

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

Programa de Pós-Graduação em
Ciências e Aplicações Geoespaciais - CAGE

DENIS PAVEL CABEZAS HUAMÁN

ESTUDO EM MÚLTIPLAS FREQUÊNCIAS DA BAIXA
ATMOSFERA SOLAR DURANTE EXPLOSÕES

São Paulo - Brasil

2015

DENIS PAVEL CABEZAS HUAMÁN

**ESTUDO EM MÚLTIPLAS FREQUÊNCIAS DA
BAIXA ATMOSFERA SOLAR DURANTE
EXPLOSÕES**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geo-espaciais (CAGE), da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geoespaciais.

Orientador: Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin

H874e Huamán, Denis Pavel Cabezas

Estudo em múltiplas frequências da baixa atmosfera solar durante explosões / Denis Pavel Cabezas Huamán - 2015.
84f.:il., 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciências e Aplicações Geoespaciais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.

Orientação: Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin

Bibliografia: f. 80-83

1. Explosões solares. 2. Regiões ativas. 3. Cromosfera. 4. Coroa. 5. Rádio. 6. Espectros em rádio. 7. Infravermelho. 8. H-alpha. 9. Luz branca. 10. Raios X duros. 11. Raios X moles. 12. Ultravioleta. 13. Ultravioleta extremo. I. Título.

CDD 523.75

Denis Pavel Cabezas Huamán

**ESTUDO EM MULTIPLAS FREQUÊNCIAS DA BAIXA
ATMOSFERA SOLAR DURANTE EXPLOSÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Aplicações Geoespaciais.

Aprovada em

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin - Orientador
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Caius Lucius Selhorst
Universidade do Vale do Paraíba



Profa. Dra. Adriana Benetti Marques Valio
Universidade Presbiteriana Mackenzie

*A B. Santiago,
donde quiera que estés viejo amigo.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Jean-Pierre Raulin, meu orientador, pela oportunidade de trabalhar com ele, já que devido a seu particular modo de trabalho, aprendi muito relacionado ao mundo da pesquisa no campo da Física Solar. Ao Prof. Dr. Pierre Kaufmann, diretor do CRAAM, à Profa. Dra. Adriana Valio, coordenadora do Programa de Pós-Graduação (CAGE).

Agradeço também à Dra. Rositsa Miteva, pelos seus conselhos e comentários úteis durante o desenvolvimento deste trabalho.

Um especial agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e por fazer possível a realização do curso de pós-graduação.

À Dra. Marilu Luoni, do Instituto de Astronomía y Física del Espacio, Universidad de Buenos Aires, e ao pessoal do Observatorio Félix Aguilar, pela disponibilidade dos dados de $H\alpha$ do telescópio HASTA, utilizados neste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer aos professores, membros e amigos do CRAAM, pelo apoio que recebi durante o desenvolvimento do curso de mestrado.

Resumo

O trabalho tem como objetivo estudar as perturbações da baixa atmosfera solar produzidas pelas explosões solares, usando observações em $H\alpha$, 30 THz ($10 \mu m$), UV/EUV, raios X e uma ampla faixa de emissões em ondas de rádio (microondas, milimétrica, submilimétrica); com o propósito de determinar a natureza dos processos físicos envolvidos. Este conjunto de dados multiespectrais nos permitiu (i) analisar os diferentes aspectos das explosões tanto na fase impulsiva como gradual, (ii) determinar a origem da emissão em rádio durante a fase gradual, e conseqüentemente (iii) entender melhor os mecanismos de aceleração das partículas. Os dados em $H\alpha$ e 30 THz foram fornecidos pelo sistema de aquisição de dados com alta resolução temporal, instalado nos observatórios OSM¹ e CASLEO², adicionalmente dados do telescópio HASTA (H-Alpha Solar Telescope for Argentina) instalado no observatório Oafa³. Enquanto as observações em rádio, os dados foram do rádio polarímetro POEMAS (Polarization Emission of Millimeter Activity at the Sun) nas frequências de 45 e 90 GHz, do telescópio SST (Sub-millimeter Solar Telescope) nas frequências 212 e 405 GHz, ambos instalados no CASLEO. Dados na faixa de microondas (0,2-15 GHz) obtidos pela rede RSTN (Radio Solar Telescope Network). Além disso, foram considerados observações do Sol obtidas pelos satélites RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), Fermi e GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) para raios X, e dos instrumentos AIA (Atmospheric Imaging Assembly), HMI (Helioseismic and Magnetic Imager), a bordo do satélite SDO (Solar Dynamics Observatory), respectivamente.

¹Observatório Solar Mackenzie

²Complejo Astronómico El Leoncito

³Observatorio Astronómico Félix Aguilar

Abstract

The project aims to study the disturbances (responses) of the low solar atmosphere caused by solar flares, using $H\alpha$, 30 THz ($10 \mu m$), UV/EUV, soft and hard X-rays observations, and a wide range of radio waves emissions (microwaves, millimeter, sub-millimeter). This set of multispectral data enabled us to (i) examine in detail various aspects of the phenomena, (ii) determine the origin of the radio emission during the gradual phase, and therefore (iii) understand the mechanism of the particles acceleration. The data we used for the completion of this study are based on $H\alpha$ and 30 THz ($10 \mu m$) observations, made by the high cadence flare imaging system installed at OSM⁴ and CASLEO⁵ observatories, additionally data from HASTA (H-Alpha Solar Telescope for Argentina) telescope installed at OAFA⁶ observatory. In the sub-millimeter and millimeter domain at 212, 405 GHz and 45, 90 GHz, were from SST (Solar Sub-millimeter Telescope) and from POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun) solar radio telescopes, respectively. Complementary radio observations in the microwave range (0.2-15 GHz) from RSTN (Radio Solar Telescope Network) were considered. In addition, solar observations obtained by RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), Fermi and GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) satellites in X-ray channels, and from AIA (Atmospheric Imaging Assembly) and HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) instruments, onboard the SDO (Solar Dynamics Observatory) satellite, respectively.

⁴Observatório Solar Mackenzie

⁵Complejo Astronómico El Leoncito

⁶Observatorio Astronómico Félix Aguilar

Sumário

1. Introdução Geral	14
1.1. Explosão solar	14
1.1.1. Mecanismos de emissão	16
1.1.2. Explosões solares observadas em ondas de rádio	18
1.1.3. Explosões solares em $H\alpha$ e 30 THz	21
2. Objetivos da Dissertação	24
3. Tratamento e Calibração de Dados - Metodologia	25
3.1. Redução e calibração dos dados em 30 THz e $H\alpha$	26
3.1.1. Procedimento	26
3.1.2. Cálculo do fluxo em 30 THz	30
3.2. Calibração dos dados em rádio	31
3.3. Dados complementares	32
3.4. Determinação do fluxo térmico em rádio a partir dos dados de GOES	34
4. Análise de Eventos	36
4.1. Evento do 13 de Março de 2012	36
4.1.1. Observações	37
4.1.2. Evolução morfológica do evento	37
4.1.3. Distribuição das fontes de emissão	38
4.1.4. Evolução temporal em 30 THz, $H\alpha$, e luz branca	40
4.1.5. Evolução temporal e espectral em rádio	42
4.2. Evento do 13 de Maio de 2013	45
4.2.1. Observações	45
4.2.2. Evolução temporal e espectral em rádio	45

	8
4.2.3. Fontes de emissão em UV, luz branca e raios X duros	47
4.3. Evento do 29 de Março de 2014	50
4.3.1. Observações	50
4.3.2. Fase térmica e não-térmica da explosão solar	50
4.3.3. Espectros em rádio	51
4.3.4. Fontes de emissão em $H\alpha$ e Raios X	54
4.4. Evento do 1 de Agosto de 2014	56
4.4.1. Observações	56
4.4.2. Fotometria em 30 THz, $H\alpha$ e UV/EUV	56
4.4.3. Evolução morfológica em 30 THz, $H\alpha$, e UV/EUV	58
4.4.4. Evolução temporal e fontes de emissão em 30 THz	59
5. Resultados e Discussões	62
5.1. Resultados observacionais	62
5.2. Fase impulsiva dos eventos	69
5.3. Fase gradual dos eventos	70
5.4. Origem da emissão 30 THz	75
6. Conclusões e Perspectivas	78

Lista de figuras

1.1.	Esquema da evolução temporal de uma explosão solar em diferentes comprimentos de onda. No visível ($H\alpha$), raios X moles, EUV, rádio e raios X duros. (Fonte: Benz, 2002.)	15
1.2.	Espectros em rádio na faixa decímetrica-submilimétrica, obtido durante o evento do dia 6 de Dezembro de 2006. Na faixa submilimétrica (212 e 405 GHz), pode-se observar a componente crescente. (Fonte: Kaufmann et al., 2009)	19
1.3.	Espectros em rádio observados durante a fase gradual prolongada do evento de 27 de Outubro de 2003 (asteriscos com as barras de erro). As linhas tracejadas são espectros térmicos obtidos a partir da temperatura (T) e a medida de emissão (EM) do GOES, enquanto que as linhas contínuas são espectros derivados considerando dois modelos de temperatura. (Fonte: Trottet et al., 2011)	20
3.1.	Painel esquerdo: imagem em $H\alpha$ ajustada a um círculo. A cruz vermelha indica o centro do disco solar calculado, enquanto que as cruzes brancas localizadas no limbo são os pontos utilizados para o ajuste. Painel direito: Mesmo procedimento de ajuste aplicado no painel esquerdo, mas para uma imagem em 30 THz. A caixa maior sobre a imagem indica a região de interesse selecionada, enquanto a caixa menor que contém uma mancha solar é o ponto de referência, a partir do qual serão determinados os <i>offsets</i> para o alinhamento.	29
4.1.	Evolução morfológica em diferentes comprimentos de onda da explosão solar do dia 13 de Março, 2012. Da esquerda-direita: 30 THz, $H\alpha$, luz branca, e EUV (304 Å). A seta na imagem 30 THz às 17:23:08 UT indica o aumento da emissão neste comprimento de onda, enquanto as fontes identificadas em $H\alpha$ e luz branca estão etiquetadas com S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , e WL_1 , WL_2 , respectivamente.	38

- 4.2. Distribuição espacial das fontes de emissão durante o pico do evento. $H\alpha$ (vermelha; às 17:23:38 UT), luz branca (amarela; às 17:23:00 UT), e 30 THz (verde; às 17:22:44 UT) superpostas no magnetograma do instrumento SDO/HMI obtida às 17:13:15 UT. 40
- 4.3. Evolução temporal em 30 THz da explosão solar do 13 de Março de 2012, juntamente com os perfis em luz branca (WL), e raios X duros na faixa 500-2000 keV. Além disso foram plotadas as evoluções temporais das fontes de emissão $H\alpha$ (S_1 , S_2 , S_3 e S_4). 41
- 4.4. Densidade de fluxo solar em microondas (0,24 - 8,80 GHz), milimétrico (45 e 90 GHz) e submilimétrico (212 GHz), observado durante o evento do dia 13 de Março de 2012. As linhas verticais e os numeros (1-4) indicam os horários em que foram obtidos os espectros. 43
- 4.5. Espectros em rádio obtidos durante as diferentes etapas da explosão solar do dia 13 de Março de 2012. No painel inferior direito além do espectro observado, foram plotados os espectros derivados (linha contínua e tracejada) a partir das observações do GOES, considerando uma fonte isotérmica de 30'' e 40'' de diâmetro, respectivamente. 44
- 4.6. Evolução temporal do evento do dia 13 de Maio de 2013. Painel superior: em 45 e 90 GHz do rádio polarímetro POEMAS, em 212 GHz do radiotelescópio SST, juntamente com o fluxo de raios X moles do GOES. Painel inferior: perfis temporais em microondas na faixa 1,41-15,4 GHz da rede RSTN. As linhas verticais e os numeros (1-6) indicam os horários em que foram obtidos os espectros. . . . 46
- 4.7. Espectros em rádio observados durante as diferentes etapas da explosão solar. As linhas contínuas e tracejadas são os espectros calculados para fontes isotérmicas, a partir das observações do GOES. 47
- 4.8. Imagens com escala de cores invertidas, exibindo o material ejetado durante a fase impulsiva (painel esquerdo), fontes WL_1 , WL_2 em luz branca (painel central) no máximo do evento, e o arco com restos do material ejetado (painel direito) durante a fase gradual. Adicionalmente na imagem de luz branca foram plotadas as emissões de raios X duros como contornos com níveis: 65, 75, 85, e 96 %, da máxima intensidade. 48

- 4.9. Contagem de raios X duros na faixa de 25-7000 keV, observado pelo satélite RHESSI. Para efeitos de comparação foram incluídas emissões em luz branca (WL_1+WL_2), UV (1700 Å), dos instrumentos HMI e AIA a bordo do satélite SDO. 49
- 4.10. Evolução temporal da explosão solar em 212 GHz observada pelo radiotelescópio SST, juntamente com os perfis temporais na faixa de microondas (1,41-15.4 GHz) da rede RSTN e o fluxo de raios X moles do satélite GOES. As linhas verticais e os números (1-8) indicam os horários em que foram obtidos os espectros. . . . 51
- 4.11. Etapa inicial da explosão solar em raios X moles, ocorrida o dia 29 de Março de 2014. Para fins de comparação, o círculo tracejado de 40" de arco de diâmetro representa o tamanho da fonte coronal considerado no modelo para simular os espectros térmicos. 52
- 4.12. Espectros em rádio observados no pico (dois painéis superiores) e durante a fase gradual prolongada do evento. As linhas tracejadas (preta) indicam os espectros derivados a partir das observações do GOES, supondo uma fonte isotérmica de 30" de diâmetro, enquanto as linhas contínuas (verdes) representam o espectro para uma fonte de 40" de diâmetro. 53
- 4.13. Perfis temporais das cinco fontes identificadas em $H\alpha$ durante o evento de 29 de Março de 2014, observado pelo telescópio HASTA. As posições das fontes estão indicadas com números (1-5) no painel esquerdo da Figura 4.14. 54
- 4.14. Painel esquerdo: Imagem em $H\alpha$ durante o pico do evento, os números indicam a posição das fontes identificadas. Os contornos (níveis: 75 %, 85 % e 95 %) são as fontes de emissão em raios X duros, nos canais: 50-100 keV (laranja) e 100-300 keV (azul). Painel direito: Evolução temporal das fontes S1 e S5 de $H\alpha$ em relação as fontes de emissão de raios X duros. 55

- 4.15. Painel esquerdo: Imagem em 30 THz no pico do evento. A caixa vermelha indica a região onde foi calculado o excesso da emissão, a caixa azul e a preta delimitam as regiões consideradas para a subtração do background. Painel central: Imagem em $H\alpha$, a caixa ciana corresponde à região S_0 , as marcas '+' azul, vermelha, e verde, são as posições em torno das quais foram calculadas as intensidades de S_1 , S_2 , e S_3 , respectivamente. A caixa branca é a região considerada como Sol calmo. Painel direito: Imagem em 1700 Å, a caixa ciana e a branca delimitam I_0 e a região do Sol calmo respectivamente, enquanto que os números indicam as fontes identificadas. 57
- 4.16. Evolução morfológica da explosão solar do dia 1 de Agosto de 2014, em 30 THz, $H\alpha$, 1700 e 304 Å. 59
- 4.17. Evolução temporal do evento de 1 de Agosto de 2014 em 30 THz, e rádio (15.4 GHz). Para efeitos de comparação também foi incluída a derivada no canal (1.0-8.0 Å) do GOES. 60
- 4.18. Mapa de contornos das fontes identificadas em 30 THz (F_1 lado este, F_2 lado oeste) e $H\alpha$, superpostas no magnetograma do dia 1 de Agosto de 2014 obtida às 14:47:09 UT. 61
- 5.1. Evolução temporal da explosão solar do dia 13 de Março de 2012, observada em múltiplos comprimentos de onda. A linha vertical superposta no perfil temporal de 30 THz, indica o excesso de temperatura (Kelvin) observado durante o máximo da explosão. 65
- 5.2. Evolução temporal da explosão solar do dia 13 de Maio de 2013, observada em múltiplos comprimentos de onda. As linhas verticais ressaltam as pulsações observadas durante a fase impulsiva do evento. 66
- 5.3. Evolução temporal em múltiplos comprimentos de onda, do evento do dia 29 de Março de 2014. Do painel inferior ao superior: excesso da densidade de fluxo em 212 GHz, perfil temporal da soma de todas as fontes $H\alpha$ com o perfil de raios X moles, evolução temporal em 1700 e 304 Å, e perfis temporais das fontes S_1 e S_5 de $H\alpha$ com as evoluções temporais de raios X duros nos canais 100-300 keV e 50-100 keV, respectivamente. 67

- 5.4. Evolução temporal em múltiplos comprimentos de onda do evento de 1 de Agosto de 2014. As duas linhas verticais em torno das 14:47 UT indicam os instantes do duplo pico observado em 30 THz. 68
- 5.5. Espectro em rádio observado durante a fase gradual do evento 29 Março de 2014 (triângulos com as barras de erro). A linha tracejada (preta) representa o espectro simulado obtido a partir das observações do GOES para uma fonte quente, enquanto que a linha contínua (verde) é o espectro simulado para uma fonte fria. Em ambos casos foi considerada uma área de 30'' de arco de diâmetro. A linha vermelha é a soma de fluxos de fontes frias mais fluxos de fontes quentes. 73
- 5.6. Mesmo que a Figura (5.5) mas para o evento de 13 de Maio do 2013. Neste caso foi considerada uma área de emissão de 40'' de arco de diâmetro. 74
- 5.7. Mesmo que as Figuras (5.5 e 5.6) mas para o evento de 13 de Março do 2012. Neste caso foi considerada uma área de emissão de 30'' de arco de diâmetro. . . 74
- 5.8. Painel superior: Opacidade (linhas tracejadas) e função de contribuição (linhas contínuas) em função da altura (0 km é fotosfera). Painel inferior: Temperatura da atmosfera (linhas tracejadas) e função de contribuição em função da altura. Para ambos painéis, a cor vermelha representa o resultado do modelo FLA, enquanto a cor preta representa o modelo C7. 77

Capítulo 1

Introdução Geral

1.1. Explosão solar

A explosão solar (solar flare) é um dos fenômenos mais energéticos, complexos, e de múltiplas facetas, que ocorrem na atmosfera solar associadas com as regiões ativas. A explosão acontece repentinamente liberando quantidades de energia da ordem de 10^{26} a 10^{32} ergs, num tempo muito curto (100 a 1000 segundos) (Bhatnagar et al., 2005). A dissipação de energia resulta na presença de elétrons e prótons acelerados até altas energias (dezenas ou centenas de MeV), produzindo aquecimento e movimento do plasma. Estes elétrons e prótons emitem ao longo de uma ampla faixa da radiação electromagnética estendendo-se desde rádio, passando pelo infravermelho, visível, ultravioleta e ultravioleta extremo (UV/EUV), raios X até os raios γ . Tais radiações apresentam características particulares e evoluem em diferentes escalas temporais.

Durante a explosão solar são observadas as fases precursora, impulsiva e gradual, onde diferentes tipos de emissões são produzidos, sendo observadas em microondas, milimétrico/submilimétrico (devido à emissão giro-síncrotron produzidas pelo espiralamento dos elétrons), raios X duros e raios- γ (pela precipitação de partículas não-térmicas), rádio em baixas frequências (devido à radiação de plasma), raios X moles (devido à emissão térmica e linhas atômicas), visível e emissão EUV (pelo plasma térmico quente) (Figura 1.1). As emissões durante a fase impulsiva e gradual estão associadas com as componentes não-térmicas e térmicas da explosão respectivamente, que são caracterizadas através dos espectros em rádio.

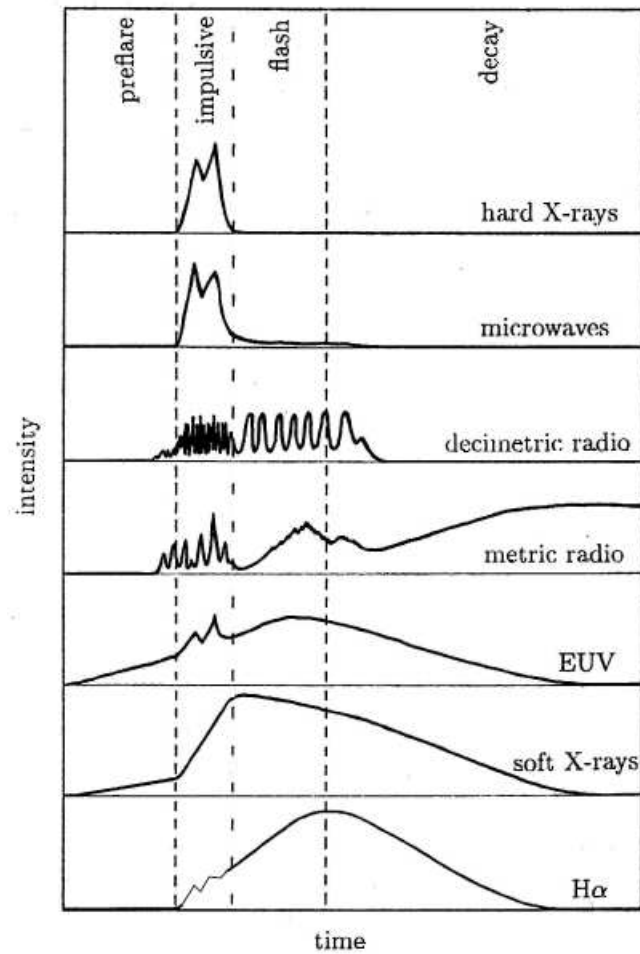


Figura 1.1: Esquema da evolução temporal de uma explosão solar em diferentes comprimentos de onda. No visível ($H\alpha$), raios X moles, EUV, rádio e raios X duros. (Fonte: Benz, 2002.)

Assim, observações simultâneas das explosões solares em vários comprimentos de ondas fornecem informações acerca do plasma, partículas energéticas e campo magnético. Emissões simultâneas da explosão em raios X (duros e moles), $H\alpha$ (6563 Å), UV/EUV, microondas e milimétrico foram estudadas por vários autores (Kampfer et al., 1983; Bastian et al., 1992; Silva et al., 1996; Trotter et al., 2000; Wang et al., 2000). Uma atenção especial tem sido dada à comparação entre as emissões em rádio, raios X duros e $H\alpha$, pelo fato da similaridade na evolução temporal. Para determinar a relação entre tais emissões, são necessárias observações em $H\alpha$ com alta resolução temporal, a fim de obter informações mais confiáveis dos mecanismos físicos envolvidos. É desejável também ter uma alta resolução espacial, já que algumas regiões da explosão não refletem necessariamente os mesmos processos.

1.1.1. Mecanismos de emissão

As observações solares em rádio são fortemente limitadas pelas condições atmosféricas, no entanto, são sensíveis a quase todas as características da atmosfera solar, cobrindo uma ampla faixa de temperatura, isto é, a partir da temperatura mínima (5000 K), até a emissão de plasma gerada durante as explosões solares ($> 10^7$ K) (White, 2002).

Três diferentes mecanismos de emissão contribuem para o fluxo solar em rádio, o qual um deles é dominante dependendo da frequência de observação e a atividade solar. O primeiro é a emissão térmica *free-free* ou também conhecida como *bremsstrahlung* térmica. Esta emissão é gerada quando elétrons térmicos livres sofrem colisões de longo alcance com outras partículas (íons), alterando suas velocidades e trajetórias. Este tipo de emissão está sempre presente mesmo quando os outros estão ausentes e é particularmente efetiva em altas densidades.

Na presença de campos magnéticos outro mecanismo é a giro-emissão, definida pela frequência com que um elétron gira (giro-frequência) em torno das linhas do campo magnético sob a força de Lorentz (Raulin & Pacini, 2005). A aceleração associada com o movimento em forma de espiral em torno das linhas do campo magnético faz com que o elétron emita radiação, isto é, o processo giromagnético. Tal processo fornece opacidade em frequências que são múltiplos inteiros (harmônicos) da giro-frequência dos elétrons (White & Kundu, 1992). A giro-frequência de um elétron num campo magnético B está definida por:

$$f_B = \frac{\Omega_e}{2\pi} = \frac{e|B|}{2\pi m_e c} \approx 2,8 \times 10^6 |B| \text{ [Hz]} \quad (1.1)$$

sendo:

f_B = frequência de giro do elétron (Hz)

Ω_e = frequência fundamental do elétron

$|B|$ = intensidade do campo magnético (G)

e = carga do elétron ($4,8 \times 10^{-10} \text{ g}^{1/2} \text{ cm}^{3/2} \text{ s}^{-1}$)

m_e = massa do elétron ($9,11 \times 10^{-28} \text{ g}$)

c = velocidade da luz ($3 \times 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$)

O mecanismo giro-magnético é predominante em regiões de campos magnéticos de intensa concentração e esta relacionado com o movimento dos elétrons. Para elétrons não-relativísticos a emissão é chamada “cíclotron”, para elétrons moderadamente relativísticos a emissão é chamada “giro-síncrotron”, e por fim, para elétrons altamente (ultra) relativísticos o mecanismo de emissão é “síncrotron”. O mecanismo “cíclotron” é responsável pela emissão coronal que ocorre acima das manchas solares, enquanto a “giro-síncrotron” predomina em altas frequências, associadas com as explosões solares. Já a emissão “síncrotron” é importante no diagnóstico de partículas aceleradas durante as explosões.

Tanto a emissão *bremsstrahlung* térmica como a giro-emissão são processos “incoerentes”, o que significa que os elétrons atuam de forma independente para produzir radiação, não existe uma relação de fase entre os fótons emitidos. Portanto a temperatura de brilho observada está relacionada com a temperatura cinética das partículas. Porém, os elétrons podem ser acelerados em fase, desencadeada por uma onda, resultando em um movimento coletivo, a emissão para tal processo é chamado emissão “coerente”. A emissão coerente pode apresentar uma temperatura de brilho aproximadamente da ordem de 10^{15} K (Warmuth & Mann, 2005), que é principalmente devido à emissão de plasma.

A emissão de plasma (plasma emission), está associada com as oscilações dos elétrons no meio ionizado. Isto implica na produção de ondas eletrostática de Langmuir, e a posterior conversão destas ondas em ondas electromagnéticas com frequência de plasma (f_p) ou em seus harmônicos (White, 2002). O valor numérico da frequência de plasma eletrônica pode ser escrita em termos da densidade de elétrons, isto é:

$$f_p = 9 \times 10^{-3} \sqrt{n_e} [\text{cm}^{-3}] [\text{MHz}] \quad (1.2)$$

Onde:

f_p = frequência de plasma (MHz)

n_e = densidade de elétrons (cm^{-3})

A frequência de plasma constitui um meio para o diagnóstico da densidade numérica de elétrons, nas imediações das fontes de emissão de uma explosão. Por ser um mecanismo

coerente, a intensidade da emissão de plasma não está relacionada com a energia dos elétrons que produz a emissão (Bastian et al., 1998).

A presença de mais de um mecanismo de emissão no Sol, faz com que as diferentes frequências sejam produzidas em diferentes profundidades da atmosfera solar, isso dependerá das condições locais. Uma importante característica da emissão solar em rádio é que todas as frequências tornam-se opticamente espessas em algum ponto da atmosfera solar. Por outro lado, os comprimentos de ondas em rádio encontram-se no limite de Rayleigh-Jeans ($h\nu \ll kT$), portanto o fluxo de rádio é proporcional à temperatura de brilho.

1.1.2. Explosões solares observadas em ondas de rádio

A importância das ondas de rádio na astronomia solar baseia-se em dois aspectos: (*i*) a maioria dos comprimentos de onda de rádio (a partir de alguns cm até ~ 10 m) atravessam a atmosfera terrestre, e (*ii*) o espectro em rádio é extremamente variável, o que indica a presença de diferentes mecanismos de emissão durante uma explosão solar.

Nesta seção faremos uma revisão sobre as explosões solares observadas em rádio, com ênfase na faixa milimétrica e submilimétrica. Esta última faixa, exige uma nova compreensão acerca dos processos de aceleração das partículas até altas energias durante as explosões.

As explosões solares emitem fortemente em comprimentos de ondas de rádio (Bastian et al., 1998). Elétrons são acelerados até atingir altas energias da ordem de algumas dezenas de MeVs, e tendem a formar feixes sujeitos à instabilidade de plasma, capazes de produzir excessos na temperatura de brilho. Durante uma explosão a emissão solar pode tornar-se muito intensa em ondas de rádio, cuja densidade de fluxo pode exceder 10^5 sfu (solar flux units, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), detetáveis na faixa de 1-100 GHz (Krucker et al., 2013). O mecanismo de emissão é associado à emissão giro-síncrotron incoerente de elétrons com uma distribuição de energia seguindo uma lei de potência, que são acelerados em torno das linhas do campo magnético cuja intensidade situa-se tipicamente entre 100-1000 gauss (G).

Em frequências acima da faixa de microondas, o fluxo da radiação giro-sincrotrônica é decrescente e compete com os fluxos oriundos do Sol calmo e das regiões ativas, os quais aumentam com a frequência ($f_\nu \propto \nu^2$). As emissões não-térmicas em altas frequências tornam-se cada vez menos detectáveis, e provavelmente são suprimidas pela forte atenuação térmica *free-free* (White, 2002), no entanto, em alguns casos os espectros em rádio exibem uma componente inesperada apresentando uma inclinação (slope) positiva (Figura 1.2), subindo para o domínio terahertz (THz) (por exemplo: Kaufmann et al., 2004; Lüthi et al., 2004a; Silva et al., 2007; Kaufmann et al., 2009).

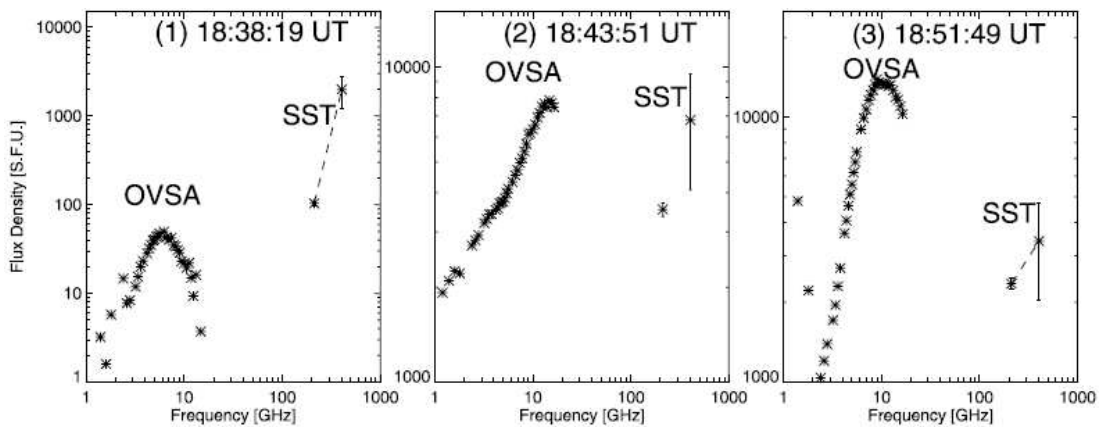


Figura 1.2: Espectros em rádio na faixa decimétrica-submilimétrica, obtido durante o evento do dia 6 de Dezembro de 2006. Na faixa submilimétrica (212 e 405 GHz), pode-se observar a componente crescente. (Fonte: Kaufmann et al., 2009)

Kaufmann et al. (2004), apresentaram os resultados da análise de uma explosão na faixa submilimétrica (212 e 405 GHz), classificada como X17 na escala de raios X moles, ocorrida o dia 4 de Novembro de 2003. O espectro obtido foi interpretado como: para o fluxo abaixo de 212 GHz parece ser parte do típico espectro giro-síncrotron decrescente, enquanto as emissões em 212 e 405 GHz poderiam estar associadas com um mecanismo completamente diferente, devido a exibirem um aumento da densidade de fluxo com a frequência. A característica de recuperação (upturn), aumento da densidade de fluxo com a frequência, é chamada de componente THz.

Vários mecanismos e processos têm sido propostos para explicar a componente THz. Estes são: espalhamento Compton inverso (Kaufmann et al., 1986), radiação síncrotron incoerente durante o fenômeno de *micro-bunch* (Kaufmann & Raulin, 2006; Klopff et al., 2014), emissão giro-síncrotron de elétrons e/ou pósitrons relativísticos (Silva et al., 2007;

Trottet et al., 2008), emissão térmica *free-free* (Trottet et al., 2008), radiação Cherenkov (Fleishman & Kontar, 2010).

Fase impulsiva e gradual na faixa milimétrica e submilimétrica

As emissões observadas na faixa milimétrica e submilimétrica provenientes das explosões solares são produzidas pela aceleração de elétrons energéticos, e pelo material cromosférico aquecido devido à deposição de energia dos prótons e elétrons não-térmicos nas baixas camadas da atmosfera solar (White & Kundu, 1992).

Na fase impulsiva da explosão, a emissão sincrotrônica é produzida pela radiação de elétrons energéticos (com dezenas de MeV) que espiralam em torno das linhas dos campos magnéticos coronais. Em geral os eventos acima de 200 GHz apresentam uma fase impulsiva que têm uma duração de poucos minutos. No entanto, algumas vezes essa fase precede a uma componente lenta e de longa duração chamada fase gradual. Durante o período da fase gradual, em alguns casos os espectros em rádio apresentam uma tendência a serem planos (flat spectrum) em frequências entre 15 e 200 GHz aproximadamente (Figura 1.3). No entanto, acima de 200 GHz exibem um aumento na densidade de fluxo, diferente do típico espectro giro-síncrotron (por exemplo: Lüthi et al., 2004; Trottet et al., 2011).

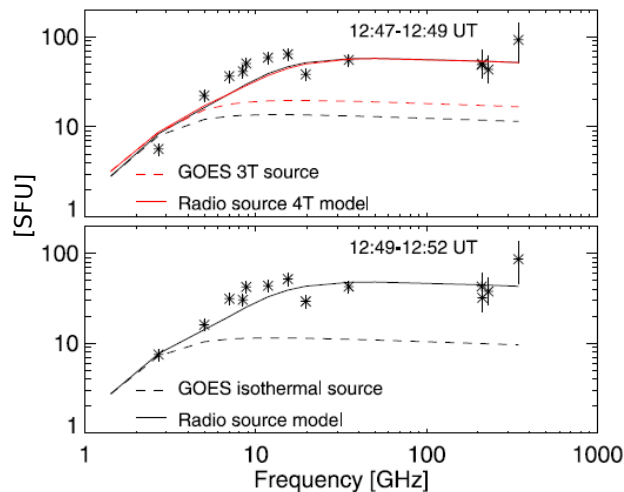


Figura 1.3: Espectros em rádio observados durante a fase gradual prolongada do evento de 27 de Outubro de 2003 (asteriscos com as barras de erro). As linhas tracejadas são espectros térmicos obtidos a partir da temperatura (T) e a medida de emissão (EM) do GOES, enquanto que as linhas contínuas são espectros derivados considerando dois modelos de temperatura. (Fonte: Trottet et al., 2011)

Os espectros planos foram interpretados como sendo produzidos pelas emissões *bremss-trahlung* térmicas ou *free-free*, provenientes da coroa para frequências abaixo de 200 GHz, enquanto que o excesso da emissão medida em altas frequências surge a partir de emissões *bremss-trahlung* térmicas desde a baixa atmosfera solar (por exemplo desde a cromosfera). Portanto, tais emissões provenientes da cromosfera e da coroa poderiam ser responsáveis por esse tipo de espectro, particularmente na fase de decaimento da explosão solar.

Recentemente, Trottet et al. (2011) discutiram extensamente a emissão térmica *free-free* observada na faixa 200-400 GHz durante a explosão de 27 de Outubro de 2003. Os autores mostraram que a densidade de fluxo em 345 GHz na fase gradual foi significativamente maior do que a densidade de fluxo na fase impulsiva, e os espectros obtidos durante a fase gradual estendida diferem do típico espectro giro-síncrotron e apresentam uma forma plana (Figura 1.3). Usando observações da cromosfera com alta resolução em $H\alpha$ e UV (1600 Å) e a densidade de fluxo (derivada a partir da temperatura (T) e a medida de emissão (EM) do GOES, para uma fonte isotérmica), os autores concluíram que a emissão térmica foi originada devido à contribuição de duas fontes: uma componente opticamente fina dos arcos coronais com uma temperatura da ordem de $1 - 3 \times 10^6$ K, e outra componente opticamente espessa proveniente de regiões cromosféricas com temperaturas da ordem de $10^3 - 10^5$ K.

1.1.3. Explosões solares em $H\alpha$ e 30 THz

As observações em $H\alpha$, com alta resolução temporal ($<1s$), são uma importante ferramenta de diagnóstico para estudar a resposta da cromosfera às explosões solares. A análise da morfologia e sincronismo da fase impulsiva e gradual no óptico (usualmente $H\alpha$), em relação às emissões de rádio (milimétrico/submilimétrico) e de raios X duros, fornece um teste útil, através do qual pode-se discriminar a origem de tais emissões, ou seja, se foram produzidas pela mesma população de elétrons. O sincronismo entre os perfis temporais de $H\alpha$ e raios X duros, poderiam também ser usados para o estudo dos mecanismos de transporte de energia durante explosões solares (cf. Trottet et al., 2000).

Emissão em $H\alpha$

Observações e simulações mostraram que as respostas temporais da emissão $H\alpha$ ao aquecimento devido aos feixes de partículas (beam heating), surgem a partir de três diferentes processos físicos (Canfield & Gayley, 1987), cuja relativa importância varia ao longo dos perfis temporais. Estes processos são: (i) resposta da temperatura, (ii) resposta da ionização e (iii) resposta hidrodinâmica (Canfield & Gayley, 1987; Trotter et al., 2000). Os dois primeiros processos são responsáveis pelas rápidas respostas temporais. Tipicamente menor que 0,1 segundos para a resposta da temperatura a qual apresenta uma maior amplitude na linha central $H\alpha$ (6563 Å), já a resposta da ionização é aproximadamente 0,5 segundos sendo evidente o deslocamento para o azul da linha central $H\alpha$ (blue wing). A resposta hidrodinâmica, que está relacionada com a formação e condensação cromosférica, apresenta uma escala temporal mais prolongada com relação aos dois primeiros processos e é mais proeminente o deslocamento para o vermelho da linha central $H\alpha$ (red wing).

A resposta da temperatura tende a ser impulsiva, já que a intensidade do feixe aquecido (beam heating) é extremamente intenso comparado com os níveis da pre-erupção (pre-flare). Originalmente o material da cromosfera é altamente neutro, tornando-se ionizado devido à ação do feixe aquecido. Neste ponto a abundante ionização atua como dissipadora de energia. Devido à energia dissipativa ser aproximadamente 10 vezes maior do que a energia térmica E_{th} (13,6 eV corresponde a 10^5K), a temperatura aumentara lentamente até que a ionização seja predominante (saturação).

O efeito da ionização nas regiões mais profundas da cromosfera é observado nos perfis laterais (wings) da linha central $H\alpha$ (especialmente uma intensa amplificação no sinal “blue wing”), isto é devido ao papel dos elétrons livres no processo de ionização e recombinação. Isto mostra que o excesso da emissão vem principalmente da região opticamente fina na baixa cromosfera, onde a densidade de elétrons (n_e) atinge seu máximo ($\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$) (Canfield & Gayley, 1987).

A resposta hidrodinâmica está relacionada com a expansão e condensação do material cromosférico, devido aos gradientes de pressão que são gerados pelo aumento súbito da temperatura, o que provoca a “evaporação” do material. A evaporação cria uma pressão excessiva que desloca o material em direção da coroa, contrariamente se produz uma força

na direção da cromosfera causando um movimento descendente do material. O movimento deste denso material é chamado de “condensação cromosférica” e tem implicações na emissão $H\alpha$, particularmente produz um aumento na amplitude do sinal “red wing”.

Por isso, em muitos casos as observações em $H\alpha$ não são somente realizadas na linha central, mas também nos comprimentos de onda ligeiramente deslocadas chamados “wings”, os quais fornecem informações relacionadas ao desenvolvimento da explosão na cromosfera solar.

Emissão em 30 THz

Outra ferramenta importante para a análise das explosões solares são as observações no infravermelho contínuo distante (Far InfraRed continuum, 0,5 – 30 THz). Esta faixa de comprimento de onda que ainda não é bem explorada, fornece informação provavelmente da fotosfera e cromosfera (Trottet et al., 2013). A procura de emissão das explosões solares nas frequências THz foi motivada pela descoberta da componente espectral crescente em 405 GHz por Kaufmann et al. (2004). Provavelmente as características dos espectros crescente poderiam ser ainda mais proeminentes na faixa THz.

Emissões em THz durante uma explosão implicam em processos de aceleração de partículas até o limite relativístico, que ainda não têm explicações satisfatórias. Tal particular processo precisa de um profundo estudo e medições fotométricas/imagem no domínio THz. Os procedimentos anteriores, poderiam proporcionar novas evidências sobre o mecanismo de aceleração de partículas, a estrutura e dinâmica das explosões solares.

Capítulo 2

Objetivos da Dissertação

O objetivo deste trabalho é estudar a dinâmica (resposta) da baixa atmosfera solar durante explosões, através dos perfis temporais e espectros em rádio. Para isso vamos considerar observações em múltiplos comprimentos de onda, tais como: rádio (microondas, milimétrico, submilimétrico), visível ($H\alpha$, luz branca), 30 THz, ultravioleta e ultravioleta-extremo (UV/EUV), e raios X (duros e moles). Isso nos permitirá entender melhor a natureza dos processos físicos que estão envolvidos na fase impulsiva e gradual durante as explosões.

Capítulo 3

Tratamento e Calibração de Dados - Metodologia

Os sistemas de aquisição de dados de 30 THz e $H\alpha$ do CRAAM, instalados no observatório de CASLEO e no Observatório Solar Mackenzie (OSM), não possuem um sistema automático de redução e tratamento de dados. Devido à importância de ter um conjunto de dados bem calibrados para a análise dos eventos solares, foram desenvolvidas rotinas em IDL (Interactive Data Language) para resolver certas tarefas. Tais como: alinhamento das imagens, determinação da resolução espacial e a conversão dos dados brutos a um formato mais convencional (FITS: Flexible Image Transport System). Todos os procedimentos para o tratamento dos dados em 30 THz e $H\alpha$ são apresentados neste capítulo, como também uma descrição sobre o cálculo do excesso de fluxo a partir do dado de 30 THz. Por outro lado, é feita uma breve referência acerca dos dados em outros comprimentos de onda, e seus procedimentos de calibração.

Um dos objetivos é caracterizar a fase gradual das explosões através dos espectros, já que a emissão nessa etapa da explosão observada na faixa submilimétrica do espectro é provavelmente produzida pela contribuição tanto de fontes frias ($\sim 10^4$ K), proveniente da cromosfera, como das fontes extremamente quentes (> 1 MK), proveniente da coroa. No final deste capítulo é apresentado o procedimento para a determinação do fluxo em rádio a partir dos dados de GOES. Estes resultados são usados para simular espectros térmicos, e são comparados com os espectros observados.

3.1. Redução e calibração dos dados em 30 THz e $H\alpha$

Originalmente as observações em 30 THz e em $H\alpha$ são registradas como um cubo de imagens contendo 5 minutos de observação. Este é um modo conveniente para organizar os dados devido ao número elevado de registros de imagens (por exemplo, a uma taxa de amostragem de 10 quadros/segundo), no entanto, em modo de análise, algumas vezes é conveniente trabalhar com arquivos individuais (uma amostra). Os dados brutos têm como extensões: *serial* (*ser*) para $H\alpha$, *sequential* (*seq*) e (*avi*) para 30 THz. A este conjunto de dados chamaremos dados de “nível 0”.

3.1.1. Procedimento

Em geral a redução dos dados foi realizada em duas etapas: (a) alinhamento e geração de arquivos FITS, que contêm um bloco ou estrutura (header) com informações de certos parâmetros, e (b) correção do norte solar.

Existem dois modos para ler dados de “nível 0” sob IDL. A primeira opção é gerar arquivos individuais com extensão “Raw”, a partir do cubo original. Para fazer isso pode-se usar o software LucamRecorder e em seguida usar a função desenvolvida “rd_haraw”. A segunda opção é ler o cubo de dados diretamente em IDL com a rotina “rd_haser”, mas este último não é muito conveniente devido às limitações de memórias dos computadores. Exemplos da sintaxe:

```
> im=rd_haraw('F1668.Raw.gz',/compress)
> im=rd_haraw('F1668.Raw')
> help, im
IM   UINT = Array[640,480]
> im=rd_haser('Serial29.ser')
> help, im
IM   UINT = Array[640,480,1200]
```

No caso dos dados de 30 THz, em primeiro lugar o cubo foi convertido em arquivos individuais com extensão “bmp”. Na plataforma Linux, isto pode ser feito usando o programa “ffmpeg”.

Exemplo, usando o terminal:

```
ffmpeg -i [nome-do-arquivo].avi frame%.bmp
```

A linha de comando anterior gerará arquivos individuais com extensão “bmp”, de modo que a leitura dos dados sob IDL será:

```
> img0=read_bmp('frame1.bmp')
> img1=reform(img0[0,*,*],/overwrite)
> help,img1
IMG1   BYTE = Array[352,240]
```

(a) Alinhamento e geração de arquivos FITS

A idéia principal para o alinhamento é ajustar um círculo no limbo das imagens parciais do disco solar em 30 THz e em H α . Para o ajuste dos dados foi construída a rotina “adjust_circle” que requer da função “fit_circle” disponível nos pacotes de *solarsoft* (SSW). “fit_circle” precisa como variáveis de entrada dois vetores cujos elementos sejam as coordenadas ‘ x ’, ‘ y ’ do limbo solar, estas variáveis são também calculadas com a rotina “adjust_circle”. Exemplos da sintaxe:

```
> adjust_circle,im,xyr,/ha,/display ;** Para H-alpha
> print,xyr
-41.98  117.25  316.02
> adjust_circle,im,xyr,/ir,/display ;** Para 30 THz
> print,xyr
241.818  229.507  236.852
```

Os valores calculados anteriormente são as coordenadas do centro (x, y) e raio (r) do disco solar em unidades de pixels, respectivamente (ver Figura 3.1). Considerando os três parâmetros obtidos (x, y, r), o passo seguinte é deslocar (shift) as imagens posteriores com respeito a uma imagem de referência. Para este propósito foram construídas as rotinas “hacraam_prep0” e “ircraam_prep0”, as quais alinham as imagens tomando como referência a posição (x, y) tanto da imagem de referência como da imagem a ser alinhada (imagem objeto).

Exemplos da sintaxe:

```
> yyyy='2014' & mm='08' & dd='01'
> hacraam_prep0,path,yyyy,mm,dd,dn=100 ;** Para H-alpha
> ircraam_prep0,path,yyyy,mm,dd,dn=100 ;** Para 30 THz
```

Os programas “`prep0`” levam em conta o programa “`craam_struct`” que contém variáveis da estrutura do *header*, tais como: dimensão da imagem, resolução espacial, horário, data de observação, raio solar, coordenadas do centro da imagem expressas em coordenadas heliográficas etc., que são preenchidas no momento da execução. Uma das variáveis do *header* é o “`index.cdelt`”, que possui informação da resolução espacial calculada a partir do ajuste do círculo nas imagens parciais. Os valores obtidos da resolução espacial são: 3,051” de arco/pixel para H α , 2,049” e 4,023” de arco/pixel para 30 THz dos instrumentos de CASLEO e OSM.

O procedimento anterior é uma primeira tentativa de alinhamento sendo que, corrige o efeito de rastreamento (tracking), desloca as imagens ajustadas ao centro do detetor CCD (Charge Coupled Device), determina os parâmetros a serem incluídos no *header*, e finalmente todas as imagens corrigidas são registradas como arquivos FITS. Este novo conjunto de dados é denominado dados de “nível 1”.

A segunda maneira baseia-se no método de correlação cruzada (cross-correlation). Neste caso aproveita-se o conjunto de dados de “nível-1” obtidos previamente com as rotinas “`prep0`” (embora pode-se também usar um cubo de dados gerados com IDL), e utilizamos os programas “`hacraam_prep1`” e “`ircraam_prep1`” com objetivo de co-alinhar as imagens de H α e 30 THz. As rotinas “`prep1`” atuam sobre uma região de interesse selecionada durante a execução (Figura 3.1, painel direito), leva em conta a posição de um ponto de referência (exemplo, mancha solar) para determinar o deslocamento (offsets) de cada imagem em relação à de referência para fazer o co-alinhamento. Exemplos da sintaxe:

```
;** Para arquivos 'Fits' (nível 1):
> hacraam_prep1,path,/fts,data,time
```

```

;** Para arquivos 'idl-save' (cubo de dados):
> hacraam_prep1,path,/save,data,time
Input the 'save' filename: ha_20140801_cube.sav

```

Utilizando o método de correlação cruzada conseguiu-se alinhar satisfatoriamente o conjunto de dados de $H\alpha$ e 30 THz, a partir dos quais foram obtidos os perfis temporais para a análise dos eventos.

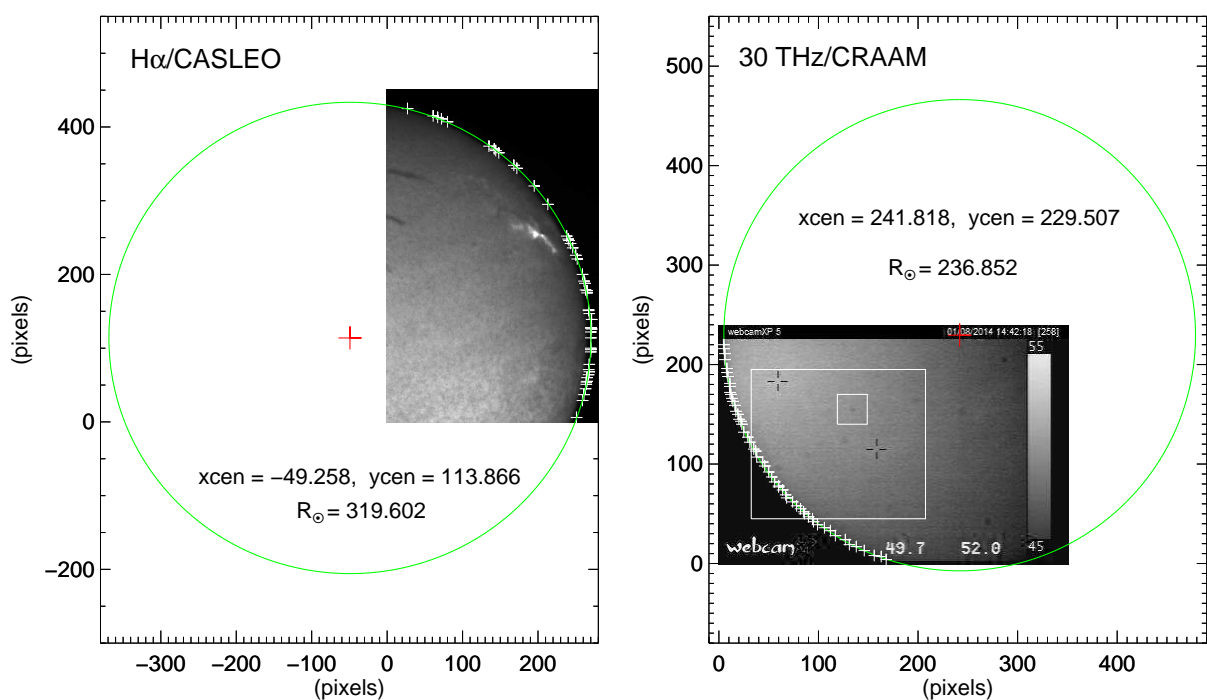


Figura 3.1: Painel esquerdo: imagem em $H\alpha$ ajustada a um círculo. A cruz vermelha indica o centro do disco solar calculado, enquanto que as cruces brancas localizadas no limbo são os pontos utilizados para o ajuste. Painel direito: Mesmo procedimento de ajuste aplicado no painel esquerdo, mas para uma imagem em 30 THz. A caixa maior sobre a imagem indica a região de interesse selecionada, enquanto a caixa menor que contém uma mancha solar é o ponto de referência, a partir do qual serão determinados os *offsets* para o alinhamento.

(b) Correção do norte solar

Um modo para a correção do norte solar poderia ser usando uma imagem de referência registrada por outro instrumento (por exemplo, imagens do satélite SDO), e comparar uma característica em comum desta imagem com as imagens registradas pelos instrumentos do CRAAM. Por exemplo, uma característica em comum seria uma mancha solar ou filamento, a partir do qual pode-se determinar as coordenadas de um mesmo ponto tanto para a imagem de referência (x_0, y_0) como para as imagens registradas pelos instrumentos

do CRAAM (x_1, y_1) . Através dos ângulos $\theta_0 = \arctan(y_0/x_0)$ e $\theta_1 = \arctan(y_1/x_1)$, cuja as coordenadas x, y foram obtidas previamente, pode-se determinar o ângulo de rotação correspondente, isto é: $\theta = \theta_1 - \theta_0$.

Após a calibração dos dados de H α e 30 THz, é possível fazer a comparação e superposição com dados registrados por outros instrumentos. Tais como: UV/EUV, luz branca, raios X (moles e duros) e magnetograma.

3.1.2. Cálculo do fluxo em 30 THz

Nesta seção apresenta-se o procedimento para calcular/estimar o excesso do fluxo solar utilizando dados em 30 THz. A calibração do sinal em 30 THz, que está expressa em unidades de intensidade (DN: Data Number per pixel), para temperatura em kelvin (K), foi feita considerando as seguintes medições:

- Intensidade na fotosfera (i_{ph}) sobre a área da mesma (s_{ph}), é igual a intensidade por unidade de área: $I_{ph} = i_{ph}/s_{ph}$.
- Intensidade no céu (i_{sk}) sobre a área da mesma (s_{sk}), é igual a intensidade por unidade de área: $I_{sk} = i_{sk}/s_{sk}$.
- Intensidade na explosão (i_{fl}) sobre a área da mesma (s_{fl}), é igual a intensidade por unidade de área: $I_{fl} = i_{fl}/s_{fl}$.
- Intensidade na mancha solar (i_{sp}) sobre a área de mesma (s_{sp}), é igual a intensidade por unidade de área: $I_{sp} = i_{sp}/s_{sp}$.

Como em Kaufmann et al. (2013); Miteva et al. (2015), adotamos uma temperatura de 5000 K e 300 K para o Sol calmo (fotosfera) e o céu, respectivamente. De modo que pode-se calcular o equivalente entre a intensidade (DN) e a temperatura (K), através da seguinte razão:

$$\mathbf{k} = \frac{(I_{ph} - I_{sk})}{4700} \equiv \left[\frac{\text{DN}}{\text{K}} \right]; \Delta T_{fl} = \frac{(I_{fl} - I_{ph})}{\mathbf{k}} \quad (3.1)$$

O sistema óptico de 30 THz no observatório de CRAAM, antes de formar a imagem do disco solar no detector, tem reflexões sobre quatro espelhos aluminizados com uma transmissão de 80 %. Além disso, uma transmissão de 46 % pela lente Ge, e 85 % devido ao bloqueio físico da abertura. Portanto a eficiência (η) resultante final da abertura é: $0,8^4 \times 0,46 \times 0,85 = 0,16$. Por outro lado, a área física (A_p) do sistema considerando o espelho newtoniano de 150 mm de abertura, é $0,018 \text{ m}^2$. Finalmente a área efetiva do sistema 30 THz resulta em:

$$A_e = \eta A_p = 0,0028 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

Então considerando que a aproximação Rayleigh-Jeans à lei de Planck ainda é válida para 30 THz, a densidade de fluxo será dada pela seguinte expressão:

$$\Delta S = \frac{2k_B \Delta T_{fl}}{A_e} \quad (3.3)$$

Onde k_B é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$), e ΔT_{fl} é o excesso da temperatura medida em 30 THz calculado a partir da Equação (3.1).

Para o sistema em 30 THz sendo operado no observatório de CASLEO existe uma reflexão adicional. Assim, nesse caso a eficiência é de 0,13 e a área efetiva é de $0,0023 \text{ m}^2$.

3.2. Calibração dos dados em rádio

O rádio polarímetro solar POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun; Valio et al., 2013) opera nas frequências de 45 e 90 GHz, e fornece informação da polarização circular direita (CPR) e polarização circular esquerda (LCP) em ambas frequências, com uma resolução temporal de 10 ms. Os dados finais estão expressos em temperatura de brilho (T_b), aos quais fizemos a subtração do background (observações do dia anterior ou posterior ao dia do evento) com a finalidade de corrigir os efeitos do instrumento (tracking). O passo seguinte foi a conversão de T_b a densidade de fluxo solar (solar flux units, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), para isso consideramos a elevação da antena (θ_{el}), a opacidade (τ_z) para a correção da atenuação atmosférica, e os fatores de cali-

bração (3,47 para 45 GHz e 17,2 para 90 GHz; Valio et al., 2013).

A Tabela 3.1 mostra os eventos sob análise registrados pelo rádio polarímetro POEMAS, os valores de elevação da antena expressa em graus (Deg), e a opacidade em Nepers (Np) tanto para 45 como para 90 GHz. Também são apresentados os dados considerados para a subtração do background.

Tabela 3.1: Eventos observados pelo rádio polarímetro POEMAS, analisados nesta dissertação.

Evento	Pico (UT)	Elevação (Deg.)	τ_{45} (Np)	τ_{90} (Np)	Background
13/03/2012	17:41	59,54	0,07	0,15	12/03/2012
13/05/2013	16:05	39,05	0,07	0,09	14/05/2013

Em relação aos dados na faixa submilimétrica, utilizamos dados do radiotelescópio SST (Solar Submillimeter Telescope; Kaufmann et al., 2004), que opera simultaneamente em 212 e 405 GHz com uma resolução temporal de 5 e 40 ms. O plano focal do SST está composto de quatro receptores operando em 212 GHz e dois em 405 GHz. O procedimento para a calibração dos dados do SST, foi: (i) conversão dos dados brutos (valores de ADC) a temperatura, (ii) correção da atenuação atmosférica, e (iii) cálculo da densidade de fluxo aplicando a técnica de feixes múltiplos. Na Tabela 3.2 apresentam-se os eventos registrados pelo SST, informação de elevação da antena e a opacidade dos eventos analisados.

Tabela 3.2: Eventos observados pelo radiotelescópio SST, considerados para a análise.

Evento	Pico (UT)	Elevação (Deg.)	τ_{212} (Np)	τ_{405} (Np)
13/03/2012	17:41	55,5	0,46	2,32
13/05/2013	16:05	37,6	0,37	0,50
29/03/2014	17:35	50,9	0,25	1,43

3.3. Dados complementares

Como um dos principais objetivos desta dissertação é analisar as explosões solares em múltiplos comprimentos de onda, além do conjunto de dados e instrumentos mencionados anteriormente, foram utilizados dados complementares de outros instrumentos. Tais como:

- Dados na faixa de microondas da rede RSTN (USAF Radio Solar Telescope Network; Guidice et al., 1979), das estações Sagamore Hill (USA), San Vito (Itália) e Palehua (Hawaii). Utilizamos dados em todas suas frequências disponíveis: 0,21; 0,41; 0,61; 1,41; 2,69; 4,99; 8,80; e 15,4 GHz, com uma resolução temporal de 1 s.
- Dados de $H\alpha$ centrado na linha 6563 Å do átomo de hidrogênio, do telescópio HASTA (H-Alpha Solar Telescope for Argentina; Bagalá et al., 1999), instalado no Observatório Astronômico Félix Aguilar (OFA), Argentina. A resolução temporal e espacial dos dados de $H\alpha$ são: 5 s no modo *flare* e 1,93" (segundos de arco/pixel), respectivamente.
- Ultravioleta (UV: 1600 Å, 1700 Å) e Ultravioleta-Extremo (EUV: 94 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å e 304 Å), dados em luz branca (6173,3 Å) e magnetograma, dos instrumentos AIA (Atmospheric Imaging Assembly; Lemen et al., 2012) e HMI (Helioseismic and Magnetic Imager; Scherrer et al., 2012), abordo do satélite SDO (Solar Dynamics Observatory). As emissões em UV são atribuídas às linhas C IV e contínuo, enquanto que as emissões em EUV são atribuídas às linhas Fe XVIII, Fe IX, Fe XII XXIV, Fe XIV, e He II, respectivamente. Neste trabalho utilizamos uma resolução temporal de 12 e 20 s para os dados do instrumento AIA, e 45 s para os dados de HMI, fornecidos com uma resolução espacial de $\sim 0,6''$ (segundos de arco/pixel) para ambos instrumentos.
- Raios X duros (HXR), dos satélites RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager; Lin et al., 2002) e Fermi (Share & Murphy, 2007), em seus diferentes canais de energia.
- Raios X moles (SXR), do instrumento XRT (X-Ray Telescope; Golub et al., 2007) abordo do satélite HINODE, assim como também do satélite GOES nas faixas 0,5-4,0 Å e 1,0-8,0 Å. XRT e GOES, são sensíveis à radiação térmica dos plasmas coronais quentes, e podem detectar emissões do plasma com temperaturas da ordem de 1 até dezenas de milhões de Kelvin (MK).

A calibração dos dados dos instrumentos AIA e HMI foram feitas utilizando suas próprias bibliotecas (“aia_prep”, “hmi_prep”) que são executadas no âmbito do SSW. A calibração consiste principalmente em correção de *flatfield*, subtração de *dark*, correção do

norte solar, redimensionamento e co-alinhamento das imagens registradas em diferentes comprimentos de onda. Para a obtenção das curvas de luz, co-alinhamos as imagens seguindo os mesmos procedimentos descritos na Seção 3.1. Em alguns casos foi necessário corrigir o efeito da rotação diferencial, para isso usamos a rotina “`drot_map`”. Foi também utilizada a rotina “`xrt_prep`” para a calibração dos dados do instrumento XRT, e as próprias bibliotecas do RHESSI para a reconstrução da imagem de explosão solar em raios X duros.

3.4. Determinação do fluxo térmico em rádio a partir dos dados de GOES

Esta seção descreve o procedimento para o cálculo do fluxo térmico utilizando a temperatura (T) e a medida de emissão (EM), ambos parâmetros sendo estimados das observações do satélite GOES. Em geral o GOES calcula T a partir da razão dos fluxos observados em duas linhas ou faixas de energia (0,5-4 Å, 3-25 keV; 1-8 Å, 1,5-10 keV), tal cálculo é efetuado considerando tratar-se de um plasma isotérmico. A temperatura calculada é utilizada para estimar a emissividade, a qual junto com os valores do fluxo, resulta na EM (Bornmann, 1990).

Para caracterizar uma fonte térmica utilizamos a temperatura $T(t)$ do plasma e a medida de emissão $EM(t)$ em função do tempo. Como em Trotter et al. (2011), considerando a fonte ser isotérmica num determinado tempo t para uma faixa de frequências ν , pode-se simular o espectro em rádio para a dita fonte. Por outro lado, a temperatura de brilho (T_{br}) em função do tempo (t) e da frequência (ν) é dada por:

$$T_{br}(t, \nu) = T(t) \left(1 - e^{-\tau(t, \nu)}\right) \quad (3.4)$$

onde a profundidade óptica $\tau(t, \nu)$ para uma fonte homogênea com temperatura $T > 2 \times 10^5$ K, e medida de emissão $EM(t)$, segundo Dulk (1985) é:

$$\tau(t, \nu) = \frac{\kappa(t, \nu) EM(t)}{\nu^2 A T(t)^{3/2}} \quad (3.5)$$

Sendo κ o coeficiente de absorção igual a: $9,78 \times 10^{-3} \times (24,5 + \ln T(t) - \ln \nu)$ em unidades c.g.s., A a área da fonte projetada normal à linha de visada. Portanto a densidade de fluxo $S(t, \nu)$ será:

$$S(t, \nu) = \frac{2k_B T_{br}(t, \nu)}{\lambda^2} \Omega = \frac{2k_B T_{br}(t, \nu) \nu^2}{c^2} \frac{A}{R^2} \quad (3.6)$$

onde R é a distância Sol-Terra (1UA) e c a velocidade da luz.

Para um regime opticamente espesso ($\tau \gg 1$), a Equação (3.4) é reduzida para: $T_{br}(t, \nu) = T(t)$. Por outro lado no regime opticamente fino ($\tau \ll 1$), $T_{br}(t, \nu) = T(t)\tau(t, \nu)$; de modo que substituindo este resultado na Equação (3.6) implica que a densidade de fluxo esperada $S(t, \nu)$ não depende da área da fonte, mas sim apenas pouco da frequência ν , isto é:

$$S(t, \nu) = \frac{2k_B \kappa(t, \nu)}{c^2 R^2} \frac{EM(t)}{T(t)^{1/2}} \quad (3.7)$$

Usando $T(t)$ e $EM(t)$ calculados a partir das observações do GOES, considerando uma fonte circular de $30''$ ($\sim 2,1 \times 10^9$ cm) e outra de $40''$ ($\sim 2,8 \times 10^9$ cm) segundos de arco de diâmetro, uma profundidade da fonte ao longo da linha de visada de $5,0 \times 10^8$ cm para ambos casos, resultando uma área (A) de $3,46 \times 10^{18}$ cm² e $6,15 \times 10^{18}$ cm² respectivamente; calculamos os valores dos fluxos $S(t, \nu)$ para uma faixa de frequências de 1-500 GHz, com os que foram simulados os espectros térmicos e comparados com os espectros obtidos a partir dos dados observacionais.

Capítulo 4

Análise de Eventos

Neste capítulo são apresentados a análise dos quatro eventos que foram estudados durante o desenvolvimento desta tese. Os eventos analisados são enumerados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Lista de eventos analisados.

Item	Data	<i>Classe</i>	<i>GOES</i>	<i>SXR</i>	NOAA	Coord.	
	do evento		<i>Início</i>	<i>Pico</i>			<i>Fim</i>
E1	13 Março 2012	M7,9	17:12	17:41	18:25	1429	N17W66
E2	13 Maio 2013	X2,8	15:48	16:05	16:16	1748	N08E89
E3	29 Março 2014	X1,0	17:35	17:48	17:54	2017	N11W32
E4	01 Agosto 2014	M2,0	14:43	14:48	14:57	2130	S09E35

4.1. Evento do 13 de Março de 2012

Recentemente Kaufmann et al. (2013), apresentaram um estudo sobre a detecção inédita em 30 THz durante a explosão solar do 13 de Março de 2012. A análise foi feita utilizando observações em vários comprimentos de onda, e mostram que a emissão em 30 THz apresenta uma resposta similar em luz branca (6173,3 Å). Embora os autores não confirmaram a presença de elétrons acima de 1 MeV, um estudo mais aprofundado mostra emissões de elétrons com energias de até 10 MeV (Trottet et al., 2015).

Nesta seção apresentamos uma análise detalhada em múltiplos comprimentos de onda, do evento do dia 13 de Março de 2012, incluindo a análise dos dados de H α .

4.1.1. Observações

A explosão solar do dia 13 de Março de 2012 classificada como M7,9 na escala de raios X moles (GOES), aconteceu na região ativa NOAA-1429 (N17°W66°), teve seu início em torno das 17:12 UT, alcançando seu máximo às 17:41 UT. Este evento foi simultaneamente registrado pelo sistema de observação de alta cadência em 30 THz e $H\alpha$, instalado no observatório CASLEO, Argentina. No entanto os dados de $H\alpha$ apresentam erros na gravação do tempo de aquisição (assincronismo) assim como também problemas de saturação do detector, de modo que foram usados principalmente os dados do telescópio HASTA.

4.1.2. Evolução morfológica do evento

A Figura 4.1 mostra a evolução morfológica da explosão solar de 13 de Março de 2012, em diferentes comprimentos de onda: 30 THz, $H\alpha$, luz branca (WL: 6173,3 Å), e na banda EUV/304 Å. Em $H\alpha$ foram identificadas quatro fontes de emissão (S_1 , S_2 , S_3 e S_4 ; segunda coluna na Figura 4.1), enquanto em luz branca duas fontes (WL_1 , WL_2 ; terceira coluna na Figura 4.1). As fontes S_1 e WL_1 parecem estar associadas espacialmente com a emissão detectada em 30 THz, claramente distinguível às 17:23:08 UT, que corresponde ao período do máximo observado neste comprimento de onda.

As imagens das 17:22 UT e 17:23 UT em luz branca (Figura 4.1), foram obtidas a partir da diferença de imagens (subtraída com uma imagem “*pre-flare*” das 17:14 UT), com a finalidade de evidenciar melhor as duas fontes de emissão (WL_1 e WL_2) neste comprimento de onda. Estas duas fontes estão relacionadas espacialmente com as fontes S_1 e S_2 de $H\alpha$, pelo menos durante o pico do evento. Acompanhando a evolução do evento em $H\alpha$ e EUV, a explosão parece começar às 17:11 UT nas regiões S_1 e S_2 , mas com menor intensidade em S_2 . Quase instantaneamente se percebe uma expansão de material (plasma) na direção sudoeste originando a fonte S_3 , enquanto S_4 exibe um leve abrilhantamento com um retardo de alguns minutos. A morfologia da explosão pode ser melhor apreciada na banda EUV do instrumento SDO/AIA (quarta coluna da Figura 4.1), onde é observado um arco (*loop*) principal, do qual um dos pés separados pelo filamento (linha neutra) está localizado próximo à fonte S_1 de $H\alpha$.

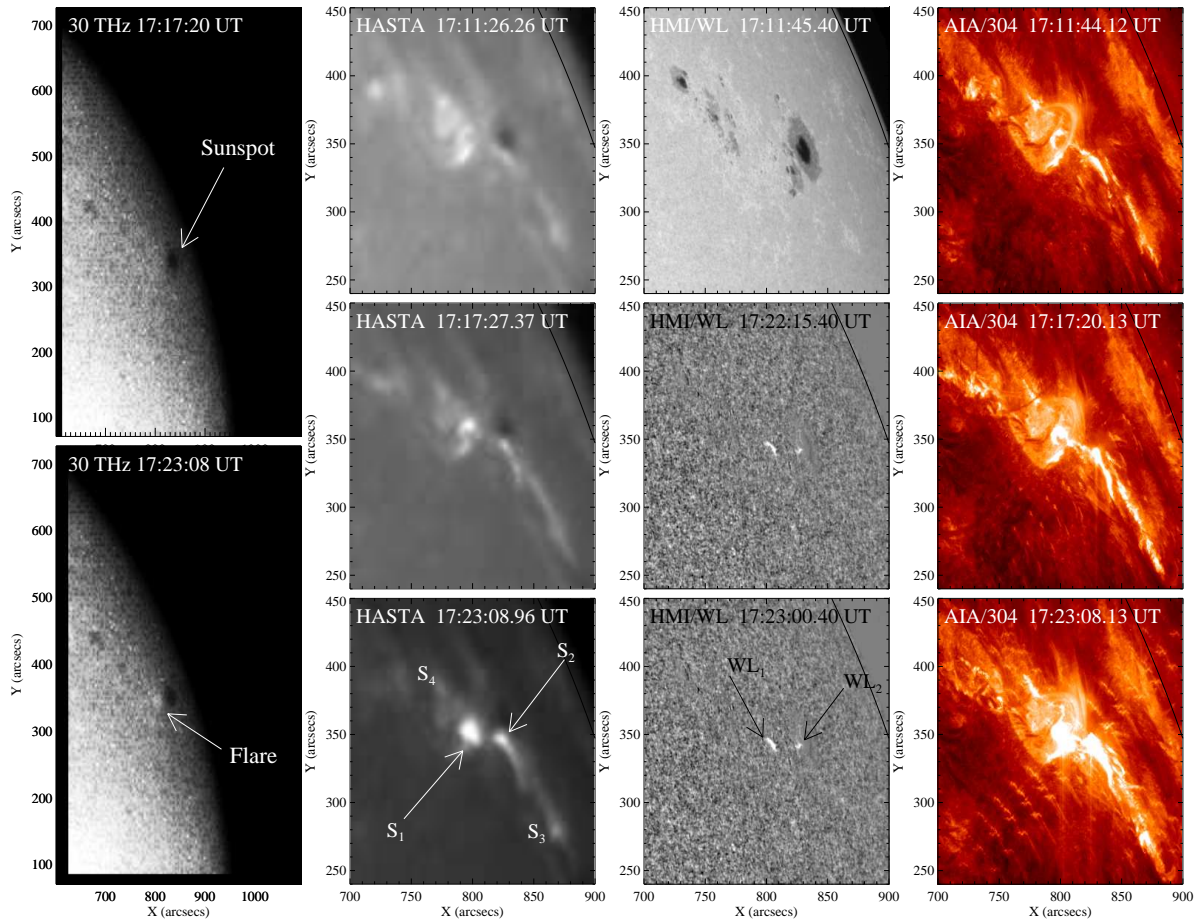


Figura 4.1: Evolução morfológica em diferentes comprimentos de onda da explosão solar do dia 13 de Março, 2012. Da esquerda-direita: 30 THz, $H\alpha$, luz branca, e EUV (304 Å). A seta na imagem 30 THz às 17:23:08 UT indica o aumento da emissão neste comprimento de onda, enquanto as fontes identificadas em $H\alpha$ e luz branca estão etiquetadas com S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , e WL_1 , WL_2 , respectivamente.

4.1.3. Distribuição das fontes de emissão

Tendo observações simultâneas em 30 THz, $H\alpha$ e luz branca, a posição relativa das fontes de emissão em diferentes comprimentos de onda pode ser estudada. No entanto, nos eventos que acontecem afastados do limbo ou vistos de cima (perpendicular à linha-de-visada), é difícil inferir se as diferentes emissões ocorrem quase na mesma e/ou diferente altura da atmosfera solar, mas para eventos que acontecem exatamente no limbo é possível estimar as regiões de emissão em relação à altura. O evento sob estudo não aconteceu no limbo, de modo que apenas se faz um comentário sobre a posição relativa horizontal das fontes de emissão.

Com a finalidade de conhecer a distribuição espacial das fontes de emissão nos diferentes comprimentos de onda, foram feitos mapas de contornos em torno das 17:22:44 UT da fonte 30 THz. O mapa de contornos de $H\alpha$ onde são observadas as quatro fontes (S_1 , S_3 , S_3 , e S_4), corresponde às 17:23:38 UT, enquanto que os contornos das fontes em luz branca (WL_1 , WL_2) corresponde às 17:23:00 UT. Para ter melhor idéia sobre a configuração magnética durante o evento, os mapas de contornos foram sobrepostos no magnetograma das 17:13:15 UT.

Na Figura 4.2 se apresenta a distribuição espacial das fontes de emissão em 30 THz, $H\alpha$ e luz branca. Foi plotada a posição da fonte 30 THz como uma cruz devido a que a resolução espacial do telescópio 30 THz é muito menor comparado com a de luz branca e $H\alpha$. Devido à limitação na determinação de qual camada da região da atmosfera solar esteve mais comprometida com a explosão, e levando em conta uma incerteza de alguns segundos de arco devido à menor resolução espacial de 30 THz, pode-se dizer pelo menos que horizontalmente a fonte de 30 THz (cruz verde), S_1 e WL_1 estão co-espacialmente associadas.

Tal correspondência espacial acima mencionada, pode ser interpretada como a radiação em 30 THz foi originada na mesma área projetada da emissão em luz branca e $H\alpha$, em algum lugar da baixa cromosfera solar. Esta correlação também é apoiada pelo perfil temporal apresentado na Figura 4.3, onde claramente pode-se verificar que a evolução da fonte em 30 THz (painel superior) em relação as fontes WL_1 de luz branca e S_1 de $H\alpha$, têm um comportamento semelhante no início, no máximo e durante a fase gradual da explosão, respectivamente.

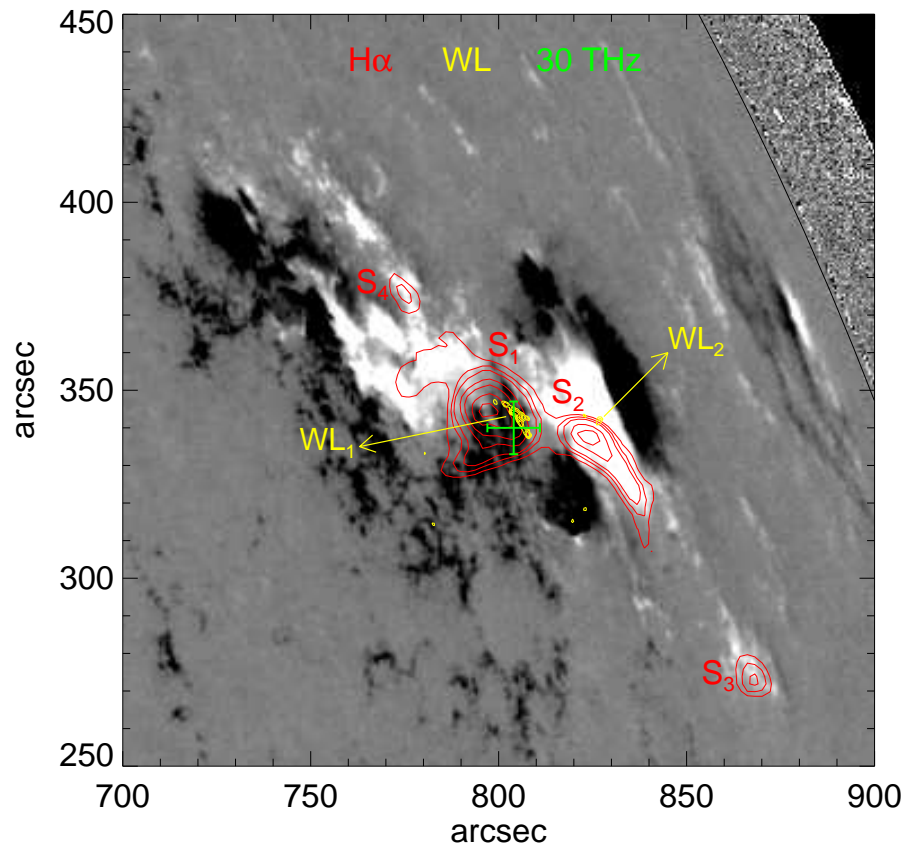


Figura 4.2: Distribuição espacial das fontes de emissão durante o pico do evento. $H\alpha$ (vermelha; às 17:23:38 UT), luz branca (amarela; às 17:23:00 UT), e 30 THz (verde; às 17:22:44 UT) superpostas no magnetograma do instrumento SDO/HMI obtida às 17:13:15 UT.

4.1.4. Evolução temporal em 30 THz, $H\alpha$, e luz branca

A fotometria da emissão em 30 THz foi obtida calculando a intensidade total sobre uma área retangular de 9×8 (pixels) centrada na explosão, à qual foi subtraída outra intensidade calculada sobre uma área de 11×12 (pixels), localizada numa região da fotosfera calma. No caso da fotometria da luz branca, o excesso relativo ao nível de “pre-flare”, foi calculado sobre uma área de 10×10 (pixels). Por outro lado, as medidas fotométricas para as fontes de $H\alpha$ foram obtidas calculando as intensidades sobre cada fonte, cujas dimensões foram: $S_1=3 \times 2$, $S_2=3 \times 2$, $S_3=4 \times 4$, e $S_4=5 \times 5$ (pixels), respectivamente. O passo seguinte foi subtrair as intensidades do background calculadas a partir de regiões circundantes a cada fonte, cujos tamanhos foram: 18×22 , 24×31 , 19×22 , e 21×21 (pixels), na mesma ordem, respectivamente. Uma área adicional de 16×17 (pixels) do Sol calmo foi considerada, a fim de expressar os excessos das intensidades relativos ao Sol calmo.

No painel superior da Figura 4.3 se apresentam os perfis temporais de 30 THz, e luz branca (WL_1), enquanto que no painel inferior se mostram os perfis temporais das quatro fontes de $H\alpha$. Para efeito de comparação também foram plotadas no painel superior as evoluções temporais de raios X duros nos canais de energia 500-900 keV e 900-2000 keV, observados pelo satélite Fermi.

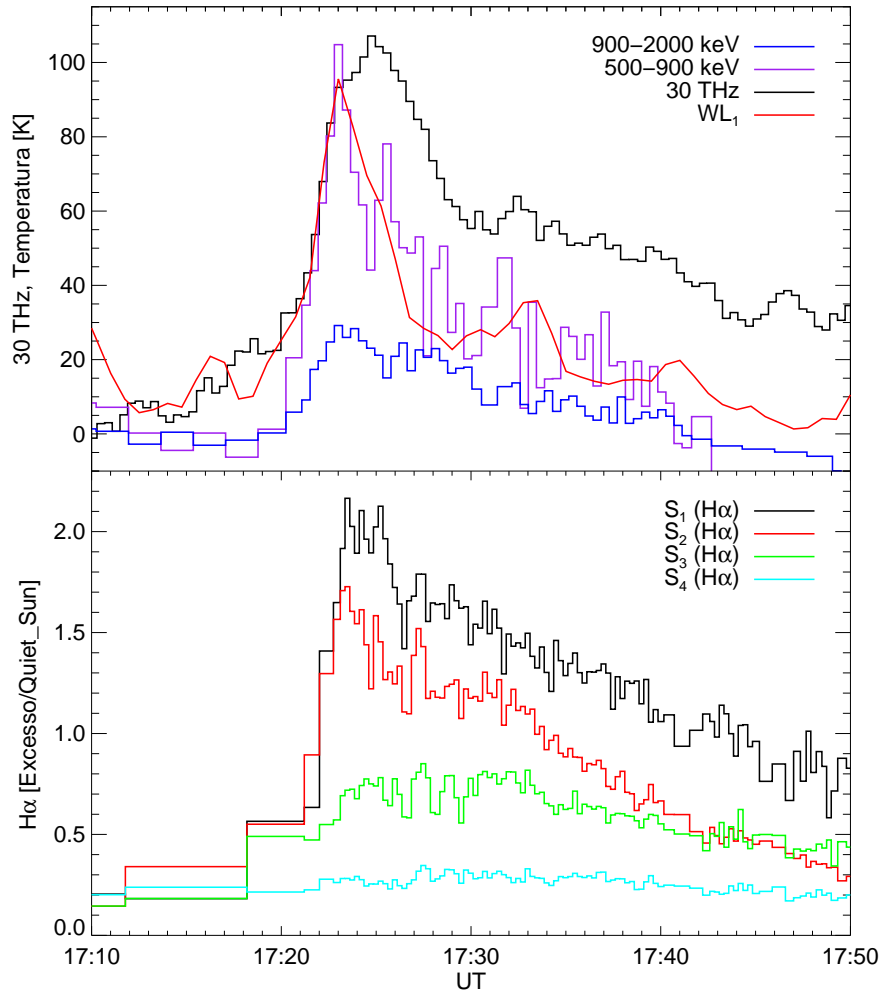


Figura 4.3: Evolução temporal em 30 THz da explosão solar do 13 de Março de 2012, juntamente com os perfis em luz branca (WL), e raios X duros na faixa 500-2000 keV. Além disso foram plotadas as evoluções temporais das fontes de emissão $H\alpha$ (S_1 , S_2 , S_3 e S_4).

De acordo com a evolução temporal, a emissão em 30 THz apresenta duas etapas: uma fase impulsiva que tem uma duração de pelo menos 8 minutos, e uma fase gradual de mais de 20 minutos de duração. Na fase inicial da explosão, o perfil de 30 THz apresenta uma boa coincidência temporal com os perfis de luz branca (WL_1) e de raios X duros na faixa de energia de 500-900 keV, no entanto, o pico em 30 THz (17:24:30 UT) é observado

com um atraso de aproximadamente 1,5 minutos, em relação aos picos de WL_1 e raios X duros (17:23:00 UT). Se comparamos a evolução de 30 THz com as fontes S_1 e S_2 de $H\alpha$, pode-se também observar uma boa correlação na etapa inicial, no pico e durante a fase gradual. Esta última característica se assemelha melhor com a fonte S_1 .

Levando em conta uma incerteza do tempo devido à baixa cadência dos dados de luz branca e $H\alpha$, o sincronismo descrito acima poderia ser interpretado como: durante a fase impulsiva, partículas não-térmicas de algumas centenas de keV podem ter sido capazes de penetrar até a baixa atmosfera solar e produzir emissões em 30 THz, luz branca e suas componentes observadas em $H\alpha$; enquanto que a componente na fase gradual mais evidente em 30 THz e $H\alpha$, poderiam ter sido produzidas devido a emissões térmicas. Na Figura 4.3 (painel superior) o fato de ter sido incluído o perfil temporal de raios X, no canal 900-2000 keV, foi apenas para notar que neste evento provavelmente foram produzidas partículas energéticas de alguns MeV.

4.1.5. Evolução temporal e espectral em rádio

O evento também foi analisado em ondas de rádio na faixa 0,24-405 GHz. Foram utilizados observações em microondas (0,24 - 8,80 GHz), milimétrico (45 e 90 GHz) e submilimétrico (212 e 405 GHz); no entanto o fluxo calculado em 405 GHz é menor do que o limite superior detectável (<50 SFU). A Figura 4.4, mostra a evolução temporal em comprimentos de ondas de rádio.

Em microondas nas frequências 2,69, 4,99 e 8,80 GHz, é possível distinguir até cinco pulsos regulares com um período de 1,2 minutos antes do primeiro pico principal das 17:23:00 UT, o segundo pico principal acontece às 17:24:30 UT. Em frequências mais altas (>8 GHz), igualmente os dois picos durante o máximo do evento são observados, mais evidente em 45 GHz. Note-se que os dois picos na fase principal do evento têm uma estreita coincidência no tempo com os máximos de luz branca e raios X duros, 30 THz e $H\alpha$ (Figura 4.3). Por outro lado, aproximadamente às 17:14 UT que corresponde à fase precursora da explosão, são observados alguns *spikes* principalmente em 0,24 e 0,41 GHz. Curiosamente às 17:23:00 UT, é distinguido um *narrowband spike* em 0,61 GHz, esta característica corresponde no tempo com o primeiro pico durante o máximo da explosão.

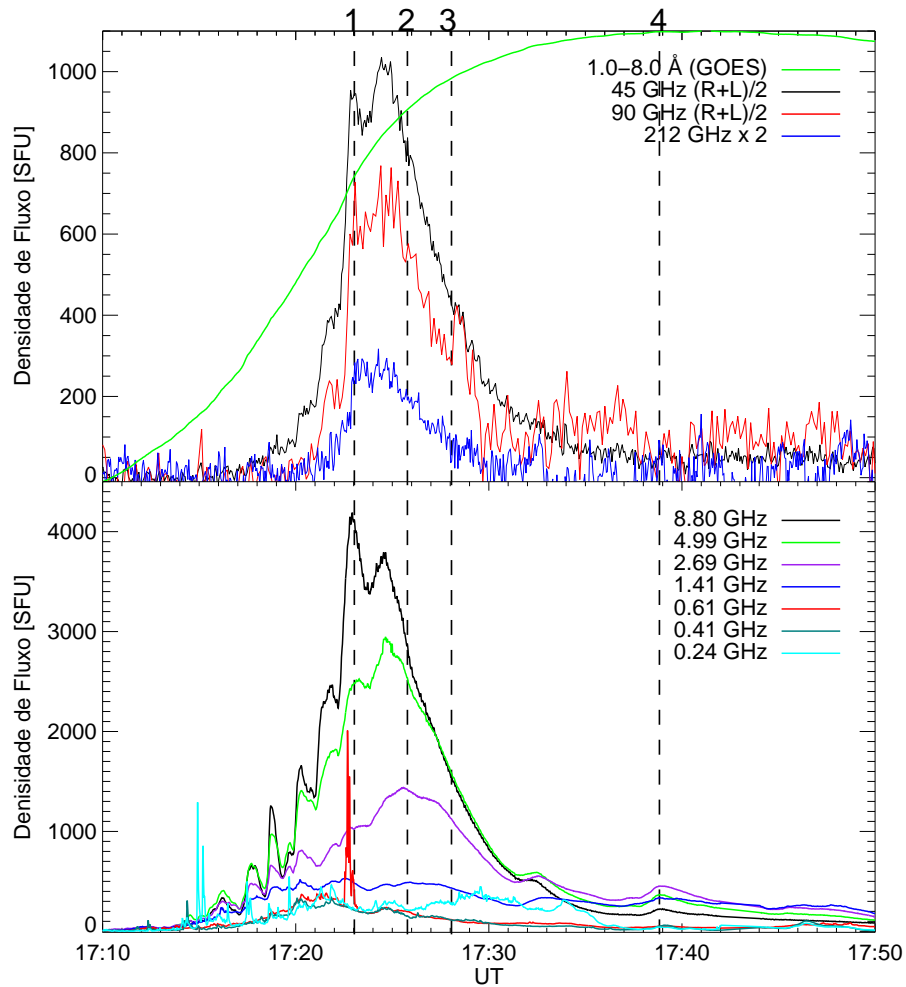


Figura 4.4: Densidade de fluxo solar em microondas (0,24 - 8,80 GHz), milimétrico (45 e 90 GHz) e submilimétrico (212 GHz), observado durante o evento do dia 13 de Março de 2012. As linhas verticais e os numeros (1-4) indicam os horários em que foram obtidos os espectros.

Para caracterizar a explosão em rádio, foram também construídos espectros na faixa 1-212 GHz (Figura 4.5) consideramos quatro tempos: 17:23:02 UT (no primeiro pico: 1), 17:25:47 UT (depois do segundo pico: 2), 17:28:04 UT (queda: 3), e 17:38:50 UT (fase gradual: 4). Em geral a forma dos espectros durante as três primeiras etapas (1, 2 e 3), exibem o típico espectro giro-síncrotron irradiada por elétrons não-térmicos. Notar também que a frequência de pico está em torno de 8 GHz, o que é habitual neste tipo de emissão. No entanto, o espectro na fase gradual (4) sugere a presença de dois tipos de emissões: térmica para altas frequências, e não-térmica para as baixas frequências.

Usando o modelo descrito na Seção 3.4, foi estimado o espectro para uma fonte puramente isotérmica considerando as medições da temperatura (T) e da medida de emissão (EM) para um plasma térmico, obtidas a partir das observações do GOES. A temperatura T atinge um máximo de ~ 19 MK apenas depois do máximo do evento em rádio, enquanto EM atinge o máximo valor de $\sim 4 \times 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ em torno das 17:40 UT. Então utilizando os valores de T e EM , calculamos a densidade de fluxo para uma faixa de frequências (1-500 GHz), considerando uma fonte de $30''$ e outra de $40''$ segundos de arco de diâmetro, respectivamente. Os resultados são apresentados no painel inferior direito da Figura 4.5.

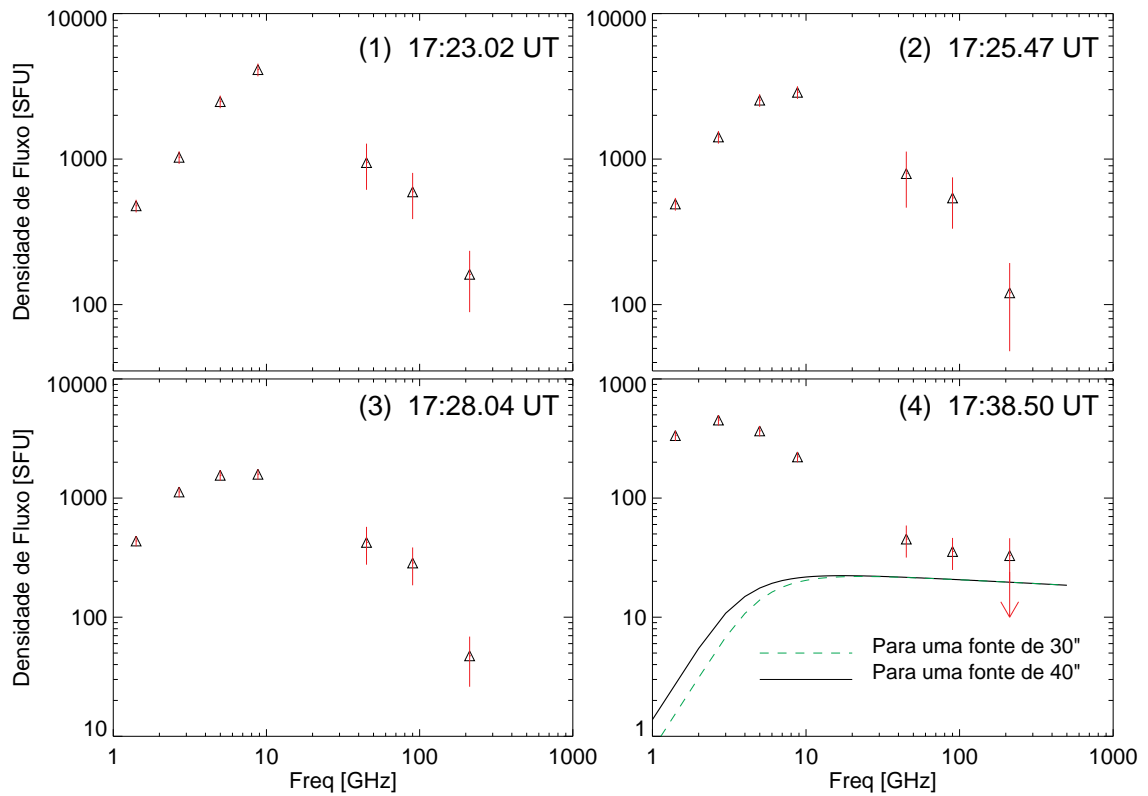


Figura 4.5: Espectros em rádio obtidos durante as diferentes etapas da explosão solar do dia 13 de Março de 2012. No painel inferior direito além do espectro observado, foram plotados os espectros derivados (linha contínua e tracejada) a partir das observações do GOES, considerando uma fonte isotérmica de $30''$ e $40''$ de diâmetro, respectivamente.

4.2. Evento do 13 de Maio de 2013

Nesta seção apresentamos o estudo de um evento que aconteceu no limbo solar. O estudo baseia-se na análise de dados em vários comprimentos de onda, tais como: rádio (microondas, milimétrico e submilimétrico), visível (luz branca), UV/EUV, e raios X (moles e duros). Para caracterizar a resposta da baixa atmosfera solar em relação às observações em rádio em altas frequências, foram utilizados dados em UV (1600 Å, 1700 Å) do instrumento AIA.

4.2.1. Observações

Segundo o informe da NOAA, o evento do 13 de Maio de 2013 classificado como X2,8 ocorreu na região ativa 1748 (N08°E89°). Começou às 15:48 UT, alcançando seu máximo às 16:06 UT aproximadamente. Associado a este evento foram observadas pulsações durante a fase inicial e gradual, detectadas numa ampla faixa de comprimentos de onda (rádio, raios X duros, UV/EUV). Por outro lado, durante o evento foram observadas duas fontes compactas de emissão localizadas na baixa atmosfera solar, as quais correspondem aos pés do arco coronal. Também foi detectada uma terceira fonte no topo do arco coronal observada em UV, raios X duros e até mesmo em luz branca.

4.2.2. Evolução temporal e espectral em rádio

O evento foi observado numa ampla faixa em ondas de rádio, desde microondas até submilimétrico. Na Figura 4.6 se apresenta a evolução temporal em rádio na faixa 1-212 GHz, juntamente com o perfil temporal dos fluxos de raios X moles do satélite GOES no canal 1-8 Å. Acima de 8 GHz são observados vários episódios, quatro pulsações intensas com um período de aproximadamente 1,5 minutos na fase impulsiva, e três pulsações de menor intensidade durante a fase gradual em torno das 16:10 UT e 16:19 UT.

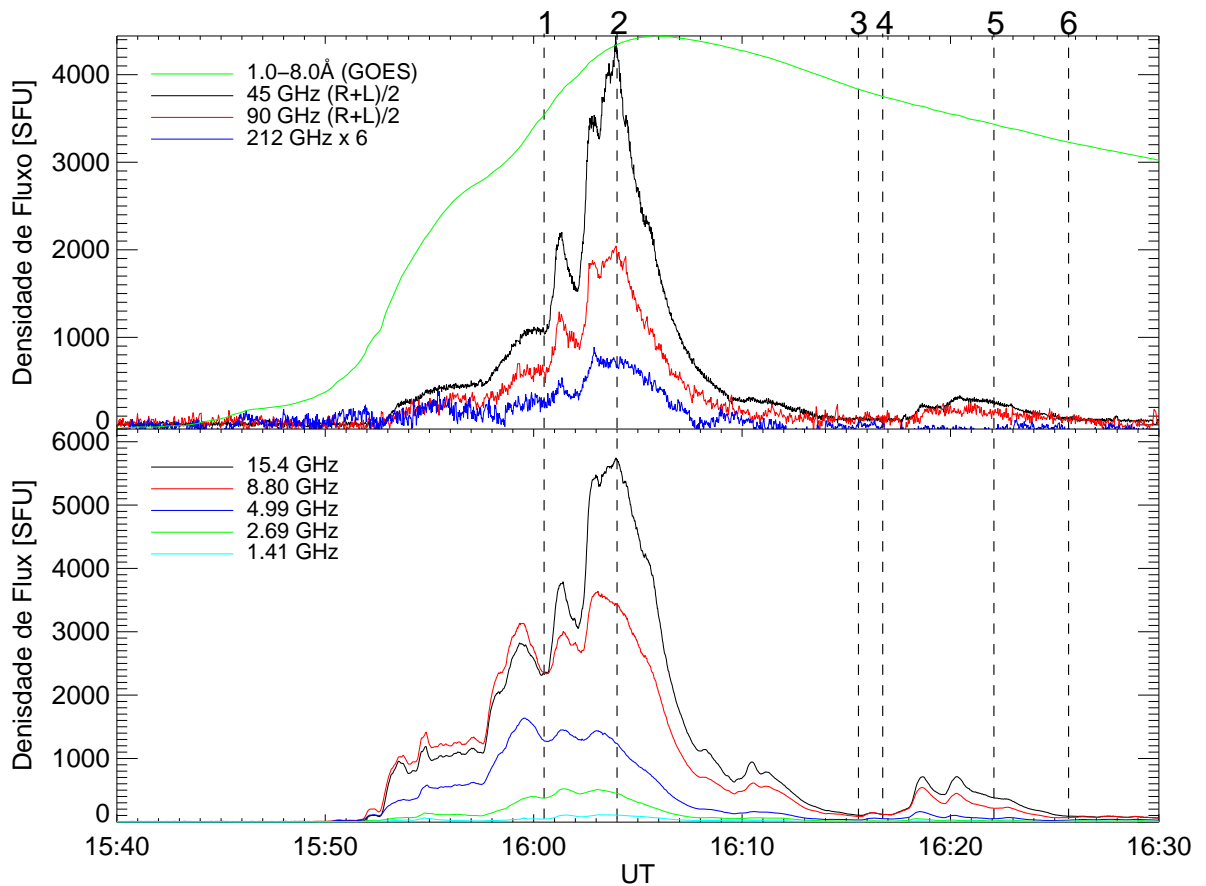


Figura 4.6: Evolução temporal do evento do dia 13 de Maio de 2013. Painel superior: em 45 e 90 GHz do rádio polarímetro POEMAS, em 212 GHz do radiotelescópio SST, juntamente com o fluxo de raios X moles do GOES. Painel inferior: perfis temporais em microondas na faixa 1,41-15,4 GHz da rede RSTN. As linhas verticais e os numeros (1-6) indicam os horários em que foram obtidos os espectros.

De forma geral, os espectros obtidos até antes das $\sim 16:15$ UT (Figura 4.7) exibem a típica emissão giro-síncrotron de elétrons não-térmicos, cuja frequência de pico está em torno de 15 GHz. A tendência dos espectros a partir das $\sim 16:15$ UT, é mostrar a contribuição de duas componentes: uma componente giro-síncrotron predominante devido a elétrons não-térmicos, e outra componente *bremstrahlung* térmica de menor intensidade. Foram também estimados os espectros para uma faixa de 1-500 GHz, a partir das observações do GOES, usando o modelo descrito na Seção 3.4. Os resultado são apresentados nos quatro painéis inferiores da Figura 4.7.

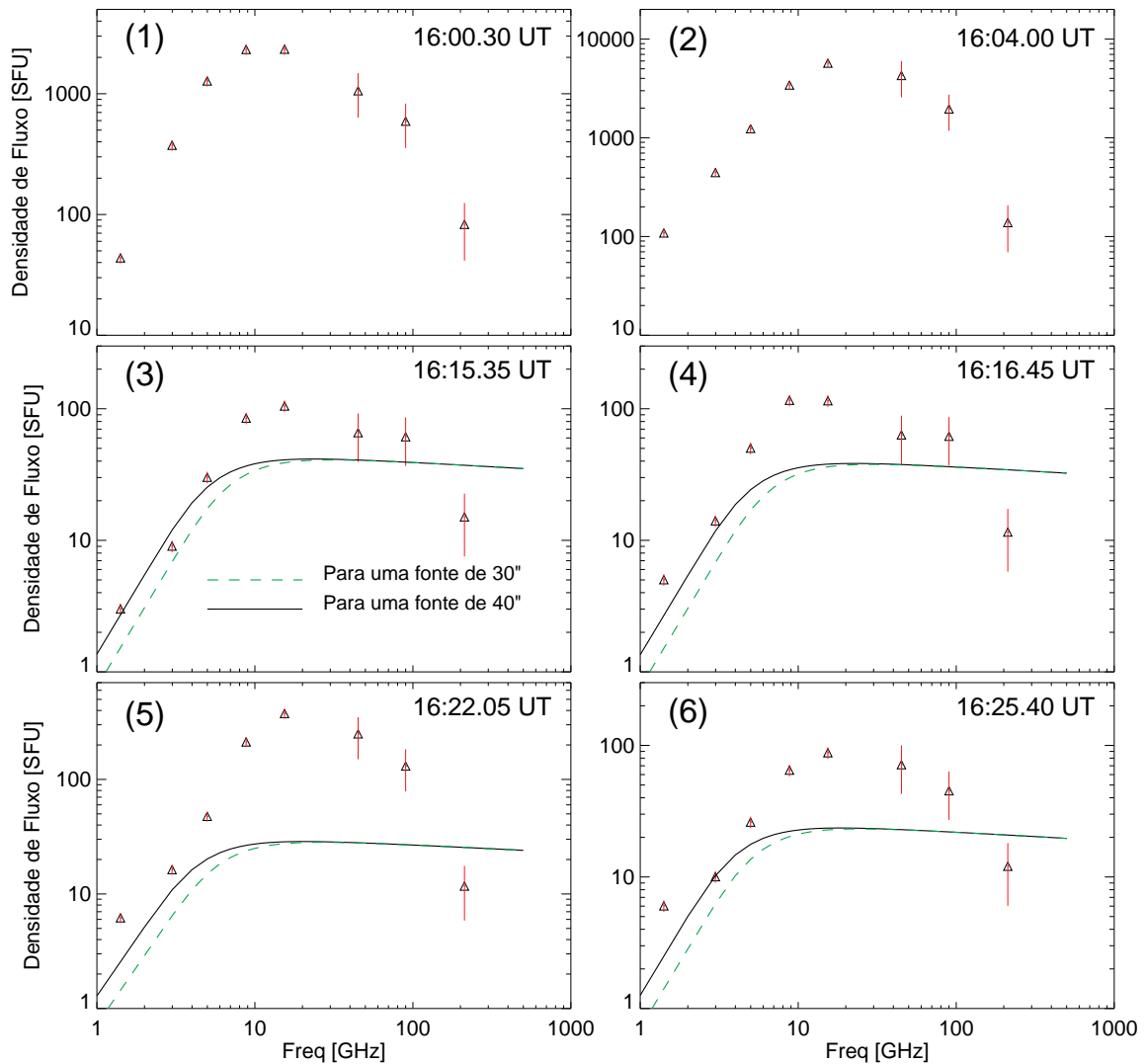


Figura 4.7: Espectros em rádio observados durante as diferentes etapas da explosão solar. As linhas contínuas e tracejadas são os espectros calculados para fontes isotérmicas, a partir das observações do GOES.

4.2.3. Fontes de emissão em UV, luz branca e raios X duros

Usando observações simultâneas em UV do instrumento AIA, luz branca do instrumento HMI, e imagens em raios X duros do satélite RHESSI, identificamos e comparamos as fontes de emissão do evento acontecido no limbo.

As imagens nos comprimentos de onda de 1600 e 1700 Å, mostram duas fontes intensas de emissão nos pés do arco coronal e uma fonte no topo do arco. Em torno das 15:57:04 UT, foi observada uma estrutura que começa a ser ejetada de entre os pés do arco, e às 15:59:52 UT atinge um altura máxima de $\sim 50''$ segundos de arco acima do limbo, esta característica é mais evidente em 1600 Å (Painel esquerdo da Figura 4.8).

Por outro lado, examinando os dados em luz branca ($6173,3 \text{ \AA}$) identificamos duas fontes compactas de emissão (WL_1 , WL_2) posicionadas espacialmente abaixo das fontes em UV, que evoluem simultaneamente atingindo um máximo em torno das 16:03 UT. As imagens de raios X reconstruídas com o método Pixon, também exibem várias fontes de emissão nas suas diferentes faixas de energia.

Após o co-alinhamento das imagens de luz branca com as imagens de raios X, notamos uma boa correlação espacial entre as fontes de luz branca e as fontes de raios X. Os dados de raios X mostram emissões no limbo com maior energia (25-300 keV), e emissões sobre o limbo com menor energia (12-50 keV). No painel central da Figura 4.8, se apresenta uma imagem (diferença de imagens) em luz branca, sobre a qual foram superpostas os mapas de contornos de raios X. As fortes emissões de raios X duros ($> 50 \text{ keV}$), localizadas nos pés indicariam que as fontes de luz branca são consequência da precipitação do feixe de elétrons energéticos, acelerados no topo do arco coronal.

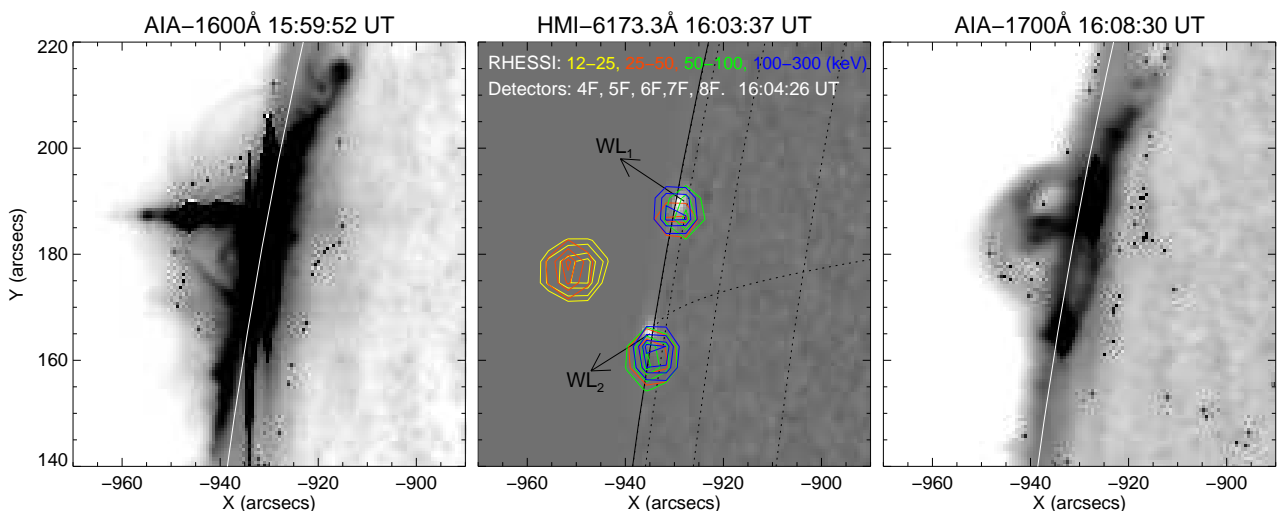


Figura 4.8: Imagens com escala de cores invertidas, exibindo o material ejetado durante a fase impulsiva (painel esquerdo), fontes WL_1 , WL_2 em luz branca (painel central) no máximo do evento, e o arco com restos do material ejetado (painel direito) durante a fase gradual. Adicionalmente na imagem de luz branca foram plotadas as emissões de raios X duros como contornos com níveis: 65, 75, 85, e 96 %, da máxima intensidade.

A fonte de raios X localizada acima do limbo, com emissão acima de 25 keV dá indícios de aceleração de elétrons fora da superfície solar. Comparando a posição desta fonte de emissão em relação ao material ejetado, nota-se que não estão relacionados, mas sim com o topo do arco coronal que indicaria o ponto de partida de aceleração de elétrons. Por

outro lado, em torno das 16:08:30 UT um segundo material é ejetado da mesma posição do primeiro, que é mais proeminente em 1700\AA (Painel direito da Figura 4.8).

Calculamos também os perfis temporais das fontes de emissão de luz branca a fim de correlacionar com os perfis de raios X do RHESSI nos diferentes canais de energia. Na etapa impulsiva da explosão (Figura 4.9), em raios X se observam as mesmas pulsações que foram observadas em rádio (Figura 4.6). Às 16:20 UT, em luz branca devido à baixa resolução temporal não é possível identificar detalhes, no entanto, durante o máximo da explosão a emissão em luz branca coincide no tempo com os raios X. Para fins de comparação também foi incluída a evolução temporal em 1700\AA , onde pode-se distinguir os pulsos na etapa inicial do evento similar aos de raios X e rádio.

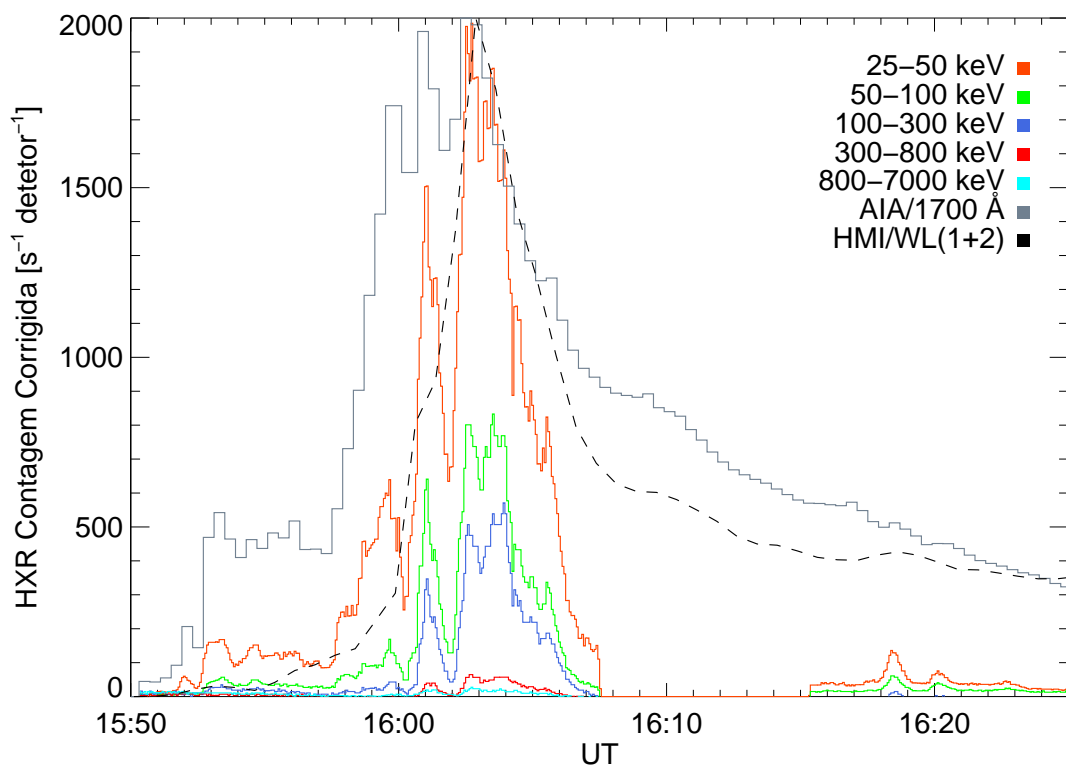


Figura 4.9: Contagem de raios X duros na faixa de 25-7000 keV, observado pelo satélite RHESSI. Para efeitos de comparação foram incluídas emissões em luz branca (WL_1+WL_2), UV (1700\AA), dos instrumentos HMI e AIA a bordo do satélite SDO.

4.3. Evento do 29 de Março de 2014

Apresentamos um estudo em múltiplos comprimentos de onda, de um evento intenso classificado como X1,0 na escala do GOES, acontecido o dia 29 de Março de 2014. Este evento exhibe uma componente gradual de longa duração de 40 minutos aproximadamente, muito mais proeminente em 212 GHz. A fim de investigar a origem desta componente prolongada no submilimétrico, comparamos os perfis temporais de rádio com os obtidos de $H\alpha$, UV/EUV e raios X moles. Foram também obtidos espectros em rádio durante as diferentes etapas de explosão, resultando espectros planos durante a fase gradual do evento.

Por outro lado, tentamos encontrar uma relação entre as fontes de emissão identificadas em $H\alpha$ com as fontes de raios X duros do RHESSI, através de mapas de contornos e curvas de luz.

4.3.1. Observações

Baseado em observações do satélite GOES, o evento classificado como X1,0 do dia 29 de Março de 2014, aconteceu na região ativa NOAA-2017 (N11°W32°). Teve seu início às 17:35 UT e atingiu seu máximo às 17:48 UT, aproximadamente. Para a análise em comprimentos de ondas de rádio, foram usados dados na faixa de microondas (1-15 GHz) e no submilimétrico (212, 405 GHz), este evento não foi observado na faixa milimétrica (45, 90 GHz). Por outro lado, para a obtenção dos perfis temporais das fontes de $H\alpha$ foram utilizados dados do telescópio HASTA, assim como dados em UV/EUV (1600, 1700 e 304 Å) do instrumento AIA, enquanto que os dados de raios X (duros e moles) são dos satélites RHESSI e GOES. Também usamos dados do satélite HINODE para verificar o tamanho da fonte coronal.

4.3.2. Fase térmica e não-térmica da explosão solar

Na Figura 4.10, se mostra o perfil temporal em rádio da explosão solar do dia 29 de Março de 2014, na faixa 1,41-15,4 GHz e 212 GHz, juntamente com o fluxo de raios X moles do satélite GOES. O evento apresenta duas etapas: uma fase impulsiva mais proeminente em microondas, com uma duração aproximadamente de 5 minutos (14:45-14:49 UT), e uma fase gradual mais evidente em 212 GHz, cuja duração é de 40 minutos (17:50-

18:30 UT) aproximadamente. Três aspectos devem ser ressaltados da evolução temporal em rádio: (i) entre às 17:35 UT e 14:45 UT, nenhuma emissão significativa é observada em microondas, no entanto neste período em 212 GHz se observa um aumento gradual da emissão, o que indicaria que a explosão começou nas baixas camadas da atmosfera solar. (ii) O perfil temporal em 212 GHz, mostra uma evolução similar ao perfil de raios X do GOES mesmo durante a fase inicial do evento. (iii) O único sinal intenso observado na faixa de microondas durante o pico da explosão, sugere que durante o máximo da fase impulsiva, alguns feixes de elétrons acelerados na baixa atmosfera atingiram a atmosfera solar superior produzindo emissão em microondas.

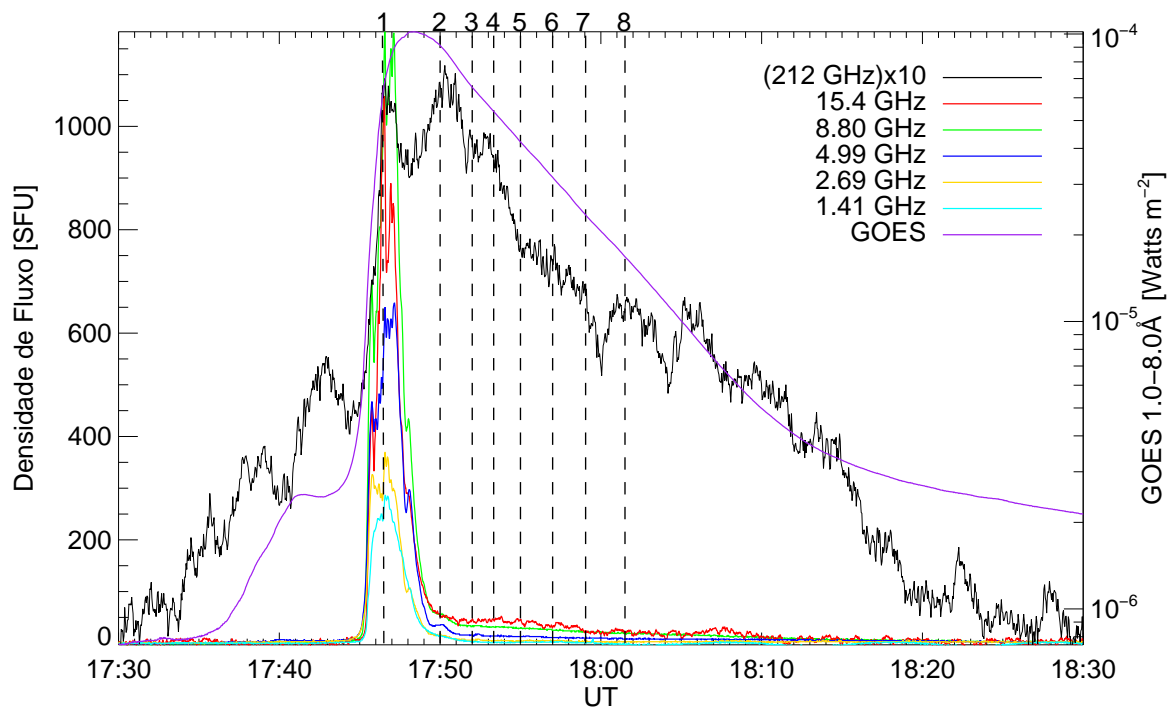


Figura 4.10: Evolução temporal da explosão solar em 212 GHz observada pelo radiotelescópio SST, juntamente com os perfis temporais na faixa de microondas (1,41-15,4 GHz) da rede RSTN e o fluxo de raios X moles do satélite GOES. As linhas verticais e os números (1-8) indicam os horários em que foram obtidos os espectros.

4.3.3. Espectros em rádio

Foram obtidos espectros em rádio na faixa 1-405 GHz, no pico e durante a fase prolongada da explosão solar. No máximo da fase impulsiva às 17:46:30 UT (1), o espectro exhibe uma típica emissão giro-síncrotron regida principalmente por elétrons não-térmicos, cuja frequência de pico está em torno de 10 GHz, comumente observado no domínio de

microondas. Contrariamente os espectros obtidos na fase gradual (2-8), isto é a partir das 17:50:00 UT, apresentam uma redução da densidade de fluxo em frequências menores. Não obstante em 212 e 405 GHz se observa que a densidade de fluxo entre às 17:50:00 UT (2) e 17:53:20 UT (3) permanece quase invariável, e depois o fluxo apresenta uma diminuição lenta e gradual. A forma dos espectros observados na fase estendida do evento exhibe uma tendência “plana” em frequências acima de ~ 8 GHz, que são geralmente associadas com a emissão *bremsstrahlung* térmica.

Como para os dois eventos anteriores, caracterizamos a fonte térmica usando a temperatura (T) e a medida de emissão (EM) do plasma, ambos parâmetros derivados dos fluxos de raios X moles observados pelo satélite GOES. A temperatura T atinge um máximo de ~ 21 MK em torno das 17:46:30 UT quase ao mesmo tempo do pico da fase impulsiva, enquanto EM alcançou um valor máximo de $\sim 4,7 \times 10^{49} \text{ cm}^{-3}$ em torno das 17:49 UT. Similarmente foram consideradas duas fontes isotérmicas, uma de $30''$ e outra de $40''$ de diâmetro para simular os espectros térmicos através do modelo descrito na Seção 3.4. Para verificar se a nossa suposição dos tamanhos das fontes são representativas, usamos imagens de raios X moles do telescópio HINODE (Figura 4.11).

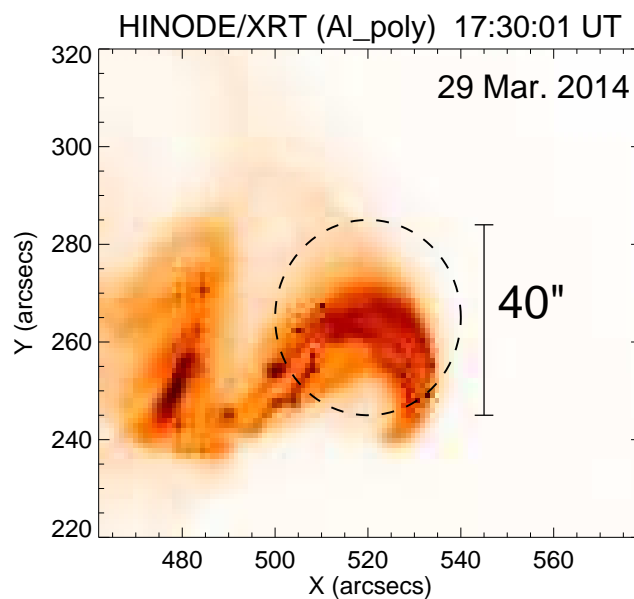


Figura 4.11: Etapa inicial da explosão solar em raios X moles, ocorrida o dia 29 de Março de 2014. Para fins de comparação, o círculo tracejado de $40''$ de arco de diâmetro representa o tamanho da fonte coronal considerado no modelo para simular os espectros térmicos.

Na Figura 4.12 apresentamos os espectros obtidos durante as diferentes etapas da explosão solar. Os espectros das 17:46.30 UT (1) e 17:50.00 UT (2) correspondem aos dois picos de 212 GHz observados no máximo da explosão, enquanto que a partir das 17:52.00 UT (3) em diante correspondem à fase prolongada do evento. São também mostrados os resultados dos espectros simulados a partir das observações do GOES para duas fontes isotérmicas.

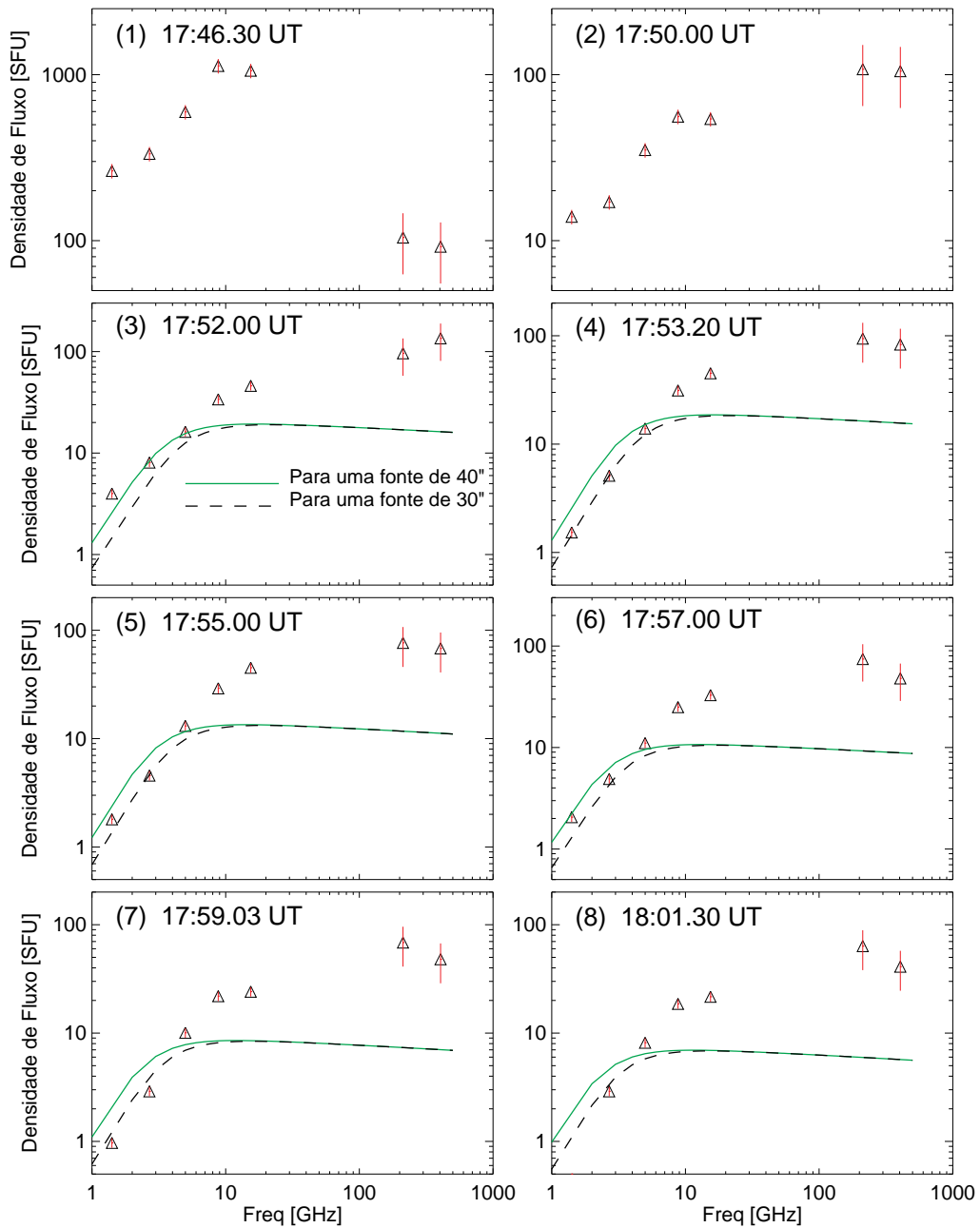


Figura 4.12: Espectros em rádio observados no pico (dois painéis superiores) e durante a fase gradual prolongada do evento. As linhas tracejadas (preta) indicam os espectros derivados a partir das observações do GOES, supondo uma fonte isotérmica de 30'' de diâmetro, enquanto as linhas contínuas (verdes) representam o espectro para uma fonte de 40'' de diâmetro.

4.3.4. Fontes de emissão em $H\alpha$ e Raios X

Nos dados de $H\alpha$, identificamos 5 principais fontes (kernels: S1, S2, S3, S4 e S5). Estas fontes mostram múltiplos brilhantamentos durante a explosão, e estão conectadas com os arcos (flares loops) distinguíveis nos dados de EUV (304 e 171 Å) do instrumento AIA. Examinamos a evolução temporal das fontes em $H\alpha$ calculando as intensidades de cada uma delas, onde foi considerada um área de 5×5 pixels para cada caso. A Figura 4.13 mostra os perfis temporais das cinco fontes, resultado da soma total das intensidades dos elementos (pixels) das regiões de interesse, expressos em porcentagem com respeito à intensidade do Sol calmo (QS). Estas curvas de luz indicam a evolução temporal do excesso de emissão da linha $H\alpha$ durante a explosão solar. Interessante notar uma semelhança nas respostas das fontes durante o início da explosão solar, apesar de exibirem diferentes níveis de intensidades. No entanto, na fase gradual diferem no tempo, mas apresentam similar comportamento com exceção das fontes S3 e S4.

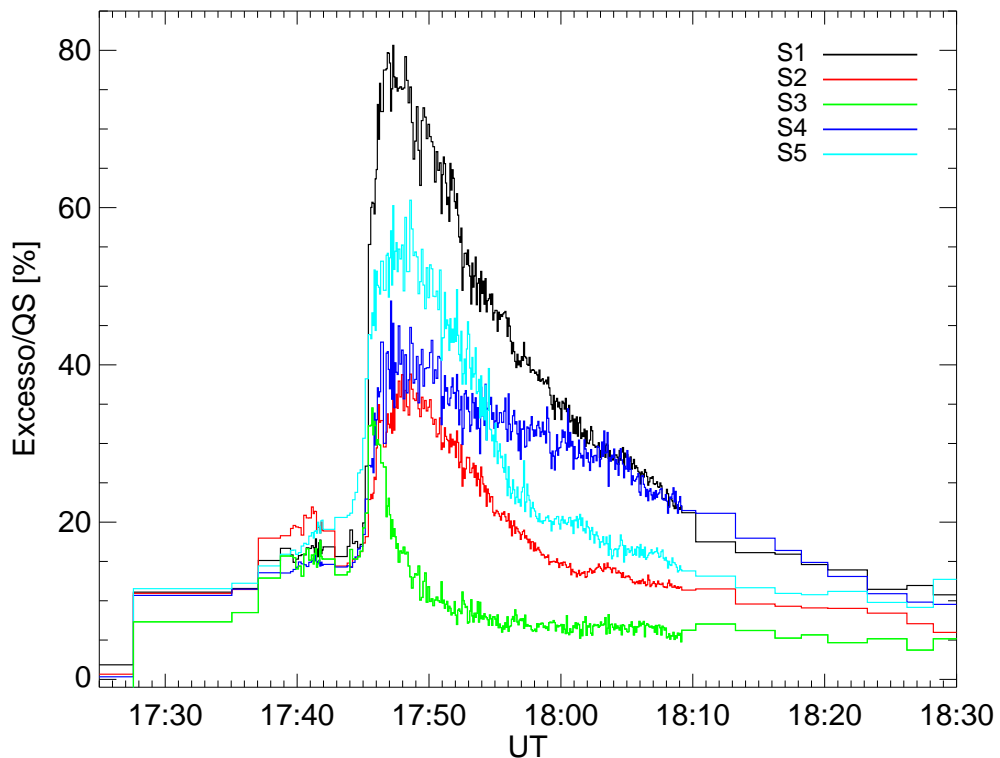


Figura 4.13: Perfis temporais das cinco fontes identificadas em $H\alpha$ durante o evento de 29 de Março de 2014, observado pelo telescópio HASTA. As posições das fontes estão indicadas com números (1-5) no painel esquerdo da Figura 4.14.

Na Figura 4.14 se apresentam as cinco fontes observadas em $H\alpha$ durante o pico do evento, os contornos são as fontes detectadas em raios X duros nos canais de energia 50-300 keV. As fontes mais intensas em $H\alpha$ são S1 e S5 (ver Figura 4.13), e de acordo com a distribuição espacial estas fontes correspondem em posição com as fontes de emissão observadas em raios X duros, nos canais 50-100 keV e 100-300 keV. Tal correlação pode-se verificar na Figura 4.14 onde as fontes de raios X duros (contornos) obtidas a partir da reconstrução de imagem, superpostas na imagem $H\alpha$ no momento do pico, são co-espacialmente afins.

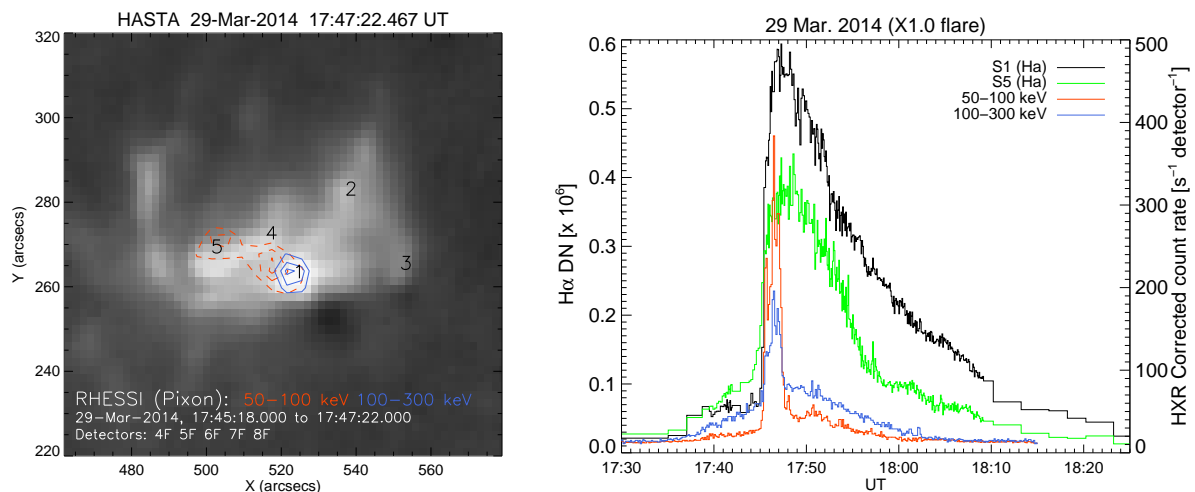


Figura 4.14: Painel esquerdo: Imagem em $H\alpha$ durante o pico do evento, os números indicam a posição das fontes identificadas. Os contornos (níveis: 75 %, 85 % e 95 %) são as fontes de emissão em raios X duros, nos canais: 50-100 keV (laranja) e 100-300 keV (azul). Painel direito: Evolução temporal das fontes S1 e S5 de $H\alpha$ em relação as fontes de emissão de raios X duros.

Os perfis temporais de comparação das fontes de $H\alpha$ e raios X duros são apresentadas na Figura 4.14 (Painel direito). Examinando a evolução temporal tanto de S1 como os fluxos de raios X duros no canal 100-300 keV, nota-se uma semelhança ao menos na fase inicial (impulsiva) da explosão. A emissão máxima em raios X duros tem uma duração de aproximadamente 4 minutos, enquanto que as emissões das fontes $H\alpha$ têm uma duração mais prolongada que corresponde à fase gradual da explosão. A correlação tanto espacial como temporal no início, sugere que o aumento da emissão em $H\alpha$ foi possivelmente devido à precipitação de partículas não-térmicas na cromosfera, com energias ao menos da ordem de 100 keV.

4.4. Evento do 1 de Agosto de 2014

O evento detectado em 30 THz durante a explosão solar do dia 1 de Agosto de 2014, foi classificado como M2,0 na escala de raios X moles do GOES. Este evento foi registrado simultaneamente em 30 THz e $H\alpha$, pelo sistema de observação solar, recentemente instalado no Observatório Solar Mackenzie, da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Foram feitas as análises, da evolução temporal do evento em 30 THz, juntamente com os perfis obtidos em $H\alpha$, UV/EUV, raios X moles e observações em rádio na faixa de microondas. Também foram examinadas a distribuição espacial das fontes de emissão identificadas em 30 THz, em relação as fontes de $H\alpha$ e UV/EUV.

4.4.1. Observações

A explosão solar do dia 1 de Agosto aconteceu na região ativa NOAA-12130 (S09°E35°). Baseado em observações do satélite GOES, a explosão começou às 14:43 UT atingindo o seu máximo às 14:48 UT. Em 30 THz o excesso da emissão começou a ser notado em torno das 14:46:40 UT, onde no máximo é possível distinguir dois picos (isto é, às 14:47:15 UT e 14:47:26 UT), que apresentam coincidência temporal com os picos observados em microondas em 8,8 e 15,4 GHz. Assim, os picos dos perfis temporais das fontes em $H\alpha$ e a derivada dos fluxos de raios X moles, também exibem uma correspondência temporal com os picos observados em 30 THz. O evento apresenta também uma fase gradual com uma duração de 10 minutos aproximadamente, esta característica é igualmente observada em $H\alpha$, UV/EUV (1700, 304 Å), assim como em microondas.

Também fizemos uma inspeção nos dados de luz branca (6173,3 Å), com a finalidade de encontrar uma componente na fotosfera associado com a explosão, no entanto, não identificamos nenhuma clara evidência do excesso de emissão em luz branca nos dados do instrumento SDO/HMI.

4.4.2. Fotometria em 30 THz, $H\alpha$ e UV/EUV

O cálculo da fotometria em 30 THz foi obtida a partir da diferença de duas áreas retangulares concêntricas, uma de 5×5 pixels ($20.1'' \times 20.1''$) sobre a região da explosão, enquanto que a outra uma área sobre a fotosfera calma circundante à explosão, com uma

dimensão de 11×18 pixels ($44'' \times 72''$). No caso dos dados de $H\alpha$ e 1700 \AA , devido à melhor resolução espacial, identificamos várias estruturas e fontes de emissão, sobre as quais foram calculados os perfis temporais. Para $H\alpha$ foi considerada uma área de 19×19 pixels ($36'' \times 36''$) que cobre toda a região da explosão (S_0), enquanto que para as três fontes menores S_1 , S_2 , e S_3 foram consideradas áreas de 5×5 pixels (Painel central na Figura 4.15), respectivamente.

Em 1700 \AA , foram identificadas até sete fontes (I_1 a I_7), sobre os quais foram calculadas as curvas de luz numa área de 5×5 pixels, enquanto que a região maior (I_0) que cobre toda a explosão é de 51×51 pixels ($30'' \times 30''$). Também foi calculado o perfil temporal para 304 \AA (L_0), para uma área similar à de I_0 de 1700 \AA . A Figura 4.15 mostra as posições e tamanhos das regiões de interesse, a partir dos quais foram calculadas as curvas de luz. Para os casos de $H\alpha$ e 1700 \AA , são também mostradas as regiões de referência do Sol calmo, delimitadas pelas caixas brancas os quais têm mesmos tamanhos do que S_0 e I_0 , respectivamente.

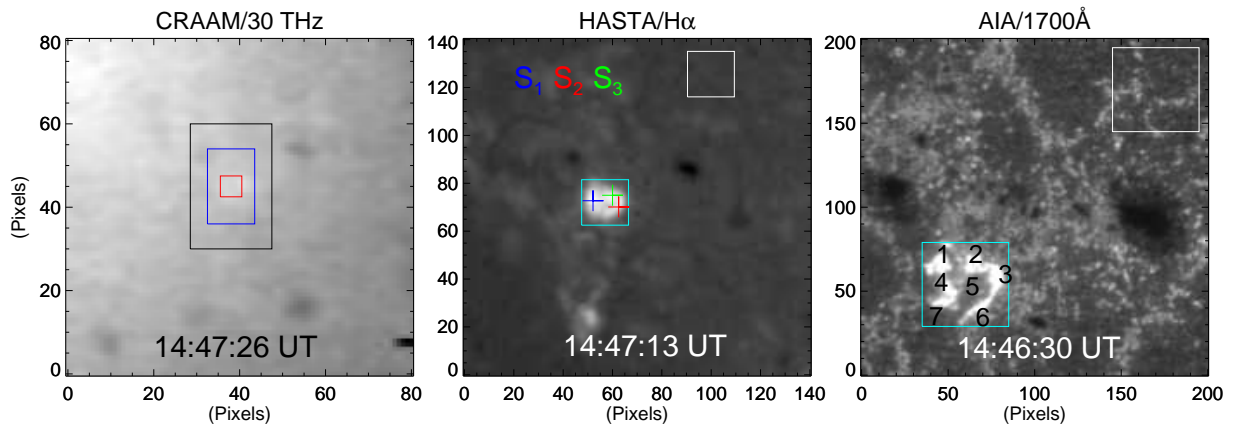


Figura 4.15: Painel esquerdo: Imagem em 30 THz no pico do evento. A caixa vermelha indica a região onde foi calculado o excesso da emissão, a caixa azul e a preta delimitam as regiões consideradas para a subtração do background. Painel central: Imagem em $H\alpha$, a caixa ciana corresponde à região S_0 , as marcas '+' azul, vermelha, e verde, são as posições em torno das quais foram calculadas as intensidades de S_1 , S_2 , e S_3 , respectivamente. A caixa branca é a região considerada como Sol calmo. Painel direito: Imagem em 1700 \AA , a caixa ciana e a branca delimitam I_0 e a região do Sol calmo respectivamente, enquanto que os números indicam as fontes identificadas.

O procedimento para estabilizar (co-alinhar) às imagens dos três conjunto de dados (isto é: 30 THz, $H\alpha$, e 1700 Å) para obtenção dos perfis temporais, foi feito aplicando a técnica descrita na Seção 3.1. No entanto, a técnica referida previamente, não é aplicável sobre os dados de 304 Å, devido a estes não possuírem um ponto de referência fixo para o alinhamento, já que a camada do Sol observada neste comprimento de onda apresenta mudanças todo o tempo. Em vez disso, foi usada a função “`drot_map`”, que simula uma rotação diferencial das imagens para um certo tempo de referência.

4.4.3. Evolução morfológica em 30 THz, $H\alpha$, e UV/EUV

Durante o evento do dia 1 de Agosto de 2014, aumentos das emissões mais evidentes em $H\alpha$ e UV/EUV foram observadas conforme o evento em 30 THz evoluía. A Figura 4.16 mostra a evolução morfológica do evento em $H\alpha$, UV (1700 Å) e EUV (304 Å). Na sequência de imagens é de notar que a localização da emissão em 30 THz é espacialmente coincidente com as observadas em $H\alpha$ e UV/EUV. Em torno das 14:46 UT, é possível identificar várias fontes e estruturas de emissão em $H\alpha$ e UV/EUV, as quais não são possíveis de indentificar nas imagens de 30 THz. Outra fonte de emissão de menor intensidade é observada no sul a partir das 14:47 UT em $H\alpha$, 1700 e 304 Å, mas não foi detectada em 30 THz.

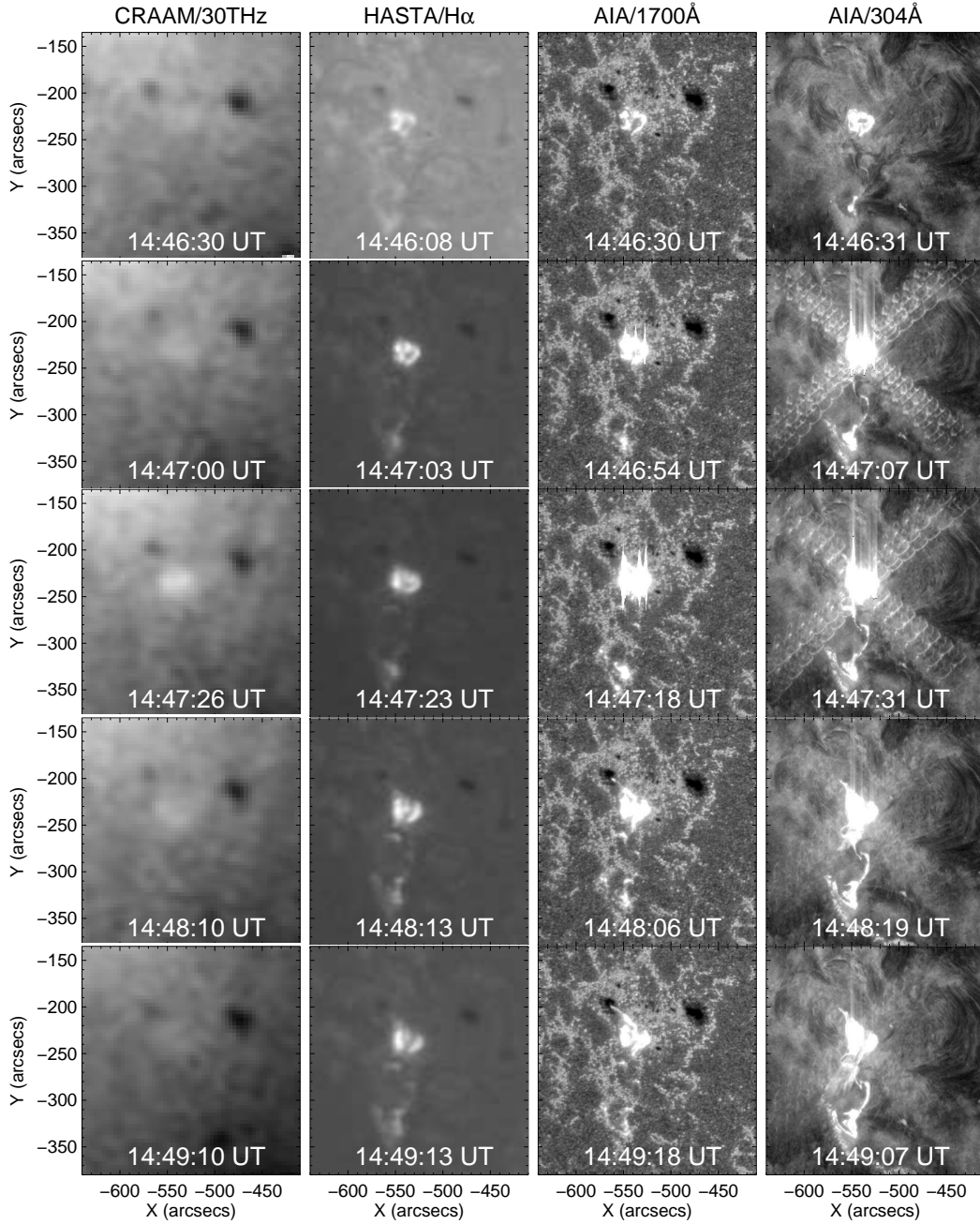


Figura 4.16: Evolução morfológica da explosão solar do dia 1 de Agosto de 2014, em 30 THz, $H\alpha$, 1700 e 304 Å.

4.4.4. Evolução temporal e fontes de emissão em 30 THz

A Figura 4.17 apresenta a evolução temporal do evento em 30 THz, expressa em unidades de fluxo solar (sfu), juntamente com o perfil de rádio em 15 GHz e a derivada de raios X moles do GOES (1 - 8 Å). Foi usada a derivada da emissão de raios X moles como uma aproximação da emissão de raios X duros (Neupert 1968), já que para este evento não foi registrado plenamente em raios X duros. Durante o máximo da explosão,

em 30 THz claramente pode-se distinguir dois picos (*bursts*) em torno das 14:47:14 UT e 14:47:26 UT (linhas verticais tracejadas na Figura 4.17). Estas características são igualmente observadas em rádio, e na derivada de raios X moles. Nos perfis temporais das fontes de $H\alpha$, foram também observados os dois picos no máximo do evento, que são apresentados e discutidos junto com outros comprimentos de onda, no Capítulo 5. Os dois picos observados em 30 THz levaram à procura de fontes de emissão, já que frequentemente numa explosão solar os múltiplos picos sugerem a presença de distintas fontes de emissão. Certamente, foram identificadas duas fontes de emissão em 30 THz durante a fase impulsiva da explosão.

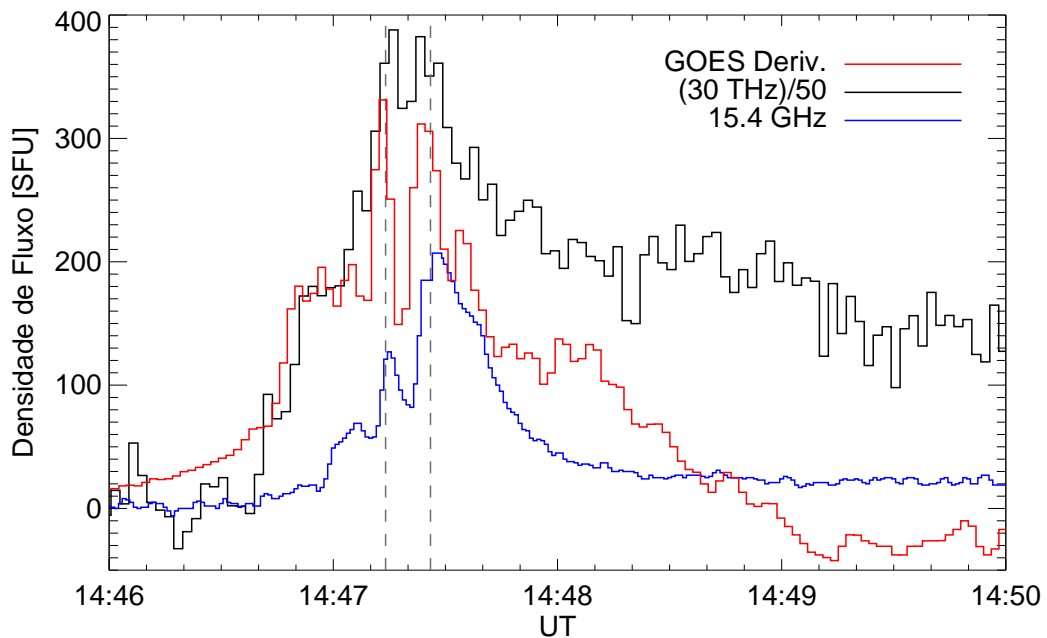


Figura 4.17: Evolução temporal do evento de 1 de Agosto de 2014 em 30 THz, e rádio (15.4 GHz). Para efeitos de comparação também foi incluída a derivada no canal (1.0-8.0 Å) do GOES.

Para examinar a distribuição espacial das fontes identificadas em 30 THz, foram usados mapas de contornos obtidos durante o pico do evento. A fim de tornar muito mais evidentes estas fontes, calculou-se a média de 50 imagens em torno das 14:47:14 UT para a fonte do lado oeste (F_2) e em torno das 14:47:26 UT para a fonte do lado leste (F_1). Sobre os resultados das médias das imagens anteriores, foi subtraída uma imagem prévia à explosão (pre-flare image) obtida da média de 50 imagens em torno das 14:45:40 UT. Também foram obtidos os mapas de contornos para as fontes de $H\alpha$ (S_1 , S_2 e S_3) nos horários mais próximos aos instantes das fontes F_1 e F_2 de 30 THz, ou seja às 14:47:13 UT e

14:47:23 UT, respectivamente.

A Figura 4.18 apresenta as fontes, onde claramente podem-se observar que as fontes de emissão em 30 THz estão posicionadas muito próximas às fontes de $H\alpha$, isto é: F_1 sobre S_1 e F_2 sobre S_2 e S_3 , respectivamente. Os contornos obtidos foram sobrepostos no magnetograma do SDO/HMI, para visualizar a configuração magnética no momento da explosão solar. É importante ressaltar que às 14:47:14 UT (Painel esquerdo na Figura 4.18) a fonte mais intensa é F_2 , enquanto que às 14:47:26 UT (Painel direito na Figura 4.18) a mais intensa é a fonte F_1 . As intensidades máximas das fontes F_1 e F_2 , apresentam uma coincidência temporal com os dois picos observados durante o máximo da explosão solar em 30THz (Figura 4.17). Por outro lado, as fontes identificadas em 30 THz e $H\alpha$, estão também espacialmente associadas com as fontes observadas em outros comprimentos de ondas (UV/EUV), o que indicaria que as radiações tiveram uma origem na mesma área projetada ao longo da baixa atmosfera solar.

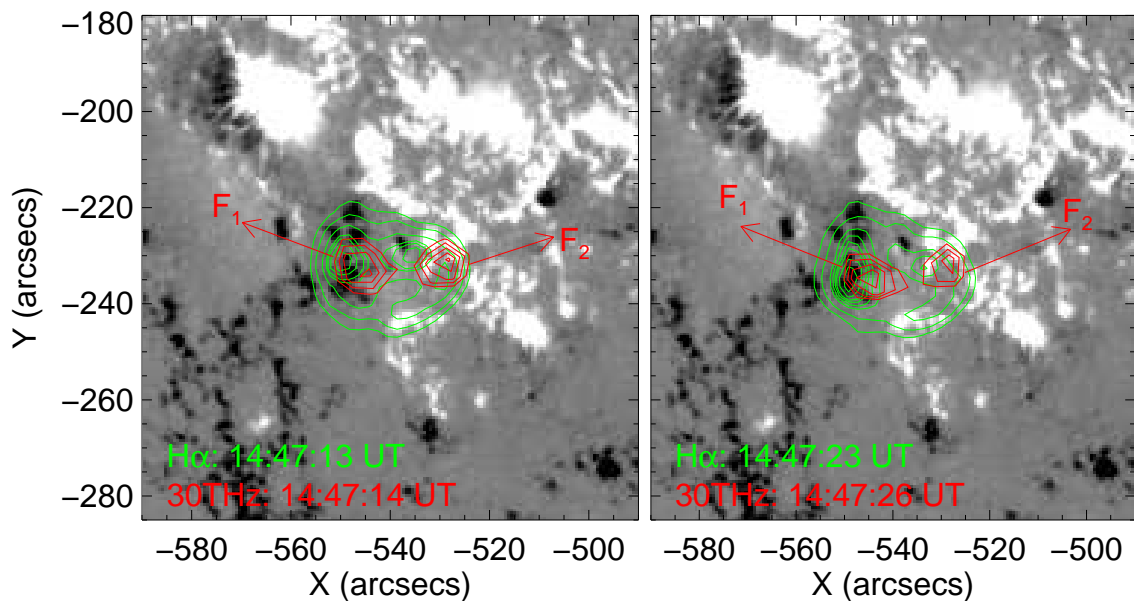


Figura 4.18: Mapa de contornos das fontes identificadas em 30 THz (F_1 lado este, F_2 lado oeste) e $H\alpha$, superpostas no magnetograma do dia 1 de Agosto de 2014 obtida às 14:47:09 UT.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Este trabalho teve como objetivo estudar a dinâmica (resposta) da baixa atmosfera solar durante explosões, baseado principalmente em observações de rádio em altas frequências (milimétrico e submilimétrico), no visível ($H\alpha$, luz branca), 30 THz, e UV/EUV. Adicionalmente foram utilizados dados de raios X (duros e moles). Dos quatro eventos analisados (E1: 13 de Março de 2012, E2: 13 de Maio de 2013, E3: 29 de Março de 2014, e E4: 1 de Agosto de 2014), E1 e E4 foram detectados em 30 THz, aos quais se fez uma análise comparativa da evolução temporal e a distribuição das fontes de emissão, com observações em outros comprimentos de onda.

5.1. Resultados observacionais

Nesta seção apresentamos um resumo da evolução temporal em múltiplos comprimentos de onda, dos eventos analisados. As Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, mostram os perfis temporais dos eventos E1, E2, E3 e E4, respectivamente.

Em relação ao evento E1 (Figura 5.1) o qual foi observado em uma banda extensa de frequências, o principal resultado é que a emissão em 30 THz apresenta duas etapas: uma fase impulsiva com componentes em $H\alpha$, luz branca, raios X duros, e rádio (>8 GHz), e uma fase gradual com respostas similares nas duas fontes principais de $H\alpha$ (S_1 , S_2). A componente da fase gradual observada em 30 THz e sua similaridade com $H\alpha$, permite sugerir a possibilidade que a origem da emissão em 30 THz seja térmica.

As emissões rádio em 15 e 45 GHz do evento E2 (Figura 5.2), apresentam várias e intensas pulsações durante a fase impulsiva, seguidas de uma componente gradual lenta e fraca. Tais pulsações da fase inicial são igualmente observadas em raios X duros nos mesmos intervalos de tempo. Por outro lado, os perfis temporais de luz branca (WL_1 , WL_2) calculadas a partir dos pés do arco coronal (Figura 4.8) apresentam uma boa correlação no máximo com os calculados em outros comprimentos de onda, mas não é possível distinguir as pulsações devido à baixa resolução temporal. Com respeito à emissão em 1600 e 1700 Å, apresentam três picos na fase principal da explosão, os quais correspondem às três pulsações observadas em rádio e raios X duros.

O evento E3, exibe uma fase gradual prolongada mais acentuada na faixa submilimétrica. Comparamos a evolução temporal de rádio em 212 GHz com os perfis das fontes de $H\alpha$, 304 e 1700 Å (Figura 5.3), a fim de verificar se a baixa cromosfera contribui para a emissão submilimétrica durante a fase gradual do evento. De fato, os perfis das fontes de $H\alpha$, 304 Å e 212 GHz mostram uma correlação estreita durante todo o evento, e também com a evolução temporal de raios X moles. Isto sugere que a emissão na faixa submilimétrica deste evento foi produzida pela contribuição tanto de fontes frias provenientes da cromosfera, como das fontes extremadamente quentes da coroa. Foram também plotados os perfis temporais de raios X duros na faixa 50-100 keV e na faixa 100-300 KeV, que correspondem espacialmente com as fontes S1 e S5 de $H\alpha$ (ver a Figura 4.14). Isto concorda com estudos onde indicam que o aumento da emissão $H\alpha$ é produzida pela precipitação de elétrons na cromosfera (cf. Trotter et al., 2000).

A Figura 5.4 mostra a evolução temporal do evento E4 em 30 THz, $H\alpha$, UV/EUV, rádio e raios X moles. A emissão em 30 THz apresenta duas etapas, uma fase impulsiva aproximadamente de 1 minuto e uma fase gradual que se prolonga por até 10 minutos. Estas características também são observadas em $H\alpha$ (S_0), 1700 Å (I_0) e 304 Å. Por outro lado, a coincidência no tempo entre o duplo pico observado no perfil temporal e as fontes de emissão em 30 THz sugere que tais fontes de emissão produziram os correspondentes picos. Portanto, a fim de verificar o duplo pico, foram calculados os perfis temporais das fontes S_1 e S_3 de $H\alpha$ localizadas próximas às fontes de 30 THz, e encontramos similar respostas entre as fontes 30 THz e $H\alpha$. O duplo pico detectado em 30 THz é igualmente observado

em rádio a 8 e 15 GHz, assim como, na derivada de raios X moles. Por outro lado, o evento E4 foi associado com emissões de rádio tipo III-*(reverse drift bursts)* que aparecem entre as 14:47:05 - 14:47:16 UT (Miteva et al., 2015), estas características indicam feixes de electrons movendo-se em direção à baixa atmosfera (Fárník & Karlický, 2007).

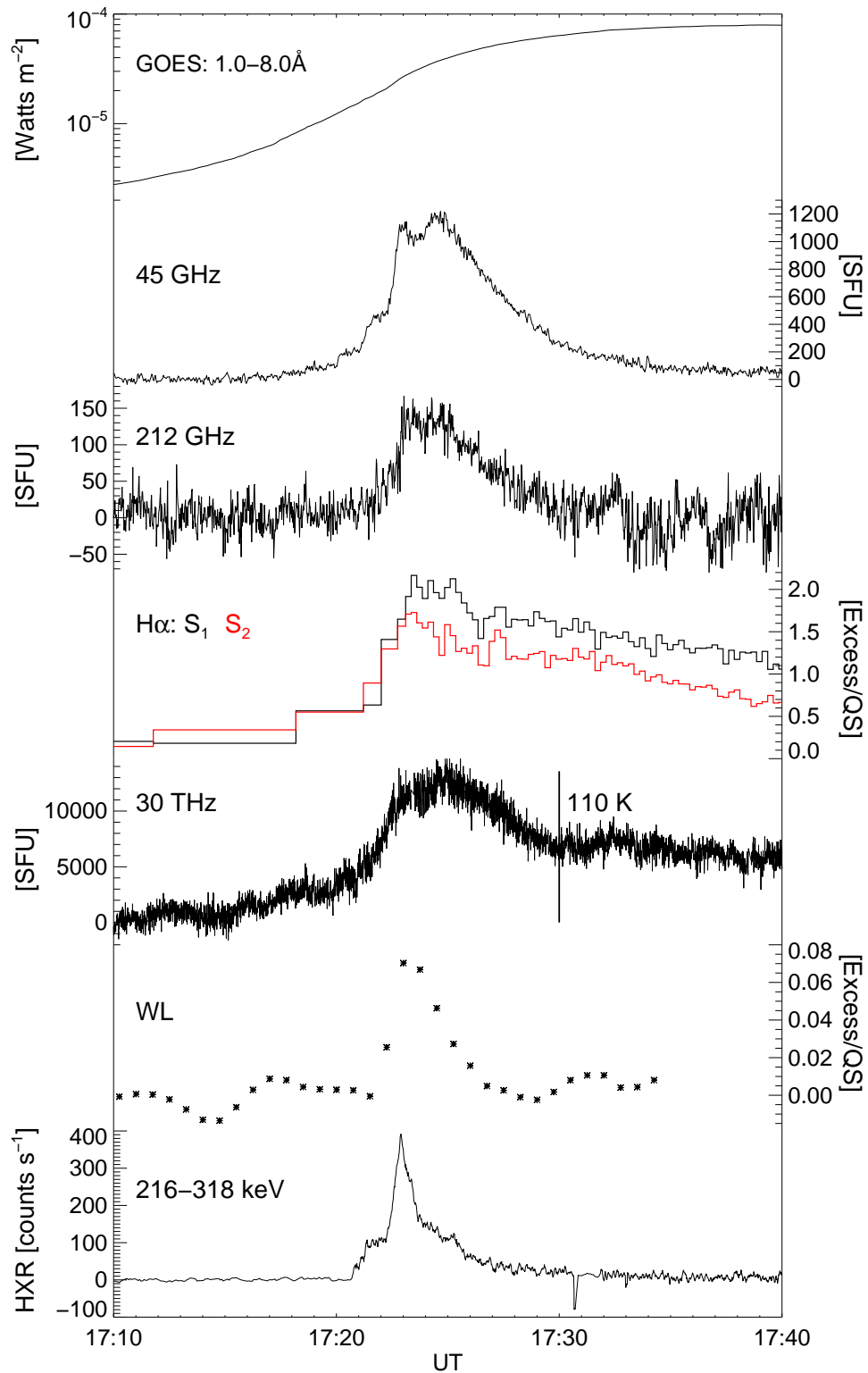


Figura 5.1: Evolução temporal da explosão solar do dia 13 de Março de 2012, observada em múltiplos comprimentos de onda. A linha vertical superposta no perfil temporal de 30 THz, indica o excesso de temperatura (Kelvin) observado durante o máximo da explosão.

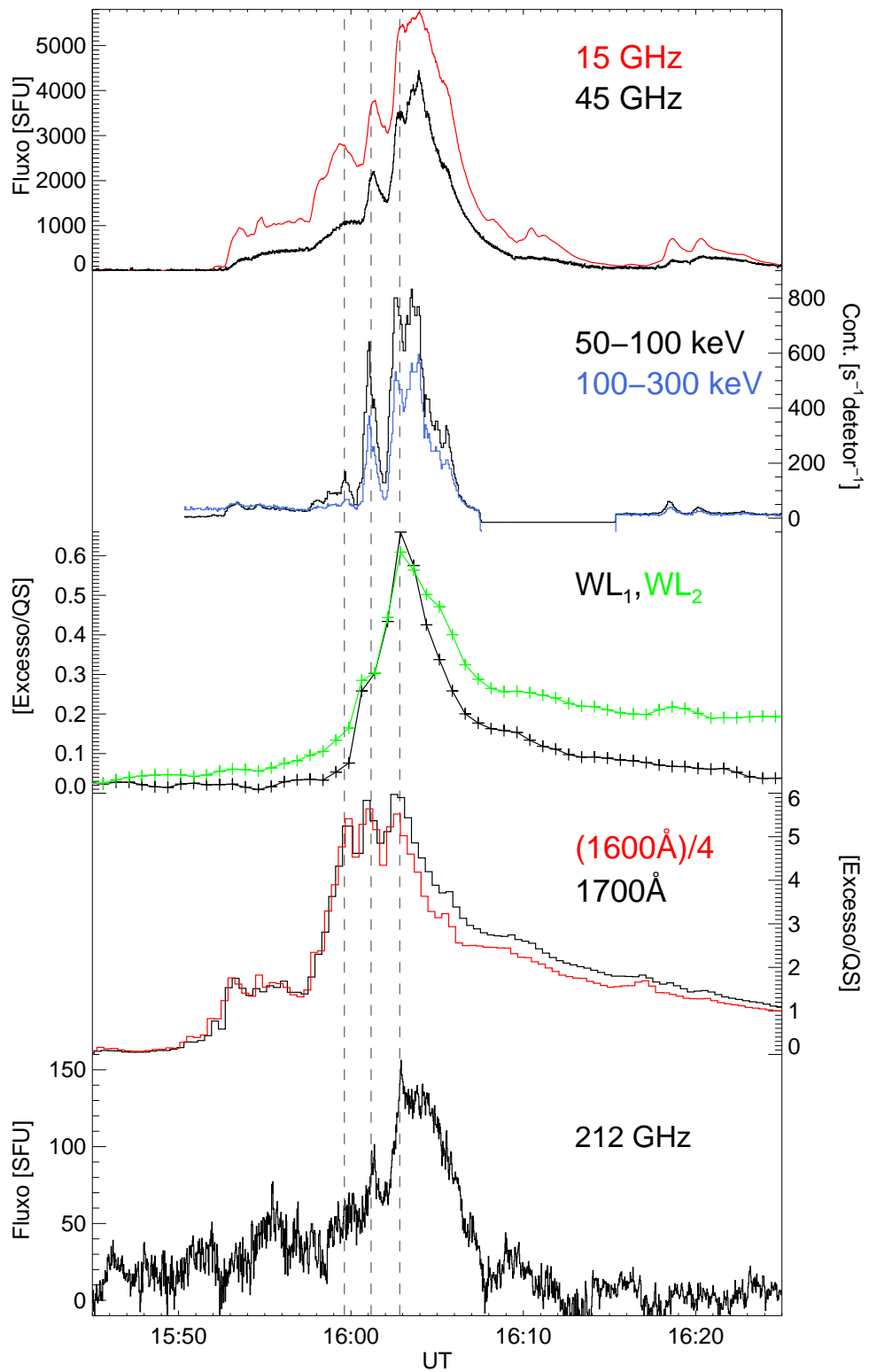


Figura 5.2: Evolução temporal da explosão solar do dia 13 de Maio de 2013, observada em múltiplos comprimentos de onda. As linhas verticais ressaltam as pulsações observadas durante a fase impulsiva do evento.

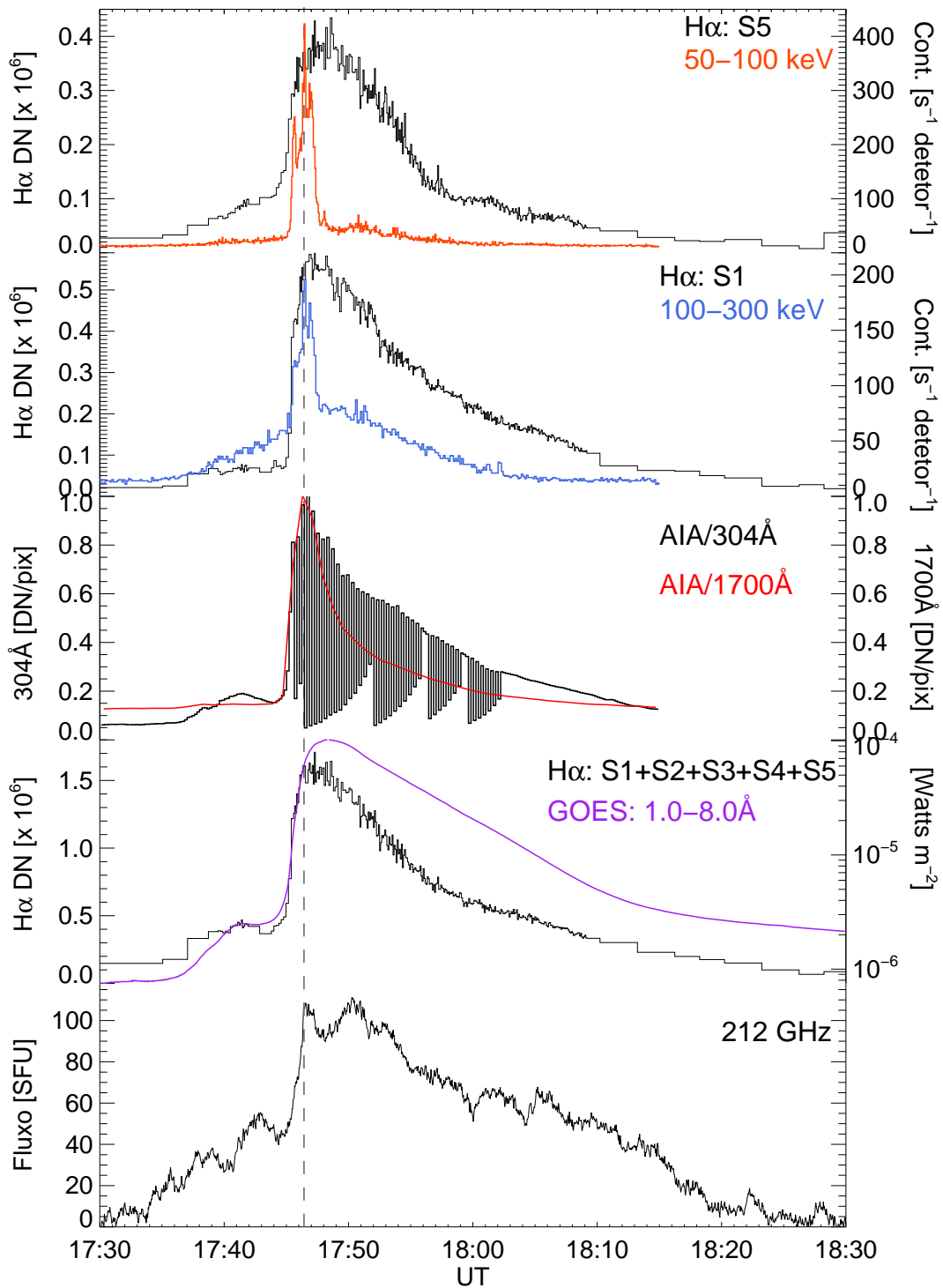


Figura 5.3: Evolução temporal em múltiplos comprimentos de onda, do evento do dia 29 de Março de 2014. Do painel inferior ao superior: excesso da densidade de fluxo em 212 GHz, perfil temporal da soma de todas as fontes H α com o perfil de raios X moles, evolução temporal em 1700 e 304 Å, e perfis temporais das fontes S1 e S5 de H α com as evoluções temporais de raios X duros nos canais 100-300 keV e 50-100 keV, respectivamente.

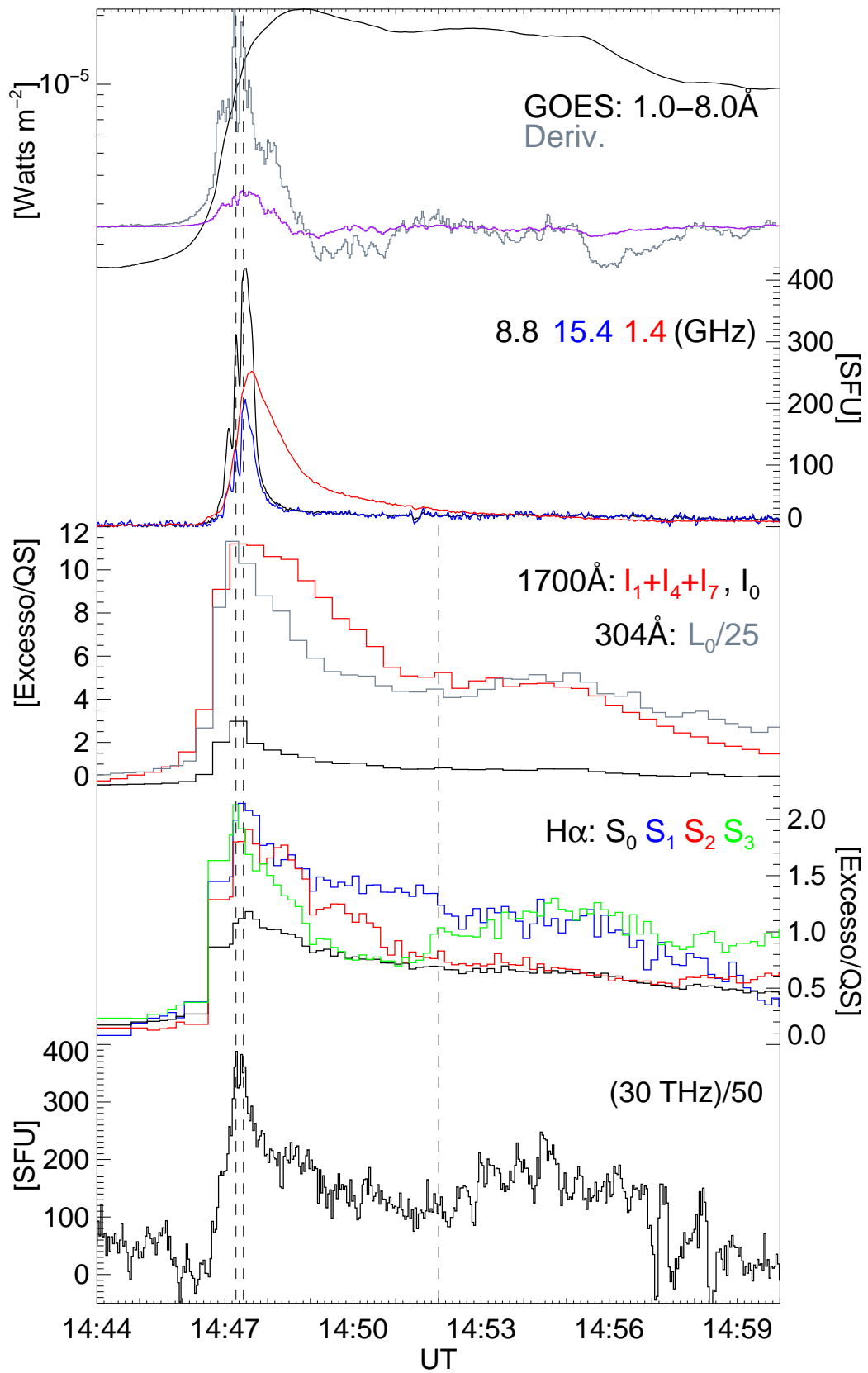


Figura 5.4: Evolução temporal em múltiplos comprimentos de onda do evento de 1 de Agosto de 2014. As duas linhas verticais em torno das 14:47 UT indicam os instantes do duplo pico observado em 30 THz.

5.2. Fase impulsiva dos eventos

Nesta seção discutimos principalmente os eventos E1, E2, e E3. O evento E4 não será discutido neste momento, pois não teve registro na faixa milimétrica, e também no submilimétrico a densidade de fluxo observada foi menor do que o limite superior (10 sfu). Os espectros obtidos durante o máximo da fase impulsiva, apresentam a típica característica da emissão giro-síncrotron, irradiada principalmente por elétrons não-térmicos, onde a frequência de pico está em torno de 10 GHz. Durante a fase impulsiva os espectros em frequências submilimétricas, exibem uma continuação da emissão giro-síncrotron usualmente observada na faixa de microondas.

Em relação à parte opticamente fina dos espectros, pode-se estimar os índices espectrais para cada evento. Estes valores são: $\alpha_{th1} = -1,22$ e $\alpha_{th2} = -2,11$, para os eventos E1, e E2, respectivamente. A radiação nesta parte do espectro é geralmente atribuída a emissão de elétrons com energias de vários MeVs (cf. Raulin et al., 1999; Krucker et al., 2013). Se considerarmos o caso giro-síncrotron relativístico como uma aproximação geral, o índice espectral δ dos elétrons acelerados durante o pico da explosão pode ser calculado a partir de $\delta = 2\alpha - 1$. Isto é: $\delta_1 = -3,4$ para o evento E1, e $\delta_2 = -5,2$ para o evento E2. Para os eventos discutidos previamente, os espectros obtidos durante o máximo da fase impulsiva claramente indicam emissões predominantemente de fontes não-térmicas, com alguma contribuição em menor escala de emissões térmicas *free-free* devido ao plasma quente (>1 MK).

Um estudo mais detalhado da fase impulsiva do evento E1 foi realizado por Trottet et al. (2015). O espectro em raios X e raios gama foi invertido para obter a distribuição dos elétrons e prótons emissores. O espectro resultante para os elétrons mostra uma dupla lei de potência com energia de quebra em aproximadamente 800 keV. Os dois resultados mais importantes decorrentes do estudo da fase impulsiva foram: (i) o espectro não-térmico observado em rádio é compatível com a emissão da distribuição de elétrons obtidos da análise em raios X e raios gama, (ii) a emissão milimétrica e submilimétrica é produto dos elétrons com energia de até ~ 10 MeV.

A seguinte etapa do trabalho seria derivar parâmetros físicos aplicando o código giro-

síncrotron, ajustando a parte opticamente fina dos espectros. Isto nos permitirá estimar a distribuição de energia que atingiram os elétrons acelerados para produzir emissões em frequências acima da faixa de microondas.

5.3. Fase gradual dos eventos

Após a fase impulsiva em rádio todos os eventos analisados, sem exceção, exibem uma fase gradual que é observada em frequências acima de 8 GHz. Esta etapa da explosão tem uma duração de aproximadamente 20 minutos nos eventos E1 e E2. Contrariamente, o evento E3 apresenta uma fase gradual prolongada muito mais proeminente no submilimétrico (212 GHz; Figuras 4.10, e 5.3), com uma duração de aproximadamente 40 minutos. No caso do evento E4, a fase gradual em 8 e 15 GHz começa às 14:48 UT estendendo-se por cerca de 10 minutos, esta característica também é observada em 30 THz.

Por outro lado, os espectros obtidos durante esta etapa, exibem características particulares o que indica a presença de mais de um mecanismo de emissão. Os pontos principais a serem discutidos em relação aos espectros obtidos são:

- No evento E1 às 17:38:50 UT, a componente giro-síncrotron do espectro em microondas parece ser superposta por uma componente *bremstrahlung* térmica observada acima de 45 GHz, onde a radiação em 212 GHz permanece quase constante, enquanto que os níveis de emissão em microondas, e milimétrico apresentam uma diminuição considerável comparados com os níveis das 17:28:04 UT (Figura 4.5).
- No caso do evento E2, levando-se em consideração os espectros obtidos (a partir das 16:15 UT, na Figura 4.7) pode-se estabelecer que neste evento foi predominante a emissão giro-síncrotron irradiada por elétrons não-térmicos, com presença de uma pequena fracção de radiação térmica distinguível em frequências altas (>45 GHz).
- Em relação ao Evento E3, durante toda a fase gradual a densidade de fluxo em 212 e 405 GHz é notavelmente maior do que na faixa de microondas. Os espectros seguem um padrão crescente com aumento das frequências (Figura 4.12). Estas características são atribuídas a emissões térmicas de duas componentes, uma componente opticamente fina situada na coroa, e outra opticamente espessa localizada na cromosfera.

Perfis temporais em $H\alpha$ e UV

A fim de abordar as considerações feitas previamente, investigamos a resposta da baixa cromosfera através dos perfis temporais das fontes de $H\alpha$, UV (1600, 1700 Å) e EUV (304 Å), os quais foram comparados com os perfis de rádio obtidos na faixa milimétrica e submilimétrica.

A melhor resposta cromosférica com relação à evolução temporal de rádio em 212 GHz foi observada no evento E3, onde os perfis das fontes $H\alpha$ e 304 Å acompanham muito bem no início, no máximo, e durante a fase gradual do evento. Isto sugere que neste evento a emissão em 212 GHz provém de fontes *bremsstrahlung* térmicas opticamente-espessa, originadas provavelmente nos pés dos arcos coronais. Em referência ao evento E1, foram observadas similaridades nas respostas das fontes S_1 e S_2 de $H\alpha$ em relação à emissão em 212 GHz. No entanto, na etapa inicial, no máximo e durante a fase gradual apresentaram diferenças. No que diz respeito ao evento E2, levando em conta uma incerteza no horário devido à baixa resolução temporal dos dados do instrumento AIA, a evolução da emissão em 1600 e 1700 Å exibe uma certa semelhança com os perfis de rádio em altas frequências, principalmente no máximo do evento.

Emissão térmica

Para caracterizar a fase gradual dos eventos, comparamos os espectros observados na faixa 1-405 GHz, com os espectros térmicos obtidos utilizando o modelo a partir das medições do GOES (ver a Seção 3.4 para detalhes), e encontramos algumas semelhanças. A similaridade principalmente reside na parte opticamente espessa dos espectros, no entanto, na parte opticamente fina os valores observados na faixa 90-405 GHz são aproximadamente 1, 3, e 4 vezes maior do que o modelo, para os eventos E1, E2, e E3, respectivamente. Mesmo assim, se consideramos que na fase gradual tal diferença entre os espectros observados e os obtidos do modelo é devido à presença ou contribuição parcial de emissões não-térmicas, se for o caso, tais contribuições só afetaria até a faixa milimétrica. Isto indica que é necessária a contribuição de uma componente adicional para explicar a diferença entre tais espectros, principalmente na faixa submilimétrica.

Dos resultados observacionais e os obtidos a partir do modelo, alguns aspectos devem ser salientados sobre as diferenças mencionadas anteriormente: (i) a emissão da fonte de raios X moles provavelmente encontra-se nos arcos coronais, (ii) a suposição de uma fonte coronal isotérmica durante a explosão não é inteiramente correta, e (iii) as observações em rádio em altas frequências são mais sensíveis a fontes mais frias e densas do que o plasma coronal quente.

Até aqui foi mostrado que aplicando o modelo descrito na Seção 3.4, notamos que durante a fase gradual a emissão do plasma coronal não desempenha um papel significativo na emissão rádio acima de 10 GHz, de modo que a contribuição substancial na emissão em frequências mais altas seria devido a fontes mais frias e densas, localizadas na baixa atmosfera solar. A afirmação anterior pode ser verificada alterando os parâmetros livres na Equação (3.7), isto é: a temperatura (T) e a medida de emissão (EM), o que nos daria uma melhor idéia da resposta da baixa atmosfera solar. Por exemplo, supondo uma fonte de emissão mais fria do que a coroa durante a explosão, com uma temperatura da ordem de $T' \approx 3 \times 10^6$ K e a medida de emissão de $EM' \approx 6 \times 10^{49}$ cm⁻³, consegue-se obter uma boa aproximação entre o espectro simulado e o observado na parte opticamente fina (linha verde na Figura 5.5).

O fato de que os espectros simulados não ajustam os dados, ou em baixas frequências, ou em altas frequências, conduz a concluir que a densidade de fluxo observada, não é resultado da emissão de uma fonte única, mas sim de mais de uma fonte localizadas em diferentes camadas da atmosfera solar. Isto é: devido a uma componente opticamente fina proveniente dos arcos coronais com temperaturas extremamente quentes (T_q) da ordem de $5 - 21 \times 10^6$ K, e outra componente opticamente espessa das regiões cromosféricas com temperaturas frias (T_f) da ordem de $1 - 3 \times 10^6$ K. Levando em conta estas considerações, e a fim de obter uma boa representação dos espectros através do modelo, a Equação (3.4) (Seção 3.4) deveria conter um termo adicional que representasse a contribuição da fonte fria, ou seja:

$$T'_{br}(t, \nu) \approx T_q(t)(1 - e^{-\tau_q(t, \nu)}) + T_f(t)(1 - e^{-\tau_f(t, \nu)}) \quad (5.1)$$

Isto implicará na modificação da Equação (3.7) (Seção 3.4) onde o resultado final da densidade de fluxo total, será representado pela combinação das duas fontes de emissão.

Como primeira aproximação do cálculo da densidade total do fluxo derivado a partir da Equação (3.7), foram somadas os fluxos simulados devido a uma fonte fria e outra devido a uma fonte quente, considerando em cada caso um mesmo tamanho das fontes de emissão. Os resultados são apresentados nas Figuras (5.5, 5.6 e 5.7; linhas vermelhas), os quais confirmam que nesta etapa da explosão a radiação é produzida pela combinação de várias fontes de emissão das diferentes camadas da atmosfera solar. A partir dos resultados obtidos, deve-se destacar que as altas frequências em rádio podem responder a emissões localizadas em diferentes camadas da atmosfera solar, isto é: às emissões de fontes quentes e fracas localizadas nas altas camadas da atmosfera, assim como às fontes frias e densas da baixa atmosfera.

Por outro lado, alguns eventos exibem aumentos na densidade de fluxo na fase gradual acima de 200 GHz (cf. Trotter et al., 2011), o que torna importante observações em frequências ainda mais altas, como 30 THz.

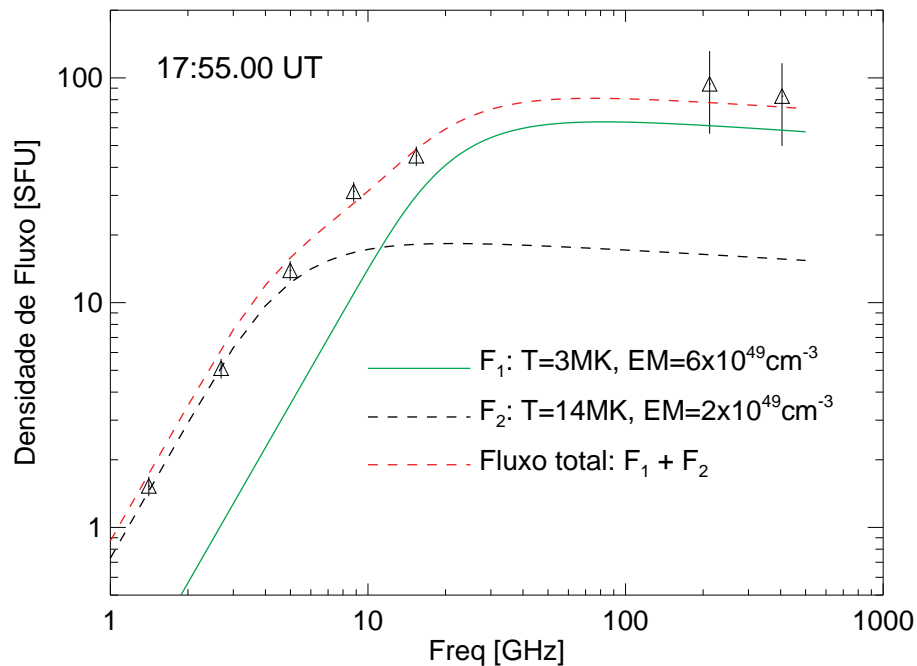


Figura 5.5: Espectro em rádio observado durante a fase gradual do evento 29 Março de 2014 (triângulos com as barras de erro). A linha tracejada (preta) representa o espectro simulado obtido a partir das observações do GOES para uma fonte quente, enquanto que a linha contínua (verde) é o espectro simulado para uma fonte fria. Em ambos casos foi considerada uma área de $30''$ de arco de diâmetro. A linha vermelha é a soma de fluxos de fontes frias mais fluxos de fontes quentes.

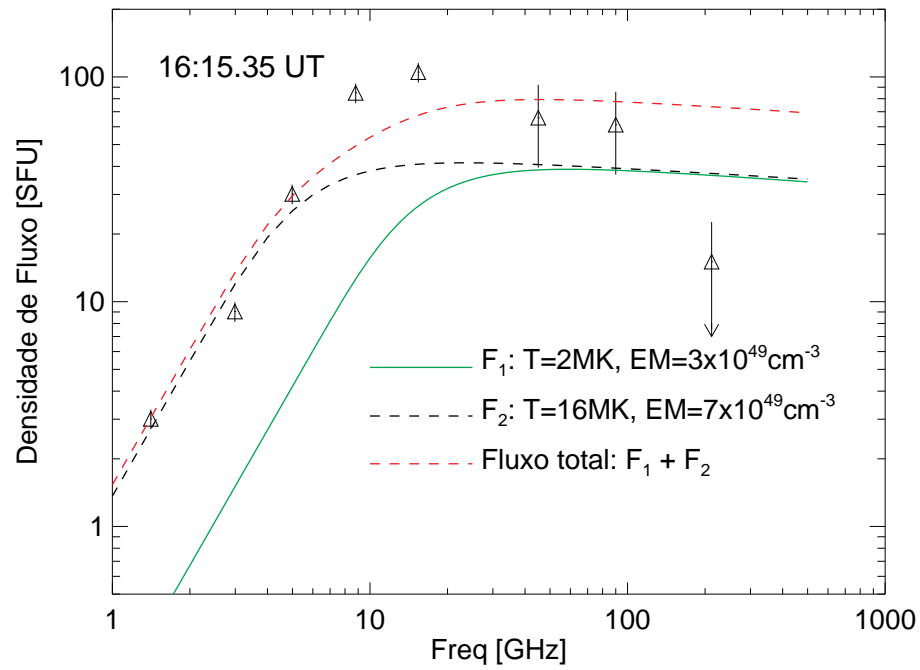


Figura 5.6: Mesmo que a Figura (5.5) mas para o evento de 13 de Maio do 2013. Neste caso foi considerada uma área de emissão de $40''$ de arco de diâmetro.

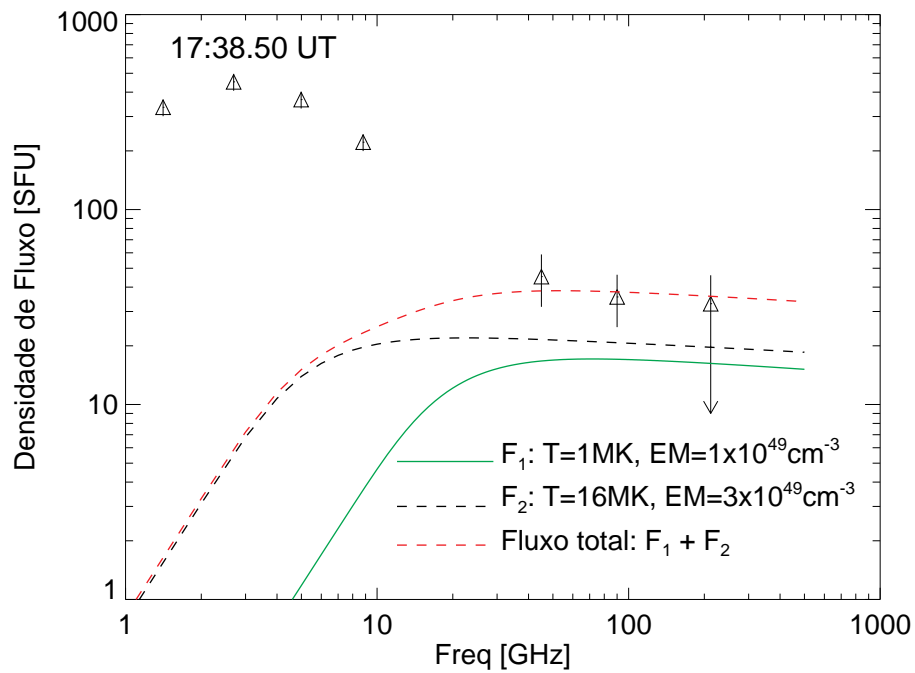


Figura 5.7: Mesmo que as Figuras (5.5 e 5.6) mas para o evento de 13 de Março do 2012. Neste caso foi considerada uma área de emissão de $30''$ de arco de diâmetro.

5.4. Origem da emissão 30 THz

Dos quatro eventos analisados, dois deles (E1 e E4) foram registradas na recém explorada frequência 30 THz (Infravermelho médio, mid-Infrared). O fato de ter sido encontradas respostas similares na evolução temporal de 30 THz em relação à luz branca, $H\alpha$, UV (1700 Å), e raios X duros. Também a coincidência encontrada na distribuição espacial entre as fontes de emissão de 30 THz com as de $H\alpha$ e luz branca, conduz a abordar as seguintes perguntas: de qual região da baixa atmosfera solar provém a radiação 30 THz, e qual mecanismo é responsável de tal emissão? já que no estudo preliminar deste evento (Kaufmann et al., 2013), não houve uma resposta conclusiva a estas perguntas.

Vários mecanismos foram sugeridos para explicar a emissão no infravermelho-contínuo-distante (Far Infrared continuum), tais como: radiação sincrotrônica, emissão térmica da baixa atmosfera solar, emissão térmica *free-free* da coroa, e emissão térmica da região cromosférica o que produz a radiação $H\alpha$ (Ohki & Hudson 1975). Além disso, outros modelos da atmosfera solar situam a profundidade óptica $\tau \approx 1$ para 30 THz a uma altura de ~ 150 km acima da superfície, onde a temperatura é da ordem de 5000 K, o que sugere que a emissão 30 THz poderia estar próxima à região de emissão de luz branca. Esta última foi medida a uma altura de 195 ± 70 km acima da fotosfera (Martínez Oliveros et al., 2012).

Para o evento E1 (13 Março de 2012), usando modelos semi-empíricos tanto para a baixa atmosfera do Sol calmo como para a explosão (flare), investigamos a provável região de emissão em 30 THz (Trottet et al., 2015). Estes modelos baseados no equilíbrio hidrostático e estatístico, dado um perfil de temperatura em função da altura resolvem numericamente a equação de transferência radiativa para um sistema *non-LTE* (non-Local Thermodynamic Equilibrium), a fim de obter um espectro representativo (synthetic flare spectrum) da atmosfera. Com o objetivo de comparar os resultados dos modelos para uma explosão (flare) com as condições do Sol calmo, foi utilizado o modelo C7 (Avrett & Loeser, 2008), para uma atmosfera solar calma. Foi também considerado o modelo FLA (Mauas, Machado, e Arvett, 1990) desenvolvido para eventos com emissões de luz branca. Utilizando o código PAKAL (De la Luz et al., 2010; De la Luz, Lara, e Raulin, 2011), e levando em consideração a temperatura e o perfil da densidade de hidrogênio com a al-

tura, derivado a partir do código de transferência radiativa PANDORA (Avrett & Loeser, 2003), foram realizados os seguintes passos: (i) calcular a densidade da população de íons e elétrons em função da altura, incluindo H^- , (ii) calcular os coeficientes de absorção e emissão em função da altura, e (iii) resolver a equação de transferência radiativa. Os resultados foram utilizados para estimar uma “função de contribuição” (CF_{30}) (Heinzel & Avrett, 2012) para 30 THz em função da altura para os dois modelos, FLA e C7.

Na Figura 5.8 é apresentada CF_{30} obtida a partir dos modelos (FLA, C7), superpostas aos perfis da espessura óptica (τ_{30}) e temperatura (T) em função da altura (h). Das figuras deve-se notar que: (i) o perfil da CF_{30} em função da altura é similar para os dois modelos, (ii) CF_{30} é máxima onde τ_{30} é ≈ 1 , como é de esperar, e (iii) o máximo da CF_{30} acontece a ~ 180 km de altura. O que indica a altura de emissão em 30 THz. Nota-se também que em ~ 180 km é observada uma diferença de 200 K entre os perfis de temperatura do modelo C7 e de FLA. Esta diferença indica para as condições explosivas do modelo FLA, um excesso de ~ 200 K em 180 km de altura em relação ao modelo C7. Por outro lado, o excesso observado durante o pico da explosão foi de ~ 110 K, o que representa o excesso de temperatura de antena medido pelo instrumento.

Finalmente, o fato do modelo FLA produzir resultados compatíveis com as observações, mostra que para o evento E1 a emissão em 30 THz pode ser entendida através de um mecanismo térmico *free-free*.

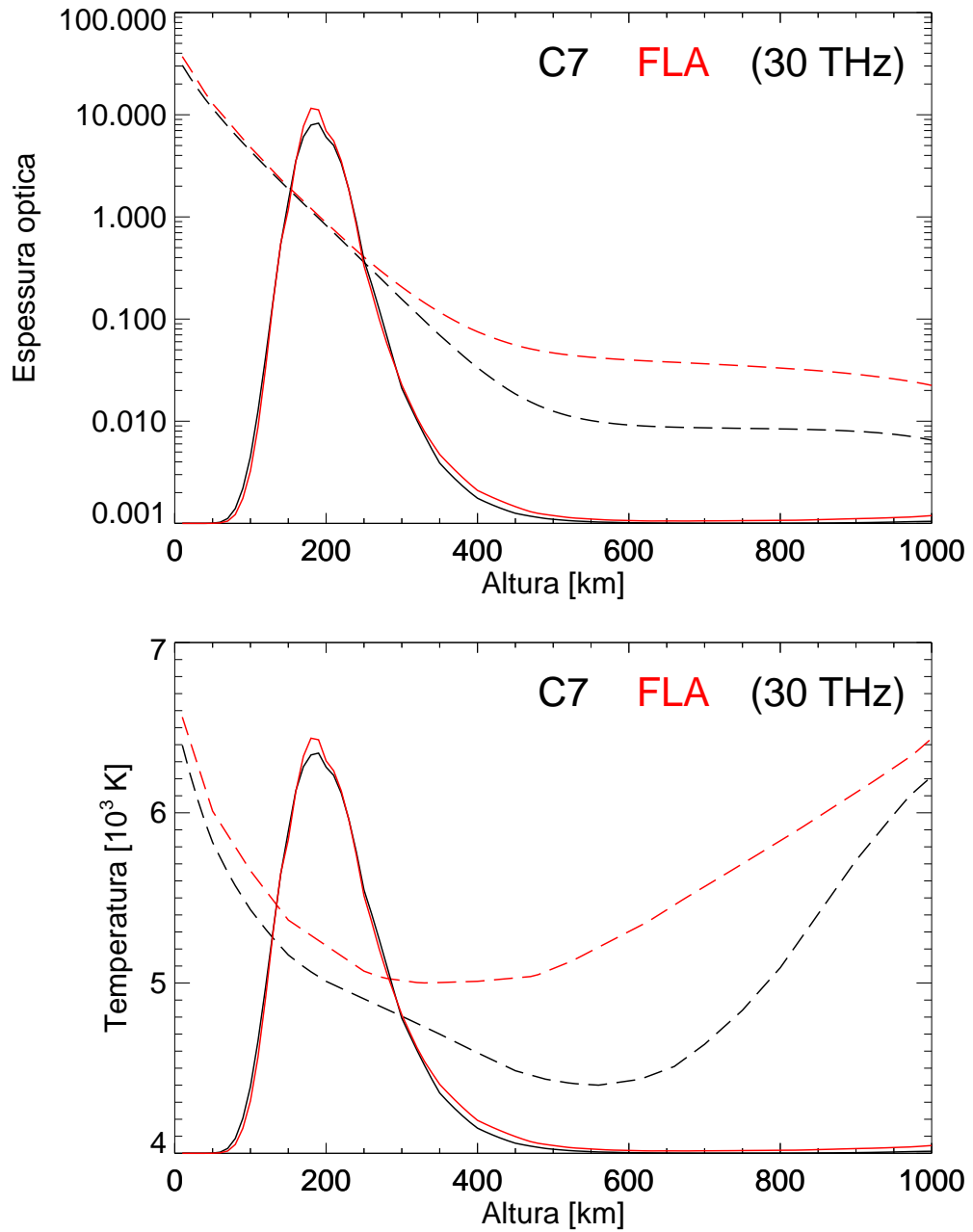


Figura 5.8: Paineis superior: Opacidade (linhas tracejadas) e função de contribuição (linhas contínuas) em função da altura (0 km é fotosfera). Paineis inferior: Temperatura da atmosfera (linhas tracejadas) e função de contribuição em função da altura. Para ambos painéis, a cor vermelha representa o resultado do modelo FLA, enquanto a cor preta representa o modelo C7.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

O aspecto principal do evento do dia 13 de Março de 2012, foi a detecção da emissão em 30 THz e sua semelhança com a evolução das fontes S_1 e S_2 de $H\alpha$, tanto na etapa inicial como gradual do evento, também as respostas similares achadas entre as emissões 30 THz, luz branca, e raios X duros na fase impulsiva da explosão. Levando-se em conta a similaridade da evolução temporal de $H\alpha$ em relação a 30 THz, sugerimos como uma primeira aproximação que a origem da emissão 30 THz seja térmica. Este fato foi confirmado com os resultados obtidos após utilizar os modelos atmosféricos C7, FLA e PAKAL. Tais modelos determinaram que a origem da emissão 30 THz está localizada a uma altura de ~ 180 km, camada atmosférica onde é dominada pela radiação térmica *free-free*. Por outro lado, a partir da distribuição de elétrons derivados de raios X e raios gama, foi também verificado que as emissões em rádio a altas frequências foram produzidas por elétrons e prótons de vários MeVs. Um problema importante a ser estudado, é o de saber se estas partículas aceleradas, são energéticas o suficiente para produzir o excesso de emissão térmica na baixa atmosfera solar.

O evento acontecido no limbo para o dia 13 de Maio de 2013, apresenta diferentes características em rádio, raios X, UV/EUV, e luz branca. A análise em comprimentos de ondas de rádio mostra que durante a fase gradual tem presença de duas componentes de emissão, uma devido à radiação de elétrons não-térmicos e a outra mas com menor proporção devido a elétrons térmicos, esta característica pode ser verificada nos espectros. Também foram analisados os dados em 1600 e 1700 Å, a fim de verificar se a emissão na etapa gradual em 212 GHz foi produzida pelo plasma térmico da baixa atmosfera solar.

No entanto, não encontramos uma clara relação entre tais emissões.

Com respeito ao evento de 29 de Março de 2014, a emissão prolongada na fase gradual observada em 212 GHz, é similar as evoluções observadas em $H\alpha$, 304 Å e raios X moles, sugerindo contribuições de componentes cromosféricas e coronais. Os espectros térmicos calculados a partir do modelo, tanto para uma fonte localizada na cromosfera como na coroa, confirmam as contribuições de tais componentes durante a fase gradual da explosão.

O evento de 1 de Agosto de 2014, em 30 THz exibe uma fase impulsiva que tem componentes em todos os comprimentos de onda considerados para a análise, enquanto que a fase gradual é acompanhada melhor pelas emissões $H\alpha$, 1700 e 304 Å. Por outro lado, as duas fontes identificadas em 30 THz coincidem espacialmente com as fontes de $H\alpha$, o que sugere que tais emissões tiveram uma origem comum na baixa atmosfera solar. As características das duas fontes são observadas como um duplo pico no máximo do perfil temporal em 30 THz, os quais são também detectados nos perfis dos outros comprimentos de onda que apresentam similar características.

Examinaram-se diferentes aspectos dos eventos analisados, dando maior ênfase à observações em rádio a altas frequências, 30 THz, $H\alpha$, e sua relação com outros comprimentos de onda. Os espectros em rádio apontam para uma contribuição térmica opticamente fina em altas frequências. Porém, em alguns casos fluxos adicionais são necessários, o que demonstra a importância de observações ainda em frequências maiores. Quando esse diagnóstico é disponível, como no caso do evento de 13 de Março de 2012, com a emissão em 30 THz, foi possível determinar a altura da região de emissão em 30 THz. Finalmente, os modelos atmosféricos em condições explosivas de tipo FLA, são capazes de reproduzir a emissão observada em 30 THz.

Referências

- [1] Avrett E.H., Loeser R., *Solar and stellar atmospheric modeling using the Pandora computer program*, 2003, IAU Symposium 210, 21P.
- [2] Avrett E.H., Loeser R., *Models of the solar chromosphere and transition region from SUMMER and HRTS observation*, 2008, ApJ Supp. Series 175, 229.
- [3] Bagalá, G.G., Bauer, O.H., Fernández Borda, R., Francile, C., Haerendel, G., Reigner, R., Rovira, M.G., *The new H α Solar Telescope at the German-Argentinian solar observatory.*, 1999, in ESA Special Pub., Vol 488., Ed. Wilson et al., 469-474.
- [4] Bastian T.S., Benz A.O., Gary D.E., *Radio emission from solar flares*, 1998, Annu. Rev. Astron. Astrophys, 36:131-88.
- [5] Bhatnagar A., Livingston W., *Fundamentals of solar astronomy*. 2005, Worlds scientific series in astronomy and astrophysics - Vol.6
- [6] Bornmann P.L., *Limits to derived flare properties using estimates for the background fluxes: examples from GOES*, 1990, ApJ, 356:733-742.
- [7] Canfield R.C., Gayley K.G., *Impulsive H α diagnostic of electron-beam-heated solar flare model chromospheres.*, 1987, Apj, 332, 999-1009.
- [8] De la Luz V., Lara A., Raulin J.-P., *Synthetic spectra of radio, millimeter, submillimeter, and infrared regimes with Non-Local Thermodynamic Equilibrium Approximation.*, 2011, ApJ., 737, 1
- [9] De la Luz V., Lara A., Mendoza-Torres J.E., Selhorst C.L., *Pakal: A tree-dimensional model to solve the radiative transfer equation*, 2010, ApJ., Supplement series 188, 437.
- [10] Dulk G., *Radio emission from the Sun and stars.*, 1985, Ann. Rev., A.A. 23:169-224.
- [11] Fárník F. & Karlický M., 2007, Sol. Phys., 240, 121

- [12] Golub L., DeLuca E., Austin G., Bookbinder J., Caldwell D., Cheimets P., et al., 2007, *Sol. Phys.*, 243, 63.
- [13] Guidice, D.L., 1979.
- [14] Kämpfer N., Magun A., *Observed time delays between solar H α flares and microwave burts as a evidence for a various energy transport mechanisms*, 1983. *Apj*, 910-915.
- [15] Kaufmann, P., Raulin, J., de Castro, C.G.G., Levato,H., Gary, D.E., Costa, J.E.R., Marun, A., Pereyra, P., Silva, A.V.R., Correia, E., *A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range.*, 2004, *Apj*, 603, L121-L124
- [16] Kaufmann, P., Trottet, G., Giménez de Castro G., Raulin, J.-P., Krucker, S., Shin, A., Levato, H., *Sub-terahertz, microwave and high energy emissions during the 6 December 2006 flare, at 18:40 UT.*, 2009, *Sol. Phys.*, 255:131-142.
- [17] Kaufmann, P., White, S.M., Freeland, S.M., Marcon, R., Fernandes, L.O.T.,Kukada, A.S., De Souza, R.V., Aballay, J.L., Godoy, R., Marun, A., Valio, A., Raulin, J.-P, Giménez de Castro, C.G., *A bright impulsive solar burst detected at 30 THz.*, 2013, *Apj*, 768-134.
- [18] Klopf J.M., Kaufmann P., Raulin J.-P., Szpigel S., *The Contribution of microbunching instability to solar flare emission in the GHz to THz range frequencies*, 2014, *ApJ.*, 791:31
- [19] Krucker S., Giménes de Castro C.G., Hudson H.S, Trottet G., Bastian T.S., Hales A.S., Kašparová J., Klein K.-L., Kretschmar M., Lüthi T., Mackinnon A., Pohjolainen S., White S.M., *Solar flares at submillimeter wavelengths*, 2013, *Sol. Phys.*, 21:58
- [20] Lemen, J.R., Title, A.M., Akin, D.J., and 44 co-authors, *The Atmospheric Imaging Assembly on the Solar Dynamics Observatory (SDO)*, 2012, *Sol. Phys.*, 275, pp17-40.
- [21] Lin R.P., Dennis B.R., Hurford G.J., Smith D.M., and 62 co-authors., *The Reuven Ramaty HighEnergy Solar Spectroscopy Imager (RHESSI).*, 2002, *Sol Phys* 210, 3-32.
- [22] Lüthi, T., Magun, A., Miller, M., *Determination of the location and effective angular size of a solar flares with a 210 GHz multibeam radiometer.*, 2004, *A&A*, 420, 361-370.
- [23] Martínez Oliveiros J.C., Kruker S., Hudson H., Saint-Hilaire P., Bain H., Lindsey C., Bogart R., Couvidat S., Phil S., Schow J., *Chromospheric and coronal observations of solar flares with the Helioseismic and Magnetic Imager.*, 2014, *Apl*, 780:L28.

- [24] Mauas P.J.D., Machado M.E. Avrett E.H., The white-flare of 1982 June 15 - Models, 1990, ApJ 360, 715.
- [25] Miteva R., Kauffman P., Cabezas D.P., Cassiano M.M., Fernandes L.O.T., Freeland S.L., Karlický M., Kerdraon A., Kudaka A.,S., Luoni M.L., Marcon R., Raulin J.-P, Trottet G., White S.M., *30 THz impulsive burst observed during the solar M2-class flare on 1 August 2014*, 2015, A&A.
- [26] Neupert, W.M., 1968, Apj, 193, L59
- [27] Ohki K., Hudson H.S., 1975, Sol. Phys. 43, 405
- [28] Raulin J-P., Pacini A., *Solar radio emissions*, 2005, Adv. Spa. Res. 739-754.
- [29] Raulin, J.-P., White, S.M., Kundu, M.R., Silva, A.V.R., Shibasaki, K., *Multiple components in the millimeter emission of a solar flare*, 1999 Apj., 522:547-558.
- [30] Scherrer, P.H., Schou, J., Bush, R.I., and 10 co-authors., *The Helioseismic and Magnetic Imager Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO)*., 2012, Sol. Phys., 275, pp 207-227.
- [31] Share, G.H., & Murphy, R., *The First Fermi Symposium, Fermi Solar System Science*., 2007, AIP Conf. Proc. 921.
- [32] Silva, A.V.R., White S.M., Lin R.P., Pater I., Gary D.E., Mctiernan J.M., Hudson H.S., Doyle G.J., Hagyard M.J., Kundu M.R., *Comprehensive multiwavelength observations of the 1992 january 7 solar flare*., 1996, 106,621-646.
- [33] Trottet G., Klein K.-L., *Far infrared solar physics*. 2013, Mem. S.A. It. Vol. 84,405.
- [34] Trottet G., Rolli E., Magun A., Barat C., Kuznetsov A., Sunyaev R., Terekhov O., *The fast and slow H α chromospheric responses to non-thermal particles produced during the 1991 March 13 Hard X-ray/gamma-ray flare at ~ 08 UTC*. 2000, aap, 356, 1067-1075.
- [35] Trottet G., Raulin J-P., Giménez de Castro G., Lüthi T., Caspi A., Mandridi C.H., Luoni M.L., Kaufmann P., *The origin of the submillimeter radio emission during the time-extended phase of a solar flare*. 2011, Sol Phys 1109-5729.
- [36] Valio, A., Kaufmann, P., Giménez de Castro, C.G., Raulin, J.-P., Fernandes, L.O.T., Marun A., *Polarization emission of millimeter activity at the Sun (POEMAS): New circular polarization solar telescopes at two millimeter wavelength ranges*., 2013, Sol Phys, 283:651-665.

- [37] Wang H., Qui J., Denker C., Spirock T., Chen H., Goode P., *High cadence observations of an impulsive flare.*, 2000, *Apj*, 540:1080-1087
- [38] White S.M., *The solar atmosphere at radio wavelengths.* 2002, ASF Conference Series. Vol. 277.
- [39] White S.M., Kundu M.R., *Solar observations with a millimeter-wavelength array.* 1992, *Sol. Phys.* 141: 347-369.