

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

---

DISCURSO INAUGURAL  
DEL AÑO ACADÉMICO 1967-1968

LEIDO EN LA SESIÓN CELEBRADA EL DÍA 22 DE NOVIEMBRE DE 1967

POR EL ACADEMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. JOSÉ BALTÁ ELÍAS



M A D R I D  
DOMICILIO DE LA ACADEMIA:  
VALVERDE, 22. — TELEFONO 221-25-29  
1 9 6 7

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

DISCURSO INAUGURAL

DEL AÑO ACADÉMICO 1967-1968

LECTO EN LA SESIÓN DE ABERTURA DEL CURSO ACADÉMICO 1967-1968

EL DÍA VEINTIDOS DE NOVIEMBRE DE 1967

EXCMO. SR. D. JORGE BALTA BLAS



Depósito Legal M. 20.200.-1967

TALLERES GRAFICOS VÍA. DE C. BERMEJO. — J. GARCÍA MORATO, 122. — TEL. 233-06-19. — MADRID

## LA EXPLORACION RADIOELECTRICA DEL ESPACIO. SUS RECIENTES RESULTADOS Y PROBLEMAS ACTUALES

Sres. Académicos, Señoras. y Señores :

Sean mis primeras palabras, expresión de mi profundo agradecimiento a esta docta Academia por haberme confiado el honoroso encargo de pronunciar el discurso inaugural del presente Año Académico 1967-68.

El tema que me propongo desarrollar constituye una de las cuestiones más debatidas de Astrofísica en estos últimos años, durante los cuales tanto se han perfeccionado las técnicas de intercomunicación espacial en sus distintos aspectos como radioastronomía, seguimiento de satélites y sondas espaciales, radar, investigaciones ionosféricas, etc. En dichas técnicas, uno de los elementos más importantes, científica y económicamente, lo constituye sin duda la antena directiva y orientable en sus múltiples formas (reflectores paraboloidales o esféricos, simples o múltiples o sus variantes tipos Cassegrain y Gregory, bocina reflectora, radiointerferómetros desde los más simples con sólo dos reflectores, a las alineaciones *en cruz* de un gran número de éstos fijos o con uno móvil constituyendo la antena de *abertura sintética* de Ryle).

El ideal de estas antenas es que actúen o funcionen *frías*, aplicándoseles este calificativo cuando sea mínima la radiación recibida procedente del suelo y baja atmósfera. Tales reflectores o colectores de las radio-ondas son siempre de grandes dimensiones, impuestas por la ínfima energía transportada por aquéllas y captada por los indicados medios, de cuyas nuevas orientaciones nos ocuparemos en la última parte de este trabajo.

### *Radio-manantiales cósmicos.*

En nuestro sistema solar, el Sol, la Luna y casi todos los planetas han sido estudiados bajo el punto de vista radioeléctrico, desde que Jansky, hace una treintena de años, logró la recepción de los radio-ruídos galácticos y del emitido por el Sol; ello había sido sugerido ya e intentado sin éxito por Sir O. Lodge en 1894 desde los comienzos de la radiotelegrafía.

Las estrellas, en general, no son radiomanantiales, pero en nuestra Galaxia existen zonas u *objetos* que emiten radio-ondas y que han sido identificados con los restos de las pretéritas explosiones de ciertas *supernovas* y con nubes de hidrógeno ionizado; este mismo gas *neutro*, tanto el contenido en nuestra Galaxia como en otras más distantes, emite o absorbe la radiación *monocromática* (intuida por Van de Hulst en Holanda en 1945) o raya espectral de estructura hiperfina en la frecuencia de 1.420 Mc/s ( $\lambda = 21,1$  cms.). Han transcurrido más de tres años desde que fue descubierto un multiplete de cuatro rayas cuyas frecuencias están comprendidas entre 1.616 y 1.720 Mc/s ( $\lambda = 18$  cms.) emitidas o absorbidas por el radical libre *hidróxilo* interestelar. Además se sospecha la existencia de una raya espectral debida al deuterio cósmico en la banda entre 322-29 Mc/s, así como otra del radical CH, pero hasta ahora no han podido ser identificadas todavía.

Hace poco más de un lustro fueron descubiertos los enigmáticos *cuasares*, potentes radioemisores casi estelares de pequeño diámetro angular, cuya fabulosa potencia radioeléctrica y luminosa todavía no ha recibido una satisfactoria explicación. Los radio-ruídos de origen cósmico se caracterizan por un espectro, cuya intensidad es generalmente decreciente con la frecuencia, al revés de lo que ocurre con los radio-ruídos terrestres; entre éstos citaremos: 1.º el originado por el vapor de agua y otros componentes de la atmósfera, 2.º el debido a las nubes, 3.º el de las precipitaciones, 4.º el procedente del suelo, 5.º el de las *ventanas electromagnéticas* o *radomos* (envolturas de plástico protectoras de antenas).



La información con que se inició y continúa forjándose la Radioastronomía la suministra el ruido de fondo superpuesto al siempre existente a la salida de todo radioreceptor y conocido por ruido de *fluctuaciones de tensión* en el propio receptor. El ruido de fondo extraterrestre está constituido por señales de ínfima energía solamente detectables mediante sistemas de antenas de grandes dimensiones acopladas a los más sensibles radioreceptores de ondas cortas. Bastará recordar que el flujo de energía que recibimos del Sol en calma y con frecuencia de 1.000 Mc/s es del orden de los  $7,10^{-21}$  vatios/m<sup>2</sup> c/s y el procedente de Casiopea A (uno de los más potentes radiomanantiales) es unas mil veces menor, elevándose hasta un millón de veces estos valores el de la energía captada por el espejo de Green Bank de 90 metros de diámetro, el mayor construido hasta la fecha.

A pesar de la pequeñez de la radio-energía así captada, no sólo se mide su valor y el de la dirección del espacio de donde procede, sino otras magnitudes ; p. e., la polarización de las ondas, distribución de la luminancia en un radiomanantal, etc.

Todas estas medidas se llevan a cabo dentro de límites de la longitud de onda lo más amplios posibles. Las observaciones desde la superficie terrestre sólo están limitadas por la absorción ionosférica en la zona de las frecuencias elevadas (sobre todo por encima de los 10 kMc/s) y por la absorción y reflexión de las bajas frecuencias en la ionosfera (por bajo de los 30 Mc/s). Como es bien sabido, recientemente se ha intentado ampliar los indicados límites de observación, mediante el empleo de cohetes y satélites artificiales.

Considerando tal amplitud de dichos límites del espectro, las ondas electromagnéticas que surcan el espacio cósmico tienen su origen en una gran variedad de mecanismos.

La mayor contribución en la región óptica de dicho espectro proviene de la radiación engendrada en las transiciones electrónicas entre estados discretos atómicos o moleculares (*bound-bound electron transitions*), transiciones durante la recombinación (*free-bound transitions*) y transiciones libres (*free-free transitions*).

En este último caso, si se cumple  $h \omega \ll k T$  (siendo  $\omega = 2 \pi \nu$

la pulsación de la radiación y T la temperatura absoluta) este proceso da lugar a la clásica *radiación de frenado* (*Bremsstrahlung*) a causa de la aceleración que experimentan los electrones en las proximidades del campo nuclear del átomo o ion que los desvía de su primitiva dirección; ciertas componentes de la radiación cósmica reconocen este origen. En cambio, así como la raya espectral del hidrógeno de 21 cms. y las del hidróxilo interestelares, son resultado de las transiciones *bound-bound*, la radioemisión térmica del H interestelar y de la corona solar son de origen térmico.

Existen además otros mecanismos en la región radioeléctrica de gran importancia; especialmente los procesos coherentes y no coherentes dependientes de la existencia de plasmas cósmicos suficientemente densos a los que se atribuye las radioemisiones solares esporádicas, pues la frecuencia del plasma solar

$$\omega = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N_e}{m}} = 64 \cdot 10^4 \sqrt{N_e}$$

está dentro de las radiofrecuencias.

Finalmente, los electrones libres relativistas en el vacío y en el seno de un campo magnético, están sujetos todavía a otro mecanismo que desempeña un importante papel en radioastronomía. Nos referimos a la *Magnetobremsstrahlung*, conocida corrientemente por *radiación sincrotrón* (a causa de la analogía que presenta en su génesis con la del funcionamiento del acelerador de partículas de este mismo nombre); la teoría prevé que debe estar polarizada linealmente (en más de un 70 por 100), hecho que ha comprobado la experiencia.

Indicios distintivos entre estas radiaciones pueden conseguirse observándolas dentro de amplios límites de frecuencias y de los datos espectrales así obtenidos, deducir conclusiones acerca del más probable origen de las señales emanadas del radiomanantial observado, su velocidad de aproximación o alejamiento (si es posible discriminar el efecto Doppler), la existencia de campos magnéticos interestelares que se traduce por la polarización observable

de la radiación giro sincrotrónica, etc., en cuyas particularidades no entraremos por ser ya del dominio de todos.

Tan sólo insistiremos en el concepto de la temperatura de una antena. Es bien sabido por la teoría elemental de la difracción que el poder separador  $\theta$  de una antena de espejo se expresa por (criterio de Rayleigh)  $\theta = \frac{\lambda}{A} = \frac{3438 \lambda}{A}$  minutos de arco, siendo  $\lambda$  la longitud de onda y  $A$  la abertura total, dependiente del diámetro del espejo. De acuerdo con la termodinámica clásica, cuando una tal antena está situada en un recinto en el que reina la temperatura  $T$ , la energía  $W_f$  recibida en su foco entre las frecuencias  $\nu$  y  $\nu + d\nu$  viene expresada por  $W_f d\nu = k T d\nu$ , siendo  $k$  la constante de Boltzman (1). Análogamente, cuando una antena de espejo *sin pérdidas* está orientada hacia un conjunto de *cuerpos negros* perfectos, la energía disponible en su foco constituye una medida de la temperatura media del cono de radiación cuya base es el espejo y su vértice el objeto radiante.

Las mismas consideraciones pueden aplicarse a cualquier tipo de cuerpo radiante con tal que se especifique su temperatura por la equivalencia del cuerpo negro en la frecuencia de observación, a la que se llama temperatura de *brillo* o *luminancia*  $T_b$ ; con ella se caracteriza la intensidad del radiomanantial observado.

#### *Temperatura de ruido de una antena.*

La energía de ruido captada por una antena se define por la integral del producto de la ganancia de aquélla por la energía de ruido emanada en sus inmediaciones. Designando por  $\Delta B$  la anchura de banda del receptor, es conveniente convertir la energía de ruido  $W_a$  de la antena en su temperatura de ruido  $T_a$  mediante la relación  $T_a = W_a / k \Delta B$ , siendo  $k$  la constante de Boltzman. También puede definirse una temperatura de ruido de la antena mediante la integral del producto de su ganancia por la temperatura de ruido reinante en las inmediaciones de la antena.

(1) R. E. BURGESS: «Proc. Phys. Soc.» (London), 53, 293, 1941.

da antena. La distribución de la temperatura de ruido se evalúa generalmente en función de los siguientes componentes : (a), ruido de procedencia galáctica y extragaláctica ; (b), ruido originado por *radioestrellas* discretas ; (c), ruido dependiente de la absorción atmosférica ; (d), ruido asociado con la absorción terrestre (pero no incluyendo en ella las interferencias industriales, etcé-

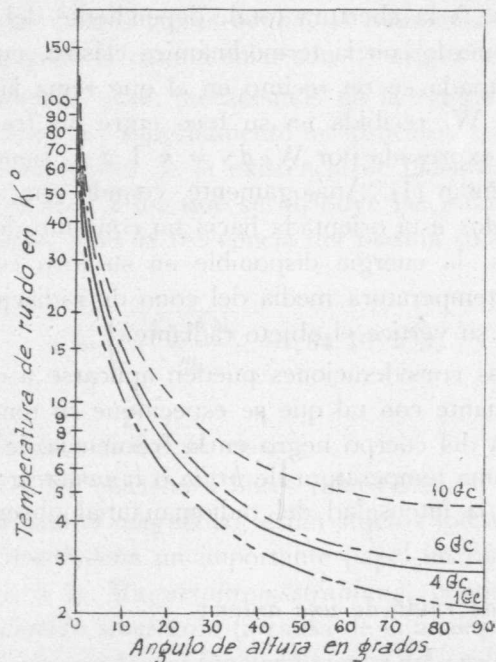


Fig. 1 a.—Temperatura de ruido en función del ángulo de elevación de la antena.

tera). Las temperaturas de ruido (a) y (b) han sido correctamente tabuladas por los radioastrónomos y, en general, decrecen con la frecuencia. La temperatura de ruido debida a (c) disminuye con el ángulo de elevación sobre el horizonte (fig. 1 a) depende de las condiciones meteorológicas y, en general, aumenta con la frecuencia.

El mínimo de la temperatura de ruido de una antena ideal a



ras del suelo, se obtiene cuando ésta se orienta verticalmente hacia el polo galáctico (mínimo de ruido galáctico), mientras que el máximo ocurre cuando la antena apunta casi horizontalmente al centro galáctico; estos límites se indican en la figura 1 b función

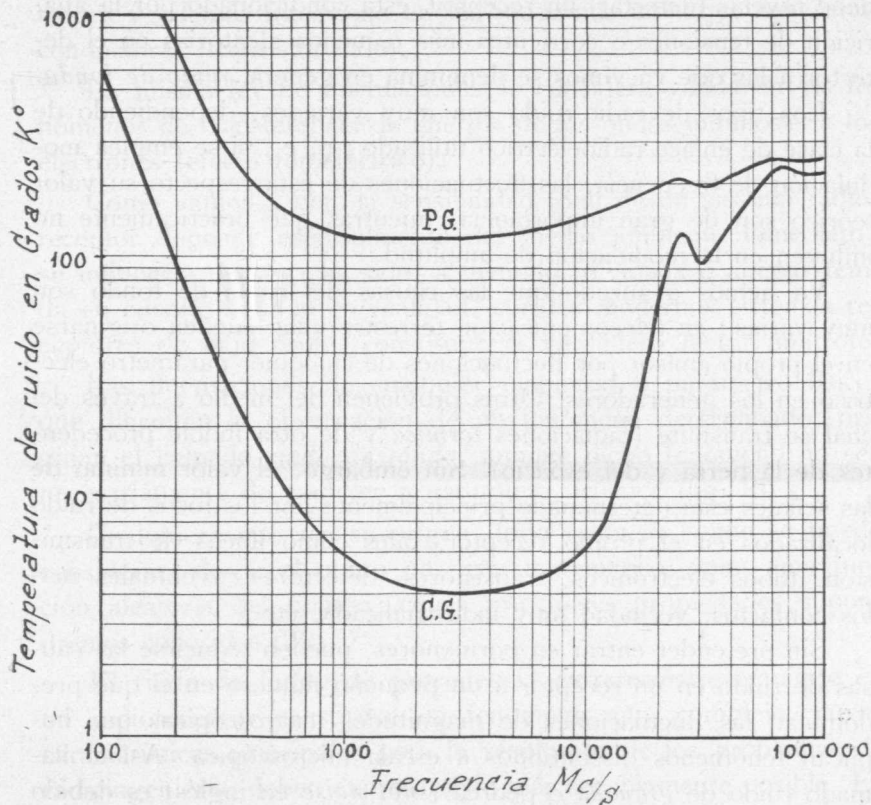


Fig. 1 b.—C. G. Antena ideal con su eje de simetría casi vertical, paralelo a la normal al plano galáctico. P.G. Antena ideal con su eje de simetría apuntando casi horizontalmente al plano galáctico.

de la frecuencia, suponiendo una moderada humedad relativa atmosférica. De todos modos, tal temperatura de ruido de una antena fija ha de variar con el tiempo a causa de las variaciones de la componente del ruido galáctico, debidas a la rotación terrestre, además de las originadas por las condiciones meteorológicas, etc.



## *Componentes del ruido de fondo en Astrofísica.*

Es bien sabido que el valor mínimo de las radioseñales (portadoras de la información que se desea recibir o transmitir) y que debe revelar (detectar) un receptor, está condicionado por la aparición de tensiones o corrientes más o menos aleatorias en el detector a las que ya vimos se denomina en general *ruido de fondo*.

Los tipos de radio-ruido son muy variados, dependiendo de la clase de enlace radioeléctrico utilizado ; p. e., si se emplea modulación de frecuencia, las fluctuaciones de ésta respecto su valor teórico son de gran importancia, mientras que prácticamente no influyen en la modulación de amplitud.

Ya hemos avanzado que las causas del ruido de fondo son muy varias ; en telecomunicación terrestre unas pueden originarse en el propio emisor por fluctuaciones de cualquier parámetro eléctrico en los generadores. Otras provienen del medio a través del cual se transmite (radiaciones *térmica* y de otra índole procedentes de la tierra y del espacio). Sin embargo, el valor mínimo de las señales está determinado principalmente por los focos de ruido localizados en el propio receptor, tales como líneas de transmisión, tubos electrónicos, transistores, detectores, eventuales malos contactos, vecindad muy industrializada, etc.

Sin pretender entrar en pormenores, pueden reducirse las causas de ruido en un receptor a un pequeño número en el que predominan las fluctuaciones de magnitudes macroscópicas que implican fenómenos discontinuos a escala microscópica. Así el llamado ruido de *granalla* o pedrea (*shot noise* en inglés) es debido a las fluctuaciones de corriente a causa de la discontinuidad de la emisión electrónica por los cátodos incandescentes de los mencionados tubos. Admitiendo que la expulsión de cada electrón constituye un hecho al azar independiente de la emisión de otros electrones, se demuestra que la probabilidad de que el número  $n$  de ellos emitidos en un breve lapso (finito) de tiempo obedece a la ley de Poisson ; según el cálculo de probabilidades

$$\overline{(n - \bar{n})^2} = \bar{n}$$

De aquí se deduce que la media cuadrática de las fluctuaciones de corriente en una banda de frecuencias  $\Delta B$  viene expresada por  $i^2 = 2 e I_0 \Delta B$ , siendo  $I_0$  la corriente media y  $e$  la carga del electrón. Esta causa de ruido reside en los tubos electrónicos, siendo dependiente de las fluctuaciones de velocidad de los electrones y además interviene en los modernos montajes con semiconductores (transistorizado).

La misma ley de fluctuaciones se considera válida en los fenómenos de transferencia de energía de las ondas luminosas a los electrones (efecto fotoeléctrico).

Como vamos a ver, la sensibilidad total de un sistema radioreceptor depende esencialmente del medio ambiente inmediato; su influencia decisiva ha sido, a menudo, olvidada o apenas tenida en cuenta, cuando en realidad, con los modernos sistemas receptores de bajo ruido, constituye el verdadero factor limitrofe.

Las fluctuaciones de cualquier magnitud o parámetro físico, que dificultan la observación de un fenómeno determinado, originan el llamado *ruido de fondo*, aunque dicho fenómeno no sea necesariamente de carácter o naturaleza acústica (fig. 2).

Cualquiera que sea su origen, todo *ruido de fondo* se puede considerar, desde el punto de vista matemático, como una función aleatoria del tiempo, cuyas principales propiedades supondremos conocidas (2).

El ruido de fondo de procedencia extraterrestre actuante en un radioreceptor constituye un fenómeno muy complejo, cuyas características principales para la resolución de los problemas de radioingeniería, deben expresarse lo más sencillamente posible. Es preciso, pues, definir y medir dichas características, seleccionándolas para su más amplia aplicación.

No es posible suministrar una completa descripción estadística de tales ruidos que sea apta para resolver con toda generalidad los múltiples problemas planteados en radiotecnica; en la prác-

---

(2) A. BLANC-LAPIERRE et B. PICINBONO: *Propriétés statistiques du bruit de fond* (Masson edit. Paris, 1961).—N. M. BLACHMAN: *Noise and its effects on communication* (Mc Graw the N. Y., 1960).

tica, se miden a tal efecto una o más series de magnitudes estadísticas.

Después de hacerle atravesar un filtro de banda estrecha, de

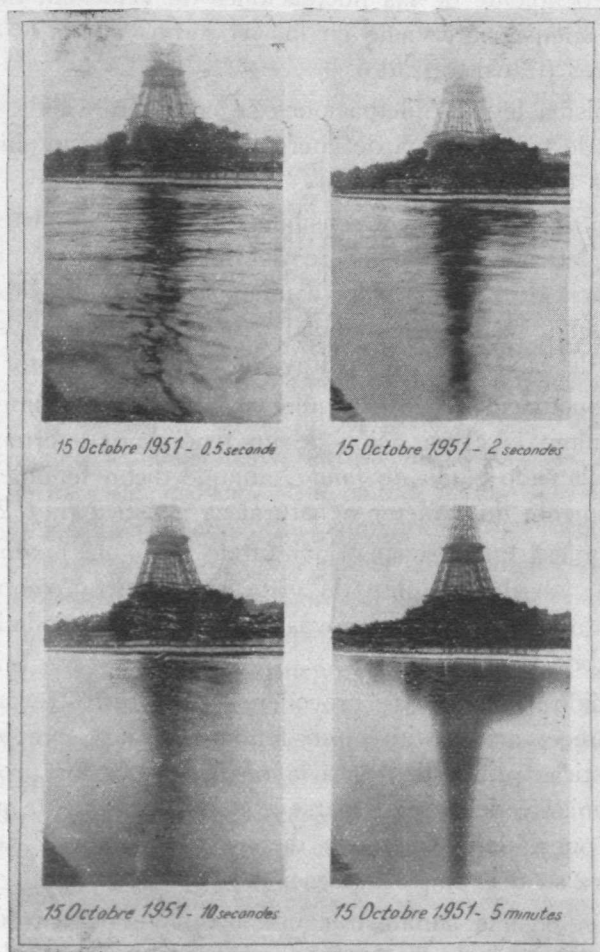


Fig. 2. - Imágenes de la torre Eiffel reflejadas por la superficie del Sena, tomadas con tiempos crecientes de exposición. Cuanto más breve es este último, más borrosa resulta la imagen por *efecto-ruido*, causado por las fluctuaciones de nivel de la superficie del río.

característica rectangular amplitud-frecuencia, el ruido de fondo puede considerarse como una oscilación cuya frecuencia central es la de la banda pasante, modulada a la vez en amplitud y fase; la descripción completa del ruido en cuestión lleva inherente ambas características de amplitud y fase, siendo las de esta última de menor importancia que las de la primera. En caso de disponerse solamente de limitadas facilidades de medida, los esfuerzos para realizarlas deben concentrarse principalmente en la mejor definición de las características del contorno o envolvente de la gráfica del ruido de fondo.

La descripción de las características de la amplitud de este último a la salida de un filtro de banda estrecha pueden expresarse de distintas maneras. Una razonable y útil completa descripción se consigue mediante la distribución acumulativa de la probabilidad de amplitud, la cual se expresa por el porcentaje del tiempo durante el cual es rebasada la envolvente de amplitud por diversos niveles de la misma, con lo que se pone de manifiesto si el ruido objeto de estudio es aproximadamente de forma gaussiana o impulsiva, o bien una combinación de ambas.

Entre otras diversas aplicaciones, la información contenida en la distribución puede emplearse para determinar satisfactoriamente la interferencia causada por el ruido en los diversos sistemas de comunicación (3).

Desde luego, la medición de parámetros simples suministra menos información que la distribución completa de la probabilidad de amplitud. El parámetro más fácilmente medible y de preciso significado matemático es la amplitud media de la envolvente de tensión; también se emplean técnicas para la determinación de la amplitud cuadrática media de dicha tensión. Aunque esta medida es más difícil de realizar, sin embargo, según el fin perseguido, puede estar más estrechamente relacionado con la interferencia causada por el ruido de fondo. Cualquiera que sea el parámetro escogido para medirlo a largos intervalos, parece prudente obte-

---

(3) A. D. WATT, R. M. COON, E. L. MAXWELL and R. W. PLUSH: P. I. R. E., 46, 1914, 1958.



ner la media de los valores durante un tiempo del orden de algunos minutos por lo menos.

Otro parámetro utilizado es el logaritmo de la envolvente de tensión; éste, conjuntamente con las tensiones media y raíz cuadrática media, ha resultado muy útil para determinar una representación aproximada de la distribución completa de la probabilidad de distribución (4).

#### *Optimación de una antena.*

Vamos a resumir brevemente el estudio de las condiciones óptimas con que debe cumplir una antena directiva, p. e., paraboloïdal. La imagen que determina en su eje un radiomanantial celeste, es una figura de difracción que señala la ley de repartición del flujo radioelétrico en el plano focal del reflector dado y está caracterizado por un gran lóbulo central rodeado de anillos periféricos (fig. 3).

Aquella ley viene expresada analíticamente (en amplitud compleja) por una función  $\psi(r)$ , siendo  $r$  la distancia desde un punto del plano focal al foco F. Para las antenas corrientes en las que el ruido de la radiación térmica terrestre apenas tiene acción, la abertura primaria situada en el foco tiene por objeto interceptar el máximo del flujo energético útil contenido en la figura de difracción. Se define como *factor de ganancia* de una antena la fracción de flujo energético interceptado por el manantial primario; sea  $f(r)$  la ley de iluminación que tendría la abertura primaria si funcionara como emisora.

En estas condiciones, se demuestra que el mencionado factor de ganancia viene expresado por el producto de convolución normalizado (Faltung) entre  $\psi(r)$  y  $f(r)$

$$\eta = \frac{|\iint f(r)^* \psi ds|^2}{\iint f^2 ds \iint \psi^2 ds}$$

(4) W. Q. CRICLOW, C. J. ROUBIQUE, A. D. SPAULDING and W. M. BEERY: «JOUR. Res. N. B. S.», 64, D, 49, 1960 f.



La ganancia se obtiene multiplicando  $\eta$  por la *ganancia teórica*  $4 \pi A_0 / \lambda^2$ , siendo  $A_0$  el área del espejo y  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación; el factor de ganancia es máximo (igual a la unidad) cuando  $\psi(r) \equiv f(r)$ , o sea, si la ley de iluminación primaria reproduce la forma de la figura de difracción. Prácticamente

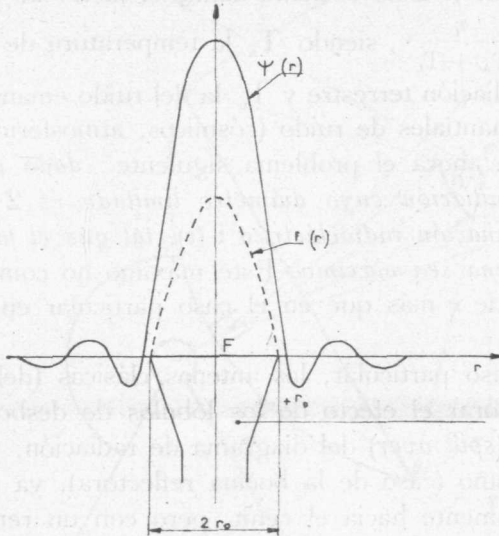


Fig. 3.—Sección de la figura de difracción por el plano del dibujo que indica la distribución del flujo radiométrico en el plano focal de la antena reflectora.

las dimensiones del manantial primario quedan limitadas a un radio  $r_0$ , siendo imposible de reproducir rigurosamente la forma de la figura de difracción.

Con las antenas clásicas, ordinariamente se utiliza un manantial primario que intercepta únicamente el lóbulo principal de la figura de difracción, obteniéndose por ello factores de ganancia bastante mediocres (del 50 al 60 por 100).

En cambio, trabajando con antenas frías, el papel del manantial primario es más complicado. En efecto, suponiendo el paraboloide orientado hacia el cenit, hemos dicho que su plano focal está atravesado por un flujo de energía útil distribuido según la

figura de difracción, al cual se superpone el flujo de ruido procedente de la radiación térmica terrestre. La acción de la abertura primaria ya no se reduce solamente a optimizar el factor de ganancia, sino que su papel es optimizar la *relación* entre el factor de ganancia y el ruido térmico total, comprendiendo no sólo el ruido terrestre, sino los procedentes de otros orígenes posibles (industriales, etc.). Este cociente define el *factor de calidad* de la antena  $Q = \frac{\eta}{T_A + T_L}$ , siendo  $T_A$  la temperatura de ruido procedente de la radiación terrestre y  $T_L$  la del ruido emanado de todos los demás manantiales de ruido (cósmicos, atmosféricos, etc.).

Se plantea ahora el problema siguiente: *dado un manantial primario de radiación cuyo diámetro limitado es  $2r$ , averiguar la ley de iluminación radioeléctrica  $f(t)$ , tal que el factor de calidad de la antena sea máximo*. Este máximo no coincide, en general, con el de  $\eta$  más que en el caso particular en que  $T_A$  sea nulo (5).

En este caso particular, las antenas clásicas (del tipo *offset*) permiten aminorar el efecto de los lóbulos de desbordamiento o rebosamiento (*spill over*) del diagrama de radiación, ya sea reduciendo su tamaño (caso de la bocina reflectora), ya sea dirigiéndolos principalmente hacia el cenit, pero con un rendimiento de iluminación muy limitado. En cambio, las antenas con reflector principal de revolución, permiten conseguir un rendimiento muy próximo a la unidad, pero los lóbulos de desbordamiento alrededor de las superficies reflectoras son menos fácilmente regulables. Esta última solución ha sido la preferida por numerosos investigadores; entre los precursores Foldes (6) y luego los franceses Mandel, Roger y Tocquet (7), principalmente a causa de que una ligera elevación de la temperatura de ruido puede compensarse mediante un aumento del rendimiento de iluminación y que una antena centrada, a igualdad de superficie útil, permite una reducción de volumen, así como una mayor simplicidad mecánica.

(5) S. DRABOWITCH: *L'Onde Electrique*, 47, 381, febrero 1967.

(6) P. FOLDES: *AGARD Avionic Conferencie*. Oslo, 1961. Pergamon Press.

(7) P. MANDEL, G. ROGER and Y. TOCQUET: *L'Onde Electrique*, 47, 258, febrero 1967.

La antena preconizada por aquellos investigadores es del tipo Cassegrain (como el telescopio óptico de este nombre) con pequeña relación entre la distancia focal  $f$  y el diámetro  $D$  del reflector principal, pues comporta un reflector auxiliar hiperbólico  $H$  de menores dimensiones (fig. 4) coaxial con el primero y situado en las

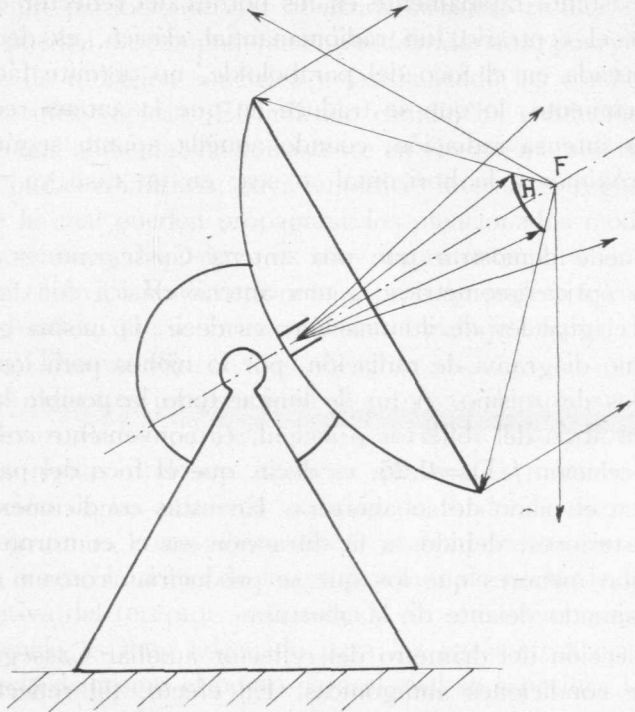


Fig. 4. - Antena Cassegrain.

proximidades de su foco, con lo que el manantial primario (o su imagen) ha de estar próximo al vértice del paraboloide. Así se acortan las conexiones entre los equipos y el manantial, eliminándose los problemas de accesibilidad que plantean los receptores o emisores situados en el foco del paraboloide; además este último implica un parámetro suplementario susceptible de mejorar el sistema de iluminación.

Finalmente, esta configuración es más ventajosa con respecto a la energía radiante, que desborda alrededor de los reflectores. En efecto, dicha energía es despreciable en cuanto el eje del reflector se levanta algunos grados sobre el horizonte y la energía reradiada por el espejo y desbordante por el contorno del reflector principal puede atenuarse mucho si la ley de iluminación decrece bastante rápidamente en los bordes del reflector en cuestión. Por el contrario, un radiomanantial clásico, es decir, una bocina situada en el foco del paraboloide, no permite fácilmente tal decrecimiento, lo que se traduce en que la antena reciba del suelo una intensa radiación, cuando aquélla apunta según direcciones próximas a la horizontal, o sea, en un caso ya desfavorable.

Se puede demostrar que una antena Cassegrain es equivalente, en óptica geométrica, a una antena clásica con la misma abertura e igual ley de iluminación; es decir, la misma ganancia y el mismo diagrama de radiación, por lo menos para los primeros lóbulos del mismo. A fin de limitar todo lo posible la radiación hacia atrás del reflector principal, es conveniente construirlo con una relación  $f/D = 0,25$ , es decir, que el foco del paraboloide está en el plano de su abertura. En estas condiciones los lóbulos posteriores, debidos a la difracción en el contorno del reflector, son menores que los que se producirían con un reflector auxiliar situado delante de la abertura.

La elección del diámetro del reflector auxiliar Cassegrain depende de condiciones antagónicas. En efecto, tal reflector funciona tanto mejor, según las leyes de la óptica, cuanto mayores son sus dimensiones en comparación con la longitud de onda, transformando las ondas esféricas reflejadas por el paraboloide en otras convergentes hacia el manantial primario. En cambio, un reflector Cassegrain muy grande constituye una pantalla importante en el plano de abertura de la antena, disminuyendo por tanto su abertura y por ende su ganancia, originando además lóbulos secundarios de niveles elevados. Parece que el diámetro del reflector Cassegrain que da mejores resultados debe ser del orden de la décima del diámetro del reflector principal.



El elevadísimo coste de las antenas paraboloïdales de gran abertura, agobiante problema actual del que nos ocuparemos en la última parte de este trabajo, impone el empleo de sistemas de alimentación y conducción (guías de onda) para conservar al máximo la ínfima energía recibida de alta frecuencia.

De un reciente estudio acerca de los campos creados en el foco de un paraboloides con abertura circular, resulta que estos campos pueden descomponerse en *modos híbridos*, poseyendo propiedades de radiación simétrica y satisfaciendo las condiciones de contorno anisotrópicas. El indicado estudio ha conducido al concepto de una alimentación consistente en el extremo abierto de una guía de ondas cilíndricas, cuya superficie interna es rugosa y a lo largo de la cual pueden propagarse los mencionados modos híbridos. Este nuevo dispositivo es muy importante para las medidas de polarización en Radioastronomía, pero no podemos entrar aquí en más detalles, que se encuentran en el trabajo original de H. C. Minnet y Thomas (8).

Estos recientes progresos en el proyecto de antenas direccionales, desarrollados paralelamente con el de los radioreceptores cada vez menos ruidosos, implican que sea lo menor posible la contribución de las primeras al ruido de fondo de estos últimos.

A este fin es conveniente referir la temperatura de ruido del sistema, o sea, la suma de la temperatura de ruido de la antena y la efectiva del receptor, a la entrada de este último; este punto de referencia es muy adecuado para los parámetros más utilizados, siendo asimismo el punto para el cual se especifica la ganancia de la antena. En muchos sistemas con grandes antenas, sus características se especifican por la «relación entre ganancia y temperatura de ruido» ( $G/T$ ); así se estipulan corrientemente las de las estaciones terrestres para intercomunicación con satélites.

En una antena real, no teórica, su temperatura de ruido viene expresada por

$$T_a = \alpha T_a' + T_a (1 - \alpha)$$

---

(8) H. C. MINNET, B. and Mc A. THOMAS: *I. E. E. E. Trans. on Antennas and Propagation*. Vol. Ap. 14, 654, septiembre 1966.



siendo  $\alpha$  el factor de transmisión de todas las pérdidas óhmicas en la propia antena y demás componentes del complejo receptor (líneas de radiofrecuencia, conmutadores, etc., anteriores al punto de referencia indicado),  $T_a$  temperatura de la antena externa,  $T_r$  temperatura de referencia o temperatura física, normalmente  $290^\circ \text{ K}$ .

Las pérdidas se expresan en decibelios  $P_{dB}$ , estando relacionadas con  $\alpha$  por  $P_{dB} = 10 \log_{10} 1/\alpha$ , siendo  $\alpha$  menor que la unidad.

Matemáticamente, la temperatura  $T_a$  se expresa por

$$T_a = 1/4 \pi \int_0^{2\pi} \int_0^\pi T(\theta, \Phi) g(\theta, \Phi) \sin \theta d\theta d\Phi$$

siendo  $T(\theta, \Phi)$  la temperatura ambiente (y del suelo) y  $g(\theta, \Phi)$  la directividad de la antena.

La solución de la anterior ecuación, generalmente se obtiene sólo en primera aproximación o, si es necesario, con todo el rigor exigido por la integración numérica, siempre tediosa; actualmente, después de convenientemente programada, se resuelve mediante calculadoras electrónicas para un elevado número de puntos (5.000 o más).

El diagrama de radiación de la antena acostumbra a dividirse en las siguientes partes: lóbulo principal, lóbulos laterales de primer orden, lóbulos laterales próximos o de bajo nivel, radiación rebosante hacia adelante (aplicable solamente a los sistemas Cassegrain), lóbulos laterales alejados (de bajo nivel), radiación rebosante posterior (detrás del reflector principal) y lóbulos posteriores. Aunque establecidas específicamente para antenas Cassegrain, son aplicables a cualquier otro tipo de antenas de elevada directividad.

Si se conocen o pueden ser estimadas con bastante aproximación la potencia relativa contenida en el lóbulo principal, en los lóbulos laterales de primer orden, la energía rebosada hacia adelante, etc., la temperatura exterior de la antena se determina con facilidad. En realidad, no es de esperar que la temperatura apa-

rente del suelo sea constante ( $290^{\circ}$  K) para todos los ángulos de incidencia. Al disminuir el ángulo de incidencia (proximidad al horizonte) la tierra tiende a ser más reflectora que absorbente (9).

### *Ruidos y absorción por la ionosfera y auroras polares.*

Por diversos motivos es interesante el estudio del ruido térmico en la ionosfera, sobre todo desde que ya se emplean radio-receptores en cohetes y satélites para medir las señales cósmicas incidentes en aquélla, procedentes del espacio extraterrestre; dichas señales, lo mismo que el ruido aleatorio en la parte exterior de la ionosfera, se propagan según los dos bien conocidos *modos* de la teoría magnetoiónica, es decir, modo ordinario y modo extraordinario.

En las frecuencias más interesantes para la ionosfera, o sea, de 1 a 10 MHz, la temperatura de brillo del cielo es del orden de  $3,10^6$  K, mientras que la de la ionosfera superior solamente alcanza unos  $2.000^{\circ}$  K; por lo tanto, puede admitirse sin gran error que el ruido térmico provocado localmente en la ionosfera generalmente no se tenga en cuenta. Por otra parte, la media cuadrática del campo eléctrico fluctuante del ruido térmico, puede considerarse casi proporcional al índice de refracción del medio para las ondas que consideramos; este índice generalmente es del orden de la unidad para las ondas ordinaria y extraordinaria. Por lo demás pueden propagarse en la ionosfera ondas de plasma, cuyo índice de refracción es del orden de  $10^3$  a  $10^4$ . Desde luego, no es probable que las señales cósmicas engendren una onda de plasma de notable amplitud, aunque tales ondas plasmáticas pueden originarse como parte del ruido térmico, pudiendo así dar lugar a campos comparables a los de las ondas ordinaria y extraordinaria del ruido cósmico.

Supongamos una simple antena situada en el seno de la ionosfera; conociendo la estadística de campo del ruido térmico, se puede averiguar la media cuadrática  $\langle V V' \rangle$  de la tensión en sus

---

(9) HERBER H. REED: *Microwaves*, 6, 46, abril 1967.

extremos en una banda de frecuencias  $\Delta \nu$ , que según el teorema de Nyquist vale  $\langle V V' \rangle = 8 k T R_r \Delta \nu$ , siendo  $R_r$  la resistencia de radiación de la antena en cuestión. Así pues, el campo de ruido térmico suministra un medio de evaluar la resistencia de radiación de una antena situada en la ionosfera.

Es interesante plantearse la cuestión sobre la posibilidad de medida del ruido térmico en la ionosfera. De las observaciones recientes mediante satélites, efectuadas por Harvey en 1965 (10), se deduce que en determinadas frecuencias y a ciertas altitudes en el interior de la ionosfera existen señales de ruido de gran amplitud, mucho más importantes que las señales cósmicas o que el ruido térmico y cuya procedencia podría ser debida a la radiación de las partículas rápidas aprisionadas por el campo magnético terrestre, envolturas de van Allen, etc. Evidentemente, en experiencias de este tipo es de gran importancia poder discriminar con qué amplitud de ruido térmico se está operando.

Diversos investigadores han sugerido métodos para evaluar el campo electromagnético del ruido térmico en un medio disipativo; véase Callen y Welton (11), Greene y Callen (12), Callen y Greene (13), Callen, Barasch y Jackson (14).

Estos últimos años han sido muy fructíferos en la obtención de nuevos y útiles conocimientos sobre las propiedades físicas de las regiones inferiores de la ionosfera, gracias a las medidas de absorción del ruido cósmico; éstas se acostumbran a realizar mediante los *riómetros* (aparatos medidores de la *opacidad ionosférica relativa*, «relative ionospheric opacity»), operando entre las frecuencias de 18 a 60 Mc/s (15).

En la ionosfera, la disipación de energía de las ondas que la atraviesan es debida casi totalmente a los choques de los electrones con otras partículas, siendo prácticamente despreciable la disi-

(10) C. C. HARVEY: «Ann. d'Astrophysique», 28, 248, 1965.

(11) H. B. CALLEN and T. A. WELTON: «Phys. Rev.», 83, 34, 1951.

(12) R. F. GREENE and H. B. CALLEN: 83, 1231, 1951.

(13) H. B. CALLEN and R. F. GREENE: «Phys. Rev.», 86, 702, 1952.

(14) R. KUBO: *The fluctuation dissipation Theorem*. «Reports on Progr. in Physics», 29, 255, 1966.

(15) C. G. LITTLE and H. LEINBACH: P. I. R. E., 47, 315, 1959.

pación sin choques por amortiguamiento (Landau) de las ondas del plasma excitadas por las microondas incidentes. Las partículas con que chocan los electrones oscilantes adquieren energía de estos últimos, transformando en calor la energía de las ondas; por lo tanto, el coeficiente de absorción debe ser proporcional a la frecuencia de los choques  $\nu$ . Pero si ésta es mayor que la de las ondas  $\omega$ , los choques impedirán que los electrones oscilen en el campo eléctrico de aquéllas y de consiguiente que absorban su energía; para tales altos valores de  $\nu$  es de esperar una disminución del coeficiente de absorción con el aumento de  $\nu$ . Esta transición ocurre hacia los 50 kms. de altitud para las frecuencias que registra el riómetro.

Las propiedades electromagnéticas macroscópicas de un gas ionizado están condensadas en su índice de refracción complejo  $M$ , debiendo relacionar las teorías físicas apropiadas este parámetro macroscópico con los microscópicos, o sea, la densidad electrónica  $N$  y la frecuencia de choque  $\nu$ .

Escribiendo el índice de refracción complejo

$$M = \mu - j \frac{c}{\omega} k$$

la ecuación del campo eléctrico de la onda que se propaga, según el eje  $z$ , será

$$E = \exp(-kz) E_0 \exp[j\omega(t - \mu z/c)]$$

siendo  $\mu$  el índice de refracción y  $k$  el coeficiente de absorción.

Appleton (16), Goldstein (17) y Hartree (18) generalizaron la teoría de Lorentz (19) sobre la propagación de ondas electromagnéticas a través de un gas débilmente ionizado (en el que pueden despreciarse las interacciones electrón-ion y electrón-electrón), obteniendo una relación entre la macroscópica  $k$  y las microscópicas  $N$  y  $\nu$ .

(16) E. V. APPLETON: U. R. S. I. Reports. Washington, 1927.

(17) S. GOLDSTEIN: «Proc. Roy. Soc.», London A, 121, 260, 1928.

(18) D. R. HARTREE: «Proc. Cambrid. Phil. Soc.», 25, 97, 1929.

(19) H. A. LORENTZ: *Theory of Electrons*. Teubner, 2.ª edición. Dover edit., 1915.



En la deducción de esta relación se tienen en cuenta los choques introduciendo un término friccional  $g \cdot v$  (siendo  $v$  la velocidad del electrón), mientras que el coeficiente  $g$ , que puede formalmente identificarse con  $m v$  (siendo  $m$  la masa del electrón), se supone independiente de la velocidad del electrón. Admitiendo que  $\nu \approx n \sigma v$  ( $n$  es la densidad de las partículas neutras y  $\sigma$  su sección eficaz de choque) esta hipótesis equivale a admitir que  $\sigma = 1/v$ .

A partir de la teoría magnetoiónica de Appleton, se puede obtener la siguiente expresión de  $k$  para el caso de  $\mu = 1$  en la denominada aproximación casi longitudinal

$$k = \frac{2 \pi e^2 N \nu}{m c (\omega \pm \omega_L)^2 + v^2}$$

Esta aproximación es válida en las frecuencias del riómetro para las antenas verticales o apuntando al polo galáctico y en latitudes altas o medias.

Los problemas relacionados con la absorción del ruido de fondo cósmico por las auroras polares, recibieron gran atención desde que viene empleándose el riómetro, habiéndose hecho gran acopio de datos experimentales. Sin embargo, persisten aún controversias sobre las siguientes cuestiones :

a) Simultaneidad de la ocurrencia de la absorción del ruido cósmico y dichas auroras.

b) La región o área celeste en la que tiene lugar la absorción indicada.

c) Altura de la región absorbente.

Muchas de tales desavenencias pueden explicarse en función de los factores experimentales :

1.º Empleo de fotómetros y riómetros bajo campos de visión muy diferentes.

2.º Errores imputables a los diagramas de los lóbulos laterales de la antena del riómetro ; ello puede ser muy importante si se emplea una antena Yagi simple con tres elementos.

3.º Escasa consideración de la geometría auroral durante el fenómeno absorbente.

4.º Poca atención prestada a los llamados «efectos de van



Rhijn» en la intensidad auroral, cuando se emplean amplios campos de visión. También tiene su importancia la oblicuidad de las señales recibidas por el riómetro; los errores por esta causa pueden llegar a ser del orden del 50 por 100 si la absorción ocurre cerca del borde del campo visual, sobre todo con instrumentos de gran amplitud.

Concretándonos a los efectos de absorción auroral observados por las Expediciones de Investigación Nacional Antártica Australiana en la estación de Mawson, resulta que tales efectos pueden ser clasificados en los cuatro tipos siguientes: 1.º, fenómenos diurnos; 2.º, absorción ionosférica débil nocturna; 3.º, brusca absorción; 4.º, absorción ionosférica variable lentamente.

Durante la fenomenología comprendida en el tercer tipo, son simultáneos los picos y la intensidad auroral (en onda de  $5.577 \text{ \AA}$ ) y la absorción queda limitada a las regiones luminosas del cielo. En cambio, en la del tipo cuarto, la absorción es mucho más amplia, y sólo existe una pequeña correlación entre las fluctuaciones de absorción y las de intensidad auroral; la relación entre la absorción y la intensidad, puede ser del orden de unas cien veces mayor que en los del 3.º tipo.

Las variaciones observadas en tal relación absorción/intensidad no sólo entre distintos acontecimientos, sino incluso dentro de cada uno de ellos, se atribuyen a variaciones del espectro de energía de los electrones incidentes.

Considerando los espectros variables de acuerdo con la ley exp. ( $-e/\beta$ ) son necesarias variaciones de  $\beta$  entre 5 y 24 keV para poder explicar los hechos observados del tipo 3.º; ello está en pleno acuerdo con los datos de los cohetes. Teniendo en cuenta la relación entre los valores de día y de noche, las mediciones simultáneas en dos frecuencias y la simultaneidad de la intensidad auroral y de absorción indicada por el riómetro, se llega a evaluar un límite inferior de la altura de la región absorbente, variable entre los 80 y 95 kms., lo cual depende del espectro energético de los electrones (20).

(20) Véanse más detalles en el trabajo de R. H. EATHER and F. JACKA: «Australian Jour. of Physics», 19, 215, abril 1966.

### *Radioperturbaciones atmosféricas de audiofrecuencia («whistlers»).*

Como es sabido, constituyen un tipo especial entre las diversas radioperturbaciones de origen natural, observadas en la banda de audiofrecuencia del espectro radioeléctrico.

Descubiertas tales radioperturbaciones (conocidas también por *atmosférico* y *whistlers* en inglés) entre el primero y segundo lustro de este siglo por Barkhausen-Eckersley y estudiadas a fondo sobre todo por Storey (21), está fuera de toda duda que en muchos casos este curioso fenómeno es debido indudablemente a las descargas eléctricas de los rayos y relámpagos en la troposfera, aunque también las provocan otras causas de tipo impulsivo tales como las explosiones nucleares en la alta atmósfera.

Dichas perturbaciones se reconocen auditivamente por la coexistencia de uno o más tonos perfectamente coherentes, cuya frecuencia varía rápida y progresivamente con el tiempo y cuya duración oscila entre una fracción de segundo y algunos segundos.

La relación entre ambas magnitudes está determinada por la propagación dispersiva de la descarga inicial a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre; algunos de los componentes de muy baja frecuencia penetran en la ionosfera según el modo magnetoiónico polarizado circularmente *dextrorsum* (*whistle mode*) y recorren un largo camino a través de aquélla, avanzando las distintas frecuencias con diferentes velocidades y por lo tanto sufren la dispersión.

Un atmosférico *breve* es originado por un impulso eléctrico en la hemisfera opuesta a la en que está situado el receptor y realiza un solo trayecto a través de la magnetosfera, mientras que un atmosférico *largo* se inicia en el mismo hemisferio en que está el receptor, pero después de haber realizado el trayecto de ida y vuelta al otro hemisferio. Así pues, el *eco* de un atmosférico breve recorre tres veces la magnetosfera y el de un atmosférico largo cuatro veces. A menudo un eco determinado engendra ecos de sí

---

(21) L. R. O. STOREY: «Phil. Trans. Roy. Soc.» (London), A 246, 113, 1953.

mismo, formándose una cadena de ecos con dispersión creciente, es decir, un tren de ecos de atmosféricos.

Recientemente, Helliwell (22) ha discutido detalladamente las condiciones que han de provocar la reflexión de un atmosférico descendente en la capa límite inferior de la ionosfera, y últimamente Cartwright (23), gracias a los registros obtenidos con un cohete durante la noche, ha comprobado que los atmosféricos pueden recorrer efectivamente la ionosfera, pero no descender hasta la superficie terrestre.

Los ecos de atmosféricos pueden explicarse mediante un mecanismo captador de la magnetosfera, según el cual todo atmosférico debe estar saltando de delante-atrás entre las ionosferas de los dos hemisferios terrestres opuestos, derivándose una fracción de su energía hacia el suelo en uno o ambos extremos de su trayectoria.

Sin embargo, la verdadera naturaleza del conjunto de fenómenos implicados en los ecos que nos ocupan todavía no se ha explicado satisfactoriamente, ya que no deben reducirse a una simple reflexión en los gradientes de densidad electrónica (24).

#### PROGRESOS RECIENTES EN LA INVESTIGACIÓN ESPACIAL POR VÍA RADIOELÉCTRICA

##### *Distribución del hidrógeno interestelar. Ruido galáctico, etc.*

Los numerosos e importantes estudios realizados últimamente sobre esta cuestión, tienen importancia intrínseca por ser el hidrógeno el principal componente del gas interestelar, pero además ofrece el especial interés de que aquel gas puede utilizarse como guía e indicador en el estudio de ciertas estructuras básicas tales como los brazos en espiral de la Galaxia, etc.

El hidrógeno puede ser observado en el gas interestelar bajo

---

(22) R. A. HELLIWELL: P. I. R. E., 47, 200, 1959.

(23) D. G. CARTWRIGHT: *Planetary Space*, Sc. 12, 11, 1964.

(24) J. BALTÁ ELÍAS: Ponencia presentada al «II Congreso Internacional de Técnicas de Telecomunicación». Madrid, 1965.

sus formas neutra e ionizada, pudiendo estar también presente en estado molecular. En forma ionizada puede observarse por medios ópticos y radioeléctricos; los primeros conciernen a las «regiones H II» (doblemente ionizado) susceptibles de estudiarse con gran detalle, principalmente en las inmediaciones del Sol, nebulosa de Orión, etc. Mediante la observación radioeléctrica, también pueden detectarse tales regiones, pero con menos detalle; por este medio se adquiere la evidencia de la distribución en gran escala del hidrógeno ionizado por toda la Galaxia. Hasta ahora no han dado resultado las tentativas para acusar la presencia del HI tanto en emisión como en absorción.

Hoy está fuera de duda que la mayor parte del hidrógeno atómico cósmico es neutro y, por lo tanto, no susceptible de ser observado ópticamente. La observación radioeléctrica de la raya de 21 cms. permite explorar toda la Galaxia, suministrando el único método actualmente disponible para el trazado de la estructura de aquélla a gran escala.

Hasta ahora no ha sido posible detectar el hidrógeno molecular cósmico, pero Gold (1961) y Zwicky (1959) y otros admiten la posibilidad de su presencia en cantidades mucho mayores incluso que bajo forma atómica. Ello explicaría la discrepancia observada entre la masa del H cerca del Sol, procedente de las estrellas, y la que parece ser necesaria para explicar los efectos locales de gravitación. Sin embargo, parece más plausible que notables cantidades de asociaciones de átomos puedan formarse en regiones en las que la densidad interestelar sea muy alta (Mc Crea 1960).

Es de esperar que pronto se realicen observaciones desde satélites artificiales más allá de la atmósfera para intentar la detección del hidrógeno molecular en el infrarrojo lejano.

La observación de la raya de 21 cms. del H neutro ha revolucionado el estudio de la estructura galáctica. Contrariamente a las ondas luminosas y decamétricas, las decimétricas atraviesan sin dificultad el polvo interestelar y el H ionizado.

Hoy se sabe que el ruido galáctico, descubierto por Jansky en 1932, es debido a dos componentes distintas, una de simetría casi esférica, proveniente de un halo de partículas relativistas que en-



vuelven toda nuestra Galaxia, y la otra, superpuesta a la anterior, situada en la región del plano galáctico. Como estos radiomanantiales son de grandes dimensiones respecto a los lóbulos del diagrama de radiación de las antenas generalmente utilizadas, se puede expresar su intensidad por su temperatura *de brillo*  $T_b$ , que según ya hemos avanzado, es la que debería tener el cuerpo negro para emitir, en la frecuencia considerada, el flujo de energía observado. Como la Galaxia no lo es, su temperatura de brillo resulta variable con la frecuencia.

La figura 5 reproduce un mapa de isófotas de la Galaxia en la frecuencia de 400 Mhz y en coordenadas ecuatoriales celestes (ascensión recta y declinación).

Expuestos ya a grandes rasgos los fundamentos del tema objeto de esta conferencia, en la primera parte de la misma vamos a ocuparnos de los últimos adelantos realizados en la materia.

Sería vano intento pretender dar siquiera una breve idea de los numerosísimos trabajos realizados hasta la fecha (principalmente por la activa escuela australiana) sobre la estructura espacial del hidrógeno interestelar, pues la bibliografía es realmente abrumadora y, por tanto, difícil de extractar dada la brevedad de este trabajo; bastará mencionar que durante poco más de los cuatro años últimamente transcurridos fueron catalogados con el gran radiotelescopio australiano de Parkes (25) unos 2.000 radiomanantiales en la frecuencia 408 Mc/s comprendidos entre las declinaciones de  $+ 20^\circ$  y  $- 90^\circ$ , y otros 628 focos análogos en la misma frecuencia entre las declinaciones de  $0^\circ$  y  $- 20^\circ$ . Actualmente se trabaja asimismo en el estudio monográfico no ya de focos radioemisores, sino de regiones más o menos extensas de la bóveda celeste.

Por su interés, vamos a resumir los resultados obtenidos por Carl Heiles (26) de sus observaciones de la región comprendida entre  $l^{\text{II}} 100^\circ$  a  $140^\circ$  y  $b^{\text{II}} = 13^\circ$  a  $17^\circ$  que expone en su tesis doctoral presentada el año pasado en la Universidad de Princeton.

---

(25) J. G. BOLTON: «Nature», 211, 917, 1966.

(26) CARL HEILES: *Observations of the spatial structure of interstellar H*. Princeton, 1966. Univ. Obs.

Empleó el radiotelescopio (*de pasos*) mayor del mundo, de Greenbank (90 metros de abertura), conjuntamente con el receptor de autocorrelación de 100 canales; la abertura del haz de esta

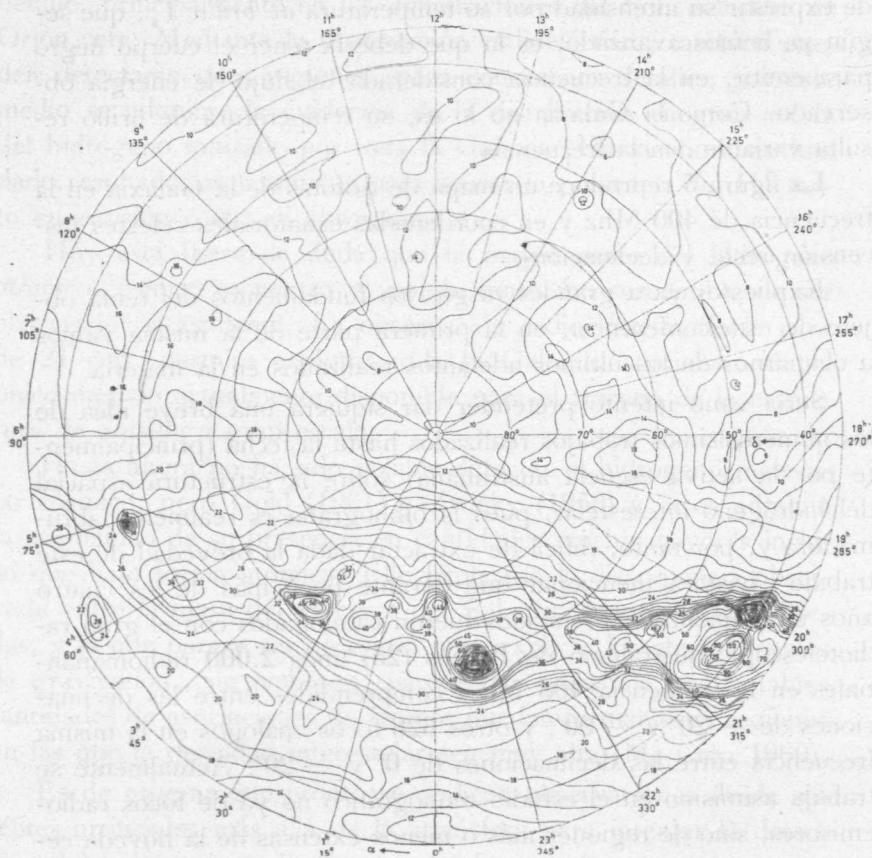


Fig. 5.—Mapa del ruido galáctico en 400 Mhz en las regiones de declinación superior a 35°, se observa un fondo casi continuo del orden de 10 unidades (25° K) y una banda mucho más brillante siguiendo la Vía Láctea.

antena para la longitud de onda de 21 cms., es de 10' ; la velocidad de resolución de 1 km/seg. y la sensibilidad a la temperatura de 1° K aproximadamente.

Por diversas consideraciones, adopta Heiles con razonable

aproximación para la distancia a que se encuentran de la Tierra las regiones que contienen el hidrógeno por él estudiadas, la de **500** parsecs.

Este gas parece poder considerarse físicamente constituido por los tres componentes siguientes: un fondo difuso que contribuye en unas  $3/4$  partes a la emisión en **21** cms. y dos amplias láminas gaseosas en movimiento relativo y en las que la densidad del hidrógeno debe ser del orden de unos dos átomos por  $\text{cm}^3$ . La velocidad de cada una de aquellas láminas se mantiene muy ordenada dentro de distancias de decenas de grados, apreciándose en aquéllas unas estructuras lineales (*grietas* o *rendijas*) caracterizadas por la ausencia del hidrógeno; probablemente la causa productora de dichas grietas existe asimismo bajo tal forma.

Estas observaciones no coinciden en absoluto con las predicciones resultantes del «modelo de nube patrón». Desde luego, existen en aquellas láminas concentraciones de gas que pueden considerarse como nubes, aunque generalmente su densidad no llega a ser mayor que el doble de la existente en sus alrededores. Se cuentan como una decena de estos *objetos-nubes*, algunos de los cuales son tan grandes que las fuerzas de marejada del campo gravitatorio galáctico deben afectar notablemente su equilibrio. Especialmente prominentes son los «grupos de nubes» muy parecidos a las clásicas «nubes interestelares», aunque están arracimadas en dos grandes grupos; la gran velocidad de dispersión de los objetos que nos ocupan, puede ser resultado de un sistemático movimiento radial. No se ha observado incremento alguno de la emisión en **21** cms. en las regiones nubosas de polvo denso, lo que se atribuye a la presencia de hidrógeno frío o molecular en tales nubes, ligadas mutuamente por propia gravitación.

Se observan profusamente pequeñas concentraciones de masas estelares próximas, bien distintamente diferentes de las concentraciones antes citadas, pero dada su pequeñez sólo han de contener alrededor de un **10** por **100** de la masa de las láminas gaseosas mencionadas. Los radios típicos de esas *nubecillas* son del orden de algunos parsecs, así como las densidades por exceso no son grandes alrededor del factor dos; el límite superior de su tempe-

ratura cinética, implicada por su anchura de velocidad, viene a ser de unos  $100^\circ \text{ K}$ .

La más alta temperatura de brillo observada por Heiles en esta región es de  $130^\circ$ , igual al valor comúnmente aceptado para la temperatura cinética del plano galáctico; el perfil de la línea no aparece saturado. Ello, conjuntamente con las determinaciones previas de la temperatura cinética, implica la existencia de grandes variaciones de temperatura en el gas interestelar. La disminución del número de átomos de hidrógeno por  $\text{cm}^2$  en la dirección de la visual con latitudes galácticas decreciente es mucho más rápida que  $1/\sin b$ ; la conclusión inmediata es que en la región estudiada existe muy poco hidrógeno en las inmediaciones del Sol.

Más recientemente, Kerr y Vallak (27) acaban de publicar los primeros resultados de sus observaciones en gran escala de la Vía Láctea a lo largo de su ecuador entre las longitudes  $l = 355^\circ$  y  $l = 5^\circ$  y para bajas latitudes galácticas, cubriendo un área de unos 4 grados cuadrados alrededor del centro. Dichas observaciones, mediante la raya de 21 cms., han sido realizadas con el gran radiotelescopio australiano de Parkes N. S.:W de 63 m. de abertura, que con dicha longitud de onda su haz de radiación es de 14,5'; el receptor era de 48 canales, descrito por McGee y Murray (28), poseyendo cada canal una anchura de banda de 36 kHz y el espaciado entre canales es de 33 kHz, equivalente a una diferencia de velocidad de 7 km/seg.

Los resultados obtenidos abarcan una limitada amplitud de velocidades que excluyen los bordes alejados de la raya en cuestión, cuyos perfiles son muy amplios; desgraciadamente no es posible entrar aquí en más pormenores, p. e., el equipo registrador digital, etc.

También con el radiotelescopio de Parkes, Tovmassian llevaba observadas hasta el año pasado 18 galaxias, cuyo espectro y coloración en su región central son anómalas respecto sus tipos mor-

---

(27) F. J. KERR and REED VALLAK: «Austral. Jour. Phys. Astroph.» Supp. número 3, marzo 1967.

(28) H. M. TOVMASSIAN: «Austr. Jour. Phys.», 19, 883, diciembre 1966.



fológicos, llegando a la conclusión que, comparadas con las que poseen espirales normales, presentan en dicha región central una activa emisión radioeléctrica. Probablemente esta actividad es la causa de la producción de electrones relativistas, que a su vez podrían originar una emisión anormal bajo forma óptica y radioeléctrica.

Recientes observaciones (29) del núcleo de la nebulosa de Andrómeda (M 31) llevadas a cabo con el radiotelescopio de *apertura sintética* (de 1 milla) en Cambridge con las frecuencias de 408 y 1.047 Mc/s, han demostrado que la radioemisión de M 31 es mucho menos intensa que la de Sagitario (en el centro de nuestra Galaxia), a pesar del parecido de la estructura de sus núcleos.

#### *Aportación a la Cosmogonía.*

Los estudios recientes del espectro de absorción de las moléculas del cianógeno CN interestelar y la recepción de las microondas de 20,7 cms. de idéntico origen, parecen demostrar que el Universo contiene la radiación del cuerpo negro a 3° K, testimonio actual de la existencia pristina en el Cosmos de una masa de gases incandescentes en muy primitivas épocas. Las dos primeras determinaciones que se ajustan con el espectro de 3° K indicado, fueron obtenidas directamente por radiorecepción en la longitud de onda de 7,5 cms. por A. A. Penzias y R. W. Wilson (30), y en la de 3,2 cms. por P. G. Roll y D. T. Wilkinson (31), mientras que T. F. Howell y J. R. Shakeshaft lo hicieron en la longitud de onda de 20,7 cms. (32).

Esto ha dado pie para apoyar el modelo cosmológico de Friedman, conteniendo simultáneamente radiación y materia (33); expliquemos brevemente los hechos cuya interpretación ha conducido a los resultados que acabamos de exponer.

Hace unos dos años algunos investigadores de los laboratorios

---

(29) G. G. POOLEY and S. KENDERDINE: «Nature», 214, 1190, 17 junio 1967.

(30) P. A. PENZIAS and R. R. WILSON: «Astrophys Jour.», 142, 419, 1965.

(31) A. G. ROLL and D. T. WILKINSON: «Phys. Rev. Lett.», 16, 405, 1966.

(32) T. G. HOWELL and J. R. SHAKESHAF: «Nature», 210, 1318, 1966.

(33) K. C. JACOBS: «Nature», 215, 1156, 1967.

«Bell System» empleaban una gran antena con reflector de bocina para estudiar el radio-ruido emitido en ondas de 7,5 cms. por *Casiopea A*, procurando eliminar los procedentes de nuestra atmósfera, del suelo y de los accesorios de la propia antena (guía-ondas). A pesar del extremo cuidado con que procedían en tal empeño los Dres. A. A. Penzias y R. W. Wilson (utilizando un generador de nivel de ruido como manantial de referencia de gran precisión sumergido en helio líquido expresamente construido a tal fin) estaban intrigados por la persistencia de un ruido residual (más intenso que el de muchas estrellas) de origen inexplicable. De otra parte, independientemente de estos trabajos, en la Universidad de Princeton un grupo de colaboradores (Profs. P. J. Peebles, P. G. Roll y D. T. Wilkinson) del renombrado especialista, Prof. R. H. Dicke, buscaban las relaciones posibles entre la gravitación y la fuga mutua de las galaxias distantes y con respecto a la Tierra. Es bien sabido que la composición primitiva de nuestra Galaxia (deducida de las rayas espectrales de las estrellas *antiguas*) y la hipótesis, sostenida por diversos astrónomos, de que toda la materia interestelar constituía primitivamente un gigantesco átomo (hipótesis de Lemaitre), conduce a la concepción de un Universo inicial ígneo (*fireball*) que emitiría la radiación del *cuerpo negro* hasta iniciar su expansión por efecto de una explosión (*big-bang*). Después de enfriarse durante billones de años de expansión, la frecuencia de sus radiaciones (del orden de  $10^{20}$  c. p. s.) actualmente podría haber descendido a los  $10^{10}$  c. p. s., es decir, a frecuencias del espectro radioeléctrico, cuyas longitudes de onda serían del orden de algunos centímetros.

Puestos en relación los colaboradores de ambos centros, el Prof. P. J. Peebles, de Princeton, llegó a la conclusión de que las señales persistentes recibidas en los laboratorios Bell podían pertenecer a una radiación hipotética, la intensidad de cuyo espectro tuviera más o menos parecido con el de la curva que reproduce la figura 6.

En ella se ve que la radiación del *cuerpo negro* que podría haber emanado de la primitiva masa incandescente, estaría ahora concentrada entre las longitudes de onda de 7.500 cms. y 0,01 cm.

Ahora bien, la zona de las ondas largas del espectro indicado estaría enmascarada por la radiación galáctica observada por los radioastrónomos, mientras que el extremo de las ondas cortas quedaría disimulado por la radio-radiación térmica terrestre; de con-

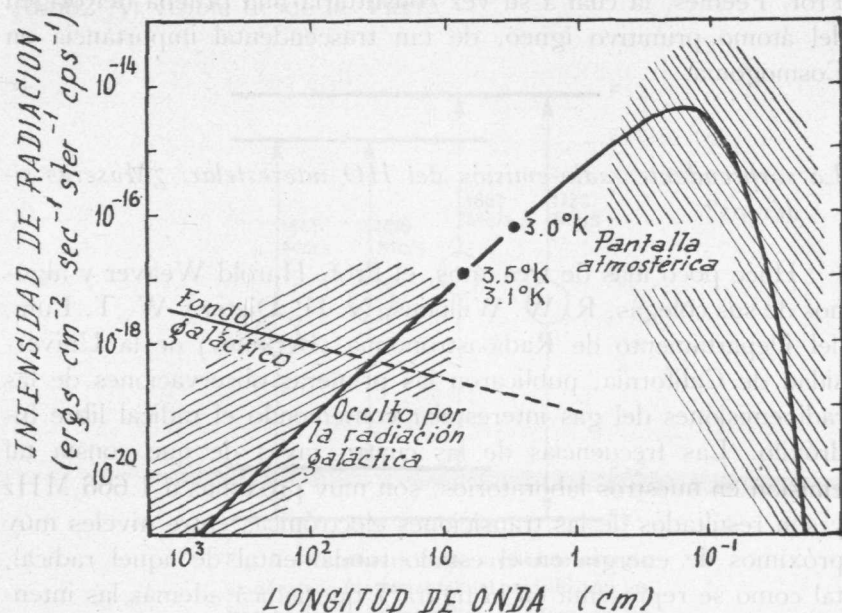


Fig. 6.—Posible forma de la curva de radiación en microondas procedente de la radiación del cuerpo negro remanente en el espacio.

siguiente, solamente la porción de la curva comprendida entre los 20 y 1 cms. de longitud de onda sería accesible a la observación.

Desde luego, los investigadores de los laboratorios Bell habían determinado un punto seguro ( $\lambda = 7,3$  cms.) (cuya longitud de onda coincidía precisamente con la que emitía el satélite *Telstar*). Por otra parte, recientes estudios del espectro de absorción del radical CN interestelar parecen demostrar que el Universo contiene la radiación del cuerpo negro a  $3^\circ$  K, residual de una primitiva e inmensa masa incandescente (*fireball*) (34).

(34) G. B. FIELD & J. L. HITCHCOCK: «Phys. Rev. Letters», 16, 817, 1966. P. THADDEUS & J. F. CLAUSER: «Phys. Rev. Letters», 16, 819, 1966. A. F. HOWELL & J. R. SKAKESHAF: «Nature», 210, 1318, 1966.

Las observaciones posteriores debían suministrar nuevos puntos sobre la misma curva, sin que hasta ahora hayamos podido encontrar subsiguiente información sobre el particular. En caso afirmativo, se tendrá una potente razón en favor de la teoría del Prof. Peebles, la cual a su vez constituiría una prueba del origen del átomo primitivo ígneo, de tan trascendental importancia en Cosmogonia.

*La sorprendente radio-emisión del HO interestelar. ¿Maseres sí-déreos?*

Hace poco más de tres años, el Prof. Harold Weaver y algunos de sus colegas, R. W. Williams, N. H. Dieter y W. T. Lum, del Departamento de Radioastronomía (Berkeley) de la Universidad de California, publicaron las primeras observaciones de las radioemisiones del gas interestelar conteniendo el radical libre hidróxilo. Las frecuencias de las cuatro rayas de que consta tal emisión en nuestros laboratorios, son muy próximas a 1.666 MHz y son resultados de las transiciones electrónicas entre niveles muy próximos de energía en el estado fundamental de aquel radical, tal como se representa en la figura 7 que indica además las intensidades relativas de las cuatro rayas en cuestión.

Hasta ahora sólo han sido observadas (tanto en emisión como absorción) en las regiones del HII que rodean las estrellas de elevadísima temperatura; dichas regiones están incluidas dentro de grandes nubes de hidrógeno neutro, siendo muy brusca la zona de transición entre el hidrógeno ionizado y el no ionizado. Tal zona se designa por *frente de ionización* que se comporta como un frente de choque, avanzando dentro del hidrógeno neutro impulsado por la energía de la radiación ultravioleta procedente de la estrella. En el grosor del frente de ionización, el hidrógeno neutro se ioniza, elevándose su temperatura desde los 50°-100° K hasta los 1.000° K en el seno de HII.

En esta región predomina la radiación de 1.000 Å, y las inferiores a 1.216 Å son fuertemente absorbidas por el hidrógeno neu-



tro frío, penetrando muy poco más allá del frente de ionización.

Los electrones se recombinan con los protones en la región HII y los átomos así formados y excitados emiten el espectro del hidrógeno atómico; especialmente deben radiar la raya roja  $H\alpha$  ( $6.562 \text{ \AA}$ ) visible desde la Tierra.

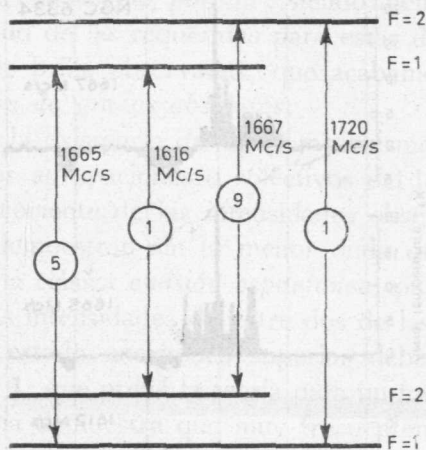


Fig. 7.—Estructura de los niveles de energía en el estado fundamental del oxidrilo, con las frecuencias e intensidades relativas de las rayas de su espectro.

Ahora bien, los espectros realmente observados en Berkeley difieren mucho del obtenido en el laboratorio, como puede verse en la figura 8, que reproduce el correspondiente a la Galaxia NGC 6.334; está constituido por estrechos salientes con separaciones correspondientes a una temperatura de movimiento desordenado de las moléculas de unos  $50^\circ \text{ K}$ .

Sin embargo, recientes medidas con el interferómetro han demostrado que las dimensiones de algunos manantiales son menores que un segundo de arco, lo que implica temperaturas *de brillo* del orden de *cientos millones* de grados absolutos. Además, la relación de las intensidades de las cuatro rayas no corresponden a los valores numéricos antes indicados en particular; para un determi-

nado manantial la raya de 1.667 Mc/s, que debería ser la más intensa en emisión, sólo es visible en absorción.

De ciertas observaciones muy cuidadosas, realizadas por el grupo de Berkeley, parece deducirse que los orígenes de la radio-emisión hidroxílica coinciden con las fronteras de ciertas regiones

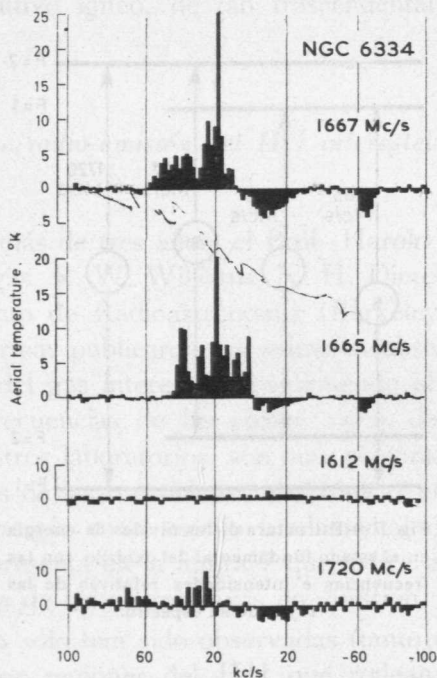


Fig. 8.—Aspecto de las rayas del hidróxilo correspondientes a la Galaxia NGC 6.334.

del HII y que tal radiación está polarizada, unas veces linealmente y otras casi totalmente circular, pudiendo variar su intensidad del simple al doble en el intervalo de unos pocos meses y acaso semanas (35).

Estos hechos son difíciles de conjugar con la idea de una emisión espontánea desde una nube del gas hidróxilo. En tal emisión su intensidad depende solamente del número total de moléculas

(35) WARREN: «Nature», 197, 636, 16 febrero 1963.

con alto nivel energético, y por lo tanto es posible evaluar cuál debe ser dicho número para producir las intensidades observadas.

Se tiene, desde luego, una idea aproximada del número de radicales hidróxilo existentes en un  $\text{cm}^3$  del espacio a partir de de las de la densidad del hidrógeno y del oxígeno, y de la absorción del radical en cuestión; las cifras correspondientes son del orden de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  moléculas por  $\text{cm}^3$ , siendo menores en varios órdenes de magnitud de las requeridas para estar de acuerdo con las temperaturas de brillo observadas, que acabamos de ver son del orden del *millón de grados absolutos*.

Podría aducirse la existencia de algún mecanismo especial productor de muy altas agrupaciones o colectivos del hidróxilo, pero las relaciones por cociente de las intensidades observadas de sus rayas espectrales demuestran sin la menor duda que no pueden ser originadas por la clásica *emisión espontánea*, pues si así fuera las relaciones de las intensidades de entre dos de las rayas procedentes del mismo estado energético superior deberían ser muy análogas a 1, 9, 5, 1, que prevé la teoría para un foco emisor delgado; la experiencia demuestra que muy frecuentemente son notablemente diferentes de aquellas relaciones numéricas.

La única explicación posible de ello, sugerida por el doctor A. H. Cook (36), del «National Physical Laboratory», es que la radiación del hidróxilo sea una *emisión estimulada* de naturaleza análoga a la de los maseres. ¿Existen estos mecanismos en el firmamento?

Sabido es que en la emisión estimulada (prevista ya por Einstein desde la primera década de este siglo) la intensidad de la radiación depende del número de átomos excitados y de la intensidad de la radiación que los estimula para emitir más radiación de la misma frecuencia. Para que la emisión estimulada sobrepase la absorción ordinaria, el número de moléculas poseyendo la elevada energía de un par de niveles debe exceder del de las que los tienen de inferior energía. Es bien sabido que en el equilibrio termodinámico ocurre lo contrario, pero con la emisión estimula-

---

(36) A. H. COOK: «New Scientist», 34, 26, 6 abril 1967. «Nature», 214, 689, 13 mayo 1967. «Nature», 213, 1109, 18 marzo 1967.

da la intensidad de la emisión puede superar la espontánea para *un mismo número* de átomos. Asimismo, también es posible que la relación de las intensidades entre diferentes rayas espectrales, difieran considerablemente de las correspondientes a las de la emisión espontánea, para lo cual tales relaciones dependen solamente de las probabilidades de la evolución molecular decreciente espontánea (*decay*).

Postulando la emisión estimulada para el caso del hidróxilo, se facilita conjuntamente la explicación de otras aparentes anomalías en las observaciones, aunque es necesario explicarse la causa del elevado número de moléculas con mayor energía.

Para ello, recordemos que como la intensidad de las rayas espectrales depende *exponencialmente* de la diferencia entre el número de hidróxilos con mayor energía y el de los con energía inferior, resulta que aun con diferencias pequeñas pueden conducir a grandes intensidades de radiación. Asimismo, también es posible explicar la casi completa polarización de esta última por un relativamente pequeño grado de alineamiento espacial de los grupos hidroxílicos.

También la interacción del número de éstos con la radiación podría explicar las variaciones de esta última con el tiempo, aunque su tratamiento matemático es muy difícil.

### *Radiogalaxias.*

Exceden del centenar los radiomanantiales que hasta ahora han sido identificados con galaxias visibles; estas *radiogalaxias* han sido clasificadas en dos grandes grupos, las *normales* y las *peculiares*, de acuerdo con sus características ópticas y radioeléctricas. Tal división en dos grupos no es tajante ni mucho menos, pues todavía no se conoce un criterio para poder especificar si una galaxia es normal o peculiar, y en lo que sigue trataremos de especificarlas o definir las mediante algunas de sus características observables.

Todas las brillantes galaxias casi espirales, como las tan familiares de Andrómeda y el Triángulo, son radiomanantiales poco



intensos ; parte de su radioemisión procede del disco visible de la galaxia y otra parte se origina en el extenso halo que a veces se extiende a un volumen diez o más veces mayor que el del disco visible de la galaxia. A juzgar por los resultados de observación de las galaxias más próximas, es razonable admitir que la gran mayoría de las galaxias espirales, y aun probablemente las irregulares, son radioemisores débiles. Estas constituyen las *radiogalaxias normales*.

La energía total emitida en la zona de radiofrecuencia del espectro, por una radiogalaxia normal, es del orden de  $10^{33}$  ergios/segundo, equivalentes a unos  $10^{28}$  kilovatios. Esta cifra es unas *mil veces* mayor que la potencia emitida por los más potentes radiomanantiales de nuestra Galaxia, aunque tan sólo representa la millonésima parte de la energía que las galaxias emiten en la parte visible del espectro.

Algunas galaxias de aspecto normal emiten bastante más que los  $10^{28}$  kilovatios de potencia radioeléctrica ; p. e., la galaxia espiral NGC1068 emite unas cien veces más que las normales, estando concentrada su radioemisión en una pequeña región central de la misma. De otra parte, el espectro óptico de esta misma radiogalaxia presenta amplias e intensas rayas de emisión, que sugieren una caótica actividad altamente energética en el núcleo de dicha galaxia. Sin embargo, existen otras galaxias espirales cuyo espectro óptico presenta características análogas a las de NGC 1068, pero no manifiestan intensa radioemisión ; esta última es una *radiogalaxia peculiar*, así denominada por emitir ondas radioeléctricas mucho más intensas que las normales.

Un sorprendente carácter distintivo de tan potente radiomanantial, pero no exclusivo sino común a otras galaxias (p. e., la elíptica M87, la del Cisne A, la NGC5128 y otras), consiste en la distribución espacial de su radioemisión. En efecto, la del Cisne A no se origina en su región visible, sino en dos simétricamente situadas a uno y otro lado del centro y a distancias de unos 100.000 años-luz ; la NGC5128 posee cuatro regiones de radioluminancia, de las cuales dos son muy parecidas a las del Cisne A y las otras dos más próximas al centro.

Sin poder entrar en más pormenores, se ha visto la insuficiencia de esta provisional clasificación, llegándose a la conclusión de que las radiogalaxias peculiares debía subdividirlas por lo menos en otros tres tipos, cuyos detalles no daremos; de todos modos la clasificación general de las radiogalaxias en cuatro grandes categorías no tiene nada de absoluto y, por lo tanto, no es seguro que todas las radiogalaxias descubiertas hasta ahora o por descubrir encajen perfectamente en una de aquellas cuatro categorías, cuyo verdadero significado físico está todavía por aclarar. Con todo, su utilidad es innegable desde el punto de vista ordenador de aquellas entidades basado principalmente en sus características macroscópicas.

La energía emitida por la mayoría de radiomanantiales galácticos y extragalácticos aumenta en intensidad al aumentar la longitud de onda; ello es claro indicio de que obedece a una distribución no térmica de energía, ya que no corresponde a la debida a una masa de gases a alta temperatura, tal como una estrella. En efecto, en el seno de un gas muy caliente, las interacciones entre electrones libres y protones son consecuencia de su agitación caótica térmica y ello origina radiaciones comprendidas en las regiones óptica y radioeléctrica del espacio electromagnético. La intensidad de esta emisión térmica permanece sensiblemente constante dentro de amplios límites de longitud de onda, pero rebasado un cierto valor la mencionada intensidad decrece al aumentar la longitud de onda. Únicamente los radiomanantiales asociados con las nebulosas emisoras de nuestra propia Galaxia, manifiestan este típico espectro de emisión térmica.

Todos los restantes radiomanantiales discretos poseen una distribución espectral no térmica; el mecanismo productor de esta distribución espectral constituyó durante bastantes años uno de los mayores enigmas de la naciente Radioastronomía.

El primer plausible mecanismo para explicarlo fue propuesto por el renombrado astrofísico soviético I. S. Shklovsky, quien admitió que la radioemisión y una buena parte de la óptica de la nebulosa del Cangrejo (descendiente de una supernova y potente radiomanantial de nuestra Galaxia) era originada por la interac-

ción de energéticos electrones con el campo magnético asociado con aquella nebulosa.

Ya hemos adelantado en la primera parte de esta conferencia que los electrones relativistas (es decir, animados de velocidades próximas a la de la luz), al describir trayectorias en espiral alrededor de las líneas de fuerza de un campo magnético, emite una intensa radiación dentro de una estrecha banda de longitudes de onda, denominada radiación sincrotrónica por su analogía con la emitida por el acelerador de partículas de este mismo nombre. En el seno de los débiles campos magnéticos existentes en el espacio interestelar, los electrones que poseen energías entre un billón y 10 billones de eV, radian energía radioeléctrica y los todavía más energéticos emiten ondas luminosas. Por otra parte, como la distribución de energía de los rayos cósmicos es muy parecida a la distribución espectral en radiofrecuencia de la nebulosa del Cangrejo, Shklovsky llegó a la conclusión de que electrones relativistas con idéntica distribución energética que la de los rayos cósmicos, eran los responsables no sólo de las radioemisiones, sino también de las ópticas emitidas por tal nebulosa. Predijo asimismo que su emisión óptica debía presentar un alto grado de polarización, ya que, como dijimos, ésta es otra de las características de la radiación sincrotrónica.

Esta atrevida predicción fue maravillosamente confirmada por los astrónomos soviéticos Dombrovsky y Vachakidze, y los holandeses Oort y Walraven. Tales descubrimientos hicieron plausible admitir que el mecanismo sincrotrónico sea también el que explique la emisión de las radiogalaxias; sin embargo, hasta ahora sólo se cuenta con la importante observación de Baade sobre la polarización de la luz emitida por la nebulosa en chorro M87.

### *La radioemisión de los «Cuasares».*

Estos todavía enigmáticos cuerpos celestes, descubiertos hace poco más de un lustro, se caracterizan, como es sabido, por su pequeño diámetro angular, su potente emisión radioeléctrica y el acentuado corrimiento hacia el rojo de las rayas de su espectro

visible. El más poderoso argumento sobre su significado cosmológico reside en el parentesco de los cuasares con las radiogalaxias, cuyo carácter extragaláctico nadie discute. En efecto, tanto por la distribución de la intensidad luminosa como por la radioestructura de estos manantiales, los cuasares son muy análogos a las potentes radiogalaxias. Especialmente las más recientes investigaciones mediante sistemas de antenas con gran poder de resolución (37), han demostrado la existencia entre los cuasares de numerosos radiomanantiales dobles, cuya distancia entre sus componentes (dada su significación cosmológica) viene a ser del mismo orden de magnitud que el de numerosas radiogalaxias. Sin embargo, en el reciente Simposio sobre «Astrofísica relativista», celebrado en Nueva York del 23 al 27 de enero p. p., no se llegó a tomar ninguna decisión sobre el camino a seguir para aclarar la complicada situación actual de estas cuestiones; tan oscura y contradictoria es la fenomenología correspondiente, que hizo exclamar al gran especialista Sandage: «There is no crucial experiment, or if there is, people dont agree» (38).

De los pocos resultados conseguidos inteligibles, citaremos la *variabilidad* observada de los manantiales en cuestión, tanto en el dominio óptico como radioeléctrico. Como caso extremo debe señalarse la variabilidad óptica del manantial 3C446, cuya luminancia azul se ha decuplicado desde 1964, y desde julio hasta octubre de 1966 venía fluctuando según un factor del orden de cinco!! Con ello se ha comprobado que la intensidad de las rayas de emisión no variaba sensiblemente; la erupción luminosa sólo se notaba dentro del continuo, en los máximos en que tales rayas casi desaparecían. Asimismo es digna de mención la *radiovariabilidad*, que se manifestaba más notablemente en la banda de las ondas milimétricas, en la que las bruscas sacudidas avanzan hacia las mayores longitudes de onda, pues todavía son susceptibles de ser registradas con sensible corrimiento de fase en la zona de las

---

(37) M. RYLE, B. ELSMORE & A. C. NEVILLE: «Nature», 207, 1024, 1965.

(38) V. WEIDEMANN: *Die Naturwissenschaften*, 54, 233, Heft 10 (Zweites Maiheft), 1967.



ondas centimétricas. En cambio, no se han descubierto ninguna correlación ostensible con las fluctuaciones de luz.

Moffet señaló el caso extremo hasta ahora de la duplicación de la intensidad radioeléctrica del manantial CT26 en la onda de 21 cms. durante el intervalo de cuatro meses, e hizo hincapié en la posible amplia aplicación a este hecho de la teoría de la radiación sincrotrónica. Las altas densidades de radiación sugieren la posibilidad de procesos *coherentes*, sobre los que debemos profundizar: *before any finer conclusions either religious or otherwise may be drawn* (haciéndose eco del comentario de uno de los congresistas quien dio a entender que la admisión de una cualquiera de las diversas hipótesis sobre los cuasares sea una *question of faith either religious or otherwise*).

### *Las emisiones radioeléctricas del Sol, la Luna y los planetas.*

El astro-rey constituye el foco radioeléctrico más intenso del firmamento, suministrando el Sol en calma, intenso ruido, aun recibéndolo a través de la región de los lóbulos secundarios de la antena (39).

---

(39) Parece ser que fue el renombrado radio-precursor Sir O'iver Lodge quien por primera vez intentó la recepción de las ondas radioeléctricas emitidas por el Sol. De una conferencia que dio en la «Royal Institution» el día 1 de junio de 1894 (sólo seis años después del descubrimiento por Hertz de las ondas hertzianas) traducimos los párrafos siguientes: «Espero ensayar la captación de la radiación solar de gran longitud de onda, filtrando las ondas ordinarias emitidas por el Sol, mediante una pantalla u otras sustancias suficientemente opacas.» Parece que así lo intentó entre 1897 y 1900, pues en la tercera edición de su conferencia insertó la siguiente nota: «No tuve éxito en mis tentativas empleando un cohesor muy sensible con el resto de la instalación, que no podía mantenerse estacionaria mucho tiempo, pues estaba dentro de un cobertizo apenas protegido por las gruesas paredes de un gran edificio. El *spot* luminoso de la escala del galvanómetro experimentaba frecuentes sacudidas, a veces muy fuertes, pero no me fue posible relacionarlas con ninguna influencia solar. Desde luego, en una ciudad como Liverpool existen demasiadas causas perturbadoras para que el experimento fuera concluyente; no sé si hubiera tenido éxito en algún otro sitio más tranquilo y siempre contando con un montaje de altísima sensibilidad.» Cuarenta años más tarde, en 1942, Southwort, en New Jersey, detectó y midió por primera vez las ondas solares presentidas por Lodge. O. J. LODGE. *The Electrician*. London. 1897.

En su emisión se distinguen dos componentes principales: una casi estable, que es la emisión *térmica* de la atmósfera solar, y la otra de sacudidas o erupciones (*flares*) cromosféricas, que sólo se observan después de las grandes exaltaciones de la actividad solar (40). La primera es la radiación por transiciones hiperbólicas (*free-free*) de los electrones de la cromósfera y de la corona solar, siendo el origen de la emisión tanto más elevada en el seno del astro cuanto más baja es su frecuencia.

Ello es debido a que el gas o *plasma* solar constituye un filtro *pasa-alto* para las ondas allí engendradas, siendo la frecuencia de corte dependiente de la densidad electrónica; hemos visto que la frecuencia propia del plasma vale

$$\nu = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} = 9 \sqrt{N_e} \quad (\text{M. K. S.})$$

pudiendo utilizarse para la medida del diagrama polar vertical de antena (41).

Puesto que la densidad electrónica  $N_e$  disminuye con el alejamiento del Sol, lo mismo ocurrirá con  $\nu$ , o sea, que las frecuencias bajas son emitidas a mayores distancias que las altas frecuencias. En ondas métrica el diámetro aparente del Sol resulta, pues, mayor que su diámetro visible (unos 30') y la temperatura observada es la de la corona solar, del orden del millón de grados. En cambio, la emisión de las ondas centimétricas y milimétricas debe surgir de las capas bajas (fotosfera y cromosfera), cuyas temperaturas son mucho más bajas, de 5.000° a 25.000°; el radio-Sol es prácticamente igual al disco visible.

Las erupciones solares son extraordinariamente intensas en ondas métricas, en las cuales pueden alcanzar más de 1.000 veces el flujo total del Sol en calma, pero su importancia disminuye con la longitud de onda. En microondas, alcanzan a veces el nivel del Sol en calma, pero en general son mucho menos intensas.

(40) M. J. B. SCANLAN: *Electronic Engin*, 39, 334, 367, mayo y junio 1967.

(41) J. BALTÁ ELÍAS: «Revista de la Real Academia de Ciencias de Madrid», 46, 195, 1953.

La duración de tales erupciones es a lo más de algunas horas, por lo que resultan poco perturbadoras de las radiocomunicaciones normales, aunque son inutilizables para calibrar antenas.

La Luna también es un manantial intenso de microondas, emitiendo la radiación térmica del cuerpo negro, de modo que la medida del flujo recibido en la Tierra permite determinar la temperatura de la superficie de nuestro satélite (42).

Por efecto de las diferencias de iluminación de su superficie por el Sol, la Luna no ofrece un disco con radioluminancia uniforme. Atendiendo a la temperatura media del disco, se pone de manifiesto que la que realmente interviene cuando se utiliza una antena cuyo lóbulo principal es mayor que los 30' del diámetro lunar no es constante, sino que varía con la lunación y de manera diferente según la frecuencia. En primera aproximación, se puede representar dicha temperatura por la expresión

$$T = T_0 + T_1 \cos \left( \frac{\omega}{2\pi} t - \zeta \right)$$

siendo  $T_0$  una constante igual a  $220 \pm 10^\circ$  K para todas las frecuencias y  $T_1$  la amplitud de la modulación durante el transcurso de la lunación, aumentando con la frecuencia desde cero para  $\nu = 3$  GHz hasta  $100^\circ$  K para  $\nu = 100$  GHz. Además con muy altas frecuencias la modulación deja de ser sinusoidal, obediendo a una ley más complicada.

Los planetas de nuestro sistema solar son radiomanantiales bastante intensos, sobre todo de ondas muy cortas que pueden ser utilizadas para el calibrado de sistemas muy sensibles; además tienen la ventaja de ser manantiales pequeños, cuyas dimensiones son conocidas con precisión. Su emisión principal es también la del cuerpo negro, cuyo espectro viene dado por la ley de Planck y aun con aproximación suficiente en radio por la ley de Rayleigh  $B = \frac{2kT}{\lambda^2}$ , siendo B el brillo espectral energético del manantial. La densidad de flujo recibido en la Tierra varía como la superficie aparente del manantial, es decir, como el cuadrado

---

(42) J. BALTÁ ELÍAS: «Las Ciencias», 28, núm. 2, 1963.

de su distancia. Así pues, la intensidad de radiación de los planetas ha de ser muy variable durante el año, dependiendo de su posición respecto la Tierra; serán por lo tanto más fácilmente detectables los planetas exteriores cuando estén en oposición y en conjunción inferior para Venus y Mercurio.

Venus y Júpiter son los dos planetas de más fácil observación radioeléctrica en frecuencias superiores a 10 GHz, su temperatura es prácticamente igual a la que puede determinarse por infrarrojo; pero en frecuencias inferiores a 10 GHz aparecen emisiones de características especiales. Así para Venus la temperatura de brillo, que normalmente es de 225° K, se eleva hasta 550°, valor que se conserva hasta las más bajas frecuencias con que dicho astro ha sido observado.

Las enigmáticas emisiones suplementarias de Júpiter son de origen más complejo, y cuya explicación todavía presenta dificultades; se trata de emisiones no térmicas, sino de tipo ciclotrón o sincrotrón, probablemente originadas en las envolturas de partículas de alta energía, aprisionadas por el campo magnético de este planeta, análogas a las de van Allen que rodean la Tierra, pero parece ser de mayor intensidad (43).

De aquí resulta que el origen de las emisiones de Júpiter no ha de ser la superficie del planeta sino su atmósfera, y por lo tanto sus dimensiones son mucho mayores que su diámetro visible (de dos a tres veces). Además, estas radiaciones están polarizadas linealmente, según un eje paralelo al ecuador joviano.

Desde luego, la emisión no térmica se observa hasta las muy bajas frecuencias, superponiéndosele además otro tipo de emisión todavía más intenso, con frecuencias inferiores a los 30 MHz; en estas condiciones, Júpiter actúa como un radiomanantial incluso más intenso que el Sol.

Finalmente, el descubrimiento realizado en 1954 de que el satélite joviano Io ejercía una gran influencia en las erupciones de Júpiter en ondas decamétricas, ha sido plenamente confirmado por numerosos investigadores; parece pues razonable averiguar la existencia de otras posibles periodicidades en las menta-

---

(43) K. I. KELLERMAN: «Icarus», 5, 478, septiembre 1966.



das emisiones y que probablemente podrían ayudar al esclarecimiento del origen de las mismas.

Actualmente parece (44) que por lo menos sus radioemisiones están comprendidas dentro de tres grandes intervalos de longitudes de onda, a saber: 1.º, ondas menores de 5 cms. de longitud de origen térmico, correspondientes a una temperatura de 130° C. del cuerpo negro; 2.º, ondas de longitud algo mayor, decimétricas de origen *no térmico*, y 3.º, la porción del espectro correspondiente a las ondas *decamétricas* comprende las potentes ráfagas de radio-ruídos, también de origen no térmico, y aunque más inciertamente se atribuyen a la intensa proyección de las partículas aprisionadas en los más o menos hipotéticos cinturones jovianos de van Allen (45) ya mencionados.

Sin embargo, en los dos últimos años se ha comprobado que la intensidad de tales ráfagas está estrechamente relacionada con el movimiento periódico alrededor de Júpiter de su satélite Io, el más interno de los cinco que le rodean. ¿Por qué este satélite, que dista del centro de Júpiter lo mismo que la Luna de nosotros, ejerce esta continua influencia sobre la alta atmósfera del planeta? ¿Cuál puede ser el mecanismo productor de la radiación que nos ocupa?

Hace apenas medio año fueron enunciadas casi simultáneamente dos teorías: una por los profesores norteamericanos Marshall y Libby (46), por la que sugieren que la corriente de partículas solares (*viento solar*) debe provocar la formación de un largo rastro detrás de Io, lo mismo que la propia corriente origina otro de unos 300.000 kms. detrás de la Luna: esta teoría explica asimismo por qué la radiación joviana no está precisamente centrada con la posición de Io, sino corrida con respecto a ella a unos 15°, es decir, como si el rastro del satélite se comportara a modo de una gigantesca cola apuntando a Júpiter.

---

(44) E. K. BIGG: *Planetary and Space Science*, 14, 741, 1966.

(45) J. BALTÁ ELÍAS: *Las enigmáticas emisiones radioeléctricas del planeta Júpiter*. «Urania», núm. 258, 1964.

(46) L. MARSHALL and W. F. LIBBY: *Simulation of Jupiter's Radio Emission by Io*. «Nature», 214, 126, 8 abril 1967.

La otra teoría, debida al Dr. Gledhill (47), señala que la relativamente rápida rotación de Júpiter (36 horas) y la existencia de su campo magnético, deben empujar el plasma atrapado centrífugamente, de modo que la cintura de radiación debe estar configurada más como discoidal que toroidal y suficientemente extendida para que Io la atraviese dos veces en cada revolución: este punto de vista también explica el corrimiento de las ondas radioeléctricas respecto la posición de Io en su órbita, acaso más directamente que la teoría de Marshall y Libby. De todos modos, la inseguridad con que conocemos tanto el campo magnético de Júpiter como la densidad de partículas en su cintura de radiación, impide poder discriminar de momento cuál de las dos teorías es la más conforme con la realidad.

#### *Sondeo de la ionosfera desde sus confines superiores.*

Creemos innecesario exponer ante este culto auditorio los fundamentos de los métodos empleados desde hace unos cuarenta años para la exploración de la ionosfera; sabido es que la técnica más corriente para ello, consiste en la reflexión vertical en los estratos constituyentes de la misma de trenes de impulsos radioeléctricos emitidos por las estaciones radioemisoras llamadas ionosondas; de ello se deduce la densidad electrónica de dichos estratos y su variación con la altura. Si la frecuencia de las ondas en cuestión es suficientemente grande penetra hasta grandes altitudes, perdiéndose entonces en el espacio sin reflejarse y, por tanto, no producen *eco*.

Por esta razón la frontera superior de la ionosfera había permanecido inexplorada hasta el advenimiento de los satélites artificiales, que convenientemente equipados han sido utilizados en estos últimos años para completar las observaciones de la densidad electrónica de la ionosfera por encima de sus confines superiores (*topside sounding*) (48).

---

(47) J. A. GLEDHILL: *Magnetosphere of Jupiter*. «Nature», 214, 155, 8 abril 1967.

(48) W. CALVERT: «Science», 154, 228, 11 octubre 1966.

La técnica empleada es esencialmente la misma que la de las ionosondas terrestres, aunque adaptadas para su instalación en el satélite cuya trayectoria envuelve a la ionosfera emitiéndole los impulsos y recibiendo los ecos reflejados por aquélla; éstos a su vez son retransmitidos por el propio satélite a los receptores terrestres mediante canales de muy alta frecuencia, con lo que así pueden trazarse los perfiles verticales de la densidad electrónica por debajo del satélite hasta los límites superiores de la ionosfera.

La doble observación combinada por este medio y desde la superficie terrestre ha permitido poner de manifiesto fenómenos mucho más sutiles que la simple reflexión ionosférica. Por ejemplo, se han podido estudiar las irregularidades de la densidad electrónica a lo largo de trayectos de metros o kilómetros, que dispersa la energía radioeléctrica hacia atrás del sondeador, oblicuamente respecto la vertical. Otro ejemplo de versatilidad, típico de los sondeadores satelitarios, es el descubrimiento de resonancias del plasma ionosférico, realizado por el satélite canadiense «Alouette I» (lanzado por la NASA en septiembre de 1962), en cuya tarea se ha complementado posteriormente con el «Alouette II» (lanzado en noviembre de 1965) y el «Explorer» (lanzado en agosto de 1964).

Sin poder entrar en más pormenores (p. e., progresos en la teoría de la capa F) (49), no dejaremos de mencionar las observaciones realizadas por el «Alouette I» de los atmosféricos en muy baja frecuencia que han revelado algunos interesantes aspectos de los mismos, p. e. la banda de emisión (o bandas) con una bien definida baja frecuencia, la cual aumenta al disminuir la latitud magnética que recorre el satélite. En ciertas ocasiones, tales bandas de emisiones son *disparadas*, exaltadas o incrementadas por sacudidas cortas o largas de atmosféricos de baja frecuencia, propagándose detrás del satélite, es decir, con la región generatriz de aquéllos en las proximidades de este último. Las más regulares bandas en cuestión se presentan generalmente en estre-

---

(49) J. S. BELROSE and R. E. BARRINGTON: «JOUR. Res. N. B. S.», Sec. D, 69 D, 69, enero 1965.

chas zonas entre los  $50^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  de latitud magnética, pero hasta ahora todavía no se ha dado una explicación satisfactoria de las mentadas bandas de emisión de ruido (50).

#### PROBLEMAS PLANTEADOS POR EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ANTENAS ORIENTABLES DE GRAN TAMAÑO

Probablemente el elemento más importante para la exploración del espacio por vía radioeléctrica lo constituye la gran antena orientable, uno de cuyos ejemplos es el bien conocido reflector de Jodrell Bank, de 75 m. de diámetro, en las cercanías de Manchester (fig. 9).



Fig. 9.—Gran antena orientable de 75 m. de diámetro en Jodrell-Bank (Manchester).

Existen en funcionamiento diferentes tipos de antenas de reflector, y otras en proyecto con sus correspondientes panegiristas; cualquiera que sea su tipo, su coste es siempre elevadísimo,

(50) H. RISHBATH: P. I. E. E. E., 55, 16, enero 1967.



siendo necesario un cuidadoso y profundo estudio de los factores económicos y científicos que intervienen en su construcción antes de decidir el tipo de antena que se adopte para el fin (o fines) a que aquélla se destine.

El reflector o colector de ondas paraboloidal orientable es indudablemente la antena más empleada actualmente, aunque tam-

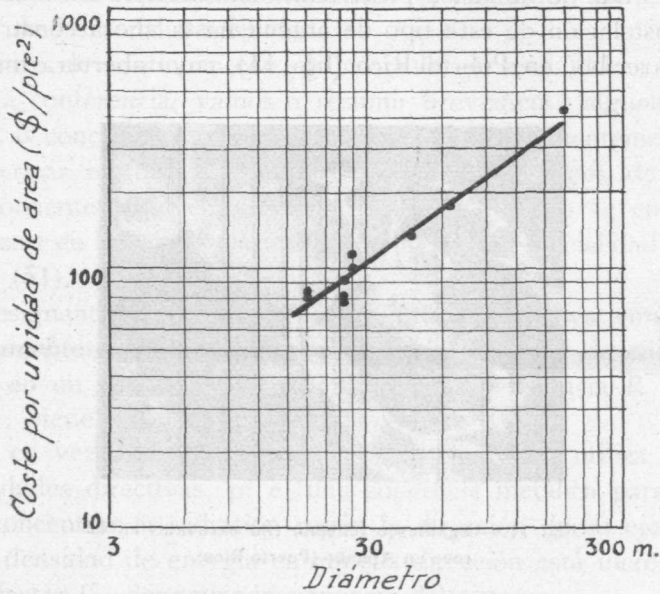


Fig. 10.—Gráfica para la evaluación aproximada del coste de un reflector paraboloidal en función de su diámetro.

bién implica una técnica muy costosa cuando son necesarias grandes aberturas del mentado espejo; éste o la bocina, de grandes dimensiones, que colecta la energía de las ondas radioeléctricas, han de ser evidentemente móviles para orientar el haz de las mismas mediante un gigantesco soporte giratorio, según las dos coordenadas espaciales (galácticas, azimut y altura, etc.).

La gráfica reproducida en la figura 10, diseñada por P. Blacksmith y A. C. Schell, de los laboratorios de investigación de la «Air Force», en Cambridge, Bedford (Mass), pone de manifies-

to lo caras que resultan las antenas de aquel tipo y el rápido incremento de su coste, proporcional al cubo de su diámetro, mientras que su ganancia sólo aumenta según  $D^2$  siempre que no tengan que resistir vientos de intensidad extremada. Los mismos investigadores han examinado el coste y características de funcionamiento de grandiosos reflectores esféricos fijos, excavados en el suelo, combinados con una bocina móvil para la captación orientable del haz de radiación procedente del exterior. La más gigantesca instalación de este tipo de antena hasta ahora construida es la de Arecibo, en Puerto Rico (fig. 11), cuya abertura mide 300

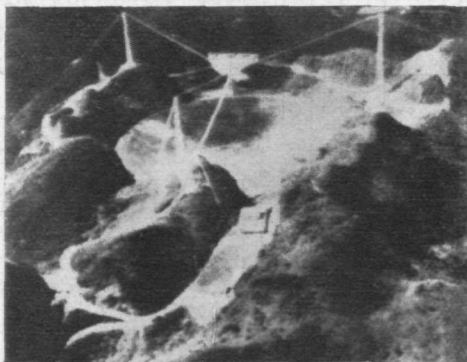


Fig. 11.— Gigantesco reflector tijo excavado en la roca en Arecibo (Puerto Rico).

metros de diámetro, equivalente a 430 longitudes de onda en la frecuencia de 430 Mc/s ; el haz de radiación puede moverse dentro de un cono ideal de  $20^\circ$  de semiángulo sólido y el coste total ha sido de 7,5 millones de dólares !!

Téngase presente que en el programa presentado por la Comisión de Ciencia Espacial norteamericana se propone el proyecto de un fabuloso radiotelescopio de 20 kms. de abertura, cuya construcción parece debía comenzar el año pasado y está previsto entre en funcionamiento dentro de una decena de años.

Sin embargo, a pesar de lo ya expuesto, el tamaño de una antena no es todo, pues igual importancia tiene la precisión con que esté construida su superficie ; las irregularidades en la misma

establecen un límite de la *ganancia* obtenible en las más altas frecuencias de funcionamiento. En efecto, toda componente de la señal incidente, reflejada en un punto de la superficie, en la que, p. e., exista una ligera depresión, habrá recorrido al penetrar en la bocina un trayecto ligeramente mayor que el de las restantes componentes al incidir sobre los demás puntos superficiales correctos; ello se traduce en un desfase entre estas últimas y la componente no reflejada sincrónicamente y, por tanto, en una debilitación de las señales recibidas.

Antes de continuar con el desarrollo de esta última parte de nuestra conferencia, vamos a resumir brevemente algunas definiciones o conceptos fundamentales empleados corrientemente para caracterizar el funcionamiento de los diversos tipos de antenas hoy corrientemente empleadas y que desde luego se encuentran expuestas en las obras clásicas referentes a la especialidad que nos ocupa (51).

Designando por  $W$  la energía electromagnética emitida isotrópicamente por un sistema radiante, la densidad de energía recibida en un punto del espacio situado a la distancia  $R$  del foco emisor, viene dada por el cociente  $W/4\pi R^2$ .

Si en vez de un sistema radiante isótropo se utiliza uno con propiedades directivas, p. e. una superficie metálica paraboloidal para concentrar la radiación según la dirección de su eje, entonces la densidad de energía en aquella dirección está incrementada en el factor  $G$ , denominado *ganancia* del sistema.

Se demuestra que esta ganancia está relacionada con la abertura eficaz  $A_e$  del sistema en cuestión y con la longitud de onda radiada  $\lambda$  por la expresión

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

La abertura eficaz  $A_e$  del reflector es menor que la realmente medida  $A$  y el cociente entre ambas define la *eficacia* o *rendimiento* de la abertura  $\eta = A/A_e$ .

(51) S. SILVER: *Microwave Antenna Theory and Design*. M. I. T. Radiation Lab. Series, núm. 12, Mc Graw. N. Y., 1949.

En la práctica este cociente es siempre menor que la unidad a causa de:

a) Las pérdidas de energía por *desbordamiento* de la misma en los bordes (contorno de la superficie reflectora y otros motivos de menor importancia).

b) *Radio-iluminación* no uniforme de la superficie indicada.

c) Apantallado de la misma por las conducciones de energía de alta frecuencia, soportes, etc.

d) Imperfecciones o irregularidades de la superficie reflectora.

Si un generador de radioenergía  $W$  está situado a la distancia  $R$  de tal superficie, la energía absorbida en su foco por un receptor de impedancia *adaptada* vale

$$W_r = \frac{W}{4\pi R^2} \cdot A_e = \frac{WG}{4\pi R^2} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Los numerosísimos problemas mecánicos, radioeléctricos, etcétera, que plantean el proyecto y construcción de antenas orientables de grandes dimensiones son tan complejos y de tal envergadura que, ya en septiembre de 1963, bajo los auspicios de la Academia de Ciencias de Nueva York, se celebró una Conferencia Internacional sobre los aspectos climatológicos y aerodinámicos de aquellos problemas (52).

Más recientemente, hace poco más de un año (a primeros de junio de 1966), tuvo lugar otra gran Conferencia Internacional en los locales de la «Institution of Electrical Engineers» de Londres, presentándose asimismo un gran número de comunicaciones, que ocupan un grueso tomo de 375 páginas (53). En la imposibilidad de dar a conocer aquí tan interesantes aportaciones, nos ceñiremos en lo que sigue a dar un sucinto extracto de los principales

(52) *Large Steerable Radio Antennas — Climatological and Aerodynamic Considerations*. «Annals of the New York Academy of Sciences», vol. 116, págs. 1-355. New York, junio 1964.

(53) *Design and Construction of Large Steerable Aerials (for Satellite Communications, Radio Astronomy and Radar)*. «I. E. E. Conference Publication», núm. 21. London, 1966.



resultados y conclusiones de las mismas, y más especialmente en lo referente a reflectores paraboloidales, con o sin espejos secundarios.

La ganancia de cualquier reflector aumenta con la frecuencia de la radiación utilizada, puesto que el diámetro efectivo de aquél en función de la longitud de onda, aumenta asimismo. Se demuestra que el incremento de ganancia es proporcional al cuadrado de la frecuencia, hasta tanto que los efectos de las imperfecciones de la superficie adquieren importancia, produciéndose entonces una rápida reducción de la ganancia con la frecuencia; la máxima ganancia resulta ser proporcional al cuadrado de la precisión en la manufactura.

Es precisamente aquí que el pequeño reflector de precisión gana en calidad al de mayores dimensiones, pues este último necesariamente debe presentar mayores irregularidades. J. Ruze, del M. I. T., presentó las gráficas (54) referentes a la ganancia de algunos de los reflectores de mayor tamaño existentes actualmente. Por ellas se ve claramente que los menores y de mayor precisión son más eficaces en ondas muy cortas, o sea, en las más altas frecuencias.

Se están haciendo grandes esfuerzos para mejorar la precisión superficial de los grandes reflectores, y en uno de los que ello se ha logrado con más éxito es el de Haystack, del M. I. T. Las presiones ejercidas por los vientos sobre aquellos artefactos constituyen uno de los más graves problemas con que se enfrenta el proyectista de los mismos, y, de otra parte, hasta muy recientemente se admitía que los paraboloides en cuestión eran excesivamente grandes para protegerles con radomo. De aquí que fueran contruidos para poder resistir las destructivas cargas impuestas por los vientos huracanados, depósitos de hielo, escarcha, con lo que naturalmente ello constituía un severo límite de su precisión superficial.

El diseño de antenas *de abertura* (o especulares), de acuerdo con las técnicas usuales, constituye en último término la adopción de un ecuánime equilibrio entre las dos condiciones antagónicas

(54) J. RUZE: *Antenna tolerance theory*. «A review», pág. 75 del tomo anterior.

que imponen, por una parte, la uniformidad de *radio-iluminación* de la superficie de aquéllas, y por otra la energía radiante perdida por *rebosamiento* en su contorno (*spill-over*). Tal equilibrio o compromiso es consecuencia de que el diagrama de radiación de cualquier tipo alimentador de la antena varía con el ángulo, de acuerdo con la teoría de la difracción. Si se quiere mejorar notablemente el rendimiento de una antena por encima del 55 por 100 (máximo alcanzable con las técnicas corrientes) es preciso recurrir a otras soluciones, prescindiendo del ya mentado equilibrio-compromiso.

En este sentido se ha desarrollado recientemente un nuevo enfoque del problema intercalando entre el alimentador primario de la antena y el reflector (o subreflector) determinadas estructuras dieléctricas *guiadoras* (*Dielguides* en inglés) (55). En estas guías *dieléctricas* de ondas se usufructúa el fenómeno de la *reflexión total interna* (56), que constituye una propiedad de la superficie limítrofe entre dos medios dieléctricos, para reducir las pérdidas de radiación por rebosamiento y así conseguir una más uniforme iluminación del reflector. Esta técnica es aplicable a los sistemas con reflector simple o múltiple y es compatible con cualquier método para generación de señales con seguimiento automático de error (*auto-track error signal*).

En lo que antecede, hemos considerado muy superficialmente los motivos que hacen recurrir a las altas ganancias, minimizar los lóbulos laterales de los diagramas de radiación, etc.; sin pretensiones de agotar estos temas ni otros afines concernientes al detallado proyecto electrónico de una antena de grandes dimensiones, ahora tan sólo haremos hincapié en las condiciones climatológicas bajo las cuales debe aquélla funcionar.

En este aspecto, el radioastrónomo está más bien inclinado a sacrificar alguna fracción de su tiempo de trabajo a fin de reducir el coste de la instalación; así, p. e., si sus observaciones pueden

---

(55) H. E. BARTLETT and R. E. MOSELEY: *Dielguides*. «Microwave Journal», 9, 53, diciembre 1966.

(56) R. RAMO and J. R. WHINNERY: *Fields and Waves in Modern Radio*, pág. 302 (Wiley, 1953).

ser realizadas satisfactoriamente con vientos de 20 a 25 m/s, ello representa un alto porcentaje de uso en las dos zonas templadas.

Por su parte, los radares militares estratégicos imponen también un porcentaje elevado de horas de funcionamiento en zonas de interés estratégico preferente.

Los modernos enlaces, intercomunicaciones de continente a continente mediante satélites artificiales, etc., y el funcionamiento de las estaciones terrestres exige el máximo aprovechamiento del tiempo, y si ello no es posible el sistema de explotación resulta antieconómico, comparado con el de los cables submarinos u otros sistemas existentes.

Para fines comerciales es absolutamente necesario reducir al mínimo las interrupciones del servicio, siendo el desideratum emplear sistemas cuya eficiencia o rendimiento de tiempo sea del orden del 99,9 por 100.

### *Estudio monográfico del reflector paraboloidal y sus congéneres.*

Se acostumbra a considerar a esta antena de abertura como el prototipo de la gran diversidad de las mismas, y por eso vamos a detenernos en su estudio; provisto o no de reflectores secundarios, las características del reflector paraboloidal vienen a constituir como el patrón de toda antena de alta ganancia. Alimentándola con un único manantial de microondas situado en el foco del paraboloides, suministra un haz colimado de radiación con una ganancia proporcional al área de su abertura, y por simple cambio de aquella alimentación primaria se puede garantizar su impecable funcionamiento entre amplios límites de frecuencia.

De este montaje más sencillo deriva el de Cassegrain, que a su vez origina el reflector de bocina y el Cassegrain abierto.

### *Paraboloides con alimentación frontal.*

La ganancia de un paraboloides y su rendimiento o eficacia de abertura quedan determinadas en el caso ideal por el diagrama polar de la alimentación primaria y por la relación  $f/D$  entre la

distancia focal  $f$  y el diámetro  $D$  del reflector (fig. 12). Considerándolo primero como transmisor se consigue la máxima ganancia con la *iluminación* uniforme de la abertura, pero en la práctica se produce una concentración cónica de energía desde los bordes hacia el centro del paraboloide. Ello se traduce en una disminución de la ganancia, pues el contorno de aquél contribuye menos

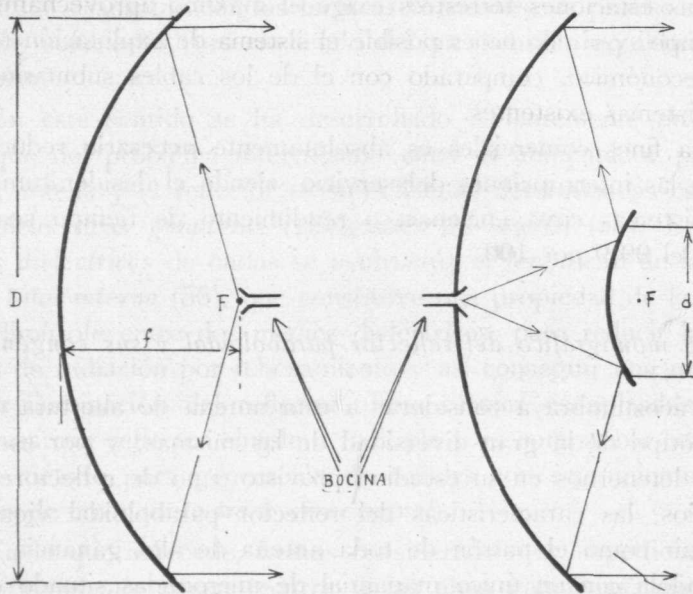


Fig. 12.—Esquema del paraboloide ordinario y del Cassegrain con alimentación frontal por bocina.

eficazmente que su porción central a la reflexión de energía y también porque una fracción de ella no es interceptada por el reflector, sino radiada hacia afuera formando grandes ángulos con el haz principal.

Alimentando el reflector mediante una bocina, cuyo diagrama polar de tensión sea, según  $\cos \theta$ , los óptimos valores de  $f$  y  $D$ , se consiguen cuando su relación  $f/D$  oscila entre 0,33 y 0,45, que es asimismo cuando la energía a lo largo de la abertura disminuye en unos 10 decibelios en sus bordes; entonces el rendimiento



de aquélla es de un 80 a 83 por 100. Sin embargo, en la práctica raras veces excede del 60 por 100 a causa de la imprecisión del perfil superficial, imperfecciones en la alimentación energética y el efecto de pantalla que ejerce esta última y sus soportes, etc.

En diversos sistemas con alimentación frontal se monta un pequeño reflector en el plano focal del mayor ( $f/D = 0,25$ ) para aminorar la interferencia provocada por las instalaciones perturbadoras próximas, evitar la captación de radiaciones indeseables, etcétera.

El radiotelescopio de 75 m. de diámetro de Jodrell Bank emplea este artificio y la eficacia en su abertura viene a ser de un 60 por 100 en la longitud de onda de 1,3 m., mientras que en la frecuencia de la raya del hidrógeno, de 21 cms. de onda, el rendimiento se reduce a un 20 por 100, a causa principalmente de imprecisiones en el perfil de su superficie.

Sin embargo, el renombre de este radiotelescopio es suficiente garantía de la utilidad y versatilidad del paraboloide con alimentación frontal simple.

Este mismo recurso en el plano focal, se utiliza también en la antena de Goonhilly Downs (Gran Bretaña) para el seguimiento e intercomunicación con satélites experimentales; desde luego, sacrificando la eficacia de la abertura, para favorecer el más bajo nivel de ruido.

### *Antena Cassegrain.*

Acabamos de ver que el funcionamiento del reflector paraboloide con alimentación frontal no puede suministrar el máximo rendimiento, pues los radioreceptores con bajo nivel de ruido son difíciles de montar en el foco de aquél, lo que exige además el empleo de largas guías de ondas que introducen más pérdidas y el subsiguiente aumento del ruido de fondo.

Ya hemos avanzado que la antena Cassegrain permite reducir hasta cierto punto aquellos inconvenientes, pues tanto la bocina alimentadora como el radioreceptor han de estar situados cerca de la cúspide del reflector principal en donde pueden montarse

y ser ajustado fácil y cómodamente. Respecto al ruido del sistema, la energía desbordante por el contorno de la bocina alimentadora está ahora dirigida hacia el cielo *frío*, y aunque ensanchando el haz principal de radiación, sin embargo reduce la fracción de la misma dirigida hacia atrás (lóbulos posteriores). De otra parte, no hay que olvidar que el reflector secundario es de dimensiones no despreciables aparte de requerir sus inevitables soportes, por lo que la dispersión debida a estos obstáculos contrarresta parcial, si no completamente, la prevista mejora en el ruido de fondo.

Téngase muy presente que el empleo del sistema Cassegrain, sólo es aconsejable en reflectores de gran tamaño; el diámetro del reflector secundario debe equivaler a un múltiplo de la longitud de onda de trabajo  $\lambda$  (p. e.,  $d \geq 10 \lambda$ ), mientras que al mismo tiempo no debe interceptar más que un pequeño porcentaje de la abertura (1 por 100). En pocas palabras, el montaje Cassegrain sólo es útil cuando  $D \geq 10 \cdot d$  y, por lo tanto, el diámetro del reflector principal  $D$  debe ser del orden de  $100 \lambda$  (57).

El montaje Cassegrain se viene utilizando cada vez más en estos últimos tiempos; con su foco situado en las proximidades del reflector principal, ofrece una gran libertad para el empleo de los más artificiosos sistemas de alimentación primaria, sobre todo teniendo disponible el espacio posterior al reflector para las instalaciones auxiliares de las guías de onda, bocinas, etc. La renombrada antena «Haystack», del M. I. T., alojará en grandes locales detrás de su cúspide las necesarias instalaciones previstas para el empleo de bocinas como alimentación radiofrecuente primaria.

Una ventaja suplementaria del sistema Cassegrain es la posibilidad de variar parámetros adicionales del mismo, a fin de conseguir todavía mejores resultados; ello se refiere, p. e., a la forma, posición y tamaño del espejo secundario, que conjuntamente con las posibles variaciones del primario parece ser permitieron alcanzar eficacias teóricas de abertura del orden del 98/100 (58).

---

(57) J. W. DAWSON: P. I. R. E., 50, 1451, junio 1962.

(58) W. F. WILLIAMS: «Microwave Jour.», 79, julio 1965.

## Las antenas de bocina reflectora y de tipo Cassegrain abierto.

Ya hemos visto que el funcionamiento del reflector paraboloide y sus variantes está más o menos obstaculizado por el inevitable apantallado de su abertura debido a los espejos secundarios, soportes de estructuras, etc. Sin embargo, utilizando solamente una parte del paraboloide (excluida la región cuspidal) aquel apantallado no cuenta para el haz reflejado y por lo tanto no existe el bloqueo de abertura

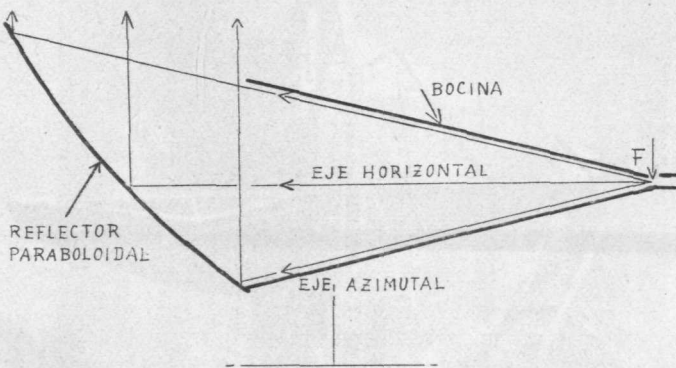


Fig. 13.—Esquema de una bocina reflectora.

Los relevantes progresos alcanzados últimamente con la bocina reflectora como antena poco ruidosa y de gran ganancia (figura 13) se deben principalmente a los «Laboratorios Bell», en donde se construyeron su antena experimental de 6 m. de abertura instalada en Holmdel, y la bocina reflectora de 21 m. de abertura en Andover (Maine), empleada en ensayos Telstar, como relé de enlace y seguimiento de satélites, etc. (figs. 14 y 15).

Esta última (de 27 m. de longitud) está montada horizontalmente y explora en altura girando el paraboloide alrededor del correspondiente eje horizontal y en azimut describiendo el conjunto un círculo de 21 m., todo ello protegido por un radomo de 63 m. de diámetro, sostenido al aire libre.

La eficiencia de abertura de esta antena es del orden del 80 por 100, con bajo rebosamiento por el contorno ; sus respectivas ganancias en las frecuencias de 6,4 y 4 Gc/s son de 61 y 58 dB, y la temperatura de ruido es inferior a 2,0° K (no incluyendo atmósfera, radomo, etc.), siendo el lóbulo de radiación posterior unos 50 dB inferior al isotrópico.

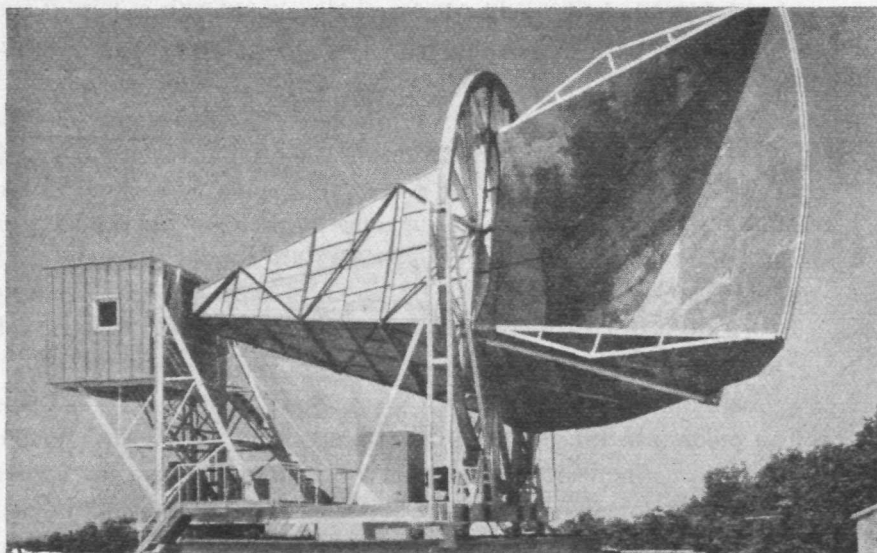


Fig. 14.—Antena de reflector paraboidal combinada con bocina en Holmdel (U. S. A.)

Como se deduce de estos datos, el funcionamiento de la instalación es excelente, aunque empeora mucho con la lluvia, tiempo húmedo, etc., por la capa de agua que se deposita sobre la superficie exterior del radomo.

Recientemente la propia casa constructora modificó esta construcción, sustituyendo la primitiva bocina por otra triplemente plegada (59), de modo que el eje azimutal atraviesa la cúspide de la bocina (fig. 16) ; esta más compacta disposición reduce conside-

(59) J. S. COOK, E. M. ELAM and H. ZUCKER: B. S. J. T., 44, 1255, septiembre 1965.





Una ulterior modificación (60) ha consistido en sustituir la bocina por un reflector Cassegrain, produciéndose el consabido traslado del foco a las proximidades de la superficie interna de la cúspide del paraboloide; como el reflector secundario y sus soportes no obstruyen la abertura de aquél, este montaje ha recibido el nombre de *tipo Cassegrain abierto* (fig. 17). Nótese que los ejes de simetría del paraboloide principal y del hiperboloide sub-reflector no coinciden, por lo que no son ortogonales los más convenientes ejes de rotación.

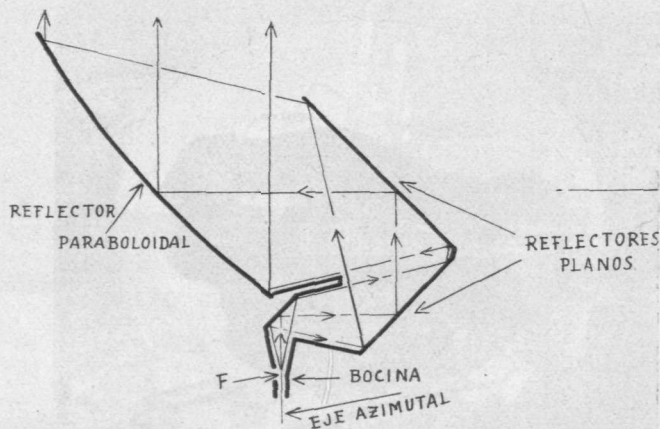


Fig. 16.—Bocina reflectora triplemente plegada.

*Normas generales y precisiones para el proyecto de antenas orientables de grandes dimensiones. Grado de exactitud de la superficie reflectora.*

Si el reflector de una antena de abertura no es exactamente paraboloide, ya hemos indicado la inevitable producción de diferencias de fase al reflejarse sobre aquélla los innumerables rayos del haz incidente, con lo que se merma la ganancia máxima obtenible de la antena.

(60) A. J. GIGER and H. H. TURRIN: «Bell, Sys. Tech. Jour.», 44, 1229, septiembre 1965.

De las recientes e importantes investigaciones teóricas de Ruze (61) se deduce que designando por  $\varepsilon$  el error cuadrático medio del perfil de la superficie reflectora, se demuestra que la ganancia de la antena disminuye según el factor  $\eta = e^{-(4\pi\varepsilon)^2}$ . Ello presupone que las desviaciones superficiales son aleatorias en magnitud y posición, y que la distancia de correlación de las irregularidades es del orden de varias longitudes de onda. Esta

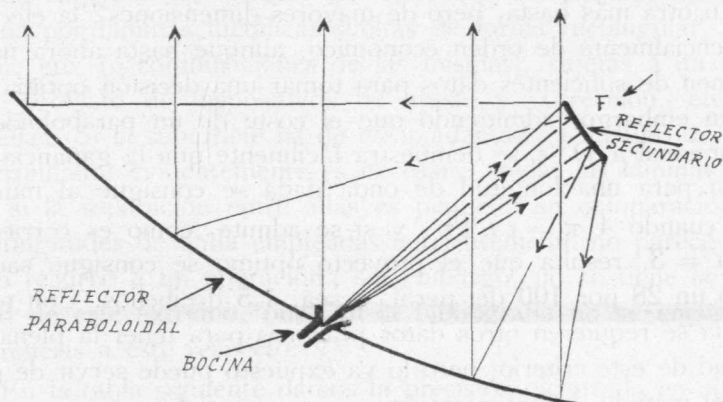


Fig. 17.—Reflector Cassegrain abierto.

fórmula ha sido comprobada experimentalmente por diversos investigadores, que obtuvieron una buena concordancia entre los valores observados de la ganancia y los calculados a partir de la medida de los errores superficiales.

Conociendo las pérdidas tolerables del perfil, ya es posible especificar con seguridad el error cuadrático medio.

El problema máximo que aparece en todo proyecto de esta clase de antenas, consiste en determinar una tolerancia superficial de confianza; Ruze ha señalado que si el error de un reflector es debido a su perfil, como la longitud de onda se reduce, la ganancia aumenta al principio hasta que finalmente predominan las pérdidas debidas al perfil; se obtiene un máximo valor de la ganancia

(61) J. RUZE: «Ann. of New-York Ac. Sc.», 116, 39, 1965.

cuando  $\lambda = 4 \pi \varepsilon$  y ésta entonces alcanza aproximadamente el 37 por 100 de la que se conseguiría con un paraboloide perfecto.

Este resultado puede ser de utilidad en radioastronomía, que opera generalmente entre amplios límites de longitudes de onda; en cambio, el problema de la comunicación por radar es diferente, ya que la longitud de onda está determinada por otros factores y ésta requiere una cierta ganancia de antena, con abertura efectiva. Puede elegirse entre un pequeño reflector con superficie casi perfecta u otra más basta, pero de mayores dimensiones; la elección es esencialmente de orden económico, aunque hasta ahora no se disponen de suficientes datos para tomar una decisión óptima.

Sin embargo, admitiendo que el coste de un paraboloide es proporcional a  $D^n/\varepsilon$  se demuestra fácilmente que la ganancia necesaria para una longitud de onda dada se consigue al mínimo coste cuando  $4 \pi = \varepsilon \lambda / \sqrt{\pi}$  y si se admite, como es corriente, que  $n = 3$ , resulta que el proyecto óptimo se consigue sacrificando un 28 por 100 del perfil, o sea, 1,5 decibelios. Con todo, todavía se requieren otros datos prácticos para tener la plena seguridad de este criterio, pero lo ya expuesto puede servir de guía para el método de optimización a seguir en el futuro.

En la práctica, generalmente, los errores de perfil del reflector aumentan con la aproximación a su perímetro, pero como los bordes están peor iluminados ello no implica una gran perturbación. En realidad, tal como ha sugerido Shinn, la disposición óptima podría muy bien ser aquella en que el error aumentara desde la cúspide a los bordes del reflector.

En el acabado de la superficie de una antena reflectora, todavía son de tener en cuenta las dos siguientes posibilidades respecto a los extremos indicados a continuación:

a) Si dicha superficie debe ser continua (plancha) o discontinua (tela metálica).

b) Si en el primer caso deben soldarse las planchas o pueden dejarse desconectadas.

Existen datos acerca del comportamiento y las propiedades de los enrejados metálicos en microonda, pudiéndose seleccionar según la longitud de onda, porcentaje de transmisión, etc.; desde



luego, para ondas inferiores a los 6 cms de longitud, resulta más económico el empleo de la superficie metálica continua. Por encima de este valor pueden utilizarse las redes metálicas, aprovechando sus ventajas de la reducción de peso y de la presión del viento, aunque si son de esperar formación de nieve, hielo, etcétera, éstos convierten la superficie del reflector en sólida, por lo que el diseño estructural debe adecuarse a este extremo a no ser que se emplee un radomo protector.

La superficie de las grandes antenas paraboloideas está constituida por láminas metálicas sueltas de forma rectangular, triangular, etc. (o combinaciones de las mismas), sujetas a un armazón, provisto de dispositivos de ajuste y corrección, etc., de aquéllas. Si la superficie ha de estar adaptada a un tipo de carga determinado, evidentemente es necesario soldar las láminas, aunque si la separación entre ellas es pequeña en comparación con las longitudes de onda empleadas corrientemente no parece necesario recurrir a tal operación; sin embargo, no se tiene la seguridad de este extremo, pues en la bibliografía no se encuentran referencias a este respecto.

En la tabla siguiente damos la precisión alcanzada en algunos de los paraboloideas de mayor tamaño existentes en la actualidad, tomando la relación  $\epsilon/D$  como medida de la precisión.

SITUACION	Diam	Error méd. cuadr.	$\epsilon/D$
Universidad de Texas.. ...	4,1 m.	0,075	16,10 <sup>-6</sup>
Aerospace Corp. ... ..	4,5 »	0,075	17 »
Lebedev U. S. S. R. ....	21,6 »	0,005	23 »
Goonhilly (modificado) ...	25,5 »	0,075	32 »
Robledo de Chavela ... ..	26,0 »	0,008	30 »
Haystack. M. I. T. ... ..	36,0 »	0,100	35 »
Parkes (Australia) C. S. I. R. O. ... ..	63,0 »	1,4	56 »

No tenemos datos fidedignos del gran radiotelescopio de Jodrell-Bank (Manchester), de 75 m. de diámetro, ni del aún ma-

yor de Greenbank (U. S. A.), de 90 m.; éste es fijo (o de *pasos*) y, por tanto, no orientable, con un peso de 2.500 toneladas.

*Estación radiastronómica de Nançay (Francia).*

En un extenso claro del grandioso bosque de brezos y álamos que cubre la región de Sologne en la porción central de Francia,

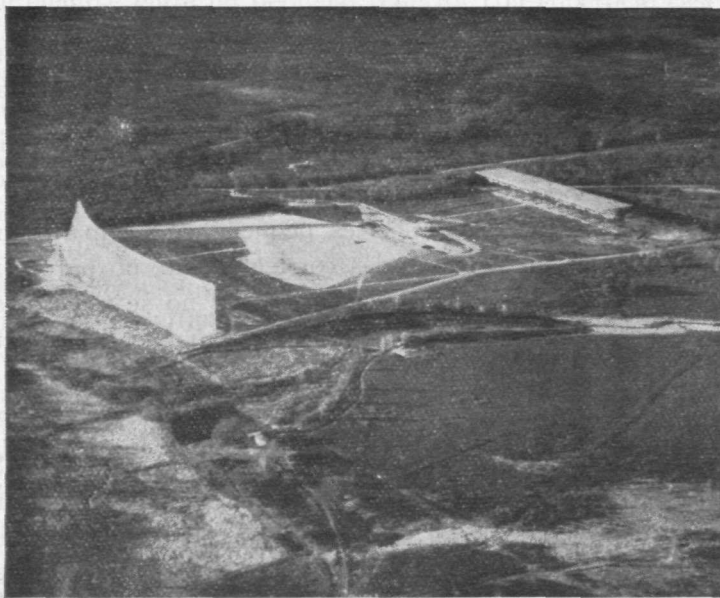


Fig. 18.—Vista aérea de las instalaciones de Nançay. A la derecha el espejo plano en posición horizontal y a la izquierda el cóncavo fijo.

fue construido en 1962 uno de los radiotelescopios más imponentes actuales.

Su aspecto, según puede verse en la figura 19, es muy diferente de los corrientemente utilizados reflectores paraboloïdales. En la estación de Nançay se montaron frente a frente, a 500 metros de distancia, dos grandes superficies reflectoras en fina tela metálica (cuya malla la constituyen cuadraditos de 5 milímetros de lado) sostenidas por robustos armazones metálicos; la más al

Norte constituye un espejo plano de 200 metros de longitud, móvil alrededor de un eje horizontal, que refleja las radiaciones procedentes del espacio en otro espejo cóncavo fijo de 35 metros de altura y 300 metros de longitud (al Sur del primero) y en cuyo foco (casita focal situada a 280 metros) se concentra la radiación mediante un espejo parabólico de 5 metros de diámetro en un dipolo montado al extremo de una guía de ondas, cuyo otro extremo termina en una bocina abierta al exterior.

Dando al espejo plano la inclinación conveniente, se puede seleccionar la radiación procedente de zonas celestes localizadas a diferentes alturas sobre el horizonte, efectuándose las observaciones al pasar por el meridiano las zonas en cuestión. El conjunto de la casita y espejo focal es móvil sobre rieles para facilitar el enfoque. Existe además un radiointerferómetro *en cruz*, para la raya de 21,1 cms. (y ondas más cortas) que consta de 32 espejos móviles sobre rieles en la dirección E.-W. y otra alineación de 8 espejos de 4 metros de diámetro, también móviles, en la dirección N.-S.

#### *Proyectos para el futuro.*

El «Cambridge Radio Observatory Committee» (CAMROC) está planeando la construcción de un gigantesco radiotelescopio, todavía mayor que los anteriores, pues su reflector paraboloidal, orientable en todas direcciones, debe alcanzar entre los 90 a los 150 metros de diámetro, para funcionar entre los límites de frecuencia de 0,3 a 6,0 Gc/s; aún no está decidido si se protegerá con radomo, ni cuál será la forma definitiva del reflector que ofrezca el óptimo funcionamiento por dólar.

En Alemania, en las montañas del Eifel (al oeste del Rin medio), parece que va a comenzar la construcción de otro gran radiotelescopio, también totalmente orientable, cuyo espejo (que se ha comparado por su tamaño con la fachada de la catedral de Colonia) tendrá 96,4 m. de diámetro, pesará unas 3.000 toneladas y estará movido por cuatro motores alrededor de dos ejes ortogonales para poder observar todo el hemisferio. Su coste se

evalúa aproximadamente en unos dos millones de libras esterlinas, donadas por la Compañía «Volkswagen», que pone el futuro telescopio a disposición del «Max Planck Institut für Radio-Astronomie», en Bonn, que está bajo la dirección del Prof. Hachenberg (fig. 19).

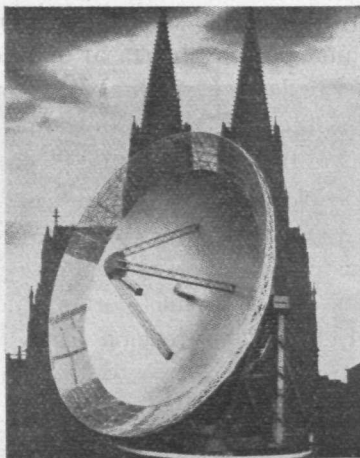


Fig. 19.—El futuro gran radiotelescopio alemán con el fondo simbólico de la catedral de Colonia.

En Norteamérica, la NARO (National Radio Astronomy Observatory) ha propuesto la construcción de un potentísimo radiotelescopio cuyo poder de resolución sería de un segundo de arco, a fin de poder detectar radiomanantiales un centenar de veces menos intensos que los más débiles detectables actualmente, y alcanzando además el cero del tiempo cosmológico, esto es, el límite del universo observable. Considerado como el análogo del telescopio óptico de 5 metros de abertura de Monte Palomar, este inigualable radiotelescopio, a juicio de sus promotores, debería revolucionar la radioastronomía actual.

En esencia, constaría de 36 paraboloides de unos 25 metros de diámetro, alineados de modo que pudieran moverse a lo largo



de los brazos de una gigantesca Y de 21 kms. de longitud, que se montaría en una alta y seca zona del SW de los E.S. UU.

El coste de la nueva instalación se estima en unos 36 millones de dólares, recomendándose su elevación hasta los 59 millones de dólares incluidos gastos suplementarios imprevistos; su construcción duraría unos cuatro años y los gastos anuales de sostenimiento serían del orden de 1,7 millones de dólares.

#### *Ajuste y corrección del perfil de la superficie reflectora.*

Aunque el perfil de la superficie de un reflector pueda garantizarse probablemente con un error del orden de la cienmilésima, ello no permite asegurar su invariabilidad por estar sometidas las estructuras a la acción del viento, gradientes de temperatura y tensiones gravitatorias variables con los movimientos del sistema. La antena «Haystack», con su cubierta-radomo, suprime las dos primeras causas anteriores y la total estructura está construida para resistir los efectos de la última. Sin embargo, es verdaderamente atractiva la idea de conseguir la regulación automática del foco, de manera que cualesquiera que sean las distorsiones del reflector se mantenga su ganancia lo más completamente posible; ello es factible por medios mecánicos o electrónicos.

Un ejemplo típico de los primeros fue ensayado en el paraboloide orientable de 18 m. de diámetro, montado en Sugar Grove (Virginia) por la Marina norteamericana. La superficie del mismo estaba formada por cuadrados metálicos de 1,6 m. regulados por servomecanismos en sus vértices, a fin de mantener cada unidad dentro de los límites de tolerancia impuestos. Se utilizaba un sistema óptico para acusar los corrimientos de los cuatro puntos del sistema de suspensión.

Puttock y Minnett, investigadores del CSIRO (Australia), han ideado recientemente un método (62) para medir rápidamente las deformaciones superficiales del radiotelescopio de Parkes (fig. 20),

---

(62) M. J. PUTTOCK and H. C. MINNETT: «Proc. Inst. Elec. Engin.», 113, 1723, noviembre 1966.

fundado en la determinación desde su foco de las pequeñas diferencias en la posición angular de una serie de puntos de referencia, fijos en la superficie reflectora a distancias radiales bien conocidas ; los resultados se registran fotográficamente para su estudio

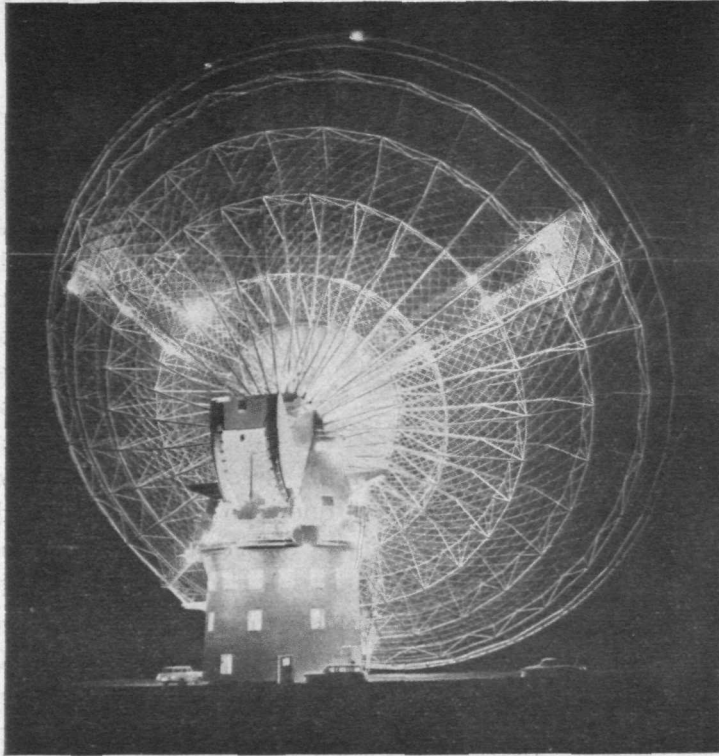


Fig. 20.—Vista nocturna del radiotelescopio de Parkes (C. S. I. R. O.) Australia, de 63 metros de diámetro.

ulterior. De ello se deduce que el contorno del paraboloide puede medirse cuando está orientado al cenit con un error no mayor de 1,2 mm., así como las deformaciones causadas por la inclinación del sistema móvil no exceden de 1,5 mm. para un ángulo cenital máximo de  $60^\circ$  ; con un viento de 20 millas/hora los errores permitidos alcanzan el doble de aquéllos.

En todo dispositivo de esta clase es muy conveniente reducir al mínimo el número de secciones o partes móviles, necesariamente rígidas y fabricadas con perfil de gran precisión. En general, debe intentarse corregir las deformaciones mecánicas del reflector mediante sensores electrónicos montados en las proximidades del foco y reconstituir la señal primitiva por corrección electrónica de fase.

Al disminuir el intervalo de correlación de errores se requieren en el foco mayor número de elementos sensores, con lo que se agrava el problema del bloqueo de la abertura especular. Sin embargo, esta orientación es muy prometedora como futura línea de ataque para corregir las deformaciones a relativa gran escala debidas a la gravedad, vientos huracanados, etc. ; en la Universidad de Birmingham se está procediendo al estudio teórico-experimental de tales problemas.

### *Radomos.*

Con este neologismo se designan las cubiertas-cúpulas con que se protegen las antenas de abertura de los efectos perjudiciales ejercidos por los agentes atmosféricos, tales como vientos y variaciones de temperatura. Evidentemente, así se facilita la producción de tales antenas con tamaño y precisión determinados al mínimo coste, pero si se incluye el del radomo, aunque aquél aumente forzosamente, no parece que tal suplemento lo sea en demasía.

Pueden distinguirse tres tipos generales de radomos, a saber:

- 1.º Los de dieléctrico rígido únicamente.
- 2.º Los de armazón metálico rígido poliédrico, sosteniendo placas o paneles dieléctricos.
- 3.º Los auto-sostenidos al aire empleando dieléctricos flexibles.

El reunir los requisitos estructurales exigidos por la rigidez de un gran radomo con propiedades dieléctricas aceptables, se traduce en desventajas para la transmisión, anchura de banda, etcétera, por lo que sólo nos ocuparemos de los dos últimos tipos de

radomos, que no dejan de presentar, sin embargo, ciertos inconvenientes.

Los autosostenidos en el aire deben estar constituidos por materiales ligeramente elásticos y suficientemente resistentes para que, una vez inflados, presenten una superficie aceptablemente lisa y rígida; ello impone algunas restricciones sobre las propiedades mecánicas y eléctricas del material empleado. Sin embargo, con el radomo flexible sostenido en el aire y empleado en la estación para comunicaciones con satélites de Andover, las pérdidas óhmicas a través del material son muy reducidas, pues con un grosor de dos milímetros y una tangente de pérdidas de 0,0155, resulta una contribución de temperatura de ruido de sólo unos 3° K; con una constante dieléctrica del orden 3, se produce una cierta dispersión en la superficie interna del radomo y cuando el reflector está orientado hacia el cenit el suplemento de ruido llega a los 7° K y aun más, según la situación atmosférica.

Sin embargo, estos valores no son permanentes; durante las épocas de lluvia, en las que una delgada capa de agua recubre el radomo, aumentan la absorción, difusión, etc., así como la temperatura de ruido puede alcanzar los 30° K aun sólo lloviznando. Con el tiempo seco la temperatura *total* de ruido (incluyendo las del radomo, atmósfera, diplexer, maser) del receptor de Andover es de unos 30° K, aumentando hasta los 160° K en tiempo húmedo; con lluvia moderada (6 mm/hora) la relación señal/ruido puede llegar a disminuir en unos 5 decibelios, hecho explicado teóricamente por Blevis (63).

En ciertas aplicaciones se prefiere el radomo rígido por ofrecer protección más segura bajo condiciones climáticas extremas. Como en este tipo de radomos la resistencia estructural reside en su trama metálica, se dispone de amplia libertad para la elección del material de los paneles dieléctricos, por lo que las pérdidas óhmicas pueden ser mucho menores que en los radomos autosostenidos. El mayor inconveniente de los que ahora nos ocupamos consiste en el apantallado y dispersión debidos a la estructura me-

---

(63) B. C. BLEVIS: Comunicación a la «I. E. E. Conference Publication». Londres, 1966.



tálica ; así en el radomo que protege la antena Haystack de 36 m. de abertura, un 6 por 100 de su superficie lo ocupa el enrejado metálico indicado (fig. 21).

A causa de la oblicuidad de la superficie de los paneles dieléctricos y celosía metálica, el apantallado que ésta ejerce a través

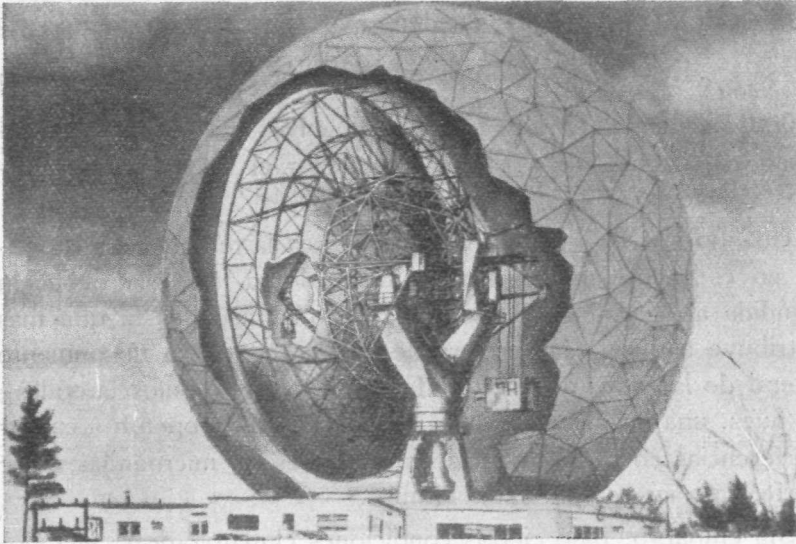


Fig. 21.—Rado no del radiotelescopio de Haystack del M. I. T. (U. S. A.) de 36 m. de diámetro; su peso móvil es de 180 toneladas.

de la abertura puede alcanzar hasta el 11 por 100, y por lo tanto este porcentaje de la energía recibida procede de la dispersión (*scattering*) por aquella estructura metálica ; de consiguiente, puede contribuir a una temperatura de ruido de  $15^{\circ}$  K en todas las frecuencias. Las pérdidas óhmicas en el dieléctrico de fibra de vidrio son prácticamente despreciables, pero en la frecuencia de 7.500 Mc/s la reflexión por las placas puede introducir una temperatura de ruido de unos  $8^{\circ}$  K ; al agudizarse el cono de iluminación de la abertura de la antena, pueden reducirse las cifras anteriores, pero no por bajo de  $7,5^{\circ}$  K y  $4^{\circ}$  K, respectivamente. En

cuanto a los efectos de la lluvia, no se han publicado datos referentes a este radomo.

El diseño de un radomo de estructura metálica requiere gran cuidado para evitar los perjudiciales lóbulos de difracción, efectos de polarización antagónica, etc., debidos a la estructura metálica. La pseudo-aleatoria distribución de las *costillas* de tal estructura dificulta la formación de aquellas perturbaciones, aunque los lóbulos de difracción siempre pueden aparecer bajo un ángulo de  $\frac{\lambda}{\text{espaciado}}$ . Kay ha señalado la aparición de lóbulos de difracción a 30-40 decibelios del lóbulo principal, cuyos efectos pueden perturbar los sistemas de radar o incrementar el ruido en bajos ángulos de elevación.

Cuando el requisito más importante sea la temperatura de ruido, no es aconsejable el empleo del radomo, pues la radiación difundida al azar, que en tiempo seco o húmedo es la que más contribuye a dicha temperatura de ruido, se debe a un aumento general de la retro-radiación y del nivel de los lóbulos laterales; así, pues, una instalación con radomo es la más propensa a causar interferencias con otras estaciones terrestres de microondas o ser interferida a su vez por estas últimas.

Sin embargo, bajo ciertas condiciones climatológicas, el radomo ofrece la única solución para poder contar con una alta probabilidad funcional de servicio.

Con lo que llevamos expuesto en esta última parte de nuestra disertación no puede considerarse agotado el tema, ni mucho menos, ya que existen puntos no tratados por nosotros tales como el empleo de los reflectores esféricos (ya utilizados en los radares militares durante la última guerra mundial), el de los sistemas con múltiples reflectores (para obtener grandes ganancias más económicamente que con gigantescos reflectores, o un poder separador de  $I''$  de arco, como el que requiere el examen de la estructura de los cuasares), el de los radiointerferómetros, alineaciones de antenas lineales *en cruz*, los sistemas de varios reflectores de dimensiones moderadas constituyendo la *apertura sintética* (equiva-

lente a una de gran tamaño obtenida por síntesis combinando observaciones a lo largo de *líneas de base* con diferentes espaciados), etcétera, etc. Renunciamos a ello para no abusar de la paciencia de esta selecta concurrencia, que tanta atención ha prestado a mis pobres palabras, por lo cual me complazco en manifestarle mi mayor agradecimiento.

He dicho.