

Dan žena u astronomiji

Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Majda Smole

Astronomska opservatorija u Beogradu

msmole@aob.rs

Beograd, 2019

- Formiranje supermasivnih crnih rupa u ranom Univerzumu
 $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\odot}$ na crvenom pomaku $z = 7$ (Mortlock et al. 2011)
↳ kosmološke simulacije
- Emisija gravitacionog talasnog zračenja i gravitacioni uzmak crnih rupa
↳ izolovane simulacije sudara galaksija

Formiranje supermasivnih crnih rupa u ranom Univerzumu

- Zvezde Pop III $10 - 1000 M_{\odot}$ at $z = (10, 30) \implies M_{\text{BH}} \sim 100 M_{\odot}$
- Razvijen metod za spajanje Millennium ($L = 500h^{-1}$ Mpc) i Millennium-II ($L = 100h^{-1}$ Mpc) simulacija.
- U svakom halou tamne materije se nalazi po jedna crna rupa sa masom $100 M_{\odot}$.
- Drvo sudara prati rast crnih rupa usled sudara i usled akrecije gasa.

$$M_{\text{BH}} = M_{\text{BH},0} \times \exp \left[\frac{f_{\text{Edd}}(1-\epsilon)}{\epsilon} \frac{t_f - t_i}{t_{\text{Edd}}} \right]$$

Cilj:

- 1 Formiranje supermasivne crne rupe $10^9 M_{\odot}$ na $z = 7$
- 2 Poklapanje funkcije mase crnih rupa iz simulacija sa funkcijom mase dobijenom iz posmatranja kvazara na $z \sim 6$ (Willott et al. 2010)

Oba kriterijuma su zadovoljena za $f_{\text{Edd}} = 3.7$

Novija posmatranja ukazuju na super-Eddington akreciju u kvazarima na visokim z ($1 < f_{\text{Edd}} < 10$):

Kelly & Shen 2013, Du et al. 2014, Page et al. 2014, Mortlock et al. 2011, Lapi et al. 2006, 2014, ...

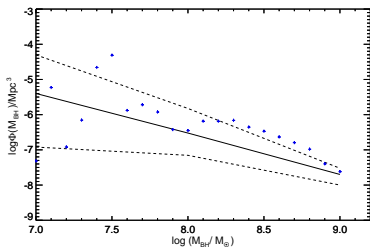


Figure: Funkcija mase crnih rupa, Smole et al. (2015)

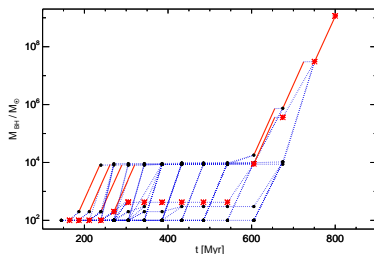


Figure: Drvo sudara u kome se formira $10^9 M_{\odot}$ crna rupa na $z = 7$. Rast usled sudara (plave linije) i usled akrecije (crvene linije). Smole et al. (2015)

Gravitacioni uzmak crnih rupa

- Hijerarhijski rast struktura \Rightarrow sudari galaksija \Rightarrow formiranje dvojnih sistema crnih rupa
 - Interakcije dvojnih sistema crnih rupa sa zvezdama i gasom
 - Kada rastojanje između crnih rupa postane $\lesssim 10^{-3}$ pc gravitaciono zračenje "izvlači" moment impulsa i energiju iz sistema što dovodi do naglog spajanja crnih rupa.
 - Asimetrija u sistemu dovodi do asimetrične emisije gravitacionih talasa i gravitacionog uzmaka (engl. black hole recoil)
- Brzina gravitacionog uzmaka zavisi od odnosa masa crnih rupa, njihove rotacije i orijentacije ose rotacije u odnosu na ravan orbite crne rupe.
- Numeričke relativističke simulacije su pokazale da u pojedinim slučajevima brzine gravitacionog uzmaka mogu biti ~ 4000 km/s.

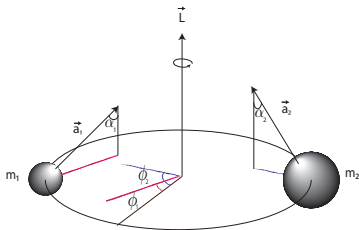
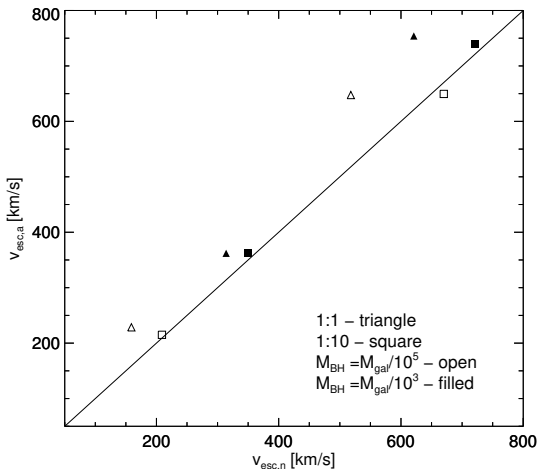


Figure: Geometrija dvojnog sistema crnih rupa. Izvor: Guedes et al. (2011).

Gravitacioni uzmak crnih rupa u analitičkim i numeričkim modelima galaksija

- Galaksije sa masom $10^{12} M_{\odot}$ i $10^{11} M_{\odot}$ čije su komponente halo tamne materije, centralni oval i disk.
- Galaksije koje nastaju u:
 - 1 velikim (1:1) sudarima
 - 2 malim (1:10) sudarimau čijem se centru nalazi crna rupa sa masom
 - 1 $M_{\text{BH}} = M_{\text{gal}}/10^5$
 - 2 $M_{\text{BH}} = M_{\text{gal}}/10^3$
- Numerički modeli - GADGET-2 kod
- Početni uslovi - GalactICs, $N = 10^6$ čestica

Gravitacioni uzmak crnih rupa u analitičkim i numeričkim modelima galaksija



Zaključci

- 1 Rast crnih rupa
 - Crne rupe sa početnom masom od $100 M_{\odot}$ mogu objasniti f-ju mase crnih rupa u kvazarima na $z \gtrsim 6$ ukoliko rastu u kombinaciji sudara i akrecije gasa na Edingtonovom odnosu $f_{\text{Edd}} = 3.7$.
 - 2 Gravitacioni uzmak
 - Crne rupe najlakše napuštaju galaksije koje nastaju u velikim sudarima
 - Veliki sudari aktiviraju akreciju gasa.
 - Ipak, brzine gravitacionog uzmaka zavise od parametara dvojnog sistema crnih rupa.
-
- Smole M., Micic M., Martinovic N., 2015, MNRAS, 451 , 1964
 - Smole M. , 2015., Serbian Astronomical Journal , 191 , 17
 - Smole M., Micic M., Mitrasinovic A., MNRAS, korekcije u toku