

# Eksperyment „Pi of the Sky”

Algorytmy wyznaczania okresu  
krzywych blasku gwiazd zmiennych

Marek Biskup

2006.01.23

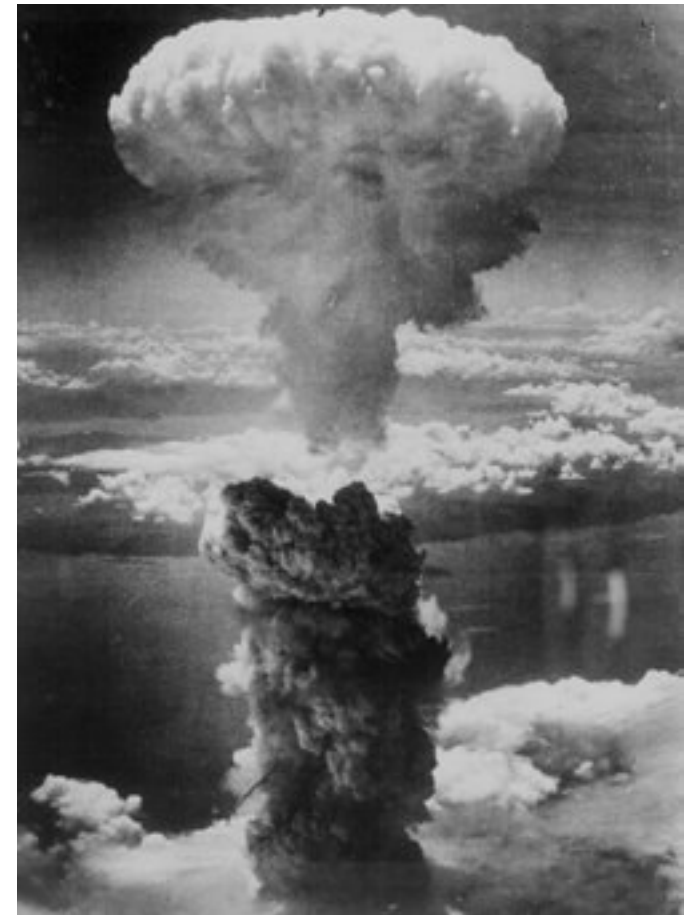


# Plan prezentacji

- Błyski gamma
- Eksperyment „Pi of the Sky”
- Gwiazdy zmienne
- Algorytmy wyznaczania okresu zmienności

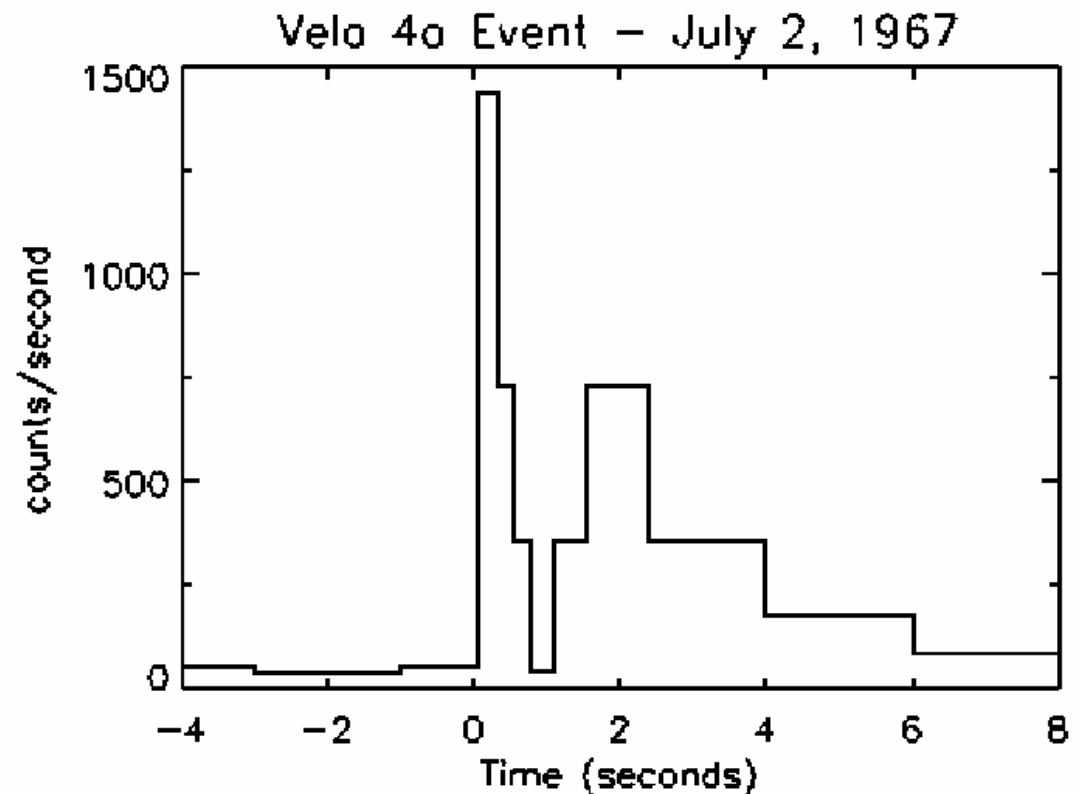
# Satelity z detektorami $\gamma$

- 1963 – pakt zabraniający prób nuklearnych w kosmosie
- Satelity Vela – do wykrywania eksplozji nuklearnych w kosmosie i atmosferze
  - pierwsze wysłane w 1963
  - 12 zewnętrznych detektorów prom. X
  - 18 wewnętrznych detektorów neutronów i  $\gamma$
  - Mogły wykryć eksplozję po drugiej stronie księżyca



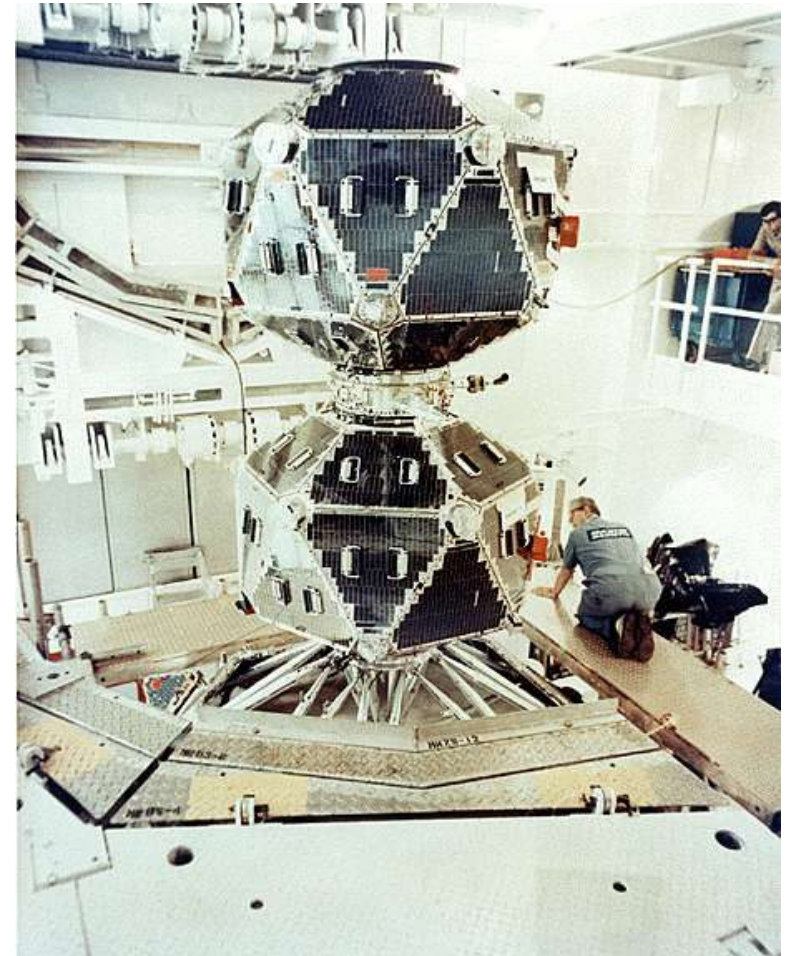
# Zarejestrowany wybuch $\gamma$

- 1967 – satelita Vela rejestruje eksplozję
- Próba nuklearna?
- Ale kształt impulsu jest inny niż z eksplozji nuklearnej



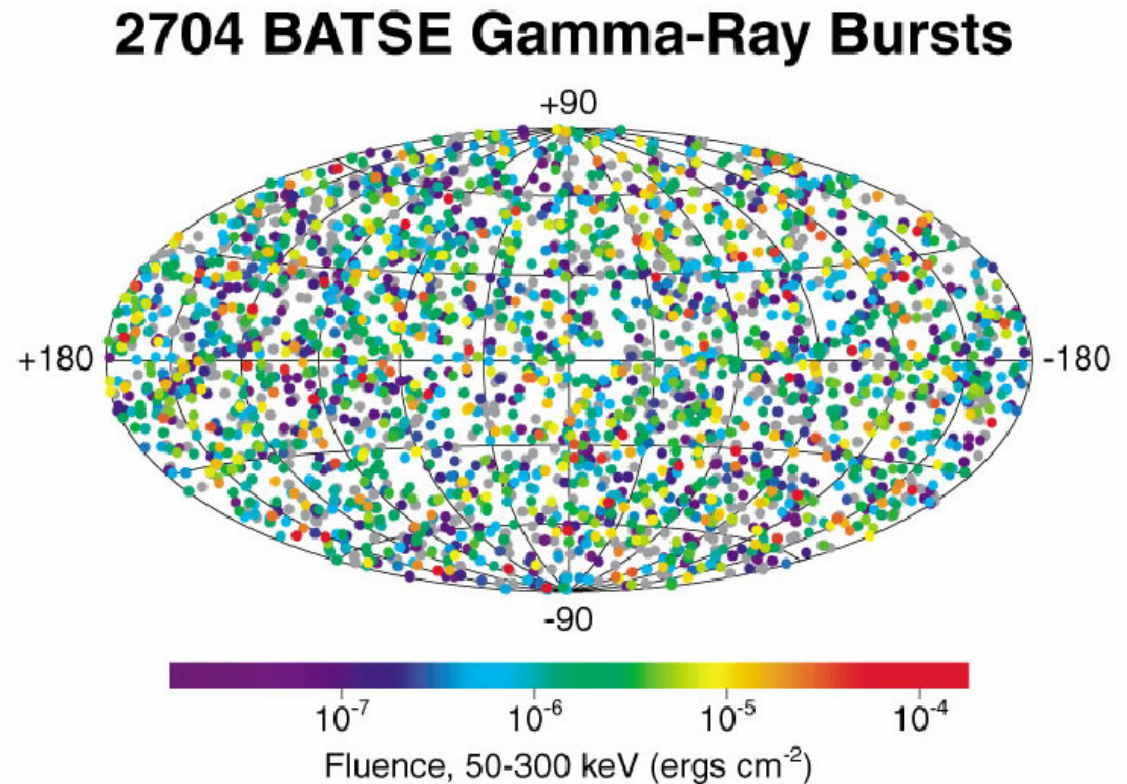
# Kolejne wybuchy $\gamma$

- 1967-73 – nowe satelity Advanced Vela
  - Możliwość rejestrowania kierunku i odległości
- 1969-73 – 16 nowych wybuchów  $\gamma$ 
  - Odległość  $> 1$  mln km
  - Nie na planetach ani słońcu
  - Jednorodnie rozłożone
- Różne hipotezy astronomów
  - Zderzenie komety z gwiazdą neutronową
  - Zapaść masywnej gwiazdy do czarnej dziury
  - Zderzenie gwiazd neutronowych
  - Supernowa



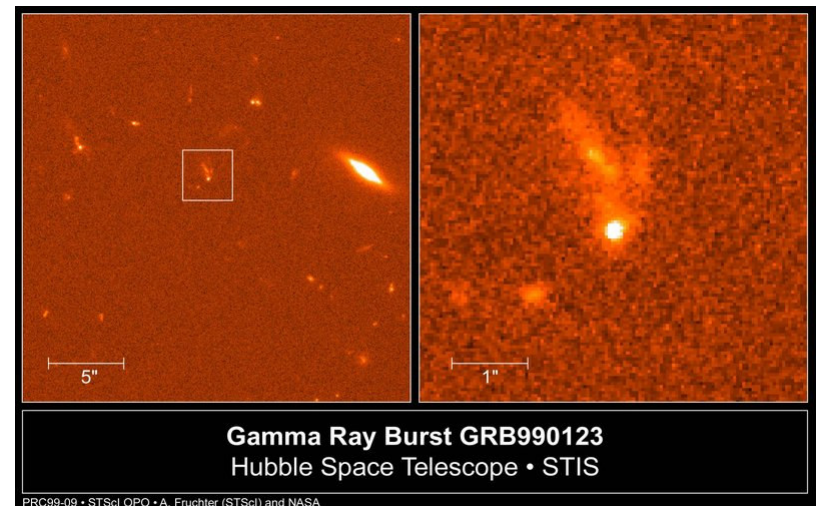
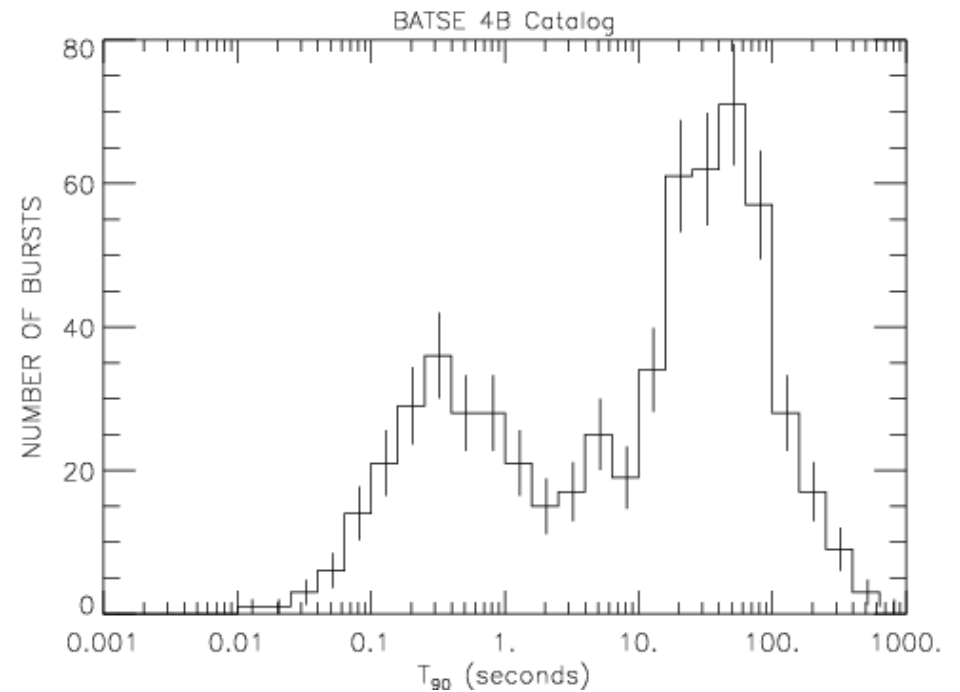
# Wybuchy promieniowania $\gamma$ (GRB)

- Krótkie (0,01s – 100s) błyski prom.  $\gamma$
- Ze źródeł punktowych
- Jaśniejsze niż cała reszta nieba
- Energia odpowiadająca  $10^{10}$  lat świecenia słońca
- Odległe – do  $13 \cdot 10^9$  lat świetlnych (poza galaktyką)
- 2-3 na dzień



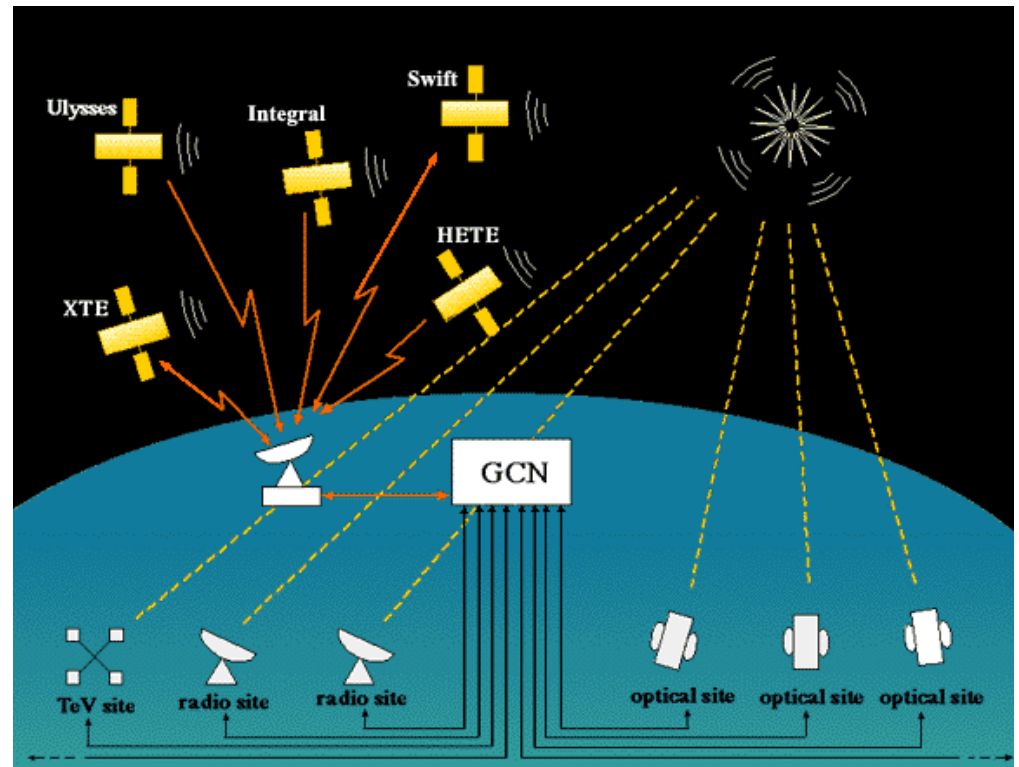
# GRB c.d.

- 2 typy: długie i krótkie
- Dotychczas ponad 3000 zaobserwowanych
  - Z tego około 100 miało część w świetle widzialnym
  - Dla około 70 udało się zmierzyć odległość
- Obserwowane w częstościach radiowych, X,  $\gamma \sim \text{GeV}, \text{TeV}$



# GRB c.d.

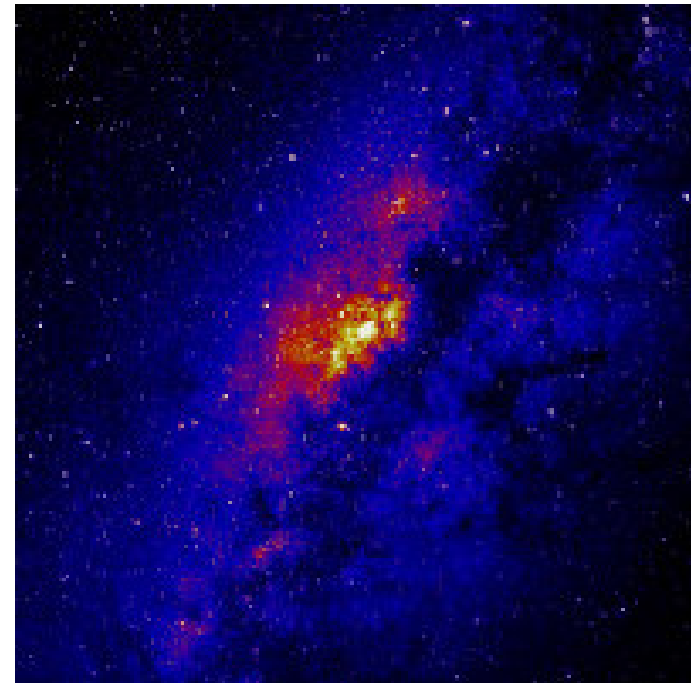
- Nie znana przyczyna, hipotezy:
  - Długie błyski: Hipernowa (40-100 mas słońca), zapas do czarnej dziury
  - Krótkie błyski: Połączenie dwóch gwiazd neutronowych w czarną dziurę
- Istnieją eksperymenty szukające GRB
  - Satelity wykrywają GRB i przekazują współrzędne do teleskopów naziemnych
  - Ale wtedy może już być za późno na ciekawe obserwacje



# Pi of the Sky – cele

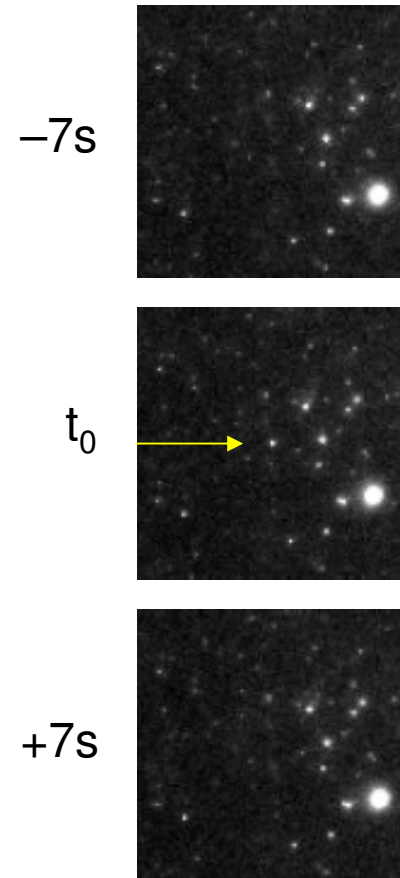
## Stała obserwacja nieba kamerami CCD

- Poszukiwania szybkich zmian jasności obiektów astrofizycznych
- W szczególności optycznych błysków towarzyszących GRB
- Analiza zmienności gwiazd – w szczególności gwiazd szybkozmiennych
- Obserwacja rotacji asteroid



# Pi of the Sky - eksperyment

- 2 x 16 kamer CCD
  - 2000x2000 pikseli
  - Ekspozycje 5 – 10 s
  - Niskie szумы
- Analiza on-line danych
  - Błyski
- Analiza off-line (w ciągu dnia)
  - Fotometria wszystkich gwiazd



# Prototyp

- 2 kamery własnej produkcji
  - Elektronika
  - Mechanika
- Ruchoma podstawa
  - Śledzenie gwiazd w czasie pomiarów
  - Możliwość przesunięcia do dowolnego punktu nieba w mniej niż 1 minuta
- Umieszczony w bazie eksperymentu ASAS w Chile



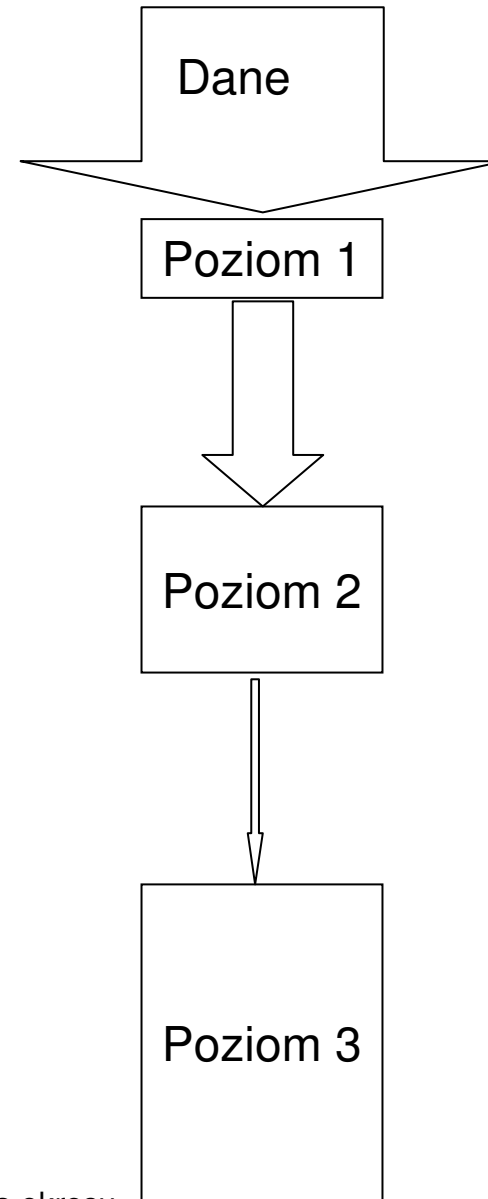


# Zbierane dane

- Zdjęcia
  - Naświetlanie 10s
  - 2s przerwy na przesyłanie danych
  - Każde zdjęcie to 8MB danych
- Prototyp: 10h obserwacji na dobę daje 2x3000 zdjęć, czyli 50GB danych
- Końcowy system: ~1TB/dobę

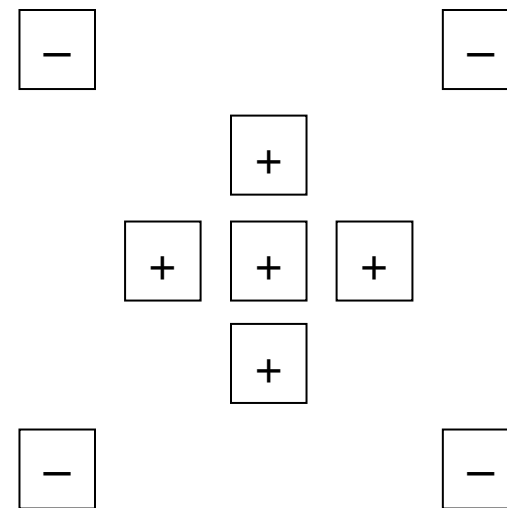
# Analiza on-line

- Wykrywanie błysków w czasie rzeczywistym
- Wielostopniowy algorytm (3 poziomy)
  - W każdym poziomie odrzucamy część danych
  - Kolejne poziomy coraz bardziej zaawansowane obliczeniowo
- Poziom 1: znalezienie kandydatów
- Poziom 2: odrzucanie fałszywych błysków
- Poziom 3: dalsze uwiarygodnienie



# Poziom 1 – znajdowanie kandydatów

- Pomiar jasności każdego piksela
- Odrzucenie piksele przesyconych, ciemnych, gorących
- Wybór lokalnych maksimumów
- Porównanie z poprzednią klatką – odrzucenie jeśli na poprzedniej klatce obiekt nie był ciemny
- Odrzucenie jeśli:
  - Jest dużo przypadków dookoła (powód: przelot samolotu, meteor, przesunięcie kamery)
  - Nie ma tego przypadku na drugiej kamerze (promienie kosmiczne)



Jasność punktu to  
suma pikseli + odjąć  
suma pikseli -



# Poziom 2 – odrzucanie fałszywych błysków

- Odrzucamy jeśli:
  - Błysk pokrywa się ze współrzędnymi jakiegoś satelity lub błyski układają się wzdłuż linii prostej
  - Przeszła chmura: porównujemy z katalogiem gwiazd
  - Kształt błysku jest zły
- Pozostaje kilka – kilkadziesiąt błysków na dzień
  - Ręczna analiza
  - Poziom 3 – dalsze uwiarygodnienie

# Analiza off-line

- Fotometria
  - Odjęcie klatki ciemnej (szum elektroniki)
  - Podzielenie przez mapę wzmocnienia (niejednorodność matrycy CCD)
  - Zamiana zdjęcia na ciąg pomiarów (współrzędne na matrycy, jasność)
  - Dla zwiększenia dokładności robiona dla klatek posumowanych po 20
- Astrometria
  - Określenie współrzędnych astronomicznych gwiazd
- Katalogowanie
  - Porównanie jasności znanych gwiazd z danymi katalogowymi i kalibracja jasności wszystkich gwiazd na tej podstawie

**Magnitudo:** astronomiczna  
miara jasności gwiazd:

$$m_x = -2.5 \log_{10}(F_x) + C$$

$F_x$  – strumień światła,  $C$  – stała

Słońce: **-27,73**

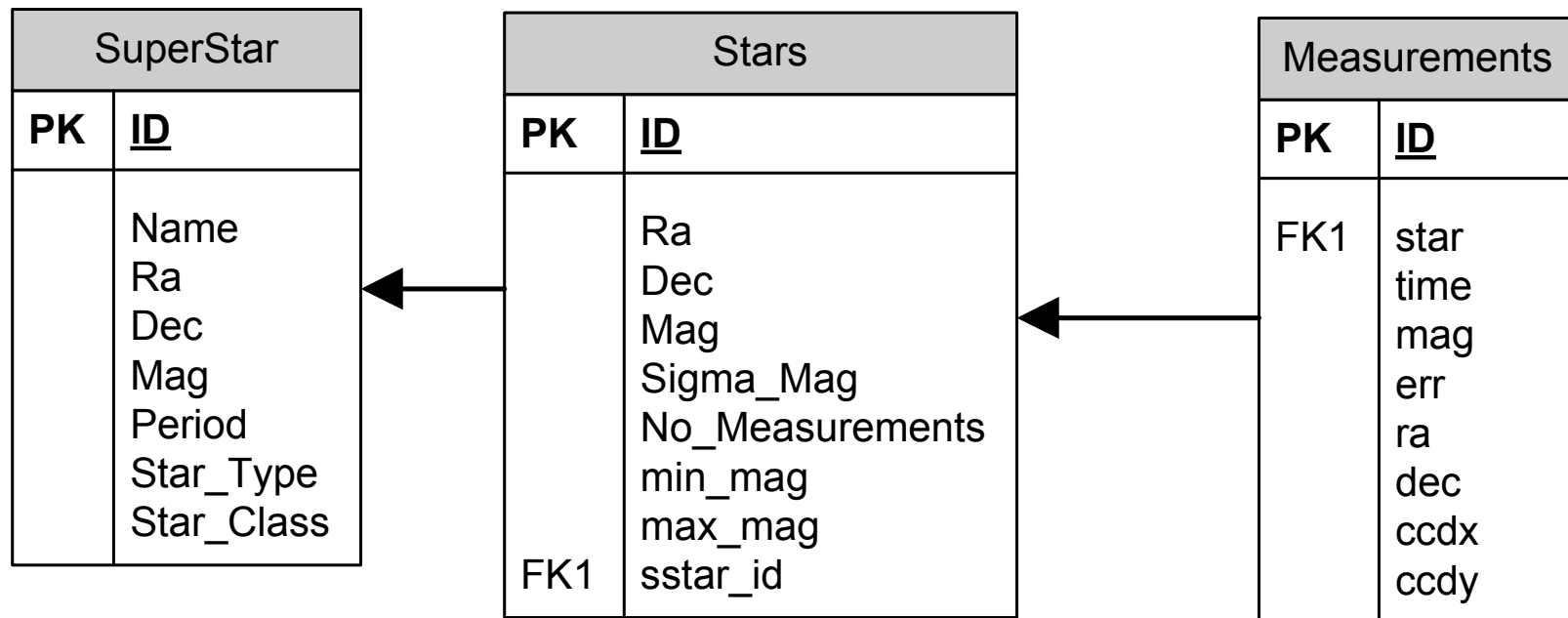
Mars: **-2,8**

Najśłabsza gwiazda

obserwowalna gołym okiem: **6,0**

# Zapisywane dane

- Relacyjna baza danych (PostgreSQL)
  - Około 15mln nowych pomiarów na dobę!

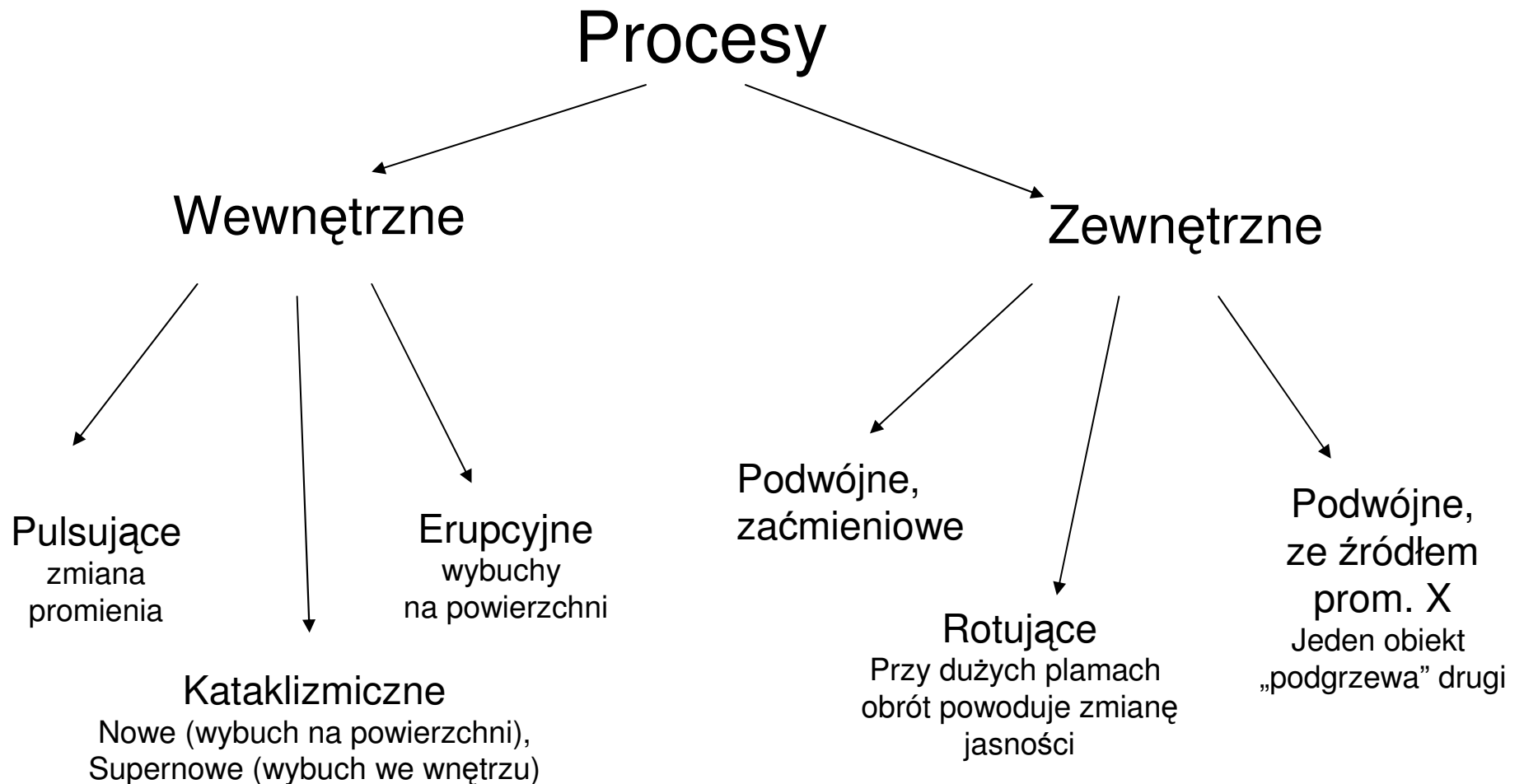




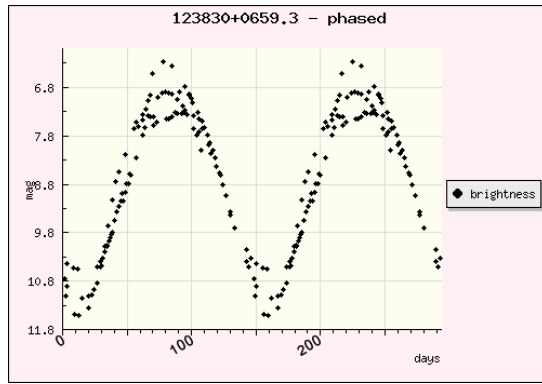
# Gwiazdy zmienne

- **Przyczyny zmienności**
  - Zmiana parametrów fizycznych (rozmiar, temp. powierzchni)
  - Zmiana ustawienia w przestrzeni (gwiazdy zaćmieniowe)
  - Oddziaływania (np. gorący obiekt ogrzewa inny)
- **Amplitudy**
  - Od tysięcznych do 20 mag.
- **Okresy**
  - Od milisekund do setek lat

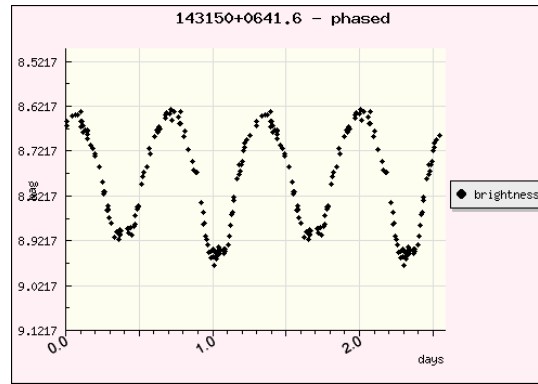
# Podział gwiazd zmiennych



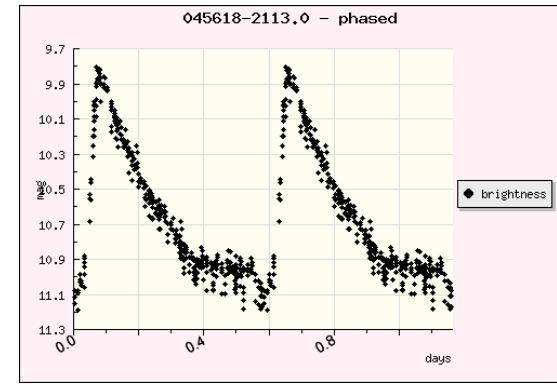
# Przykłady krzywych blasku



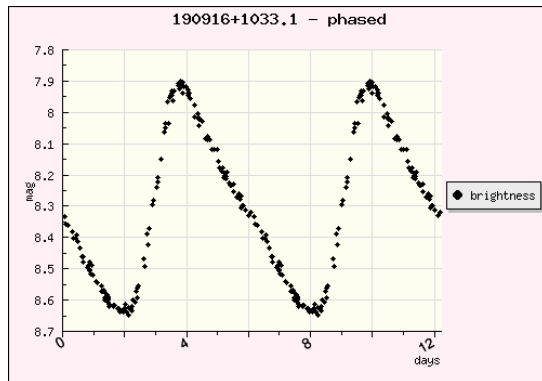
mira



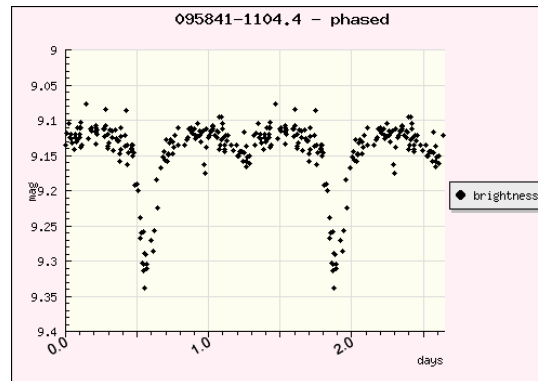
EC



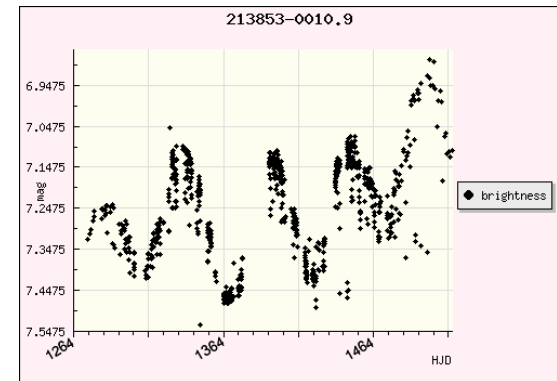
RRAB



DCEP



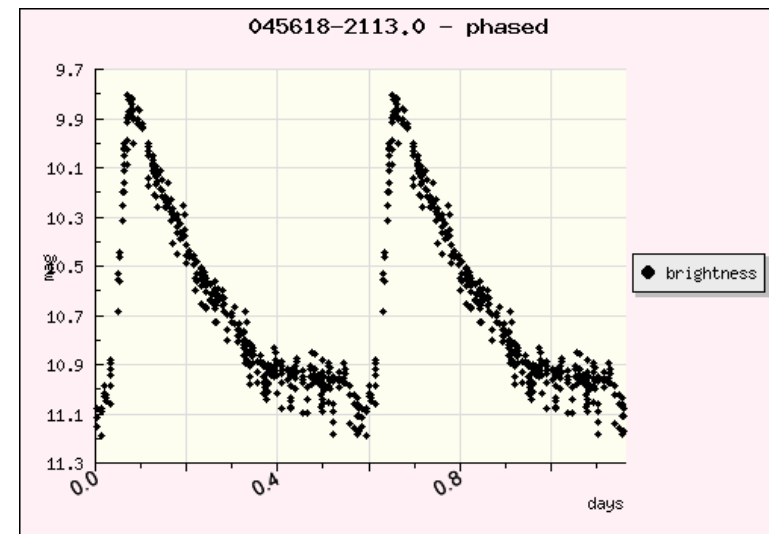
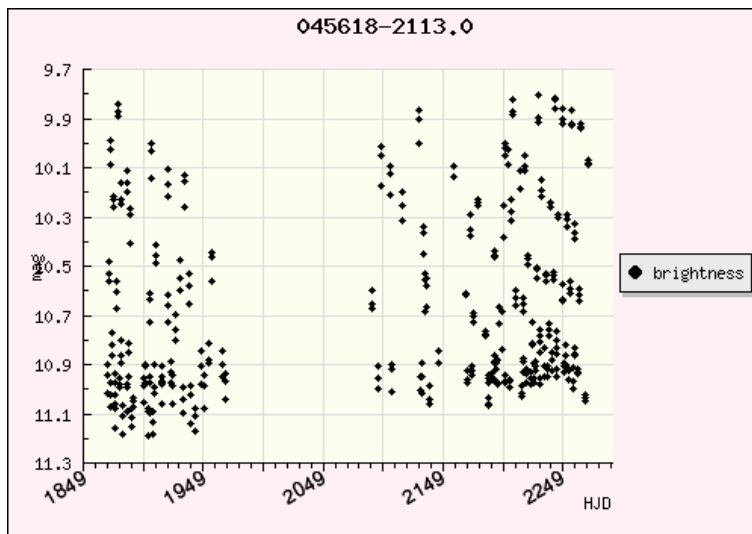
ESD



Inne

# Określanie okresu

- Gwiazdy zmienne często są okresowe; problemem przy wyznaczaniu okresu jest:
  - Nieregularność próbkowania
  - Błędy pomiarów





# Określanie okresu

- Brak ogólnego algorytmu (jak FFT w przypadku próbkowania regularnego)
- Ogólna technika - próbowanie różnych okresów i sprawdzanie jak bardzo punkty układają się wzdłuż linii
- Różne metody sprawdzania „liniowości” wykresu dla ustalonego okresu



# Algorytmy sprawdzania okresu

- W każdej metodzie badamy różne okresy poprzez:
  - Ustalenie fazy (część ułamkowa z czas/okres) dla każdego pomiaru
  - Sortujemy punkty względem fazy
- Metody:
  - Lafer-Kinman
  - Burke-Rolland-Boy
  - Stellingwerf
  - Transformata Fouriera
  - Schwarzenberg Czerny

# Lafer-Kinman

- Suma kwadratów różnic kolejnych wartości ma być minimalna
- Mianownik – normalizacja; stała dla wszystkich okresów ( $M$  – średnia wartość  $m$ )

$$\Theta = \frac{\sum_i (m_i - m_{i+1})^2}{\sum_i (m_i - \bar{M})^2}$$

- Zalety – szybkość
- Wady – mała czułość na wielokrotności okresu



Pierwsza praca o fazowaniu krzywych blasku z użyciem komputera.

- grudzień 1963
- IBM 1620 Mark 1, 60000 cyfr dziesiętnych pamięci
- Liczba pomiarów 10 – 40
- Pół minuty na sprawdzenie jednego okresu



# Burke, Rolland, Boy

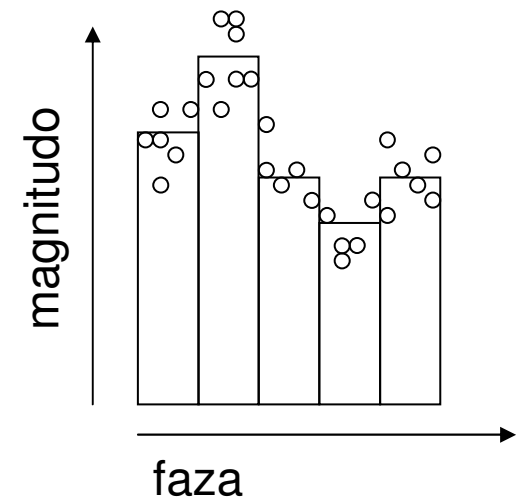
- Na punktach pomiarowych rozpinamy linkę
- Prawdziwy okres to ten, dla którego długość linki jest minimalna
- Wady: trzeba uzgodnić jednostki dla obu osi (faza i magnitudo)

# Stellingwerf

- Punkty dzielimy na grupy i liczymy średnią i wariancję w każdej grupie
- Całkowitą wariancję wyznaczamy za pomocą wariancji poszczególnych grup:

$$s^2 = \frac{\sum (n_i - 1) s_i^2}{\sum n_i - M}$$

$$\Theta = \frac{s^2}{\sigma^2} \quad - \text{minimalne}$$





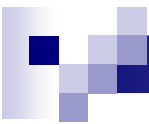
# Transformata Fouriera

- Liczymy korelację punktów pomiarowych z wielomianami trygonometrycznymi  $\exp(ikt)$
- Największa wartość korelacji wskazuje na okres
- Wady:
  - Nie można stosować FFT, bo dane są nieregularne
  - Wielomiany trygonometryczne nie są ortogonalne przy nieregularnych danych!



# Schwarzenber-Czerny

- Na podstawie punktów osi X konstruuje się ortogonalne wielomiany trygonometryczne
- Sygnał przybliża się wielomianami ortogonalnymi metodą najmniejszych kwadratów i sprawdza błąd przybliżenia
- Metoda najbardziej poprawna z matematycznego punktu widzenia
- Wady:
  - O rząd wielkości wolniejsza od poprzednich metod
  - Wyniki nie są o wiele lepsze



# Automatyczna klasyfikacja krzywych blasku

- Sieci neuronowe

- Krzywa rysowana na bitmapie o niskiej rozdzielczości
- I analizowana przez sieć neuronową

- Współczynniki fourierowskie

- Typy gwiazd mają charakterystyczne składowe harmoniczne
- Można analizować również za pomocą sieci neuronowych

# Jak gęsto sprawdzać okres

- Przypuśćmy, że znaleźliśmy okres różniący się o  $\Delta P$  od właściwego. Jaki będzie maksymalny błąd fazy punktu?

$$\Delta\Phi = \frac{T}{P} \Delta P$$

- $T$  – czas między pierwszym a ostatnim pomiarem,  $P$  – okres
- Błąd fazy możemy ustalić z góry (np. 1%)

Stąd:

$$\Delta P = P \frac{\Delta\Phi}{T}$$

Duże okresy próbujemy rzadziej.

Czyli okresy próbne to:

$$P_n = P_0 \left( 1 + \frac{2\Delta\Phi}{T} \right)^n$$

$$n_{\max} = \frac{T}{2\Delta\Phi} \ln \left( \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right)$$



# Podsumowanie

- Eksperyment Pi of the Sky zbiera masę użytecznych danych
- Kluczem do ich optymalnego wykorzystania jest zautomatyzowana analiza
- Tematem mojej pracy magisterskiej będzie automatyczna analiza krzywych blasku gwiazd
  - Znajdowanie okresu
  - Klasyfikacja typu zmienności