

MUNI

O – C diagramy

Jakub Kolář

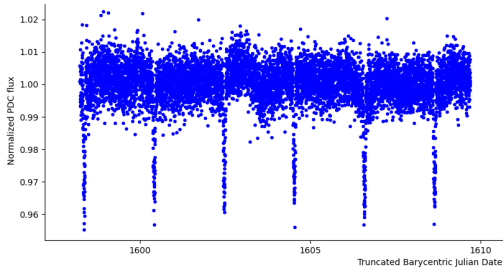
Periodicita

- Většina proměnných hvězd je periodická
- Periodické jevy: pulzace, rotace, oběh
- Časová řada (světelná křivka)
- $t, m, \delta m$
- Předpoklady: t známe přesně, jsme si jisti periodou a měřením

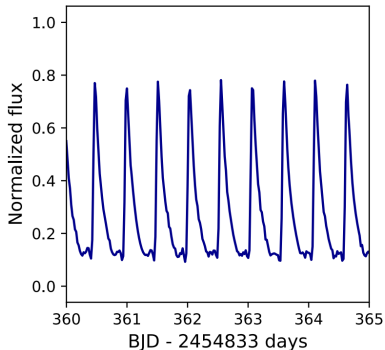
Periodová analýza

- Většinou je k dispozici alespoň nějaká hodnota
- Zpřesňování periody
- Změna periody
- Efekty ovlivňující periodu

Světelné křivky



TESS eclipsing binary catalog, Prša



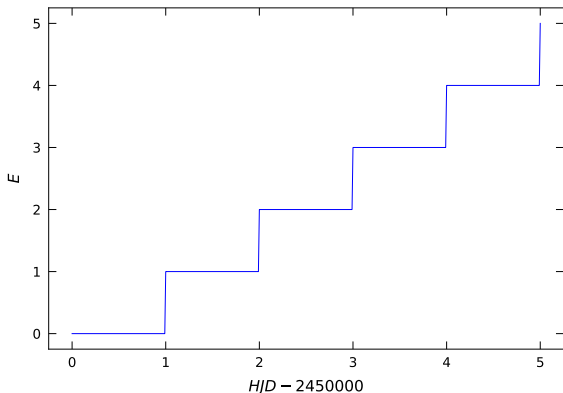
Forró et al., 2022

Fázová křivka, fázová funkce

- Známe periodu (alespoň s nějakou přesností)
- Můžeme sestavit fázovou světelnou křivku
- Fázová funkce $\vartheta = E + \varphi$
- Fáze $\varphi = \text{frac}(\vartheta)$, frac bere pouze desetinnou část
- Epoque $E = \text{floor}(\vartheta)$, floor zaokrouhuje směrem k nejbližšímu nižšímu číslu

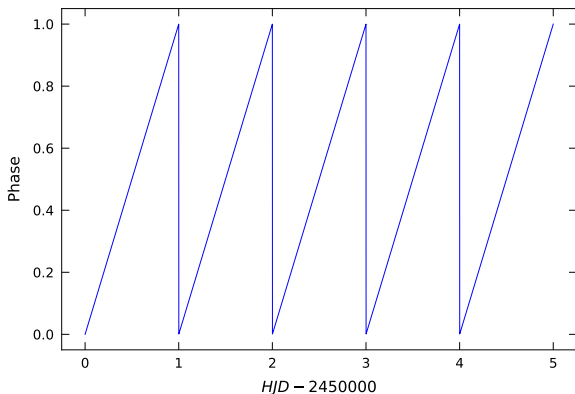
Epocha

- Vyjadřuje počet cyklů, které uplynuly od základního okamžiku M_0
- Neklesající schodovitá funkce
- Po jednom cyklu se zvedne o 1



Fáze

- Vyjadřuje, v jaké jsme části periodického cyklu
- Na začátku 0, pak roste do 1
- Pilovitá funkce



Příklad

- $\vartheta = 3,5$
- $E = 3$
- $\varphi = 0,5$
- Jak to bude pro $\vartheta = -2,6$?

Příklad

- $\vartheta = -2,6$

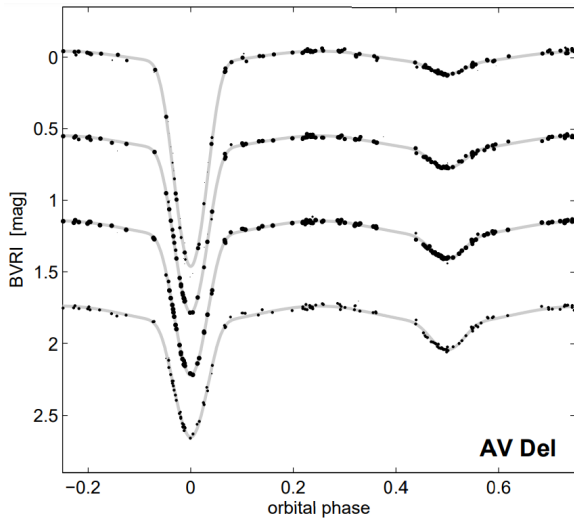
- $E = -3$

- $\varphi = 0,4$

Lineární efemerida

- Nejjednodušší možný případ
- Základní okamžik M_0 a perioda P
- Perioda je konstantní
- $\vartheta = \frac{t-M_0}{P}$

Fázová křivka



Mikulášek, 2015

Časy významných okamžiků

- Minima a maxima na světelné křivce
- Určení časů
- Význam pro detekci, stanovení a zpřesnění periody
- Fázové posuny
- Pokud známe periodu, můžeme si spočítat, kdy nastane daná fáze (nejčastěji minimum pro dvojhvězdy)

Předpověď

- Známe M_0 a P
- Jaká bude předpověď?

$O - C$

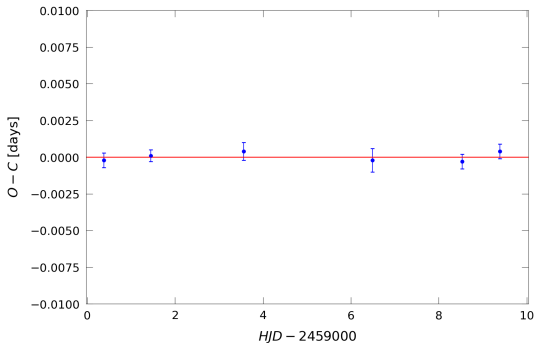
- Spočítaný čas C (calculated)
- $C = M_0 + PE$
- Naše měření: čas O z pozorování (observed)
- Porovnání těchto časů
- Grafickou podobou je $O - C$ diagram
- Dvojhvězdy ETV, exoplanety TTV

$O - C$ diagram

- Osa x: epocha, čas
- Osa y: $O - C$, což je taky čas (dny, minuty)
- Perioda je správně, M_0 taky, nenastává změna periody ani další jev, co dostaneme?

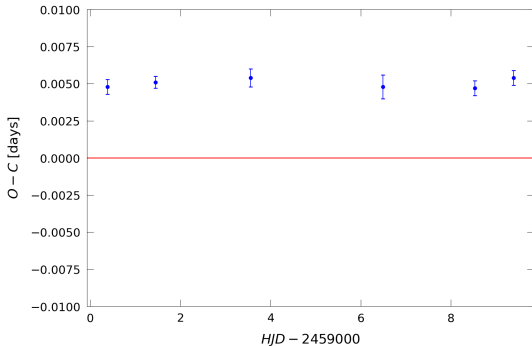
O – C diagram

- Přímka kolem nuly
- Perioda správně
- Pokud máme dostatek dat po dlouhou dobu, můžeme periodovou analýzu hvězdy uzavřít



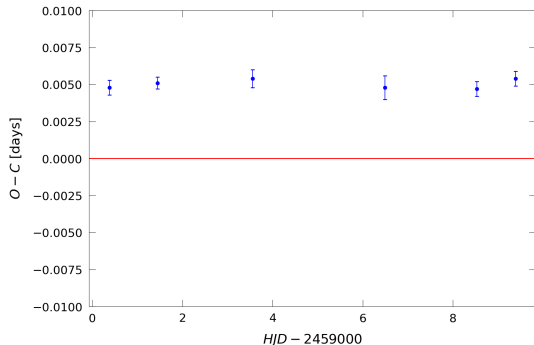
Vodorovná posunutá přímka

- Směrnice je nulová
- Data neprochází bodem [0;0]
- Perioda je správně
- Je tam posun, způsoben nepřesným určením M_0
- Jak to opravit?



Vodorovná posunutá přímka

- O je napozorovaný čas, s tím nemůžeme nic dělat (ověřit správnost)
- Můžeme změnit C
- Jsme nad nulou $\rightarrow O - C$ je kladný \rightarrow minima nastávají později
- Musíme to dorovnat, zvětšit M_0 o 0,005 dne
- při záporném $O - C$ jsou minima dříve, M_0 se zmenší

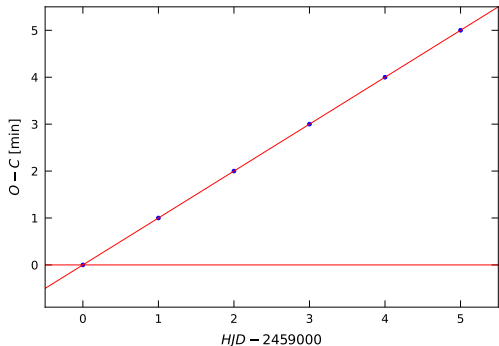


Šikmá přímka

- Perioda je konstantní
- Není určena správně
- Směrnice přímky může být kladná, nebo záporná
- Případný vertikální posun M_0

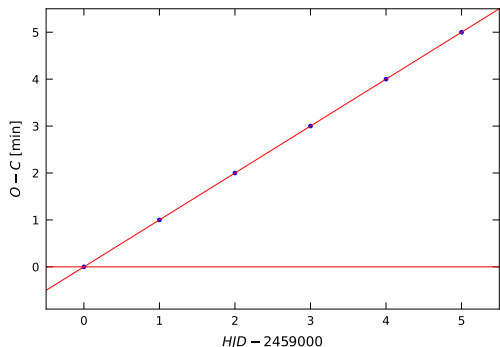
Šikmá přímka

- Odhadovaná perioda
 $P_0 = 1$ den
- Skutečná perioda
 $P = 1$ den 1 minuta
- $\Delta P = P - P_0$ při každém oběhu vznikne tento rozdíl, při více obězích se nám rozdíly sčítají
- S každým dalším oběhem je $O - C$ větší, časy minim jsou později
- Směrnice přímky

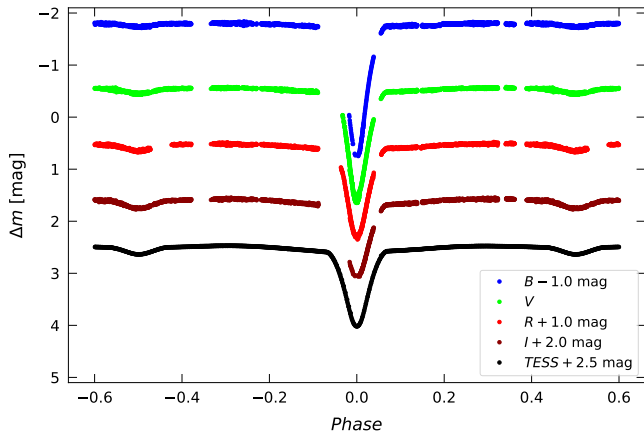


Šikmá přímka

- Směrnice je 1 min/den
= $6,94 \cdot 10^{-4}$ dnů/den
- Hodnota směrnice přímky je ΔP
- Časy O nastávají později, ta předpověď je musí dohnat
- Musíme přičíst jednu minutu, tím opravíme periodu a $O - C$ diagram

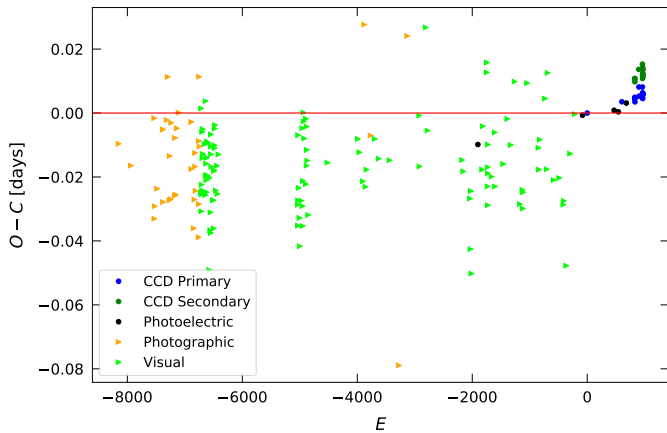


TT Lyr - algolida s výrazným primárním minimem



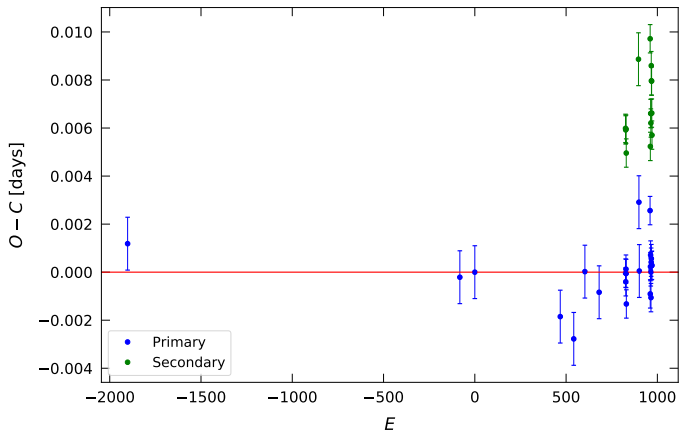
Modrá horká hvězda hlavní posloupnosti a červený podobr, Kolář et al., 2023

TT Lyr



Všechny možné druhy pozorování, ovlivnění pozorování

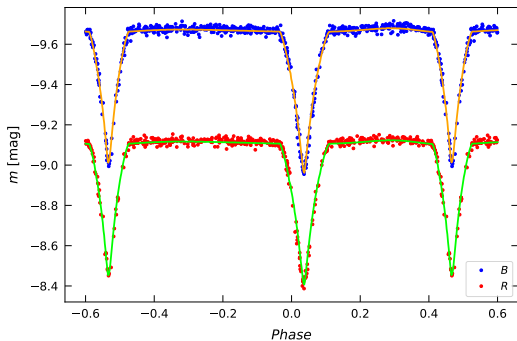
TT Lyr



Analýza nejspolehlivějších dat

Excentricita

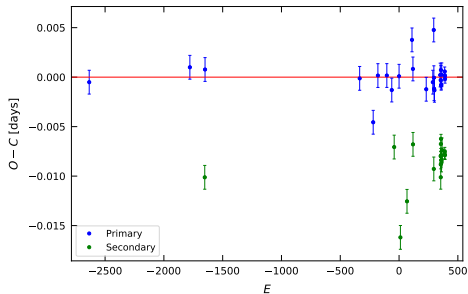
- Eliptické trajektorie, při nenulové hodnotě excentricity
- Minima nenastávají přesně po polovině oběhu
- Můžeme predikovat, kdy nastanou zákryty mimo fáze 0,5 a 1, uzpůsobit výpočet $O - C$



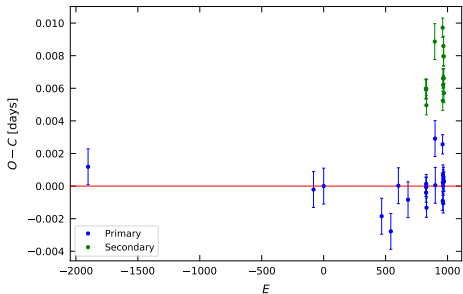
Kolář et al., 2023

Eliptické trajektorie

GX Lac



TT Lyr

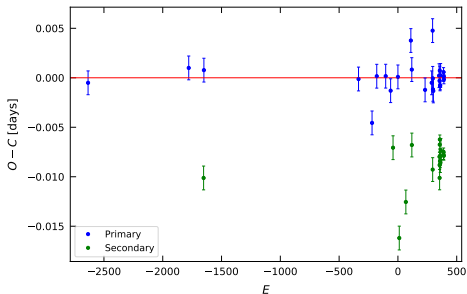


Jaký je zde rozdíl?

Detekování excentricity

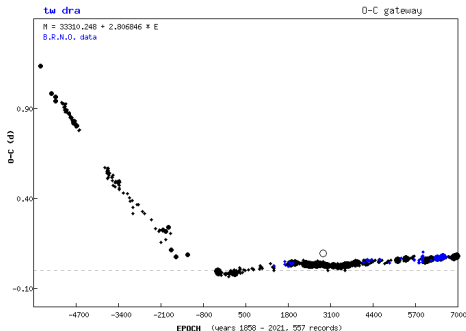
- $P = 6.355242075(10)$ dne
- $\varphi_{\text{sek}} = 0,4986$, nemusí se poznat na světelné křivce
- Časový rozdíl oproti fázi 0,5: $0,0014 P = 0,0089$ dne
- Na $O - C$ diagramu již dost velký rozdíl

GX Lac



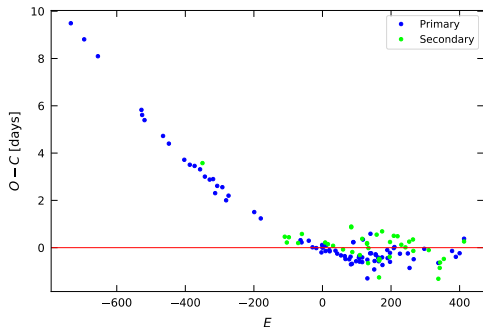
Změna periody

- Skoková změna
- Neobvyklé
- Může se jednat o eruptivní procesy
- Kontrolovat data



Pozvolná změna

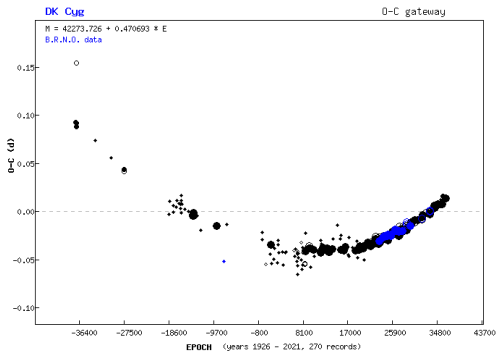
- Většinou parabola
- Interpretace změn: přetok látky, složitější jevy
- Parabola otevřená vzhůru



RX Cas, O-C brána

Pozvolná změna

- Parabola otevřená vzhůru: prodlužování periody
- S každým dalším oběhem se zvětšuje doba mezi minimy, čas O se čím dál tím více posouvá, nárůst $O - C$
- Parabola otevřená dolů: zkracování periody
- Složitější změny, polynom vyššího stupně, obtížná fyzikální interpretace



Pozvolná změna

- Pro popis nám nestačí lineární efemerida

- Změna periody \dot{P}

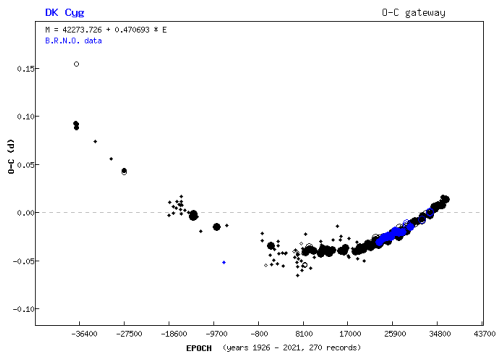
- $C = M_0 + P_0 E + P_0 \dot{P} \frac{E^2}{2}$

- Z výpočtů parametr Q

- Člen $Q \frac{E^2}{2}$

- $P_0 \dot{P} \frac{E^2}{2} = Q E^2$

- Jednotka Q ?



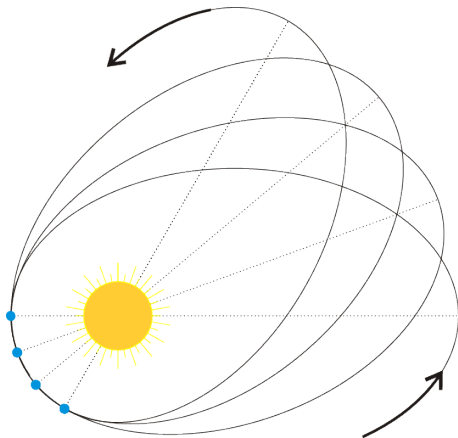
Pozvolná změna

- Časová jednotka (nejčastěji den)

- $Q = \frac{P_0 \dot{P}}{2}$

- $\dot{P} = \frac{2Q}{P_0}$

Apsidální pohyb (stáčení přímky apsid)

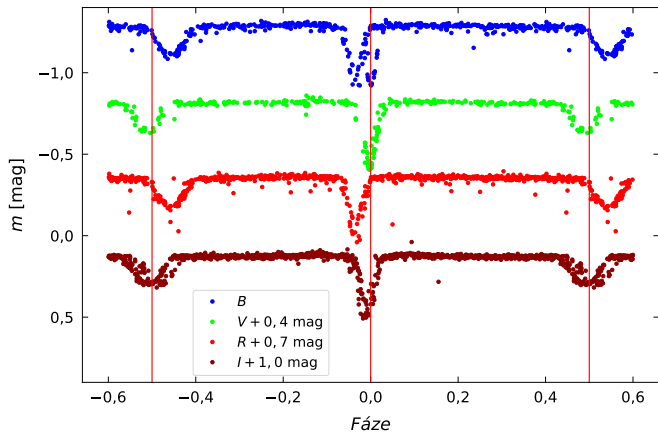


aasnova.org/2017/07/12/wasp-12b-and-its-possible-fiery-demise/

Apsidální pohyb

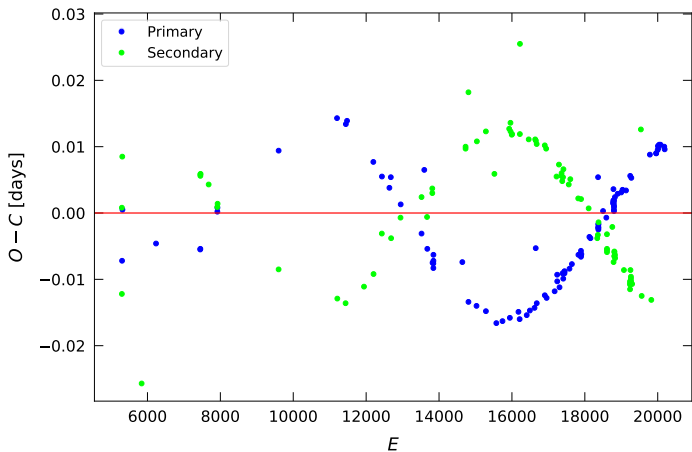
- Spojnice pericentra a apocentra
- Pro excentrické dvojhvězdy
- Příčiny pohybu: odchylka od kulového tvaru a nehomogenní rozložení hustoty hvězd, relativistické efekty
- Periodický pohyb
- Perioda U , většinou velmi dlouhé, stovky, nejkratší desítky roků
- Různě natočené systémy, argument periastra ω
- Potřeba co největšího pokrytí dat, nejlépe více než jedna celá perioda

OGLE LMC-ECL-7641 - apsidální pohyb



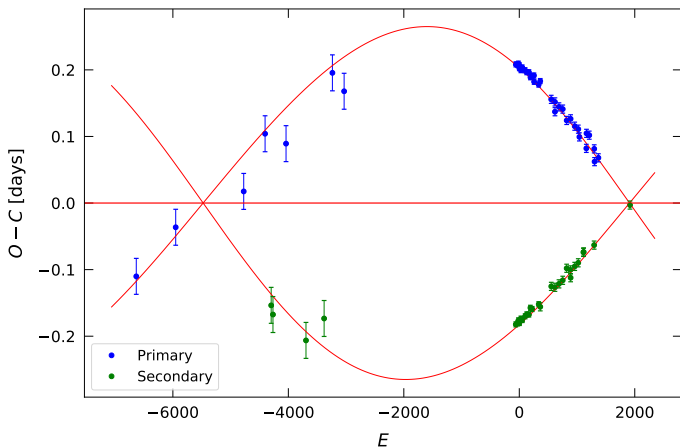
Minima oscilují kolem předpokládaných hodnot fáze.

O – C diagram CO Lac



$U \approx 40$ roků, O-C brána

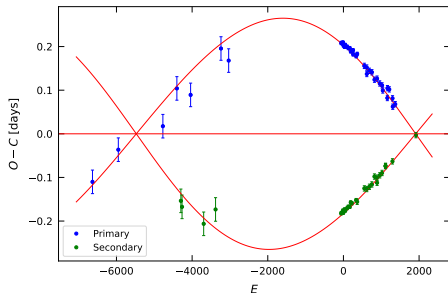
$O - C$ diagram OGLE LMC-ECL-17411



$U \approx 216$ roků, Kolář et al., 2023

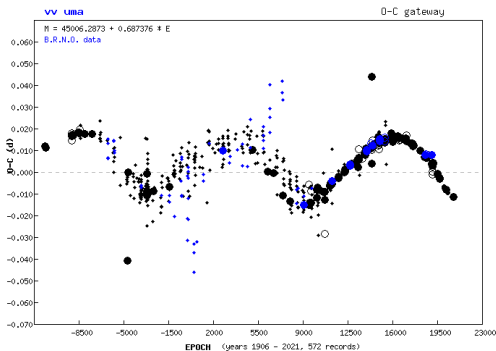
Apsidální pohyb

- Jeden model (primární i sekundární minima dohromady)
- Tvar závisí na excentricitě
- Amplitudy obou minim by měly být stejné
- Perioda $U = \frac{360}{\dot{\omega}}$
- $\dot{\omega}$: změna argumentu periastra (takto uvedeno ve stupních za jednotku času)



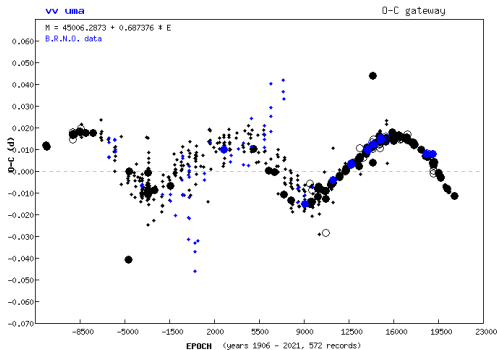
Sinusoida

- Periodická změna
- Primární a sekundární minima jdou stejně
- Co to může znamenat, proč?



Sinusoida

- Oběh kolem společného těžiště ve vícenásobné soustavě
- Efekt rozdílné dráhy světla
- Dynamické jevy



Light Time Effect (LiTE)

- Geometrický jev
- Pohyb se třetí složkou kolem společného těžiště
- Oběžná perioda zůstává stejná
- Světelná křivka se cyklicky mění, podle toho, kde se při globálním oběhu hvězda nachází
- Spíše menší amplitudy změn, dlouhé periody
- Třetí složka: jedna hvězda, více hvězd, exoplaneta

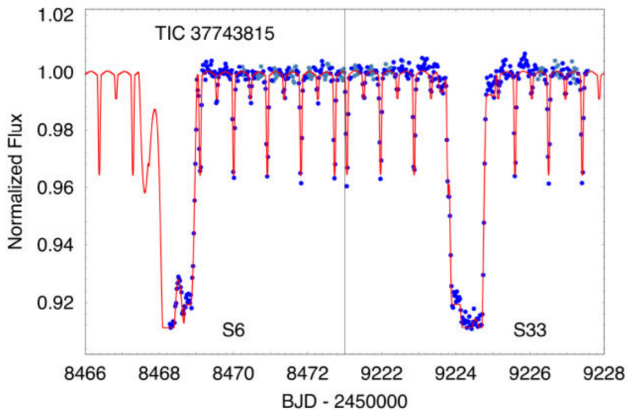
Light Time Effect (LiTE)

- Z analýzy $O - C$ diagramu jsme schopni určit funkci hmotnosti (mass function) f_m
- f_m dává odhad minimální hmotnosti třetího tělesa
- Objev kandidátů, potvrzení spektroskopicky, případně fotometricky

Vícenásobné systémy

- Třetí těleso (více těles)
- Stabilní jsou jenom některá řešení, vždy dvojice
- Trojhvězda: těsná dvojhvězda a vzdálená složka
- Čtyřhvězda: struktura $3 + 1$ nebo $2 + 2$

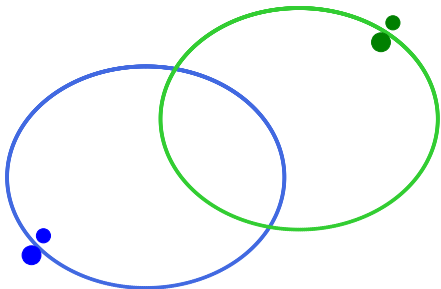
Trojhvězda, zákryt třetí složkou



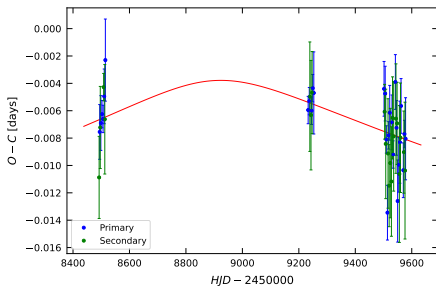
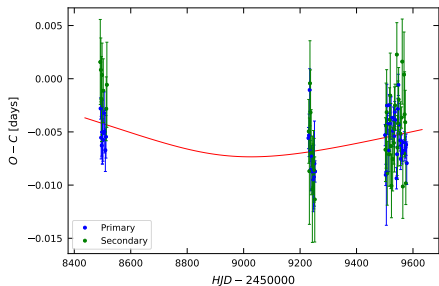
Rappaport et al., 2022 (data družice TESS)

Dvozákrytové čtyřhvězdy

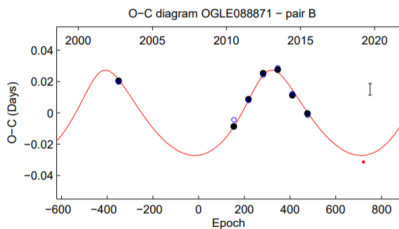
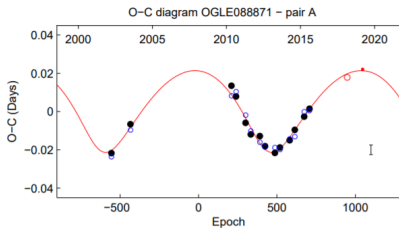
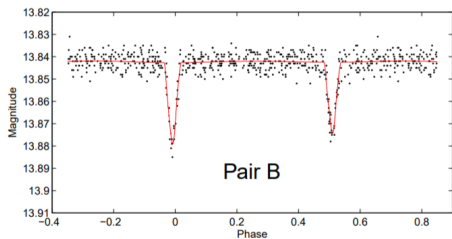
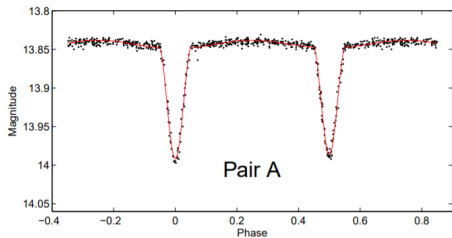
- Čtyři hvězdy ve struktuře 2 + 2
- Dva zákrytové podsystemy, oběh kolem jejich společného těžiště
- Vzájemný pohyb, většinou velké periody, vyžaduje dlouhodobé fotometrické sledování
- Jak budou vypadat $O - C$ diagramy?



Dvozákrytové čtyřhvězdy



Dvozákrytové čtyřhvězdy



OGLE BLG-ECL-088871, Zasche et al., 2019

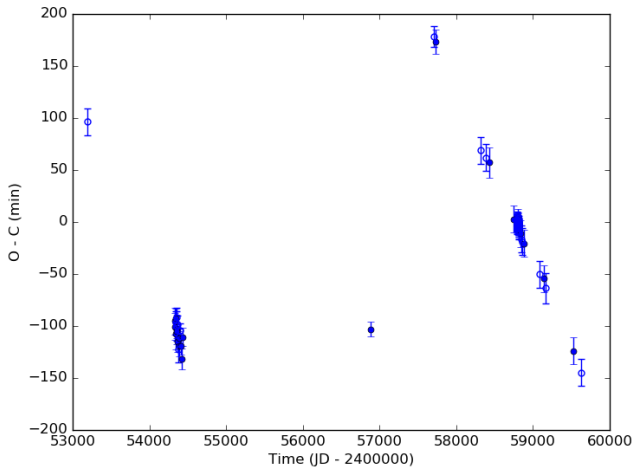
Dvožákrytové čtyřhvězdy

- Perioda vzájemného pohybu je pro oba páry stejná
- Změny vzájemně v protifázi
- Obvykle podobné amplitudy, nemusí být stejné
- $\frac{m_A}{m_B} = \frac{A_B}{A_A}$
- Dlouhodobá fotometrie nám může říct poměr hmotností mezi dvojhvězdami

Analýza

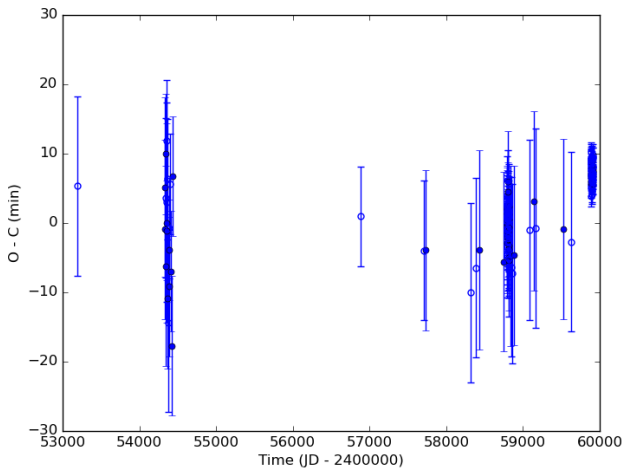
- Kontrolovat měření (hlavně ta cizí)
- Nejistoty: nepřesné, nebo nemusí být uvedeny
- Váhy, robustní regrese
- Body mimo
- Podivné tvary

ASASSN-V J020003.56+452605.2



Krátká perioda, velký $O - C$, převedení do špatné epochy

ASASSN-V J020003.56+452605.2

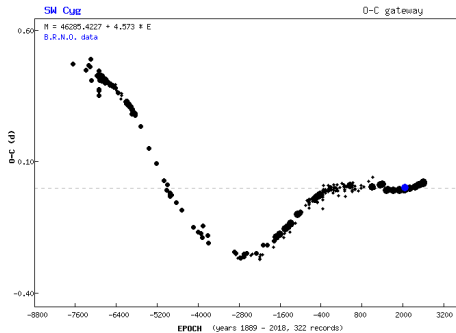
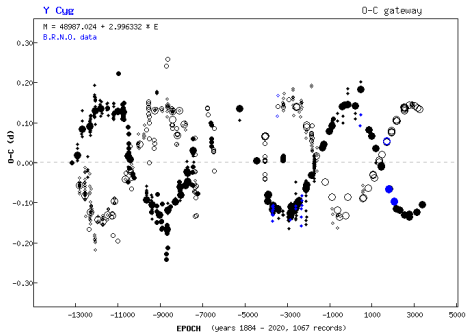


Úprava periody, přidání dalších dat

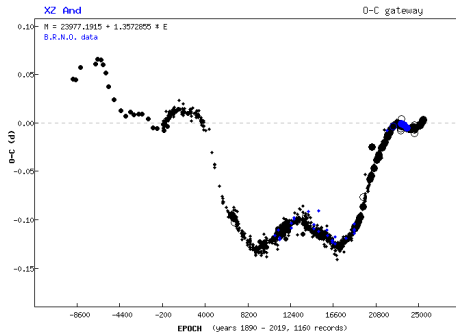
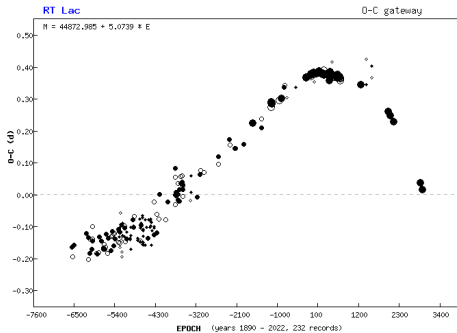
Zdroje dat pro $O - C$ diagramy

- Vlastní měření, družice a přehlídky
- Publikace, databáze minim
- O-C brána: var2.astro.cz/ocgate/index.php?lang=cz
- Lichtenknecker-Database:
bav-astro.eu/index.php/veroeffentlichungen/service-for-scientists/lkdb-engl
- Nelson Database of Eclipsing Binary O-C Files:
aavso.org/bob-nelsons-o-c-files

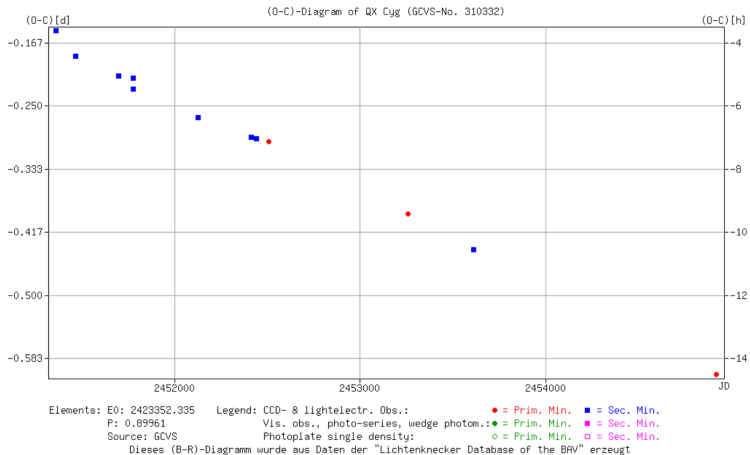
O – C diagramy



O – C diagramy



Domácí úkol, QX Cyg



Zpřesnit periodu

**MASARYKOVA
UNIVERZITA**