

ANÁLISE DE EMISSÕES SOLARES TIPO U MÉTRICAS

Elzino Rodrigues Junior¹, Francisco Carlos Rocha Fernandes².

¹Universidade de Brasília-UnB/Instituto de Geociência, Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC - Ala Central, 70.910-900 - Brasília-DF, Brasil, junior.rodriguesp2@gmail.com.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE/Divisão de Astrofísica, Avenida dos Astronautas, 1.758, Jd. Granja - 12227-010 - São José dos Campos-SP, Brasil, francisco.fernandes@inpe.br.

Resumo

Neste trabalho, foram analisadas estruturas finas presentes na rádio emissão solar em ondas métricas (45 – 870 MHz), classificadas como emissões tipo U, observadas por rádio espectrógrafos da rede e-Callisto. As emissões tipo U apresentam, nos espectros dinâmicos, uma morfologia característica (letra U), com taxa de deriva em frequência que varia de negativa (de alta para baixa frequência) para positiva, passando pela deriva nula, na chamada frequência de retorno (*turning frequency*). A partir dos espectros dinâmicos das emissões selecionadas, entre 2023 e 2025, foram estimados parâmetros observacionais e parâmetros físicos do agente e da fonte emissora, considerando a emissão de plasma como mecanismo físico gerador. Os resultados das análises mostram que as emissões tipo U apresentaram frequência de retorno entre 15 e 63 MHz; taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente da ordem de 0,4 – 4,8 MHz/s; velocidade média do feixe de elétrons na estrutura magnética de $3,2 \times 10^7$ m/s, temperatura média do ápice do loop coronal de $5,1 \times 10^5$ K e limite inferior da intensidade do campo magnético na região é de 0,23 G.

Palavras-chave: Radiação solar. Ondas métricas. Emissão de plasma. Emissões tipo U.

Área do Conhecimento: Astronomia

Introdução

As emissões solares observadas em rádio frequências representam diagnósticos para investigação de eventos solares impulsivos, como os *flares*, pois sua análise permite a determinação da densidade eletrônica da fonte emissora, quando o mecanismo de emissão gerador é a emissão de plasma. Em particular, as estruturas finas como emissões tipo III, e variantes como tipo U, têm sido interpretadas como resultantes da emissão de plasma gerada por elétrons acelerados durante os *flares* solares, e que se propagam ao longo dos arcos magnéticos fechadas (arcos) na cromosfera e na baixa coroa solar associados às regiões ativas (Wild *et al.*, 1963; Aschwanden *et al.*, 1994).

As diferenças na morfologia das emissões tipo III, U, J e demais variantes nos espectros dinâmicos são consequência da geometria da configuração magnética e dos feixes de elétrons acelerados que são injetados nas linhas de campo magnético abertas ou fechadas (Aschwanden *et al.*, 1994).

As emissões tipo U são principalmente observadas em ondas métricas e decamétricas (Stone; Fainberg, 1971; Karlický; Tlamicha, 1976; Hamidi *et al.*, 2014; Reid; Kontar, 2017; Dabrowski *et al.*, 2023), mas também, apesar de menos frequentemente, na faixa decimétrica (Yao *et al.*, 1997a; Yao *et al.*, 1997b; Aschwanden *et al.*, 1992; Aurass; Klein, 1997; Wang *et al.*, 2001; Cecatto *et al.*, 2002; Dutra *et al.*, 2008; Dutra, 2010; Gao *et al.*, 2021). No entanto, a taxa de ocorrência das explosões tipo U é muito pequena, principalmente se comparada à das explosões tipo III típicas (Labrum; Stewar, 1970, apud Suzuki; Dulk, 1985).

Nesse sentido, a motivação do trabalho é a escassez de análises de emissões com morfologia tipo U, relativamente raras, a investigação do mecanismo de emissão e a determinação das características da geometria dos arcos magnéticos e estimativa de parâmetros das fontes e dos agentes emissores.

Instrumentação

O projeto e-Callisto consiste em uma rede de rádio espectrógrafos de baixo custo instalados em diferentes locais ao redor do mundo, com o objetivo de monitoramento contínuo da atividade solar na faixa de frequências métricas, entre 45 e 870 MHz (Benz *et al.*, 2005; Benz *et al.*, 2009).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Os dados são gravados em arquivos FITS (*Flexible Image Transport System*), com até 400 canais de frequências por varredura. A resolução temporal é de 250 milissegundos. Os dados de instrumentos individuais são carregados automaticamente por FTP para o servidor central. Para uma manipulação de dados, várias rotinas em diferentes linguagens de programação foram escritas, incluindo em Python, como as utilizadas no presente trabalho.

Atualmente, a rede e-Callisto conta com 72 espectrógrafos com observação e produção regular de dados (27 de maio de 2025). Detalhes do projeto podem ser obtidos em <https://www.e-callisto.org/>.

Observações

Embora as emissões tipo U sejam geradas pelo mesmo mecanismo de emissão de plasma que as emissões tipo III, sua ocorrência é muito menos frequente. Considerando a base de dados das observações da rede e-Callisto, para os anos de 2022 a 2024, foram selecionadas para análise 12 estruturas finas com morfologia tipo U (com intensidade suficiente para determinação dos parâmetros na faixa de frequência de observação). A Tabela 1 apresenta as emissões analisadas, cujos espectros dinâmicos são mostrados na Figura 1.

Tabela 1 – Emissões tipo U, registradas entre 2022 e 2024, selecionadas para análise.

Tipo U #	Data	Tempo (UT)	Flare em raios-X	Rádio emissões*
1	14/02/2022	03:49	-	-
2	03/01/2023	01:33	-	-
3	18/04/2023	04:26	-	RSP
4	18/04/2023	17:24	-	RSP
5	16/06/2023	16:39	-	III
6	08/09/2023	16:30	-	RSP
7	21/05/2024	03:42	-	-
8	04/08/2024	16:51	-	-
9	05/08/2024	23:01	-	-
10	15/12/2024	01:54	-	-
11	22/12/2024	05:41	-	RSP
12	28/12/2024	07:13	C6.2	RSP

*RSP - *Sweep-frequency radio burst*; III – Tipo III

Fonte: os autores.

Metodologia

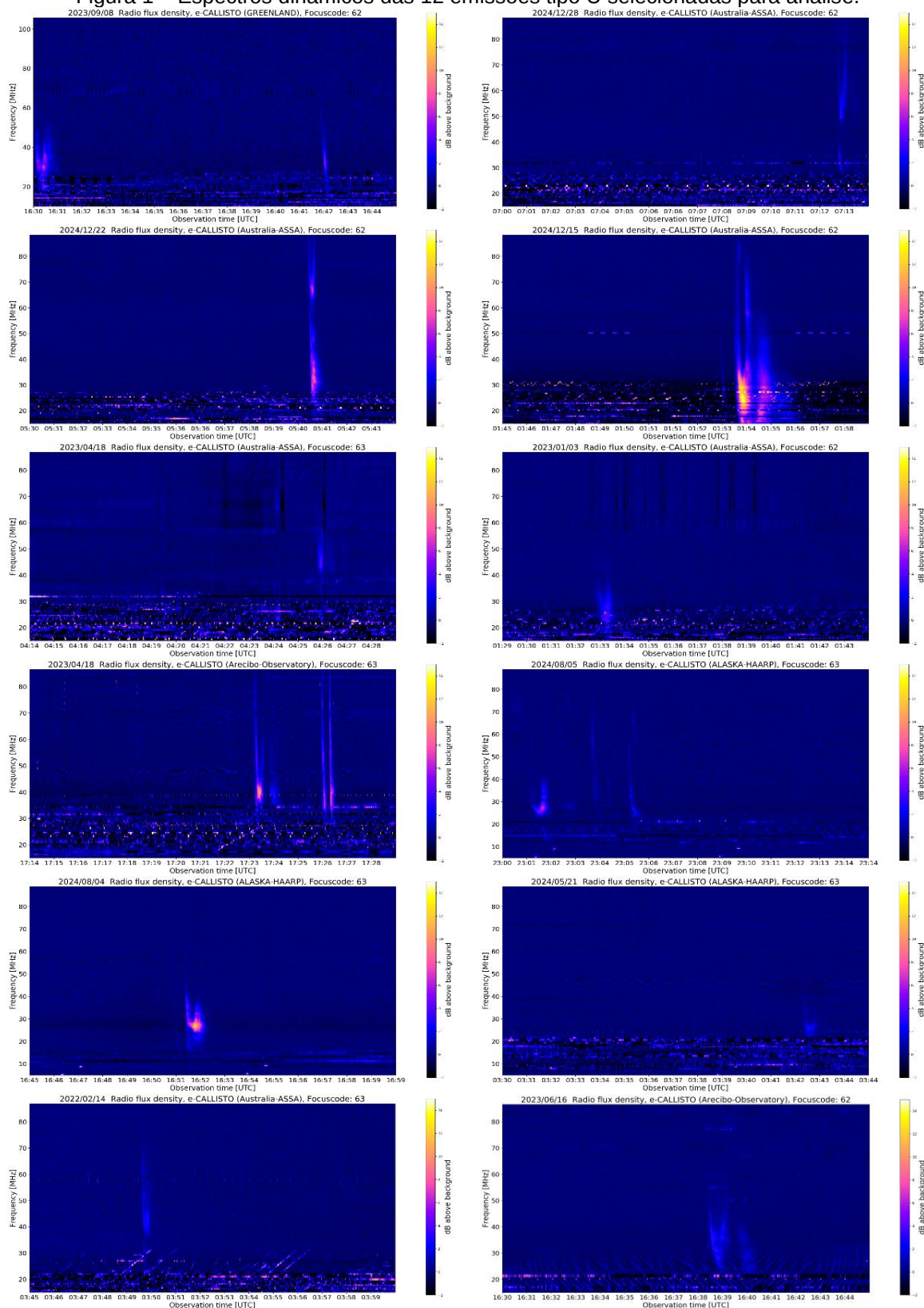
Assumindo que as rádio-emissões tipo U são variantes de emissões tipo III, e são geradas pelo processo de emissão de plasma por feixes de elétrons acelerados se propagando ao longo de estruturas magnéticas fechadas (arcos), os parâmetros físicos da fonte podem ser estimados a partir dos parâmetros observacionais das emissões determinados a partir dos espectros dinâmicos (registros de intensidade x frequência x tempo).

Para o presente trabalho, foi aplicada a metodologia de análise elaborada por Aschwanden *et al.* (1992) e utilizada por Dutra *et al.* (2008) e Dutra (2010), para estruturas finas tipo U na faixa decimétrica, que foi adaptada e aplicada para as emissões registradas na faixa de ondas métricas.

Assim, a partir dos parâmetros observados medidos do espectro dinâmico, para cada emissão métrica tipo U selecionada, foram estimados os principais parâmetros da emissão e da fonte emissora, como a densidade eletrônica na fonte, as taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente da emissão, a velocidade do feixe de elétrons, a temperatura da região e o limite inferior para a intensidade do campo magnético na fonte, conforme descrito brevemente a seguir.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 1 – Espectros dinâmicos das 12 emissões tipo U selecionadas para análise.



Fonte: os autores a partir dos dados da rede e-Callisto.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Densidade Eletrônica - A frequência de plasma (f_p) é relacionada com a densidade eletrônica do plasma na coroa solar (n_e) pela relação $f_p \text{ (Hz)} = s \cdot 8,9 \times 10^3 n_e^{1/2}$, sendo s o parâmetro harmônico. Foi obtida a densidade eletrônica média para emissão fundamental ($s = 1$).

Geometria do Arco Magnético - Considerando uma aproximação da dimensão do loop, baseada em argumentos cinemáticos, $L \approx t_D v_b$, a temperatura do topo do arco magnético pode ser estimada. Adotando uma estrutura magnética semicircular com um raio de curvatura de $r_o = 1,3 \times 10^{10} \text{ cm}$ (Aschwanden *et al.*, 1992), pode-se estimar a ordem de grandeza da extensão do arco magnético semicircular, $L = \pi r_o$, que equivale a um valor da ordem de $4,1 \times 10^{10} \text{ cm}$.

Tempo de Vida do Feixe de Elétrons - Baseado nas características intrínsecas de deriva em frequência e largura de banda das rádio-emissões tipo U, é possível considerar o mecanismo de emissão de plasma como responsável pela geração dessas estruturas finas. O feixe de elétrons se propaga através de um meio relativamente denso na atmosfera solar, onde pode ser rapidamente termalizado por colisões coulombianas. Neste caso, o tempo de colisão (t_D) é dado por (Boyd; Sanderson, 1969): $t_D = 3,45 \times 10^{-14} v_b^3 / n_e$, em que n_e é a densidade eletrônica e v_b é a velocidade do feixe. O tempo de vida do feixe corresponde à duração em meio arco da emissão tipo U.

Temperatura do plasma no arco magnético - A Lei de Rosner *et al.* (1978) fornece uma relação entre a temperatura (T), a pressão (p) e o tamanho (L) do loop, de tal forma que $T = 1,4 \times 10^3 (pL)^{1/3}$. Relacionando a pressão à densidade eletrônica (n_e) e a temperatura T do plasma ($p = n_e k_b T$), em que k_b é a constante de Boltzmann, a temperatura na região pode ser obtida por $T = 6,2 \times 10^{-4} (n_e L)^{1/2}$.

Campo Magnético - O parâmetro β , que expressa a razão entre a pressão térmica e a pressão magnética, é dado pela relação $\beta = 3,47 \times 10^{-15} (n_e T / B^2)$. A condição para o plasma estar magneticamente confinado onde a pressão do gás é inferior à pressão magnética, é $\beta < 1$. Para os valores de T e n_e estimados, foi determinado o limite inferior para a intensidade do campo magnético.

Resultados

A partir das características observadas no espectro dinâmico foi possível determinar os principais parâmetros da fonte, seguindo a metodologia descrita. Os principais resultados da análise e os parâmetros da fonte estimados estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da fonte e dos agentes das emissões tipo U estimados

Tipo U #	Duração Total (s)	Velocidade do feixe (v/c)	Densidade Eletrônica (10^6 cm^{-3})	Temperatura da região (10^5 K)	Campo Magnético (G)
1	18	0,15	23,6	6,10	0,29
2	38	0,07	8,4	3,64	0,13
3	14	0,20	25,1	6,29	0,30
4	20	0,14	20,6	5,70	0,26
5	105	0,03	10,4	4,05	0,16
6	46	0,06	11,8	4,31	0,17
7	38	0,07	8,5	3,66	0,13
8	52	0,05	9,7	3,91	0,15
9	31	0,09	10,0	3,97	0,15
10	29	0,09	7,4	3,41	0,12
11	16	0,18	56,7	9,45	0,56
12	18	0,15	31,5	7,04	0,36

Fonte: os autores.

Discussão

Conforme os resultados apresentados, as emissões tipo U têm duração total, incluindo tempos de subida e descida da ordem de 15 a 100 s; frequência de retorno entre 15 e 63 MHz, correspondendo a densidades na coroa solar da ordem de 10^7 cm^{-3} ; temperatura média do ápice do *loop* coronal de cerca $5,1 \times 10^5 \text{ K}$ e limite inferior da intensidade do campo magnético na região é de 0,23 G, valor inferior aos obtidos por Aschwandem *et al.* (1992) da ordem de 10 G, para emissões decimétricas.

A análise também mostrou que as emissões tipo U apresentam assimetria em frequência, sendo o ramo ascendente geralmente mais alargado que o ramo descendente, concordando com resultados anteriores de Yao *et al.* (1997a) e Yao *et al.* (1997b).

Para cerca de metade das emissões analisadas, as estimativas de velocidade do feixe de elétrons na estrutura magnética entre de 0,14-0,20 c, são semelhantes aos valores inferidos para feixes de elétrons responsáveis por explosões do tipo métrico U obtidos por Fokker (1970) ou por feixes interplanetários do tipo III (Dulk *et al.*, 1987).

Conclusão

A análise de uma amostra de 12 emissões tipo U registradas em ondas métricas abaixo de 100 MHz, pelos espectrógrafos da rede e-Callisto, entre 2022 e 2024, ampliam as análises realizadas em ondas decimétricas (1250 – 2250 MHz) com dados do BSS (*Brazilian Solar Spectroscope*) realizadas por Dutra *et al.* (2008); Dutra (2010) e Fernandes *et al.* (2012).

Para a análise, foi assumido que as emissões tipo U são geradas por emissão de plasma no modo fundamental. Assim, foram estimados os parâmetros observacionais da emissão: faixa de frequência de 25 - 90 MHz, duração total ~14 – 105 s. A partir das características das emissões no espectro dinâmico, foi possível estimar os parâmetros da fonte, como a densidade de elétrons $\sim 1,4 - 4,9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. A temperatura do ápice do *loop* magnético foi de $9 \times 10^6 \text{ K}$ e o limite inferior para o campo magnético era de 20 G, que são consistentes com resultados anteriores.

Referências

- AURASS, H.; KLEIN, K.-L., Spectrographic and imaging observations of solar type U radio bursts. **Astron. Astrophys Supl. Ser.**, v. 123, p. 279-304, 1997.
- ASCHWANDEN, M. J.; BASTIAN, T. S.; BENZ, A. O.; BROSIUS, J. W., Decimetric solar type bursts: VLA and PHOENIX observations. **ApJ**, v. 391, p. 380-392, 1992.
- ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O.; MONTELLO, M. L. Coherent-Phase or Random-Phase Acceleration of Electron Beams in Solar Flares. **ApJ**, v. 431, n. 1, p. 432-449, 1994.
- BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H. Callisto - A new concept for solar radio spectrometers. **Solar Phys.**, v. 226, p. 143-151, 2005.
- BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H.; MANOHARAN, P. K.; RAMESH, R.; ALTYNTSEV, A.; LARA, A.; PAEZ, J.; CHO, K. S. A World-Wide Net of Solar Radio Spectrometers: e-CALLISTO. **Earth, Moon and Planet**, v. 104, p. 27, 2009.
- BOYD, T. J. M.; SANDERSON, J. J., **Plasma Dynamics**, London. 1969,
- CECATTO, J. R.; SAWANT, H. S.; FERNANDES, F. C. R.; KRISHAN, V.; ROSA, R. R.; KARLICKÝ, M., Decimetric Reverse Drift and U- Type Bursts in the April 9, 2001 Flare. **COSPAR Colloquia Series** v. 13, p. 313, 2002.
- DABROWSKI, B. et al. Interferometric imaging of the type IIIb and U radio bursts observed with LOFAR on 22 August 2017. **Astron. Astrophys.**, v. 669, p. A52, 2023.

A Ciência do **NANO** e seu impacto transformador no **MACRO**

DULK, G. A.; GOLDMAN, M. V.; STEINBERG, J. L.; HOANG, S. The speeds of electrons that excite solar radio bursts of type III. **Astron. Astrophys.**, v. 173, n. 2, p. 366-374, 1987.

DUTRA, J. A. S. S.; GURANIERI, F. L.; FERNANDES, F. C. R. Estruturas finas na rádio emissão solar em ondas decimétricas: parâmetros e caracterização da região de aceleração. **Anais VIII EPG – Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação**, UNIVAP, 2008.

DUTRA, J. A. S. S. **Estruturas finas tipo U e tipo J presentes na rádio-emissão solar em ondas decimétricas**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Paraíba, 2010.

FERNANDES, F. C. R.; DUTRA, J. A. S. S.; CUNHA-SILVA, R. D.; SAWANT, H. S. Flaring loop parameters estimated from solar decimeter type U-like and type J-like fine structures. **Adv. Space Res.**, v. 49, p. 1607-1614, 2012.

FOKKER, A. D., Trajectories Followed by U-Like Solar Radio Bursts. **Solar Phys.**, v. 11, n. 1, p. 92-103, 1970.

GAO, G.; CAI, Q.; GUO, S.; WANG, M. Decimetric Type-U Solar Radio Bursts and Associated EUV Phenomena on 2011 February 9. **ApJ**, v. 923, p. 268, 2021.

HAMIDI, Z. S.; SHARIFF, N. N. M.; MONSTEIN, C. An Observation of an Inverted Type U Solar Burst Due to AR1429 Active Region. **International Letters of Chemistry, Phys. Astron.**, v. 29, p. 81-90, 2014.

KARLICKÝ, M.; TLAMICHA, A., The trajectories of U-type solar radio bursts. **Bull. Astron. Inst. Czech.**, v. 27, n. 4, p. 223-226, 1976.

REID, H. A. S.; KONTAR, E. P. Imaging spectroscopy of type U and J solar radio bursts with LOFAR. **Astron. Astrophys.**, v. 606, p. A141, 2017.

ROSNER, R.; TUCKER, W. H.; VIANA, G. S., Dynamics of the quiescent solar corona. **ApJ**, v. 220, p. 643. 1978.

STONE, R. G.; FAINBERG, J. A U-Type Solar Radio Burst Originating in the Outer Corona. **Solar Phys.**, v. 20, p. 106-111, 1971.

SUZUKI, S.; DULK, G. A. Bursts of Type III and Type V. In: MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. Chapter 12. Cambridge University Press, 1985.

WANG, M.; FU, Q. J.; XIE, R. X.; HUANG, G. L.; DUAN, C. C. Observations of Microwave Type-U Bursts. **Solar Phys.**, v. 199, p. 157-164, 2001.

WILD, J. P.; SMERD, S. F.; WEISS, A. A. Solar Bursts. **Ann. Rev. Astron. Astrophys.**, v. 1, p. 291, 1963.

YAO, J.; YU, X.; TLAMICHA, A.; WEI, F. A solar type U burst in the decimetric range. **Adv. Space Res.**, v. 20, n. 12, p. 2351-2354, 1997a.

YAO, J.-X.; TLAMICHA, A.; WEI, F.-S.; YU, X.-F., Analysis of a solar decimetric U-type burst. **Chin. Astron. Astrophys.**, v. 21, n. 2, p. 221-228, 1997b.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado dentro do Projeto LETAES-IC, com apoio do Instituto de Física e do Laboratório de Física dos Plasmas da UnB. Os dados foram disponibilizados pela rede e-Callisto.