



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA / OBSERVATÓRIO DO VALONGO

TÍTULO

EVOLUÇÃO INICIAL DA LINHA  $H\alpha$  DA SN 1987A

AUTOR

MARÍLIA JOBIM SARTORI

ORIENTADOR

JORGE RAMIRO DE LA REZA

Projeto apresentado ao Corpo Docente do Departamento de  
Astronomia como requisito para obtenção do grau de Astrônomo.

Rio de Janeiro, 1º de setembro de 1989.

*Para Lilia,  
Com a alegria de  
poder contar com sua amizade,  
Marília*

## RESUMO

Neste trabalho apresentamos os resultados observacionais de espectroscopia óptica em alta resolução na região da linha  $H\alpha$  da SN 1987A, obtidos no Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/ON) de 27 de fevereiro a 30 de março de 1987. De nosso conhecimento estes espectros são os únicos observados em alta resolução. Este fato nos permitiu fazer um estudo mais detalhado dos perfis de  $H\alpha$ . Reduzimos 74 espectros de 1ª ordem obtidos com o telescópio de 1,60 m, o espectrógrafo Coudé e o Detector Intensificado Contador de Fótons Reticon.

A linha  $H\alpha$  apresentou desde o primeiro dia de observação um largo perfil P-Cygni, consequência da expansão à alta velocidade das camadas ejetadas. Com o passar do tempo, a matéria em expansão vai se esfriando e desacelerando, fazendo com que a linha fique mais estreita. Pudemos observar estruturas finas nesta linha: uma pequena absorção situada no pico de emissão (em aproximadamente  $6460 \text{ \AA}$ ) em 1º e 2 de março; um pico de emissão secundário, entre o vale de absorção e a emissão principais da linha, visível a partir de 17 de março; um platô do lado vermelho do pico de emissão, visível a partir de 18 de março.

Medimos as velocidades radiais das componentes da linha para acompanhar o processo de desaceleração da matéria ejetada. A velocidade radial do pico de absorção decresceu de aproximadamente  $-17000 \text{ km/s}$  em 27 de fevereiro a  $-6500 \text{ km/s}$  em 30 de março. A velocidade radial do pico de emissão era da ordem de  $-5500 \text{ km/s}$  em 27 de fevereiro e variou em torno de  $400 \text{ km/s}$  de 11 a 30 de março. A absorção situada no pico de emissão em 1º e 2 de março tinha velocidade da ordem de  $-4000 \text{ km/s}$ . As velocidades radiais da absorção e emissão do pico secundário decresceram de  $-3775$  a  $-2165 \text{ km/s}$  e de  $-4250$  a  $-2862 \text{ km/s}$ , respectivamente, de 17 a 30 de março.

---

**PALAVRAS-CHAVE:** supernovas - SN 1987A, espectros ópticos

## ÍNDICE

Capítulo I - Introdução .....	1
Capítulo II - Observações .....	4
II.1 - Descrição dos Instrumentos :	
II.1.1 - Telescópio "Boller and Chivens" .....	4
II.1.2 - Espectrógrafo Coudé .....	4
II.1.3 - Detector Intensificado Contador de Fótons Reticon .....	7
II.2 - Características dos Espectros .....	8
II.3 - Seleção dos Espectros .....	9
Capítulo III - Métodos Espectroscópicos .....	10
III.1 - Processo de Redução .....	10
III.2 - Filtragem dos Dados ("Smoothing") .....	21
III.3 - Normalização .....	22
Capítulo IV - Espectros da Linha H $\alpha$ da SN 1987A .....	24
Capítulo V - Velocidades Radiais .....	37
Capítulo VI - Conclusão .....	51
Agradecimentos .....	54
Apêndice: O Programa AJUSTE .....	56
Referências bibliográficas .....	66

## I - INTRODUÇÃO

Supernova é um dos eventos estelares mais violentos. A explosão de uma estrela libera tanta energia quanto 10 bilhões de vezes a liberada anualmente pelo nosso Sol. O material ejetado a altas velocidades enriquece o meio interestelar para novas gerações de estrelas. As ondas de choque produzidas pela explosão influenciam a estrutura galáctica e podem mesmo iniciar a formação de novas estrelas. Apesar de ser um fenômeno tão importante para a compreensão da evolução estelar, não se conhece com exatidão os mecanismos que fazem uma estrela explodir, embora existam muitas idéias que os tentam explicar.

A supernova (SN) 1987A foi detectada em 24 de fevereiro de 1987 na Grande Nuvem de Magalhães (GNM), galáxia irregular vizinha à nossa. Foi a mais brilhante desde 1604 e a primeira supernova visível a olho nu na história da astronomia moderna. Isto significou a possibilidade inédita de se obter informações em todas as faixas do espectro eletromagnético de uma supernova tão brilhante. Seu intenso brilho aparente (chegou a magnitude aparente 2.9) é devido a sua proximidade em relação a tantas outras que explodem todos os anos em galáxias mais distantes.

Com estas características, a SN 1987A concentrou em si a atenção de dezenas de astrônomos de todo o mundo, pois seu estudo prometia informações que poderiam revolucionar nossos conhecimentos sobre evolução estelar e os processos que fazem uma estrela explodir. E também poderia trazer informações sobre os gases interestelares entre

ela e nós, e contribuir para as teorias cosmológicas. Foi possível, pela primeira vez, a identificação da estrela que originou a supernova e a detecção de pulsos de neutrinos provenientes de uma supernova. E talvez seja possível, também pela primeira vez, a observação do nascimento de um pulsar.

As supernovas são classificadas em tipo I e II, de acordo com seus espectros e curvas de luz. A principal distinção é a intensidade das linhas da série de Balmer do hidrogênio: são fracas ou ausentes em supernovas tipo I e muito proeminentes em tipo II. A SN 1987A foi classificada como tipo II.

Os espectros da SN 1987A obtidos mostram a dinâmica das camadas fotosféricas expulsas violentamente depois do colapso do núcleo. Segundo a literatura, o primeiro espectro obtido, em 23/24 de fevereiro de 1987, era um contínuo. No segundo dia, a linha  $H\alpha$  do hidrogênio com perfil tipo P-Cygni já estava formada. Perfil tipo P-Cygni é constituído por uma componente em emissão não muito afastada da linha de referência e uma componente em absorção afastada para o azul. Este deslocamento para o azul representa, pelo efeito Doppler (Cap.V), que a matéria que está absorvendo a radiação está se deslocando com uma velocidade radial negativa, ou seja, está se expandindo com uma componente na direção do observador. Isto significa que a aceleração das camadas foi muito rápida para ser detectada. Nos dias seguintes, a matéria em expansão foi se esfriando e desacelerando, fazendo com que a linha ficasse mais estreita.

O Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/ON), durante os primeiros 70 dias após a detecção da SN 1987A realizou um intenso

programa de observação (Cap.II). O LNA obteve 719 espectros de alta dispersão, em diferentes ordens (diferentes resoluções) e em várias regiões do espectro óptico. Estes espectros foram armazenados sob a forma de contagens de fótons por unidade de detecção, pixel. Para se obter informações fisicamente interpretáveis, deve-se converter o pixel em uma quantidade física: comprimento de onda, segundo um processo que chamamos de redução. Neste trabalho, escolhemos os espectros que continham a linha  $H\alpha$ , de 27 de fevereiro a 30 de março (Cap.II.3), e os reduzimos (Cap.III).

No estudo de processos dinâmicos, o principal interesse de dispor de uma série temporal completa de espectros de alta resolução é medir a evolução de estruturas finas do espectro, a princípio não detectáveis ou de difícil medida em espectros de baixa resolução. No Capítulo IV apresentamos os espectros e destacamos as estruturas finas de  $H\alpha$  observadas. Para verificar o processo de desaceleração das camadas, medimos as velocidades radiais de suas componentes e comparamos com os valores da literatura (Cap.V).

## II - OBSERVAÇÕES

Os espectros utilizados neste projeto foram obtidos no Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA-ON), situado no Pico dos Dias, município de Brazópolis, MG (lat.=  $-22^{\circ} 32' 03.9''$ , long.=  $45^{\circ} 34' 58.6''$ , altitude= 1860 m). As observações foram feitas por Carlos Alberto Torres, Carlos Roberto Mendonça, Germano Rodrigo Quast e José Veliz Navarro, do LNA-ON, e Kepler de Oliveira, do Departamento de Astronomia, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para este programa de observações da SN 1987A, utilizou-se o telescópio de 1.60 m de abertura, o espectrógrafo Coudé e o detector Intensificado Contador de Fótons Reticon.

### II.1 - Descrição dos Instrumentos

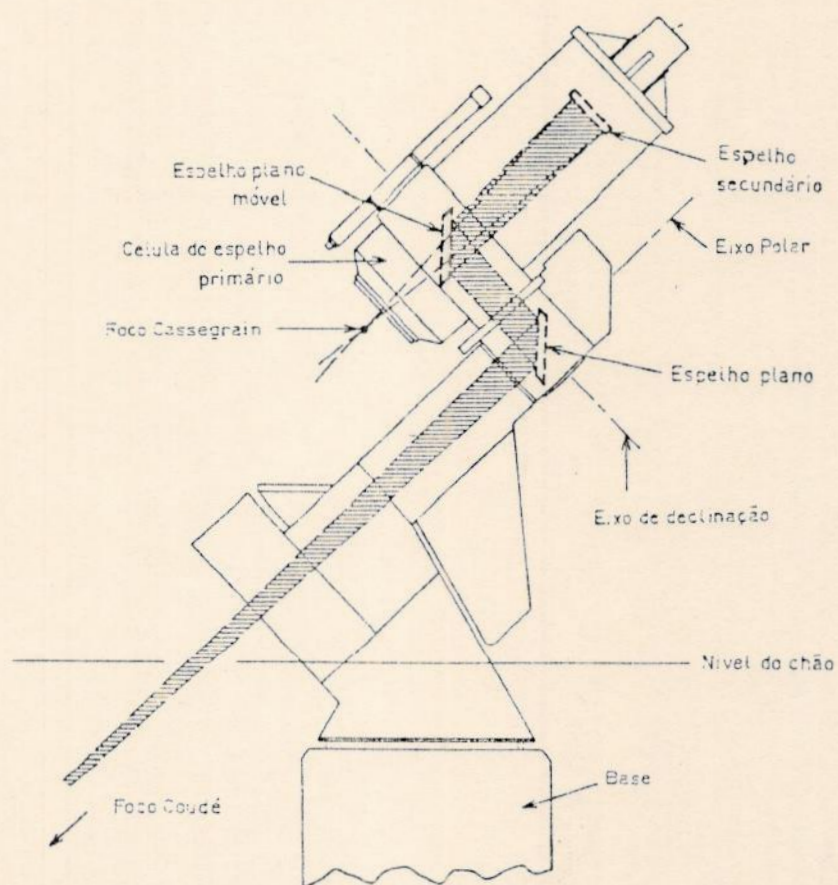
#### II.1.1 - Telescópio "Boller and Chivens":

- abertura: 1.60 m
- sistema óptico: Ritchey-Chrétien e Coudé (fig.II.1)
- relação focal Coudé:  $f/150$  ( $f/31.2$  na entrada do espectrógrafo Coudé)
- escala no plano focal: 4.1 "/mm na fenda do espectrógrafo Coudé
- campo: 50'

#### II.1.2 - Espectrógrafo Coudé:

- Sistema de espelhos Coudé:

A alimentação do foco Coudé é feita através de um conjunto de espelhos de alta refletividade em regiões escolhidas do espectro. As



**Fig.II.1** Diagrama esquemático de um telescópio refletor. O modo de operação Coudé usa os dois espelhos planos para desviar o feixe convergente primeiro para o eixo de declinação e depois para o eixo polar, até o foco Coudé, situado abaixo do nível do chão. Desta forma, o foco Coudé permanece fixo e independente da posição no céu do objeto a ser observado. (Gray,1976)

curvas de refletividade do conjunto dos espelhos 2º, 3º e 4º são dadas na figura II.2, para cada um dos conjuntos disponíveis: A (ultravioleta), B (visual), C (vermelho). O observador pode optar por qualquer um deles, sendo a troca de conjunto feita automaticamente através de um seletor na console Coudé.

O feixe óptico, ao chegar à fenda do espectrógrafo, tem relação focal  $f/31.2$ , dando uma escala no plano da fenda de  $1''$  no céu =  $240 \mu\text{m}$ .



- Características do espectrógrafo:

São disponíveis as seguintes lâmpadas de comparação: Fe, Ne, Fe/Ar, Th e He/Ne/Ar.

O colimador possui distância focal 7.13 m, o diâmetro do feixe é de 22.8 cm e a abertura  $f/31.2$ .

A rede possui 600 linhas/mm. O ângulo entre a normal à rede e a bissetriz dos eixos ópticos da câmara e colimador é ajustável de  $-5^\circ$  a  $+70^\circ$ .

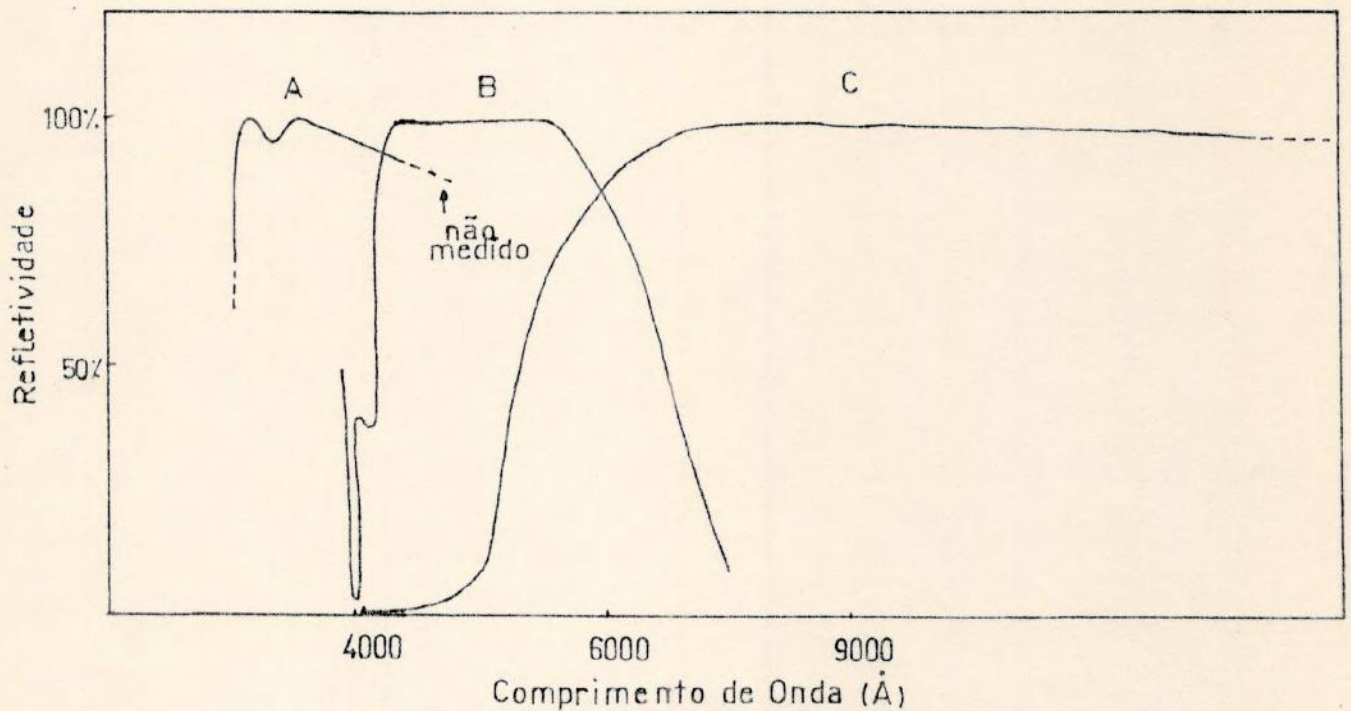


Fig.11.2 Curvas de refletividade ( em %) do conjunto dos espelhos  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  e  $4^\circ$ , para cada um dos 3 conjuntos disponíveis: A (ultravioleta), B (visual) e C (vermelho). (Observatório Astrofísico Brasileiro, Manual do Usuário, 1984)

### II.1.3 - Detector Intensificado Contador de Fótons Reticon ("Intensified Photon-Counting Reticon Detector"):

O detector contador de fótons Reticon do ON (da Costa et al., 1985) utiliza o "chip" Reticon CP1008, fabricado por EG&G Reticon. Este "chip" é constituído por duas filas adjacentes de 936 fotodiodos cada, mas completamente independentes, para exposições simultâneas de objeto e céu. O detector é acoplado a um intensificador de imagem de alto ganho, para compensar pelo grande ruído "readout" (de saída de leitura) típico destes "chips" de silício.

O pacote intensificador de imagem produz um ganho luminoso da ordem de  $10^6$ . Este pacote foi montado nos laboratórios do Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA).

O sistema é resfriado a aproximadamente  $-25^{\circ}\text{C}$ , para manter a corrente de escuro baixa. A baixa temperatura é atingida pela circulação de metanol resfriado a  $-30^{\circ}\text{C}$ , dentro do pacote.

A interface de computador foi projetada para computadores Data General Novas. Um Nova 3 é usado para controlar o detector, para processamento em tempo real e para redução de dados.

## II.2 - Características dos Espectros

No período de 24 de fevereiro de 1987 a 6 de maio do mesmo ano, foram obtidos 719 espectros da SN 1987A, em diferentes ordens e de diferentes regiões do espectro óptico. Em primeira ordem foram obtidos espectros para todas as faixas, desde aproximadamente 3700 até 9400 Å. Para as outras ordens levou-se em consideração o interesse no estudo de linhas específicas, como, por exemplo, o lítio interestelar em 6708 Å, estudado em 4ª ordem. Os espectros de 1ª ordem abrangem regiões de aproximadamente 420 Å. As outras ordens abrangem faixas menores, por possuírem melhores resoluções.

A tabela II.1 mostra para cada ordem: o número de espectros tomados, a resolução e as regiões limites, ou seja, o menor e o maior comprimento de onda central dos espectros tomados.

TABELA II.1 - Espectros da SN 1987A

Ordem	Número de espectros	R (Å)	Regiões Limites (Å)
1	559	0.74	3900 - 9188
2	118	0.38	3793 - 5900
3	7	...	3934 - 7682
4	20	0.025	5170 - 6707
5	15	0.025	3939 - 6703

Cada espectro é o resultado de um certo tempo de observação da SN 1987A, chamado tempo de integração. O tempo de integração é escolhido de acordo com a intensidade do fluxo da fonte na faixa espectral observada, para um dado número de contagens desejado.

Os espectros da SN 1987A foram tomados em tempos de integração que variaram de 3 a 10 minutos, para satisfazer a um número de contagens total fixado pelos observadores. Conhecendo o tempo de integração, escolhemos indicar a hora em que cada espectro foi tomado como a hora do meio da observação (tabela III.1)

### II.3 - Seleção dos Espectros

Os espectros de baixa dispersão publicados (Ashoka et al. 1987, Hanuschik e Dachs 1987, Menzies et al. 1987, Hearnshaw et al. 1988, Phillips et al. 1988) mostram que a linha  $H\alpha$  da SN 1987A nos primeiros dias começava pouco depois de 6000 Å e se estendia até próximo de 7000 Å. Isto representa uma faixa espectral maior que a abrangida por um espectro de 1ª ordem obtido com o Coudé-Reticon. Desta forma, a linha  $H\alpha$  ficou dividida em pelo menos dois espectros de regiões subseqüentes. E mesmo com a diminuição da largura da linha evidenciada pelos espectros de baixa dispersão, até o final de março, a linha continuou dividida em dois espectros. Então, selecionamos para estudo os espectros de 1ª ordem, centrados em 6000, 6300, 6600 (ou 6500) e 6900 (ou 6800) Å, do início do programa até 7 de março e de 11 a 30 de março, somente os centrados em 6300 e 6600 Å (tabela III.1), totalizando 74 espectros.

### III - MÉTODOS ESPECTROSCÓPICOS

#### III.1 - Processo de Redução

Os espectros obtidos com um detector contador de fótons são armazenados sob a forma de contagens de fótons por pixel. Contagem de fótons é uma medida de intensidade relativa do fluxo. Pixel é o menor elemento de um detector capaz de fornecer uma resposta individualizada. É considerado, portanto, uma unidade de detecção. Esta unidade não possui sentido físico. Para se obter informações fisicamente interpretáveis, deve-se converter o pixel em uma quantidade física: o comprimento de onda. O processo que realiza esta conversão é chamado de redução.

A relação entre pixel e comprimento de onda não é linear. Esta relação pode ser estabelecida empiricamente conhecendo-se os comprimentos de onda que correspondem a certos pixels. Esta tabela de pixels relacionados a comprimentos de onda é obtida através da identificação de linhas de um espectro de comparação.

Espectro de comparação é um espectro de uma lâmpada de um elemento bastante estudado, como ferro, hélio, neônio e tório. Ele deve ser da mesma região e da mesma ordem do espectro do objeto, e deve ser tomado imediatamente antes ou após a exposição do objeto. Suas linhas são bem determinadas e catalogadas. Assim, pode-se comparar as linhas que aparecem no espectro de comparação com as que constam nos catálogos. Para isto são conhecidas a região do espectro, através do comprimento de onda central, a faixa que ele abrange e a dispersão

aproximadas.

Então, pode-se ajustar um polinômio relacionando pixel e comprimento de onda. O grau deste polinômio varia para cada tipo de detector. O polinômio para os espectros obtidos com o Reticon é de 7º grau.

Os dados obtidos com o detector Reticon são armazenados e analisados por um computador Nova 3 (Cap.II.1.3), que utiliza sistema operacional e programas baseados na linguagem SAO FORTH. Esta linguagem é uma versão do FORTH, desenvolvida no Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO). Como não dispúnhamos de um Nova 3 para fazer as reduções, tivemos que adaptar os dados para serem lidos e analisados por outro computador. O computador disponível para o nosso trabalho era um tipo IBM-PC, o NEXUS 2600. Esta adaptação é necessária pois os códigos utilizados pelo SAO FORTH não são interpretados por um PC. Utilizamos então, o programa de comunicação VTERM II, da Coefficient Systems Corporation, para a conversão dos dados para códigos ASCII, usados por PCs.

Utilizamos para efetuar as etapas do processo de redução o programa AJUSTE, desenvolvido por Mariza Waki, da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, MG. Este programa é escrito em linguagem FORTRAN e ocupa 322354 bytes de memória. Para seu bom rendimento é conveniente o uso de disco rígido de memória e é fundamental uma impressora. Outra característica deste programa é que as contagens devem estar sob a forma de coluna, em um arquivo, para serem lidas e interpretadas. O programa VTERM II grava em arquivo os dados dispostos em linha. Então, para usar o AJUSTE, tivemos que transformar a disposição dos dados

através do programa INPARQ, escrito em BASIC, também desenvolvido por Mariza Waki.

O primeiro passo para a redução de um espectro é a identificação das linhas do espectro de comparação. Para isto, precisamos do espectro, na forma de contagens por pixel, "plotado" em papel, e de um atlas contendo as linhas e seus respectivos comprimentos de onda. Precisamos, entretanto, para seguir adiante conhecer um pouco mais sobre os espectros obtidos com o Reticon.

A despeito da simplicidade do esquema de resfriamento do Reticon (Cap.II.1.3), ele reduz a corrente de escuro a um nível de cerca de 1.5 contagens/pixel/hora. A figura III.1 ilustra um espectro de corrente de escuro após integração de 0.5 horas. A curvatura nos espectros em ambos os canais reflete a variação do ganho do intensificador, do centro para as bordas. Só há picos destacados nas bordas dos espectros, indicando que pontos quentes nos tubos de imagem não contribuem nas regiões centrais. Estes picos nas bordas fazem com que a área útil do "chip" do Reticon seja reduzida.

Portanto, em vez de utilizarmos todos os pixels do canal que contem o espectro do objeto (no caso, o direito, que vai do pixel 2049 ao 4096), escolhemos trabalhar com os dados do pixel 2200 até os do 3700, ou seja, 1500 pontos. Este critério foi mantido para todos os espectros, tanto os da SN 1987A quanto os de comparação e "flat-field" (o conceito de "flat-field" será visto adiante neste capítulo). Pudemos garantir assim, que não haverá picos irreais nos espectros da SN 1987A.

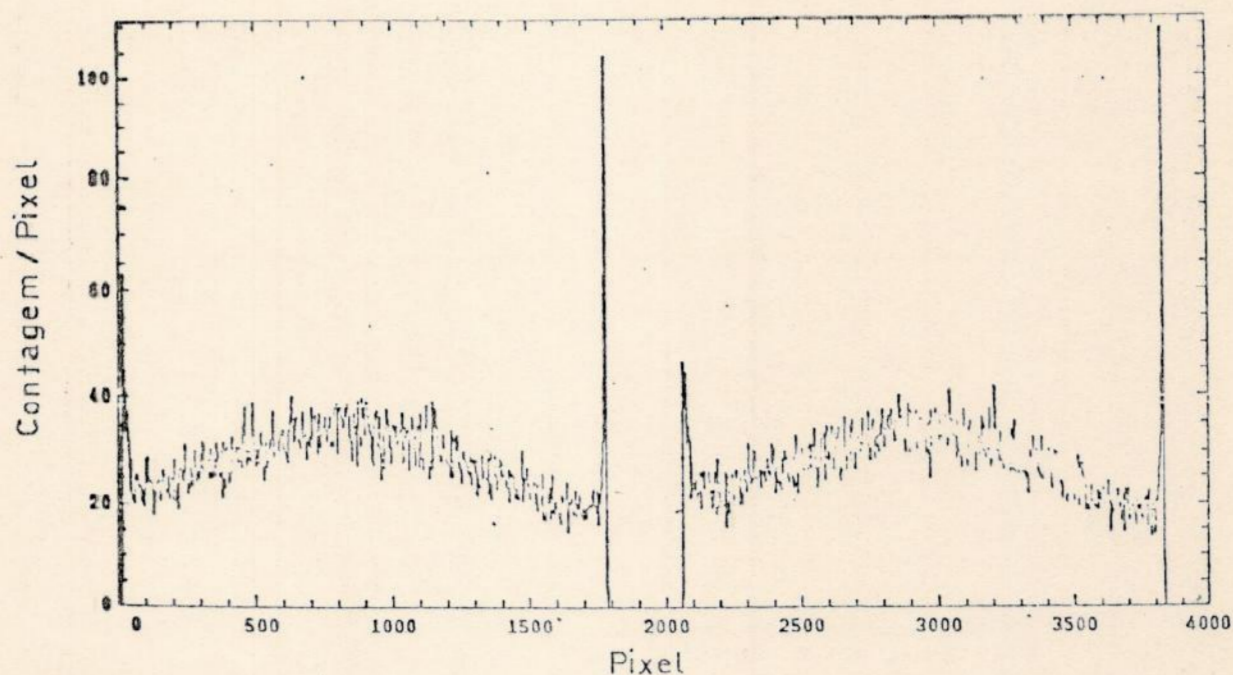


Fig.III.1 Espectros em ambos os canais após integração de corrente de escuro de 0.5 horas. Note a curvatura dos espectros e os picos nas bordas. (da Costa et al., 1985)

A lâmpada usada como comparação foi, na maioria dos espectros da SN 1987A somente a do tório. Os espectros de Th situados mais para o vermelho (a partir de  $6700 \text{ \AA}$ ), não possuem linhas suficientes para a construção de um polinômio de 7º grau. Nestes casos foi necessário somarmos aos de Th espectros de neônio para complementar o número de linhas necessárias na região. A tabela III.1 mostra o nome dos arquivos contendo os espectros da SN 1987A e os espectros de comparação usados em suas reduções.

O atlas usado para a identificação das linhas de Th foi o Atlas Fotográfico Coudé, preparado por José Veliz Navarro, do ON, baseado no "New Description of Thorium Spectra", de R. Zalubas (1960). Mas nem todas as linhas mostradas no atlas estão presentes nos nossos espectros de comparação e vice-versa. Isto depende: i) do tempo de



integração, ou seja, do nível de contagens, que permite ou não a presença de linhas fracas; ii) dos tubos de imagem do Reticon, que fazem com que as linhas fiquem mais ou menos resolvidas; iii) da existência de ruído, que se mistura com as linhas verdadeiras. Não basta que a linha presente no espectro de comparação seja realmente uma linha de emissão do elemento, ela ainda deve estar isolada de outras linhas. O programa AJUSTE identifica como linhas todos os picos com intensidade superior a um certo nível de contagens pré-fixado. E a determinação do pixel exato da linha é feita pelo ajuste de uma curva gaussiana (o centro da gaussiana é considerado o centro da linha). Se outras linhas estiverem de tal forma próximas a uma determinada linha que o programa não as considere separadas, a determinação do pixel correspondente a esta linha de interesse ficará comprometida e, conseqüentemente, não contribuirá para um bom ajuste do polinômio. O número de linhas identificadas depende de cada espectro, tanto pelo número total de linhas existentes na região como pelas características citadas acima.

TABELA III.1 - Espectros reduzidos

Objeto	Data	Hora <sup>a</sup> (TU)	Comparação	Flat-field	Espec. reduzido
SN6300.368	27/02	03:11:46.1	TH6300.368	IN6300.373	SN630068.ANL
SN6600.368	27/02	03:17:08.1	TH6600.368	IN6600.377	*SN660068.ANL
SN6300.370	28/02	01:26:37.6	TH6300.370	IN6300.373	SN630070.ANL
SN6600.370	28/02	01:33:34.1	TH6600.370	IN6600.377	*SN660070.ANL
SN6300.371	28/02	02:27:27.1	TH6300.371	IN6300.373	SN630071.ANL
SN6000.371	28/02	02:52:21.1	TH6000.371	IN6000.373	*SN600071.ANL
SN6000A.371	28/02	23:20:33.3	TH6000A.371	IN6000.373	*S6000A71.ANL
SN6000.372	01/03	01:50:03.3	TH6000.372	IN6000.373	*SN600072.ANL
SN6000A.372	01/03	01:58:34.3	TH6000A.372	IN6000.373	S6000A72.ANL
SN6300.372	01/03	02:07:22.3	TH6300.372	IN6300.373	SN630072.ANL

Objeto	Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Comparação	Flat-field	Espec. reduzido
SN6500.372	01/03	02:11:52.3	TH6500.372	IN6500.373	SN650072.ANL
SN6800.372	01/03	02:19:04.3	TH6800.372	IN6800.373	SN680072.ANL
SN6500A.372	01/03	02:38:18.3	TH6500A.372	IN6500.373	S6500A72.ANL
SN6300A.372	01/03	02:45:38.3	TH6300A.372	IN6300.373	S6300A72.ANL
SN6000.373	01/03	02:53:55.3	TH6000.373	IN6000.373	SN600073.ANL
SN6500.373	01/03	23:25:40.3	TH6500.373	IN6500.373	SN650073.ANL
SN6300.373	01/03	23:33:43.3	TH6300.373	IN6300.373	SN630073.ANL
SN6300.374	01/03	23:39:36.3	TH6300.374	IN6300.373	SN630074.ANL
SN6800A.374	02/03	00:13:48.5	TH6800.374	IN6800.373	*SN680074.ANL
SN6800B.374	02/03	00:17:09.5	"	"	*S6800A74.ANL
SN6500.374	02/03	...	TH6500.374	IN6500.373	SN650074.ANL
SN6300A.374	02/03	...	TH6300B.374	IN6300.373	S6300A74.ANL
SN6000.376	03/03	01:36:01.4	TH6000.376	IN6000.373	SN600076.ANL
SN6300.376	03/03	02:29:36.4	TH6300.376	IN6300.373	SN630076.ANL
SN6600.376	03/03	02:35:43.4	TH6600.376	IN6600.377	SN660076.ANL
SN6900.376	03/03	02:55:11.8	TH6900.376	IN6900.377	SN690076.ANL
SN6000.377	04/03	00:31:38.4	TH6000.377	IN6000.377	SN600077.ANL
SN6300.378	04/03	01:05:03.4	TH6300.378	IN6300.377	SN630078.ANL
SN6600.378	04/03	01:11:24.2	TH6600.378	IN6600.377	SN660078.ANL
SN6900.378	04/03	01:23:31.4	TH6900.378	IN6900.377	SN690078.ANL
			NE6900.378		
SN6000.379	05/03	02:30:15.8	TH6000.379	IN6000.377	SN600079.ANL
SN6300.379	05/03	02:43:00.3	TH6300.379	IN6300.377	SN630079.ANL
SN6600.379	05/03	03:04:08.3	TH6600.379	IN6600.379	SN660079.ANL
SN6000.380	05/03	23:51:53.3	TH6000.380	IN6000.382	SN600080.ANL
SN6300.381	06/03	00:58:15.3	TH6300.381	IN6300.382	SN630081.ANL
SN6600.381	06/03	01:05:56.3	TH6600.381	IN6600.382	SN660081.ANL
SN6900.381	06/03	01:11:50.3	TH6900.381	IN6900.382	SN690081.ANL
			NE6900.381		
SN6300.382	06/03	02:40:46.3	TH6300.382	IN6300.382	SN630082.ANL
SN6600.382	06/03	02:46:31.1	TH6600.382	IN6600.382	SN660082.ANL
SN6000.383	07/03	00:47:41.3	TH6000.383	IN6000.382	SN600083.ANL
SN6300.383	07/03	01:35:14.3	TH6300.383	IN6300.382	SN630083.ANL
SN6600.384	07/03	...	TH6600.384	IN6600.382	SN660084.ANL
SN6900.384	07/03	01:55:43.3	TH6900.384	IN6900.382	SN690084.ANL
			NE6900.384		
SN6300.385	11/03	23:56:54.1	TH6300.385	IN6300.386	SN630085.ANL
SN6600.385	12/03	00:12:47.1	TH6600.385	IN6600.386	SN660085.ANL
SN6300.387	13/03	01:55:58.1	TH6300.387	IN6300.386	SN630087.ANL
SN6600.387	13/03	02:09:07.1	TH6600.387	IN6600.386	SN660087.ANL
SN6600.389	14/03	02:55:12.9	TH6600.389	IN6600.387	SN660089.ANL
SN6300.389	14/03	03:00:59.9	TH6300.389	IN6300.387	SN630089.ANL
SN6300.391	17/03	01:04:42.2	TH6300.391	IN6300.392	SN630091.ANL
SN6600.391	17/03	01:09:08.2	TH6600.391	IN6600.392	SN660091.ANL
SN6600.392	17/03	03:01:15.2	TH6600.392	IN6600.392	SN660092.ANL
SN6300.392	17/03	03:08:07.2	TH6300A.392	IN6300.392	SN630092.ANL
SN6300.393	18/03	02:20:01.3	TH6300.393	IN6300.392	SN630093.ANL
SN6600.393	18/03	02:33:57.3	TH6600.393	IN6600.392	SN660093.ANL
SN6300.395	20/03	01:40:26.4	TH6300.395	IN6300.393	SN630095.ANL
SN6600.395	20/03	01:46:19.4	TH6600.395	IN6600.393	SN660095.ANL

Objeto	Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Comparação	Flat-field	Espec. reduzido
SN6300.397	22/03	02:23:40.3	TH6300.397	IN6300.398	SN630097.ANL
SN6600.397	22/03	02:28:23.3	TH6600.397	IN6600.398	SN660097.ANL
SN6600.399	23/03	23:04:42.9	TH6600.399	IN6600.398	SN660099.ANL
SN6600.401	25/03	00:10:25.9	TH6600.401	IN6600.402	SN660001.ANL
SN6300.401	25/03	00:24:41.9	TH6300.401	IN6300.402	SN630001.ANL
SN6600.403	25/03	22:51:17.9	TH6600.403	IN6600.402	SN660003.ANL
SN6300.403	25/03	23:07:22.9	TH6300.403	IN6300.402	SN630003.ANL
SN6600.405	26/03	23:01:31.9	TH6600.405	IN6600.404	SN660005.ANL
SN6300.405	26/03	23:17:20.9	TH6300.405	IN6300.404	SN630005.ANL
SN6300.407	28/03	00:41:19.9	TH6300.407	IN6300.406	SN630007.ANL
SN6600.407	28/03	00:46:01.9	TH6600.407	IN6600.406	SN660007.ANL
SN6300.409	29/03	01:59:47.8	TH6300.409	IN6300.408	SN630009.ANL
SN6600.409	29/03	02:07:02.8	TH6600.409	IN6600.408	SN660009.ANL
SN6600.411	29/03	23:28:19.7	TH6600.411	IN6600.410	SN660011.ANL
SN6300.411	29/03	23:33:44.7	TH6300.411	IN6300.410	SN630011.ANL
SN6600.413	30/03	23:28:29.6	TH6600.413	IN6600.412	SN660013.ANL
SN6300.413	30/03	23:37:08.6	TH6300.413	IN6300.412	SN630013.ANL

OBS.: <sup>1</sup>A hora indicada corresponde ao meio da observação.

\* Estes espectros assinalados não constam das figuras IV.1.

**Tabela.III.1** Relação dos nomes dos arquivos dos espectros que foram reduzidos, por ordem cronológica. Para cada espectro são indicados: data (dia/mês) e hora em que foram obtidos, os nomes dos arquivos do espectros de comparação e dos "flat-field" utilizados no processo de redução, e o nome do arquivo do espectro reduzido.

**OBSERVAÇÃO:** O nome de um arquivo de PC possui no máximo 8 caracteres e uma extensão com até 3 caracteres. O critério para nomear os arquivos foi o seguinte:

- os dois primeiros caracteres representam o tipo de espectro (SN= espectro da supernova; TH= espectro de Th; NE= espectro de Ne; IN= espectro do "flat-field");
- os quatro dígitos seguintes indicam o comprimento de onda central do espectro;
- os três dígitos da extensão são o número do disco original onde foram gravados os espectros pelo Nova 3, que também segue um ordenamento cronológico.

No caso de mais de um arquivo com as mesmas características, para diferenciá-los colocou-se uma letra após o comprimento de onda central, iniciando-se pela primeira letra de alfabeto.

Os espectros reduzidos tiveram a referência ao disco de origem, representada pelos dois últimos algarismos do número original, acrescentada ao nome do arquivo. A extensão ANL representa um espectro analisado (reduzido).

Após a identificação das linhas, ficamos com uma tabela de pixels e comprimentos de onda correspondentes. O passo seguinte é ajustar um polinômio de 7º grau a estes pontos. Feito o ajuste, o programa fornece uma tabela indicando os comprimentos de onda calculados (Apêndice), através do polinômio ajustado para os pixels usados, e as diferenças entre estes valores calculados e os fornecidos, ou seja, os resíduos do ajuste. Fornece também outras informações sobre o ajuste: os parâmetros do polinômio, a convergência alcançada, o número de pontos lidos e usados, o qui-quadrado reduzido e os graus de liberdade. A tabela III.2 mostra para cada espectro reduzido, estas duas últimas informações, que servem para testar a qualidade do ajuste. O qui-quadrado reduzido é dado por:

$$\sum_i = (Y_{\text{exper},i} - Y_{\text{ajust},i})^2 \times \text{peso} / f \quad (\text{III.1})$$

onde:  $Y_{\text{exper},i}$  é o valor fornecido;  $Y_{\text{ajust},i}$  é o valor ajustado;  $f$  é o número de graus de liberdade (= número de pontos além do necessário para ajustar o polinômio). O peso pode ser estatístico (= inverso de  $Y_{\text{exper},i}$ ), instrumental (= inverso do desvio padrão  $\sigma$ ) ou sem peso (= 1). O chamado teste de qui-quadrado compara o valor dado por (III.1) com os valores da variável qui-quadrado para  $f$  graus de liberdade e uma dada área da curva da distribuição qui-quadrado. Quanto maior a área associada ao valor encontrado, melhor será o ajuste. Todos os valores da tabela III.2 representam 100% da área da curva, exceto os valores assinalados pelas letras a, b, c, associados a 99.72%, 69.96% e 94.72%, respectivamente.

TABELA III.2 - Erros das Reduções dos Espectros

Espec. de comparação	Qui-quadrado reduzido	f	Espec. de comparação	Qui-quadrado reduzido	f
TH6300.368	0.282086E-02	20	TH6300.382	0.187136E-02	18
TH6600.368	0.159651E-02	17	TH6600.382	0.924751E-03	16
TH6300.370	0.575249E-02	20	TH6000.383	0.264722E-02	19
TH6600.370	0.333944E-02	19	TH6300.383	0.345083E-02	21
TH6300.371	0.300891E-02	20	TH6600.384	0.139243E-02	18
TH6000.371	0.218607E-02	27	TN6900.384 <sup>d</sup>	0.202146E-02	5
TH6000A.371	0.221846E-02	23	TH6300.385	0.333940E-02	17
TH6000.372	0.212559E-02	14	TH6600.385	0.228137E-02	17
TH6000A.372	0.186175E-02	21	TH6300.387	0.162767E-02	17
TH6300.372	0.244029E-02	22	TH6600.387	0.167690E-02	18
TH6500.372	0.362339E-02	17	TH6600.389	0.162889E-02	20
TH6800.372 <sup>m</sup>	0.162084E-01	3	TH6300.389	0.167227E-02	16
TH6500A.372	0.359600E-02	22	TH6300.391	0.161973E-02	17
TH6300A.372	0.366361E-02	21	TH6600.391	0.173859E-02	19
TH6000.373	0.177033E-02	19	TH6600.392	0.185025E-02	20
TH6500.373	0.181173E-02	16	TH6300A.392	0.249349E-02	16
TH6300.373	0.340363E-02	20	TH6300.393	0.181655E-02	17
TH6300.374	0.372089E-02	17	TH6600.393	0.199299E-02	20
TH6800.374 <sup>b</sup>	0.148837	1	TH6300.395	0.235948E-02	19
TH6800.374 <sup>b</sup>	0.148837	1	TH6600.395	0.210735E-02	21
TH6500.374	0.199360E-02	18	TH6300.397	0.184652E-02	21
TH6300B.374	0.255499E-02	19	TH6600.397	0.278174E-02	19
TH6000.376	0.166661E-02	14	TH6600.399	0.207850E-02	21
TH6300.376	0.322671E-02	23	TH6600.401	0.224199E-02	20
TH6600.376	0.262126E-02	17	TH6300.401	0.189728E-02	17
TH6900.376 <sup>c</sup>	0.438881E-02	1	TH6600.403	0.228606E-02	20
TH6000.377	0.371096E-02	24	TH6300.403	0.306017E-02	20
TH6300.378	0.259069E-02	23	TH6600.405	0.286542E-02	20
TH6600.378	0.127149E-02	19	TH6300.405	0.303501E-02	19
TN6900.378 <sup>d</sup>	0.101790E-02	5	TH6300.407	0.165122E-02	19
TH6000.379	0.197128E-02	21	TH6600.407	0.156549E-02	20
TH6300.379	0.230544E-02	22	TH6300.409	0.158914E-02	18
TH6600.379	0.140202E-02	19	TH6600.409	0.172715E-02	21
TH6000.380	0.224246E-02	19	TH6600.411	0.167656E-02	20
TH6300.381	0.159592E-02	22	TH6300.411	0.173793E-02	18
TH6600.381	0.310767E-02	16	TH6600.413	0.121339E-02	19
TN6900.381 <sup>d</sup>	0.215440E-02	5	TH6300.413	0.239581E-02	19

Tabela.III.2 Relação dos valores de qui-quadrado reduzido e graus de liberdade f dos polinômios ajustados aos pontos (pixel, comprimento de onda), formados pelas linhas identificadas nos espectros de comparação. O qui-quadrado para o espectro assinalado pela letra a representa 99.72%, o da letra b 69.96% e o da letra c 94.72%, da área da curva de distribuição de  $\chi^2$ . Todos os outros representam 100%. Os espectros assinalados por d representam a soma de espectros de Th e de Ne.

Com estes dados podemos avaliar se o ajuste está satisfatório ou não. O critério que escolhemos para esta avaliação é: usando o máximo de pontos possíveis, ter resíduos menores que  $0.1 \text{ \AA}$  para todos os pontos. Se houvessem resíduos maiores, deveríamos eliminar os pontos mal ajustados e repetir o ajuste do polinômio. Mas nem todos os pontos mal ajustados precisam ser eliminados, pois, às vezes, um ponto próximo mal identificado é a causa do desvio do polinômio naquela região e deste modo, de um mau ajuste de outros pontos. A primeira medida é eliminar primeiro os pior ajustados e se for necessário os seguintes, até satisfazer o critério.

Antes de substituir os pixels pelos comprimentos de onda correspondentes, dados pelo polinômio calculado, o espectro do objeto precisa passar por um processo de normalização. Este processo é necessário para reduzir a amplitude do padrão fixo e corrigir a variação do ganho do intensificador (fig. III.1)

O padrão fixo está associado com a não-uniformidade da resposta espacial ao longo da fila de diodos do Reticon. Esta característica limita o seu uso para trabalhos espectrofotométricos acurados. Entretanto, desde que o padrão fixo seja razoavelmente estável durante a escala de um dia, ele pode ser corrigido normalizando-se o espectro com a exposição de um "flat-field", com alto sinal/ruído, tomado todos os dias. No caso, chamamos de "flat-field" o espectro de uma lâmpada incandescente de tungstênio, que deve ser tomado nas mesmas condições (região e ordem) do espectro do objeto.

Como foi dito acima, o "flat-field" deve ser tomado todas as noites que tiver observações. Mas por questões técnicas, os

observadores algumas vezes não puderam seguir esta recomendação. Nos primeiros dias do programa de observação, o "flat-field" da região de 6600 Å só foi tomado dia 3 de março às 20h 08min 23.5seg (TU), e os das regiões de 6000, 6300, 6500 e 6800 Å, dia 1º de março no início da noite. Escolhemos, portanto, os "flat-fields" tomados nos horários mais próximos possível dos espectros do objeto. Mesmo assim, para os casos citados acima, acreditamos que a normalização de espectros com "flat-fields" tomados dias mais tarde não pode ser a ideal. Ou seja, este tipo de normalização não corrige satisfatoriamente o padrão fixo.

Como já foi dito neste capítulo, a região a partir de 6700 Å possui poucas linhas de Th. Mas para os espectros SN6800.372, SN6800A.374, SN6800B.374 e SN6900.376 foram tomados só os espectros de comparação de Th (tabela III.1). Estes espectros tiveram que ser normalizados (divididos pelo "flat-field"), para que as linhas mais fracas das bordas pudessem ser identificadas pelo programa AJUSTE. Fizemos o mesmo para a soma dos espectros de Th e Ne (TN6900.378, TN6900.381 e TN6900.384 - tabela III.2). E podemos verificar pela tabela III.2 que os polinômios ajustados às linhas de Th dos espectros assinalados pelas letras a, b, c, ficaram piores que os ajustados às linhas de Th e Ne somadas (espectros assinalados pela letra d).

Feita a normalização do espectro do objeto, pode ser executada então, a etapa final do processo de redução: a substituição de pixel por comprimento de onda. Desta forma, temos o espectro do objeto pronto para ser analisado.

### III.2 - Filtragem dos dados ("smoothing")

Os dados podem sofrer uma filtragem para eliminar parte do ruído existente nos espectros. Escolhemos fazer um alisamento suave da curva, através de um comando do programa AJUSTE. Este comando faz um tipo de média ponderada de três pontos em seqüência, dando peso dois ao ponto do meio, que será o substituído por esta média. A seguinte expressão mostra como o novo valor  $Y'_i$  de cada  $Y_i$  da curva a ser alisada é calculado:

$$Y'_i = (Y_{i-1} + 2Y_i + Y_{i+1})/4 \quad (\text{III.2})$$

O cálculo acima é feito para todos os pontos da curva. Este procedimento pode ser repetido quantas vezes se considerar conveniente.

Aplicamos este método de alisamento de curvas uma vez nos espectros já reduzidos. O resultado é mostrado nas figuras IV.1 e no apêndice é visto um exemplo de um espectro antes e depois de alisado.

Outro procedimento de filtragem poderia ser o feito pelo programa SMOOTH87 (Hayden, 1987). Este programa remove o ruído que é incompatível com a "função instrumental", que caracteriza o aparato usado na obtenção dos dados. A dificuldade que encontramos para utilizá-lo foi justamente definir a "função instrumental" do aparato Coudé-Reticon, a fim de não eliminar perfis reais presentes na linha H $\alpha$  com um possível alisamento excessivo.



### III.2 - Normalização

Para se comparar um espectro com outro de mesma região, eles devem, ao menos, ter seus fluxos normalizados um em relação ao outro. Esta normalização requer que exista um ponto fixo nos espectros, que possa servir de padrão para a normalização. Os espectros da SN 1987A modificavam-se a cada instante, devido ao próprio tipo de evento, não possuindo, portanto, nenhuma linha de comprimento de onda fixo.

A normalização poderia ser feita usando alguma linha telúrica. Hanuschik e Dachs (1987) utilizaram as linhas de absorção telúricas de  $O_2$  em 6272 e 6867 Å como linhas padrões. Para os nossos espectros centrados em 6300 Å, isto só é possível para os tomados a partir do dia 22 de março. Isto porque nos primeiros dias a linha  $H\alpha$  era muito mais intensa que as linhas telúricas, que portanto não poderiam ser identificadas nestes espectros. Os espectros centrados em 6500 ou 6600 Å não possuem nenhuma linha telúrica de  $O_2$  suficientemente intensa. Esta região possui várias linhas telúricas de  $H_2O$  (tabela IV.1). Mas estas linhas a princípio não são adequadas para normalização porque suas intensidades dependem da umidade atmosférica, além da massa de ar no momento da observação, da qual também dependem as linhas de  $O_2$ .

Uma tentativa de normalizar os espectros centrados em 6600 Å seria:

- i) desprezar a diferença de tempo na obtenção de um espectro centrado em 6300 Å e outro em 6600 Å (considerar que uma diferença de até 10 min não influencia significativamente a forma da linha);

- ii) escolher uma região que seja comum aos dois espectros (por exemplo, o segmento da linha que vai do mínimo de absorção ao máximo do pico secundário nos espectros a partir do dia 17/03 - figs.IV.1);
- iii) tomar a diferença em intensidade desta região escolhida no espectro de 6300 Å, já normalizado pela linha de  $O_2$ , como padrão para normalizar o espectro de 6600 Å.

O ideal seria não somente normalizar o fluxo dos espectros um em relação aos outros, mas calcular o fluxo absoluto. Para isso seria necessário que tivessem sido feitas observações de estrelas padrões, todas as noites e nas mesmas condições da SN 1987A.

#### IV - ESPECTROS DA LINHA H $\alpha$ DA SN 1987A

Apresentamos nas figuras IV.1 os espectros reduzidos da SN 1987A na região da linha H $\alpha$ , após sofrerem um alisamento por média ponderada de três pontos (Cap.III.1 e Cap.III.2). As faixas de comprimento de onda estão dispostas em seqüência crescente de comprimento de onda (Cap.II.3). Os espectros estão ordenados cronologicamente, de modo que espectros de faixas subseqüentes, obtidos em instantes muito próximos, tenham um dado comprimento de onda comum a eles num mesmo nível de intensidade. Para cada um são indicadas a data e a hora do meio da observação (em TU), em que foram obtidos.

Os espectros não estão normalizados (Cap.III.3). Portanto, não podemos avaliar a evolução com o tempo da intensidade dos picos de emissão e de absorção da linha. Contudo, a variação da forma da linha em comprimento de onda não depende de normalização. Por isso, podemos medir a velocidade radial de cada parte da linha (emissão e absorção) e analisar sua evolução temporal (Cap.V).

**Figs.IV.1** Espectros da SN 1987A apresentados em seqüência cronológica por faixa de comprimento de onda, obtidos com o espectrógrafo Coudé e o detector Reticon (Cap.II.1). Os espectros não estão normalizados em intensidade. Para cada espectro são indicadas a data (dia/mês) e o instante (hora:min em TU) do meio da observação em que foram obtidos. (a) espectros obtidos de 27/02 a 02/03; (b) idem de 03/03 a 07/03; (c) idem de 11/03 a 20/03; (d) idem de 22/03 a 30/03.

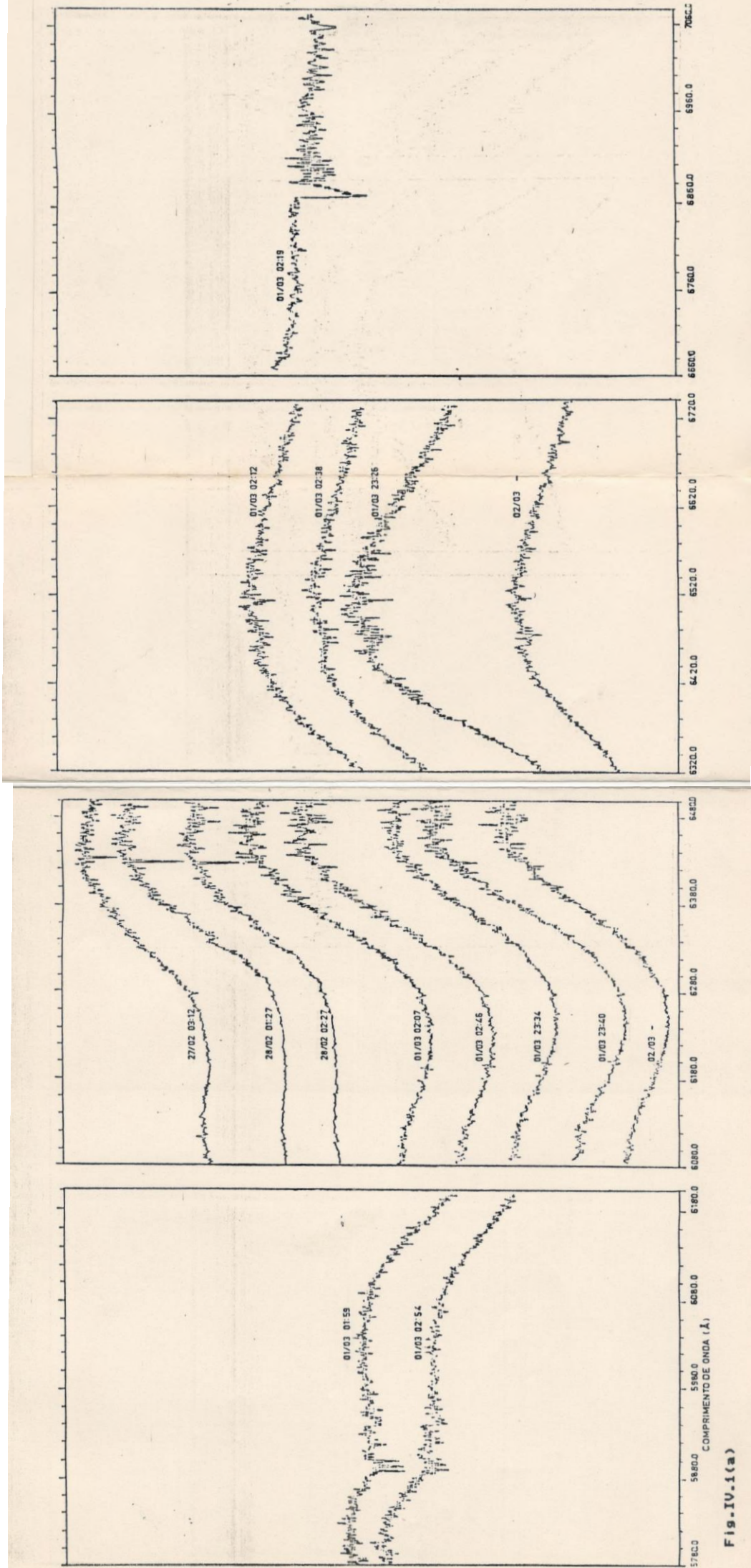


Fig. IV.1(a)

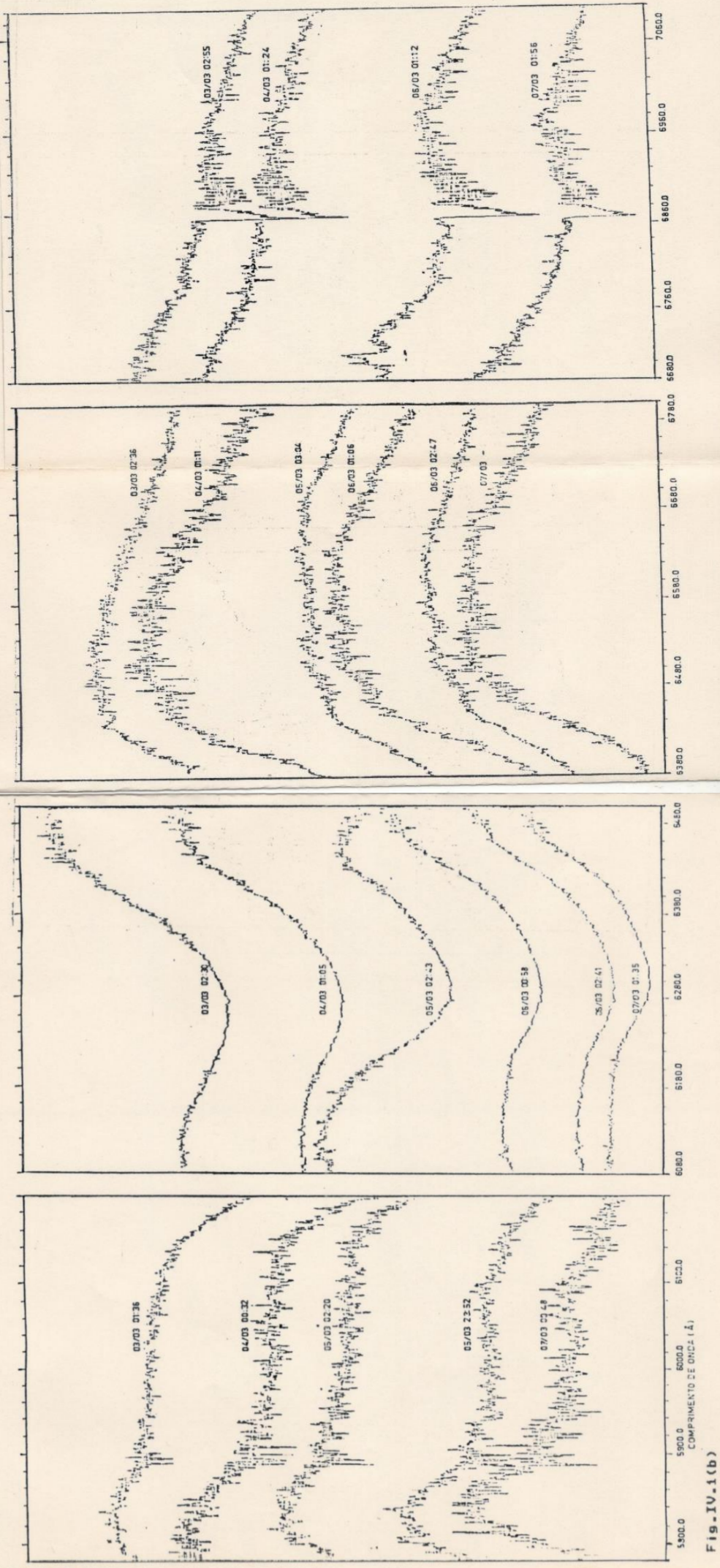
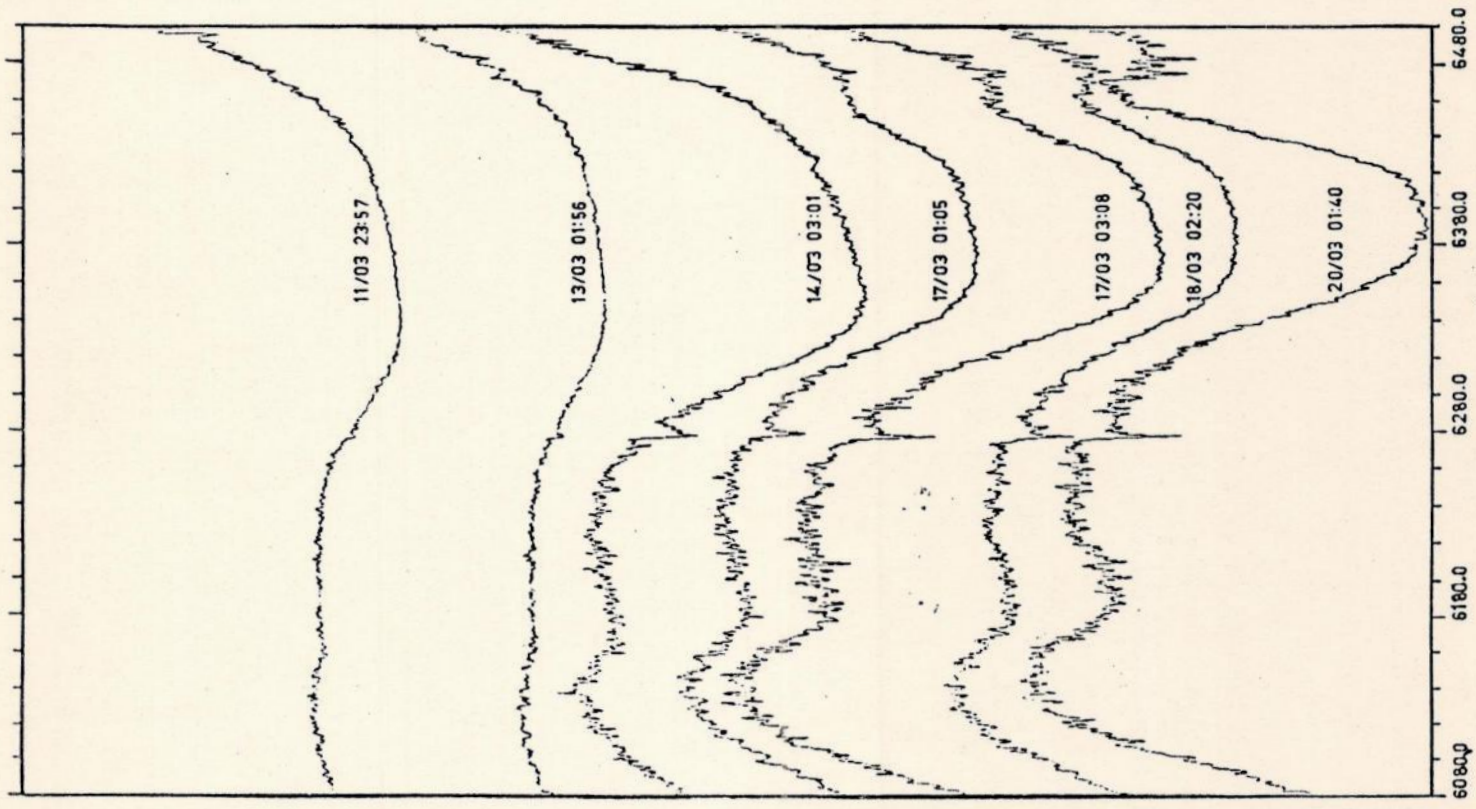
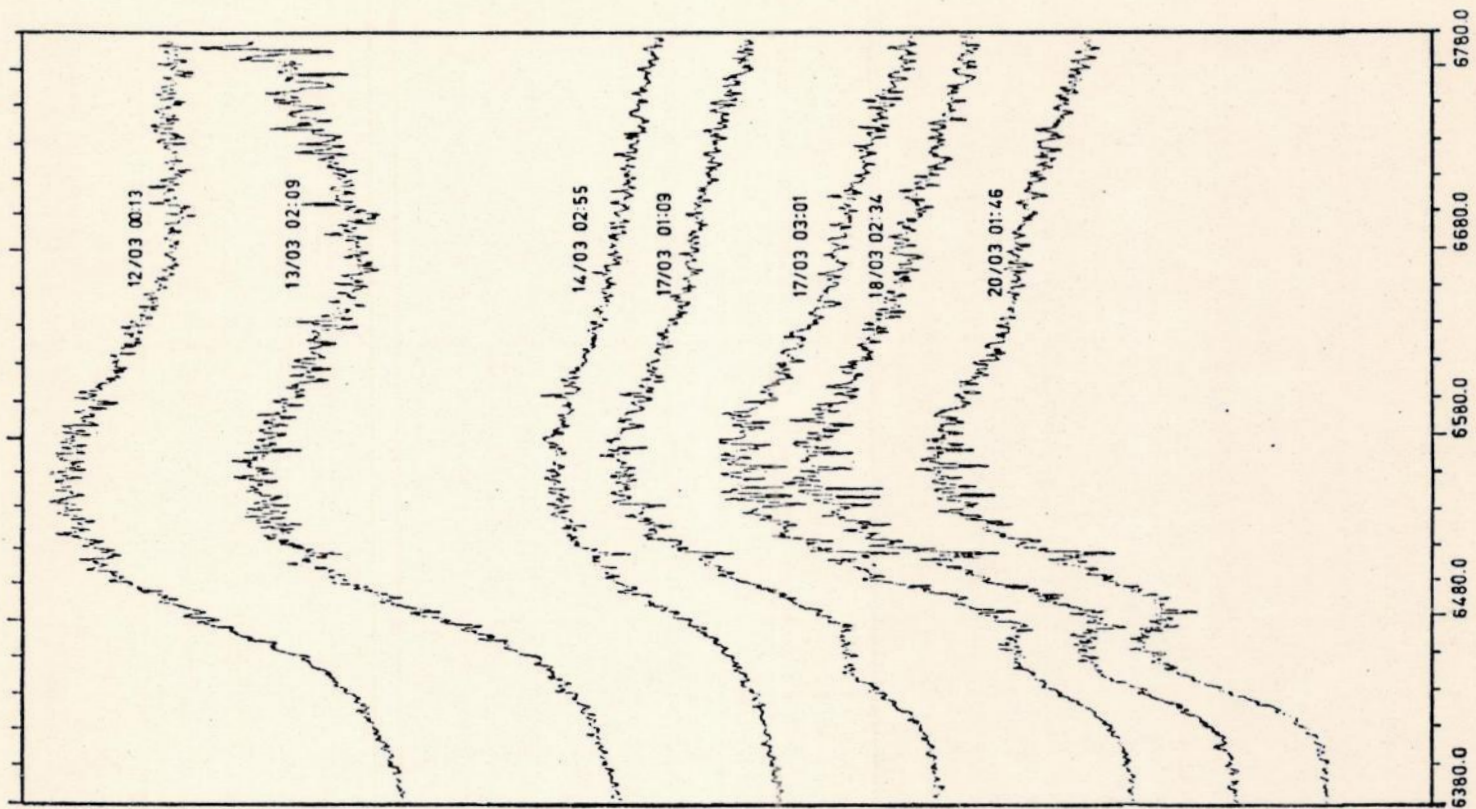


Fig-IV.1(b)



6780.0  
6680.0  
6580.0  
6480.0  
6380.0  
6480.0  
6380.0  
6280.0  
6180.0  
6080.0  
COMPRIMENTO DE ONDA (Å)

Fig. IV.1(c)

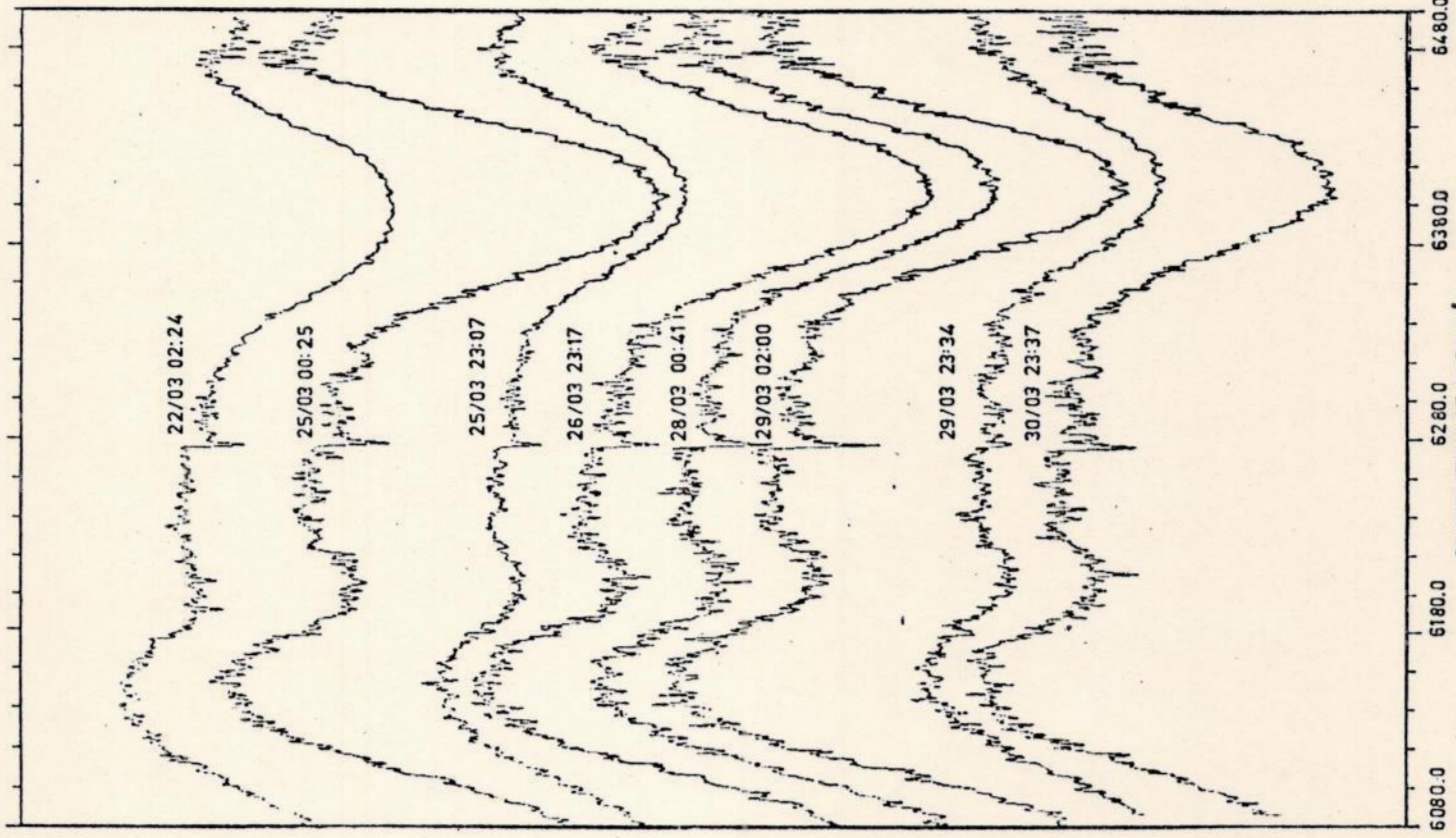
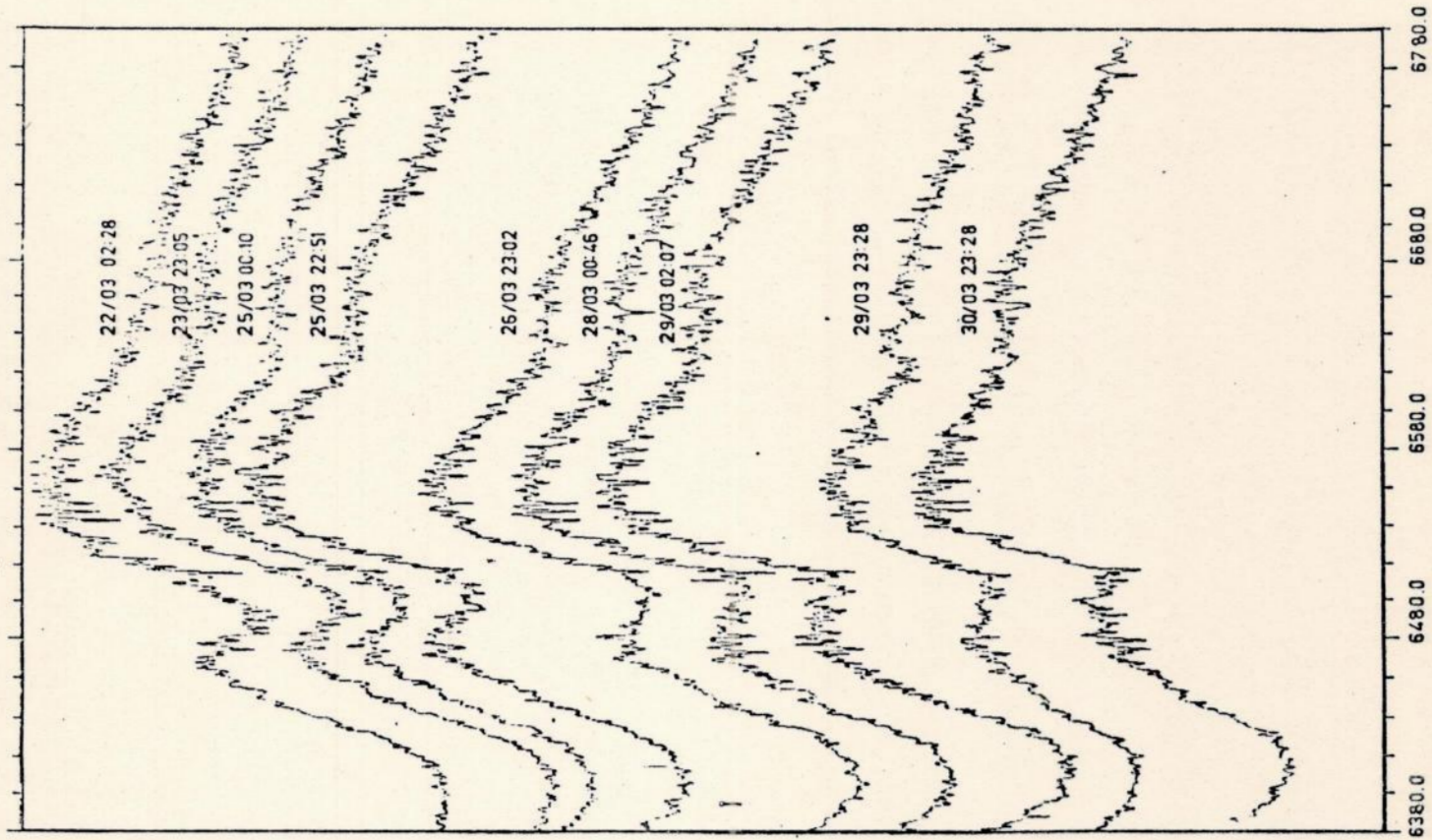


Fig. IV.1(d)

Diferentes causas fizeram com que alguns espectros reduzidos não fossem incluídos nas figuras IV.1 (tabela III.1):

- Os espectros de nome SN660068 e SN660070 foram excluídos porque apresentaram uma forma geral bastante diferente da esperada com base nos espectros de baixa resolução publicados (Ashoka et al. 1987, Hanuschik e Dachs 1987, Menzies et al. 1987, Hearnshaw et al. 1988, Phillips et al. 1988). Os espectros de comparação utilizados estão corretos e os polinômios ajustados estão satisfatórios (tabela III.2). O "flat-field" foi o mesmo utilizado para espectros que não apresentaram o mesmo tipo de problema. Acreditamos, portanto, que tenha havido algum problema técnico em suas obtenções não indicado nos comentários de seus arquivos.

- Os espectros SN680074 e S6800A74 foram desprezados porque o polinômio ajustado para o espectro de comparação TH6800.374 teve um valor de qui-quadrado muito alto, inclusive com área associada de 69.96% (tabela III.2). As linhas deste espectro são as mesmas do espectro TH6800.372, mas o ajuste do polinômio ficou pior, com menos linhas aproveitadas.

- Os espectros SN600071, S6000A71 e SN600072 não foram incluídos simplesmente porque não fazem parte de nenhuma seqüência que contenha a linha  $H\alpha$ .

Como dissemos na Introdução, desde os primeiros dias após o colapso do núcleo, a linha  $H\alpha$  apresentou um largo perfil P-Gygni, que com o passar do tempo foi se estreitando. Podemos verificar esta mudança na forma da linha observando sua evolução através dos espectros das figuras IV.1. Nas faixas de 6080 a 6500 Å vemos a



absorção da linha e nas faixas de 6380 a 6800 Å (6320 a 6740 Å para alguns espectros), a emissão. Nos dias 27/02 a 01/03, vemos também parte do pico de emissão na faixa de 6080 a 6500 Å. E nos espectros a partir do dia 22/03, o pico de absorção já aparece na faixa de 6380 a 6800 Å. Tanto a componente em absorção como a em emissão estão inicialmente deslocadas para o azul em relação ao comprimento de onda de laboratório de H $\alpha$ . Com a evolução do tempo, ambas as componentes se deslocaram para o vermelho (ver medidas de velocidades radiais - Cap.V). Isto confirma a desaceleração das camadas ejetadas.

Nestes espectros podemos observar estruturas finas na região da linha H $\alpha$  da SN 1987A:

(1) Nos espectros de 01/03 e 02/03, podemos perceber uma pequena absorção no pico de emissão, em 6460 Å aproximadamente. Esta absorção não é visível nos espectros de baixa dispersão obtidos por outros observatórios do hemisfério sul (Ashoka et al. 1987, Hanuschik e Dachs 1987, Menzies et al. 1987, Hearnshaw et al. 1988, Phillips et al. 1988). É uma informação nova, presente somente nestes espectros.

(2) Em 17/03 começa a se formar um pico de emissão secundário, entre a absorção e a emissão principais da linha. Este pico secundário, com o passar dos dias, vai se deslocando para o vermelho. Em torno do dia 26/03 começa a desaparecer, mas no dia 30/03 ainda está presente. Os espectros de baixa dispersão citados acima também apresentam este pico secundário, mas com menos detalhes (Fig.IV.3). Segundo o atlas

espectroscópico da SN 1987A de Phillips et al. (1988), a partir de 05/04 não se observa mais um pico entre a emissão e a absorção da linha, mas ainda se nota um pequeno patamar até 17/04, quando então já não se pode afirmar nada sobre a existência deste pico secundário. Hearnshaw et al. (1988) observaram este pico de 18.33/03 até 17/04, cuja intensidade foi máxima em 22/03.

(3) Em 18/03 vemos a formação de um platô (uma região quase horizontal, seguida de uma região em declínio) do lado vermelho do pico de emissão. Este platô se mantém pelo menos até o dia 30/03 e também pode ser detectado nos espectros de baixa dispersão. Hearnshaw et al. (1988) se referem a este platô como a segunda componente de um pico de emissão duplo de  $H\alpha$ , o qual observaram de 19.37/03 a 19.34/04, com intensidade máxima em 25/03.

Ashoka et al. (1987) afirmam que o que chamamos de pico secundário é produzido pelo perfil P-Cygni da linha de FeII em 6456 Å, de forma que a evolução da absorção de  $H\alpha$  não pôde ser traçada além de 22 de março devido ao aumento da intensidade desta linha de FeII. Este artigo apresenta um espectro obtido em 30 de março com um pico de emissão duplo (Fig.IV.2). A absorção central está em 6563 Å e a separação dos picos é de 1400 km/s. O espectro que possuímos obtido em 30 de março não apresenta este pico duplo (Fig.IV.1(d)).

Menzies et al. (1987) também comentam que o perfil da linha de absorção de  $H\alpha$  parece se misturar com outras linhas a partir de 3 de março, o que tornou difícil a medida de sua velocidade.

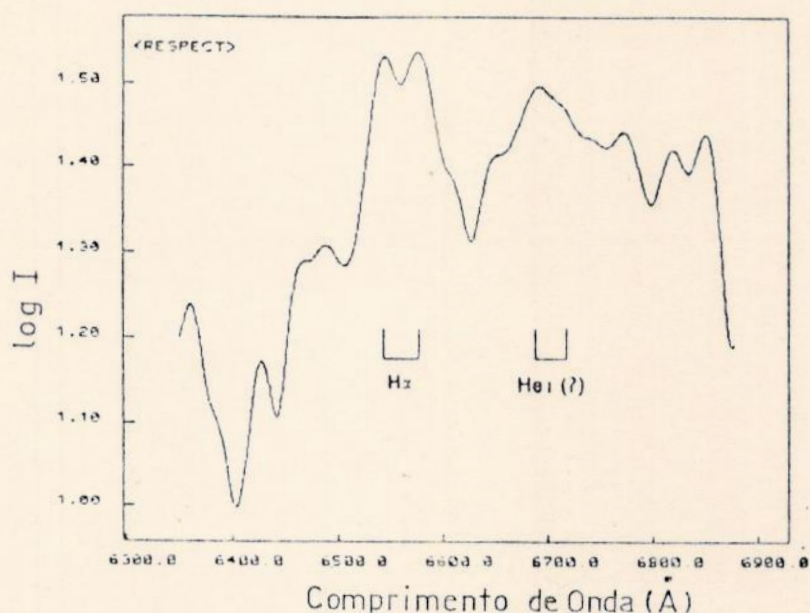


Fig.IV.2 Região de  $H\alpha$  em 30 de março de 1987, mostrando o pico de emissão duplo. O espectro foi consideravelmente suavizado. (Ashoka et al. 1987)

Entretanto, segundo Hanuschik e Dachs (1987) as mudanças na forma do perfil da linha podem refletir um desvio de um fluxo e de uma distribuição de material ejetado esfericamente simétricos. E poderia sugerir também interação com material circum-estelar ou interestelar. O platô do lado vermelho do pico de emissão poderia resultar de contribuições de crescentes de HeI, comprimento de onda de  $6678 \text{ \AA}$ , como proposto por Hearnshaw e Haar (1987). Eles afirmam, no entanto, que um perfil que poderia ser identificado tanto como de HeI, comprimento de onda de  $5876 \text{ \AA}$ , ou como NaI, comprimento de onda de  $5890/5896 \text{ \AA}$ , esteve visível desde 3 de março e não mostrou mudanças de intensidade significativas. Assim, eles propõem que o platô seja devido a alguma absorção adicional ou a redução de emissão na parte superior do perfil de emissão de  $H\alpha$ . Isto poderia também explicar o leve desvio

do máximo de emissão para velocidades negativas (Cap.V).

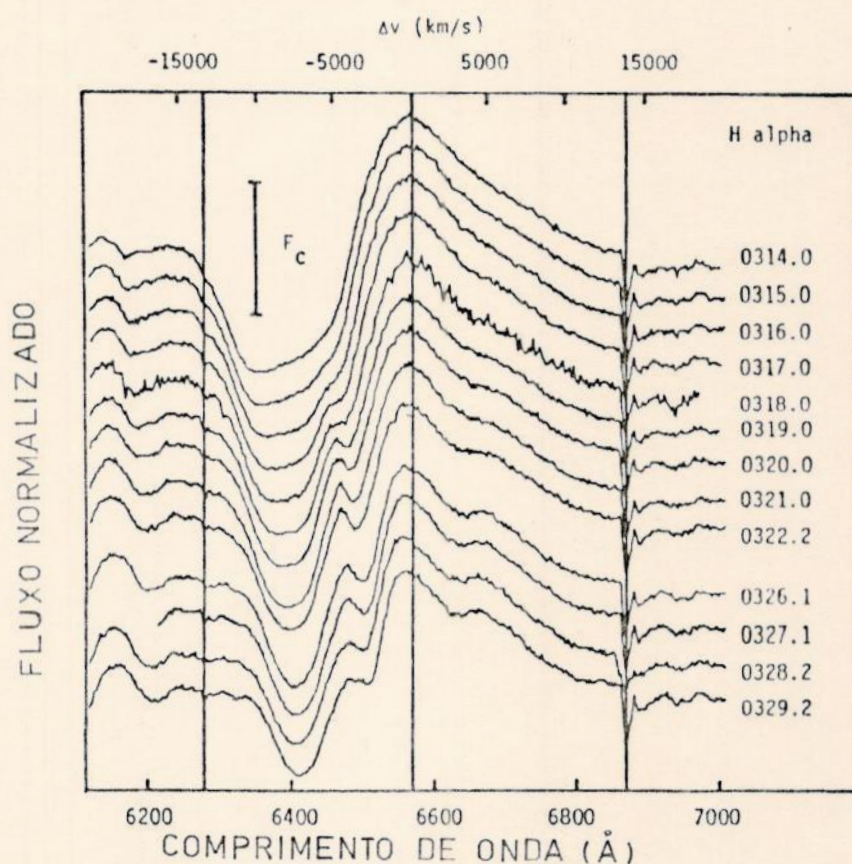


Fig.IV.3 Perfis de  $H\alpha$  de resolução intermediária ( $3 \text{ \AA}$ ) no período de 14.0 a 29.2 de março de 1987. Comprimentos de onda de repouso de  $H\alpha$  no referencial da GNM e de duas linhas de absorção telúricas (6272 e 6867  $\text{\AA}$ ), que serviram como comprimentos de onda padrão, estão indicados. Os perfis foram normalizados em relação ao fluxo do lado vermelho da linha telúrica em 6867  $\text{\AA}$ . A unidade de fluxo deste contínuo está indicada pela barra. (Hanuschik e Dachs, 1987)

Nesta região do espectro óptico existem muitas linhas de absorção telúricas. A tabela IV.1 apresenta uma relação das linhas telúricas de  $H_2O$  mais intensas. Estas linhas foram indicadas por traços verticais no espectro da figura IV.4. Se tivessem sido obtidos, durante as observações da SN 1987A, espectros de estrelas padrões (Cap.III.3), estas linhas poderiam ter sido eliminadas.

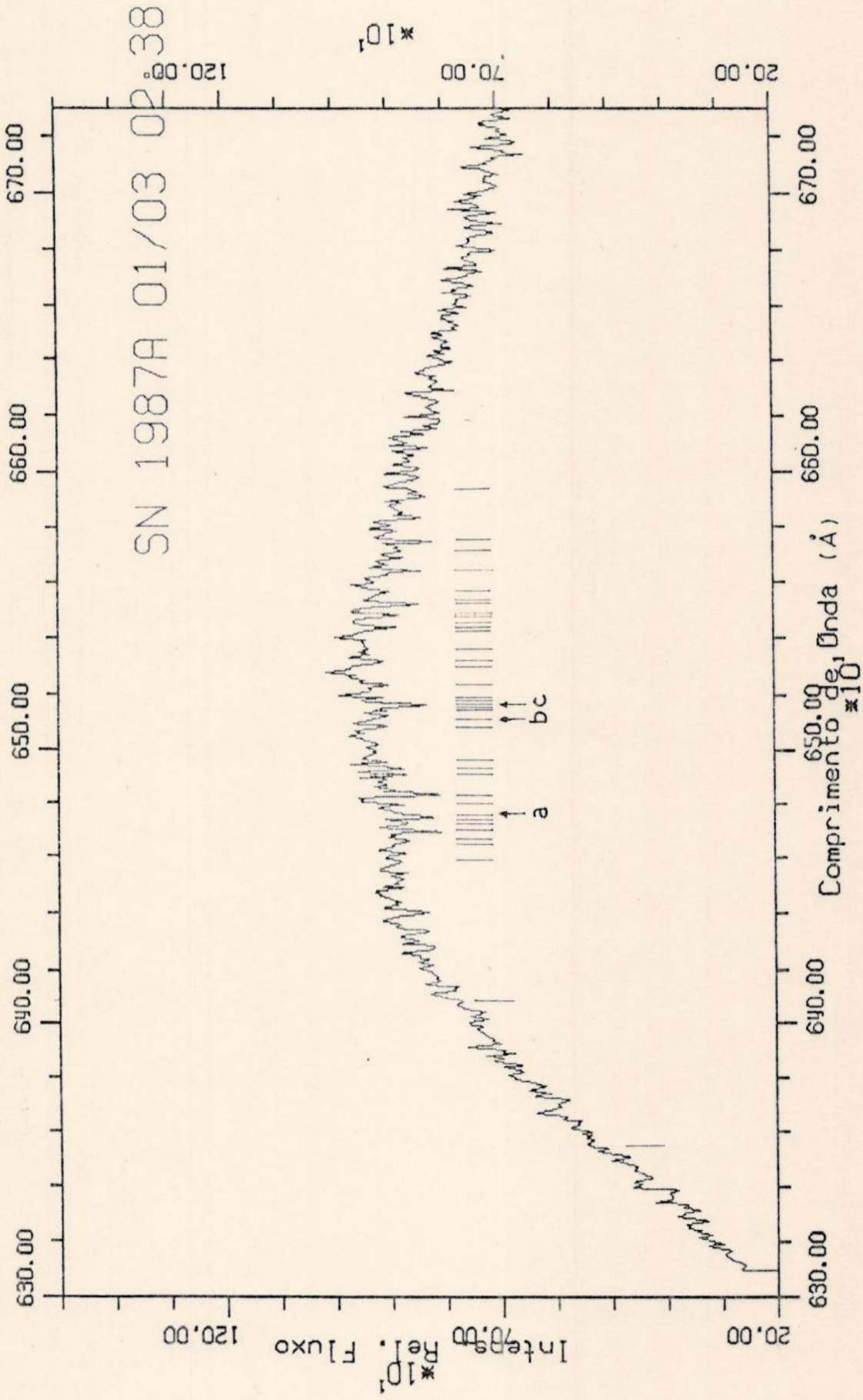
Poderíamos pensar que a pequena absorção, presente no pico de emissão nos espectros de 01/03 e 02/03, talvez fosse provocada pela presença das várias linhas de  $H_2O$  existentes justamente nesta região. Mas estas mesmas linhas continuam identificáveis nos espectros tomados nos dias seguintes, onde esta absorção não está mais presente. Portanto, as linhas telúricas não são a causa desta pequena absorção.

TABELA IV.1 - Linhas Telúricas de  $H_2O$

Compr. Onda (Å)	$W_\lambda$	Obs.	Compr. Onda (Å)	$W_\lambda$	Obs.
6355.1701	2.7		6516.5486	3.5	c
6408.6626	1.2		6516.6365	4.0	c
6458.8728	1.5		6517.0893	2.8	c
6464.4157	1.4		6518.0131	1.8	
6466.2646	1.2		6519.4572	3.1	
6469.6404	1.8		6523.8440	3.2	
6472.4684	1.8		6530.5906	1.1	
6473.1732	2.6		6532.3546	3.7	
6475.0522	2.8	a	6536.7186	1.2	
6475.2019	3.9	a	6542.3090	2.1	
6475.8134	2.5	a	6543.9055	5.2	
6480.0587	1.4		6545.7739	1.2	
6483.2391	1.5		6547.6934	2.4	
6490.7907	2.2		6548.6214	3.0	
6492.9088	1.5		6552.6270	2.9	
6495.8655	1.2		6553.7811	2.0	
6508.5994	2.2		6557.1735	2.3	
6512.0048	1.2	b	6564.2000	2.1	
6512.2556	1.2	b	6572.0704	2.9	
6514.7274	5.1		6574.8488	2.9	
6515.8482	1.8		6594.3694	1.2	

Obs.: Cada grupo de linhas assinaladas com as letras a, b, c, está indicado no espectro de 01/03 02:38 como uma única linha, por falta de resolução do gráfico.

Tabela.IV.1 Comprimentos de onda em angstroms e larguras equivalentes  $W_\lambda$  das linhas telúricas de  $H_2O$  mais intensas na região da linha  $H_\alpha$  da SN 1987A (Pierce & Breckinridge, 1973).



**Fig. IV.4** Espectro da SN 1987A na faixa de 6380 a 6800  $\text{\AA}$ , tomado dia 01/03 às 2 h 38 min. Os traços verticais indicam as linhas telúricas de  $\text{H}_2\text{O}$  mais intensas (tabela IV.1). Os traços assinalados pelas letras a, b e c representam grupos de linhas.

Em nossa opinião, as alterações que surgiram no perfil de  $H\alpha$  durante o mês de março são devidas principalmente a uma expansão não homogênea das camadas ejetadas. E estamos de acordo com Hanuschik e Dachs quanto ao platô ser intrínseco a linha  $H\alpha$  e não devido à linha de FeII.

## V - VELOCIDADES RADIAIS

Encontramos na linha H $\alpha$  da SN 1987A, além das componentes em emissão e em absorção, um pico secundário entre a absorção e a emissão principais e uma pequena absorção presente no pico de emissão principal durante dois dias (Cap.IV). Queremos agora, determinar as velocidades radiais destas componentes para verificar o processo de desaceleração sofrido pelas camadas da SN 1987A ejetadas.

O efeito Doppler é o efeito do estado de movimento sobre o comprimento de onda (ou frequência) observado. A expressão que relaciona o comprimento de onda (ou frequência) de laboratório  $\lambda$  (ou  $\nu$ ) com o observado  $\lambda_{obs}$  (ou  $\nu_{obs}$ ) fornece a velocidade radial  $V_r$  (componente da velocidade  $V$  do observador com respeito a fonte, na linha de visada do observador):

$$(\lambda_{obs} - \lambda) / \lambda = (\nu - \nu_{obs}) / \nu = V_r / c \quad (V.1)$$

Assim,

$$V_r = c(\lambda_{obs} / \lambda - 1) \quad (V.2)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz.  $V_r$  pode ser positiva se a fonte está se afastando e negativa se a fonte está se aproximando do observador.

O primeiro passo é determinar o comprimento de onda observado de cada componente. Como a linha é bastante larga e os nossos espectros são de alta dispersão, os picos de absorção e emissão não possuem mínimos e máximos, respectivamente, facilmente determináveis. Estes espectros possuem a vantagem de serem mais precisos, mas na determinação de um ponto de máximo ou de mínimo em uma linha como a H $\alpha$  da SN 1987A perdemos parte desta precisão.



Resolvemos, então, determinar estes pontos por um método manual:

- (i) plotamos em papel o espectro com a região de interesse;
- (ii) traçamos manualmente uma curva pelos pontos médios dos picos ao longo da linha;
- (iii) traçamos uma reta horizontal tangente à esta curva traçada;
- (iv) tomamos o ponto médio do segmento de reta resultante da intersecção da curva traçada com a reta tangente, como sendo o ponto de máximo ou de mínimo em questão.

Para calcular as velocidades radiais, usamos a expressão (V.2) acrescentada de um termo de correção devido ao movimento da progenitora da SN 1987A,  $v_p$ :

$$V_r = c(\lambda_{obs}/\lambda - 1) - v_p \quad (V.3)$$

onde:  $c = 299792.5$  km/s;

$\lambda =$  comprimento de onda de laboratório de  $H\alpha = 6562.85 \text{ \AA}$  (Striganov e Sventistskü, 1968);

$v_p =$  média dos valores das velocidades nebular e estelar para a região de 30 Dor (Elliot et al., 1977) = 265 km/s.

Para determinar o erro associado ao cálculo da velocidade radial de qualquer uma das componentes da linha  $H\alpha$ , partimos da expressão (V.2) e obtemos:

$$\Delta V_r = (c/\lambda)\Delta\lambda_{obs} \quad (V.4)$$

O erro  $\Delta\lambda_{obs}$  do comprimento de onda observado  $\lambda_{obs}$  depende de vários fatores, desde a aquisição do espectro até a medida do  $\lambda_{obs}$ :

- (a) A aquisição do espectro: estes espectros possuem resolução de 0.74

Å (Cap.II.2).

(b) A redução: sabemos que o polinômio ajustado possui sempre resíduos menores do que  $0.1 \text{ \AA}$  (Cap.III.1), mas não determinamos qual o erro introduzido em cada espectro porque acreditamos que ele seja desprezível em relação à resolução do espectro.

(c) O espectro plotado: os espectros reduzidos são formados por cerca de 850 pontos, plotados de  $0.5$  em  $0.5 \text{ \AA}$  (Apêndice).

(d) O traçado da curva (item (ii) acima): dependendo da quantidade de ruído e da largura da linha, várias curvas traçadas para o mesmo espectro podem resultar em diferenças de  $1$  a  $4 \text{ \AA}$  no ponto de máximo ou de mínimo determinado. Este é um erro de ordem pessoal.

(e) A determinação do ponto de máximo ou de mínimo (ponto médio citado no item (iv) acima): os segmentos de reta intersecções das curvas com as tangentes para cada componente tiveram de  $6$  a  $56 \text{ \AA}$ , o que implica num erro de  $3$  a  $28 \text{ \AA}$ .

(f) A precisão da régua usada para as medidas:  $0.5 \text{ cm}$ . Um espectro plotado pelo programa AJUSTE (Cap.III.1) possui divisões de  $20 \text{ \AA}$ , de  $12.5 \text{ cm}$  de comprimento cada (em tamanho normal). Isto implica num erro de  $0.8 \text{ \AA}$  na determinação de um ponto.

Os valores dos erros dos itens (a), (c) e (f) são fixos, independem do espectro, e o erro do item (b) é o menor de todos. Os erros dos itens (d) e (e) são os maiores porque estão associados à parte mais imprecisa do método e dependem das características do espectro. A determinação do ponto de máximo ou de mínimo depende da curva traçada manualmente pelos picos ao longo da linha. E como o erro associado a esta determinação é maior que o erro pessoal envolvido no

traçado da curva, achamos que este é o erro máximo possível para  $\lambda_{obs}$ , ou seja, todos os outros erros estão embutidos nele. Então, substituindo em (V.4) o erro da determinação do ponto de máximo ou de mínimo, agora chamado de  $\Delta\lambda_{obs}$ , encontramos  $\Delta V_r$  para cada  $V_r$  calculado.

Os valores das velocidades radiais calculados estão nas tabelas V.1, V.2 e V.3. Para cada medida indicamos: o erro associado; a data, a hora em TU e a data juliana em que foram obtidos; os dias após o colapso do núcleo. Estamos considerando como instante de colapso do núcleo o evento de detecção do pulso de neutrinos pelos detectores IMB e Kamiokande II em 23 de fevereiro às 7h 35min 35seg ou D.J. 2446849.82 (Bionta et al., 1987; Hirata et al., 1987).

A grande maioria dos espectros possui apenas uma das componentes da linha  $H\alpha$  (figs.IV.1). As velocidades medidas para as componentes de absorção e emissão principais, por exemplo, não pertencendo ao mesmo espectro, não podem ser consideradas componentes da mesma linha. Esta é outra desvantagem do estudo da Hada SN 1987A através de espectros de alta dispersão em comparação com os espectros de baixa dispersão que possuem a linha completa. Mesmo pequenas diferenças de tempo entre a aquisição de um espectro e de outro, implicam em pequenas alterações na linha. A princípio, podemos desprezar estas diferenças, pois os erros associados às medidas são muito grandes e certamente maiores que a variação das velocidades em escala de minutos.

TABELA V.1 - Velocidades Radiais das componentes de Absorção e Emissão

Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Data <sup>2</sup>	Dia Juliano 2446800. +	V <sub>abs</sub>	ΔV <sub>abs</sub>	V <sub>eml</sub>	ΔV <sub>eml</sub>
27 fev	03:11:46.1	3.81	53.6332	-16712.1	502.5	-5417.1	616.4
28 fev	01:26:37.6	4.74	54.5602	-16821.7	1215.1	-4579.4	630.4
28 fev	02:27:27.1	4.78	54.6024	-17041.0	1215.1	-4608.9	616.4
01 mar	02:07:22.3	5.77	55.5885	-15031.0	776.6	-4257.5	581.2
01 mar	02:11:52.3	5.77	55.5916	-	-	-1802.0	411.2
01 mar	02:38:18.3	5.79	55.6099	-	-	-1217.3	484.3
01 mar	02:45:38.3	5.80	55.6150	-14921.4	557.4	-	-
01 mar	23:25:40.3	6.66	56.4762	-	-	-1984.8	447.7
01 mar	23:33:43.3	6.66	56.4818	-14272.7	593.9	-	-
01 mar	23:39:36.3	6.67	56.4858	-14236.2	667.0	-	-
02 mar	...	...	...	-	-	-1619.3	520.8
02 mar	...	...	...	-14080.9	557.4	-	-
03 mar	02:29:36.4	7.78	57.6039	-13884.5	977.6	-	-
03 mar	02:35:43.4	7.79	57.6095	-	-	-2423.3	849.7
04 mar	01:05:03.4	8.73	58.5452	-12829.2	630.4	-	-
04 mar	01:11:24.2	8.73	58.5496	-	-	-1217.3	1069.0
05 mar	02:43:00.3	9.79	59.6132	-12163.7	546.1	-	-
05 mar	03:04:08.3	9.81	59.6279	-	-	...	...
06 mar	00:58:15.3	10.72	60.5405	-12128.6	546.1	-	-
06 mar	01:05:56.3	10.73	60.5458	-	-	1231.1	1507.5
06 mar	02:40:46.3	10.79	60.6116	-12070.9	557.4	-	-
06 mar	02:46:31.1	10.80	60.6156	-	-	1891.7	1354.3
07 mar	01:35:14.3	11.75	61.5661	-11669.0	703.5	-	-
07 mar	...	...	...	-	-	134.8	1544.0
11 mar	23:56:54.1	16.68	66.4972	-9914.8	520.8	-	-
12 mar	00:12:47.1	16.69	66.5089	-	-	-75.3	580.2
13 mar	01:55:58.1	17.76	67.5847	-9476.3	539.1	-	-
13 mar	02:09:07.1	17.77	67.5897	-	-	281.0	593.9
14 mar	02:55:12.9	18.80	68.6217	-	-	317.5	630.4
14 mar	03:00:59.9	18.81	68.6257	-9257.0	447.7	-	-
17 mar	01:04:42.2	21.72	71.5449	-8614.7	546.1	-	-
17 mar	01:09:08.2	21.73	71.5480	-	-	536.8	557.4
17 mar	03:01:15.2	21.81	71.6259	-	-	591.6	475.1
17 mar	03:08:07.2	21.81	71.6306	-8453.1	520.8	-	-
18 mar	02:20:01.3	22.78	72.5972	-7941.5	630.4	-	-
18 mar	02:33:57.3	22.79	72.6069	-	-	427.2	484.3
20 mar	01:40:26.4	24.75	74.5698	-7579.0	575.6	-	-
20 mar	01:46:19.4	24.75	74.5738	-7525.8	511.7	381.5	493.4
22 mar	02:23:40.3	26.78	76.5998	-7247.1	520.8	-	-
22 mar	02:28:23.3	26.78	76.6030	-7314.6	475.8	308.4	484.3
23 mar	23:04:42.9	28.64	78.4616	-7068.6	440.7	450.0	484.3
25 mar	00:10:25.9	29.69	79.5072	-7027.8	411.2	427.2	539.1
25 mar	00:24:41.9	29.79	79.5172	-7032.4	447.7	-	-
25 mar	22:51:17.9	30.63	80.4523	-6918.2	374.6	-6.8	543.6
25 mar	23:07:22.9	30.54	80.4635	-6881.7	447.7	-	-
26 mar	23:01:31.9	31.64	81.4594	-6890.8	406.6	207.9	447.7

Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Data <sup>2</sup>	Dia Juliano 2446800. +	$V_{abs}$	$V_{abs}$	$V_{emi}$	$V_{emi}$
26 mar	23:17:20.9	31.65	81.4704	-6858.8	411.2	-	-
28 mar	00:41:19.9	32.71	82.5207	-6822.3	484.3	-	-
28 mar	00:46:01.9	32.71	82.5320	-6881.7	484.3	207.9	447.7
29 mar	01:59:47.8	33.76	83.5832	-6735.5	466.0	-	-
29 mar	02:07:02.8	33.77	83.5882	-6612.2	438.6	239.9	493.4
29 mar	23:28:19.7	34.66	84.4700	-6589.3	447.7	244.4	484.3
29 mar	23:33:44.7	34.66	84.4818	-6552.8	447.7	-	-
30 mar	23:28:29.6	35.66	85.4781	-6589.3	484.3	98.3	484.3
30 mar	23:37:08.6	35.66	85.4841	-6589.3	447.7	-	-

<sup>1</sup> A hora indicada corresponde ao meio da observação.

<sup>2</sup> Dias após o colapso do núcleo em D.J. 2446849.82.

Tabela.V.1 Velocidade radiais do mínimo de absorção  $V_{abs}$  e do máximo de emissão  $V_{emi}$ , com os erros calculados correspondentes  $\Delta V_{abs}$  e  $\Delta V_{emi}$ , em km/s.

TABELA V.2 - Velocidades Radiais da Absorção em 6460 Å

Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Data <sup>2</sup>	Dia Juliano 2446800. +	$V_{abs,1}$	$\Delta V_{abs,1}$	$V_{emi,1}$	$\Delta V_{emi,1}$
01 mar	02:11:52.3	5.77	55.5916	-3921.6	447.8	-4689.0	411.2
01 mar	02:38:18.3	5.79	55.6099	-3871.3	447.7	-4784.9	484.3
01 mar	23:25:40.3	6.66	56.4762	-3802.8	447.7	...	...
02 mar	...	...	...	-3702.3	447.7	...	...

<sup>1</sup> A hora indicada corresponde ao meio da observação.

<sup>2</sup> Dias após o colapso do núcleo em D.J. 2446849.82.

Tabela.V.2 Velocidades radiais da pequena absorção presente no pico de emissão principal  $V_{abs,1}$  e da emissão do lado azul desta absorção  $V_{emi,1}$ , com os erros calculados correspondentes  $\Delta V_{abs,1}$  e  $\Delta V_{emi,1}$ , em km/s.

TABELA V.3 - Velocidades Radiais das componentes do Pico Secundário

Data	Hora <sup>1</sup> (TU)	Data <sup>2</sup>	Dia Juliano 2446800. +	$V_{abs.,2}$	$\Delta V_{abs.,2}$	$V_{emi.,2}$	$\Delta V_{emi.,2}$
17 mar	03:01:15.2	21.81	71.6259	-3775.4	338.1	-4250.5	338.1
18 mar	02:33:57.3	22.79	72.6069	-3624.7	333.5	-4118.0	370.1
20 mar	01:46:19.4	24.75	74.5738	-3382.6	333.5	-4140.9	392.9
22 mar	02:28:23.3	26.78	76.6031	-2971.4	374.6	-3885.0	374.6
23 mar	23:04:42.9	28.64	78.4616	-2788.7	374.6	-3802.8	370.1
25 mar	00:10:25.9	29.69	79.5072	-2642.5	411.2	-3629.2	374.6
25 mar	22:51:17.9	30.63	80.4523	-2606.0	411.2	-3519.6	411.2
26 mar	23:01:31.9	31.64	81.4594	-2386.7	374.6	-3510.5	388.3
28 mar	00:46:01.9	32.71	82.5320	-2368.5	406.6	-3446.5	370.1
29 mar	02:07:02.8	33.77	83.5882	-2240.6	411.2	-3300.3	447.7
29 mar	23:28:19.7	34.66	84.4780	-2254.3	370.1	-3236.4	388.3
30 mar	23:28:29.6	35.66	85.4781	-2167.5	370.1	-2861.8	388.3

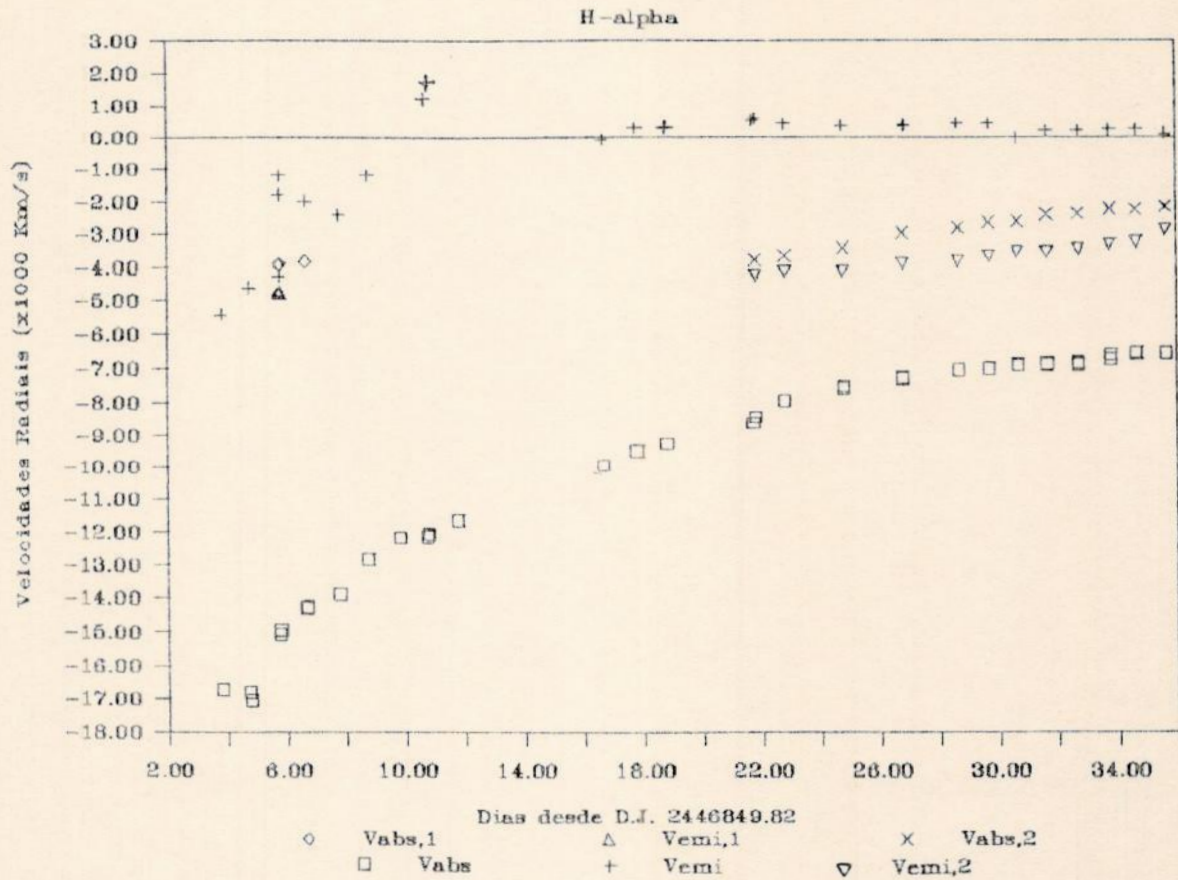
<sup>1</sup> A hora indicada corresponde ao meio da observação.

<sup>2</sup> Dias após o colapso do núcleo em D.J. 2446849.82.

**Tabela.V.3** Velocidades radiais do mínimo de absorção secundário  $V_{abs.,2}$  e do máximo de emissão secundário  $V_{emi.,2}$ , com os erros calculados correspondentes  $\Delta V_{abs.,2}$  e  $\Delta V_{emi.,2}$ , em km/s.

O gráfico da figura V.1 apresenta todas as velocidades radiais medidas para as diferentes componentes da linha H $\alpha$ , contra o tempo em dias após o colapso do núcleo.

Podemos notar que a diminuição do módulo da velocidade do mínimo de absorção não ocorre de forma linear. Por exemplo: do 4º ao 12º dia,  $V_{abs.,2}$  cai de -17000 km/s a pouco menos de -12000 km/s; nos 24 dias seguintes a queda foi de cerca de -12000 km/s a pouco menos de -7000 km/s. Para aproximadamente uma mesma diminuição de velocidade (5000 km/s), um pouco mais que o dobro do tempo, ou seja, inicialmente o módulo da aceleração era o duas vezes a aceleração a partir do 12º dia.



**Fig.V.1** Gráfico das velocidades radiais (em 1000 km/s) das componentes da linha H $\alpha$ : mínimo de absorção principal,  $V_{abs,1}$ ; máximo de emissão principal;  $V_{emi,1}$ ; absorção presente no pico de emissão principal,  $V_{abs,2}$ ; máximo de emissão do lado azul desta absorção,  $V_{emi,2}$ ; mínimo de absorção secundário,  $V_{abs,2}$ ; máximo de emissão secundário,  $V_{emi,2}$ ; contra dias após o colapso do núcleo, ocorrido em D.J. 2446849.82.

A desaceleração do máximo de emissão ocorre de modo diferente:  $V_{emi,1}$  cai mais rapidamente até próximo de zero, até o 12º dia e depois se mantém flutuando em torno da velocidade zero. Durante os dois dias em que foi observada a absorção no pico de emissão, 01/03 e 02/03, a  $V_{emi,1}$  foi menor do que deveria ter sido se sua desaceleração obedecesse uma lei semelhante à desaceleração da  $V_{abs,1}$ . Acreditamos que isto ocorreu porque a definição do ponto de máximo ficou prejudicada

pela presença desta absorção. Pela figura IV.1.(b) podemos ver que os picos de emissão dos espectros de 05/03, 06/03 e 07/03 têm uma forma irregular, mais achatada do que o de outros dias. Isto dificultou a determinação do ponto de máximo, fazendo com que as  $V_{em,1}$  tivessem os maiores erros (Tabela.V.1). Inclusive, não medimos a velocidade para a emissão do dia 05/03 (espectro obtido às 03h 04min) por não sabermos como determinar o ponto de máximo.

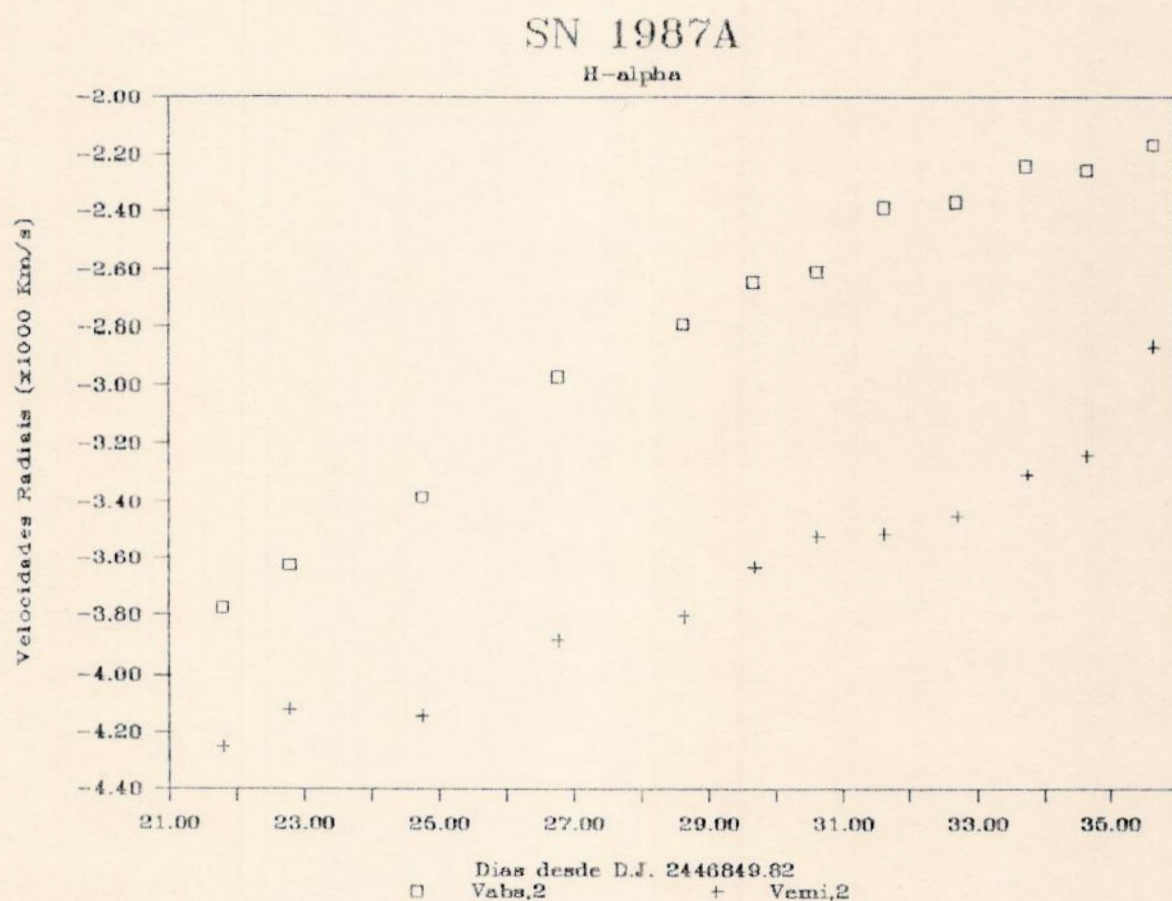


Fig.V.2 Gráfico das velocidades radiais (em 1000 km/s) do máximo de emissão secundário  $V_{em,2}$  e do mínimo de absorção associado  $V_{abs,2}$ , contra dias após o colapso do núcleo.

As velocidades do máximo de emissão e do mínimo de absorção do pico secundário acompanham aparentemente a desaceleração da



$V_{\text{obs}}$ . Isto é um forte indício de que esta emissão é uma componente real da  $H\alpha$ . Podemos ver com mais detalhes a desaceleração destas duas componentes no gráfico da figura V.2.

Alguns artigos apresentam resultados de medidas de velocidade radial para as componentes de  $H\alpha$ . Escolhemos dois trabalhos para comparar com nossos dados:

- Hearnshaw et al. (1988) obtiveram espectros fotográficos de média resolução separados em parte azul (3600 a 5100 Å) e parte vermelha (4600 a 7000 Å). A maioria com telescópio "Boller and Chivens" de 0.61 m e alguns com telescópio óptico Craftsmen de 0.61 m, do Observatório Mt. John, Nova Zelândia. Características dos espectros: dispersões: 90.0 Å/mm (2ª ordem vermelha) e 60.0 Å/mm (3ª ordem azul); resoluções: 1.6 e 1.1 Å, respectivamente, correspondentes a cerca de 83 e 70 km/s. As velocidades radiais foram estimadas a partir dos espectros em gráfico e calculadas relativas ao centro de massa da supernova, ( $270 \text{ km/s} - v_{\text{rad}}$ ), onde  $v_{\text{rad}}$  é a velocidade radial medida na Terra. O artigo não menciona os erros das medidas.

- Phillips et al. (1988) obtiveram espectros com o detector contador de fótons bi-dimensional "2D-Frutti", acoplado ao espectrógrafo "Boller and Chivens" do telescópio de 1.0 m do Observatório Inter-Americano de Cerro Tololo em La Serena, Chile. Uma rede de 300 linhas/mm foi usada, fornecendo uma faixa espectral de 3700 a 7100 Å, com resolução de aproximadamente 5 Å. As velocidades radiais foram calculadas assumindo-se como velocidade radial da progenitora 265 km/s. Este artigo também não se refere aos erros das medidas.

Os gráficos das figuras V.3 e V.4 apresentam as medidas de velocidades radiais do mínimo de absorção e do máximo de emissão, respectivamente, obtidas por nós (Tabela V.1), por Hearnshaw et al. (indicadas pelo sub-índice h) e por Phillips et al. (indicadas pelo sub-índice p).

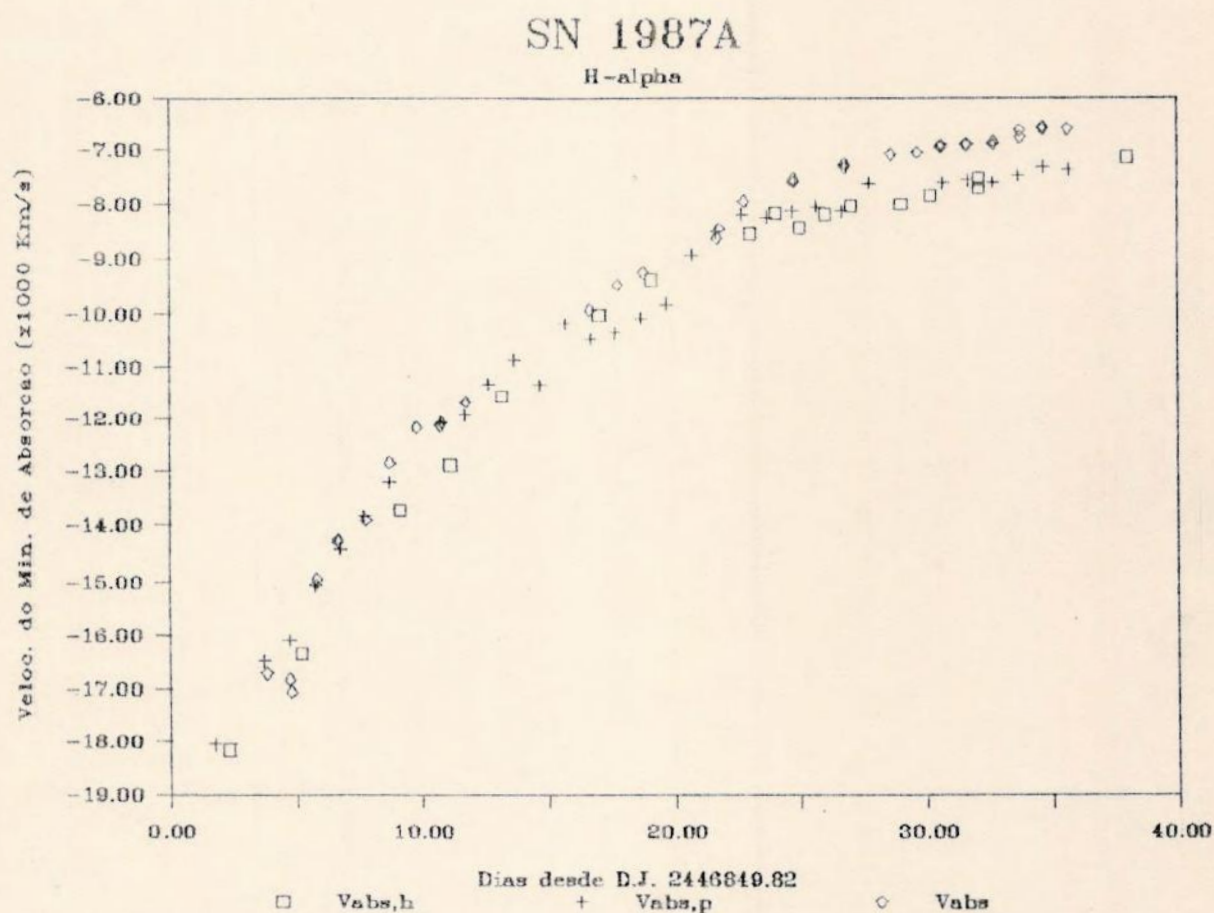


Fig.V.3 Gráfico comparativo das velocidades radiais (em 1000 km/s) do mínimo de absorção obtidas por nós,  $V_{abs}$ , por Hearnshaw et al.,  $V_{abs,h}$  e por Phillips et al.,  $V_{abs,p}$ , contra dias desde o colapso do núcleo.

Pela figura V.3 podemos notar que os três conjuntos de dados possuem o mesmo comportamento e a dispersão se mantém basicamente

constante. Entretanto, a partir do 25º dia, nossos valores são sistematicamente inferiores em módulo (considerando o sinal, menos negativos) que os outros dados (diferenças de aproximadamente 500 km/s).

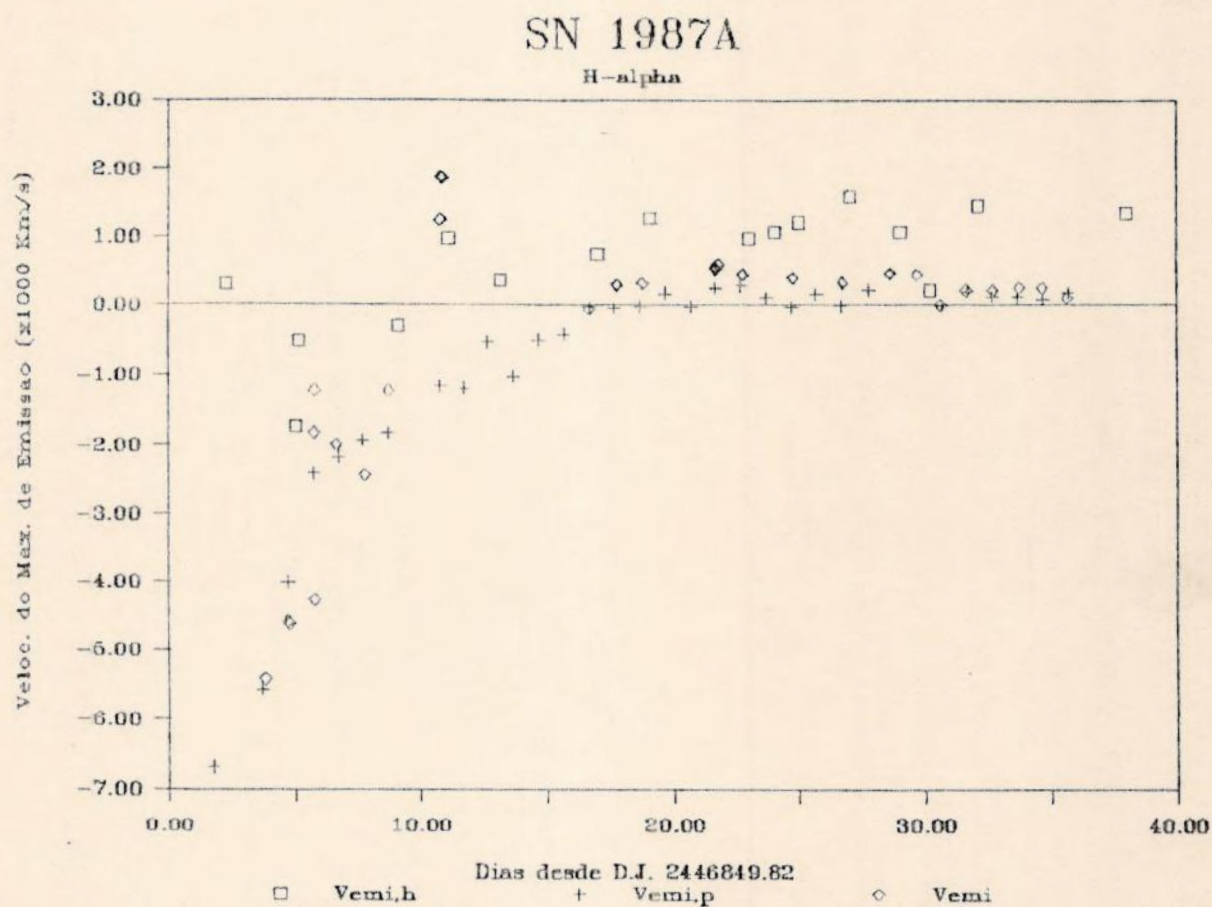


Fig.V.4 Gráfico comparativo das velocidades radiais (em 1000 km/s) do máximo de emissão, obtidas por nós,  $V_{emi}$ , por Hearnshaw et al.,  $V_{emi,h}$  e por Phillips et al.,  $V_{emi,p}$ , contra dias desde o colapso do núcleo.

Por outro lado, as velocidades do máximo de emissão apresentam-se bastante dispersas no gráfico da figura V.4. Os dados de Phillips et al. apresentam um comportamento mais ordenado. Os dados de

Hearnshaw et al. apresentam a maior dispersão e são sempre menores que os de Phillips et al.. Os nossos dados, como já foi discutido neste capítulo, apresentam dois pontos bastante afastados do esperado, em 10.73 e 10.80 dias após o colapso do núcleo. Excetuando-se estas duas medidas, as restantes estão mais em acordo com as medidas de Phillips et al. do que com as de Hearnshaw et al..

Outros artigos que apresentam resultados de velocidades radiais para  $H\alpha$  :

- Ashoka et al. (1987) mediram as velocidades radiais da absorção da linha  $H\alpha$  de 26 de fevereiro (-16400 km/s) a 22 de março (-7700 km/s). As velocidades também foram corrigidas pela velocidade da GNM. Os erros típicos são de 200 km/s. Estas medidas não serviram para comparação porque não são indicados os instantes de obtenção dos espectros, apenas as datas em dia e mês.

- Hanuschik e Dachs (1987) mediram as velocidades radiais de várias componentes da linha  $H\alpha$ , de 25.1 de fevereiro a 29.2 de março. Estas medidas foram apresentadas sob a forma de gráfico (velocidade x tempo) (Fig.V.5), o que impossibilitou a comparação direta.

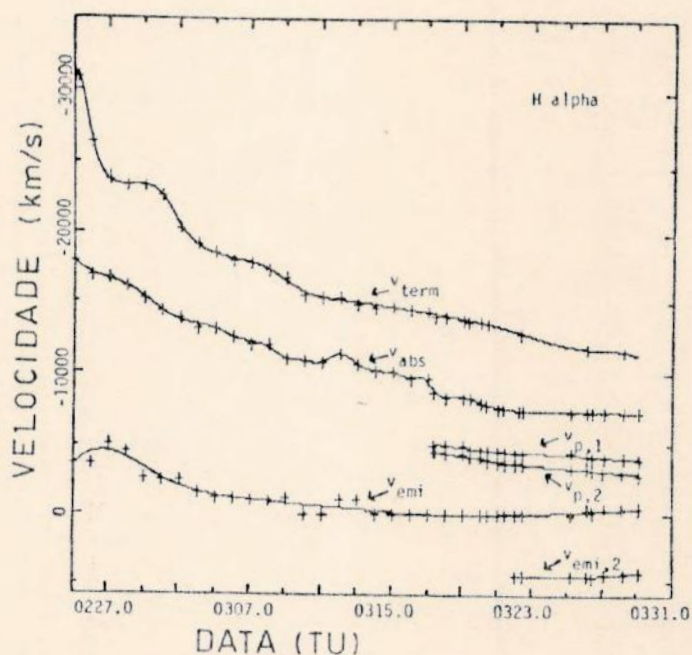


Fig.V.5 Medidas de velocidades do perfil de H $\alpha$ . Data 0227.0 representa 27.0 de fevereiro de 1987 (TU).  $v_{term}$  corresponde a velocidade do limite do lado azul do vale de absorção;  $v_{abs}$  corresponde ao mínimo de intensidade da absorção;  $v_{emi}$  ao pico de emissão;  $v_{p,1}$  ao pico secundário na transição entre a absorção e a emissão, visível a partir de 17 de março;  $v_{p,2}$  ao fluxo mínimo local do lado vermelho;  $v_{emi,2}$  ao "bump" do lado vermelho da emissão (platô), visível a partir de 22 de março. (Hanuschik e Dachs, 1987)

## VI - CONCLUSÃO

A SN 1987A foi a mais brilhante desde 1604. Devido a sua proximidade e por contar com detectores modernos em todas as faixas do espectro eletromagnético para seu estudo, ela trouxe importantes e inéditas informações sobre este tipo de evento.

O interesse em se estudar espectros de alta resolução é a possibilidade de detectar estruturas finas do espectro. Para estudar a dinâmica das camadas ejetadas escolhemos acompanhar a evolução temporal da linha  $H\alpha$  do hidrogênio. Reduzimos 74 espectros, obtidos entre 27 de fevereiro e 30 de março de 1987.

Esta linha possui uma estrutura complexa e interessante, mostrando detalhes da estrutura fina da ejeção da fotosfera da estrela que originou a SN 1987A. Pudemos perceber nestes espectros as seguintes peculiaridades:

(i) Nos espectros de 01/03 e 02/03, percebemos uma pequena absorção no pico de emissão, situada em  $6460 \text{ \AA}$  aproximadamente. Esta absorção não é visível nos espectros de baixa dispersão obtidos pelos outros observatórios do hemisfério sul. É uma informação nova, presente somente em nossos espectros.

(ii) Em 17/03 começa a se formar um pico de emissão, entre a absorção e a emissão principais da linha. Este pico com o passar dos dias vai se deslocando para o vermelho, ou seja, na direção do comprimento de onda de referência da linha. Em torno do dia 26/03 começa a desaparecer, mas no dia 30/03 ainda está presente. Os espectros de baixa dispersão publicados também mostram este pico, mas justamente por serem de baixa

dispersão, com menos detalhes.

(iii) Em 18/03 vemos a formação de um platô (uma região quase horizontal, seguida de uma região em declínio) do lado vermelho do pico de emissão. Este platô se mantém pelo menos até o dia 30/03 e também pode ser detectado nos espectros de baixa dispersão.

Alguns autores (Ashoka et al. 1987) sugerem que o pico entre a absorção e a emissão da linha  $H\alpha$ , o qual chamamos de pico secundário, seja a linha de FeII em 6456 Å. Outros autores (Hearnshaw e Haar 1987) sugerem que o platô seja devido a linha de HeI em 6678 Å. Nós acreditamos que as estruturas finas, observadas na região da linha  $H\alpha$  sejam componentes da própria linha. Isto significa que não vemos a expansão da fotosfera, acompanhada de desaceleração, como um bloco, mas como um processo que envolve diferentes camadas que evoluem no tempo.

Após esta etapa de redução dos espectros, medimos as velocidades radiais de cada componente da linha. A velocidade radial do pico de absorção decresceu de aproximadamente  $-17000$  km/s em 27/02 a  $-6500$  km/s em 30/03. A velocidade radial do pico de emissão era da ordem de  $-5500$  km/s em 27/02 e variou em torno de  $400$  km/s de 11 a 30/03. A absorção situada no pico de emissão em 01 e 02/03 tinha velocidade da ordem de  $-4000$  km/s. As velocidades radiais da absorção e emissão do pico secundário decresceram de  $-3775$  a  $-2165$  km/s e de  $-4250$  a  $-2862$  km/s, respectivamente, de 17 a 30/03. Os valores que encontramos para o mínimo de absorção principal estão em acordo com os valores dos artigos publicados, mas os valores para o máximo de emissão apresentaram algumas divergências. Mas para o caso destes valores de velocidade divergentes, os nossos espectros apresentaram problemas na

determinação do ponto correto de máximo. Esta dificuldade em determinar o ponto de máximo (ou de mínimo) resultou em erros maiores do que os que poderíamos ter levando em consideração a resolução de nossos espectros. O único artigo que apresentou medidas de componentes da linha além da absorção e emissão principais (Hanuschik e Dachs 1987), o fez na forma de gráfico, o que impossibilitou a comparação direta.



## AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer

- aos astrônomos Carlos Alberto Torres, Carlos Roberto Mendonça, Germano R. Quast e José Veliz Navarro (in memoria), do LNA/ON, e Kepler de Oliveira, do Depto. de Astronomia da UFRGS, pela cessão dos espectros da SN 1987A, objeto de estudo deste trabalho.
  
- a Mariza Waki, da EFEI, por ter-me cedido gentilmente uma cópia de seu programa AJUSTE, instrumento fundamental para a realização deste trabalho; e por ter-me ensinado a usá-lo, esclarecendo também, todas as dúvidas quanto a seu correto uso que surgiram ao longo do trabalho.
  
- a memória de José Veliz que, mesmo me conhecendo por pouco tempo, sempre se colocou inteiramente a disposição para me ajudar. Seu apoio durante a realização deste trabalho foi fundamental para sua conclusão. Eu sei que este estudo da SN 1987A era muito importante para ele, tal o seu ânimo e dedicação diante de tanto trabalho e de tantas dificuldades. Lamento ele não estar aqui hoje para vê-lo concluído. José foi uma pessoa que deixou um vazio na vida de quem teve a sensibilidade de perceber que boa pessoa ele era.
  
- ao meu orientador Ramiro de la Reza, por ter, ao longo de minha iniciação científica, sempre ter demonstrado interesse por minha formação, inclusive, dando-me condições de participar de atividades

científicas muito interessantes.

- ao colega Bruno V. Castilho, pela trabalhosa montagem e compactação dos espectros em seqüência temporal.

- ao colega Gustavo F. P. de Mello, por ter sido o responsável pela oportunidade que tive de fazer a iniciação científica que resultou neste trabalho; e também pelas sugestões durante a elaboração escrita deste projeto.

- ao colega Nuno Caminada, pelo auxílio na construção dos gráficos que apresentam os resultados obtidos.

- aos professores do Observatório do Valongo, Encarnacion A. M. Gonzales, Heloísa B. Roberty, Jorge A. Vieira e Lilia I. A. Prado, por terem sido, durante minha graduação, muito mais que professores. Foram exemplo, apoio, orientação e mais do que tudo, foram e são amigos.

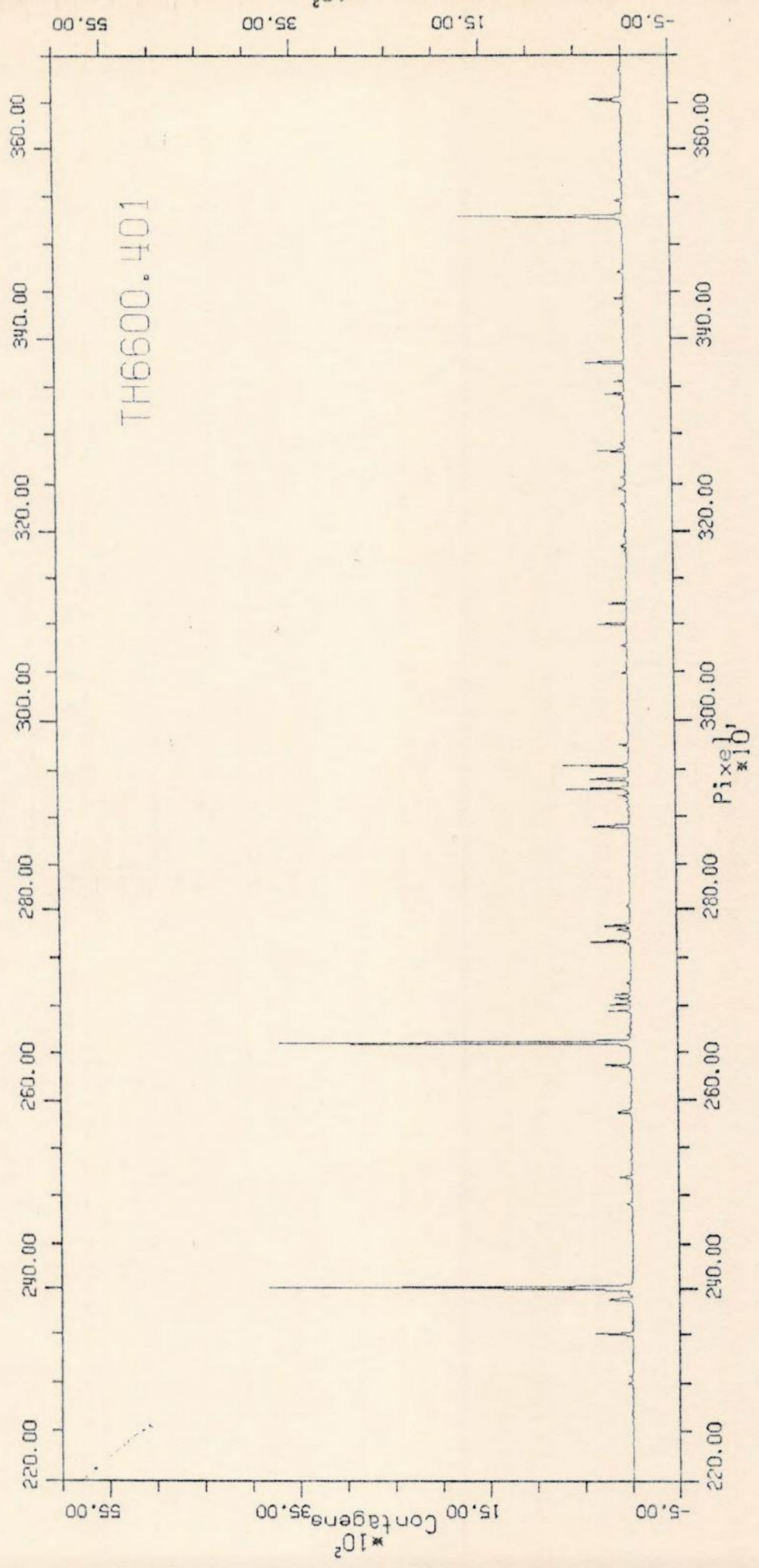
## APÊNDICE: O Programa AJUSTE

Neste apêndice, tentarei mostrar como se utiliza o programa AJUSTE para a redução de um espectro. Escolhi fazer isto utilizando a impressão dos comandos necessários, seguidos (ou em alguns casos, precedidos) de explicações assinaladas por NO=.

```
AJU>ZE
AJUSTE VERSAO 1 - 17000 - 17:56:38          3: 7:1989
```

```
*****
*
*           A T E N C A O
*
*   O PROGRAMA SO AJUSTA FUNCOES A REGIOES DE
*           NO MAXIMO 100 PONTOS
*
*****
```

```
AJU>DE
AJU>NO=0 COMANDO ACIMA LEU O ESPECTRO DE COMPARACAO DO PIXEL 2200 AO 3700.
AJU>VI
AJU>SP
AJU>VI
AJU>NO=0 COMANDO SP MANDA A SAIDA DO PROGRAMA PARA A IMPRESSORA.
AJU>NO=0 COMANDO VI PLOTA OS DADOS LIDOS.
AJU>NO=0 ELE PERMITE A ESCOLHA DAS AMPLIFICACOES VERTICAL E HORIZONTAL;
AJU>NO=SE PLOTA BARRA DE ERRO E SE UNE OS PONTOS POR RETA.
```



AJU&gt;IL

I	P.MED.	I	Ymax	I	DESV.PADR.	I	AREA	I
I	2258.2	I	10.466	I	0.71969	I	23.000	I
I	2267.9	I	13.291	I	0.70468	I	27.000	I
I	2272.1	I	6.0334	I	0.72976	I	13.000	I
I	2286.0	I	7.0000	I	0.47140	I	9.0000	I
I	2300.0	I	56.059	I	0.72954	I	120.00	I
I	2305.3	I	9.3522	I	0.59628	I	15.000	I
I	2307.8	I	41.528	I	0.64823	I	74.000	I
I	2310.7	I	6.9209	I	0.62361	I	12.000	I
I	2325.0	I	6.0000	I	0.50000	I	8.0000	I
I	2329.1	I	6.1121	I	0.74231	I	14.000	I
I	2351.1	I	402.34	I	0.66781	I	730.00	I
I	2357.9	I	8.1257	I	0.51426	I	11.000	I
I	2364.0	I	9.0158	I	0.76736	I	22.000	I
I	2369.9	I	10.132	I	0.47419	I	13.000	I
I	2372.2	I	7.3592	I	0.57496	I	11.000	I
I	2376.1	I	9.1937	I	0.72629	I	20.000	I
I	2380.1	I	6.0224	I	0.77172	I	15.000	I
I	2383.0	I	8.0147	I	0.78535	I	21.000	I
I	2389.1	I	264.56	I	0.75171	I	622.00	I
	:		:		:		:	
I	3603.9	I	6.0224	I	0.77172	I	15.000	I
I	3607.3	I	30.238	I	0.67987	I	60.000	I
I	3615.4	I	7.6740	I	1.0141	I	23.000	I
I	3618.5	I	13.884	I	0.83622	I	31.000	I
I	3631.0	I	7.0000	I	0.60302	I	11.000	I
I	3636.1	I	6.1121	I	0.74231	I	14.000	I
I	3640.1	I	13.194	I	0.75100	I	31.000	I
I	3644.0	I	17.009	I	0.75788	I	40.000	I
I	3650.1	I	10.030	I	0.68623	I	19.000	I
I	3654.2	I	342.53	I	0.72961	I	761.00	I
I	3658.9	I	8.0385	I	0.67987	I	15.000	I
I	3662.0	I	8.0000	I	0.74536	I	18.000	I
I	3668.0	I	6.0000	I	0.75593	I	14.000	I
I	3672.1	I	7.0363	I	0.70349	I	14.000	I
I	3684.1	I	22.213	I	0.73526	I	49.000	I
I	3699.5	I	4.9462	I	0.50000	I	6.0000	I

AJU>NO=0 COMANDO IL FAZ A IDENTIFICACAO DAS LINHAS DO ESPECTRO DE COMPARACAO.

AJU>MO

AJU>GR=TH660001.LIN

AJU>NO=0 COMANDO MO FAZ A MODIFICACAO DA TABELA DE LINHAS:

AJU>NO=(A) APAGA-SE OS PONTOS QUE NAO INTERESSAM;

AJU>NO=(B) SUBSTITUI-SE OS VALORES DE Y PELOS COMP. ONDA CORRESPONDENTES.

AJU>NO=0 COMANDO GR GRAVA A NOVA TABELA DE LINHAS NO ARQUIVO CUJO NOME EH DADO.

AJU&gt;LU

I	X	I	Y	I	SIGMA Y	I
I*	2300.03	I	6778.31	I	0.000000E+00	I
I*	2401.83	I	6752.83	I	0.000000E+00	I
I*	2636.79	I	6684.29	I	0.000000E+00	I
I*	2659.76	I	6677.28	I	0.000000E+00	I
I*	2694.87	I	6666.36	I	0.000000E+00	I
I*	2702.20	I	6664.05	I	0.000000E+00	I
I*	2707.88	I	6662.27	I	0.000000E+00	I
I*	2712.89	I	6660.68	I	0.000000E+00	I
I*	2766.90	I	6643.70	I	0.000000E+00	I
I*	2779.33	I	6639.74	I	0.000000E+00	I
I*	2784.09	I	6638.22	I	0.000000E+00	I
I*	2889.35	I	6604.85	I	0.000000E+00	I
I*	2923.30	I	6593.94	I	0.000000E+00	I
I*	2931.07	I	6591.48	I	0.000000E+00	I
I*	2940.29	I	6588.54	I	0.000000E+00	I
I*	2954.98	I	6583.91	I	0.000000E+00	I
I*	2976.13	I	6577.21	I	0.000000E+00	I
I*	3049.04	I	6554.16	I	0.000000E+00	I
I*	3100.21	I	6538.11	I	0.000000E+00	I
I*	3122.31	I	6531.34	I	0.000000E+00	I
I*	3283.27	I	6483.08	I	0.000000E+00	I
I*	3341.68	I	6466.55	I	0.000000E+00	I
I*	3356.00	I	6462.61	I	0.000000E+00	I
I*	3375.14	I	6457.28	I	0.000000E+00	I
I*	3530.09	I	6416.31	I	0.000000E+00	I
I*	3547.00	I	6411.90	I	0.000000E+00	I
I*	3654.17	I	6384.72	I	0.000000E+00	I

AJU>N0=0 COMANDO LD LISTA OS PONTOS DA TABELA DE LINHAS IDENTIFICADAS.  
 AJU>SX=-2950.

AJU>N0=0 COMANDO SX FAZ UM DESLOCAMENTO DO EIXO X.

AJU>PE=S

AJU>N0=0 COM ESTE COMANDO FIXA-SE O PESO, NO CASO, SEM PESO.

AJU>FU=7

AJU>N0=0 COMANDO FU DEFINE A FUNCAO, 7= POLINOMIO DE GRAU ATE 9.

AJU>PA

AJU>N0=0 COMANDO PA PEDE O NUMERO DE PARAMETROS E SEUS VALORES INICIAIS.

AJU>FX=8

AJU>N0=0 ESTE COMANDO FIXA O PARAMETRO 8.

AJU>IM

AJU>N0=0 COMANDO IM DETERMINA A IMPRESSAO DE CADA ITERACAO.

AJU>N0=0 PROXIMO COMANDO, CO, INICIA O AJUSTE DO POLINOMIO.

AJU>CO

AJU>N0=0 OS PROXIMOS COMANDOS, TA E RE, IMPRIMEM A TABELA E OS RESULTADOS DO AJUSTE

AJUSTA

I	X	I	Y EXPER	I	SIGMA Y	I	Y AJUSTADO	I	RESIDUO**2	I	RESIDUO	I
I	-649.97	I	6778.3	I	1.0000	I	6778.3	I	0.11539E-031	0.10742E-011		
I	-548.17	I	6752.8	I	1.0000	I	6752.8	I	0.77462E-031	-0.27832E-011		
I	-313.21	I	6684.3	I	1.0000	I	6684.4	I	0.41542E-021	0.64433E-011		
I	-298.24	I	6677.3	I	1.0000	I	6677.3	I	0.38147E-031	-0.19531E-011		
I	-255.13	I	6666.4	I	1.0000	I	6666.3	I	0.48280E-031	-0.21973E-011		
I	-247.80	I	6664.1	I	1.0000	I	6664.0	I	0.19317E-041	-0.43945E-021		
I	-242.12	I	6662.3	I	1.0000	I	6662.3	I	0.85831E-051	-0.29297E-021		
I	-237.11	I	6660.7	I	1.0000	I	6660.7	I	0.42057E-031	0.20508E-011		
I	-183.10	I	6643.7	I	1.0000	I	6643.7	I	0.16117E-031	-0.12695E-011		
I	-170.67	I	6639.7	I	1.0000	I	6639.8	I	0.11539E-031	0.10742E-011		
I	-165.91	I	6638.2	I	1.0000	I	6638.2	I	0.62013E-031	0.24902E-011		
I	-60.654	I	6604.9	I	1.0000	I	6604.8	I	0.64909E-021	-0.80566E-011		
I	-26.701	I	6593.9	I	1.0000	I	6594.0	I	0.42057E-031	0.20508E-011		
I	-18.927	I	6591.5	I	1.0000	I	6591.5	I	0.95367E-061	0.97656E-031		
I	-9.7051	I	6588.5	I	1.0000	I	6588.6	I	0.14901E-031	0.12307E-011		
I	4.9822	I	6583.9	I	1.0000	I	6583.9	I	0.52667E-031	-0.22949E-011		
I	26.131	I	6577.2	I	1.0000	I	6577.2	I	0.20180E-021	-0.44922E-011		
I	99.040	I	6554.2	I	1.0000	I	6554.2	I	0.38147E-031	-0.19531E-021		
I	150.21	I	6538.1	I	1.0000	I	6538.2	I	0.61035E-021	0.78125E-011		
I	172.31	I	6531.3	I	1.0000	I	6531.4	I	0.18692E-031	0.13672E-011		
I	333.27	I	6483.1	I	1.0000	I	6483.2	I	0.61035E-021	0.78125E-011		
I	391.68	I	6466.6	I	1.0000	I	6466.5	I	0.38147E-031	-0.19531E-011		
I	406.00	I	6462.6	I	1.0000	I	6462.5	I	0.63345E-021	-0.79590E-011		
I	425.14	I	6457.3	I	1.0000	I	6457.2	I	0.18046E-021	-0.42480E-011		
I	580.09	I	6416.3	I	1.0000	I	6416.3	I	0.32640E-031	-0.18066E-011		
I	597.00	I	6411.9	I	1.0000	I	6412.0	I	0.63345E-021	-0.79590E-011		
I	704.17	I	6384.7	I	1.0000	I	6384.7	I	0.42057E-031	-0.20508E-011		

AJUSTE

RESULTADOS PARA A FUNCAO 7 :  
POLINOMIO

8 PARAMETROS' SENDO 1 FIXOS DURANTE O AJUSTE

CONVERGENCIA ALCANÇADA: 0.989530E-06 CONVERGENCIA EXIGIDA: 0.100000E-04  
 NUMERO DE PONTOS LIDOS: 27 DOS QUAIS FORAM USADOS 27  
 LIMITES DA REGIAO AJUSTADA: DE -649.967 A 704.173  
 CHI-QUADRADO REDUZIDO: 0.224298E-02 (100.00%) COM 20 GRAUS DE LIBERDADE  
 TIPO DE PONDERACAO :SEM PESO

PARAMETROS :

A 1 =	0.658547E+04 +-	0.35E+00	GRAU 0
A 2 =	-0.3178E+00 +-	0.21E-02	GRAU 1
A 3 =	0.112E-04 +-	0.95E-05	GRAU 2
A 4 =	0.60E-07 +-	0.21E-07	GRAU 3
A 5 =	0.17E-10 +-	0.56E-10	GRAU 4
A 6 =	0.8E-14 +-	0.41E-13	GRAU 5
A 7 =	-0.64E-16 +-	0.09E-16	GRAU 6
A 8 =	-0.1E-19 +-	0.00E+00	GRAU 7      FIXO

```

AJU>VG=-750.          750.          1.
AJU>NO=0 COMANDO VG CALCULA A FUNCAO DE X0 A XF COM PASSO DX:
AJU>NO=MAS TAMBEM GRAVA OS VALORES NUM ARQUIVO A SER DADO.
AJU>DE
AJU>NO=AGORA O COMANDO DE LEU O ESPECTRO DO OBJETO, TAMBEM DE 2200 A 3700 PIXELS.
AJU>BG
AJU>NO=0 COMANDO BG LE OS DADOS DO FLAT-FIELD, TAMBEM DE 2200 A 3700 PIXELS.
AJU>NB
AJU>NO=0 COMANDO ACIMA FAZ A NORMALIZACAO DO FLAT-FIELD.
AJU>RB
AJU>NO=0 COMANDO ACIMA FAZ A DIVISAO DO ESPECTRO DO OBJETO PELO FLAT-FIELD.
AJU>SX=-2950.
AJU>NO=0 COMANDO ACIMA FEZ PARA O ESPEC. NORMALIZADO O MESMO FEITO ANTERIORMENTE.
AJU>TX
AJU>NO=0 COMANDO TX SUBSTITUI X POR VALORES DO ARQUIVO GRAVADO PELO VG.
AJU>NO=0 PROXIMO COMANDO IMPRIME O STATUS DO PROGRAMA.
AJU>ST
AJU>
ST
FUNCAO DEFINIDA NUMERO 7

DADOS LIDOS : 1501 PONTOS      ELIMINADOS :      0 PONTOS
  REGIAO USADA DE  6798.92      A  6372.66      ( 1501 USADOS)
PONDERACAO USADA : ESTATISTICO
CONVERGENCIA EXIGIDA :  0.100000E-04
RESULTADOS SERAO "SPOOLADOS" NA IMPRESSORA
CADA ITERACAO SERA IMPRESSA
PARAMETROS ATUAIS : A1 =  6585.47
                   A2 = -0.317838
                   A3 =  0.112206E-04
                   A4 =  0.600794E-07
                   A5 =  0.171489E-10
                   A6 =  0.803038E-14
                   A7 = -0.641263E-16
                   A8 = -0.150000E-19  FIXO
STATUS=0 010 000 011 110 010 (0020F2)
AJU>
AJU>NO=0 PROXIMO COMANDO SUBSTITUI OS DADOS POR VALORES INTERPOLADOS DE X0 A XN,
AJU>NO=COM PASSO DX.
AJU>IT=6372.66          6798.92          0.5
AJU>GR=SN660001.ANL
AJU>NO=0 COMANDO ACIMA GRAVOU OS DADOS REDUZIDOS NO ARQUIVO CUJO NOME FOI DADO.
AJU>ST

```



AJU>  
ST

FUNCAO DEFINIDA NUMERO 7

DADOS LIDOS : 853 PONTOS ELIMINADOS : 0 PONTOS  
REGIAO USADA DE 6372.66 A 6798.66 ( 853 USADOS)

PONDERACAO USADA : ESTATISTICO

CONVERGENCIA EXIGIDA : 0.100000E-04

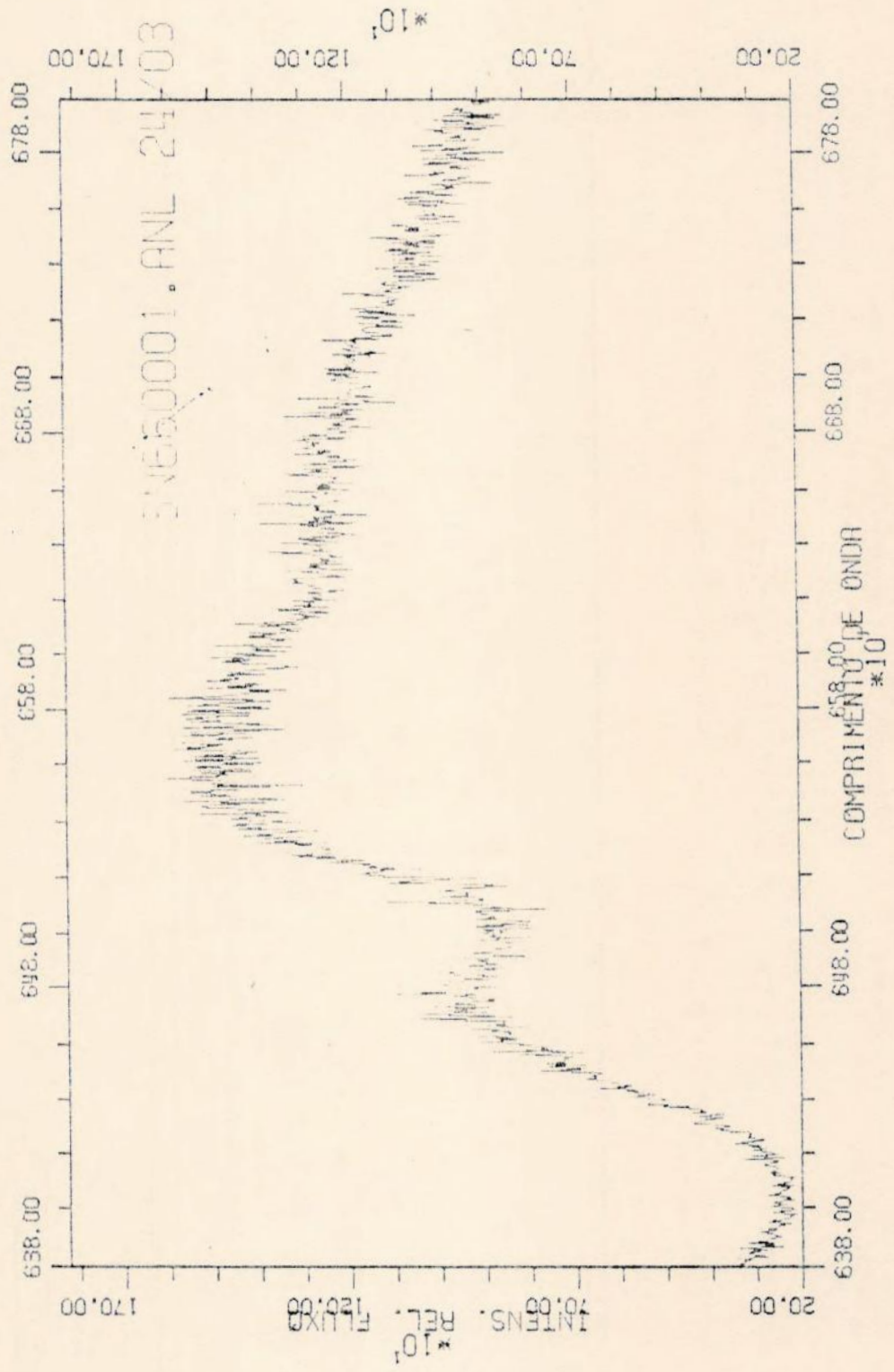
RESULTADOS SERAO "SPOOLADOS" NA IMPRESSORA

CADA ITERACAO SERA IMPRESSA

PARAMETROS ATUAIS : A1 = 6585.47  
A2 = -0.317838  
A3 = 0.112206E-04  
A4 = 0.600794E-07  
A5 = 0.171489E-10  
A6 = 0.803038E-14  
A7 = -0.641263E-16  
A8 = -0.150000E-19 FIXO

STATUS=0 000 000 001 110 010 (000072)

AJU>



AJU>SM

AJU>N0=0 COMANDO SM FAZ O "SMOOTHING" DOS DADOS COMO VISTO NO CAP.III.2.

AJU>

ST

FUNCAO DEFINIDA NUMERO 7

DADOS LIDOS : 853 PONTOS ELIMINADOS : 0 PONTOS  
REGIAO USADA DE 6372.66 A 6798.66 ( 853 USADOS)

OS DADOS SOFRERAM "SMOOTHING"

PONDERACAO USADA : ESTATISTICO

CONVERGENCIA EXIGIDA : 0.100000E-04

RESULTADOS SERAO "SPOOLADOS" NA IMPRESSORA

CADA ITERACAO SERA IMPRESSA

PARAMETROS ATUAIS : A1 = 6585.47

A2 = -0.317838

A3 = 0.112206E-04

A4 = 0.600794E-07

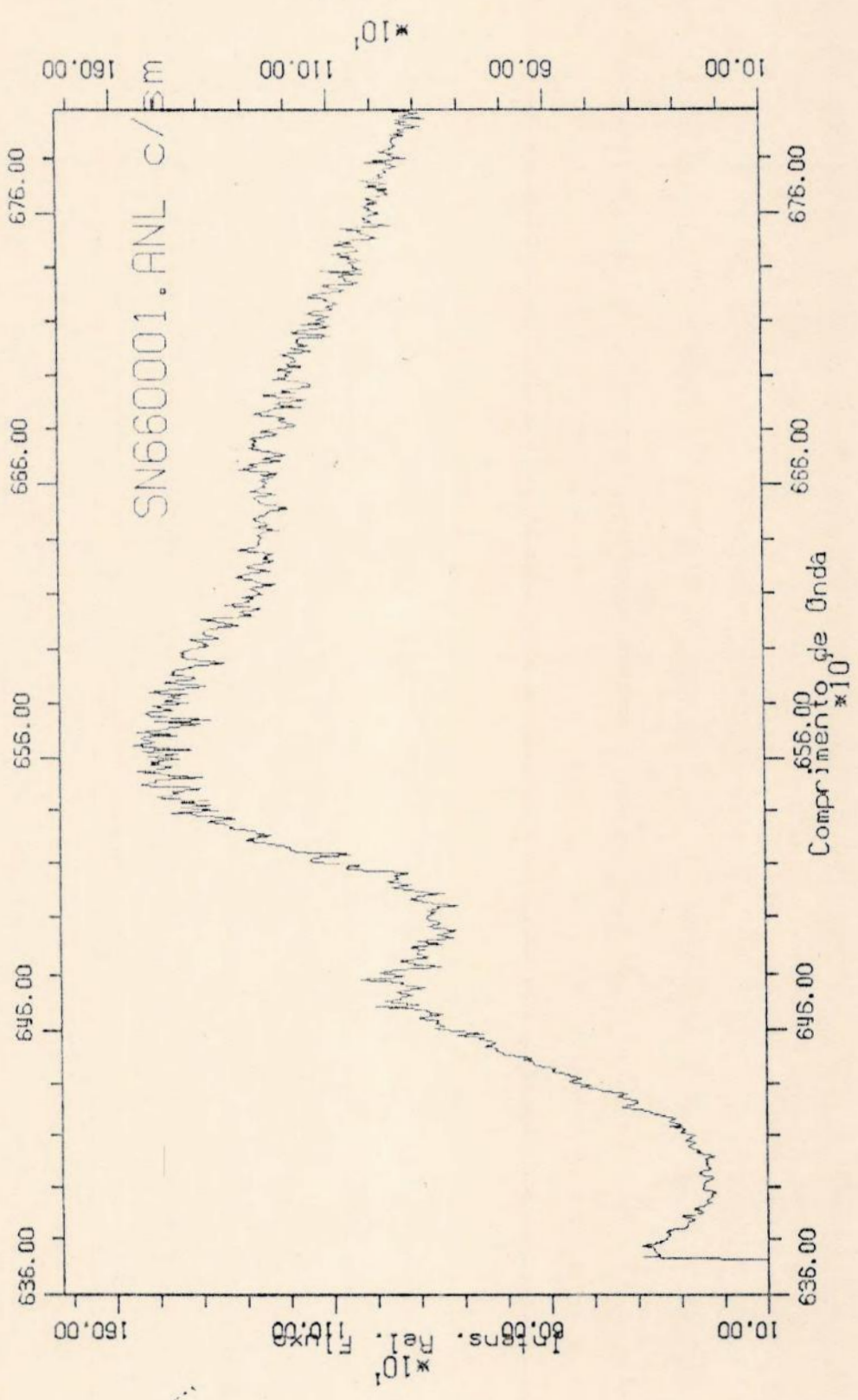
A5 = 0.171489E-10

A6 = 0.803038E-14

A7 = -0.641263E-16

A8 = -0.150000E-19 FIXO

STATUS=0 000 001 101 110 010 (000372)



## REFERÊNCIAS

- ASHOKA, B.N.; ANUPAMA, G.C.; PRABHU, T.P.; GIRIDHAR, S.; GHOSH, K.K.; JAIN, S.K.; PATI, A.K. & KAMESWARA RAO, N. - Evolution of the Optical Spectrum of SN 1987a in the Large Magellanic Cloud. *J. Astrophys. Astr.*, 8:195-209, 1987.
- BIONTA, R.M. et al. - *Phys. Rev. Lett.*, 58, 1494, 1987.
- DA COSTA, L.N.; NUNES, M.A. & GEARY, J. - *Rev. Fís. Apl. e Instrumentação*, 1, 1, p.77, 1985.
- ELLIOT, K.H.; GOUDIS, C.; MEABURN, J. & TEBBUTT, N.J. - *Astron. Astrophys.*, 55, p.187, 1977.
- GRAY, D.F. - *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*. New York, John Wiley and Sons, Cap.3, 1967.
- HANUSCHIK, R.W. & DACHS, J. - The H $\alpha$  Velocity Structure During the First Month of SN 1987a in the LMC. *Astron. Astrophys.*, 182:L29-L30, 1987.
- HADEN, H.C. - *Computers in Physics*, 74 (Nov/Dec), 1987.
- HEARNSHAW, J.B. & HAAR, J. - IAU Circular No.4355, 1987.
- HEARNSHAW, J.B.; MCINTYRE, V.J. & GILMORE, A.C. - Spectroscopic Observations of SN 1987a in the LMC. *J. Astrophys. Astr.*, 9:93-106, 1988.
- HIRATA, R. et al. - *Phys. Rev. Lett.*, 58, p.1490, 1987.
- MENZIES, J.W. et al. - Spectroscopic and Photometric Observations of SN 1987a: the first 50 days. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 227, p.39p, 1987.
- OBSERVATÓRIO ASTROFÍSICO BRASILEIRO - Manual do Usuário. 1984.
- PHILLIPS, M.M.; HEATHCOTE, S.R.; HAMUY, S.R. & NAVARRITE, M. - An Optical

Spectrophotometric Atlas of Supernova 1987A in the LMC. I. The First 130 Days. *Astron. J.*, **95**:1087-1110, 1988.

PIERCE, A.K. & BRECKINRIDGE, J.B. - The Kitt Peak Table of Photographic Solar Spectrum Wavelengths. The Kitt Peak National Observatory, Contribution No. 559, 1973.

STRIGANOV, A.R. & SVENISTSKU, N.S. - Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms. New York, IFI/PLENUM, 1968.

ZALUBAS, R. - New Description of Thorium Spectra. National Bureau of Standards Monograph 17, 21/06, 1960.