



Investigaciones de Polarización Astrofísica en México

David Hiriart

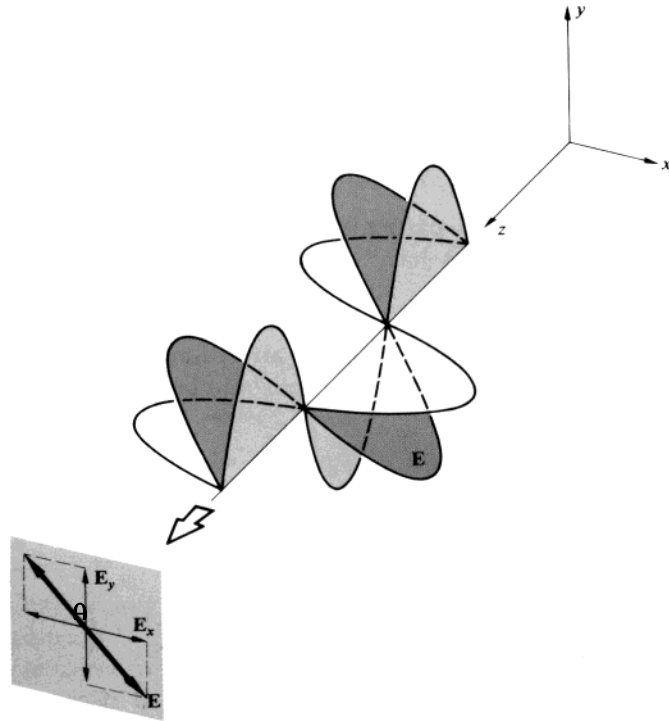
Instituto de Astronomía

Universidad Nacional Autónoma de México

ÍNDICE

- 1. FUNDAMENTOS DE POLARIMETRÍA
- 2. POLIMA
- 3. POLIMA-2
- 4. POLICAN
- 5. MODULO ESPECRO-POLARÍMETRO FICUS
- 5. CONCLUSIONES

1. Fundamentos de polarimetría:



El campo de radiación se puede describir por dos componentes:

$$\mathbf{E}_x = E_x \cos(kz - \omega t)$$

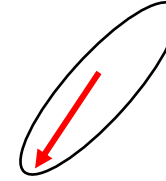
$$\mathbf{E}_y = E_y \cos(kz - \omega t + \xi)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$$

Tomado de Hecht (1987) "Optics"

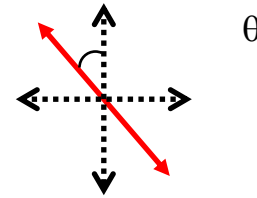
Fundamentos de Polarimetría:

En general, la radiación está elípticamente polarizada →

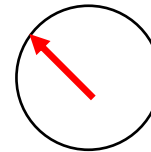


Casos especiales:

$\xi = 0$ o $n\pi$ – linealmente polarizada →



$\xi = \pi/2 \pm n\pi$ $E_x = E_y$ circularmente polarizada →



Luz no polarizada tiene un vector **E** que cambia aleatoriamente de dirección.

En general, la luz está parcialmente polarizada

- Parametros de Stokes

- La radiación electromagnética se puede describir en términos de los parámetros de Stokes: I, Q, U & V:
 - I – Intensidad total
 - Q & U – Describen polarización lineal
 - V – Describe polarización circular

- Grado de Polarización:
$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}$$

Para polarización lineal $V = 0$

- Ángulo de Polarización en el caso linealmente polarizado:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right)$$

El Angulo de posición siempre esta entre 0 y 180 grados

Generalmente, la luz es parcialmente polarizada y P es de un pequeño porcentaje.

1970-1980.-El Dr. Luis Carrasco obtiene en donación del Observatorio Nacional de Kitt Peak un polarímetro óptico de un solo canal.

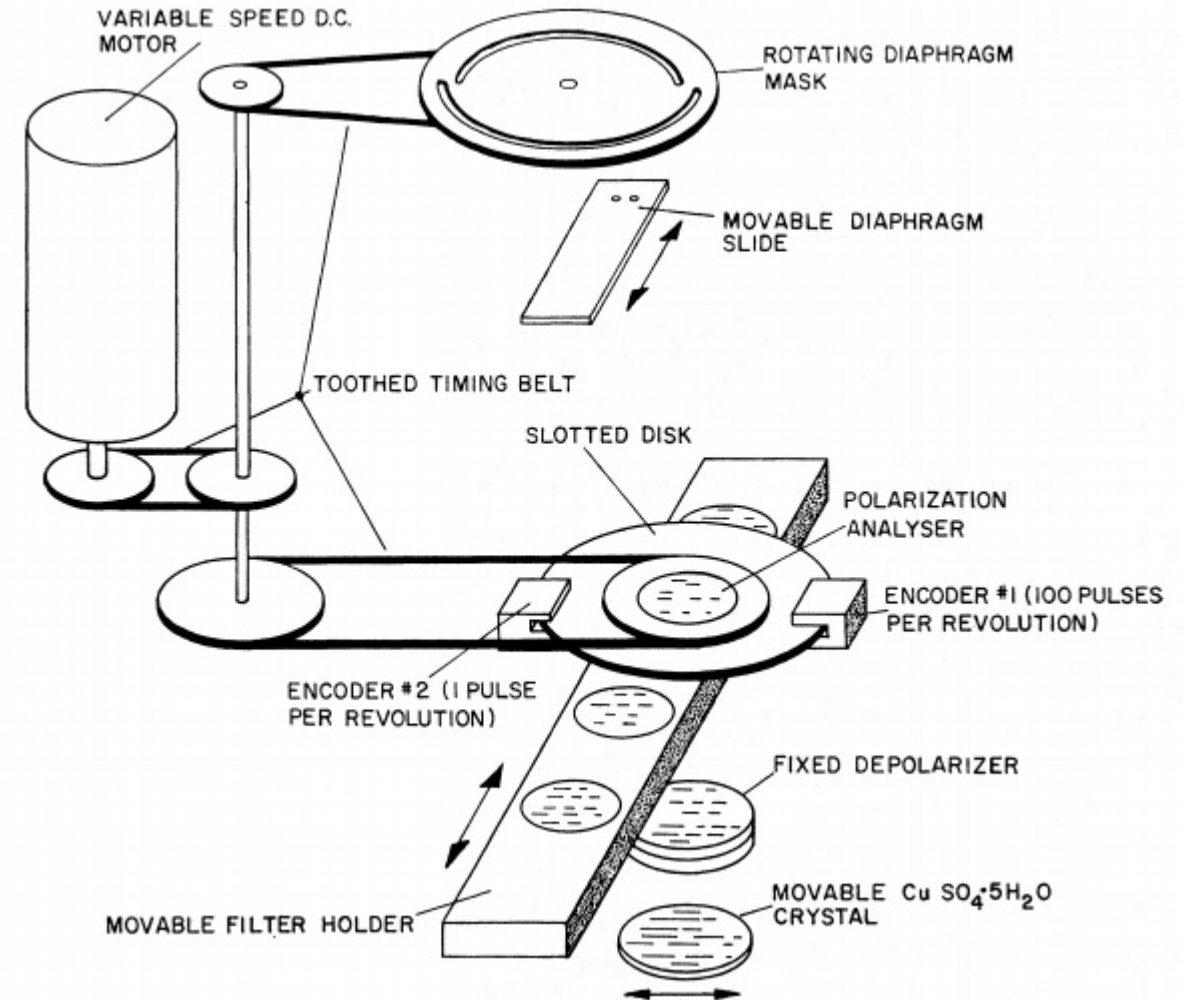
Objetivo: Estudio de la crecimiento de granos de polvo en regiones de alta densidad de gas.

Detector: Fotomultiplicador 1P21 con respuesta S20 enfriado con hielo seco.

Registro: Analizador multicanal.

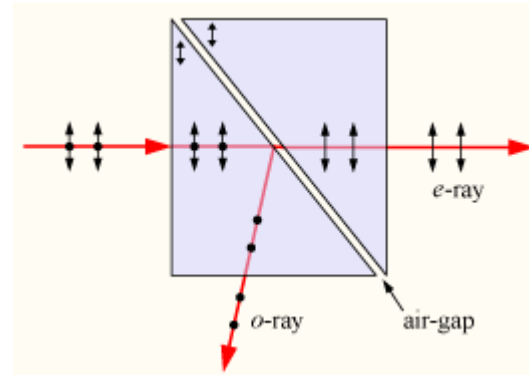
Analizador de polarización: Lámina Polaroid HNP'B

Modulación @ 16 Hz entre cielo y objeto.



1989.- “Sistema Adquisidor de Datos de un Polarímetro para uso Astronómico”, Tesis Maestría CICESE, Directores: Dr. Luis Carrasco y Dr. Enrique Mitrani.

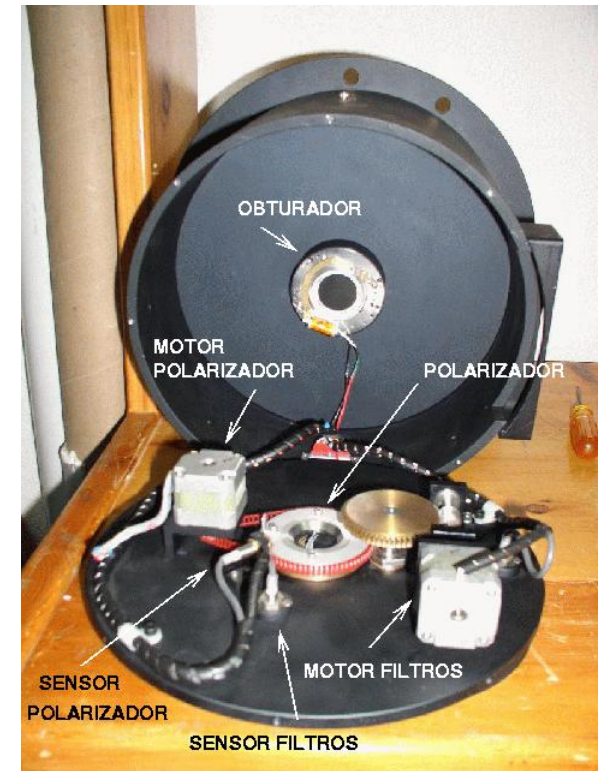
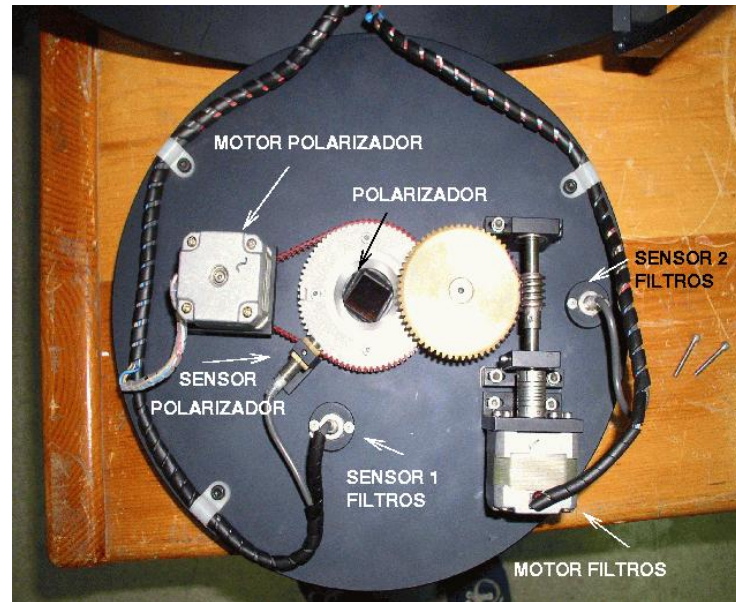
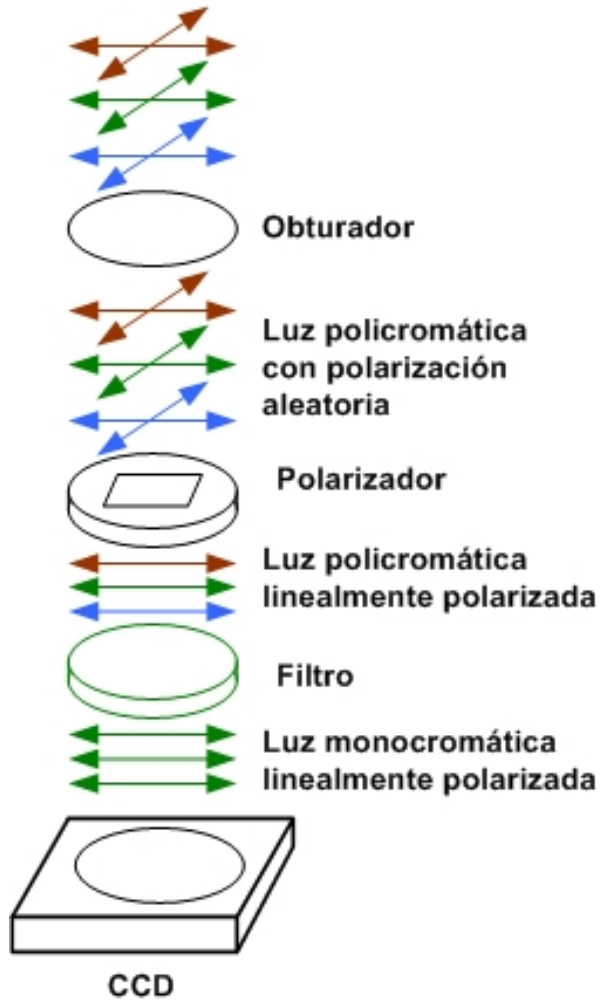
- Sustitución de la hoja Polaroid HNPB por un prisma de Glan-Taylor que permite un mejor análisis de polarización (asilamiento entre estados ortogonales de polarización de 10^{-4}).



- El mecanismo de modulación se mantiene a una frecuencia de 16 Hz.
- Sustitución del multicanal por una tarjeta con un microprocesador y una memoria FIFO dentro un computador personal XT.
- Programa de adquisición y reducción de datos en Turbo C de Borland.
- No pudo explotarse su aplicación astronómica pues me fui a la Universidad de Massachusetts a obtener el grado de doctorado en astrofísica.

2005.- Construcción de Polima en las instalaciones del IAUNAM-E.

- polarímetro óptico de imagen en el OAN-SPM utilizando un CCD.
- Objetivo: Estudio de geometrías de envolventes circunestelares de estrellas AGB
- Instrumento de bajo costo (~600 USD) pues se utilizó el prisma de Glan-Taylor existente.
- Datos para 32 artículos, 3 tesis de doctorado, 1 maestría.



Observación de Polarización lineal con POLIMA:

- Obtención de campos planos al inicio y/o final de la noche en cada filtro a las posiciones del polarizador de 0° , 45° , 90° y 135°
- Obtener dos juegos de 5 imágenes de bias durante la noche.
- Realizar las observaciones polarimétricas en cada filtro con polarizador a posiciones de 0° , 90° , 45° y 135° (EN ESE ORDEN) para los objetos de estudio.

Parámetros q y u de Stokes ($v=0$)

$$q = \frac{f(0^\circ) - f(90^\circ)}{f(0^\circ) + f(90^\circ)}$$
$$u = \frac{f(45^\circ) - f(135^\circ)}{f(45^\circ) + f(135^\circ)},$$

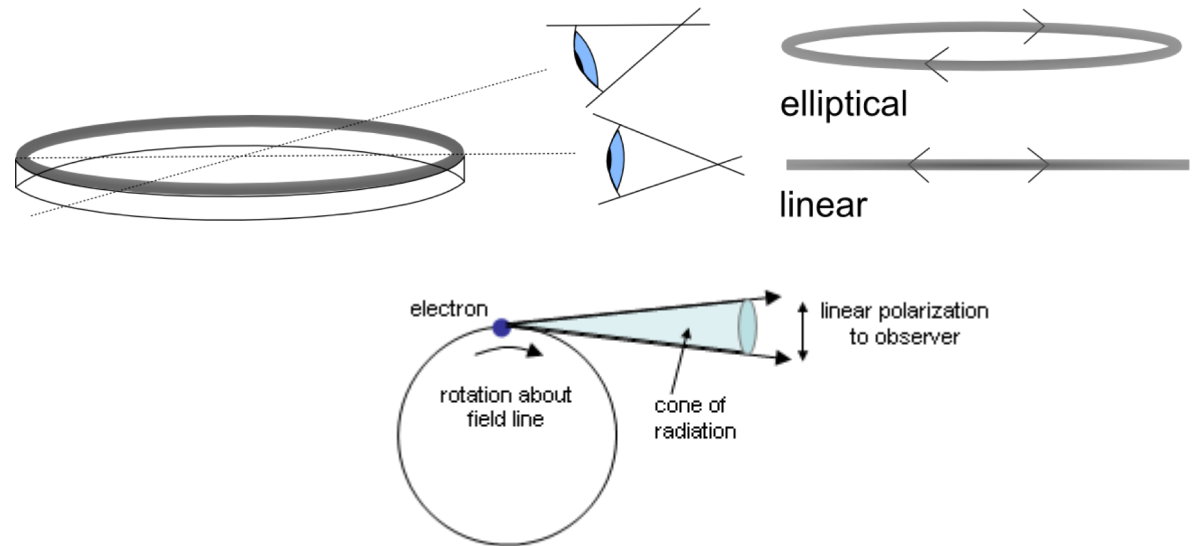
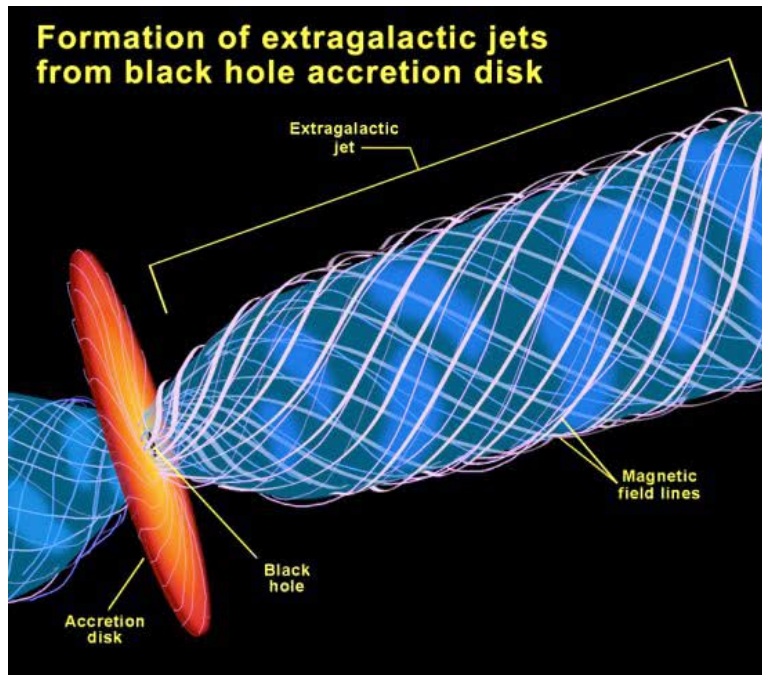
Polarización y Angulo del EVPA

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}$$
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{u}{q} \right).$$

2007.- Inicio del proyecto de monitoreo fopolarimetrico de TeV blazares utilizando el polarímetro polima y el telescopio de 0.84m del OAN-SPM.

- Proyecto propuesto por la Dr. Erika Benitez y el Dr. Jochen Heidt de la Universidad de Heidelberg, Alemania.

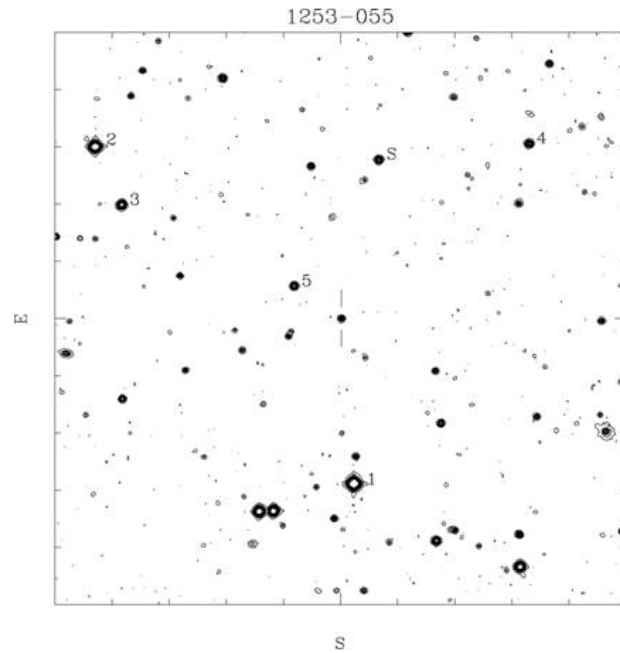
-Medimos en la banda R la polarización lineal de la emision sincrotrón de los electrones relativistas atrapados en el campo magnético del jet del blazar dirigido hacia nosotros. .



https://www.wpclipart.com/space/black_hole/blazar_structure.jpg.html

1253-055 (3C 279, 4C -05.55, CTA 56)

Coordinates
 R.A. = 12:56:11.1665, Dec. = -05:47:21.523 (2000.0)
 z = 0.5362

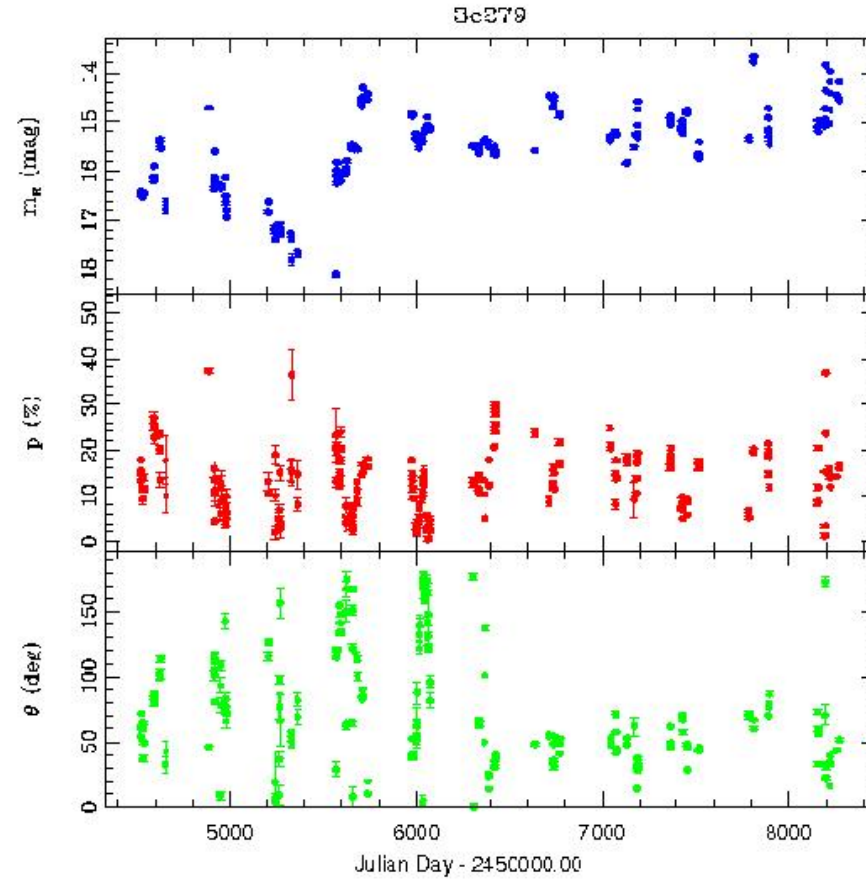


GASP suggested stars: 1 2 3 5

Comparison stars

Star	U	B	V	R	I
1	13.08 (0.06)	13.02 (0.03)	12.42 (0.03)	12.05 (0.02)	11.70 (0.02)
2	14.06 (0.07)	13.73 (0.04)	12.99 (0.04)	12.56 (0.03)	12.17 (0.03)
3	15.51 (0.07)	15.49 (0.03)	14.87 (0.03)	14.53 (0.02)	14.20 (0.08)
4		16.53 (0.05)	15.66 (0.03)	15.13 (0.02)	
5	17.23 (0.16)	16.79 (0.04)	15.98 (0.04)	15.47 (0.02)	15.00 (0.04)
S*	---	---	---	---	---

comparison stars from Raiteri C.M. et al., 1998, A&AS 130, 495
 U and I data from Smith P.S. & Balonek T.J., 1998, PASP 110, 1164



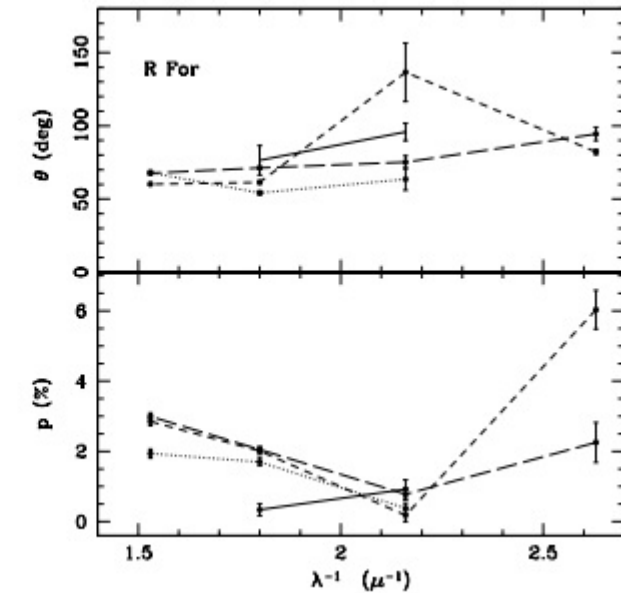
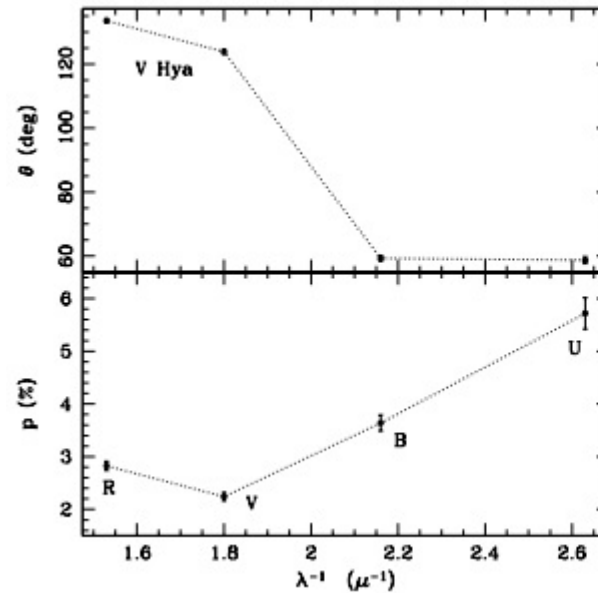
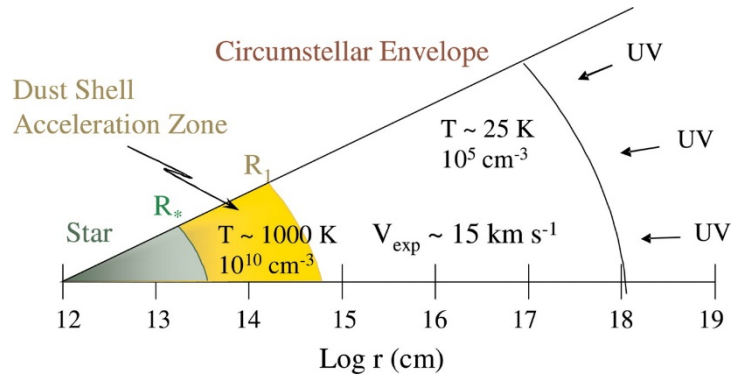
2012.- Estudios de polarización lineal de estrellas AGB.

Emisión de gas y polvo en envoltentes circumstelares. cSuposición fundamental: Envoltentes esféricamente simétricas.

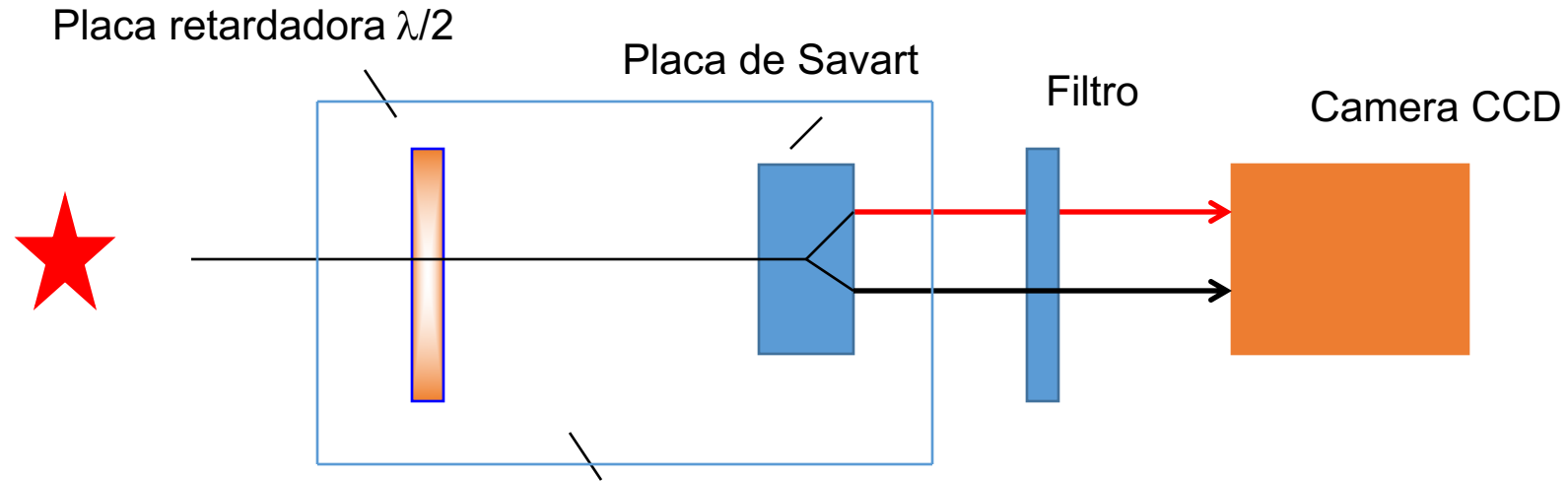
Polarización óptica: dispersión de la luz central de la estrella por el polvo de la envoltente produciría polarización a menos que la envoltente fuera esféricamente simétrica e isotrópica.

Fuente de polarización en forma de V: producida por el la contribución de cuerpo negro de la misma envoltente dispersada por ella misma.

Alta variabilidad en el ultravioleta: polvo se forma en la parte interna de la envoltente.

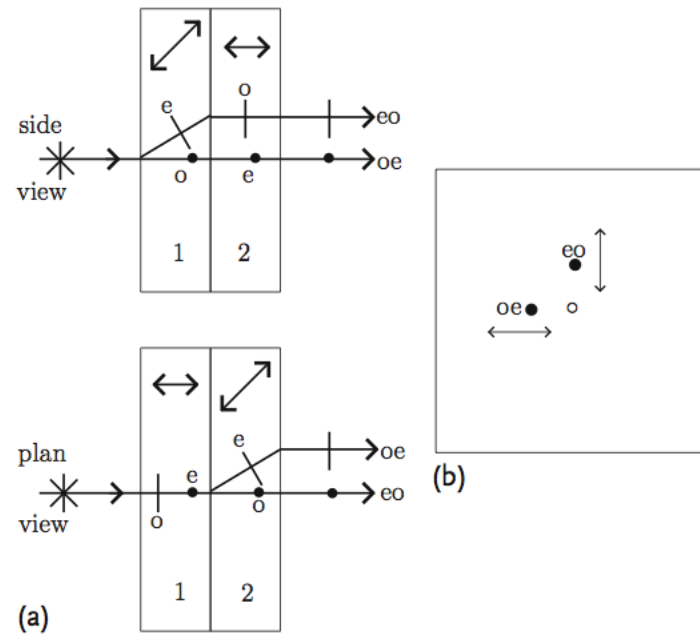


Polima-2



2013.- En colaboración con la Dra. Anabel Arrieta de la Universidad Iberoamericana, se establece un convenio de colaboración para construir un polarímetro óptico de doble haz para objetos puntuales (Polima-2) que permite una mejor resolución al permitir la medición simultánea en dos haces ortogonales disminuyendo así las influencias de los efectos de la variación de la atmósfera.

Placa de Savart



Placa de Savart::

-Dos haces saliendo con polaridades ortogonales

-Los dos haces estan en foco, pero desplazados de la posicion original del haz

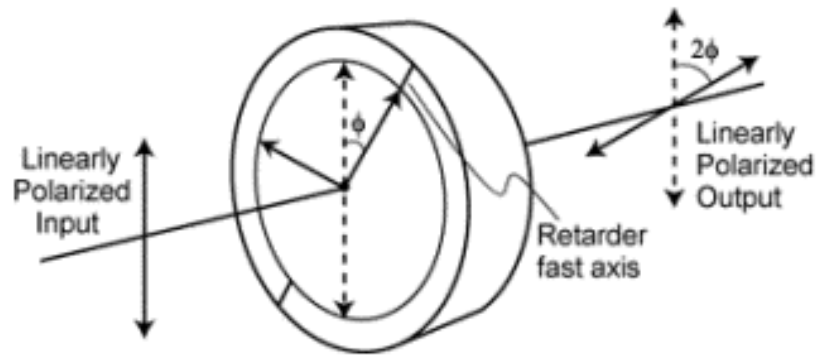
-Se pueden hacer imagenes puntuales con dos polaridades ortogonales simultaneas (poco efecto del cielo)

-Necesitamos rotar la placa 45 grados para medir las otras dos imagenes y calcular la polarizacion.

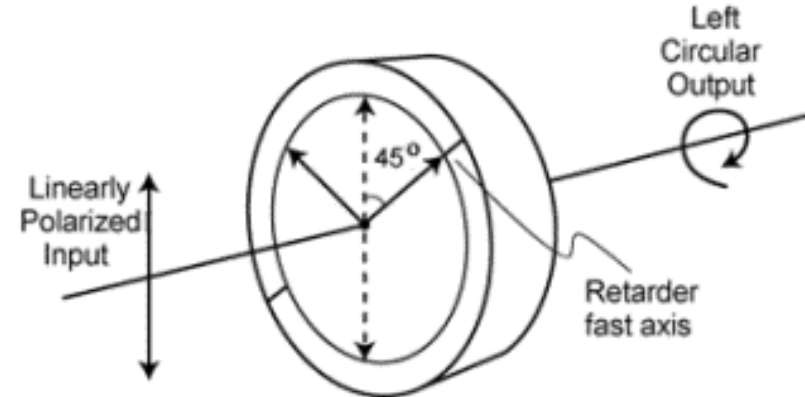
Esto mueve la imagen puntual en el plano pues no es concentrico al eje de giro. Solucion: usar una placa retardadora de $\lambda/2$

Retardadores

Adaptado de Frans Snik

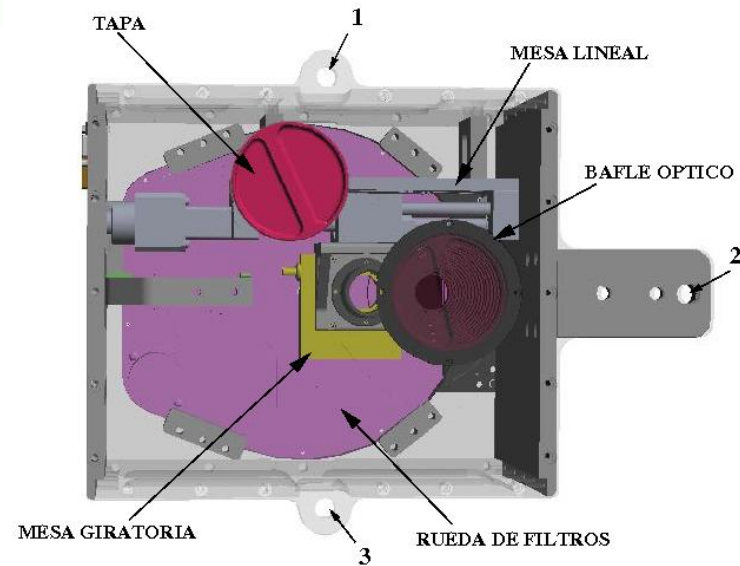
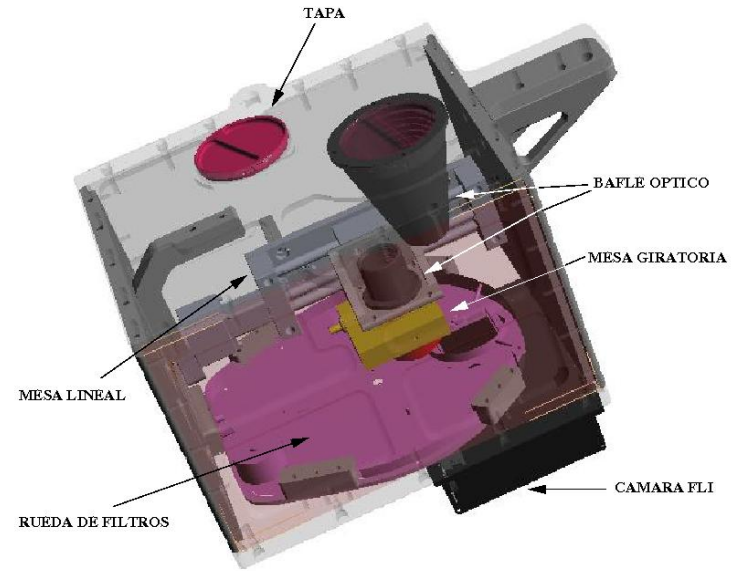
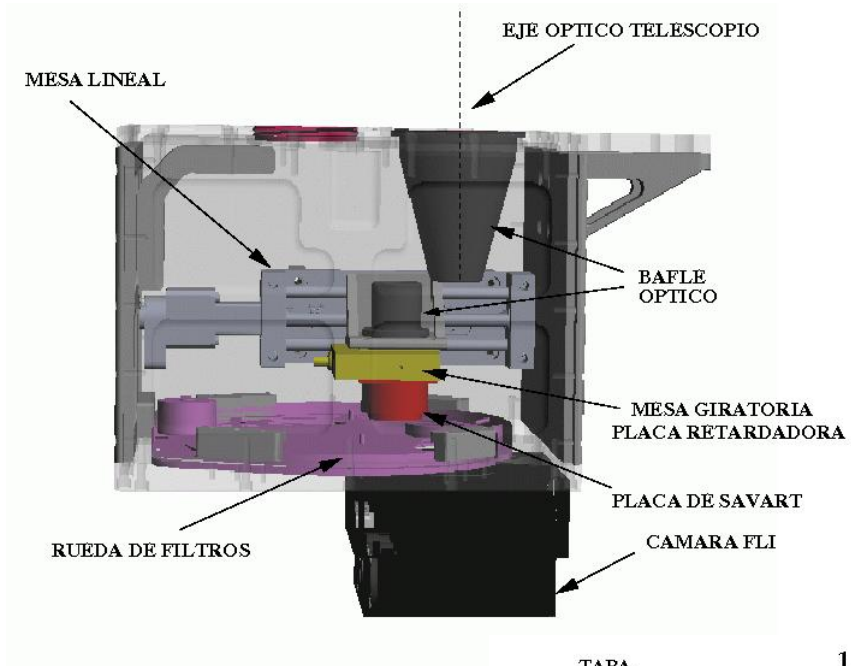


Placa retardadora de $\lambda/2$
(Polima-2)



Placa retardadora de $\lambda/4$
(Espectropolarimetro)

POLIMA-2





POLICAN, primer polarímetro de imagen en la banda infrarroja en México

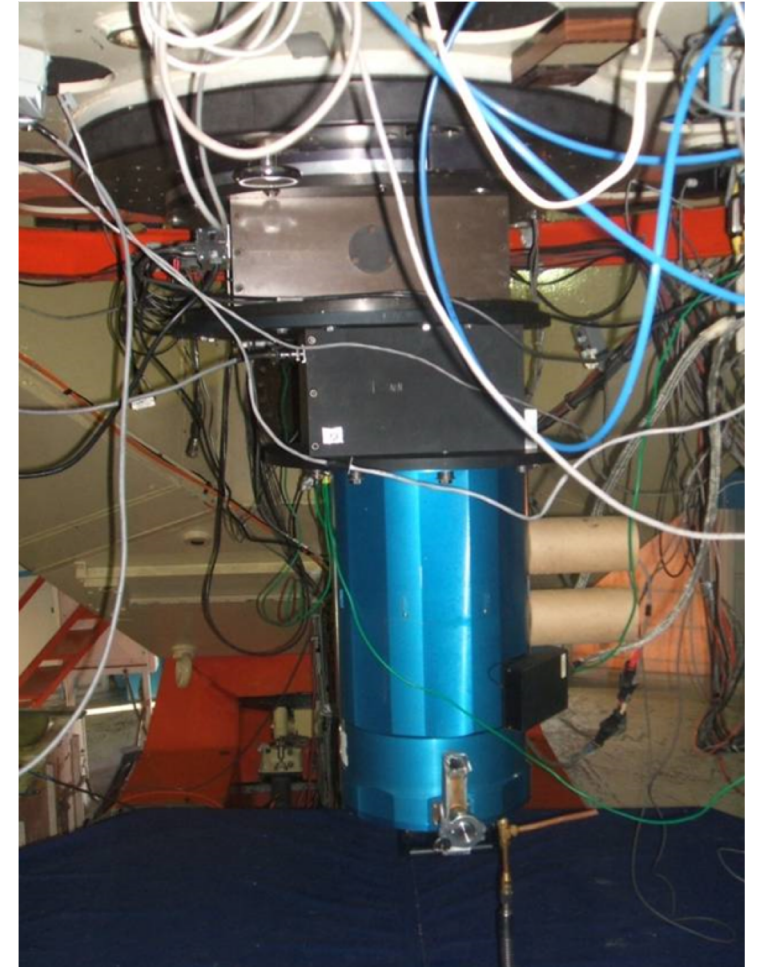
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México
Proyecto SEP CB 2012 01 182841

Investigadores: Abraham Luna (P.I.), Luis Carrasco y Divakara Mayya.

Estudiantes: Marco A. Vazquez, Enrique Omar Serrano y Devaraj Rangaswamy.

Técnicos: Alvaro Cuellar, Juan Tanori y Javier Martínez

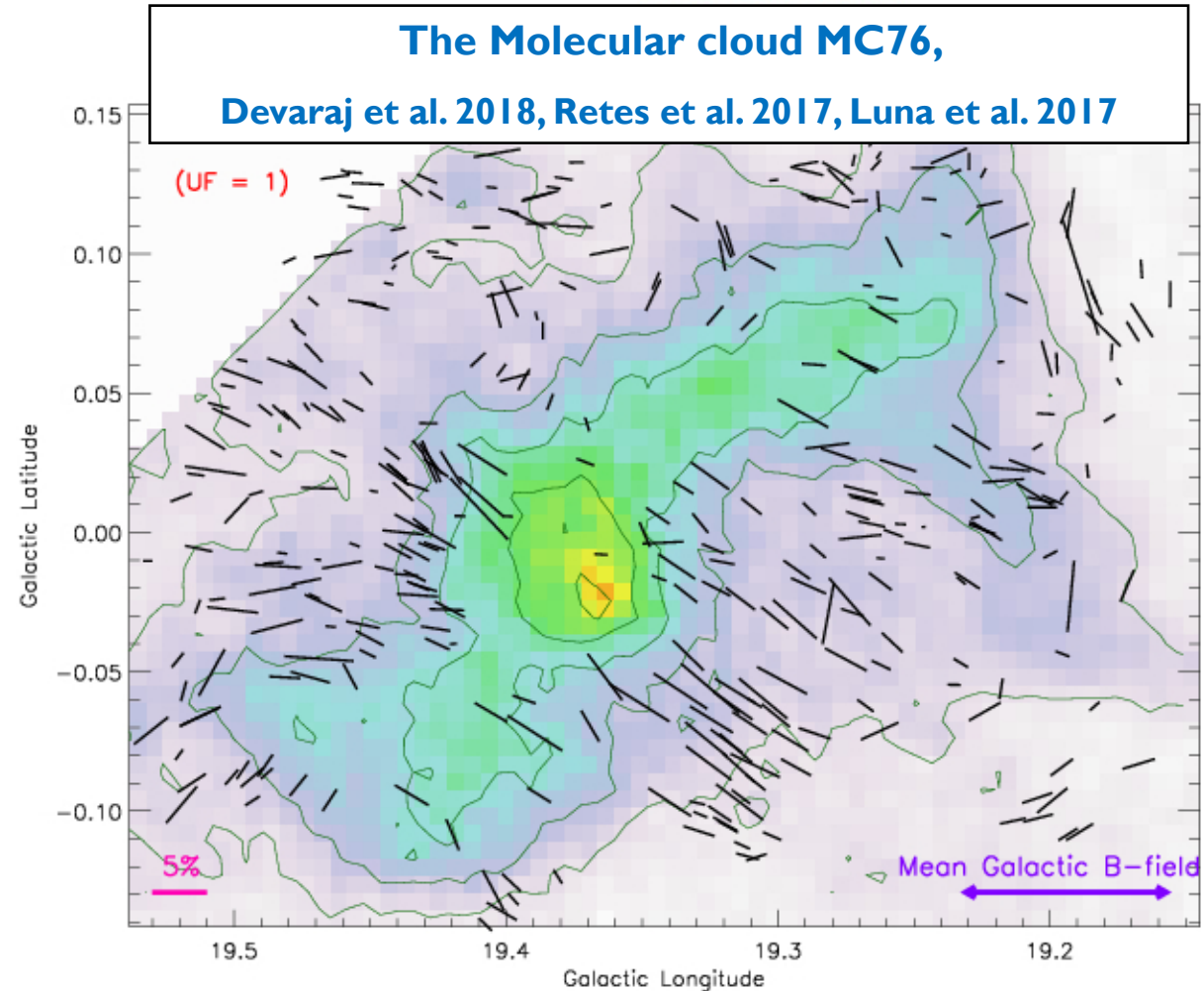
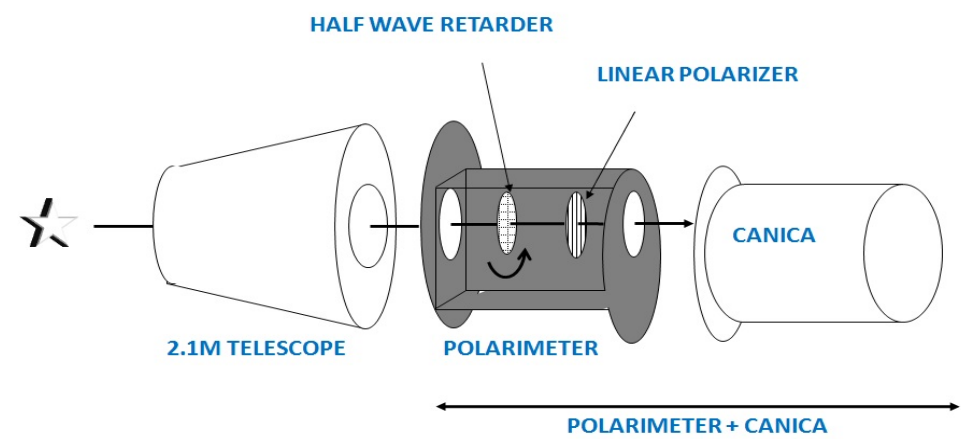
Posdoctorados: Lokesh Dewangan



RESUMEN: POLICAN es el primer polarímetro de imágenes astronómicas en la banda infrarroja en México. Surge con la necesidad de poder estudiar temas relacionados con campos magnéticos que se presentan en diversos entornos astronómicos, temas de frontera en la investigación astrofísica. Acoplado al detector CANICA, permite observar un campo de visión de 5x5 minutos de arco y permite observar objetos hasta magnitudes tan débiles como 16 en la banda de 1 a 2 micrones. POLICAN actualmente alcanza una precisión del 1.0% en grado de polarización y una incertidumbre de 3 grados en ángulo. Observaciones preliminares de regiones de formación estelar, remanentes de supernovas y nebulosas pre-planetarias, han sido obtenidas exitosamente y con ellas se realiza el estudio del campo magnético en su entorno.

Áreas interdisciplinarias participantes:

- Diseño opto-mecánico
- Taller mecánico de precisión
 - Mecatrónica (control)
- Software (análisis de imágenes)
- Instrumentación Astronómica
 - Astrofísica



LOGROS DEL PROYECTO:

Construcción y calibración del primer polarímetro de imagen astronómica, en la banda infrarroja en México.

Colaboraciones nacionales en proceso:

- ✓ Grupo de polarimetría UNAM (Dra. Laurence Sabin, Dr. David Hiriart y Dr. Julio Ramírez).
- ✓ U. de Guadalajara (Dra. Silvana Navarro).

Colaboraciones internacionales en proceso:

- ✓ U. de Boston (Dr. Dan Clemens).
- ✓ Radio Observatorio de Onsala (Dra. Sandra Treviño)
- ✓ U. de Massachusetts, con el detector ToITeC-GTM.

Temas Astrofísicos actualmente abordados:

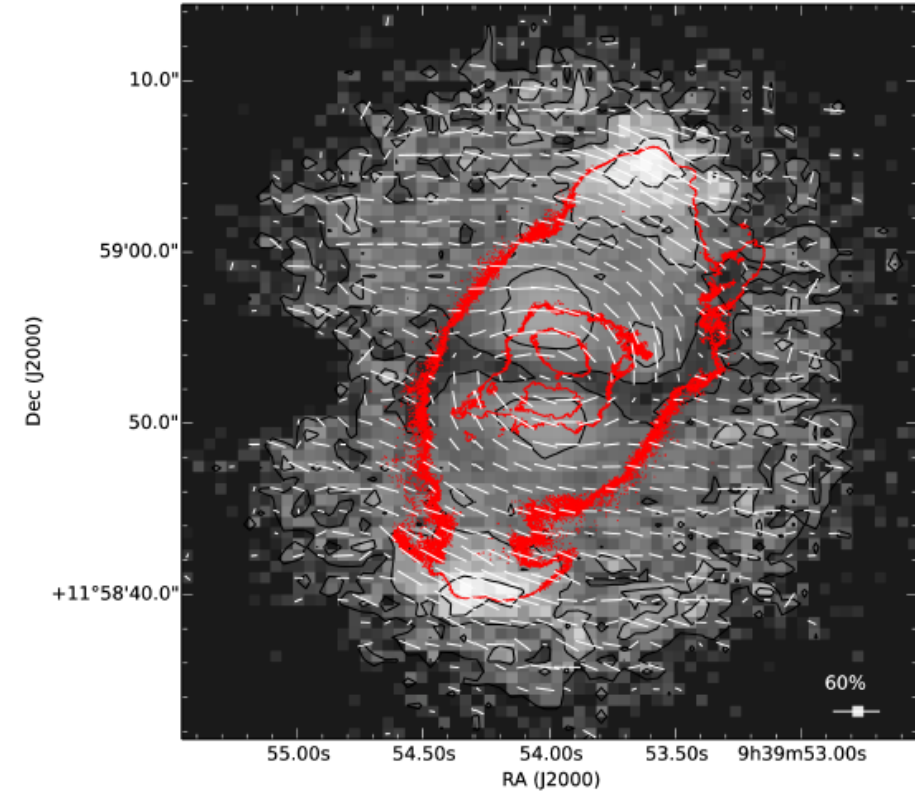
- ✓ Polarización infrarroja (IR) de nubes moleculares Galácticas.
- ✓ Polarización IR de nebulosas pre-planetarias.

Publicaciones:

- ✓ Devaraj, R.; Mayya, Y. D.; Carrasco, L.; Luna, A. 2018, PASP, 130, 5001
- ✓ Devaraj, R.; Luna, A.; Carrasco, L.; Vázquez-Rodríguez, M. A.; Mayya, Y. D.; Tánori, J. G.; Serrano Bernal, E. O. 2018, PASP, 130
- ✓ Dewangan, L., Ojha, D., Luna, A., et al. (2016) ApJ, 819
- ✓ R. Devaraj, A. Luna, L. Carrasco and Y. D. Mayya (2015). Proceedings of the IAU, Vol 10, pp 175-180.
- ✓ Dewangan, L., Luna A., Ojha, D., et al. (2015) ApJ 811
- ✓ Dewangan, L., Mayya, D., Luna, A. & Ojha, D. (2015) ApJ, 803

Tesis y reportes técnicos producidos por el proyecto:

- ✓ Devaraj Rangaswami, tesis doctoral INAOE, en proceso
- ✓
- ✓ Marco A. Vázquez, tesis de Maestría INAOE, febrero 2012
- ✓ Marco A. Vázquez, Reporte técnico INAOE, Junio 2012



Polarización de cercano infrarrojo en la nebulosa Pre-Planetaria Frosty Leo. El mapa de color indica el Grado de Polarización y los contornos en rojo muestran la emisión en visible. La luz dispersada se polariza linealmente, nuestras observaciones hechas con POLICAN revelan nuevas estructuras en este objeto. [Serrano-Bernal et al en prep]

Enrique O. Serrano, tesis doctoral INAOE, en proceso

Efecto Zeeman Normal

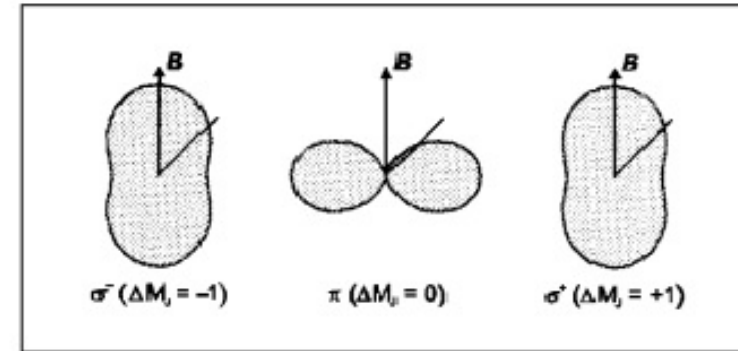
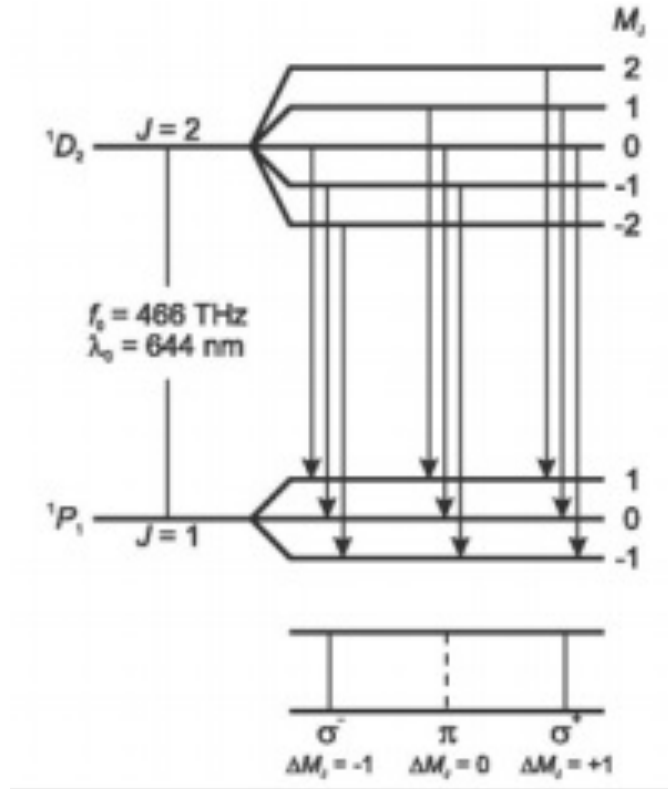


Fig. 2 Angular distributions of the electrical dipole radiation (ΔM_j : angular-momentum components of the emitted photons in the direction of the magnetic field)

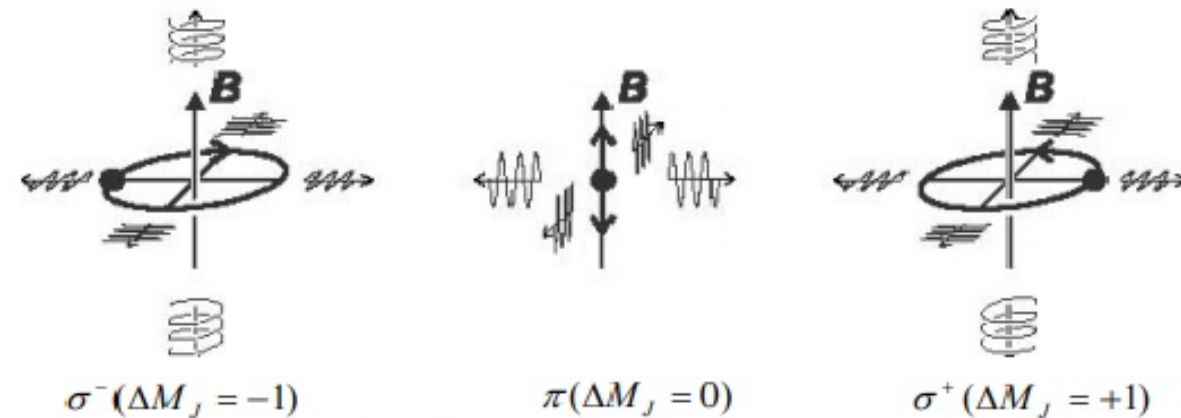


Fig. 3 Schematic representation of the polarization of the Zeeman components (ΔM_j : angular-momentum components of the emitted photons in the direction of the magnetic field)

2018.- Entrega al OAN-SPM un nuevo modulo de polarización (FICUS) . El nuevo modulo se conecta al espectrografo Boller & Chivens en el telescopio de 2.1m del OAN-SPM

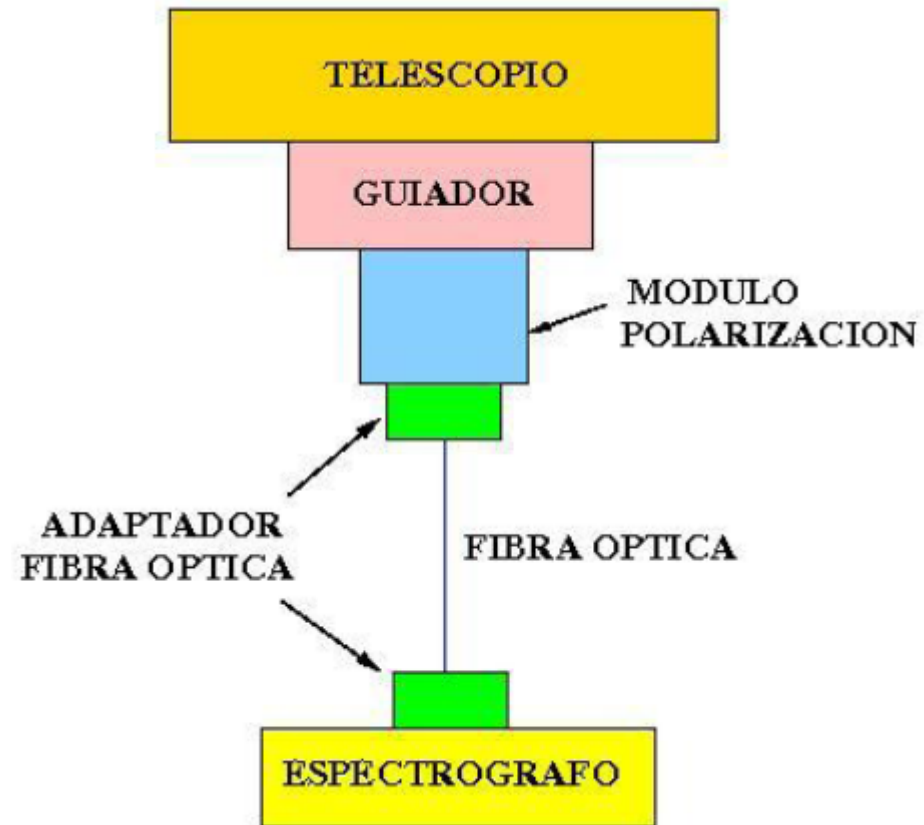
ESPECTRO-POLARÍMETRO

Medir la polarización en líneas espectrales (lineal y circular) permite determinar la presencia de un campo magnético en el lugar de la emisión (efecto Zeeman)

Para polarización circular usamos una placa de $\lambda/4$ para convertir a polarización lineal lineal y luego utilizamos un esquema similar a la polarización lineal utilizando placa de Savart..

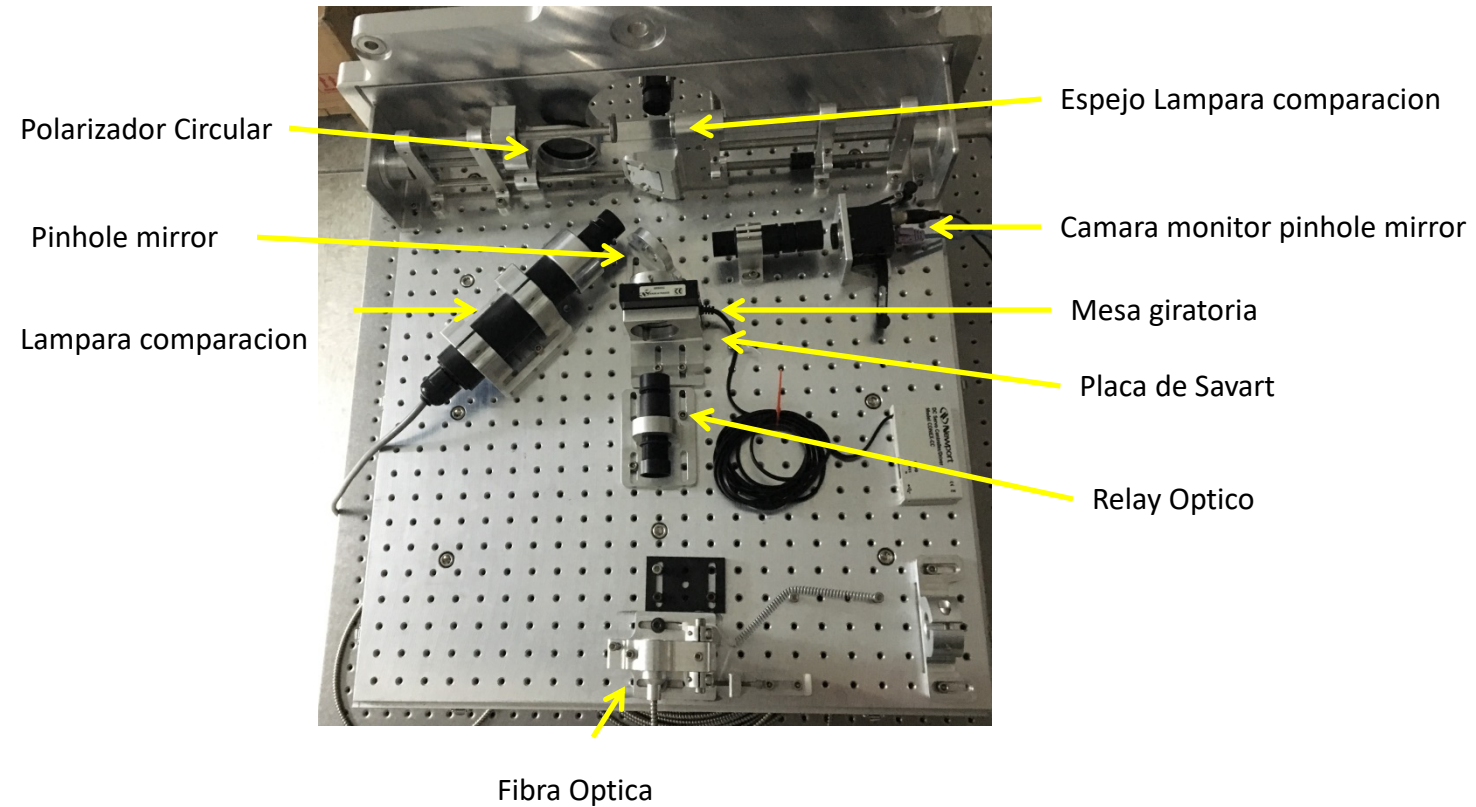
Para polarización lineal usamos una placa de $\lambda/2$ y placa de Savart y luego utilizamos un esquema similar a la polarización lineal

La idea es no modificar el espectrografo y que no cuelgue del telescopio para evitar flexiones por lo que se utiliza una fibra óptica para llevar la señal del analizador de polarización a la entrada del espectrografo.



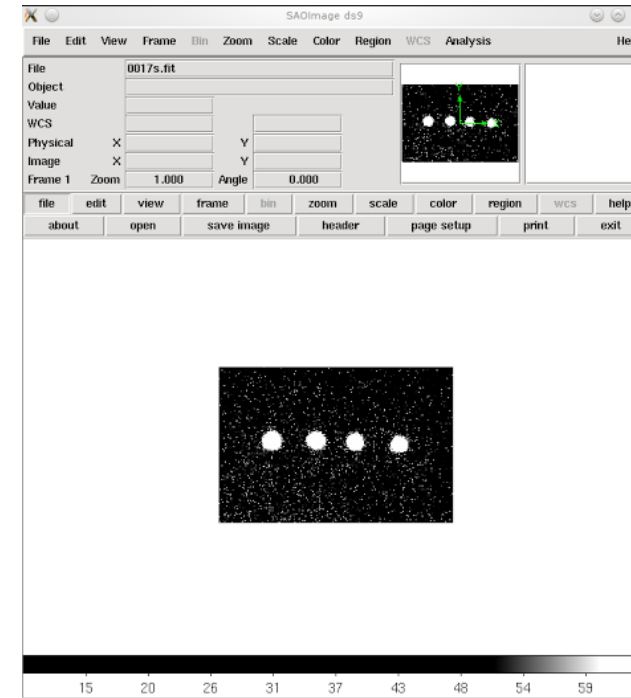
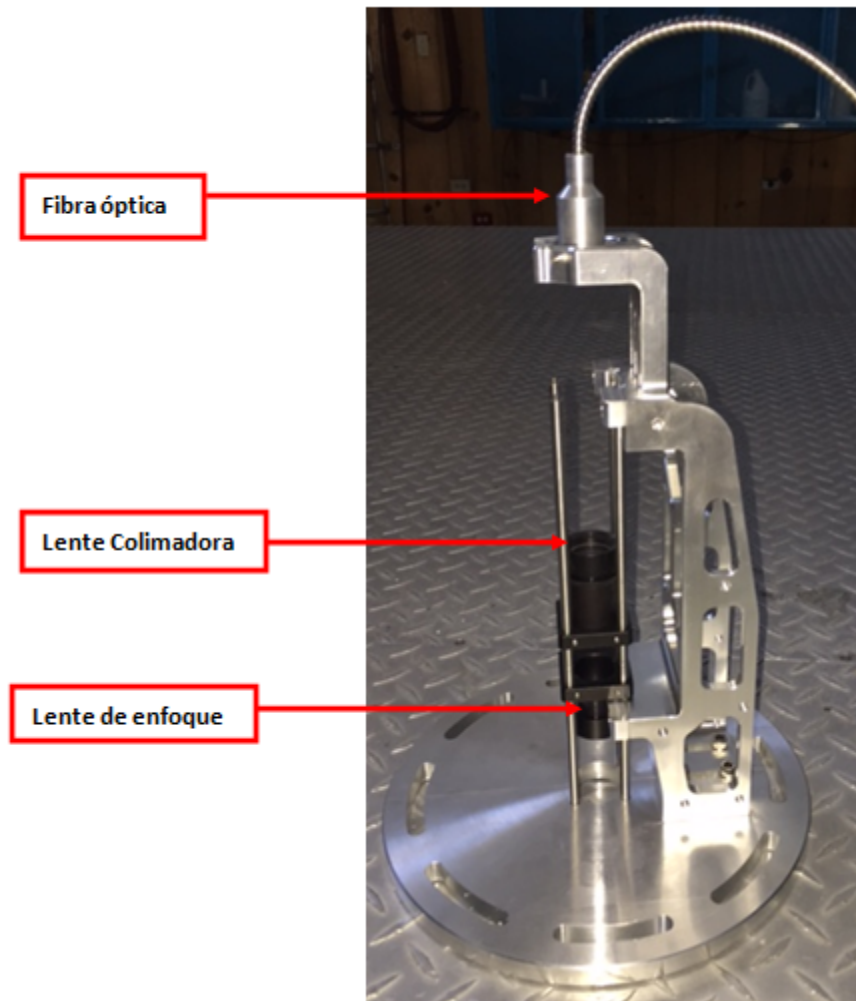
ESPECTRO-POLARIMETRO

MÓDULO DE POLARIZACIÓN + ADAPTADOR A LA FIBRA ÓPTICA



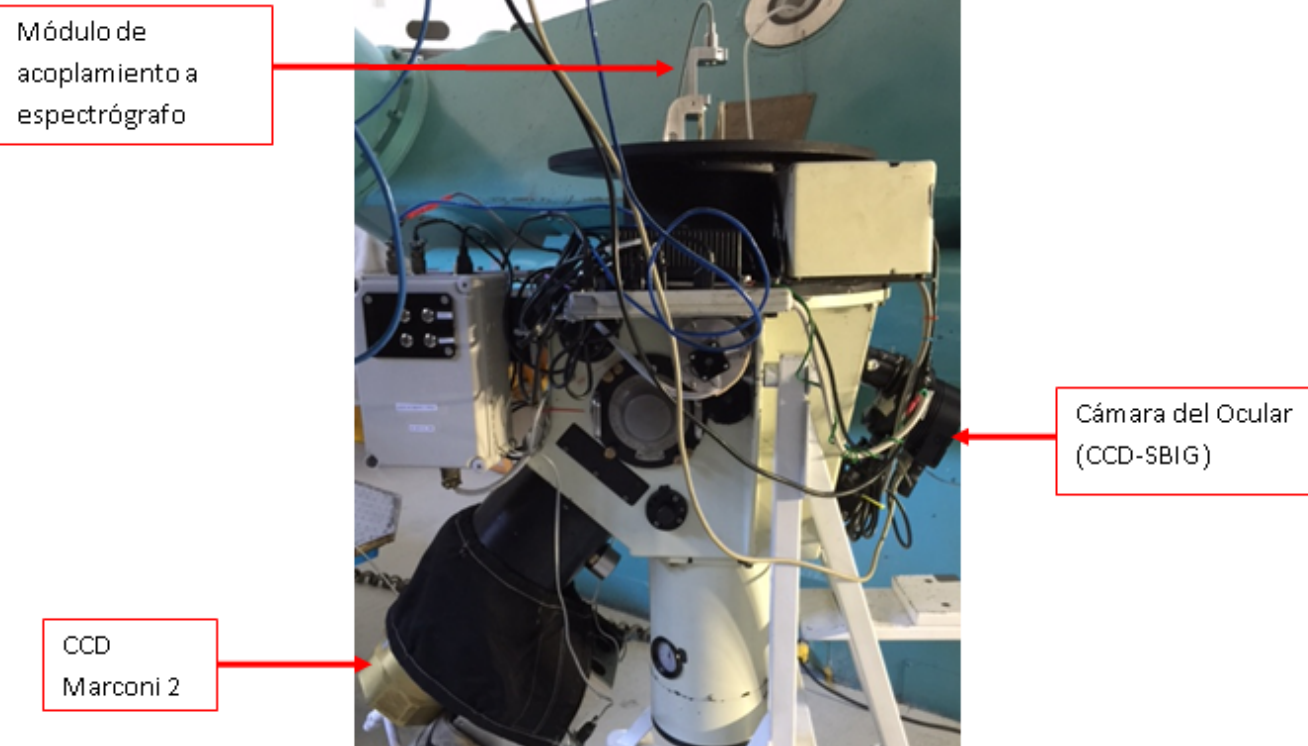
ESPECTRO-POLARIMETRO

ADAPTADOR AL ESPECTROGRAFO



ESPECTRO-POLARIMETRO

ADAPTADOR AL ESPECTRÓGRAFO

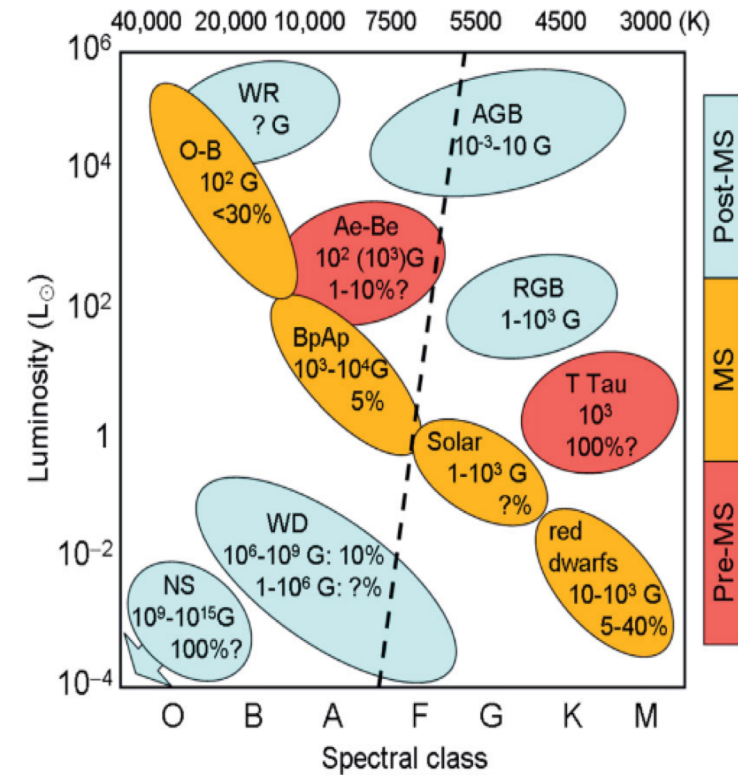


Estamos en proceso de adaptar FICUS al espectrografo de alta resolución CanHiS del OGH para utilizarse en el telescopio de 2.1m del OAN-SPM

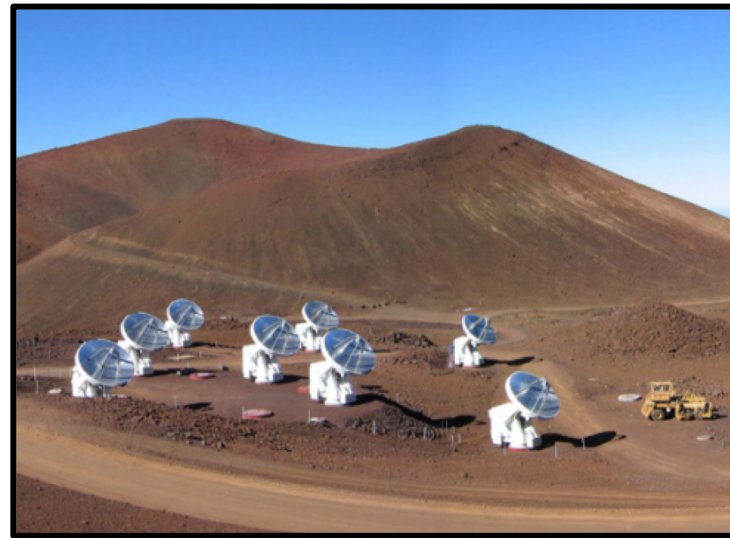
Campos magnéticos en estrellas evolucionadas de masa intermedia

Objetivos

- Determinar el papel de los campos magnéticos en la dinámica de las estrellas post-AGB y las Nebulosas Planetarias.
- Posicionar las NPs en el marco del diagrama HR “magnético”.



I- Mapear los campos magnéticos en los envolventes.

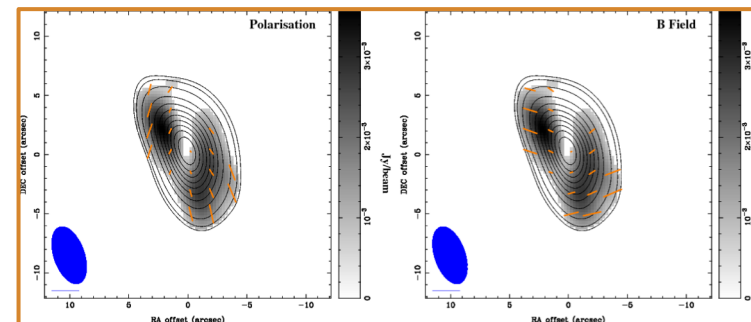
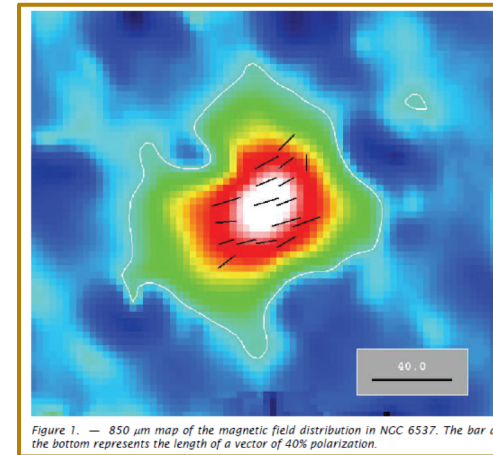


NGC 6302 & SMA array

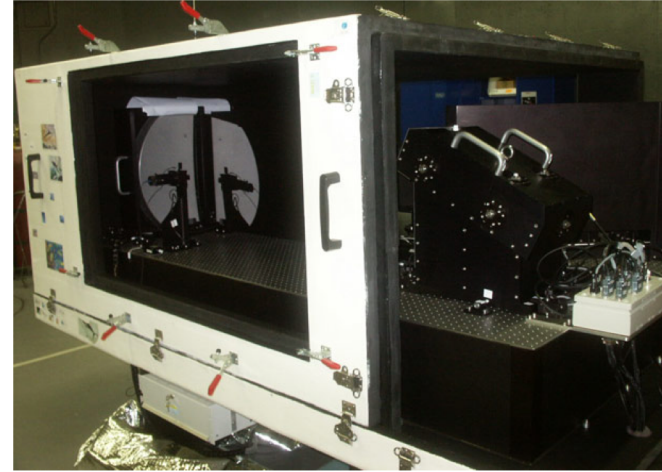
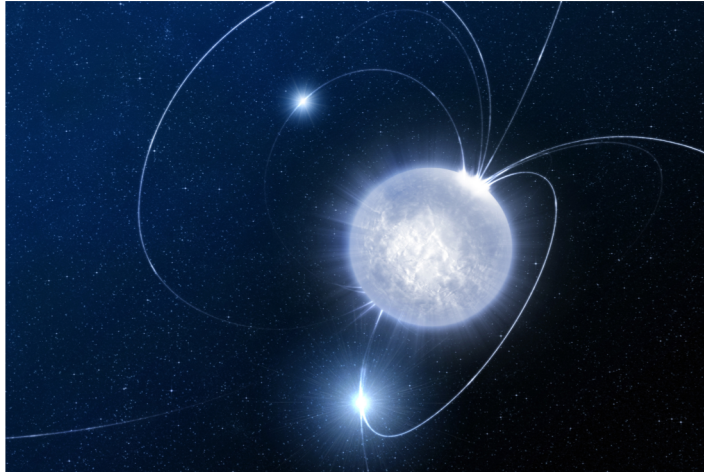
Polarización de la emisión del polvo

- Ver Sabin et al. (2007,2014,2015)
- Se detectaron campos magnéticos **Toroidales y Polares** en envoltantes de NPs.
- Se usaron los interferómetros : SMA, CARMA y ALMA

Futuro.- Esperamos iniciar en un futuro cercano estudios a longitudes de onda milimétrica usando Toltec en el GTM

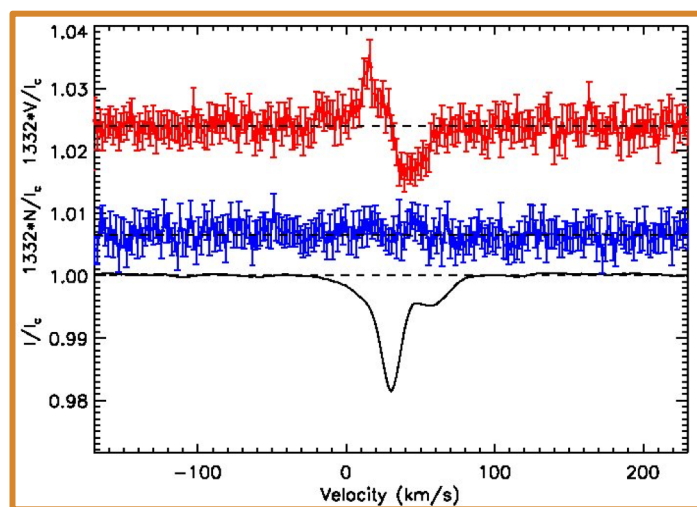


II- Detección & mediciones en las estrellas centrales (fotosfera)

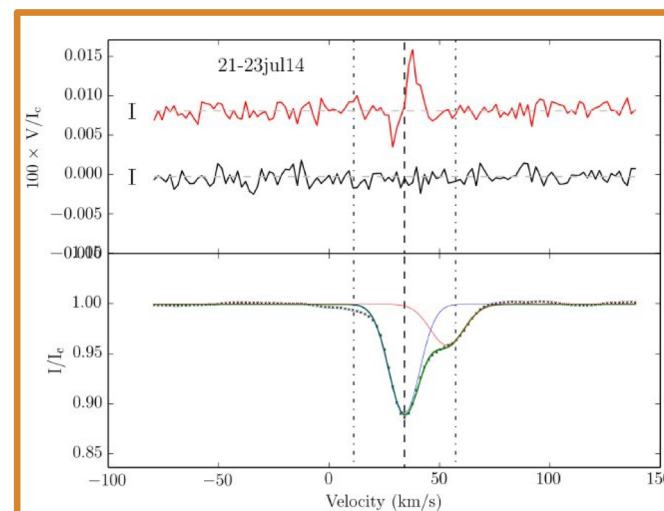


Artistic view (Wikimedia) & Espadons @CFHT

Detection en estrellas Post-AGB



U Mon, RV TAURI type
LSD flag: Definite Detection
 $Bl \pm \sigma B = 10.2 \pm 1.7 \text{ G}$



R Sct, RV TAURI type
LSD flag: Definite Detection
 $Bl \pm \sigma B = 0.9 \pm 0.5 \text{ G}$

No se detectaron esos campos en
estrellas centrales de NPs !

CONCLUSIONES

- La polarimetría aplicada a la astrofísica es una técnica muy poderosa para obtener información en escenarios astrofísicos, especialmente aquellos en los campos magnéticos estén involucrados.
- En México se ha formado un grupo de investigadores de diferentes Instituciones interesados en aplicar esta técnica en el estudio a diferentes problemas en astrofísica.
- Este grupo ha desarrollado instrumentos para medir polarización en banda ancha y en línea para las regiones del óptico y el infrarrojo. Esperamos pronto poder integrar esta técnica en la región milimétrica.