

Institut za fiziku, Zemun
24 Jun, 2009

Hidrodinamičke simulacije astrofizičkih sredina

Tamara Bogdanović
University of Maryland



Kolaboratori:

- Michael Eracleous and Steinn Sigurdsson (Penn State)
- Britton Smith (Univ. of Colorado)
- Suvrath Mahadevan (Univ. of Florida)
- Pablo Laguna (GeorgiaTech)
- Chris Reynolds and Cole Miller (Univ. of Maryland)
- Sean O'Neill (Univ. of Maryland)
- Jeremy Schnittman (Johns Hopkins Univ.)

Hidrodinamičke simulacije sa primenom u astrofizici

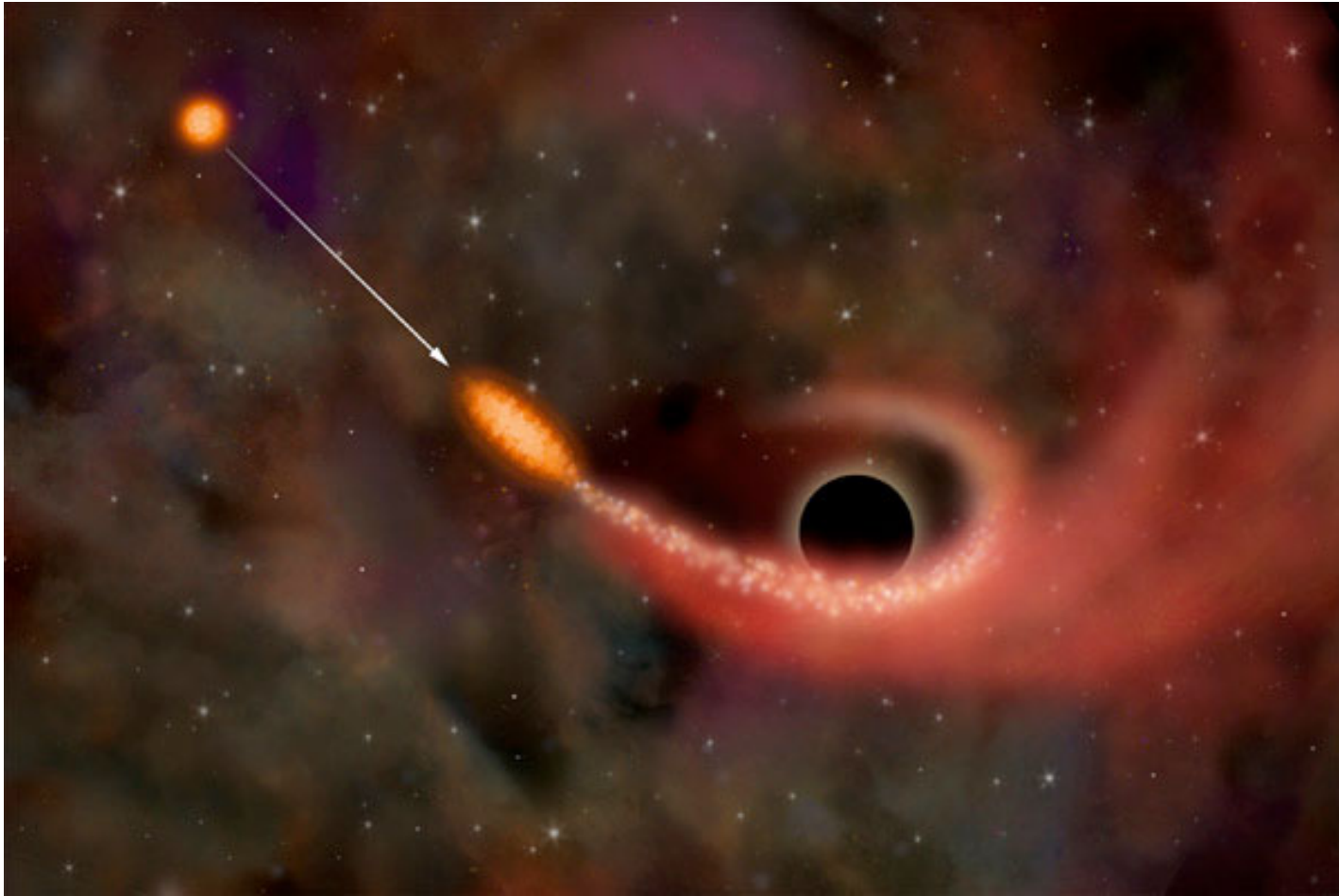
- Zahvaljujući napretku u numeričkim simulacijama gasa i plazme, moguće je modelovati kompleksne (nelinearne) **astrofizičke sredine**.
- To uključuje evoluciju struktura u svemiru, razvoj galaksija, formaciju zvezda i planeta, evoluciju binarnih crnih rupa, ponašanje gasa i zvezdanih sistema u potencijalu galaksije ili masivne crne rupe, itd.
- **Fizički procesi:** gravitacija, termička provodnost, nuklearno sagorevanje, hemija, zračenje (fotoni i neutritini), magnetno polje, ostali mikro-modeli (subgrid physics).

Simulirani fenomeni:

- Disrupcija zvezde u gravitacionom polju **super-masivne crne rupe (SMCR)**
- Interakcija binarne SMCR i gasa
- MHD nestabilnosti plazme u klasterima galaksija
- Gubitak mase i gravitacioni trzaj SMCR

1) Disrupcija zvezde u gravitacionom polju SMCR

(TB, Eracleous, Mahadevan, Sigurdsson, & Laguna 04)



Šta i zašto?: Astrofizički kontekst

- Zvezda mase $1M_{\odot}$ u grav. polju SMCR mase $10^6 M_{\odot}$ pretrpi disrupciju kada plimske sile crne rupe nadjačaju vezivnu energiju zvezde (Rees 88).

$$r_t \simeq r_* (M_{\text{bh}}/M_*)^{1/3},$$

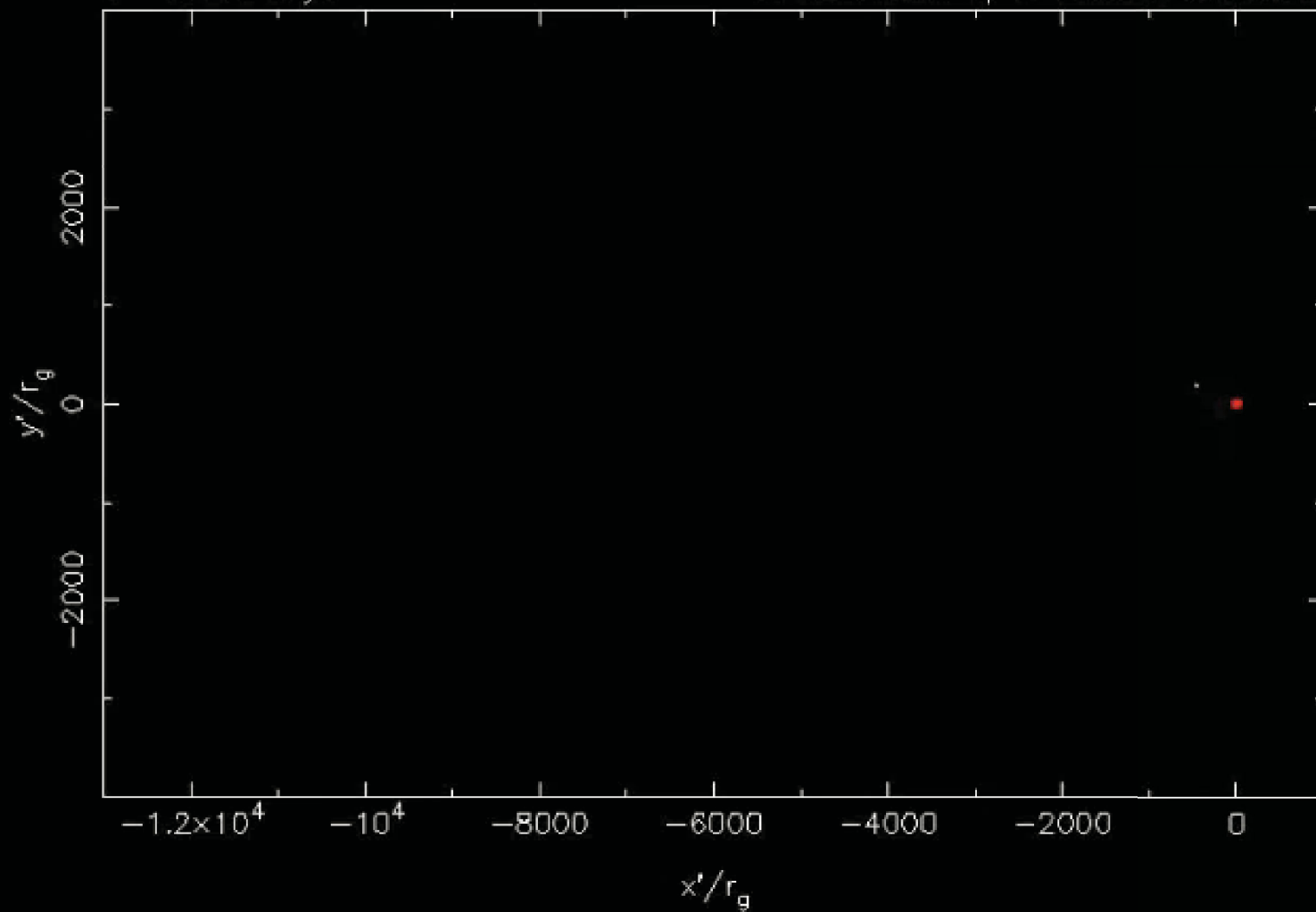
- Preostali materijal (gas) se akretuje na SMCR i postaje izvor UV i X-zraka koji obasjavaju ostatak gasa.
- Disrupcija zvezda i akrecija gasa doprinose rastu crne rupe i njenoj aktivnosti (Hills 75). Predviđena frekvencija disrupcija za normalne galaksije je $10^{-5} - 10^{-4}$ god^{-1} po galaksiji (Magorrian & Tremaine 99, Donley et al. 02, Gezari et al. 09).
- Predviđena posmatračka karakteristika je bljesak u UV/X-zracima ($L \sim t^{-5/3}$).
- Da li promenljive vodonikove Balmer linije u nekim ne-luminoznim galaksijama potiču bas u ovakvim događajima (Eracleous et al. 95, Bergmann et al. 95)?

Kako?: Simulacije disrupcije zvezde

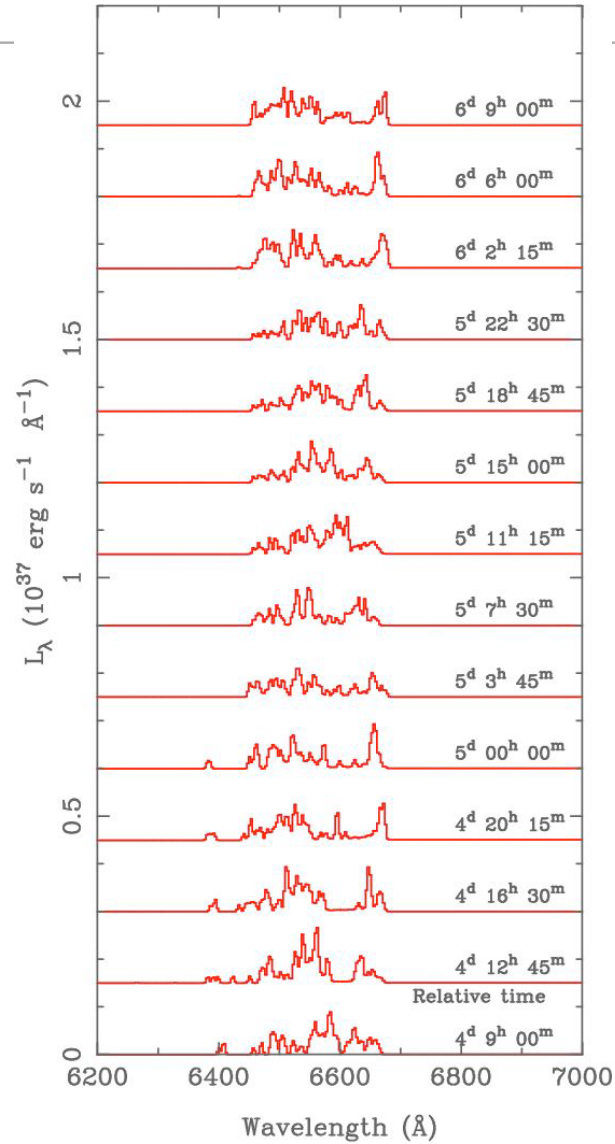
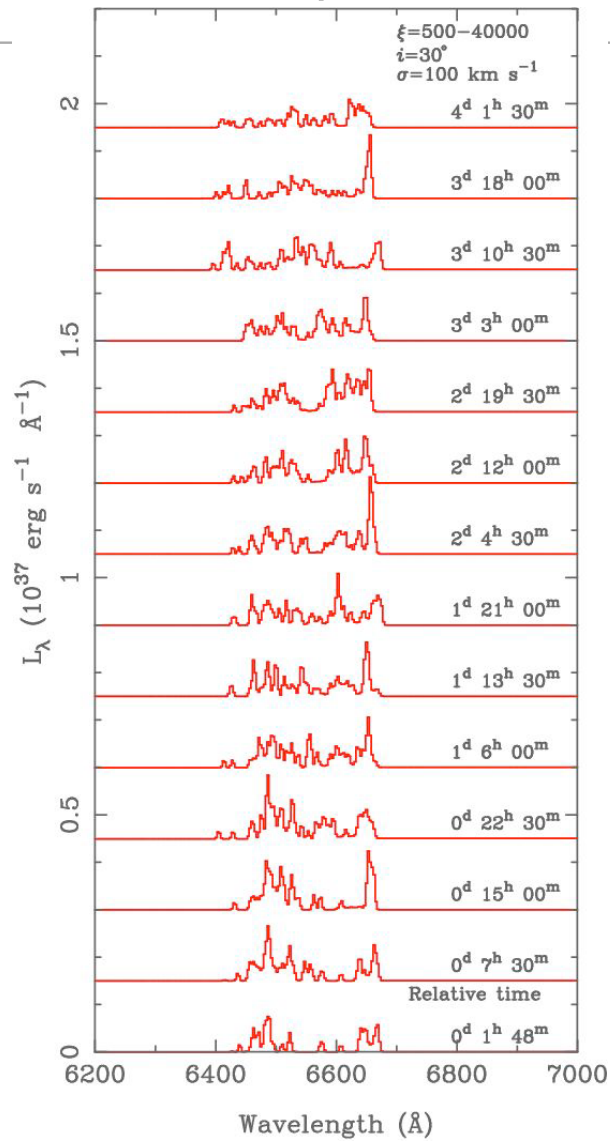
- Varijabilni emisijski profili H α linija kao i H α i luminoznost X-zraka.
- Simulacije su urađene 3D relativističkim SPH programom (Laguna et al. 93)
 - SPH = Smoothed Particle Hydrodynamics
 - omogućava evoluciju relativističkih fluida u statičkom, relativističkom potencijalu SMCR.
- Radijativni procesi su okarakterisani uz pomoć foto-jonizacionog programa CLOUDY (Ferland et al. 98).

t= 0.170 days

5k simulation up to start of accretion

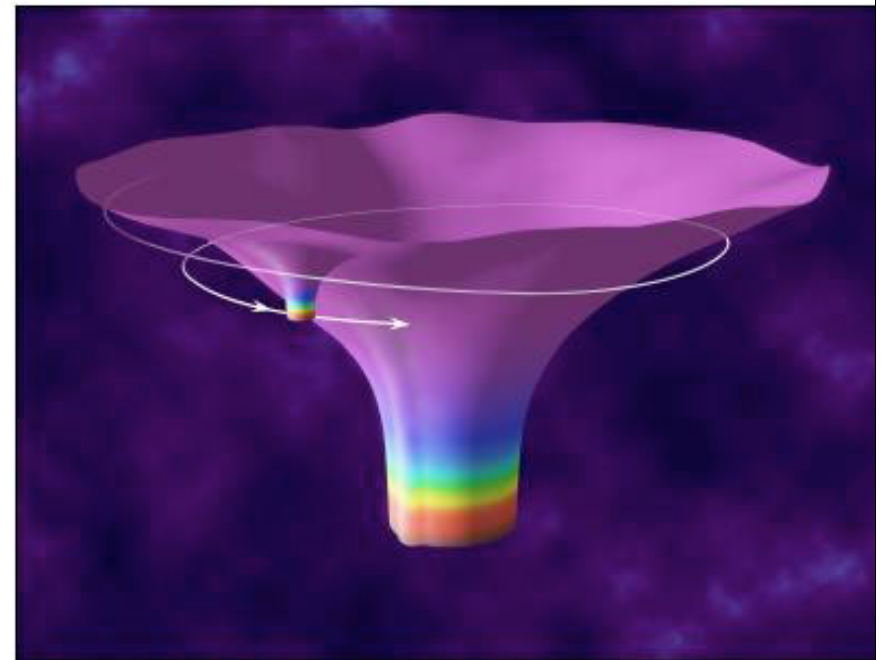


H α emission profiles



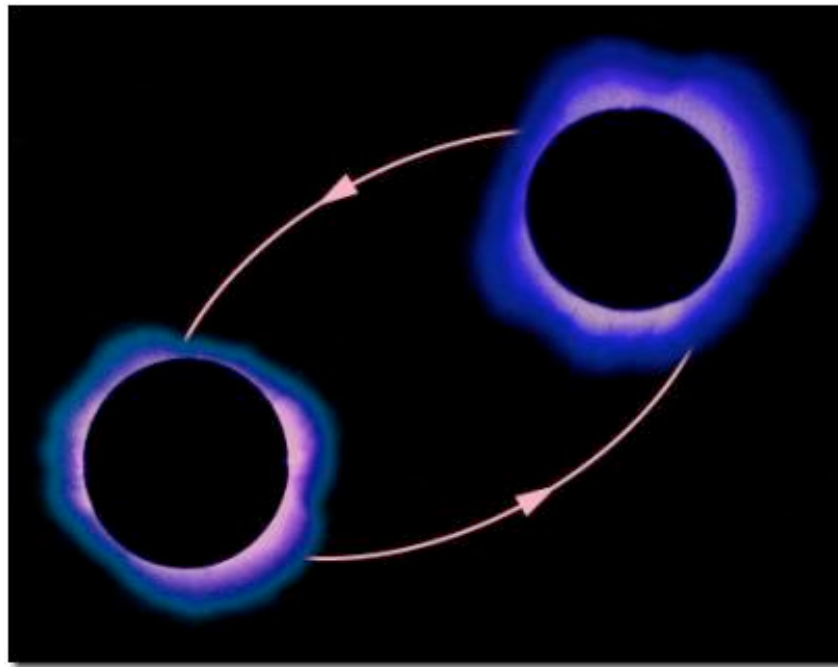
Perspektiva

- Gravitaciona disrupcija drugih klasa zvezda: crvenih džinova, belih patuljaka (LSST, PanSTARRS). Veza sa grav. talasima u slučaju binarnih sistema sa velikom razlikom u masi.
- Takođe, interakcija zvezda u centralnom parseku sa akrecionim diskom crne rupe: gubljenje omotača zvezde, uticaj gasa na orbite, raspodela zvezdanih populacija u disku i krajnja struktura diska...



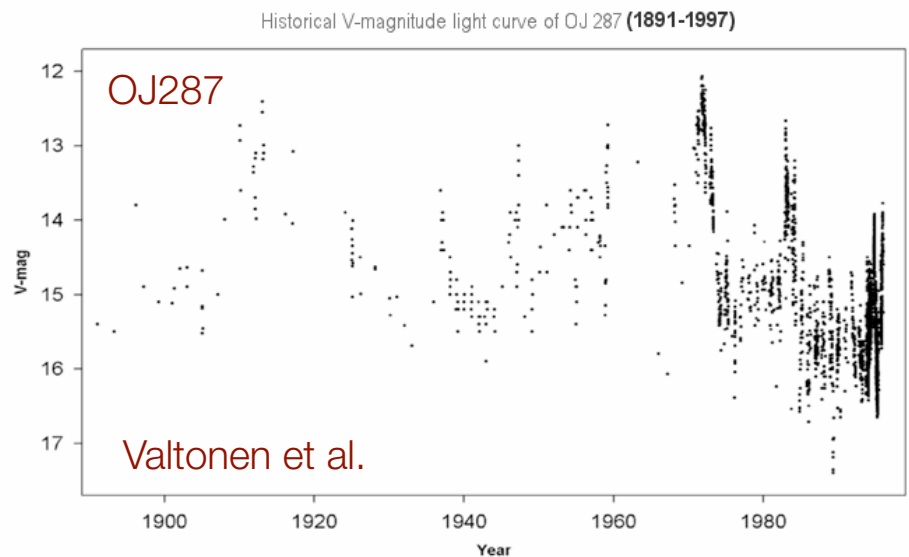
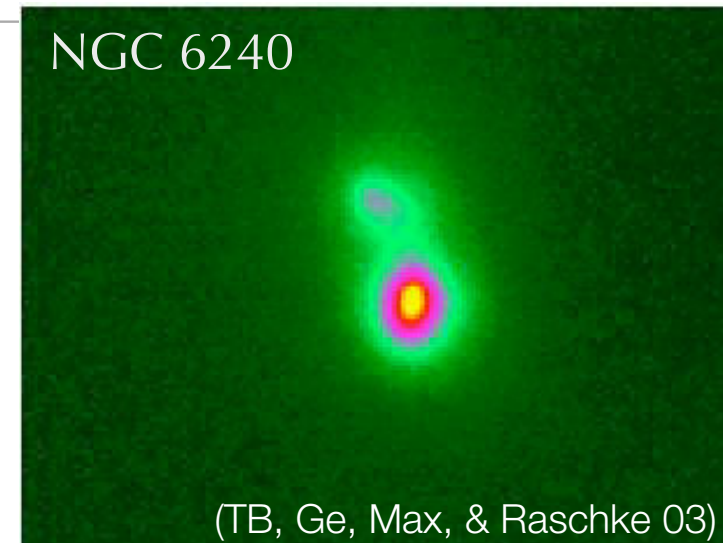
2) Interakcije binarne SMCR i gasa

(TB, Smith, Sigurdsson, & Eracleous 08)



Šta i zašto?: Astrofizički kontekst

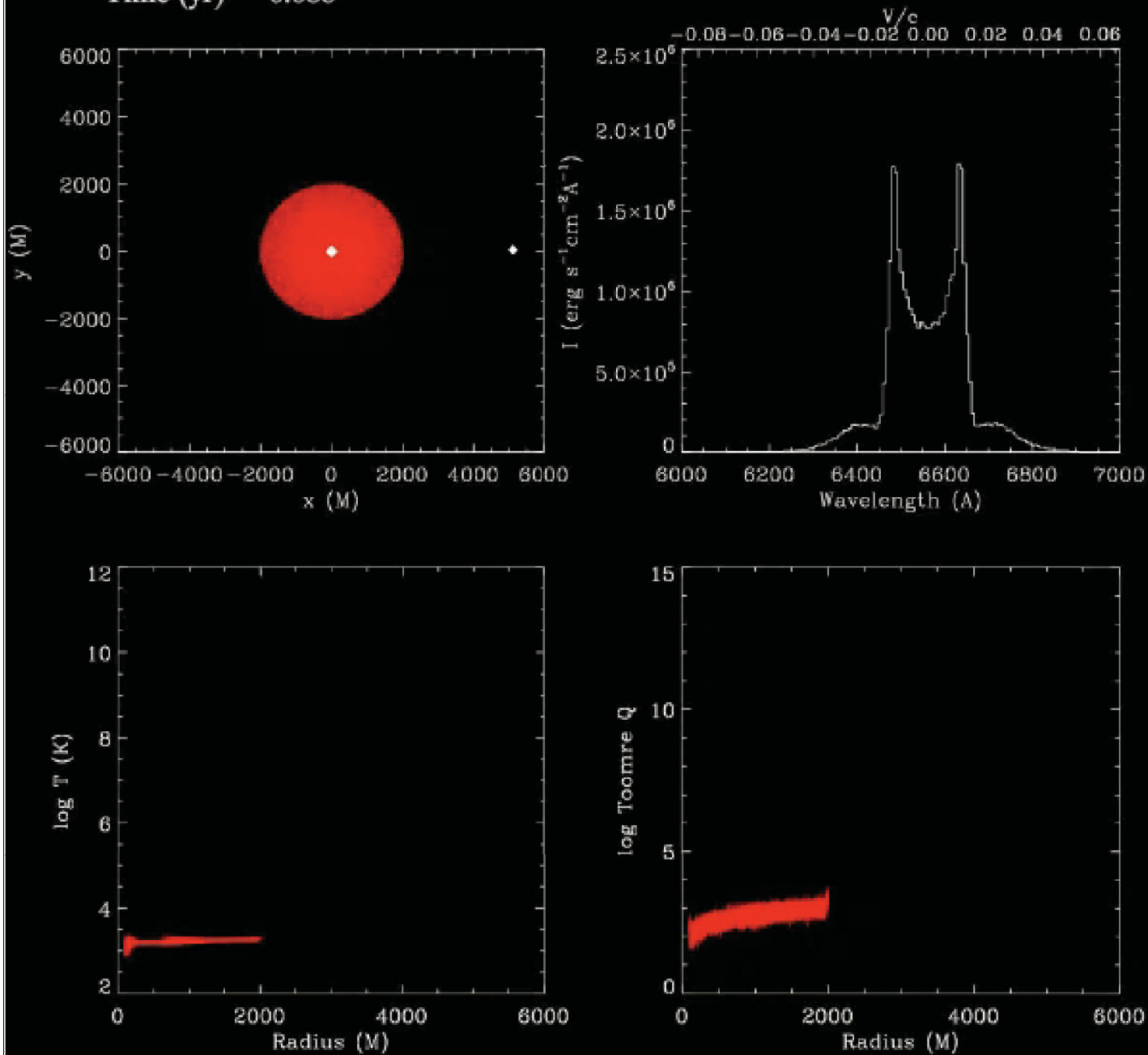
- Sudari SMCR su najjači izvor gravitacionih talasa u svemiru.
- EM zračenje zajedno sa grav. talasima omogućava kosmološka merenja velike preciznosti i može da razjasni akrecionu fiziku binarnih sistema.
- Kosmološki rast crnih rupa: sudari ili akrecija?
- Ali binarne SMCR je teško naći posmatranjima...
- **Cilj:** modelovanje posmatračkih karakteristika u optičkom i X-rej delu spektra.



Kako?: Simulacije binarnih SMCR i gasa

- Hidrodinamičke simulacije programom Gadget (Springel et al. 01, Springel 05).
 - N-body drvo + SPH
- Sistem SMCR predstavljen dvema masivnim česticama koje rastu kroz akreciju gasa.
- Hlađenje i iradijacija gasa računati u kontekstu aproksimativnog radijacionog transfera.
- Radijativni procesi su okarakterisani uz pomoc foto-jonizacionog programa CLOUDY (Ferland et al. 98).
- Izračunati su X-rej i H α kriva luminoznosti i H α emisijski profili.

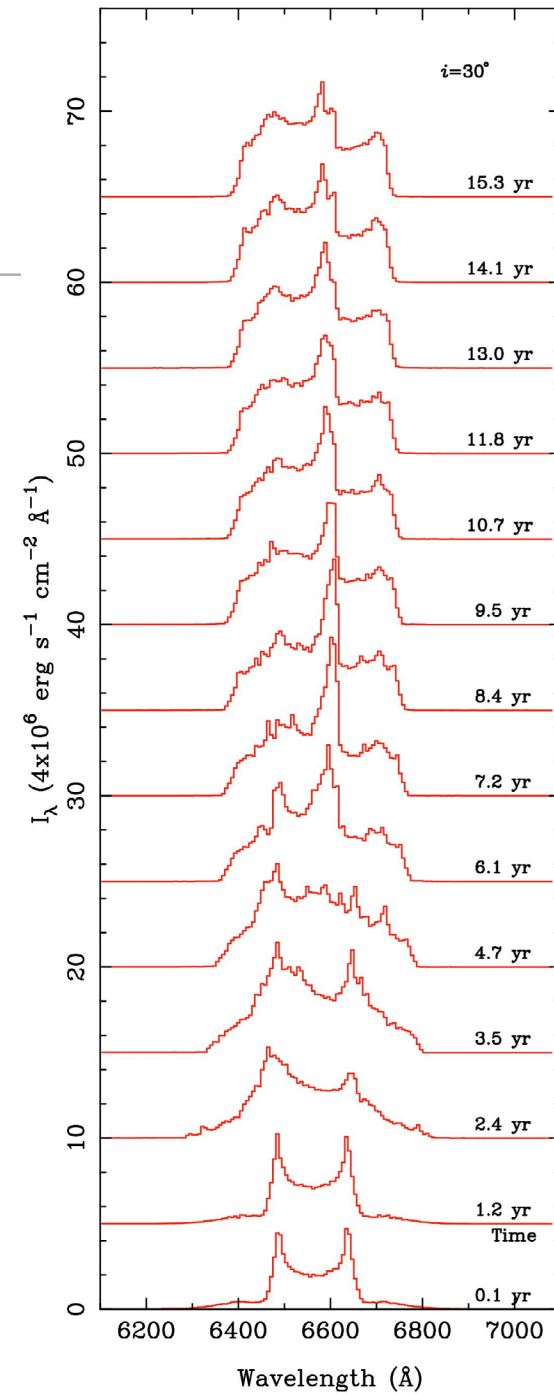
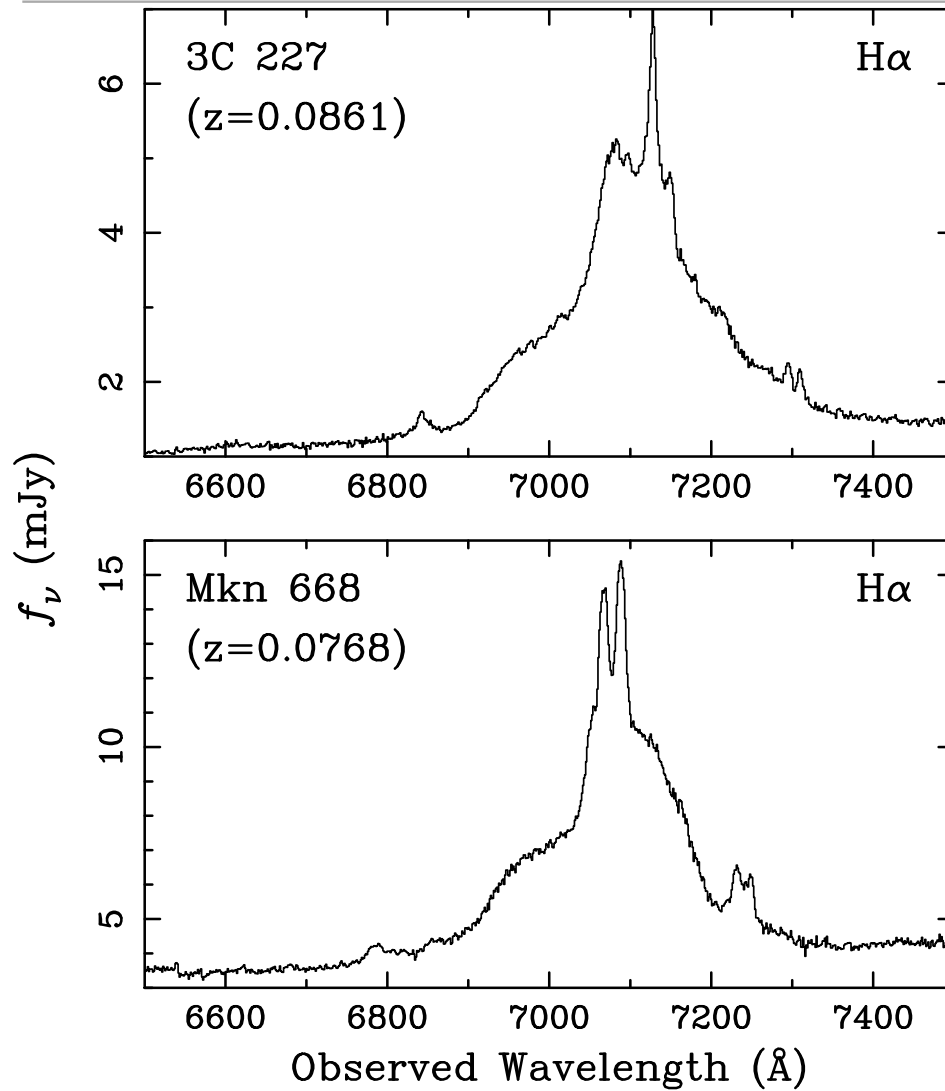
Time (yr) = 0.088



Korotaciona binarna SMCR

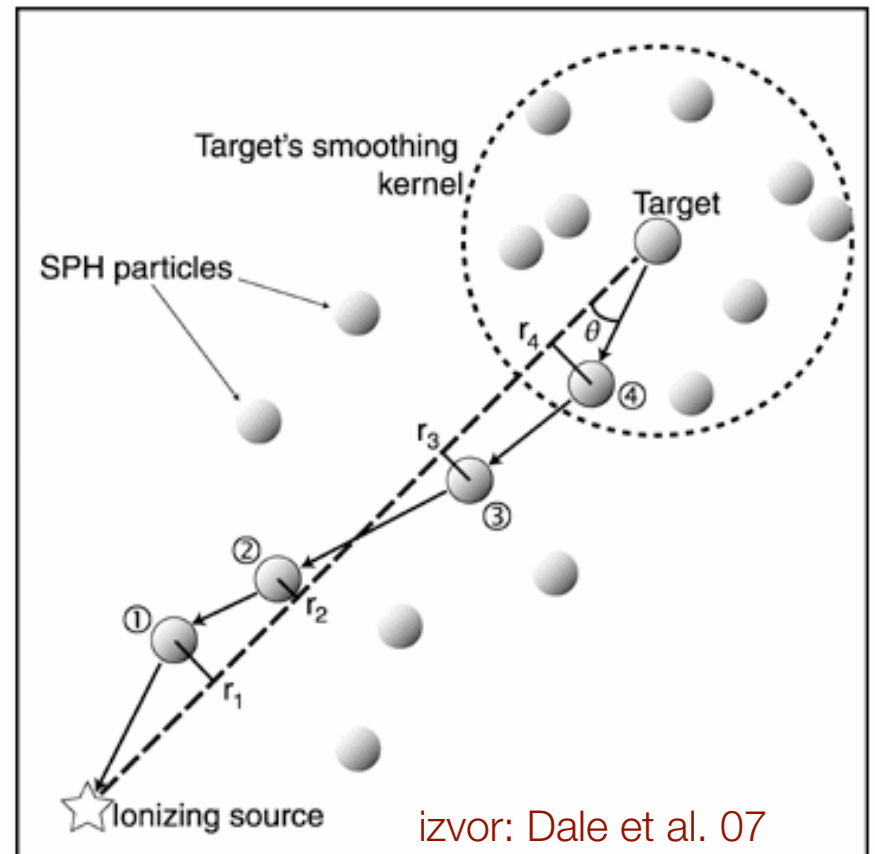
- Koplanarna
- $a = 3000$, $e = 0.7$
- $P = 16$ god
- CR1: $10^8 M_{\odot}$
- CR2: $10^7 M_{\odot}$
- Gas: $10^4 M_{\odot}$

Posmatrani i modelovani profili



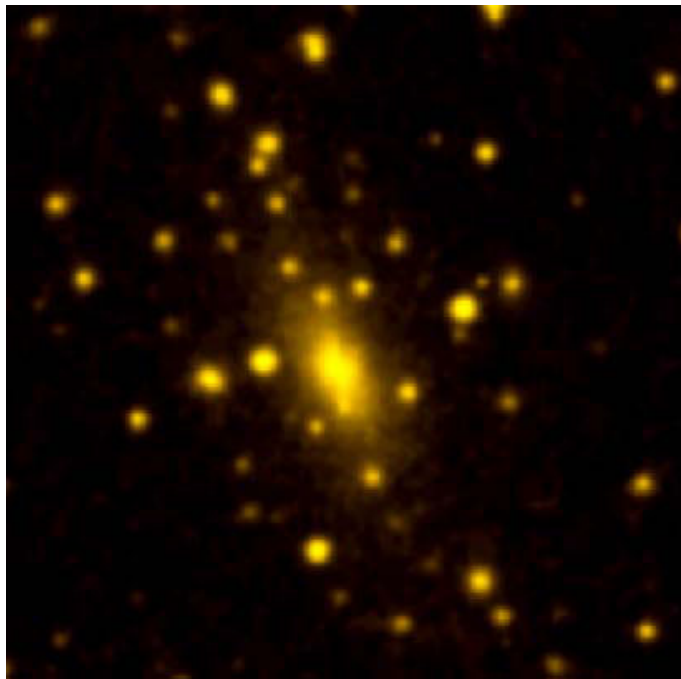
Perspektiva

- Hidrodinamičke simulacije binarnih SMCR i gasa do sada uglavnom nisu uključivale radiacioni transfer.
- Kao rezultat, nemoguće je na osnovu ovih simulacija okarakterisati posmatračke karakteristike binarnih SMCR.
- Hidrodinamičke simulacije sa aproksimativnim radijativnim transferom koji uključuje mnoštvo atomskih tranzicija i "ray-tracing" (NASA ATP 09).



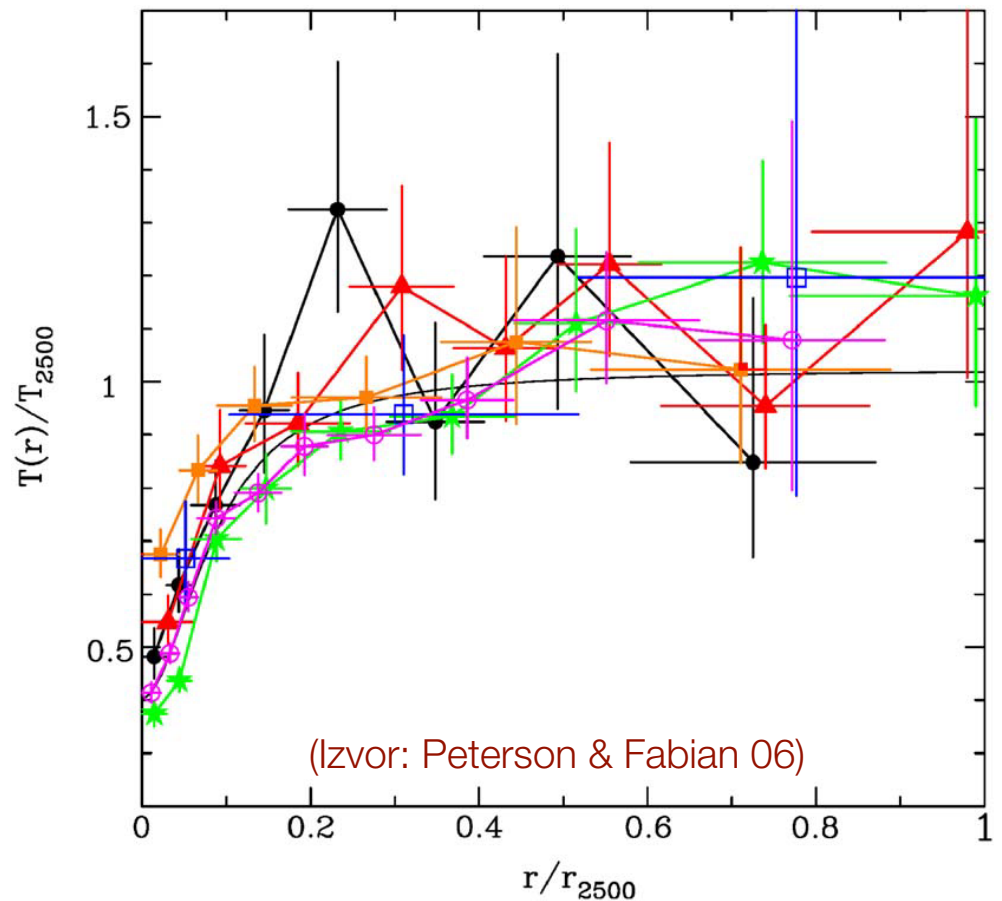
3) MHD nestabilnosti plazme u klasterima galaksija

(TB, Reynolds, Balbus, & Parrish 09)



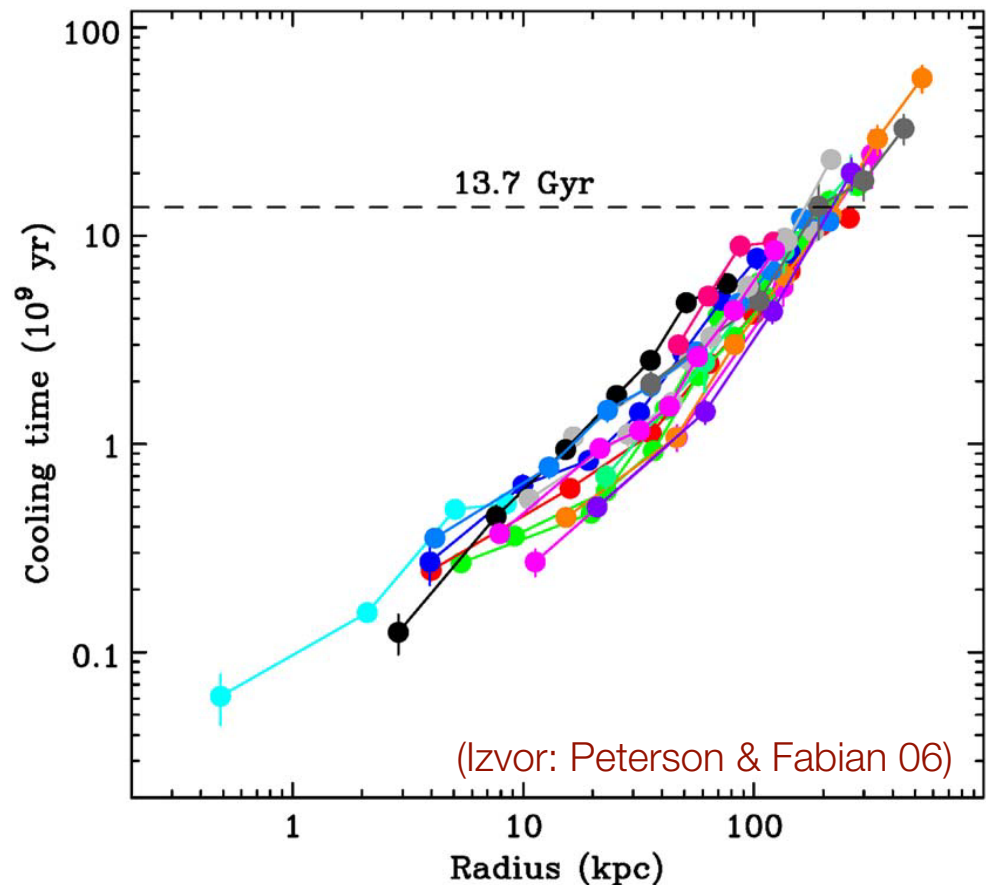
Šta i zašto?: Astrofizički kontekst

- Klasteri: 16% gasa (13% plazme + 3% zvezda) i 84% tamne materije.
- Stotine galaksija
- Plazma u centralnim regionima u klasterima galaksija ima bimodalnu distribuciju temperature: neki od klastera imaju izotermalna jezgra dok neki imaju niže temperature.



Šta i zašto?: Astrofizički kontekst

- Centralni regioni (jezgra) sa nižom temperaturom bi trebalo da su davno doživeli gravitacioni kolaps jer je karakteristično vreme za hlađenje gasa manje od 10^8 god.
- Ali ovo se ne događa...
- Smatra se da u ovakvim klasterima aktivna galaktička jezgra zagrevaju plazmu, ali da i termička provodnost duž linija magnetnog polja može da bude bitna.
- Termička provodnost je vrlo anizotropna što dovodi do nestabilnosti i konvekcije plazme.



Kako?: Simulacije MHD nestabilnosti u klasterima galaksija

- Simulacije HBI (heat-flux buoyancy instability) nestabilnosti koja se javlja u jezgrima galaksija sa nižom temperaturom koristeći 3D MHD program Athena (Stone et al. 2008).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}{4\pi} - \nabla p + \rho \mathbf{g},$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e\mathbf{v}) = -p\nabla \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{Q} - n_e^2 \Lambda(T),$$

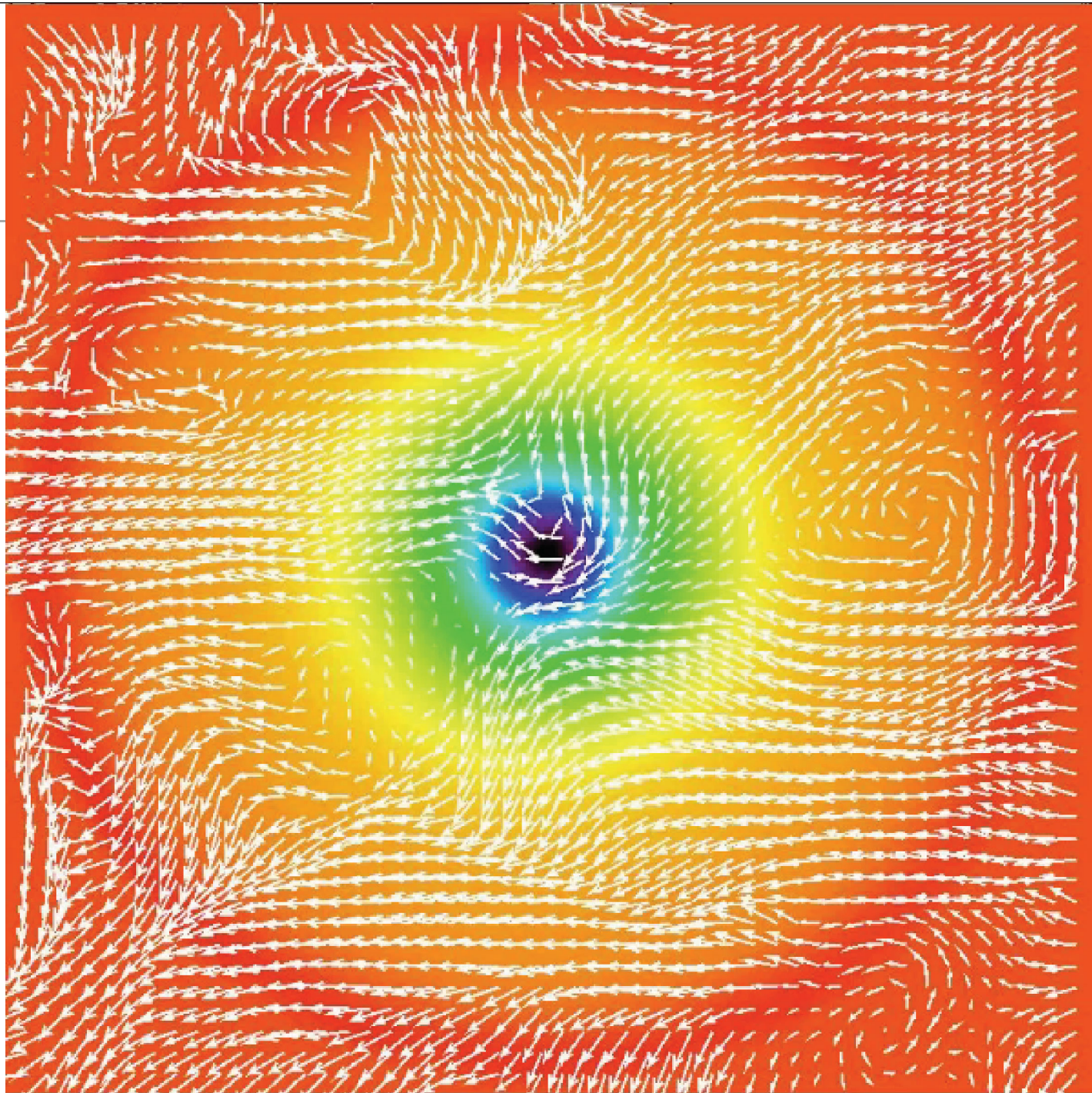
anizotropna termička provodnost

radijativno hlađenje

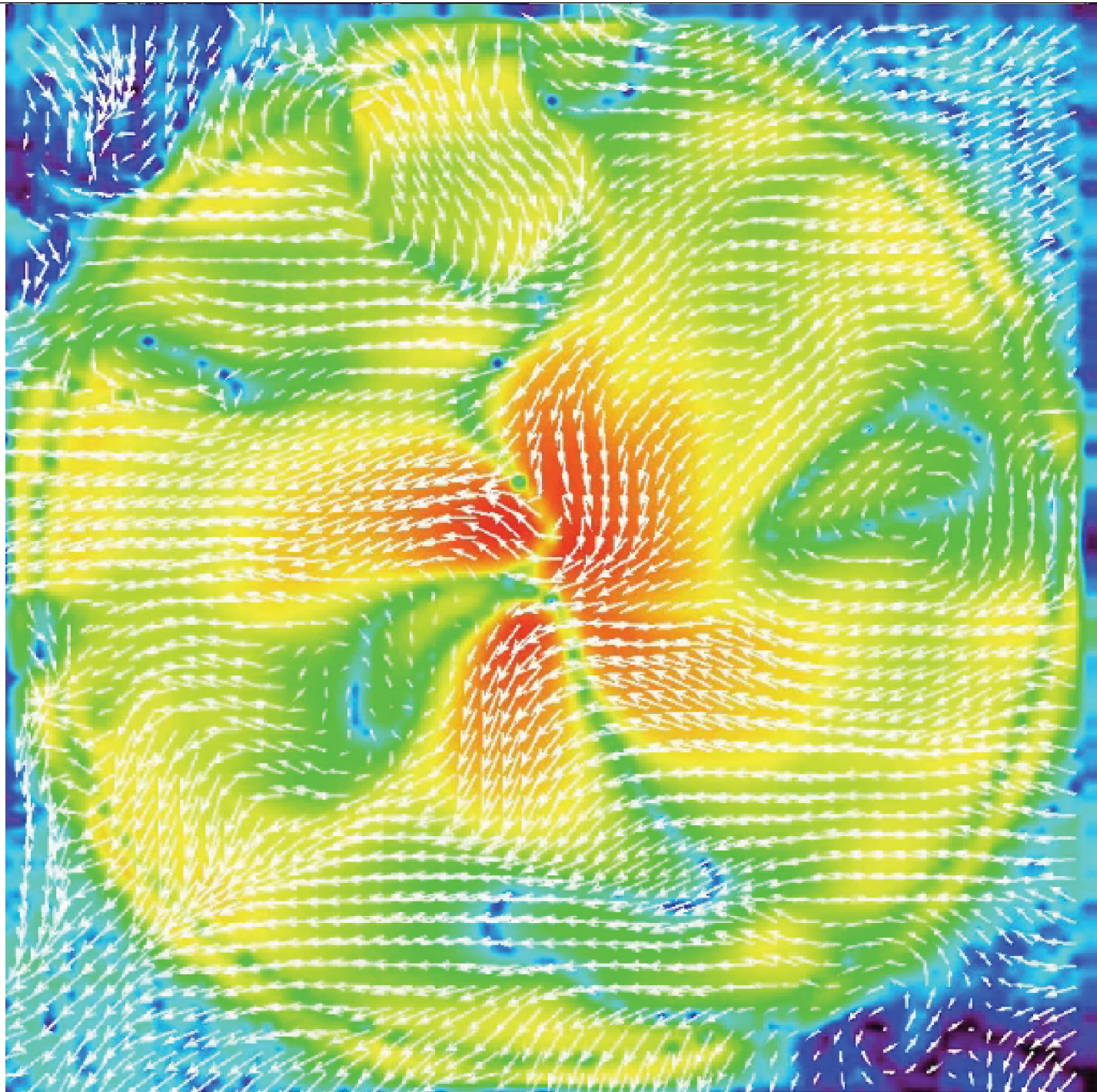
$$\mathbf{Q} = -\chi \hat{\mathbf{b}} (\hat{\mathbf{b}} \cdot \nabla T)$$

$$p = (\gamma - 1)e = \frac{\rho T}{\mu m_p}, \quad \gamma = 5/3$$

TiB



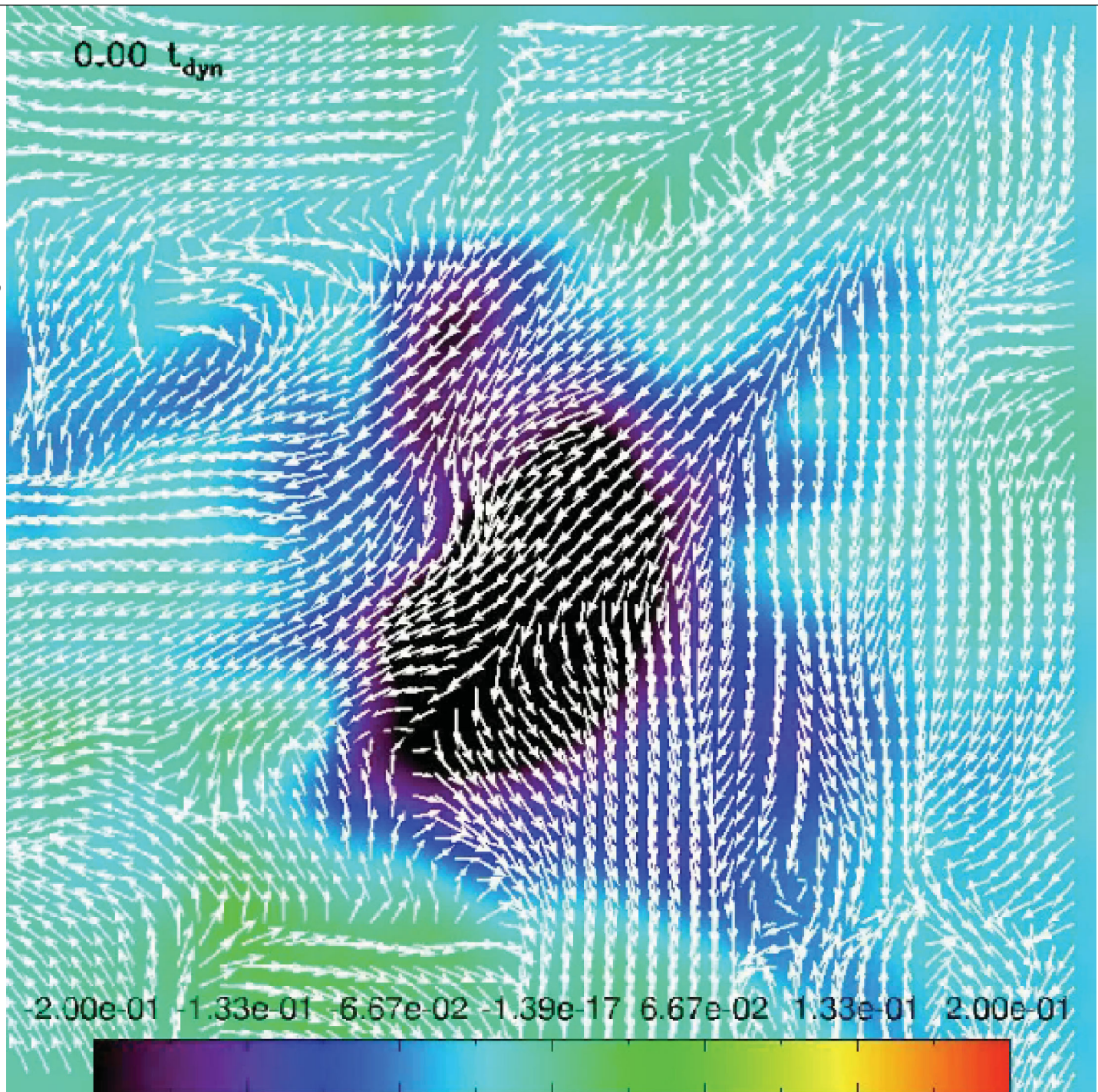
Q i B



RM i B

$$RM = 812 \int n_e \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l},$$

0.00 t_{dyn}



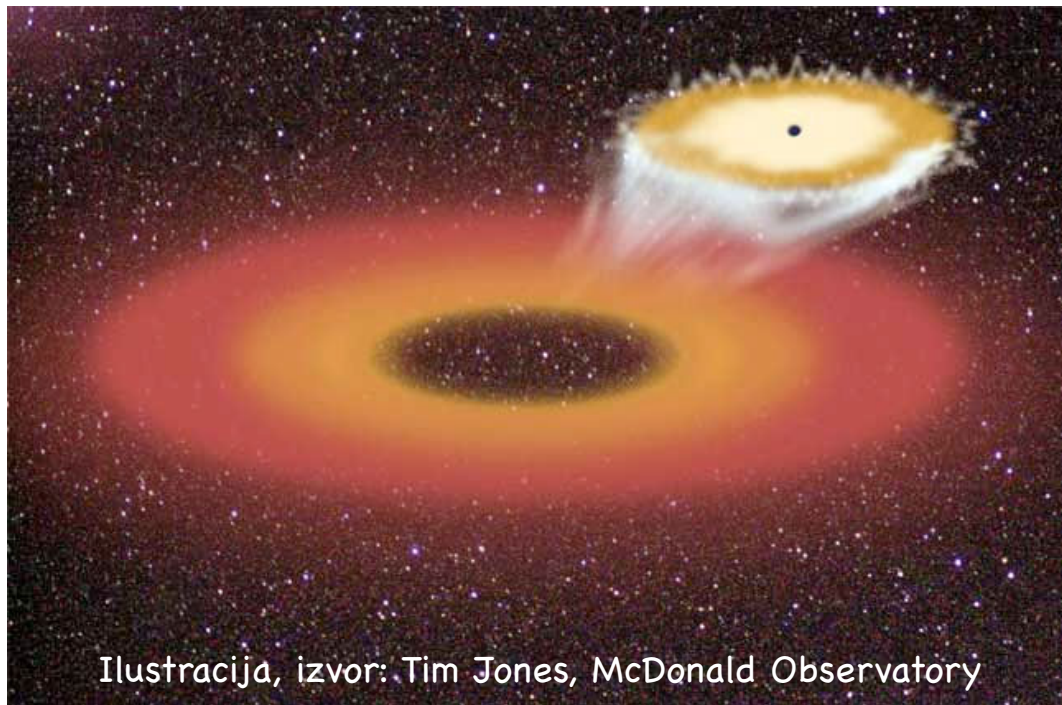
Perspektiva

- **Athena:** Sferni i cilindrični sistem koordinata, adaptive mesh refinement.
- Dizajnirati realističnije modele klastera u kosmološkom kontekstu: sudari galaksija utiču na morfologiju magnetnog polja i termodinamiku plazme.
- Slično je tačno i u slučaju aktivnog galaktičkog jezgra čiji radio-džetovi komešaju plazmu i utiču na raspored linija magnetnog polja.
- Dodatni fizički procesi od značaja za termodinamiku gasa: kosmički zraci i anizotropna viskoznost.

(NSF AST 08)

4) Gubitak mase i gravitacioni trzaj crnih rupa

(O'Neill, Miller, TB, Reynolds, & Schnittman 09)



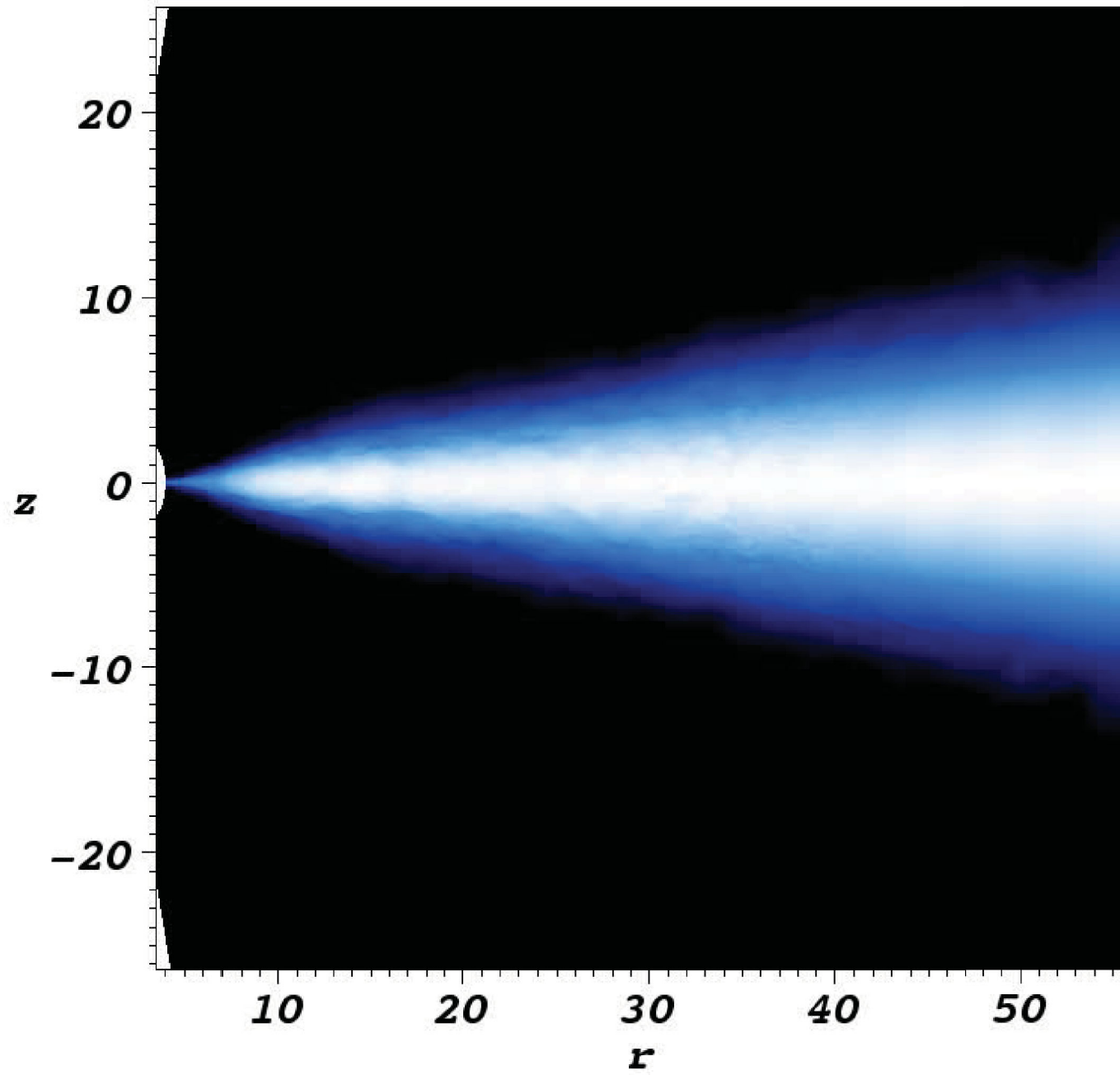
Ilustracija, izvor: Tim Jones, McDonald Observatory

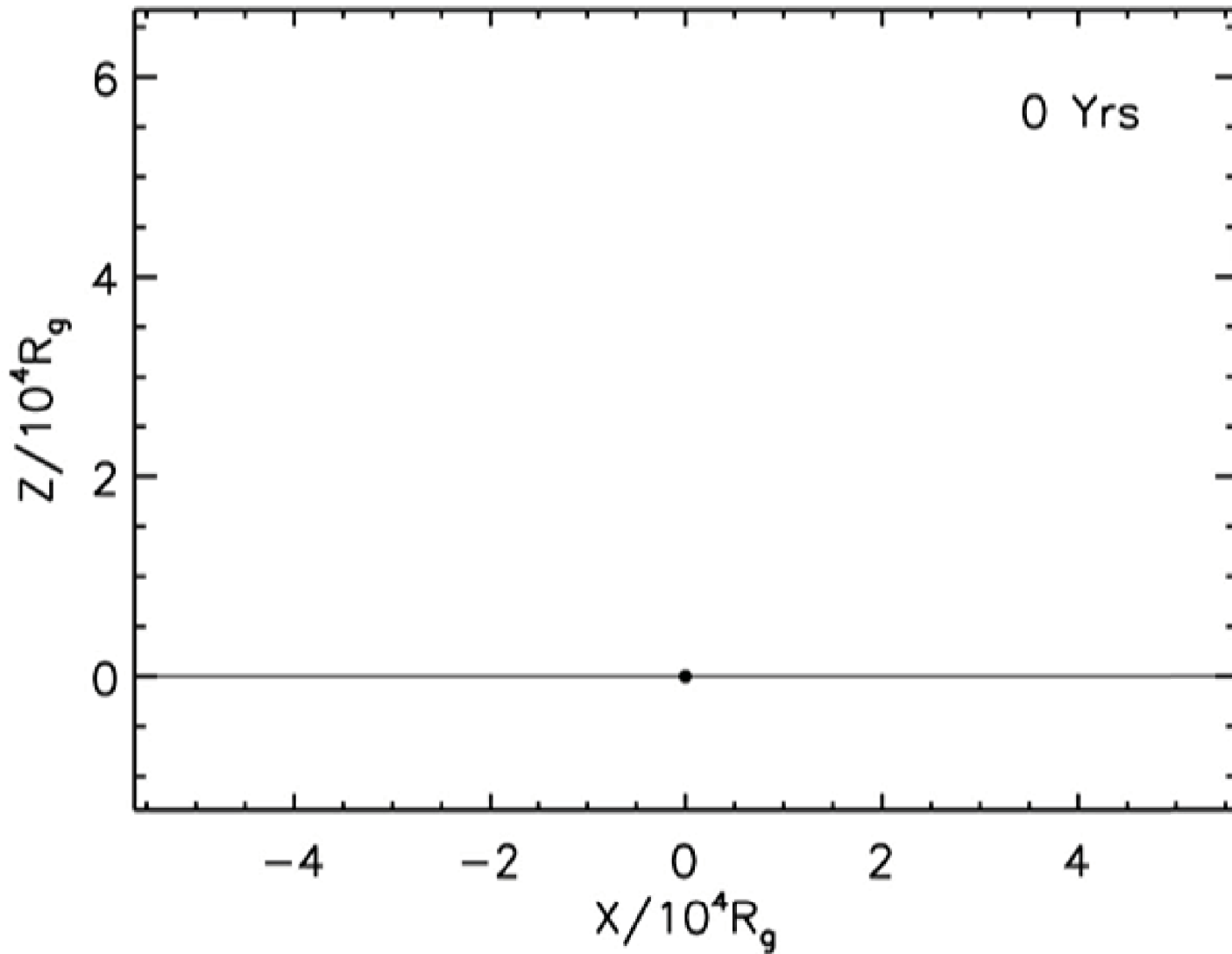
Šta i zašto?: Astrofizički kontekst

- Gubitak mase novostvorene SMCR:
 - Gubitak energije kroz emisiju gravitacionih talasa
- Gravitacioni trzaj:
 - Gubitak impulsa kroz emisiju gravitacionih talasa
- **Cilj:** Predviđanje posmatračkih efekata, simulirajući reakciju akrecionog diska na trenutni gubitak mase centralne SMCR ili njen gravitacioni trzaj.

Kako?: Simulacije gubitka mase i gravitacionog trzaja

- MHD i HD simulacije diska programom Zeus-MP (Stone & Norman 92a,b).
- 3D MHD simulacije prirodno dočaravaju transport momenta impulsa usled magneto-rotacione nestabilnosti.
- HD simulacije je moguće svesti na 2D (uz pretpostavku azimutalne simetrije), posto nije neophodno pratiti 3D morfologiju magnetnog polja.





(Jason Hwang, završna teza na osnovnim studijama, Penn State 09)
Korišćen program: Gadget (Springel et al.)

Zaključak

- U poslednjih 10 godina kompjutaciona astrofizika je postala jedna od značajnih grana u okviru astrofizike, zajedno sa posmatračkom, teorijskom-analitičkom i instrumentacionom astrofizikom.
- Sa tehnološkim napretkom u polju kompjutera i kvalitetnim, skalabilnim, paralelnim programima nove generacije, postaje moguće ujediniti hidrodinamiku sa kompleksnom fizikom radijativnog transfera i/ili magnetnog polja u simulacijama nelinearnih astrofizičkih sredina.