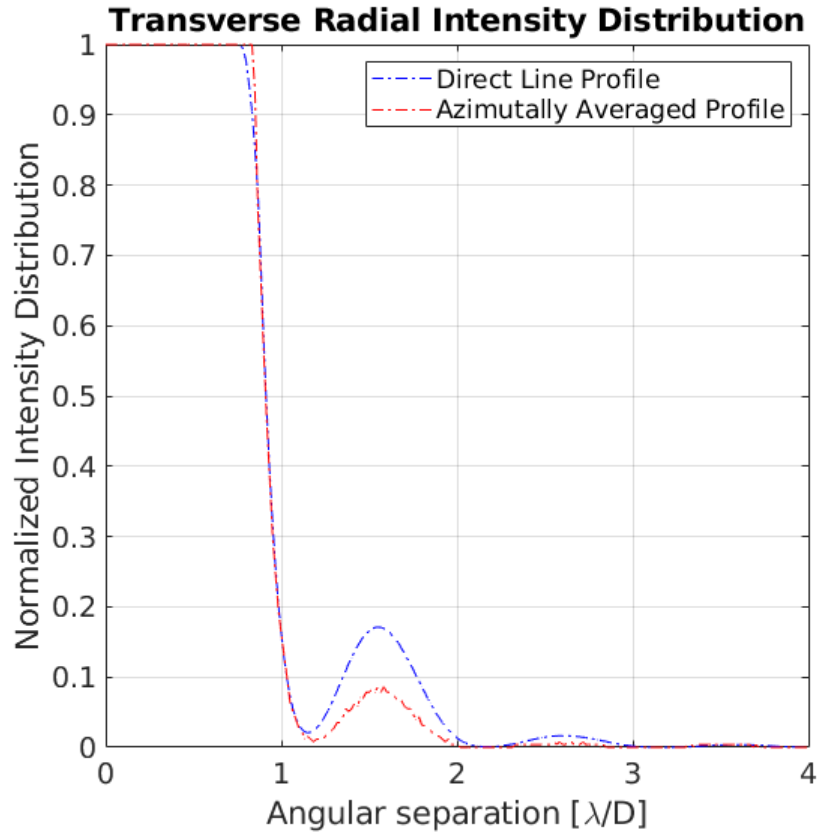
La definición de la posición del plano imagen del telescopio, permite establecer la óptica de integración al sistema coronográfico mediante un periscopio y planos *relay*.

La metodología de análisis



Análisis radial de intensidades

Tipos de análisis Radiales



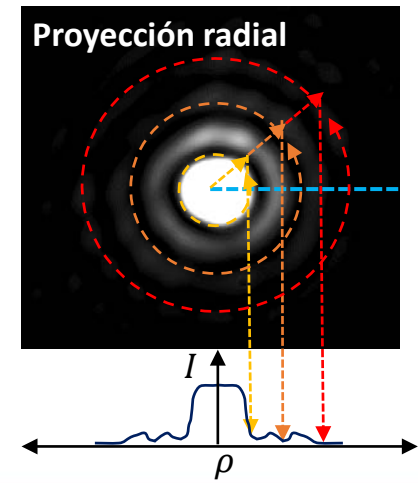
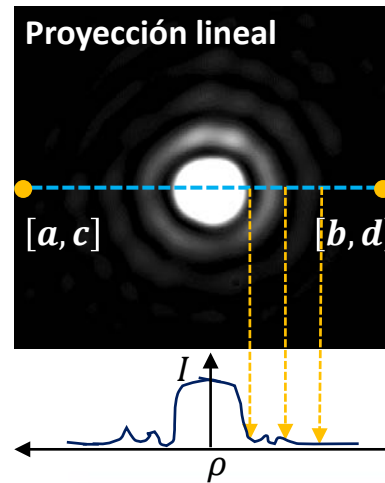
Funciones de perfiles Radiales de intensidad

Proyección de línea transversal

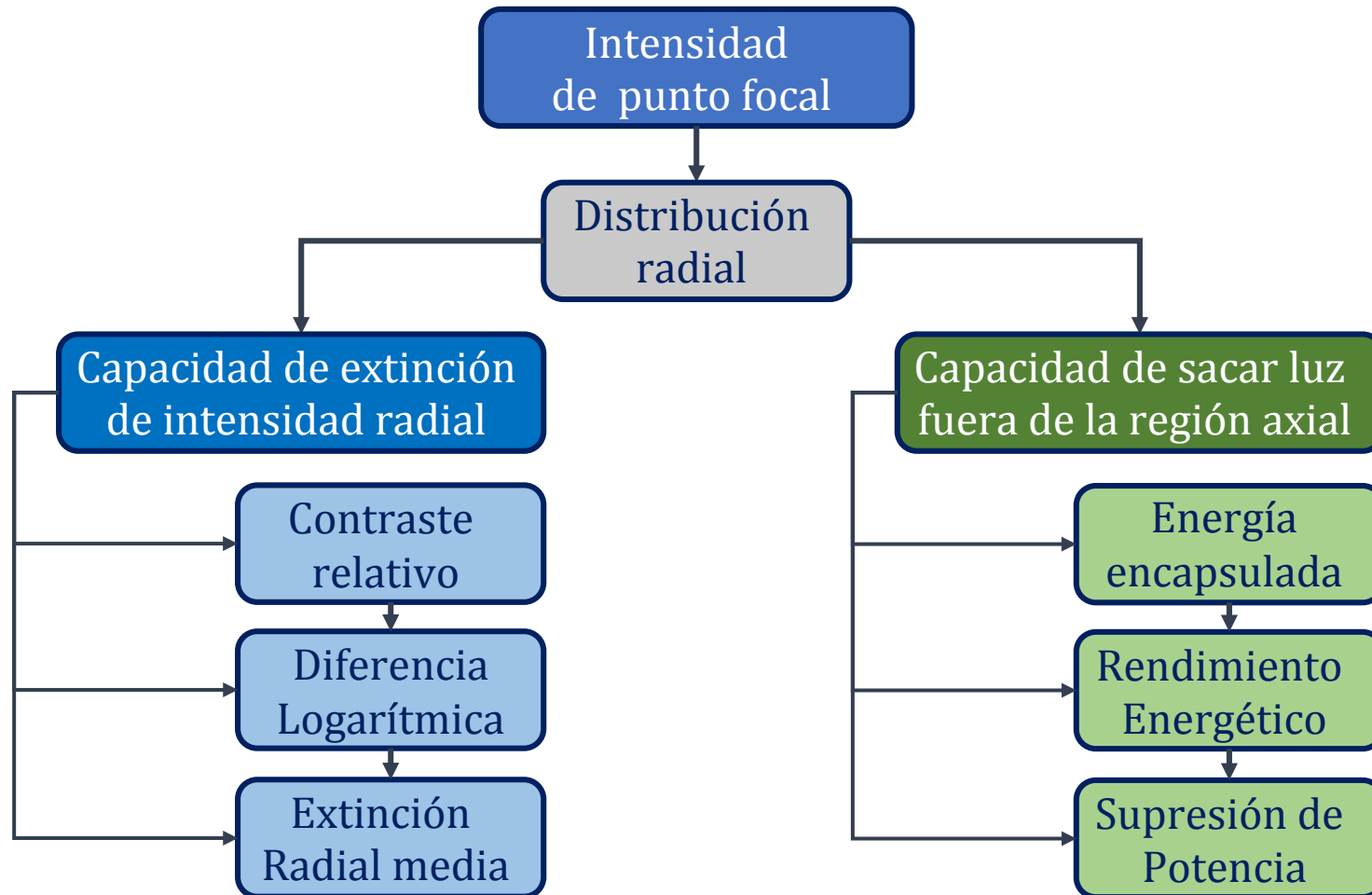
$$I(\rho) = I(x, y) \Big|_{\substack{\forall x \in [a, b] \\ \forall y \in [c, d]}} \quad | \quad \rho \leq \sqrt{b^2 + d^2}$$

Proyección radial promediada

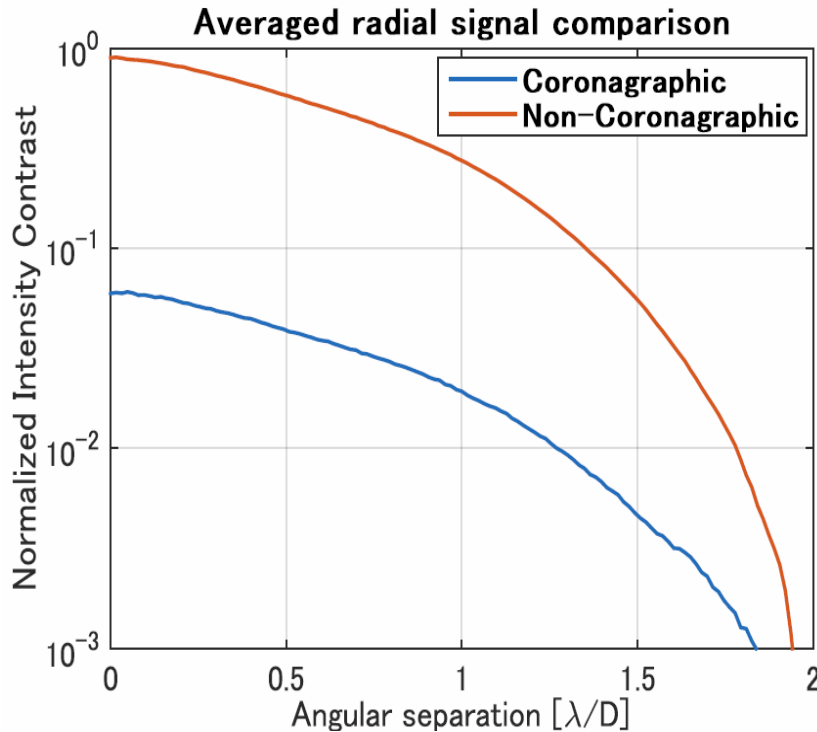
$$I(\rho_{mx}) = \frac{1}{R} \sum_{\substack{x=0 \\ y=0}}^R I(x, y) \Big|_{\forall \sqrt{x^2 + y^2} = \rho_{mx}} \quad | \quad \rho_{mx} \in \left[0, \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \right]$$



Categorías de Métricas de estudio



Métricas de estudio – Contraste de Intensidades



Comparación de los efectos del filtrado en la señal.

Contraste de intensidades

$$N = \frac{I_{cor}(\rho)}{I_{ncr}(\rho)} \quad \text{Atenuación}$$

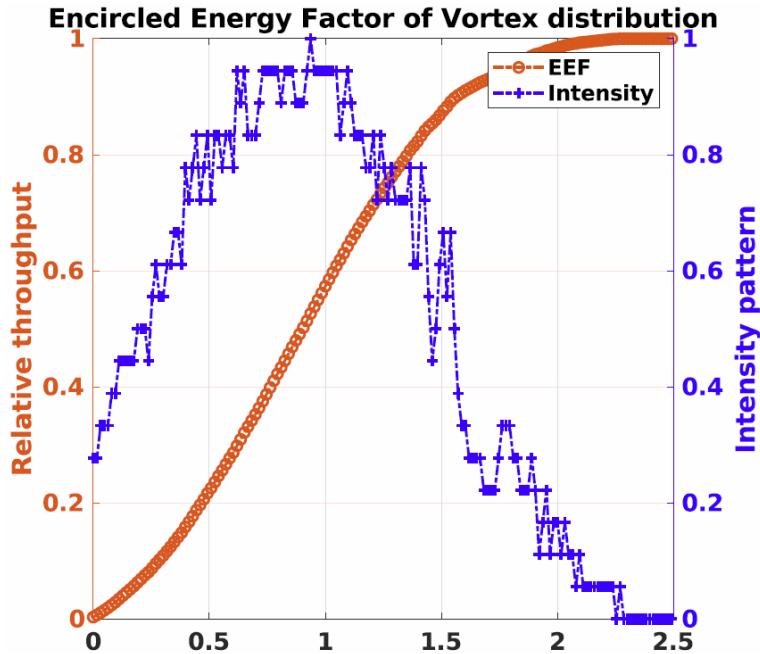
Relación Diferencial logarítmica

$$SNR_l = \log_{10} \left(\frac{I_{cor}(\rho)}{I_{cor}(0)} \right) - \frac{1}{2} \log_{10} \left(\frac{I_{ncr}(\rho)}{I_{ncr}(0)} \right)$$

Capacidad de Supresión RMS

$$RMS_l(\rho) = \sqrt{\frac{1}{r_{max}} \sum_{n=0}^{N_{rmax}} \left[\log_{10} \left(\frac{I_{cor}(\rho)_n}{I_{ncr}(0)} \right) - \frac{1}{2} \log_{10} \left(\frac{I_{ncr}(\rho)_n}{I_{ncr}(0)} \right) \right]^2}$$

Métricas de estudio – Concentración Energética



La concentración es de la intensidad residual, sin considerar su magnitud.

Factor de Energía Encapsulada

$$EEF \{I(\rho); r\} = \frac{1}{I_{m\acute{a}x}} \int_0^r I(\rho) d\rho \quad | \quad I_{m\acute{a}x} = \int_0^{\infty} I(\rho) d\rho$$

Throughput

Comparación de las densidades energéticas EEF

Supresión de Potencia

Evaluación del EEF sólo hasta la región radial del primer disco de Airy

Los análisis coronográficos

Análisis de intensidades
Experimentales y simuladas

Parámetros

Bajos: 2-10
Altos: 12-256

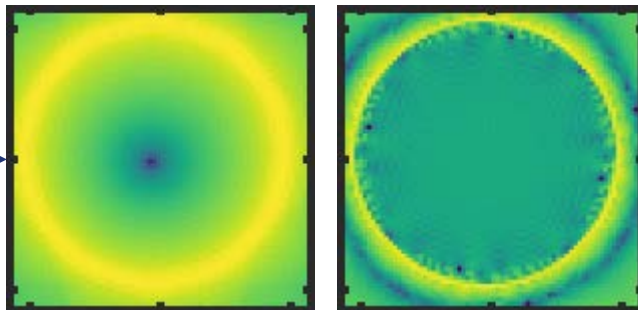
TC: 1-10

Métricas del
Plano de Lyot

Métricas del
Plano de la PSF

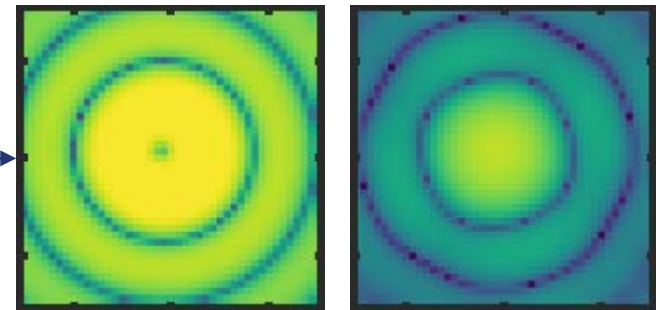
- Altos niveles de gris
- Bajos niveles de gris

- Mayor energía fuera de eje
- Menor Energía interna



- Altos niveles de gris
- Bajos niveles de gris

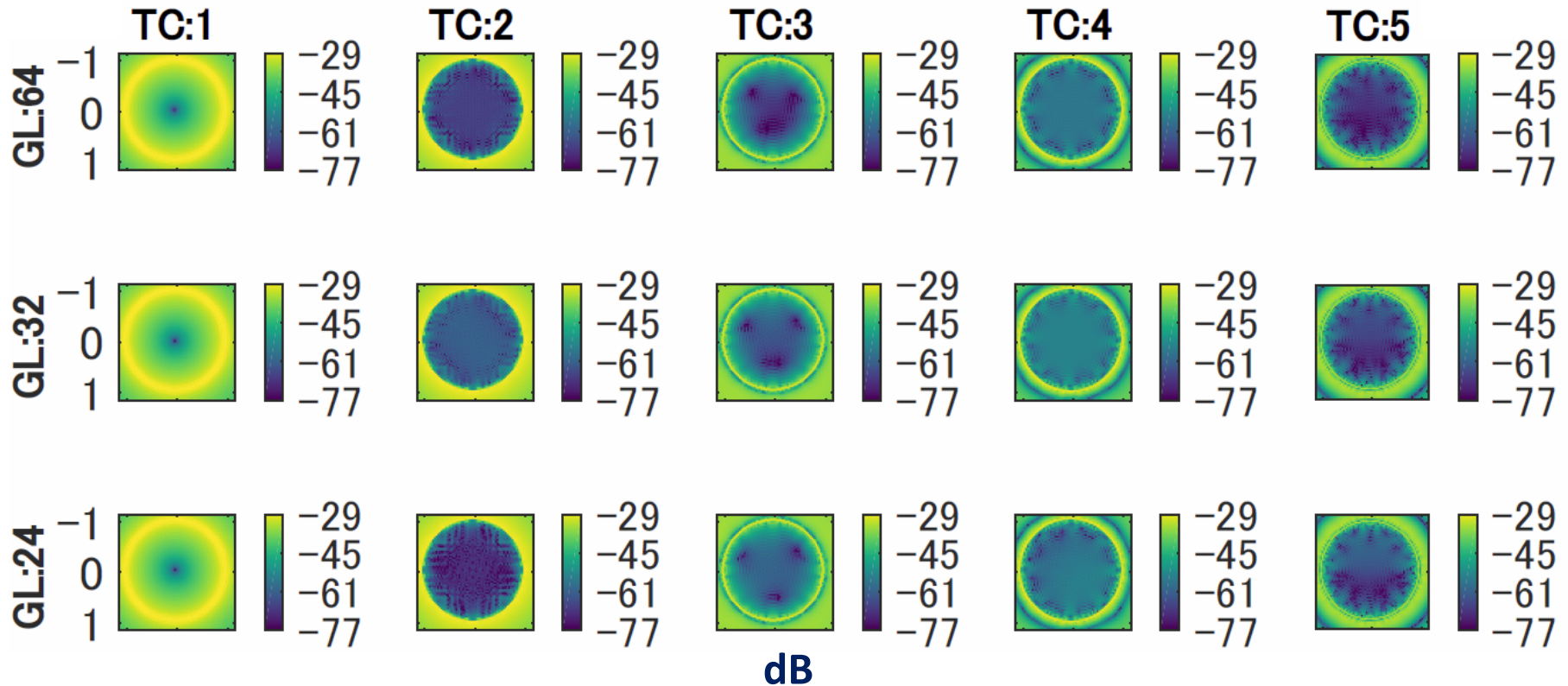
- Forma del *Stellar Leakage*
- Concentración de energía



[3] Parte de Resultados Coronográficos

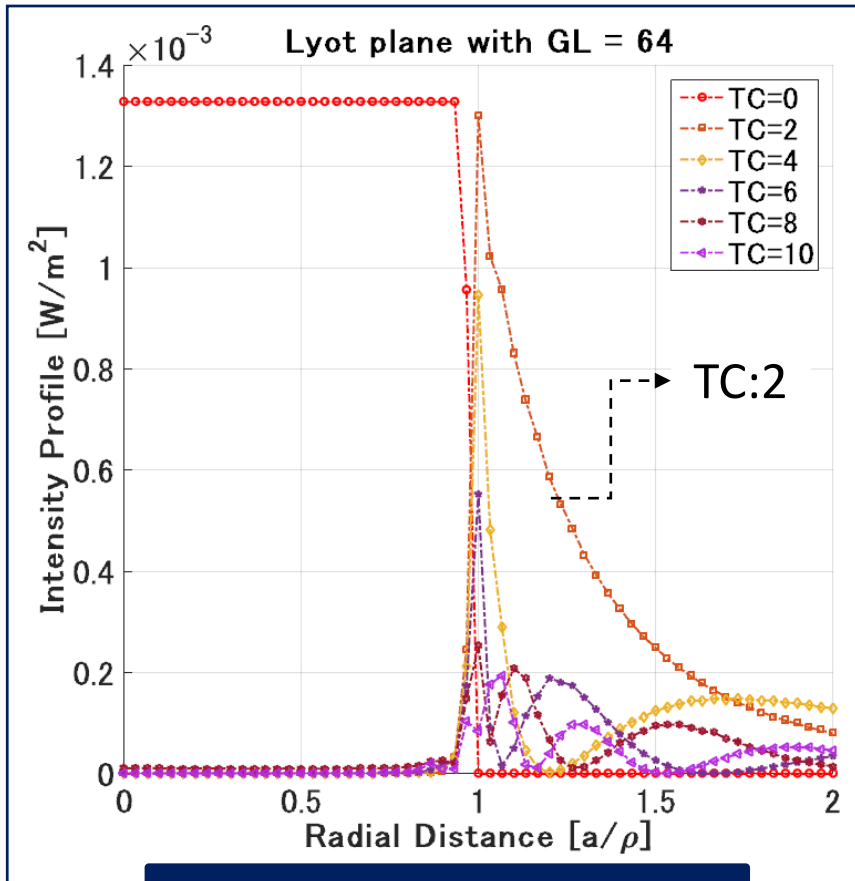


Planos de Lyot: Altos niveles

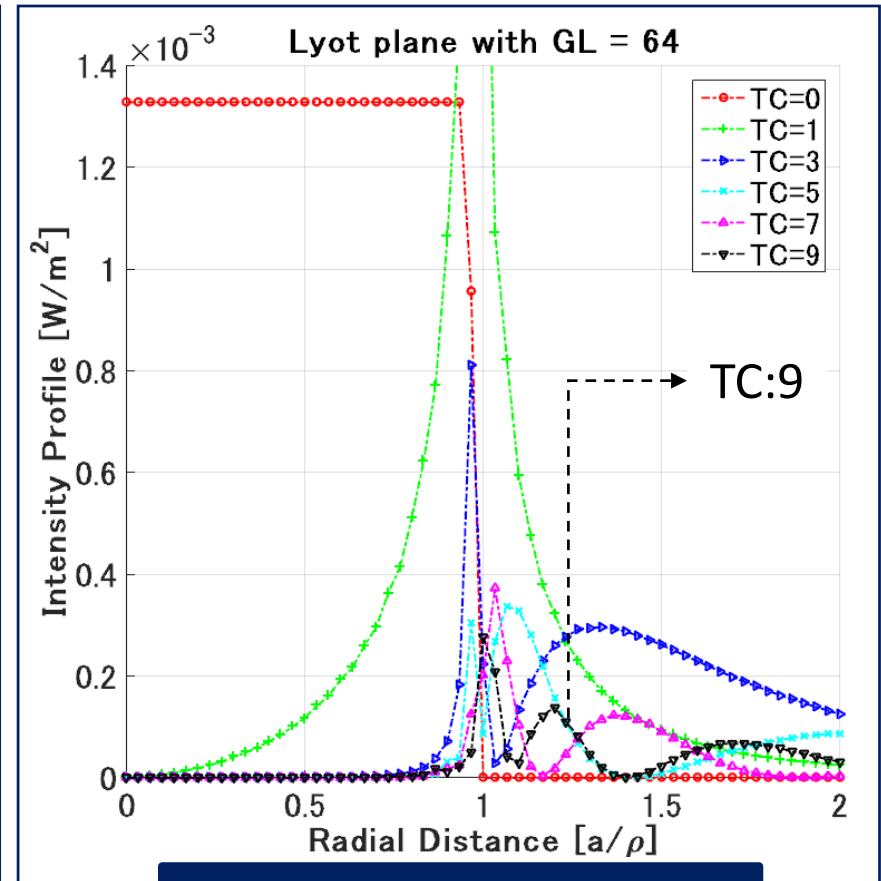


- El rango óptimo de niveles de gris se establece entre 24 y 64 niveles.
- La posición del corte de luz depende del diámetro de la apertura de entrada α .

Paridad en las distribuciones en Lyot

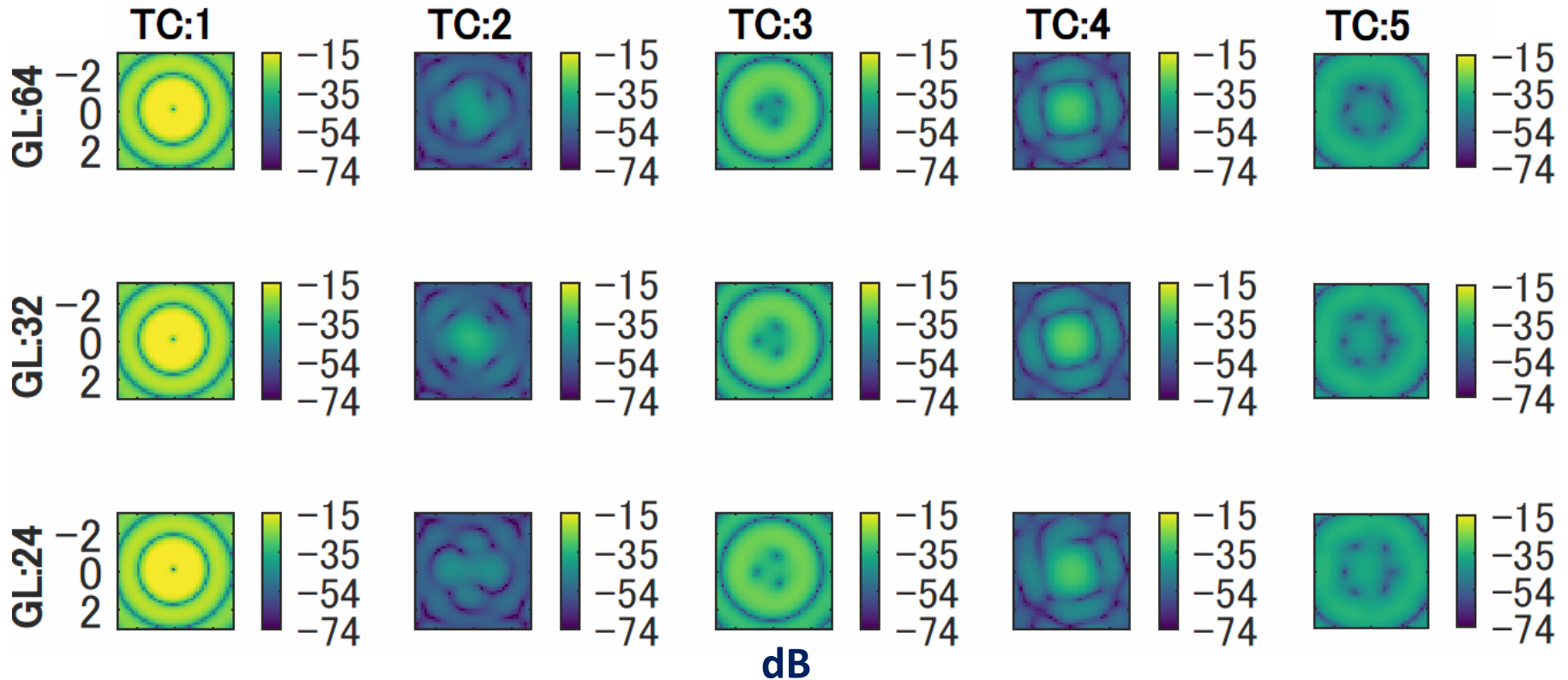


Cargas Pares



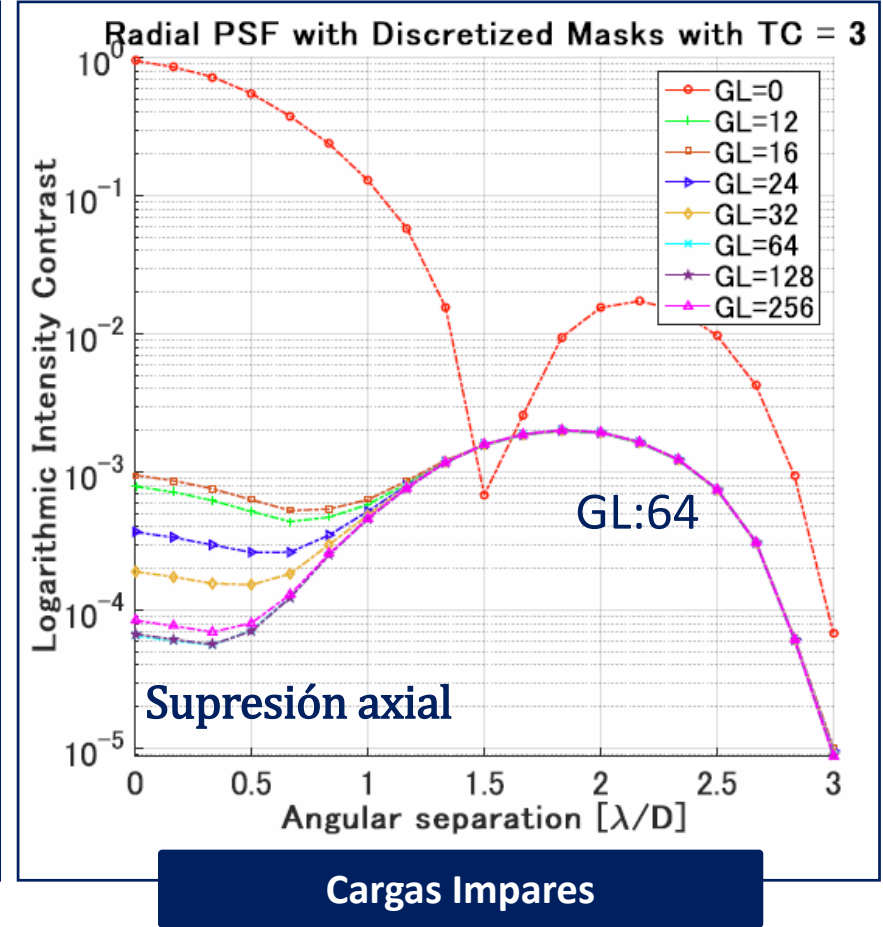
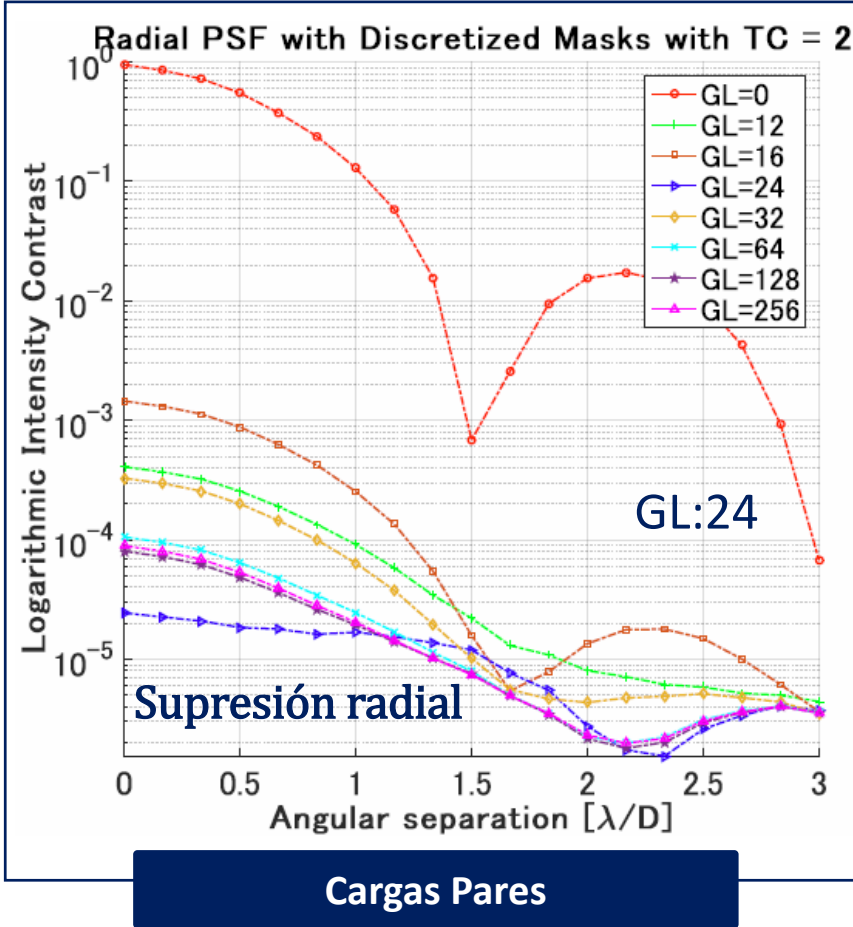
Cargas Impares

Planos de la PSF: Altos niveles



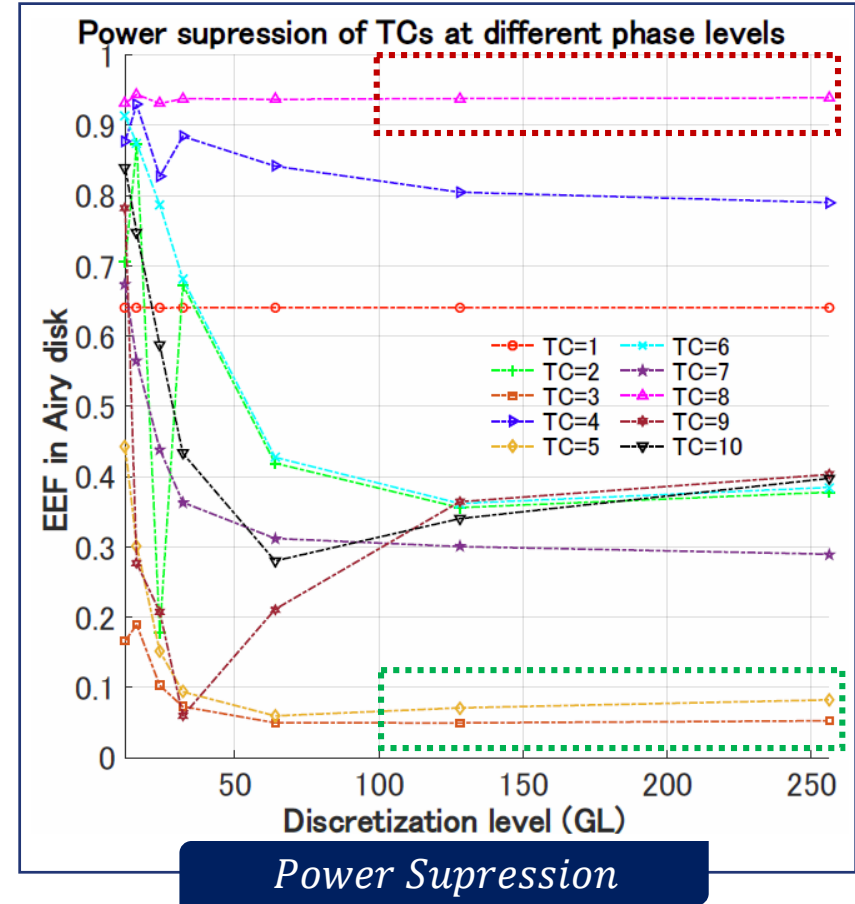
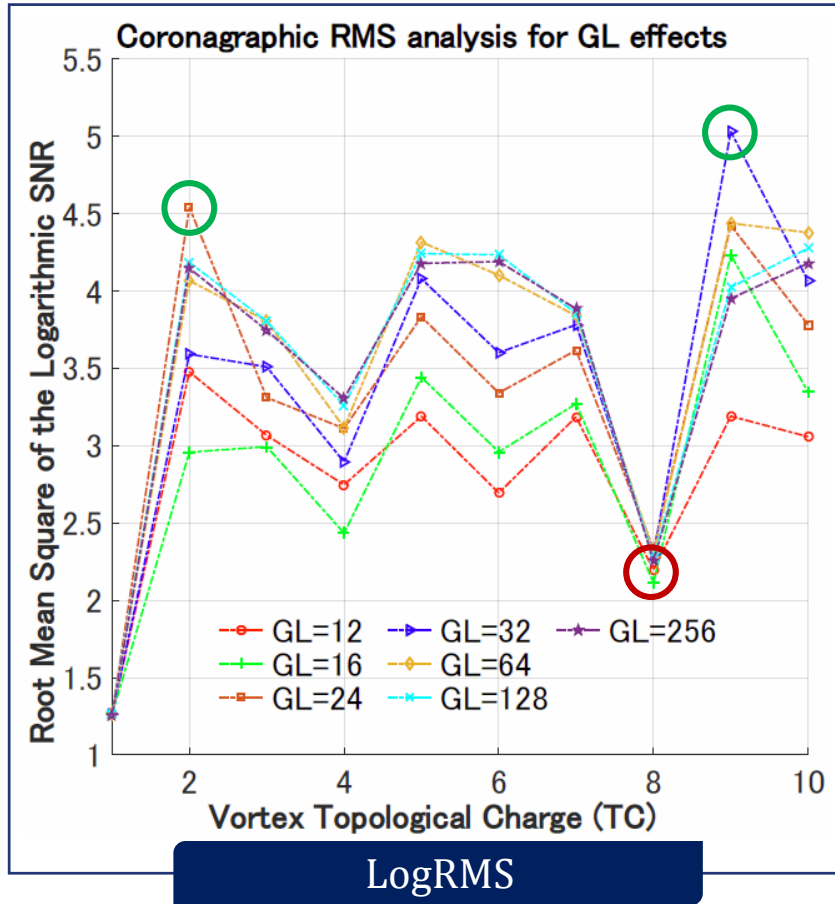
Las cargas pares concentran más energía en la parte central, mientras que las impares en la región alrededor del eje

Paridad en las distribuciones de la PSF



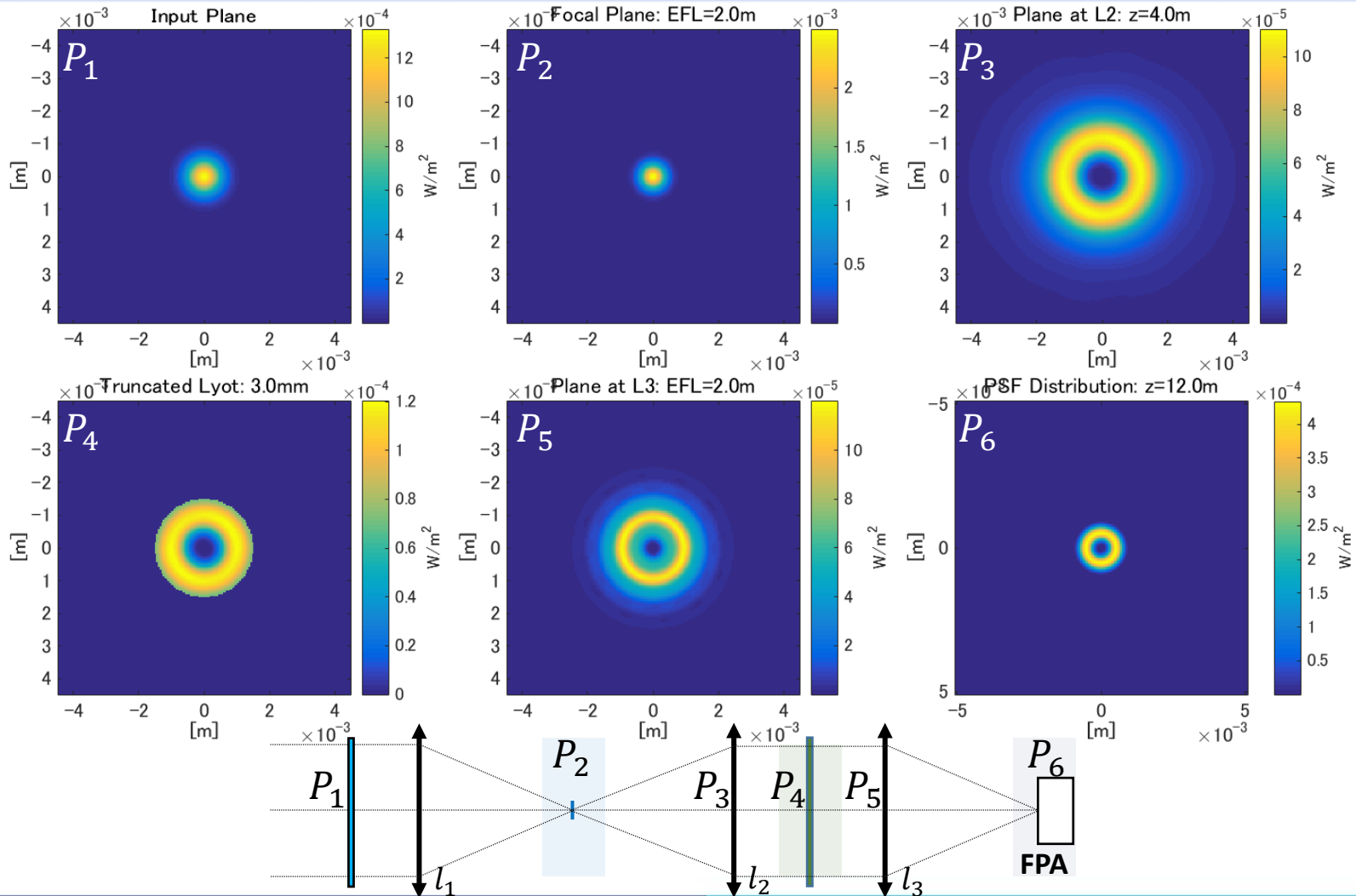
- EL incremento hasta 64 niveles de gris mejora la supresión

Valores de mérito del grupo de altos niveles

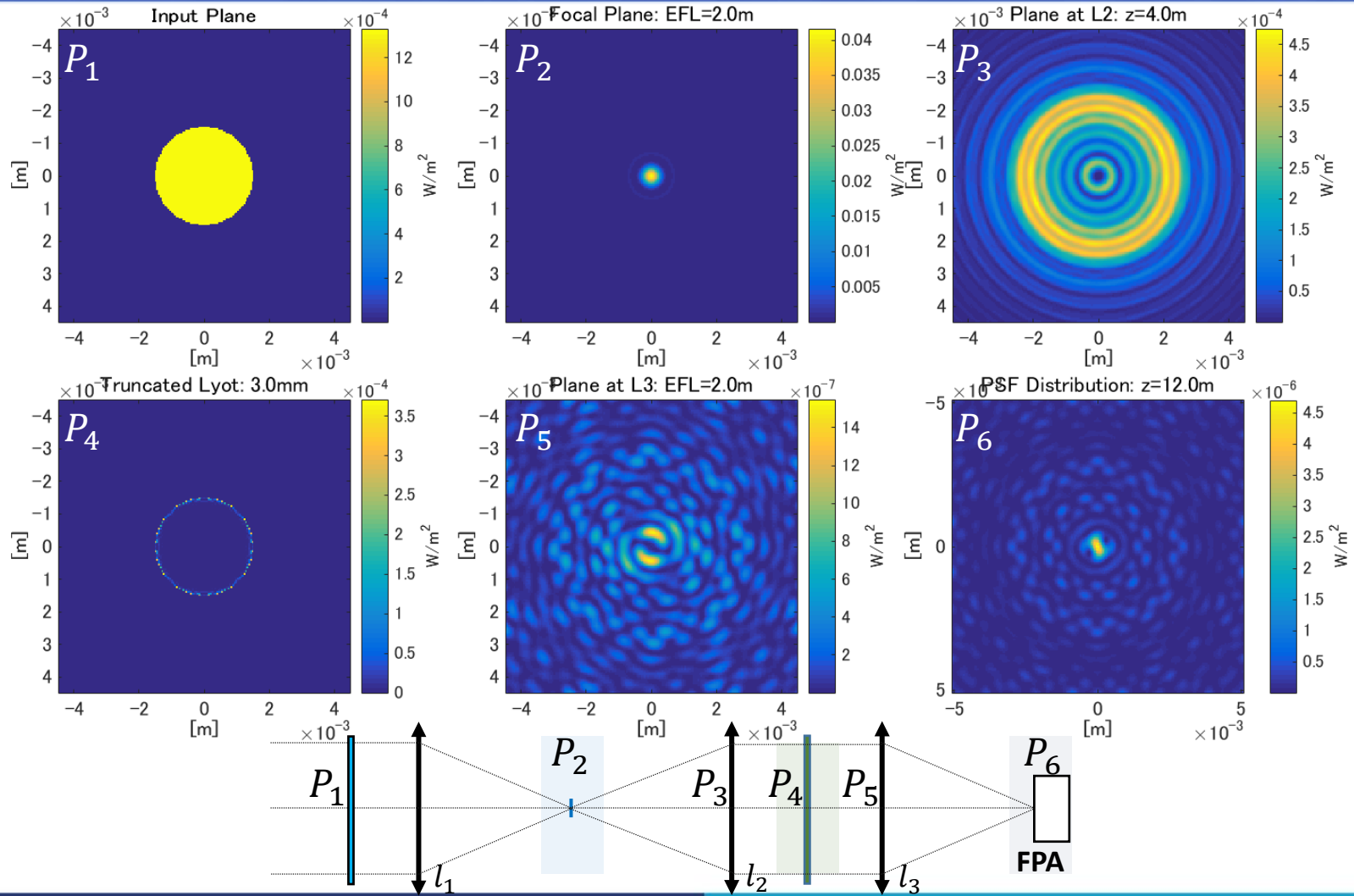


La supresión se analiza hasta la separación angular de $1\lambda/D$

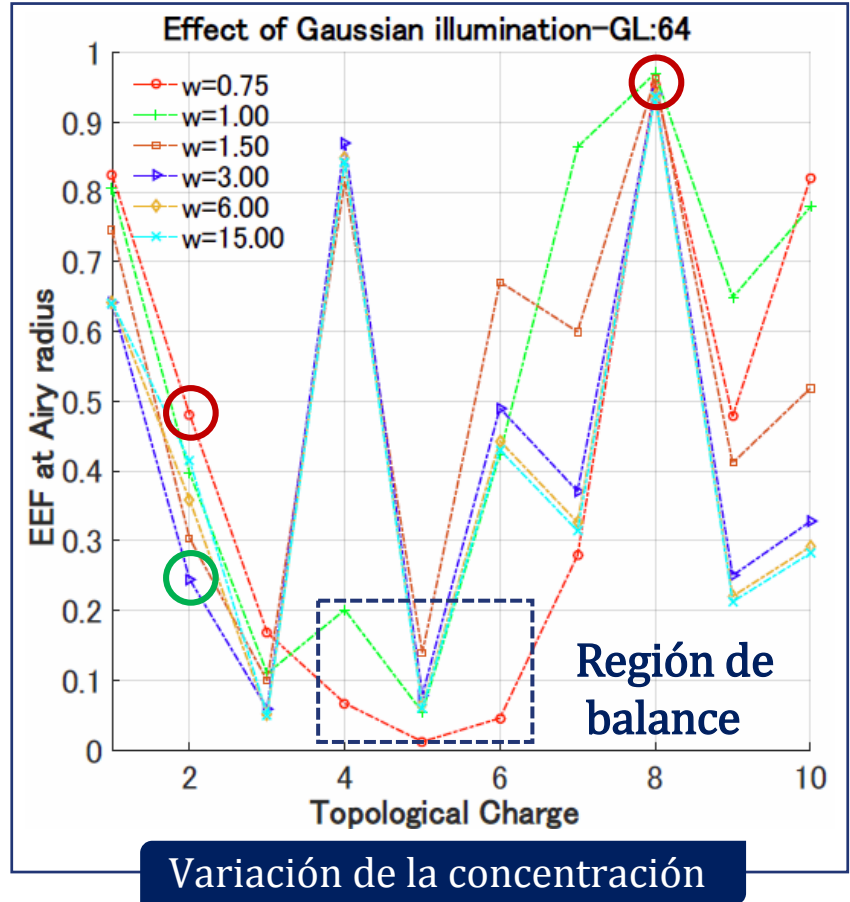
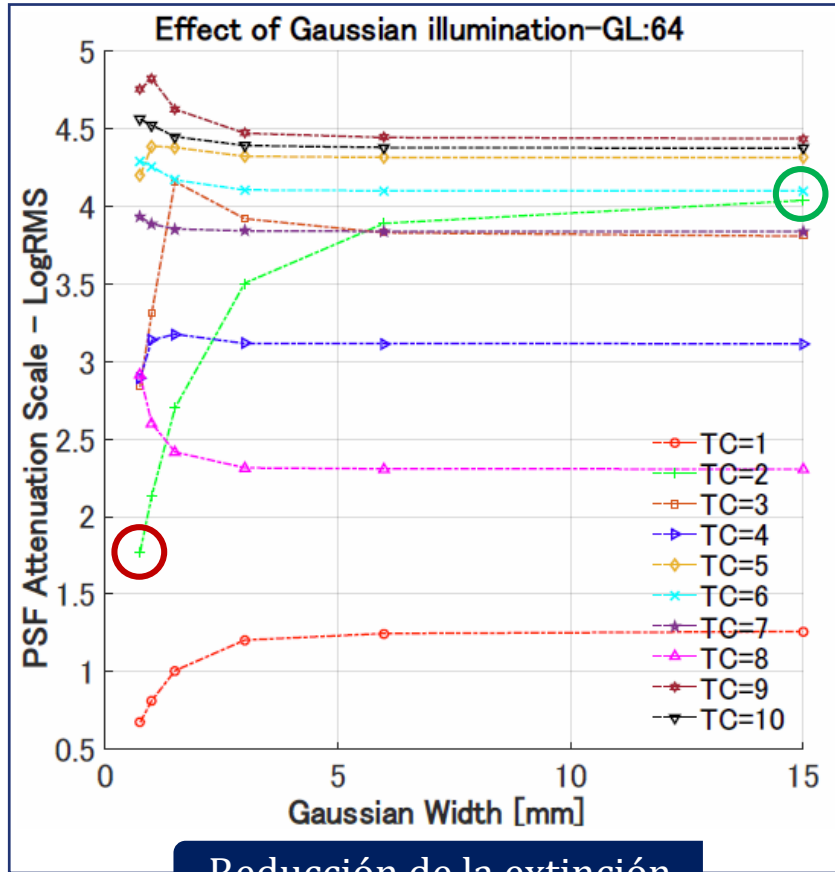
Comportamiento con la iluminación gaussiana



Comportamiento con la iluminación uniforme

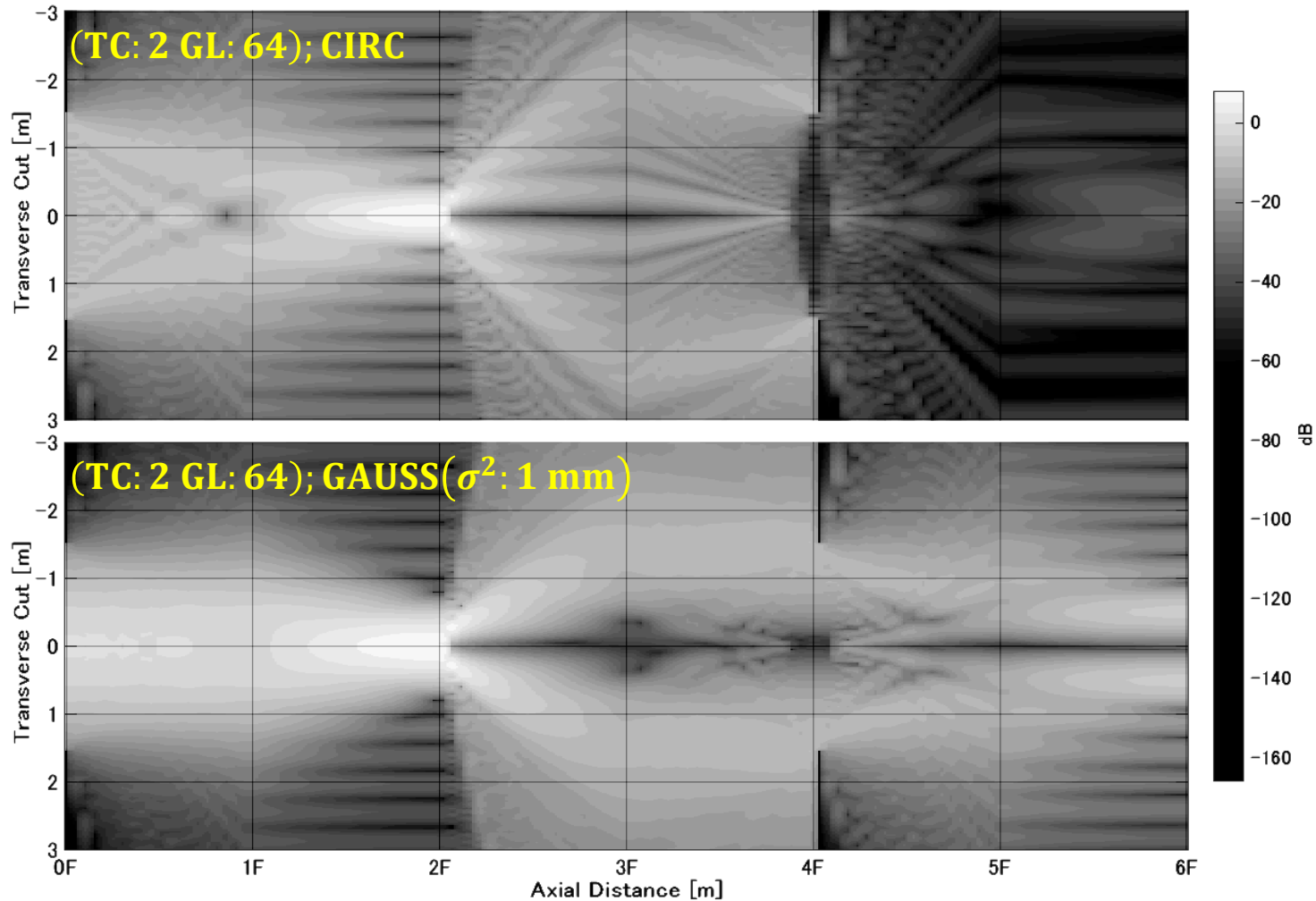


Reducción del rendimiento por borde suave

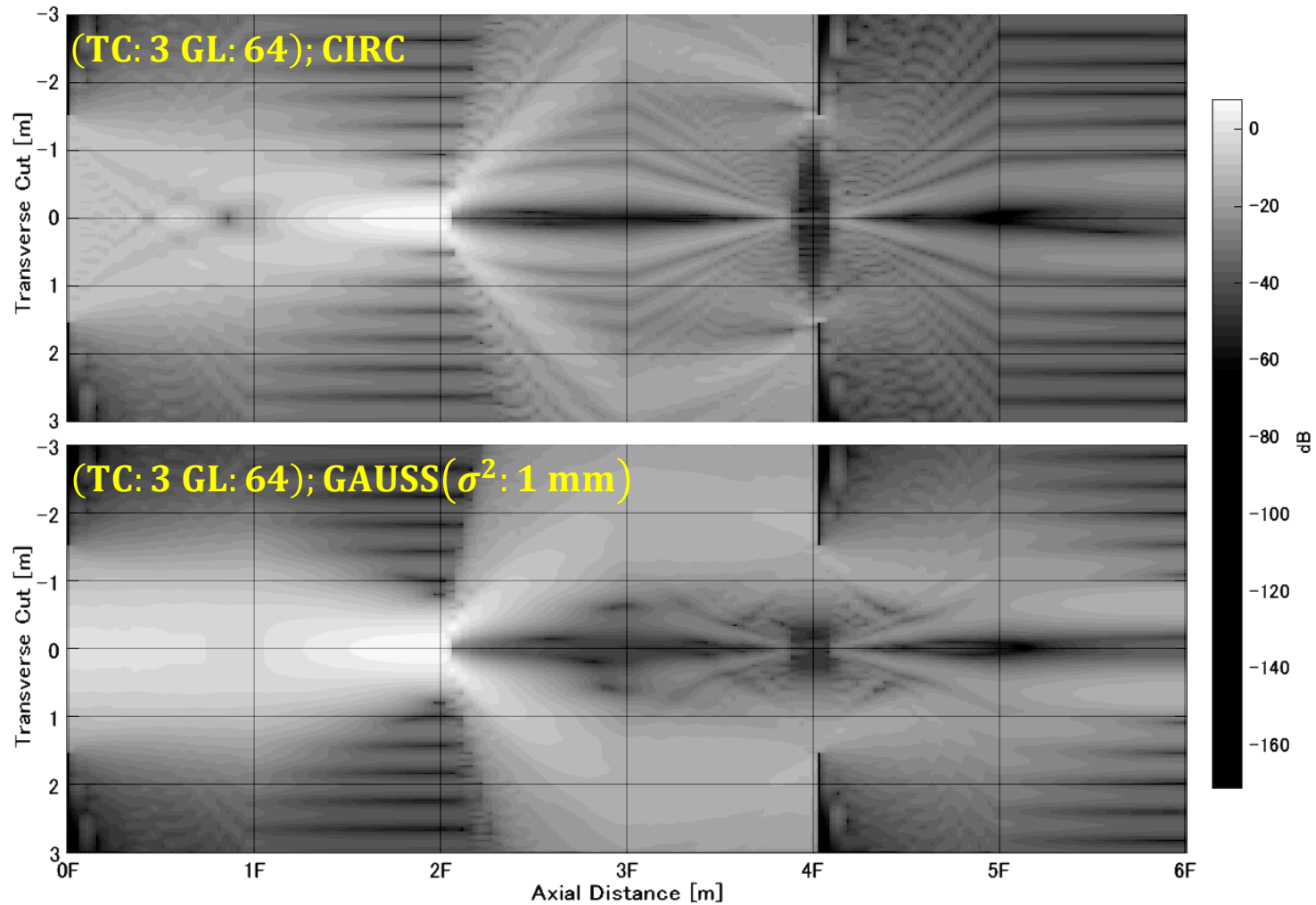


Entre más gaussiana sea la iluminación se transfiere más intensidad

Incremento del *Stellar Leakage* gaussiano



Incremento del *Stellar Leakage* gaussiano



Resultados de la simulación

Efectos con la iluminación uniforme:

- Las cargas pares permiten una mayor supresión energética radial, y las cargas impares concentran la intensidad residual fuera de eje.
- La carga de mejor desempeño es TC=2 con un punto óptimo en 64 niveles.

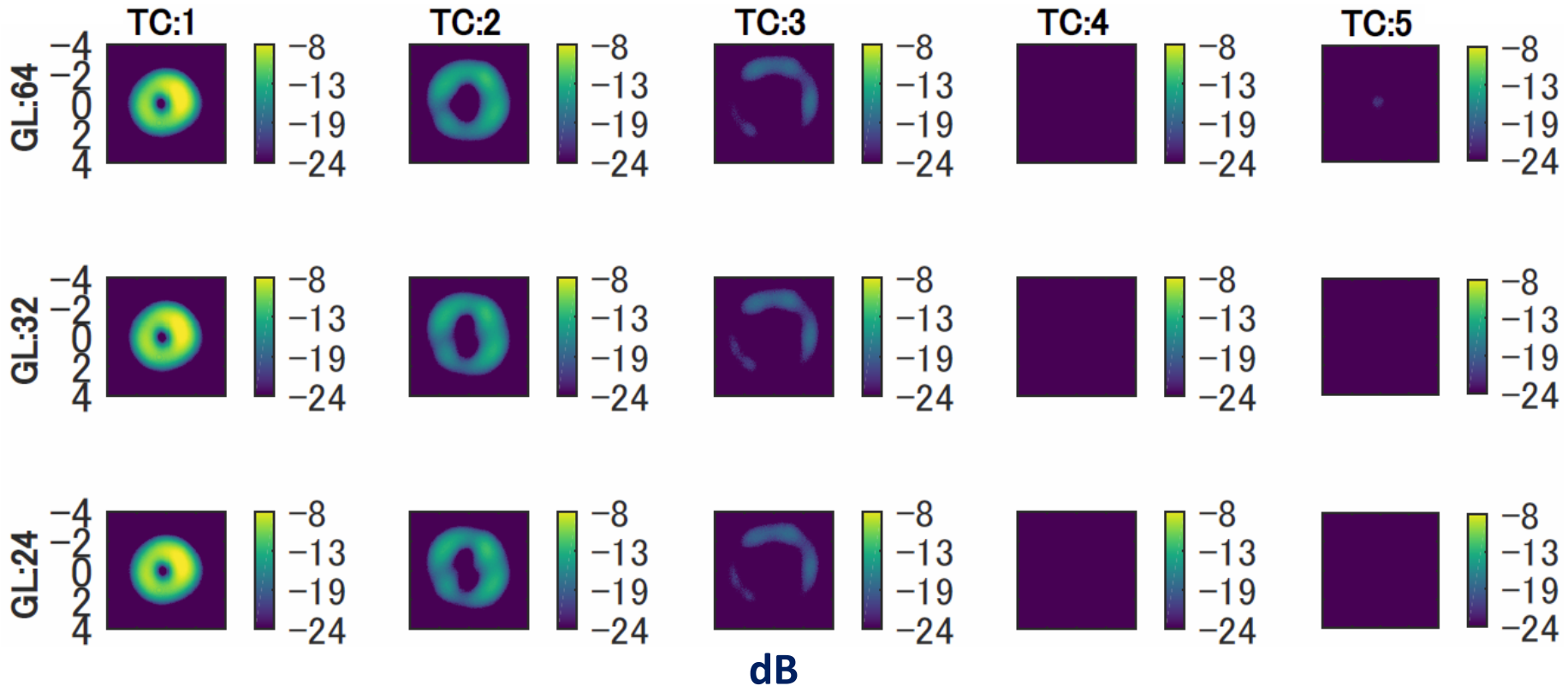
Efectos con la iluminación gaussiana:

- La eficiencia se reduce bajo la distribución gaussiana, y la circulación posee mayor dependencia en la magnitud del momento angular.
- Con la iluminación gaussiana la carga TC = 5 posee el mejor desempeño.

Análisis del experimento - PLUTO

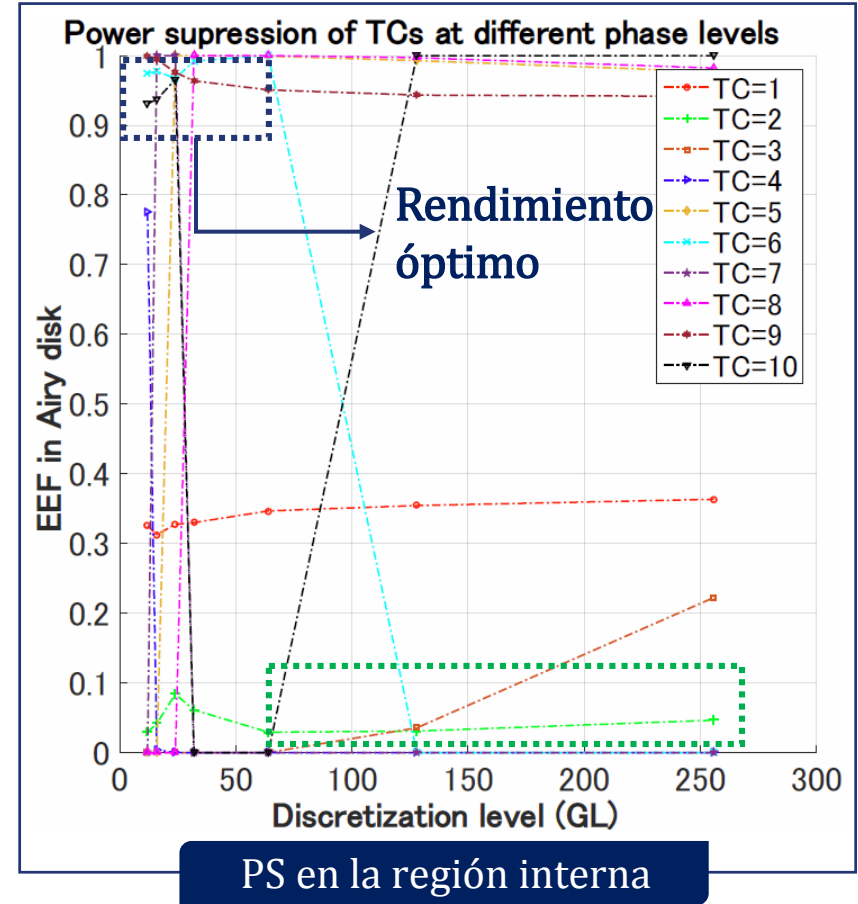
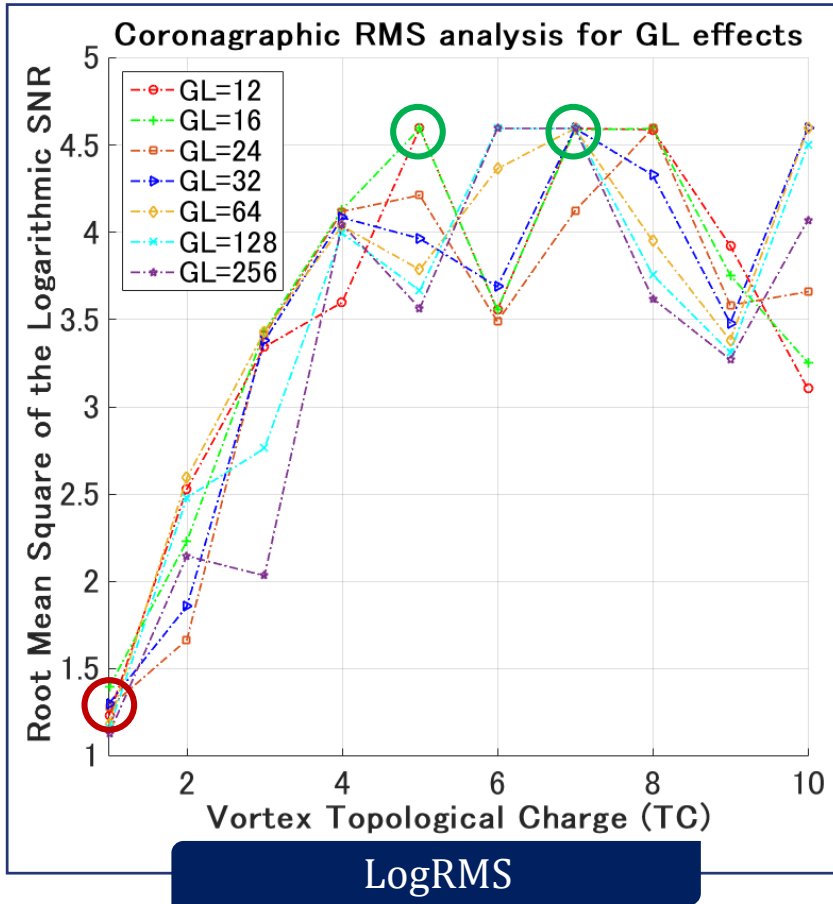


Planos de la PSF: Altos niveles



Las cargas entre 4 y 7 generan la mejor supresión energética y alcanzan un comportamiento óptico a partir de 32 niveles de gris

Valores de mérito del grupo de altos niveles

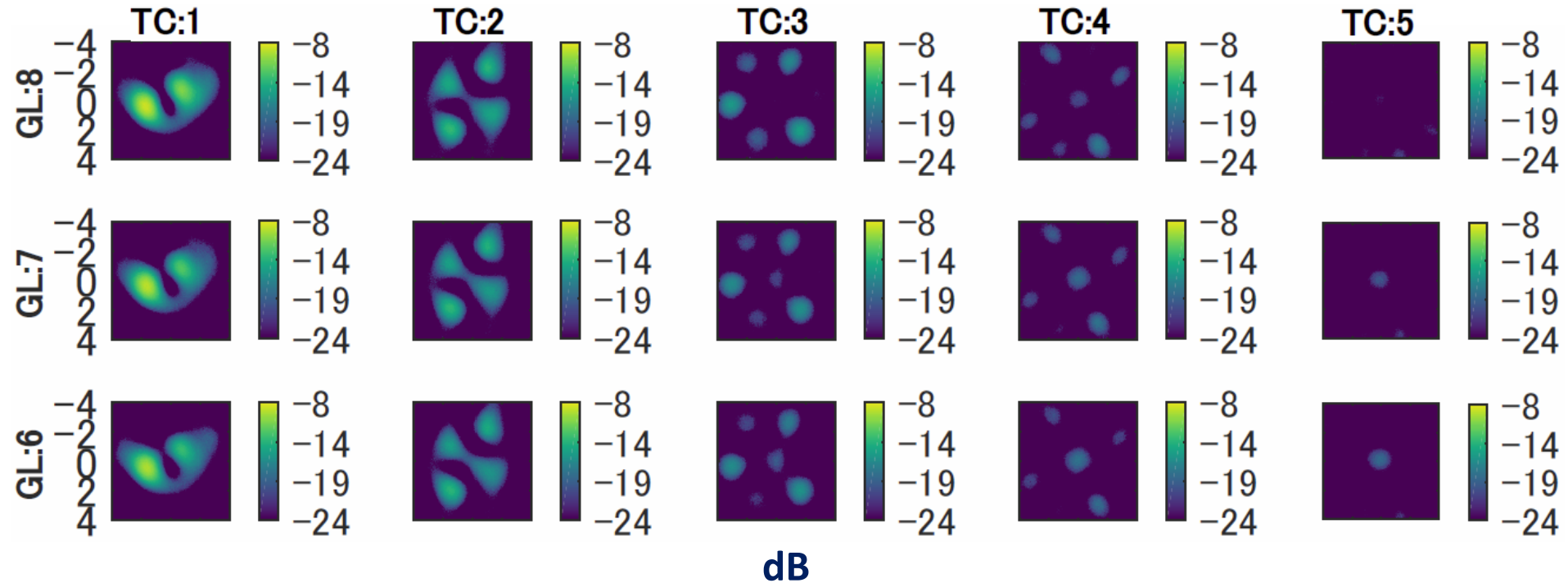


La energía residual se concentra en su totalidad en el punto axial

Análisis del experimento – LC2002

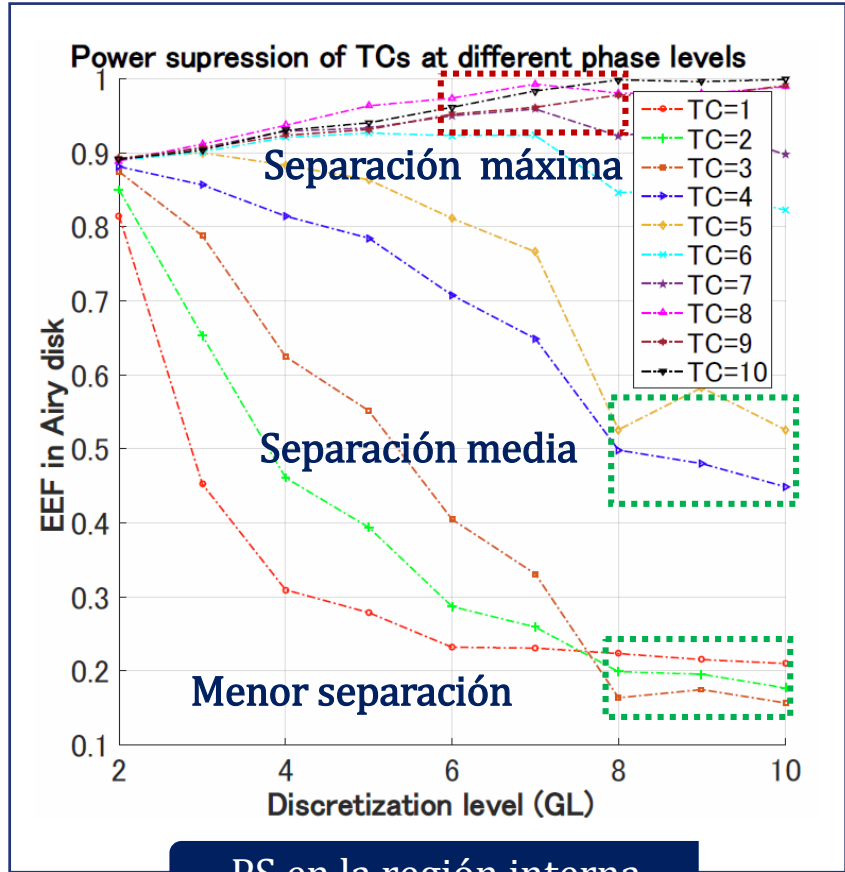
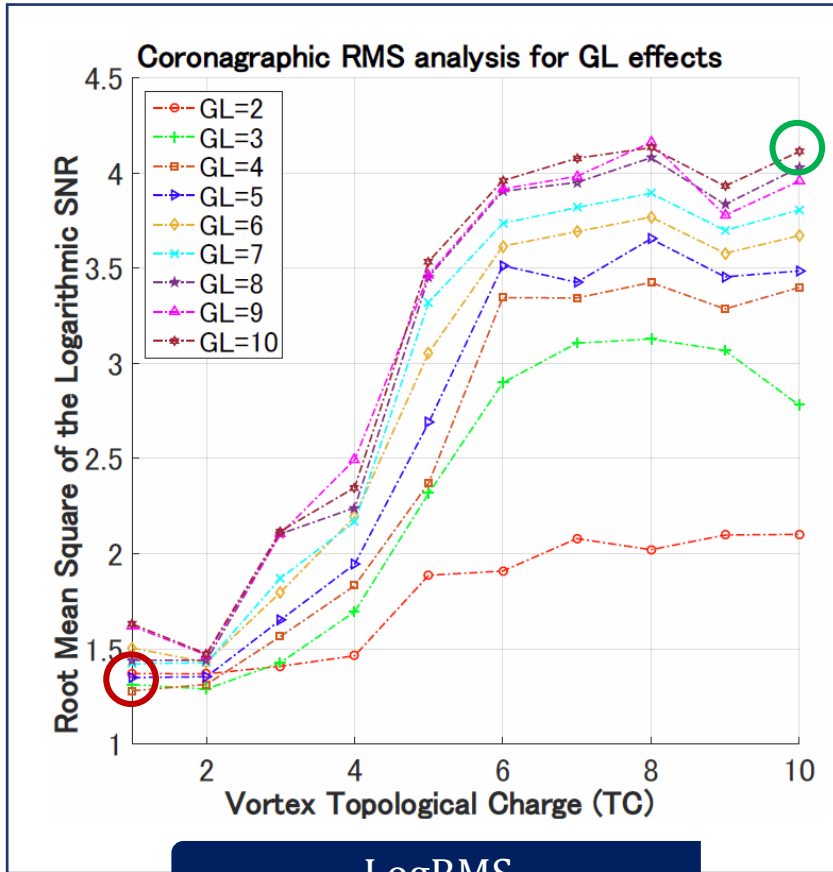


Planos de la PSF: Bajos niveles



El aumento del momento angular y los niveles de discretización aumentan la supresión energética

Valores de mérito del grupo de bajos niveles



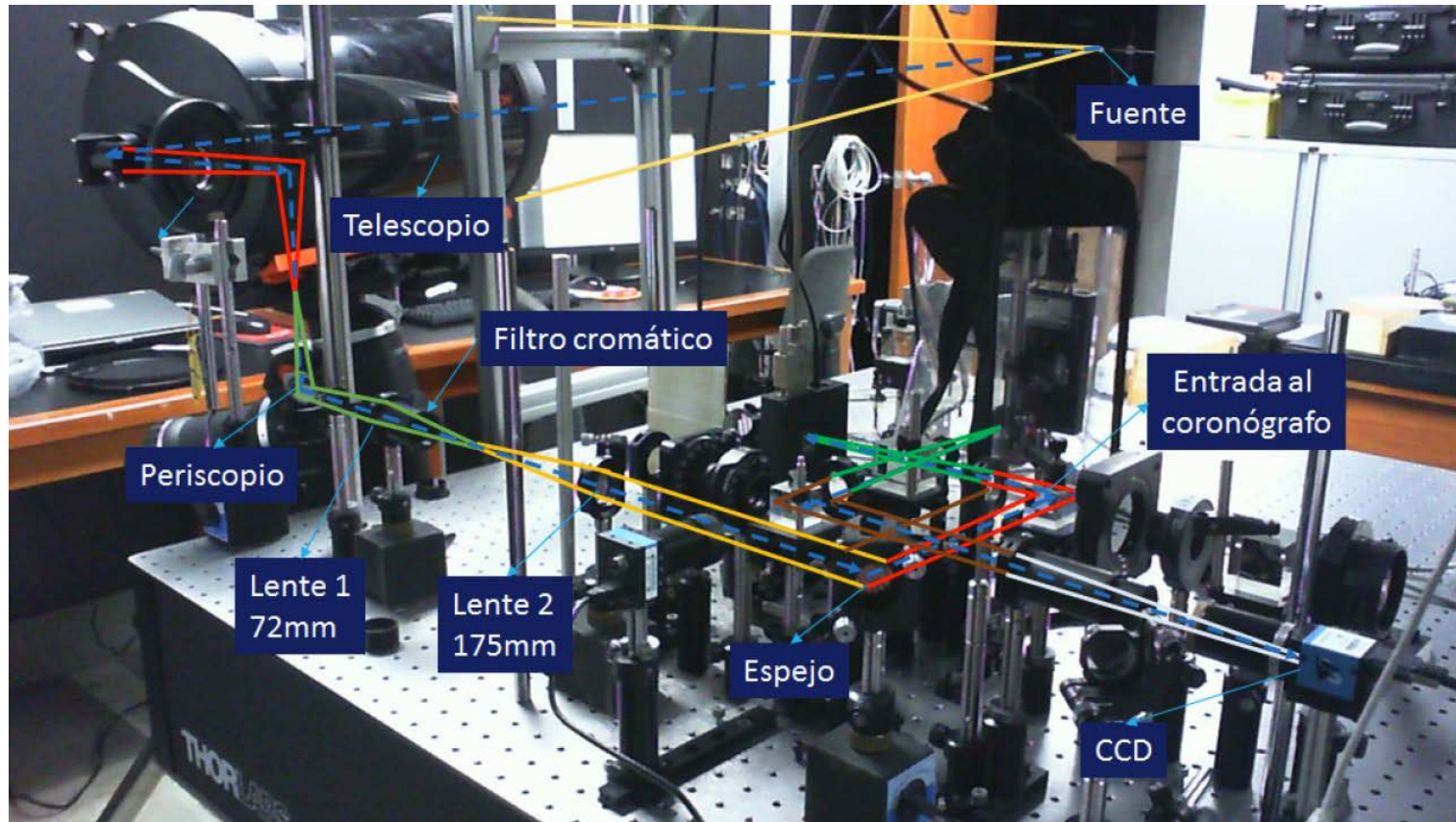
Resultados experimentales

- Se presenta una distribución difractada en el campo de iluminación.
- No se observa un efecto de paridad en la circulación energética.
- Hay una separación equidistante de las cargas topológicas que aumenta según su magnitud.
- La separación de cargas posibilita la concentración de energía central.
- El desempeño óptimo con el PLUTO se encuentra entre las cargas 4 y 7.
- El LC2002 requiere el máximo valor de cada parámetro $TC=10, GL=256$, para **alcanzar una circulación** suficiente

Análisis del telescopio

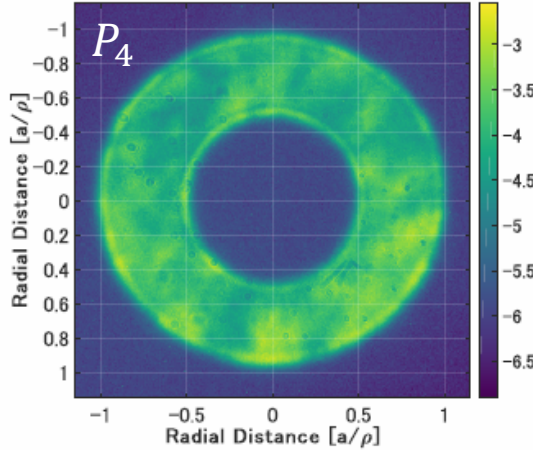


Experimento con fuente incoherente

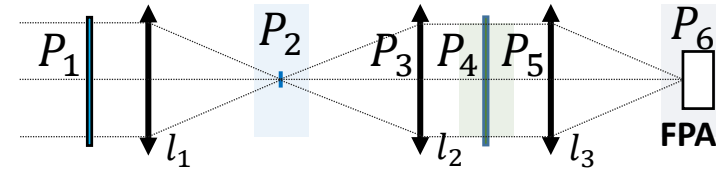
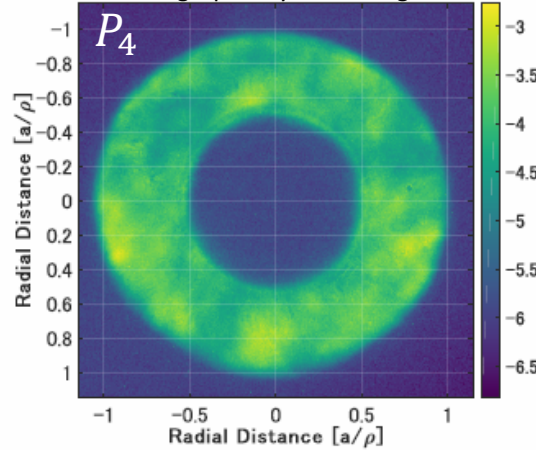


Comportamiento del plano de Lyot - Telescopio

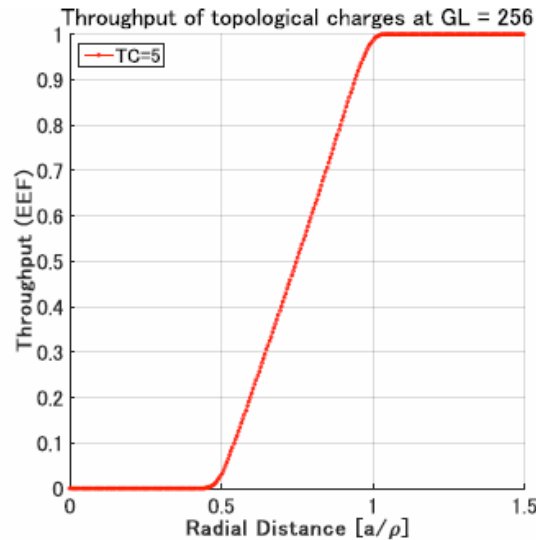
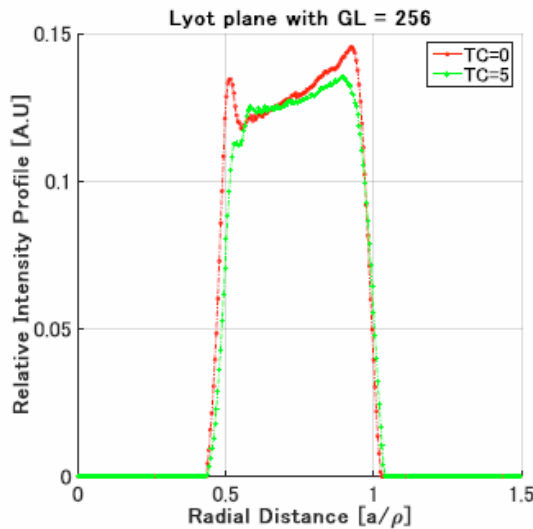
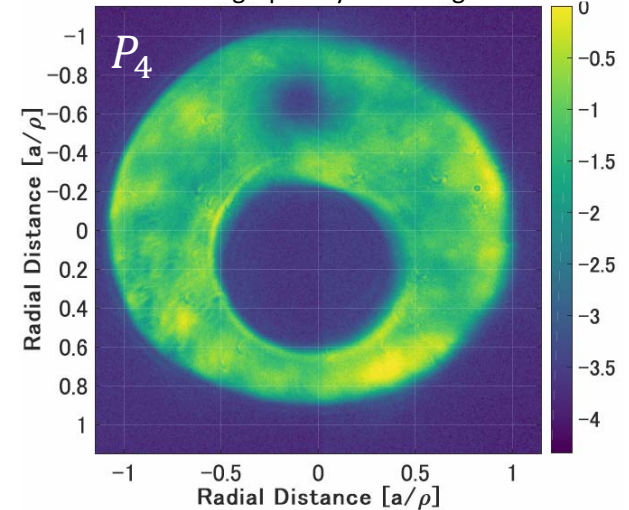
Log View: Referential Non Coronagraphy Lyot



Coronagraphic Lyot: tc-5-ng-256



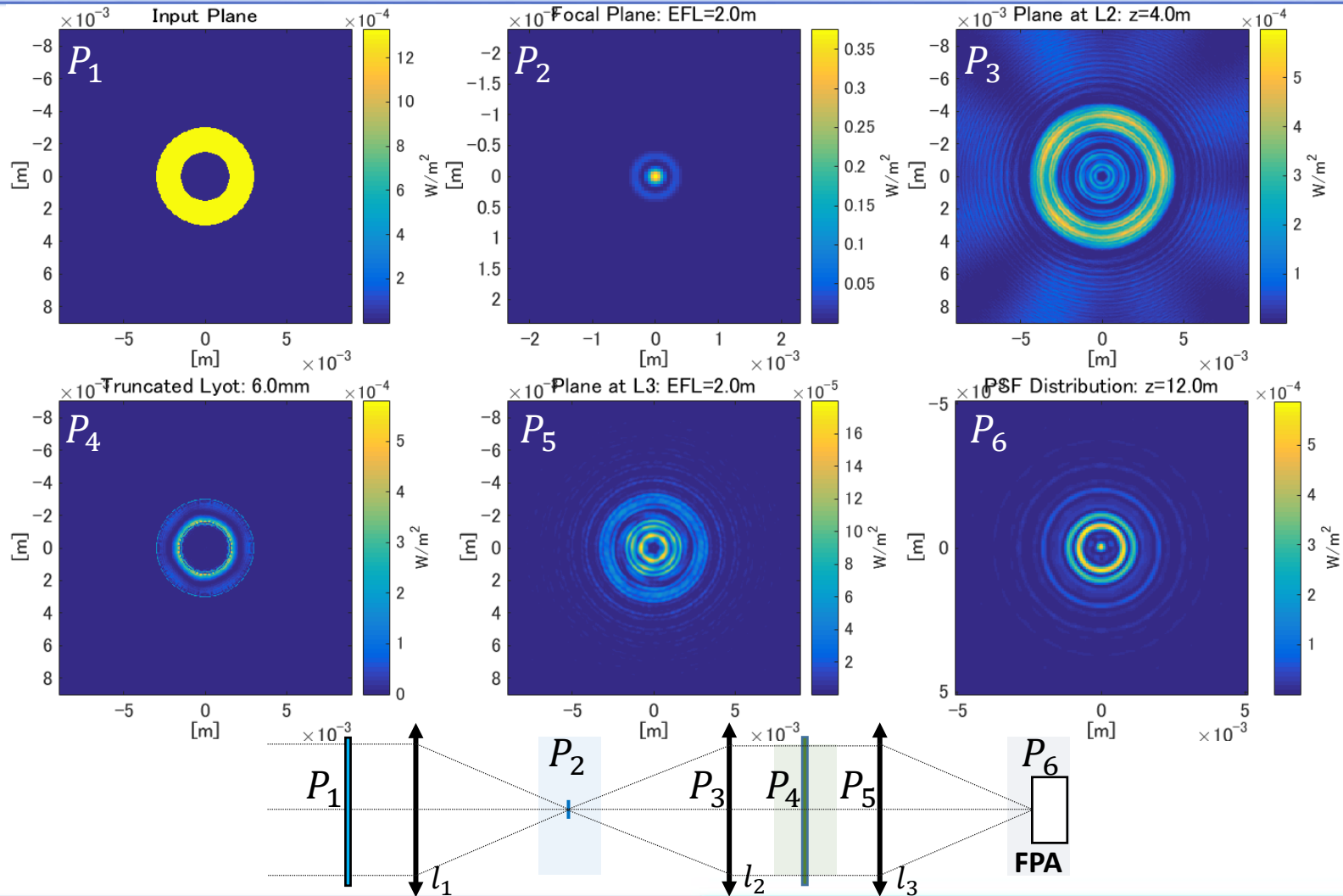
Coronagraphic Lyot: tc-5-ng-256



Singularidad fuera de eje

El plano de Lyot no presenta la concentración de luz anular

Campos coronográficos con apertura obstruida



Conclusiones

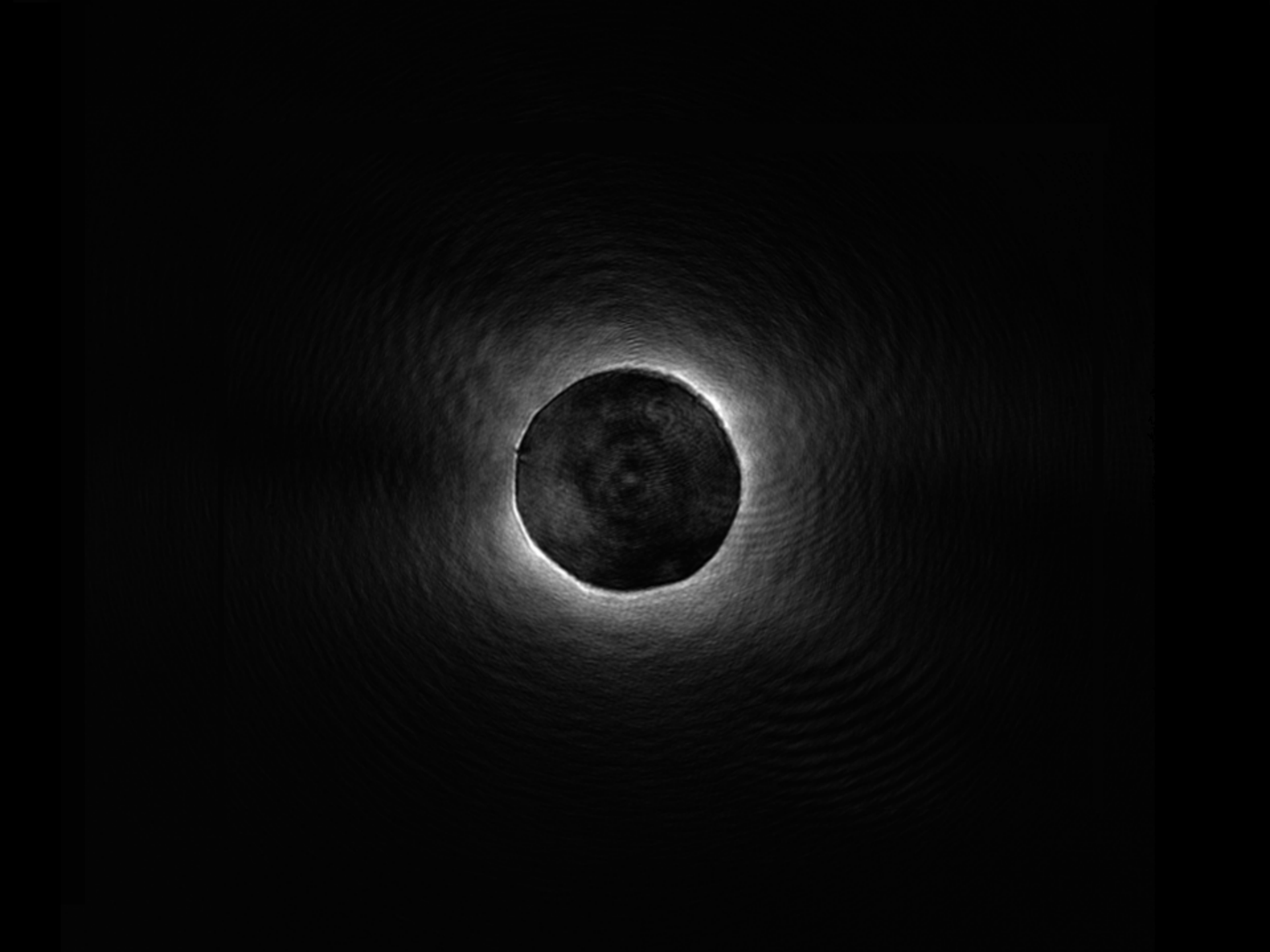


Conclusiones por objetivos

- La **herramienta computacional** desarrollada posibilita el estudio de **todos los planos coronográficos** bajo **diferentes condiciones de filtrado** e iluminación, simulando el **comportamiento esperado** en sistemas ópticos de mayor $F/\#$.
- El diseño del sistema permite el **filtrado simultáneo** con ambos moduladores, y **analizar paralelamente** los planos de Lyot y de la PSF **bajo las mismas condiciones** de iluminación de entrada.
- La **descripción cuantitativa** de las métricas y el análisis de las intensidades permitieron **establecer los parámetros óptimos** del filtrado, donde cada configuración de carga topológica posee un **nivel de gris propio** más óptimo.
- El sistema telescópico presenta **dificultades en la modulación** debido a la **condición incoherente de la iluminación** y la cercanía del objeto que **desplaza el plano de observación** de la imagen.

Conclusiones de los resultados

- El **rendimiento coronográfico** tiene una **alta dependencia** en la función de iluminación, en donde la **ausencia de transiciones discontinuas** en el campo de entrada produce un **perfil de corte menos definido** en el plano de Lyot.
- La **paridad de cargas** posibilita la **escogencia** de la aplicación para **eliminar mayor energía** en el espacio con **cargas pares** o **concentrar menos energía** en la **región axial** con **cargas impares**.
- Con la iluminación de bordes gaussianos, la **circulación energética** queda en función de la **magnitud del momento angular orbital** y se **incrementa el *stellar leakage***, en comparación a la **iluminación uniforme**.
- En el experimento, **es necesario un balance** en el valor de la carga topológica en **función** de la **circulación energética** y la separación de las singularidades, ya que se **aumenta la energía** residual a **mayor carga topológica**.



Referencias

Referencias de la presentación

1. D. Mawet. High Contrast Imaging Lab. Measure the off-axis response and inner working angles for charge. California Institute of Technology. ASTRO-CALTECH. 2016 Recurso web. www.astro.caltech.edu/~dmawet/teaching/2016-2017/high-contrast-imaging-lab.pdf
2. Mawet, D., Murakami, N., Delacroix, C., Serabyn, E., Absil, O., Baba, N., ... & Forsberg, P. Taking the vector vortex coronagraph to the next level for ground-and space-based exoplanet imaging instruments: review of technology developments in the USA, Japan, and Europe. In *Techniques and instrumentation for detection of exoplanets V* (Vol. 8151, p. 815108). International Society for Optics and Photonics. 2011.
3. Foo, G., Palacios, D. M., & Swartzlander, G. A. Optical vortex coronagraph. *Optics letters*, 30(24), 3308-3310. 2005.
4. Swartzlander Jr, G. A. The optical vortex coronagraph. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11(9), 094022. 2009.
5. J. G. Kühn, P. Patapis. Digital adaptive coronagraphy using slms: promising prospects of a novel approach, including high-contrast imaging of multiple stars systems. Conference Workshop. Institute for Astronomy. ETH Zürich. 2016. Recurso web: www.astro.caltech.edu/~dmawet/meetings/slms_kuhn_vortex-workshop_t.pdf
6. Kühn, J., Patapis, P., Ruane, G., & Lu, X. Implementing focal-plane phase masks optimized for real telescope apertures with SLM-based digital adaptive coronagraphy. *Optics express*, 25(14), 16686-16700. 2017.
7. Ruane, G. J., Dennis, M. R., & Swartzlander, G. A. Zernike amplitude pupil apodization for vortex coronagraphy with obscured apertures. arXiv preprint arXiv:1412.8731. 2014.
8. Errmann, R., Minardi, S., & Pertsch, T. A broad-band scalar vortex coronagraph. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 435(1), 565-569. 2013.
9. Pavel Frolov. Space Research Institute (IKI) of Russian Academy of Sciences. (RAS). CP-ARC for Direct Imaging of Extrasolar planets. 2016.
10. de Jonge, C., Baudoz, P., Galicher, R., Huisman, R., Peletier, R., & Jayawardhana, B. Effect of multiple deformable mirrors in broadband high-contrast coronagraphs. In *Adaptive Optics Systems VI* (Vol. 10703, p. 107035D). SPIE 2018.

Referencias destacables

11. N. Jovanovic, O. Absil, P. Baudoz, M. Beaulieu, M. Bottom, E. Cady, B. Carlomagno, A. Carlotti, D. Doelman, K. Fogarty y col. Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-based and space-based telescopes: part ii. Common path wavefront sensing/control and coherent differential imaging. En *Adaptive Optics Systems VI*, vol. 10703, 107031U. International Society for Optics y Photonics, 2018.
12. G. Ruane, A. Riggs, J. Mazoyer, E. Por, M. N'Diaye, E. Huby, P. Baudoz, R. Galicher, E. Douglas, J. Knight y col. Review of high-contrast imaging systems for current and future ground-and space-based telescopes i: coronagraph design methods and optical performance metrics. En *Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, vol. 10698, 106982S. International Society for Optics y Photonics, 2018.
13. H. Pierre, B. Pierre, M. Dimitri y N. Schuhler. Adaptive Phase-Mask Coronagraph. En S. Esposito y L. Fini, edición, *Proceedings of the Third AO4ELT Conference*, pág. 19, 2013. DOI: 10.12839/AO4ELT3.13183.
14. G. A. Swartzlander Jr. The optical vortex coronagraph. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11(9):094022, 2009. DOI: 10.1088/1464-4258/11/9/094022
15. Mawet, Dimitri et al. Annular groove phase mask coronagraph. *The Astrophysical Journal*, 633(2):1191, 2005 (vid. págs. 28, 36, 51).
16. G. Ruane, D. Mawet, A. E. Riggs y E. Serabyn. Scalar vortex coronagraph mask design and predicted performance. En S. B. Shaklan, edición, *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets IX*, vol. 11117, págs. 454-469. International Society for Optics y Photonics, SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2528625. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2528625>.
17. O. Guyon, E. Pluzhnik, M. Kuchner, B. Collins y S. Ridgway. Theoretical limits on extrasolar terrestrial planet detection with coronagraphs. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 167(1):81, 2006 (vid. pág. 46).
18. J. Kühn, P. Patapis, X. Lu y M. Arikan. SLM-based digital adaptive coronagraphy: current status and capabilities. En R. Navarro y R. Geyl, edición, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, vol. 10706, págs. 770-783. International Society for Optics y Photonics, SPIE, 2018. DOI: 10.1117/12.2312554. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2312554>