

## EL ESPECTRO SUBMILIMÉTRICO DE LA ATMÓSFERA MEDIDO CON ESPECTROSCOPIA DE TRANSFORMADA DE FOURIER

J. R. PARDO (\*), J. CERNICHARO (\*) y E. SERABYN (\*\*)

pardo@isis.iem.csic.es

(\*) Instituto de Estructura de la Materia, Dpto. de Física Molecular, CSIC, Madrid, España.

(\*\*) Division of Physics, Mathematics and Astronomy of the California Institute of Technology, MS 320-47, Pasadena, CA 91125, USA.

**RESUMEN:** Es éste trabajo presentamos los resultados de nuestra campaña de medidas del espectro atmosférico a longitudes de onda submilimétricas usando la técnica de espectroscopía por transformada de Fourier, cuyo objetivo fundamental ha sido obtener un buen modelo de dicho espectro para su uso en la corrección de observaciones astrofísicas con telescopios e interferómetros submilimétricos. El espectrómetro que hemos desarrollado ha sido instalado en el telescopio submilimétrico de Caltech en la cima de Mauna Kea (Hawaii), a 4,1 km sobre el nivel del mar. la situación en un lugar muy elevado y seco permite acceder a las ventanas submilimétricas del espectro atmosférico, las cuales son altamentepacas a menores alturas.

**ABSTRACT:** In this work we report on the results of our campaign of measurements of the atmospheric submillimeter spectrum using Fourier Transform Spectroscopy. The main goal has been to get the necessary information to build a good model of that spectrum for use in correcting astrophysical observations by single telescopes or by interferometers. The spectrometer developed for this experiment has been installed on the Caltech Submillimeter Observatory at the Mauna Kea summit (HI), 4,1 km above sea level. Such a high and dry site allows access to the atmospheric submillimeter windows, otherwise opaque at lower elevations.

**Palabras clave:** Atmósfera, espectro submilimétrico, transformada de Fourier.

### INTRODUCCIÓN

la radioastronomía milimétrica y submilimétrica necesitan un modelo preciso del efecto de la atmósfera terrestre a la hora de realizar en las observaciones la corrección de la atenuación atmosférica, para conocer la contribución de la atmósfera a las temperaturas de ruido observadas y para estimar y corregir las diferencias de fase debidas a la atmósfera sobre las observaciones en modo interferométrico. A pesar de la existencia de diversos modelos, ninguno de ellos era suficientemente preciso, especialmente a longitudes de onda submilimétricas, o eran incompletos debido a dos razones principales: descripción incorrecta de la absorción no resonante (pseudo-continuo) y no consideración de la dispersión de fase.

Las medidas precisas en éste rango espectral on vistas a la determinación del espectro atmosférico han sido escasas, comenzando por unos primeros intentos de Hills *et alii* (1978) en Tenerife, a 2.400 metros sobre el nivel del mar, que delinearon de forma básica las ventanas

atmosféricas hasta una frecuencia máxima de 1.000 GHz. Otras medidas en laboratorio fueron efectuadas siempre a frecuencias inferiores a 350 GHz, y entre ellas podemos señalar: Bauer *et alii* (1995, 1998).

La técnica de espectroscopía por transformada de Fourier (ETF) se revela especialmente bien adaptada para este tipo de estudios debido a la posibilidad de cubrir una banda muy ancha (del orden de 1 THz) con una resolución espectral más que suficiente (200 MHz en nuestro experimento) para resolver perfectamente las líneas rotacionales ensanchadas por efecto de la presión de las principales moléculas atmosféricas. Esta fue la razón por la cual iniciamos un proyecto de medidas ETF, montando uno de estos espectrómetros en el telescopio submilimétrico de Caltech (CSO) a 4,1 km sobre el nivel del mar. La selección de un lugar de observación seco y a gran altura viene motivada por la necesidad de acceder a las ventanas submilimétricas que sólo se abren parcialmente en esas condiciones. Otras iniciativas similares se han tomado recientemente en lugares por en-

cima de los 4.8 km en el desierto de Atacama (Chile), donde se instalará el futuro interferómetro ALMA («Atacama Large Millimeter Array»), así como en el Polo Sur.

### EL ESPECTRO ATMOSFÉRICO (MM/SUBMM) A GRANDES RASGOS

La absorción milimétrica y submilimétrica está dominada por las siguientes moléculas:  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H_2O^{1/2} = 1$ , HDO,  $^{16}O^{18}O$  y  $O_3$ . Existen líneas estrechas de otros gases minoritarios pero son muy difíciles de detectar desde observatorios en tierra, aunque no así por encima de la troposfera. Además de esta parte «resonante», una parte de la opacidad se presenta como un continuo, el cual se puede dividir en dos partes. Por un lado el continuo ligado al vapor de agua se cree debido total o parcialmente a alas lejanas de resonancias infrarrojas. La otra contribución se debe a absorción de tipo cuadrupolar eléctrico generada en las colisiones donde están involucradas las moléculas de  $N_2$  y  $O_2$ , los dos gases atmosféricos mayoritarios. Estas opacidades en forma de continuo adquieren gran importancia en el submilimétrico y de ahí nuestro interés en poder medirlas y separarlas con precisión.

### INSTRUMENTACIÓN Y OBSERVACIONES

El espectómetro de transformada de Fourier usado para éste trabajo, la descripción de la técnica de calibración y las primeras observaciones, están descritas en Serabyn et alii (1998). Para éste estudio se instaló a la entrada del detector (bolómetro enfriado a temperatura de  $^3He$ ) un filtro de paso bajo a 1.1 THz para cubrir de forma eficiente todo el dominio sub-THz más una ventana centrada a 1.035 THz que se esperaba detectar en condiciones especialmente secas.

Las primeras medidas en ésta configuración se obtuvieron el 1 de abril de 1998 bajo condiciones «El Niño»

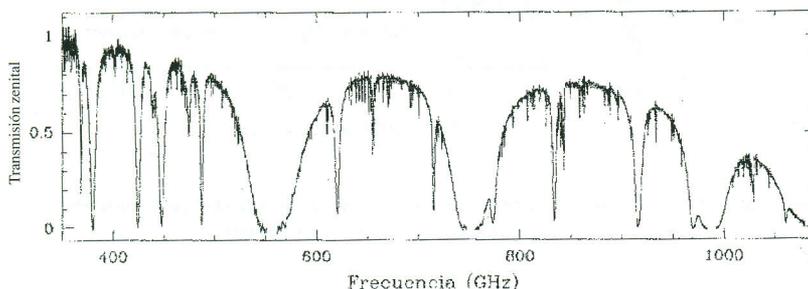
extremas en Hawai. En el medio del Pacífico esto supone una extrema sequedad atmosférica, mientras que las costas americanas sufrían fuertes precipitaciones. Los datos obtenidos fueron de gran calidad (figura 1) y se complementaron con observaciones realizadas en julio de 1999 en casi idénticas condiciones de presión y temperatura pero con una columna de vapor de agua unas tres veces mayor que la existente en las observaciones de 1998.

Cada espectro, completamente calibrado en términos de transmisión atmosférica, se derivó de un total de cuatro barridos del brazo móvil del ETF con el telescopio apuntando al zénit, y después otros cuatro barridos más sobre cada uno de los absorbentes de referencia, uno a temperatura ambiente y otro a la del nitrógeno líquido. la velocidad del barrido fue 0.25 cm/s usando una longitud total de 47 cm en el brazo móvil. De esta forma la resolución espectral finalmente obtenida fue de 200 MHz.

### RESULTADOS

Dadas las excepcionales condiciones que se dieron durante las observaciones de 1998 (el espectro de la figura 1 es el récord absoluto de transparencia atmosférica en el submilimétrico), parecía claro que los datos ofrecían una magnífica oportunidad para determinar los dos términos de continuo citados con anterioridad. Sin embargo, la separación sin ambigüedad requiere el uso de la medida de 1999. Al ser las condiciones de temperatura y presión similares en ambos casos, el continuo seco debía ser el mismo mientras el ligado al vapor de agua era proporcional a la columna de este gas presente en cada medida.

En primer lugar se ajustaron los espectros observados usando un modelo de transferencia radiativa atmosférica con una primera aproximación de los términos de continuo.



**Figura 1.** Espectro atmosférico, con una resolución de 2300 MHz obtenido el 1 de abril de 1998 en Mauna Kea. La columna integrada de vapor de agua resultó ser 185  $\mu m$ . Con la ayuda de medidas complementarias tomadas en julio de 1999, se pudo realizar la separación de los términos de continuo (seco y  $H_2O$ ) del espectro atmosférico terrestre en esa región de frecuencias.

El parámetro libre en el ajuste de la columna de vapor de agua, la cual puede ser determinada con gran precisión al estar dominado éste parámetro por las fuertes resonancias rotacionales que esta molécula presenta a 380, 557 y 752 GHz, cuyos parámetros espectroscópicos se conocen con gran precisión. Como resultado se obtuvieron 185  $\mu\text{m}$  de columna zenital de vapor de agua en la observación de abril de 1998 y 600  $\mu\text{m}$  en la de julio de 1999.

A partir de ahí se sustrajo a las observaciones la contribución resonante de la opacidad usando la información de presión, temperatura, columna de vapor de agua obtenida del primer ajuste, y una distribución tropical típica de  $\text{O}_3$ . A partir de aquí tenemos dos continuos totales medidos a cada frecuencia que tienen una parte común (el continuo «seco», y otra parte proporcional a la columna de vapor de agua. Resulta pues inmediato separar ambas componentes.

## DISCUSIÓN

### Continuo de $\text{H}_2\text{O}$

Una expresión analítica del exceso de absorción del vapor de agua en microondas, que aquí llamamos simplemente el continuo de  $\text{H}_2\text{O}$ , es la siguiente:

$$\kappa_{c,\text{H}_2\text{O}}(m^{-1}) = A \cdot \left(\frac{\nu}{225}\right)^B \cdot \left[\frac{e}{1013} \cdot \frac{P-e}{1013}\right] \cdot \left(\frac{300}{T}\right)^3$$

Unidades: GHz, mb y K. Los resultados de nuestras medidas se pueden usar para llevar a cabo un ajuste por mínimos cuadrados de  $A$ , si fijamos  $B=2.0$  [valor predicho por la teoría: Rosenkranz (1998)]. el resultado es  $A=0.031 \text{ m}^{-1}$ , lo cual nos lleva a una discrepancia respecto a modelos previos a estas medidas. Este desacuerdo se debe fundamentalmente a que tales modelos están basados en medidas de laboratorio por debajo de 350 GHz, lo que hace muy dudosa su extensión a las frecuencias en las que nosotros hemos podido medir.

### Continuo seco

El continuo seco derivado de nuestras medidas se explica por la absorción cuadrupolar eléctrica inducida por colisiones  $\text{N}_2\text{-N}_2$ ,  $\text{O}_2\text{-O}_2$  y  $\text{O}_2\text{-N}_2$ . Si se compara nuestro resultado con un modelo preciso de la absorción ligada al proceso  $\text{N}_2\text{-N}_2$  se ve una discrepancia que se explica prácticamente a la perfección si añadimos el efecto de los otros dos mecanismos. Hemos realizado sólo una estimación de ese efecto suplementario ya que carecemos de modelo preciso. El resultado es bastante satisfactorio.

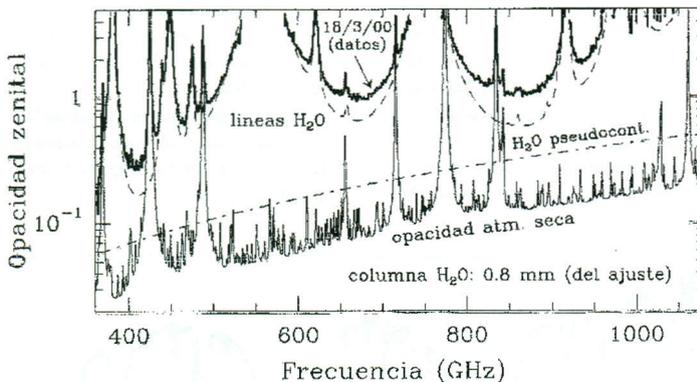


Figura 2. Medidas FTS recientes (marzo 2000) y descomposición de la opacidad en sus diferentes componentes según el modelo resultante de nuestro estudio.

## MODELO RESULTANTE

Gracias, entre otras, a las medidas presentadas en este trabajo, se ha podido construir un modelo de la transmisión atmosférica mejorando para frecuencias de hasta 1.6 GHz. Dicho modelo ha demostrado su precisión al aplicarse a nuevos datos obtenidos con el instrumento ETF en Manua Kea, así como a los de nuevos experimentos instalados en Atacama y en el Polo Sur. La figura 2 ilustra las diferentes componentes de la opacidad discutidas (o derivadas) en éste trabajo, tal como las predice el modelo resultante para ajustar un espectro ETF reciente. El modelo constituirá la base para efectuar correcciones de la señal en el futuro *Atacama Large Millimeter Array*, el gran interferómetro de 64 antenas a construir en el Llano de Chajnantor (Chile).

## BIBLIOGRAFÍA

BAUER, A., GODON, M., CARLIER, J. y MA, Q.; *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 50, 463-475 (1995),

BAUER, A., GODON, M., CARLIER, J. y GAMACHE, R. R.; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 59, 273-285 (1998).

HILLS, R. E., WEBSTER, A. S., ALSTON, D. A., MORSE, P. L. R., ZAMMIT, C. C., MARTIN, D. H., RICE, D. P. y ROBSON, E. I.; *Infrared Physics*, 18, 819-825 (1978).

ROSENKRANZ, P. W.; *Radio Science*, 33, 919-928 (1998).

SERABYN, E., WEISSTEIN, E., LIS, D. C. y J. R. PARDO; *Appl. Opt.*, 37, 2185-2198 (1998).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CICYT española su apoyo a éste trabajo mediante los proyectos financiados PNIE98-01351E y PB96-0883, así como a la NSF americana que contribuyó mediante los proyectos ATM-9616766 y AST-9980846.