

WOMEN IN THEORETICAL PHYSICS

Premio Nazionale "Milla Baldo Ceolin" 2021

Fully Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Spinning Massive Black Hole Binaries

Relatrice:
Sofia MAGGIONI

21 Ottobre 2022

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

INTRO

METODI

SETUP

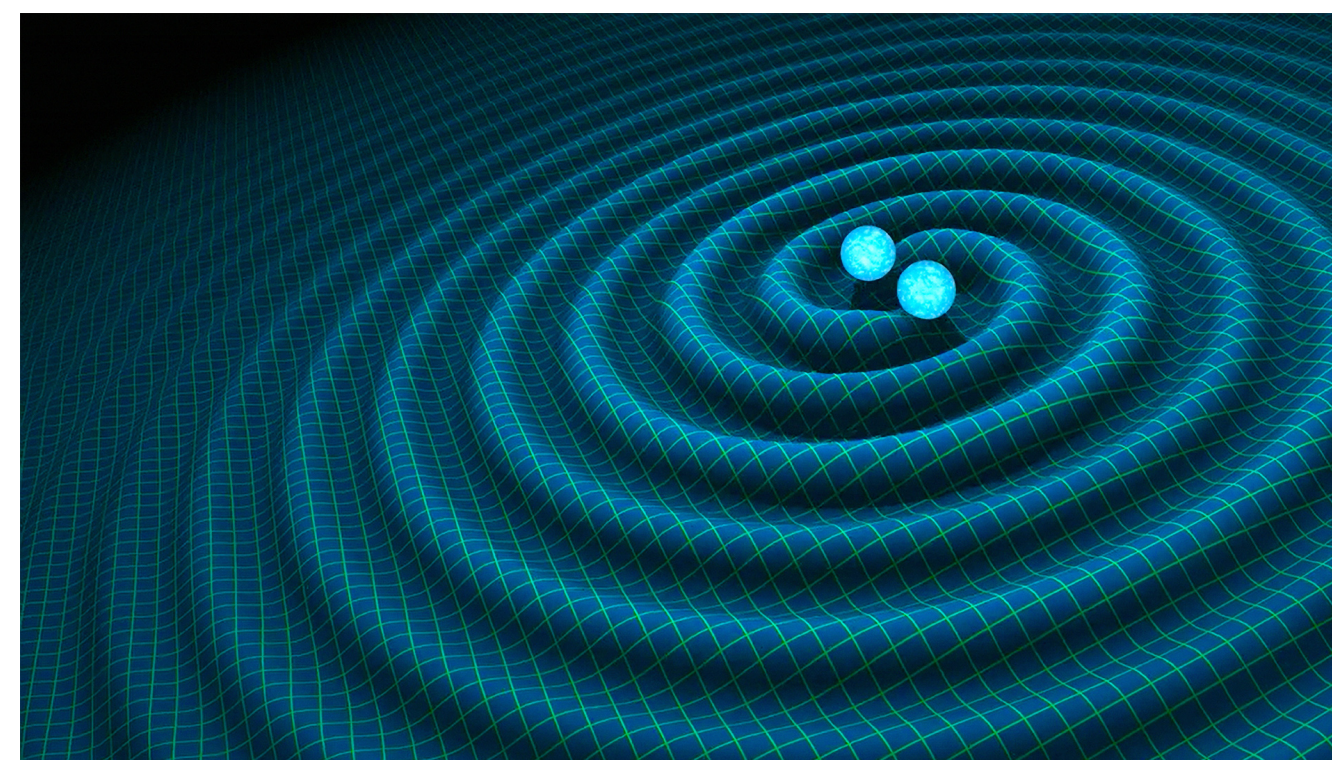
RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

ONDE GRAVITAZIONALI



INTRO

METODI

SETUP

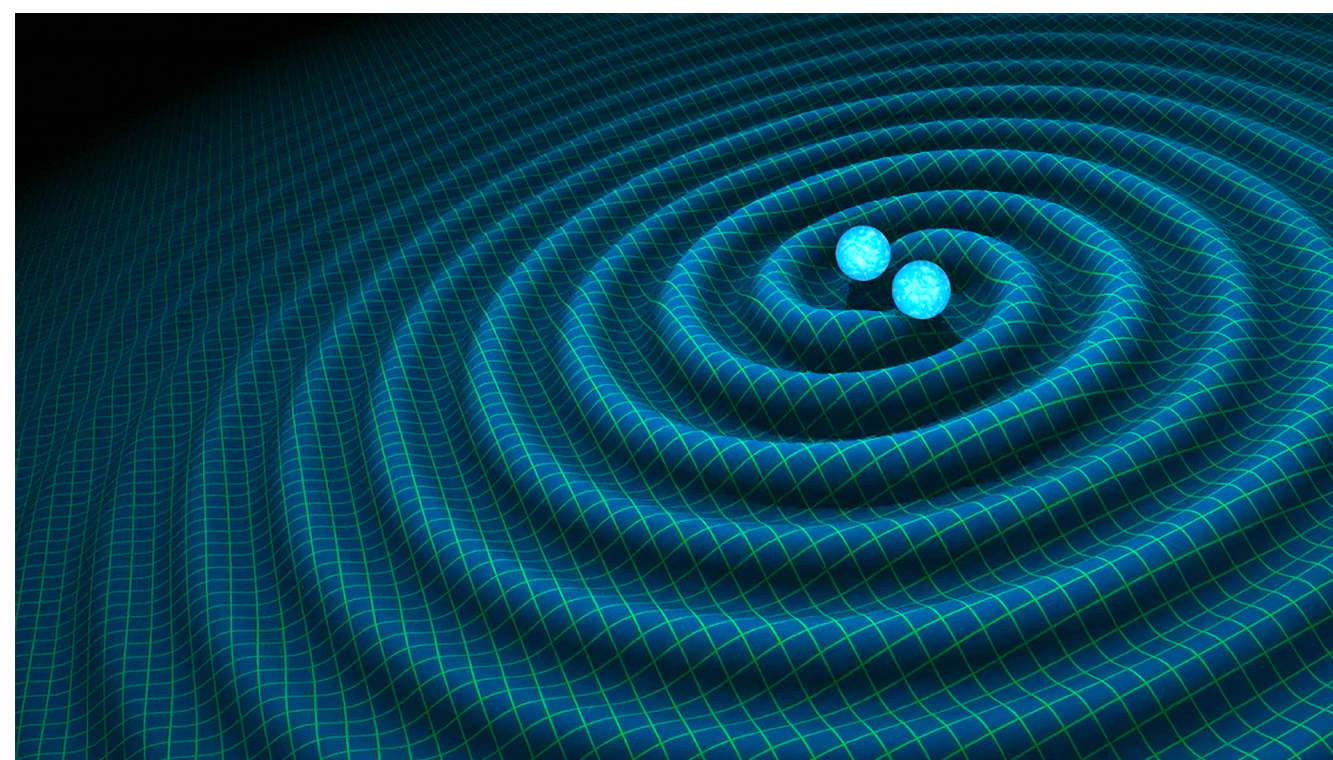
RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

ONDE GRAVITAZIONALI



+

SEGNALI ELETTRROMAGNETICI



INTRO

METODI

SETUP

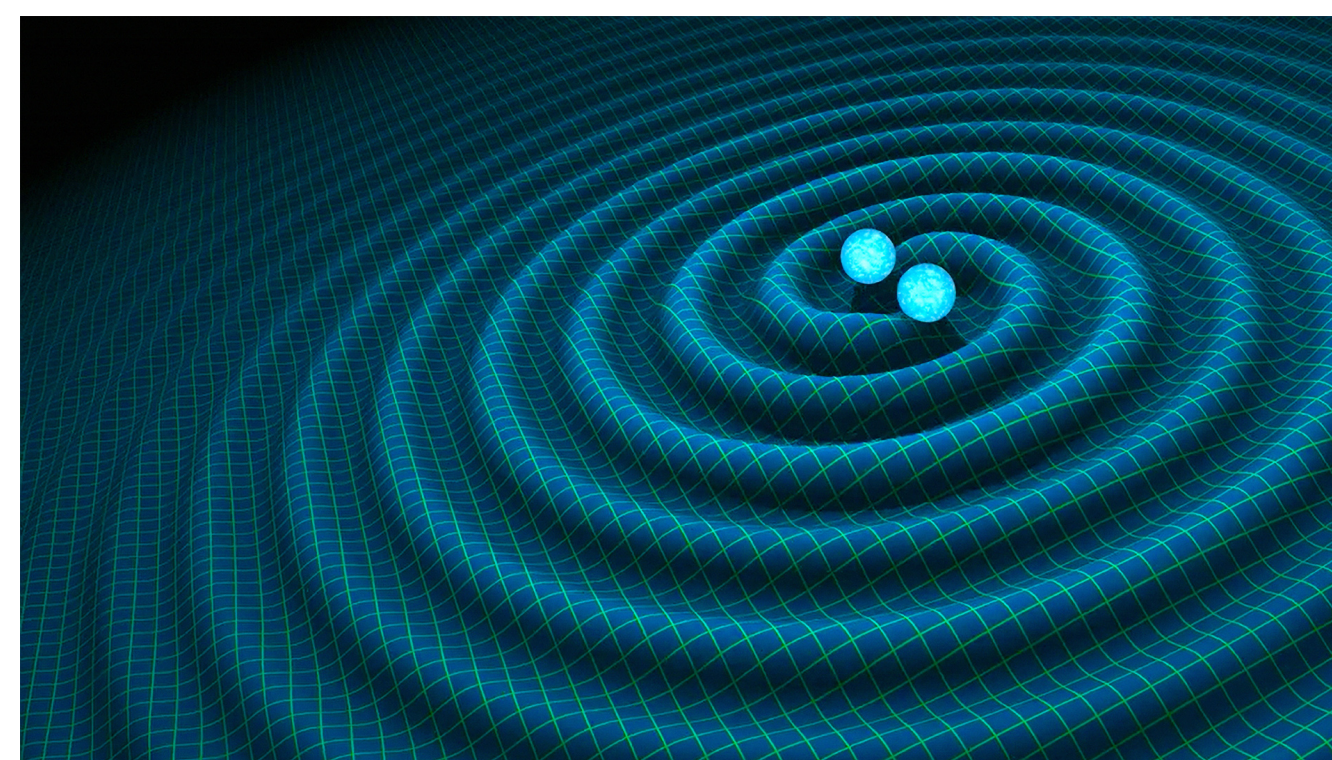
RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

ONDE GRAVITAZIONALI



+

SEGNALI ELETTRROMAGNETICI



- **Perchè?** Informazioni su oggetti compatti, dinamica del gas in regime di campo forte, test di GR, cosmologia.

INTRO

METODI

SETUP

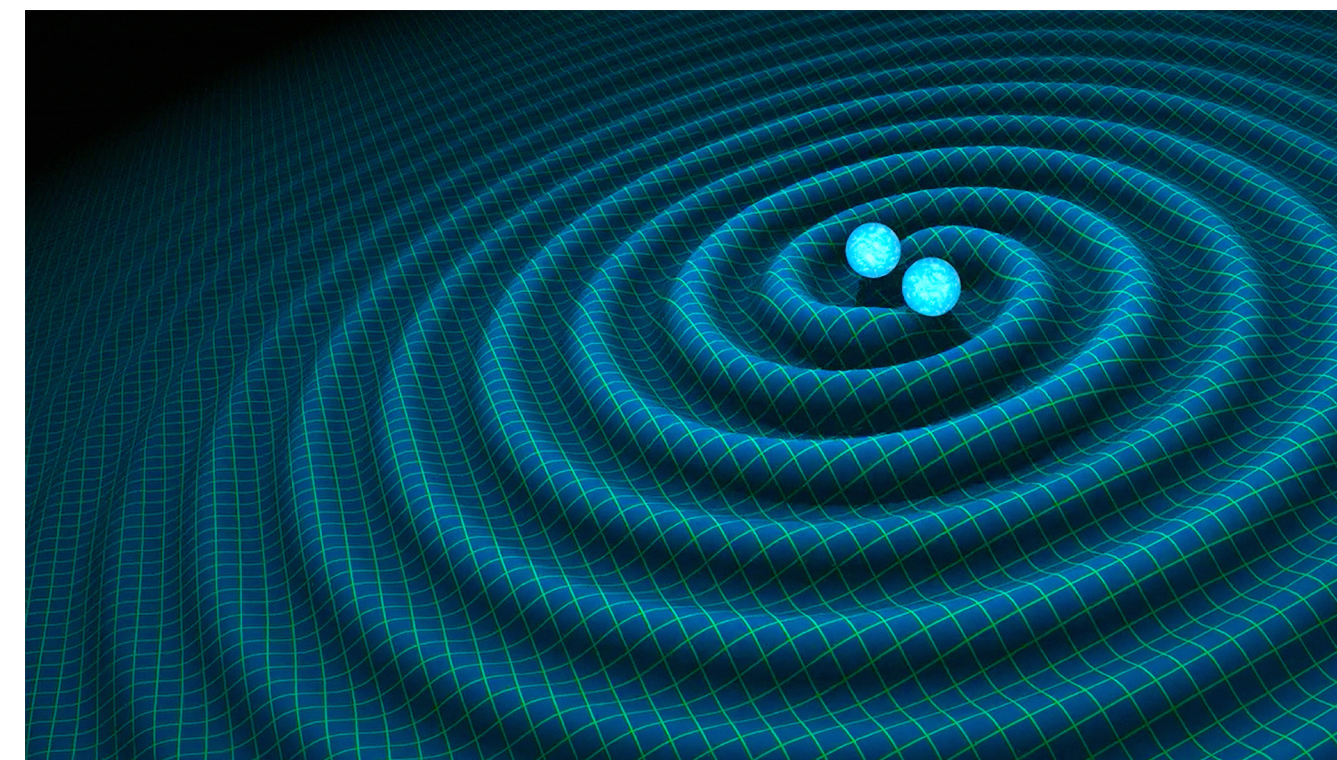
RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

ONDE GRAVITAZIONALI



+

SEGNALI ELETTROMAGNETICI



- **Perchè?** Informazioni su oggetti compatti, dinamica del gas in regime di campo forte, test di GR, cosmologia.
- **Ad oggi: GW/GRB170817** (Interferometri ground-based + telescopi spaziali per raggi γ)

INTRO

METODI

SETUP

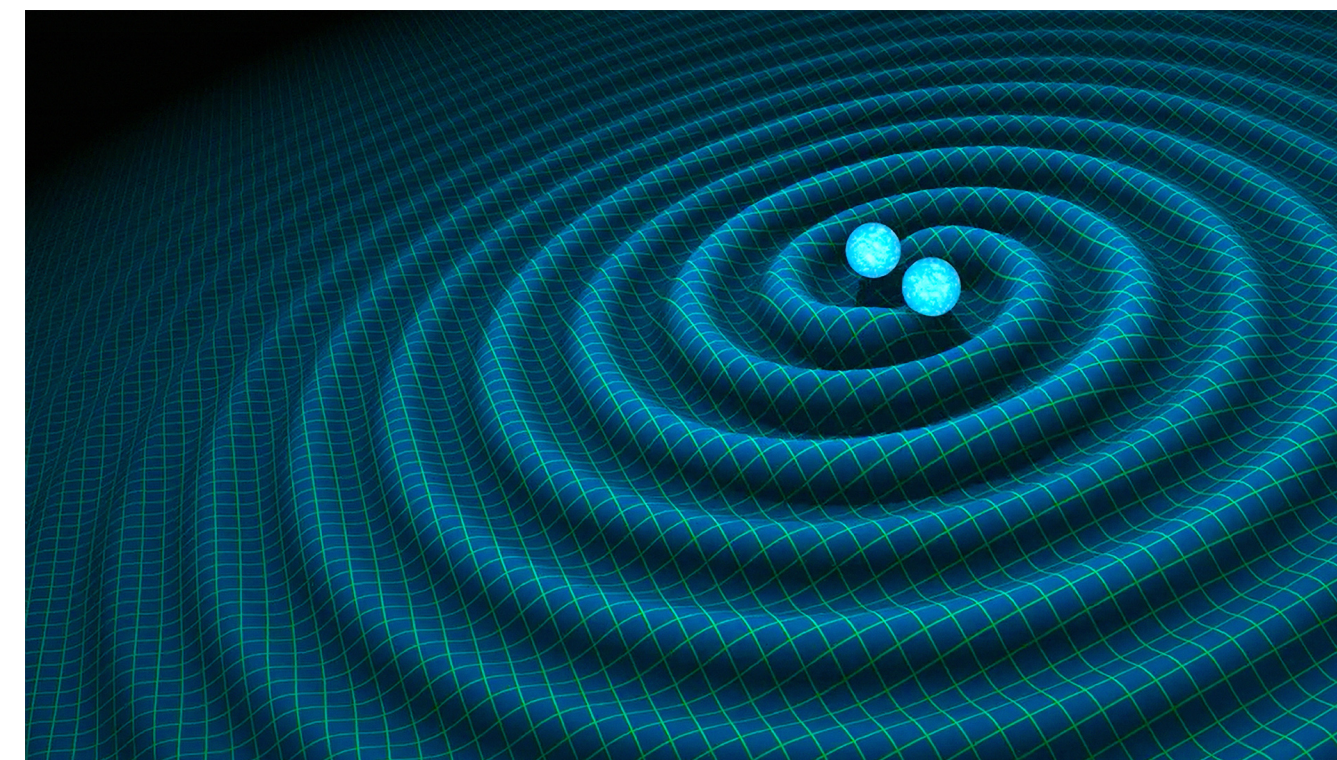
RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

Astronomia basata sull'osservazione coordinata e sull'interpretazione di diversi segnali astronomici

ONDE GRAVITAZIONALI



+

SEGNALI ELETTRROMAGNETICI



- **Perchè?** Informazioni su oggetti compatti, dinamica del gas in regime di campo forte, test di GR, cosmologia.
- **Ad oggi: GW/GRB170817** (Interferometri ground-based + telescopi spaziali per raggi γ)
- **Il futuro:** detector space-based (LISA), nuove sorgenti: **SMBHBs**

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

Predizioni per SMBHBs per LISA:

- Risultato di merger di galassie gerarchici
- Masse: $10^5 - 10^7 M_{\odot}$
- Ambiente: gas-rich

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

Predizioni per SMBHBs per LISA:

- Risultato di merger di galassie gerarchici
- Masse: $10^5 - 10^7 M_{\odot}$
- Ambiente: gas-rich
- Controparte EM: ???

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

INTRO

Predizioni per SMBHBs per LISA:

- Risultato di merger di galassie gerarchici
- Masse: $10^5 - 10^7 M_{\odot}$
- Ambiente: gas-rich
- Controparte EM: ???

OBIETTIVO:
Identificare proprietà del segnale EM correlate all'evento gravitazionale

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

ASTRONOMIA MULTI-MESSENGER

INTRO

Predizioni per SMBHBs per LISA:

- Risultato di merger di galassie gerarchici
- Masse: $10^5 - 10^7 M_{\odot}$
- Ambiente: gas-rich
- Controparte EM: ???

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



OBIETTIVO:

Identificare proprietà del segnale EM correlate all'evento gravitazionale

- in che condizioni?
- caratteristiche?
- come è correlato alla GW?

INTRO

IN QUESTA TESI:

- Obiettivo: modellizzare un merger di SMBH immersi in gas magnetizzato



METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

IN QUESTA TESI:

- ▶ Obiettivo: modellizzare un merger di SMBH immersi in gas magnetizzato
- ▶ Ruolo dell'inclinazione dello spin



METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

IN QUESTA TESI:

METODI

- ▶ Obiettivo: modellizzare un merger di SMBH immersi in gas magnetizzato

- ▶ Ruolo dell'inclinazione dello spin

- ▶ Come? simulazioni numeriche

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

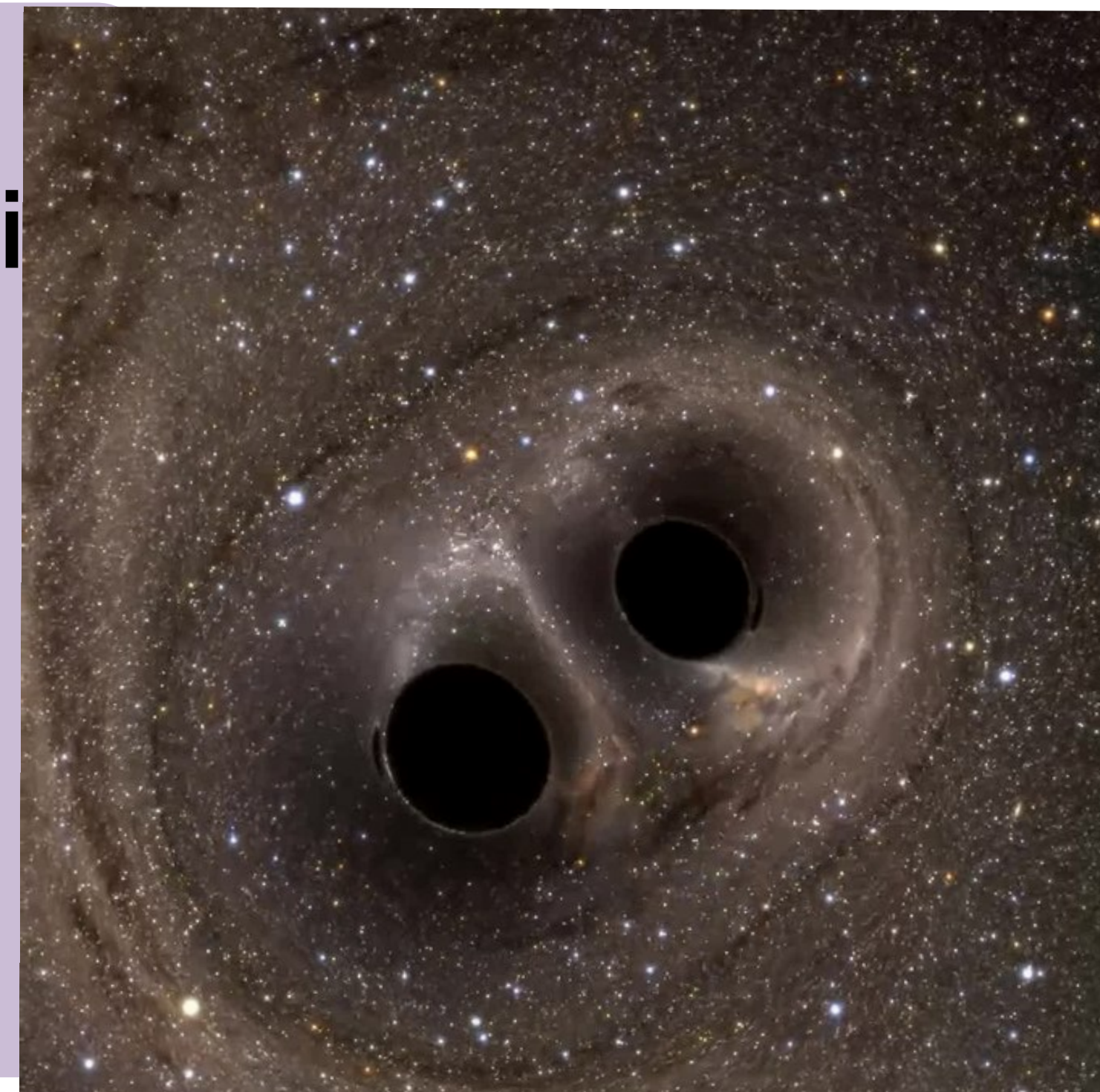
IN QUESTA TESI:

METODI

► Obiettivo: modellizzare un merger di SMBH immersi in gas magnetizzato

► Ruolo dell'inclinazione dello spin

► Come? simulazioni numeriche



SETUP

RISULTATI

Team Bicocca/Insubria:

- *Bruno Giacomazzo (Prof. Associato, Bicocca)*
- *Monica Colpi (Prof. Ordinaria, Bicocca)*
- *Federico Cattorini (Dottorando, Insubria)*
- *Francesco Haardt (Prof. Ordinario, Insubria)*

CONCLUSIONI

RELATIVITA' NUMERICA

FISICA

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

FISICA

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

$$\begin{array}{c} \text{Curvatura} \\ | \\ R_{\mu\nu} \end{array} - \frac{1}{2} \begin{array}{c} R \\ | \\ g_{\mu\nu} \\ \text{Metrica} \end{array} = \frac{8\pi G}{c^4} \begin{array}{c} \text{Materia} \\ | \\ T_{\mu\nu} \end{array}$$

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

FISICA

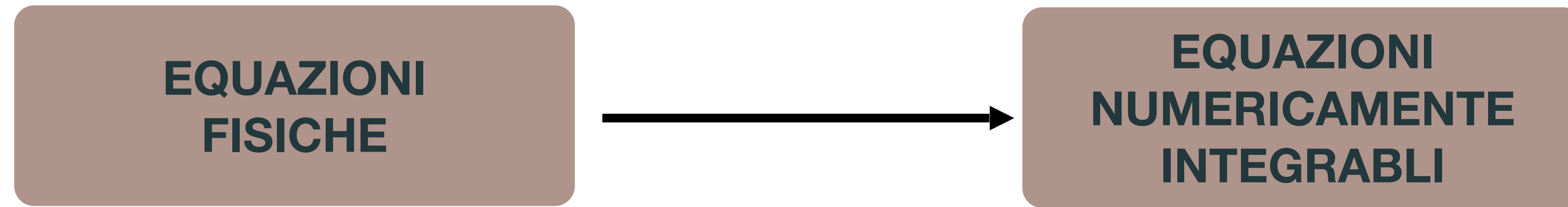
SIMULAZIONI

$$\begin{array}{c} \text{Curvatura} \\ | \\ R_{\mu\nu} \end{array} - \frac{1}{2} \begin{array}{c} R \\ | \\ g_{\mu\nu} \\ \text{Metrica} \end{array} = \frac{8\pi G}{c^4} \begin{array}{c} \text{Materia} \\ | \\ T_{\mu\nu} \end{array}$$

RELATIVITA' NUMERICA:

Ramo della GR incentrato sulla soluzione delle equazioni di Einstein per gli spazi-tempo per i quali non esiste soluzione analitica e non sono valide approssimazioni Post-Newtoniane

RELATIVITA' NUMERICA



INTRO

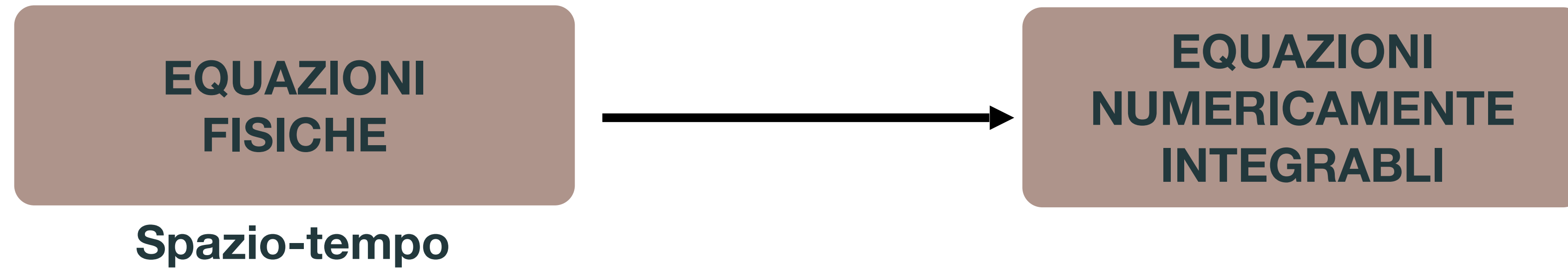
METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

RELATIVITA' NUMERICA



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

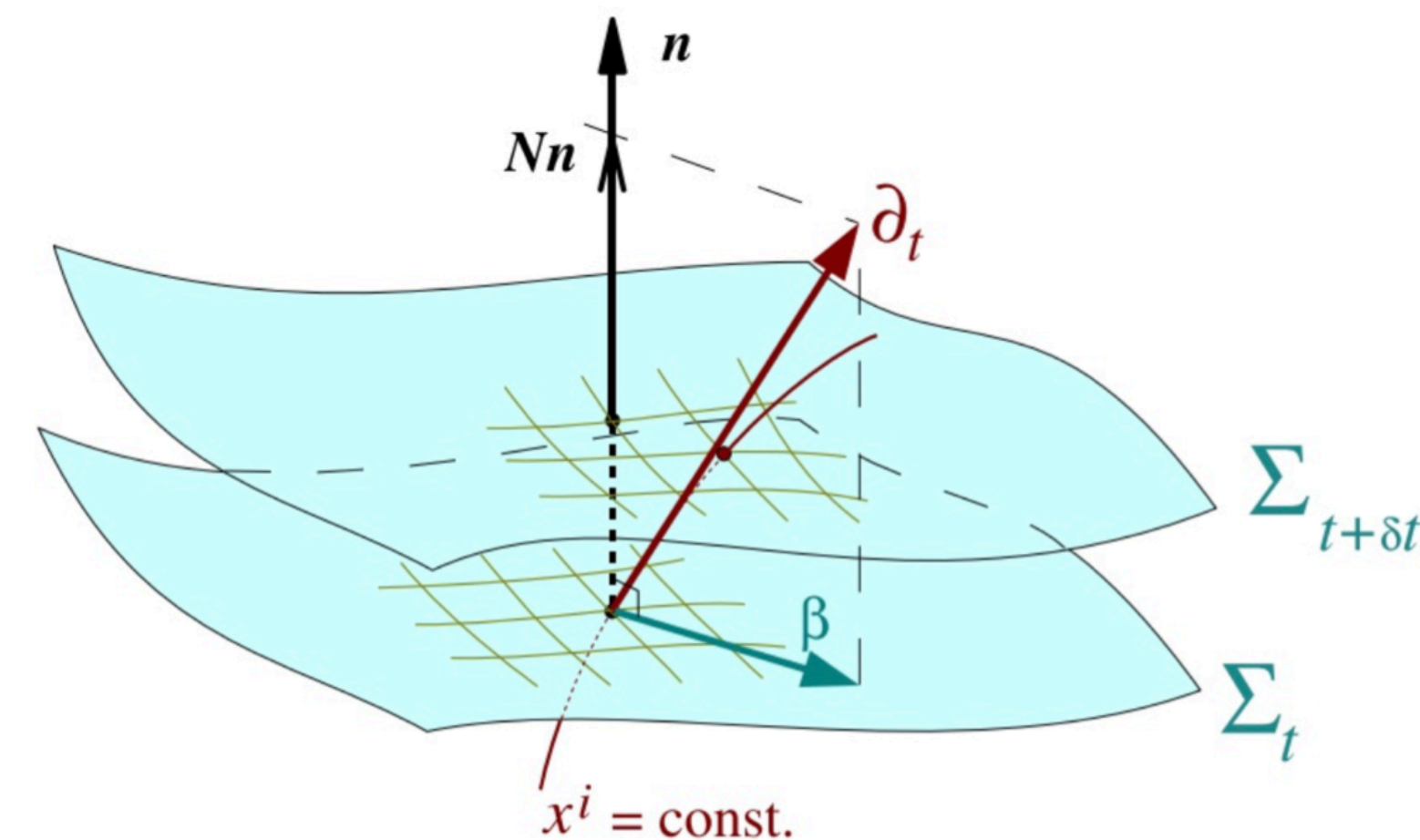
EQUAZIONI
FISICHE

Spazio-tempo



EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO



RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EQUAZIONI
FISICHE

Spazio-tempo

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EQUAZIONI
FISICHE

Spazio-tempo

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

FORMULAZIONE BSSNOK

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EQUAZIONI
FISICHE

Spazio-tempo

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Magnetoidrodinamica

$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

FORMULAZIONE BSSNOK

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

**EQUAZIONI
FISICHE**

**EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI**

Spazio-tempo

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

FORMULAZIONE BSSNOK

Magnetoidrodinamica

$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

FORMULAZIONE 3+1 MHD

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EQUAZIONI
FISICHE

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

Spazio-tempo

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

FORMULAZIONE BSSNOK

Magnetoidrodinamica

$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

FORMULAZIONE 3+1 MHD



EINSTEIN
TOOLKIT

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EQUAZIONI
FISICHE

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

Spazio-tempo

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

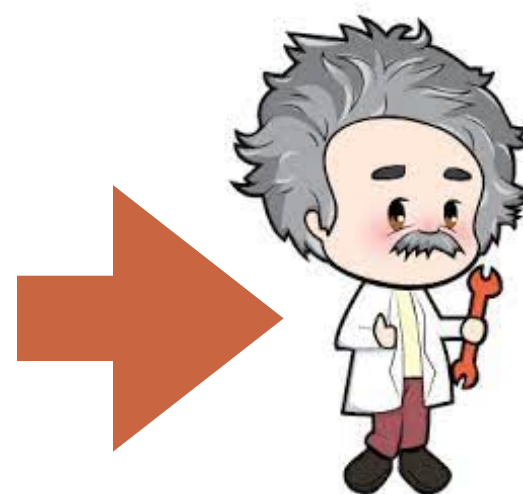
FORMULAZIONE BSSNOK

Magnetoidrodinamica

$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

FORMULAZIONE 3+1 MHD

INPUT

FILE DI
PARAMETERIEINSTEIN
TOOLKIT

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

EQUAZIONI
FISICHE

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

Spazio-tempo

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

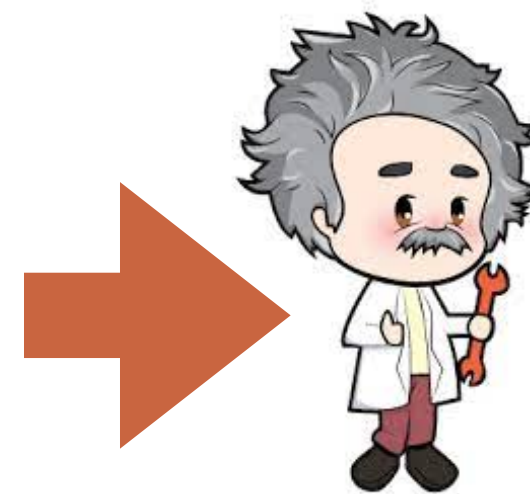
FORMULAZIONE BSSNOK

Magnetoidrodinamica

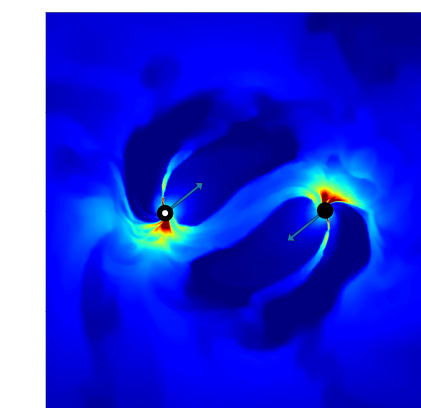
$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

FORMULAZIONE 3+1 MHD

INPUT

FILE DI
PARAMETERIEINSTEIN
TOOLKIT

OUTPUT:



RISULTATI

CONCLUSIONI

RELATIVITA' NUMERICA

INTRO

METODI

EQUAZIONI
FISICHE

EQUAZIONI
NUMERICAMENTE
INTEGRABILI

Spazio-tempo

FOLIAZIONE SPAZIOTEMPO

Equazioni di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

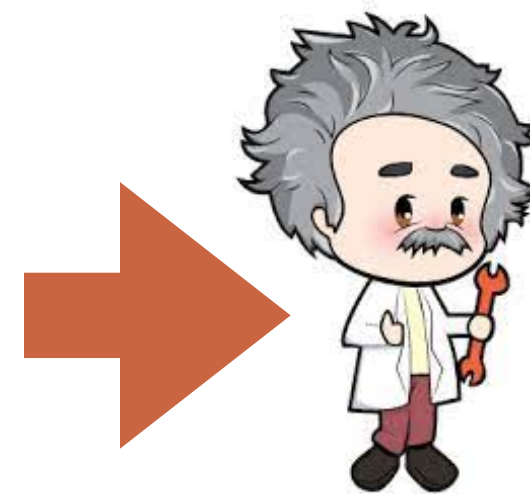
FORMULAZIONE BSSNOK

Magnetoidrodinamica

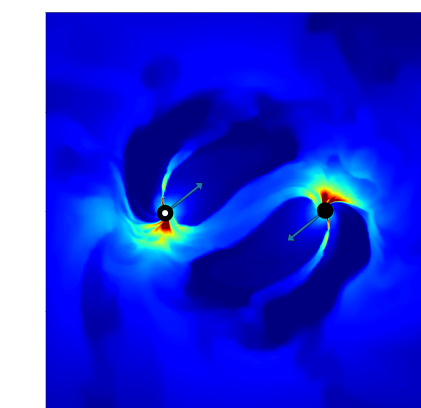
$$\begin{aligned}\nabla_{\mu}(\rho u^{\mu}) &= 0 \\ \nabla_{\nu}T^{\mu\nu} &= 0 \\ \nabla_{\nu}F^{*\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

FORMULAZIONE 3+1 MHD

INPUT

FILE DI
PARAMETERIEINSTEIN
TOOLKIT

OUTPUT:



CINECA

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$

INTRO

METODI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$

Giacomazzo et al.
2012

Kelly et al.
2017

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$

Cattorini et al.
2021

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**
- Separazione iniziale $d \sim 12M$ (ultime ~ 10 orbite)

INTRO

METODI

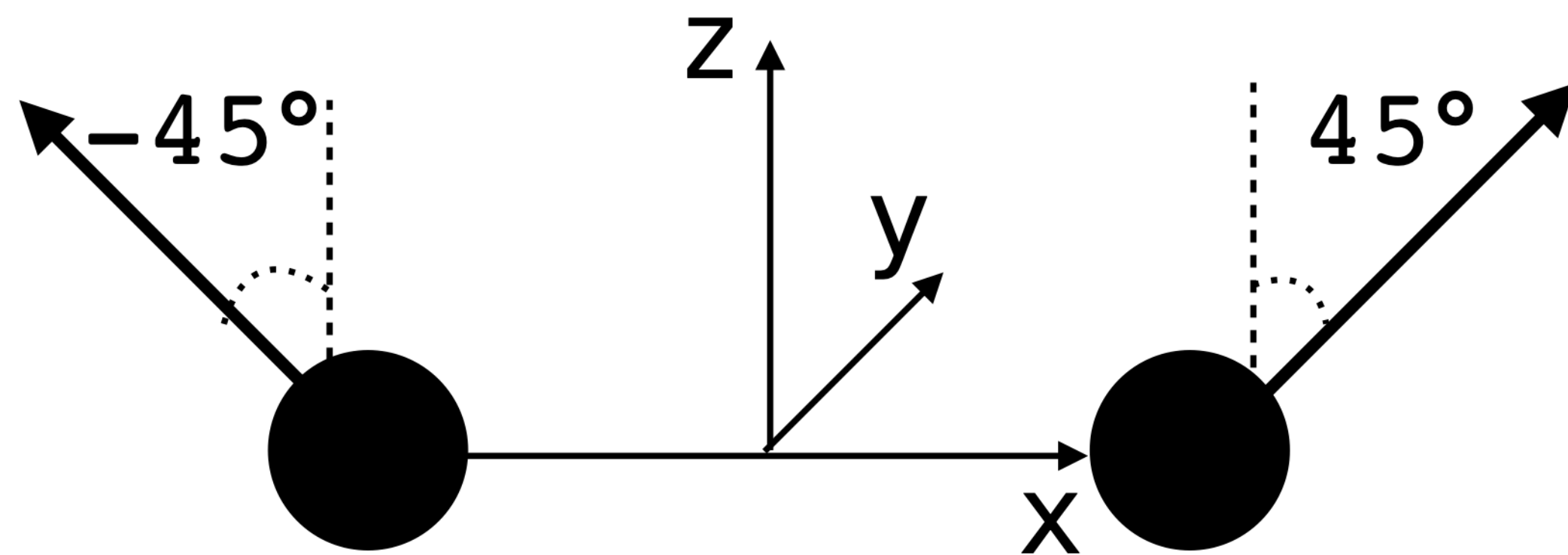
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**
- Separazione iniziale $d \sim 12M$ (ultime ~ 10 orbite)



INTRO

METODI

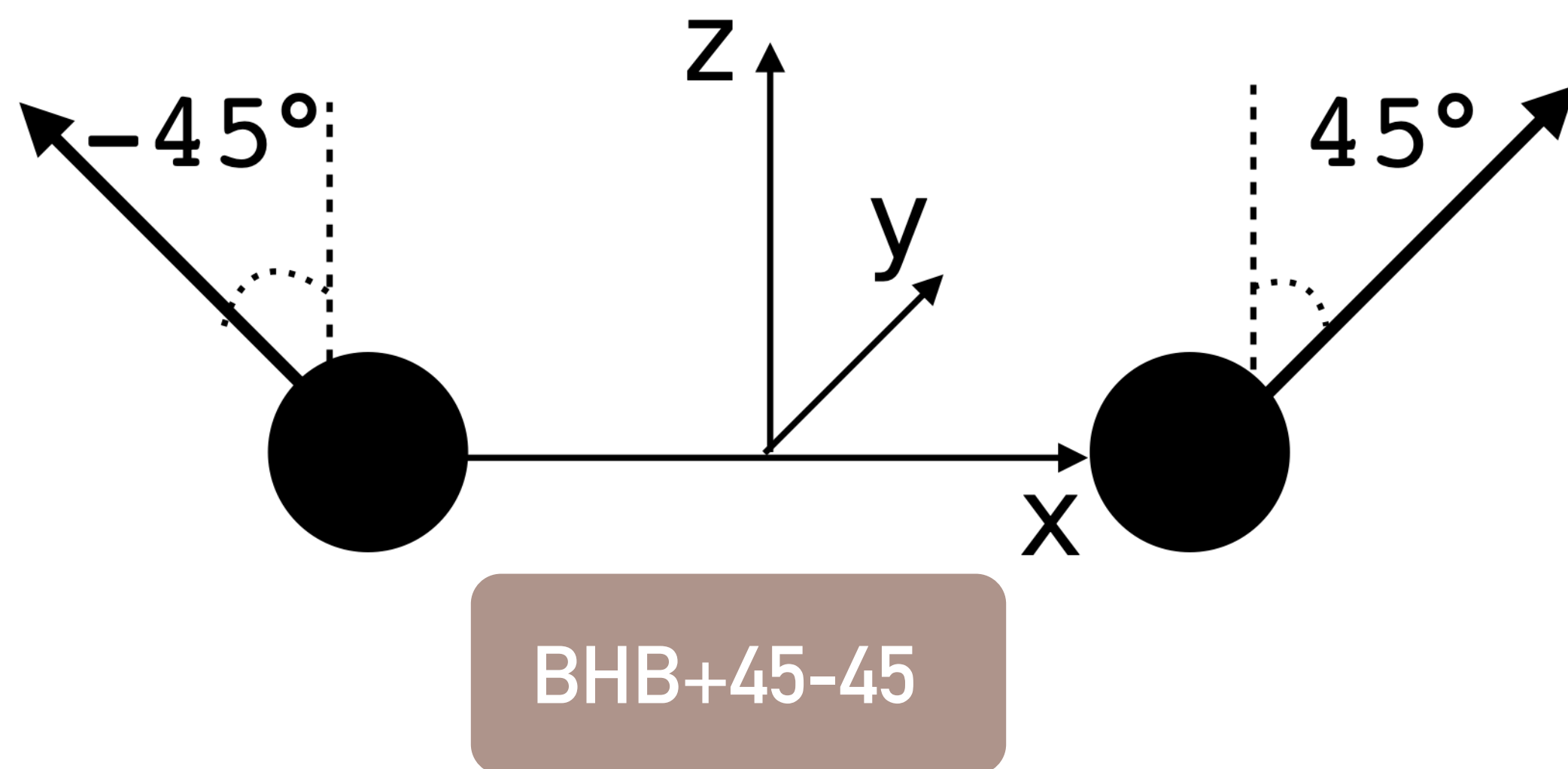
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**
- Separazione iniziale $d \sim 12M$ (ultime ~ 10 orbite)



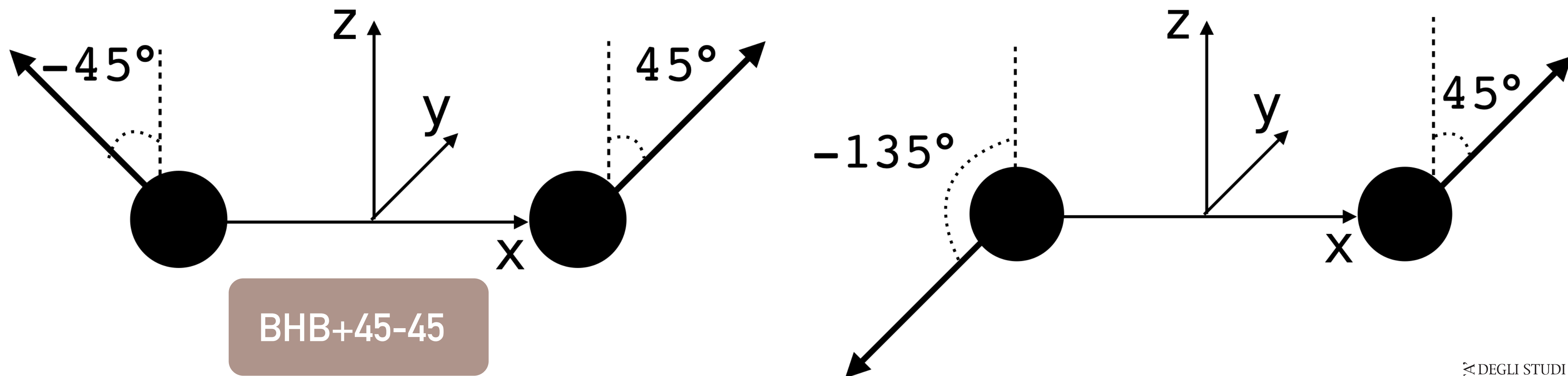
INTRO

METODI

SETUP

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**
- Separazione iniziale $d \sim 12M$ (ultime ~ 10 orbite)



RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

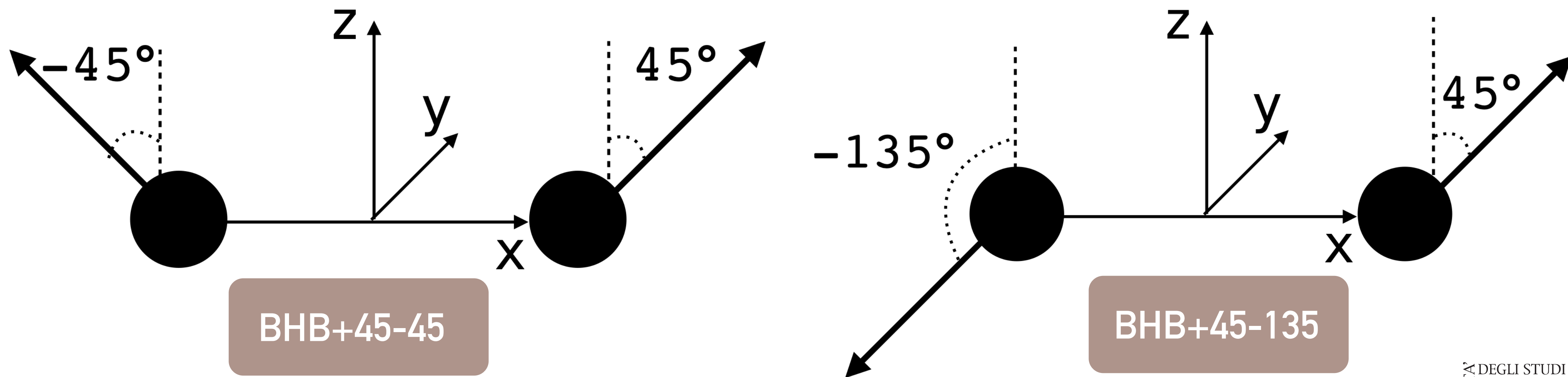
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

SETUP INIZIALE

- Pari massa: $m_1 = m_2 = M/2$
- Materia intorno ai BHs: “gas cloud”, $\rho_0 = \text{const}$, $\bar{v} = 0$
- Campo magnetico uniforme $\beta_0^{-1} \equiv p_{\text{mag}}/p_{\text{fluid}} = 0.31$
- Magnitudine dello spin: $a = S/m^2 = 0.6$
- **Inclinazione spin-momento angolare orbitale**
- Separazione iniziale $d \sim 12M$ (ultime ~ 10 orbite)



DINAMICA DEI BH

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

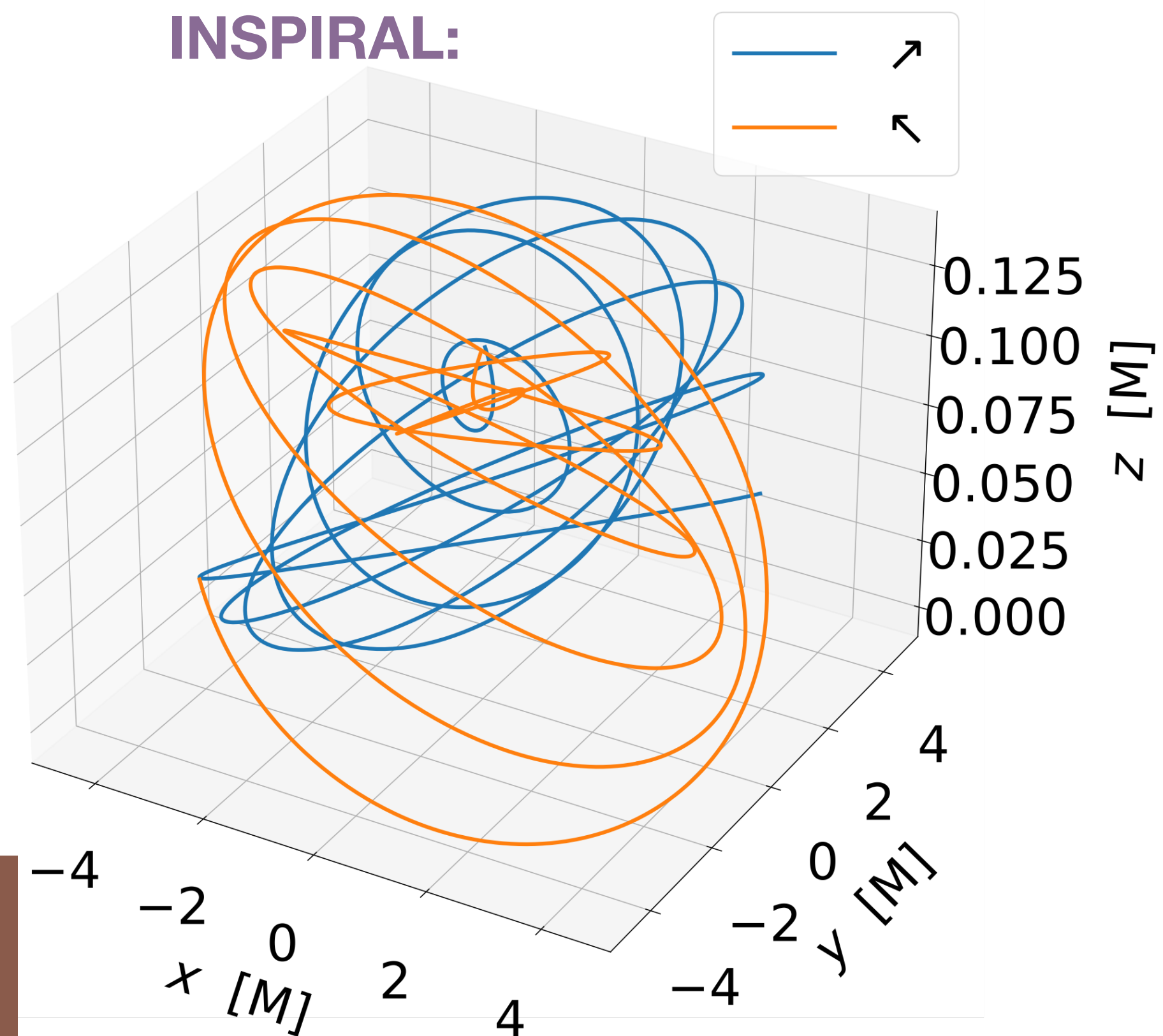
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

DINAMICA DEI BH

LATE
INSPIRAL:



INTRO

METODI

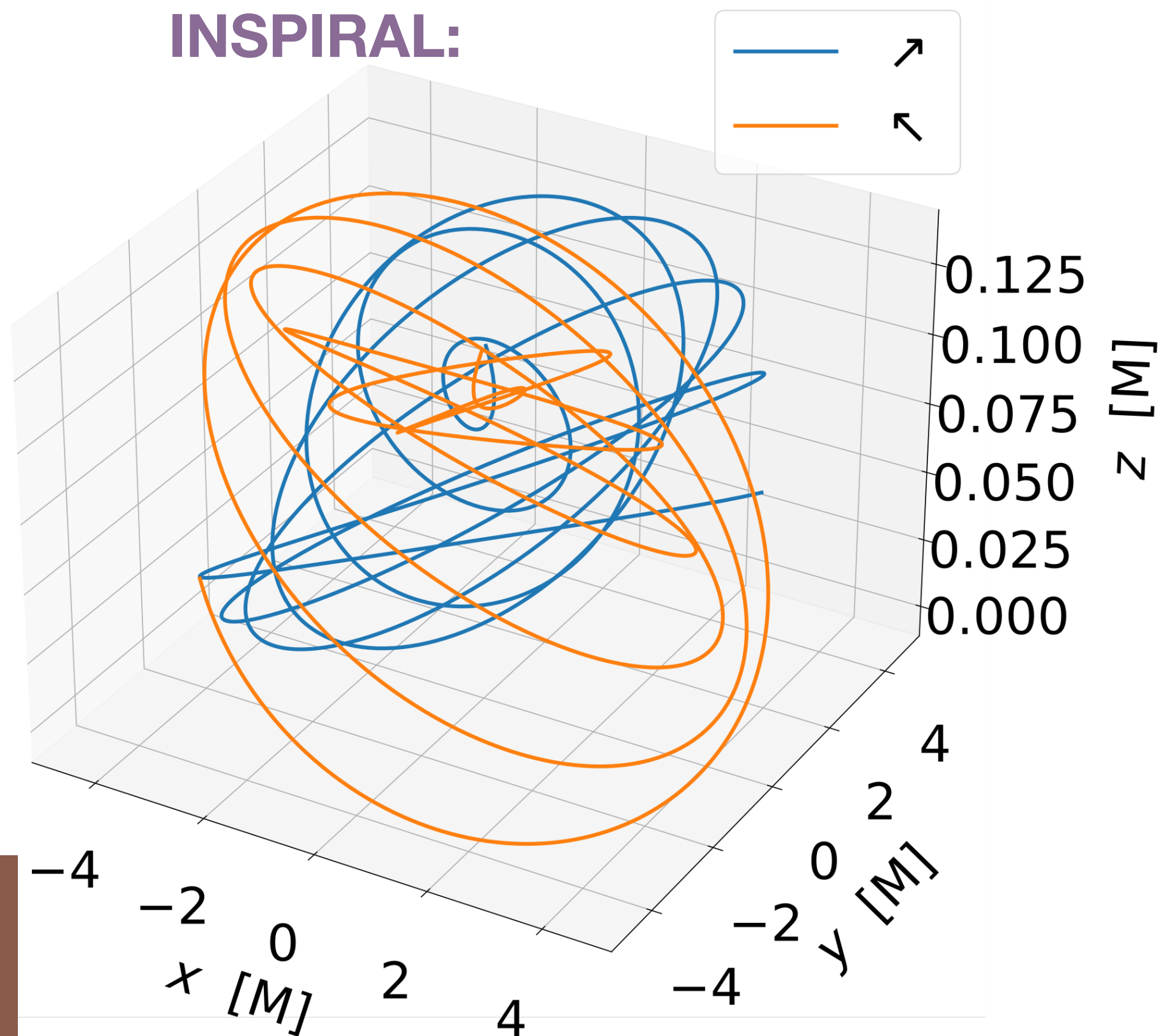
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

DINAMICA DEI BH

LATE
INSPIRAL:



- Precessione di orbita e spin durante l'inspiral

INTRO

METODI

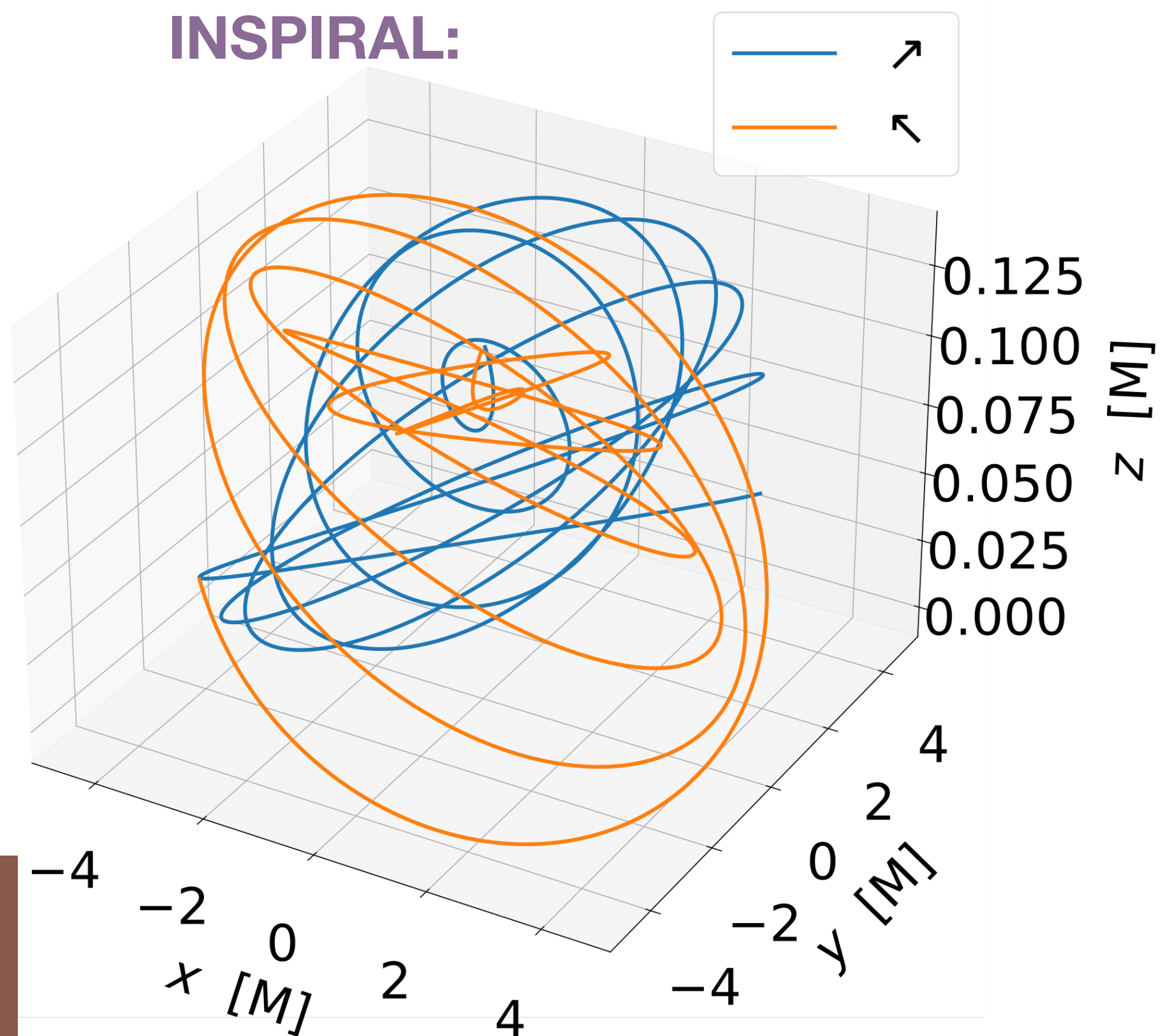
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

DINAMICA DEI BH

LATE
INSPIRAL:



- Precessione di orbita e spin durante l'inspiral
- BHB+45-45: kick lungo asse z

INTRO

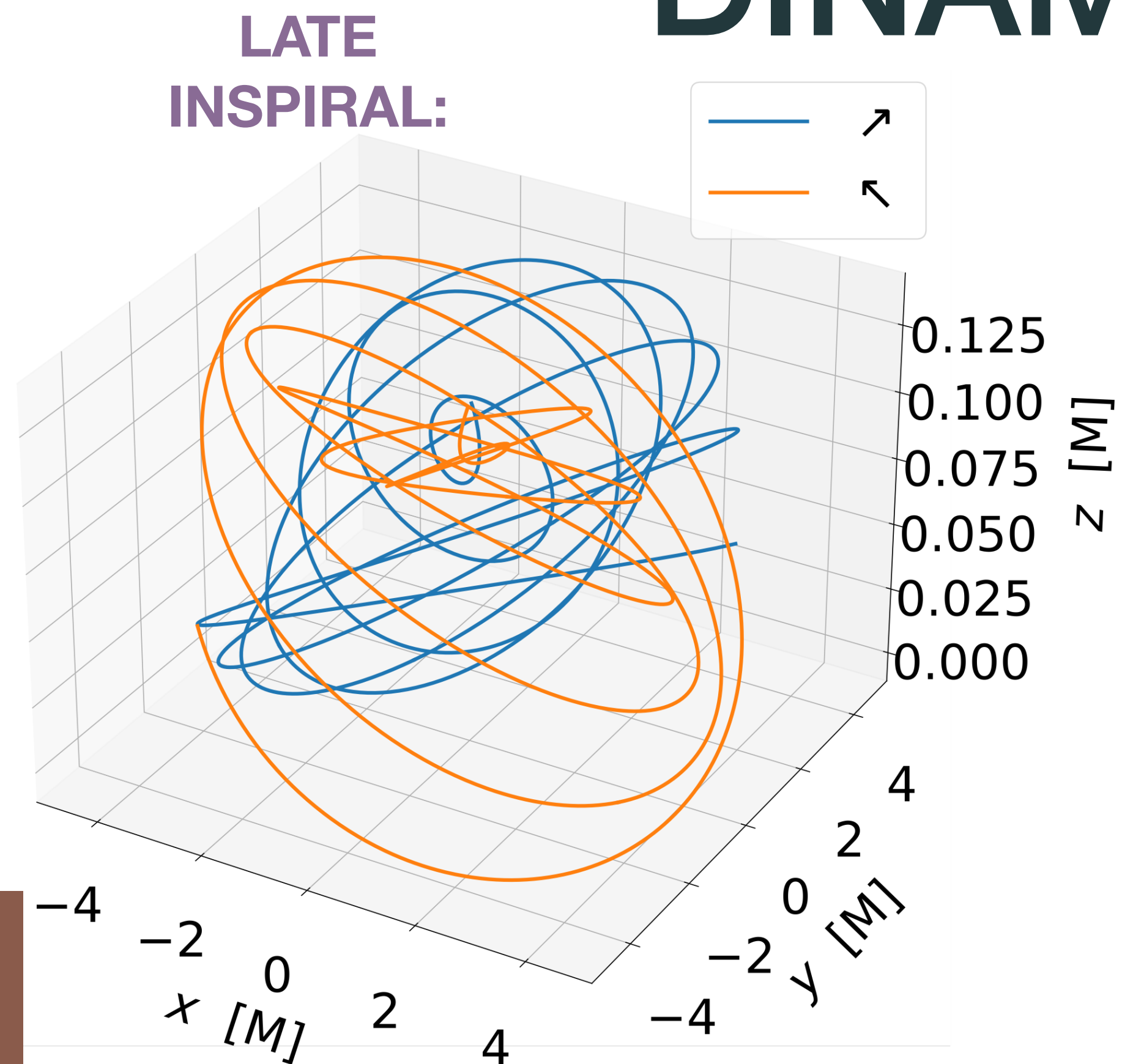
METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

DINAMICA DEI BH



- Precessione di orbita e spin durante l'inspiral
- BHB+45-45: kick lungo asse z
- BHB+45-135: kick lungo asse x, y, z

INTRO

METODI

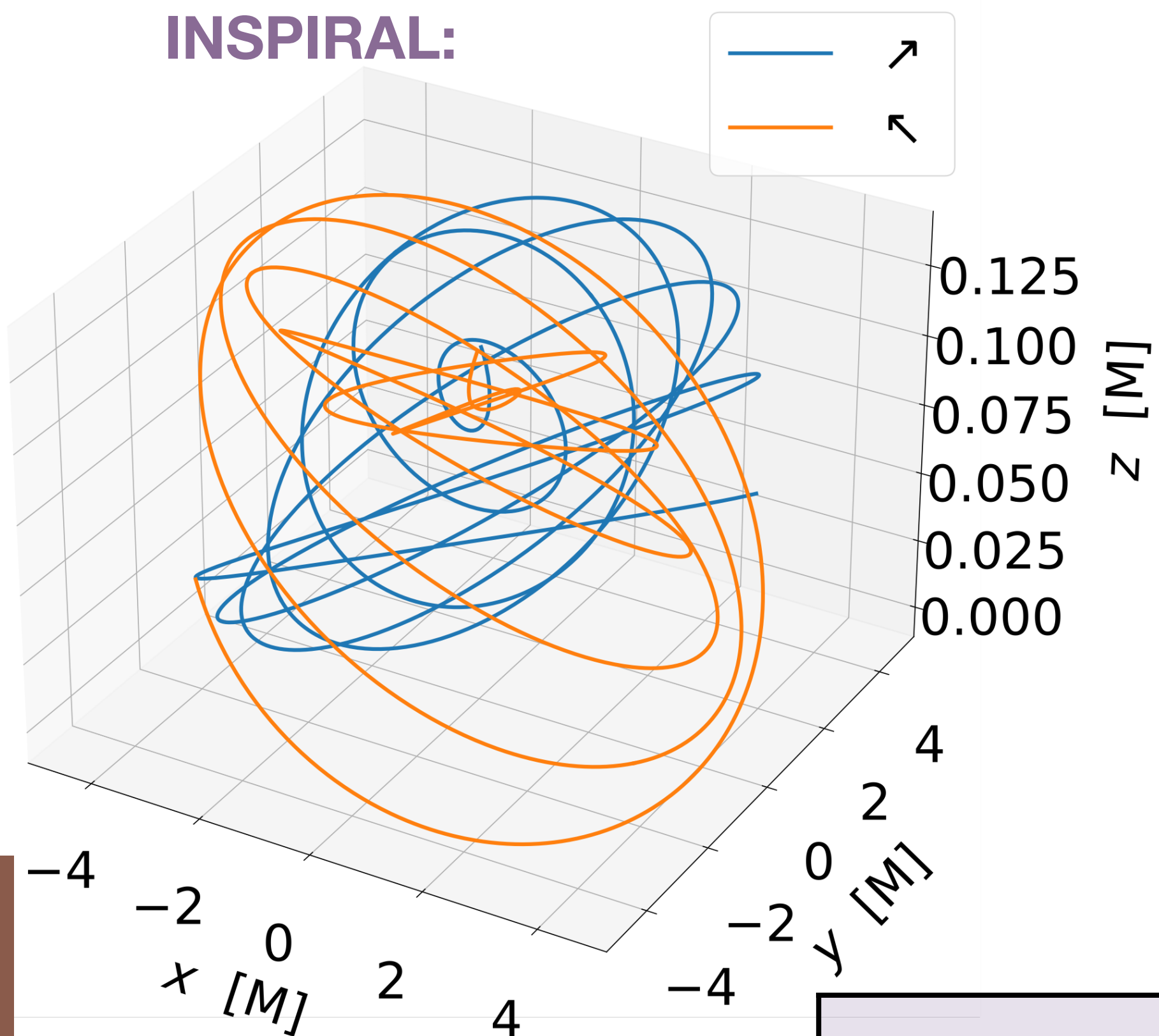
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

DINAMICA DEI BH

LATE
INSPIRAL:



- Precessione di orbita e spin durante l'inspiral
- BHB+45-45: kick lungo asse z
- BHB+45-135: kick lungo asse x, y, z

DOPO IL MERGER:

	$t_{\text{merger}}[M]$	$M_{\text{rem}}[M]$	a_{rem}	$u_{\text{kick}}[\text{kms}^{-1}]$
BH+45-45	2402	0.93	0.81	1793
BH+45-135	2018	0.95	0.69	767



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

BHB+45-45

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

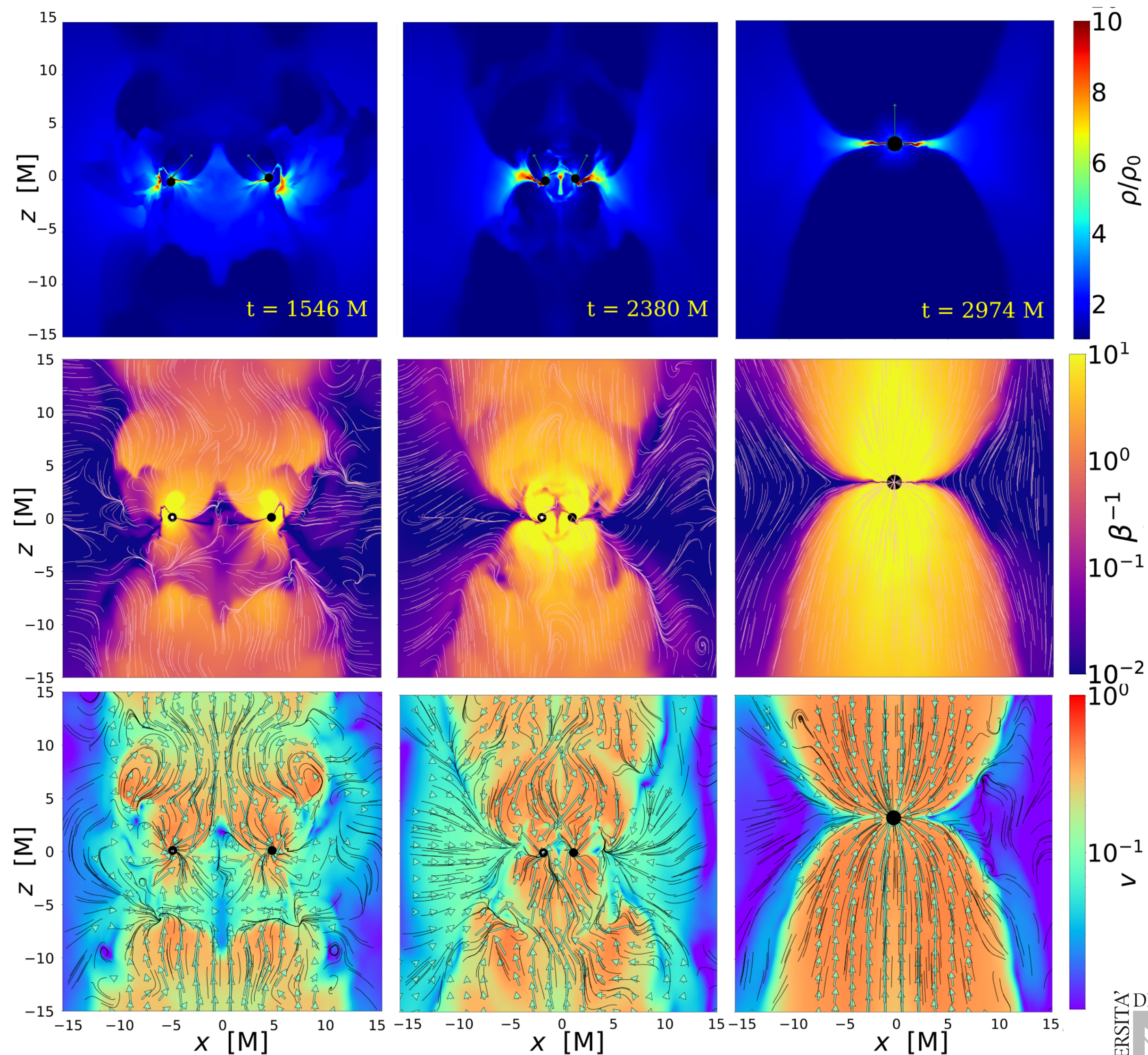
BHB+45-45

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

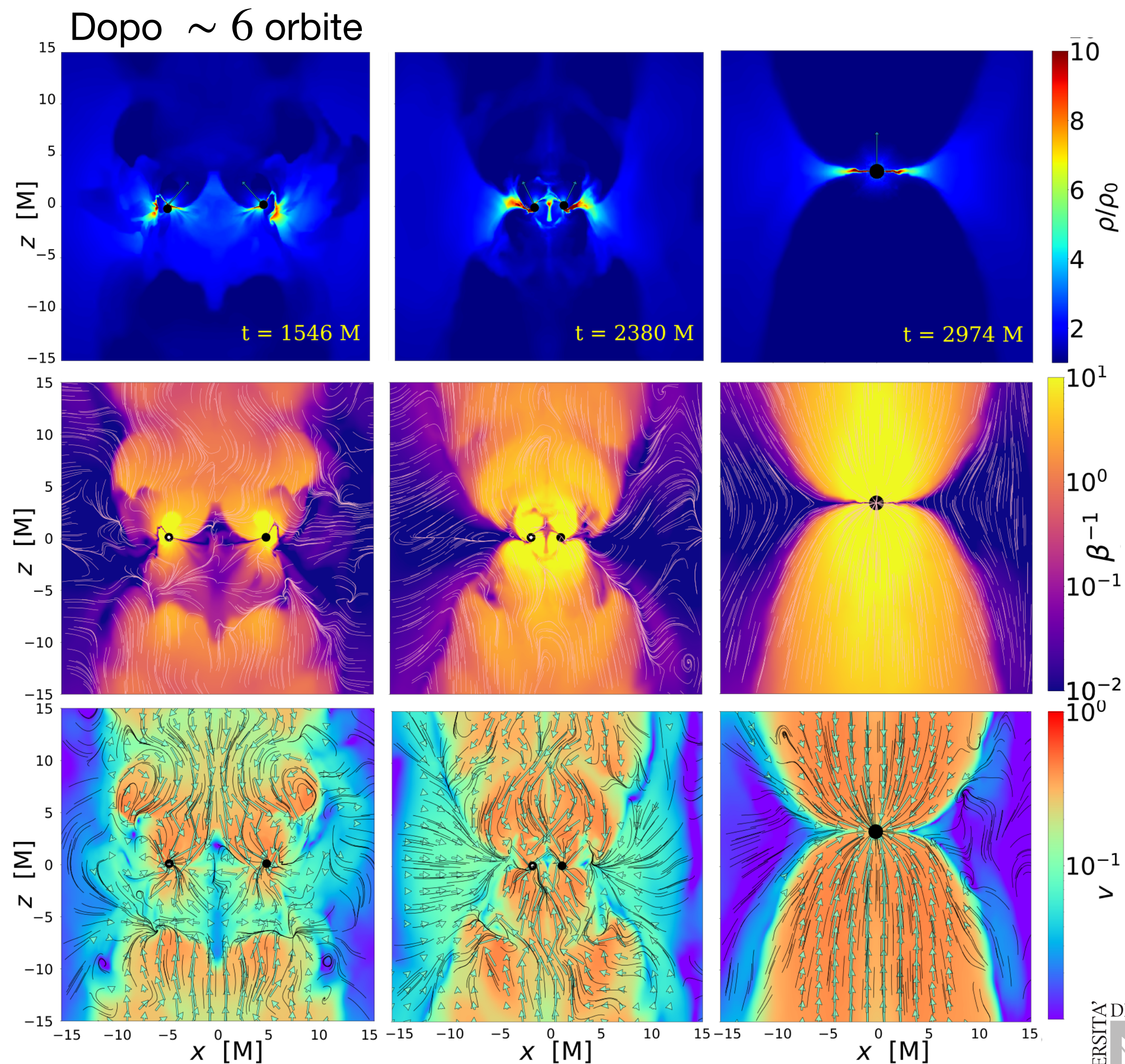
BHB+45-45

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

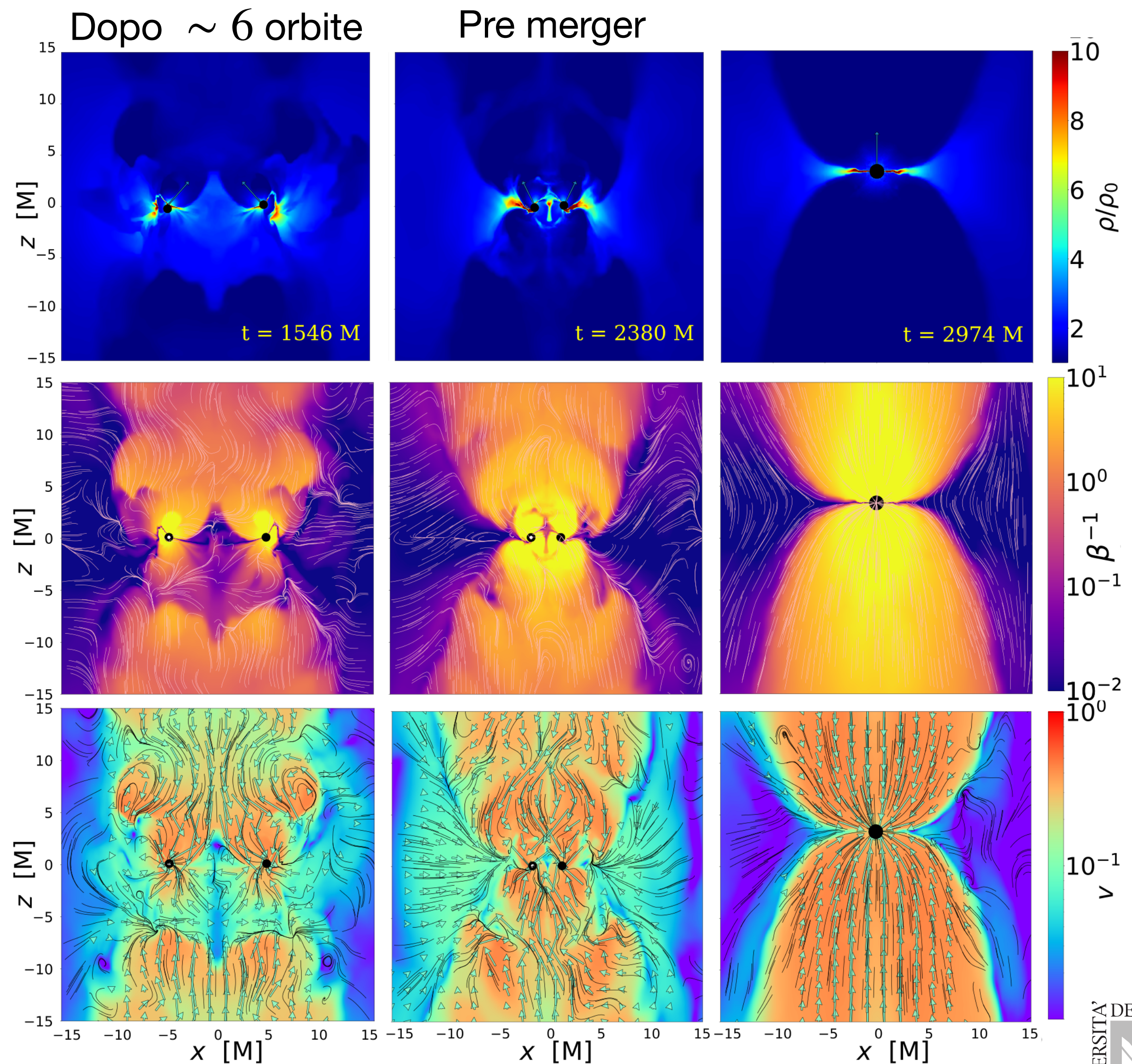
BHB+45-45

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

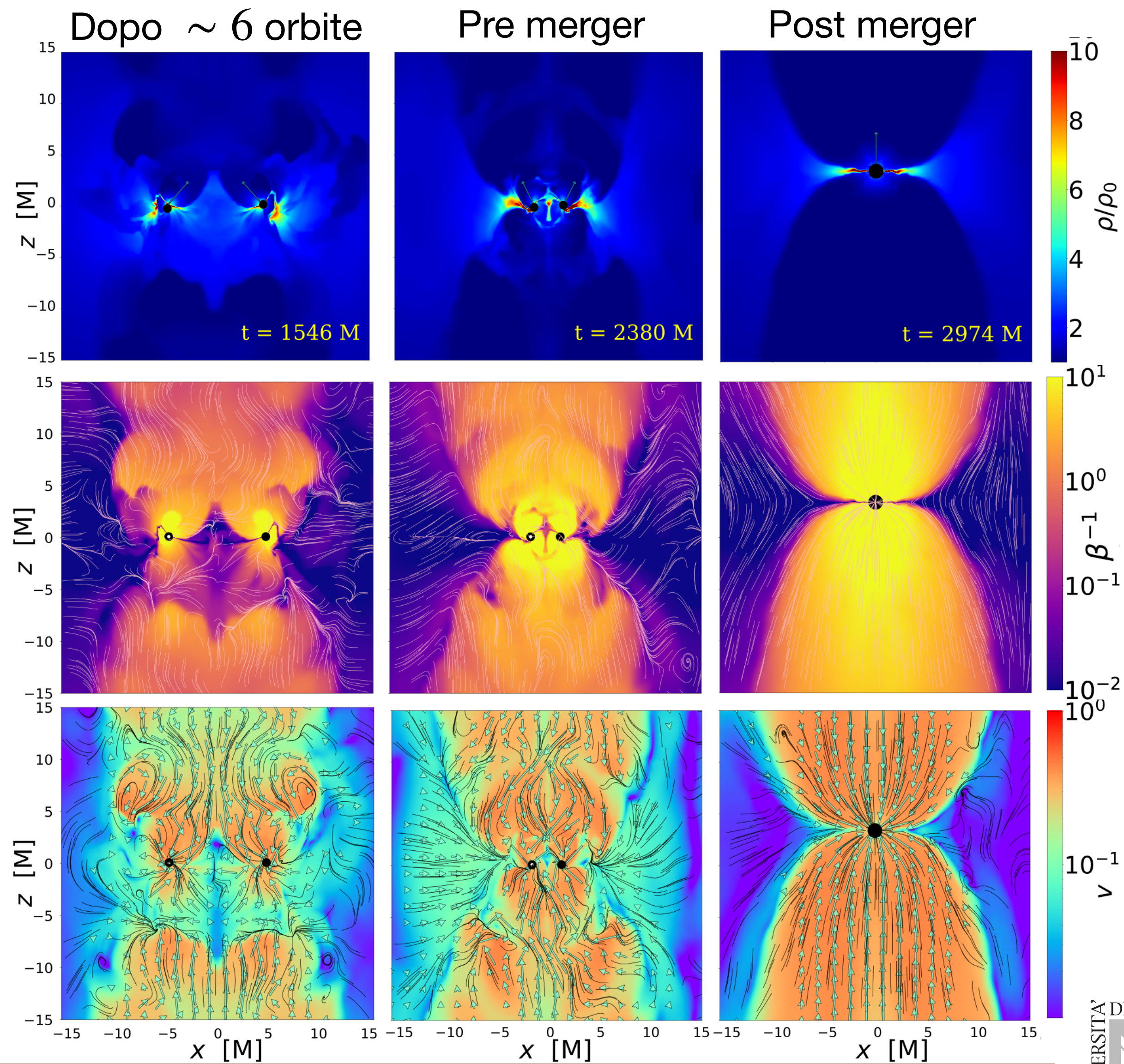
BHB+45-45

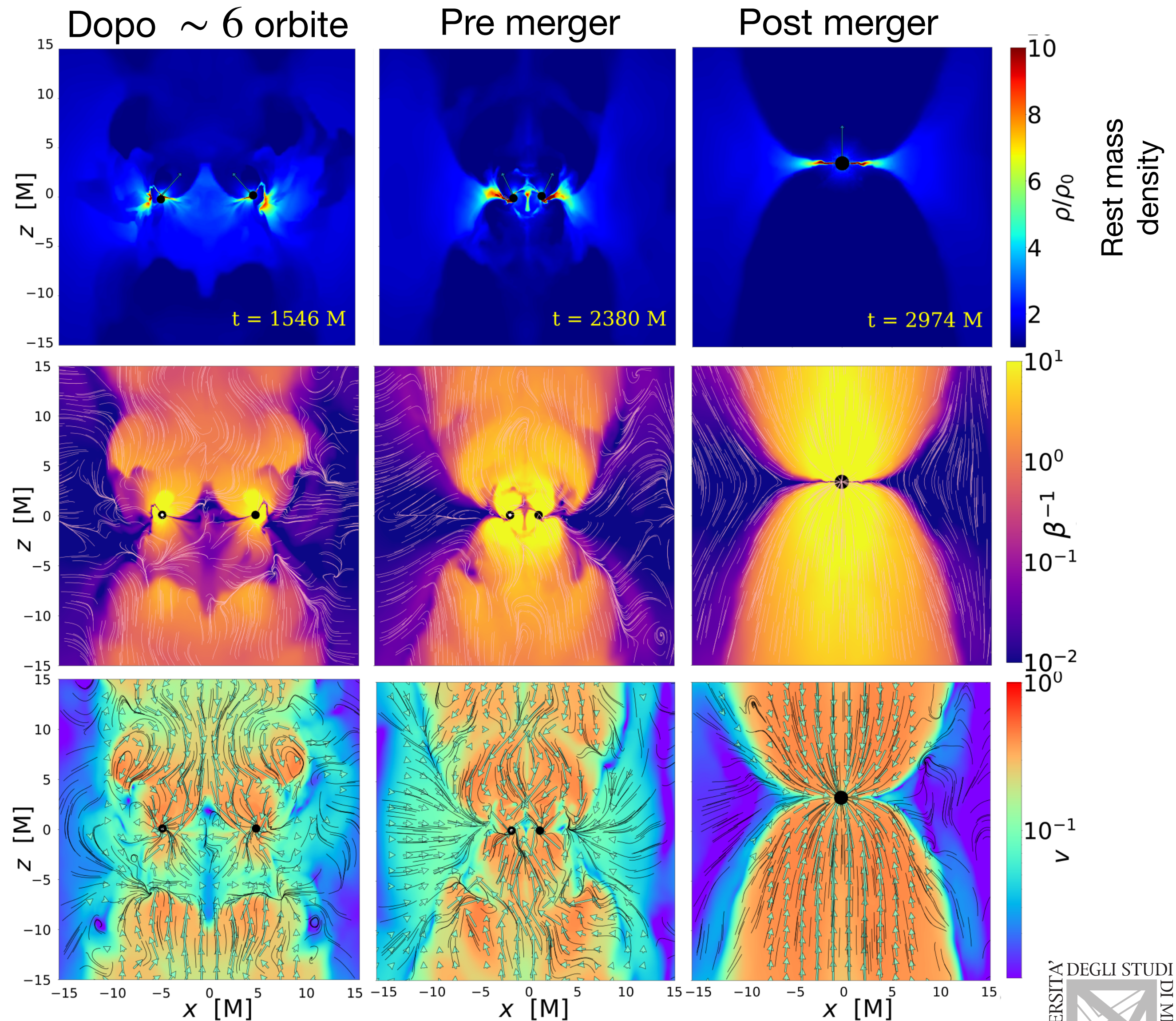
METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI





INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

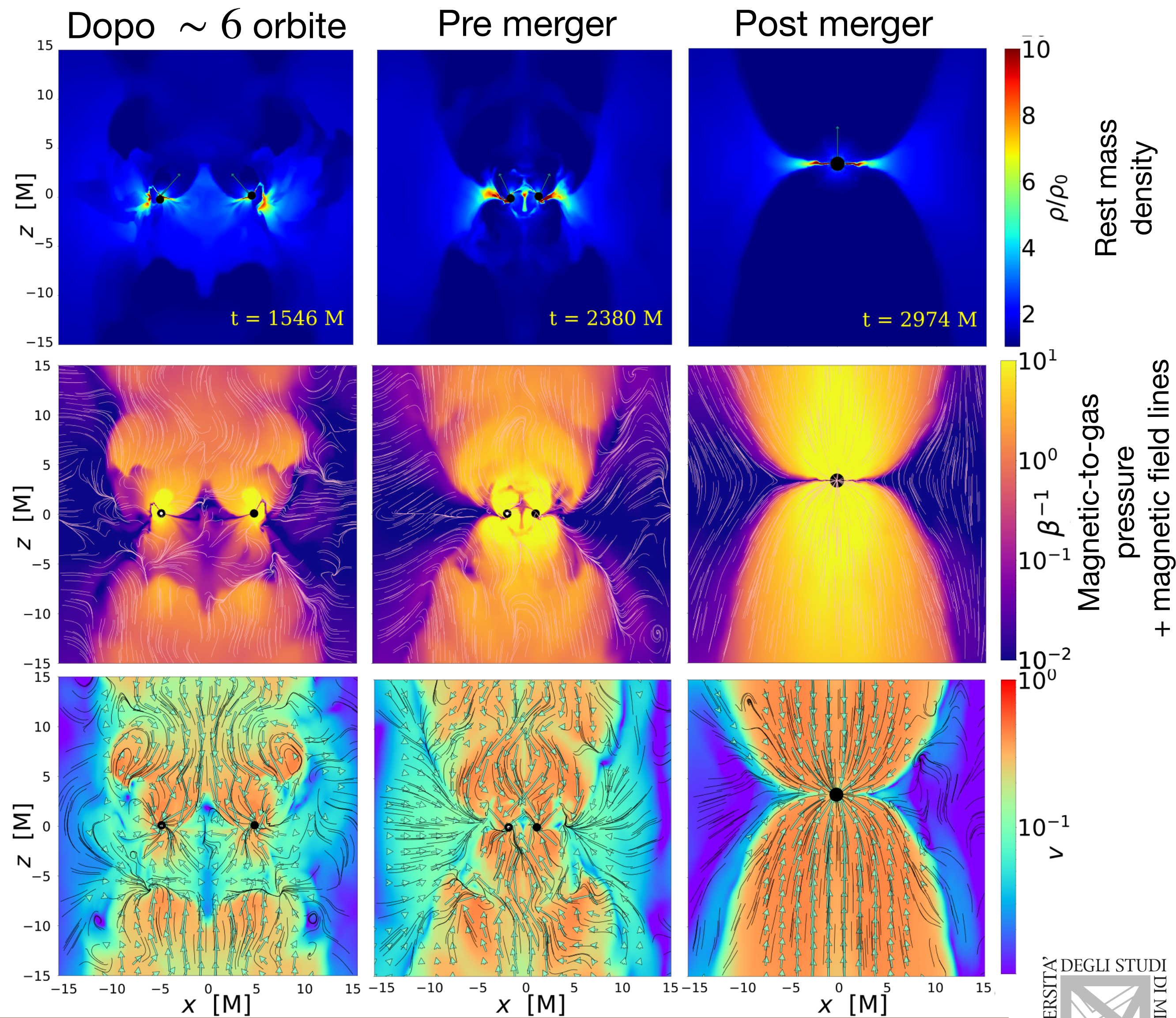
BHB+45-45

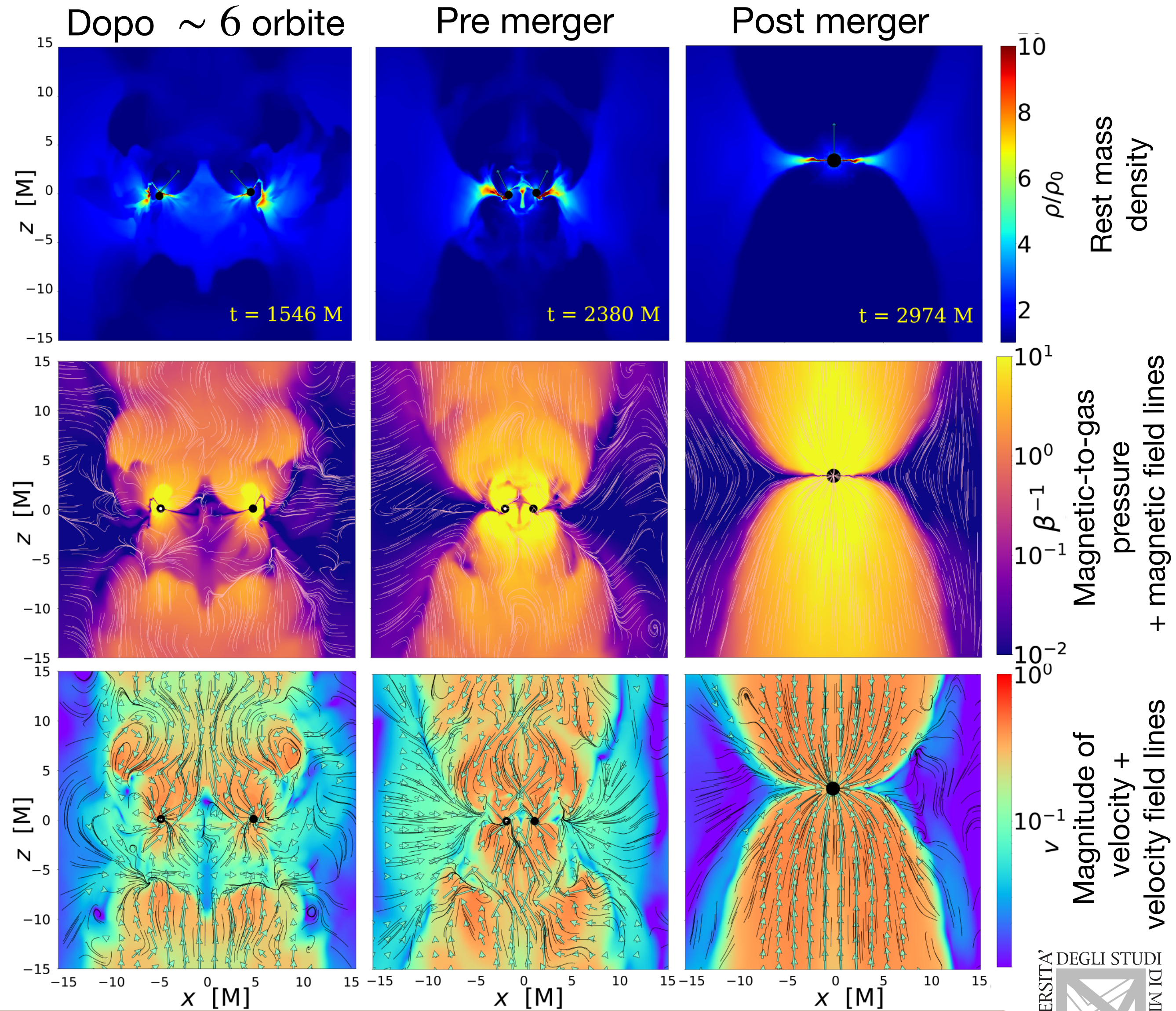
METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI





INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

BHB+45-45

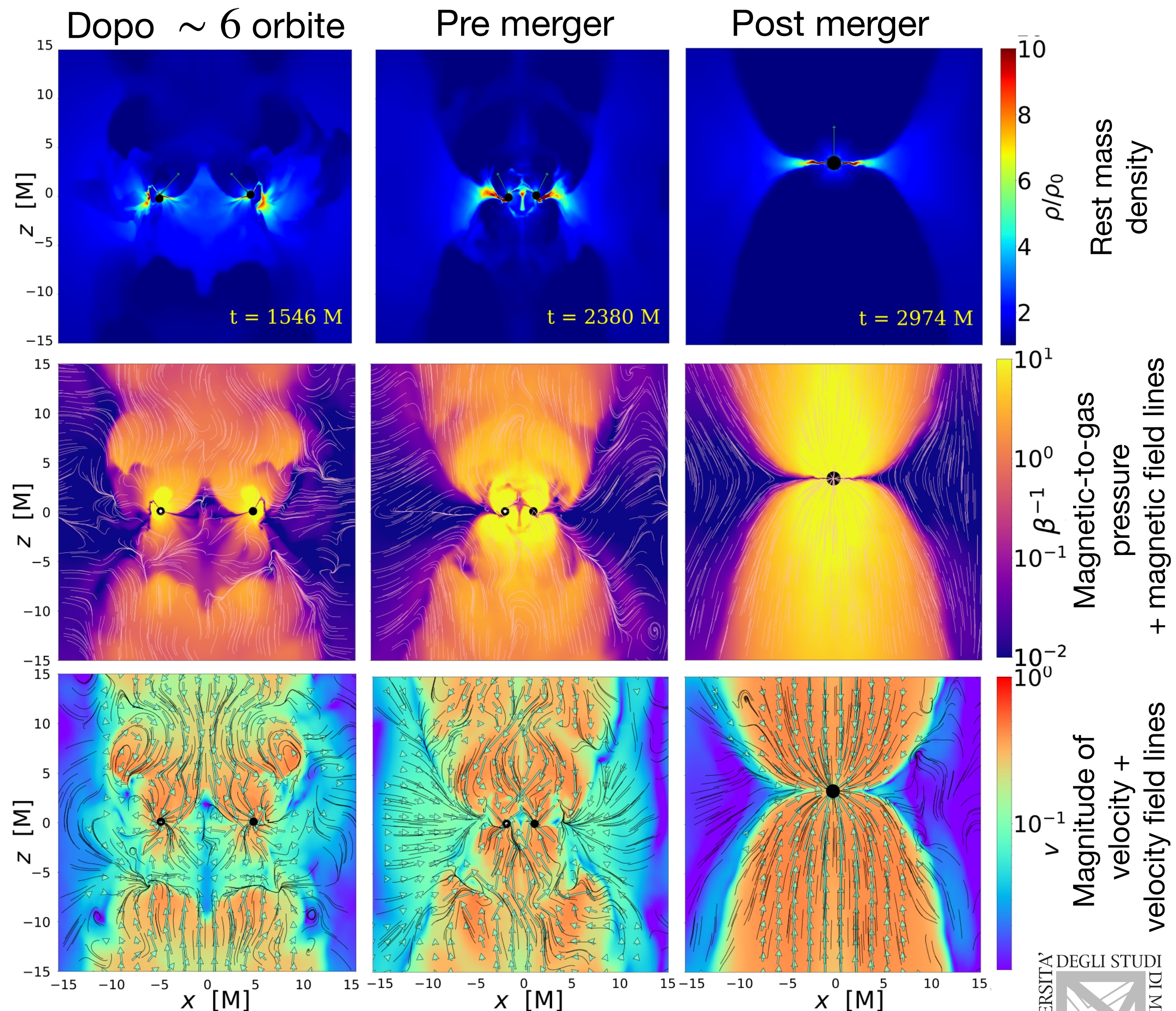
METODI

- BH inizialmente circondati da **sovradensità di materia** inclinate rispetto al piano orbitale. Dopo la fusione, il BH finale è circondato da una distribuzione **a disco** sottile e ad alta densità di materiale in accrescimento

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

BHB+45-45

METODI

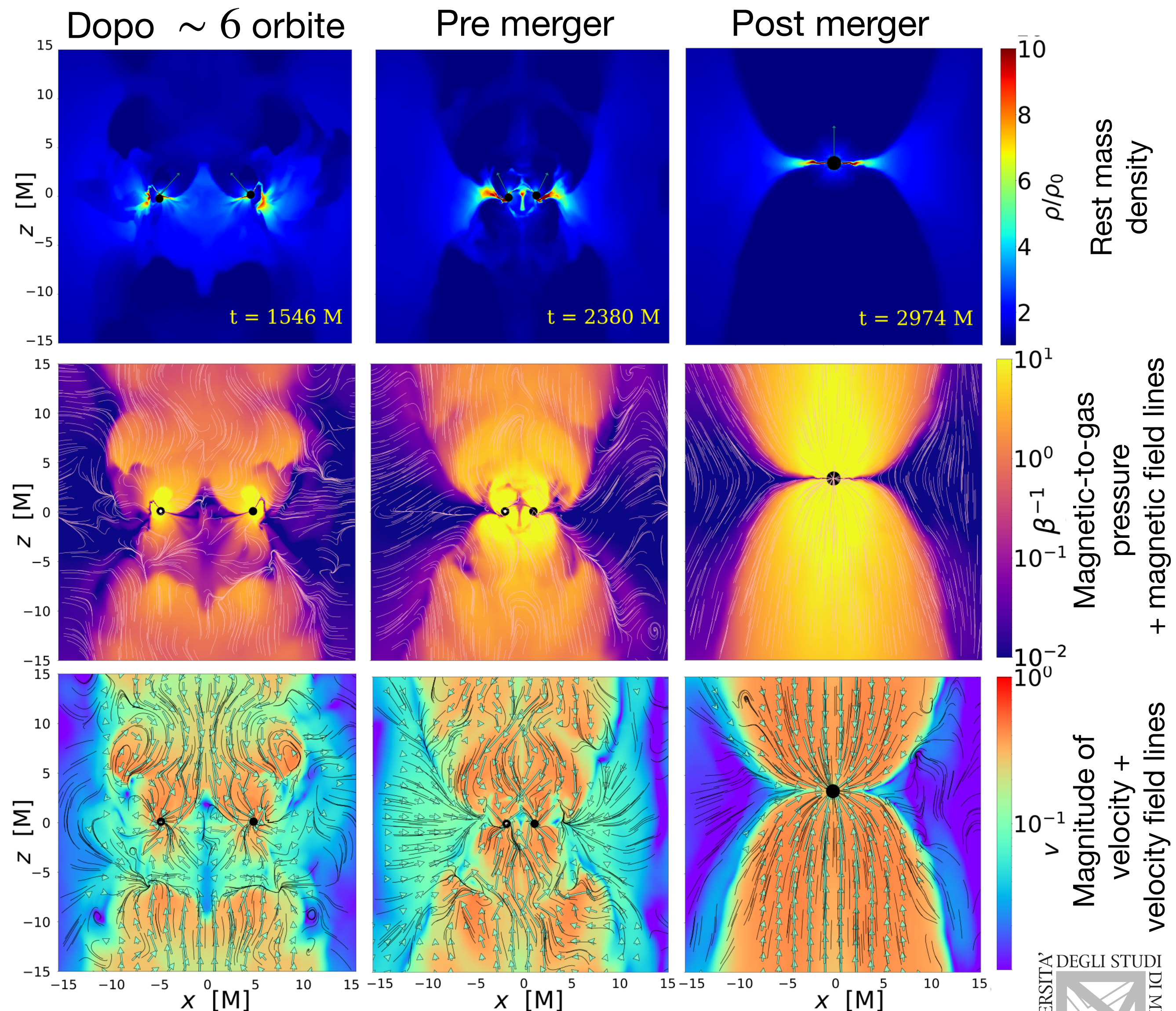
- BH inizialmente circondati da **sovradensità di materia** inclinate rispetto al piano orbitale. Dopo la fusione, il BH finale è circondato da una distribuzione **a disco** sottile e ad alta densità di materiale in accrescimento

- Il **campo magnetico** viene “trascinato” attorno a ciascun BH. La regione polare, dopo la fusione, è magneticamente dominata. L'intensità del campo magnetico è aumentata di un fattore 10^2

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



INTRO

DINAMICA GAS E CAMPO MAGNETICO

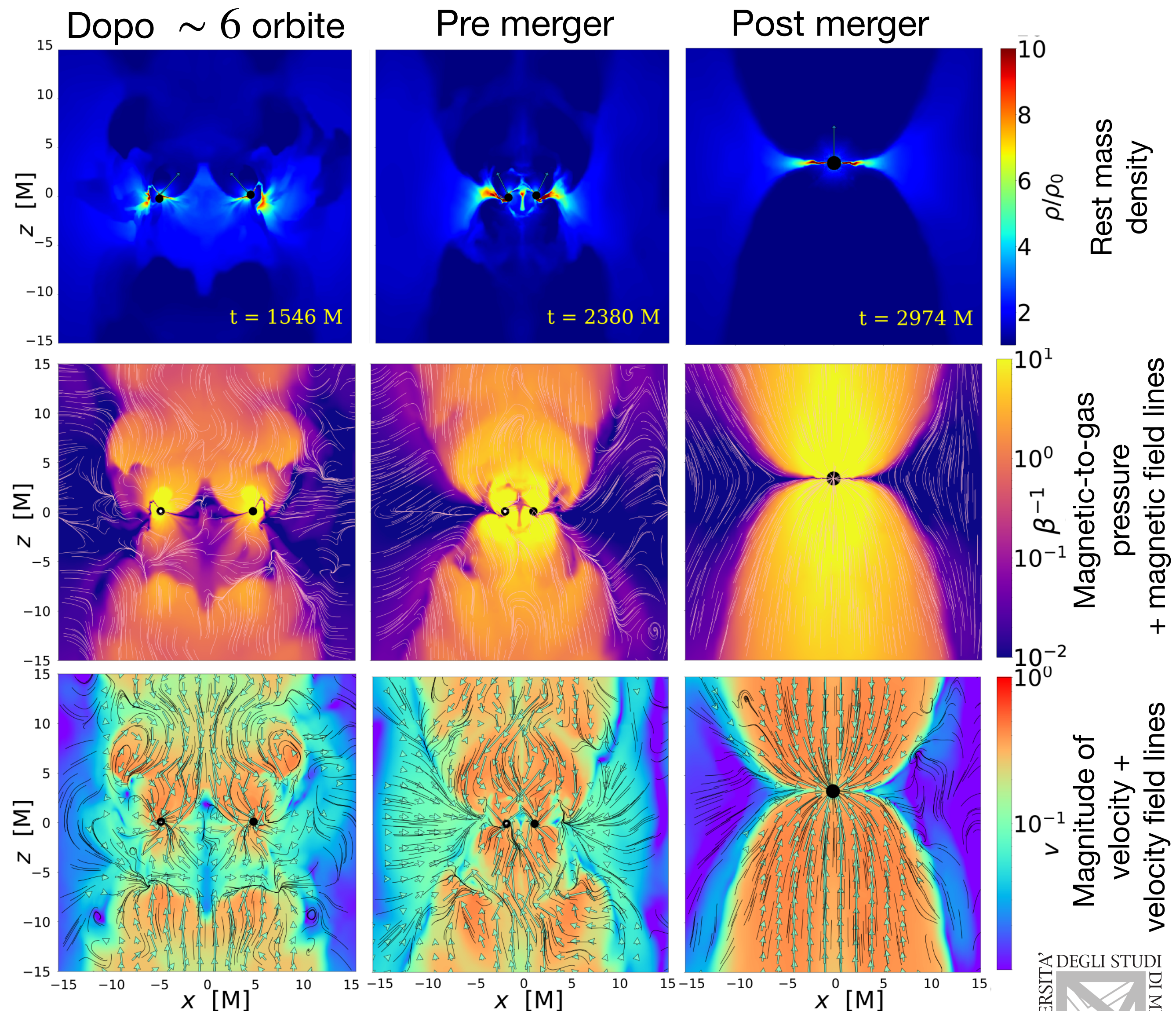
BHB+45-45

METODI

- BH inizialmente circondati da **sovradensità di materia** inclinate rispetto al piano orbitale. Dopo la fusione, il BH finale è circondato da una distribuzione **a disco** sottile e ad alta densità di materiale in accrescimento

- Il **campo magnetico** viene “trascinato” attorno a ciascun BH. La regione polare, dopo la fusione, è magneticamente dominata. L'intensità del campo magnetico è aumentata di un fattore 10^2

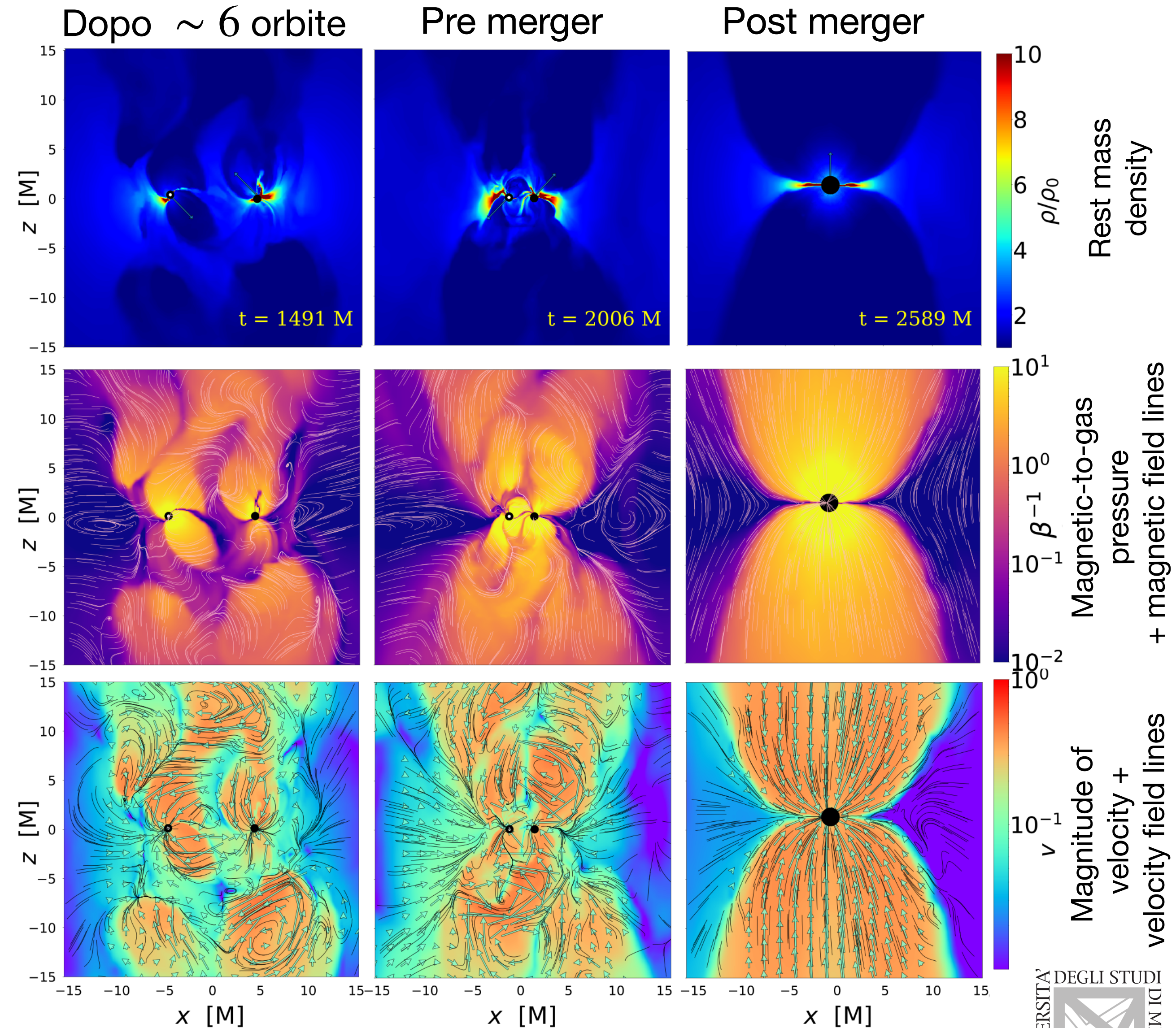
- La **velocità** del gas è maggiore nelle aree magneticamente dominate. Il gas magnetizzato mostra turbolenze nelle regioni vicine ai BH.



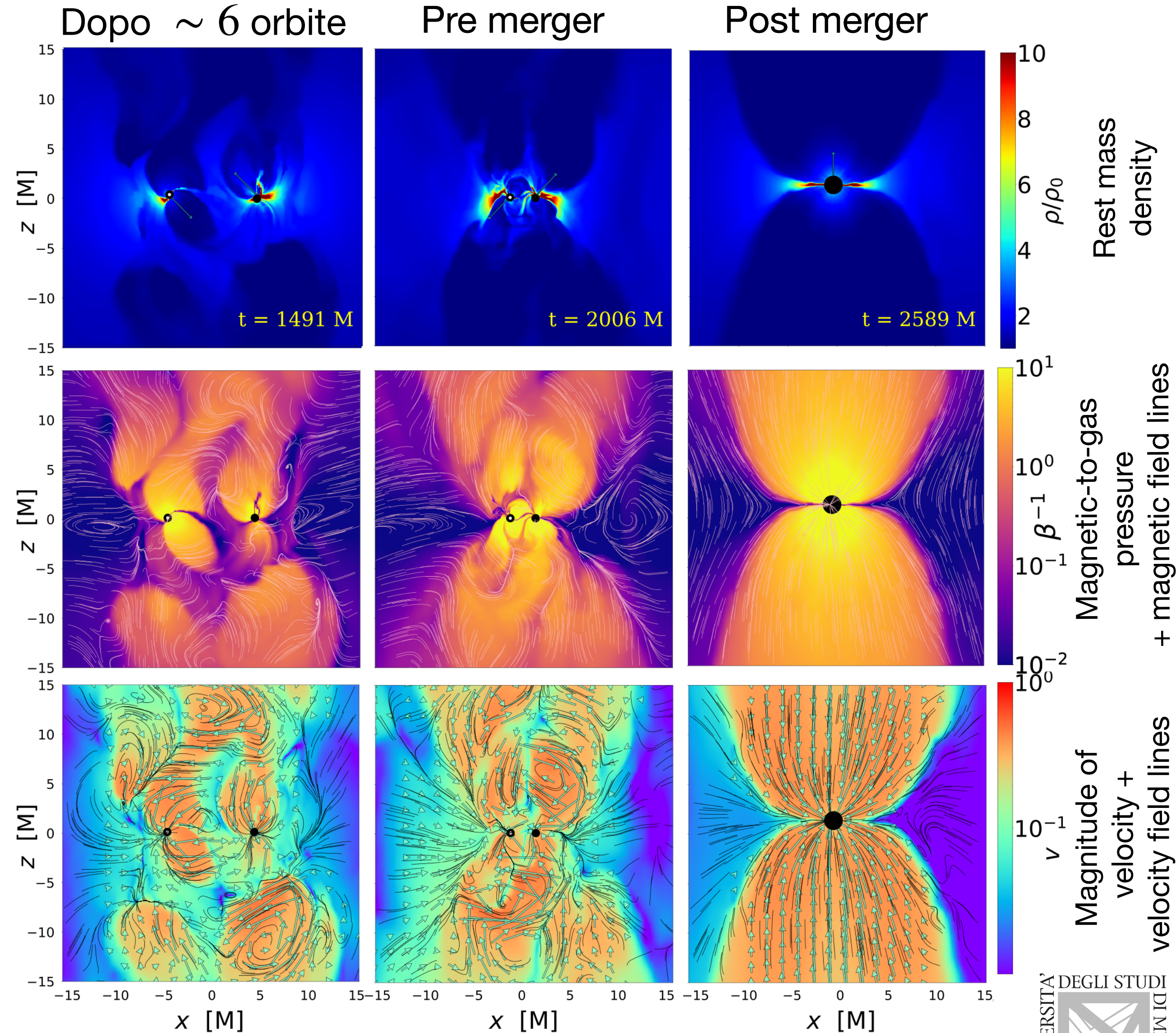
SETUP

RISULTATI

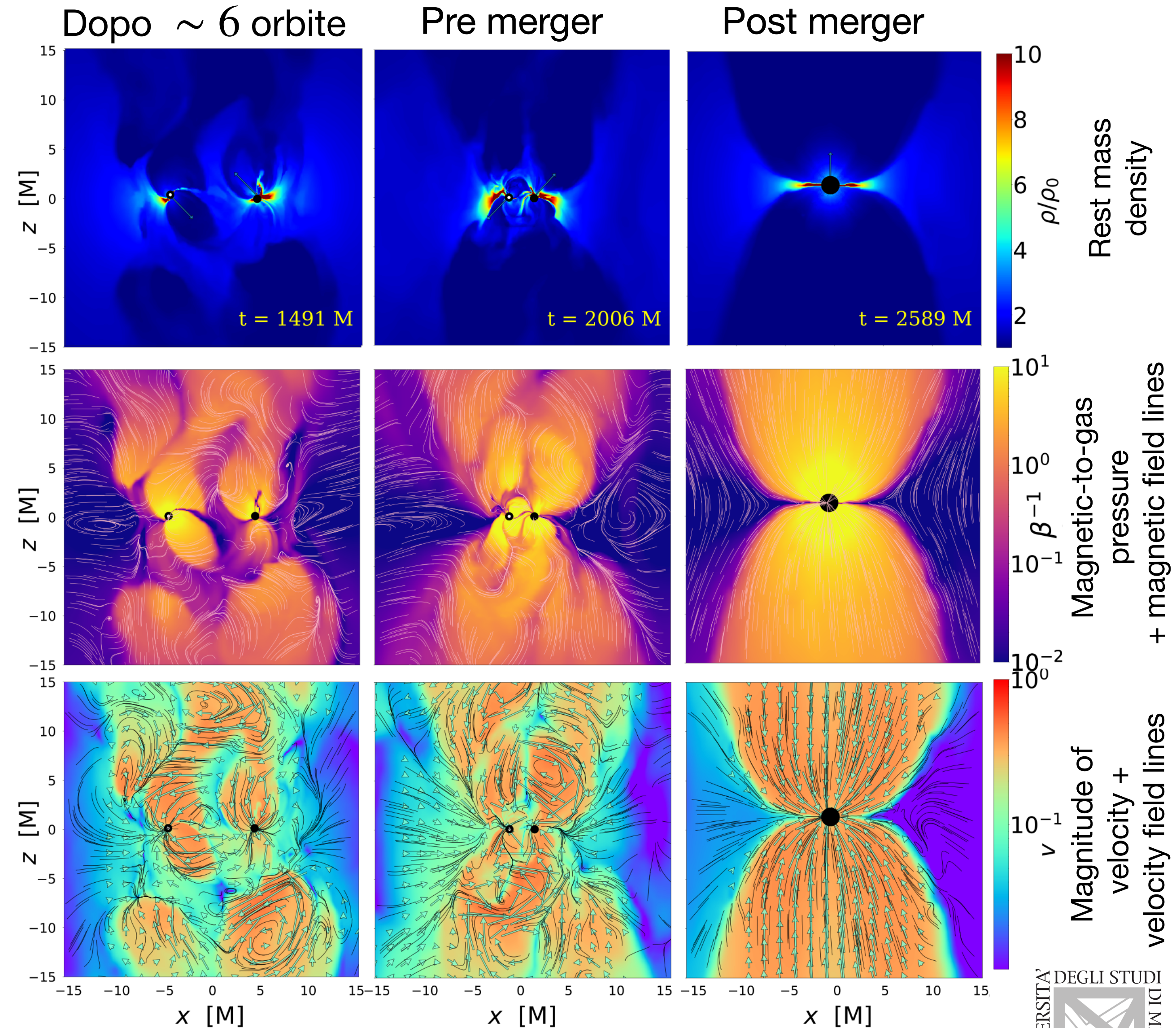
CONCLUSIONI



- **Inspiral:** più turbolento, asimmetrico



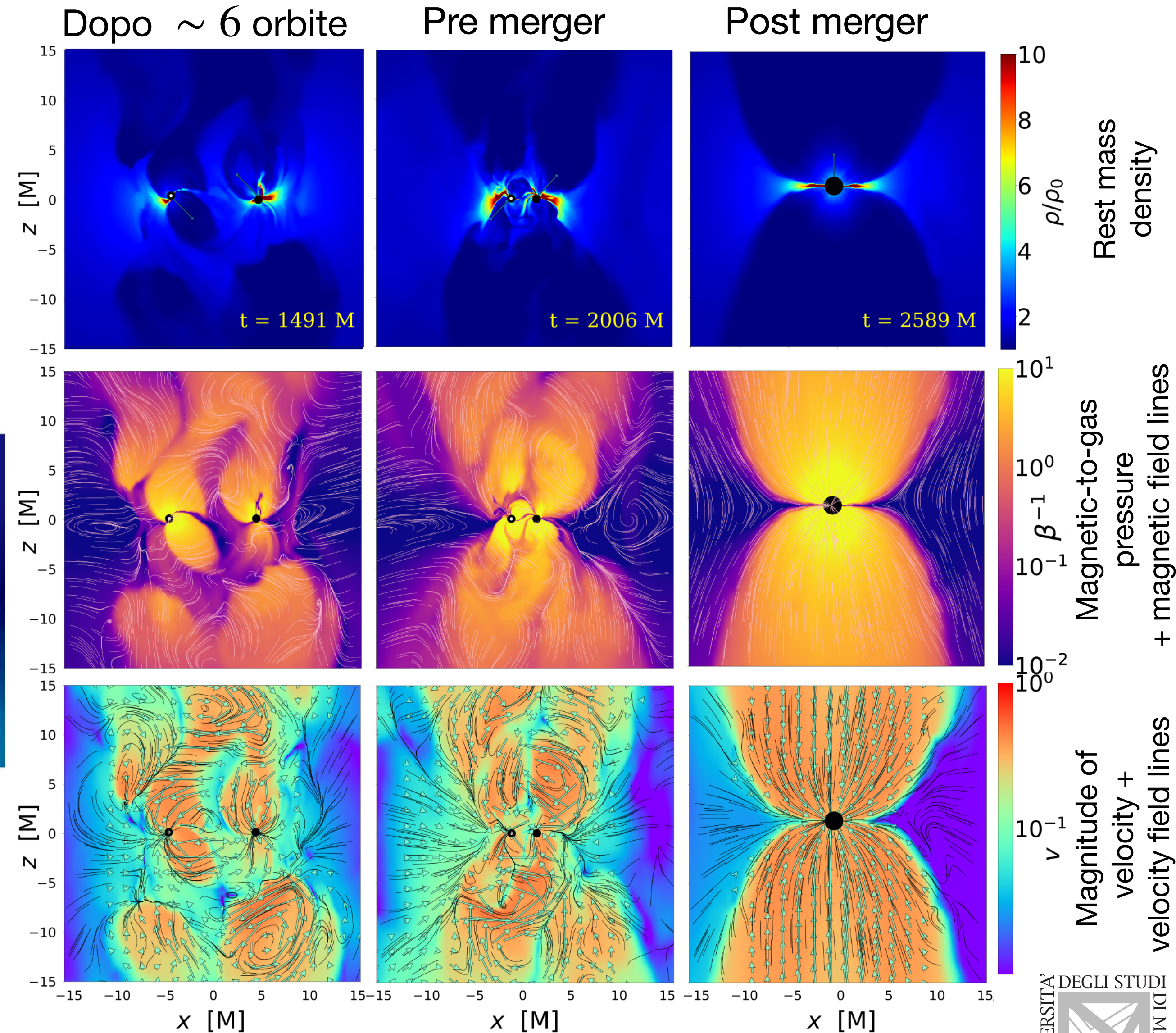
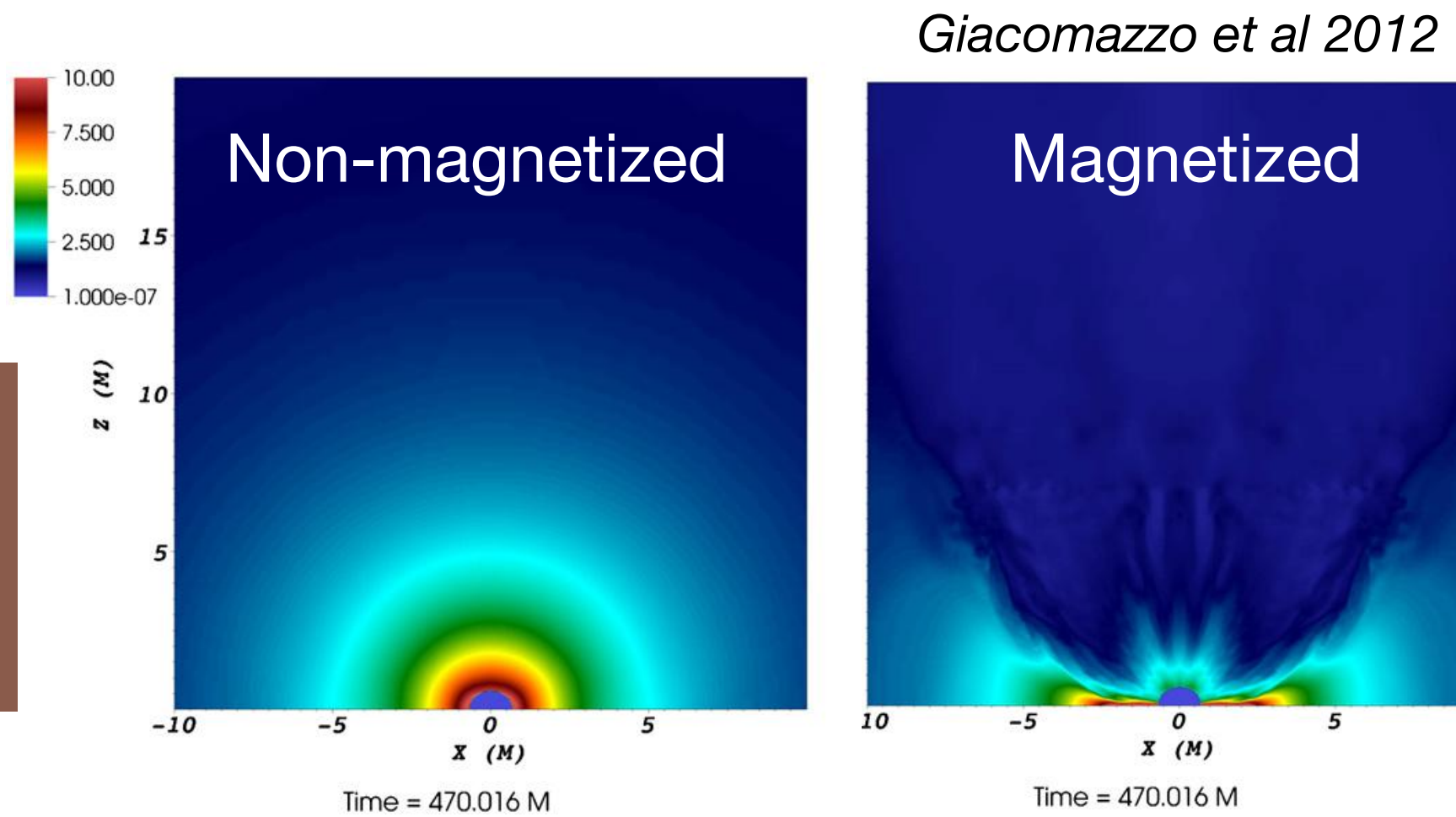
- **Inspiral:** più turbolento, asimmetrico
- **Post-merger:** analogo a BHB+45-45



METODI

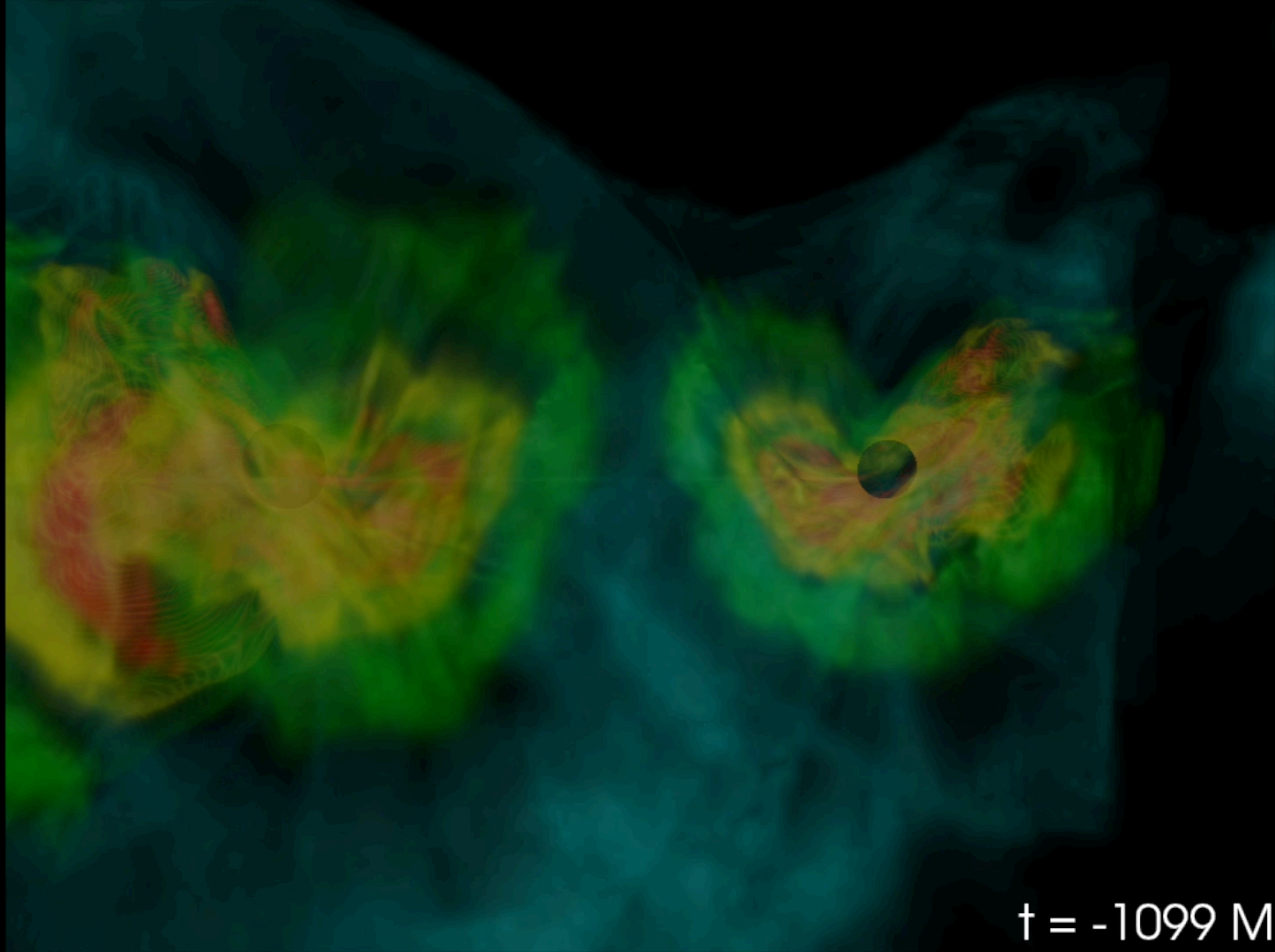
- **Inspiral:** più turbolento, asimmetrico
- **Post-merger:** analogo a BHB+45-45

SETUP



RISULTATI

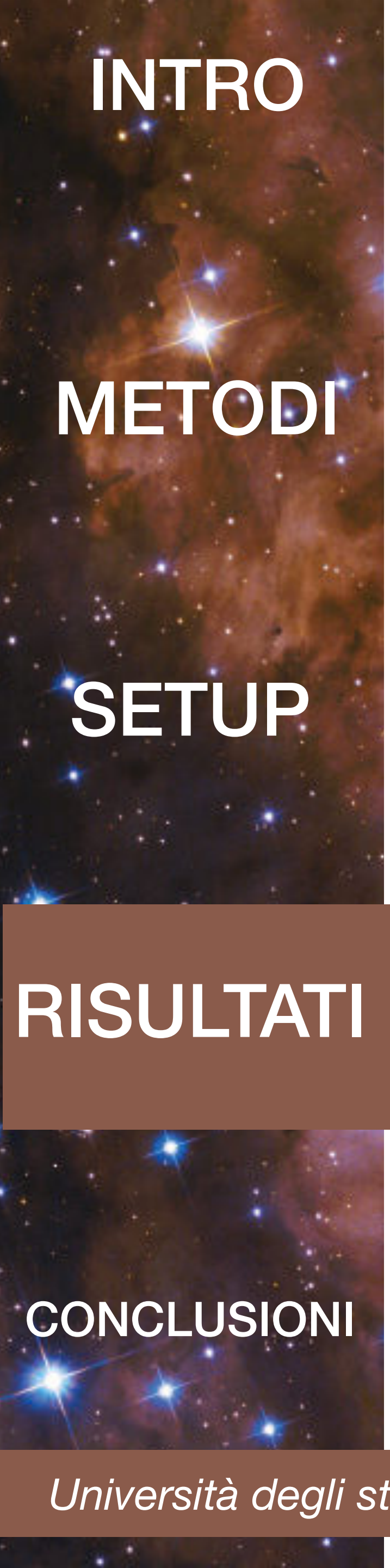
CONCLUSIONI



$\dagger = -1099 \text{ M}$

EMISSIONE EM

Emissione EM



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di *accretion luminosity*:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

EMISSIONE EM

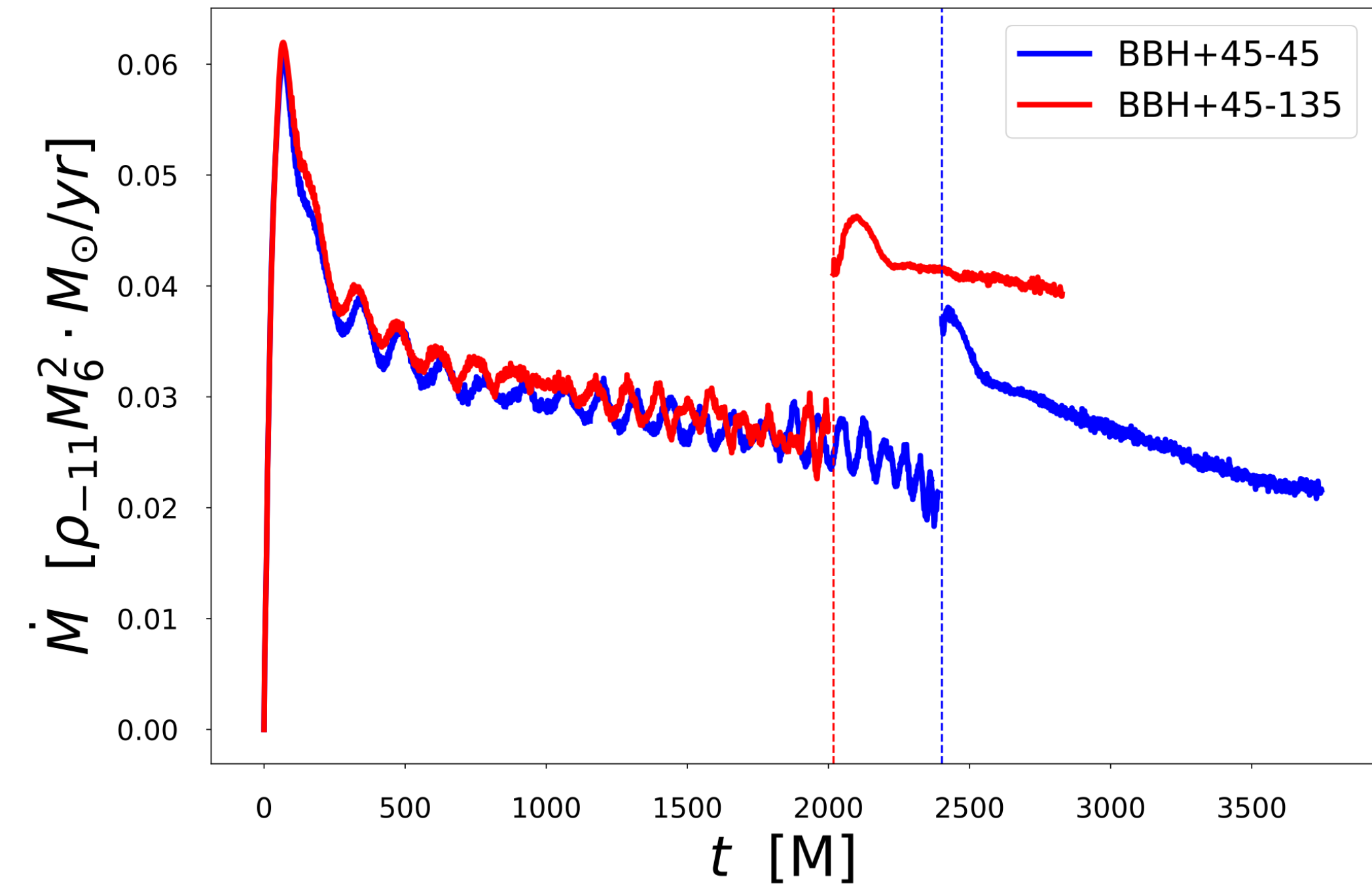
Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di *accretion luminosity*:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

MASS ACCRETION RATE TOTALE



METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

EMISSIONE EM

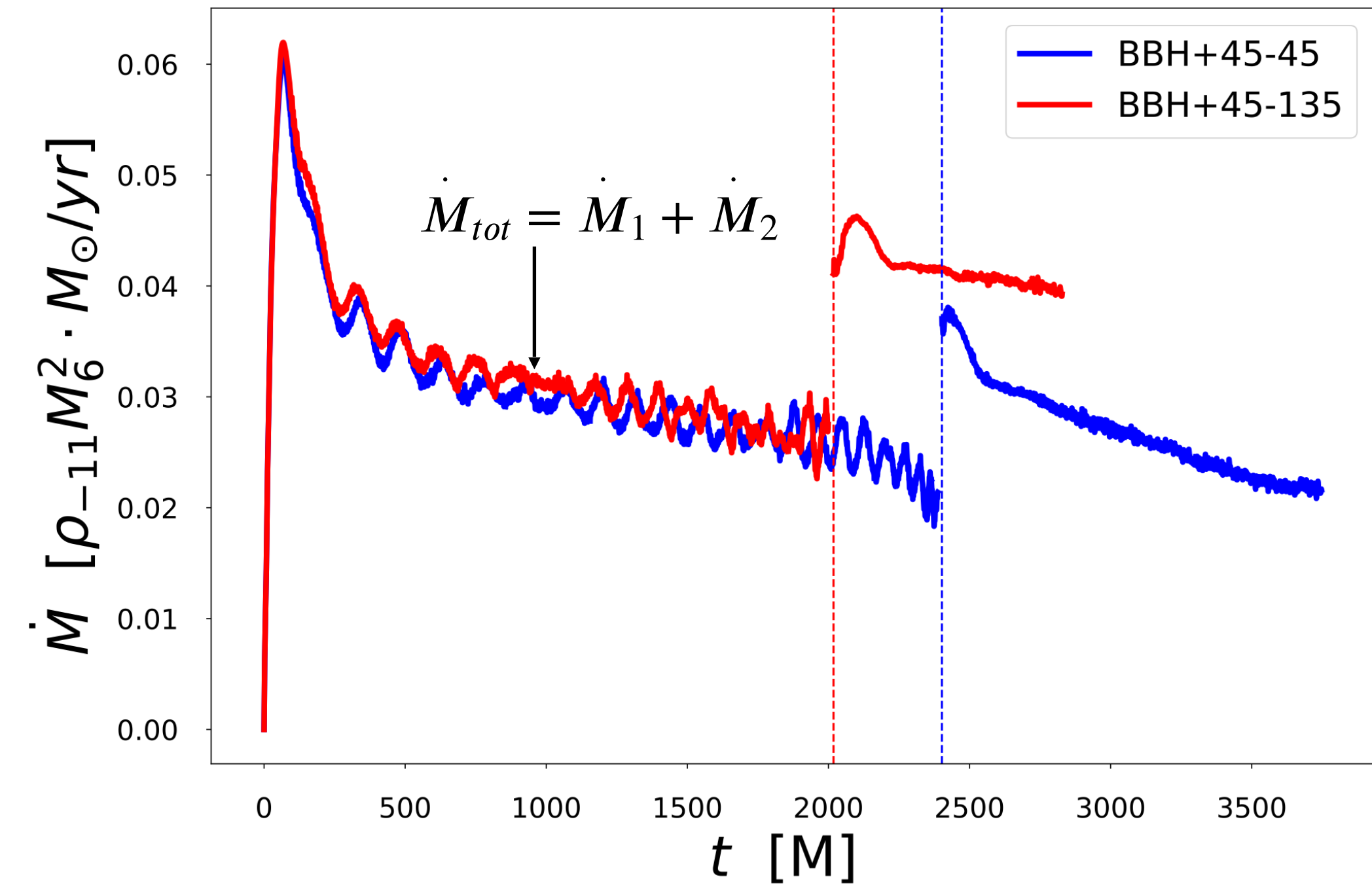
Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di *accretion luminosity*:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

MASS ACCRETION RATE TOTALE



METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

EMISSIONE EM

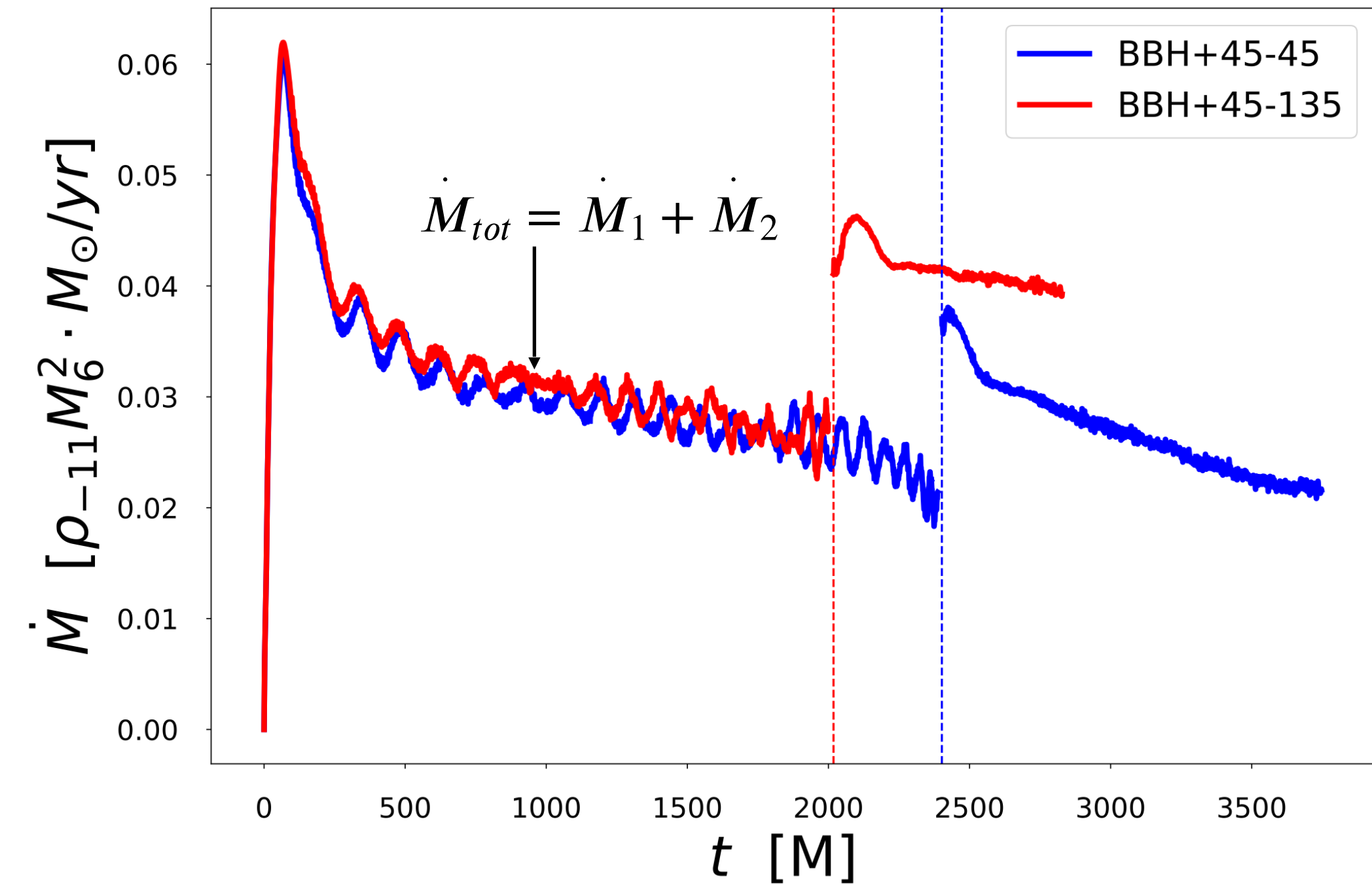
Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di *accretion luminosity*:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

MASS ACCRETION RATE TOTALE



modulazioni quasi - periodiche

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EMISSIONE EM

INTRO

METODI

SETUP

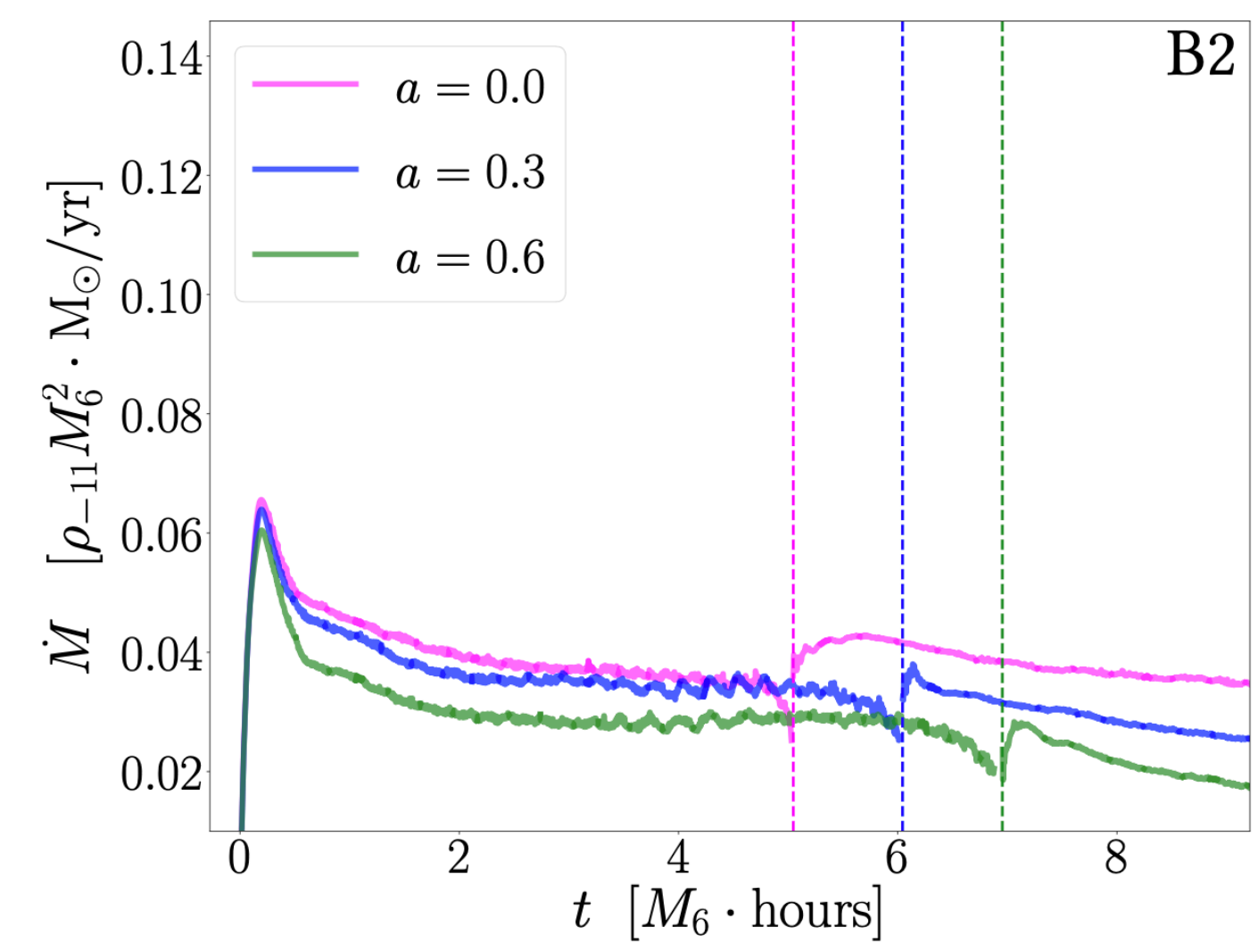
RISULTATI

CONCLUSIONI

Emissione EM

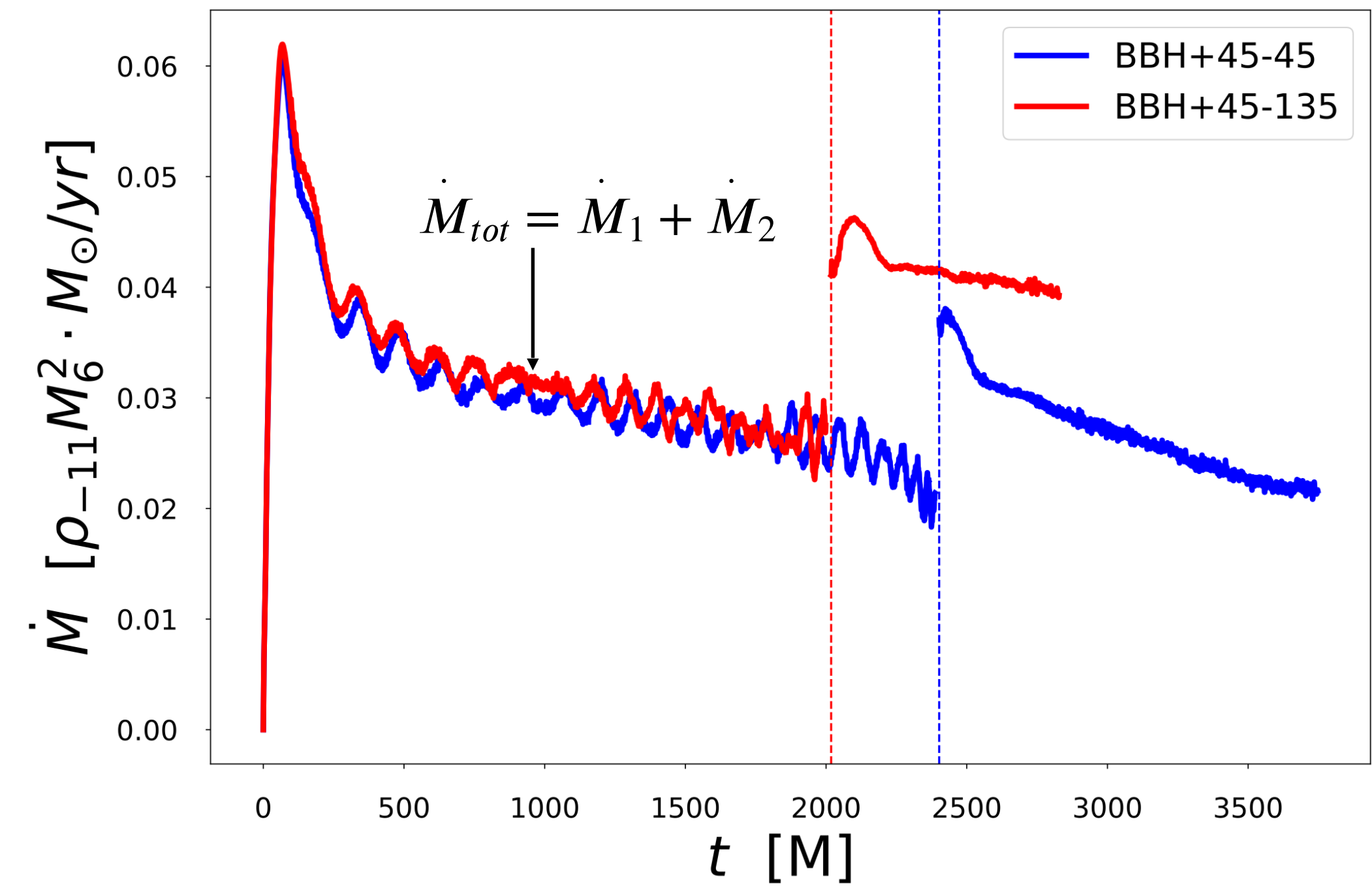
→ **MASS ACCRETION RATE \dot{M} :**
 Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



Cattorini et al 2021

MASS ACCRETION RATE TOTALE



modulazioni quasi - periodiche

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

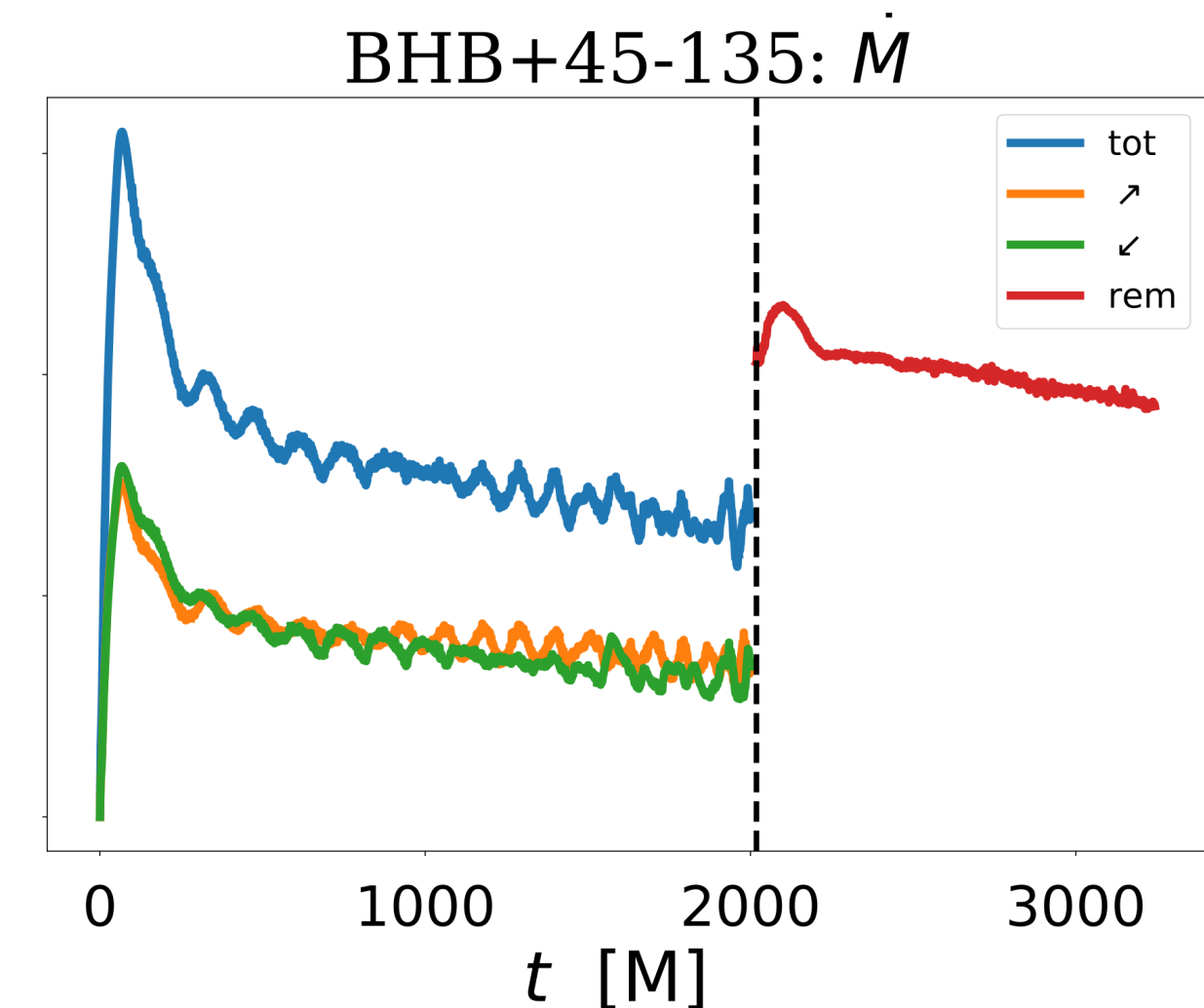
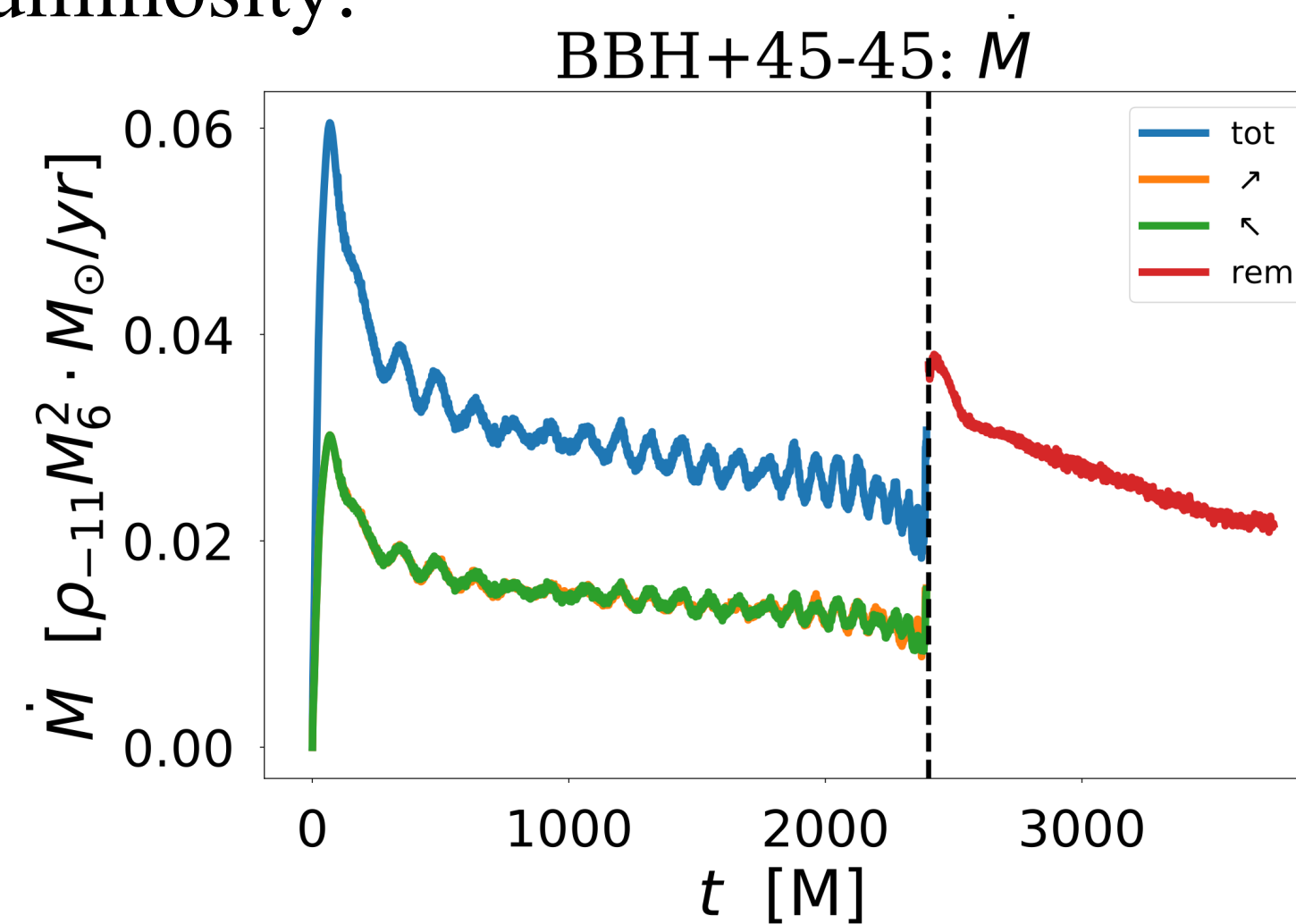
EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

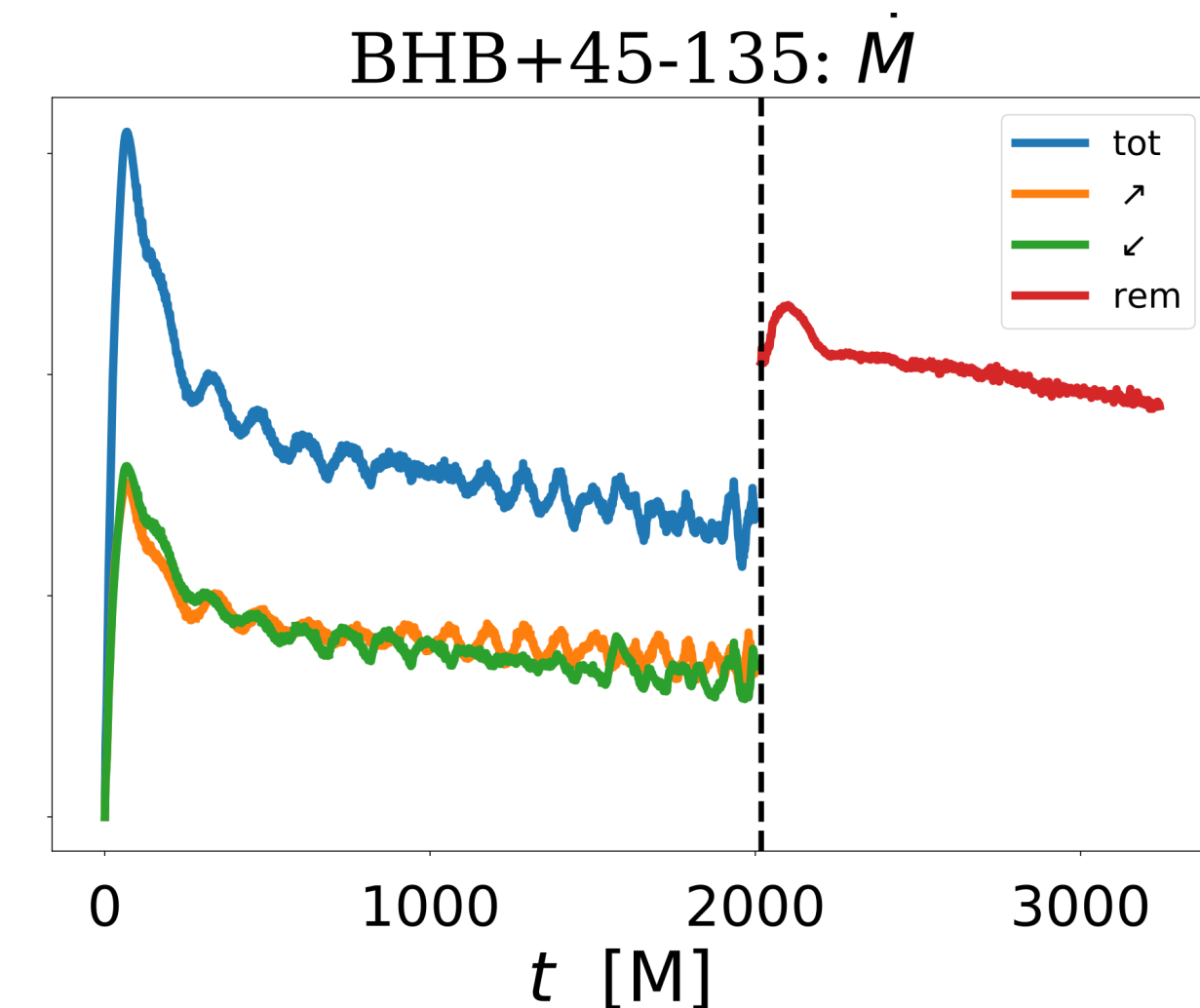
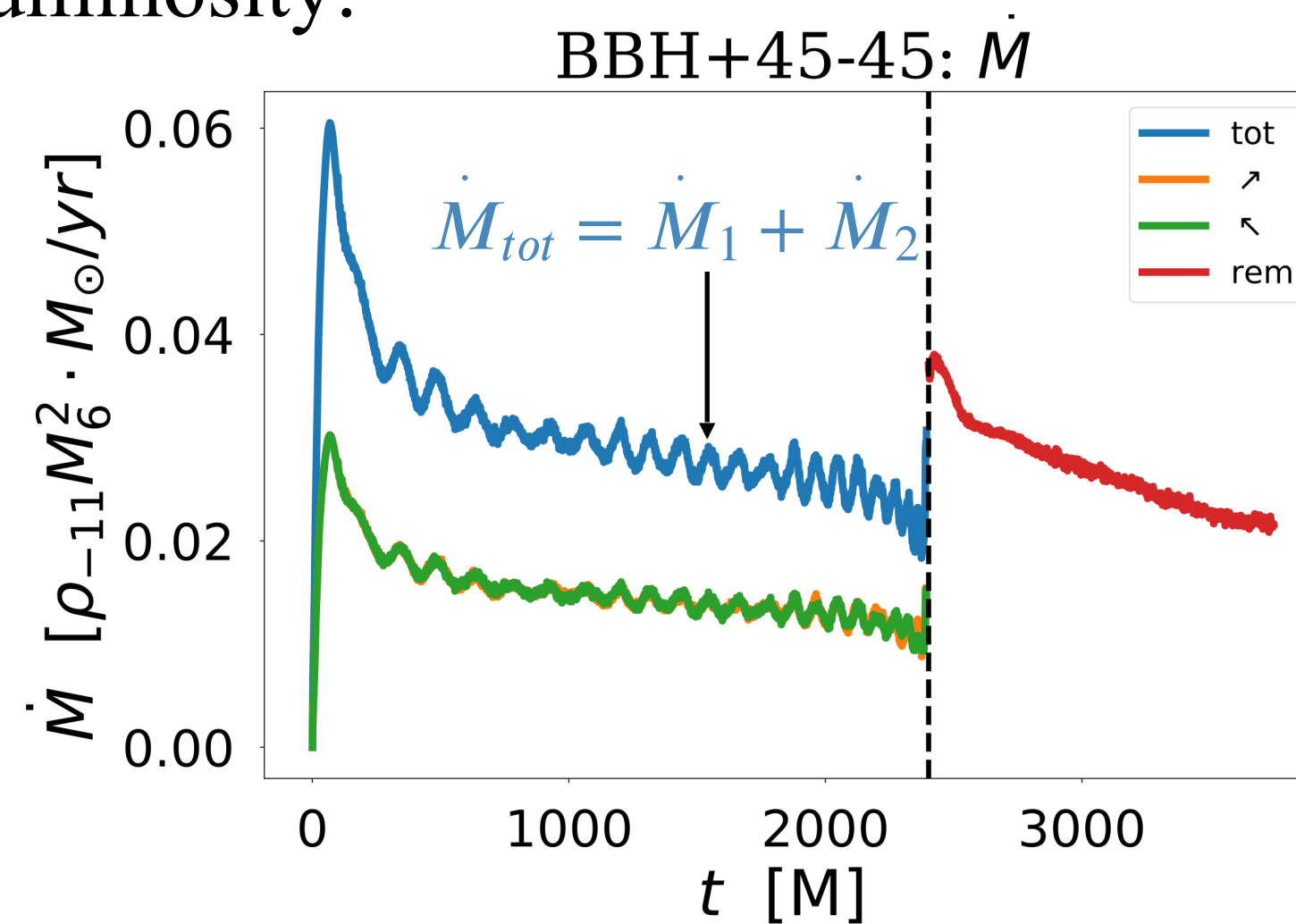
EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

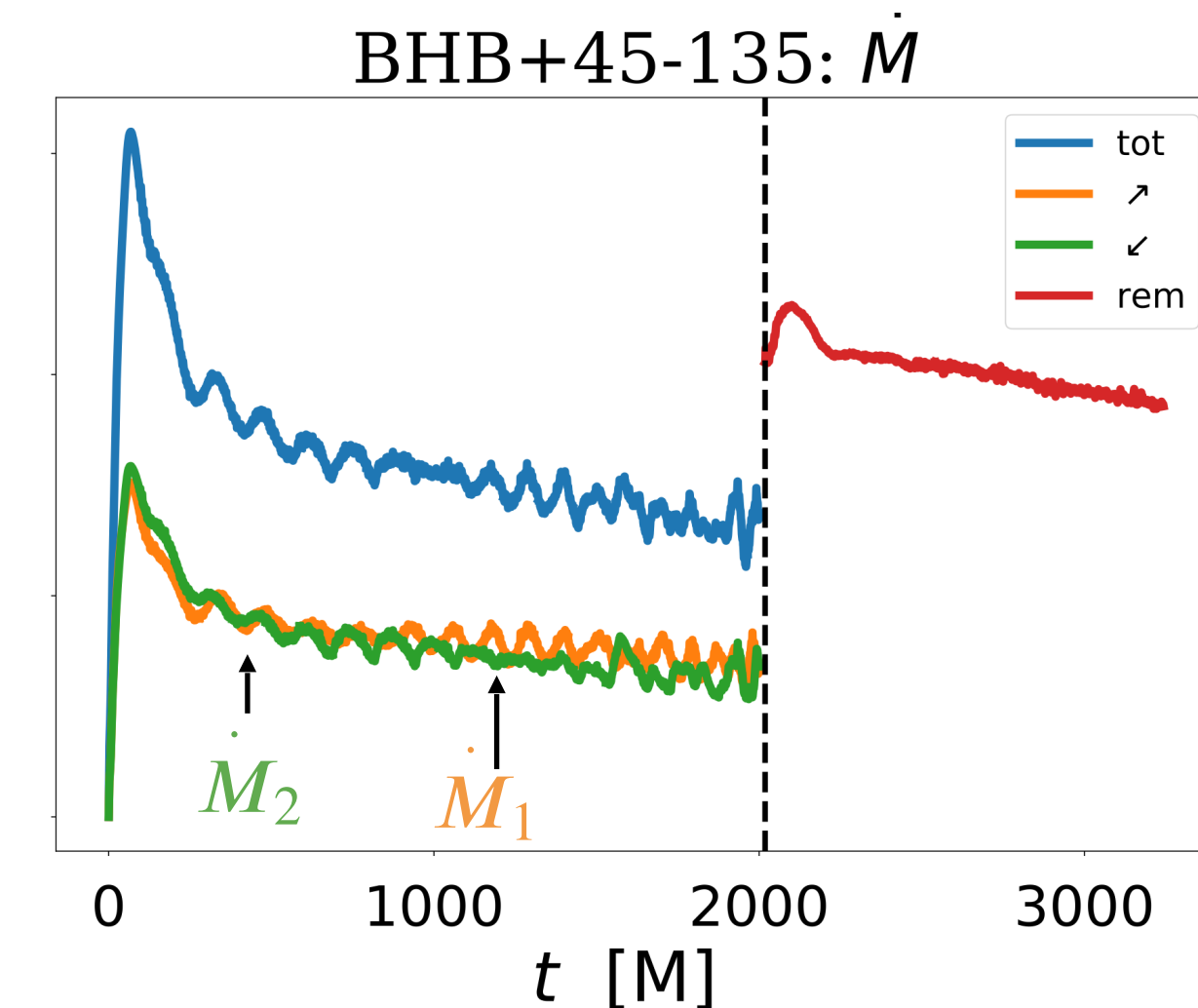
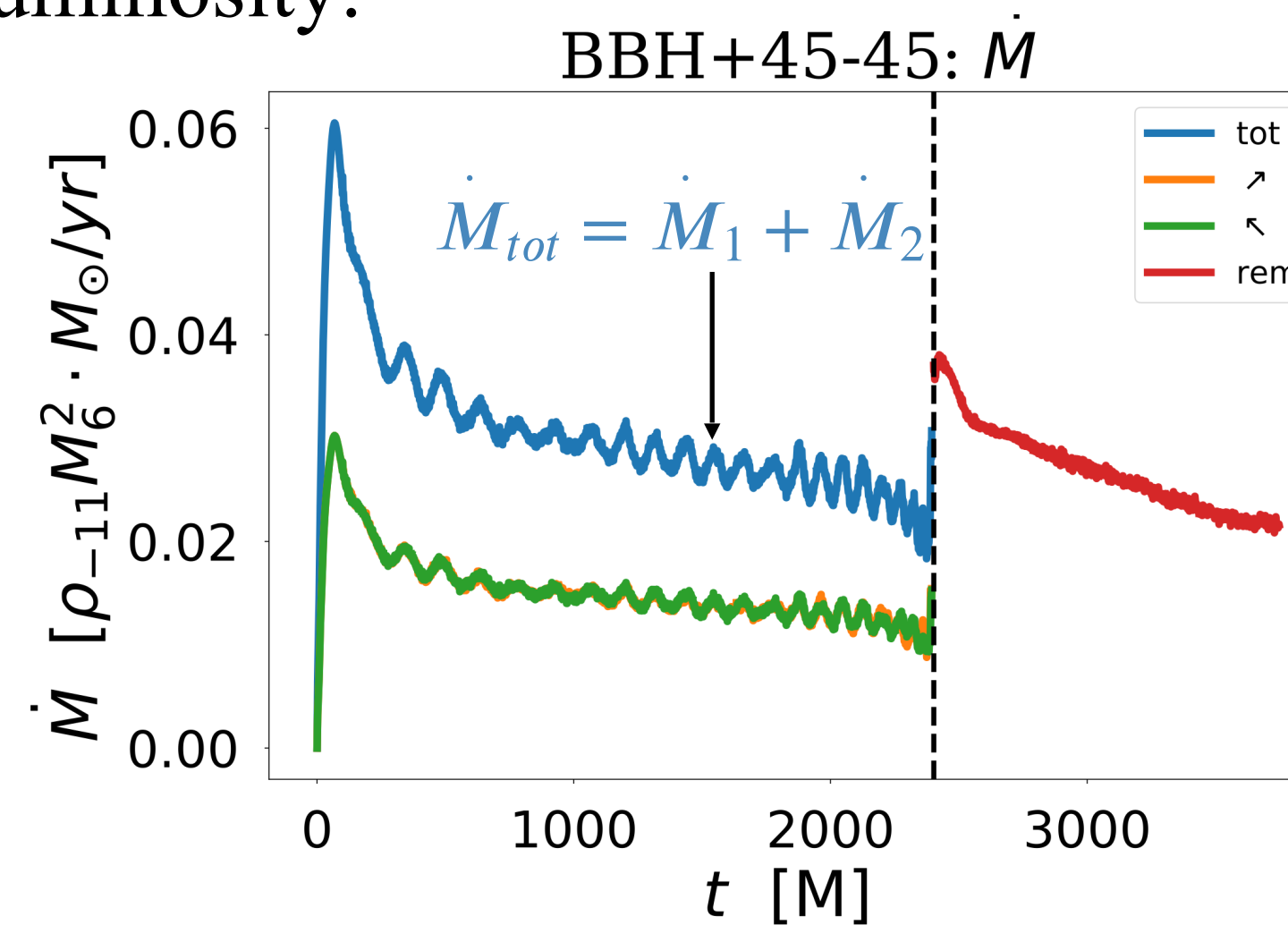
EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

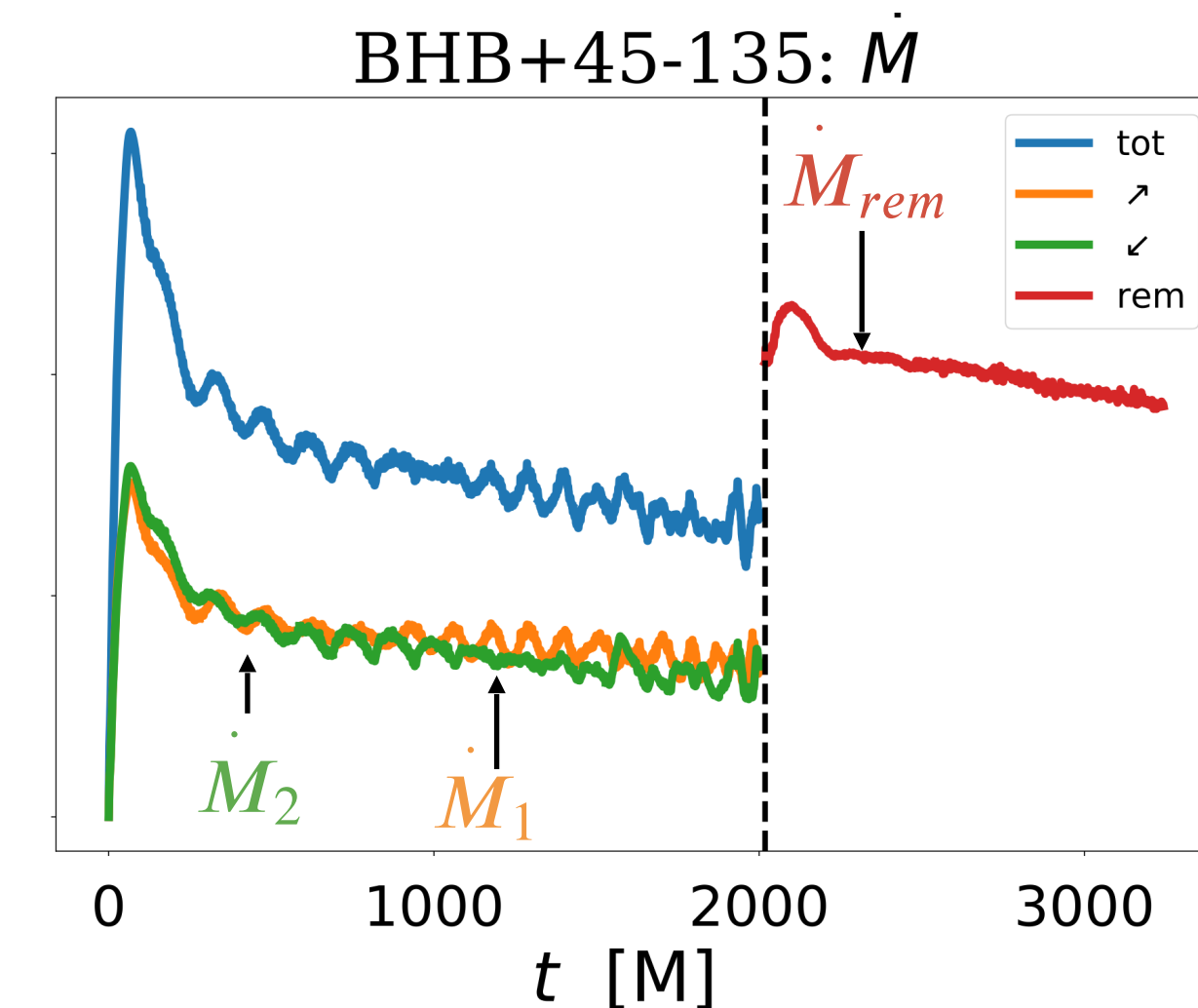
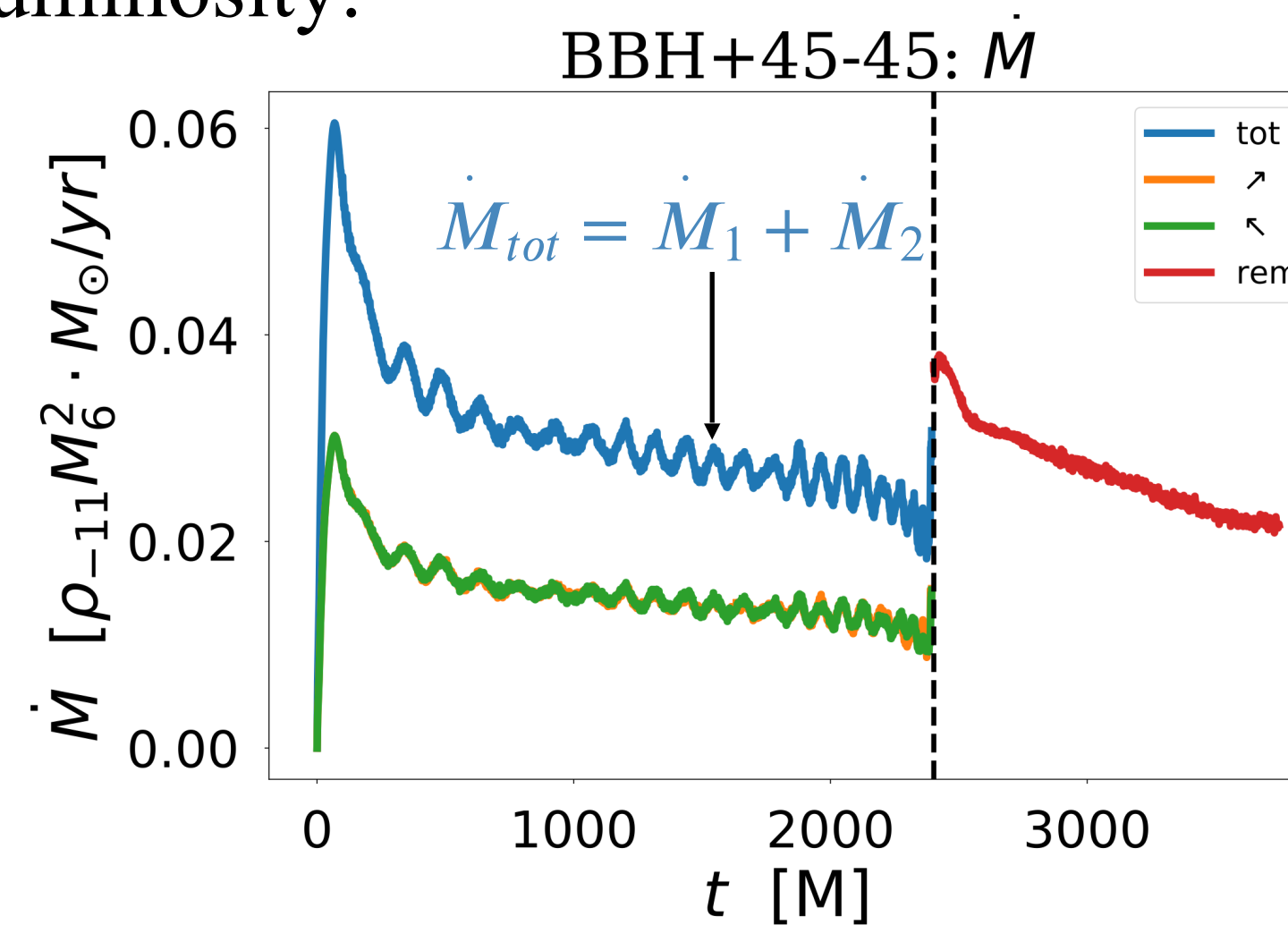
EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

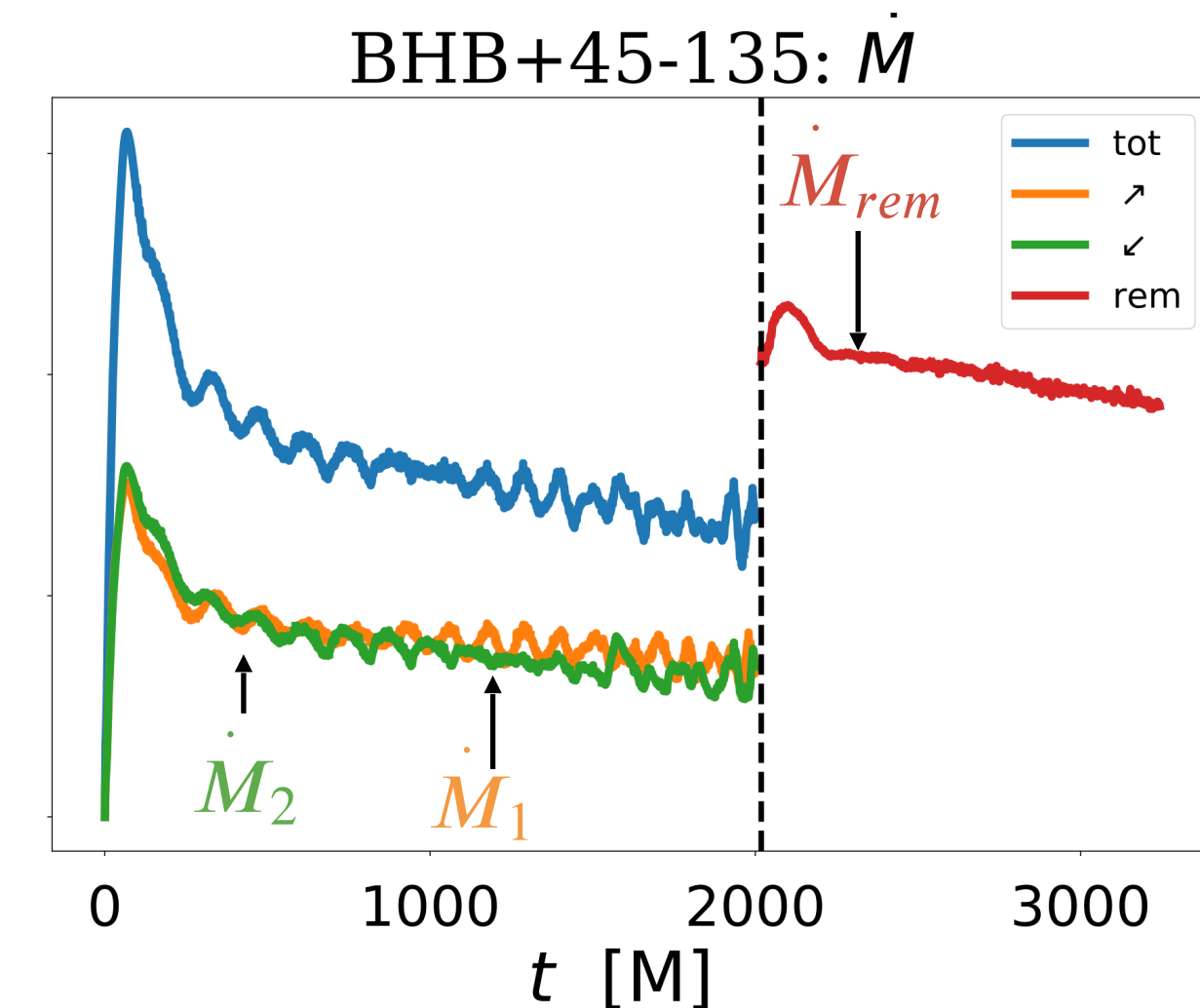
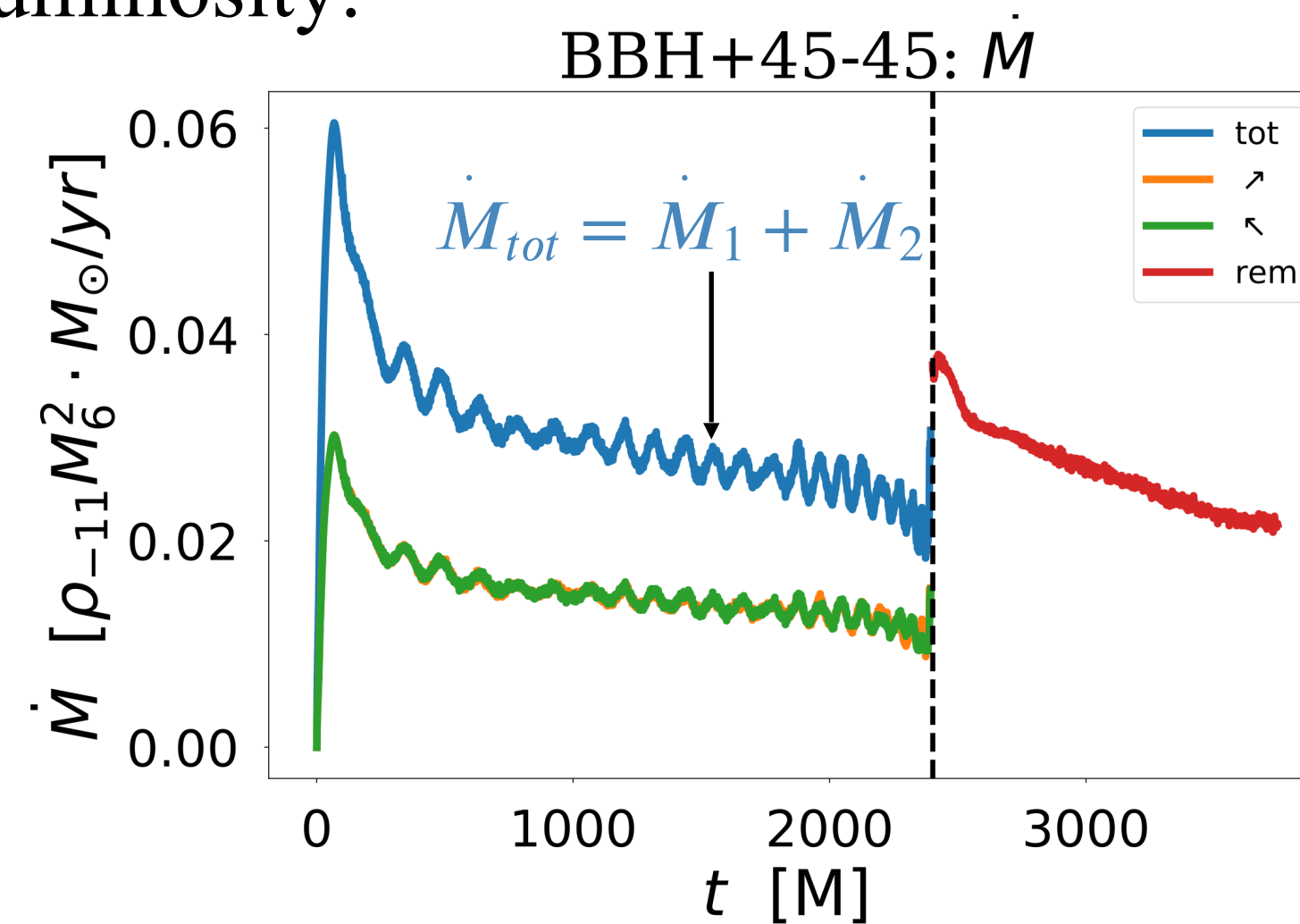
EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



Simmetrica

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

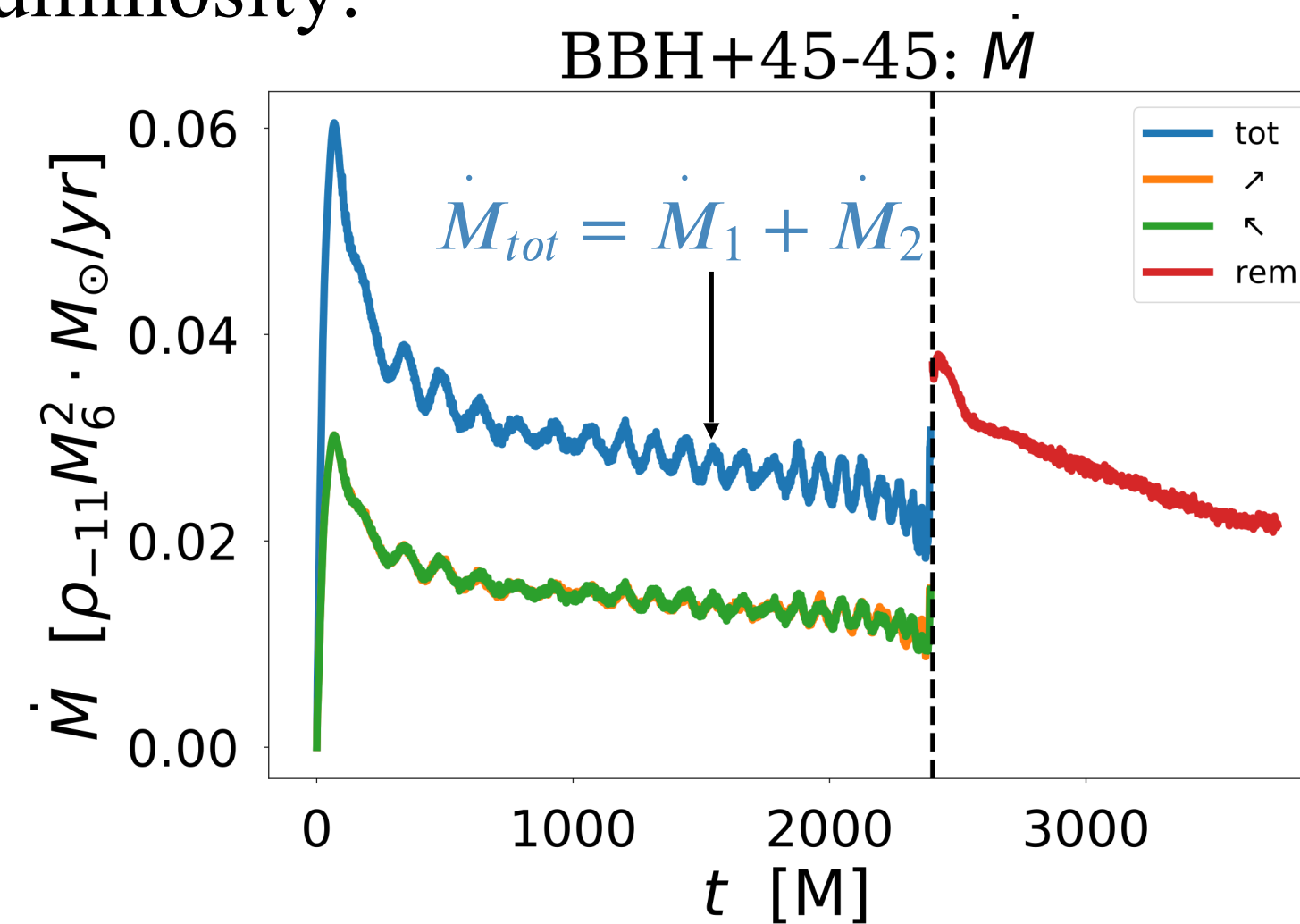
EMISSIONE EM

Emissione EM

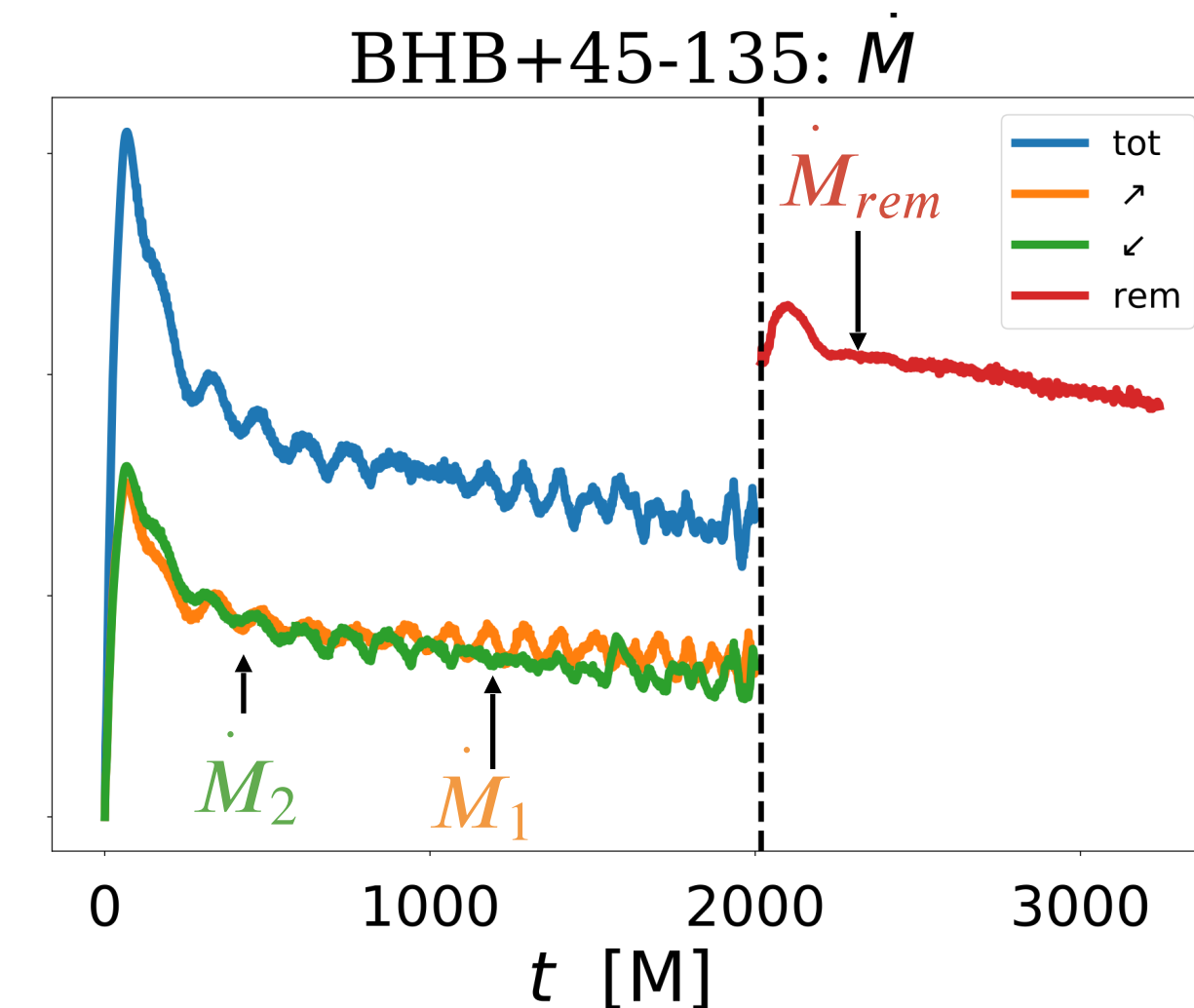
MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$



Simmetrica



Asimmetrica

EMISSIONE EM

Emissione EM

→ MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

→ POYNTING LUMINOSITY L_{Poyn} :

l'interazione con l'ambiente magnetizzato fa sì che parte dell'energia rotazionale del BH venga convertita in energia EM, nella forma di un flusso di Poynting collimato (meccanismo di Blandford Znajek)

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EMISSIONE EM

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

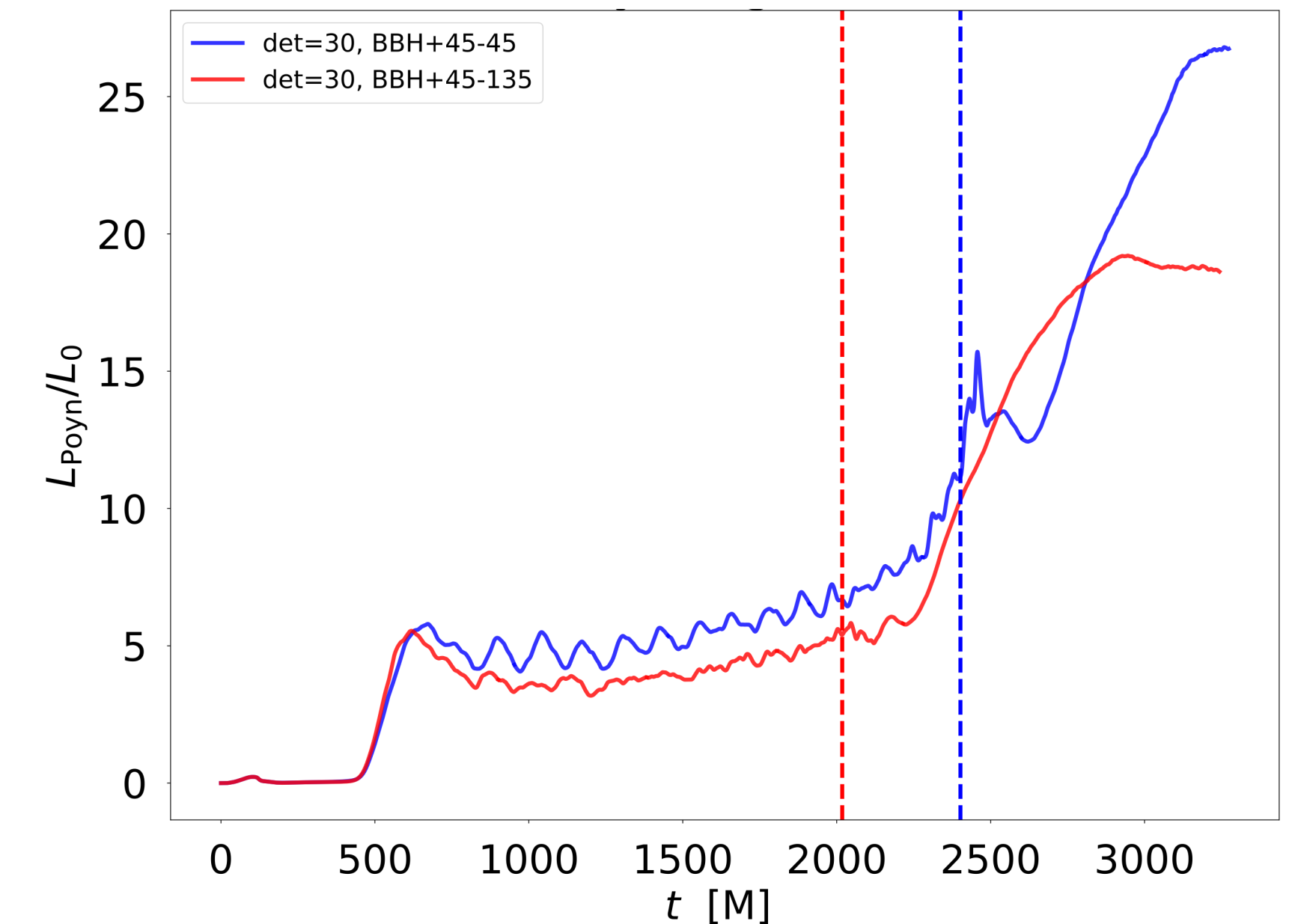
Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

POYNTING LUMINOSITY L_{Poyn} :

l'interazione con l'ambiente magnetizzato fa sì che parte dell'energia rotazionale del BH venga convertita in energia EM, nella forma di un flusso di Poynting collimato (meccanismo di Blandford Znajek)

Poynting flux L_{Poyn}



INTRO

EMISSIONE EM

Emissione EM

MASS ACCRETION RATE \dot{M} :

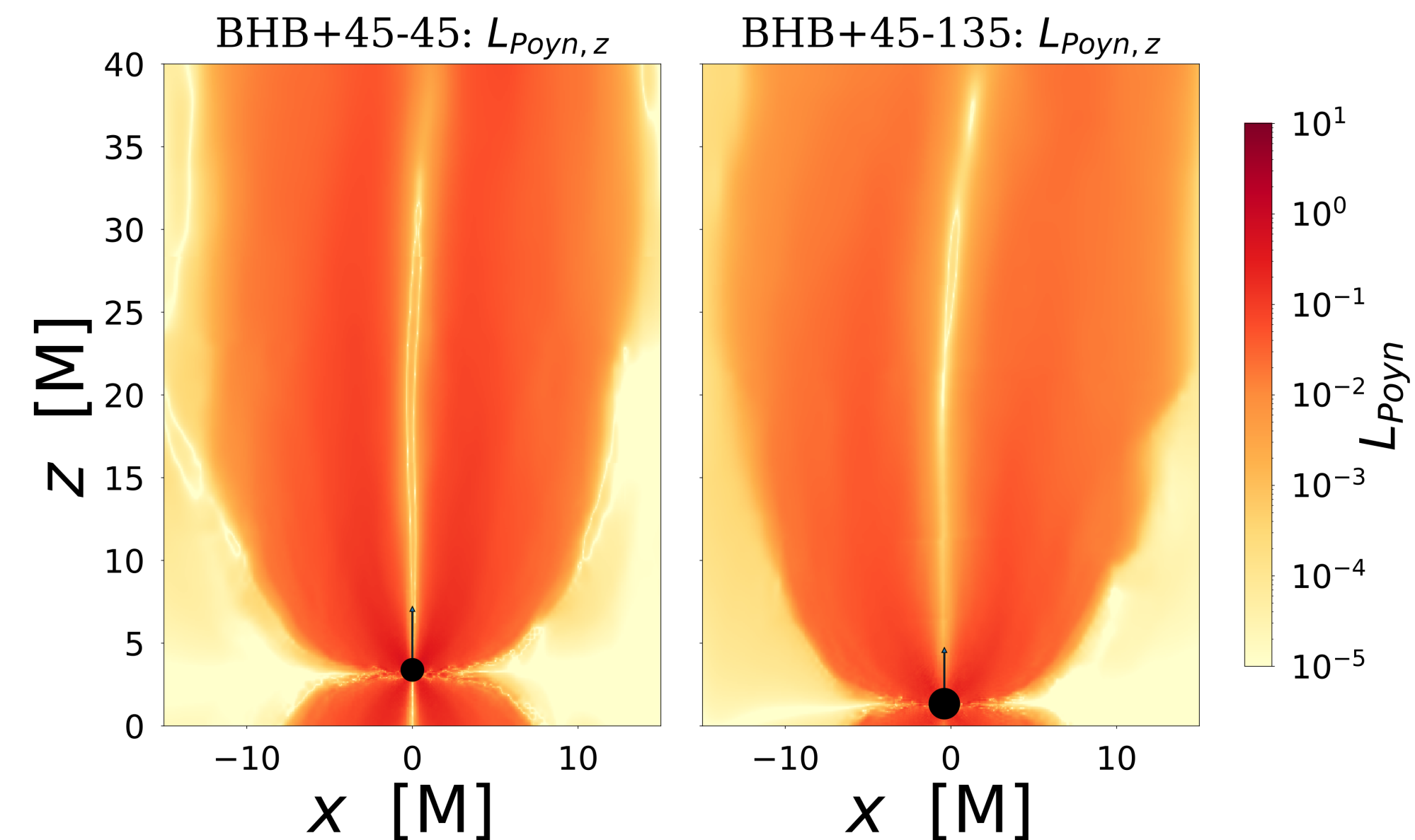
Meccanismi dissipativi scaldano il gas, il quale può emettere radiazione sotto forma di Accretion Luminosity:

$$L = \eta c^2 \dot{M}$$

POYNTING LUMINOSITY L_{Poynt} :

l'interazione con l'ambiente magnetizzato fa sì che parte dell'energia rotazionale del BH venga convertita in energia EM, nella forma di un flusso di Poynting collimato (meccanismo di Blandford Znajek)

Poynting flux L_{Poynt}



METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

EMISSIONE MULTI-MESSENGER

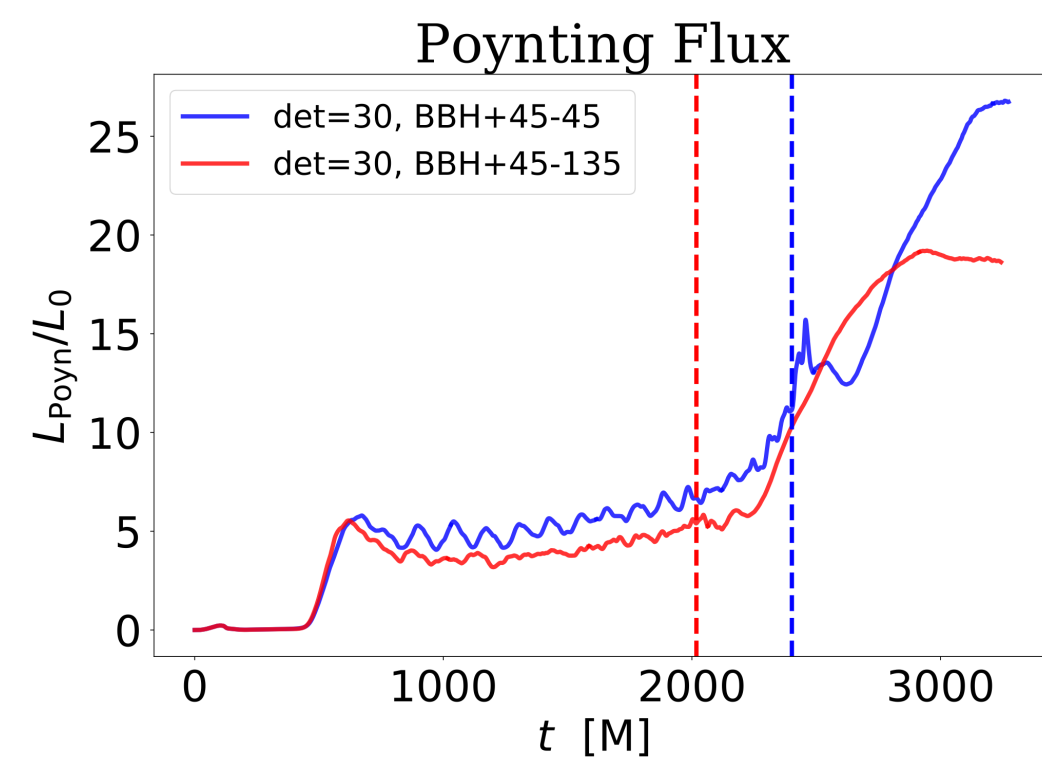
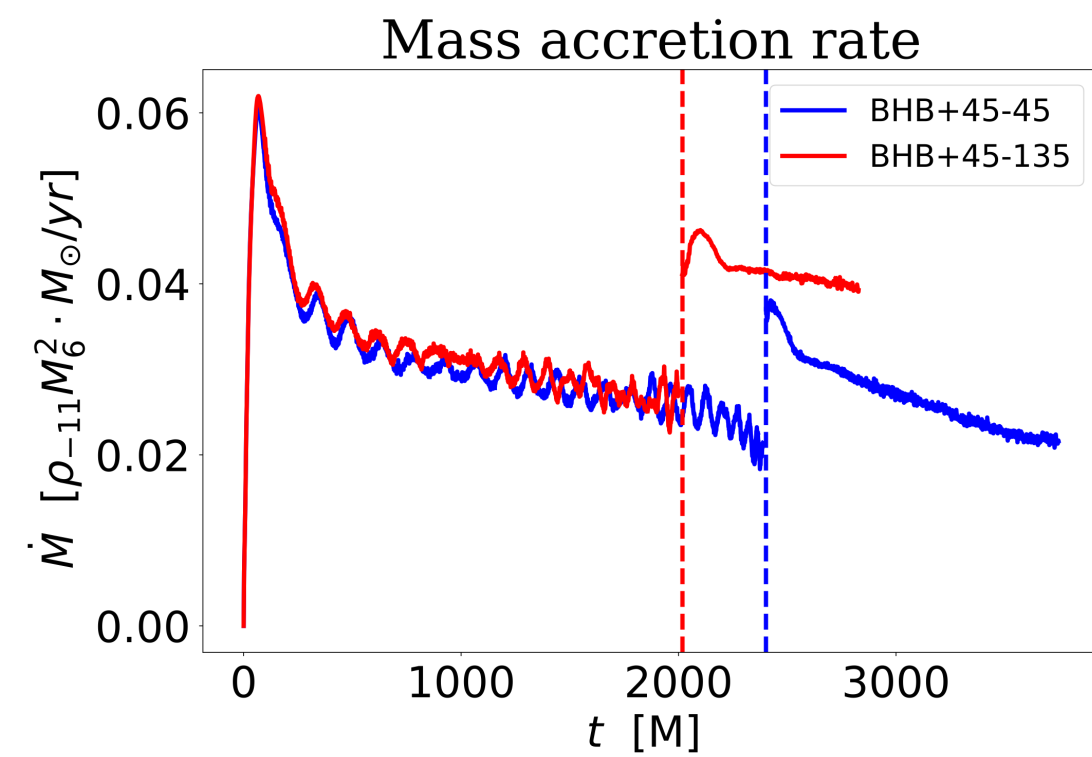
INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



EM

EMISSIONE MULTI-MESSENGER

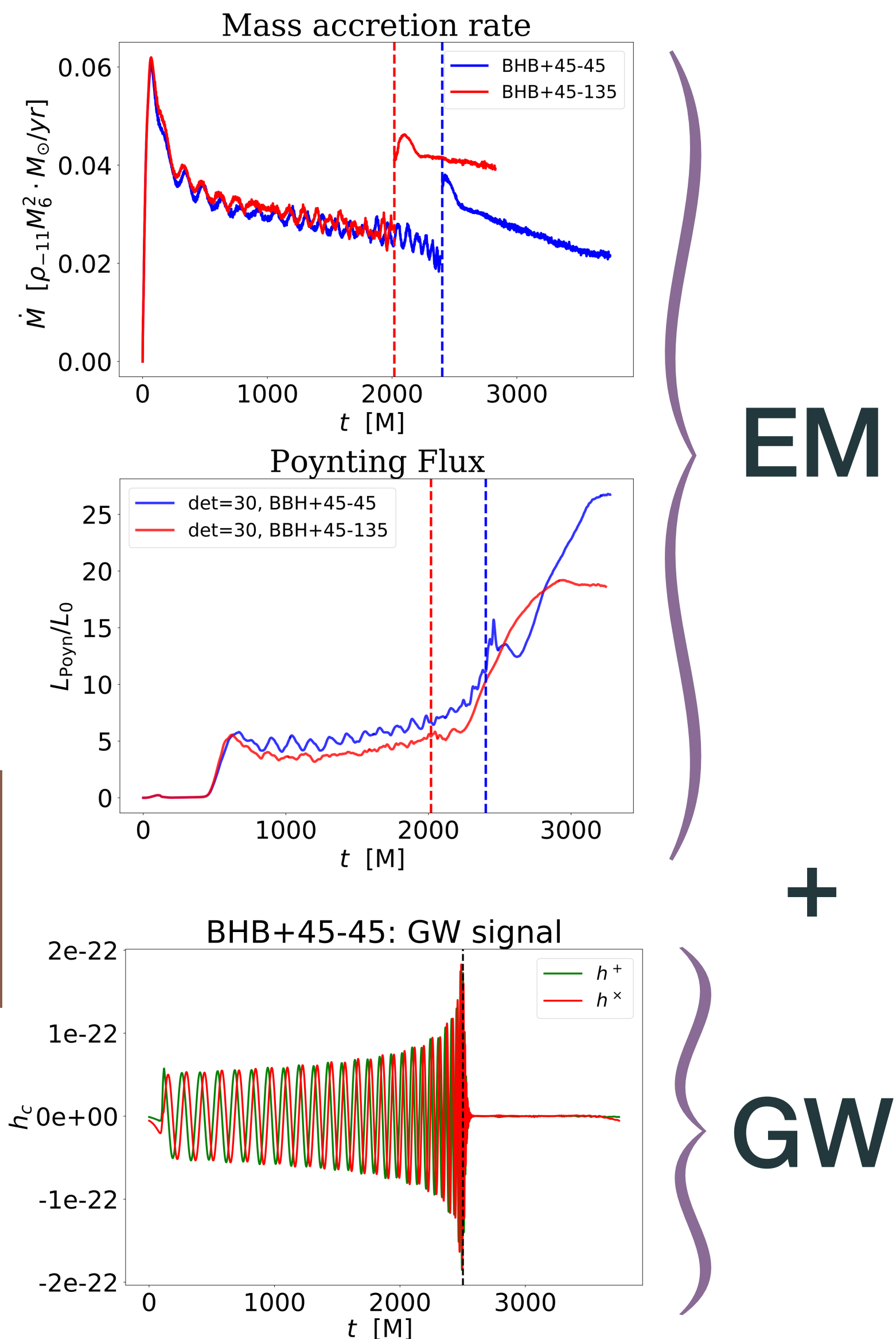
INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



EMISSIONE MULTI-MESSENGER

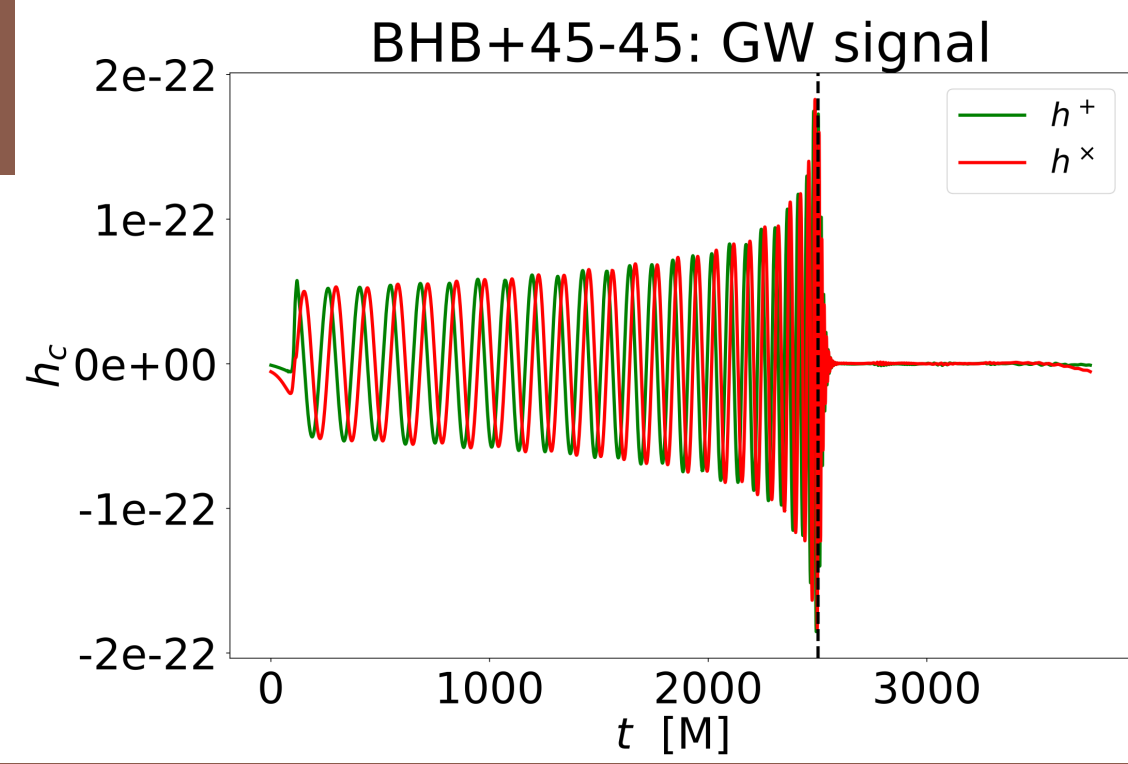
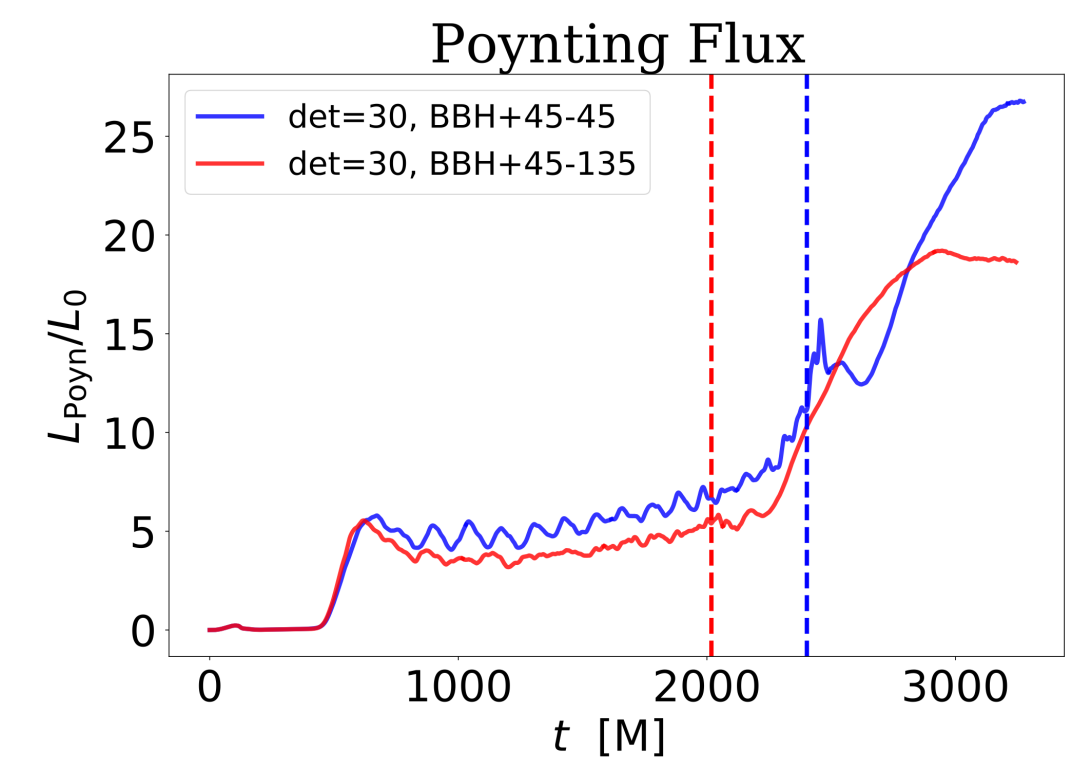
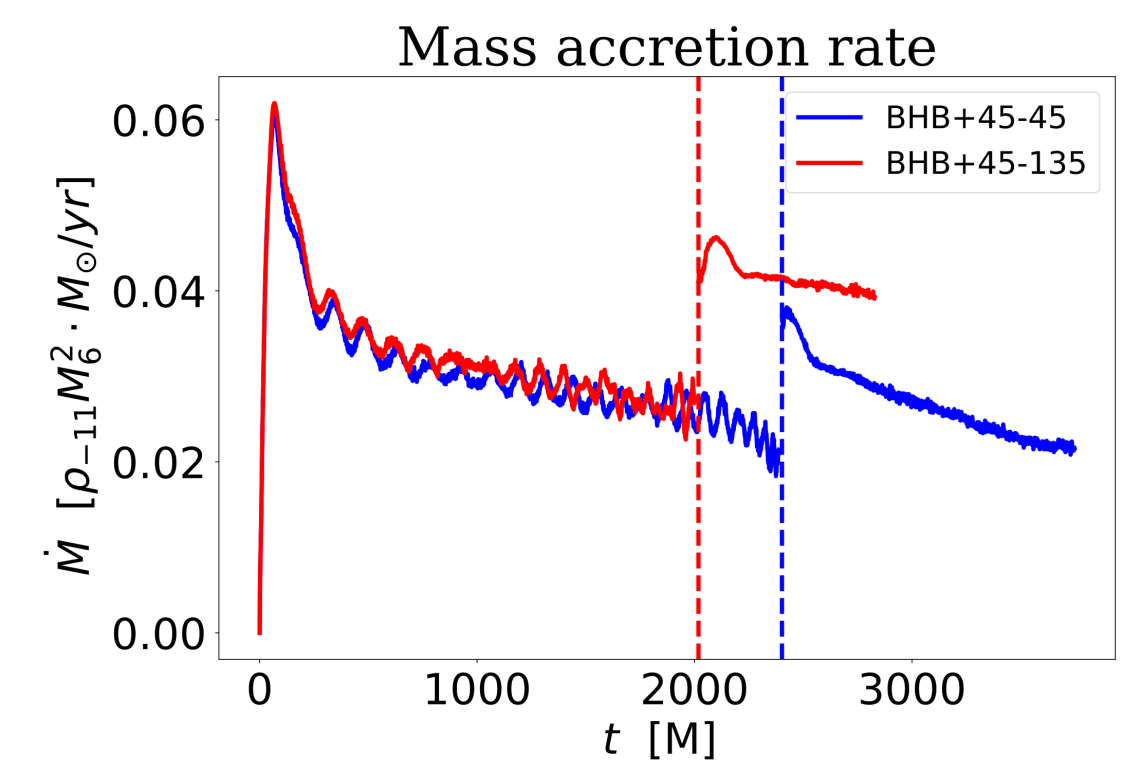
INTRO

METODI

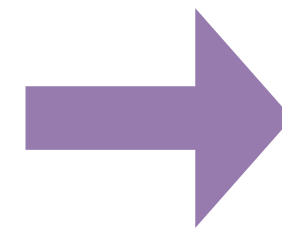
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



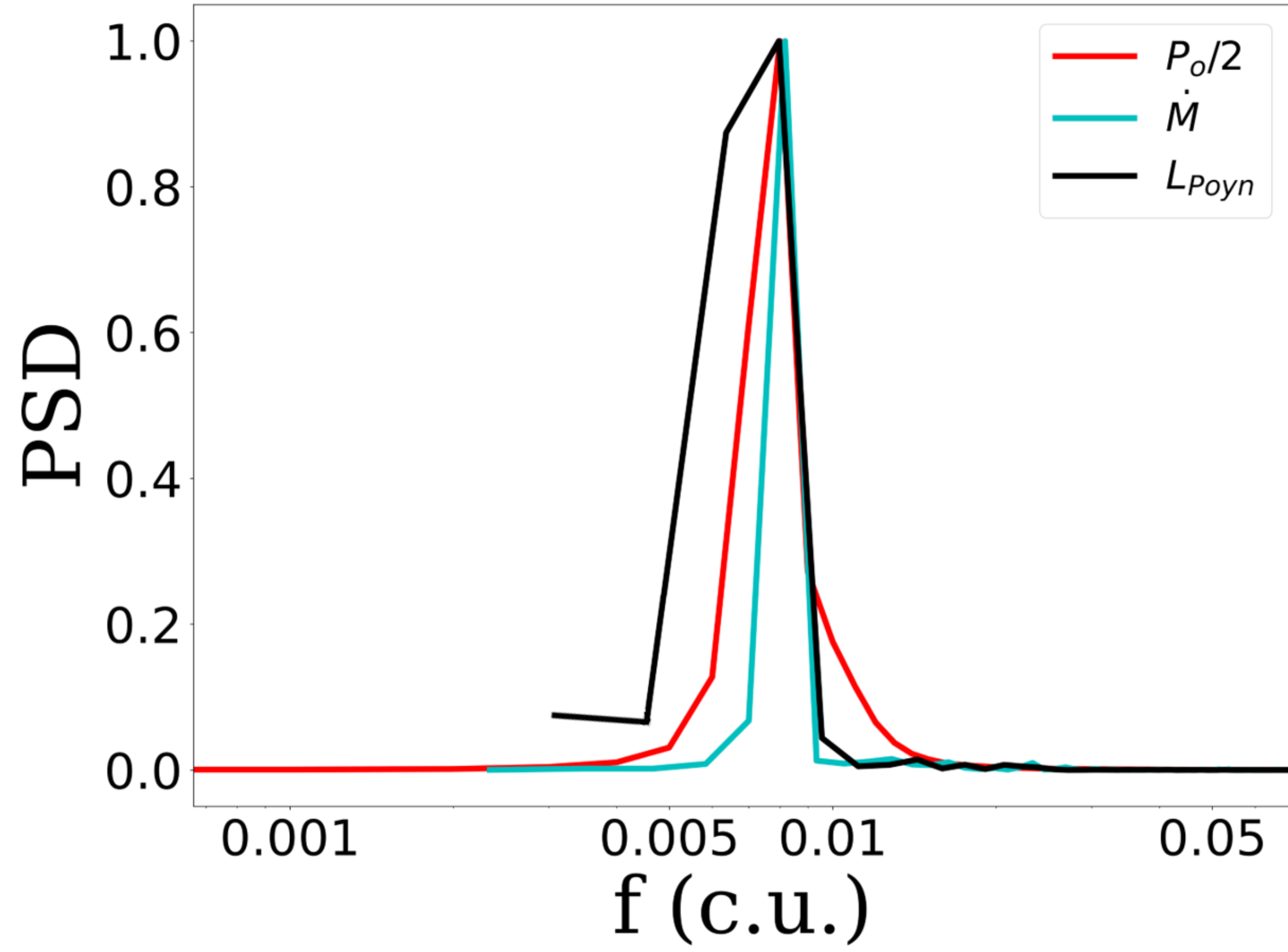
EM



+

GW

BHB+45-45: PSD



EMISSIONE MULTI-MESSENGER

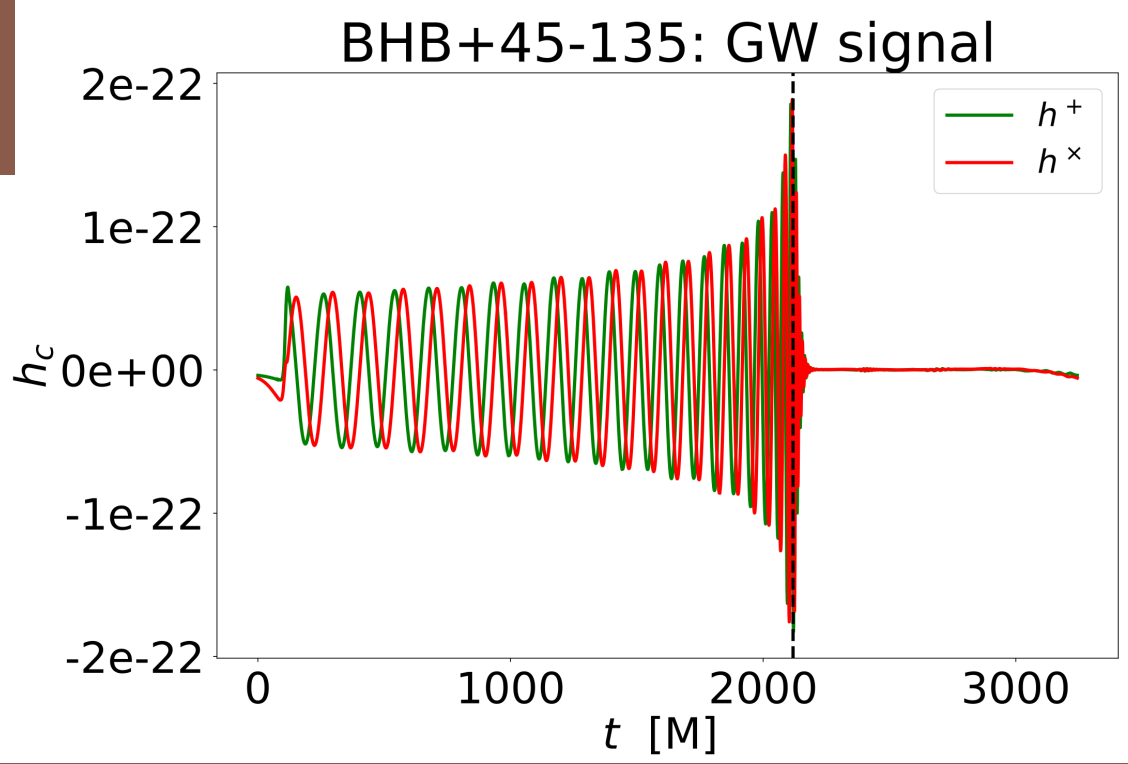
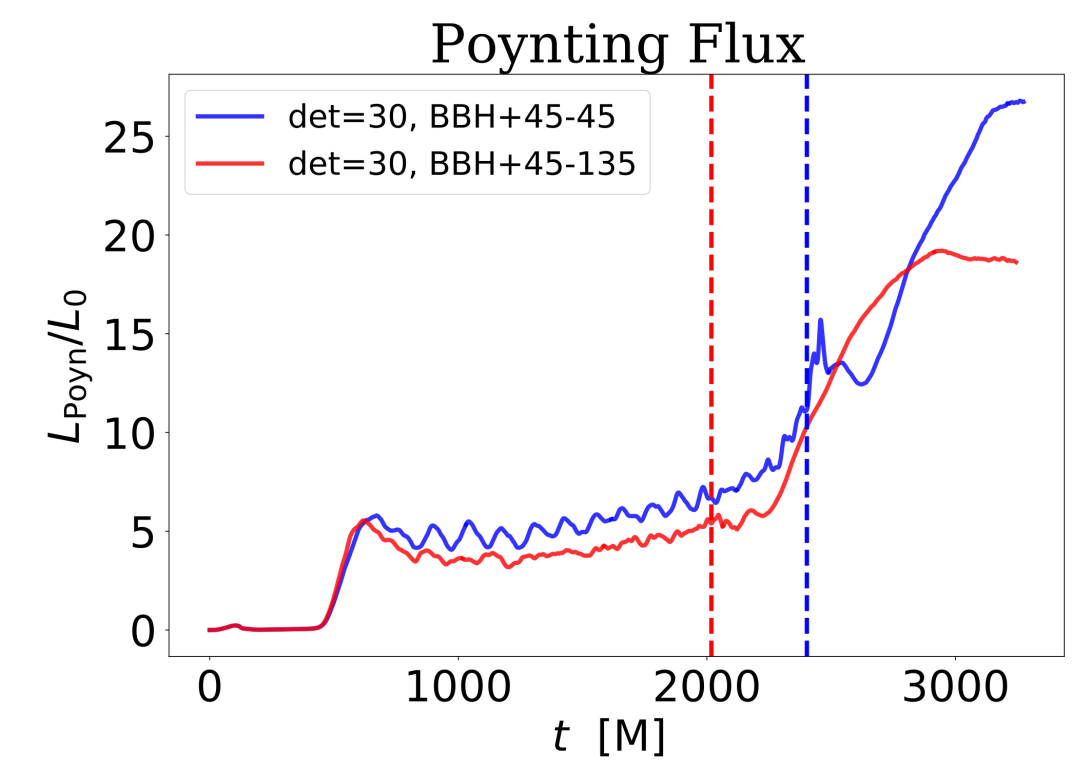
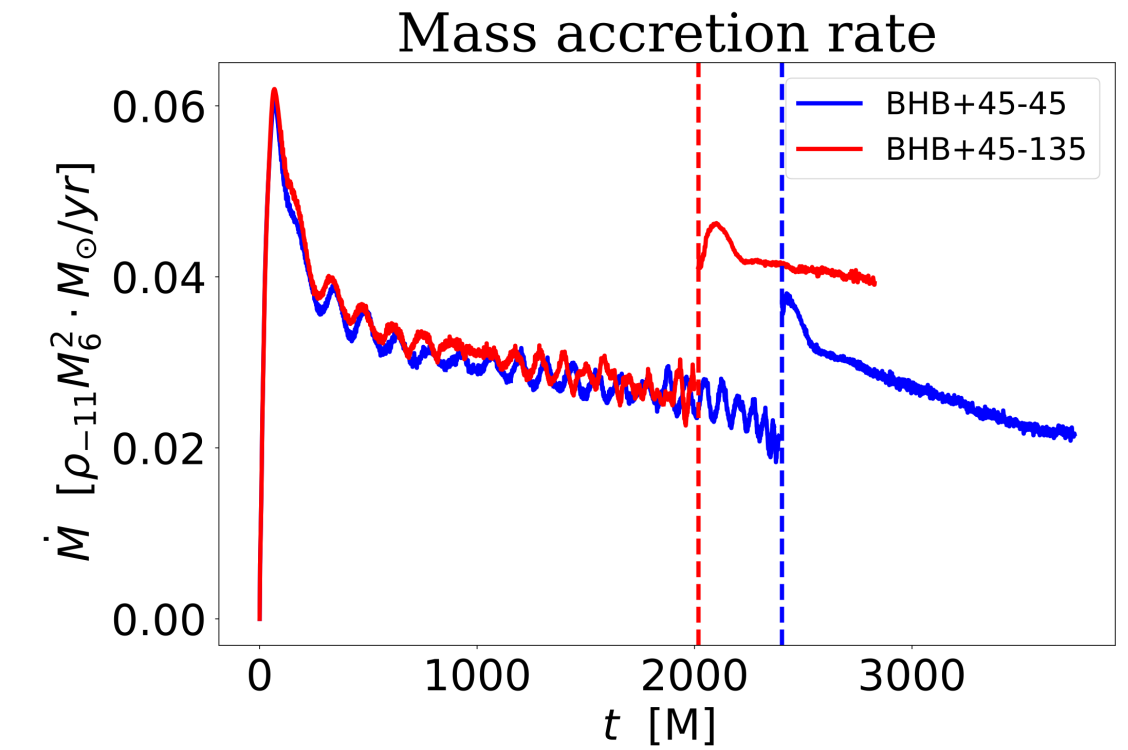
INTRO

METODI

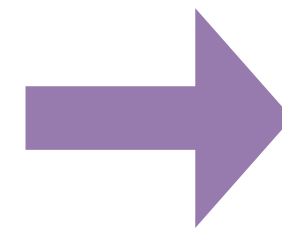
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



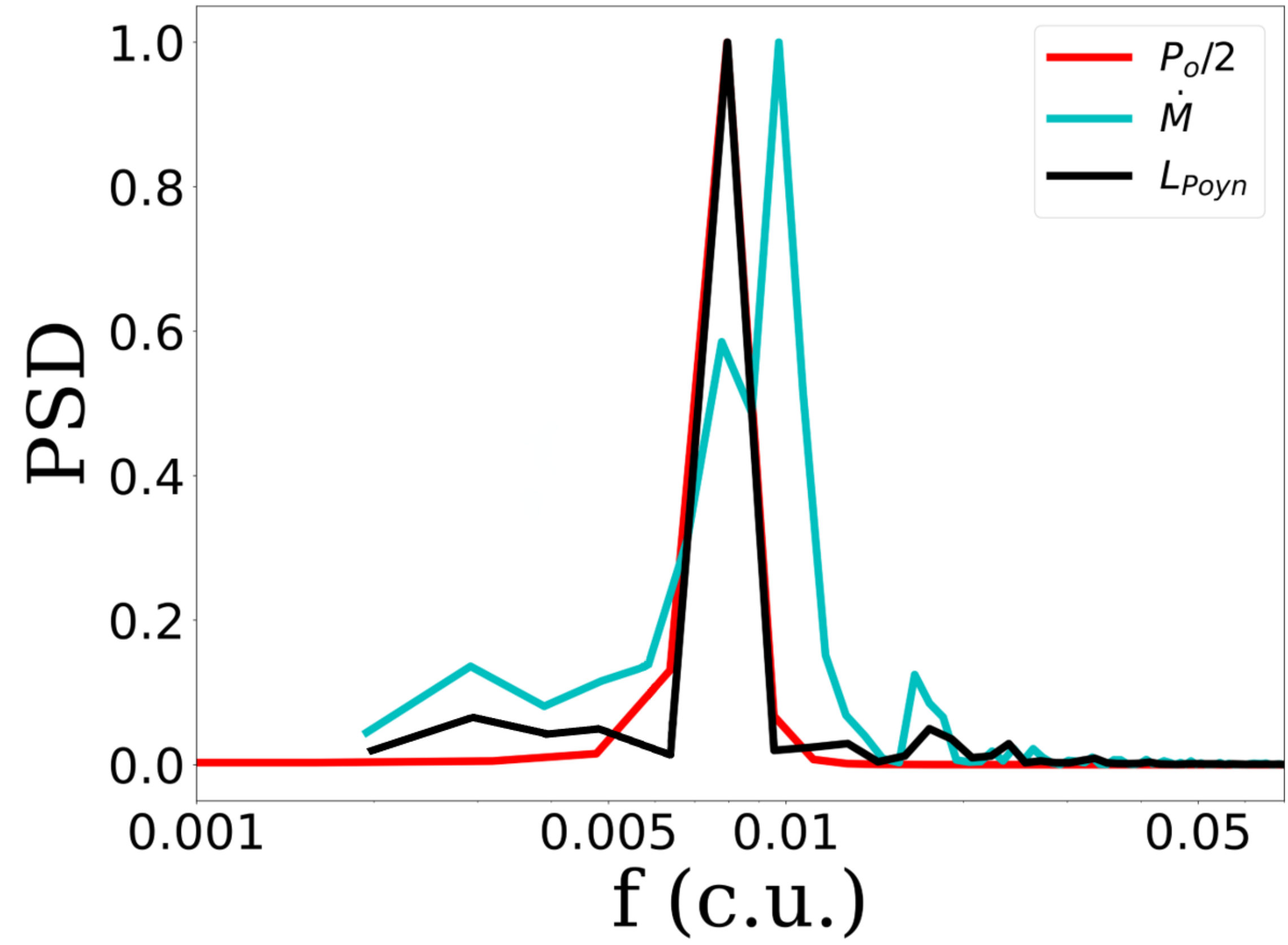
EM



+

GW

BHB+45-135: PSD



EMISSIONE MULTI-MESSENGER

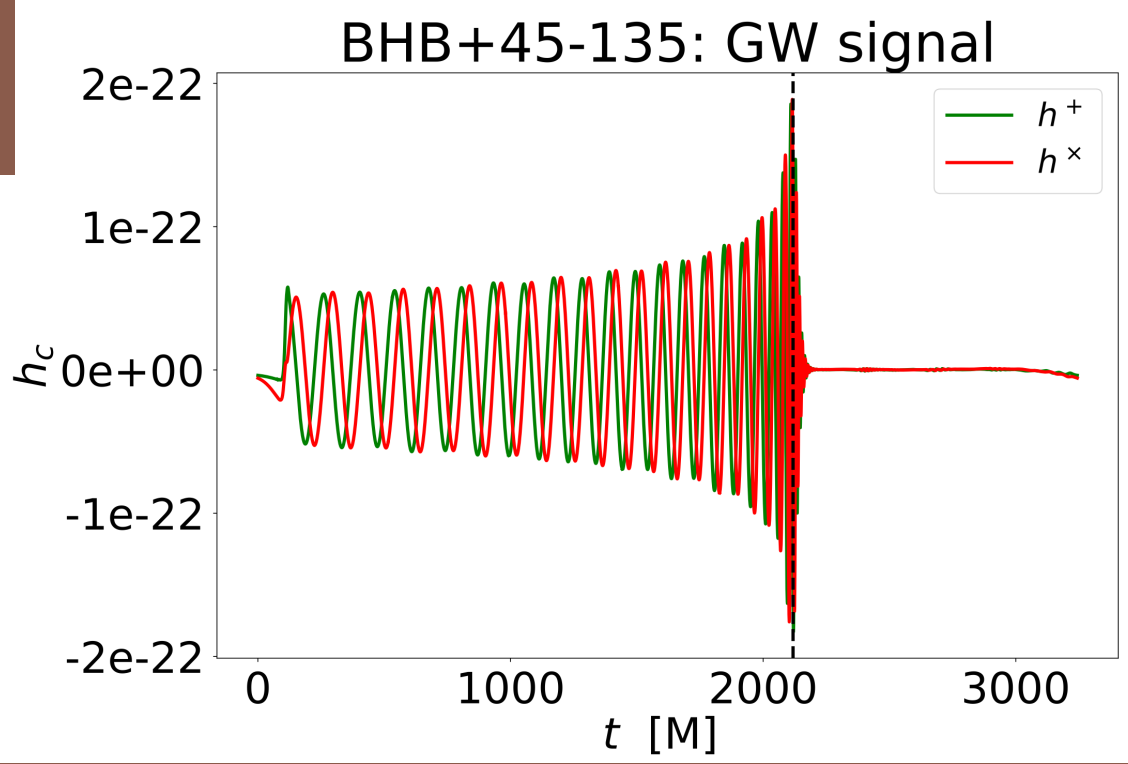
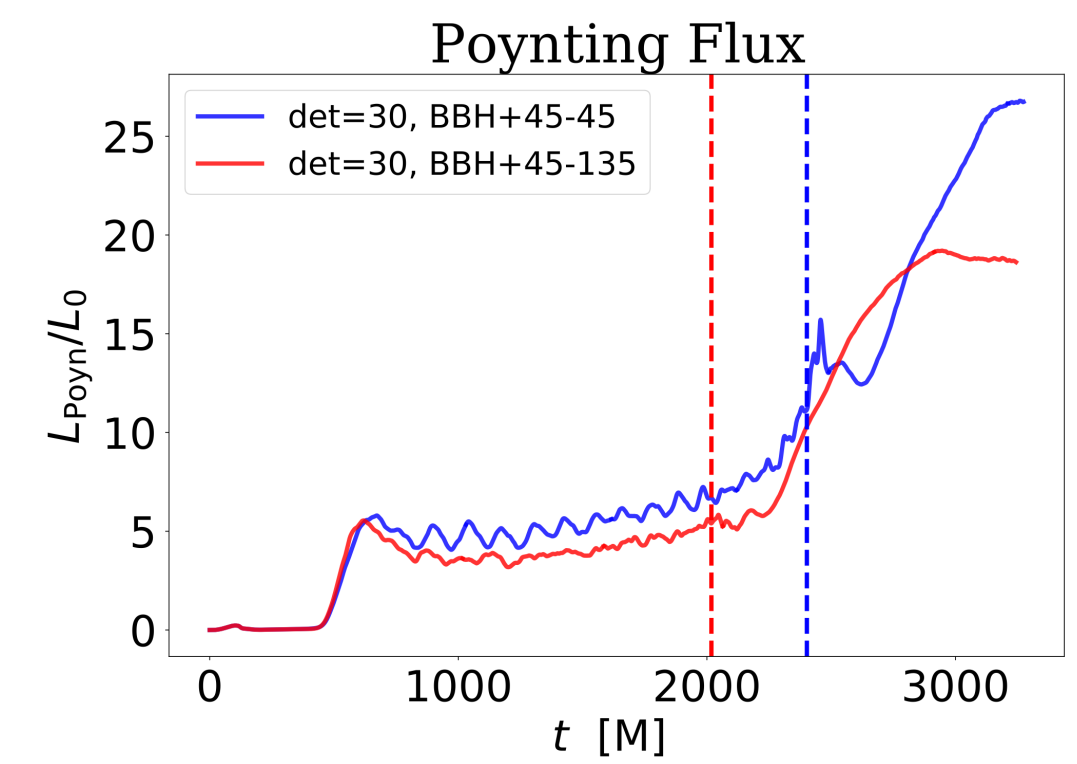
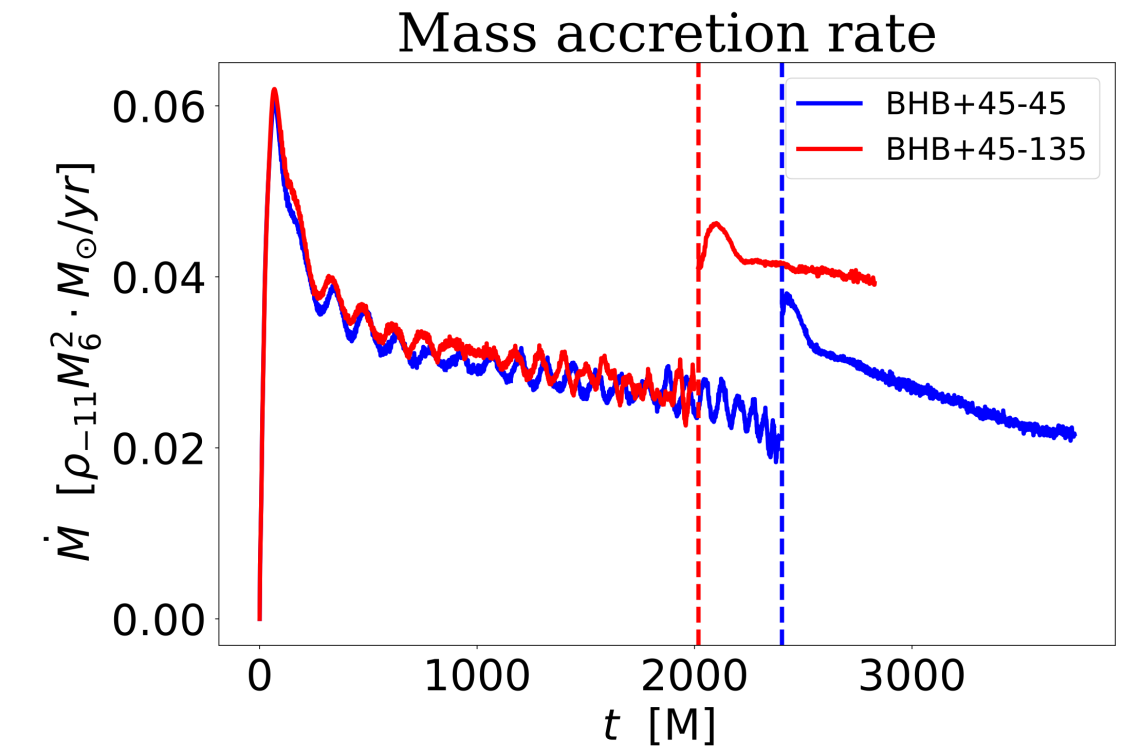
INTRO

METODI

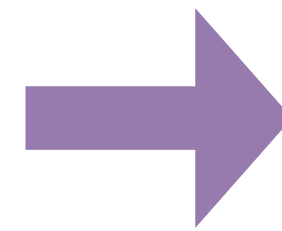
SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI



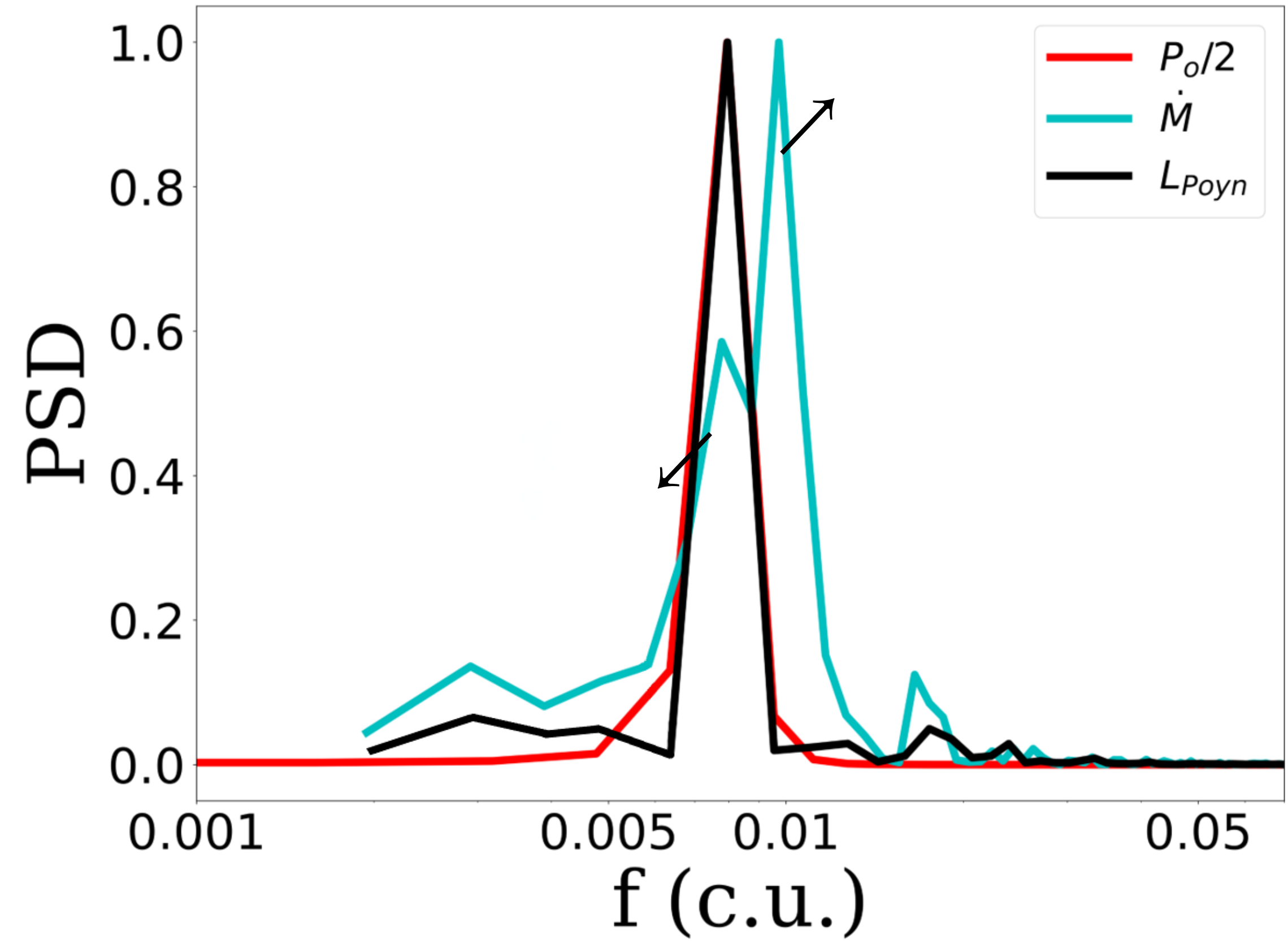
EM



+

GW

BHB+45-135: PSD



CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

ULTERIORI SVILUPPI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

ULTERIORI SVILUPPI

- **Condizioni iniziali** → coprire una spazio dei parametri più ampio

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

ULTERIORI SVILUPPI

- **Condizioni iniziali** → coprire una spazio dei parametri più ampio
- **Distribuzione del gas** → Considerare distribuzioni più realistiche (es. disco circumbinario)

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

ULTERIORI SVILUPPI

- **Condizioni iniziali** → coprire uno spazio dei parametri più ampio
- **Distribuzione del gas** → Considerare distribuzioni più realistiche (es. disco circumbinario)
- **Tenere conto dell'emissione di radiazioni da parte del plasma** → determinerebbe l'entità della *accretion luminosity* e la forma degli spettri.

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

- **Risultati consistenti con letteratura** → dinamica del gas influenzata da campo magnetico.
- **Spin significativo durante l'inspiral** → influenza dinamica dei BH causando precessione e inclinando le regioni di sovradensità.
- **Distribuzione gas e campo magnetico post merger** → stessa di configurazioni senza spin o con spin allineato a momento angolare orbitale
- **Emissione EM** → legata ad inclinazione dello spin, mostra **modulazione coerente con l'emissione gravitazionale**. Possibile collegamento tra un segnale gravitazionale e un segnale EM.
- **Articolo** “Misaligned Spinning Binary Black Hole Mergers in Hot Magnetized Plasma” (*Cattorini, Maggioni, Giacomazzo, Haardt, Colpi e Covino, 2022, Astrophysical Journal Letter*)

ULTERIORI SVILUPPI

- **Condizioni iniziali** → coprire una spazio dei parametri più ampio
- **Distribuzione del gas** → Considerare distribuzioni più realistiche (es. disco circumbinario)
- **Tenere conto dell'emissione di radiazioni da parte del plasma** → determinerebbe l'entità della Accretion Luminosity e la forma degli spettri.

GRAZIE PER
L'ATTENZIONE

INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

ALLEGATI

INTRO

FATTORI DI CONVERSIONE

METODI

$$[M] = 2 \cdot 10^{39} M_6 g$$

$$[L] = G/c^2 [M] = 1.48 \cdot 10^{11} M_6 \text{cm}$$

$$[T] = G/c^3 [M] = 4.94 M_6 \text{s}$$

SETUP

$$M = 2 \times 10^6 M_\odot$$

$$\rho = 10^{-11} \text{gcm}^{-3}$$

$$t_{\text{merg}} \sim 6 \text{h}$$

$$\dot{M}_{\text{cgs}} = 6.6 \times 10^{21} \dot{M}_{\text{c.u.}} \rho_{-11} M_6^2 \text{gs}^{-1}$$

$$L_0 \equiv 2.347 \times 10^{43} \rho_{-11} M_6^2 \text{ergs}^{-1}$$

RISULTATI

CONCLUSIONI

INTRO

METODI

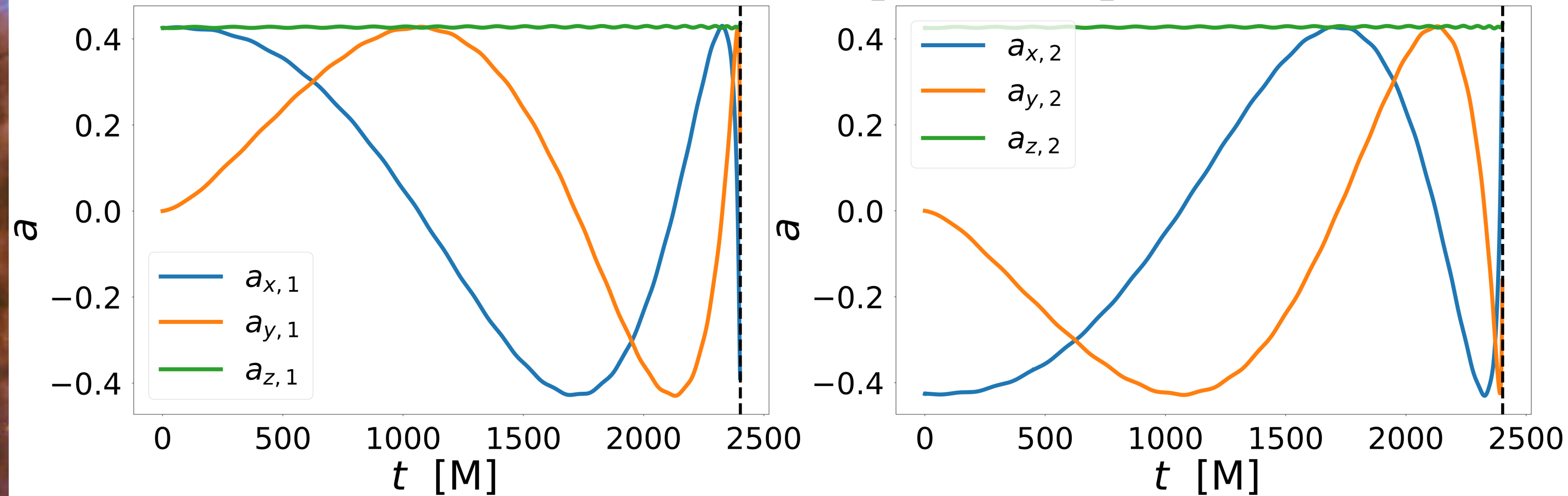
SETUP

RISULTATI

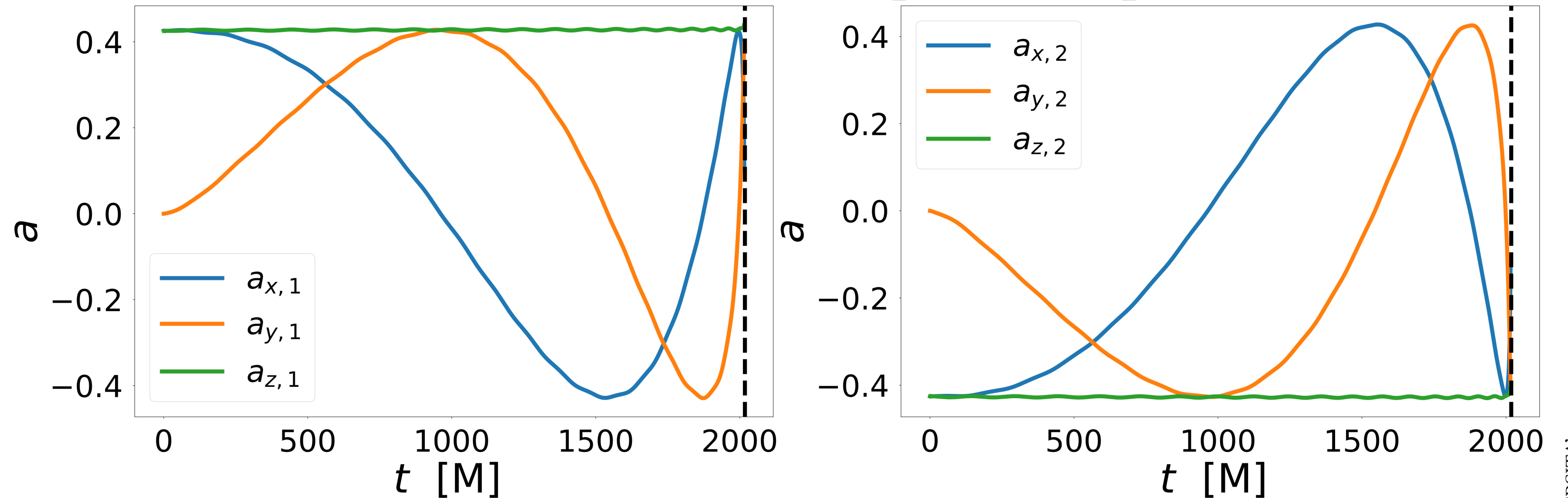
CONCLUSIONI

SPIN

BHB+45-45: BH Spins - inspiral



BHB+45-135: BH Spins - inspiral



INTRO

METODI

SETUP

RISULTATI

CONCLUSIONI

BH FINALE

