

CARACTERIZAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DE ENERGIA EM EXPLOSÕES SOLARES

João Gabriel Pimentel Uzeda Santos e Dr. Paulo J. A. Simões

Contatos: uzeda.joao.p@gmail.com e paulo@craam.mackenzie.br

Apoio: PIVIC Mackenzie

RESUMO

Explosões solares são fenômenos transientes e localizados que ocorrem na atmosfera solar devido à liberação de energia magnética. A energia liberada aquece o plasma e acelera partículas, que carregam parte da energia para a cromosfera solar, causando grandes alterações na estrutura desta camada atmosférica. Para estudar a dinâmica da cromosfera durante explosões solares devido à deposição de energia, podemos usar observações de linhas espectrais e avaliar o movimento do plasma via o efeito Doppler. Utilizamos observações da linha espectral $H\alpha$ de hidrogênio atômico durante o evento SOL2014-09-06, feitas pelo Swedish Solar Telescope (SST), e previamente estudado por Kuridze et al. (2015). Avaliamos a dinâmica do plasma através da assimetria da linha $H\alpha$ para 5 regiões dos *ribbons* identificadas pelas imagens do SST. Encontramos Em nossos resultados, notamos que 4 das 5 regiões apresentaram assimetria para o azul durante todo o evento. Apenas uma região se manteve com simetria entre as asas azul e vermelha, dentro das incertezas das observações. Em nenhum dos casos notamos uma inversão da assimetria no instante de máxima intensidade, como encontrado por Kuridze et al. (2015). Ressaltamos, porém, que estudamos regiões muito maiores do que a analisada por Kuridze et al.; a dinâmica do plasma apresentada por aqueles autores pode não ser facilmente observável em maiores escalas espaciais.

Palavras-chave: Explosão solar. Espectroscopia. Cromosfera.

ABSTRACT

Solar flares are transient, localized phenomena that occur in the solar atmosphere due to the release of magnetic energy. The energy released heats the plasma and accelerates particles, which carry part of the energy to the solar chromosphere, causing major changes in the structure of this atmospheric layer. To study the dynamics of the chromosphere during solar flares due to energy deposition, we can use spectral line observations and evaluate plasma motion via the Doppler effect. We used observations of the $H\alpha$ spectral line of atomic hydrogen during the SOL2014-09-06 event, made by the Swedish Solar Telescope (SST), and previously studied by Kuridze et al. (2015). We evaluated the plasma dynamics through the asymmetry of the $H\alpha$ line for 5 regions of the ribbons identified by the SST images. We found In our results, we noticed that 4 of the 5 regions showed asymmetry for blue throughout the event. Only one region remained with symmetry between the blue and red wings, within the uncertainties of the observations. In none of the cases we noticed an asymmetry inversion at the moment of maximum intensity, as found by Kuridze et al. (2015). We emphasize, however, that we studied regions much larger than the one analyzed by Kuridze et al.; the plasma

dynamics presented by those authors may not be easily observable at larger spatial scales. **Keywords:** Flares. $H\alpha$. Asymmetry.

1. INTRODUÇÃO

Estando no centro do sistema solar, o Sol é uma estrela do tipo espectral G e é responsável por conter aproximadamente 98% da massa do sistema solar. Sua composição é majoritariamente hidrogênio e hélio. A fonte de energia solar vem da fusão de hidrogênio em hélio em seu núcleo. A massa do Sol é aproximadamente $1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$ e seu raio é 695 000 km, sendo que a maior parte de sua massa está localizada em seu núcleo, que representa apenas uma pequena parcela do tamanho da estrela.

O Sol tem um ciclo de atividade de 11 anos, como demonstrado na imagem abaixo, onde alguns fenômenos são mais frequentes. Dentre eles estão as explosões solares que são flashes de radiação que duram desde alguns segundos a horas, que ocorrem em sua atmosfera e são, muitas vezes, relacionadas a ejeção de massa coronal (*coronal mass ejections*, CME). As CMEs, após expelidas, viajam pelo meio interplanetário. A atividade solar dita o clima espacial do nosso sistema planetário e pode afetar a vida como conhecida na Terra, causando desde auroras boreais à danos em satélites.

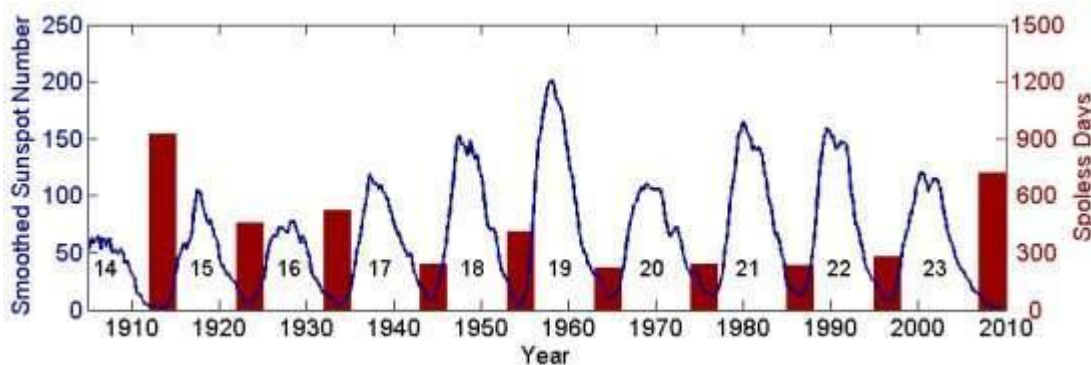


Figura 1: gráfico apresenta os períodos de maior e menor atividade solar FONTE: Dibyendu Nandi et al. 2011

A energia liberada por explosões solares é de origem magnética. Campos magnéticos presentes na atmosfera solar acumulam energia, que é eventualmente liberada após reestruturações do campo para configurações de menor energia potencial. Esta liberação de energia causa a aceleração de partículas e aquecimento do plasma local. O plasma aquecido emite mais radiação, principalmente nas faixas de raios-X e ultravioleta. As partículas aceleradas (elétrons, prótons e íons) viajam ao longo das linhas de campo magnético, em direção à fotosfera. Estas partículas, carregando grande parte da energia liberada em uma

explosão, sofrem colisões com o plasma mais denso na cromosfera e depositam seu excesso de energia, o que a força uma resposta do plasma local em escalas de tempo menores que 1 segundo até vários minutos mudando completamente sua estrutura inicial. Estas alterações na atmosfera solar no local da deposição de energia são controladas por diversos processos como aquecimento e resfriamento do plasma, movimentos do plasma, ionização e recombinação por colisões e por radiação.

Embora a duração da fase impulsiva de explosões solares varie entre alguns segundos até dezenas de minutos, graças à telescópios com alta resolução espacial, notou-se que explosões podem ser formadas pela ativação mais ou menos sequencial de liberações de energia mais compactas na atmosfera solar (GRAHAM; CAUZZI, 2015).

A emissão de raios-X evidencia as regiões na atmosfera solar onde a energia liberada durante explosões solares, marcando a localização de colisões de elétrons acelerados com o plasma mais denso na cromosfera (KOSUGI et al. 1992). No entanto, as técnicas de imageamento de raios-X não permitem a caracterização das escalas de tempo deste processo, por tratarem-se técnicas que requerem um alto tempo de integração de fótons (HURFORD et al. 2002). Observações na faixa do ultravioleta e óptico contam com imageamento direto em alta cadência por telescópios operando em solo e no espaço (LEMEN et al. 2012). A alta taxa de fótons emitida nessas faixas por explosões solares permite a detecção de imagens na ordem de frações de segundos. Entretanto, os mecanismos de radiação que tipicamente produzem esses fótons são associados com a excitação e recombinação de átomos de diversos elementos na atmosfera solar (KURUCZ 1970). Tais processos possuem suas próprias escalas de tempo quando ativados pelo aquecimento causado pela deposição de energia das explosões, dificultando a caracterização das escalas de tempo desta deposição através da análise deste tipo de dados observacionais.

Alguns estudos (HEINZEL et al. 1994; KURIDZE et al. 2015), no entanto, mostraram que a linha $H\alpha$ tem um alto potencial para o diagnóstico da deposição de energia na cromosfera, ainda inexplorado para este tipo de estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Observações solares na linha espectral $H\alpha$ de hidrogênio atômico, no comprimento de onda 656,3 nm relativa à transição eletrônica do 3º nível de energia para o 2º nível, tem sido utilizada desde a década de 1940 para inferir as propriedades do plasma solar, tanto em condições quiescentes como durante explosões (SVESTKA 1976). Em particular, assimetrias espectrais são frequentemente observadas nessa linha durante explosões solares (BERLICKI 2007). Assimetrias para o vermelho são caracterizadas quando a intensidade em comprimentos de onda mais longos (vermelho) do que o centro da linha (656,3 nm) é mais intensa do que a intensidade em comprimentos mais curtos (azul). Séries de observações indicam que a assimetria para o vermelho é mais comum durante a fase impulsiva das explosões, quando a maior parte da energia é liberada e depositada na cromosfera (TANG 1983, ICHIMOTO; KUOKAWA 1984, FALCHI et al. 1997). Entretanto, assimetrias para o azul também foram reportadas e ocorrem tipicamente durante o início da fase impulsiva (SEVERNY 1968, SVESTKA 1972, HEINZEL et al. 1994, YU; GUN 2006). Várias tentativas de explicar essas assimetrias espectrais observadas foram baseadas em modelos estáticos de atmosfera e resultaram em perfis espectral simétricos, sugerindo que tais assimetrias estariam associadas a gradientes de velocidade de plasma na atmosfera solar (CANFIELD et

al. 1984, FANG et al. 1993, CHENG et al. 2006). A presença de assimetrias para o vermelho em linhas espectrais formadas na cromosfera durante explosões é tipicamente atribuída ao movimento do plasma mais frio na direção da fotosfera, ou seja, para longe do observador, causando um deslocamento Doppler para o vermelho. Com a deposição de energia da explosão em certa altura da atmosfera, espera-se um aumento de temperatura do plasma na região, causando uma expansão do material. Esta expansão, por conservação do momento linear, deslocaria o plasma verticalmente, uma fração em direção à estrela, com a manifestação do deslocamento espectral de linhas para o vermelho, e outra fração na direção contrária, com a formação de deslocamentos Doppler em outras linhas espectrais para o azul (MILLIGAN; DENNIS 2009). No entanto, no caso da linha $H\alpha$, a propagação da radiação pelo plasma deve ser considerada, uma vez que os fótons podem ser absorvidos e reemitidos em camadas se movendo com velocidades diferentes (DING; FANG 1996). Heinzel et al. (1994), ao interpretar observações de assimetrias da linha $H\alpha$, sugerem que assimetrias para o azul poderiam ser causadas pela absorção da radiação nos comprimentos de onda no vermelho por camadas de plasma acima da região de emissão em $H\alpha$ movendo-se para longe do observador. Esta nova interpretação difere da explicação usual onde assimetrias azuis são formadas diretamente pela camada emissora movendo-se na direção do observador. Esta hipótese foi confirmada recentemente por Kuridze et al. (2015) através de análise de dados observacionais com alta resolução espacial, espectral e temporal, conjuntamente com resultados de simulações radiativo hidrodinâmicas (RHD). Segundo o trabalho de Kuridze et al. (2015), uma assimetria para o vermelho, ou seja, um excesso de intensidade na asa vermelha, aparece pela absorção da radiação com comprimentos de onda mais curtos (para o azul) por camadas de plasma movendo-se na direção do observador. Uma assimetria para o azul representaria a fase de relaxamento da região atmosférica, após o término da deposição de energia, quando o plasma se move para regiões mais baixas da atmosfera. Outra conclusão importante de Kuridze et al. (2015) é que a presença da assimetria vermelha está associada com a deposição de energia na atmosfera. Pode-se inferir, portanto, que a duração da deposição de energia em cada região da atmosfera pode ser estimada pela duração da assimetria para o vermelho na linha $H\alpha$.

3. METODOLOGIA

Trabalhamos com $H\alpha$ por ser a linha do hidrogênio que é mais brilhante do espectro visível, e ocorre quando um elétron do hidrogênio cai do nível mais energético para um nível menos energético emitindo uma luz com um comprimento de onda de 656,28 nm, sendo assim é uma onda visível na parte vermelha do espectro eletromagnético da série de Balmer, que é quando a transição do elétron é da $n \geq 3$ para $n = 2$ como demonstrado na Figura 1.

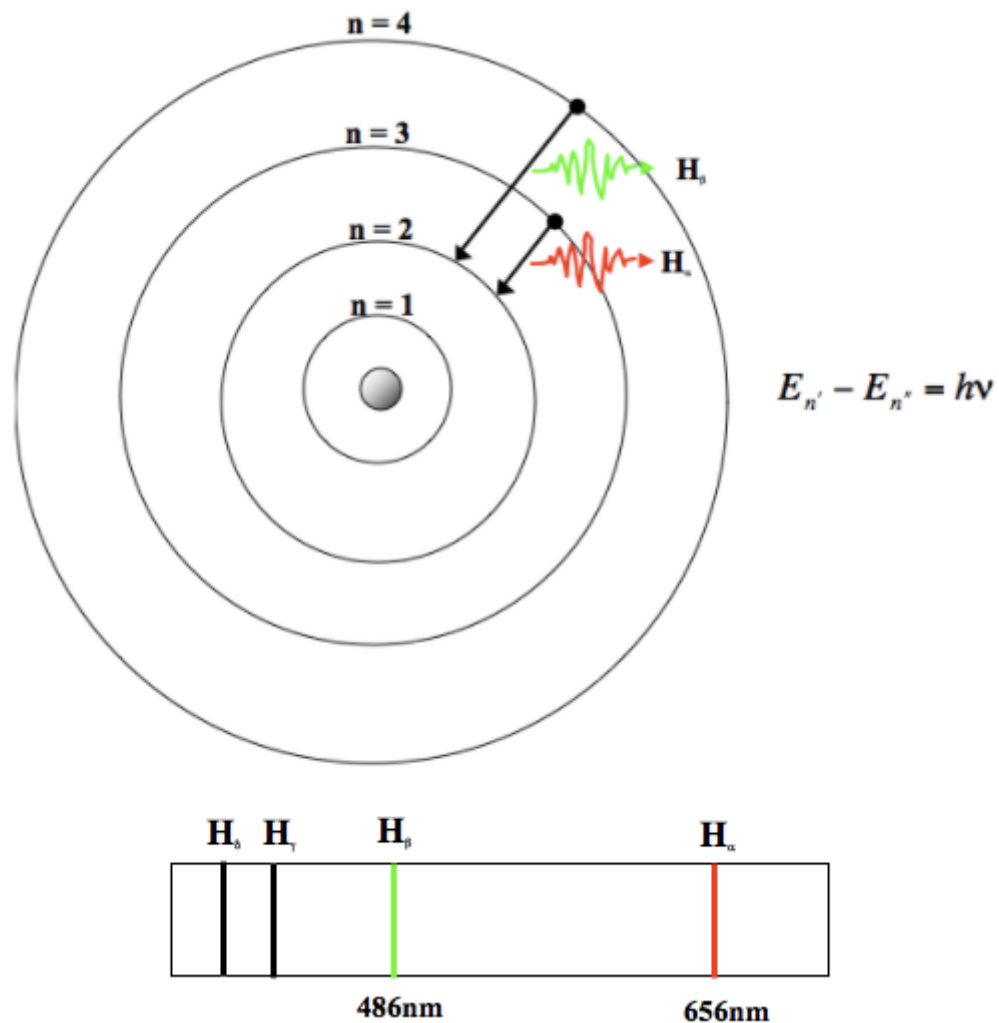


Figura 1: Linhas espectrais vermelhas e verdes da série Balmer na parte visível do átomo de hidrogênio FONTE: < <https://plato.stanford.edu/entries/bohr-correspondence/> >

Os dados do instrument CRISP no Swedish Solar Telescope (SST/CRISP) do evento SOL104-09-06 são extraídos de arquivos de extensão FITS (*Flexible Image Transport System*), utilizando a biblioteca astropy do Python. Esses arquivos contêm imagens tiradas sequencialmente entre 16:28:48 UT e 17:26:25 UT, num total de 300 quadros. Cada quadro contém 15 imagens cobrindo o espectro da linha H-alfa centrada em 6563 Å, com separação de 0,2 Å. A resolução espacial das imagens é de 0,057 segundos de arco por pixel. As imagens foram calibradas para unidades de intensidade específica e rotacionadas para ter o norte solar para cima por Kuridze et al. (2015). Com o intuito de reduzir a quantidade de dados selecionamos apenas a região que contém a explosão como mostrado na figura 2.

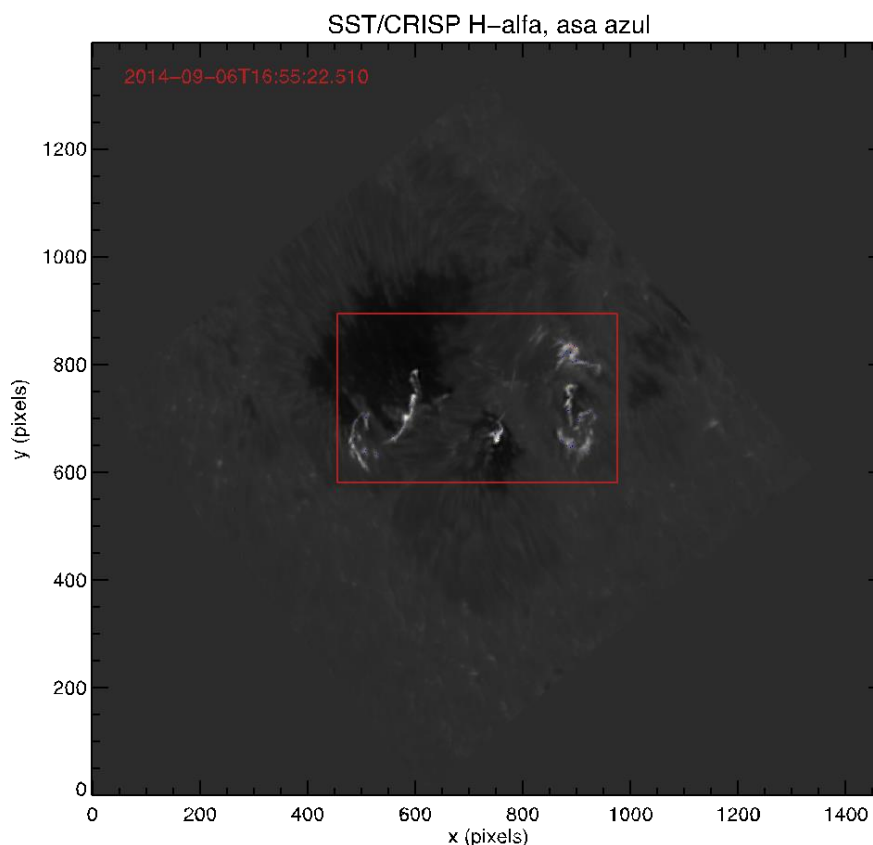


Figura 2: Imagem do SST/CRISP para o evento SOL2014-09-06 na asa azul da linha H-alfa. O retângulo mostra a região selecionada para análise.

O objetivo era analisar a assimetria da linha de cada pixel; porém foi identificado que o nível de sinal-ruído era muito elevado comprometendo a qualidade dos resultados. Decidimos por estudar as regiões maiores do evento. Da região selecionada, identificamos cinco regiões da explosão, das quais analisamos a assimetria da linha, como indicado pelos quadros na figura 3

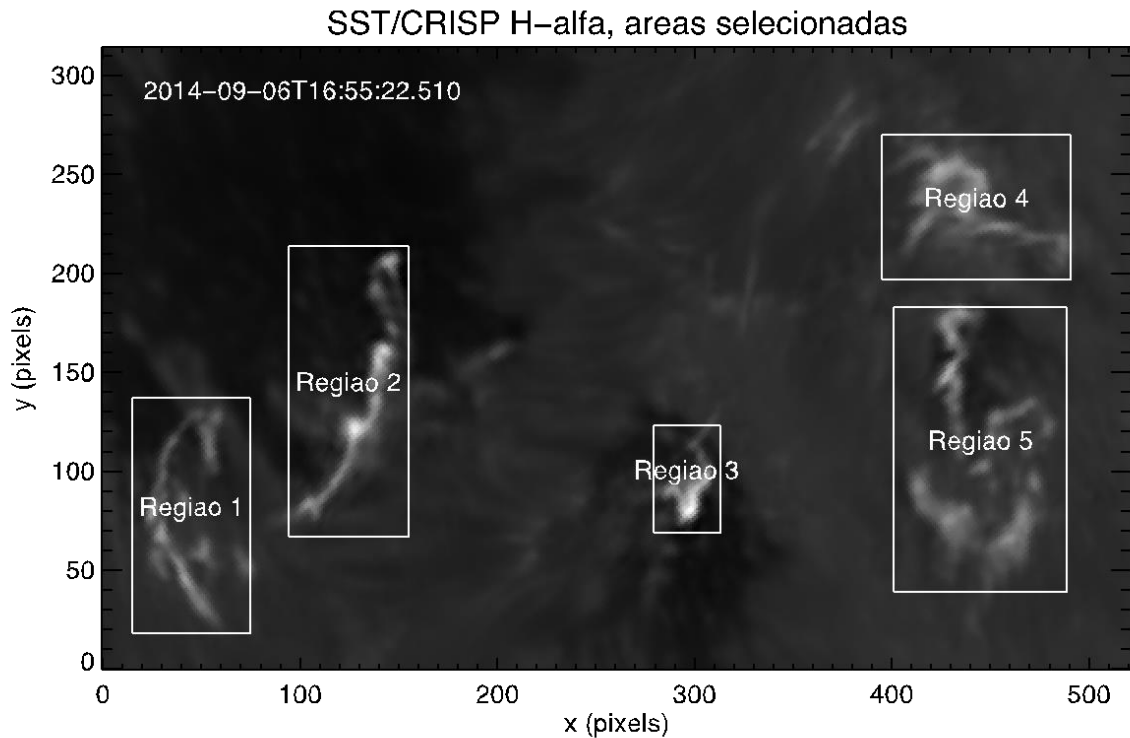


Figura 3: Imagem do SST/CRISP com as cinco regiões selecionadas para o estudo da assimetria da linha $H\alpha$

Para cada região, identificamos os pixels com intensidade igual ou maior do que 50% do máximo da emissão dentro de cada região, para o comprimento de onda na asa azul da linha. Esta escolha se deu porque a emissão das asas da linha refletem mais diretamente a deposição de energia na atmosfera, ao contrário do centro da linha que está sujeita a efeitos de transferência radiativa e influência de outras emissões (KURIDZE et al., 2015).

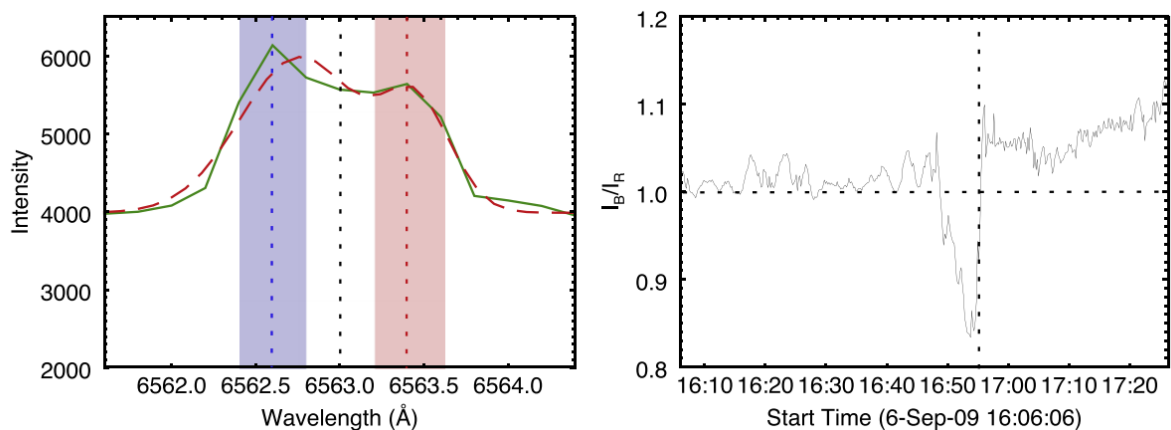


Figura 4: Espectro da linha $H\alpha$ durante a explosão, indicando as faixas selecionadas para o cálculo da assimetria (quadro esquerdo) e variação temporal da assimetria obtida por Kuridze et al. (2015). FONTE: KURIDZE et al. (2015).

Para demonstrar selecionamos 2 pixels mostrados na Figura 5.

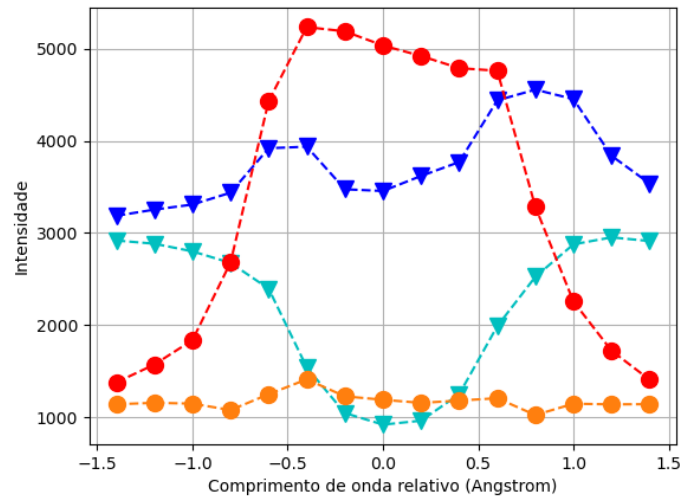
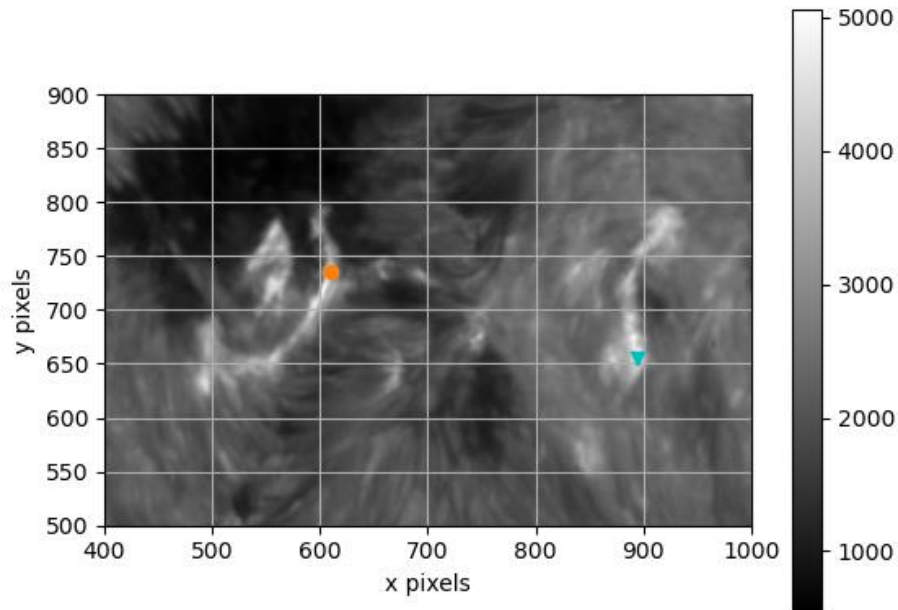


Figura 5: Imagem do SST/CRISP referente aos 2 pixels brilhantes destacados anteriormente onde em azul escuro e vermelho temos o momento da explosão e em azul claro e laranja momentos antes da explosão, ambas as situações referente a linha $H\alpha$

Com os pixels mais brilhantes selecionados, calculamos a intensidade no azul e no vermelho, seguindo a metodologia de Kuridze et al. (2015): das 15 imagens cobrindo o espectro da linha, a intensidade nas posições espectrais $[-1.0; -0.8; -0.6]$ Å foram somadas para definir a intensidade azul I_{azul} , enquanto para a intensidade vermelha $I_{vermelha}$ foram usadas as posições $[0.6; 0.8; 1.0]$ Å, todas relativas ao centro da linha, 6563 Å. Para ambas, a intensidade antes do evento foi subtraída, para obter-se apenas o excesso da emissão. Assim, a assimetria A é definida como

$$A = \frac{I_{azul}}{I_{vermelha}}$$

E pode ser ter uma observação exemplificada na imagem Figura 6.

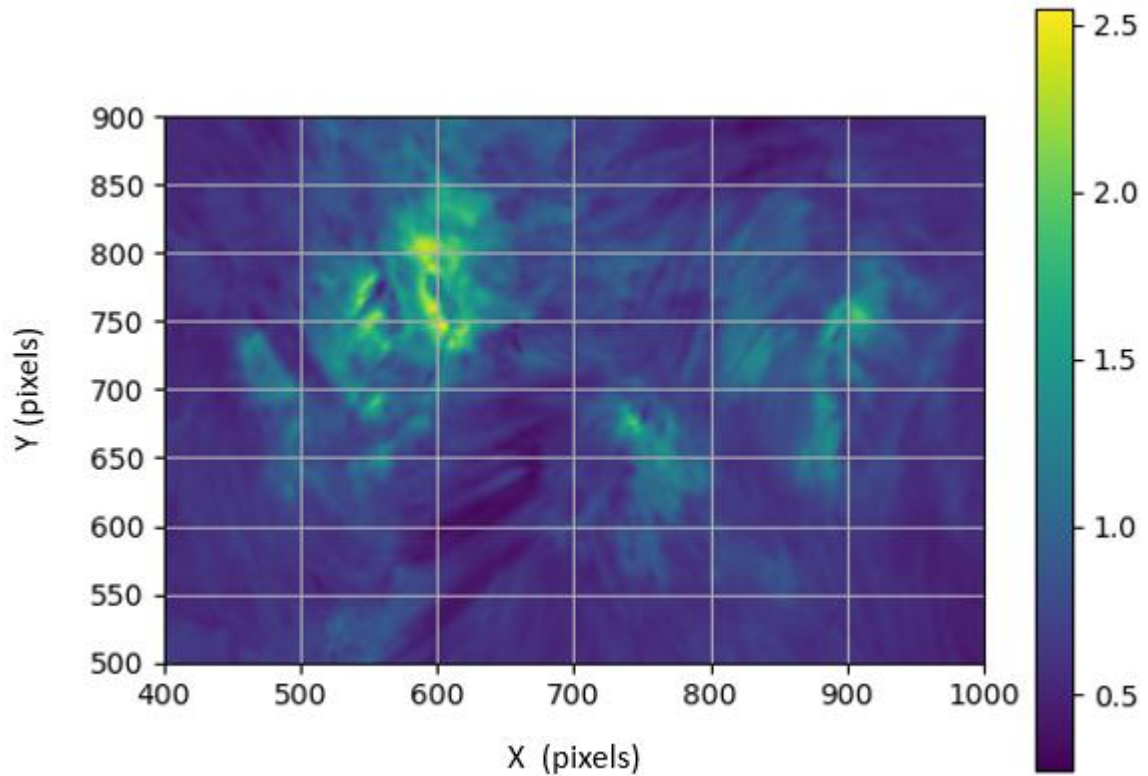


Figura 6: Exemplo da imagem resultante da aplicação da assimetria A para um instante durante a explosão solar analisada.

Sendo que uma assimetria maior do que 1 indica excesso de emissão no azul, enquanto uma assimetria menor do que 1 indica um excesso de emissão no vermelho. Os cálculos foram então realizados para todos os instantes observados.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

As curvas de assimetria obtidos para cada região são mostrados nas Figuras 7 a 11 a seguir, juntamente com o fluxo azul e vermelho da linha. Em quatro das cinco regiões selecionadas notamos o movimento do plasma com uma assimetria voltada para azul durante o aumento da intensidade da explosão, o que difere do constatado por Kuridze et al. (2015). Seguindo a interpretação de Kuridze et al. (2015), a assimetria para o azul indicaria um movimento do plasma em direção à altitudes mais baixas na atmosfera solar – uma “condensação” cromosférica – que absorve os fótons de comprimento de onda mais longos (vermelhos) em relação ao centro da linha,

causando a assimetria para o azul. No entanto, não podemos descartar aqui a interpretação original: a assimetria para o azul poderia indicar o movimento do plasma na direção da coroa, a “evaporação” cromosférica. Em nossos resultados 4 das 5 regiões apresentaram assimetria para o azul durante todo o evento. Apenas a região 1 se manteve com simetria entre as asas azul e vermelha, dentro das incertezas das observações. Em nenhum dos casos notamos uma inversão da assimetria no instante de máxima intensidade, como encontrado por Kuridze et al. (2015). Notamos, no entanto, que os autores analisaram apenas uma pequena região contendo alguns pixels, enquanto esse estudo trabalhou com foco em regiões maiores, os chamados *flare ribbons*.

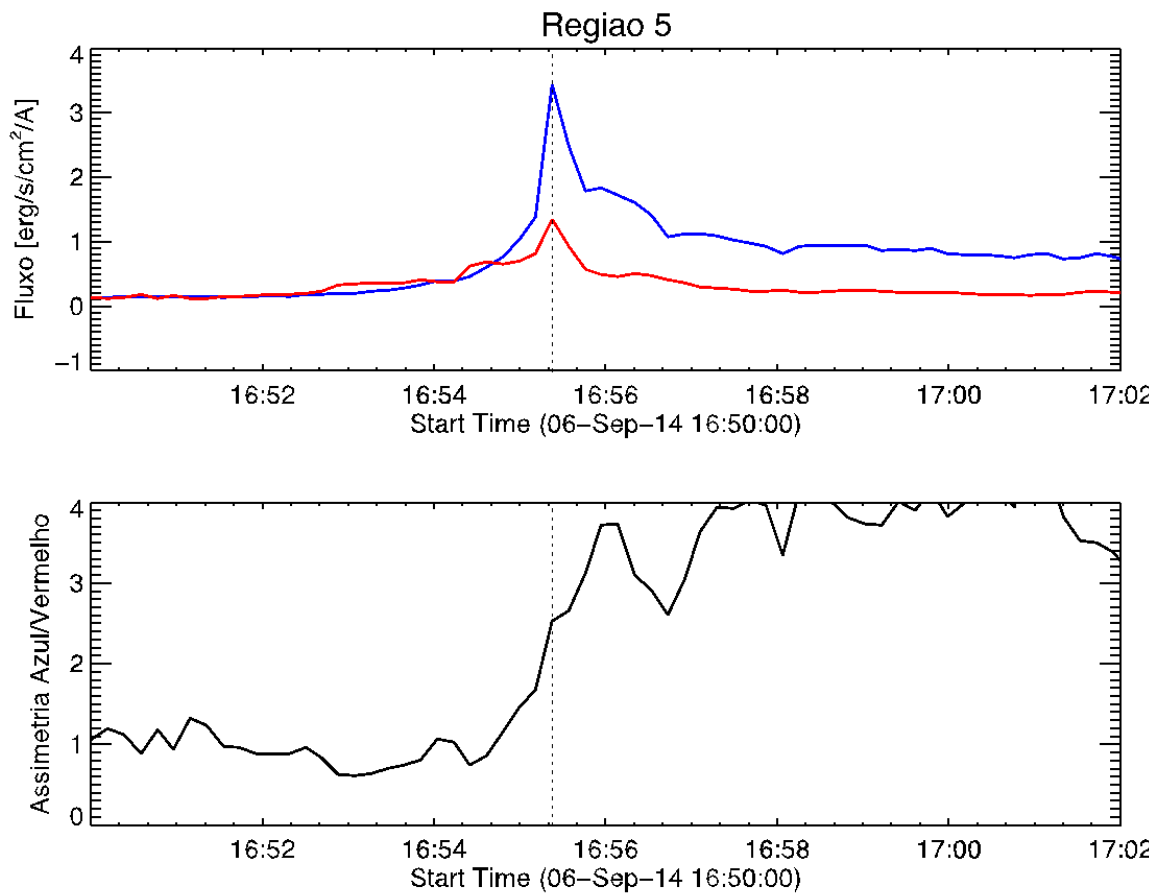


Figura 7: primeiro grafico apresenta o fluxo da energia para as assimetrias, e o segundo apresenta a assimetria do azul sobre o vermelho

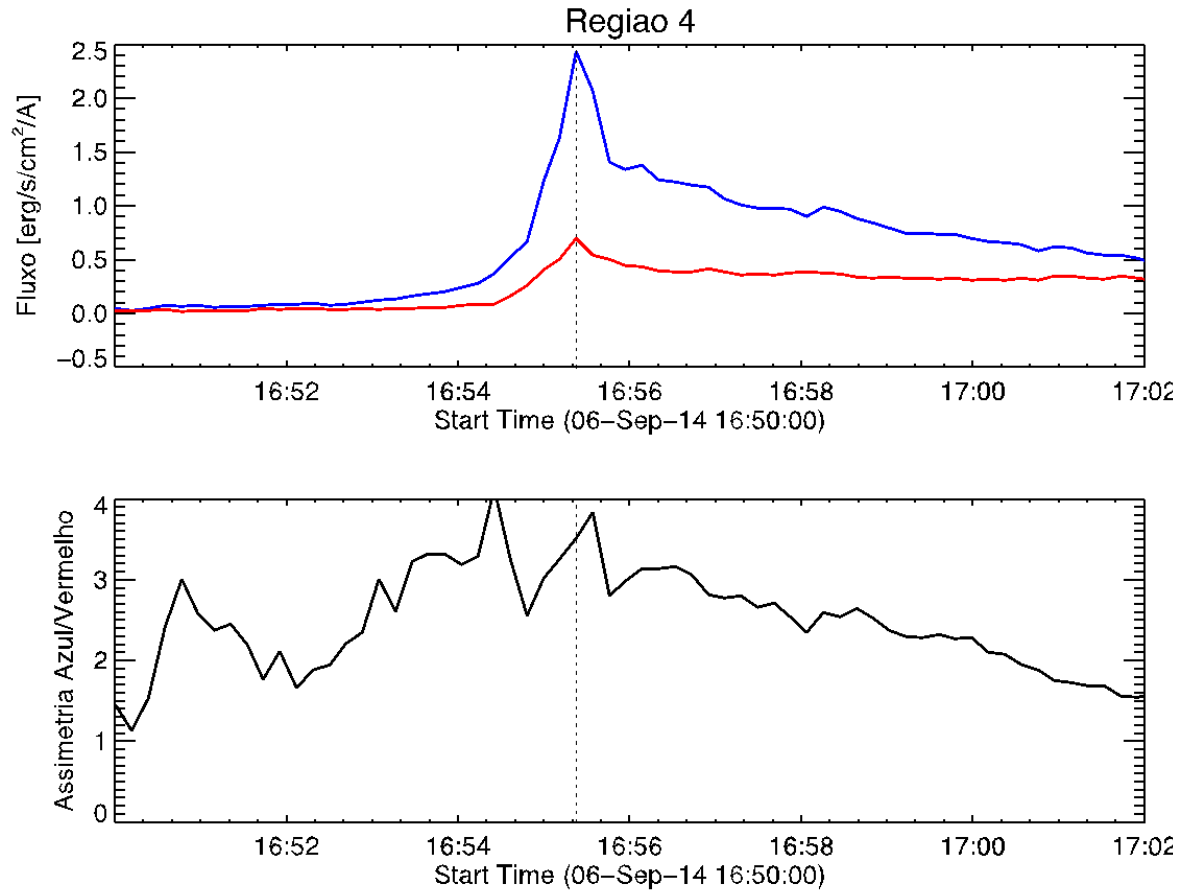


Figura 8: primeiro grafico apresenta o fluxo da energia para as assimetrias, e o segundo apresenta a assimetria do azul sobre o vermelho

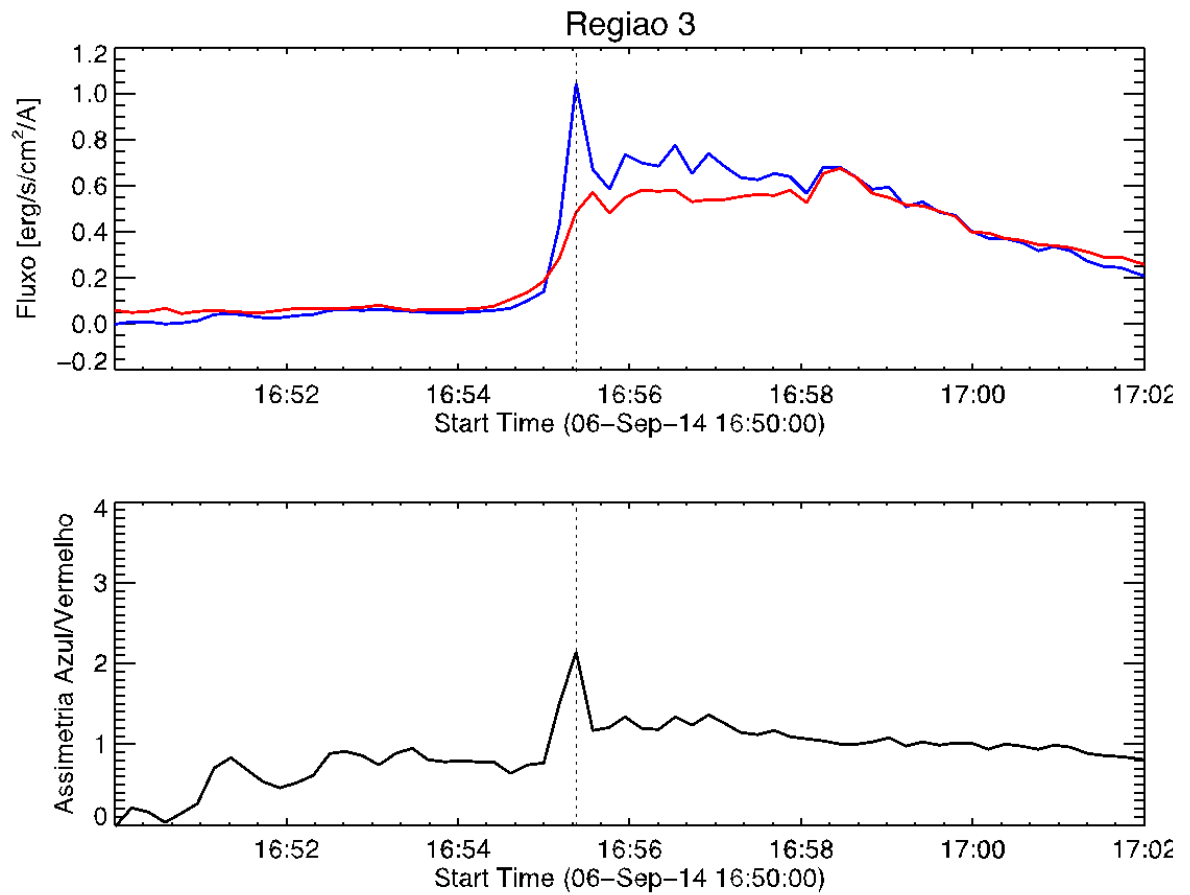


Figura 9: primeiro grafico apresenta o fluxo da energia para as assimetrias, e o segundo apresenta a assimetria do azul sobre o vermelho

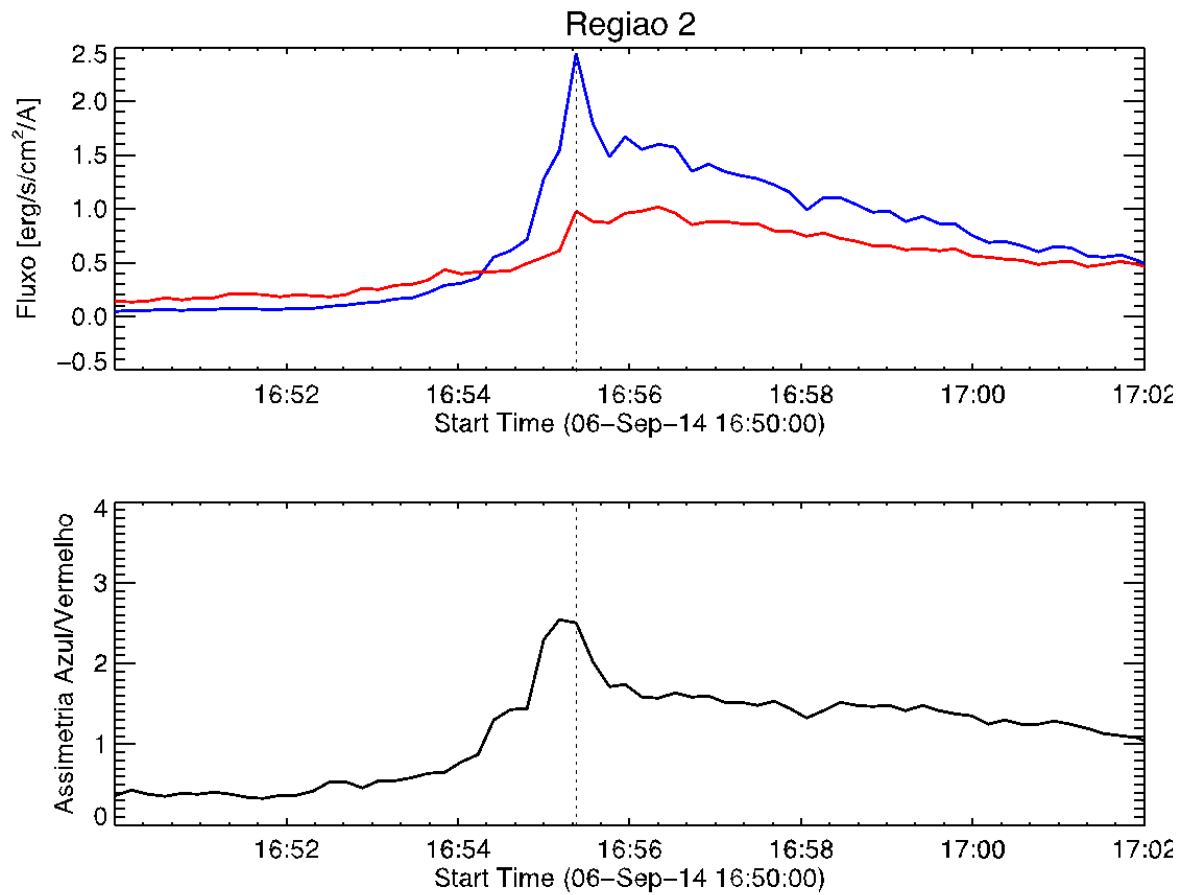


Figura 10: primeiro grafico apresenta o fluxo da energia para as assimetrias, e o segundo apresenta a assimetria do azul sobre o vermelho

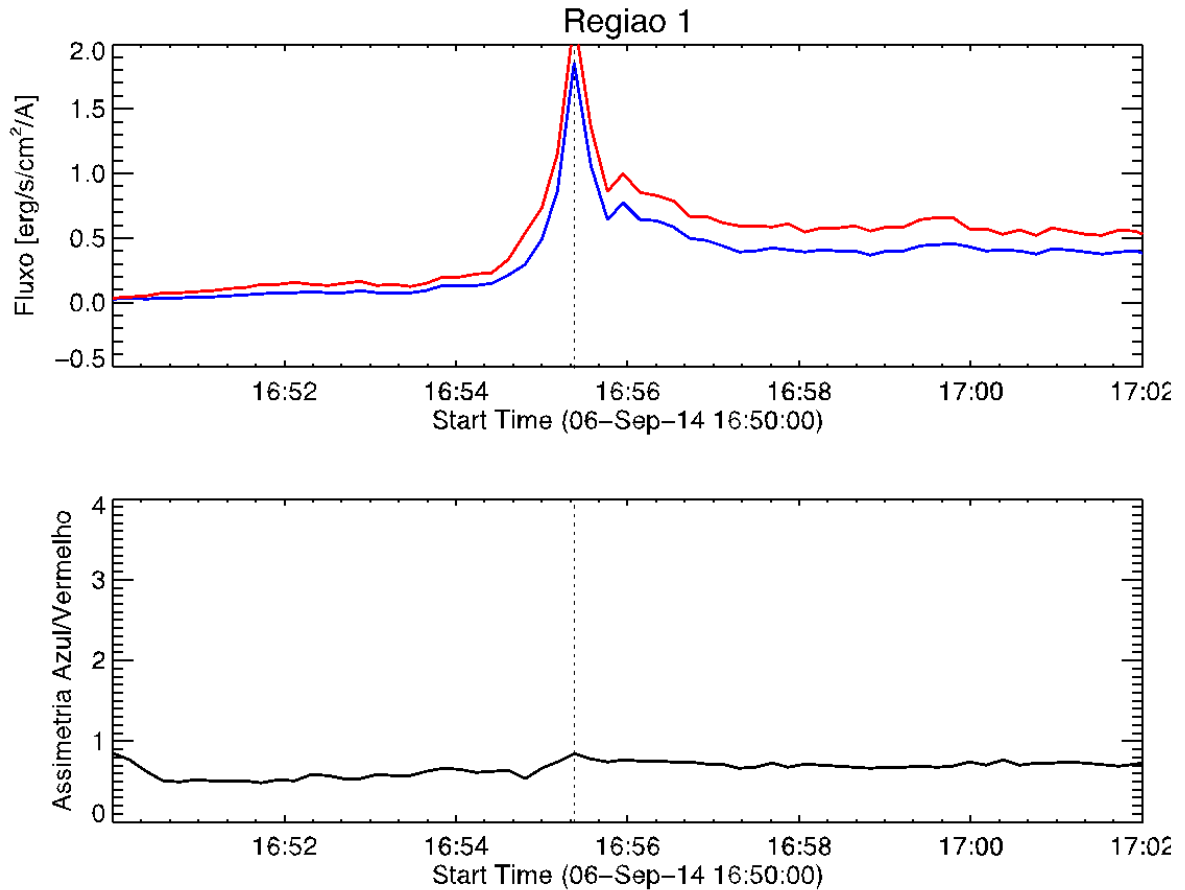


Figura 11: primeiro grafico apresenta o fluxo da energia para as assimetrias, e o segundo apresenta a assimetria do azul sobre o vermelho

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No artigo apresentado por Kuridze et al. (2015), os autores estudam apenas uma região pequena, com alguns pixels. Ao analisar regiões maiores do evento, identificando as explosões e dividindo cada uma em regiões menores para facilitar o processamento, pode-se calcular que a assimetria se manteve para o azul em quatro das cinco regiões selecionadas, e em nenhuma delas ocorreu uma inversão da assimetria no instante de máxima intensidade da explosão, como apresentado no artigo. Sendo assim podemos estar tratando de uma exceção, porém novos estudos são necessários para obter uma conclusão mais precisa.

6. REFERÊNCIAS

ALLENS, Clabon Walter, et al. Allen's Astrophysical Quantities, **SPRINGER**, 2015

BERLICKI, A. Spectrophometric analysis of Ellerman bombs in the Ca II, H α , and UV range, **Astronomy and Astrophysics**, volume 473 primeira edição de outubro de 2007

BUKULICH, Alisia e BUKULISCH, Peter, Bohr's Correspondence Principle, **METAPHYSICS RESEARCH LAB, STANFORD UNIVERSIT**, The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Outono de 2020

CANFIELD, R. C. et al. The H-alpha spectral signatures of solar flare nonthermal elétrons, conductive flux, and coronal pressure, **Astrophysical Journal**, volume 282 de julho de 1984

CHENG, J. X. et al. Diagnostics of the Heating Processes in Solar Flares Using Chromospheric Spectral Lines, **The Astrophysical Journal**, volume 653, primeira edição de dezembro de 2006

DING, M. D. e FANG, C. Parametric study of the continuum emission of White-light flares, **Astronomy and Astrophysics**, volume 314 de outubro de 1996

FALCHI, A et al. Chromospheric evidence of magnetic reconnection, **Astronomy and Astrophysics**, volume 328 de dezembro de 1997

FANG, C et al. Semiempirical Flare Models with Chromospheric Condensation, **Astrophysical Journal**, volume 416 de outubro 1993

GRAHAM, D. R e CAUZZI, D. Temporal Evolution of Multiple Evaporating Ribbon Sources in a Solar Flare, **The Astrophysical Journal Letters**, volume 807, 2º edição de 2015

HEINZEL, Petr et al. On the Occurrence of Blue Asymmetry in Chromospheric Flare Spectra, **Solar Physics**, volume 152 2º edição de 1994

HURFORD, G. J. et al. 2002. RHESSI X-ray imaging spectroscopy of the 2002 July 23 solar Gamma-ray Flare, **American Geophysical Union**, encontro de outono de dezembro de 2002

ICHIMOTO, K. e KUROKAWA, H. H α Red Asymmetry of Solar Flares, **Solar Physics**, volume 83, primeira edição de junho de 1984

KOSUGI, Takeo et al. 1992. The Hard X-Ray Telescope (HXT) Onboard Yohkoh: Its Performance and Some Initial Results; **Publications of the Astronomical Society of Japan**, volume 44 de outubro de 1992

KURIDZE, David, et al. H α line profile asymmetries and the chromospheric flare velocity field; **THE ASTROPHYS JOURNAL**, volume 83, número 2 de 10 de novembro de 2015

KURUCZ, R. L. Atlas: a computer Program for calculation Model Stellar Atmospheres, **SÃO Special Report**, #309 de fevereiro de 1970

LEMEN, J. R. et al. 2012. Quantifying Coronal Dimming as Observed in EUV and X-ray Images in Eruptive Events, **American Geophysical Union**, encontro de outono de dezembro de 2012

MILLIGAN, Rayan e DENNIS, Brian. Velocity Characteristics of Evaporated Plasma Using Hinode/EUV Imaging Spectrometer, **The Astrophysical Journal**, volume 669, 2ª edição de julho de 2009

SEVERNY, A. B. Mass motions in flares and moustaches indicated by special spectral features, introductory lecture, **Mass Motions in Solar Flares and Related Phenomena. Proceedings of the 9th Nobel Symposium**, de 1986

SVETSKA, Z. Solar Flares. **Geophysics and Astrophysics Monographs**, , em 1976

SVETSKA, Z. The Expected Behaviour of the Hydrogen Lyman Lines in Solar Flares, **Ultraviolet and X-ray Spectroscopy of Astrophysical and Laboratory Plasmas, Proceedings of IAU Colloq. 14**, de setembro de 1972

TANG, F. Flare Asymmetry as Seen in Offband H α Filtergrams, **Solar Physics**, volume 83 primeira edição de fevereiro de 1983

YUN, X. X. e GUN, W. Q. On H α line asymmetries of chromospheric flares, **Acta Astronomica Sinica**, volume 47, no. 1, de janeiro de 2006