

ASTROFISICA DE ALTAS ENERGIAS

COMUNICACION

Medición simultánea de los cuatro parámetros de Stockes

J. ALBANO Y R. J. TERLEVICH

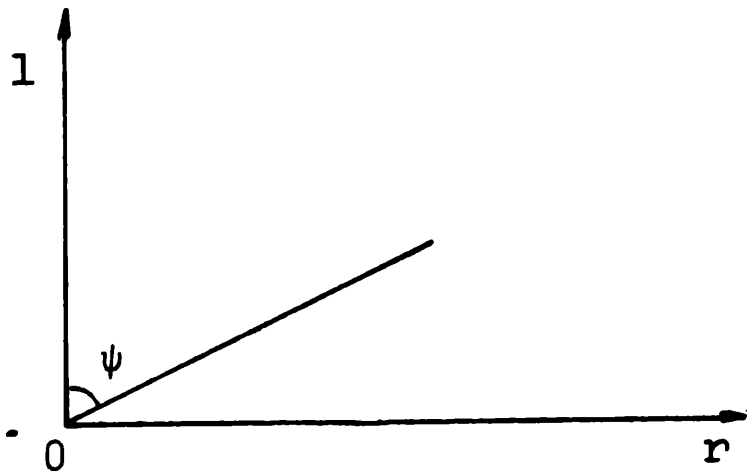
*Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Buenos Aires
y Observatorio Astronómico, La Plata
Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Buenos Aires*

Introducción: Una de las formas de indagar sobre los procesos físicos responsables de emisiones electromagnéticas, es mediante el estado de polarización de las mismas. Analizando el porcentaje y tipo (ya sea lineal, circular o elíptica) podemos concluir si la radiación está polarizada debido a: ser emisión de Síncrotron, dispersión Thompson, dispersión por partículas anisotrópicas, etc.

El objeto de esta comunicación es mostrar un sistema que permitiría la determinación simultánea de los cuatro parámetros de Stockes (IQUV), lo que lo hace particularmente útil para el estudio de objetos cuya polarización e intensidad varía rápidamente con el tiempo.

El estado de polarización de una radiación electromagnética queda caracterizado por los cuatro parámetros de Stockes referidos a dos ejes perpendiculares entre sí y orientados arbitrariamente, de tal forma que la intensidad de la misma analizada a través de una lámina retardadora y un filtro polarizante cuyo plano de transmisión forma un ángulo ψ respecto a uno de los ejes de referencia, viene dada por la siguiente expresión:

$$I(\psi, \epsilon) = 1/2 (I + Q \cdot \cos 2\psi + (U \cdot \cos \epsilon - V \cdot \sin \epsilon) \sin 2\psi)$$



donde:

I, Q, U, V = Parámetros de Stockes
 ϵ = retardo de fase

El grado de polarización, la orientación de la elipse de polarización y la elipticidad de la misma, tienen la siguiente expresión en función de los parámetros de Stockes:

$$P^2 = (Q^2 + U^2 + V^2) / I^2 \quad (2)$$

$$\tan 2\psi = U/Q \quad 0 < \psi < \pi \quad (3)$$

$$\sin^2 2\beta = V^2 / (Q^2 + U^2 + V^2) \quad (4)$$

$$-\pi/4 < \beta < \pi/4$$

β es el ángulo cuya tangente es el cociente de los ejes de la elipse; y cuyo signo da el sentido de rotación del vector eléctrico.

Para determinar los parámetros de Stockes es necesario conocer la intensidad de la radiación para cuatro posiciones diferentes del sistema analizador. Las expresiones que determinan dichos parámetros resultan mucho más simétricas si se utilizan 6 mediciones (con analizadores en diferente posición), siendo además esto necesario para determinar el signo de la polarización. Las expresiones son:

$$(5) \quad \begin{cases} I_1 = I(0, 0) = 1/2(I + Q) \\ I_2 = I(90, 0) = 1/2(I - Q) \\ I_3 = I(45, 0) = 1/2(I + U) \\ I_4 = I(135, 0) = 1/2(I - U) \\ I_5 = I(45, \pi/2) = 1/2(I + V) \\ I_6 = I(135, \pi/2) = 1/2(I - V) \end{cases}$$

Teniendo en cuenta 2, 3 y 4 se obtiene:

$$P^2 = (I_1 - I_2)^2 / (I_1 + I_2)^2 + (I_3 - I_4)^2 / (I_3 + I_4)^2 + (I_5 - I_6)^2 / (I_5 + I_6)^2 \quad (6)$$

pues

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = I_5 + I_6 = I$$

$$\tan 2\psi = \frac{(I_3 - I_4) / (I_3 + I_4)}{(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)}$$

$$\sin^2 2\beta = \frac{1}{\frac{(I_1 - I_2)^2 / (I_1 + I_2)^2}{(I_5 - I_6)^2 / (I_5 + I_6)^2} + \frac{(I_3 - I_4)^2 / (I_3 + I_4)^2}{(I_5 - I_6)^2 / (I_5 + I_6)^2} + 1}$$

Si definimos $P_{1,2} = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$

Resulta:

$$p^2 = P_{1,2}^2 + P_{3,4}^2 + P_{5,6}^2 \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} 2\psi = P_{3,4} / P_{1,2} \quad (8)$$

$$\operatorname{cosec} 2\beta = P / P_{5,6} \quad (9)$$

Mediante este formalismo, y dado un determinado modelo de fuente emisora, se puede estimar la intensidad y estado de polarización de la radiación emitida, o viceversa, si mediante una experiencia determinada se logra medir el estado de polarización y la distribución espectral de la radiación recibida, con un desarrollo inverso al anterior se puede determinar el proceso físico responsable de la emisión, y calcular diferentes parámetros de la fuente (densidad electrónica, temperatura, intensidad del campo magnético, etc.).

Este instrumento fue diseñado pensando medir polarización en el continuo de fulguraciones solares en luz blanca, y para aplicarlo a un Astrográfico, dado que las condiciones de estabilidad, óptica refractora y Anteojo Visual con igual escala, lo hacen ideal para este trabajo, pero además, en principio, con fines de calibración se lo piensa utilizar en campos estelares con lo cual alcanzaría $m_v = 6.5$ con una hora de exposición y trabajando en banda ancha $m_v = 10$ también en una hora.

Descripción del instrumento

Para conseguir la simultaneidad en la observación de los parámetros de Stokes se divide el haz incidente en seis, o sea se obtienen 6 imágenes del objeto; cada una de las imágenes se analiza con distintas posiciones de polarizador y desfasador, de manera de obtener en la placa fotográfica densidades proporcionales $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$.

Específicamente el polarímetro consta de un grupo compacto (A) (ver figura 1), que se coloca delante del sistema astrográfico y un filtro $H\alpha$ que se coloca delante del anteojo visual para controlar el fenómeno.

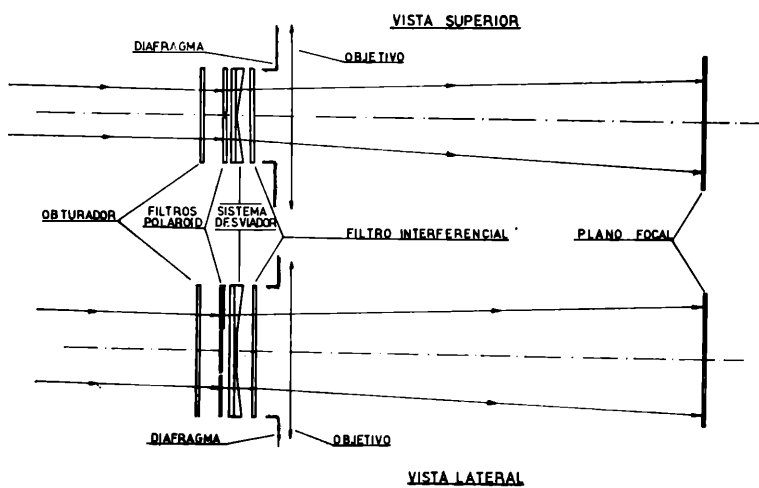


FIG. 1 — Esquema del polarímetro

Este grupo compacto cumple varias funciones, a saber:

I) Divide el haz en seis, para lo cual utiliza un sistema de cuatro prismas y una lámina de caras paralelas, combinadas como lo indica la figura 2.

II) Cada uno de estos frentes de onda se analiza tratando de que represente a I_i con $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, lo mejor posible y donde las direcciones origen están fijas con respecto a los ejes del instrumento, que debe ser por comodidad, ecuatorial.

III) Seleccionar la banda de observación, para lo cual se utiliza un filtro interferencial con transmisión en $6800 \pm 27\text{Å}$. Esta parte del espectro solar es la que presenta menor influencia de las líneas de absorción y emisión, existe otra zona similar en $5832 \pm 14\text{Å}$.

Esta selección se efectuó con el fin de minimizar la influencia debido al efecto Zeeman presente en las líneas del espectro solar, lo cual introduce una polarización en el haz incidente, que debe ser rechazada.

Esto aparentemente no ha sido tomado en cuenta en anteriores trabajos (1).

IV) Obturar la luz de forma conveniente, de manera de tener tiempos de exposición lo más constante posibles y además disponer de varios.

Luego de esto la luz atraviesa el objetivo y llega al plano focal como se ve en la figura 2.

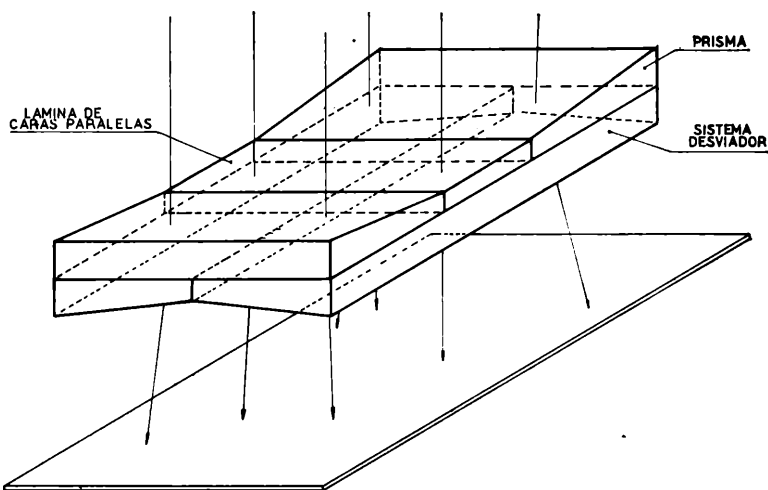


FIG. 2

Las placas fotográficas deben seleccionarse por: sensibilidad en el rojo, grano extrafino y gran latitud y contraste, para asegurar gran aceptación de información, teniendo en cuenta que no hay problema en cuanto a intensidad. En particular, parece adaptarse muy bien la emulsión Kodak-649.

Análisis

La ventaja fundamental de este instrumento frente a los anteriormente utilizados (1) es el de minimizar la polarización instrumental, esto se consigue con el hecho de hacer

que el primer elemento óptico que atraviesa la luz solar, sean las láminas polarizadoras, este simple hecho hace que la polarización introducida luego por todo el sistema óptico pueda ser tomada como variación de la transmisión del sistema óptico, por tanto no se necesita conocer la polarización instrumental; este no es el caso cuando se tienen elementos ópticos por delante del analizador, que pueden introducir una polarización del mismo orden, sino mayor (en el caso de trabajar con óptica de reflexión) a la buscada.

Otra muy importante, ya puntualizada arriba es la simultaneidad de la observación de los cuatro parámetros de Stokes, lo que permite desechar como fuente de errores a la variación de la polarización de la fuente misma en el transcurso de una observación.

Un inconveniente que se encuentra, pero no ya en el instrumento, sino en este tipo de operaciones, es la muy diferente escala de tiempo entre la obtención de la información (minutos), y su reducción (semanas).

La determinación de los parámetros de Stokes significa efectuar la microfotometría de la zona a estudiar y el procesamiento de esos datos, para luego al final recién obtener resultados.

Hemos llegado a la conclusión que resultaría muy conveniente un método de reducción rápido que permitiese obtener resultados de poca precisión pero que indiquen la presencia de una polarización variable en el objeto estudiado. Para eso hemos desarrollado un método de análisis fotográfico basado en interpretar la emulsión fotográfica como una memoria logarítmica. *

De esta manera se logra determinar de una manera rápida la distribución fotosférica de la polarización, arco tangente de la dirección de polarización y el seno del duplo de la elipticidad, en placas donde el ennegrecimiento es proporcional a estos parámetros. Una vez ubicada una serie de placas interesante éstas se reducen con toda la precisión disponible.

Debemos puntualizar cuáles serán los límites de precisión esperables de este instrumento. Dadas las condiciones particulares de éste, ya arriba remarcadas, las fuentes de error provendrán fundamentalmente de:

- A) Variaciones del sistema analizador. (geometría).
- B) Variaciones del sistema óptico. (transmisión).
- C) Variación del detector. (sensibilidad de la placa).

Las A) fundamentalmente serán debidas a falta de rigidez mecánica del conjunto, que apareja variaciones en la dirección de los ejes de los analizadores; los B), tendrán como fuente las fluctuaciones de transmisión del Sistema.

Tanto A) como B) se dejan tratar en conjunto, pues si consideramos su variación pequeña, podemos referir las observaciones a calibraciones propiamente hechas, ya sea

* Ver Apéndice I.

fotométricas y polamétricas, en cada placa, lo cual independiza cada observación de las demás y hace al método, insensible a las variaciones A) y B).

En realidad, como otros autores ya han puntualizado, la principal fuente de errores proviene de la emulsión fotográfica, fundamentalmente a su falta de homogeneidad, esto establece una cota, que aún tomando grandes recaudos

en el revelado puede llegar a $\frac{\Delta D_0}{D_0} \leq 0.5\%$ donde ΔD_0

indica el apartamiento del valor medio D_0 en densidad, esto significa que la polarización mínima medible sería

$$P \cong \frac{0.5\%}{\gamma} \quad (10)$$

donde γ es el factor de contraste y puede ser a lo sumo del orden de $\gamma \approx 9 - 10$ por lo tanto podríamos decir que la polarización mínima medible es:

$$P_m \cong 0.05\%$$

Conclusiones

Las condiciones ya enumeradas sobre este equipo, o sea:

- 1) Simultaneidad de observación de los parámetros de Stokes.
- 2) Simplicidad operativa y constructiva.
- 3) Independencia con respecto a la polarización instrumental.
- 4) Bajo costo.

Unido a la necesidad de aporte de datos sobre la naturaleza del continuo de las fulguraciones solares en luz blanca, indican que es particularmente útil la construcción y operación de este instrumento por su período no menor a un año.

Apéndice I

Fotografía analítica aplicada a la determinación de polarización

Si observamos las expresiones 7, 8 y 9 vemos que la función base es $P_{i,j} = \frac{I_1 - I_j}{I_1 + I_j}$, lo que pretendemos es

obtener placas fotográficas donde la densidad sea proporcional a P.

En general tenemos una placa con densidad proporcional a I_1

$$D_1 = A_1 + \gamma_1 \log I_1$$

y otra

$$D_j = A_1 + \gamma_1 \log I_j$$

con el mismo A y γ dado que están ambas imágenes del objeto impresas en la misma placa.

A esta última se le hace un positivo:

$$D_j^N = A^N - \gamma_1 \gamma_N \log I_j$$

Donde γ_N es el gamma del positivo. Sumando D_1 y D_j resulta:

$$D_c = B_c - \gamma_1 \gamma_2 \log \frac{I_1}{I_j^{\gamma_N}}$$

Esto significa, si tomamos

$$\gamma_N = 1$$

y además

$$I_1 = I_j + \Delta$$

con

$$\Delta \ll I_1 \cong I_j,$$

tenemos

$$D_c = B_c - \gamma_1 \gamma_2 \log \left(1 + \frac{\Delta}{I_j} \right)$$

o bien

$$D_c = B_c - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{M} \frac{\Delta}{I_j}$$

con un error menor que

$$\frac{\Delta^2}{I_j}$$

pero también en esa aproximación

$$\frac{\Delta}{I_j} = 2 P_{1,j}$$

por lo tanto:

$$D_c = B_c - \frac{2}{M} \gamma_1 \gamma_2 P_{1,j}$$

o sea tenemos en una placa fotográfica una distribución de densidad proporcional a la polarización en la fuente.

Una conclusión que se extrae de esta expresión es que convenientemente elegidos γ_1 y γ_2 , ambos mayores que 1, la expresión anterior indica que se puede efectuar una verdadera amplificación del efecto buscado; dadas las condiciones que restringen este tipo de observaciones se puede tomar emulsiones de gramo extremadamente fino para el original ($\gamma_1 \sim 4$) y de alto contraste para la copia final ($\gamma_2 \sim 9$) esto significa que el producto $\gamma_1 \gamma_2 \sim 36$ por lo tanto $D_c \cong B_c^* - 30 P_{1,j}$.

Otra conclusión importante que se obtiene es que mientras podamos desestimar las variaciones de sensibilidad que afecten a grandes áreas de la placa y nos remitimos a tratar de observar variaciones en pequeñas zonas de la imagen podemos desestimar a

$$\frac{\delta D_c}{\delta \gamma_1 \gamma_2}$$

pero se puede ver que si la condición $\gamma_N = 1$ no se cumple esto significa que $\gamma_N = 1 \pm \delta \gamma_N$

$$D_c^1 = B_c^* - \gamma_1 \gamma_2 \log \frac{I_1}{I_j} + \gamma_1 \gamma_2 \log I_j^{\delta \gamma_N}$$

$$D_c^1 = D_c + \gamma_1 \gamma_2 \delta \gamma_N \log I_j$$

Esto nos indica que en la placa vamos a tener la distribución de la polarización (D_c) con coeficiente $\gamma_1 \gamma_2$ y superpuesto a esto una imagen del Sol proporcional a $\gamma_1 \gamma_2 \delta \gamma_N$ (imagen correspondiente a la placa que se le hace el positivo), debido a que la cancelación no fue correcta.

Debemos entonces hacer que $\gamma_N = 1$ se cumpla, para esto podemos utilizar el método de cancelaciones propuesto por WRAY⁷⁰ el cual permite, sin trabajar con placas especiales detectar diferencias de densidad de 0,04, cancelando placas con rangos de más de 3.0 en densidad, usando un proceso de dos etapas paralelas, esto significaría en nuestro caso detectar, trabajando con emulsiones especiales y de alto contraste polarizaciones del orden de

$$P_{1,j} \sim 0,005.$$

(Ver también DE VAUCOULERS 43).

de Vaucouleurs, G., 1943, Science et Industries Photographiques, N° 7-8, 2ª Série, Tome XIV.

Stüber, G., Arkiv For Astronomi. Bd. 4, N° 38.

Wray, J., 1970, A. J. 75, N° 3.

INFORME DE TRABAJO

Importancia de los procesos Sincrotron-Compton

J. R. ALBANO, J. FRANK Y R. TERLEVICH

*Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Buenos Aires,
y Observatorio Astronómico, La Plata*

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Buenos Aires

Introducción:

El objeto de este trabajo es analizar la producción de radiación X y gamma a través del mecanismo Sincrotron-Compton para diferentes condiciones físicas del medio emisor, el cual puede ser radiogalaxias radiofuentes, espacio interestelar, remanentes de supernova, halos galácticos, etc.

Una de las características principales de una fuente emisora es el espectro energético de sus electrones $N(E, t)$, el cual está regido por la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial t} N(E, t) + \frac{\partial}{\partial E} (E \cdot N(E, t)) = \sum_i Q_i(E, t) \quad (1)$$

donde Q_i son las fuentes y sumideros de electrones.