

Como las ve la Radioastronomía



Figura 1a: Las dos antenas de 30m del IAR, a 100m una de otra, y la sala de control en medio.

por Esteban Bajaja (*) (IAR),
para Revista Astronómica

Importancia de las Nubes de Magallanes como objetos astronómicos

Las Nubes de Magallanes (NM) son las galaxias más cercanas a nuestra Vía Láctea y, por lo tanto, son los objetos astronómicos extragalácticos más importantes para el estudio de todos los aspectos relacionados con la composición, dinámica y procesos evolutivos internos en galaxias. Esto no puede ser estudiado totalmente en nuestra propia Galaxia (por estar nosotros, como observadores, inmersos en ella) ni en otras galaxias externas, por su lejanía. Además, la cercanía de las Nubes entre ellas y con la Vía Láctea, permite hacer suponer la existencia de interacciones gravitatorias con efectos sobre los respectivos componentes, especialmente del material interestelar, efectos que han sido hallados ciertamente. Las NM son, por lo tanto, junto con el Centro Galáctico (CG) y muchas galaxias australes interesantes, los responsables de la gran importancia del hemisferio sur terrestre para la Astronomía y de la instalación en estas latitudes de observatorios astronómicos notables.

Esto ha sucedido, particularmente, en Chile, cuyo cielo, en ciertas regiones, es privilegiado desde el punto de vista de las condiciones atmosféricas. Los grandes observatorios ópticos instalados en ese país, ciertamente han dedicado una enorme cantidad de tiempo de observación a las Nubes de Magallanes, pero también la radioastronomía (RA) ha

tenido cabida allí, en forma de radiotelescopios para la observación de ondas milimétricas y sub-milimétricas, en particular para observar algunas transiciones entre niveles rotacionales del CO (monóxido de carbono). Estas frecuencias fueron utilizadas para relevamientos de las componentes moleculares en las NM.

El país que le ha dedicado la mayor atención a las NM, en forma permanente, es Australia. Pionero en el desarrollo de la radioastronomía en el mundo, fue el primer país en observarlas. En la Argentina, las Nubes fueron estudiadas ópticamente, en forma extensa, desde el Observatorio de Bosque Alegre, perteneciente a la Universidad Nacional de Córdoba; y radioastronómicamente, desde el observatorio del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), ubicado en el Parque Pereyra Iraola, partido de La Plata, en la provincia de Buenos Aires. Justamente, la instalación del primer radiotelescopio, en la década del '60 en el marco de un Convenio con el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington (CIW), fue también motivada en gran medida por la presencia de las NM y del CG en el hemisferio sur, además de todos los objetos visibles sólo desde estas latitudes. En esa época, sin embargo, los australianos acababan de publicar el relevamiento completo de ambas Nubes, lo cual retrasó el comienzo de la observación de esas galaxias.

En esta descripción radioastronómica de las NM utilizaremos los resultados de las observaciones radioastronómicas realizadas en los

países mencionados.

Advertencia: El presente trabajo no pretende ser exhaustivo ni mucho menos. La cantidad de trabajos realizados y publicados, en relación con las observaciones radioastronómicas del Sistema Magallánico, es tan grande que sólo hacer un compendio requeriría una enorme tarea y una extensión que excedería ampliamente el espacio aquí disponible. En la selección de los trabajos a describir se ha tratado, en lo posible, de incluir aquellos que contaron con la participación de algún miembro o ex miembro del IAR.

* * * *

La Nube Mayor de Magallanes (NMM) se encuentra en la constelación de Dorado. Las coordenadas ecuatoriales de su centro son: ascensión recta a $\sim 5^h 23^m$ y declinación $\delta \sim -69^\circ 45'$ (J2000), y las galácticas, $l = 248,5^\circ$, $b = -32,9^\circ$. Su distancia es de 49,4 kpc ($\sim 1,61 \cdot 10^5$ AL) y su diámetro es de $\sim 7^\circ$. Fue catalogada por de Vacouleurs y Freeman (1973) como SB(s)m. Aparenta tener un disco aplastado cuya inclinación sería de $\sim 35^\circ$ y en un ángulo de posición (o línea de nodos) de $\sim 168^\circ$. El lado más cercano a nosotros sería el lado este. El máximo de rotación diferencial es de ~ 62 km/s. Los movimientos del disco se ven complicados, aparentemente, por la presencia de un alabeo que introduciría movimientos no circulares y complicaría la determinación de la curva de rotación. La NMM es remarcable por tener una de la regiones HII más grandes conocidas (30 Dorado), de la cual parecen emerger brazos, y por la presencia de una Barra.

La **Nube Menor** (NmM) se encuentra en la constelación de Tucán, con centro en $\alpha \sim 0^h 52^m$, $\delta \sim -72^\circ 48'$, $l \sim 302,8^\circ$, $b \sim -44.3^\circ$. Su distancia es de 57,8 kpc ($\sim 1,88 \cdot 10^5$ AL) y tiene un diámetro de $\sim 3.5^\circ$. No posee un disco claramente definido y presenta una extensión considerable a lo largo de la visual (profundidad). Es más modesta que la NMM, aunque presenta también una región HII, la N66, que se considera como una versión más pequeña de 30 Dorado, y una Barra.

Las dos nubes tienen una baja abundancia de elementos pesados lo cual, justamente, origina su color azulado. En cuanto a la formación estelar por unidad de Masa total, en la NMM, con $0,14 M_\odot/\text{año}$, es 2,7 mayor que en la Vía Láctea; y en la NmM, con $0,038 M_\odot/\text{año}$, 1,6 veces mayor. Las relaciones gas a polvo en la NMM y en la NmM son 4 y 16 veces mayores, respectivamente, que en la Vía Láctea, o sea, el oscurecimiento en las NM es relativamente pequeño.

* * * *

A los efectos de que las descripciones de las observaciones radioastronómicas y de sus resultados sean comprensibles para quienes no estén familiarizados con la radioastronomía, describiremos brevemente cuales son las emisiones que se detectan en radiofrecuencias y los instrumentos que se utilizan con ese fin.

Las radiaciones provenientes del medio interestelar

Las radiaciones en el rango de radiofrecuencias (RF), provenientes del espacio exterior, que pueden ser detectadas desde la superficie de la Tierra se extienden, aproximadamente, desde 30 MHz ($\lambda = 10$ m) hasta unos 1000 GHz ($\lambda = 3$ mm). El mínimo, en la práctica, está determinado por los efectos de la ionosfera, y el máximo por la absorción de las moléculas en la atmósfera. Las radiaciones propiamente dichas provienen, en general, del medio interestelar (MIE), de transiciones entre niveles cuánticos de átomos o moléculas (emisión de líneas espectrales), o de la radiación de electrones acelerados (emisión en el continuo). Cada uno de estos tipos de emisión provee información acerca de diferentes parámetros del MIE.

Las líneas espectrales proveen información acerca de la cantidad de los respectivos átomos o moléculas observados, por unidad de superficie a lo largo de la visual (densidad columnar), en función de su velocidad radial y de sus condiciones físicas, principalmente de su temperatura cinética. La línea espectral más utilizada para la observación del medio interestelar, en la Vía Láctea y en galaxias externas, es la del Hidrógeno neutro (HI), por ser el elemento más abundante. Fue el primer elemento detectado radioastronómicamente, en 1952, luego de ser prevista esa posibilidad, en la frecuencia de 1420,406 MHz, por van de Hulst, en 1943. Esta línea se produce como resultado de la transición entre los niveles $1^2 S_{1/2}$, F_1 y F_0 de la estructura hiperfina del átomo de Hidrógeno neutro (HI) o, dicho de modo más práctico, cuando los momentos magnéticos del protón y del electrón en su nivel fundamental, cambian de orientación de igual a opuesta. La enorme utilidad de las observaciones de esta línea reside en la posibilidad de estimar la masa de HI y la cinemática del mismo en un objeto. En lo que se refiere a moléculas, existe una amplia variedad de ellas en el medio interestelar que pueden ser detectadas en radiofrecuencias, pero las más observadas son las del CO. Las transiciones entre niveles rotacionales de $^{12}\text{CO}(1-0)$, en 115 GHz, y $^{12}\text{CO}(2-1)$, en 230 GHz, pudieron ser observadas recién cuando se desarrollaron los receptores para estas frecuencias. Su utilidad reside en que, a partir de su intensidad integrada en velocidad, se puede determinar la del Hidrógeno molecular (H_2), al que es muy difícil detectar directamente.

Las radiaciones en el continuo pueden ser, esencialmente, de dos tipos: térmicas o no térmicas. Las primeras tienen lugar, generalmente, en ambientes ionizados por el efecto de fuentes intensas como estrellas en formación (regiones HII), donde las aceleraciones tienen lugar por efecto de las colisiones mutuas. Las segundas tienen lugar cuando electrones a velocidades relativistas, producidos, por ejemplo, en las cercanías de restos de supernova, son acelerados por campos magnéticos dando lugar a radiaciones del mismo tipo que las que se producen en los sincrotrones utilizados en la investigación nuclear. De allí su denominación de emisiones sincrotrónicas. Radioastronómicamente, las emisiones en el continuo

se caracterizan por la dependencia del flujo de radiación con la frecuencia: en las radiaciones térmicas la dependencia es pequeña, mientras que en las no térmicas, decrece exponencialmente con la frecuencia. Esta dependencia se mide con el valor del exponente al que se denomina índice espectral. Las radiaciones térmicas tendrán un índice espectral cercano a cero, mientras que en el caso de las no térmicas, su valor será del orden de $-0,7$. Estas últimas, debido al proceso físico que las origina, están, además, polarizadas en mayor o menor grado, dependiendo de la homogeneidad de las condiciones físicas del medio interestelar a lo largo de la visual y dentro del haz de recepción.

Las propiedades del medio interestelar que se pueden derivar de la medición de las radiaciones continuas son muchas, y son de utilidad para estudiar: las interacciones con el MIE en los entornos de los objetos mencionados; las estrellas en formación o en evolución, o luego de su explosión como nova o supernova; y para estimación, en los casos de emisiones no térmicas, a través de la polarización, de la intensidad y orientación de los campos magnéticos interestelares.

Los radiotelescopios

Para que las radiaciones descritas en la sección anterior puedan ser de utilidad con fines astronómicos, deben poder detectarse determinando la dirección de la cual provienen y su intensidad con la mayor precisión posible. Para ello se usan los radiotelescopios, que consisten en una antena direccional y un receptor de radiofrecuencias de alta sensibilidad. Las antenas direccionales típicas se basan, principalmente, en el uso de: a) un paraboloide de revolución, construido con un material que, a la frecuencia de trabajo, se comporte como un espejo; b) un alimentador en el foco del paraboloide que recibe las ondas reflejadas en la superficie dentro de un cono cuyas características direccionales están determinadas por el mismo alimentador; y c) un montaje que permite rotar el paraboloide alrededor de dos ejes perpendiculares.

El montaje ecuatorial, aquel en que uno de los ejes es paralelo al eje de rotación terrestre (eje polar), fue el diseño preferido durante las primeras décadas de la

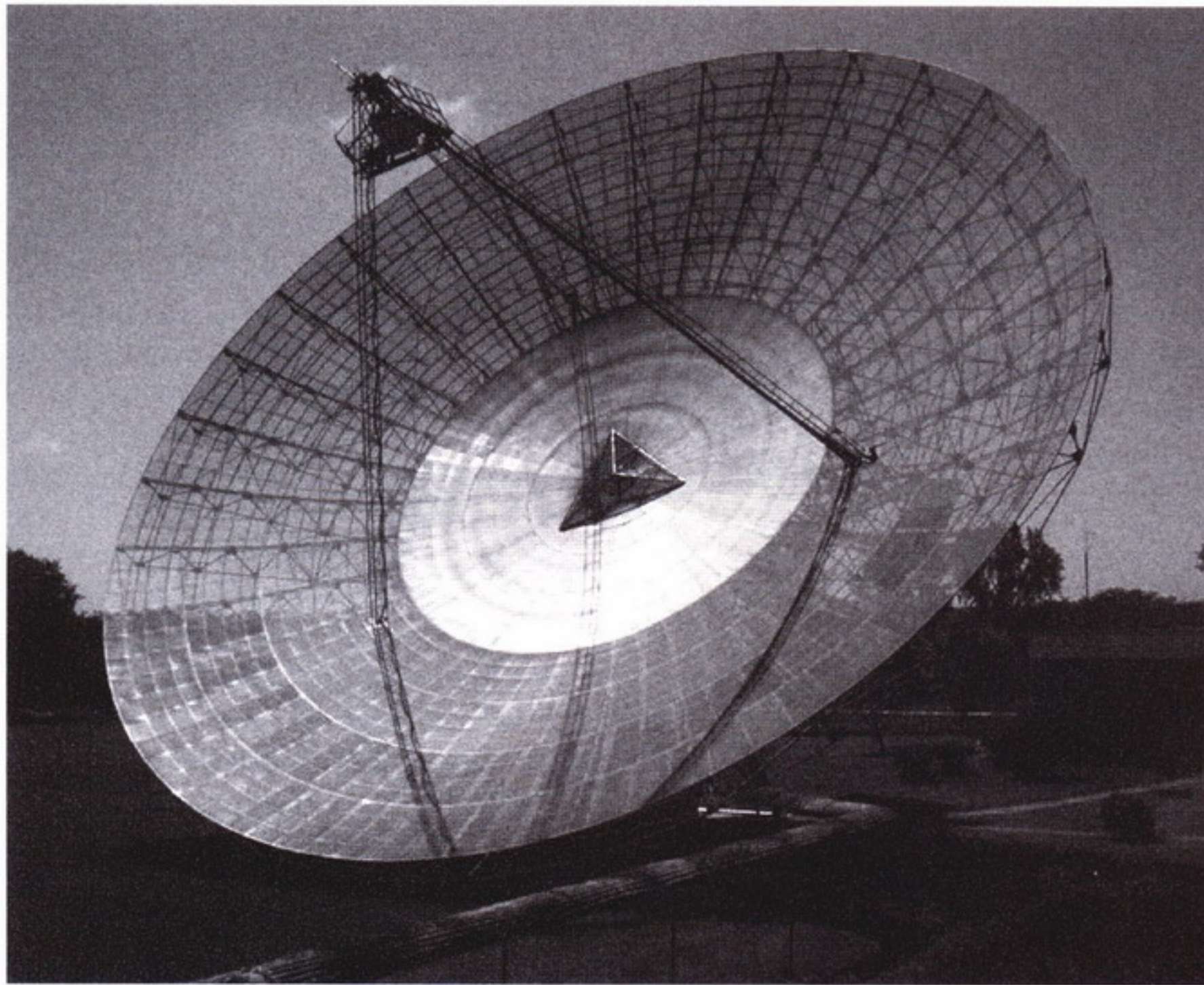


Figura 1b: La antena N° 1 del IAR apuntando al Polo Sur Celeste (PSC).

radioastronomía, por la facilidad en el seguimiento de las radiofuentes ya que, para compensar el movimiento de rotación terrestre hace falta sólo rotar el sistema alrededor del eje polar, utilizando un motor sincrónico. Las dos coordenadas usadas en este sistema son las de Ascensión Recta (alrededor del eje polar) y las de Declinación (alrededor del eje perpendicular al polar).

El otro montaje utilizado, de acuerdo con un algoritmo adecuado, sobre todo a partir del momento en que las computadoras hicieron posible el control de los motores, consiste en un eje horizontal y otro vertical, donde las coordenadas son el ángulo de elevación y el de azimuth. Éste es el montaje altazimuth, cuya construcción es más sencilla pero en el cual, para seguir una fuente, es necesario computar continuamente los valores de ambas coordenadas.

Los parámetros que importan en un radiotelescopio son el área efectiva de la antena y la sensibilidad del receptor. El área efectiva (A_e) de la antena es el área que efectivamente contribuye a coleccionar la energía que llega al receptor. El área efectiva para una dirección cualquiera, definida por dos coordenadas angulares ϵ y δ con respecto a la dirección axial, depende de éstas, y la función $A(\epsilon, \delta)$ es el diagrama de antena, que se aproxima a una gaussiana, y su ancho a potencia mitad es el AHMP que define las propiedades resolutivas de la ante-

na. En lo que se refiere a la sensibilidad del receptor, ésta está definida por el ruido generado por el sistema de antena y por los amplificadores, en particular los ubicados en la primera etapa de amplificación. Por esta razón, se utilizan en ellos semiconductores de muy bajo nivel de ruido intrínseco, enfriados a temperaturas cercanas al cero absoluto. Las potencias en radioastronomía se manejan en forma de temperaturas a través de la relación $P = k T$, donde k es la constante de Boltzman ($k = 10^{-23}$ watts/°K) y T es la temperatura, en grados Kelvin, que tendría un resistor que produce la misma potencia en forma de ruido radioeléctrico. Si S es el flujo de energía proveniente de una radiofuente $P = S A_e = k T$, o sea, $T = (S A_e)/k$, donde A_e y S dependen de ϵ y δ .

Las dificultades en la construcción y el costo de antenas parabólicas de gran diámetro originaron otro tipo de radiotelescopio que consiste, no en un disco simple, sino en dos o más de ellos usados simultáneamente. Este sistema múltiple también conoció dos etapas, la anterior y la posterior a la aparición de las computadoras. En la anterior a esa aparición (la analógica), se graficaba la oscilación que producía la interconexión entre dos antenas, debido a la interferencia entre las señales recibidas por las antenas y transmitidas a lo largo de la línea que las unía al receptor. El gran avance tecnológico en materia de uso de interferómetros

se produjo cuando la computación permitió realizar cálculos a alta velocidad en tiempo real y consistió en asignarle a cada Interferómetro el carácter de medidor de una frecuencia espacial, correlacionando las señales provenientes de cada par de antenas y midiendo la amplitud y la fase de la señal obtenida. Las tres coordenadas en el espacio de las frecuencias espaciales están definidas, en cada instante, por las componentes de cada línea de base, medidas en longitudes de onda. Estas componentes varían, a lo largo del día, por la rotación terrestre. Observando varios días, con varios interferómetros cuyas longitudes de líneas de base se modifican, cambiando de posición las antenas, se puede cubrir una región del espacio de las frecuencias espaciales con mediciones de amplitud y fase. La transformada de Fourier de todos estos puntos origina un mapa del cielo, en coordenadas angulares celestes, equivalente al que se obtendría con un radiotelescopio simple con un área definida por la suma de las áreas individuales, y cuya resolución angular queda definida por las longitudes de los interferómetros utilizados. En esto consiste la Síntesis de Apertura con Interferómetros de Correlación.

Las antenas del IAR

Las dos antenas del Instituto Argentino de Radioastronomía tienen ambas un paraboloide de 30 m de diámetro, con montaje ecuatorial, y pueden seguir una radiofuente durante un máximo de 4 horas (entre -2^h y $+2^h$ de ángulo horario) a declinaciones entre -10° y -90° (PSC). Fueron construidas principalmente para la frecuencia de 1420 MHz ($\lambda = 21$ cm), para observar la línea del HI, aunque la calidad de la superficie y la precisión del apuntamiento las habilita para llegar hasta frecuencias de 3000 MHz y quizás mayores. Además de la velocidad para seguimiento de radiofuentes, el movimiento se puede realizar también en $\dot{\alpha}$ y $\dot{\delta}$, a $10^\circ/\text{min}$. El área geométrica de la superficie del disco es de 707 m^2 y la eficiencia de apertura depende de la iluminación del alimentador. De ésta depende también el haz de la antena que, con una iluminación normal, tiene un AHMP de $\sim 30'$. La razón para construir dos antenas similares fue la intención original de tener también un interferó-

metro con línea de base variable entre 100 y 900 m a lo largo de la dirección N-S. La primera construida, que designaremos la antena N° 1, puede verse en la **Fig. 1b** apuntando en la dirección al PSC. Esta antena fue dedicada especialmente a la observación de líneas espectrales, muy en particular, del HI. La segunda antena (la N° 2) puede verse en la **Fig. 1a** en su ubicación a 100 m de la N° 1. Esta antena se utilizó principalmente para el relevamiento del continuo en 21 cm.

Primeras observaciones de HI en las NM realizadas desde Australia con el radiotelescopio de Parkes

Las primeras observaciones de la línea de 21 cm del HI en las Nubes de Magallanes fueron realizadas y publicadas en Australia en 1954 (dos años después de la primera detección de HI en el mundo), por Kerr, Hindman y Robinson, quienes descubrieron que las Nubes contenían una sorprendente cantidad de HI. Estas observaciones se hicieron con un buen receptor pero con una resolución angular pobre. Las primeras observaciones de las NM con el radiotelescopio de Parkes que, con un diámetro de 64 m, tenía un haz de 14,5', fueron publicadas en 1965 y 1966. El espectrómetro consistía en 48 canales de 7 km/s de ancho. La NMM fue observada por McGee y Milton en 1965, con barridos a declinación constante a 3'/min, cada 12' en \ddot{a} . Los perfiles revelaron la presencia de tres rangos diferentes de velocidades, centrados en 300, 273 y 243 km/s, y con una desviación estándar de 8 km/s. En la **Figura 2a** se muestran, con diferentes tonos de gris, la distribución de las tres componentes asociadas a grandes complejos de HI. En vista de la estructura espiral que ven en sus resultados, los autores suponen la existencia de dos subsistemas de brazos espirales, cada uno con una inclinación algo diferente, lo que explicaría las distorsiones de la curva de rotación. La masa total se estimó en $M_T = 6,1 \cdot 10^9 M_\odot$, y la masa de HI en $M_{HI} = 5,4 \cdot 10^8 M_\odot$, o sea que $M_{HI}/M_T = 0,09$.

La NmM fue observada con el mismo radiotelescopio por Hindman en 1966. En este caso los barridos a declinación constante se hicieron cada 6' en \ddot{a} . En la **Fig. 2b** se muestra la distribución de HI, que es menos irregular que en la NMM.

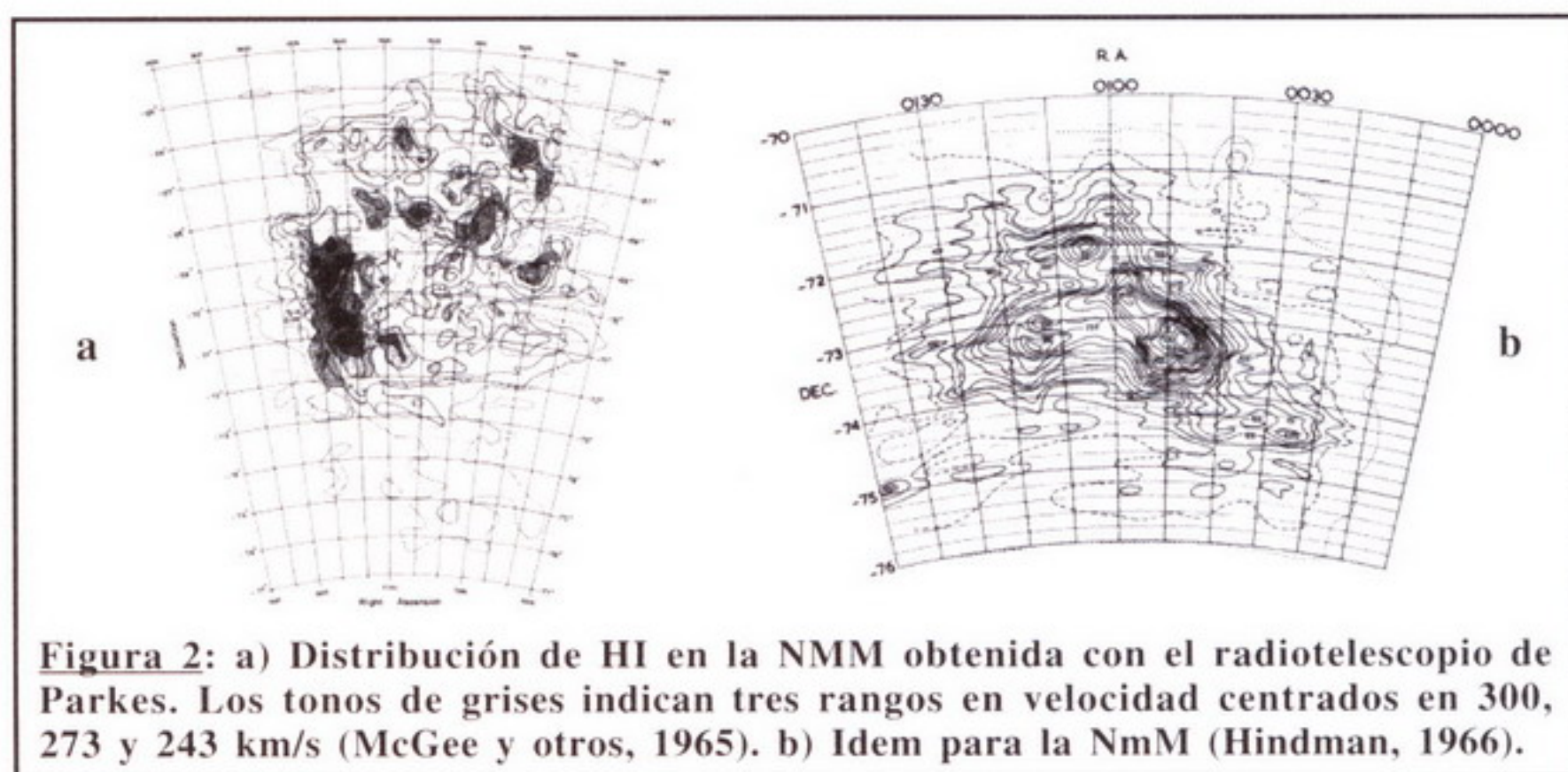


Figura 2: a) Distribución de HI en la NMM obtenida con el radiotelescopio de Parkes. Los tonos de grises indican tres rangos en velocidad centrados en 300, 273 y 243 km/s (McGee y otros, 1965). b) Idem para la NmM (Hindman, 1966).

La masa total, para esta Nube, se estimó en $M_T = 1,5 \cdot 10^9 M_\odot$, y la masa de HI en $M_{HI} = 4,8 \cdot 10^8 M_\odot$, o sea que $M_{HI}/M_T = 0,32$, una proporción mucho más alta que en el caso de la NMM. Este autor interpreta sus resultados como indicativo de que la NmM es un sistema altamente achatado rotando en un plano visto de canto (de ahí su profundidad).

En 1974 Mathewson dio a conocer, a través de varias publicaciones, la existencia de un filamento de HI que se extendía desde las NM hasta el Polo Sur Galáctico, y se conectaba con otro filamento, descubierto por Wannier y Wrixon en 1972, que se prolongaba hasta cerca del plano galáctico a longitud galáctica $\sim 90^\circ$ (**Fig. 3**). Las velocidades a lo largo del filamento varían en forma continua, lo cual confirma su identidad como un objeto extendido. Este descubrimiento dio lugar a innumerables trabajos observacionales y especulativos acerca de la verdadera extensión, de su distancia y del origen del mismo. Se lo denominó Corriente Magallánica (*Magellanic Stream*) (CM). El hecho de que se conectara con las NM y se extendiera a lo largo de casi todo el hemisferio sur galáctico, necesariamente inducía a modelar la historia de las NM como lo hicieron, por ejemplo, Murai y Fujimoto en 1980, y Tanaka en 1981. La existencia de la Corriente Magallánica podría deberse a la

interacción gravitatoria con la Vía Láctea, o ser una estela natural que describía la órbita de las NM. En todo caso contenía información acerca del pasado de las Nubes.

Observaciones desde el IAR

El primer receptor con que contó el IAR, entre 1966 y 1980, consistía aún en un sistema a válvulas electrónicas y, para la observación del HI galáctico, se disponía de un espectrómetro que consistía en un banco de 56 filtros de ~ 10 kHz (~ 2 km/s) de ancho, sintonizados en frecuencias consecutivas espaciadas en unos 20 kHz (~ 4 km/s). Para tener valores de temperatura cada ancho de canal, se utilizaban dos frecuencias de oscilador local separadas en 10 km/s, con lo que se obtenían 104 valores consecutivos espaciados en 2 km/s. La lectura de las intensidades de la señal mezclada, amplificada, filtrada y detectada (con un detector cuadrático), se realizaba con una llave mecánica rotativa que leía sucesivamente cada señal y la mandaba a un registrador y a un perforador de tarjetas. Un sistema de conmutación periódica, entre la señal de antena y una fuente de ruido calibrada, permitía calibrar aquella. La temperatura de ruido del sistema, que define la sensibilidad del radiotelescopio, era de 250 K.

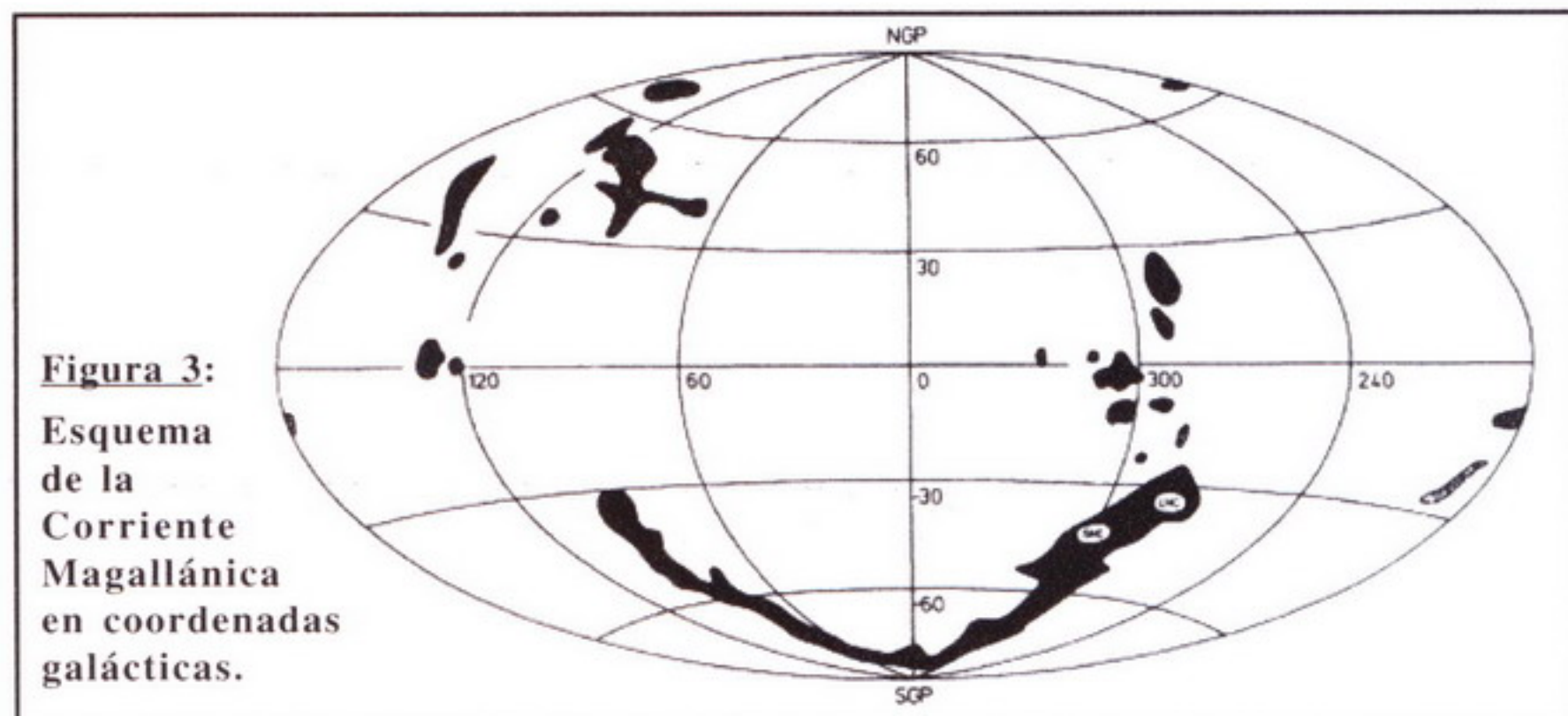


Figura 3: Esquema de la Corriente Magallánica en coordenadas galácticas.

El primer trabajo sobre la NmM en el IAR (Loiseau y Bajaja, 1981) se realizó con este receptor y con la antena de 30 m que, con el alimentador con el que se contaba en ese momento, tenía un haz prácticamente circular con el AHPM = 30'. A pesar de haber sido ya observada por los australianos (AHPM=14,6', $\Delta V=7$ km/s, $\sigma=1.4$ K), el hecho de que se usara una resolución en velocidad de 2 km/s permitía ganar información sobre las propiedades cinemáticas del HI en la galaxia, sobre todo teniendo en cuenta que las irregularidades observadas en la distribución y en la cinemática del HI, habían sido atribuidas a la presunta existencia de una barra a lo largo de la visual o de un alabeo en la dirección de la NMM. Las observaciones consistieron en barridos en α con la antena detenida (en tránsito), entre 0 y 2^h, a δ constante, entre -76° y -70° cada 0,25° (1/2 AHPM), de modo de tener un muestreo completo. El tiempo de integración fue de 90 seg., lo que representa 0,37° en α y 0,11° en el cielo. Mediante una convolución con una gaussiana de 0,38° de ancho mitad se produjo una grilla de puntos de 0,20° x 0,20° en el cielo, se logró una resolución angular final de 0,72° x 0,63° en las direcciones E-O y N-S, respectivamente.

Los resultados se tradujeron en mapas de distribución de HI (Fig. 4a), que puede compararse con la Fig. 2a, y del campo de velocidades medias (Fig. 4b). A partir de este último se obtuvo la curva de rotación (velocidades a lo largo de una línea que pase por el centro y en la dirección del ángulo de posición) que se muestra en la Fig. 4c. La velocidad a lo largo de la visual del centro de la NmM, que representa la de toda la galaxia, resultó ser de 154 km/s con respecto al LSR y de 22 km/s con respecto al centro galáctico. La velocidad de rotación máxima proyectada a lo largo de la visual obtenida era de 36 km/s. Los perfiles muestran, en general, más de una componente indicando la presencia de más de una nube de HI a lo largo de la visual, lo cual confirmaba la extensión a lo largo de la misma, pero complicaba la interpretación de las observaciones. La falta de información acerca de la distancia a la cual se encuentran las nubes de HI detectadas, hace necesario recurrir a las observaciones ópticas para determinarlas a través de correlaciones no siempre evidentes.

La NmM fue observada también en el continuo (Loiseau y Bajaja, 1985). Para este trabajo fue

utilizada también la antena N° 1 del IAR con la segunda versión del receptor que ya incorporaba componentes de estado sólido de bajo nivel de ruido, y con enfriamiento por Nitrógeno líquido en sus primeras etapas de radiofrecuencias. La banda de paso para estas observaciones era de 40 MHz, centrada en 1410 MHz, pero se incluyó un filtro de 2 MHz de ancho, centrado en la velocidad de la NmM, para evitar la contribución de las emisiones de HI. La antena utilizaba un alimentador que atenuaba más la señal en sus bordes, disminuyendo la contribución de las reflexiones en tierra. Esto hizo que el ancho del haz se incrementara a 34'. La temperatura de ruido de sistema, resultante para esta configuración, era de 83 K.

El procedimiento para la observación fue también de barridos, sólo que en este caso se realizó en δ , a α constante, a 15°/min, entre -79° y -76°. Se hicieron seis barridos consecutivos en 1981 y otros cinco en 1983 para cada α entre 0° y 35°. El promedio de estos barridos permitió obtener un nivel de ruido de 10 mk (rms). Las Figuras 5a y b permiten apreciar los perfiles y el diagrama de contorno obtenidos con estas observaciones. La comparación con los resultados de Haslam y otros (1982) en 408 MHz, permite apreciar la similitud entre las distribuciones en ambos relevamientos, que presentan una zona central y una extendida, y determinar, una vez convolucionado el mapa en 1410 MHz, de modo de tener la misma resolución angular de 48', el índice espectral α para cada zona. Para la zona central, este índice resultó ser de -0.56, y para la extendida, de -0.98, más similares a los de galaxias espirales que a los de galaxias irregulares, para las cuales el espectro es más plano. En la parte central de la NmM se encuentran emisiones concentradas térmicas y no térmicas, asociadas a regiones HII y restos de supernova, respectivamente, y una emisión extendida no térmica, probablemente debida a electrones difundidos desde la zona central e interactuando con los campos magnéticos extendidos.

La NMM no fue observada en esta época, ni en el continuo ni en la línea de 21 cm. Ambas Nubes, sin embargo, fueron observadas, junto con el resto de la parte del hemisferio sur celeste visible con las antenas del IAR, al realizar los relevamientos respectivos de HI con la antena N° 1, y del continuo en 1435/1420 MHz con la antena N° 2 del IAR.

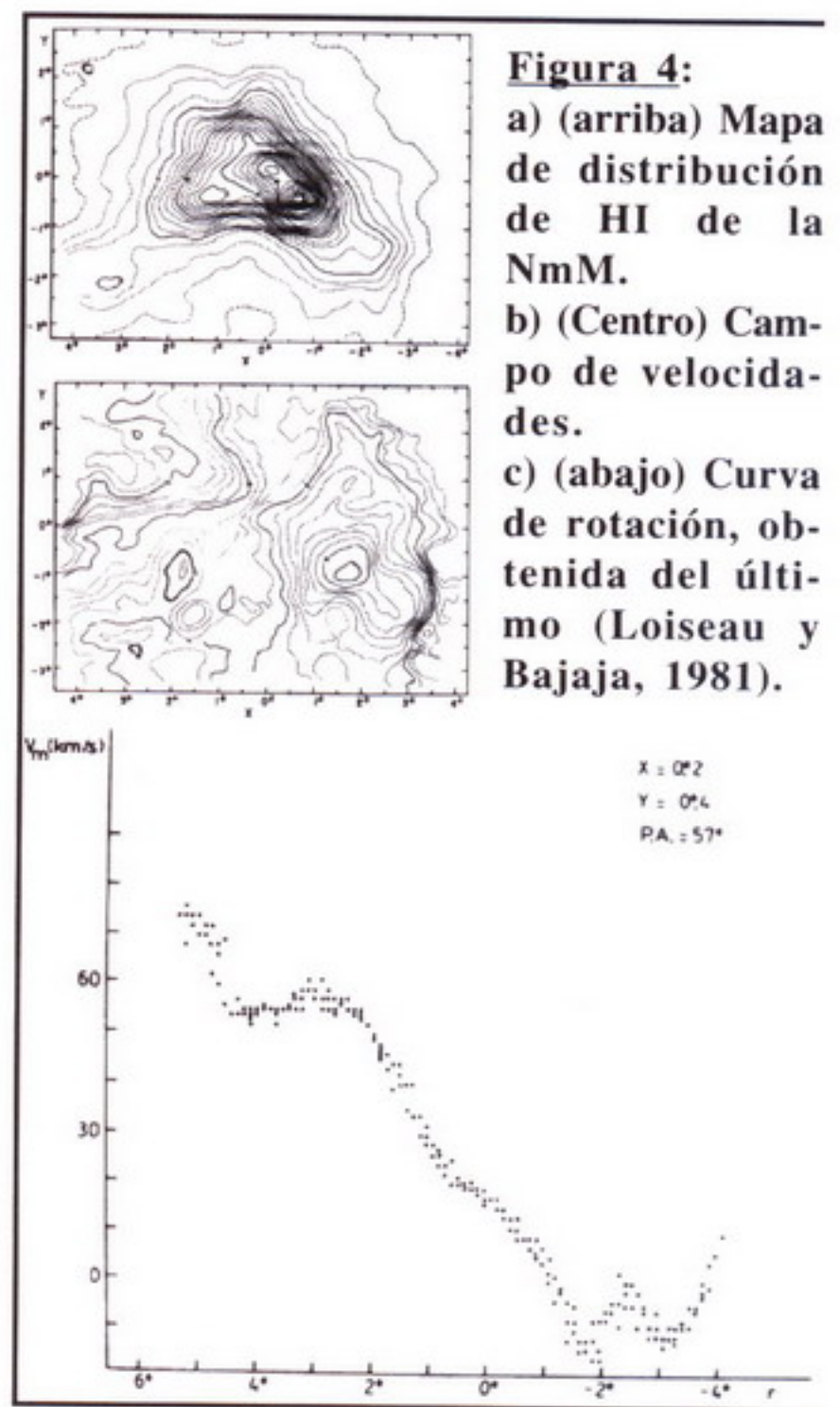


Figura 4:
a) (arriba) Mapa de distribución de HI de la NmM.
b) (Centro) Campo de velocidades.
c) (abajo) Curva de rotación, obtenida del último (Loiseau y Bajaja, 1981).

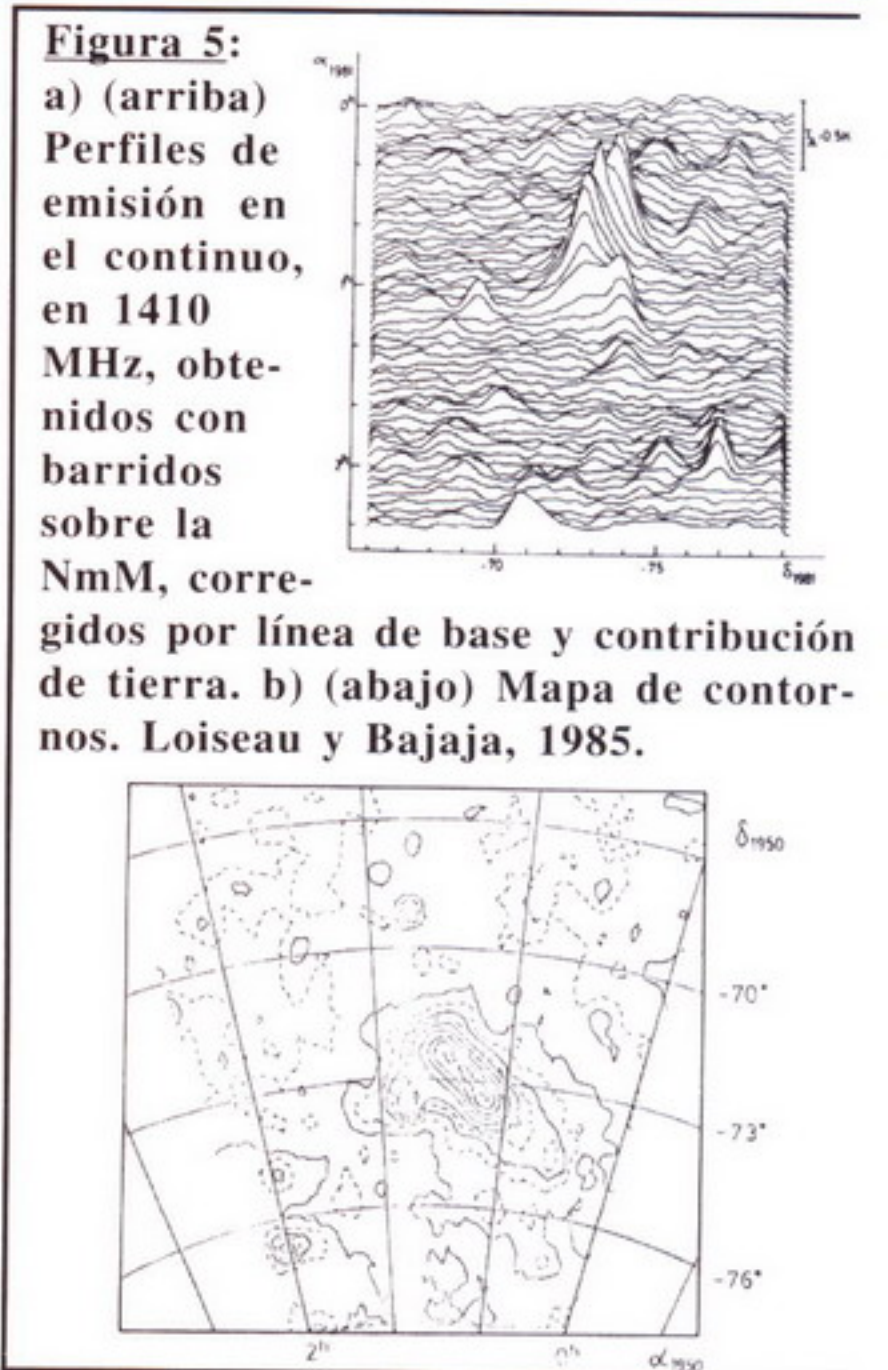


Figura 5:
a) (arriba) Perfiles de emisión en el continuo, en 1410 MHz, obtenidos con barridos sobre la NmM, corregidos por línea de base y contribución de tierra. b) (abajo) Mapa de contornos. Loiseau y Bajaja, 1985.

Observaciones más recientes de las NM en el continuo, realizadas desde Australia

Las observaciones de las NM en el continuo en Australia comenzaron, como en el caso de las observaciones de HI, muy temprano en la historia de la radioastronomía. El primer relevamiento, en la frecuencia de 85,5 MHz, fue hecho por Mills en 1955. Mathewson y Healey (1964) lo hicieron en 408 y 1410 MHz con el radiotelescopio de Parkes, al mismo tiempo que McGee y Milton observaban el HI en la NMM. Hubo varios relevamientos posteriores en varias frecuencias, pero aquí nos referiremos a las observaciones rea-

lizadas por Haynes y otros (1986, 1991) con el radiotelescopio de Parkes. Un primer relevamiento se realizó en la frecuencia de 1400 MHz (Haynes y otros, 1986). El AHMP del haz de Parkes era de 15,0' y se usó un polarímetro para determinar los parámetros I, Q y U de Stokes. En las **Figuras 6a y b** se muestran los resultados para la NMM y NmM, respectivamente. A este relevamiento siguieron otros tres a las frecuencias de 2,45, 4,75 y 8,55 GHz (Haynes y otros, 1991). Las **Figs. 7a, b y c** muestran los diagramas de contorno para la NMM, y las **Figs. 8a, b y c** para la NmM, a las frecuencias mencionadas y en el mismo orden. Las intensidades de las polarizaciones lineales, en la NMM, para las frecuencias de 2,45 GHz y 4,75 GHz, se muestran en las **Figs. 9a y b** respectivamente.

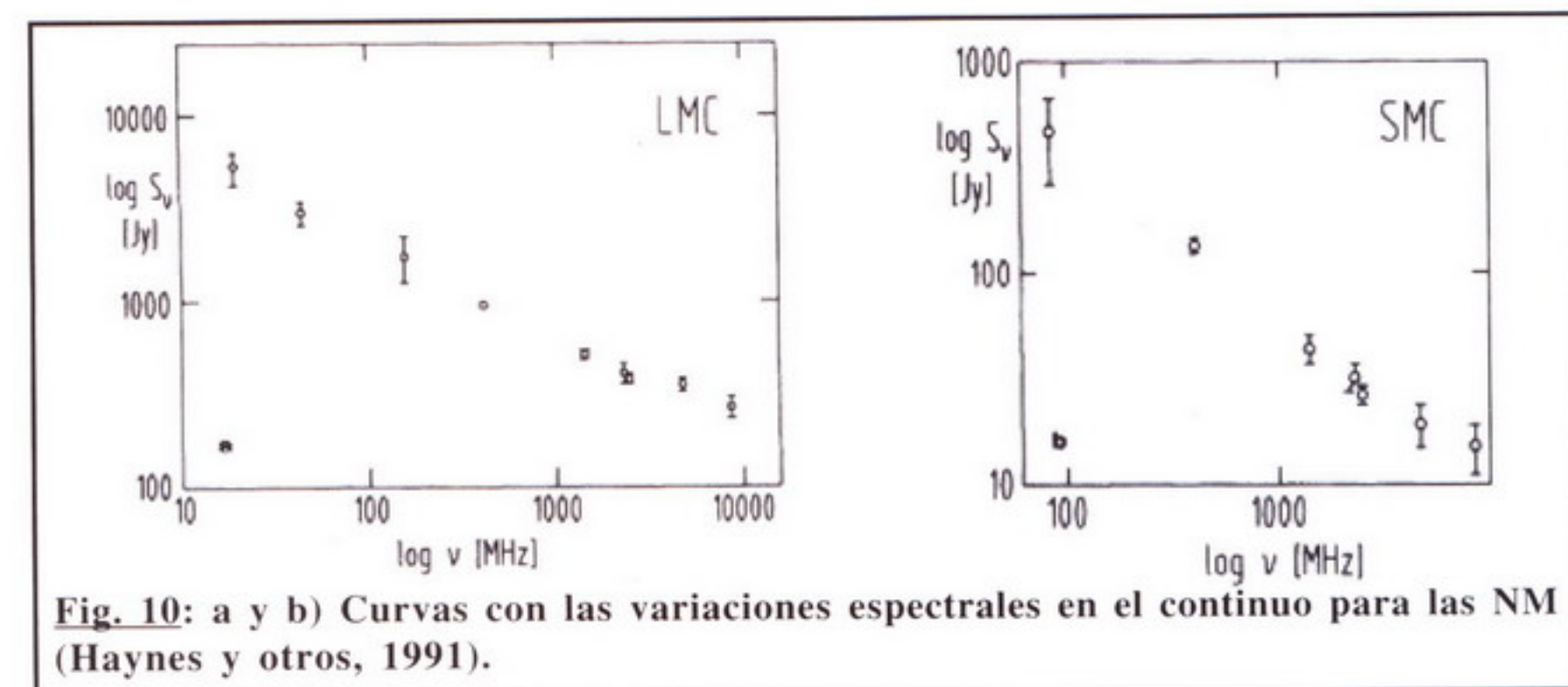
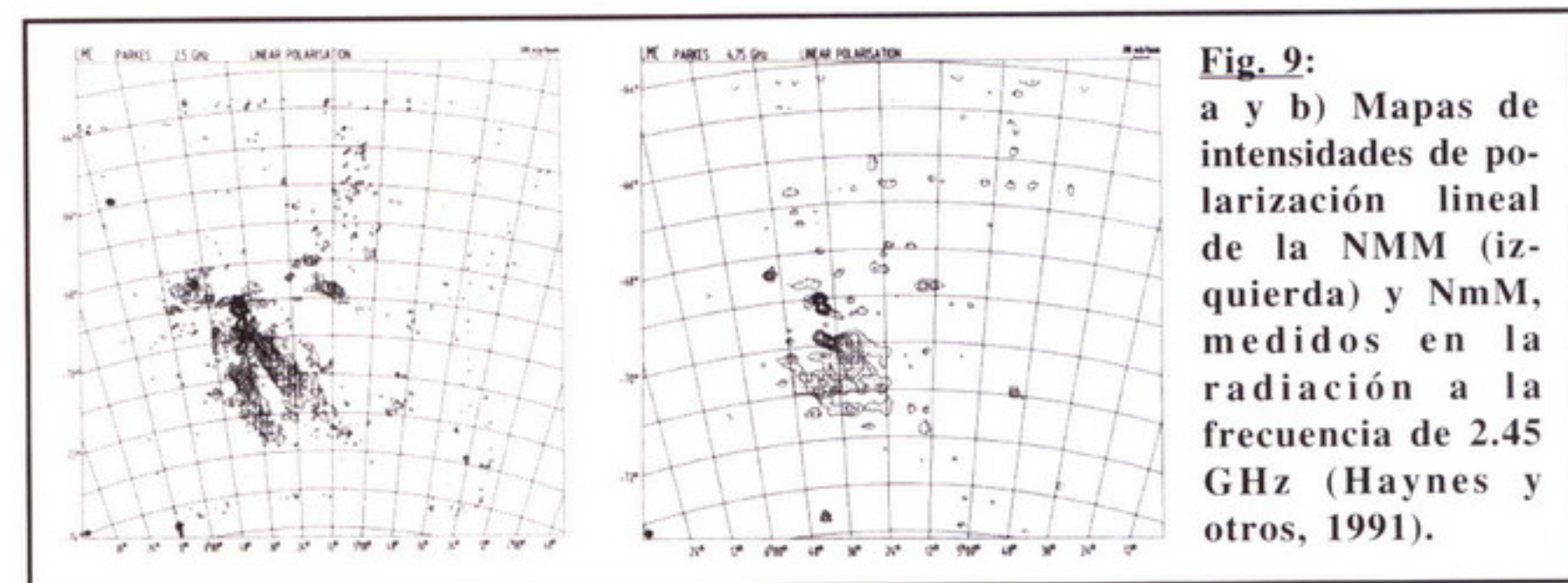
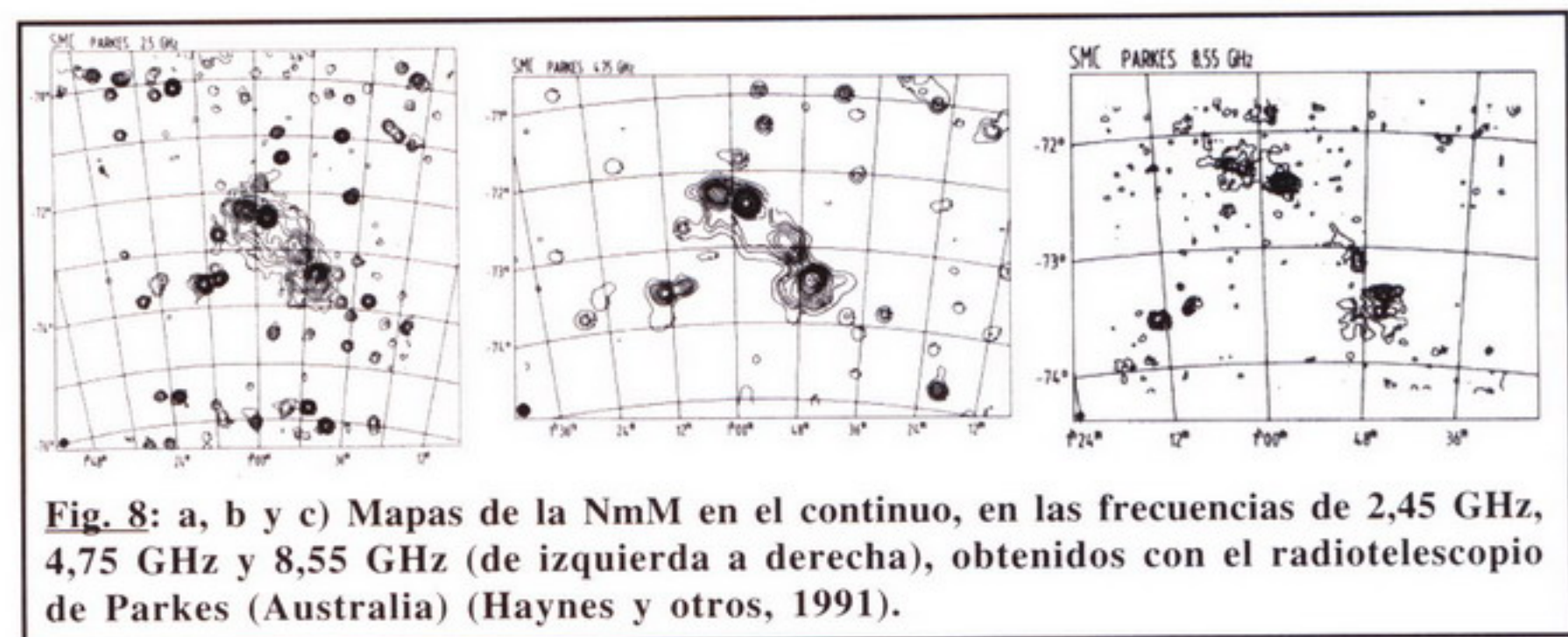
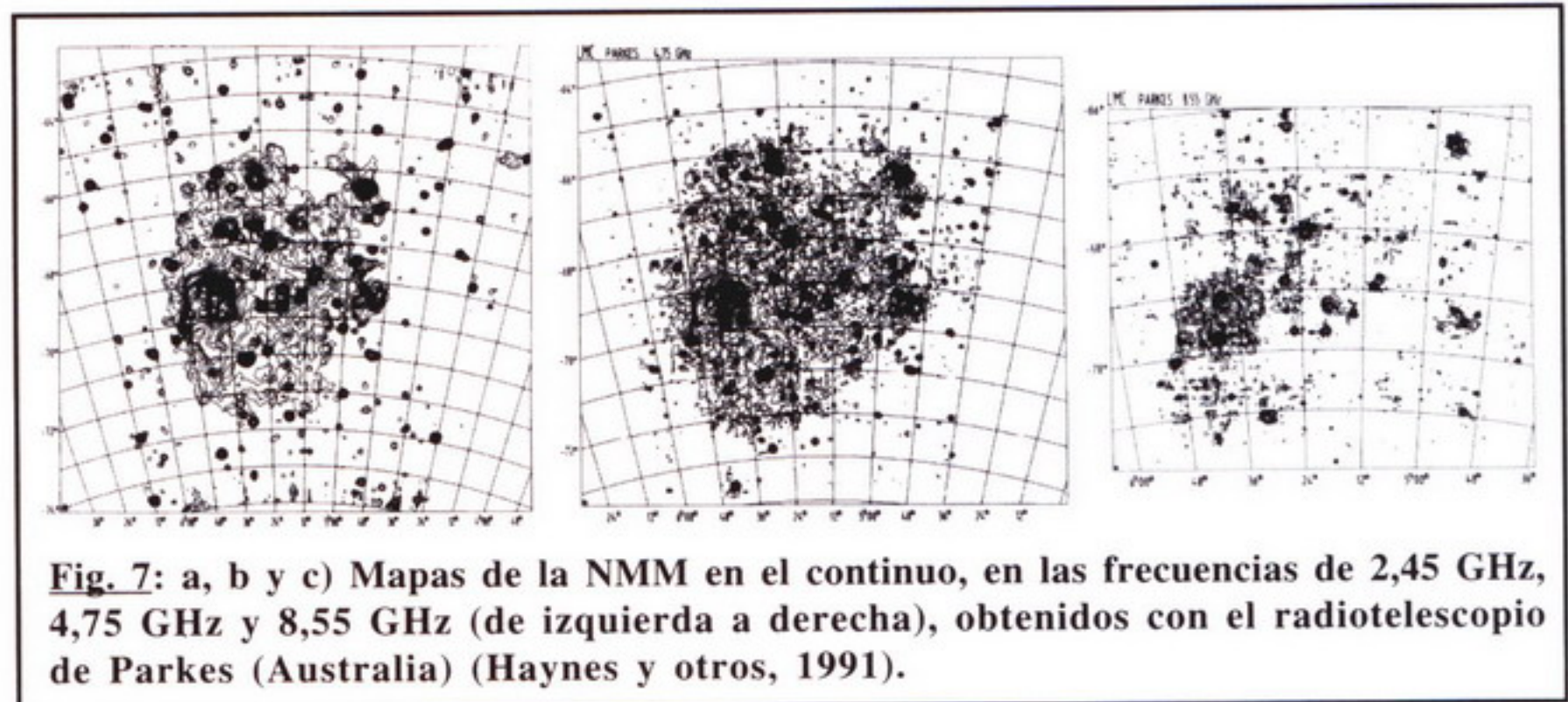
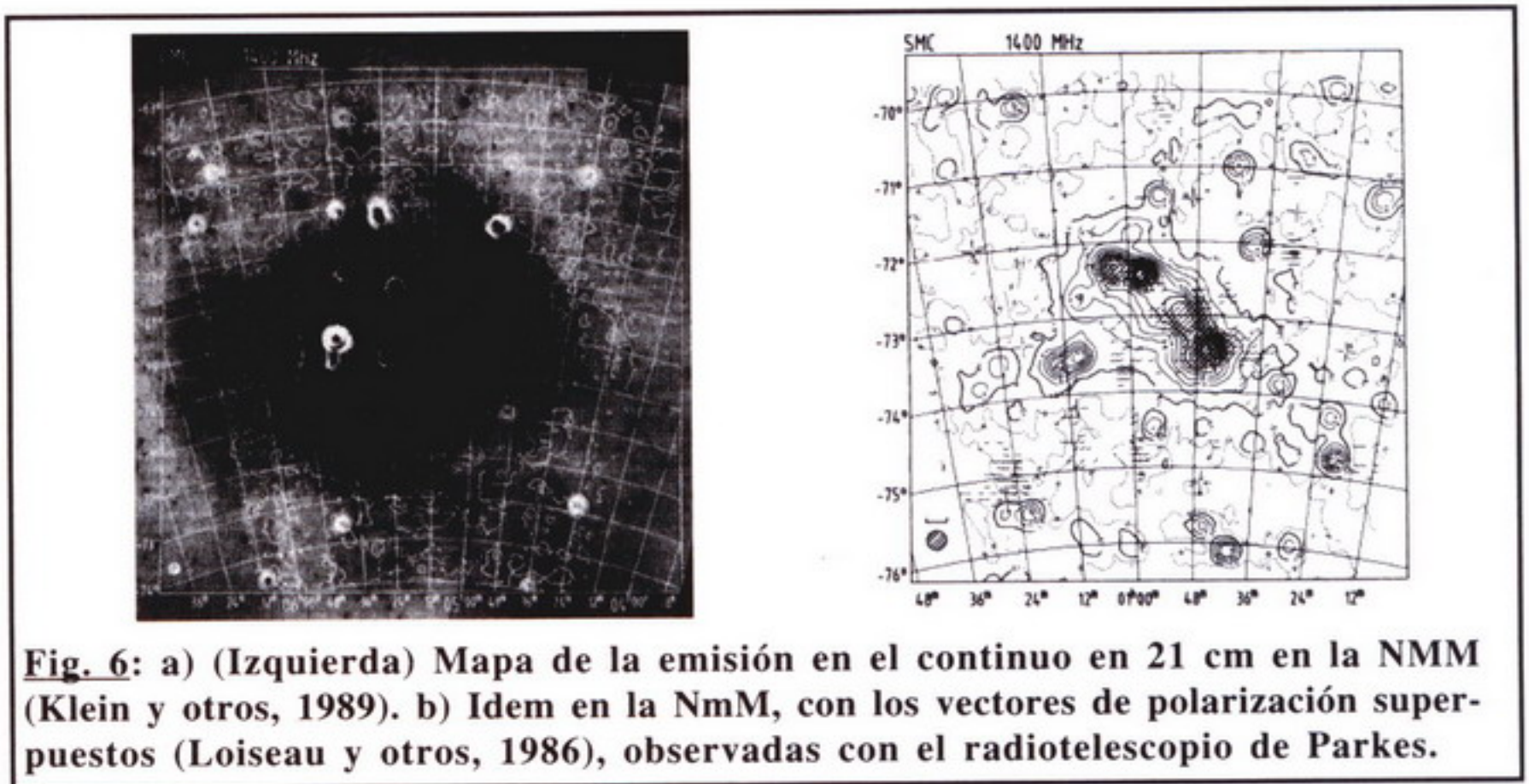
Con la recopilación de observaciones realizadas en el continuo a diferentes frecuencias desde 1959, se pudieron graficar los espectros en el continuo entre 20 MHz y 8,55 GHz para la NMM (**Fig. 10a**), y entre 85,5 MHz y 8,55 GHz para la NmM (**Fig. 10b**), integrando las intensidades sobre los respectivos mapas. Los índices espectrales que se derivan de estas dos figuras indican que, en la NMM, predomina la radiación sincrotrónica a bajas frecuencias, con un índice espectral de $-0,7$, mientras que a las frecuencias más elevadas comienza a ser importante la contribución térmica. De todos modos, el valor de $-0,7$ es algo mayor al que muestran las galaxias espirales normales ($\sim -0,88$), mientras que la contribución térmica es algo mayor y más bien similar a la de galaxias Irregulares. El índice espectral para la NmM es más inclinado ($-0,85$) y se vuelve térmico a las frecuencias más elevadas.

Relevamientos del continuo y de HI en el hemisferio sur desde el IAR

La antena N° 2 del IAR fue utilizada, entre 1987 y 1994, para el relevamiento del hemisferio sur en el continuo, en 21 cm, y la antena N° 2, entre 1994 y 1997, para un relevamiento similar del HI. En ambos casos se permitieron obtener, con trabajos similares del hemisferio norte, relevamientos totales del cielo en el continuo y en HI. Dentro de estos relevamientos del hemisferio sur están incluidas la NM.

Continuo en 1435 – 1420 MHz

La sensibilidad, rango dinámico (> 40 dB), estabilidad en la calibración, protección contra interferencias locales



de HI y del Sol y posibilidad de medir los parámetros de Stokes para medir polarización fueron necesarios para poder llevar a cabo este relevamiento (Testori y otros, 2001; Reich, Testori y Reich, 2001). El AHMP era de 35,4' y el cabezal admitía las dos componentes de polarización, linear o circular. El proyecto fue llevado a cabo en cooperación con el *Max-Planck-Institut für Radioastronomie*. La temperatura de sistema era de 90K. Los barridos se hicieron en Δ entre -10° y -90° a $10^\circ/\text{min}$ sobre el meridiano, por lo que el desplazamiento en Δ era de 8^m , de comienzo a final del barrido. Los barridos se hicieron en ambas direcciones cada $15'$ en Δ con lo cual se tuvo un sistema entrelazado con muestreo completo. La convolución final produjo una base de datos con una temperatura de ruido de 0,050 K.

En las **Figs. 11a y b** se muestran las partes del mapa obtenido que contienen la NMM y la NmM respectivamente. Estos datos se complementan con los de polarización y están en proceso de estudio.

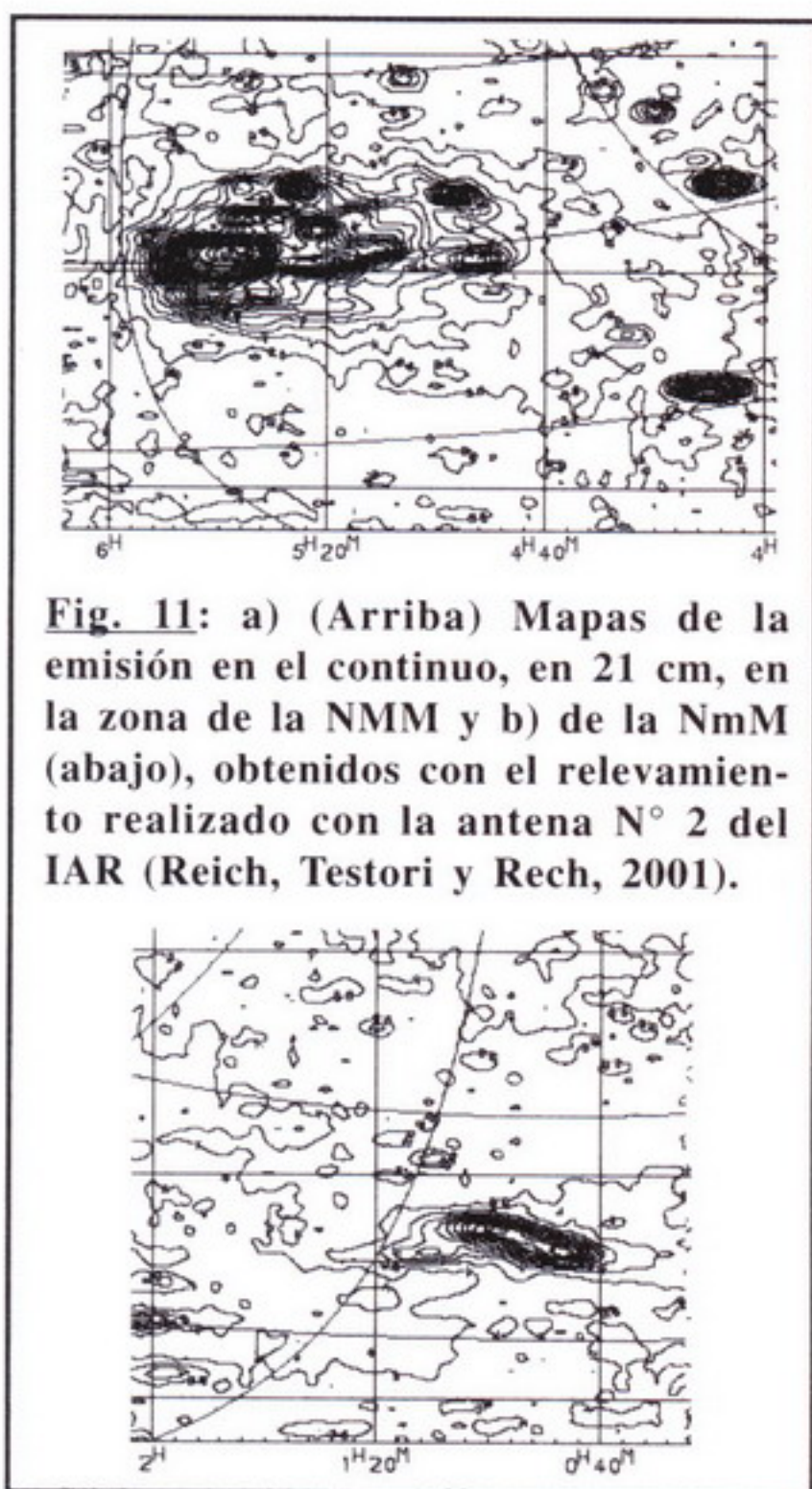


Fig. 11: a) (Arriba) Mapas de la emisión en el continuo, en 21 cm, en la zona de la NMM y b) de la NmM (abajo), obtenidos con el relevamiento realizado con la antena N° 2 del IAR (Reich, Testori y Rech, 2001).

HI

Las observaciones se realizaron con la tercera y última versión del receptor que incluye: amplificadores de muy bajo nivel de ruido en el cabezal, enfriados a 4 K con He líquido; osciladores locales controlables por computadora; un espectrómetro consistente en un autocorrelador digital de 1008 canales; un encoder digital para la lectura de las coordenadas de apuntamiento de la antena, y una

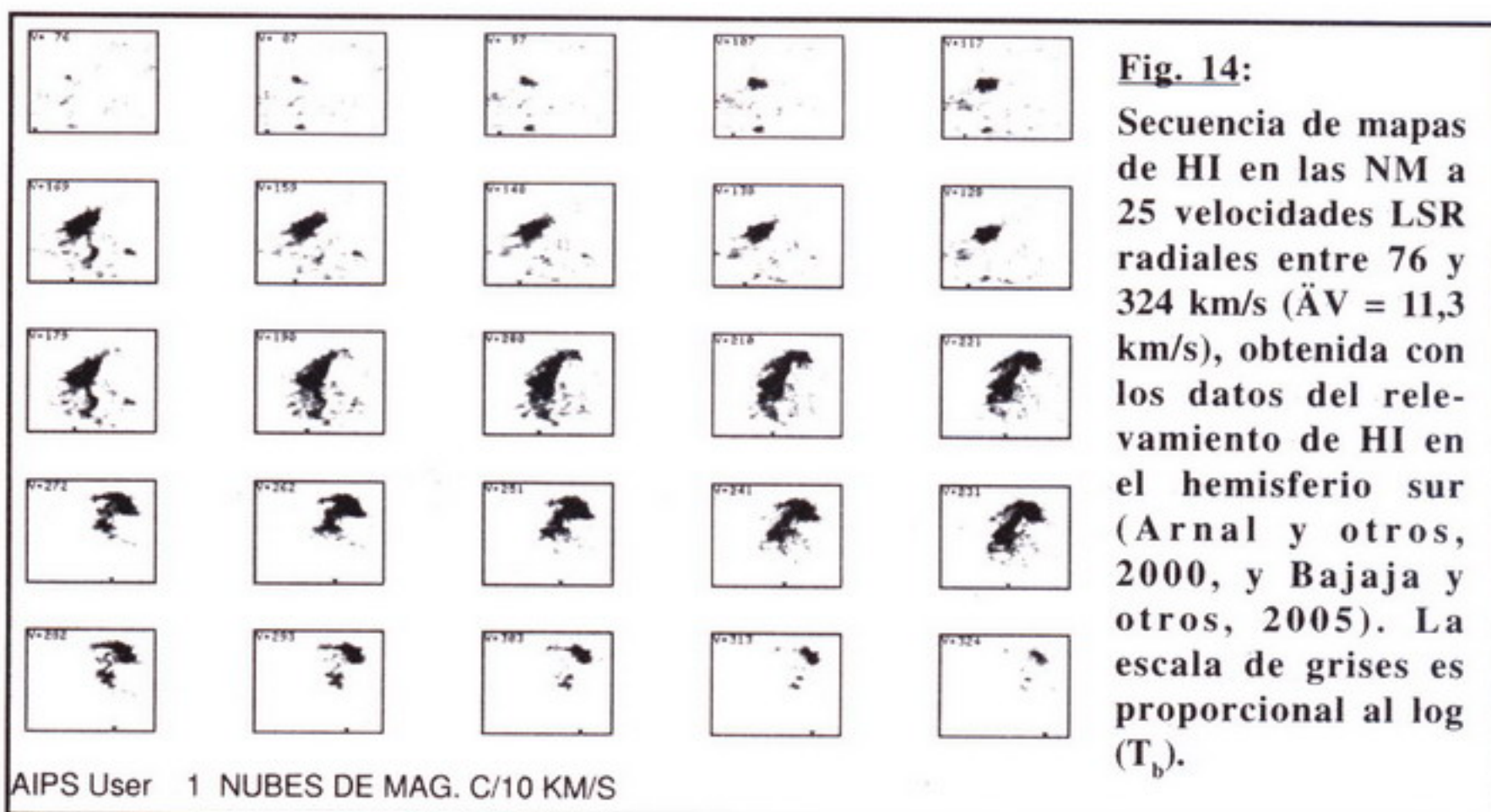


Fig. 14: Secuencia de mapas de HI en las NM a 25 velocidades LSR radiales entre 76 y 324 km/s ($\Delta V = 11,3$ km/s), obtenida con los datos del relevamiento de HI en el hemisferio sur (Arnal y otros, 2000, y Bajaja y otros, 2005). La escala de grises es proporcional al $\log(T_b)$.

computadora para el control de las diferentes etapas del receptor y de la posición de la antena; la calibración de la señal recibida, y la transformada de Fourier de la salida del correlador. La temperatura de sistema es de ~ 35 K.

Con este receptor se observaron los puntos distribuidos en una grilla de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ en el cielo (en l y b), entre $\Delta = -25^\circ$ y $\Delta = -90^\circ$. Fueron obtenidos 50980 perfiles con una resolución en velocidad de 1,27 km/s, una separación entre canales de $\sim 1,0$ km/s y un tiempo de integración suficiente para tener un ruido $\sigma \leq 0,070$ K. (Arnal y otros, 2000; Bajaja y otros, 2005).

Este relevamiento se juntó con uno similar realizado desde el hemisferio norte para tener un relevamiento de todo el cielo con parámetros de antena y de receptor similares (Kalberla y otros, 2005). En las **Figs. 12 a y b (**)**, pueden verse los resultados de esta integración para dos rangos de velocidades, de -400 a -100 km/s, donde puede apreciarse la Corriente Magallánica, y de 100 a 400 km/s, donde aparecen las Nubes con el puente entre ellas y las diversas extensiones de HI partiendo de las mismas. En la **Fig. 13 (**)** se muestran, para el intervalo de velocidades 100 a 400 km/s, a) la distribución de HI en las NM en una proyección esférica; b) una vista ampliada de las NM mismas y c) las velocidades medias del HI. Las velocidades medias tienen un valor relativo debido a la presencia de varias componentes de velocidad a lo largo de la visual. En la **Fig. 14** se muestran los mapas individuales para 25 canales separados en ~ 10 km/s, que indican no sólo la variación en función de la velocidad radial, sino también la presencia de diferentes componentes en algunas zonas.

(**) Figuras 12 y 13 en la Contratapa de esta edición.

Observaciones de HI a muy alta resolución con el ATCA

Australia posee un interferómetro de correlación, el *Australian Telescope Compact Array* (ATCA), que fue utilizado para observar las NM en la línea de 21 cm del HI, con líneas de base hasta 375 m. Con esta configuración, el haz sintetizado tiene un AHMP de $\sim 1,5'$. En la **Fig. 15** se muestra un mapa con la distribución de HI en la NMM obtenido por Kim y otros (1996), para mostrar la cantidad de detalles que aparecen a esta resolución que hacen más completa la información pero más compleja su interpretación. Es evidente que esta tecnología es la indicada para poder estudiar fenómenos asociados a objetos individuales. Cada mapa provee así mucho material para trabajar. La alta resolución también se vuelve necesaria para correlaciones con observaciones realizadas con discos simples pero en ondas milimétricas y sub-milimétricas, como es el caso de las observaciones del CO con paraboloides de 15 m (SEST, en La Silla, Chile) o 30 m (IRAM, Granada, España).

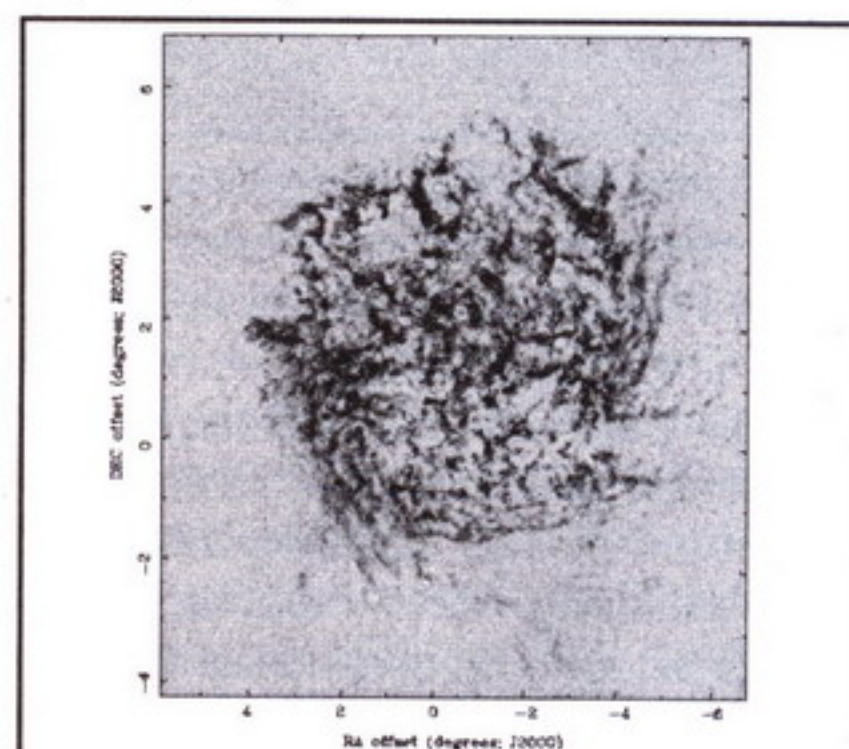


Fig. 15: Distribución de HI en la NMM obtenido con el Interferómetro de correlación de Australia (ATCA). Una enorme cantidad de detalles se puede detectar con una resolución angular de $\sim 1,5'$ (Kim y otros, 1996).

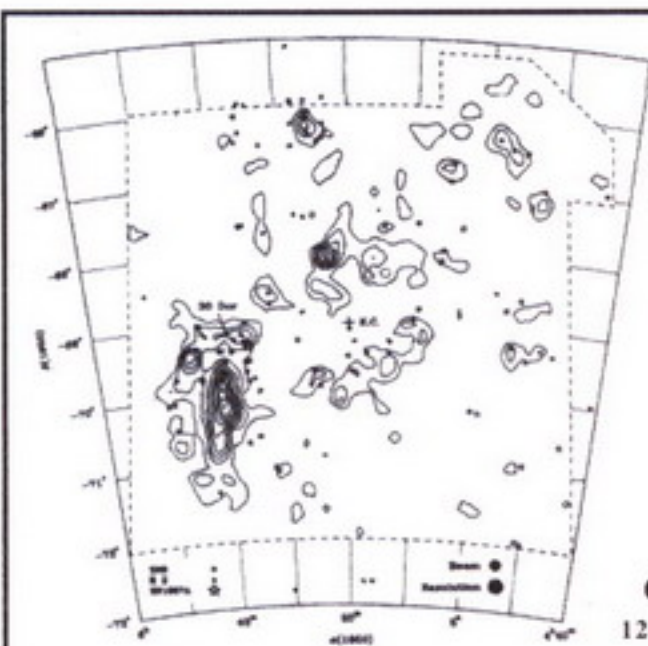
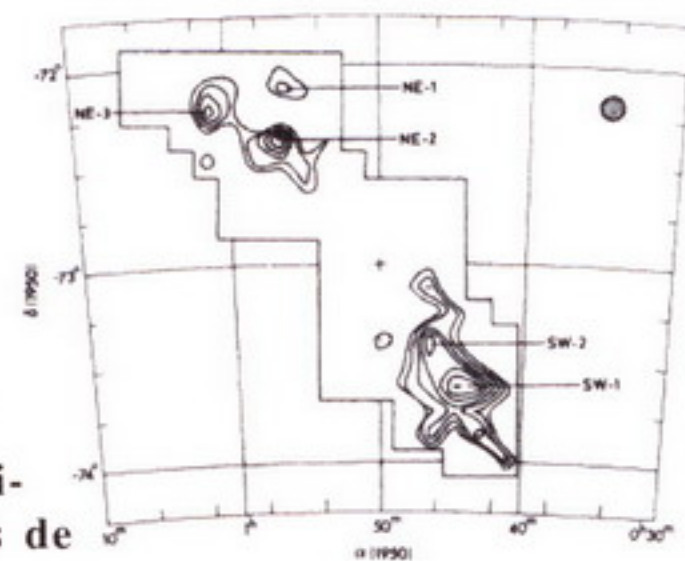


Fig. 16: a y b)

Mapas de intensidades de emisiones de $^{12}\text{CO}(1-0)$, integradas en




velocidad, de la NMM (izquierda) y de la NmM, obtenidos mediante observaciones con la antena de 1,2 m de la Universidad de Columbia, instalada en Chile (Cohen y otros, 1988). Los mapas representan la distribución de Hidrógeno molecular (H_2) si se utiliza el factor de conversión de CO a H_2 correcto.

Observaciones de CO

Como se ha dicho en el párrafo anterior, las observaciones de las líneas del CO con telescopios grandes producen mapas de alta resolución angular, pero requieren una enorme cantidad de tiempo de observación para un relevamiento completo de objetos de gran tamaño angular, como lo son las NM. Por ello, generalmente, las observaciones se realizan sobre una zona reducida para un estudio determinado. Sin embargo hay observaciones con discos más pequeños, cuyas resoluciones angulares son comparables a las de los discos simples usados para HI. Ése es el caso de los mapas obtenidos por Cohen y otros (1988) en el caso de la NMM. En las **Figs. 16a y b** se muestran los mapas, para la NMM y la NmM, de las intensidades de $^{12}\text{CO}(1-0)$, integradas en velocidad, en donde la resolución angular es de $12'$ y que puede compararse con los mapas de HI obtenidos, por ejemplo, con el radiotelescopio de Parkes. El uso de un factor de conversión de las intensidades integradas a densidad columnar de H_2 permite tener un mapa

de hidrógeno molecular, que no puede obtenerse mediante mediciones directas en radioastronomía.

Conclusiones

Los resultados, mostrados aquí en forma muy sintética, permiten apreciar la enorme cantidad de información ya disponible, y que crecerá en el futuro inmediato mucho más, para la interpretación de los innumerables fenómenos que ocurren dentro de estas galaxias y que revelarán muchos aspectos que se plantean aún como enigmas astrofísicos, y que están relacionados con la evolución dentro de ellas mismas como en su relación con la Vía Láctea. 

(*) **Esteban Bajaja** es Dr. en Ciencias Físicas, recibido en La Plata en 1969. Toda su actividad como Investigador y como miembro de la Carrera de Investigador Científico del CONICET la desarrolló en el Instituto Argentino de Radioastronomía. Actualmente está retirado, pero sigue teniendo su lugar de trabajo en el IAR, ocupándose de temas como el relacionado con las Nubes de Magallanes y el relevamiento del HI en el hemisferio sur.

Referencias

- Arnal, E.M., Bajaja, E., Larrate, J.J., Morras, R., Pöppel, 2000, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 142, 35.
- Bajaja, E., Arnal, E.M., Larrarte, J.J., Morras, R., Pöppel, W.G.L., Kalberla, P.M.W., 2005, *Astron. Astrophys.* 440, 767.
- Cohen, R.S., Dame, T.M., Garay, G., Montani, M., Rubio, M., Thaddeus, P., 1988, *The Astrophys. Journal*, 331, L95.
- De Vaucouleurs, G., Freeman, K.C., 1973, *Vistas in Astronomy*, 14, 163.
- Haslam, C.G.T., Salter, C.J., Stoffel, H., Wilson, W.E., 1982, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 47, 1.
- Haynes, R.F., Klein, U., Wielebinski, R., Murray, J.D., 1986, *Astron. Astrophys.*, 159, 22.
- Haynes, R.F., Klein, U., Wayte, S.R., Wielebinski, R., Murray, J.D., Bajaja, E., Meinert, D., Buczylowski, U.R., Harnett, J.I., Hunt, A.J., Wark, R., Sciacca, L., 1991, *Astron. Astrophys.*, 252, 475.
- Hindman, B.J., 1967, *Aust. J. Phys.*, 20, 147.
- Kalberla, P.M.W., Burton, W.B., Hartmann, D., Arnal, E.M., Bajaja, E., Morras, R., Pöppel, W.G.L., 2005, *Astron. Astrophys.* 440, 775.
- Kerr, F.J., Hindman, J.V., Robinson, B.J., 1954, *Aust. J. Phys.*, 7, 297.
- Kim, S., Staveley-Smith, L., Sault, R.J., Kesteven, M.J., McConell, D., Freeman, K.C., 1997, *Pub. Astron. Soc. Australia*, 14, 119.
- Klein, U., Wielebinski, R., Haynes, R.F., Malin, D.F., 1989, *Astron. Astrophys.*, 211, 280.
- Loiseau, N., Bajaja, E., 1981, *Rev. Mexicana Astron. Astrof.*, 6, 55.
- Loiseau, N., Bajaja, E., 1985, *Rev. Mexicana Astron. Astrof.*, 10, 95.
- Mathewson, D.S., Cleary, M.N., Murray, J.D., 1974, *The Astrophys. Journal*, 190, 291.
- Mathewson, D.S., Healey, J.R., 1964, en el *Simposio de la IAU-URSI N° 20*, pág. 24.
- Mc Gee, R.X., Milton, J.A., 1966, *Aust. J. Phys.*, 19, 343.
- Murai, T., Fujimoto, M., 1980, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 32, 581.
- Tanaka, K.I., 1981, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 33, 247.
- Wannier, P., Wrixon, G.T., Wilson, R.W., 1972, *Astron. Astrophys.*, 18, 224.

LAS NUBES DE MAGALLANES

NUBE MENOR DE MAGALLANE

REVISTA
ASTRONÓMICA

CÚMULO GLOBULAR 47 TUCANA

Las Nubes tienen una baja abundancia de elementos pesados, lo cual origina su color azulado apreciable en "visible". (Fotografías de Matías Jones - A.A.A.A.).

NUBE MAYOR DE MAGALLANES

COMO LAS VE LA RADIOASTRONOMÍA (Página 30)

Fig. 12: a y b) Distribución de HI para velocidades LSR entre -400 y -100 km/s, en una proyección Aitoff, centrada en $l=0^\circ$ y $b=0^\circ$ (izquierda) y entre 100 y 400 km/s, centrada en $l=180^\circ$ y $b=0^\circ$. Los colores corresponden a una escala que depende del logaritmo de la suma de las temperaturas de brillo en cada uno de esos rangos de velocidad. (Kalberla y otros, 2005). Dr. Esteban Bajaña - Instituto Argentino de Radioastronomía - Especial para *Revista Astronómica*.

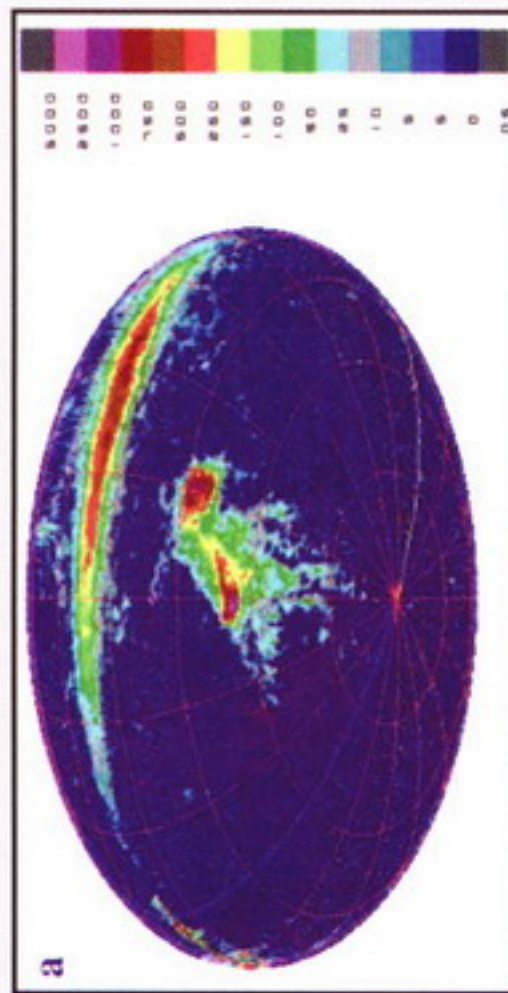
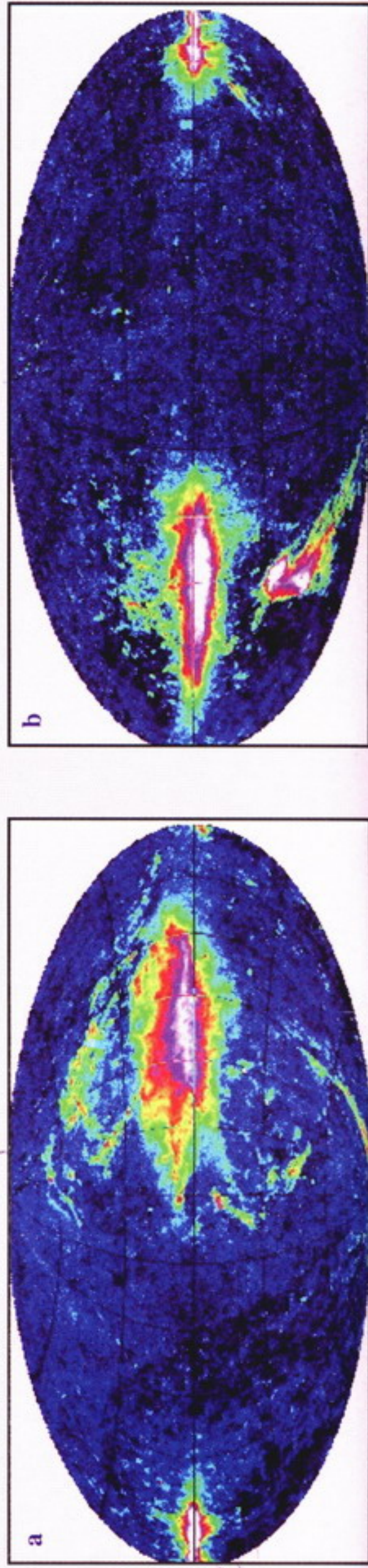
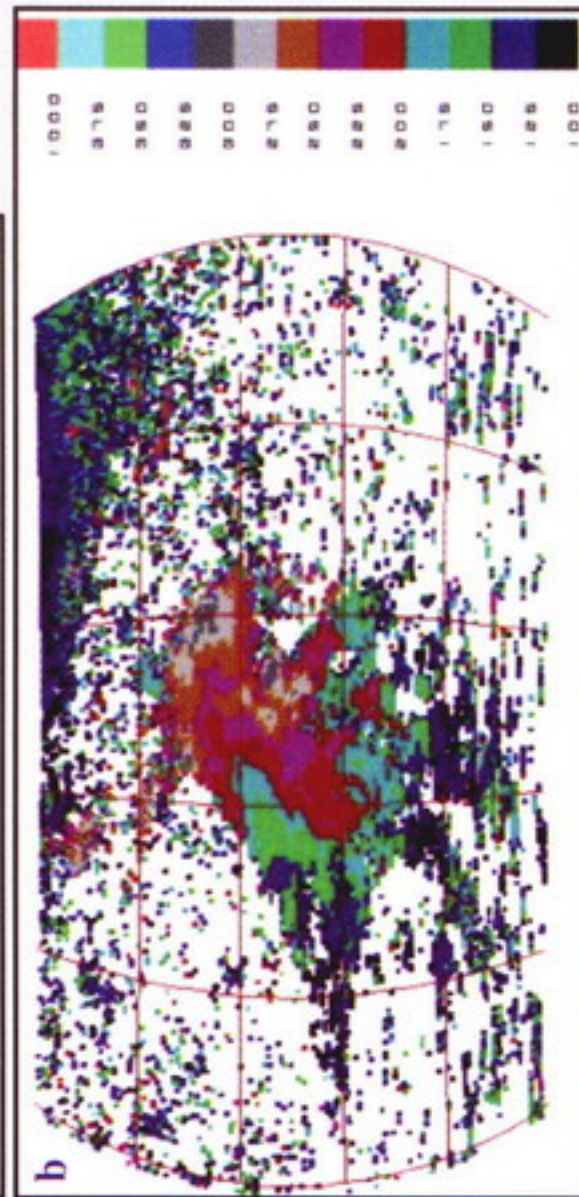
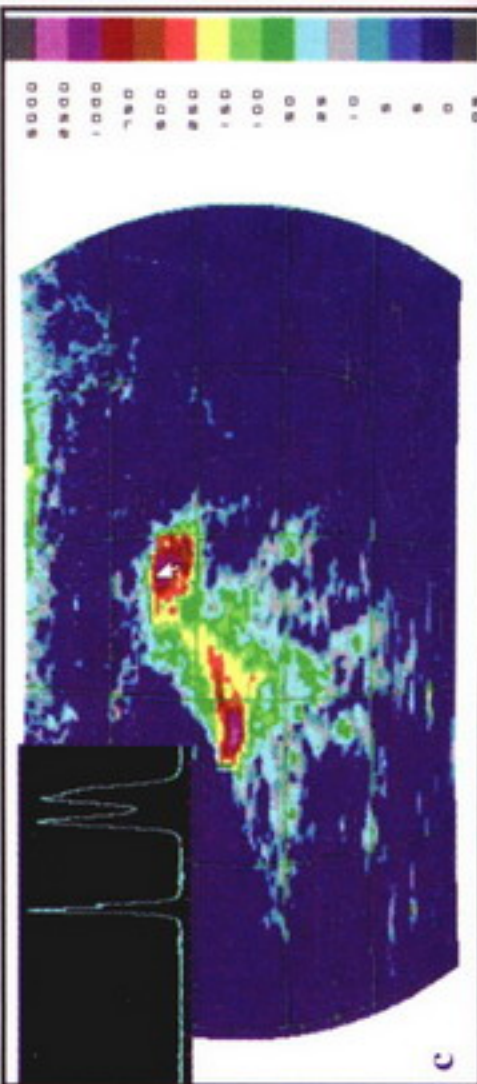


Fig. 13:

a) Distribución de HI en las NM para velocidades LSR entre 100 y 400 km/s, en una proyección Esférica centrada en $l=300^\circ$ y $b=-40^\circ$.



b) Vista ampliada de las NM con un ejemplo de perfil de HI mostrando dos picos en la NMM.



c) Campo de velocidades en el rango elegido. Para las figuras a y b, las escalas de niveles están dadas en T_b km/s, y para la figura c, en km/s.