

0/6.086.

Inv. 983

**BIBLIOTECA
INSTITUTO ARGENTINO
de Radioastronomía**
Referencias

T R A B A J O D E S E M I N A R I O
=====

F O R M A C I Ó N D E H I D R O G E N O M O L E C U L A R
E N E L E S P A C I O I N T E R E S T E L A R

P. M Ę S Z Á R O S

M A R Z O 1967.

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES.

P A R T E I.

I N T R O D U C C I Ó N

a./Objeto del trabajo.

Se trata de estudiar una zona altamente obscurecida, situada en la constelación de Ophiucus /coordenadas galacticas alrededor de $l = 353$, $b = 16$ / mediante la radiación de 21 cm a fin de obtener evidencia indirecta en pro o en contra de la existencia de hidrógeno molecular en ella.

Desde hace mucho tiempo se sospecha la existencia de hidrógeno molecular en el espacio interestelar siendo el mecanismo de formación más plausible la recombinación de átomos de hidrógeno sobre la superficie de granos interestelares / Van de Hulst 1948, Gould y Salpeter 1963 /. Estos últimos autores sostienen que los átomos de hidrógeno neutro, cuya densidad media en una nube típica es de 10 átomos/ cm^3 son adsorbidos físicamente por los granos, cuya temperatura está entre 15 y 20°K , o sea son capturados por un pozo de potencial tipo Lennard-Jones. En esas condiciones, durante el tiempo de residencia de los átomos sobre el grano existe la posibilidad de que se encuentren dos átomos, recombinándose, ya que tienen una gran movilidad superficial debida a efecto túnel. Entonces si los spines electrónicos forman singulete, los dos átomos son atraídas por la cola del potencial $^1 \sum_g$ del H_2 , hay recombinación y la energía de formación se entrega al cristal. Subsecuentemente las moléculas de H_2 son eyectadas térmicamente del cristal.

La temperatura de los granos se estima entre 15 y 20°K , y su composición / relativa / sería:

100	30	20	10	5
H_2O	H_2	CH_4	NH_3	MgH y otros

En un artículo más reciente Van de Hulst et al /1965/ muestran que este proceso de adsorción física no es eficiente para convertir átomos de hidrógeno en moléculas, dentro de intervalos de tiempo comparables a la edad de la galaxia para una nube típica, pero dejan abierta la posibilidad de que un mecanismo combinación de adsorción química y física reemplaze ventajosamente al sugerido por Gould y Salpeter.

En estos dos últimos mecanismos, cuanto mayor es el área de granos disponible, mayor sería la conversión de H en H₂.

El problema para la detección experimental de tal proceso es que la atmósfera terrestre absorbe todas las líneas del H₂, ya que éstas se hallan, o bien en el ultravioleta lejano, o bien entradas en el infrarojo, y son absorbidas por la atmósfera terrestre.

Mientras no se hagan observaciones mandando satélites o cohetes fuera de la atmósfera terrestre, sólo queda la detección por medios indirectos.

Un método para ello es el empleado por S. Garzoli y C.M. Varsavsky /1965/, que consiste en medir la densidad N_H de hidrógeno atómico en una columna de sección unitaria a lo largo de la visual en función de A, la absorción óptica, siendo esta última proporcional a la densidad de granos.

Estudiando una zona en Taurus, altamente obscurecida, obtienen una relación inversa entre N y A, lo cual está de acuerdo con la teoría de formación de H₂ sobre granos.

Hasta ahora no se han estudiado otras zonas y es de sumo interés ver si en otras nubes oscuras sucede lo mismo.

Ello constituye el objeto del presente trabajo.

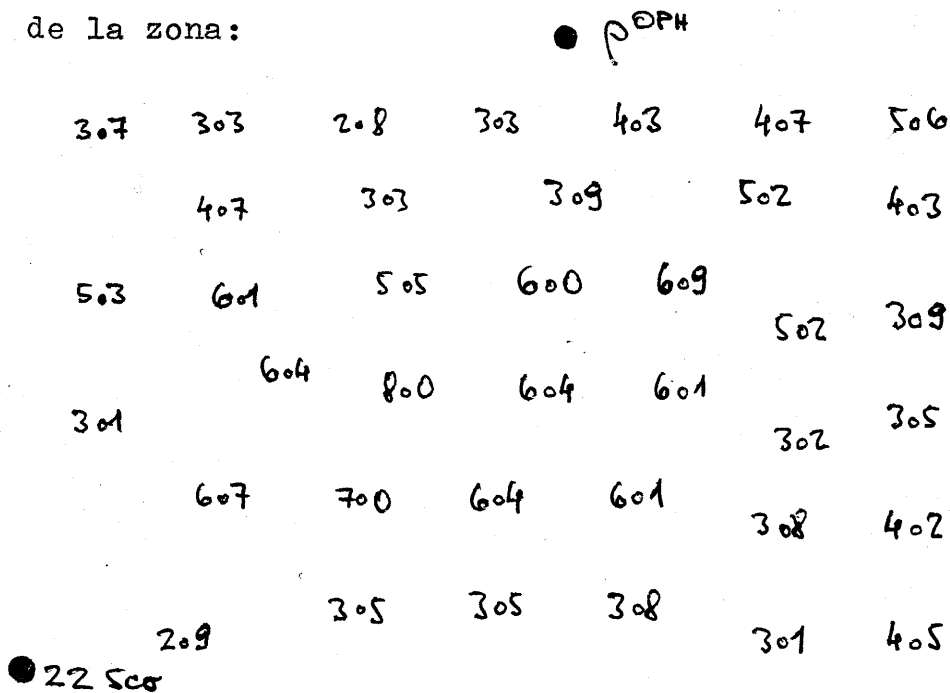
b./ Zona estudiada.

Un trabajo publicado por B. Bok en el Astronomical Journal, año

1956: "On two highly obscured zones", informa que alrededor de las estrellas ρ Ophiuci y 22 Scorpii existe una nube opaca, que absorbe la radiación electromagnética /óptica/ proveniente de detrás de ella, por lo cual. con medios ópticos se ve una mancha oscura en esa zona.

La nube opaca consiste en granos de polvo interestelar, que difractan la luz y Bok presenta un estudio detallado de la zona, en un cuadrado de 2 1/2 grados por 2 grados, midiendo la absorción óptica mediante placas fotográficas de larga exposición y comparándolas con una zona cercana no obscurecida.

Tomando como unidad de absorción una magnitud estelar, y usando un reticulado de aproximadamente $0,25^\circ$, obtiene el siguiente mapa de la zona:



La nube puede representarse por un modelo circular y puede verse que la absorción es máxima en el centro, donde llega a 8 magnitudes estelares./ Hay que recordar que la magnitud estelar, tal como se la define, es una medida logarítmica. Una estrella de 1^a magnitud es 2,5 veces más brillante que una de 2^a , etc./

Se estima que esta nube se halla a una distancia de unos 200 parsecs del Sol, y que tiene un radio medio de 3,5 a 5 parsecs

$1 \text{ pc} = 3,2 \text{ años luz} = 206.265 \text{ veces la distancia Tierra-Sol.}$

Una aproximación razonable para la densidad media de los granos de polvo es : $1,1 \text{ gr/cm}^3$

El modelo circular deducido por Bok para la nube es el siguiente

Distancia al centro		magn.	Dens. granos
en grados	en parsecs		
0.00	0.0	8.0	1.3×10^9
0.25	0.9	6.5	1.0×10^9
0.50	1.8	5.0	8.0×10^8
1.00	3.5	3.3	5.3×10^8
1.50	5.3	2.0	3.2×10^8
2.00	7.0	1.0	1.6×10^8

Ahora bien, la resolución angular del radiotelescopio del I.A.R. es de medio grado, es decir, al apuntar la antena en una cierta dirección lo que se recibe es la radiación proveniente de todo el hidrógeno neutro que cae dentro de un cono cuyo "radio" es 0.25° .

Como el reticulado de Bok es precisamente 0.25° , no hay inconveniente en observar todos los puntos de la nube estudiados por él, pues en ninguna parte hay superposición excesiva.

P A R T E II.

DESCRIPCIÓN DE LA ANTENA
Y SUS PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES .

a./Generalidades.

La antena sirve para transformar energía electromagnética radiante en diferencias de potencial. La del radiotelescopio del IAR usado para este trabajo consiste en un paraboloide de 30 m. de diámetro, montado ecuatorialmente, con una relación focal 0,5. La superficie reflectora consiste en una malla de aluminio con espaciado de 2 cm. Sobre el foco se halla la antena propiamente dicha, un dipolo, y inmediatamente encima está el front-end del receptor, con el primer mezclador y el amplificador cascode, estando el resto del receptor situado en la sala de control. El movimiento en ángulo horario de la antena se hace con un motor sincrónico, que tiene dos velocidades, una rápida y otra lenta. La velocidad lenta es la de "seguimiento", es decir, hace girar la antena con velocidad angular igual a la sidérea, lo cual permite observar una misma zona del cielo durante cuatro horas, correspondiente al rango de -30° , $+ 30^{\circ}$ de desplazamiento posible a ambos lados del meridiano. En declinación la mueve un motor asíncrono, también de dos velocidades, que le permite enfocar el polo Sur celeste /desplazado en unos 65° de la vertical en Pereyra/por un lado. y el ecuador celeste por el otro.

La posición de la antena se controla desde la sala mediante servomecanismos a los engranajes de arrastre de ésta.

b./Potencia.

Una dada radiofuente se caracteriza por su densidad de flujo S, y un radio-telescopio por su "área efectiva" colectora A, que se define de forma tal que la potencia disponible, P es

$$P = S A$$

La antena en cuestión es direccional y además es también selectiva en frecuencias, aunque con un ancho de banda B muy grande. La radiación de 21 cm que llega a ella es incoherente, polarizada en cualquier dirección, pero hasta ahora no se ha logrado hacer antenas que acepten los dos componentes de polarización, por ello se hace necesario introducir un factor 1/2 .

Entonces en definitiva, la potencia P_{in} colectada por el radiotelescopio es

$$P_{in} = \frac{S A B}{2}$$

S = dens.flujo de la radiofuente

A = área efectiva colectiva

B = ancho de banda

c./Ruido de fondo.

Si uno aplica un detector sensitivo a la salida de la antena, conectado a un parlante, sin señal de entrada, escucha un ruido como de una catarata. Es el ruido de fondo, que aparece siempre y cuyo límite inferior absoluto viene dado por el ruido térmico de las resistencias presentes en la antena y en el receptor.

Se puede demostrar que, si tenemos una resistencia R, y un amplificador sensible que trabaja alrededor de ν con ancho de banda B, el todo a una temperatura T, que el valor cuadrático medio del potencial de ruido a través de los terminales de R es

$$\overline{e^2} = 4. k T R B \quad / \text{Nyquist}/$$

Su valor medio por supuesto es cero. ya que es al azar.

Notamos, que no depende de la frecuencia ν alrededor de la cual está centrada B.

Ahora bien, existe una cierta "resistencia de antena", que se puede definir a partir de la energía absorbida por ella, que ha transformado

en energía radiante, cuando se la usa como transmisor.

Se ha demostrado que esta resistencia de antena también produce ruido térmico. Se define entonces como TEMPERATURA DE ANTENA, a la temperatura a que debería estar la resistencia de antena para producir el ruido que produce. Generalmente esta temperatura es la ambiente.

d./Direccionalidad y ganancia.

Si la antena fuera usada como emisor, la densidad de flujo no sería la misma en todas las direcciones; variaría de un punto a otro sobre una esfera de radio d según

$$S_d = g(\theta, \varphi) \frac{P}{4\pi d^2}$$

donde $g(\theta, \varphi)$

es la ganancia en la dirección θ, φ , y es la relación entre densidad de flujo producido por una antena isotrópica a esa misma distancia.

O sea $g > 1$ para ciertas direcciones y cumple que $\int_{\text{esf. d}} g d\omega = 4\pi$

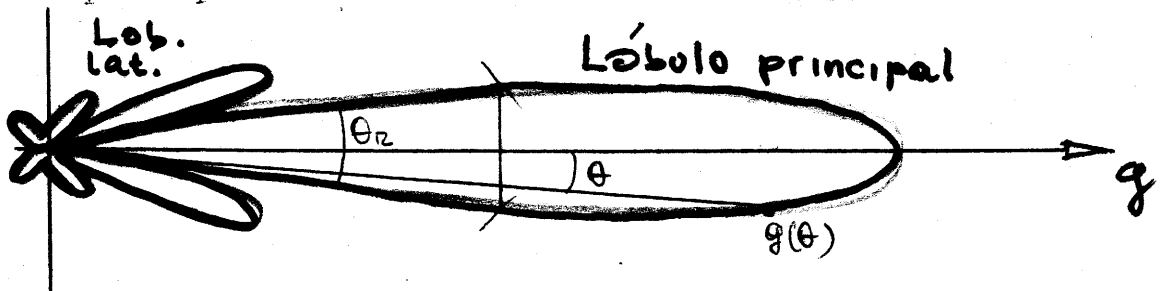
para que $\int_{\text{esf. d}} S_d \cdot d\omega = P$

En recepción la situación es idéntica; ahora es el área colectora la que depende de θ y φ

$$P = A(\theta, \varphi) S$$

$$g(\theta, \varphi) = 4\pi A(\theta, \varphi) / \lambda^2$$

El esquema polar de radiación de la antena es



En general la ganancia de los lóbulos secundarios es entre lo y 200 veces menor que la del principal, pero no es unusual que colecten un 30% de la energía total recibida. *desusado*

En la práctica se define como resolución angular del radiotelescopio \times la distancia angular entre los dos puntos en que la ganancia del lóbulo principal disminuye a la mitad.

Para el radiotelescopio del IAR la resolución angular es de $0,5^\circ$

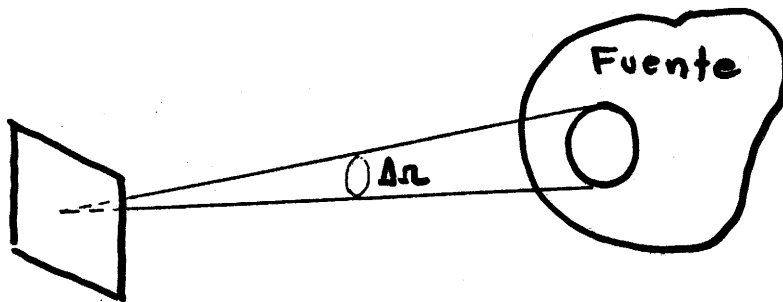
e. Brillo y temperatura.

La temperatura de brillo de una radiofuente se define por la relación

$$\lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta\Omega} = \frac{2kT_B}{\lambda^2}$$

Esto no es más que la aproximación de Rayleigh-Jeans a la ley de Planck para frecuencias de radio.

Se hace necesaria la definición de temperatura de brillo porque lo que se observa no es una fuente puntual, para lo que bastaría dar S , densidad de flujo, sino que se observa la radiación proveniente de todo un cono. En este caso se usa el brillo, definido como densidad de flujo recibido de un elemento de fuente que subtende un cierto ángulo sólido, dividido por este ángulo sólido.



Si referimos el brillo a un intervalo de frecuencias de un c/seg, se obtiene el brillo monocromático.

Para un cuerpo negro, según Planck es

$$B(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

y en la aproximación de radio de Rayleigh

$$B(\nu) = \frac{2kT}{c^2} \nu^2 = 2kT/\lambda^2$$

Entonces la temperatura de brillo de una radiofuente /o de una zona del cielo/ es la temperatura que debería tener un cuerpo negro que tiene el mismo brillo monocromático que el observado.

Temperatura de antena: Si tenemos una fuente extensa de temperatura de brillo uniforme T_s que subtende un ángulo sólido ω lo suficientemente fuerte como para desprestigiar la emisión de fondo del cielo, podemos calcular la temperatura T_a de antena que inducirá. Si suponemos que la ganancia es constante dentro del cono de resolución Ω y nula fuera de él, la temperatura de antena es la temperatura a la que habría que llevar la resistencia de antena para que produzca un ruido de igual intensidad que la fuente.

Hay que recordar que la señal de 21 cm del Hidrógeno neutro también es, esencialmente, ruido, pues es al azar. También es la temperatura de un cuerpo negro que produciría la misma intensidad de ruido, si rodeara a toda la antena. Según esta última definición, el cuerpo negro irradiaría una potencia

$$\frac{1}{2} (2 k T_a \Omega / \lambda^2) \quad / \text{ya que } g = 0 \text{ fuera de } \Omega /$$

La fuente real en cambio irradia $\frac{1}{2} \cdot 2 k T_s \omega / \lambda^2$

y por definición de T_a , temperatura de antena, estas dos potencias deben ser iguales, luego

$$T_a = T_s \frac{\omega}{\Omega} \quad \text{si } \omega \geq \Omega, T_s = T_a$$

En el caso de una fuente puntual no se usa temperatura de brillo, sino S , densidad de flujo, y en ese caso la temperatura de antena, como la potencia recibida es $S A B / 2$

debe ser

$$T_a = P_m / k B$$

En el presente trabajo no se observan fuentes puntuales, sino fuentes extensas, y es precisamente $\omega = \Omega$, o sea $T_s = T_a$.

f. Descripción del receptor.

El receptor es esencialmente un superheterodino de doble conversión, cuya misión es medir la energía recibida por la antena dentro de una cierta banda de frecuencias, dando la distribución de la energía en función de la frecuencia dentro de esa banda. Se lo puede considerar como un espectrógrafo de radiofrecuencia.

La energía captada por el reflector es enfocada por este en el pequeño dipolo de media onda, dimensionado para recibir principalmente la longitud de onda de 21 cm.

$$/ 1,420 \text{ Mc/seg/}$$

Como una señal de esta frecuencia solo es amplificable con un maser, del cual no se dispone, además de presentar algunos difíciles problemas técnicos, se hace pasar la señal a un diodo mezclador de germanio al que se inyecta también la señal de un primer oscilador local. Este es un elemento no lineal, a la salida del cual se obtienen varias frecuencias, pero todos son filtradas menos una, de frecuencia

$$V_{\text{señal}} - V_{\text{osc.loc.}}$$

que viene a estar alrededor de 27 Mc. Esta señal se amplifica y se convierte a 2,5 Mc, pasando a un sistema de 56 filtros que seleccionan bandas de 12 Kc de ancho, separadas una de otra por 18 Kc.

La salida de estos filtros es rectificadora en un detector cuadrático, y después de amplificarla se la integra durante unos dos minutos / cuatro en el trabajo presente/. Las tensiones así obtenidas son registradas secuencialmente sobre una banda de papel en un "Recorder". Cada una de ellas es exactamente proporcional a la energía recibida por la antena dentro de una banda de 12 Kc.

Los 56 registros así obtenidos corresponden a 56 bandas situadas una al lado de otra, y estando el todo centrado alrededor de alguna frecuencia /determinable a voluntad / entre 1419 y 1421 Mc.

Conviene definir algunos parámetros importantes del receptor. Como es sabido, el receptor tiene una cierta cantidad de ruido, propio, originado por efecto térmico en las resistencias y elementos del receptor, y además por el carácter granular de la electricidad, evidenciado en las válvulas. Como todo ruido, cualquiera sea su origen microscópico, presenta iguales características que el ruido térmico de una resistencia, se define una temperatura del receptor equivalente a la temperatura que debería tener la resistencia de antena para producir por sí sola, el ruido del receptor.

Se puede definir también el exceso de temperatura de ruido : es la temperatura a que habría que llevar la resistencia de antena para que, él solo / con receptor ideal / produzca un ruido equivalente al ruido de antena + el ^{de} receptor, menos 290° K. O sea si

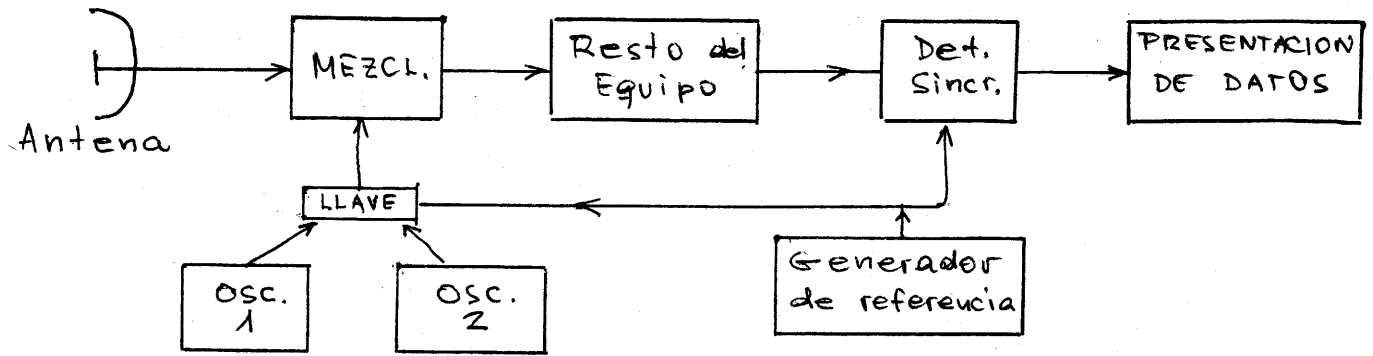
$$P' = K(T_A + T_R)BG$$

es el ruido efectivo a la salida /donde G es factor de ganancia de poder del reflector/ entonces

$$T_{ex} = P' / KBG - 290^{\circ}K$$

Ahora bien, para eliminar parcialmente al ruido propio del receptor, que es muy superior al ruido medido /la señal de 21 cm/, se conmuta rápidamente el primer oscilador local entre dos frecuencias distantes unos 2 Mc., y mediante la intercalación de un detector sincrónico en cada canal se logra que la salida sea proporcional, no a la señal de entrada, sino a la diferencia en señal de entrada que se produce cuando el receptor pasa de recibir la banda de frecuencia de interés. /Alrededor de 1,420 Mc/ a otra distante unos 2 Mc, donde se sabe que seguro no hay señal.

Un diagrama en bloque grueso es el siguiente:



O sea la frecuencia en que se recibe es conmutada periódicamente desde la señal en 21 cm /que se mezcla con la señal del osc.1./ hasta una frecuencia fuera de la línea /de comparación/ que se mezcla con la señal del osc.2. La potencia de salida es / a la frecuencia de señal/

$$G_s k B (T_{R_s} + T_A + T_{A_{21}})$$

mientras que a la frecuencia de comparación es

$$G_c k B (T_{R_c} + T_A)$$

- T_{R_s} = Temp. equivalente de ruido del receptor al recibir 21 cm $T =$
- T_A = Temp. equivalente de ruido de la antena
- $T_{A_{21}}$ = Temp. de antena debido a la señal de 21 cm
- T_{R_c} = Temp. equivalente de ruido del receptor al recibir en la zona de comparación.

Si el receptor opera debidamente $G_c = G_s$, $T_{R_s} = T_{R_c}$ y un pulso alcanzará la salida con una intensidad

$$G k B T_{A_{21}}$$

proporcional solamente a la potencia de la línea de 21 cm.

g./Diagrama en bloque.

Corresponde ahora analizar más en detalle el receptor, pues, para poder utilizar debidamente el radiotelescopio es imprescindible conocer, por lo menos a grandes rasgos, todas las partes de éste, a fin de detectar enseguida las posibles fallas que pueden ser muchas, pues se trata de un instrumento muy sensible a todo cambio en sus parámetros externos y internos.

h./Explicación del diagrama en bloque.

Como ya se ha dicho la señal en 1420 Mc se conmuta con otra en 1417 Mc, fuera de la línea. La señal en 1420 /21 cm/ es mezclada con la recibida por el oscilador local en el mezclador / 1 A /. Veamos como se produce la señal introducida por el oscilador local / 4 / : aquí hay dos partes, el oscilador de frecuencia de referencia / /OFR/ y el oscilador de frecuencia de señal /OFS/. El /OFR/ consta de un oscilador /4 E/ sintonizado en aprox. 58 Mc, y de un circuito duplicador / 4 E-V 3/ que lleva la frecuencia a 116 Mc. Esta es triplicada en / 4E - V4/ dando 348 Mc; esta señal pasa consecutivamente por un híbrido / 4F/ que es un circuito local, con la señal del /OFS/, finalmente un cuadruplicador / 4G / lleva la frecuencia a 1390 Mc. En el / OFS/ hay dos osciladores, el oscilador patrón / 4B / sintonizado en 22.6 Mc y el oscilador variable / 4A / en 2.6 Mc. Estas dos señales son mezcladas en el mezclador / 4C - V1 / obteniendo 25.3 Mc. Estos 25.3 Mc se inyectan al mezclador / 4C - V3 / junto con los 90.7 Mc provenientes del cuadruplicador / 4B - V4 / de la frecuencia del oscilador patrón, obteniéndose 116.1 Mc. Esta señal, que después del triplicador / 4D / sale con frecuencia 348.36 Mc, pasa por el híbrido / 4F / y el cuadruplicador / 4G / ~~y el cuadruplicador / 4G /~~ teniendo a la salida 1393.4 Mc.

Ambos triplicadores están comandados por el manipulador / 4J/ cuyas válvulas son alimentadas por una onda cuadrada contrafase. De la / 4J - V3 / a través de un potenciómetro manual, directamente al triplicador / 4E - V4 / ; y de la / 4J - V4 / a través de un potenciómetro automático comandado por el balance de potencia / 4I / , al triplicador / 4D / . La función del manipulador es conmutar la señal del / OFS / y del / OFR / con la onda cuadrada de 463 c , y la del balance de potencia es balancear la salida del oscilador local en ambas frecuencias. Por medio del motor , esto se hace en forma automática.

De esta manera tenemos la forma en que se generan la dos señales, de 1390 Mc y 1393.4 Mc que se mezclan con las recibidas por la antena en 1417 Mc y 1420.4 Mc en el mezclador 1A. Tendremos a la salida una señal de frecuencia intermedia de 27 Mc. El cristal mezclador es polarizado con el circuito de polarización / 1D /, por donde circula una corriente proporcional a la amplitud de las señales del oscilador local. Ahora bien, la amplitud en ambas frecuencias debe ser la misma. En caso de desbalance visualizado en el osciloscopio, se utiliza esta corriente por intermedio del transformador / 1E / para enviarla al chasis / 4I / de balance de potencia automática, para su corrección.

Los acopladores direccionales / 1A / y / 1C' / están para que la corriente proveniente de la antena y del oscilador local vaya hacia el mezclador y no hacia el circuito de polarización. La señal obtenida a la salida del mezclador es amplificada en el amplificador cascode / 1B / que está en el front-end.

Abajo, la señal es nuevamente amplificada en / 2A / y mezclada con una señal de 25 Mc, teniendo a la salida del conversor / 2A' / una señal de 2 Mc la cual es nuevamente amplificada por dos amplificadores / 2A'' / y / 2B / antes de entrar en los 56 canales.

En cada uno de ellos hay un amplificador y un filtro / 3A / que selecciona bandas de 11 Kc de ancho, separada en 18 Kc de la de los otros canales. La salida del filtro es rectificada en un detector cuadrático / 3B / e inyectada al amplificador de audio / 3C /. Después de pasar por un filtro de 20 c de ancho de banda centrado en 463 c y un condensador cuya finalidad es sacar el ruido y la componente continua, es nuevamente amplificada y detectada en el detector sincrónico / 3C /, Esta corriente continua es inyectada al integrador / 3D /.

Aquí, una llave rotatoria / 7A / recibe en forma consecutiva la información de los 56 canales que nuevamente amplificada por un electrómetro / 8A /, que no es más que un amplificador de corriente continua con alta impedancia de entrada, va al registrador.

===== P A R T E I I I . =====

OBSERVACIÓN DE LOS PUNTOS

a./ Generalidades acerca de la emisión en 21 cm.

La línea de 21 cm del hidrogeno proviene de la transición entre los dos subniveles en que se desdobra el nivel fundamental /estructura hiperfina/. El nivel superior 2 corresponde a la orientación paralela de los spines del nucleo y del electrón, y el inferior 1 a la antiparalela.

Pueden tener lugar los fenómenos de absorción / con transición de 1 a 2/ de emisión espontánea / con transición de 2 a 1 / y de emisión estimulada / absorción de un fotón de energia igual a la de separación, seguido de transición 2 a 1./

Si llamamos A_{21} la probabilidad de emisión espontánea para la transición en cuestión ésta es una constante. La emisión estimulada, por otra parte, depende del numero de fotones $h\nu$ contenidos en el medio, que se expresa mediante la densidad monocromática de flujo

$$P_{\nu} = 4\pi B(\nu) \quad , \text{ en } \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2 \text{ c/ seg.}}$$

en todas las direcciones, siendo $B(\nu)$ el brillo monocromático ya definido.

La probabilidad de pasar da 2 a 1 en un segundo se expresa mediante B_{21} . Similarmente la probabilidad de absorción por segundo se escribe B_{12} . Si g_1 , y g_2 son los pesos estadísticos de ambos niveles, es sabido que

$$1./ \quad g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$$

$$2./ \quad g_2 A_{21} = 8\pi \frac{h\nu^3}{c^3} g_2 B_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} g_1 B_{12}$$

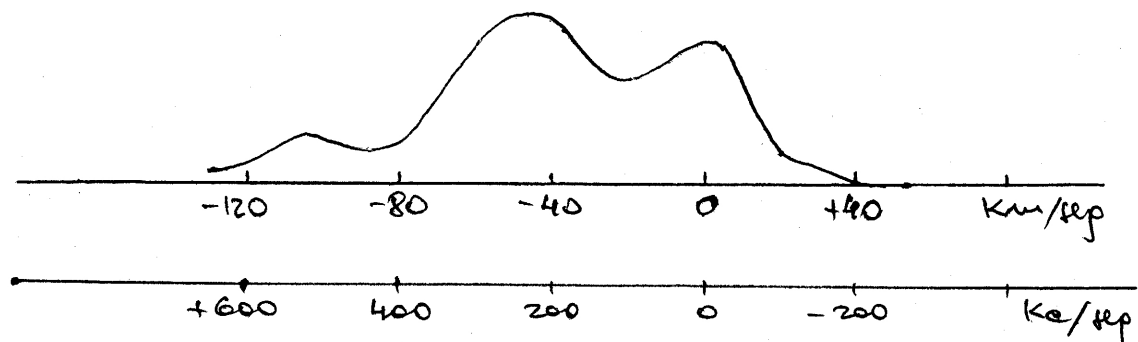
En el espectro optico ³ es grande y predomina la emisión espontánea. En la frecuencia de radio, sin embargo, puede predominar la emisión estimulada, si P_{ν} es lo suficientemente grande. Afortunadamente

en el espacio interestelar P_{ν} es muy pequeño, y generalmente predomina también la emisión espontánea, lo cual hace detectable la línea de 21 cm.

Se puede calcular que un átomo en el estado superior tiene una vida media de 11 millones de años. Su probabilidad de emisión espontánea es $2.84 \cdot 10^{-15}$ 1/seg. Se ha determinado que la temperatura a que se hallan las nubes de hidrógeno neutro que componen la galaxia es entre 100 y 125°K, en promedio.

Como el observador siempre recibe la emisión simultánea de varias nubes situadas una detrás de otra, teniendo casi siempre todas ellas distinta velocidad radial debido al fenómeno de rotación diferencial de la galaxia, la línea tiene una estructura complicada, con varios picos correspondientes a nubes con distinta velocidad radial, y por efecto Doppler, a frecuencias distintas.

Un esquema típico para la línea sería,



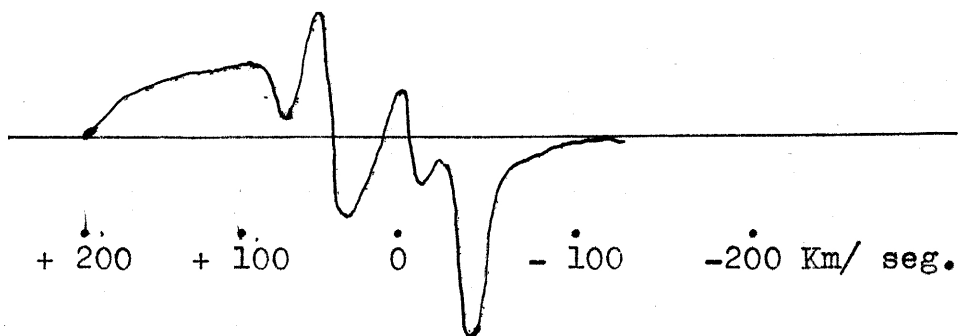
tomado para $b=0$, $l = 80^\circ$ en el cual se pueden individualizar 3 brazos espirales de la galaxia.

Como todas las nubes que se encuentran a lo largo de la visual tienen frecuencia distinta, no se presenta casi nunca el fenómeno de absorción, y el espectro es puramente emisivo. Solamente la radiación de fondo, / " el continuo" / sería capaz de provocar absorción, pero la temperatura de brillo del continuo cerca de la línea es generalmente de unos 30°K, mucho menor que la temperatura de

excitación del hidrogeno neutro. Solo en el caso de fuerte emisión / continua/ por una radiofuente puntual es que se obtiene a veces absorción en 21 cm.

También se obtiene absorción en la dirección del centro galáctico, situado en la constelación de Sagitario, donde la condensación de materia es enorme, y de donde viene una cantidad muy grande de energía en la frecuencia de radio.

Un espectro formado en Sagitario dá de la forma



En el trabajo presente, sin embargo el espectro es puramente emisoro.

b./ Determinación de las coordenadas de los puntos a observar.

El artículo mencionado trae un diagrama con la posición relativa de los puntos observados respecto a tres estrellas que se tomaron como referencia. Se buscó en un Atlas las coordenadas de dos de ellas / 22 Scorpii y Ophiuci / en el cual estaban calculadas para los años 1900 y 2000, y se las precesó a 1967 mediante el siguiente método, detallado en el "Lundt Atlas for conversion of coordinates".

Partiendo de las coordenadas en 1900 / coordenadas celestes / que son

POPH	$\alpha = 16^h$	19^m	35^s	$\delta = -23^\circ 13'$
22 Ser	$\alpha = 16^h$	24^m	08^s	$\delta = -24^\circ 54'$

se aplica la formula

$$\alpha = [\Delta t (\text{años}) \cdot P\alpha] + \alpha_0$$

$$\delta = [\Delta t (\text{año}) \cdot P\delta] + \delta_0$$

$$\begin{cases} P\alpha = M + N \sin \alpha \tan \delta \\ P\delta = N \cos \alpha \\ M = 46.0250 \text{ "/año} \\ N = 20.0468 \text{ "/año} \end{cases}$$

Los resultados fueron

$$\alpha^{sc} = 247.3480^\circ$$

$$\alpha^{op} = 245.8986^\circ$$

$$\delta^{sc} = -25.0517^\circ$$

$$\delta^{op} = -23.3750^\circ$$

A continuación se hizo una ampliación del diagrama de Bok, se lo llevó a papel milimetrado, se le dieron a las estrellas sus valores y se dedujo de ellos las coordenadas de los puntos en cuestión.

No se requiere una exactitud mayor que el 0,05 de grado en esta determinación, primero porque las absorciones están calculadas como promedio sobre un área de radio aproximadamente $0,25^\circ$ en radio, y segundo porque la fidelidad de los diales indicadores de posición de la antena es también aproximadamente 0,04 de grado.

En todo caso, fueron calculadas con una precisión de $0,01^\circ$.

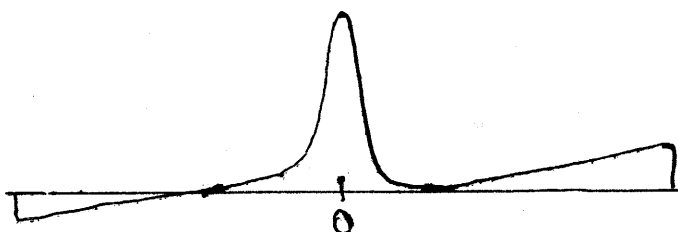
Ahora bien, la resolución angular del radiotelescopio del I.A.R. es de medio grado, es decir al apuntar la antena en una cierta dirección lo que se recibe es la radiación proveniente de todo el hidrogeno neutro que cae dentro de un cono cuyo "radio" es $0,25^\circ$.

Como el reticulado de Bok es precisamente $0,25^\circ$, no hay inconveniente en observar todos los puntos de la nube estudiados por él, pues en ninguna parte hay superposición excesiva.

c./ Observación de los puntos.

Como los puntos están alrededor de $l = 353^\circ$ / el centro galáctico está a $l = 360^\circ$ / , la teoría de rotación diferencial nos predice que las nubes observadas no tendrán velocidad radial respecto a nosotros. Esto efectivamente es así. Los perfiles obtenidos tienen un pico muy pronunciado sobre 1420, y una señal muy rápidamente decreciente en los 3 o 4 canales de frecuencia mayor que 1420 siguientes.

Los perfiles son de la forma



Se vé que los perfiles tienen una " línea de base". Esta línea de base viene dada por el ruido de antena + receptor / sin incluir la señal /. Variando la corriente y tensión de cristal del oscilador local se puede variar la forma e inclinación de la línea de base.

Antes de iniciar una serie de registros conviene experimentar con I_c y V_c a fin de obtener una línea de base lo más recta y lo más horizontal posible, lo cual se hizo.

Un estudio preliminar de la zona indicó que lo más conveniente era hacer registros dobles de 4 minutos, con 1420 centrado en el canal 22 una vez y en el 24,5 otra vez. El centrar H_0 en 22 y en 24,5 es aconsejable, pues pudiera ser que el pico del perfil, por algún motivo u otro no cae justo dentro de un canal, sino entre dos canales. O sea, se hacen dos registros superpuestos de 4 minutos con 1420 en el 22, y otros dos de 4 minutos con 1420 en el 24,5.

El integrar la señal durante un tiempo más o menos largo es conveniente pues con ello se disminuyen las fluctuaciones estadísticas. Se puede demostrar que

$$\frac{\Delta T}{T_a + T_r} \sim \frac{1}{\sqrt{B \tau}}$$

con τ = tiempo de integración.

Efectivamente, al hacer dos registros superpuestos de 4 minutos las fluctuaciones / diferencias entre las dos pasadas / son mucho menores que con 2 minutos. También conviene que la señal aparezca lo más grande posible en el papel a fin de no hacer errores de lectura al analizar el perfil.

Ello se logra ajustando la sensibilidad del electrómetro y la atenuación de la señal de entrada, aunque al hacer esto debe tenerse en cuenta que la calibración, en la cual intervienen algunas señales bastante fuertes como ser la del tubo de ruido y la del punto de calibración, deben ser hechos en exactamente las mismas condiciones que

los registros si nó, la calibración no tendría sentido.

Para poder decir efectivamente si en la nube hay o no hay defecto de hidrogeno atómico, se tomó una zona / no obscurecida / cercana, de comparación. Los puntos observados en la nube son 38 y se tomaron 28 otros puntos de comparación. Hay que hacer notar que la zona de comparar, según un mapa galactico de Kerr, Oort y Westerhout, es atravesado por una isofota, pero esto no afecta mayormente la comparación, pues se la tiene en cuenta.

Para evitar errores debidos a posibles irregularidades no detectadas en el equipo se decidió tomar cada punto dos veces, en días distintos. Lo cual llevó mucho tiempo, pues cada calibración es aproximadamente 1 1/2 hora y hacer un perfil completo / una sola vez / de cada punto es por lo menos 20 minutos.

Se observaron todos los puntos una vez en Octubre-Noviembre 1966 tanto como en Diciembre del mismo año, y una segunda vez en Enero-Febrero 1967.

La primera vez se usó una calibración cuyo error estadístico era del mismo orden que la de los perfiles. Luego se comprobó que esto desmejoraba la calidad de los datos y se decidió empezar a hacer dobles calibraciones / tal como descritas más adelante / de 4x4 minutos, a fin de disminuir el orden del error en éstas.

Consecuentemente los primeros perfiles presentan mas dispersión que los segundos. Se encontró conveniente el método de hacer, en un mismo día y con una misma calibración series de observaciones a $\alpha = \alpha_0$ o $\delta = \delta_0$ a fin de poder detectar más facilmente, aun antes haber reducido los perfiles per ganancia, frecuencia y línea de base, las eventuales variaciones en densidad de H / proporcional a la altura y al area total del pico / al atravesar la nube.

En particular se hicieron dos o tres series exploratorias, abarcando puntos puntos a $\delta = \text{cte}$, que atravesaban de lado a lado la nube, incluyendo puntos de ésta y de la zona de comparación, y tratando de que todos los parámetros del receptor se mantuvieran estables.

A veces esto ultimo es difícil, pues la corriente y tensión de cristal sufren pequeñas variaciones, que se evidencian en cambios de línea de base, y deben ser reajustados a mano. Además, desgraciadamente, a pesar de que el front-end está termostatzado a 45° , parece ser que hay por algun lado filtraje de efectos de temperatura exterior, que se manifiesta en cambios pequeños de la ganancia total. Estos cambios son detectables en el indicador de tensión del amplificador Broad-band y se recurrió al método de anotar, sobre cada perfil, el valor de todos estos parámetros, a fin de no atribuir a otra cosa lo que era en realidad solo variación del equipo.

Aun así, a simple vista, sobre los perfiles en bruto no se puede apreciar casi ninguna relación entre A y N_H . Esto se verá más en detalle en la parte de análisis de datos.

d./ Método de calibración.

Como se vió, el receptor en realidad consiste en 56 canales, cada uno de ellos en circuito amplificador separado. En general se trata de que la ganancia de los 56 canales sea igual, para lo cual cada semana se hace un registro de prueba, y si es necesario, se corrige la ganancia con un trimmer construido a tal efecto.

De todas maneras, jamás se logra que las 56 ganancias sean exactamente iguales, ya que estas varían en forma independiente día a día.

Se impone por ello hacer una calibración de las ganancias, cada vez que se hace una serie de registros, y es incluso conveniente hacer una calibración antes de empezar a observar y una al terminar, pues a veces puede variar la ganancia en el espacio de pocas horas.

El método para ello es el siguiente:

Se apunta la antena al polo Sur celeste / cuyo perfil es muy bien conocido / con la frecuencia 1420 centrada en el canal 22 y se hacen varios registros superpuestos para eliminar al máximo las fluctuaciones estadísticas.

Conviene adoptar el mismo tiempo de integración que para los perfiles a estudiar / 4 minutos / y, para no afectar a los perfiles / que se deben corregir en cada canal por ganancias / de un error mayor que su propio error estadístico, se hacen cuatro registros superpuestos del polo.

A continuación, con la antena siempre en el polo, y con el mismo ángulo horario con que se observó el polo se hacen cuatro registros de 4 minutos con un tubo Neon de 8 Watts, colocado cerca del dipolo, encendido. Esta fuente provee un ruido prácticamente blanco, o sea de igual intensidad en los 56 canales. Por supuesto, en el registrador lo que se observa es $T_{\text{polo}} + T_{\text{Ne}}$, pues se sigue recibiendo la emisión del polo. Restando entonces para cada canal la señal Polo + Neón menos la señal del Polo se tiene una idea de la relación de ganancia entre canales, pudiéndose tomar alguno de ellos / arbitrario / como ganancia unidad.

Sin embargo aun no se sabe cual es la temperatura absoluta de lo que se ha medido, pues la temperatura del tubo de ruido / unos 10.000°K / varia lentamente con el tiempo. Para ello hay que observar además algún punto del cielo cuya temperatura sea bien conocida. Esta generalmente es alguna radiofuente puntual, pero como el grado de movilidad de la antena está limitado a 4 horas en sentido horario, ésta debe ser una radiofuente con ángulo horario cercano al de los puntos a observar.

En este trabajo se usaron dos puntos; situados sobre el plano galactico:

$$\begin{array}{l} 2. // 1 = 319 \\ 3. // 1 = 358 \end{array} \quad \begin{array}{l} b = 0 \\ b = 0 \end{array} \quad // \quad \begin{array}{l} = 224.29 \\ = 264.20 \end{array} \quad = \quad \begin{array}{l} - 58.66 \\ - 30.62 \end{array}$$

Sus temperaturas de brillo son respectivamente

$$T_2 = 114^\circ \text{ K} \quad \text{y} \quad T_3 = 130^\circ \text{ K}$$

Como se quiere usar el perfil del polo para corrección por línea de base, se mide después el polo / 4x4 minutos / con 1420 Mc centrados en el canal 24,5.

Se trató en lo posible de hacer siempre una calibración antes y otra después. En todos los casos se verificó que la línea de base se había desplazado algo, aunque en general sin cambiar de forma. Este efecto presumiblemente es debido a cambios en la temperatura exterior; apreciables, pues se empezaba a observar a la madrugada y se terminaba a mediodía.

P A R T E I V .

=====

I N T E R P R E T A C I Ó N D E D A T O S .

a./ Reducción de los perfiles.

Los perfiles en bruto que salen del registrador deben ser corregidos, en primer lugar por ganancias, y en segundo lugar por movimiento propio del sistema solar dentro de la galaxia.

Esto ultimo implica una corrección en frecuencias y se lo conoce como reducción al standard local / en escala galáctica/ de reposo. Además hay que adjudicarle a la señal en c/ canal la temperatura de brillo que le corresponde, lo cual se hace comparando la altura de la señal con la altura del pico de alguna de las radiofuentes bien estudiadas.

Este trabajo de reducción se hace con una computadora IBM 1620 que funciona a tarjetas. Se entrega a la maquina la calibración para esa serie de registros, junto con algunos otros datos pertinentes del equipo y los perfiles indicando la altura de la señal en cada canal y para cada H_0 . La maquina - a la salida - presenta los perfiles con la temperatura de brillo en cada canal, corregido en frecuencias, y además lo grafica, reuniendo en un solo dibujo los dos perfiles correspondientes a H_0 22 y 24,5.

Incluso se puede obtener , con una subrutina, que la maquina les reste la linea de base a los perfiles, pero esto solo conviene si se tiene una linea de base con muy buena estadística, si nó, puede empeorar los resultados.

La labor de preparar los datos para la máquina insume mucho tiempo especialmente si uno hace promedio de calibraciones dobles. Hasta la fecha, más de la mitad de los 128 perfiles y 30 calibraciones estan pasadas a tarjetas, faltando revisarlas, y se pasó por la computadora una serie piloto de datos, tomados a $\delta =$ cte, que atraviesan

la nube de lado a lado pasando por el punto más oscuro de ella y abarcando extremos a la zona de comparación.

b./ Resultados obtenidos.

Se redujeron los perfiles tomados el 31 de Enero 1967, a $\delta = -24.3^\circ_z$ cte. Estos son los puntos indicados en los gráficos con siglas y, t, 36, 30, 24, 19, 13, 7, g que los identifican.

Se calcula que reducir el resto de los perfiles / faltan llo más /, el volver a observar una tercera vez todos los puntos y el análisis general llevará arriba de medio año de trabajo full-time, así que para este trabajo de seminario se optó por presentar solo este análisis preliminar, siendo las conclusiones también de carácter tentativo.

Ante todo, se nota que los perfiles pertenecientes a la nube exhiben un "hombro", a velocidades **positivas**, que no aparece en los perfiles de comparación. Además en general, parece que la nube se caracteriza por tener hidrogeno a velocidades más negativas que el fondo galáctico.

Se nota que los perfiles de la nube aparecen más abultados por el lado derecho que los de comparación. Por supuesto harían falta más perfiles reducidos para hablar con cierta seguridad pero en principio se puede identificar a la nube con ese hombro. Si resultara cierto esto, lo más correcto sería restar de los perfiles de la nube los perfiles de comparación, o sea restarles el fondo galactico, y quedaría el perfil con el hidrogeno de la nube solamente.

Para esto sin embargo no hay por el momento suficiente estadística, así que se optó por estudiar los perfiles como están. O sea, se les restó la línea de base y se calculó al área subtendida por el perfil, proporcional a la densidad de hidrogeno. Esto incluye no solo el de la nube, sino también el del "fondo galáctico", pero se puede suponer que esto es una cantidad constante sobre toda la zona en cuestión.

Se notan algunos detalles interesantes, como ser la presencia de un pico secundario muy pequeño, a velocidades negativos, pero no parece

tener relación con la nube, pues aparece también en la zona de comparación, y en algunos puntos de la nube no aparece.

También es digno de mención que los puntos 30 y 36 tengan el pico principal a velocidades negativas, mientras que el resto de los perfiles /comparación y nube/ lo tengan a velocidades positivas.

Evidentemente, estos son fenómenos atribuibles más bien a todo el fondo galáctico que a la nube exclusivamente. En todo caso, resultará interesante hacer un plano de velocidades de la zona y un plano con secciones de densidad constante, pero esto más adelante.

Por el momento - con los datos disponibles - se hizo un gráfico de área vs. ángulo horario, para ver la dependencia de n_H con la posición dentro de la nube, y un gráfico de área vs. absorción.

El gráfico I . área vs. α , es de difícil interpretación. Al parecer la nube cae dentro de una zona donde el fondo galáctico tiene variaciones de densidad. El punto 13, / absorción máxima / presenta un mínimo, pero hay otro mínimo también para el punto 24.

Los datos son:

pto	α	δ	abs.	Área
y	242.96	-24.37	-	2.360
t	244.47	- 24.36	-	3.120
36	244.97	- 24.39	3.5	2.810
30	245.27	- 24.46	3.2	2.740
24	245.58	- 24.31	6.1	2.420
19	245.93	- 24.31	6.4	2.630
13	246.32	- 24.31	8.0	2.330
7	246.63	- 24.26	6.4	2.510
g	247.51	- 24.26	-	2.380

No se pueden sacar conclusiones relativas a este gráfico hasta tanto no haya una estadística más completa.

El gráfico II , área vs. absorción, en cambio, muestra claramente

una dependencia lineal e inversa de n_{H} con la absorción. Esto está de acuerdo con las observaciones en Taurus , o sea trae evidencia indirecta en favor de la formación de H_2 en la nube, si lo mismo llega a confirmarse en el análisis ulterior de los demás perfiles.

Es de notar que estos datos corresponden a un día de observación en que el receptor se mostró notablemente estable, como evidencia la forma regular de la línea de base, es decir, son datos bastante dignos de confianza.

Entonces en base a este análisis preliminar, se pueden interpretar los datos obtenidos diciendo que el defecto de hidrogeno atomico en las zonas oscurecidas se debe a que éste se ha transformado en H_2 .

12 de Marzo, 1967

Melrose P

Referencias.

- Bok B. "On two highly obscured Zones" Astronomical Journal, 1956.
- Garzoli S. y Varsavsky C. "The distribution of Hydrogen in a region of Taurus" Astrophysical Journal, Julio 1966.
- Gould R. y Salpeter E. "The Interstellar Abundance of the Hydrogen molecule" Astrophysical Journal, Agosto 1963.
- Knaap, van de Meidenberg, Beenaker, Van de Hulst: "Formation of molecular Hydrogen in interstellar space", Bull. Astr. Inst. of the Netherlands, April 1966.
- Steinberg-Léqueux "Radioastronomy" McGraw-Hill, 1962
- Shklovsky V. "Cosmic Radiowaves".

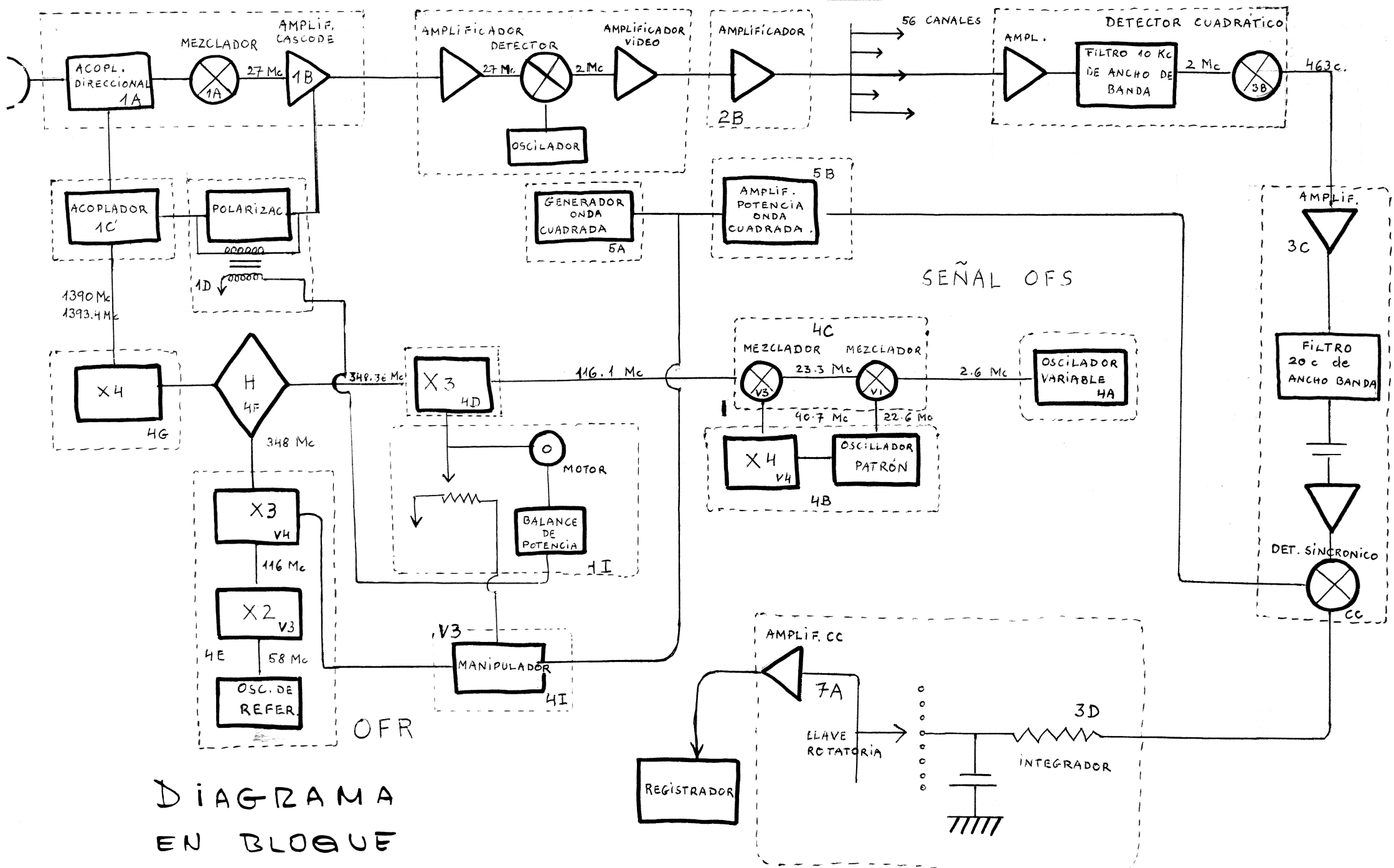


DIAGRAMA EN BLOQUE DEL RECEPTOR