

**INPE-6382-TDI/601**

**EXPLOSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS TIPO III ASSOCIADAS  
COM A FASE IMPULSIVA DO “FLARE” SOLAR**

**Jorge Luis Melendez Moreno**

**Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial / Física Solar, orientada pelo  
Dr. Hanumant Shankar Sawant, aprovada em fevereiro de 1997.**

**INPE  
São José dos Campos  
Fevereiro de 1997**

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-6382-TDI/601**

**EXPLOSÕES SOLARES DECIMÉTRICAS TIPO III ASSOCIADAS  
COM A FASE IMPULSIVA DO “FLARE” SOLAR**

**Jorge Luis Melendez Moreno**

**Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Física Solar, orientada pelo  
Dr. Hanumant Shankar Sawant, aprovada em fevereiro de 1997.**

**INPE  
São José dos Campos  
Fevereiro de 1997**

523.985

MELLENDEZ MORENO, J. L.

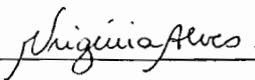
Explosões solares decimétricas tipo III associadas com a fase impulsiva do "flare" solar / J. L. Melendez Moreno. - São José dos Campos: INPE, 1997.

134 p. - (INPE-6382-TDI/601).

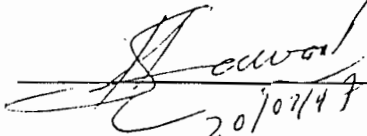
1. Explosões solares tipo 3. 2. Espectrógrafos. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de Mestre em Astrofísica

Dra. Maria Virgínia Alves

  
\_\_\_\_\_  
Presidente

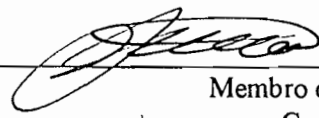
Dr. Hanumant Shankar Sawant

  
\_\_\_\_\_  
20/02/97 Orientador

Dra. Nandita Srivastava

*N. Srivastava*  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca

Dr. Carlos Augusto de Azevedo

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Jorge Luis Melendez Moreno

São José dos Campos, 20 de fevereiro de 1997

*“A mis queridos padres  
Juan Ramos y Rosa Elena*

*e a mi abuelita Amaranta,  
quien desde el cielo guio mi camino”  
(In Memoriam)*

## AGRADECIMENTOS

Para começar, meu sincero agradecimento ao Dr. Sawant, com quem tive o prazer de trabalhar aqui no INPE.

Agradeço também ao Guga pela amizade, ele me ensinou muito, e sempre acreditou no meu trabalho e em minhas capacidades. Ao Cláudio Faria, pela ajuda na elaboração do programa de classificação. Também ao Hugo Trigo, ao Cecatto, ao Reinaldo, à Nandita e ao Eduardo, com os quais partilhei o orgulho de integrar o “Grupo de Física Solar” do INPE.

Meus sinceros agradecimentos também à Cláudia, pelas dicas com o SuperMongo e o IRAF, as quais ajudaram para a rápida realização do meu trabalho. Assim como a todo o pessoal da Divisão de Astrofísica pela acolhida, aos pesquisadores e alunos, assim como à nossa sempre atenciosa secretária Ivone.

Meu grande agradecimento às instituições que permitiram que este trabalho fosse realizado: INPE, CNPq e ao Instituto ETH-Zurich (Suíça).

Agradeço ao Dr. A.O. Benz pelos espectros dinâmicos obtidos em Zurich (Suíça), assim como ao Dr. S. Kane (Universidade de California, USA) pelas proveitosas discussões.

Não posso esquecer de agradecer sempre à astrônoma María Luisa Aguilar, assim como a todos os membros do *SPACE (ex-SAA)* da minha velha Universidade de São Marcos em Lima (a universidade mais antiga das Américas), pelo apoio e incentivo que motivou a minha vinda ao Brasil.

Meu agradecimento especial à Rocío, perto ou longe, ela sempre foi motivo para eu sorrir cada dia.

Por último, meu mais profundo agradecimento a minha família, mesmo longe, eles sempre estiveram ao meu lado e torcendo para que tudo de certo: meus pais Juan Ramos e Rosa Elena, e meus irmãos Miguel, Zoila, José, Lucho, Elena e Juan Carlos.

## RESUMO

As explosões decimétricas tipo III são geradas próximas à região de aceleração das partículas e de liberação de energia para os “flares” na fase impulsiva. Portanto, investigações destas ajudam o conhecimento do processo de aceleração. São analisados os espectros dinâmicos de explosões decimétricas (100-3000 MHz) detectadas em 13 flares pelo Rádio Espectrógrafo PHOENIX (Suíça). É feita a classificação destas explosões em tipo III, “spike” e “patch”, e apresentado um catálogo. A análise das explosões tipo III apresentou os seguintes resultados: a maioria das explosões tem menos do que 250 MHz de faixa de frequência; a duração a meia altura é dada por:  $t_{1/2} = 1.7 \times 10^4 f^{-0.60}$ ; há um decréscimo do número de explosões com o aumento da frequência e do fluxo; o fluxo decresce para frequências maiores; das 160 explosões analisadas, 102 casos (67 %) foram “reverse slope”, 52 casos (36 %) normais, e 8 casos (5 %) foram pares de explosões bi-direcionais; encontramos a seguinte relação entre taxa de deriva e frequência:  $| (df/dt) | = 0.09 f^{1.35}$ ; a velocidade média do excitador das explosões tipo III é  $v_{III} = 0.16 c$ ; a emissão no harmônico é predominante na faixa decimétrica; a densidade numérica média ( $n_b$ ) e o número de elétrons ( $N$ ) para o feixe emissor são  $n_b \simeq 6 \times 10^4 cm^{-3}$  e  $N \simeq 6 \times 10^{31}$  elétrons, respectivamente; a região de aceleração pode apresentar densidades eletrônicas de  $n_e \approx 10^9 - 10^{11} cm^{-3}$ , e estar localizada a alturas  $h \approx 10^4 - 10^5 km$  acima da fotosfera; inferimos limites superiores para a extensão da região de aceleração de  $\Delta h \leq 400 - 4000 km$  e para a escala temporal de aceleração das partículas de  $\tau < 0.5 - 5 ms$ . Também é apresentado um “software” para detecção e classificação preliminar de explosões tipo III e “spikes”, e é proposto o formato FITS para os dados digitais do Espectrógrafo WDDHRS do INPE.

# DECIMETRIC SOLAR TYPE III BURSTS IN ASSOCIATION WITH IMPULSIVE PHASE OF SOLAR FLARES

## ABSTRACT

Decimetric type III bursts are generated near the region of acceleration of the particles and liberation of the energy to the flare, particularly for impulsive phase, hence their investigations will lead to a better understanding of the process of acceleration. We have analyzed dynamic spectra of decimetric bursts (100-3000 MHz) observed with the spectrometer PHOENIX (Switzerland). These bursts are classified as type III, spike, and patch, and a catalogue of these bursts is presented. From the detailed analysis of type III bursts, the major results are: most of type III bursts have less than 250 MHz frequency range; the average half power duration is  $t_{1/2} = 1.7 \times 10^4 f^{-0.60}$ ; the number of bursts decreases with increasing start frequency and flux; flux decreases with increasing frequency; of all bursts, 67 % are reverse slope, 36 % normal and 5 % bidirectional; the average drift rate of propagating beams is  $|(df/dt)| = 0.09 f^{1.35}$ ; the mean type III exciter velocity is found to be  $v_{III} = 0.16 c$  (7 keV); harmonic emission is predominantly in the decimetric range; mean electron density ( $n_b$ ) and total number of electrons ( $N$ ) per beam are  $n_b \simeq 6 \times 10^4 cm^{-3}$  and  $N \simeq 6 \times 10^{31}$  electrons, respectively; we infer electron densities of  $n_e \approx 10^9 - 10^{11} cm^{-3}$  at the acceleration site, at heights of  $10^4 - 10^5$  km above the photosphere; we infer an upper limit of  $\Delta h \leq 4000 km$  for the extension of the acceleration site and an acceleration time of  $\Delta t \leq 5 ms$ . Also, is presented a software for the detection of type III and spike bursts which will be used for studies of solar flares observed by the Wide Band Decimeter Spectroscopy at INPE, and the FITS format for the digital data.



# SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS . . . . .	xv
LISTA DE TABELAS . . . . .	xvii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 “Flares” solares . . . . .	1
1.2 Explosões tipo III decimétricas . . . . .	4
1.3 Emissão de plasma . . . . .	8
1.4 Absorção das ondas decimétricas . . . . .	8
1.5 Motivação para o estudo de explosões tipo III decimétricas . . . . .	11
1.6 Apresentação do trabalho . . . . .	12
<b>CAPÍTULO 2 - OBSERVAÇÕES . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1 Introdução . . . . .	13
2.2 O espectrômetro PHOENIX . . . . .	13
2.2.1 Características do espectrômetro . . . . .	13
2.2.2 Calibração em fluxo . . . . .	14
2.3 Seleção de dados . . . . .	15
2.4 Classificação dos dados . . . . .	18
<b>CAPÍTULO 3 - TRATAMENTO DE DADOS . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1 Introdução . . . . .	25
3.2 Metodologia . . . . .	27
3.2.1 Duração e fluxo de pico . . . . .	27
3.2.2 Taxa de deriva ( $df/dt$ ) . . . . .	29
3.2.3 Faixa de emissão . . . . .	31
3.3 Análise . . . . .	31
3.3.1 Distribuição da faixa de emissão . . . . .	31
3.3.2 Duração vs frequência . . . . .	33
3.3.3 Distribuição da frequência de início . . . . .	33
3.3.4 Distribuição das taxas de deriva . . . . .	33
3.3.5 Taxa de deriva vs frequência . . . . .	36
3.3.6 Fluxo de pico . . . . .	36
3.4 Discussões e interpretações . . . . .	39
3.4.1 Duração . . . . .	39
3.4.2 Frequência de início das explosões . . . . .	39
3.4.3 Distribuição da frequência de início segundo sua taxa de deriva . . . . .	39
3.4.4 Taxa de deriva vs frequência . . . . .	40
3.4.5 Fluxo de pico . . . . .	41

3.5	Sumário . . . . .	42
<b>CAPÍTULO 4 - O CENÁRIO DAS EXPLOSÕES TIPO III . . . . .</b>		<b>43</b>
4.1	Introdução . . . . .	43
4.2	Modelo de densidade para “loops” emissores de explosões tipo III . . . . .	43
4.3	Velocidade média do excitador das explosões tipo III . . . . .	48
4.4	Densidade e número total de elétrons do feixe . . . . .	51
4.5	Altura da região da aceleração . . . . .	53
4.6	Explosões bi-direcionais . . . . .	53
4.6.1	Limite na dimensão espacial da região de aceleração . . . . .	54
4.6.2	Limite na escala temporal de aceleração . . . . .	56
4.7	Sumário . . . . .	57
<b>CAPÍTULO 5 - APLICAÇÕES AO WDDHRS . . . . .</b>		<b>59</b>
5.1	Introdução . . . . .	59
5.2	“Software” para detecção e classificação de explosões . . . . .	59
5.2.1	Introdução . . . . .	59
5.2.2	Descrição do “software” . . . . .	61
5.3	Simulação de explosões . . . . .	63
5.4	O padrão FITS . . . . .	66
5.4.1	Introdução . . . . .	66
5.4.2	Formato dos arquivos FITS do WDDHRS . . . . .	67
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PLANOS FUTUROS . . . . .</b>		<b>73</b>
6.1	Introdução . . . . .	73
6.2	Modelo do “flare” . . . . .	73
6.3	Principais resultados . . . . .	76
6.3.1	Explosões tipo III . . . . .	76
6.3.2	Explosões decimétricas bi-direcionais . . . . .	77
6.3.3	Região de aceleração . . . . .	78
6.3.4	O cenário do “flare” . . . . .	78
6.4	Planos futuros . . . . .	80
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>		<b>81</b>
<b>APÊNDICE A - CATÁLOGO DE EXPLOSÕES . . . . .</b>		<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1.1	Esquema com os diferentes tipos de radiação eletromagnética emitidos durante as várias fases de um “flare” solar. . . . .	2
1.2	Representação dos diferentes tipos de explosões solares observadas na faixa de rádio frequências (10 – 30000 MHz) . . . . .	3
1.3	Cenário simplificado de um “loop” magnético, associado a uma região ativa, onde são mostradas a região de aceleração e as fontes de emissão tipo III (métricas e decimétricas), microondas e raios-X duros, que ocorrem durante os “flares” solares. . . . .	6
1.4	Espectro dinâmico de uma explosão tipo III . . . . .	7
1.5	Diagrama de blocos representando as várias etapas do processo de emissão de plasma . . . . .	9
2.1	Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas observadas em 02/out/93 pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX associadas com explosões em raios-X duros (14-23-33-53 keV) observadas pelo satélite YOHKOH . . . . .	21
2.2	Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo III observadas em 02/out/93 (07:41:20 UT) pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX. . . . .	22
2.3	Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo “spike” observadas em 03/out/93 pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX . . . . .	23
2.4	Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo “patch” observadas em 07/set/92 (07:11:13 UT) pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX . . . . .	24
3.1	Esquema com os diferentes parâmetros de uma explosão tipo III. (a) Espectro dinâmico e (b) perfil temporal . . . . .	26
3.2	Ajuste gaussiano ao perfil temporal de uma explosão tipo III em 580 MHz . . . . .	28
3.3	Espectro dinâmico, mapa de contornos e gráfico tridimensional de uma explosão tipo III . . . . .	30
3.4	Metodologia de determinação da taxa de deriva . . . . .	32
3.5	Deslocamento do $t_m$ , mostrando a taxa de deriva em frequência de uma explosão tipo III . . . . .	32
3.6	Distribuição da faixa de emissão das explosões tipo III decimétricas . . . . .	34
3.7	Duração das explosões tipo III decimétricas . . . . .	34
3.8	Distribuição da frequência de início das explosões tipo III decimétricas . . . . .	35
3.9	Distribuição das taxas de deriva das explosões tipo III decimétricas . . . . .	35
3.10	Taxa de deriva (df/dt) das explosões tipo III decimétricas . . . . .	37
3.11	Ajuste dos valores absolutos das taxas de deriva (df/dt) . . . . .	37
3.12	Distribuição de fluxo de pico das explosões tipo III decimétricas . . . . .	38
3.13	Gráfico de fluxo de pico vs frequência das explosões tipo III decimétricas . . . . .	38
4.1	Modelo de densidade para “loops” emissores de explosões tipo III . . . . .	47
4.2	Pares de explosões bi-direcionais . . . . .	55

5.1	Diagrama de blocos representando o Espectrógrafo Decimétrico Digital de Banda Larga com alta sensibilidade e altas resoluções temporal e espectral (WDDHRS). . . . .	60
5.2	Explosões tipo III e “spikes” no canal 69 . . . . .	65
5.3	Perfil temporal integrado em todos os canais . . . . .	65
5.4	Exemplo de um “header” de um arquivo FITS do WDDHRS. . . . .	70
5.5	Exemplo de um espectro dinâmico a ser obtido pelo WDDHRS. . . . .	71
6.1	Cenário do “flare” para reconexão espontânea. . . . .	75
6.2	Diagrama esquemático da reconexão de fluxo emergente com o campo coronal: (a) horizontal, (b) oblíquo, (c) vertical. . . . .	75
6.3	O cenário do “flare” solar . . . . .	79

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
1.1 Estudos estatísticos na faixa (1.0 – 3.0 GHz) . . . . .	4
1.2 Escalas de altura para absorção da radiação decimétrica ( $\geq 500$ MHz)	10
2.1 Explosões solares observadas em rádio (100-3000) MHz pelo PHOENIX associadas a observações em raios-X duros do satélite YOHKOH . .	16
2.2 Atividade solar associada - dados espectrais em rádio . . . . .	17
2.3 Classificação das explosões solares observadas (100-3000) MHz . . . .	20
3.1 Grupos de explosões solares tipo III selecionadas para análise . . . .	27
3.2 Distribuição da taxa de deriva. . . . .	40
4.1 Parâmetros do modelo de densidade . . . . .	46
4.2 Velocidades do excitador das explosões tipo III . . . . .	50
5.1 Classificação de explosões na faixa de (1000-2500) MHz . . . . .	63
5.2 Classificação das explosões simuladas . . . . .	66
A.1 Catálogo das explosões solares observadas pelo Espectrômetro PHOENIX (100-3000) MHz . . . . .	90

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 “Flares” solares

O primeiro “flare” solar foi observado no dia 1<sup>o</sup> de setembro de 1859, por Carrington e Hodgson (Haisch et al., 1991). Eles observaram, independentemente, um aumento transitório do brilho (alguns minutos) em luz branca, numa pequena área na superfície do Sol.

Um “flare” solar é um crescimento transitório (da ordem de minutos) na brilhância em qualquer emissão do espectro eletromagnético (raios- $\gamma$ , raios-X, EUV, H $\alpha$ , rádio). Um esquema reunindo os vários tipos de radiação emitida durante as várias fases de um “flare” solar é dado na Figura 1.1, enquanto que a Figura 1.2 mostra diversos tipos de explosões solares observadas em ondas de rádio (10 – 30000 MHz).

Os “flares” solares são fenômenos explosivos que liberam energia total da ordem de ( $10^{29}$ - $10^{33}$ ) erg (Cargill, 1996). O processo mais aceito atualmente para produzir a liberação de grandes quantidades de energia observadas é a conversão da energia magnética das regiões ativas, através da aniquilação e reconexão das linhas de campo dos loops (Melrose, 1993), resultando no aquecimento do ambiente e aceleração de elétrons no topo, ou dentro dos “loops” magnéticos, em zonas conhecidas como **regiões de aceleração**.

Recentemente, Masuda et al. (1995), apresentaram clara evidência observacional de que a região de reconexão magnética e aceleração de partículas, de 6 dentre 10 “flares” analisados, acontece acima do topo do “loop” emissor em raios-X moles. Mas, são necessários novos estudos da geometria da região de aceleração para definir este processo.

Na **fase impulsiva** dos “flares” solares, a emissão de energia acontece de um modo bastante rápido, diferente da fase precursora, ou da fase gradual (Figura 1.1). A fase impulsiva dura até 10 minutos, e às vezes é tão curta como 1 ou 2 minutos (De Jager, 1986). A importância do estudo desta fase, reside na sua associação com o processo básico de aceleração de partículas e liberação de energia de elétrons até 200 keV.

As emissões mais investigadas durante a fase impulsiva, são a emissão girossincrotrônica, emissão de plasma (tipo III, “spike”), assim como a emissão bremsstrahlung (raios-X).

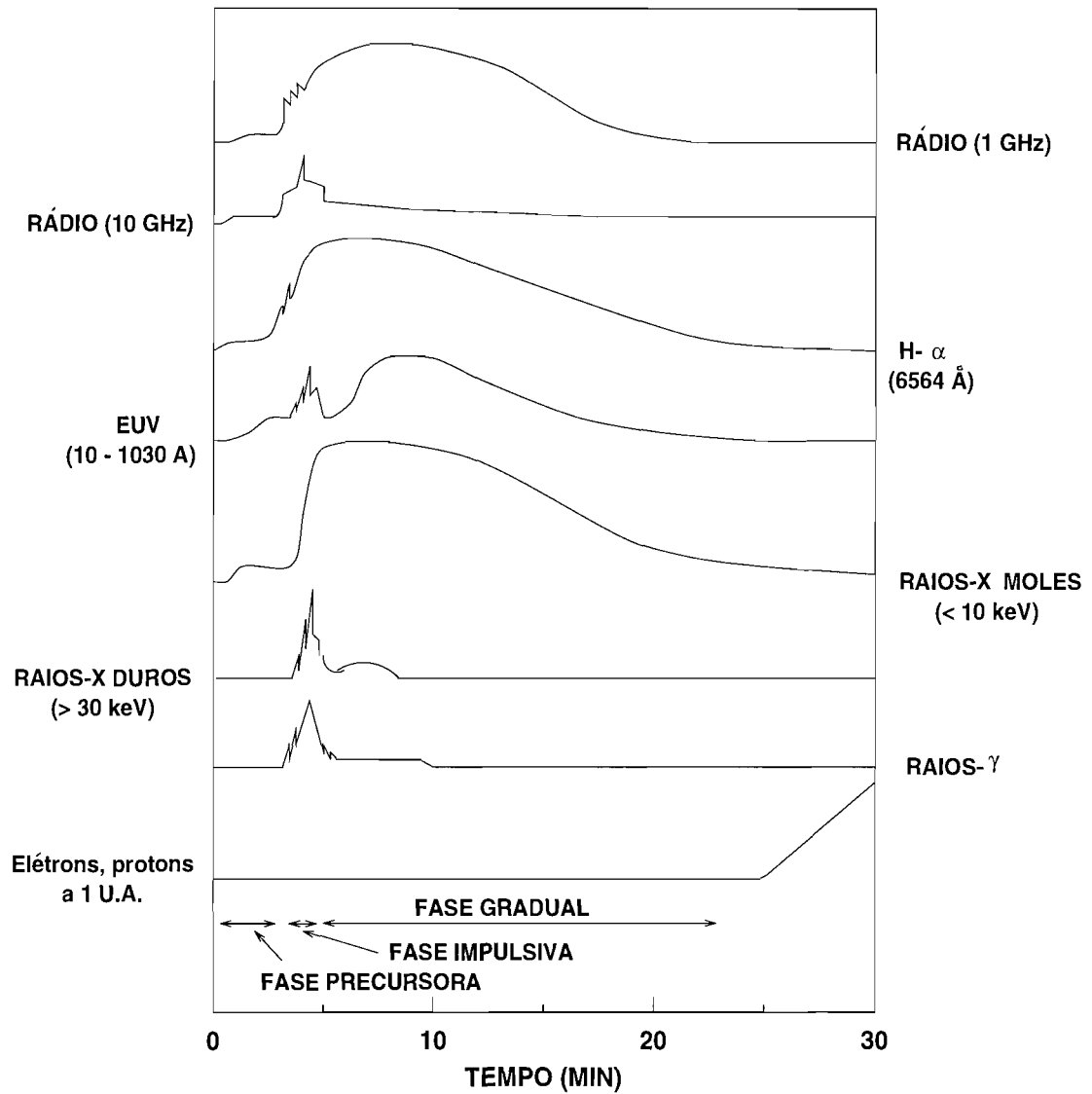


Fig. 1.1 - Esquema com os diferentes tipos de radiação eletromagnética emitidos durante as várias fases de um “flare” solar.  
 FONTE: Adaptada de Kane (1974), p. 105.

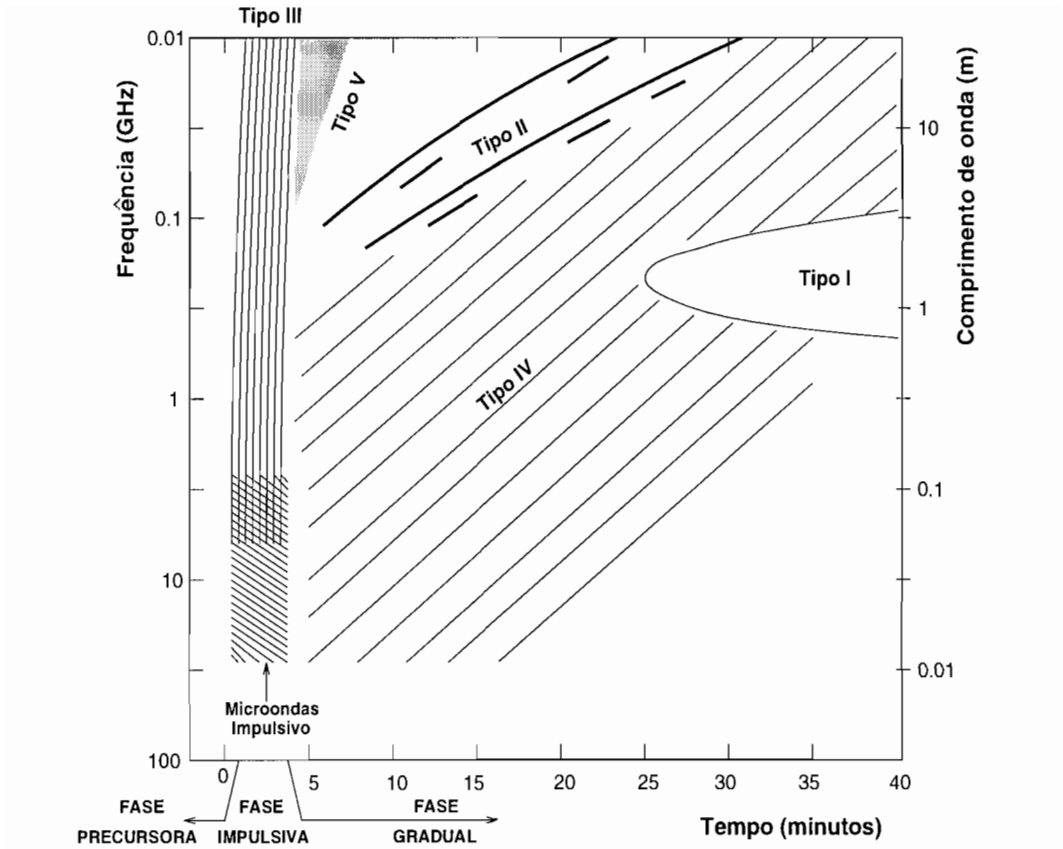


Fig. 1.2 - Representação dos diferentes tipos de explosões solares observadas na faixa de rádio frequências (10 – 30000 MHz).  
 FONTE: Adaptada de Dulk (1985), p. 169, e atualizada incluindo as várias fases do “flare”, e as recentemente observadas explosões tipo III até 6 GHz.



A Figura 1.3 representa um cenário simplificado de um “loop” magnético associado a uma região ativa, onde ocorrem os “flares” solares. São mostradas a região de aceleração e as fontes de emissão de plasma (tipo III métricas e decimétricas), emissão girossincrotrônica e raios-X duros.

## 1.2 Explosões tipo III decimétricas

As explosões tipo III foram reconhecidas como um tipo de explosão solar em rádio por Wild e McCready (1950). No **espectro dinâmico** (registro da intensidade como função da **frequência** e do **tempo**), elas apresentam uma rápida deriva em frequência do pico de fluxo (Figura 1.4), geralmente de altas para baixas frequências para a faixa métrica (Wild e McCready, 1950), e de baixas para altas frequências para o caso decimétrico (Young et al., 1961).

Desde sua descoberta nos anos 50, as explosões tipo III tem sido um dos fenômenos mais estudados em Astrofísica, tanto teórica, como observacionalmente. Estes estudos tem sido coletados e sumarizados em vários livros e artigos de revisão, como por exemplo Wild et al. (1963), Zheleznyakov (1970), Suzuki e Dulk (1985), Benz (1993).

Somente nesta última década, as explosões tipo III na faixa decimétrica (0.3 – 3.0 GHz) vêm sendo exaustivamente investigadas, sendo que a faixa de (1.0 – 3.0 GHz) tem sido ainda pouco explorada (ver Tabela 1.1).

**TABELA 1.1 - ESTUDOS ESTATÍSTICOS  
NA FAIXA (1.0 – 3.0 GHz)**

Faixa de frequência	Resolução (tempo/frequência)	Referência
1.5 – 1.7 GHz	0.1 s / 3 MHz	Fernandes (1992), Sawant et al. (1994)
1.0 – 3.0 GHz	0.1 s / 12 MHz	Isliker e Benz (1994)
0.1 – 3.0 GHz	0.1 s / 15 MHz	Aschwanden et al. (1995)*

(\*) Este estudo apresenta poucas explosões ( $\approx 20$ ) acima de 1 GHz.

Algumas das principais características das explosões tipo III decimétricas (0.3 – 3 GHz) são:

- 1) A deriva em frequência ( $df/dt$ ) aumenta com o aumento da frequência. Aschwanden et al. (1995) encontraram a relação  $| (df/dt) | = 0.10 \times f^{1.40}$  MHz/s para representar a média das taxas de deriva na faixa 100-3000 MHz.
- 2) A velocidade média do excitador é  $v \approx (0.15 - 0.30) c$  (Aschwanden et al., 1992, 1993b).
- 3) Geralmente ocorrem em grupos de 10 – 1000 explosões individuais (Islaker e Benz, 1994).
- 4) A duração da explosão varia entre (0.2 – 1.0) s (Fernandes 1992; Sawant et al., 1994; Islaker e Benz, 1994).
- 5) A emissão ocorre na frequência de plasma  $f_p = (n_e e^2 / \pi m)^{1/2}$  ou no 2<sup>o</sup> harmônico  $2f_p$ , sendo que para frequências maiores a 500 MHz, a emissão deve acontecer principalmente no 2<sup>o</sup> harmônico (Stähli e Benz, 1987).
- 6) O diâmetro aparente das fontes decresce com o aumento da frequência (Aschwanden et al., 1993a).
- 7) A densidade numérica média ( $n_b$ ) e o número médio de elétrons ( $N$ ) do feixe emissor são  $n_b \approx 5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  e  $N \approx 5 \times 10^{31}$  elétrons, respectivamente (Fürst et al., 1982; Fernandes, 1992; Sawant et al., 1994).
- 8) O número de explosões decresce com o aumento do fluxo (Fernandes, 1992; Aschwanden et al., 1995) e da frequência (Aschwanden et al., 1995).
- 9) Correlações de um para um, entre explosões individuais e picos em raios-X duros, tem sido observadas na fase impulsiva (Sawant et al., 1990; Aschwanden et al., 1995).

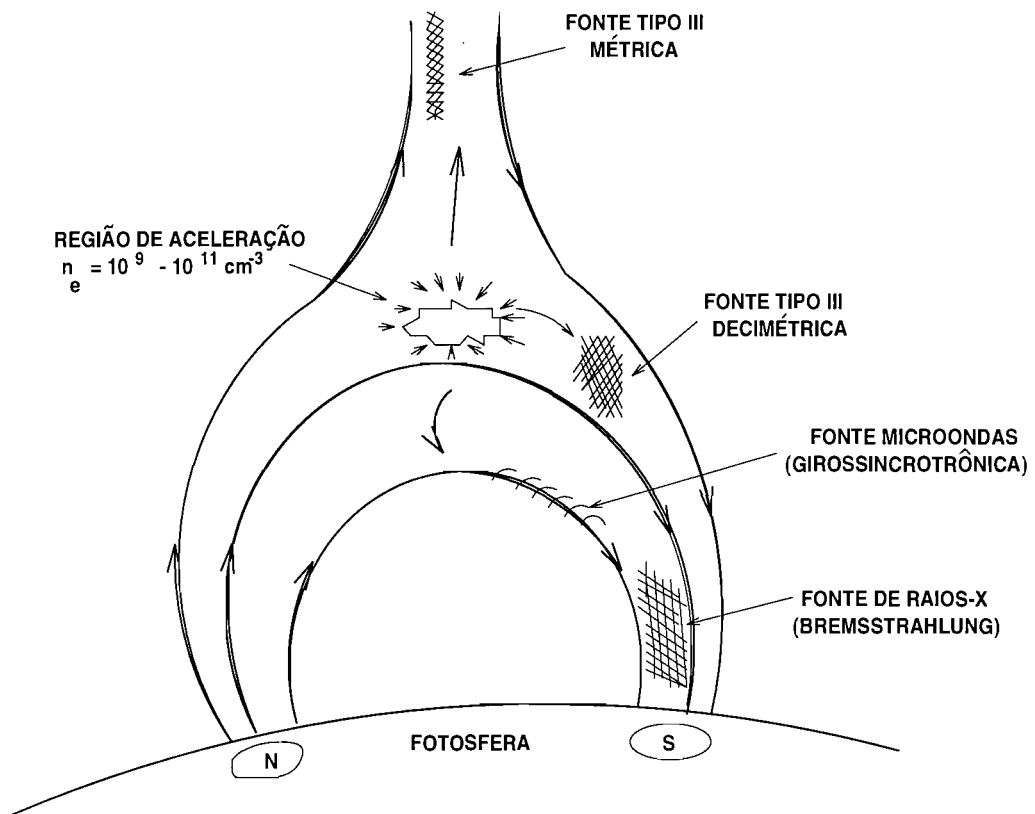


Fig. 1.3 - Cenário simplificado de um “loop” magnético, associado a uma região ativa, onde são mostradas a região de aceleração e as fontes de emissão tipo III (métricas e decimétricas), microondas, e raios-X duros, que ocorrem durante os “flares” solares.  
 FONTE: Adaptada de Trevisan (1991), p.40.

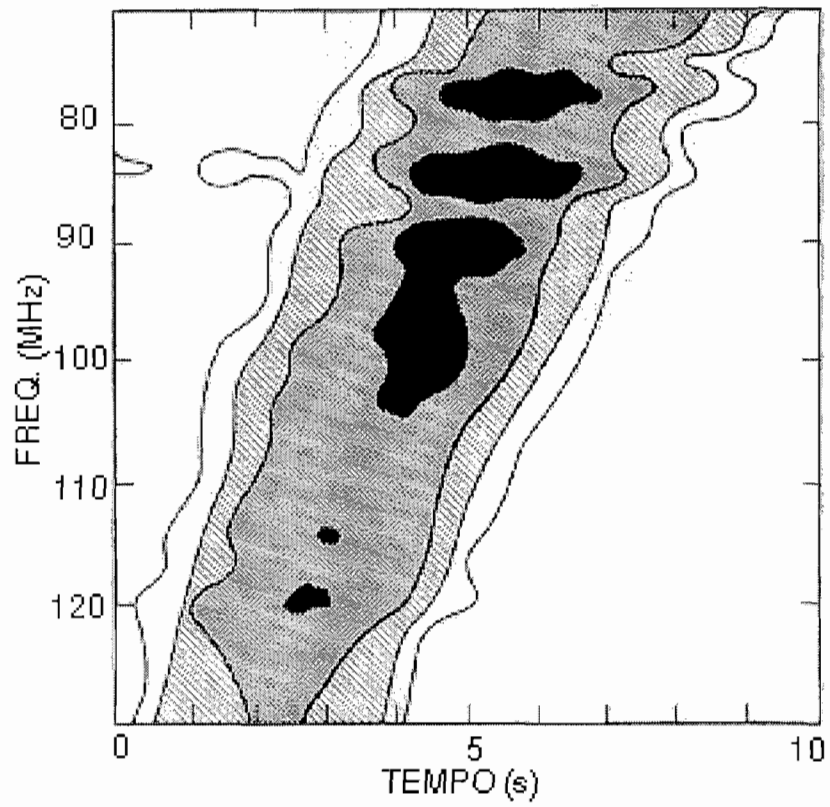


Fig. 1.4 - Espectro dinâmico de uma explosão tipo III. O eixo horizontal representa o tempo em segundos, e o eixo vertical a frequência em MHz. Os registros mais escuros indicam maior fluxo.  
FONTE: Wild e McCready (1950), p. 387.

### 1.3 Emissão de plasma

As emissões de rádio das explosões solares tipo III e variantes, são emissões de plasma, causadas por feixes de elétrons de baixa energia ( $\approx 10$  keV). Estes feixes de elétrons interagem com o plasma ambiente gerando oscilações, que recebem o nome de ondas de Langmuir.

Devido a efeitos não lineares, estas ondas são amplificadas e, por sua vez, cedem energia aos elétrons menos energéticos, ou seja, mais lentos, que chegam depois dos elétrons de alta energia, dentro do mesmo feixe (espalhamento em velocidade do feixe). Este círculo vicioso (transferência de energia dos elétrons para as ondas e vice-versa) é responsável para que o feixe percorra grandes distâncias na atmosfera solar, solucionando o “dilema de Sturrock”, no qual um feixe de elétrons que transferisse sua energia para o plasma, não percorreria mais do que  $\sim 1$  km dentro da atmosfera solar (Sturrock, 1964).

As ondas de Langmuir podem sofrer então dois tipos de efeitos: ou são espalhadas por íons térmicos e/ou por ondas de baixa frequência (e.g. ondas de Alfvén e ondas acústico-iônicas) em ondas transversais, dando origem à radiação numa frequência igual a do plasma ambiente ou, então, sofrem coalescência com ondas de Langmuir de sentido contrário, gerando ondas transversais no segundo harmônico.

Este mecanismo, mostrado no diagrama da Figura 1.5, é o mesmo usado para explicar as emissões métricas e decimétricas (Dulk, 1985), no entanto, é a localização em determinada altura da atmosfera solar (determinada densidade) que determina a frequência da emissão.

### 1.4 Absorção das ondas decimétricas

A absorção das ondas decimétricas é devida ao mecanismo de absorção livre-livre (Dulk, 1985). Por este processo, um elétron em movimento é espalhado ao passar pelo campo potencial de um próton e a energia eletromagnética do campo é transformada em energia cinética para o elétron.

A profundidade ótica ( $\tau$ ), para a interação livre-livre de uma radiação eletromagnética na frequência fundamental é dada por (Dulk, 1985):

$$\tau = 1,5 \times 10^{-17} T^{-3/2} f^2 H, \quad (1.1)$$

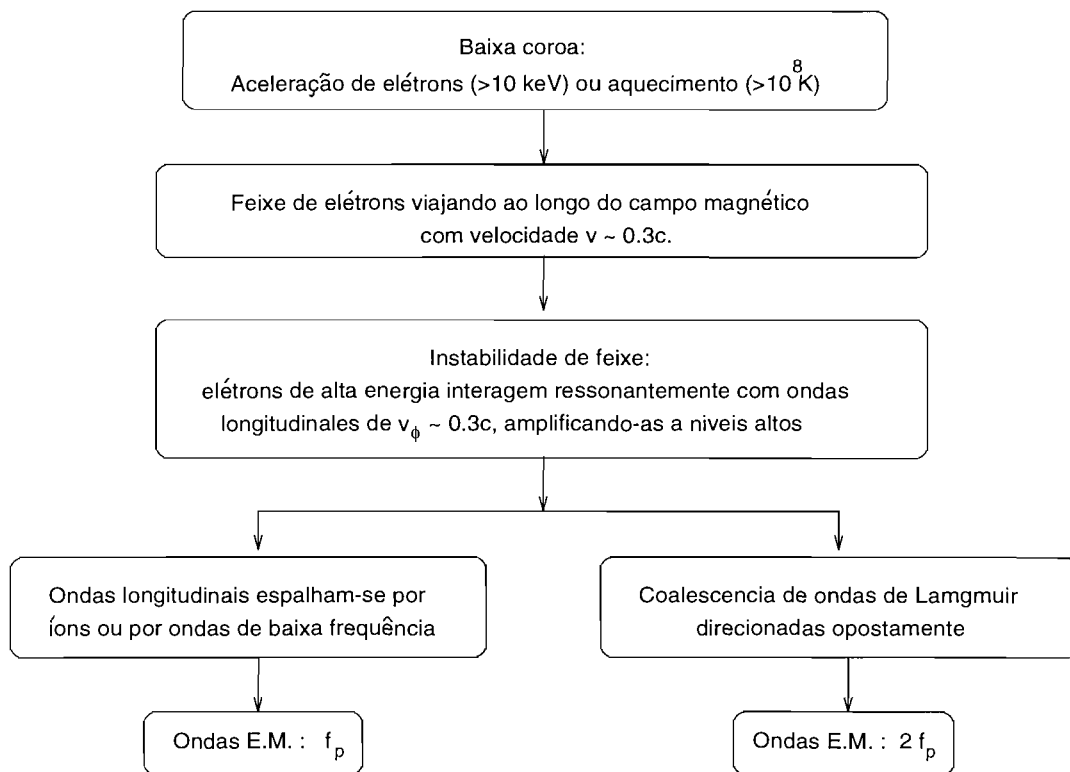


Fig. 1.5 - Diagrama de blocos representando as várias etapas do processo de emissão de plasma.

FONTE: Adaptada de Melrose (1985, p.182; 1991, p.37).

**TABELA 1.2 - ESCALAS DE ALTURA PARA ABSORÇÃO DA RADIAÇÃO DECIMÉTRICA ( $\geq 500$  MHz)**

Frequência (MHz)	Escala de altura (km)	
	Estado Fundamental	Segundo Harmônico
500	950	15200
1000	240	3700
1600	130	725
3500	18	310
5200	9	140

FONTE: Adaptada de Stähli e Benz (1987), p.275.

onde  $T$  é a temperatura da coroa, em K,  $f$  é a frequência no estado fundamental, em Hz e  $H$  é a escala de altura, em cm.

Para a emissão no segundo harmônico, o valor da profundidade ótica é cerca de 16 vezes menor (Dulk, 1985).

Considerando a absorção livre-livre, toda a emissão decimétrica ( $\geq 500$  MHz) seria absorvida, no caso de uma atmosfera homogênea. **Este foi um dos motivos para a pouca atenção prestada às emissões na faixa decimétrica durante os anos 60-70.** Só em finais dos anos 70, concluiu-se que a atmosfera não é homogênea.

Stähli e Benz (1987) obtiveram que a emissão fundamental é fortemente absorvida para frequências maiores que 1 GHz, considerando inhomogeneidades em densidade da ordem de 100 km. No segundo harmônico, contudo, a emissão pode ser observada até aproximadamente 6 GHz, como mostrado na Tabela 1.2, que fornece as escalas de altura ( $H$ ) correspondentes à profundidade ótica unitária, no estado fundamental e no segundo harmônico, para diferentes frequências e uma temperatura da coroa da ordem de  $5 \times 10^5$  K.

## 1.5 Motivação para o estudo de explosões tipo III decimétricas

As emissões solares na faixa decimétrica já eram conhecidas desde a década de 60 (Young et al., 1961; Kundu et al., 1961; Kundu e Spencer, 1963). Entretanto, as observações solares do laboratório orbital SKYLAB, através de mapas em raios-X moles, sugerem que as regiões de ocorrência da aceleração das partículas emissoras, durante os “flares” solares, encontram-se em altitudes correspondentes à baixa coroa onde as densidades estão associadas a emissões na banda de comprimentos de onda decimétricos (Moore et. al., 1980).

Desde então, a banda decimétrica tornou-se um laboratório em potencial para as investigações de estruturas finas espectrais e temporais de explosões solares, e para a investigação dos procesos de aceleração de partículas e liberação de energia nos “flares” solares.

É principalmente por isso que na última década, cada vez mais, tem-se tentado aumentar (melhorar) as resoluções temporal e espectral e a sensibilidade dos instrumentos de observação solar na faixa decimétrica. O uso de técnicas digitais, revolucionou o estudo da faixa decimétrica, permitindo a observação de inúmeras estruturas finas associadas à fase impulsiva dos “flares” solares (Fernandes, 1992; Isliker e Benz, 1994).

Existe uma falta de estudos estatísticos para explosões solares tipo III na faixa decimétrica acima de 1 GHz (Tabela 1.1). **Sendo assim, o presente trabalho vem cobrir uma importante lacuna nos estudos deste tipo de explosões.**

Já que a região de aceleração apresenta densidades eletrônicas para as quais a emissão decimétrica ocorre, estudos desta faixa podem esclarecer qual a geometria da região de aceleração, e ajudar a definir o processo de aceleração de partículas nos “flares” solares.



## 1.6 Apresentação do trabalho

O Espectrógrafo Decimétrico Digital de Banda Larga (WDDHRS) do INPE encontra-se em operação desde maio de 1996. O Sol está na fase mínima de atividade, e por este motivo procuramos dados similares aos que, num futuro próximo, serão observados pelo WDDHRS. Aproveitamos então os dados de 13 “flares” observados pelo espectrômetro PHOENIX (Suíça), que já haviam sido selecionados por Fernandes (1997, pesquisa de doutoramento), para investigações de explosões na faixa decimétrica acima de 1 GHz, associadas com raios-X duros.

As observações do PHOENIX, e a classificação dos dados são apresentados no Capítulo 2. Um catálogo das explosões classificadas é apresentado no Apêndice A.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para o tratamento dos dados, e são apresentados os parâmetros obtidos: frequência de início, faixa em frequência da emissão, duração, fluxo do pico, taxa de deriva em frequência, assim como sua correlação com a frequência de emissão. Estes parâmetros são comparados com os existentes na literatura.

O modelo de densidade de Aschwanden e Benz (1995), foi modificado de acordo com as investigações citadas acima. O modelo é descrito no Capítulo 4, e em seguida é aplicado para a obtenção da energia dos elétrons emissores, assim como do diagnóstico da região de aceleração nos “flares” solares. Também, foi estimada a densidade de elétrons dos feixes emissores, seguindo a metodologia apresentada por Fürst et al. (1982) com base nos parâmetros observacionais obtidos no Capítulo 3. Os valores obtidos, são comparados com determinações de outros autores.

No Capítulo 5, é aplicada a experiência obtida no tratamento dos dados do PHOENIX, para o desenvolvimento de um programa de detecção e classificação preliminar de explosões a serem observadas no futuro com o WDDHRS do INPE, assim como é proposto o futuro formato de armazenamento dos dados do WDDHRS.

No Capítulo 6, são discutidos os principais resultados obtidos, e sugerido o cenário das explosões decimétricas associadas à fase impulsiva dos “flares” solares.

## CAPÍTULO 2

### OBSERVAÇÕES

#### 2.1 Introdução

O Espectrógrafo Decimétrico Digital de Banda Larga (200–2500 MHz) de Alta Sensibilidade e Alta Resolução temporal (variável entre 10, 100, 500 ou 1000 ms, dependendo da faixa de frequência selecionada) e em frequência (3 MHz) (WDDHRS), encontra-se em operação no INPE desde maio de 1996, no período de 10 – 19 UT (Sawant et al., 1996; Fernandes, 1997). Devido a que atualmente o Sol está na fase mínima de atividade, não é possível a observação de explosões solares com o WDDHRS.

Existe um programa de colaboração entre a Divisão de Astrofísica (DAS) do INPE e o grupo de Radioastronomia do Instituto de Astronomia ETH, em Zurich (Suíça). Este acordo permite ao grupo de Física Solar da DAS-INPE, ter acesso aos dados de explosões solares observadas pelo PHOENIX, o único espectrógrafo no mundo similar ao WDDHRS.

A seguir, são apresentadas as principais características do espectrômetro PHOENIX, o critério de seleção de dados, e finalmente é descrita a classificação destes.

#### 2.2 O espectrômetro PHOENIX

O Rádio Observatório do Instituto de Astronomia ETH, encontra-se localizado em Bleien, a cerca de 50 km de Zurich.

Este observatório desenvolveu e operou 2 espectrômetros digitais desde 1978 até o presente. O primeiro deles foi o “IKARUS” (Perrenoud, 1982), operando na faixa de frequência de 100-1000 MHz, enquanto que seu sucessor, o “PHOENIX” (Benz et al., 1991), opera na faixa de 100-3000 MHz.

##### 2.2.1 Características do espectrômetro

O espectrômetro PHOENIX opera na banda de frequência de (100 – 3000 MHz), conjuntamente com uma antena parabólica de 7 m de diâmetro, com um alimentador tipo log–periódico cruzado no foco da parábola.

A antena tem montagem azimutal e segue o Sol continuamente. A posição do Sol é calculada em tempo real usando data e tempo como parâmetros de entrada (Stehling, 1995). O sistema permite a obtenção de ambos os sentidos de polarização circular para qualquer faixa de frequência determinada e possibilita uma varredura em frequência com uma resolução temporal entre 0,5 e 250 ms.

A resolução temporal depende do número de canais (ou faixa de frequência). O número de canais varia desde 1, para uma resolução temporal de 0,5 ms, até 500 para uma resolução em frequência de 15 MHz e temporal (mínima) de 250 ms.

A precisão em tempo do espectrômetro PHOENIX é controlada por um relógio atômico, o qual é controlado pelo sinal do relógio atômico do transmissor público de Prangin (Suíça), sendo a incerteza absoluta em tempo de uns poucos milisegundos.

### **2.2.2 Calibração em fluxo**

A calibração em fluxo do PHOENIX é feita em 3 passos:

- 1) Calibração diária do receptor por uma fonte de ruído de referência.
- 2) Calibração “on-line” durante cada varredura em uma frequência.
- 3) Calibração absoluta do fluxo por comparação com o espectro do Sol calmo reportado por outros observatórios.

Comparações com outros observatórios, mostram que o PHOENIX tem uma calibração absoluta do fluxo  $\leq 10\%$  (Aschwanden et al., 1992).

## 2.3 Seleção de dados

Os dados foram escolhidos através da procura de explosões solares observadas simultaneamente em raios-X duros e em ondas decimétricas (acima de 1 GHz), por Fernandes (1997).

A procura foi concentrada em eventos observados em rádio frequências pelo Espectrômetro PHOENIX (100–3000 MHz), e em raios-X pelo satélite YOHKOH (Fernandes, 1994). Foram encontrados 13 flares simultâneos entre o PHOENIX e o YOHKOH. A Tabela 2.1 mostra os dados selecionados em rádio e os dados associados do YOHKOH.

A Figura 2.1 mostra os registros em rádio e em raios-X de uma explosão solar observada sumultaneamente pelo PHOENIX e pelo YOHKOH.

Os dados fornecidos pelo grupo de Zurich, foram adquiridos com uma resolução temporal de 100 ms, e tem uma resolução em frequência de 14 MHz para os dados adquiridos no ano de 1992 e de 15 MHz para os dados do ano de 1993.

A Tabela 2.2 mostra a atividade solar associada observada por outros rádio-observatórios, nos dias de ocorrência selecionados. Na coluna “tipo” são indicadas basicamente explosões tipo III (G, GG, N, U, RS), DCIM, CONT, V. A definição destas explosões é dada em Solar Geophysical (1987).

**TABELA 2.1 - EXPLOSÕES SOLARES OBSERVADAS EM RÁDIO  
(100-3000) MHZ PELO ESPECTRÔMETRO PHOENIX  
SIMULTÂNEAS A OBSERVAÇÕES EM RAIOS-X DUROS  
DO SATÉLITE YOHKOH**

#	DATA	YOHKOH				PHOENIX	
		INÍCIO	MAX (UT)	FIM	conts/seg L-M1-M2-H	INÍCIO (UT)	FIM
1	05/09/92	11:22:54	11:27:02	11:31:12	160-56-23-13	11:25:31	11:31:13
2	06/09/92	09:02:08	09:04:08	09:10:40	142-64-25-15	09:03:25	09:04:35
3	06/09/92	11:47:06	11:51:26	11:51:28	129-43-10-9	11:48:48	11:58:48
4	07/09/92	07:09:34	07:11:34	07:13:34	30-14-6-9	07:11:13	07:11:41
5	07/09/92	07:38:52	07:39:16	07:43:04	9-7-4-10	07:41:13	07:42:45
6	07/09/92	08:46:14	08:52:46	09:01:42	39-8-5-10	08:46:09	08:49:49
7	12/09/92	15:38:15	15:38:51	15:42:15	31-22-8-10	15:39:51	15:40:16
8	18/01/93	13:02:41	13:02:59	13:03:29	8-5-3-9	13:01:07	13:01:36
9	02/10/93	07:39:50	07:40:10	07:45:34	102-116-87-54	07:39:39	07:45:09
10	03/10/93	09:24:54	09:27:32	09:30:24	38-40-23-17	09:26:27	09:31:19
11	03/10/93	12:42:30	12:42:42	12:45:36	17-19-11-10	12:42:08	12:44:36
12	20/10/93	09:49:57	09:52:33	09:57:05	9-3-2-8	09:53:50	09:56:32
13	01/12/93	11:12:51	11:12:55	11:13:01	4-2-2-7	11:12:44	11:13:09

As bandas de energia são: L  $\approx$  14-23 keV, M1  $\approx$  23-33 keV,  
M2  $\approx$  33-53 keV, H  $\approx$  53-93 keV.

**TABELA 2.2 - ATIVIDADE SOLAR ASSOCIADA EM  
RÁDIO**

#	DATA	centimétrica (3-10 GHz) início-fim (UT)	decimétrica (0.3-3 GHz) início-fim (UT)	métrica (0.03-0.3 GHz) início-fim (UT)	tipo	I	Local
	05/set/92		1122.8-1129.4	1123.1-1129.4	IIIGG	3	ONDR
	06/set/92			0523.0-1652.0	CONT	3	SVTO
				0615.0-0958.0	CONT	2	LEAR
			0705.0-1402.0	0705.0-1402.0	IN	1	ONDR
				1035.0-2145.0	CONT	2	SGMR
			1147.5-1158.2	1141.9-1158.2	IIIGG S	3	ONDR
				1147.6-1148.3	IIIG	2	WEIS
	07/set/92			0017.0-0815.0	CONT	2	SGMR
			0620.0-1402.0	0620.0-1402.0	IN	1	ONDR
				0620.0-1709.0	IIIN	3	WEIS
			0710.7-0712.0		IIIG		ONDR
				0705.0-0718.0	S	1	SVTO
				0840.0-0848.0	III	3	SVTO
		0840.5-0849.1		0840.5-0849.1	IIIGGU	2	ONDR
				0840.8-0848.4	IIIGG,V,C	3	POTS
				0843.6-0846.4	IIIG,SP	3	WEIS
		0846.3-0848.3			DCIM	1	POTS
				0847.9-0849.1	IIIGRS	3	POTS
	12/set/92			1538.0-1539.0	III	1	SGMR
				1538.0-1539.0	III	2	SVTO
				1538.5-1539.9	IIIRRS	3	WEIS
				1538.8-1538.9	SP	1	WEIS
	18/jan/92		1301.1-1302.0		DCIM	2	ONDR
				1300.4-1300.9	IIIG,U	1	POTS
	02/out/93			0700.0-0755.0	IIIS	2	IZMI
				0739.0-0745.0	IIIGG	2	IZMI
			0739.8-0745.0	0739.8-0745.0	DCIM	1	ONDR
				0716.0-1609.0	CONT	3	SVTO
	03/out/93			0924.9-0929.0	IIIG,V	3	IZMI
				0923.0-0930.0	V	3	SVTO
		1158.8-1243.5			CONT P	2	ONDR
		1242.5-1243.5			IIIGGG	2	ONDR
			0730.8-1243.5	0710E-1401D	CONT P	2	ONDR
				1238.0-1245.0	III	3	SGMR
				1238.0-1246.0	V	3	SVTO
	20/out/93	0950.6-0951U	0950.6-0951.0		IIIG	1	ONDR
		0955.7-1000.5	0955.7-1000.5		CONT	1	ONDR
	01/dez/93			1112.8-1113.0	IIIG	2	POTS
				0800E-1414.0	I,S,C,DC	2	POTS

I (Intensidade do evento): 1 = (5 - 50) *ufs*, 2 = (50 - 500) *ufs*, 3 > 500 *ufs*.

Fonte: Solar Geophysical Data (1992, 1993, 1994).

## 2.4 Classificação dos dados

Os dados das explosões solares foram trazidos da Suíça ao INPE via FTP em forma compactada, sendo descompactados no INPE usando o programa “gunzip”.

Os dados foram fornecidos no formato “FITS” (“Flexible Image Transport System”), contendo no começo de cada arquivo um “header” com a informação da aquisição e a seguir os dados propriamente ditos.

O valor em fluxo destes dados encontravam-se numa escala logarítmica ( $S_{log}$ ):

$$S_{log} = 45 \times \log_{10} (S_{ufs} + 10) , \quad (2.1)$$

onde  $S_{ufs}$  é o fluxo em unidades de fluxo solar ( $1 \text{ ufs} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ).

O pacote escolhido para a análise dos dados foi o IRAF V2.10.4 das estações SUN da Divisão de Astrofísica-INPE, dada a sua grande potencialidade de trabalhar dados como imagens.

Os valores em fluxo dos dados foram transformados da escala logarítmica original ( $S_{log}$ ) em que foram fornecidos para uma escala linear ( $S_{ufs}$ ) em  $ufs$  pela seguinte equação:

$$S_{ufs} = \exp(0.05117 \times S_{log}) - 10 , \quad (2.2)$$

Feito isto, os dados ficaram prontos para serem trabalhados com as diversas tarefas do pacote IRAF.

Os dados foram visualizados como imagens (espectros dinâmicos) dentro do “software” SAOimage, utilizando um monitor colorido de alta resolução. O fato de se trabalhar os arquivos de dados como imagens, permitiu analisar rapidamente as explosões para sua classificação.

Foram usadas diversas escalas de intensidade (linear, logarítmica, raiz quadrada) para observar melhor as estruturas finas, assim como foram usados diferentes níveis de contrastes de acordo com a intensidade das explosões.

Os 13 eventos (“flares”) de explosões solares decimétricas observados pelo rádio espectrômetro PHOENIX foram subdivididos em grupos menores, para facilitar a análise e o tratamento de dados. Foram determinadas a faixa de emissão em frequência e a duração das explosões, e, de acordo com estes parâmetros e a sua taxa de deriva em frequência, foram classificados basicamente em explosões tipo III, “spikes” e “patches” (Tabela 2.3), seguindo o catálogo de Isliker e Benz (1994).

Um exemplo de um grupo de explosões tipo III observado em 02/out/93 é mostrado na Figura 2.2, enquanto que na Figura 2.3 é apresentado um exemplo de explosões tipo “spike” observadas em 03/out/93, e na Figura 2.4 um exemplo de explosões tipo “patch” observadas em 07/set/92 pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX.

Um catálogo com os espectros dinâmicos de todos os eventos analisados, é mostrado no Apêndice A.

As principais características apresentadas através da análise preliminar das explosões solares tipo III, “spike” e “patch”, são:

- **EXPLOSÕES TIPO III:**  
A largura de banda é  $\leq 100$  MHz para explosões de banda estreita (nb),  $\leq 500$  MHz (banda intermediária, ib) e  $\geq 500$  MHz (banda larga, bb).  
A duração fica entre (0.2 - 0.7) s. A explosão que apresenta deriva em frequência positiva (de baixa para alta frequência) é classificada como “reverse slope” (RS).
- **EXPLOSÕES TIPO “SPIKE”:**  
A largura de banda instantânea é  $\leq 15$  MHz.  
A duração é da ordem de milissegundos ( $< 100$  ms).
- **EXPLOSÕES TIPO “PATCH”:**  
Este tipo de explosões são tanto de banda estreita ( $< 100$  MHz) quanto de banda larga ( $> 100$  MHz).  
A duração varia entre 1 s e 1 min.

Nos próximos capítulos, será apresentada a análise detalhada das explosões tipo III e suas interpretações.



**TABELA 2.3 - CLASSIFICAÇÃO DAS EXPLOSÕES SOLARES  
OBSERVADAS PELO ESPECTRÔMETRO  
PHOENIX (100-3000) MHZ**

GRUPO	DATA	TIPO	INÍCIO (UT)	FIM	FAIXA (MHz)
1	05/09/92	pulsations	11:25:31	11:25:57	1140-1840
2	05/09/92	IV, ibIII-RS (GG)	11:26:30	11:27:40	230-1900
3	05/09/92	cigar patch	11:29:47	11:31:13	1500-1600
4	06/09/92	nbIII (GG)	09:03:25	09:04:35	1500-2000
5	06/09/92	nbIII-RS (GG)	11:48:48	11:48:54	1250-1420
6	06/09/92	ibIII	11:49:23	11:49:33	1000-1560
7	06/09/92	ibIII	11:49:48	11:49:55	2400-3000
8	06/09/92	ibIII	11:50:15	11:51:14	800-1200
9	06/09/92	nb-ibIII-RS	11:53:30	11:54:15	400-1400
10	06/09/92	ibIII-RS	11:54:15	11:55:45	650-1450,1630-2500
11	06/09/92	mIII,ibIII-RS (GG)	11:56:18	11:58:48	900-1900
12	07/09/92	patch (split?) (G)	07:11:13	07:11:41	1000-1250
13	07/09/92	patch	07:41:13	07:41:17	1110-1170
14	07/09/92	patch	07:42:15	07:42:38	950-1100,1050-1800
15	07/09/92	ibIII-RS	07:42:42	07:42:45	1070-1660
16	07/09/92	cloudy patches	08:46:09	08:46:30	750-1100
17	07/09/92	cloudy patches	08:48:26	08:48:47	900-1000
18	07/09/92	cloudy patches	08:49:27	08:49:49	1000-1100
19	12/09/92	carterp. patches, m IV	15:39:51	15:40:16	500-700,750-1750
20	18/01/93	nb-ibIII (GG, drifting chain)	13:01:07	13:01:36	1100-2200
21	02/10/93	bbIII-RS (GG)	07:39:39	07:41:01	500-2200
22	02/10/93	mIII-RS, nb-ib-bbIII-RS (GG)	07:41:20	07:42:03	500-3000
23	02/10/93	mIII-RS, ibIII	07:44:27	07:45:09	100-500,1100-3000
24	03/10/93	mIII-RS, ibIII+absorp.	09:24:46	09:26:19	100-300,2000-2500
25	03/10/93	absorption	09:26:27	09:27:09	
26	03/10/93	ibIII+absorp.	09:27:13	09:27:41	1320-1600
27	03/10/93	absorption	09:27:48	09:28:08	
28	03/10/93	bbIII-RS+dm spikes	12:42:08	12:44:36	200-700,100-3000
29	20/10/93	patch	09:53:50	09:56:32	1100-1500
30	01/12/93	patch	11:12:44	11:13:09	800-1450

TIPO: tipo de explosão classificada seguindo o catálogo de Isliker e Benz (1994).

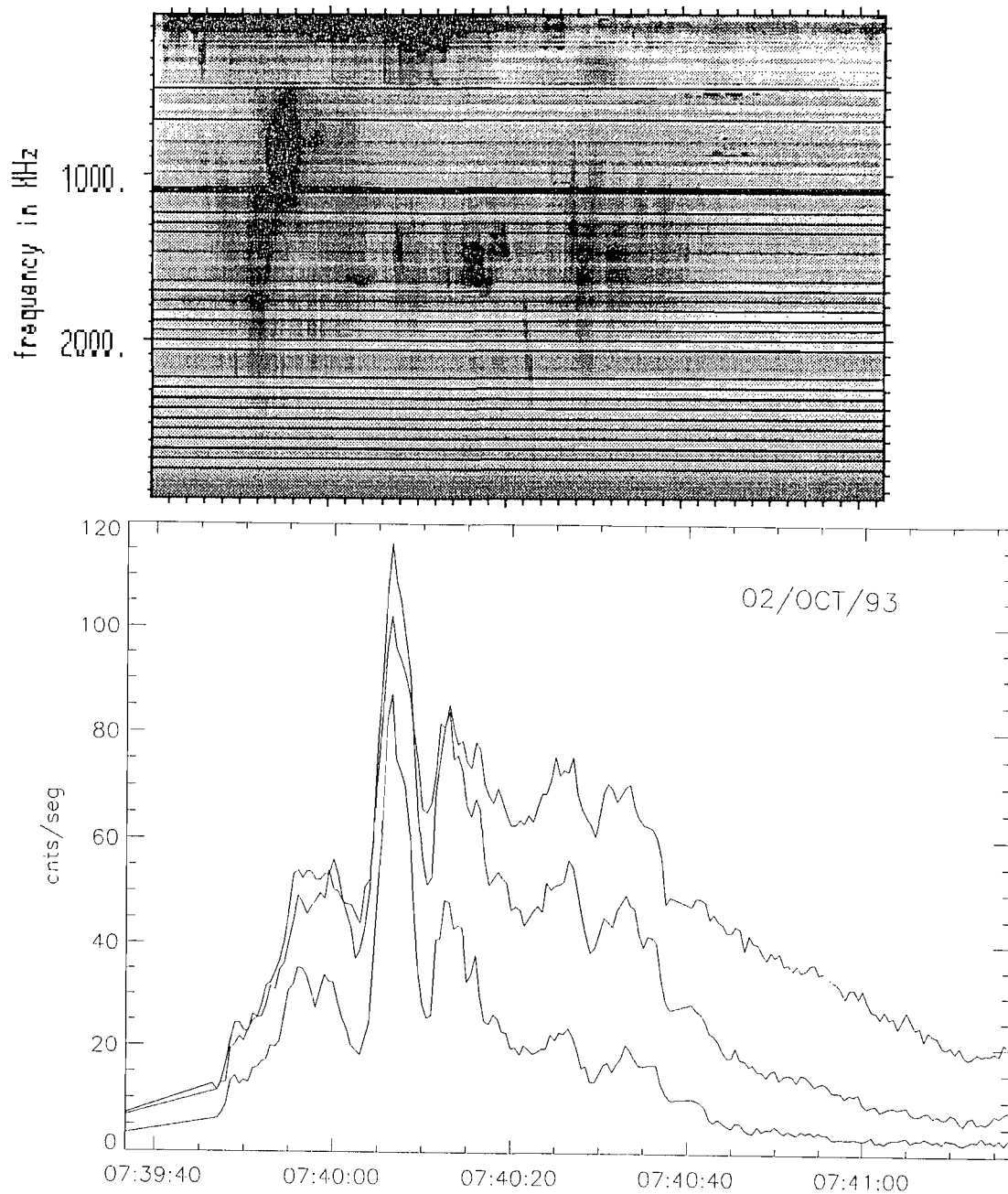


Fig. 2.1 - Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas observadas em 02/out/93 pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX (Figura superior), associadas com explosões em raios-X duros (14-23-33-53 keV) observadas pelo satélite YOHKOH (Figura inferior).

g1500031: 93/OCT/02, 07:41:20

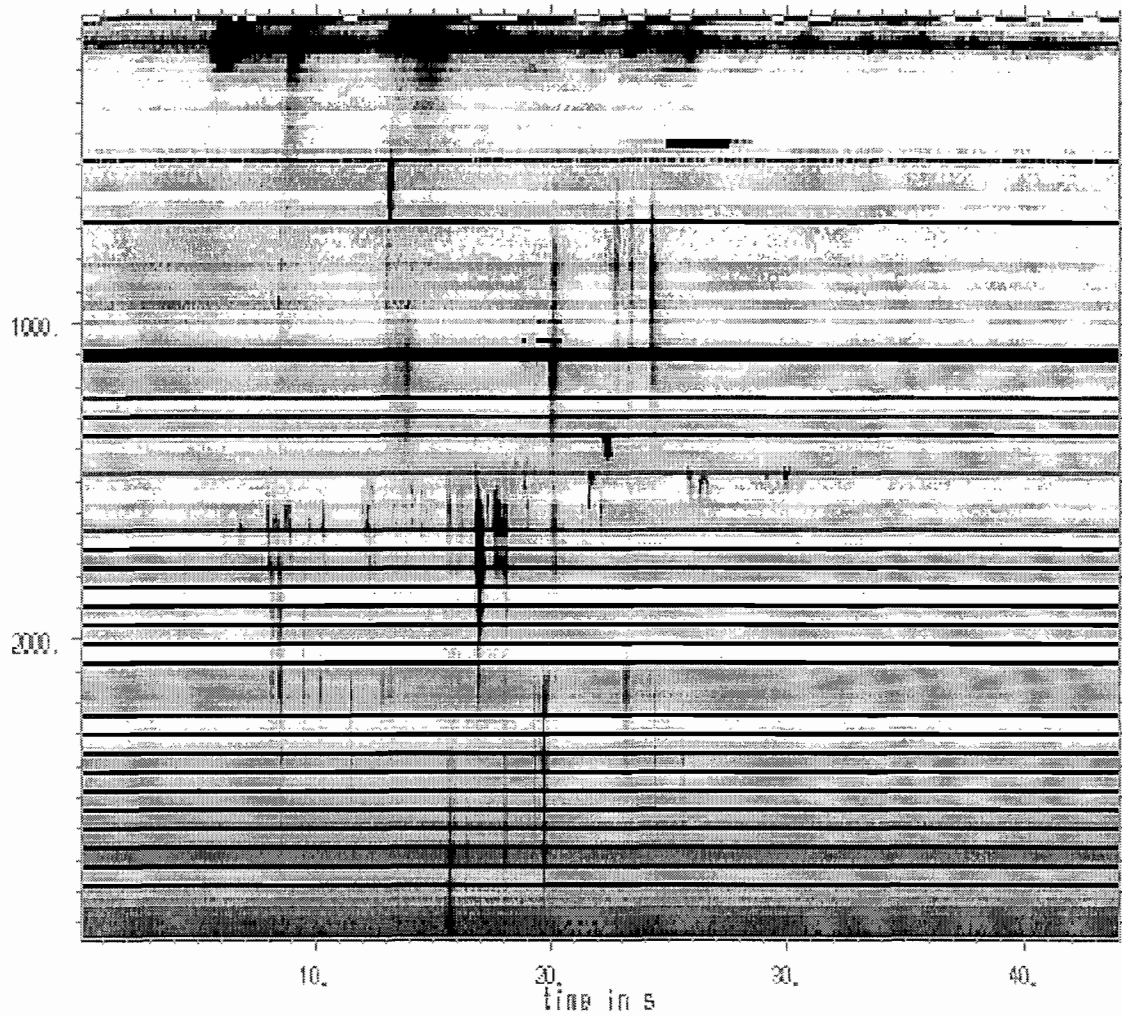


Fig. 2.2 - Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo III observadas em 02/out/93 (07:41:20 UT) pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX. O eixo vertical corresponde à frequência em MHz.

g180002spikes2: 93/OCT/03, 12:42:08

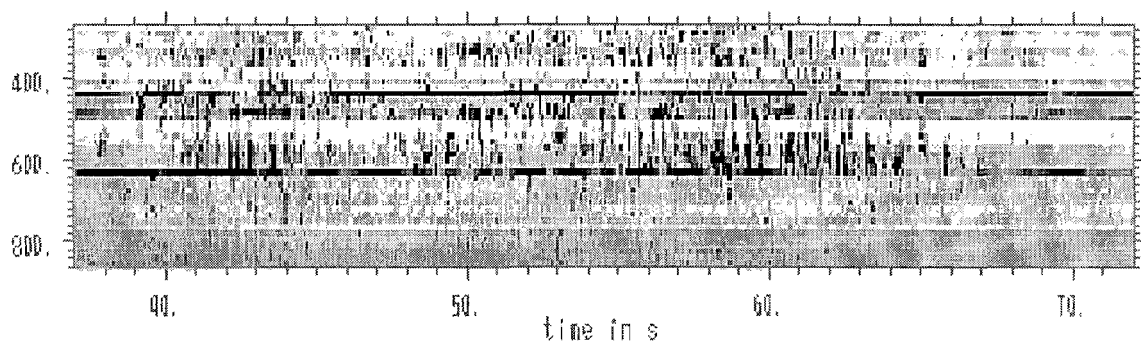


Fig. 2.3 - Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo “spike” observadas em 03/out/93 pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX. O eixo vertical corresponde à frequência em MHz.

g061: 92/SEP/07, 07:11:13

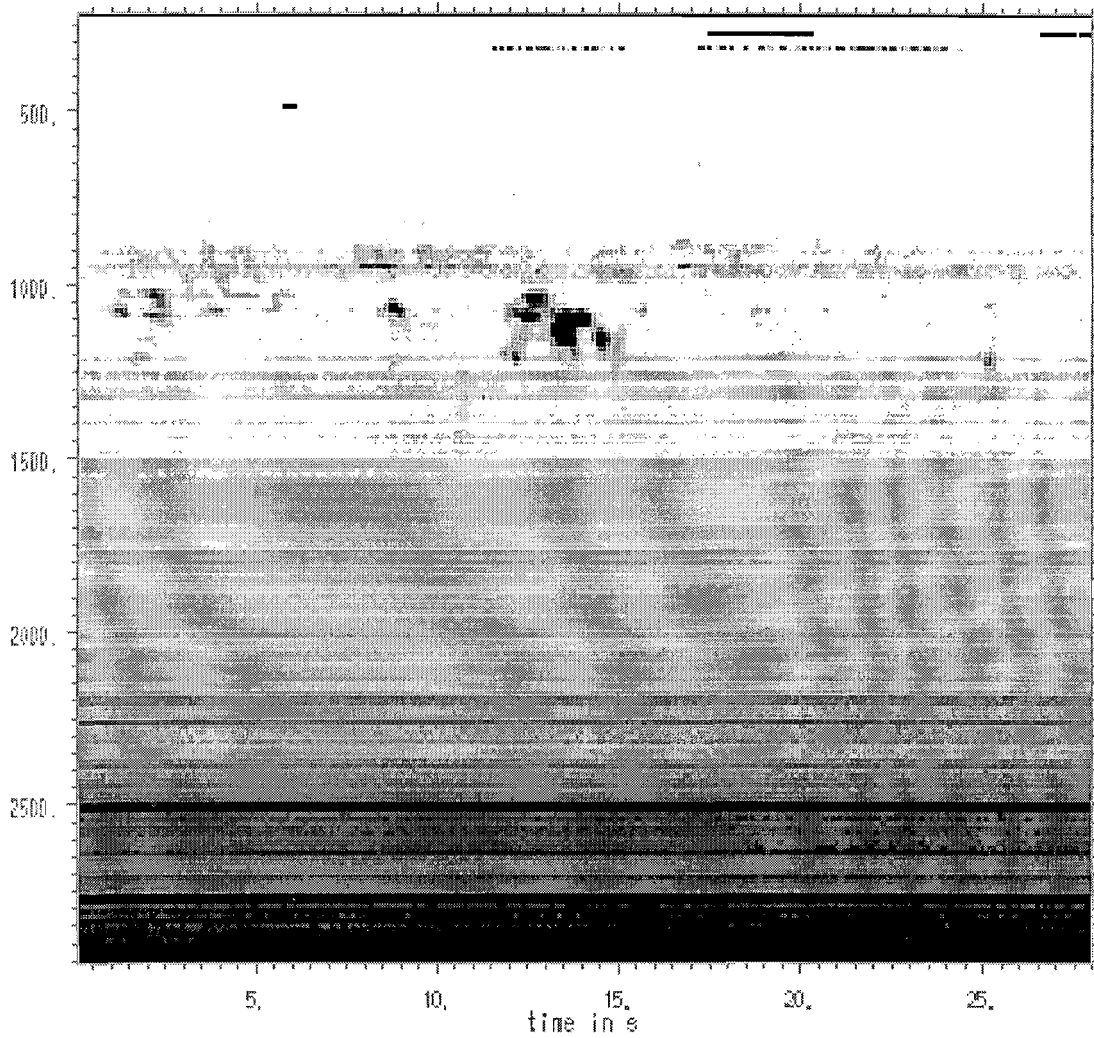


Fig. 2.4 - Espectro dinâmico de explosões solares decimétricas tipo “patch” observadas em 07/set/92 (07:11:13 UT) pelo Rádio Espectrômetro PHOENIX. O eixo vertical corresponde à frequência em MHz.

## CAPÍTULO 3

### TRATAMENTO DE DADOS

#### 3.1 Introdução

São poucas e recentes as investigações de explosões solares tipo III na faixa decimétrica acima de 1 GHz. Por exemplo, Aschwanden et al. (1995) analisaram explosões tipo III na faixa (0.1 – 3.0 GHz), cuja maioria foram para frequências menores que 1 GHz. Fernandes (1992) e Sawant et al. (1994), também investigaram explosões tipo III, mas restritas à faixa de 1.5-1.7 GHz.

Neste trabalho, no entanto, são apresentadas investigações de explosões solares tipo III na faixa decimétrica (0.3 – 3.0 GHz), **sendo que, pela primeira vez, é analisado um grande número destas explosões acima de 1 GHz.**

Dos 30 grupos de explosões classificadas no capítulo anterior (Tabela 2.4), foram selecionados para análise todos os grupos (17) de explosões tipo III. Ficaram então 8 flares, correspondentes a estes 17 grupos de explosões tipo III, mostrados na Tabela 3.1.

Em uma primeira seleção, foi selecionado um total de 416 explosões tipo III nestes 17 grupos, porém devido a diversos fatores como interferência, superposição de explosões, e deriva em frequência não definida, só para 160 explosões foi possível determinar os seguintes parâmetros (Figura 3.1a,b):

- 1) Frequência de início ( $f_i$ ) da emissão.
- 2) Frequência de fim ( $f_f$ ) da emissão.
- 3) Frequência central ( $f_c$ ) da emissão,  $f_c = (f_i + f_f)/2$ .
- 4) Faixa em frequência ( $\Delta f$ ) da emissão,  $\Delta f = f_i - f_f$ .
- 5) Duração a meia potência ( $t_{1/2}$ ).
- 6) Fluxo do pico ( $S$ ).
- 7) Taxa de deriva em frequência ( $df/dt$ ).

A seguir, é apresentada a metodologia aplicada para a determinação dos parâmetros acima citados, a análise detalhada destes parâmetros, as discussões e interpretações dos resultados obtidos, e finalmente um sumário destes resultados.

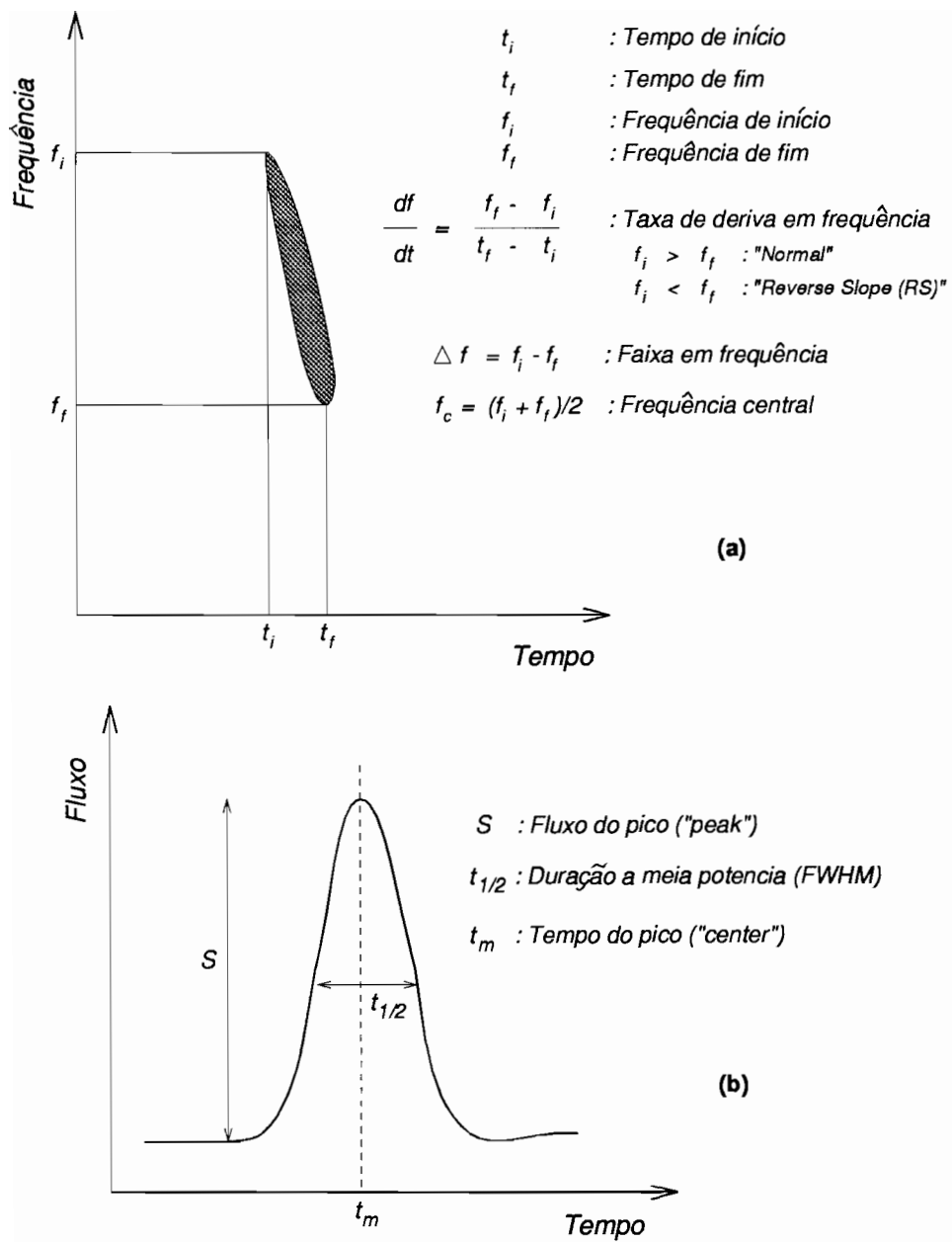


Fig. 3.1 - Esquema com os diferentes parâmetros de uma explosão tipo III. (a) Espectro dinâmico e (b) perfil temporal em uma dada frequência.

**TABELA 3.1 - GRUPOS DE EXPLOSÕES SOLARES TIPO III SELECIONADAS PARA ANÁLISE**

#	DATA	TIPO	INÍCIO (UT)	FIM	FAIXA (MHz)
1	05/09/92	IV, ibIII-RS (GG)	11:26:30	11:27:40	230-1900
2	06/09/92	nbIII (GG)	09:03:25	09:04:35	1500-2000
3	06/09/92	nbIII-RS (GG)	11:48:48	11:48:54	1250-1420
4	06/09/92	ibIII	11:49:23	11:49:33	1000-1560
5	06/09/92	ibIII	11:49:48	11:49:55	2400-3000
6	06/09/92	ibIII	11:50:15	11:51:14	800-1200
7	06/09/92	nb-ibIII-RS	11:53:30	11:54:15	400-1400
8	06/09/92	ibIII-RS	11:54:15	11:55:45	650-1450,1630-2500
9	06/09/92	mIII,ibIII-RS (GG)	11:56:18	11:58:48	900-1900
10	07/09/92	ibIII-RS	07:42:42	07:42:45	1070-1660
11	18/01/93	nb-ibIII (GG, drifting chain)	13:01:07	13:01:36	1100-2200
12	02/10/93	bbIII-RS (GG)	07:39:39	07:41:01	500-2200
13	02/10/93	mIII-RS, nb-ib-bbIII-RS (GG)	07:41:20	07:42:03	500-3000
14	02/10/93	mIII-RS, ibIII	07:44:27	07:45:09	100-500,1100-3000
15	03/10/93	mIII-RS, ibIII+absorp.	09:24:46	09:26:19	100-300,2000-2500
16	03/10/93	ibIII+absorp.	09:27:13	09:27:41	1320-1600
17	03/10/93	bbIII-RS+dm spikes	12:42:08	12:44:36	200-700,100-3000

## 3.2 Metodologia

Os dados foram visualizados como espectros dinâmicos em um monitor de alta resolução, e foi usada a tarefa IMEXAMINE do IRAF para analisar os vários parâmetros observacionais das explosões solares tipo III.

### 3.2.1 Duração e fluxo de pico

Foi ajustado um perfil gaussiano aos dados, para uma dada frequência, tal como é mostrado na Figura 3.2. Com isto, foi possível obter os seguintes parâmetros (os parâmetros em **negrito** correspondem aos da Figura 3.2) :

- 1) Tempo do pico da emissão ( $t_m$ ), correspondendo ao centro (**center**) da gaussiana.
- 2) Fluxo de pico ( $S$ ), correspondendo ao pico (**peak**) da gaussiana.
- 3) Duração a meia potência ( $t_{1/2}$ ) da gaussiana (**FWHM**).



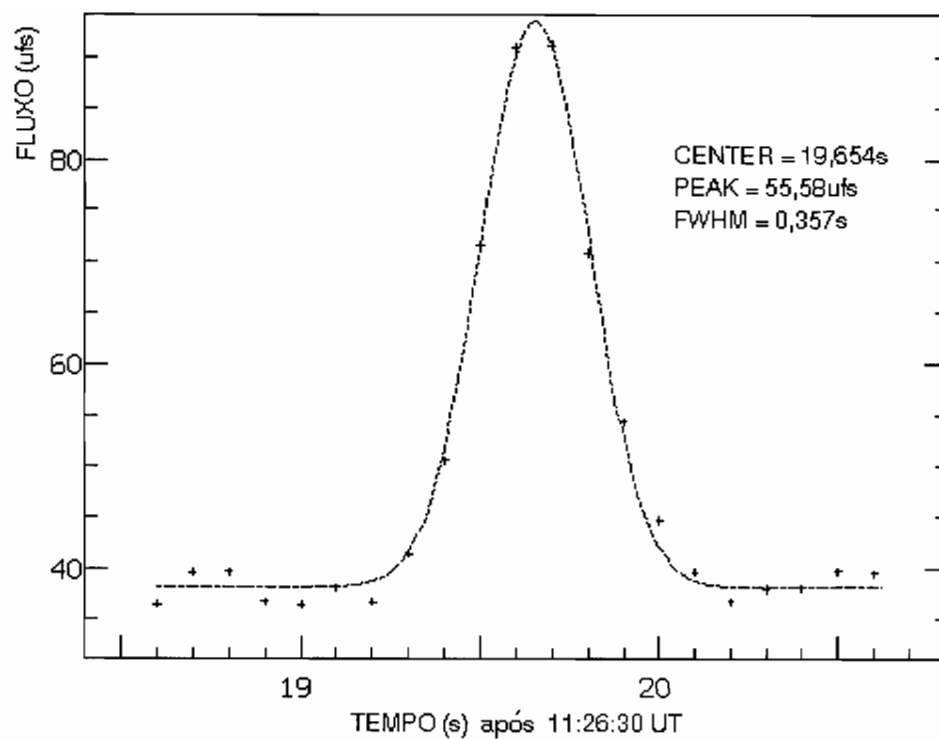


Fig. 3.2 - Ajuste gaussiano ao perfil temporal de uma explosão tipo III na frequência de 580 MHz observada no dia 05-set-92 (Tarefa **imexamine** do IRAF).

### 3.2.2 Taxa de deriva ( $df/dt$ )

Historicamente, tem-se apresentado os espectros dinâmicos com o eixo em frequência (eixo vertical) invertido, isto é, com valores de frequência decrescendo para cima. Isto reflete o fato de que as explosões tipo III que se deslocam para a alta coroa vão emitindo em frequências baixas, enquanto as que se deslocam para a fotosfera (para baixo) vão emitindo em frequências altas.

Portanto foi adotada a seguinte convenção na definição da taxa de deriva ( $df/dt$ ):

$$(df/dt) \rightarrow -df/dt, \quad (3.1)$$

Sendo assim, temos que:

- **Explosões “normais”**: apresentam  $(df/dt) > 0$  e vão emitindo de frequências altas para baixas (se deslocam para a coroa).
- **Explosões “reverse slope (RS)”**: apresentam  $(df/dt) < 0$  e vão emitindo de frequências baixas para altas (se deslocam rumo à fotosfera).

Devido ao fato dos dados terem uma baixa resolução temporal, é praticamente impossível se medir diretamente do espectro dinâmico uma taxa de deriva  $(df/dt) > 1$  GHz/s. Por exemplo, para uma explosão típica com uma  $\Delta f = 0.1$  GHz, isto implicaria um deslocamento  $< 100$  ms no tempo do máximo de emissão, ou seja, menor do que a resolução temporal dos dados.

São poucos os casos onde as explosões tipo III na faixa decimétrica apresentam deslocamentos facilmente identificáveis. Isto geralmente acontece para explosões abaixo de 800 MHz. Um bom exemplo é mostrado na Figura 3.3, onde se pode observar claramente a taxa de deriva da explosão .

Portanto, buscou-se um método que permitisse calcular as taxas de deriva com boa precisão.

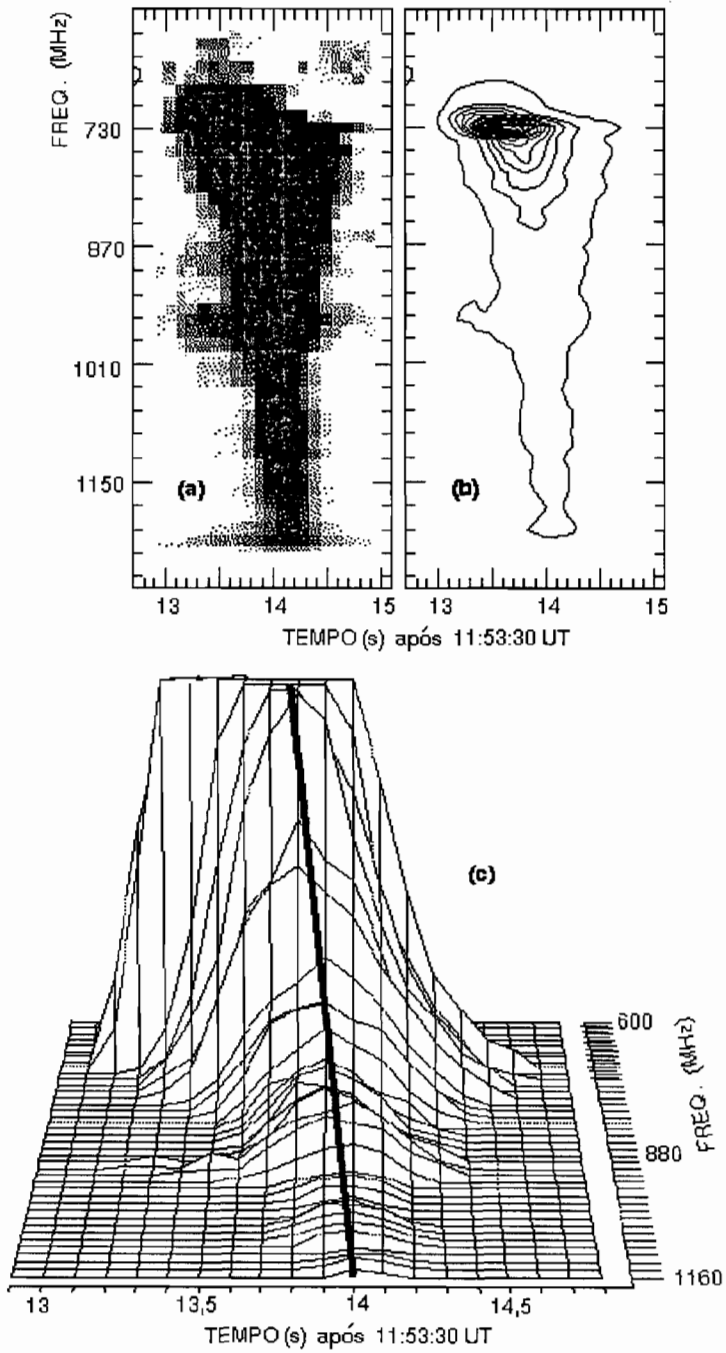


Fig. 3.3 - (a) Espectro dinâmico, (b) mapa de contornos, e (c) gráfico tridimensional de uma explosão tipo III, observada em 06-set-92.

A determinação da  $(df/dt)$  foi feita por regressão linear entre os tempos de pico de emissão ( $t_m$ ) dos perfis temporais. Ajustando uma gaussiana aos perfis temporais em uma dada frequência, podemos determinar o tempo onde acontece o máximo de emissão ( $t_m$ ), isto é, o tempo de pico. A seguir é feita a regressão linear para determinar  $(df/dt)$ . Este procedimento é ilustrado esquematicamente na Figura 3.4, enquanto que na Figura 3.5 é apresentado uma superposição de três destes ajustes gaussianos (para três frequências diferentes) onde pode-se apreciar claramente o deslocamento do  $t_m$  (centro da gaussiana).

### 3.2.3 Faixa de emissão

As frequências  $f_i$  e  $f_f$  das explosões, foram medidas diretamente dos espectros dinâmicos, através de uma ampliação em 2 ou 4 vezes. No caso de dúvida, foi usado um mapa de contornos, como o mostrado na Figura 3.3b.

Em princípio, dada a baixa resolução temporal, não era possível conhecer *a priori* qual frequência correspondia ao início da explosão ( $f_i$ ) ou ao fim ( $f_f$ ) da explosão. Uma vez determinada a taxa de deriva  $(df/dt)$ , isto foi feito considerando o seguinte:

- 1) Se a explosão tem  $(df/dt) < 0$ , então  $f_i$  corresponde à frequência mais baixa, enquanto que  $f_f$  corresponde à frequência mais alta.
- 2) Se a explosão tem  $(df/dt) > 0$ , então  $f_i$  corresponde à frequência mais alta, enquanto que  $f_f$  corresponde à frequência mais baixa.

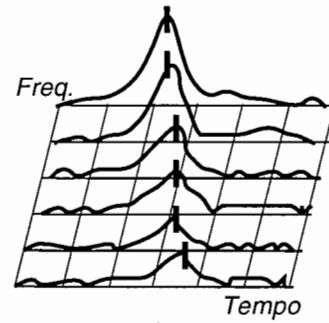
## 3.3 Análise

### 3.3.1 Distribuição da faixa de emissão

A distribuição das faixas de emissão,  $\Delta f = f_i - f_f$ , é mostrada na Figura 3.6. Claramente, temos que a maioria de explosões solares decimétricas analisadas (85%) apresentou:

$$\Delta f \leq 250 \text{ MHz.}$$

1) Determinação dos máximos de emissão dos perfis temporais



2) Regressão linear

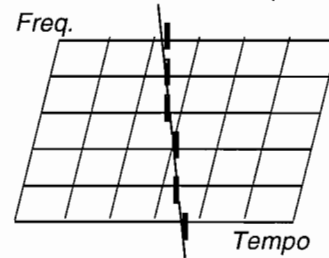


Fig. 3.4 - Metodologia de determinação da taxa de deriva

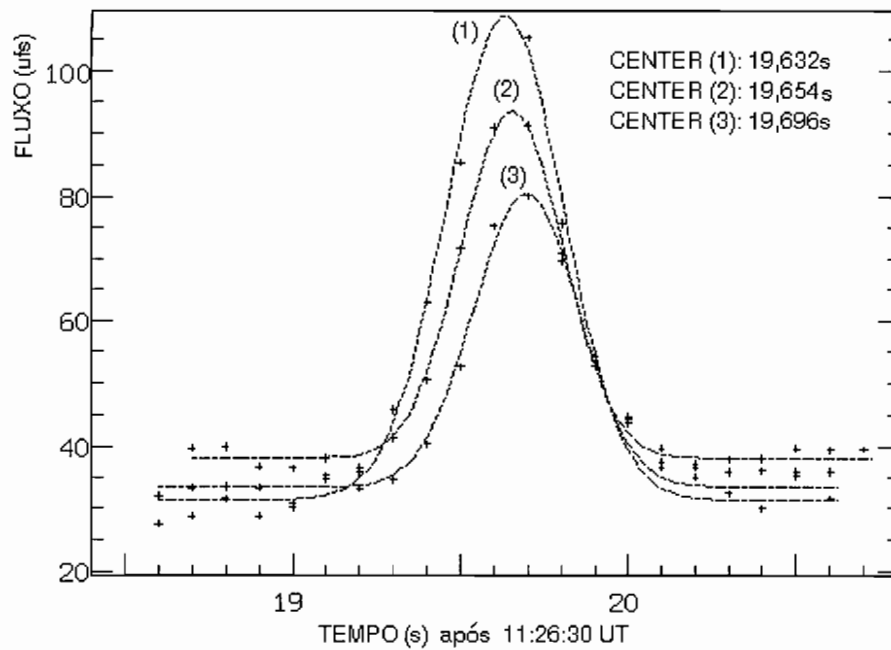


Fig. 3.5 - Deslocamento do  $t_m$ , mostrando a taxa de deriva em frequência de uma explosão tipo III, observada em 05-set-92. Os perfis temporais correspondem às frequências de 594 MHz (1), 580 MHz (2) e 566 MHz (3).

### 3.3.2 Duração vs frequência

As medidas efetuadas indicam que em uma dada frequência, a duração de uma explosão pode variar em um factor de 1.5 até 3. Isto pode ser apreciado claramente na Figura 3.7, onde são plotadas as durações médias medidas, junto com os desvios padrão. O círculo preto na Figura 3.7 corresponde às medições de Stahli e Benz (1987) para 3500 MHz.

A duração das explosões apresenta um decréscimo para frequências mais altas. Considerando todos os pontos da Figura 3.7, obtemos a seguinte relação válida para a faixa decimétrica (300-3500) MHz:

$$t_{1/2} = 1.7 \times 10^4 f^{-0.60}, \quad (3.2)$$

onde o tempo  $t_{1/2}$  é dado em ms, e a frequência  $f$  em MHz.

### 3.3.3 Distribuição da frequência de início

A distribuição dos valores da frequência de início ( $f_i$ ) das explosões solares tipo III decimétricas é apresentada na Figura 3.8. Tem-se uma diminuição do número de explosões com o aumento da frequência.

### 3.3.4 Distribuição das taxas de deriva

A Figura 3.9 mostra a distribuição das taxas de deriva em função da sua frequência de início para as explosões com taxa de deriva normal (linha fina) e RS (linha grossa). Desta Figura, pode-se notar um fato muito importante, **que as explosões com  $(df/dt)$  normais, começam em frequências tão altas como 3 GHz (ou seja, até  $n_e \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , enquanto as explosões com  $(df/dt)$  RS se originam até frequências tão baixas como 300 MHz (correspondente a  $n_e \approx 10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Este fato permitirá inferir limites na densidade eletrônica da região de aceleração (seção 3.4.3).**

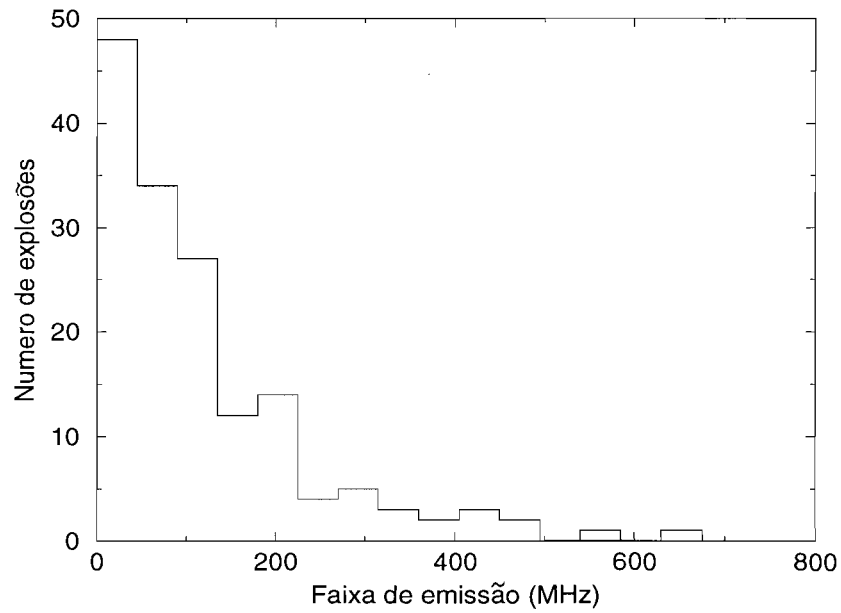


Fig. 3.6 - Distribuição da faixa de emissão das explosões tipo III decimétricas.

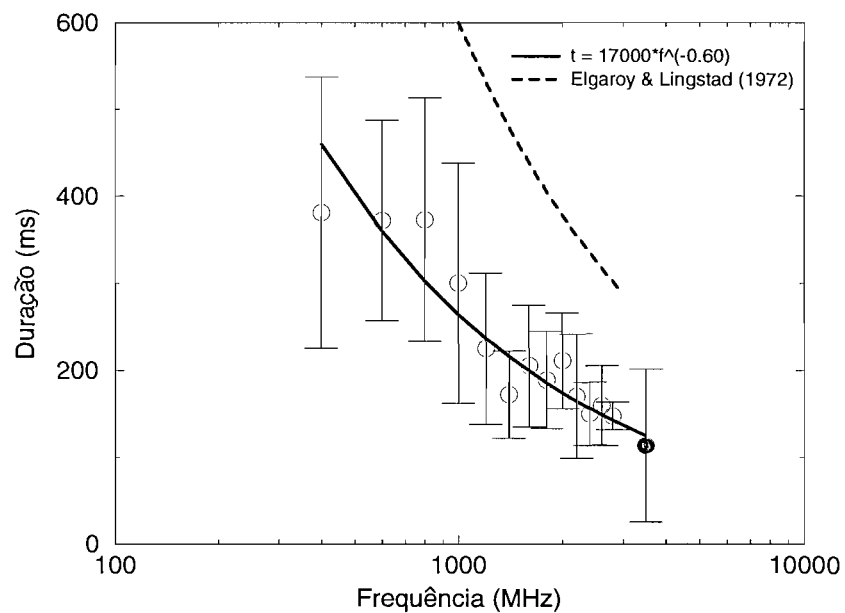


Fig. 3.7 - Duração das explosões tipo III decimétricas. O círculo preto corresponde às medições de Stahli e Benz (1987) para 3500 MHz, e a linha tracejada é a extrapolação para a faixa decimétrica da relação empírica de Elgaroy e Lingstad (1972).

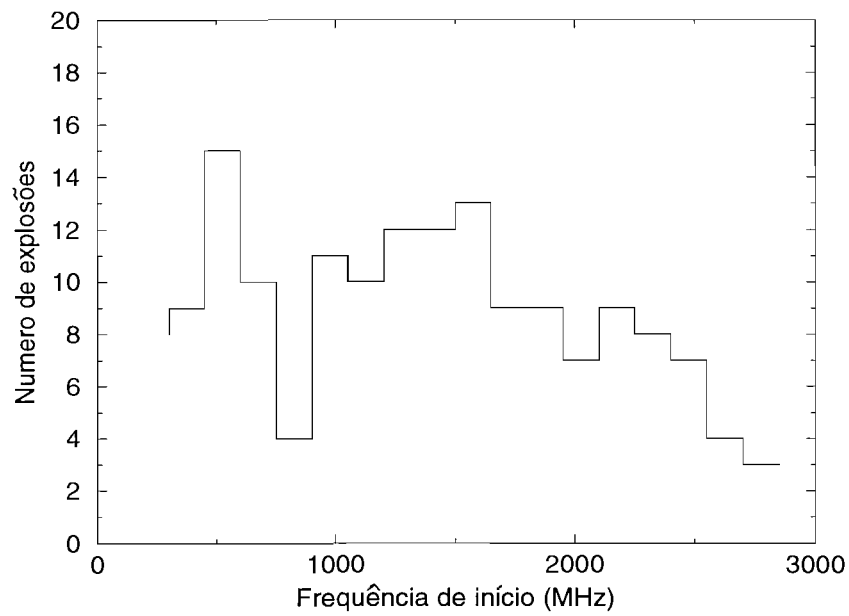


Fig. 3.8 - Distribuição da frequência de início das explosões tipo III decimétricas.

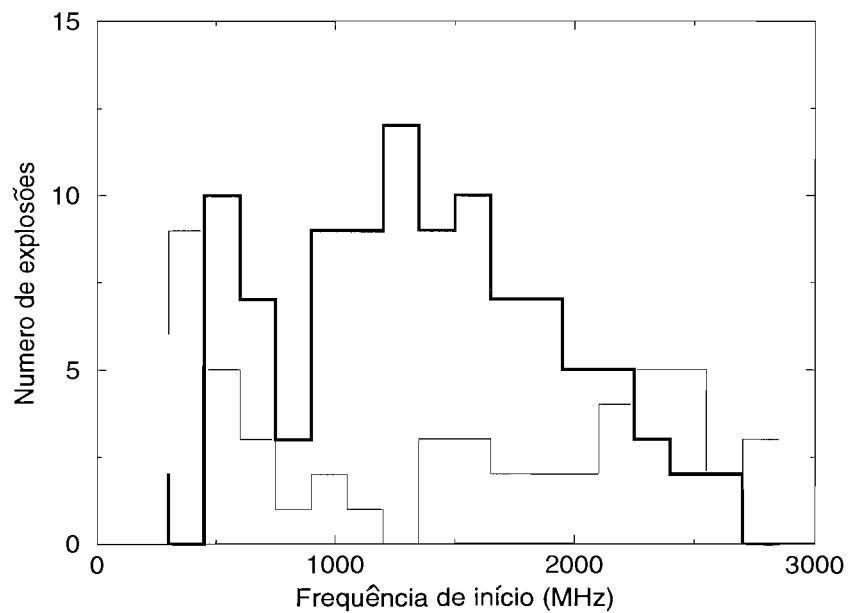


Fig. 3.9 - Distribuição das taxas de deriva ( $df/dt$ ) das explosões tipo III decimétricas. A linha fina representa explosões normais, a grossa explosões RS.



Das 160 explosões analisadas, 102 casos (67 %) apresentaram taxa de deriva “reverse slope”, 52 casos (36 %) taxa de deriva normal, e 8 casos (5 %) foram pares de explosões que apresentaram taxa de deriva oposta (bi-direcional).

### 3.3.5 Taxa de deriva vs frequência

A taxa de deriva ( $df/dt$ ) das explosões analisadas é mostrada na Figura 3.10, onde ( $df/dt$ ) é plotada em função de  $\log(f_i)$ . Para uma melhor visualização, nesta Figura foram eliminadas 2 das 160 explosões analisadas, pois apresentavam valores excessivamente altos de ( $df/dt$ ) [ $> 10^4$  MHz/s]. As taxas de deriva para explosões com ( $df/dt$ ) normais são representadas com círculos, e para “reverse slope (RS) com triângulos.

Já que aparentemente não há diferenças significativas entre os valores absolutos de ( $df/dt$ ), combinamos as explosões normais e RS (Figura 3.11) para encontrar a seguinte relação válida na faixa decimétrica (300-3000 MHz):

$$| (df/dt) | = 0.09 \times f^{1.35}, \quad (3.3)$$

onde ( $df/dt$ ) é dada em MHz/s, e  $f$  em MHz.

### 3.3.6 Fluxo de pico

A Figura 3.12 mostra a distribuição do fluxo de pico ( $S$ ) das 160 explosões tipo III analisadas, onde pode-se observar claramente que a maioria das explosões decimétricas é de baixa intensidade, as mais fracas chegando a  $\approx 5$  ufs, quase no limite de detecção. São poucas as explosões acima de 100 ufs.

Na Figura 3.13, é plotado o fluxo de pico  $S$  das explosões analisadas versus  $\log(f)$ . Mesmo que a dispersão de fluxos seja alta, pode-se observar um decréscimo do fluxo  $S$  para frequências mais altas.

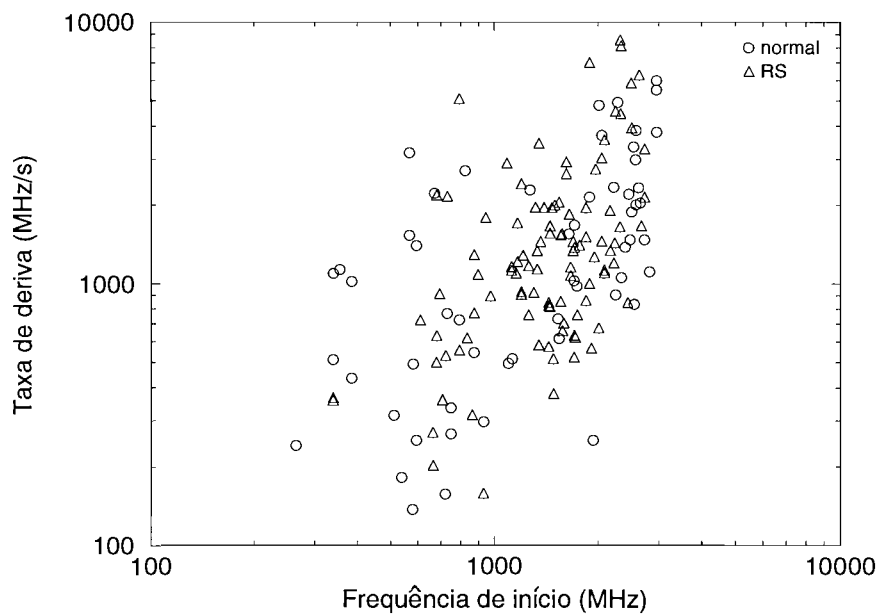


Fig. 3.10 - Taxa de deriva ( $df/dt$ ) das explosões tipo III decimétricas. Explosões normais são representadas com um círculo e explosões RS com um triângulo.

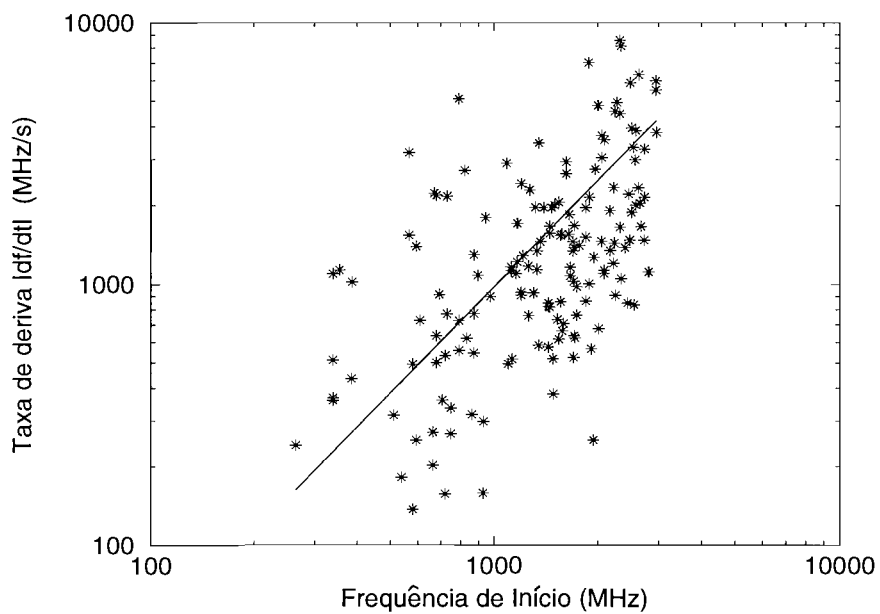


Fig. 3.11 - Ajuste dos valores absolutos das taxas de deriva ( $df/dt$ ).

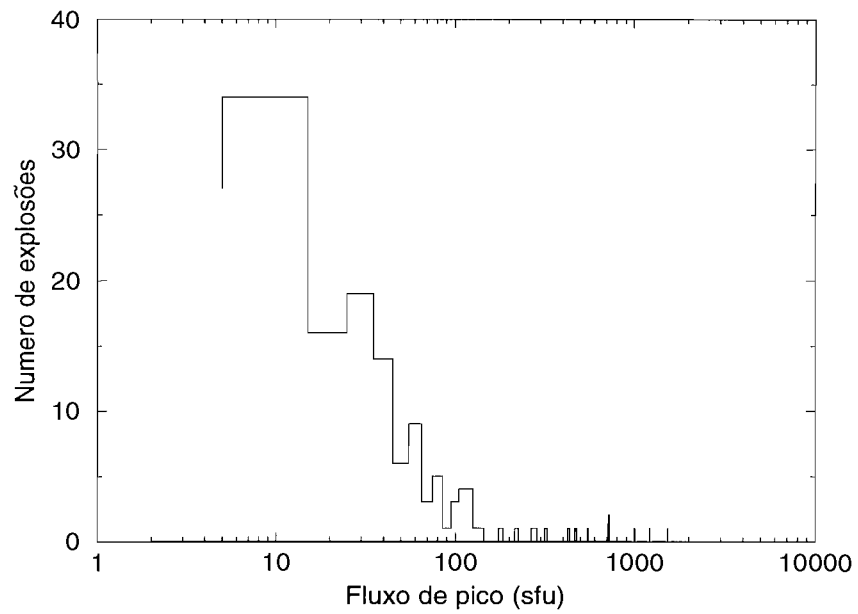


Fig. 3.12 - Distribuição de fluxo de pico das explosões tipo III decimétricas.

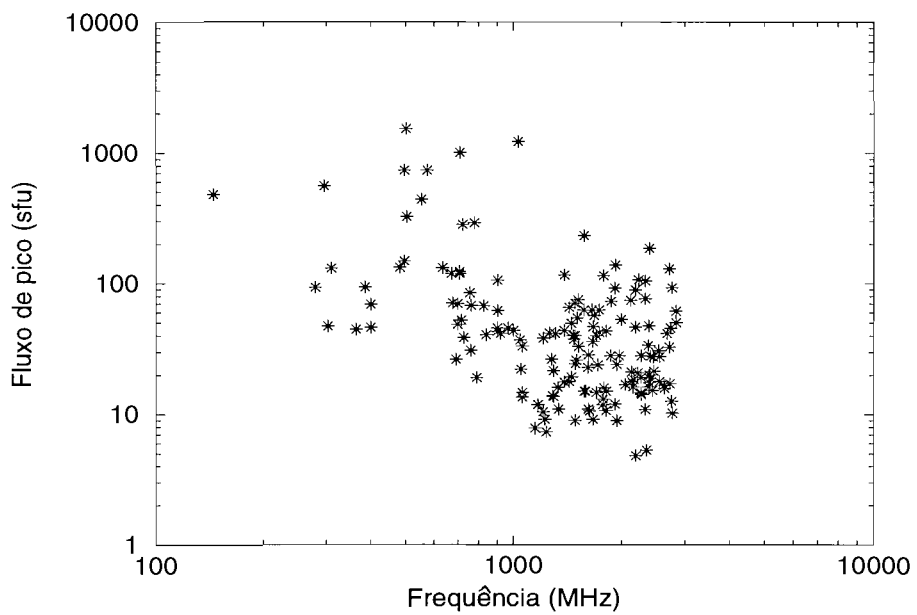


Fig. 3.13 - Gráfico de fluxo de pico vs frequência das explosões tipo III decimétricas.

## 3.4 Discussões e interpretações

### 3.4.1 Duração

Um fato importante a se destacar, é que as durações a meia potência obtidas, são menores, em um factor de  $\approx 2$ , do que as esperadas segundo a relação empírica de Elgaroy e Lyngstad (1972) estabelecida para a faixa de frequência de (0.5-500) MHz, a qual é plotada para comparação com as medidas efetuadas neste trabalho na Figura 3.7.

A relação encontrada (3.2), é válida ainda em frequências mais altas; segundo as medições de Allaart et al. (1990), para  $f \approx 6$  GHz, a duração é da ordem de 100 ms para explosões tipo III.

### 3.4.2 Frequência de início das explosões

A diminuição do número de explosões com o aumento da frequência de início ( $f_i$ ), possivelmente está relacionada com uma maior absorção do meio para frequências mais altas (densidades eletrônicas mais altas) e/ou com o fato de que a região de aceleração dos elétrons está localizada mais frequentemente em zonas de baixa densidade ( $< 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ).

Aschwanden et al. (1995) também observaram, para a faixa decimétrica, um decréscimo do número de explosões com o aumento da  $f_i$ .

### 3.4.3 Distribuição da frequência de início segundo sua taxa de deriva

A  $f_i$  das explosões normais (que se deslocam para a coroa superior), deve fornecer um limite superior da densidade da região de aceleração, pois a região de aceleração teria que ficar a uma menor altura, ou seja, maior densidade eletrônica (em comparação com a densidade correspondente à  $f_i$ ), para a ocorrência desta explosão. Similarmente, a  $f_i$  das explosões RS (que se deslocam rumo à fotosfera) deve fornecer um limite inferior da densidade da região de aceleração.

Portanto, o fato de encontrar  $f_i$  até  $\approx 3$  GHz para explosões normais, indica que a região de aceleração se origina até  $n_e \approx 3 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  (para emissão no 2º harmônico), e o fato de se observarem explosões RS com  $f_i$  até  $\approx 300$  MHz, indica que a região de aceleração pode-se originar até  $n_e \approx 0.7 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$  (considerando uma média de emissão no 2º harmônico e no fundamental).

Benz et al. (1992), encontraram 1 explosão, entre 5, com deriva normal em  $f_i \approx 7.5$  GHz, a qual, segundo a análise realizada, implicaria em um limite máximo de  $n_e \approx 2 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$  para a região de aceleração.

Então, levando em consideração estes valores limites, deduzimos que a região de aceleração poderia acontecer para densidades eletrônicas na faixa de:

$$n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}. \quad (3.4)$$

Análises de observações em raios-X moles (Strong et al., 1984; Tsuneta, 1996), também mostram que a região de aceleração de partículas e liberação de energia está localizada nesta faixa de densidade ( $n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ).

Outro resultado que merece destaque, é o fato de que a maioria de explosões (67 %) apresentaram taxa de deriva “reverse slope”. Este valor porcentual é oposto ao encontrado recentemente por Aschwanden et al. (1995) para explosões tipo III correlacionadas com pulsos em raios-X (Tabela 3.2).

O resultado obtido neste trabalho para a faixa decimétrica, com uma maioria de explosões RS (as quais se deslocam rumo à fotosfera), é compatível com a emissão bremsstrahlung (raios-X) de elétrons precipitando-se rumo à fotosfera.

**TABELA 3.2 - DISTRIBUIÇÃO DA TAXA DE DERIVA.**

TAXA DE DERIVA	PORCENTAGENS	
	Aschwanden et al. (1995)	Este trabalho
normal	77 %	36 %
RS	34 %	67 %
bi-direcional	13 %	5 %

#### 3.4.4 Taxa de deriva vs frequência

A relação (3.3), entre taxa de deriva e frequência, é semelhante à encontrada recentemente por Aschwanden et al. (1995) para a faixa decimétrica:

$$| (df/dt) | = 0.10 \times f^{1.40}, \quad (3.5)$$

mas fica longe da relação estabelecida para a faixa 75 kHz – 550 MHz por Alvarez e Haddock (1973):

$$| (df/dt) | = 0.01 \times f^{1.84}. \quad (3.6)$$

Levando em conta que a relação de Alvarez e Haddock (1973) foi feita considerando poucos pontos acima de 200 MHz, e que a relação de Aschwanden et al. (1995) tem poucos pontos acima de 1 GHz, a equação (3.3) é uma representação mais realística para a faixa decimétrica da variação da taxa de deriva média com a frequência.

A relação encontrada é ainda válida para frequências mais altas, como pode-se deduzir comparando a equação (3.6) com as determinações de Stähli e Benz (1987) em  $f \approx 3.5$  GHz:  $| (df/dt) | = 8.1 \pm 4.3$  GHz/s

de Allaart et al. (1990) em  $f \approx 6.0$  GHz:  $| (df/dt) | = 11 \pm 9$  GHz/s,

e de Benz et al. (1992) em  $f \approx 7.5$  GHz:  $| (df/dt) | = 11.5 \pm 8.5$  GHz/s.

### 3.4.5 Fluxo de pico

Possivelmente o meio mais denso da baixa coroa, faz com que a maioria de explosões analisadas na faixa decimétrica seja de baixa intensidade (Figura 3.12).

O decréscimo do fluxo  $S$  para frequências mais altas (Figura 3.13), isto é, para densidades eletrônicas mais altas, obviamente tem a ver com uma diminuição da razão  $n_b/n_e$  entre a densidade do feixe ( $n_b$ ) e a densidade do plasma ambiente ( $n_e$ ) para  $n_e$  maiores.

### 3.5 Sumário

Neste capítulo, foram analisadas 160 explosões tipo III associadas com 8 flares, com os seguintes resultados:

- 1) A maioria de explosões tipo III tem menos do que 250 MHz de faixa de frequência (Figura 3.6).
- 2) A duração das explosões apresentam um decréscimo para frequências mais altas (Figura 3.7). Temos obtido pela primeira vez a seguinte relação válida para a faixa decimétrica (300-3500) MHz:

$$t_{1/2} = 1.7 \times 10^4 f^{-0.60},$$

onde  $t_{1/2}$  é dado em ms, e  $f$  em MHz.

- 3) Tem-se um decréscimo do número de explosões com o aumento da frequência (Figura 3.9).
- 4) A região de aceleração poderia acontecer para densidades eletrônicas na faixa de:

$$n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

- 5) Das 160 explosões analisadas, 102 casos (67 %) apresentaram  $(df/dt)$  “reverse slope”, 52 casos (36 %)  $(df/dt)$  normais, e 8 casos (5 %) foram pares de explosões que apresentaram deriva oposta.
- 6) Encontramos a seguinte relação entre taxa de deriva e frequência:

$$|(df/dt)| = 0.09 \times f^{1.35},$$

onde  $(df/dt)$  é dada em MHz/s, e  $f$  em MHz.

- 7) A maioria de explosões decimétricas é de baixa intensidade, chegando as mais fracas a  $\approx 5 \text{ ufs}$ .
- 8) As explosões tipo III apresentam um decréscimo do fluxo  $S$  para frequências mais altas.

## CAPÍTULO 4

### O CENÁRIO DAS EXPLOSÕES TIPO III

#### 4.1 Introdução

É bem conhecido que os modelos “clássicos” de densidade da baixa coroa, não são adequados para “loops” emissores de explosões tipo III na faixa decimétrica. Isto dificulta a determinação da velocidade do excitador das explosões tipo III, pois a velocidade depende criticamente do modelo de densidade adotado (Fernandes, 1992).

Visando resolver este problema, Aschwanden e Benz (1995) elaboraram recentemente um modelo empírico. Este modelo é adotado, e melhorado, no presente trabalho.

Utilizando o modelo de densidade acima citado, são feitos alguns cálculos que irão contribuir para o melhor entendimento do cenário das explosões tipo III, como por exemplo, qual a velocidade média do feixe de elétrons, qual a densidade e o número total de elétrons do feixe, e qual a altura média onde está ocorrendo o processo de aceleração das partículas no “flare” solar.

Também, foram investigados os pares de explosões bi-direcionais observados, de feixes de elétrons indo simultaneamente para cima (alta coroa) e para baixo (rumo à cromosfera), que **permitem a determinação com alta precisão da dimensão espacial e temporal da região de aceleração das partículas.**

#### 4.2 Modelo de densidade para “loops” emissores de explosões tipo III

Os modelos de densidade da coroa existentes estão baseados no espalhamento da luz branca para a coroa quieta [por exemplo, o modelo de Baumbach-Allen (Lang, 1980, p.286) ou o modelo de Newkirk (Lang, 1980, p.287)], sendo que existe um ajuste arbitrário em um fator de 5 - 10 no caso das regiões (“streamers”, “loops”) onde acontecem as explosões tipo III. O modelo de Baumbach-Allen e o modelo barométrico para uma coroa isotérmica (com uma temperatura de 1.5 MK), mostrados na Figura 4.1, não são adequados para “loops” emissores de explosões tipo III por duas razões (Aschwanden e Benz, 1995):



- 1) Representam um limite inferior na densidade eletrônica dos “loops” emissores de explosões tipo III, e
- 2) estes “loops” estão sujeitos a aquecimento e fluxo de matéria, e portanto não se encontram em equilíbrio hidrodinâmico.

O modelo de  $n_e(h)$  apresentado aqui, é o mesmo proposto por Aschwanden e Benz (1995), o qual é feito usando a relação estatística entre a taxa de deriva e a frequência:

$$(df/dt) = A f^\alpha , \quad (4.1)$$

Porém, como Aschwanden e Benz (1995) usaram a relação de Alvarez and Haddock (1973), onde  $A = 0.01$  e  $\alpha = 1.8$ , e aqui usa-se a relação encontrada na seção 3.3.5 (Equação 3.3),

$$A = 0.1 \quad \alpha = 1.4 , \quad (4.2)$$

os resultados obtidos para o modelo de densidade são quantitativamente diferentes.

O modelo de densidade segue uma lei de potência para a baixa coroa, e uma forma exponencial do modelo barométrico para a coroa superior, da seguinte forma:

$$n_e(h) = \begin{cases} n_1 (h/h_1)^{-p} & h < h_1 \text{ (baixa coroa)} \\ n_q \exp(-h/H) & h > h_1 \text{ (coroa superior)} \end{cases} \quad (4.3)$$

com uma transição na altura  $h_1$ .

As constantes  $n_1$ ,  $p$  e  $h_1$ , do modelo de densidade para a baixa coroa, são obtidas da condição de continuidade da função  $n_e(h)$  e da sua derivada em  $h = h_1$ .

O modelo barométrico para a coroa superior, é restrito pela densidade eletrônica  $n_q$  na base da coroa quieta e pela escala de altura  $H$ :

$$n_q = 4.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}, \quad (4.4)$$

$$H = 46500 \frac{T}{10^6 K} \text{ km}. \quad (4.5)$$

Para uma temperatura da coroa quieta de  $T = 1.5 \times 10^6$  K, temos:

$$H = 7 \times 10^4 \text{ km}. \quad (4.6)$$

As relações entre as constantes do modelo de densidade (4.3) e a taxa de deriva (4.1) são as seguintes (Aschwanden e Benz, 1995):

$$h_1 = p H, \quad (4.7)$$

$$n_1 = n_q \exp(-p), \quad (4.8)$$

$$\alpha = (1 + 2/p), \quad (4.9)$$

$$A = \frac{e v [m n_q^{1/2} 8.98 \times 10^{-3}]^{-2/p}}{2 H}, \quad (4.10)$$

onde  $m = 1$  (fundamental) ou  $m = 2$  (harmônico), e  $v$  é a velocidade do feixe de elétrons.

Substituindo (4.2), (4.4) e (4.6) em (4.7), (4.8) e (4.9), temos:

$$\begin{cases} n_1 = 3.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3} \\ h_1 = 3.5 \times 10^5 \text{ km} \\ p = 5 \end{cases} \quad (4.11)$$

Para comparação, na Figura 4.1 são mostrados os modelos de densidade de Baumbach-Allen (Lang, 1980, p.286), o barométrico e de lei de potência, sendo que o modelo de Baumbach-Allen concorda com o modelo barométrico para alturas  $h < h_1$ .

Na Tabela 4.1, são mostrados os parâmetros do modelo de Aschwanden e Benz (1995) junto aos parâmetros deste trabalho. A causa principal para a diferença entre o modelo de Aschwanden e Benz (1995) e este trabalho (Figura 4.1), é a suposição de um valor diferente para o parâmetro  $\alpha$  (obtido da relação estatística entre a taxa de deriva e a frequência), o que deriva em valores diferentes do parâmetro  $p$  [Equação (4.9)], que conduzem a uma lei de potência diferente para o modelo de densidade da baixa coroa.

**TABELA 4.1 - PARÂMETROS DO MODELO DE DENSIDADE**

Parâmetros	Aschwanden e Benz (1995)	Este trabalho
$A$	0.01	0.1
$\alpha$	1.8	1.4
$H$	$6.9 \times 10^4 km$	$7.0 \times 10^4 km$
$n_q$	$4.6 \times 10^8 cm^{-3}$	$4.6 \times 10^8 cm^{-3}$
$n_1$	$4.3 \times 10^7 cm^{-3}$	$3.1 \times 10^6 cm^{-3}$
$h_1$	$1.6 \times 10^5 km$	$3.5 \times 10^5 km$
$p$	2.4	5.0

## Modelo de densidade

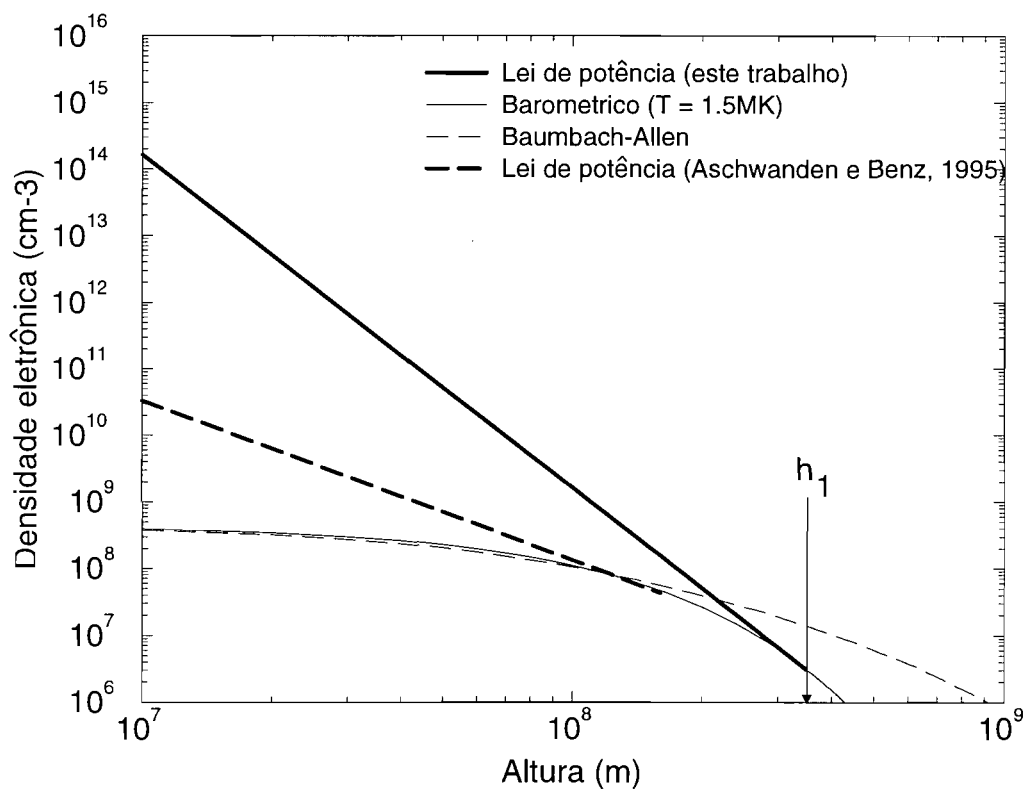


Fig. 4.1 - Modelo de densidade para “loops” emissores de explosões tipo III. O modelo de lei de potência para a baixa coroa ( $h < h_1$ ) é mostrado pela linha contínua-grossa (este trabalho), junto ao modelo de Aschwanden e Benz (1995) mostrado pela linha tracejada-grossa. A linha fina mostra a componente barométrica para a coroa superior ( $h > h_1$ ). O modelo de Baumbach-Allen (linha fina-tracejada) é mostrado para comparação.

### 4.3 Velocidade média do excitador das explosões tipo III

A velocidade média do excitador das explosões tipo III, consistente com o modelo de densidade inferido da nossa relação para a taxa de deriva, pode ser obtida da Equação (4.10):

$$v = \frac{2 A H}{e} [m n_q^{1/2} 8.98 \times 10^{-3}]^{2/p} . \quad (4.12)$$

Substituindo as constantes da seção anterior, temos:

$$v = m^{0.4} 4.22 \times 10^4 \text{ km/s} , \quad (4.13)$$

ou, em função da velocidade da luz ( $c$ ):

$$v = m^{0.4} 0.14 c . \quad (4.14)$$

Já que temos um feixe relativístico, na verdade a velocidade ( $v_{III}$ ) do excitador das explosões tipo III seria:

$$v_{III} = \frac{c v}{c + v \cos\phi} , \quad (4.15)$$

onde  $\phi$  é o ângulo entre o feixe e a linha de visada (Kane et al., 1982).

Supondo  $\phi = 0^\circ$ , temos que:

$$v_{III} = \frac{0.14 m^{0.4} c}{1 + 0.14 m^{0.4}} . \quad (4.16)$$

Para emissão no fundamental ( $m = 1$ ):

$$v_{III} = 0.12 c , \quad (4.17)$$

e para o harmônico ( $m = 2$ ):

$$v_{III} = 0.16 c . \quad (4.18)$$

Estes valores obtidos, são baixos quando comparados ao valor geralmente aceito de  $0.3 c$ . Aparentemente, as primeiras determinações da velocidade do excitador (antes de 1970) foram muito altas, como pode ser observado da Tabela 4.2. Isto já foi notado por Dulk et al. (1987), e recentemente destacado por Aschwanden e Benz (1995).

O valor da velocidade para emissão no 2<sup>o</sup> harmônico ( $v_{III} = 0.16 c$ ), é o que se ajusta melhor ao valor médio de velocidade obtido por outros autores ( $v_{III} = 0.15 c \pm 0.04 c$ , Tabela 4.2).

Este fato indica que a maioria de explosões tipo III na faixa decimétrica é emitida no 2<sup>o</sup> harmônico. Este é um resultado geralmente aceito para a faixa decimétrica, porém oposto ao sugerido por Aschwanden e Benz (1995) com um método similar ao empregado aqui. Novamente cabe resaltar que a causa para esta diferença, reside na adoção de um valor diferente para o parâmetro  $\alpha$  [relacionado ao parâmetro  $p$ , Equação (4.9)], que conduz a valores de velocidade diferentes [Equação (4.12)].

A velocidade estimada em (4.18), corresponde a elétrons com uma energia média de:

$$E = 6.7 keV . \quad (4.19)$$

**TABELA 4.2 - VELOCIDADES DO EXCITADOR  
DAS EXPLOSÕES TIPO III**

Velocidade $v_{III}/c$	Faixa de Frequência	Eventos Analisados	Referência
0.45	45-60 MHz	8	Wild et al. (1959)
0.33	7-220 MHz	50	Stewart (1965)
$0.15 \pm 0.03$	160-320 MHz	12	Fokker (1970)
$0.16 \pm 0.05$	56 kHz	3	Lin et al. (1981, 1986)
$0.14 \pm 0.04$	1 MHz	28	Dulk et al. (1987)
$0.18 \pm 0.04$	1.446 GHz	1	Aschwanden et al. (1992)
$0.15 \pm 0.02$	250-850 MHz	1	Aschwanden et al. (1993)
$0.30 \pm 0.10$	560-1240 MHz	1	Aschwanden et al. (1993)
<b><math>0.15 \pm 0.04</math></b>	<b>56kHz-1.5GHz</b>	(*)	(*)

(\*) Média ponderada (referências após 1970)

FONTE: Adaptada de Aschwanden e Benz (1995), p. 1000.

#### 4.4 Densidade e número total de elétrons do feixe

A densidade numérica ( $n_b$ ) e o número total ( $N$ ) de elétrons do feixe emissor foram obtidos através do fluxo médio das explosões solares tipo III.

Segundo Fürst et al. (1982), o fluxo ( $S$ ) das explosões em ondas decimétricas, à distância de 1 UA (distância Terra-Sol), pode ser calculada por:

$$S = 1,16 \times 10^{-5} \left( \frac{v_{III}}{c} \right) \left( \frac{f_p}{\Delta w} \right) \left( \frac{n_b}{n_e} \right)^4 \left( \frac{v_{III}}{\Delta v} \right)^8 V_{dm} n_e k T \delta, \quad (4.20)$$

onde

$v_{III}/c = 0.16$  (seção 4.3);

$f_p$  é a frequência de plasma para a emissão no segundo harmônico, (Hz);

$\Delta w$  é o espalhamento em frequência, (Hz);

$n_b$  é a densidade do feixe de elétrons, ( $\text{cm}^{-3}$ );

$n_e$  é a densidade de elétrons do ambiente (região da emissão), ( $\text{cm}^{-3}$ );

$\Delta v$  é o espalhamento de velocidade do feixe, (cm/s);

$V_{dm}$  é o volume da fonte de emissão em ondas decimétricas, ( $\text{cm}^3$ );

$k$  é a constante de Boltzmann, ( $1,38 \times 10^{-16}$  erg/K);

$T$  é a temperatura da coroa  $\approx 1.5 \times 10^6$  K;

$\delta$  é a absorção da radiação decimétrica.

Considerando uma frequência de observação média de  $f = 1400$  MHz, temos uma correspondente  $f_p = 700$  MHz, que corresponde a uma  $n_e = 6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ .

Segundo Aschwanden et al. (1993a), o tamanho aparente ( $R$ ) da fonte em função da frequência ( $f$ ) observada, em GHz, pode ser obtido por:

$$R(f) = 15000 f_{GHz}^{-1.08} km, \quad (4.21)$$



Assim, para  $f = 1.4$  GHz, temos  $R = 10^9$  cm para o tamanho da fonte, e portanto um volume para a fonte decimétrica  $V_{dm} = 10^{27}$  cm<sup>3</sup>.

Então, substituindo na Equação (4.20) os valores dos parâmetros de plasma para emissão decimétrica:  $(v_{III} / \Delta v_f) = 1$ ,  $(f_p / \Delta \omega) = 4$ , e  $\delta = 0,1$  (Fürst et al., 1982), juntamente com os valores anteriormente mencionados, obtém-se a seguinte relação:

$$S \simeq 1,26 \times 10^{-18} n_b^4. \quad (4.22)$$

Então, tomando uma densidade de fluxo média ( $\langle S \rangle \simeq 10,0$  ufs), das explosões tipo III analisadas (ver Figura 3.13), foi calculada a densidade do feixe de elétrons ( $n_b$ ), que escapa da região fonte de emissão e que viaja pela baixa coroa, causando as emissões decimétricas pela interação com o plasma. O valor obtido foi

$$n_b \simeq 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}. \quad (4.23)$$

Este valor concorda com o resultado obtido por Fürst et al. (1982) de  $n_b \simeq 5 \times 10^4$  cm<sup>-3</sup>, e com o valor obtido por Fernandes (1992) e Sawant et al. (1994) de  $n_b \simeq 7 \times 10^4$  cm<sup>-3</sup> para explosões tipo III observadas em 1600 MHz (usando um outro método).

Finalmente, o número de elétrons ( $N$ ) necessários para gerar uma explosão tipo III, foi obtido multiplicando a densidade do feixe ( $n_b$ ) pelo volume da fonte emissora ( $V_{dm} = 10^{27}$  cm<sup>3</sup>), assim temos:

$$N \simeq 6 \times 10^{31} \text{ elétrons}. \quad (4.24)$$

O resultado concorda com aquele fornecido por Fürst et al. (1982), que aponta o valor de  $N \sim 5 \times 10^{31}$  elétrons, para frequências entre 600 e 1000 MHz, e com o resultado de Fernandes (1992) e Sawant et al. (1994), usando um outro método ( $N \sim 7 \times 10^{31}$  elétrons).

## 4.5 Altura da região da aceleração

Do modelo de densidade (Seção 4.2), podemos encontrar a seguinte relação para calcular a altura  $h$  (acima da fotosfera) em função da densidade eletrônica  $n_e$ :

$$h = \frac{7 \times 10^6}{n_e^{1/5}} \text{ km} , \quad (4.25)$$

onde  $n_e$  está em  $\text{cm}^{-3}$ .

Segundo deduzido da distribuição das taxas de deriva (seção 3.4.3), a região de aceleração acontece para  $n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{cm}^{-3}$ . Então, substituindo estes valores em (4.20), deduzimos para a região de aceleração dos elétrons, alturas de:

$$h \approx 10^4 - 10^5 \text{ km} , \quad (4.26)$$

Estes valores são da mesma ordem de grandeza que os encontrados recentemente por Aschwanden et al. (1996b) e Aschwanden (1996) para a altura da região de aceleração, através da análise de dados em raios-X de 42 “flares” observados pelo BATSE-CGRO e o YOHKOH:

$$h = 0.5 \times (10^4 - 10^5) \text{ km}.$$

## 4.6 Explosões bi-direcionais

Foram encontrados 8 pares de explosões simultâneas que apresentaram deriva oposta, na análise dos 8 flares (estes 8 flares contém os 17 grupos de explosões tipo III da Tabela 3.1). Aschwanden et al. (1995) descobriram 30 destes pares analisando explosões tipo III (observadas com o PHOENIX) correlacionadas com pulsos em raios-X (observados pelo HXRBS a bordo do “Solar Maximum Mission” e pelo BATSE a bordo do “Compton Gamma Ray Observatory”), em 86 flares.

É importante assinalar que a razão entre o número de pares com deriva oposta descobertos e o número de “flares” analisados é significativamente maior no presente trabalho (8 pares / 8 flares), que no caso de Aschwanden et al. (1995) (30 pares / 86 flares).

Dois pares encontrados neste trabalho já haviam sido descobertos por Aschwanden et al. (1995). Assim no presente estudo, amplia-se em 20 % o número de pares já conhecidos.

Este tipo de explosão com deriva oposta é importante no contexto de **injeção bidirecional simultânea de elétrons na região de aceleração**, sendo possível determinar com maior precisão a dimensão espacial e temporal da região de aceleração das partículas. Dada sua importância, apresentamos estes 8 pares na Figura 4.2. A frequência comum de início destes pares de explosões com deriva oposta é assinalada com uma seta.

Como pode ser visto claramente nas figuras apresentadas, em todos os 8 pares, as explosões que vão para cima e para baixo da coroa parecem começar simultaneamente (dentro do limite de resolução instrumental), como também foi notado por Aschwanden et al. (1995).

A frequência comum de início destes pares de explosões vão desde 340 até 1700 MHz, sendo que nos pares descobertos por Aschwanden et al. (1995), a frequência comum de início está entre 300 e 1000 MHz.

#### 4.6.1 Limite na dimensão espacial da região de aceleração

Seguindo Aschwanden et al. (1995), como não foi observada nenhuma separação entre as frequências de início dos pares bi-direcionais, podemos usar a resolução em frequência dos dados ( $\Delta f = 15$  MHz) para inferir um limite superior na extensão da região de aceleração:

$$\Delta h = \Delta f / \left( \frac{df}{dn_e} \frac{dn_e}{dh} \right). \quad (4.27)$$

Com nosso modelo de densidade, obtemos:

$$\Delta h = 9.3 \times 10^5 \Delta f f^{-1.4} \text{ km}, \quad (4.28)$$

onde  $f$ ,  $\Delta f$ , estão em MHz.

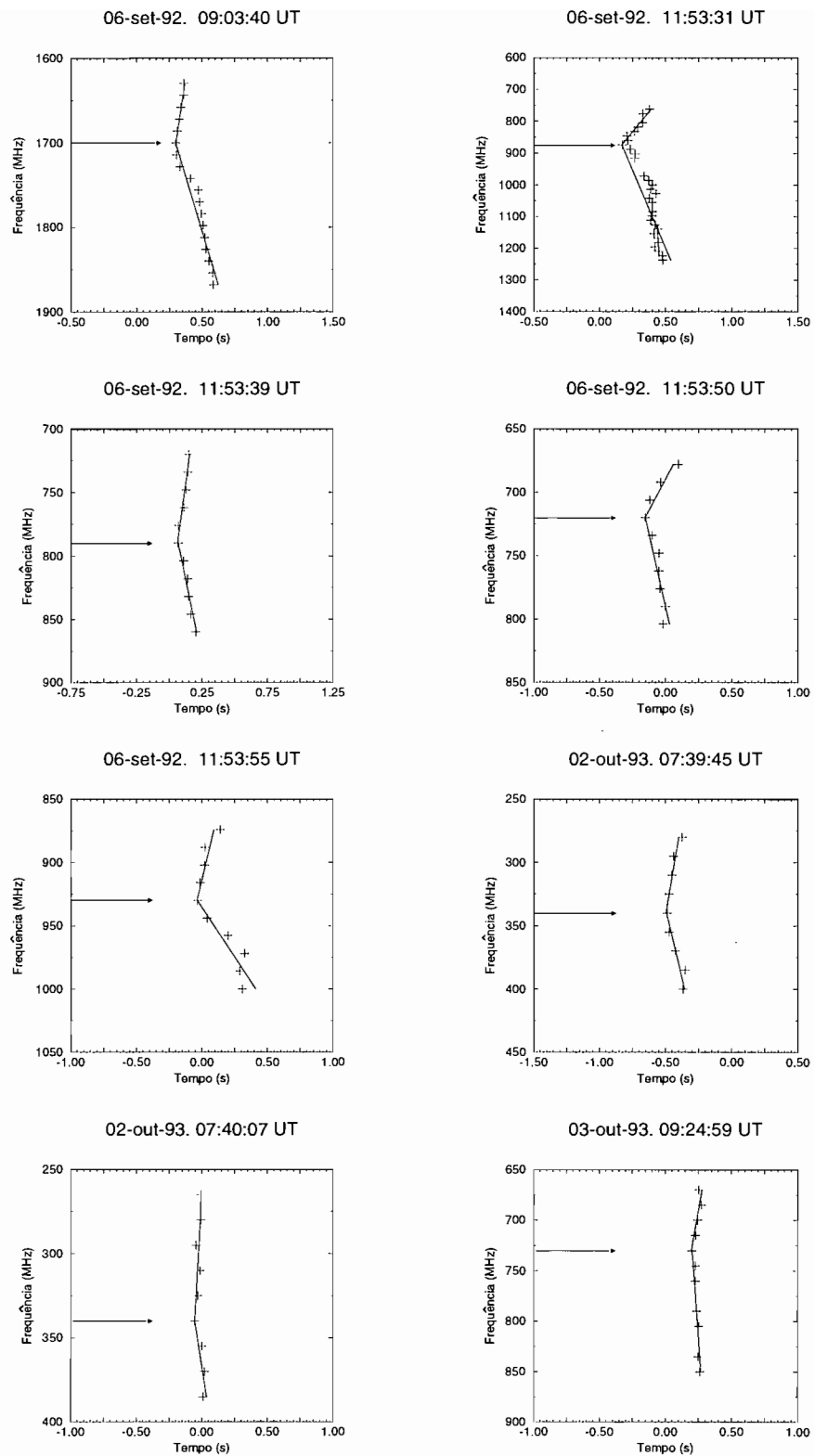


Fig. 4.2 - Pares de explosões bi-direcionais. A frequência de início é marcada com uma seta. Data e tempo (UT) de observação são indicados no topo de cada gráfico.

Substituindo  $\Delta f = 15$  MHz, e as frequências de início encontradas entre 340–1700 MHz, temos que:

$$\Delta h \leq 400 - 4000 \text{ km} . \quad (4.29)$$

Aschwanden et al. (1995), com uma resolução de 10 MHz, também não observaram separação entre as explosões bi-direcionais encontradas. Supondo escalas de altura entre  $10^4 - 10^5$  km, encontraram  $\Delta h \leq 200 - 2000 \text{ km}$ .

#### 4.6.2 Limite na escala temporal de aceleração

Um limite superior na escala temporal de aceleração pode ser derivado da distância  $x_{min}$ , que os elétrons mais rápidos precisam para ultrapassar os mais lentos antes que o feixe se torne instável:

$$x_{min} = 4 \alpha \tau v_{te} , \quad (4.30)$$

onde temos que (Kane et al., 1982) :

$\tau$  é o tempo de aceleração exponencial,

$\alpha$  é o expoente da lei de potência da distribuição térmica de velocidades e

$v_{te}$  ( $= 3.75 T^{1/2} \text{ km/s}$ ) é a velocidade térmica média dos elétrons.

Assumindo o modelo de alvo colisionalmente espesso (“thick-target”), o expoente  $\alpha$  está relacionado ao índice  $\gamma$  do espectro observado em raios-X duros por:  $\alpha = 2\gamma + 1$  (Hudson et al., 1978, citado por Kane et al., 1982).

Igualando  $\Delta h \approx 2x_{min}$  (Aschwanden et al., 1995), podemos estimar o tempo de aceleração da Equação (4.30):

$$\tau = \frac{1}{30} \frac{\Delta h}{\alpha T^{1/2}} , \quad (4.31)$$

onde  $\tau$  é dado em s,  $\Delta h$  em km, e T em K.

Considerando os mesmos valores adotados por Aschwanden et al. (1995), isto é,  $\gamma \approx 4$  (típico para explosões em raios-X duros impulsivos), e  $T \approx 10^7 K$  (temperatura típica de um flare), obtemos:

$$\tau < 0.5 - 5 \text{ ms} , \quad (4.32)$$

enquanto que Aschwanden et al. (1995) obtiveram  $\tau < 0.3 - 3 \text{ ms}$ .

## 4.7 Sumário

Neste capítulo foi melhorado o modelo de densidade de Aschwanden e Benz (1995), para “loops” emissores de explosões tipo III decimétricas. Utilizando este modelo, encontramos os seguintes resultados:

- 1) A densidade numérica média ( $n_b$ ) dos elétrons do feixe emissor é  $n_b \simeq 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ .
- 2) O número de elétrons ( $N$ ) necessários para gerar uma explosão tipo III é  $N \simeq 6 \times 10^{31}$ .
- 3) O valor da velocidade média do excitador das explosões tipo III é  $v_{III} = 0.16 c$  ( $6.7 \text{ keV}$ ) para emissão no  $2^{\circ}$  harmônico.
- 4) A emissão no  $2^{\circ}$  harmônico é predominante na faixa decimétrica.
- 5) Foram encontrados 8 pares de explosões simultâneas que apresentaram deriva oposta, sendo que a frequência comum de início destes pares de explosões vão desde 340 até 1700 MHz.
- 6) Deduzimos que a região de aceleração dos elétrons acontece em alturas de  $h \approx 10^4 - 10^5 \text{ km}$ .
- 7) Inferimos um limite superior para a extensão da região de aceleração de  $\Delta h \leq 400 - 4000 \text{ km}$ .
- 8) Inferimos um limite superior na escala temporal de aceleração de  $\tau < 0.5 - 5 \text{ ms}$ .

## CAPÍTULO 5

### APLICAÇÕES AO WDDHRS

#### 5.1 Introdução

O Espectrógrafo Decimétrico de Banda Estreita ( $1600 \pm 100$  MHz) e altas resoluções temporal e em frequência (DDHRS) foi recentemente modificado para operar em uma banda larga de 1000–2500 MHz. O antigo DDHRS é descrito detalhadamente por Fernandes (1992), assim como por Sawant et al. (1993).

As modificações feitas ao DDHRS para operar em uma banda larga, são descritas por Sawant et al. (1996), assim como por Fernandes (1997). Basicamente, a alteração consistiu na instalação de um alimentador de banda larga, constituído de 2 antenas log-periódicas cruzadas, no foco da antena de 9 metros de diâmetro, que permite a aquisição simultânea nas duas polarizações lineares, com resolução temporal de (10-1000) ms, resolução espectral de (0,3-3,0) MHz e digitalização em até 100 canais de frequência (Figura 5.1), constituindo assim o novo **Espectrógrafo Decimétrico Digital de Banda Larga (1000-2500 MHz) e Alta Sensibilidade e Resolução (WDDHRS)**.

Com base na experiência adquirida pelo autor no tratamento dos dados digitais de explosões solares observadas na faixa decimétrica pelo PHOENIX, foi desenvolvido um “software” para a detecção e classificação preliminar das explosões solares observadas pelo WDDHRS do INPE, o qual é testado com uma simulação de explosões tipo III e “spike”. Finalmente, é proposto o padrão para armazenamento dos dados digitais do WDDHRS.

#### 5.2 “Software” para detecção e classificação de explosões

##### 5.2.1 Introdução

O “software” para a detecção e classificação preliminar de explosões solares, tem como objetivo facilitar o estudo dos dados adquiridos pelo WDDHRS.

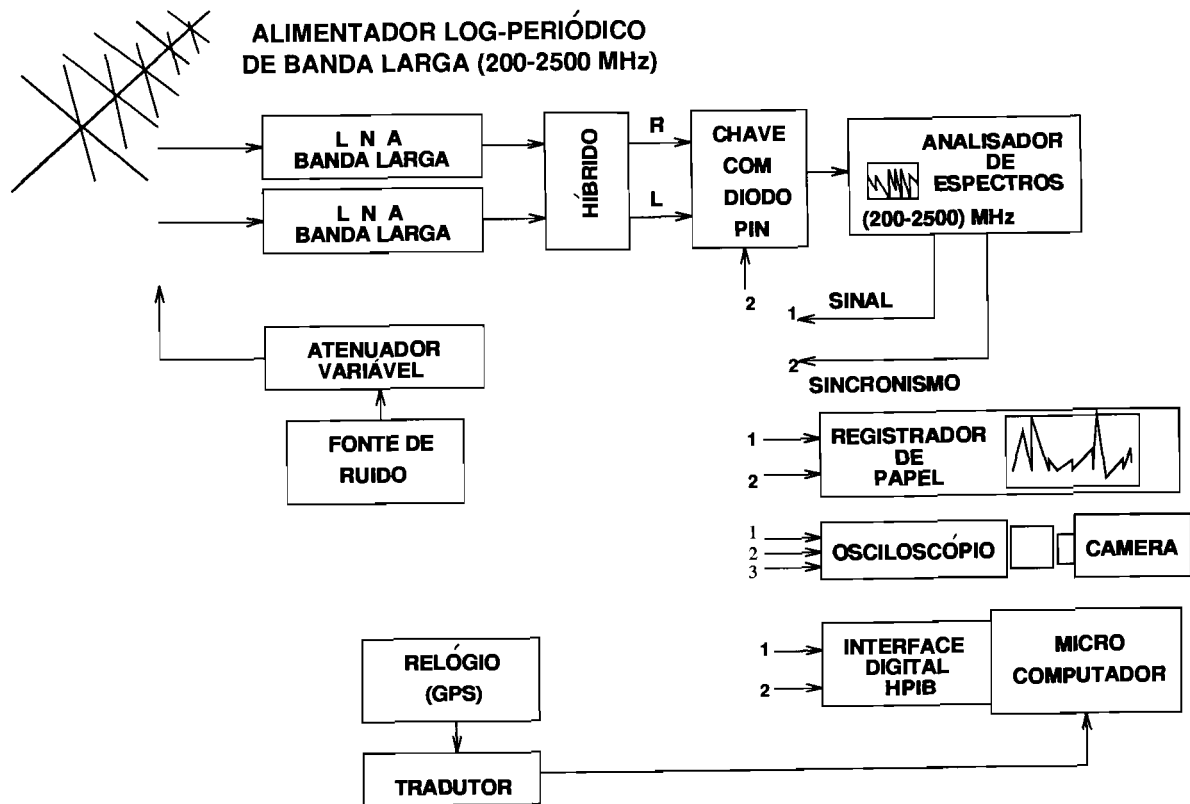


Fig. 5.1 - Diagrama de blocos representando o Espectrógrafo Decimétrico Digital de Banda Larga com alta sensibilidade e altas resoluções temporal e espectral (WDDHRS).  
Fonte: Adaptada de Sawant et al. (1996), p. 386.



É importante ressaltar que a detecção e classificação das explosões solares é preliminar, e com o único objetivo de direcionar os estudos para uma análise mais detalhada, pois a natureza do fenômeno em questão é bastante complexa para se conseguir modelar todos os parâmetros ligados ao fenômeno.

As explosões solares a detetar e classificar, para nossas investigações, são de tipo III e “spike”, as quais podem ser determinadas pela sua faixa de frequência e pela sua duração (Tabela 5.1).

### 5.2.2 Descrição do “software”

Analisando os espectros dinâmicos do catálogo de explosões (Apêndice A), podemos ver que o fluxo solar das explosões é variável, sendo que a variação pode chegar até uma ordem de  $10^3$ . Portanto, um bom programa de detecção de estruturas finas (explosões tipo III, “spikes”), tem que levar em conta este fato.

#### 5.2.2.1 Detecção de estruturas

Já que a máxima duração a meia potência de uma explosão tipo III na faixa de interesse é  $\approx 500 \text{ ms}$  (ver Figura 3.7), escolhemos esta escala de tempo para testar a significância das explosões detetadas.

Para a detecção de explosões solares, usamos o fluxo integrado em todos os canais, ou seja, em toda faixa de frequência de observação.

Então integramos o fluxo  $C_i$  em intervalos de tempo (que chamaremos de “caixas”) de 500 ms:

$$C_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j . \quad (5.1)$$

sendo que:

$j$  é o índice dentro da caixa  $i$ ,

$n$  é o número de elementos da caixa, e

$I_j$  é a intensidade do elemento  $j$  da caixa.

A seguir calculamos em cada caixa  $i$  o aumento de fluxo  $F_i$  acima do “background”  $B_i$ :

$$F_i = C_i - B_i , \quad (5.2)$$

onde o “background”  $B_i$  é obtido do fluxo médio das caixas adjacentes, isto é:

$$B_i = \frac{C_{i-1} + C_{i+1}}{2} . \quad (5.3)$$

A significância do aumento do fluxo  $F_i$  é calculada por:

$$\sigma_{F_i} = \frac{\sigma_{F_{i-1}} + \sigma_{F_{i+1}}}{2} , \quad (5.4)$$

onde o desvio padrão  $\sigma_{F_i}$  é calculado por:

$$\sigma_{F_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - C_i)^2}{n}} . \quad (5.5)$$

O “software” deteta estruturas que estejam necessariamente acima do nível de significância de  $\geq 3\sigma$ , ou seja,

$$F_i \geq 3 \sigma_{F_i} . \quad (5.6)$$

Uma vez detetada alguma estrutura na caixa  $i$ , uma sub-rotina procura dentro da caixa qual é o tempo exato em que começa o aumento do fluxo, e armazena em memória este tempo. O final desta estrutura é obtido quando o aumento de fluxo  $F_i$  é  $< 3\sigma$ . A seguir, é calculada a duração da estrutura.

### 5.2.2.2 Classificação de estruturas

Uma vez detetada uma estrutura segundo o algoritmo anterior, o “software” vai para o arquivo original e posiciona-se no tempo central ( $\approx$  tempo de pico) onde aconteceu a estrutura, para analisar sua variação em frequência.

Então, é possível obter a faixa em frequência da estrutura detetada, utilizando um procedimento similar ao empregado para obter a duração da estrutura.

Tendo a duração e faixa em frequência, é possível discernir, estabelecendo limites de acordo às propriedades observadas das explosões tipo III e “spikes” (Capítulo 2), se realmente a estrutura detetada trata-se de uma explosão, de uma flutuação estatística ou de alguma interferência.

Sendo um total de 100 canais, onde cada canal corresponde a 5 MHz, a classificação de estruturas é feita segundo a Tabela 5.1.

**TABELA 5.1 - CLASSIFICAÇÃO DE EXPLOSÕES SOLARES NA FAIXA DE (1000-2500) MHZ**

TIPO DE EXPLOSÃO	DURAÇÃO (ms)	FAIXA DE FREQUÊNCIA (MHz)	No. DE CANAIS	No. DE VARREDURAS	
				10 ms	100 ms
III “spike”	100 – 600	> 40	> 8	15-60	1-6
	$\leq 100$	$\leq 20$	$\leq 4$	< 9	1

## 5.3 Simulação de explosões

Para testar o “software” desenvolvido, foi simulado um grupo de explosões solares.

Dada a natureza do fenômeno, a simulação foi feita com máximo nível de complexidade para testar o “software” sob condições típicas de observação de um “flare”. Isto é:

- 1) Temos simulado um nível de “background” do fluxo solar que varia rapidamente com o tempo.
- 2) Temos injetado a este “background” explosões solares através de funções gaussianas.
- 3) Tanto o “background” quanto as explosões injetadas tem um nível de ruído, o qual é obtido através de um gerador de números aleatórios.
- 4) Injetamos rádio interferência local.

Sob as condições acima, foi gerado então um arquivo binário similar ao obtido pelo programa de aquisição de dados do WDDHRS. Simulamos uma aquisição de 30 segundos, com explosões tipo III e “spike” injetadas acima do nível do “background”, e também injetamos interferência.

Os dados armazenados em arquivo foram então submetidos ao “software” de detecção e classificação preliminar de explosões. O resultado obtido pelo “software” é mostrado na Tabela 5.2, onde podemos compará-lo com os valores originais das explosões injetadas.

Nas Figuras 5.2 e 5.3, são plotados os perfis temporais para o canal 69, e para a média de todos os canais.

O “software” produz resultados satisfatórios, sendo que todas as explosões injetadas foram detetadas no perfil temporal integrado em frequência (Figura 5.3), mesmo que várias delas (os três primeiros “spikes” asinalados com setas) estejam no limite de detecção.

Com isto, temos então uma ferramenta poderosa, para, no futuro, ajudar no estudo dos “flares” observados pelo WDDHRS.

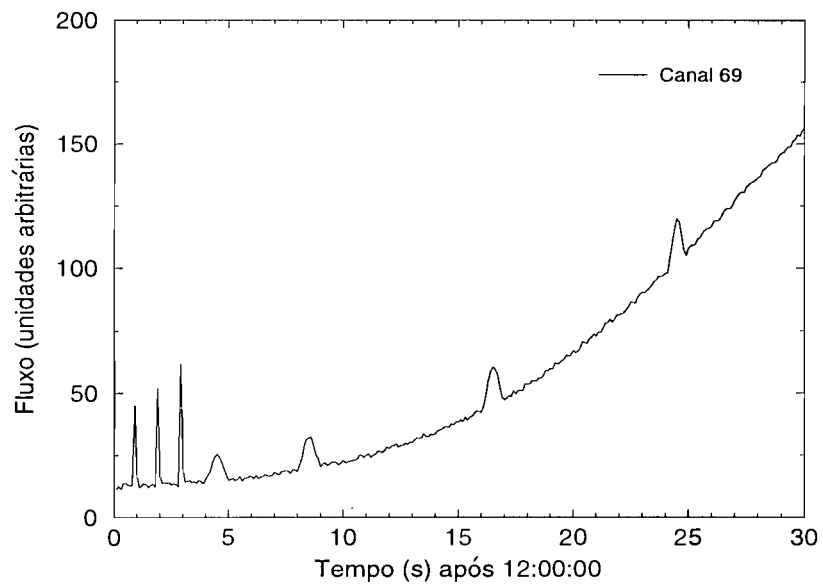


Fig. 5.2 - Primeiro 3 explosões tipo “spikes”, e a seguir 4 explosões tipo III, no canal 69.

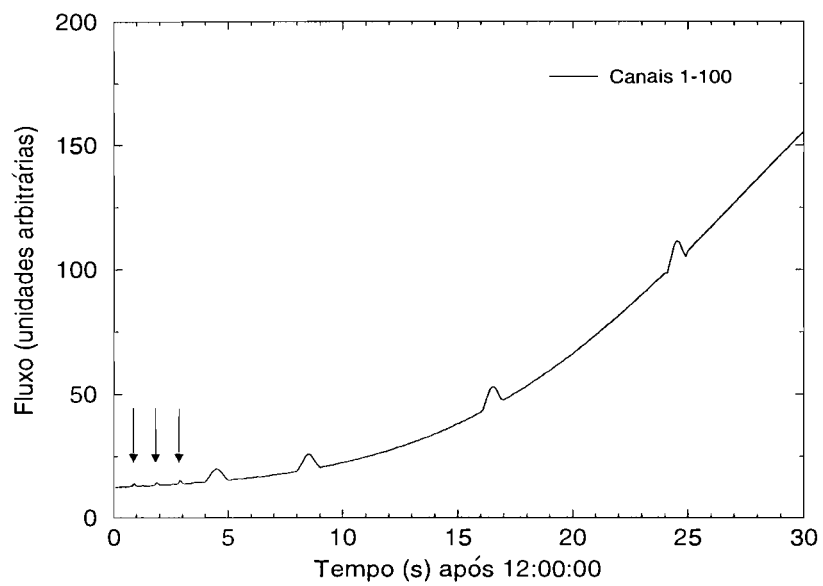


Fig. 5.3 - Perfil temporal integrado em todos os canais, das explosões da Figura anterior. As primeiras três explosões tipo “spikes”, são assinaladas com setas.

**TABELA 5.2 - CLASSIFICAÇÃO DAS EXPLOSÕES SIMULADAS**

SIMULADO				DETETADO			
Tipo de explosão	TEMPO	CANAIS	DURAÇÃO $t_{1/2}(s)$	Tipo de explosão	TEMPO	CANAIS	DURAÇÃO (s)
“spike”	12:00:00.8	67-69	0.1	“spike”	12:00:00.8	67-69	0.1
“spike”	12:00:01.8	67-69	0.1	“spike”	12:00:01.8	67-69	0.1
“spike”	12:00:02.8	67-69	0.1	“spike”	12:00:02.8	67-70	0.1
III	12:00:04.4	36-82	0.4	III	12:00:04.4	36-82	0.2
III	12:00:08.4	37-84	0.4	III	12:00:08.4	37-84	0.3
III	12:00:16.4	39-88	0.4	III	12:00:16.4	39-88	0.4
III	12:00:24.4	41-92	0.4	III	12:00:24.4	41-92	0.2

## 5.4 O padrão FITS

### 5.4.1 Introdução

Devido à necessidade de possuir um formato padrão, para armazenamento dos dados digitalizados pelo WDDHRS, que possa ser usado por outros grupos de pesquisa no mundo, os arquivos do WDDHRS serão convertidos ao formato FITS (“Flexible Image Transport System”), muito usado no meio astronômico (Wells et al. 1981).

Um arquivo FITS consta de um “header”, com a informação sobre a organização dos dados, e a seguir os dados (a imagem) propriamente ditos.

Seja em rádio, infravermelho, ótico, ultravioleta ou raios-X, os dados adquiridos podem ser considerados como imagens, de uma, duas, três, ou mais dimensões. Assim, no formato FITS, temos uma imagem com n-dimensões, ou eixos coordenados, os quais são definidos no “header” do arquivo FITS.

O “header” é composto de palavras chaves (“keywords”) de 8 caracteres ASCII, sendo que a sintaxe básica é a seguinte:

$$\textit{Palavra chave} = \textit{Valor} / \textit{Comentario} . \quad (5.7)$$

#### 5.4.2 Formato dos arquivos FITS do WDDHRS

Um exemplo da organização dos arquivos FITS do WDDHRS, é mostrado na Figura 5.4. As palavras chaves do “header” neste exemplo são descritas a seguir.

- SIMPLE = T  
especifica que o arquivo obedece ao padrão FITS
- BITPIX = 8  
número de bits usado para representar o valor de cada pixel da imagem
- NAXIS = 2  
definimos 2 eixos para representar a imagem: frequência e tempo, justamente como tem-se no espectro dinâmico em filme fotográfico
- NAXIS1 = 600  
é o número de pixels do eixo 1, correspondendo a 6000 varreduras (1 minuto de observação com uma resolução temporal de 100 ms)
- NAXIS2 = 100  
número de canais
- EXTEND = T  
indica que o arquivo pode conter extensões ao FITS (Grosbol et al., 1988; NASA/NOST, 1994, p. 33)
- DATE = '20/09/97'  
data em que foi escrito o arquivo FITS ('dd/mm/yy')
- ORIGIN = 'DAS-INPE'  
instituição que escreveu o arquivo
- TELESCOP= 'Radio, SJ Campos'  
tipo e localização do telescópio
- INSTRUME= 'WDDHRS '  
nome do espectrógrafo

- OBJECT = 'Sun: 010397-140829'  
título da imagem (nome do objeto): data e tempo (ddmmyy-hhmmss)
- DATE-OBS= '01/03/97'  
data em que começa a observação (dd/mm/yy)
- TIME-OBS= '14:08:29'  
tempo de início de observação
- DATE-END= '01/03/97'  
data em que finaliza a observação
- TIME-END= '14:09:29'  
tempo de fim da observação
- BUNIT = '45\*log10(sfu+10)'  
título do eixo Z, isto é, os valores dos pixels estão na escala  
 $S_{log} = 45 \times \log_{10}(S_{ufs} + 10)$
- DATAMIN = 40.917717  
é o mínimo valor da imagem
- DATAMAX = 202.69560  
é o máximo valor da imagem
- CRVAL1 = 0.00000  
valor do pixel de referência no eixo 1
- CRPIX1 = 0  
localização no eixo 1 do pixel de referência
- CTYPE1 = 'TIME UT (s)'  
nome do eixo 1, tempo UT em segundos
- CDELT1 = 0.100000  
incremento entre pixels ao longo do eixo 1, correspondente a 100 ms (0.1 s)
- CRVAL2 = 2000.00  
valor do pixel de referência no eixo 2
- CRPIX2 = 0  
localização no eixo 2 do pixel de referência
- CTYPE2 = 'FREQ (MHz)'  
nome do eixo 2, correspondente à frequência em MHz
- CDELT2 = -5.0000  
incremento entre pixels ao longo do eixo 2, correspondente a 5 MHz



- COMMENT The time axis is not regular  
assinala que o eixo do tempo não é regular
- HISTORY calibration file: cal010397.lis  
arquivo de calibração dos dados
- END  
fim do “header”

Um exemplo de espectro dinâmico obtido com o “header” acima é mostrado na Figura 5.5, onde os registros mais escuros indicam maior fluxo. O espectro dinâmico foi simulado com o programa IRAF, a partir dos dados do espectrógrafo PHOENIX.

O programa a ser usado para a conversão dos dados do WDDHRS ao padrão FITS, será o CFITSIO (Pence, 1996), recentemente liberado na versão “beta” pela NASA.

O CFITSIO está escrito em linguagem C++. O programa contém, uma livreria de rotinas para leitura e escrita de arquivos em formato FITS. Atualmente o programa está instalado no computador do WDDHRS, na sede do INPE, assim como está disponível o guia do usuário do programa (Pence, 1996).

Com o formato FITS implementado, teremos não só a possibilidade de intercâmbio de dados com outros grupos de pesquisa no mundo, como também a grande possibilidade de trabalhar os dados do WDDHRS como imagens nos 3 grandes pacotes de análise de imagens em astronomia como são por exemplo, o AIPS (“Astronomical Image Processing System”, <http://www.cv.nrao.edu/aips/>), ESO-MIDAS (“European Southern Observatory Munich Image and Data Analysis System”, <http://www.hq.eso.org/midas-info/midas.html>), IRAF (“Image Reduction and Analysis Facility”, <http://iraf.noao.edu/iraf-homepage.html>), assim como também o IDL (“Interactive Data Language”, <http://www.rsiric.com/idl/index.html>).

```

SIMPLE = T /
BITPIX = 8 / Integer*1 (byte)
NAXIS = 2 /
NAXIS1 = 600 /
NAXIS2 = 100 /
EXTEND = T / File contains extensions
DATE = '20/09/97' / Written by CFITSIO
ORIGIN = 'DAS-INPE' / Organization name
TELESCOP= 'Radio, SJ Campos' / Type and Location of the telescope
INSTRUME= 'WDDHRS ' / Name of the spectrometer
OBJECT = 'Sun: 010397-140829' / Title of image
DATE-OBS= '01/03/97' / date observation starts
TIME-OBS= '14:08:29' / time observation starts
DATE-END= '01/03/97' / date observation ends
TIME-END= '14:09:29' / time observation ends
BUNIT = '45*log10(sfu+10)' / z-axis title
DATAMIN = 40.917717 / Minimum element in image
DATAMAX = 202.69560 / Maximum element in image
CRVAL1 = 0.00000 / value on axis 1 at the reference pixel
CRPIX1 = 0 / reference pixel of axis 1
CTYPE1 = 'TIME UT (s)' / title of axis 1
CDEL1 = 0.100000 / step between pixels
CRVAL2 = 2000.00 / value on axis 2 at the reference pixel
CRPIX2 = 0 / reference pixel of axis 2
CTYPE2 = 'FREQ (MHz)' / title of axis 2
CDEL2 = -5.0000 / step between pixels
COMMENT The time axis is not regular
COMMENT
HISTORY calibration file: cal010397.lis
END

```

Fig. 5.4 - Exemplo de um “header” de um arquivo FITS do WDDHRS.

wddhrs: Sun: 010397-140829

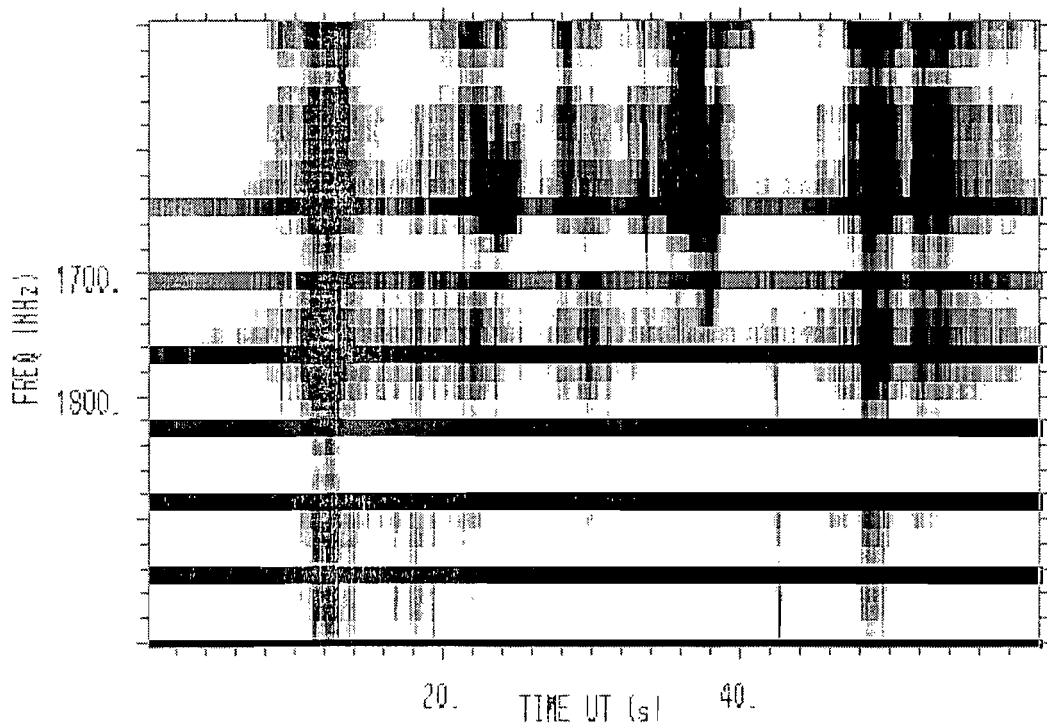


Fig. 5.5 - Exemplo de um espectro dinâmico a ser obtido pelo WDDHRS, segundo o "header" da Figura 5.4. No topo da imagem são dados a data (01/março/1997) e o tempo de início da observação (14h08m29s UT). O eixo horizontal representa o tempo (s) após o início, enquanto que o eixo vertical representa a frequência (MHz).

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E PLANOS FUTUROS

#### 6.1 Introdução

Pela primeira vez, foi feita uma investigação de um grande número de explosões decimétricas (0.3 – 3.0 GHz) acima de 1 GHz. Da análise das explosões tipo III, em 8 flares, obteve-se vários parâmetros (como por exemplo, a taxa de deriva), os quais são comparados com investigações anteriores. Descobrimos alguns resultados novos (por exemplo, a relação entre duração e frequência), já citados nos capítulos anteriores.

Assim, melhoramos a modelagem de densidade de Aschwanden e Benz (1995), e conseqüentemente os parâmetros do feixe de elétrons e da região de aceleração. Resumimos o atual modelo da fase impulsiva dos “flares”, e sugerimos o cenário apropriado para explicar nossas investigações.

#### 6.2 Modelo do “flare”

Recentes observações em raios-X moles e duros, do satélite YOHKOH, evidenciam claramente que a aceleração impulsiva de partículas e liberação de energia nos “flares” solares, é devida basicamente ao processo de reconexão magnética (Masuda et al., 1995; Shibata et al., 1995; Tsuneta, 1996; Aschwanden et al., 1996b).

O processo que dirige a reconexão magnética, pode ser:

- 1) **Espontâneo** (Ugai, 1987; Tsuneta, 1996), devido a uma resistividade anômala, altamente localizada em um determinado ponto da folha de corrente neutra, que desencadeia o processo de reconexão (Figura 6.1), ou
- 2) Devido à interação de **fluxo emergente** com o existente campo magnético coronal, que dá início à reconexão (Heyvaerts et al., 1977; Vlahos, 1993; Yokoyama e Shibata, 1996). A configuração de campo coronal pre-existente, pode ser: horizontal (Figura 6.2a), oblíquo (Figura 6.2b), ou vertical (Figura 6.2c).

Ambos os processos podem ter cenário similar (Figura 6.1, Figura 6.2c), onde a reconexão acontece acima do topo do “loop”, podendo gerar fonte de raios-X duros, conforme observado por Masuda et al. (1995).

Muitos modelos têm sido propostos para explicar o mecanismo detalhado de aceleração (por exemplo, Holman, 1985; Tsuneta 1996), nenhum deles sendo, no entanto, conclusivo. A maioria dos modelos podem acelerar as partículas tanto na direção para cima, como para baixo, devido à simetria imposta por uma topologia tipo-X da reconexão. Estes mecanismos podem explicar então a observação de explosões tipo III que se deslocam tanto à alta coroa, quanto à cromosfera.

Embora nestes últimos anos tenha aumentado a quantidade de observações de “flares”, falta ainda uma maior resolução espacial e temporal nestas observações. Existe portanto, grande incerteza sobre a altura, extensão espacial e escala temporal da região de aceleração.

No entanto, as pesquisas nos últimos anos apontam para uma localização acima do “loop” emissor em raios-X moles (Masuda et al., 1995; Shibata et al., 1995; Tsuneta, 1996; Aschwanden et al., 1996b; Aschwanden, 1996).

A seguir, resumimos os principais resultados, e sugerimos o cenário da fase impulsiva dos “flares”.

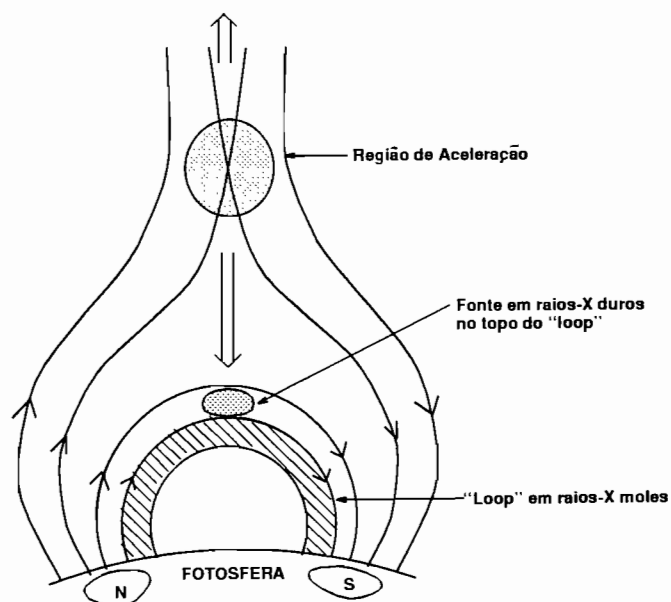


Fig. 6.1 - Cenário do "flare" para reconexão espontânea. A região de aceleração está localizada na zona de reconexão magnética, acima do "loop" em raios-X moles.

FONTE: Adaptada de Masuda et al. (1995), p. 688.

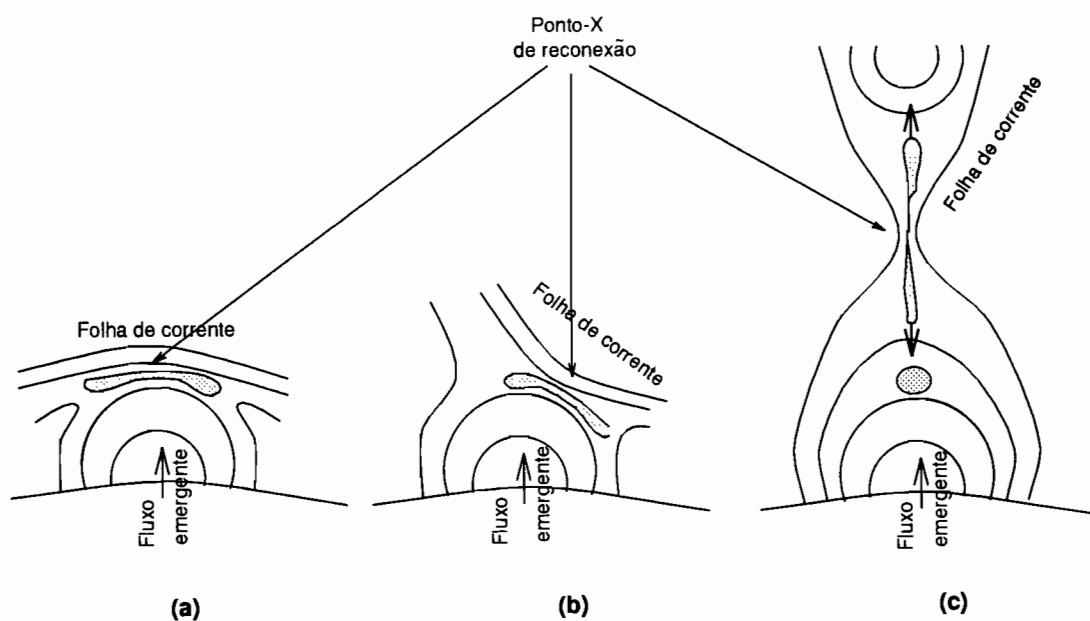


Fig. 6.2 - Diagrama esquemático da reconexão de fluxo emergente com o campo coronal: (a) horizontal, (b) oblíquo, (c) vertical.

FONTE: Adaptada de Yokoyama e Shibata (1996), p. 371.

## 6.3 Principais resultados

Os principais pontos a serem ressaltados na conclusão deste trabalho, são apresentados a seguir, sendo que os mesmos são válidos para a nossa faixa de estudo (300-3000 MHz):

### 6.3.1 Explosões tipo III

- A maioria de explosões tipo III tem menos do que 250 MHz de faixa de frequência, sendo o valor médio de  $\Delta f \approx 100$  MHz.
- A duração das explosões apresenta um decréscimo para frequências mais altas. Mesmo que os dados tenham baixa resolução temporal, temos obtido pela primeira vez a seguinte relação válida para a faixa decimétrica (300-3500) MHz:

$$t_{1/2} = 1.7 \times 10^4 f^{-0.60}$$

a qual difere da relação empírica de Elgaroy e Lyngstad (1972) estabelecida para a faixa de frequência de (0.5-500) MHz.

Nossa relação é ainda válida para frequências mais altas (até  $\approx 6$  GHz).

- Tem-se um decréscimo do número de explosões com o aumento da frequência, similar ao observado por outros autores na faixa métrica, assim como por Aschwanden et al. (1995) para a faixa decimétrica. Isto deve estar relacionado a uma maior absorção do meio para frequências mais altas (densidades eletrônicas mais altas).
- Das 160 explosões analisadas, 102 casos (67 %) apresentaram (df/dt) “reverse slope”, 52 casos (36 %) (df/dt) normais, e 8 casos (5 %) foram pares de explosões que apresentaram deriva oposta.

Estas porcentagens diferem daquelas encontradas por Aschwanden et al. (1995) para explosões tipo III correlacionadas com pulsos em raios-X: 34 % para explosões RS, 77 % para normais e 13 % para pares de explosões bi-direcionais. Possivelmente devido a uma baixa amostra de explosões acima de 1 GHz.

- Encontramos a seguinte relação entre taxa de deriva e frequência:

$$|(df/dt)| = 0.09 \times f^{1.35}.$$

Confirmando assim a relação encontrada por Aschwanden et al. (1995) para a faixa decimétrica:

$$|(df/dt)| = 0.10 \times f^{1.40}.$$

Porém, nossa relação se ajusta melhor para frequências mais altas que a relação encontrada por Aschwanden et al. (1995). Isto pode ser entendido facilmente, notando que no trabalho de Aschwanden et al. (1995) são analisadas apenas umas poucas explosões acima de 1 GHz.

- A maioria de explosões decimétricas são de baixa intensidade, chegando as mais fracas a  $\approx 5$  *ufs*, quase no limite de detecção. São poucas as explosões acima de 100 *ufs*.

Possivelmente o meio mais denso da baixa coroa, faz que a maioria de explosões analisadas na faixa decimétrica seja de baixa intensidade.

- Aparentemente, as explosões tipo III apresentam um decréscimo do fluxo  $S$  para frequências mais altas, o qual é devido a uma diminuição da razão  $n_b/n_e$  para densidades eletrônicas mais altas.
- A densidade numérica média ( $n_b$ ) dos elétrons do feixe emissor é:

$$n_b \simeq 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}.$$

- O número de elétrons ( $N$ ) necessários para gerar uma explosão tipo III é:

$$N \simeq 6 \times 10^{31}.$$

- O valor da velocidade média do excitador das explosões tipo III é  $v_{III} = 0.16 c$  para emissão no 2<sup>o</sup> harmônico.
- Comparando com os valores de velocidade estimados por outros autores, concluímos que a emissão no 2<sup>o</sup> harmônico é predominante na faixa decimétrica, resultado oposto ao sugerido recentemente por Aschwanden e Benz (1995).

### 6.3.2 Explosões decimétricas bi-direcionais

- Foram encontrados 8 pares de explosões simultâneas que apresentaram deriva oposta na análise dos 8 flares, enquanto Aschwanden et al. (1995) descobriram 30 destes pares analisando explosões tipo III correlacionadas com pulsos em raios-X em 86 flares.
- Dois pares encontrados em nosso trabalho já haviam sido descobertos por Aschwanden et al. (1995), assim neste trabalho, estamos acrescentando em 20 % o número de pares já conhecidos.
- Em todos os 8 pares, as explosões que vão para cima e para baixo da coroa parecem começar simultaneamente (dentro do limite de resolução instrumental), o que também foi notado por Aschwanden et al. (1995).



- A frequência comum de início destes pares de explosões vão desde 340 até 1700 MHz, sendo que nos pares descobertos por Aschwanden et al. (1995), a frequência comum de início está só entre 300-1000 MHz.

### 6.3.3 Região de aceleração

- Analisando a distribuição das taxas de deriva, assim como as observações de Benz et al. (1992), deduzimos que a região de aceleração poderia acontecer para densidades eletrônicas na faixa de:

$$n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

- Com o resultado anterior e o modelo de densidade adotado, deduzimos que a região de aceleração dos elétrons acontece em alturas de:

$$h \approx 10^4 - 10^5 \text{ km}.$$

- Inferimos um limite superior para a extensão da região de aceleração de

$$\Delta h \leq 400 - 4000 \text{ km},$$

enquanto Aschwanden et al. (1995) encontra  $\Delta h \leq 200 - 2000 \text{ km}$ .

- Inferimos um limite superior na escala temporal de aceleração das partículas de

$$\tau < 0.5 - 5 \text{ ms},$$

enquanto que Aschwanden et al. (1995) obtem  $\tau < 0.3 - 3 \text{ ms}$ .

### 6.3.4 O cenário do “flare”

O presente trabalho, sugere o seguinte cenário (Figura 6.3) da fase impulsiva do “flare” para as explosões tipo III:

A liberação de energia e aceleração de partículas em “flares” solares acontece em regiões compactas de comprimento máximo  $\Delta h \leq 4000 \text{ km}$ . O tempo de aceleração para os elétrons emissores em rádio deve ser  $\Delta t \leq 5 \text{ ms}$ .

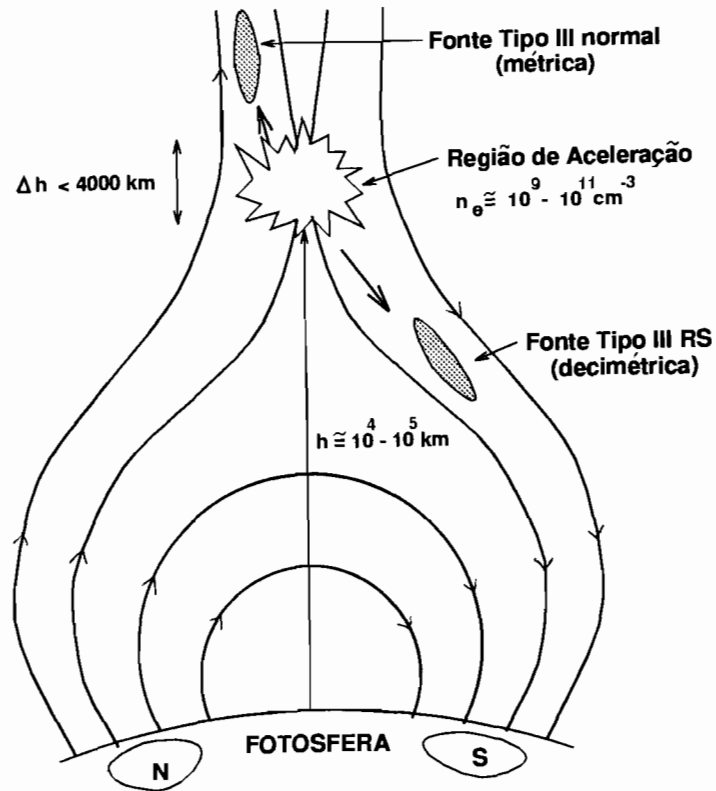


Fig. 6.3 - O cenário das explosões tipo III segundo o presente trabalho, indica que o mecanismo de aceleração produz feixes bi-direcionais de elétrons, que se propagam para cima (Tipo III normal) e para baixo (Tipo III RS).

O mecanismo de aceleração produz geralmente feixes bi-direccionais de elétrons, com uma densidade média de  $n_b \simeq 6 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  e um número total de elétrons de  $N \simeq 6 \times 10^{31}$ , que se propagam para cima (explosões tipo III normais) e para baixo (observáveis como explosões “reverse slope”), com uma velocidade média de  $v_{III} = 0.16 c$  (7 keV).

A aceleração deve ocorrer em regiões com densidade eletrônica de  $n_e \approx 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  (da análise da distribuição de explosões normais e RS) correspondente a alturas da ordem de  $h \approx 10^4 - 10^5 \text{ km}$  (segundo nosso modelo de densidade). Isto indica que, provavelmente, a região de aceleração está localizada perto do topo, ou acima dos “flare loops”, como sugerem recentemente os trabalhos de Masuda et al. (1995); Aschwanden et al. (1996a, 1996b); Aschwanden (1996).

## 6.4 Planos futuros

A maior dificuldade encontrada no presente trabalho foi trabalhar com dados de baixa resolução temporal (100 ms). Assim, será de grande importância o fato de trabalhar no futuro com os dados do WDDHRS do INPE, que com uma resolução temporal de 10 ms, será de grande utilidade para uma melhor determinação dos parâmetros aqui apresentados.

Também, a baixa resolução em frequência impede a separação da frequência de início dos pares de explosões tipo III bi-direccionais. Normalmente o WDDHRS do INPE trabalhará com um espaçamento de 5 MHz entre canais, o que permitirá definir melhor este assunto, assim como as determinações do comprimento da região de aceleração, e a escala de tempo em que ocorre o processo de aceleração.

Comparar as porcentagens de explosões tipo III normais e RS abaixo de 1 GHz obtidas por Aschwanden et al. (1995), com as porcentagens obtidas até 1 GHz no presente estudo; isto permitirá definir se verdadeiramente alguns resultados do estudo de Aschwanden et al. (1995) podem ser extrapolados até 3 GHz.

Fazer uma análise de todas as explosões tipo III da amostra usada no trabalho de Aschwanden et al. (1995), e não só das “aparentemente” correlacionadas com pulsos em raios-X. Isto permitiria essencialmente 3 coisas:

- 1) Aprimorar as propriedades das explosões tipo III encontradas neste trabalho.
- 2) Definir diferenças e semelhanças entre explosões tipo III “simples” e explosões tipo III “correlacionadas” (um para um) com pulsos em raios-X.
- 3) Definir definitivamente se tem sentido fazer uma correlação de um para um entre explosões tipo III e raios-X.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allaart, M.A.F.; Van Nieuwkoop, J.; Slottje, C.; Sondaar, L.H. Fine structure in solar microwave bursts. **Solar Physics**, 130(1-2): 183–189, 1990.
- Alvarez, H.; Haddock, F.T. Wind density model from km-wave type III bursts. **Solar Physics**, 29(1): 197–209, 1973.
- Aschwanden, M.J.; Bastian, T.S.; Benz, A.O.; Brosius, J.W. Decimetric solar type U bursts: VLA and PHOENIX observations. **Astrophysical Journal**, 391(1): 380-392, May 1992.
- Aschwanden, M.J.; Benz, A.O.; Schwartz, R.A. The timing of electron beam signatures in hard X-ray and radio: solar flare observations by BATSE/Compton Gamma Ray Observatory and Phoenix. **Astrophysical Journal**, 417(2): 790-804, Nov. 1993a.
- Aschwanden, M.J.; Benz, A.O.; Dennis, B.R.; Gaizauskas, V. Quasi-periodic particle injection into coronal loops. **Astrophysical Journal**, 416(2): 857–874, 1993b.
- Aschwanden, M.J.; Benz, A.O. Chromospheric evaporation and decimetric radio emission in solar flares. **Astrophysical Journal**, 438(2): 997-1012, Jan. 1995.
- Aschwanden, M.J.; Benz, A.O.; Dennis, B.R.; Schwartz, R.A. Solar electron beams detected in hard X-rays and radio waves. **Astrophysical Journal**, 455(1): 347-365, Dec. 1995.
- Aschwanden, M.J.; Hudson, H.; Kosugi, T.; Schwartz, R.A. Electron time-of-flight measurements during the Masuda flare, 1992 January 13. **Astrophysical Journal**, 464: 985-998, June 1996a.
- Aschwanden, M.J.; Kosugi, T.; Hudson, H.; Wills, M.J.; Schwartz, R.A. The scaling law between electron time-of-flight distances and loop lengths in solar flares. **Astrophysical Journal**, 470: 1198-1217, Oct. 1996b.
- Aschwanden, M.J. **Scaling law and acceleration site**. Comunicação pessoal, 1996.
- Benz, A.O. **Plasma astrophysics: kinetic processes in solar and stellar corone**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993. 299 p.

- Benz, A.O.; Güdel, M.; Isliker, H.; Miskowicz, S.; Stehling, W. A broadband spectrometer for decimetric and microwave radio bursts: first results. **Solar Physics**, 133(2): 385-393, June 1991.
- Benz, A. O., Magun, A., Stehling, W., e Su, H. Electron beams in the low corona. **Solar Physics**, 141(2): 335-346, Oct. 1992.
- Cargill, P. Do protons or electrons dominate particle acceleration in solar flares?. **EOS**, 77(37): 353-357, Sept. 1996.
- De Jager, C. Solar flares and particle acceleration. **Space Science Reviews**, 44(1-2): 43-90, June 1986.
- Dulk, G.A. Radio emission from the sun and stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, 23: 169-224, 1985.
- Dulk, G.A.; Steinberg J.L.; Hoang, S.; Goldman, M.V. The speeds of electrons that excite solar radio bursts of type III. **Astronomy and Astrophysics**, 173(2): 366-374, 1987.
- Elgaroy, O.; Lyngstad E. High-resolution observations of type III solar radio bursts. **Astronomy and Astrophysics**, 16(1): 1-12, 1972.
- Fernandes, F.C.R. **Espectrógrafo decimétrico de alta sensibilidade e resolução: análise preliminar das explosões solares.** (Dissertação de Mestrado em Ciências Espaciais / Radioastronomia e Física Solar) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, INPE, Jun. 1992. 132 p. (INPE-5537-TDI/525).
- Fernandes, F.C.R. **Desenvolvimento do espectrógrafo decimétrico de banda larga e análise de explosões decimétricas associadas com emissões em raios-X duros.** (Tese de Doutorado em Ciências Espaciais / Astrofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, INPE, 1997. No prelo.
- Fernandes, F.C.R. O satélite YOHKOH. **Boletim da SAB**, 13(4): 30-40, 1994.
- Fokker, A.D. Trajectories followed by U-like solar radio bursts. **Solar Physics**, 11(1): 92-103, 1970.
- Fürst, E.; Benz, A.O; Hirth, W. About the relation between radio and soft X-ray emission in case of very weak solar activity. **Astronomy and Astrophysics**, 107(1): 178-185, 1982.

- Grosbol, P.; Harten, R.H.; Greisen, E.W.; Wells, D.C. Generalized extensions and blocking factors for FITS. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, 73: 359-364, June 1988.
- Haisch, B.; Strong, K.T.; Rodonò, M. Flares on the sun and other stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, 29: 275-329, 1991.
- Heyvaerts, J.; Priest, E.R.; Rust, D.M. An emerging flux model for the solar flare phenomenon. **Astrophysical Journal**, 216(1): 123-137, Aug. 1977.
- Holman, G.D. Acceleration of runaway electrons and joule heating in solar flares. **Astrophysical Journal**, 293(2): 584-594, June 1985.
- Hudson, H.S.; Canfield, R.C.; Kane, S.R. Indirect estimation of energy disposition by non-thermal electrons in solar flares. **Solar Physics**, 60(1): 137-142, 1978.
- Isliker, H.; Benz, A.O. Catalogue of 1-3 GHz solar flare radio emission. **Astronomy & Astrophysics Supplement and Series**, 104(1): 145-160, Apr. 1994.
- Kane, S.R. Impulsive (flash) phase of solar flares: Hard X-ray, microwave, EUV and optical observations. In: Nerwik, G., ed. **Coronal Disturbances**, Proc. IAU Symposium 57, Reidel, Dordrecht, 1974. p.105.
- Kane, S.R.; Benz, A.O.; Treumann, R.A. Electron acceleration in impulsive solar flares. **Astrophysical Journal**, 263: 423-432, Dec. 1982.
- Kundu, M.R.; Spencer C.L. Spectral characteristics of solar continuum radiation in the 500-1000 Mc/s range. **Astrophysical Journal**, 137(1-2): 572-579, Jan. 1963.
- Kundu, M.R.; Roberts, J.A.; Spencer, C.J.; Kuiper, J.W. A comparison of the dynamic spectra of solar radio bursts in the decimeter and meter-wave-length ranges. **Astrophysical Journal**, 133(1): 255-257, Jan. 1961.
- Lang, K.R. **Astrophysical Formulae** 2. ed. Berlin, Springer-Verlag, 1980.
- Lin, R.P.; Potter, D.W.; Gurnett, D.A.; Scarf, F.L. Energetic electrons and plasma waves associated with a solar type III radio burst. **Astrophysical Journal**, 251(1): 364-373, Dec. 1981.

- Lin, R.P.; Levedahl, W.K.; Lotko, W.; Gurnett, D.A.; Scarf, F.L. Evidence for nonlinear wave-wave interactions in solar type III radio bursts. **Astrophysical Journal**, 308(2): 954-965, Sept. 1986.
- Masuda, S.; Kosugi, T.; Hara, H.; Sakao, T.; Shibata, K.; Tsuneta, S. Hard X-ray sources and the primary energy-release site in solar flares. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, 47(5): 677-689, 1995.
- Melrose, D.B. Collective plasma radiation processes. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, 29: 31-57, 1991.
- Melrose, D.B. Solar flares: current dissipation or magnetic annihilation?. **Australian Journal of Physics**, 46(1): 167-193, 1993.
- Melrose, D.B. Plasma emission mechanisms. In: McLean, D.J.; Labrum, N.R., ed. **Solar radiophysics: studies of emission from the sun at meter wavelengths**. Cambridge, London, Cambridge University Press, 1985. Chap.8, p.177-210.
- Moore, R.; McKenzie, D.L.; Svestka, Z.; Widing, K.G.; Antiochos, S.K.; Dere, K.P.; Dodson-Prince, H.W.; Hiei, E.; Krall, K.R.; Krieger, A.S.; Mason, H.E.; Pettrasso, R.D.; Pneuman, G.W.; Silk, J.K.; Vorpahal, J.A.; Withbroe, G.L. **The Thermal X-Ray Flare Plasma**. In: Sturrock, P.A., ed. **Solar flares: a monograph from Skylab solar Workshop II**. Report of NASA Skylab Workshop on Solar Flares. Boulder, Colorado, Colorado University Press, 1980. Chap. 8, p.341-409.
- NASA/NOST **A user's guide for the Flexible Image Transport System (FITS)** Version 3.1 Greenbelt, NASA/Goddard Space Flight Center, May 2, 1994.
- Pence, W.D. **User's guide: an interface to FITS format files for C Programmers** Beta Version 0.99 Greenbelt, NASA/Goddard Space Flight Center, June, 1996.
- Perrenoud, M.R. The computer-controlled solar radio spectrometer 'Ikarus'. **Solar Physics**, 81(1): 197-203, Nov. 1982.
- Sawant, H.S.; Lattari, C.J.B.; Benz, A.O.; Dennis, B.R. Hard X-rays and associated weak decimetric bursts. **Solar Physics**, 130(1-2): 57-73, Dec. 1990.

- Sawant, H.S.; Sobral, J.H.A.; Neri, J.A.C.F.; Fernandes, F.C.R.; Rosa, R.R.; Cecatto, J.R. High sensitivity digital decimetric spectroscop. **Advances in Space Research**, 13(9): 199–202, 1993.
- Sawant, H.S.; Fernandes, F.C.R.; Neri, J.A.C.F. Microwave type III-RS bursts. **Astrophysical Journal Supplement Series**, 90: 689–691, Feb. 1994.
- Sawant, H.S.; Sobral, J.H.A.; Fernandes, F.C.R.; Cecatto, J.R.; Day, W.R.G.; Neri, J.A.C.F.; Alonso, E.M.B.; Moraes, A. High sensitivity wide band digital solar polarimetric spectroscop. **Advances in Space Research**, 17(4/5): 385–388, 1996.
- Shibata, K.; Masuda, S.; Shimojo, M.; Hara, H.; Yokoyama, T.; Tsuneta, S.; Kosugi, T.; Ogawara, Y. Hot-plasma ejections associated with compact-loop solar flares. **Astrophysical Journal**, 451(2): L83–L85, 1995.
- Solar Geophysical Data prompt reports, Boulder, n. 579, part 1, Nov. 1992. 122 p.
- Solar Geophysical Data prompt reports, Boulder, n. 583, part 1, Mar. 1993a. 125p.
- Solar Geophysical Data prompt reports, Boulder, n. 590, part 1, Dec. 1993b. 125 p.
- Solar Geophysical Data prompt reports, Boulder, n. 594, part 1, Feb. 1994. 125 p.
- Solar Geophysical Data, Explanation of data reports, No. 515, Supplement, July 1987.
- Stähli, M.; Benz, A.O. Microwave emission of solar electron beams. **Astronomy and Astrophysics**, 175(1–2): 271–276, Mar. 1987.
- Stehling, W. Solar radio telescopes at ETH Zurich. **SPIE**, 2479: 89–95, 1995.
- Stewart, R.T. The speed and acceleration of the source of type III and type V solar radio bursts over large distances in the corona. **Australian Journal of Physics**, 18(1): 67–76, Feb. 1965.
- Strong, K.T.; Benz, A.O.; Dennis, B.R.; Leibacher, J.W.; Mewe, R.; Poland, A.I.; Schrijver, J.; Simnett, G.; Smith, J.B.; Sylwester, J. A multiwavelength study of a double impulsive flare. **Solar Physics**, 91: 325–344, 1984.
- Sturrock, P.A. Type III solar radio bursts. In: Hess, W.N., ed. **Proc. AAS–NASA Symposium on the Physics of Solar Flares**, 1964. p. 357. (NASA SP–50).



- Suzuki, S.; Dulk, G.A. Bursts of type III and type V. In: McLean, D.J.; Labrum, N.R., ed. **Solar radiophysics: studies of emission from the sun at metre wavelengths.** Cambridge, London, Cambridge University Press, 1985. Chap.12, p.289–332.
- Trevisan, R.H. **Estudos multiespectrais das explosões solares associadas com a fase impulsiva do flare.** (Tese de Doutorado em Ciência Espacial / Radioastronomia e Física Solar) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, mar. 1991. 157 p.
- Tsuneta, S. Structure and dynamics of magnetic reconnection in a solar flare. **Astrophysical Journal**, 456(2): 840–849, 1996.
- Ugai, M. Strong loop heating by the fast reconnection in a closed system. **Geophysical Research Letters**, 14(2): 103-106, Feb. 1987.
- Vlahos, L. Filamentation of magnetic structures and particle acceleration in solar and stellar flares. **Advances in Space Research**, 13(9): 161–170, 1993.
- Wells, D.C.; Greisen, E.W.; Harten, R.H. FITS: A Flexible Image Transport System. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, 44(3): 363-370, June 1981.
- Wild, J.P.; McCready, L.L. Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelengths. I. The apparatus and spectral types of solar bursts observed. **Australian Journal Science Research**, A3: 387-398, Sept. 1950.
- Wild, J.P.; Sheridan K.V.; Neylan A.A. An investigation of the speed of the solar disturbances responsible for type III radio bursts. **Australian Journal of Physics**, 12(4): 369–398, 1959.
- Wild, J.P.; Smerd, S.F.; Weiss, A.A. Solar Bursts. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, 1: 291-366, 1963.
- Yokoyama, T.; Shibata, K. Numerical simulation of solar coronal X-ray jets based on the magnetic reconnection model. **Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)**, 48(2): 353–376, 1996.
- Young C.W.; Spencer, C.L.; Moreton, G.E. A preliminary study of the dynamic spectra of solar radio bursts in the frequency range 500–950 Mc/s. **Astrophysical Journal**, 133(1): 243-250, Jan. 1961.

Zheleznyakov, V.V. **Radio Emission of Sun and Planets** Oxford, Pergamon Press, 1970.

## APÊNDICE A

### APÊNDICE A: CATÁLOGO DE EXPLOSÕES

Aqui é apresentado um catálogo de explosões solares (100-3000 MHz) observadas pelo espectrômetro PHOENIX.

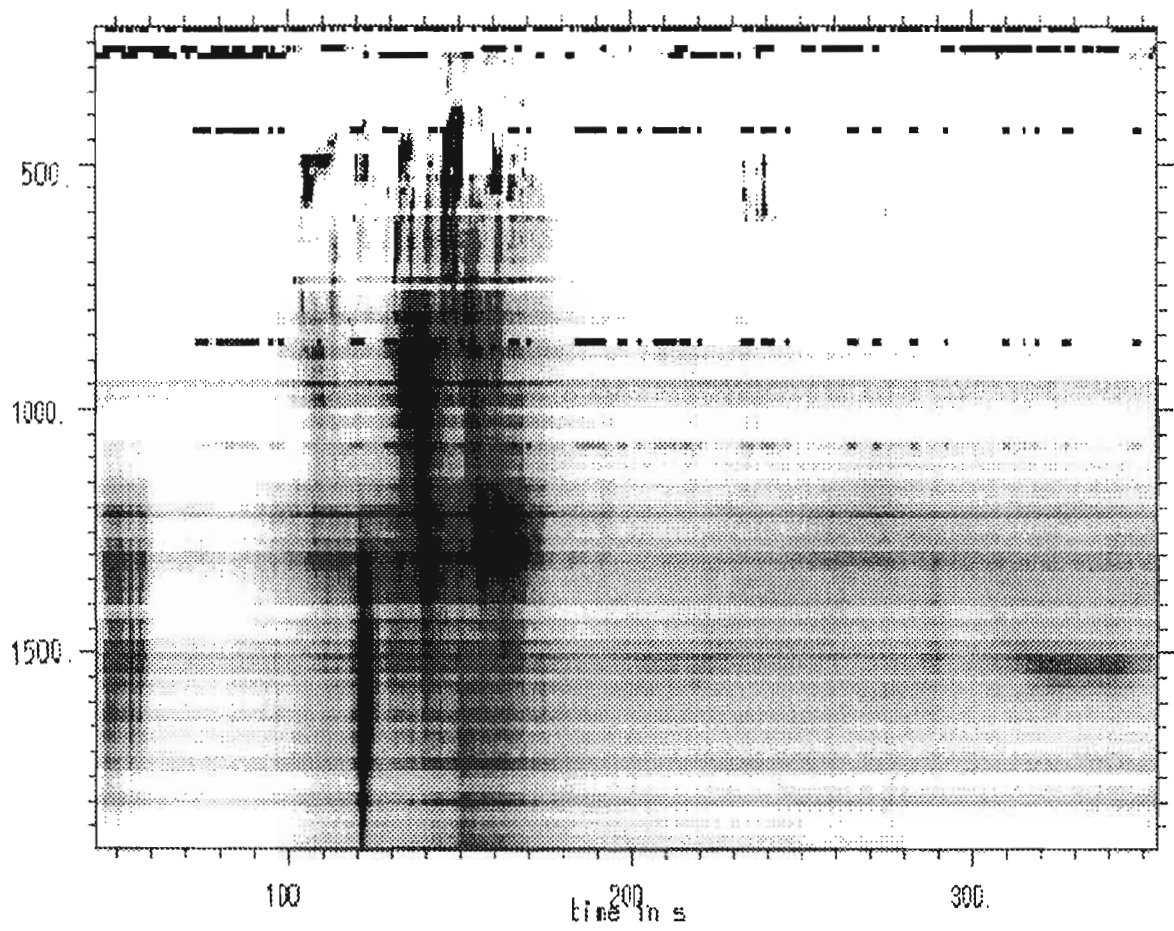
Os espectros dinâmicos tem sido plotados com as seguintes características:

- Os registros mais escuros indicam maior fluxo.
- O eixo vertical representa a frequência em MHz
- O eixo horizontal representa o tempo (UT) em segundos, após o tempo assinalado no cabeçalho da Figura.
- O nome designado a cada imagem é dado no topo da Figura.
- Na seguinte Tabela (A.1), é dado o nome de cada imagem, e o numero de grupo correspondente segundo a classificação feita no capítulo 2 (Tabela 2.4.)

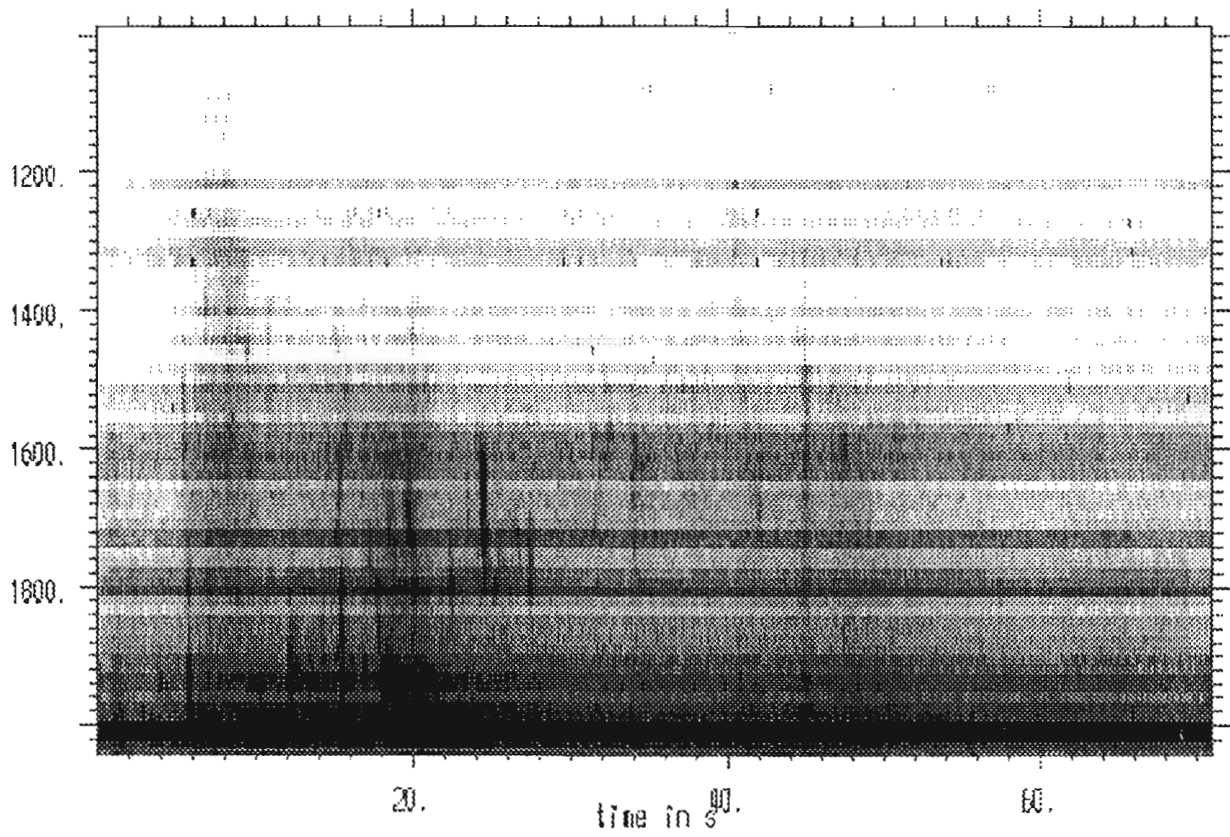
**TABELA A.1 - CATÁLOGO DAS EXPLOSÕES SOLARES  
OBSERVADAS PELO ESPECTRÔMETRO  
PHOENIX (100-3000) MHZ**

DATA	NOME da IMAGEM	No. GRUPO	TIPO
05/09/92	g03cat	1,2,3	pulsations, tipo III, patch
06/09/92	g04cat	4	tipo III
06/09/92	g05cat	5,6,7,8	tipo III
06/09/92	setembro	9	tipo III
06/09/92	g05b	10	tipo III
06/09/92	g05c	11	tipo III
07/09/92	g06i	12	patch
07/09/92	g070001	13	patch
07/09/92	g070003	14	patch
07/09/92	g070005	15	tipo III
07/09/92	g090001	16	patch
07/09/92	g090003	17	patch
07/09/92	g090005	18	patch
12/09/92	g10i	19	patch
18/01/93	g12icut	20	tipo III
02/10/93	g150001	21	tipo III
02/10/93	g150003l	22	tipo III
02/10/93	g150005	23	tipo III
03/10/93	g170001	24	tipo III
03/10/93	g170002	25	absorption
03/10/93	g170003	26	tipo III + absorption
03/10/93	g170004	27	absorption
03/10/93	g180002	28	tipo III + spikes
20/10/93	g19i	29	patch
01/12/93	g20i	30	patch

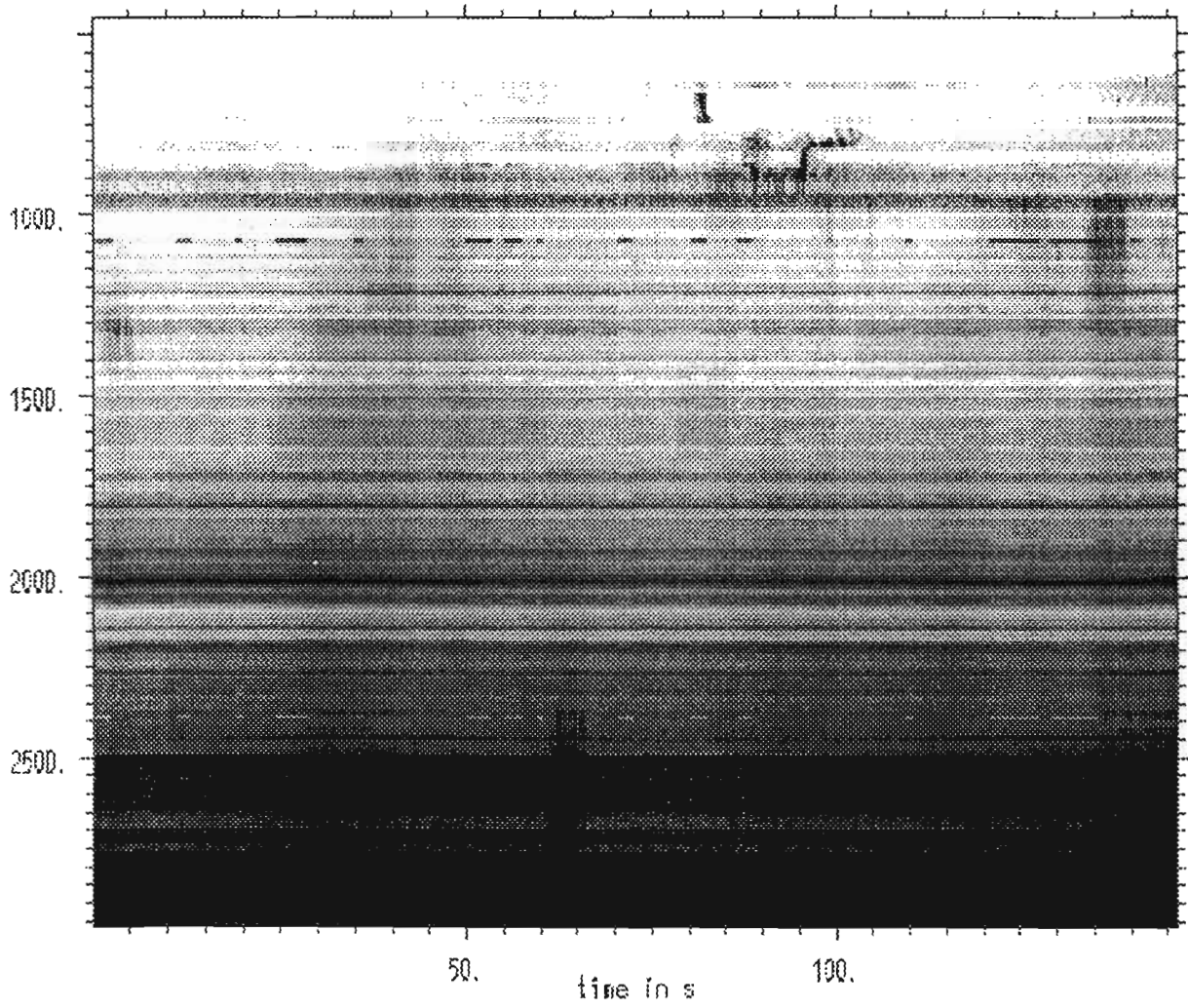
g03cat: 92/SEP/05, 11:24:47



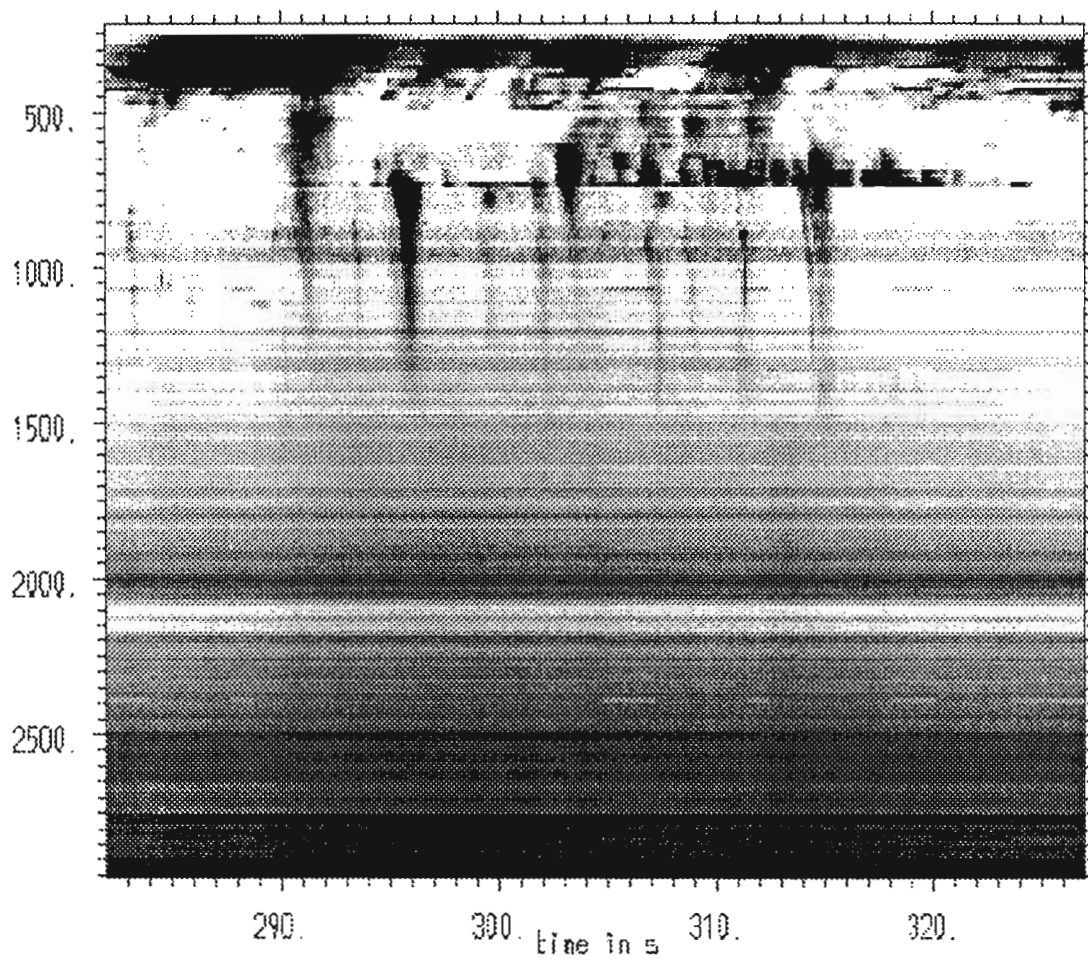
g04cat: 92/SEP/06, 09:03:25



g05acat: 92/SEP/06, start time 11:48:48

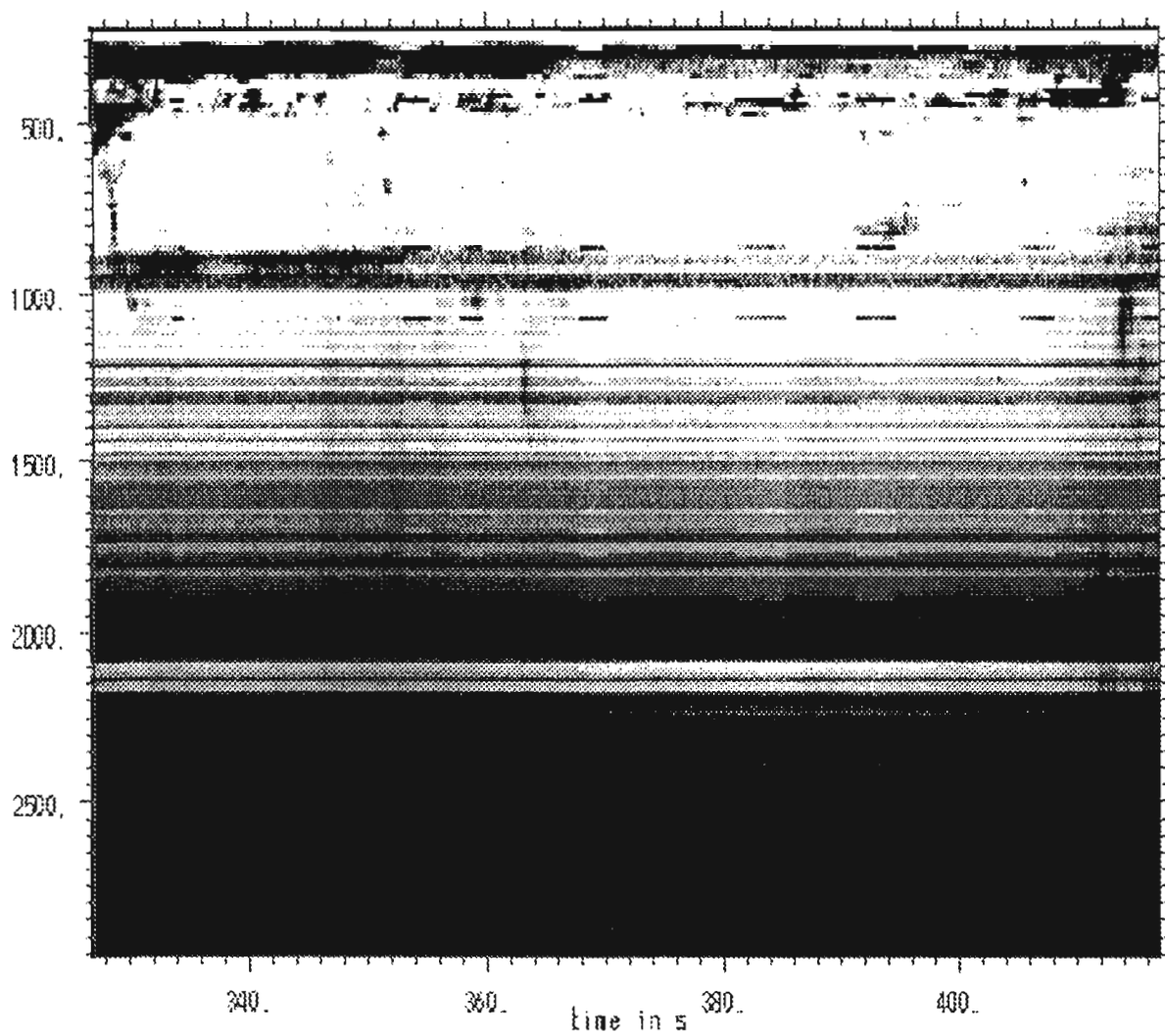


setembro: 92/SEP/06, start time: 11:48:48

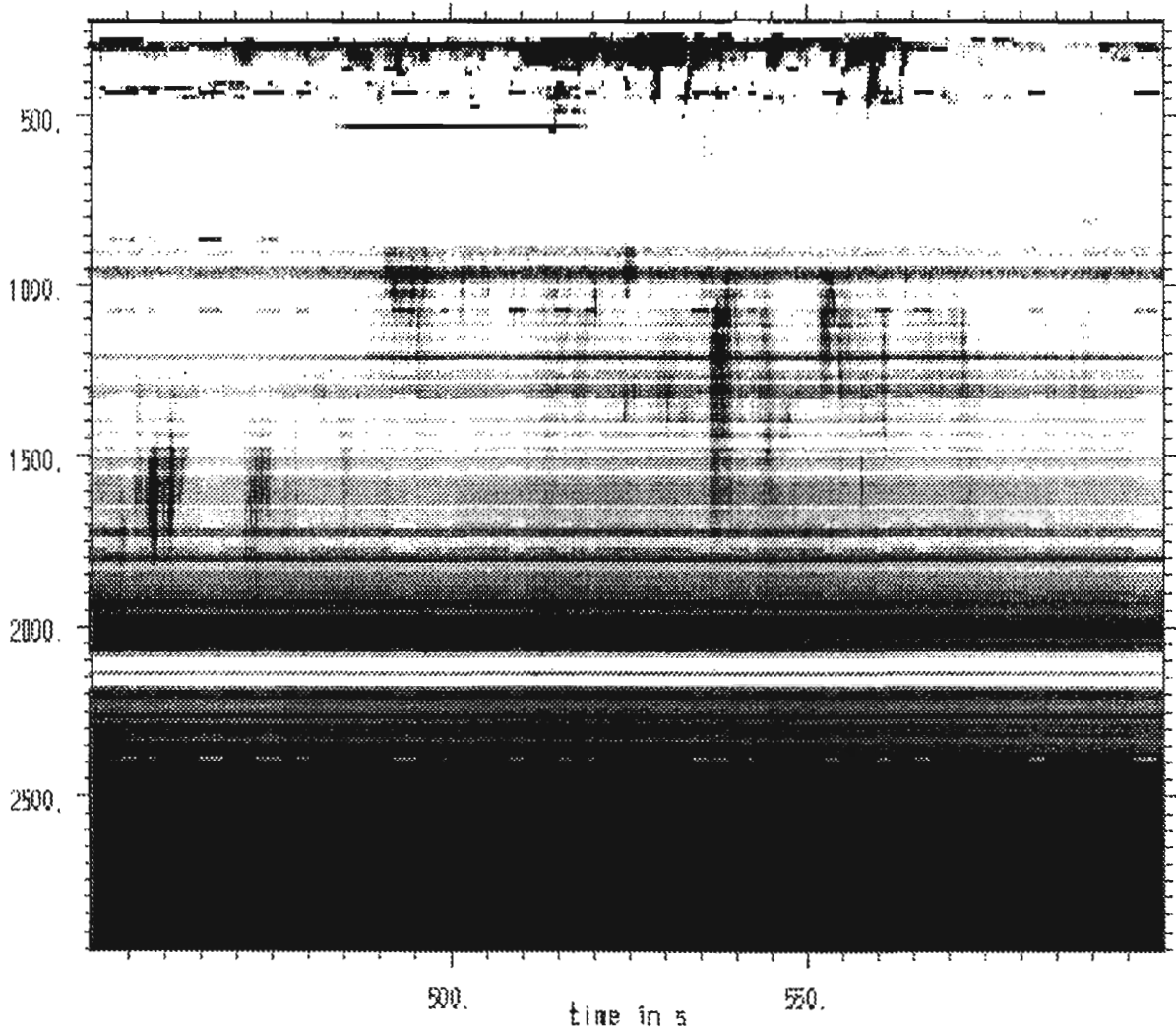




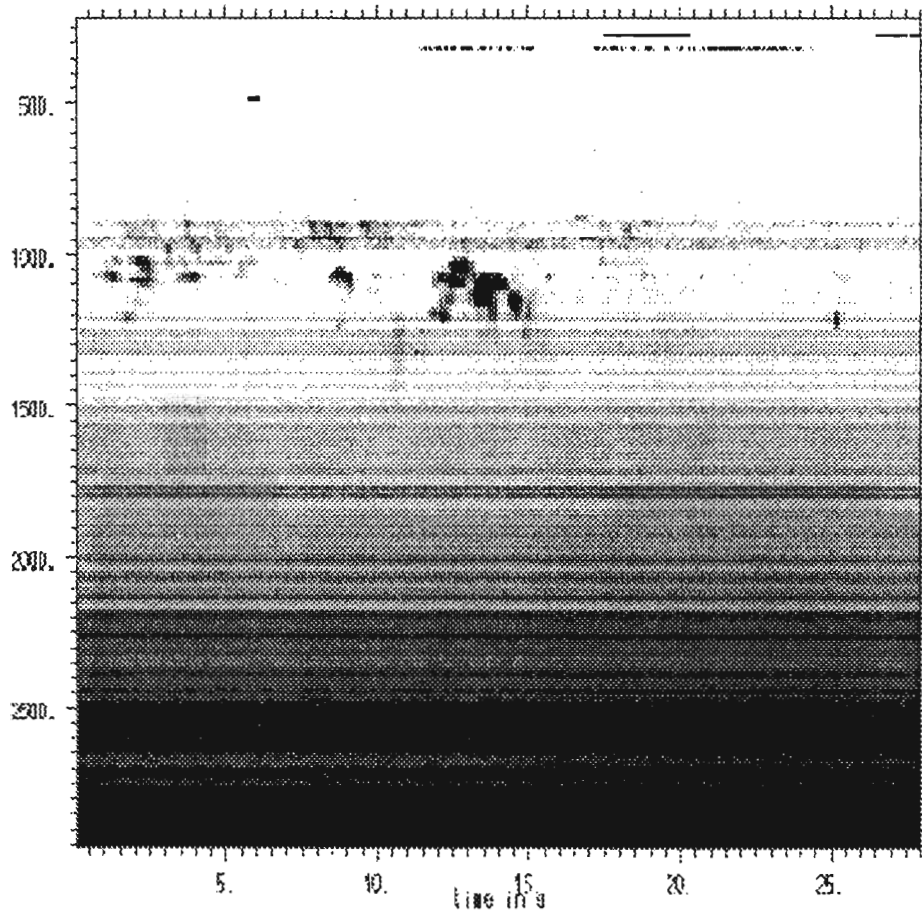
g05b: 92/SEP/06, start time 11:48:48



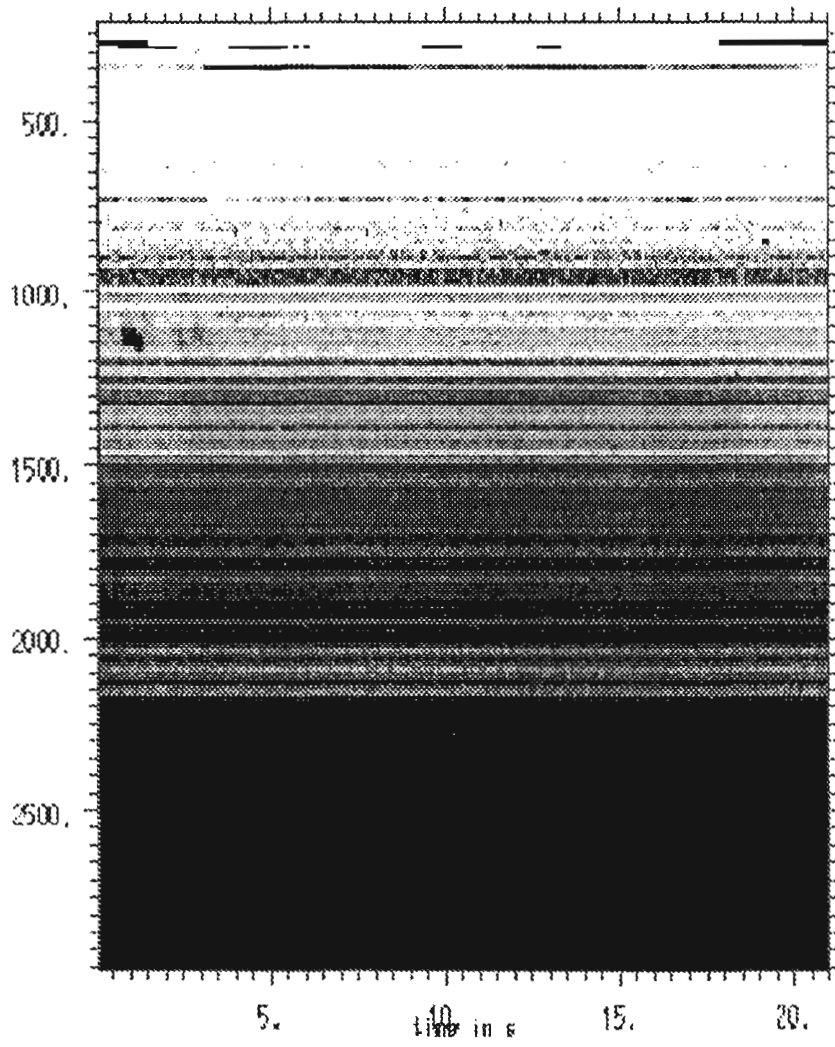
g05c: 92/SEP/06, start time 11:48:48



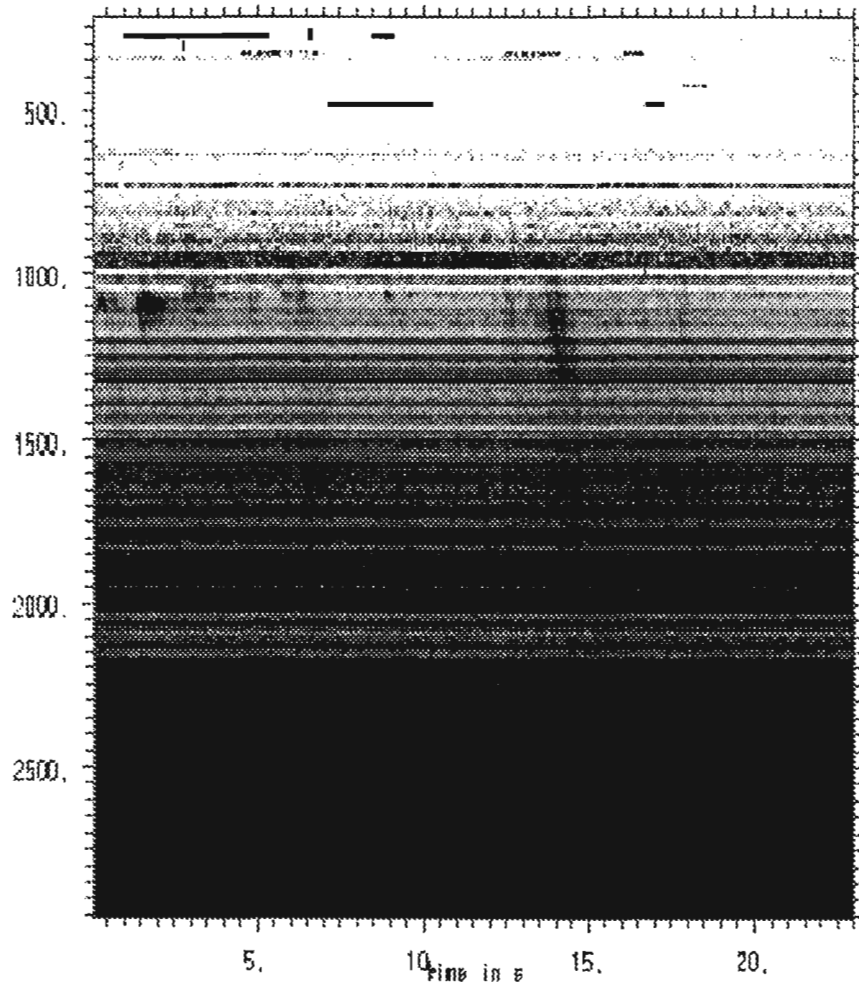
g06i: 92/SEP/07, 07:11:13



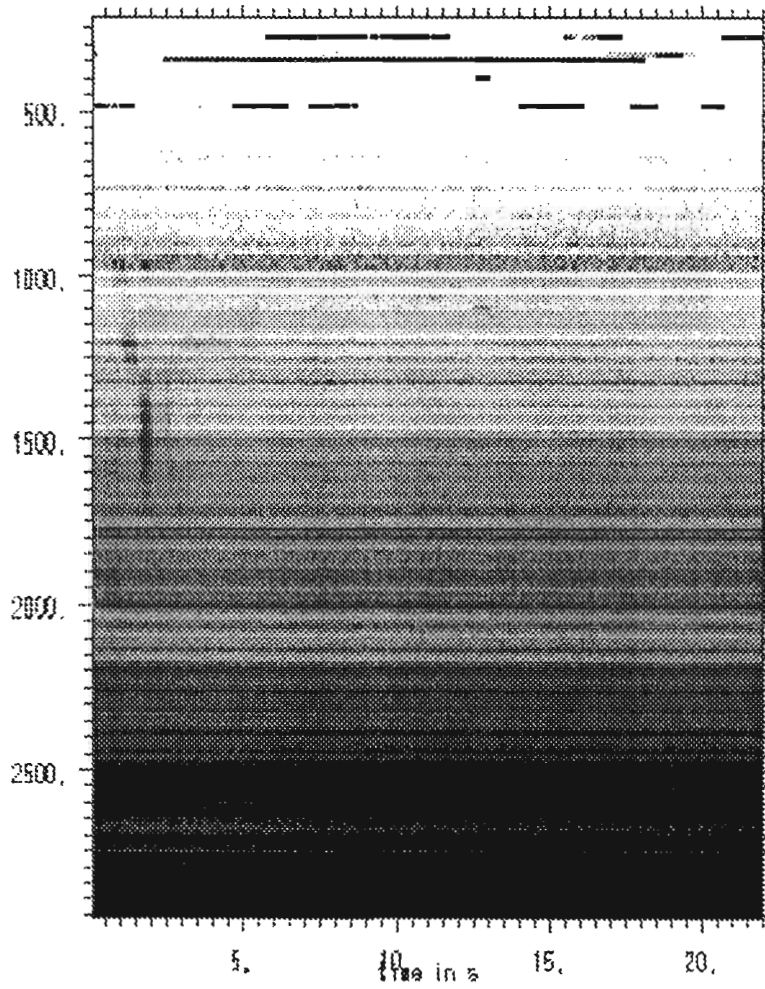
g070001: 92/SEP/07 fluz density, 07:41:13



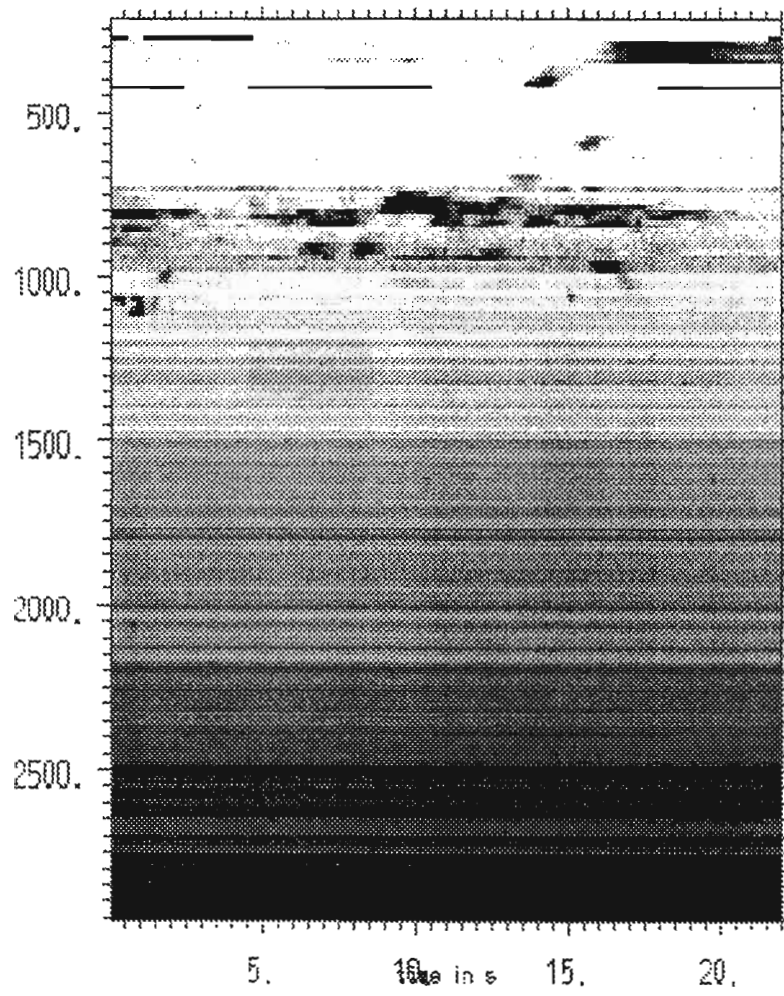
g070003: 92/SEP/07 flux density, 07:42:15



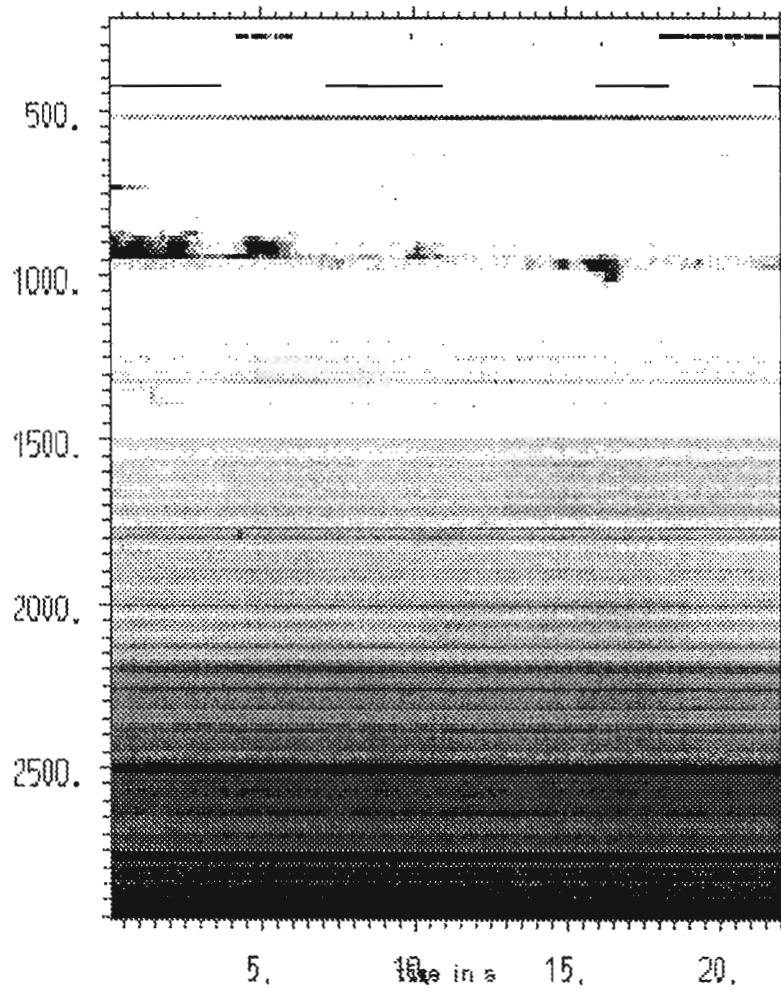
g070005: 92/SEP/07 fluz density, 07:42:42



g090001: 92/SEP/07, 08:46:09

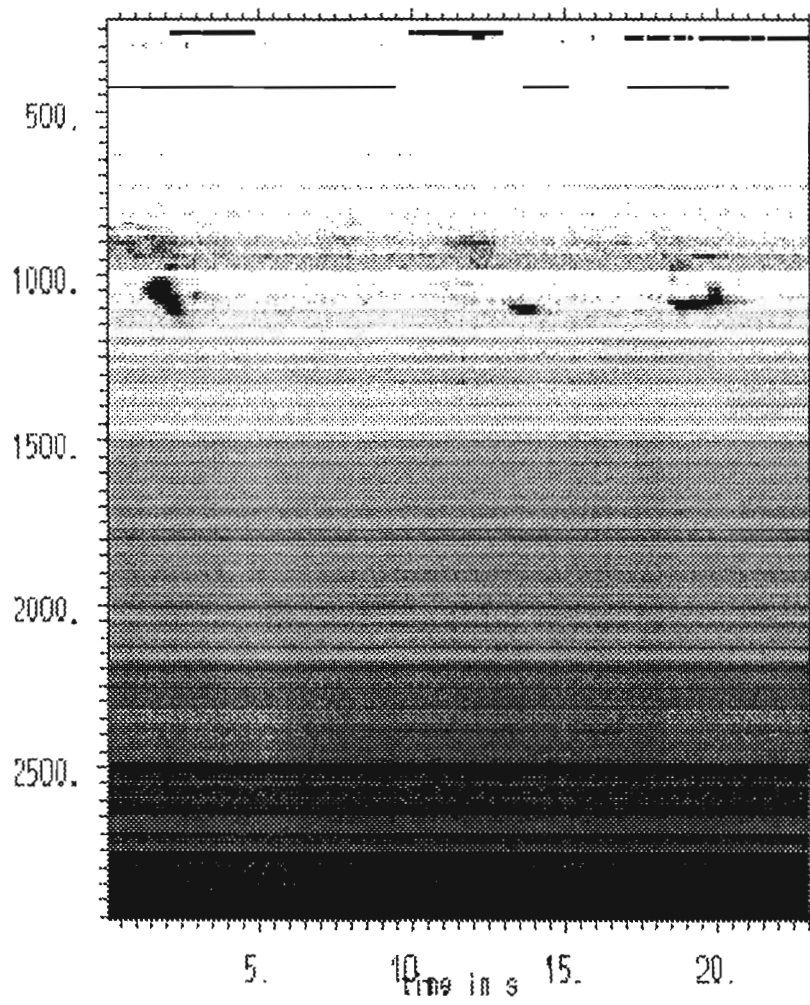


g090003: 92/SEP/07, 08:48:26

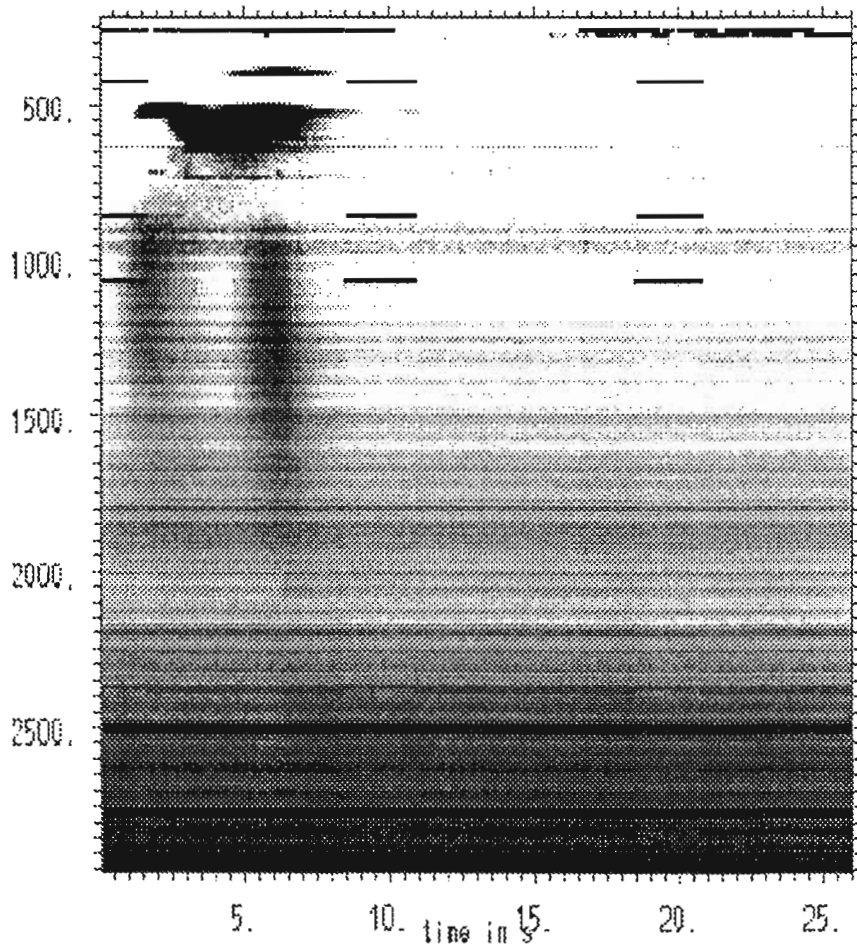




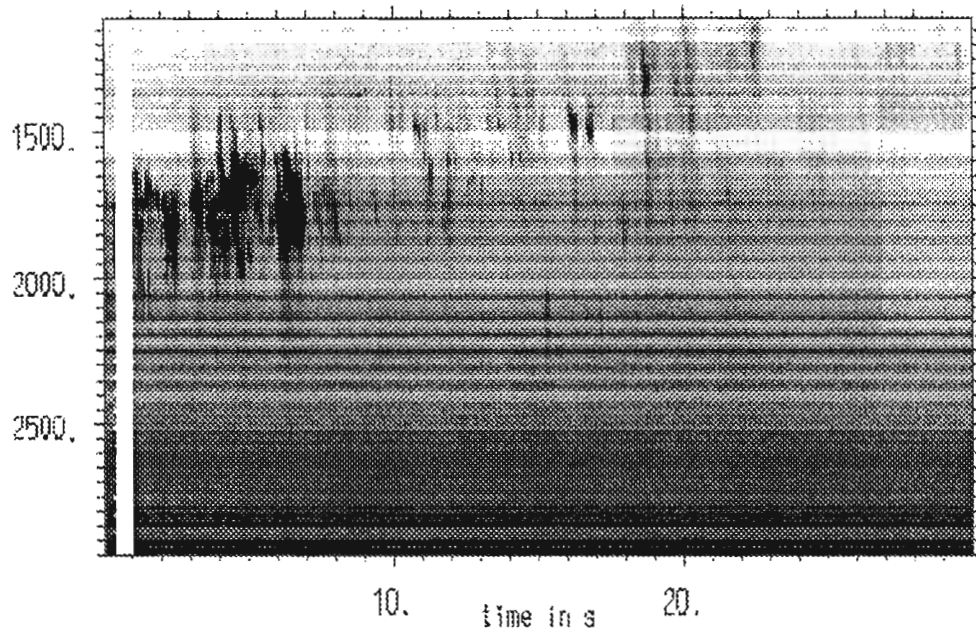
g090005: 92/SEP/07, 08:49:27



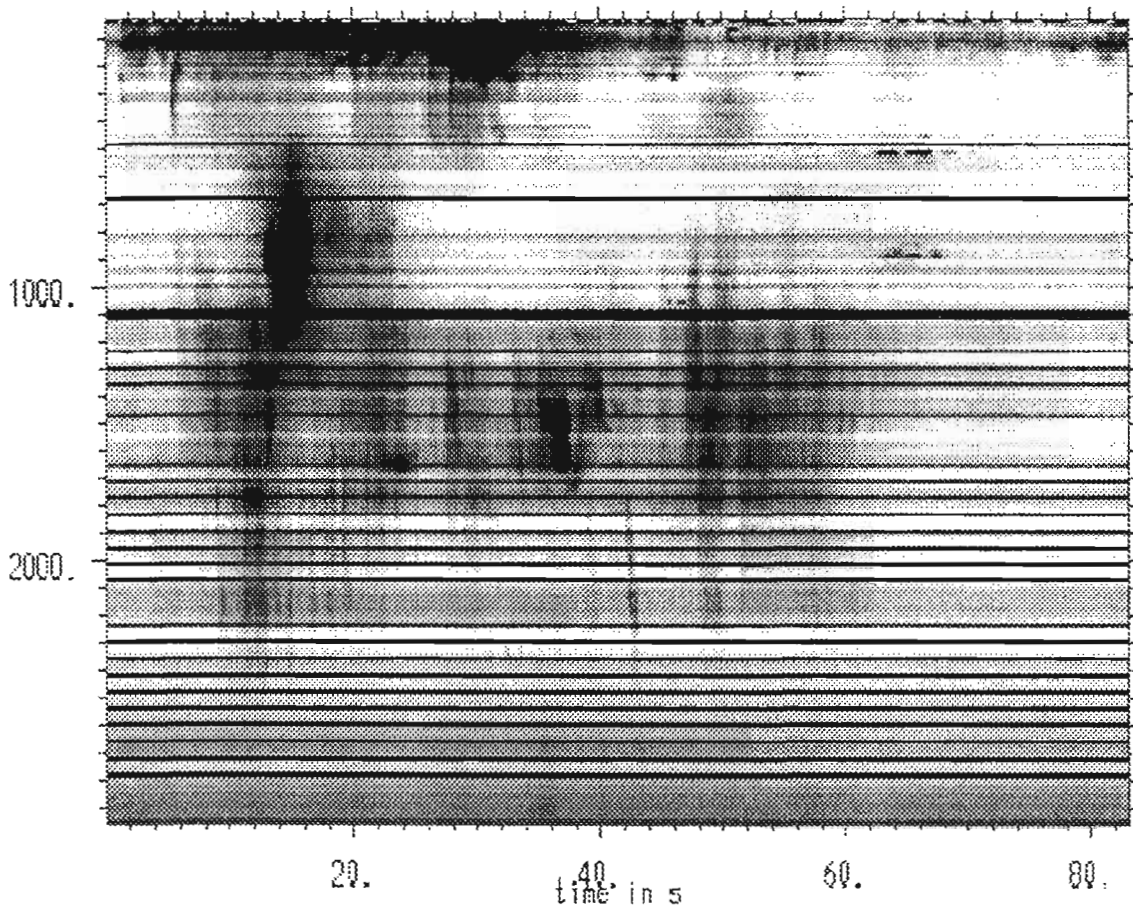
g10i: 92/SEP/12, 15:39:51



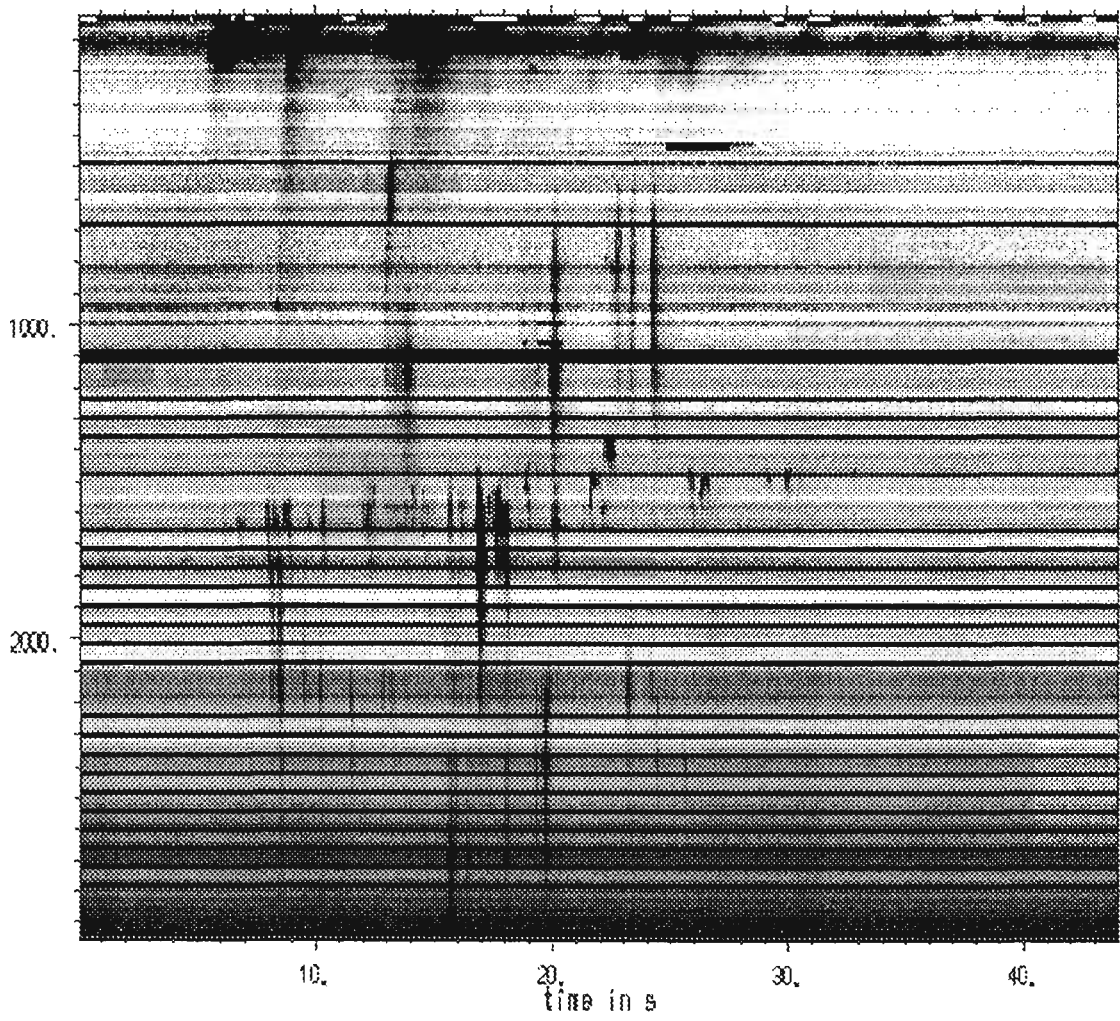
g12icut: 93/JAN/18, 13:01:07



g150001: 93/OCT/02, 07:39:39

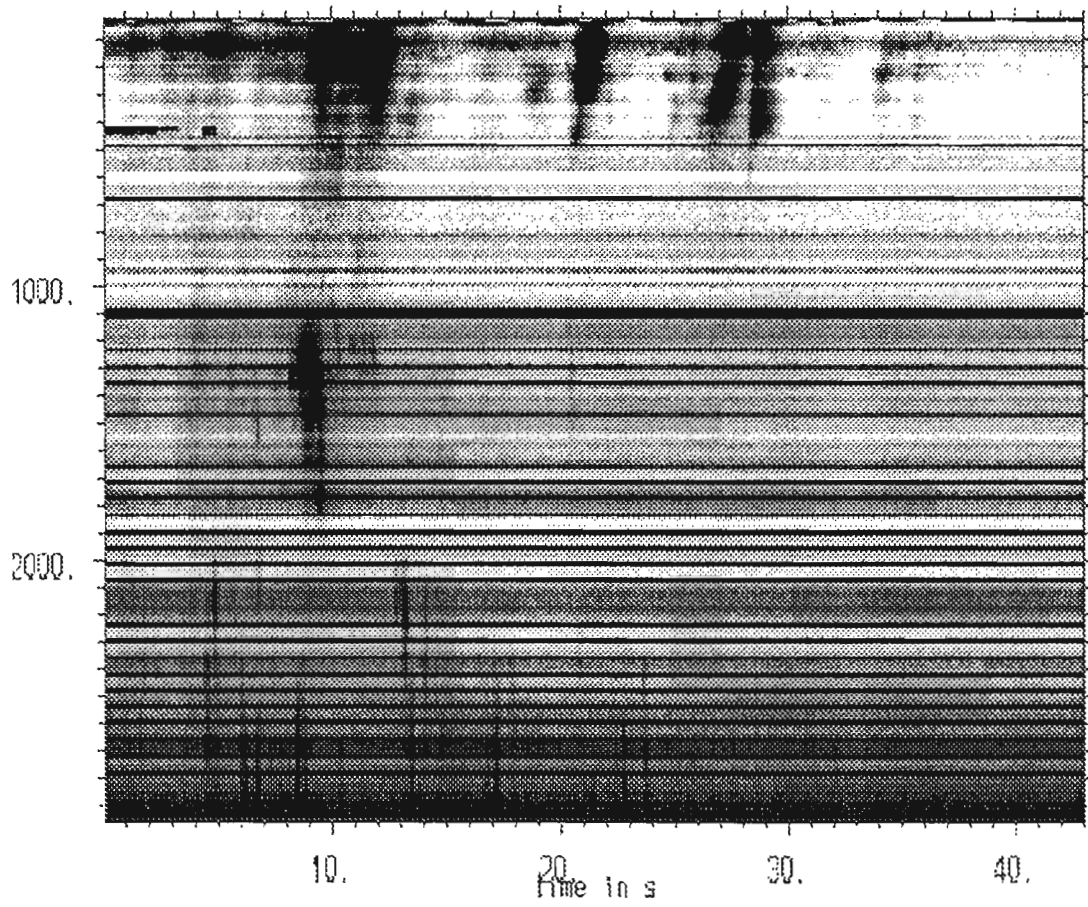


g1500031: 93/OCT/02, 07:41:20

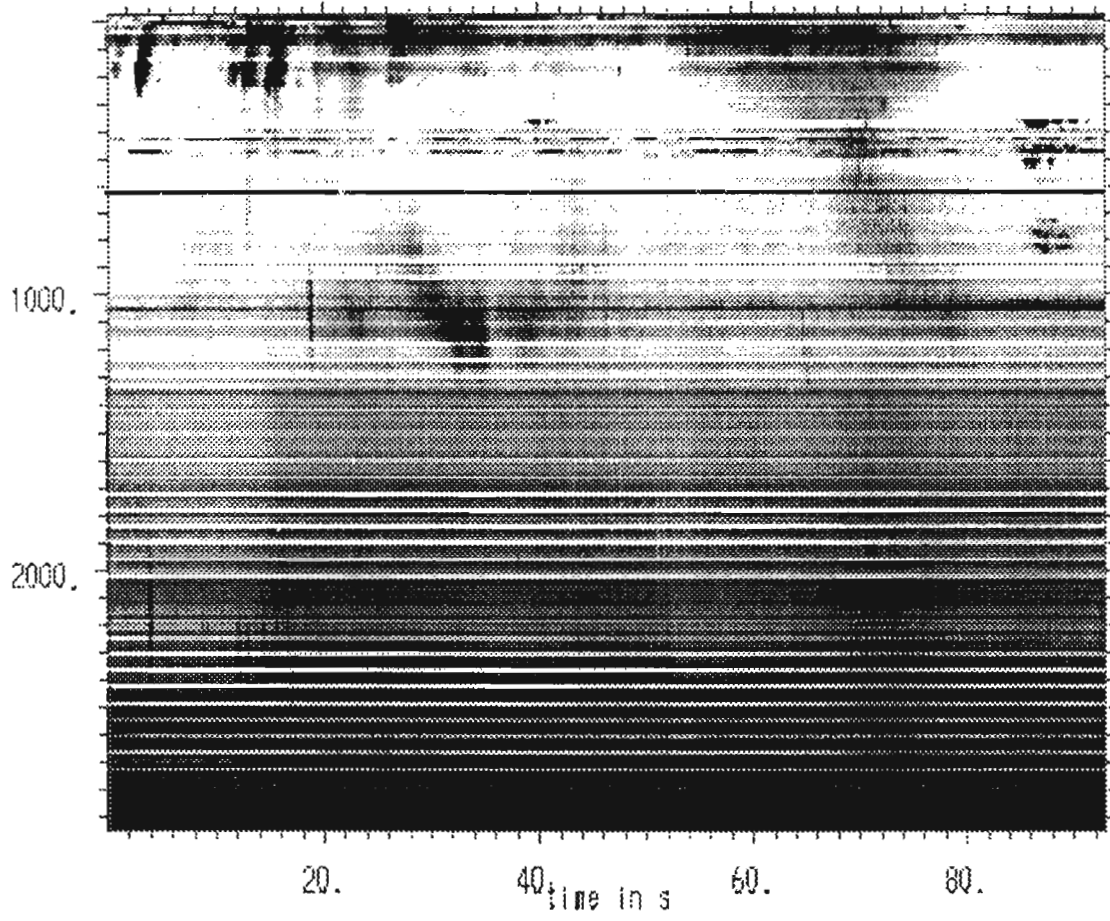




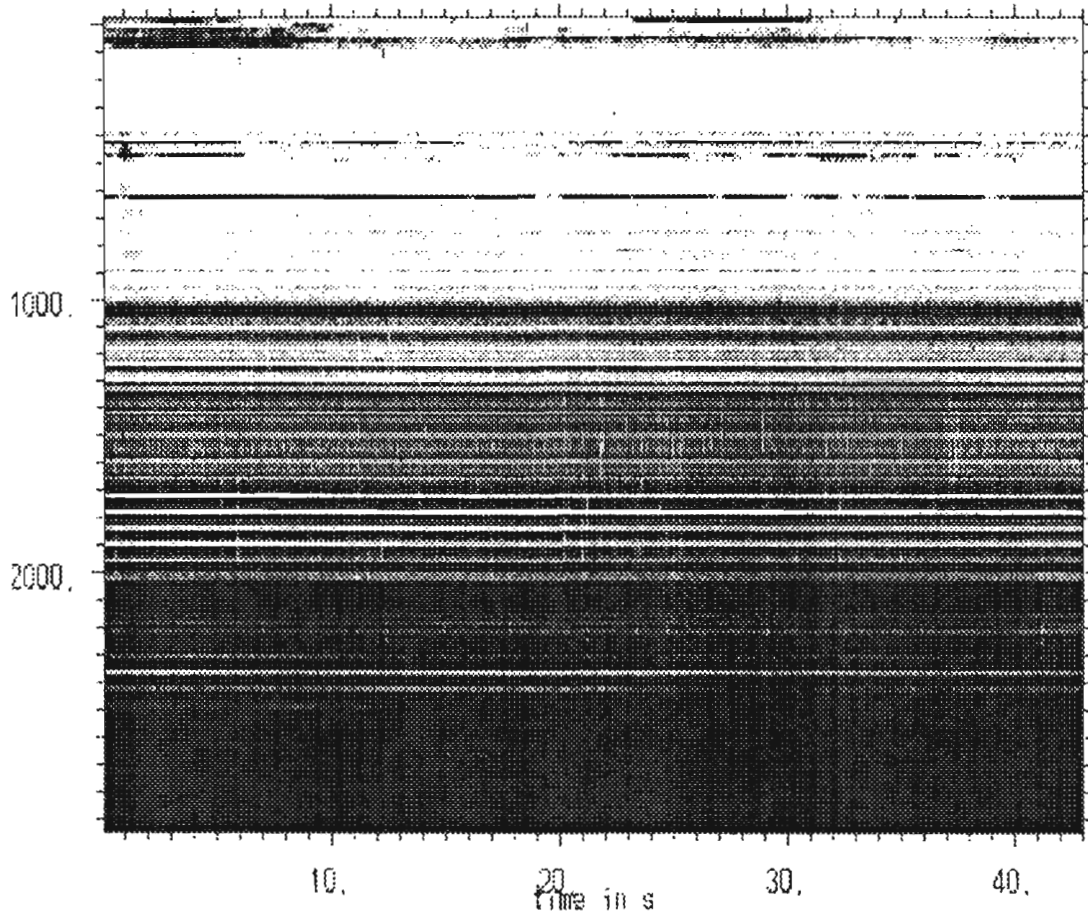
g150005: 93/OCT/02, 07:44:27



g170001: 93/OCT/03, 09:24:46

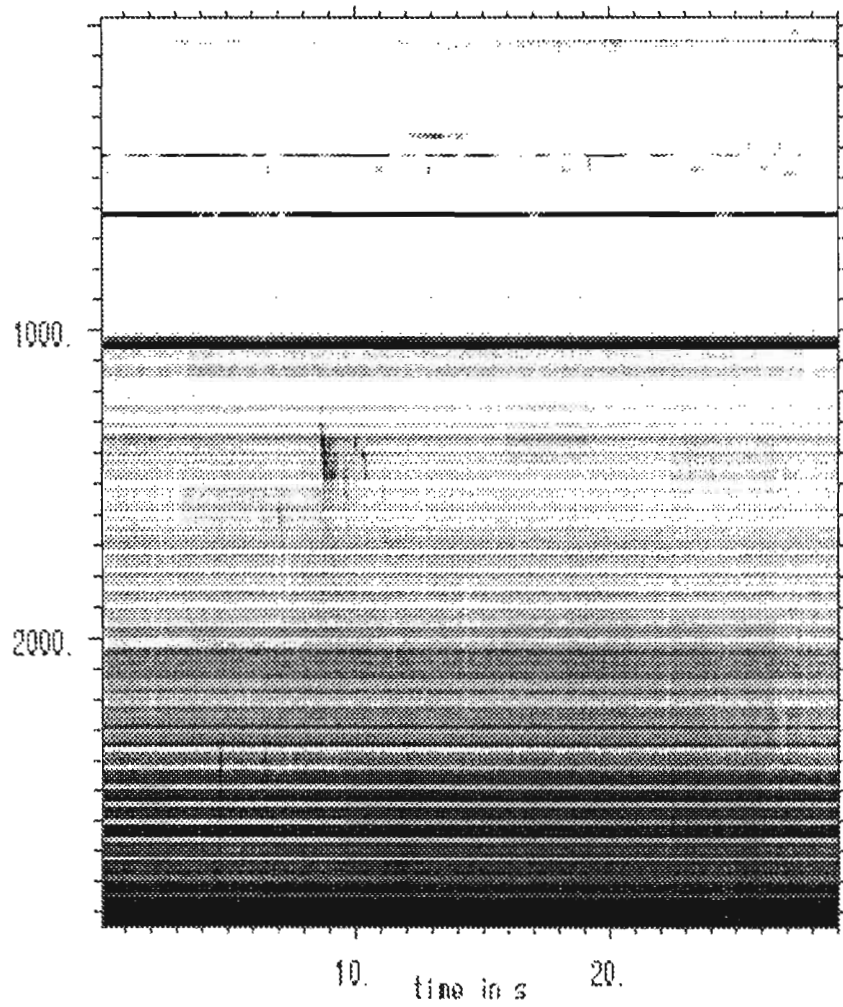


g170002: 93/OCT/03, 09:26:27

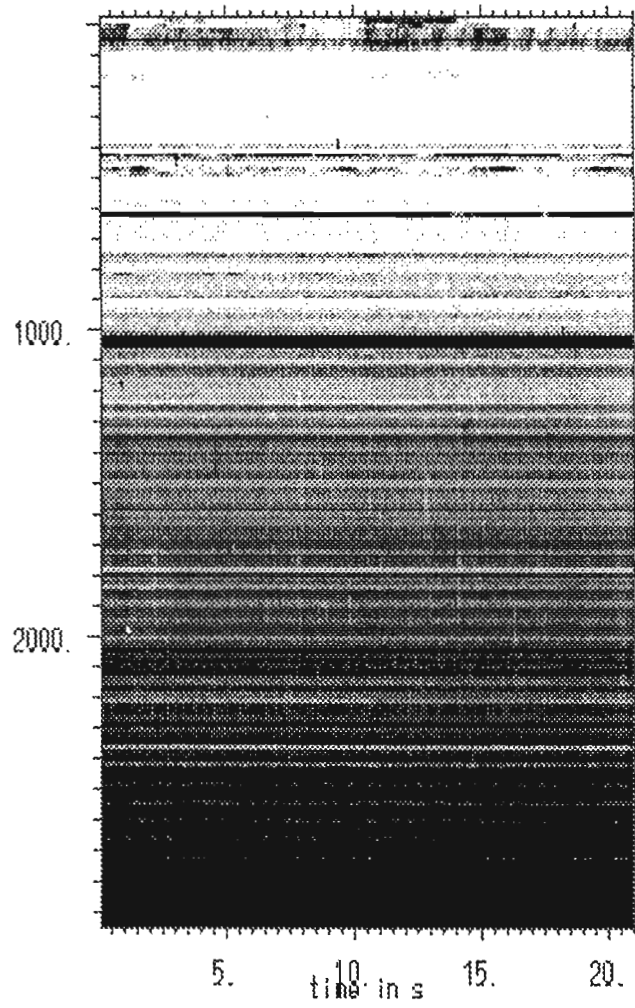




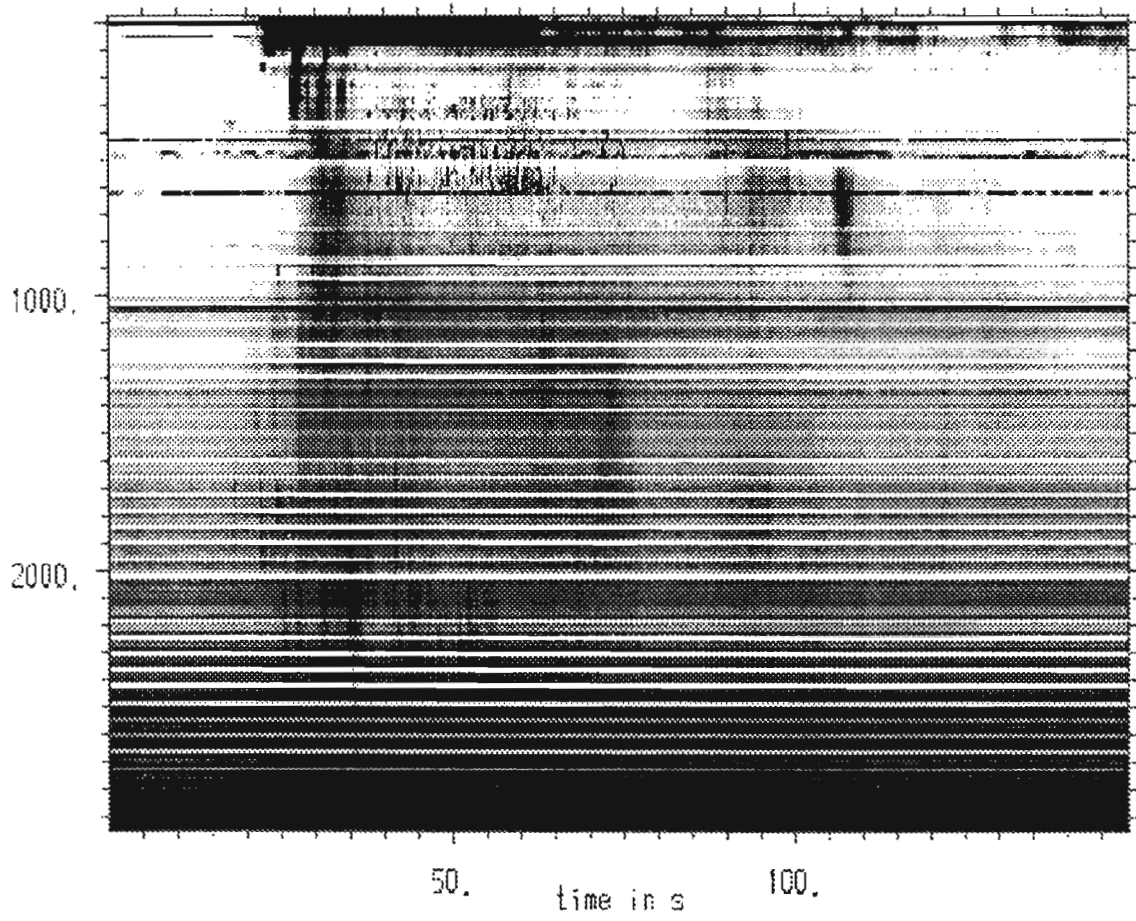
g170003: 93/OCT/03, 09:27:13



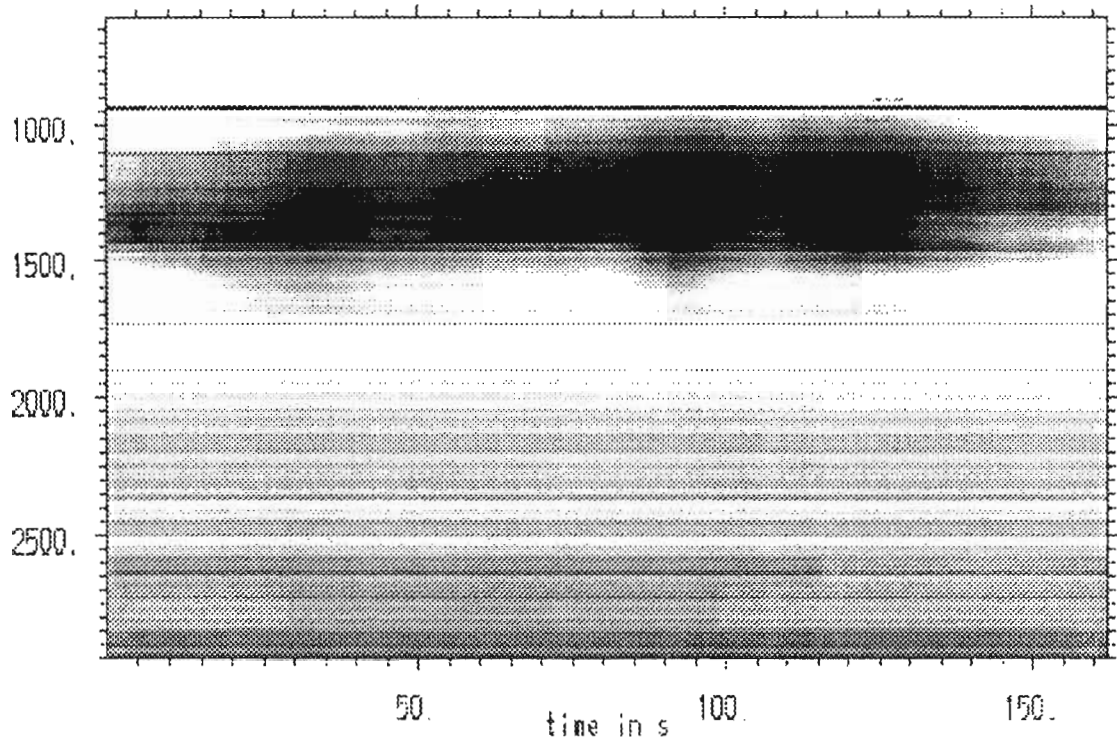
g170004: 93/OCT/03, 09:27:48



g180002: 93/OUT/03, 12:42:08



g19i: 93/OCT/20, 09:53:50



g201: 93/DEC/01, 11:12:44

