

El modelo del Backwarming y un método observacional para entender los flares que emiten luz blanca

The Backwarming model and an observational method to understand the white-light flares

J. S. Castellanos-Durán ^a*, B. Calvo-Mozo ^a.

^a*Observatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia,
Carrera 45 # 26-85 Bogotá D.C., Colombia.*

Aceptado xxxx; Publicado en línea xxxx.

ISSN 2256-3830.

Resumen

Los flares son fenómenos transientes altamente energéticos que ocurren en la atmósfera solar. Estos eventos son detectados en todo el espectro electromagnético, siendo en el continuo y NUV donde emiten la mayor cantidad de energía. Históricamente los flares con una emisión en el continuo visible han sido llamados white-light flares (WLF), aunque con la reciente instrumentación, se ha observado pequeños brillantamientos en casi todos los flares. Sin embargo, es aún desconocido si los WLFs son una clase especial de flares. Adicionalmente, diferentes autores han propuesto modelos para explicar el aumento del continuo pero hay aún controversia entre estos. Analizamos 43 WLFs usando imágenes del continuo tomadas con el SDO, concluyendo que los métodos actuales pueden generar artefactos puesto que realizan diferencias entre imágenes en largos intervalos de tiempo introduciendo errores provenientes de la evolución de la región activa. Estos artefactos podrían sobre/sub estimar el flujo. Proponemos un método basado en las ventajas de los métodos clásicos. Para modelar los WLFs, escribimos un código de transferencia radiativa para simular la emisión de ion H^- y las opacidades de H, Si, C, concluyendo que el modelo de Backwarming es capaz de calentar la atmósfera solar baja para producir la emisión del continuo.

Palabras Claves: Flares Solares, Técnicas Observacionales, Observational tools, Procesos Radiativos, Simulación numérica..

Abstract

Flares are highly energetic transient phenomena occurring in the solar atmosphere. These events are detectable throughout the entire electromagnetic spectrum, and their radiated bulk energy is in the continuum and near-UV. Historically, flares with a clear emission in the continuum were called white-light flares (WLF), although it seems that with recent instrumentation, at least minor enhancements in the continuum can be detected in most flares. However, it is still unknown if WLFs are a special class of flares. In addition, different authors have proposed different models to explain the enhancement in the continuum but there is still controversy between them. We analyzed 43 WLFs using continuum images from the SDO, concluding that current methods may generate artifacts because some of them perform time differences between intensity images in large lapses of time, introducing errors from the evolution of the active regions,

* jscastellanosd@unal.edu.co

which may over/underestimate the flux. We propose a method based on the advantages of classical methods. To model WLFs, we wrote a radiative transfer code to simulate the H^- ion emission and the opacities of H, Si, C, concluding that the Backwarming model is able to heat the lower solar atmosphere to produce the white-light emission.

Keywords: Solar flares, Observational tools, Radiative process, Numerical simulation.

1. Introducción

Los *flares* o fulguraciones solares son eventos explosivos que suceden en la corona solar liberando grandes cantidades de energía súbitamente en escala de minutos. En lo que sigue, usaremos el término inglés *flare* para referirnos a este tipo de fenomenología solar. Dicho proceso radia en todas las longitudes de onda, acelera partículas, calienta y mueve grandes cantidades de plasma solar entre otros. Debido a la complejidad del fenómeno aún no se cuenta con una completa descripción de los mecanismos de liberación de energía. Sin embargo, el modelo estándar de flares considera que los campos magnéticos y a la reconexión de sus líneas son la causa del proceso de liberación de energía [1, 2].

En particular, *algunos* flares presentan un abrigantamiento en luz blanca, como fue mostrado en el primer flare observado por Carrington [3] y Hodgson [4] separadamente en 1859. Los eventos que presentan esta emisión en luz blanca (LB) son conocidos en la literatura científica como *White-light flares* (WLFs¹). La comprensión tanto teórica como observacional de los WLFs ha mejorado considerablemente en las últimas décadas, pero debido a limitaciones instrumentales no se ha conseguido realizar un análisis estadístico de parámetros físicos de estos eventos. En la actualidad se clasifican en dos tipos de clase los WLFs basado en la presencia de características especiales en su espectro como lo son los saltos de Balmer y Paschen, así como las correlaciones entre la intensidad del continuo, los rayos X y las microondas [5, 6]. Además, diversos estudios observacionales han sugerido una correlación entre la luz blanca con los rayos X duros sucediendo estos fenómenos en tiempos similares [7], en sus posiciones relativas horizontales [8, 9, 10] y la altura en la que ocurren respecto a la fotosfera [11].

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: en las secciones 2 y 3 se describen los datos usados en este estudio y se discuten los métodos observacionales aplicados. La simulación realizada se presenta en la sección 4. Por último, las conclusiones del trabajo se describen en la sección 5.

2. Observaciones

La muestra de flares seleccionados consiste en 43 eventos de clase GOES mayor a M1.0 que ocurrieron en el presente máximo solar entre Octubre del 2010 hasta Julio del 2012. Para medir el exceso de luz blanca durante estos eventos se usaron imágenes de la intensidad del continuo registradas por el instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) a bordo del satélite Solar Dynamics Observatory (SDO). Estas imágenes observan la línea de absorción del Fe I centrada en $6173.3 \text{ \AA} \pm 0.1 \text{ \AA}$ con una cadencia de 45 segundos. El rango de tiempo seleccionado es de hora y medio, es decir, para cada evento se cuenta con 80 imágenes de la intensidad del continuo ($\sim 2.3 \text{ GB}$ por evento). Debido a que la mayor parte de emisión de luz blanca sucede en la fase impulsiva del flare [8], este intervalo comienza 40 minutos antes del pico GOES en la banda de 1 a 8 \AA . A todos los datos observacionales antes de ser analizados son co-alineados, se les sustrae la rotación diferencial y se cortan a una región que contenga completamente la región activa que hospeda al flare. La figura (1) muestra las imágenes más cercanas al pico GOES de los flares SOL-2011-07-30T02:12.0 y SOL-2011-09-06T22:20.0 que tuvieron lugar en las regiones activas NOAA 11283 y 11261 respectivamente. Las flechas negras apuntan a los núcleos de emisión de luz blanca. Estos dos eventos fueron los que más emitieron luz blanca en la muestra seleccionada.

¹ Usaremos esta nomenclatura en este trabajo.

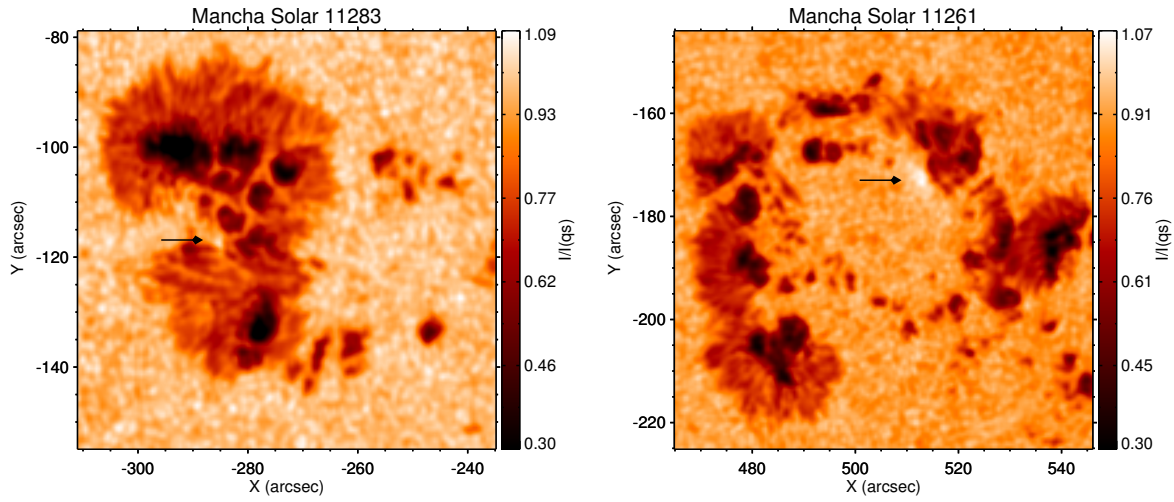


Fig. 1. Emisión de luz blanca producida por un flare en la imagen más cercana a su pico GOES observada por el instrumento SDO/HMI. *Izquierda* - Flare de clase GOES M9.3 SOL-2011-07-30T02:12.0. *Derecha* - Flare de clase GOES X2.1 SOL-2011-09-06T22:20.0 flare. Las flechas negras están dirigidas a los núcleos de emisión de la luz blanca de estos dos eventos

3. Métodos de para determinar el flujo de luz blanca en imágenes del continuo

En la literatura actual se encuentran principalmente dos métodos para medir el exceso de luz blanca debido a un flare [7, 9, 10]. Estos métodos consisten en realizar diferencias entre imágenes para separar las características propias de las regiones de la emisión de luz blanca debida al proceso flare. El primero de ellos lo denotaremos como diferencias *normales* y está dadas por

$$I_i^{dif}(x, y) = I_{i+1}(x, y) - I_i(x, y), \quad i = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

donde $I_i(x, y)$ es la intensidad del pixel con coordenadas x y y , tomada en el instante de tiempo i que representa la candencia del instrumento y N es el número total de imágenes en el intervalo escogido. Para el caso del instrumento HMI/SDO $(i + 1) - (i) = 45$ segundos (ver figura 2, paneles a, b, c). La ventaja de este método es que tiene en cuenta la mayor cadencia que permite el instrumento, pero genera dos problemas: (i) al realizar las diferencias luego del pico del flare se producen intensidades negativas provenientes del flare (zonas blancas en los paneles b y c - figura 2); (ii) al realizar diferencias luego del comienzo de la emisión de luz blanca la señal de fondo es la suma entre la emisión propia de la región en cuestión más la emisión producida por el flare. Esto quiere decir que al realizar la diferencia entre dicha secuencia de imágenes se está sub estimando el flujo. La segunda clase de diferencias las llamaremos *promedio* (ver figura 2, paneles d, e, f). Estas consisten en tomar una imagen promedio antes de empezar el flare y restársela a todo el cubo de dato. Matemáticamente se puede escribir como

$$I_i^{dif}(x, y) = I_i(x, y) - I_{\langle k \rangle}^{promedio}(x, y) \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (2)$$

$$I_{\langle k \rangle}^{promedio}(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^k I_i(x, y)}{k} \quad (3)$$

donde k significa el número de imágenes promediada. Aunque este es el método más sencillo para sustraer la señal de fondo de la emisión proveniente del flare, implica varias desventajas: (i) se asume que la región activa no cambia en tiempos de minutos, lo cual significa pérdida de resolución espacial de los datos; (ii) se pierde información de la cadencia del instrumento puesto que se asumen que los pixeles cercanos a las fronteras entre regiones como la umbra, penumbra y sol calmo son estáticos al pasar el tiempo.

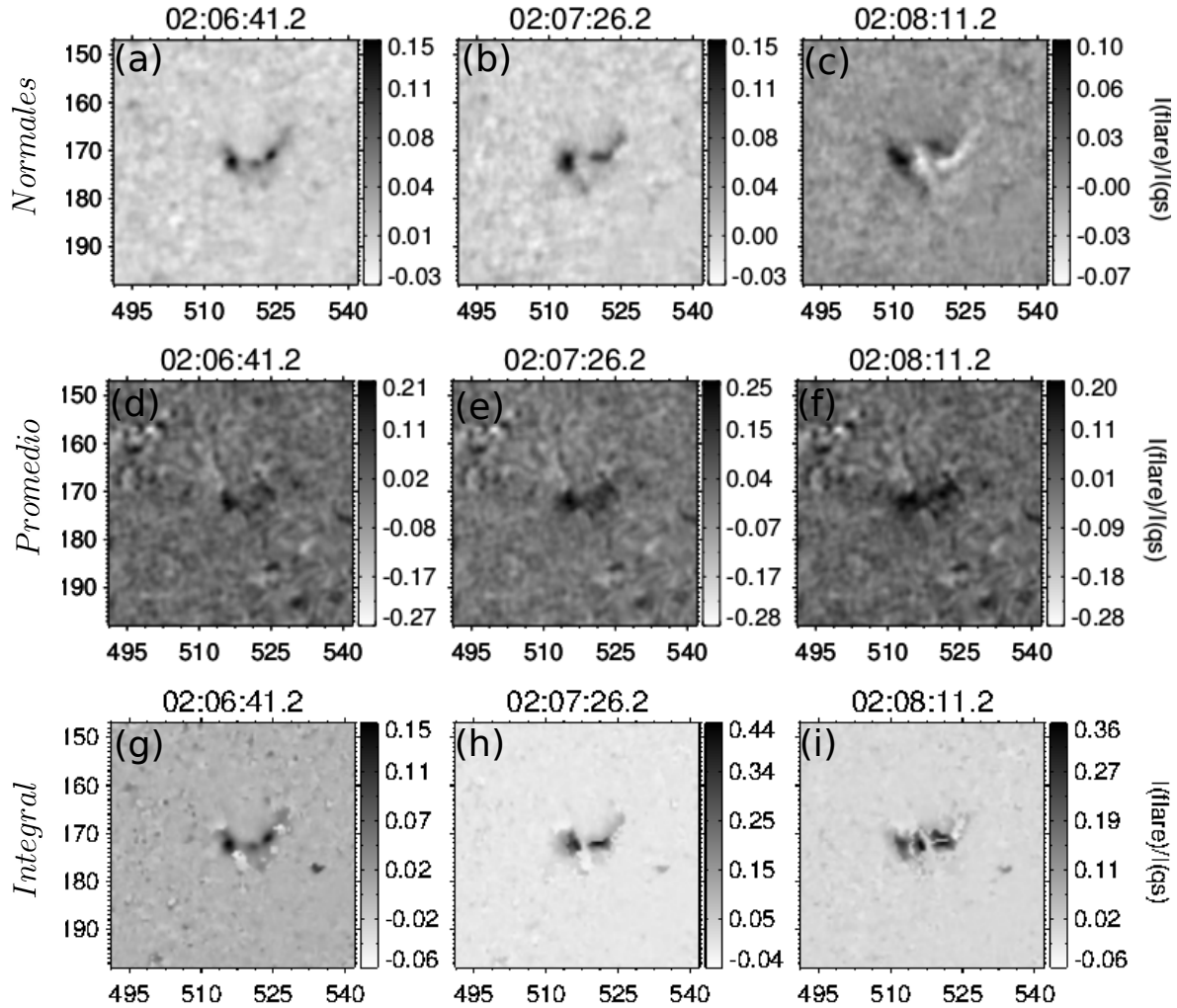


Fig. 2. Evolución del flare que emisión en luz blanca SOL-2011-09-06T22:20.0 usando los tres métodos de diferencias para sustraer la señal de fondo de la región activa para los mismos tiempos. Los paneles a-c representan las diferencias normales. Los paneles d - f se obtuvieron con las diferencias promedio. Los paneles g - i son el resultado de las diferencias integradas mas el algoritmo de reconstrucción. Todas las imágenes están normalizadas a el sol calmo observado en el centro.

Para solventar estos problemas expuesto por los métodos usados, nosotros implementamos un algoritmo el cual se basa en las ventajas y solventa en primera aproximación los problemas de los métodos antes expuestos. El método para calcular el exceso de luz blanca se basa en el principio de encontrar el área bajo la curva de una función dada y debido a esto lo llamaremos *integral* (ver figura 2, paneles g, h, i). El método asume el teorema del valor extremo y la propiedad de suma de integrales $\int_a^c f(t)dt = \int_a^b f(t)dt + \int_b^c f(t)dt$. En otras palabras, asumimos que el flare tiene un pico lo cual nos permite separar el problema antes y después de este. Con base en esto se realizan diferencias normales pixel a pixel hasta llegar al pico del flare (i_{max}). Para las imágenes que suceden luego de i_{max} invertimos el orden de la diferencia, es decir, le restamos a la imagen i aquella que sucede un tiempo siguiente $i + 1$. Esto lo podemos describir como

$$I_i^{dif}(x, y) = \begin{cases} I_{i+1}(x, y) - I_i(x, y) & \text{Si } 0 \leq i \leq i_{max} \\ I_i(x, y) - I_{i+1}(x, y) & \text{Si } i_{max} \leq i \leq N - 1 \end{cases} \quad (4)$$

Finalmente, reconstruimos la señal completa del exceso producido por el flare, un algoritmo que suma iterativamente, para los dos intervalos antes y después del pico, la intensidad restada con la inmediatamente anterior/después

siempre y cuando la intensidad sea mayor a 3σ .

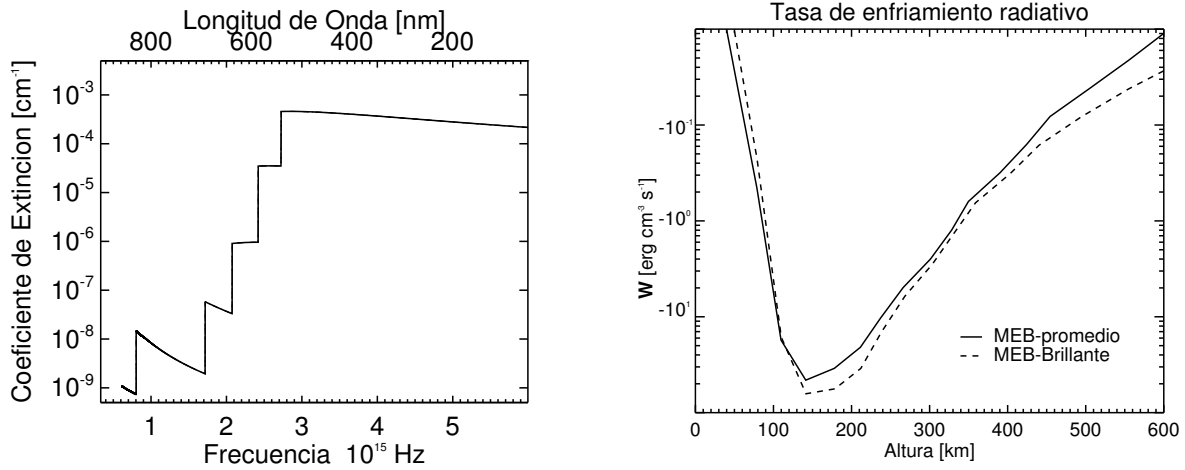


Fig. 3. *Izquierda* - Opacidades de línea calculada para los elementos H, Si y C line-opacities. *Derecha* - Tasa neta de enfriamiento suponiendo una atmósfera perturbada por el proceso flare.

4. Simulación

En la literatura se encuentran diversos modelos para explicar la emisión de luz blanca durante flares como: el modelo de blanco grueso [12] y blanco delgado [13], los procesos de pérdida de energía por protones [14], el modelo de radiación hidrodinámica [15] y el modelo de *Backwarming* model [16]. Para este trabajo asumimos el modelo de *Backwarming* que implica la emisión del ion H^- debido el calentamiento de las capas bajas en atmósfera solar por radiación de rayos X y Ultravioleta dada por

$$J_\nu(\tau_\nu) = 7.5 \times 10^{-9} \left(\frac{\nu}{10^{17}} \right)^{-1.2} e^{\tau_\nu} \quad \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1} \quad (5)$$

En la simulación del modelo de *Backwarming* calculamos las opacidades de los elementos H, Si and C para las transiciones libre-acotados (ver figura 3, izquierda), así como las opacidades libre-libre, libre-acotado y emisión del ion H^- asumiendo tres modelos de atmósfera: calma [17], flare promedio y flare brillante [18]. Para calcular que tanto se calienta la atmósfera debido a la radiación de rayos x y ultravioleta se calcula las funciones de calentamiento/enfriamiento Ψ dadas por [19]

$$\Psi_{H^-}^{\text{libre-libre}} = 4\pi n_{H^-} \int \kappa_\nu^{f-f} (S_\nu - J_\nu) d\nu \quad (6)$$

$$\Psi_{H^-}^{\text{libre-acotado}} = 4\pi n_{H^-} \int \kappa_\nu^{f-b} \left[\frac{n_{H^-}^*}{n_{H^-}} \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} + J_\nu \right) e^{-h\nu/kT} - J_\nu \right] d\nu \quad (7)$$

donde n_{H^-} y $n_{H^-}^*$ son las densidades numéricas dentro y fuera del equilibrio local. Esta función nos dice que para valores positivos hay un proceso de enfriamiento y para valores negativos el proceso físico tenido en cuenta calienta la región de estudio. La gráfica 4-derecha muestra que efectivamente el modelo supuesto calienta la fotosfera y cromosfera baja teniendo un máximo alrededor de 150 km sobre la fotosfera.

5. Conclusiones

Se realizó un análisis observacional de 43 flares que ocurriendo en el ciclo solar 24 concluyendo que 27 de esos eventos presentan un abrigamiento en luz blanca. Se implementó un método para la medición del flujo de luz blanca que no asume una región activa estática, mantiene la resolución espacial y temporal de las mediciones y no

produce flujos negativos.

Se realizó una simulación de transferencia radiativa asumiendo el modelo del Backwarming para la emisión de la luz blanca durante flares, encontrando que la radiación ultravioleta y rayos X producida luego de la reconexión magnética logra calentar exitosamente la atmósfera solar baja como para que el ion H^- produzca un exceso en la intensidad del continuo.

References

- [1] A. O. Benz. Flare Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 5:1, February 2008.
- [2] K. Shibata and T. Magara. Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes. *Living Reviews in Solar Physics*, 8:6, December 2011.
- [3] R. C. Carrington. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *MNRAS*, 20:13–15, November 1859.
- [4] R. Hodgson. On a curious Appearance seen in the Sun. *MNRAS*, 20:15–16, November 1859.
- [5] M. E. Machado, E. H. Avrett, R. Falciani, C. Fang, L. Gesztelyi, J.-C. Henoux, E. Hiei, D. F. Neidig, D. M. Rust, P. Sotirovski, Z. Svestka, and H. Zirin. White light flares and atmospheric modeling (Working Group report). In D. F. Neidig, editor, *The lower atmosphere of solar flares*, p. 483 - 488, pages 483–488, 1986.
- [6] C. Fang and M. D. Ding. On the spectral characteristics and atmospheric models of two types of white-light flares. *A&AS*, 110:99, April 1995.
- [7] H. S. Hudson, L. W. Acton, T. Hirayama, and Y. Uchida. White-light flares observed by YOHKOH. *PASJ*, 44:L77–L81, October 1992.
- [8] T. R. Metcalf, D. Alexander, H. S. Hudson, and D. W. Longcope. TRACE and Yohkoh Observations of a White-Light Flare. *ApJ*, 595:483–492, September 2003.
- [9] S. A. Matthews, L. van Driel-Gesztelyi, H. S. Hudson, and N. V. Nitta. A catalogue of white-light flares observed by Yohkoh. *A&A*, 409:1107–1125, October 2003.
- [10] L. Fletcher, I. G. Hannah, H. S. Hudson, and T. R. Metcalf. A TRACE White Light and RHESSI Hard X-Ray Study of Flare Energetics. *ApJ*, 656:1187–1196, February 2007.
- [11] M. Battaglia and E. P. Kontar. Height structure of X-ray, EUV, and white-light emission in a solar flare. *A&A*, 533:L2, September 2011.
- [12] H. S. Hudson. Thick Target Processes and White Light Flares. *Sol. Phys.*, 24:414–428, June 1972.
- [13] A. Unsold. On the Theory of Flares and Some Related Solar Phenomena. *QJRAS*, 9:294, September 1968.
- [14] V. V. Zharkova and V. A. Kobylinskii. The effect of non-thermal excitation and ionization on the hydrogen emission in impulsive solar flares. *Sol. Phys.*, 143:259–274, February 1993.
- [15] J. C. Allred, S. L. Hawley, W. P. Abbett, and Carlsson. Radiative Hydrodynamic Models of the Optical and Ultraviolet Emission from Solar Flares. *ApJ*, 630:573–586, September 2005.
- [16] M. E. Machado, A. G. Emslie, and E. H. Avrett. Radiative backwarming in white-light flares. *Sol. Phys.*, 124:303–317, September 1989.
- [17] J. E. Vernazza, E. H. Avrett, and R. Loeser. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun. *ApJS*, 45:635–725, April 1981.
- [18] M. E. Machado, A. G. Emslie, and J. C. Brown. The structure of the temperature minimum region in solar flares and its significance for flare heating mechanisms. *Sol. Phys.*, 58:363–387, July 1978.
- [19] J. Aboudarham and J. C. Henoux. Energy deposit at temperature minimum level and white light flares. *A&A*, 156:73–78, February 1986.