

# Poszukiwanie wielomodalnych Cefeid w danych "Pi of the Sky"

Paweł Leon Swaczyna  
e-mail: pawel.swaczyna@student.uw.edu.pl

13 marca 2011

## Streszczenie

Celem projektu "Pi of the Sky" jest obserwacja błysków gamma. W ramach projektu są jednak także zbierane dane fotometryczne gwiazd. Pozwala to na analizę przebiegu zmienności ich jasności. W szczególności możliwe jest badanie cefeid wielomodalnych. Napisany w tym celu program komputerowy został przetestowany na dwunastu gwiazdach, o których wiadomo, że są cefeidami wielomodalnymi. Dla czterech z nich udało się na podstawie danych "Pi of the Sky" wyznaczyć wszystkie okresy pulsacji, a następnie wyznaczono ich współczynniki szeregów Fouriera. W celu porównania taką samą analizę przeprowadzono na danych projektu ASAS. W przyszłości gdy będzie dostępne więcej obserwacji poszczególnych gwiazd, powinna być możliwa ich analiza pod względem poszukiwania cefeid wielomodalnych.

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Opis problemu</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Działanie programu CepheidsQt</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Uzyskane wyniki</b>	<b>4</b>
3.1	Parametry cefeid wielomodalnych na podstawie danych "Pi of the Sky" . . . . .	4
3.2	Porównanie wyników uzyskanych z baz danych "Pi of the Sky" i ASAS . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Podsumowanie i wnioski</b>	<b>5</b>

# 1 Opis problemu

Cefeidy stanowią jeden z rodzajów gwiazd zmiennych, które drgają w modach radialnych, tzn. drgania materii wewnątrz gwiazdy zależą tylko od odległości od jej środka. Wśród drgań cefeid najczęstsze są drgania w modzie fundamentalnym (podstawowym), dla którego wszystkie warstwy gwiazdy kurczą lub rozszerzają się razem. Jeżeli wewnątrz gwiazdy istnieje węzeł, tzn. powierzchnia sferyczna, która nie bierze udziału w drganiach, to mówimy o pierwszym overtone. Przy dwóch węzłach mówimy o drugim overtone, itd.

Cefeidy wielomodalne to takie, które równocześnie drgają w więcej niż jednym modzie. Najczęściej mamy do czynienia z drganiami w układzie mod podstawowy - pierwszy overtone (FU/FO), lub pierwszy overtone - drugi overtone (FO/SO). Znajomość modów w których drga gwiazda i ich częstotliwość pozwala na wyznaczenie parametrów fizycznych tej gwiazdy. W ten sposób można w szczególności uzyskiwać informacje o ich bezwzględnych jasnościach, które pozwalają przy znajomości jasności obserwowanej na określenie odległości do danej gwiazdy. A następnie pozwala to na skalowanie kosmicznej miary odległości. Więcej o znaczeniu fizycznym cefeid wielomodalnych można znaleźć w [1].

Podstawowym problemem przy analizie cefeid wielomodalnych jest określenie okresu ich pulsacji. Biorąc pod uwagę okresy cefeid rzędu kilku dni nie można w trakcie jednej obserwacji dokonać pomiaru zmian jasności w całym okresie. Należy wziąć więc obserwacje z wielu nocy i próbować znaleźć w tych obserwacjach okres. Istnieje wiele metod wyznaczania okresów gwiazd zmiennych. Najprostszą metodą jest obliczenie dyskretnej transformaty Fouriera uzyskanych pomiarów i wyszukiwanie w otrzymanych wynikach częstotliwości drgań. Następuje to poprzez obliczenie następujących wartości:  $A(\omega) = \sum_{n=1}^N a_n e^{i\omega t_n}$ , gdzie  $a_n$  to wartość pomiaru w czasie  $t_n$ , zaś  $N$  to ilość obserwacji. Tą funkcję od  $\omega$  obliczamy dla dyskretnej liczby punktów z dokładnością co najmniej rzędu  $1/(t_N - t_1)$ . Pozwala to na wyznaczenie jasności gwiazdy w funkcji częstotliwości. Maksima tej funkcji odpowiadają szukanym okresom. Jednakże jest to metoda stosunkowo wolna i niekoniecznie pozwala uzyskać zadowalające rezultaty. Istnieją inne metody określania okresów gwiazd zmiennych, np. Analysis of Variance opracowana przez A. Schwarzenberg-Czerny [2], [3].

Dla cefeid wielomodalnych należy ustalić więcej niż jedną częstotliwość. W tym celu można użyć metody odejmowania od wyników obserwacji częstotliwości pierwotnie znalezionej. Tzn. dla ustalonej w pierwszym rzędzie częstotliwości dopasowywany jest szereg Fouriera, a następnie od danych jest odejmowana wartość wynikająca z tego szeregu. Procedura ta jest powtarzana do znalezienia wszystkich modów drgania gwiazdy, zaś główne ograniczenie bierze się z błędów pomiarów jasności badanych gwiazd.

Dla ustalonych w ten sposób częstotliwości dopasowuje się krzywe zmian blasku poprzez szereg Fouriera obliczony na danych z obserwacji. Tak obliczone wartości szeregu Fouriera dla określonych cefeid mogą być później używane do określenia ich parametrów fizycznych.

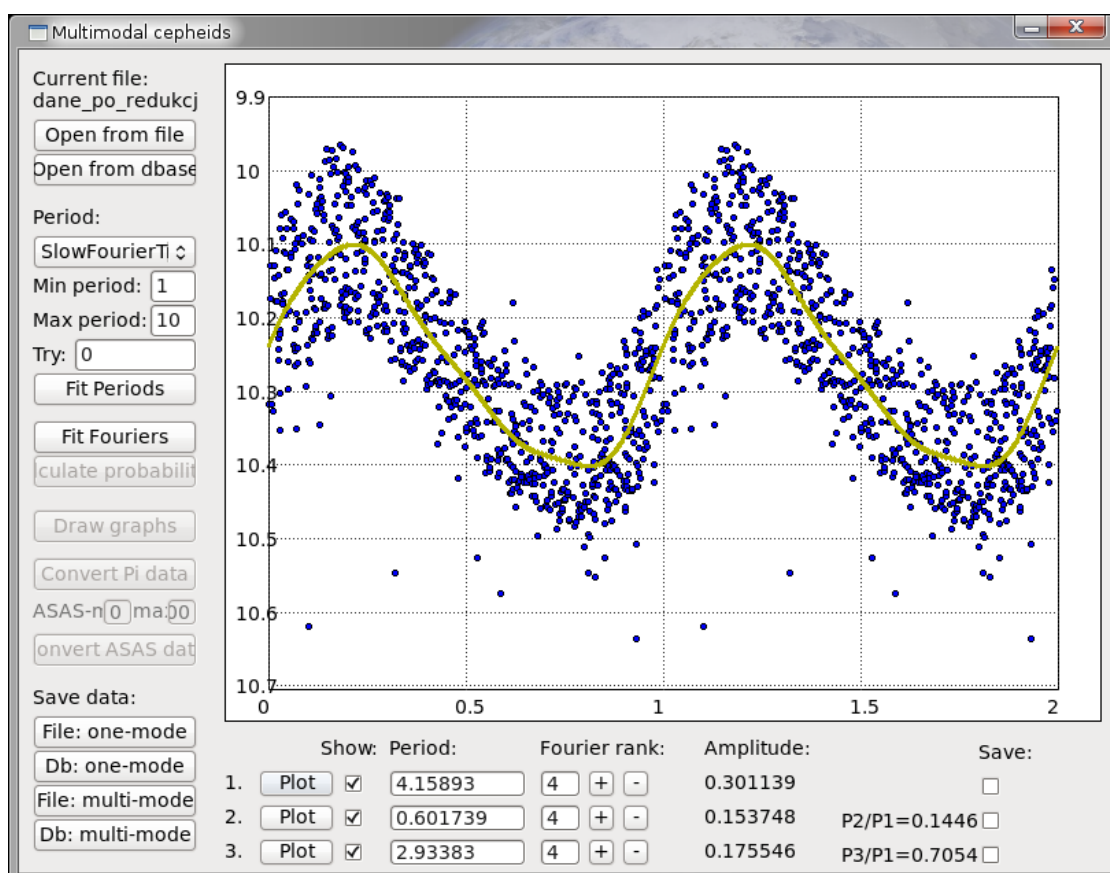
## 2 Działanie programu CepheidsQt

Napisany program został oparty o wcześniej opracowaną wersję programu pozwalającą na znajdowanie okresu cefeid jednomodalnych. Ponadto wykorzystano istniejącą bibliotekę wyszukującą okresy przy pomocy kilku różnych metod. Program jest napisany w języku C++, zaś interfejs użytkownika jest oparty o bibliotekę Qt.

Główne okno programu zostało przedstawione na rysunku 2. Po lewej stronie od góry widoczne są przyciski pozwalające wczytać dane do programu. Jest możliwe otwieranie danych z plików tekstowych w formie dwóch kolumn, gdzie w pierwszej znajduje się czas obserwacji, zaś w drugiej jasność. Druga możliwość to wczytanie obserwacji z bazy danych "Pi of the Sky"<sup>1</sup> poprzez podanie numeru ID gwiazdy. Niżej znajduje się część dotycząca wyszukiwania okresów drgań. Najpierw można wybrać metodę wyszukiwania częstotliwości z rozwijanej listy, a następnie należy wybrać przedział w jakim spodziewany się znaleźć wyszukiwane okresy<sup>2</sup>. Kliknięcie przycisku Fit

<sup>1</sup>Program łączy się z bazą 2006\_2009 na komputerze `heplx61.fuw.edu.pl`. Bazę danych można zmienić w pliku źródłowym programu `CDane.cpp` w wierszach 60-61.

<sup>2</sup>Program może znaleźć okres leżący poza wybranym w ten sposób zakresem. Jest to możliwe, ponieważ po wyszukiwaniu za pomocą określonej metody program zmienia kilkakrotnie swoją "rozdzielczość" i wyszukuje okres metodą kolejnych przybliżeń. Ponadto w ostatniej fazie program stara się sprawdzić czy prawdziwy okres nie jest



Rysunek 1: Główne okno programu CepheidsQt w wersji pozwalającej na analizę cefeid wielo-modalnych.

periods powoduje wyszukanie trzech najmocniejszych okresów przy pomocy metody opisanej wcześniej.

Znalezione w poprzednim kroku okresy są wyświetlane na dole. Można także ręcznie edytować znalezione w ten sposób okresy. Następnie należy kliknąć przycisk **Fit Fouriers**, co spowoduje dopasowanie do danych szeregów Fouriera w stopniu określonym przy poszczególnych okresach do danych obserwacyjnych. Wyświetlona zostanie wtedy wartość amplitudy dopasowanego szeregu Fouriera. Po dopasowaniu można wybrać które dane mają zostać uwzględnione na rysunku poprzez ewentualne odznaczenie checkboxa w kolumnie **Show**, co spowoduje, że dopasowane dane do tego okresu zostaną odjęte od danych wyświetlanych na rysunku. Naciśnięcie przycisku **Plot** powoduje wyrysowanie sfazowanych danych dla danego okresu z naniesionym dopasowaniem szeregu Fouriera do danych.

Po ostatecznym określeniu przez użytkownika które okresy należy zapisać w wyniku, należy zaznaczyć w ostatniej kolumnie **Save** te okresy, które użytkownik wybrał a następnie nacisnąć któryś z czterech przycisków służących do zapisania danych. Zapisywać do bazy danych należy tylko wtedy, gdy odczytano dane z bazy danych. Po naciśnięciu przycisku **Db one-mode** dane są zapisywane w tabeli `fourier_parameters`, zaś po kliknięciu **Db multi-mode** są zapisywane w tabeli `fourier_parameters_double`. W kolumnie `class` w tej tabeli jest określone czy cefeida jest dwumodalna (`double`), czy trójmodalna (`triple`). Dane do pliku tekstowego są zapisywane w formacie: okres, logarytm dziesiętny okresu, kolejne wyrazy szeregu fouriera dla danej częstotliwości, przesunięcia fazowe kolejnych wyrazów, względne wartości amplitud poszczególnych wielokrotnością znalezionej okresu.

wyrazów szeregu, względne przesunięcia fazowe w stosunku do pierwszego<sup>3</sup> wraz z błędami<sup>4</sup>. W przypadku cefeid wielomodalnych, dla kolejnych pulsacji, dane są dopisane w następnych kolumnach.

### 3 Uzyskane wyniki

W celu sprawdzenia poprawności działania programu przetestowano je na przykładowym zestawie cefeid wielomodalnych. Do zestawienia wzięto gwiazdy określone w pracy magisterskiej Anny Barnackiej [4] jako cefeidy wielomodalne. Są to gwiazdy o nazwach: DZ CMA, EY CAR, GZ CAR, UZ CEN, BK CEN, VX PUP, EW SCT, V0367 SCT, V0458 SCT, BQ SER, AP VEL, AX VEL.

#### 3.1 Parametry cefeid wielomodalnych na podstawie danych “Pi of the Sky”

Dla każdej z gwiazd wymienionych wyżej wyszukiwano gwiazdę w bazie “Pi of the Sky”, a następnie wczytywano daną gwiazdę do programu i starano się wyszukać częstotliwości w których gwiazda pulsuje. Niezbyt duża ilość danych pozwalała na zastosowanie w poszukiwaniu okresów metody *Slow Fourier Transform*. Dla większości z gwiazd z bazy ASAS istnieje więcej niż jeden odpowiednik w bazie “Pi of the Sky”. Spośród 12 analizowanych gwiazd udało się otrzymać parametry dla czterech z nich. Uzyskane wyniki zostały zapisane do tabeli `fourier_parameters_double` bazy danych. Dla pozostałych gwiazd albo było zbyt mało obserwacji lub dane były zbyt słabe. Skrót uzyskanych wyników jest przedstawiony w poniższej tabeli<sup>5</sup>:

Nazwa	ID	$T_n$	$T_n/T_1$	$A_n^{[mag]}$	$A_n/A_1$	$I_{min}$	$I_{av}^{[mag]}$	$I_{max}$	$n$
AX Vel	4722914	3.6730		0.273		7.97	8.21	8.45	453*
		2.5925	0.706	0.205	0.751				
	12226382	3.6762		0.17		8.12	8.31	8.50	234
		2.5916	0.705	0.217	1.276				
EW Sct	439245	5.8230		0.301		7.32	7.60	7.88	791*
		4.0687	0.699	0.252	0.837				
GZ Car	4874239	4.1593		0.246		9.92	10.13	10.34	961*
		2.9340	0.705	0.174	0.707				
	12172285	4.1574		0.227		9.80	10.00	10.20	677
		2.9370	0.706	0.168	0.740				
UZ Cen	4865216	3.3348		0.498		8.46	8.78	9.10	1552
		2.3558	0.706	0.142	0.285				

Tablica 1: Wyniki przeprowadzenia analizy cefeid wielomodalnych programem *CepheidsQt* dla danych z projektu “Pi of the Sky”. Kolumna  $n$  oznacza ile obserwacji zostało uwzględnionych przy analizie gwiazdy. Liczba oznaczona \* odpowiada analizie na podstawie wszystkich obserwacji, zaś jej brak tylko obserwacji dla których flaga `quality` była pusta.

Podane w tabeli okresy gwiazd zostały wyznaczone korzystając z metody *SlowFourierTransform*. Sfazowane krzywe zmiany blasku dla tych gwiazd przedstawiają rysunki na końcu raportu. Na rysunkach na osi pionowej znajduje się jasność gwiazdy wyrażona w  $[^{mag}]$ , zaś na poziomej ułamek okresu. Zatem ostatecznie okazało się, że tylko dla czterech spośród dwunastu analizowanych gwiazd można było je wykryć jako cefeidy wielomodalne. Dla trzech innych udało się uzyskać wartość jednego z okresów. Zaś dla pozostałych nie było zupełnie możliwe przeprowadzenie konstruktywnego wykrywania okresu.

<sup>3</sup>Podawana jest wartość wyrażenia  $\phi_{k1} = k\phi_k - \phi_1$ , gdzie  $\phi_n$  to przesunięcie fazowe n-tego wyrazu.

<sup>4</sup>Aktualna wersja programu nie oblicza błędów wyznaczonych wartości

<sup>5</sup>W tabeli przedstawiono tylko sumaryczną amplitudę uzyskanych wyników dla poszczególnych okresów. Parametry fouriera zostały zapisane do bazy danych

### 3.2 Porównanie wyników uzyskanych z baz danych “Pi of the Sky” i ASAS

Podobną analizę jak w powyższym punkcie można przeprowadzić dla danych z katalogu ASAS, dla których pierwotnie powstała lista z której gwiazdy były analizowane. Dla tych danych było możliwe określenie parametrów dla wszystkich analizowanych gwiazd. W szczególności w celu porównania, w poniższej tabeli przedstawiono rezultaty dla tych gwiazd, dla których była możliwa analiza z bazy danych “Pi of the Sky”:

Nazwa	$T_n$	$T_n/T_1$	$A_n$	$A_n/A_1$	$I_{min}$	$I_{av}^{[mag]}$	$I_{max}$
AX Vel	3.6732		0.203		7.97	8.22	8.47
	2.5930	0.706	0.299	1.473			
EW Sct	5.8234		0.344		7.72	8.02	8.32
	4.0681	0.699	0.26	0.756			
GZ Car	4.1589		0.306		10.00	10.24	10.48
	2.9338	0.705	0.181	0.592			
UZ Cen	3.3343		0.669		8.29	8.82	9.14
	2.3552	0.706	0.157	0.235			

Tablica 2: Wyniki przeprowadzenia analizy cefeid wielomodalnych programem CepheidsQt dla danych z projektu ASAS.

Na końcu raportu znajdują się również sfazowane krzywe zmian blasku dla danych z katalogu ASAS.

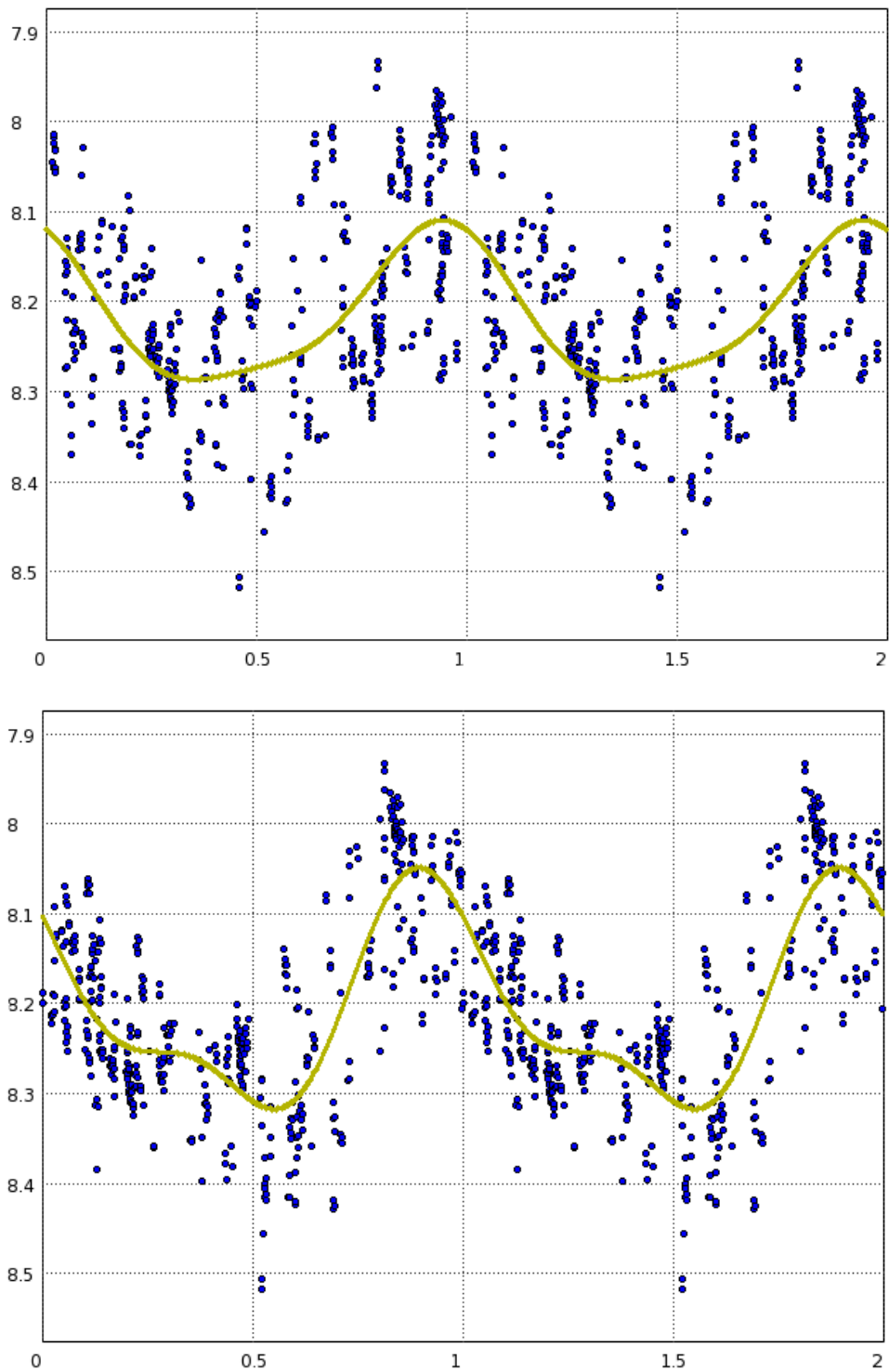
Dokonując porównania uzyskanych wyników dla danych z ASAS i “Pi of the Sky” można zauważyć, że wyniki dotyczące okresów są zgodne. Natomiast amplitudy zmian blasku i ich stosunki są już zasadniczo różne. Wynika to najprawdopodobniej z faktu, że projekt “Pi of the Sky” nie używa filtrów, a prowadzi obserwacje w dużym zakresie widma. Co powoduje niezgodność uzyskanych jasności.

## 4 Podsumowanie i wnioski

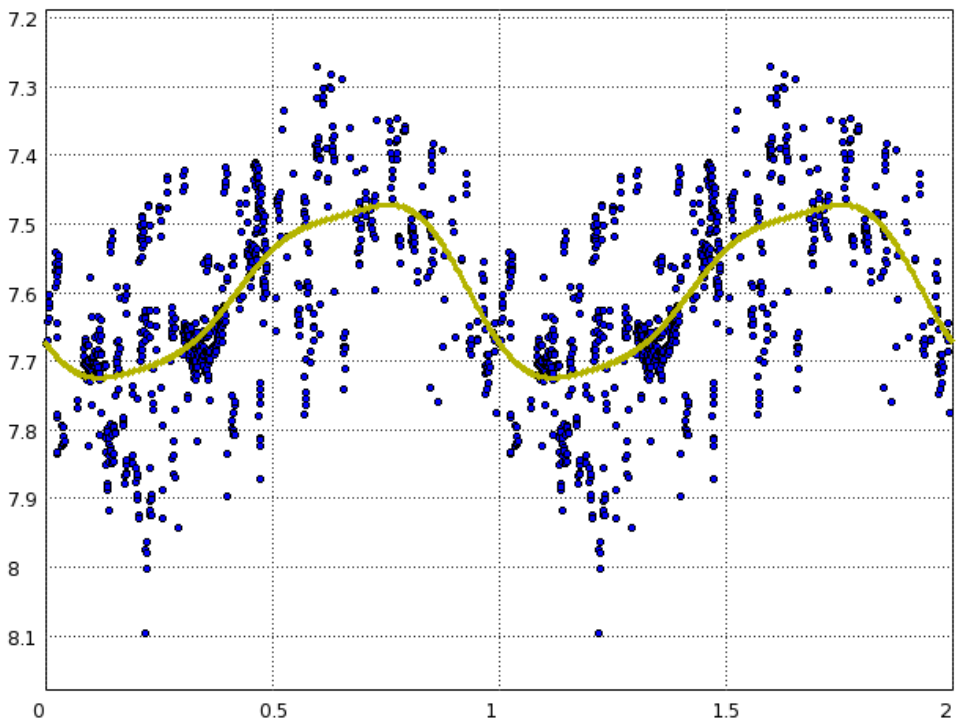
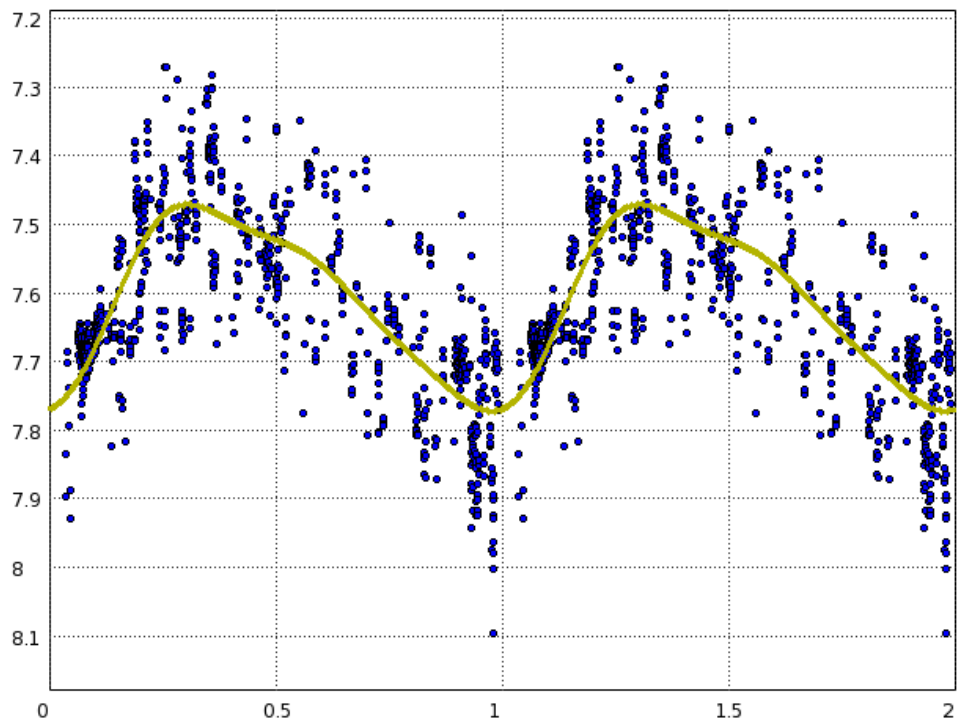
Podsumowując uzyskane wyniki można stwierdzić, że przeprowadzenie masowej analizy pod kierunkiem poszukiwania cefeid wielomodalnych w bazie danych “Pi of the Sky” może być trudne do wykonania. Niestety dane uzyskane z tego projektu dużo gorzej nadają się do tego celu w stosunku do wyników projektu ASAS. Jednakże jest możliwe w niektórych przypadkach wyznaczenie okresów cefeid wielomodalnych. Nie należy jednak spodziewać się znalezienia nowych cefeid wielomodalnych tylko na podstawie danych z projektu “Pi of the Sky”.

## Literatura

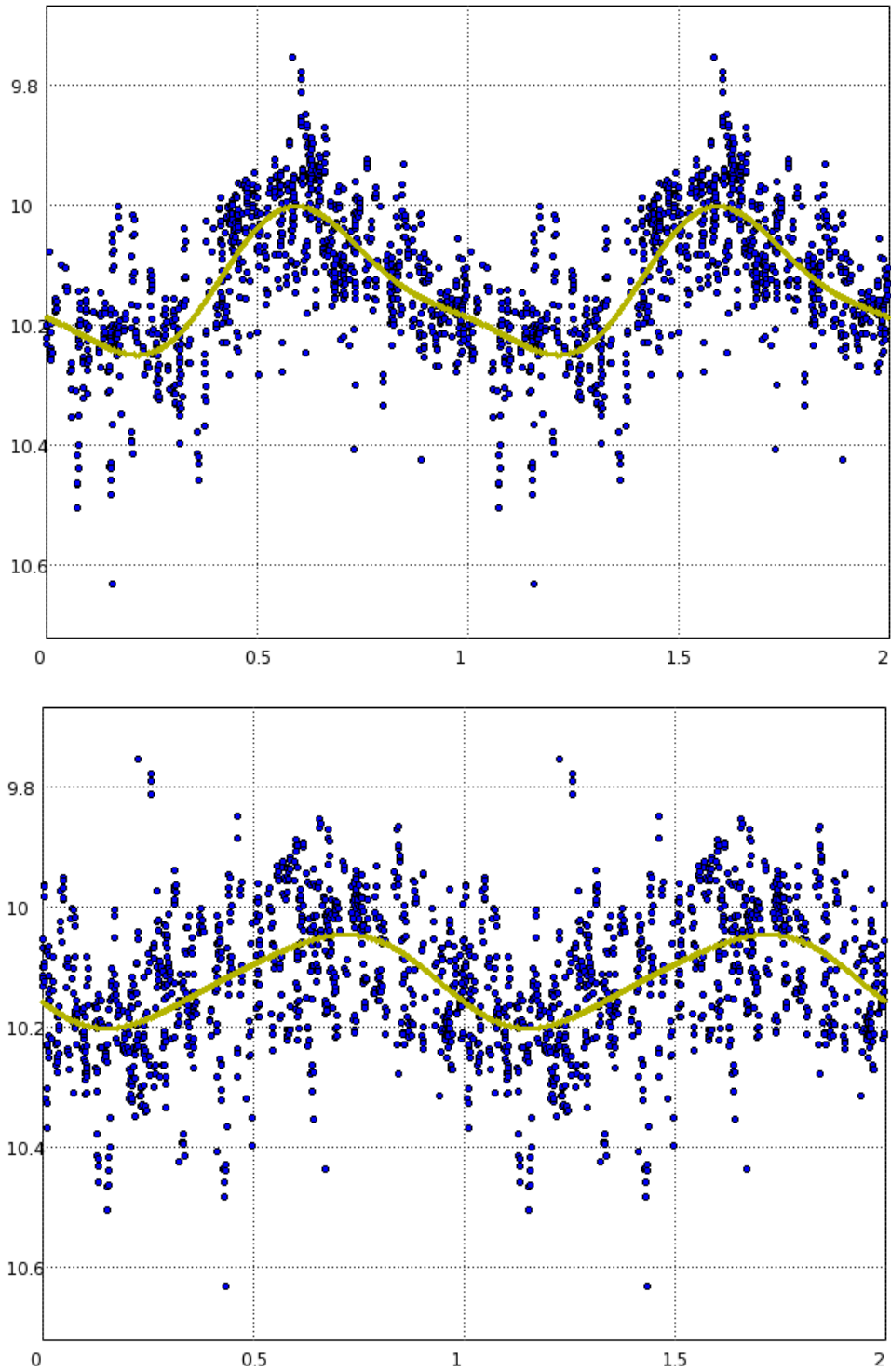
- [1] P. Moskalik, Z. Kołaczkowski, *Frequency analysis of Cepheids in the Large Magellanic Cloud: new types of classical Cepheid pulsators*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **394** (2009) 1649-1666.
- [2] A. Schwarzenberg-Czerny, *On the advantage of using analysis of variance for period search*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **241** (1989) 153-165.
- [3] A. Schwarzenberg-Czerny, J.-Ph. Beaulieu *Efficient analysis in planet transit surveys*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **365** (2006) 165-170.
- [4] A. Barnacka, *Analiza danych fotometrycznych z przeglądów “Pi of the sky” i ASAS*.



Rysunek 2:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **AX Vel**,  $ID = 4722914$ .  
 Górny rysunek  $T = 3.673$ , dolny  $T = 2.592$

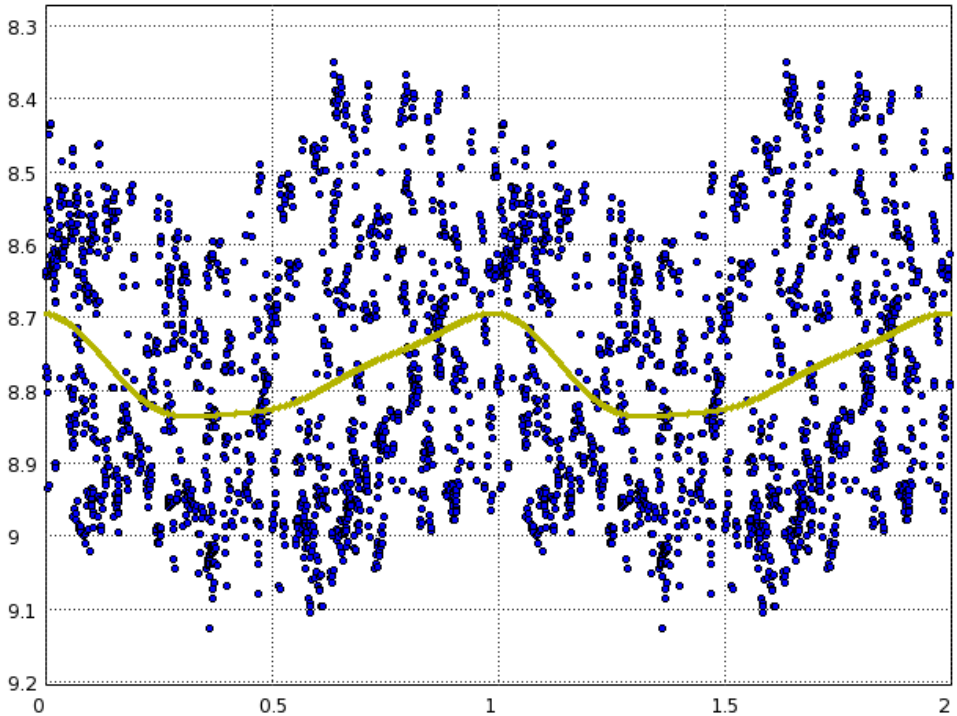
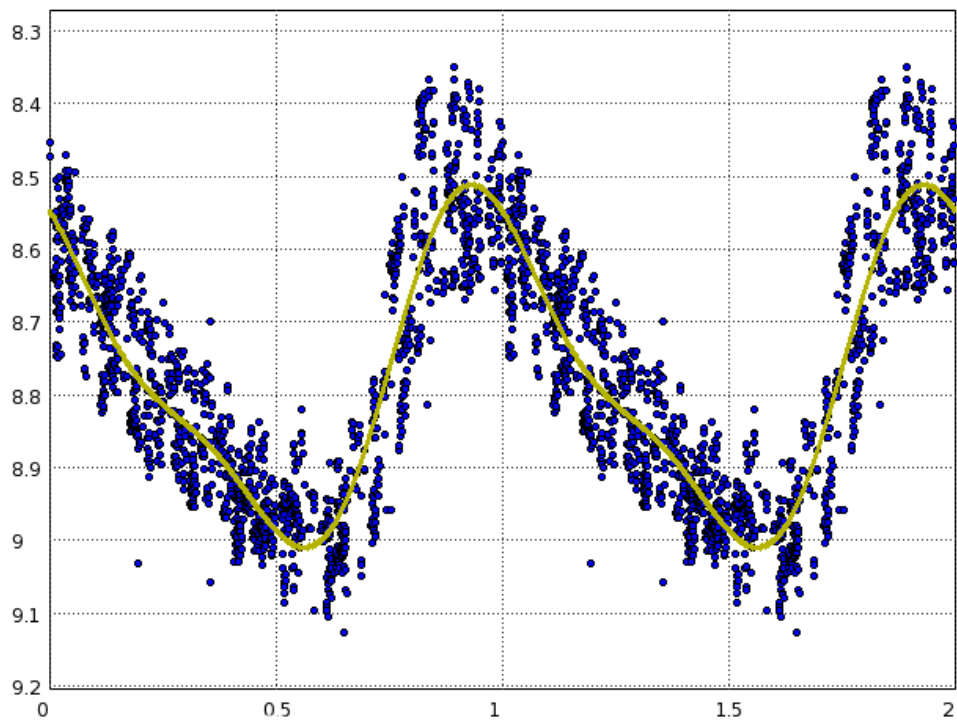


Rysunek 3:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy EW Sct,  $ID = 439245$ .  
 Górny rysunek  $T = 5.823$ , dolny  $T = 4.069$

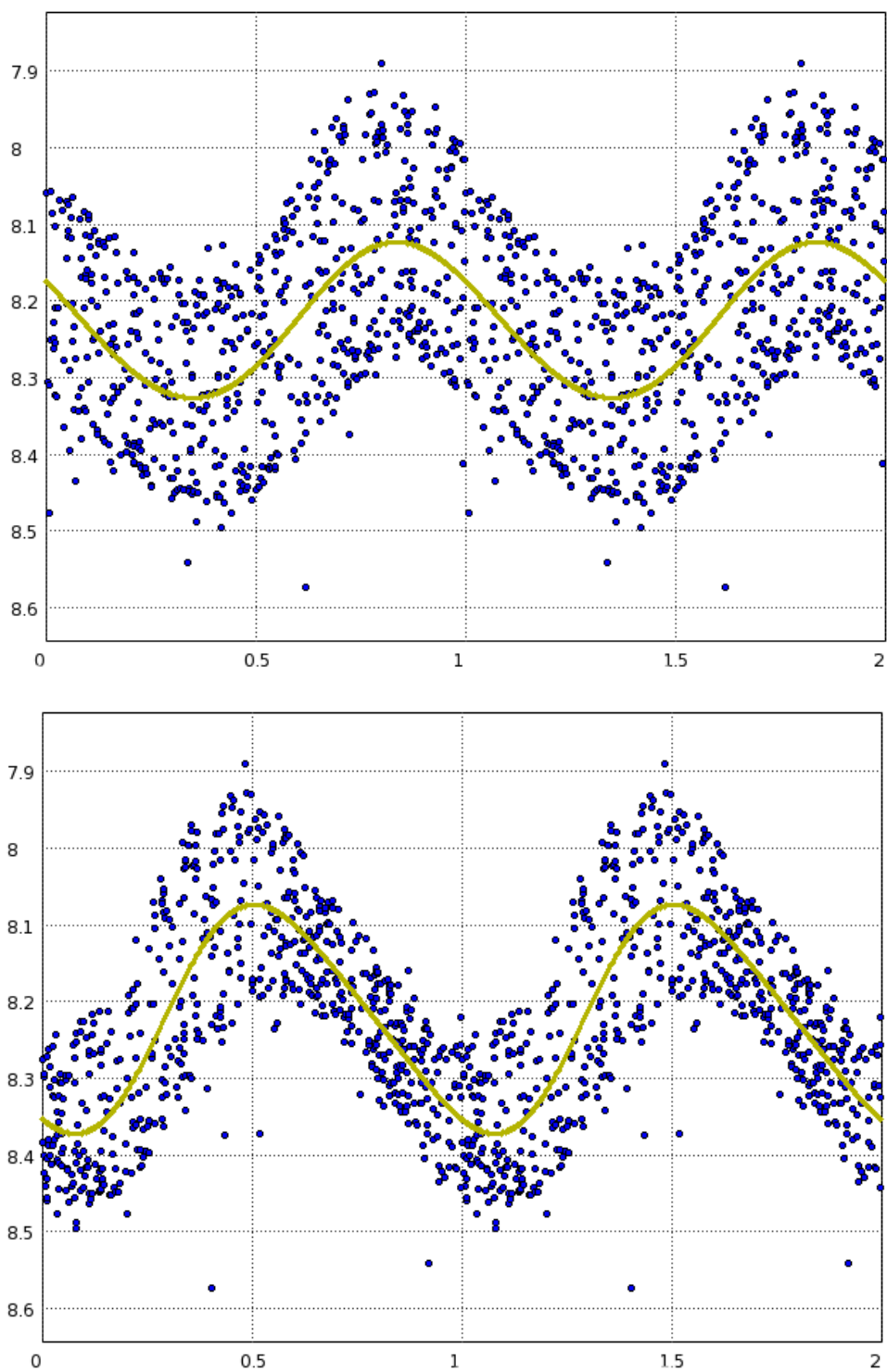


Rysunek 4:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **GZ Car**,  $ID = 4874239$ .  
 Górny rysunek  $T = 4.159$ , dolny  $T = 2.937$

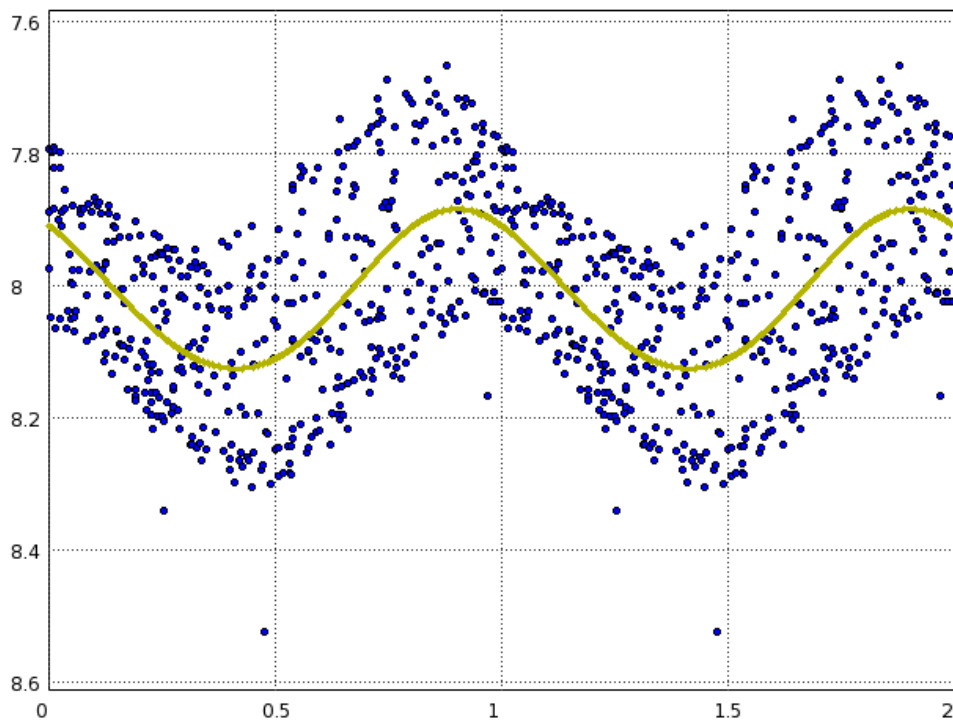
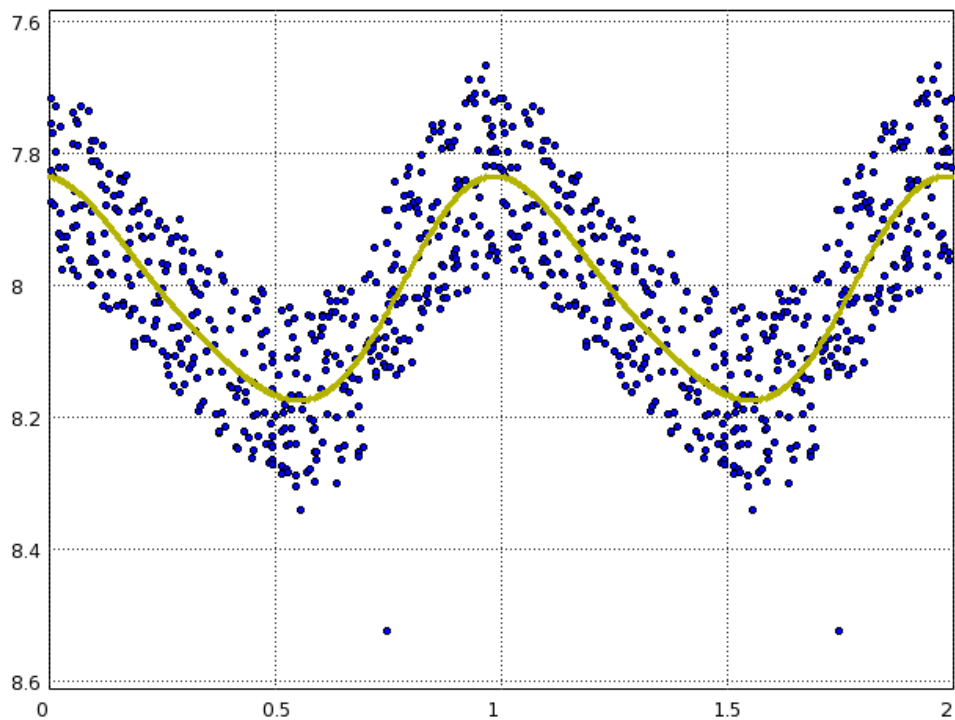




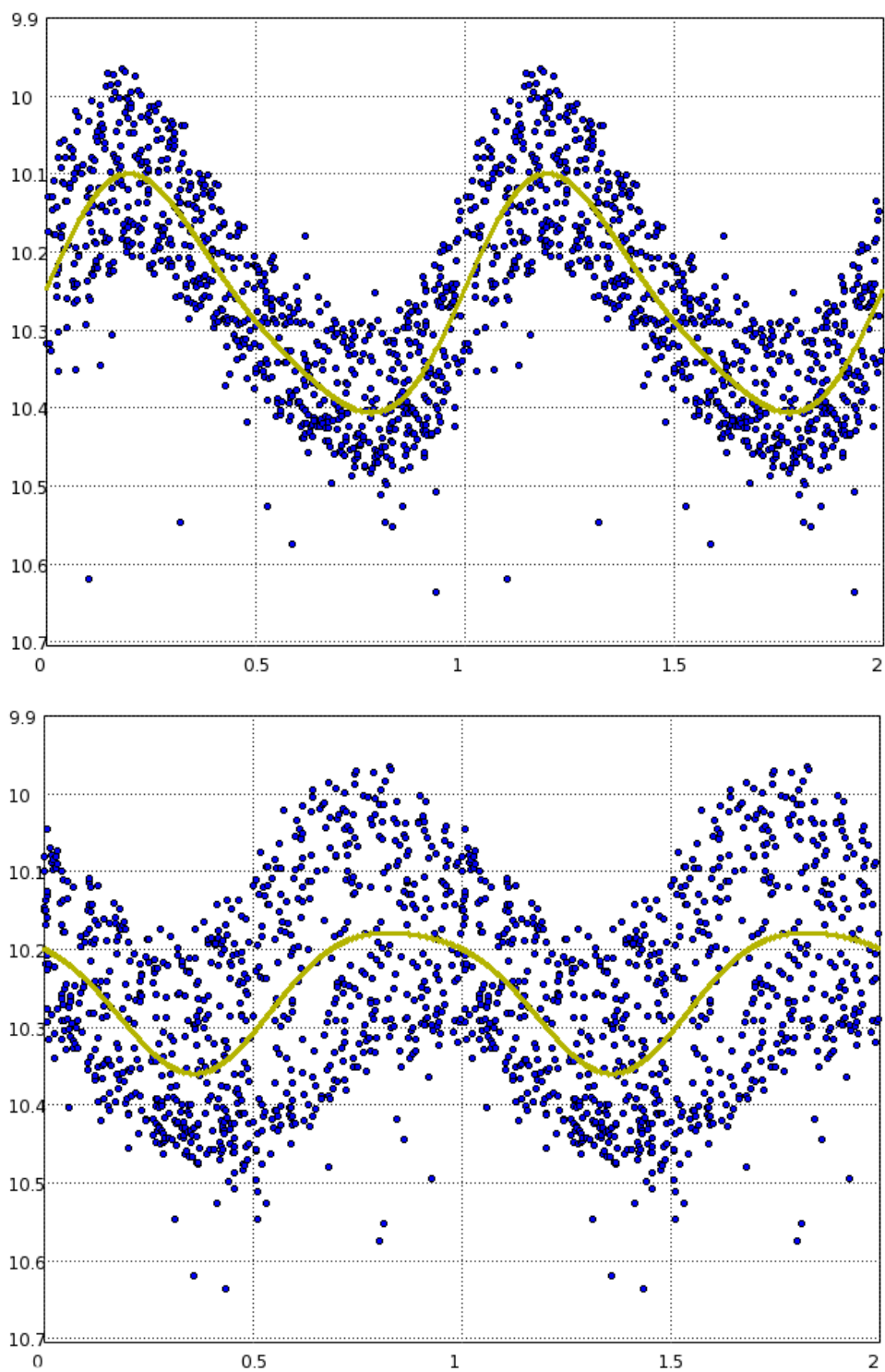
Rysunek 5:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **UZ Cen**,  $ID = 4865216$ .  
 Górny rysunek  $T = 3.335$ , dolny  $T = 2.356$



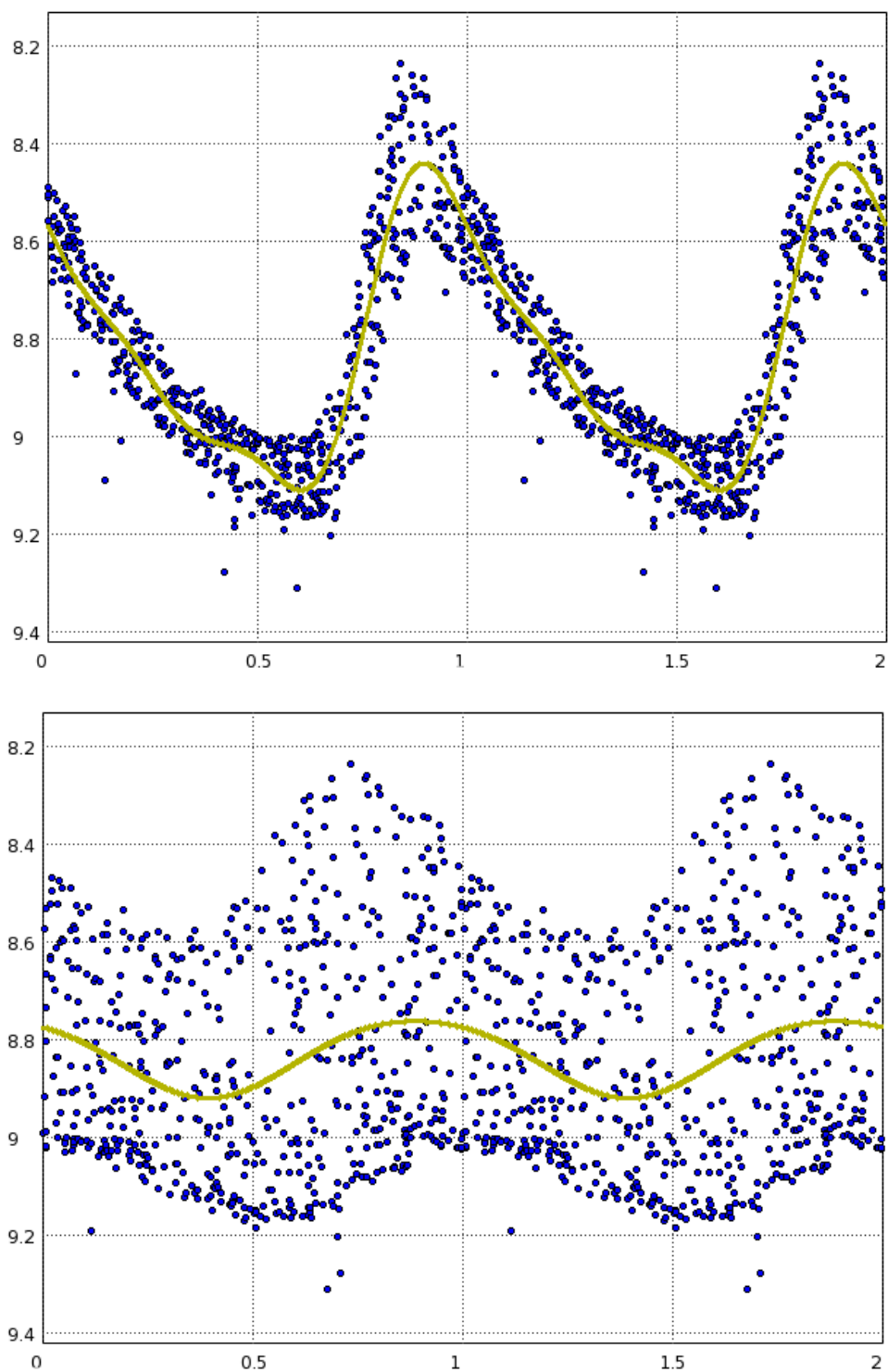
Rysunek 6:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **AX Vel** z danych katalogu ASAS.  
 Górny rysunek  $T = 3.673$ , dolny  $T = 2.592$



Rysunek 7:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **EW Set** z danych katalogu ASAS.  
 Górny rysunek  $T = 5.823$ , dolny  $T = 4.069$



Rysunek 8:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **GZ Car** z danych katalogu ASAS.  
 Górny rysunek  $T = 4.159$ , dolny  $T = 2.937$



Rysunek 9:  
 Sfazowane krzywe zmian blasku dla gwiazdy **UZ Cen** z danych katalogu ASAS.  
 Górny rysunek  $T = 3.335$ , dolny  $T = 2.356$