

LA INTERFEROMETRIA FABRY-PEROT: APLICACIONES ASTRONOMICAS†

Paris Pişmiş

Instituto de Astronomía, UNAM

Apartado Postal 70-264. 04510 - México, D.F.

RESUMEN

Se presentan algunas propiedades de la interferometría de la luz con énfasis en la interferometría mediante el etalón Fabry-Pérot. Se discute la aplicación del etalón acoplado a un "reductor focal" a problemas astronómicos; en particular a la determinación de velocidades radiales en objetos extendidos de emisión, nebulosas galácticas y extragalácticas. Se hace mención al trabajo hecho en México en este campo, así como de los trabajos que están en marcha.

ABSTRACT

Some properties of the interference of light are presented with emphasis on interferometry by means of a Fabry-Pérot étalon. The application of the étalon with a focal reducer to astronomical problems is discussed related in particular to the determination of radial velocities of extended emission objects, in galactic and extragalactic nebulae. Mention is also made of the work carried out in Mexico in this field as well as of developments under way.

INTRODUCCION

Las pesquisas sobre la naturaleza de la luz y el anhelo de ex-

† Presentado en la asamblea general ordinaria de la SMF el 13 de septiembre de 1982.

plicarla son de las páginas más apasionantes de la historia de la física.

Desde fines del siglo pasado, científicos del calibre de Fresnel, Arago, Fizeau, Lord Rayleigh, Maxwell, Michelson y otros, estudiaron la naturaleza de la luz con experimentos de admirable ingenuidad llegando a interpretar los fenómenos como la difracción, la interferencia y la polarización, a base de la teoría ondulatoria o corpuscular de la naturaleza y propagación de la luz, según el caso.

El fenómeno de la interferencia de la luz ha hecho posible la determinación de parámetros físicos muy importantes como la velocidad de la luz, iniciada como es bien conocido por Michelson y refinada por otros. Un campo en que mayores utilidades se han obtenido de este fenómeno es el de la determinación de longitudes de onda de líneas espectrales con alta precisión, tan importantes en la física como en la astronomía.

La refracción de la luz a través de un prisma fue aprovechada por Fraunhofer a principios del siglo pasado al poder mostrar la existencia de líneas oscuras en el espectro solar. Aunque Newton un siglo y medio antes había obtenido el espectro del Sol en colores, no había podido observar las líneas de absorción. El espectro era la imagen del orificio por el que dejaba pasar la radiación del Sol en los diferentes colores y la sobreposición de éstos no permitía la detección de las imágenes oscuras. El éxito de Fraunhofer se debió a que él dispersó la radiación del Sol pasándola primero por una rendija, y así pudo obtener la imagen aislada de ésta en los lugares en donde la radiación continua está absorbida.

La astronomía ha aprovechado enormemente estas experiencias de Fraunhofer, extendiendo el estudio de los espectros a los cuerpos celestes no sólo del sistema solar sino a las estrellas, el material difuso y a los sistemas estelares. Los primeros espectrógrafos acoplados a telescopios usaban como medio dispersor un prisma. Más tarde, con el avance de la técnica de construir rejillas de difracción, estas últimas han substituido al prisma y hoy en día están en uso más común como medio para producir el espectro, evitando así la pérdida de la luz por la absorción del prisma, que afecta principalmente la radiación de ondas cortas en el azul-violeta.

La espectrofotometría de alta resolución y eficiencia es esencial para una variedad de problemas de la astrofísica referentes a objetos tanto brillantes como débiles, estrellas o material difuso. Por ejemplo, el

estudio de líneas moleculares de H_2O y CO_2 en el espectro de Marte, el de la débil línea interestelar de absorción de CN, la determinación de la abundancia estelar del isótopo L_1^6 relativo a L_1^7 , para mencionar unos cuantos problemas, han requerido el poder resolutivo de espectrógrafos en el foco coudé de grandes refractores. Es cierto que las técnicas de hoy en día producen rejillas de difracción o "echelle" en dimensiones más grandes, alcanzando un poder resolutivo 10^6 , pero por lo angosto que debe ser la rendija del espectrógrafo no se puede aprovechar la luminosidad que rinde el telescopio en su totalidad.

Desde hace unas dos décadas se ha empezado a superar esa limitación de los espectrógrafos con el empleo de métodos interferométricos. La ventaja esencial de los interferómetros consiste en su capacidad de aceptar alrededor de 100 veces más luz de una fuente extendida con una brillantez dada, comparado con un espectrógrafo de rendija de igual tamaño y poder resolutivo. Es en especial con el uso del etalón Fabry-Pérot que los mayores adelantos se han tenido y se espera tener.

El desarrollo tecnológico ha permitido la construcción de espejos semi-reflectantes depositando más capas de sustancias dieléctricas de muy baja absorción y alta frecuencia de reflexiones, aumentando así la luminosidad resultante de la respuesta.

En esta presentación el énfasis será sobre la interferometría Fabry-Pérot como un medio eficiente para obtener longitudes de onda y a partir del efecto Doppler determinar velocidades radiales de precisión, en las nebulosas difusas y en las galaxias.

EL ETALON FABRY-PEROT

El etalón Fabry Pérot consiste en un par de discos idénticos de vidrio (cuarzo), con caras semi-reflectantes montadas frente a frente, perfectamente paralelas y con una separación pequeña, del orden de unos cientos de micras o poco más; las superficies semi-reflectantes deben tener una "planeidad" del orden de $\lambda/100$ cuando menos. Un esquema del etalón Fabry-Pérot, esquema ya clásico en tales demostraciones, se da en la Fig. 1 en la que se advierte también su funcionamiento.

Sea a un rayo monocromático que incide sobre el etalón bajo un

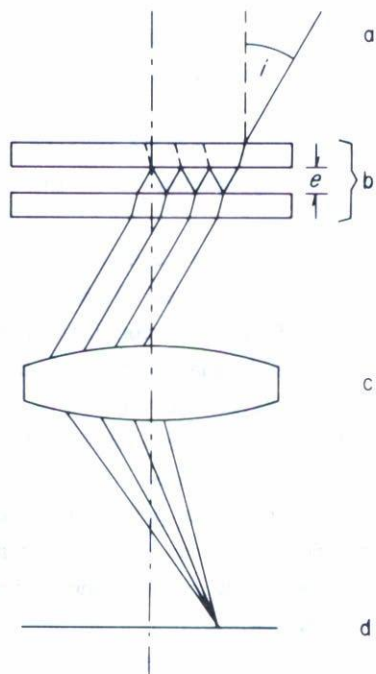


Fig. 1. Esquema del etalón Fabry-Pérot acoplado a un objetivo: a-rayo mono cromático, b-etalón Fabry-Pérot, c-objetivo de la cámara, d-placa fotográfica o detector.

ángulo i con la normal a la superficie del mismo. Llamemos e la separación efectiva de las caras semi-reflejtantes y sea n el índice de refracción de material o gas entre los espejos. El rayo incidente estará sujeto a reflexiones múltiples pero una parte atravesará el etalón. La radiación transmitida será observable sólo cuando el rayo transmitido esté en fase con el rayo incidente. Esto requiere que el camino óptico de las reflexiones del rayo para la λ dada satisfaga la relación bien conocida:

$$2ne \cos i = p \lambda, \quad (1)$$

donde p es un número entero; la luminosidad transmitida será por lo tanto

un máximo. Si p no es entero los rayos no están en fase y esto causará disminución de la luminosidad hasta llegar a un mínimo donde la interferencia será destructiva y no se observará iluminación alguna. Al variar i se observarán sucesivamente anillos brillantes e intervalos oscuros y los máximos se darán cada vez que p sea entero. La p a la máxima transmisión (interferencia constructiva) para el mínimo valor de i se llama el orden de interferencia del etalón.

Acoplado un objetivo los rayos paralelos transmitidos llegan a formar un punto sobre el plano focal de la cámara. Como los rayos con inclinación i , llegando de una superficie de luz monocromática, forman un cono, el lugar geométrico de la máxima iluminación será un círculo. El siguiente círculo con máxima iluminación ocurrirá para $p-1$, ya que $\cos i$ será menor y así sucesivamente; para el anillo con número q , el orden de interferencia será $p-q+1$. Aunque el orden central para $q=0$ puede ser un máximo, y por lo tanto una imagen redonda, suele llamarse "anillo" también.

Los anillos de interferencia son semejantes en principio a los anillos de Haidinger; estos se producen cuando la luz atraviesa dos vidrios paralelos con una pequeña separación entre ellos. Los anillos de Haidinger son apenas visibles por el poco contraste entre los anillos brillantes y oscuros. El contraste aumenta debido a las múltiples reflexiones; los anillos brillantes se hacen más finos aumentando así el ancho de los que son oscuros. La posibilidad técnica de asegurar superficies semireflectantes con poca absorción y alta frecuencia en la multiplicidad reflectiva ha dado relieve a las posibilidades del etalón Fabry-Pérot, el cual es ahora un instrumento de frontera para el estudio de la cinemática de nebulosas. Más tarde señalaremos algunos rendimientos relativos del Fabry-Pérot y de un espectrógrafo de rendija.

Fabry-Pérot y Buisson principalmente (aunque hay que mencionar a Jacquinet también), habían intentado el uso del etalón para fines astronómicos. Pero el desarrollo de un equipo estable y manejable acoplado al telescopio fue la obra de Georges Courtes del Observatorio de Marsella; ya en 1960 se presentaban los resultados de la determinación de velocidades radiales punto por punto en nebulosas de emisión, usando la línea $H\alpha$ de hidrógeno que es la línea más brillante en general en tales objetos⁽¹⁾.

Una discusión breve de la fórmula (1) será oportuna en este momento; para un etalón de separación fija de los espejos, e , la posición del anillo, es decir, su radio en el plano focal, aumenta conforme se disminuye la longitud de onda monocromática incidente. Esto implica que si se puede evaluar y calibrar esa diferencia de los radios se puede obtener el desplazamiento Doppler de una fuente emisora y por lo tanto su velocidad radial con respecto a la Tierra. Esto, en esencia, es lo que hacemos nosotros.

De la relación (1) se ve claramente que el orden de interferencia p para una λ dada se puede variar de tres maneras: (a) variando la separación e ; (b) variando el índice de refracción n ; o bien (c) inclinando el etalón. Este último modo tiene sus limitaciones y no se aplica en general.

Seguiremos dando algunas definiciones que precisan las características de los etalones⁽¹⁾.

Sea $\Delta\lambda$ la separación entre dos órdenes sucesivos, es decir, el rango espectral y $\delta\lambda$ el ancho total a media transmisión en los anillos; se define

$$\text{"finesse"} = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} .$$

Para el etalón que hemos empleado con buenos resultados, la separación de los espejos e , es de 348 micras. De la relación (1) se deduce que la $\Delta\lambda$ correspondiente es 283 km s^{-1} (6.2A) en la línea H α y la p central es 1060. La "finesse" del etalón es 10 y por lo tanto el ancho medio de los anillos, $\delta\lambda$, es igual a 28 km s^{-1} .

Se puede demostrar que la "finesse" es sólo función de R , el coeficiente de reflexión de las caras de los semi-espejos, o sea

$$\frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} = -\pi R^{1/2} (1-R) . \quad (2)$$

Es implícito esperar que la intensidad I transmitida de un rayo monocromático por un etalón ideal dependa de la fase ϕ . Tal relación está dada por el perfil del anillo:

$$I(\phi) = I_0 \frac{T^2}{1 + R^2 - 2 R \cos \phi} , \quad (3)$$

donde T es el factor de transmisión e I_0 es la intensidad incidente. Esta es una función de Airy, pero para fines prácticos se representa con una

gaussiana. La máxima transmisión se obtiene para $\phi = 0$. Es interesante considerar la resolución espectral del F.P. Este parámetro se define como $\frac{\lambda}{\delta\lambda}$. Para el etalón mencionado arriba, la resolución es del orden de 10^4 en la línea H α ($\lambda = 6563\text{\AA}$) y es solamente función de la "finesse" para una p central dada.

La dispersión en el plano focal de la cámara es otro parámetro característico de estudios espectrales. La dispersión lineal se define como $\frac{dx}{d\lambda}$, donde x es el radio vector desde el centro de los anillos. De la relación (1) se deduce que

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{f \cot i}{\lambda}, \quad (4)$$

donde f es la distancia focal efectiva de la combinación telescopio y cámara. Es interesante señalar que la dispersión lineal aumenta cuando i , el ángulo de incidencia de los rayos (en otros términos el radio de los anillos) disminuye ¡llegando al infinito en el centro de éstos!

EL REDUCTOR FOCAL

Hemos visto que el etalón Fabry-Pérot debe usarse con rayos paralelos tal y como son las radiaciones de los cuerpos celestes que llegan a un telescopio. Pero hacer un etalón con la alta "planeidad" requerida de los semi-espejos y asegurar el paralelismo de éstos al tamaño de un telescopio grande es imposible técnicamente. En efecto, las dimensiones de los etalones en uso hasta la fecha en general no sobrepasan de 50 mm de diámetro.

Courtes ha resuelto el problema con un llamado "reductor focal" que reúne la potencia de un reflector grande a las ventajas de un etalón normal. La Fig. 2. es el esquema de un reductor focal. La Fig. 3. muestra tal reductor focal acoplado al foco Cassegrain F/15 del reflector de Tonantzintla de 1 m de diámetro.

En 1972 principiamos el uso de nuestro reductor focal réplica del de Courtes, gracias a la colaboración generosa de los jóvenes astrónomos de Marsella no sólo en darnos el diseño sino supervisando la construcción del instrumento en un taller en la vecindad de Marsella.



Fig. 2. Esquema de un reductor focal:
 a-filtro de interferencia, b-foco del reflector donde se encuentra una retícula cuya sombra produce los ejes cartesianos, observados en las fotografías, c-lente de campo, d-colimador, e-etalón Fabry-Pérot, f-objetivo de cámara, g-detector.

Mencionemos algunas características de nuestro equipo. Usamos filtros de interferencia con ancho total a media transmisión de 10 \AA , asegurando así la monocromatización. Para los objetos galácticos cuyas velocidades con respecto a la Tierra en general quedan en el rango -200 a $+200 \text{ km s}^{-1}$ se usa un filtro centrado en $\lambda 6563$ para $H\alpha$ en reposo. Disponemos

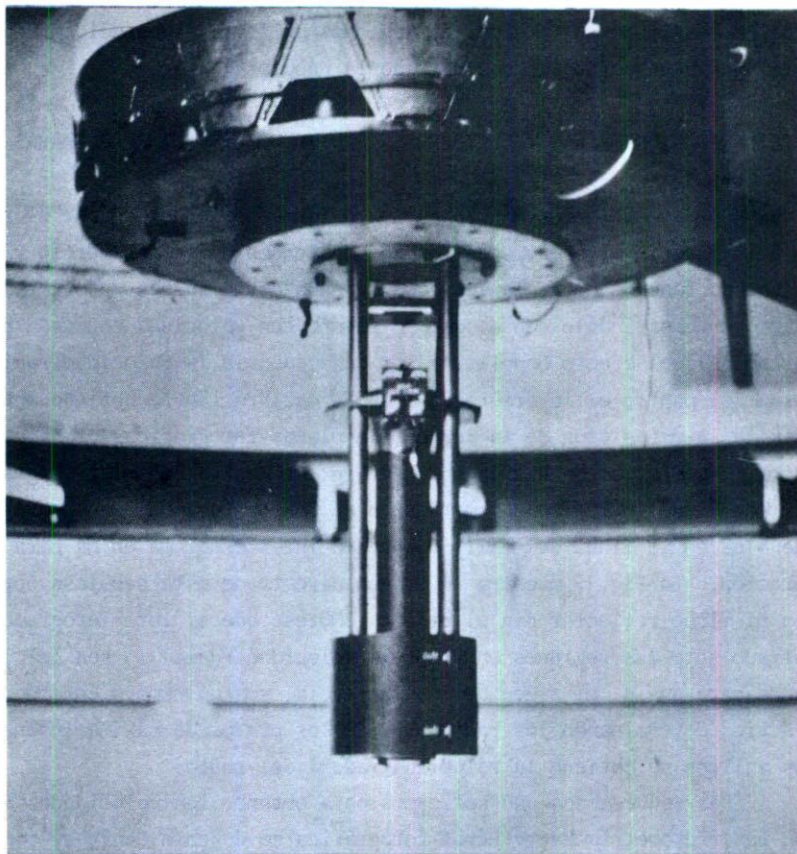


Fig. 3. El reductor focal montado en el foco Cassegrain del reflector de 1 metro de diámetro del Observatorio Astronómico Nacional en Tonantzintla.

también de varios filtros para el estudio de las galaxias cuyas líneas espectrales (en este caso $H\alpha$) están desplazadas hacia el rojo (red shift). Últimamente hemos empleado un filtro centrado en la línea prohibida de N II ($\lambda 6584$ [NII]); esta línea es más delgada que la de $H\alpha$, los anillos de interferencia son más delgados y por lo tanto las velocidades radiales obtenidas son de mayor precisión.

En la última década hemos trabajado en la determinación y discusión del campo de velocidades de objetos galácticos con líneas de emisión. A la fecha hemos publicado una docena de trabajos de la serie con el título

lo general "Movimientos Internos en Regiones H II". Tal estudio proporciona asimismo la velocidad de conjunto de la nebulosa.

DETERMINACION DE LAS VELOCIDADES A PARTIR DE LOS INTERFEROGRAMAS

Por lo que hemos mencionado anteriormente se deduce que el radio de un anillo de interferencia es función del orden de interferencia y por lo tanto una función de λ , la longitud de onda de la fuente. Estimando ese radio y comparándolo con el de una fuente con velocidad conocida puede deducirse $\Delta\lambda$, el efecto Doppler, y por consecuencia la velocidad radial que tiene el punto; el interferograma de la calibración se obtiene antes y después de la exposición de la región, en placas fotográficas o con otro detector, con el tubo de hidrógeno. La Fig. 4 muestra un interferograma tomado con el reflector de 2.1 metros en el Observatorio de San Pedro Mártir de S162 en la línea de $[\text{NII}]\lambda 6584$ y un interferograma en $\text{H}\alpha$ para su calibración. La Fig. 5 muestra la imagen directa de esta nebulosa obtenida con el mismo reflector sin el etalón. Nótese que el interferograma ha registrado sólo las regiones en donde la velocidad radial (o sea λ/λ) es adecuada para que p , el orden de interferencia, sea un número entero. En la práctica determinando los radios, ρ , de los puntos de máxima intensidad de los anillos se obtiene la velocidad radial del punto.

Las reducciones que aplicamos para obtener las velocidades radiales con interferometría Fabry-Pérot fotográfica se deben a Courtes⁽¹⁾; aquí daremos sólo la fórmula para la velocidad radial (km s^{-1}) observada desde la ubicación de la Tierra en ese momento, a saber,

$$v_{\text{radial}} = \frac{c}{f} \left(\rho_n^2 - \rho_e^2 \right). \quad (5)$$

Aquí c es la velocidad de la luz, f la distancia focal efectiva de la cámara, ρ_n y ρ_e son los radios de los anillos de la calibración y la nebulosa respectivamente a lo largo de una dirección dada en el interferograma. Una manera más sencilla de reducción equivalente a la anterior es

$$v_{\text{radial}} = K \left[\frac{\rho_n^2 - \rho_e^2}{\rho_{n-1}^2 - \rho_n^2} \right], \quad (6)$$

donde ρ_n, ρ_{n-1} son los radios de dos anillos sucesivos entre los cuales queda el radio del detalle de la nebulosa, ρ_e . El factor K en km s^{-1} es el intervalo espectral libre entre los anillos sucesivos.

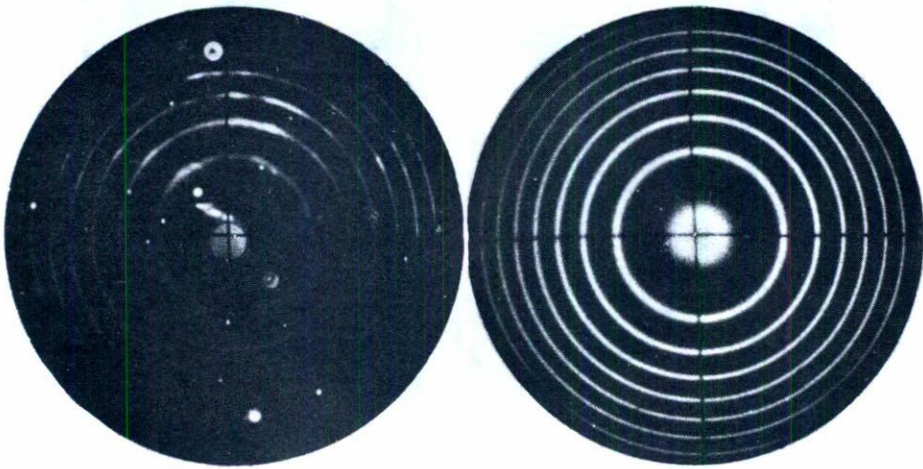


Fig. 4. Interferograma de la nebulosa de emisión galáctica S162 (la letra S corresponde al del catálogo de Sharpless⁽²⁾) en la línea de $[\text{NII}] \lambda 6584\text{\AA}$ obtenida con el reductor focal acoplado al reflector de 2.1 m de diámetro del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, Baja California. A la derecha se da el interferograma de calibración en la línea $\text{H}\alpha$ de un tubo de hidrógeno montado en el reductor focal.

Las imágenes extrafocales en el borde superior y adentro del primer anillo del interferograma de la nebulosa son los reflejos de las estrellas diametralmente opuestas causados por las caras exteriores del etalón. La mancha grande en el centro marca el cruce de la retícula.

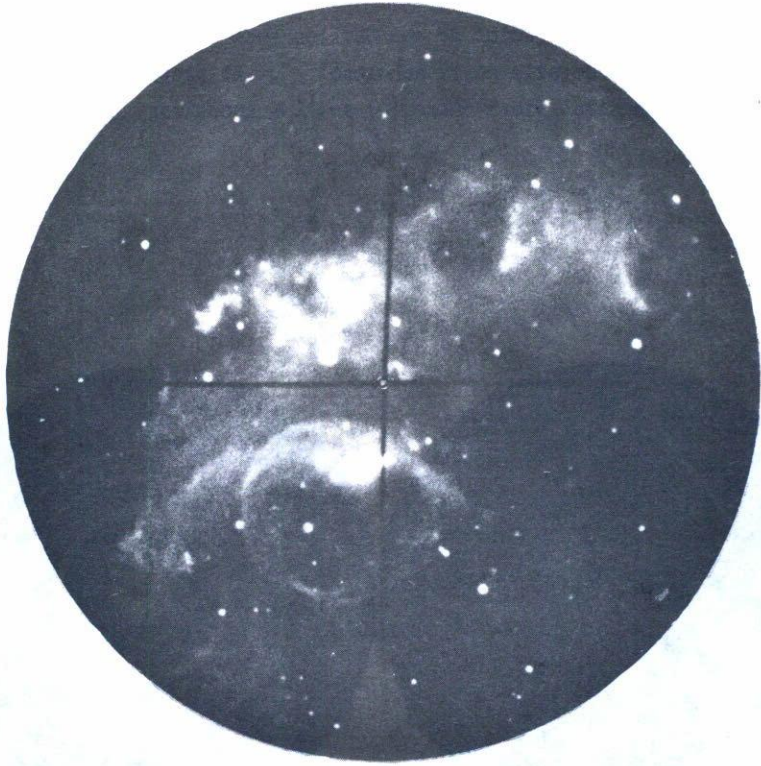


Fig. 5. Imagen directa de la misma región que en la Fig. 4 (S 162) en la línea de $[NII]\lambda 6584\text{\AA}$ obtenida con el mismo reflector. Tanto ésta como la imagen de los interferogramas anteriores están tomadas a través de un tubo intensificador "Varo" de una etapa.

COMPARACION ENTRE EL FABRY-PEROT Y EL ESPECTROGRAFO

Consideraremos solamente la determinación de velocidades radiales:

- 1) El Fabry-Pérot fotográfico permite la determinación de la velocidad radial en todos los cientos de puntos, de un objeto extendido en emisión, que caen sobre los anillos. Mientras que con el espectrógrafo se puede estudiar sólo los puntos que caen en una rendija, o sea en una dimensión solamente. Por lo tanto, la interferometría es más eficiente para determinar la velocidad radial de puntos en una región extendida.
- 2) Aunque con una exposición sobre la región, el Fabry-Pérot da la velocidad

en un gran número de puntos, tales velocidades están basadas en una sola línea espectral ($H\alpha$ en la mayoría de nuestras determinaciones); mientras que con el espectrógrafo la velocidad se obtiene como un promedio de varias líneas de emisión: $H\alpha$, $H\beta$, $[O III]$, $[S II]$, $[N II]$, etc.

- 3) Los anillos de interferencia son convoluciones de los perfiles instrumentales con la imagen de la nebulosa, una circunstancia que puede introducir errores considerables en las velocidades, en especial si el detalle de la nebulosa es pequeño con respecto al ancho instrumental del anillo. Hay que poner mucho énfasis en la comparación de la morfología de las regiones medidas en el anillo con la imagen directa para desechar las velocidades espurias o bien llevar a cabo una deconvolución. Analíticamente este último proceso es tan engorroso que es recomendable recurrir a otro tipo de interferometría, como es la de barrido, y que trataremos en un momento. La convolución es una seria limitación de la interferometría fotográfica con etalones con separación fija de los espejos.
- 4) La determinación de velocidades de regiones extendidas en emisión es mucho más eficiente con el F.P., puesto que no se necesita una rendija y se aprovecha así de toda la superficie luminosa de una imagen, sea ésta una nebulosa galáctica o extragaláctica.
- 5) El espectrógrafo rinde velocidades radiales de objetos sin limitaciones de velocidad radial, mientras que para lograr grabar con un F.P., por ejemplo la línea $H\alpha$, se necesita usar un filtro interferencial "afinado" a la velocidad promedio (corrimiento hacia el rojo) del objeto. Para objetos galácticos, en donde la velocidad radial no sobrepasa en general de $\pm 200 \text{ km s}^{-1}$, un filtro para la línea espectral en reposo con un ancho medio de 10\AA basta; pero en las galaxias con corrimiento al rojo considerable (450 km s^{-1} o más) se debe usar el filtro adecuado, esto requiere a su vez el valor promedio del corrimiento hacia el rojo de la galaxia, información que es obtenible sólo con un espectrógrafo o por radio-ondas; sin embargo, las velocidades radiales relativas interferométricas no están sujetas a ambigüedad alguna.

INTERFEROMETRIA FABRY-PEROT EN MEXICO

El propósito en introducir interferometría Fabry-Pérot en México ha sido originalmente para comprobar una interpretación que había propuesto para explicar "anomalías" en la cinemática de nuestra y otras galaxias; hace casi dos décadas había llamado la atención a las variaciones en la curva de rotación de las galaxias en forma de ondas. En algunas publicaciones^(3,4,5) se había insistido en que las variaciones eran físicamente significativas y propuesto una interpretación a base de la existencia en nuestra y otras galaxias de "poblaciones" o subsistemas que difieren entre sí por sus características cinemáticas. En nuestra y en otras galaxias la población I con distribución no homogénea y, esencialmente en forma de brazos espirales, coexiste con una población II cuya distribución de densidad es continua. Las observaciones en los últimos cinco años por otros autores confirman nuestra proposición: los máximos de la curva de rotación corresponden a los brazos espirales mientras que entre los brazos la velocidad promedio de rotación es más lenta^(6,7).

Asimismo hemos señalado que las ecuaciones hidrodinámicas del estado estacionario de una galaxia dan cabida a la existencia de los subsistemas (poblaciones) que difieren en su velocidad de rotación. Las mismas ecuaciones muestran también que la dispersión de velocidad será alta para la rotación lenta y viceversa.

La teoría de ondas de densidad para explicar la persistencia de los brazos espirales en las galaxias predice una rotación más rápida en los brazos espirales sin una variación en la dispersión. Entonces es claro que el conocimiento de la dispersión de velocidades al mismo tiempo que la velocidad de rotación constituiría una prueba crucial para saber cual de las dos interpretaciones es la adecuada.

La determinación de la dispersión de velocidades, aunque posible con espectroscopía convencional, es un tanto arriesgada y complicada. Mientras que con la interferometría Fabry-Pérot es mucho más directa su obtención y confiable el resultado.

El trabajo sobre galaxias requería una resolución espacial considerable, un reflector grande como colector de luz (nuestro instrumental no cumplía estas condiciones). En un principio, por lo tanto, tuvimos que de

dicarnos a las nebulosas galácticas brillantes con el reductor focal ya descrito, con placas fotográficas y una cámara. A partir de 1975 usamos un tubo intensificador de imágenes "Varo". La disminución de la resolución debida al intensificador se remedió usando una cámara con relación focal del doble de la anterior. La ganancia resultante es sin embargo mayor de 5. Ahora tenemos un intensificador de dos etapas que acoplado a un objetivo con distancia focal del doble de lo de una etapa nos da una ganancia de un factor de cinco. Montando este último al reflector de 2.12 metros instalado en el Observatorio de San Pedro Mártir, B.C., hemos principiado al estudio de las galaxias como habíamos proyectado hace casi una década.

Entretanto hemos llevado a cabo estudios de objetos alcanzables a nuestro equipo. Nuestras investigaciones han rendido resultados significativos sobre las velocidades en regiones de emisión en nuestra galaxia. La mayoría de los trabajos están publicados bajo el título general de "Movimientos Internos en Regiones H II"; el número XII de la serie está en prensa. Existen algunos trabajos fuera de esta serie que han surgido como un subproducto de las posibilidades ofrecidas por la interferometría Fabry-Pérot.

Las conclusiones globales de nuestro trabajo sobre las regiones H II pueden resumirse como sigue:

Nuestra experiencia muestra que las nebulosas emisoras pueden dividirse en dos categorías generales:

- a) Las que están formadas esencialmente como resultado de la eyección del gas por la estrella ionizante (tres regiones satisfacen esta condición);
- b) Las que están presentes como vestigio de la formación de una o varias estrellas que ahora la ionizan. La Fig. 6, tomada con el reflector de 1.0 metros instalado en el Observatorio de Tonantzintla Pue, muestra un ejemplar de esta clase de nebulosa: NGC 2467

Hemos propuesto además, y esto es lo novedoso de nuestro trabajo, que la eyección de la estrella en el caso (a) no ha sido isotrópica; contrario a lo aceptado comúnmente. Tenemos evidencia, basada en la morfología de la nebulosa y sus movimientos internos, que la eyección ha tenido lugar desde regiones activas sobre la estrella central; estas regiones están en hemisferios opuestos en la fotosfera de la estrella y sensiblemente en las extremidades de un diámetro que forma un ángulo agudo con el eje de

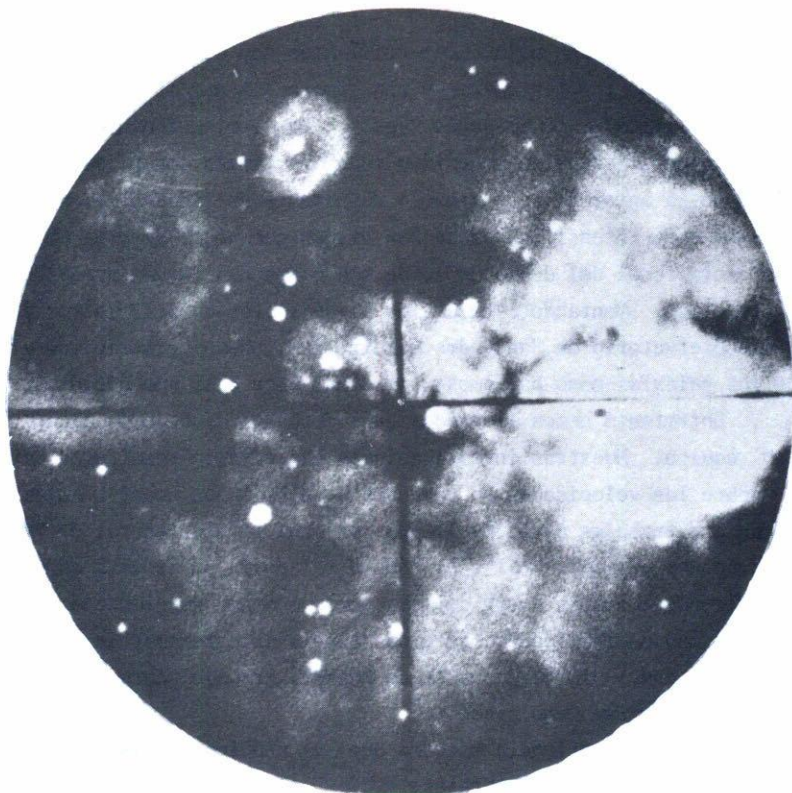


Fig. 6. Imagen directa de la nebulosa galáctica NGC 2467 en H α obtenida con el reflector de 1.0 metros de diámetro del O.A.N. en Tonantzin tla y con un reductor focal.

rotación de la misma. Tal configuración sugiere la existencia de un campo bi-polar magnético asociado a la estrella central. Las Figs. 7 y 8 muestran dos de las tres regiones mencionadas, a saber NGC 6164-5 y NGC 2359 respectivamente, y la Fig. 9 el esquema propuesto por nosotros para explicar la morfología y el campo de velocidades de estas dos regiones.

Las estrellas centrales de estas nebulosas están en la actualidad perdiendo masa, un resultado obtenido a través del estudio de las líneas espectrales por otros autores. Extrapolando, hemos propuesto que si la estrella en el pasado (algunos 10^4 - 10^5 años antes) ha perdido masa de manera no isotrópica, en particular de modo bipolar, es razonable esperar que en la actualidad puede perderse el gas de una forma semejante⁽⁸⁾.

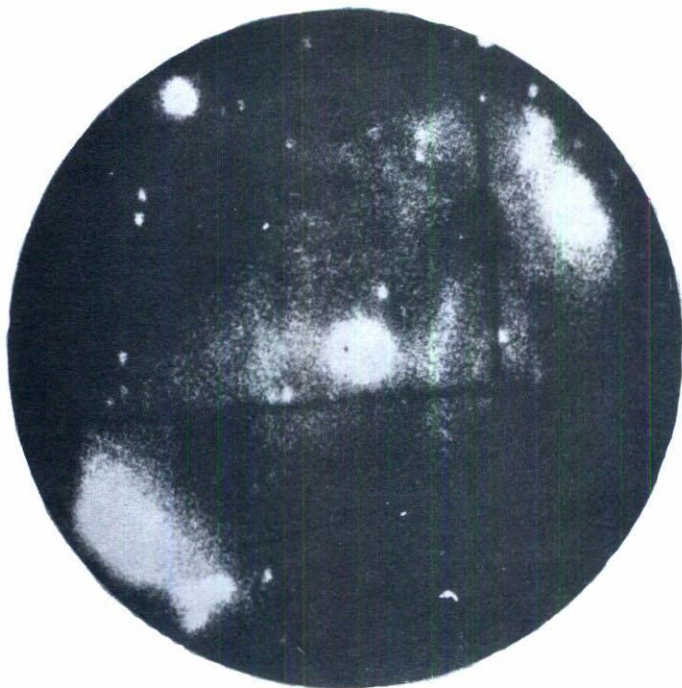


Fig. 7. La región HII NGC 6164-6165 en la línea $[\text{NII}]\lambda 6584\text{\AA}$ fotografiada con el reflector de 1.5 m de diámetro del Observatorio en Bosque Alegre, Argentina.



Fig. 8. La región HII NGC 2359 en la línea $\text{H}\alpha$ de Balmer fotografiada con el reflector de 1 m. del O.A.N. en Tonantzintla.

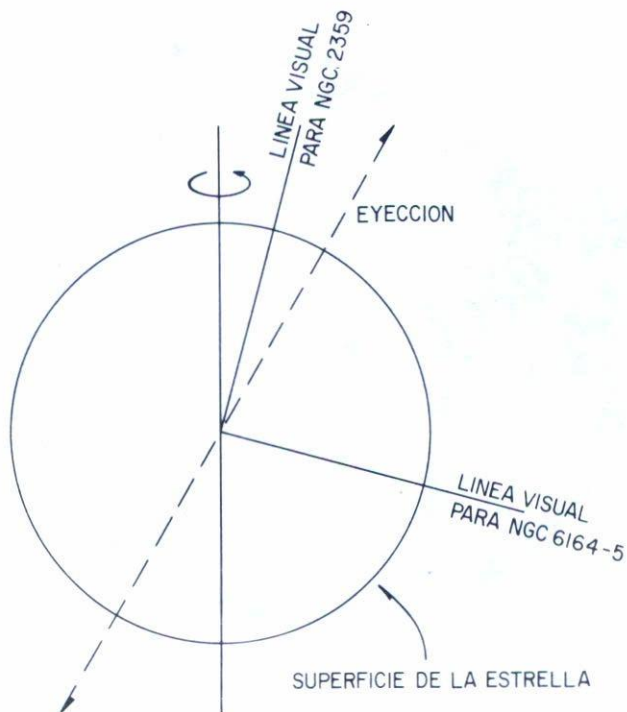


Fig. 9. Modelo esquemático de eyección de masa de una estrella para interpretar la morfología y el campo de velocidades en las regiones HII, NGC 6164-5 y NGC 2359.

Ultimamente se ha empezado a creer en este modo de pérdida de masa. La razón por la suposición de isotropía proviene probablemente de la conveniencia, pues en este caso los parámetros del problema son funciones de una coordenada, el radio vector, mientras que la no-isotropía requiere la consideración de dos parámetros más: las coordenadas angulares. Esta última circunstancia complica el tratamiento teórico del problema.

Un detalle referente al inciso (b): en algunos casos hemos encontrado evidencia de que regiones H II pequeñas, aunque formadas a partir de la misma nube interestelar, tienen edades diferentes. Es decir, que la formación de las nebulosas en la misma nube de gas y polvo no ha sido coeval⁽⁹⁾. En el caso particular de una de estas regiones, la "nebulosa triple", la

edad disminuye al pasar de S254 a S257 y a S255.⁽⁹⁾ La Fig. 10 muestra el conjunto de estas nebulosas.

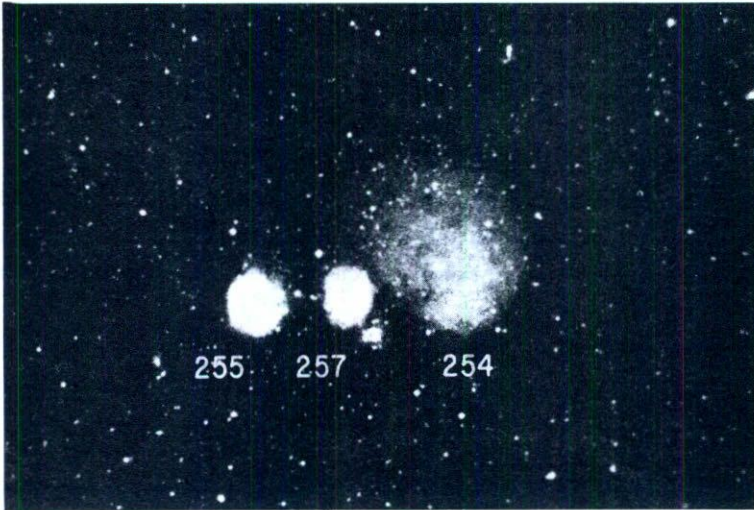


Fig. 10. Las regiones HII S254, S257 y S255⁽²⁾. La fotografía de este conjunto que hemos llamado "nebulosa triple" está tomada con una placa sensible al rojo.

En los últimos años un pequeño grupo en nuestro Instituto ha estado investigando los movimientos internos en las remanentes de supernovas usando el equipo Fabry-Pérot descrito arriba.

FABRY-PEROT DE BARRIDO

La velocidad medida tanto con un espectro como con el etalón es el promedio de la velocidad interna de la nebulosa en la dirección del visual. ¿Cómo es la relación entre la velocidad radial y la intensidad luminosa de la región cuyo promedio se observa? En otras palabras, se desea conocer el perfil de la línea brillante, o sea intensidad versus velocidad a lo largo de la visual. Esta información no se puede obtener con precisión por medio de un etalón fijo, es decir, donde la p del etalón es constante. La variación de p , quedándose en un punto fijo en la nebulosa es lo que nos da el perfil; esta variación se puede realizar de dos maneras

(no consideraremos la posibilidad de la variación de la inclinación del etalón); recordemos la relación (1).

Para una λ central, digamos $H\alpha$, la variación de p puede obtenerse:

- a) Variando la presión del gas, es decir, variando el índice de refracción n del gas entre los espejos, y
- b) Variando la e , la separación entre los espejos del etalón.

La tendencia ahora es aplicar el segundo. A los tres separadores de los espejos se añade material piezo-eléctrico, lo cual asegura la variación de e con el suministro de un campo eléctrico variable y controlado.

Han empezado a aparecer en la literatura astronómica detallados estudios de nebulosas galácticas, planetarias y otras, usando el Fabry-Pérot de este tipo que llamaremos de barrido. Aún no se ha aplicado el Fabry-Pérot de barrido a galaxias.

Un tal equipo está en proceso de elaboración en el taller electrónico del Instituto de Astronomía con el que esperamos poder observar galaxias a fines del presente año. La respuesta del etalón se detectará primero con un fotómetro fotoeléctrico convencional posibilitando el estudio de la región punto por punto. Esperamos muy pronto hacer el "barrido" en dos dimensiones por medio de un CCD (Charge Coupled Device) o un Mepsicron, un detector mucho más eficiente que el CCD, diseñado por nuestro colega Claudio Firmani. Las reducciones serán muy laboriosas y complicadas pero finalmente podremos descifrar problemas dinámicos de las galaxias, problemas que nos han conducido a la interferometría Fabry-Pérot.

CINEMATICA GALACTICA CON INTERFEROMETRIA

Cabe mencionar que el grupo de Marsella, en donde nació la interferometría Fabry-Pérot astronómica, ha continuado su estudio tanto en nuestra como en otras galaxias. Este grupo, principalmente los Georgelin, basado en interferometría de nebulosas de emisión, está realizando una serie de investigaciones sobre la cinemática de la Galaxia.

El promedio de la velocidad radial de un número de puntos en una nebulosa proporciona una velocidad confiable de la nube en cuestión.

Georgelin y colaboradores han obtenido así la velocidad radial de unas 120 nebulosas cubriendo toda la Vía Láctea.

Adoptando una curva de rotación comúnmente usada, es decir, la curva de Schmidt⁽¹⁰⁾ puede estimarse la distancia llamada "cinemática de las regiones H II". La ventaja de este procedimiento es el poder alcanzar distancias más allá de las determinables por otros medios ópticos.

Determinadas las distancias, los Georgelin⁽¹¹⁾ lograron obtener la distribución de las nebulosas de emisión en el plano galáctico. Según estos autores el conjunto delinea los brazos espirales que aparecen en la Fig. 11. Esta representación de la estructura espiral de la Galaxia se considera en el presente como la más confiable.

Es posible suponer que las distancias cinemáticas sean comparables a las de las estrellas ionizantes asociadas a las nebulosas (distancias fotométricas). Sin embargo, Georgelin y Georgelin⁽¹²⁾ encuentran diferencias entre los dos tipos de distancias, diferencias que parecen ser sistemáticas. Ha transcurrido una década desde entonces y no se ha aclarado esta discrepancia. Si verdaderamente existe tal efecto sistemático tampoco está claro. En el brazo de Perseo la distancia cinemática es mayor que la fotométrica, mientras que en el cuadrante siguiente la diferencia tiende a ser invertida. Según mi interpretación, son las distancias cinemáticas que originan la discordancia mencionada siendo la causa el insuficiente conocimiento nuestro de la curva de rotación de la Galaxia⁽¹³⁾.

En los últimos años de Vaucouleurs (véase por ejemplo el resumen en los reportes de la IAU de 1979) ha estado aplicando el método Fabry-Pérot exclusivamente a las galaxias. Los campos de velocidad cubren 3,000-4,000 puntos en cada galaxia.

Es mi convicción que aún quedan por explotar posibilidades técnicas de la interferometría. Referente a esto voy a mencionar una experiencia mía que mostró una utilidad inesperada de Fabry-Pérot.

UN USO INSOLITO DEL FABRY-PÉROT

En NGC 2175 (una región H II estudiada) se encuentra un pequeño e intenso glóbulo en emisión donde hay dos estrellas con tipos espectrales B1.5 y B9 y con magnitudes ~ 10.5 y 14, respectivamente. Hemos detectado que la estrella débil tiene intensas líneas de emisión, siendo la línea H α

la más intensa. En nuestros interferogramas el glóbulo siempre cayó dentro del anillo central y sólo eran visible las dos estrellas. La velocidad radial no la podíamos determinar. Era sorprendente que la estrella débil no sólo aparecía de igual brillo, sino un poco más brillante que la estrella brillante. Una interpretación plausible es que la emisión en $H\alpha$ de la estrella débil es muy ancha y llena toda la ventana de transmisión del filtro de interferencia empleada (10 Å). Comparando la intensidad de $H\alpha$ con la intensidad de la radiación del continuo de la estrella brillante, que atraviesa el filtro, se ha estimado la energía contenida en la línea $H\alpha$ como 6×10^{33} ergs s^{-1} . Esto es 1.5 veces la que el Sol radía en un segundo. Es entonces posible que la radiación $H\alpha$ de la nebulosa que envuelve a las dos estrellas sea parcialmente causada por dispersión de $H\alpha$ por el polvo coexistente con el gas⁽¹⁴⁾.

Esta experiencia muestra que es posible descubrir estrellas con líneas de emisión anchas con el Fabry-Pérot actuando éste como filtro.

VARIANTES DE MONTURAS

Existen monturas semejantes al reductor focal sin el colimador. En este caso los anillos son los de la imagen integrada del área de la nebulosa que cae sobre el telescopio. Aunque se pierde la información cinemática detallada de la región, esta montura permite la determinación de la longitud de onda y por lo tanto la velocidad radial del conjunto, así como la dispersión de velocidades, sin la desventaja de convoluciones. Es posible disminuir las áreas integradas, es decir, aumentar la resolución espacial usando un sistema óptico compuesto de una serie de lentes idénticas, llamada ojo de insecto, yuxtapuestas de tal modo que la imagen resultante sea un mosaico, proporcionando la velocidad y la dispersión en áreas correspondientes a cada lente pequeño.⁽¹⁵⁾ El caso está ilustrado en la Fig. 12.

En el Instituto Max Planck de Astronomía en Heidelberg están elaborando un esquema interesante para descubrir nubes en emisión extendidas y débiles, y así poder estudiar la cinemática de éstas. Para tal estudio se ha construido un etalón con diámetro mucho más grande que los usados comúnmente, el cual estará colocado fijo y horizontal en el foco de un celostato. La posición fija del etalón asegura la estabilidad de la separación

de los semi-espejos, condición necesaria para la buena calidad de las velo
cidades.

El campo está abierto a muchas innovaciones en el uso del etalón Fabry-Pérot, no sólo por la versatilidad intrínseca de la interferometría, sino también porque la inventiva de la mente humana parece no tener límites. En las palabras de Lord Byron con las que principia su famoso poema El Pri
sionero de Chillon:

El eterno espíritu de la mente no tiene cadenas...

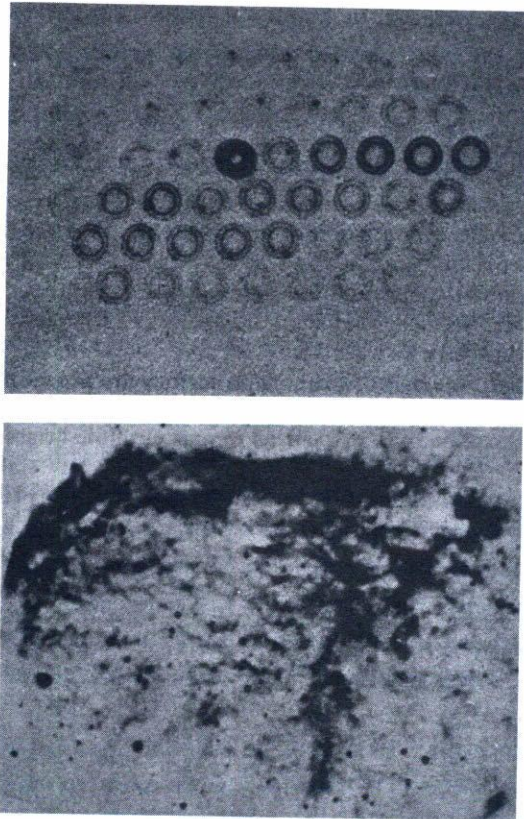


Fig. 12. La nebulosa en emisión NGC 6888 en $H\alpha$ y el correspondiente interferograma obtenido con una lente llamada "ojo de insecto". Los anillos intensos son debidos a $H\alpha$ y los más débiles son de $[NII]\lambda 6584$ (fotografía tomada de la Ref. 15). Imágenes negativas.

REFERENCIAS

1. Courtes, G., *Annales d' Astrophysique.*, 23 (1960) 115.
2. Sharpless, S. *Ap. J. Suppl. Series 4* (1959) 257
3. Pişmiş, P. *Bol. Obs. Tonantintla y Tacubaya.*, 4 (1965) 8.
4. Pişmiş, P. in *Non-Stable Phenomena in Galaxies*, IAU Symposium No. 29, Ed. Ambartzumian (Yerevan: Academy of Sciences of Armenian SSR), (1966) p. 429.
5. Pişmiş, P. in *Galaxies and Relativistic Astrophysics*, Proceedings First European Astr. Meeting, eds. Barbanis and J.D. Hadjidemetriod (Berlin: Springer) (1974) p. 133.
6. Simkin, S.M. *Ap. J.*, 195 (1975) 293.
7. Rubin, V.C., Ford, W.K., and Thonnard, N., *Ap. J.*, 225 (1978) L10.
8. Pişmiş, P. *Mass Loss and Evolution of O-Type Stars*, IAU Symposium No. 83, Eds. Conti and de Loore (1979) p. 43.
9. Pişmiş, P. and Hasse, I. *Ap. and Space Sci.*, 45 (1976) 79.
10. Schmidt, M. in *Galactic Structure*, eds. A. Blaauw and M. Schmidt, (Chicago: The University of Chicago Press, (1965) p. 513.
11. Georgelin, Y.M., and Georgelin, Y.P. *Astron. and Astroph.* 49 (1976) 57.
12. Georgelin, Y.P., and Georgelin, Y.M. *Astron. and Astroph.* 6 (1970) 349.
13. Pişmiş, P. *Memorias de la Segunda Reunión Regional Latinoamericana de Astronomía*, IAU. *Rev. Mex. de Astr.* 6 (1981) 65.
14. Pişmiş, P. *Rev. Mex. de Astron. y Astrof.* 2 (1977) 59.
15. Courtes, G. in *Vistas in Astronomy*. Ed. A. Beer (Pergamon Press) (1972) p. 81.