

Rozdz 7: Fotometria a nauka

Pierwsze sześć rozdziałów tego przewodnika daje Ci wszystko, czego potrzeba do naukowo przydatnych obserwacji gwiazd zmiennych z wykorzystaniem CCD. Przedstawiono tam większość wymagań, procedur, technik obserwacji i analizy tak że jesteś gotowy, aby rozpocząć obserwację. Niniejszy rozdział ma na celu dać kilka dodatkowych informacji, które pomogą Ci w planowaniu i wykonywaniu obserwacji, które przyniosą naukowo użyteczne wyniki. W wielu przypadkach, AAVSO lub inna organizacja podczas swoich kampanii obserwacyjnych powie dokładnie co chce obserwować i dlaczego. My chcemy tutaj przedstawić raczej ogólne zasady, którymi powinieneś kierować się podczas obserwacji. Można potraktować Rozdział 7 jako „ekstra”, ale należy przynajmniej przeczytać jego treść, aby zobaczyć, co w AAVSO jest postrzegane jako dobre obserwacje. W szczególności chcemy skupić się na dwóch rzeczach: (1) dlaczego dopiero filtrowane i obrabiane obserwacje są użyteczne oraz (2) o czym myśleć w trakcie planowania obserwacji poszczególnych klas zmiennych, stosowania filtrów, obserwacji rytmów i czasów ekspozycji.

Zanim pójdziemy dalej, pierwszym krokiem w procesie obserwacji powinno być skonsultowanie strony internetowej AAVSO, aby zobaczyć jakie zasoby mamy dla obserwatorów i które gwiazdy są dla nas szczególnie interesujące. Jako przykład AAVSO (i kilka innych organizacji) prowadzi „kampanie obserwacyjne”, gdzie potrzebne są dane dotyczące poszczególnych gwiazd w określonym czasie. Istnieje również wiele stałych celów, dla których dane są zawsze potrzebne, więc nie będziesz narzekał na brak pracy. Przewodnik nie obejmie informacji, które szczególne zmienne obserwować. Jest ich tak wiele, że można by napisać osobną książkę i każda jest godna, aby poświęcić jej czas obserwacyjny. Pamiętaj, że wybór celu będzie miał wpływ na prawdopodobieństwo tego, czy Twoje dane będą wykorzystywane przez naukowców. Wyjątkiem jest sytuacja, gdy sam jesteś badaczem i masz dobrze zdefiniowane pytania na które chcesz znaleźć odpowiedź, ale to jest już temat na zupełnie inny przewodnik.

Filtry w fotometrii

Zanim zaczniesz, być może zechcesz przeczytać dodatek A i B. Tam dowiesz się o fizycznej naturze światła i radiacji gwiazd. Krótko można powiedzieć, że ze światła gwiazd możemy pozyskać więcej informacji niż tylko ilość fotonów przechwyconych przez nasz teleskop w danym momencie oraz, że możesz dowiedzieć się więcej wykonując obserwacje z wykorzystaniem standardowych filtrów niż z obrazów niefiltrowanych. Filtry fotometryczne mają dokładnie zdefiniowane właściwości transmisji i to które długości fali są odcinane. Są tak zaprojektowane, aby ściśle odpowiadać standardowym systemom takim jak Johnson-Cousins lub Sloan. Jeśli mierzysz światło gwiazd przy użyciu filtrów, to nie mierzysz całkowitej ilości światła, które dociera do aparatury, ale ilość w zakresie długości fali przepuszczanej przez dany filtr.

Fotometria z użyciem filtrów może dostarczyć bardzo użytecznych danych astrofizycznych. Gwiazdy o różnych właściwościach fizycznych (takich jak temperatura i skład chemiczny) będą miały unikatową charakterystykę widmową w każdym z tych systemów filtrujących. Na przykład, gwiazda typu widmowego „A” będzie miała takie widmo, że gdy uzyskasz skalibrowane pomiary gwiazdy w systemie Johnson B i V, różnica w tych skalibrowanych magnitudo będzie zbliżona do 0,0. Mówiąc prościej, kolor (B-V) gwiazdy A jest bliski zeru. Tak został zdefiniowany systemy jasności w założeniach w systemie Johnsona. Kolor (B-V) gwiazdy typu G, chłodniejszej niż gwiazdy typu A, będzie wynosił około +0,7. Skalibrowane magnitudo B-band tej gwiazdy będzie o 0,7 magnitudo słabsze niż V-band. Typy widmowe gwiazd opierają się w dużej mierze od ich temperatury, co z kolei przekłada się na to, jak wyglądają ich widma. Co ważniejsze, jeśli uzyskasz zestaw skalibrowanych fotometrii dla danej gwiazdy, możesz następnie porównać te kolory ze znanymi kalibracjami widmowymi, aby określić przybliżony typ widmowy tej gwiazdy. Dokładne określanie typu widmowego jest bardziej skomplikowane (i zazwyczaj polega na pobraniu widma), ale kolory fotometryczne mogą dostarczyć kilka przydatnych informacji o właściwościach gwiazd. Dobrym przykładem jest wykres kolor-magnitudo, gdzie wielkości i kolory gwiazd w klastrach leżą w wyszczególnionych miejscach na tym wykresie, a te lokalizacje odpowiadają różnym stadium ewolucyjnym np. gwiazdy ciągu głównego i czerwonych olbrzymów.

Jest jeszcze bardziej ciekawie dla gwiazd zmiennych, ponieważ ich kolory mogą ulec zmianie w czasie. Pamiętaj, że kolory mogą częściowo zależeć do temperatury gwiazdy. Wiemy również, że niektóre gwiazdy zmieniają temperaturę w trakcie ich cyklu. Gwiazdy pulsujące, np. cefeidy lub RR Lyrae mogą zmienić temperaturę o 1000 K lub więcej podczas cyklu, a ta zmiana powoduje zasadniczą zmianę koloru,

szczególnie w (B-V). Przy wykonywaniu skalibrowanej fotometrii wielofiltrowej cefeid zobaczymy kilka rzeczy. Po pierwsze, krzywa V-band będzie miała inną amplitudę niż krzywa B-band (a nawet mogą mieć nieco inny kształt i fazy). Po drugie, ze względu na różnicę między V i B, krzywa koloru – wykres (B-V) w funkcji czasu – jest zmienny. To użyteczna informacja dotycząca cefeid, ponieważ jest to dobry sposób na pokazanie w jakim zakresie krzywej światła gwiazda jest najgorętsza. Znajdziesz kilka podobnych przykładów w innych klasach zmiennych, które zmieniają temperatury podczas ich cyklu, nowe karłowate są dobrym przykładem; rozbłyskają, ponieważ ich dyski akrecyjne przechodzą w cieplejszy, bardziej jasny stan, który czasowo dominuje światło pochodzące od chłodniejszej, bardziej czerwonej gwiazdy. Istnieją również inne procesy fizyczne, które mogą powodować zmiany koloru, np. zaciemnienia przez pył. Pył preferencyjnie rozprasza bardziej niebieskie długości fal świetlnych, dzięki czemu gwiazda jawi się bardziej czerwona niż jest w rzeczywistości. Pył jest jednym z powodów, dlaczego niektóre zmienne długookresowe i R Coronae Borealis widzimy jako bardzo czerwone.

Dlaczego to wszystko jest istotne dla fotometrii gwiazd zmiennych? Zauważ, że wielokrotnie użyliśmy słowa „skalibrowany”. Kiedy powstały normy widmowe, zostały one zrobione przy użyciu dokładnych filtrów i urządzeń o właściwościach dobrze zmierzonych i poznanych. Ekstynkcja atmosferyczna została skalibrowana i usunięta z pomiarów. Twoje filtry, sprzęt i warunki obserwacji prawie nigdy nie będą takie same jak obserwatorów, którzy stworzyli standardy widmowe definiujące różne właściwości gwiazd. Tak więc, jeśli uzyskasz wielkości „V” i „B” dla gwiazdy, bez kalibracji filtrów i sprzętu lub uwzględnienia ekstynkcji atmosferycznej, to będą one inne niż te ze znanych standardów. Możesz zmierzyć kolor (B-V) gwiazdy typu G, o którym mowa powyżej i okaże się, że jest to 0,8 zamiast 0,7, a gwiazdy typu A wynosi 0,05 zamiast 0,0. Dlatego musisz określić współczynniki formatowania danych za pomocą dobrze zdefiniowanych standardów: ustalasz korekty, które należy zastosować do danych tak, aby pomiary odpowiadały temu samemu systemowi, jak w przypadku uzgodnionych standardów. W ten sposób twoje wielkości mogą być łatwo porównane do wielkości innych obserwatorów. Nie oznacza to, że Twoje magnitudo są „złe” –ale to, że są różne. Jak wtedy zrozumieć różnorodne dane od wielu różnych obserwatorów? Ostatecznie dane będą o wiele bardziej użyteczne, jeśli zminimalizujesz różnice między wielkościami zmierzonymi a standardowymi. Dlatego poświęcamy tyle czasu, prosząc ludzi, aby sformatowali swoje dane.

Względy czasowe: różna zmienność, czasy ekspozycji i rytmiczność

Jeśli już obserwujesz gwiazdy zmienne od jakiegoś czasu, prawdopodobnie jesteś świadom, że gwiazdy różnią się swoją zmiennością. Niektóre gwiazdy mogą się zmieniać w odstępach sekund lub minut (niektóre zmienne kataklizmiczne), podczas gdy inne mogą ulegać zmianie w ciągu tygodni, miesięcy lub lat. Niektóre gwiazdy wykazują nawet oba rodzaje zmienności. Trzeba to mieć na uwadze przy podejmowaniu decyzji, jak obserwować daną gwiazdę. Jeśli masz wiele różnych typów zmiennych w programie obserwacyjnym, prawie na pewno nie będziesz używać tej samej metody dla każdej gwiazdy. Oto trzy podstawowe rzeczy, o których warto pamiętać:

1. Musisz być w stanie uzyskać wystarczający stosunek sygnału do szumu przy czasie ekspozycji, która jest mniejsza niż skala czasowa zmienności.
2. Musisz uśrednić kilka obserwacji jasnych gwiazd, gdzie czas integracji jest bardzo krótki (dziesięć sekund lub mniej) z powodu scyntylacji.
3. Nie powinieneś nadmiernie obserwować gwiazdę, której harmonogram zmienności jest bardzo długi, ani „zaniedbać” tej, której harmonogram jest bardzo krótki.

Punkt 1 jest przede wszystkim problemem dla gwiazd, które zmieniają się szybko oraz są ze swej natury słabe. Klasycznym tego przykładem jest orbitalna krzywa jasności krótkoterminowej zmiennej kataklizmicznej. Istnieje wiele CV (ZK), których okresy orbitalne wynoszą 90 minut lub mniej, ale są również bardzo słabe. Sztuką jest, aby zrównoważyć stosunek sygnału do szumu z wymaganym czasem naświetlania aby nie „zamazać” jakiejś ciekawej szybkiej zmiany.

Punkt 2 jest częstym problemem dla obserwatorów pracujących w jasnym końcu – wielkości jaśniejszych niż 7 lub 8 dla wielu typowych systemów SCT + CCD. Scyntylacja to szybka zmiana natężenia światła gwiazd spowodowana przez niejednorodności w atmosferze ziemskiej. Nic nie można zrobić, aby jej uniknąć, można tylko uśrednić wpływ. Zawierowania atmosferyczne odpowiedzialne za scyntylację

są różnej wielkości, a ich wpływ jest znaczniejszy (a) w małych aperturach i (b) w krótkich okresach czasu. Zakładamy, że nie możesz dowolnie zwiększać wielkości przysłony, więc jedyną metodą naprawczą jest uśrednienie wielu pomiarów. Prawdopodobnie zobaczysz błędy rms od kilku do kilkunastu setnych magnitudo dla dziesięciosekundowych lub krótszych czasów ekspozycji. Jeśli gwiazdy zmieniają się w znacznie dłuższych okresach niż czas ekspozycji (mirydy i inne jasne olbrzymy są klasycznym przykładem), wówczas powinieneś bezwzględnie zrobić kilka ekspozycji, zmierzyć wielkości i przedłożyć uśrednione wielkości jako wynik. Przedstawienie wielkość z każdej klatki jest naukowo bezcelowe.

To prowadzi w naturalny sposób do punktu 3, czyli optymalizacji rytmu obserwacji. Różne klasy gwiazd zmiennych różnią się okresami zmienności od milisekund do tysiącleci. Twoje obserwacje powinny być zoptymalizowane do rodzaju zmienności, którą chcesz badać i musisz również zdać sobie sprawę, że niektóre rodzaje zmienności mogą być poza zasięgiem Twojego sprzętu.

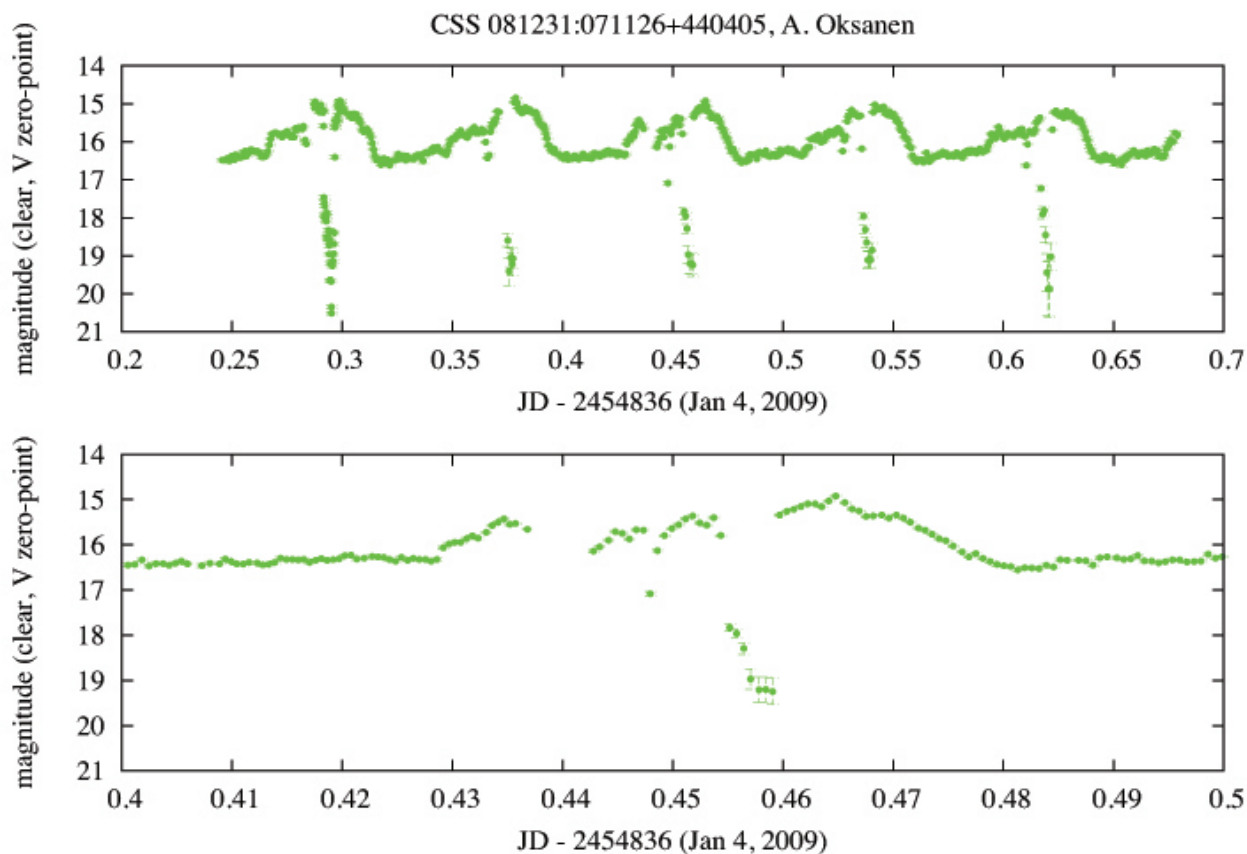
Jako przykład weźmy przypadek powoli zmieniającej się gwiazdy i dużą ilość fotonów. Jasne mirydy w programie AAVSO są dobrym przykładem. Prawie wszystkie dobrze znane mirydy w archiwach AAVSO są łatwo mieralne przez obserwatorów CCD (z filtrami) w prawie całym zakresie zmienności. Istnieją setki miryd, które większość swojego czasu „świecą” jaśniej niż $V = 14-15$. Powstaje zatem pytanie, jak często je obserwować? Rada dla obserwatorów wizualnych jest prosta – nie więcej niż raz na 1–2 tygodnie – odnosi się to również dla obserwatorów CCD. Nieco bardziej wyrafinowanym rozwiązaniem byłoby uwzględnić kilka zestawów obserwacji – 3 lub 4 ekspozycje z każdym z filtrów – w czasie jednej nocy, a następnie uśrednić wynikowe wielkości z każdego filtra z osobna. Można by następnie przedstawić średnie zamiast pojedynczych wielkości i można by przedstawić je jako grupy wielkości tak, że naukowiec będzie miał nie tylko wielkości, ale i kolory. Jak często należy to robić, zależy od gwiazdy, ale generalnie dla gwiazd zmiennych, dobrze jest mieć między 20 a 50 obserwacji rozłożonych równomiernie w całym okresie zmienności gwiazdy. Jeżeli okres ten wynosi 500 dni, to jedna noc obserwacyjna co 10 dni będzie adekwatna. Jeżeli okres ten wynosi 100 dni, to nie częściej niż raz na dwa dni (a raczej nie częściej niż raz na 4–5 dni).

Niektórzy obserwatorzy nie stosują się do zaleceń i istnieją tego rażące przykłady w Międzynarodowej Bazie Danych AAVSO. Robili oni tak częste obserwacje miryd jakby to były szybkie zmienne. Dane te nie są technicznie złe, ale jest to w dużej mierze zmarnowany wysiłek, a w większości przypadków nie są przydatne dla badaczy w tej formie. [Jedyną możliwością wykorzystania tych danych byłoby poszukiwanie szybkich zmian, nietypowych dla takich gwiazd, które to mogłoby być spowodowane przez akrecję na niewidocznego towarzysza]. Zwykle obserwator może dać bardziej użyteczny wkład, jeśli zarejestruje kilka zestawów obserwacji jednej gwiazdy, a następnie przejdzie do rejestracji podobnych danych dla kilku innych zmiennych. Istnieje wiele obiektów, które wymagają obserwacji i sumienny obserwator CCD może zarejestrować wiele bardzo użytecznych danych dla wielu gwiazd.

Czasem jest całkiem odwrotnie – słaby obiekt, który zmienia się bardzo szybko, a ty walczysz o każdy foton (chyba, że masz ogromny teleskop). Jako przykład takiej sytuacji, jedna noc obserwacji zakrycia CSS 081231: 071126 + 440405 (obserwator AAVSO Arto Oksanen) pokazana została na rysunku 7.1. Dane te zostały zarejestrowane przy użyciu jasnego filtra za pomocą 0,4-metrowego (16-calowego) teleskopu. Gdy gwiazda jest między 15 a 17 mag, niepewności pomiarowe fotometrii wynoszą około 0,015 do 0,02 magnitudo, co jest znacznie poniżej amplitudy. Równie ważne jest to, że rytm obserwacji wynosi około jeden na minutę. Okres orbitalny gwiazdy to nieco ponad 117 minut, a więc częstotliwość zapewnia duże pokrycie w całym cyklu orbitalnym. Powoduje to, że większość zmian orbitalnych tej gwiazdy jest bardzo dobrze zmierzona, a ogólna krzywa blasku wygląda świetnie.

Zaczyna to być problematyczne, gdy w trakcie bardzo krótkiego i głębokiego zaćmienia magnitudo spada poniżej 20. Po pierwsze zakrycie jest bardzo szybkie – trwa tylko kilka sekund – a więc nie jest możliwe zarejestrowanie odpowiednich danych w cyklu 1 obserwacja/min. Po drugie, zakrycie jest znaczne – ponad trzy wielkości – taka sytuacja powoduje dodatkowy problem – pogorszenie stosunku sygnału do szumu. Niepewności podczas zakrycia zbliżają się do 0,3 mag i są ponad dziesięć razy większe niż w czasie jasnej części cyklu.

W tym przypadku naprawdę nic nie można zrobić, aby poprawić zarówno dokładność pomiaru w funkcji czasu, jak i stosunek sygnału do szumu podczas zaćmienia – jesteś ograniczony przez aperturę teleskopu i liczbę zarejestrowanych fotonów i nie ma tutaj powodu z astrofizycznego punktu widzenia, aby skrócić lub wydłużyć czas naświetlania. Skrócenie ekspozycji poprawi rozdzielczość czasową, ale spowoduje zbyt wiele „zanieczyszczeń”, natomiast dłuższe ekspozycje po prostu ukryją prawdziwą istotę



Rysunek 7.1 Niefiltrowana seria obserwacji zakrycia zmiennej kataklizmicznej AM Herculis. Zauważ, że słupki błędów są bardzo małe i zwróć uwagę również na liczbę wykonanych obserwacji. Częstotliwość to około jedna obserwacja na minutę, w tym czas ekspozycji i odczyt matrycy.

zjawiska, pozostawiając niewiele danych dotyczących tego interesującego zakrycia. Jest to skrajny przypadek, ale liczba ciekawych, słabych gwiazd, stale się zwiększa w wyniku badań na dużą skalę, jak na przykład LSST. W przypadkach bardziej typowych należy zdawać sobie sprawę z jakiego rodzaju zmiennością mamy do czynienia i z wyprzedzeniem pomyśleć o odpowiednich czasach i częstotliwości ekspozycji.

Jest to też dobry przykład, aby zadać pytanie, czy nie lepiej obserwować bez filtra. Mimo, że traktujemy filtry oddzielnie, są one istotne w dyskusji o wycuciu czasu, ponieważ obniżają one całkowity rejestrowany sygnał, a tym samym wpływają na czasy ekspozycji i stosunek sygnału do szumu. W niektórych przypadkach filtry mogą obniżyć sygnał tak bardzo, że nie będzie można dokonać użytecznych obserwacji. Istnieją dwie zasady, o których należy pamiętać:

1. Jeśli obiekt jest jasny i możesz uzyskać odpowiedni stosunek sygnału do szumu, powinieneś zawsze używać filtrów („Odpowiedni” tzn zdefiniowany przez dany projekt i jego cele, ale >20 jest rozsądną wielkością).
2. Jeśli obiekt jest bardzo czerwony, to musisz użyć filtrów jeśli nie ma żadnego specjalnego powodu, dla którego niefiltrowane dane są użyteczne (np. poszukiwania tranzytów i rozbłyski gamma). Jeśli nie możesz używać filtrów na znanych czerwonych obiektach, lepiej obserwuj inne.

W tym przypadku obiekt jest czasowo bardzo słaby (mag poniżej 20 podczas zakrycia), więc na pewno będziesz „głodny” fotonów. Zmiany są również stosunkowo szybkie, więc będziesz chciał utrzymać jak najkrótsze ekspozycje. Jednak najważniejszym powodem, dla którego można zrezygnować z filtra jest to, że ta gwiazda jest bardzo niebieska jak większość zmiennych kataklizmicznych. Jeśli weźmiesz pod uwagę spektrum tej gwiazdy, to stwierdzisz, że jej kontinuum jest stosunkowo płaskie i nie zmienia się zasadniczo wraz z długością fali. W tym przypadku zmiany szerokopasmowe pokrywają się w zasadzie ze zmianami zmierzonymi przez filtry, a niefiltrowane obserwacje są dobrym kompromisem, który zapewni nieco wyższy stosunek sygnału do szumu i/lub krótsze czasy ekspozycji kosztem informacji spektralnej, co w tym przypadku nie jest równie ważne jak inne informacje, które można uzyskać.

Wyjątki

Nie ma reguły bez wyjątku, także w przypadku wytycznych dotyczących częstotliwości obserwacji i czasu ekspozycji. Najważniejszą rzeczą do zapamiętania z powyższej dyskusji jest to, że czasy ekspozycji muszą być wystarczające, aby wykryć zachowania których szukasz, a częstotliwość obserwacji musi również odpowiadać ramom czasowym zjawiska, które mają pokryć. Istnieją projekty badawcze, które szukają zachowania różnego od tego, co oczekujemy dla danej klasy gwiazdy zmiennej. Jednym z przykładów może być odkrycie tranzytu planety pozasłonecznej przez długookresową zmienną, olbrzymia typu M lub K. Możesz obserwować taką gwiazdę raz na kilka dni, ale tranzyt może zmieniać blask w odstępach kilku minut do kilku godzin. W tym przypadku musisz zaplanować obserwacje znacznie częściej. Na ogół takie przypadki są rzadkie i zazwyczaj wiemy już, że gwiazda jest „specjalna” (na przykład mirydy w układzie symbiotycznym). Możesz oczywiście częściej rejestrować dane w poszukiwaniu ciekawych zjawisk, ale musisz uświadomić sobie, że dane te będą rzadko używane w tej postaci. Należy rozważyć samodzielne zbadanie tych danych w trybie offline, a następnie uśrednienie ich i wysłanie uśrednionych danych do archiwum AAVSO zamiast badań poszczególnych.

Jeszcze jedna uwaga na temat miryd: nie rób niefiltrowanych obserwacji miryd, półregularnych lub innych zmiennych czerwonych w ogóle. Niefiltrowane obserwacje nadają się tylko do „niebieskich” gwiazd (z B-V około 0,0). Dla zmiennych czerwonych CCD jest bardziej wrażliwe na bliską podczerwień i czerwone gwiazdy będą znacznie „jaśniejsze” niż można by się było spodziewać. Prawdopodobnie znajdziesz sporadyczne przykłady kogoś raportującego wielkości „CV” dla miryd lub gwiazd zmiennych półregularnych, które są dwa lub trzy wielkości jaśniejsze niż z danych wizualnych i filtrowanych danych CCD. Takie obserwacje są naprawdę bezużyteczne, ponieważ pasmo „CV” jest bardzo mylące dla badaczy. Można pokusić się o obserwacje bardzo słabych miryd bez filtra w celu zapewnienia pokrycia w minimum, ale widmowe właściwości tych danych są tak bardzo ograniczone, że nie dostarczą naukowcom wiele użytecznych informacji, a mogą, wręcz przeciwnie, wprowadzić wiele zamieszania. Jeśli nie masz filtrów, powinieneś unikać prawie wszystkich typów zmiennych czerwonych i ograniczyć swoją pracę przede wszystkim do zmiennych kataklizmicznych. Jeszcze raz, wyjątkiem mogą być bardzo słabe tranzyty i rozbłyśki gamma.