

GAS IONIZADO

Tres medios diferentes:

- Regiones HII ó nebulosas gaseosas
- **El medio ionizado difuso (WIM)**
- **El medio ionizado a alta T (HIM)**

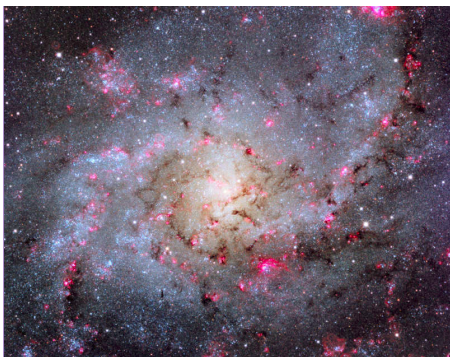
VER EL PAPER DE WEN 2025! MENCIONA PAPERS DEL WIM EN RADIO Y EN IR, Y EN ESTE PAPER CON LINEAS OPTICAS USANDO LAMOST. PUSE EL PAPER EN LA CARPETA DE CLASE 4

Overview ISM phases in Milky Way

phase	$n \text{ (cm}^{-3}\text{)}$	$T \text{ (K)}$	f_V
coronal (HIM)	~ 0.004	$> 10^{5.5}$	$\sim 0.5?$
warm, neutral (WNM)	~ 0.6	~ 5000	~ 0.4
warm, ionized (WIM)	~ 0.2	~ 8000	~ 0.1
cold, neutral (CNM)	~ 30	~ 100	~ 0.01
molecular clouds	$\sim 10^{3-6}$	$\sim 10-50$	~ 0.0001
HII regions	$\sim 1-10^5$	$\sim 10^4$	very small

El medio ionizado tibio (WIM)

Fuera de las RHII, el MIE contiene gas ionizado difuso.



- 1938 (Struve and Elvey, ApJ, 88, 364): primeros que encuentran gas ionizado FUERA de las RHII. Detectaron emisión en $H\alpha$ y $[OII]$ de zonas extendidas en Cygnus y Cepheus.
El estudio sistemático de este gas empezó recién 30 años más tarde, a través del estudio de líneas de emisión ópticas.

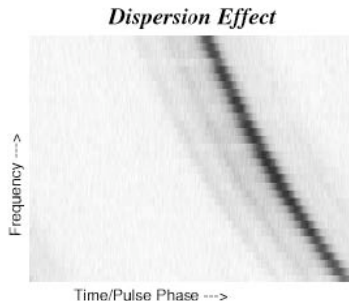
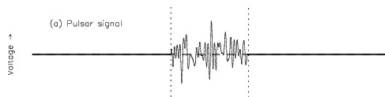
El medio ionizado tibio, el WIM

- Sus características se pueden inferir a través de:
 - Dispersión en la emisión de los púlsares
 - Líneas de emisión débiles, especialmente H_α , SII, NII (hasta 2-3 kpc, por absorción)
 - Emisión libre-libre en el continuo de radio
- Origen: fotones de estrellas O (fotoionización). Se requiere una O4 ó 15 B0 cada kpc^2 . Son fotones que escapan de las RHII.
- Tibio: ~ 8000 K, de baja densidad (difuso), $n_e \sim 0,1 \text{ cm}^{-3}$
- Contiene más masa que las RHII y ocupa más volumen (f_V tabla).
- Emisión extendida. Ancho de 2 kpc respecto al plano galáctico.

Púlsares: Medida de dispersión

La señal de un púlsar atraviesa el WIM:

- el WIM tiene electrones libres $\rightarrow$ actúa como un plasma dispersivo ya que el índice de refracción depende de la frecuencia $\rightarrow \nu$ alta llega antes que ν baja $\rightarrow$ el pulso se dispersa



Medida de dispersión

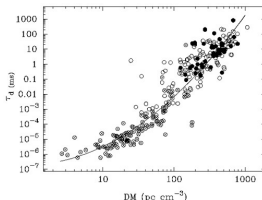
- Se define MEDIDA DE DISPERSIÓN

$$DM = \int_0^d n_e dl \quad d \text{ es la distancia al pulsar}$$

- El tiempo de retraso está dado por:

$$\frac{\Delta \tau_D}{\mu s} = 4.148 \times 10^9 \left[\frac{DM}{\text{cm}^{-3} \text{ pc}} \right] \left[\frac{1}{\left(\frac{v_1}{\text{MHz}} \right)^2} - \frac{1}{\left(\frac{v_2}{\text{MHz}} \right)^2} \right]$$

- Midiendo el retraso en 2 frecuencias distintas $\rightarrow DM \rightarrow n_e$ (conociendo d)

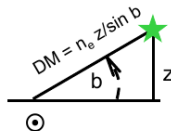


WIM

- Si podemos medir con precisión el tiempo de retraso $\rightarrow$ los púlsares pueden ayudar a determinar la distribución de n_e :
 $\rightarrow$ el WIM se extiende ~ 1 kpc por encima del plano.

$$DM = n_e D$$

$$D = z / \sin b:$$



- necesitamos las DISTANCIAS a los púlsares para pasar de DM a n_e :
 - relacionarlos con SNR
 - absorción en HI
 - paralaje
 - distancia a una compañera binaria

OJO: la DM da una estimación promedio de la n_e a lo largo de la línea de la visual.

- La DM puede usarse para obtener la distancia a un púlsar, conociendo o suponiendo n_e (0.03 cm^{-3} es una primera aprox) (actualmente hay varios modelos).

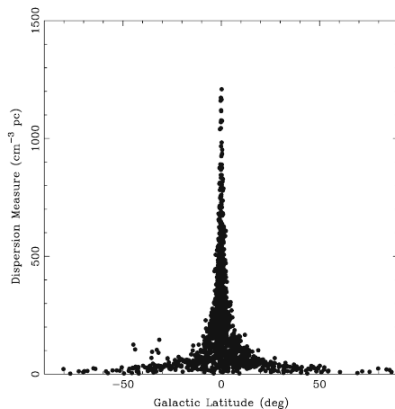


Fig. 2.3 Dispersion measure, DM, for pulsars at different galactic latitudes [adapted from B. Klein (MPIfR) unpublished]

Modelo de dos componentes para la distribución de n_e

Primer trabajo importante sobre la densidad electrónica del medio interestelar de la Vía Láctea

Axisymmetric Model

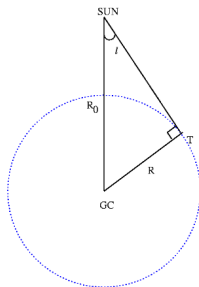
- Two component model for DM

$$n_e = \bar{n}_{e1} \exp(-z/H_1) \exp(-[R/A_1]^2) + \\ \bar{n}_{e2} \exp(-z/H_2) \exp(-[(R-4)/A_2]^2)$$

	Outer Galaxy (1)	Inner Galaxy (2)
$\bar{n}_e$	0.025 cm ⁻³	0.20 cm ⁻³
H	1 kpc	0.15
A	> 20 kpc	2 kpc

(Cordes et al. 1991 Nature 354 121)

Para analizar la distribución de DM Taylor & Cordes (1993, 1161 citas!) usan la estructura galáctica obtenida usando otras bases de datos. En esta figura se combina datos de RHII, zonas de emisión de HI y de continuo de radio. Tienen en cuenta los brazos espirales. Es esperable que los púlsares más distantes localizados cerca de las zonas sombreadas, tengan mayor DM



1992AB11.2

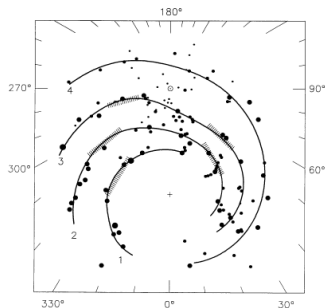


FIG. 1.—Spiral model of the Galaxy after Georgelin & Georgelin (1976), with updates. Circles represent H II regions, and hatched areas correspond to the directions of intensity maxima in the thermal radio continuum and neutral hydrogen emission. The spiral pattern traces the arms defined by interpolating Table 1 with a cubic spline.

Pasa lo que supusieron. Zona de I entre 50° y 80° , sólo un púlsar con $DM > 260 \text{ cm}^{-3}\text{pc}$. Y en las zonas donde cruza más brazos, DM es mayor

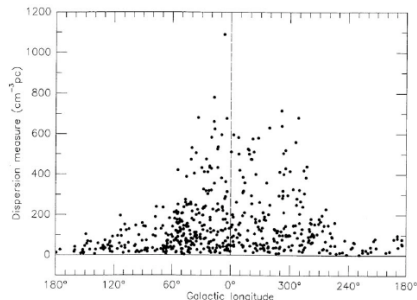


FIG. 2.—Dispersion measures of 553 pulsars as a function of Galactic longitude. Note the deficit of high-dispersion pulsars at longitudes 50° – 80° , compared with the corresponding zone 280° – 310° on the other side of the Galactic center.

Cordes et al 1991 Nature 354 121;
Taylor & Cordes 1993 ApJ 411 476

Valores de DM típicos: $100 \text{ cm}^{-3}\text{pc}$, pero algunos llegan a $500 \text{ cm}^{-3}\text{pc}$.

Modelo para la distribución de n_e propuesto por Cordes & Taylor (1993)

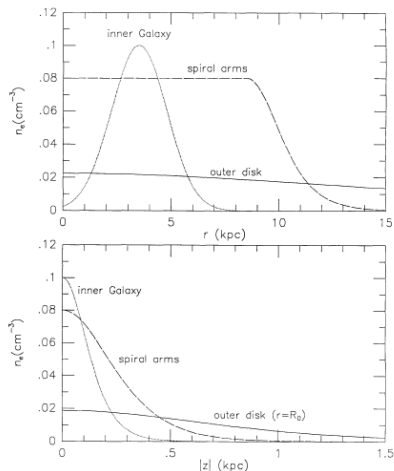
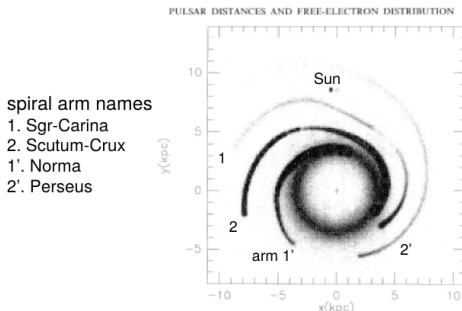


FIG. 3.—Electron densities as functions of Galactocentric radius, r , and distance from the galactic plane $|z|$, for the axisymmetric features of our model. (Note that although the model spiral arms have complicated shapes, the modulations with respect to r and z , defined by eqs. [11] and [17], are axisymmetric.) The z -dependence of the outer disk component is shown for $r = R_0 = 8.5$ kpc.

Results of Taylor & Cordes Analysis



- Escala de grises representa n_e en el plano
- la mayor densidad se da en la parte más externa de arm2,
 $n_e \sim 0,18\text{cm}^{-3}$
- $n_e \sim 0,02\text{ cm}^{-3}$ cerca del sol
- El cuadradito cerca del Sol es la nebulosa de Gum (RHII grande (36 grados), muy cercana (350 pc)

DM esperados a partir del modelo de n_e :

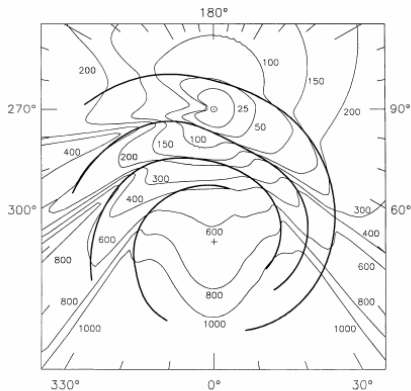


FIG. 5.—Contours of constant heliocentric dispersion measure in the Galactic plane, according to our model. The locations of the spiral arms are also shown.

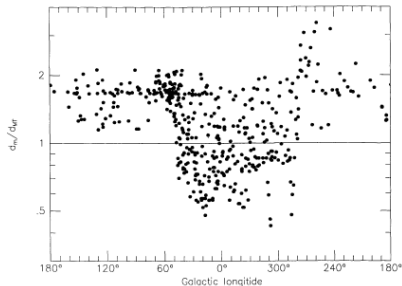


FIG. 9.—Ratios of the new model distances d_n of 452 pulsars to those obtained from the unmodified Manchester & Taylor (1981) model, d_{MT} , plotted as a function of Galactic longitude.

Distancias:

- * muchas cambian en un factor 2, hacia más lejos o más cerca.
- * púlsares entre $50^\circ < l < 280^\circ$: varios están mas cerca de lo estimado antes.
- * a 250° es por lo de la nebulosa de Gum.

Hay varios modelos sobre la distribución de la densidad electrónica.
Dos muy usados son:

- NE2001 (Cordes & Lazio 2002, arXiv e-prints, pp astro-ph/0207156):
 - ① corrige algunas limitaciones del modelo TC93 de Taylor y Cordes (1993).
 - ② se basa en 112 mediciones independientes de la distancia de los púlsares y 269 mediciones de dispersión, y asume componentes a gran escala y variaciones pequeñas debidas a regiones subdensas o sobredensas.
 - ③ considera componentes locales como la burbuja local, la nebulosa Gum, la supernova Vela, Loop 1 y algunos otros rasgos, así como también los brazos espirales y el centro galáctico.
 - ④ utiliza un enfoque iterativo para ajustar los parámetros, comenzando con valores iniciales del modelo TC93 y ajustando los parámetros para las componentes a gran escala y locales mediante una función de verosimilitud.

- YMW16 (Yao et al. 2017, ApJ, 835, 29)
 - ① es un modelo alternativo al modelo NE2001 que tiene la ventaja de utilizar 15 años adicionales de datos para ajustar su modelo.
 - ② utiliza 189 mediciones independientes de distancia de púlsares, pero no utiliza mediciones de dispersión interestelar.
 - ③ A diferencia de NE2001, YMW16 utiliza un modelo de disco delgado y grueso con cuatro brazos espirales.
 - ④ YMW16 también incluye siete características locales, incluyendo la Burbuja Local, la Nebulosa de Gum y el Loop I

Research Paper

A comparison of Galactic electron density models using PyGEDM

D. C. Price^{1,2,3} , C. Flynn² and A. Deller²

¹International Centre for Radio Astronomy Research, Curtin University, Bentley, WA 6102, Australia, ²Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology, Hawthorn, VIC 3122 Australia and ³Department of Astronomy, University of California Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA

<https://apps.datacentral.org.au/pygedm/>

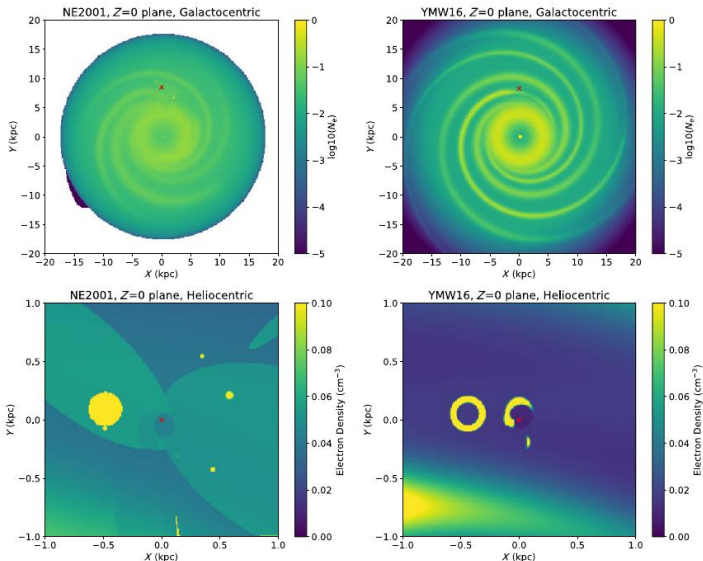


Figure 1. Electron density of NE2001 (left) and YMW16 (right) models, in the Galactic plane ($z=0$). The NE2001 model extends to ± 17 kpc, whereas YMW16 extends to a radius ± 30 kpc. The Sun (red cross) is placed at $x=0$, $y=8500$ pc, $z=0$ in NE2001, and at $x=0$, $y=8300$ pc, $z=6$ pc in YMW16. The top panels show large-scale Galactic structure; differences in the spiral arm structure are visible. The bottom panels show the local ISM in a ± 1 kpc region centred about the Sun. The large ellipses in NE2001 (bottom left) correspond to a 'local superbubble' and 'low-density region', which are not included in the YMW16 model. The local 'clumps' of NE2001, also not used in YMW16, are also visible as small circular regions. The local ISM in the YMW16 model (bottom right) has visibly fewer components; identifiable are the Gum Nebula, Local Bubble, Loop I, and Carina-Sagittarius spiral arm.

Galactic H-Alpha Observations and EM

WHAM = Wisconsin H-Alpha Mapper
(a big name for a small telescope, but
WHAM leads to WIM)



- * Dada la naturaleza difusa del WIM, es muy difícil de detectar y caracterizar usando instrumentos tradicionales
- * El Wisconsin H-Alpha Mapper es un instrumento diseñado para estudiar la distribución y la cinemática del gas **difuso** ionizado de la Vía Láctea.
- * Telescopio de 63 cm. Espectrómetro Fabry-Perot
- * Resolución angular de 1 grado (se prioriza sensibilidad a gran escala más que detalle angular).
- * Resolución en velocidad: 12 km/s. Línea! traza la velocidad del gas.
- * Kitt Peak en Arizona: Cielo norte y Cerro Tololo en Chile: cielo sur (lo trasladaron en el 2009)

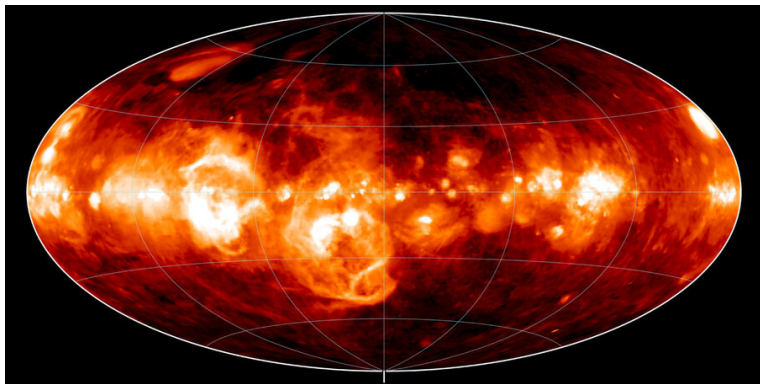
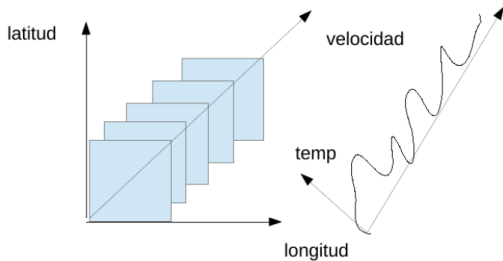


Figura: The WHAM all-sky survey showing the location of warm hydrogen gas (specifically everything moving between -10 to 10 (toward or away from us) km/sec) in the sky. Credit: WHAM Collaboration, UW–Madison, Space Science Institute National Science Foundation.

El Wisconsin H-Alpha Mapper (WHAM) permite estudiar una componente muy importante del MIE, para responder preguntas tales como:

- A dónde va la energía producida en las regiones de formación estelar de nuestra Galaxia?
- Cómo se propaga esa energía ?
- Cómo cambia esa energía a medida que viaja y cómo se deposita de nuevo en la Galaxia?

- **WHAM también es capaz de observar otras líneas de emisión óptica**, que permiten el estudio de la temperatura y grado de ionización del WIM.
- El espectro del WIM se caracteriza por líneas de emisión intensas de bajos niveles de excitación: SII, NII, y por líneas más débiles de estados de excitación más altos: OIII. Estas líneas sirven para estudiar regiones de gas ionizado de baja densidad como el WIM, donde las colisiones no desexcitan rápidamente los niveles metaestables responsables de estas líneas.



WHAM Observations of $H\alpha$, [S II], and [N II] toward the Orion and Perseus Arms: Probing the Physical Conditions of the Warm Ionized Medium

L. M. Haffner

R. J. Reynolds

S. L. Tufte

The advent of WHAM provides a unique opportunity to trace some of these diagnostics over a larger region of the sky. This paper presents the first velocity-resolved study of [S II] and [N II] from the diffuse gas of our Galaxy. A region of the sky that includes the Perseus arm was chosen for examination since the $H\alpha$ emission from the WIM in this arm is well separated in velocity from local WIM emission and can be traced to high Galactic latitude, allowing an exploration of the emission with distance, z , from the Galactic plane.

ApJ 523, 223, 1999

Brazo local (centrado cerca de 0 km/s) y Perseo (– 40 a – 60 km/s)

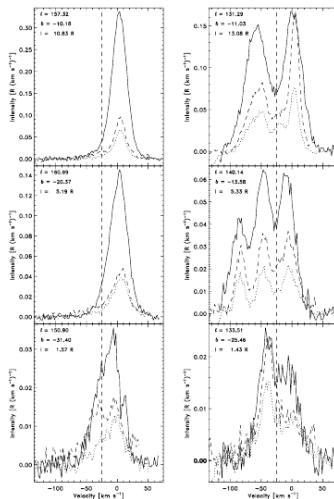
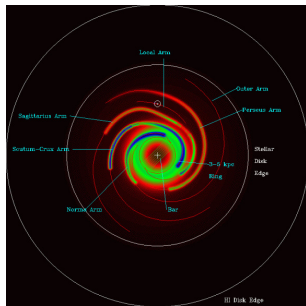


FIG. 1.—Sample H α (solid line), [N II] (dashed line), and [S II] (dotted line) spectra from several directions are plotted as intensity vs. LSR velocity. The total integrated intensity of the emission is labeled in the upper left-hand corner of each plot. The dashed vertical line denotes the delineation for integration ranges between the Local and Perseus arms in this paper.

$$1R(Rayleigh) = 2,4 \times 10^{-7} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ para H}\alpha$$

WIM from WHAM

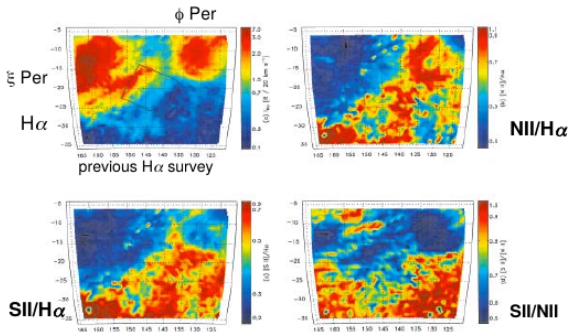


Fig. 2. (a) H α emission from the Local Orion arm. This pseudocolor image shows the H α emission integrated over $\lambda_{H\alpha} \pm 10$ in ± 0.5 km s $^{-1}$. The map are $20''$ in longitude and latitude. The dashed line shows the location of the original H α background survey in this region (see text). Because the ratio maps of (b) [NII]/H α , (c) [SII]/H α , and (d) [SII]/[NII] are the same for the same velocity band. The color scale in each image is logarithmic, applied to reduce a spatial detail.

Haffner, Reynolds, & Tufte ApJ 533 233 1999

Local Orion arm: $b = -5^\circ$ to -35° , $l = 65^\circ$ - 125° , $v = -10$ to $+10$ km/s



- * H α : 2 fuentes intensas a bajas latitudes: conocidas (NGC1499 y superposición)
- . En brazo de Perseo se ve solo la de la derecha, con una morfología diferente. A altas latitudes (Perseo): filamentos, cavidad.

WHAM to WIM

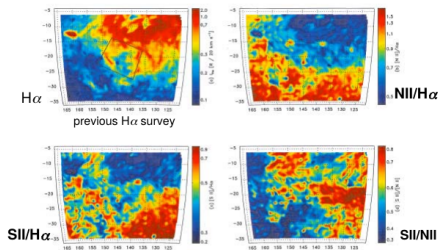


Fig. 3—(a) H α emission from the Perseus arm, approximately 2.5 kpc distant. This production stage shows the H α emission integrated over $\lambda_{\text{rest}} = -20$ to $+20$ km s $^{-1}$. The map on Galactic longitude and latitude. The rectangular boundaries are the limits of the WHAM survey. (b) The nitrogen ion ratio, [N II]/H α , and (c) the sulfur ion ratio, [S II]/H α , and (d) the [S II]/[N II] ratio also shown for the same velocity band. The color scale in each image is listed against its relative spatial scale.

Haffner, Reynolds, & Tufte ApJ 533 233 1999

Perseus arm: $b = -5^\circ$ to -35° , $l = 65^\circ$ - 125° , $v = -50$ to -30 km/s

se puede interpretar que:

- [N II]/H α y [S II]/H α : distribución de temperaturas : Si la temperatura aumenta $\rightarrow$ más electrones tienen energía suficiente para excitar esos niveles $\rightarrow$ aumenta [NII] y [SII], pero H α no tanto
- [S II]/[N II] : estado de ionización IP(S $+$) = 23.3 eV and IP(N $+$) = 29.6 eV).

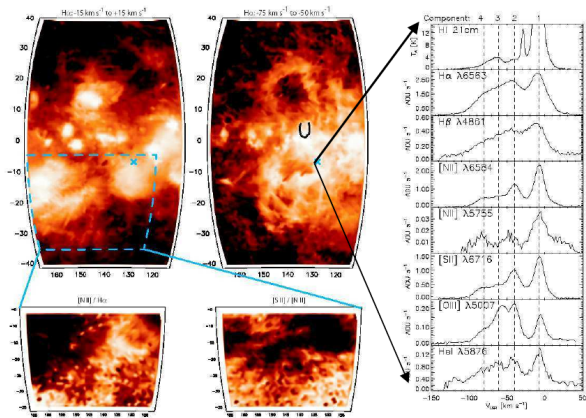


Figura: $H\alpha$, $[N II]/H\alpha$, and $[S II]/[N II]$ velocity interval maps of selected regions plus emission line spectra toward $l = 130$, $b = -7.5$. The 21 cm spectrum is from the Leiden/Dwingeloo survey, and the optical line observations are from WHAM.



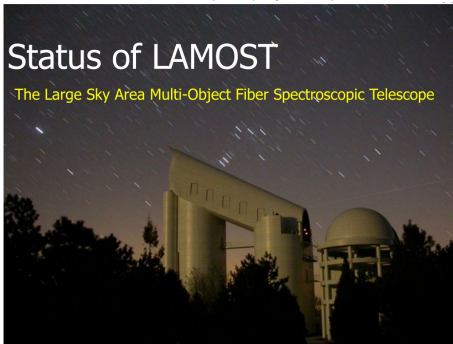
Diffuse Ionized Gas in the Anticenter of the Milky Way

Shiming Wen¹ , Wei Zhang¹ , Lin Ma^{2,1,3} , Yunning Zhao^{1,3} , Man I. Lam⁴, Chaojian Wu¹, Juanjuan Ren⁴ , Jianjun Chen⁴,
Yuzhong Wu¹, Guozhen Hu⁵ , Yonghui Hou^{3,6}, Yongheng Zhao^{1,3}, and Hong Wu^{1,3}

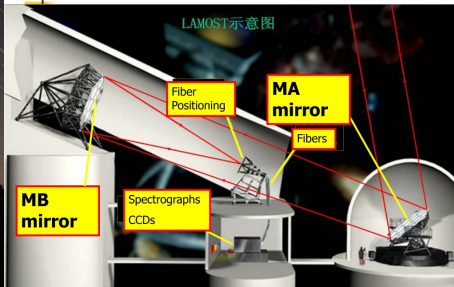
¹ CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, People's Republic of China;

Status of LAMOST

The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope



Structure of LAMOST



LAMOST-MRS-N (Media Resolution Survey-Nebulae)

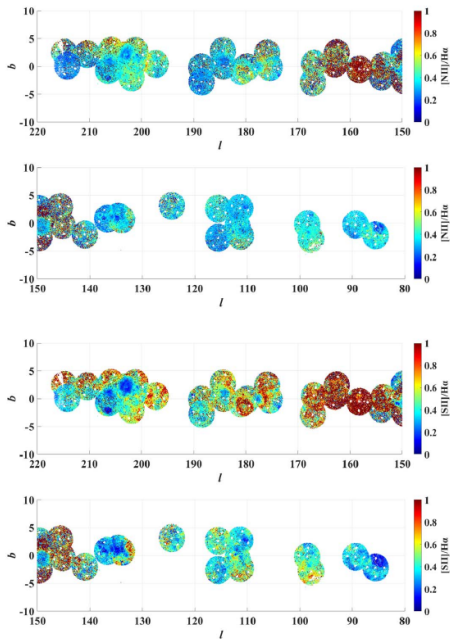


Figure 1. Footprints of LAMOST MRS-N up to the end of 2021, colored by $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ ratios in the top two panels and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratios in the bottom two panels.

LAMOST-MRS-N (Media Resolution Survey-Nebulae)

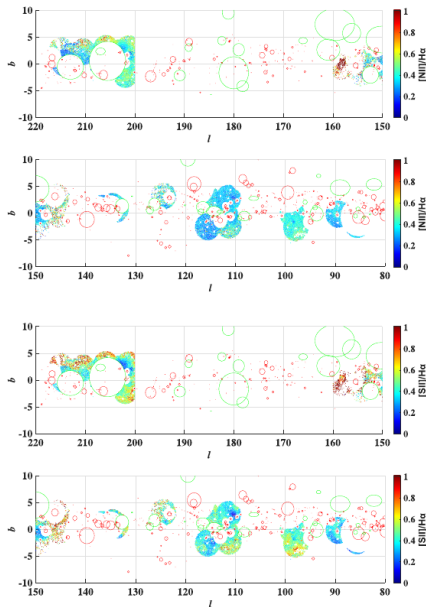


Figure 2. Spatial distribution of the Galactic DIG sample (Sample-I). Red circles represent the H II regions sourced from the WISE H II catalog by L. D. Anderson et al. (2014), while the green circles correspond to the SNRs listed in the catalog by D. A. Green (2019). Upper two panels: colored by $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ ratios; bottom two panels: colored by $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratios.

LAMOST-MRS-N (Media Resolution Survey-Nebulae)

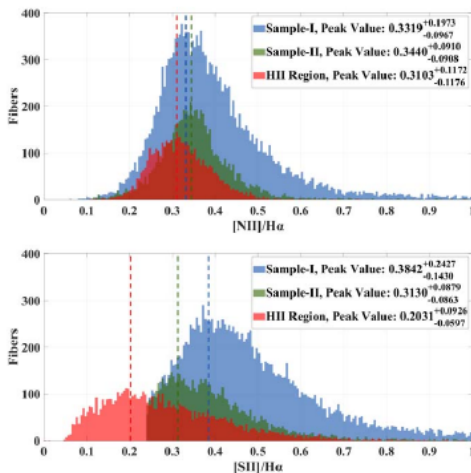


Figure 5. Histogram distribution of [N II]/H α and [S II]/H α line ratios. The panels represent Sample-I, Sample-II, and H II regions with blue, green, and red bars, respectively. The dashed line indicates the distribution's peak. The regions to the left and right of this peak are individually fitted with Gaussian profiles. The 1σ values of the Gaussians are annotated in the upper-right corner of each panel.

DISTRIBUCIONES: ●

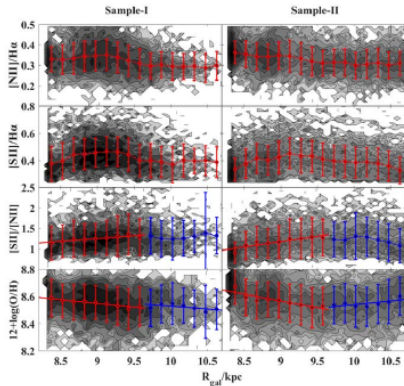


Figure 7. Radial distributions of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, and $[\text{S II}]/[\text{N II}]$ line ratios and oxygen abundance as a function of R_{gal} . The data are organized into 16 bins based on R_{gal} , and a dashed line connects the median value of each bin. The results of Sample-I and Sample-II are illustrated in the left and right panels, respectively.

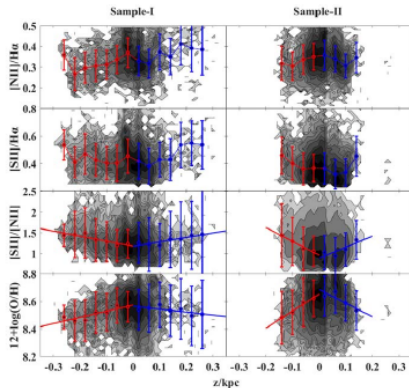


Figure 8. Similar to Figure 7, with the variation plotted as a function of Galactic disk height (z).

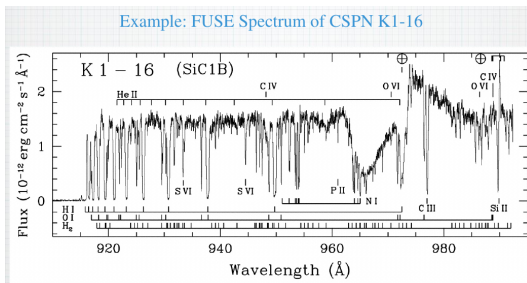
- **Púlsares** → permiten estimar la densidad electrónica media del WIM (a través de la medida de dispersión, DM).
- **WHAM Y LAMOST** y otros telescopios ópticos → observan líneas como $H\alpha$, $[N II]$, $[S II]$, etc., y permiten estimar:
 - Temperatura electrónica (a partir de cocientes sensibles a T_e , como $[N II]/H\alpha$)
 - Abundancias relativas (como $[S II]/[N II]$)
 - Grado de ionización (por ejemplo, con $[O III]/H\alpha$ o $[S II]/H\alpha$)

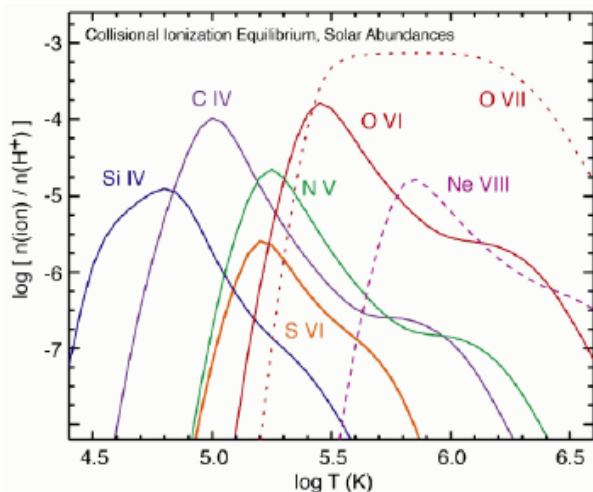
Hot Ionized Medium (HIM) DETECCION

- Spitzer (1956) fue el primero en proponer la existencia de gas en el halo a muy altas temperaturas (10^6 K), el cual provee la presión suficiente para mantener confinadas las nubes neutras observadas a altas latitudes
- Se pudo observar casi 2 décadas más tarde, por dos tipos de observaciones diferentes:
 - 1) 1974: el satélite *Copernicus* detectó líneas UV en absorción de especies con altos estados de ionización (OVI, NV, CIV) en el espectro hacia estrellas brillantes $\Rightarrow$ Temperatura elevada
 - 2) 1968: Emisión difusa de Rayos X blandos ($< 1\text{keV}$) $\Rightarrow$ plasma a muy alta temperatura, se observa si $T > 10^6$ K

HIM: absorción en el UV

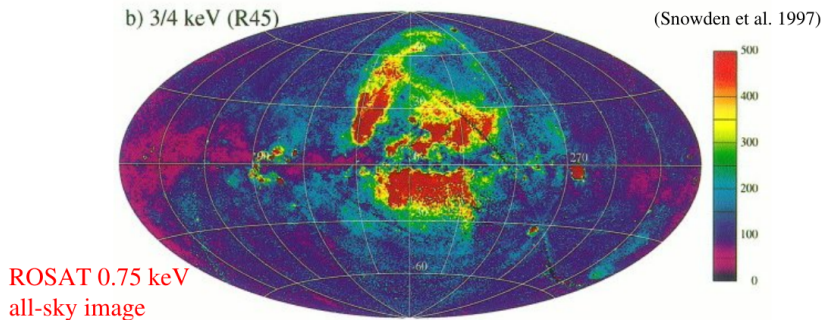
- Las líneas de O VI y N V son las mejores trazadoras de este gas.
Anchos de las líneas ~ 15 km/s $\rightarrow T \sim 3 - 4 \times 10^5$ K
Intensidad integrada de la línea $\rightarrow$ densidad de columna $\rightarrow$ distribución espacial
- en base a estudios de densidad de columna de O VI hacia estrellas presentes a altas latitudes y hacia núcleos de galaxias activas (AGNs) $\rightarrow$ escala de altura de $2,7 \pm 0,4$ kpc $\rightarrow$ el HALO galáctico
- estudios similares usando otras especies (N V, C IV, Si IV) dan alturas aún mayores, del orden de 4 a 5 kpc.



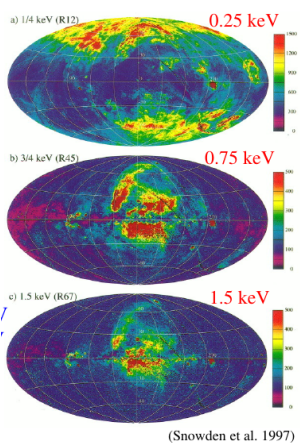


Abundancias en los distintos estados de ionización: temperaturas, densidades

- En 1968, un experimento con un cohete realizado por Bowyer et al. reveló la existencia de emisión difusa de rayos X en el rango de energía por debajo de 1 keV.
- Esta emisión difusa se podía separar en una componente extragaláctica y una componente 'anómala' que parecía ser de origen galáctico.
- Este descubrimiento fue consistente con la predicción de Spitzer en 1956 de que existía gas a muy altas temperaturas en el halo de la galaxia.
- La emisión difusa de rayos X es producida principalmente por el gas caliente del MIE (radiación de frenado)
Se han realizado numerosos estudios y misiones espaciales para investigar la emisión difusa de rayos X y entender mejor las propiedades físicas del HIM en nuestra galaxia y en otras galaxias.



A map of the sky produced by Rosat in the 3/4 keV band. This figure shows broad diffuse features of gas with temperatures of a few million degrees. The strong striping of the data is an artifact of the contamination and is caused by several processes.



Higher energy emission from higher temperature gas:

0.25 keV: $T \sim 10^6$ K.

0.75 keV: $T \sim 3 \times 10^6$ K.

1.5 keV: $T \sim 6 \times 10^6$ K.

- Ionización de gas: por colisiones entre átomos del mismo gas. Potenciales de ionización muy altos (114 eV para el OV) $\rightarrow$ los fotones ionizantes no alcanzan
- Calentamiento: ondas de choque originadas por vientos y explosiones de supernova
- Enfriamiento: expansión adiabática, pérdidas radiativas y emisión libre-libre
- Densidad siempre menor a la crítica pero muchas especies $\rightarrow$ muchas líneas
- Debido a la baja densidad, el enfriamiento lleva mucho tiempo, mas de 10^7 años a $T \sim 10^6$ K!
- Se cree que ocupa casi el 50 % del disco galáctico, tema aún en debate. Algunos creen que $f_V = 0,7$

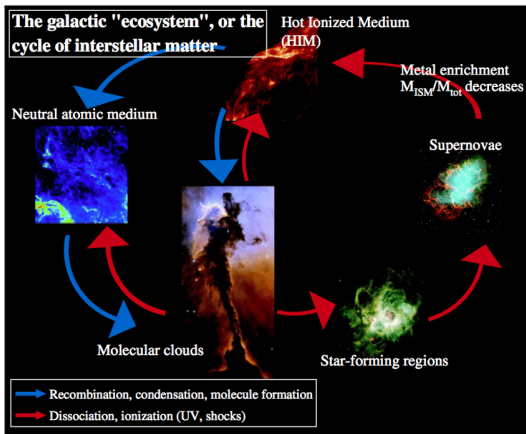


Figura: Ciclo del MIE. Ilustración de Guillard (2010). EL MIE no es estático, su evolución está íntimamente ligada a la de las estrellas. Sus diferentes componentes son renovadas continuamente.