

Efecto Neupert

Análisis para fulguraciones del Ciclo Solar 24

G. Cristiani¹ & C.H. Mandrini¹

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

Received: 09 February 2024 / Accepted: 04 June 2024

©The Authors 2024

Resumen / El efecto Neupert representa el resultado empírico que indica que en muchas de las fulguraciones solares la derivada temporal de la emisión en rayos X blandos (SXR) muestra concordancia con el perfil temporal en rayos X duros (HXR) o en microondas. Esta relación simple entre las emisiones a diferentes frecuencias da sustento a los modelos de fulguración en los cuales los HXR son producidos por bremsstrahlung no térmico de electrones energéticos al termalizarse en la baja corona y cromósfera, y los SXR corresponden al bremsstrahlung térmico del plasma calentado por los mismos electrones. Analizamos este efecto para las fulguraciones más energéticas (clasificadas como M o X) pertenecientes al Ciclo Solar 24, usando observaciones en SXR y en el rango de las microondas (MW), bajo la hipótesis de que los electrones energéticos responsables de la emisión en HXR al arribar a la cromósfera son los mismos que generan radiación en microondas por emisión girosincrotrónica en la baja corona. Observamos, por primera vez, que cuanto mayor es la frecuencia en MW considerada, mayor es el acuerdo con el efecto Neupert.

Abstract / The Neupert effect empirically states that, for many solar flares, the soft X-ray (SXR) time derivative nearly fits the hard X-ray (HXR) or microwave time profiles. This simple relationship supports flare models in which the HXR emission is non-thermal bremsstrahlung by accelerated electrons as they gradually lose their energy in the lower corona and chromosphere, and the SXR emission is thermal bremsstrahlung from plasma heated by the same electrons. We analyze this effect for the most energetic flares (classified as M or X) during the Solar Cycle 24, using SXR observations and microwave data (MW), taking into account that the energetic electrons responsible for HXR emission at chromospheric levels are the same that, at low corona levels, produce MW radiation by gyrosynchrotron emission. We observe for the first time that, at higher MW frequencies, the Neupert effect works better.

Keywords / Sun: flares — Sun: activity — Sun: radio radiation — Sun: X-rays, gamma rays

1. Introducción

Las fulguraciones solares son eventos súbitos de liberación de energía ocasionados por un proceso de reconexión magnética, en el que se aceleran partículas cargadas (principalmente electrones) en láminas de corriente. Estas partículas quedan atrapadas en arcos magnéticos coronales, donde producen emisión en el rango de las microondas por girosincrotrón, pero paulatinamente van precipitando hacia la cromósfera donde, debido a su mayor densidad, se termalizan produciendo emisión en rayos X duros por bremsstrahlung de blanco grueso (thick-target bremsstrahlung). Por otro lado se produce emisión en rayos X blandos por bremsstrahlung térmico del plasma calentado debido a la pérdida de energía de los electrones termalizados. El efecto Neupert (Neupert, 1968; Hudson, 1991) establece que, para la mayoría de las fulguraciones, los flujos integrados temporalmente en el rango de las microondas o en rayos X duros ajusta, en forma bastante cercana, las regiones crecientes de las curvas de emisión en rayos X blandos o, dicho de otra forma, que el flujo en rayos X duros $F_{HXR}(t)$ está relacionado al número instantáneo de electrones mientras que el flujo en rayos X blandos $F_{SXR}(t)$ está conectado

con la energía acumulada por estos mismos electrones no térmicos

$$F_{HXR}(t) \propto \frac{d}{dt} F_{SXR}(t) \quad , \quad (1)$$

donde en nuestro caso usamos el flujo en microondas F_{MW} en lugar de la emisión en rayos X duros. Es decir que el efecto Neupert sugiere una relación causal entre las emisiones térmica y no térmica de una fulguración, relación que puede explicarse a partir de un modelo de fulguración en que la energía liberada, en primer término, se transforma en la aceleración de electrones, dichos electrones al precipitarse a la cromósfera generan emisión no térmica en rayos X duros y calentamiento del plasma cromosférico que luego da lugar al proceso de evaporación cromosférica, es decir, el llenado de los arcos coronales por un plasma más denso y caliente que origina la emisión térmica en rayos X blandos.

Como trabajos previos en que se hace un estudio estadístico del efecto Neupert podemos mencionar a Veronig et al. (2002) quienes, utilizando datos en rayos X blandos de los Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) y en rayos X duros del Burst and Transient Source Experiment (BATSE, Harmon et al., 2004), estudiaron fulguraciones de parte del Ciclo Solar

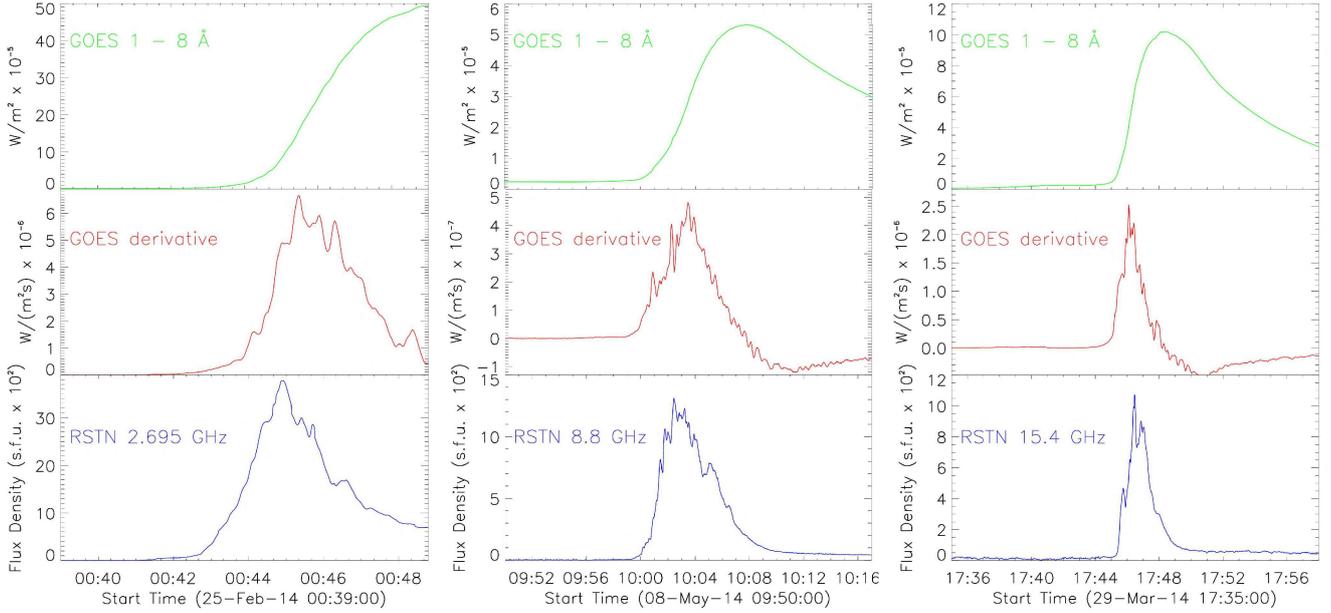


Fig. 1. *Panel izquierdo:* Curvas de emisión para la fulguración del 25/02/2014 00:39 TU, catalogada como X4.9 según GOES. El gráfico superior muestra la emisión registrada por GOES entre 1 y 8 Å, el gráfico medio representa su derivada temporal (agrupada cada 8 segundos para reducir el ruido debido al proceso de derivación) y el gráfico inferior reproduce la emisión en 2.695 GHz registrada por RSTN. *Panel central:* Lo mismo que en el anterior para el evento del 08/05/2014 09:50 TU, catalogado como M5.3 por GOES, pero la emisión en microondas corresponde a 8.8 GHz. *Panel derecho:* Lo mismo que en los anteriores para el evento del 29/03/2014 17:35 TU, catalogado como X1 por GOES, pero la emisión en microondas corresponde a 15.4 GHz. Nótese en los tres casos la similitud entre las curvas correspondientes a la derivada de la emisión en rayos X blandos con las curvas de densidad de flujo en microondas.

23. Por otro lado, Effenberger et al. (2017) y Yu et al. (2021) estudiaron el efecto Neupert usando observaciones de GOES y datos en rayos X duros del Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI, Lin & et al., 2002). Los primeros se restringieron al estudio de fulguraciones parcialmente ocultas por el limbo (fuentes exclusivamente coronales) durante el Ciclo Solar 23, mientras que los últimos analizaron eventos entre 2002 y 2013, lo que abarca parte de los Ciclos 23 y 24.

En este trabajo analizamos la pertinencia o no del efecto Neupert para las fulguraciones del Ciclo Solar 24 catalogadas como M o X según la clasificación de GOES. Se utilizan los datos en microondas con frecuencias entre 2.695 y 15.4 GHz obtenidos por la Radio Solar Telescope Network (RSTN, Guidice et al., 1981) y las observaciones en rayos X blandos (1 – 8 Å) de los GOES-14 y GOES-15. La RSTN posee antenas en Sagamore Hill (Massachusetts – EEUU), San Vito (Italia), Learmonth (Australia) y Palehua (Hawaii – EEUU) lo que le permite disponer de una cobertura continua del Sol en frecuencias desde 245 MHz a 15.4 GHz. Este es el primer trabajo estadístico de análisis del efecto Neupert usando datos en rayos X blandos junto con datos en microondas en diferentes frecuencias.

2. Método

Para el análisis del efecto Neupert de un evento en particular, generalmente se comparan las curvas de emisión en rayos X duros o microondas con la derivada tem-

poral del flujo en rayos X blandos (Dennis & Zarro, 1993; McTiernan et al., 1999; Veronig, 2003; Ning & Cao, 2010). En esta comparación se analiza la coincidencia temporal de los picos de dichas curvas, aunque no necesariamente los tamaños relativos de los picos se preservan de una curva a otra. Como ejemplo de este tipo de comparaciones, en la Fig. 1 se puede apreciar la similitud de las curvas de la derivada de la emisión en rayos X blandos (GOES 1 – 8 Å) con la densidad de flujo en microondas para las frecuencias de 2.695, 8.8 y 15.4 GHz (RSTN), para algunos eventos seleccionados.

Esta similitud en las curvas representa la evidencia gráfica del efecto Neupert y también el hecho de que la emisión en rayos X blandos es de origen térmico mientras que la emisión en microondas se debe principalmente a procesos no térmicos (emisión girósincrotrón de una población acelerada de electrones). Sin embargo, la emisión en radio (microondas y frecuencias mayores) no siempre puede asociarse a procesos de emisión no térmicos, siendo en ciertas ocasiones el aporte de los procesos térmicos no despreciable en la emisión total, o incluso pasando a ser la componente principal de emisión. Un ejemplo de esto lo dan Valle Silva et al. [2019] quienes analizan un evento en que la emisión en radio en el submilimétrico a la frecuencia de 212 GHz representa la componente térmica en el efecto Neupert.

En este trabajo de todos los eventos en rayos X blandos observados por GOES en el Ciclo Solar 24 (más de 8000) nos quedamos sólo con los clasificados como M (flujo entre 10^{-5} y 10^{-4} W/m²) o X (flujo mayor a 10^{-4} W/m²), es decir los más energéticos (representa-

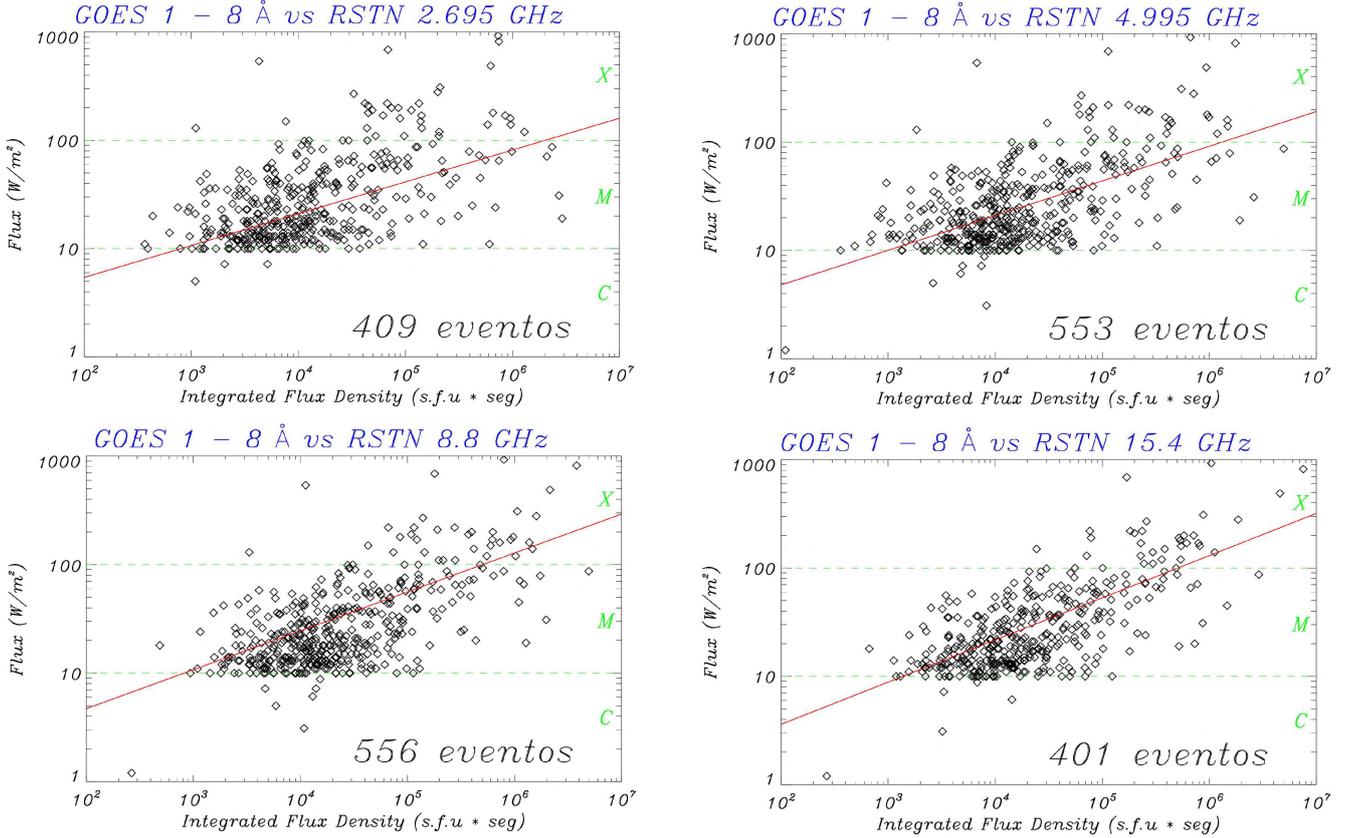


Fig. 2. Diagramas de dispersión. En el eje vertical se tiene la intensidad máxima del flujo en rayos X blandos y en el horizontal el flujo en microondas integrado. La recta en rojo corresponde al ajuste lineal. El panel superior izquierdo corresponde a la frecuencia de 2.695 GHz, el panel superior derecho a la frecuencia de 4.995 GHz, el panel inferior izquierdo a la frecuencia de 8.8 GHz y el panel inferior derecho a la frecuencia de 15.4 GHz.

tan alrededor de un 8% del total) y para los cuales la determinación de su contraparte en microondas es más factible. En rigor de verdad, también se incluyeron unos pocos eventos clasificados como C (flujo entre 10^{-6} y 10^{-5} W/m^2) cuya asociación con eventos en microondas resultó evidente al momento de analizar las curvas de flujo en microondas para los eventos M y X. Esta asociación se logró en alrededor de un 70% de los casos, siendo los casos con asociación fallida debidos a que no se observó un incremento significativo en la emisión en radio o a la existencia de vacíos observacionales en los datos de RSTN. La asociación de los eventos se realizó en forma manual, es decir, observando la emisión en microondas en el rango temporal establecido por cada evento GOES. Al trabajar con fulguraciones X y M, la mayoría de las veces la asociación en microondas era inequívoca; en los casos en que la asociación no era tan evidente (la mayoría de las veces por observarse una emisión ruidosa) recurrimos al criterio de 3σ : consideramos el incremento en radio como relevante si el pico de la emisión superaba el valor medio de la emisión en el rango temporal considerado más tres veces la desviación estándar. Este criterio se aplicó a la emisión en cada frecuencia, teniéndose en general el caso que un evento resultó detectado en cierta/s frecuencia/s mientras que en otra/s no.

Una vez establecido nuestro conjunto de eventos

procedimos a integrar el flujo en radio tomando como período de integración el tiempo que va desde el comienzo hasta el pico del evento en rayos X blandos informado por GOES. Para la integración se utilizó una rutina basada en la suma de trapezoides que además tiene en cuenta la posibilidad de que los datos temporales no se encuentren igualmente espaciados, detalle que es relevante para los datos del RSTN, ya que es habitual que las series temporales registradas por este conjunto de radiotelescopios presenten falta de regularidad en la toma de datos, aunque nominalmente debería corresponder a una cadencia de un registro por segundo. El flujo integrado se calculó extrayendo el fondo, el cual siempre se consideró como el valor más bajo de la emisión en microondas en el período de integración correspondiente, y el cual, en la gran mayoría de los casos, coincidió con el valor del flujo en el momento inicial del período. En definitiva, cada evento de nuestro conjunto quedó caracterizado por la diferencia del flujo en rayos X blandos entre el inicio y el máximo y el flujo integrado en radio, durante el dado intervalo de tiempo, para cada una de las cuatro frecuencias en que el evento fue efectivamente detectado. Cabe aclarar que en cada evento determinado no siempre fue posible observar la emisión en las cuatro diferentes frecuencias de RSTN, ya sea porque no se observó un incremento efectivo de la emisión o porque no se registraron observaciones en alguna de las

frecuencias. En consecuencia, el número de eventos en cada frecuencia difiere de un caso a otro.

3. Resultados preliminares

Para cada frecuencia de RSTN hicimos un diagrama de dispersión, los cuales se muestran en la Fig. 2. El eje de las ordenadas representa la intensidad del evento en rayos X blandos mientras que el eje de las abscisas da el flujo integrado en radio para las cuatro frecuencias analizadas de RSTN. Se hizo un ajuste lineal de los datos (trazo rojo), obteniéndose un coeficiente de correlación lineal $r = 0.55$ para 2.695 GHz, $r = 0.6$ para 4.995 GHz, $r = 0.64$ para 8.8 GHz y $r = 0.70$ para 15.4 GHz. Este último valor es similar al valor obtenido por Veronig [2003], $r = 0.71$, en su estudio del efecto Neupert en el que comparó intensidad en rayos X blandos con la fluencia en rayos X duros.

Si comparamos los valores de correlación mencionados con los que se obtienen al correlacionar el pico en rayos X blandos con los valores pico de la emisión en microondas, podemos notar que estos últimos son notablemente menores ($0.3 < r < 0.4$). Esto indicaría que la correlación es debida principalmente a la relación pico en rayos X blandos – flujo integrado en microondas, como predice el efecto Neupert, y no al hecho que fulguraciones con mayores flujos en rayos X blandos también tienden a tener contrapartes en microondas más intensas.

4. Conclusiones y trabajo a futuro

A partir del análisis del efecto Neupert para los eventos M y X del Ciclo Solar 24 (y unos pocos eventos C), usando datos en rayos X blandos y en microondas, podemos concluir que cuanto mayor es la frecuencia en microondas considerada mejor es el acuerdo con lo predicho por el efecto Neupert, resultado que se evidencia con el valor creciente con la frecuencia del coeficiente de correlación lineal. Este estudio estadístico del efecto Neupert utilizando diferentes frecuencias en microondas es abordado por primera vez en este trabajo, por lo que puede decirse que el resultado obtenido es novedoso. El marco teórico del efecto Neupert supone que la emisión en microondas se debe a electrones energéticos “espiralando” alrededor de las líneas de campo magnético de la baja corona y produciendo emisión girosincrotrón, mientras que la emisión en rayos X blandos se produce como respuesta al calentamiento del plasma que originan esos mismos electrones cuando precipitan hacia la cromósfera. Que el efecto Neupert sea más ostensible a las frecuencias mayores de microondas que a las meno-

res podría indicar que para las frecuencias menores los mecanismos de emisión térmicos son más relevantes, en un sentido estadístico, que para las frecuencias mayores.

Como trabajo a realizar se podría tratar de incorporar un mayor número de eventos C a la estadística, tratando de hallar la contraparte en microondas para estos eventos observados en rayos X blandos. Esto implica un volumen de trabajo considerable, teniendo en cuenta que los eventos C son mucho más numerosos que los M y los X, aunque probablemente un bajo porcentaje de ellos muestren una contraparte claramente detectada en microondas. Por otro lado, la clasificación de los eventos por tipo impulsivo o gradual, la cual para eventos particulares en ocasiones no suele ser tan clara, nos permitiría hacer un estudio discriminando por tipo de evento y constatar si esta separación lleva a resultados notoriamente diferentes, o no, en cuanto al análisis del efecto Neupert.

En un trabajo reciente Kazachenko [2023] correlaciona distintos parámetros de las fulguraciones del Ciclo Solar 24, las cuales cataloga en confinadas y eruptivas, de acuerdo a su asociación con las eyecciones coronales de masa (CMEs): en una fulguración eruptiva se eyecta plasma hacia el espacio interplanetario, el cual es observado posteriormente como una CME en imágenes coronográficas en luz blanca, aunque su visibilidad depende en gran medida de la intensidad de la fulguración; en una fulguración compacta, de haber plasma eyectado este cae nuevamente hacia el Sol y no se produce CME. En dicho trabajo, una de las conclusiones a las que se arriba es que las fulguraciones confinadas son más eficientes en la aceleración de partículas. Esta es otra forma en la que se podrían discriminar los eventos para analizar si esta separación es relevante al momento de evaluar el efecto Neupert.

Referencias

- Dennis B.R., Zarro D.M., 1993, *Solar Phys.*, 146, 177
 Effenberger F., et al., 2017, *ApJ*, 835, 124
 Guidice D.A., et al., 1981, *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 13, 553–553
 Harmon B.A., et al., 2004, *ApJS*, 154, 585
 Hudson H.S., 1991, *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 23, 1064
 Kazachenko M.D., 2023, *ApJ*, 958, 104
 Lin R.P., et al., 2002, *Solar Phys.*, 210, 3
 McTiernan J.M., Fisher G.H., Li P., 1999, *ApJ*, 514, 472
 Neupert W.M., 1968, *ApJL*, 153, L59
 Ning Z., Cao W., 2010, *Solar Phys.*, 264, 329
 Valle Silva J.F., et al., 2019, *Solar Phys.*, 294, 150
 Veronig A., 2003, *Hvar Observatory Bulletin*, 27, 47
 Veronig A., et al., 2002, *A&A*, 392, 699
 Yu W.h., Li Y.p., Gan W.q., 2021, *ChA&A*, 45, 82