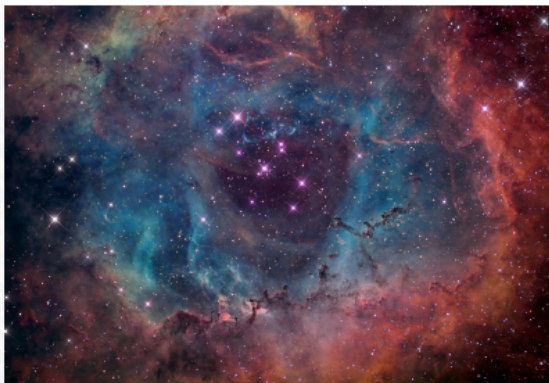


GAS IONIZADO

Tres medios diferentes:

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

Regiones III



The Rosette Nebula (NGC 2237). Inside the nebula lies the open cluster NGC 2244. Its bright young stars formed about 4 Myr ago from the nebular material and their stellar winds are clearing a hole in the nebula's center, insulated by a layer of dust and hot gas. UV light from the hot cluster stars causes the surrounding nebula to glow. The nebula spans about 100 light-years across, lies about 5000 light-years away, and can be seen towards the constellation of the Unicorn (*Monoceros*).

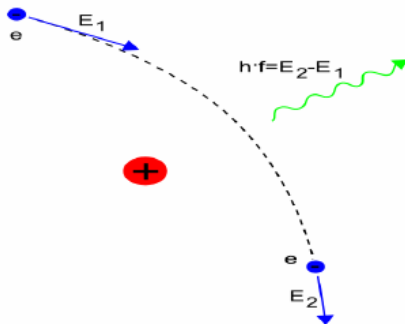
Credit: Brian Lula (<http://www.heavensgloryobservatory.com/>)

- ¿Por qué las regiones HII emiten en el continuo de radio?
- ¿Qué parámetros físicos podemos obtener a partir de esas observaciones?
- ¿Qué cuidados hay que tener al medir el flujo?
- ¿Qué información podemos obtener de las RRL?
- ¿Cómo se clasifican las RHII?

- Si una estrella es lo suficientemente caliente, sus fotones UV pueden ionizar el medio circundante, formando una región HII
- Los electrones libres y los núcleos se pueden recombinar y emitir nuevos fotones
- los electrones pueden colisionar con los iones y emitir líneas de emisión en el óptico
- **⇒ la radiación emitida por la estrella es transmitida al medio circundante y es el MIE que la reemite de distintas maneras**
- Las RHII son observables en un amplio rango del espectro, desde UV hasta radio.

Emisión térmica de regiones HII

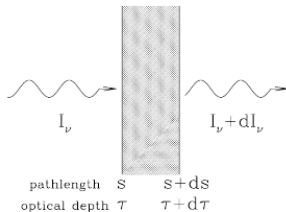
- Interacciones coulombianas entre electrones libres y protones: electrones libres emiten radiación libre-libre (free-free) ó radiación de *bremstrahlung* ó radiación de frenado



- parte de la energía cinética es radiada
- esta radiación es importante en frecuencias de radio

La radiación libre-libre es también absorbida en longitudes de onda de radio:

- La ecuación de transporte radiativo para frecuencias de radio: aproximación de Rayleigh-Jeans para $h\nu/kT \ll 1$ (Clase 1)



$$I_\nu = B_\nu(T_b) = 2\nu^2 k T_b / c^2$$

$$T_b(\nu) = T_{bg} e^{-\tau_\nu} + T_e (1 - e^{-\tau_\nu})$$

T_e : temp. electrónica

Para $T_{bg} = 0$:

- si $\tau \ll 1 \implies e^{-\tau_\nu} \sim 1 - \tau \implies T_b = T_e \tau_\nu$
- si $\tau \rightarrow \infty \implies T_b \rightarrow T_e$

- **Profundidad óptica:**

Para calcularla hay que modelar la interacción coulombiana entre partículas y la distribución de partículas en función de su velocidad. -se considera emisión de una partícula cargada, se promedia sobre la distribución de energías y sobre los posibles valores del parámetro de impacto. Se obtiene:

$$\kappa_{\nu}(\text{pc}^{-1}) \sim 0,08235 \left(\frac{n_e n_i}{\text{cm}^{-6}} \right) \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1,35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2,1} \quad (1)$$

$$\tau_{\nu}^{ff} = 8,235 \times 10^{-2} \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1,35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2,1} \left(\frac{ME}{\text{pc cm}^{-6}} \right) \quad (2)$$

- ME es la Medida de Emisión, $ME = \int n_e^2 ds$

Tiene unidades de cm^{-6}pc y es un parámetro observable importante que se puede obtener a partir del flujo de la nebulosa.

Emisión en el continuo de radio

El flujo total de la nebulosa (la intensidad integrada en el ángulo sólido Ω), puede expresarse en términos de la T_b (aprox RJ):

$$S_\nu = \int I_\nu d\Omega = \frac{2k\nu^2}{c^2} \int T_b(\nu) d\Omega$$

Sabemos que:

- $T_b(\nu) \longrightarrow T_e \tau_\nu^{ff}$ para $\tau_\nu^{ff} \longrightarrow 0$
- $T_b(\nu) \longrightarrow T_e$ para $\tau_\nu^{ff} \longrightarrow \infty$
- $\tau \propto \nu^{-2,1}$

Entonces, en una misma nebulosa:

- para frecuencias bajas: $\tau \longrightarrow \infty$ y $S_\nu \longrightarrow \nu^2$
- para frecuencias altas: $\tau \longrightarrow 0$ y $S_\nu \longrightarrow \nu^{-0,1}$
- La transición se da para $\tau = 1 \longrightarrow \nu = \nu_{crit} (\nu_{to})$

$$\nu_{crit}(GHz) = 0,30 \left(\frac{ME}{cm^{-6} pc} \right)^{0,48} \left(\frac{T_e}{K} \right)^{-0,64}$$

Se la conoce como “Turn-Over Frequency”, y depende de n_e y T_e

Emisión térmica en el continuo de radio

$S_\nu \propto \nu^\alpha$, α : índice espectral

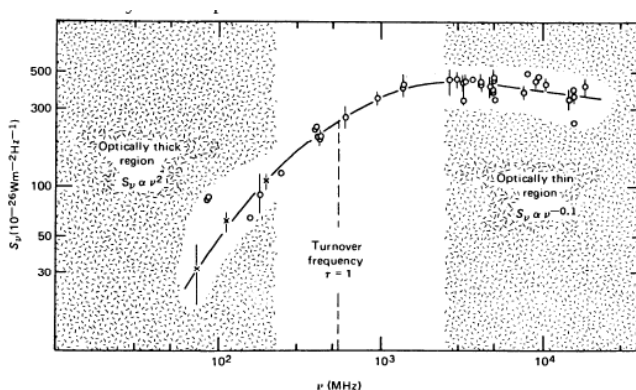


Figure III-10: Radio spectral flux density of the Orion Nebula HII region. Reproduced from Terzian & Parrish (1970, ApLett, 5, 261).

$$\frac{S_{\nu_1}}{S_{\nu_2}} = \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^\alpha$$

Emisión térmica en el continuo de radio

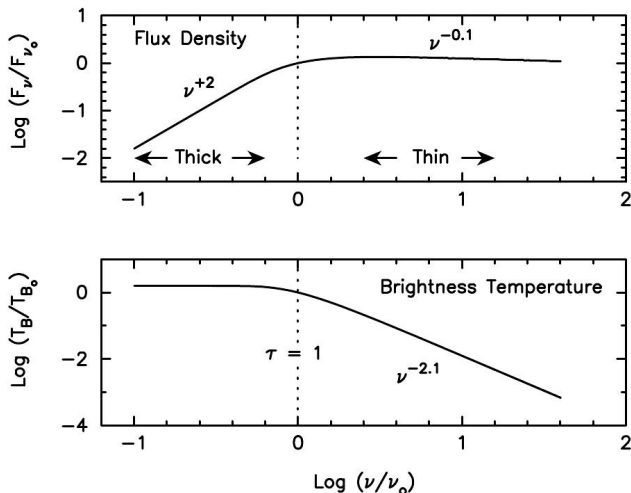
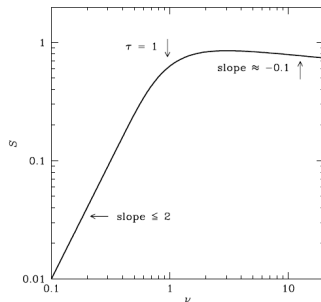


Figure 6.2: The normalized flux density, above, and the normalized brightness temperature, below, plotted as a function of normalized frequency, where ν_0 is the turnover frequency, given by Equation 3.20.

Emisión en el continuo de radio: n_e



Este comportamiento permite calcular la **densidad electrónica** n_e :

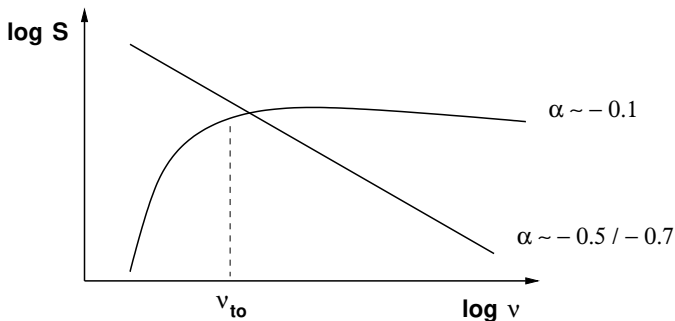
- Se mide el flujo en una frecuencia chica $\Rightarrow \tau \gg 1 \Rightarrow T_b \rightarrow T_e$
- Se mide el flujo en una frecuencia grande $\Rightarrow \tau \ll 1 \Rightarrow T_b = \tau T_e$

Esto es (usando la Eq. 2):
$$T_b = 0,082 \left(\frac{ME}{cm^{-6} pc} \right) \left(\frac{T_e}{K} \right)^{-0,35} \left(\frac{\nu}{GHz} \right)^{-2,1}$$

$\rightarrow$ conociendo T_e calculo ME y de ahí n_e .

Emisión térmica y no térmica

Remanentes de supernova: emisión sincrotrón (no térmica)



Teniendo el flujo en dos frecuencias $\Rightarrow$ índice espectral

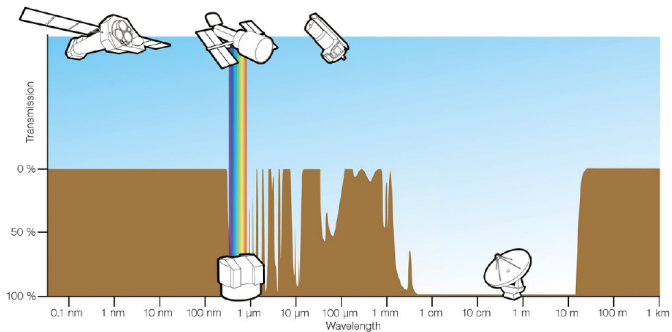


Figura 2.3: Transmisión atmosférica en función de la longitud de onda de la radiación. Créditos: ESA/Hubble (F. Granato).

Antena simple: IAR



ARGENTINA, $D=30$ metros (30' a 1420 MHz)

Antena simple: Effelsberg



Alemania, D=100 metros (9' a 1420 MHz)
<https://www.mpifr-bonn.mpg.de/effelsberg/>

Interferómetros: VLA y DRAO



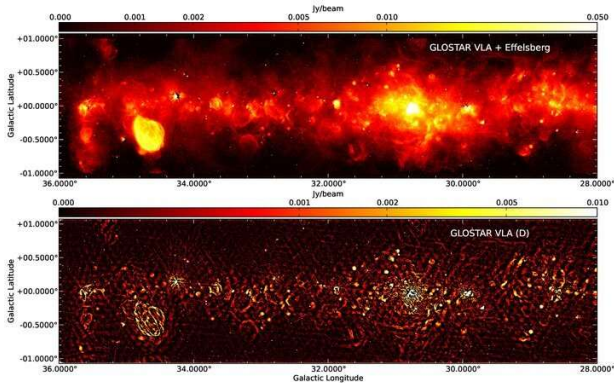
VLA (Very Large Array) : 28 antenas de 25 m cada una. USA.

<https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>

DRAO (Dominion Radio Astrophysical Observatory): 7 antenas de 9 m cada una + una antena simple de 26 m.

<https://nrc.canada.ca/en/research-development/nrc-facilities/dominion-radio-astrophysical-observatory-research-facility>

GLOSTAR: The Global view on Star formation in the Milky Way survey uses the wideband (4-8 GHz) C-band receivers of the VLA and the Effelsberg 100-m telescope to conduct an unbiased survey to characterize star-forming regions in the Milky Way.



Arriba: VLA + Effelsberg, Abajo: solo VLA

<https://glostar.mpifr-bonn.mpg.de/glostar/>

El disco simple recupera la emisión extendida que el interferómetro no

Algunos Relevamientos

- The Green Bank 6-cm Continuum Survey (GB6): Este relevamiento fue realizado con el radiotelescopio de 100 metros de Green Bank a una frecuencia de 4.85 GHz. Proporciona imágenes con una resolución de 4 minutos de arco y una sensibilidad de 18 mJy/beam.
- The Parkes-MIT-NRAO (PMN) Survey: Este relevamiento fue realizado con el radiotelescopio de 64 metros de Parkes a una frecuencia de 4.85 GHz. Proporciona imágenes con una resolución de 5 minutos de arco y una sensibilidad de 30 mJy/beam.
- The Bonn 1420 MHz Survey: Este relevamiento fue realizado con el radiotelescopio de 100 metros de Effelsberg a una frecuencia de 1420 MHz. Proporciona imágenes con una resolución de 9 minutos de arco y una sensibilidad de 1 mJy/beam.
- The NRAO VLA Sky Survey (NVSS): Es un relevamiento completo del cielo del norte realizado con el Very Large Array (VLA) a una frecuencia de 1.4 GHz. Proporciona imágenes con una resolución de 45 segundos de arco y una sensibilidad de 0.45 mJy/beam.

- The Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS): Es un relevamiento del cielo del sur realizado con el radiotelescopio Molonglo Observatory Synthesis Telescope (MOST) a una frecuencia de 843 MHz. Proporciona imágenes con una resolución de 45 segundos de arco y una sensibilidad de 1 mJy/beam.
- The Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters (FIRST) Survey: Es un relevamiento del cielo del norte realizado con el Very Large Array (VLA) a una frecuencia de 1.4 GHz. Proporciona imágenes con una resolución de 5 segundos de arco y una sensibilidad de 0.15 mJy/beam.
- The WISE Radio Continuum Survey (WENSS): Es un relevamiento del cielo del norte realizado con el radiotelescopio Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) a una frecuencia de 325 MHz. Proporciona imágenes con una resolución de 54 segundos de arco y una sensibilidad de 18 mJy/beam.
- The Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) Radio Halo Survey: Es un relevamiento del cielo del norte realizado con el radiotelescopio Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT) a una frecuencia de 610 MHz. Proporciona imágenes con una resolución de 15 segundos de arco y una sensibilidad de 0.2 mJy/beam.

<https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/query.pl>

<https://third.ucllnl.org/gps/>

Imagen 1420 MHz

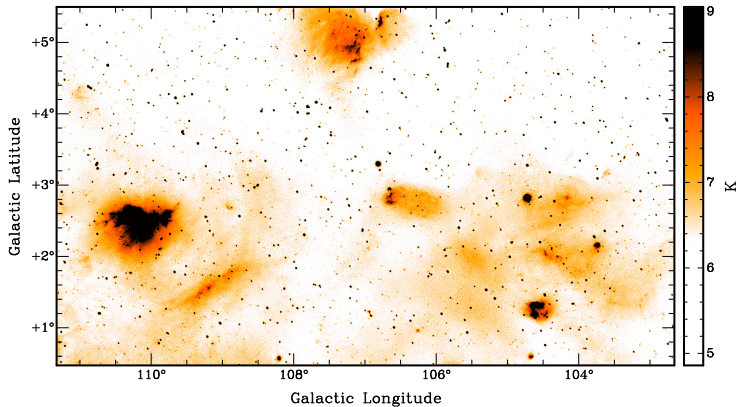


Figura: Relevamiento CGPS

- Emisión de continuo: No tenemos información de distancia!!!

Imagen 843 MHz

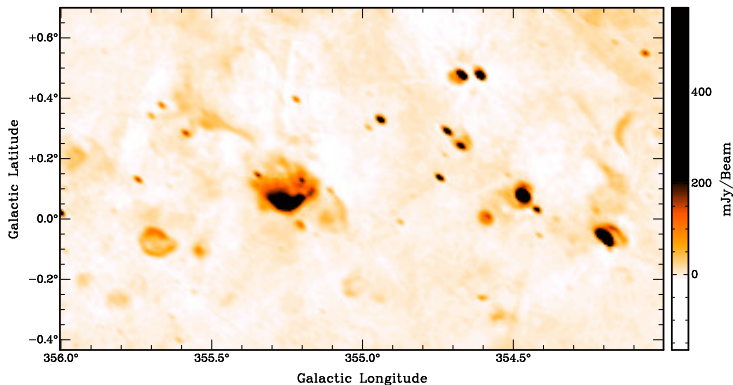


Figura: Relevamiento MOST

La unidad de flujo comúnmente utilizada en radioastronomía es el Jansky, que en unidades del Sistema Internacional equivale a: $\text{Jy} = 10^{-26} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz}}$

Parámetros físicos de la RHII

Suponiendo T_e uniforme en la nebulosa y $\tau \ll 1$:

$$T_b = 8.235 \times 10^{-2} a \left(\frac{T_e}{^\circ\text{K}} \right)^{-0.35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \int N^2(x, y, \mathbf{r}) d\mathbf{r}.$$

- ¿Estructura de la RHII en la línea de la visual?
- Se adopta un modelo para la distribución de n_e dentro de la nebulosa (Mezger & Henderson, 1967, ApJ147, 471):
 - 1 Esférico: $n_e = N_0$ dentro de una esfera de diámetro θ_{esf} , $n_e = 0$ afuera.
 - 2 Cilíndrico: $n_e = N_0$ dentro de un cilindro de diámetro θ_{cil} , $n_e = 0$ afuera.
 - 3 Exponencial: distribución exponencial, con máximo en N_0 y un ancho a mitad de valor de θ_G

$$\theta_{sph} = 1.471 \theta_G \quad \text{and} \quad \theta_{cyl} = 1.201 \theta_G.$$

Parámetros físicos de la RHII

Resolviendo la integral de N para cada uno de los modelos, podemos estimar la densidad electrónica, la masa de H ionizado y la medida de emisión máxima (en el centro de la nebulosa):

$$\left(\frac{N_0}{\text{cm}^{-3}}\right) = u_1 a^{1/2} 6.351 \times 10^2 \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ } ^\circ\text{K}}\right)^{0.175} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{0.05} \\ \times \left(\frac{S_\nu}{\text{f.u.}}\right)^{0.5} \left(\frac{D}{\text{kpc}}\right)^{-0.5} \left(\frac{\theta_G}{\text{min arc}}\right)^{-1.5}.$$

$$\frac{M}{M_\odot} = u_2 a^{1/2} 0.3864 \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ } ^\circ\text{K}}\right)^{0.175} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{0.05} \left(\frac{S_\nu}{\text{f.u.}}\right)^{0.5} \left(\frac{D}{\text{kpc}}\right)^{2.5} \left(\frac{\theta_G}{\text{min arc}}\right)^{1.5}.$$

$$E_{\text{max}} = \int N^2 d\mathbf{r} = D \int N^2 d\phi = u_3 0.291 \left(\frac{D}{\text{kpc}}\right) \left(\frac{\theta_G}{\text{min arc}}\right) \left(\frac{N_0}{\text{cm}^{-3}}\right)^2$$

El número de fotones necesarios para mantener la región ionizada es:

$$N_\nu = 0.76 \times 10^{47} \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}}\right)^{-0.45} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{0.1} \left(\frac{D}{\text{kpc}}\right)^2 \left(\frac{S_\nu}{Jy}\right)$$

S_ν y θ_G : de las observaciones en el continuo de radio.

Errores en las mediciones.

Distancia y T_e de otras observaciones (RRL, otras líneas, etc)

Factor de llenado

- El factor de llenado f :
 - inhomogeneidades de la nebulosa
 - geometría (cavidades por vientos!)
- Se define como $f = \frac{V'}{V} < 1$, V' es el volumen *real* ocupado por el plasma.
- al no tener en cuenta f estamos calculando un límite superior para la masa e inferior para la densidad,
- $\Rightarrow \theta'_G = f^{1/3} \theta_G$
- $N_0 \propto \theta_G^{-3/2} \Rightarrow N'_0 = \frac{N_0}{f^{0,5}}$
- $M \propto \theta_G^{3/2} \Rightarrow M'_0 = M_0 f^{0,5}$
- Estas estimaciones tienen mucho error: f , D
- para estimar n_e a partir de cocientes de líneas no se necesita D
- $n_e(\text{lin-proh}) > n_e(\text{cont})$ (porque la emisividad de la línea depende de $n_e \rightarrow$ se observan las zonas con mayor densidad)

Estimación de flujos

Tener datos de interferómetro + disco simple es fundamental para medir TODO el flujo.

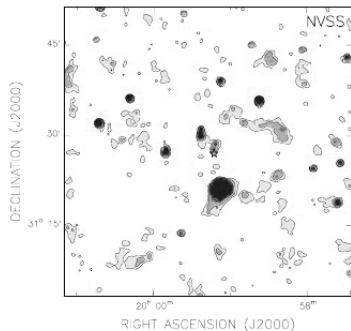
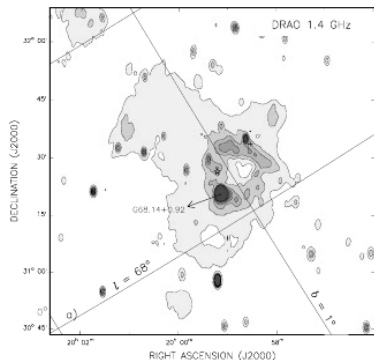


FIG. 3.—A 1.4 GHz radio continuum image from the NVSS survey (Condon et al. 1998). The star symbol indicates the position of WR 130. Resolution is 45". Contour levels are 1, 2, and 5 mJy beam⁻¹.

Estimación de flujos

La resolución espacial del instrumento es importante para discernir el flujo que proviene de la fuente bajo estudio.

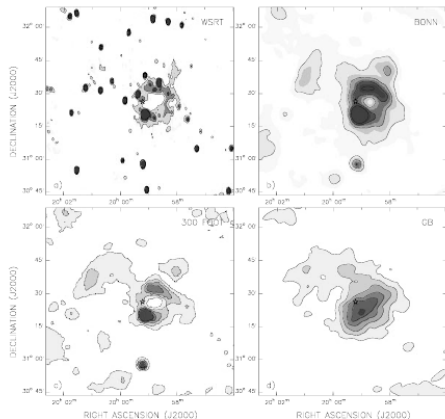


FIG. 2.—Radio continuum images of the same area as in Fig. 1, obtained from various surveys. The star symbol indicates the position of WR 130. (a) 327 MHz (Taylor et al. 1996), ($\theta_x \times \theta_y = (1' \times 19')$). Contour levels are at 15–60 K in steps of 15 K. (b) 2695 MHz (Fürst et al. 1990), ($\theta_x \times \theta_y = (4.3 \times 4.3)$). Contour levels are at 0.2–0.8 K in steps of 0.2 K. (c) 4.85 GHz (Condon et al. 1994), ($\theta_x \times \theta_y = (3.7 \times 3.3)$). Contour levels are at 0.01–0.17 K in steps of 0.04 K. (d) 8.35 GHz (Langston et al. 2000), ($\theta_x \times \theta_y = (9.7 \times 9.7)$). Contour levels are at 0.01–0.05 K in steps of 0.01 K.

- Las RHII contienen polvo
 - dispersan la luz de las estrellas
 - absorben fotones $\rightarrow$ re-emiten en el infrarrojo medio y lejano, via radiación térmica.

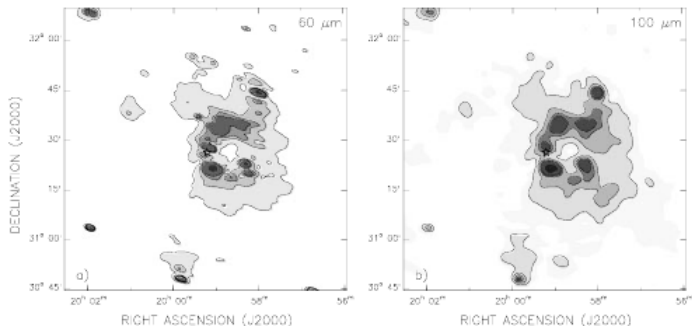


FIG. 4.—HIREs maps of the same area as in Fig. 1. The star symbol indicates the position of WR 130. (a) 60 μm . Resolution (slightly variable over the map) is $1.62 \times 1'$ at a P.A. of 154° east of north. Contour levels are $15\text{--}60 \text{ MJy sr}^{-1}$ in steps of 15 MJy sr^{-1} . (b) 100 μm . Resolution is $2.12 \times 1.83'$ at a P.A. of 150° east of north. Contour levels are $50\text{--}170 \text{ MJy sr}^{-1}$ in steps of 40 MJy sr^{-1} .

Esta emisión la estudiaremos más adelante.

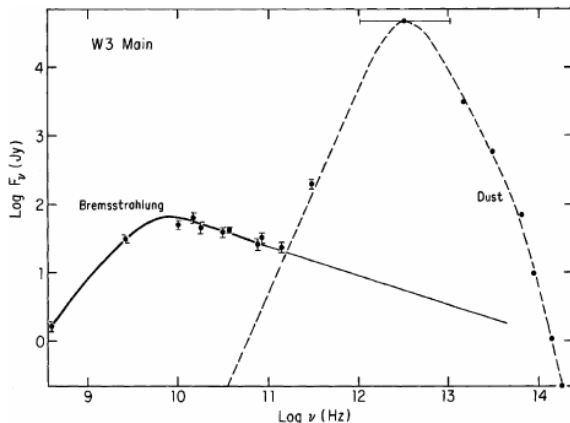


Fig. 2.16 The flux density in Janskys plotted against frequency from approximately 400 MHz ($\lambda = 75$ cm) through 178 THz ($\lambda = 1.7 \mu\text{m}$) for the H II region W3. The *solid curve* marks the free-free or Bremsstrahlung emission and the *broken curve* marks the thermal emission from warm dust embedded in the H II region. The *filled circles* show the observations. From Gordon (1988). Reproduced with permission of Springer-Verlag

Líneas de recombinación en radio (RRL)

- Se producen para estados excitados n grandes, $n > 50$
- La diferencia de energía entre esos n tan altos es muy chica $\implies$ la radiación resultante es en frecuencias de radio, $\nu < 50\text{GHz}$
- La población en estos estados altamente excitados es baja (10^{-5} respecto al fundamental) pero las nebulosas son tan grandes que la abundancia de H es suficiente como para que estas líneas sean detectables.
- Estas líneas son menos intensas que las ópticas PERO no sufren extinción: se pueden detectar en RHII que aún están embebidas en nubes densas.
- El coef. de Einstein A_{ul} es mayor para transiciones con $\Delta n = 1$, un electrón que se recombina al nivel 110 tiene mayor probabilidad de caer al nivel 109 que a los demás.

La frecuencia de estas líneas es:

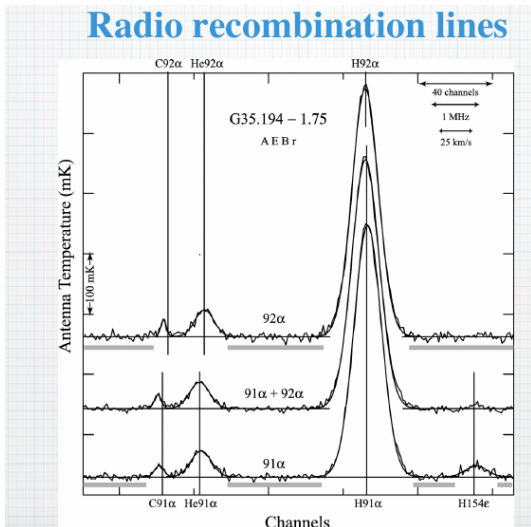
$$\nu = R c Z^2 \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n + \Delta n)^2} \right]$$

R es la cte de Rydberg, depende de la especie, para H:

$$R_H = 1,09678 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$$

Δn	Designation	Example
1	α transitions ($Xn\alpha$)	H106 α (n=107–106)
2	β transitions ($Xn\beta$)	He109 β (n=111–109)

Radio recombination lines



Son líneas anchas y gaussianas: permiten estimar propiedades físicas de la nebulosa: velocidad, temperatura, abundancias, turbulencia del gas, etc

Ensanchamiento de la línea

Perfil de línea:

- **Ancho natural:** principio de incertidumbre de Heisenberg:

$$\Delta E \Delta t \sim h/2\pi$$

Perfil Lorentziano. Importante para líneas ópticas pero no en radio porque es proporcional al A_{ul} , que es chico generalmente. En una propiedad intrínseca de la transición atómica.

- **Ensanchamiento Doppler:**

Se produce debido al movimiento aleatorio de las partículas del gas. Intrínseco de la fuente y no de la línea.

Distribución Maxwelliana de velocidades

Corrimiento Doppler:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = \frac{\Delta v}{c} \implies \nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\Delta v}{c} \right)$$

El ensanchamiento Doppler se produce por dos factores: el movimiento turbulento del gas y el movimiento térmico de las partículas. $\Delta V_{obs}^2 = \Delta V_{th}^2 + \Delta V_{turb}^2$

La contribución del ensanchamiento debido a los movimientos térmicos se puede calcular a partir de la temperatura del gas y la masa de las partículas en el medio interestelar utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta V_{th} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Movimientos turbulentos : más difíciles de estimar. Si se considera una turbulencia homogénea e isotrópica:

$$\Delta V_{turb} \approx \sqrt{\frac{v_{turb}^2}{2}}$$

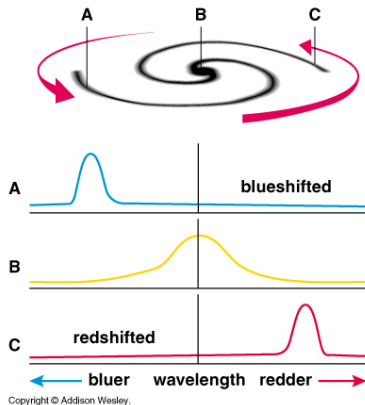
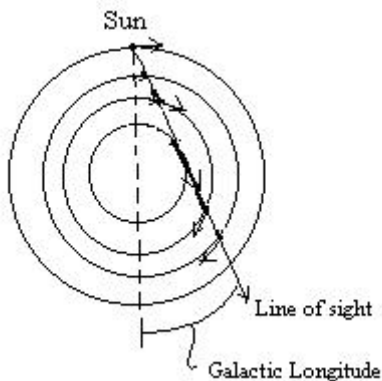
Se define Temperatura Doppler (a partir del FWHM) T_D tal que

$$T_D = \frac{mc^2}{k} \frac{\Delta V^2}{2}$$

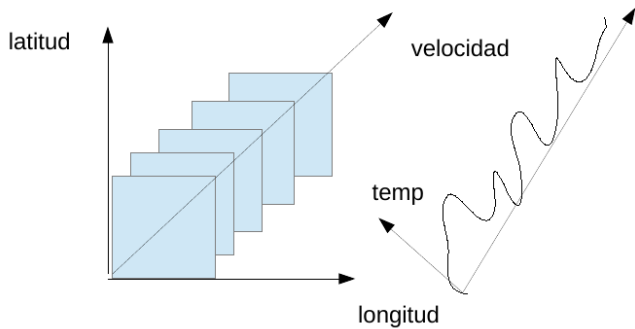
Este ancho es el que medimos. La T_D representa el ensanchamiento total de la línea y refleja tanto el efecto térmico como el de otros procesos, como la turbulencia.

- Corrimiento por movimientos ordenados: movimientos del gas alrededor del CG

RRL: Distancias!



RRL: Distancias!



RRL: Distancias!

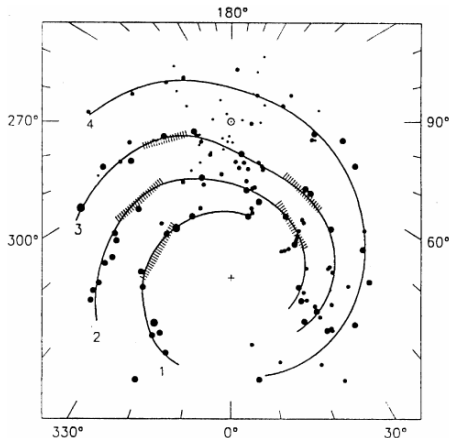


Fig. 3.13 A spiral model of the Galaxy originally proposed by Georgelin and Georgelin (1976) but now including the results of additional RRL surveys of H II regions. *Filled circles* represent the H II regions and *shaded areas* are directions of intensity maxima in the radio continuum and in neutral hydrogen. In each arm, the *lines* are cubic splines fitted to the H II region positions. A *number* marks each arm, the *cross* indicates the Galactic center, and the *open circle with dot* indicates the position of the Sun. From Taylor and Cordes (1993)

Las RRL están superpuestas a la emisión térmica del continuo de la RHII

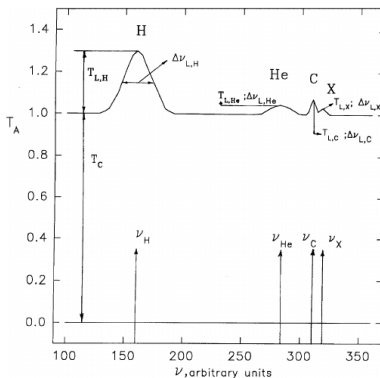


Fig. 3.2 A hypothetical spectrogram toward an HII region showing the radio recombination lines of hydrogen, helium, and carbon. The lines from heavier elements are merged into common line marked "X." The composite profile contains information about the ISM in the form of the measured antenna (brightness) temperatures of each of the constituent lines (T_L), their full widths at half-maximum ($\Delta\nu_L$) and their line shapes, the observed (Doppler-shifted) frequencies of the line centers (ν), and the underlying continuum temperature (T_C) contributed by the free-free emission from their ionization products

- Para estimar la T_e se asume ETL $\implies T_e = T_{exc}$ (n grandes muchas colisiones y coeficientes A_{ul} chicos)
- La T_e se puede estimar a partir del cociente de las temperaturas de la emisión de la línea y la de la emisión del continuo, asumiendo que $\tau_\nu^L \ll 1$ y $\tau_\nu^C \ll 1$.

Entonces:

$$T_L = \tau_\nu^L T_e$$

$$T_C = \tau_\nu^C T_e$$

$$\implies \boxed{T_L/T_C = \tau_\nu^L/\tau_\nu^C}$$

RRL: Temperatura electrónica

Teníamos, la profundidad óptica en el continuo (causada por la absorción de la radiación libre-libre)

$$\tau_{\nu}^C \approx 0.0824 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.35} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-2.1} \left(\frac{EM}{\text{cm}^{-6} \text{ pc}} \right).$$

y de la Clase 1, teníamos que: $\tau_{\nu}^L = \frac{c^2 A_{ul}}{8\pi\nu_0^2} \Phi_{\nu} (e^{h\nu_0/kT_{exc}} - 1) N_u$

Teniendo en cuenta que para RRL

$h\nu \ll kT_e \implies (e^{h\nu_0/kT_{exc}} - 1) \approx h\nu_0/kT_{exc}$, adoptando que el perfil de línea para el centro de la línea es $\Phi_0 = 2(\ln 2)^{1/2} \pi^{-1/2} \Delta\nu^{-1}$ ($\Delta\nu = \text{FWHM}$), y teniendo en cuenta la expresión para A_{ul} se llega a:

$$\tau_o^L \approx 503 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-5/2} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \left(\frac{EM}{\text{cm}^{-6} \text{ pc}} \right),$$

$$\Delta\nu = \nu \frac{\Delta v}{c}.$$

Entonces, podemos calcular T_e a partir del cociente de la temperatura de la línea y la temp. de brillo del continuo de radio.

$$\frac{T_L}{T_C} = \frac{\tau_o^L}{\tau_\nu^C}.$$

$$\frac{T_L}{T_C} = 6110 \left(\frac{T_e}{\text{K}} \right)^{-1.15} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{1.1} \left(\frac{\Delta v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1}.$$

$$T_e = 1960 \text{ K} \left(\frac{T_L}{T_C} \right)^{-0.87} \left(\frac{\nu}{\text{GHz}} \right)^{0.96} \left(\frac{\Delta v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-0.87}.$$

- Al momento sólo son detectables en nuestra galaxia. Interferometría.
- Es uno de los métodos más precisos para medir temperaturas

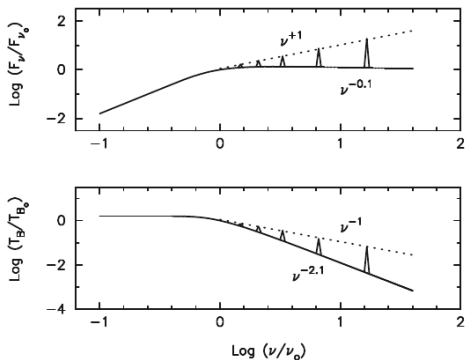


Figure 6.3: Radio recombination lines only appear in the optically thin part of the spectrum, above the turnover frequency. The separation between consecutive α lines (of different n levels) increases with the frequency, so at lower frequencies the lines are more closely spaced with respect to one another. The intensity of the lines relative to the background continuum rises as $\nu^{1.1}$.

$T_L/T_C \propto \nu^{1.1} \implies$ las RRL son más intensas, con respecto al continuo, a
frec más altas (+ fáciles de detectar)

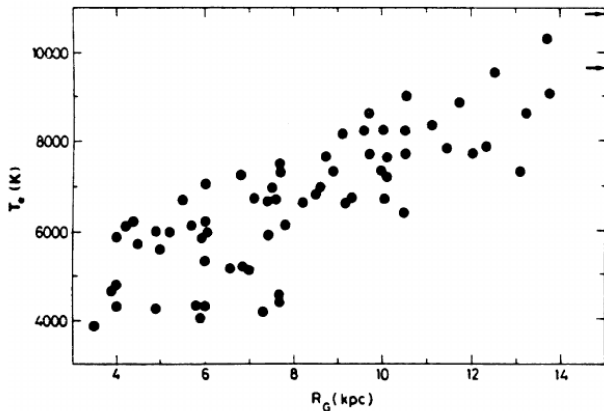


Fig. 3.7 Electron temperature of H II regions as a function of Galactocentric radius. The horizontal arrows at upper right indicate the N66 and 30 Doradus nebulae in the Magellanic Clouds. From Shaver et al. (1983). Reproduced with permission of Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

Why should this gradient exist? Shaver et al. (1983) suggested that the temperature gradient could be explained by a corresponding Galactocentric gradient of metallic elements³ in the Galaxy. Of these, the most abundant are oxygen and nitrogen that cool H II regions through radiation in spectral lines. Collisions with free electrons easily excite metastable levels associated

HIPASS: HI Parkes All-Sky Survey (MNRAS 450, 2025, 2015)

The HIPASS survey of the Galactic plane in radio recombination lines

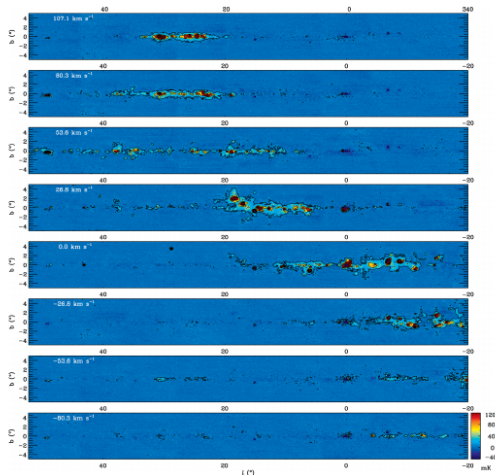
H168 α , H167 α , and H166 α 

Figure 5. Maps of the RRL emission at different velocity channels, as indicated in the top-left corner of each panel. The longitude coverage of the survey is divided into three sections as in Fig. 2. Contours are at 10, 50, 90, 190, 290, and 390 mK.

Colores: RRL. Contornos: Radio continuo (libre-libre)

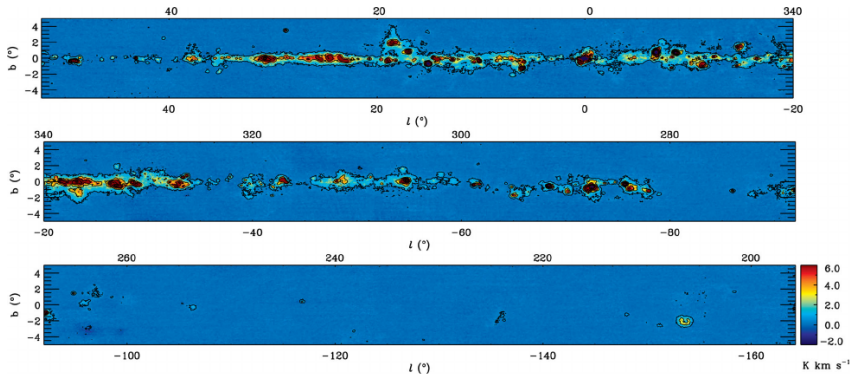


Figure 7. Map of the total RRL integrated emission in units of K km s^{-1} and at a resolution of 14.4 arcmin. The contours correspond to the free-free brightness temperature distribution at 1.4 GHz (Section 3.4); they are at 1.5, 7.5, 13.5, 25, 45, 65, and 85 K. The longitude coverage of the survey is divided into three sections as in Fig. 2.

En ese Survey encuentran que:

- la T_e media del plano galáctico es 6000 K, en las cercanías del Sol, de 7000 K y en la zona del CG, ≤ 4000 K
- T_e decrece hacia el CG debido al aumento de abundancia de metales $\rightarrow$ hay más emisión de líneas prohibidas $\rightarrow$ mayor tasa de enfriamiento

$$T_e(\text{K}) = (3609 \pm 479) + (496 \pm 100) R_G(\text{kpc})$$

(este valor es un 5-10 % más alto que el encontrado en trabajos previos).

$R_G \rightarrow$ curva de rotación galáctica usando la velocidad central de la línea

- la incerteza en T_e es del orden de 1000 K
- el gradiente de T_e en la galaxia refleja el gradiente de abundancia
- a partir de observaciones de RRL de H y de He $\rightarrow N_{\text{He}}/N_{\text{H}} \sim 0,08 \rightarrow$ el factor de corrección para considerar He en la emisión libre-libre es de $\sim 10\%$

Diferencia de presiones $\rightarrow$ la RHII se expande.

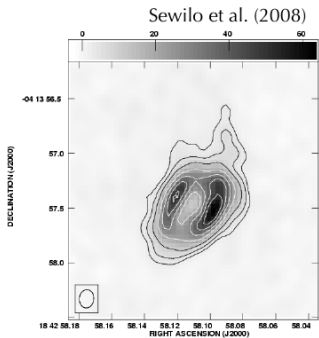
Tamaños más chicos $\rightarrow$ más jóvenes

De acuerdo a su densidad y tamaño se clasifican en:

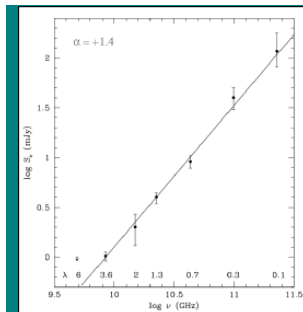
- Hiper-compactas
- Ultra-compactas
- Compactas
- Clásicas

- Hiper-compactas (HC HII)

- Muy pequeñas: $R \leq 0,03$ pc
- $n_e > 10^6 \text{ cm}^{-3}$
- $ME \geq 10^{10} \text{ cm}^{-6} \text{ pc}$
- índice espectral en el continuo de radio: $S_\nu \sim \nu^\alpha$, $\alpha \sim 1$ ($\tau \gg 1$) $\rightarrow$ difícil detectarlas en radio
- RRL muy anchas, con $\Delta v > 40 \text{ km/s}$, algunas $> 100 \text{ km/s}$
- asociadas a formación estelar masiva reciente $\rightarrow$ estudiar sus propiedades físicas ayuda a determinar las condiciones en las que se forman estas estrellas
- se detectan en el continuo mm



Shell-like morphology
600 AU cavity in a
Hypercompact HII region



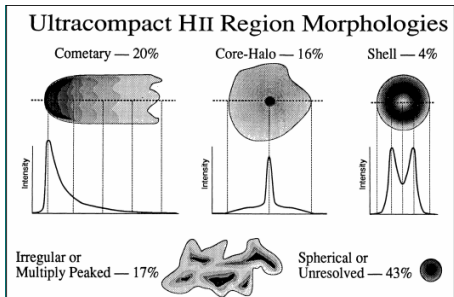
Sewilo et al. (2004)

Figura: emisión a 7mm, imagen del VLA

RHII: clasificación

- Ultra-compactas (UC HII)

- $R \leq 0,1$ pc
- $n_e > 10^4$ cm $^{-3}$
- $ME \geq 10^7$ cm $^{-6}$ pc
- Se distinguen de las HC HII porque sus RRL son menos anchas, $\Delta v \sim 25 - 30$ km/s,
- se detectan en ondas de radio, mm e infrarrojo, están entre los objetos más brillantes a $100 \mu\text{m}$
- la estrella central ya dejó de acretar gas



RHII: clasificación

- Compactas (C HII)
 - $R \sim 0,05 - 0,4$ pc
 - $n_e \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - algunas ya se detectan en el óptico, se detectan en continuo de radio, IR
 - morfología variada

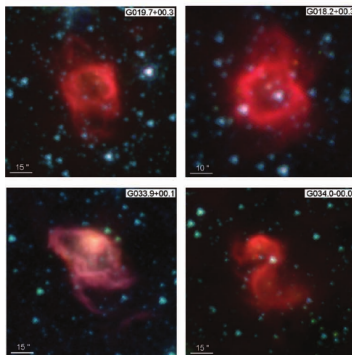


Figure 1. Colour images of 18 compact H II regions, where blue colours correspond to 3.6 μm , green to the 4.5 μm and red colours correspond to 8 μm emission. In all cases, Galactic north is located towards the top of the images, and Galactic east (i.e. higher longitudes) is to the left. It will be noted that many of the emission structures are very closely similar, although there is also evidence for more extensive and complex longer wave emission, associated (in certain cases) with exterior PDRs.

- Clásicas
 - $R \geq 10$ pc
 - $n_e > 10^2 \text{ cm}^{-3}$
 - estructura difusa e irregular
 - se detectan en ondas de radio, infrarrojo y óptico (H_{α})

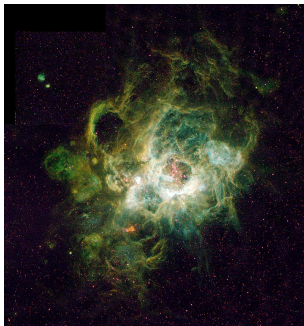


Table 6.2: Physical Parameters of HII Regions

Class of Region	Size (pc)	Density (cm^{-3})	Emission Measure (pc cm^{-6})	Ionized Mass ($M_{\odot}$)
Super-Giant	$\gtrsim 100$	~ 10	$\gtrsim 10^4$	$10^6 - 10^8$
Giant	~ 100	~ 30	10^5	$10^4 - 10^6$
Classical	~ 10	~ 100	10^5	$10^2 - 10^4$
Compact	$\lesssim 0.5$	$\gtrsim 5,000$	10^6	~ 1
Ultracompact	$\lesssim 0.1$	$\gtrsim 10^4$	$\gtrsim 10^7$	$10^{-3} - 10^{-1}$

- Las RHII son observables en ondas de radio.
- A partir de la medición del flujo se pueden estimar sus parámetros físicos: masa, densidad, T_e , ME
- Medir el flujo no es trivial, varias fuentes de error
- es importante tener una buena determinación de la distancia a la fuente
- es necesario adoptar una geometría para la fuente. Factor de llenado.
- el estudio de las RRL es muy utilizado para estimar velocidades (distancias) y temperaturas.
- las RHII evolucionan en el tiempo, se expanden, varían su densidad y eso genera que vayan siendo detectables en distintas bandas del espectro electromagnético.