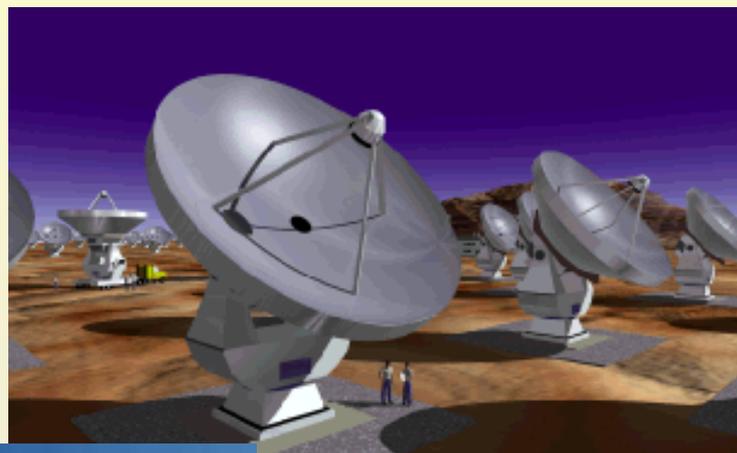




Tema 3: radiotelescopios

Consultar: *"Astrophysical techniques"*, K08. *"Tools of Radio Astronomy"*, Wilson, Rohlfs, Hüttemeister.





Ventana Radio

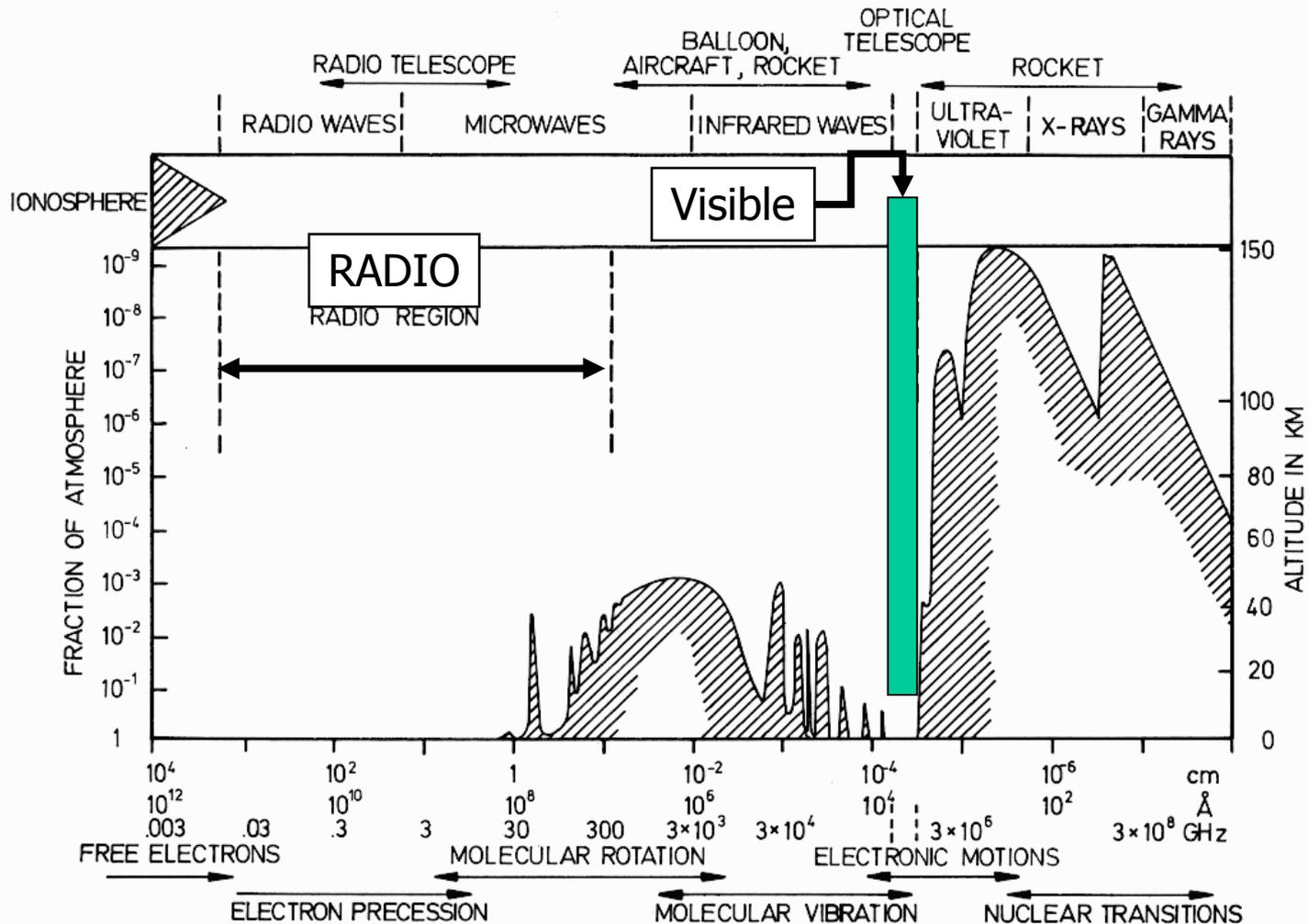


Fig. 1.1. The transmission of the earth atmosphere for electromagnetic radiation. The diagram gives the height in the atmosphere at which the radiation is attenuated by a factor 1/2

Desde 15MHz (20m) hasta 200GHz (1mm): 10 octavas.
Límites dependen de la posición geográfica y del tiempo.

CURSO 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)





Ventana Radio

Desde 15MHz (20m) hasta 200GHz (1mm): 10 octavas.
Límites dependen de la posición geográfica y del tiempo.

Límite alta frecuencia:

200GHz (1mm) ondas milimétricas

- Debida a la absorción resonante de las moléculas que se encuentran en la troposfera →

- Otras moléculas como N_2 y CO_2 tienen las bandas a frecuencias más altas donde la atmósfera ya no es transparente.

H_2O	22.2 GHz	13.5 mm
	184 GHz	1.63 mm
O_2	60 GHz	5 mm
	119 GHz	2.52 mm

- Las moléculas del ISM emiten y absorben en milimétricas.
- Radio Telescopios en zonas altas y secas.

Visita: <http://www.alma.info/>

THE ATACAMA LARGE MILLIMETER ARRAY





Ventana Radio

Límite baja frecuencia:

15 MHz (20m) ondas métricas

Debida a los electrones libres de la atmósfera (ionosfera).

El plasma impide el paso de radiación con frecuencia menor que la frecuencia del plasma

$$\nu < \nu_p$$

no se transmite

frecuencia del plasma

$$\nu_p (Hz) = 9 \times N_e^{1/2} (m^{-3})$$

$$\text{(noche)} \quad \nu_p \simeq 4.5 MHz \quad N_e \simeq 2.5 \times 10^{11} m^{-3}$$

$$\text{(de día)} \quad \nu_p \simeq 11 MHz \quad N_e \simeq 1.5 \times 10^{12} m^{-3}$$

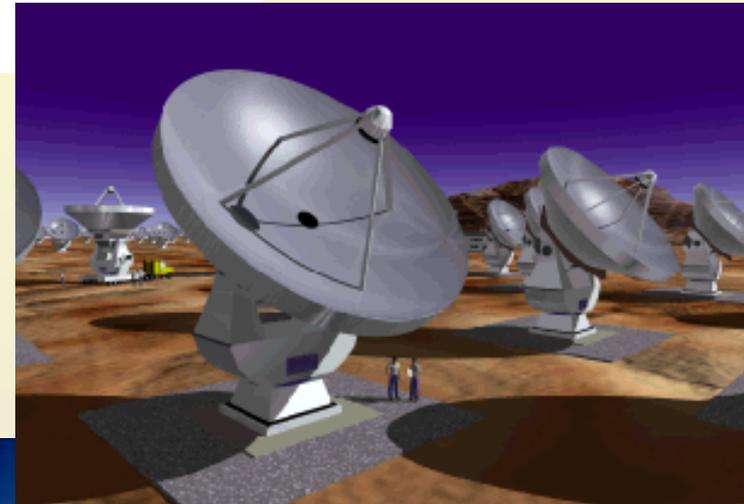
Límite depende de la densidad electrónica (N_e) y por lo tanto varía entre día y noche y con la actividad solar.





Atacama Large Milimeter Array (ALMA)

- 64 antenas de 12 m
- 5000 m de altura en Chile (Chajnantor)
- Hasta 10 mili arcosegundos (mas)
- Muy sensible



<http://www.almaobservatory.org/>





Instituto de Radio Astronomía Milimétrica (IRAM)

- Antena de 30 m en Sierra Nevada (2900m)
- Otras 6 de 15m en Plateau de Bure (2552m), Alpes franceses.

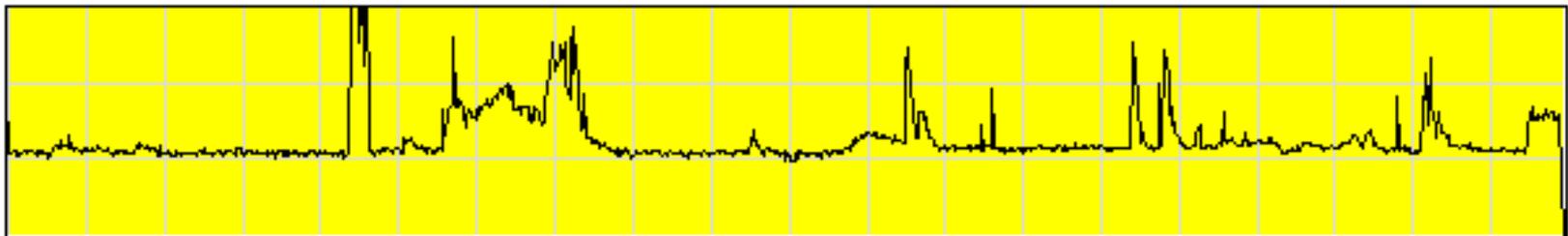
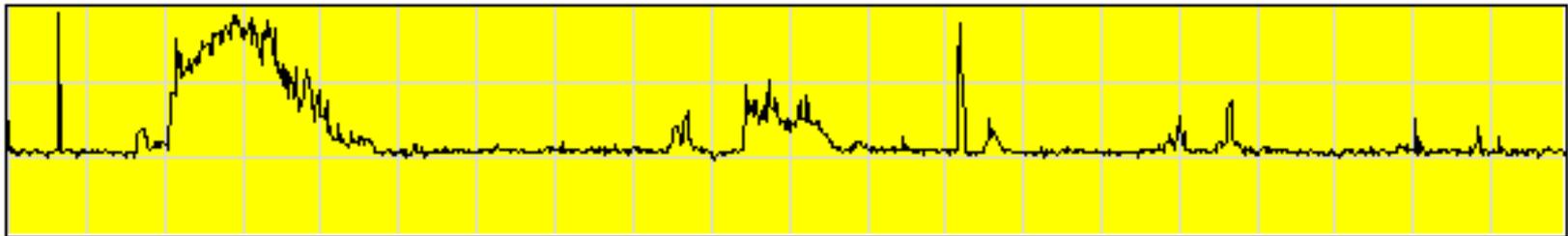
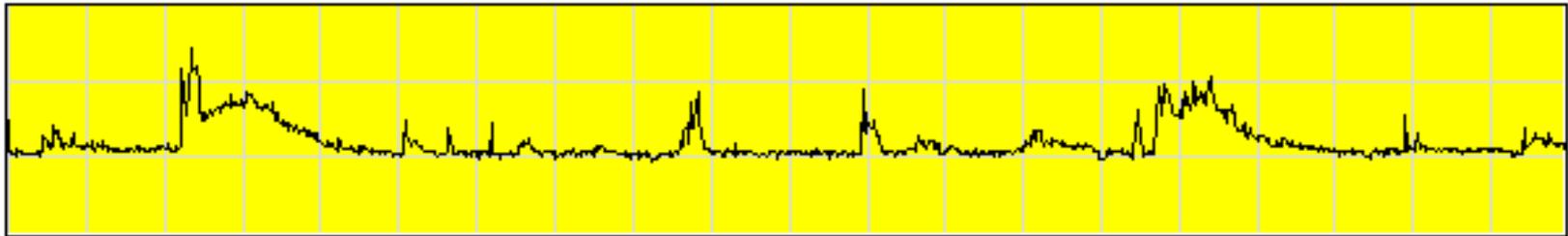
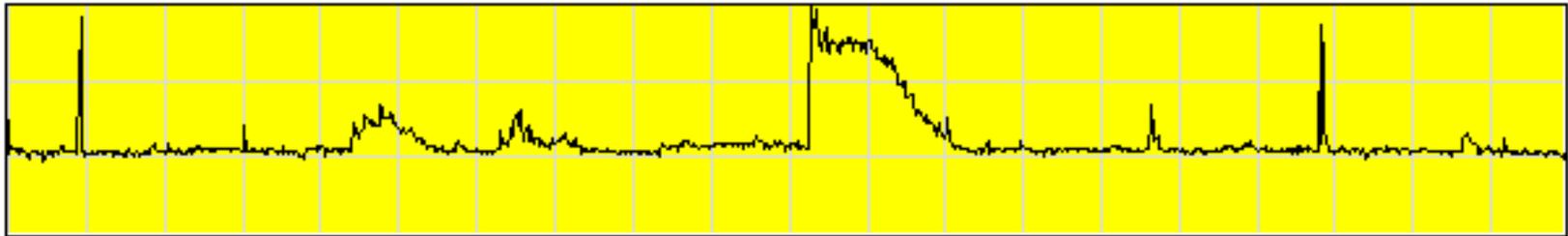




Observando meteoritos con una radio



11/17/98 03:00 Leonids 97.7 300 Degree

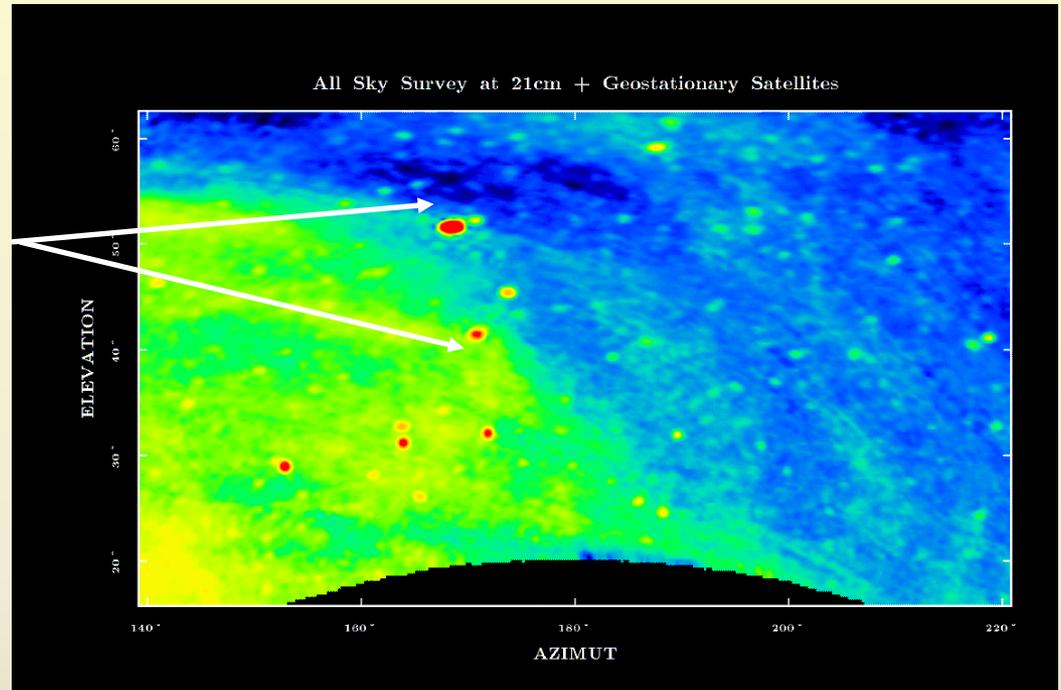




Contaminación por dispositivos terrestres

Flujo de los objetos celestes es de 6 a 12 órdenes de magnitud menor que las señales de los dispositivos de comunicaciones.

Exploración en 21cm
+ satélites geoestacionarios



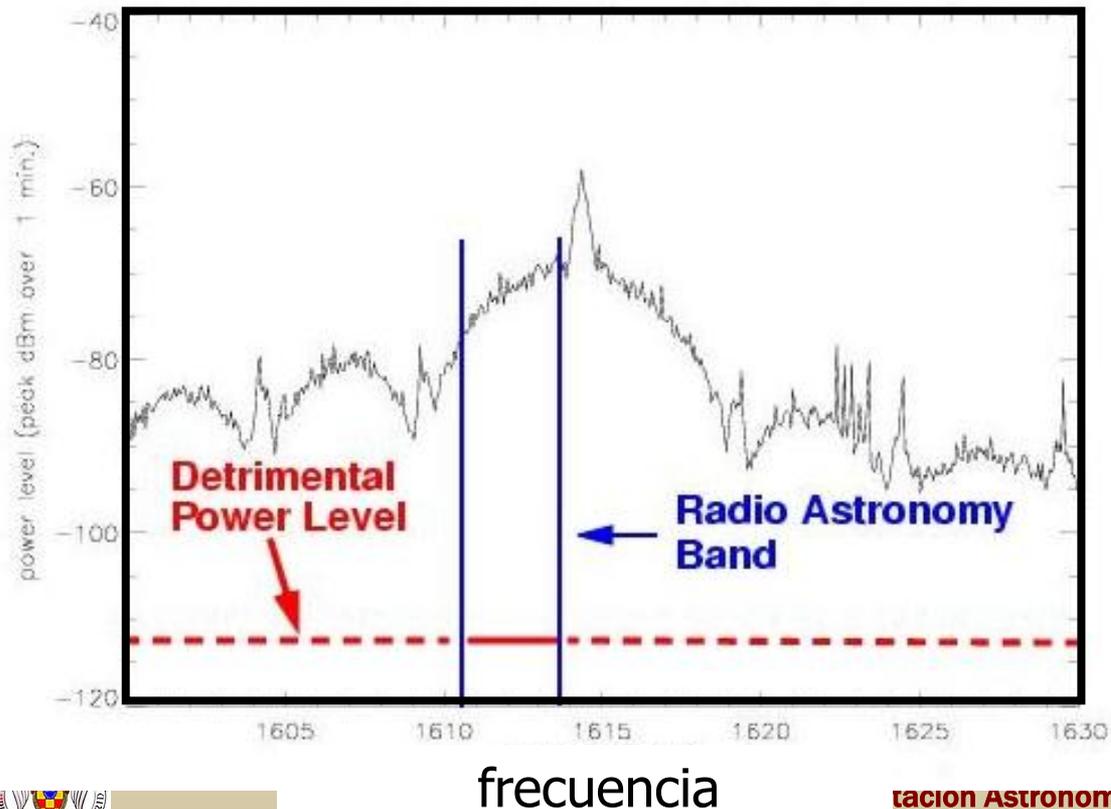
- Un teléfono móvil en la Luna radiando de forma isótropa 0.1W en una banda de 10MHz →
→ señal de 1 Jy en Tierra.
- Un objeto celeste observable → 10^{-4} Jy





Contaminación por dispositivos terrestres

IRIDIUM: telefonía móvil de alcance planetario. Transmite cerca de 1612 MHz que está reservado para uso astronómico (OH).



P
o
t
e
n
c
i
a

Motorola a ciertas horas bajará sus transmisiones cerca de Arecibo por debajo de $1.6 \cdot 10^{-24}$ W/m²/Hz (160 Jy).

Mucho más brillante que cualquier fuente astronómica, pero se espera que no caiga dentro del haz.





IRIDIUM



IRIDIUM: a constellation of 66 low-earth orbiting (LEO) satellites operated by Boeing, Iridium delivers essential communications services to and from remote areas where terrestrial communications are not available



<http://www.heavens-above.com/>

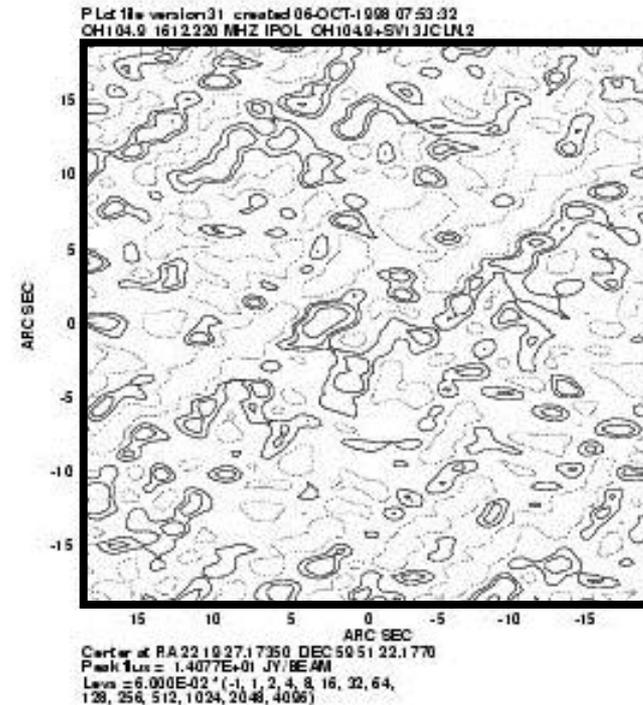
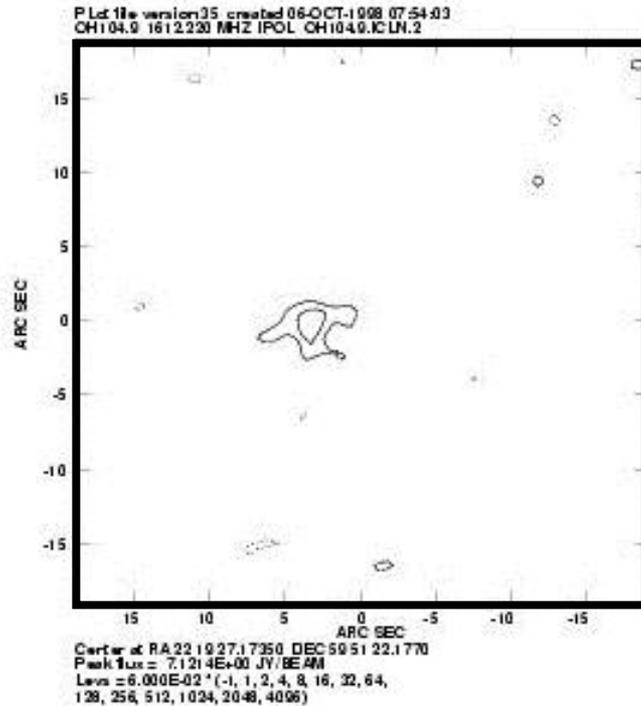
Date	Local Time	Intensity (Mag)	Alt.	Azimuth	Distance to flare centre	Intensity at flare centre (Mag.)	Satellite
12 Mar	19:52:01	-4	56°	169° (S)	9.8 km (W)	-8	Iridium 25
13 Mar	19:45:57	-1	56°	167° (SSE)	25.1 km (E)	-8	Iridium 47
17 Mar	05:37:26	-2	17°	10° (N)	25.9 km (E)	-6	Iridium 66
18 Mar	05:31:38	-5	15°	10° (N)	15.9 km (W)	-6	Iridium 74

Date	Local Time	Intensity (Mag.)	Flare position		Flare centre		Sun			Satellite
			Alt.	Azimuth	Distance	Mag	Alt.	Azimuth	From flare	
18 Mar	09:42:42	-7.4	69°	102° (ESE)	3.0 km (E)	-8.0	25°	115° (ESE)	45°	Iridium 96



Contaminación terrestre

Effect of Radio Interference On Astronomical Observations



VLA Images of OH/IR Star at 1612 MHz: No satellite present (left) and satellite ~22 degrees from star (right)

(From G.B. Taylor, NRAO)



Th. de NYQUIST - T DE RUIDO

- El movimiento térmico de los electrones en un resistor supone una corriente aleatoria. El valor medio de esa corriente i será nulo, pero no su valor cuadrático medio $\langle i^2 \rangle \neq 0$.

- La energía del resistor es térmica (la única disponible, por la primera ley de la termodinámica) y es la que provoca el mvto. de los electrones.

$$W d\nu = \frac{h \nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

- T es la temperatura termodinámica del resistor.
- Obsérvese que la potencia es independiente de la resistencia.

$$e^{h\nu/kT} \simeq 1 + \frac{h \nu}{k T} + \dots \rightarrow$$

$$W d\nu = k T_N d\nu$$

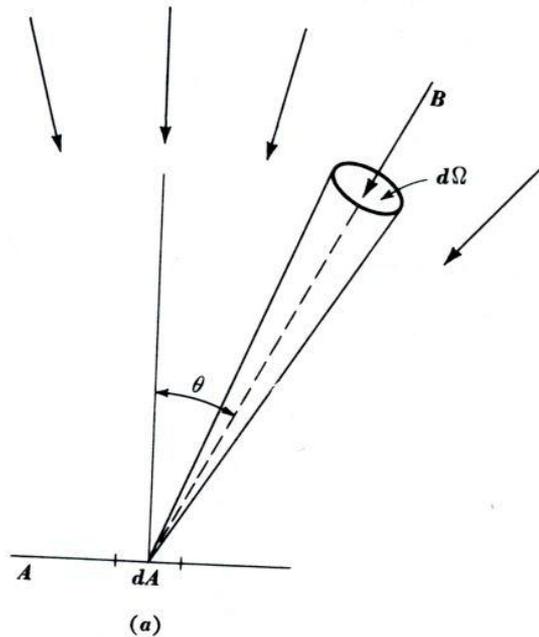
- La potencia de ruido de un resistor es proporcional a su T de ruido.
- Si conectamos un amplificador medimos una potencia como la de un BB a esa T.





POTENCIA E INTENSIDAD

Relaciones básicas



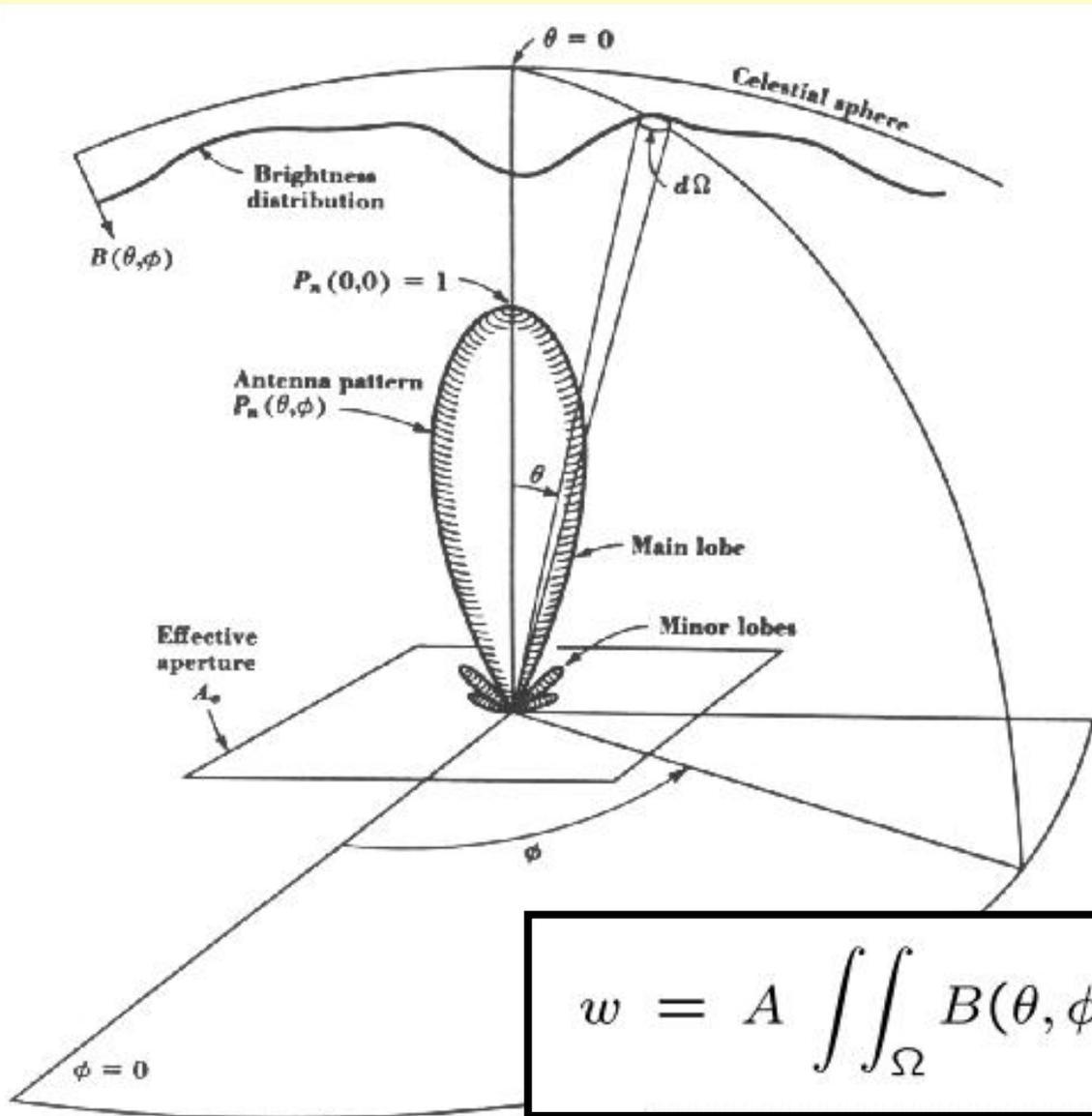
Radiación EM procedente del cielo que incide sobre una superficie plana horizontal en la Tierra

$$dW = B \cos\theta d\Omega dA d\nu$$

dW	potencia infinitesimal	W
B	intensidad en la posición de $d\Omega$	$W m^{-2} rad^{-2} Hz^{-1}$
$d\Omega$	ángulo sólido infinitesimal	rad^2
θ	distancia cenital	rad
dA	superficie infinitesimal	m^2
$d\nu$	intervalo de frecuencia	Hz



DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD



- Antena que apunta al cénit y responde a la llegada de radiación según el diagrama de antena

$$P(\theta, \phi)$$

- La intensidad que recibimos del cielo es, por lo general, variable con la dirección, es decir función del ángulo.

$$w = A \iint_{\Omega} B(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega \quad (W/Hz)$$



DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD

$$w = \frac{1}{2} A_e \iint_{\Omega} B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

w	potencia monocromática	W/Hz
A_e	Apertura efectiva	m^2
$B(\theta, \phi)$	intensidad del cielo	$W m^{-2} Hz^{-1} rad^{-2}$
$P_n(\theta, \phi)$	diagrama polar de potencia	(normalizado)
$d\Omega =$ $= \sin\theta d\theta d\phi$	elemento de ángulo sólido	rad^2

- Para intensidad cte con la dirección,

$$w = \frac{1}{2} A_e B_c \iint_{\Omega} P_n(\theta, \phi) d\Omega = \frac{1}{2} A_e B_c \Omega_A$$

- Ángulo sólido del haz

$$\Omega_A = \iint_{\Omega} P_n(\theta, \phi) d\Omega$$





DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD

- Potencia total en una cierta banda (no monocromática),

$$W = \frac{1}{2} A_e \int_{\nu}^{\nu+dv} \iint_{\Omega} B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega d\nu \quad (W)$$

Ejemplo:

RT con haz de $5^\circ \times 20^\circ$

$$\Omega_A \simeq \frac{4}{3} \theta_{HP} \phi_{HP} = \frac{4}{3} 5 \times 20 = 133 \text{ deg}^2$$

Cielo emitiendo a $10^{-21} \text{ W/m}^2/\text{Hz}/\text{rad}^2$

Abertura efectiva del RT 36 m^2

Potencia recibida por unidad de intervalo de frecuencia

$$w = \frac{1}{2} A_e B_c \Omega_A = \frac{1}{2} 36 \times 10^{-21} \times \frac{133}{3282} = 7.3 \times 10^{-22} \text{ W/Hz}$$

$$1 \text{ stereo radian} \equiv \text{rad}^2 = 57.3^2 = 3282 \text{ deg}^2$$

$$\text{ó } \text{rad}^2 = 41253/(4\pi) = 3282 \text{ deg}^2$$





TEMPERATURA DE ANTENA

Temperatura y ruido

- Teorema de Nyquist: la potencia de ruido por unidad de intervalo de frecuencia en los terminales de un resistor R a temperatura T ,

$$\omega = k T$$

ω	potencia / intervalo de ν	W / Hz
k	constante de Boltzmann	$1.38 \times 10^{-23} J/K$
T	temperatura absoluta del resistor	K

- Si tenemos una antena trabajando se asocia la potencia de salida a una temperatura equivalente T_A
- Esta temperatura de antena depende de la radiación que se recibe.

 T_A 



TEMPERATURA DE ANTENA

Si la antena apunta a una fuente a temperatura T , la potencia recibida por unidad de intervalo de frecuencia,

$$\omega = \frac{1}{2} A_e \iint B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

Si colocáramos la antena en un receptáculo que fuera un cuerpo negro (BB) (T y B ctes en cualquier dirección)

$$B(\theta, \phi) = B_c = \frac{2k}{\lambda^2} T \quad (RJ)$$

$$\omega = \frac{12k}{2\lambda^2} T A_e \Omega_A = k T$$

$$A_e \Omega_A \equiv \lambda^2$$

- La T del RT sería también T (BB) en este caso.
- NO es la T física de la antena la que determina sino la de la región a la que apunta la antena

$$T_A$$




TEMPERATURA DE ANTENA

Un RT actúa como un radiómetro para determinar la temperatura de los objetos celestes.

$$\omega = \frac{1}{2} A_e \iint B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega = k T_A$$

Densidad de flujo y Temperatura

$$S_o = \iint_{\text{fuente}} B(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega = 2 k T_A / A_e$$

$$B_s = \frac{2k}{\lambda^2} T_s$$

$$T_A = \frac{A_e}{\lambda^2} \iint T_S(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \iint T_S(\theta, \phi) P_n(\theta, \phi) d\Omega$$

T_s : temperatura de la fuente (lo que queremos medir)

T_A : debida a la fuente (lo que medimos con el RT)

T_A es la convolución de T_s con la respuesta espacial del telescopio.





TEMPERATURA DE ANTENA

The Kölner Observatorium für SubMillimeter Astronomie (KOSMA) 3m telescope

<http://www.ph1.uni-koeln.de/gg/>



Telescopio Infrarosso del Gornergrat (TIRGO)
<http://www.arcetri.astro.it/irlab/tirgo/>

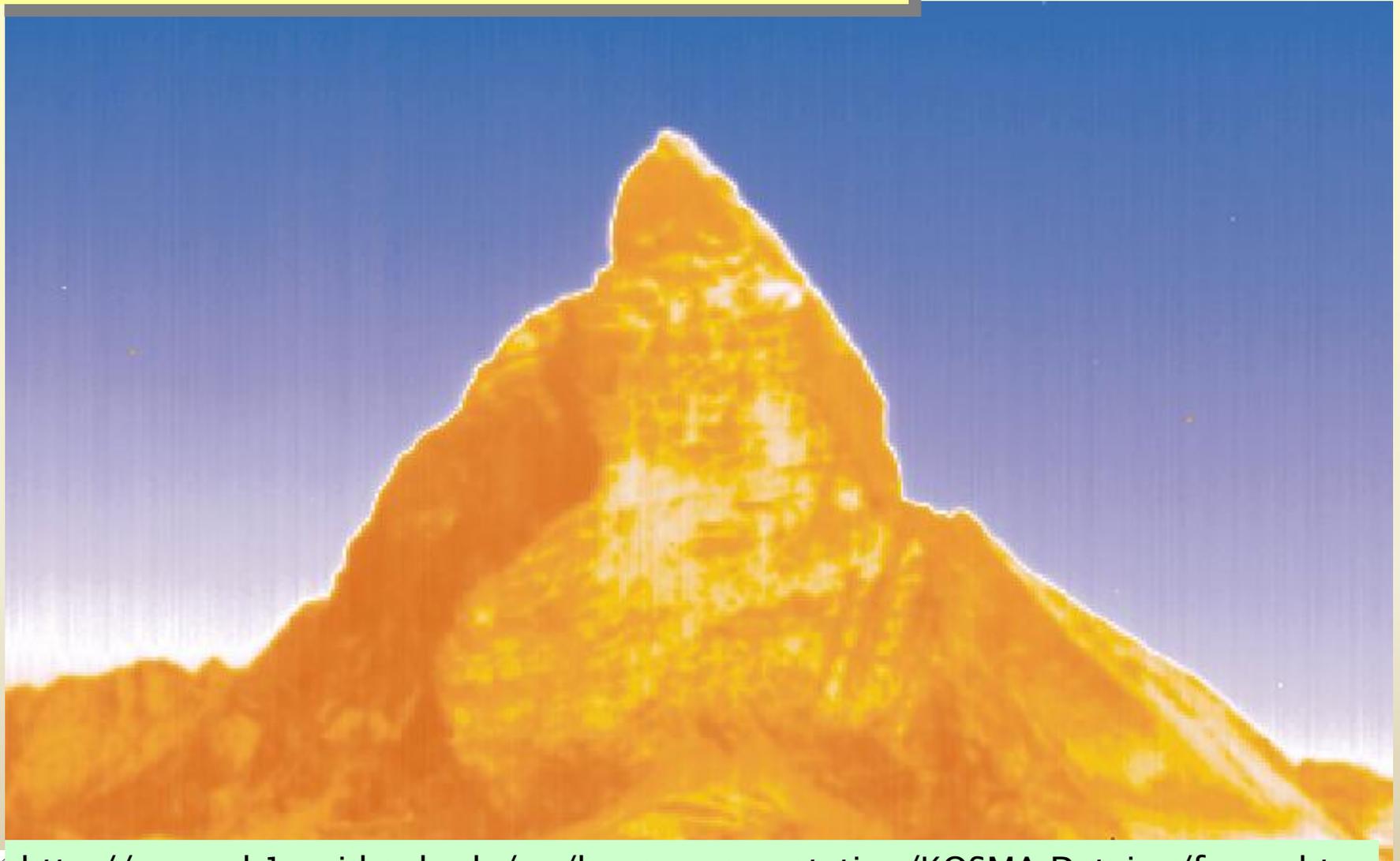
Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)





El Cervino (Matterhorn) observado en 4 mm.
© M. Miller. (KOSMA)



<http://www.ph1.uni-koeln.de/gg/kosma-presentation/KOSMA-Dateien/frame.htm>



Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

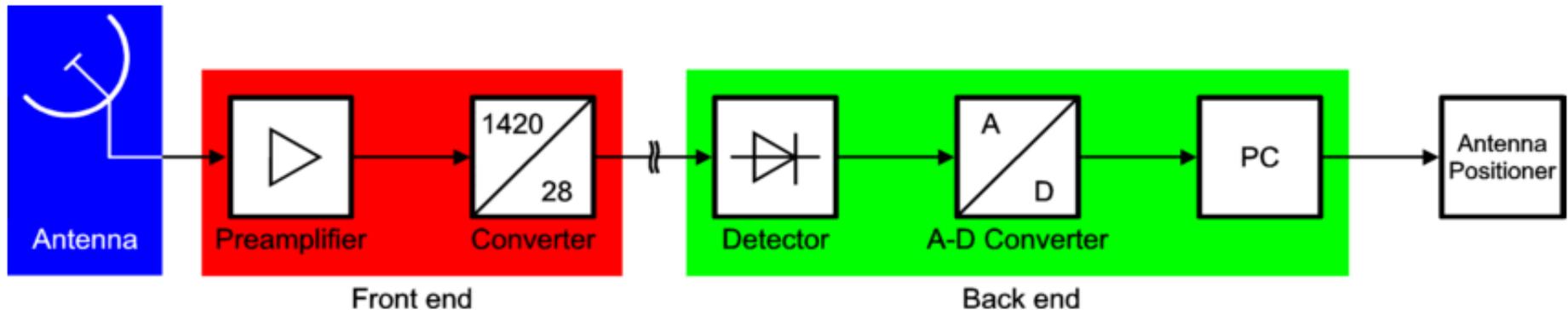
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



RADIO TELESCOPIOS

Fundamentos

- Las medidas en RA se realizan con ayuda de una radio antena
- La antena es el colector. Los fotones radio son poco energéticos
→ antena debe ser de gran tamaño
- La señal es preamplificada → cable → receptor principal.
- Receptor en la antena o en edificio adyacente.
- Además: fuentes de calibración y ordenadores.
- Señal detectada e integrada en el receptor.
- Resultado almacenado para posterior tratamiento.

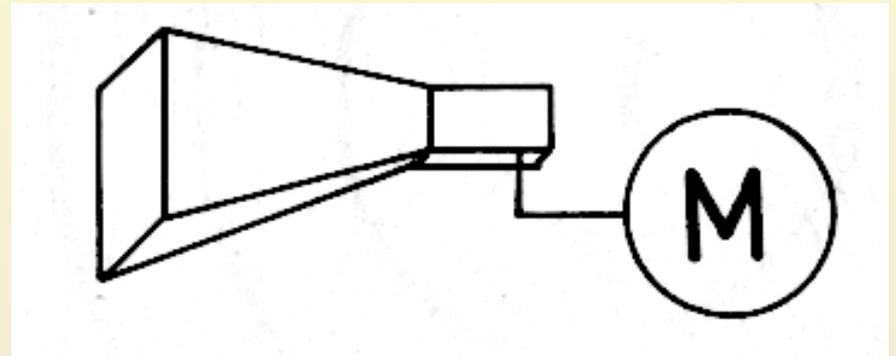
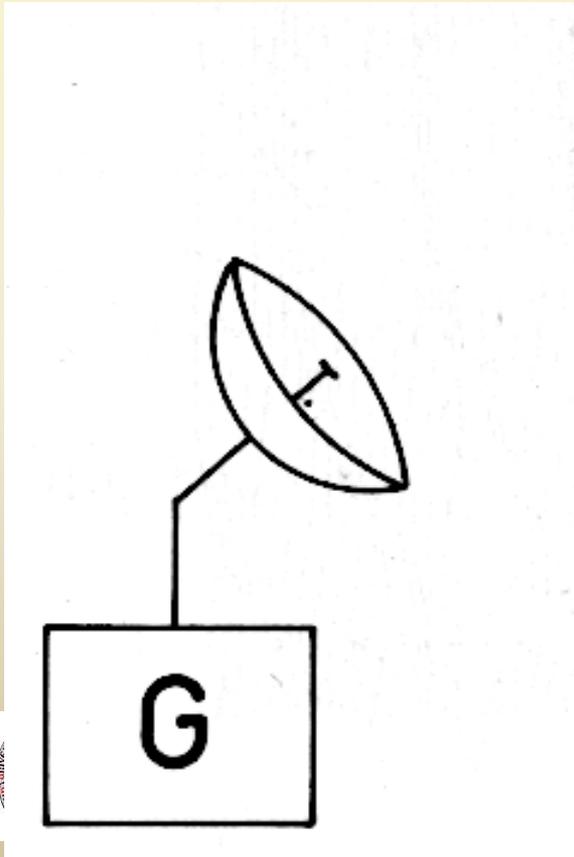




RADIO TELESCOPIOS

Antenas

- Es la región de transición entre onda libre y guiada (recepción)
- Idem al revés en emisión.

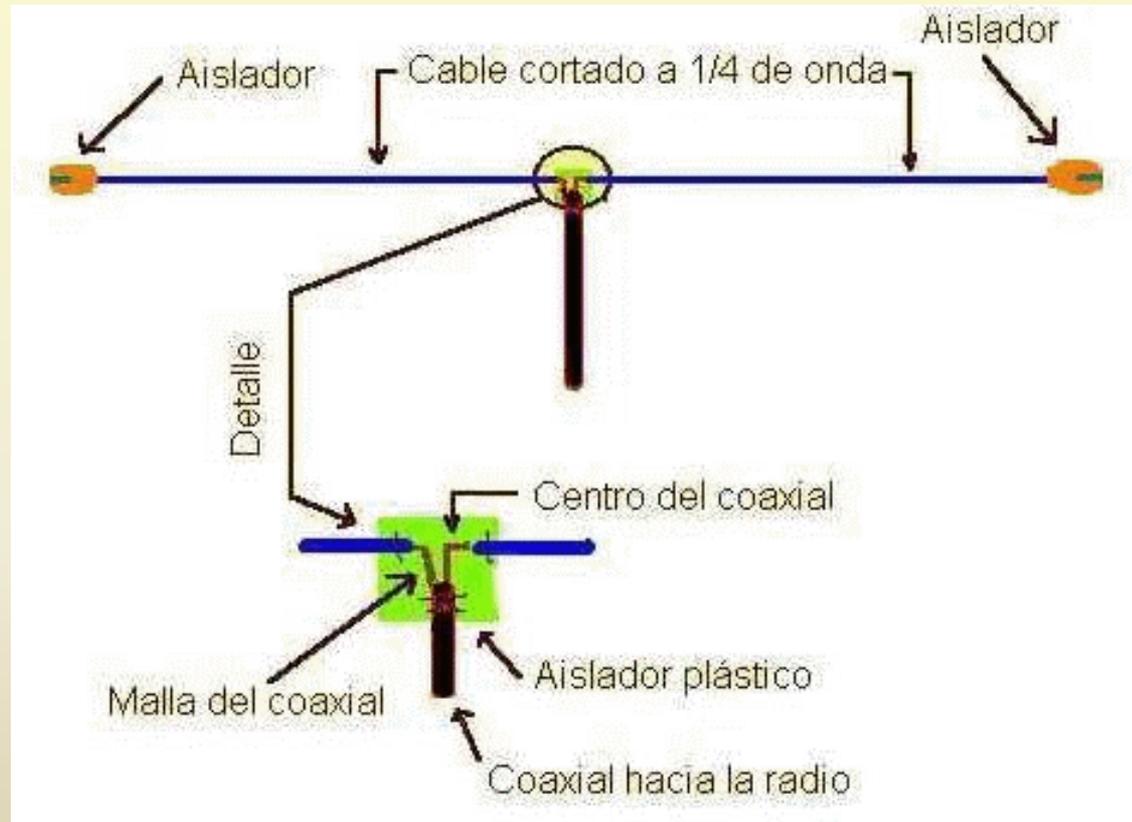


- Th de reciprocidad (Rayleigh y Helmholtz): Las propiedades de una antena son las mismas en recepción y emisión.
- No importa qué antena emite y cuál recibe.



PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

- La antena más sencilla es el dipolo de Hertz (1888) que puede ser investigado teóricamente.



- Emisión:
una corriente variable produce un campo EM que se propaga radialmente hacia el exterior.
- Absorción:
campo EM variable que llega al dipolo induce corrientes variables que pueden ser registradas.

- Antenas más complicadas sólo pueden ser estudiadas empíricamente.



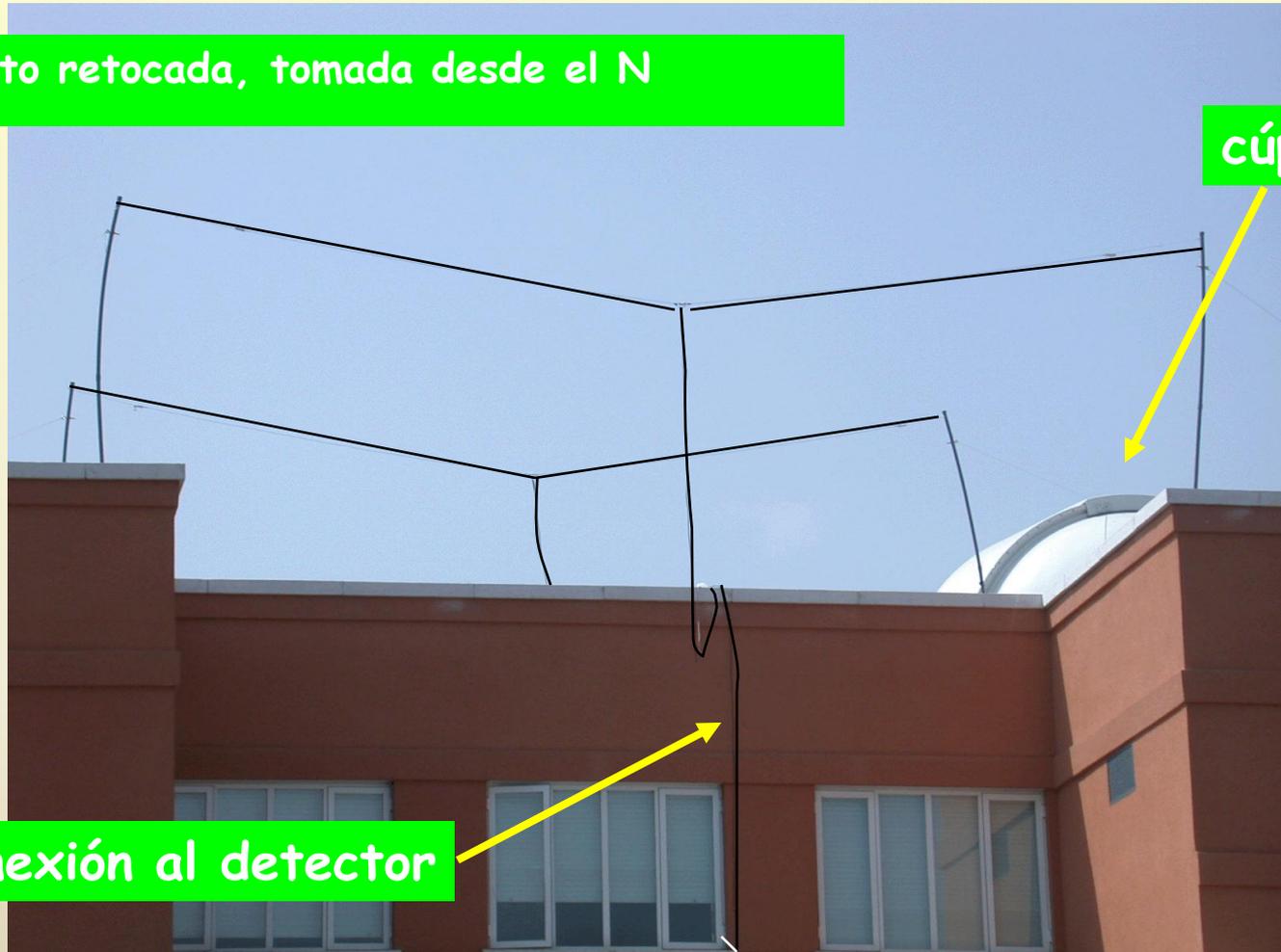


Radio telescopio del observatorio UCM

Foto retocada, tomada desde el N

cúpula W

conexión al detector



<http://www.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/RADIO/>

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

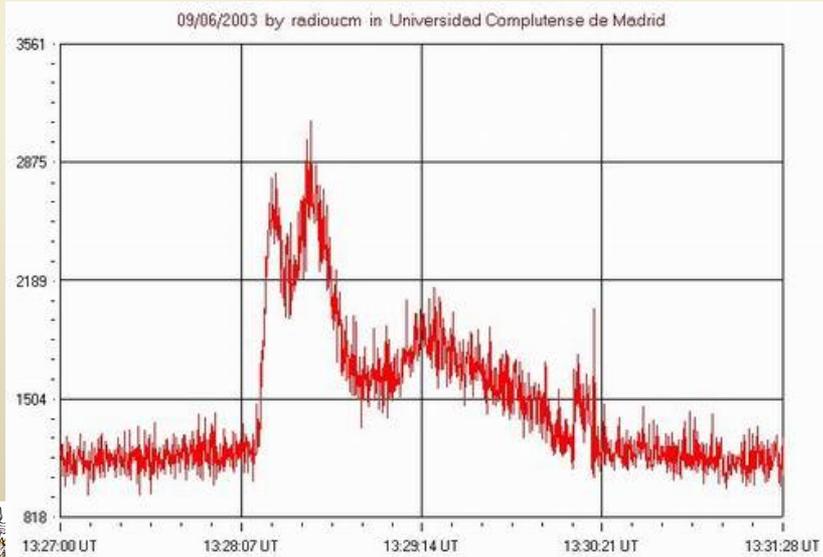




Radio telescopio del observatorio UCM



Radio telescopio del observatorio UCM

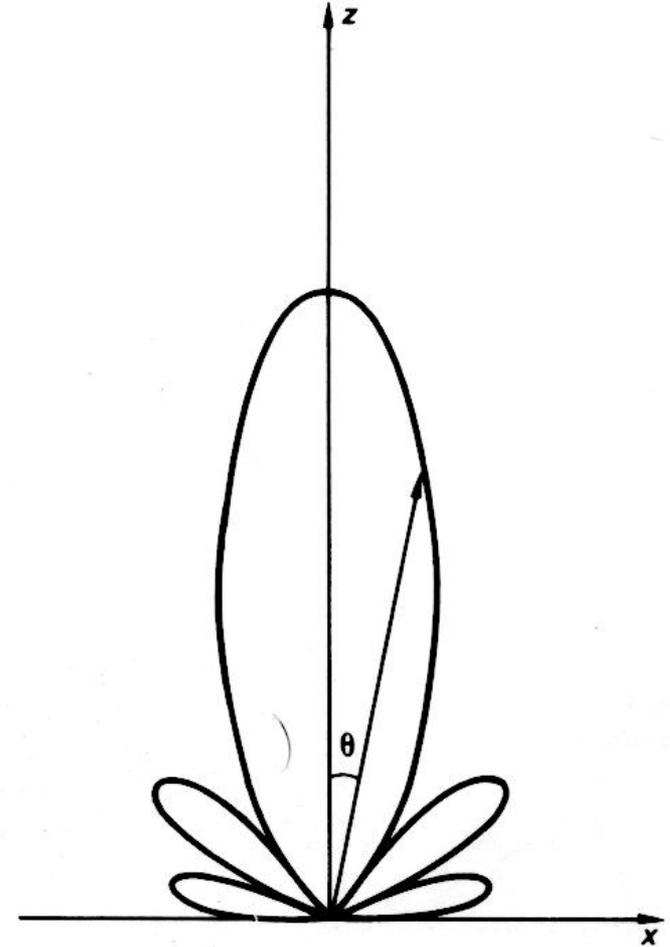




PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Diagrama polar de antena

- Representa la respuesta de la antena a la llegada de radiación.
- Por Th. Reciprocidad: mismo diagrama en emisión y absorción.
- Diagrama polar de campo lejano.
- Diagrama de potencia.
- Simetría de revolución (no siempre)
- Si no simétrico: diagrama polar según los planos principales.



Roy & Clarke fig 18.2 Diagrama polar de antena en coordenadas polares.

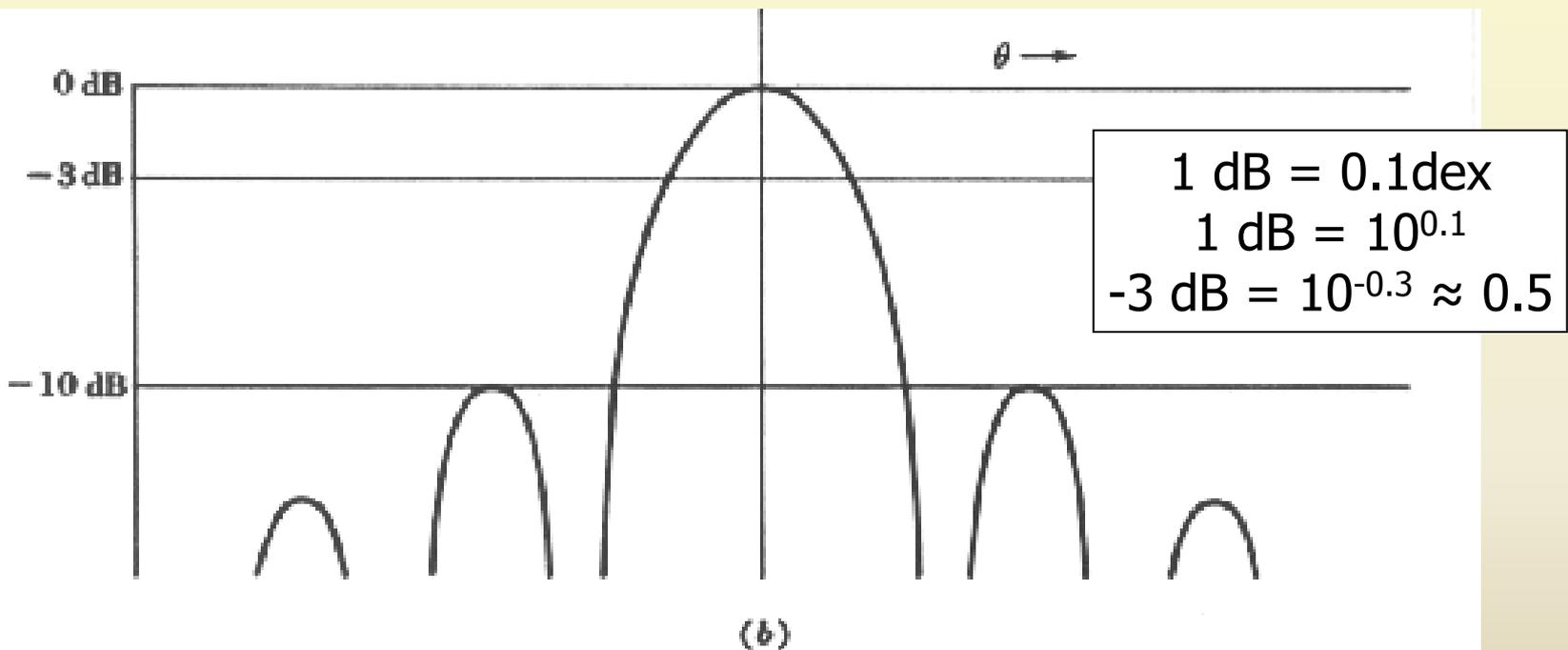




PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Diagrama polar de antena

- Se determina empíricamente apuntando a una fuente patrón.



Kraus fig 6.1

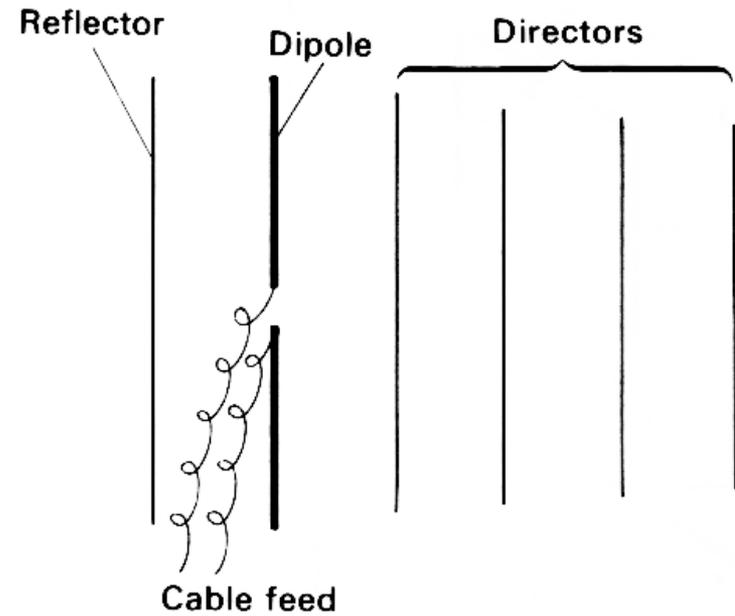
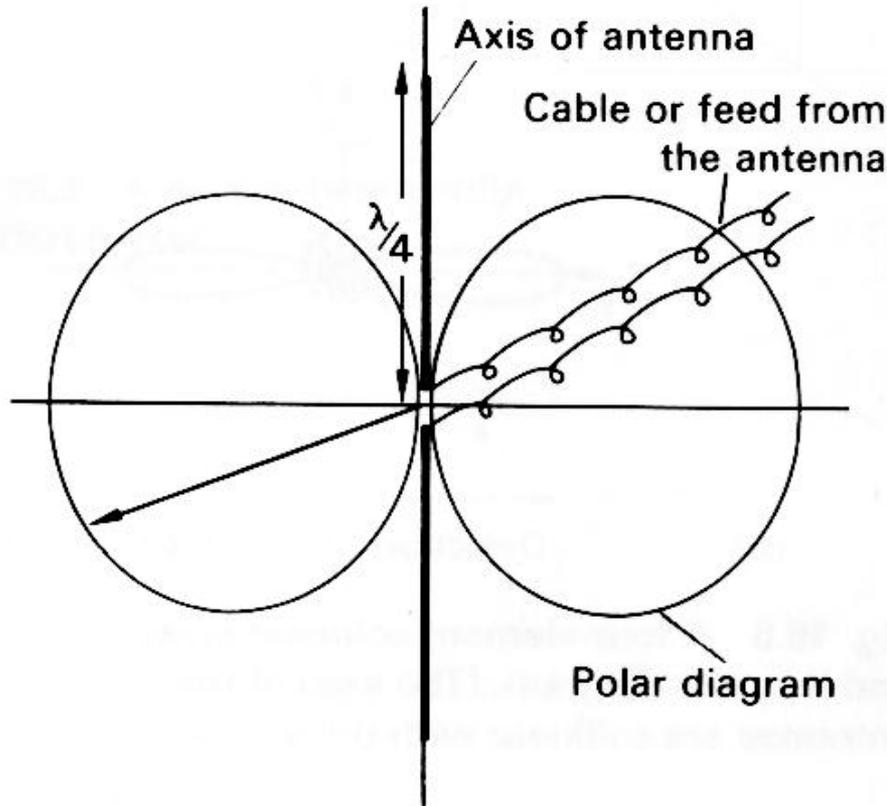
Diagrama polar en coordenadas rectangulares y escala de decibelios.



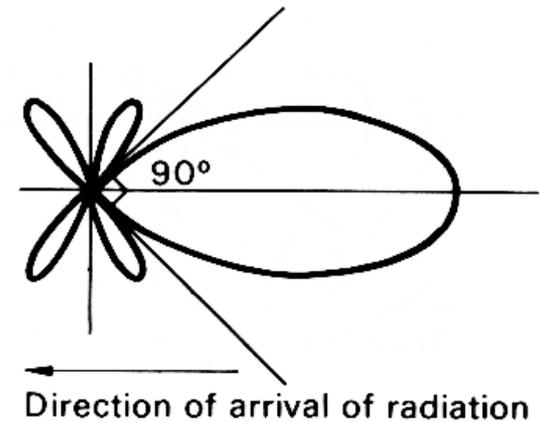


PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Diagrama polar de antena



(a)



(b)

Roy & Clarke figs 18.4-18.5

Diagrama polar para un dipolo y antena de Yagi y su diagrama polar.

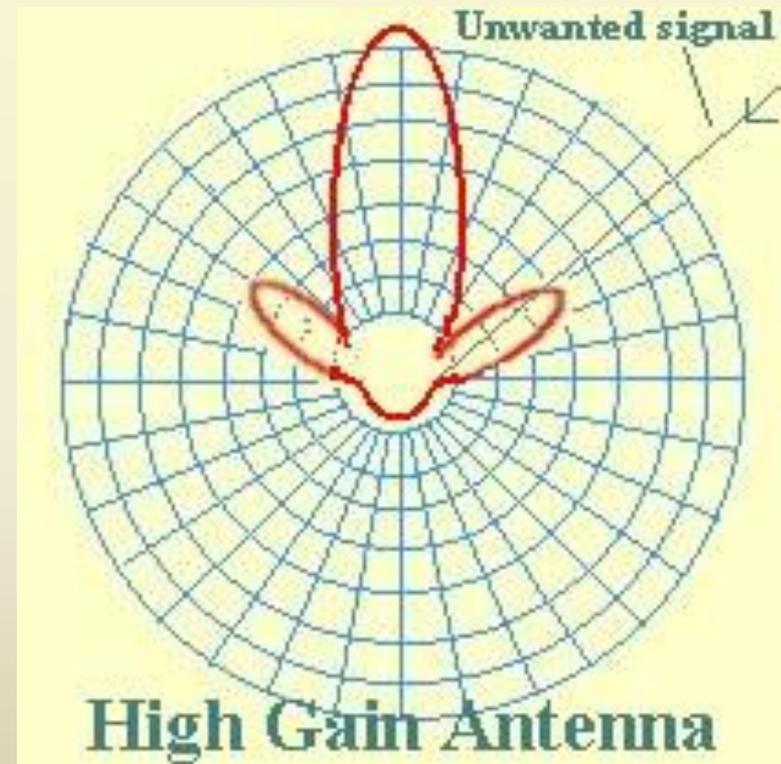
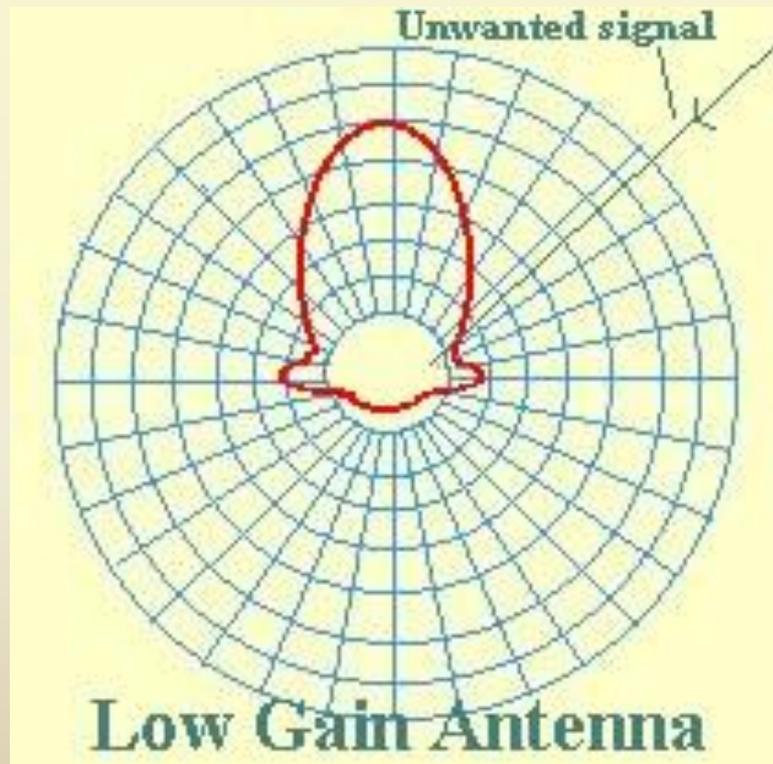
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, F.G. Perez-Gonzalez)





PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

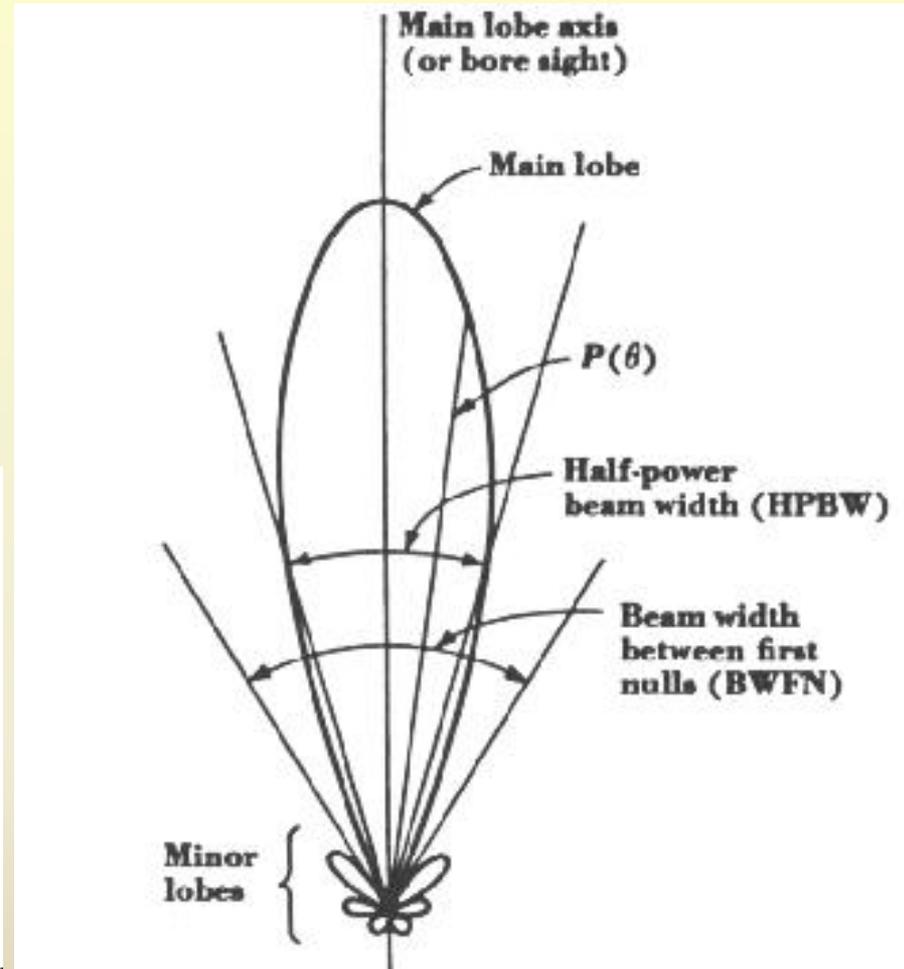
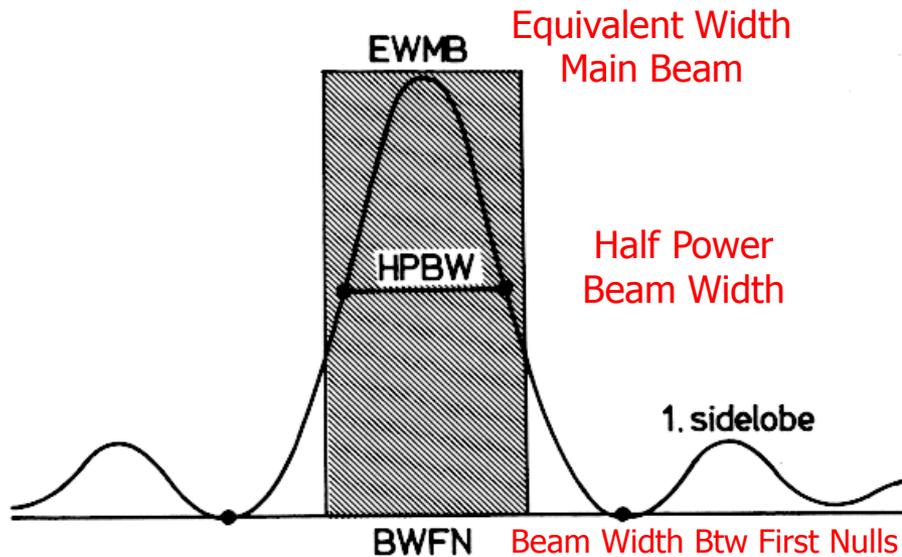
Diagrama polar de antena



PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Anchura del haz

- Medida numérica del diagrama polar en términos de la anchura angular del haz (lóbulo principal a diferentes niveles).
- Ligado a tamaño de la antena y a λ .



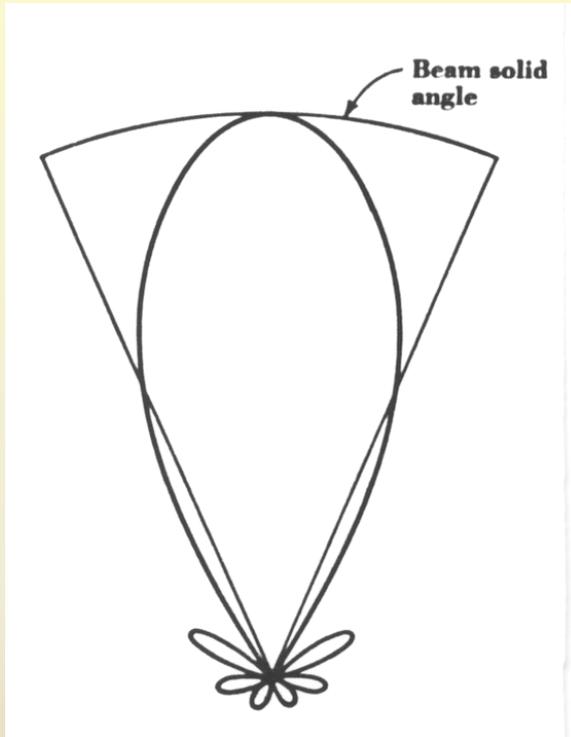
- Si no hay simetría: anchura del haz según los planos principales.

Rolhfs fig. 4.6 y Kraus fig. 6.1



PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Ángulo sólido del haz



Kraus fig. 6.2

Toda la potencia de la antena saldría (emisión) si ésta fuera cte y máximo a lo largo de ese ángulo sólido y nulo en el resto.

$$\Omega_A = \int \int_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (\text{rad}^2)$$

$$d\Omega = \text{sen}\theta d\theta d\phi$$

$$P_n(\theta, \phi) = P(\theta, \phi) / P_{max}(\theta, \phi)$$





PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Ángulo sólido del haz principal

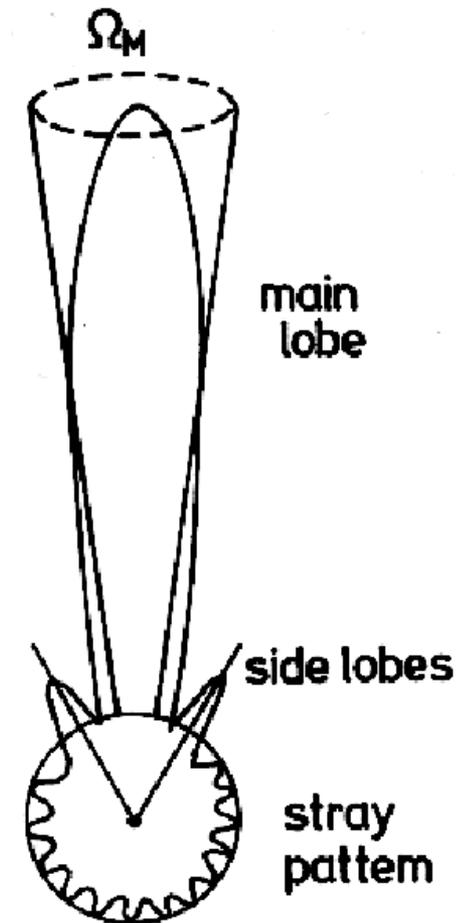
Como el ángulo sólido del haz pero restringiendo la integral al lóbulo ppal o, lo que es lo mismo, entre los primeros ceros.

$$\Omega_M = \iint_{lob.ppal} P_n(\theta, \phi) d\Omega \quad (rad^2)$$

$$\Omega_m = \Omega_A - \Omega_M$$

$$\epsilon_M = \Omega_M / \Omega_A$$

Ω_M	ángulo sólido del haz principal
Ω_m	ángulo sólido de los lóbulos menores
$\Omega_m = 0$	si no existen ($\Omega_A = \Omega_M$)
ϵ_M	eficiencia del haz



Rolhfs fig. 4.5



PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Directividad

- Cociente entre la intensidad máxima de radiación (antena emitiendo) y la promedio.

$$D = \frac{U_{max}(\theta, \phi)}{U_{med}}$$

$$U_{med} = \frac{1}{4\pi} \iint_{4\pi} U(\theta, \phi) d\Omega$$

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} \frac{U(\theta, \phi)}{U_{max}(\theta, \phi)} d\Omega} = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} P_n(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

- Ganancia directiva (que sí depende de la dirección)

$$D(\theta, \phi) = D P_n(\theta, \phi)$$

$$\iint_{4\pi} D(\theta, \phi) d\Omega = 4\pi$$

$$P_n(\theta, \phi)_{max} = 1 \rightarrow D_{max}(\theta, \phi) = D$$



PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Abertura efectiva

Supongamos una onda de flujo S interceptada por una antena y que P_e sea la potencia extraída por la antena de esa onda.

$$A_e = \frac{P_e}{S}$$

$$[S] \text{ W m}^{-2} ; [P_e] \text{ W}$$

Es una magnitud similar a una sección eficaz.

Eficiencia en la abertura

$$\epsilon_a = \frac{A_e}{A_p}$$

Depende de la orientación relativa de la antena y alcanza el máximo con la antena apuntando al objeto.





PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

Abertura efectiva y directividad

$$D = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \rightarrow (D = 4\pi/\Omega_A) \rightarrow A_e \Omega_A = \lambda^2$$

La resolución espacial de una antena es \sim HPBW.
Fuentes individuales que una antena puede resolver.

más conservador
pero erróneo también.

N es un orden de magnitud menor que D.

$$N = \frac{4\pi}{\Omega_M} ; N = \frac{4\pi}{\Omega_A} = D$$

Directividad: cota superior al núm de fuentes separables por la antena.

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A} = \frac{4\pi \epsilon_M}{\Omega_M} = \frac{4\pi \epsilon_M}{K_p \theta_{HP} \phi_{HP}}$$

$K_p = 1.05 \pm 0.05$ depende de la forma del diagrama
 $\theta_{HP}; \phi_{HP}$ (rad) HPBW en planos principales
 $\epsilon_M = 0.75 \pm 0.15$ eficiencia del haz



DISEÑO DE ANTENAS

En RA se usan en preferencia antenas parabólicas para colectar el máximo de fotones.

Las monturas acimutales son habituales.

Tras el reflector la onda plana se convierte en convergente hacia el foco.

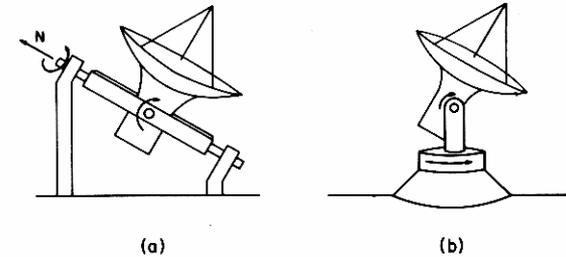
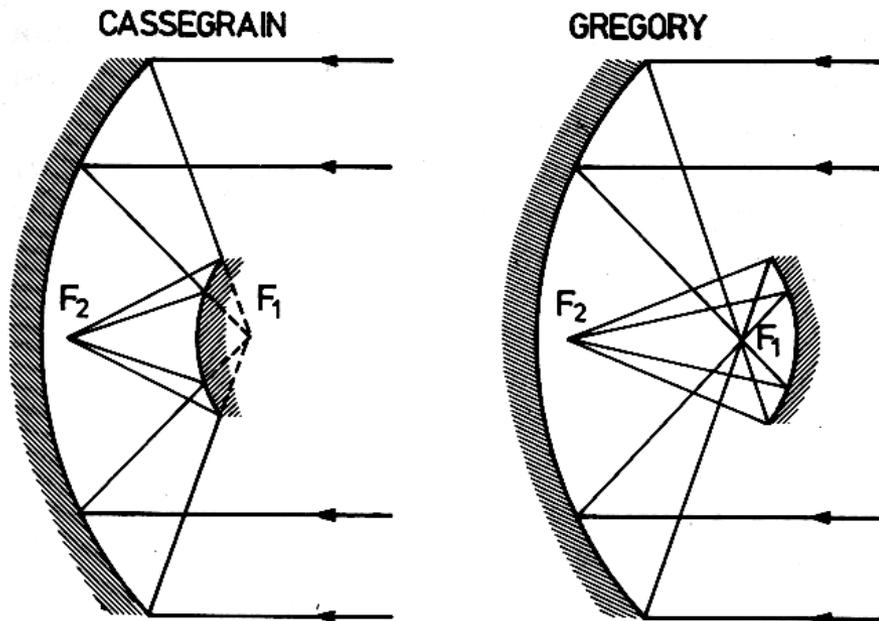


FIG. 4. Telescope mountings: (a) equatorial with one axis parallel to the pole of the earth; (b) azimuth elevation with one axis pointing to the local zenith.



Rolhfs fig. 5.8 Geometría de los sistemas Cassegrain y Gregory

Allí el 'feed' la transforma en una onda dentro de una guía de ondas.

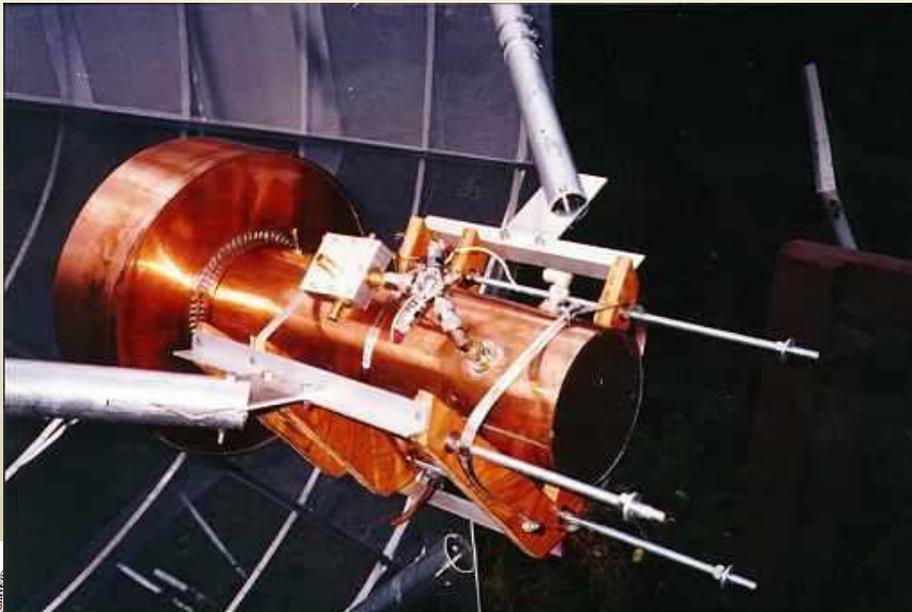
Si este dispositivo de alimentación es muy voluminoso se diseña la antena con un segundo reflector.



DISPOSITIVOS DE ALIMENTACIÓN

'Feed'

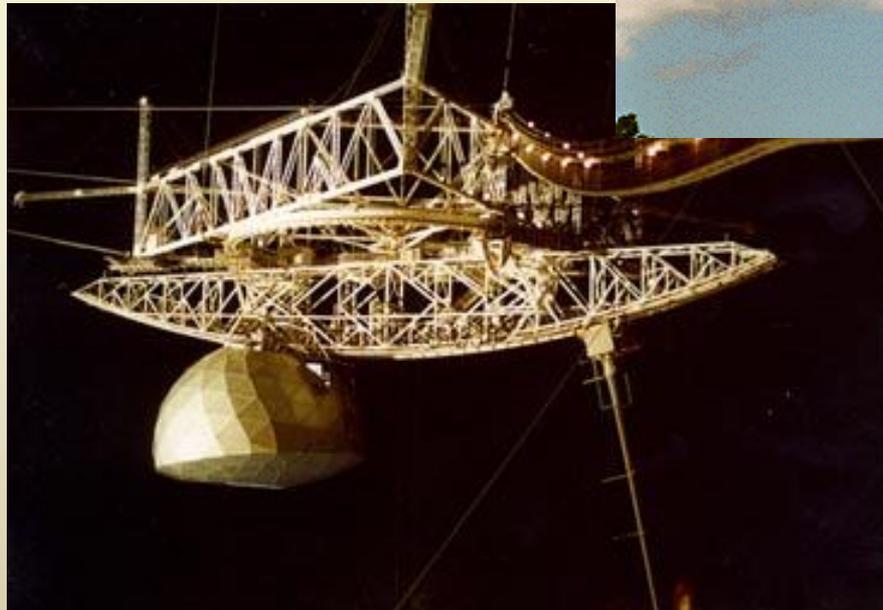
En antenas compuestas hay que tener en cuenta los diagramas polares de los elementos intermedios.





DISPOSITIVOS DE ALIMENTACIÓN

'Feed'



Dual - Dipole - Feed 432 MHz

reflector plane: 700x700mm

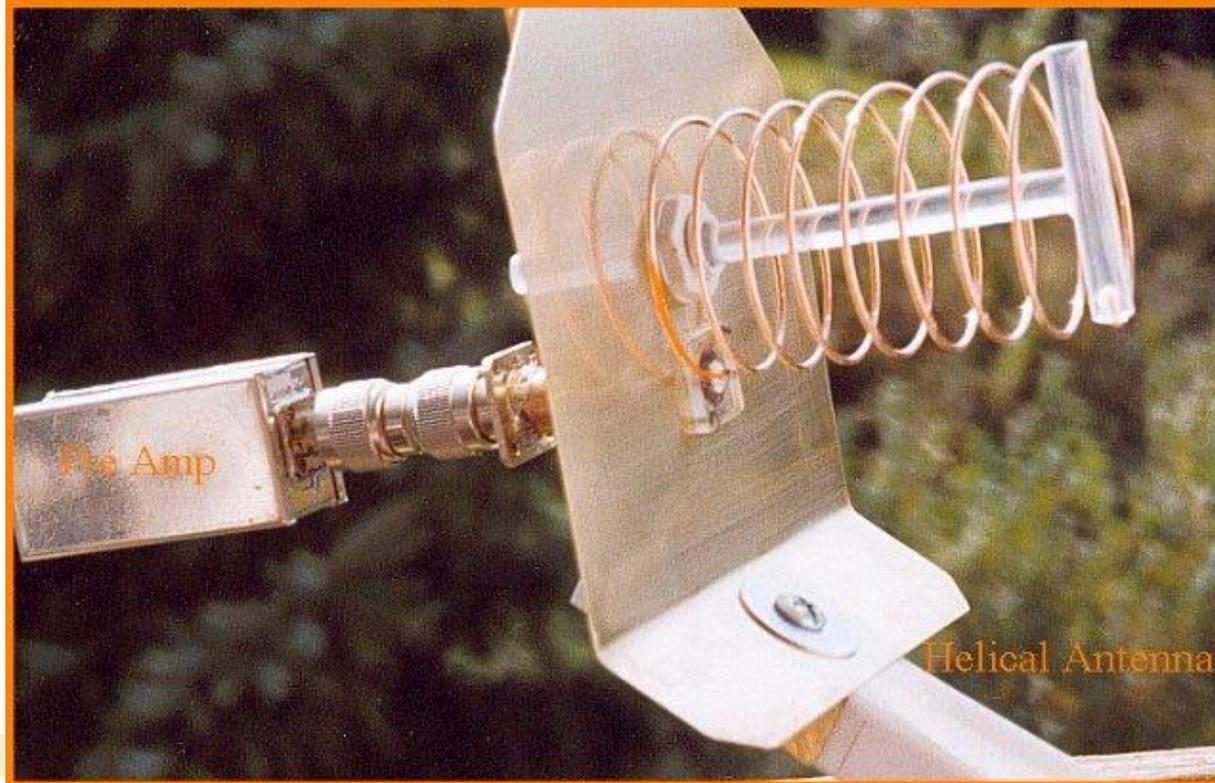
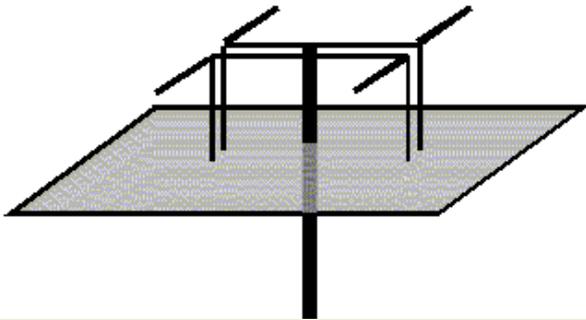
dipoles 340mm (adjust for best SWR)

170mm above reflector

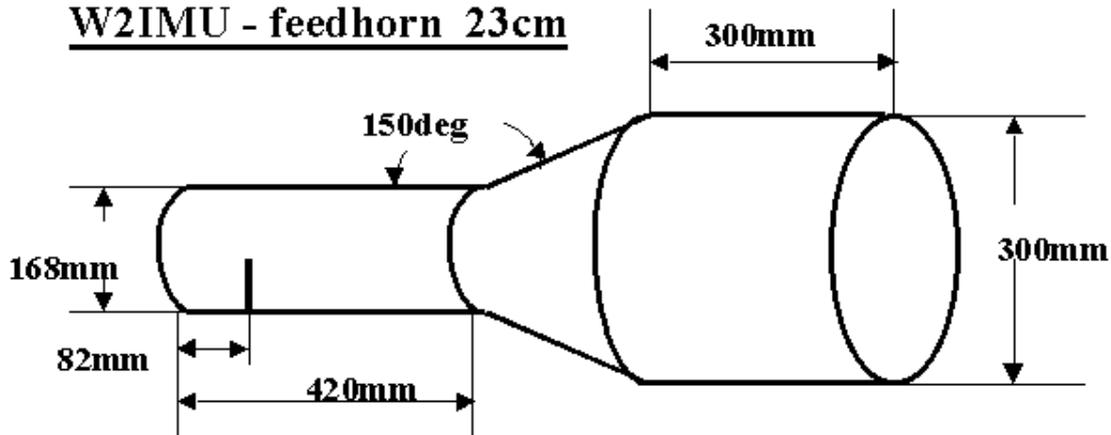
350mm stacking distance

connected by 75Ohm parallel line

fed by 50Ohm coax



W2IMU - feedhorn 23cm



monopole 50...55mm
cut for best SWR
(linear polarisation)

'Feed'



DISEÑO DE ANTENAS

La superficie reflectora tiene tolerancia $\lambda / 20$ generalmente.

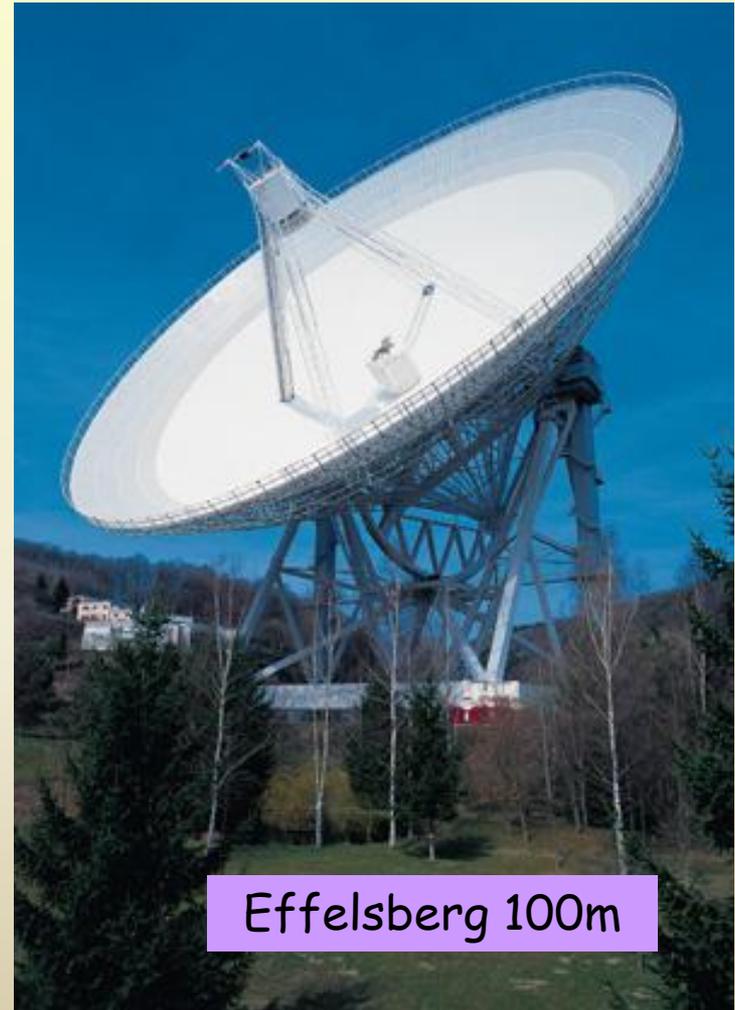
Ejemplo:

$\lambda = 2\text{mm} \rightarrow 0.1\text{ mm}$

$\lambda = 1\text{cm} \rightarrow 0.5\text{ mm}$



IRAM 30m



Effelsberg 100m





DISEÑO DE ANTENAS



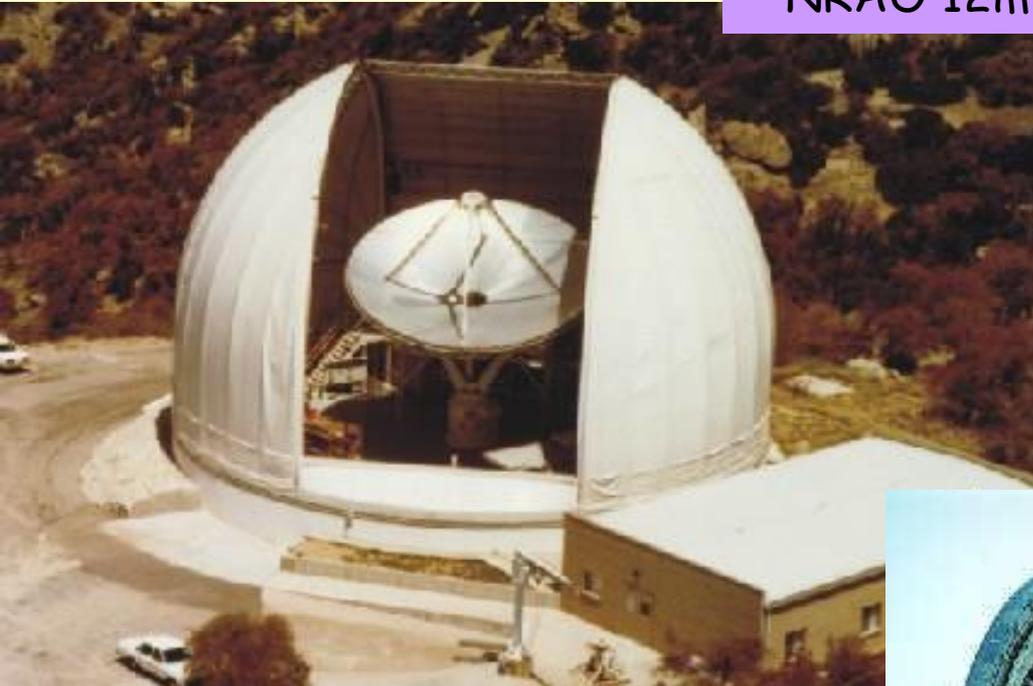
Yebes 14m





RT DE MILIMÉTRICAS

NRAO 12m



JCT 15m



CSO 10.4m

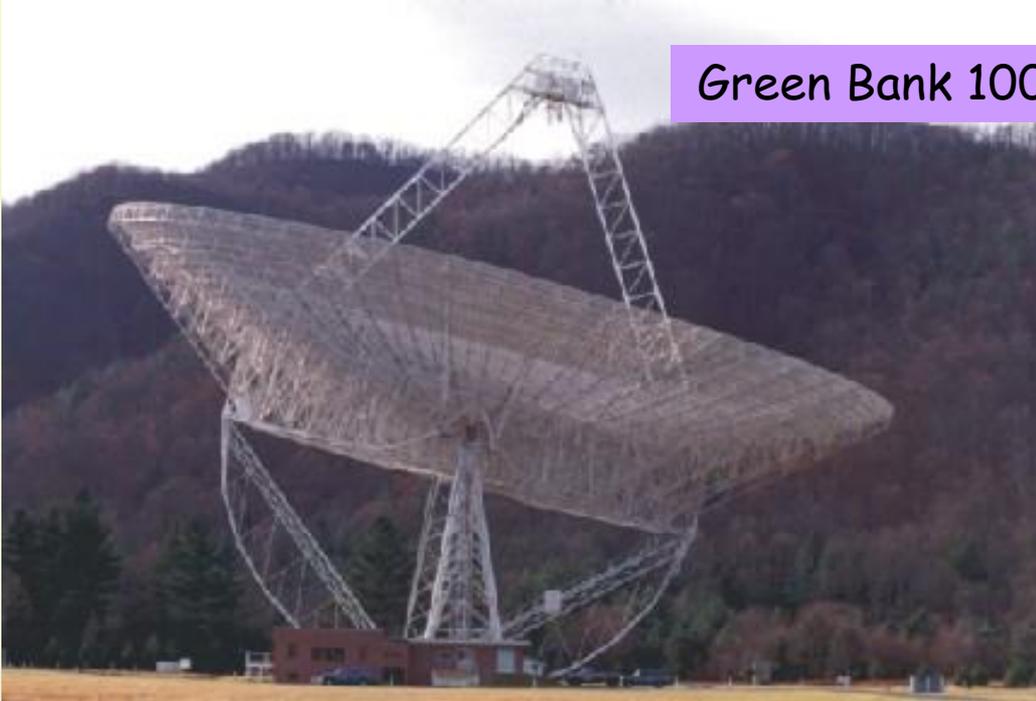




GRANDES PARÁBOLAS

Para grandes paraboloides existen problemas de deformaciones, apuntado y seguimiento.

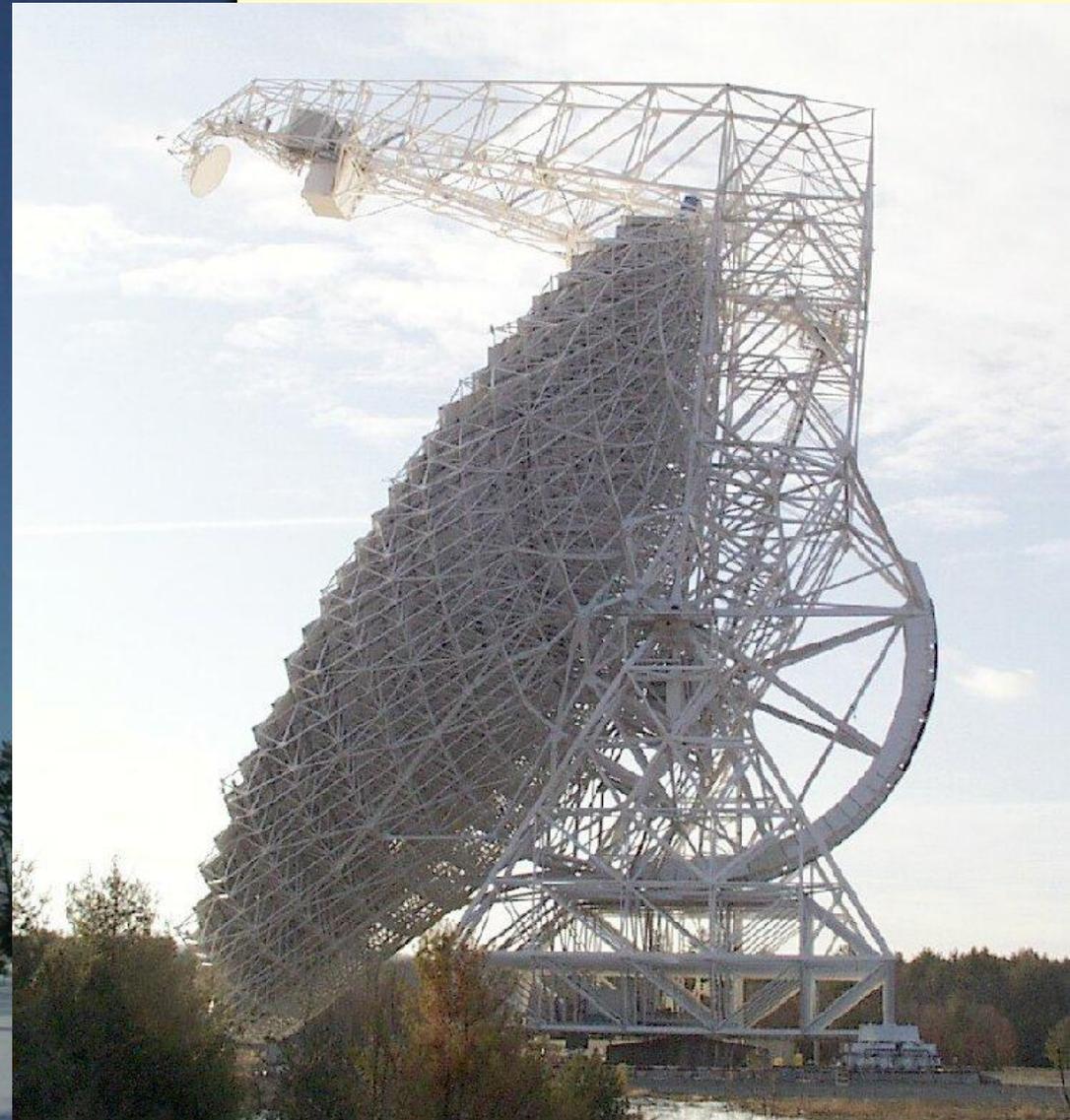
Green Bank 100ft



Effelsberg 100m



Green Bank Telescope (GBT) 100m

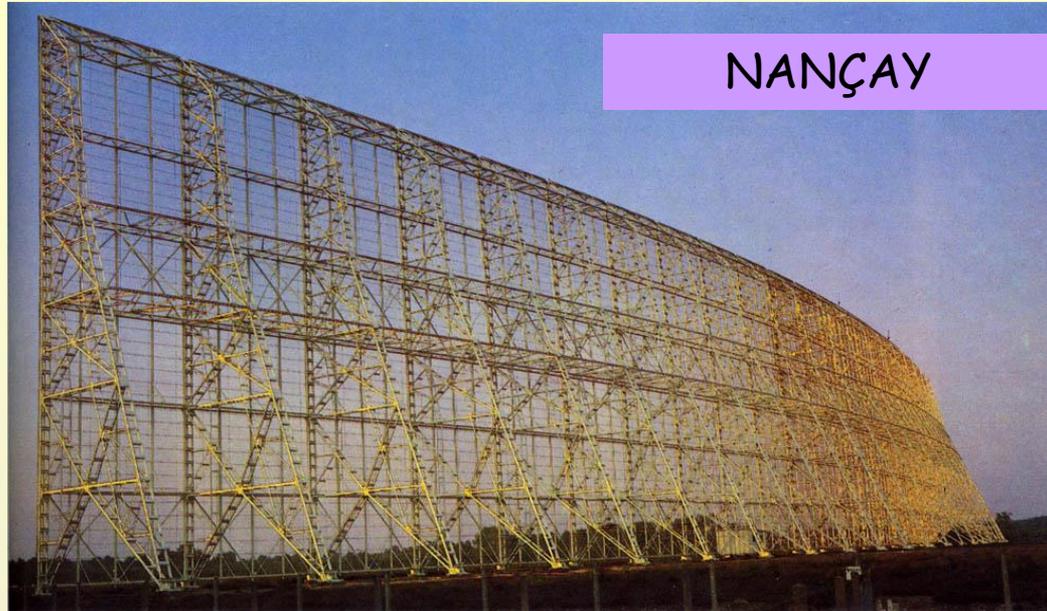


Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

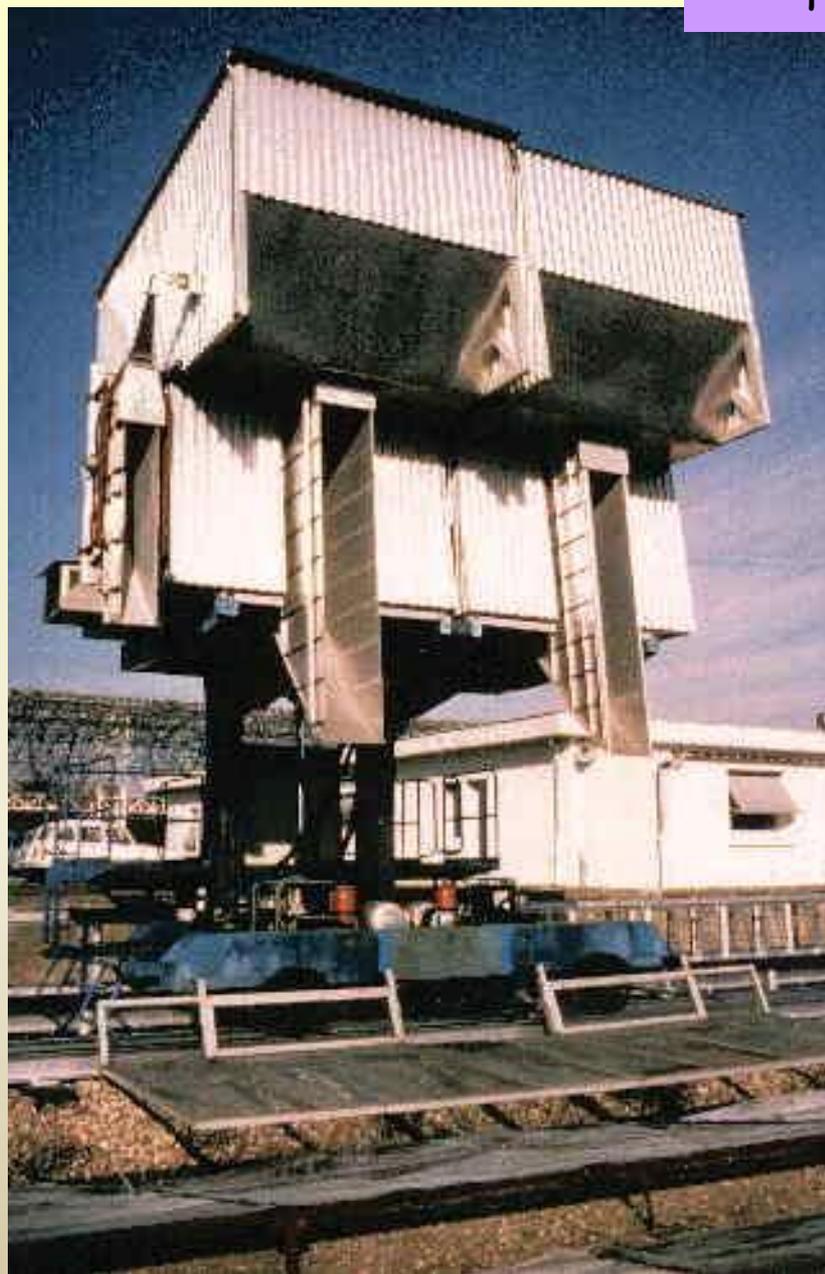






NANÇAY







¡Desmantelado en 1998 !

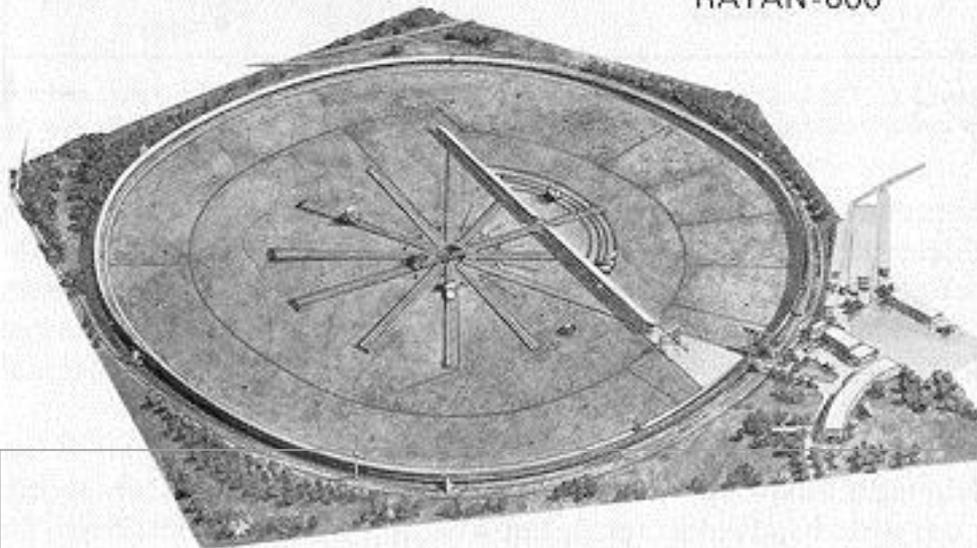
ronómica

Curso 2011/2012

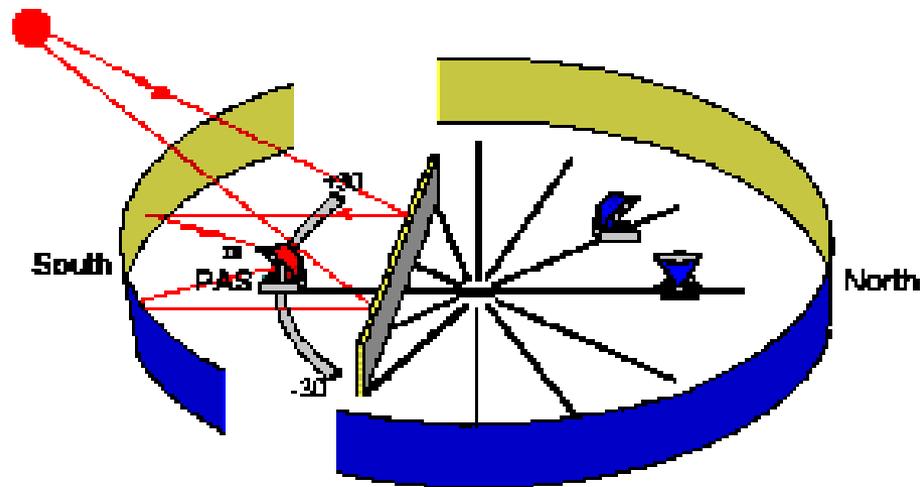
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



RATAN-600



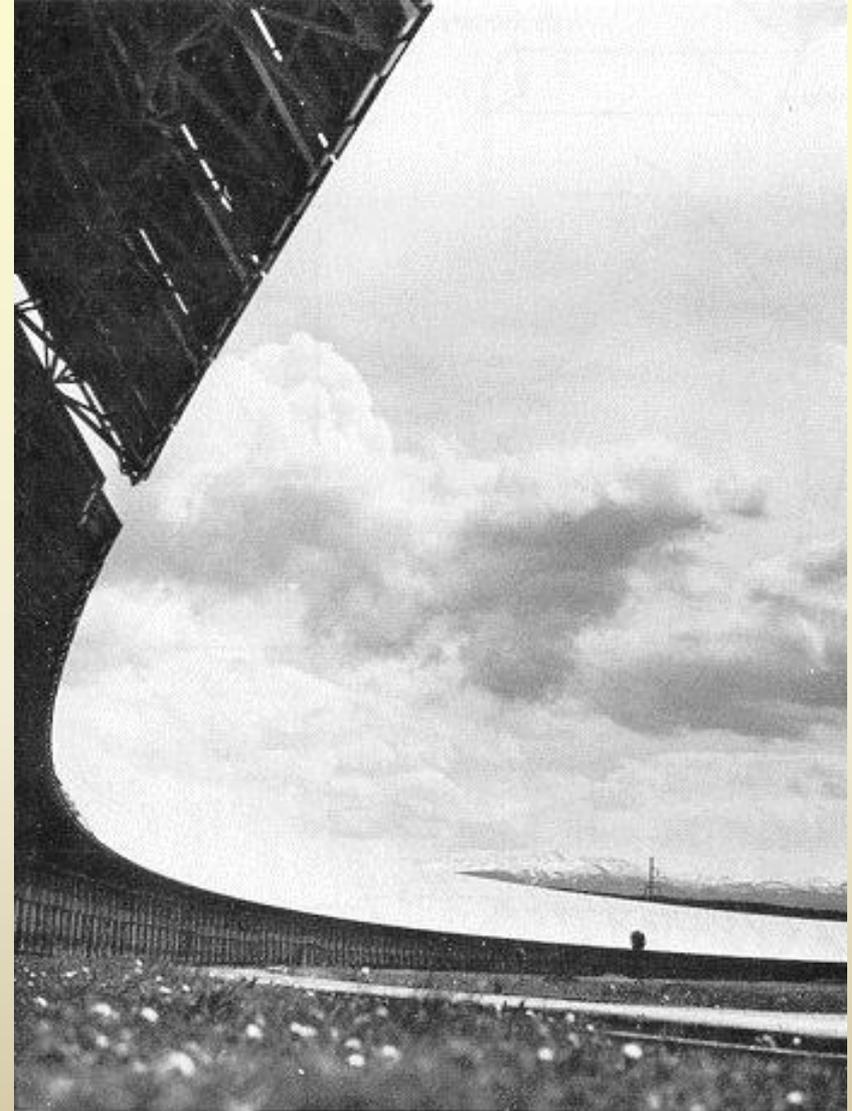
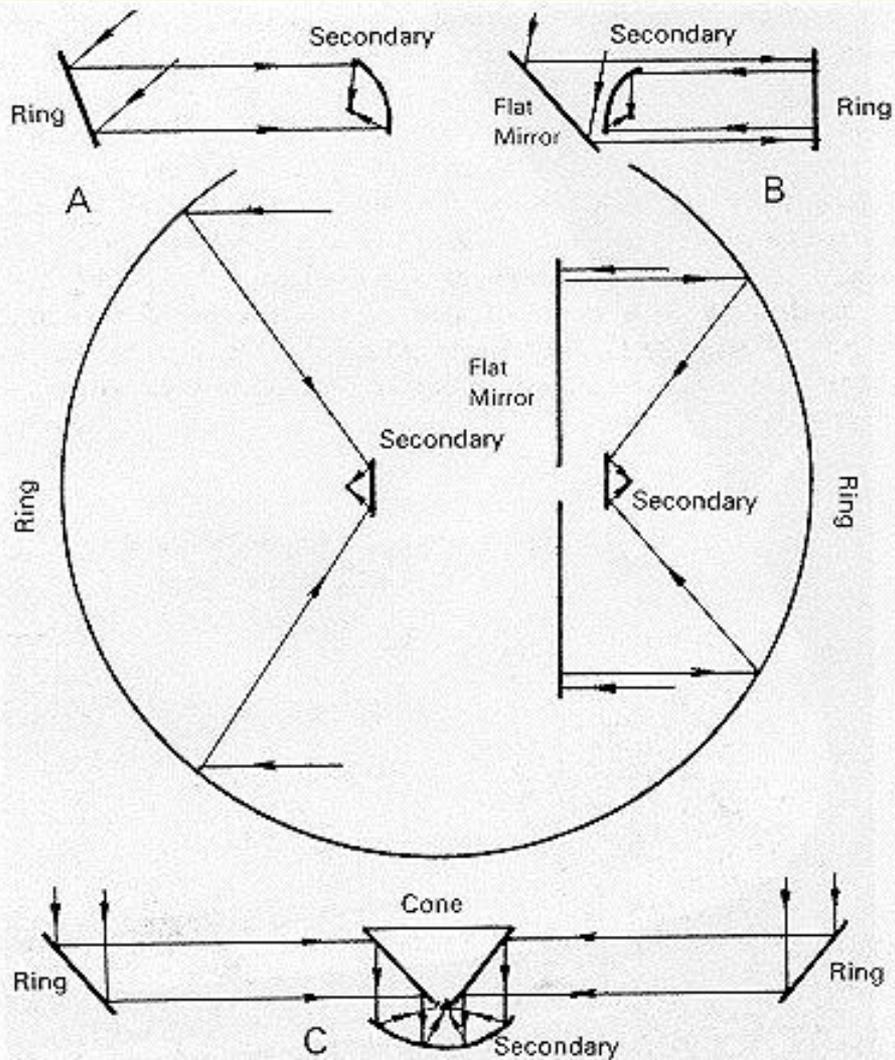
RATAN

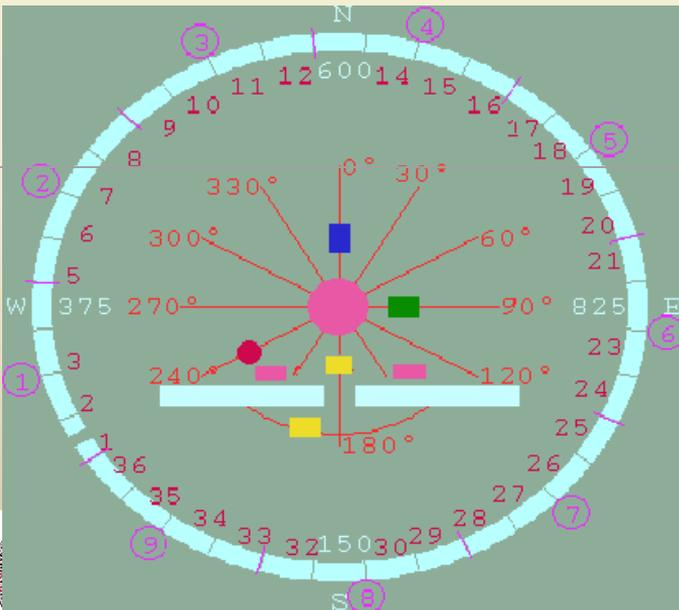
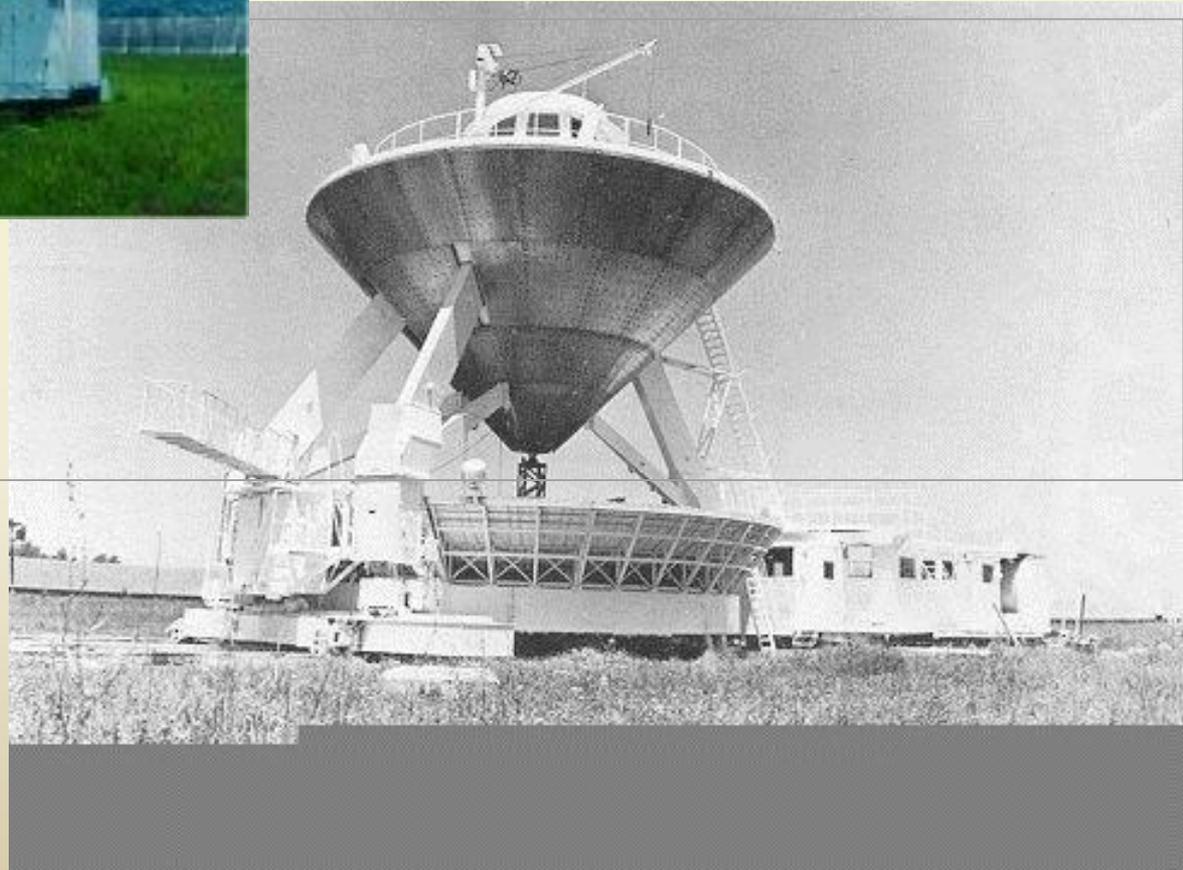


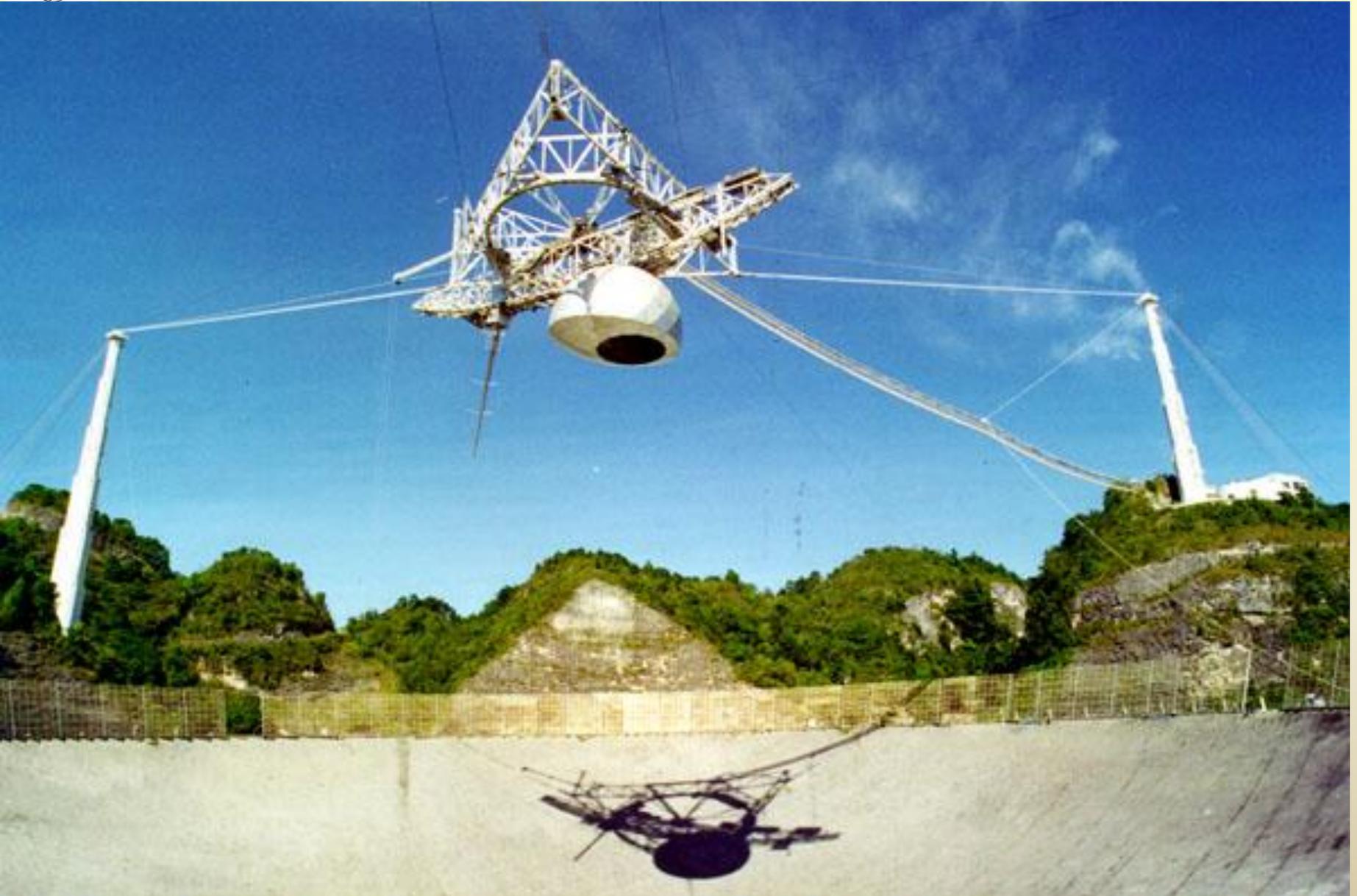
Círculo de 576-m con 895 elementos de (2 x 11.5 m)

Se puede observar simultáneamente con los diferentes sectores.

RATAN









ARECIBO 300m



Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



ARECIBO 300m





ARECIBO 300m



Instrumento
Curso 2011/2012

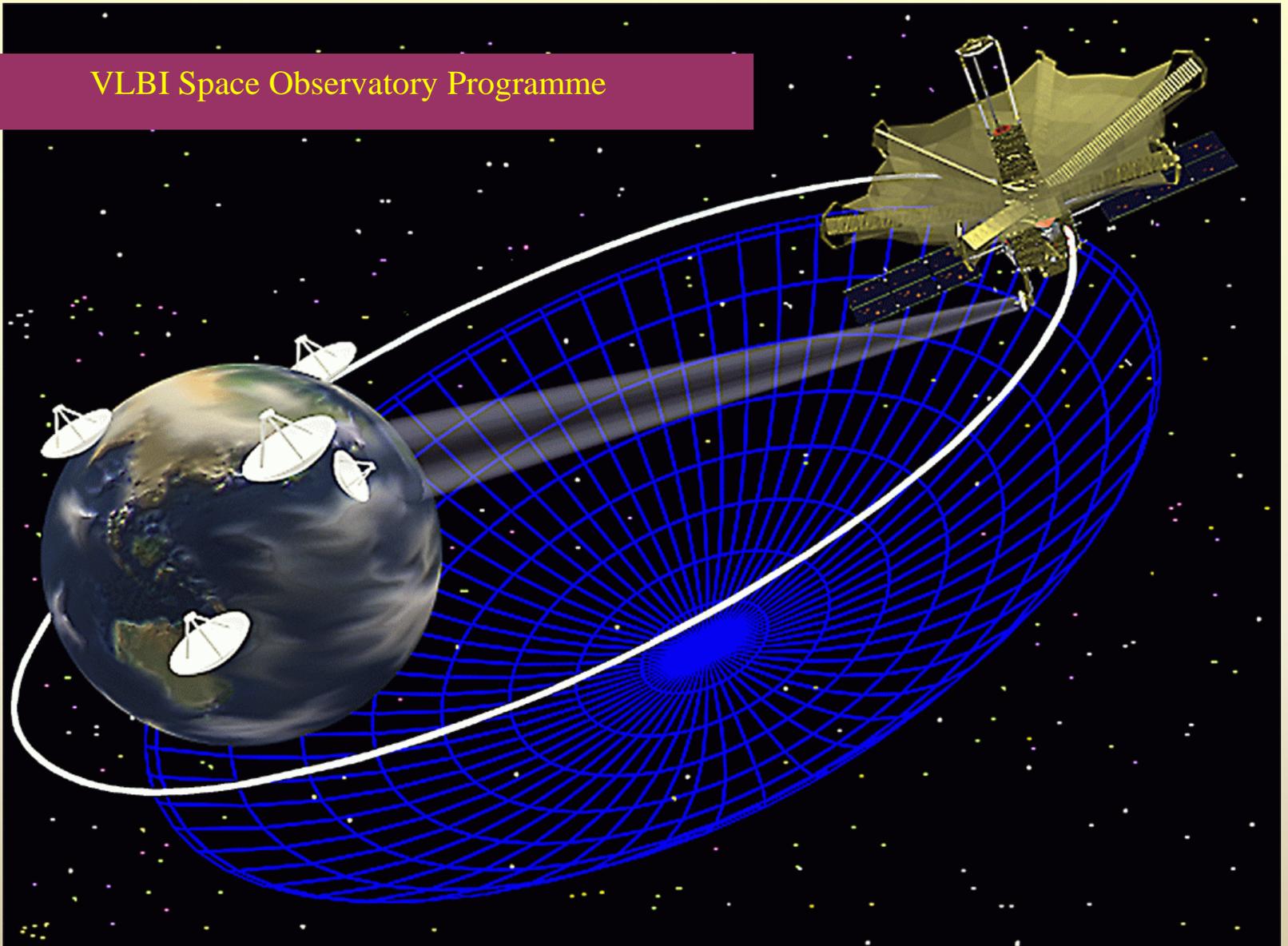
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)





INTERFEROMETRÍA

VLBI Space Observatory Programme



Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

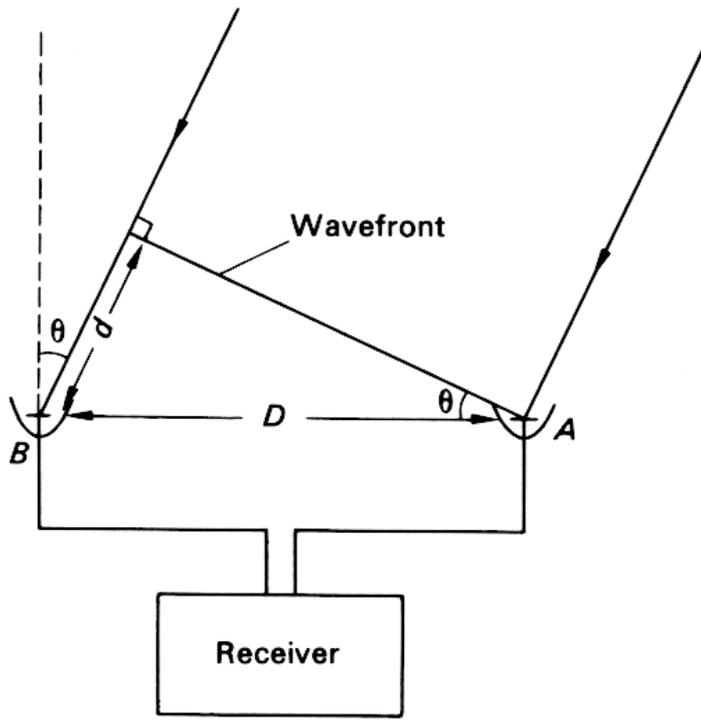




INTERFEROMETRÍA

Para obtener resoluciones en radio similares a las obtenidas en el óptico se necesitan RT de tamaño enorme.

Ejemplo: RT de 100m observando HI 21cm \rightarrow resolución 10'. $R = 1.22 \frac{\lambda}{D}$ (rad)



La solución la proporciona la Interferometría: se emplean varias antenas observando a la vez y se combinan sus señales.

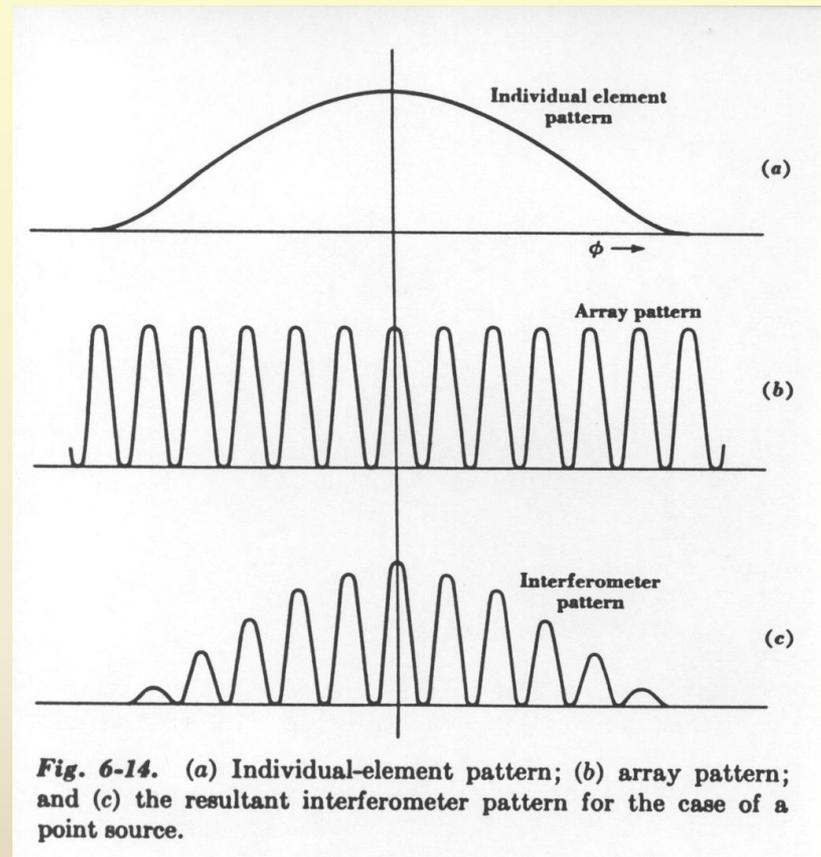
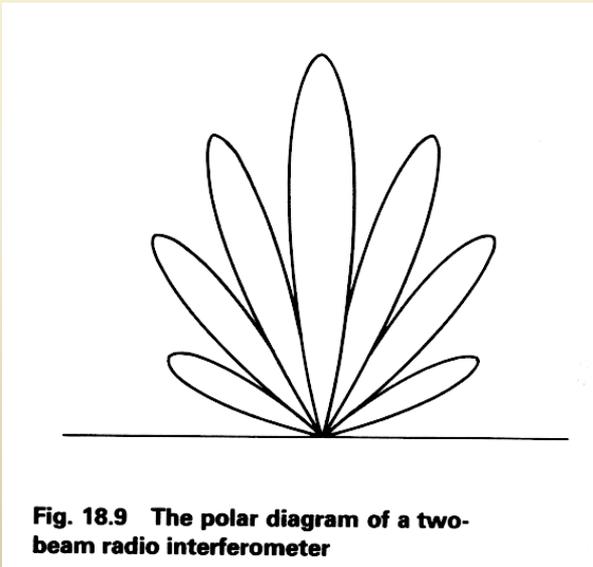
Interferencias constructivas

$$\left. \begin{array}{l} d = n \lambda \\ \text{sen } \theta = d/D \end{array} \right\} \Rightarrow \text{sen } \theta = n \lambda / D$$

Interferómetro de dos elementos

INTERFEROMETRÍA

- Si mantenemos el sistema interferométrico fijo y el objeto se mueve en el firmamento \rightarrow observamos un diagrama de interferencias con máximos y mínimos.
- El diagrama polar de un interferómetro sencillo tiene lóbulos laterales muy desarrollados.
- Estos lóbulos proyectados sobre el cielo son bandas.



El tamaño y posición de las bandas (de los lóbulos) depende de la posición relativa de los elementos.



INTERFEROMETRÍA

• Como todos los objetos en las bandas contribuyen a la señal este sistema es poco eficaz para discriminar la dirección de procedencia de la radiación (que es lo que se pretende).

• SOLUCIÓN:

→ aumentar el número de elementos.

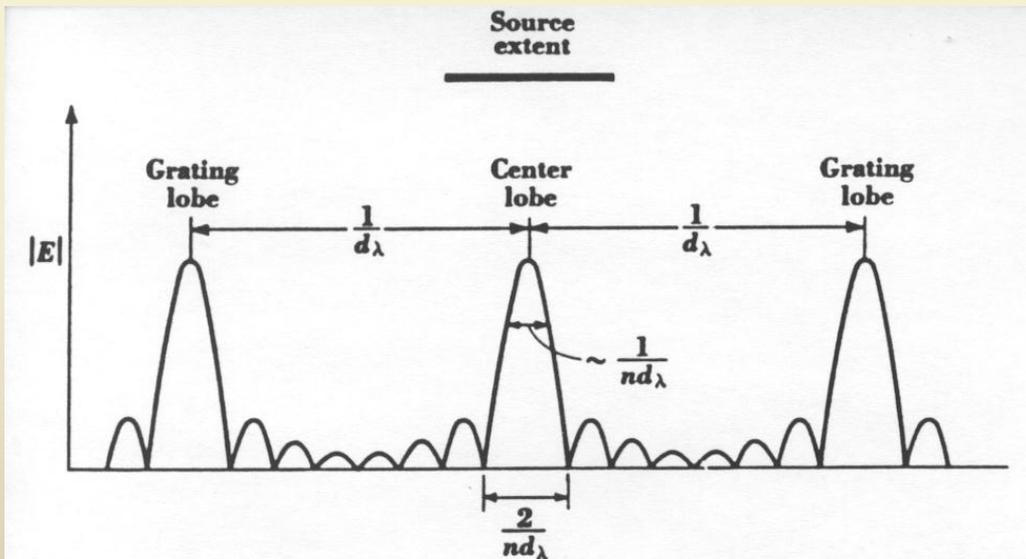
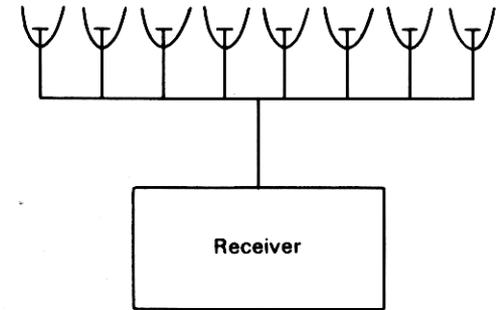
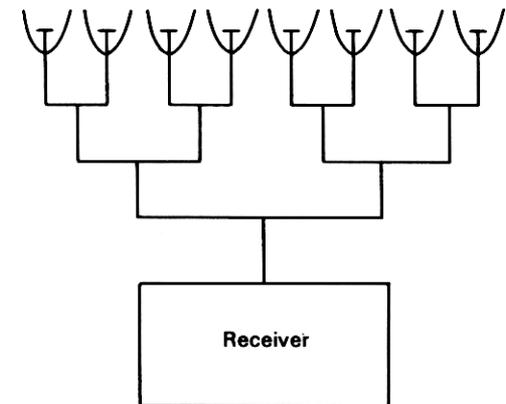


Fig. 6-24. Grating interferometer with grating-lobe spacing ϕ_g larger than source extent.



(a)



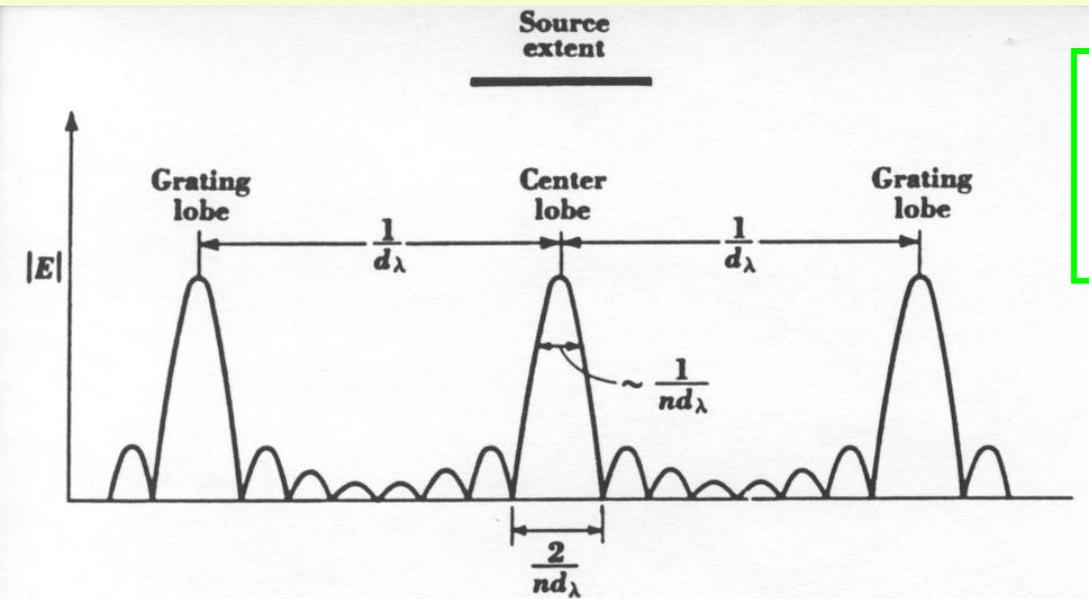
(b)

Fig. 18.10 An eight-element interferometer as (a) a collinear array and (b) in the Christiansen arrangement





INTERFEROMETRÍA



$$E(\phi) = E_o(\phi) \frac{\text{sen}(n \psi/2)}{\text{sen}(\psi/2)}$$

Fig. 6-24. Grating interferometer with grating-lobe spacing ϕ_g larger than source extent.

$$\psi = 2\pi d_\lambda \text{sen}(\phi)$$

d_λ espaciado entre las antenas en unidades de λ

ϕ ángulo desde la perpendicular a la línea

n número de elementos





INTERFEROMETRÍA

Si se trata de un interferómetro multielementos (n dl grande)

$$BWFN = 2/n d_\lambda \text{ en } \phi = 0$$

Si $d_\lambda > 1$ (en unidades de ldo) \rightarrow lóbulos secundarios son iguales al ppal en amplitud y se encuentran a una distancia,

$$\phi_G = \text{sen}^{-1} \frac{m}{d_\lambda} \quad m = 1, 2, 3 \dots$$

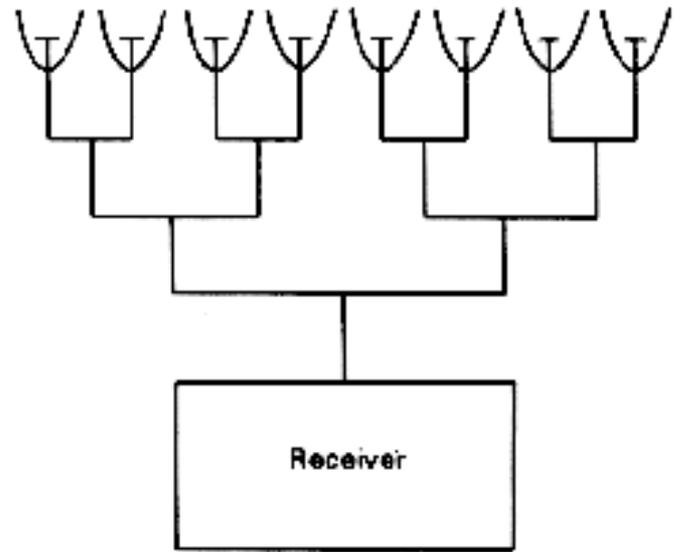
$$d_\lambda \gg 1 \Rightarrow \phi_G = \text{sen}^{-1} \frac{m}{d_\lambda} = \frac{m}{d_\lambda} \quad (\text{rad})$$

Si $FG >$ tamaño angular de la fuente \rightarrow
sólo un lóbulo recibe señal de la fuente.



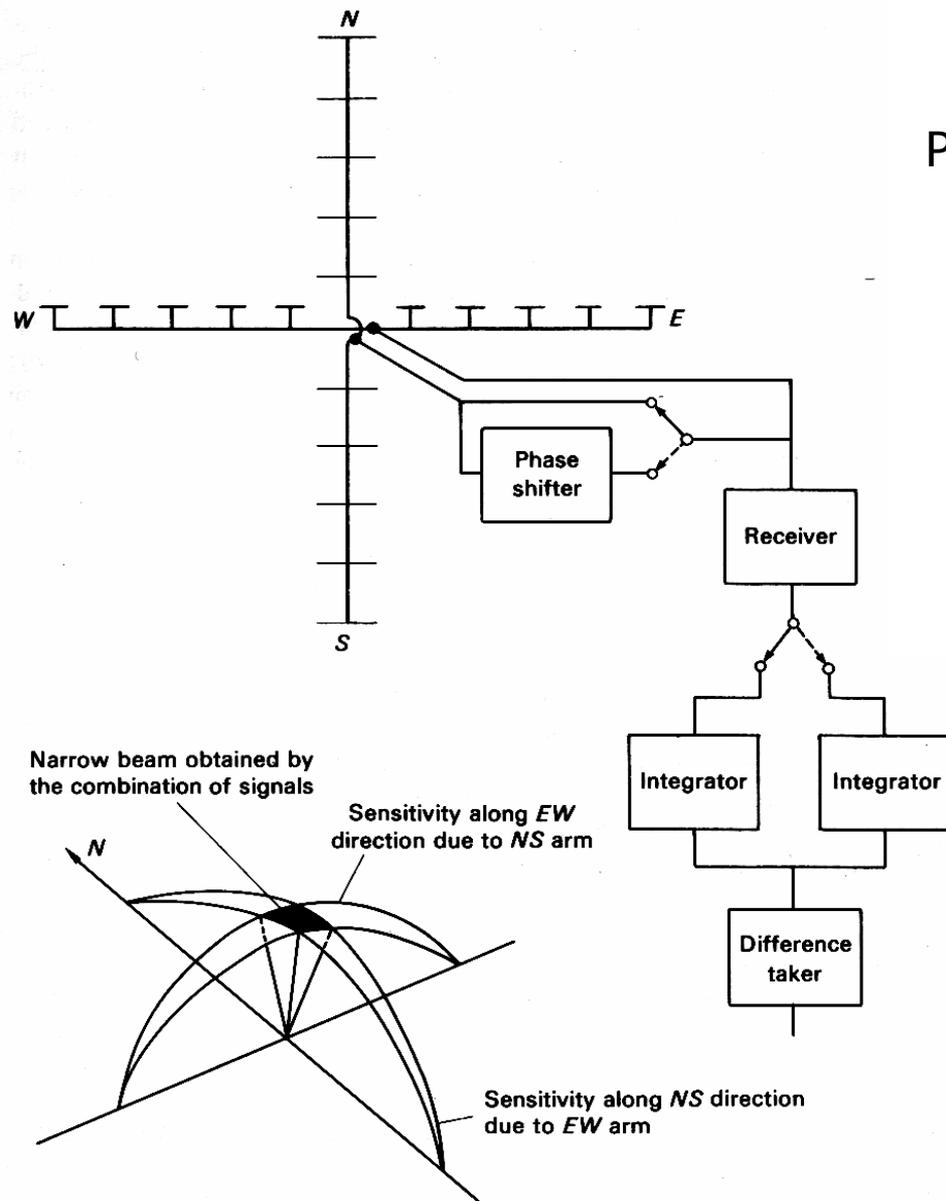
Interferómetro de Chistiansen

- Colectores parabólicos orientables.
- Idéntica longitud de cables.
- Señales se suman dos a dos de forma progresiva
- Ventajas:
 - Se conserva la fase de la señal.
 - Mayor rango de frecuencias.
- Inconveniente: Mayores pérdidas.



Elementos	32	Línea de base	217 m
Diámetro	2 m	Longitud de onda	$\lambda = 200 \text{ mm}$
Ω_A	$\Omega_A = \lambda^2 / A_e = 0.2^2 / \pi 1^2 = 0.013 \text{ rad}^2 = 42 \text{ deg}^2 \simeq 6^\circ \times 7^\circ$		
Distancia	$d = 217 / 31 = 7 \text{ m}$ $d_\lambda = 7 \text{ m} / 200 \text{ mm} = 35$		
Resolución	$BWFN = 2 / (n d_\lambda) = 2 / (32 \times 35) = 0.0018 \text{ rad} = 6.4'$; $HPBW \simeq 3'$		
Distancia lóbulos	$1 / d_\lambda = 1 / 35 = 0.02857 \text{ rad} = 1^\circ 43'$		

Cruz de Mills



La resolución angular sólo en el plano que contiene la línea de elementos.

Por ello se diseñaron interferómetros en cruz.

Cada brazo 250 dipolos muy juntos ($d_\lambda \sim 0 \rightarrow 1/d_\lambda$ enorme)
Lóbulos secundarios muy alejados.

Diagrama polar de cada brazo

$\sim 0.5^\circ \times 60^\circ$

El haz puede direccionarse añadiendo un retardo entre cada dipolo.



Cruz de Mills





Cruz de Christiansen

Completamente orientable en los dos ejes.

Poder de resolución un orden de magnitud mayor.

32 reflectores orientables de 20 ft por brazo conectados como en un interferómetro de Christiansen

El cambio de posición del haz en altura (declinación) se efectúa con retardadores de forma remota.

Longitud de onda	$\lambda = 20 \text{ cm}$	
anchura del haz	2.5°	cada reflector
Distancia	40 pies	entre ellos
Distancia total	1240 <i>pies</i>	cada brazo
Resolución	$3'$ (a $\sim 1^\circ$)	Christiansen
Combinacion	pinceles $3' \times 3'$	

Instrumento de tránsitos.

Se barre el Sol según pasa.

Se completan bandas variando el apuntado en declinación en sucesivas pasadas.





INTERFEROMETRÍA

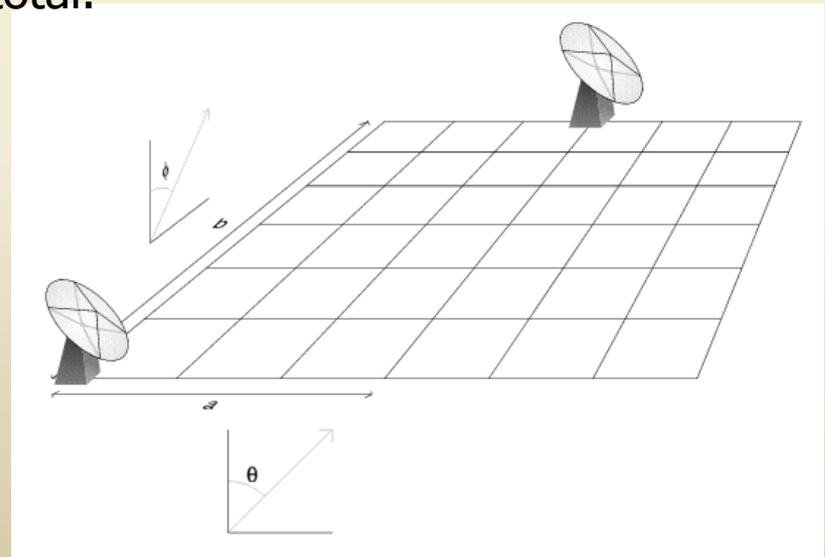
- Si queremos obtener el flujo total de una fuente → no interesa resolución espacial.

En ese caso usamos una antena simple y acabamos antes.
El flujo colectado depende del tamaño del colector.

Síntesis de abertura

- Para aumentar la resolución angular usamos interferómetros de muchos elementos.
- La señal depende de la superficie colectora total.

- La síntesis de abertura es un método barato de conseguir un interferómetro de gran resolución usando pocos elementos.





INTERFEROMETRÍA

Síntesis de abertura

- Objetivo: → Cartografiado de la fuente.
- Resultado de una observación → la ecuación del interferómetro.
 - Relaciona la variación de intensidad de la fuente con las características del interferómetro.

$$I(x, y)$$

Función de visibilidad de la distribución de intensidad

$$V(u, v, w) e^{-i 2\pi w} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x, y) I(x, y) e^{i 2\pi (ux+vy)} dx dy$$

$A(x, y)$	forma del haz	u	paralelo al E
$I(x, y)$	mapa de intensidad	v	apunta al N
(u, v)	plano perpendicular a la dirección del objeto	w	dirección apuntado

La síntesis de abertura es un método para resolver la ecuación.



INTERFEROMETRÍA

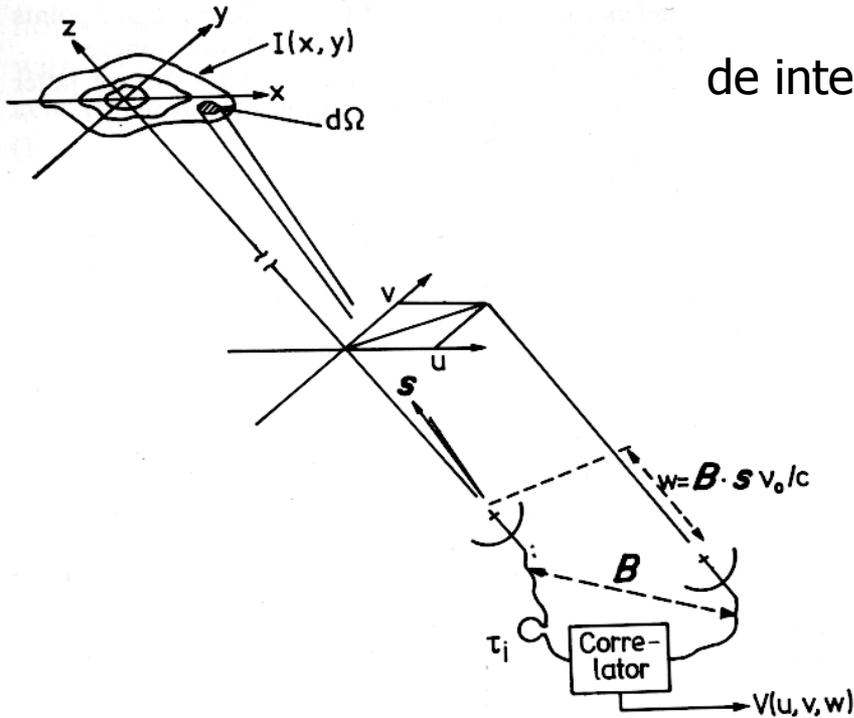
Síntesis de abertura

Para fuentes no muy extensas V es independiente de w y

$$V(u, v, w) = V(u, v)$$

Con la transformada inversa de Fourier obtenemos el mapa de intensidad del objeto $I(x, y)$ modificado por la forma del haz $A(x, y)$

$$I'(x, y) = A(x, y) I(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u, v, 0) e^{-i 2\pi(ux+vy)} du dv$$



Es necesario muestrear la función de visibilidad $V(u, v)$ con diferentes telescopios distribuidos en el plano (u, v) .



INTERFEROMETRÍA

Síntesis de abertura

Muestreo de la función de visibilidad $V(u,v)$

Caso ideal: Llenar de telescopios el plano (u,v) .

Versión pobre: Mover dos o más telescopios en el plano y combinar sus observaciones.

Esquema básico: medidas repetidas cambiando la posición de los radiotelescopios.

Ryle et al (1957) emplearon el brazo E-W de una cruz de Mills y una antena móvil que se desplazaba en una vía en dirección N-S.

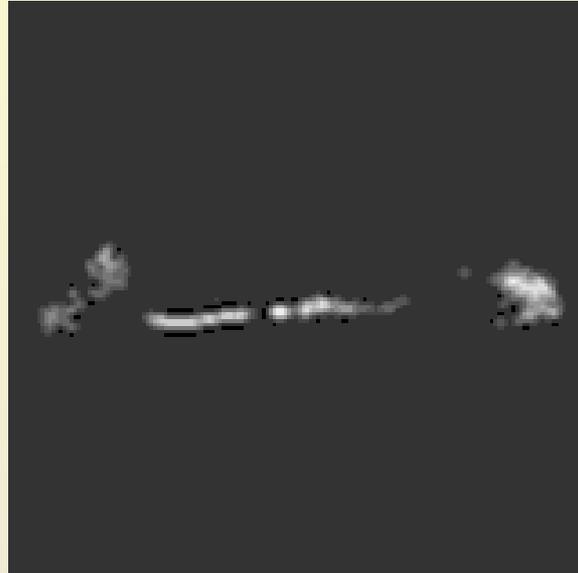
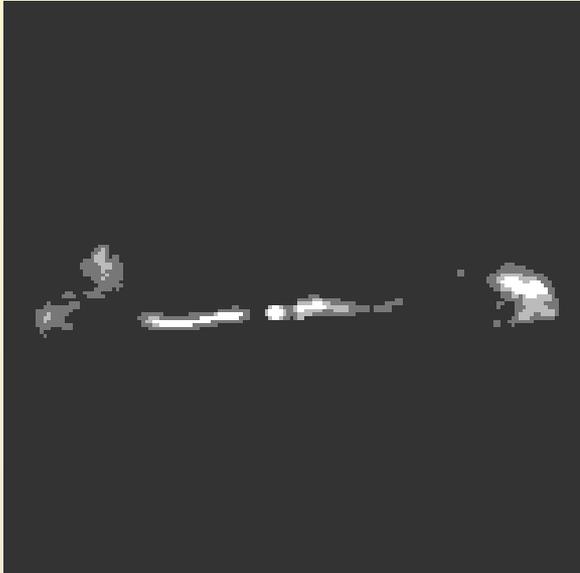
Para obtener buenos mapas (imágenes) se necesita asegurar una buena cobertura de separaciones y orientaciones de las antenas.





INTERFEROMETRÍA

Síntesis de abertura



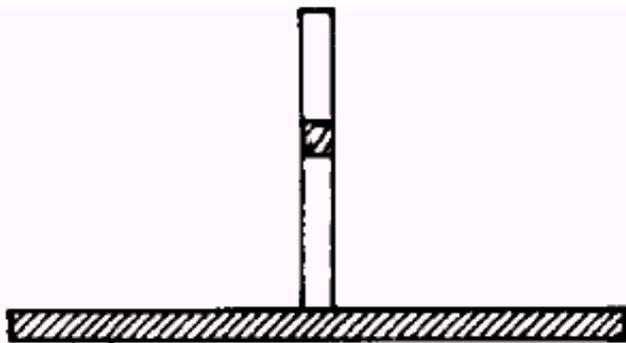


INTERFEROMETRÍA

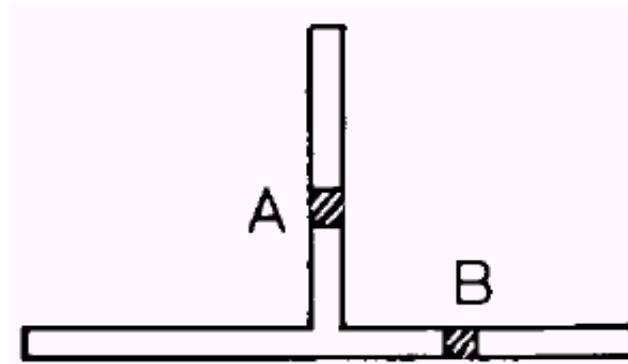
Síntesis de abertura

Bythe (1954)

Interferómetro sencillo de Ryle.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) The arrangement used in the instrument built in 1954 by J. H. Bythe. (b) The equivalent instrument using two small elements.

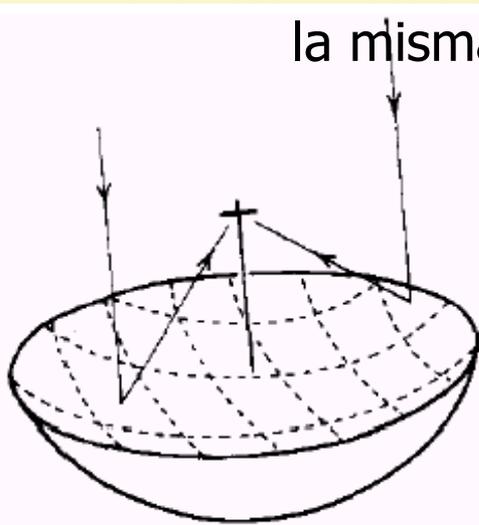
Ryle (1974), conferencia en el premio Nobel.



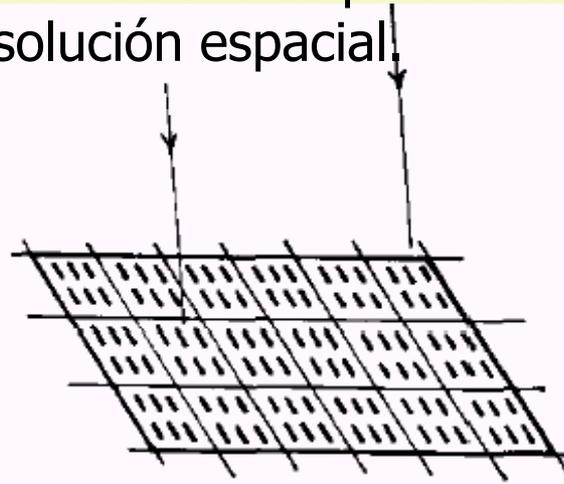
INTERFEROMETRÍA

Síntesis de apertura

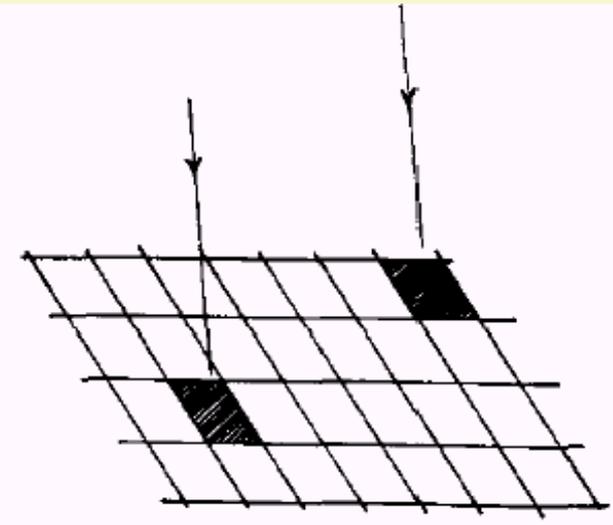
Diferentes métodos observacionales para obtener la misma resolución espacial



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. The use of (a) a paraboloid, (b) an array of dipoles or (c) the sequential sampling of the wavefront by small aerial elements to achieve a high resolving power by combining the signals from a large part of the incident wavefront.

Ryle (1974), conferencia en el premio Nobel.

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



INTERFEROMETRÍA

Síntesis de apertura

Equivalencia de observación con dos antenas durante un día.

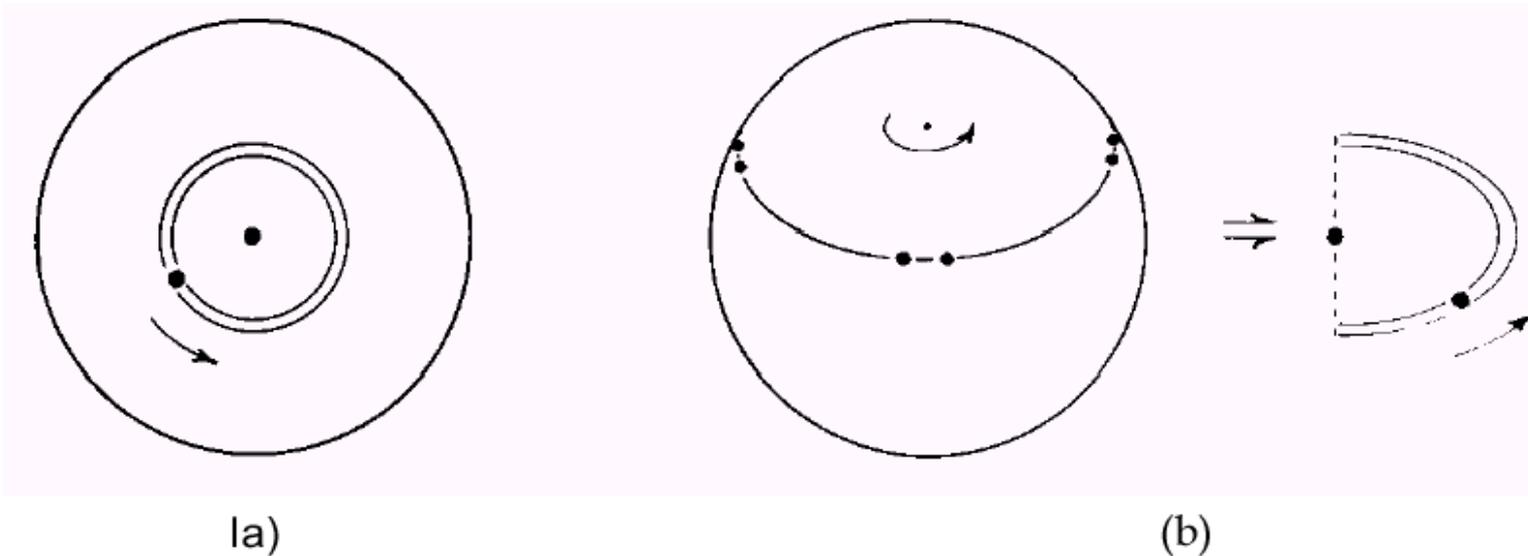


Fig. 4. (a) Two aerial elements mounted near the North Pole observing throughout the day are equivalent to one ring of a much larger instrument.

(b) The elements may be used at other latitudes if arranged on an east-west line and used to track the chosen point for 12^h.

Ryle (1974), conferencia en el premio Nobel.

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

INTERFEROMETRÍA

Síntesis de abertura

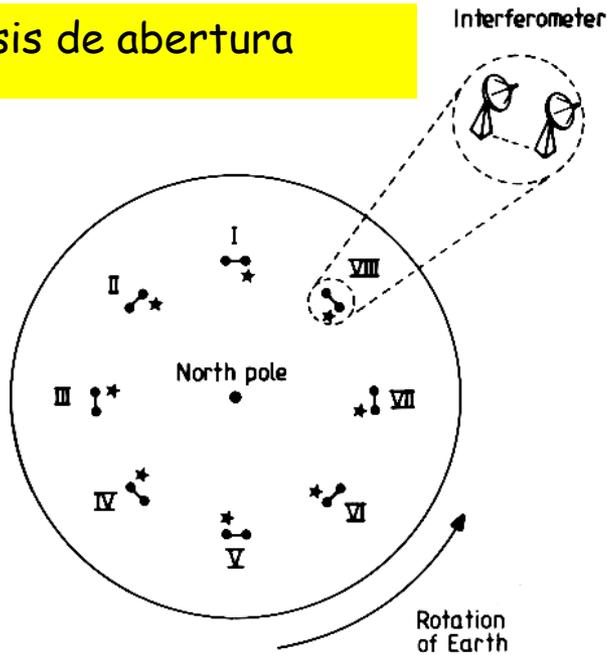


Figure 2.4.17 Changing orientation of an interferometer. The Earth is viewed from above the north pole and successive positions of the interferometer at three hour intervals are shown. Notice how the orientation of the starred aerial changes through 360° with respect to the other aerial during a day.

Observando a lo largo del día: Las dos antenas cambian su orientación relativa respecto a la fuente \rightarrow diferente posición en el plano (u,v) .

Separando los elementos al día siguiente
barremos otra parte del plano (u,v) .

Supersíntesis.

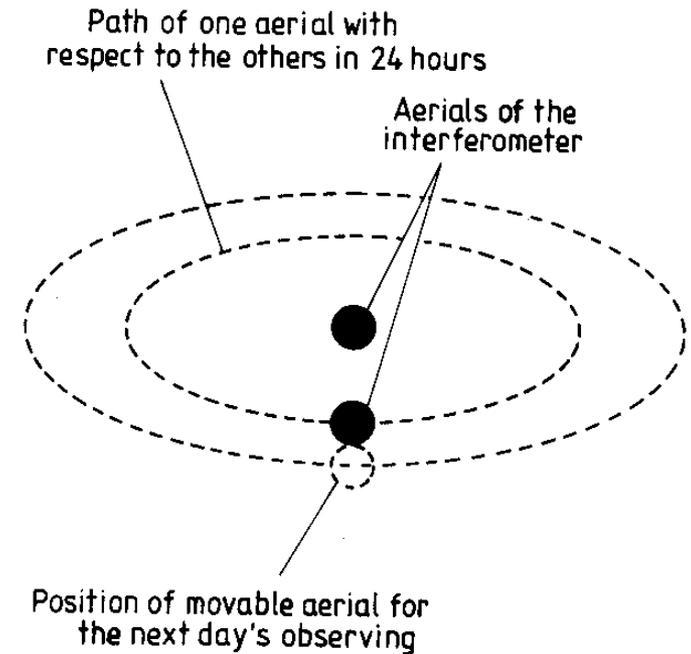


Figure 2.4.18 Aperture synthesis.



INTERFEROMETRÍA

Supersíntesis.

- Observando a lo largo del día y en días sucesivos:
 - Se obtienen imágenes en alta resolución en los dos ejes.
- Resolución: (para interferómetro orientado E-W)

$$RA: \propto d_\lambda$$

$$DEC: \propto d_\lambda / \sin \delta$$

- La línea de separación de los dos elementos describe una elipse (completa en un día) en el plano (u,v).
- Estas elipses están comprimidas en la dirección v (declinación) por ese factor $\delta \rightarrow$ Rectas en $\delta=0^\circ$ y son Círculos en $\delta=90^\circ$
- Si $\delta=0^\circ$ el plano (u,v) se muestrea insuficientemente y hay que colocar elementos fuera del eje EW.





INTERFEROMETRÍA

- Empleado varios elementos el sistema es más rápido.
- No es necesario observar las 24h (elipses completas).
- La imagen final se obtiene tras un procesado complejo.

Supersíntesis.

Fig. 6.22 A 'dirty' 21 cm map of BG 2107+49 produced by inversion from complex visibilities at thirty-six baselines (three sets are shown in Figure 6.20) with incremental spacings of $8/\lambda$ to which the 'grating' response corresponds. Courtesy of the Herzberg Institute of Astrophysics, Dominion Radio Astrophysical Observatory.

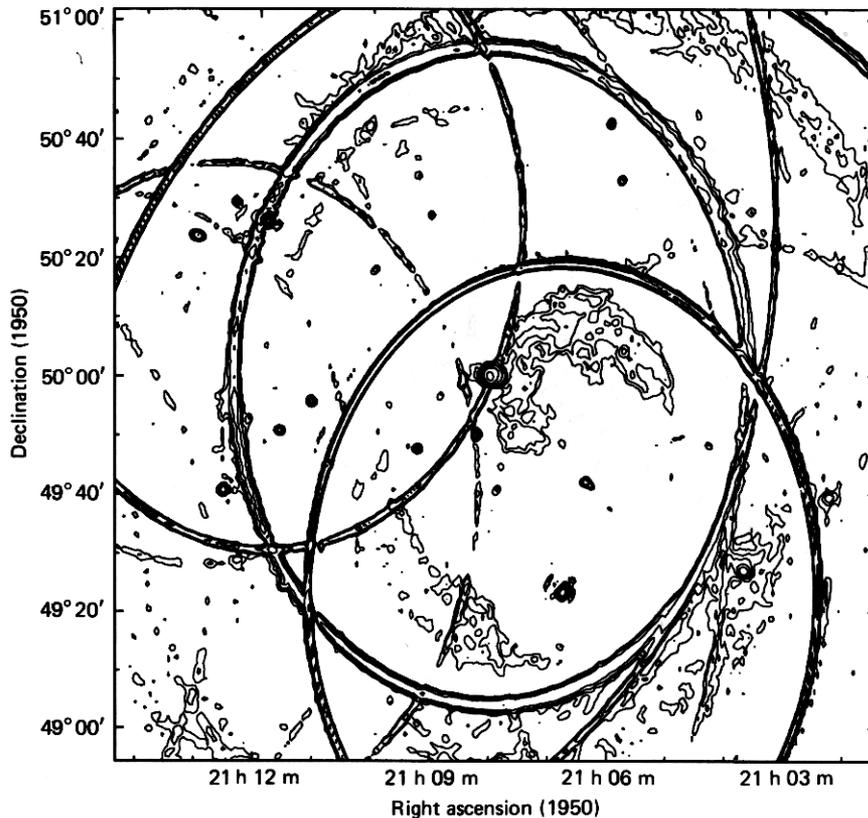
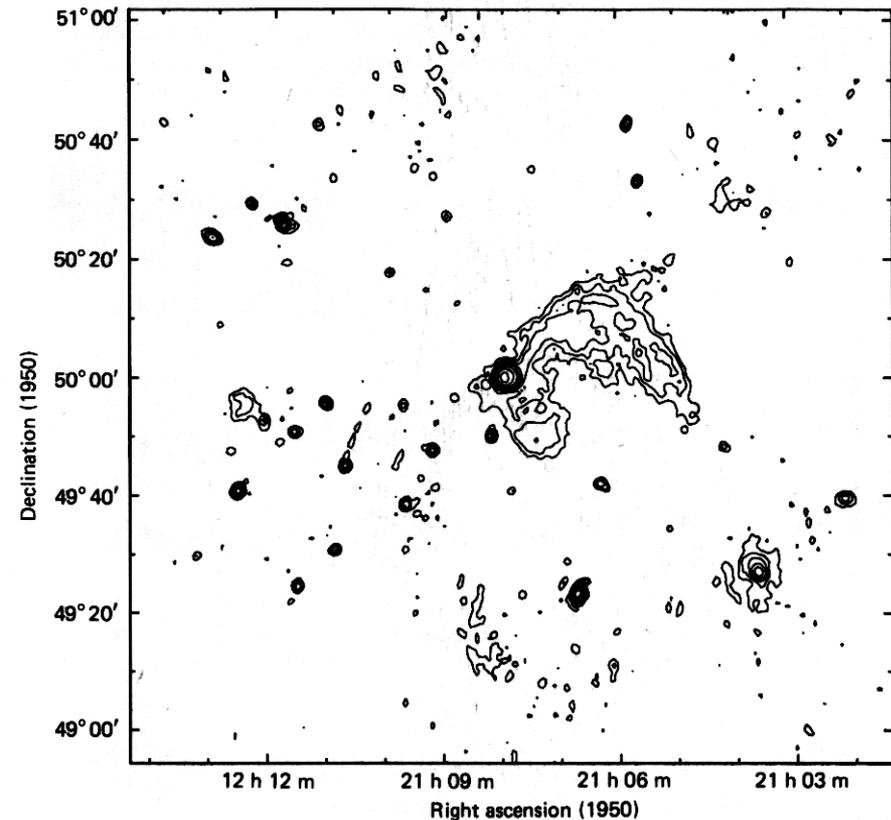


Fig. 6.21 A 'clean' 21 cm map of the source BG 2107+49 produced by a 'CLEAN' deconvolution algorithm from the 'dirty' map in Figure 6.22. The synthesised beam (fwhm) is $1(\text{EW}) \times 1.3(\text{NS})$ arc minutes and the contour levels are 4, 10, 18, 33, 58, 104, 183, 323, 569 mill-jansky per beam width. Courtesy of the Herzberg Institute of Astrophysics, Dominion Radio Astrophysical Observatory.





Nobeyama Array



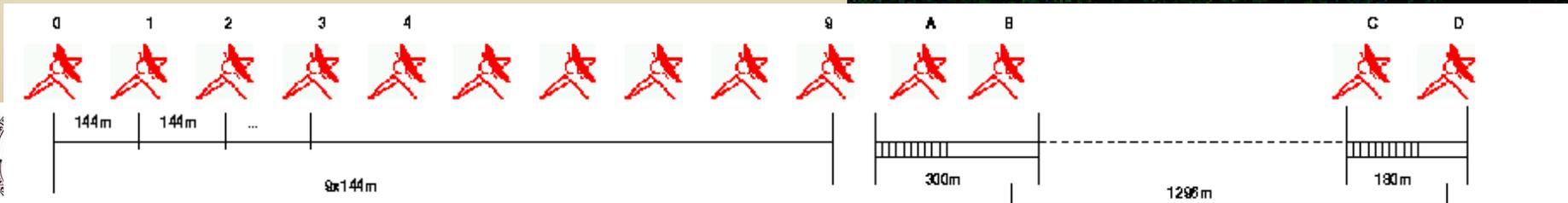
Seis telescopios de 10 m de diámetro que se mueven en raíles en dirección N-S y E-W para realizar síntesis de abertura.





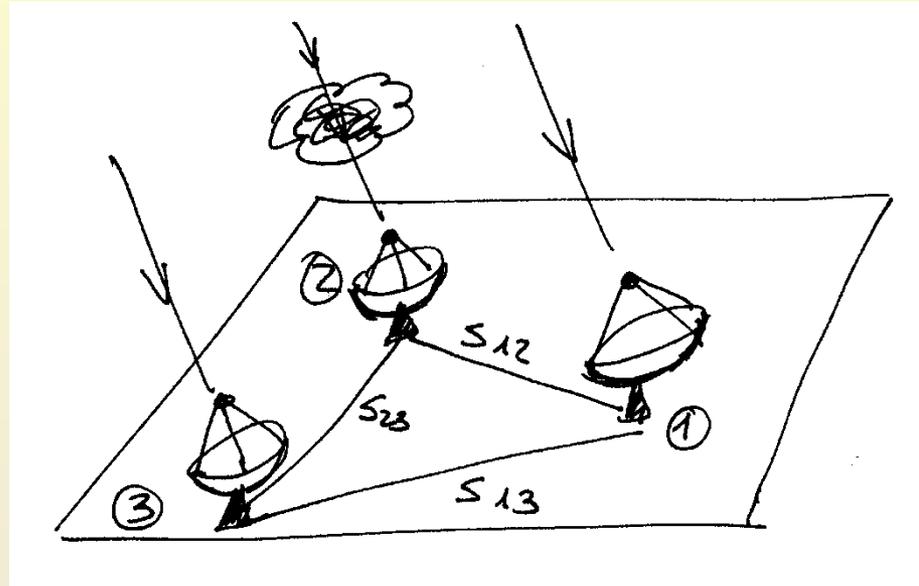
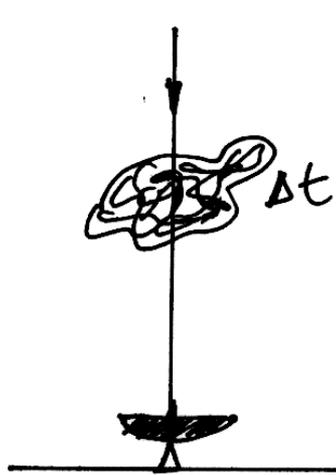
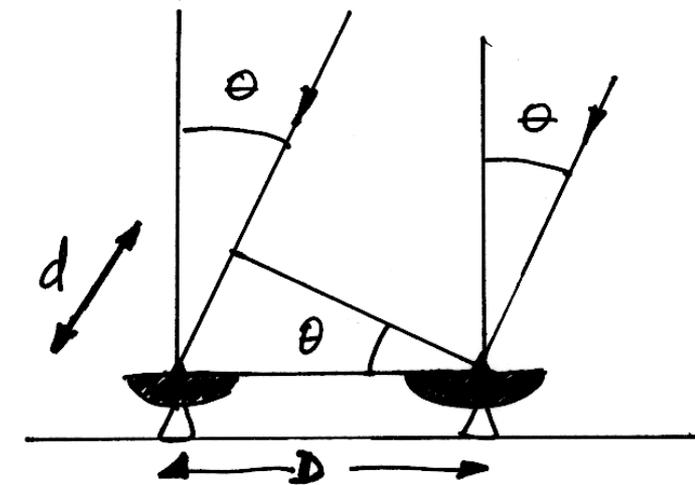
Westerbork (WRST)

Interferómetro de síntesis con 14 antenas colocadas en la dirección E-W a lo largo de una línea de 2.7 km.



INTERFEROMETRÍA

Fase de clausura



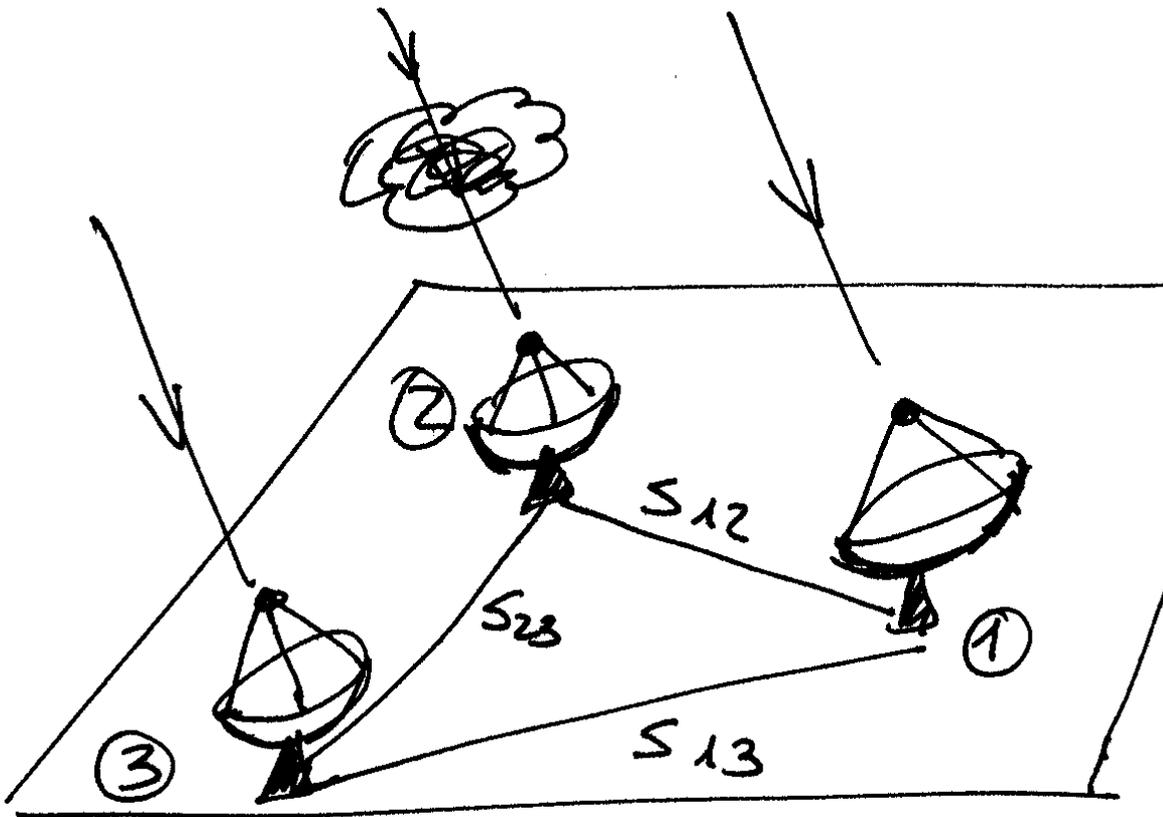
En grandes distribuciones de radiotelescopios un desfase producido por la atmósfera puede simular una diferencia de camino.



INTERFEROMETRÍA

Solución: combinar los radiotelescopios dos a dos para cancelar el desfase producido por la atmósfera.

Fase de clausura



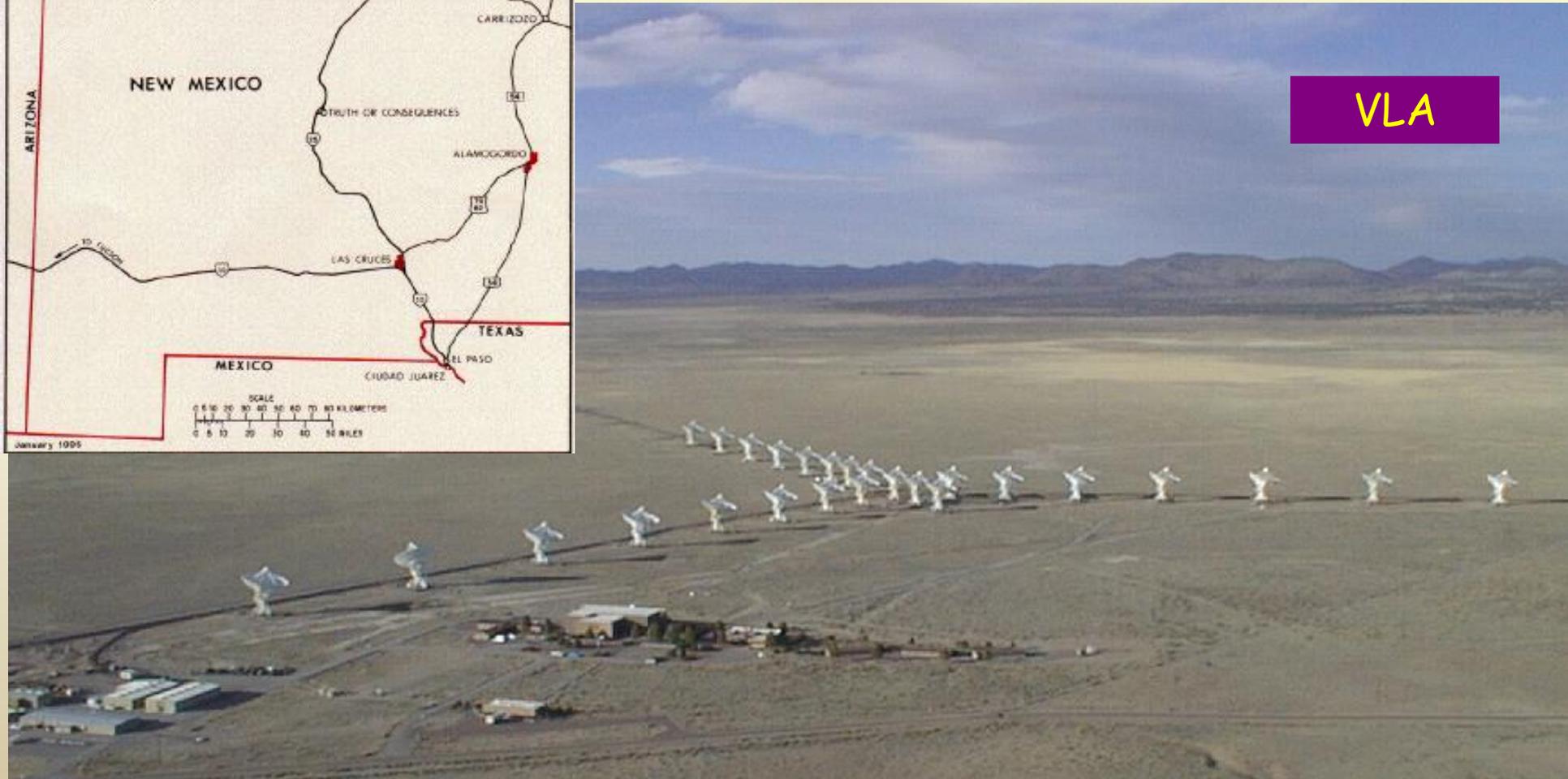
	Desfase
1 - 2	$+\Delta\alpha$
2 - 3	$-\Delta\alpha$
3 - 1	0
TOTAL	0





- 27 antenas en una Y de 36 km
- Cada antena 25 m de diámetro
- Sensibilidad: antena de 130 m
- Resolución: antena de 36 km

VLA



Fase de clausura



VLA

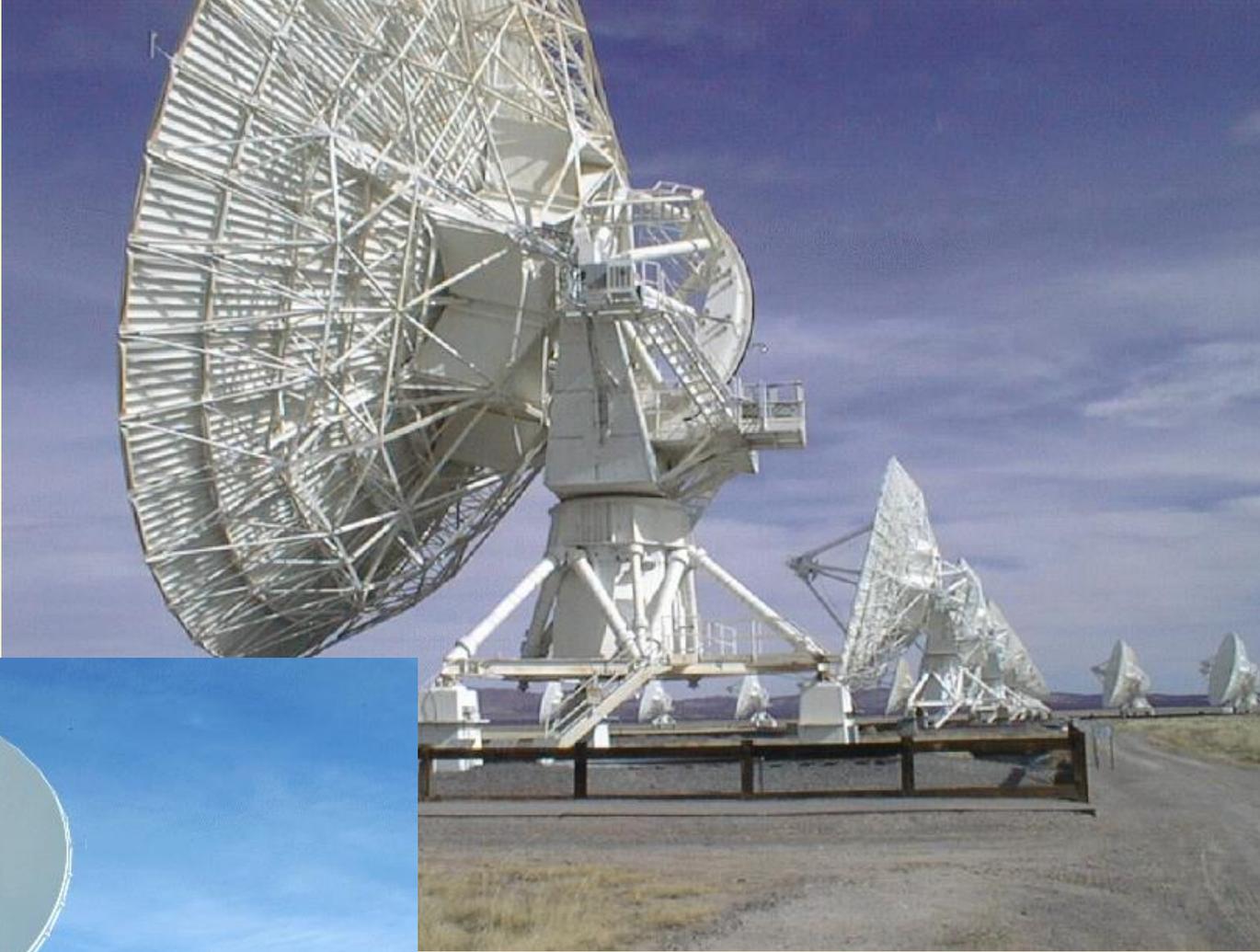


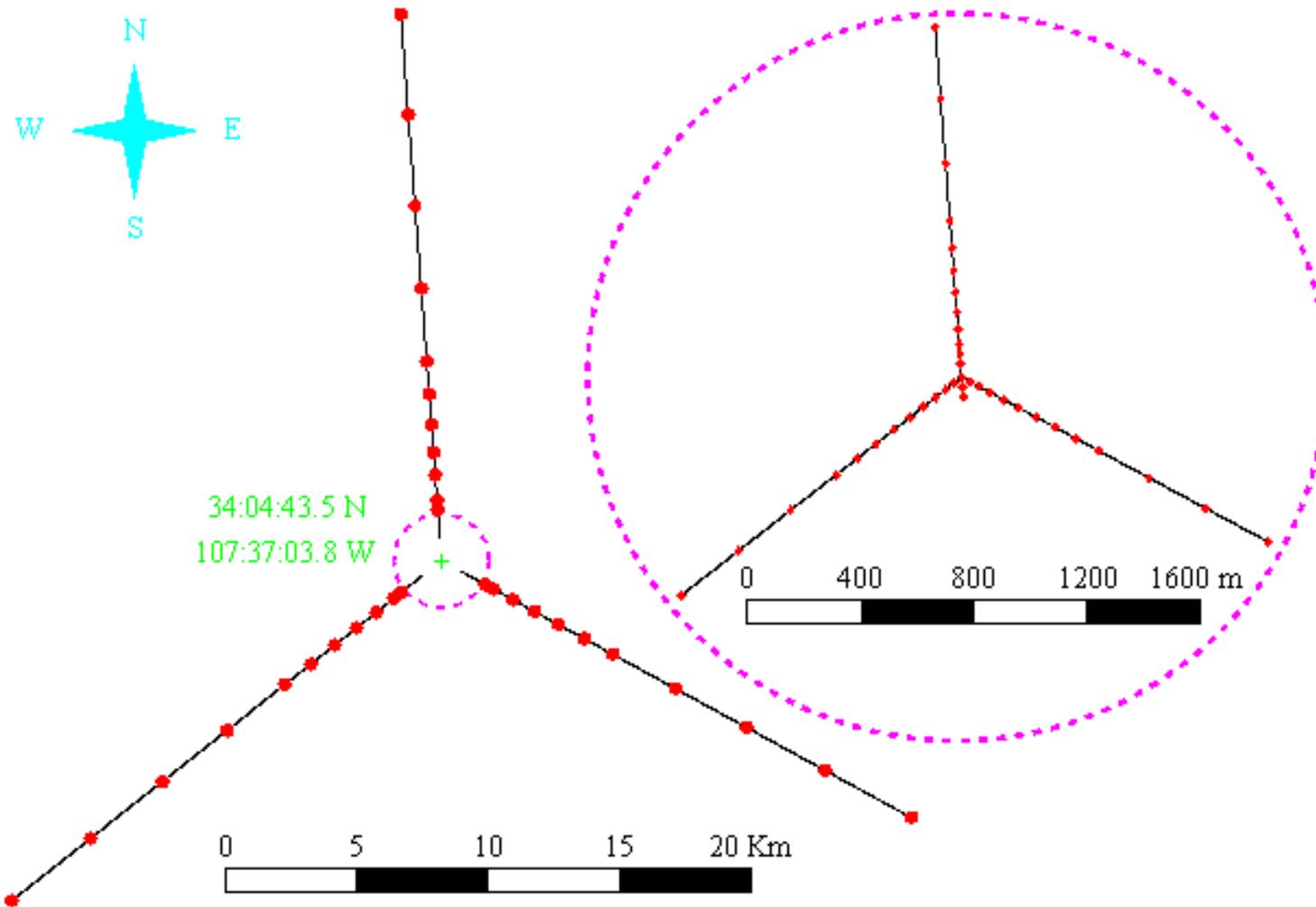
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



VLA





Modos de operación:

Normal:

Imágenes del cielo en radio como función de la posición y de la frecuencia.

A partir de los patrones interferenciales se elaboran los mapas mediante transformadas de fourier.

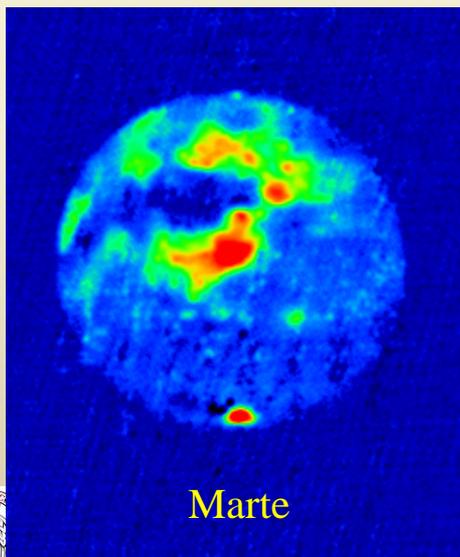
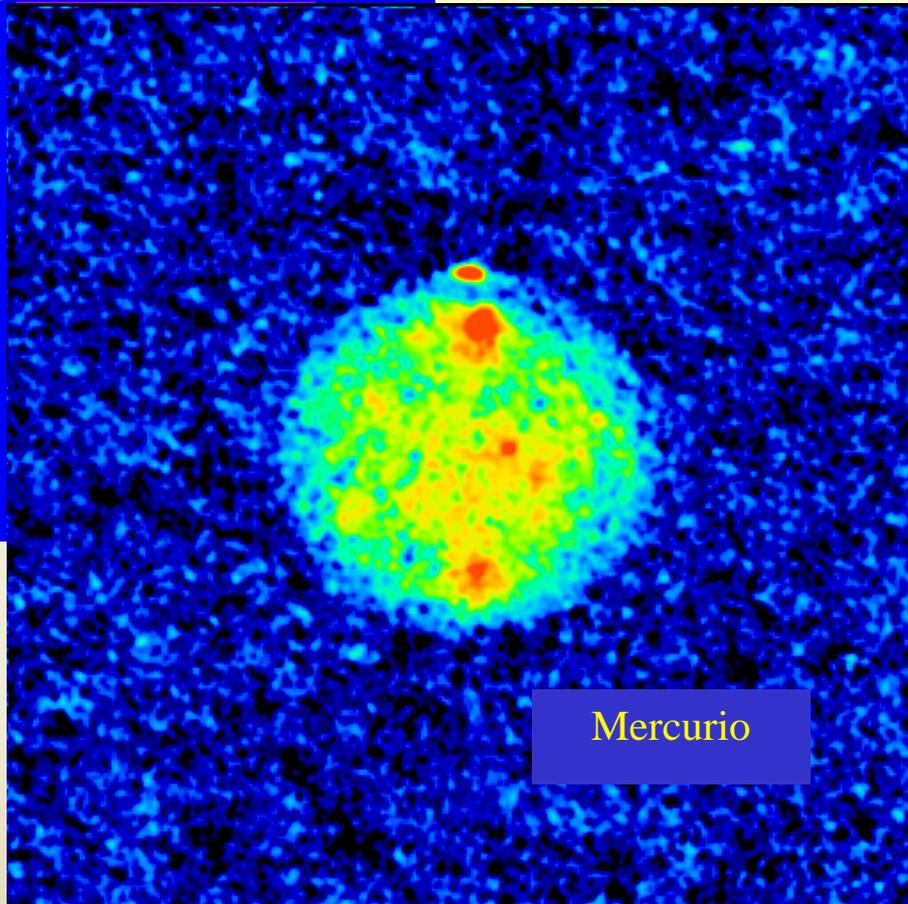
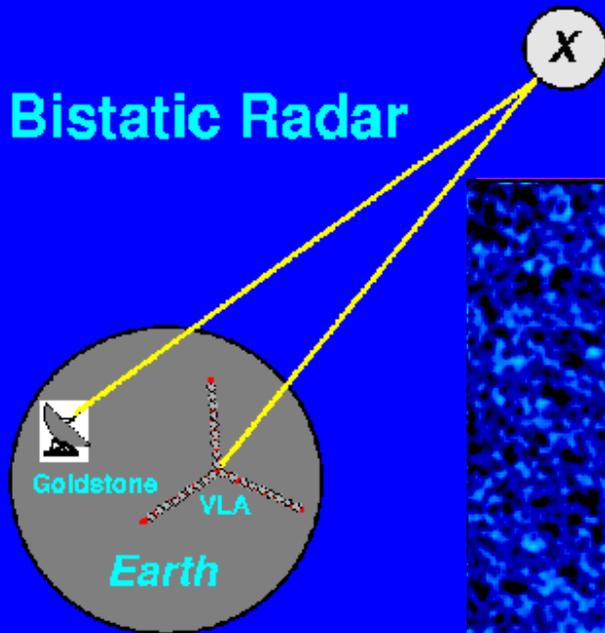
Phased array:

Interferómetro como un elemento sencillo sumando las señales individuales de las antenas.

<http://www.vla.nrao.edu/>



Bistatic Radar





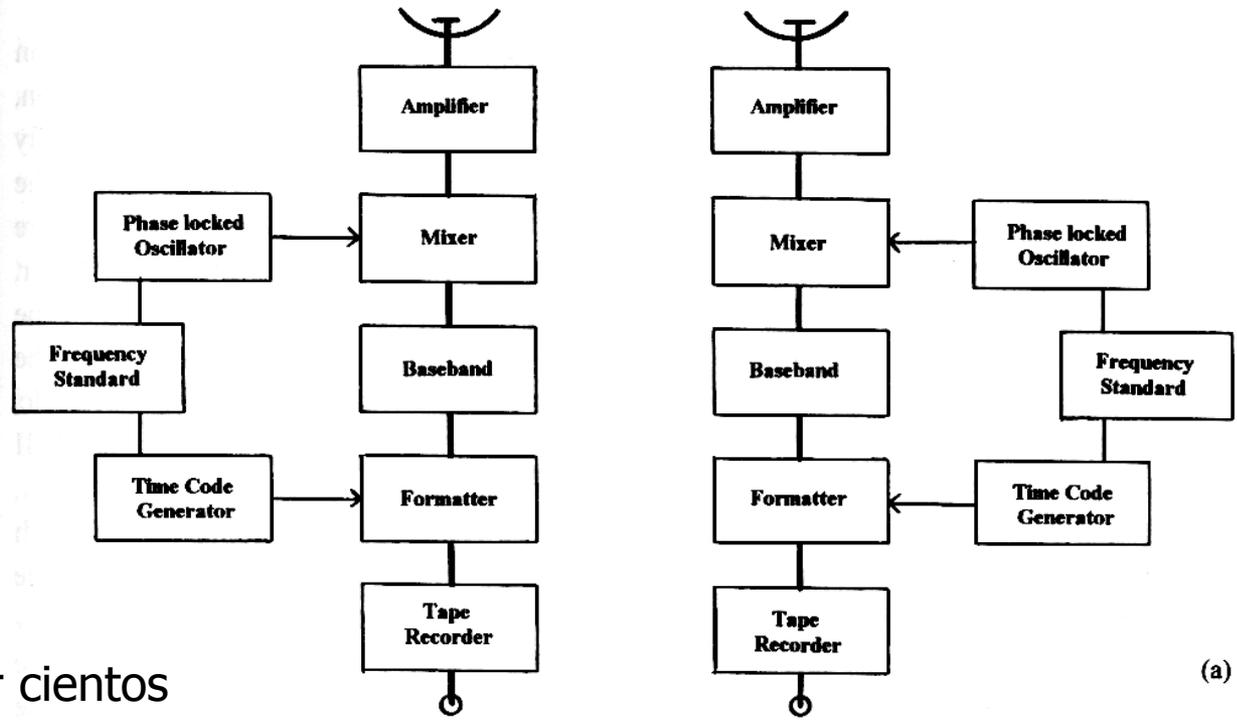
Multi-Element Radio Linked Interferometer Network:

An array of radio telescopes distributed around Great Britain, with separations of up to 217km.

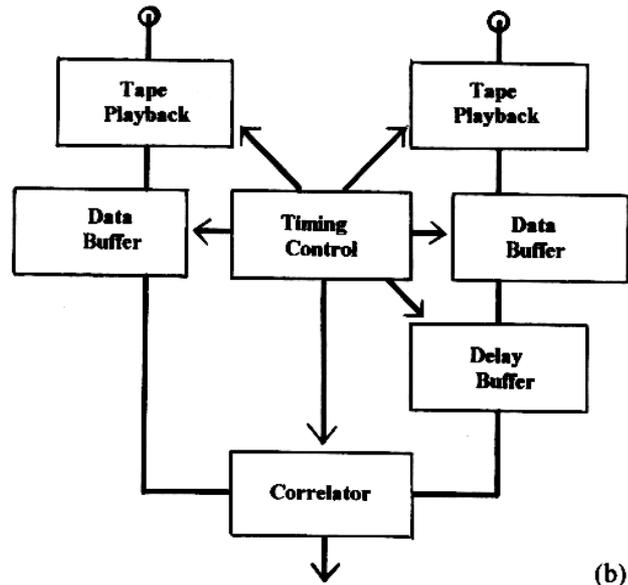
It operates at frequencies ranging from 151 MHz to 24 GHz.

At 5GHz, the resolution of **MERLIN** is better than 50 milliarcseconds, somewhat greater than that of the Hubble Space Telescope.

- Telescopios separados por cientos o miles de km.
- Antenas no unidas físicamente.
- Imposible conservar la fase aunque unamos las antenas por cable.
- Altísima resolución.



(a)



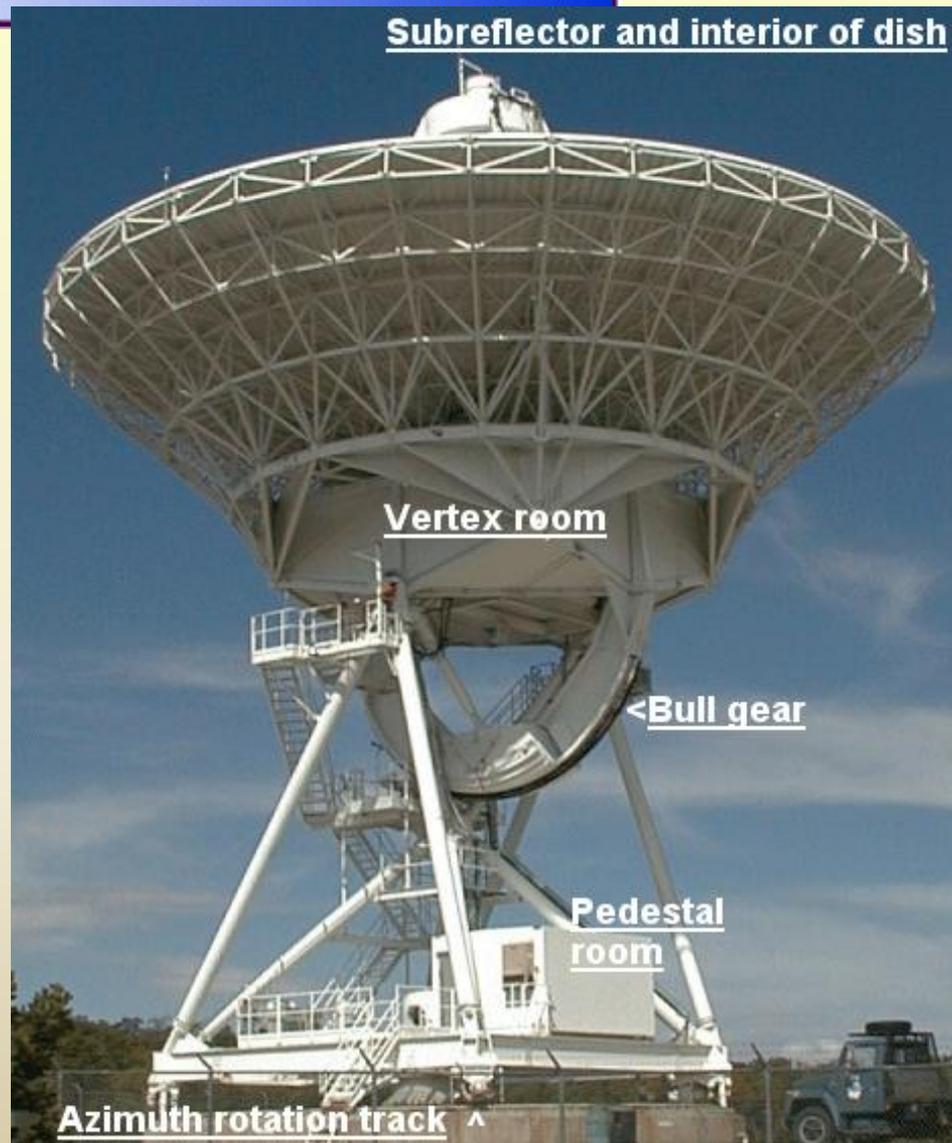
(b)





The Very Long Baseline Array

10 antenas de 25 m entre Hawai
y las islas Vírgenes en una línea
de base de 8000 km

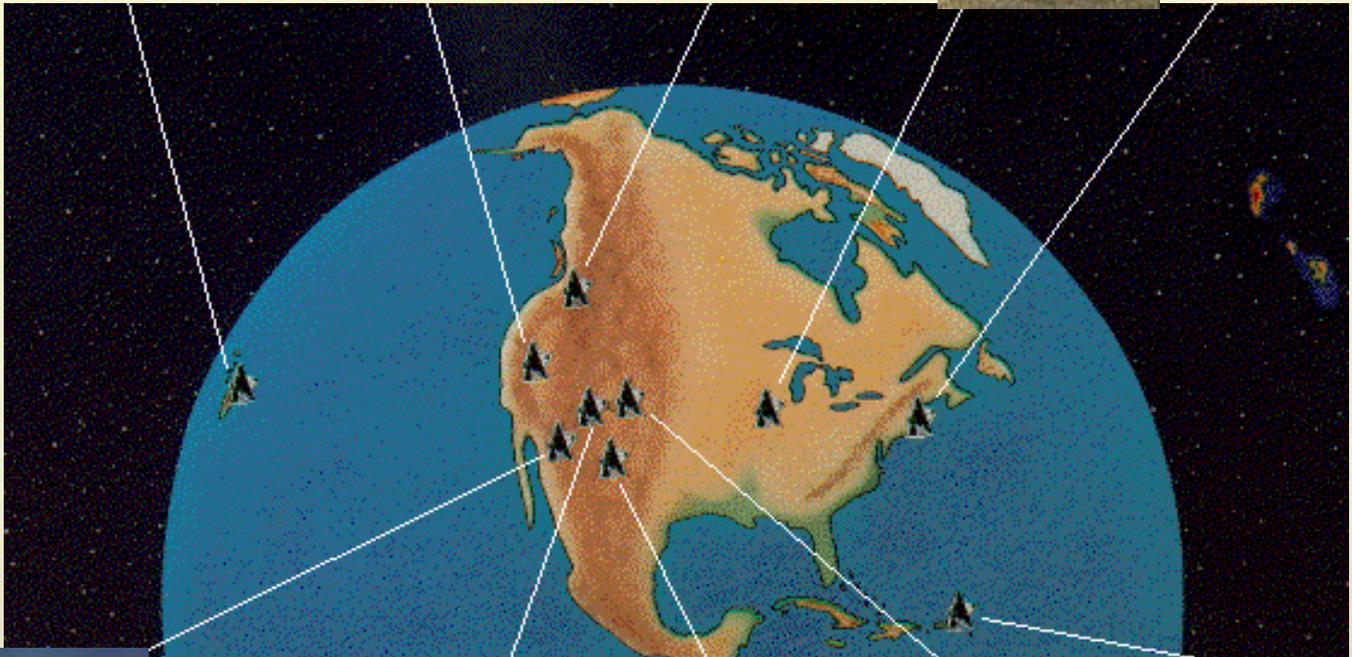


<http://www.vlba.nrao.edu/>





The Very Long Baseline Array

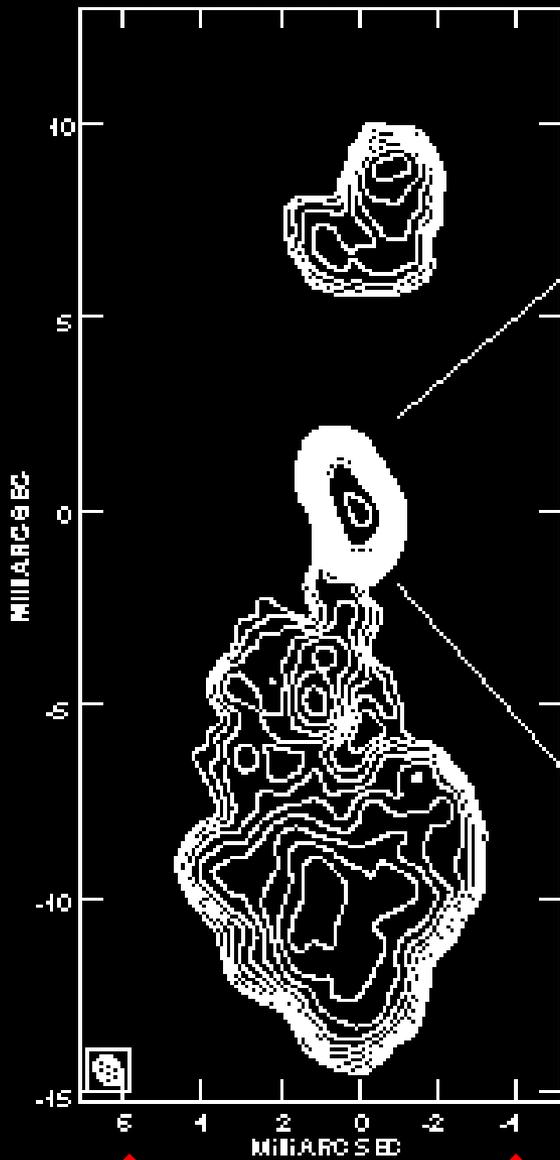


Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



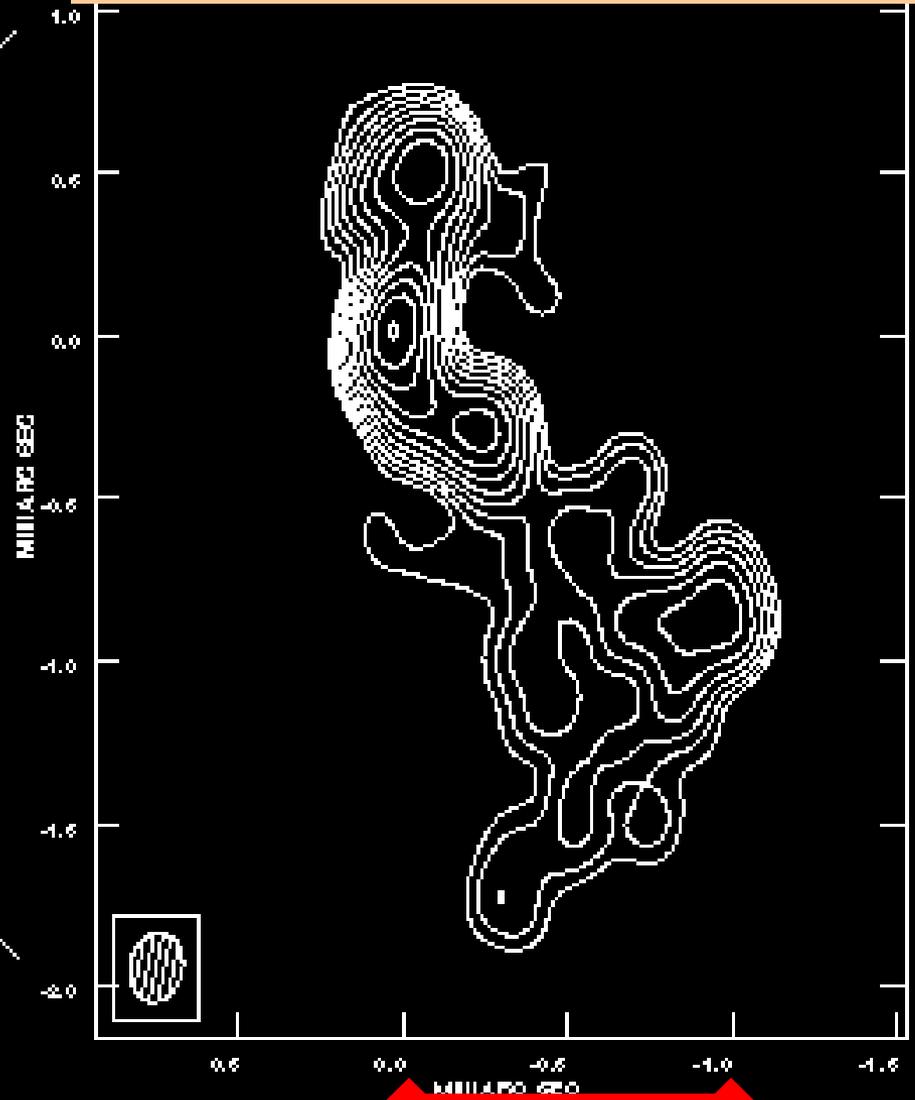
03-16-113 15343.490 MHz SSJAN29



Peak Flux = 997 JWB/AM

0.01"

3C84 (VLBA, 43 GHz)



Peak Flux = 0.66 JWB/AM

0.001"





Joint Institute
for VLBI
in Europe



European VLBI Network



European  Network

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Cambridge/MERLIN UK



Joint Institute
for VLBI
in Europe



Jodrell Bank (UK)



Onsala Space Obs (SE)



WSRT (NL)



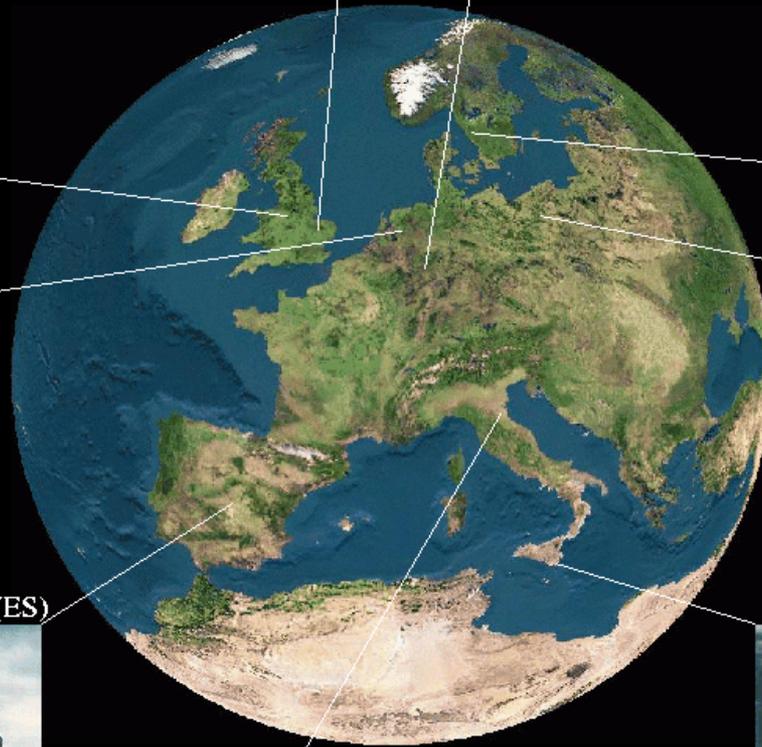
Torun (PL)



DSN Robledo (ES)



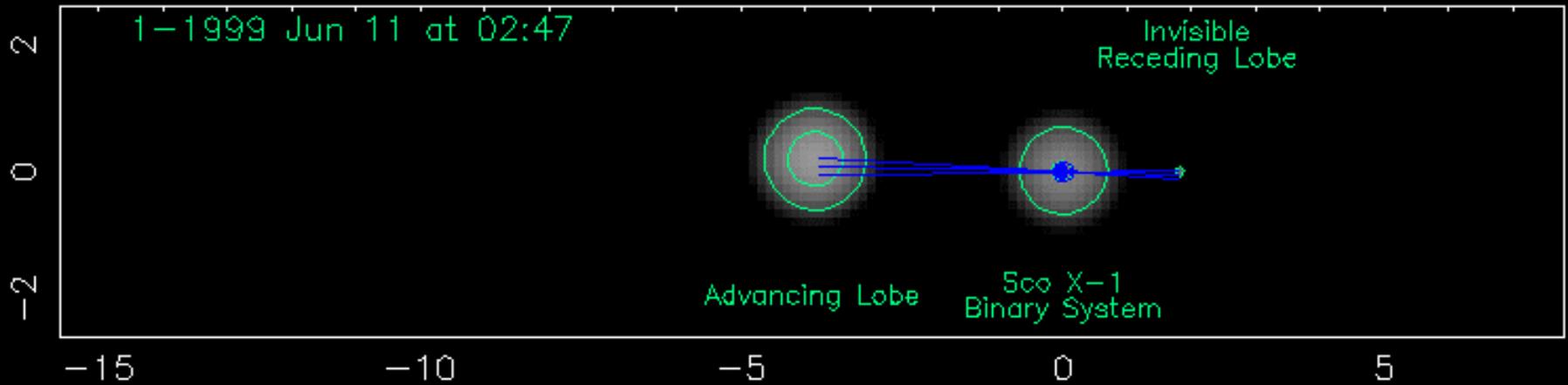
Noto (IT)



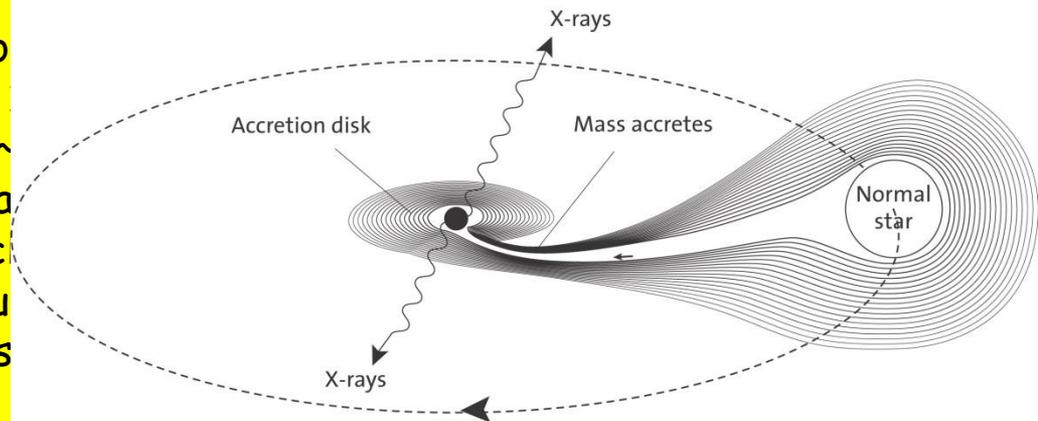
Medicina (IT)

Radio-Image "Movie" of Scorpius X-1

<http://www.nrao.edu/pr/2001/scox1/scox100.htm>



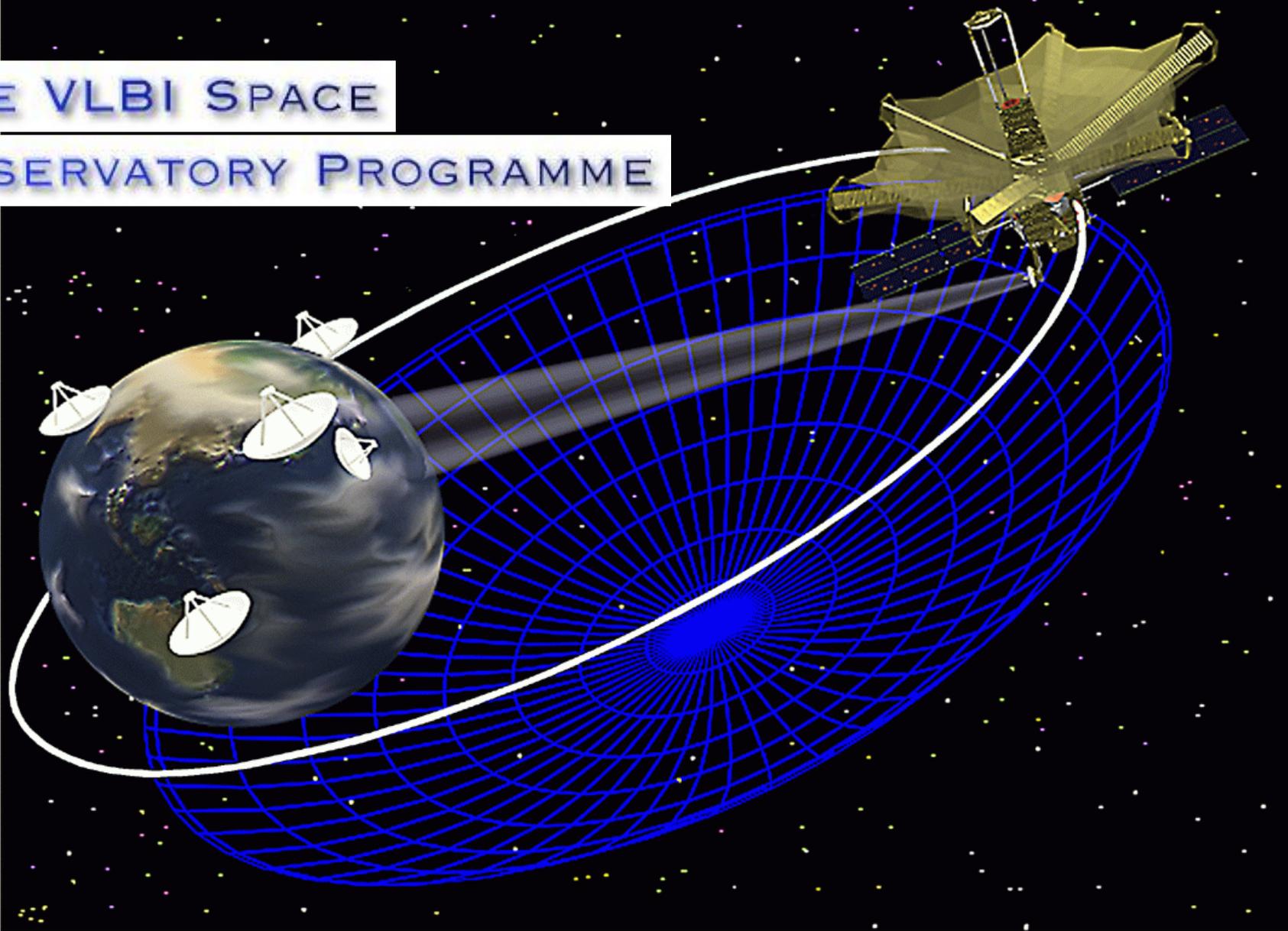
Scorpius X-1, a system consisting of a neutron star roughly the size of a city and a "normal" star about the size of our Sun. The superdense neutron star is spitting out subatomic particles in two narrow jets as it pulls material from a companion star.



The jets ejecting clouds of hot plasma are then "zapped" by pulses of energy in the jets as they move away from the neutron star.



THE VLBI SPACE OBSERVATORY PROGRAMME



- Antena de 8 m en órbita excéntrica (apogeo de 21000 km y perigeo 560 km).
- Permite líneas de base 3 veces a las obtenidas en Tierra.

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

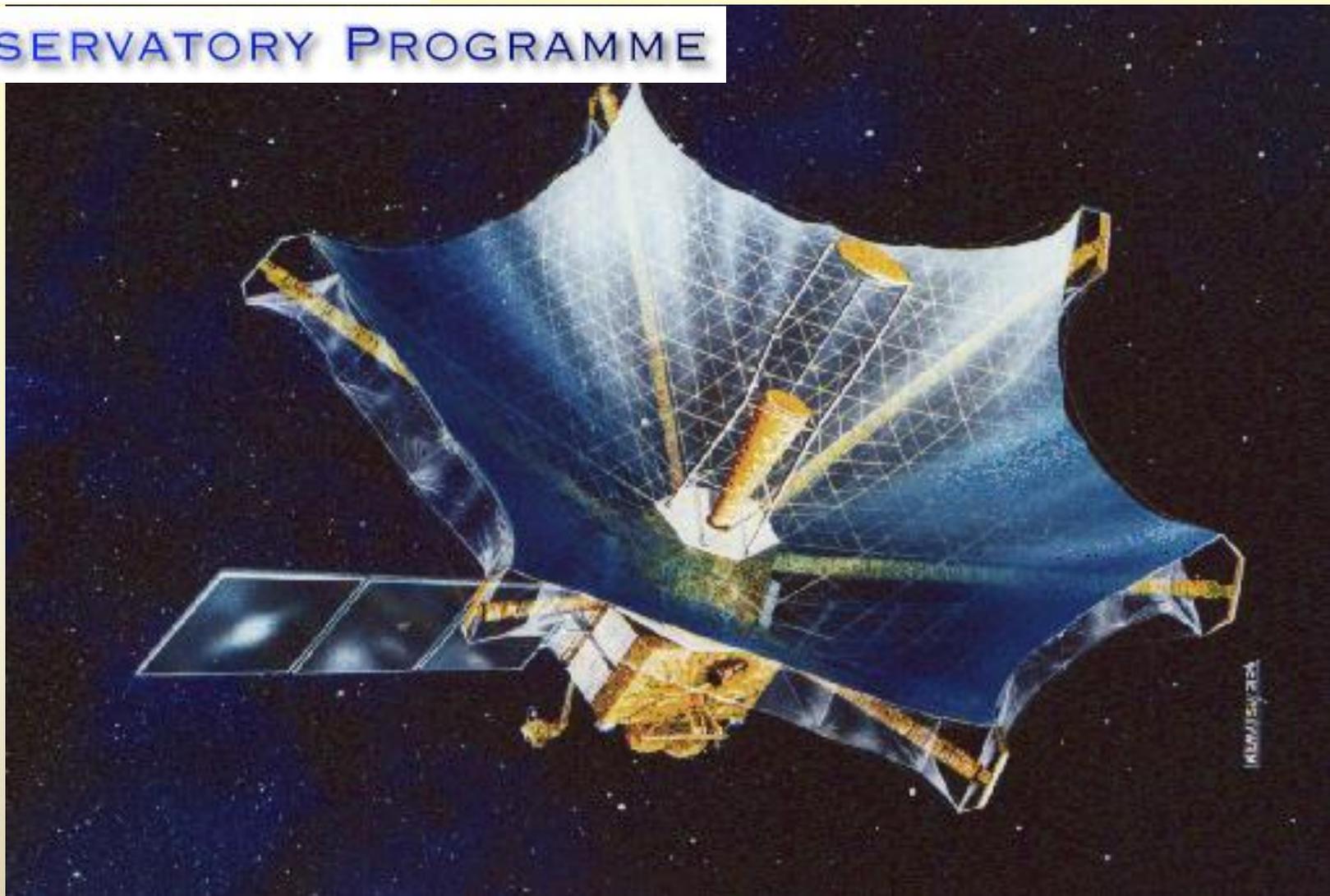
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)





THE VLBI SPACE

OBSERVATORY PROGRAMME



<http://www.vsop.isas.jaxa.jp/vsop2e/>

**Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012**

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)





Resumen de contenidos

- **Ventana radio.**
- **¿Qué mide un radiotelescopio? Conceptos como temperatura de antena, potencia medida, patrón de antena, apertura efectiva, etc...**
- **Interferometría. Síntesis de apertura.**
- **Radiotelescopios existentes y proyectos futuros.**

