



Fenomenologické modelování
světelných křivek
nezákrytových dvojhvězd

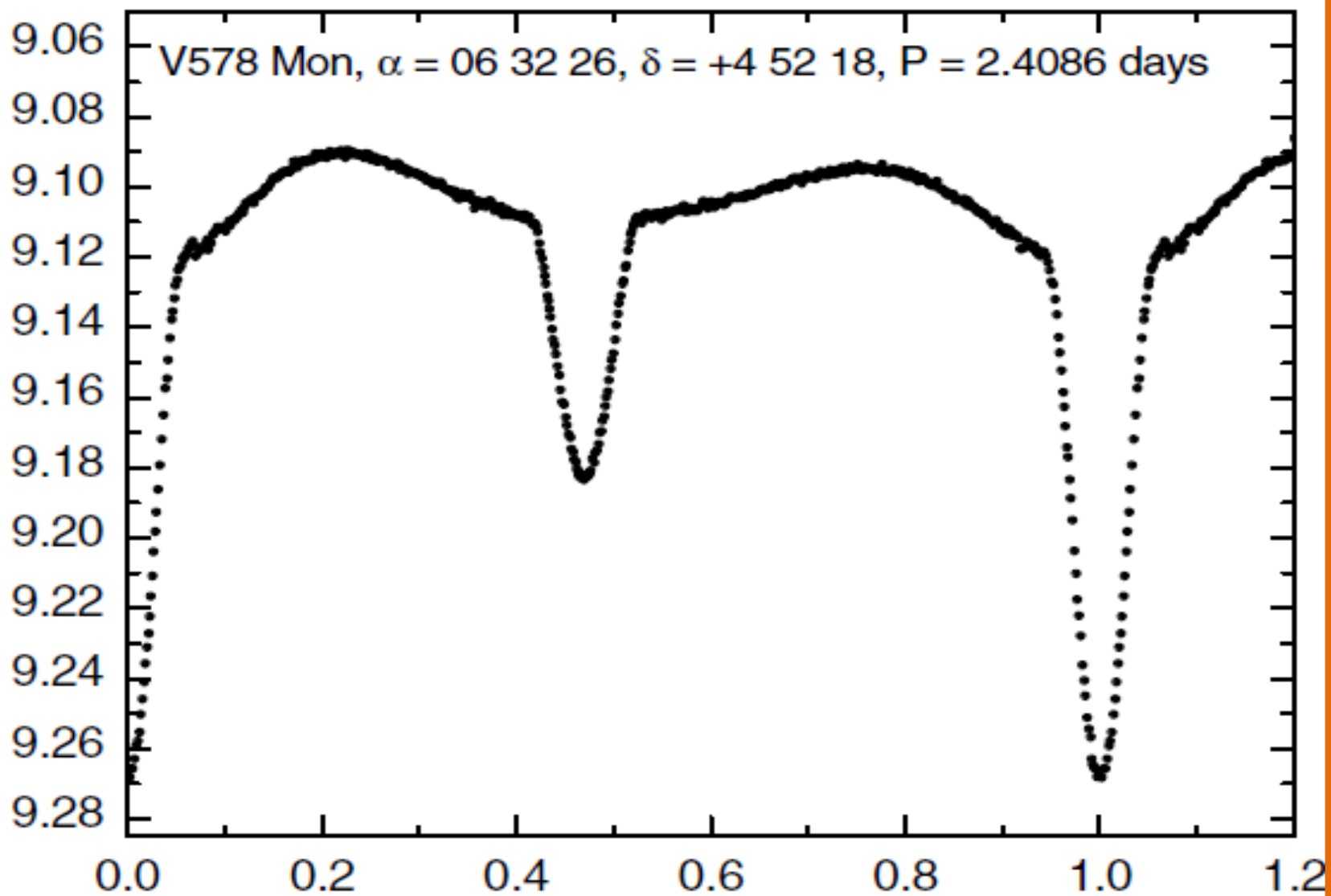
Zdeněk Mikulášek, Theodor Pribulla, Miloslav Zejda

Astronomický ústav SAV Tatranská Lomnica, 15. července 2016

Proč nás zajímají nezákrytové soustavy?

Většina hvězd vázána ve dvojhvězdách, z nich ovšem jen nepatrné procento patří mezi zákrytové systémy.

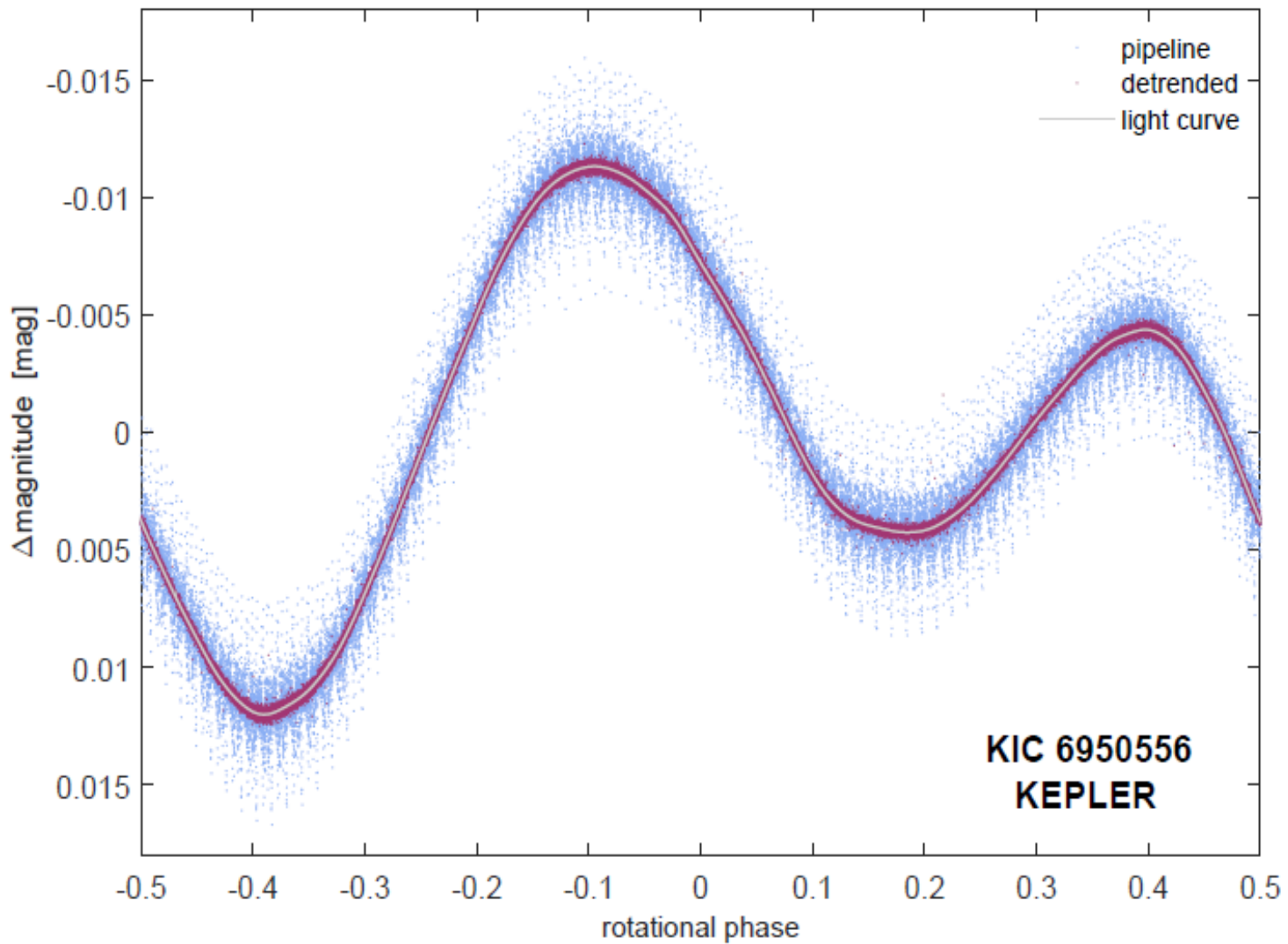
- Právě zákryty z nich ovšem činí nápadně proměnné hvězdy. Analýza jejich světelných křivek a křivek radiálních rychlostí poskytuje základní informace i o hvězdách samotných: rozměry, hmotnosti, teploty, vnitřní stavba i vzdálenosti – je na nich vystavěna současná astrofyzika i kosmologie.



Proč nás zajímají nezákrytové soustavy?

Většina hvězd vázána ve dvojhvězdách, z nich ovšem jen nepatrné procento patří mezi zákrytové systémy.

- Právě zákryty z nich ovšem činí nápadně proměnné hvězdy. Analýza jejich světelných křivek a křivek radiálních rychlostí poskytuje základní informace i o hvězdách samotných: rozměry, hmotnosti, teploty, vnitřní stavba i vzdálenosti – je na nich vystavěna současná astrofyzika i kosmologie.
- Pokud je soustava dostatečně těsná, pozorujeme změny jasnosti i mimo zákryty. Příčiny světelných změn jsou již známé a astrofyzikálně dobře pochopené – je to především důsledek slapové deformace složek dvojhvězdy a vzájemného osvětlování.
- **Cílem fenomenologického modelování je věrně popsat vzhled světelných křivek i mimo zákryty.**
- Viz např.: **V578 Mon** sledovaná z družice MOST (Pribulla et al. 2011). Úhel sklonu dráhy 74° - zákryty částečné, nepřiliš hluboké (cca 0,12 mag).
- Pokud bychom soustavu naklonili ještě více, až do úhlu 62° , zmizí úplně. I pak by hvězda zůstala proměnnou s amplitudou kolem 0,02 mag. Tyto nezákrytové proměnné dvojhvězdy se označují jako eliptické proměnné – ELL.



Proč nás zajímají nezákrytové soustavy?

Většina hvězd vázána ve dvojhvězdách, z nich ovšem jen nepatrné procento patří mezi zákrytové systémy.

- Právě zákryty z nich ovšem činí nápadně proměnné hvězdy. Analýza jejich světelných křivek a křivek radiálních rychlostí poskytuje základní informace i o hvězdách samotných: rozměry, hmotnosti, teploty, vnitřní stavba i vzdálenosti – je na nich vystavěna současná astrofyzika i kosmologie.
- Pokud je soustava dostatečně těsná, pozorujeme změny jasnosti i mimo zákryty. Příčiny světelných změn jsou již známé a astrofyzikálně dobře pochopené – je to především důsledek slapové deformace složek dvojhvězdy a vzájemného osvětlování.
- **Cílem fenomenologického modelování je věrně popsat vzhled světelných křivek i mimo zákryty.**
- Viz např.: **V578 Mon** sledovaná z družice MOST (Pribulla et al. 2011). Úhel sklonu dráhy 74° - zákryty částečné, nepříliš hluboké (cca 0,12 mag).
- Pokud bychom soustavu naklonili ještě více, až do úhlu 62° , zmizí úplně. I pak by hvězda zůstala proměnnou s amplitudou kolem 0,02 mag. Tyto nezákrytové proměnné dvojhvězdy se označují jako eliptické proměnné – ELL.

Takto jsou ale šmahem klasifikovány všechny proměnné s hladkou dvojnou křivkou. Viz např.: KIC 6950556 – rotující chemicky pekulární hvězda se skvrnami na povrchu.

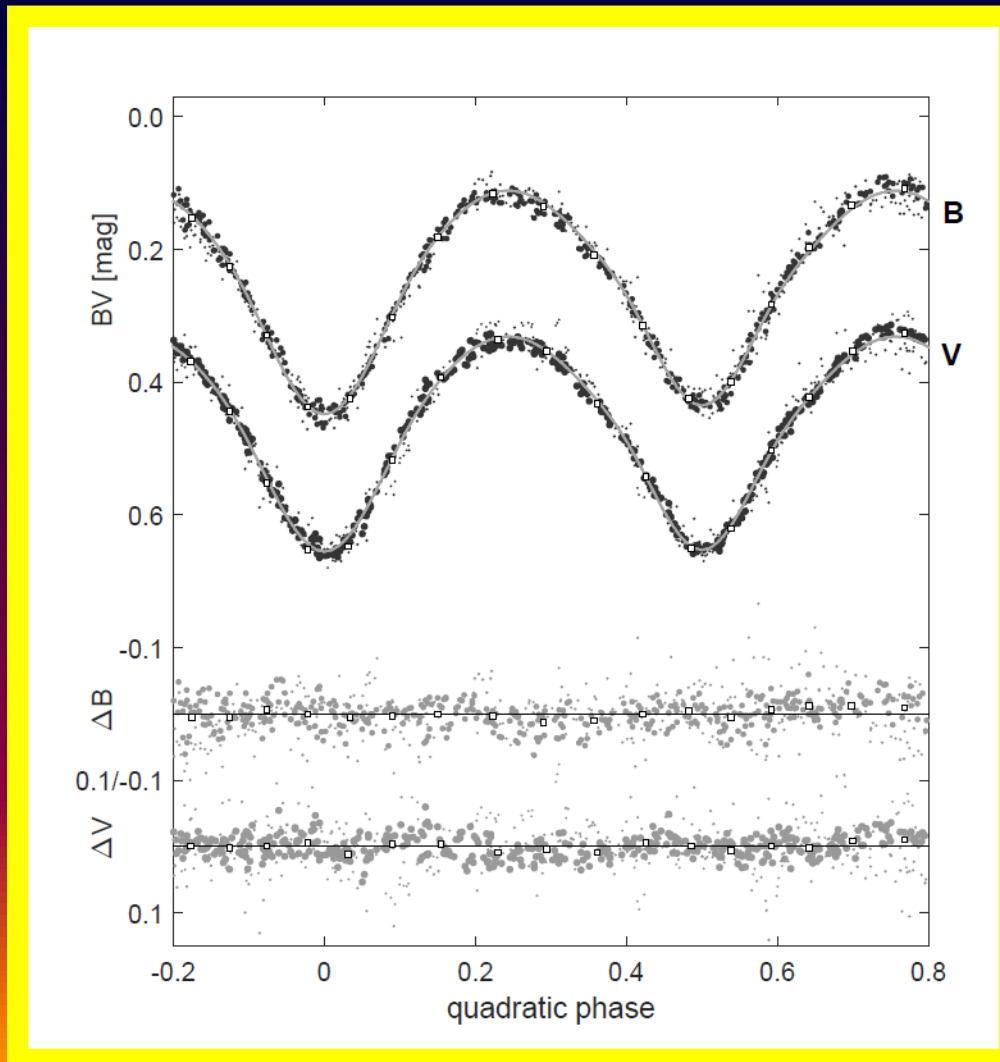
- **Dalším cílem FeM je vyvinutí nástroje k rozlišení eliptických a CP hvězd.**

Fenomenologické modelování světelných křivek zákrytových soustav

Dva rozdílné přístupy ke studiu zákrytových soustav (ZS)

- **Fyzické modelování (FyM)** – vytvoří se nejprve fungující model podvojně soustavy sestávající z $*+*$, $*+^\circ$, obíhající po kruhové nebo eliptické dráze. Hvězdy modelovány jako koule, elipsoidy nebo Rocheovy plochy – počítají se pozorovatelné fázové křivky a ty se porovnávají se skutečností. V jednotlivých iteracích se upravují parametry soustavy, dokud není dostatečná shoda s realitou.
- FyM má tradici a množství programů: WD, Phoebe, Fotel, Roche, BM, Nightfall aj.
- **Fenomenologické modelování (FeM)** – co nejuvěrnější matematické modelování pozorovaných dat – LC, RV, okamžiky minim, astrometrie – neřeší se fyzický model.

Fenomenologické modelování světelných křivek zákrytových soustav



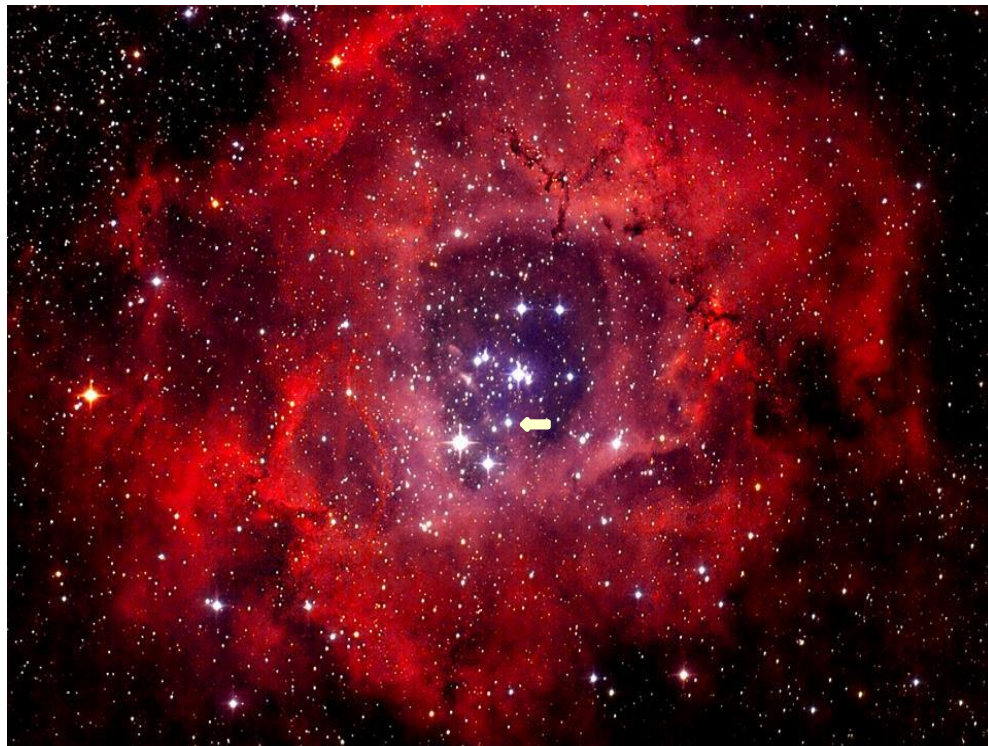
Fenomenologické modelování světelných křivek zákrytových soustav

Dva rozdílné přístupy ke studiu zákrytových soustav (ZS)

- **Fyzické modelování (FyM)** – vytvoří se nejprve fungující model podvojně soustavy sestávající z $*+*$, $*+^\circ$, obíhající po kruhové nebo eliptické dráze. Hvězdy modelovány jako koule, elipsoidy nebo Rocheovy plochy – počítají se pozorovatelné fázové křivky a ty se porovnávají se skutečností. V jednotlivých iteracích se upravují parametry soustavy, dokud není dostatečná shoda s realitou.
- FyM má tradici a množství programů: WD, Phoebe, Fotel, Roche, BM, Nightfall aj.
- **Fenomenologické modelování (FeM)** – co nejuvěrnější matematické modelování pozorovaných dat – LC, RV, okamžiky minim, astrometrie – neřeší se fyzický model.
- Některé parametry jsou shodné, tudíž porovnatelné: speciálně orbitální perioda P a její časová změna \dot{P} způsobené přenosem látky nebo oběžná perioda 3. tělesa P_3 .
- U ZS s eliptickými dráhami lze zjistit výstřednost ε , délku periastra ω , čas průchodu periastrum T_0 , případně anomalistickou perioda P_a a perioda stáčení apsid U .
- **Pokud nás zajímá jen předpověď vzhledu pozorovaných fázových křivek a hodnoty výše uvedených parametrů (85% studií), doporučujeme fenomenologické modelování. Je praktičtější, často i přesnější, ale hlavně - nejméně stokrát rychlejší než FyM!**

Zákrytová dvojhvězda V578 Monocerotis

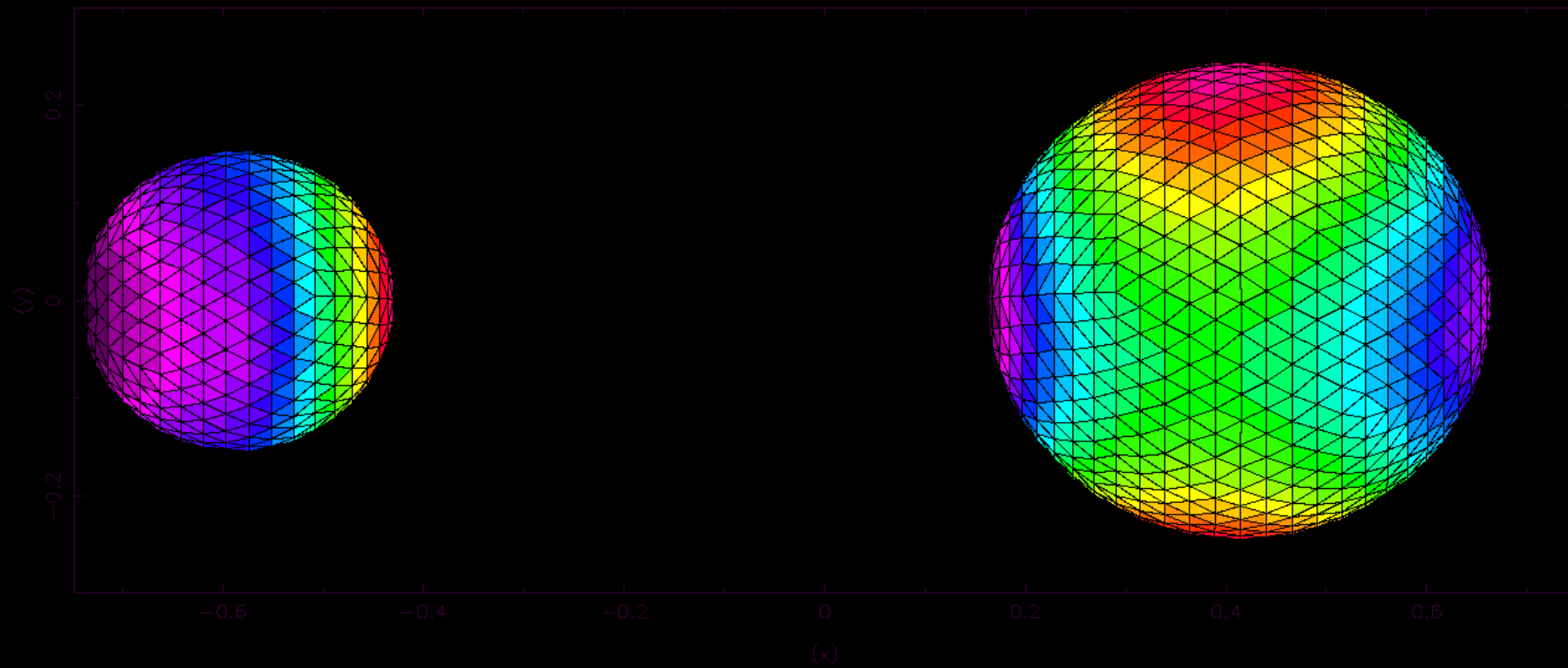
Hlavním objektem zájmu: V578 Mon – jasná, velmi mladá, hmotná ($14,5 + 10,3 M_{\odot}$), dvoučárová dvojhvězda, ležící v otevřené hvězdokupě NGC 2244, v oblasti se silnou tvorbou masivních hvězd, poblíž centra emisní mlhoviny Rosetta.



$P = 2,40848 \text{ d}$, $i = 74^{\circ}$, $T_{\text{ef1}} = 17\,000 \text{ K}$,
 $T_{\text{ef2}} = 13\,300 \text{ K}$, $r_1 = 0,177$, $r_2 = 0,167$.

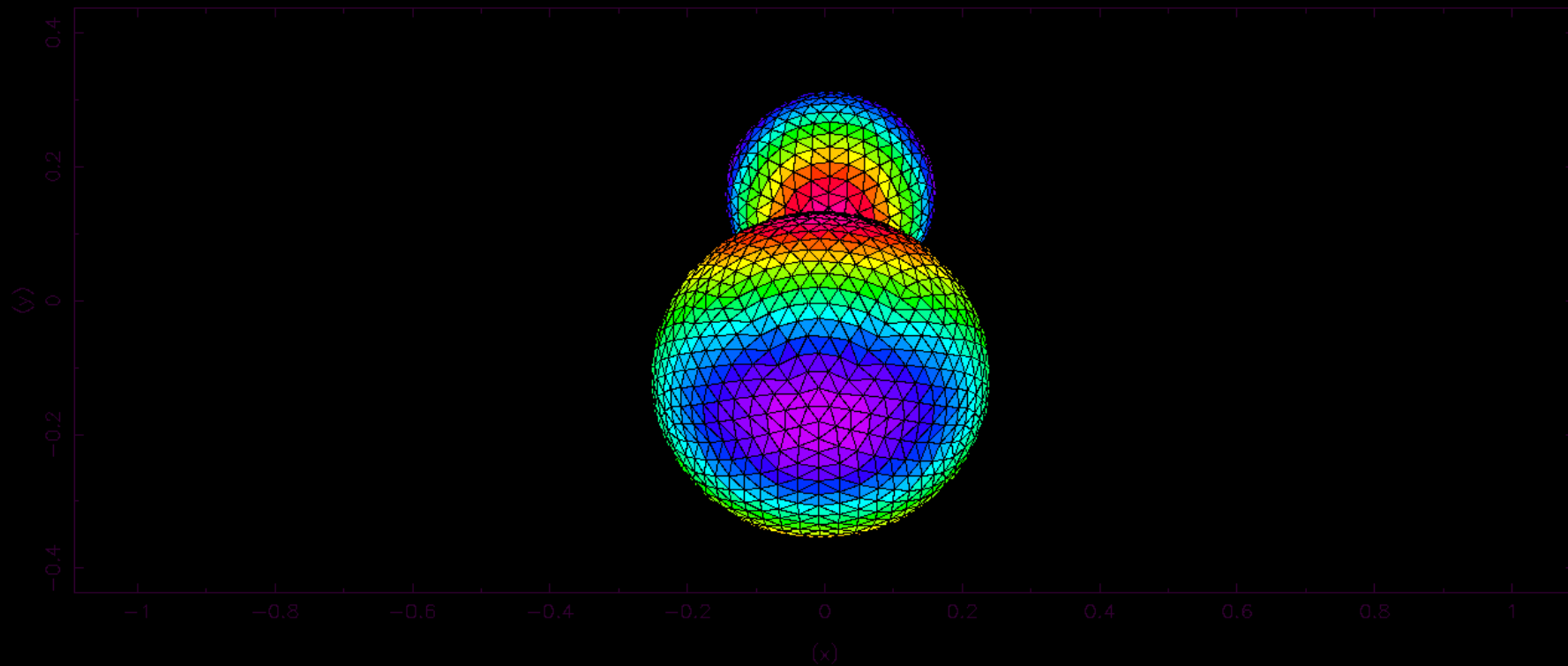
Dráha je eliptická s číselnou
výstředností $\epsilon = 0,0654$ (vzdálenosti
složek kolísají $\pm 6,5 \%$, míra slapového
protažení složek se mění o $\pm 24 \%$,
intenzita iradiace o $\pm 15 \%$!)

Roche model



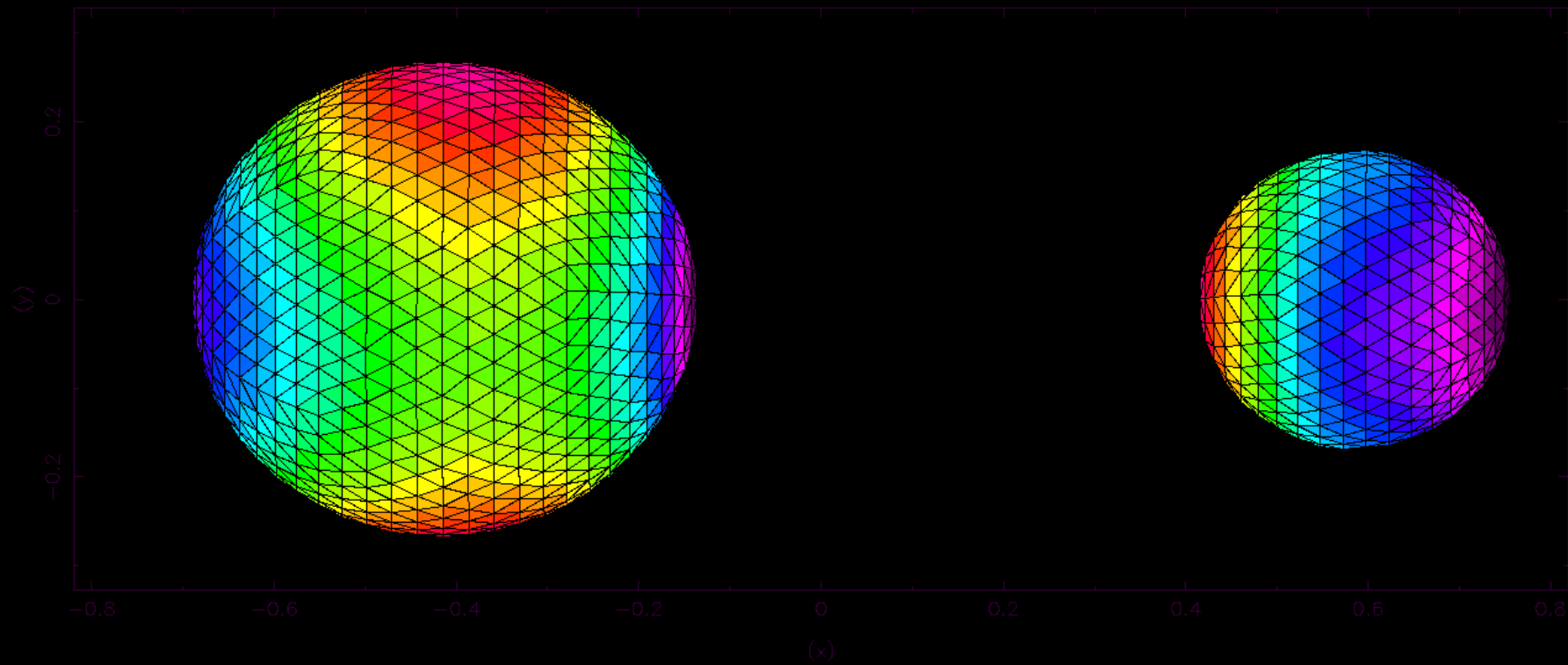
PGPLOT Window 1

Roche model



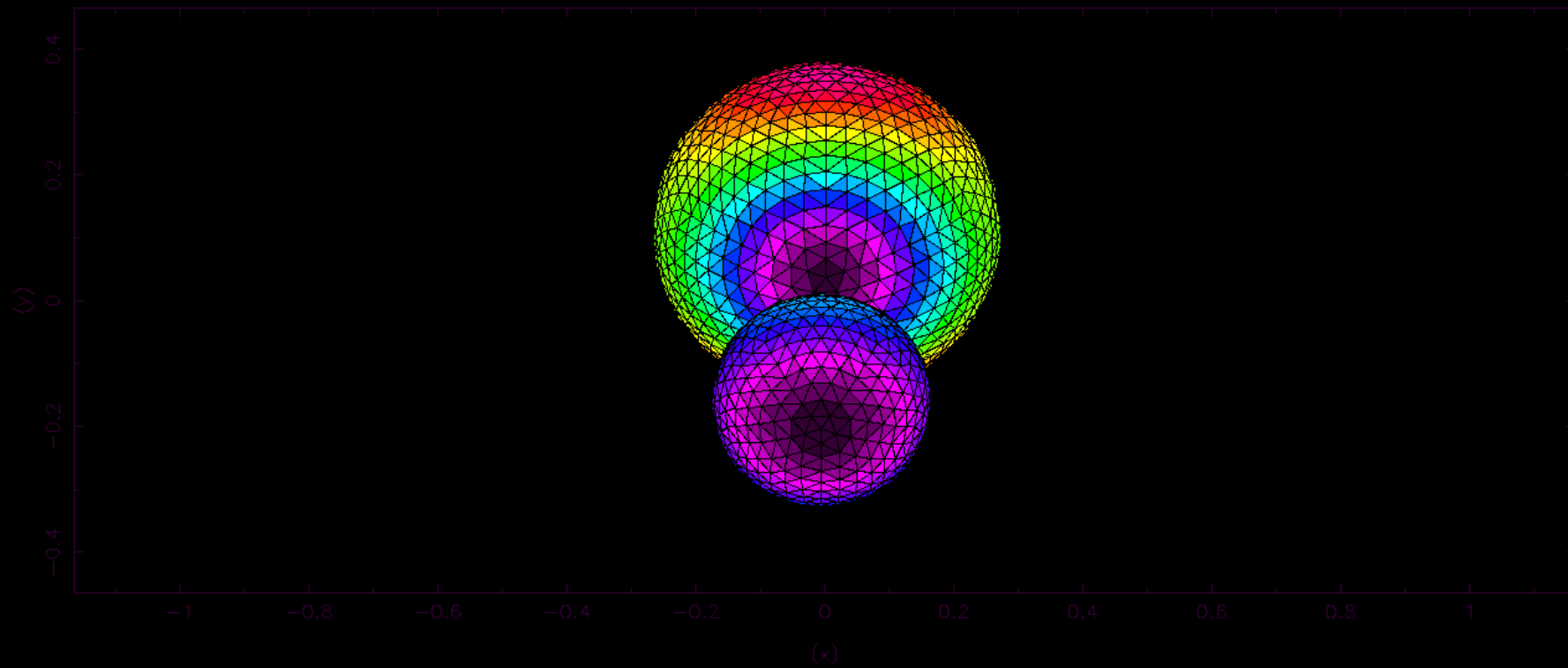
PGPLOT Window 1

Roche model



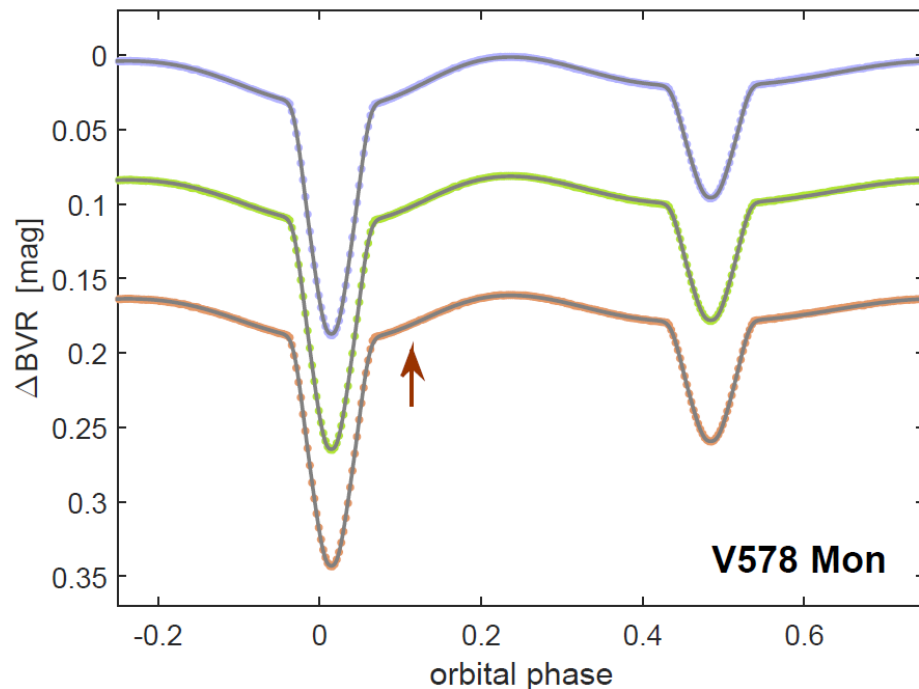
PGPLOT Window 1

Roche model



Zákrytová dvojhvězda V578 Monocerotis

Hlavním objektem zájmu: V578 Mon – jasná, velmi mladá, hmotná ($14,5 + 10,3 M_{\odot}$), dvoučárová dvojhvězda, ležící v otevřené hvězdokupě NGC 2244, v oblasti se silnou tvorbou masivních hvězd, poblíž centra emisní mlhoviny Rosetta.



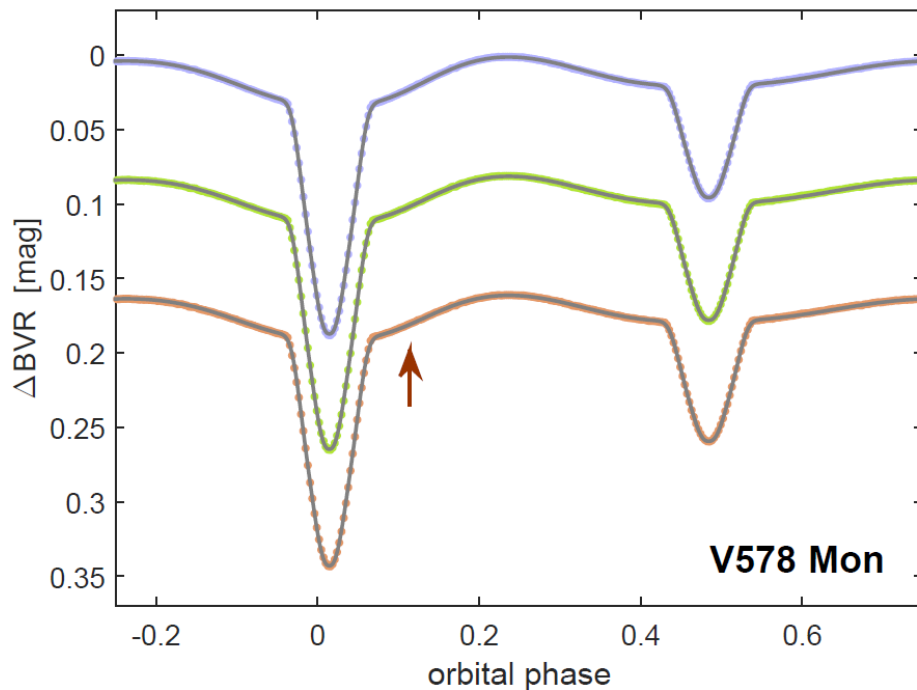
$P = 2,40848$ d, $i = 74^{\circ}$, $T_{\text{ef1}} = 17\,000$ K,
 $T_{\text{ef2}} = 13\,300$ K, $r_1 = 0,177$, $r_2 = 0,167$.

Dráha je eliptická s číselnou výstředností $\epsilon = 0,0654$ (vzdálenosti složek kolísají $\pm 6,5\%$, míra slapového protažení složek se mění o $\pm 24\%$, intenzita iradiace o $\pm 15\%$!)

Délka periastra 135° , takže průchod periastrum nastává ve fázi 0,125, tedy po primárním minimu.

Zákrytová dvojhvězda V578 Monocerotis

Hlavním objektem zájmu: V578 Mon – jasná, velmi mladá, hmotná ($14,5 + 10,3 M_{\odot}$), dvoučárová dvojhvězda, ležící v otevřené hvězdokupě NGC 2244, v oblasti se silnou tvorbou masivních hvězd, poblíž centra emisní mlhoviny Rosetta.

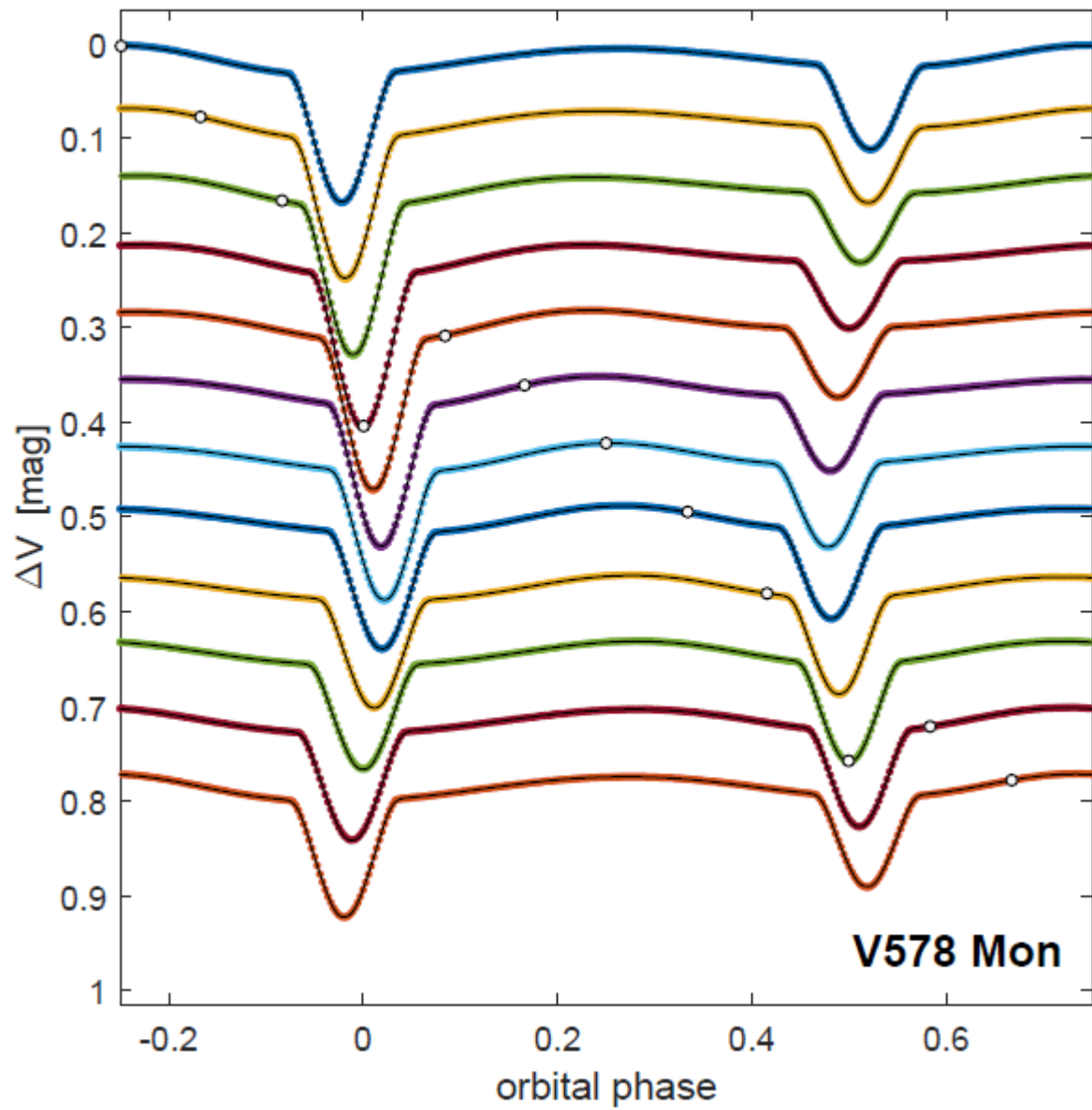


$P = 2,40848$ d, $i = 74^{\circ}$, $T_{\text{ef1}} = 17\,000$ K,
 $T_{\text{ef2}} = 13\,300$ K, $r_1 = 0,177$, $r_2 = 0,167$.

Dráha je eliptická s číselnou výstředností $\epsilon = 0,0654$ (vzdálenosti složek kolísají $\pm 6,5\%$, míra slapového protažení složek se mění o $\pm 24\%$, intenzita iradiace o $\pm 15\%$!)

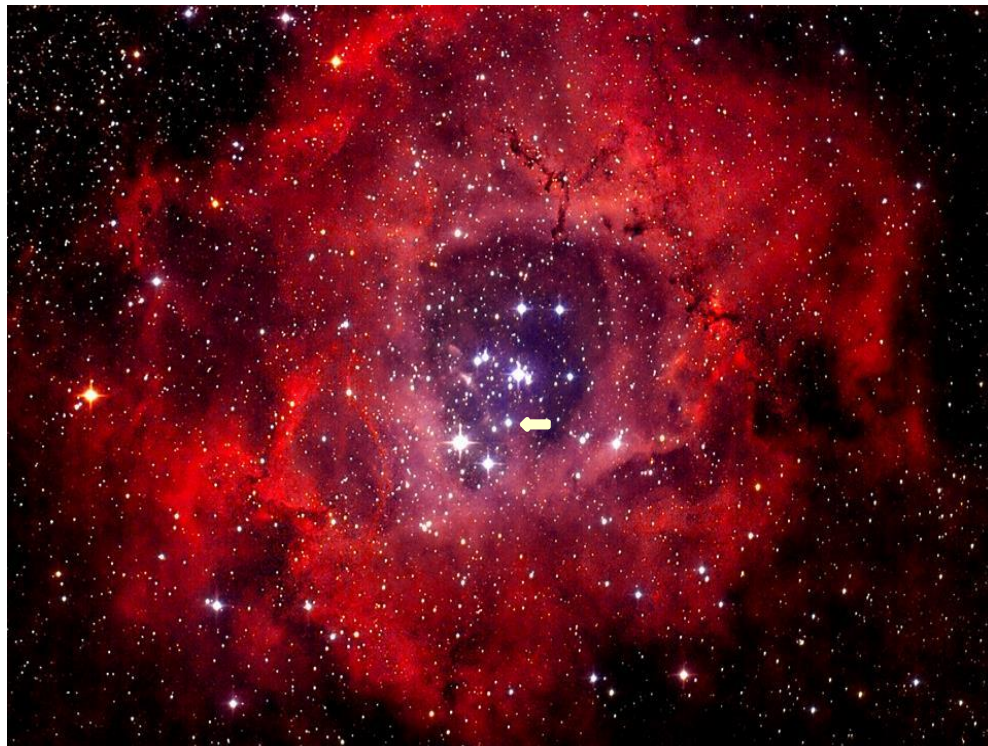
Délka periastra 135° , takže průchod periastrum nastává ve fázi $0,125$, tedy po primárním minimu.

Vzhled světelných křivek se dosti silně mění s apsidální periodou cca 30 let, Délka periastra se každý rok zvýší o cca 12° !



Zákrytová dvojhvězda V578 Monocerotis

Hlavním objektem zájmu: V578 Mon – jasná, velmi mladá, hmotná ($14,5 + 10,3 M_{\odot}$), dvoučárová dvojhvězda, ležící v otevřené hvězdokupě NGC 2244, v oblasti se silnou tvorbou masivních hvězd, poblíž centra emisní mlhoviny Rosetta.



$P = 2,40848 \text{ d}$, $i = 74^{\circ}$, $T_{\text{ef1}} = 17\,000 \text{ K}$,
 $T_{\text{ef2}} = 13\,300 \text{ K}$, $r_1 = 0,177$, $r_2 = 0,167$.

Dráha je eliptická s číselnou výstředností $\epsilon = 0,0654$ (vzdálenosti složek kolísají $\pm 6,5 \%$, míra slapového protažení složek se mění o $\pm 24 \%$, intenzita iradiace o $\pm 15 \%$)

Délka periastra 135° , takže průchod periastrum nastává ve fázi $0,125$, tedy po primárním minimu.

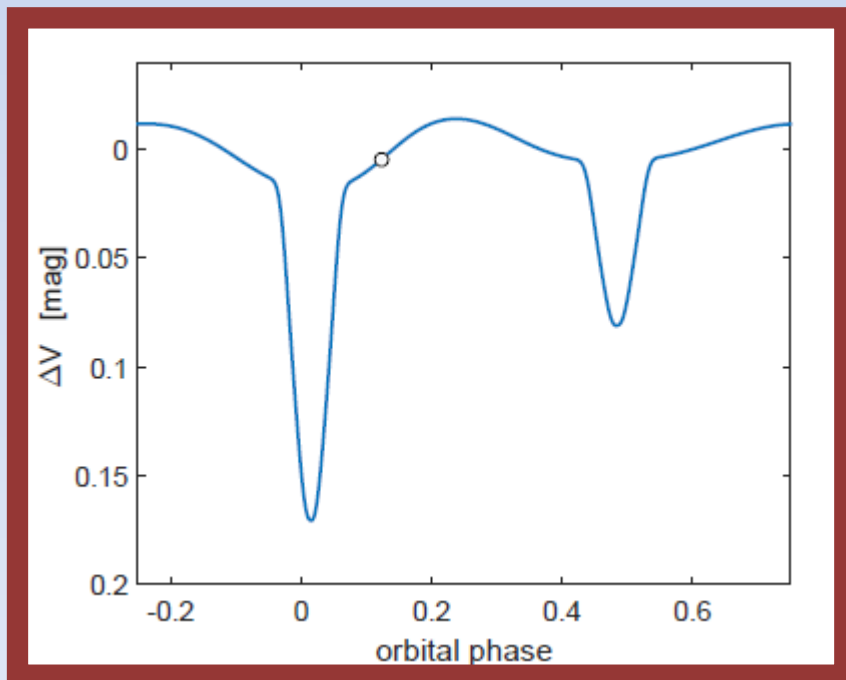
Vzhled světelných křivek se dosti silně mění s apsidální periodou cca 30 let, Délka periastra se každý rok zvýší o cca 12° !

Proč zrovna V 578 Mon? Těsná dvojhvězda s apsidálním pohybem. V tom je jednička!

Světelné křivky eliptických proměnných

Aby nedošlo k mýlce – eliptické proměnné jsou těsné dvojhvězdy se slapově protaženými složkami (elipsoidy), u nichž nedochází k zákrytům.

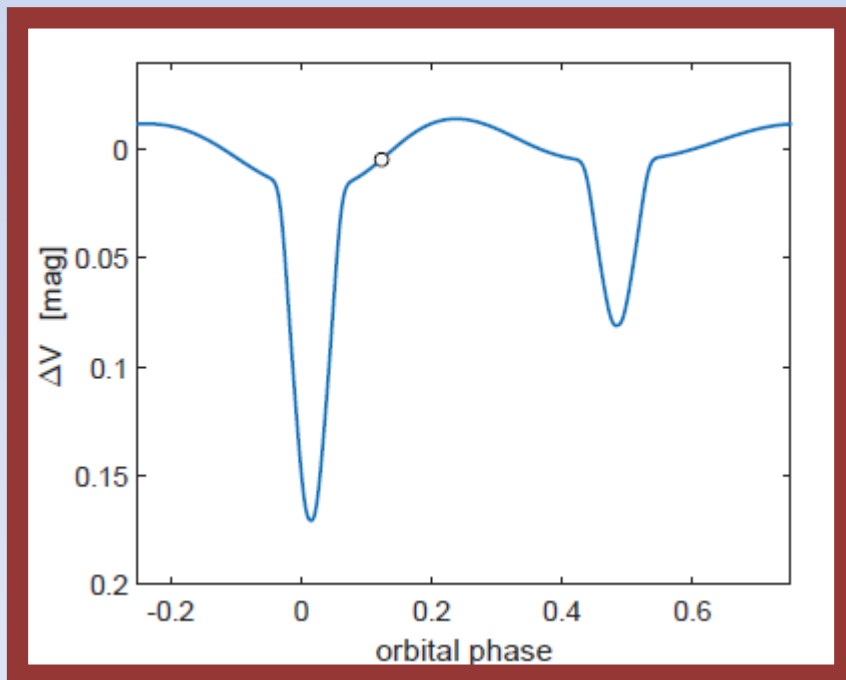
Vůbec to tedy neznamena, že by jejich dráhy musely být nutně výstředné, tedy eliptické. Naopak, nejčastěji mají dráhy spíše kruhové, stejně jako naprostá většina zákrytových dvojhvězd. Důvod tentýž – slapová interakce mezi složkami vede k rychlé **cirkularizaci** jejich drah, a to v relativně krátkém čase.



Světelné křivky eliptických proměnných

Aby nedošlo k mýlce – eliptické proměnné jsou těsné dvojhvězdy se slapově protaženými složkami (elipsoidy), u nichž nedochází k zákrytům.

Vůbec to tedy neznamena, že by jejich dráhy musely být nutně výstředné, tedy eliptické. Naopak, nejčastěji mají dráhy spíše kruhové, stejně jako naprostá většina zákrytových dvojhvězd. Důvod tentýž – slapová interakce mezi složkami vede k rychlé **cirkularizaci** jejich drah, a to v relativně krátkém čase.



Experiment se zákrytovou dvojhvězdou

V578 Mon – připusťme, že by u ní došlo k překotné cirkularizaci drah složek, a to v noci ze včerejška na dnešek.

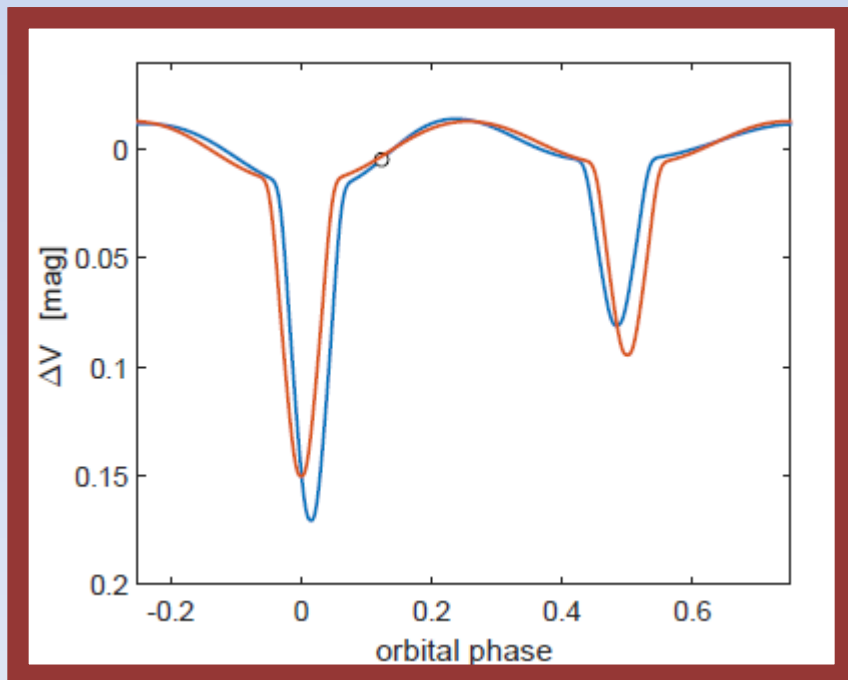
Upřesněme, že tato událost nijak nedotkla hvězd samotných, ani sklonu dráhy, ten by zůstal 74° , ani oběžné periody.

Odrazí se to nějak ve světelné křivce?

Světelné křivky eliptických proměnných

Aby nedošlo k mýlce – eliptické proměnné jsou těsné dvojhvězdy se slapově protaženými složkami (elipsoidy), u nichž nedochází k zákrytům.

Vůbec to tedy neznamena, že by jejich dráhy musely být nutně výstředné, tedy eliptické. Naopak, nejčastěji mají dráhy spíše kruhové, stejně jako naprostá většina zákrytových dvojhvězd. Důvod tentýž – slapová interakce mezi složkami vede k rychlé **cirkularizaci** jejich drah, a to v relativně krátkém čase.



Experiment se zákrytovou dvojhvězdou V578 Mon – připusťme, že by u ní došlo k překotné cirkularizaci drah složek, a to v noci ze včerejška na dnešek.

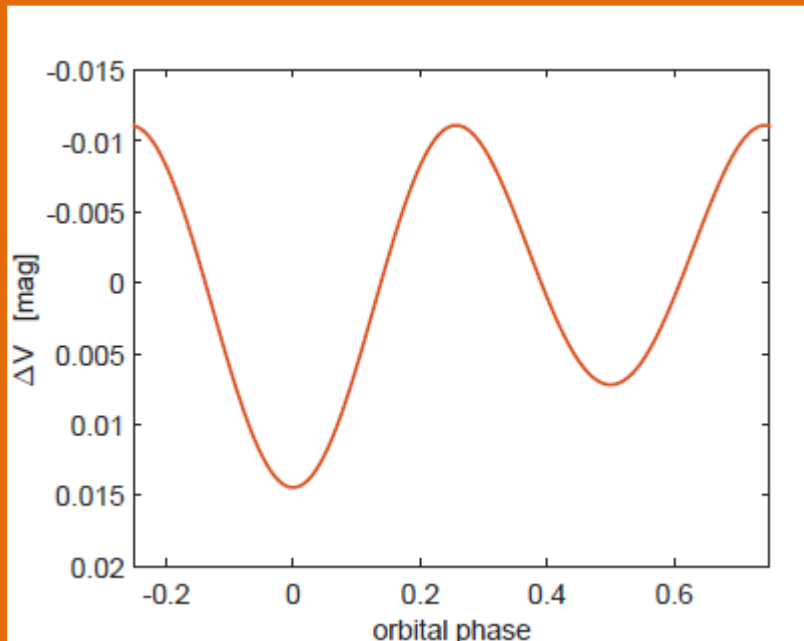
Upřesněme, že tato událost nijak nedotkla hvězd samotných, ani sklonu dráhy, ten by zůstal 74° , ani oběžné periody.

Odrazí se to nějak ve světelné křivce?

Zjevně, vzhled křivky se zjednoduší, minima se posunou do fází 0 a 0,5, změní se jejich hloubky, chod světelných změn mezi zákryty se stane symetričtější.

Fenomenologický model eliptických proměnných

Pokračujme v experimentu; máme teď V578 Mon s kruhovou drahou, potřebujeme se ale ještě nějak zbavit zákrytů. Sklopme tedy dráhu až na 62° , a soustava stane nezákrytovou.



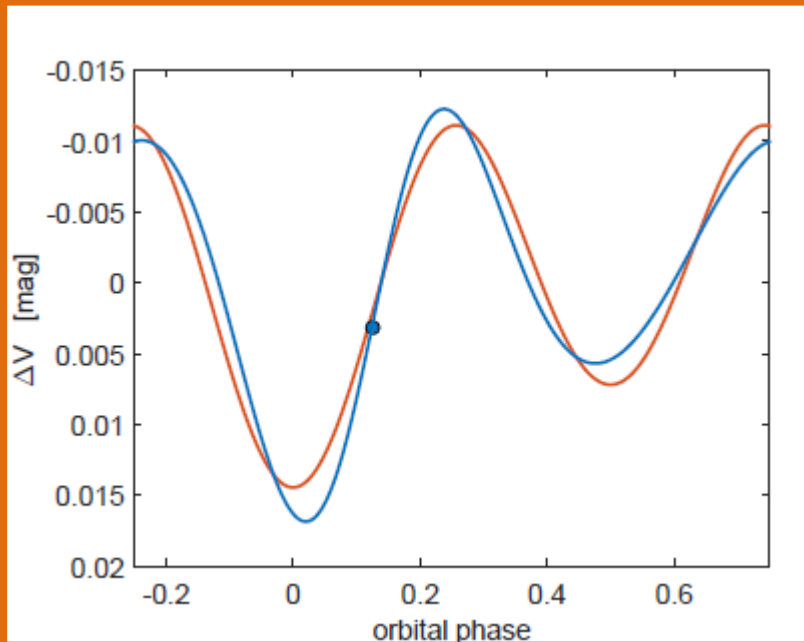
Takto vypadá typická světelná křivka **eliptické proměnné** s kruhovou drahou – včetně amplitud.

Charakteristické – vždy je to dvojitá vlna se stejně vysokými maximy ve fázích 0,25 a 0,75 a obecně různě hlubokými minimy, kde to hlubší je ve fázi odpovídající primárnímu minimu (0,0) a mělčí sekundárnímu minimu (0,5).

Nejjednodušší fenomenologický model LC má 5 parametrů: m_0 , P , M_0 , A_1 a A_2 , kde $\vartheta = (t - M_0)/P$,
$$m = m_0 + A_1 \cos(2 \pi \vartheta) + A_2 \cos(4 \pi \vartheta).$$

Fenomenologický model eliptických proměnných

Pokračujme v experimentu; máme teď V578 Mon s kruhovou drahou, potřebujeme se ale ještě nějak zbavit zákrytů. Sklopme tedy dráhu až na 62° , a soustava stane nezákrytovou.



Takto vypadá typická světelná křivka **eliptické proměnné** s kruhovou drahou – včetně amplitud.

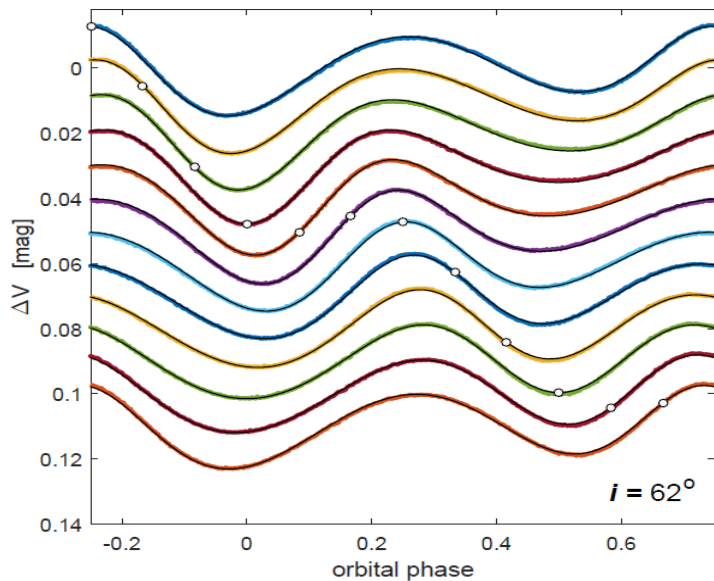
Charakteristické – vždy je to dvojitá vlna se stejně vysokými maximy ve fázích 0,25 a 0,75 a obecně různě hlubokými minimy, kde to hlubší je ve fázi odpovídající primárnímu minimu (0,0) a mělčí sekundárnímu minimu (0,5).

Nejjednodušší fenomenologický model LC má 5 parametrů: m_0 , P , M_0 , A_1 a A_2 , kde $\vartheta = (t - M_0)/P$,
$$m = m_0 + A_1 \cos(2 \pi \vartheta) + A_2 \cos(4 \pi \vartheta).$$

Komplikovanější vzhled mají světelné křivky v případě **eliptických drah** eliptických proměnných, kde v **FeM** přistupují další dva parametry: výstřednost ε a délka periastra ω .

Fenomenologický model eliptických proměnných

Pokračujme v experimentu; máme teď V578 Mon s kruhovou drahou, potřebujeme se ale ještě nějak zbavit zákrytů. Sklopme tedy dráhu až na 62° , a soustava stane nezákrytovou.



Takto vypadá typická světelná křivka **eliptické proměnné** s kruhovou drahou – včetně amplitud.

Charakteristické – vždy je to dvojitá vlna se stejně vysokými maximy ve fázích 0,25 a 0,75 a obecně různě hlubokými minimy, kde to hlubší je ve fázi odpovídající primárnímu minimu (0,0) a mělčí sekundárnímu minimu (0,5).

Nejjednodušší fenomenologický model LC má 5 parametrů: m_0 , P , M_0 , A_1 a A_2 , kde $\vartheta = (t - M_0)/P$,
$$m = m_0 + A_1 \cos(2 \pi \vartheta) + A_2 \cos(4 \pi \vartheta).$$

Komplikovanější vzhled mají světelné křivky v případě **eliptických drah** eliptických proměnných, kde v **FeM** přistupují další dva parametry: výstřednost ε a délka periastra ω .

V principu lze sestavit fungující **FeM** apsidálního pohybu v eliptických proměnných s dalším parametrem – periodou stáčení přímky apsid U .

Závěrem

Jde o první informaci o výsledcích naší práce v průběhu několika posledních měsíců, vše bude publikováno v rámci rozsáhlého článku pro A&A, zabývající se fenomenologickým modelováním zákrytových soustav s eliptickými drahami. Článek bude navazovat na základní stať o FeM otištěném Ioni v témže časopisu.

A&A 584, A8 (2015)
DOI: [10.1051/0004-6361/201425244](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425244)
© ESO 2015

**Astronomy
&
Astrophysics**

Phenomenological modelling of eclipsing system light curves

Zdeněk Mikulášek

Department of Theoretical Physics and Astrophysics, Masaryk University, Kotlářská 2, 611 37 Brno, Czech Republic
e-mail: mikulas@physics.muni.cz

Received 30 October 2014 / Accepted 17 August 2015

ABSTRACT

Context. The observed light curves of most eclipsing binaries and stars with transiting planets can be described well and interpreted by current advanced physical models that also allow for determining many of the physical parameters of eclipsing systems. However, for several common practical tasks, there is no need to know the detailed physics of a variable star, but only the shapes of their light curves or other phase curves.

Aims. We present a set of phenomenological models for the light curves of eclipsing systems.

Methods. We express the observed light curves of eclipsing binaries and stars, which are transited by their exoplanets orbiting in circular trajectories, by a sum of special analytical few-parameter functions that enable fitting their light curves with an accuracy