

**PROTOCOLO DEL PROYECTO DE
INVESTIGACIÓN**

ESPECTRO-POLARIMETRÍA DE ESTRELLAS MAGNÉTICAS

RESPONSABLE

Dr. David Salomé Hiriart García (1)

COLABORADORES:

Dr. Julio Ramírez Vélez (1)
Dra. Gloria Koenisberger (3)
Dr. Leonid Georgiev (2)
Dr. Gennady Valyavin (1,5)
Dr. Juan Manuel Núñez Alfonso (1)
Dr. Joel Herrera Vázquez (1)
Dr. Martin Stift (4)
Dr. Joel Humberto Castro Chacón (1)
M.C. José Manuel López Rodríguez (1)

- (1) Instituto de Astronomía, UNAM, Ensenada, B.C.**
- (2) Instituto de Astronomía, UNAM, C.U., México, D.F.**
- (3) Instituto de Ciencias Físicas, UNAM, Cuernavaca, Mor.**
- (4) Instituto de Astronomía de Viena, Suiza.**
- (5) Observatorio de Krimea, Rusia.**

Fecha de elaboración: Febrero 2012

Introducción, Antecedentes y Justificación

El objetivo principal de este proyecto es estudiar los campos magnéticos en las estrellas. Se sabe que el campo magnético juega un papel principal en una gran variedad de objetos astrofísicos a diversas escalas. En particular, no existe duda que el campo magnético es el principal responsable de la actividad solar observada y que juega un papel muy importante en la variabilidad de muchas estrellas de todos los tipos espectrales.

Para lograr el objetivo de esta propuesta, abordaremos dos aspectos fundamentales: (1) Realizaremos observaciones de distintos objetos estelares para establecer una relación entre la velocidad de rotación de la estrella y su temperatura con el campo magnético. Es bien aceptado que el efecto dínamo es el responsable de la generación de campos magnéticos estelares. Un ingrediente clave del efecto dínamo es la velocidad de rotación del plasma, por lo cual proponemos estudiar observacionalmente la relación entre actividad magnética estelar y el periodo de rotación; (2) desarrollaremos e implementaremos nuevas técnicas en el análisis de los datos espectro-polarimétricos obtenidos en las observaciones.

Este último objetivo se logrará por medio del análisis de las observaciones espectro-polarimétricas que se realizarán usando una versión mejorada del módulo polarimétrico "*Policlam*" (Hiriart et al. 2012; Ramírez Vélez et al. 2011) acoplado a los espectrógrafos *Echelle* y *Boller & Chivens* del Observatorio Astronómico Nacional en la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California (OAN-SPM). La detección de los campos magnéticos y su precisa medición son fundamentales para lograr establecer las relaciones antes mencionadas. Para ello, utilizaremos una moderna y prometedora técnica de análisis de datos basada en métodos estadísticamente muy robustos como lo es el "Análisis por Componentes Principales" (PCA) (Ramírez Vélez et al. 2010) en combinación con cálculos teóricos de modelos de radiación y transferencia polarizadas en atmósferas estelares. La combinación de nuestras observaciones con esta técnica de análisis de datos permitirá alcanzar nuestro objetivo principal ayudando a entender los procesos por los cuales se generan los campos magnéticos estelares y la influencia de éstos en la evolución de la estrella.

Es importante mencionar que mucho del conocimiento de la actividad magnética estelar encuentra una analogía con la actividad solar. Ésta última se manifiesta a través de la presencia de manchas solares (intensas concentraciones de campo magnético), eyecciones de masa coronal, ráfagas y reconexiones magnéticas que liberan grandes cantidades de energía al medio interplanetario. Estas manifestaciones no son exclusivas del sol. Las estrellas de tipo solar, como su nombre lo indica, tienen una estructura interna similar al sol: poseen una zona interna radiativa y una zona externa convectiva. Se cree que el efecto dínamo, responsable de la generación de los campos magnéticos a escala global, opera en la región de interfaz entre ambas zonas, la llamada "*tachocline*" (Parker 1993). En consecuencia, todas las estrellas tipo solar potencialmente presentan actividad magnética. Sin embargo, el magnetismo estelar no está limitado a las estrellas de tipo solar y se encuentra también en estrellas con diferentes estructuras internas. Por ejemplo, en estrellas completamente convectivas (estrellas de la parte inferior de la secuencia principal) o bien en estrellas calientes de tipos espectrales A y B (parte superior de la secuencia principal). En estas últimas su estructura es tal que la zona externa es radiativa excluyendo una posible generación del magnetismo estelar por efecto dínamo operando en la "*tachocline*", por lo que dos procesos alternos de generación de campos magnéticos han sido propuestos. En el primer escenario, se ha propuesto que el magnetismo observado es de tipo "fósil"; es decir, remanente del proceso de formación estelar (Moss 1987), mientras que como escenario alternativo se ha postulado la presencia del efecto dínamo operando en el núcleo convectivo de la estrella (Charbonneau & MacGregor 2001). Por el otro lado de la secuencia principal, para estrellas completamente convectivas (tipo espectral M y L), se cree que una dínamo de tipo no solar esté operando cerca de la superficie.

En la actualidad se han hecho progresos significativos en la formulación física de los modelos teóricos, en el rendimiento de los códigos numéricos magneto-hidrodinámicos y en las técnicas de análisis de datos, pero el origen y evolución de los campos magnéticos a lo largo de la vida de una estrella son procesos todavía poco comprendidos. Por otro lado, debido a que los campos "fósiles" y los campos por efecto dínamo deben correlacionarse de manera diferente con los parámetros estelares como la temperatura y la rotación es de crucial importancia obtener más y mejores resultados observacionales en tantos objetos estelares como sea posible.

Actualización del Módulo de Polarización Policlam:

El módulo de polarización "Policlam", en su versión actual, fue diseñado y construido en el IA-UNAM en Ensenada para utilizarse con los espectrógrafos del telescopio de 2.1 metros del OAN-SPM. Fue diseñado para medir la polarización circular para detectar campos magnéticos estelares.

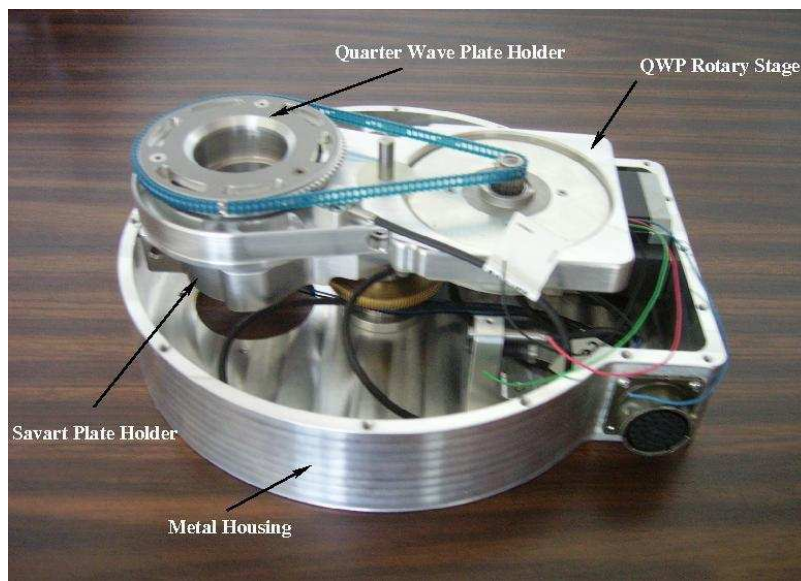


Figura 1. Módulo de polarización *Policlam*, para los espectrógrafos del OAN-SPM (Hiriart et al. 2012). Este módulo se instala a la entrada de los espectrógrafos entre el instrumento y el guiador excéntrico del telescopio. Se muestra la mesa giratoria para la placa de $\lambda/4$ (QWP) y la montura para la placa de Savart. Para realizar espectrografía clásica, ambas placas pueden retirarse del camino óptico al rotar en el eje central de la montura.

Aunque útil en su estado actual, este módulo tiene los siguientes inconvenientes:

- (1) El analizador de polarización está colocado antes de la rendija de entrada del espectrógrafo por lo que errores en el guiado del telescopio, o por efectos del *seeing*, puede introducir *offsets* en alguno de los haces que pasan por la rendija de entrada del espectrografo. Para disminuir estos efectos la rendija debe colarse antes del analizador de polarización.
- (2) Para mediciones de polarización lineal, actualmente se tiene que rotar la platina del telescopio para cambiar la dirección en el cielo del polarizador lineal. Esta situación puede evitarse si se integra una placa retardadora de $\lambda/2$ que pueda ser rotada respecto del espectrógrafo.

Para contar con un mejor instrumento de observación, se propone la construcción de un nuevo módulo de polarización conectado a los espectrógrafos del OAN-SPM a través de fibras ópticas. Esto permitirá evitar los problemas antes mencionados y además ofrecerá una mayor estabilidad térmica y mecánica de los espectrógrafos y por ende una mayor calidad en los datos obtenidos. Además, como el módulo será la única parte conectada a la platina del telescopio, los cambios de los espectrógrafos pueden realizarse más rápidamente e incluso los espectrógrafos podrían utilizarse en los otros telescopios del OAN-SPM.

Cabe mencionar que esta nueva versión no modificará en absoluto dichos espectrógrafos (Ver Figura 2). Una descripción más detallada del nuevo sistema propuesto se presenta en el apéndice A.

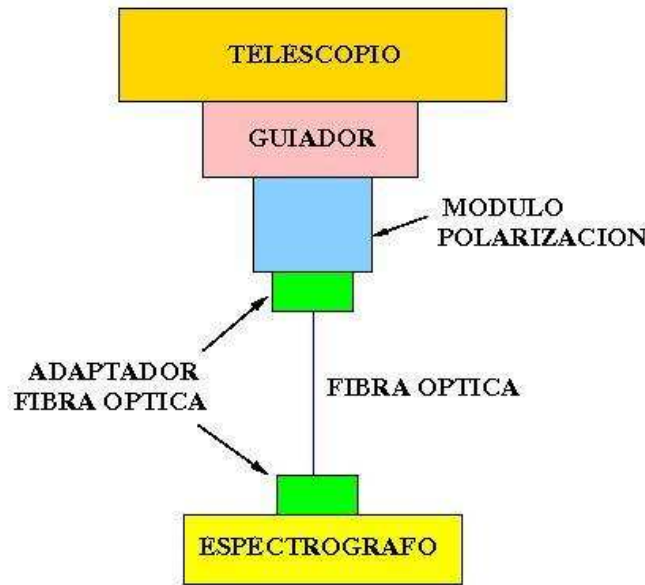


Figura 2. Diagrama esquemático del módulo de polarización a desarrollar en el proyecto para los espectrógrafos del OAN-SPM.

Objetivos principales del proyecto

En este proyecto proponemos realizar un estudio de los campos magnéticos en estrellas frías, con temperaturas efectivas en el intervalo de 4000 a 7000 K, utilizando datos obtenidos en el OAN-SPM. Para el análisis de las observaciones emplearemos un nuevo código de inversión de datos el cual estará basado en la técnica de análisis por componentes principales y en modelos teóricos de radiación y transferencia. Este nuevo método llamado "PCA-ZDI" permitirá medir la intensidad del vector campo magnético y la geometría de las componentes vectoriales (estructura vectorial dipolar, cuadrupolar, etc.) en distintos objetos estelares.

En particular, buscamos determinar la relación que existe entre el periodo de rotación de las estrellas y su actividad magnética. Se estudiarán por ende las propiedades físicas de las estrellas y la relación con su atmósfera magnetizada y se desarrollará un código de detección, medición y determinación de la estructura de los campos atmosféricos a través de la inversión de datos. Para tal fin, se realizarán observaciones de tipo espectro-polarimétricas de alta y mediana resolución en el OAN-SPM.

Metas del proyecto:

- 1) Entender y determinar, a través de estudios espectro-polarimétricos, la relación que existe entre la presencia del campo magnético y los parámetros estelares de velocidad de rotación y temperatura.
- 2) Relacionar el punto anterior con la dinámica (evolución temporal en escala de meses) de los campos magnéticos atmosféricos.
- 3) Estudiar los perfiles espectrales de polarización estelares para mejorar la formulación de los modelos teóricos.
- 4) Fomentar el desarrollo del conocimiento y adquirir una mayor experiencia entre los investigadores del país en el área instrumental y de observaciones espectro-polarimétricas a través de cursos, proyectos de tesis, participación en congresos nacionales e internacionales y de colaboraciones con otros grupos de investigación a nivel nacional e internacional.
- 5) Desarrollar un nuevo módulo analizador de polarización para obtener espectros en polarización lineal y circular con los espectrógrafos del OAN-SPM. Este módulo en su nueva versión estaría conectado por medio de fibras ópticas a los espectrógrafos. Dicho modulo estará disponible para toda la comunidad interesada a fin de poder llevar a cabo distintos estudios espectro-polarimétricos en otras áreas de la astrofísica.

Situación del proyecto en referencia al estado cognoscitivo actual en el tema

El análisis de los estados de polarización de luz en distintas líneas espectrales, por medio de observaciones espectro-polarimétricas, es la mejor herramienta que actualmente disponemos para el estudio de los campos magnéticos. En efecto, por medio del tratamiento y análisis de este tipo de datos es posible inferir simultáneamente las propiedades físicas de la estrella, así como la orientación e intensidad del campo magnético.

Sin embargo, cabe mencionar que existen dos grandes inconvenientes observacionales en el estudio del magnetismo estelar. Primeramente está el hecho de que debido a que las observaciones son no resueltas, es decir el flujo total de la superficie estelar está integrado, si existen dos campos magnéticos de la misma intensidad pero de polaridades opuestas, entonces las señales totales de polarización circular (el perfil de Stokes V) se anularía, lo cual llevaría a la falsa conclusión de que no existe campo magnético en la estrella. Para poder vencer este impedimento la técnica llamada “*Zeeman Doppler Imaging*” (ZDI) aprovecha la rotación de las estrellas para obtener las señales polarizadas en distintas líneas espectrales en el espacio de velocidades (Semel 1989). Usando esta técnica, Donati, Semel & Pradière (1989) publicaron las primeras detecciones de campos magnéticos en estrellas por medio del análisis de los parámetros de Stokes. Si el campo magnético es lo suficientemente intenso tal que la señal en polarización sea mayor al nivel del ruido entonces aplicando ZDI podemos detectar el campo magnético. Sin embargo, y este es el segundo gran inconveniente, los niveles de polarización típicos de las líneas espectrales son extremadamente débiles (típicamente inferiores al 0.1% del nivel del continuo en estrellas frías) por lo que la mayor parte de las veces, las señales polarizadas se encuentran por debajo del nivel del ruido impidiendo el análisis directo de los datos. Es necesario entonces utilizar los llamados métodos “multi-líneas” en donde “sumando” las señales polarizadas de las distintas líneas espectrales atómicas es posible obtener una señal “promedio”. La manera de obtener la señal “promedio” es delicada. La más popular de dichas técnicas es “*Least Square Deconvolution*” LSD (Donati et al. 1997), sin embargo recientemente distintos métodos alternativos se han propuesto debido a algunos problemas que se han detectado en el análisis de datos con LSD (Martínez Gonzalez et al., 2008, Khochukov et al., 2010, Ramírez Vélez et al., 2010).

En particular, la técnica LSD utiliza la aproximación de campo débil (e.g. del Toro Iniesta 2003), la cual asume que la primera derivada de la intensidad de una línea espectral es proporcional al campo magnético. Basándose en este método de LSD Donati et al. (1997) lograron obtener las primeras mediciones magnéticas usando datos espectro-polarimétricos.

Actualmente, la gran mayoría de los trabajos publicados en magnetismo estelar usando métodos observacionales en espectro-polarimetría han empleado la técnica ZDI y la técnica LSD para respectivamente detectar y medir la intensidad del campo. Sin embargo, en LSD el uso de la aproximación de campo débil antes mencionada limita los resultados y la interpretación de los mismos. Muy recientemente, la veracidad de muchos de dichos resultados se ha sometido a cuestionamiento: Bagnulo et al. (2012) han hecho un exhaustivo re-análisis de las observaciones obtenidas con FORS1 en el telescopio VLT en Chile encontrando que la mayoría de las detecciones magnéticas en estrellas calientes usando la técnica LSD reportadas en la literatura caen dentro de las barras de error, concluyendo así que dichas mediciones no son definitivas y deben tomarse con muchas reservas. Es sabido que una de las razones por las que se puede llegar a un análisis no confiable como los que mencionan Bagnulo et al. es por una parte el uso de un método de reducción de datos espectro-polarimétricos que no se ha probado antes de aplicarse, y por otra parte la aproximación de campo débil. Stift et al. (2012) han mostrado las grandes inconsistencias en el método LSD resaltando la importancia de utilizar un tratamiento de radiación y transferencia adecuado en vez de utilizar la aproximación de campo débil como lo hace LSD.

Es entonces necesario que para realizar el tratamiento de datos espectro-polarimétricos, el método de reducción de los mismos sea probado exhaustivamente hasta comprobar que dicha reducción no genera señales espurias. Aunado a esto, si no se desea utilizar la aproximación de campo débil, se deberá entonces emplear un tratamiento completo de los modelos de radiación y transferencia de luz polarizada (RTP). En este sentido, Carroll, Kopf & Strassmeier (2008) han propuesto un método de inversión de perfiles de Stokes que emplea el método numérico de “redes neuronales artificiales”

para inferir el campo magnético atmosférico en la estrella observada. Si bien este método realiza un tratamiento correcto de las ecuaciones de RTP la principal debilidad de este método es que se empleó en estrellas con intensos campos magnéticos o bien en estrellas que han sido observadas en repetidas ocasiones de tal manera que utilizando el Análisis por Componentes Principales (PCA) es posible aplicar la técnica en líneas espectrales individualmente. En otra alternativa, publicada por Martínez Gonzalez et al. (2008), se ha propuesto que utilizando todas las líneas espectrales de la estrella y utilizando PCA es posible obtener una señal promedio en polarización evitando la aproximación de campo débil. La debilidad de este método es que si bien es muy útil para la detección del campo no permite (aún) la inferencia de la intensidad ni la geometría del mismo.

En este proyecto proponemos continuar para el análisis de datos el desarrollo de la técnica PCA-ZDI que utiliza modelos de RTP (Ramírez Vélez et al, 2010) así como desarrollar un código de reducción de datos en el cual su buen funcionamiento esté demostrado.

Metodología

Una vez construida la nueva versión del módulo de polarización acoplado por fibras ópticas, éste se utilizará para las observaciones en los telescopios del OAN-SPM utilizando el espectrógrafo *Echelle* para estudios de alta y mediana resolución espectroscópica y al espectrógrafo *Boller & Chivens* para baja resolución.

En nuestra propuesta para lograr un análisis óptimo de los datos observacionales emplearemos la técnica “PCA-ZDI” (Ramírez Vélez et al. 2010) que evita la aproximación de campo débil ya que utiliza modelos teóricos de los espectros polarizados. Además, en esta técnica se suman todas las líneas atómicas contenidas en el espectro estelar observado. Debido a que el ruido es una señal no coherente mientras que los perfiles de Stokes de las distintas líneas sí son señales coherentes, al sumar todas las líneas espectrales, es posible lograr detecciones extremadamente débiles.

El principio de funcionamiento de PCA-ZDI de manera muy resumida es el siguiente. Con el código de radiación y transferencia de luz polarizada “Cossam” (Stift et al. 2000) construimos un base de datos con espectros estelares. En dicha base datos para cada modelo consideramos como variables, la intensidad, orientación y posición del campo magnético, así como la temperatura y la velocidad de rotación de la estrella. A dicha base de datos, la cual consideramos representativa, le aplicamos PCA para obtener los eigen-vectores de la base. Posteriormente hacemos una correlación cruzada en el espacio de velocidades entre el espectro observado y los eigen-vectores para así obtener una señal en polarización “promedio” que contendrá la contribución de todas las líneas espectrales atómicas. Una descripción detallada de PCA-ZDI puede encontrarse en Semel et al., (2006) y Ramírez Vélez et al., (2010). Cabe por último resaltar el hecho de que bajo este método estamos haciendo un uso correcto de las ecuaciones de RTP y por tanto no utilizamos la aproximación de campo débil. La inversión de los parámetros de Stokes utilizando la técnica PCA-ZDI ya ha sido probada en espectros artificiales y los campos magnéticos han podido determinarse de manera correcta. Proponemos extender el uso de las inversiones de los perfiles de Stokes a casos más realistas y analizar cómo se afectan las inversiones cuando consideramos distintos niveles de ruido en los espectros estelares artificiales. Una vez probado el buen funcionamiento del código en la inversión de los perfiles de Stokes, aplicaremos dicho método a los espectros observados.

A continuación mostramos, a modo de ejemplo, dos detecciones en una estrella fría (HR1099, de tipo espectral K) utilizando el método de PCA-ZDI. Es pertinente aclarar que las gráficas

mostradas en la Figura 3 representan la primera detección de polarización lineal en un estrella fría (Semel et al. 2006), mientras que las gráficas de la Figura 4 muestran la capacidad del método PCA-ZDI (Ramírez Vélez et al. 2010) para detectar niveles muy bajos en polarización circular.

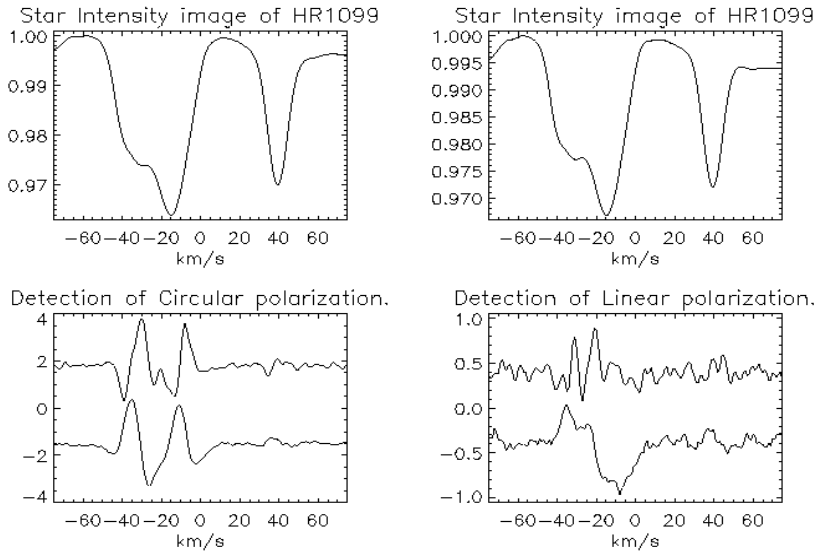


Figura 3. Perfiles en intensidad, en polarización circular y lineal del sistema binario HR1099. En los paneles superiores, la depresión que se observa en el perfil de intensidad izquierdo es debido a la mancha estelar ya que la mancha está más fría que el resto de la superficie (Semel et al. 2006).

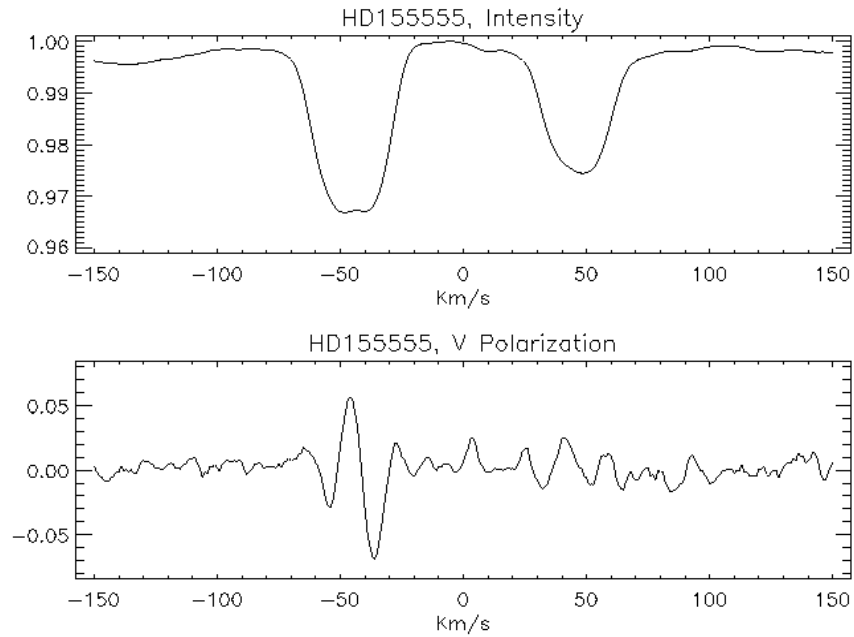


Figura 4. Perfiles en intensidad y polarización circular del sistema binario HD155555 (Ramírez Vélez et al. 2010).

Por otra parte, para el efecto dínamo, dos ingredientes son fundamentales: (1) La rotación diferencial de la estrella, longitudinal y horizontalmente, y la convección ciclónica, y; (2) el decaimiento de energía magnética de las manchas estelares. La combinación de estos dos elementos regenera la componente poloidal del campo magnético a través del llamado efecto dínamo.

Basándonos en el catálogo de Valenti & Fischer (2005) para el proyecto que estamos proponiendo hemos seleccionado para las primeras dos campañas de observaciones una muestra de objetos estelares con un rango de velocidades proyectadas a lo largo de nuestra línea de visión ($V_{\sin[i]}$) que va de rotadores “lentos” de ~ 1 km/s a rotadores “rápidos” de ~ 16 km/s. En esta muestra hemos seleccionado objetos con temperaturas muy similares para poder estudiar directamente el impacto del efecto de rotación en la generación de actividad magnética a nivel fotosférico. La lista de objetos de estudio es la siguiente:

TABLA1

Objeto	Ascensión Recta	Declinación	Magnitud V	Temperatura (K)	$V_{\sin[i]}$ (km/s)
HD 76151	08:54:17	-05:26:04	6.0	5790	1.2
HD 73350	08:37:50	-06:48:25	6.7	5802	4.0
HD 206387	21:41:43	06:25:15	8.3	5852	8.4
HD 39587	05:54:22	20:16:34	4.4	5882	9.8
HD 152555	16:54:08	-04:20:25	7.8	5967	15.9

De hecho, el catalogo de Valenti & Fischer (2005) provee de distintos parámetros físicos de las estrellas para una muestra de más de 1,000 objetos. Por medio del ajuste de líneas espectrales, los autores determinan temperatura efectiva, gravedad superficial, metalicidad, abundancia de ciertos elementos y velocidades proyectadas. Además, combinando datos de Hipparcos con fotometría en la banda V, los autores determinan la luminosidad de la estrella, el radio y la masa. Finalmente, usando modelos teóricos y los parámetros arriba mencionados, en la mayoría de los casos se infiere la edad del objeto. Nosotros proponemos estudiar si existe alguna relación entre cada uno de estos parámetros físicos y la actividad magnética. Sin embargo, como nuestro objetivo central es el estudio de la relación entre rotación, temperatura y actividad magnética, en función de los resultados obtenidos con los objetos de las primeras dos campañas (Tabla 1), las muestras de las campañas posteriores serán adecuadas a distintos valores tanto en velocidades de rotación como en temperaturas.

Infraestructura y apoyo técnico disponible

Como se ha mencionado previamente, dispondremos inicialmente del módulo analizador de polarización *Policlam* y los espectrógrafos *Echelle* y *Boller & Chivens* para realizar las observaciones en el telescopio de 2.1 metros del OAN-SPM. Solicitamos en esta propuesta apoyo económico para acoplar con fibras ópticas este módulo de polarización a los espectrógrafos del OAN-SPM. Esto permitirá una mayor calidad en los datos observacionales al tener una estabilidad mecánica y térmica de los espectrógrafos ya que éstos se encontraran en un sitio con ambiente controlado y no colgados al telescopio donde están sujetos a los cambios térmicos y cargas gravitacionales. Contamos con los talleres mecánicos de precisión, de los laboratorios ópticos y electrónicos del Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM), así como el apoyo técnico de estas infraestructuras. La experiencia con la cuenta nuestro equipo es ideal para asegurar un desarrollo óptimo del proyecto.

El Dr. D. Hiriart diseñó y construyó, junto con el grupo técnico del IA-UNAM, el módulo de polarización “policlam” (Hiriart et al. 2012) para los espectrógrafos del telescopio de 2.1m del OAN-SPM. El Dr. Hiriart tiene un amplio conocimiento en instrumentación astronómica y observacional en estudios de polarización astronómica.

La Dra. Gloria Koenisberger, estudia los fenómenos de interacción entre estrellas binarias; en particular, binarias mucho más masivas que el Sol. Es participante del Proyecto PLANETS (*Polarized Light from Atmospheres of Nearby ExtraTerrestrial Systems*) que tiene un gran énfasis en estudios de polarización. (Ver <http://kopiko.ifa.hawaii.edu/planets/>).

El Dr. Julio Ramírez cuenta con una gran experiencia en observaciones espectro-polarimétricas en estrellas frías y estudios de magnetismo solar a nivel fotosférico, además de que desarrolló el código de análisis PCA-ZDI en su versión más actual.

El Dr. Gennady Valyavin, ex-astrónomo residente del OAN-SPM, tiene una amplia experiencia en observaciones y reducción de datos espectro-polarimétricos para el estudio del magnetismo en estrellas de tipo enanas blancas. El Dr. Valyavin participó en el diseño y construcción del espectro-polarímetro BOES del *Korea Astronomy and Space Science Institute*, en Daejeon, Corea del Sur (Kim et al. 2007).

En cuanto al modelado de los espectros teóricos, el Dr. M. Stift, creador del código numérico “*Cossam*”, asegurará el cálculo de dichos espectros e implementará las modificaciones necesarias al código numérico.

El Dr. Leonid Georgiev cuenta con la experiencia necesaria para llevar a cabo un buen planeamiento de las noches de observación.

El Dr. Juan Manuel Núñez y el Dr. Joel Herrera son técnicos académicos del OAN-SPM con especialidad en óptica, adscritos al IA-UNAM en Ensenada. Ambos tienen gran experiencia en el diseño óptico y en la construcción de instrumentos astronómicos tanto para el OAN-SPM como para otras instituciones. El Dr. Núñez es además el Jefe de Instrumentación del IAUNAM-Ensenada.

El M.C. José Manuel López Rodríguez, tiene una amplia experiencia en observaciones polarimétricas en el OAN-SPM. Él es candidato a doctorado del IA-UNAM y presentará su tesis en estudios de polarización en banda ancha de estrellas evolucionadas de carbono en el mes de Marzo 2012. Asimismo, junto con el Dr. Hiriart, colabora en el monitoreo de polarización en el óptico de blazares brillantes desde el OAN-SPM.

(Ver <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/jheidt/spm/spm.html>)

El Dr. Joel Humberto Castro Chacón es egresado del Departamento de Óptica del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) y es especialista en sistemas de fibras ópticas y óptica no lineal.

Resultados entregables

Formación de recursos humanos en el área teórica, observacional e instrumental de la polarimetría astronómica ofreciendo cursos en el posgrado de astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México y proyectos de tesis de maestría y doctorado.

Publicación de artículos originales en revistas científicas internacionales y nacionales con arbitraje.

Presentación de resultados en congresos y foros de trabajo nacionales e internacionales.

Presentación de resultados en foros y eventos de divulgación.

Entrega de un módulo polarimétrico con fibras ópticas para conectarlo a los espectrógrafos *Echelle* y *Boller & Chivens* en los telescopios del OAN-SPM, junto con los programas de reducción y manuales respectivos. Este módulo estará disponible para todos los usuarios del OAN-SPM que soliciten usarlo en los espectrógrafos descritos.