

Observando la cromosfera solar en el infrarrojo

C.G. Giménez de Castro^{1,2}

¹ Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, Brasil.

² Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Buenos Aires, Argentina.

Contacto / guigue@craam.mackenzie.br

Resumen / La cromosfera solar ha sido históricamente estudiada a partir de líneas espectrales en el visible y el UV, notablemente H α , Ca II, Mg I y Ly α . Recientemente se han agregado observaciones espaciales en las longitudes de onda largas del UV (304, 1600 y 1700 Å). Sin embargo, también puede ser estudiada en el infrarrojo (IR), tanto en el continuo como en las líneas. Estudios en esta banda espectral, que por definición se extiende de 1 μ m a 1 mm, son escasos y recientes, habiéndose explorado poco sus ventajas. En este trabajo presentamos una revisión de lo que se ha hecho y detallamos lo mucho que se puede hacer con instrumentos instalados en tierra. Argentina cuenta con un conjunto de telescopios únicos para la observación de la cromosfera, algunos con más de 20 años de operación y en proceso de renovación, otros recientemente instalados y algunos en desarrollo. El panorama es muy alentador y permite prever una fuerte cooperación internacional con otros instrumentos en tierra y embarcados en sondas espaciales.

Abstract / The solar chromosphere has historically been studied from spectral lines in the visible and UV, notably H α , Ca II, Mg I and Ly α . Observations at long UV wavelengths (304, 1600 and 1700 Å) from space have been recently added. However, the chromosphere can also be studied in the infrared (IR), both in the continuum as in the lines. Studies in this spectral band, which by definition extends from 1 μ m to 1 mm, are scarce and recent, and its advantages having been little explored. In this work we present a review of what has been done and detail how much can be done with ground-based instruments. Argentina has a set of unique telescopes for the observation of the chromosphere, some with more than 20 years of operation and in process of renovation, others recently installed and still some in development. The panorama is very encouraging and allows to anticipate a strong international cooperation with other ground and space facilities.

Keywords / Sun: chromosphere — Sun: flares — Sun: particle emission — Sun: radio radiation

1. Introducción

Conocemos la cromosfera fundamentalmente gracias a observaciones en el visible de líneas espectrales como H α o C II. La astronomía espacial nos permitió observarla a través de filtros ultravioleta (UV) en líneas espectrales de Fe I y He I, entre muchas otras, o en el continuo en 1600 y 1700 Å. Fotosfera y cromosfera pueden ser observadas también en el infrarrojo (IR), tanto en el continuo como a través de líneas espectrales. Sin embargo, a pesar del amplio rango espectral que abarca el IR, este no ha sido debidamente explorado. Las razones son múltiples: la tecnología IR era considerada hasta hace pocos años, militar, por lo tanto cara y de acceso restringido. Observaciones en estas longitudes de onda *oscuras* requieren de observatorios en altura, en algunos casos, incluso fuera de la troposfera. Sólo en los últimos años estas desventajas se han ido revirtiendo. En este artículo hacemos una revisión de las observaciones solares en el IR, destacando las mayores contribuciones. Además describimos la instrumentación actual y la futura con hincapié en los telescopios instalados (o a instalar) en Argentina.

1.1. El Infrarrojo

Desde el experimento pionero de los hermanos Herschel

que los llevó a especular con la existencia de una radiación *por debajo del rojo*, podemos definir al IR como la región espectral invisible con frecuencias inferiores a las del rojo. Como toda definición los límites del IR son arbitrarios y sujetos al área de actuación. Usando criterios tanto físicos (de los que hablaremos más abajo) como tecnológicos definimos al rango IR

$$1000 \gtrsim \lambda_{\text{IR}} \gtrsim 1 \mu\text{m}, \quad 0.3 \lesssim \nu_{\text{IR}} \lesssim 300 \text{ THz}.$$

Este rango de 3 órdenes de magnitud lo dividimos por comodidad en

	$\simeq \lambda [\mu\text{m}]$	$\simeq \nu [\text{THz}]$
Próximo (IRP)	1 – 5	300 – 60
Medio (IRM)	5 – 30	60 – 10
Lejano (IRL)	30 – 300	10 – 1
submilimétrico (submm)	300 – 1000	1 – 0,3

Sólo recientemente el mercado ha presentado una variedad de oferta accesible y sin restricciones para este rango de frecuencias. Para el IRM y el IRL hoy se puede comprar cámaras comerciales a temperatura ambiente por precios que rondan las decenas de miles de dólares, también se puede acceder a detectores a los que se les adosa una electrónica específica incluyendo control de temperatura. En el submm la tecnología es la de receptores superheterodinos (*coherentes*) refrigerados o no, aunque todavía no cuenta con muchos proveedores

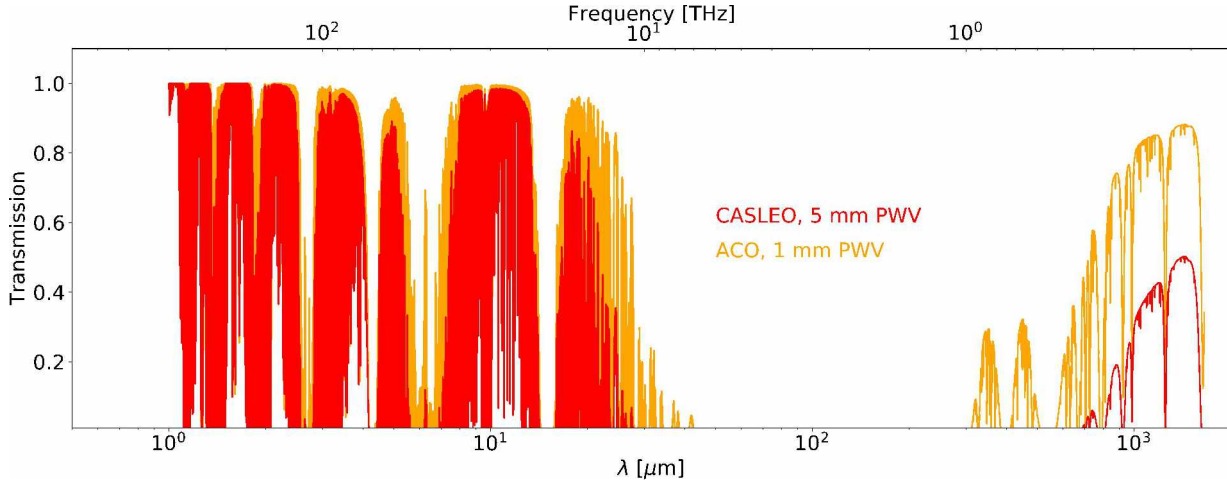


Figura 1: Transmisión atmosférica al cénit en función de la longitud de onda para Alto Chorrillos (ACO, Salta) a 4800 m sobre el nivel del mar y con un contenido de vapor de agua PWV=1 mm (curva naranja) y para el CASLEO a 2500 m sobre el nivel del mar con PWV=5 mm (curva roja).

disponibles. En la última década aparecieron firmas ofreciendo bolómetros (detectores térmicos *incoherentes*) para longitudes específicas desde el submm hasta el IRM con gran ancho de banda ($10\text{--}20\% \times \nu_0$).

Otro punto en común del rango de frecuencias que hemos definido como IR es la absorción atmosférica: la atmósfera terrestre es bastante opaca a la radiación a lo largo de los tres órdenes de frecuencia. En la Fig. 1 mostramos la transmisión atmosférica al cénit calculada usando el programa ATRAN para dos lugares diferentes: Alto Chorrillos (sitio de instalación del radiotelescopio Llama) para un contenido de vapor de agua PWV=1 mm y el CASLEO con PWV=5 mm que son valores típicos de cada lugar. Como se puede ver, el IRL es completamente invisible y de hecho sólo observable por encima de la troposfera. El submm, por otra parte, es razonablemente observable desde ACO entre 1000 y 700 μm aproximadamente, después la transmisión cae por debajo del 50%, mientras que desde CASLEO la atenuación es bastante fuerte limitando el flujo mínimo detectable y la calidad de las observaciones sujetas a las variaciones de la temperatura atmosférica. Ya en el IR Medio y Próximo tenemos rangos bien definidos y anchos en los que es posible observar con comodidad desde cualquiera de los dos sitios. La transmisión *efectiva*, sin embargo, es menor porque hay millones de líneas de absorción atmosféricas que en la figura se encuentran superpuestas dificultando su identificación individual. En este trabajo nos enfocamos en los rangos Medio a submm del IR, es decir de ≈ 5 a 1000 μm .

1.2. El continuo

Junto a los desafíos tecnológicos y atmosféricos, podemos agregar que los tres órdenes de magnitud del IR tienen en común el origen de la emisión del Sol calmo, dominada por bremsstrahlung térmico electrón-H⁺ y, en menor medida, electrón-H⁰. En esta atmósfera

en LTE la función fuente es la función de Planck que además puede ser aproximada por Rayleigh-Jeans $S_\nu \simeq 2k_B T \nu^2 / c^2$ (con k_B la constante de Boltzmann, T la temperatura de brillo y c la velocidad de la luz en el vacío). Esto significa que el flujo observado es directamente proporcional a la temperatura de brillo, lo que simplifica las interpretaciones (Wedemeyer et al., 2016). Y en los casos ópticamente delgados la temperatura de brillo corresponde a la temperatura del plasma. Además, los modelos atmosféricos muestran que el continuo de diferentes frecuencias se forma a diferentes alturas lo que permite hacer diagnósticos a lo largo de la fotosfera / cromosfera. En la Fig. 2 vemos las diferentes alturas a las que se forman las diferentes frecuencias. Estas alturas se modifican durante las fulguraciones corriéndose a alturas mayores (Simões et al., 2017). También durante las fulguraciones, se suma al continuo submm la emisión girosincrotrónica producida por electrones acelerados (o *supratérmicos*) durante su movimiento espiral en torno a las líneas magnéticas (Pick & Vilmer, 2008).

1.3. Líneas espectrales

Que la cromosfera es una región inhomogénea queda comprobado por la existencia de líneas espectrales moleculares muy intensas, como CO 4.666 μm . Los campos magnéticos pueden ser observados por medio del efecto Zeeman en la línea de Fe I 1.564 μm y durante fulguraciones en la línea de He I 1.083 μm , aunque esta puede formarse hasta 2000 km de altura, ya en la región de transición (Avrett et al., 1994). En la región Media del rango IR, la línea de Mg I 12.318 μm tiene la más alta *sensibilidad magnética* y permite la reconstrucción completa del campo magnético cromosférico si se cuenta con un espectropolarímetro que resuelva los 4 parámetros de Stokes (Deming et al., 1994).

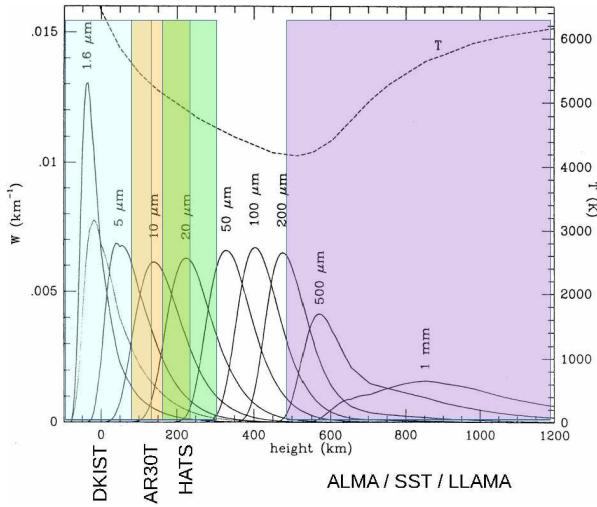


Figura 2: Funciones de ponderación de la emisión del continuo para diferentes longitudes de onda en función de la altura (curvas negras). La curva punteada es la distribución de temperatura del modelo VAL-C (Vernazza et al., 1981). Las áreas coloreadas marcan aproximadamente el rango de alturas observadas por los diferentes instrumentos comentados en este artículo. Fuente: adaptada de Jefferies (1994).

La región submm cuenta también con líneas espectrales de H I para transiciones atómicas de niveles altos $n \geq 19$, o incluso del C III. El modelado de estas líneas no está completamente resuelto, en parte por la complejidad de la cromosfera y en parte por la carencia de observaciones que sienten restricciones (Wedemeyer et al., 2016; Clark et al., 2000b,a).

2. Observaciones

La región del IR Próximo cuenta con una extensa literatura producto de años de observación con telescopios cada vez más refinados. De hecho en este momento se está realizando el comisionamiento del Telescopio Solar Daniel K. Inouye (DKIST) localizado en el observatorio de Haleakala (Hawaii, USA) a 3800 m sobre el nivel del mar. Este telescopio tiene una apertura de 4 m y un rango espectral que cubre desde el azul hasta el IR Próximo, $0.38\text{--}5\ \mu\text{m}$, logrando resoluciones espaciales de entre 0.02 y 0.24 segundos de arco. En su foco cuenta (o contará) con una amplia oferta de detectores. Siendo que las observaciones en el IR Próximo son más fotosféricas, no nos referiremos aquí a esta rango.

2.1. El Continuo del Sol calmo y activo

2.1.1. Sol Calmo

Desde la década de 2000, el Centro de Rádio Astronomía e Astrofísica Mackenzie (CRAAM) viene utilizando cámaras comerciales con detectores no refrigerados centrados en $10\ \mu\text{m}$ y banda pasante de aproximada-

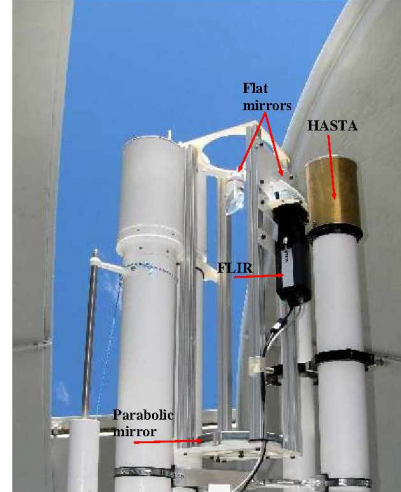


Figura 3: AR30T está formado por un telescopio newtoniano de 20 cm de apertura y una cámara FLIR. El sistema está adosado al telescopio HASTA.

mente $2\ \mu\text{m}$. Estos detectores, que se han mostrado suficientemente sensibles para observaciones solares, fueron adosados al foco de telescopios reflectores, en algunos casos usando también celostatos (Marcon et al., 2008; Cassiano et al., 2010; Kudaka et al., 2015). En este momento el CRAAM posee dos configuraciones permanentemente montadas: el SP30T en São Paulo (Kudaka et al., 2015; Giménez de Castro et al., 2018) y el AR30T en Argentina (López et al., 2022). Ambas configuraciones comparten características: resolución espacial del orden de 15 segundos de arco, sensibilidad del orden de 1 K, resolución temporal de 1 s. SP30T usa un celostato y un telescopio newtoniano de 15 cm de apertura para crear un FOV $> 0.5^\circ$ en la cámara FLIR Termovision AM20 de 160×120 pixeles. Por su parte AR30T tiene un espejo parabólico de 20 cm de diámetro, está adosado al telescopio HASTA y usa una cámara FLIR Termovision SC645 de 640×480 pixeles con un FOV ≈ 20 minutos de arco (Fig. 3).

Observaciones en $10\ \mu\text{m}$ muestran una gran correlación espacial con líneas espectrales (Marcon et al., 2008). Durante fulguraciones la emisión es compatible con bremsstrahlung térmico. Trotter et al. (2015) usan el modelo atmosférico de Machado et al. (1980) y concluyen que la emisión proviene de una altura de ≈ 1000 km sobre la fotosfera y originada en el calentamiento del plasma provocado por la precipitación de las partículas aceleradas. Penn et al. (2016) observaron el evento SOL204-09-24T17:50 en 5.2 y $8.2\ \mu\text{m}$ usando un detector refrigerado de tipo QWIP en el foco del telescopio MacMath-Pierce consiguiendo una resolución de 3 segundos de arco. Estas observaciones simultáneas en longitudes de onda diferentes confirman la tesis de que la emisión es bremsstrahlung térmico ópticamente delgado. En general, durante las fulguraciones se observa una correlación espacio-temporal con la emisión en luz blanca (Kaufmann et al., 2013) y con el continuo en 1700 y $1600\ \text{\AA}$ (López et al., 2022). Esta última característica se revela incluso en eventos muy débiles

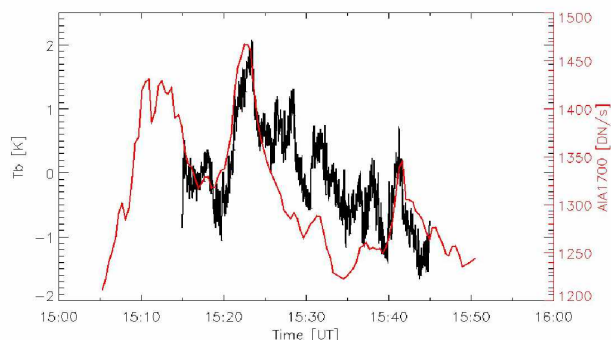


Figura 4: Intensidad luminosa registrada por AR30T en $10 \mu\text{m}$ durante SOL2022-02-28T15:20 (negro) superpuesta con la intensidad en 1700 \AA (rojo). (Gentileza de F. López, Univ. de Mendoza/CONICET, trabajo en preparación).

como es el caso de SOL2022-02-28T15:20 (Fig. 4), clasificado de B2 por su emisión en rayos-x blandos.

El IR Lejano ha sido muy poco explorado, podemos apenas encontrar dos intentos esporádicos. Su mayor dificultad reside en la necesidad de observaciones por fuera de la troposfera terrestre. Las primeras observaciones se remontan a 1987 utilizando el Kuiper Airbone Observatory de NASA (Lindsey et al., 1990), un avión que volaba a 12.800 m sobre el nivel del mar con un telescopio de 1 m de apertura al que los autores adicionaron detectores para las longitudes de onda de 50 , 100 y $200 \mu\text{m}$. Se reportaron variaciones de varios K en la temperatura del Sol calmo, asociadas con oscilaciones de 5 minutos observadas en la línea D1 del sodio (5894 \AA). Casi 30 años más tarde, Kaufmann et al. (2016) construyeron un telescopio, el Solar-T, que voló adosado al globo estratosférico Gamma-Ray Imager / Polarimeter for Solar Flares (GRIPS), con detectores bolométricos basados en células de Golay y filtros pasa banda para observar el Sol en las longitudes de onda de 43 y $100 \mu\text{m}$.

El submm fue ocasionalmente observado con el radiotelescopio de 15 m de apertura James Clerk Maxwell Telescope (JCMT, Lindsey & Kopp, 1995; Lindsey et al., 1995) en $350 \mu\text{m}$ (857 GHz), $850 \mu\text{m}$ (353 GHz) y $1200 \mu\text{m}$ (250 GHz), revelando la existencia de abrillantamiento al limbo en todas las frecuencias aunque con intensidades diferentes. También mostraron la estructura de las manchas: la penumbra tiene temperaturas semejantes a las plagas vecinas, mientras que la umbra es más de 1000 K más fría.

El Telescopio Solar Submilimétrico (SST Kaufmann et al., 2008), instalado en el CASLEO a 2500 m sobre el nivel del mar, es el primero en observar rutinariamente el sol en $740 \mu\text{m}$ (405 GHz) y $1415 \mu\text{m}$ (212 GHz). Este radiotelescopio Cassegrain de 1.5 m de diámetro (Fig. 5), cuenta con un sistema multi haz que le permite localizar el centroide de emisión de una fuente puntual con una resolución temporal de hasta 5 ms (Giménez de Castro et al., 1999). Los seis haces que componen el



Figura 5: El SST con el radomo abierto para tareas de mantenimiento.

arreglo focal tienen tamaños angulares nominales de 2 y 4 minutos de arco para 740 y $1415 \mu\text{m}$, respectivamente y una sensibilidad del orden de 10 K . En un análisis provisorio que incluyó apenas una veintena de mapas, Silva et al. (2005) encontraron que la emisión de las regiones activas es compatible con bremsstrahlung térmico en el régimen ópticamente grueso. Esta emisión debe provenir mayormente de las plagas vecinas y la penumbra ya que por la resolución espacial del SST la emisión observada resulta de la convolución de *plage*, penumbra y umbra. Este resultado fue confirmado posteriormente por Valle Silva et al. (2021) adicionando imágenes de baja resolución espacial del Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en $3000 \mu\text{m}$ y por Giménez de Castro et al. (2020b) aprovechando los 20 años de observaciones diarias del SST; además, estos últimos autores mostraron que el exceso de temperatura de brillo de las regiones activas está correlacionado positivamente con el ciclo solar. Más recientemente Menezes et al. (2021, 2022) midieron con gran precisión el radio solar usando el SST y mostraron su variación a lo largo del ciclo.

Usando observaciones de ALMA, se han corroborado muchas de las observaciones realizadas con el JCMT (White et al., 2017; Alissandrakis et al., 2017). En modo interferómetro, ALMA alcanza resoluciones espaciales < 0.01 segundos de arco lo que le permite estudiar detalles hasta ahora desconocidos en este rango. Loukitcheva et al. (2017) consiguen separar la emisión de las distintas partes de una mancha, mostrando que hay un comportamiento diferente en 1.3 mm respecto de 3 mm . La correlación con emisión espectral, particularmente con la línea de $H\alpha$, es analizada por Molnar et al. (2019) y posteriormente confirmada por Kobelski et al. (2022) y Tarr et al. (2023). La mejor correlación espacio temporal se da entre observaciones en 3 mm y el ancho de la línea $H\alpha$ y hay también proporcionalidad entre el ancho de $H\alpha$ y la temperatura de brillo del

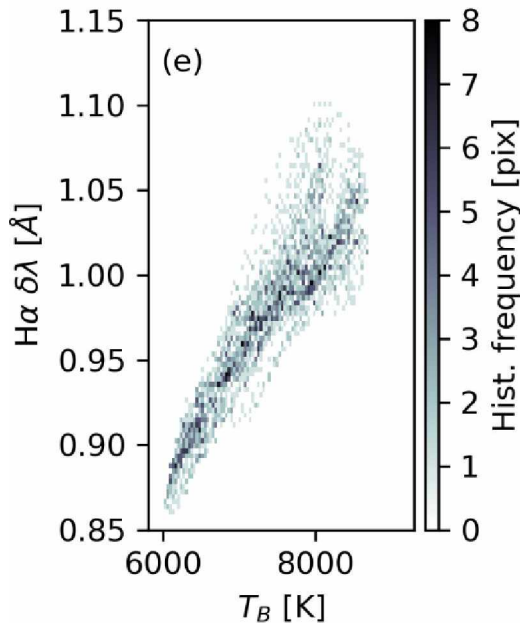


Figura 6: Distribución de probabilidad conjunta de la temperatura de brillo en 3 mm y el ancho de la línea $H\alpha$. (Reproducido con permiso de Tarr et al., 2023)

continuo de 3 mm (Fig. 6). Estas correlaciones pueden deberse a la sensibilidad de $H\alpha$ al ensanchamiento Doppler térmico (Cauzzi et al., 2009) aunque de ser así, cuestionan Molnar et al. (2019), implicaría temperaturas por encima de los 50000 K y una cromosfera completamente ionizada. Patsourakos et al. (2020) observan las oscilaciones de 3–5 minutos sobre el Sol calmo, mientras que Tarr et al. (2023) muestran evidencia marginal de estas oscilaciones sobre las manchas.

2.1.2. Fulguraciones

El mayor impacto del SST han sido sus observaciones de fulguraciones, mostrando una íntima correlación con la emisión en rayos- γ (Kaufmann et al., 2002) y rayos-X duros (Giménez de Castro et al., 2009), mientras que el carácter discretizado de la emisión fue analizado por Raulin et al. (2003) y Kaufmann et al. (2009). Usando una configuración parecida al SST, el radiotelescopio Kölner Observatorium für Submillimeter Astronomie (KOSMA) de 3 m de apertura tuvo por un breve tiempo un sistema multi-beam que le permitió determinar, también, el tamaño de la fuente emisora y su variación durante la fulguración SOL2003-10-28. Lüthi et al. (2004) muestran que el tamaño de la fuente emisora llega a ser menor que la resolución teórica del instrumento de unos pocos segundos de arco. Las observaciones de KOSMA de este evento fueron analizadas por Trotter et al. (2008) junto con imágenes de rayos- γ y rayos-x, mostrando que el submm coincide espacialmente con los primeros, resultado que refuerza la tesis de que la emisión submm se origina en partículas de muy alta energía.

La existencia de una componente espectral submm

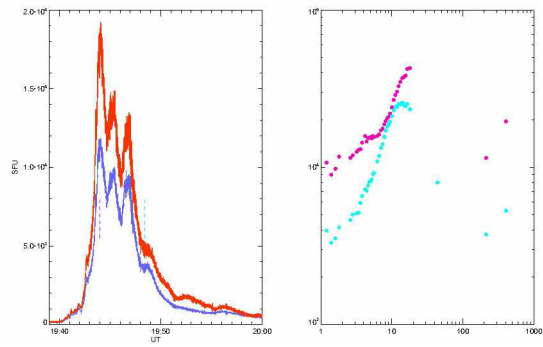


Figura 7: *Izquierda*: variación de la densidad de flujo durante el evento SOL2003-11-04T19:45, rojo, 405 GHz, azul, 212 GHz. *Derecha*: dos espectros tomados en instantes diferentes mostrando la componente por encima de 200 GHz diferenciada de las frecuencias más bajas.

continúa diferente a la observada en microondas observada en varios eventos es aún materia de investigación (Fig. 7, Kaufmann et al., 2004). El origen es especulado en Krucker et al. (2013) e incluye, además de bremsstrahlung térmico y síncrotron de electrones ultrarelativísticos, síncrotron de positrones producidos durante reacciones nucleares y otras causas más exóticas. A pesar de más de 20 años de la primera detección de un “evento THz”, la instrumentación todavía no permite llegar a una conclusión firme porque la respuesta a la incógnita sólo se logrará por medio de observaciones simultáneas en frecuencias mayores incluyendo polarización e imágenes.

2.2. Líneas espectrales

Observaciones de líneas espectrales desde el IR Medio hasta el submm son muy escasas aunque su potencial es muy grande. Hewagama et al. (1993) usaron un espectropolarímetro de alta resolución espectral y un detector IR de 128×128 píxeles para observar el efecto Zeeman de la línea de Mg I $12.318 \mu\text{m}$. Aplicando un modelo NLTE para calcular la transferencia radiativa de los parámetros de Stokes, I , Q , U y V , mostraron que el perfil de la línea no es afectado por la saturación y por lo tanto se puede obtener el campo magnético vectorial con alta confiabilidad incluso para intensidades muy grandes.

También se han estudiado muy poco las líneas espectrales del submm con la única excepción de los trabajos de Clark et al. (2000b,a) quienes aprovecharon las pocas oportunidades en que el JCMT observó el Sol en la década de 1980, en $337 \mu\text{m}$ (888 GHz) y $453 \mu\text{m}$ (662 GHz). En el primer artículo, estos autores muestran claramente la línea de H I en absorción con un efecto de brillantamiento al limbo y mezclada con una posible línea de Mg I. En el segundo artículo, la línea es sólo observada próxima al limbo. Estudios espectrales en el submm permitirán establecer con mayor precisión la escala de temperatura en la cromosfera y región de

transición, mientras que los perfiles pueden ser usados para estudiar la turbulencia, el flujo y la densidad del plasma (Wedemeyer et al., 2016).

3. Instrumentación: presente y futuro

A lo largo de este artículo ya hemos mencionado la mayoría de los instrumentos en funcionamiento para los rangos del IR Medio al submm, casi todos operados por el CRAAM en cooperación con instituciones argentinas como CASLEO y OAFa: las cámaras AR30T (OAFa) y SP30T (São Paulo), y el SST (CASLEO) al que podemos agregar como instrumento auxiliar el polarímetro Polarization Emission of the Millimeter Activity at the Sun (POEMAS) (en el CASLEO, Valio et al., 2013) que observa en 3.3 y 6.6 mm (90 y 45 GHz, respectivamente). No hay otros instrumentos dedicados al Sol en esta banda de frecuencias. Eventuales observaciones han sido realizadas con el JCMT, como hemos dado cuenta. Ya en el borde del submm (3.2 y 2.2 mm) con el telescopio ruso RT-7.5 (Tsap et al., 2018), y en 2.6 y 3.5 mm con la gran antena de 45 m de apertura de Nobeyama (Iwai & Shimojo, 2015). El interferómetro ALMA tiene como uno de sus *use cases* observaciones solares. Su uso, sin embargo, ha mostrado que es adecuado principalmente para analizar las estructuras atmosféricas del Sol calmo y quiescente con gran detalle. La metodología de observación, que precisa de calibraciones con duración de algunos minutos a cada 10 minutos aproximadamente, lo hace poco útil para la detección de las oscilaciones fotosféricas de 3–5 minutos (ver las conclusiones de Tarr et al., 2023, por ejemplo), mucho menos para fulguraciones cuyo carácter espacio-temporal es aleatorio. Se suma a estos inconvenientes, la baja oferta de tiempo para observaciones solares (en 2022 sólo un proyecto fue aprobado), limitación de recursos (polarización lineal únicamente, pocas bandas espectrales) y la imposibilidad de observaciones simultáneas en varias frecuencias del continuo, lo que limita la obtención de espectros confiables (ver, por ejemplo, Rodger et al., 2019, quienes analizan una erupción de plasma). Curiosamente, ALMA ha inaugurado, *serendípicamente*, la observación submm de fulguraciones estelares (MacGregor et al., 2018, 2020).

En enero de 2023 el *High Altitude THz Solar photometer* (HATS, Giménez de Castro et al., 2020a) fue integrado en su lugar de instalación la Estación Carlos U. Cesco del OAFa (Fig. 8), y pasó satisfactoriamente los tests de funcionamiento. HATS cuenta con un detector centrado en la longitud de onda de $20 \mu\text{m}$ (15 THz) en el foco primario de un telescopio de montura ecuatorial con 45 cm de apertura y un haz de gran tamaño para observar el Sol entero. La figura 8 presenta las primeras barrida no calibradas sobre el Sol, que para todos los efectos representan el perfil del haz (el Sol es mucho menor que el haz) y demuestran la calidad de la óptica que no genera deformaciones en la imagen. En este momento el telescopio entró en la fase de comisionamiento mientras realiza las primeras observaciones solares en esta frecuencia todavía inex-

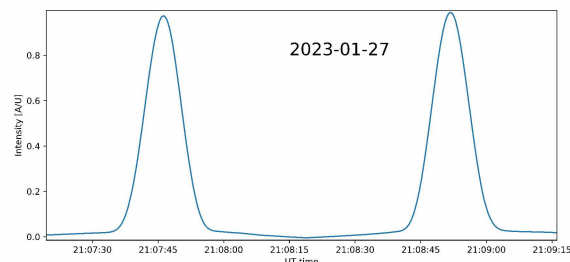
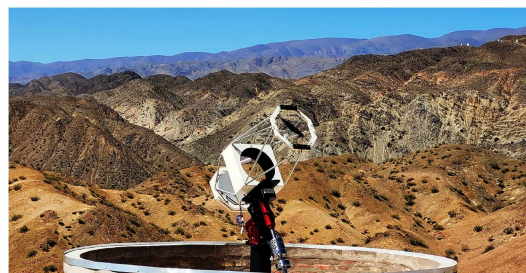


Figura 8: *Arriba*: HATS durante la etapa de integración y tests en enero de 2023. *Abajo*: Perfiles solares obtenidos por barridas en las direcciones de ascensión recta (*izquierda*) y declinación (*derecha*). Primeras observaciones no-calibradas de HATS.

plorada.

El proyecto binacional argentino-brasileño *Large Latin American Millimeter Array* (LLAMA, Lepine et al., 2020; Arnal et al., 2017) tendrá capacidad de realizar observaciones solares en diferentes bandas de frecuencias simultáneamente, una característica especialmente diseñada para capturar eventos transientes solares, convirtiéndolo en un instrumento único en el submm. Su construcción, largamente demorada, ha ganado fuerte impulso y se espera que para 2024/2025 comience la etapa de comisionamiento y primeras observaciones científicas.

Por último, el SST, único telescopio solar submm en el mundo, debe pasar por una reforma integral que lo tornará más sensible cambiando las frecuencias de observación a las más adecuadas para el sitio y aumentando el tamaño del reflector primario, contará con polarización circular y un espectrómetro. El SST *next generation* se encuentra ahora en la etapa de diseño, esperamos contar con financiamiento en los próximos años para comenzar su construcción.

4. A modo de conclusión

El rango espectral que abarca desde el IR Medio al submm, es decir de 5 a $1000 \mu\text{m}$, ha sido muy poco explorado. Aumentar la cobertura espectral, contar con medidas de polarización circular y de líneas espectrales con instrumentos dedicados exclusivamente al Sol mejorará los diagnósticos y nuestra comprensión de los procesos cromosféricos. Argentina dispone en la actualidad de instrumentos únicos a los que se le sumarán en

el futuro próximo otros más, con los que puede realizar aportes significativos en el área. AR30T, por ejemplo, ha demostrado capacidad de observar eventos muy débiles, lo que abre perspectivas de colaboración con otros instrumentos (por ejemplo, análisis conjuntos con el Spectrometer Telescope for Imaging X-rays (STIX), detector de rayos-x a bordo del Solar Orbiter) y contar con una estadística mayor de casos. Por otro lado, la excelente correlación entre 10 μm , luz blanca y el continuo UV, puede convertir al IR Medio en un proxy de las últimas dos usando instrumentos en tierra.

Los rectángulos coloreados de la Fig. 2 muestran el rango de alturas aproximado de las observaciones de los diferentes instrumentos para un modelo de Sol calmo. Como se puede ver, la región del IR Lejano que permitiría observar la transición entre fotosfera y cromosfera, sigue estando despoblada de instrumentos. La comunidad solar internacional debería hacer un esfuerzo por colocar un instrumento para esta banda a bordo de un satélite o estación espacial. Infelizmente, varios intentos anteriores, que vienen desde la década de 1980* no consiguieron financiamiento. Creemos que esta es la hora de completar el espectro solar con observaciones que nos han de llenar de nuevas informaciones y preguntas.

Agradecimientos: Agradezco a la Asociación Argentina de Astronomía, en particular al Comité Científico de la 64ta reunión, por la gentil invitación a dar una charla invitada. Agradezco además a la FAPESP, CAPES, Mackpesquisa y CNPq de Brasil y al CONICET y la Universidad Nacional de San Juan de Argentina por el apoyo financiero y humano recibido para realizar las investigaciones cuyos resultados se presentan aquí. Especial agradecimiento a Lucas Tarr (NSO, USA) que cedió la figura 6. Por último, agradezco a mis colegas del CRAAM en Brasil y del IAFE en Argentina que no están incluidos en la lista de autores, porque sin su colaboración de más de 20 años, este artículo no habría jamás existido.

Referencias

- Alissandrakis C.E., et al., 2017, *A&A*, 605, A78
 Arnal E.M., et al., 2017, *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Conference Series*, vol. 49, 53–53
 Avrett E.H., Fontenla J.M., Loeser R., 1994, *In: Infrared Solar Physics*, vol. 154, 35–47
 Cassiano M.M., et al., 2010, *Solar Phys.*, 264, 71
 Cauzzi G., et al., 2009, *A&A*, 503, 577
- *Una versión preliminar del Satélite de Aplicaciones Científicas B, (SAC-B), de la Comisión Nacional de Aplicaciones Espaciales, contemplaba un telescopio solar para el IR.
- Clark T.A., Naylor D.A., Davis G.R., 2000a, *A&A*, 357, 757
 Clark T.A., Naylor D.A., Davis G.R., 2000b, *A&A*, 361, L60
 Deming D., et al., 1994, D.M. Rabin, J.T. Jefferies, C. Lindsey (Eds.), *Infrared Solar Physics*, vol. 154, 379
 Giménez de Castro C.G., et al., 1999, *A&AS*, 140, 373
 Giménez de Castro C.G., et al., 2009, *A&A*, 507, 433
 Giménez de Castro C.G., et al., 2018, *Space Weather*, 16, 1261
 Giménez de Castro C.G., et al., 2020a, *Solar Phys.*, 295, 56
 Giménez de Castro C.G., et al., 2020b, *ApJ*, 902, 136
 Hewagama T., et al., 1993, *ApJS*, 86, 313
 Iwai K., Shimojo M., 2015, *ApJ*, 804, 48
 Jefferies J.T., 1994, D.M. Rabin, J.T. Jefferies, C. Lindsey (Eds.), *Infrared Solar Physics*, vol. 154, 1
 Kaufmann P., et al., 2002, *ApJ*, 574, 1059
 Kaufmann P., et al., 2004, *ApJL*, 603, L121
 Kaufmann P., et al., 2008, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 7012
 Kaufmann P., et al., 2009, *Solar Phys.*, 255, 131
 Kaufmann P., et al., 2013, *ApJ*, 768, 134
 Kaufmann P., et al., 2016, *AAS/Solar Physics Division Meeting, AAS/Solar Physics Division Meeting*, vol. 47, 6.11
 Kobelski A.R., et al., 2022, *ApJS*, 261, 15
 Krucker S., et al., 2013, *A&A Rv*, 21, 58
 Kudaka A.S., et al., 2015, *Solar Phys.*, 290, 2373
 Lüthi T., Lüdi A., Magun A., 2004, *A&A*, 420, 361
 Lepine J., et al., 2020, *BAAA*, 61C, 91
 Lindsey C., Kopp G., 1995, *ApJ*, 453, 517
 Lindsey C., et al., 1990, *ApJ*, 350, 475
 Lindsey C., et al., 1995, *ApJ*, 453, 511
 López F.M., et al., 2022, *A&A*, 657, A51
 Loukitcheva M.A., et al., 2017, *ApJ*, 850, 35
 MacGregor A.M., Osten R.A., Hughes A.M., 2020, *ApJ*, 891, 80
 MacGregor M.A., et al., 2018, *ApJL*, 855, L2
 Machado M.E., et al., 1980, *ApJ*, 242, 336
 Marcon R., et al., 2008, *PASP*, 120, 16
 Menezes F., et al., 2021, *ApJ*, 910, 77
 Menezes F., et al., 2022, *MNRAS*, 511, 877
 Molnar M.E., et al., 2019, *ApJ*, 881, 99
 Patsourakos S., et al., 2020, *A&A*, 634, A86
 Penn M., et al., 2016, *ApJL*, 819, L30
 Pick M., Vilmer N., 2008, *A&A Rv*, 6–+
 Raulin J.P., et al., 2003, *ApJ*, 592, 580
 Rodger A.S., et al., 2019, *ApJ*, 875, 163
 Silva A.V.R., et al., 2005, *Solar Phys.*, 227, 265
 Simões P.J.A., et al., 2017, *A&A*, 605, A125
 Tarr L.A., et al., 2023, *Front. Astron. Space Sci.*, 9, 978405
 Trotter G., et al., 2008, *ApJ*, 678, 509
 Trotter G., et al., 2015, *Solar Phys.*, 290, 2809
 Tsap Y.T., et al., 2018, *Solar Phys.*, 293, 50
 Valio A., et al., 2013, *Solar Phys.*, 283, 651
 Valle Silva J.F., et al., 2021, *MNRAS*, 500, 1964
 Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R., 1981, *ApJS*, 45, 635
 Wedemeyer S., et al., 2016, *SSRv*, 200, 1
 White S.M., et al., 2017, *Solar Phys.*, 292, 88