



# Submillimeter radiation as the thermal component of the Neupert Effect

C. Guillermo Giménez de Castro  
guigue@craam.mackenzie.br

Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie   
São Paulo

60<sup>a</sup> Reunión de la Asociación Argentina de Astronomía,  
Malargüe, Septiembre 2017

# Submillimeter radiation as the thermal component of the Neupert Effect

Jorge F. Valle Silva,  
C. Guillermo Giménez de Castro,  
Paulo J. A. Simões,  
Jean-Pierre Raulin.

Submitted to *Astron & Astrophys*

## What is the Neupert Effect?

The *Neupert effect* is the empirical observation that the time evolution of non-thermal emission (e.g. hard X-rays) is proportional to the time derivative of the thermal emission flux (soft X-rays), or, vice versa, that time integrated non-thermal flux is proportional to thermal flux.

$$F_{non-thermal}(t) \propto \frac{dF_{thermal}(t)}{dt} \quad (1)$$

$$F_{thermal}(t) \propto \int_{t_0}^t F_{non-thermal}(t') dt' \quad (2)$$

# A tale of two fluxes

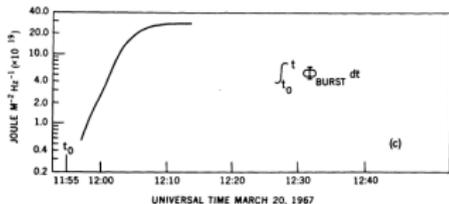
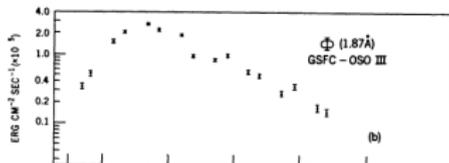
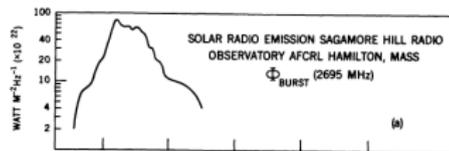
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, Vol. 153, July 1968

## COMPARISON OF SOLAR X-RAY LINE EMISSION WITH MICROWAVE EMISSION DURING FLARES

WERNER M. NEUPERT

Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland

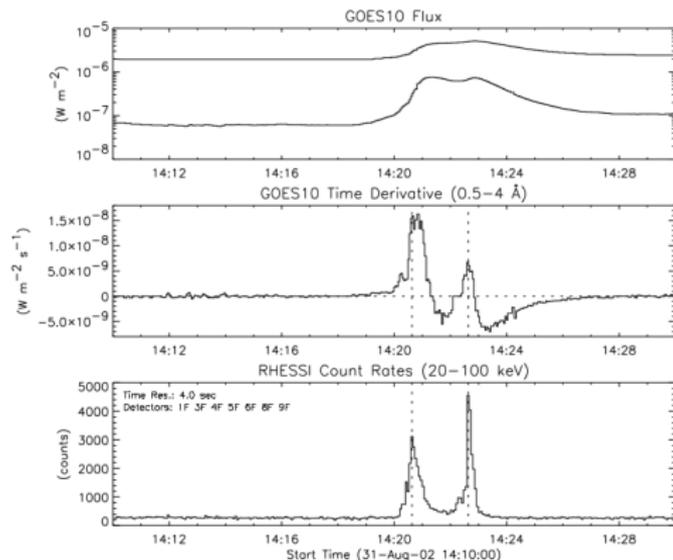
Received April 18, 1968; revised June 3, 1968



*Although...*

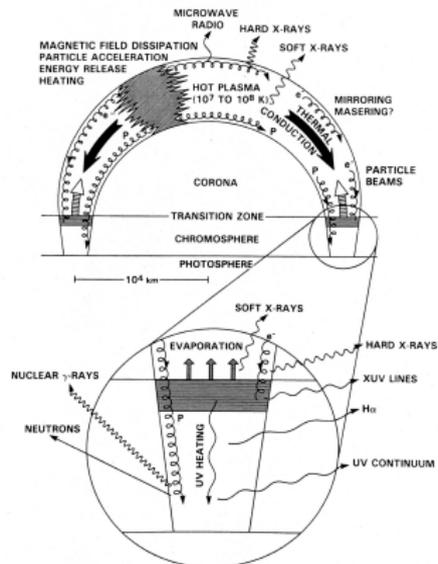
- ▶ 2.695 GHz is not only *non-thermal* emission (It may have coherent radiation as well)
- ▶ UV lines emission is not purely *thermal*

# A tale of two fluxes



Veronig (2003), *Hvar Obs. Bull.*

# Neupert effect explained (!?)



## *The Chromospheric Evaporation Model*

Dennis, B.R., and Schwartz, R.A., (1989) *Solar Phys.* 121, 75.

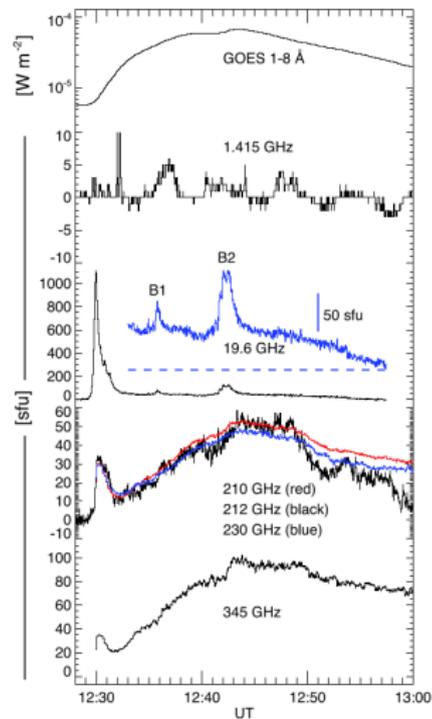
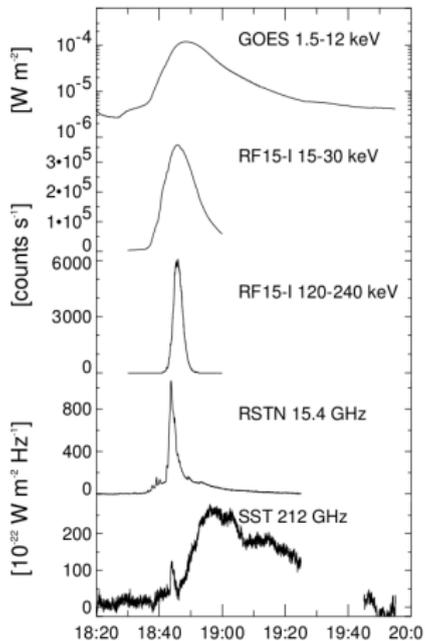
## The Neupert effect in the Literature

- ▶ Hudson & Ohki (1972) present the *chromospheric evaporation* model, which is the base of the Neupert effect.
- ▶ Hudson (1991) presents the first results using HXR and SXR and *baptizes* the effect.
- ▶ Lee et al. (1995) argue that electrons alone cannot be responsible for the chromospheric evaporation.
- ▶ Veronig et al (2002) present an statistical analysis: in 50% of all flares there is no Neupert effect (*vice versa, in 50% the effect is present*).
- ▶ Veronig et al. (2005) confirm Lee et al. (1995): *fast electrons cannot be the only source of energy for the chromospheric evaporation.*
- ▶ Trottet et al (2000) show that  $H\alpha$  has a *fast* (direct) and *slow* (accumulative) relationship with HXR.

# Origin of the submillimeter emission

- ▶ Flare observations at  $\nu > 100$  Ghz started in 2000
- ▶ The emission mechanism is usually attributed to either
  - ▶ Synchrotron of relativistic electrons.
  - ▶ Thermal bremsstrahlung.
  - ▶ A mixture of both.

# Origin of the submillimeter emission



## EMISIÓN GIROSINCROTRÓNICA DE FUENTES BIPOLARES

G. Cristiani<sup>1</sup>

(1) Instituto de Astronomía y Física del Espacio / CONICET-UBA Buenos Aires, Argentina.

## Resumen

Las fulguraciones son uno de los procesos más energéticos que pueden observarse en el Sol. Actualmente hay consenso en la comunidad de físicos solares en considerar al mecanismo de reconexión magnética como el responsable de estos eventos de liberación súbita de energía, en forma de radiación, aceleración de partículas cargadas y calentamiento de plasma. Para estos fenómenos se cuenta con modelos teóricos que establecen los mecanismos relevantes de emisión en cada rango de frecuencias del espectro electromagnético y, a grandes rasgos, explican el origen y dinámica del evento. A pesar de esto, la forma detallada en que se produce la emisión sigue siendo materia de estudio, tanto desde el punto de vista observacional como desde el teórico.

Cuando se considera la emisión en el rango de radio desde unos pocos a cretzenas de GHz el principal mecanismo de emisión durante las fulguraciones suele ser el girrosincrotrónico, es decir la emisión de partículas cargadas (principalmente electrones) mecánicamente relativistas moviéndose en un ambiente permeado por un campo magnético. Son varios los parámetros que en este caso caracterizan la emisión, los cuales no quedan unívocamente determinados por el conjunto de observaciones disponibles en la actualidad.

Los primeros códigos desarrollados para calcular la emisión de una fuente girrosincrotrónica se limitaban a considerar distribuciones uniformes de los parámetros vinculados a la emisión [Ramaty et al., 1994]. Dichos códigos en general no modelan en forma apropiada la emisión cuando, por ejemplo, la fuente presenta una anisotropía marcada. En este trabajo se presentan resultados obtenidos por un código que calcula la emisión de fuentes inhomogéneas, aplicado a distribuciones dipolares de campo magnético.

## Método

La emisión girrosincrotrónica que se produce en un plasma ambiente con las características de la corona solar, depende de múltiples parámetros. Incluso cuando se considera la emisión de una fuente homogénea es necesario especificar una serie de parámetros que influyen en el mecanismo de emisión y de transferencia radiativa. Por un lado tenemos los parámetros propios del medio en el que se produce la emisión, intensidad de campo magnético, densidad del plasma ambiente, volumen, área efectiva de emisión, orientación respecto de la línea de visión, temperatura, etc. Por otro, tenemos parámetros que caracterizan el haz de partículas aceleradas responsables de la emisión, a saber, densidad, distribución energética, ángulo de paso, etc. En el caso de una fuente no homogénea ya no se tendrían parámetros que caracterizan la fuente, si no que se tendrían distribuciones espaciales de campo magnético, densidad del plasma, temperatura, etc.

La distribución energética de las partículas aceleradas en principio podría tener cualquier forma, sin embargo debido a lo que prevén los mecanismos teóricos de aceleración de partículas durante fulguraciones, la distribución es de la forma de ley de potencias, con un exponente característico y energías de corte inferior y superior. Esto también es avalado por observaciones en rayos X duros, cuyo espectro puede ajustarse teóricamente en forma adecuada por una ley de potencias.

Para el cálculo teórico de la emisión girrosincrotrónica en una fuente homogénea (campo magnético y parámetros físicos constantes) para un haz de electrones acelerados con una dada distribución energética y de ángulo de paso [pitch-angle, el ángulo entre el vector velocidad de la partícula y el vector campo magnético] fue presentado por Ramaty (1969), y consiste en el cálculo de los coeficientes de emisión y de autoabsorción girrosincrotrónica. A pesar de considerarse una fuente no homogénea este formalismo puede utilizarse descomponiendo la fuente de emisión en pequeños volúmenes elementales (torzda) para los cuales la hipótesis de homogeneidad se torna muy adecuada; la variación espacial de los parámetros físicos de la fuente se discretiza considerando torzdas homogéneas, es decir, con parámetros físicos constantes.

Con la orientación de la fuente 3D respecto del observador definida, los planos normales a esta

latitud heliográfica (orientación E-O), en el segundo las bases a la misma longitud heliográfica (orientación N-S). Para cada una de las dos orientaciones se calculó la emisión para diferentes longitudes heliográficas entre 80° E y 0°; en todos los casos se tomó una latitud de 15° N. La distribución de densidades y temperaturas del plasma base se obtuvieron a partir del modelo de atmósfera en fulguración de Hawley & Fisher (1992 y 1994), el cual tiene como único parámetro libre la temperatura en la cima del arco, tomándose un valor de 10<sup>7</sup> K. Para el haz de electrones acelerados se utilizó una distribución tipo ley de potencias isotrópica con exponente  $\delta = 3.5$ , energía de corte inferior de 20 keV, superior de 10 MeV y densidad numérica de electrones 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>. Para todos los cálculos se tomaron vóxeles cúbicos de 6.25 × 10<sup>12</sup> Mm, resultando de esa forma una distribución del orden de 10<sup>9</sup> vóxeles. Se consideraron también haces de partículas con diferentes distribuciones gaussianas, obteniéndose esencialmente los mismos resultados que con distribución isotrópica.

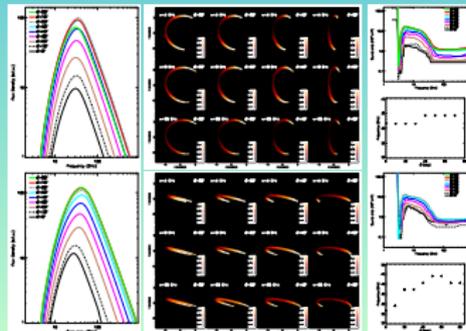


FIGURA 1. Espectros obtenidos a diferentes longitudes heliográficas<sup>(1)</sup> para los arcos con orientaciones N-S y E-O. Centro: Mapa de la distribución de brillo normalizada para las frecuencias de 4 GHz, 9 GHz y 25 GHz para los dos haces a las longitudes heliográficas de 30°, 40°, 50° y 60° E. Derecha: Evolución del pico de emisión de la fuente en función de la frecuencia para diferentes longitudes heliográficas, y frecuencia del pico de emisión como función de la longitud heliográfica.

En el panel izquierdo se muestran los espectros obtenidos para las fuentes al ir variando la ubicación del arco coronal sobre el disco solar. Como predice la teoría, y como también puede observarse en el caso de fuente homogénea, hay un decrecimiento de la frecuencia del pico de emisión al corearse el arco coronal desde el limbo hacia el centro del disco solar, que es más evidente en la fuente con orientación E-O que en la de orientación N-S (la discretización en las frecuencias para las que se calcula el flujo torna más dificultoso la observación de este fenómeno). La forma del espectro no parece diferir demasiado del espectro correspondiente a una fuente homogénea (la forma de "V" invertida). En el panel central se tiene la distribución de brillo normalizada para tres frecuencias distintas, 4 GHz, 9 GHz y 25 GHz. Como rasgo principal puede destacarse que cuanto mayor es la frecuencia, en mayor medida la radiación proviene de regiones más cercanas a las bases del arco coronal, es decir, de regiones con mayores valores de intensidad de campo magnético. El código también permite realizar mapas de polarización circular u obtener el grado de polarización de toda la fuente en función de la frecuencia asumiendo la aproximación QL. Los resultados obtenidos coinciden con desarrollos previos en esta temática Simões & Costa, 2006; Simões & Costa, 2010. Los gráficos del panel derecho muestran el tamaño del arco coronal (a la potencia media) como

## General Characteristics of SOL2011-02-14T17:25

- ▶ GOES class M2.2, the weakest flare detected by SST.
- ▶ AR 11158 at Heliographic Coordinates S20W04.
- ▶ Suffered a rapid growth becoming in a few days a big AR with tens of spots and extended over  $10^\circ$ .
- ▶ SST tracked the AR since the day before. On Feb 14 atmospheric conditions were not good:  $\tau_{212} \simeq 0.8$  and  $\tau_{405} \simeq 4.5$
- ▶ SST detected the flare with the multibeam system allowing correct flux determination and source localization.

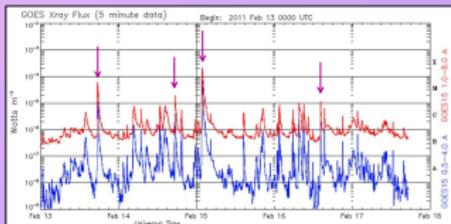
## Sobre el origen de los eventos eruptivos de febrero de 2011: Evolución del campo fotosférico y estructura magnética de la baja corona

C.H. Mandrini<sup>1,2</sup>, G. Cristiani<sup>1,2</sup>, H. Cremades<sup>3,4</sup>, C. Francile<sup>5</sup>, F.M. López<sup>6</sup>, M.V. Gutiérrez-Escate<sup>1</sup>

- 1 Instituto de Astronomía y Física del Espacio, UBA-CONICET, Argentina
- 2 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina
- 3 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina
- 4 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina
- 5 Observatorio Astronómico Félix Aguilar, Universidad Nacional de San Juan, Argentina
- 6 Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio, CONICET, Argentina

**RESUMEN:** La región activa (RA) NOAA 11158 produjo numerosas fulguraciones entre el 13 y el 16 de febrero de 2011, algunas de ellas fueron acompañadas por eyecciones coronales de masa. En este período se observó la emergencia de dos bipolos magnéticos que se desplazaron de manera paralela. Las fulguraciones y los eventos eruptivos ocurrieron a lo largo de distintas porciones de la línea de inversión de polaridad (LIP) del conjunto. Las zonas en donde se originan los eventos activos están relacionadas con los desplazamientos de las polaridades centrales de la RA y la presencia de zonas de cizalladura intensa del campo observadas en los magnetogramas vectoriales del *Helioseismic and Magnetic Imager* a bordo del *Solar Dynamics Observatory*. A partir de un modelo del campo magnético coronal encontramos la presencia persistente de un punto de campo nulo a lo largo de los días analizados. La estructura del campo en el entorno del nulo, así como su ubicación por encima de la LIP, varía acompañando la evolución del campo fotosférico. Proponemos que el mecanismo de reconexión del campo que ocurrirá en el entorno del nulo, forzado por los movimientos del campo fotosférico, podría dar lugar a la disminución de la tensión magnética por encima del tubo de flujo ubicado a lo largo de la LIP dando lugar a sus reiteradas erupciones.

### Los eventos analizados



Curva de luz en rayos X blandos del GOES 15 en el rango de 1 a 8 Å. Se señalan con flechas color lila las cuatro fulguraciones más intensas observadas del 13 al 16 de febrero. Estas son:

Evento	Clase	Inicio	Pico	Fin	Coordenadas
0110213	M6.6	17:28	17:38	17:47	S20E05
20110214	M2.2	17:20	17:26	17:32	S20W04
20110215	X2.2	01:44	01:56	02:06	S20W10
20110216	M1.6	14:10	14:25	14:29	S21W30

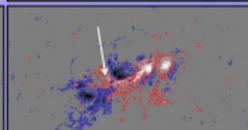
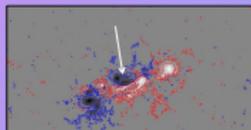
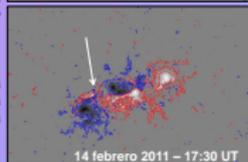
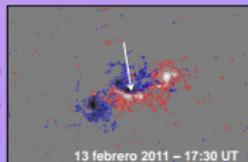
### Modelo del campo coronal y su topología

### Evolución del campo magnético

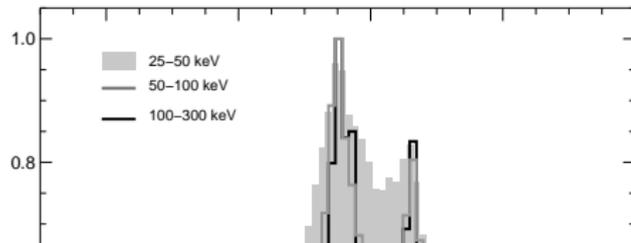
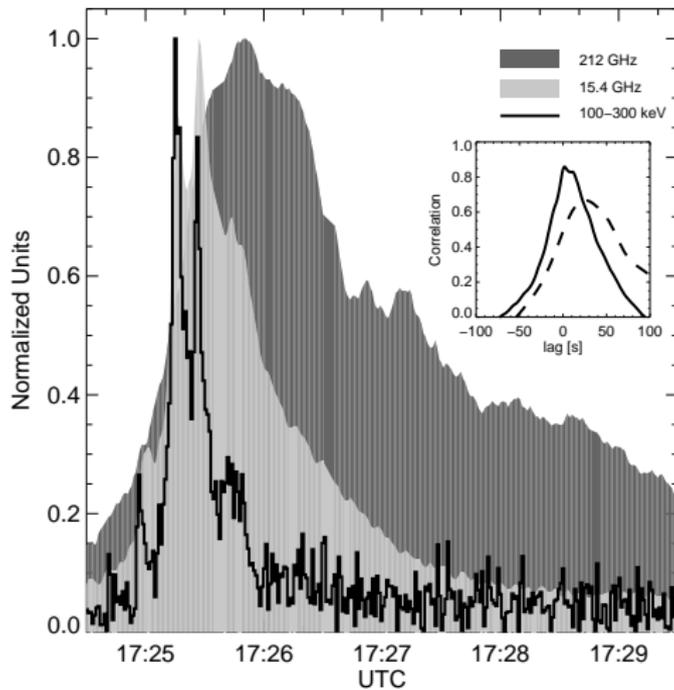
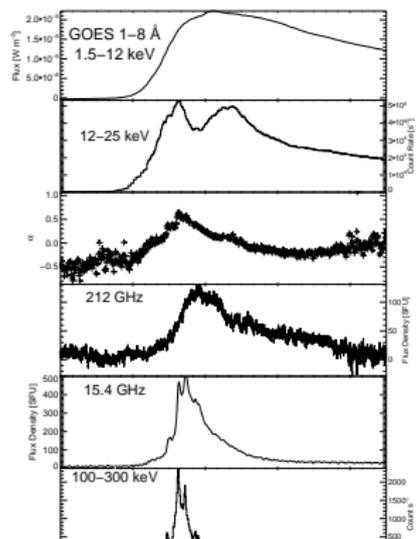
Observaciones del campo magnético en la dirección de la visual obtenidas con el HMI. La hora de cada magnetograma es cercana a cada fulguración.

Nótese que el desplazamiento de las polaridades centrales semeja una rotación. Este desplazamiento aumenta el grado de cizalladura del campo a lo largo de la LIP donde se observa un filamento delgado.

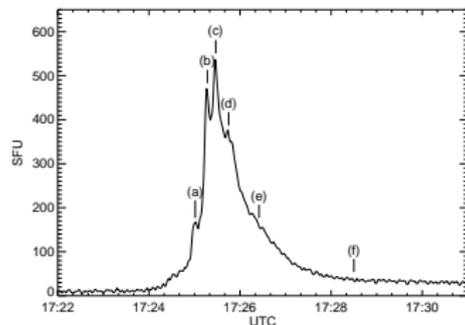
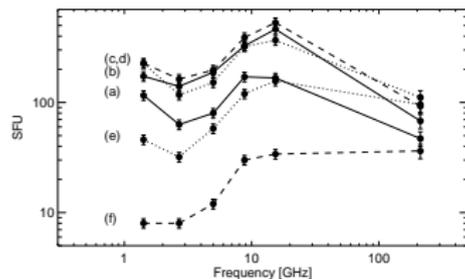
Las flechas blancas señalan la porción de la LIP en donde se inicia cada fulguración. Esta región es central el 13 y el 15 y se encuentra hacia el este el 14 y el 16 de febrero.



# Flux Time evolution

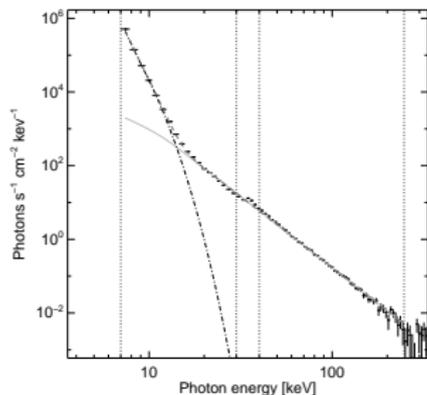


# Radio spectra



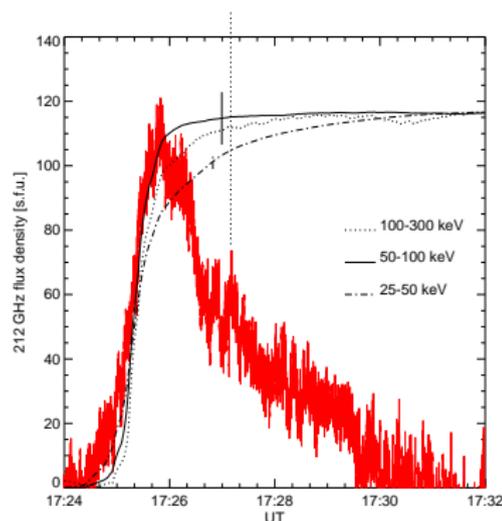
- ▶  $\alpha_{15.4}^{212} \leq 0.5$
- ▶  $\Rightarrow \delta \leq 2.0$
- ▶ 15.4 GHz *optically thin*.

# HXR spectrum



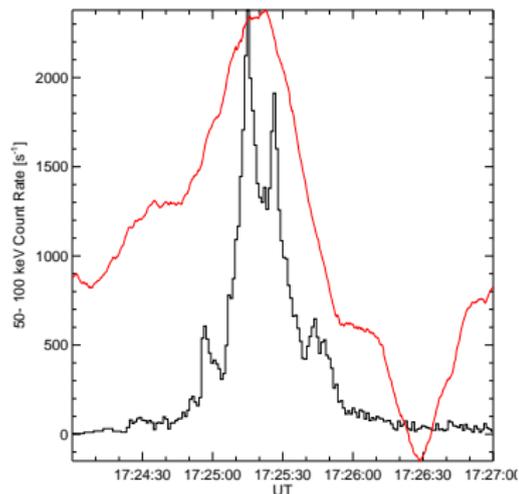
- ▶ Thermal component:  
 $T = 13$  MK,  
 $EM = 56 \times 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ .
- ▶ Thick target :  
 $F = 2.6 \times 10^{35} \text{ s}^{-1}$ ,  
 $\delta = 4.6$ ,  $E_c = 16$  keV

## The Neupert effect on the submillimeter data



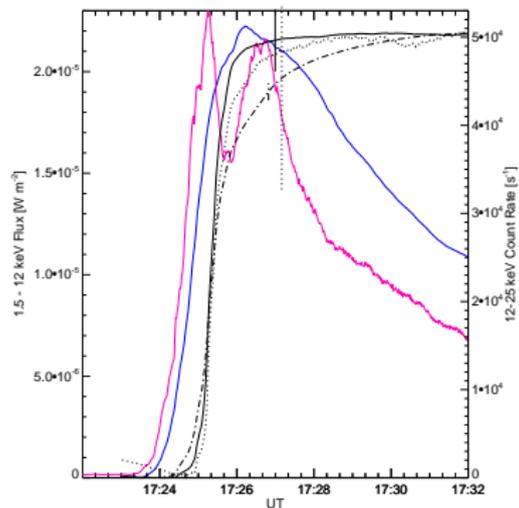
- ▶ Black curves represent fluence  $\int F_{HXR} dt$ .
- ▶ Red curve is 212 GHz flux density.
- ▶ HXR fluence and 212 GHz emission start together.
- ▶ Maximum of the 50–100 keV fluence is coincident with 212 peak time.

# The Neupert effect on the submillimeter data



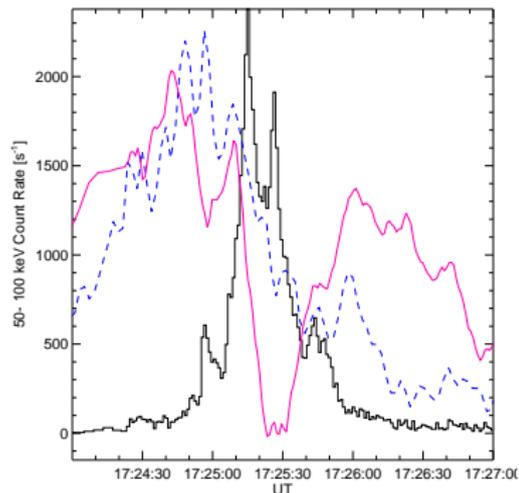
- ▶ Red curve is 212 GHz time derivative, smoothed (20 s).
- ▶ Black curve is 50–100 keV.

# The Neupert effect on the SXR



- ▶ Blue and pink curves are SXR 1.5-12 keV and 12-25 keV.
- ▶ Black curves are HXR fluences.
- ▶ SXR starts **before** the HXR energy deposition.

# The Neupert effect on the SXR

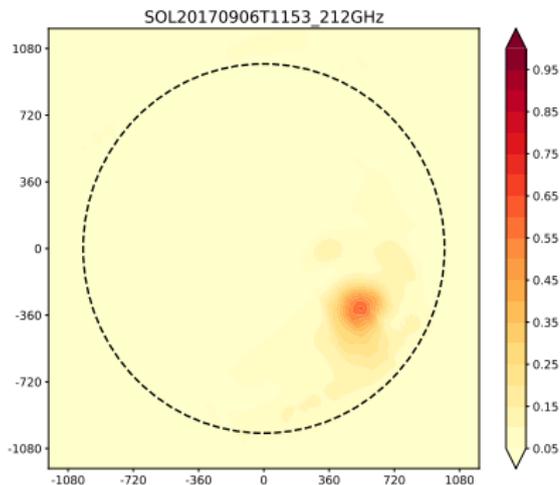


- ▶ Blue and pink curves are the SXR time derivatives.
- ▶ Black curve is 50-100 keV.

# Origin of 212 GHz emission

- ▶ First event ever without impulsive phase detected.
- ▶ Thermal bremsstrahlung
- ▶ No evidence of synchrotron
- ▶ No evidence of trapping
- ▶ **Thermal counterpart of the Neupert effect.**

# First ever image of a 212 Ghz flare?



A SST map 212 Ghz during the great X9.3 flare SOL2017-09-06T12:00