

Redukcja widm CCD za pomocą pakietu IRAF

T. Brożek, A. Niedzielski, T. Tomov

Centrum Astronomii UMK

1 Pakiet IRAF

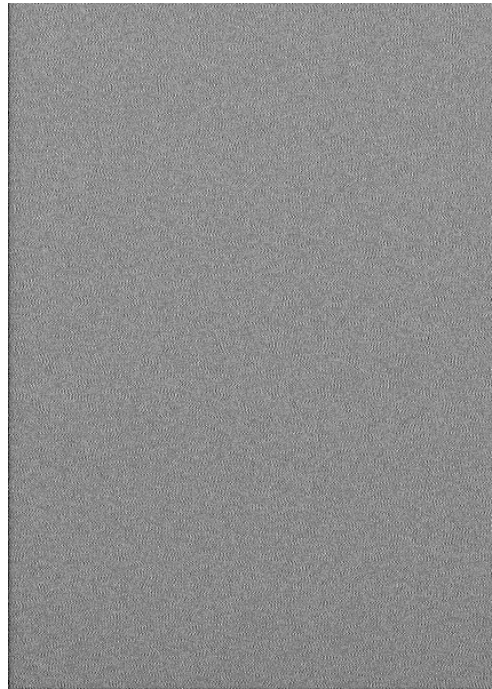
IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) jest pakietem do szeroko rozumianej redukcji i analizy obrazów. Został on stworzony i rozwinięty specjalnie dla potrzeb astronomii przez *IRAF programming group* przy NOAO (National Optical Astronomy Observatories) mieszczącym się w Tucson w Arizonie, może być on jednakże wykorzystywany również w innych dziedzinach wykorzystujących obróbkę obrazów.

IRAF jest środowiskiem modułowym, zawierającym swój własny format danych, język komend oraz rozbudowany system pomocy. Upraszczając bardzo rozumowanie można powiedzieć, że działanie pakietu opiera się przede wszystkim na wywoływaniu i uruchamianiu tzw. *tasków*, zadań (z ang. *task* — zadanie, ćwiczenie), które można postrzegać jako swoiste programy wchodzące w skład pakietu i wykonujące odpowiednie operacje na obrazach CCD. Każde zadanie posiada pewną ilość parametrów, które modyfikują jego działanie w żądany sposób. Są one więc, można powiedzieć, znów upraszczając, bardziej rozbudowanymi komendami (podobnymi do komend środowiska dosowego czy unixowego). Każde zadanie wywołuje się wpisując jego nazwę w linii komend oraz ewentualne parametry. Pakiet IRAF jest właściwie jednym wielkim pakietem zawierającym inne mniejsze (stąd budowa modułowa). Te zawierają dalsze podpakiety, albo zadania. Pakiety zajmują się poszczególnymi zagadnieniami obróbki obrazów, jak np. obróbką danych astrometrycznych, fotometrycznych czy spektroskopowych. Inne z kolei odpowiadają za wszelkie operacje na obrazach, jak transformacje, dopasowania czy łączenie ich ze sobą. Istnieją także pakiety zajmujące się wszelkimi operacjami wejścia/wyjścia, łącznie z konwertowaniem plików zapisanych w różnych formatach czy zapisywaniem danych na taśmy magnetyczne. IRAF

poza tym zawiera pakiety operujące na listach danych, pakiety zajmujące się wyświetlaniem obrazów lub danych na wykresach. Podpakiety i ich poszczególne zadania zajmują się już bardziej konkretnymi operacjami należącymi do dziedziny obsługiwanej przez dany pakiet.

2 Obrazy CCD

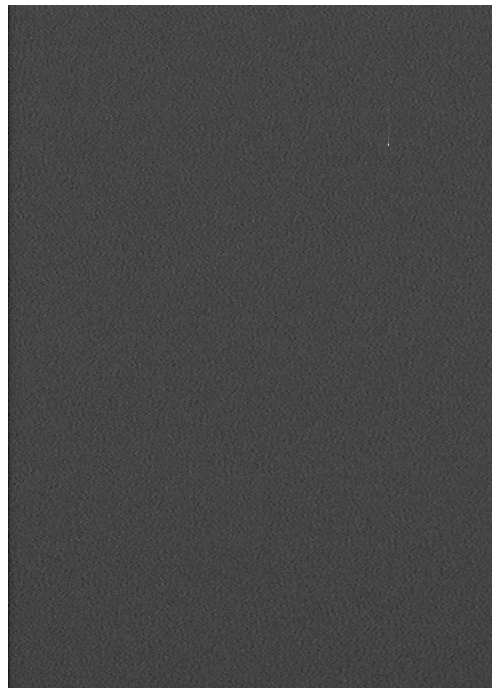
W obserwacjach wykonywanych z wykorzystaniem matryc CCD (Charge Coupled Device) dużą rolę przykłada się do odpowiedniej redukcji danych, uwzględniającej usuwanie szumów, błędów pomiarowych spowodowanych zastosowaną aparaturą i przyjętą metodą pomiarową. Wszelkie elementy elektroniczne są źródłem zakłóceń, szumów, które mają swoje odzwierciedlenie w jakości otrzymanych obrazów CCD i w konsekwencji w jakości uzyskanych na ich podstawie danych obserwacyjnych. Dopiero uwzględnienie wszystkich znanych szumów umożliwia uzyskanie obrazu gotowego do analizy naukowej.



Rysunek 1: Przykład obrazu typu bias (zero).

Podstawowym addytywnym zakłóceniem przy rejestracji obrazów CCD jest tzw. *bias*.

Jest to obraz matrycy CCD utworzony przy zerowym czasie ekspozycji, czyli faktycznie przy zamkniętej migawce. W konsekwencji na matrycy CCD zostają zarejestrowane jedynie zakłócenia spowodowane odczytem danych z matrycy oraz szum powstały przez zakłócenia aparatury pomiarowej dołączonej do niej (m. in. komputer, urządzenia przesyłowe, itp.). Wartość sygnału zarejestrowanego w każdym pikselu jest następnie traktowana jako punkt zerowy tak, aby rejestrowany sygnał był zawsze dodatni. Warto w tym miejscu zauważyć, że bias faktycznie nie jest zerowym poziomem sygnału generowanego przez kamerę CCD. Bias bowiem jest obrazem niejednorodności punktu zerowego kamery CCD w poszczególnych pikselach matrycy. Poziomem zerowym jest natomiast tzw. *overscan*, czyli obszar obrazu CCD otrzymywany przez zapis sygnału zarejestrowanego przy czytaniu rejestru matrycy ponad jej fizyczny rozmiar. W nowoczesnych kamerach overscan często jest jednak co do wartości bardzo bliski poziomowi sygnału zarejestrowanego jako bias. Dla właściwej redukcji obrazów CCD z reguły rejestruje się kilkanaście - kilkadziesiąt biasów, które są następnie uśredniane celem minimalizacji szumu. Sygnał zerowy (bias) jest z reguły bardzo niski i jednorodny na matrycy - patrz Rysunek 1.



Rysunek 2: Przykład obrazu typu dark.

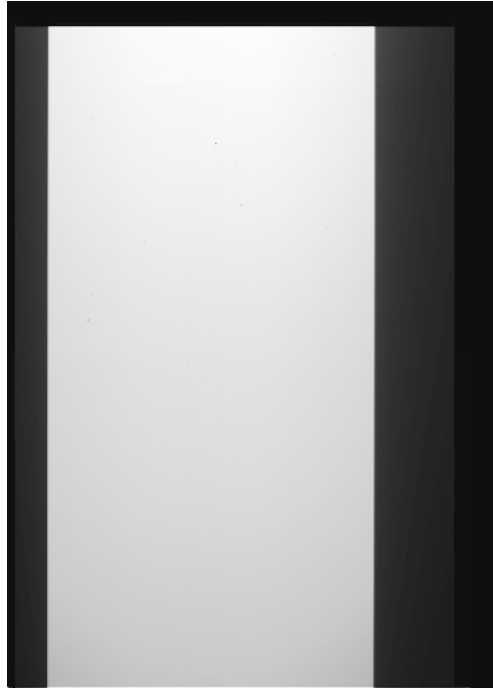
Następnym addytywnym zakłóceniem wpływającym na otrzymane obrazy CCD jest obecność tak zwanego prądu ciemnego (dark current). Jest ono spowodowane niezerową temperaturą matrycy CCD i objawia się obecnością dodatkowego ładunku w każdym z pikseli. Dla eliminacji wpływ tego zakłócenia wykonuje się w ramach ciągu obserwacji szereg tzw. *darków*, czyli ekspozycji przy zamkniętej przysłonie z czasem ekspozycji zbliżonym, lub większym od normalnego czasu ekspozycji dla badanych obiektów naukowych. Dark jest więc obrazem matrycy z zarejestrowanym wpływem szumu termicznego.

W praktyce im więcej wykonamy darków, tym dokładniej pozbawiony szumu termicznego będzie obraz naukowy.

Doświadczenie pokazuje, że najlepsze wyniki uzyskuje się, jeśli czas ekspozycji darków jest identyczny jak czas ekspozycji kalibrowanego obrazu. Na przykład dla 2-minutowej ekspozycji obserwowanego sygnału dobrze zrobić wiele darków, każdy z 2-minutową ekspozycją. Duża liczba darków pozwala dodatkowo uwzględnić zmieniające się warunki temperaturowe matrycy w ciągu nocy obserwacyjnej. Dobrze jest, gdy ekspozycje darków są wykonywane na początku, w środku i na końcu sesji obserwacyjnej. Z oczywistych względów w praktyce rejestruje się, niestety, minimalną ilość darków. Często stosowaną praktyką jest także rejestrowanie darków o czasach ekspozycji znacznie przekraczających czas ekspozycji dla badanych obiektów, a następnie skalowanie w dół. Technika ta jednak zakłada liniową zależność ilości ładunku termicznego od czasu ekspozycji co w ogólności nie musi być prawdą.

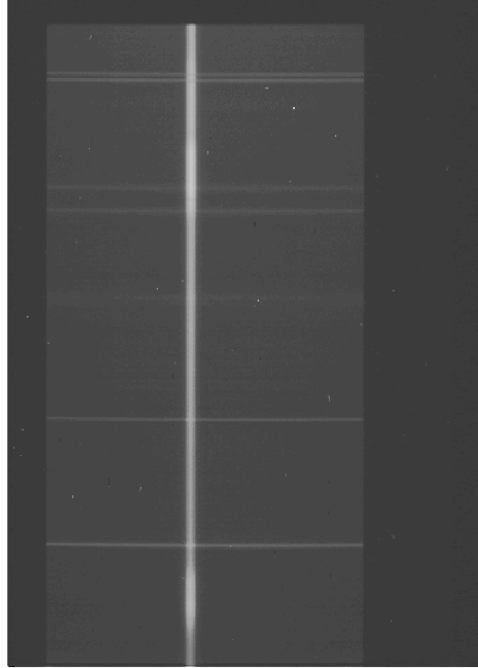
Z wykonywania darków rezygnuje się często w przypadku, kiedy chłodzenie matrycy jest bardzo efektywne i jej temperatura robocza jest tak niska, że udział prądu ciemnego w rejestrowanym sygnale jest właściwie znikomy. Z powodzeniem można go wtedy zaniedbać, szczególnie jeśli nie planujemy redukcji obserwacji do jednostek absolutnych w natężeniach. Jest to możliwe zazwyczaj przy chłodzeniu nowoczesnej matrycy do temperatury ciekłego azotu, lub przy zastosowaniu nowoczesnych matryc CCD, które wykazują szum spowodowany prądem ciemnym rzędu kilku, a nawet mniej jednostek ADU. Obraz matrycy CCD z zarejestrowanym ładunkiem termicznym przedstawiony jest na Rysunku 2. Od biasu różni się on w zasadzie jedynie nieznacznie wyższym poziomem sygnału.

Kolejną rzeczą, którą należy uwzględnić przy poprawnej redukcji obrazów CCD są



Rysunek 3: Przykład obrazu typu flat-field.

zakłócenia wiązek świetlnych na drodze od elementów optycznych instrumentu obserwacyjnego (np. teleskopu) do samego detektora CCD. Obejmują one wszelkiego rodzaju przesłonięcia, odbicia, efekty spowodowane winietowaniem, a także obecność pyłu i drobnych ziaren na powierzchni elementów optycznych. Podobne efekty dają fluktuacje wzmocnienia pomiędzy poszczególnymi elementami matrycy CCD. Uwzględnienie wpływu obu tych czynników multiplikatywnych przeprowadza się w oparciu o obrazy tzw. płaskiego pola (z ang. *flat field* — płaskie pole). Są to ekspozycje jednorodnego źródła światła białego. W praktyce może to być na przykład biały ekran oświetlony równomiernie lampą dającą widmo ciągłe, jak również niebo o zmierzchu lub o świcie, gdyż wtedy gradient jasności na niebie jest najmniejszy, obserwowane w odległości kątowej 90 stopni od Słońca (Księżyc). Z reguły w trakcie obserwacji wykonuje się kilka obrazów flat field dla jednego ciągu obserwacyjnego w danym ustawieniu spektrografu. Pamiętać przy tym należy, że wszelkie zmiany warunków obserwacji mogą wpływać na wygląd bieżącego płaskiego pola (np. zmiana temperatury otoczenia, chłodzenia CCD, zmiany optyki — m. in. filtrów, pozycji teleskopu, itp.) i należy je uwzględnić. Rysunek 3 przedstawia typowy obraz matrycy



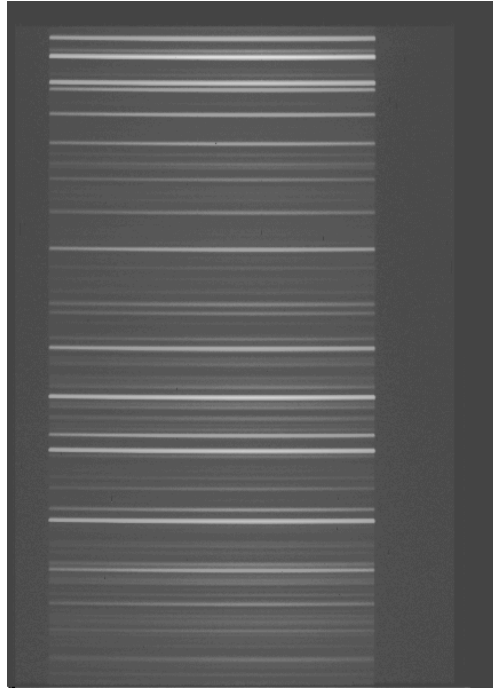
Rysunek 4: Przykład obrazu CCD zawierającego surowe widmo gwiazdy.

CCD z zarejestrowanym płaskim polem.

Na Rysunku 4 widzimy przykładowy obraz matrycy CCD z zarejestrowanym widmem gwiazdy. Jasna pionowa linia to ślad widma gwiazdy na matrycy CCD. Słabsze linie poziome to linie emisyjne nieba nocnego. Ich długość odpowiada długość szczeliny spektrofografu. W przypadku przedstawionym na Rysunku 4 oś pionowa to oś dyspersji zaś oś pozioma to oś przestrzenna.

Na Rysunku 5 widzimy typowy obraz CCD z zarejestrowanym widmem lampy kalibracyjnej czyli znanego widma liniowego (w tym wypadku He-Ne-Ar), które posłuży do kalibracji widm w skali długości fali. W trakcie obserwacji spektroskopowych widmo lampy porównania należy wykonywać po każdej zmianie ustawień spektrofografu. Dobrze jest wykonywać kilka widm lampy porównania w ciągu obserwacyjnym także wtedy, gdy nie zmieniamy ustawień spektrofografu w trakcie obserwacji aby wyleminować wpływ ewentualnych gięć wewnątrz spektrofografu na jakość uzyskanych danych.

Oprócz właściwej ekspozycji sygnału interesującego nas źródła, w trakcie obserwacji



Rysunek 5: Obraz CCD zawierający surowe widmo lampy porównania.

detektorem cyfrowym wykonywane są jak widać także dodatkowe obrazy, które są niezbędne do przeprowadzenia poprawnej redukcji. Wraz z surowymi obrazami obserwowanego obiektu stanowią one kompletną obserwację CCD. Ilość obrazów niezbędnych do poprawnej redukcji z reguły znacznie (kilkakrotnie!) przewyższa ilość obrazów zawierających dane naukowe. Powoduje to nie tylko znaczne powiększenie ilości nośnika niezbędnego do rejestracji zebranych obserwacji ale także zajmuje wiele czasu. Niestety wykonanie obrazów kalibracyjnych jest konieczne dla poprawnej redukcji.

3 Redukcja obrazów CCD

Mając do dyspozycji, obok surowych obserwacji, zestaw biasów, flat fieldów, obrazów widma lampy porównania i ewentualnie darków można przystąpić do redukcji obrazów. Z reguły postępuje się wg. następującego schematu. Najpierw uśrednia się wszystkie obrazy z biasami otrzymując tzw. *średni bias*. Następnie odejmuje się średni bias od wszystkich wykonanych obrazów, tzn. od flat fieldów, surowych obrazków z widmem naszych obiektów

tów i widmem lampy porównania a także ewentualnie darków. Kolejnym krokiem jest uśrednienie wszystkich darków. Uzyskany w ten sposób *średni dark* jest odejmowany od wszystkich flat fieldów i surowych obrazów spektroskopowych. W dalszych etapach należy uśrednić flat fieldy otrzymując tzw. *master flat*. Aby móc podzielić obrazy z surowymi danymi przez master flat, należy ten ostatni znormalizować, tzn. znaleźć średnią wartość piksela, a następnie podzielić przez nią wszystkie wartości pikseli tego obrazu. Otrzymany w ten sposób znormalizowany flat można ostatecznie podzielić przez surowe obrazy obserwacji. Jeżeli dysponujemy obszarem overscan na obrazach CCD na każdym etapie redukcji najpierw od obrazów odejmujemy wektor overscan.

W zależności od rodzaju obserwacji, ilości obserwowanych obiektów, długości sesji obserwacyjnej, powyższy schemat może ulec bądź skomplikowaniu, bądź uproszczeniu. Zależy to przede wszystkim od rodzaju obserwacji, rodzaju i ilości obserwowanych obiektów, długości sesji obserwacyjnej, a także od warunków obserwacyjnych (m. in. temperatury, ale także tych związanych z pozycją teleskopu czy innych urządzeń obserwacyjnych). Zmiana warunków obserwacji związana często z długością czasu obserwacji, bądź zmiana ustawień spektrografu wymaga oddzielenia od siebie poszczególnych grup obrazów kalibracyjnych. Jeśli na przykład dokonuje się kilku obserwacji jednego obiektu przez dłuższy czas, w którym warunki obserwacji ulegają zmianie a kamera jest dajmy na to chłodzona elektronicznie czyli jej temperatura zależy od temperatury otoczenia, wtedy może okazać się konieczne, ażeby wszystkie z wykonywanych obrazów pomocniczych, tzn. biasy, darki i flat fieldy zostały podzielone na grupy, odpowiadające obrazom surowych obserwacji obiektu i w tych grupach uśredniane i odejmowane, bądź dzielone przez te ostatnie. Wtedy wpływ zmian warunków obserwacji zostanie lepiej uwzględniony lub nawet zlikwidowany.

W szczególnym przypadku redukcji obrazów CCD z widmami gwiazd postępuje się podobnie z tą różnicą, że dodatkowo wykonywane są ekspozycje widma lampy porównania, a redukcja surowego obrazu obiektu ma na celu uzyskanie jego widma najczęściej nie w dwóch, a w jednym wymiarze, oraz wyskalowanie go w długościach fali na podstawie widma lampy porównania. Taka operacja bywa nazywana również *ekstrakcją* widma. W następnym rozdziale zostanie dokładniej omówiona redukcja danych spektroskopowych uzyskanych dzięki matrycy CCD dla konkretnego zestawu gwiazd.

4 Redukcja obserwacji widmowych CCD

Przed pierwszym uruchomieniem pakietu IRAF należy wcześniej utworzyć katalog, w którym znajdują się pliki konfiguracyjne, a wśród nich najważniejszy — `login.cl`. Następnie po przejściu do tego katalogu należy wykonać komendę

```
mkiraf,
```

która tworzy wszystkie pliki konfiguracyjne. W pliku `login.cl` znajdują się podstawowe informacje dotyczące działania pakietu, m. in. podana jest tu ścieżka dostępu do katalogu z plikami konfiguracyjnymi, ścieżka dostępu do katalogu z obrabianymi plikami zawierającymi obrazy CCD - *imdir* (od *image directory*). Plik ten zawiera ponadto wszelkie ustawienia dotyczące okien, pod którymi pracuje IRAF, wybór edytorów tekstu i inne polecenia sterujące działaniem pakietu. W pliku tym możliwe jest także ustawienie bezpośredniego dostępu do wybranych pakietów i podpakietów.

Dopiero po wykonaniu powyższych czynności możliwe jest pierwsze uruchomienie pakietu IRAF. Robi się to za pomocą komendy `cl` (od *command language* czyli język komend). Po uruchomieniu zostają wyświetlone informacje dotyczące podstawowych pakietów i zadań dostępnych z poziomu początkowego pakietu IRAF.

Praca z obrazami z matrycy CCD ułatwia przeglądarka DS9, która może być uruchamiana oddzielnie ze środowiska UNIX bądź z poziomu pakietu IRAF. Drugi sposób umożliwia współdziałanie pakietu z przeglądarką. Możliwe jest wtedy uruchamianie specjalnych zadań i komend, dzięki którym możliwe jest wykonywanie przeróżnych operacji na obrazach, a także ich analizy, w tym także statystycznej. Uruchomienie przeglądarki jest podobne do wykonywania niektórych zewnętrznych komend unixowych, które nie są aktywne w środowisku IRAF: nazwa wywoływanej komendy musi być wtedy poprzedzona bezpośrednio znakiem wykrzyknika `!`. Przeglądarkę DS9 uruchamia się z poziomu unixa komendą

```
ds9,
```

natomiast ze środowiska pakietu komendą

```
!ds9,
```

przy tym aby móc nadal pracować ze środowiskiem IRAFa dobrze jest uruchomić prze-

glądarkę „w tle”, co odpowiada nieco zmodyfikowanej komendzie

```
!ds9 &.
```

Najbardziej podstawowe komendy pakietu mają postać komend unixowych, ale są osiągalne bez potrzeby poprzedzania ich nazw znakiem ! (np. komenda `ls` listująca aktualny katalog, `cat` czy `less` wyświetlające zawartości plików, `pwd` wyświetlająca ścieżkę dostępu do aktualnego katalogu, komenda `cd` zmieniająca katalog czy `cp` kopiująca wybrane pliki, itp.). Inne pozostałe komendy pakietu należą tylko i wyłącznie do tego środowiska, i są najczęściej nazwami zadań o modyfikowalnych parametrach. Do wywołania jakiegokolwiek komendy lub zadania najczęściej wystarczy wpisać kilka pierwszych liter ich nazwy, których ilość zależy głównie od ilości nazw komend i zadań zaczynających się od tych samych znaków.

Pokazana tu zostanie obróbka widm CCD trzech gwiazd: gwiazdy typu algola *V454 Aur*, *GT UMa* oraz β *Vir*, które zostały wykonane 2-metrowym teleskopem w obserwatorium w Rozhen w Bułgarii. Obejmują one zakres widmowy dalekiej czerwieni. Matryca CCD, na której przeprowadzono obserwacje ma fizyczne rozmiary 1024×1024 pikseli, z czego w spektroskopii używane w obserwacji jest jedynie około 190×1030 pikseli. Sama matryca jest typu *back illuminated*. Matryce takie odznaczają się bardzo małą grubością rzędu kilkunastu mikrometrów, co osiąga w bardzo precyzyjnym procesie produkcji. Małe grubości pozwalają naświetlać tą stronę matrycy, która w normalnej matrycy znajduje się po przeciwnej stronie niż padające światło. Jednocześnie dzięki temu rośnie znacznie efektywność kwantowa matrycy nawet do ponad 80%! Duża przezroczystość dla kwantów światła wywołuje jednak efekt uboczny, a mianowicie interferencję światła - fringing. Powoduje on znaczne niejednorodności w naświetleniu matrycy na jej powierzchni, co odbija się na niejednorodnościach w zliczonym sygnale. Efekt ten jest szczególnie dobrze widoczny w przypadku obrazów flat field. Fringing czyni obróbkę widma znacznie bardziej skomplikowaną.

Do dyspozycji mamy 26 plików w formacie FITS (Flexible Image Transport System), który bardzo dobrze nadaje się do zapisywania wszelkich danych w astronomii. Pliki te zawierały 10 obrazów biasów, 9 obrazów flat fieldów, 1 obraz widma lampy porównania torowo-argonowej (Th-Ar), oraz 6 obrazów z widmami trzech wspomnianych gwiazd, w

tym 2 widma gwiazdy *V454 Aur*, 3 widma *GT UMa* oraz 1 widmo gwiazdy β *Vir*. Ilość ekspozycji zależała od jakości uzyskanych widm. Dla dwóch pierwszych gwiazd widma ich były dość słabe (tzn. silnie zaszumione), dlatego wykonanych było więcej ekspozycji.

Pliki typu FITS składają się z dwóch części. Pierwszą stanowi tzw. *header* czyli nagłówek, w którym opisane są wszelkie parametry obserwacji, mogące okazać się pomocne w procesie obróbki, m. in. czas i miejsce powstania, modyfikacji, czas i miejsce obserwacji, czas ekspozycji, informacje o wszelkich operacjach, którym poddawane były dane (np. lista zadań, którymi obrabiano dane i czas ich uruchamiania) i inne. Nagłówek jest zapisywany zwykle w trybie ASCII, więc można go przeglądać nawet za pomocą najprostszego edytora tekstu. Druga część plików FITS zawiera wyłącznie dane zapisane w postaci binarnej. W przypadku danych z matrycy CCD dane te zawierają informacje o pozycji każdego piksela i ilości zgromadzonego w nim ładunku przeliczonej na jednostki ADU (analog to digital units) przeliczone przez konwerter analogowo-cyfrowy kamery.

Chcąc pracować na takich plikach w pakiecie IRAF należy je odpowiednio przygotować. Służy do tego celu zadanie `rfits` (od *read FITS* — czytanie plików FITS). Task ten faktycznie dzieli każdy plik fitsowy na dwie części i zapisuje je w oddzielnych plikach, w pliku z samym nagłówkiem o rozszerzeniu `.imh` (od *image header* — nagłówek obrazu), oraz w pliku z samymi danymi (obrazami) z rozszerzeniem `.pix` (od *pictures* — obrazy). Wszelkie operacje na obrazach w środowisku IRAF sprowadzają się do operacji jedynie na plikach `*.imh`, co automatycznie przenosi się na pliki z rozszerzeniem `.pix`. W szczególności dotyczy to również tworzenia nowych plików, bądź ich kasowania.

Wszystkie zadania w IRAFie posiadają pewną liczbę parametrów. Wykonywanie zadania odbywa się przez wywołanie jego nazwy z opcjonalnymi parametrami:

```
nazwa_zadania parametr1 parametr2 ...,
```

albo przez wypełnienie odpowiednich parametrów zadania przed jego uruchomieniem komendą do edycji parametrów `eparam` (od *edit parameters* — edycja parametrów)

```
eparam nazwa_zadania.
```

Komenda ta wyświetla listę parametrów danego zadania z możliwością jej edycji. Parametrami mogą być w szczególności nazwy plików do obróbki, m. in. nazwy plików wejściowych i wyjściowych zadania. Wyjście z edytora `eparam` i zapisanie zmian w parametrach

zadania następuje przez wciśnięcie klawiszy `ctrl+D`, a wyjście bez zapisania zmian przez kombinację klawiszy `ctrl+C`. Ostatni sposób jednak nie zawsze daje pozytywny skutek. Może być to wynikiem pewnych konfliktów z systemem operacyjnym lub jego niepełną kompatybilnością. Jeśli potrzeba powrócić do domyślnych ustawień parametrów zadania przed ich modyfikacją, można tego dokonać za pomocą komendy

```
unlearn nazwa_zadania,
```

która w wolnym tłumaczeniu „oducza” dane zadania wszelkich „nabytych” wartości parametrów, przywracając domyślne, niejako „fabryczne” wartości parametrom z momentu pierwszego uruchomienia pakietu.

Pomoc na temat działania każdej komendy czy zadania i jego parametrów można uzyskać za pomocą komendy

```
help nazwa_komendy_lub_zadania.
```

Istnieje także możliwość podglądu parametrów zadania bez niebezpieczeństwa ich przypadkowej zmiany komendą

```
lparam nazwa_komendy_lub_zadania
```

(od *list parameters* — listowanie parametrów).

Task `rfits` zawiera parametry, które określają m. in. jak będą się nazywać przeczytane i rozdzielone pliki fitsowe. Z reguły ich nazwy składają się z ciągu liter, a następnie cyfr numerujących kolejne przeczytane pliki. W rozpatrywanym przykładzie wszystkie przeczytane pliki mają w swojej nazwie ciąg `spec` oraz 4 cyfry numerujące obrazy CCD od 1 do 26 (`spec0001`, `spec0002`, ..., `spec0010`, ... itd.).

W środowisku IRAF wygodnie jest stosować listy plików (tzw. *@files*), które stanowią pliki tekstowe zawierające listę obrabianych plików. Dzięki temu łatwiejsze staje się uruchamianie szczególnie tych zadań, które operują wieloma plikami naraz. Wystarczy wtedy bowiem podać nazwę pliku z listą obrabianych obrazów poprzedzoną znakiem `@`, zamiast wpisywać wszystkie nazwy plików. W przypadku podobieństwa nazw plików można stosować także maski stosowane w systemie UNIX przy operacjach na wielu plikach (znaki `?` lub `i *`).

Po przeczytaniu i podzieleniu plików fitsowych na formaty obsługiwane przez IRAFa

można wylistować tak powstałe pliki za pomocą zadania

`ccdlist`,

które listuje nie tylko wszelkie 2-wymiarowe obrazy CCD, ale także jednowymiarowe obrazy widm. Wyższość tego zadania nad „zwykłą” komendą `ls` przejawia się w wyświetlaniu obok samych nazw plików z obrazami także niektórych rekordów nagłówek FITS, które pozwalają np. zidentyfikować do jakiego typu obserwacji należy dany plik (bias, flat, widmo lampy porównania czy widmo gwiazdy). Task ten potrafi listować także całe pliki fitsowe, natomiast nie listuje plików zwykłych, które nie są plikami typu FITS. W parametrach tego zadania warto ustawić listowanie jedynie plików z rozszerzeniem `.imh`, co uczyni listę bardziej przejrzystą.

Dla rozpatrywanych w opracowaniu 26 plików z obrazami, ich lista po wykonaniu zadania `ccdlist` wygląda następująco:

```
spec0001.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0002.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0003.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0004.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0005.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0006.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0007.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0008.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0009.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0010.imh[190,1030][ushort][zero] []:
spec0011.imh[190,1030][ushort][comp] []:
spec0012.imh[190,1030][ushort][object] []:V454 Aur
spec0013.imh[190,1030][ushort][object] []:V454 Aur
spec0014.imh[190,1030][ushort][object] []:GT UMa
spec0015.imh[190,1030][ushort][object] []:GT UMa
spec0016.imh[190,1030][ushort][object] []:GT UMa
spec0017.imh[190,1030][ushort][object] []:Beta Vir
```

```
spec0018.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0019.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0020.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0021.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0022.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0023.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0024.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0025.imh[190,1030][ushort][flat] []:  
spec0026.imh[190,1030][ushort][flat] []:
```

Dodatkowe komentarze obok nazw plików zawarte w kwadratowych nawiasach informują m. in. o fizycznych wymiarach obrazów w pikselach, o ich typie: (**zero** oznacza obraz z zarejestrowanym biasem, **comp** oznacza obraz z widmem lampy porównania, **object** wskazuje na plik z widmem gwiazd, a **flat** na obrazy z flat fieldem. Dodatkowo dla plików z widmami wylistowane są nazwy obiektów, do których się odnoszą, jeśli zostały one umieszczone przez obserwatora w nagłówku. Para pustych nawiasów przy każdym z plików obrazu będzie wypełniana literami symbolizującymi przejście przez kolejne etapy redukcji. Przed jakąkolwiek redukcją warto wyświetlić w przeglądarce DS9 po jednym z obrazów każdego typu i przejrzeć je choćby po to, aby sprawdzić jakość widm, poziom szumu, ilość śladów po promieniowaniu kosmicznym i wygląd flat fieldów. Z poziomu IRAFa możliwe jest załadowanie do pamięci przeglądarki DS9 4 obrazów naraz. Każdy z obrazów ładowany jest do jednej z 4 ramek (z ang. *frame*) komendą

```
display nazwa_pliku numer_ramki,
```

np.

```
display spec0001 1
```

wyświetla w przeglądarce DS9 plik **spec0001** z obrazem biasu w ramce nr 1. Obraz w przeglądarce jest wyświetlany standardowo w odcieniach szarości, jednak w menu DS9 dostępne są opcje pozwalające na wyświetlenie obrazu w kolorach. Możliwa jest również płynna zmiana skali koloru za pomocą myszy, co umożliwia zwiększenie lub zmniejszenie zakresu obserwowanych wartości, co wiąże się bezpośrednio ze zwiększeniem kontrastu

obrazu, a tym samym zwiększeniem jego czytelności.

Pobieżny ogląd obrazów w przeglądarce pozwala zauważyć pionowy ciemniejszy pasek po prawej stronie obrazu. Ten obszar to tzw. *overscan*. Każdy piksel obrazu CCD poza obszarem overscanu odpowiada fizycznemu pikselowi matrycy CCD. Obszar overscanu jest natomiast tworzony po sczytaniu ostatniej kolumny obrazu. Zostaje wtedy sczytana sztucznie dodatkowo pewna ilość kolumn, które już nie zawierają żadnego ładunku. Obszar overscanu zawiera wyłącznie szum aparatury sczytującej sygnał z matrycy i przesyłającej wzmocniony dalej. Jest to więc faktyczny poziom zerowy sygnału rejestrowanego przez kamerę CCD. Obszar overscan jest bardzo pomocny w redukcji CCD, gdyż może zostać zarejestrowany na każdej z ekspozycji, co umożliwia dokładniejsze uwzględnienie ewentualnych zmian warunków w trakcie obserwacji. Obszary overscanu w naturalny sposób uzupełniają ekspozycje biasów, które mogą być wykonywane jedynie przed i po ekspozycji obiektu. W odróżnieniu od biasu, który pozwala uwzględnić strukturę szumu na dwuwymiarowej powierzchni matrycy, overscan pozwala jedynie uzyskać całkowitą średnią wartość poziomu zerowego dla jednej kolumny matrycy. Najczęściej obszar overscanu jest rejestrowany automatycznie przy każdej ekspozycji, nawet tej z zerowym czasem (bias). W szczególnych wypadkach overscan może zastępować bias.

Jedną z podstawowych czynności podczas procesu redukcji jest określenie zakresu obszaru zawierającego dane (tzw. *trim section*), oraz obszaru zawierającego overscan, który w procesie redukcji zostaje odcięty od reszty obrazu. Najbardziej precyzyjnym narzędziem do tego celu jest zadanie `implot` (od *image plot*), który wyświetla żądane linie bądź kolumny obrazu CCD. Obszar overscanu określa się najczęściej na podstawie plików z biasem. Można przykładowo zbadać pierwszy z plików `spec0001` wpisując w linii komend `implot spec0001`.

Powoduje to wyświetlenie dodatkowego okna, którego po zakończeniu zadania **nie należy zamykać** — posłuży ono do wyświetlania wykresów podczas uruchamiania innych zadań. W oknie wyświetlony jest wykres przedstawiający przebieg wartości zliczeń w funkcji numerów pikseli. Domyślnie są to zliczenia pikseli tworzących konkretną z linii matrycy. Linie matrycy są to rzędy pikseli w kierunku poziomym matrycy, a jej kolumny tworzą rzędy pikseli w kierunku pionowym. Widać stąd, że liczba wszystkich linii matrycy jest

równa pionowemu wymiarowi matrycy, a liczba kolumn — jej wymiarowi poziomemu. Po prawej stronie na osi pionowej jest wyświetlana skala ilości dostępnych linii, bądź kolumn matrycy.

Pomoc na temat wszelkich aktywnych klawiszy i komend wpisywalnych w oknie wykresu można uzyskać naciskając znak `?` w oknie wykresu. W oknie IRAFa zostaje wtedy wyświetlona lista komend i klawiszy, którą przewija się za pomocą spacji, a wychodzi się z niej naciskając klawisz `Q`. Wtedy dopiero można z powrotem pracować w oknie wykresu.

Wiele opcji okna wykresu jest możliwych jedynie poprzez naciśnięcie jakiegoś klawisza, ale są też bardziej złożone komendy, które uaktywnia się wpisując znak dwukropka `:`. Przykładowo chcąc wyświetlić przebieg zliczeń jakiejś innej linii matrycy należy nacisnąć `:` i w oknie wykresu na dole pokazuje się wówczas znak dwukropka. Po nim należy wpisać znak `l`, a następnie po spacji numer linii, np. 200:

```
:l 200.
```

Po wciśnięciu klawisza `Enter` zostaje wyświetlona żądana linia. Podobnie postępuje się chcąc wyświetlić którąś z kolumn matrycy: po dwukropku wpisuje się literę `c` i po spacji numer kolumny, np. 1000:

```
:c 1000.
```

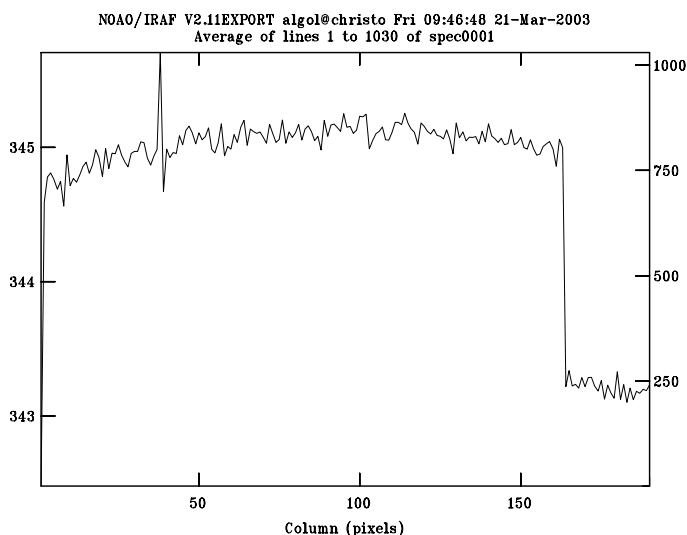
Można także zastosować uśrednienie większej ilości linii bądź kolumn, co powoduje zmniejszenie niejednorodności, szumu, a co uzyskuje się poprzez podanie zakresu uśrednienia, wpisując po dwukropku literę `l` lub `c`, a następnie po spacji górny i dolny zakres uśrednienia oddzielony również znakiem spacji np.:

```
:c 10 30.
```

Rysunek 6 przedstawia uśredniony obraz przebiegu zliczeń w liniach o numerach od 1 do 1030 pliku obrazu biasu `spec0001`.

Na rysunku widać wyraźnie niższy obszar overscanu w zakresie kolumn powyżej około 160. Zwraca uwagę także obecność dziwnego sygnału w zakresie od 37. do 40. piksela. Jest on widoczny w tych miejscach także na innych obrazach biasu. Wartość jego ulega znacznym wahaniom powyżej wartości średniej. Możliwe, że jest to spowodowane wadliwym działaniem tych kolumn matrycy CCD.

Jeśli w trybie wyświetlania jednej linii/kolumny naciśnie się klawisz `l` lub `c`, wtedy



Rysunek 6: Wykres obrazu biasu `spec0001` z uśrednionymi liniami od 1. do 1030. za pomocą zadania `implot`.

zostanie wyświetlona linia lub kolumna o numerze odpowiadającym pionowej współrzędnej pozycji kursora względem prawej osi wykresu. Naciśnięcie spacji w dowolnym punkcie wykresu pokazuje aktualny numer wyświetlanej linii/kolumny, numer piksela oraz wartość zliczenia w skali pionowej. W ten sposób można określić w jakim zakresie zawierają się obszary overscanu i trimu. Uśrednienie większej liczby linii umożliwia bardziej precyzyjne określenie tych zakresów. Dobrze jest również uśrednić kilka oddzielnych serii linii, np. z początku, środka i końca matrycy, aby móc wyeliminować ewentualne wahania pozycji obydwu obszarów. Warto poza tym sprawdzić chociaż czy odczytane zakresy overscanu i trimu zgadzają się z zakresami w innych obrazkach, szczególnie w pozostałych obrazach biasu, czy obrazach widm i flat fieldów. Czasami poziomy biasu i overscanu na obrazach biasu są nie do odróżnienia. Wtedy obszar overscanu można także określić w oparciu o obrazy płaskiego pola, czy ewentualnie o surowe obrazy z widmami gwiazd. Ponieważ nie da się wyeliminować wszystkich wahań obydwu zakresów, dlatego lepiej zawsze ustalić te obszary nieco mniejsze niż w rzeczywistości. Pozwoli to także wyeliminować zakłócenia pojawiające się na brzegach matrycy.

Poza ustaleniem zakresu obszaru trim i overscan w zakresie kolumn trzeba także okre-

ślić rozmiar w liniach (czyli w skali pionowej) obrazów, szczególnie obszarów overscanu i trimu. Robi się to w celu wyeliminowania zakłóceń na brzegu matrycy, gdzie wartości zliczeń mogą wykazywać znaczne odstępstwa od reszty danych. Zakres ten można ocenić wyświetlając zadaniem `implot` kilka uśrednionych kilka uśrednionych linii i kolumn obrazów biasu, flat fieldu, czy także obrazów widm. Ocenione wartości zakresów obszarów overscanu, trimu podano poniżej:

- zakres obszaru trim w kolumnach [4:162],
- zakres obszaru trim w liniach [10:1018],
- zakres obszaru overscan w kolumnach [166:189],
- zakres obszaru overscan w liniach [10:1018].

Po tych czynnościach można zająć się właściwą redukcją danych, która rozpoczyna się od uśrednienia obrazów biasu.

4.1 Bias i overscan

Właściwie przed uśrednianiem obrazów biasu należałoby poobcinać je wstępnie obszarów określonych jako trimsection a następnie poprawnie wyznaczony wektor overscan odjąć je od tak otrzymanych obszarów z danymi. Tutaj jednak dla prostoty przeprowadzono najpierw uśrednienie całego obrazu, razem z overscanem.

Uśrednianie obrazów biasu przeprowadza się za pomocą zadania `zerocombine`. W parametrach zadania należy ustawić nazwy plików wejściowych z obrazami biasu (od `spec0001` do `spec0010`). Pomocne w tym miejscu jest zrobienie odpowiedniego pliku `@file`. Poza tym należy wypełnić parametr `output` nazwą pliku wyjściowego będącego uśrednionym biasem, w tym przypadku `Zero`. W parametrach zadania należy wypełnić parametr `combine` przez `average`. Powoduje to operację uśredniania obrazów biasu. Parametr `process` powinien mieć wartość `no`, co uniemożliwi przeprowadzenie jakichkolwiek innych operacji przed uśrednieniem biasów. Parametr `ccdtype` ma wartość `zero`, co informuje, że operacje będą prowadzone na plikach tego typu. Parametr `rdnoise` jak i `gain` powinny mieć wartości odpowiednio `ron` i `gain`. Oznaczają one wartość szumu odczytu

(od *readout noise* i wartości wzmocnienia (*gain*). Parametry te mogą przyjmować różne wartości, albo odnosić się do słów kluczowych o tej samej nazwie zawartych w nagłówkach plików z obrazami, którym przypisane są określone wartości szumu odczytu czy wartości *gain*. W przypadku rozpatrywanych widm nazwy te odnoszą się właśnie do słów kluczowych w plikach nagłówkowych obrazów i we **wszystkich** innych uruchamianych zadaniach parametry *rdnoise* (w niektórych zadaniach pod nazwą *readnoi*) i *gain* powinny mieć także takie wartości.

Po wypełnieniu listy parametrów zadania można je uruchomić. Wykonanie zadania *ccdlist* ujawnia powstanie nowego pliku wyjściowego *Zero* będącego uśrednionym biasem:

```
Zero.imh [190,1030] [real] [zero] [] :
```

Następnym krokiem będzie odcięcie zakresów *trim* i *overscan* w tak spreparowanym biasie. Przeprowadzić to można za pomocą zadania *ccdproc* (od *CCD process* — przetwarzanie CCD). W jego parametrach, oprócz wypełnienia standardowych pól wejścia (*Zero*) i wyjścia (w tym przypadku *Zero.ot*) należy przede wszystkim wpisać zmierzone wartości zakresów każdego z obszarów *trim* i *overscan* w polach *biassec* i *trimsec*. Dla obrabianych widm wpis ten ma postać:

```
(biassec= [166:189,10:1018]) Overscan strip image section  
(trimsec= [4:162,10:1018]) Trim data section
```

Pamiętać należy przy tym o umieszczeniu wpisywanych wartości w nawiasach kwadratowych, oraz o oddzieleniu poszczególnych zakresów znakiem przecinka. Pierwszy zakres któregośkolwiek z parametrów odpowiada zakresowi obszaru w kolumnach, a drugi po przecinku odpowiada zakresowi tego obszaru w liniach. Należy poza tym wypełnić parametry *oversca* i *trim* wartościami *yes*, co oznacza zgodę na ograniczenie obrazu do obszaru zdefiniowanego jako *trimsection* i odrzucenia obszaru *overscan* z jednoczesnym odjęciem wektora *overscan* od obszaru *trim*. Reszta parametrów opisujących korekcje na odpowiednio *flat field*, *bias*, *dark* itp., będące w tym samym paragrafie listy parametrów co *overscan* i *trim*, powinny mieć ustawione wartości *no*. Poza tym należy ustawić

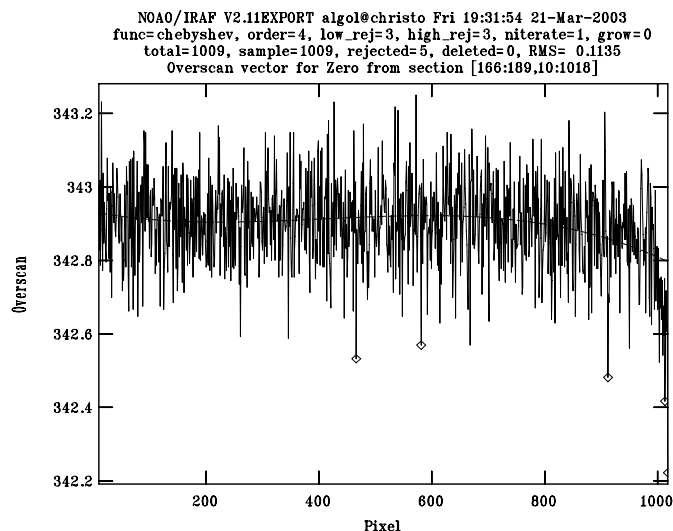
dopasowanie krzywej przybliżającej poziom overscan interaktywnie przez wypełnienie parametru `interac` wartością `yes`. Można wtedy ustawić parametry dopasowania, m. in. rodzaj dopasowywanej funkcji `functio`, oraz jej rząd `order`. W tym przypadku zastosowano wielomiany Czybyszewa rzędu 2-giego, czyli prostą. Powyższe parametry przyjmują dlatego wartości odpowiednio `chebyshev` oraz `2`. Reszta parametrów pozostaje bez zmian.

Tak przygotowane zadanie `ccdproc` obcina zadane obszary overscanu, a następnie uśrednia w pewien sposób wartości wzdłuż każdej z linii „paska” overscanu. W ten sposób tworzony jest wektor zawierający wartości średnie poziomu zerowego dla każdej z linii. Następnie do tych wartości dopasowywana jest zadana funkcja i dopiero jej wartości są odejmowane od średniego obrazu biasu `Zero`. Task ten może także odejmować od całego obrazu pewną średnią wartość obliczoną dla overscanu (`functio=Chebyshev`, `order=1`). Jest to jednak mniej precyzyjne niż poprzednia metoda.

Po uruchomieniu zadania w oknie wykresu zostaje wyświetlony wektor z uśrednionymi wartościami overscanu dla każdej linii, oraz dopasowanie wielomianu wybranego stopnia. Aby zmienić rząd wielomianu należy wcisnąć klawisz dwukropku i wtedy w oknie wykresu napisać literę `o` a po niej po spacji liczbę odpowiadającą rzędowi funkcji. Po wciśnięciu klawisza `enter` dopasowanie funkcji przeprowadza się poprzez naciśnięcie klawisza `F` (od *fit* — dopasowanie). Wskaźnikiem prawidłowego dopasowania jest odchylenie standardowe, które jest wyświetlane u góry wykresu i oznaczane jako `RMS` (od *root-mean-square*). Im lepsze dopasowanie, tym mniejsza jego wartość. Jeśli zwiększenie rzędu wielomianu nie pociąga za sobą poprawę wartości `RMS`, wtedy lepiej jest zostawić mniejszą wartość. W przypadku pliku `Zero` dopasowano wielomian 4-tego stopnia z wartością `RMS=0.1135` (rysunek 2). Wyjście z wykresu i jednocześnie z zadania następuje poprzez klawisz `Q`.

Po wylistowaniu plików zadaniem `ccdlist` zwraca uwagę nowopowstały plik `Zero.ot`:
`Zero.ot.imh[159,1009][real][zero][][0T] :`

Literki w ostatnim nawiasie kwadratowym symbolizują fakt, że obraz przeszedł już korekcję polegającą na odcięciu overscanu i pozostawieniu obszaru `trim`. Widać też, że rozmiary obrazu odpowiednio się zmniejszyły. Tak uzyskany obraz średniego biasu można skontrolować w przeglądarce DS9. Obecność kilku kolumn (w pobliżu 35–38 kolumny), gdzie sygnał ulega znacznym wahaniom wyraźnie powyżej średniej (rysunek 3) spowodowane jest ku-



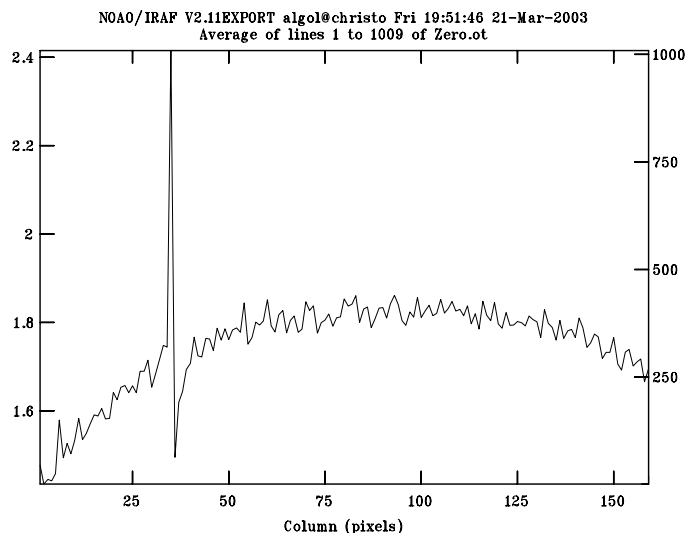
Rysunek 7: Wykres uśrednionego po liniach overscanu uzyskany w trakcie wykonywania zadania `ccdproc`. Widoczna jest linia dopasowanego wielomianu Czybyszewa stopnia czwartego. Dane znacznie odbiegające od pozostałych, oznaczone rąbami, nie są brane pod uwagę w dopasowaniu.

mulacją sygnału z pojedynczych biasów. Efekt ten jest jednak na tyle niski, że nie będzie znacząco wpływał na wyniki redukcji widm.

4.2 Płaskie pole

Następnym krokiem redukcji danych jest uzyskanie średniego flat fieldu, tzw. *masterflata* z pojedynczych obrazów flat fieldów. Przedtem jednak każdy z nich musi przejść operację usunięcia obszaru overscanu i odjęcia jego od powstałego w ten sposób obrazu z danymi. Od każdego z tak spreparowanych flat fieldów należy odjąć otrzymany poprzednio średni bias z usuniętym obszarem overscanu, który mieści się w pliku `Zero.ot`. Operacje te można przeprowadzić w oparciu o dwa zadania: `flatcombine` oraz `ccdproc`.

Parametr `input` pierwszego zadania zostaje wypełniony listą plików flat fieldów, np. za pomocą `@file`. Plik wyjściowy z obrazem *masterflata* może zostać nazwany np. `Flat`. Parametr `combine` w tym przypadku będzie miał wartość `median`. Oznacza to, że będzie liczona nie średnia z wszystkich flatów, ale mediana, czyli wartość środkowa wszystkich możliwych wartości. Parametr `ccdtype` należy wypełnić wartością `flat`, co spowoduje,



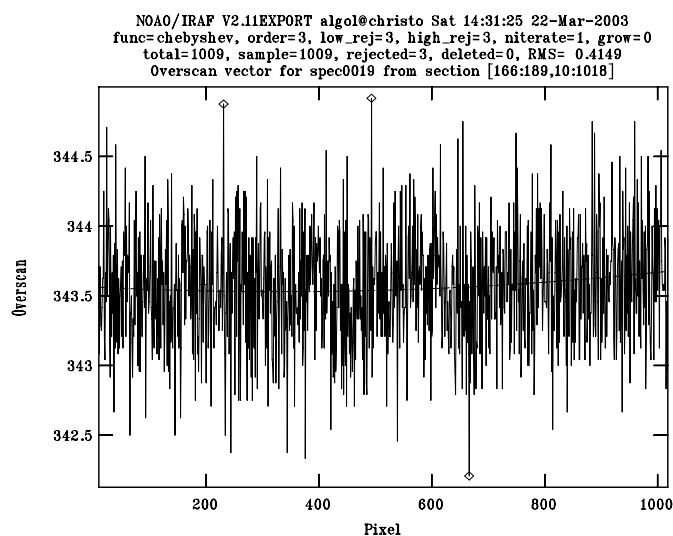
Rysunek 8: Wykres zadania `implot` ukazujący uśrednione linie od 1. do 1009. pliku biasu `Zero.ot`.

że obróbce poddane zostają jedynie pliki typu `flat`. Ważnym parametrem tego zadania jest `process`, który decyduje czy wejściowe pliki z obrazami mają zostać wcześniej przetworzone przez zadanie `ccdproc` przed przetworzeniem ich zadaniem `flatcombine`. W zadaniu `zerocombine` obrazy nie były wcześniej przerabiane przez `ccdproc`. Jednak w tym przypadku potrzeba najpierw poobcinać obrazy do rozmiarów `trim` i odjąć wektor `overscan` od obrazów płaskiego pola, a dopiero potem uśrednić obrazy `flatów` tworząc `masterflat`. Dlatego parametr `process` należy wypełnić wartością `yes`. Pamiętać należy także o odpowiednim wypełnieniu parametrów `rdnoise` i `gain`.

Przed samym uruchomieniem zadania `flatcombine`, należy jeszcze wypełnić odpowiednie parametry drugiego z zadań — `ccdproc`, które jest uruchamiane niejako w tle zaraz po uruchomieniu pierwszego z nich i nie musi być oddzielnie uruchamiane. Parametry określające nazwy plików wejściowych/wyjściowych można pozostawić puste, gdyż zadanie będzie operowało na plikach określonych w parametrach zadania `flatcombine`. Aby umożliwić przeprowadzenie korekcji na poziom zerowy, czyli odjęcie pliku ze średnim biasem `Zero.ot` należy zmienić wartość parametru `zerocor` na `yes`, oraz dodać nazwę tego pliku jako wartość parametru `zero`. Parametry odpowiadające za korekcję na over-

scan i trim powinny pozostać z wartościami `yes`, a także zakresy tych obszarów. Reszta parametrów zadania pozostaje bez zmian.

Z chwilą uruchomienia zadania `flatcombine`, zostaje początkowo uruchomione zadanie `ccdproc`, które obcina obszary overscanów, dopasowuje do ich średnich wartości z każdej linii wielomian, a następnie odejmuje jego wartości od każdej kolumny obrazu płaskiego pola. Operacja dopasowania wielomianu przeprowadzana jest na podstawie okna wykresu (Rysunek 9), analogicznie do omówionego wcześniej dopasowywania sygnału overscanu pochodzącego od obrazu średniego biasu `Zero`. Następnie zostaje także odjęty od każdego z nich przygotowany uprzednio, pozbawiony obszaru overscanu średni bias z pliku `Zero.ot`.



Rysunek 9: Okno wykresu po uruchomieniu zadania `flatcombine` — dopasowywanie wielomianu do wartości średnich overscanu przez zadanie `ccdproc`.

Na tym przetwarzanie danych przez `ccdproc` się kończy i następuje właściwe działanie zadania `flatcombine`, podobne nieco do działania `zerocombine`, a polegające na utworzeniu obrazu średniego flat fieldu, będącego właściwie medianą wszystkich składowych flatów. W zadaniu dopasowywano wielomiany Czybyszewa o rzędach 2 lub 3 w zależności od wartości `RMS`, która utrzymywała się w zakresie 0.4 (rysunek 4). Ostatecznie lista plików wzbogaciła się o plik `Flat` zawierający uśredniony, oraz pozbawiony zakresu over-

scanu masterflat:

```
Flat.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

Litery w ostatnim nawiasie oznaczają, że obraz przeszedł korekcję na overscan, trim, oraz poziom zerowy biasu. Takie same własności posiadają teraz także pliki pojedynczych flatów — wszak zostały one pozbawione obszaru overscan, odjęty został od nich poziom zerowy z pliku `Zero.ot`, tak że pozostał w nich jedynie obszar trim:

```
spec0018.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0019.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0020.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0021.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0022.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0023.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0024.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0025.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

```
spec0026.imh [159,1009] [real] [flat] [] [OTZ] :
```

Tak powstały obraz masterflata można następnie wyświetlić w przeglądarce DS9 za pomocą zadania `display`.

Następnym krokiem redukcji CCD jest normalizacja masterflata, co umożliwi następnie podzielenie przez niego obrazów widm gwiazd. Z uwagi jednak na skomplikowany wygląd flat fieldów wymaga ona zastosowania pewnych dodatkowych operacji.

4.2.1 Normalizacja obrazu płaskiego pola

Zastosowanie w obserwacjach matrycy CCD typu *back illuminated* powoduje powstanie na eksponowanych obrazach wielu niejednorodności związanych z interferencją światła pomiędzy obiema powierzchniami matrycy - *fringing*. Dlatego właśnie obrazy flat fieldów są tak bardzo niejednorodne. Efekt ten ma duży wpływ na zredukowane dane, dlatego podczas następnych kroków należy ograniczyć jego wpływ do minimum.

Operacja normalizowania obrazu *master flat* w przypadku silnego wpływu interferencji

polega na obliczeniu średniego przebiegu płaskiego pola wzdłuż śladu widma. Jeśli ślad eksponowanego na matrycy widma jest dokładnie równoległy do jej osi dyspersji, wtedy wystarczy uśrednić poszczególne piksele znajdujące się w liniach równoległych do osi przestrzennej matrycy. Otrzymuje się wtedy wektor średnich wartości pikseli w każdej linii, do którego można dopasować wielomian. Następnie dzieli się poszczególne kolumny pikseli płaskiego pola leżące wzdłuż osi dyspersji przez wartości dopasowanego wielomianu.

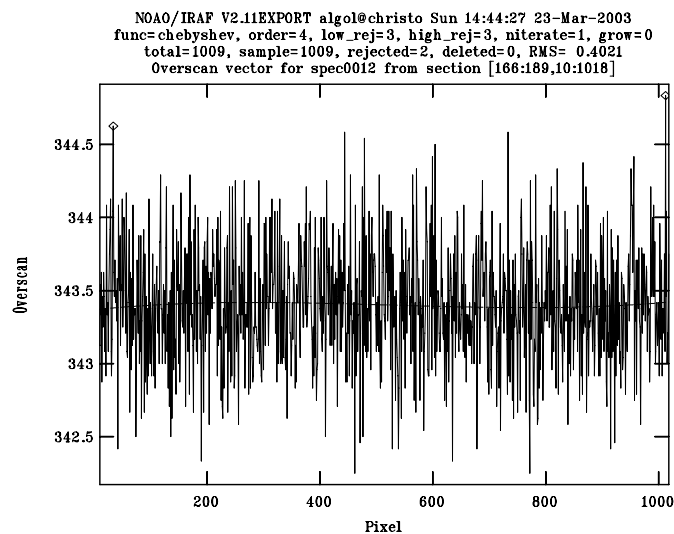
W ogólności jednak oś dyspersyjna jakiegokolwiek rejestrowanego widma nie musi być równoległa do osi dyspersji matrycy, dlatego jakakolwiek ekstrakcja, czyli sprowadzenie widma 2-wymiarowego do postaci 1-wymiarowej wymaga uwzględnienia przebiegu widma gwiazdy na powierzchni matrycy. Czyni się to wyznaczając tzw. *trace* (z ang. ślad) widma. Jest to dopasowana krzywa, która pokazuje przebieg maksimum widma na matrycy w funkcji fizycznych współrzędnych (rzęd, kolumna).

Obrazy płaskiego pola tworzą także obraz widm. Są to jednak widma ciągle pochodzące od lampy stosowanej w oświetlaniu jednorodnych powierzchni, za pomocą których tworzy się te obrazy. Dodatkowo wiadomo, że natężenie widma lampy nie będzie jednakowe wzdłuż osi dyspersji, gdyż widmo lampy używanej do flat fieldu przypominać powinno raczej widmo planckowskie.

Z reguły odchyłki położenia maksimum natężeń widm (śladu) na matrycy od linii będącej kolumną lub rzędem wynoszą zaledwie kilka pikseli na długości całej matrycy. W przypadku jednorodnych flat fieldów nie ma potrzeby dopasowywania na niej śladu widma, gdyż wkład ewentualnych błędów do uzyskanych na tej drodze wyników redukcji widm jest znikomy. Jeśli jednak wartości zliczeń na powierzchni matrycy na obrazach płaskiego pola ulegają dość znacznym zmianom na stosunkowo niewielkich obszarach, jak to jest w przypadku interferencji światła na matrycy, wtedy wpływ tych niejednorodności na uzyskane znormalizowane obrazy masterflata może być już znaczny i powinien zostać uwzględniony.

Tak jest właśnie w rozpatrywanym przypadku. Operację znalezienia śladu widma przeprowadzić można na podstawie wybranego widma jednej z badanych gwiazd, np. widma `spec0012`. Wcześniej jednak należy je wstępnie opracować. Podobnie jak w przypadku wcześniej opracowywanych obrazów musimy zmniejszyć obrazek do rozmiarów zdefinio-

wanych jako *trim section*, odjąć wektor *overscan* za pomocą zadania `ccdproc`. W parametrach zadania `ccdproc`, oprócz pliku wejściowego `spec0012` warto dla bezpieczeństwa wpisać także nazwę zmodyfikowanego przeprocesowanego pliku wyjściowego, np. `spec0012.1`. Parametry pozostające bez zmian to zakresy obszaru overscanu i trimu `biassec` i `trimsec`, oraz parametry włączające korektę na te obszary, czyli `oversca` i `trim`. W przypadku korekcji na średni bias, która uwzględniono w przeprowadzonej obróbce, należy także pozostawić wartość parametru `zerocor` na `yes`, oraz w wartości parametru `zero` wpisać nazwę pliku zawierającego średni bias, czyli `Zero.ot`. Po uruchomieniu zadania należy jedynie dopasować obszar overscanu w oknie wykresu (Rysunek 10).



Rysunek 10: Okno wykresu po uruchomieniu zadania `ccdproc` dla widma gwiazdy `spec0012` — dopasowanie wielomianu 4 rzędu do wartości średniej overscanu.

W wyniku działania zadania otrzymuje się spreparowane widmo gwiazdy gotowe do przeprowadzenia operacji znalezienia śladu:

```
spec0012.1.imh[159,1009][real][object][ ][OTZ]:V454 Aur
```

W ostatnim nawiasie kwadratowym widać, że obraz przeszedł pomyślnie korekcje na overscan, trim i poziom zerowy (bias). Widać także, że rozmiary obrazu uległy odpowiednio zmianie.

Następnym krokiem jest znalezienie śladu widma na tak przygotowanym obrazie. Prze-

prowadza się to w oparciu o zadanie `apall`, które jednocześnie sprowadza widmo z postaci dwu- do jednowymiarowej, czyli przeprowadza jego ekstrakcję.

Ślad widma na matrycy znajdujący jest jako krzywa na powierzchni matrycy odpowiadająca położeniom maksimum sygnału widma w kolejnych pikselach osi dyspersji. Idealnie widmo gwiazdy powinno być równoległe do osi dyspersji matrycy i wtedy śladem widma byłaby konkretna kolumna lub rząd matrycy z osi przestrzennej. W praktyce jednak występują drobne odchyłki od stanu idealnego i maksimum sygnału pochodzącego od widma zmienia swe położenie w osi przestrzennej. Spowodowane jest to bądź niedokładnością ustawień kamery CCD względem spektrografu bądź geometrią uzyskiwanego widma. Dlatego też konieczne jest znajdowanie śladu i jego opis za pomocą krzywej.

Po ustaleniu przybliżonego zakresu kolumn bądź linii na matrycy w którym według obserwatora znajduje się widmo (apertury) oraz określeniu rodzaju funkcji jaka ma być dopasowana do śladu widma IRAF samodzielnie znajduje ślad pozostając jednak w interakcji z osobą dokonującą redukcji.

Zmieniając rodzaj i stopień krzywej możemy interakcyjnie uzyskać zadowalający nas przebieg śladu widma kontrolując wyniki za pomocą liczonej za każdym razem dobroci dopasowania.

Po znalezieniu śladu każdy fragment widma odpowiadający jednemu elementowi dyspersyjnemu jest sumowany wzdłuż osi przestrzennej tak, by w jednowymiarowym widmie uzyskać cały sygnał pochodzący od widma rozproszony przez seeing. Sumowanie to odbywa się w różny sposób w zależności od wybranej przez obserwatora procedury oraz w różnym zakresie przestrzennym, także zdefiniowanym przez obserwatora. Istotnym elementem tej procedury jest określenie obszaru w osi przestrzennej, który zawiera sygnał pochodzący od tła nieba a nie od gwiazdy. Wartość sygnału pochodzącego od nieba po obu stronach widma, po uśrednieniu bądź dopasowaniu wybranej krzywej zostanie aproksymowana w punktach, w których zarejestrowane jest interesujące nas widmo i usunięta z ekstrahowanego widma.

Sumowanie sygnału w osi przestrzennej może odbywać się z wykorzystaniem dopasowania teoretycznego rozkładu oraz z modelowaniem szumu na podstawie informacji o wzmocnieniu i szumie odczytu kamery. W takim wypadku sumowanie odbywa się z

uwzględnieniem wag statystycznych proporcjonalnych do lokalnego stosunku sygnału do szumu w danym punkcie osi przestrzennej. Taka procedura nazywana jest ekstrakcją optymalną. Istnieje także możliwość ekstrakcji widma innymi, prostszymi procedurami.

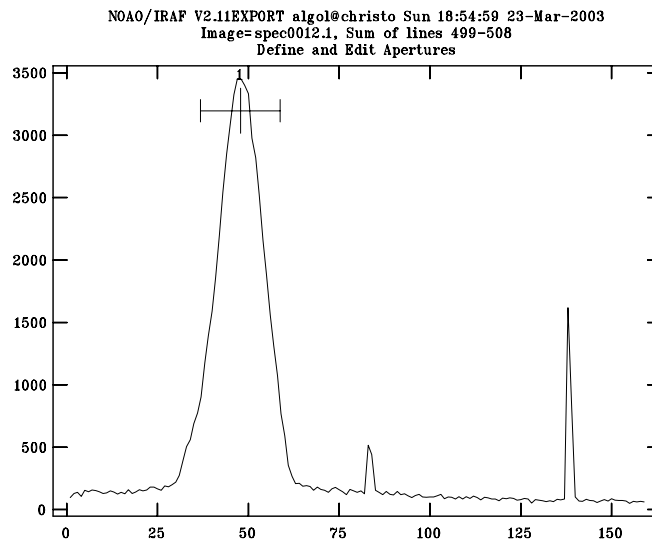
Po ekstrakcji widma każdemu punktowi śladu przyporządkowana jest liczba proporcjonalna do sygnału pochodzącego od źródła widma. Otrzymujemy tym sposobem widmo jednowymiarowe.

Parametry opisujące dopasowany ślad oraz parametry ekstrakcji widma zostają następnie zapisane domyślnie w katalogu `database` znajdującym się w katalogu z obrabianymi obrazami.

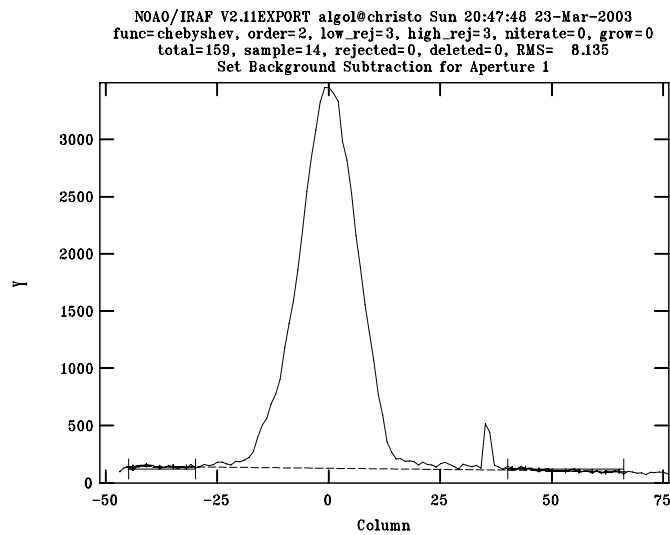
Parametr pliku wejściowego w zadaniu `apall` wypełniamy nazwą wybranego widma (`spec0012.1`), z którego obliczony zostanie ślad. Parametr `output` może pozostać pusty, wtedy wyjściowy plik domyślnie otrzyma dodatkowe rozszerzenie w zależności od wybranego przez nas formatu danych (np. `.ms` od *multispectra*). Następnie warto ustawić parametr `recente` i `resize` na `yes`. Spowoduje to, że dla innych prążków widma zadanie to będzie, o ile będzie to konieczne, przesuwało zadaną aperturę tak, aby zawsze większa część prążka znajdowała się wewnątrz apertury. Drugi parametr zmienia nieco rozmiary apertury tak, aby wartości sygnału na jej brzegach stanowił mniej więcej tę samą część wysokości całego prążka, co w wypadku pierwszej ustawionej ręcznie apertury. Wartość tej części ustala parametr `ylevel`, który domyślnie ma wartość 0.1. Aby móc edytować aperturę parametr `edit` musi mieć także wartość `yes`. Ważnym parametrem jest `trace`, który znajduje szukany ślad widma wzdłuż matrycy. W wypadku dopasowywania poziomu tła, czyli *background* należy wypełnić parametr `backgro` wartością `fit`. Lepszy efekt uzyskuje się jednak dla wartości środkowej (mediany) przypisując temu parametrowi wartość `median`. Dodatkowo `clean` można ustawić na `yes`, co spowoduje likwidowanie wpływu promieniowania kosmicznego. Pamiętać należy o odpowiednich wartościach parametrów `readnoi` i `gain`. Ostatni parametr `weights`, czyli wagi statystyczne dopasowanych punktów prążka należy ustawić na `variance`, co zapewnia optymalną ekstrakcję widma.

Po uruchomieniu zadania na wykresie okna pokazana jest pewna linia widma `spec0012.1` ukazująca tło i prążek widma, oraz przykładową aperturę. Lepiej jest jednak dopasować ręcznie aperturę ustawiając jej dolny i górny zakres przy pomocy klawiszy `L` i `U`, co poka-

zuje Rysunek 11.



Rysunek 11: Okno wykresu po uruchomieniu zadania `apall` dla widma gwiazdy `spec0012`. Widoczna suma linii 499–508.



Rysunek 12: Okno wykresu po uruchomieniu zadania `apall` dla widma gwiazdy `spec0012`. Widoczna suma linii 499–508.

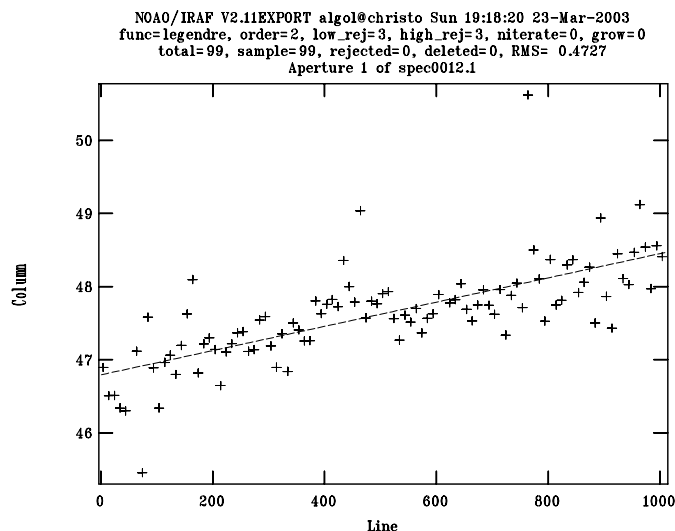
Następnie zaznaczyć należy zakres tła, które zostanie odjęte od widma gwiazdy przez

naciśnięcie klawisza **B**. Ukazuje się wykres pokazujący automatyczne dopasowanie. Należy je jednak zmienić ustawiając zakresy po obu stronach widma tak, aby wkład ich skrzydeł nie był istotny. Zakres domyślny kasuje się naciskając klawisz **T**. Nowe zakresy zaznacza się przez parokrotne naciskanie klawisza **s** tyle razy, ile punktów stanowiących początki i końce zakresów potrzeba zaznaczyć. Następnie nacisnąć należy przycisk **F** aby zaakceptować podane zakresy, oraz w celu ewentualnego dopasowania poziomu tła (Rysunek 12). Można również zmienić rząd dopasowywanego wielomianu postępując analogicznie jak w przypadku innych zadań. Następnie opuszcza się procedurę dopasowywania tła przez przycisk **Q** i wraca do wykresu z aperturą. Ponowne naciśnięcie poprzedniego klawisza powoduje wyświetlenie serii zapytań o wykonanie śladu widma, jego interaktywne dopasowanie. Domyślnie są one ustawione na **yes**, więc wystarczy po prostu naciskać klawisz **Enter**. W oknie wykresu pokazuje się zbiór punktów i dopasowana przykładowa krzywa, domyślnie rzędu drugiego (Rysunek 13) w przestrzeni linii vs kolumny matrycy. Widać tu, że ślad widma faktycznie nie jest równoległy do kolumn, lecz przebiega ukośnie od 47 do 49 kolumny. Wykres śladu można oglądać w różnych postaciach, które przełącza się klawiszami **J** (rezidua wykresu), **K** i **L**. Powrót na pierwszy wykres (linie vs kolumny) następuje po naciśnięciu **H**.

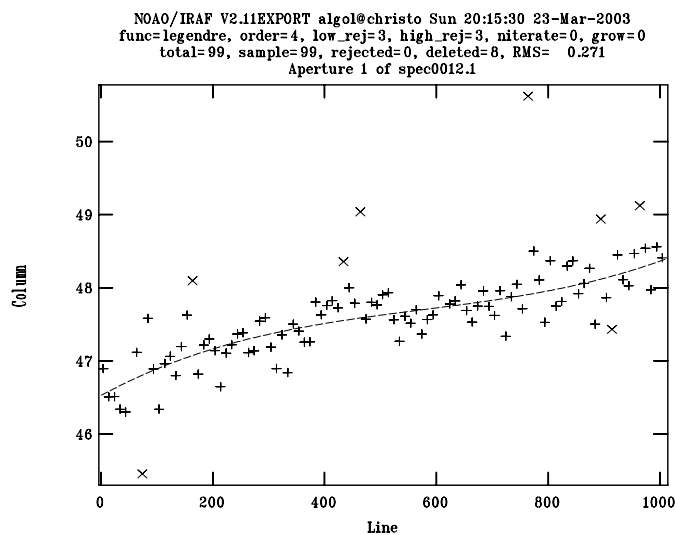
Na wykresie widać kilka punktów, które znacznie odstają od średniego trendu. Można je skasować zbliżając do nich kursor myszy i naciskając **D**. Naciśnięcie klawisza **F** powoduje uwzględnienie tej operacji i dopasowanie krzywej do punktów z wyłączeniem punktu skasowanego. Przywrócenie skasowanych punktów następuje po zbliżeniu doń kursora i naciśnięciu klawisz **U**. Można także dopasować wyższy rząd wielomianu. Wszystkie te operacje należy kontrolować poziomem wartości odchylenia standardowego **RMS** w oknie wykresu.

Ostatecznie dobre dopasowanie otrzymano dla rzędu 4-tego kasując 8 punktów (Rysunek 14). Poziom **RMS** wyniósł 0.271.

Następnie należy nacisnąć klawisz **Q**. Na dole wykresu pojawiają się pytania czy zapisać tak dopasowany ślad do katalogu **database**, czy dokonać ekstrakcji takiej apertury i inne, które domyślnie są ustawione na **yes**. W konsekwencji otrzymujemy obraz widma w 1 wymiarze (Rysunek 15).

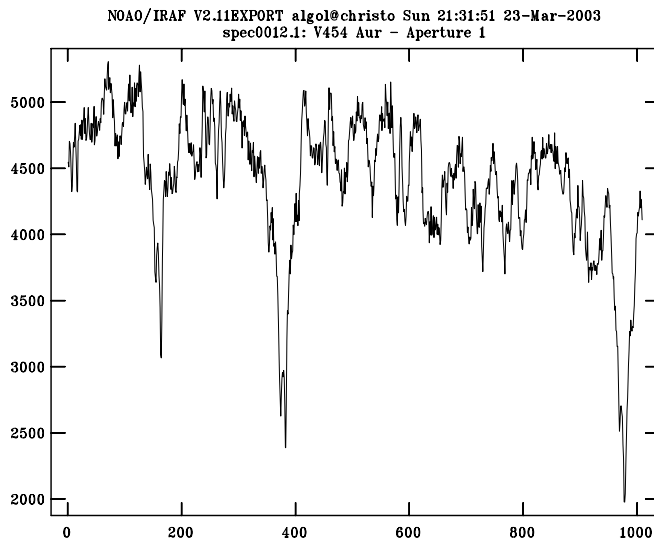


Rysunek 13: Okno wykresu zadania `apall` w momencie wyświetlenia surowego dopasowania śladu widma gwiazdy z pliku `spec0012.1`.



Rysunek 14: Okno wykresu dopasowania śladu widma `spec0012.1` w zadaniu `apall`. Punkty nieuwzględniane w dopasowaniu oznaczone są na wykresie symbolami `x`.

Widać na nim wyraźnie wpływ niejednorodności spowodowanych nieuwzględnieniem flat fieldu. Wyjście z zadania następuje po wciśnięciu `Q`. W wyniku tego powstaje plik z roz-



Rysunek 15: 1-wymiarowe widmo gwiazdy `spec0012.1.ms` bez korekcji flat fieldu.

szerzeniem `.ms`, który jest widmem gwiazdy z pliku `spec0012.1` w jednym wymiarze pozbawiony korekcji na flat field:

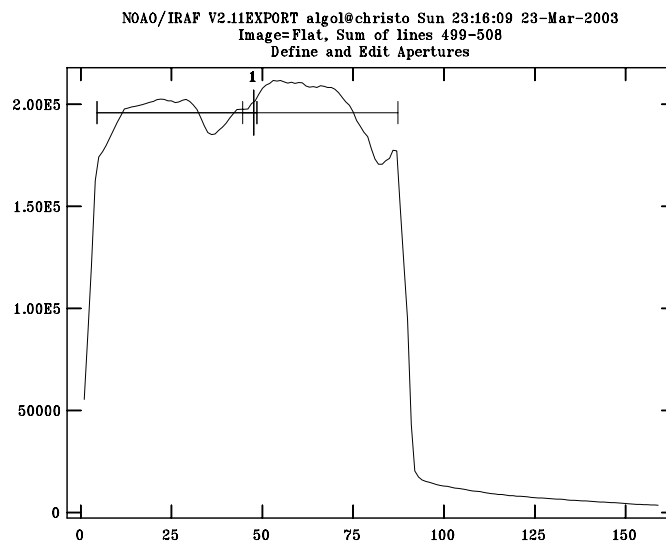
```
spec0012.1.ms.imh [1009,1] [real] [object] [] [OTZ]:V454 Aur
```

oraz odpowiednie pliki w katalogu `database`, w których znajdują się parametry śladu i ekstrakcji widma.

Kolejnym krokiem jest właściwe znormalizowanie masterflata `Flat` za pomocą zadania `apnormalize`, przy uwzględnieniu śladu widma gwiazdy `spec0012.1` zawartego w `database`. W parametrze `input` wpisać trzeba nazwę pliku z masterflatem, tzn. `Flat`. Parametr `output` można pozostawić pusty — domyślnie powstanie plik `Flat.norm` zawierający znormalizowany masterflat. W parametrze `referen` należy wpisać nazwę pliku widma, z którego dopasowano ślad i którego parametry zapisane zostały w `database`. To właśnie według tego śladu widma będzie normalizowany masterflat, dlatego także parametr `trace` powinien być ustawiony na `no`, co uniemożliwi dopasowywanie śladu w tak niejednorodnym flat fieldzie. Parametry `find` i `recente` ustawić należy na `no`, aby nie były szukane apertury i aby zadanie nie przesuwało centrum apertury względem znalezionego śladu widma. Aby móc edytować aperturę ręcznie w oknie wykresu, należy wypełnić

parametr `edit` wartością `yes`. Także `resize` może mieć wartość `yes`, co skutkuje jedynie niewielkimi poprawkami w szerokości zadanej apertury. Poza tym parametry `backgro` oraz `weights` należy ustawić na `none`, ażeby nie było odejmowane tło i aby każdy punkt w zadanej aperturze wchodził z jednakową wagą. Również parametr `clean` ustawić można na `no`. Wartość `order` wystarczy przyjąć równą 1, co spowoduje dopasowanie funkcji 1-go rzędu.

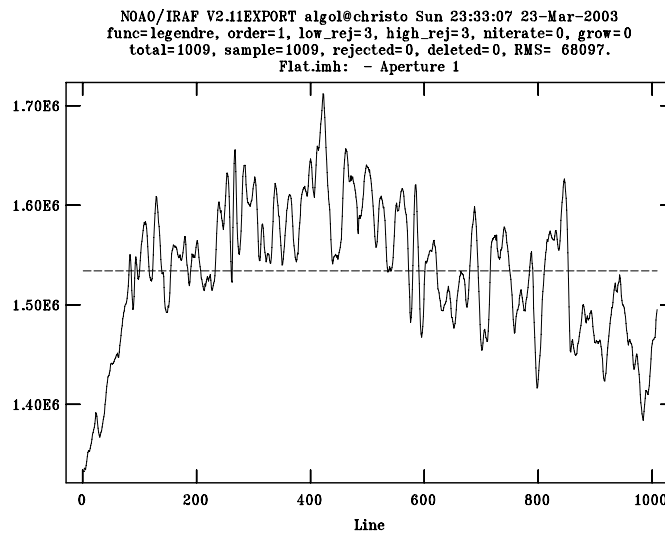
Po uruchomieniu zadania IRAF wyświetla kilka pytań, których odpowiedzi domyślnie są ustawione na `yes` i przechodzimy przez nie wciskając `Enter`. W oknie wykresu wyświetla się zsumowany po kilku liniach profil masterflata z zaznaczoną aperturą. Należy ją poszerzyć zmieniając odpowiednio zakresy używając tych samych klawiszy, co w zadaniu `apall`. Zakresy te powinny pokrywać te obszary flat fieldu, gdzie zaczyna się wypłaszczenie przebiegu natężenia tak, aby nie uwzględniać zbyt słabego sygnału (Rysunek 16).



Rysunek 16: Ustalanie apertury masterflata w zadaniu `apnormalize` dla sumy kilku linii obrazu Flat.

W tym wypadku nie przechodzimy do okna dopasowania tła, gdyż w normalizowaniu masterflata nie jest ono odejmowane. Po naciśnięciu `Q` zadanie pyta się m. in. o zapisanie parametrów apertury, znormalizowanie i dopasowanie krzywej znormalizowanego

flat fieldu `Flat`. Wszystkie one są domyślnie ustawione na `yes`, co nas satysfakcjonuje, przechodzi się je naciskając `Enter`. Na wykresie zostaje ostatecznie wyświetlony obraz jednowymiarowy uśrednionego po liniach profilu masterflata (Rysunek 17). Jest to przebieg nie wzdłuż kolumn matrycy CCD, ale wzdłuż śladu widma znalezionej na podstawie gwiazdy `spec0012.1`. Przebieg ten można by dopasować krzywą typu `polynomial` albo jedną z typu krzywych „sklejanych” `spline` o wyższym rzędzie, jednak w tym przypadku wystarczające jest pozostawienie dopasowania wielomianem 1-go rzędu.

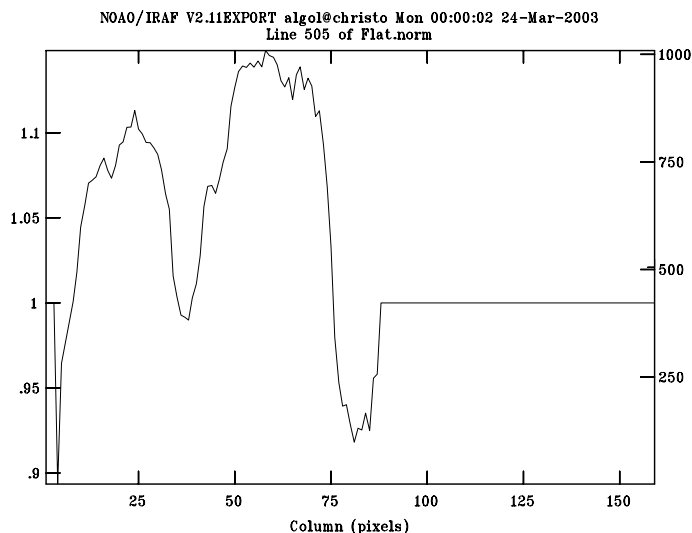


Rysunek 17: Dopasowany przebieg wzdłuż śladu widma uśrednionego po liniach masterflata.

Przez tak otrzymany dopasowany średni przebieg masterflata wzdłuż śladu widma zadanie `apnormalize` dzieli obraz masterflata `Flat`, a w wyniku otrzymuje się znormalizowany masterflat `Flat.norm`:

```
Flat.norm.imh[159,1009][real][flat][ ][OTZ]:
```

Przy pomocy zadania `implot` można dokonać sprawdzenia poprawności normalizacji masterflata. Pomóc może także wyświetlenie obrazu `Flat.norm` w oknie DS9. Na Rysunku 18 widać, że wartości flata oscylują poprawnie w pobliżu wartości 1. Dopiero taki obraz flat fieldu nadaje się do podzielenia przez niego widma gwiazdy.

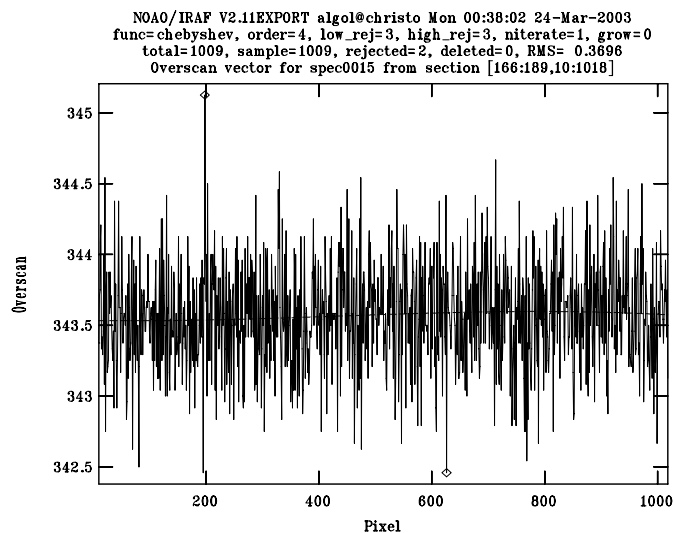


Rysunek 18: Wykres sygnału 505. linii znormalizowanego masterflata `Flat.norm` w zadaniu `implot`.

4.3 Korekta obrazów z widmami gwiazd na overscan, bias i płaskie pole.

Redukcję w tym zakresie przeprowadza się w oparciu o zadanie `ccdproc`, podobnie jak w przypadku obrazów biasów i flat fieldów. Ponieważ plik `spec0012.1` służył jedynie do wyznaczenia śladu widma, dlatego można go usunąć razem z plikiem `spec0012.1.ms`. W drodze redukcji zostaną utworzone nowe pliki z uwzględnioną korekcją flata. W parametrze `input` zadania umieścić należy nazwy plików z widmami gwiazd albo `@file`. Pusty parametr `output` spowoduje nadpisanie starych plików. Wśród parametrów zadania należy, oprócz `oversca`, `trim` i `zerocor`, także parametr `flatcor` ustawić na `yes`, co spowoduje włączenie korekcji na znormalizowany masterflat, czyli po prostu podzielenie obrazu przez znormalizowany flat field `Flat.norm`, którego nazwę trzeba jeszcze wpisać jako parametr `flat`.

Po uruchomieniu zadania należy dopasować na wykresie uśrednione po liniach obszary overscanów dla każdego z widm (Rysunek 19). Po każdym dopasowaniu należy naciskać klawisz `Q`, aby przejść do dopasowywania overscanu następnej gwiazdy.



Rysunek 19: Okno wykresu dopasowywania przebiegu overscanu dla gwiazdy `spec0015` w zadaniu `ccdproc`.

Dopasowywano krzywe różnych rzędów, od stopnia 2-go, do 4-go, przy czym poziom RMS utrzymywał się wokół wartości 0.4. Działanie zadania modyfikuje pliki widm gwiazd:

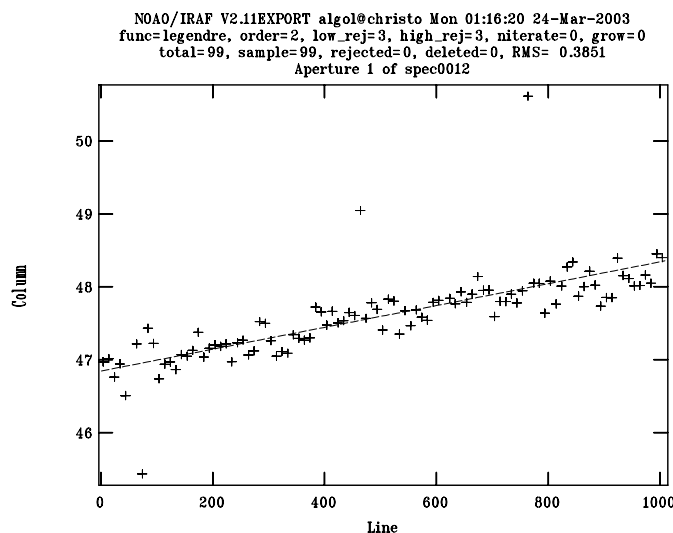
```
spec0012.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:V454 Aur
spec0013.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:V454 Aur
spec0014.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:GT UMa
spec0015.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:GT UMa
spec0016.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:GT UMa
spec0017.imh[159,1009][real][object][][OTZF]:Beta Vir
```

Widać stąd, że wszystkie z obrazów przeszły pomyślnie korekcję na overscan, trim, bias oraz flat field. Są one teraz gotowe do procesu ekstrakcji jednowymiarowego widma.

4.4 Ekstrakcja widma 1-wymiarowego gwiazd i lampy porównania

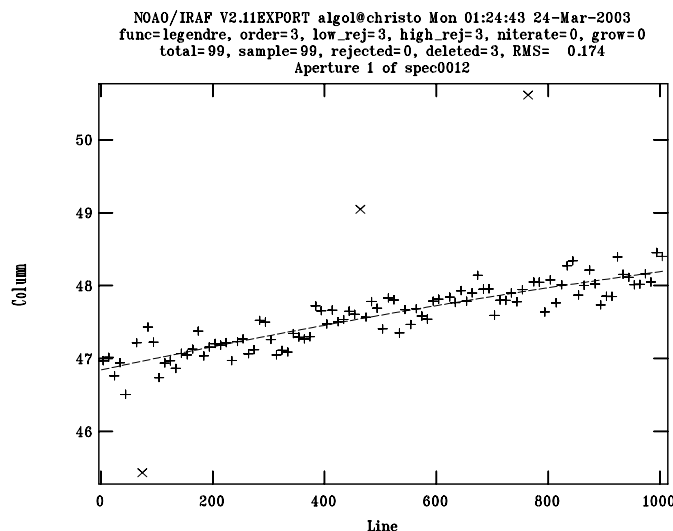
Ekstrakcję przeprowadza się na podstawie tego samego zadania, którego już używaliśmy do znalezienia śladu widma gwiazdy `spec0012` czyli za pomocą `apall`. Należy jedynie zmienić wartość parametru `input` na `@file` z nazwami wszystkich widm gwiazd. Wartości parametrów `backgro`, `weights` i `clean` należy ustawić odpowiednio na `median`, `variance` i `yes`) z tych samych powodów, jak w przypadku znajdowania śladu widma w procesie normalizacji.

Po wywołaniu zadania należy dla każdego widma wyznaczyć aperturę i zakres odejmowanego następnie tła, a następnie dopasować krzywą śladu widma dla każdej z redukowanych gwiazd, analogicznie jak podczas uruchamiania tego zadania przy normalizacji `flat fieldu`.



Rysunek 20: Dopasowanie śladu apertury funkcją 2-go rzędu w widmie gwiazdy `spec0012`.

Na Rysunku 20 przedstawiono przykładowe dopasowanie śladu apertury funkcją 2-go rzędu. Widać, że dzięki uwzględnieniu `flat fieldu` ochyłki pozycji maksimum każdego prążka uległy znacznemu zmniejszeniu, a odchylenie standardowe osiąga wartość 0.3851. Po usunięciu 3 punktów odstających znacznie od średniego trendu wartość `RMS` zmniejszyła się do

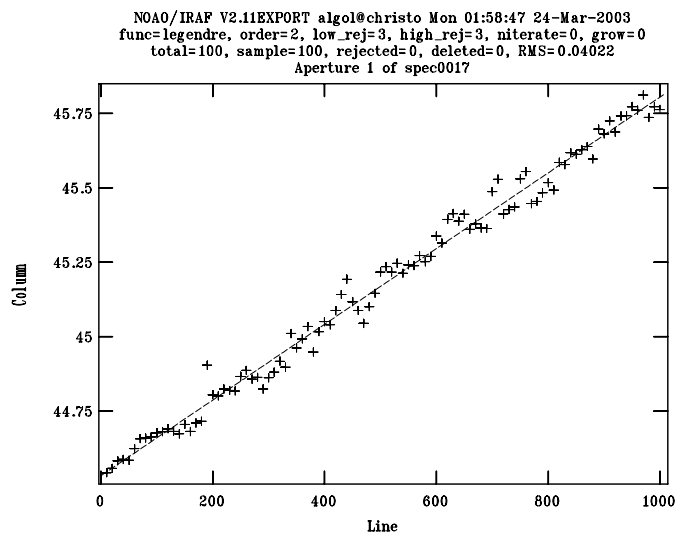


Rysunek 21: Ślad apertury w widmie gwiazdy `spec0012` dopasowany wielomianem 3 rzędu po usunięciu trzech punktów (symbole `x`).

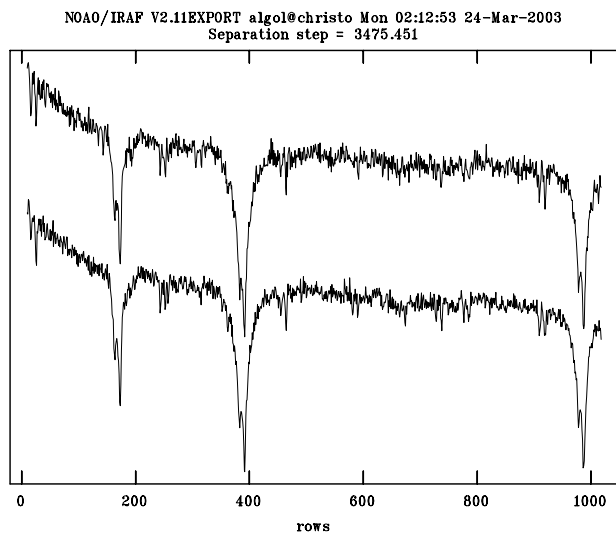
0.1756! Po zmianie rzędu na 3 jej wartość spadła do 0.174 (Rysunek 21). W dopasowaniach śladów w następnych widmach stosowano rzędy od 2 do 4, a poziomy RMS zawierały się w przedziale od około 0.03 do około 0.04 w przypadku widma gwiazdy `spec0017` (Rysunek 22).

Seria następnych Rysunków (od 23 do 25) pokazuje wygląd widm poszczególnych gwiazd w jednym wymiarze po dopasowaniu śladu każdego z nich i ekstrakcji apertury. Widma umieszczone na jednym wykresie należą do tej samej gwiazdy. Dwa pierwsze wykresy zostały sporządzone przy użyciu zadania `specplot` umożliwiającym umieszczenie większej ilości widm na jednym wykresie. Siłą rzeczy pozbawione zostały one pionowej skali natężeń. Wykres gwiazdy β Vir można uzyskać dzięki zadaniom `implot`, albo `splot`, będącym zadaniem służącym do bardziej zaawansowanego analizowania widm.

Po ekstrakcji widm gwiazd trzeba także dokonać ekstrakcji widma lampy porównania, którą przeprowadza się tym samym zadaniem `apall`. Ponieważ jednak widmo lampy nie zostało poprawione na overscan, trim i poziom zerowy, więc należy go najpierw obrobić za pomocą zadania `ccdproc`. W tym wypadku niepotrzebna jest korekcja na flat field, gdyż sama lampa porównania jest tak jasna, że wystarczają bardzo krótkie ekspozycje, któ-

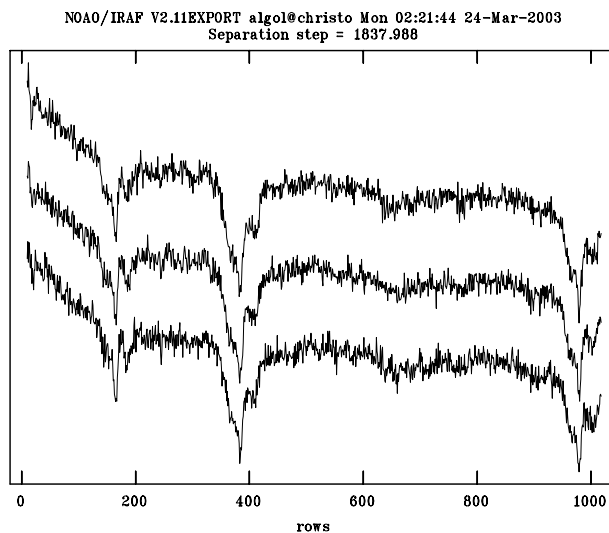


Rysunek 22: Ślad apertury gwiazdy *spec0017*. Zwraca uwagę bardzo niski poziom odchylenia standardowego RMS przy dopasowaniu krzywej 2 rzędu.

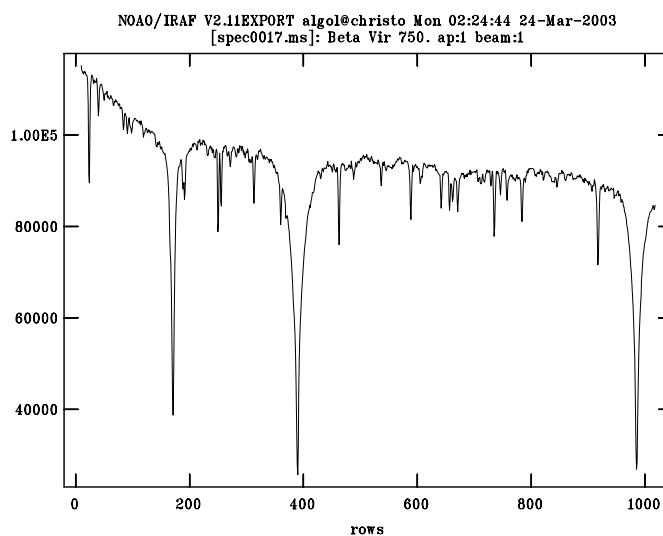


Rysunek 23: Wykres przedstawiający widma gwiazdy *V454 Aur* po zabiegu ekstrakcji. Widmo górne należy do pliku *spec0013.ms*, a dolne do *spec0012*.

re właściwie nie powodują niejednorodności spowodowanych interferencją na powierzchni matrycy. Stąd parametr `flatcor` ustawić należy na `yes`, a wartość `flat` pozostawić pu-

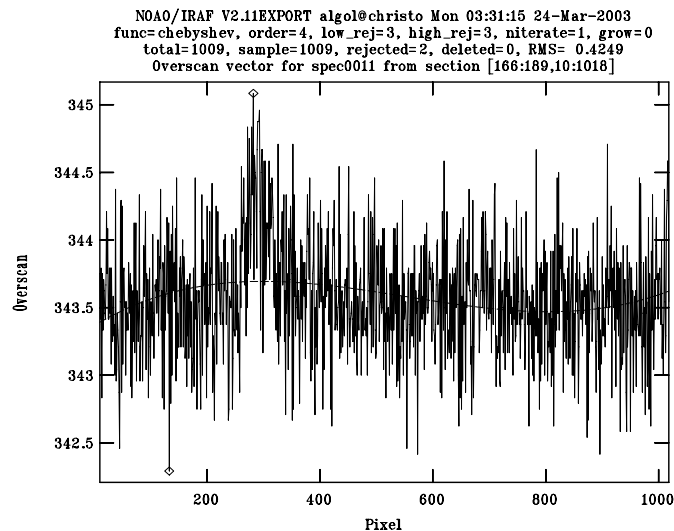


Rysunek 24: Wykres trzech widm gwiazdy *GT UMa* po ekstrakcji. Wyraźnie widoczny jest znaczny udział szumu w widmach. Górne widmo pochodzi z pliku `spec0016.ms`, środkowe z `spec0015.ms`, a dolne z pliku `spec0014.ms`.



Rysunek 25: Widmo gwiazdy β Vir uzyskane przy pomocy zadania `implot` z pliku `spec0017.ms`, odznaczające się najlepszym stosunkiem sygnału do szumu.

stą. Po dopasowaniu krzywej odpowiedniego rzędu do overscanu (Rysunek 26) plik widma lampy ulega modyfikacji:



Rysunek 26: Okno wykresu dopasowania krzywej 4 rzędu do overscanu widma lampy porównania spec0011.

```
spec0011.imh[159,1009][real][comp] [] [OTZ]:
```

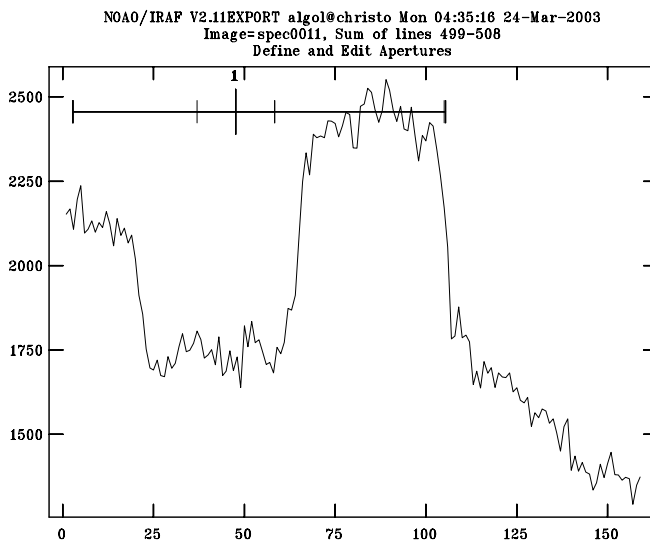
Teraz można wypełnić parametry zadania `apall`. Aby sumowanie sygnału apertury odbywało się wzdłuż śladu widma gwiazd należy w wartość parametru `referen` wpisać nazwę któregoś z widm gwiazd, np. `spec0012`, a także wypełnić parametr `trace` wartością `no`. Plik wejściowy to oczywiście plik widma lampy porównania `spec0011`. Nie wolno w tym wypadku odejmować poziomu tła, dlatego `backgro` ustawić można na `none`, podobnie parametr `clean` ustawić najlepiej na `no`. `weights` można ustalić na `variance` dla sumowania w aperturze według wag. Po uruchomieniu zadania pojawiają się pytania, m. in.:

```
Recenter apertures for spec0011? (yes):
```

```
Resize apertures for spec0011? (yes):
```

Domyślnie ustawione są one na `yes`, ale ponieważ sumowanie następuje po śladzie wid-

ma i mamy dwa prążki widma lampy porównania, musimy odpowiedzieć na oba no. W procesie edycji należy zaznaczyć zakresy apertury tak, aby obejmowały one oba widma lampy równocześnie (Rysunek 27)¹.

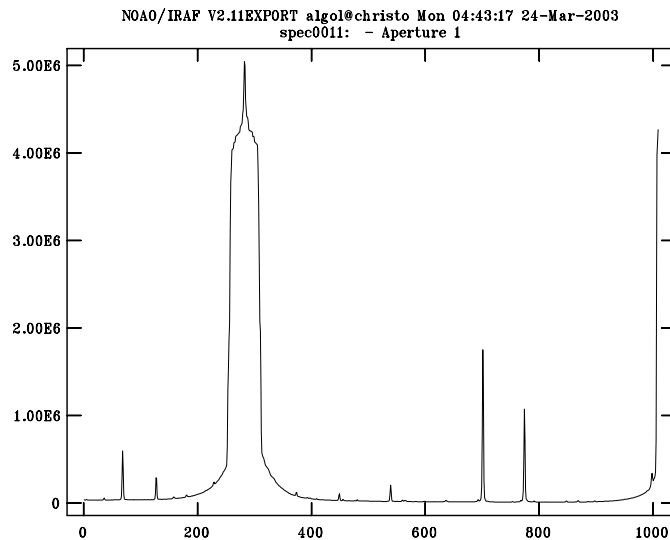


Rysunek 27: Wykres zadania `apall` przedstawiający edycję zakresu apertury dla dwóch prążków widma lampy porównania `spec0011`.

Tło nie jest w tym wypadku dopasowywane. Klawiszem `Q` opuszcza się edycję i na dalsze pytania należy odpowiadać `yes`, albo naciskając `Enter`. Ostatecznie otrzymuje się 1-wymiarowe widmo lampy porównania przedstawione na rysunku 23:

```
spec0011.ms.imh[1009,1][real][comp][ ][0TZ]:
```

¹W omawianych widmach z Rozhena lampa z widmem porównania wykonuje na matrycy nie jedno widmo jak na Rysunku 5 lecz dwa równoległe. Każde z nich posiada zatem inny ślad, którego konkretny przebieg nas jednak nie interesuje. Stąd taka właśnie procedura ich redukcji

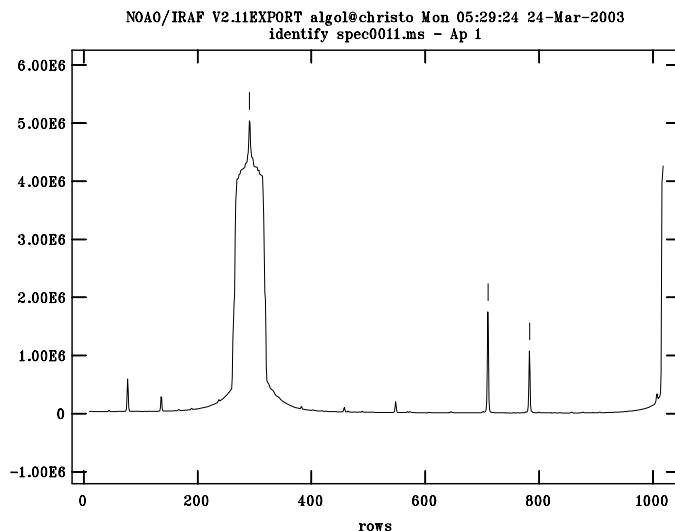


Rysunek 28: 1-wymiarowe idmo lampy porównania z pliku `spec0011.ms`.

4.5 Identyfikacja linii lampy porównania i wykreślenie widm w długościach fali

Identyfikacja linii przeprowadza się na pliku jednowymiarowego widma lampy porównania. Task uruchamiany do tego celu nazywa się `identify`. W jego parametrach należy wpisać na wejściu nazwę pliku widma lampy z rozszerzeniem `.ms`. Ponieważ w obserwacjach wykorzystywana była lampa torowo–argonowa (Th-Ar), dlatego należy w miejscu parametru `coordli` wpisać odpowiednią ścieżkę dostępu do pliku bazy danych IRAF-a, zawierający atlas linii takiej lampy. Wartość tego parametry powinna być postaci `linelists$thar.dat`. Lampa użyta w obserwacjach generuje linie emisyjne, więc parametr `ftype` ustawiony musi być jako `emission`. Uruchomienie zadania powoduje wyświetlenie okna wykresu z widmem lampy. Klawiszem `M` zaznacza się wybraną linię do identyfikacji, a następnie wpisuje się znaną długość fali, po czym naciska `Enter`. W celu podglądu poszczególnych części widma użyteczne może okazać się wciśnięcie klawisza `W`, a następnie najechanie kursorem na interesujący obszar i wciśnięcie jednego z klawiszy `T`, `B`, `J` lub `K`, co odpowiada kolejno ustaleniu górnej, dolnej, lewej lub prawej krawędzi obrazu. Wymagane jest, by przynajmniej trzy linie były zidentyfikowane ręcznie. Wtedy

reszta linii jest zidentyfikowana automatycznie przez IRAFa na podstawie tabeli określonej w `coord1i`. Na podstawie otrzymanych obrazów widma lampy torowo–argonowej zidentyfikowano trzy najsilniejsze linie 8521.4422, 8605.7762 oraz 8620.4602Å (Rysunek 29).

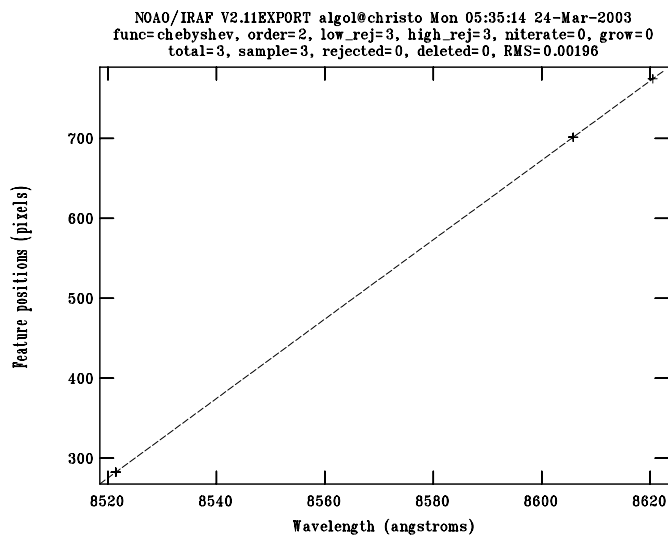


Rysunek 29: Task `identify`. Zidentyfikowane ręcznie trzy linie w widmie lampy `spec0011.ms`.

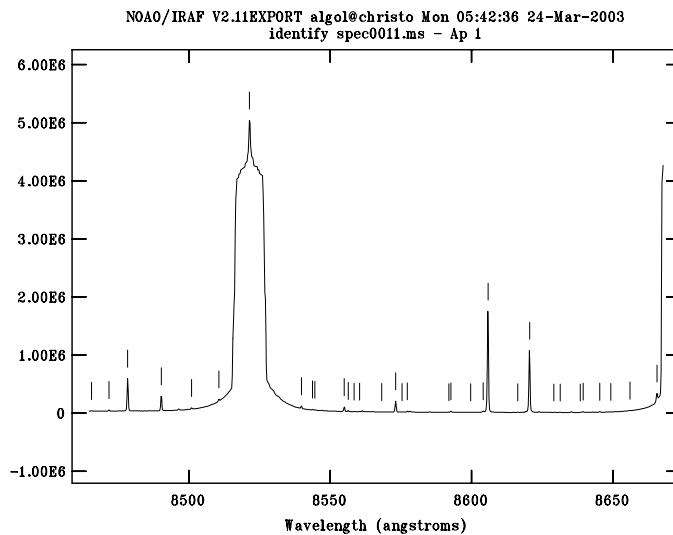
Po naciśnięciu klawisza F następuje dopasowanie wielomianu 2-go stopnia krzywej dyspersji na podstawie trzech zidentyfikowanych linii (Rysunek 30). Powrót do wykresu widma następuje po naciśnięciu Q. Teraz można spróbować identyfikacji automatycznej na podstawie bazy danych jakimi dysponuje pakiet IRAF. Identyfikację automatyczną włącza się przez klawisz L (Rysunek 31).

Aby jednak sprawdzić dokładność dopasowania należy wrócić do okna dopasowania krzywej dyspersji. Widać (Rysunek 32), że dopasowanie nawet wielomianu 2-go rzędu jest dość dobre, gdyż odchylenie standardowe osiąga wartość tylko 0.106. Aby zakończyć działanie zadania wystarczy nacisnąć Q. Następuje wtedy zapisanie danych o zidentyfikowanych liniach w katalogu `database`.

Kolejną rzeczą jest przedstawienie widma gwiazd w długościach fali na podstawie zidentyfikowanych linii i wyznaczonej krzywej dyspersji, której parametry znajdują się w katalogu `database`. Służy do tego zadanie `dispcor` (od *dispersion correct* — czyli korekcji

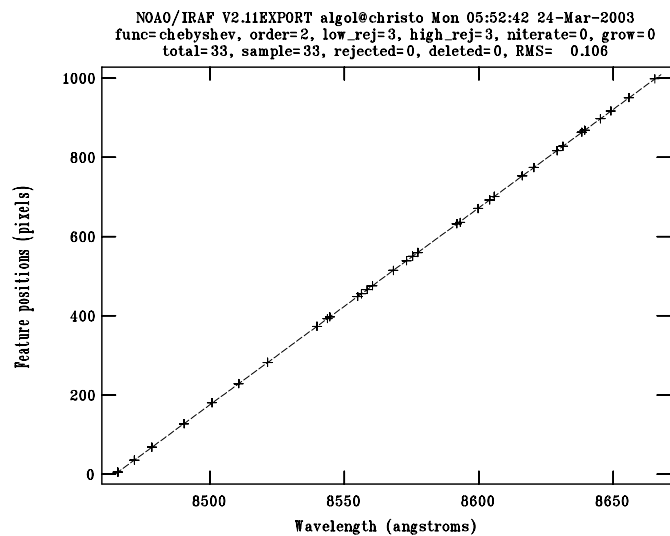


Rysunek 30: Wykres krzywej dyspersji dla trzech zidentyfikowanych linii w widmie lampy spec0011.ms.

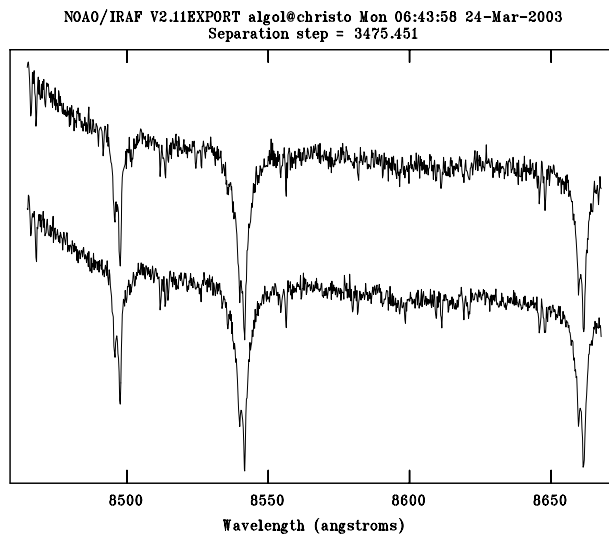


Rysunek 31: Automatyczna identyfikacja linii lampy w zadaniu identify.

widma pod względem dyspersji). Warto ustawić parametr `output` zadania jako `@file` z listą nazw plików z rozszerzeniem `ms.wv`, aby zabezpieczyć w ten sposób pliki wejściowe `*.ms` przed nadpisaniem.



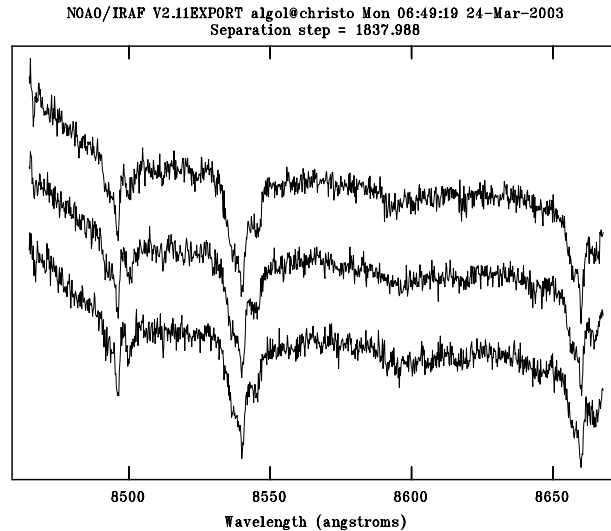
Rysunek 32: Identyfikacja automatyczna pozostałych linii w widmie lampy torowo-argonowej spec0011.ms.



Rysunek 33: Widmo gwiazdy *V454 Aur* wyskalowane w długościach fali na podstawie plików odpowiednio z góry na dół spec0013.ms.wv i spec0012.ms.wv.

Task `dispcor` działa na widmach gwiazd i decyduje jaka krzywa dyspersji ma być zastosowana do konkretnej gwiazdy potrafi podjąć samodzielnie zgodnie z określonymi przez

obserwatora regułami. Może to być np. kolejność obserwacji danej nocy (JD) albo odległość zenitalna. Następnie dopiero szukane są parametry krzywej dyspersji w katalogu `database` i przeprowadzana redukcja długości fali. `Dispcor` może także używać dwóch krzywych dyspersji nadając im określone wagi jeśli mamy powody przypuszczać, że rozwiązanie to poprawi jakość wyników.

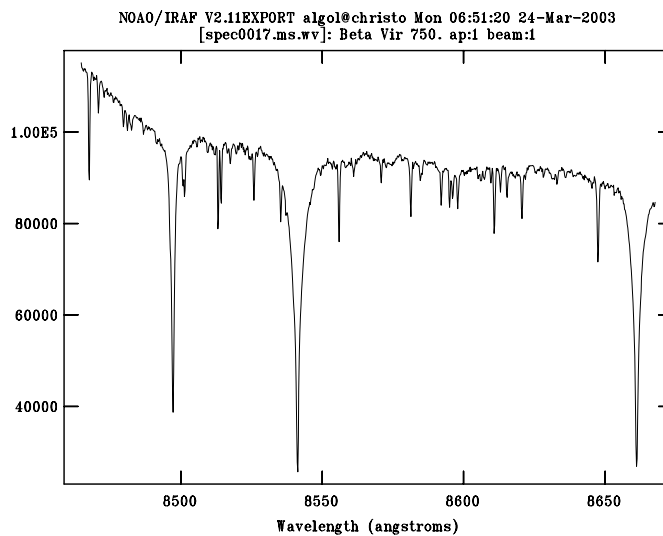


Rysunek 34: Widmo gwiazdy *GT UMa* wyskalowane w długościach fali na podstawie plików odpowiednio z góry na dół `spec0016.ms.wv`, `spec0015.ms.wv` i `spec0014.ms.wv`.

Aby `dispcor` mógł tak działać niezbędne są odpowiednie informacje zawarte na nagłówkach FITS. Niestety, w praktyce informacji tych często brakuje. Ponieważ w nagłówkach FITS rozpatrywanych widm gwiazd nie ma odpowiednich informacji do nagłówków plików z wyredukowanymi widmami interesujących nas gwiazd należy wpisać nazwy plików z właściwymi krzywymi dyspersji ręcznie za pomocą zadania `hedit` służącego do edytowania nagłówków (z ang. *header edit*). Przykładowo dla pierwszego z widm `spec0012.ms` poprawna składnia wprowadzająca informację o widmie referencyjnym lampy do nagłówka pliku ma postać:

```
hedit spec0012.ms REFSPEC1 spec0011.ms add+ ver-
```

Operację tę należy wykonać dla każdego z widm gwiazd. Dopiero po wykonaniu tej czynności można uruchomić zadanie `dispcor`.

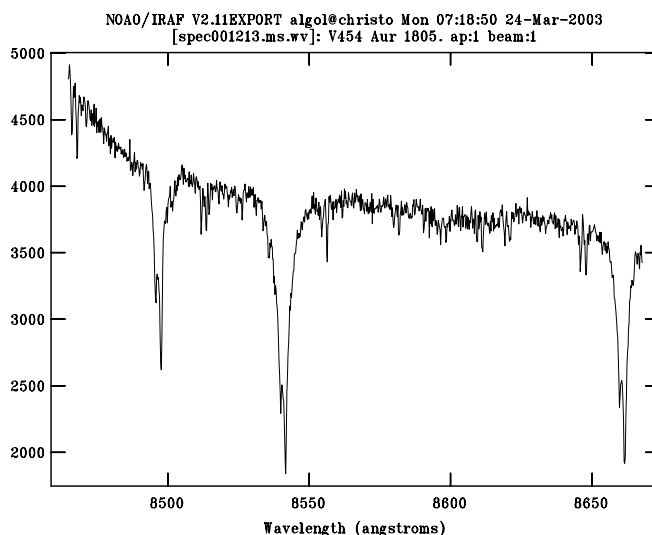


Rysunek 35: Widmo gwiazdy β Vir wyskalowane w długościach fali na podstawie pliku `spec0017.ms.wv`.

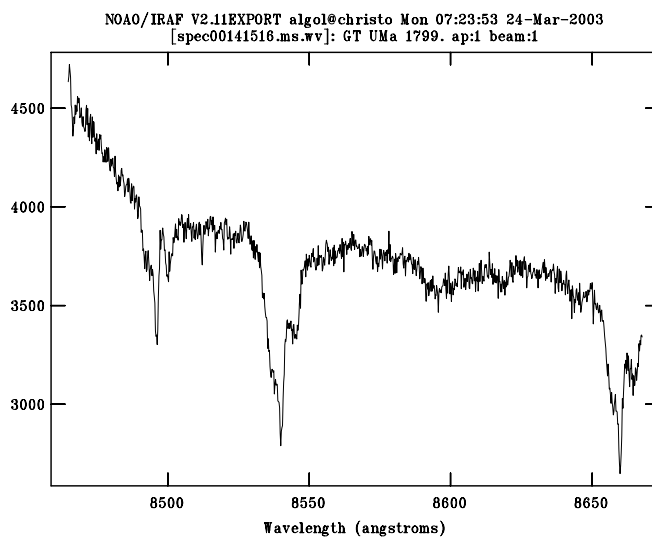
Uruchomienie jego spowoduje uwzględnienie przebiegu krzywej dyspersji i utworzenie plików widma 1-wymiarowych w długościach fal. Pliki te mają rozszerzenie `.ms.wv`, dla odróżnienia od plików widm niewyskalowanych w długościach fal. Aby wyświetlić widma gwiazd w długościach fali można posłużyć się zadaniem `specplot`, albo `splot`. Na Rysunkach 32–34 przedstawiono widma poszczególnych gwiazd, analogicznie jak na rysunkach 23–25 lecz już w skali długości fali.

Ponieważ dwie z trzech gwiazd, tj. *V454 Aur* oraz *GT UMa* mają więcej niż jedno widmo, oraz z uwagi na dość duży poziom szumu w obydwu gwiazdach można pokusić się o próbę uśrednienia ich widm. Należałoby najpierw uruchomić zadanie, które umożliwia dodawanie wektorów, jakimi są przecież widma jednowymiarowe. Następnie należałoby je podzielić przez liczbę widm tej samej gwiazdy. Można to zrobić w dwóch etapach za pomocą zadania `sarith`, które jest przystosowane do przeprowadzania prostej arytmetyki na widmach jednowymiarowych, zwłaszcza wyskalowanych w długościach fali. Prościej jednak jest dokonać uśrednienia za pomocą zadania `scombine`. Jest to również pewna modyfikacja zadania `combine` dostosowana specjalnie do jednowymiarowych widm.

W parametrach zadania najważniejsze są: wejście, wyjście, oraz rodzaj operacji. W



Rysunek 36: Widmo gwiazdy *V454 Aur* z pliku `spec001213.ms.wv` będące wynikiem uśrednienia dwóch widm tej samej gwiazdy (pliki `spec0012.ms.wv` i `spec0013.ms.wv`).



Rysunek 37: Widmo gwiazdy *GT UMa* z pliku `spec00141516.ms.wv` będące wynikiem uśrednienia trzech widm tej samej gwiazdy (pliki `spec0014.ms.wv`, `spec0015.ms.wv` i `spec0016.ms.wv`).

wypadku gwiazdy *V454 Aur* należy wpisać dwa pliki z widmami: `spec0012.ms.wv`, oraz `spec0013.ms.wv`. Plik wyjściowy ustalić można jako `spec001213.ms.wv`. Parametr `combine`

ustawić należy na `average` czyli uśrednianie. Pamiętać należy o odpowiednich wartościach `rdnoise` i `gain`. W przypadku gwiazdy GT UMa pliki wejściowe to `spec0014.ms.wv`, `spec0015.ms.wv` i `spec0016.ms.wv`. Plik wyjściowy może się nazywać `spec00141516.ms.wv`. Następnie należy uruchomić dwukrotnie zadanie, raz dla jednej gwiazdy, raz dla drugiej. Powstałe w ten sposób dwa pliki można wykreślić za pomocą `splot` pokazującego jednocześnie na osi pionowej wartości zliczeń (Rysunek 36 i 37).

Bardzo użyteczną komendą dostępną pod oknem wykresu w czasie pracy jakiegokolwiek zadania jest `.snap`, która powinna być wpisana po wciśnięciu znaku dwukropku w oknie wykresu. Umożliwia ona zapis obrazu wykresu do wybranego typu pliku graficznego. Np. dla zapisania pliku typu Encapsulated Postscript (z rozszerzeniem `.eps`) należy wpisać po wciśnięciu dwukropku: `.snap epsf1`. Obrazy te są zachowywane domyślnie pod nazwą zaczynającą się od ciągu `sgi` następowanego przez generowane przez IRAFa ciąg cyfr. Wszystkie rysunki wykresów w tym opracowaniu zostały zapisane właśnie przy pomocy tej komendy.

Tak zredukowane widma są gotowe do dopasowania poziomego continuum, pomiarów linii widmowych i przeprowadzenia dalszych czynności związanych z szeroko rozumianą analizą widm gwiazdowych.