

Institut za fiziku, Zemun
23 Jun 2009

Astrofizičke implikacije sjedinjenja crnih rupa

Tamara Bogdanović



Super-masivne crne rupe: pregled parametara

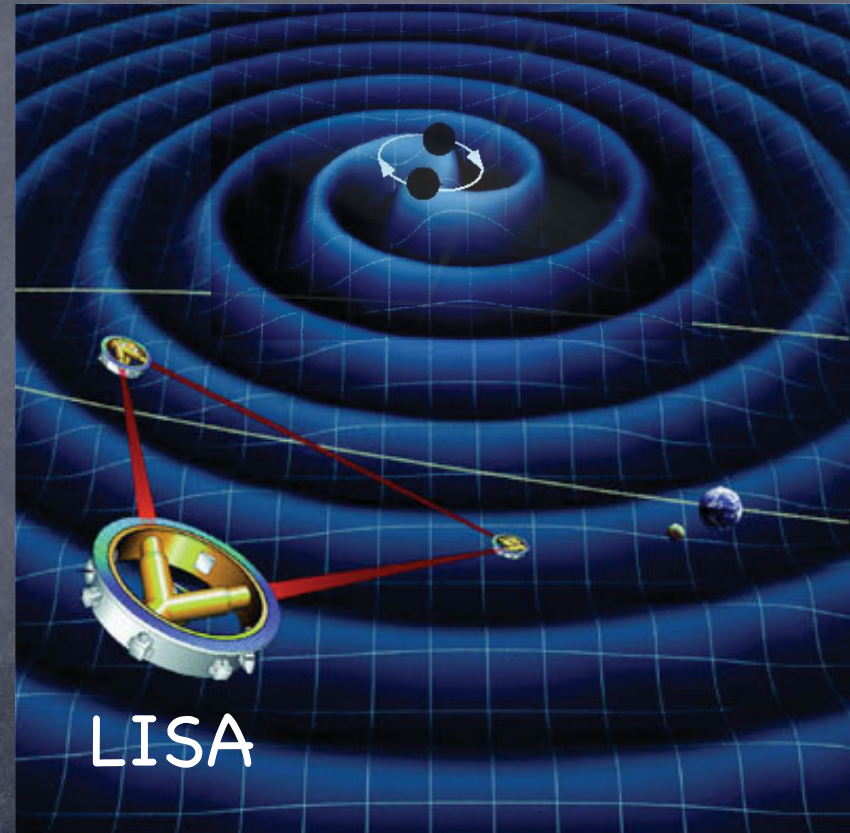
(CR = Crna Rupa)

- **Biometrijski podaci:** masa i spin
- **Super-masivne CR:** $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
- **Spin:** 0-1 (0-100%)
- **Lokacija:** centri galaksija
- **Gravitacioni uticaj:** centralnih 10 - 100 svetlosnih godina, ili 1/1000 deo lokalne galaksije
- **Bračno stanje:** pojedinačne ili binarne



Binarne SMCR: motivacija

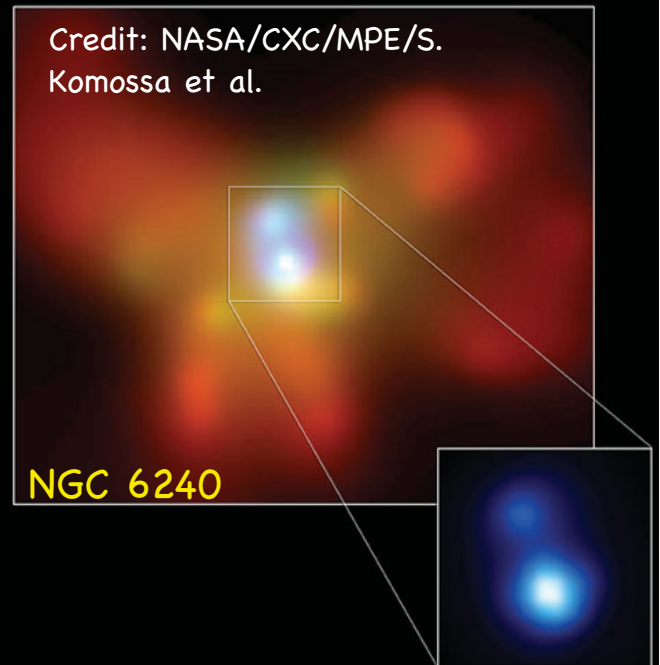
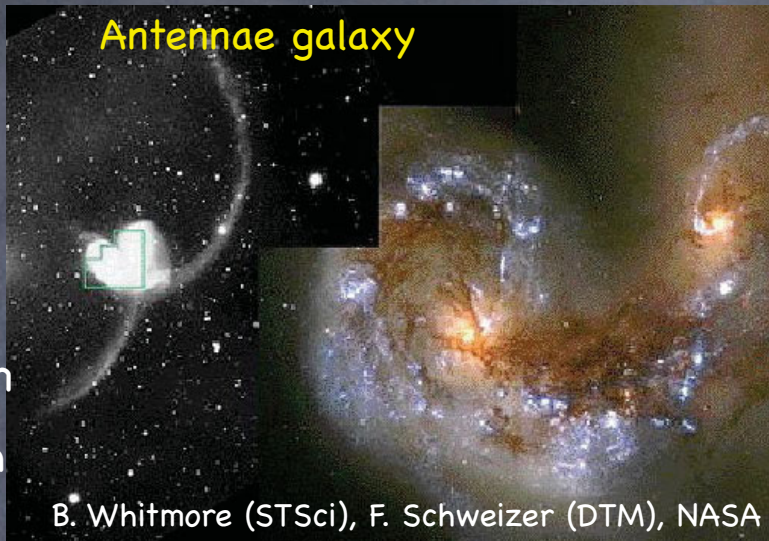
- Najluminozniji izvor gravitacionih talasa u svemiru
- Kombinacija EM zraka i gravitacionih talasa će omogućiti precizna kosmološka merenja
- U kojoj meri SMCR "rastu" kroz sjedinjenje sa drugim SMCR, a koliko kroz akreciju gasa



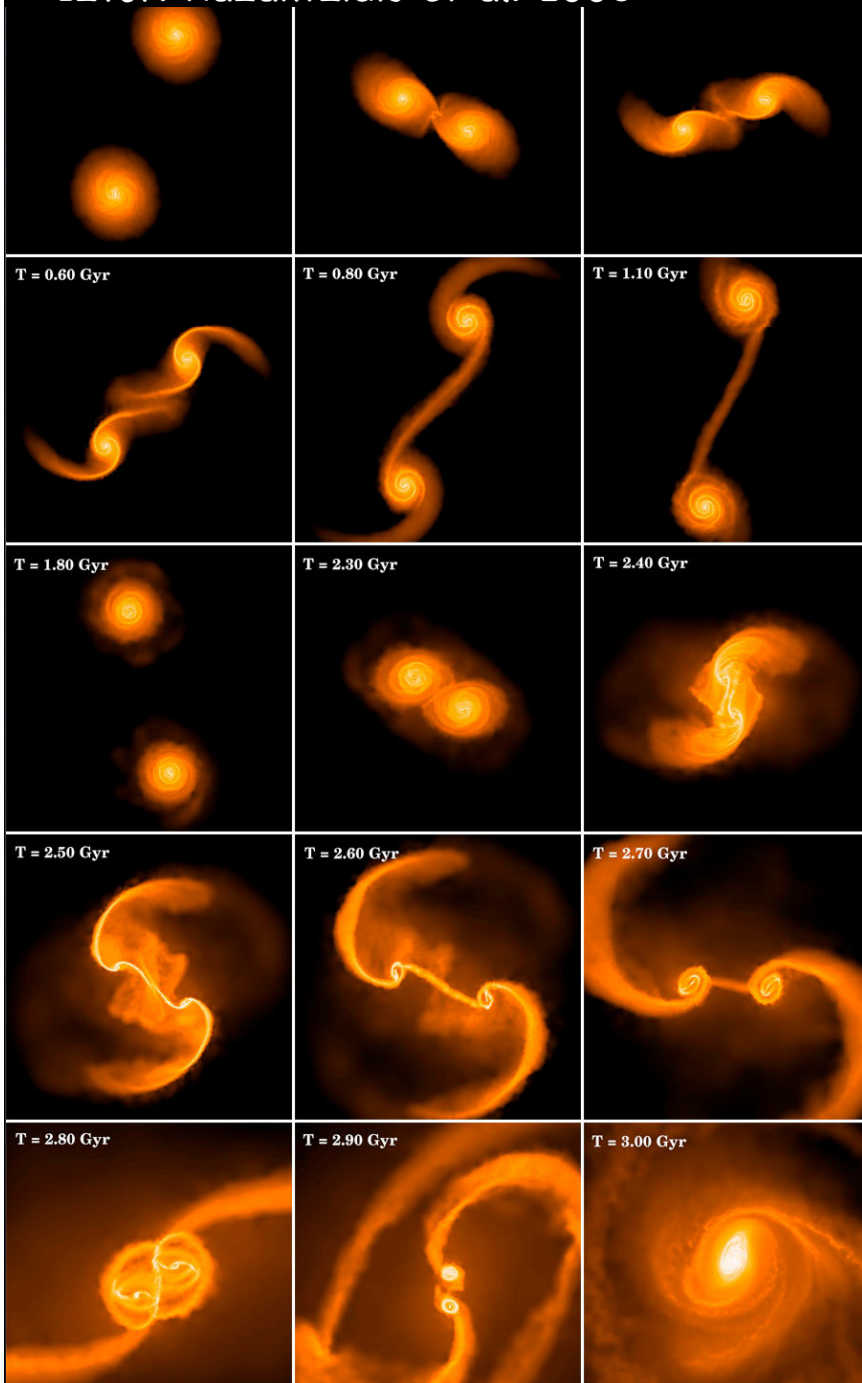
Izvor: www.srl.caltech.edu/lisa/graphics/master.html

Binarne SMCR: nastanak i evolucija

- Sudari galaksija
- Interakcije sa zvezdama i gasom
- Faza gravitacionih talasa
- Sjedinjenje crnih rupa
- "Gubitak" mase
- Gravitacioni trzaj

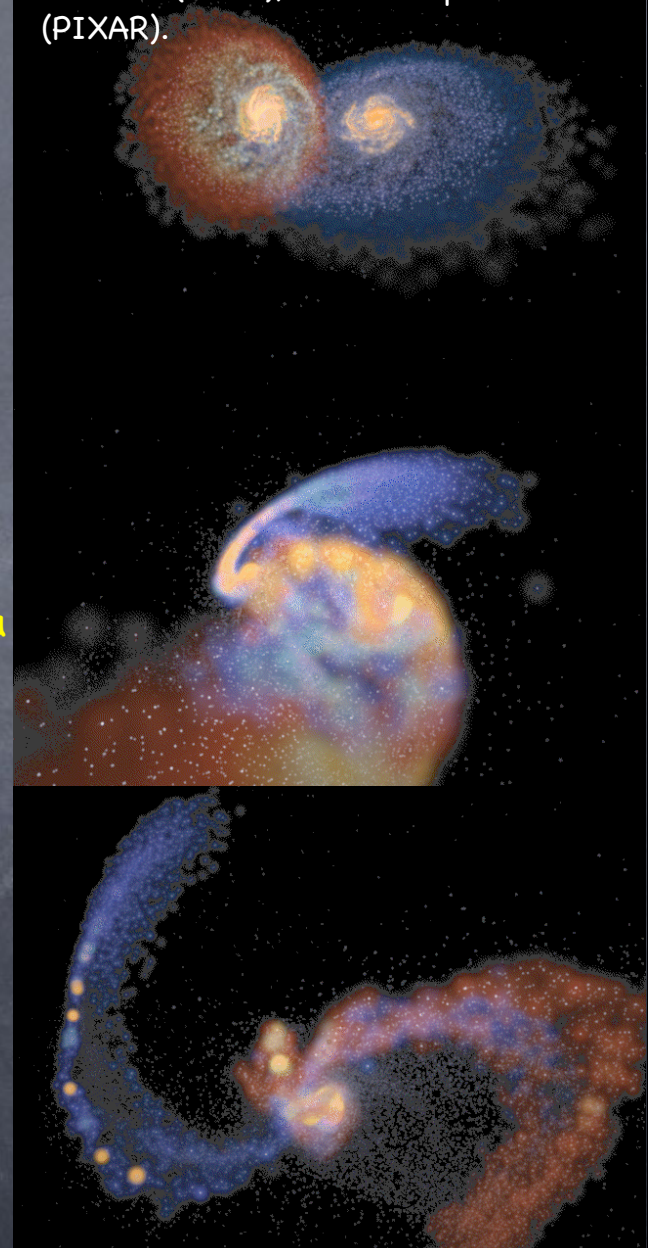


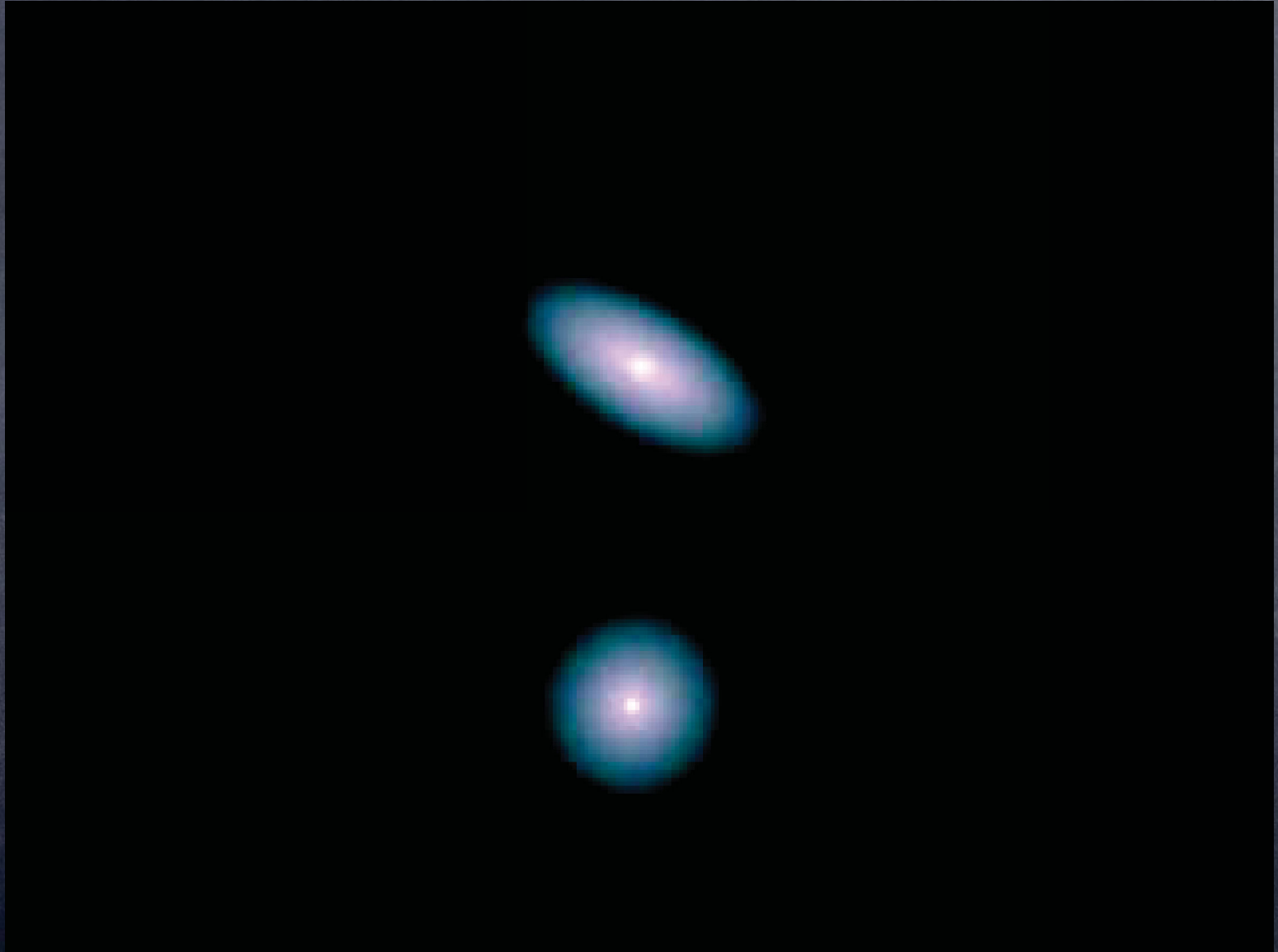
Izvor: Kazantzidis et al. 2005



Milijarde godina u
realnom vremenu,
nedelje na
superkompjuterima

Izvor : Chris Mihos, Lars Hernquist
(Santa Cruz), Donna Cox, Robert
Patterson, Erik Wesselak, Barry
Sanders (NCSA), Loren Carpenter
(PIXAR).



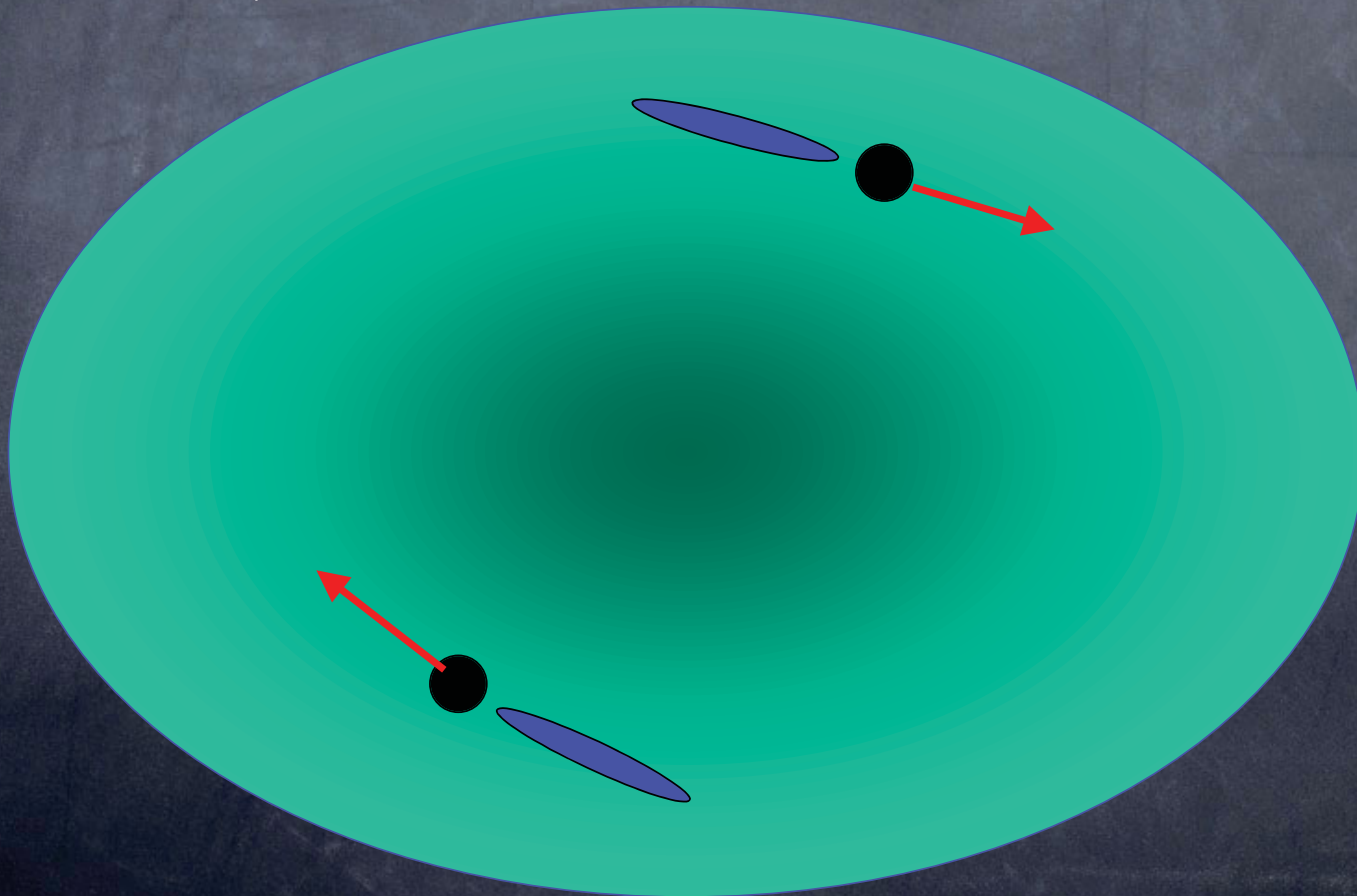


Sudari galaksija i formiranje binarnih CR

- Pretpostavimo da je došlo do sudara dve galaksije, od kojih svaka ima SMCR -- šta se dešava sa ovim crnim rupama?
 - U početku dve SMCR su na velikom rastojanju od centra novoformirane galaksije (~1-10 kpc).
 - Proces poznat pod nazivom "dinamička frikcija" crpi orbitalnu energiju i moment impulsa SMCR.
 - Ovo za posledicu ima smanjenje orbita SMCR i obe tonu ka centru nove galaksije.
 - Ukoliko se dve SMCR dovoljno približe (~10 pc), počinju da se kreću pod uticajem uzajamnog gravitacionog polja i formiraju **binarnu SMCR**.

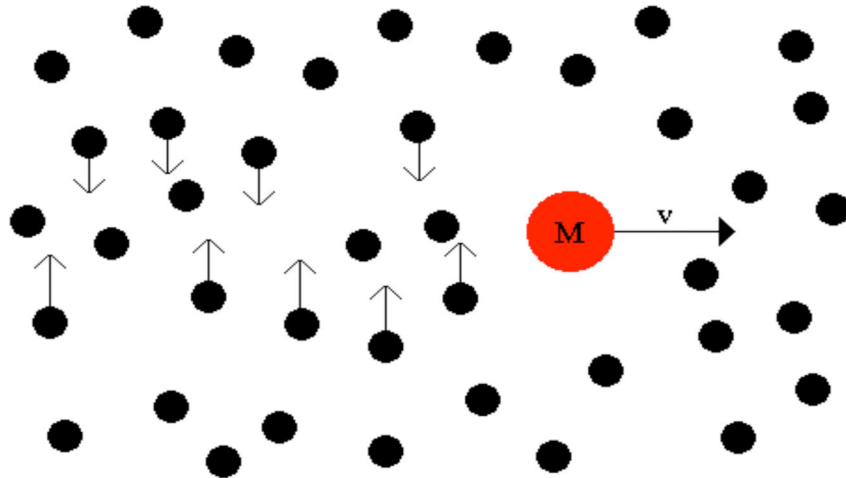
Dinamička frikcija

- Gravitaciono polje crnih rupa dovodi do povećane koncentraciju zvezda i gasa duž trajektorije SMCR..., gravitaciona atrakcija dovodi do smanjnja orbitalne energije i momenta impulsa SMCR.

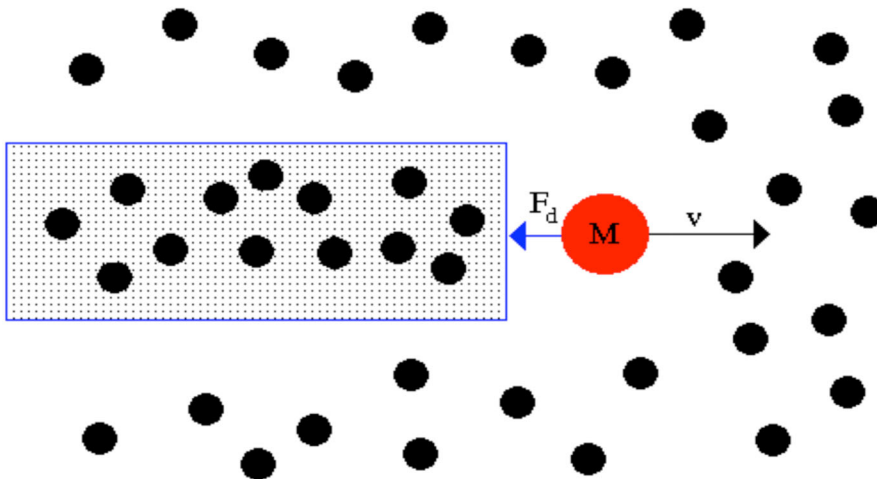


Dinamička frikcija

consider a mass, M , moving through a uniform sea of stars. Stars in the wake are displaced inward.



this results in an enhanced region of density behind the mass, with a drag force, F_d known as dynamical friction



$$F_{DF} = -\mathcal{F} I, \quad \mathcal{F} \equiv \frac{4\pi(GM_p)^2 \rho_0}{V^2}$$

Chandrasekhar 1943
Ostriker 1999

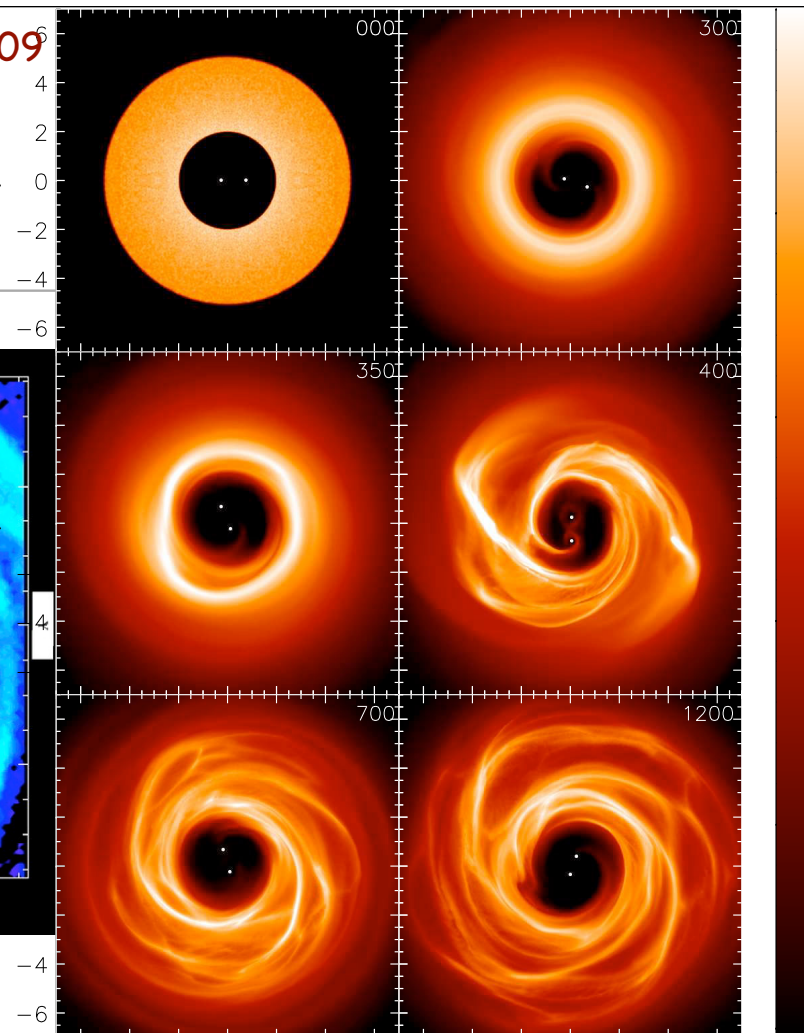
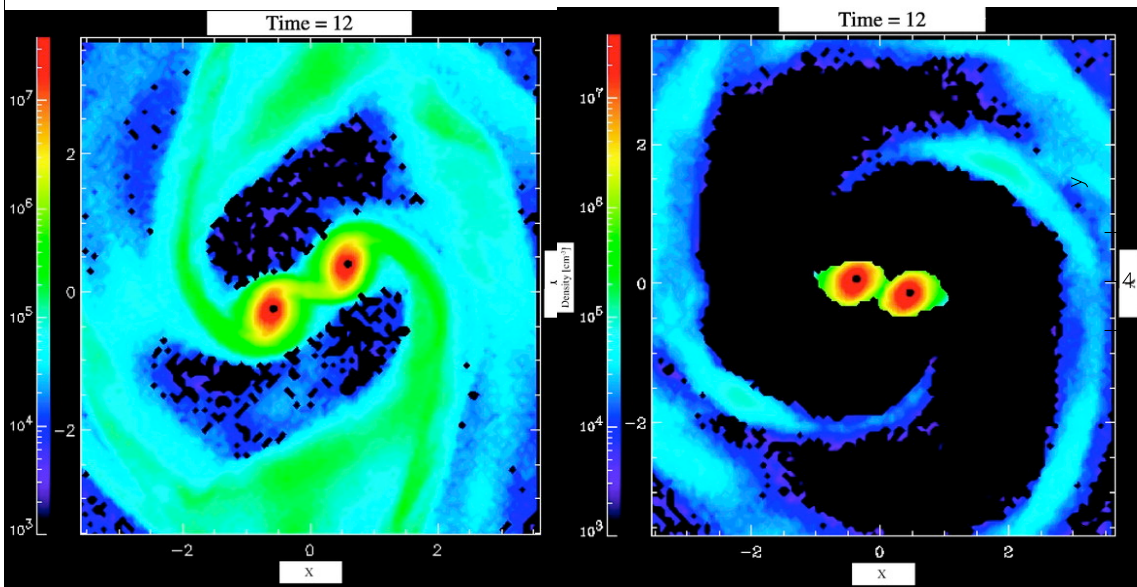
Problem poslednjeg parseka

- Dinamička frikcija omogućava SMCR da potonu do centra novoformirane galaksije
- Kod orbitalnih rastojanja $\sim 1\text{pc}$, dinamička frikcija postaje ne-efikasna
- Kod SMCR koje postignu orbitalna rastojanja $\leq 0.01\text{ pc}$ dolazi do spajanja usled emisije gravitacionih talasa
- **Last parsec problem:** kako binarne SMCR prevale rastojanje od 1 do 0.01 pc?

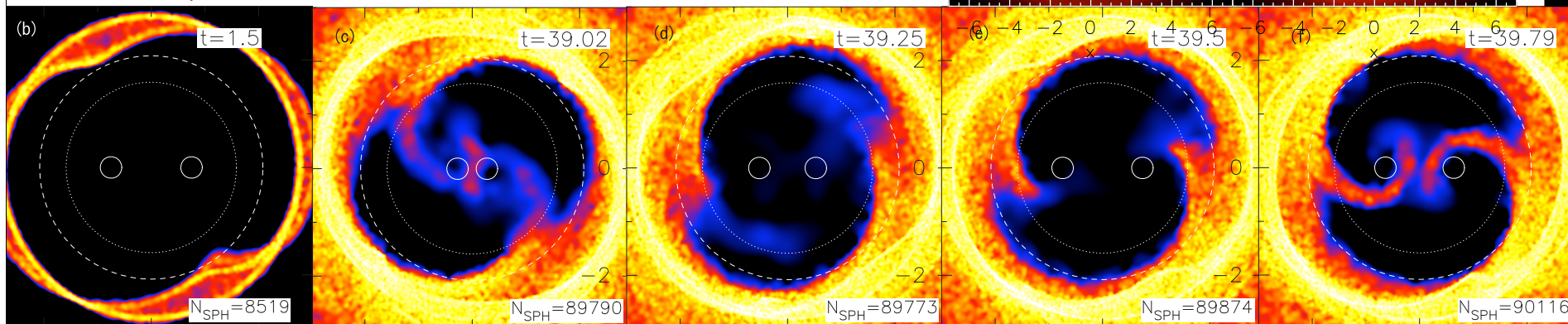
Cuadra et al. 2009⁶

Hidrodinamičke simulacije binarnih SMCR

Escala et al. 2005



Hayasaki et al. 07



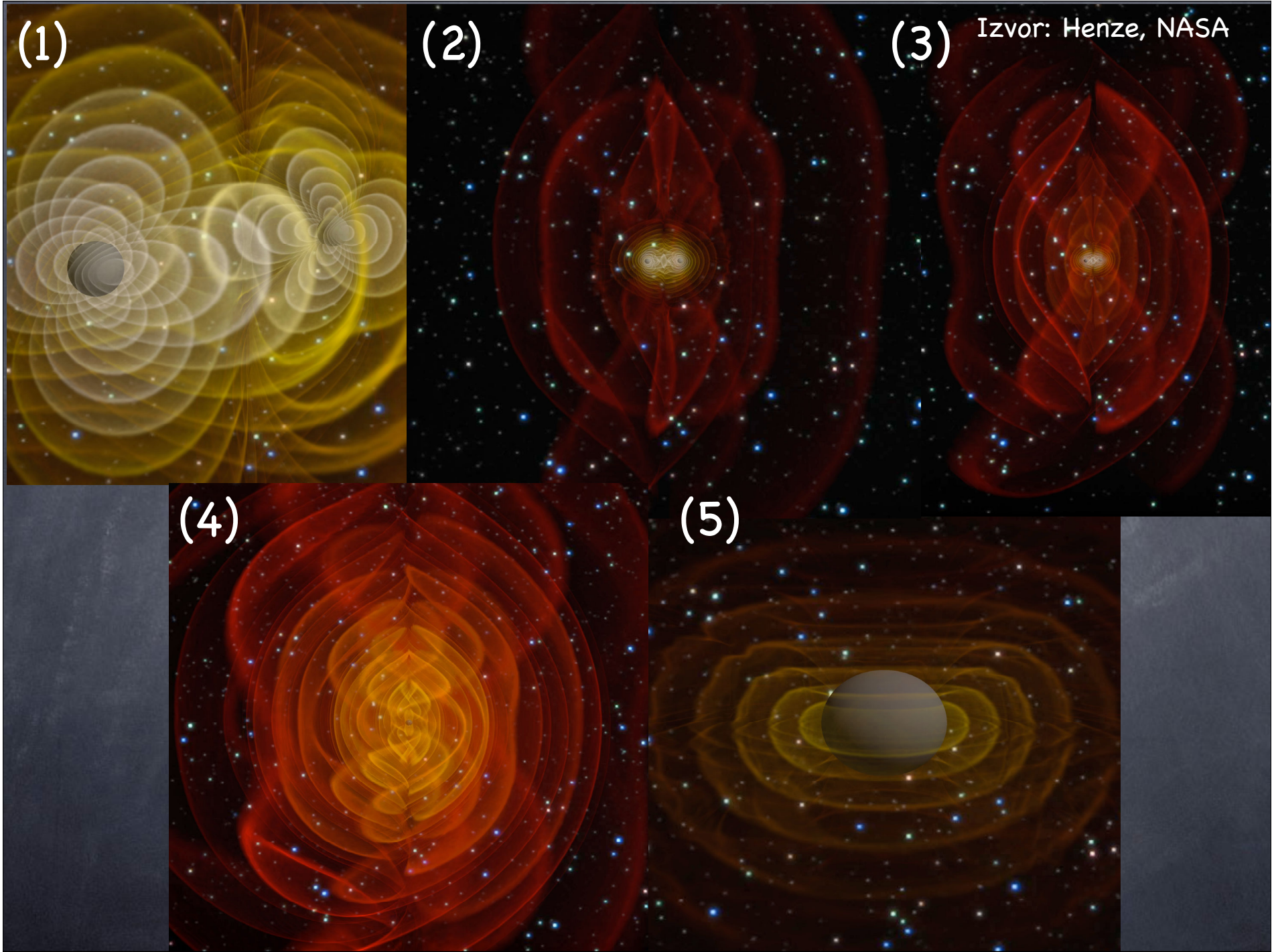
Sjedinjenje crnih rupa i emisija gravitacionih talasa

- Količina energije oslobodjena u toku sjedinjenja dve SMCR u obliku grav. talasa:

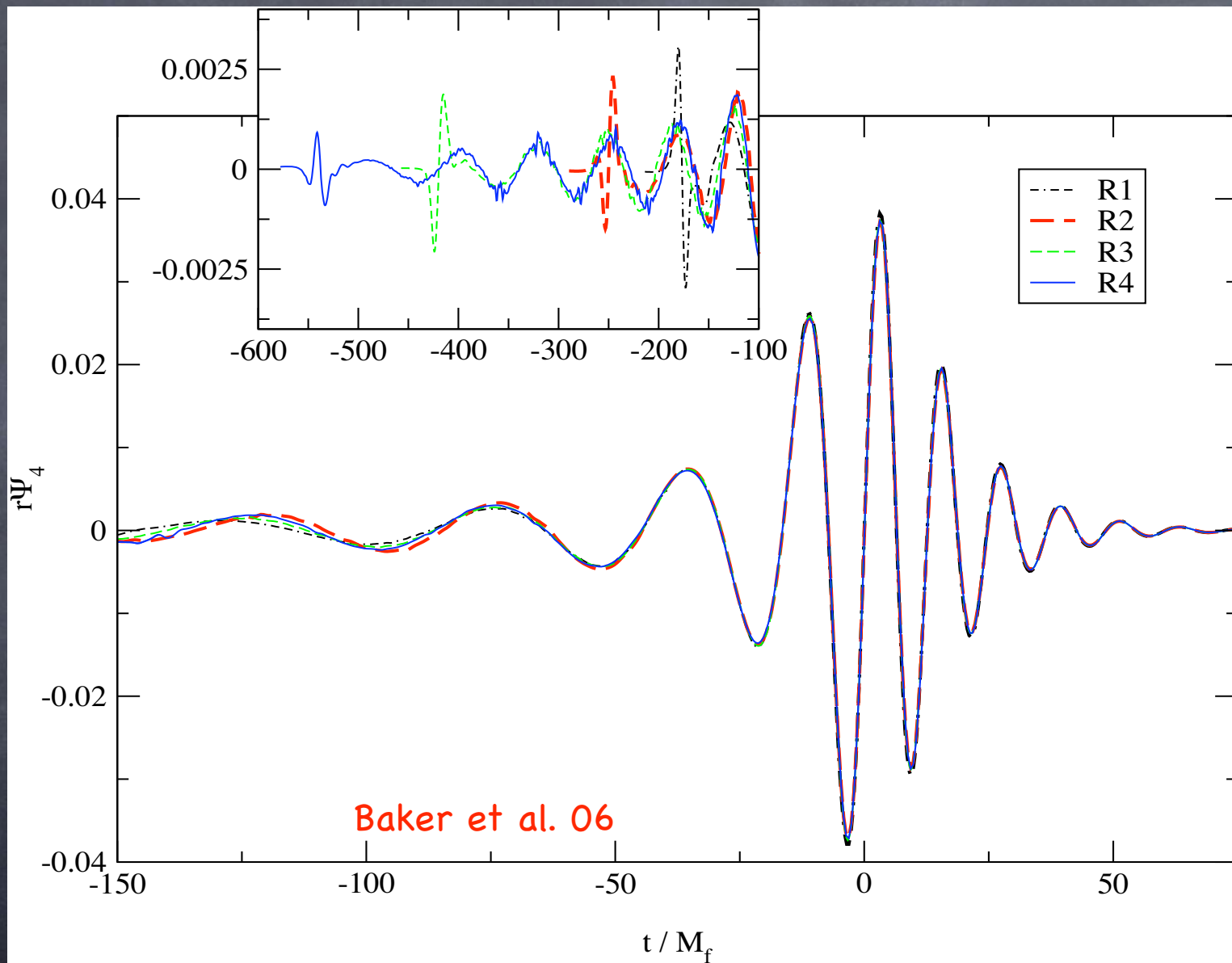
$$E \approx 10^{60} \text{ erg} \quad (L_{\text{gt}} \sim 10^{56} - 10^{57} \text{ erg/s})$$

$$1J = 10^7 \text{ erg}$$

- Za kratko vreme, luminoznost gravitacionih talasa prevazilazi luminoznost svih zvezda u svemiru zajedno.







Sjedinjenje crnih rupa i emisija gravitacionih talasa

- Količina energije oslobodjena u toku sjedinjenja dve SMCR u obliku grav. talasa:

$$P \approx 10^{60} \text{ erg} \quad (L_{\text{gt}} \sim 10^{56} - 10^{57} \text{ erg/s})$$

$$1J = 10^7 \text{ erg}$$

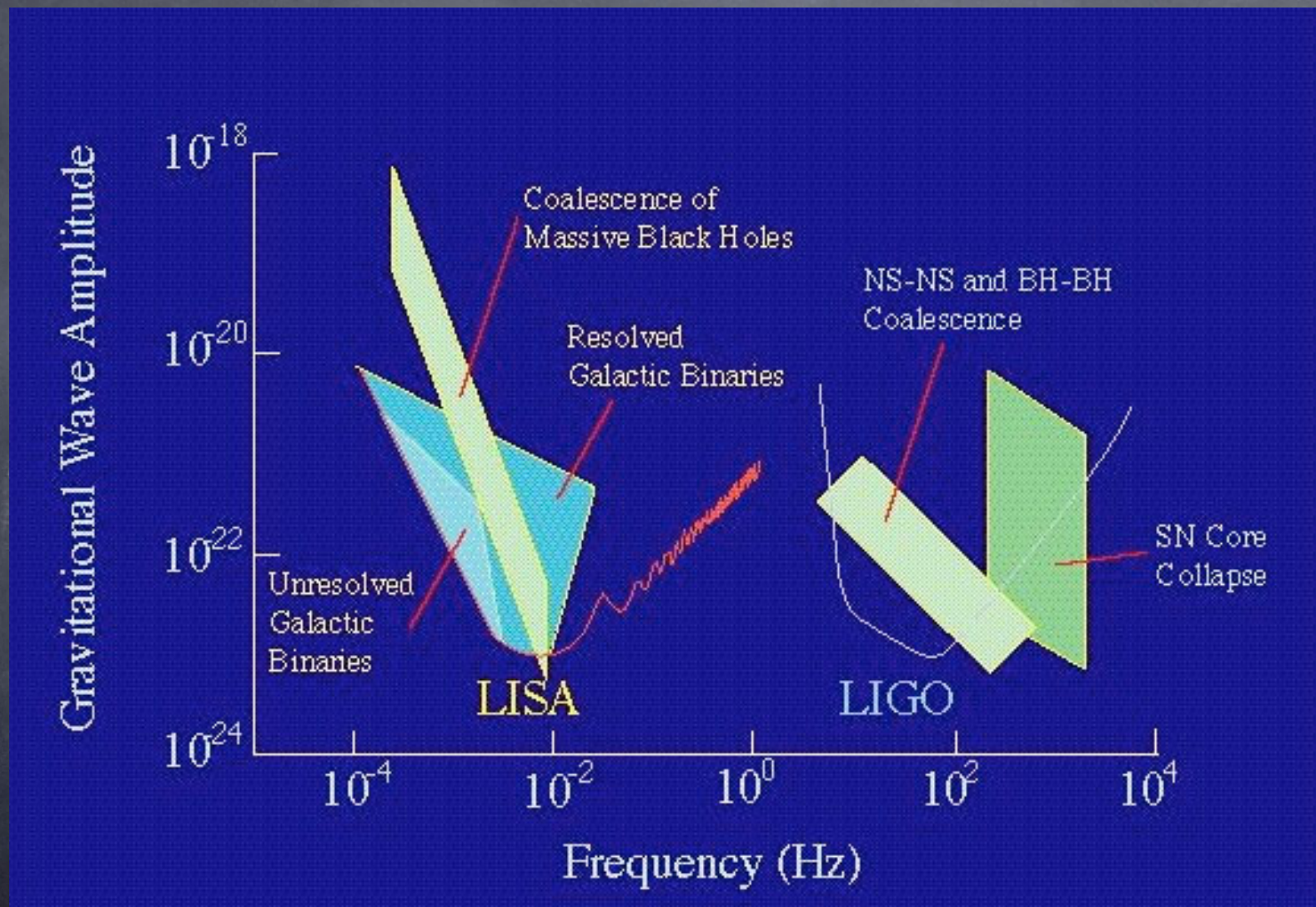
- Za kratko vreme, luminoznost gravitacionih talasa prevazilazi luminoznost svih zvezda u svemiru zajedno.
- Ali, u pitanju su gravitacioni talasi, ne EM zračenje...
Koja je perspektiva za njihovu detekciju?
- To je cilj opservatorije **LISA** (Laser Interferometer Space Antena).



Posmatranje gravitacionih talasa sa zemlje (LIGO) i satelitima (LISA)

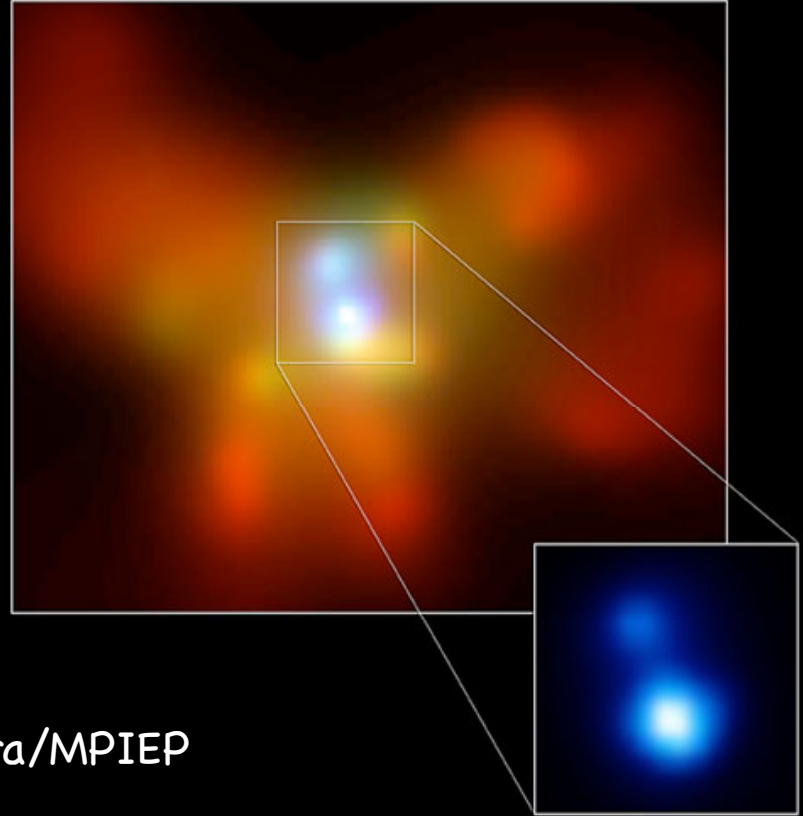
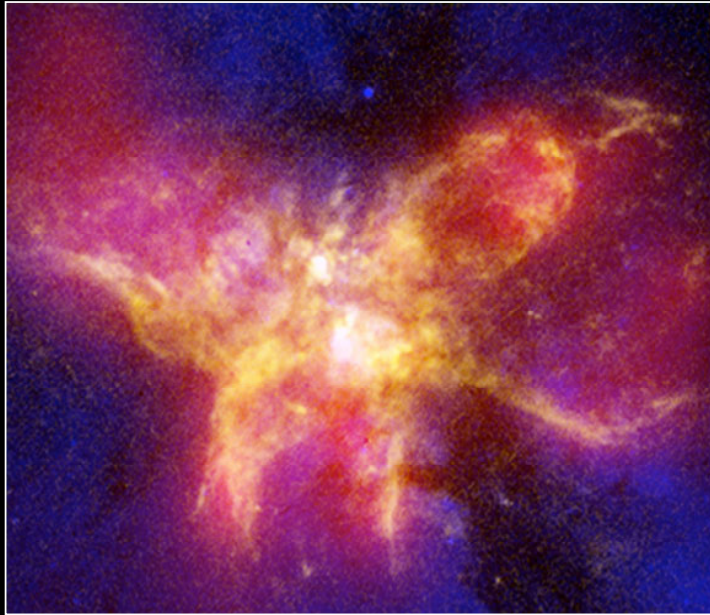
- LIGO - detektuje grav. talase visoke frekvencije
 - Spajanje binarnih neutronske zvezde
 - Spajanje CR male mase sa drugim CR ili neutronske zvezdama.
 - Kolaps supernove u CR?
- LISA - detektuje grav. talase niže frekvencije (NASA/ESA, circa 2020)
 - Spajanje SMCR
 - Pad CR male mase ili neutronske zvezde u SMCR
 - Galaktičke binarne sisteme (npr. binarne bele patuljke)

Senzitivnost: LISA i LIGO opservatorije

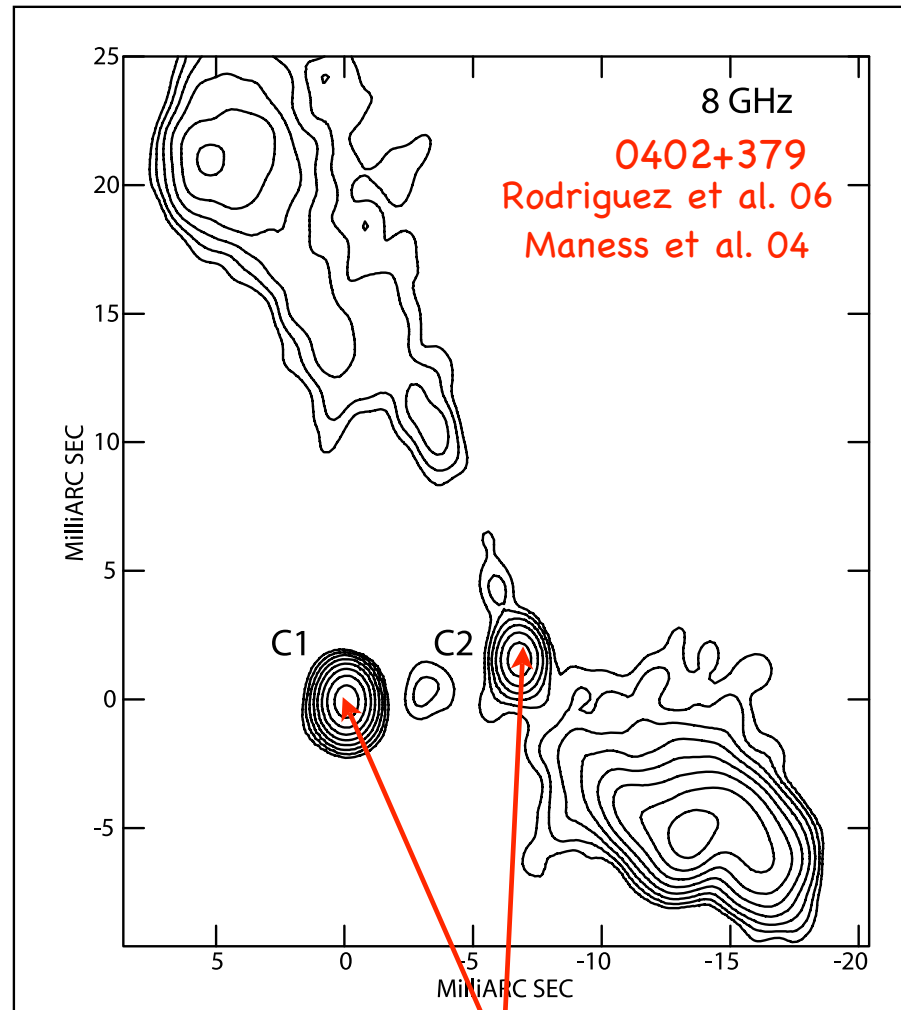


Posmatranja binarnih SMCR

- Ako su očekivanja zasnovana na teoriji tačna, trebalo bi da u nekim galaksijama detektujemo binarne SMCR, pre sjedinjenja
- Ali, binarne SMCR nije lako detektovati...
- Znamo za nekolicinu primera pre-binarnih SMCR
- Detekcija binarnih crnih rupa oslanja na indirektno metode: rezultati su kontraverzni



NGC 6240, Izvor: HST/Chandra/MPIEP



Rastojanje ~7 pc

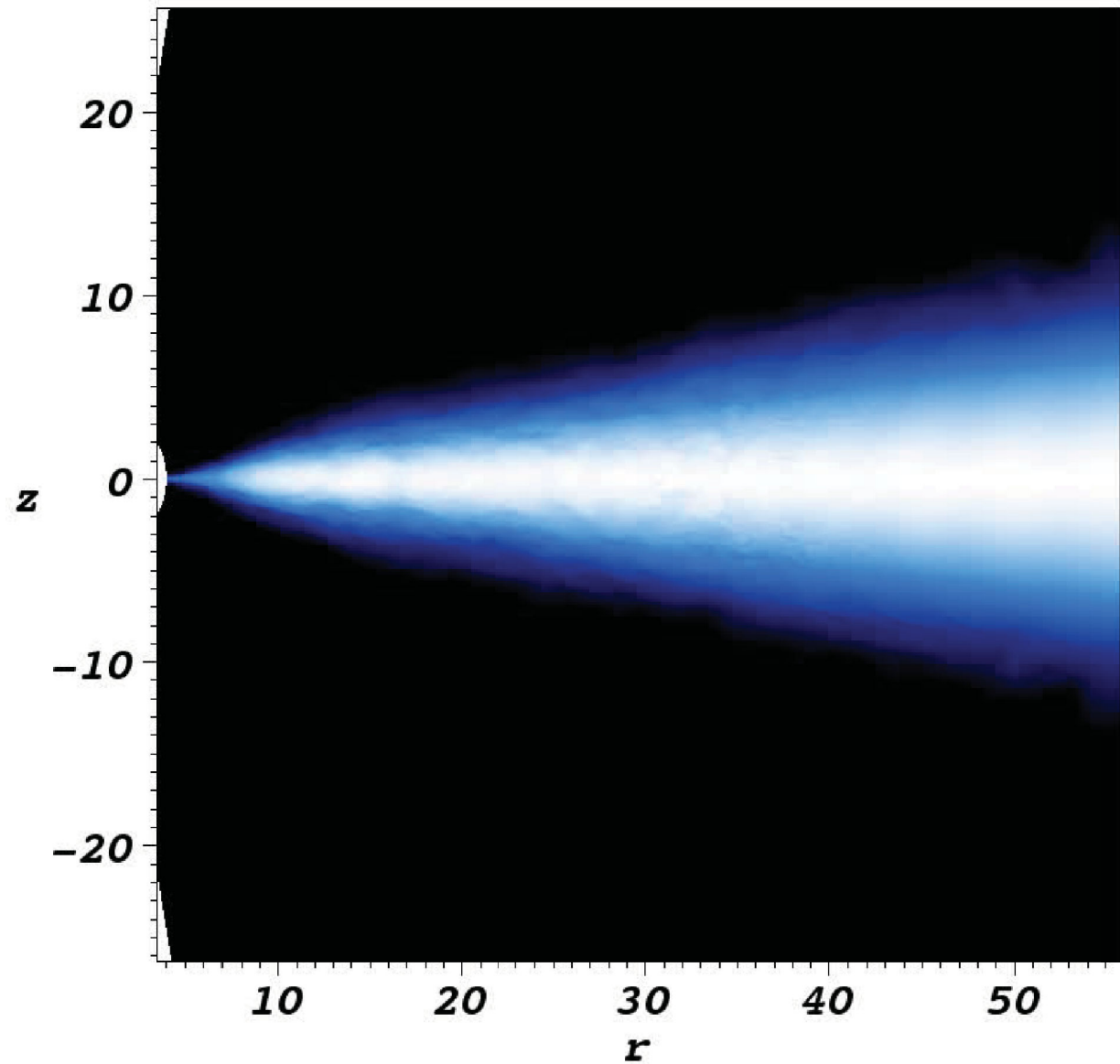
VLBA (Very Long Baseline Array)

Druge pojave vezane za sjedinjenje binarnih SMCR

- Gubitak mase novostvorene SMCR
 - Gubitak energije kroz emisiju grav. talasa
- Gravitacioni "trzaj"
 - Gubitak impulsa kroz emisiju grav. talasa

Gubitak mase

O'Neill, Miller, TB, Reynolds 09



Gravitacioni trzaj



Ilustracija, izvor: Tim Jones, McDonald Observatory

- Numerička relativnost predviđa ubrzanje novostvorene SMCR u odnosu na centar mase binarnog pretka
Herrmann et al. 06, 07; Baker et al. 06, 07; Koppitz et al. 07
- U nekim slučajevima brzina može biti i do **4000 km/s !!!**
Gonzalez et al. 07, Schnitman & Buonanno 07, Campanelli et al. 07, Baker et al. 08
- SMCR koje se kreću brzinom >2000 km/s mogu da napuste svoju galaksiju

Zaključak

- Značajan napredak u razumevanju evolucije binarnih SMCR kao i ogroman napredak na frontu numeričke relativnosti u poslednjih nekoliko godina.
- Binarne SMCR će biti jedan od najbitnijih izvora za budući grav. interferometar LISU
- Potraga za bliskim binarnim sistemima kao i lutajućim crnim rupama se nastavlja.
- Detekcija gravitacionih talasa otvara novi posmatrački prozor u svemir i u kombinaciji sa EM zračenjem će omogućiti precizna kosmološka merenja.