

Formiranje ultrakompaktnih patuljastih galaksija

Andrej Obuljen

VII SAR

5. april 2014.

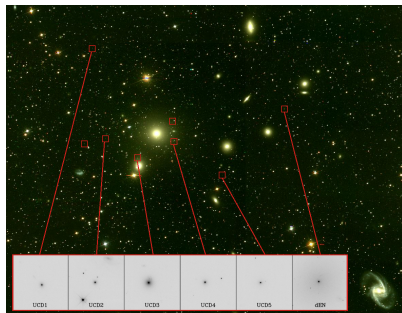
Šta su ultrakompaktne patuljaste galaksije?

Ultrakompaktne patuljaste (UCD od eng. *ultra-compact dwarf*) galaksije (?)

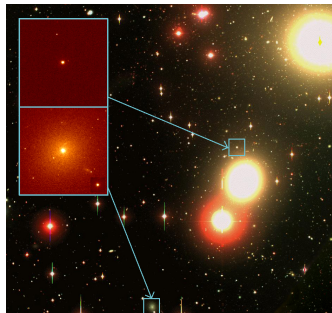
- ▶ Kompaktni zvezdani sistemi
- ▶ Veličina: 10 - 100 pc
- ▶ Masa: 2×10^6 i $10^8 M_{\odot}$
- ▶ Luminoznost: $-14 \lesssim M_V \lesssim -9$
- ▶ Između globularnih jata i eliptičnih patuljastih galaksija

Gde se nalaze?

- ▶ Otkriveni krajem XX veka u jatu Fornax (Hilker et al. 1999, Drinkwater et al. 2000)
- ▶ Potom i u drugim jatima galaksija: Virgo, Centaurus, Hydra I, Coma...
- ▶ Izolovane galaksije (Sombrero) i oko galaksija u jatima galaksija (M60)



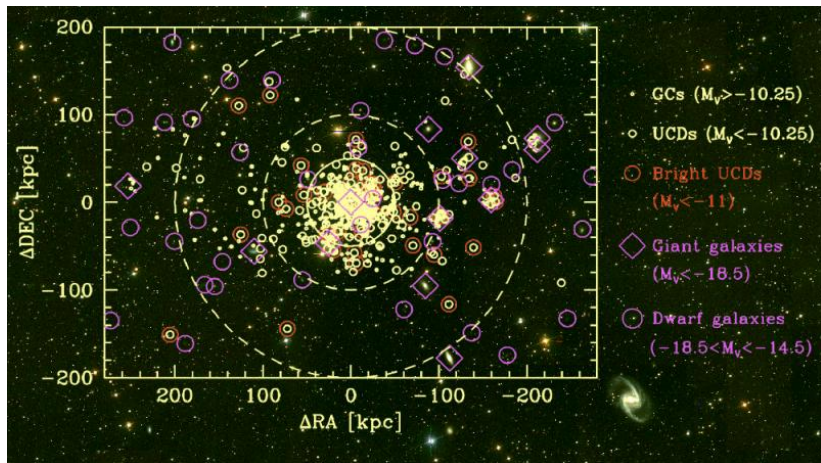
(a) (Hilker)



(b) (Hilker)

Slika

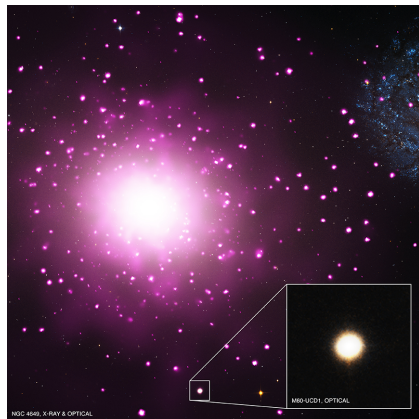
UCD galaksije u jatu Fornax



(Mieske et al. 2012)

UCD galaksija M60-UCD1 - najgušća galaksija!

- ▶ Otkrivena u jatu Virgo oko galaksije M60 (Strader et al. 2013)
- ▶ Masa $2 \times 10^8 M_{\odot}$
- ▶ Dimenzije ~ 24 pc



Kako nastaju UCD galaksije?

Nije u potpunosti utvrđen i postoji tri predložena scenarija:

1. Veoma masivna globularna jata (Mieske et al. 2002)
2. Sudari više globularnih jata (Fellhauer & Kroupa, 2002)
3. Plimsko ogoljavanje (od eng. *tidal stripping*) patuljastih galaksija (Bekki et al. 2003)

Pretraživanje literature

Formiranje UCD galaksija u jatima galaksija:

- ▶ Bekki et al. (2003) - Galaxy Threshing and the Formation of Ultracompact Dwarf Galaxies.
- ▶ Goerdt et al. (2008) - The formation of ultra-compact dwarf galaxies and nucleated dwarf galaxies.

Formiranje sferoidnih patuljastih galaksija (dSph) u gustim sredinama:

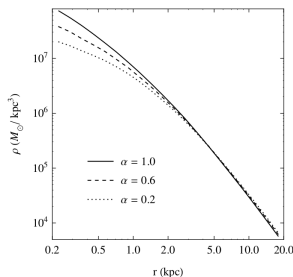
- ▶ Kazantzidis et al. (2010, K10) - On the Efficiency of the Tidal Stirring Mechanism for the Origin of Dwarf Spheroidals: Dependence on the Orbital and Structural Parameters of the Progenitor Disky Dwarfs

Uticaj nagiba profila gustine tamnog haloa

- ▶ NFW profil gustine (Navarro, Frank & White, 1996):

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

- ▶ Patuljaste galaksije imaju manje nagibe profila gustine - *Core-cusp* problem (de Blok, 2009)
- ▶ Barionski procesi - hlađenje gasa, formiranje zvezda, pozadinsko kosmičko UV zračenje, zagrevanje gasa i eksplozije supernovih
- ▶ Numeričke simulacije formiranja izolovanih patuljastih galaksija u kosmološkom Λ CDM modelu sa barionskim procesima (Governato et al. 2010)



Cilj ovog rada

- ▶ U ovom radu pratimo dinamičku i morfološku evoluciju galaksija u potencijalu jata Fornax i ispitujemo mehanizam plimskog ogoljavanja kao mogući način formiranja UCD galaksija
- ▶ Koristimo stabilne dinamičke modele patuljastih galaksija koje se sastoje od diska i tamnog haloa
- ▶ Koristimo numerički potencijal kako bismo bolje opisali jato Fornax
- ▶ Ispitujemo uticaj profila gustine tamnog haloa i različitih orbita galaksije unutar jata Fornax

Kako smo napravili galaksije?

- ▶ Koristili smo programski paket GalactICs koji je razvijen da generiše stabilne početne modele galaksija (Widrow et al. 2008)
- ▶ Ispitujemo galaksije koje se sastoje iz dve komponente: tamnog haloa i diska

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_s)^\alpha (1 + r/r_s)^{3-\alpha}}$$

- ▶ Broj čestica u tamnom halou je $N_h = 10^6$, masa $M_h = 10^9 M_\odot$.

$$\rho_d(R, z) \propto \exp\left(-\frac{R}{R_d}\right) \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_d}\right)$$

- ▶ Broj čestica u disku je $N_d = 1.2 \times 10^6$, masa $M_d = 2 \times 10^7 M_\odot$.

Dva modela galaksija

- ▶ Razmatramo dva modela patuljastih galaksija koji se razlikuju u profilu gustine tamnog haloa:
 1. DW1: $\alpha = 1$ (NFW)
 2. DW2: $\alpha = 0.6$

Kako smo napravili jato Fornax?

- ▶ Najveći uticaj tamne materije
- ▶ Modelujemo jato Fornax NFW haloom tamne materije
- ▶ Stabilni “živi” halo N tela
- ▶ Ukupna masa jata Fornax je $7.0 \times 10^{13} M_{\odot}$
- ▶ Broj čestica u halou je $N_H = 2 \times 10^6$

Gadget2

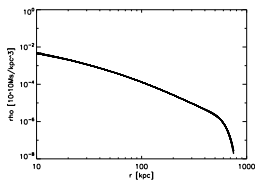
- ▶ Paralelizovani *Tree-PM N-body* kôd Gadget2 (Springel, 2005)
- ▶ *Barnes-Hutt* algoritam za računanje gravitacione interakcije čestica na malim skalama, *PM* (eng. *particle mesh*) na većim skalama
- ▶ Dužina ublažavanja (eng. *softening length*, ϵ) predstavlja udaljenost između čestica ispod koje se ne računa njihov međusobni gravitacioni uticaj:
 - ▶ Patuljaste galaksije: $\epsilon_h = 60$ pc, $\epsilon_d = 15$ pc
 - ▶ Jato Fornax: $\epsilon_H = 8$ kpc
- ▶ Sve simulacije evoluirane su do 10 Gyr sa presekom pozicija i brzina svih čestica na svakih 0.1 Gyr
- ▶ Za realizovanje simulacija korišćen je računar na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu koji radi pod *Scientific Linux* operativnim sistemom, a čine ga 24 procesora *Intel X5675* sa radnim taktom od 3.0 GHz, zatim 24 grafička modula *nVidia M2090 Tesla* i 288 GB radne memorije. Ukupan skladišni kapacitet na raspolaganju iznosi 2 TB-a

Izolovane patuljaste galaksije

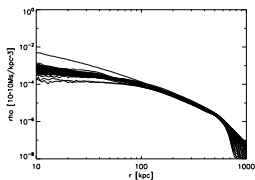
- ▶ Test simulacije patuljastih galaksija u izolaciji 10 Gyr koristeći zadate dužine ublažavanja
- ▶ Relativna promena ukupne energije galaksija DW1 i DW2 održana je ispod 0.3% i 0.1%, respektivno, nakon 10 Gyr
- ▶ Pored ove analize ispitali smo i disperzije brzina, održanje ugaonog momenta i parametre tamnih haloa galaksija koji se takođe ne menjaju značajno
- ▶ Zaključili smo da su galaksije stabilne u vremenskom intervalu od 10 Gyr i da se ne pojavljuju značajne promene u disku

Izolovano jato Fornax

- ▶ Ispitali smo i kako odabir dužine ublažavanja za jato Fornax ima uticaj na njegovu stabilnost
- ▶ 10 test simulacija jata Fornax u izolaciji 10 Gyr sa različitom dužinom ublažavanja $\epsilon_H = \{0.1, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 100\}$ kpc



(a) 8 kpc



(b) 100 kpc

Slika

Odabir dužine ublažavanja za jato Fornax

- ▶ Uticaj izbora ϵ_H na galaksije
- ▶ Praćena je promena relevantnih parametara DW1 u vremenu od 0.5 Gyr
- ▶ Efekat *two-body heating*
- ▶ Kao dodatnu proveru, pustili smo DW1 i u analitičkom potencijalu jata
- ▶ Analizirali smo kinematičke i dinamičke parametre galaksije na svakih 10 Myr
- ▶ Na osnovu ove analize izabrali smo $\epsilon_H = 8$ kpc
- ▶ Izbor konzistentan sa K10 za čestice tamnog haloa Mlečnog puta od $\epsilon_H = 2$ kpc (plimski radijus: $R_{MW} = 244.5$ kpc, $R_H = 1000$ kpc)

Simulacije i orbite

- ▶ Ukupno 8 numeričkih simulacija orbita patuljastih galaksija u jatu Fornax
- ▶ Svaku galaksiju postavili smo na četiri zatvorene orbite i pratili njenu evoluciju 10 Gyr
- ▶ Izbor orbita na osnovu kosmoloških simulacija N tela (Ghigna et al. 1998; Diemand et al. 2007)
- ▶ Progradne orbite

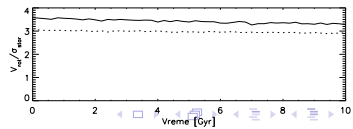
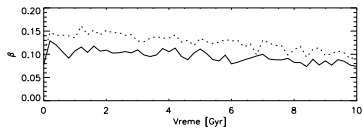
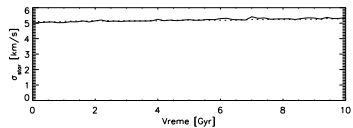
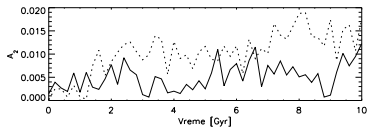
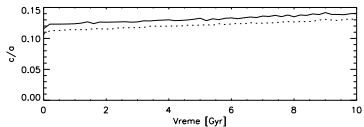
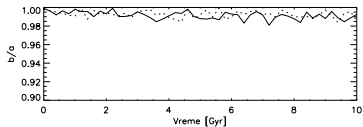
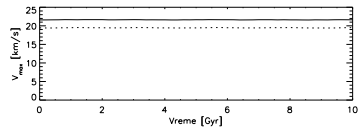
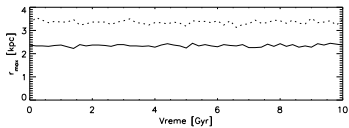
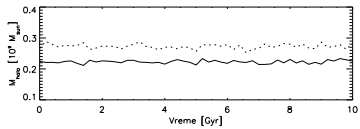
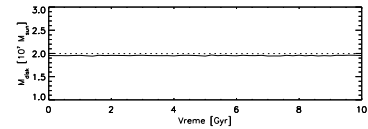
Orbita	(x_0, y_0, z_0) (kpc)	(v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) (km s ⁻¹)	r_{apo} (kpc)	r_{peri} (kpc)	r_{apo} / r_{peri}	i (°)
O1	(0, 353.55, 353.55)	(-397.56, 0, 0)	500	158	3.2	45
O2	(0, 212.13, 212.13)	(-426.50, 0, 0)	300	104	2.9	45
O3	(0, 353.55, 353.55)	(-240.00, 0, 0)	500	83	6	45
O4	(0, 212.13, 212.13)	(-244.00, 0, 0)	300	50	6	45

Relevantni parametri

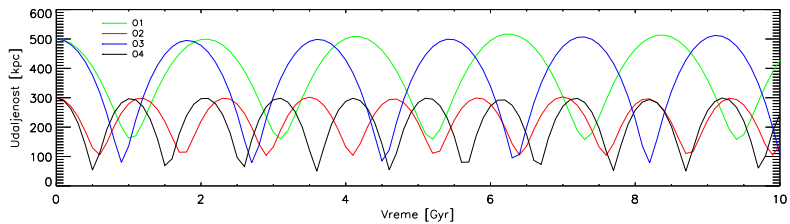
- ▶ v_{max} i r_{max} - karakteristično rastojanje od centra galaksije u okviru koga su razmatrani drugi parametri galaksije
- ▶ Površinska gustina - b/a , c/a
- ▶ Pojavljivanje prečage:

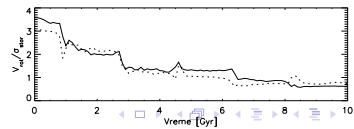
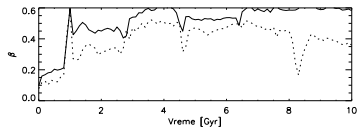
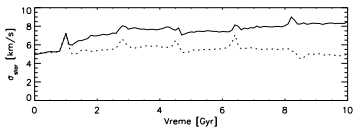
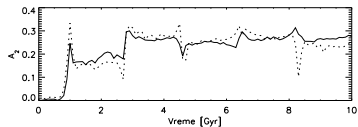
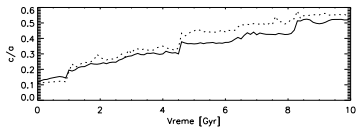
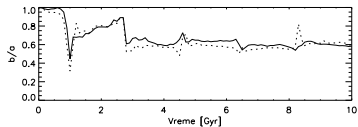
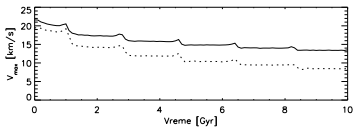
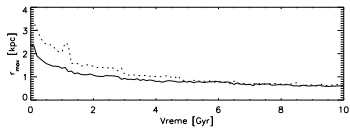
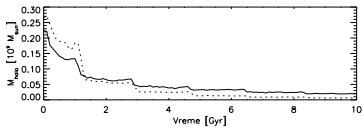
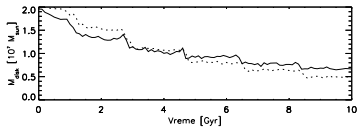
$$A_2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=1}^N e^{2i\phi_j} \right|$$

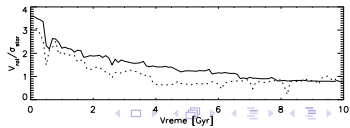
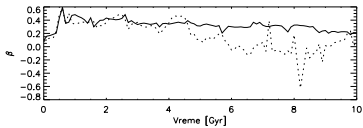
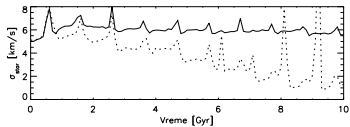
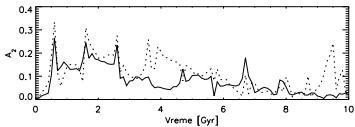
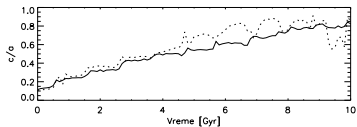
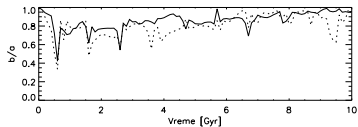
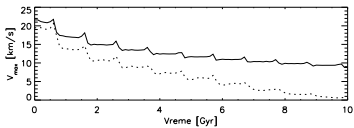
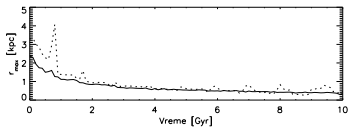
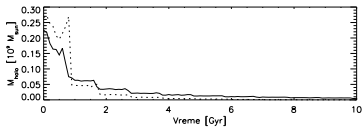
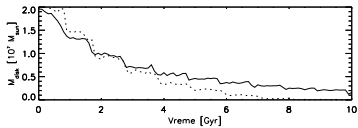
- ▶ Disperzija brzina: $\sigma_{\star} \equiv [(\sigma_r^2 + \sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\phi}^2)/3]^{1/2}$
- ▶ Srednja rotaciona brzina: V_{rot}
- ▶ *Rotationally supported vs pressure supported*: V_{rot}/σ_{\star}
- ▶ Parametar anizotropije: $\beta \equiv 1 - \sigma_t^2/(2\sigma_r^2)$



Orbite







Konačni rezultati

	r_{max} (kpc)	M_h^f [$10^9 M_\odot$]	M_d^f [$10^7 M_\odot$]	A_2	b/a	c/a	β	V_{rot}/σ_*	σ_* (km s^{-1})	<i>Bar</i>	<i>dSph</i>
S1	0.87	0.042	1.09	0.16	0.76	0.45	0.55	1.37	7.71	ne	ne
S2	0.87	0.017	0.95	0.29	0.53	0.44	0.50	0.76	6.26	da	ne
S3	0.59	0.017	0.59	0.10	0.82	0.62	0.29	1.14	6.87	da	ne
S4	0.53	0.002	0.20	0.14	0.76	0.67	0.02	0.85	3.53	da	da
S5	0.59	0.020	0.66	0.28	0.58	0.53	0.58	0.64	8.47	da	da
S6	0.62	0.006	0.47	0.26	0.58	0.55	0.36	0.73	5.04	da	da
S7	0.36	0.005	0.16	0.02	0.96	0.83	0.21	0.76	5.58	ne	da
S8*	0.47	0.0006	0.04	0.10	0.82	0.76	0.18	0.86	2.77	ne	da

Zaključak

- ▶ Ispitali smo mehanizam plimskog ogoljavanja kao moguć način nastanka posmatranih UCD galaksija
- ▶ Koristili smo:
 - ▶ simulacije N tela visoke rezolucije kako bismo ispitali evoluciju patuljastih galaksija kasnog tipa unutar jata galaksija Fornax
 - ▶ numerički potencijal kako bismo bolje opisali jato Fornax
 - ▶ stabilne modele patuljastih galaksija koje se sastoje od tamnog haloa i diska
- ▶ Ispitali smo uticaj profila gustine tamnog haloa i različitih orbita galaksije unutar jata Fornax

Zaključak

- ▶ Pokazali smo da profil gustine tamnog haloa bitno utiče na evoluciju patuljastih galaksija u jatu Fornax
- ▶ Izbor orbita takođe ima značajan uticaj na krajnji ostatak
- ▶ Karakteristike objekata koje dobijamo u našim simulacijama odstupaju od karakteristika posmatranih UCD galaksija
- ▶ Mase kompaktnih ostataka slažu sa masama posmatranih UCD galaksija
- ▶ Jednodimenzionalne disperzije brzine UCD galaksija unutar jata Fornax imaju nekoliko puta veće vrednosti od onih koje dobijamo u ovom radu
- ▶ Efektivni radijusi UCD galaksija u jatu Fornax imaju dimenzije ispod 100 pc, dok su naši ostaci veći od 300 pc
- ▶ Objekti koje dobijamo bliži su po karakteristikama sferoidnim patuljastim galaksijama
- ▶ Mogući razlozi koji su uticali na dobijene ostatke:
 - ▶ dužina ublažavanja čestica diska
 - ▶ dužina ublažavanja čestica jata Fornax

Šta trenutno radimo?

- ▶ Povećavamo rezoluciju po masi čestica jata Fornax
- ▶ Povećavamo prostornu rezoluciju za čestice diska patuljastih galaksija

Pitanja?