

**MUNI**

# **Zákrytové dvojhvězdy**

**Jakub Kolář**

## Dvojhvězdy (fyzické)

- Soustava dvou hvězd
- Gravitační vazba
- Oběh kolem společného těžiště
- Stejně stáří a počáteční chemické složení

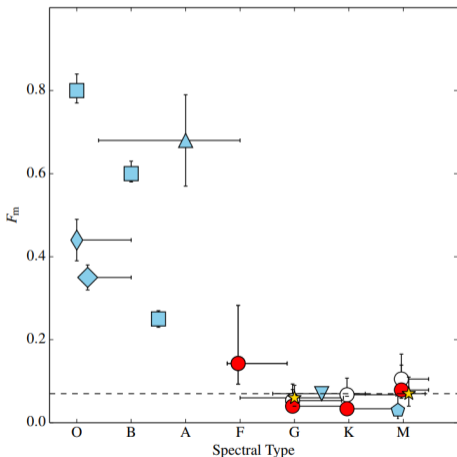
optické nejsou gravitačně vázány, jen stejný směr k pozorovateli



[eso.org/public/videos/eso1311b/](https://eso.org/public/videos/eso1311b/)

# Dvojhvězdy

- Vznik složek ze stejného materiálu na stejném místě, moment hybnosti
- Další vývoj může být různý
- Četnost vícehvězdných soustav silně závisí na spektrálním typu
- M: kolem 20 %, B: většina, O: téměř všechny ve dvojhvězdách (přesné hodnoty se liší dle publikací)

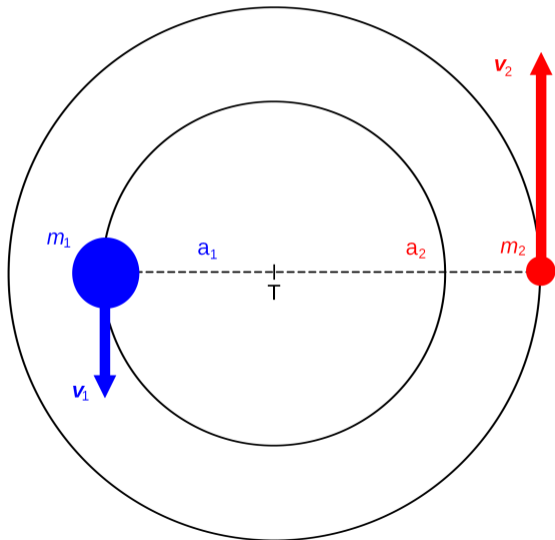


# Oběh složek

Zachování hybnosti

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{a_2}{a_1}$$



## Význam studia dvojhvězd

- Určování důležitých vlastností, které se obvykle určují obtížně (hmotnosti, absolutní rozměry, vzdálenosti)
- Různorodé druhy hvězd (spektra, stáří, vývojové fáze)
- Hvězdná stavba a vývoj
- Vícenásobné soustavy, vždy se vyskytují dvojice

# Metody detekce

- Vizuální
- Astrometrické
- Spektroskopické
- Zákrytové

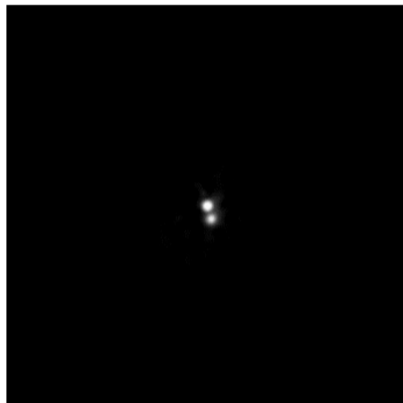
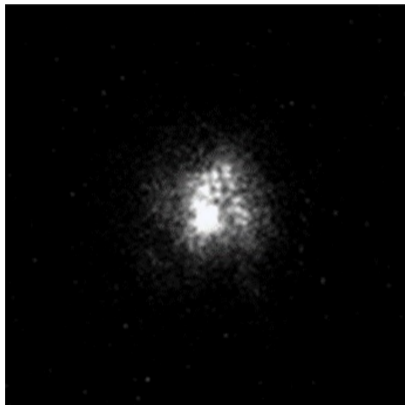
## Vizuální dvojhvězdy

- Složky můžeme vizuálně rozlišit
- Dalekohled nebo interferometr
- Dlouhodobým sledováním lze měřit oběžné trajektorie (pak hmotnosti)
- Většinou dlouhé periody (roky a více), jsou daleko od sebe (v absolutních jednotkách), mohou být daleko i úhlově a tím tak rozlišitelné
- Sírius (nejdříve astrometrická dvojhvězda, potom teprve vizuální)



Mizar

# Interferometrie

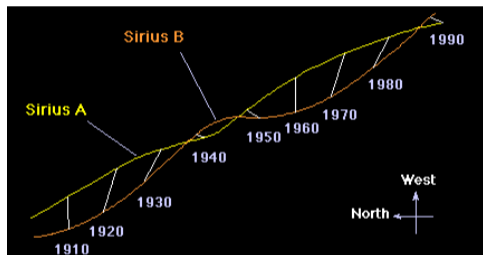


Hardy et al., 2023



## Astrometrické dvojhvězdy

- Přesná měření poloh a jejich změn (vlastní pohyb)
- Periodické odchylky
- Sírius: Bessel (1844), Clark (1862)
- Problém pro vzdálené hvězdy a hustá pole

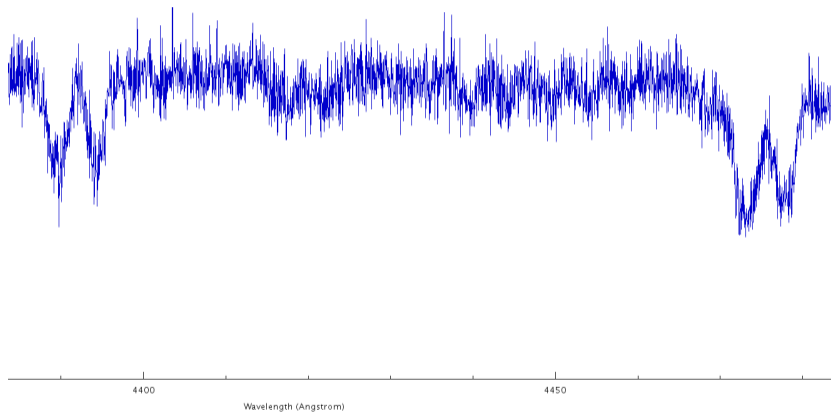


Courtesy of Mike Guidry, University of Tennessee

## Spektroskopické dvojhvězdy

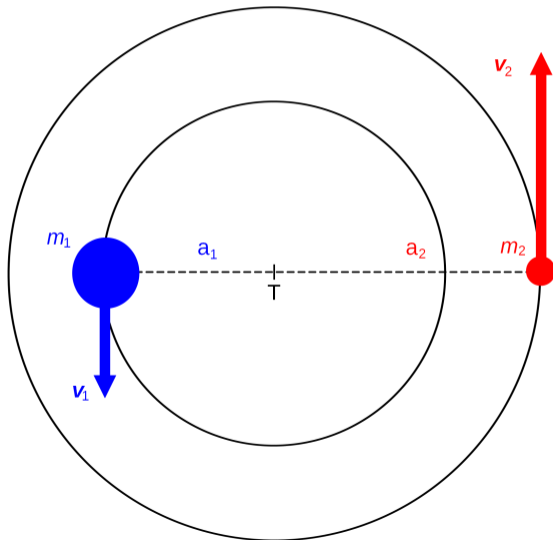
- Pravidelné změny poloh spektrálních čar v důsledku Dopplerova jevu
- Složky se střídavě přibližují a vzdalují
- Radiální rychlosti
- SB1 - ve spektrech viditelná pouze jedna složka (nelze zjistit vše, někdy odhad)
- SB2 - štěpení, vidíme čáry obou složek, lepší případ
- Nesmí se zapomenout na rychlost těžiště, systém se nějak pohybuje jako celek, do toho pohyb složek kolem těžiště

# Čáry He I 4387 a 4471, OGLE LMC-ECL-17411



# Radiální rychlosti

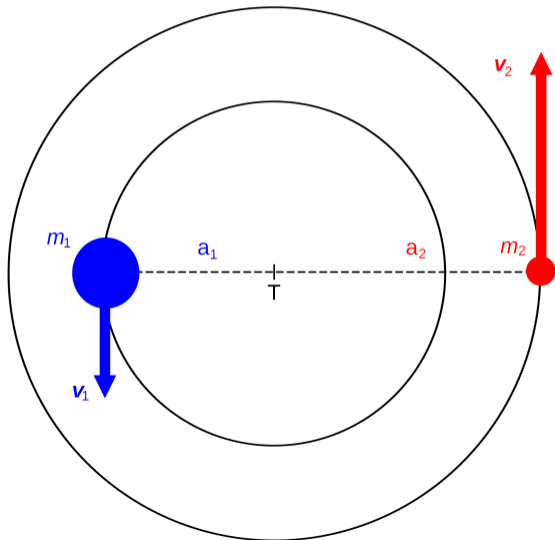
- Jak se budou radiální rychlosti počítat?
- Co znamená modrý posun, co červený?



# Radiální rychlosti

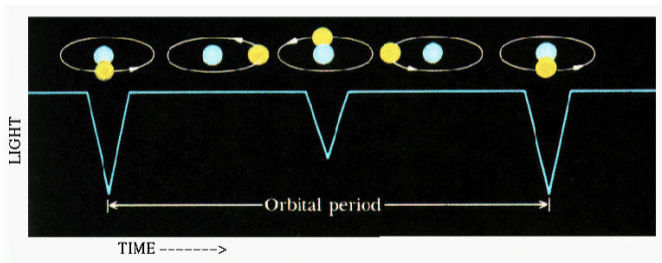
$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v_{\text{rad}}}{c}$$

- Modrý posun: záporná rychlost, přibližuje se
- Červený posun: kladná rychlost, vzdaluje se



## Zákrytové dvojhvězdy

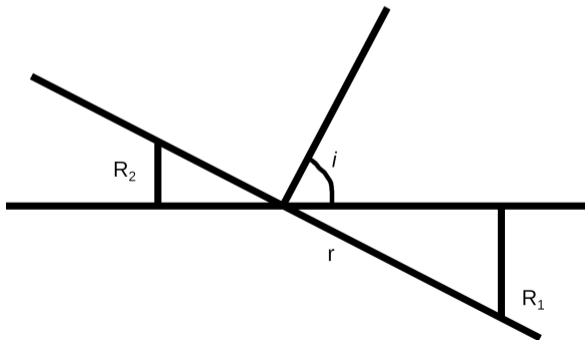
- Během oběhu se složky vzájemně zakrývají
- Pravidelné změny jasnosti (perioda oběhu), další možné jevy
- Vhodné natočení systému - nezbytná podmínka



[homepages.uc.edu/~hansonmm/ASTRO/LECTURENOTES/W04/Binaries/Page57.html](http://homepages.uc.edu/~hansonmm/ASTRO/LECTURENOTES/W04/Binaries/Page57.html)

## Podmínka zákrytu

- Rovina pozorovatele
- Inklináčn $\acute{\text{y}}$  úhel  $i$ , úhel mezi normálou oběžné roviny a rovinou pozorovatele



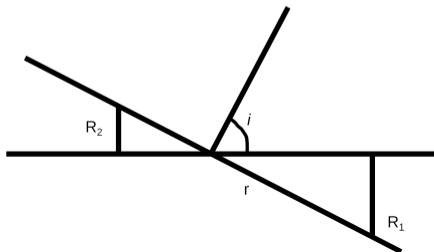
## Podmínka zákrytu

Limitní případ:

$$\sin(90 - i) = \frac{R_1 + R_2}{r}$$

Podmínka pro zákryty:

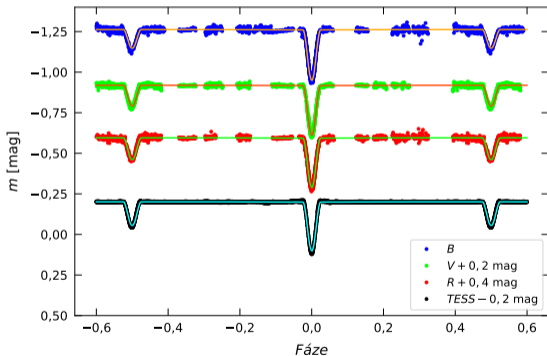
$$\sin(90 - i) < \frac{R_1 + R_2}{r}$$





# Světelná křivka

- Závislost hvězdné velikosti na čase/fázi
- Hvězdná velikost, intenzita, flux
- Čas, různé formáty (JD, HJD, BJD, MJD)



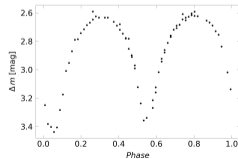
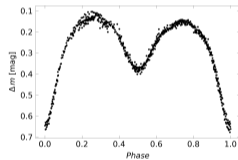
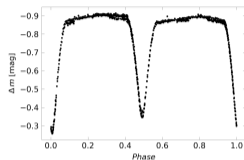
## Fáze $\varphi$

$$\varphi = \text{frac} \frac{t - M_0}{P}$$

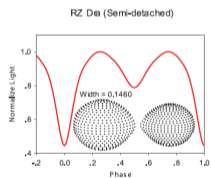
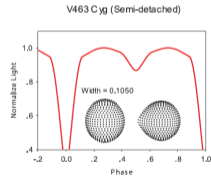
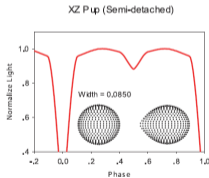
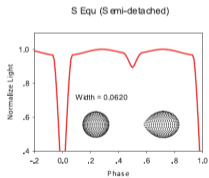
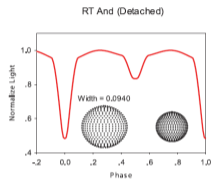
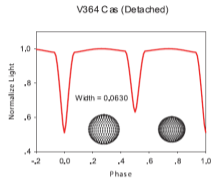
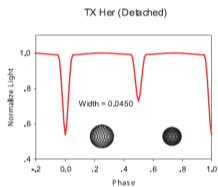
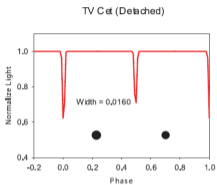
- Vyjadřuje, v jaké části periodického oběhu se nacházíme
- Desetinná část, od 0 do 1
- Monotónně roste
- Někdy je fázová křivka posunuta pro lepší viditelnost zákrytů

# Světelné křivky

- Algolidy
- Typ  $\beta$  Lyr
- Typ W UMa



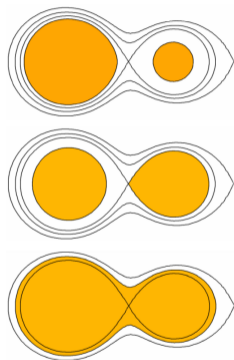
# Světelné křivky



Kang, 2010

# Morfologie

- Rocheovy laloky
- Bod  $L_1$
- Oddělené
- Polodotykové
- Kontaktní: overcontact, double contact
- Doplnující klasifikace (např. WD - bílí trpaslíci)



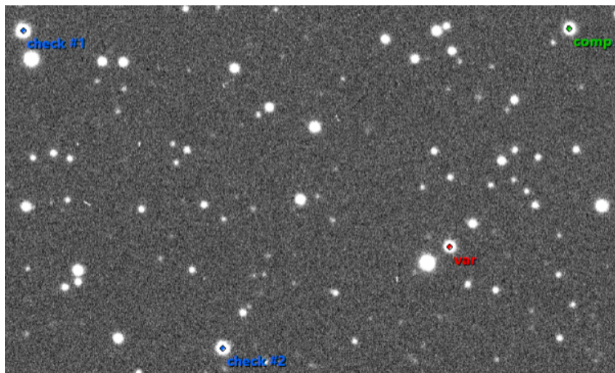
Terrell, 2001

# Výzkum zákrytových dvojhvězd

- Fotometrie
- Spektroskopie
- Periodová analýza
- Astrometrie, interferometrie
- Dlouhodobé sledování

# Fotometrie

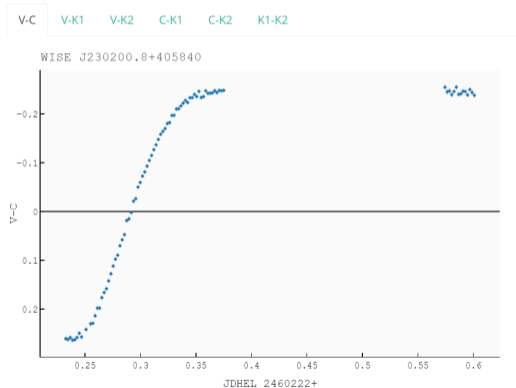
- Měření jasnosti hvězd (změna jasnosti v čase)
- Zpracování CCD snímků
- Vlastní data a přehlídky
- Světelná křivka



C-Munipack

# Fotometrie

## Graph



Databáze AMPER, 4.10.2023



# Analýza světelné křivky

- Nepostradatelná, ale nemůžeme z ní získat vše
- Tvar hvězd
- Teploty (při použití více barevných filtrů)
- Relativní rozměry
- Inklinální úhel

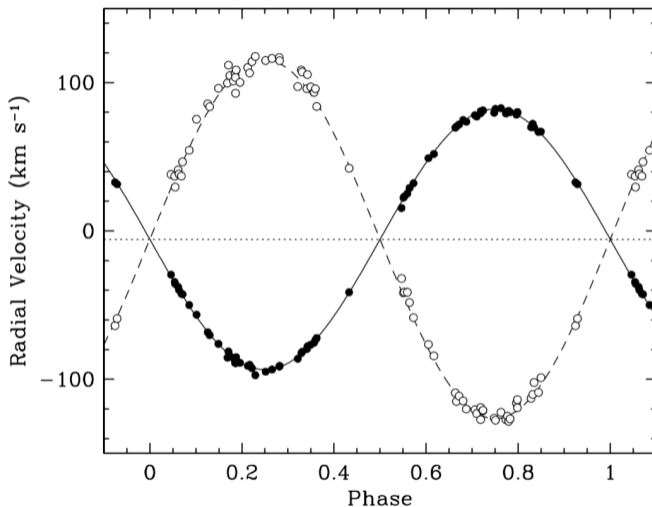
# Spektroskopie

- Doplnění k fotometrii
- Nejlépe SB2 - vidíme čáry obou složek
- Informace o teplotách, chemickém složení, povrchovém zrychlení
- Násobnost soustavy
- Radiální rychlosti
- Určení hmotností, rozměrů a vzdáleností

## Křivka radiálních rychlostí

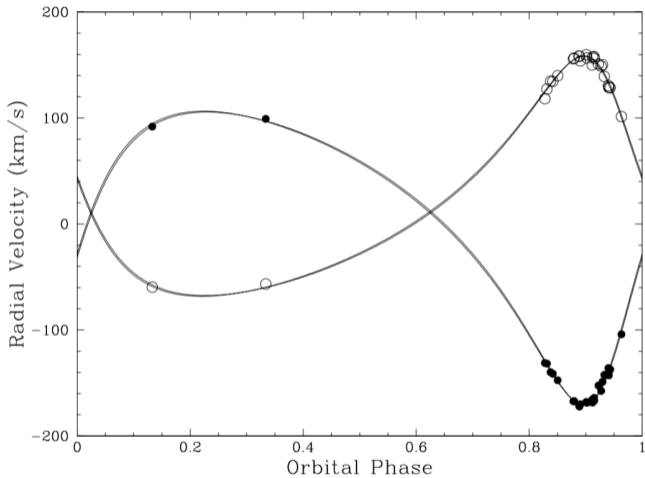
- Amplitudy  $K_1$  a  $K_2$
- Poměr hmotností  $q = \frac{M_2}{M_1} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{a_1}{a_2}$
- Kromě hvězd se pohybuje také těžiště
- Tvar závisí na trajektoriích obou složek a orientaci systému
- Získáme konzistentní modely a absolutní parametry

## Křivka radiálních rychlostí - kruhová trajektorie



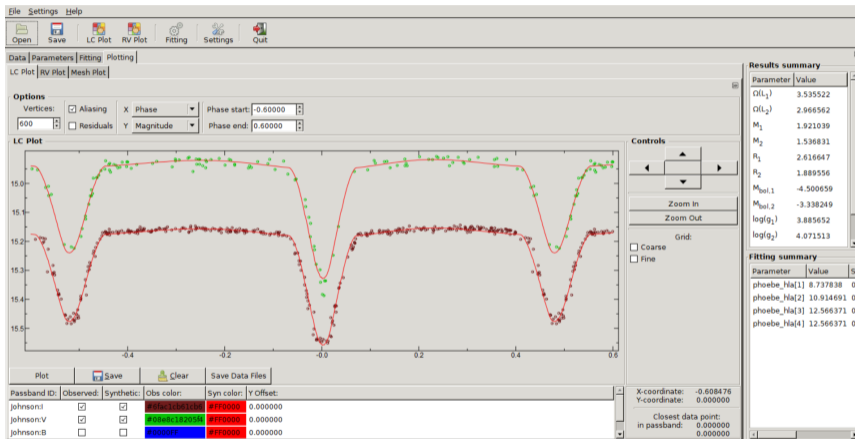
Během zákrytů mají hvězdy radiální rychlost těžiště, mezi zákryty se k pozorovateli složky postupně vzdalují a přibližují, plné body značí rychlost primární složky, (Torres et al., 2006).

# Křivka radiálních rychlostí - eliptická trajektorie



Deformované křivky, rychlost se mění různě v závislosti na poloze (Sabby et al., 2011).

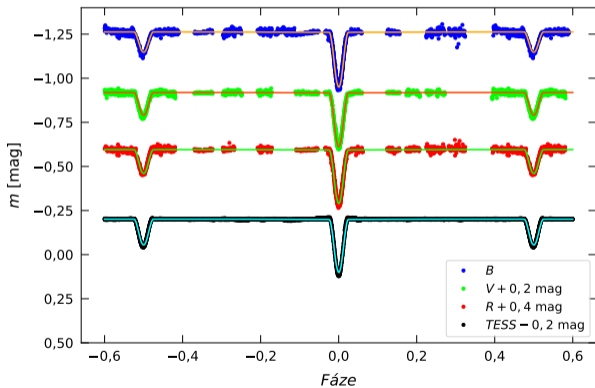
# Modelování



PHOEBE (Fyzikální model)

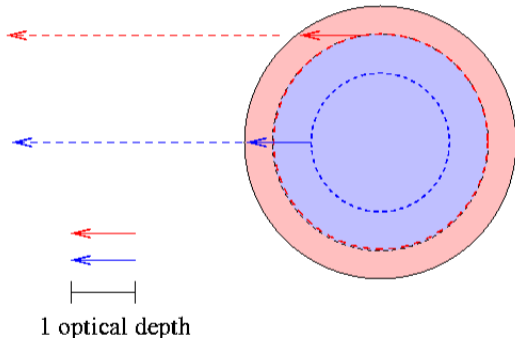
# Vlivy na tvar křivek

- Velikosti a vzdálenosti složek
- Teploty, inklinace
- Oběžné trajektorie (kruhová, eliptická)
- Další proměnnost (složka je rotující, pulzující, vícenásobný systém)
- Efekty druhého řádu



## Okrajové ztemnění

- Okraj hvězdy nemá stejnou jasnost jako střed hvězdy
- Záření z fotosféry má převážně radiální šíření
- Na střed se díváme přímo, u kraje sledujeme chladnější vrstvy

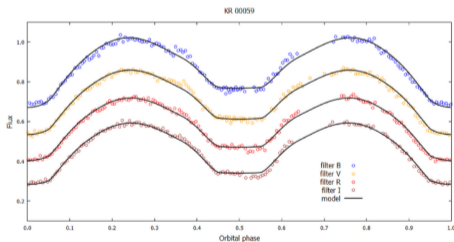


[spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/limb/limb.html](http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/limb/limb.html)

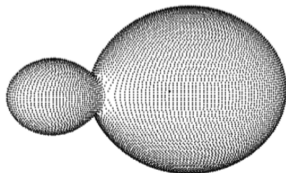


# Okrajové ztemnění

- Příklad - úplné zákryty
- Primární minimum - lehké změny
- Sekundární minimum - rovné



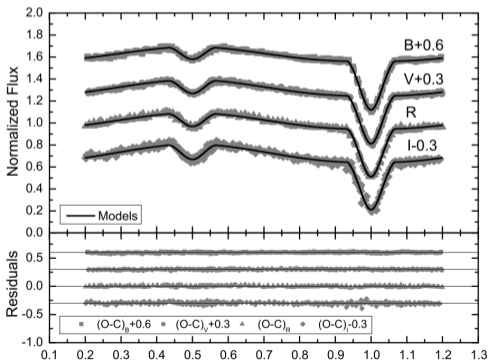
KR 00059 = V802 Cep



Debski et al., poster, Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes III, 2023

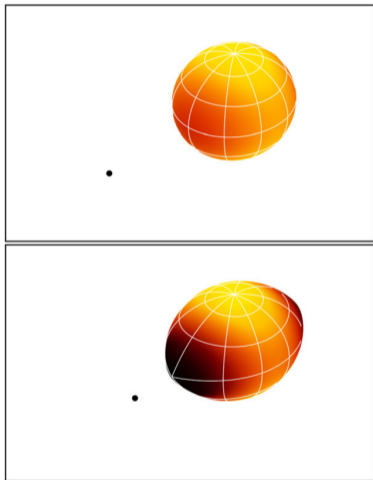
## Efekt odrazu

- Hvězdy se vzájemně osvětlují
- Většinou teplejší hvězda nahřeje povrch té chladnější
- Pravidelné kolísání jasnosti (někdy i více než 0,1 mag)



# Gravitační ztemnění

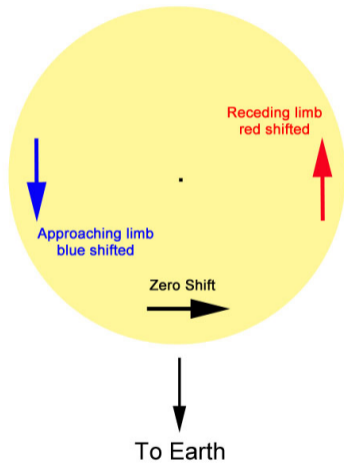
- Zploštělost hvězdy
- Povrch pólů je světlejší než u rovníkových oblastí
- Změny v řádu setin mag



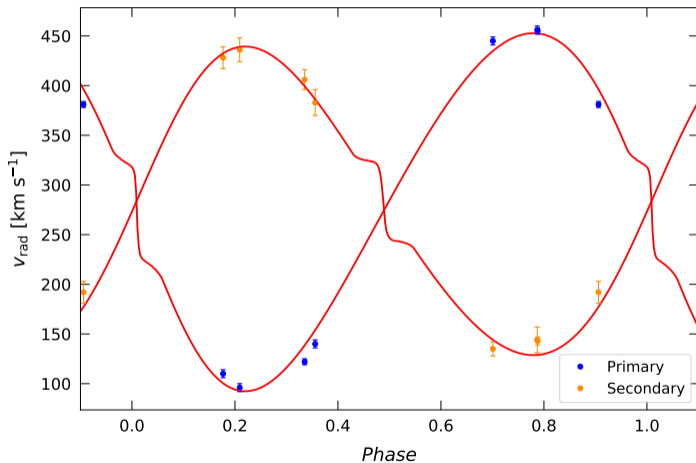
White et al., 2012

# Rossiterův efekt

- Rotační jev
- Deformace křivky radiálních rychlostí v době zákrytů
- Část hvězdy rotuje k nám a část od nás
- Postupný zákryt těchto oblastí

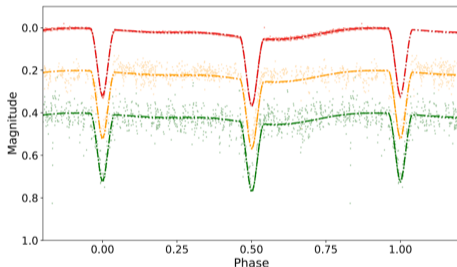


# Rossiterův efekt



# Skvrny

- Doplnění ke dvojhvězdnosti
- Určování přítomnosti skvrn či jejich parametrů není snadné, světelné křivky mají více řešení
- Kvalitní spektra, dlouhodobé sledování
- V publikacích často ničím nepodložená tvrzení (např. parafráze: Skvrny na rovníku hmotnější hvězdy s teplotou 80 % povrchové teploty.)

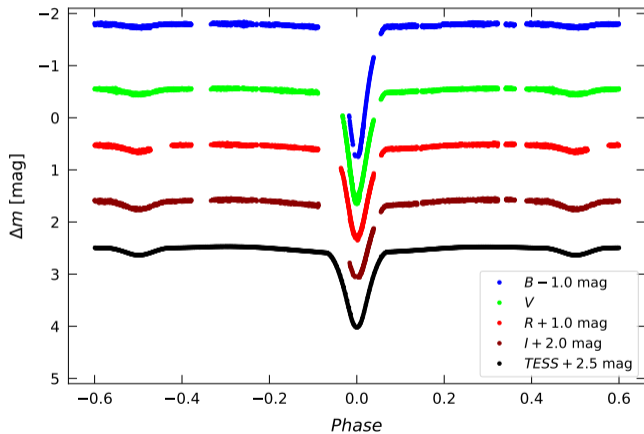


Křivkou prostupuje vlna způsobená skvrnou či více skvrnami, Miller et al., 2021.

## Vývoj těsných dvojhvězd

- Těsná dvojhvězda - alespoň jedna ze složek během svého vývoje vyplní Rocheův lalok, přenos látky
- Rozhodující parametr u rychlosti vývoje hvězd je hmotnost
- Hmotnější hvězdy se vyvíjejí rychleji
- Algol: hmotná horká hvězda hlavní posloupnosti  $3,4 M_{\odot}$ , podobr  $0,8 M_{\odot}$ , paradox Algolu
- Přetok hmoty, původně hmotnější složka pokračuje rychleji ve vývoji i přes ztrátu hmoty

# TT Lyr - algolida

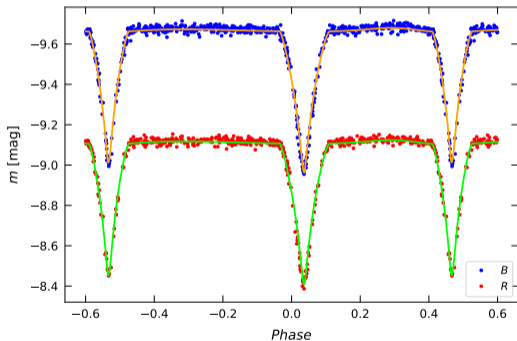


Modrá horká hvězda hlavní posloupnosti a červený podobr, Kolář et al., 2023



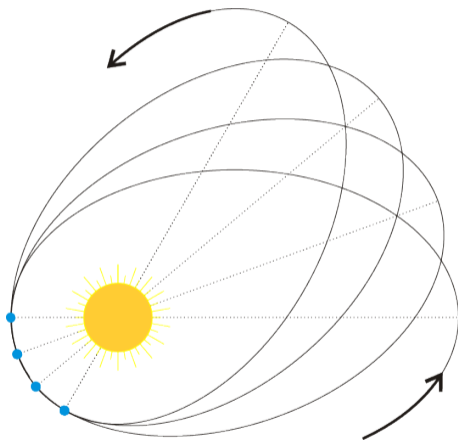
# Excentricita

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



Kolář et al., 2023

## Apsidální pohyb (stáčení přímky apsid)

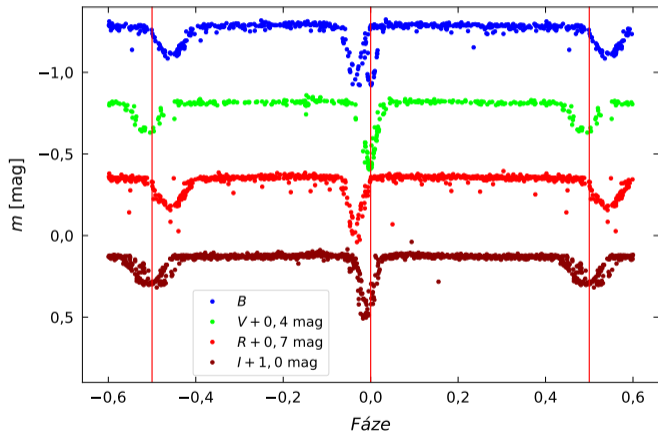


[aasnova.org/2017/07/12/wasp-12b-and-its-possible-fiery-demise/](https://aasnova.org/2017/07/12/wasp-12b-and-its-possible-fiery-demise/)

## Apsidální pohyb

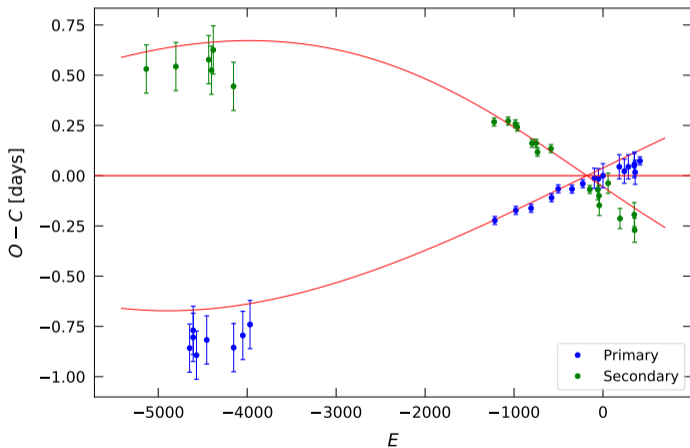
- Spojnice pericentra a apocentra
- Pro excentrické dvojhvězdy
- Příčiny pohybu: odchylka od kulového tvaru a nehomogenní rozložení hustoty hvězd, relativistické efekty
- Periodický pohyb
- Perioda  $U$ , většinou velmi dlouhé, stovky, nejkratší desítky roků
- Různě natočené systémy, argument periastra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

# OGLE LMC-ECL-7641 - apsidální pohyb



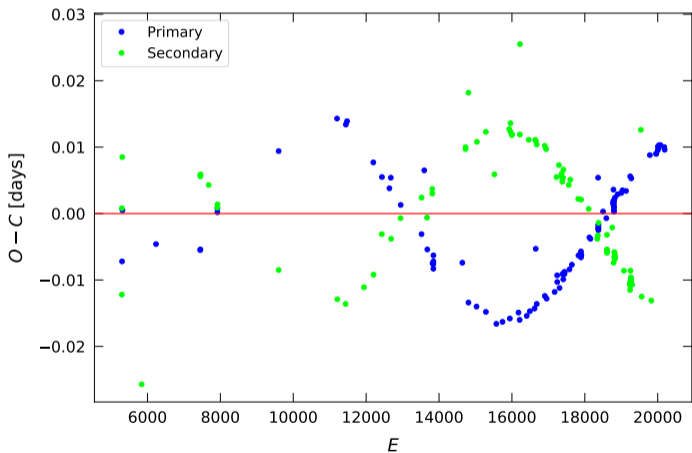
Minima oscilují kolem předpokládaných hodnot fáze.

# O – C diagram OGLE LMC-ECL-7641



$U \approx 300$  roků, Kolář et al., 2023

# O – C diagram CO Lac

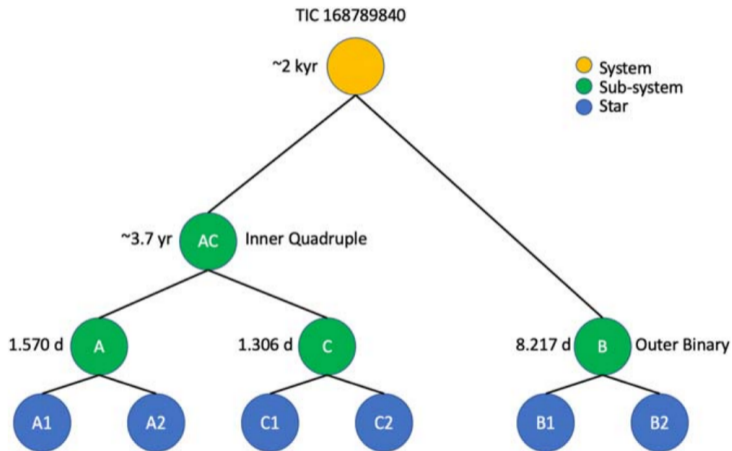


$U \approx 40$  roků, [var2.astro.cz/ocgate/index.php?lang=cz](http://var2.astro.cz/ocgate/index.php?lang=cz)

# Vícenásobné systémy

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

# Zákrytová šestihvězda TIC 168789840

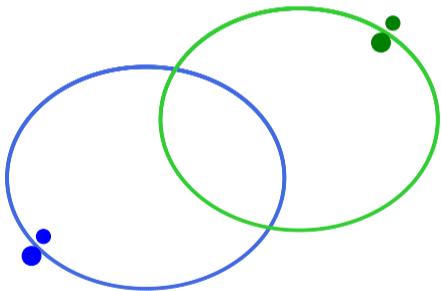


Tři zákrytové dvojhvězdy, Powell et al., 2021

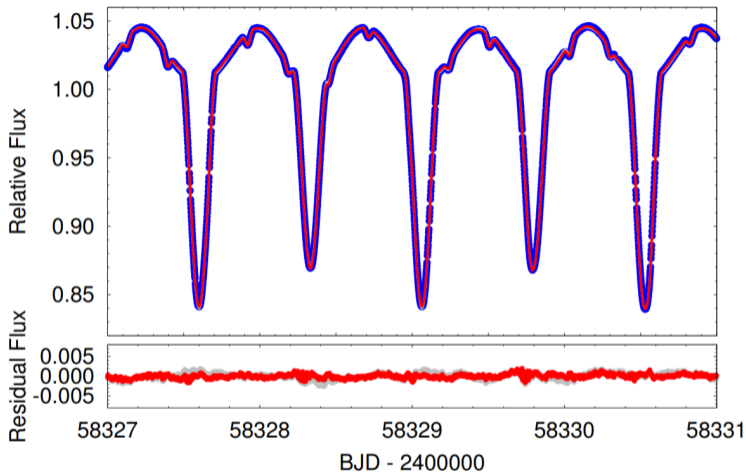


## Dvožákrytové systémy

- Čtyři hvězdy ve struktuře 2 + 2
- Dva zákrytové podsystemy, oběh kolem jejich společného těžiště
- Kolem 500 známých systémů
- Komplexní studie jen pro několik
- Vzájemný pohyb, většinou velké periody, vyžaduje spektra nebo dlouhodobé fotometrické sledování

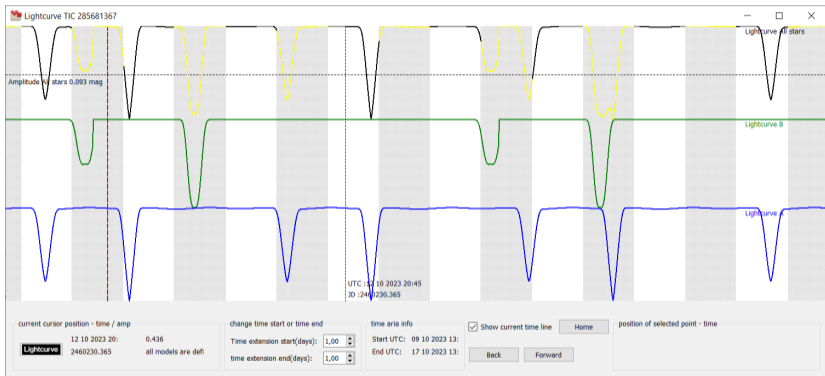


## BG Ind



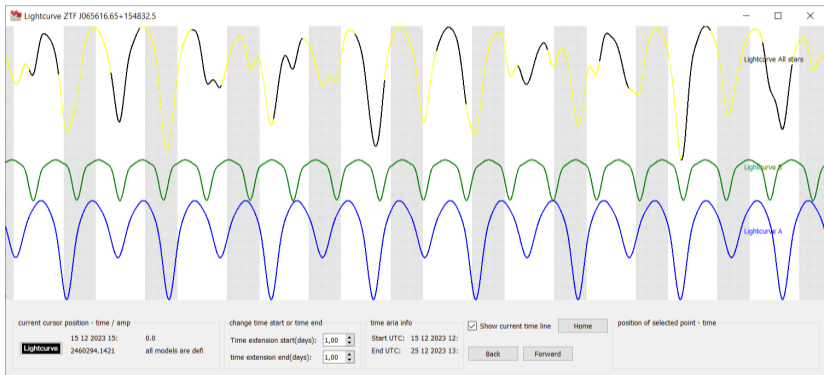
Dobře patrná dvojhvězda, do toho velmi malé periodické změny - druhý pár, (Borkovits et al., 2021).

# S8 Cas



Velmi excentrické dvojhvězdy, STEP, Z. Henzl

# S1 Gem



STEP, Z. Henzl

**MASARYKOVA  
UNIVERZITA**