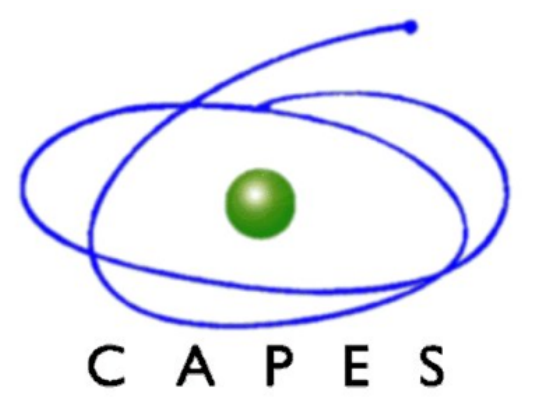




Redução Automática de Espectros Echelle para Obtenção de Velocidades Radiais

Eder Martioli & Francisco Jablonski

Divisão de Astrofísica - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



Resumo

APRESENTAMOS os procedimentos de redução e tratamento de dados espectroscópicos do High-Resolution Spectrograph (HRS), obtidos com o Telescópio Hobby-Eberly (HET), Observatório McDonald, para a obtenção de velocidades radiais de alta precisão. Esses dados visam o estudo e detecção de companheiras de baixa massa, como anãs marrons e exoplanetas. Todas as rotinas de redução foram desenvolvidas em linguagem C e utilizam bibliotecas convencionais, sendo facilmente transportadas e implementadas em qualquer sistema operacional. Estas rotinas são automatizadas e podem ser adaptadas para dados de outros espectrógrafos. Visto que o OPD tem a intenção de construir um espectrógrafo echelle e que a comunidade cada vez mais demanda o uso automatizado deste observatório, apresentamos estas rotinas como uma opção para futuras implementações no projeto do espectrógrafo echelle do OPD.

1. Introdução

O instrumento HRS é um espectrógrafo echelle instalado no Telescópio HET no observatório McDonald. Entre outros trabalhos realizados com esse instrumento, o HRS já possibilitou a detecção e caracterização de diversos exoplanetas e companheiras sub-estelares. Isso foi possível através de medidas de velocidades radiais de alta precisão, tipicamente 3 m/s para estrelas do tipo solar. Dois fatores são decisivos para que tais precisões sejam alcançadas: 1) a técnica observacional; 2) a redução dos dados. Neste trabalho apresentaremos exclusivamente os métodos de tratamento e redução dos dados. Desenvolvemos para isso, uma série de rotinas montadas em um script que realiza o tratamento automático desses dados (pacote ASTROSPEC). Esses programas estão escritos em linguagem C e são independentes de qualquer outro pacote externo, salvo as bibliotecas convencionais, como o CFITSIO, NR, FFTW, etc.

2. Pipeline (Pacote ASTROSPEC)

Mostramos abaixo na Figura 1 um esquema com os passos de redução seguidos pelo pacote ASTROSPEC. Maiores informações sobre cada um desses passos será mostrado a seguir.

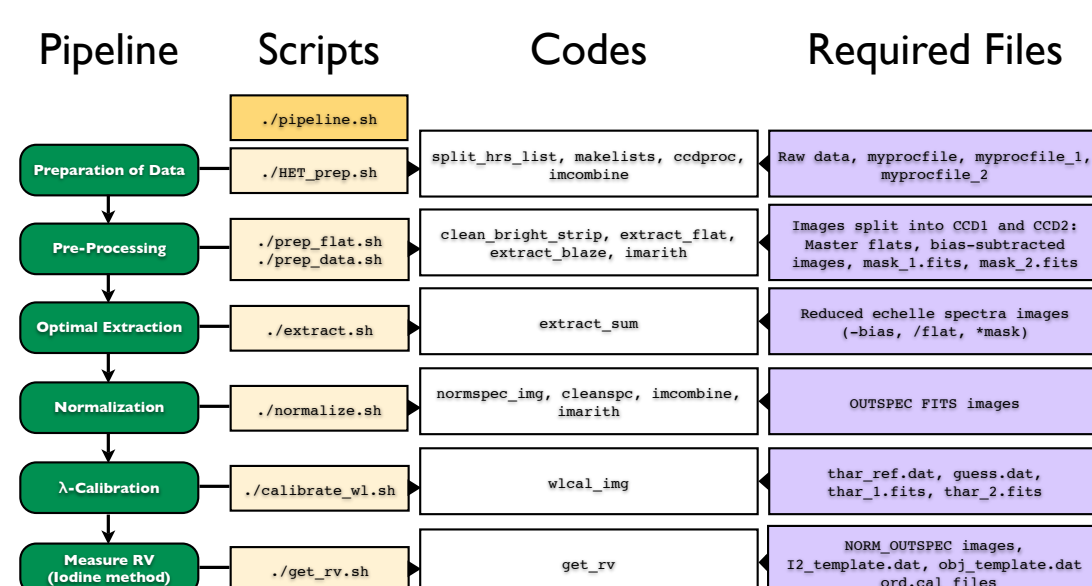


Figure 1: ASTROSPEC pipeline.

2.1 Preparação dos Dados

A preparação dos dados consiste na primeira fase da redução, onde é feita a leitura dos dados e algumas operações de calibração inicial, como o recorte de bordas e a subtração de BIAS. Os dados são obtidos em forma de imagens no formato FITS. Cada imagem possui dados referentes a dois chips CCD. Um deles, o CCD1 ou 'RED CCD', que capta a porção do espectro de maiores comprimentos de onda, e o CCD2 ou 'BLUE CCD', que capta a porção de menores comprimentos de onda. A Figura 2 mostra uma exposição típica de flat-field, onde já estão separadas as imagens do CCD 1 e 2.

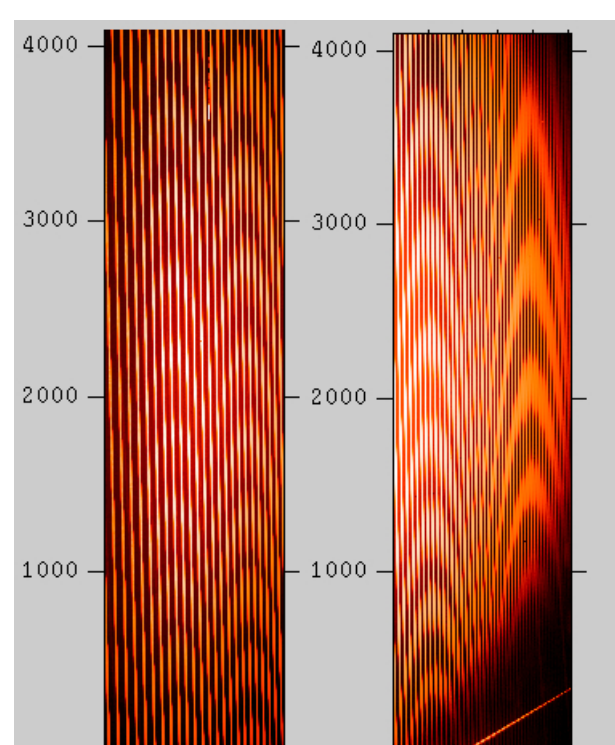


Figure 2: Par de imagens de uma exposição de flat-field de um espectro echelle do HRS. As imagens são referentes ao RED CCD (esquerda) e BLUE CCD (direita).

A preparação dos dados termina montando uma estrutura de diretórios (Figura 3), onde serão armazenadas as imagens já subtraídas pelo BIAS. Essa estrutura é importante para endereçar corretamente o caminho das imagens para as rotinas subsequentes de redução.

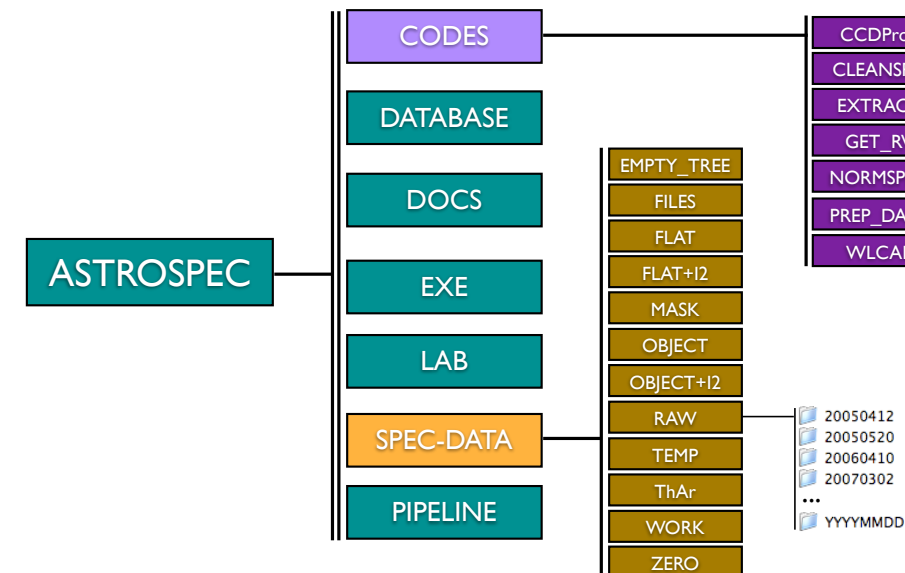


Figure 3: Árvore de diretórios do ASTROSPEC.

2.2 Pré-processamento

O pré-processamento consiste no cálculo das calibrações obtidas através das imagens de flat-field. Nesse caso utilizamos principalmente duas correções: 1) as variações de sensibilidade pixel-a-pixel (flat). 2) a variação global de iluminação nos detectores (blaze fuction). O flat é obtido através da localização das ordens espectrais e normalização por um fluxo médio dentro de pequenas "caixas". Essa operação é realizada somente na região onde há fluxo considerável. As regiões entre as ordens, onde não há fluxo expressivo, atribuímos o valor 1. A função blaze é obtida através de um ajuste polinomial bidimensional a pontos selecionados que representam a função blaze. A Figura 4 mostra os resultados dessa operação.

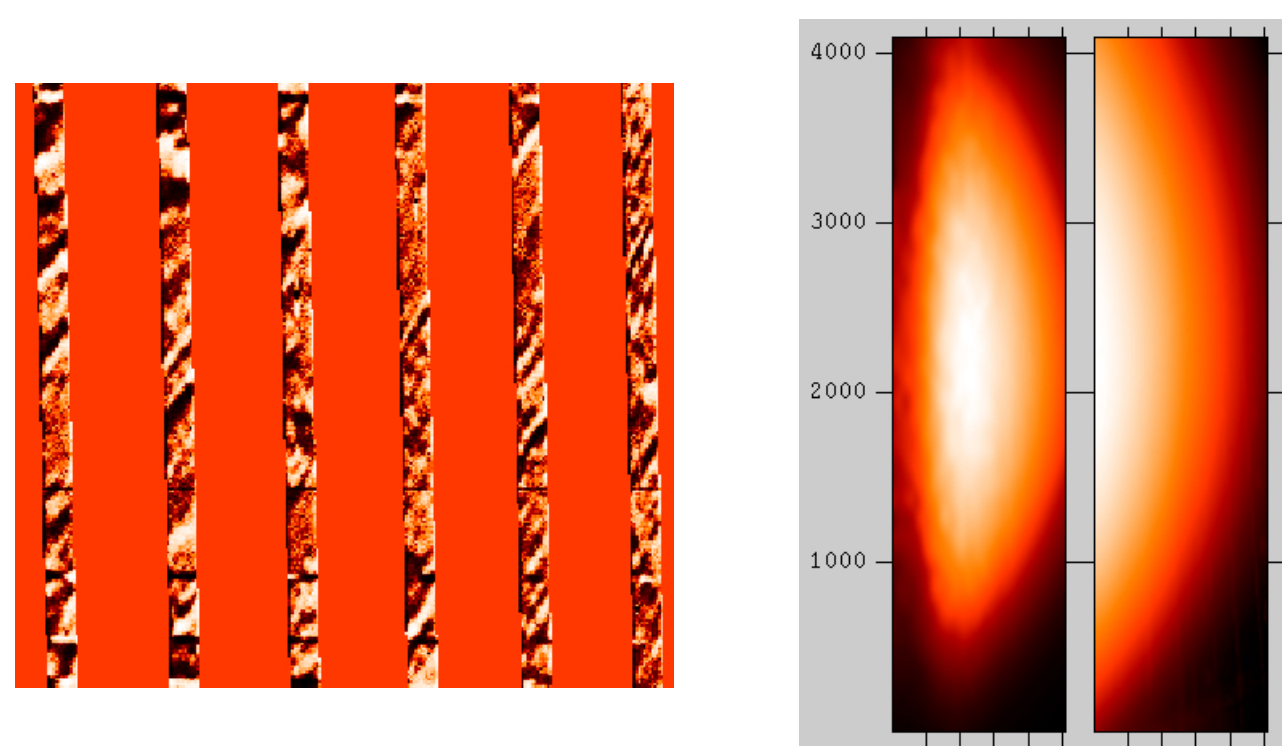


Figure 4: Pannel esquerdo: Amostra de um pedaço de flat-field normalizado. Pannel direito: Exemplo da função blaze obtida para o CCD 1 (esquerda) e CCD 2 (direita).

2.3 Extração

A extração consiste na obtenção de um espectro unidimensional para cada ordem echelle. Para isso deve-se primeiramente detectar automaticamente a posição de cada ordem, enumerá-las, encontrar a região útil para a extração e finalmente obter uma maneira mais eficiente de se extrair a informação do fluxo ao longo da direção de dispersão das ordens espectrais. Nosso algoritmo extrai o fluxo da seguinte maneira. Cada ponto de fluxo no espectro unidimensional é dado por f_j , calculado para uma certa linha j , utilizando a seguinte expressão:

$$f_j = \sum_{i=i_0-N_s/2}^{i_0+N_s/2} \left(\sum_{j'=j-M_s/2}^{j+M_s/2} \frac{S_{ij'}}{M_s} \right) \quad (1)$$

onde S_{ij} é a contagem de um pixel na posição (i, j) , sendo i a coluna e j a linha da matriz de pixels do chip CCD. i_0 é a coluna do pixel situado no foto-centro da ordem, N_s é a largura da fenda (abertura de extração) em unidades de pixel, e M_s é o número de pixels vizinhos. A Figura 5 ilustra como essa operação é realizada.

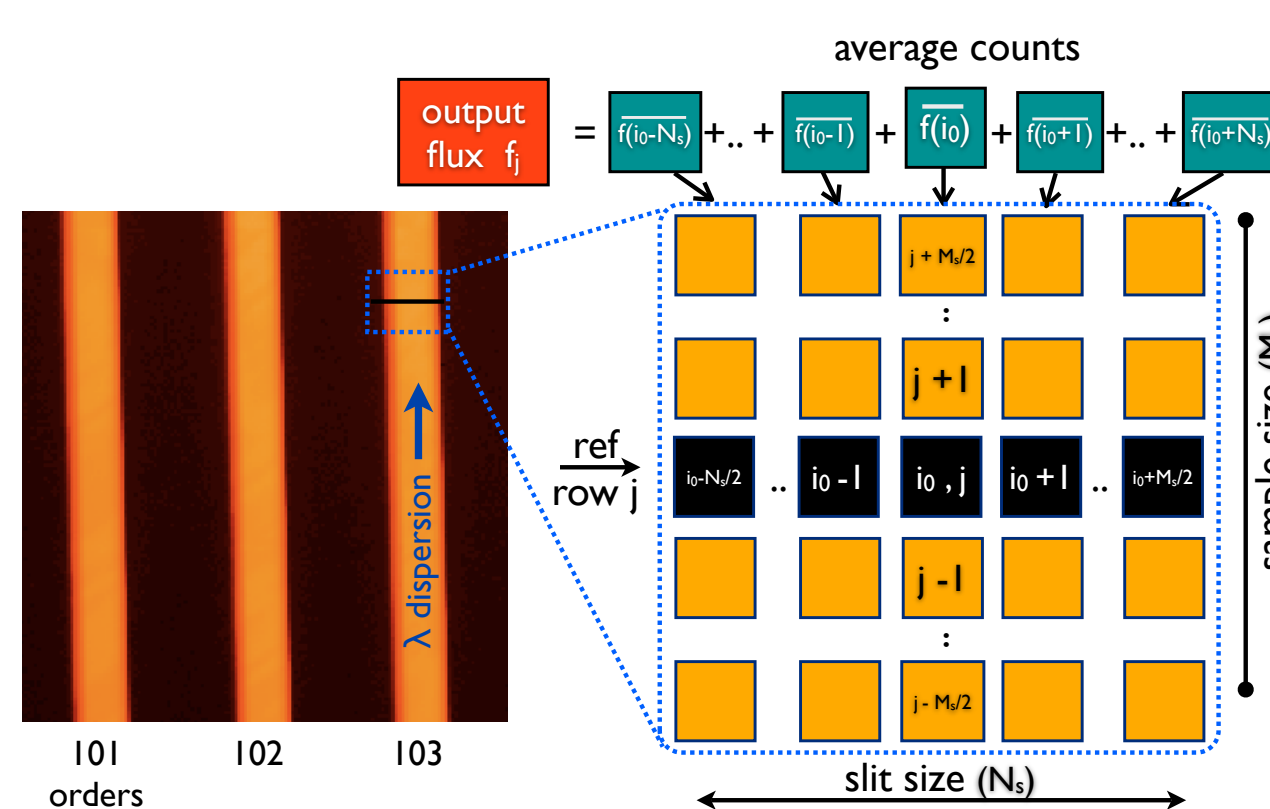


Figure 5: Esquema de extração.

Afim de testar os efeitos que N_s e M_s têm na qualidade da extração, realizamos alguns testes para diversos valores dessas quantidades, como mostra a Figura 6.

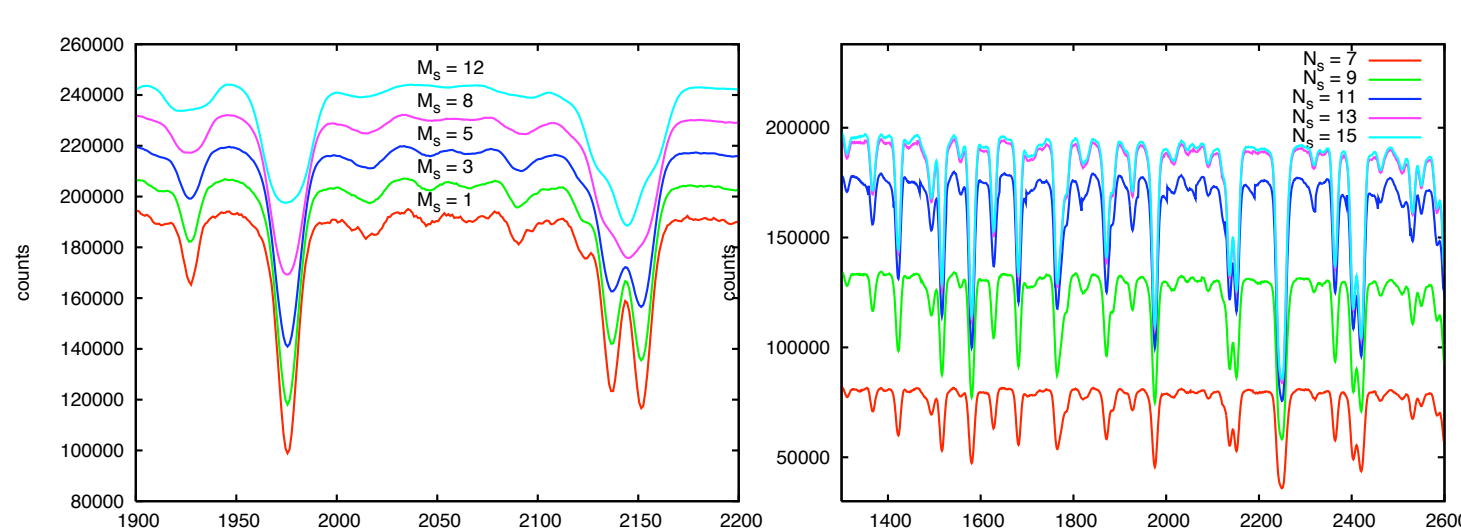


Figure 6: Amostra de um espectro extraído utilizando 5 valores diferentes para o número de pixels vizinhos, $M_s = 1, 3, 5, 8, e 12$ (esquerda) e utilizando 5 valores diferentes para a abertura $N_s = 7, 9, 11, 13, e 15$ (direita).

2.4 Normalização

A normalização dos espectros unidimensionais é uma etapa importante para obtenção de velocidades radiais. Isso é devido ao fato de que as velocidades são obtidas pela medida do deslocamento do espectro, que por sua vez pode ser medido com precisão através do uso de linhas de absorção, com comprimentos de onda bem determinados. Além das linhas, existem outras características presentes no espectro, tais como a emissão contínua da fotosfera estelar. Assim, o grande desafio que se encontra na normalização é o de modelar a emissão contínua, para então removê-la, deixando assim somente as linhas espectrais. Desenvolvemos um algoritmo para realizar essa tarefa de forma otimizada e automática. A Figura 7 mostra os resultados obtidos pelo nosso código na normalização do espectro da estrela HD 136118 para uma dada ordem. A Figura 8 mostra o mesmo resultado, porém com os espectros completos, com todas as ordens, em imagem FITS, já normalizados.

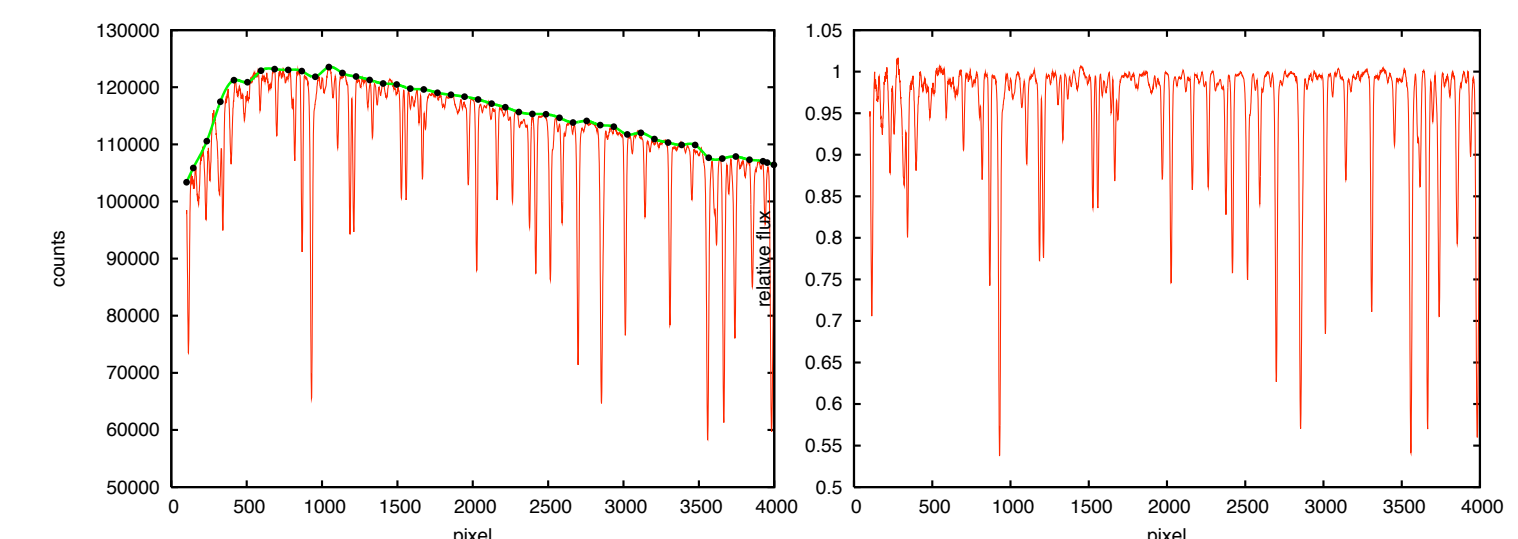


Figure 7: Exemplo da normalização de uma dada ordem espectral. Na esquerda os círculos preenchidos representam os pontos máximos representam dados do contínuo, a linha verde representa o modelo para o contínuo e a linha vermelha representa o espectro. Na direita mostramos o espectro normalizado, depois de remover o contínuo.

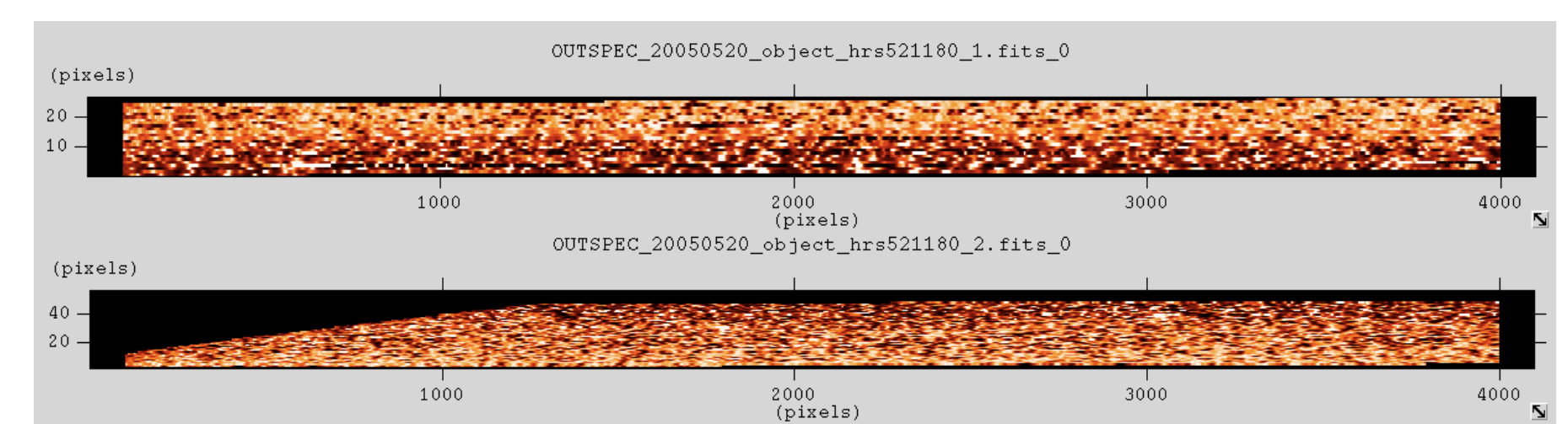


Figure 8: Imagem OUTSPEC normalizada de HD 136118 para ambos os chips RED CCD (cima) e BLUE CCD (baixo).

2.5 Calibração em λ

A calibração em comprimentos de onda também é uma etapa de extrema importância para a redução desses dados. Para isso, desenvolvemos um código que utiliza um catálogo de linhas do Th-Ar para realizar uma calibração através de um ajuste polinomial variável, ou seja, testam-se polinômios de calibração desde ordem 1 até 7, então seleciona-se aquele que produzir um menor valor de χ^2 . O processo é repetido iterativamente até que a calibração não apresente melhoras no valor de χ^2 . A Figura 9 mostra uma região do espectro observado do Th-Ar já calibrado para duas ordens adjacentes. Mostramos também o espectro de referência para comparação.

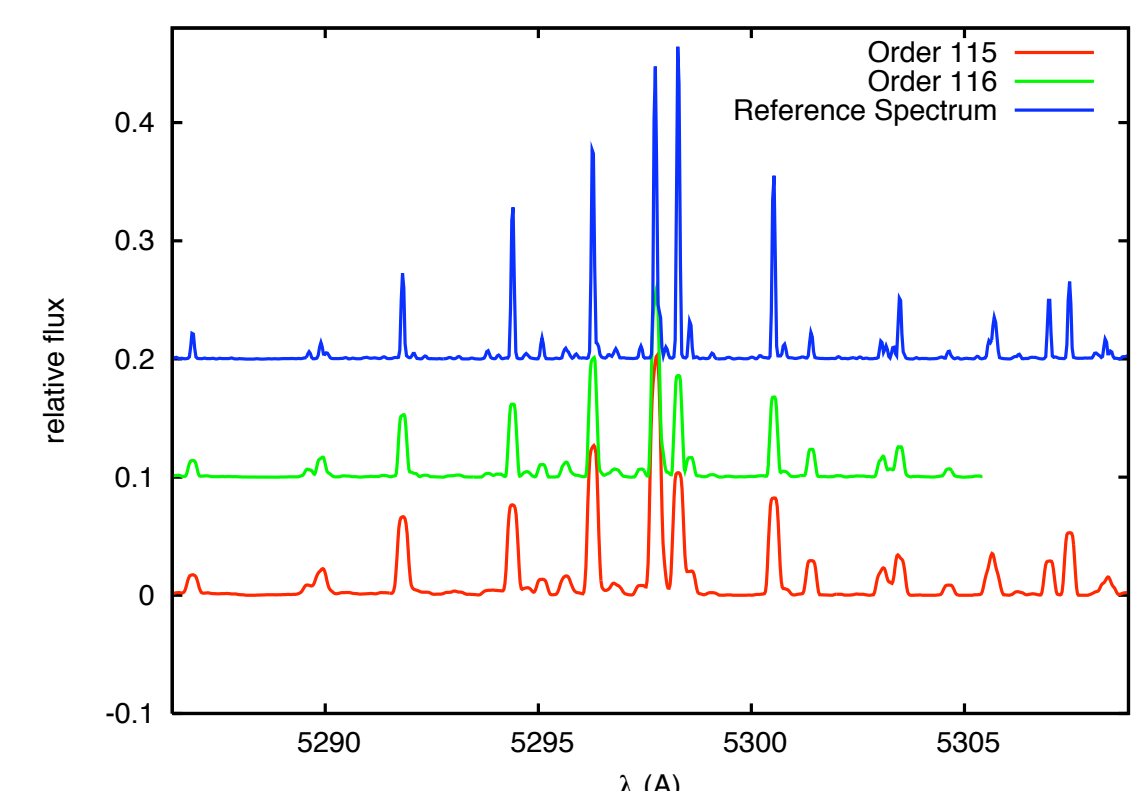


Figure 9: Espectro calibrado do Th-Ar para as ordens 115 (vermelho) e 116 (verde). Mostramos também o espectro de referência (azul).

3. O espectrógrafo Echelle do LNA

Sabe-se que o LNA possui um projeto para implementação de um espectrógrafo echelle no OPD (LNA em dia, no. 9, 2009). Dada a portabilidade e o caráter automático do ASTROSPEC, acreditamos que seja de interesse do LNA a possível utilização desses códigos, mesmo que parcialmente, na redução dos seus dados. Assim, manifestamos aqui nossa disponibilidade em contribuir nesse projeto.