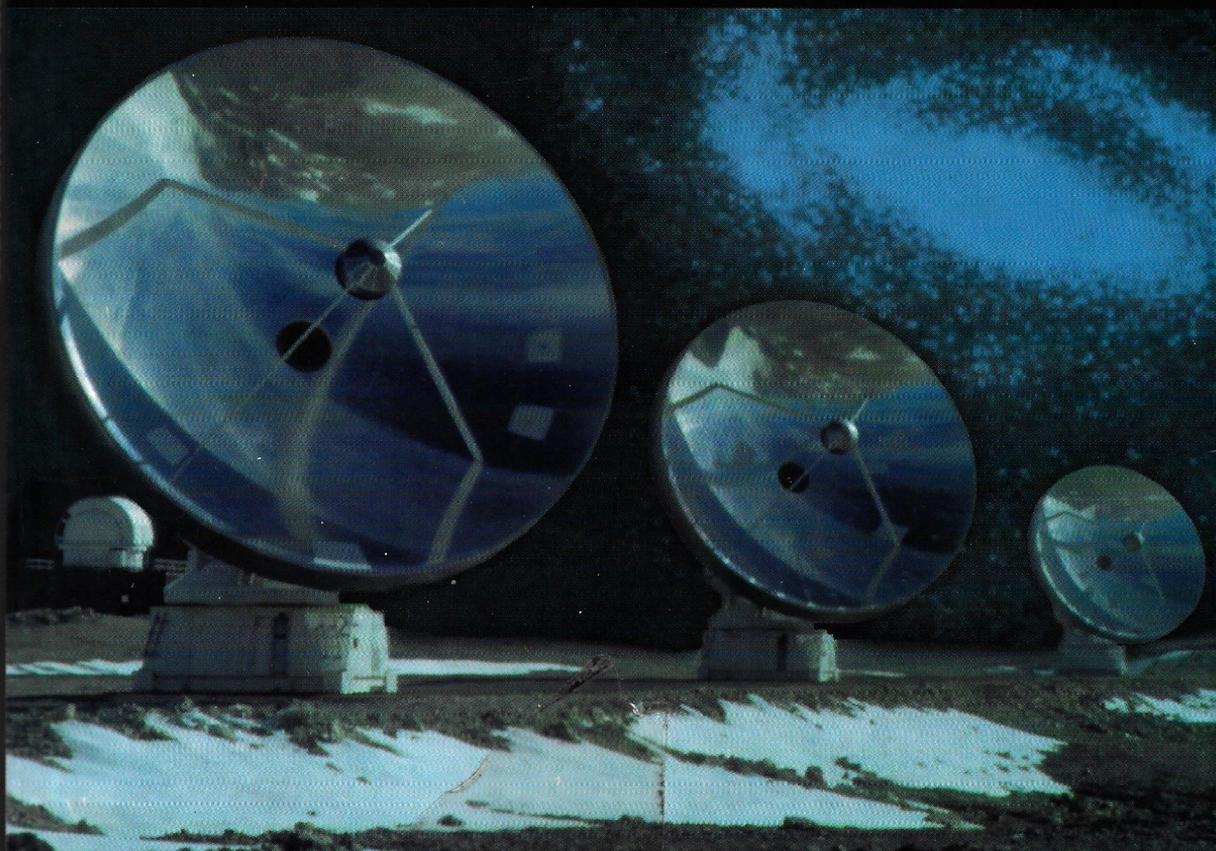


# Astronomía básica

JOSÉ ANTONIO GARCÍA BARRETO



Primera edición, 2000

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra  
—incluido el diseño tipográfico y de portada—,  
sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,  
sin el consentimiento por escrito del editor.

D.R. © 2000, Universidad Nacional Autónoma de México  
Edificio de la Coordinación Científica, circuito exterior,  
Ciudad Universitaria, México, D.F.

D.R. © 2000, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA  
Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-6092-7

Impreso en México

## V. INSTRUMENTACIÓN EN ASTRONOMÍA

### NECESIDAD DE DISEÑAR Y CONSTRUIR TELESCOPIOS MÁS GRANDES

LA ASTRONOMÍA OBSERVACIONAL moderna se basa mucho en el uso de diferentes instrumentos para recabar datos del Universo. Esto se realiza al recibir fotones de radiación del Universo a diferentes longitudes de onda tales como luz visible, ondas infrarrojas, ondas de radio, rayos X, rayos UV, etc. Algunas de las razones para diseñar y construir telescopios más grandes son:

- Se desea estudiar objetos celestes a distancias muy grandes con respecto a la distancia del Sol a la Tierra, y para ello es necesario captar tantos fotones de radiación como sea posible,
- estudiar objetos celestes con más detalle. La capacidad de estudiar con más detalle un objeto celeste es directamente proporcional al diámetro del telescopio,
- de igual manera, existe el propósito de estudiar objetos celestes que intrínsecamente son débiles emisores de radiación, es decir, emiten pocos fotones. Para esto existen dos posibles soluciones: una es observarlos durante mayores intervalos y tratar así de captar cuantos fotones sea posible, y la segunda es tener telescopios más grandes para captar más fotones por unidad de tiempo.

### NECESIDAD DE DISEÑAR Y CONSTRUIR INSTRUMENTOS PARA LOS TELESCOPIOS

En forma paralela existen muchas razones por las cuales se desea diseñar y construir instrumentación adicional al telescopio. Entre ellas están las siguientes:

- estudiar la radiación que proviene de los objetos celestes a una frecuencia específica; para este fin hay que desarrollar espectrógrafos, los cuales son instrumentos que sólo dejan pasar la radiación a ciertas frecuencias. En particular, en radioastronomía se requiere el desarrollo de filtros *pasa banda* (es decir, sólo dejan pasar fotones en un intervalo de frecuencias o banda) y el conjunto de ellos se denominaría

banco de filtros. Esta técnica nos permite estudiar la radiación en función de la frecuencia, y como sabemos que la frecuencia es proporcional a la velocidad, entonces tenemos oportunidad de estudiar las velocidades,

- obtener imágenes de los objetos celestes extendidos de su radiación a diferente longitud de onda o frecuencia. En el intervalo de luz visible, se ha tenido desde mucho tiempo la cámara fotográfica, pero una de las desventajas es que la respuesta de las placas a la radiación no es lineal, y otra gran desventaja es que para objetos muy débiles uno debe observar continuamente por mucho tiempo. Actualmente se han diseñado instrumentos que detectan la radiación en un área. Esta área está compuesta de pequeños *detectores* de fotones de radiación que transmiten y amplifican. En el rango de luz visible existen instrumentos que se conocen como CCD (siglas que en inglés significan *Charge Couple Device*), los cuales son detectores bidimensionales de fotones, y sistemas como el MEPSICRON. En el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir en Baja California, México, existen varios sistemas CCD y uno de ellos tiene  $1024 \times 1024$  pequeños detectores. La ventaja de un CCD o MEPSICRON con respecto a las placas fotográficas es que el observador tiene que dedicar menos tiempo para detectar objetos débiles, aunque la gran desventaja es que el campo de visión (el número de pequeños detectores es aún pequeño) es menor que el campo de visión de una placa fotográfica.

En radioastronomía se han desarrollado sistemas con un conjunto de detectores que producen imágenes bidimensionales después del adecuado procesamiento de la señal. Estos sistemas se colocan justo en el plano focal del radiotelescopio.

Existe otra técnica que se denomina interferometría, que en el rango de la luz visible se denomina *interferometría óptica* y en el rango de las ondas de radio se denomina *radio interferometría*. Esta técnica se basa en la observación simultánea de un objeto celeste por parte de dos o más elementos, es decir, telescopios o radiotelescopios, y en combinar las señales para resaltar la emisión del objeto celeste. Al final del procesamiento de imágenes se producen imágenes bidimensionales. Con esta técnica se tiene mayor capacidad de estudiar los detalles del objeto celeste en cuanto más separados estén los telescopios o radiotelescopios unos de otros (figura V.1).



## NECESIDAD DE CONSTRUIR TELESCOPIOS EN EL ESPACIO

Existe una razón principal para construir receptores de radiación o telescopios espaciales: la atmósfera de la Tierra. La atmósfera, como se mencionó en el primer capítulo, actúa como filtro para la radiación de muy corta longitud de onda y además introduce turbulencia para la radiación que logra pasar hasta la superficie terrestre.

Para la detección de rayos UV, rayos X, rayos gamma y parte de los rayos infrarrojos (con longitud de onda  $\gg 10\mu\text{m}$ ) se han diseñado y construido varios telescopios espaciales como los conocidos por sus siglas en inglés IUE (detector de rayos UV), IRAS (detector de rayos infrarrojos), *Einstein* (detector de rayos X), *Rosat* (detector de rayos X) y el telescopio *Hubble* (detector de luz visible). Estos telescopios se ponen en órbitas alrededor de la Tierra, lo que los convierte en satélites de ésta, pero a causa de las fuerzas gravitacionales y a las debidas a su movimiento de traslación alrededor de la Tierra, tienen una vida corta, quizás de uno a dos años. Otra razón para esta corta vida es su fuente de energía, pues los instrumentos necesitan energía eléctrica para funcionar y refrigeradores para mantener la temperatura de los instrumentos cerca del cero absoluto.

## ARREGLOS FOCALES DE TELESCOPIOS ÓPTICOS

Por “arreglo focal” se desea denotar el punto o lugar que en el telescopio recibe los fotones de radiación; en este caso, de luz visible. Aun cuando existen diferentes tipos de arreglos focales, los más usados son los que detectan la luz en el foco primario (de la parábola o espejo primario) y los que detectan la luz en el foco secundario, también llamado *tipo Cassegrain*. Los espejos primarios tienen forma de paraboloide de revolución, con el fin de poder utilizar sus propiedades: toda la luz que llega a su superficie se refleja hacia un punto llamado foco (véase la figura V.2).

- *Foco primario*. Los rayos se concentran en un punto o foco, en donde se colocan los detectores de luz.
- *Foco tipo Cassegrain*. Los rayos se reflejan primero en el espejo primario y después en un espejo secundario (que intercepta los rayos que en principio van hacia el foco primario) y finalmente se detecta el otro punto o foco secundario que generalmente está por debajo de la superficie del espejo primario (véase la figura V.3). En el foco secundario es en donde se colocan los receptores o detectores de

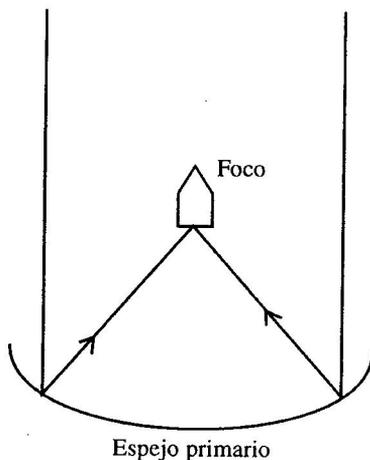


FIGURA V.2. Dibujo esquemático de un telescopio óptico. La superficie es una parábola de diámetro  $D$ , la cual refleja la radiación hacia un punto que se denomina foco primario.

luz. Una gran ventaja de este sistema es que existe más espacio para los diferentes detectores, y además no importa el peso de ellos. La superficie del espejo secundario no es un paraboloides, sino un hiperboloides de revolución (figura V.3).

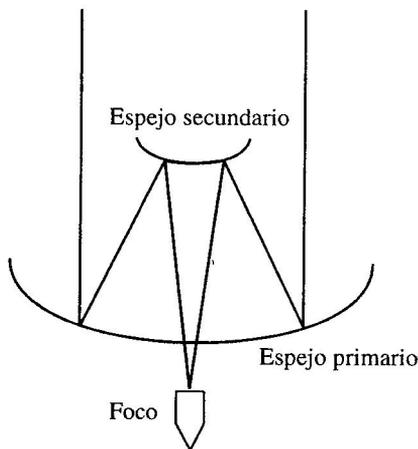


FIGURA V.3. Dibujo esquemático de un telescopio óptico con sistema Cassegrain. La radiación es reflejada del espejo primario hacia (teóricamente) el foco primario. En su trayectoria se coloca otro espejo (espejo secundario en forma de hipérbola) que refleja a su vez la radiación hacia el foco secundario.

- *Focos tipo Coudé y tipo Nasmyth.* En estos sistemas los detectores se colocan en el foco del último espejo reflejante, que bien puede ser el tercero o el cuarto. El punto de detección puede quedar a los lados del telescopio (véase la figura V.4).

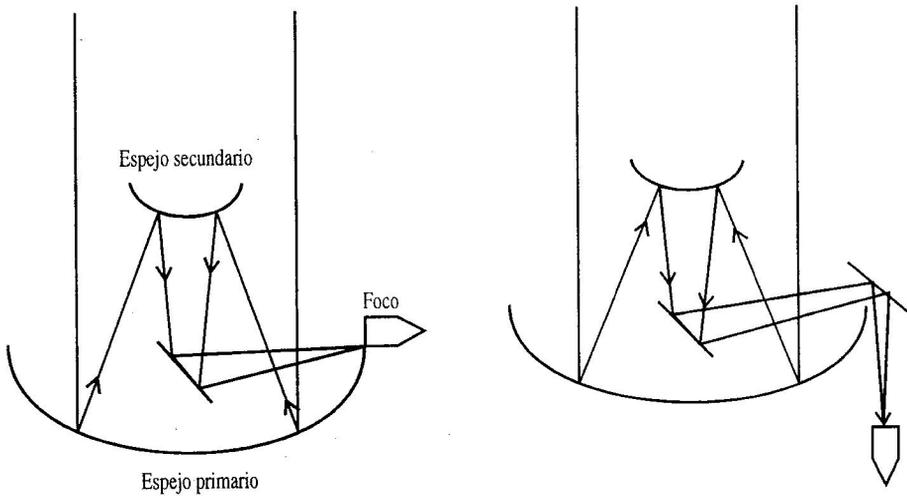


FIGURA V.4. Dibujo esquemático de sistemas ópticos Coudé, en los cuales existe un tercer espejo que refleja la radiación hacia un tercer foco que generalmente se encuentra en un lado del telescopio.

Un factor que se maneja en el diseño de un telescopio óptico es el cociente  $f/D$ , donde  $f$  es la distancia focal, es decir, una medida de la distancia que recorre la luz desde que se refleja en el espejo primario hasta que llega al foco, y  $D$  es el diámetro del espejo primario. En una sección posterior de este capítulo se estudia por qué nos referimos al diámetro del telescopio si es la superficie la que refleja la radiación.

El arreglo de foco primario tiene un cociente  $f/D \sim 1 \rightarrow 2$ ; el arreglo de foco Cassegrain, un cociente  $f/D \sim 7 \rightarrow 30$ , y los arreglos de foco Coudé un cociente  $f/D \geq 50$ .

Los telescopios con  $f/D$  pequeños se dice que son telescopios *rápidos* y esto pudiese ser entendido en el contexto de que los rayos tienen un camino más corto hasta alcanzar los detectores.

## ARREGLOS FOCALES DE RADIOTELESCOPIOS

Análogamente a los telescopios ópticos, los radiotelescopios están formados por una parábola de revolución, o bien parte de ella, que actúa como superficie primaria reflectora, y la radiación puede detectarse ya sea en el foco primario o en el foco secundario tipo Cassegrain. No existen sistemas de Coudé en radioastronomía; lo que existen son sistemas en los cuales la radiación se *conduce* o *refleja* hacia el detector final por medio de superficies reflectoras (una o varias) (figura V.5).

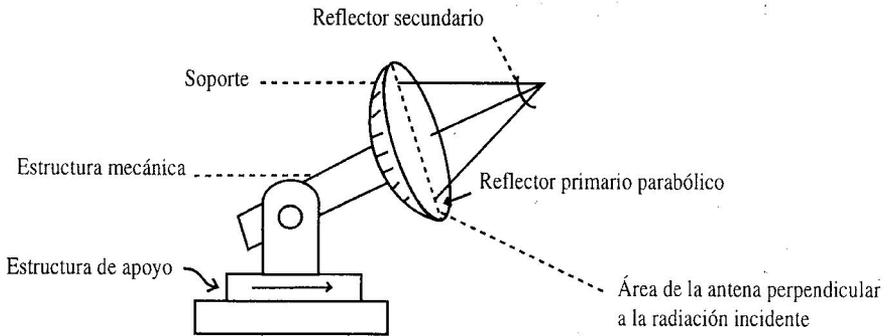


FIGURA V.5. Radiotelescopio básico. La superficie es una parábola de revolución que refleja las ondas de radio ya sea hacia el foco primario o hacia el foco secundario.

## MONTURAS DE TELESCOPIOS

Tanto los telescopios ópticos como los radiotelescopios deben estar montados sobre estructuras que permitan su movimiento. Esto es porque el movimiento de rotación de la Tierra provoca que las imágenes de los objetos celestes se muevan en el cielo. Si se desea observar objetos celestes por mucho tiempo los telescopios *deberán* contrarrestar ese movimiento. Para telescopios ópticos o radiotelescopios con una superficie primaria en forma de paraboloides existen dos tipos de monturas mecánicas:

- La montura conocida como *ecuatorial*, en la cual uno de los ejes de rotación está alineado hacia el Polo Norte, lo cual permite el seguimiento de un objeto celeste en su paso por el cielo, es decir en ascensión recta, y el otro eje de rotación perpendicular al anterior, que permite el movimiento del telescopio para localizar los objetos

celestes en la dirección norte-sur, o sea en declinación. Esta montura ha sido la predilecta para la mayoría de los telescopios ópticos, pero existen muy pocos radiotelescopios con ella.

- La montura conocida como Alt-AZ, en la cual uno de los ejes de rotación es vertical (apuntando hacia el zenit local) y el otro eje es perpendicular al primero. Los movimientos del telescopio en esta montura no dan directamente los movimientos de los cuerpos celestes en el cielo ( $\alpha, \delta$ ), sino que es una combinación de movimientos, vertical y azimutal, con los que finalmente se logra seguir a los objetos celestes. Esta montura es la montura predilecta para la mayoría de los radiotelescopios (figura V.6).

#### APERTURA DE UN (RADIO) TELESCOPIO

En esta sección del capítulo consideraremos telescopios con superficie primaria formada por un paraboloide de revolución.

Si pensamos en el diámetro que subtiende una superficie de revolución en términos de la longitud de onda de la radiación a recibir, es decir,  $D_\lambda = D/\lambda$ , nos daremos cuenta de que existe una gran diferencia entre los telescopios ópticos y los radiotelescopios. Por ejemplo, si  $\lambda = 5\,000 \text{ \AA}$  y el diámetro es de 2.12 m en el telescopio de SPM, entonces  $D_\lambda \simeq 4 \times 10^6$ , mientras que para una antena o radiotelescopio de 25 m de diámetro observando a  $\lambda = 2 \text{ cm}$  el cociente será  $D_\lambda \simeq 1\,250$ , es decir unas 4 000 veces menor que el cociente en el telescopio óptico. Otra forma de ver esto es que si se deseara tener el mismo cociente  $D_\lambda$  en el radiotelescopio que en telescopio óptico se necesitaría tener un radiotelescopio con un diámetro de  $\sim 85 \text{ km}$ . Es obvio que una antena o radiotelescopio tan grande costará mucho dinero, además de que su estructura será muy pesada (y costará mucho esfuerzo moverla). La realidad es que no se pueden (ni se podrán) construir radiotelescopios tan grandes. Pero aun así se desea tener radiotelescopios con diámetros tan grandes como permitan tanto la economía como la ingeniería. Para solventar este problema en particular se desarrolló la técnica de radiointerferometría, que en realidad lo que hace es simular una antena con el diámetro igual a la separación entre dos antenas.

¿Cómo es que hablamos de un diámetro del radiotelescopio si es la superficie de la parábola de revolución la que refleja las ondas hacia la superficie reflectora secundaria, y ésta la refleja finalmente hacia el foco secundario, donde están los receptores? (figura V.7).

Para entender esto no debemos olvidar que lo que recibimos es radiación en forma de ondas electromagnéticas con campos eléctrico y

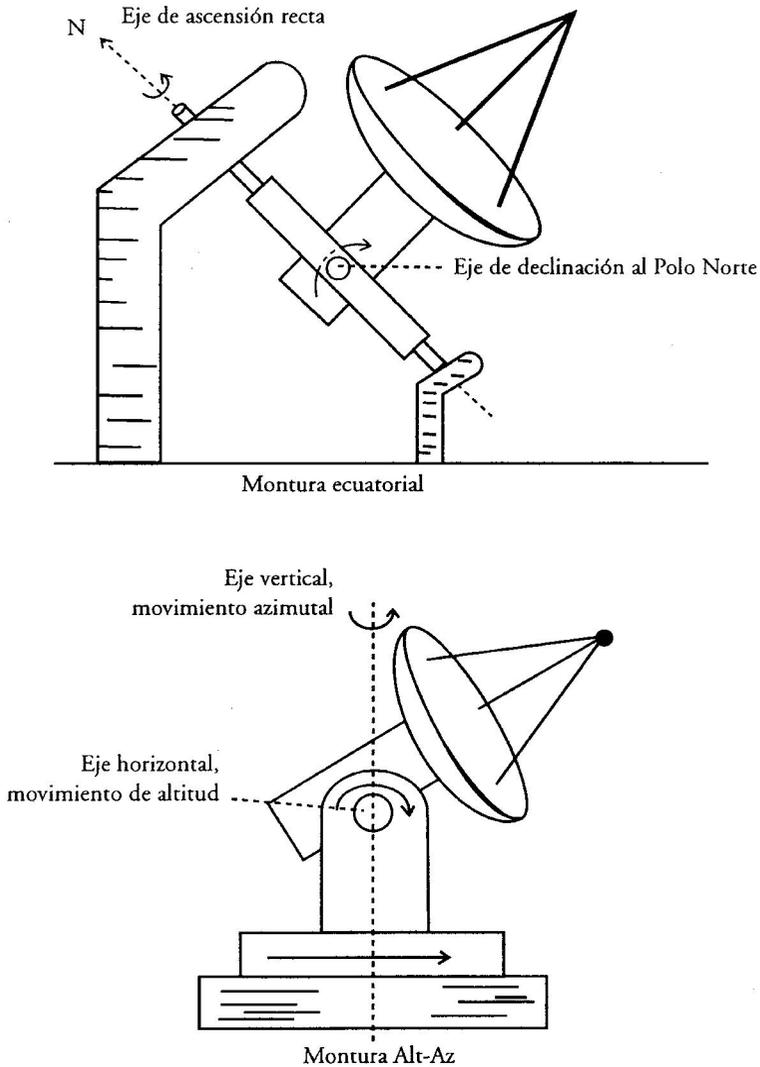


FIGURA V.6. Monturas usadas en radiotelescopios y en telescopios ópticos. a) Montura *ecuatorial*, donde un eje está dirigido hacia la estrella polar y permite movimientos a lo largo de la coordenada de ascensión recta, y el otro eje perpendicular al anterior permite movimientos a lo largo de la coordenada de declinación. Esta montura es la que usualmente tienen los telescopios ópticos. b) Montura *Alt-Az*, la cual tiene un eje vertical y uno horizontal. Para encontrar un objeto con cierta ascensión recta y declinación requiere una combinación de rotaciones tanto en azimut como en altitud. Esta montura es generalmente usada en radiotelescopios.

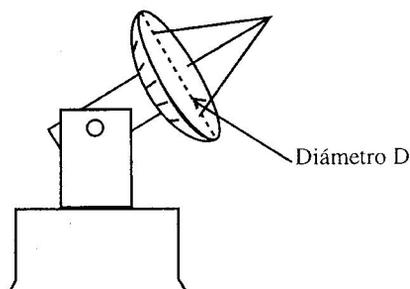


FIGURA V.7. Radiotelescopio con una superficie reflectora en forma de parábola, la cual tiene un diámetro  $D$ .

magnético asociados. En una dimensión la expresión del campo eléctrico propagándose en la dirección  $x$  y con una longitud de onda  $\lambda$ , es:

$$E^{\rightarrow} = E_x e^{-i2\pi[(kx/2\pi)-(ct/\lambda)]} \hat{x}.$$

En esta expresión  $E_x$  es la amplitud del campo eléctrico en la dirección  $x$ ;  $k$  es el número de onda,  $k/2\pi = 1/\lambda$ ; y  $c$  es la velocidad de la luz.

Para entender el término de *apertura* debemos tener presente la analogía electromagnética entre recepción y transmisión de radiación. En otras palabras, para el análisis electromagnético de la respuesta de la antena o telescopio es indistinto hablar de transmitir radiación o recibirla; sin embargo, el hecho de transmitir radiación es más sencillo de entender, ya que concuerda con experiencias ordinarias de nuestra vida diaria. Consideremos, pues, el caso de transmisión de radiación por una antena (figura V.8).

Supongamos que tenemos una antena con paredes laterales que encierra un volumen  $V$ , pero con un lado abierto con una superficie  $S$ .

En la base de la antena se tiene una fuente de radiación con campos eléctrico y magnético  $E_0^{\rightarrow}$ ,  $H_0^{\rightarrow}$ . Esta radiación eventualmente se transmite por la superficie  $S$  con campos  $E_T^{\rightarrow}$  y  $H_T^{\rightarrow}$  teniendo una parte de radiación reflejada hacia la antena con campos  $E_r^{\rightarrow}$  y  $H_r^{\rightarrow}$  cuyas magnitudes son mínimas con respecto a los campos transmitidos. La razón de esta reflexión es que los campos eléctricos y magnéticos iniciales se transmiten de cierto modo mientras *sientan* la presencia de las paredes metálicas de la antena, mientras que se transmiten de otro modo cuando ya no las hay. En el límite donde se terminan las paredes metálicas de la antena existe una discontinuidad en donde las ondas

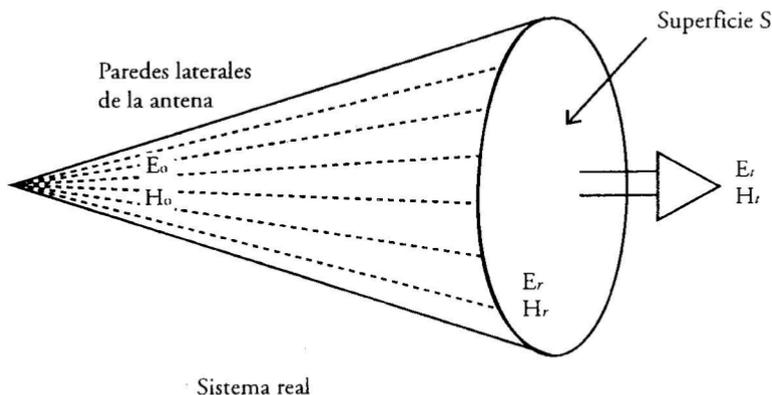


FIGURA V.8. Representación esquemática de un sistema *real* de una antena formada solamente por paredes laterales y un lado abierto con una superficie  $S$ , que transmite radiación.  $E_0$  y  $H_0$  representan los campos eléctrico y magnético iniciales.  $E_t$ ,  $E_r$  y  $H_t$ ,  $H_r$  representan los campos eléctricos y magnéticos transmitidos y reflejados, respectivamente.

deben ajustarse al nuevo medio transmisor (que será el aire o vacío). Este ajuste no es perfecto, y como consecuencia tenemos que parte de las ondas sí se transmite, pero otra parte se refleja.

El principio de Huygen nos permite reemplazar las fuentes de radiación electromagnética de ese volumen,  $V$ , por una hoja *conductora* o *metálica* que coincida con las dimensiones de la superficie  $S$ .

La magnitud y la fase de las corrientes,  $J^{\rightarrow}$ , deben ser tales que produzcan la *misma* distribución espacial de los campos electromagnéticos  $E^{\rightarrow}$ ,  $H^{\rightarrow}$  fuera de la superficie  $S$  como cuando existían las fuentes en el volumen inscrito dentro de la superficie  $S$ . Así, el diagrama que reemplaza al sistema real sería algo así (figura V.9), donde  $\hat{n}$  es el vector unitario perpendicular al plano de la superficie  $S$ , y  $E^{\rightarrow}$  y  $H^{\rightarrow}$  son los campos electromagnéticos de la radiación transmitida, y  $J^{\rightarrow}$  es la densidad de corriente eléctrica (paralela al plano de la superficie) y es igual a  $\sigma E^{\rightarrow}$ , donde  $\sigma$  es la conductividad del medio u hoja conductora.

Ahora entendemos por qué al hablar de un radiotelescopio o de un telescopio óptico, con superficie primaria reflectora en forma de parábola, nos referimos, como característica importante, al *diámetro*,  $D$ , de la apertura y no nos interesan las dimensiones de la superficie reflectora. El área de la apertura sería  $\pi D^2/4$  y ya no hay que preocuparse de las

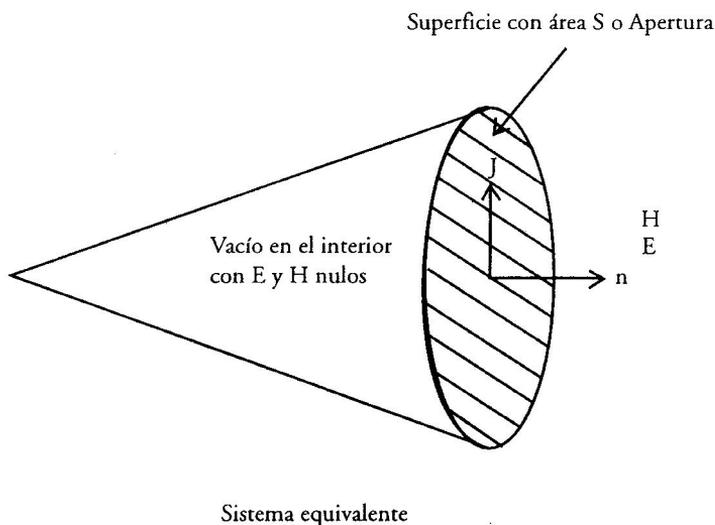


FIGURA V.9. Representación esquemática del sistema equivalente en donde *sólo* se tiene una superficie,  $S$ , conductora que produce una corriente  $J$  y ésta da lugar a los campos eléctricos y magnéticos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$ . A la superficie  $S$  se le denomina *apertura*.

paredes del volumen inscrito dentro de esa superficie ni de los campos electromagnéticos dentro de ese volumen.

#### PATRÓN DE RADIACIÓN DE UN (RADIO) TELESCOPIO

Una vez que entendemos el concepto de apertura de un (radio) telescopio, la pregunta siguiente sería: ¿cuál es la distribución espacial (o angular) de los campos eléctrico y magnético transmitidos? o, en el caso de recepción, ¿desde qué direcciones u orientaciones pueden las ondas electromagnéticas incidir en la apertura del (radio) telescopio?

En forma análoga al tratamiento de la sección anterior, consideremos el caso de transmisión, ya que sabemos que el análisis es equivalente al caso de recepción. Para contestar la pregunta permítasenos pensar en un ejemplo de la vida cotidiana. La pregunta original es equivalente a preguntarse cuál es la distribución espacial (angular) de los campos eléctrico y magnético  $\vec{E}_t$  y  $\vec{M}_t$  de la radiación transmitida desde la apertura con diámetro  $S$ , es decir, ¿cuál es el patrón de radiación del (radio) telescopio? (figura V.10).

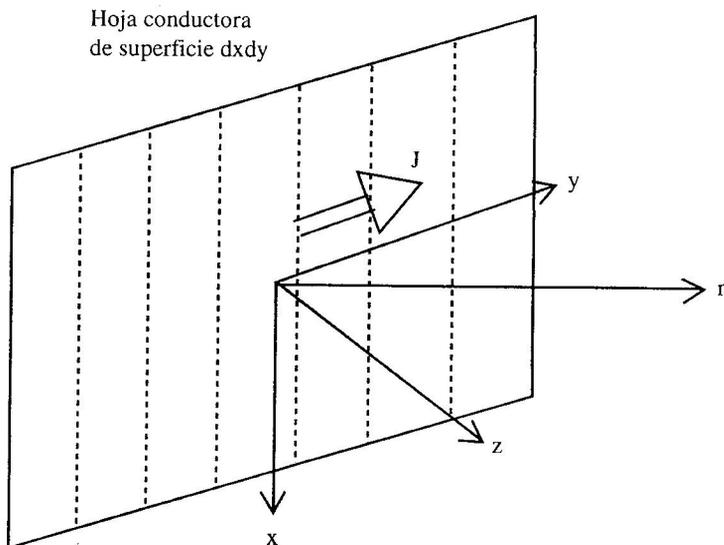


FIGURA V.10. Figura esquemática de una hoja conductora y el sistema de coordenadas  $x, y, z$ .

El campo eléctrico a una distancia  $r$  de una pequeña área con dimensiones  $dxdy$  es (Kraus, 1966):

$$dE = -\frac{i2\pi\nu\mu E(x)e^{-i2\pi r/\lambda}}{4\pi r Z} dxdy,$$

donde  $\mu$  es la permeabilidad del medio transmisor,  $\nu$  es la frecuencia de la onda electromagnética,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $Z$  es la impedancia (resistencia) intrínseca del medio en el que se propaga la radiación, y  $E(x)$  es la amplitud de distribución del campo eléctrico en la dirección  $x$  sobre la apertura e  $i = \sqrt{-1}$ .

Para una apertura cuadrada con dimensión  $y$  y con una distribución del campo eléctrico  $E^{\rightarrow}$  sólo en la dirección  $x$ , y uniforme en la dirección  $y$ , el campo eléctrico en función del ángulo  $\phi$  a distancias tales que  $r \gg a$ , donde  $a$  es la dimensión de la apertura en el eje  $x$ , es:

$$E(\phi) = -\frac{i2\pi\nu\mu e^{-i(2\pi/\lambda)r_0}}{4\pi r_0 Z} \int_{-a/2}^{a/2} E(x)e^{-i(2\pi/\lambda)x \text{sen } \phi} dx.$$

La amplitud del campo eléctrico  $|E(\phi)|$  para una distribución uniforme  $E_x^{\rightarrow} = E_a \hat{x}$  es finalmente lo que se conoce como el patrón de difracción cuya expresión es:

$$|E(\phi)| = \frac{AEa}{2r_0\lambda} \frac{\sin\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \frac{1}{2} \sin\phi\right)}{\left(\frac{2\pi a}{\lambda} \frac{1}{2} \sin\phi\right)},$$

donde  $A$  es el área de la apertura (figura V.11).

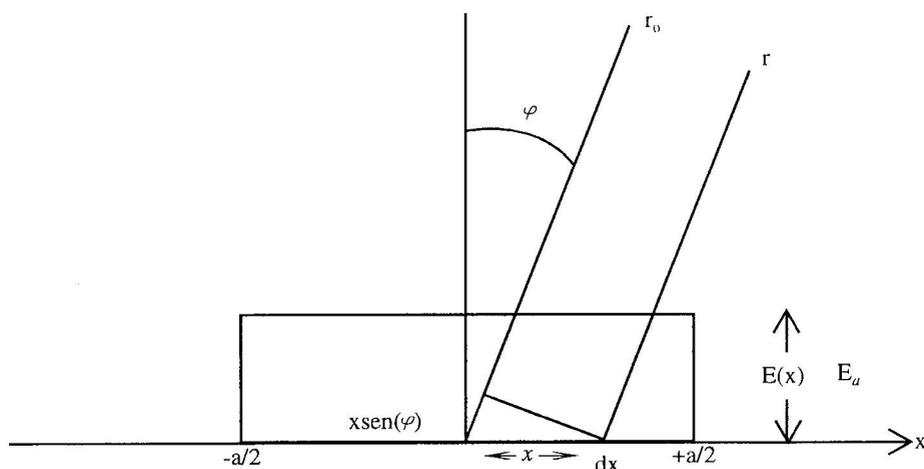


FIGURA V.11. Distribución del campo eléctrico de una superficie o apertura con dimensiones  $a$ .  $\varphi$  es el ángulo desde la vertical hasta la dirección de la radiación. La amplitud del campo eléctrico como función de  $x$ ,  $E(x)$ , es constante e igual a  $E_a$ .

La gráfica de  $|E(\phi)|$ , es decir del *patrón de difracción*, se muestra en la figura V.12.

La expresión  $|E(\phi)|$  es para el caso de transmisión, es decir, dada una distribución del campo eléctrico sobre la apertura del (radio) telescopio se tiene una distribución espacial del campo eléctrico transmitido.

En el caso de recepción, se empieza con una distribución del campo eléctrico lejos del (radio) telescopio (el patrón de radiación) y se trata de obtener la distribución del campo eléctrico sobre la apertura. En la astronomía observacional, en donde uno está en el caso de recepción de radiación, se denota el patrón de difracción o haz o lóbulo primario del telescopio, como una característica importante del telescopio.

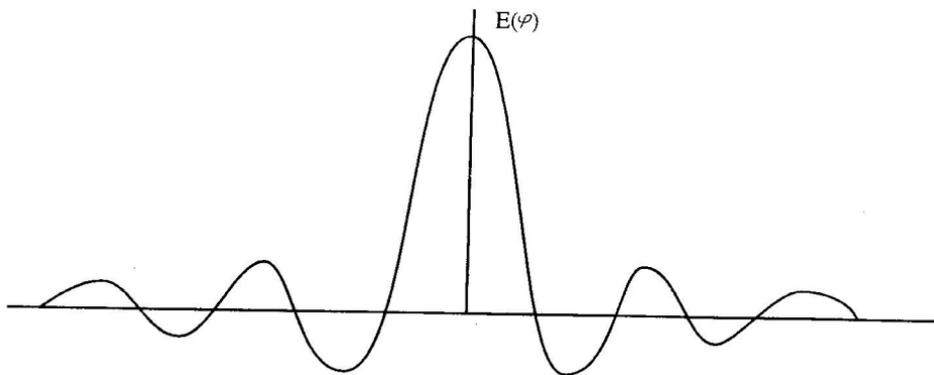


FIGURA V.12. Distribución del campo eléctrico con respecto al ángulo  $\varphi$  debida a una apertura con dimensiones  $a$  con un campo eléctrico constante a su largo. Al intervalo de ángulos para los cuales  $E(\varphi)$  es un medio del valor máximo, se le conoce como el ancho total a media amplitud o  $\theta$ .

El haz o lóbulo primario nos indica la distribución espacial con la cual es capaz de recibir radiación el (radio) telescopio. Sin embargo, también se puede recibir radiación a través de los lóbulos secundarios. Claro está que la capacidad principal de captar información es a través del lóbulo primario y por lo tanto nos interesa saber qué tan ancho es este lóbulo primario. En general se ha convenido en medir el ancho del lóbulo primario en tal punto que la amplitud del campo eléctrico sea un medio de la máxima amplitud. A esta medida se le conoce en inglés como FWHM (*Full Width at Half Maximum*) o ancho total a media altura, y en la figura se ve que es una dimensión angular.

Mientras más angosto es el FWHM de un (radio) telescopio se dice que tiene una directividad muy alta, y en astronomía esto se traduce en tener una *mejor* resolución angular.

¿Existe una analogía en la vida diaria que ilustre este concepto? Parece que sí existe, y está en el siguiente ejemplo sencillo: si observamos la distribución de luz que emana de un foco común y corriente, nos damos cuenta de que es de casi más de medio hemisferio (véase la figura V.13).

En este caso se dice que su directividad es muy baja (es decir la luz no está dirigida sólo hacia una dirección sino hacia muchas) y que su FWHM es muy grande.

Por otro lado si observamos cuál es la distribución de luz que emana de una lámpara de mano vemos que el haz de luz está dirigido preferentemente hacia una dirección (figura V.14).

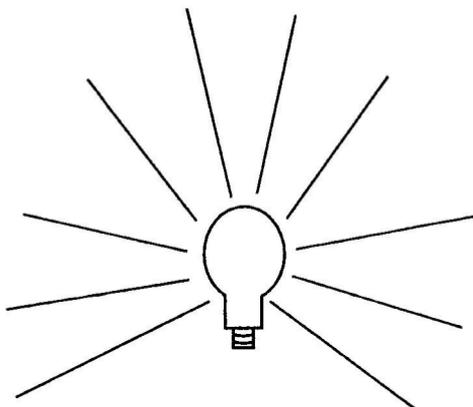


FIGURA V.13. Representación esquemática de la distribución espacial de luz de un foco. La distribución es casi uniforme en *todas* direcciones.

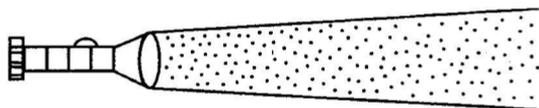


FIGURA V.14. Representación esquemática de la distribución espacial de luz de una lámpara de mano. La distribución va *muy* dirigida hacia una dirección.

En este caso se dice que la directividad es muy alta y que el FWHM es muy pequeño. En astronomía observacional moderna se desea tener cada vez un FWHM más pequeño y por lo tanto el diseño de (radio) telescopios está encaminado a tener una mejor resolución angular. Se puede deducir (pero no lo haremos, sino que sólo mencionaré el resultado) que el FWHM de un (radio) telescopio está directamente relacionado con la longitud de onda de la radiación a recibirse e inversamente al diámetro de la apertura, es decir:

$$\text{FWHM} \sim \frac{\lambda}{D},$$

por esta razón, para (radio) telescopios con diámetros mayores el FWHM será menor y por lo tanto se tendrá una mejor resolución angular de los objetos celestes.