

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE GUADALAJARA
Incorporada a la Universidad Autónoma de México

Escuela de Ingeniería

10²
Ejemplar



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

—Diseño del reflector-colector de un radiotelescopio parabólico de cinco metros y de su montura ecuatorial —

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico Electricista

P R E S E N T A

Ricardo Alejandro Gutiérrez Blanco

Guadalajara, Jalisco. 1986



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

PROLOGO	6
INTRODUCCION	
1.- Ondas Electromagnéticas	9
2.- Radiación. Características	12
3.- Mecanismos de generación de radioondas	22
4.- Radioastronomía	32
I.-DISEÑO Y CALCULO DEL SISTEMA REFLECTOR-COLECTOR.	
1.- Generalidades	39
2.- Parámetros que rigen al radiotelescopio ..	40
3.- Selección de ondas incidentes	42
4.- Reflector	58
5.- Colector	70
6.- Receptor	73
II.-MONTURA ECUATORIAL.	
1.- Introducción	77
2.- Mecanismo	78
III.-COSTOS	85
IV.-PRINCIPALES RESULTADOS DE LA RADIOASTRONOMIA .	
1.- Radiofuentes discretas	87
2.- Estructura de la Galaxia	91
3.- Panorámica actual	94
CONCLUSIONES	107
APENDICE	109
Bibliografía y Reconocimientos	110

PROLOGO

La presente tesis representa un trabajo de investigación de aproximadamente un año. En el brindé mi mejor esfuerzo y considero que cumplí con mis objetivos, trazados al terminar mi carrera, en Junio de 1984, los cuales fueron presentar un trabajo claro, conciso y sin cortapisas, al desarrollar un tema muy vasto y que, dado el estado actual de avance de las técnicas, ciencias y, en específico, de la Astronomía, la más bella de las ciencias, resulta muy modesto. Muy halagado me sentiría al saber que alguien se interesa sinceramente en este humilde trabajo, dicho sea de paso hecho con todo el entusiasmo de que soy capaz, y que, al leerlo, busque profundizar en el estudio de temas tan interesantes y a la vez tan complejos, como Cosmogonía, Evolución Estelar y en general de la Astronomía y la Astrofísica.

El desarrollo de la presente tesis se puede resumir en tres etapas, a saber: búsqueda de información, selección de tópicos específicamente relacionados con el tema y, por último, aplicación de la información en la búsqueda del objetivo final: diseño de un radiotelescopio para ser usado, huelga señalarlo, con fines astronómicos. Al presentar el tema a juicio del comité de tesis de mi Universidad, sinceramente no conocía a fondo la enorme tarea que me aguardaba, desde la búsqueda de información, escasa y anticuada

en la literatura comercial de México, hasta la penosa ' tarea de deshechar información interesantísima pero, la mentablemente, no aplicable directamente a esta tesis, ' información relacionada principalmente con Astrofísica y Cosmogonía. La última parte, el cálculo de los elementos componentes del radiotelescopio fué la parte menos difícil, puesto que conté con el apoyo de la información ' previamente obtenida, que me dió los parámetros de diseño; y con los conocimientos obtenidos en mi Universidad, que me dieron la herramienta de cálculo.

INTRODUCCION

1. ONDAS ELECTROMAGNETICAS.

La insaciable curiosidad del hombre lo ha impulsado a inventar y perfeccionar, sin cesar, instrumentos que multipliquen la capacidad de sus sentidos, como el teléfono, que nos permite hablar y escuchar a personas que se encuentran a gran distancia de nosotros.

Otro ejemplo muy conocido, es el vasto cúmulo de conocimientos que siguieron a la invención del telescopio óptico, en 1609, por el célebre sabio Italiano Galileo Galilei (1564-1642), que paradójica y tristemente, murió ciego. En esencia, el telescopio es simplemente un ojo inmenso. En contraste con la pupila humana, de 6 mm^2 , el telescopio de 200 pg de Monte Palomar (EE. UU.), tiene más de $100,000 \text{ mm}^2$ de superficie receptora de luz. Su poder colector de luz, intensifica la luminosidad de una estrella, aproximadamente un millón de veces, en comparación a la que puede verse a ojo desnudo.

En 1666, Sir Isaac Newton descubrió que la luz solar podía descomponerse en lo que él denominó un espectro de colores, al hacerla incidir en una prisma de cristal de forma triangular; el haz originaba una banda constituida por luz roja, naranja, amarilla, verde, azul y violeta, y que cada color pasaba al próximo mediante una suave transición. Newton demostró que la luz solar o "luz blanca", es una mezcla de muchas radiaciones específicas, las cuales excitan el ojo humano.

En 1860, el genial físico escocés James Clerk Maxwell, elaboró una teoría que predecía toda una gama de radiaciones asociadas a los fenómenos eléctricos y magnéticos, gama de la cual, la luz blanca es sólo una pequeña fracción. También pertenecen a esta gama las radiaciones calóricas y las de radio, producidas estas últimas por primera vez, por el físico alemán Hertz, en 1887, por lo que se llaman ondas Hertzianas.

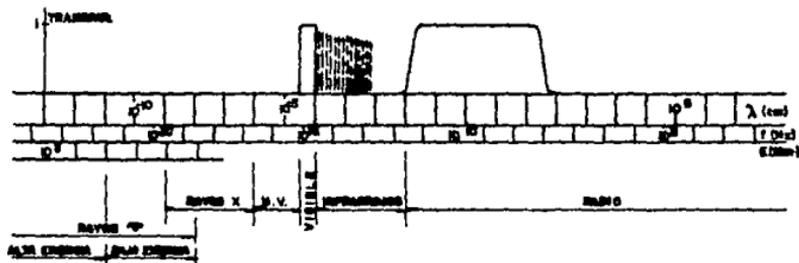
Las radiaciones de calor, luz, rayos X y las hertzianas, se transmiten en el vacío a la misma velocidad: - 299,800 Km/seg.

Se diferencian entre sí, solamente por su frecuencia (f), o sea, el número de vibraciones por segundo que las caracterizan. La longitud de onda (λ), o sea la distancia que hay entre cresta y cresta, o valle y valle de la onda, está relacionada con la frecuencia por la expresión: $\lambda = c/f$, siendo c la velocidad de la luz, - las radiaciones luminosas, o luz visible, ocupan el pequeño rango comprendido por los valores 4×10^{-5} cm -- (con una frecuencia de $7,495 \times 10^{14}$ ciclos/seg. o Hertz correspondiente al extremo violeta del espectro visible) y 8×10^{-5} cm (con $f=3.7475 \times 10^{14}$ ciclos/seg. o Hertz, correspondiente al rojo). En contraste, las ondas electromagnéticas, en general, pueden tener longitudes de onda tan pequeñas como 10^{-12} cm y tan altas como decenas de km (figura 1).

Nuestra atmósfera permite que lleguen a la superficie terrestre solamente las ondas electromagnéticas comprendidas en dos pequeñas bandas del referido espectro de radiaciones electromagnéticas; una de éstas bandas es la luz visible, que, dicho sea de paso, nos permite el maravilloso espectáculo del cielo estrellado y permitió el avance de la astronomía y, en gran medida

de toda la ciencia; la otra banda es la de las ondas de radio u ondas Hertzianas, cuyas longitudes de onda se encuentran entre 1 mm ($f=3 \times 10^{10}$ ciclos/seg) y 30 m ($f=10^7$ ciclos/seg. = 10^7 Hertz = 10 Mega--- Hertz)

F I G U R A 1



F I G U R A 1

EN ABSCISAS SE HA REPRESENTADO, CON ESCALA LOGARÍTFICA, UN ANCHO RANGO DE LONGITUDES DE ONDA λ EN CENTÍMETROS. LAS ESCALAS SUPERIORES CORRESPONDEN A LAS FRECUENCIAS f Y A LAS ENERGÍAS E , EN CICLOS/SEG. Y EN ELECTRON-VOLTIOS, RESPECTIVAMENTE. POR DEBAJO DE ESTAS ESCALAS SE HAN MARCADO LOS INTERVALOS Y GRUPOS ANUALES CORRESPONDIENTES DE LAS SUSTANCIAS RADIAANTES QUE CONSTITUYEN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. EN ORDENADAS SE HA REPRESENTADO, EN UNA ESCALA ADECUADA, LA TRANSPARENCIA DE LA ATMÓSFERA. SE PUEDEN VER LOS DOS INTERVALOS DE GRANDE TRANSPARENCIA QUE SON EL LLAMADO VENTANA VISIBLE Y DE INFRARROJO.

Esta segunda banda de transparencia, fué descubierta en 1932, por el Ingeniero Radiotécnico de la Bell Telephone Co., Karl Jansky, al darse cuenta del arribo de señales de radio en forma de ruido, cuyo origen era cósmico y no atmosférico, mientras estudiaba las perturbaciones que la atmósfera produce en ondas de 20×10^6 ciclos/seg. ($\lambda = 14.6$ m). Confirmó que las máximas señales aparecían cuando la antena de su equipo se enfocaba al centro de la galaxia; de ello conclu-

yó que se originaban con la agitación térmica de las - partículas cargadas, abundantes en la materia interestelar.

Esta segunda "ventana" de la astronomía, está limitada en el extremo de las menores longitudes de onda por la absorción de los átomos y moléculas del aire en la tropósfera y hacia las mayores longitudes de onda por las capas conductoras de la ionósfera, que reflejan las radiaciones que llegan a la tierra desde las fuentes celestes.

2. RADIACION.

Características:

Un cuerpo caliente pierde energía en forma continua - por radiación (calor, luz, ondas hertzianas), con una rapidez que depende de la forma, tamaño y sobre todo, de la temperatura del cuerpo. Esta energía de radiación es capaz de pasar a un cuerpo distante, donde - puede ser absorbida, reflejada, dispersada o transmitida.

Las ondas Hertzianas de origen cósmico, quedan determinadas cuando se conoce de ellas la dirección de la cual proceden, su densidad de flujo y su polarización. Estos dos últimos parámetros, son función del tiempo y de la frecuencia, por lo cual, su determinación deberá efectuarse en cada instante y para cada frecuencia del espectro de radiación.

- ° DIRECCION DE PROPAGACION: Para determinarla, en radioastronomía, se procede de la misma -

forma que en astronomía óptica: una antena sólo captará las ondas que incidan en ella y su dirección será aquella a la cual se capten con mayor intensidad.

- ° DENSIDAD DE FLUJO: Considérese un haz de radiación emitido por un pequeño elemento de área da_2 y que atraviesa otro elemento de área da_1 . Los rayos incidentes en da_1 , tienen un ángulo sólido de divergencia dw , igual al área aparente de da_2 , vista desde da_1 , dividida por el cuadrado de la distancia que las separa.

FIGURA 2

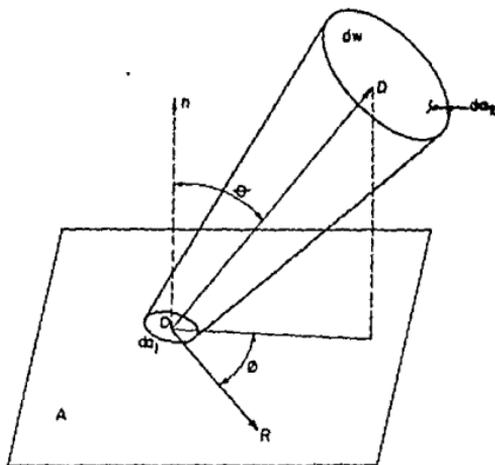


FIGURA 2

EN UN PUNTO O DE UNA SUPERFICIE A, SE MUESTRA UN ELEMENTO DE AREA da_1 Y UNA DIRECCION OD CON COORDENADAS θ, ϕ . n ES LA NORMAL A da_1 EN O Y ORIGEN DE MEDIDA DE ϕ . OR ES EL ORIGEN DE MEDIDA DE θ ; dw UN ELEMENTO DE ANGULO SOLIDO CON EL QUE SE DEFINE EN EL TEXTO LA INTENSIDAD ESPECIFICA DE RADIACION EN LA DIRECCION OD.

Considérese que la normal a da_1 forma un ángulo ϕ con la normal da_2 . La intensidad de radiación de da_1 se define como:

$$I_f = \frac{dE_f}{\cos \phi \cdot da_1 \cdot df \cdot d\omega \cdot dt} \quad (1)$$

Ahora, la densidad de flujo a través de da_1 , de área - aparentemente $da_1 \cos \phi$, normal a la radiación, está dada - por:

$$dE_f = I_f da_1 \cos \phi d\omega \quad (2)$$

Integrando para toda la superficie de da_1 , tenemos que:

$$E_f = \int_{\omega} I_f \cos \phi d\omega \quad (3)$$

Cuando la superficie emisora considerada es la de un "cuerpo negro" (características: absorbe toda la radiación incidente sobre su superficie y la intensidad de la radiación que emite están completamente determinadas por su temperatura), la ley de Planck nos da el valor de I_f en función de la frecuencia f y de la temperatura absoluta T del emisor:

$$I_f = \frac{2hf^3}{c^2} \left(e^{hf/kT} - 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

donde:

h = constante de Planck; 6.6252×10^{-34} Julios x seg.

c = velocidad de la luz en el vacío; 2.9979×10^8 m /seg.

K = Cte. de Boltzmann = 1.38049×10^{-23} Julios/molécula. °K.

Siendo $f=c/\lambda$, (λ = long. de onda), la ec. 4 puede escribirse:

$$I_r = \frac{2hc}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

Cuando nos limitamos a operar en la zona del espectro correspondiente a las ondas Hertzianas, las longitudes de onda son mucho mayores que las de las radiaciones visibles y cumplen: $hc \ll \lambda kT$.

En tal caso, desarrollando la serie exponencial:

$$e^{\frac{hc}{\lambda kT}} = 1 + \frac{hc}{\lambda kT} + \frac{1}{2!} \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{hc}{\lambda kT} \right)^3 + \dots$$

se pueden despreciar todas las potencias de orden superior al primero de $hc/\lambda kT$ y se obtiene, con buena aproximación:

$$\left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \approx \frac{\lambda kT}{hc}.$$

Este valor del paréntesis, suplantado en 5, nos dá la aproximación de Rayleigh-Jeans a la ley de Planck:

$$I_r = \frac{2kT}{\lambda^4}. \quad (6)$$

Esta expresión nos indica que, la intensidad específica de radiación de un cuerpo negro, en la zona del espectro de las ondas de radio, es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda que se considere, y que, analizando diversos emisores, utilizando la misma longitud de onda, las intensidades específicas encontradas son proporcionales a las temperaturas absolutas de sus respectivos emisores.

Esta última condición, hace que en radioastronomía se empleen las temperaturas absolutas de los emisores para establecer las intensidades específicas de radiación. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la ec. 6, sólo es válida para un cuerpo negro o emisores que tengan características muy semejantes al mismo.

Las radiofuentes que interesan en radioastronomía tienen diferencias más o menos grandes con el cuerpo negro, por lo cual, a la temperatura que cumple la relación 6 con la intensidad específica I_f de emisión, en cierta longitud de onda λ , se le llama temperatura de brillo, T_b , de la radiofuente en tal λ . Estrictamente, T_b es la temperatura de un cuerpo negro cuya intensidad específica es equivalente a la de la radiofuente considerada, y puede discrepar en mayor o menor grado con la temperatura real del radioemisor según las diferencias que éste tenga con el cuerpo negro.

En la práctica, pues, la especificación de la radiación proveniente de cierta dirección, se hace indistintamente con la intensidad específica o con la temperatura de brillo de la fuente que la emite.

Cuando se desea determinar en la tierra la densidad de flujo o la intensidad específica de una cierta -- fuente celeste en una λ preelegida, hay que recurrir a algún detector apropiado que de algún modo, transforme la energía de radiación de longitud de onda proveniente de la fuente en la otra forma de energía susceptible de ser medida por sus efectos.

La elección del tipo de detector más apropiado en cada caso, depende de la frecuencia o longitud de onda de la radiación que se quiere estudiar, pero en todo caso deberá existir una superficie colectora de radiación, de manera que, la energía que incida en ella pueda transformarse y medirse satisfactoriamente. Esta superficie colectora, es la pupila del ojo, cuando se trata de observación directa, o la abertura frontal de un telescopio cuando el análisis se hace mediante su empleo. En radioastronomía, los detectores son antenas, y cada antena presenta también cierta superficie colectora de radiación.

Consideremos una antena de área colectora C , enfrentada a una radiofuente cuya superficie aparente valga el ángulo sólido B .

FIGURA 3

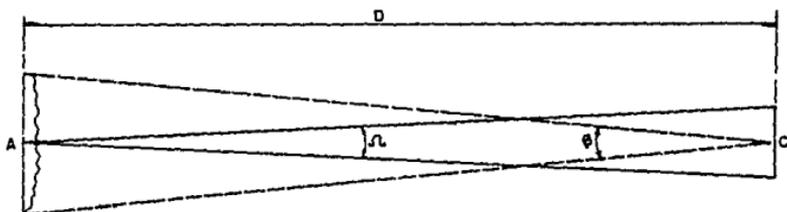


FIGURA 3

A REPRESENTA EL ÁREA NETA DE UNA FUENTE ENFRENTADA A UNA ANTENA DE ÁREA COLECTORA C Y SITUADA A UNA DISTANCIA D.
B Y A DENOTAN LOS RESPECTIVOS ÁNGULOS SÓLIDOS.

Sea "D" la distancia que separa a la fuente de la antena, "A" la proyección de la superficie de la fuente sobre el plano normal a la recta que la una a la antena y Ω el ángulo sólido determinado por D.

Supongamos, para mayor simplicidad, que la fuente se comporta como si fuera un disco, de área A, con una intensidad de emisión I_f constante en todos sus puntos. La energía que cada elemento de área da de la fuente, emite al área C, por unidad de tiempo y por unidad de intervalo de frecuencia será:

$$\frac{dE_f}{df dt} = I_f \cos \theta da d\omega.$$

Estando enfrentadas las áreas C y A (la fuente y la antena), será $\cos \theta = 1$, y ya que I_f es constante para todos los puntos de A, la energía aportada a C por A, será:

$$\frac{dE_f}{df dt} = I_f A \Omega. \quad (7)$$

La densidad de flujo F_f con la que incide la radiación en la superficie C será igual a:

$$F_f = \frac{dE_f}{df dt C} = \frac{I_f A \Omega}{C}.$$

y,

$$\frac{A}{C} = \frac{\Omega}{4\pi}.$$

entonces:

$$\frac{A \Omega}{C} = \beta.$$

con lo que:

$$F_f = I_f \beta. \quad (8)$$

Si la radiofuente no tiene una intensidad específica - I_f constante en todos los puntos de su área aparente, bastará considerar regiones dB bastante pequeñas para que en ellas se cumpla dicha condición. Si se puede - medir el flujo incidente dF_f proveniente de cada re-
gión dB, la intensidad específica de cada zona será da da por la expresión correspondiente a la 8:

$$I_f = \frac{dF_f}{d\beta}.$$

y el flujo incidente F_f proveniente de toda la fuente será:

$$F_f = \int_p dF_f = \int_p I_f d\beta.$$

En casos de radiofuentes tan alejados que se presenten como puntuales al instrumento empleado, la caracteriza ción de la radiación en cada intervalo de frecuencia - Δf , se realiza midiendo P_f (potencia):

$$P_f = \frac{dF_f}{dt} = F_f C. \quad (9)$$

y calculando $F_f = P_f / C \cdot \Delta f$. La unidad empleada comunmen te para F_f es el vatio/m² Hz. Para fuentes puntuales, la determinación de la intensidad de radiación y la -- temperatura de brillo sólo es posible si por otros me dios se pueden establecer las distancias que las sepa ran de la tierra y sus dimensiones lineales.

Generalmente, la caracterización de cada fuente pun-- tual, se limita al conocimiento de la densidad de flu jo de radiación F_f que de ella llega a nosotros.

En algunos casos, especialmente para las radiofuentes puntuales ' constituidas por galaxias exteriores, la densidad de flujo de la fuente se expresa indirectamente mediante las llamadas radiomagnitudes, m_r . Análogamente a como se procede en el campo óptico, se define la radiomagnitud de una fuente con la fórmula de Pogson:

$$m_r = C - 2.5 \log F_f \quad (10)$$

La constante C depende de la frecuencia f en que se mide F_f y de las unidades empleadas para dicha medida. El valor corrientemente empleado es $C = -53.4$ y vale para la frecuencia $f = 158$ Mciclos/seg. y cuando F_f se mide en vatios/m² Hz. Este valor de la ' constante se ha elegido de modo que la radiomagnitud m_r de una de terminada radiofuente, las galaxia NGC 5194 + 5195, sea igual, en 158 Mciclos/seg, a la magnitud aparente fotográfica $m_f = +9,7$ de ' dicho par de galaxias.

Análogamente también a como se hace en el campo óptico, se define la radiomagnitud absoluta M_r de una fuente como la radiomagnitud aparente m_r que presentaría esa misma fuente si estuviera situada a una distancia de 10 parsecs de la Tierra. La relación que vincu la radiomagnitudes absoluta y aparente de una misma fuente es la misma que relaciona las respectivas magnitudes monocromáticas de otras regiones del espectro:

$$M_r = m_r + 5 - 5 \log d \quad (11)$$

donde d es la distancia entre la fuente y la Tierra, medida en - parsecs.

También se emplea, como en el campo óptico, la diferencia entre ' magnitudes aparentes de una fuente en distintas frecuencias para especificar indirectamente su magnitud radio; y así se define el índice radio de una fuente por la expresión $i_r = m_r - m_f$ en la que, como antes, m_f designa la magnitud aparente fotográfica de ' la fuente.

POLARIZACION. Una onda electromagnética de frecuencia f , consiste de campos eléctricos y magnéticos que se propagan desde el emisor, los valores de éstos campos eléctricos E y magnéticos H , son funciones periódicas de la distancia X - al emisor y del tiempo t y son:

$$E = E_0 \cdot \text{Sen } 2\pi f(t - X/c),$$

$$H = H_0 \cdot \text{Sen } 2\pi f(t - X/c).$$

En donde E_0 y H_0 son los valores máximos de E y H y C es la velocidad de la luz en el vacío.

Cuando una onda electromagnética se propaga en un medio isótropo, es decir, en un medio homogéneo, con propiedades homogéneas, los vectores E y H son normales entre sí y normales a la dirección de su propagación. El plano en el que se mantiene el campo eléctrico E durante la propagación, se llama plano de polarización de la onda.

Cuando la onda electromagnética es emitida por un solo dipolo, el campo eléctrico que la acompañará será paralelo al dipolo en cuestión y se conservará la misma orientación durante toda su propagación, entonces se dice que tal onda está linealmente polarizada.

La radiación de ondas electromagnéticas desde un cuerpo cualquiera por agitación térmica de sus partículas elementales - llamada radiación térmica - es provocada por la múltiples vibraciones desordenadas de los electrones conteni--

dos en el campo emisor. Estos electrones se comportan como pequeños dipolos individuales y cada uno de ellos emite ondas linealmente polarizadas. En ausencia de campos magnéticos exteriores, el plano de polarización de las múltiples ondas emitidas, toma cualquier orientación dentro del haz de planos que corresponde a la dirección de propagación. En tal caso, se dice que está polarizada aleatoriamente.

Las propiedades de polarización de una onda, dependen del estado del emisor, si éste es perfectamente isotrópico, las ondas emitidas deben ser polarizadas al azar. En forma recíproca, si una onda presenta polarización parcial, puede asegurarse que el emisor o el medio transmisor, no son isotrópicos. La determinación de la referida polarización permite evaluar la intensidad del campo magnético que la origina, ya sea en el propio emisor o en el medio transmisor.

En todo caso, la determinación de la polarización de una radiación, se realiza en Radioastronomía mediante disposiciones especiales del instrumental que valora la radiación y tal determinación permite deducir importante información sobre las condiciones físicas del emisor.

3. MECANISMOS DE GENERACION DE RADIO-ONDAS

Los procesos conocidos que dan lugar a radiación

electromagnética del rango de las radio-ondas exteriormente a nuestra atmósfera, tienen como común denominador: la presencia de cargas libres (como un electrón - no ligado a un núcleo ni antes ni después de realizado el proceso de emisión). La única excepción a esta generalidad, es la emisión discreta que realiza el hidrógeno neutro. En principio, éstos procesos se clasifican en: A) procesos de índole térmico, en sólidos o gases, y B) procesos no térmicos.

- A) La generación de radio-ondas por emisión térmica de cuerpos sólidos tiene, astronómicamente, poco interés, ya que sólo se relaciona con objetos situados dentro del sistema solar. En cambio, reviste una gran importancia la radioemisión térmica de gases ionizados, donde la energía radiante (calor, luz, radio-ondas), proviene de la aceleración de electrones libres provocada por su acercamiento o alejamiento a los iones.

Para la radiación emitida por un gas ionizado, se obtiene la distribución espectral típica, -- (EC.6), para la emisión térmica del cuerpo negro: el espectro es continuo y la intensidad - específica de radiación varía como λ^{-2} .

La materia ionizada es muy abundante en las atmósferas estelares y en el medio interestelar. Una parte importante de la radiación captada - en la tierra, en el rango de las radio-ondas, se origina por esta clase de procesos y su caracterización se manifiesta por la referida relación espectral, característica de la emisión térmica.

- B) Las emisiones de carácter no térmico, comprenden las fuentes más importantes que se estudian en Radioastronomía. La caracterización de estas radiaciones, la realizan los mismos procesos generadores: la emisión térmica de radio-ondas, es provocada por procesos microscópicos similares a las emisiones cuánticas (en "cuantos" o paquetes de energía), de los átomos individuales que originan las ondas luminosas; en cambio las radioemisiones no térmicas son producidas por procesos macroscópicos en los que conjuntos de cargas se mueven ordenadamente emitiendo en forma coherente. Así, por ejemplo, es de carácter no térmico, la radiación de una antena de radiocomunicaciones, la de una descarga eléctrica entre dos electrodos, etc.

En el caso de la emisión térmica, la intensidad de radiación no puede exceder a la que correspondería al cuerpo negro con temperatura igual a la del verdadero emisor; en la emisión por movimientos macroscópicos de conjuntos de cargas, este límite no existe. Los mecanismos conocidos de generación de radio-ondas de carácter no térmico, son: 1) Oscilaciones de gases ionizados; 2) Emisión ciclotrón; 3) Emisión sincrotrón; y 4) Radiación Cerenkov.

- 1) Cuando en un gas ionizado, o plasma, una perturbación altera el equilibrio termodinámico de los electrones, se producen fenómenos que se manifiestan por la emisión de radio-ondas. Si la perturbación engendra apartamientos locales de la neutralidad eléctrica, se producen oscilacio

nes del plasma. En este tipo de proceso, que puede producirse en el espacio interestelar por turbulencia o por la acción de campos magnéticos, se engendra una emisión de radiación en un angosto intervalo de frecuencias, si la densidad de cargas eléctricas es constante en el medio emisor. (figura 4).

Si la perturbación engendra apartamientos locales de la neutralidad eléctrica se producen oscilaciones de plasma. Sea un medio en el que existen n_e electrones por unidad de volúmen. Si todos los electrones son desplazados de su posición de equilibrio en cierta dirección x , con una longitud dx , el campo eléctrico \bar{E} será dado por la ecuación de Maxwell: $\nabla \cdot \bar{E} = 4\pi p$ en que $p = -n_e e$ es la densidad de cargas en el medio y $\nabla \cdot \bar{E}$ denota la divergencia de \bar{E} . El potencial eléctrico U cumplirá $\nabla^2 U = 4\pi e n_e$ y si el campo sólo tiene componente según x , como hemos supuesto:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = 4\pi e n_e.$$

La fuerza F que actúa sobre un electrón será:

$$F = eE = -e \frac{dU}{dx} = -2\pi e^2 n_e dx.$$

Con lo que la ecuación del movimiento es:

$$m_e \ddot{X} = -2\pi e^2 n_e dx.$$

Que corresponde a una oscilación de frecuencia angular $\omega_0 = \sqrt{k/m_e}$, en que $k = -dF/dx$ o sea:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = e \sqrt{2\pi n_e / m_e}.$$

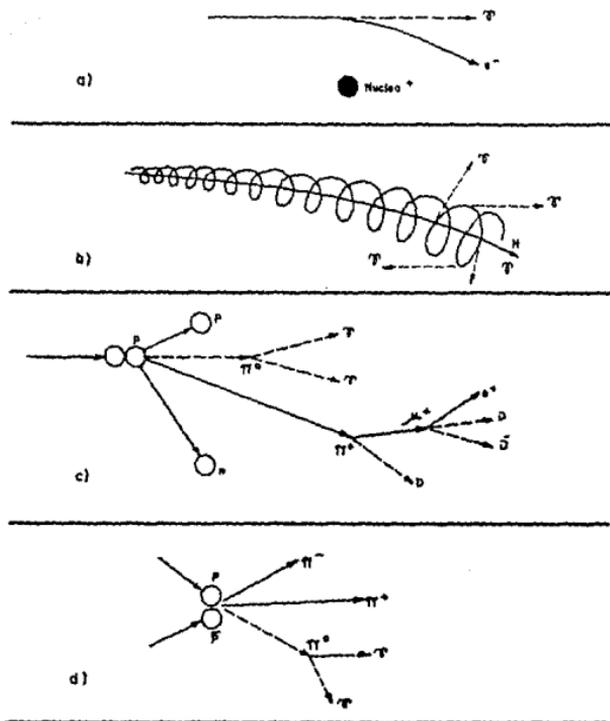


FIGURA 4

EN EL ESQUEMA SE MUESTRAN ALGUNOS DE LOS PROCESOS QUE PUEDEN DAR ORIGEN A LOS RAYOS γ EN EL MEDIO INTERESTELAR. LAS DENOMINACIONES DE CADA ZONA DE LA FIGURA SE CORRESPONDEN CON LAS EMPLEADAS EN EL TEXTO PARA LOS RESPECTIVOS PROCESOS. EN a) EL ELECTRON e^- SUFRE UNA ACCELERACION EN EL CAMPO DEL ION PROXIMO Y EMITE UN RAYO γ (BREMSSTRAHLUNG); EN b) UN ELECTRON RELATIVISTICO DESCRIBE UNA HELICE A LO LARGO DE LA LINEA DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO H Y EMITE RADIACION SINCROTRON. EN c) LA COLISION ENTRE UN PROTON Y OTRO DE ALTA ENERGIA DA ORIGEN A VARIAS PARTICULAS ELEMENTALES Y DOS FOTONES γ . EN d) LA ANIQUILACION DE UN PAR PROTON-ANTI-PROTON GENERA DOS FOTONES γ , ADENAS DE DOS MESONES π . NOMENCLATURA Y PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LAS PARTICULAS QUE FIGURAN EN EL ESQUEMA:

		CARGA		MASA EN REPOSO ($m = m_0$)	VIDA MEDIA(seg)
		ELEC.	ESPM		
P	PROTON	+ 1	1/2	1836, 1	ESTABLE
\bar{P}	ANTI-PROTON	- 1	1/2	1836, 1	ESTABLE
n	NEUTRON	0	1/2	1838, 6	1000
π^+	PION POSITIVO	+ 1	0	273, 2	$2, 6 \times 10^{-8}$
π^-	PION NEGATIVO	- 1	0	273, 2	$2, 6 \times 10^{-8}$
π^0	PION NEUTRO	0	0	264, 2	$10^{-16} \approx 10^{-15}$
μ^+	MUON POSITIVO	+ 1	1/2	206, 7	$2, 2 \times 10^{-6}$
$\bar{\mu}$	ANTI-MUON	- 1	1/2	206, 7	ESTABLE
e^-	ELECTRON	- 1	1/2	1	ESTABLE
e^+	POSITRON	+ 1	1/2	1	ESTABLE
γ	RAYO GAMMA	0	1	?	ESTABLE

A la frecuencia f_0 , que es proporcional a $\sqrt{n_e}$ se le llama frecuencia del plasma.

2. La emisión ciclotrón o giromagnética es originada por la influencia que sufre el movimiento de partículas cargadas cuando ingresan a una región en que existe un campo magnético. Si una -- partícula con carga e y masa m se mueve con velocidad \vec{v} es una región en que existe un campo eléctrico \vec{E} y un campo magnético \vec{H} estará sometida a dos fuerzas que valen $e\vec{E}$ y $e(\vec{v} \times \vec{H})$, respectivamente. La ecuación del movimiento será:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e [\vec{E} + (\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H})]$$

En los casos más sencillos en que $\vec{E} = 0$ y \vec{H} es constante en el espacio y el tiempo, la aceleración $d\vec{v}/dt$ tiene un módulo constante, y si inicialmente \vec{v} es normal a \vec{H} describirá una -- circunferencia de radio r cuyo valor se obtiene igualando el módulo de la aceleración debida a \vec{H} al módulo de la aceleración centrífuga:

$$c \sqrt{H} / mc = v^2 / r .$$

la frecuencia angular $\omega_c = v/r$ resulta valer:

$$\omega_c = 2\pi f_c = eH / mc .$$

La frecuencia f_c es llamada en este caso, frecuencia ciclotrón. Cuando además de la aceleración provocada por el campo \vec{H} existen aceleraciones debidas a campos eléctricos, a inhomogeneidades de \vec{H} o a campos gravitacionales, la trayectoria deja de ser una circunferencia, pe

ro conserva en parte tal carácter porque el movimiento total se puede descomponer en una parte circular, de frecuencia angular ω_c , y en un movimiento de traslación del centro de la circunferencia. En todo caso, la partícula emite energía radiante de frecuencia f_c que es proporcional a su carga e , al campo \vec{H} y a la inversa de su masa m . Una parte apreciable de la energía será emitida en frecuencias armónicas de la fundamental f_c . Esto es importante para los casos en que, el medio emisor es opaco a la frecuencia f_c , -- porque en tales casos puede abandonar de to dos modos el medio alguna energía en frecuen cias armónicas superiores.

3. La emisión sincrotrón es un fenómeno análogo al de la radiación ciclotrón. Las diferencias entre ambas se deben a las velocidades de las partículas que en la emisión sincrotrón son próximas a la velocidad de la luz. Al consi derar las correcciones relativísticas que co rresponden a tan altas velocidades, la emisión toma caracteres especiales. Llamando, como es habitual, $\beta = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, la frecuencia ciclotrón se convierte en $\omega'_c = eH/m_0 c \beta$, en la que m_0 es la masa de la partícula en repo so. La potencia emitida por la partícula va le:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^4 H^4 v^2 \beta^4}{H^2 m_0^2 c^5} = \frac{e^4 H^2 v^4 \beta^4}{m_0^2 c^5}$$

Analizando la distribución angular de la radiación, se encuentra que el máximo de poten cia es emitido en la dirección del vector \vec{v} en cada instante y que la mitad de la energía

irradiada está confinada en un ángulo sólido con eje \bar{v} y ángulo al vértice $\Omega = m_0 c^2 / w \sim 1/\beta$ en que $w = m_0 c^2 \beta$ es la energía cinética de la partícula.

El espectro de la radiación sincrotrón para electrón relativístico, al contrario de lo que pasa en la emisión ciclotrón que contiene casi toda la energía en la frecuencia f_c , tiene el máximo de energía en la armónica de $f'_c = w'_c / 2\pi$, cuyo orden es $n_{m\acute{a}x.} = (w/m_0 c^2)^{3/2}$, - siendo la energía emitida en cada armónica - proporcional a $n^{1/3}$ para $n \leq n_{m\acute{a}x.}$

Cuando la radiación sincrotrón proviene, como ocurre en la práctica, de una multitud de -- electrones con diversas energías cinéticas, - su espectro se hace continuo con características que, para cada fuente cósmica, dependerán a su vez del espectro de las energías cinéticas presentes.

Una fracción muy importante de la radiación que estudia la radioastronomía, es seguramente tipo sincrotrón. En el medio interestelar son numerosas las regiones abundantes en electrones relativísticos y la interacción entre tales partículas y el campo magnético general de la Galaxia, da lugar a emisiones que responden a este mecanismo de generación. También en galaxias y en objetos exteriores a -- nuestra Vía Láctea, se produce este tipo de - proceso y gran parte de la radiación que nos llega de ellos, es producida por electrones -

relativísticos afectados por campos magnéticos locales.

4. La radiación Cerenkov, difiere fundamentalmente de los mecanismos precedentes, porque no es promovida por una aceleración en la partícula cargada que la produce como en aquéllos. Se trata de una radiación generada por cargas en movimiento uniforme, cuando éste se produce en un medio en el que la velocidad de propagación de la luz es menor que la velocidad de la partícula. Ver apéndice.

RAYA ESPECTRAL DE 21 CM.

Todos los procesos de generación de radio-ondas mencionados previamente, dan lugar a espectros continuos. Algunos de estos mecanismos originan frecuencias discretas, cuando se considera una única partícula; pero aún en ellos, la frecuencia es función de parámetros -como la velocidad de las partículas- que, cubren con continuidad amplios intervalos y, en consecuencia, la emisión de conjuntos de partículas por alguna radiofuente en particular, genera un espectro continuo. -- Dicho de otra forma, la frecuencia es función de ciertos parámetros, los cuales son variables en un gran rango de valores, el espectro generado es función de la frecuencia, por lo tanto, a una amplia gama de valores de velocidad de la partícula, por ejemplo, corresponde un espectro de radiación continuo. El único proceso que da lugar a una raya espectral discreta en todo el rango de las radio-ondas, es el que origina la llamada raya de 21 cm. ($f=1420.4$ mciclos/seg) -- del hidrógeno neutro. El mecanismo que produce esta emisión, es similar al que explica la generación de rayas discretas en el espectro visible, es decir, --

por una transición atómica que da lugar a una emisión o una absorción de energía. Esta transición es básicamente el cambio de orientación del momento magnético de giro del núcleo, respecto al del electrón. En una situación, los dos momentos son paralelos y en la otra, antiparalelos. La diferencia de energía total entre ambos estados posibles es tal que cada transición origina la emisión de un cuanto de radiación con frecuencia de 1420 Mciclos/seg.

Las transiciones que originan la raya de 21 cm, son provocadas principalmente por colisiones atómicas, - por lo que la energía radiante emitida en dicha longitud de onda por el hidrógeno neutro, depende de la energía interna del gas interestelar.

La observación de esta raya espectral, constituye un potentísimo instrumento de medición de velocidades y de distancias a nubes cósmicas, debido a la abundancia del hidrógeno neutro en el medio interestelar, y a que la determinación de la frecuencia central de la raya, permite conocer, por el efecto Doppler, la velocidad con que la fuente se aleja o se acerca a la tierra.

4.- RADIOASTRONOMIA

A pesar de su corta edad, aproximadamente 40 años, la radioastronomía se ha vuelto fundamental para el estudio del universo. Esta ciencia ha conducido, en las tres últimas décadas, al descubrimiento de nuevas clases de remotas y poderosas fuentes de radiación, pulsares, cuasares, galaxias en colisión, etcétera.

Los astrofísicos confían en que la radioastronomía les ayudará a comprender lo que sucedió en las primeras etapas de expansión del universo; cómo y cuándo las primeras galaxias, estrellas y sistemas planetarios aparecieron; qué son los cuasares y los núcleos galácticos, y en qué casos estos últimos se relacionan con los hoyos negros. Quieren aprender las principales propiedades del cosmos, su densidad y su evolución a partir de la gran explosión que originó al universo.

No es menos interesante tratar de descubrir si existen otros universos cuyas leyes difieran de las del nuestro, y conocer la naturaleza de las estrellas de neutrones y estrellas enanas blancas, cuyo estado material aún no puede reproducirse en el laboratorio. Los científicos desean detectar y estudiar los quarks, que podrían proporcionar mucha información sobre la estructura y propiedades de las partículas elementales. Asimismo esperan encontrar otros sistemas planetarios en diferentes estados evolutivos, para comprobar la probabilidad de que los seres surjan en diferentes sitios del universo, y aun para detectar alguna posible civilización lejana.

Los métodos de radio permiten detectar y estudiar objetos remotísimos a partir sólo de la cantidad infinitesimal de energía que, emitida por ellos, alcanza la Tierra. Estos métodos también ayudan a encontrar objetos muy fríos cuya radiación cae principalmente dentro del campo de la radiofrecuencia. Estas longitudes de onda son mayores que las de otras formas comunes de energía -infrarrojas, visibles, ultravioleta, etcétera. Debido a eso, la precisión que requiere la superficie de una radiotelescopio es menor que la de un telescopio óptico. La aparición de radiointerferómetros -sistemas de antenas separados entre sí por varios kilómetros, pero que operan en forma integrada- fué un gran adelanto en el desarrollo de la radioastronomía. La resolución angular (capacidad de separar objetos aparentemente unidos en el cielo) de un interferómetro se determina por la distancia de las antenas extremas, llamada línea de base del interferómetro. Entre 1950 y 1970 aparecieron sistemas de emergencia con líneas de base que sumaban varios kilómetros. Las observaciones con estos sistemas llevaron al descubrimiento de radiogalaxias y a su identificación con objetos visibles peculiares.

Actualmente el alcance de estos interferómetros es comparable con el de un lente del diámetro de la Tierra. Existen algunos pares de antenas que trabajan con el diámetro de la Tierra. Existen algunos pares de antenas que trabajan a distancias intercontinentales. Como resultado, la resolución angular se ha ampliado a 0.0002 segundos de arco.

Al llevar una de las antenas al espacio exterior, es posible obtener un interferómetro con mayor poder de resolución. Mientras más alta sea la órbita, más pequeños serán los detalles observables. Además, como la gravedad no es un problema en órbitas lejanas, pueden construirse antenas muy grandes con materiales de poca masa.

El método más directo para incrementar la sensibilidad del instrumento, es aumentar el área recolectora de los radiotelescopios, con lo que se alcanzan objetos más débiles. De esta manera, también se reduce la interferencia de las ondas de radio producidas por el hombre.

Incluso se pueden diseñar sistemas donde dos o más elementos de un interferómetro operen en órbita. Así podrán diseñarse antenas de varios kilómetros de tamaño, separadas por millones de kilómetros que recibirían longitudes de onda del orden de decímetros, centímetros y milímetros. Estas estructuras podrían construirse a partir de unidades estándar de 100 a 300 metros de diámetro. Además, su costo puede ser menor que el de las unidades terrestres de tamaño similar.

Es posible que en el espacio sea más conveniente -- utilizar reflectores específicos gigantes, en vez de los paraboloides utilizados en la mayoría de los radiotelescopios terrestres. Habrá una nave espacial independiente con equipo receptor radiométrico estacionada en la zona local del sistema. La precisión de la superficie del reflector se determinará y controlará por medio de otra nave ubicada en el centro

de la curvatura del plato.

Además de las ventajas que ofrece su construcción, los reflectores esféricos poseen otras importantes ventajas. Una de ellas es que se amplía la profundidad de campo, lo que permite realizar observaciones simultáneas en diferentes lugares de una extensa área del cielo.

El desarrollo de un radiointerferómetro con una línea de base de varias unidades astronómicas de largo, formada por antenas de varios kilómetros de diámetro, ayudará a que la sensibilidad y resolución angular sea millones de veces mayor que las obtenidas comúnmente en la Tierra. Esto ampliará las posibilidades de la investigación, especialmente para la búsqueda de señales artificiales de radio y rastros de actividad de civilizaciones extraterrestres, producción de películas de tres dimensiones de objetos astronómicos, y cálculos de las distancias y velocidades de estos objetos.

Por ejemplo, al emplear métodos directos de precisión se pueden ubicar objetos que se encuentran a 200 o 300 años luz. Para ubicar cuerpos celestes más distantes deben utilizarse los métodos indirectos. En 1950 se descubrió que la distancia extragaláctica tenía un error de un factor de 10, lo que demostraba que el universo era más grande de lo que se suponía, y permite calcular el margen de error de estos métodos.

Como se sabe, el plasma interestelar e intergaláctico afecta la propagación de ondas de radio. Esto hace que se borre aún la imagen de radio de las fuen

tes más compactas. Las técnicas nuevas resolverán este problema. Al utilizar una línea de base que exceda los 15,000 kilómetros, se realizarán y analizarán observaciones sincrónicas de las variaciones como una función de tiempo. El plasma tiene forma de nube y no es uniforme, lo que hace que se produzca una cierta cantidad de concentración de la energía de radio, a manera de una lente cósmica.

En su forma más simple, la técnica de recepción sincrónica envuelve la operación simultánea de dos antenas, como si fuera un interferómetro con una línea de base de longitud y dirección variable. Esto se puede lograr colocando una antena en el espacio y otra en el suelo. Si se coloca un tercer radiotelescopio, se puede obtener más información, así como pinturas tridimensionales, mediante tres diferentes pares de antenas.

Como efecto colateral, se puede medir la velocidad del objeto bajo estudio y de las nubes de plasma interestelar que intervienen. Otros resultados serán los estudios de espacio intergaláctico y los cascarones: conchas de plasma que rodean las galaxias.

En un futuro próximo, se construirá un aro formado por una antena múltiple colocada en órbita circular terrestre. Se dispondrá tan rápidamente de información que podrán filmarse películas de los cambios en los objetos estudiados.

Es muy probable que las mejores perspectivas para el desarrollo de la radioastronomía se encuentren en la expansión del área de las antenas y en la mayor separación entre ellas. Enviarlas al espacio ofrece muchas ventajas. Es apropiado instalar antenas relati-

vamente pequeñas, situadas en una órbita terrestre relativamente baja. Ello permite obtener observaciones de muy buena calidad, que revelen los detalles estructurales de las fuentes de radio más cercanas a nosotros.

Por ejemplo, el núcleo de nuestra galaxia que no es posible observar directamente. La importancia de esta región de la galaxia es comparable a la del núcleo del átomo. Se supone que hay un hoyo negro en el núcleo galáctico, así como una enorme multitud de estrellas y gas interestelar, formado por compuestos orgánicos complejos.

Los informes sobre el clima podrán perfeccionarse -- considerablemente al medir desde el espacio, con bastante exactitud, la temperatura y vientos superficiales de los océanos. Asimismo, se abre la perspectiva de regresar a la Tierra la energía solar capturada en el espacio, en forma de energía electromagnética.

C A P I T U L O

I

DISEÑO Y CALCULO DEL SISTEMA REFLECTOR-COLECTOR

1.- GENERALIDADES

A pesar de que las ondas visibles y las de radio son esencialmente iguales, ya que solo difieren en la frecuencia, las técnicas de observación y el instrumental que se emplea en ambos campos son radicalmente distintos. En cierto modo, la función del lente o espejo objetivo de un telescopio es cumplida por una antena en un radiotelescopio, en tanto que las funciones del ojo o la placa fotográfica que operan en el telescopio son realizadas en el radiotelescopio, por un receptor registrador.

Fundamentalmente, el radiotelescopio más elemental está constituido por una antena que recoge la energía electromagnética que llega a ella desde ciertas direcciones y por un receptor especial que percibe y registra la energía recogida por la antena. La figura (5) muestra los elementos principales de este instrumento simple llamado radiómetro. En muchos casos, cuando se consideran las pérdidas eléctricas, hay que agregar a las dos partes fundamentales una tercera a saber: las líneas de transmisión, encargada de transportar la energía desde la antena hasta el receptor.

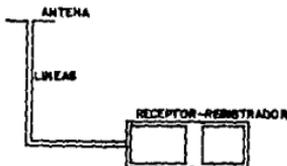


FIGURA 3

ESQUEMA DE UN RADIOMETRO O RADIOTELESCOPIO SIMPLE CON DENOMINACION DE SUS ELEMENTOS ESSENCIALES.

En el caso de un radiotelescopio parabólico, como el del caso que nos ocupa, la antena esta formada por un receptor y un colector.

El receptor es un paraboloide de revolución, en cuyo foco se sitúa el colector, al que concurre toda la radiación que ingresa desde el frente del paraboloide, dentro de un ángulo sólido más o menos pequeño centrado por el eje de simetría de la superficie. La energía captada por el colector es transmitida por cable al receptor electrónico, donde es procesada.

2.- PARAMETROS QUE RIGEN EL RADIOTELESCOPIO.

Tanto en el campo óptico como en el de las ondas de radio hay dos parámetros que caracterizan el instrumento de observación: el poder separador, vinculado a la capacidad de establecer la dirección de la cual proviene la energía, y el poder de percepción o sensibilidad, que se relaciona a la posibilidad de percibir y medir la energía que llega al instrumento.

a) PODER SEPARADOR. El poder separador o la resolución es una medida de la capacidad del aparato para distinguir separados objetos angularmente próximos. Idealmente, la energía que proviene de una fuente ' puntual como la estrella, debe ser concentrada por ' el reflector en un punto del plano focal donde el colector la hace pasar al receptor; prácticamente tal ' concentración no es puntual sino un pequeño círculo, llamado disco de difracción, en cuyo centro se concentra más energía que en las zonas que lo rodean. Cuando dos estrellas son angularmente muy próximas, ' sus respectivas radiaciones energéticas se superponen en el plano focal de un determinado radiotelescopio y se dice entonces que tal instrumento no las separa, o que su poder separador es insuficiente para el caso.

En un radiotelescopio el poder de resolución es proporcional a d/λ , donde d es el diámetro del reflector de la antena y λ la longitud de onda con que opera, se ve inmediatamente que, al operar en radioastronomía con longitudes de onda mucho mayores que en óptica, el poder separar de un radiotelescopio es muy inferior al de un anteojo astronómico de igual superficie colectora de radiación. Así, por ejemplo, ' para reproducir el poder de resolución del gran telescopio de Monte Palomar en el campo visible, el diámetro del reflector de un radiotelescopio que opere con $\lambda = 1 \text{ m}$ tendría que ser del orden del diámetro terrestre.

El mejoramiento del poder separador, una vez que se ha elegido la longitud de onda de operación, se consigue, tanto en óptica, como en radioastronomía, aumentando las dimensiones de la superficie colectora de la radiación, o usando técnicas interferométricas, que no encarecen excesivamente el sistema, en las que ahondaré más adelante, en el tercer apartado del capítulo cuarto.

b) SENSIBILIDAD. El poder de percepción o sensibilidad consiste en la capacidad de un determinado instrumento para reaccionar ante reducidas densidades de flujo que llegan a él. Se sabe que en astronomía óptica el alcance de un telescopio en la escala de magnitudes estelares crece cuando aumenta la superficie del lente o espejo objetivo; lo mismo ocurre en los radiotelescopios, en los que con un mismo receptor se pueden percibir fuentes tanto más débiles cuanto mayor sea la superficie que actúa como colectora de la radiación.

3.- SELECCION DE ONDAS INCIDENTES

La antena de un radiotelescopio tiene por función recoger energía de ondas de determinadas frecuencias y

polarización que llegan a ella de ciertas direcciones y entregar en sus terminales, para el receptor, la potencia extraída de las ondas. Es este dispositivo el que realiza la transición entre dos formas diferentes de propagación de la energía: la onda libre y la onda guiada por la línea de transmisión que une la antena con el receptor. Toda antena realiza una selección, de las ondas de las que extrae energía según un cierto rango de frecuencias y actúa como elemento lineal, es decir, no altera las frecuencias. La selección de ondas que llegan a la antena, según la polarización, es inherente a ella. Además la antena realiza una discriminación entre las direcciones en que arriba la radiación y extrae energía de ondas de algunas direcciones particulares solamente. Resulta pues que la antena de un radiotelescopio realiza una triple selección de las ondas incidentes: primero, en la polarización; segundo, en el espectro de frecuencias; y por último en las direcciones de propagación de las ondas.

a) POLARIZACION. Una antena convencional de polarización lineal, como un dipolo simple, solo toma energía de la componente de la onda polarizada colinealmente y rechaza la componente polarizada en ángulo recto con su dirección. Una antena tal acepta solo la mitad

de la energía de una onda polarizada al azar. Para detectar una polarización circular se recurre a combinaciones de antenas con orientaciones convenientes, en las que cada antena extrae energía de una de las dos componentes lineales de la polarización. También se ha recurrido a procedimientos interferométricos para la determinación del plano de polarización de las ondas, usando dos antenas cuyos planos de polarización sean perpendiculares: si las ondas recibidas no son polarizadas las señales entregadas por las dos antenas no producen interferencia y viceversa.

b) FRECUENCIA.- La selección de frecuencias que realiza toda antena se caracteriza por el llamado ancho de banda. En general la óptima función que una antena tiene es a una determinada frecuencia; el ancho de banda es un intervalo de frecuencias que tiene como centro el valor de la máxima capacidad y dentro del cual el funcionamiento de la antena es satisfactorio. Generalmente, el ancho de banda que acepta el receptor es menor que el de la antena y, por lo tanto, la selección de frecuencia que realiza la antena no es importante cuando se considera el conjunto del radiotelescopio; salvo los casos de trabajos en espectrometría, en los que se hace necesario operar con antenas de gran ancho de banda porque se trabaja con un conjunto de receptores con diferentes frecuencias centrales. Según sea su frecuencia de régimen, los reflectores parabólicos pueden ser de plancha o de tela metálica e incluso de material plástico metalizado.

Sus dimensiones dependen de la directividad deseada ' en relación con la frecuencia de régimen. Además, pa ra lograr una buena eficiencia eléctrica, las dimen siones del paraboloide han de ser del orden de la lon gitud de las ondas recibidas.

c) DIRECTIVIDAD. La tercera discriminación que reali za toda antena es efectuada por su directividad. La ' capacidad que tiene una antena para extraer energía ' de una onda electromagnética depende de la direcció n en que esta se propaga. La antena tiene una máxima ' capacidad para algunas determinadas direcciones, y pa ra otras solo una fracción de la máxima y eventualmen te es nula.

La especificación completa del funcionamiento de una antena receptora exige conocer estos parámetros, pero en la mayoría de los casos tal especificación es sufi ciente cuando se conoce uno o dos de dichos parámetros.

Se define como respuesta de una antena a una onda in cidente de determinada frecuencia, polarización, y di rección, a la potencia que la antena entrega en sus ' terminales a una línea de transmisión y receptor eléc tricamente ajustados para retirar de ellos el máximo posible de potencia. Las condiciones para la entrega

de la máxima potencia en las terminales de la antena dependen de la línea de transmisión y del receptor. El circuito equivalente a una antena dipolo que alimenta a un receptor, según la figura (5) , se representa en la figura (6).

La energía que la antena extrae en la onda produce en sus terminales una diferencia de potencial alterna con un cierto valor eficaz V en el receptor. En la figura (6). Se ha indicado la presencia de una impedancia propia de la antena Z_A que es característica de ésta. Z_B denota la impedancia que el conjunto de la línea de transmisión y el receptor presentan en las terminales T1 y T2. En general las dos impedancias son complejas:

$$Z_B = R_B + j X_B$$

$$Z_A = R_A + j X_A$$

La parte real de Z_A se divide en dos sumandos: R_r - Se llama resistencia de radiación y R_p resistencia de pérdida. De modo que $R_A = R_r + R_p$.

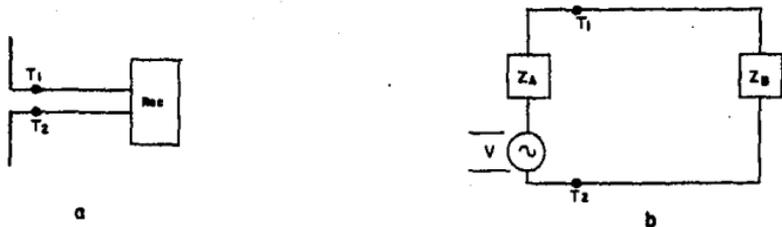


FIGURA 6

(a) UNA ANTENA CON TERMINALES T_1 Y T_2 Y EL RECEPTOR ALIMENTADO POR ELLA.

(b) ESQUEMA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE AL (a), EN EL QUE V DENOTA LA DIFERENCIA DE POTENCIALES PRODUCIDA EN LA ANTENA ANTE LA INCIDENCIA DE RADIACION; Z_A LA IMPEDANCIA PROPIA DE LA ANTENA Y Z_B LA IMPEDANCIA QUE EN T_1 , T_2 PRESENTA EL RECEPTOR Y LA LINEA DE TRANSMISOR.

La corriente eficaz que circula valdrá:

$$I = \frac{V}{\sqrt{(R_r + R_p + R_B)^2 + (X_A + X_B)^2}}$$

Y la respuesta de la antena, P , será:

$$P = R_B I^2$$

En general el valor máximo de P es dado por $dp/dR_B = 0$. Si se desprecia la resistencia de pérdida R_p , que es siempre muy pequeña frente a R_r y R_B , y se hace $X_B = -X_A$ Resulta:

$$\frac{dP}{dR_0} = \frac{d}{dR_0} \left[\frac{R_0 V^2}{(R_r + R_0)^2} \right] = V^2 \frac{(R_r^2 - R_0^2)}{(R_r + R_0)^4}.$$

La condición $dP/dR_B = 0$ se cumple cuando son: $R_B = R_r$ y $X_B = -X_A$. Cuando se cumplen estas dos condiciones en una antena sin pérdidas, se dice que la línea de transmisión y el receptor, o sea la carga, están adaptados a la antena. La respuesta de la antena vale entonces:

$$P = \frac{V^2 R_0}{4 R_0^2} = \frac{V^2}{4 R_0} = \frac{V^2}{4 R_r} \quad (11a)$$

En todo caso en que una antena adaptada a su carga entrega en sus terminales una potencia p , otra potencia equivalente se consume en la resistencia de radiación R_r de la antena; esta última potencia es extraída por la antena a la onda incidente y reemitida al espacio en diversas direcciones, por lo que se le designa potencia difundida, su valor es:

$$P_r = R_r I^2$$

Otro término de la potencia total que una antena capta de una onda incidente es el que corresponde a las pérdidas óhmicas en la misma antena, que aparecen en forma de calor en la misma antena y cuyo valor es:

$$P_p = R_p I^2$$

La potencia total extraída de la onda incidente por la antena vale pues:

$$P_T = I^2 (R_B + R_r + R_p) = P + P_r + P_p$$

ABERTURA DE UNA ANTENA .

La abertura o superficie colectoras A_c de una antena se define por la expresión:

$$A_T = \frac{P_T}{F}$$

(12)

Donde P_T tiene el significado ya anotado y F es la densidad de flujo de la radiación considerada. Con expresiones análogas se definen las tres aberturas A , A_r y A_p que corresponden a las potencias ya mencionadas P , P_r y P_p y que son, respectivamente, la abertura efectiva, la dispersión y la de pérdidas.

La caracterización de la función de la antena en un radiotelescopio se realiza fundamentalmente a través de la potencia útil que entrega en sus terminales al receptor, ante la incidencia de la ondas. Por lo tanto, un parámetro esencial para tal función es su abertura efectiva A, que cumple:

$$A = \frac{P}{F}$$

A tiene, como se ve, la dimensión de una superficie y equivale a una cierta área en el frente de onda con densidad de flujo F y por la que atraviesa una potencia P. Esta abertura o superficie efectiva en una antena determinada es función de la frecuencia o longitud de onda y de la dirección de arribo de la onda a la antena; es decir que $A=A(f, \theta, \phi)$ en donde θ y ϕ son los dos coordenadas de dirección en un sistema polar centrado en la antena. Para una onda polarizada al azar, de la que una antena típica sólo capta una componente de la polarización, la potencia P corresponde realmente a la mitad de la que la densidad de flujo total F_T de la onda hace atravesar dicha superficie A, o sea que en tal caso:

$$P = \frac{1}{2} A F_T$$

(13)

La relación entre el área efectiva y la superficie que físicamente presenta la antena a la onda depende del tipo particular de antena que se considere. En muchos casos esta abertura física o proyección de la antena en el plano del frente de la onda carece de sentido, como en las antenas formadas por un tramo de conductor vertical que opera junto con un plano de tierra de gran extensión; pero en otros, como en las bocinas electromagnéticas o las antenas con receptor paraboloidal, como el caso que nos ocupa, el área física tiene gran significación y es del mismo orden de magnitud que el área efectiva.

Si colocamos una antena en un medio cuya densidad eléctrica uniforme sea F_f , y ésta no tuviera pérdidas en la recepción de las ondas en toda su superficie, su intensidad eléctrica de percepción F_p se expresaría así:

$$F_p = F_f \times A_R$$

6

$$A_R = \frac{F_p}{F_f}$$

Donde A_R es el área real de la antena.

El grado de diferencia entre el área real de la antena A_R y el área física de la antena A_f , representa la eficiencia de la antena:

$$\eta = \frac{A_R}{A_f} = \text{Eficiencia}$$

(14)

Las antenas parabólicas se encuentran en un rango de 0.5 a 0.7 ahora bien, en una antena isotrópica (artificio teórico que no existe en la realidad y que se supone radia o recibe ondas de iguales características en todas direcciones), su área real de recepción que llamaremos A_{Ri} se calcula de la forma siguiente:

$$A_{Ri} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Apliquemos la teoría anterior a este tipo de antena. Si la antena isotrópica se coloca en un medio con F_f de densidad eléctrica uniforme, obtendremos una intensidad eléctrica de recepción F_{Pi} , que se calcula con la siguiente expresión:

$$F_{Pi} = \frac{\lambda^2}{4\pi} F_f$$

En las antenas reales de uso común para obtener A_R utilizamos la expresión:

$$A_R = \frac{F_p}{F_{Pi}} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)$$

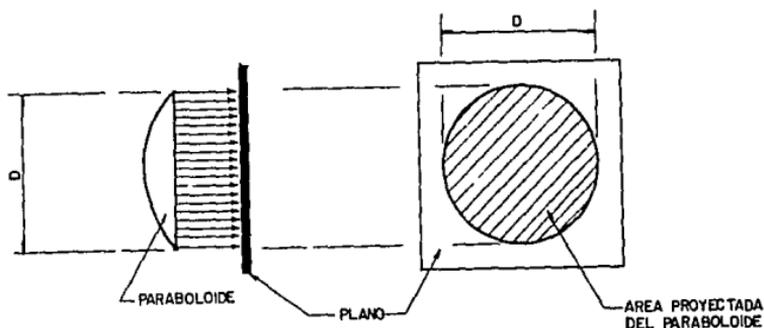
donde F_p/F_{pi} es la GANANCIA de la antena, que es la razón de la energía eléctrica del medio transmisor referida a la energía eléctrica captada por la antena. Es obvio que la ganancia máxima de una antena se da en cierta dirección, para cada dirección de propagación. De ésto podemos concluir que:

$$A_R = \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) G$$

Donde A_R es ésa área real de la antena, λ la longitud de onda de operación y G la ganancia. A_R también es el llamada abertura efectiva, parámetro ya considerado arriba.

Es necesario anotar aquí que el área física de recepción de ondas de la antena parabólica es la proyección del paraboloide sobre un plano enfrentado a ésta. Esta proyección es siempre circular.

FIGURA 7



Por lo tanto, el área física del paraboloide es:

$$A_f = \frac{\pi D^2}{4}$$

en donde la ganancia de la antena se expresa como:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (16)$$

donde η es la eficiencia de la antena y para el caso de las parabólicas oscila entre 50% y 70%.

DIAGRAMA POLAR DE UNA ANTENA.

Se acostumbra representar las cualidades de una antena mediante su diagrama polar que representan los valores de G o de A_R para las distintas direcciones con relación a la antena, con segmentos de longitud proporcional a dichos valores de G .

En la práctica las antenas parabólicas presentan el máximo de ganancia en una dirección determinada. En este caso el diagrama polar consiste en un lóbulo simétrico respecto a la dirección de máxima ganancia.

Para describir la forma de este lóbulo se recurre generalmente a un ángulo llamado ancho de haz. Este ángulo está determinado por los segmentos representativos de la ganancia para valores de esta última iguales a la mitad de la máxima ganancia.

En la figura (8) se representa una sección plana del diagrama polar espacial correspondiente a una cierta antena provista de un reflector paraboloidal . Si asumimos una simetría alrededor del segmento OA es ta sección plana determina totalmente el diagrama polar espacial que será el engendrado por revolución de la sección en torno a OA. Se puede observar que tal diagrama comprende un lóbulo mayor, llamado principal, y algunos lóbulos menores, llamados secundarios.

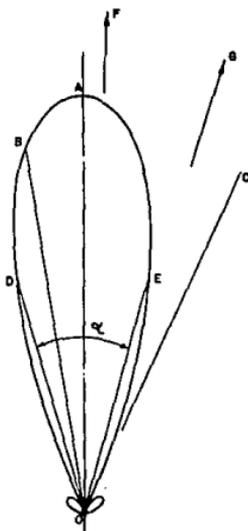


FIGURA 8

DIAGRAMA POLAR PLANO DE UNA ANTENA, CON ORIGEN O EN EL QUE SE SENALAN: EL ANCHO DE HAZ α DETERMINADO POR LAS DIRECCIONES OD Y OE QUE CUMPLEN $OD = OE = OA/2$; UNA DIRECCION OC PARA LA QUE LA ANTENA NO ACTUARIA; Y DOS DIRECCIONES OF Y OB PARA LAS QUE LA ANTENA TIENE DISTINTA CAPACIDAD DE RECEPCION.

La longitud de un segmento como OB es una medida de la ganancia o área real de la antena para una onda que se propaga en tal dirección OB. La máxima ganancia corresponde en este caso a la dirección OA, que es la del eje de simetría del diagrama. El ancho de haz de esta antena - que es único para todos los planos secantes por la simetría asumida - vale α , ya que tal ángulo es el que abren los segmentos $OD = OE = OA/2$. Si la antena es receptora no responderá en absoluto a una onda que arribe a ella en una dirección como OC. El ancho de haz de una antena es una medida de su poder separador o resolución: a menor ancho de haz corresponde mayor resolución. Para aclarar esto supongamos que dos fuentes puntuales F y G se desplazan frente a la antena. Cuando F se encuentra sobre la recta OA, la antena estará recibiendo también energía de la fuente G si la separación angular entre ambas fuentes no supera el valor $\alpha/2$. Aún cuando la mencionada distancia angular valga $\alpha/2$, hay una suma de las dos energías recibidas por la antena; pero la respuesta de ésta a la fuente G será de la mitad de la correspondiente a F, cuando esta última ocupa la dirección central del lóbulo. Si la distancia angular entre F y G sobrepasa sensiblemente a $\alpha/2$ será posible recibir la energía de cada una de las fuentes separadamente y entonces se dice que la antena las separa o resuelve totalmente.

En antenas con reflector paraboloidal el ancho de haz disminuye cuando aumenta la abertura física del reflector, o sea que, como ya se mencionó, un incremento de la superficie del reflector provoca un aumento del poder de resolución.

En general toda antena presenta, además de su lóbulo principal, varios lóbulos secundarios. La existencia de lóbulos secundarios en una antena constituye un inconveniente para su operación, por ejemplo, cuando se desean estudiar fuentes débiles se trata de que estas se sitúen en la dirección del lóbulo principal, pero simultáneamente otras fuentes más intensas pueden quedar enfrentadas a los lóbulos secundarios. En tales casos es muy difícil discernir cuál es el aporte de unas y otras fuentes a la potencia que entrega la antena en sus terminales, no pudiéndose valorar la densidad de flujo de la fuente débil que interesa. Para evaluar la función de los lóbulos secundarios se acostumbra definir un rendimiento direccional de la antena dividiendo la integral de la ganancia en dos términos:

$$\int G_{dw} \quad + \quad \int G_{dw} = 4\pi$$

En lóbulo principal. En lóbulos secundarios.

y haciendo:

$$\int \frac{G_{dw}}{4\pi} = e$$

En lóbulos secundarios.

$$\int \frac{G_{dw}}{4\pi} = 1 - e$$

En lóbulo principal.

Al número $(1-\rho)$ se le llama rendimiento direccional de la antena. En la práctica $(1-\rho)$ varía enormemente según el tipo de antena, pero generalmente es menor a 0.6 en antenas simples con reflector paraboloide, o sea que ante una fuente que "rodea" totalmente, la antena solo alrededor del 60% de la respuesta es debida al ingreso de radiación por el lóbulo principal.

4.- REFLECTOR. DISEÑO

DIMENSIONES:

Como ya hemos mencionado, en un radiotelescopio la energía en forma de ondas libres proveniente de cierta ' ' fuente es colectada por el paraboloide en revolución y reflejada a su punto focal o foco, donde se encuentra situada una antena tipo bocina.

Las dimensiones más importantes del paraboloide están mostradas en la figura (9).

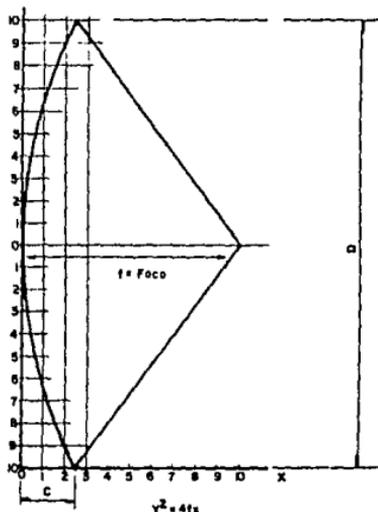


FIGURA 9

DIMENSIONES DEL PLATO PARABOLICO

LA ANCHURA (C) SE ENCUENTRA RESOLVIENDO $f = d^2/16c$

Conocido como el radio f/D , esta relación es muy importante al diseñar un paraboloide. Empíricamente se ha encontrado que radios f/D de 0.5 y mayores funcionan muy bien en radioastronomía.

Como vimos con la fórmula 16, el diámetro D es básico para determinar la ganancia, la abertura y el poder se parador de la antena. Obviamente un disco de 5 metros de diámetro coleccionará más señales - y por lo tanto energía - que una de 2 metros. Podemos observar, además, que cuando doblamos el diámetro, la ganancia se incrementa en un factor de 4. La ganancia del radiotelescopio depende también de su eficiencia y de su frecuencia de operación. Asumiendo una razonable eficiencia de antena del 50% y para una λ de operación determinada, obtenemos la siguiente gráfica que relaciona la ganancia con el diámetro del disco, en escala logarítmica:

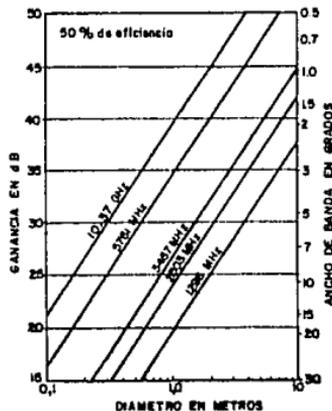


FIGURA 10

RELACION ENTRE EL DIAMETRO DEL PLATO Y SU GANANCIA

Una vez definido el diámetro de plato parabólico como de 5 metros, para el caso que nos ocupa, buscaremos el punto focal óptimo por medio de el radio f/D , cuyo valor será de 0.5 como ya vimos arriba, entonces:

$$\frac{f}{D} = 0.5 \quad (17)$$

$$y \quad f = 0.5 \text{ (5 metros)}$$

$$f = 2.5 \text{ metros.}$$

La excentricidad o curvatura exacta necesitada para obtener un paraboloide con el diámetro y punto focal deseados la encontraremos a partir de la ecuación general de una parábola, la cual es la siguiente:

$Y^2 = 4fX$ (Ecuación general de una parábola con vértice en el origen) y graficando valores de "Y" para ciertos valores de X.

Como ya obtuvimos el valor de "f" para nuestra parábola, podemos definir su ecuación general como sigue:

$$Y^2 = 4 (2.5)X$$

$$Y^2 = 10X$$

Para encontrar la anchura "C", encontramos el valor de "X" cuando "Y" vale 2.5 metros, que es el radio de la parábola:

$$Y^2 = 10X$$

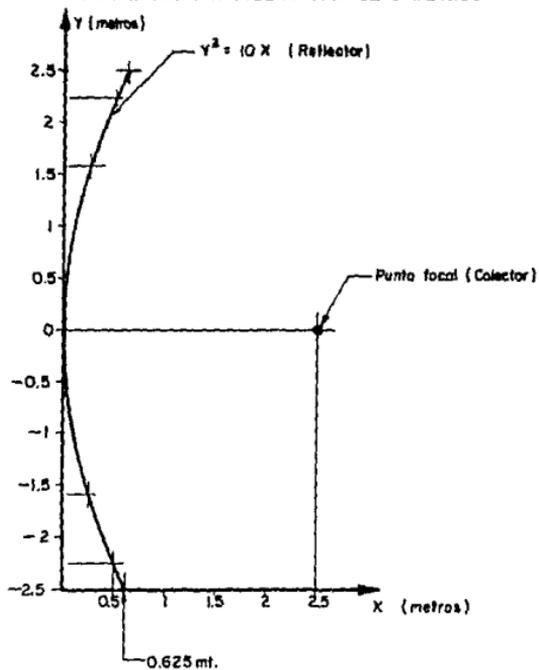
$$X = \frac{Y^2}{10}$$

$$X = \frac{(2.5)^2}{10} \text{ MTS}$$

$$= 0.625 \text{ mts. o } 62.5 \text{ cm.}$$

Graficando "Y" para ciertos valores de "X" obtenemos el perfil de nuestro radiotelescopio, mostrado en la figura (11).

FIGURA 11 -- PERFIL DEL RADIOTELESCOPIO DE 5 METROS



X=0	Y=0
X=0.25	Y=± 1.58
X=0.5	Y=± 2.24
X=0.625	Y=± 2.5

MATERIALES.

Los materiales convencionales para estructuras y reflectores han sido tradicionalmente aluminio, titanio, magnesio, berilio, acero inoxidable y fibra de vidrio. En forma similar a la fibra de vidrio, para la cual las fibras son colocadas en una matriz adhesiva de baja resistencia, los materiales compuestos avanzados emplean fibras de grafito más fuertes y firmes como boro colocado en una matriz adhesiva de epoxy, las fibras pueden estar colocadas unidireccionalmente entrelazadas o en forma aleatoria, dependiendo sus propiedades mecánicas de las diferentes combinaciones de fibra y grosor.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se comparan con las de los metales en la tabla I. Claramente podemos observar que las propiedades dependen del arreglo de la fibra. La configuración unidireccional cede fuerza prominente y firmeza en la dirección de las fibras, pero bajos valores en el sentido transversal a las mismas. Las fibras unidireccionales son prácticas en elementos que están sujetos a fuerzas de una sola dirección, como en miembros de armadura, por ejemplo en el soporte. Cuando se realizan por medio de la orientación múltiple de capas de fibra unidireccional.

	RESISTENCIA ESPECIFICA Nm/Kg $\times 10^5$	RIGIDEZ ESPECIFICA Nm/Kg $\times 10^7$	DENSIDAD Kg/m ³ $\times 10^3$	EXPANSION TERMICA $\mu/m \text{ } ^\circ C$ $\times 10^4$	CONDUCCION TERMICA W/m ² $^\circ C$
GRAFITO-EPOXY					
HTS, UNIDIRECCIONAL	5.0	8.7	1.6	-0.3	-
HTS, ISOTROPICO	1.7	3.0	1.6	+1.0	-
GY70, UNIDIRECCIONAL	2.5	16.6	1.6	-1.1	12.1
GY70, ISOTROPICO	0.9	6.2	1.6	-0.1	26
CORTADO, MATRIZ ALEATORIA	0.8	5.4	1.6	1.4	-
KELVAR					
UNIDIRECCIONAL	1.4	5.2	1.4	-3.6	1.7
ISOTROPICO	0.7	1.9	1.4	-1.1	0.5
FIBRA DE VIDRIO					
UNIDIRECCIONAL	4.0	2.7	2.0	7.2	0.2
ISOTROPICO	1.3	1.0	2.0	7.2	0.1
ALUMINIO					
BERILIO	1.2	2.5	2.8	23	132
INVAR	1.5	15.8	8.0	11	160
MAGNESIO	0.3	1.8	1.8	1.3	11
TITANIO	1.2	2.5	4.4	25	87
ACERO INOXIDABLE	1.2	2.5	8.1	9.5	7
				11	17

Tabla I.- Propiedades de los materiales.

MATERIAL	RIGIDEZ DENSIDAD X COEF. EXP. TERMICA	EN VALOR ABSOLUTO X 10 ⁷
GRAFITO EPOXY		
HTS, UNIDIRECCIONAL	-1.8125×10^{11}	161.25
HTS, ISOTROPICO	1.875×10^{10}	18.75
GY70, UNIDIRECCIONAL	-9.4318×10^{10}	94.318
GY70, ISOTROPICO	-3.875×10^{11}	387.5
CORTADO, MATRIZ ALEATORIA	2.4107×10^{10}	24.107
KELVAR		
UNIDIRECCIONAL	-1.0317×10^{10}	10.317
ISOTROPICO	-1.231×10^{10}	12.31
FIBRA DE VIDRIO		
UNIDIRECCIONAL	1.675×10^9	1.675
ISOTROPICO	6.9444×10^8	0.6944
ALUMINIO		
BERILIO	1.882×10^8	1.882
INVAR	7.5746×10^7	0.75746
MAGNESIO	1.73×10^7	1.73
TITANIO	5.55×10^7	5.55
ACERO INOXIDABLE	5.98×10^7	5.98
	2.8×10^7	2.8

Tabla II.- Fibra de Berilio.

Una figura de mérito en la selección del material es la relación de rigidez dividida por la densidad y el coeficiente de expansión térmica del material. La tabla II muestra la dominancia de los compuestos avanzados que usan este criterio.

Además del material utilizado en la fabricación del paraboloide reflector, existen dos factores importantes que pueden afectar la ganancia de la antena. Primero: las desviaciones de la superficie con respecto a la ideal tienden a desenfocar el haz de la antena y producen una disminución en la ganancia (figura (12)). Segundo: los errores de apuntamiento del haz pueden disminuir la ganancia de la antena (figura (13)).

Ahora, la ganancia absoluta de una antena de reflector parabólico, incluyendo el efecto de las desviaciones de superficie, puede expresarse como:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 e^{-\left(\frac{4\pi E}{\lambda} \right)^2} \quad (10)$$

donde:

e = Constante. Base de los logaritmos neperianos = 2.7182818

E = Desviación rms de la superficie del reflector desde lo ideal.

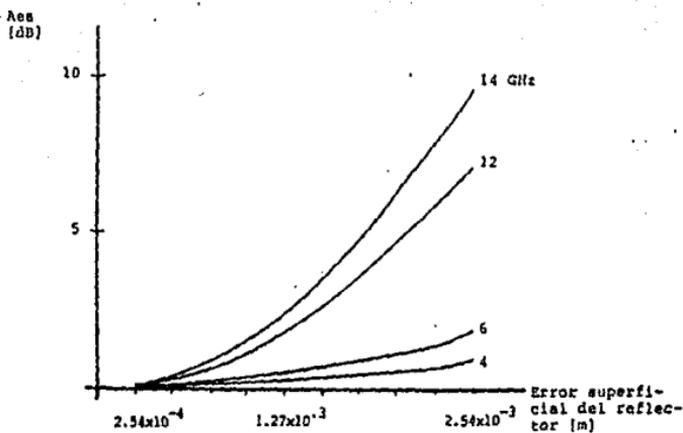


Fig. 12.- Error superficial del reflector, en metros
 Y.S. atenuación de error superficial en dB.

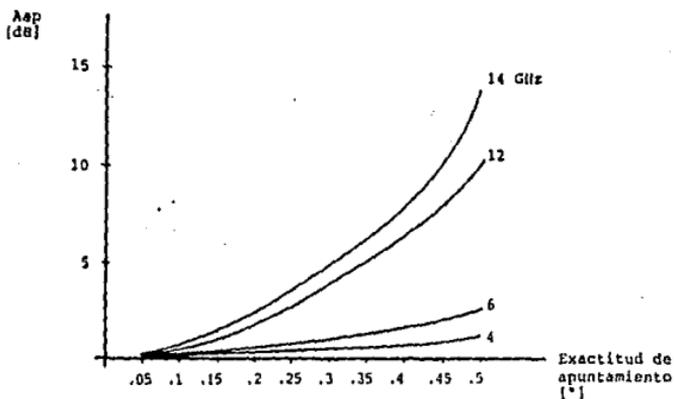


Fig. 13.- Exactitud de Apuntamiento en grados
 V.S. atenuación de apuntamiento en dB.

Por consiguiente, se requiere de ciertos materiales y técnicas para lograr un fino acabado superficial con objeto de reducir al máximo el error superficial. La tabla III nos muestra la calidad de la superficie y la profundidad de las rugosidades en diversos procesos de mecanizado de materiales con arranque de viruta. Es importante mencionar que el orden del máximo error superficial permisible es el mismo que el de la longitud de onda de operación del radiotelescopio. Así, con $\lambda = 1$ mm, el máximo valor permisible para la desviación rms de la superficie con relación a la ideal debe encontrarse por debajo a este valor, para ser, por ejemplo de 0.5 mm. Para las longitudes de onda de operación del radiotelescopio (de 1 cm a 30 metros) vemos, en la fórmula 18, que no es importante este factor, cuando el radiotelescopio se encuentra operando con $\lambda = 10$ m y el valor rms del error superficial del plato parabólico es de 0.5 mm (debido a un torneado de bajísima calidad) y que la ganancia se ve afectada por un factor:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 e^{-(4 \times 10^7)}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 (0.9999996).$$

pero que operando a una longitud de onda $\lambda = 1$ cm, este mismo error de 0.5 mm ya toma importancia, de la forma siguiente:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 e^{-0.335}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 (0.674)$$

Ahora, podemos definir con ciertos fundamentos el material a utilizar en el plato parabólico de nuestro radiotelescopio. En base a los parámetros ya definidos, utilizaremos lámina de fibra de vidrio de arreglo ---- isotrópico, puesto que es barata, fácil de adquirir y de trabajar, y, con una fina capa de laca metálica de aluminio, que no encarece a nuestro equipo, le damos el acabado superficial requerido puliéndola, y disminuyendo errores superficiales hasta llegar a un error superficial rms de 0.3 mm, obtenemos una razonable funcionalidad, ya que operando a $\lambda = 1$ cm la ganancia se verá afectada por un factor de:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 e^{-(0.14212)}$$

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 (0.87).$$

5. COLECTOR.

Como ya se vió la función del plato parabólico es reflejar y concentrar las ondas en su foco, donde serán captadas por el colector, el cual tiene como función efectuar la transición entre la onda libre y la onda guiada. Las ondas emitidas por alguna fuente cósmica viajan y se mueven con la libertad que les dá su medio transmisor, el espacio interestelar o intergaláctico, o la atmósfera terrestre. El colector nos permite guiar esta onda y su energía, mediante una línea de transmisión, hasta el receptor electrónico, donde será procesada para su análisis posterior.

Es en este dispositivo donde se genera la diferencia ' de potencial alterna debida a la incidencia de las ondas desde el plato parabólico. La frecuencia de oscilación del voltaje está en relación directa a la longitud de onda $-\lambda-$ de operación de la forma siguiente:

$$f = c / \lambda$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío. El valor del voltaje está en función de la potencia de las ondas y esta potencia es, de fórmula 9:

$$P_f = F_f \cdot C : \Delta f$$

donde Δf es el intervalo de frecuencias considerado ' (medido en Hz) y C el área real de la antena y es (fórmula 14):

$$C = A_R = \mathcal{A} A F$$

$$A_R = 0.5 \left[\frac{\pi (5 \text{ m})^2}{4} \right], \text{ y suponiendo } \mathcal{A} = 50\%$$

$$A_R = 9.82 \text{ m}^2 = C$$

Ff es la densidad de flujo de la radiación, dada por las fórmulas 6 y 8 y se mide en Watts / m² Hz, entonces:

$$P_f = 9.82 \text{ m}^2 F_f \Delta f$$

Ahora, para una onda polarizada al azar, la antena solo captará una componente de la polarización, o sea la mitad de la energía total (fórmula 13):

$$P_{\text{real}} = \frac{9.82 \text{ m}^2}{2} F_f \Delta f$$

$$P_{\text{real}} = 4.91 \text{ m}^2 F_f \Delta f$$

Esta potencia será la que recibirá el colector de nuestro radiotelescopio y, sin considerar pérdidas electrónicas, entregará en sus terminales un voltaje V dado por (fórmula 11a).

$$V^2 = 4 (P_r) (R_r)$$

$$V^2 = 4 (4.91 \text{ m}^2 F_f \Delta f) (R_r)$$

$$V^2 = 19.64 \text{ m}^2 (F_f \Delta f) (R_r)$$

(19)

Para conocer V medimos R_r del plato parabólico, una vez construido, obtenemos de tablas la radiomagnitud M_r y aplicamos la fórmula 10:

$$M_r = -53.4 - 2.5 \text{ Log } F_f$$

(20)

Despejando F_f :

$$F_f = 10^{- (53.4 + M_r) / 2.5}$$

Podemos encontrar tablas de magnitudes estelares en la literatura existente sobre Astronomía. Presentamos aquí algunas de las principales estrellas de la bóveda celeste con sus correspondientes magnitudes.

Nombre	Constelación	Magnitud	Distancia (años luz)	Temperatura °K
Alfa centauri	Centauro	-0.3	4.3	5800
Aldebarán	Toro	+0.8	68	3500
Antares	Escorpión	+0.9	425	3600
Betelgeuse	Orión	+0.4	600	3400
Deneb	Cisne	+1.3	1600	8800
Mizar	Osa Mayor	+2.1	88	9200
Polaris	Osa Menor	+2	650	5600
Regulus	León	+1.3	84	12000
Sirius	Can Mayor	-1.5	8.7	9700
Spica	Virgen	+1.0	220	22000
Vega	Lira	+0.1	265	9700

También existen tablas análogas para galaxias completas.

6. RECEPTOR

La energía recibida por el colector será transmitida al receptor mediante una línea, como puede ser un cable coaxial de bajas pérdidas. Figura 12.

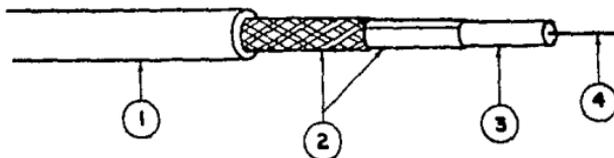


FIGURA 14

CABLE COAXIAL

1.- CUBIERTA DE PVC NEGRO RESISTENTE A LA INTemperie

2.- BLINDAJE ELECTROSTATICO: CINTA ALAMBREZADA

ELECTRODINAMICO: TRENZA DE ALAMBRES DE COBRE ESTAÑADO

3.- AISLAMIENTO DE POLIETILENO CELULAR DE BAJAS PERDIDAS

4.- CONDUCTOR COBRE DURO

En el mercado existen varias marcas y clases de cable coaxial. Como ejemplo de ello tenemos los cables marca CONDUMEX tipos CATV 59/U y CATV 6/U cuyas características son las siguientes:

CONCEPTO	DESCRIPCION	CLASES	
		CATV 59/U	CATV 6/U
.Conductor interno	Alambre de cobre duro d (mm)	0.81	0.95
.Aislamiento	Polietileno celular. d (mm)	3.93	4.59
.Conductor externo	Alambres de cobre estañado		
.Cubierta	PVC resistente a la intemperie. d (mm)	6.20	7.00

CONCEPTO	DESCRIPCION	CLASES	
		CATV 59/U	CATV 6/U
.Peso	Peso aproximado. kg/km	36.6	42.7
.Impedancia	Ohms.	75	75
.Capacitancia.	Picofarads/m. $1 \text{ pf} = 1 \times 10^{-12} \text{ farads}$.	53	53
.Atenuación en dB/100m	a 10 MHz	2.2	1.9
	30 MHz	3.9	3.3
	100 MHz	7.1	6.1
	150 MHz	8.8	7.6
	200 MHz	10.2	8.8
	300 MHz	12.6	10.8
	1000 MHz	23.7	20.5

Podemos observar que el cable con menores pérdidas es el tipo CATV 6/U, por lo que debe usarse como conexión entre el colector y el receptor.

El receptor de un radiotelescopio típico tiene por función convertir la potencia contenida en un ancho de banda Δf , que recibe del sistema de antena (reflector-colector-cable), en una potencia mayor y rectificada, que será medida y registrada por el correspondiente instrumento a la salida del receptor. La amplificación de la potencia que recibe debe ser efectuada de modo tal que las variaciones de la potencia de salida sean proporcionales a las respectivas variaciones de la entrada. Esta función genérica del receptor es realizada por las dos partes esencialmente diferentes que lo constituyen: el amplificador y el detector. El amplificador, como su nombre lo indica, se ocupa de incrementar las amplitudes de todas las ondas de frecuencias comprendidas en Δf y, fundamentalmente, es igual a los que se usan en los receptores corrientes de radiocomunicación. El detector

realiza la rectificación de las ondas eliminando parcialmente una de las dos polaridades presentes en la salida del amplificador, con lo que la potencia de salida puede ser evaluada y registrada por un instrumento común de corriente continua.

Además de la frecuencia central f_0 y del ancho de banda Δf en que opera el receptor hay otro parámetro fundamental para interpretar su operación, éste es la ganancia de potencia G . La ganancia total de un receptor es una relación entre la potencia que éste entrega en sus terminales de salida, P_s , y la potencia que en Δf , recibe en su entrada P_f . Es en cierto modo una medida de la amplificación que se realiza en el equipo. La mayoría de las fuentes celestes tienen densidades de flujo menores a 10^{-26} Watts/m² Hz (ver fórmula 21). Con una antena de 4.91 m² de área real (el caso que nos ocupa) y para una banda $\Delta f = 10^6$ Hz; la potencia que se obtiene como respuesta en la entrada del receptor es, de fórmula 9, igual a 4.91×10^{-20} Watts. La potencia mínima que requiere un registrador convencional es del orden de 10^{-10} Watts con lo que se ve que en el caso considerado la ganancia de potencia del receptor debe de ser 10^{10} veces mayor que la convencional o mayor. Las grandes ganancias que deben tener los receptores usados en radioastronomía constituyen una de las grandes diferencias con los receptores comunes de radiocomunicación que operan con potencias de entrada muy superiores.

CAPITULO II

MONTURA ECUATORIAL

1- INTRODUCCION.

Los montajes de las antenas y sus reflectores se realizan generalmente de modo que permitan la orientación de su lóbulo principal a cualquier zona del cielo. Para esto se emplean disposiciones similares a las de las monturas de telescopios ópticos, es decir, monturas que permiten mover la dirección principal de la antena en dos orientaciones normales entre sí. En antenas de dimensiones pequeñas y medianas (como la que se describió y calculó en la presente Tesis), se usan montajes ecuatoriales en los que los dos movimientos angulares se realizan en el plano del meridiano del lugar - en ascensión recta - y en un círculo horario, movimiento perpendicular al primero - en declinación. Para las antenas paraboloides de mayor tamaño se emplean generalmente monturas altacimutales, las cuales solo proporcionan uno de los dos movimientos mencionados, debido a las imposibilidades físicas que establecen las dimensiones del reflector. En estos casos el único movimiento de la antena se realiza en el plano meridiano y la dirección principal (fija) del instrumento se apunta previamente a un determinado círculo de declinación; el movimiento general estelar permite luego orientar la antena hacia cualquier fuente, para lo cual hay que elegir el momento de la observación de acuerdo con la ascensión recta de la fuente en cuestión.

El tiempo disponible para la observación se limita ' en estos casos al que consume el tránsito de la fuente - debido al movimiento estelar en conjunto - por el lóbulo de recepción de la antena.

Existen además disposiciones de antenas con reflector demasiado grande para ser movido de cualquier ' forma, en los que se fija al terreno, y es el movimiento del elemento activo de la antena (el colector) el que permite la movilidad de la dirección principal del conjunto.

2- MECANISMO. DISEÑO.

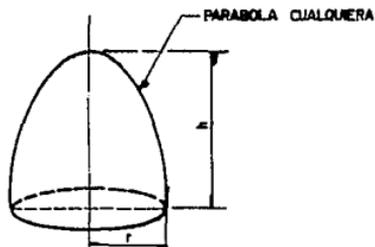
Una vez definidas las dimensiones generales del plato parabólico (figura 11), calculemos ahora su peso total, que será el que soportará la estructura de la montura.

Tomando como espesor de la placa de fibra de vidrio como de 4 mm, suficiente como para darle la rigidez necesaria para soportar los embates del viento, único esfuerzo mecánico al que se verá sometida, procedamos a calcular su volumen aproximado.

Tomemos que el volúmen total de un paraboloides de revolución es: Figura 15 :

$$V = \frac{1}{2} \pi r^2 h$$

FIGURA 15



VOLUMEN DEL PARABOLOIDE

Tomando $r = 2.5$ m y $h = 0.525$ m. resulta que:

$$V_1 = 6.1359 \text{ m}^3$$

y, si el espesor del plato es 4 mm, $r = 2.5$ m y $h = 0.621$ m, por lo que:

$$V_2 = 6.0967$$

Con lo que el volúmen total de la fibra de vidrio del plato parabólico será:

$$V_T = V_1 - V_2$$

$$V_T = 6.1359 \text{ m}^3 - 6.0967 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0.0392 \text{ m}^3$$

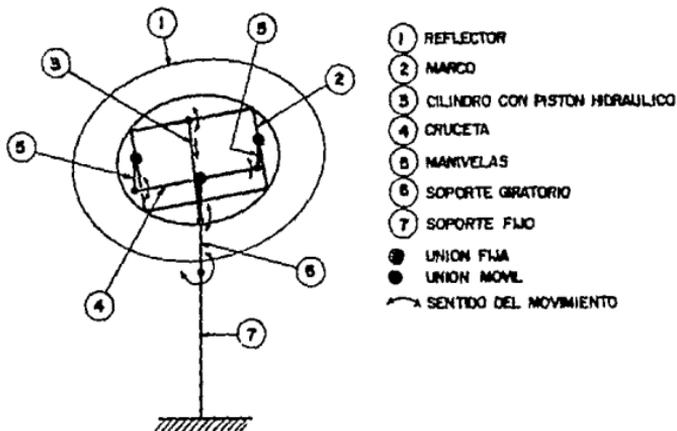
ESTE TRABAJO DEBE SER ENTREGADO EN LA SECRETARIA DE LA ESCUELA DE INGENIERIA

Ahora, de Tabla I, tenemos que la densidad de la fibra de vidrio de arreglo isotrópico es de 2000kg/m^3 , por lo que el peso de nuestro reflector parabólico será, aproximadamente, de :

$$\begin{aligned}\text{Peso} &= 2,000 \text{ Kg/m}^3 (0.0392 \text{ m}^3) \\ &= 78.4 \text{ Kg}\end{aligned}$$

Calculemos ahora el mecanismo que dará movimiento al reflector. Un sistema muy sencillo y muy usado en antenas de pequeño tamaño es el mostrado, en forma esquematizada, en la figura 16; y será el que aplicaremos en nuestro radiotelescopio.

FIGURA 16

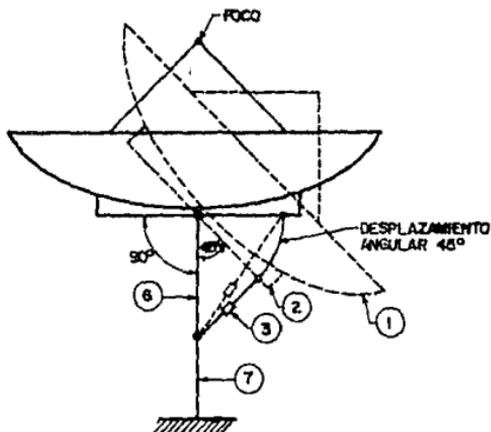


ESQUEMA MECANISMO DE MONTAJE

Este mecanismo le dará movimiento al plato de la forma siguiente:

- 1.- El pistón hidráulico 3 proveerá del movimiento en altura en un ángulo de 45° de la forma indicada (figura 17):

FIGURA 17



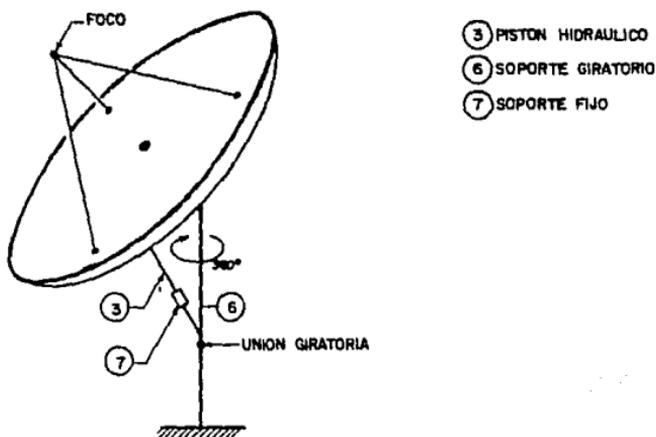
- ① REFLECTOR
- ② MARCO
- ③ PISTÓN HIDRÁULICO
- ④ SOPORTE GIRATORIO
- ⑦ SOPORTE FIJO

MOVIMIENTO EN ALTURA DE LA PARABOLA. POSICIONES EXTREMAS

El ángulo de 45° es debido a que con mayor inclinación del reflector aparecería interferencia provocada por las ondas reflejadas por la superficie terrestre.

2.- La unión entre 6 y 7 es móvil y proveerá al plato de movimiento en acimut, es decir, circular sobre un ángulo de 360° . Figura 18.

FIGURA 18



MOVIMIENTO ACIMUTAL

Como podemos ver este sistema es por demás sencillo, imprime gran movilidad al plato parabólico y no requiere gran inversión, puesto que construido en ace ro al carbón nos da buena resistencia mecánica a muy bajo costo. Para evitar corrosión debido a intemperismo, es recomendable pintar o galvanizar la estructura metálica.

CAPITULO III

COSTOS

Los precios indicados son aproximados y a valores de
Noviembre de 1985.

- Antena parabólica de 5 mts. construida en fibra de
vidrio: \$325,000.
Proveedor: Diseños Electromecánicos, S.A. México,
D. F.
- Colector Electrónico y Soporte para el mismo:
\$80,000.
Proveedor: Diseños Electromecánicos, S.A. México,
D.F.
- Cable Coaxial (30 mts): \$45,000.
Proveedor: Condumex, S.A. de C.V., México, D.F.
- Montura en acero al carbón: \$50,000.
Proveedor: Tuyper, S.A., Celaya, Gto.
- Receptor Electrónico: (para usos astronómicos son
de fabricación especial, debido a la bajísima po-
tencia de la señal recibida y son de importación).
arriba de \$1'000,000.
- Monto total aproximado de la inversión: \$1'500,000.

CAPITULO IV

PRINCIPALES RESULTADOS DE LA RADIOASTRONOMIA

1. RADIOFUENTES DISCRETAS

Cuando se efectuaron los primeros estudios de las radio-ondas provenientes de distintas regiones del cielo, se observó la existencia de irregularidades locales, en las que la intensidad de la radiación era mucho mayor que la correspondiente al fondo. Estas fluctuaciones son apreciables entre distintas zonas del plano central de nuestra Galaxia y presentan considerables diferencias para las distintas -- longitudes de onda en que se observen. Cuando posteriormente se emplearon instrumentos de mayor poder separador, se pudieron observar regiones de elevada temperatura de brillo con dimensiones angulares (el ángulo con el cual se ven desde la tierra) muy reducidas, virtualmente puntuales, a las que se denominó radiofuentes discretas.

Los descubrimientos, localizaciones y medidas de dimensiones angulares de fuentes discretas, se multiplicaron a partir de 1946 y en este momento se conocen más de 2000. Las observaciones se han orientado a la determinación precisa, para cada una de las fuentes de las coordenadas celestes, paralajes (distancias), medida de densidades de flujo y polarización de la radiación, así como a la investigación de la vinculación de los emisores con objetos observables en el campo óptico.

Las densidades de flujo de las diversas fuentes conocidas son muy débiles y cubren un intervalo comprendido entre 10^{-23} y 10^{-26} watts/m² Hz. Es interesante, sin embargo, que con relación al flujo solar, -el cual para $\lambda=1$ M., es del orden de 10^{-21} watts/m² Hz.- muchas radiofuentes son más intensas que en el rango visible.

Para determinar la distancia que separa a una fuente discreta de la tierra, no es posible aplicar el clásico método de las paralajes trigonométricas, utilizando en el rango visible, debido a los reducidos poderes separadores de que se dispone en radioastronomía. La única manera conocida actualmente de obtener resultados razonablemente precisos, consiste en identificar la radiofuente con el emisor de luz correspondiente, si ello es posible, y luego aplicar los métodos de la astronomía óptica para determinar las distancias estelares. Este es uno de los motivos por los que se realizan tantos esfuerzos por lograr la identificación de radiofuentes con objetos visibles.

Otro métodos que permite obtener estimaciones de las distancias en los casos de fuentes situadas en nuestra Galaxia, consistente en observar la fuente en la zona espectral de la raya del hidrógeno neutro ($\lambda = 21$ cm, $f = 1420.4$ MHz). Como se conocen aproximadamente las distancias que nos separan de los brazos galácticos a lo largo de distintas direcciones desde la tierra, cuando se logra determinar la situación de la fuente respecto a los diferentes brazos espirales, se obtiene un máximo y un mínimo para la distancia a la fuente, de acuerdo a las distancias conocidas a los mencionados brazos. Así, por ejemplo, en la dirección de Cassiopea A (la radiofuente más intensa de la constelación de Cassiopea), se encuentran tres brazos galácticos a distancias de 0.5, 3 y 5.5 kilópasecs (un paralaje de 1 segundo de arco corresponde a 1 parsec. Este equivale a 3.1×10^{13} Km o a 3.3 años luz) de la tierra. Cuando se obtiene el espectro de esta fuente en la re-

gión de los 21 cm de longitud de onda se ven en absorción dos rayas de hidrógeno neutro (el elemento más abundante en el universo), que corresponden al de los dos brazos espirales más próximos. Se concluye, entonces que la fuente está entre el segundo y el tercero, o sea que Cassiopea A dista entre 3 y 5.5 Kiloparsecs de la tierra. El resultado es muy impreciso, pero el método es útil para fuentes cuya distancia no puede detectarse por otros métodos. Por otra parte, éste procedimiento permite conocer si una fuente determinada pertenece o no a nuestra Galaxia.

Las dimensiones angulares de las fuentes discretas son difícilmente medibles aún con los mayores radiotelescopios simples por las ya mencionadas limitaciones en el poder separador que afectan a toda observación en esa banda de frecuencia. Cuando se descubrieron las primeras fuentes discretas se les llamó radioestrellas, porque se supuso que podrían tener diámetros angulares del orden de las de las estrellas, luego, al aplicarles las técnicas interferométricas, se pudo conocer el diámetro de muchas radiofuentes que resultaron del orden de minutos de grado o mayores, lo cual permitió determinar que en general son objetos mucho mayores que las estrellas (como nebulosas, e incluso Galaxias). La expresión radioestrella se eliminó totalmente de la nomenclatura astronómica. Más recientemente, en los últimos 20 años, se han descubierto unas pocas fuentes discretas con estructura muy especial, parecida al de las estrellas clásicas, han obligado a designarlas "Quasistarlar radio sources" - en forma abreviada "Quasar"-

que son objetos que han sido muy teorizados por los astrónomos, debido a la imposibilidad de comprobar sus hipótesis. Se dice que son los objetos más alejados de nosotros, que marcan la frontera del universo visible y que son la mayor concentración de energía conocida, pues siendo su diámetro del orden de un año luz, irradian más energía, en todas las bandas, que muchas Galaxias juntas (dada una de ellas de cientos de miles de años luz de diámetro). Además, se habla de que su velocidad relativa a la tierra es de $7/10$ de la de la luz, casi 210 000 km/seg.

IDENTIFICACION DE FUENTES DISCRETAS.

La identificación de una radiofuente con un objeto visible es útil, como ya se dijo, para la determinación de su distancia a la tierra; pero además es el medio para lograr un mejor conocimiento del objeto en sí, del estado físico del material que lo constituye, etc., la gran dificultad para conseguir estas identificaciones radica en la reducida capacidad de las antenas para medir con gran precisión las coordenadas celestes de la fuente, debido a lo limitado de su capacidad de resolución. Los radiotelescopios individuales no permiten la medición de las coordenadas de una fuente con precisión mayor de un minuto de arco para las fuentes más intensas. A pesar de tales dificultades y por este medio, se puede formar una idea bastante clara sobre la naturaleza de los más conspicuos emisores de radioondas.

En nuestra Galaxia las fuentes son: nubes de Hidrógeno ionizado, llamadas regiones H que aparecen a poca distancia de estrellas muy calientes y emiten radio-

ondas breemstrahlung (producidas por el repentino re tardo de una partícula eléctrica, electrón o positrón, en un intenso campo eléctrico como el núcleo atómico); y restos de supernova, como Cassiopea A y Tauro A, en las que la emisión es no térmica y producida por in teracción de electrones relativísticos (aquellos cuya velocidad es próxima a la de la luz) con campos ' magnéticos.

Las fuentes extragalácticas más numerosas son Galaxias exteriores normales y peculiares. En las primeras la ' radiación predominantes es no térmica y se produce en muchas de ellas en un volúmen mayor que el ocupado por el objeto óptico. Esto a originado diversas explicaciones sobre la existencia de gas que rodea a la Galaxia en un halo donde se generarían las radioondas. Las Galaxias peculiares comprenden pares de galaxias en co lisión, como en el caso de Cisne A, donde la mezcla ' del material interestelar da origen a potentes emisio- nes hertzianas.

Tal vez las más emocionantes, identificaciones son las de los mencionados Quasar. Ellas han sido posibles por el mejoramiento del poder de resolución disponible en los últimos años, logrado con técnicas interferométricas, y mediante la técnica que aprovecha las ocultaciones ' de las fuentes por la luna.

2. ESTRUCTURA DE LA GALAXIA.

Una de las contribuciones más interesantes de la radio astronomía al conocimiento astronómico clásico se refiere a la constitución de nuestra propia Galaxia, los

estudios ópticos están limitados a regiones relativamente cercanas al Sol, porque las ondas luminosas son absorbidas por grandes nubes de gas y polvo interestelares que abundan en las proximidades del plano central de la Galaxia. El alcance máximo en el rango visible, para direcciones que yacen cerca de dicho plano de simetría, es solamente de algún millar de parsecs. Como el diámetro de la Galaxia es del orden de 30 kiloparsecs y el Sol está en una posición notablemente excéntrica con el solo recurso de las ondas visibles sería totalmente imposible el conocimiento por observación de la mayor parte de la Galaxia. En cambio, el material interestelar que bloquea la luz, es transparente a las ondas hertzianas; además, el hidrógeno neutro es el elemento más abundante del medio interestelar y la observación de la raya espectral de 1420 Mcz permite conocer la estructura y los movimientos de conjunto en el sistema.

La radiación continua de la Galaxia ha sido estudiada en toda la gama del radioespectro. En todas las frecuencias se ha encontrado una mayor intensidad a lo largo del plano central y un máximo muy conspicuo hacia el centro galáctico. En el rango de las ondas métricas la radiación tiende a regularizarse para todas las direcciones. Este último componente se atribuye al halo que rodea la Galaxia.

El centro galáctico, que se denomina como fuente discreta Sagitario A, tiene una estructura muy compleja. Se acepta que está constituido por una zona central de hidrógeno ionizado de $1/2$ de diámetro aparente. Rodeando al centro existiría una extensa zona de unos 2° de diámetro que emite radiación no térmica, y por fuera de ella habría un anillo poblado de estrellas muy calientes generadoras de regiones II.

En dirección opuesta al centro la observación en radio ondas ha puesto en evidencia, de forma definitiva, la estructura espiral de la Galaxia. Alrededor de 1951, se obtuvo un esquema de los brazos espirales en las proximidades del Sol basado en observaciones ópticas de grupos de estrellas de las primeras clases espectrales, que son las más abundantes en los brazos. Poco después se iniciaron medidas sistemáticas a base de la raya espectral de 21 cm. Estas medidas tenían que dar un esquema de la estructura espiral, porque el hidrógeno neutro es abundante y se concentra en los brazos galácticos y el material de éstos está rotando con distintas velocidades alrededor del centro, según la distancia que media entre el respectivo brazo y el centro. Cuando a lo largo de la visual el radiotelescopio "ve" dos o tres brazos, el componente a lo largo de la visual de sus respectivas velocidades de rotación provoca distintos desplazamientos Doppler en las correspondientes rayas. Se obtiene entonces un registro espectral con dos o tres rayas de hidrógeno neutro distintas y separadas. La separación entre la frecuencia observada para cada una de ellas y los 1420.4 Mhz. que corresponden a un emisor estático permite valorar el componente radial de la velocidad de rotación de cada brazo e, indirectamente, estimar las distancias entre cada uno de los brazos y el sol. El ancho de las diversas rayas permite además apreciar la densidad del hidrógeno neutro en cada brazo.

Los resultados obtenidos mediante la raya de 21 cm. de longitud de onda coinciden con algunas variantes, con los obtenidos alrededor de 1951 para regiones próximas al Sol. Este se encuentra en la zona interior de uno de los brazos espirales llamado de Orión; hacia la periferia hay otros dos brazos que distan 10.5 y 13 kiloparsecs

del centro galáctico. El andamio de estos dos brazos y el de otros situados entre el de Orión y el centro se ha podido determinar en la mayoría de las direcciones ' del plano galáctico, la región central impide completar el esquema en las direcciones que pasan próximas ' a él, aún con los métodos radioastronómicos.

Con la observación del hidrógeno neutro se ha podido determinar además el sentido de rotación de la Galaxia y éste es un resultado importante para el estudio de la ' génesis y evolución de sistemas galácticos.

3. PANORAMA ACTUAL

Las antenas empleadas actualmente en los radiotelescopios abarcan todos los tipos conocidos, desde el simple dipolo elemental con algunos elementos que mejoran su ' directividad, hasta los más complejos sistemas de antenas múltiples y con reflectores. A continuación mencionaré los tipos de uso más común en los distintos radiotelescopios.

El dipolo, en general, tiene una directividad muy limitada para poderlo utilizar sin varias modificaciones en Radioastronomía, pero la combinación de varios dipolos ' convenientemente acoplados forman antenas de muy poco peso y precio y con ganancias de entre 5 y 10 db (decibelios). Una derivación muy popular de éste sistema ' constituye la antena Yagui, que consiste en un dipolo ' plegado y un conjunto de barras paralelas independientes situadas en el plano principal del dipolo y parale

las al mismo. Una de estas barra, situadas a un lado del dipolo, actúa como reflectoras y las restantes, al otro lado del dipolo, trabajan como directoras. Las funciones de reflectoras o de directoras se obtienen eligiendo convenientemente sus longitudes y distancias al dipolo en función de la longitud de onda en la que se va a operar la antena. Estas antenas tipo Yagi, que se emplean frecuentemente en aparatos de televisión, tiene relativamente buenas propiedades direccionales o sea reducidos anchos de haz pero pequeños anchos de banda. Su gran ventaja proviene de la simplicidad de construcción y facilidad de montaje debido a su poco peso.

Las antenas rómicas constituyen un tipo de uso común en radioespectrómetros por su amplio ancho de banda y sencillez de construcción. Sus mayores desventajas son su reducida ganancia máxima con respecto a sus dimensiones y la existencia de lóbulos secundarios importantes en su diagrama polar.

Los tipos de antena simples mencionadas se emplean generalmente provistos de reflectores de distintas formas, constituidos por metales continuos, mallas de alambre o chapas perforadas. Con relación a los efectos de la reflexión de la radiación, una malla con aberturas de dimensiones lineales l es equivalente a una superficie continua cuando opera con longitudes de onda $\lambda \gg l$ con todas las ventajas que implica su menor peso, menor resistencia al viento, costo, etc. Una forma típica para la superficie reflectora de una antena es la de un paraboloido en revolución, como el tratado y calculado en páginas anteriores. En todo caso, el reflector refuerza el flujo incidente

en la antena activa, concentrado la radiación que arribo desde ciertas direcciones sobre dicho elemento activo y aumentando su abertura efectiva y ganancia.

PRINCIPALES INSTRUMENTOS EXISTENTES.

Una de las mayores antenas con reflector paraboloidal móvil en operación es la del National Radioastronomy Observatory en Green Bank, West Virginia (Estados Unidos). El diámetro del reflector es de 91 metros (300 pies) y su montura le permite un único movimiento, en altura, alrededor de un eje normal al meridiano del lugar; su ancho de haz es de 18.5 y 10 pies en las dos frecuencias en que opera, 750 Mciclos/seg. y 1400 Mciclos/seg., respectivamente.

En la misma estación existe una antena menor de 42 m (130 pies) de diámetro que opera en frecuencias de hasta 8,000 Mciclos/seg. Este es uno de los mayores equipos con montaje ecuatorial existentes en el mundo.

Otro de los grandes equipos a nivel mundial es el instalado cerca de Parkes, en New South Wales, Australia, que tiene un diámetro de 64 mts. y movilidad también del tipo ecuatorial. El reflector está construido con malla metálica y puede operar con una radiación de 10 cm. de longitud de onda o mayor. Sus movimientos altacimutales están dirigidos automáticamente con motores, a su vez controlados por dispositivos pilotos, que posibilitan el seguir una fuente cualquiera en su arco diurno sobre el horizonte.

Algo mayor que la australiana es la antena también ' paraboloidal de Jodrell Banck, Inglaterra, de 75 mts. (250 Pies) de diámetro. Se trata de una antena de montaje altacimutal.

En el rango de los mayores paraboloides con montaje ' ecuatorial se halla el de la Institución Carnegie de Washington (Estados Unidos), que opera en la longitud de onda de 21 cm y cuyo diámetro es de 18 mts. (60 - pies).

De mayor diámetro que el mencionado anteriormente es el reflector paraboloidal de 45 mts (150 pies) que, ' con montaje altacimutal, ha armado la universidad de Stanford, en Palo Alto, California.

El mayor reflector de abertura circular es el de Ar cibo, Puerto Rico. La antena fué construida por la ' Universidad de Cornell con el apoyo del Departamento de Defensa Norteamericano para uso mutuo. El reflector es un casquete esférico de 265 mts. de radio cuya abertura es un círculo horizontal de 305 mts. de ' diámetro, y está construido por una malla metálica apoyada directamente en el terreno, al que previamente se le confirmó con ese fin. Aunque el reflector es estacionario y su dirección principal apunta al cenit, el lóbulo de la antena completa se puede desplazar a cualquier dirección dentro de un ángulo de 20° desde el cenit, desplazando el elemento activo de la antena. La técnica fué desarrollada por los Cambridge Research Laboratories de la Fuerza Aerea (Massachusetts, Est ados Unidos), y para la movilización del dipolo el apa rato costa de tres enormes torres de aproximadamente 100 Mts. de altura, desde las cuales se sostiene la '

plataforma del dipolo mediante cables.

ANTENAS MULTIPLES.

Todas las antenas mencionadas anteriormente son simples porque en principio, están constituidas por un único elemento activo. Cuando se requiere disponer de un gran poder separador se debe operar con una antena dotada de un reflector de gran superficie, ya que así se contará con una elevada ganancia máxima y, consecuentemente, con un reducido ancho de haz; se obtendrá también en ese caso una gran capacidad para detectar fuentes de débil nivel de emisión. En muchos casos sin embargo, la necesidad de disponer de grandes resoluciones no está acompañada del requisito de poder operar con fuentes débiles -como por ejemplo el estudio del Sol- y para ello el uso de reflectores de grandes dimensiones es económicamente inconveniente. La mejor solución en tales casos consiste en emplear sistemas de antenas múltiples en los que el poder separador puede ser muy elevado por efecto de interferencias. Las antenas que constituyen un sistema múltiple pueden ser de cualquiera de los tipos denominados simples y las disposiciones posibles de las distintas antenas en el sistema son muy variadas de acuerdo con el objeto observado.

En la figura (19) se esquematiza el sistema interferométrico más elemental constituido por dos antenas de modo que sus direcciones de máxima ganancia son normales a la recta que une A con B.

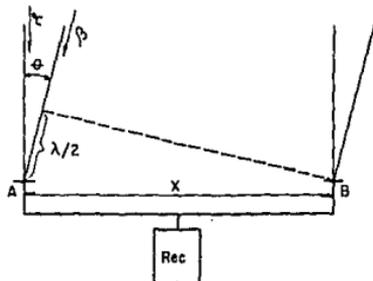


FIGURA 19

A Y B REPRESENTAN LAS DOS ANTENAS DE UN INTERFEROMETRO SIMPLE, CON LINEAS AL RECEPTOR DE IGUAL LONGITUD Y SEPARADAS POR UNA DISTANCIA X. α Y β SEÑALAN DOS DIRECCIONES EN LA QUE LAS ONDAS INCIDENTES LLEGAN A AMBAS ANTENAS EN FASE Y EN ANTIFASE, RESPECTIVAMENTE. θ ES EL ANGULO QUE SEPARA α Y β Y, EN GENERAL, ES EL ANGULO DE INCIDENCIA QUE CARACTERIZA A CADA DIRECCION DE ARRIBO DE LA RADIACION AL INTERFEROMETRO.

Cuando las dos antenas se conectan a un mismo receptor, mediante líneas de igual longitud eléctrica, la incidencia de una onda proveniente de una fuente muy alejada provocará iguales efectos en ambas antenas si la propagación de la onda se realiza en la dirección α : las ondas que llegan a A y B habrán recorrido una misma distancia desde la fuente, por lo que las ondas estarán en fase y sus efectos en el receptor serán aditivos. Si, en cambio, la dirección de propagación de la onda fuera β , de modo que la diferencia de distancia recorrida por las ondas con longitud de onda incidentes en ambas antenas sea $\lambda/2$, las dos antenas recibirán ondas defasadas en $\lambda/2$ y el efecto creado en el receptor será nulo. En este caso particular si llamamos θ al ángulo de incidencia de las ondas con respecto a la normal a la recta que une ambas antenas y x a la distancia entre ellas, se cumplirá:

$$\frac{\lambda}{2x} = \text{Sen } \theta$$

La misma situación se reproducirá, en general, para otros valores de θ en los que la diferencia de distancia de la fuente a las antenas valga $(3/2)\lambda$, $(5/2)\lambda$, etc., en las que las ondas estén defasadas $\lambda/2$ y sus efectos respectivos en el receptor común se anulen. A estos ángulos de anulación de ondas les llamaremos θ_n y los consideraremos positivos o negativos hacia uno u otro semiplano a partir de la normal a AB, obtendremos que:

$$a) \quad \text{Sen } \theta_n = \pm \frac{(2n+1)\lambda}{2x} \quad \text{para } n=0,1,2,3,\dots$$

Estos valores de θ_n corresponden entonces a las direcciones en las que el par de antenas da respuesta total nula a la radiación incidente, y corresponden a ceros en el diagrama polar resumen de las características de directividad del par de antenas.

Otro conjunto de valores particulares de θ que interesa es el formado por las θ'_n que reproducen la situación de la dirección α y en los que la diferencia de distancia entre la fuente y cada una de las antenas sea 2λ , 3λ , 4λ , etc., Estos θ'_n están definidos por:

$$b) \quad \text{Sen } \theta'_n = \pm \frac{n\lambda}{x} \quad \text{para } n=0,1,2,3,\dots$$

Los distintos θ'_n corresponderán a valores máximos en el mencionado diagrama polar del sistema de dos antenas, y en cada uno de ellos el valor de la ganancia en el diagrama conjunto será doble del que en la respectiva dirección tiene una sola de las antenas.

En la figura 20 está representado: a) el diagrama polar de una de las antenas y b) el correspondiente al par de antenas. Este segundo diagrama tendrá una envolvente semejante al a) con relación 2, y presenta una división del haz de direcciones en distintos lóbulos independientes. Cada lóbulo parcial está separado de los adyacentes por dos ángulos θ_n y tendrá su máximo en una dirección θ'_n .

En la práctica, el par de antenas se dispone según una dirección AB normal al plano del meridiano local, de modo que el movimiento diurno hace pasar las fuentes celestes frente a los distintos lóbulos con una velocidad angular constante. El lóbulo central, que contiene el máximo absoluto de ganancia, es atravesado por la fuente durante su culminación superior. En todas las aplicaciones prácticas se usa la distancia entre las antenas $x \gg \lambda$. Con tal condición para la zona del lóbulo central y adyacente vale $\sin \theta \approx \theta$ en radianes, con lo que a) y b) pueden escribirse para los primeros valores de n :

$$\theta_n = \pm \frac{(2n+1) \lambda}{2x}$$

$$\theta'_n = \pm \frac{n\lambda}{x}$$

Cuando $n = 0$, la primera expresión da los límites del lóbulo central $\theta_0 = \pm \lambda/2x$ y entre ambos límites habrá una distancia angular $\Delta = |\Delta\theta|$, o sea $\Delta\theta_0 = \lambda/x$. El ancho de haz del considerado lóbulo central será algo menor que esta distancia entre ceros, pero, siendo $\lambda \ll x$, tendrá un valor aproximadamente igual a λ/x radianes. Para los restantes lóbulos podría razonarse en forma análoga y se ve fácilmente que los anchos de haz $\Delta\theta_n$ de los sucesivos lóbulos

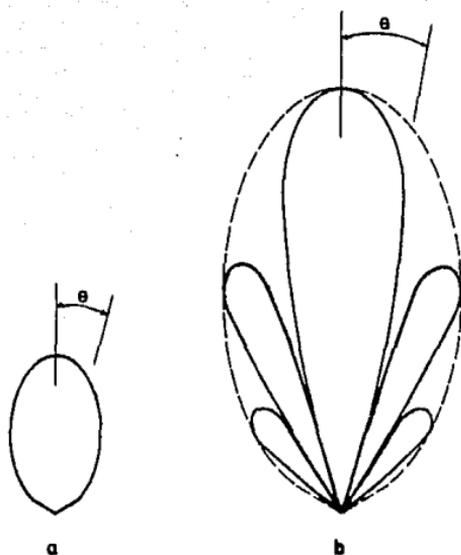


FIGURA 20

(a) DIAGRAMA POLAR PLANO DE CADA UNA DE LAS ANTENAS DE LA FIGURA (18). (b) DIAGRAMA POLAR DEL SISTEMA DE AMBAS ANTENAS, EN EL MISMO PLANO DEL INTERFEROMETRO (DETERMINADO POR LAS DOS ANTENAS Y LA FUENTE). LOS LOBULOS PARCIALES QUE COMPONEN EL DIAGRAMA TOTAL ESTAN SEPARADOS POR LAS DIRECCIONES EN LA QUE LAS ONDAS LLEGAN A AMBAS ANTENAS CON FASES OPUESTAS, DANDO UNA RESPUESTA COMUNITARIA NULA. LOS BRAZOS DE CADA LOBULO CORRESPONDEN A DIRECCIONES EN LA QUE LAS ONDAS INCIDEN EN FASE A LAS DOS ANTENAS.

serían del mismo orden de magnitud que $\Delta\theta$.

El sistema de las dos antenas resulta tener entonces un poder separador central, $P_s = 1/\Delta\theta$, independientemente del ancho de haz de cada una de las antenas que como puede verse, el ancho de haz de cada lóbulo del par de antenas puede hacerse todo lo pequeño que se quiera para un determinada longitud de onda, aumentando suficientemente la separación entre ambas antenas. Naturalmente, la ganancia máxima o la respectiva área efectiva del par de antenas no varía con X y es solo la suma de las ganancias máximas -o áreas efectivas- individuales. Esto confirma lo señalado anteriormente sobre la conveniencia de operar con antenas múltiples para obtener un elevado poder separador, siempre que no se requiera a la vez, por observar fuentes débiles, grandes áreas efectivas.

Cuando se disponen dos antenas para operar como un interferómetro, la multiplicidad de lóbulos mencionada y el consecuente mejoramiento del poder separador solo se producen en el haz de planos que pasa por la recta que une ambas antenas. En la orientación normal a dicha antena, el diagrama polar del conjunto es similar al original de una de ellas y el poder separador idéntico al de cada antena por separado. Para reducir el ancho de haz en esta segunda orientación se tiene que recurrir a antenas alineadas según dos direcciones perpendiculares: una según el meridiano local y otra normal a éste.

La posibilidad de obtener lóbulos convenientemente angostos con dos antenas, dependientes de la separación de las antenas, está materialmente limitada por

la necesidad de conectar ambas antenas al receptor' y por las pérdidas que tienen lugar en tal conexión que son proporcionales a la longitud de las líneas' de conexión. Por ejemplo, para un radiotelescopio que opere con una longitud de onda $\lambda = 1\text{m}$, la obtención de un ancho de haz de 1 minuto de grado - - (1/3438 radianes) exigiría una separación $X = \lambda / \Delta\theta = 3438\text{ m}$. Aparte del costo elevado que pueden tener las líneas de 3.5 Km necesarias, las pérdidas ' que se producen en el transporte de las señales por las líneas de tal longitud, aún eligiendo las que las provoquen en menor grado, elevando aún más el costo de la instalación, pueden ser sumamente importantes afectando la sensibilidad del instrumento. Para reducir estas pérdidas en líneas de transmisión de ' gran longitud se ha recurrido, en los distintos in- terferómetros, a diversos dispositivos: amplifica- ción local de las señales de las antenas para com- pensar la debilitación que causa en las mismas su ' recorrido por las líneas, y cambio de la frecuencia de la señal observada en cada antena disminuyendola, ya que, en general una determinada línea tiene meno- res pérdidas cuando trasmite señales a más baja fre- cuencia.

Uno de los interferómetros de mayor base actualmen- te en operación es el constituido por la gran ante- na parabólica de Jodrell Bank y una antena menor si- tuada a 115 Km de distancia. Este interferómetro, o- perando en una frecuencia de 158.6 MHz ($\lambda = 189\text{ m}$), tiene un ancho de haz $\Delta\theta = \lambda / X = 1/61,000$ radia- nes; o sea 3.4 segundos de arco. En este caso, co- mo en todos aquellos en que las distancias entre an- tena llegan a decenas de kilómetros y se dificulta demasiado la transmisión mediante líneas, la cone-

ción se efectúa transmitiendo las señales recibidas por las antenas, ahora en el rango de las microondas, hasta el receptor común.

El diagrama polar de un interferómetro de dos antenas presenta, como ya se mencionó, una sucesión de ceros para valores angulares θ_n discretos, en un plano que incluye a ambas antenas. Esta proximidad angular de lóbulos consecutivos puede ser inconveniente para la observación de fuentes extensas, porque la fuente es detectada al mismo tiempo por más de un lóbulo. El estudio de los detalles finos de la considerada fuente puede realizarse observandola con diversas separaciones en las antenas.

Otra solución más directa es lograr una mayor separación angular entre los lóbulos parciales del diagrama polar total, y esto se logra empleando más de dos antenas. En la práctica se emplea generalmente un número de antenas $N=2^i$ con $i=2,3,4,5,6,\dots$ etc., igualmente espaciadas y dispuestas en una recta normal al meridiano local.

En Uruguay está funcionando un interferómetro de 16 antenas que operan en 170 MHz ($\lambda = 176$ m). Las antenas consecutivas están separadas por una distancia de 60m (34λ), con lo que el ancho de haz de los lóbulos es del orden de $6'8''$. Los lóbulos consecutivos están separados por una distancia de $1'7''$ aproximadamente. Aplicando este sistema a la observación del sol, se obtienen registros perfectamente separados en correspondencia del tránsito solar por los distintos lóbulos mayores del diagrama polar. En el interferómetro Uruguayo las antenas son del tipo Yagi con dipolo plegado, ocho elementos parásitos directores y uno poste

rior que actúa como reflector. El lóbulo principal de cada antena tiene un ancho de haz de 30° aproximadamente en el plano meridional y en el normal a éste, que contiene el dipolo con lo que cada lóbulo mayor tiene un ancho de haz de 30° en el plano meridional y de $6'8''$ en la orientación normal.

Entre los interferómetros de un gran número de antenas es típico el de Christiansen instalado en Australia, que está compuesto por 32 antenas paraboloideas de 2 m de diámetro separadas entre sí 7 m, o sea con una longitud total de 217 m. Este equipo, operando con $\lambda = 21$ cm tiene un ancho de haz de $3'$, y una separación entre lóbulos mayores de $1^\circ 7'$. Otro equipo similar es el de 32 antenas paraboloideas de 5 m de diámetro (similares a la que se diseñó en la presente tesis) en la estación de Nangay (Francia) que tiene una longitud total de 1550 m. Este interferómetro operando con $\lambda = 1.77$ m tiene un ancho de haz de $4''$ en los lóbulos mayores.

CONCLUSIONES.

No podemos valorar los beneficios que aporta un radiotelescopio, ni ningún otro equipo utilizado en investigación, en el momento de su utilización, sino hasta que los trabajos de investigación en el que intervino han sido concluidos. Un radiotelescopio no dará al usuario bienes tangibles, como una troqueladora de acero a una máquina para fabricar papel, es una herramienta que facilita al científico su tarea de crear, analizar y comprobar o deshechar teorías acerca del Universo y de su estructura. Podemos comparar un radiotelescopio con un microscopio electrónico, de un elevado costo y que su vida no se mide en términos de producción, sino en términos de cantidad y calidad de avances logrados gracias a su uso, en áreas tales como Tecnología de materiales o Biología.

Ahora bien, para mucha gente es difícil vislumbrar que beneficios aporta la Astronomía en su vida diaria, y esto es debido a que tales avances solo se perciben en Tecnologías muy modernas y a veces, aún no aplicadas en la vida diaria. Ejemplo de ello es el apoyo tan grande que le da, como herramienta de investigación, a los últimos avances en materia de tecnología nuclear, al estudiar la evolución estelar y en especial al sol, el horno nuclear natural más grande y cercano a la tierra, donde se estudia el origen de su calor y energía: las reacciones de fusión nuclear, que transforman el hidrógeno en helio y que en la tierra no han podido ser controladas, por lo que actualmente solo se utiliza esta tecnología para grises cuestiones armamentistas: la

Bomba de hidrógeno. Otro ejemplo muy sencillo de las aportaciones de la astronomía a las ciencias en general, es el descubrimiento de varios elementos naturales, como el caso del helio, descubierto en el sol y encontrado posteriormente en las capas superiores de la atmósfera terrestre.

Un radiotelescopio de 5 metros tiene poca capacidad, operando individualmente pero, si se acopla a un sistema interferométrico, brinda grandes posibilidades al investigador, como ya vimos, y además tiene la ventaja de su bajo costo, con relación a un solo aparato de gran tamaño.

Por último, quisiera mencionar que una antena de las características de la ya calculada, y acoplada a un receptor adecuado, puede utilizarse para otras bandas de radiofrecuencia, como la recepción de ondas televisivas, provenientes de los satélites artificiales puestos en órbita para este fin, con excelentes resultados. Estas bandas son de mayor longitud de onda y, por ende, menor frecuencia, que las de origen cósmico y, como podemos ver en la figura 12, la atenuación de la señal es menor, resultando una calidad de recepción excelente. Además, por su mayor tamaño, con relación a las usuales, y muy en boga actualmente, antenas de uso casero, tiene mayor capacidad que estas.

A P E N D I C E

RADIACION CERENKOV.

En 1934 Pavel Alekseevich Cerenkov observó que cuando un conjunto de electrones de alta energía penetra un líquido transparente, se emite luz. El intentó demostrar que esta luz no era la usual fosforescencia y fluorescencia que son observadas cuando las sustancias son bombardeadas por electrones de alta energía, sino que es generada solo cuando la velocidad de los electrones es mayor que la velocidad de la luz en la sustancia. Observó también que la luz emitida estaba fuertemente polarizada. En 1937, I.M. Frank e I.E. Tamm desarrollaron una teoría del fenómeno. En 1958 el premio Nobel de Física fue otorgado a estos tres hombres por el descubrimiento y la explicación teórica del efecto Cerenkov. Desde aquel tiempo la "luz Cerenkov" ha sido observada en sólidos, gases, así como en líquidos.

El desarrollo teórico de Frank y Tamm muestra que siempre que una partícula cargada atraviesa un medio transparente con una velocidad v la cual es mayor que c/n , donde c es la velocidad de la luz en el espacio vacío y n es el índice de refracción del medio, un cuanto de luz o energía electromagnética será radiada por la partícula. Esta energía es emitida a un ángulo característico θ tal que $\cos\theta = c/nv$.

BIBLIOGRAFIA Y RECONOCIMIENTOS

- 1.- La INTRODUCCION en sus puntos 1, 2 y 3 esta sustentada en la obra titulada "PANORAMA DE LA ASTRONOMIA MODERNA" de Félix Cernuschi y Sayd Codina. Editada por el Departamento de Asuntos Científicos de la Organización de Estados Americanos (OEA) en 1968.
- 2.- El punto 4 de la INTRODUCCION es una transcripción literal de un artículo editado en la revista de Ciencia y Tecnología de CONACYT. Febrero 1984.
- 3.- El capítulo I esta fundamentado en varias obras:
 - PANORAMA DE LA ASTRONOMIA MODERNA
 - RADIO ASTRONOMY DE F. Graham Smith. Penguin Books, edición de 1960.
 - COSMIC RAYS de Bruno Rossi, Mc Graw-Hill. 1964.
 - ANTENNAS. de J. D. Krauss. Mc Graw-Hill. 1950
 - Y en la parte de MATERIALES de una recopilación por parte del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de Cuernavaca, Morelos. 1985.
- 4.- El capítulo II esta basado en la misma recopilación del IIE y en el MANUAL DEL INGENIO MECANICO. Marks. Mc Graw-Hill. 1984.
- 5.- El capítulo IV fué desarrollado a partir de la obra "INTRODUCCION A LA CIENCIA" de Isaac Asimov. Editorial Plaza y Janes. 1972.
- 6.- Por último el APENDICE es una traducción tomada de la ENCICLOPEDIA BRITANICA. tomo 5, pag. 206, en su edición de 1963.