

Guillermo Giménez de CastroCentro de Radioastronomía y Astrofísica Mackenzie, San Pablo, Brasil, e IAFE, UBA-
Conicet**Cristina Hemilce Mandrini**

IAFE, UBA-Conicet

Jean-Pierre Raulin

Centro de Radioastronomía y Astrofísica Mackenzie, San Pablo, Brasil

Veinte años del telescopio solar submilimétrico

Esta historia comienza en Buenos Aires, durante la XXI Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (IAU, por su sigla en inglés), en julio de 1991. Hugo Levato, director del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), Horacio Ghielmetti, director del Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE) y Pierre Kaufmann, coordinador del Centro de Rádio Astronomia e Aplicações Espaciais (CRAAE) de San Pablo, Brasil, conversan sobre un proyecto de radiotelescopio solar en ondas submilimétricas, o sea que detecte radiación solar con longitud de onda debajo del milímetro. Kaufmann, un pionero de la radioastronomía, piensa instalarlo en algún sitio de Chile o de los Estados Unidos. Ghielmetti, quien trabaja en el diseño y la construcción de un detector de rayos X solares que volaría en el SAC-B, el primer

satélite científico argentino, le propone instalarlo en el CASLEO donde ya funcionaba el telescopio de 2,15m recientemente bautizado Jorge Sahade. En marzo de 1992, durante el 154.º Simposio de IAU 'Infrared Solar Physics' en Tucson, Estados Unidos, Kaufmann presenta oficialmente el proyecto a la comunidad internacional: instalar en los Andes argentinos un radiotelescopio con muy alta resolución angular y receptores en 210 y 405GHz para determinar la posición de la fuente emisora y construirlo en colaboración entre el CASLEO, el IAFE y el Instituto de Física Aplicada (IAP, por su sigla en alemán) de la Universidad de Berna en Suiza. Acababa de nacer el SST.

Los antecedentes del SST hay que buscarlos en la experiencia adquirida desde la década de 1960 por Kaufmann y su grupo con el Rádio Observatório do Vale do Itapetinga, hoy rebautizado Rádio Observatório Pierre

¿DE QUÉ SE TRATA?

Se cumplieron veinte años de la instalación del telescopio argentino-brasileño de investigaciones solares.

Kaufmann, próximo a la ciudad de Atibaia, distante 70km de San Pablo. Este telescopio de casi 14m de diámetro consiguió realizar observaciones solares hasta la frecuencia de 90GHz. Más tarde fue el instrumento base para un experimento que resultó exitoso; utilizó el esquema de múltiples haces, o *multibeam* como se lo conoce y se explica en la figura de la página 62, para ubicar de forma inmediata el centro de emisión de una fuente. Lo relevante es que lo hizo limitando geoméricamente el ingreso de radiación a los receptores hasta que sus haces se tocaron a un nivel del 50%. Esto, que resulta en pérdida de sensibilidad, distorsión del haz y aumento de radiación no deseada —todo lo que los manuales de la radioastronomía desaconsejan—, demostró ser eficiente para observaciones de fulguraciones solares. El primer *multibeam* fue construido en colaboración con el IAP de Suiza, para la frecuencia de 48GHz.

Radioastrofísica solar

La radioastronomía nació en 1930 cuando el norteamericano Karl Jansky (1905-1950) demostró que parte de la radiación recibida por su antena Merry-Go-Round ('calesita' en castellano), con un receptor sintonizado en 20,5MHz, provenía del centro galáctico. En 1940 otro norteamericano, Grote Reber (1911-2002), construyó el primer radiotelescopio con una antena parabólica y con receptores que iban de 160 hasta 3000MHz y en 1944 publicó el primer artículo científico radioastronómico en la revista *The Astrophysical Journal*. La Segunda Guerra Mundial aceleró la evolución de receptores de radio para radares y comunicaciones. Así fue como en 1942 el físico inglés James Stanley Hey (1909-2000), que operaba una estación de radar en las costas británicas, determinó correctamente el origen solar de un brillo intenso en su pantalla y, de paso, descartó la aterradora idea de que una superfortaleza alemana se aproximaba amenazante al Reino Unido. También en la misma época, pero en Nueva Zelanda, la británica Elizabeth Alexander (1908-1958) interpretó de forma semejante las observaciones en sus pantallas de radar, aunque estos informes solo fueron conocidos al final de la guerra. Estas observaciones no dejaban de sorprender a los astrónomos: la radiación detectada era demasiado intensa para que las fuentes de emisión conocidas en el Sol pudieran producirla. Años más tarde, refiriéndose a los orígenes de la radioastronomía en general, Reber dijo: 'Los astrónomos no conseguían imaginar ninguna forma racional por la cual estas ondas eran generadas, y como ellos no conocían ningún proceso, todo el tema [la radioastronomía] era [según ellos] en el mejor de los casos un error, y en

el peor, una farsa'. Curiosamente, en 1901, el francés Charles Nordmann del Observatorio de Niza sostuvo, en la defensa de su tesis doctoral, que el Sol debe emitir en radio y que esta emisión debía estar correlacionada con el ciclo de manchas y fáculas observadas. Una experiencia con un receptor de radio realizada en septiembre de 1900 no consiguió, sin embargo, detectar estas señales.

Para la década de 1960 la radioastronomía avanzaba a pasos agigantados: la física consiguió explicar el origen de las emisiones y este fue un motivo más para buscar nuevas ventanas de observación, o sea, nuevas bandas de frecuencia. Se construyeron antenas de mayor diámetro y la frecuencia de los receptores pasó de las ondas métricas (300MHz) a las milimétricas (30GHz), mientras la técnica observacional pasó de la de antena única (*single-dish*) a la de interferometría. Entre los nuevos mecanismos de emisión que se propusieron recibió mucha atención la giroemisión: el proceso por el cual un electrón emite radiación electromagnética al moverse a lo largo de las líneas de campo magnético. Una característica de esta emisión es que, a mayor energía cinética del electrón, mayor es la frecuencia característica de su emisión. Es decir, observando en frecuencias cada vez más altas podemos estudiar partículas de energías mayores. La distribución en energía de las partículas aceleradas en procesos naturales tiende a estar muy concentrada en las bajas energías, siendo una pequeña fracción el número de las que alcanzan energías altas. Esto es lo que se llama distribución en ley de potencias, y tiene como consecuencia que la radiación sea muy intensa en bajas frecuencias (< 10GHz) y disminuya a frecuencias altas. Observar a altas frecuencias puede dar respuesta a un enigma aún vigente de la astronomía general: cómo conseguir que partículas cargadas adquieran energías relativistas.

Kaufmann hizo un descubrimiento sorprendente en 1984 usando el radiotelescopio de Itapetinga: durante una fulguración solar, el brillo a distintas frecuencias entre 1 y 50GHz permaneció constante en intensidad, pero a 90GHz aumentó abruptamente. Esto significaba que había alguna fuente capaz de entregar energía de manera selectiva, a partir de una cierta energía. La observación de 1984 lo motivó a ir a frecuencias más altas, para ver si la tendencia se mantenía.

Pero la atmósfera terrestre no tolera la transmisión en cualquier frecuencia: a partir de alrededor de los 10GHz su opacidad aumenta gradualmente y se torna completamente opaca a 1000GHz. Desde esta frecuencia hasta el infrarrojo, la atmósfera terrestre está completamente cerrada a la radiación electromagnética. El villano de la opacidad atmosférica en este rango espectral es el vapor de agua. La solución es ir a lugares secos y altos porque la acumulación de vapor de agua se reduce exponencialmente con la altura. La elección del CASLEO para instalar un telescopio

submilimétrico fue lo lógico: ubicado a 2550m, tiene una opacidad razonable en 210GHz y aceptable en 405GHz. Otro motivo para escoger el observatorio es que ya contaba con infraestructura adecuada para operar: rutas, edificaciones, conexiones y personal técnico calificado.

El telescopio

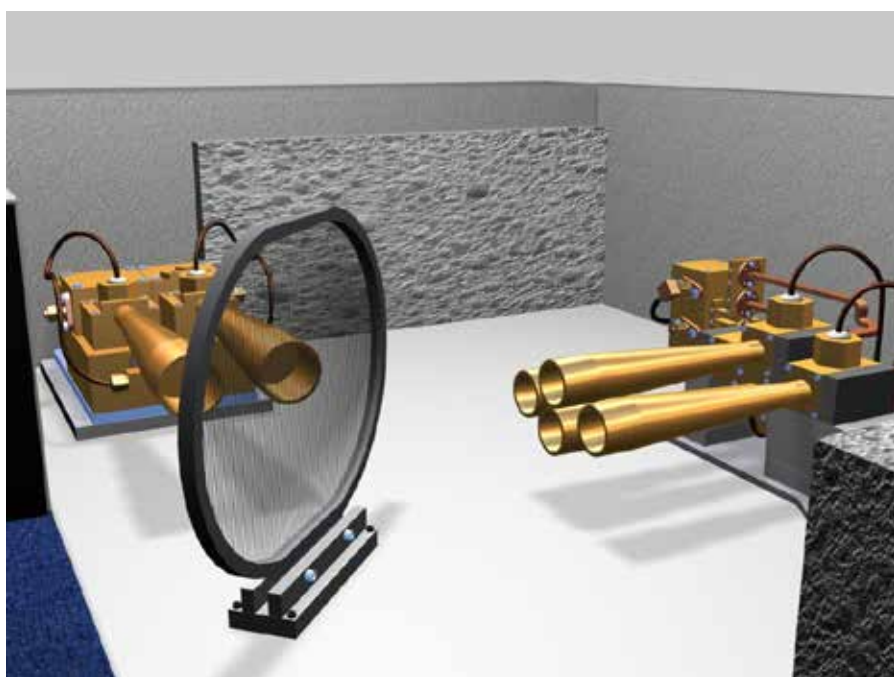
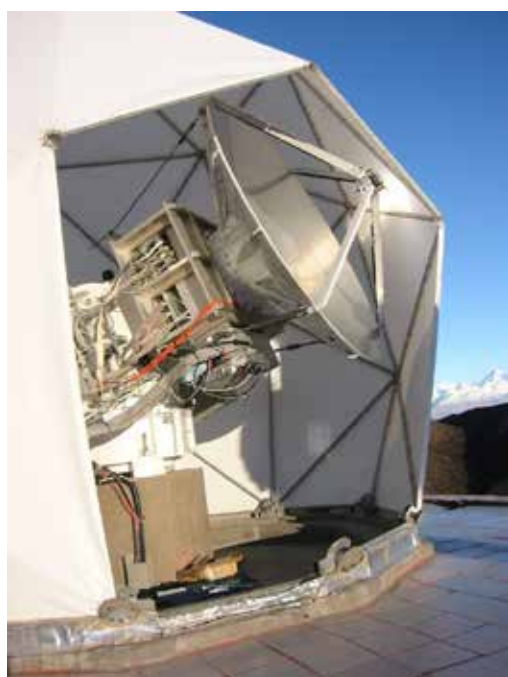
El SST fue diseñado por el CRAAE junto con el IAP. Es un telescopio de tipo Cassegrain con un reflector primario de 1,5m de diámetro y una relación focal $f / D = 8$. La antena, construida por la Universidad de Arizona en Tucson, está cubierta por una bóveda (radomo) de material sintético de la marca Gore-TeX que inhibe el pasaje de radiación infrarroja, pero es transparente a la radiación que nos interesa. El sistema multibeam está compuesto por tres receptores en la frecuencia central de 212GHz, cada uno proyecta sobre el cielo un haz nominal de cuatro minutos de arco ($4'$), más un receptor de 405GHz con un tamaño de haz de $2'$. A este conjunto de cuatro receptores se le agregaron dos más, uno en 212 y otro en 405GHz, de características similares a los anteriores, separados por $7'$ del conjunto central, y que sirven como referencia. A estas frecuencias las ondas tienen una longitud de 1,4 y 0,7mm respectivamente, de ahí la razón de ser submilimétrico. Todos los receptores fueron construidos usando la última tecnología del momento y el conjunto de antena y receptores se asienta

sobre una montura alt-azimut. El software de control de movimiento y adquisición de datos fue escrito por los propios miembros del proyecto en lenguaje C, y corre sobre QNX, un sistema operativo de tiempo real. Además, el mismo equipo desarrolló el software de calibración y análisis de los datos, usando mayormente el Interactive Data Language (migrando en 2020 a Python).

El proyecto fue financiado, principalmente, por la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de San Pablo (FAPESP, por su sigla en portugués), después de pasar por un largo proceso de aprobación que incluyó un comité internacional.

El SST fue integrado en el IAP entre noviembre de 1998 y marzo de 1999 y trasladado al CASLEO adonde arribó en abril de 1999. Si bien no hay un registro oficial, se acepta que vio la primera luz, o sea, la primera observación del Sol, el 1 de mayo de 1999. Los dos primeros años operó en modo de campaña: los miembros del equipo íbamos al CASLEO para hacer observaciones durante una o dos semanas y al irnos apagábamos los equipos. En abril de 2001, las operaciones pasaron a ser diarias, y desde 2014, remotas. Hasta este momento, fines de 2020, se han acumulado más de 7000 días, o 56.000 horas-observación y 400GB de información. Un tesoro observacional.

La finalidad más importante del SST es observar fulguraciones solares. Como el tamaño de sus ojos ($4'$ y $2'$) es menor que el Sol entero ($30'$), debemos escoger cada día una región del Sol para observar y además reali-



Izquierda. El SST con el radomo abierto durante su instalación. Puede verse la antena y la caja de los radiómetros (*front-end*). **Derecha.** Representación 3D del *front-end*. Se pueden ver las dos cornetas de los receptores de 405GHz (izquierda) y las cuatro cornetas de los receptores de 212GHz (derecha). La red (*grilla*) gris sirve como semirreflector para dividir la señal de entrada y dirigirla a las cornetas.



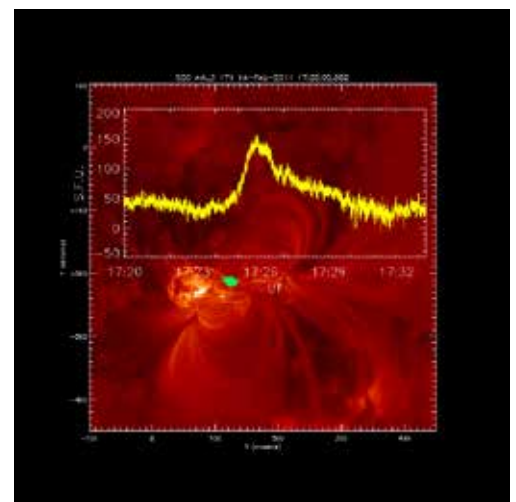
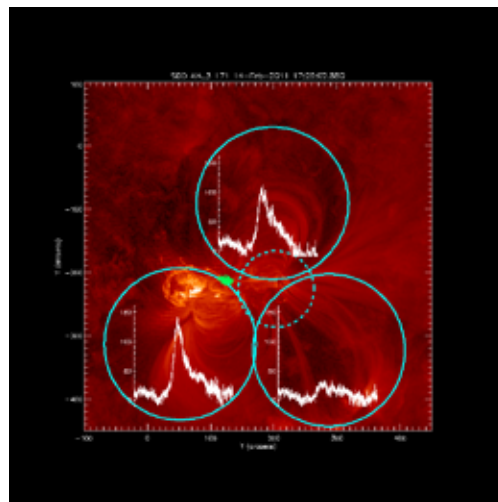
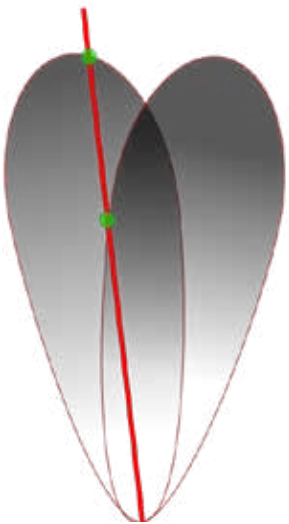
Visita del comité internacional externo que evaluó al proyecto junto con autoridades locales, CASLEO, julio o agosto de 1994. De izquierda a derecha: Antônio Mario Magalhães (USP, Brasil), Marta Rovira (IAFE, Argentina), Hugo Levato (CASLEO, Argentina), Horacio Ghielmetti (IAFE, Argentina), Horacio Dottori (UFRGS, Brasil), Lars-Åke Nyman (ESO). La foto fue tomada a pocos metros de donde hoy se erige el SST. A la izquierda se ve el edificio que aloja al telescopio Jorge Sahade.

zar otras operaciones, con fuentes conocidas, para mantenerlo calibrado: medir la opacidad atmosférica, hacer mapas del Sol y, a veces, de la Luna, Venus y Júpiter.

El método *multibeam*

Los radiotelescopios tienen un único receptor y se los denomina *single-pixel*. Sus gigantes antenas solo co-

lectan energía y ven el brillo de un único punto en el cielo cuyo tamaño es lo que llamamos haz (*beam* en inglés). Para tener una imagen, la antena debe moverse alrededor del objeto a estudiar, barrerlo para recoger el brillo de cada punto del espacio y montar un mosaico que llamamos mapa. El proceso es lento. Para aumentar la velocidad es posible utilizar muchas antenas en simultáneo usando una técnica denominada de interferometría. Si no es accesible, la alternativa es colocar un conjunto de receptores en el foco de una única antena, lo que se denomina una matriz focal. El sistema *multibeam* del SST es una matriz focal de tres receptores en 212GHz separados angularmente por 4' en una distribución triangular, superponiéndose en el nivel de 50% de la respuesta. Para determinar la posición del emisor, se usan los cocientes de las intensidades observadas por cada receptor. Un cuarto receptor en 405GHz se coloca en el centro de la matriz. En la figura de abajo se ve un ejemplo unidimensional que explica el concepto en forma gráfica. Saber exactamente la posición nos permite comparar con observaciones en otras longitudes de onda, originadas por procesos físicos diferentes. El método no permite hacer imágenes, pero sí detectar movimientos de la fuente, y tan importante como la ubicación de la fuente es la corrección de la intensidad recibida. Se ve que ninguno de los dos receptores de manera independiente captura toda la intensidad de la radiación incidente por no ingresar en su punto de máxima respuesta.



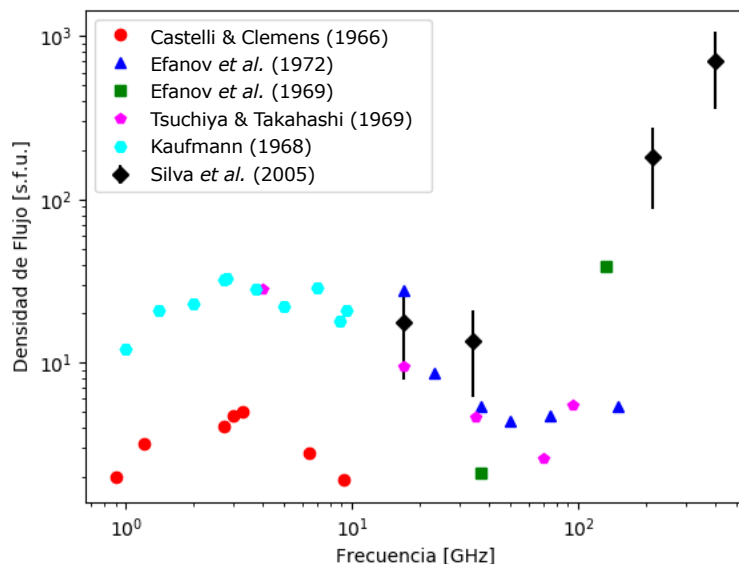
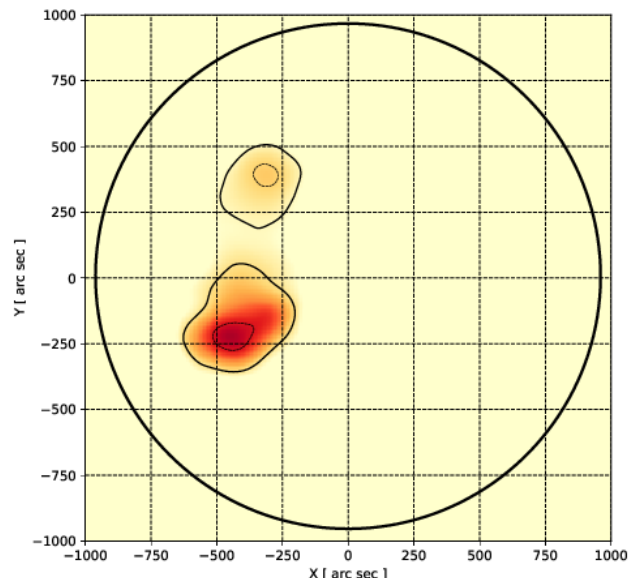
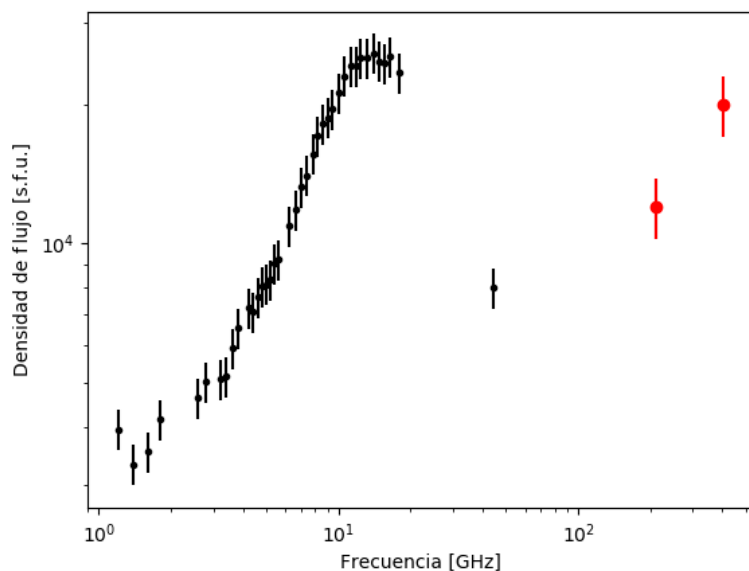
El método *multibeam*. **Izquierda.** Dos haces apuntan en direcciones ligeramente diferentes, la *respuesta* de cada haz disminuye desde el vértice superior al inferior. Un rayo de luz (línea roja) llega a ambos haces y los intercepta en diferentes posiciones relativas (círculos verdes). La intensidad recogida por cada haz será el resultado del valor original multiplicado por su respuesta (un valor entre 0 y 1). Como se verifica, ninguno de los dos haces aisladamente registraría la intensidad original. **Centro.** observación de una fulguración con el SST. La imagen del fondo es una foto en el ultravioleta. Los círculos representan los haces del SST, los de curva continua son haces de 212GHz, el círculo a trazos es el haz en 405GHz. Las curvas blancas dentro de cada círculo son las variaciones temporales de intensidad registrada por cada haz. El pequeño borrón verde es la posición de la fuente obtenida aplicando el método *multibeam*. **Derecha.** Con el mismo fondo anterior, la curva amarilla representa la evolución temporal de la intensidad recuperada y la mancha verde es la posición de la fuente según el método *multibeam*.

Espectros rampantes

Como dijimos, el objetivo principal del SST es encontrar nuevas evidencias de espectros anómalos como el observado en 48GHz. Y aunque llevó un cierto tiempo, pudimos encontrarlos. Fue durante el período de mayores fulguraciones detectadas en la era espacial, la semana del 27 de octubre al 4 de noviembre de 2003. De esta sucesión de grandes eventos llamada tormentas solares de Halloween, por coincidir con la tradicional celebración anglosajona del 30 de octubre, varios fueron detectados por el SST: el del 27 de octubre y del 2 de noviembre y, por último, el más espectacular de todos, el del 4 de noviembre como se observa en la figura de la derecha. Esta última fulguración generó el artículo con el mayor número de citas bibliográficas del SST. Nuestras observaciones mostraron que la intensidad en la frecuencia de 405GHz es mayor que en 212GHz, exactamente el tipo de inversión espectral que estábamos esperando. El del 2 de noviembre fue similar.

El telescopio KOSMA, instalado en los Alpes suizos y dotado de un sistema similar al del SST para las frecuencias de 210 y 345GHz, detectó el 28 de octubre de 2003 un evento de espectro invertido. Años más tarde, el 6 de diciembre de 2006, el SST volvió a registrar un evento anómalo. Este tipo de fulguraciones recibió el nombre de eventos THz (por terahercios, la frecuencia a la que ocurren), por la suposición de que el máximo de emisión debería estar en frecuencias arriba de 1THz. ¿Cuál es el origen físico de los eventos THz? Hay muchas hipótesis y, a pesar de que pasaron más de quince años, no existe aún confirmación. El motivo principal de nuestra ignorancia es que para poder verificar alguna de las teorías propuestas necesitamos observaciones en frecuencias más altas, hasta llegar a varios THz. Precisamos además conocer la polarización de la onda, manteniendo la capacidad de localización de la fuente. Mejor aún sería tener imágenes, pero ¿es posible? Para obtener imágenes habría que hacer un instrumento formado por un sensor matricial capaz de sintonizar y barrer muy rápidamente en frecuencia entre 100GHz y 10THz, con capacidad de registrar la polarización de la onda. Ese instrumento debería estar ubicado a más de 10km de altura, para eliminar la atmósfera terrestre, o sea, no podría ser terrestre y se debería po-

Algunos resultados del SST. **Arriba.** Espectro registrado durante el evento del 4 de noviembre de 2003. Los puntos negros con sus barras de error fueron registrados por el Owens Valley Solar Array y la antena de Itapetinga. Los dos puntos rojos, invirtiendo la caída de la intensidad, fueron observados por el SST. **Centro.** Mapa del Sol en 405GHz mostrando dos regiones activas. **Abajo.** Resumen de varios trabajos mostrando el espectro de las regiones activas; resaltada con puntos negros se ve la región submilimétrica con flujos en aumento.




nerlo en órbita. El sensor podría ser una matriz formada por centenas de sensores o bolómetros con filtros pasabanda sintonizables electrónicamente y capacidad de detectar las diferentes polarizaciones, pudiendo ajustar muy rápidamente sus características para detectar diferentes frecuencias y polarizaciones de forma que a cada lapso tengamos un cubo de imágenes, cada imagen correspondiendo a una frecuencia y una polarización distintas. La tecnología para este instrumento todavía no existe, pero está dando sus primeros pasos por medio del desarrollo de nuevos materiales basados en grafeno. Nuestro grupo está trabajando con el laboratorio de grafeno de la Universidad Presbiteriana Mackenzie con el fin de desarrollar los detectores THz de la próxima década.

Otros resultados

Las dos décadas de mapas solares diarios del SST han permitido determinar con mucha precisión el radio del Sol, así como su variación a lo largo de los años, lo que constituye la base para calcular modelos de la atmósfera solar. De la misma forma, estudiamos las llamadas regiones activas, zonas sobre la superficie del Sol que aparecen más brillantes en frecuencias de radio y que están relacionadas con las famosas manchas solares, y mostramos que ellas también presentan un espectro creciente en el rango submilimétrico del espectro. Por fin, hicimos una estadística de casi veinte años que demostró que la temperatura de las regiones activas acompaña al ciclo solar indicando que debe haber algún tipo de transferencia de energía magnética a energía térmica. La larga serie de datos nos ha permitido realizar análisis de la opacidad atmosférica y su relación con otros parámetros ambientales, lo que

nos posibilita determinar la opacidad a partir de los datos meteorológicos tomados en tierra.

El SST fue el primer instrumento solar instalado en el CASLEO. Con el correr de los años estos fueron aumentando en número hasta que hoy en día hay un laboratorio heliogeofísico de montaña (LHM) que cuenta con un polarímetro solar para las frecuencias de 45 y 90GHz, detectores de rayos cósmicos y antenas de muy baja frecuencia (VLF, por su sigla en inglés) que monitorean la actividad ionosférica terrestre: una región muy sensible al ingreso de rayos cósmicos terrestres y que permite estudiar desde las fulguraciones de rayos gama (*Gamma Ray Bursts* o GRB) hasta las solares. Y muy cerca del CASLEO, en el Observatorio Félix Aguilar (OFA), está emplazada una cámara en infrarrojo medio ($\lambda = 10\mu\text{m}$), y estamos construyendo un telescopio para $\lambda = 20\mu\text{m}$, instrumento único ya que nunca antes se observó al Sol en esta frecuencia.

Hoy en día, en el desierto de Atacama chileno, a 5000msnm, se erige el Atacama Large Millimeter Array (ALMA), un interferómetro de más de sesenta elementos con detectores desde 45 a 900GHz. En la misma región, pero en la provincia de Salta, se está construyendo el Large Latin American Millimeter Array (LLAMA), un telescopio argentino-brasileño *single-dish* con capacidad de integrarse en una red de interferometría y de observar entre 45 y 900GHz. Ambos observatorios son capaces de ‘ver’ al Sol, con una resolución espacial y sensibilidad mucho mayor que las del SST. ALMA ya está produciendo los primeros resultados científicos. Sin embargo, ninguno de los dos actuará como ‘el guardián’ del espectro submilimétrico que dedica cada uno de sus días a vigilar la actividad del Sol. Esperamos que, después de una necesaria actualización, el SST pueda continuar con su labor por otros veinte años más. 

LECTURA SUGERIDA

KOUTCHMY K, 2021, *Solar Astronomy: Observing, imaging and studying the Sun*, Axilone-Astronomy.



Guillermo Giménez de Castro

Doctor en ciencias físicas, FCEyN, UBA.
 Profesor adjunto III Período Integral, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil.
 Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie, Brasil.
 Investigador Nivel 2, CNPq (Brasil), investigador correspondiente, Conicet (Argentina)
guigue@craam.mackenzie.br



Cristina Hemilce Mandrini

Doctora en Ciencias Físicas, FCEyN, UBA.
 Investigadora superior, Conicet.
cristina.mandrini@gmail.com



Jean-Pierre Raulin

Doctor en Física de Gases y Plasmas, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).
 Profesor adjunto III Período Integral en la Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil.
 Investigador CNPq, Brasil.
raulini@craam.mackenzie.br