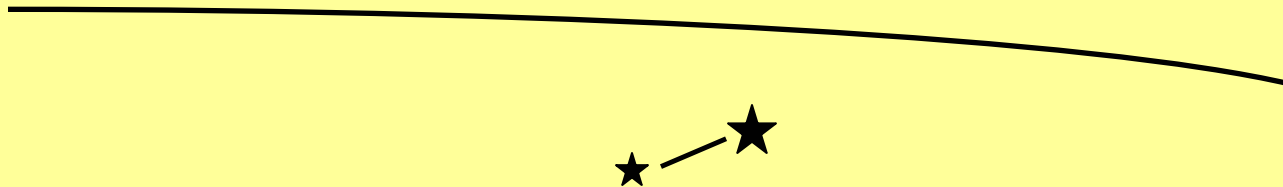


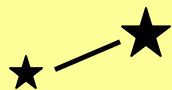
Sudari zvezda: tesni dvojni sistemi tipa W UMa i AM CVn

Bojan Arbutina

Katedra za astronomiju, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu,
Studentski trg 16, Beograd, Srbija

e-mail: arbo@matf.bg.ac.yu





SUDARI ZVEZDA

- pravi sudari, odnosno spajanje (eng. *merger, coalescence*) za razliku od bliskih prolaza
- tri klase astronomskih objekata koji verovatno nastaju kao posledica sudara:
 - i) “zalutale plave zvezde” (eng. *blue stragglers*) - bar neke od ovih brzorotirajućih, plavih zvezda koje se mogu pronaći u globularnim zvezdanim jatima verovatno nastaju kao posledica sudara (spajanja) zvezda tipa W UMa.
 - ii) **supernove tipa Ia** - alternativni model za SN Ia podrazumeva sudar dva bela patuljka, umesto eksplozije jednog belog patuljka Čandrasekarove mase uTDS.
 - iii) **gama bljeskovi** (eng. *gamma-ray bursts*) - za razliku od dugotrajnijih gama bljeskova koji se ponekad vezuju za hipernove (eksplozije izuzetno masivnih zvezda), kratkotrajni gama bljeskovi verovatno predstavljaju rezultat sudara dve neutronske zvezde.
- sudari: konstruktivni i destruktivni
- spajanje komponenata u tesnim dvojnim sistemima (TDS)



TESNI DVOJNI SISTEMI

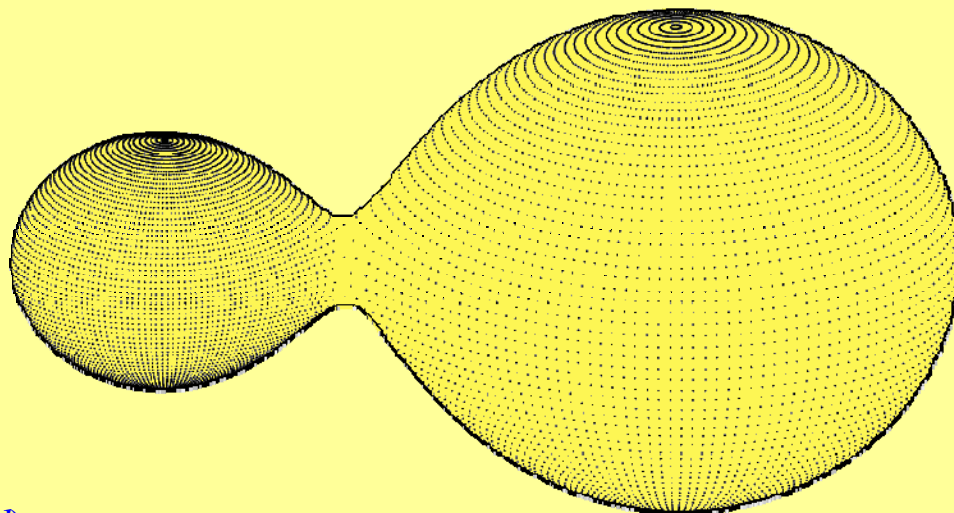
- dvojne zvezde:

- 1) vizuelne
- 2) spektroskopske
- 3) eklipsne
- 4) tesni dvojni sistemi

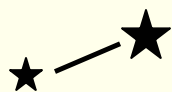
- razdvojeni (*detached*)

- polu-kontaktne (*semi-detached*)

- kontaktne (*contact*)



- zvezde nisu nezavisne, utiču na evoluciju jedna drugoj, postoji transfer mase, gubitak mase i ugaonog momenta iz sistema



Roche-ov model

- Roche-ov potencijal:

$$\Phi_{eff} = -\frac{GM_1}{r_1} - \frac{GM_2}{r_2} - \frac{1}{2}\Omega^2 R$$

$$\Omega^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}$$

- mase: $M_1 > M_2$

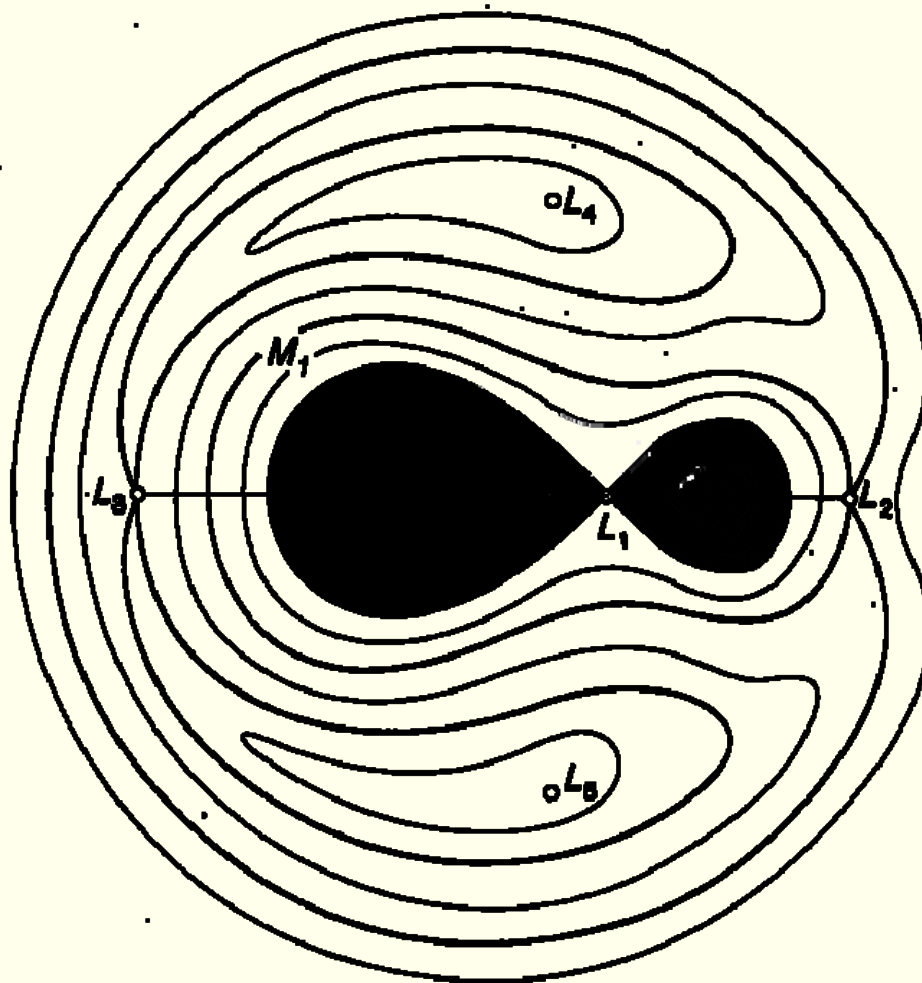
- Lagrange-ove tačke:

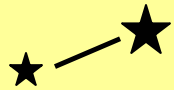
$$L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$$

- kritične ekvipotencijalne površi
(*Roche lobes*):

$$\Phi_{IL}, \Phi_{OL}$$

- *Algol* - polu-kontaktni sistem



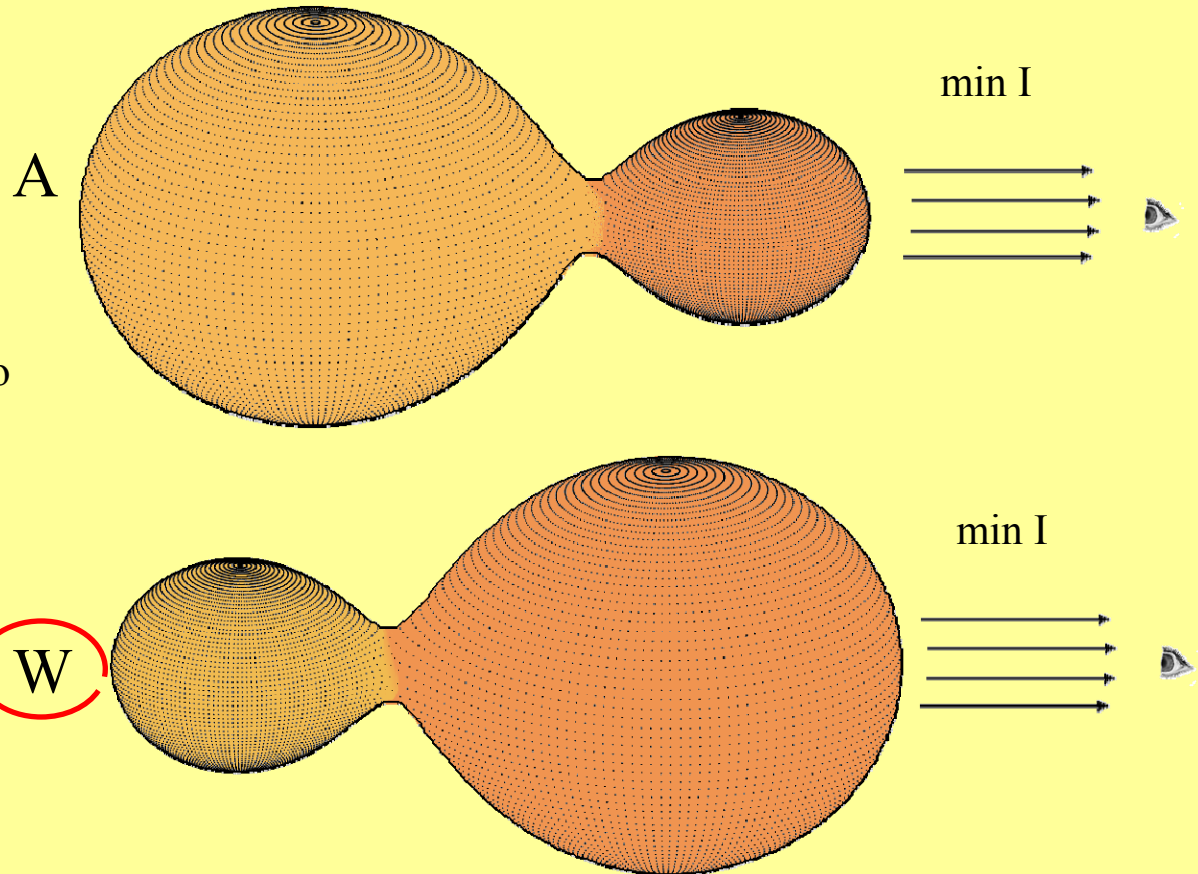
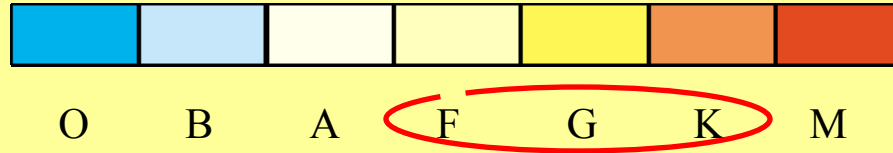


Zvezde tipa W UMa

- kontaktni sistemi
- *overcontact degree*:

$$f = \frac{\Phi - \Phi_{IL}}{\Phi_{OL} - \Phi_{IL}}$$

- spektralni tip: pozni F-K (M)
- konvektivni omotač, približno jednake temperature
- dva tipa: A i W
- primarna komponenta zvezda na glavnom nizu, sekundarna komponenta uvećana, *levo* od glavnog niza!
(videti npr. [Hilditch 2001](#))





Evolucija u TDS

- nuklearna evolucija
- TDS: dinamička ili “orbitalna evolucija”, gubitak ugaonog momenta (AML)

- sekularna, plimska ili Darwinova nestabilnost:

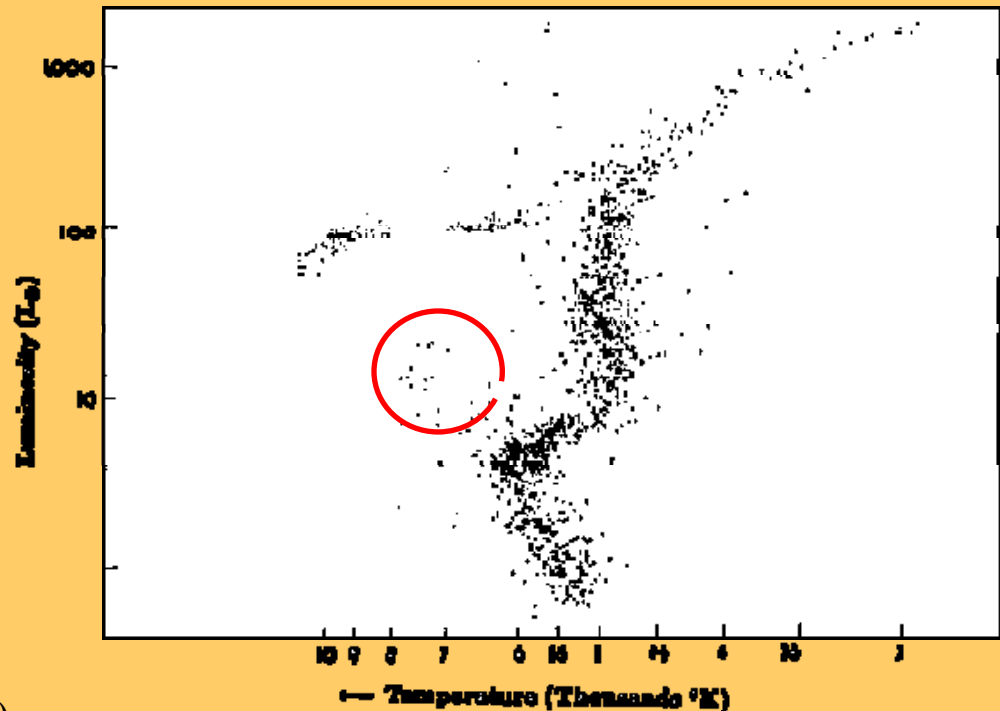
Usled plimskih dejstava u TDS dolazi do cirkularizacije i sinhronizacije. Ako postoji AML kod sinhronizovanih sistema rotacioni ugaoni momenat se povećava kako se rastojanje između komponenti a smanjuje. Orbitalni i rotacioni ugaoni momenat postaju uporedivi!

- *SUDAR!*

(Rasio 1995, Rasio & Shapiro 1995)

- sistemi tipa W UMa: $q \sim 0.5$
(Hilditch 2001, Gazeas & Niarchos 2006)
- kontaktni sistemi – “zalutale plave zvezde”
- FK Com

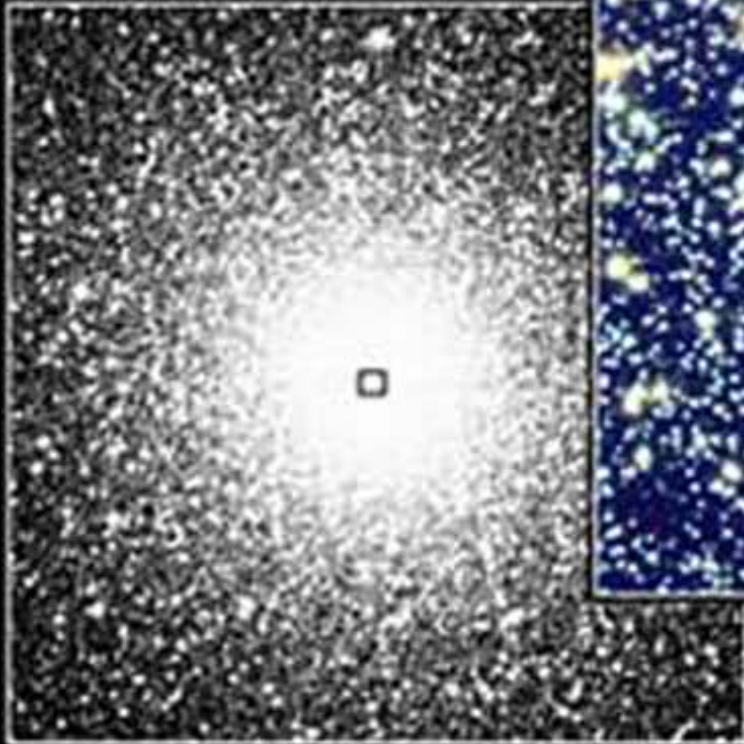
Globularno jato M3



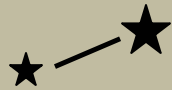
Blue stragglers



Ground



HST



Sekularna nestabilnost

$$J_{\text{spin}} = k_1^2 M_1 R_1^2 \Omega + k_2^2 M_2 R_2^2 \Omega$$

$$J_{\text{orb}} = \mu a^2 \Omega = \frac{q \sqrt{GM^3 a}}{(1+q)^2}$$

$$\mu = M_1 M_2 / M, \quad M = M_1 + M_2, \quad q = M_2 / M_1$$

$$J_{\text{tot}} = J_{\text{orb}} + J_{\text{spin}}$$

$$dJ_{\text{tot}} = 0 \quad J_{\text{orb}} = 3J_{\text{spin}}$$

$$\frac{a_{\text{inst}}}{R_1} = k_1 \sqrt{\frac{3(1+q)}{q}} \quad - \text{kritično rastojanje (Rasio 1995)}$$

- k je bezdimenzijski žiro-radijus, zavisi od raspodele gustine (za homogenu sferu $k^2 = 2/5$)

$$n = 3 \text{ politropa } (\Gamma_1 = 4/3), \quad k^2 \approx 0.075$$

$$n = 1.5 \text{ politropa } (\Gamma_1 = 5/3), \quad k^2 \approx 0.205$$

$$\text{Sunce, } k_{\odot}^2 = 0.059 \approx 0.06$$

$$\frac{R_{\text{IL}i}}{a} = \begin{cases} \frac{0.49q^{-2/3}}{0.6q^{-2/3} + \ln(1+q^{-1/3})}, & i = 1 \\ \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})}, & i = 2, \end{cases}$$

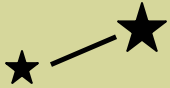
$$\frac{R_{\text{OL}i}}{a} = \begin{cases} \frac{0.49q^{-2/3} + 0.15}{0.6q^{-2/3} + \ln(1+q^{-1/3})}, & i = 1 \\ \frac{0.49q^{2/3} + 0.27q - 0.12q^{4/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})}, & i = 2. \end{cases}$$

(Eggleton 1983, Yakut & Eggleton 2005)

$$- q_{\text{min}} = 0.085-0.095$$

$$- \text{AW UMa, } q = 0.075$$

(Paczynski 1964,
Rucinski 1992,
Pribulla & Rucinski 2008)



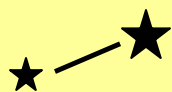
Minimalni odnos masa za sistema tipa W UMa - teorija

- doprinos rotacionog momenta sekundarne komponente ([Li & Zhang 2006](#), [Arbutina 2007](#))
- deformisanost primarne komponente usled rotacije i prisustva pratioca - nenulti kvadrupolni moment ([Arbutina 2009](#))
- struktura primarne komponente – modifikovana Lejn-Emdenova jednačina

$$\frac{1}{\Xi^2} \frac{d}{d\Xi} \left(\Xi^2 \frac{d\Theta}{d\Xi} \right) = -\Theta^n + \nu,$$

$$\Theta^n = \rho/\rho_c, \quad \Xi = R/l, \quad l^2 = \frac{K(n+1)}{4\pi G} \rho_c^{1/n-1} \quad \text{i} \quad \nu = \frac{\Omega^2}{2\pi G \rho_c}.$$

- “sferna simetrija” - [Terebey, Shu & Cassen \(1984\)](#), [Eggleton \(2006\)](#)
- $q_{\min} = 0.070-0.074$



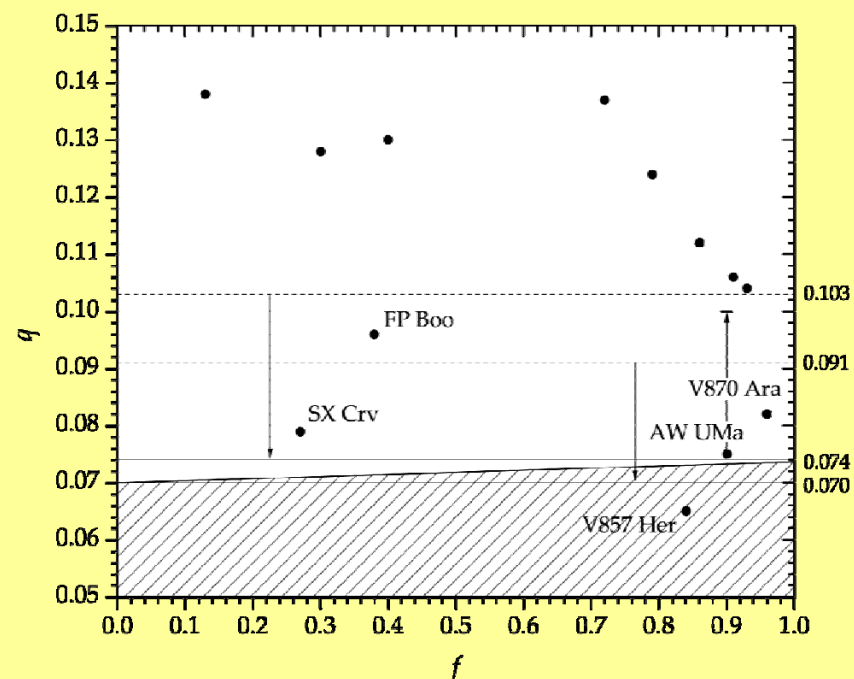
Minimalni odnos masa za sistema tipa W UMa - empirija

- kontaktni sistemi sa najmanjim odnosom masa

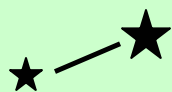
Zvezda	q	f	Reference
V857 Her [†]	0.065	0.84	Qian et al. (2006)
AW UMa [‡]	0.075	0.9?	Rucinski (1992)
SX Crv	0.079	0.27	Zola et al. (2004)
V870 Ara	0.082	0.96	Szalai et al. (2007)
FP Boo	0.096	0.38	Gazeas et al. (2006)
GSC 619-232 [†]	0.104	0.93	Qian et al. (2006)
CK Boo	0.106	0.91	Gazeas et al. (2006)
FG Hya	0.112	0.86	Qian et al. (2006)
GR Vir	0.124	0.79	Yakut & Eggleton (2005)
ϵ CrA	0.128	0.30	Yakut & Eggleton (2005)
V776 Cas	0.130	0.4?	Djurašević et al. (2004)
V410 Aur	0.137	0.72	Gazeas et al. (2006)
TV Mus	0.138	0.13	Yakut & Eggleton (2005)

[†]Odnos masa je određen fotometrijski.

[‡]Pribula i Ručinski nalaze veći odnos masa $q \approx 0.1$ i ukazuju na mogućnost da AW UMa nije kontaktni sistem (Pribulla & Rucinski, 2008).



- V857 Her, $q = 0.065?$ (Qian et al. 2005)



KOMPAKTNI TESNI DVOJNI SISTEMI

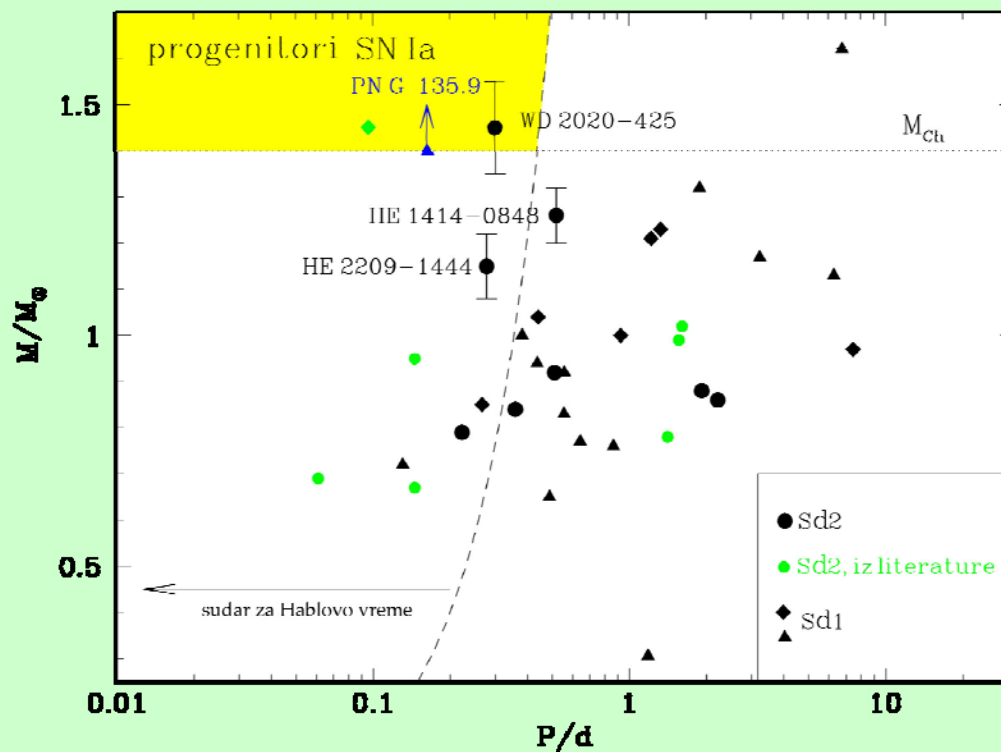
- beli patuljci, neutronske zvezde, crne rupe
- “dvostruki degenerisani” sistemi (eng. *double degenerate*, DD)

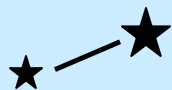
- projekat SPY
(*ESO Supernovae Ia Progenitors survey*,
Napiwotzki et al. 2001, 2003,
Nelemans et al. 2005)

- “faza zajedničkog omotača”
(dva puta)

- gubitak ugaonog momenta
magnetnim vetrom i
gravitacionim zračenjem

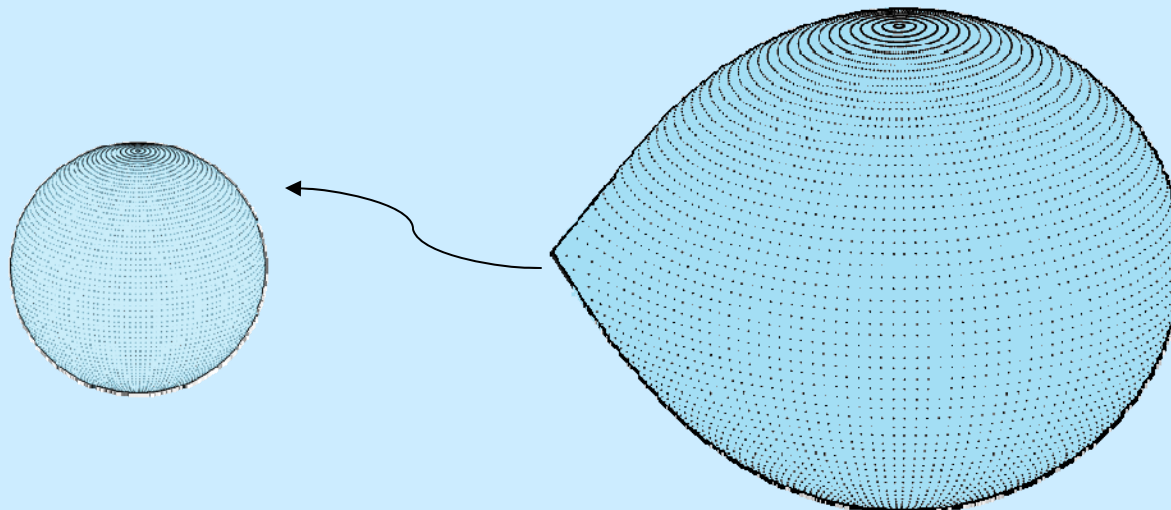
- SN Ia (R CrB)





Zvezde tipa AM CVn

- polukontaktni sistem (dva bela patuljka ili beli patuljak + sdB zvezda)
- relacija masa-radijus: $M \sim R^{-3}$ – manje masivna komponenta prva ispunjava Rošov oval!
- [Smak \(1967\)](#), $P = 17$ min! (PSR 1913+16, $P = 8$ h)
- rastojanje izmedju komponenti reda veličine Sunčevog radijusa
- još dva kanala za SN Ia (uz standardni DD scenario), iako manje verovatna...
- 20-tak sistema ([Stroeer & Vecchio 2006](#), [Anderson et al. 2005, 2008](#) - SDSS)





Maksimalni odnos masa za sistema tipa AM CVn

- zbog pretakanja masa sa manje masivne na masivniju komponentu orbita se sporo povećava

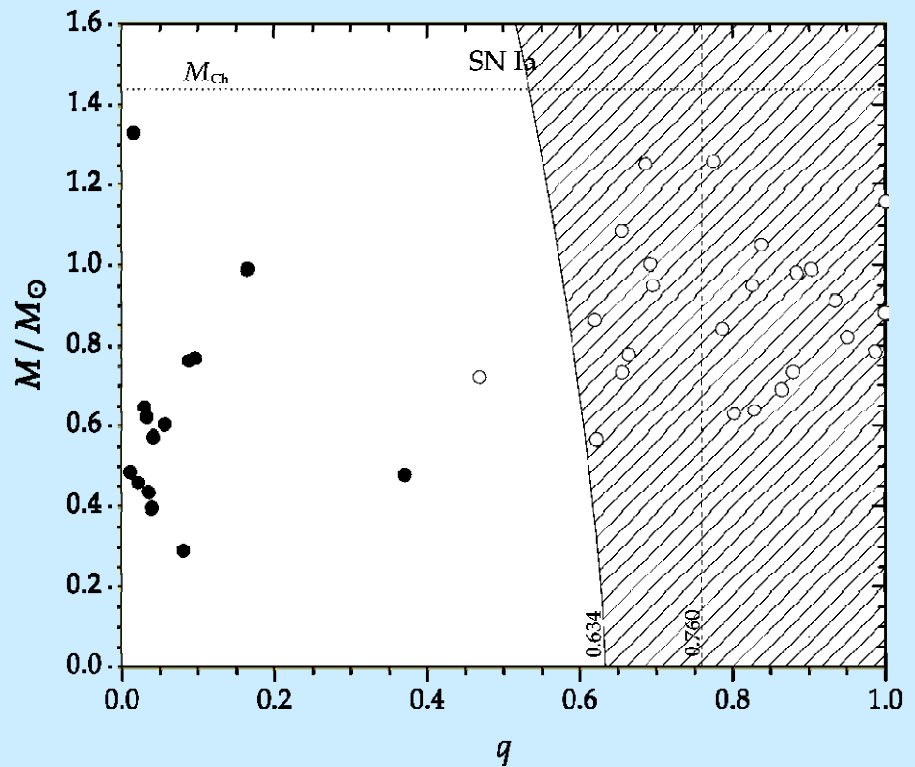
- uslov za stabilan transfer mase

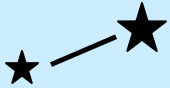
$$q_{\max} = 2/3 \text{ (Postnov \& Yungelson 2006)}$$

- popravljena vrednost

$$q_{\max} = 0.634-0.760$$

- drugi efekti, poput razmene ugaonog momenta ili super-Edingtonove stope akrecije verovatno nameću još stroža ograničenja za stabilnost i maksimalni odnos masa.





GRAVITACIONI TALASI

- U početku se smatralo da u pozadinskom gravitacionom zračenju na niskim frekvencijama ($\sim 10^{-2}$ – 10^{-4} Hz) preovladava zračenje kontaktnih sistema tip W UMa, da bi kasnije bilo shvaćeno da je u ovoj oblasti, najverovatnije, dominantno zračenje odvojenih DD sistema i sistema tipa AM CVn (Postnov & Yungelson 2006).

$$\langle h \rangle = \left(\frac{32}{5} \right)^{1/2} \frac{G^{5/3} M^{5/3}}{c^4 d} \pi^{2/3} f^{2/3} \quad - \text{amplituda}$$

$$\dot{f} = \left(\frac{96}{5} \right) \frac{G^{5/3} M^{5/3}}{c^5} \pi^{8/3} f^{11/3}$$

$$f = \Omega / \pi = 2 / P$$

- frekvencija = 2x orbitalna frekvencija

$$M = M^{2/5} \mu^{3/5}$$

- masa “cvrkuta” (eng. *chirp*)

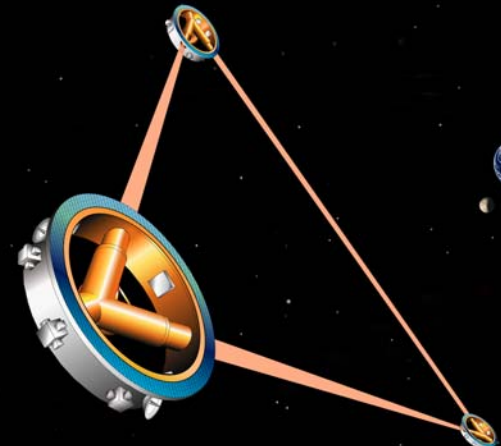
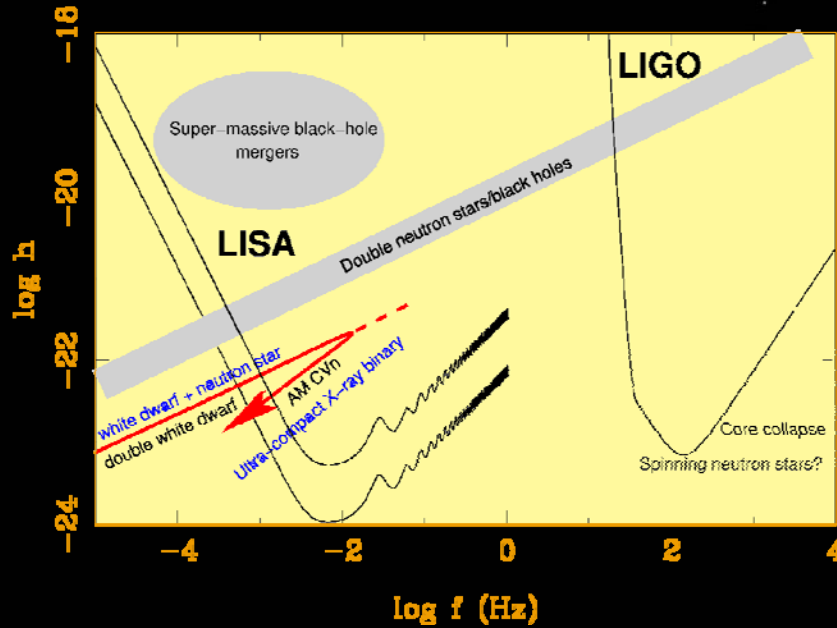
$$\tau_g = 9.83 \times 10^6 \cdot \left(\frac{P}{h} \right)^{8/3} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-5/3} (1 - e^2)^{7/2} \text{ god.}$$

- Nekoliko projekata je u toku: LIGO (*Laser Inter-ferometer Gravitational-wave Observatory*), GEO600, TAMA300 i VIRGO, ili u pripremi (LIGO2, LISA – *Laser Interferometer Space Antenna*).
- dvojne neutronske zvezde (gama bljeskovi), crne rupe (~ 1 kHz)?

LIGO



Virgo



LISA

HVALA!

e-mail: arbo@matf.bg.ac.yu

