

Seminar Katedre za astronomiju - 01.04.2014.

Modeliranje tesno dvojnih sistema

ČEKI ATILA

Astronomska opservatorija, Beograd

Zašto dvojni sistemi?

- Najvažniji izvor informacija o fundamentalnim fizičkim parametrima
 - Masa
 - Radijus
 - Luminoznost
 - Udaljenost
- Najmanje 50% zvezda sa glavnog niza se nalazi u dvojnim i višestrukim sistemima
- Dostupna ogromna količina posmatračkog materijala
 - Klasične opservatorije
 - Projekti pretrage celog neba – OGLE, SuperWASP, HAT,...
 - Sateliti – CoRoT, Kepler, GAIA, PLATO (2024),...
- Dostupna jako precizna merenja
 - Fotometrija (Kepler, CoRoT) – greška manja od 1 milimagnituda
 - Radijalne brzine – greška manja od 3 m/s

Kako se mere zvezdani parametri?

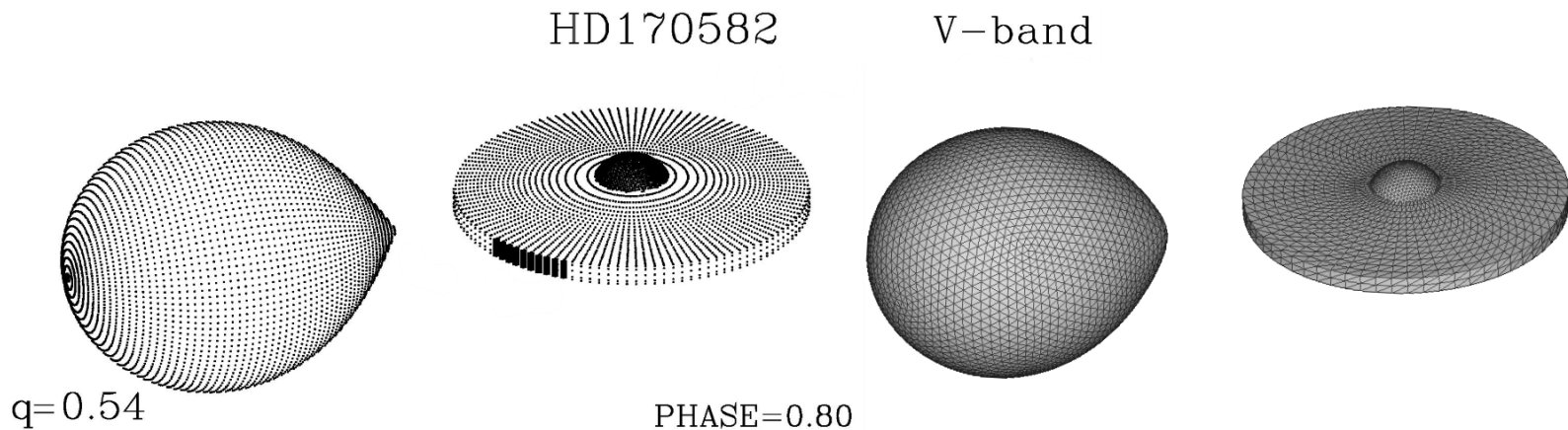
- Obrnuti zadatak
 - Algoritmi za optimizaciju – Nelder-Mead simplex, Levenberg-Marquart,...
- Posmatranja
 - Fotometrija – kriva sjaja
 - Spektroskopija – kriva radijalnih brzina, temperatura, $\log(g)$
- Teorijski model
 - Infinity - Cséki & Latković, 2014, *u pripremi*

Osnovna struktura modela

- Geometrijska reprezentacija sistema
 - Diskretizacija površine komponenata
 - Zvezde – Roche potencial
 - Perturbacija površine - pulsacije
 - Akrecioni disk – konusni, toroidalni, ...
 - Određivanje položaja komponenata na orbiti
- Detekcija vidljivosti
- Sinteza krive sjaja
 - Gravitaciono potamnjenje, refleksija, aktivni regioni, potamnjenje ka rubovima, Doppler beaming,...
- Sinteza krive radialnih brzina

Diskretizacija površine

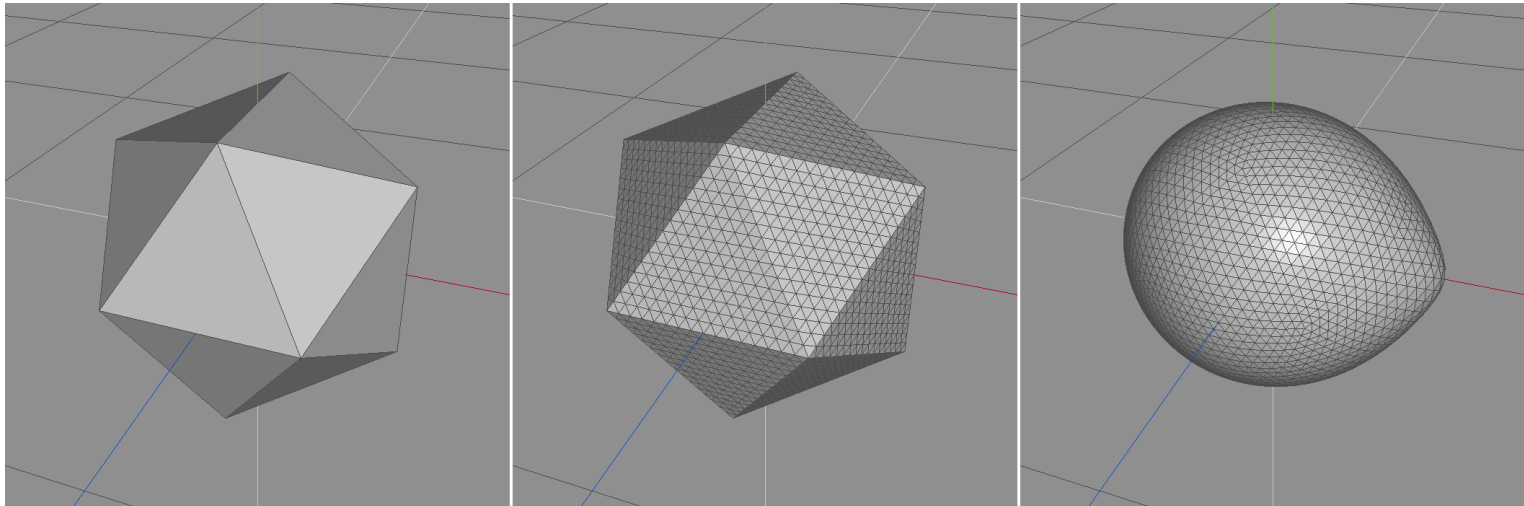
- Elementarne ćelije
 - Tačke – Đurašević, Wilson-Devinney, FOTEL, ...
 - Poligoni – Infinity, GDDSYN, Phoebe 2.0, ...



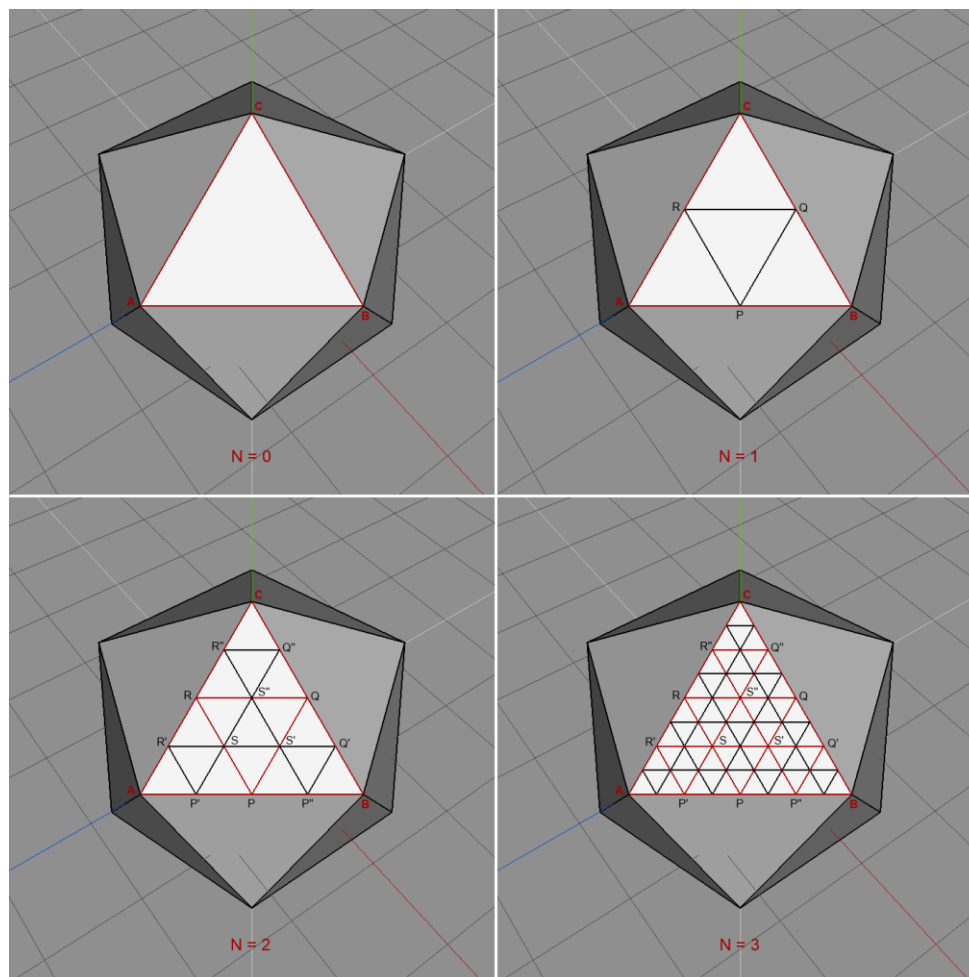
- Infinity
 - Zvezde – geodezijska mreža
 - Akrecioni disk – rotaciona mreža

Geodezijska mreža

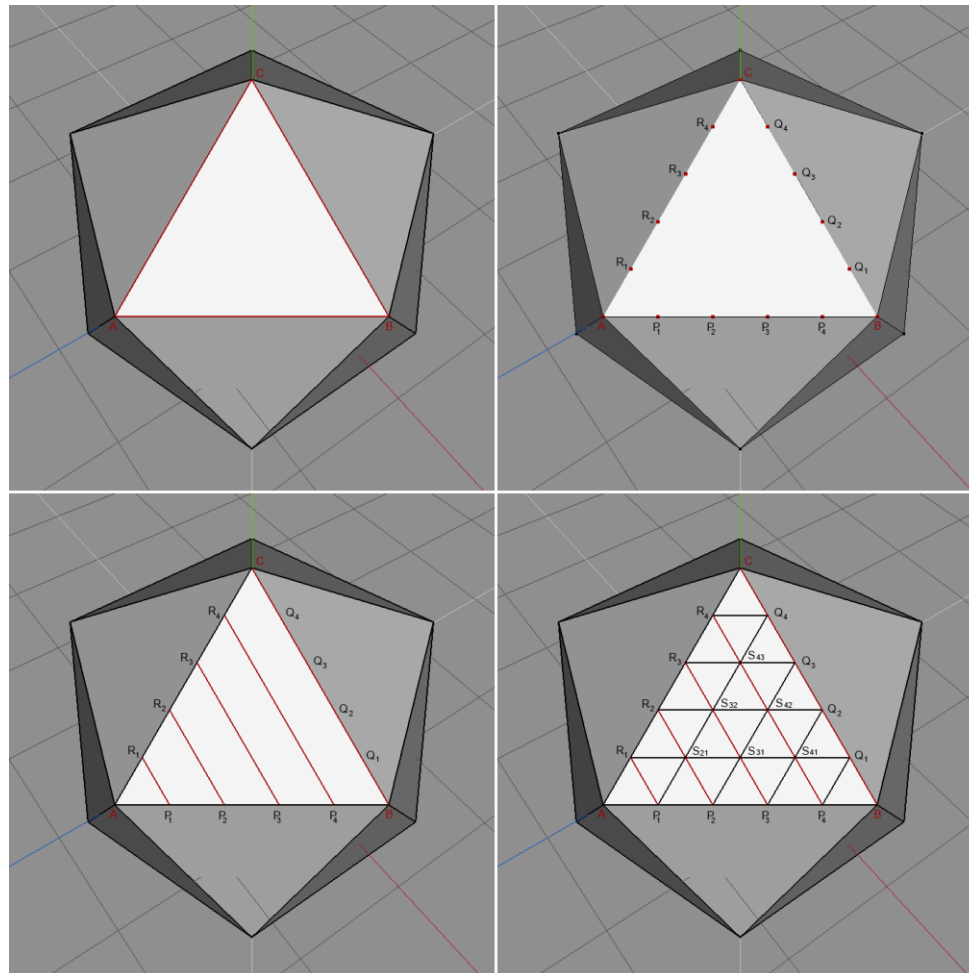
- Konstrukcija mreže
 - Ikosaedar
 - Podela na sitnije trouglove
 - Projekcija na površ



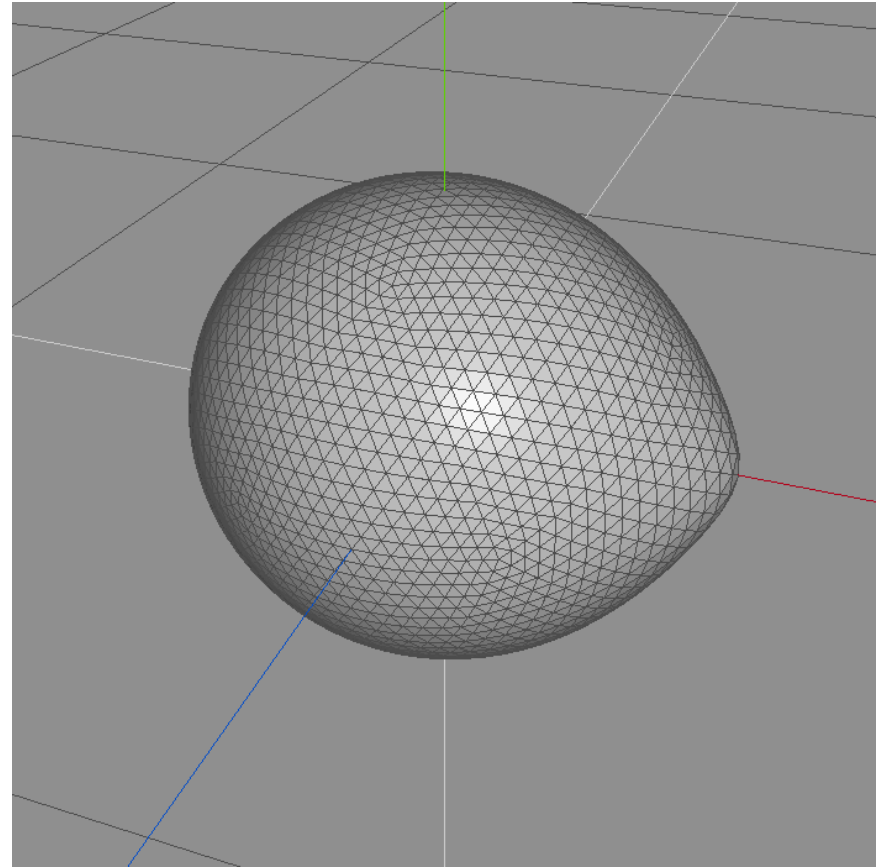
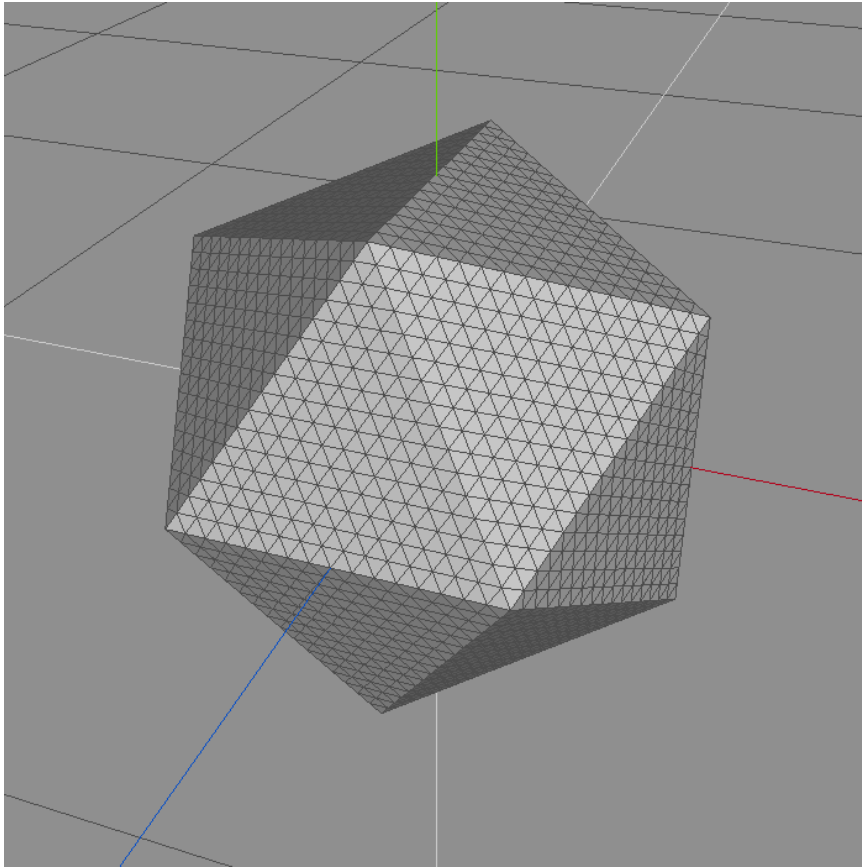
Rekurzivna podela



Frekventna podela



Projekcija na površ



Projekcija na površ

- Temena mreže se projektuju duž radijalnog pravca
- Površ se zadaje preko potencijala u sfernom koordinatnom sistemu

$$f(r) \Big|_{\theta=const, \varphi=const} = const$$

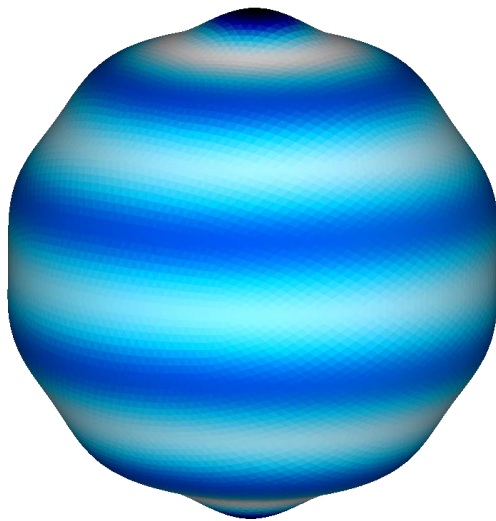
- Primeri
 - Sfera
 - $r = const$
 - Roche potencijal

$$C = \frac{1}{r} + q \left(\frac{1}{\sqrt{d^2 + r^2 - 2rd\lambda}} - \frac{r\lambda}{d^2} \right) + \frac{q+1}{2} r^2 (1 - \nu^2) f^2$$

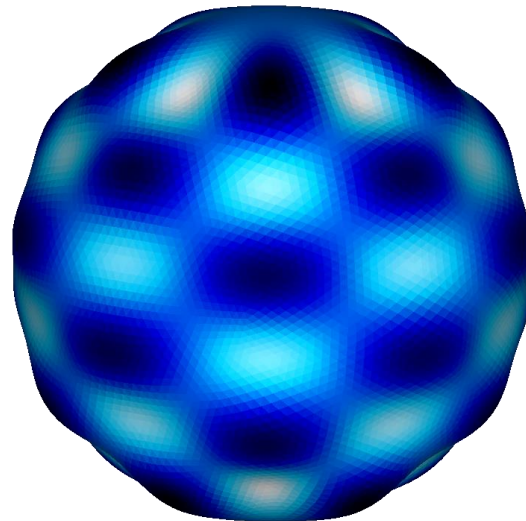
- q – odnos masa
- f – parameter asinhronosti
- d – separacija (kružna orbita - $d = 1$; eliptična orbita – iz rešenja Keplerove jednačine)

Neradialne pulsacije

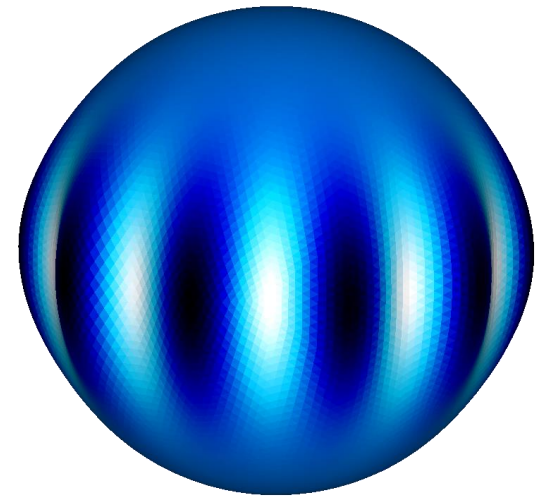
$$r(\theta, \phi, t) = r_0(\theta, \phi) + \Re e \left(\sum_{k=1}^N A_k^r Y_m^\ell(\theta, \phi) e^{-2\pi i(\nu_k t + \psi_k^r)} \right)$$



$\ell = 10, m = 0$



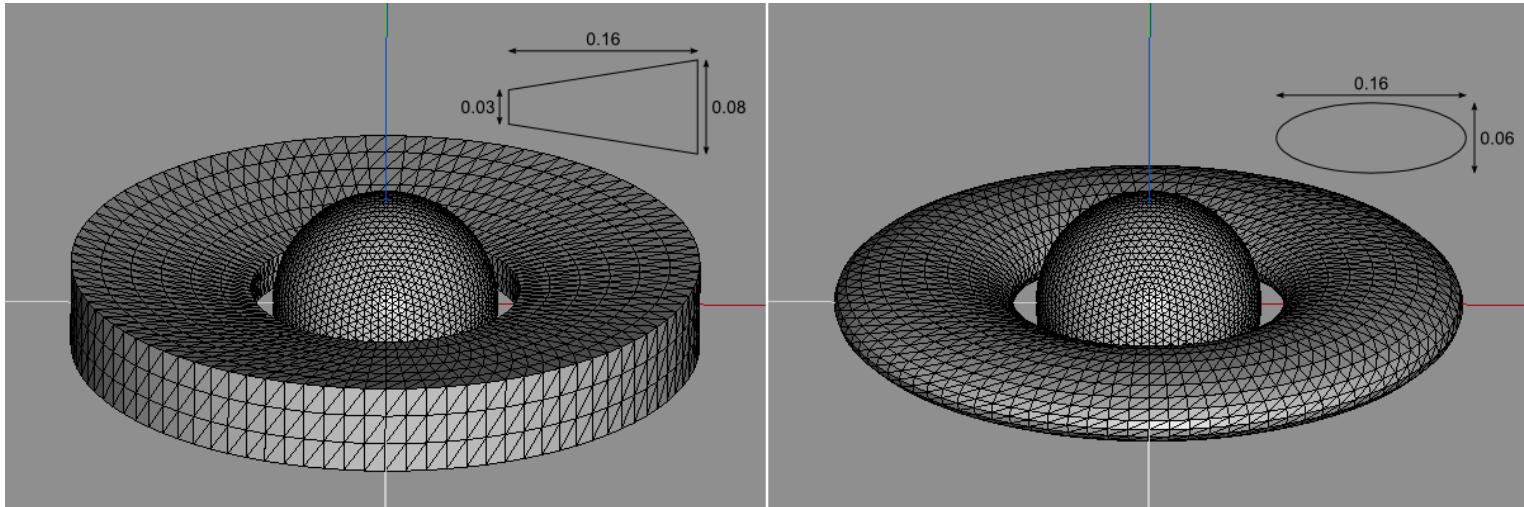
$\ell = 10, m = 5$



$\ell = 10, m = 10$

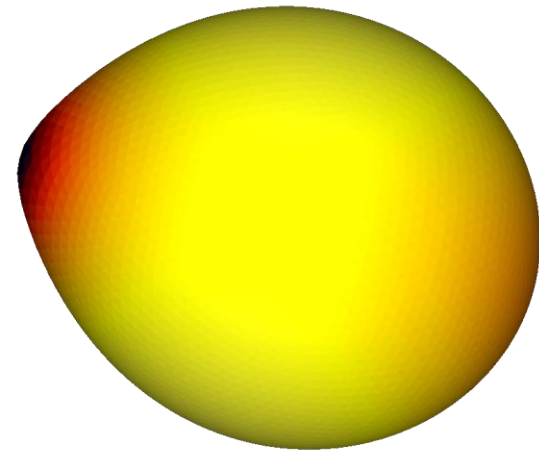
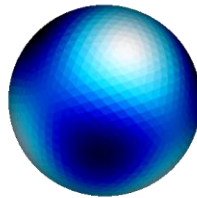
Rotaciona mreža

- Osno-simetrični akrecioni diskovi
- Rotacija poprečnog preseka oko prave normalne na orbitalnu ravan
 - Trapez – konusni disk
 - Elipsa – toroidalni disk



Orbita

- Koordinate centra zvezde $(x_i, y_i, 0)$
 - $x_i = a_i \cos \vartheta$
 - $y_i = a_i \sin \vartheta$
- Kružna orbita
 - $\vartheta = 2\pi\Phi$
- Eliptična orbita
 - Iz rešenja Keplerove jednačine
 - $E - e \sin E = M$



Detekcija vidljivosti

- Definicija problema:

Odrediti koje elementarne ćelije se vide iz pozicije posmatrača, tj. ćelije koje doprinose izlaznom fluksu zračenja

- Postoje različita rešenja ovog problema

- Inverzni slikarski algoritam (Infinity)

- Ray-tracing (Đurašević)

- Aproksimiranje horizonta zvezde Fourier-ovim redom (Wilson & Devinney)

- Aproksimiranje projekcije zvezde koja pomračuje konveksnim poligonom (GDDSYN)

- ...

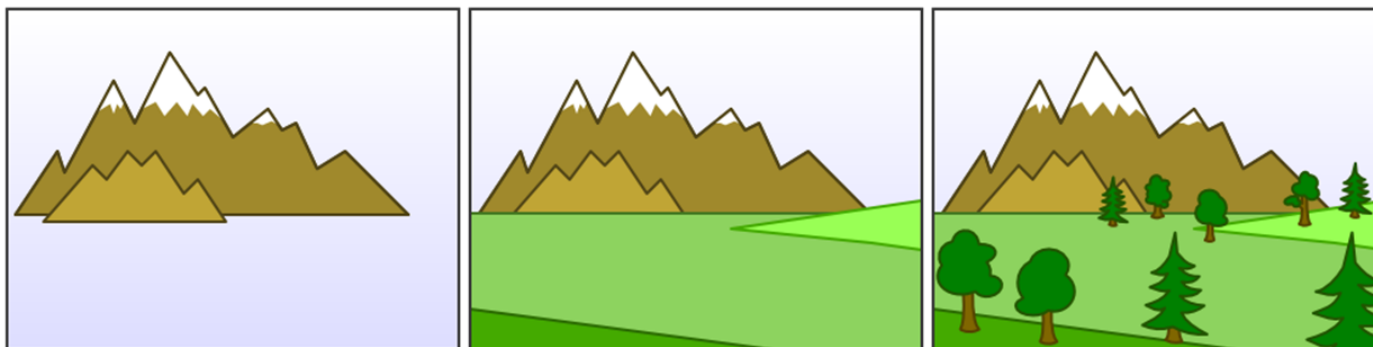
Inspiracija



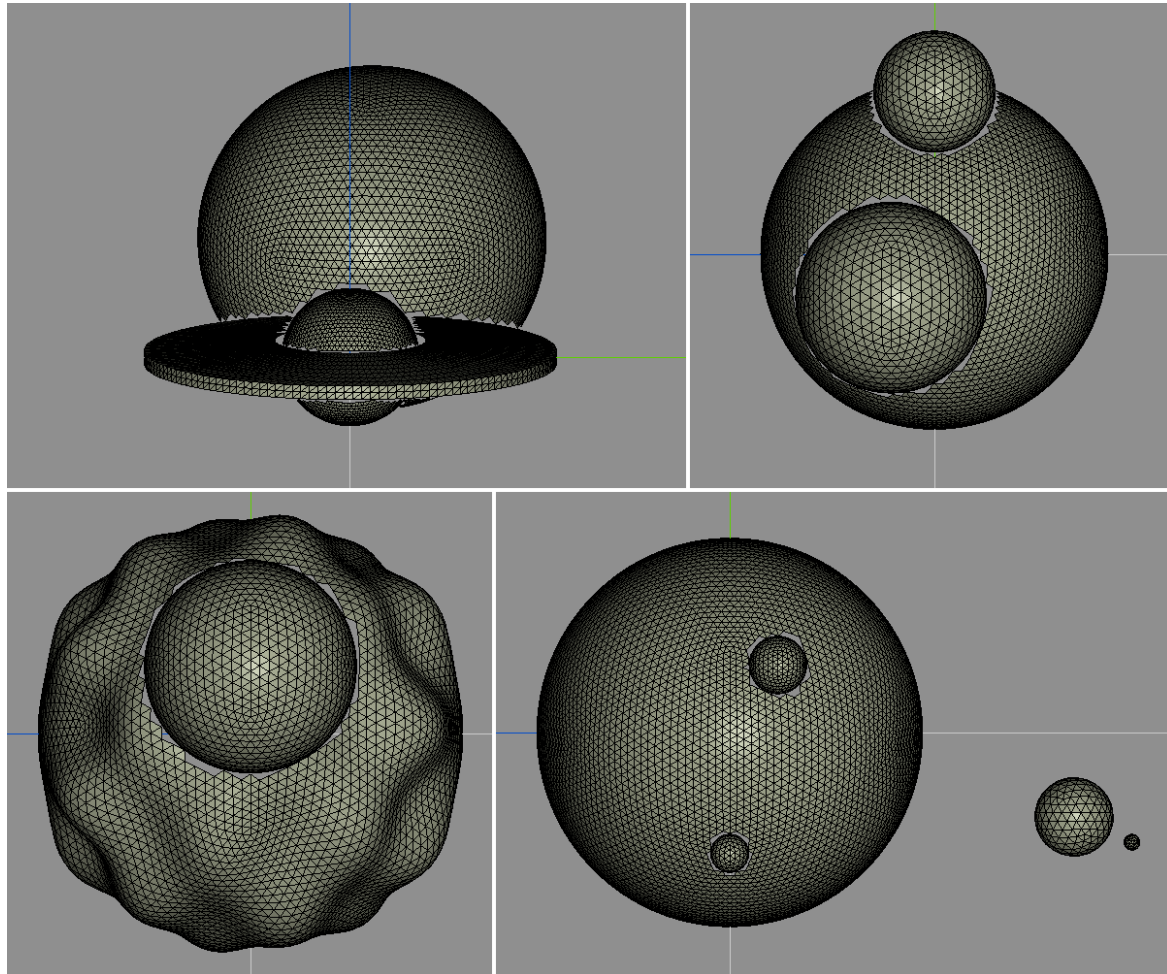
Might & Magic X: Legacy (2014, Ubisoft)

Slikarski algoritam

- Slikarski algoritam
 - Prvo se crtaju najudaljeniji objekti
 - Bliži objekti prekrivaju dalje
- Inverzni slikarski algoritam
 - Obrnuto sortiranje – od najbližeg ka najdaljem
 - Prvi trougao (najbliži posmatraču) je uvek vidljiv
 - Za svaki sledeći se proveruje da li je iza nekog od vidljivih trouglova
 - Ako nije, dodaje se u listu vidljivih trouglova
 - Ovaj postupak se ponavlja za sve trouglove

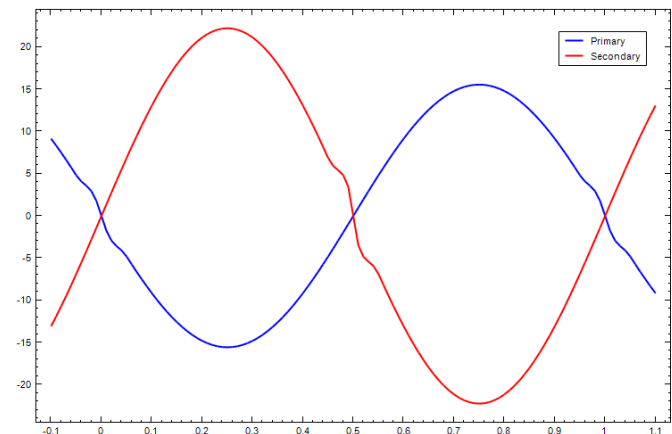
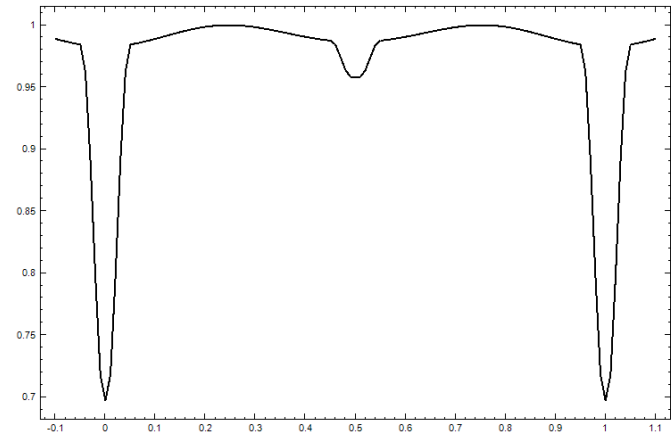


Primeri



Fizika

- Kriva sjaja
 - Gravitaciono potamnjenje
 - Efekat refleksije
 - Aktivni regioni (pege)
 - Akrecioni disk
 - Izlazni fluks
 - Potamnjenje ka rubu
- Krive radijalnih brzina
 - Rossiter–McLaughlin efekat

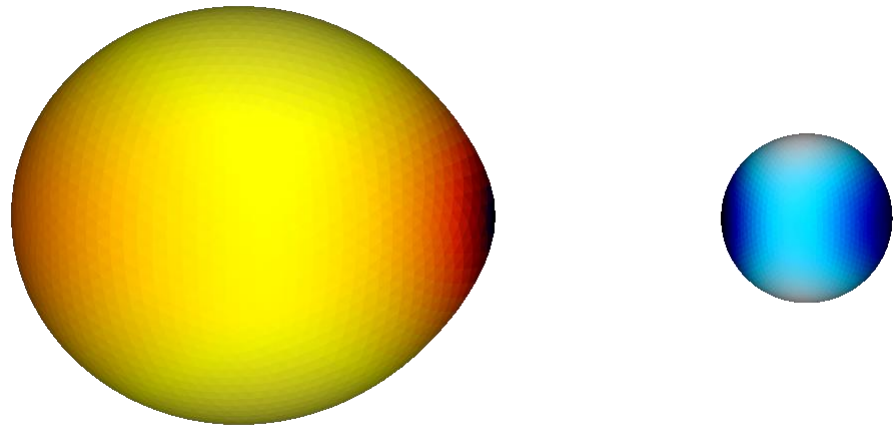


Gravitaciono potamnjenje

- Kod zvezda koje odstupaju od sfernog oblika postoji gradijent temperature od ekvatora ka polovima
- Von Zeipel-ov zakon (1924)

$$T_i = T_{eff} \left(\frac{g_i}{g_{eff}} \right)^\beta$$

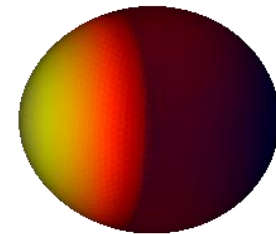
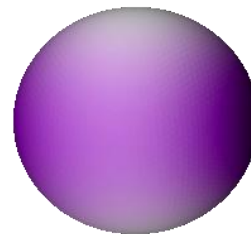
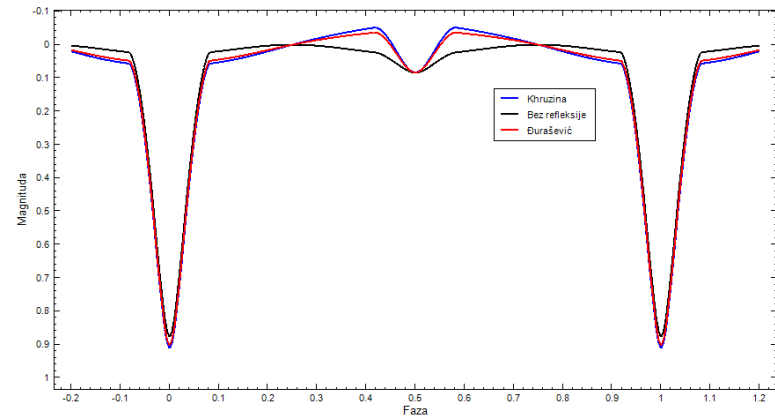
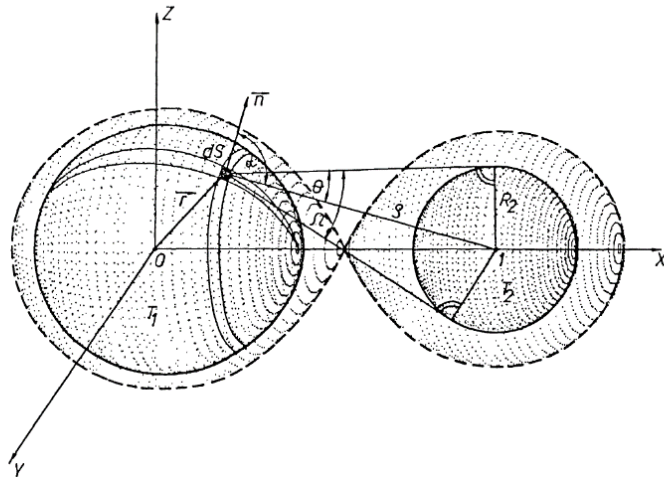
- $\beta \approx 0.25$ za radijativne atmosfere
- $\beta \approx 0.08$ za konvektivne atmosfere



Efekat refleksije

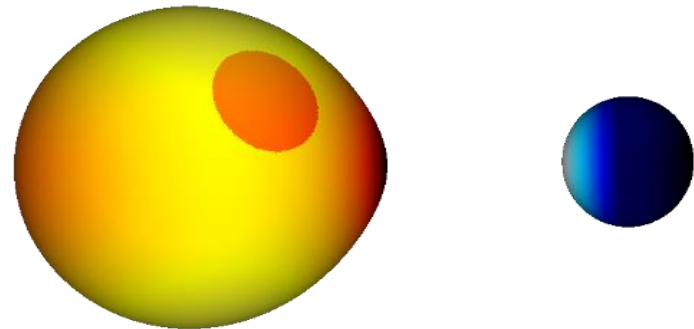
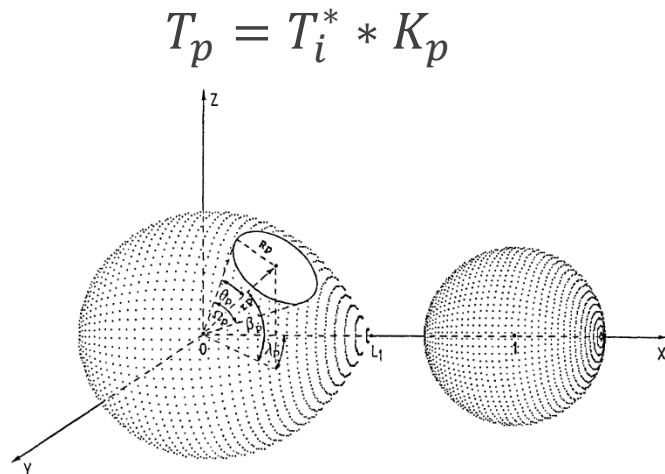
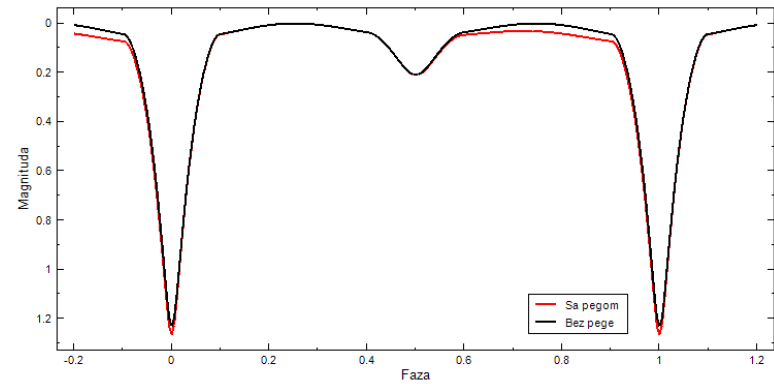
- Međusobno zagrevanje komponentata
- Đuraševićev model refleksije

$$T_i^* = T_i \sqrt[4]{1 + A_1 \cos \alpha \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_2}{\rho_*}\right)^2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4}$$



Aktivni regioni

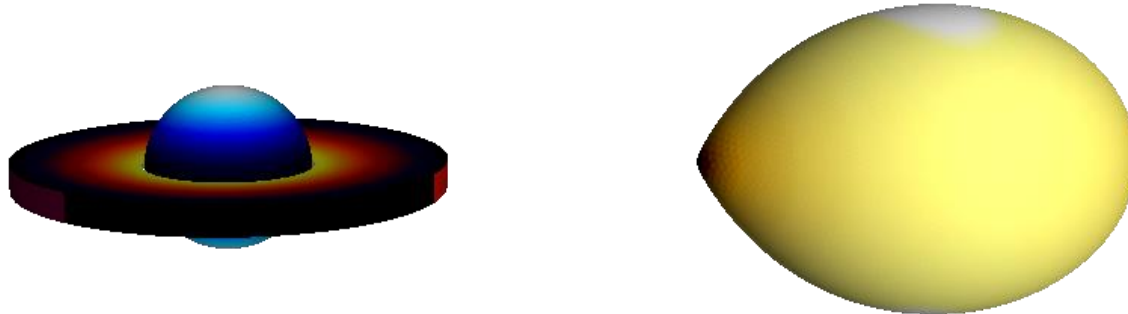
- Pege
 - Magnetno polje
 - Hemijske nehomogenosti
- Asimetrične krive sjaja
 - O'Connel-ov efekat
- Raspodela temperature



Akreциони disk

- Disk je oko primarne komponente
- Sekundarna ispunjava Roche oval
- Raspodela temperature (Zola)

$$T(\rho) = T_{out} + (T_{in} - T_{out}) \left(1 - \frac{\rho - R_{in}}{R_{out} - R_{in}} \right)^{a_T}$$



Izlazni fluks

- Kada postoji raspodela temperature po površini zvezde nemoguće je opisati njeno zračenje jednim modelom zvezdane atmosfere
- Svakoj elementarnoj ćeliji se pripisuje model koji odgovara lokalnim vrednostima temperature i gravitacionog ubrzanja

$$F_k = \int I_\lambda(\cos \gamma, T, g) \cos \gamma dS \rightarrow F_k = \sum_i \chi_i I_{\lambda i}(\cos \gamma, T, g) S'_i$$

- Svakoj ćeliji se pripisuje Kurucz-ov model atmosfere (jednodimenzioni planparaleni model)

Potamnjenje ka rubu

- Geometrijski efekat – u centru diska zvezde vidimo zračenje iz dubljih slojeva nego na rubu

- Claret-ova jednačina

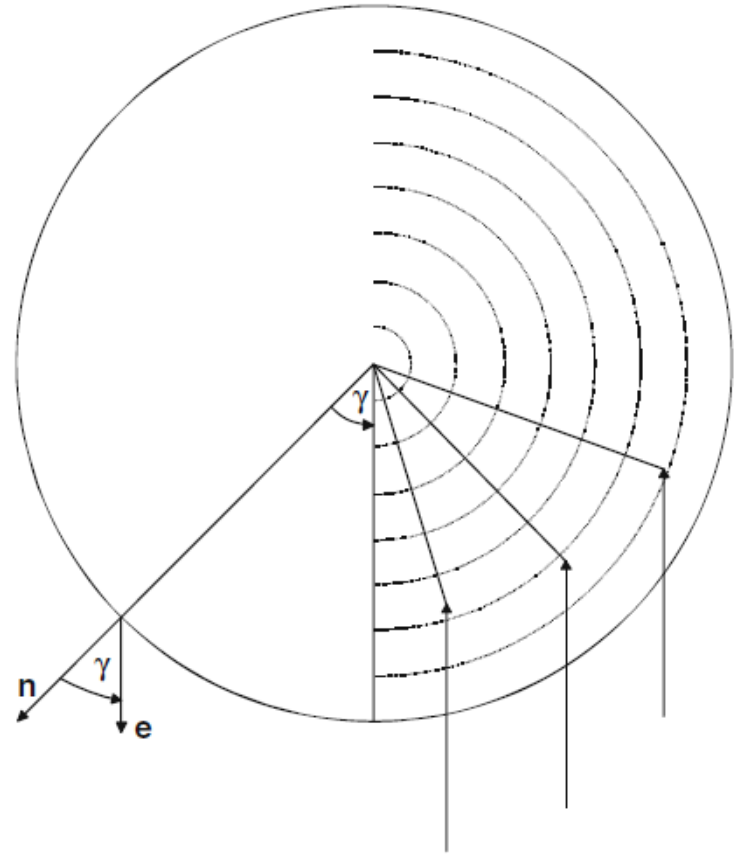
$$D(\cos \gamma) = \frac{I(\cos \gamma)}{I(1)} = 1 - \sum_{k=1}^1 a_k (1 - (\cos \gamma)^{\frac{k}{2}})$$

- Fluks sa komponente k je

$$F_k = \sum_i \chi_i I_{oi}(T, g) D_i(\cos \gamma) S'_i$$

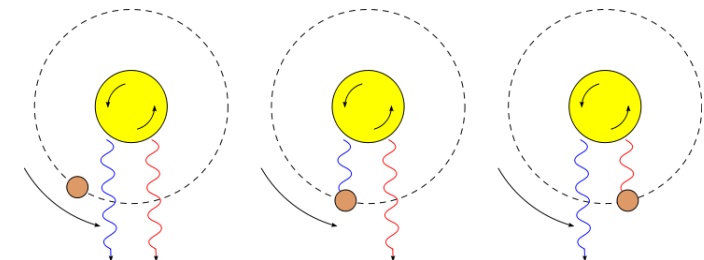
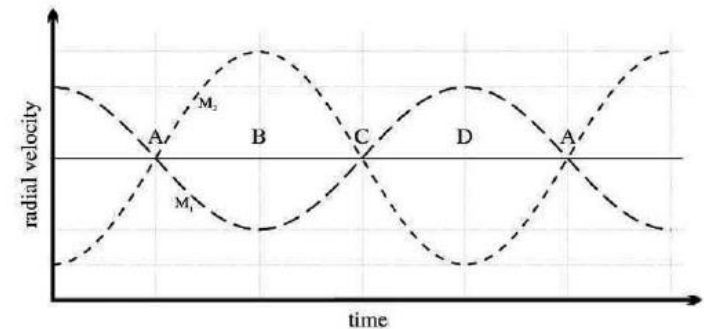
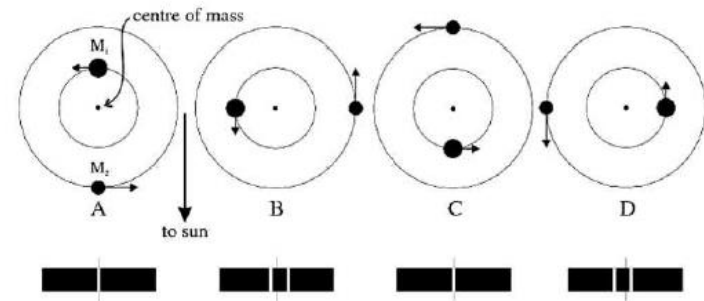
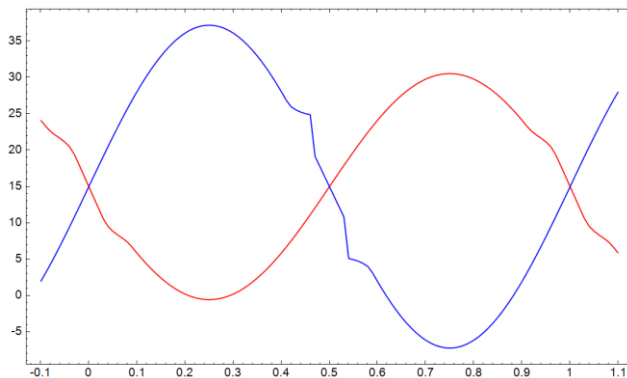
- Ukupni fluks

$$F = F_{prim} + F_{sec} + F_{disc}$$



Radijalne brzine

- Superpozicija nekoliko kretanja
 - Sopstveno kretanje centra mase sistema
 - Kretanje centra zvezde oko centra mase sistema
 - Kretanje elementarnih ćelija na površini zvezde oko centra zvezde (Rossiter–McLaughlin efekat)

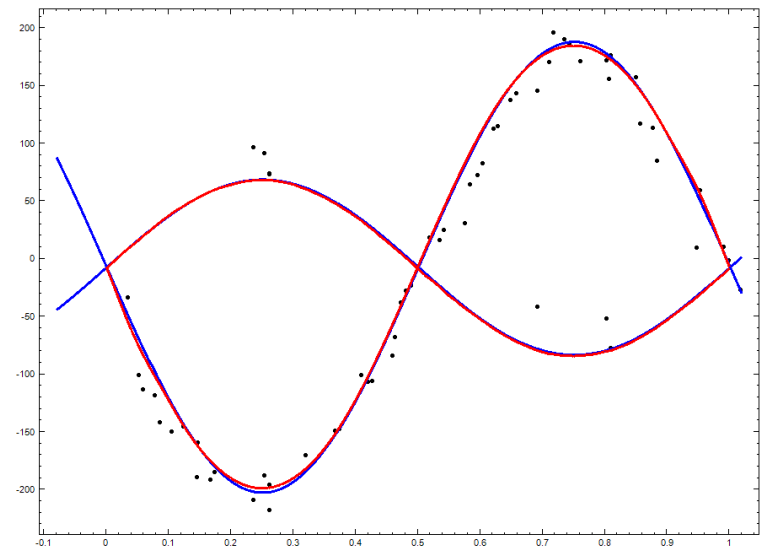
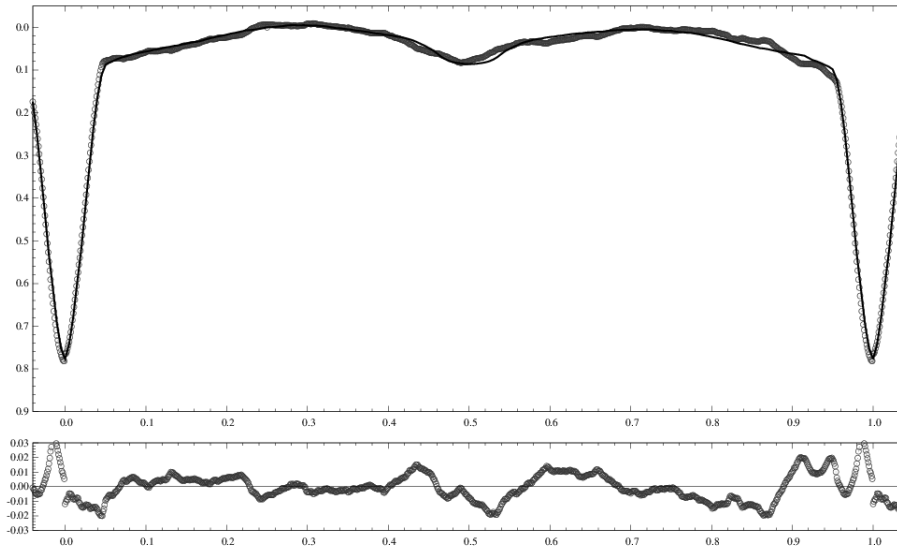


Rezultat

○ Kriva sjaja

○ Kriva radijalnih brzina

} Ulaz za algoritam za optimizaciju



Hvala na pažnji

Modeliranje tesno dvojnih sistema

Čeki Atila

attila@aob.rs