



Proyecto Académico con el Radio Telescopio de NASA en Robledo

[Página principal](#) [El proyecto y sus objetivos](#) [Cómo participar](#) [Cursos de radioastronomía](#) [Material](#) [Novedades](#)

CURSO DE INICIACIÓN A LA RADIOASTRONOMÍA

[Índice](#) [Introducción](#) [Capítulo 1](#) [Capítulo 2](#) [Capítulo 3](#) [Capítulo 4](#) [Capítulo 5](#) **[Capítulo 6](#)**

© LAEFF-INTA, Madrid 2003

CAPÍTULO 6

Observando en radio con una sola antena

1. Antena única e interferometría
2. No sólo la fuente contribuye a la emisión recibida
3. La calibración en escala de temperaturas
4. Sustracción de la temperatura de sistema
5. Estimación de la opacidad atmosférica
6. Toma de datos
 - 6.1 Apuntado
 - 6.2 Observaciones de emisión continua
 - 6.3 Observaciones de líneas espectrales

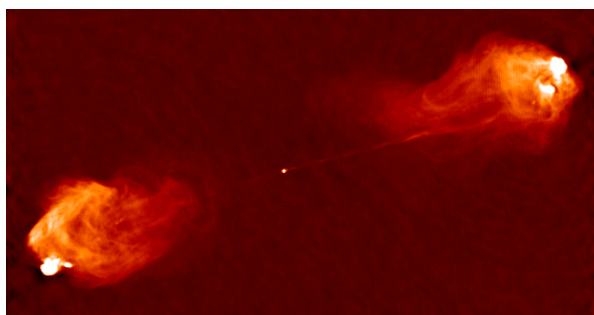


Fig.6.1. Mapa de Cygnus A tomado con el VLA a 4.8 GHz. Cortesía de C. Carilli.

1. Antena única e interferometría

Las observaciones con antena única (o *single dish*, si utilizamos su nombre en inglés) son las que se realizarán con la antena de PARTNeR. En ellas se utilizan los datos procedentes de una sola antena.

Las observaciones de interferometría utilizan varias antenas simultáneamente. Las técnicas de observación interferométrica son muy diferentes a las de antena única (además de mucho más complicadas) y no las trataremos en este curso.

2. No sólo la fuente contribuye a la emisión recibida

Cuando realizamos una observación de Radioastronomía, estamos interesados únicamente en medir la intensidad o la densidad de flujo de las fuentes astronómicas que estamos estudiando. En otras palabras, buscamos la temperatura de antena debida a la fuente. Sin embargo, hay otros elementos que contribuyen, además de la fuente, a la temperatura de antena que mide nuestro sistema receptor. Las observaciones, calibraciones y el posterior procesado de datos, están diseñados para eliminar estas contribuciones no deseadas.

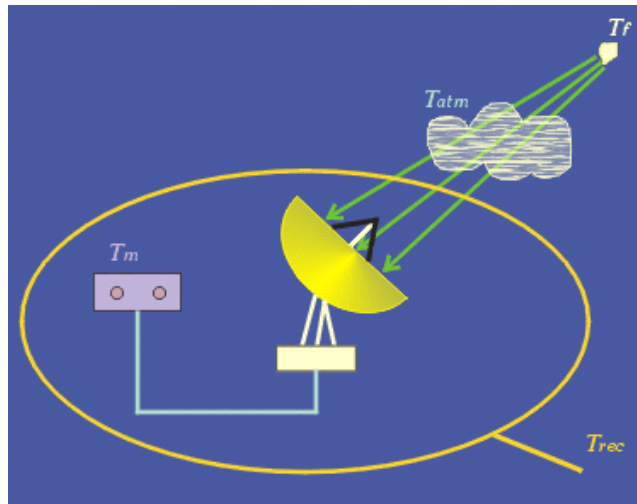


Fig.6.2. Contribuciones a la potencia total medida por el sistema receptor

Cuando apuntamos a una fuente, la temperatura de antena que medimos (T_m), tiene contribuciones de:

1. La fuente observada (T_f), que es el valor que nos interesa conocer.
2. La atmósfera (T_{atm}), por la que la radiación de la fuente debe propagarse hasta llegar a la antena.
3. El sistema receptor (T_{rec}), es decir, la propia antena, cables, amplificadores, mezcladores, y cualquier otro equipo que se encuentre entre el primer punto de la antena a la que llega la radiación y el aparato final de medida.

Estas contribuciones son aditivas, de forma que podemos expresarlas como:

$$T_m = T_{rec} + T_{atm} + T_f \cdot A_{atm}$$

El factor A_{atm} , también afecta a la temperatura de antena de la fuente y representa la absorción de ondas de radio de la fuente producida por la atmósfera terrestre. Su valor varía entre 0 (cuando la atmósfera absorbe toda la radiación que le llega) y 1 (cuando la atmósfera es totalmente transparente). Por eso aparece como un factor que multiplica (y así disminuye) la temperatura de la fuente.

Las contribuciones a la temperatura de antena que no provienen de la fuente pueden agruparse en un término, que se denomina *temperatura de sistema* (T_{sis}), es decir:

$$T_m = T_{sis} + T_f \cdot A_{atm}$$

Nuestra tarea consistirá entonces en medir T_m , y de ahí deducir T_f . Veamos qué pasos debemos dar para conseguirlo.



3. La calibración en escala de temperaturas

En el capítulo anterior ya vimos que era conveniente medir la intensidad de las ondas de radio en una escala equivalente de temperaturas de antena. El aparato de registro final (un medidor de potencias) mide la potencia en vatios, o en cualquier unidad arbitraria. Por lo tanto, lo primero que debemos hacer es averiguar la correspondencia entre las unidades del medidor de potencia y la temperatura de antena. Es decir, debemos *calibrar* el aparato de medida.

También vimos que, en longitudes de onda de radio, la relación entre intensidad (potencia) y temperatura es lineal, pues se puede aplicar la aproximación de Rayleigh-Jeans a la intensidad emitida por un cuerpo negro. Si el comportamiento del medidor de potencia es también lineal (es decir, cuando le llega el doble de intensidad, la medida que proporciona es también el doble), nuestro problema es parecido a calibrar un termómetro de mercurio, en el que la relación entre la

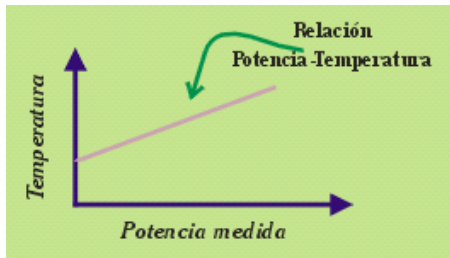


Fig.6.3. La calibración encuentra la relación entre la potencia medida por el instrumento de registro y la temperatura de antena equivalente.

longitud de la columna de mercurio y la temperatura es también lineal.

Lo que hacemos en realidad es ajustar una recta (la relación lineal, ver figura 6.3) entre los datos de potencia y los de temperatura. Esta relación podemos representarla analíticamente como

$$T = a P + b$$

donde los parámetros a y b son la pendiente y la ordenada en el origen, respectivamente. El objetivo de la calibración será determinar estos dos parámetros.

Para determinar la ecuación de una recta necesitamos al menos dos puntos. En la práctica, lo que haremos será registrar las lecturas del medidor de potencia cuando la radiación llega de dos "cuerpos negros" de temperaturas conocidas. Los cuerpos de calibración se colocan a la entrada del receptor, bloqueando toda la emisión de fuentes astronómicas y de la atmósfera (Fig 6.4). La lectura del medidor de potencia corresponderá entonces a la temperatura del cuerpo negro más la del sistema receptor (exceptuando los reflectores de la antena)

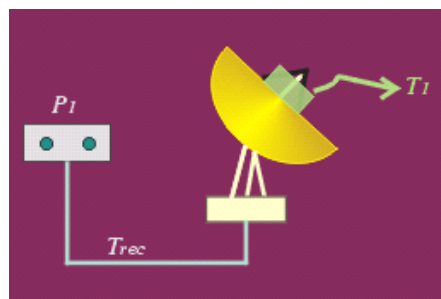


Fig.6.4. Al colocar a la entrada del sistema receptor un cuerpo negro de temperatura T_1 , la potencia registrada (P_1) corresponde a la suma de T_1 más la temperatura del sistema receptor.

Haciendo esto con dos temperaturas diferentes (Fig 6.5) podemos definir exactamente los parámetros a y b de la ecuación anterior. También se puede obtener T_{rec} , igualando el cociente de las dos potencias (P_1/P_2) al de las dos temperaturas ($[T_1+T_{rec}]/[T_2+T_{rec}]$). Dejamos como ejercicio para el lector la obtención de las expresiones analíticas de estos parámetros.

Si el cero del medidor de potencias está bien ajustado, el parámetro b en la ecuación de la recta debería ser nulo (como se deduce de la fórmula de Rayleigh-Jeans), pero este ajuste no es siempre fácil de conseguir.

Uno de los cuerpos de referencia utilizados en la calibración suele estar a temperatura ambiente (aproximadamente 300 K), por lo que se llama "carga ambiente". El otro cuerpo puede estar a una temperatura más fría (carga fría). Es habitual que la carga fría esté en el punto de ebullición del nitrógeno (78 K) o del helio (4.2 K).

Otra posibilidad sería utilizar una carga ambiente y un diodo con una temperatura equivalente conocida. En este caso, $T_1 = T_{carga}$ y $T_2 = T_{carga} + T_{diodo}$. PARTNeR utiliza cargas ambientes y diodos en su calibración.

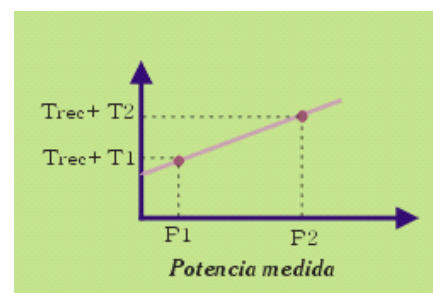


Fig.6.5. Midiendo la potencia recibida al colocar dos cuerpos de temperatura conocida, se obtiene la relación potencia-temperatura



4. Sustracción de la temperatura de sistema

Una vez retiradas las cargas y los diodos del sistema receptor, volvemos a recibir las señales del cielo, pero ya calibradas en unidades de temperatura. Como ya sabemos, al apuntar a una fuente, la temperatura de antena medida es:

$$T_m = T_{\text{sis}} + T_f \cdot A_{\text{atm}}$$

La temperatura de sistema, que engloba las contribuciones que no provienen de la fuente, es un término que, evidentemente, queremos eliminar. Esta sustracción es bastante sencilla. Basta con tomar una medida fuera de la fuente (donde $T_f = 0$), pero cerca de ella, para que la contribución atmosférica sea muy parecida. En este caso la medida coincide con la temperatura de sistema:

$$T_{m'} = T_{\text{sis}}$$

Simplemente restando las medidas en la fuente y fuera de ella ($T_m - T_{m'}$) obtendremos la temperatura de antena de la fuente, aunque atenuada por la atmósfera.

$$T_{f'} = (T_m - T_{m'}) = T_f \cdot A_{\text{atm}}$$

La forma de realizar esta observación de referencia fuera de la fuente varía según el método de observación (continuo o espectroscopía), como veremos más adelante (**secciones 6.2 y 6.3**).

Aunque la temperatura de sistema desaparece de la fórmula, su valor no es irrelevante en una observación. La emisión del sistema podemos considerarla como un ruido de fondo y determina directamente la calidad de la observación.

La temperatura de antena generada por una fuente suele ser mucho menor que la temperatura de sistema. Cuanto mayor sea esta temperatura de sistema, menor será la contribución relativa de la fuente. La fuente produce menos "contraste" respecto al ruido de fondo y, por tanto, nuestra observación será de menos calidad. En términos más técnicos, podemos decir que al aumentar la temperatura de sistema, se degrada la *relación señal-ruido*. En la fórmula de la emisión total: $T_m = T_{\text{sis}} + T_f \cdot A_{\text{atm}}$, la observación tiene mejor señal ruido cuanto mayor sea el cociente: $[T_f \cdot A_{\text{atm}}]/T_{\text{sis}}$.

Es, por lo tanto, muy importante mantener la temperatura de sistema lo más baja posible. Como vimos al principio del capítulo, hay dos contribuyentes a la temperatura de sistema: la emisión del sistema receptor y la emisión de la atmósfera.

Todos los elementos del sistema receptor emiten radiación térmica. Cuanto mayor sea su temperatura, más cantidad de ondas de radio espúreas introducen en el sistema y, por tanto, aumentarán el ruido de fondo. Algunos de los elementos de los receptores suelen mantenerse refrigerados mediante helio o nitrógeno líquido, para disminuir su contribución a la temperatura de sistema.

En cuanto a la atmósfera, hay poco que podamos hacer para mitigar su contribución al ruido de fondo. Como veremos en detalle en el siguiente apartado, su contribución a la temperatura de sistema no depende de la temperatura ambiente, sino de su mayor o menor opacidad, es decir, del tiempo meteorológico. En días despejados, la atmósfera es más transparente a las ondas de radio y, por tanto, la temperatura de sistema será menor.

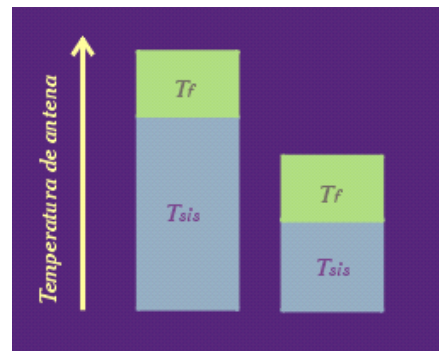


Fig.6.6. Con menor temperatura de sistema (derecha), la temperatura de antena de la fuente contrasta más sobre el ruido de fondo.



5. Estimación de la opacidad atmosférica

Por desgracia, el hecho de que la Tierra tenga una atmósfera densa, influye en gran medida en las observaciones. A pesar de que la atmósfera terrestre presenta una **ventana** para las ondas de radio, que nos permite su observación desde la Tierra, no se puede despreciar su contribución como emisora y absorbente de esta radiación.

Cualquier material que situemos entre un emisor de ondas electromagnéticas y nuestro receptor, absorberá parte de la radiación del emisor. A su vez, él mismo emitirá radiación, dependiendo de su temperatura y de su opacidad. Los cuerpos más opacos a la radiación son también los que más emiten. El caso extremo sería un cuerpo negro, que bloquea totalmente la radiación que le llega y emite también la máxima cantidad de radiación térmica. Cuando la

atmósfera sea tan opaca que se aproxima a un cuerpo negro, será imposible observar fuentes en el cielo; en cambio, recibiremos gran cantidad de señal de la propia atmósfera.

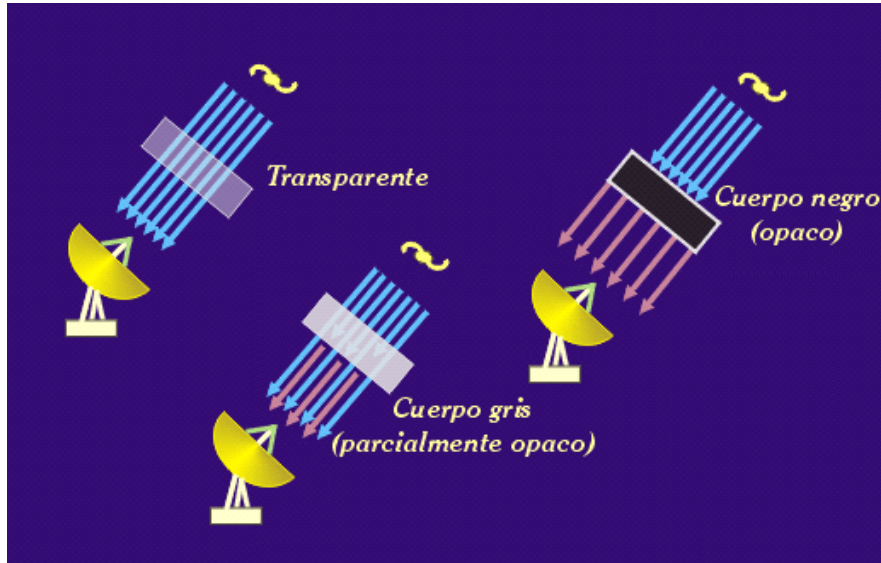


Fig.6.7. Un cuerpo transparente deja pasar toda la radiación que lo atraviesa y no emite de forma significativa. En el otro extremo, un cuerpo negro bloquea completamente la radiación incidente y emite gran cantidad de radiación térmica. En un caso intermedio (cuerpo gris) parte de la radiación se absorbe y el cuerpo emite cierta cantidad de radiación.

Por este motivo, cuando se realiza la observación de un objeto que está cerca del horizonte, la absorción (y la emisión) de la atmósfera es mucho mayor, ya que la capa que tienen que atravesar las ondas de radio para llegar a nosotros es más espesa.

El principal responsable de la opacidad atmosférica en ondas de radio centimétricas es el vapor de agua. En longitudes de onda milimétricas y submilimétricas también el oxígeno contribuye de forma importante. Los días más lluviosos, como sería de esperar, son peores para realizar observaciones. En general, el efecto del vapor de agua es mayor a longitudes de onda más cortas. En el caso de PARTNeR, la meteorología apenas influye en banda S (12 cm); puede observarse incluso en días muy nublados. Sin embargo, puede afectar bastante en banda X (3.6 cm). En telescopios milimétricos y submilimétricos se requieren unas condiciones atmosféricas excelentes para poder obtener datos de calidad. Para minimizar la cantidad de vapor de agua en las observaciones es preferible construir radiotelescopios milimétricos en lugares altos, secos y fríos.

Hasta ahora habíamos logrado determinar la temperatura de antena de la fuente, pero afectada por la absorción de la atmósfera ($T_f = T_f \cdot A_{atm}$). El último paso, por tanto, para obtener la intensidad real de nuestra fuente será estimar el factor de absorción.

Una forma de realizar esta estimación es utilizando un modelo de atmósfera, que permita calcular la cantidad de vapor de agua en la línea de visión, a partir de medidas meteorológicas de temperatura y humedad relativa en superficie. Estos modelos son adecuados cuando la opacidad de la atmósfera es moderada (como en el caso de las longitudes de onda utilizadas en PARTNeR), pero su precisión es menor al aumentar la longitud de onda observada.

Un método más preciso es obtener una *curva de temperatura de sistema*. En este caso, para estimar la absorción atmosférica se utiliza el hecho mencionado de que los cuerpos más opacos son los que más radiación emiten.

Como al observar cerca del horizonte la atmósfera es más opaca, también emite más. Es decir, la temperatura de sistema es mayor a elevaciones bajas. La curva de temperatura de sistema se obtiene midiendo dicha temperatura a diferentes elevaciones, desde el cénit (a 90° de elevación) hasta el horizonte. Esta curva permite calcular la opacidad de la atmósfera a diferentes elevaciones, y servirá para corregir los datos de la influencia atmosférica.

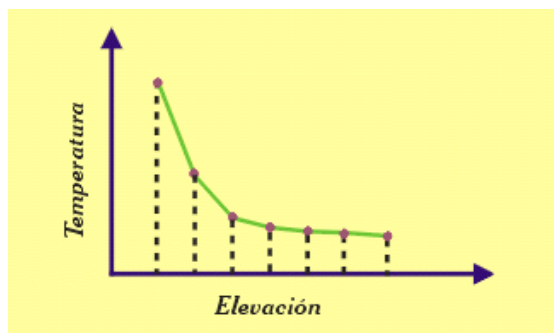


Fig.6.8. La curva de temperatura de sistema indica la contribución de la atmósfera para las distintas elevaciones

Como ya sabemos, la temperatura de sistema incluye las contribuciones de la emisión del sistema receptor y de la atmósfera

$$T_{\text{sis}} = T_{\text{rec}} + T_{\text{atm}}$$

La contribución atmosférica a la temperatura de sistema es:

$$T_{\text{atm}} = T_{\text{mat}} \cdot (1 - A_{\text{atm}})$$

Donde T_{mat} es la temperatura equivalente media de la atmósfera (unos 265 K), que es prácticamente constante, y A_{atm} es la absorción atmosférica.

De esta forma, es posible estimar A_{atm} en función de la elevación. Al realizar la observación de una fuente, podemos entonces corregir la absorción atmosférica que corresponde a la elevación a la que esté la antena en ese momento, para obtener finalmente la temperatura de antena debida a la fuente (T_p).



6. Toma de datos

Hay dos maneras fundamentales de observación en Radioastronomía: observación en continuo y observación espectroscópica. En la primera el objetivo es conocer cuánta radiación llega de un determinado punto del cielo dentro de nuestra banda de observación. En las observaciones espectroscópicas interesa saber la radiación que llega en cada frecuencia de la banda en la que se observa.

6.1. Apuntado

Los métodos que se utilizan tanto en espectroscopía como en observaciones de continuo son distintos, pero en los dos casos es fundamental el buen apuntado de la antena.

Un problema en las observaciones en radio es que no es trivial saber si la antena está apuntada correctamente o no. A diferencia de los telescopios ópticos (o de unos prismáticos, por ejemplo), un radiotelescopio no proporciona una imagen inmediata del campo que se está observando, así que no podemos saber a priori si el objeto de nuestro interés está en el centro del campo o no.

El método que se sigue para apuntar una antena es el de hacer pruebas con un objeto brillante cuya posición sea bien conocida y que se encuentre cerca de la fuente que queremos observar. A este objeto se le denomina *calibrador de apuntado*. Suele tratarse de cuásares que están muy bien estudiados, y aunque su flujo puede ser variable, su posición se conoce con mucha precisión.

La estrategia que se sigue es la siguiente:

1. Se envía la antena al calibrador elegido
2. Se hace un barrido por encima de la fuente en *elevación* y *cros-elevación* (la dirección perpendicular a la elevación), si el telescopio es de montura altazimutal, o bien en *declinación* y en *cros-declinación*, si es de montura ecuatorial.
3. Se corrige la posición de la antena según los resultados obtenidos

La idea básica del apuntado es hacer barridos en forma de cruz por encima del calibrador. Como vimos al estudiar el patrón de la antena, la potencia recibida de una fuente varía con la dirección de apuntado, siendo máxima cuando la antena apunta justo en la dirección de la fuente. La representación de la potencia recibida al realizar el barrido tendrá justamente la forma del haz de la antena, cuyo lóbulo principal es aproximadamente gaussiano.

Si al realizar un barrido, obtenemos una forma gaussiana cuyo máximo se encuentra en el centro, sabremos que la antena está bien apuntada. Si no ocurre eso, habría que corregir la posición de la antena hasta que la fuente se encuentre en el centro. En las figuras 6.9 y 6.10 se explica esto gráficamente.

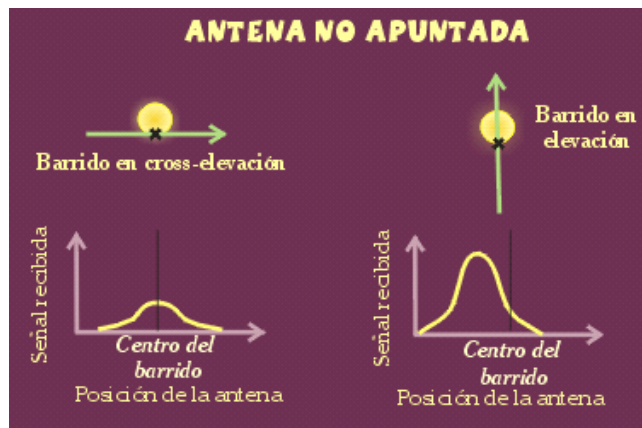


Fig. 6.9. La cruz negra marca el lugar donde está apuntada la antena, que no coincide con el centro de la fuente. Así, el máximo de la gaussiana no coincidirá con el centro de uno de los barridos, por lo que debemos corregir la posición de la antena.

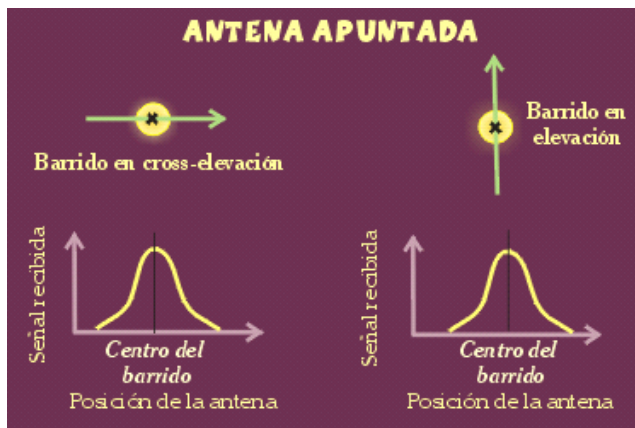


Fig. 6.10. En este caso sí tenemos la antena apuntada en el centro de la fuente, por lo que vemos que en cada barrido se obtiene una curva de forma gaussiana con su máximo en la posición central del barrido. Ambas curvas son de igual intensidad.

Es necesario, por tanto, realizar siempre las correcciones de apuntado antes de observar la fuente problema. Se debe utilizar un calibrador lo suficientemente intenso para ser detectado y que se encuentre lo más cerca posible de la fuente. Lo normal es realizar varios barridos en el calibrador hasta que las correcciones que se encuentren sean mínimas y estables. Entonces será el momento de ir a la fuente problema y comenzar la toma de datos.

Una de las unidades didácticas elaboradas por nuestro equipo para ser realizada por los alumnos de institutos trata sobre este tema, haciendo una analogía entre el apuntado de una antena y el apuntado de una escopeta en una caseta de tiro de feria. Puede resultar muy útil para que cualquier tipo de lector comprenda bien cómo se apunta una antena. Podéis acceder a ella pinchando [aquí](#).



6.2. Observaciones de emisión continua

Cuando se quieren hacer observaciones de continuo se utilizan también los *barridos* sobre la fuente. Con este método de observación, podemos obtener la densidad de flujo total emitida por fuentes puntuales, o la variación de temperatura de brillo en el caso de fuentes extensas. Este tipo de observaciones permite, por ejemplo, estudiar la variabilidad de objetos puntuales o detectar estallidos en radio como los que producen las **binarias de Rayos X**.

Vamos a centrarnos en el caso de observaciones de fuentes puntuales. El método consiste, al igual que en el caso del apuntado, en realizar dos barridos perpendiculares entre sí sobre la fuente, y medir la temperatura de antena emitida por el objeto. Como sabemos, la antena no está recogiendo únicamente radiación procedente de nuestra fuente, sino que también llegan otras contribuciones que hemos caracterizado mediante la *temperatura de sistema*. Ya mencionamos en el **apartado 4**, que el primer paso en el procesado de los datos es sustraer esa temperatura de sistema.

Dicha contaminación se corrige de la siguiente forma: el resultado de los barridos es una gaussiana, que si únicamente tuviera contribución de nuestro objeto, tendría como base la línea del 0, ya que fuera del objeto no recibiríamos ninguna señal. Lo que tendremos en la realidad es una gaussiana cuya línea de base es la temperatura de sistema. Para eliminar esta contribución a la señal, basta con calcular únicamente la altura de la gaussiana hasta su línea de base, no hasta el 0. Esto se ve con más detalle en la figura 6.11.

Con el método de observación de *barridos* es posible que no podamos ver la fuente si ésta es muy débil. Si se trata de un objeto muy débil que no se detecta en un solo barrido, lo que se hace es realizar varios sobre la posición donde se encuentra el objeto, sumando después los datos obtenidos para tener así una mejor *relación señal a ruido*.

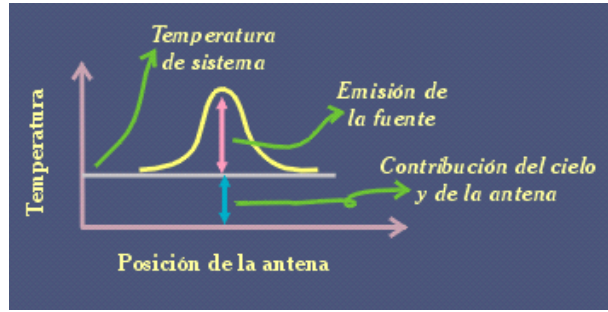


Fig.6.11. La señal que recibimos está contaminada por el cielo y por el ruido de la antena



6.3. Observaciones de líneas espectrales

Para obtener información acerca de la emisión del objeto en cada longitud de onda de nuestra banda de observación se realiza un análisis de *espectroscopía*.

Los *espectros* son representaciones del flujo en función de la frecuencia. Nos permiten estudiar las líneas de emisión de átomos o moléculas, que nos darán información sobre la composición de la fuente que estemos observando, o sobre su densidad, temperatura, morfología y movimientos.

La antena de PARTNeR no puede realizar aún observaciones de espectroscopía, aunque esperamos que sea posible en el futuro.

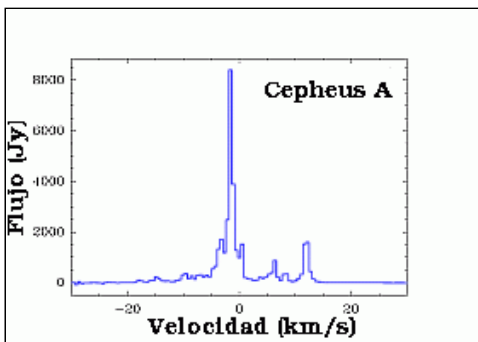


Fig.6.12. Máser de agua en una región de formación estelar

En las observaciones de espectroscopía, la señal se analiza mediante un *espectrómetro*. El espectrómetro separa las frecuencias de la banda de observación en otras bandas más estrechas, asignando a cada una su temperatura de antena correspondiente. De esta forma, a la salida del analizador, tendremos medidas de intensidad o densidad de flujo para cada frecuencia. En la figura 6.12 vemos el espectro de un máser de agua en una región de formación estelar, tomado con la antena de 70 m de Robledo.

En esta figura podemos ver que las intensidades están medidas en unidades de densidad de flujo (Janskys), y en el eje x, las frecuencias aparecen como velocidades (km/s). Esta relación entre frecuencias y velocidades viene dada por el *efecto Doppler*. El efecto Doppler relaciona la velocidad a la que se mueve un objeto respecto al observador, con la variación en la frecuencia que recibe el observador. De esta manera, si sabemos la frecuencia exacta a la que se emite una determinada línea y centramos el espectrómetro en esa línea, podemos calcular a la velocidad a la que se mueve la fuente observada respecto a nosotros.

En las observaciones espectroscópicas también existe el problema de eliminar la contaminación de la señal producida tanto por la atmósfera como por el sistema, es decir, corregir la observación de la *temperatura de sistema*. Para ello existen dos métodos de observación, el *position switching* (cambio de posición) y el *frequency switching* (cambio de frecuencia).

El método de *position switching* consiste en mover ligeramente el telescopio durante la observación, de manera que se va alternando entre medidas en la fuente y medidas fuera de la fuente. Este movimiento lo realiza automáticamente el programa de adquisición de datos, por lo que no es necesario realizarlo manualmente. Con este método se obtienen dos conjuntos de medidas distintos, uno de ellos contendrá la información de la fuente, incluyendo el ruido de fondo, y el otro será únicamente ruido. Para rescatar los datos espectroscópicos procedentes únicamente de

nuestra fuente, basta restar ambos conjuntos.

El mayor problema que presenta esta forma de observación es la pérdida de tiempo de observación real que se produce cuando se observa fuera de la fuente. De esta forma, si dedicamos 60 segundos a la observación total, sólo 30 de ellos serán en nuestra fuente, por lo que si quisiéramos realizar una observación con una integración real sobre la fuente de 60 segundos, deberemos emplear 120 s en total.

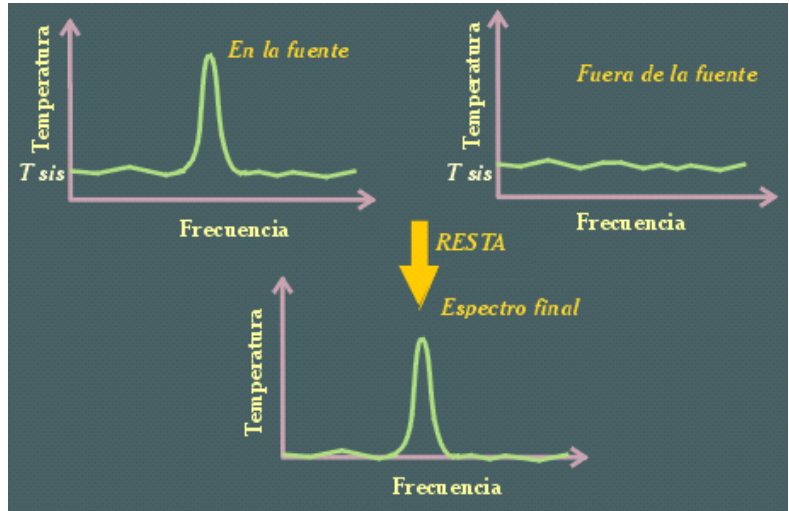


Fig.6.13. Ejemplo de position switching

El método del *frequency switching* tiene una explicación un poco más compleja. Consiste en realizar observaciones siempre sobre el objeto de nuestro interés, pero variando ligeramente, y de manera alternada, la frecuencia central de la observación. Así, la mitad del tiempo de observación el espectro estará centrado en la frecuencia de la línea que estamos observando y el resto del tiempo

centraremos el espectro en una frecuencia próxima a ella, de manera que entre en el rango de nuestro espectrómetro. En este caso tendremos dos conjuntos de espectros centrados en dos frecuencias ligeramente distintas. Al igual que en el caso anterior, para eliminar el ruido restamos estos dos conjuntos. Nos encontraremos entonces que en el espectro resta, en el cual ya no tenemos ruido, aparece dos veces la línea medida, una con valores positivos y otra con negativos.

Con este método no se pierde tiempo de observación, ya que las dos líneas que aparecen en el espectro resta son iguales y proceden del objeto de nuestro interés, por lo que para recuperar toda la señal, sólo tenemos que invertir la mitad del espectro y sumarle la otra mitad. El resultado final será un espectro cuyo tiempo total de integración real sobre la fuente será el que hemos empleado en tomarlo.

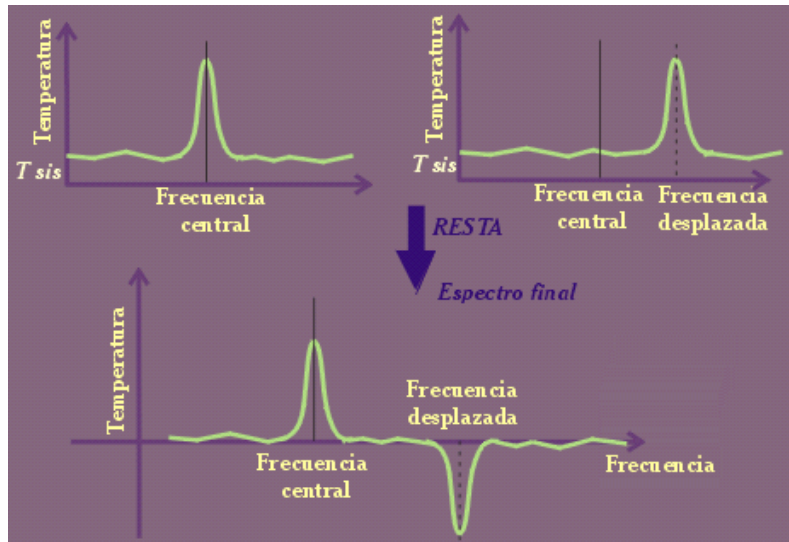


Fig.6.14. Ejemplo de frequency switching

