

Wyznaczanie typów cefeid

Raport z pracy w grupie badawczej „Pi of the Sky”
(Wersja poprawiona)

Krzysztof Wójcik*

4 lutego 2010

Spis treści

1	Wstęp teoretyczny i opis metody	3
1.1	Krzywe blasku	3
1.2	Obiekty o zmiennej jasności	3
1.3	Różne rodzaje cefeid	4
1.4	Przeprowadzona analiza	5
2	Program StarsParPlotter	6
2.1	Pliki wejściowe i uruchomienie programu	7
2.2	Rezultat działania programu	7
2.3	Perspektywy	8
3	Wyniki i wnioski	8
3.1	Typ badanych gwiazd	8
3.2	Jakość pomiarów i dopasowań	9
3.3	Przypadkowe obserwacje	9

*kontakt: k.p.wojcik@gmail.com

Streszczenie

W czasie kilkutygodniowej pracy w grupie „Pi of the Sky” zajmowałem się określeniem typu kilku wybranych cefeid, które nie zostały sklasyfikowane w bazie ASAS. W tym celu dopasowywałem szereg Fouriera do krzywej blasku badanej gwiazdy i porównywałem uzyskane parametry z parametrami cefeid wzorcowych. Dodatkowym rezultatem pracy jest napisany przeze mnie program **StarsParPlotter**, automatyzujący część pracy i generujący wykresy otrzymanych parametrów. Być może program zostanie wykorzystany w przyszłości do udoskonalenia interfejsu internetowego służącego do przeglądania danych zebranych w projekcie.

Dane fotometryczne wykorzystane przy dopasowaniach pochodzą z lat 2006-2009. Kamery nie miały założonych filtrów, więc mierzyły jasność w całym widmie widzialnym. Obecnie kamery mają założone filtry, zatem kiedy pojawi się więcej danych, będzie można porównać otrzymane wyniki z wynikami dopasowań do pomiarów niefiltrowanych.

Abstract

During my work in "Pi of the Sky" group I aimed to determine the type of a few chosen Cepheids, which were not classified in ASAS project. To reach this I've fitted a Fourier series to the light curve of the star being investigated and I've compared achieved parameters with the parameters obtained for Cepheids of known type. An additional result of my work is a program **StarsParPlotter**, which I wrote to automatize some part of work, especially creating plots of parameters. It is probable that the program (not necessary complete) will be used to improve Internet interface, which enables viewing data collected in the "Pi of the Sky" project.

Photometric data used for fitting comes from period 2006-2009, when there were no spectral filters on the cameras. Thus measured luminosity contains all the visible light. Nowadays, cameras have the filters switched and this will enable to compare results following both ways of analyzing data, when the new results come.

1 Wstęp teoretyczny i opis metody

1.1 Krzywe blasku

Podstawową mierzalną wielkością fizyczną obiektów widzianych na niebie jest ich jasność. Bywa, że jest ona (z dokładnością do błędu pomiaru) stała, ale tak być nie musi. Krzywą ilustrującą zależność jasności od czasu nazywamy krzywą blasku.

W przypadku, gdy zależność jasności od czasu jest okresowa, sporządza się sfazowaną krzywą blasku. Różni się ona od zwykłej krzywej blasku tylko tym, że na osi poziomej zamiast czasu odkłada się czas modulo okres zmienności lub fazę modulo 2π . Aby wykreślić sfazowaną krzywą blasku konieczna jest dokładna znajomość okresu zmienności, który jest wyznaczany na podstawie pomiarów jasności od czasu. Istnieje kilka konkurencyjnych metod wyznaczania okresu, które są dokładnie opisane w [1]. Ja używałem metody AoV, której szczegóły również opisuje [1].

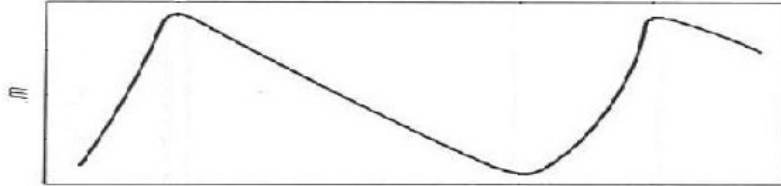
1.2 Obiekty o zmiennej jasności

W zależności od powodu zmienności wyróżniamy dwie główne kategorie układów zmiennych. Pierwszym są układy zaćmieniowe (których jasność zmienia się z powodu czynników zewnętrznych). Przykładem układu zaćmieniowego jest układ dwóch gwiazd krążących w takiej płaszczyźnie, że z punktu widzenia obserwatora na Ziemi okresowo się wzajemnie zasłaniają. Drugim typem układów zmiennych są gwiazdy pulsujące (których zmiany jasności wynikają ze zmiany tempa bądź rodzaju przebiegających w nich reakcji). Szczególnym typem gwiazd pulsujących, o charakterystycznej krzywej blasku, są cefeidy. Do innych typów obiektów zmiennych należą supernowe, błyski gamma i inne, opisane bardziej szczegółowo m. in. w [1]. W dalszej części pracy będę się skupiał na własnościach cefeid.

Cefeidy odegrały fundamentalną rolę w ocenianiu odległości we wszechświecie. Ich jasność zmienia się okresowo, a dzięki zależności między okresem zmienności i jasnością absolutną, można na podstawie danych fotometrycznych wyznaczyć odległość do obserwowanej gwiazdy. Jednak zależność ta nie jest tak uniwersalna, jak początkowo przypuszczano – istnieje wiele rodzajów cefeid, a wśród nich najważniejsze są cefeidy klasyczne, cefeidy II populacji oraz inne mniej powszechne, m. in. cefeidy typu RR Lyrae. Cefeidy różnych typów mają różną zależność jasności od okresu zmienności. O szczegółach tego podziału, w tym o innych typach cefeid, oraz o innych podziałach cefeid pisze m. in. [2].

Cefeidy mają bardzo charakterystyczną sfazowaną krzywą blasku, co ułatwia

ich rozpoznawanie. Ma ona jedno maksimum i jedno minimum, przy czym narastanie jasności trwa krócej, niż spadek. Fragment typowej (niesfazowanej) krzywej blasku cefeidy przedstawia Rysunek 1.



Rysunek 1: Typowa sfazowana krzywa blasku cefeidy, zmodyfikowany rysunek zaczerpnięty z [2].

1.3 Różne rodzaje cefeid

Rozpoznanie różnych rodzajów cefeid jest dużą trudnością. Przyczynia się do tego fakt, że brak jest modeli teoretycznych wystarczająco dokładnie opisujących zjawiska zachodzące w gwiazdach pulsujących. W tej sytuacji najpowszechniejszym sposobem ustalenia typu cefeidy jest badanie współczynników dopasowanego do sfazowanej krzywej blasku szeregu Fouriera. Niech $f(x)$ będzie dane szeregiem:

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \sin(nx + \phi_n) \quad (1)$$

Funkcję $f(x)$ (przy pewnym ustalonym N) dopasujemy do sfazowanych fotometrycznych pomiarów jasności interesującej nas gwiazdy dokonanych w wąskim przedziale widmowym. Zmienne A_i oraz ϕ_i są parametrami tego dopasowania. N nazywamy rzędem dopasowania. Parametrami dobrze rozróżniającymi między cefeidami różnego typu okazały się:

$$\begin{aligned} R_{ij} &= \frac{A_i}{A_j} \\ \varphi_{ij} &= \phi_i - \phi_j \end{aligned} \quad (2)$$

Dodatkową korzyścią płynącą z dopasowania (1) do krzywej blasku jest możliwość określenia w jakim modzie dana gwiazda pulsuje. Cefeidy pulsujące w modzie wyraźnie innym niż podstawowy nazywa się owertonowymi.

Innym istotnym parametrem jest tak zwana skośność, czyli różnica faz między minimum i maksimum na zboczu opadającym sfazowanej krzywej blasku.

1.4 Przeprowadzona analiza

W dalszej części pracy pod hasłem *parametry dopasowania* będę rozumiał zestaw siedmiu liczb: R_{21} , R_{31} , R_{41} , φ_{21} , φ_{31} , φ_{41} oraz skośność. Ponieważ kamery grupy „Pi of the Sky” do niedawna nie miały filtrów ograniczających zakres widmowy, nie ma jeszcze wystarczającej liczby pomiarów filtrowanych, aby na ich podstawie prowadzić badania. Dlatego wykonywałem dopasowania krzywych blasku do pomiarów jasności w całym zakresie światła widzialnego. Kiedy liczba danych „filtrowanych” wzrośnie, będzie możliwe porównanie wyników i sprawdzenie, jak istotne jest ograniczenie przedziału widmowego.

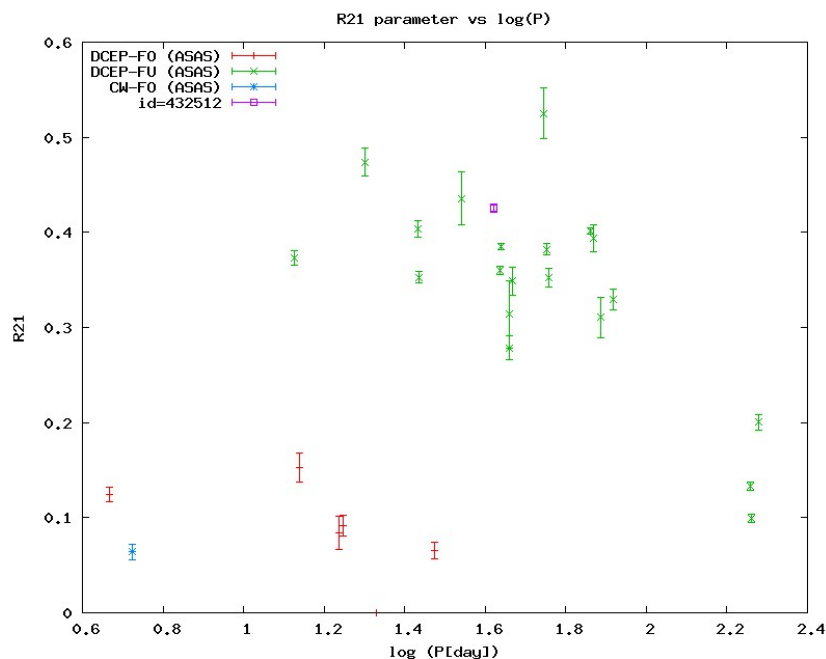
Metoda badania typu obserwowanych cefeid opiera się na założeniu, że o niektórych gwiazdach z góry wiemy, do której należą populacji, np. przez szczegółowe badanie zależności okresu od jasności. Nie musimy znać typu oscylacji. Dzięki temu można stworzyć bazę cefeid wzorcowych. W niniejszej pracy zostały uwzględnione wszystkie cefeidy, których krzywe blasku znajdują się w bazie projektu „Pi of the Sky”, a ich typ jest jednoznacznie określony w bazie ASAS. Następnie pominięte zostały te, dla których dopasowane parametry obarczone były bardzo dużymi błędami. Ostatecznie za cefeidy wzorcowe posłużyły¹: 072629-2555.7, 070916-1347.2, 071312-1843.7, 174109-2328.7, 181001-1332.7, 182105-1827.5, 182123-1851.7, 182445-1648.0, 183119-1306.3, 183849-1324.8, 184343-0743.9, 184517-2038.7, 184929-1643.3, 144634-3210.4, 153154-5914.9, 163432-6307.9, 114432-6718.5, 123317-6330.5, 190821-0726.4, 181001-1332.7, 182123-1851.7, 182318-1834.8, 182445-1648.0, 183119-1306.3, 183849-1324.8, 184517-2038.7, 184929-1643.3.

Następnie parametry dopasowań gwiazd o nieznanym typie były porównywane z parametrami cefeid wzorcowych. Dla każdej gwiazdy, dla każdego parametru został stworzony diagram, którego każdy punkt odpowiadał innej gwiazdzie. Współrzędną x -ową każdego z punktów stanowił logarytm okresu w dniach, natomiast współrzędną y -ową – badany parametr. Wszystkie punkty poza jednym odpowiadały gwiazdom wzorcowym, jeden zaś – badanej. Porównywanie odbywało się na podstawie sprawdzania umiejscowienia punktu odpowiadającego badanej gwiazdzie na tle punktów odpowiadających cefeidom wzorcowym. Przykład diagramu, o którym mowa w tym paragrafie, pokazuje Rysunek 2.

Gwiazdy o nieznanym typie, dla których przeprowadzono dopasowania to gwiazdy z bazy grupy „Pi of the Sky”, o typie nieokreślonym w katalogu ASAS oraz $sc_quality = 5^2$ oraz gwiazda 063158-1513.3, dla której zaczęły

¹tu i wszędzie dalej identyfikuję gwiazdy po `name`, czyli nazwie gwiazdy w katalogu „Pi of the Sky”. W celu sprawdzenia ich pozycji na niebie lub ogólnie przyjętych nazw, można się posłużyć internetowym interfejsem projektu [3]

²`sc_quality` to ocena jakości danych pomiarowych dotyczących danej gwiazdy przez



Rysunek 2: Diagram dla parametru R_{21} dla gwiazdy 181303-2306.9

już spływać nowe („filtrowane”) dane i istnieje nadzieja na szybkie porównanie wyników. Spośród tych gwiazd usunięto te, dla których dopasowania dały bardzo duże błędy lub krzywe blasku nie miały jednoznacznie określonego okresu. Ostatecznie cefeidy, których typ zbadano, to: 181303-2306.9, 185103-2017.9, 174838-3028.8, 180501-2934.8, 063158-1513.3, 122338-6137.7, 124207-6924.6, 113056-5653.9, 195730-2633.5, 174717-2744.7, 174725-2755.2, 174716-2746.7, 181303-2306.9, 185103-2017.9.

2 Program StarsParPloter

W celu przyspieszenia pracy, autor napisał w języku C++ pracujący w środowisku UNIX program. Wczytuje on plik `FourierOut.txt` produkowany przez program fitujący *Cepheus*³ oraz plik z informacjami o okresie zmienności i typie gwiazd (szczegółowe wymagania dotyczące tych plików opisane są poniżej) i na ich podstawie generuje odpowiednie wykresy przy pomocy programu *GNUplot*. Kod źródłowy programu, opatrzony komentarzami, zawiera Dodatek A.

grupe „Pi of the Sky”

³program został napisany przez Annę Barnacką, współpracownika grupy „Pi of the Sky”

2.1 Pliki wejściowe i uruchomienie programu

Niech `path` oznacza ścieżkę, w której znajduje się program `StarsParPlotter`. Dzięki zastosowaniu programu utworzenie diagramów opisanych w części 1 odbywało się w następujący sposób:

1. Utworzenie folderu `path/roboczy`.
2. Wybranie z bazy gwiazd o typie określonym w katalogach ASAS. Na podstawie danych z bazy utworzenie pliku `path/roboczy/Types.txt`, w którego pierwszej kolumnie znajduje się id gwiazdy, w drugiej jej okres w dniach, a w trzeciej typ według danych ASAS. Kolumny muszą być oddzielone (wyłącznie) znakami białymi.
3. Wybranie z bazy gwiazd o `sc_quality` ≥ 5 . Dopisanie do pliku `Types.txt` kolejnych wierszy zawierających wybrane w tym kroku gwiazdy. W kolumnie trzeciej należy wpisać znak '-' (myślnik).
4. Ręczne dodanie wiersza odpowiadającego gwiazdzie 063158-1513.3 do pliku `Types.txt`. Dla tej gwiazdy pojawiły się już dane z kamery z filtrem.
5. Utworzenie (przy pomocy interfejsu) dla każdej z interesujących gwiazd pliku `path/roboczy/<id>_<cokolwiek>.dat` (w miejsce `<id>` wpisany jest numer id danej gwiazdy, w miejsce `<cokolwiek>` może być wpisany dowolny ciąg znaków dozwolonych w nazwie pliku; można też pominąć fragment nazwy `_<cokolwiek>`) zawierającego w pierwszej kolumnie czas pomiaru, a w drugiej zmierzoną w tym dla tego czasu jasność danej gwiazdy.
6. Wykonanie w programie *Cepheus* jednego dopasowania z opcją zapisu parametrów do pliku dla każdego pliku utworzonego w poprzednim podpunkcie.
7. Przeniesienie lub skopiowanie uzyskanego dzięki realizacji poprzedniego punktu pliku `FourierOut.txt` do katalogu `path/roboczy`.
8. Uruchomienie programu `StarsParPlotter`.

2.2 Rezultat działania programu

Rezultatem działania programu jest powstanie katalogu `path/output`. Katalog ten zawiera:

- Trzy pliki `.dat` stanowiące dane do wykresów dla poszczególnych typów cefeid występujących w bazie ASAS⁴.
- Jeden plik `.pg`, będący zestawem poleceń dla programu *GNUplot*, na podstawie którego generowane są kolejne wykresy.
- Po jednym folderze dla każdej gwiazdy, dla której wykonane zostało dopasowanie, a parametry zostały zapisane w pliku `FourierOut.txt`, a typ został określony jako '-' (myślnik). Nazwa folderu jest jednocześnie numerem id gwiazdy. Wewnątrz znajduje się siedem wykresów w formacie `.jpg`, po jednym na każdy parametr dopasowania, oraz plik `data.dat` zawierający odpowiadającą gwiazdzie linię pliku `FourierOut.txt` z pominiętą ostatnią kolumną.

2.3 Perspektywy

Opisana w punkcie 2.1 procedura jest dość uciążliwa. Główną przeszkodą w pełnym jej zautomatyzowaniu jest fakt, że program *Cepheus* pracuje jedynie w trybie graficznym, na dodatek w środowisku *MS Windows*. W odróżnieniu od *Cepheusa*, *StarsParPloter* uruchamia się w Unixowym terminalu, a ponadto może zostać łatwo przerobiony na funkcję, stanowiącą część programu napisanego w C++, który stosowne dane wejściowe będzie odbierał np. w postaci strumienia. Dlatego być może w przyszłości w jakiejś formie stanie się częścią interfejsu do przeglądania bazy danych gromadzonych przez grupę „Pi of the Sky”.

3 Wyniki i wnioski

3.1 Typ badanych gwiazd

Na podstawie danych, przy pomocy programu *StarParPloter*, dla każdej badanej gwiazdy sporządzonych zostało siedem wykresów. Każdy przedstawia jeden punkt o współrzędnej x -owej równej logarytmowi okresu danej gwiazdy oraz współrzędnej y -owej równej jednemu z parametrów dopasowania na tle punktów uzyskanych w analogiczny sposób dla cefeid wzorcowych. Za wzorcowe służyły cefeidy skatalogowane w bazie ASAS. Każdy typ cefeid: klasyczne pulsujące w modzie podstawowym (DCEP-FU, kolor zielony, 20 gwiazd), klasyczne pulsujące w pierwszym owertonie (DCEP-FO, kolor czerwony, 5 gwiazd), II populacji pulsujące w pierwszym owertonie (CW-FO,

⁴uwzględnione są tylko trzy typy: DCEP_FO, DCEP_FU oraz CW_FO, skróty rozszyfrowane są w części 3.1.

nibieski, jedna gwiazda) oraz badana gwiazda (fioletowy), został naniesiony na wykresy innym kolorem. Komplet wykresów zawiera Dodatek B. Otrzymane parametry w formie tabeli są przedstawione w Dodatku C.

Chociaż badane dane zostały uzyskane przy pomocy kamer bez filtrów, na podstawie otrzymanych w dopasowaniach parametrów można z dużą pewnością stwierdzić, że wszystkie badane gwiazdy są cefeidami jednomodalnymi. Zwłaszcza na wykresach skośności w zależności od logarytmu okresu widać, że cefeidy różnych typów dość wyraźnie się grupują.

3.2 Jakość pomiarów i dopasowań

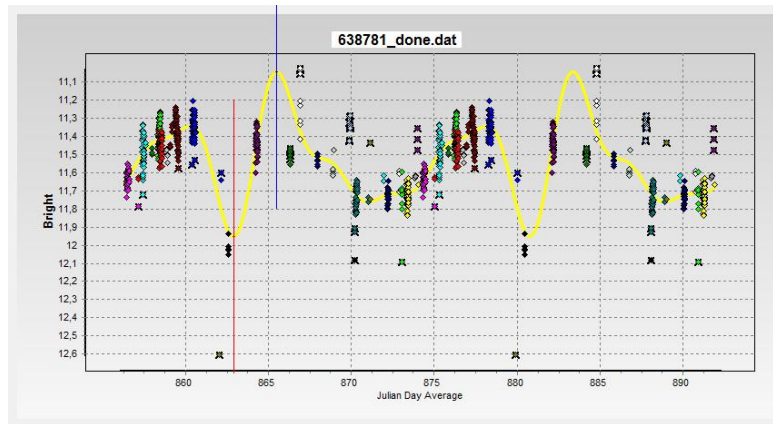
Badane były jedynie gwiazdy dla których dane są najlepszej jakości (ściślej takie, dla których w bazie w kolumnie `sc_quality` figurowała najwyższa możliwa wartość – 5 (z jednym wyjątkiem). Mimo to, przy niektórych dopasowaniach rząd był obcinany, ponieważ uzyskiwane wyniki były niefizyczne. Kiedy liczba nocy pomiarowych jest zbyt mała lub kiedy okres jest bliski całkowitej liczby dni, nawet na sfazowanych wykresach punkty pomiarowe nie są równomiernie rozłożone i program *Cepheus* dodaje szybkozmiennie składowe, które sprawiają, że krzywa bardzo dobrze pasuje do pomiarów tam, gdzie punkty pomiarowe są gęste, ale tam, gdzie są rzadkie, przebieg dopasowanej funkcji jest wyraźnie zniekształcony. W najbardziej jaskrawy sposób ilustruje to przykład gwiazdy 063158-1513.3, której okres zmienności wynosi prawie 18 dni. Rysunek 3 ilustruje dopasowanie znalezione przez program *Cepheus* bez ograniczenia rzędu dopasowania, a Rysunek 4 po obcięciu. W wypadku omawianej gwiazdy dopiero ograniczenie rzędu dopasowania do jedności (czyli sprowadzenie wykresu funkcji do sinusoidy) pozwoliło otrzymać fizyczne rezultaty. W pozostałych przypadkach, które wymagały interwencji, rząd dopasowania był ograniczany do 2 lub 3, w zależności od potrzeby.

Także ilość cefeid wzorcowych pozostawia wiele do życzenia. Przede wszystkim brakuje jakichkolwiek cefeid wielomodalnych, jest tylko jedna cefeida II populacji. Większa ilość cefeid I populacji pozwoliłaby z większą pewnością ustalać zakres parametrów odróżniający cefeidy owertonowe od pulsujących w modzie podstawowym. Mogłoby to pozwolić na automatyzację procesu nadawania typu.

3.3 Przypadkowe obserwacje

W czasie pracy z danymi zaobserwowanych zostało kilka ciekawych faktów:

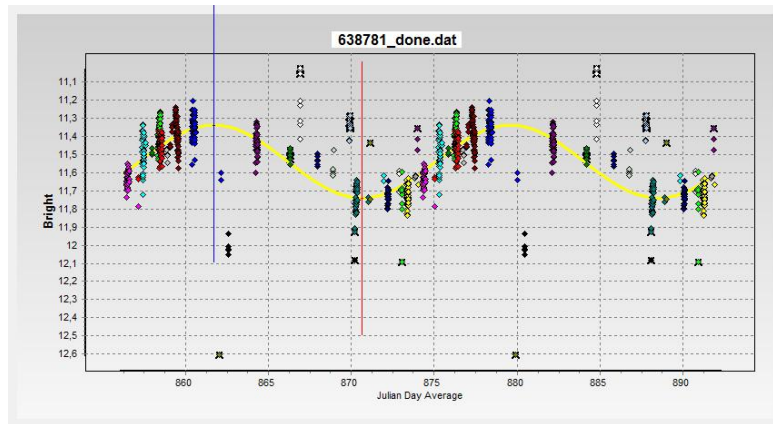
1. Dla gwiazdy 174838-3028.8 w krzywej blasku pojawia się pik. Jest on prawdopodobnie spowodowany przez inne źródło (być może poświatę



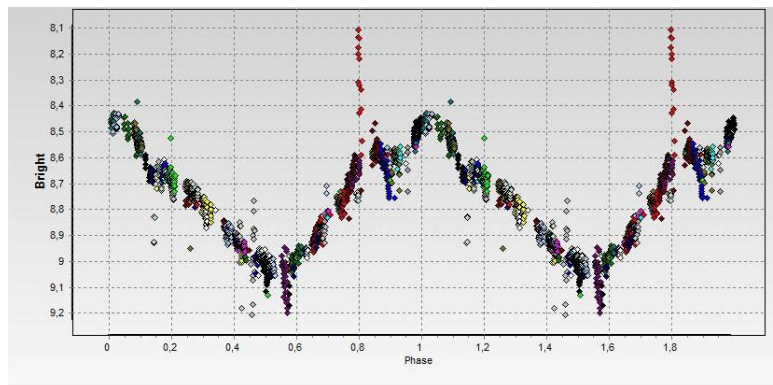
Rysunek 3: Dopasowanie automatyczne dla 063158-1513.3 (bez ograniczenia rzędu)

Księżyca). Szczegółowe omówienie źródeł błędów pomiarów zawiera [1]. Sfazowaną krzywą blasku przedstawia Rysunek 5.

2. Opisywana w części 3.2 gwiazda 063158-1513.3 raczej nie powinna mieć przypisanej $sc_quality = 5$. Sfazowaną krzywą blasku przedstawiają Rysunki 3-4.
3. Dane dotyczące gwiazdy 1389364 nie fazują się z podanym w bazie okresem. Próby znalezienia okresu w programie *Cepheus* zakończyły się niepowodzeniem.



Rysunek 4: Dopasowanie dla 063158-1513.3 z rzędem ręcznie ograniczonym do 1



Rysunek 5: Sfazowana krzywa blasku gwiazdy 174838-3028.8.

Spis rysunków

1	Typowa sfazowana krzywa blasku cefeidy	4
2	Diagram dla parametru R_{21} dla gwiazdy 181303-2306.9	6
3	Dopasowanie automatyczne dla 063158-1513.3 (bez ograniczenia rzędu)	10
4	Dopasowanie dla 063158-1513.3 z rzędem ręcznie ograniczonym do 1	11
5	Sfazowana krzywa blasku gwiazdy 174838-3028.8.	11

Literatura

- [1] Marek Biskup, *Poszukiwanie gwiazd zmiennych w eksperymencie „Pi of the Sky”* (praca magisterska), 2007
- [2] Anna Barnacka, *Analiza danych fotometrycznych z przeglądów „Pi of the sky” i ASAS* (praca magisterska), 2008
- [3] Interfejs internetowy projektu „Pi of the Sky”:
http://grb.fuw.edu.pl/pi/db/public/2006_2009/pi/