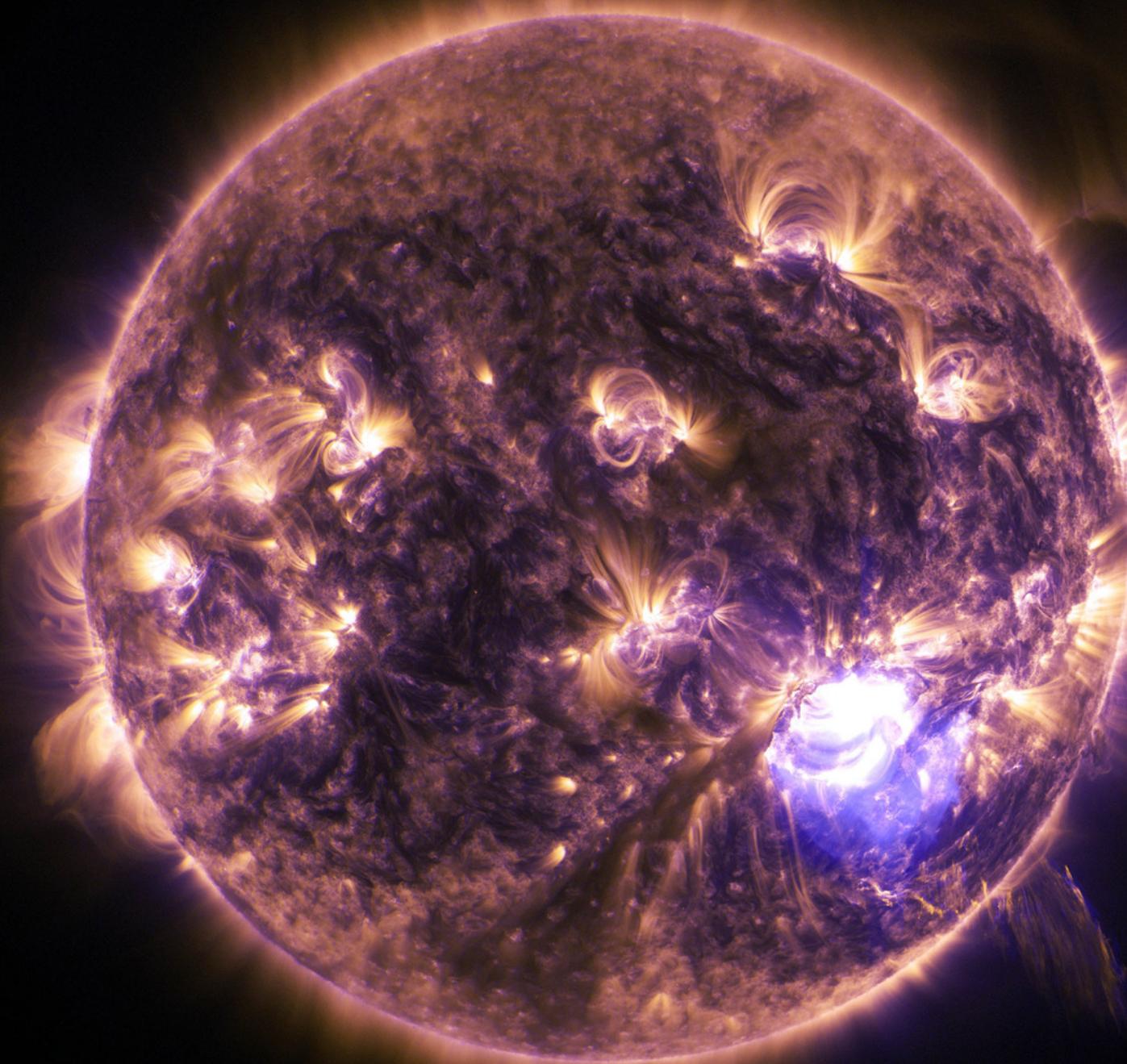


El misterio del calentamiento de la Corona Solar: ¿finalmente a un paso de su solución?



Lic. Leonardo Di G. Sigalotti

PhD Fidel Cruz

Departamento de Ciencias Básicas,

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

Un problema que ha frustrado por más de siete décadas a los astrónomos y, de manera particular, a los físicos solares es el calentamiento de la corona solar. Así se le llama a la atmósfera solar que se extiende millones de kilómetros en el espacio abierto y que, en efecto, se manifiesta como una corona blanca perlada durante los eclipses totales de sol. En nuestra experiencia cotidiana cuando nos alejamos de un cuerpo u objeto caliente percibimos que el calor emitido disminuye, mientras que ocurre lo contrario en el sol. Es decir, a medida que nos alejamos de la superficie visible del sol – la fotosfera, la temperatura aumenta. Mientras la temperatura media de la superficie solar es de 5800 kelvin (donde 1 kelvin equivale a -272.15 grados Celsius), en general la corona solar suele alcanzar temperaturas entre uno y tres millones de kelvin (Aschwanden, 2004), y hasta diez millones de kelvin en algunas partes. Esta enorme diferencia de temperaturas entre la fotosfera y la corona solar ha representado un misterio para la comunidad astronómica por casi un siglo, a pesar de haber sido objeto de numerosos estudios y debates científicos a lo largo de los años.

No fue sino hasta el año 1995, primero con el lanzamiento del *Observatorio Solar y Heliosférico* (Solar and Heliospheric Observatory, SOHO) y luego en 1998 con la puesta en órbita del satélite *Explorador de la Corona y de la Región de Transición* (Transition Region and Coronal Explorer, TRACE), que se abrió una nueva era en el estudio e investigación del calentamiento coronal. Datos provenientes de estas misiones espaciales mostraron por primera vez evidencia directa de la propagación de ondas de Alf-

vén y de ondas magneto-acústicas lentas en la corona solar (Ofman et al., 1997; De Moortel et al., 2002; Wang et al., 2005). Las primeras son ondas magneto-hidrodinámicas de baja frecuencia producidas por las oscilaciones de los iones que se encuentran anclados a las líneas del campo magnético como consecuencia de las interacciones entre el campo magnético y las corrientes eléctricas en el plasma solar. En general, estas ondas son las más efectivas en alcanzar la corona solar y son producidas por los destellos solares – las mayores explosiones en nuestro sistema solar – y, si bien transportan consigo suficiente energía, tardan en disiparse una vez que penetran en la corona solar. En cambio, las ondas magneto-acústicas lentas son ondas longitudinales, similares a las ondas de sonido en el aire, y se disipan más fácilmente que las ondas de Alfvén, convirtiendo energía mecánica en calor. En particular, observaciones con TRACE revelaron la presencia de manchas brillantes de plasma que ascienden y descienden a través de los lazos (o bucles) coronales con temperaturas de hasta seis millones de kelvin. A la vez que estas observaciones fueron también confirmadas sucesivamente por SOHO, se sugirió que estos chorros de plasma caliente propulsados contra la gravedad, como arcos de agua en una fuente, podrían dar cuenta del calentamiento coronal. Sin embargo, estudios numéricos posteriores demostraron que la propagación y la disipación de ondas magneto-acústicas a través de los lazos coronales, como por otras estructuras visibles en la corona solar, podían proporcionar solo el 10% de la energía requerida para el calentamiento coronal (Ofman et al., 1997). Observaciones más recientes con la ayuda del *Espectrógrafo de Imá-*

genes de la Región Interfacial (Interface Region Imaging Spectrograph, IRIS), lanzado por la NASA en junio de 2006, proporcionaron evidencia de una serie de eventos explosivos, parecidos a pequeños destellos, capaces no solo de depositar suficiente energía térmica en la corona solar sino también de distribuirla de manera casi uniforme (Huang et al., 2017). Mientras este proceso representa seguramente uno más de una variedad de posibles procesos complejos que explicarían el calentamiento coronal, con la puesta en órbita del observatorio Hinode en septiembre del mismo año se descubrió además que el calentamiento de la cromósfera y de la corona solar podría estar relacionado con re-conexiones del campo magnético a pequeña escala – procesos en los cuales líneas de campo magnético de dirección opuesta se rompen y se re-conectan en el plasma, convirtiendo energía magnética en energía térmica (Hinode Review Team et al., 2019). Se pensó entonces que una combinación de este con todos los posibles procesos ondulatorios que ocurren en la atmósfera solar podría proporcionar una explicación del calentamiento coronal. Sin embargo, los detalles de dicha combinación están aún a la espera de ser completados.

En 2017, la NASA lanzó la sonda *Focusing Optics X-Ray Solar Imager* con el objeto de efectuar observaciones del sol en la banda de rayos X. Los datos de esas observaciones indicaron emisión de luz de muy alta energía proveniente de una región de la corona, que estando libre de destellos solares, se atribuyó a plasma coronal con temperaturas por encima de los diez millones de kelvin (Ishikawa et al., 2017). Se propuso que estas enormes temperaturas se debían a la presencia

de muchas nano-llamaradas (es decir, destellos diminutos) muy intensas sobre la superficie solar, las cuales aparecían y se disipaban rápidamente, produciendo pequeñas regiones de plasma muy caliente. Sin embargo, para ese momento la tecnología a disposición de los físicos solares no era aún suficiente para observar y detectar dichos mini-destellos. Durante los dos años sucesivos la tecnología fue mejorando al punto que ha permitido recientemente y por primera vez la detección de dichos eventos impulsivos de duración de alrededor un segundo o inclusive menos, los cuales según estimaciones aproximadas podrían contribuir de manera significativa al calentamiento coronal.

El 12 de agosto de 2018, la NASA lanzó la Sonda *Solar Parker* (Parker Solar Probe, PSP), la cual se acercará por primera vez en la historia a una distancia de 8.5 radios solares de la superficie del sol, donde 1 radio solar equivale a 696.340 km, con la finalidad de investigar el calentamiento coronal y el origen del viento solar, entre otras metas (Verscharen, 2019). Este acercamiento sin precedentes al sol fue parafraseado como la *primera visita de la humanidad a una estrella*. El 28 de abril de 2021, durante su octavo sobrevuelo alrededor del sol, la sonda cruzó por primera vez la llamada superficie crítica de Alfvén a unos 18.8 radios solares de la superficie del sol (Witze, 2019), es decir, la región alrededor del sol donde la velocidad de Alfvén es igual a la velocidad del viento solar, descubriéndose que la superficie crítica de Alfvén, lejos de representar una esfera uniforme, es en realidad altamente irregular. El 12 de febrero de 2022, durante su onceavo sobrevuelo, la sonda se acercó a 12.2 radios solares de la superficie del sol

y los resultados de las medidas efectuadas a esa distancia estarán disponibles próximamente para el análisis. La comunidad científica internacional espera que en los próximos sobrevuelos surjan nuevas pistas que puedan ayudar a desvelar el origen del super-calentamiento coronal y las causas que aceleran el viento solar hasta alcanzar velocidades supersónicas. Por ejemplo, corrientes de viento solar con velocidades de hasta 700 km por segundo se han medido a nivel de la órbita terrestre.

Sin embargo, un paso adelante en la revelación de estas nuevas pistas se dio con el lanzamiento del *Orbitador Solar* (Solar Orbiter, SolO) el 10 de febrero de 2020 (Owen et al., 2020), desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en colaboración con la NASA. A diferencia de la Sonda Parker, SolO está equipado de telescopios y fue diseñado para acercarse a distancias de 60.3 radios solares de la superficie solar y proporcionar así las imágenes más cercanas jamás vistas del sol. El 15 de junio de 2020, las imágenes tomadas por SolO a una distancia de aproximadamente 111 radios solares de la superficie solar mostraron un nuevo y sorprendente fenómeno que consistía de un sin número de llamaradas, o destellos, en miniatura sobre la superficie solar, que los científicos llamaron hogueras o fogatas solares por sus tamaños de 400 a 4000 km y sus duraciones de 10 a 200 segundos (Berghmans et al., 2021). Nuevas imágenes del sol tomadas por SolO el 7 de marzo de 2022 a 108 radios solares de la superficie del sol muestran que estas hogueras pueden tener formas de pequeños arcos, formas puntuales, o inclusive formas más complejas y se encuentran distribuidas más o menos continuamen-

te sobre toda la superficie solar. Las hogueras solares son seguramente las estructuras más finas y menos energéticas que se han observado hasta el momento en la superficie del sol y su abundancia las señala como las piezas faltantes del rompecabezas necesario para explicar el calentamiento coronal. A medida que SolO acerque aún más su órbita alrededor de sol, alcanzando distancias del orden de 60 radios solares, se espera disponer de fotografías de la superficie solar a mayor resolución. Sin embargo, a menos que a distancias menores se observen destellos a escalas aún más pequeñas, los científicos presienten que el misterio del calentamiento coronal va en camino de ser solucionado definitivamente.

Referencias

- Aschwanden, M. J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction*. Springer-Verlag. Alemania. 2004.
- Ofman, L., Romoli, M., Poletto, G., Noci, G. y Kohl, J. L. Ultraviolet coronagraph spectrometer observations of density fluctuations in the solar wind. *The Astrophysical Journal*, 491[2], pp. L111-L114, 1997. <https://doi.org/10.1086/345548>.
- De Moortel, I., Ireland, J., Hood, A. W. y Walsh, R. W. The detection of 3 & 5 min period oscillations in coronal loops. *Astronomy and Astrophysics*, 387[1], pp. L13-L16, 2002. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020436>.
- Wang, T. J., Solanki, S. K., Innes, D. E. y Curdt, W. Initiation of hot coronal loop oscillations: Spectral features. *Astronomy and Astrophysics*, 435[2], pp. 753-764, 2005. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20052680>.

- Huang, Z., Madjarska, M. S. Scullion, E. M., Xia, L.-D., Doyle, J. G. y Ray, T. Explosive events in active region observed by IRIS and SST/CRISP. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462[2], pp. 1753-1761, 2017. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2469>.
- Hinode Review Team, Al-Janabi, K., Antolin, P., Baker, D., et al. Achievements of Hinode in the first eleven years. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 71[5], R1, 2019. <https://doi.org/10.1093/pasj/psz084>.
- Ishikawa, S., Glesener, L., Krucker, S., Christe, S., Buitrago-Casas, J. C., Marukage, N. y Vievering, J. Detection of nanoflare-heated plasma in the solar corona by the FOXSI-2 sounding rocket. *Nature Astronomy*, 1, pp. 771-774, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0269-z>.
- Verscharen, D. A step closer to the Sun's secrets. *Nature*, 576[7786], pp. 219-220, 2019. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03665-3>.
- Witze, A. Sun-bombing spacecraft uncovers secrets of the solar wind. *Nature*, 576[7785], pp. 15-16, 2019. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03684-0>.
- Owen, C. J., Bruno, R., Livi, S., Louarn, P., et al. The Solar Orbiter solar wind analyser (SWA) suite. *Astronomy and Astrophysics*, 642, A16, 2020. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937259>.
- Berghmans, D., Auchère, F., Long, D. M., Soubrié, E., et al. Extreme-UV quiet Sun brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI. *Astronomy and Astrophysics*, 656, L4, 2021. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140380>.