

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5371-TDI/470

ESTRUTURA FINA SUPERPOSTA EM ESPECTROS DE REGIÃO ATIVA SOLAR
EM COMPRIMENTOS DE ONDA MM (23 - 18 GHz)

José Roberto Cecatto

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Radioastronomia e
Física Solar, orientada pelo Dr. Hanumant Shankar Sawant, aprovada em
dezembro de 1990.

INPE
Sao José dos Campos
Fevereiro de 1991

523.9

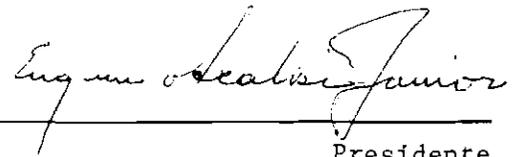
CECATTO, J.R.

Estrutura fina superposta em espectros de região ativa solar em comprimentos de onda MM (23-18 GHz). / J.R. Cecatto. -- São José dos Campos: INPE, 1991. 124p. (INPE-5371-TDI/470)

1. Estrutura fina. 2. Espectro. 3. Região ativa. 4. Título

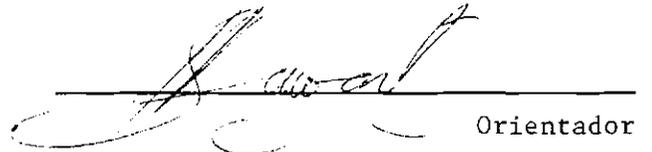
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência Espacial

Dr. Eugênio Scalise Júnior



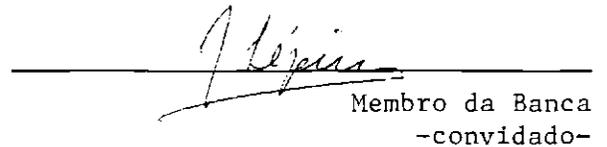
Presidente

Dr. Hanumant Shankar Sawant



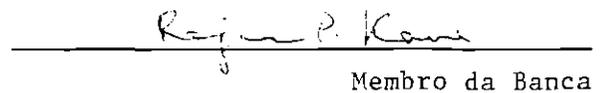
Orientador

Dr. Jacques Raymond Daniel Lépine



Membro da Banca
-convidado-

Dr. Rajaram P. Kane



Membro da Banca

Candidato: José Roberto Cecatto

São José dos Campos, 07 de dezembro de 1990

RESUMO

Um radiômetro de frequência variável com resolução em frequência de 1 GHz e resolução temporal de (0,6 - 16) segundos, operando em comprimentos de onda milimétricos, foi desenvolvido em conjunto com uma antena de 13,7 metros de diâmetro. Aqui, este novo radiômetro, os procedimentos de calibração e observações de região ativa são descritos em detalhes. As observações de região ativa foram efetuadas utilizando-se o radiômetro milimétrico. Até agora, os espectros de quatro regiões ativas foram observados. Dois destes espectros exibiram estruturas finas em frequência, tanto em emissão quanto em absorção, da ordem de 2 GHz de largura e com amplitude 100% do valor de fluxo original, permanecendo por cerca de meia hora. Os espectros do 'centro' do Sol e aqueles de regiões ativas foram interpretados em termos de 'bremsstrahlung' como um processo de emissão. A estrutura fina em absorção foi interpretada em termos da presença de uma 'lâmina de corrente neutra' entre a radiofonte e o observador. A estrutura fina em emissão superposta foi discutida em termos de dois possíveis mecanismos: 1) a emissão de linha de ciclotron e 2) o registro em rádio de um misterioso platô de temperatura na cromosfera.

FINE STRUCTURE SUPERIMPOSED ON MM-WAVELENGTH (18 - 23 GHz) SPECTRA OF
SOLAR ACTIVE REGION

ABSTRACT

A mm- λ , 23 - 18 GHz, variable frequency radiometer with frequency resolution of 1 GHz and time resolution of (0.6 - 16) sec has been developed in conjunction with a 13.7 meter diameter antenna. Here, this new radiometer, the procedures of calibration and observations of active region are described in details. Observations of active region have been carried out using the mm- λ radiometer. So far, spectra of four active regions have been observed. Two of these spectra have exhibited frequency fine structures in emission as well as in absorption, of the order of 2 GHz wide in frequency and in amplitude \leq 100% of the original flux value, lasting for about half an hour. The spectra of the center of the sun and those of the active region have been interpreted in terms of 'bremsstrahlung' as a process of emission. Fine structure in absorption has been interpreted in terms of presence of a neutral current sheet between the radio source and the observer. The superimposed fine structure in emission has been discussed in terms of two possible mechanisms: 1) the emission of cyclotron line and 2) the radio signature of a mysterious temperature plateau in the chromosphere.

AGRADECIMENTOS

Espero conseguir expressar minha eterna gratidão às pessoas que estiveram ao meu lado durante o período de elaboração desta tese.

Ao meu orientador Dr. H. S. Sawant pela atenciosa orientação.

Ao Dr. R. P. Kane pelas sugestões de grande valia para este trabalho.

À equipe técnica do ROI que desenvolveu o radiômetro de frequência variável utilizado na coleta de dados para este trabalho.

Ao engenheiro J. A. C. F. Neri e ao estagiário D. Martinazzo pelo auxílio no tratamento e digitalização dos dados coletados.

A J. A. Cecatto, M. E. B. Cecatto e a meus irmãos pelo auxílio, apoio e encorajamento para a realização deste trabalho.

Ao Dr. V. P. Nefedyev pelas sugestões úteis.

Ao Dr. A. M. Uralov pelas sugestões úteis.

Aos colegas do INPE pelo carinho e dedicação com que sempre me acolheram.

Agradeço também ao CNPq pelo período de bolsa concedido e ao INPE pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
<u>CAPITULO 1 - ESTUDOS DE 'COMPONENTE LENTAMENTE VARIÁVEL' SOLAR</u>	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Estudos de 'Componente lentamente variável' com alta resolu- ção espacial	4
1.3 - Resolução espectral (em frequência)	11
1.4 - Resoluções espectral, espacial e temporal	15
1.5 - Modelo de região ativa solar	17
1.6 - Mecanismos de emissão	18
1.6.1 - Espectro de frequência de bremsstrahlung	19
1.6.2 - Espectro de emissão girosíncrotron	20
1.7 - O problema	22
<u>CAPITULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO</u>	26
2.1 - Introdução	26
2.2 - Observações de região ativa	28
2.3 - Calibração da largura do feixe da antena dentro da faixa de 18 a 23 GHz	29
2.4 - Receptor de frequência variável	33
2.5 - Calibração	38
2.6 - Método observacional	39
2.7 - Observações espectrais de regiões ativas solares	43
2.8 - Tratamento e digitalização de dados	46
2.9 - Observações de explosões solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz	47

<u>CAPITULO 3 - ESTRUTURA FINA SUPERPOSTA ACIMA DOS ESPECTROS DE</u> <u>REGIÕES ATIVAS SOLARES</u>	51
3.1 - Observações espectrais solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz	51
3.2 - Espectros do 'centro' do Sol	51
3.3 - Espectros de regiões ativas solares	54
3.4 - Espectros de região ativa solar sem estrutura fina em fre- quência.....	57
3.4.1 - Espectros da região ativa RA5025 (S22E49)	57
3.5 - Espectros de regiões ativas solares exibindo estruturas finas em frequências (estruturas de absorção e emissão).....	62
3.5.1 - Espectro da região ativa RA5536 (N17W50)	62
3.5.2 - Espectro da região ativa RA5569 (N18W08)	68
<u>CAPITULO 4 - INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÕES</u>	75
4.1 - Interpretação dos espectros do 'centro' do Sol	75
4.2 - Interpretação dos espectros da 'componente lentamente variá- vel' de regiões ativas solares	76
4.3 - Interpretação da estrutura fina	78
4.3.1 - Estrutura fina de absorção	79
4.3.1.1 - Para o dia 19/06/89 - RA5536	79
4.3.1.2 - Para o dia 29/06/89 - RA5569	80
4.3.2 - Estrutura fina de emissão para o dia 29/06/89 - RA5569	83
4.3.2.1 - Sugestão I - Linha de ciclotron	83
4.3.2.1 - Sugestão II - Patamar no perfil de temperatura cromosféri- ca	86
4.4 - Conclusões e perspectivas	95
4.5 - Sugestões para observações futuras	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 - Média do fluxo solar em microondas para um período de 6 meses, exibindo as variações de cerca de 27 dias da 'componente S'	2
1.2 - a) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função da área da mancha solar (em unidades de 10^{-6} do hemisfério solar) com um feixe esférico; b) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função da área da mancha solar com um feixe com resolução de 1,5' de arco na direção NS; c) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função do campo magnético	3
1.3 - Espectro de uma fonte de área 10^{-3} do hemisfério solar mostrando um pico de fluxo entre 2 e 4 GHz	5
1.4 - Espectros da densidade de fluxo da 'componente S' obtidos estatisticamente a partir de observações do fluxo total em 1000, 2000, 3750 e 9400 MHz; todos exibindo um pico em torno de 5000 MHz. As curvas A foram obtidas pelas densidades de fluxo em 1000 2000 e 9400 MHz graficadas em função da densidade de de fluxo em 3750 MHz. A curva B é o espectro de uma mancha solar de 10^{-3} de área obtido a partir das densidades de fluxo nas 4 freqüências dadas acima. A curva C é o espectro nas 4 freqüências dadas obtido por observações de eclipse solar ...	6
1.5 - Mapas de síntese da intensidade total (I) em VLA, no comprimento de onda de 6 cm, mostrando os vários núcleos intensos de uma fonte (região ativa) separados por cerca de 1' de arco ..	10
1.6 - Espectro da 'componente S' de regiões ativas nos comprimentos de onda: 2, 4, 6, 8, 13 e 17 mm; mostrando a dependência com λ^{-2} na faixa de 2 a 6 mm e um espectro quase plano entre 8 e 17 mm	11
1.7 - Espectro em rádio de uma fonte local associada com uma região ativa exibindo estrutura fina em freqüência (150 - 400 MHz) na faixa de 5 a 7 GHz	13

1.8 - Espectro em rádio de uma fonte local associada com uma região ativa exibindo estrutura fina em frequência (150 - 400 MHz) na faixa de 8,5 a 10,5 GHz	14
1.9 - a) Temperatura de brilho em função da frequência para a região ativa RA4398 - 28/01/84 - mostrando a variação na temperatura de brilho de $\approx 1,5 \times 10^6$ K em 1440 MHz a $\approx 4,0 \times 10^6$ K em 1658 MHz; b) Temperatura de brilho em função da frequência para a região RA4398 - 29/01/84 - mostrando a variação de $\approx 1,5 \times 10^6$ K em 1440 MHz a $4,0 \times 10^6$ K em 1658 MHz	16
1.10 - Modelo simplificado de região ativa solar, mostrando as dependências da densidade e temperatura ambientes com a altura e os parâmetros físicos da região ativa (a figura não está em escala)	18
2.1 - Formato dos dados obtidos com o radiômetro de frequência variável, gravados em 3 canais de um gravador AMPEX PR2230 e armazenados em fitas magnéticas	30
2.2 - a) Largura do feixe da antena do ROI em função da frequência de observação tomado em elevação; b) Largura do feixe da antena em função da frequência de observação em azimute	32
2.3 - Diagrama de blocos da instrumentação atual disponível no ROI, utilizada para observações solares com o radiômetro de frequência variável operando na faixa de frequências de 18 a 23 GHz	34
2.4 - Resolução angular da antena do ROI na faixa de microondas em função da porcentagem da região ativa solar acima do nível do Sol 'calmo'	36
2.5 - Sensibilidade do receptor em função da porcentagem da região ativa solar acima do nível do Sol 'calmo'	37
2.6 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI em sua forma digitalizada	40
2.7 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI, inicialmente em sua forma digitalizada e processado para seu formato analógico. A temperatura de antena para a região ativa RA5528 em 22 GHz foi de 8655 K - 14/06/89 - as isotermas foram to	

madas a cada ≈ 200 K, exceto aquelas 3 externas as quais correspondem a 50%, 75% e 88%, respectivamente, do nível de Sol 'calmo'	41
2.8 - Dados de observações solares, obtidos com o radiômetro de frequência variável, operando na faixa de 18 a 23 GHz, e posteriormente digitalizados (com a placa PC-ADDA 12) com os sinais de todas as frequências dispostos em formato paralelo ..	49
2.9 - a) Evento de 30 de junho de 1989 observado em Atibaia, nas frequências de 18 a 23 GHz; b) Evento correspondente observado pelo satélite SMM - USA, em Raios-X	50
3.1 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 13/05/90, obtido no ROI em seu formato analógico. A seta indica a posição da região ativa observada RA6064 e suas coordenadas heliográficas	52
3.2 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 13/05/90. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol	53
3.3 - Espectro da região ativa solar RA6064, com sua evolução temporal por ≈ 1 hora de observação para o dia 13/05/90	54
3.4 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 22/05/88, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5025 e suas coordenadas heliográficas	55
3.5 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 19/06/89, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5536 e suas coordenadas heliográficas	55
3.6 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 29/06/89, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5569 e suas coordenadas heliográficas	56
3.7 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 22/05/88, tomado como uma média de 40 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol	58
3.8 - Perfil temporal do fluxo em raios-X moles para o dia 22/05/88 obtido com o detector de raios-X do satélite GOES-7	59
3.9 - (a - j) Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5025 obtidos na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para o	

dia 22/05/88 das 15:30 às 17:10 UT	60
3.10 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 19/06/89 tomado como uma média de 5 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol	63
3.11 - Perfil temporal do fluxo em raios-X moles para o dia 19/06/89, obtido com o detector de raios-X do satélite GOES-7	64
3.12 - (a - j) Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5536 obtidos na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para o dia 19/06/89 das 12:30 às 14:38 UT	65
3.13 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 29/06/89 tomado como uma média de 20 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol	69
3.14 - Perfil temporal do fluxo em raios-X moles para o dia 29/06/89, obtido com o detector de raios-X do satélite GOES-7	70
3.15 - (a - l) Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5569 obtidos na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para o dia 29/06/89 das 12:16 às 17:08 UT	71
4.1 - (a - f) Variação da densidade de fluxo para cada frequência correspondente ao intervalo de observações da região ativa solar RA5569	81
4.2 - (a - d) Variação relativa da diferença das densidades de fluxo da região ativa solar para aquela do 'centro' do Sol com relação aos 10 primeiros minutos de observações	82
4.3 - Perfil de temperatura cromosférico e coronal com a altura acima da fotosfera obtido sem resolução suficiente	86
4.4 - Modelo de Vernazza et alii (1981), para o perfil de temperatura cromosférico obtido a partir de resultados em Lyman- α e EUV	87
4.5 - Modelo de Lites e Skumanich (1982), para o perfil de temperatura com a altura acima da fotosfera para manchas solares e plages, em alturas correspondentes à cromosfera	88

4.6 - Espectro de densidade de fluxo calculado para a radiação proveniente de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, exibindo as 4 variantes do espectro que apresentaram estruturas finas superpostas ao espectro térmico de emissão	90
4.7 - Espectro de temperatura de brilho calculado para a radiação proveniente de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, exibindo as 4 variantes do espectro que apresentam estruturas finas superpostas ao espectro térmico de emissão	91

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Instrumentação atual existente em microondas para observações solares	27
2.2 - Temperatura de sistema	28
2.3 - Largura do feixe da antena	31
2.4 - Área efetiva da antena	35
2.5 - Temperatura da fonte de ruído (NOISE-COM)	38
3.1 - Decréscimo da densidade de fluxo para a RA5025	61
3.2 - Decréscimo da densidade de fluxo por unidade de tempo para a RA5025	61
3.3 - Variação da densidade de fluxo para a RA5536	66
3.4 - Variação da densidade de fluxo por unidade de tempo para a RA5536	67
3.5 - Variação da densidade de fluxo para a RA5569	72
3.6 - Variação da densidade de fluxo por unidade de tempo para a RA5569	73

LISTA DE SÍMBOLOS

$I_{\omega_{1,2}}$	- intensidade de emissão para os modos extraordinário (1) e ordinário (2);
I_o	- intensidade de emissão no vácuo;
$\tau_{1,2}$	- profundidade óptica para os modos extraordinário (1) e ordinário (2);
$T_{eff_{1,2}}$	- temperatura efetiva de bremsstrahlung para uma camada à temperatura T;
T	- temperatura dos eletrons numa camada da atmosfera solar a uma altura h acima da fotosfera;
h	- altura acima da fotosfera;
k	- constante de Boltzmann;
ω	- freqüência angular de observação;
c	- velocidade da luz;
ω_o	- freqüência angular de plasma;
ν_{eff}	- freqüência efetiva de colisão eletrôn-ion;
$n_{1,2}$	- índice de refração para a radiação nos modos extraordinário (1) e ordinário (2), respectivamente;
α	- ângulo entre a direção do campo magnético na fonte observada e a direção de propagação da radiação para o observador;
ω_H	- girofreqüência num local de campo magnético de intensidade H_o ;
N_e	- densidade de eletrons em cm^{-3} ;
λ	- comprimento de onda da radiação correspondente à freqüência f;
S	- densidade de fluxo da radiação observado;
I	- intensidade total de emissão;
Ω	- tamanho angular da fonte observada;
e	- carga do eletrôn;
m	- massa do eletrôn;
H	- intensidade do campo magnético local;
s	- número do harmônico da girofreqüência;
$\tau_{s_{o,e}}$	- profundidade óptica da radiação no s-ésimo harmônico da

	girofreqüência para os modos ordinário e extraordinário, respectivamente;
β_T	- razão da velocidade térmica dos eletrons no meio para a velocidade da luz;
v_T	- velocidade térmica dos eletrons no meio ambiente;
$\eta_{o,e}$	- índice de refração do meio para a radiação girossíncrotron nos modos ordinário e extraordinário, respectivamente;
L_H	- escala de altura do campo magnético H na direção de propagação;
dH/dl	- variação do campo magnético com a distância ao longo da linha de visada;
ω_L	- freqüência de plasma local;
T_e	- temperatura dos eletrons;
τ_B	- profundidade óptica para bremsstrahlung térmico;
$\tau_{B_{o,e}}$	- profundidade óptica para os modos ordinário e extraordinário devido a bremsstrahlung térmico;
L	- tamanho da fonte emissora;
ν	- freqüência de observação;
ΔS_{min}	- densidade de fluxo mínima detectada pelo receptor;
Δf	- largura de banda de freqüência do receptor;
τ	- constante de tempo de integração do sistema;
T_{amb}	- temperatura ambiente;
T_{sis}	- temperatura de sistema;
T_{back}	- temperatura do background;
T_{csol}	- temperatura do 'centro' do Sol (nível do Sol 'calmo');
$T_{ra}(\%)$	- temperatura da região ativa em porcentagem acima do nível do Sol 'calmo';
$A_e(f)$	- área efetiva da antena na freqüência de observação f;
θ_{az}	- largura do feixe em azimute;
θ_{el}	- largura do feixe em elevação;
ΔT_{min}	- temperatura mínima detectável pelo receptor;
$f(\theta_o)$	- padrão de potência da antena $\approx ((\text{sen } \theta)/\theta)^2$;
$T_{céu}$	- temperatura do céu;
T_{abs}	- temperatura do absorvedor de referência;

ΔT_{cal}	- amplitude de temperatura do absorvedor (calibrador);
ΔT_{fonte}	- amplitude de temperatura da fonte observada;
T_o	- temperatura corrigida da fonte observada;
f	- freqüência de observação;
$\Delta S/S$	- variação da densidade de fluxo em relação a seu valor original;
f_o	- freqüência de observação;
f_H	- girofreqüência num local de campo magnético de intensidade H;
$H(h)$	- intensidade do campo magnético numa altura h acima da fotosfera;
H_o	- intensidade de campo magnético a nível fotosférico;
b	- raio estimado da região ativa solar;
$N(h)$	- densidade dos eletrons numa altura h acima da fotosfera em cm^{-3} ;
$h(N_e)$	- altura acima da fotosfera correspondente à densidade N_e dos eletrons no interior da região ativa solar;
Φ	- densidade de fluxo da emissão;
T_B	- temperatura de brilho da emissão;
$\Omega(\omega)$	- tamanho angular da região ativa na freqüência angular de observação ω ;
$T_B(\lambda)$	- temperatura de brilho no comprimento de onda de observação λ ;
D	- constante dependente da freqüência de observação e do tamanho angular da fonte observada;
λ	- comprimento de onda de observação;
τ	- profundidade óptica;
$T(\tau)$	- dependência da temperatura com a profundidade óptica;
$\mu(\Gamma)$	- coeficiente de absorção para uma camada de altura Γ acima da fotosfera;
$\tau(\Gamma)$	- profundidade óptica para uma camada a uma altura Γ acima da fotosfera;
Γ	- altura de uma camada da atmosfera solar acima da fotosfera;
$T(\Gamma_\lambda)$	- temperatura para uma camada de altura Γ acima da fotosfera observada no comprimento de onda λ ;

$\tau(\Gamma_\lambda)$	- profundidade óptica de uma camada a uma altura Γ acima da fotosfera observada no comprimento de onda λ ;
Γ_λ	- camada de raio Γ que emite no comprimento de onda λ ;
T_p	- temperatura do patamar de temperatura cromosférico;
μ	- coeficiente de absorção;
ν_{ei}	- frequência de colisão elétron-íon;
ν_{emolec}	- frequência de colisão elétron-molécula neutra;
n	- índice de refração para a radiação;
$N(\Gamma)$	- densidade dos elétrons na camada Γ ;
$\Delta\Gamma_p$	- largura do patamar de temperatura cromosférico;
$N(r)$	- dependência da densidade dos elétrons com a altura;
$\Delta\lambda_p$	- largura de banda da estrutura fina em frequência correspondente ao patamar de temperatura cromosférico;
λ_p	- comprimento de onda médio correspondente à estrutura fina em frequência observada na faixa de 18 a 23 GHz;
μ_{ff}^{-1}	- profundidade de penetração da radiação na região do patamar;
Φ_0	- densidade de fluxo média na faixa de frequências de 18 a 23 GHz;
$\Delta\Phi$	- variação da densidade de fluxo com relação ao nível médio na faixa de 18 a 23 GHz;
$\Delta\Phi/\Phi_0$	- variação relativa da densidade de fluxo comparada ao nível médio da densidade de fluxo na faixa de 18 a 23 GHz.

CAPÍTULO 1

ESTUDOS DE 'COMPONENTE LENTAMENTE VARIÁVEL' SOLAR

1.1 - INTRODUÇÃO

A designação de 'componente lentamente variável' ou 'componente S' surgiu originalmente das observações de Covington (1946) da emissão solar em rádio, tomando o Sol inteiro (HPBW \geq 30'), efetuadas em uma única frequência fixa (2800 MHz) na região de ondas centimétricas; desde então medições sistemáticas da emissão solar em rádio nessa faixa de frequências foram feitas.

Basicamente, a 'componente lentamente variável' origina-se em regiões locais acima de manchas solares e plages cromosféricas, caracterizadas por valores elevados de densidade de eletrons, temperatura e campo magnético em relação ao meio circundante. Estendem-se da cromosfera até a baixa coroa e relacionam-se à ocorrência de condensações coronais (Piddington e Minnett, 1951). Através de medidas sistemáticas da emissão solar em rádio verificou-se uma variabilidade lenta no fluxo solar integrado diário mostrada na Figura 1.1, e que esta variabilidade apresentava um caráter periódico cujo período correspondia a uma rotação solar, cerca de 27 dias. (Piddington e Minnett, 1951)

Observou-se também que esta variabilidade estava relacionada ao excesso de emissão solar em rádio originado nas regiões ativas existentes no disco solar, estas últimas associadas a manchas solares ou fáculas brilhantes situadas na baixa cromosfera. Verificou-se além disso (Kakinuma e Swarup, 1962), uma correlação direta da componente variável com a área e campo magnético de manchas presentes no disco solar para ondas de rádio centimétricas Figura 1.2.

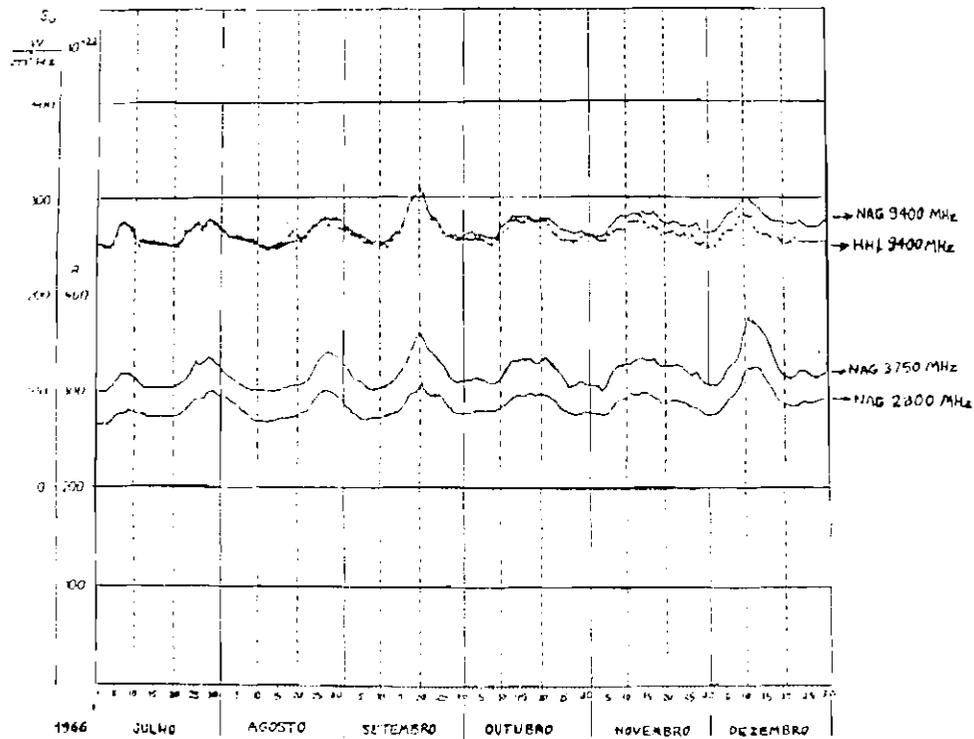


Fig. 1.1 - Média diária do fluxo solar em microondas para um período de 6 meses, exibindo as variações de cerca de 27 dias da 'componente S'.

FONTE: Kruger (1979), p. 65.

Estudos de Smerd (1965) em ondas centimétricas (3 - 10 cm) também mostraram que a temperatura de brilho aparente de todo o disco solar era constituída de um nível de fundo (a chamada temperatura do Sol 'calmo') adicionado a este havia uma contribuição a qual, a grosso modo, era proporcional à soma das áreas das manchas solares presentes no disco solar.

Uma compreensão melhor da 'componente lentamente variável' exigia informações sobre: posição, tamanho, e altura das fontes; temperatura de brilho, variação centro-limbo e diretividade da emissão. Desde o início das observações solares até o presente vários grupos de pesquisa estão frequentemente tentando obter essas informações melhorando cada vez mais as capacidades das

instrumentações.

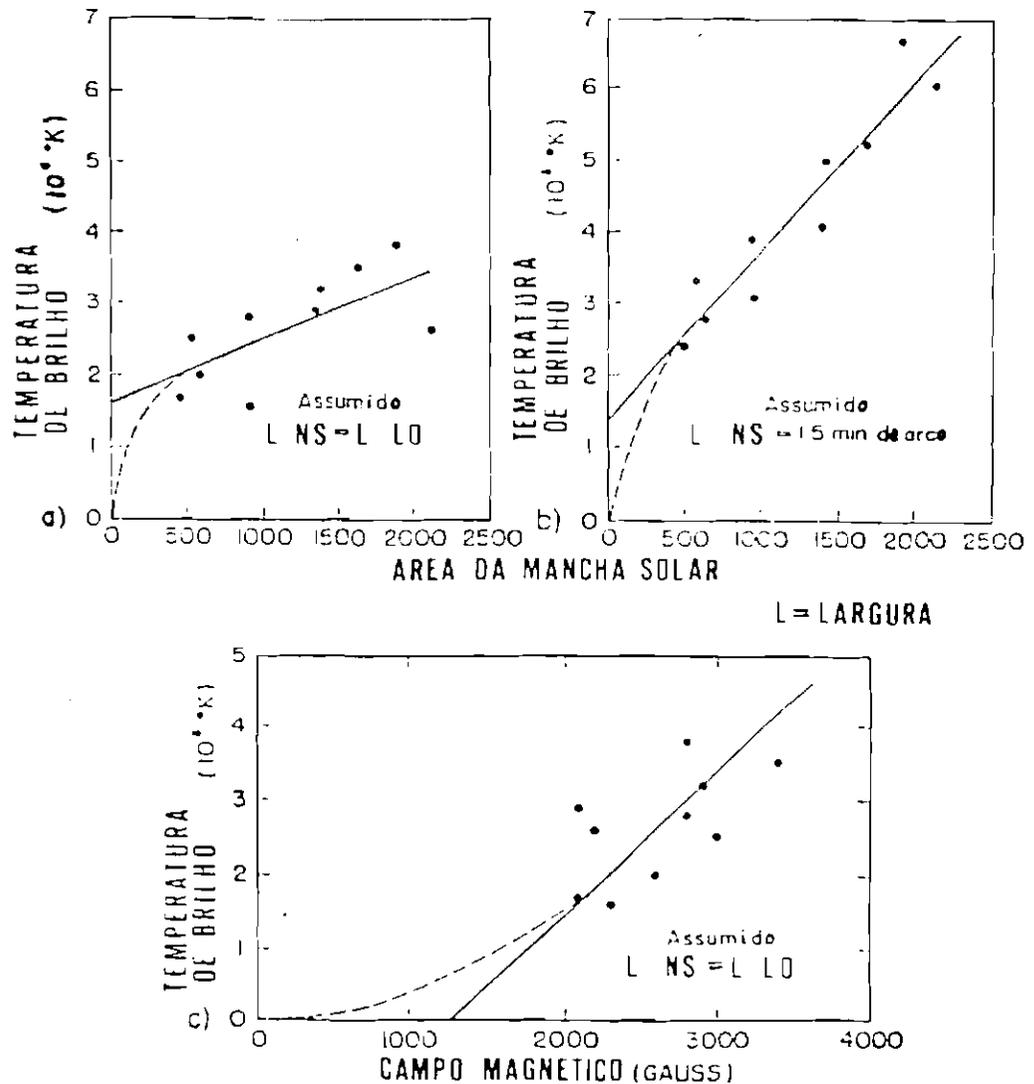


Fig. 1.2 - a) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função da área da mancha solar (em unidades de 10^{-6} do hemisfério solar) com um feixe esférico; b) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função da área da mancha solar com um feixe com resolução de 1,5' de arco na direção NS; c) Temperatura de brilho em rádio em 10,7 cm graficada em função do campo magnético.

FONTE: Swarup et al. (1962).

1.2 - ESTUDOS DE 'COMPONENTE LENTAMENTE VARIÁVEL' COM ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL

Após a associação da 'componente lentamente variável' com regiões ativas solares a partir das observações de Covington citadas acima, no fim dos anos 50 e início da década de 60 iniciaram-se observações solares da 'componente lentamente variável' de regiões ativas por meio de interferômetros e através de eclipses solares (Tanaka e Kakinuma, 1958; Swarup et al., 1962).

Nessa época, as instrumentações começavam a sofrer algumas modificações com respeito à sua resolução tanto espacial quanto em frequência. Isto possibilitou um avanço em direção a resultados mais precisos e confiáveis, além de algumas descobertas totalmente novas - com relação a tamanho, altura, temperatura, densidade e quanto à distribuição destes parâmetros na fonte - as quais não eram possíveis com a instrumentação limitada de que se dispunha até então.

As observações interferométricas de Kakinuma e Swarup (1962) efetuadas com resolução de minutos de arco ($1' < \text{HPBW} < 5'$) em 4 comprimentos de onda distintos - 3,2; 7,5; 9,1; 10,7 cm - mostraram que as densidades de fluxo de fontes intensas eram mais altas em comprimentos de onda maiores do que 3 cm, e investigações de eclipse (Tanaka e Kakinuma, 1958; Christiansen e Mathewson, 1958; Kundu, 1959; Korolkov, et al., 1960) indicaram que o espectro da densidade de fluxo possuía um pico em torno de 6 cm, Figura 1.3.

Observações interferométricas e com feixe relativamente estreito (cerca de $2'$ de arco) têm mostrado contribuições de núcleo e auréola à 'componente lentamente variável' em 3,2 cm (Kundu, 1959), em 9,1 cm (Swarup, 1961), em 8 mm (Salomonovich, 1962), com o núcleo intimamente associado com o centróide de um grupo de manchas, e a auréola estando distribuída sobre a região de plage (praia). O espectro da região do núcleo tem um pico entre 3 e 10 cm, com rápidos declínios abaixo de 2 cm e acima de 10 cm (Kundu, 1965).

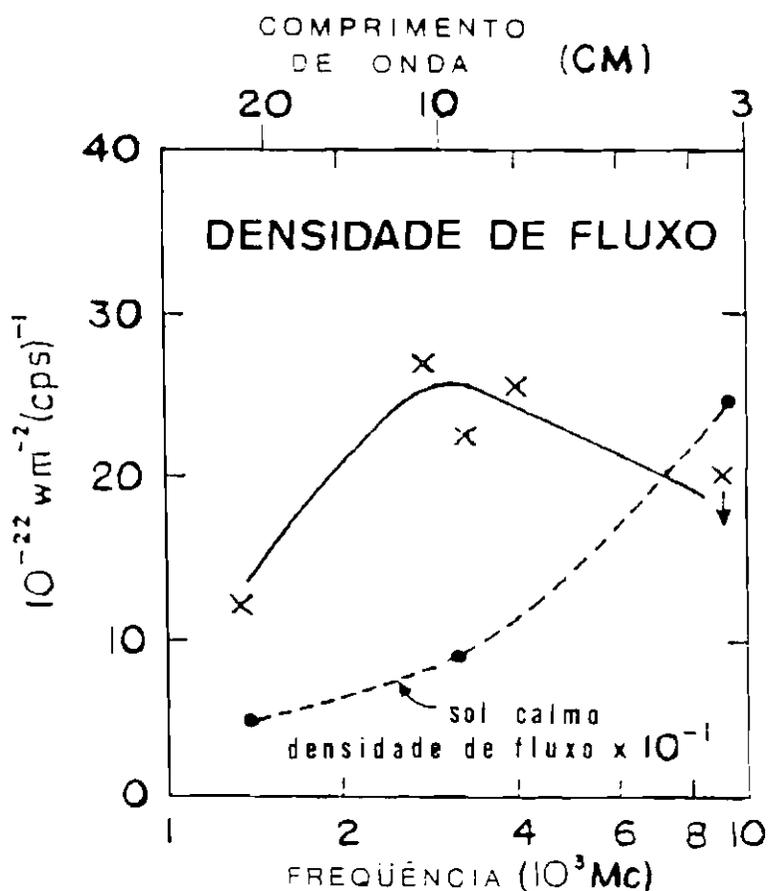


Fig. 1.3 - Espectro de uma fonte de área 10^{-6} do hemisfério solar mostrando um pico de fluxo entre 2 e 4 GHz.

FONTE: Swarup et al. (1962).

A radioemissão dessas fontes era circularmente polarizada e dependente do comprimento de onda variando de cerca de 20-30% entre 3-7 cm a cerca de 10% em 10 cm e a $\leq 2\%$ em 21 cm (Kakinuma e Swarup, 1962), correspondente à onda no modo extraordinário (Zheleznyakov, 1970).

Swarup et al. (1962) efetuaram um estudo mais extenso tomando observações inteferométricas de 10 fontes anexando dados em 21 cm além dos comprimentos de onda usados anteriormente por Kakinuma e Swarup (1962) Figura 1.4.

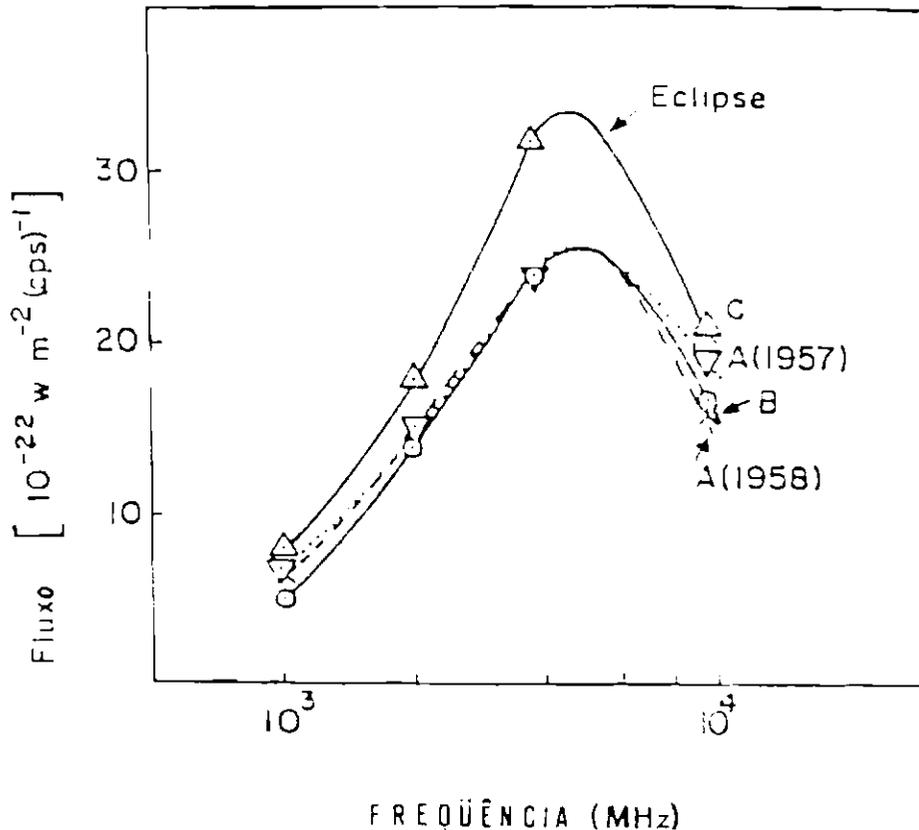


Fig. 1.4 - Espectros da densidade de fluxo da 'componente S' obtidos estatisticamente de observações do fluxo total em 1000, 2000, 3750 e 9400 MHz; todas exibindo um pico em torno de 5000 MHz. As curvas A foram obtidas pelas densidades de fluxo em 1000, 2000 e 9400 MHz em função da densidade de fluxo em 3750 MHz. A curva B e o espectro de uma mancha solar de 10^{-3} de área obtido das densidades de fluxo nas 4 frequências acima. A curva C é o espectro nas 4 frequências obtido por observações de eclipse solar.

FONTE: Kakinuma e Swarup (1962).

As regiões ativas estudadas possuíam áreas maiores do que 0,5 milésimo do hemisfério solar. As fontes estavam situadas em alturas de $10^4 - 9 \times 10^4$ km acima da fotosfera, sendo as alturas crescentes com o comprimento de onda. As temperaturas de brilho apresentadas por estas fontes estavam na faixa de $1 - 4 \times 10^6$ K, sendo sua emissão basicamente de origem térmica. O tamanho das fontes intensas podia ser de 2' - 3'

entre 3 - 10 cm (Kakinuma e Swarup, 1962; Zlotnik, 1968b) limitado pela resolução espacial existente naquela época a qual era dessa ordem de grandeza.

Verificou-se que os fluxos apresentavam valores mais altos próximo a 10 cm do que em 3 cm ou 21 cm, apresentando um pico em torno de 6 cm - a resolução espacial dos 4 interferômetros utilizados (Nagoya, Stanford, Ottawa e Sydney) estava na faixa de 1' - 3' de arco (Swarup et al., 1962) - contudo, a posição do máximo poderia diferir, dependendo tanto das condições físicas na região de emissão quanto do estágio evolutivo das fontes, situando-se na faixa de 5 - 10 cm (Zlotnik, 1968a; Zheleznyakov, 1964).

Sabia-se que a determinação da temperatura de brilho (temperatura de um corpo negro com o brilho superficial medido na frequência de observação) necessitava que as fontes de microondas fossem espacialmente resolvidas uma vez que a área destas deveria ser bem conhecida para o cálculo de T_b . Estas observações com resolução espacial permitiam que a radiação de microondas operasse como um instrumento de diagnóstico dos parâmetros físicos da fonte.

As observações do início dos anos 70, utilizando interferometria de baixa resolução espacial tiveram como resultado que a 'componente lentamente variável' da radiação solar em microondas encontrava-se associada com regiões ativas e identificou-se uma estrutura núcleo-halo. Por meio de medidas de polarização verificou-se que toda região ativa é bipolar quando observada com resolução suficiente (< 1' de arco) a despeito de seu aspecto uniforme quando observada sem polarização e com baixa resolução (Kundu e McCulloch, 1972a). Observações posteriores de vários grupos (Kundu et al. 1977; Schmahl, 1980) mostraram uma coincidência aproximada entre a emissão abrilhantada e as posições das manchas solares.

As observações interferométricas no NRAO (National Radio Astronomy Observatory - U.S.A.) em 3,7 cm (3' de arco) e 11,1 cm (9' de arco) foram discutidas por Kundu et al. (1980). Obtiveram-se

temperaturas de brilho de 2 a 3×10^6 K e campos magnéticos de cerca de 300 G, e a emissão correspondendo ao 2^o, 3^o ou 4^o harmônicos da girofrequência no modo extraordinário em 3,7 cm.

Observações em Stanford (Pallavicini et al., 1979) mostraram que os núcleos comumente cobrem as manchas solares dentro de uma resolução de 16'' de arco. Essa emissão em microondas normalmente culmina próximo à umbra da mancha solar, o que tem sido amplamente confirmado por observações com alta resolução espacial utilizando o arranjo do WSRT - Westerbork Synthesis Radio Telescope - (Alissandrakis, 1975; Kundu et al., 1977), pelo VLA - Very Large Array - (Lang e Willson, 1979; Kundu e Velusamy, 1980), pelo RATAN-600 (Pariiskii et al., 1976) e em épocas de eclipse (Boldyrev et al., 1978).

Kundu e Alissandrakis (1975), Kundu et al. (1977) obtiveram os primeiros mapas de síntese de regiões ativas solares usando o WSRT no comprimento de onda de 6 cm, os quais indicaram que a estrutura de regiões ativas no comprimento de onda de 6 cm é determinada principalmente pela estrutura e intensidade do campo magnético solar. Com o WSRT, mapas de síntese em 21 cm mostram fontes extensas ($\geq 2'$ de arco) com baixos graus de polarização circular ($\leq 5\%$) associadas com regiões ativas.

Em suma, combinando-se observações interferométricas em diferentes frequências obtiveram-se as principais características físicas da 'componente S': pico da densidade de fluxo entre 3 e 6 GHz, grau de polarização crescente com a frequência, altura da emissão entre 2 e 10×10^4 km acima da fotosfera, dimensões $\leq 2' - 3'$ de arco com estruturas internas $\leq 20''$ de arco, temperaturas de brilho dependentes tanto da área das manchas quanto do campo magnético em sua base.

Em meados da década de 70, iniciaram-se as primeiras observações de regiões ativas solares e sua emissão em rádio correspondente utilizando instrumentos de alta resolução espacial com dezenas de segundos de arco utilizando WSRT e VLA (Kundu e Alissandrakis, 1975; Kundu et al., 1977).

Observações de regiões ativas com VLA em 6 e 20 cm, com resolução espacial de 2'' a 15'' de arco, indicaram vários núcleos intensos no interior das regiões ativas, com diâmetros angulares de cerca de 0,5' de arco, temperaturas de brilho de cerca de 10^6 K, e polarização circular de 30% a 90%, com os núcleos fontes separados aproximadamente 1' de arco em cada região ativa, Figura 1.5.

A partir de observações em 6 e 20 cm, com resolução espacial suficiente para resolver dimensões dos núcleos numa escala de cerca de 10'' de arco mostrou-se que a temperatura de brilho dos núcleos normalmente encontrava-se na faixa de 2 a 5×10^6 K (Lang e Willson, 1979; Erskine et al., 1980; Kundu et al., 1981).

A partir da altura da emissão em comprimentos de onda centimétricos, cerca de 10^4 km (Felli et al., 1981) estimou-se uma escala de altura para o campo magnético de aproximadamente 10^4 km.

Melhorias na identificação espacial têm indicado a associação dos núcleos de emissão com as regiões de sombra (umbra) (Kundu et al., 1981). Outros núcleos de emissão têm sido associados com outras estruturas relacionadas a locais de aumento de fluxo magnético.

Durante os anos 80, pouco progresso foi feito com as observações da 'componente S' solar com relação às observações com alta resolução espacial. *Apesar da grande resolução angular alcançada (da ordem de décimos de segundo de arco), a resolução em frequência permaneceu muito limitada a duas ou três frequências discretas e separadas enquanto a resolução temporal não foi melhorada além de minutos ou dezenas de segundos.*

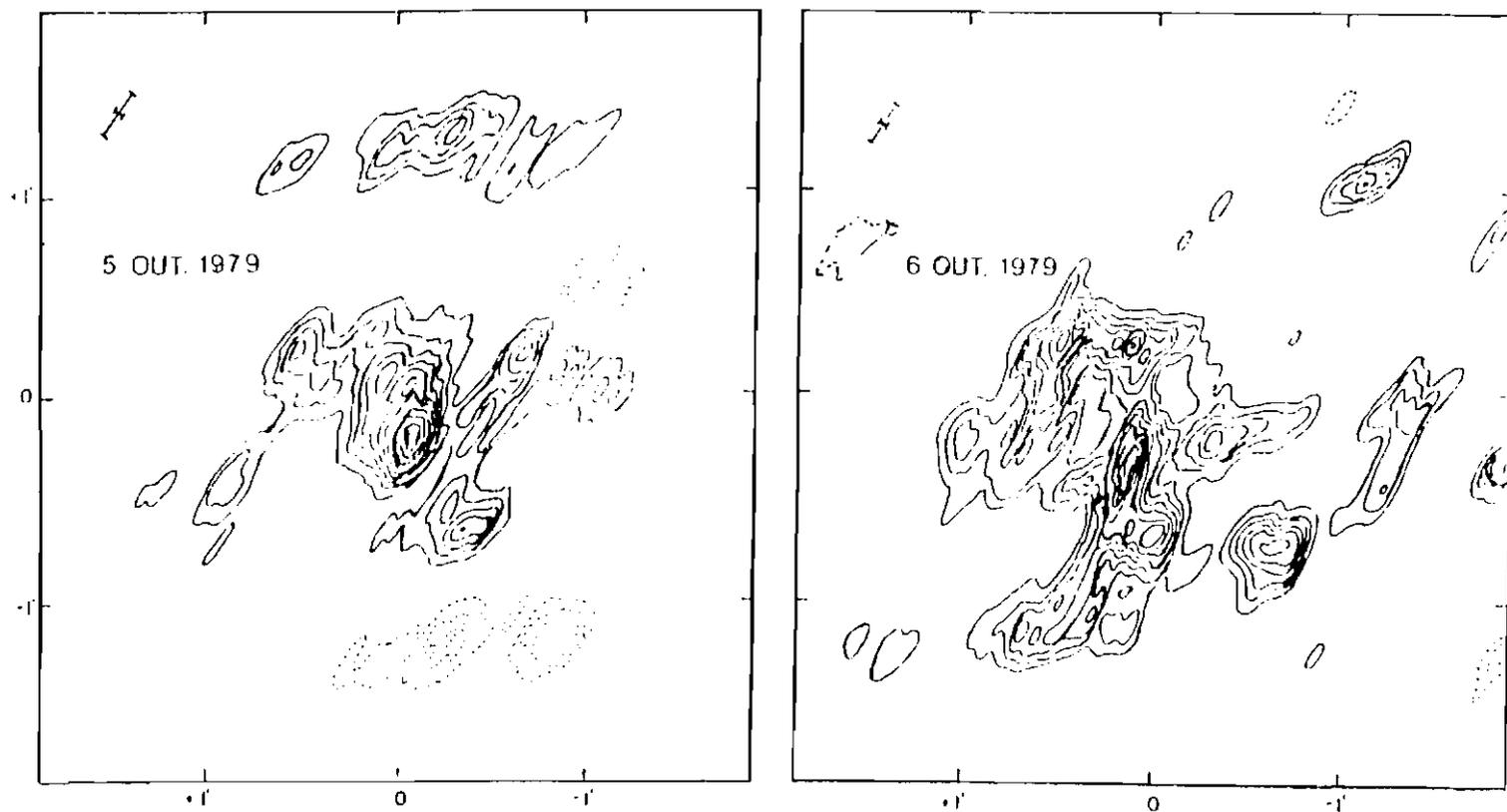


Fig. 1.5 - Mapas de síntese da intensidade total (I) em VLBA, no comprimento de onda de 6 cm mostrando os vários núcleos intensos de uma fonte (região ativa) separados por cerca de 1' de arco.

1.3 - RESOLUÇÃO ESPECTRAL (EM FREQUÊNCIA)

As primeiras observações espectrais da 'componente S' de regiões ativas solares com alta *resolução espectral* foram efetuadas por Efanov et al. (1969) utilizando um radiotelescópio de 22 metros operando em 6 frequências distintas na faixa de comprimentos de onda milimétricos (2, 4, 6, 8, 13, 17 mm) com resolução espacial na faixa de 1' - 3' de arco e sensibilidade entre 1 - 8 K (rms). Essas observações mostraram um aumento de até 20% na intensidade da região ativa solar em relação ao nível do Sol 'calmo'. Esse aumento variava proporcionalmente ao inverso do quadrado do comprimento de onda (λ^{-2}) dentro da faixa de 2 - 6 mm, enquanto na faixa de 6 - 17 mm foram observados espectros quase planos da 'componente S' das regiões ativas solares, Figura 1.6.

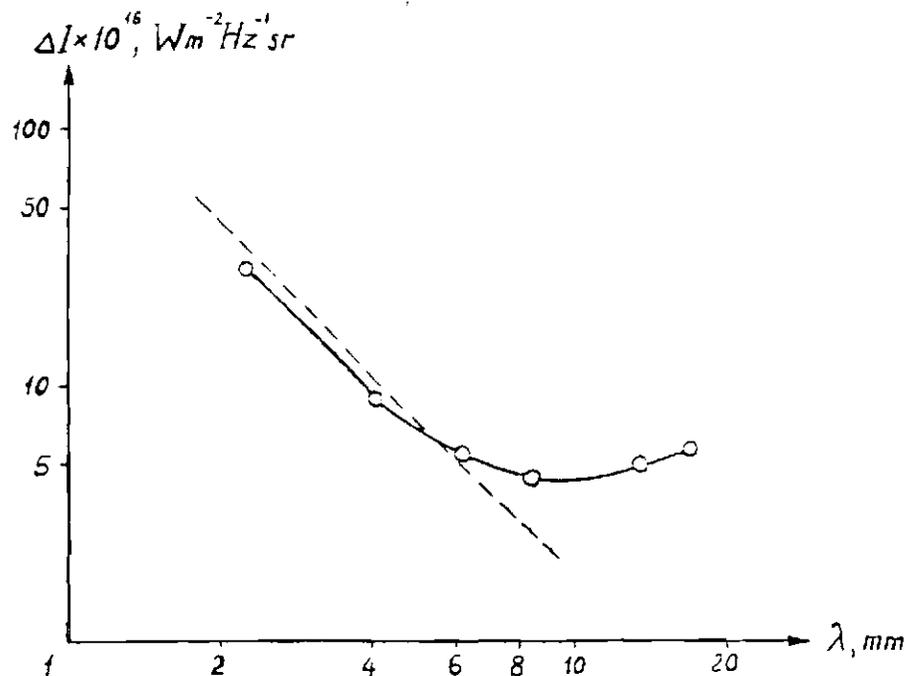


Fig. 1.6 - Espectro da 'componente S' de regiões ativas nos comprimentos de onda: 2, 4, 6, 8, 13 e 17 mm; mostrando a dependência com λ^{-2} na faixa de 2 a 6 mm e um espectro quase plano entre 8 e 17 mm.

FONTE: Efanov et al. (1972).

Outras medidas com alta resolução espectral foram efetuadas em 1971 (Kaverin et al., 1979) utilizando um espectrógrafo o qual operava na faixa de frequências de 6,0 a 7,0 GHz. Essas medidas revelaram a existência de estruturas finas em frequência de banda estreita (100 - 200 MHz) no espectro da 'componente S' e, também que essas estruturas dependiam da atividade solar.

Entende-se por estrutura fina no espectro, qualquer estrutura peculiar a qual surge em virtude de melhorias na capacidade de resolução observacional dos instrumentos existente até então, e que não permitia uma definição suficiente para as observações. *A estrutura fina pode ser observada nos perfis temporal ou espectral característicos da fonte observada.*

Medidas posteriores efetuadas com um radioespectrógrafo (Kaverin et al., 1976) operando em conjunto com o telescópio FIAN (22 m) na faixa de frequências 5,0 a 7,0 GHz com resolução em frequência de 60 MHz, resolução espacial de minutos de arco (11' em 5 GHz e 8' em 7 GHz), e sensibilidade de cerca de 1 K(rms), provenientes de fontes locais de radiação, indicaram a presença de estruturas finas de banda estreita (150 - 400 MHz) atingindo intensidades de até 20% acima do nível de radiação das fontes locais, Figura 1.7.

As mesmas medidas mostraram que a forma dessas estruturas finas se alterava com o tempo em intervalos de aproximadamente um dia ou menos de acordo com o processo de evolução da região ativa (Kaverin et al., 1979). Esses mesmos autores, acrescentaram posteriormente observações na faixa de frequências de 8,0 a 12,0 GHz à faixa anterior (5 - 7 GHz). Nesse intervalo (8 - 12 GHz), para a **maioria** das regiões ativas estudadas, não foram observadas quaisquer estruturas análogas àquelas obtidas para as mesmas regiões ativas estudadas anteriormente na faixa de 5 a 7 GHz, entretanto, uma região ativa exibiu estrutura fina em frequência entre 8 e 12 GHz (Kaverin et al., 1980). Essas estruturas finas tomam a forma de saltos no fluxo em rádio dentro de uma banda estreita de frequências medindo de 150 a 400 MHz; esses saltos podem atingir uma amplitude de até 20% da densidade média de

fluxo em rádio proveniente de fontes locais, Figura 1.8.

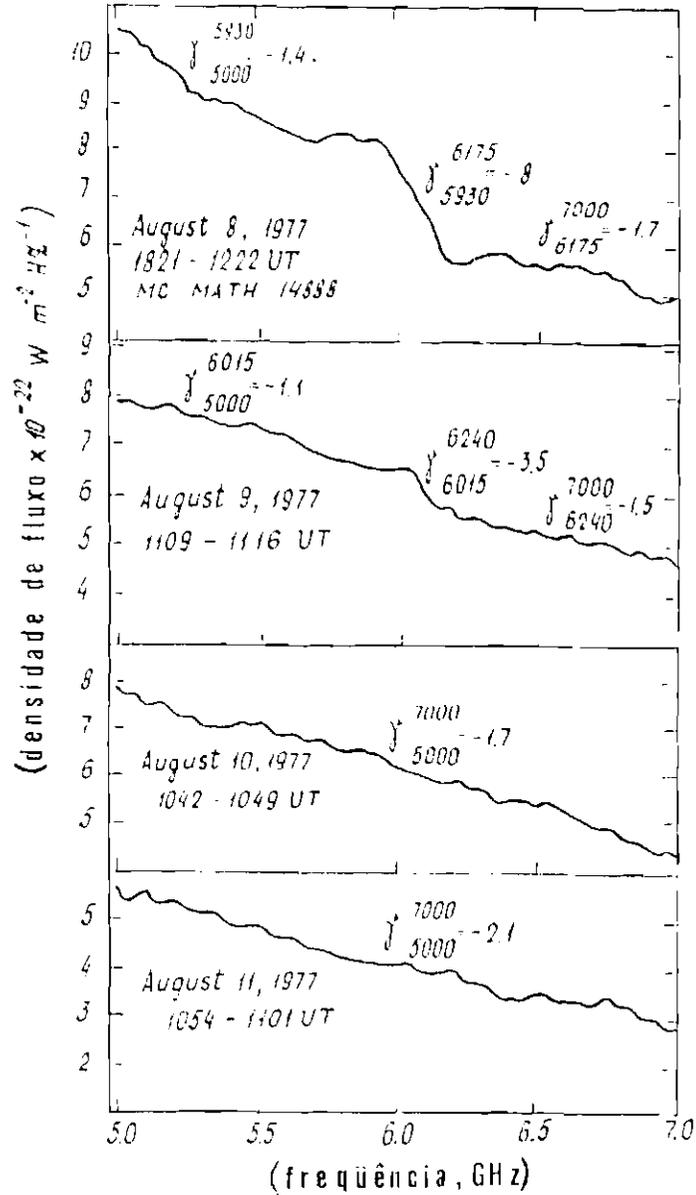


Fig. 1.7 - Espectro em rádio de uma fonte local associada com uma região ativa exibindo estrutura fina em frequência (150 - 400 MHz) na faixa de 5 a 7 GHz.

FONTE: Kaverin et al. (1979).

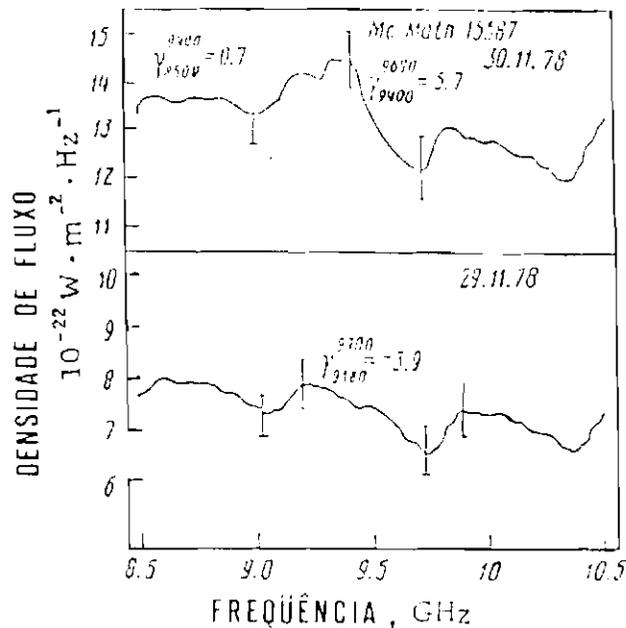


Fig. 1.8 - Espectro em rádio de uma fonte local associada com uma região ativa exibindo estrutura fina em frequência (150 - 400 MHz) na faixa de 8,5 a 10,5 GHz.

FORNE: Kaverin et al. (1979).

Esses autores verificaram também que as estruturas finas estavam presentes no espectro de radiação de fontes locais associadas com grupos desenvolvidos de manchas.

Kaverin et al. (1979) propuseram vários mecanismos de emissão e absorção para explicar a origem da estrutura fina em frequência no espectro de fontes locais de radiação:

1) Sugeriram que a emissão fosse gerada em transições entre estados excitados de átomos e íons apresentando um $\Delta f/f \leq 0,1$ (Kaverin et al., 1979); contudo, de acordo com o autor desta tese, é questionável a existência de átomos em alturas correspondentes à coroa solar, mesmo que estejam em estados altamente excitados pois nas temperaturas coronais somente deve existir íons leves - predominantemente hidrogênio totalmente ionizado.

2) Ou radiação da transição entre componentes da estrutura Zeeman

(Kaverin et al., 1979). Estes dois mecanismos possuíam incertezas se a intensidade das linhas geradas seria suficiente para que estas fossem detectadas pelas sensibilidades dos instrumentos disponíveis naquela época. Os outros mecanismos por eles propostos foram os seguintes:

3) Ressonância giromagnética em regiões ativas com distribuições complexas dos parâmetros físicos (N_e , T_e , B) no seu interior;

4) Sugeriram também que a estrutura fina no espectro de fontes locais poderia ser devido à presença de lâminas de corrente neutra suficientemente densas na coroa com temperaturas na faixa de 3 a 8×10^4 K (Somov e Syrovatskii, 1977), entre a fonte de emissão e o ponto de observação, agindo de forma seletiva à livre passagem de radiação em determinadas frequências somente sem absorção, ao passo que para outras frequências a absorção seria significativa.

Ressaltou-se ainda a necessidade de uma ampliação da faixa de frequências investigada e, de uma análise teórica dos resultados que considerasse a relação entre a estrutura fina nos espectros de fontes locais com os parâmetros físicos das regiões ativas (Kaverin et al., 1979).

A partir das observações de Kaverin et al. (1976), não foram feitas quaisquer observações da 'componente S' de regiões ativas solares na faixa de comprimentos de onda centimétricos e milimétricos com alta resolução em frequência ($\Delta f/f \leq 0,1$) ou com alta sensibilidade (da ordem de décimos a centésimos de U.F.S. (Unidade de Fluxo Solar) - $1 \text{ U.F.S.} = 10^{-22} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1} = 10^4 \text{ Jy}$). Isto porque esse tipo de observação é característico de períodos de Sol 'calmo' - baixa atividade. Também efetuamos observações da 'componente S' de regiões ativas solares durante o período de Sol 'mínimo'.

1.4 - RESOLUCAO ESPECTRAL, ESPACIAL E TEMPORAL

Willson (1985), efetuou pela primeira e única vez observações de regiões ativas, em 1984, com melhores resoluções espacial ($\approx 3'' \times 4''$ de arco), espectral de 12,5 MHz, e temporal de 10

s utilizando VLA, em 10 frequências próximas e distintas dentro da faixa de 1440 a 1720 MHz. Foram observados picos de temperatura de brilho entre $1,5 \times 10^6$ K e $4,0 \times 10^6$ K, sugerindo que essas fontes fossem as correspondentes em rádio de loops coronais vistos em Raios-X moles, Figura 1.9 a, b.

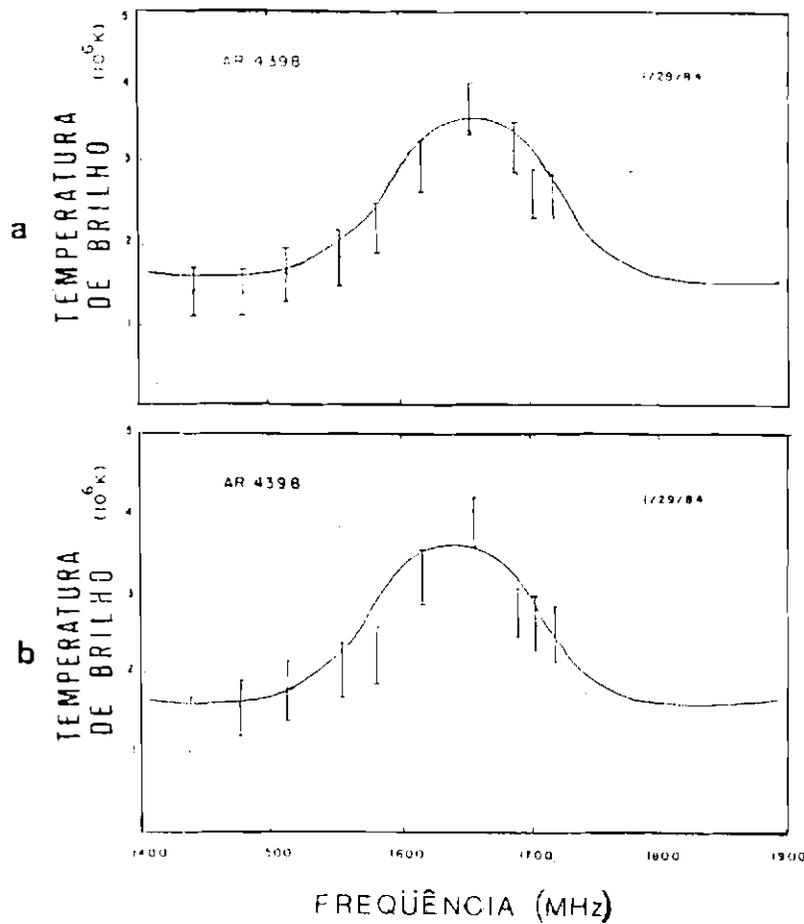


Fig. 1.9 - a) Temperatura de brilho em função da frequência para a região ativa RA4398 - 28/01/84 - mostrando variação na temperatura de brilho de $\approx 1,5 \times 10^6$ K em 1440 MHz a $\approx 4,0 \times 10^6$ K em 1658 MHz; b) Temperatura de brilho em função da frequência para a RA4398 - 29/01/84 - mostrando a variação de $1,5 \times 10^6$ K em 1440 MHz a $4,0 \times 10^6$ K em 1658 MHz. FONTE: Willson (1985).

A mudança por um fator de 2,5 maior observada na temperatura de brilho dentro de uma faixa de frequências de cerca de 300 MHz não parece ser consistente tanto com emissão ciclotron quanto com bremsstrahlung térmico de um loop coronal com distribuições uniformes (monotônicas) de densidade, temperatura ou campo magnético com a altura dentro dessa faixa de frequências de 1440 e 1720 MHz. Sugeriu-se que a estrutura fina observada na temperatura de brilho com um pico em torno de 1658 MHz com uma largura de banda de cerca de 200 MHz fosse devido à emissão de linha de ciclotron proveniente de uma estreita camada onde a temperatura excedia os valores das partes circundantes do loop e o campo magnético era relativamente constante (125 - 180 G).

1.5 - MODELO DE REGIÃO ATIVA SOLAR

Todas as discussões anteriores sugerem as seguintes características morfológicas para regiões ativas solares em microondas.

Fontes locais na faixa de emissão centimétrica estão situadas em alturas menores do que 10^5 km. A dependência da densidade e temperatura ambientes dos eletrons com a altura é fornecida na Figura 1.10. Na cromosfera o modelo de densidade cromosférico é dado por Jager (1959), sendo que densidade e temperatura no interior da região ativa são pelo menos uma ordem de grandeza maiores do que os valores do meio ambiente. O campo magnético é aproximado pelo campo de um dipolo vertical situado no eixo de uma região ativa e submerso em torno de 10^4 km na fotosfera correspondendo a um diâmetro de $\approx 10^4$ km para a mancha solar associada e a um campo de cerca de 3000 G na base da mancha (Zlotnik, 1968b).

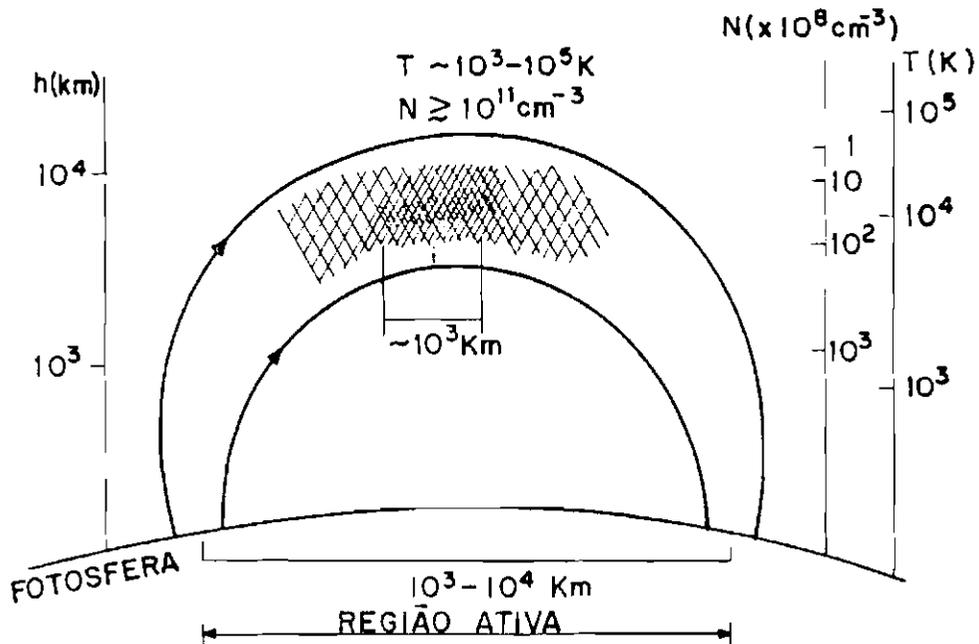


Fig. 1.10 - Modelo simplificado de região ativa solar, mostrando as dependências da densidade e temperatura ambientes com a altura e os parâmetros físicos da região ativa (a figura não está em escala).

1.6 - MECANISMOS DE EMISSÃO

Sabe-se que a emissão em microondas está sujeita a efeitos de propagação. Logo, a equação de transferência radiativa deveria ser resolvida para se obter o espectro em microondas. Em comprimentos de onda de rádio, utiliza-se a aproximação de Rayleigh-Jeans ($hf \ll KT$) para a Lei de Planck.

A partir de observações obtemos que o espectro de radiação para uma fonte térmica cresce com o aumento da frequência na faixa opticamente espessa (frequências menores do que a frequência de pico), de acordo com a lei de Rayleigh-Jeans, atinge um pico em frequências entre 3 e 6 GHz - frequência na qual $\tau \approx 1$, e cai na faixa opticamente fina (frequências maiores do que a frequência de pico).

A seguir fornecemos detalhes dos 2 mecanismos de emissão de regiões ativas solares, os quais explicam com grande aproximação as características do espectro da 'componente lentamente variável' da emissão, a saber: bremsstrahlung e girossíncrotron.

1.6.1 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE BREMSSTRAHLUNG

Considerando-se desprezível a emissão em harmônicos da girofrequência e tomando-se a emissão bremsstrahlung temos que a intensidade e a temperatura efetiva de bremsstrahlung de uma camada uniforme de espessura h à temperatura T são dadas por:

$$I_{\omega_1} = I_o/2 (1 - e^{-\tau_1}); T_{\text{eff}_1} = T/2 (1 - e^{-\tau_1}) \quad (1.1)$$

para o modo extraordinário e:

$$I_{\omega_2} = I_o/2 (1 - e^{-\tau_2}); T_{\text{eff}_2} = T/2 (1 - e^{-\tau_2}) \quad (1.2)$$

para o modo ordinário, onde $I_o = K T \omega^2/4 \pi^3 c^2$ é a intensidade de equilíbrio no vácuo, τ_1 e τ_2 são as espessuras ópticas das camadas para estas ondas. Na aproximação quase-longitudinal temos:

$$\tau_{1,2} \approx h \omega_o^2 \nu_{\text{eff}}/\omega^2 c n_{1,2} (1 \mp \omega_H \cos \alpha/\omega)^2 \quad (1.3)$$

com $\alpha = \nu H, K$;

ω_o - é a frequência de plasma, ν_{eff} - é a frequência efetiva de colisão, $n_{1,2}$ são os índices de refração para os modos extraordinário e ordinário.

Sendo:

$$\omega_o^2 \approx 3,18 \cdot 10^9 N_e \quad (1.4)$$

$$n_{1,2}^2 \approx 1 - \omega_o^2/\omega^2 (1 \mp \omega_H \cos \alpha/\omega) \quad (1.5)$$

$$\nu_{\text{eff}} \approx 5,5 N_e / T^{3/2} \ln (220 T / N_e^{1/3}) \quad (1.6)$$

(para $T < 3 \cdot 10^5$ K).

$$\omega_H \approx 1,76 \cdot 10^7 H_o \quad (1.7)$$

Para $\lambda < 10$ cm e $\omega_H / \omega \approx 1/2$, o índice de refração $n_{1,2} \approx 1$ se $N_e \leq 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ e:

$$\tau_{1,2} \approx 7 N_e^2 h / \omega^2 T^{3/2} (1 \mp \omega_H |\cos \alpha| / \omega)^2 \quad (1.8)$$

A aproximação quase-longitudinal para $n_{1,2} \approx 1$ ($\omega_o^2 \ll \omega^2$) será válida se:

$$\omega_H^2 (\sin \alpha)^4 \ll 4 \omega^2 (\cos \alpha)^2; \quad (1.9)$$

$$|1 - \omega_H \cos \alpha / \omega| \gg \omega_H^2 (\sin \alpha)^2 / 2 \omega^2 \quad (1.10)$$

Quando $\omega_H / \omega \ll 1$ ou $\omega_H / \omega \approx 1/2$ (a aproximação quase-longitudinal é válida para $\alpha < 75^\circ$).

Sabendo-se que: $S = I \cdot \Omega$, para uma fonte com uma distribuição de brilho uniforme (ou ausência de resolução espacial nas observações), onde: $I = I_{\omega_1} + I_{\omega_2}$ para observações sem polarização temos que (1.1) e (1.2) fornecem o espectro de bremsstrahlung para uma fonte com uma distribuição térmica dos eletrons emissores. (Zheleznyakov, 1970).

1.6.2 - ESPECTRO DE EMISSÃO GIROSSÍNCROTRON

Sabe-se que na atmosfera solar magnetoativa tem-se emissão na girofrequência ω_H e em seus harmônicos $\omega = s\omega_H$ ($s = 1, 2, 3, \dots$), onde $\omega_H = eH/mc$.

Absorção e emissão girossíncrotron na atmosfera solar são determinadas pela profundidade óptica do meio:

$$\tau_{s_{o,e}} \approx \sqrt{2\pi} \frac{s^{2s}}{2^s s!} \frac{\omega}{c} \beta_T^{2s-2} \eta_{o,e} B_{s_{o,e}} L_H |\cos \alpha| \quad (1.11)$$

onde: $\beta_T = \frac{v_T}{c}$

$\eta_{o,e}$ é o índice de refração para os modos ordinário e extraordinário;
 $L_H = H \cdot (dH/dl)^{-1}$ é a escala de altura do campo magnético na direção de propagação e α é o ângulo entre o campo magnético e a direção de propagação.

Considerando:

$$v = \omega_L^2 / \omega^2 \ll 1 \text{ e } \eta_{o,e} \approx 1, \text{ e tomando-se a aproximação quase logitudinal}$$

$$u = \omega_H^2 / \omega^2 = 1/s^2 \leq 1/4; \omega_H^2 (\sin \alpha)^4 \ll 4 \omega^2 (\cos \alpha)^2 \quad (1.12)$$

$$|1 - (\omega_H |\cos \alpha| / \omega)| \gg \omega_H^2 (\sin \alpha)^2 / 2 \omega^2 \quad (1.13)$$

obtemos:

$$\tau_{o,e} \approx \pi s^{2s} / (2^{s+1} s!) (\omega_L^2 / c \omega) \beta_T^{2s-2} L_H (1 \mp \cos \alpha)^2 (\sin \alpha)^{2s-2} \quad (1.14)$$

onde usamos:

$$B_{s_{o,e}} = \sqrt{\pi/8} (\omega/c) (\omega_L^2 / \omega^2) s^{2s} / (2^s s!) \beta_T^{2s-2} (1 \mp \cos \alpha)^2 (\sin \alpha)^{2s-2} / |\cos \alpha| \quad (1.15)$$

$$\omega_H = 1,76 \cdot 10^7 \text{ H} \quad (1.16)$$

$$\omega_p \approx 5,65 \cdot 10^4 \text{ N}_e^{1/2} \quad (1.17)$$

$$\beta_T = v_T / c = 3,9 \cdot 10^5 \text{ T}_e^{1/2} / c \quad (1.18)$$

$L_H = \omega_H (dl/d\omega_H)$ é a dimensão característica sobre a qual há uma mudança no valor de ω_H (campo H_0) ao longo da linha de visada.

As profundidades ópticas para os modos ordinário e extraordinário devido a bremsstrahlung térmico são:

$$\tau_{B_{o,e}} = \tau_B / (1 \mp (\nu_H/\nu) \cos \alpha)^2 \quad (1.19)$$

onde:

$\tau_B = (9,8 \cdot 10^{-3} N_e^2 L/\nu^2 T_e^{3/2}) \ln (4,7 \cdot 10^{10} T_e/\nu)$ é a profundidade óptica para bremsstrahlung sem campo magnético.

1.7 - O PROBLEMA

As discussões anteriores mostram que há escassez de observações espectroscópicas solares em comprimentos de onda centimétricos e milimétricos com alta sensibilidade e alta resolução espectral, a despeito de sua extrema importância com relação ao diagnóstico da região ativa estudada em termos de seus parâmetros físicos - densidade, temperatura e campo magnético (Kaverin et al., 1979; Zheleznyakov e Zlotnik, 1980a; Akhmedov et al., 1983; Efanov, 1972).

Uma compreensão melhor da 'componente lentamente variável' exigia informações sobre: posição, tamanho e altura das fontes; temperatura de brilho, variação centro-limbo e diretividade da emissão. Estas informações só podiam ser obtidas através de observações com melhor resolução espacial ($\leq 30'$ de arco) e em frequência ($0,1 \Delta f/f$) (Zlotnik, 1968b; Kaverin et al., 1976).

A importância das investigações sobre a 'componente lentamente variável' de regiões ativas solares está no fato de que a partir de seu estudo cuidadoso podemos obter informações sobre: os parâmetros físicos da região ativa (densidade e temperatura dos

eletrons e campo magnético na região); informações a respeito das variações dos parâmetros físicos *antes e depois de* 'flares' solares e o melhor conhecimento destes. Além disso, sua importância se estende à solução de problemas básicos de 'flares':

- 1) armazenamento de energia para 'flare';
- 2) liberação de energia em 'flares';
- 3) possível previsão de 'flares'.

Ao contrário das observações de explosões solares o monitoramento da 'componente lentamente variável' exigia uma grande estabilidade e sensibilidade do receptor utilizado, além de cuidadosa calibração do equipamento e ótimas condições meteorológicas, por isso, este trabalho restringiu-se a poucos observatórios solares. Para a detecção de linhas de ciclotron e o estudo de estrutura fina no espectro de fontes locais seriam necessários receptores de varredura em frequência e com polarização operando na faixa de comprimentos de onda centimétricos (cobrindo pelo menos um fator de 3 em frequência) ou um conjunto de receptores multicanal com resolução em frequência $\leq 0,05 \omega$ - com 20 canais ou mais - combinados com uma antena cuja largura de feixe que pudesse resolver as fontes espacialmente dentro de segundos de arco (Zheleznyakov e Zlotnik, 1988; Willson, 1983).

Teoricamente, Zheleznyakov e Zlotnik (1980b) e, Zheleznyakov e Tikhomirov (1982) sugeriram haver a possibilidade de superposição de linhas de ciclotron nos espectros da região ativa solar surgindo como uma estrutura em frequência a partir da evolução temporal dos espectros.

A partir de novembro de 1987, desenvolvemos um receptor solar variador em frequência na faixa de rádio de alta sensibilidade (cerca de 0,01 U.F.S.) operando em comprimentos de onda milimétricos (18 - 23 GHz), com resolução em frequência de 1 GHz e resolução temporal variável de 6 a 96 segundos, funcionando em conjunto com o sistema Cassegran de 13,7 metros de diâmetro do ROI (Rádio Observatório do Itapetinga). A largura de feixe era dependente da frequência

situando-se em cerca de 4' de arco em 22 GHz.

Este receptor de frequência variável iniciou sua operação no período de Sol mínimo - período de baixa atividade solar - em fins de 1987 com observações sistemáticas e regulares dos espectros de regiões ativas solares por um período de 15 dias a cada 4 meses em média.

Após 3 anos de observações, efetuamos um total de \approx 500 horas observacionais, das quais somente pouco mais de 20 horas apresentaram condições meteorológicas ótimas no local para observações de região ativa solar. Em virtude disso, apenas 4 regiões ativas foram observadas, das quais 3 em condições ótimas e que serão estudadas com detalhes neste trabalho.

Este trabalho trata basicamente dos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento de um radiômetro de frequência variável com o qual foram efetuadas observações solares em rádio na faixa de 18 a 23 GHz;
- Estudos do espectro do 'centro' do Sol para os dias 22/05/88, 19/06/89 e 29/06/89;
- Estudos do espectro da região ativa solar RA5025 (S22E49 - 22/05/88) situada no limbo leste do disco solar;
- Estudos de espectros de regiões ativas solares mostrando estrutura fina em frequência, em emissão e absorção com amplitude de cerca de 30% e com banda de frequências estreita da ordem de 2 GHz, na faixa de frequências de 18 a 23 GHz (RA5536, N17W50 - 19/06/89; RA5569, N18W08 - 29/06/89) situadas, respectivamente no limbo oeste e região central do disco solar (Sawant e Cecatto, 1988, 1990);
- Interpretação dos espectros do 'centro' do Sol e de regiões ativas solares em termos de mecanismos de emissão e parâmetros físicos da fonte;
- Possível interpretação da estrutura fina, por campo magnético constante e desuniformidade de temperatura, apresentada na evolução temporal dos espectros de 2 regiões ativas solares - RA5536 e RA5569.

CAPÍTULO 2

INSTRUMENTAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

As primeiras observações espectrográficas solares em rádio surgiram no fim da década de 40 e início dos anos 50 por intermédio de Wild e McCready (Wild e McCready, 1950), os quais desenvolveram um radioespectrógrafo operando na faixa de frequências de 40 a 70 MHz. As observações espectrográficas tornaram-se necessárias em virtude da incapacidade das instrumentações existentes, naquela época, em resolver as fontes tanto em frequência quanto em tempo.

Basicamente, um radioespectrógrafo é um receptor de frequência variável operando dentro de uma banda de frequências de rádio contínua e com cobertura de frequência larga em comparação com os receptores de frequência fixa usados até então. A vantagem dos primeiros em relação aos últimos está no fato de que fornecem um espectro dinâmico de fontes solares observadas dentro de uma banda de frequências ao invés de fornecerem observações em uma frequência fixa, entretanto, apresentam uma razão sinal-ruído pequena em comparação com os receptores de frequência fixa. Isto, em virtude de sua curta permanência em cada frequência observada.

Até meados da década de 80 as observações espectroscópicas solares na faixa de comprimentos de onda centimétricos e milimétricos eram raras (Kaverin et al., 1979) devido à inexistência de instrumentações operando nessa faixa de frequências. As observações espectroscópicas solares em rádio processavam-se basicamente em comprimentos de onda métricos e as observações na faixa centimétrica e milimétrica ocorriam em algumas frequências discretas sómente.

Nessa época começou a ser utilizado um equipamento o qual funcionava aproximadamente como um espectroscópio - observação dentro de uma determinada banda de frequências com as frequências observadas

variando com o tempo descontinuamente em degraus, ao contrário de um espectroscópio onde as frequências variam continuamente com o tempo dentro de uma determinada banda - a este novo tipo de equipamento designou-se chamar de receptor de frequência variável ou variador em frequência.

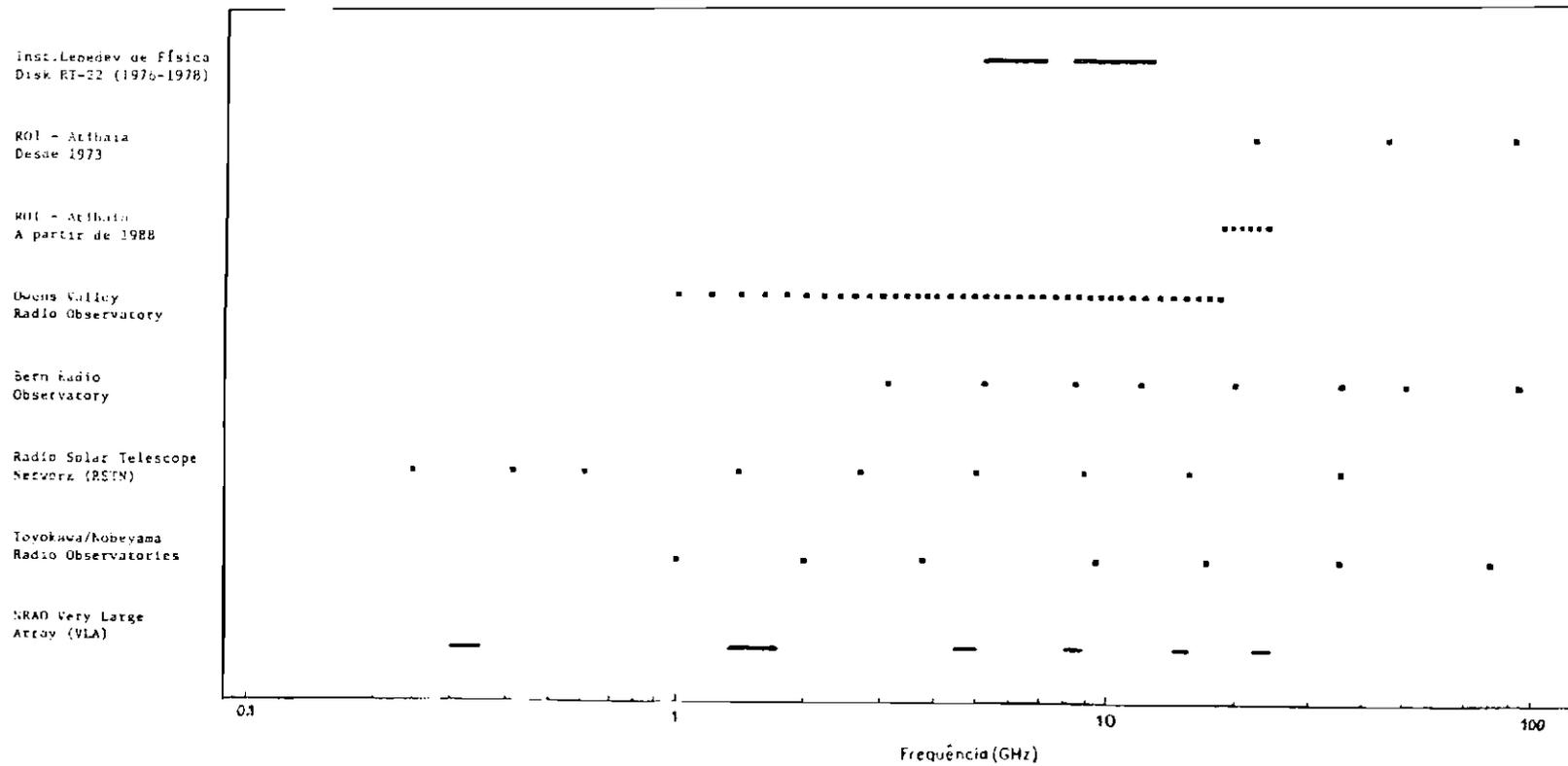
A partir de 1985, foi desenvolvido um interferômetro de alta resolução em microondas no OVRO (Owens Valley Radio Observatory - CALTECH) o qual operava com medidas de polarização circular em 40 frequências na faixa de 1 a 18 GHz (Hurford et al., 1985) com uma resolução em frequência de 120 MHz resolução temporal de 10 s, e com uma resolução espacial de 2,6' de arco em 18 GHz e 46' de arco em 1 GHz. Portanto, não havia observações solares acima de 18 GHz.

A Tabela 2.1 mostra a instrumentação atual existente no mundo, em microondas, para observações solares, a qual mostra explicitamente a falta de radiômetros de frequência variável acima de 18 GHz.

Sawant, H.S. sugeriu o desenvolvimento do radiômetro de frequência variável em ondas milimétricas (18 - 23 GHz), a equipe técnica do ROI efetuou o desenvolvimento desse receptor de frequência variável de alta sensibilidade, para operar em ondas de rádio na faixa de 18 a 23 GHz. O autor desta tese participou dos testes, calibração desse receptor e sugeriu o método observacional de regiões ativas e explosões solares. Tratava-se da instrumentação que operava normalmente em 22 GHz, a qual funcionava juntamente com a antena de 13,7 metros de diâmetro do ROI (Kaufmann et al., 1976; 1982).

Este equipamento foi desenvolvido em virtude da inexistência de instrumentação e, da necessidade de observações da 'componente lentamente variável' de regiões ativas e explosões solares em frequências acima de 18 GHz.

TABELA 2.1 - INSTRUMENTAÇÃO ATUAL EXISTENTE EM MICROONDAS PARA OBSERVAÇÕES SOLARES



No último trimestre de 1987, participamos dos primeiros testes de operação do receptor variador em frequência, e durante os períodos seguintes de observações, efetuamos medidas e calibração do feixe da antena em função das frequências utilizadas para observação. Procedemos à calibração da temperatura do receptor em função da frequência utilizando dois pontos de temperatura conhecida, correspondendo às temperaturas de duas fontes calibradoras (espuma de poliuretano impregnada com fuligem, respectivamente nas temperaturas: $T_{amb} \approx 295$ K e de ebulição do nitrogênio $T_{N_2} = 77$ K). Abaixo fornecemos uma tabela com os valores da temperatura de sistema em cada frequência de observação. (Tabela 2.2).

TABELA 2.2 - TEMPERATURA DE SISTEMA

f(GHz)	18	19	20	21	22	23
T(K)	1724	1654	1283	1148	989	1082

2.2 - OBSERVAÇÕES DE REGIÃO ATIVA

O sistema é composto de um refletor primário parabólico e um refletor secundário hiperbólico localizado no foco do parabolóide. No foco do hiperbolóide encontra-se uma corneta operando com polarização linear horizontal na banda K (18 - 26.5 GHz).

O receptor super-heterodino original para observações em 22 GHz no ROI foi modificado, a partir de 1987, para possibilitar observações em múltiplas frequências acima de 18 GHz. A modificação sofrida pelo equipamento consistiu no acoplamento de um circuito chaveador com 6 níveis seriais de tensão (ou corrente) ao oscilador local 'Yig tuned oscillator'; como resultado deste acoplamento, obteve-se a variação da frequência de recepção em 6 frequências distintas na faixa de 18 a 23 GHz com uma resolução em frequência de 1 GHz e resolução temporal variável descontinuamente entre 0,6 e 96 s. O tempo de chaveamento entre frequências é da ordem de nanossegundos enquanto o tempo de permanência em cada frequência é variável

descontinuamente entre 0,1 e 16 s.

O sinal que entra pela corneta percorre um guia de onda e é injetado no misturador em composição com o sinal do oscilador local; na saída do misturador obtemos o sinal de FI (frequência intermediária) e este sinal de FI passa por um atenuador e em seguida por um amplificador - cuja faixa dinâmica é ≈ 39 dB. Após a amplificação o sinal entra num detector quadrático (com uma potência de saída a qual é proporcional ao quadrado da tensão de entrada), a partir do detector quadrático o sinal é injetado num amplificador DC cuja saída está ligada ao sistema de gravação e registro de dados.

Os dados foram gravados de forma analógica, com as seis frequências dispostas de forma serial, simultaneamente com os sinais de marca de frequência e de marca de tempo, em 3 canais de um gravador AMPEX PR2230 e armazenados em fitas magnéticas. A Figura 2.1 abaixo, mostra o formato dos dados gravados.

2.3 - CALIBRAÇÃO DA LARGURA DO FEIXE DA ANTENA DENTRO DA FAIXA DE 18 A 23 GHz

Sabe-se que cada antena, de acordo com suas características - tamanho dos refletores e frequência de observação - possui um diagrama de radiação com parâmetros bem definidos e cujo conhecimento fornece a eficiência da antena a qual é de fundamental importância para as observações. Entre esses parâmetros devemos citar: a largura do feixe da antena e a temperatura do sistema nas frequências de observação. Em virtude disso, há necessidade de se efetuar calibrações tanto da largura de feixe quanto da temperatura de sistema nas determinadas frequências a serem utilizadas para as observações.

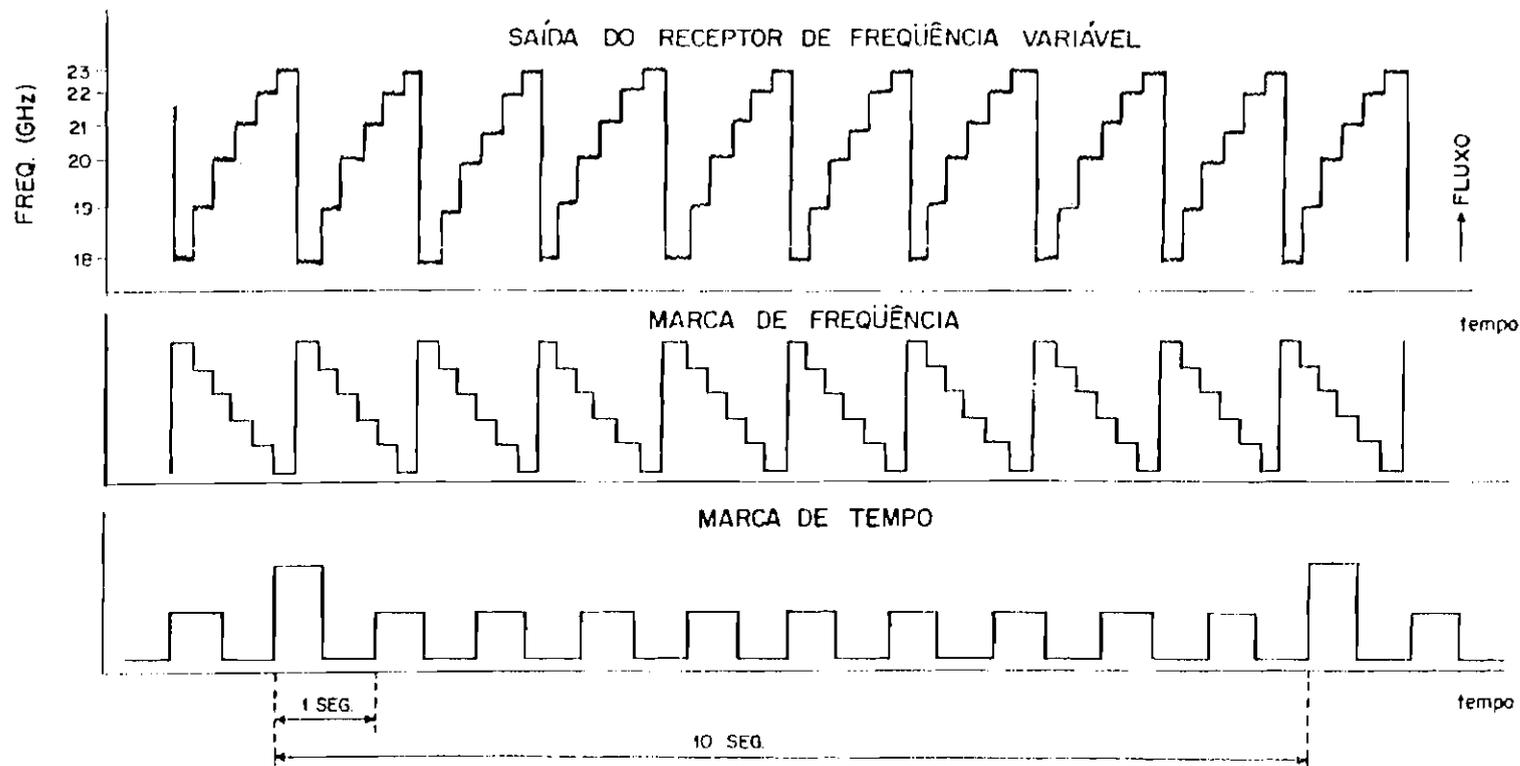


Fig. 2.1 - Formato dos dados obtidos com o radiômetro de frequência variável, gravados em 3 canais de um gravador AMPEX PR2230 e armazenados em fitas magnéticas.

O método experimental utilizado para a calibração da largura do feixe da antena, em cada frequência na faixa de 18 a 23 GHz, consistiu de 30 varreduras tanto em elevação quanto em azimute de 20 segundos de duração cada uma sobre uma fonte pontual - no caso Virgo A e Júpiter por ocasião da observação em relação à largura de feixe estimada da antena (cerca de 4' de arco). A Tabela 2.3 mostra as medidas de largura de feixe da antena em elevação e azimute obtidas durante os vários períodos observacionais.

TABELA 2.3 - LARGURA DO FEIXE DA ANTENA

DIA	FONTE	FREQÜÊNCIA (GHz)	HPBW _{EL} (')	HPBW _{AZ} (')
29/06/89	VIRGO A	18		5,4
18/12/89	JÚPITER	18		5,3
29/06/89	VIRGO A	19	4,5	5,2
18/12/89	JÚPITER	19	4,6	
20/06/89	JÚPITER	20		5,0
22/06/89	JÚPITER	20	4,2	
18/12/89	JÚPITER	20	4,6	
21/06/89	JÚPITER	21		4,8
19/12/89	JÚPITER	21	4,0	
22/12/89	JÚPITER	21	4,4	
22/12/89	JÚPITER	21	4,0	
23/12/89	JÚPITER	21	4,0	
14/06/89	JÚPITER	22		4,7
29/06/89	VIRGO A	22	4,0	
18/12/89	JÚPITER	22	4,1	4,7
27/06/89	VIRGO A	23	3,8	

A partir dos dados da tabela, tomamos uma média das várias medidas em cada uma das frequências e construímos o gráfico da largura do feixe da antena em função da frequência em elevação e em azimute Figura 2.2 a, b.

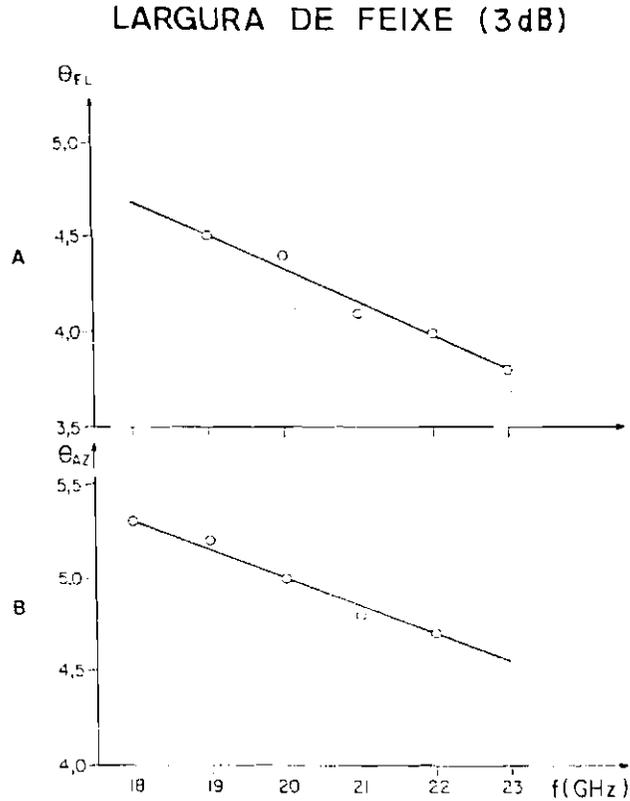


Fig. 2.2 - a) Largura do feixe da antena do ROI em função da frequência de observação tomado, em elevação; b) Largura do feixe da antena em função da frequência de observação, em azimute.

Apesar da quantidade de dias de observação dedicados à realização de medidas da largura de feixe da antena em função da frequência, muito pouco tempo observacional apresentou-se com condições atmosféricas favoráveis, isto dificultou a realização das medidas. Outro ponto que deve ser enfatizado é a posição relativa de Júpiter com o Sol e a Terra, o qual em determinado período observacional encontrava-se a cerca de 2 horas siderais à frente do Sol e em sua maior distância geocêntrica - ≈ 6 U.A. (unidade astronômica).

Os resultados para 18 GHz em elevação e 23 GHz em azimute não estavam coerentes com o comportamento das curvas para as demais frequências. Isto, em virtude ou da existência de excesso de umidade

sobre a redoma da antena ou devido à presença de neblina cerrada no momento da realização das medidas, por isso, esses dois valores foram desprezados nos gráficos.

Deve-se ressaltar que tentamos efetuar essas medidas em todos os períodos observacionais a partir de JUNHO-JULHO/89, e que em virtude de alguns dos motivos já citados acima não houve qualquer possibilidade.

2.4 - RECEPTOR DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

A Figura 2.3 mostra um diagrama de blocos com a instrumentação atual (front-end e back-end) disponível no ROI para observações solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

Para a instrumentação utilizada temos que a densidade de fluxo mínima detectada (ΔS_{\min}) é proporcional à temperatura de antena mínima detectada a qual, por sua vez, é proporcional à temperatura de sistema. A temperatura de sistema é dominada pela temperatura solar (Sol 'calmo' e contribuição da região ativa), a qual é maior que a temperatura do receptor.

Basicamente, temos:

$$\Delta S_{\min} \geq S / (\Delta f \cdot \tau)^{1/2} \quad (2.1)$$

onde:

Δf é a largura de banda do receptor;

τ é a constante de tempo de integração do sistema e;

S é o nível de densidade de fluxo acima do qual ΔS_{\min} é determinado, ou seja:

$$S \propto T_{\text{sis}} + T_{\text{back}} + T_{\text{csol}} + T_{\text{ra}} (\%) \quad (2.2)$$

RADIÔMETRO MILIMÉTRICO VARIÁVEL (23-18) GHz

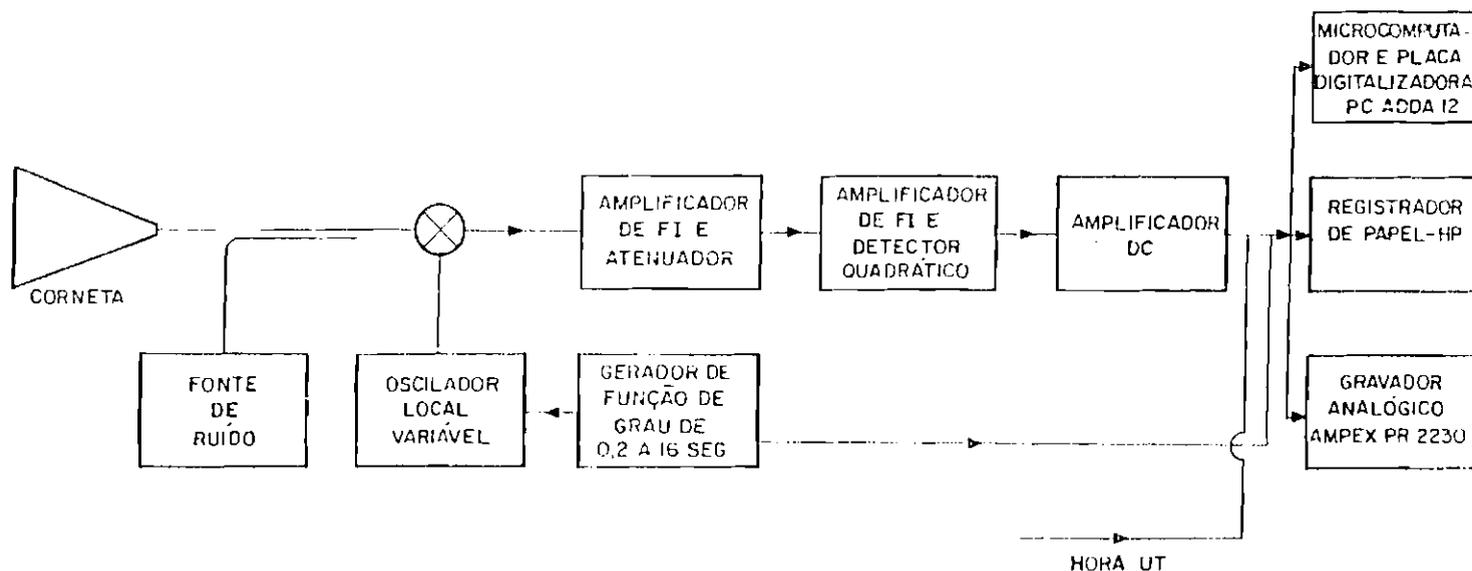


Fig. 2.3 - Diagrama de blocos da instrumentação atual disponível no ROI, utilizada para observações solares com o radiômetro de frequência variável operando na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

onde:

T_{sis} é a temperatura de sistema;

T_{back} é a temperatura do background;

T_{csol} é a temperatura do 'centro' do Sol;

$T_{\text{ra}}(\%)$ é a temperatura da região ativa, em porcentagem acima do nível do Sol 'calmo'.

Com a soma destas temperaturas sendo várias unidades de milhares de graus K, na faixa de frequências de 18 a 23 GHz. Mais precisamente temos:

$$S = k (T_{\text{sis}} + T_{\text{back}} + T_{\text{csol}} + T_{\text{ra}}(\%))/A_e(f) \quad (2.3)$$

onde:

k é a constante de Boltzmann;

$A_e(f)$ é a área efetiva da antena em função da frequência.

A área efetiva foi obtida a partir do gráfico de largura de antena em cada frequência tanto em elevação quanto em azimute. A área efetiva foi calculada por:

$$A_e(f) = (c^2/f^2 \pi \theta_{\text{el}} \theta_{\text{az}}) \cdot (3600 (')^2/3,046 \cdot 10^{-4} \text{ rad}^2) \quad (2.4)$$

onde: f é a frequência de observação;

c é a velocidade da luz no vácuo;

θ_{el} é a largura do feixe em elevação para a frequência f ;

θ_{az} é a largura do feixe em azimute para a frequência f .

Os valores da área efetiva da antena calculados em cada frequência na faixa de 18 a 23 GHz são fornecidos na tabela abaixo. (tabela 2.4)

TABELA 2.4 - ÁREA EFETIVA DA ANTENA

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
$A_e (m^2)$	41,3	40,2	39,2	38,1	37,1	36,0

Quanto à definição angular espacial de uma 'mancha quente' individual, associada com regiões ativas, que pode ser obtida com o feixe da antena podemos tomar a situação ilustrada na Figura 2.4.

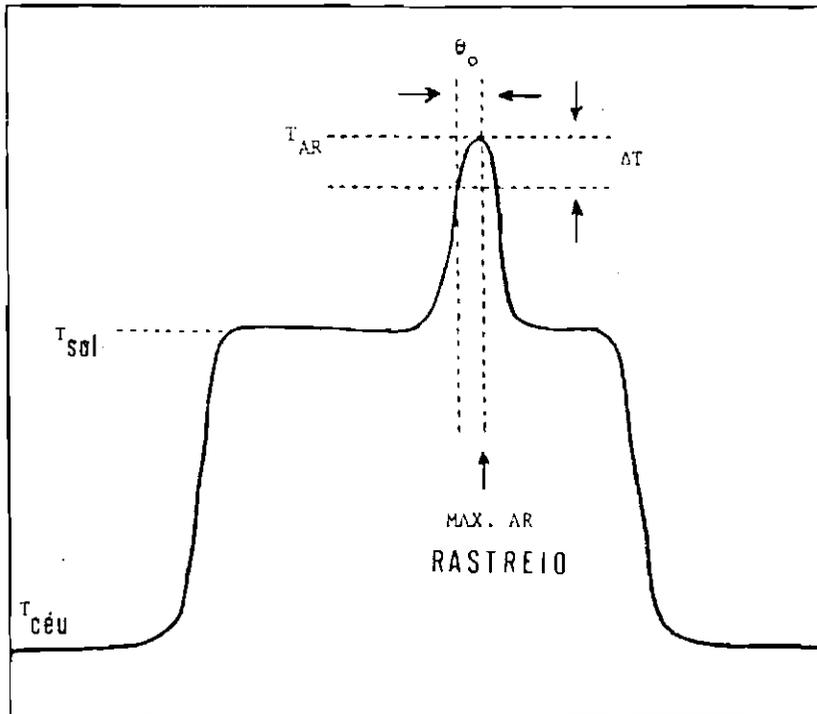


Fig. 2.4 - Resolução angular da antena do ROI na faixa de microondas em função da porcentagem da região ativa solar acima do nível do Sol 'calmo'.

FONTE: Kauffmann et al. (1982).

Na figura temos um nível elementar correspondendo à temperatura do céu em rádio - a qual na faixa de frequências de interesse entre 18 e 23 GHz situa-se em torno de 300 K. Acima deste nível, quando em procedimento de observação de uma região ativa solar, temos os níveis de Sol 'calmo' e a contribuição do nível correspondente à região ativa.

A mínima temperatura detectável pode ser tomada como:

$$\Delta T_{\min} = (T_{\text{csol}} + T_{\text{ra}} (1 - f(\theta_0)) + T_{\text{ra}} (1 - f(\Delta\theta)_{\text{rms}})) / (\Delta f \cdot \tau)^{1/2} \quad (2.5)$$

Sendo: $\Delta f = 500$ MHz; $\tau = 8$ seg e os demais parâmetros estão fornecidos na Figura 2.5 a qual fornece um gráfico da sensibilidade em função da porcentagem da região ativa solar.

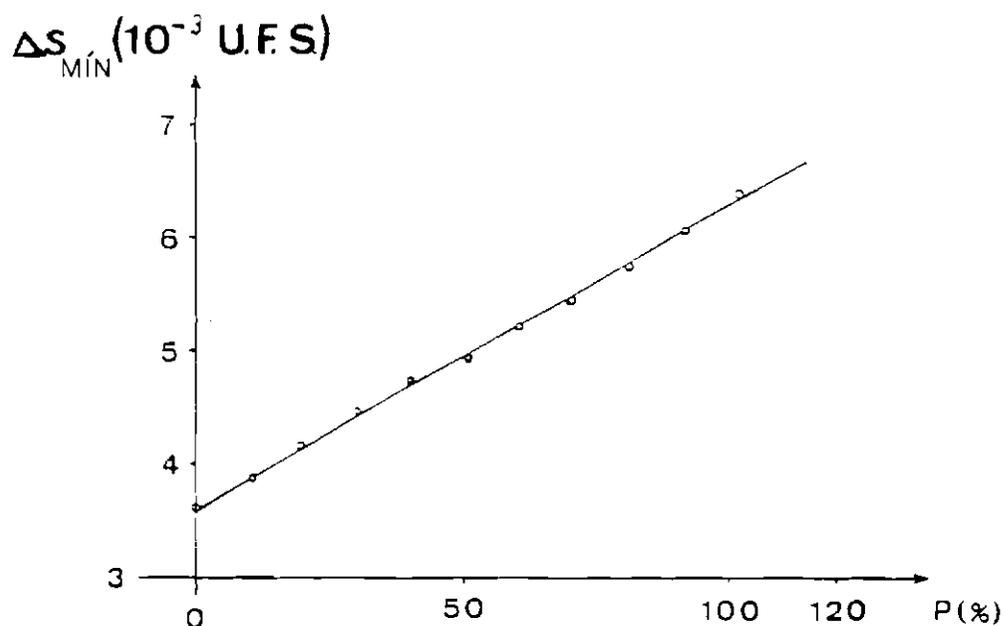


Fig. 2.5 - Sensibilidade do receptor em função da porcentagem da região ativa solar acima do nível do Sol 'calmo'.

Deve-se ressaltar que os valores de sensibilidade apresentam uma variação $\geq 10\%$ dentro da faixa de 18 a 23 GHz. A temperatura de antena de Sol 'calmo' em 22 GHz foi estimada, como a média da temperatura do Sol 'calmo' para 3 dias, em $T_{csol} \approx 4800$ K, sendo que a região ativa é tomada em porcentagem acima do nível do Sol 'calmo':

$$P = 100 \cdot (T_{ra} - T_{csol}) / (T_{csol} - T_{céu}) \quad (2.6)$$

Kaufmann et al. (1982) mostraram que a precisão de rastreamento é dependente da porcentagem da região ativa, e que abaixo de 15% a precisão de rastreamento é pobre ($\gg 10''$ de arco).

2.5 - CALIBRAÇÃO

Para calibrar a temperatura de antena devido à fonte de rádio, uma comparação com uma fonte de temperatura de ruído conhecida é necessária. Esta fonte de ruído foi acoplada dentro do sistema. Para as frequências na faixa de 18 a 23 GHz foi utilizado um diodo gerador de ruído (NOISE-COM, NC 5142). Este aparato forneceu uma temperatura de ruído constante da ordem de 11000 K - a qual após um acoplamento cruzado conveniente ≈ 20 dB, apresentou os seguintes valores fornecidos na tabela 2.5 abaixo:

TABELA 2.5 - TEMPERATURA DA FONTE DE RUÍDO (NOISE-COM)

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
T (K)	69,0	90,3	109,7	122,6	137,0	140,4

A calibração da temperatura da fonte, medida pelo receptor, é efetuada utilizando-se um absorvedor de referência - espuma de poliuretano impregnada com fuligem à temperatura ambiente. Este absorvedor é colocado em frente da corneta bloqueando totalmente a abertura desta, efetua-se então uma medida da temperatura do absorvedor pelo receptor (T_{abs}). A seguir, retira-se o absorvedor da frente da corneta e efetua-se uma medida da temperatura do céu pelo receptor ($T_{céu}$). Obtém-se desta forma, um sinal de calibração resultante o qual corresponde à diferença de temperaturas entre o absorvedor e a antena:

$$(\Delta T_{cal} = T_{abs} - T_{céu}) \quad (2.7)$$

Este método produz uma escala térmica corrigida para a extinção atmosférica (em primeira ordem de aproximação), (Ulich e Haas, 1976).

O passo seguinte é a tomada do sinal correspondente à diferença entre a fonte - Sol 'calmo' - e o céu a qual é definida por:

$$\Delta T_{fonte} = T_{csol} - T_{céu} \quad (2.8)$$

Como resultado obtemos a temperatura de antena corrigida da fonte (T_o) definida por:

$$T_o = (\Delta T_{\text{fonte}} / \Delta T_{\text{cal}}) T_{\text{amb}} = ((T_{\text{csol}} - T_{\text{céu}}) / (T_{\text{abs}} - T_{\text{céu}})) T_{\text{amb}} \quad (2.9)$$

definida para um determinado ângulo de elevação. A partir da relação (2.9) obtemos a temperatura de qualquer fonte - região ativa - pelo menos em princípio, por meio da razão de sua intensidade com o valor obtido pela calibração. Entretanto, durante as observações, o ângulo de elevação da fonte observada varia constantemente e conseqüentemente aquela relação calibradora obtida se torna inválida durante grande parte das observações. Para minimizar este problema adotamos o seguinte procedimento observacional:

- 1) Efetuamos observações da 'componente lentamente variável' de regiões ativas solares apenas durante ± 2 horas da passagem meridiana local do Sol e;
- 2) Efetuamos pelo menos 2 calibrações, ao longo deste período de cerca de 4 horas de observações espectrais.

2.6 - MÉTODO OBSERVACIONAL

O critério utilizado para decidir sobre o aproveitamento dos dados observacionais, com relação aos espectros de regiões ativas solares, a partir das condições meteorológicas (atmosféricas) considerou úteis dados obtidos com um céu totalmente limpo durante o tempo das observações. Isso, em virtude do tipo de trabalho que foi proposto - estudo da evolução temporal da 'componente lentamente variável' de regiões ativas solares - cujos resultados podem se apresentar em um período de variação de um dia ou horas (Kaverin et al., 1979).

O procedimento observacional foi decidido após os primeiros períodos observacionais de testes. Inicialmente, efetua-se o mapa solar em uma frequência fixa correspondente à melhor resposta do sistema receptor (neste caso 22 GHz - frequência de operação normal da

A partir destas temperaturas traçou-se as isofotas do disco solar por intemédio de um programa de computador e obteve-se desta maneira o mapa solar em 22 GHz na sua forma analógica, como na Figura 2.7.

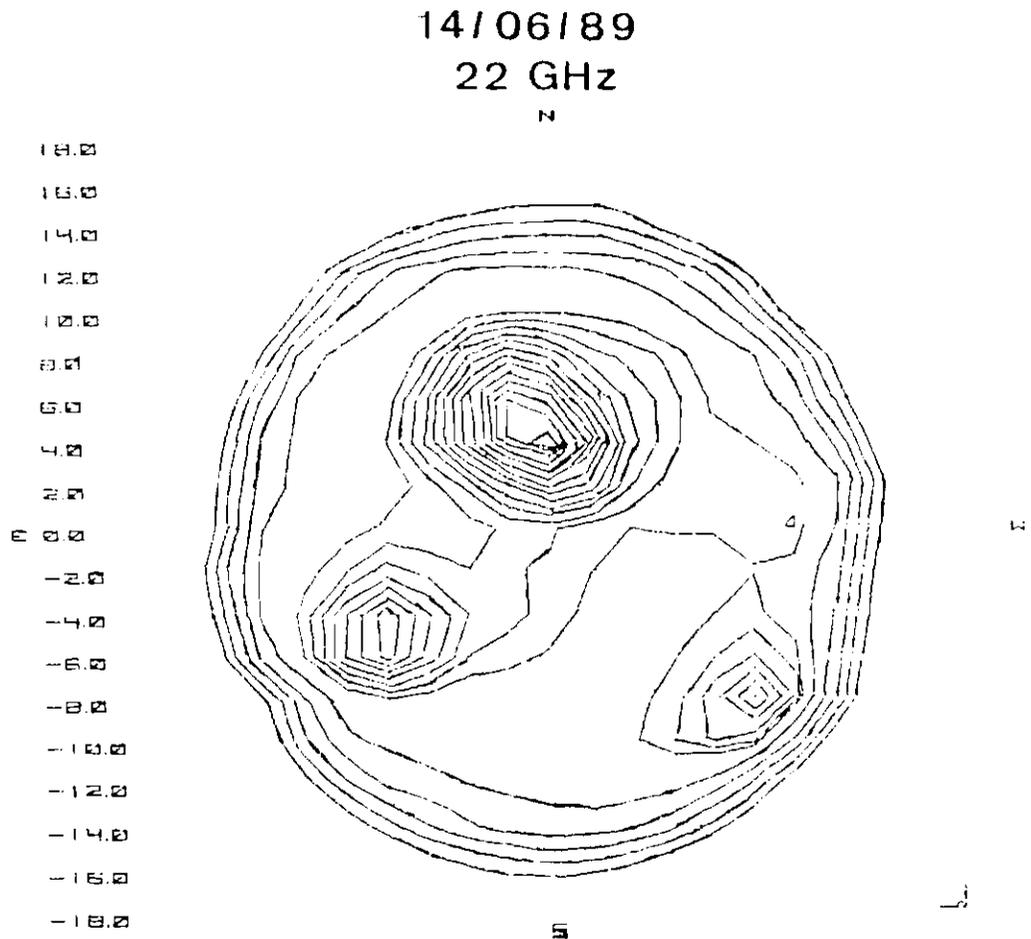


Fig. 2.7 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI, inicialmente em sua forma digitalizada e processado para seu formato analógico. A temperatura de antena para a região ativa RA5536 em 22 GHz foi de 8655 K - 14/06/89 - as isothermas foram tomadas a cada ≈ 200 K, exceto aquelas 3 externas as quais correspondem a 50%, 75% 88% respectivamente, do nível de Sol 'calmo'.

O 'centro' do Sol foi adotado como a região do disco solar, distante do limbo, a qual apresentava a temperatura mais baixa em relação ao restante do disco. O limbo solar, por sua vez, foi considerado como sendo o contorno do mapa solar o qual apresentava um nível de temperatura correspondendo a 50% do nível da região representativa do 'centro' do Sol. Por último, as regiões representativas dos níveis mais altos em relação ao nível do 'centro' do Sol, foram consideradas como correspondendo às regiões ativas passíveis de serem observadas.

As posições das regiões ativas no disco solar são fornecidas por 2 programas de computador: um fornece as coordenadas de cada região, em ascensão reta e declinação, a partir da ascensão reta e declinação do centro geométrico do disco solar, enquanto o outro programa efetua a transferência de coordenadas heliográficas a partir de 2 ângulos - um de posição da extremidade norte do eixo de rotação; medido a partir do ponto norte do disco em direção a leste, e outro de latitude heliográfica do ponto central do disco solar.

Após a realização do mapa solar, o passo seguinte foi efetuar o rastreamento do 'centro' do Sol assumido com base na definição fornecida acima. Esse rastreamento consistiu de uma observação do 'centro' do Sol por aproximadamente 30 minutos para se obter um calibrador com temperatura da ordem de 10^4 K, correspondendo ao nível do Sol 'calmo' ou com baixa atividade.

Em seguida, efetuou-se o apontamento da região ativa solar, escolhida para as observações espectrais, com a antena e iniciou-se a observação de sua 'componente lentamente variável' com o receptor de frequência variável na faixa de frequências de 18 a 23 GHz. O critério de escolha da região ativa solar a ser observada, levou em consideração a região correspondente ao nível de temperatura mais alto observado em relação ao nível assumido para o 'centro' do Sol já determinado - também foram considerados tanto informes de outros observatórios fornecidos no mesmo dia das observações, por meio de telex ou fax, quanto o aspecto de complexidade oferecido pela região

ativa e visualizado através do mapa solar. Tais informes contêm indicações sobre: posições e números de classificação (NOAA), além de atividades magnéticas e explosões solares associadas e ocorridas nas regiões ativas; também indicam os níveis de atividade e possibilidades de ocorrência de explosões solares em cada região ativa.

2.7 - OBSERVAÇÕES ESPECTRAIS DE REGIÕES ATIVAS SOLARES

Os estudos espectrais de regiões ativas solares com o receptor de frequência variável na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, cujas características estão descritas acima, foram iniciados com a observação de Novembro de 1987. A partir desta, foram efetuadas observações solares regulares e sistemáticas as quais totalizaram \approx 500 horas observacionais; dessas unicamente 20 horas foram utilizadas constituindo-se em dados observacionais de regiões ativas solares tomados sob condições meteorológicas ótimas no local e data das observações.

A seguir fornecemos um *comentário* a respeito de cada um dos 8 períodos de observações.

- *Comentários sobre os 8 períodos observacionais:*

- PERÍODO I - NOV/1987 (3 a 14 e 26 a 29 de Nov/87): Durante este período, as porcentagens das regiões ativas encontravam-se \leq 15%. Foram efetuadas 75 horas de observações, mas as condições meteorológicas não estiveram boas durante todo o período observacional.

- PERÍODO II - MAIO/1988 (12 a 28 de Maio/88): Ao longo deste período observacional, as regiões ativas apresentaram-se com maiores porcentagens (1% - 38%) em relação ao período anterior.

Foram efetuadas \approx 50 horas de observações no total, contudo, somente \approx 5 horas apresentaram dados observacionais em boas condições para estudos mais detalhados. Procedemos a *estudos espectrais do 'centro' do Sol e de região ativa solar ao longo de um dia de observações*. Em particular, a região ativa RA5025 foi investigada com

detalhes entre 15:30 e 17:10 UT do dia 22/05/88. Os detalhes das observações desta região ativa solar juntamente com a evolução temporal de seu espectro de frequências na faixa de 18 a 23 GHz estão fornecidos no capítulo 3 a seguir.

- PERIODO III - NOV/1988 (8 a 19 de Nov/88): As porcentagens para as regiões ativas, neste período, mantiveram-se entre 12% e 32%.

Pelo menos 50% do período apresentou condições atmosféricas desfavoráveis para as observações. A despeito disso, o Sol começou a apresentar sinais de atividade pois ocorreram pelo menos 2 eventos explosivos durante este período observacional. Foram efetuadas aproximadamente 65 horas de observações ao todo; *desse total apenas 7 horas apresentaram condições observacionais boas que se contituem em dados que merecem maiores estudos.*

Especificamente, os dias 11, 15 e 16 apresentaram cerca de 2 horas pelo menos, cada um, com boas condições atmosféricas possibilitando investigações posteriores.

As explosões apresentadas neste período permitirão trabalhos adicionais muito importantes referentes aos espectros de explosões solares, na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, com características inéditas até o presente momento.

- PERIODO IV - ABRIL-MAIO/1989 (26 de Abril a 3 de Maio/89): A partir do dia 26/04 iniciaram-se as observações desse período. Este dia apresentou cerca de 2 horas de condições atmosféricas razoáveis para observações da região ativa RA5454 com uma porcentagem de $\approx 20\%$. O restante do período observacional não permitiu uma coleta de dados proveitosa, isto em decorrência das péssimas condições meteorológicas apresentadas a despeito das porcentagens de até 25% exibidas pelas regiões ativas estudadas.

O total de horas das observações atingiu ≈ 40 horas mas apenas 2 horas podem merecer algum cuidado. Além disso, uma explosão de pequenas proporções e curta duração foi observada no período observacional do dia 02/05/89.

- PERÍODO V - JUNHO-JULHO/1989 (14 de Junho a 01 de Julho/89) - 'CAMPANHA SOLMAX' 91': Este período apresentou $\approx 70\%$ do tempo total das observações com condições atmosféricas desfavoráveis. Entretanto, das 104 horas de observações 14 horas em 2 dias (19/06 e 29/06/89) apresentaram condições ótimas para estudos de espectro de regiões ativas. Nesses dias, procedemos a *estudos espectrais do 'centro' do Sol e de 2 regiões ativas solares durante esses 2 dias de observações*. As regiões ativas estudadas são: RA5536 (19/06/89) e RA5569 (29/06/89). A região ativa RA5536 foi observada entre 12:30 e 14:38 UT do dia 19/06/89, ao passo que a região ativa RA5569 foi observada entre 12:16 e 17:08 UT do dia 29/06/89. *Todos os detalhes referentes às observações destas 2 regiões ativas solares bem como a evolução temporal de seus respectivos espectros de frequência na faixa de 18 a 23 GHz estão fornecidos no capítulo 3 a seguir.*

Neste período, participamos da Campanha Mundial 'SOLMAX' 91' para observações solares durante o qual ocorreram ≈ 40 explosões solares ao longo dos dias 14, 15, 18, 21, 22, 28 e 30; sendo que estas foram observadas com uma resolução temporal de 1,2 segundos.

Observamos também 3 regiões ativas, ao todo, no decorrer do período inteiro para coletar dados referentes ao espectro de regiões ativas antes, depois de flare e também o espectro das mesmas regiões ativas durante a ocorrência de flares. Os espectros de regiões ativas *antes e depois* de flare não puderam ser obtidos por causa de fatores *meteorológicos*, principalmente, e também por fatores *Operacionais* - região ativa com sinais de atividade elevada e ocorrência de explosões. Entretanto, os *espectros da região ativa RA5569* acima citada e sua *evolução temporal foram efetuados e apresentados* (Sawant e Cecatto, 1989).

Quanto às explosões, já estão sendo trabalhadas e começaram a apresentar os primeiros resultados, alguns deles totalmente inéditos e muito promissores futuramente, com vistas a trabalhos conjuntos de cooperação bilateral com grupos da NASA, U.S.A.; CALTECH, U.S.A.; SIBIZMIR, URSS.

- PERIODO VI - DEZ/1989 (11 a 23 de Dez/89): Ao longo deste período foram efetuadas, no total, cerca de 33 horas observacionais, mas o tempo útil de coleta de dados com respeito ao espectro de regiões ativas solares foi nulo, durante este período. Isso, em decorrência das condições atmosféricas desfavoráveis apresentadas durante este período.

- PERIODO VII - MAIO/1990 (3 a 17 de Maio/90): Outro período observacional que não apresentou condições atmosféricas favoráveis à observações dos espectros de regiões ativas solares. Ao todo, foram efetuadas aproximadamente 68 horas de observações, desse total apenas 1 hora foi obtida para estudos de espectro de regiões ativas, contudo, a porcentagem dessa região ativa encontrava-se em torno de 6% acima do nível do Sol 'calmo', muito abaixo de nossas expectativas sendo seus dados desprezados.

- PERIODO VIII - AGO-SET/1990 (28 de Agosto a 9 de Setembro): Durante este período as condições meteorológicas desfavoráveis não possibilitaram quaisquer estudos do espectro de regiões ativas solares.

Houve registro da ocorrência de pelo menos 1 evento durante este período observacional - correspondente ao dia 4 de setembro.

2.8 - TRATAMENTO E DIGITALIZAÇÃO DE DADOS

O processo de tratamento e digitalização dos dados coletados foi composto das seguintes etapas:

1) Os dados referentes aos espectros de regiões ativas foram trabalhados manualmente a partir de registros em papel milimetrado. Esses registros continham a calibração e a evolução temporal dos espectros nas 6 frequências desde 18 até 23 GHz (1 GHz de resolução em frequência). Através do processo de calibração, já descrito anteriormente, utilizando o absorvedor de referência e o diodo gerador de ruído foram obtidas as temperaturas do 'centro' do Sol e da região ativa observada.

As densidades de fluxo do 'centro' do Sol e da região ativa foram calculadas a partir de:

$$S = K T/A_e(f) \quad \text{W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1} \quad (2.10)$$

onde: K - é a constante de Boltzmann

$A_e(f)$ - é a área efetiva da antena na frequência f.

T - é a temperatura do 'centro' do Sol ou da região ativa calculada pela calibração.

2) Com os valores da densidade de fluxo em cada frequência foram tomadas médias de cada 10 minutos para cada frequência e, posteriormente construiu-se o gráfico da evolução temporal dos espectros, para 'centro' do Sol e para a região ativa, ao longo do tempo de observações.

2.9 - OBSERVAÇÕES DE EXPLOSOES SOLARES NA FAIXA DE FREQUÊNCIAS DE 18 A 23 GHz

Durante o 5° período observacional ('CAMPANHA SOLMAX' 91; JUNHO-JULHO/89) foram registradas cerca de 40 explosões solares com o receptor de frequência variável - 18 a 23 GHz.

Os dados correspondentes a estas explosões foram digitalizados através da placa PC - ADDA 12, pelo processo já descrito acima, e posteriormente tratados através de 'software' apropriado sendo desta forma obtidos em formato conveniente para serem trabalhados.

A maioria dessas explosões apresenta um comportamento semelhante no perfil temporal de todas as frequências, entretanto, foram registradas também explosões as quais apresentam estruturas finas em frequência com o tempo, visíveis a partir do perfil temporal de cada uma das frequências quando comparados os respectivos perfis temporais de todas as frequências conjuntamente.

Quanto aos dados referentes às explosões solares, um tratamento totalmente distinto foi desenvolvido e aplicado. Este procedimento foi composto das seguintes etapas descritas a seguir:

1) Os dados foram gravados de forma analógica em 3 canais de um gravador AMPEX PR2230 e armazenados em fitas magnéticas de 3600 pés. Um dos canais contendo o sinal das 6 frequências, dispostas de forma serial com uma resolução temporal de 1,2 seg. - tempo de permanência de 0,2 seg em cada frequência; outro canal contendo o sinal chaveado de marca de frequência, em degraus de - 200 mV a partir do nível 0 correspondendo à frequência de 18 GHz; o 3º canal contendo a marca de tempo em pulsos de 1 seg. de duração sincronizados, por intermédio de um circuito grampeador, com um relógio padrão de Rubídio o qual fornece com precisão a hora no sistema universal de tempo (UT).

2) Os dados analógicos da fita magnética foram digitalizados através de uma placa digitalizadora PC-ADDA 12 a qual estava acoplada a um microcomputador PC XT. Após a digitalização, os dados sofreram um processo de tratamento via 'software' que efetuou a separação do sinal de cada frequência com seu tempo correspondente. Deste modo, o sinal de todas as frequências foi posteriormente gravado em discos flexíveis de 5 ¹/₄'' em 3 arquivos em formato de colunas, com o sinal de 2 frequências em cada arquivo juntamente com o tempo correspondente.

A partir de então, os dados encontraram-se com os sinais de todas as frequências dispostos em formato paralelo - como pode ser visto na Figura 2.8 abaixo - podendo o sinal de cada frequência ser trabalhado diretamente e de modo independente das demais.

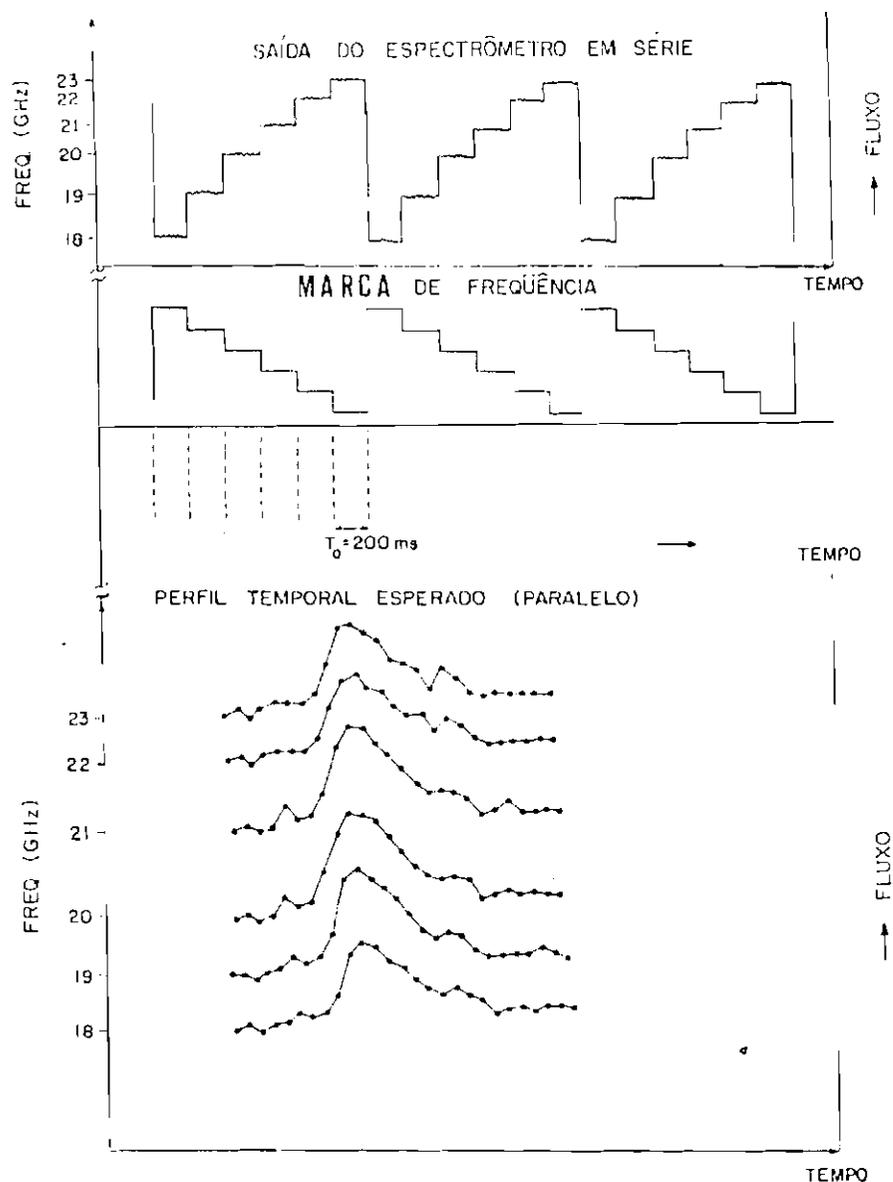


Fig. 2.8 - Dados de observações solares, obtidos com o radiômetro de frequência variável, operando na faixa de 18 a 23 GHz, e posteriormente digitalizados (com a placa PC-ADDA 12) com os sinais de todas as frequências dispostos em formato paralelo.

Abaixo fornecemos um exemplo de explosão solar em rádio na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, com seu respectivo espectro, tomada após o tratamento adequado e observada juntamente com os dados correspondentes obtidos em Raios-X. (Figura 2.9 a e b)

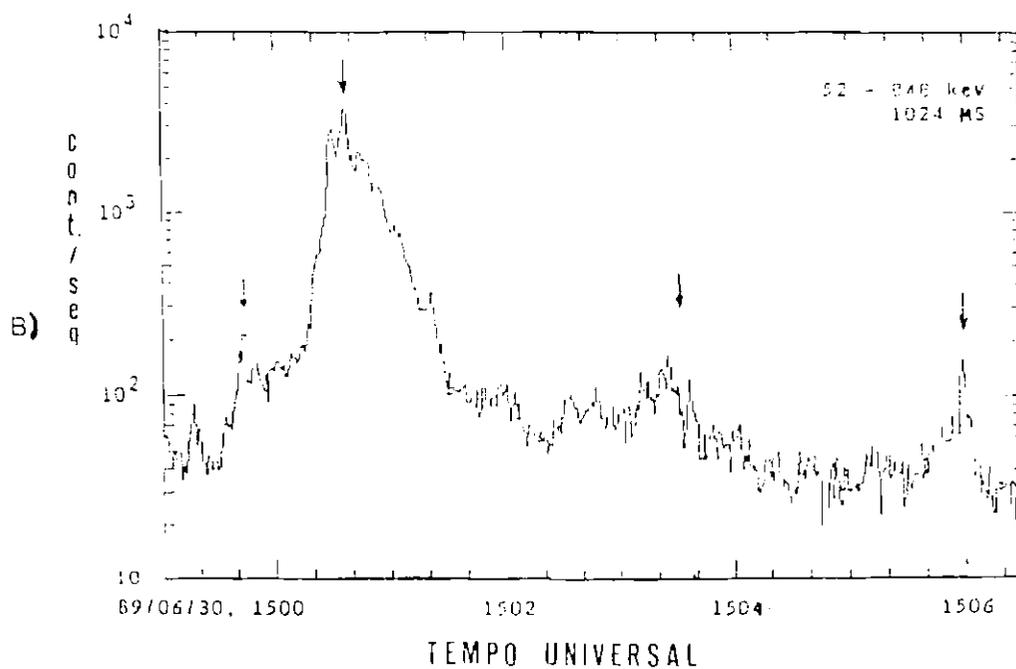
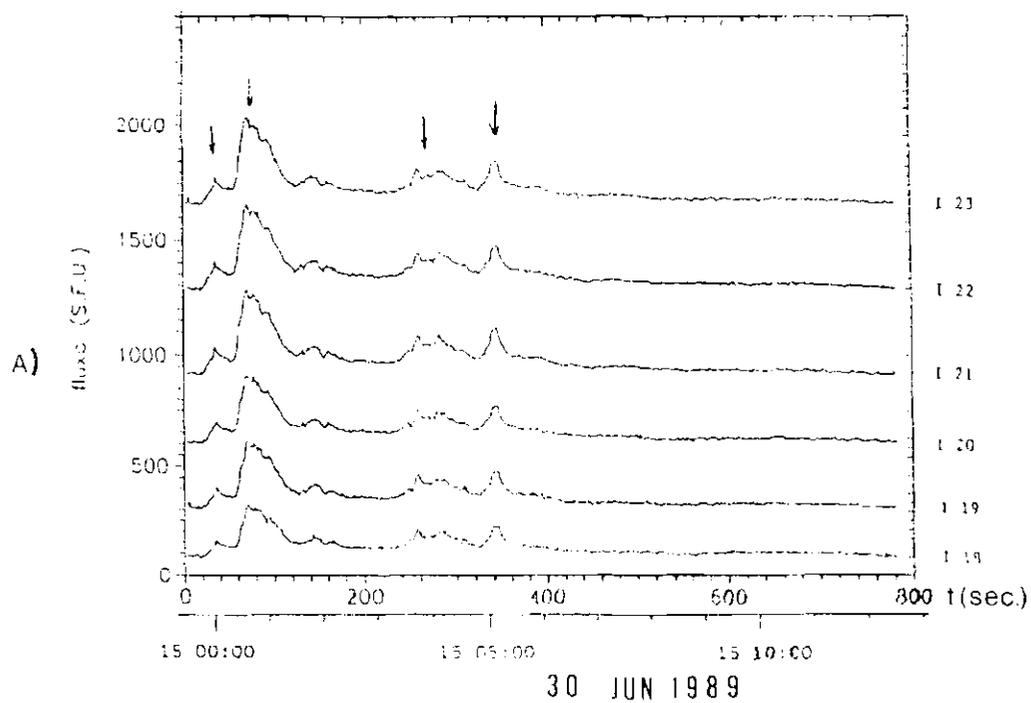


Fig. 2.9 - a) Evento de 30 de junho de 1989 observado em Atibaia, nas frequências de 18 a 23 GHz; b) Evento correspondente observado pelo satélite SMM - USA, em Raios-X.

CAPITULO 3

ESTRUTURAS FINAS SUPERPOSTAS ACIMA DOS ESPECTROS DE REGIOES ATIVAS SOLARES

3.1 - OBSERVAÇÕES ESPECTRAIS SOLARES NA FAIXA DE FREQUÊNCIAS DE 18 A 23 GHz

Neste capítulo, basicamente fornecemos os resultados observacionais em rádio (18 a 23 GHz) obtidos para os espectros de três dias escolhidos com base nos critérios descritos nos capítulos anteriores. Os resultados consistem dos espectros diários do 'centro' do Sol e da região ativa com sua evolução temporal para o dia correspondente às observações. Os dias escolhidos foram: 22/05/88; 19/06/89 e 29/06/89.

Além disso, efetuamos uma análise dos espectros tanto do 'centro' do Sol quanto das regiões ativas para obter-se um melhor discernimento com relação aos parâmetros físicos (Ne, Te, B) na região emissora e também quanto aos possíveis mecanismos de emissão - bremsstrahlung e girossíncrotron. Fornecemos uma análise dos espectros das regiões ativas solares em termos de suas posições no disco, gradientes de temperatura, comparação com dados de H- α (mapa) e/ou magnetogramas, além do perfil temporal de fluxo em RX-moles.

Fornecemos também, uma análise dos espectros das regiões ativas estudadas, em termos de estruturas finas de seu espectro de 'componente S'. Além disso, apresentamos a evolução temporal dos espectros das regiões ativas com estimativas quanto aos possíveis mecanismos físicos que podem originar a estrutura fina observada nesta faixa de frequências.

3.2 - ESPECTROS DO 'CENTRO' DO SOL

Nesta seção apresentamos nossos estudos de espectros de regiões ativas solares utilizando o radiômetro de frequência variável

na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

Abaixo fornecemos, como exemplo ilustrativo, os resultados referentes a uma região ativa solar (RA6064 - S13E63) a qual encontrava-se no limbo solar leste no dia 13/05/90 e foi observada nesse dia das 14:03 às 14:54 UT. Fornecemos o mapa solar em 22 GHz para o dia 13/05/90 na Figura 3.1, o qual mostra a posição da região ativa observada nesse dia.

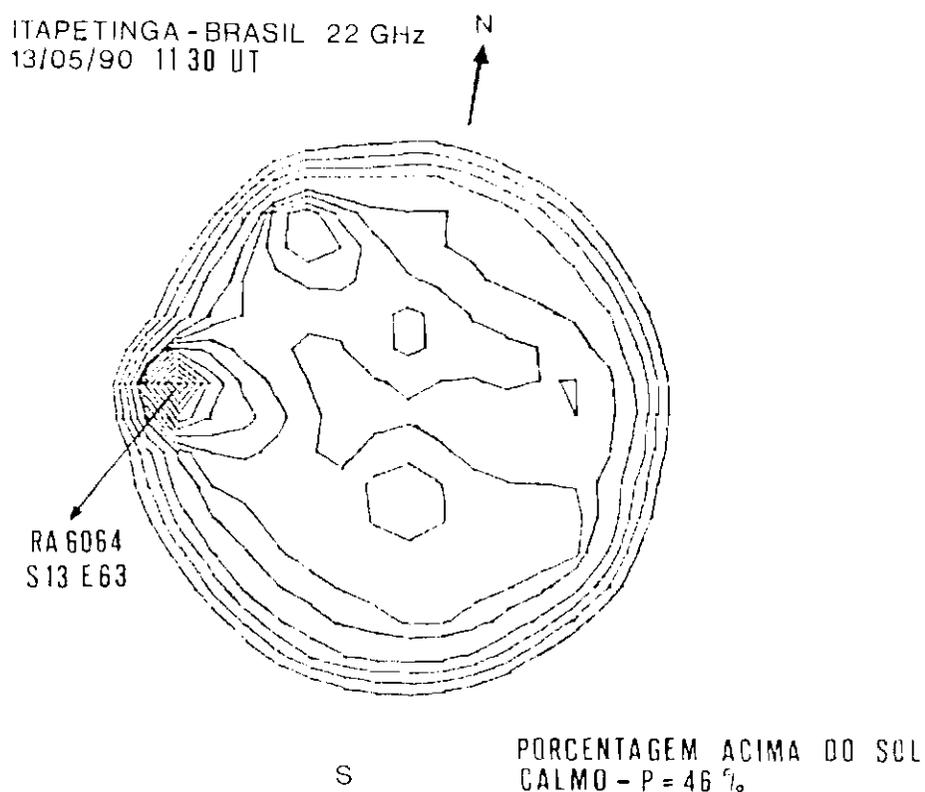


Fig. 3.1 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 13/05/90, obtido no ROI em seu formato analógico. A seta indica a posição da região ativa observada - RA6064 - e suas coordenadas heliográficas.

Na Figura 3.2, fornecemos os espectros do 'centro' do Sol observado nesse mesmo dia das 13:28 às 13:57 UT.

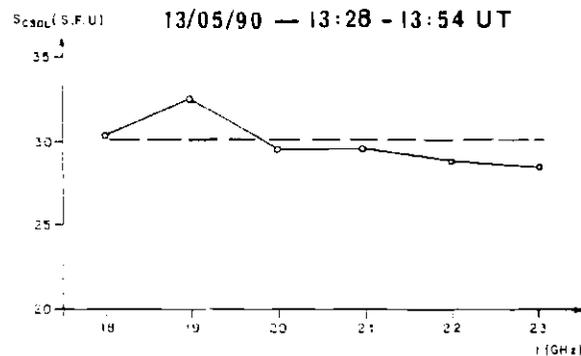


Fig. 3.2 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 13/05/90. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol.

Na Figura 3.3 a seguir, fornecemos os espectros correspondentes ao período de observações da região ativa RA6064, mostrando a evolução do temporal do espectro durante o intervalo das 14:03 às 14:54 UT.

Efetuamos observações do 'centro' do Sol para três dias distintos: 22/05/88; 19/06/89; 29/06/89. Para esses três dias estudados a região correspondente ao 'centro' do Sol - a qual foi observada - encontrava-se próxima ao centro geométrico do disco solar.

Os espectros do 'centro' do Sol na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para esses 3 dias apresentaram um índice espectral variável entre 0 e 0,2. Verificou-se que as posições das regiões ativas no disco solar não influenciaram os espectros do 'centro' do Sol; assim como as porcentagens das regiões ativas também não causaram nenhum efeito perceptível para os espectros do 'centro' do Sol. Esses espectros não foram afetados com relação à temperatura do Sol 'calmo' com exceção da amplitude do fluxo emitido em cada caso; mesmo assim, durante o intervalo de tempo das observações, os espectros apresentaram pouca variação ($\leq 5\%$) na amplitude do fluxo emitido e conseqüentemente no perfil morfológico do espectro observado.

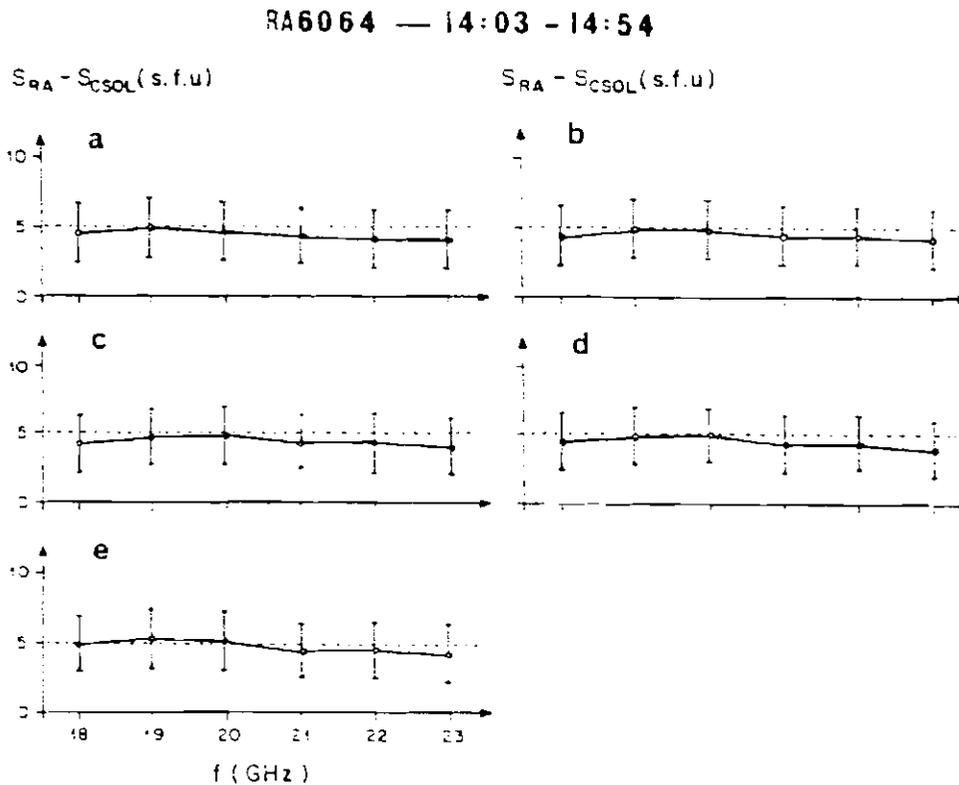


Fig. 3.3 - Espectro da região ativa solar RA6064, com sua evolução temporal por cerca de 1 hora de observação para o dia 13/05/90.

3.3 - ESPECTROS DE REGIÕES ATIVAS SOLARES

Nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 abaixo fornecemos os mapas solares em rádio (22 GHz) para os 3 dias escolhidos para estudos.

Nos mapas as posições das regiões ativas estão assinaladas com uma seta fornecendo o respectivo número de classificação (de acordo com boletim da NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration) e as coordenadas heliográficas das regiões ativas. As linhas tracejadas indicam contornos de temperatura no disco solar - isotermas - e a densidade das linhas em determinados locais mostra os gradientes de temperatura em torno das regiões ativas.

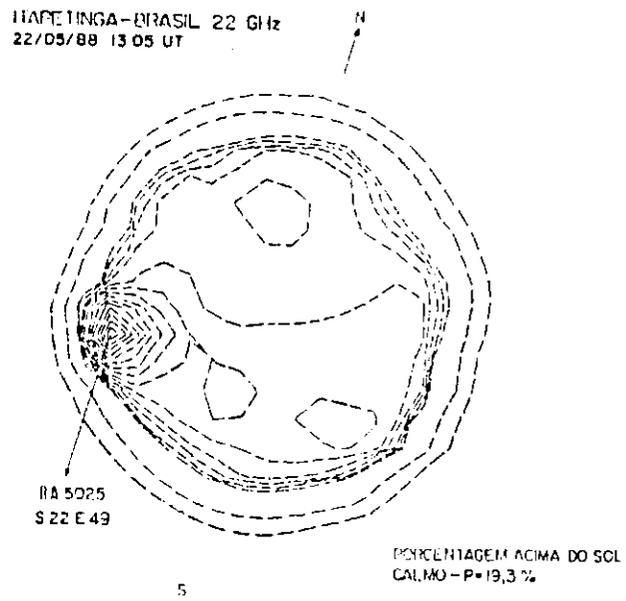


Fig. 3.4 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 22/05/88, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5025 e suas coordenadas heliográficas.

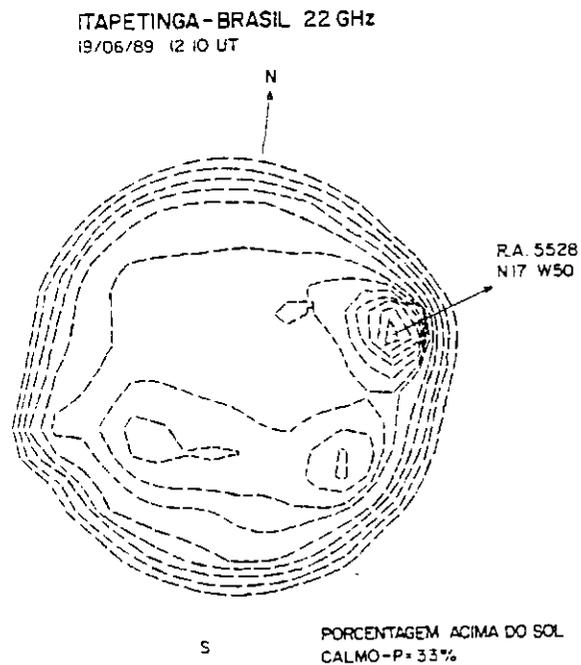


Fig. 3.5 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 19/06/89, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5536 e suas coordenadas heliográficas.

ITAPETINGA - BRASIL 22 GHz
29/06/89 11 45 UT

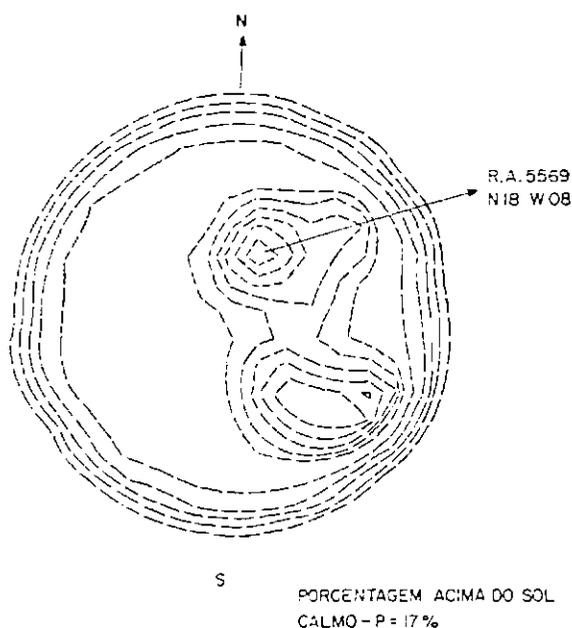


Fig. 3.6 - Mapa solar em 22 GHz para o dia 29/06/89, obtido no ROI. A seta indica a posição da região ativa RA5569 e suas coordenadas heliográficas.

De acordo com os mapas, 2 regiões ativas (RA5025 e RA5536) encontravam-se próximas aos limbos leste e oeste respectivamente, ao passo que a região RA5569 situava-se próxima ao centro geométrico do disco solar.

Para os espectros das 3 regiões ativas com sua evolução temporal ao longo dos intervalos das observações, cada curva corresponde a uma média tomada durante 10 minutos de observações. Esses espectros foram tomados subtraindo-se o espectro médio para o 'centro' do Sol daquele espectro médio correspondente à região ativa. Dessa forma eliminamos a contribuição do Sol 'calmo' e os espectros assim obtidos consistem puramente da emissão em rádio proveniente unicamente da 'componente S' das regiões ativas solares estudadas.

Abaixo, detalhamos as observações e fornecemos uma análise dos espectros para cada região ativa isolada.

3.4 - ESPECTROS DE REGIAO ATIVA SOLAR SEM ESTRUTURA FINA EM FREQUENCIA

3.4.1 - ESPECTRO DA REGIAO ATIVA RA5025 (S22E49)

Esta região ativa foi observada por 4 dias a partir de 20 de maio de 1988; quando surgiu no limbo leste estava apresentando um nível quase igual ao nível Sol 'calmo', e atingiu um valor máximo de cerca 37% em 23 de maio.

Durante o dia 22/05/88, não houve o registro de quaisquer explosões ao longo do tempo de observação (15:30 - 17:10 UT) para a região ativa estudada (RA5025) - a partir de dados do SGD (Solar Geophysical Data) N° 527 (parte I) - e as condições atmosféricas eram excelentes, por este motivo a região ativa solar observada nesse dia - RA5025 - foi escolhida para uma investigação mais completa com relação à evolução temporal de seu espectro na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

No dia 22/05/88, a região ativa (RA5025) estava situada na posição S22E49; a porcentagem da região ativa acima do nível de Sol 'calmo' era de aproximadamente 19%. O 'centro' do Sol foi observado, nesse dia, das 13:05 às 14:03 UT. Na Figura 3.7, fornecida abaixo, mostramos o espectro médio do 'centro' do Sol durante o período de observações. O espectro apresenta-se quase plano com um índice espectral de 0,1 na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

A partir do mapa em rádio (22 GHz) verifica-se que a região ativa apresentou um gradiente de temperatura maior em direção ao limbo leste do que em direção ao centro geométrico do disco solar, isto provavelmente em decorrência de efeitos geométricos de projeção das isotermas nas proximidades do limbo do disco solar.

De acordo com o mapa solar em H- α (SGD, N° 527(1)) podemos identificar uma região abrilhantada nas proximidades da região ativa observada em rádio - 22 GHz. A área apresentada pela região ativa de acordo com H- α era de 10^{-5} do hemisfério solar.

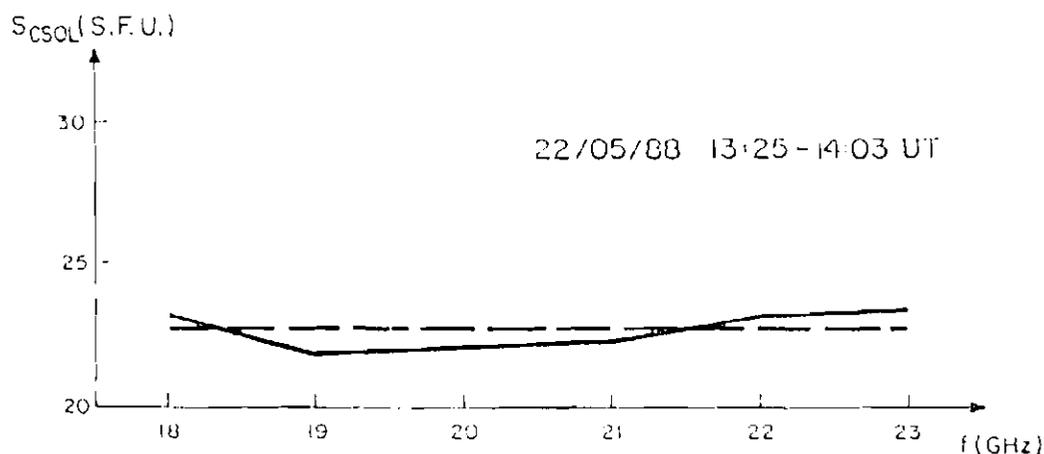


Fig. 3.7 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 22/05/88, tomado como uma média de 40 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o centro do Sol.

O perfil do fluxo em Raios-X para o dia 22/05/88 está fornecido na Figura 3.8 apresentada abaixo. Pela figura podemos observar a variação do fluxo em Raios-X durante o período de observações da RA5025.

Através do magnetograma - SGD N° 527, podemos notar que a região ativa encontrava-se na periferia de uma região magnética de extensão considerável, e que se prolongava em direção ao limbo leste do disco. De acordo com SGD N° 527, o valor do campo magnético a nível fotosférico para a RA5025 encontrava-se entre 1100 e 1500 G.

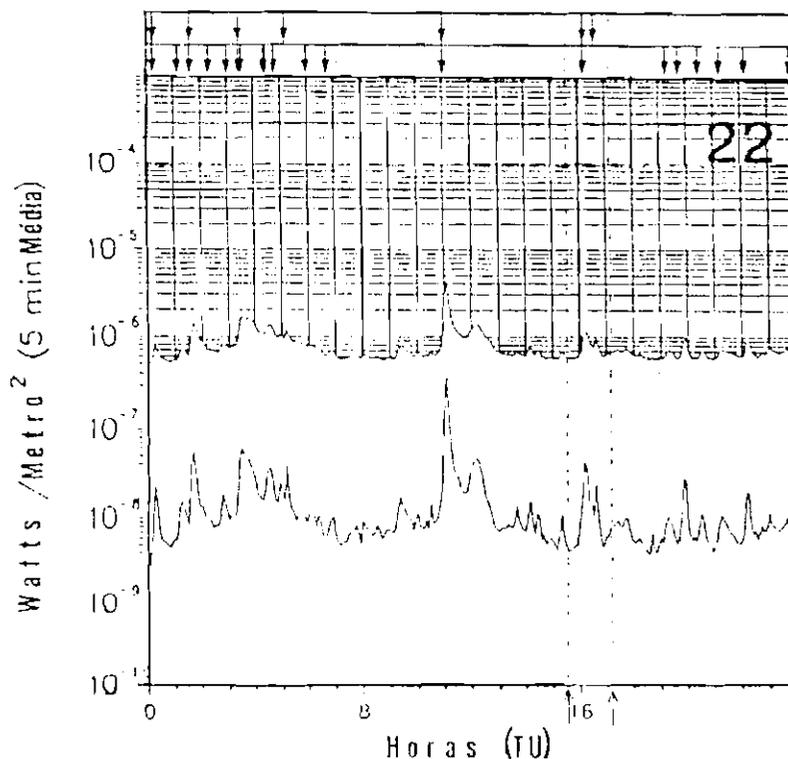


Fig. 3.8 - Perfil temporal do fluxo em Raios-X moles para o dia 22/05/88, obtido com o detector de Raios-X do satélite GOES.

- Intervalo 15:30 - 17:10 UT: A região ativa RA5025 foi observada em rádio (18 a 23 GHz) a partir das 15:30 até 17:10 UT.

Após a subtração dos espectros correspondentes ao 'centro' do Sol para cada frequência, obteve-se o espectro 'puro' da região ativa, do qual foram tomadas médias a cada 10 minutos de observações e os resultados assim obtidos foram graficados. A seguir fornecemos na Figura 3.9 a evolução temporal dos espectros para a região ativa ao longo do intervalo de tempo das observações.

RA 5025 - 22/05/88

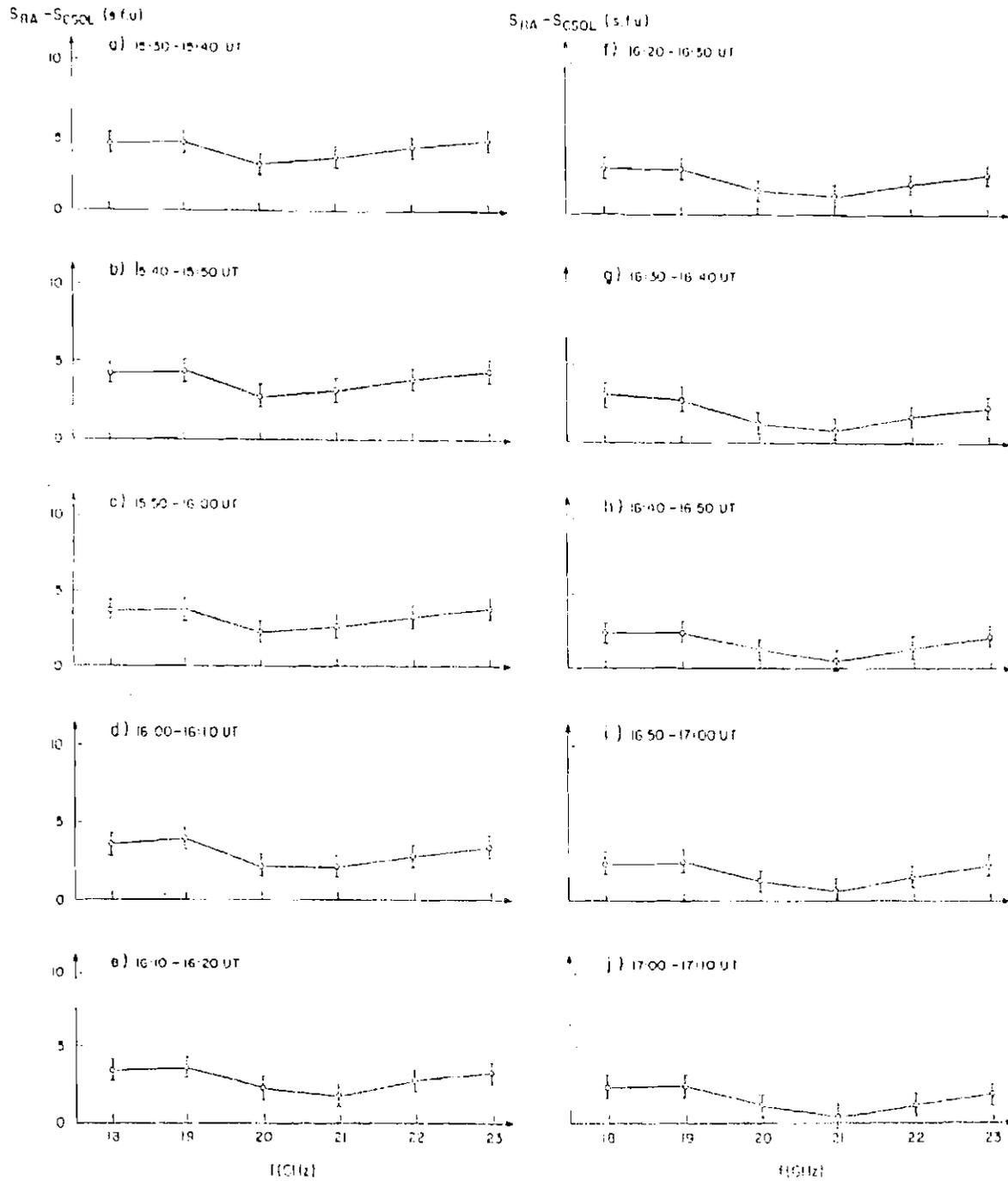


Fig. 3.9 - (a - j) Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5025 obtidos na faixa de freqüências de 18 a 23 GHz para o dia 22/05/88 das 15:30 às 17:10 UT.

Pela figura, notamos que o espectro apresentado pela região ativa era quase plano, sendo que o índice espectral não exibiu qualquer variação importante, dentro da faixa de frequências de 18 a 23 GHz, situando-se entre - 0,1 e 0,1 ao longo do período observacional. A densidade de fluxo emitido pela região ativa exibiu, durante as observações, um decréscimo diferenciado em cada frequência dado na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - DECRESCIMO DA DENSIDADE DE FLUXO

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
P (%)	-48	-48	-59	-86	-71	-60

Na tabela 3.2, exibimos o decréscimo da densidade de fluxo por unidade de tempo, para a RA5025, em porcentagem, em relação aos valores originais do início das observações para cada uma das frequências observadas. Esse decréscimo foi tomado em média a cada 30 minutos de observações.

TABELA 3.2 - DECRESCIMO DA DENSIDADE DE FLUXO POR UNIDADE DE TEMPO

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
$\Delta S/\Delta t$ (UFS/h)						
$S_{(c)} - S_{(a)}/h$	- 39	- 38	- 50	- 49	- 49	- 40
$S_{(f)} - S_{(d)}/h$	- 13	- 21	- 31	- 43	- 27	- 24
$S_{(j)} - S_{(g)}/h$	- 26	- 13	- 9	- 20	- 20	- 15

Entretanto, a morfologia do espectro da região ativa, dentro de todo o intervalo de tempo das observações, não mostrou qualquer alteração notável, apesar de se apresentar semelhante àquela observada para o espectro do 'centro' do Sol. Em suma, obtivemos os seguintes resultados para as observações da RA5025:

- Esta região apesar de encontrar-se próximo ao limbo solar leste não apresentou quaisquer estruturas finas em frequência superpostas aos espectros na faixa de 18 a 23 GHz.

- A variação do índice espectral durante o período de observações da região ativa foi de 0,2; com o índice espectral mantendo-se entre - 0,1 e 0,1.

- As densidades de fluxo medidas apresentaram decréscimos diferenciados para cada frequência, com os maiores valores sendo registrados para as frequências de 21 e 22 GHz. As outras frequências exibiram uma diminuição semelhante para os valores de densidade de fluxo medidos.

- As quedas registradas para as densidades de fluxo, com o tempo, durante o período de observações apresentaram-se maiores para 20, 21 e 23 GHz na 1ª hora de observações com valores entre - 30% e -50%, ao passo que nos últimos 40 minutos de observações os valores das quedas na densidade de fluxo para as frequências observadas mantiveram-se entre - 10% e \leq - 2,5%.

3.5 - ESPECTROS DE REGIOES ATIVAS SOLARES EXIBINDO ESTRUTURAS FINAS EM FREQUÊNCIAS (ESTRUTURAS DE ABSORÇÃO E EMISSÃO)

3.5.1 - ESPECTRO DA REGIAO ATIVA RA5536 (N17W50)

Observamos esta região ativa somente no dia 19/06/89; isto porque quando a RA5536 surgiu no disco solar em 12/06/89 apresentava um nível de densidade de fluxo quase igual ao nível correspondente ao Sol 'calmo'; nesse dia a RA5536 estava localizada nas coordenadas heliográficas N16E29. Para o dia 19/06/89, de acordo com dados do SGD N° 540 (parte I), não houve qualquer registro de explosões solares nem tampouco qualquer sinal de atividade ao longo do período de observações (12:30 - 14:38 UT) para a região ativa estudada (RA5536) de acordo com o mapa em rádio (22 GHz) a posição heliográfica da região ativa RA5536 era N17W50, situando-se deste modo próxima ao limbo oeste do disco solar, e a porcentagem exibida pela região ativa acima do nível do Sol 'calmo' era de cerca de 33% (onde a porcentagem $P \approx 100 \cdot T_{ra}/T_{csol}$). A temperatura estimada para o Sol 'calmo' era de 5559 K.

gradiente mais regular exibido em direção ao centro geométrico do disco, provavelmente devido a efeitos geométricos de projeção das isothermas nas proximidades do limbo do disco solar.

O 'centro' do Sol foi observado entre 12:15 e 12:20 UT. O espectro médio do 'centro' do Sol durante esses 5 minutos de observações é mostrado na Figura 3.10. O espectro é quase plano apresentando um índice espectral aproximadamente nulo (0,01) na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

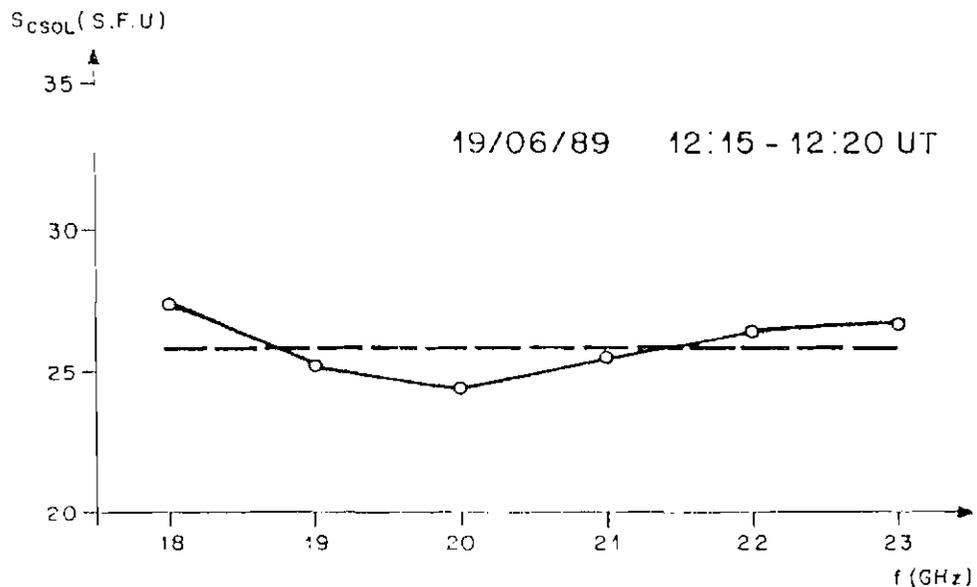


Fig. 3.10 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 19/06/89 tomado como uma média de 5 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol.

Mediante o mapa solar em H- α , observa-se uma região de manchas circundada por uma região abrihantada estendendo-se em direção ao limbo oeste, a qual corresponde aproximadamente à região ativa observada através do mapa solar em rádio (22 GHz) fornecido acima. Também, o magnetograma para o dia 19/06/89, exibe uma região magnética complexa que se estende a oeste, a qual corresponde razoavelmente bem com o quadro de H- α apresentado para a posição da região ativa RA5536.

De acordo com o SGD N° 540 o campo magnético a nível fotosférico para a RA5536 encontrava-se entre 2100 e 2500 G.

A área apresentada pela RA5536 variou de 130×10^{-6} a 170×10^{-6} do início ao fim do dia, atingindo um valor máximo de 380×10^{-6} do hemisfério do disco solar às 14:15 UT.

Pelo perfil temporal do fluxo de RX-moles (GOES-7 X-ray detector) fornecido na Figura 3.11, nota-se que ao longo do período das observações da RA5536 houve um acréscimo de quase uma ordem de grandeza no fluxo com um decréscimo posterior, fazendo com que o fluxo retornasse quase a seus valores originais do início do período observacional, período este correspondente àquele das observações de rádio (12:30 - 14:38 UT).

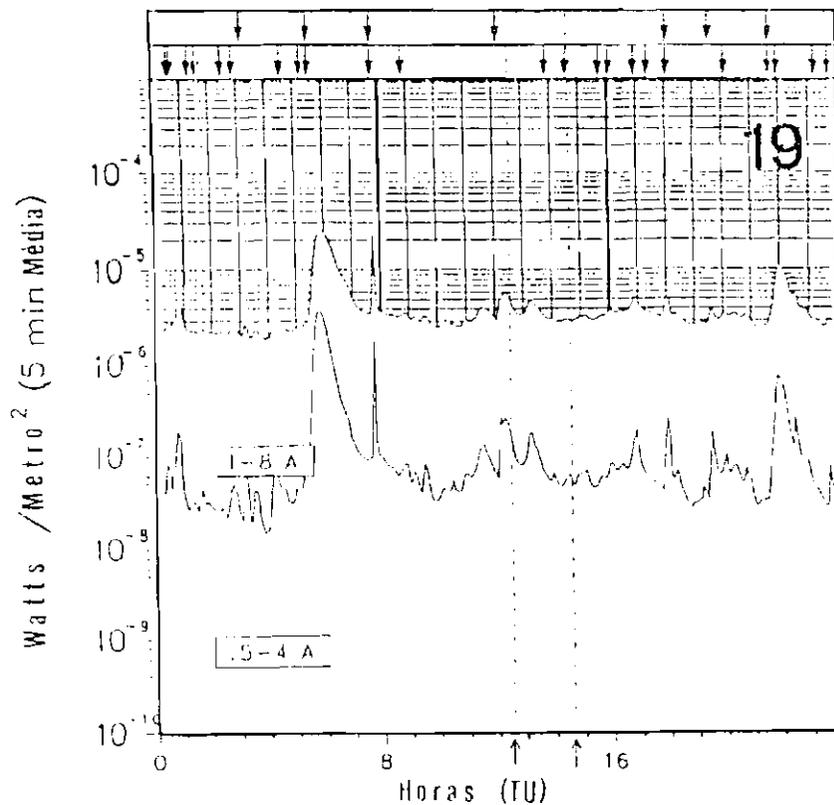


Fig. 3.11 - Perfil temporal do fluxo em Raios-X moles para o dia 19/06/89, obtido com o detector de Raios-X do satélite GOES

A região ativa RA5536 foi observada no dia 19/06/89 das 12:30 UT às 14:38 UT. Os espectros desta região ativa bem como sua evolução temporal obtida a cada 10 minutos ao longo do intervalo de observações são fornecidos na Figura 3.12 (a - j).

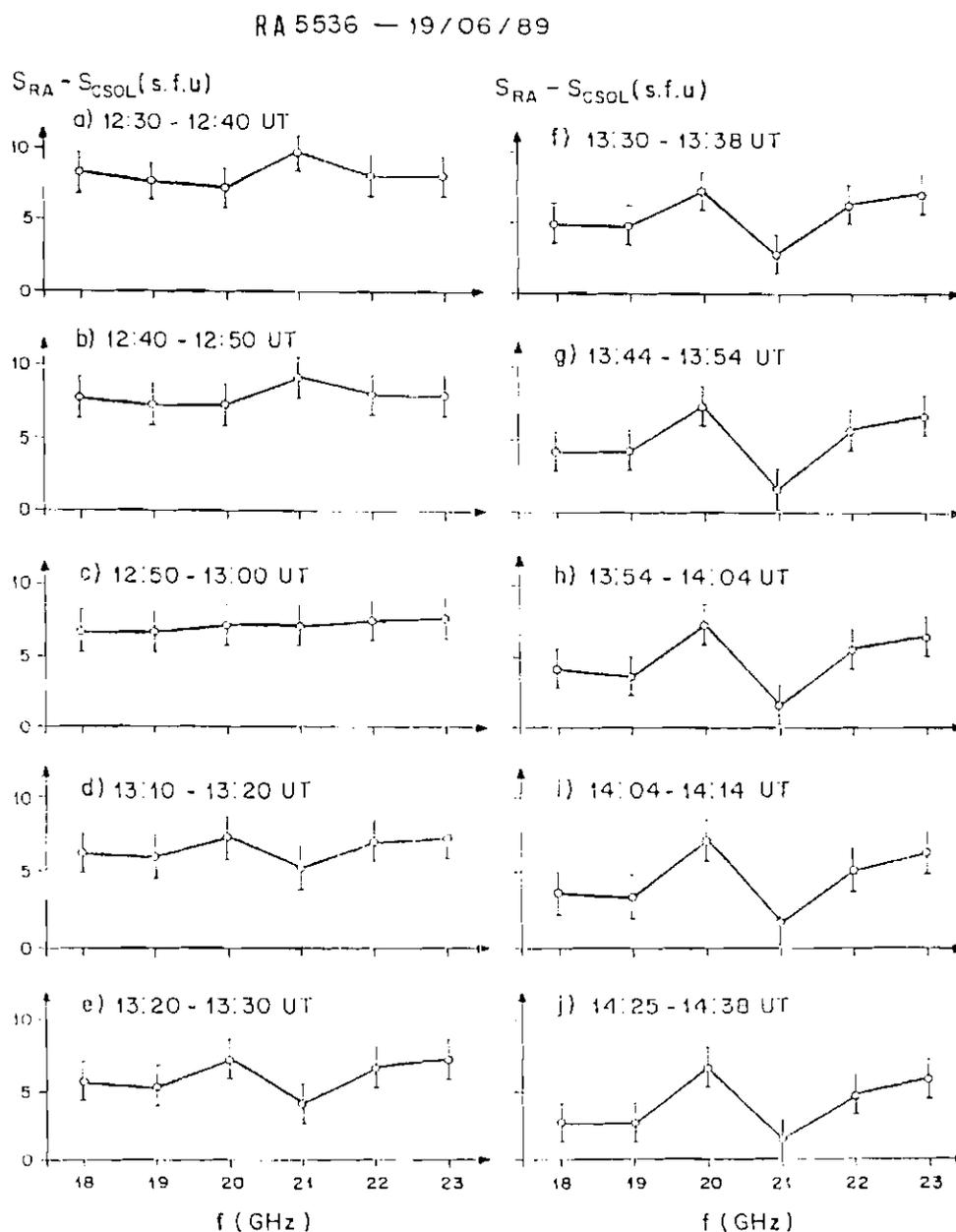


Fig. 3.12 (a - j) Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5536 obtidos na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para o dia 19/06/89 das 12:30 às 14:38 UT.

- Intervalo 12:30 - 13:00 UT: Os espectros exibidos pela RA5536, nos primeiros 30 minutos de observação (12:30 - 13:00 UT) os quais encontram-se nas Figura 3.12 (a, b, c) mostraram um espectro plano com um índice espectral de cerca de - 0,1; e ao término dos 30 minutos o espectro tornou-se quase plano com um índice espectral de aproximadamente 0,1.

- Intervalo 13:10 - 13:38 UT: Durante o intervalo de observações compreendido entre 13:10 e 13:38 UT, Figura 3.12 (d, e, f) o espectro da região ativa apresentou estruturas em frequência as quais evoluíram com o tempo até o término deste intervalo observacional. A estrutura apresentada era complexa com as densidades de fluxo em 18 e 19 GHz exibindo um decréscimo em torno de 20%, ao passo que em 21 GHz o decréscimo apresentado atingiu cerca de 50%. Enquanto isso, as densidades de fluxo nas outras 3 frequências variaram < 12% ao longo de todo esse intervalo.

- Intervalo 13:44 - 14:38 UT: No período de observação compreendido entre 13:44 - 14:38 UT, Figura 3.12 (g, h, i, j), a estrutura apresentada no espectro da região ativa no intervalo anterior, intensificou-se e caracterizou-se definitivamente ao longo dessa última hora de observações. Nesse intervalo as densidades de fluxo para as frequências de 18 e 19 GHz exibiram uma queda de cerca de 34%, enquanto para as demais frequências o decréscimo em fluxo foi \leq 16% (7% em 20 GHz; 16% em 22 GHz; 11% em 23 GHz; estável ou 0% em 21 GHz).

Ao longo de cerca de 2 horas de observações da região ativa (12:30 - 14:38 UT), a variação em fluxo apresentada para cada uma das frequências é fornecida na Tabela 3.3.

TABELA 3.3 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO

f(GHz)	18	19	20	21	22	23
P(%)	-67	-64.5	-8	-84.5	-41	-27

Na Tabela 3.4 exibimos o decréscimo da densidade de fluxo por unidade de tempo, para a RA5536, em média a cada 30 minutos de observações em relação ao valor da densidade de fluxo do início de cada intervalo de observações.

TABELA 3.4 - VARIACAO DA DENSIDADE DE FLUXO POR UNIDADE DE TEMPO

f(GHz)	18	19	20	21	22	23
$\Delta S/\Delta t$ (UFS/h)						
$S_{(c)} - S_{(a)}/h$	- 34	- 26	- 5	- 55	- 13	- 12
$S_{(f)} - S_{(d)}/h$	- 32	- 32	3	- 52	- 20	- 7
$S_{(j)} - S_{(g)}/h$	- 19	- 19	- 8	0	- 13	- 10

Em suma, obtivemos os seguintes resultados para as observações da RA5536:

- A variação do índice espectral durante o período de observações da região ativa foi de $\approx 0,3$; com o índice espectral mantendo-se entre ≈ 0 e $0,32$.

- Durante o intervalo de observações da RA5536 as densidades de fluxo medidas apresentaram decréscimos diferenciados para cada frequência, com os menores valores ($< - 10\%$) sendo registrados para a frequência de 20 GHz ao passo que as demais frequências apresentaram valores $\geq - 10\%$, com os valores mais elevados sendo registrados em 21 GHz na 1ª hora de observações. Na última hora de observações os decréscimos nas densidades de fluxo estiveram entre 0% (21 GHz) e $\approx - 20\%$ (18 e 19 GHz) exibindo valores intermediários para as outras frequências.

- Esta região apesar de encontrar-se no limbo solar oeste apresentou estruturas finas em frequência superpostas aos espectros na faixa de 18 a 23 GHz. Estas estruturas finas consistem de saltos e depressões no perfil de densidade de fluxo com a frequência. Particularmente, para a RA5536 um salto apresentou-se na frequência de 20 GHz com uma largura de banda de 2 GHz (19 - 21 GHz) e amplitude de cerca de 150% a 200% no máximo em relação às frequências vizinhas. Sugerimos que esse salto seja devido a emissão em 20 GHz, contudo, nada

podemos garantir em virtude do valor da densidade de fluxo ter apresentado um decréscimo $< 10\%$ do início ao término do período observacional. Ao mesmo tempo em que houve um salto em 20 GHz, apresentou-se uma depressão na densidade de fluxo para 21 GHz e, ao contrário do que ocorreu em 20 GHz, este decréscimo foi de cerca de 85% em relação ao valor original do início do período observacional.

3.5.2 - ESPECTRO DA REGIAO ATIVA RA5569 (N18W08)

Esta região ativa solar foi observada de 28/06 a 01/07/89. Para o dia 29/06/89, de acordo com dados do SGD N° 540 (parte I), não houve qualquer registro de explosões solares nem tampouco qualquer sinal de atividade ao longo do período de observações (12:16 - 17:08 UT) para a região ativa estudada (RA5569). Fornecemos os dados observacionais desta região ativa para o dia 29/06/89. Nesse dia, a posição da região ativa, obtida pelo mapa em rádio em 22 GHz, era N18W08 e sua temperatura acima do nível do Sol 'calmo' era de 17%. Nesse dia a região ativa estava situada próxima ao centro geométrico do disco solar.

O 'centro' do Sol foi observado das 11:55 às 12:15 UT. O espectro médio do 'centro' do Sol ao longo desses 20 minutos está mostrado na Figura 3.13 abaixo. O espectro é quase plano com um índice espectral de cerca de 0,2 sobre a faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

Pelo mapa observa-se que nas vizinhanças da RA5569 as isotermas apresentam uma distribuição aproximadamente uniforme com um gradiente quase simétrico em quaisquer direções, no plano da superfície solar, a partir do centro da região ativa.

Através do mapa em H- α , identificamos um núcleo opaco circundado por um halo abrilhantado, o qual se prolonga a oeste, nas proximidades da região ativa observada em rádio.

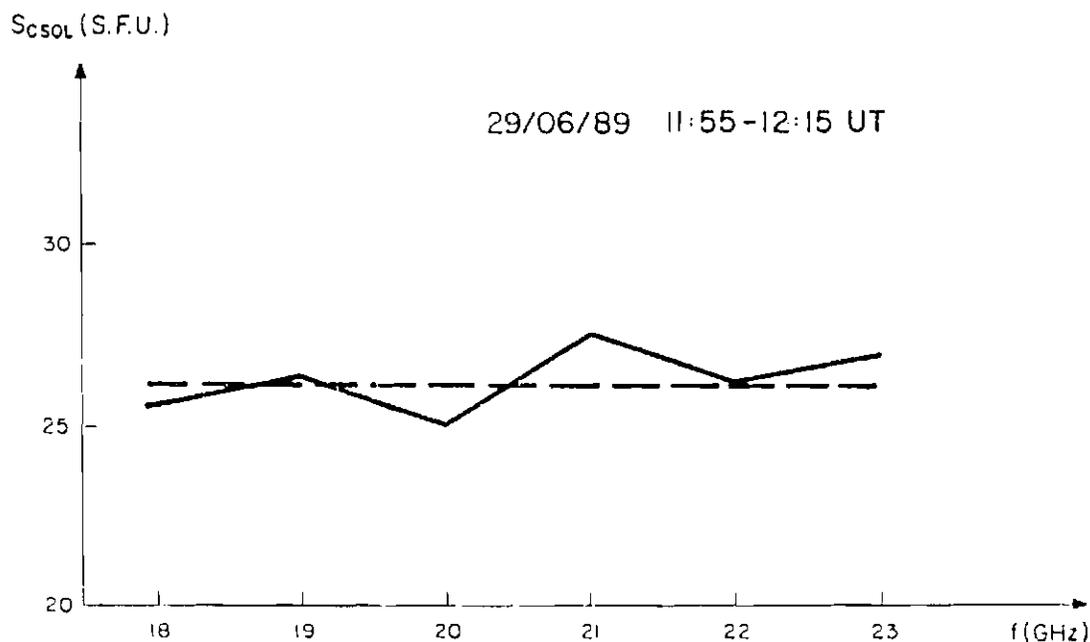


Fig. 3.13 - Espectro do 'centro' do Sol para o dia 29/06/89 tomado como uma média de 20 minutos de observações. A linha tracejada indica um espectro puramente térmico, esperado para o 'centro' do Sol.

Para o dia 29/06/89, a área apresentada pela RA5569 variou de 370×10^{-6} a 290×10^{-6} do início ao término do dia alcançando um valor máximo de 3500×10^{-6} do hemisfério solar às 17:20 UT, ou melhor, no horário correspondente ao fim das observações de 18 a 23 GHz, a região ativa estava sofrendo uma enorme expansão vindo posteriormente a contrair-se de forma intensa até o término do dia 29/06/89.

O perfil temporal de Raios-X moles (GOES-7, X-ray detector) - Figura 3.14 - mostra que o fluxo de Raios-X moles apresentou variações durante o período de observações da RA5569 (12:16 às 17:08 UT). Deve-se ressaltar a variação exibida nas proximidades das 17:00 UT com a ocorrência de um pequeno pico no fluxo.

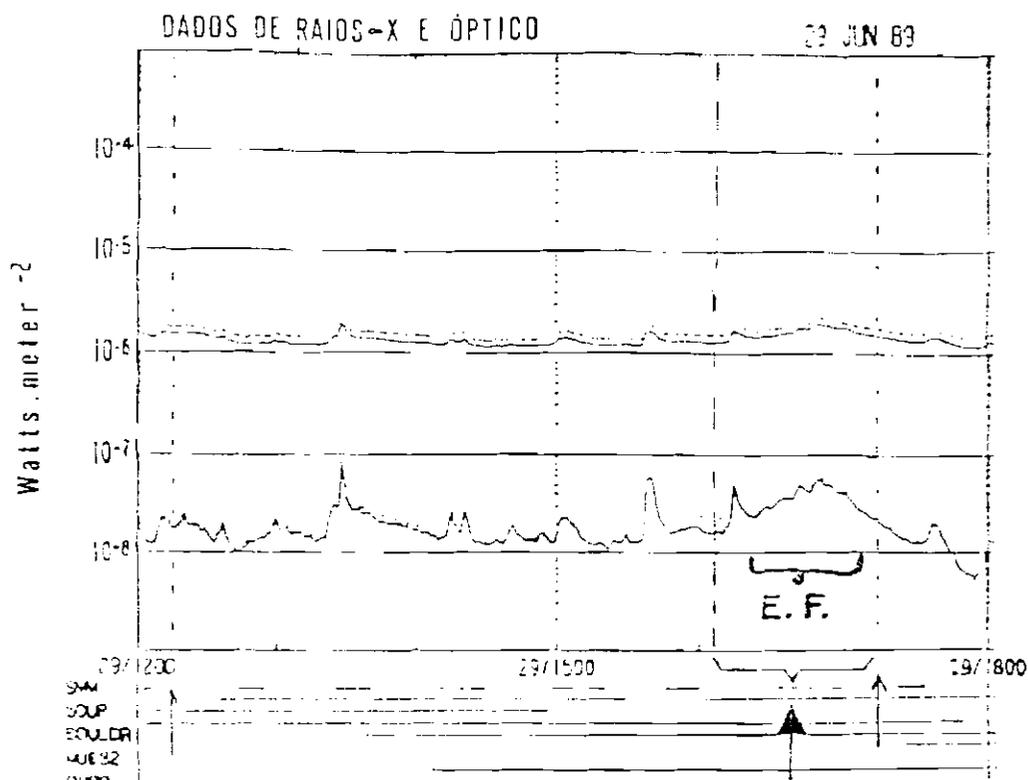


Fig. 3.14 - Perfil temporal do fluxo em Raios-X moles para o dia 29/06/89, obtido com o detector de Raios-X do satélite GOES-7.

Um magnetograma para o dia 29/06/89, mostra uma região magnética complexa que se estende a oeste, a qual corresponde razoavelmente bem com o quadro de H- α apresentado para a posição da região ativa RA5569.

A região ativa - RA5569 - foi observada durante o intervalo compreendido entre 12:16 - 17:08 UT, e os espectros desta região ativa bem como sua evolução temporal ao longo do intervalo das observações estão fornecidos na Figura 3.15 (a - 1).

- Intervalo 12:16 - 12:50 UT: A Figura 3.15 (a,b,c) mostram que ao longo do intervalo de 12:16 às 12:50 UT os espectros da região ativa exibiram uma morfologia semelhante àquela mostrada pelo espectro do 'centro' do Sol (vide fig. 3.13). Ao longo deste intervalo o fluxo apresentou um decréscimo nos seus valores com relação aos valores do

início do intervalo. Entre o término deste intervalo observacional e o início do seguinte efetuamos calibração para a região ativa observada.

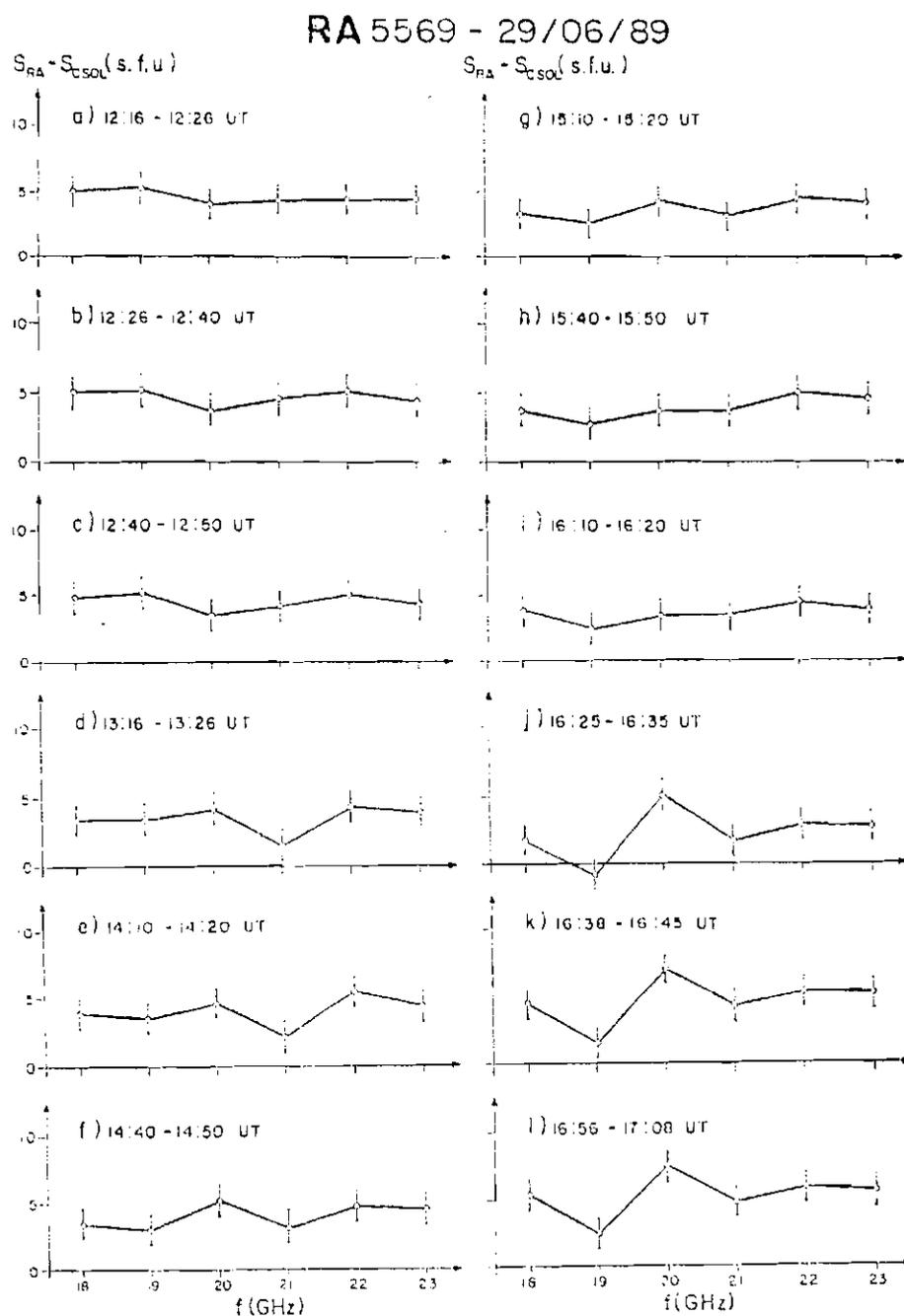


Fig. 3.15 (a - l) - Evolução temporal dos espectros da região ativa solar RA5569 obtidos na faixa de frequências de 18 a 23 GHz para o dia 29/06/89.

- Intervalo 13:16 - 15:20 UT: Os espectros da região ativa, obtidos da mesma forma como descrito acima, para o intervalo seguinte das 13:16 às 15:20 UT são exibidos na Figura 3.15 (d,e,f,g). A variação da densidade de fluxo para as frequências 18, 19, 22 e 23 GHz foi pequena ($\leq 10\%$) durante este intervalo de tempo. Entretanto, o fluxo em 20 GHz cresceu em 25% durante aproximadamente 30 minutos em torno das 14:40 UT e retornou a seu valor original nos 10 minutos seguintes. No mesmo intervalo, o fluxo em 21 GHz sofreu um decréscimo de cerca de 64%, em cerca de 10 minutos, e depois principiou a recuperar-se atingindo seu valor original somente após cerca de 2 horas, já no término do tempo observacional. Entre o término deste período e o início do seguinte efetuamos apontamento da RA5569.

- Intervalo 15:40 - 16:20 UT: É importante notar que durante o intervalo de tempo das 15:40 às 16:20 UT - Figura 3.15 (h, i) - praticamente não houve variação no fluxo ($\leq 15\%$) para todas as frequências em comparação às 15:20 UT.

Contudo, de 16:20 às 16:25 UT houve um decréscimo repentino dos valores de densidade de fluxo, em comparação com seus valores às 16:20 UT, para todas as frequências exceto para 20 GHz. A variação de densidade de fluxo para cada uma das frequências, no intervalo 16:25 às 16:35 UT comparado ao intervalo de 16:10 às 16:20 UT, é fornecida na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
P(%)	-58	-136	46	-54	-36	-28

- Intervalo 16:38 - 17:08 UT: Durante os 30 minutos seguintes - 16:38 a 17:08 UT, Figura 3.15 (j, k, l) - houve uma elevação gradual das densidades de fluxo em todas as frequências exceto 19 GHz. Enquanto 18 e 21 GHz retornaram a seus valores originais, do início das observações, os valores do fluxo em 20, 22 e 23 GHz aumentaram em 85%, 35% e 27% respectivamente; ao passo que houve decréscimo de cerca de 53% em 19 GHz no período inteiro de observações em comparação ao começo

das observações. Além disso, deve ser notado o excesso de 85% de elevação da densidade de fluxo em 20 GHz para a região ativa em comparação com seu valor original do início das observações e também em comparação às frequências vizinhas.

Ao longo de todo o período observacional da RA5569 o índice espectral variou de 0,05 nos primeiros 10 minutos das observações a 0,32 no último intervalo do tempo observacional, tendo atingido um valor máximo de 0,47 dentro do intervalo compreendido entre 16:25 às 16:35 UT.

Na Tabela 3.6 fornecida abaixo exibimos o decréscimo da densidade de fluxo por unidade de tempo, para a RA5569, em média a cada 30 minutos de observações em relação ao valor da densidade de fluxo do início de cada intervalo de observações.

TABELA 3.6 - VARIACÃO DA DENSIDADE DE FLUXO POR UNIDADE DE TEMPO

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
$\Delta S/\Delta t$ (UFS/h)						
$S_{(c)} - S_{(a)}/h$	- 3	0	-17	-8	31	0
$S_{(g)} - S_{(d)}/h$	- 1	-10	0	18	1	1
$S_{(h)} - S_{(i)}/h$	0	- 8	- 7	- 6	-17	-23
$S_{(l)} - S_{(j)}/h$	109	92	82	104	96	91

Em suma, obtivemos os seguintes resultados para as observações da RA5569:

- A variação do índice espectral durante o período de observações da região ativa foi de $\approx 0,4$; com o índice espectral mantendo-se entre 0,05 e $\approx 0,3$ valores estes correspondentes ao início e término das observações, respectivamente; com o índice espectral atingindo um valor máximo de $\approx 0,5$ durante o intervalo de 16:25 a 16:35 UT.

- As densidades de fluxo medidas apresentaram um pequeno decréscimo diferenciado para cada frequência dentro das 3 primeiras horas de observações, com os maiores valores sendo registrados para as

freqüências de 19, 20 e 23 GHz. As outras freqüências exibiram uma diminuição pequena e até acréscimo para os valores de densidade de fluxo medidos dentro deste intervalo de observações.

- As quedas registradas para as densidades de fluxo, com o tempo, durante o período de observações apresentaram-se maiores no início das observações com valores de até $\approx - 20\%$ ao passo que nos últimos 30 minutos de observações os valores sofreram uma elevação abrupta apresentando valores entre $\approx + 80\%$ a $+110\%$ no intervalo de 16:38 a 17:08 UT.

- Esta região ativa encontrava-se próximo ao centro do disco solar e apresentou estruturas finas em freqüência superpostas aos espectros na faixa de 18 a 23 GHz. Estas estruturas finas consistem de saltos e depressões no perfil da densidade de fluxo com a freqüência. Especificamente, para a região ativa RA5569 houve o registro de um salto em 20 GHz com uma largura de banda ≈ 2 GHz e amplitude de aproximadamente o dobro do nível médio correspondente às demais freqüências, ao mesmo tempo também houve o registro de uma depressão em 19 GHz com uma largura de banda de ≈ 2 GHz e amplitude de $\approx - 100\%$. Ao mesmo tempo em que houve um salto em 20 GHz, apresentou-se um decréscimo na densidade de fluxo para 19 GHz.

A possível interpretação dos espectros do 'centro' do Sol e os espectros de região ativa solar bem como as estruturas finas, em emissão e absorção, de banda estreita em freqüência (≈ 2 GHz) superpostas acima dos espectros das regiões ativas são fornecidos no capítulo seguinte.

CAPITULO 4INTERPRETAÇÃO E CONCLUSÕES4.1 - INTERPRETAÇÃO DOS ESPECTROS DO 'CENTRO' DO SOL

As primeiras observações espectroscópicas da radioemissão do Sol 'calmo' ('centro' do Sol) foram efetuadas na faixa de frequências de 5 a 7 GHz por Kaverin et al. em 1979. O erro absoluto daquelas medidas era de 25% (com um erro relativo máximo de 3%), e dentro dessa faixa de frequências o espectro da radiação proveniente do Sol 'calmo' não apresentou quaisquer estruturas finas com a frequência durante todo o período observacional (cerca de 20 dias em agosto de 1976 e 10 dias em agosto de 1977).

Como a região observada correspondente ao 'centro' do Sol tratava-se de uma região de Sol 'calmo' distante das regiões ativas, observou-se que sua emissão não foi afetada de forma perceptível - o espectro manteve-se aproximadamente térmico - pelas regiões ativas presentes no disco solar, nem tampouco pela porcentagem apresentada por estas últimas acima do nível do Sol 'calmo'.

Vista no magnetograma e no mapa em H- α do dia 22/05/88 a região do 'centro' do Sol observada situava-se num local sem qualquer estrutura ou atividade magnética e distante de quaisquer estruturas em H- α presentes no disco solar - SGD N^o 527(I).

Quanto aos dias 19/06/89 e 29/06/89 a região correspondente ao 'centro' do Sol localizava-se afastada de quaisquer estruturas magnéticas ou de H- α presentes no disco solar nesses dias. Entretanto, não tão distantes quanto para o dia 22/05/88 já que em junho de 1989 o Sol encontrava-se muito mais ativo com diversas manchas presentes no disco solar. Os espectros do 'centro' do Sol apresentaram ligeiras distorções na faixa de 18 a 23 GHz - o valor pico-a-pico da variação do espectro do 'centro' do Sol foi tomado como a barra de erro para as medidas dos espectros de regiões ativas nos dias

correspondentes - e apesar de encontrarem-se dentro dos erros experimentais $\approx 15\%$ podem ser devidas a algum tipo de influência das regiões ativas presentes em grande número no disco solar nestes dias.

Apresentamos resultados de observações dos espectros do 'centro' do Sol - na faixa de frequências de 18 a 23 GHz com resolução de 1 GHz utilizando dados de 3 dias. Os espectros do 'centro' do Sol apresentaram-se quase planos para os 3 dias escolhidos, e mostrou-se que para 3 esses dias o índice espectral esteve entre 0 e 0,2 durante as observações do 'centro' do Sol sugerindo um espectro fundamentalmente térmico, ou melhor, um mecanismo de emissão bremsstrahlung na faixa de frequências das observações.

4.2 - INTERPRETAÇÃO DOS ESPECTROS DA 'COMPONENTE LENTAMENTE VARIÁVEL' DE REGIÕES ATIVAS SOLARES

A 'componente lentamente variável' da emissão solar em microondas é originada em fontes locais situadas em regiões ativas da cromosfera e coroa, acima de manchas e flóculos solares.

Algumas particularidades apresentadas pelo espectro liso tais como: um máximo entre os comprimentos de onda de 5 a 10 cm, baixa polarização ($< 10\%$) em comprimentos de onda maiores do que $\lambda_{\text{máx}}$ decrescente com o aumento do comprimento de onda e radiação polarizada em comprimentos de onda menores do que $\lambda_{\text{máx}}$ correspondendo ao modo extraordinário; podem ser explicadas com base na ação combinada dos mecanismos ciclotron térmico e bremsstrahlung, dependendo da faixa de frequências.

Zlotnik (1987) sugere que os diferentes tipos de espectro sejam explicados somente pela diferença nas condições físicas das fontes ao invés de diferenças em sua natureza. Explicando assim a inclinação do espectro, positiva, nula (espectro plano), ou negativa. Além disso, os espectros planos (com duração menor do que 3 dias) estariam melhor correlacionados à ocorrência de flares do que os espectros inclinados (Steffen, 1980; Zlotnik, 1987).

As observações de Efanov et al. (1972) mostraram um espectro quase plano entre 6 e 17 mm com uma predominância do mecanismo de emissão bremsstrahlung nessa faixa (Zlotnik, 1968 a, b). As observações de Lang e Willson (1983) com VLA sugeriram que a baixa temperatura de brilho ($10^4 - 10^5$) observada no comprimento de onda de 2 cm seria devido à emissão bremsstrahlung de eletrons térmicos na região de transição cromosfera-coroa.

Façamos um breve cálculo do espectro de emissão bremsstrahlung. Usando-se as expressões 1.1 e 1.8, e tomando-se a parte opticamente fina do espectro ($1 - e^{-\tau_1} \approx \tau_1$), com os principais parâmetros físicos das regiões ativas solares na faixa de freqüências de 18 a 23 GHz sendo dados por:

$$T \approx 10^3 - 10^4 \text{ K}; N_e \approx 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}; \text{ e } h \approx 10^3 - 10^4 \text{ km acima da}$$

fotosfera, obtemos:

$$I_{\omega_1} = \frac{I_0}{2} \tau_1 \Rightarrow I_{\omega_1} \propto N_e^2 T^{-1/2} L \approx \text{cte. (espectro plano)} \quad (4.1)$$

onde: I_{ω_1} é a intensidade específica para a girofreqüência ω no modo extraordinário;

I_0 é a intensidade específica no vácuo para a girofreqüência ω ;

τ_1 é a profundidade óptica para a radiação no modo extraordinário;

T é a temperatura dos eletrons;

N_e é a densidade dos eletrons;

L é o tamanho da região emissora.

Para uma fonte de emissão térmica com os parâmetros N_e , T e dimensões (L) bem definidos. A partir de observações da 'componente lentamente variável' notamos que a característica mais importante apresentada pelos espectros das regiões ativas na faixa de freqüências das observações foi que os espectros mostram-se quase planos com índices espectrais situando-se entre - 0,2 e 0,2, o que sugere uma

emissão de origem basicamente térmica proveniente dessas fontes locais (Sawant e Cecatto, 1989).

4.3 - INTERPRETAÇÃO DA ESTRUTURA FINA

As estruturas finas em emissão e/ou absorção observadas na faixa de 18 a 23 GHz e citadas no capítulo 3 são explicadas por vários autores (Schmahl, 1984; Zheleznyakov e Zlotnik, 1988) em termos de linha de ciclotron e/ou pela presença de uma 'lâmina de corrente neutra' entre a fonte e o observador (Cecatto et al., 1990; Sawant e Cecatto, 1990; Sawant et al., 1990).

As observações utilizando um receptor de frequência variável, na faixa de 18 a 23 GHz, revelaram a presença de estruturas finas em frequência com o tempo para 2 (RA5536 e RA5569) das 4 regiões ativas observadas. *Basicamente, as estruturas observadas consistem de estreitas 'linhas' (\approx 2 GHz de largura) de absorção e/ou emissão - as quais apresentam-se com uma amplitude que pode atingir até 100% do nível de densidade de fluxo relativo em comparação com o nível médio observado para as frequências vizinhas àquela que apresenta a estrutura fina - exibindo-se superpostas ao espectro térmico da radioemissão proveniente de regiões ativas solares.* Para as observações do dia 19/06/89, a RA5536 apresentou uma estrutura de absorção, ao passo que durante as observações do dia 29/06/89 a RA5569 apresentou uma estrutura de emissão e outra de absorção.

Provavelmente as regiões ativas eram compostas por mais do que uma fonte emissora com dimensões $\leq 1'$ de arco, sendo que cada uma dessas fontes poderia estar emitindo um espectro crescente, plano ou decrescente em faixas de frequências distintas e adjacentes. Desta forma, o espectro da região ativa observado com resolução espacial de $4'$ de arco seria a soma das emissões de cada fonte individual resultando num espectro complexo: crescente, decrescente e plano, ao mesmo tempo, numa estreita faixa de frequências. Nas observações as várias fontes não puderam ser resolvidas e a emissão detectada era a soma das emissões provenientes de cada fonte individual. Durante as

observações, as fontes pode ter sofrido algum processo de evolução ou mutação, o que deve ter alterado o espectro de emissão de cada uma das fontes individuais e conseqüentemente o espectro da região ativa como um todo. Entretanto, como as regiões ativas não foram resolvidas espacialmente, nada podemos garantir tanto a respeito da presença de várias fontes nos seus interiores quanto ao tipo de processo físico o qual modificou o espectro emitido pelas regiões ativas estudadas durante as observações.

4.3.1 - ESTRUTURA FINA DE ABSORÇÃO

4.3.1.1 - PARA O DIA 19/06/89 - RA5536

Esta estrutura fina é constituída de uma depressão no perfil de densidade de fluxo com a frequência, a qual atingiu uma amplitude de $\approx - 85\%$ do nível original da densidade de fluxo, na última hora de observações, correspondendo à frequência de 21 GHz (semelhante a uma linha de absorção) com uma largura de banda de ≈ 2 GHz (20 a 22 GHz).

Essa estrutura fina de absorção pode ser explicada em termos da presença de uma 'lâmina de corrente neutra' na linha de visada entre a região que está sendo observada e o observador.

A seguir, fazemos um cálculo aproximado da densidade dos eletrons na 'lâmina de corrente neutra' responsável por essa absorção observada. Assumindo que o índice de refração é unitário ($n \approx 1$) para a frequência de observação (21 GHz) a radiação nessa frequência é refletida ou parcialmente transmitida com absorção. Neste caso, tomando-se a frequência de plasma local temos:

$$f_o = 9 \cdot 10^3 N_e^{1/2} \quad (4.2)$$

onde: f_o é a frequência de absorção e N_e é a densidade dos eletrons da 'lâmina de corrente neutra'.

Sabendo-se que a estrutura fina de absorção se caracteriza em 21 GHz obtemos:

$$f_p \approx 21 \text{ GHz} \Rightarrow 21 \cdot 10^9 = 9 \cdot 10^3 N_e^{1/2} \Rightarrow N_e \approx 5,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}.$$

O valor calculado acima corresponde à densidade dos eletrons na 'lâmina de corrente neutra' entre a fonte emissora e o observador.

4.3.1.2 - PARA O DIA 29/06/89 - RA5569

Na Figura 4.1 (a - f) mostramos a variação da densidade fluxo com o tempo durante as observações da RA5569, para cada uma das freqüências de observação.

Efetuando um cálculo semelhante ao realizado acima, agora para a RA5569 observada no dia 29/06/89, cujo espectro apresenta uma estrutura de absorção na freqüência de 19 GHz, com banda estreita (≈ 2 GHz) e amplitude de $\approx -110\%$ do nível original da densidade de fluxo, superposta ao espectro térmico, obtemos a densidade dos eletrons na 'lâmina de corrente neutra' a partir da freqüência de plasma local (equação 4.2):

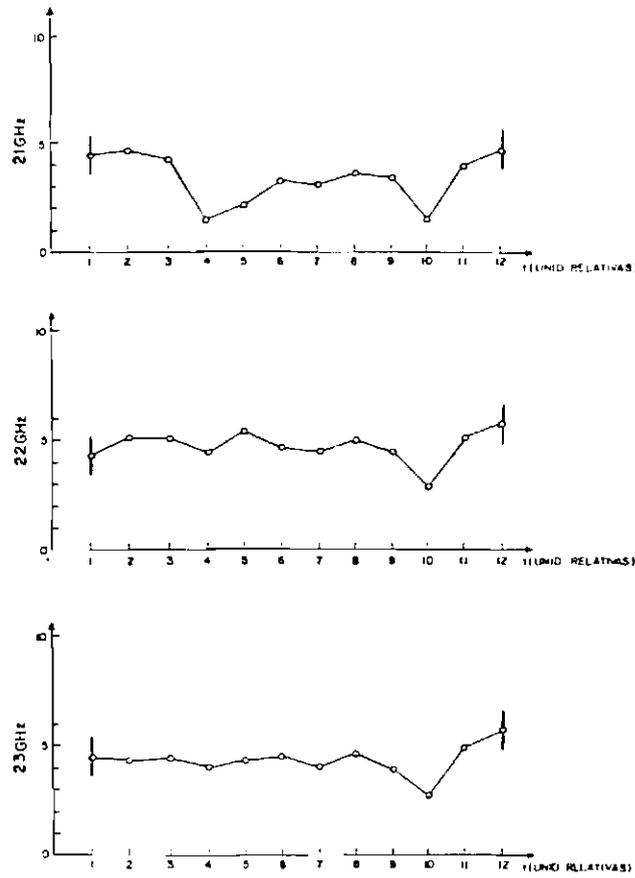
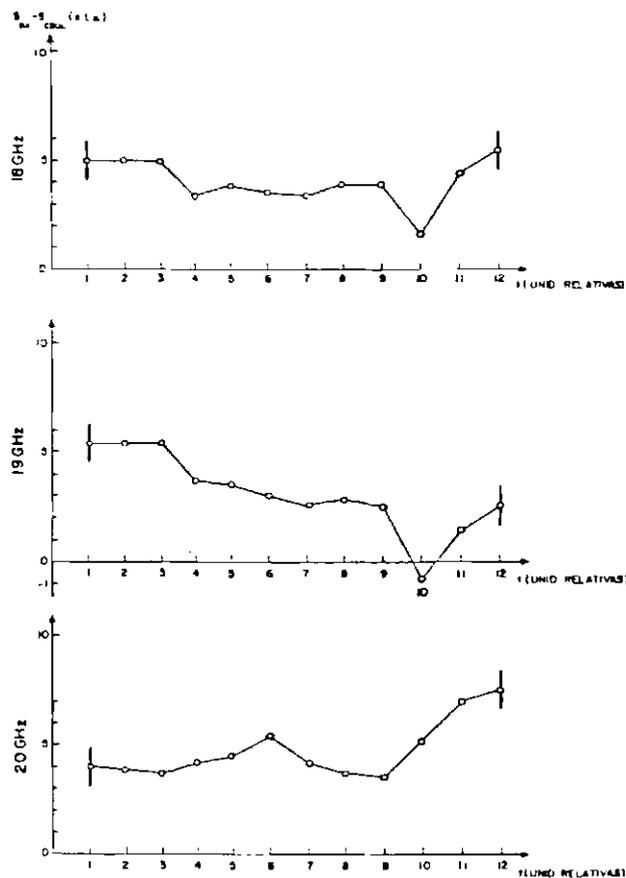
$$f_p = 9 \cdot 10^3 N_e^{1/2}$$

Sabendo-se que a estrutura fina se caracterizou em 19 GHz obtemos a partir da eq. (4.2):

$$f_p \approx 19 \text{ GHz} \Rightarrow 19 \cdot 10^9 = 9 \cdot 10^3 N_e^{1/2} \Rightarrow N_e \approx 4,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

Esta densidade corresponde àquela densidade dos eletrons na região absorvedora entre a fonte emissora e o observador.

AR5569 - 29/06/89



- 1 - 12:16 12:36 UT
- 2 - 12:26 12:40 UT
- 3 - 12:40 12:50 UT
- 4 - 13:16 13:26 UT
- 5 - 14:16 14:20 UT
- 6 - 14:40 14:50 UT
- 7 - 15:10 15:20 UT
- 8 - 15:40 15:50 UT
- 9 - 16:10 16:20 UT
- 10 - 16:25 16:35 UT
- 11 - 16:38 16:45 UT
- 12 - 16:56 17:05 UT

Fig. 4.1 (a - f) - Variação da densidade de fluxo para cada frequência correspondente ao intervalo de observações da região ativa solar RA5569.

Na Figura 4.2 (a - d) mostramos a variação relativa da diferença das densidades de fluxo da região ativa para aquela do 'centro' do Sol com relação ao espectro dos 10 primeiros minutos de observações.

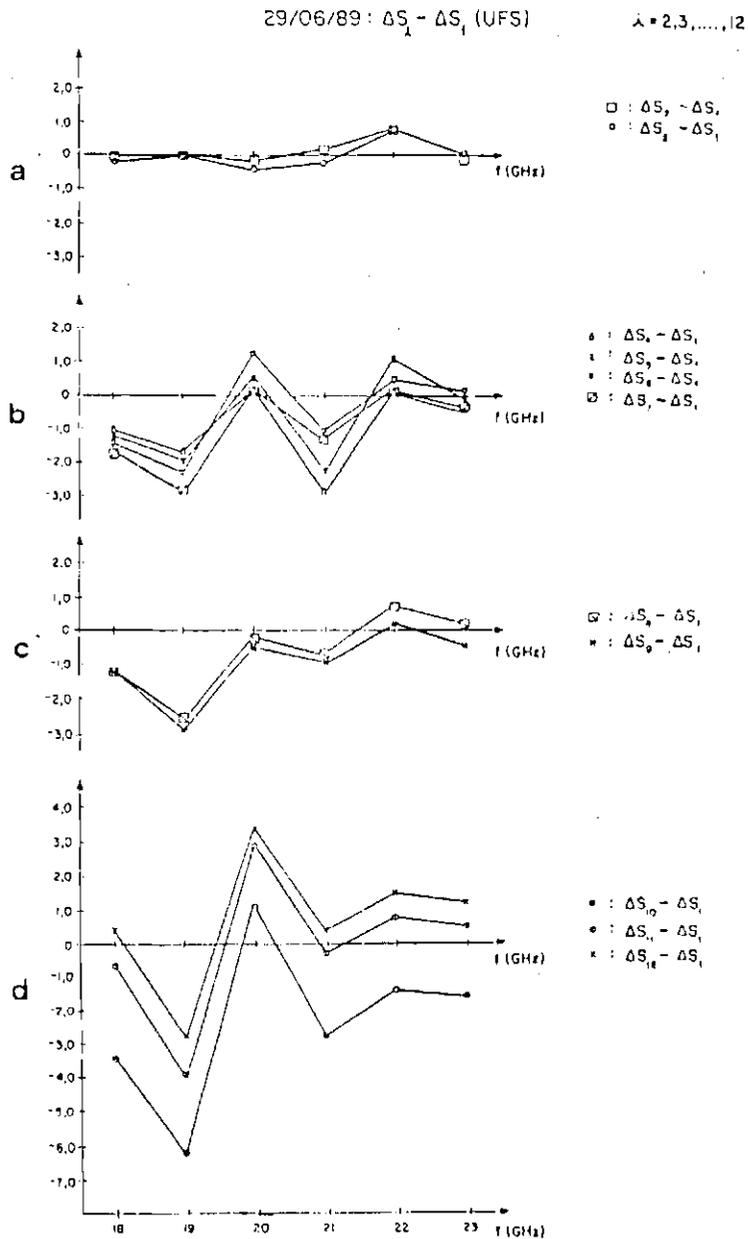


Fig. 4.2 (a - d) - Variação relativa da diferença das densidades de fluxo da região ativa solar RA5569 para aquela do 'centro' do Sol com relação aos 10 primeiros minutos de observações.

4.3.2 - ESTRUTURA FINA DE EMISSAO PARA O DIA 29/06/89 - RA5569

Esta estrutura fina é constituída de uma elevação no perfil de densidade de fluxo com a frequência, com uma amplitude de $\approx 85\%$ acima do nível de densidade de fluxo original do início das observações, correspondendo à frequência de 20 GHz (semelhante a uma linha de ciclotron de emissão) com uma largura de banda de ≈ 2 GHz (19 a 21 GHz).

Faremos a seguir um comentário mais detalhado sobre as 2 outras sugestões de explicação da estrutura fina em frequência superposta aos espectros das regiões ativas solares.

4.3.2.1 - Sugestão I - Linha de ciclotron

Sugerimos que o excesso de emissão observado na frequência de 20 GHz possa ser devido à presença de uma *Linha de ciclotron* superposta ao espectro de emissão térmico da região ativa e correspondente ao 3^o harmônico da girofrequência para o modo extraordinário. A emissão girossíncrotron é normalmente gerada nos harmônicos 1, 2, ..., n da girofrequência em locais onde o campo magnético é constante. Sendo a radiação gerada numa região de campo magnético desuniforme, neste caso, a emissão ocorre até o 3^o ou 4^o harmônicos da girofrequência e esta emissão é chamada de 'linha de ciclotron'.

Cálculos mais detalhados com respeito a esta estrutura fina de emissão observada seguem abaixo.

Supondo que a radiação observada em 20 GHz correspondente à estrutura fina, é proveniente do 3^o harmônico da girofrequência no modo extraordinário, a qual é dada por:

$$f_H = 2,8 \times 10^6 \text{ H} \quad (4.3)$$

Podemos obter a frequência fundamental f_H , correspondente à emissão numa região de campo magnético H:

$$\text{Sendo: } f = 3 f_H \Rightarrow f_H = f/3 \approx 6700 \text{ MHz}$$

Obtemos, deste modo, um campo magnético:

$$f_H = 2,8 \cdot 10^6 \text{ H} \approx 6700 \cdot 10^6 \Rightarrow \text{H} \approx 2400 \text{ G}$$

onde: f_H é a frequência de ciclotron da região emissora correspondente à emissão numa região de campo magnético H;

f é a frequência de observação;

H é a intensidade do campo magnético na região emissora.

Podemos calcular a altura da emissão na frequência fundamental, sabendo-se que esta deve estar sendo gerada acima do nível de frequência de plasma. Neste caso, usando a eq. (4.2) calculamos a densidade dos eletrons:

$$f_o \approx 6700 \text{ MHz} \Rightarrow 6700 \cdot 10^6 \approx 9 \cdot 10^3 N_e^{1/2} \Rightarrow N_e \approx 5,5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

Também podemos calcular a altura da emissão da frequência fundamental considerando que ela foi gerada logo acima do nível de plasma.

Tomando-se a lei:

$$N(h) = 2,5 \cdot 10^{12} e^{-7,7 \cdot 10^{-4}(h-500)} \text{ cm}^{-3} \quad (4.4)$$

para a variação da densidade cromosférica (correspondendo a 5 vezes o modelo de densidade cromosférico de Cillière-Menzel, 1935) onde h é a altura acima da fotosfera, obtemos uma estimativa da altura correspondente à densidade assumida - $h(N_e)$.

Considerando-se:

$N_e = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, e usando a eq. (4.4) obtemos a altura:

$$h(N_e) \approx 2600 \text{ km acima da fotosfera.}$$

Sabendo-se que a área da região ativa RA5569 era $A_{RA} \approx 3,0 \times 10^{-4}$ do hemisfério solar e supondo uma região ativa aproximadamente esférica com uma projeção circular sobre a superfície do disco solar, obtemos uma estimativa do raio da região ativa (b):

$$b \approx 12000 \text{ km}$$

Agora, podemos calcular o campo magnético a nível fotosférico, tomando-se a seguinte lei de variação do campo magnético com a altura acima da fotosfera (Zheleznyakov, 1970, pág. 11):

$$H(h) = H_o \left(1 - \frac{h}{(h^2 + b^2)^{1/2}} \right) \quad (4.5)$$

onde: h é a altura acima da fotosfera;

b é o raio estimado da região ativa observada;

H_o é a intensidade do campo magnético fotosférico;

H(h) é a intensidade do campo magnético na altura h.

podemos estimar o campo magnético a nível fotosférico, a partir dos valores de h e b acima calculados:

$$H_o \approx 3000 \text{ G}$$

O valor calculado acima para o campo magnético fotosférico correspondente à região ativa RA5569 encontra-se dentro da mesma ordem de grandeza do valor obtido por medidas em outros comprimentos de onda. Particularmente, o campo magnético fotosférico fornecido pelo SGD para a RA5569 no dia 29/06/89 (durante o período das observações de 18 a 23 GHz) encontra-se entre 2100 e 2500 G.

4.3.2.2 - Sugestao II - Patamar no perfil de temperatura cromosferica

A segunda possibilidade de explicação da estrutura fina, seria a presença de um patamar no perfil de temperatura cromosférica, correspondendo a uma temperatura de cerca de $2 \cdot 10^4$ K. Este patamar foi proposto teoricamente por Athay (1985), e deveria existir nas alturas da cromosfera superior (2000 - 2500 km acima da fotosfera) possuindo uma largura de ≈ 200 km.

Anteriormente, o perfil de temperatura cromosférica apresentava um caráter uniforme e crescente com a altura a partir da baixa cromosfera até a região de transição cromosfera-coroa, como mostrado na Figura 4.3.

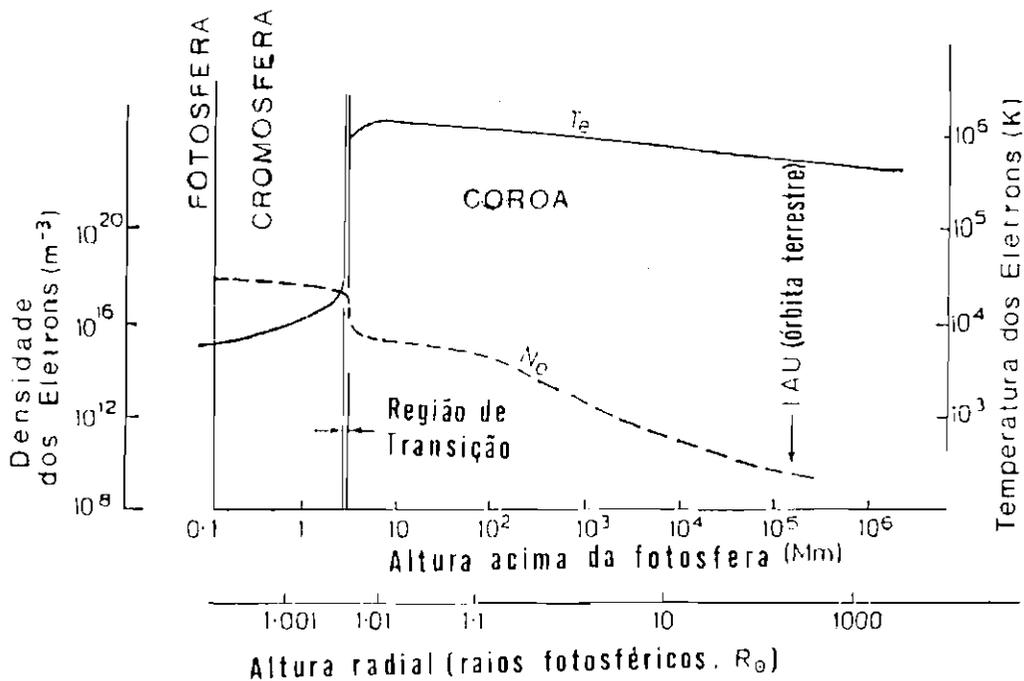


Fig. 4.3 - Perfil de temperatura cromosférico-coronal com a altura acima da fotosfera obtido sem resolução suficiente.

FONTE: Dulk (1985).

Recentemente, Vernazza et al. (1981) efetuaram estudos a partir de observações da emissão solar cromosférica em Lyman- α e EUV, e observaram que o perfil de temperatura cromosférica com a altura quando observado com alta resolução ($\leq 1''$ de arco) exhibe um aspecto mais complexo, mostrando um patamar de temperatura de cerca de 22000 km em alturas de 2000 - 2500 km acima da fotosfera, Figuras 4.4 e 4.5.

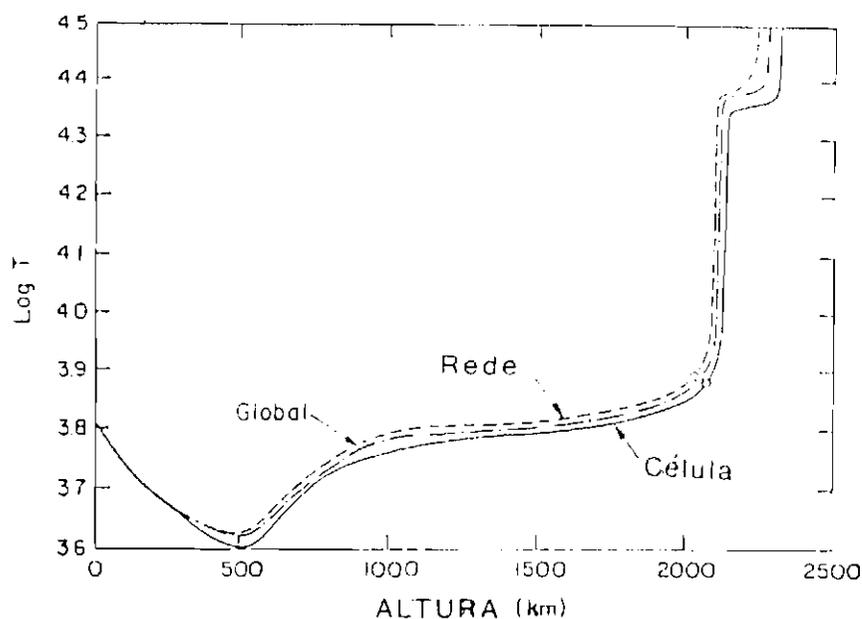


Fig. 4.4 - Modelo de Vernazza et al. (1981), para o perfil de temperatura cromosférico obtido a partir de resultados em Lyman- α e EUV.

FONTE: Vernazza et al. (1981).

As estruturas finas de emissão observadas no espectro da região ativa RA5569 poderiam ser devido à presença desse patamar de temperaturas cromosféricas quando observado na faixa de frequências de 18 a 23 GHz com alta resolução em frequência e alta sensibilidade.

Sugerimos que a estrutura fina em frequência no espectro da região ativa solar possa ser o correspondente em rádio desse patamar de temperatura cromosférica sugerido a partir de cálculos da emissão em EUV e H- α efetuados teoricamente (Athay, 1985).

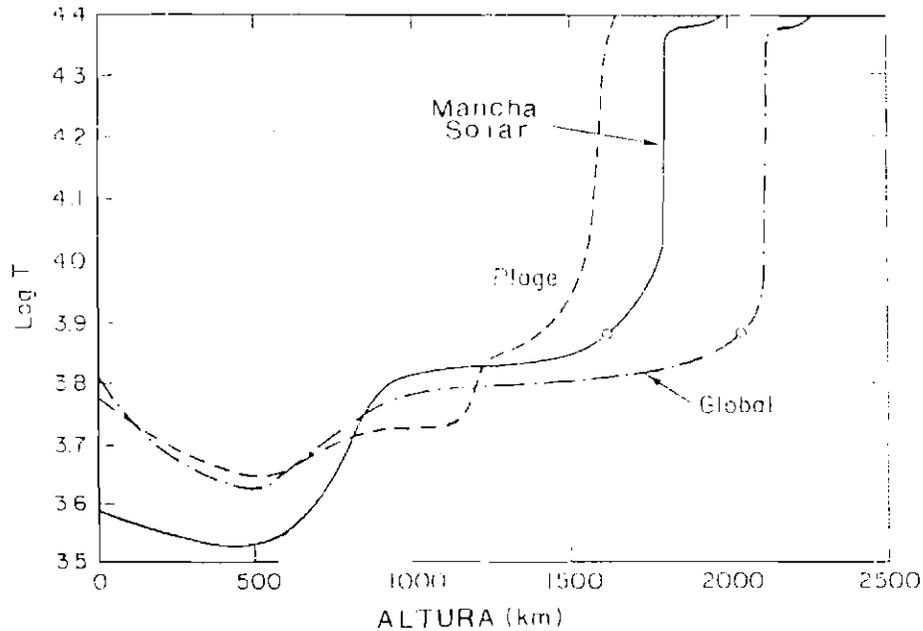


Fig. 4.5 - Modelo de Lites e Skumanich (1982), para o perfil de temperatura com a altura acima da fotosfera para manchas solares e plages, em alturas correspondentes à cromosfera.
 FONTE: Lites e Skumanich (1982).

Abaixo, fornecemos uma estimativa da *distorção* do espectro de emissão da região ativa em rádio - assumindo que esta emissão é térmica - causada pela possível presença de um patamar no perfil de temperatura cromosférica.

A densidade de fluxo de emissão Φ é dada por:

$$\Phi = \frac{k \omega^2 T_B \Omega(\omega)}{8 \pi^3 c^2} \approx \frac{D T_B(\lambda)}{\lambda^3} ; D \propto \Omega \approx \text{cte.} \quad (4.6)$$

$$T = \int_0^{\infty} T(\tau) e^{-\tau} d\tau \quad (4.7)$$

$$\tau(\Gamma) = \int_{\Gamma}^{\infty} \mu(\Gamma) d\Gamma \quad (4.8)$$

onde: T_B é a temperatura de brilho da região emissora;
 k é a constante de Boltzmann;
 ω é a frequência angular de observação;
 $\Omega(\omega)$ é o tamanho angular da região emissora na frequência ω ;
 c é a velocidade da luz no vácuo;
 λ é o comprimento de onda correspondente à frequência angular ω ;
 D é uma constante dependente dos valores de K , ω ou λ e $\Omega(\omega)$;
 T é a temperatura dos eletrons emissores;
 τ é a profundidade óptica do meio ambiente;
 $\mu(\Gamma)$ é o coeficiente de absorção num raio Γ do centro do Sol;
 Γ é uma determinada distância na qual a radiação é $1/e$ de seu valor original.

Uma solução aproximada de (4.7) para $\tau(\Gamma_\lambda) \approx 1$ é:

$$T_B(\lambda) \approx T(\Gamma_\lambda) \quad (4.9)$$

onde: $T_B(\lambda)$ é a temperatura de brilho da fonte no comprimento de onda λ
 Γ_λ é a distância correspondente ao fator $1/e$ do valor original da emissão;
 $\tau(\Gamma_\lambda)$ é a profundidade óptica na distância Γ_λ ;
 $T(\Gamma_\lambda)$ é a temperatura cinética da camada $\Gamma = \Gamma_\lambda$.

De acordo com a Figura 4.6, o espectro do Sol 'calmo' na faixa de comprimentos de onda envolvidos (18 a 23 GHz) mostra $\Phi_o(\lambda) = \text{cte}$. Nesta figura, apresentamos as 4 variantes no espectro associadas com o patamar mostrado no perfil de temperatura cromosférica fornecido acima, nas Figuras 4.4 e 4.5, e que podem explicar com boa aproximação a estrutura fina registrada nos espectros de 2 regiões ativas observadas.

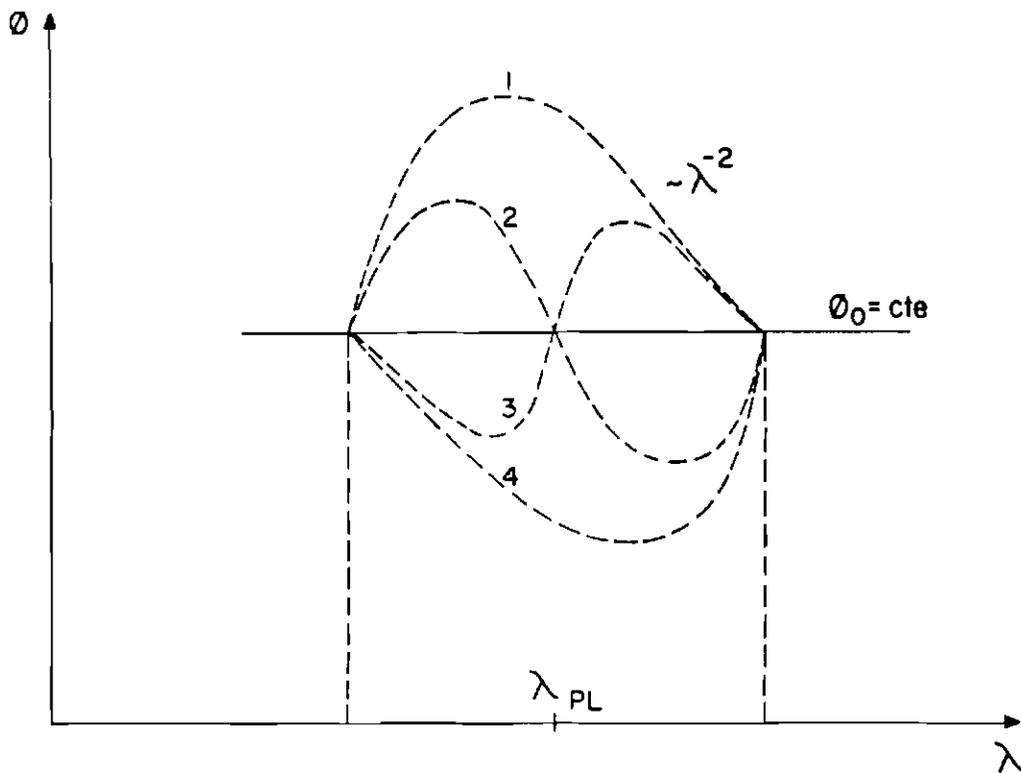


Fig. 4.6 - Espectro de densidade de fluxo calculado para a radiação proveniente de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, exibindo as 4 variantes do espectro que apresentaram estruturas finas superpostas ao espectro térmico de emissão.

Sendo $\Phi_0 = \text{cte.}$, então: $T_B(\lambda) \approx T(\Gamma_\lambda) \propto \lambda^2$, como mostrado na Figura 4.7. Nesta figura, as variantes 1, 2, 3 e 4 fornecem os desvios de $T_B(\lambda)$ correspondentes aos mesmos desvios do espectro $\Phi(\lambda)$.

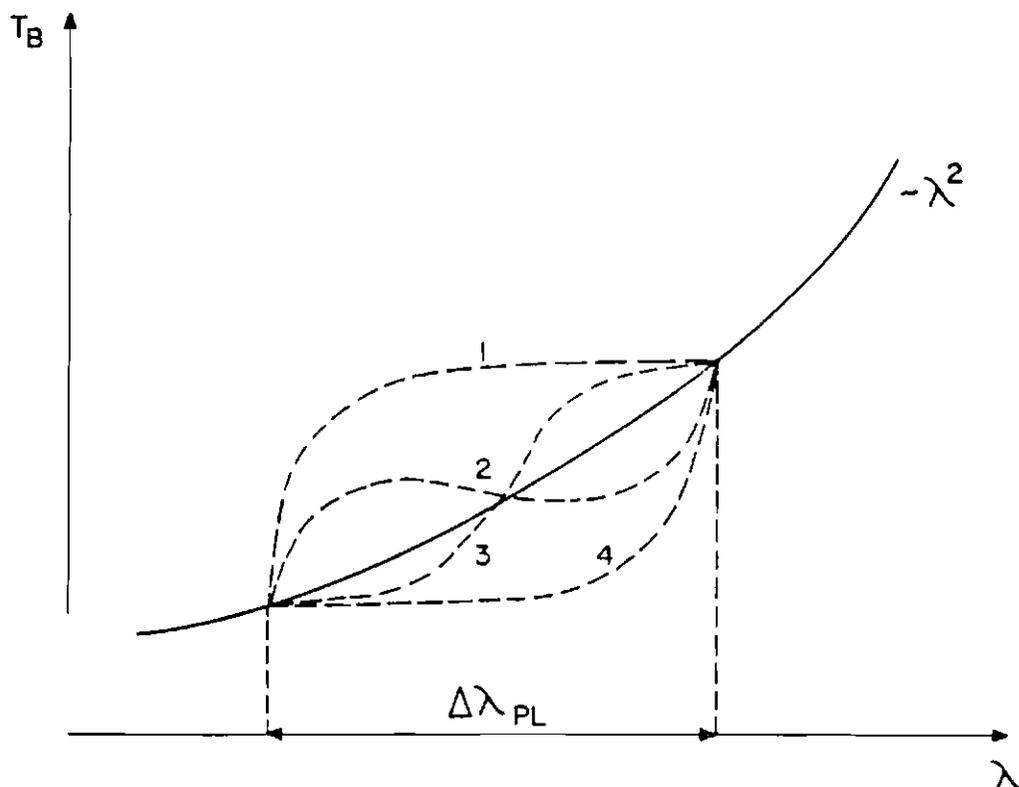


Fig. 4.7 - Espectro de temperatura de brilho calculado para a radiação proveniente de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz, exibindo as 4 variantes do espectro que apresentam estruturas finas superpostas ao espectro térmico de emissão.

A seguir apresentamos alguns cálculos referentes aos parâmetros físicos do patamar de temperatura cromosférica.

- Estimativa da largura da região com $T = T_p$ (patamar no perfil de temperatura cromosférica) onde: T_p - temperatura do patamar, onde temos: $T_p \approx 2 \cdot 10^4$ K.

O coeficiente de absorção é:

$$\mu = \frac{\nu \nu_{\text{eff}}}{c(1 - \nu^2)^{1/2}} ; \nu = \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2} ; \nu_{\text{eff}} = \nu_{ei} + \nu_{\text{emolec}} \quad (4.10)$$

$$\nu_{ei} \approx \frac{5,5 N_e}{T^{3/2}} \ln a \approx 42 \frac{N_e}{T^{3/2}} \gg \nu_{emolec} \quad (4.11)$$

$$a = 220 \frac{T}{N_e^{1/3}} ; (N_e \approx 10^{10} \text{ cm}^{-3}, T \approx 10^4 \text{ K}); \omega_{pl}^2 = \frac{4 \pi N_e e^2}{m}$$

$$n = (1 - \nu^2)^{1/2} \quad (\text{índice de refração})$$

onde: μ é o coeficiente de absorção;

ν_{eff} é a frequência de colisão dos eletrons;

ω_{pl} é a frequência angular de plasma local;

ω é a frequência angular correspondente à frequência f de observação;

ν_{ei} é a frequência de colisão eletrôn-íon;

ν_{emolec} é a frequência de colisão eletrôn-molécula neutra;

c é a velocidade da luz no vácuo;

N_e é a densidade dos eletrons na região do patamar;

T é a temperatura dos eletrons na região do patamar;

e é a carga do eletrôn;

m é a massa do eletrôn;

n é o índice de refração para a radiação na região do patamar.

Sob a condição $\nu \ll 1$ ($\omega^2 \gg \omega_{pl}^2$), em vez de (4.8) e $\tau(\Gamma_\lambda) \approx 1$ obtemos:

$$\tau(\Gamma) = \int_0^\omega \mu(\Gamma) d\Gamma = 1 \Rightarrow \frac{0,58 \ln a}{T} N_e^2 d\Gamma = \frac{4 \pi^2 c^2}{\lambda^2} \quad (4.12)$$

onde: $\tau(\Gamma)$ é a profundidade óptica na camada de raio Γ ($\Gamma >$ raio do Sol);

$\mu(\Gamma)$ é o coeficiente de absorção na camada de raio Γ ;

a é uma constante;

T é a temperatura dos eletrons na região do patamar;

N_e é a densidade dos eletrons na região do patamar;

λ é o comprimento de onda da radiação observado.

Derivando (4.12) em Γ_λ e tomando-se o módulo da expressão resultante temos:

$$\frac{0,58 \ln a}{T^{3/2}} N_e^2 = \frac{8 \pi^2 c^2}{\lambda^3} \frac{d\lambda}{d\Gamma_\lambda} \quad (4.13)$$

onde: Γ_λ é a camada com raio Γ e que emite no comprimento de onda λ .

Fazendo a substituição: $T \Rightarrow T_B(\lambda)$ e $\Gamma_\lambda \Rightarrow \Gamma$ em (4.13), é possível, com uma determinada dependência $N(r)$, calcular a dependência $T(r)$ por (4.14). Neste caso, deve-se lembrar que $\ln a = \text{cte.}$ sobre uma ampla faixa dos parâmetros N_e e T . Integrando (4.13) obtemos:

$$0,58 \int_\infty^\Gamma \ln a N^2(\Gamma) d\Gamma = 8 \pi^2 c^2 \int_\infty^\lambda T^{3/2}(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda^3} \quad (4.14)$$

Fazendo a aproximação: $d\Gamma \Rightarrow \Delta\Gamma_p$; $d\lambda \Rightarrow \Delta\lambda_p$ e colocando $T = T_p = 20000 \text{ K} = T_B(\lambda)$ em (4.13), podemos calcular a largura do patamar:

$$\Delta\Gamma \approx \frac{4,6 \cdot 10^{28}}{N_p^2} \frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p^3} \quad (4.15)$$

De acordo com os valores calculados anteriormente para a densidade, consideraremos $N \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, logo tomando-se os valores para a RA5569:

$\Delta\lambda_p = \lambda(18 \text{ GHz}) - \lambda(22 \text{ GHz}) \approx 3 \text{ mm}$, e $\lambda_p(20 \text{ GHz}) = 15 \text{ mm}$, então:

$$\frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p} = \frac{1}{5}, \text{ encontramos as seguintes larguras para o patamar}$$

$$\Delta\Gamma_p \approx 160 \text{ m} \quad (N \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}, \mu_{ff}^{-1} \approx 450 \text{ m})$$

onde $\Delta\Gamma_p$ é a largura estimada do patamar.

Supondo agora uma densidade um pouco mais baixa obtemos:

$$\Delta\Gamma_p \approx 450 \text{ m} \quad (N \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}, \mu_{ff}^{-1} \approx 1250 \text{ m})$$

$$150 \text{ m} \leq \Delta\Gamma_p \leq 500 \text{ m}$$

Derivando-se a densidade de fluxo Φ em relação a seu valor médio (Φ_o) na faixa de freqüências de observação (18 a 23 GHz) obtemos:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_o} \approx \frac{\Delta\lambda_p}{\lambda_p} \approx \frac{1}{5}, \quad \frac{\Delta\Phi}{\Phi_o} = \frac{1}{\Phi_o} \int_{\lambda_p}^{(\lambda+\Delta\lambda/2)_p} \left(\frac{d\Phi}{d\lambda} - \frac{d\Phi_o}{d\lambda} \right) d\lambda \approx \left| \frac{2}{\Phi_o} \int_D \frac{T}{\lambda^3} d\lambda \right|_{T=T_p} \quad (4.16)$$

Assumindo: $d\Phi_o/d\lambda = 0$;

$$T = T_p \approx 2 \cdot 10^4 \text{ K};$$

onde: $\lambda_p = 15 \text{ mm}$;

$$\Delta\lambda_p \approx 3 \text{ mm};$$

Obtemos: $\Delta\Phi/\Phi_o \approx 0,2$.

Contudo, o valor observado desta variação atingiu uma amplitude de até $\approx 110\%$, o que pode ser devido a uma temperatura mais elevada do patamar ou outro tipo de influência. De acordo com o que foi exposto acima e comparando os resultados dos cálculos com as observações na faixa de freqüências de 18 a 23 GHz acreditamos que a variante 2 - nas Figuras 4.5 e 4.6 - melhor se ajusta ao espectro da região ativa RA5569 observada no dia 29/06/89, o qual exhibe estrutura fina em freqüência. Também acreditamos que a variante 3 - nas mesmas figuras acima - melhor se ajusta ao espectro da região ativa RA5536 observada no dia 19/06/89, o qual mostra uma estrutura fina em freqüência.

Deve-se ressaltar que os cálculos desenvolvidos neste texto são de caráter aproximado visando obter valores dentro da mesma ordem de grandeza dos valores mais aceitos na literatura, e não devem ser tomados como valores precisos.

4.4 - CONCLUSOES E PERSPECTIVAS

A partir das observações da 'componente lentamente variável' da emissão de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz podemos expressar algumas conclusões de grande importância:

I - O espectro do 'centro' do Sol ou Sol 'calmo' mesmo em épocas de atividade solar (máximo solar em 1991) apresentou-se plano com índice espectral entre 0 e 0,2, sugerindo que a emissão é de origem térmica na faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

II - O espectro de regiões ativas solares apresentou-se basicamente plano, com índices espectrais variando entre 0 e 0,4 durante a evolução temporal das regiões ativas. Isto, sugere uma origem térmica para a emissão proveniente de regiões ativas solares e além disso que os parâmetros físicos de regiões ativas solares na faixa de frequências de 18 a 23 GHz são os seguintes: altura $h \approx 2 - 3 \cdot 10^3$ km acima da fotosfera, densidade $N_e \approx 5 - 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, campo magnético $H(h) \approx 2 - 3 \cdot 10^3$ G, e campo magnético fotosférico $H_0 \approx 3 \cdot 10^3$ G.

III - As regiões ativas podem apresentar estruturas finas em emissão e/ou absorção superpostas ao espectro térmico observado, e estas estruturas são independentes das posições das regiões ativas sobre a superfície do disco solar.

IV - A estrutura fina de absorção superposta ao espectro térmico da região ativa observada pode ser devido à presença de 'lâmina de corrente neutra' localizada acima da região ativa, e encontrando-se entre a fonte e o observador.

V - A estrutura fina de emissão superposta ao espectro térmico da região ativa observada pode ser devido 3 fatores:

1) Existência de vários núcleos emissores dentro de uma única região ativa observada, os quais não podem ser distinguidos por meio de observações sem resolução espacial suficiente ($\approx 0,5'$ de arco);

2) Existência de um patamar no perfil de temperatura cromosférica com a altura acima da fotosfera solar;

3) Presença de linha de ciclotron emitida na faixa de frequências observada e superpondo-se ao espectro térmico da radioemissão de regiões ativas solares.

Ressaltamos que, pela primeira vez são observadas estruturas finas em frequência superpostas acima do espectro térmico em rádio proveniente de regiões ativas solares, em frequências acima de 18 GHz.

Portanto, além de tratar-se de um resultado inédito abrem-se inúmeras possibilidades de trabalhos futuros relacionados à emissão de regiões ativas solares em rádio tanto nessa faixa de frequências quanto em outras. Outros trabalhos seriam interessantes pois poderiam confirmar ou até complementar o trabalho aqui desenvolvido.

Enfatizamos, que um completo diagnóstico de regiões ativas solares, atualmente só pode ser alcançado através de trabalhos de cooperação internacional pois nenhum Rádio Observatório existente no mundo dispõe de toda a instrumentação necessária para levar à cabo uma investigação deste porte.

4.5 - SUGESTOES PARA OBSERVAÇOES FUTURAS

Sugerimos os seguintes melhoramentos instrumentais para observações futuras de espectros de regiões ativas solares na faixa de frequências acima de 18 GHz:

- 1) Observações com polarização;
- 2) Observações com resolução espacial melhor;
- 3) Observações com banda de cobertura de frequências larga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHMEDOV, SH.B. et al. On the height scale of magnetic fields above sunspots derived from RATAN-600 observations. **Solar Physics**, 88(1/2):103-108, 1983.
- ATHAY, R.G. The chromosphere and transition region - current status and future directions of models. **Solar Physics**, 100(1/2):257-279, Oct. 1985.
- BOLDYREV, S.; IPATOVA, I.A.; IPATOV, A.V.; PETEROVA, N.G. Fine structure of a local solar radio source. **Soviet Astronomy Letters**, 4(5):251-253, Sept.-Oct. 1978.
- CECATTO, J.R.; ROSA, R.R; SAWANT, H.S. Possível evidência de linha de ciclotron superposta nos espectros de região ativa solar. In: Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira, 17., Caxambu, 5-9 ago. 1990. **Resumos**. São Paulo, Sociedade Astronômica Brasileira, 1990, p.82. Número especial do Boletim da SAB, v.12, n.1, 1990.
- CHRISTIANSEN, W.N.; MATHEWSON, D.S. **Proceedings of the Institute Radio Engineers**, 46(1):127-130, 1958.
- CILLIÉ, G.G.; MENZEL, D.H. The physical state of the solar chromosphere. **Harvard College Observatory Circular**, 410:1-40, Oct. 1935.
- COVINGTON, A.E. Microwave noise observations during the partial eclipse. **Nature**, 159(4038):405-406, Nov. 1947.
- DULK, G.A. The solar atmosphere, solar magnetism and solar activity. In McLean, D.J.; Labrum, N.R., ed. **Solar Radio Physics**. Cambridge University, 1985. cap. 2, Seção 2.2, p. 20.

- EFANOV, V.A.; KISLYAKOV, A.G.; MOISEEV, I.G.; NAUMOV, A.I. Observation of solar radio emission by the 22-m radio telescope at the Crimean Astrophysical Observatory at 2.25 mm and 8.15 mm wavelengths. *Solar Physics*, 8(2):331-340, 1969.
- EFANOV, V.A.; KISLYAKOV, A.G.; MOISEEV, I.G. Slowly varying component spectrum of the solar radio emission at millimeter wavelengths. *Solar Physics*, 24(1):142-153, May 1972.
- ERSKINE, F.T.; KUNDU, M.R.; RAO, A.P. 6 cm Observations of a solar active region and bursts with $\approx 6''$ resolution. *Astronomy and Astrophysics*, 83(1/2):256-260, Mar. 1980.
- FELLI, M.; TOFANI, G.; FIRST, E.; HIRTH, W. On the nature of some active regions in the microwave range. *Solar Physics*, 42(2):377-390, June 1975.
- FELLI, M.; LANG, K.R.; WILLSON, R.F. Observations of solar active regions I. The slowly varying component. *Astrophysical Journal*, 247(1):325-337, July 1981.
- GREBINSKII, A.S.; MAN'KO, V.I.; YASNOV, L.V. The 1,6 GHz radio emission of solar sources associated with sunspots and flocculi. *Soviet Astronomy*, 12(3):473-476, Nov.-Dec. 1968.
- HURFORD, G.J.; READ, R.B.; ZIRIN, H. A frequency-agile interferometer for solar microwave spectroscopy. *Solar Physics*, 94(2):413-426, Sept. 1984.
- de JAGER, C. Structure and dynamics of the solar atmosphere. In: *Handbuch der Physik*. Berlin, Springer Verlag, 1959. v.52, p. 135-139.

- KAKINUMA, T.; SWARUP, G. A model for the sources of the slowly varying component of microwave solar radiation. **Astrophysical Journal**, 136(3):975-994, Nov. 1962.
- KAUFMANN, P. et al Performance of the brazilian 45 ft Itapetinga radiotelescope at K-band. **Revista Brasileira de Tecnologia**, 7(1):81-88, mar. 1976.
- KAUFMANN, P.; STRAUSS, F.M.; SCHAAL, R.E.; LAPORTE, C. The use of the large mm-wave antenna at Itapetinga in high-sensitivity solar research. **Solar Physics**, 78(2):389-399, 1982.
- KAVERIN, N.S. et al Fine structure in the spectrum of the S-component of solar radio emission at 4.5 - 7.0 GHz. **Soviet Astronomy Letters**, 2(6):229-230, Nov.-Dec. 1976.
- KAVERIN, N.S.; KOBRIN, M.M.; KORSHUNOV, A.I.; SHUSHUNOV, V.V. Fine structure of the S-component spectrum of the solar radio emission in the frequency range 5.0-7.0 GHz. **Solar Physics**, 63(2):379-388, Sept. 1979.
- _____ Fine structure in the 5-12 GHz radio spectrum of local sources on the sun, and the current sheets of active regions. **Soviet Astronomy**, 24(4):442-443, July-Aug. 1980.
- KAVERIN, N.S. et al. On the relation between spectral characteristics of the microwave emission from solar active regions and physical conditions of the solar atmosphere. **Publications of Debrecen Heliophysical Observatory**, 5(2):631-638, Dec. 1983.
- KOROLKOV, D.V.; SOBOLEVA, N.S.; GELFREIKH, G.B. An investigation of local regions of the solar radio emission. **Izv. Glav. Astron. Observatory of Pulkovo**, 21(164):81-114, 1960.

- KRUGER, A. Phenomenology of solar radio emission. In: ———
Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics,
 2.ed., Dordrecht, D. Reidel, 1979. cap.3, Seção 3.2, p.65.
- KUNDU, M.R. Structures et propriétés des sources d'activité solaire sur ondes centimétriques. **Annales D'Astrophysique**, 22(1):1-100, jan-fév. 1959.
- KUNDU, M.R. Occultation of Taurus-A by the solar corona at 430 Mc/s in June 1964. **Nature**, 205(4972):683-684, Feb. 1965a.
- Optical features of the active sun. In: ———. **Solar Radio Astronomy**. New York, Interscience, 1965b. Cap.2, p.16.
- KUNDU, M.R.; McCULLOUGH, T.P. Polarization of solar active regions at 9.5 mm wavelength. **Solar Physics**, 24(1):133-141, May 1972a.
- KUNDU, M.R.; McCULLOUGH, T.P. Polarization structure of a solar flare region at 9.5 mm wavelength. **Solar Physics**, 27(1):182-191, Nov. 1972b.
- KUNDU, M.R.; ALISSANDRAKIS, C. Observations at 6 cm of the solar active region. **Nature**, 257(5526):465-467, Oct. 1975.
- KUNDU, M.R.; ALISSANDRAKIS, C.; BREGMAN, J.; HIN, A. 6 centimeter observations of solar active regions with 6'' resolution. **Astrophysical Journal**, 213(1):278-295, Apr. 1977.
- KUNDU, M.R. et al. Microwave, EUV, and X-ray observations of active region loops: evidence for gyroresonance absorption in the corona. **Astronomy and Astrophysics**, 82(3):265-271, Feb. 1980a.

- KUNDU, M.R.; VELUSAMY, T. Observation with the VLA of a stationary loop structure on the sun at 6 centimeter wavelength. **Astrophysical Journal**, 240(1):L63-L67, Aug. 1980b.
- KUNDU, M.R.; SCHMAHL, E.J.; RAO, A. VLA observations of solar active regions at 6 cm wavelength. **Astronomy and Astrophysics**, 94(1):72-79, 1981.
- KUNDU, M.R.; SHEVGAONKAR, R.K. Multiwavelength observations of a preflare solar active region using the VLA. **Astrophysical Journal**, 291(2):860-864, Apr. 1985.
- LANG, K.R.; WILLSON, R.F. Very large array observations of solar active regions. **Nature**, 278(5699):24-28, Mar. 1979.
- LANG, K.R.; WILLSON, R.F. Multiple wavelength observations of flaring active regions. **Advances in Space Research**, 2(11):91-100, 1983a.
- LANG, K.R.; WILLSON, R.F.; GAIZAUSKAS, V. Very large array observations of solar active regions II. Multiple wavelength observations. **Astrophysical Journal**, 267(1):455-464, Apr. 1983.
- LITES, B.W.; SKUMANICH, A. A model of a sunspot chromosphere based on OSO 8 observations. **Astrophysical Journal Supplement Series**, 49(2):293-316, June 1982.
- McCONNELL, D.; KUNDU, M.R. VLA observations of a solar active region and coronal loops. **Astrophysical Journal**, 269(2):698-705, June 1983.
- McCONNELL, D.; KUNDU, M.R. VLA observations of fine structures in a solar active region at 6 cm wavelength. **Astrophysical Journal**, 279(1):421-426, Apr. 1984.

- PALLAVICINI, R.; VAIANA, G.; TOFANI, G.; FELLI, M. The coronal atmosphere above solar active regions: comparison of high spatial resolution soft X-ray and centimetric observations. **Astrophysical Journal**, 229(1):375-386, Apr. 1979.
- PARIISKII, Yu. Observations of the sun with the RATAN-600 radio telescope - preliminary results. **Soviet Astronomy**, 20(5):577-581, Sept.-Oct. 1976.
- PIDDINGTON, J.H.; MINNETT, H.C. Solar radio-frequency emission from localized regions at very high temperatures. **Australian Journal of Scientific Research**, A4(2):131-157, June 1951.
- SALOMONOVICH, A.E. Solar radio emission on a wavelength of 8 mm. **Soviet Astronomy**, 6(2):202-209, Sept.-Oct. 1962.
- SAWANT, H.S.; CECATTO, J.R. Fine structure in the mm-wavelength spectra of the active region. In: Workshop on Impulsive Solar Flares, 2., Durham, NH, 20-26 de Sept. 1988.
- SAWANT, H.S.; CECATTO, J.R. Fine structure in the mm-wavelength spectra of the active region. Aceito para publicação na **Revista Mexicana de Astronomia e Astrofísica**, Oct. 1989.
- Possible signature of cyclotron line superimposed on spectra of active region. In: Workshop on Max 91/SMM Solar Flares Observations and Theory, 1., Estes Park, CO, 3-7 de June 1990.
- SAWANT, H.S.; CECATTO, J.R.; NERI, J.A.F.C. **High sensitivity mm-λ (18-23 GHz) variable frequency radiometer**, 1990. No prelo.
- SAWANT, H.S.; CECATTO, J.R.; NEFEDYEV, V.P.; URALOV, A.M. **Possible interpretations of fine structures superimposed on the mm-λ (18 - 23 GHz) spectra of active regions**, 1990. No prelo.

- SCHMAHL, E. Microwave, EUV, and X-ray observations of active region loops and filaments. In: International Astronomical Union (IAU). **Radio Physics of the Sun**; Proceedings of a Symposium held in College Park, MD, Aug. 7-10, 1979. Dordrecht, D. Reidel, 1980, p. 71-85. (IAU Symposium, 86).
- SCHMAHL, E.; SHEVGAONKAR, R.K.; KUNDU, M.R. McCONNELL, D. Sharp edges in solar microwave spectra: neutral current sheets or cyclotron lines? **Solar Physics**, 93(2):305-315, July 1984.
- SHEVGAONKAR, R.K.; KUNDU, M.R. Three-dimensional structures of two solar active regions from VLA observations at 2, 6 and 20 cm wavelengths. **Astrophysical Journal**, 283(1):413-420, Aug. 1984a.
- SHEVGAONKAR, R.K.; KUNDU, M.R. Simultaneous dual wavelength observations of an impulsive microwave burst using the VLA. **Advances in Space Research**, 4(7):247-250, 1984b.
- SMERD, S.F. Non-thermal sources and amplified emission. In: de JAGER, C. The Solar Spectrum; **Proceedings of the Symposium held at the University of Utrecht**, 26-31 Aug. 1963. Dordrecht, D. Reidel, 1965. p.398-407.
- SOMOV, B.V.; SYROVATSKII, S.I. Current sheets as the source of heating for solar active regions. **Solar Physics**, 55(2):393-399, Dec. 1977.
- STEFFEN, P. On the type of spectra of S-component sources and their correlation with flare occurrence. **Solar Physics**, 67(1):89-100, Aug. 1980.
- SWARUP, G. Radio pictures of the sun at wavelength of 9.1 cm. **The Astronomical Journal**, 66(7):296-297, Sept. 1961.

- SWARUP, G.; et al. High-resolution studies of ten solar active regions at wavelengths of 3-21 cm. **Astrophysical Journal**, 137(4):1251-1267, May 1962.
- TANAKA, H.; KAKINUMA, T. Eclipse observations of microwave radio sources on the solar disk on 19 April, 1958. **Reports on Ionospheric Research of Japan**, 12(3):273-284, 1958.
- ULICH, B.L.; HAAS, R.W. Absolute calibration of millimeter-wavelength spectral lines. **Astrophysical Journal Supplement Series**, 30(3):247-258, Mar. 1976.
- VELUSAMY, T.; KUNDU, M.R. VLA observations of postflare loops at 20 centimeter wavelength. **Astrophysical Journal Letters**, 243(2):L103-L107, Jan. 1981.
- VERNAZZA, J.E.; et al. Structure of the solar chromosphere III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun. **Astrophysical Journal Supplement Series**, 45(4):635-725, Apr. 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 burst observed. **Australian Journal of Scientific Research**, A3(3):387-398, Sept. 1950.
- WILLSON, R.F. Possible detection of thermal cyclotron lines from small sources within solar active regions. **Solar Physics**, 89(1):103-113, Nov. 1983.
- WILLSON, R.F.; LANG, K.R. Very large array observations of solar active regions: IV. Structure and evolution of solar bursts from 20 cm loops. **Astrophysical Journal**, 279(1):427-437, Apr. 1984.

- WILLSON, R.F. VLA observations of solar active regions at closely spaced frequencies: Evidence for thermal cyclotron line emission. **Astrophysical Journal**, 298(2):911-917, Nov. 1985.
- ZHELEZNYAKOV, V.V. The Origin of the slowly varying component of solar radio emission. **Soviet Astronomy**, 6(1):3-9, July-Aug. 1962.
- ZHELEZNYAKOV, V.V. The frequency spectrum of the slowly varying component of solar radio emission. **Soviet Astronomy**, 7(5):630-638, Mar.-Apr. 1964.
- ZHELEZNYAKOV, V.V. **Radio emission of the sun and planets**. Oxford, Pergamon, 1970. 697p.
- ZHELEZNYAKOV, V.V.; ZLOTNIK, E.Ya. Fine structure of microwave solar radio emission from solar activity centers. **Soviet Astronomy**, 24(4):448-454, July-Aug. 1980a.
- ZHELEZNYAKOV, V.V.; ZLOTNIK, E.Ya. Thermal cyclotron radio emission of neutral current sheets in the solar corona. **Solar Physics**, 68(2):317-326, Dec. 1980b.
- ZHELEZNYAKOV, V.V.; TIKHOMIROV, Yu.V. Microwave emission from hot X-ray kernels in solar flares. **Solar Physics**, 81(1):121-135, Nov. 1982.
- ZHELEZNYAKOV, V.V.; ZLOTNIK, E.Ya. On the cyclotron line recorded in the solar microwave spectrum. **Soviet Astronomy Letters**, 14(3):195-200, May-June 1988.
- ZLOTNIK, E.Ya. Theory of the slowly changing component of solar radio emission -I. **Soviet Astronomy**, 12(2):245-253, Sept.-Oct. 1968a.