

輻射流体シミュレーション による 連星ブラックホールの 軌道進化計算

2024年初代星・初代銀河研究会@信州大学



GRADUATE
SCHOOL OF
FACULTY OF
SCIENCE
KYOTO UNIVERSITY

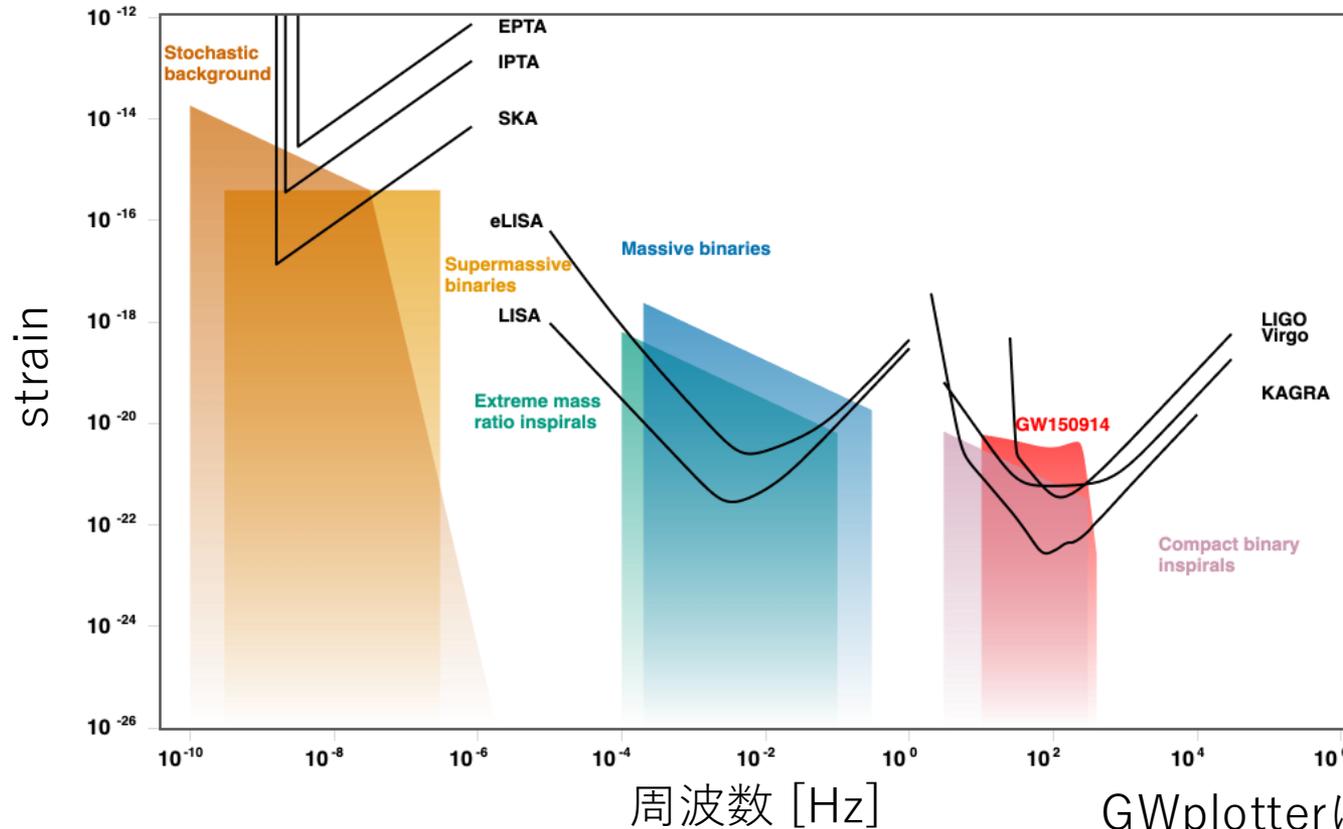
京都大学D2 鈴木智也

共同研究者：杉村和幸(北海道大)、細川隆史(京都大)、松本倫明(法政大)

道入

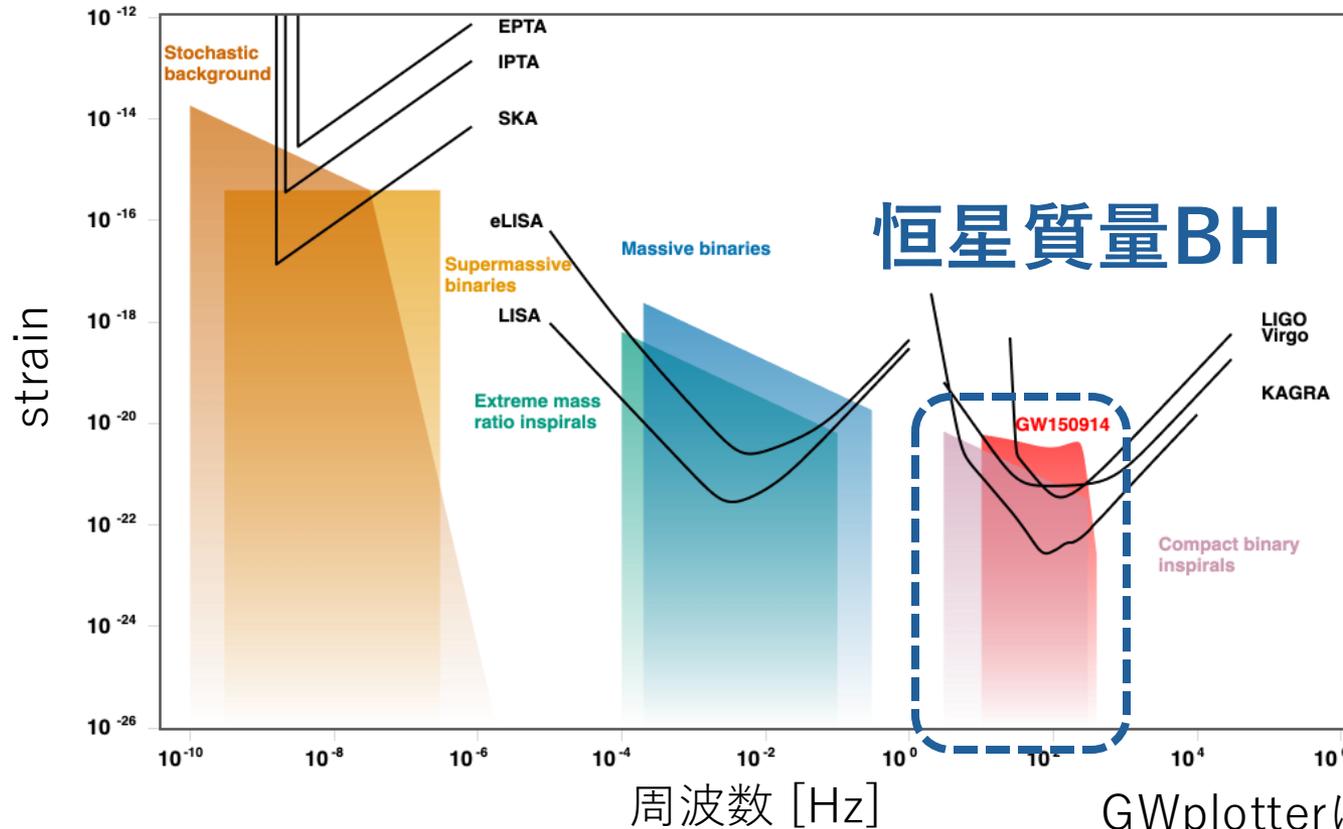
連星BH合体起源の重力波

広い質量範囲で連星BH合体からの重力波が検出される



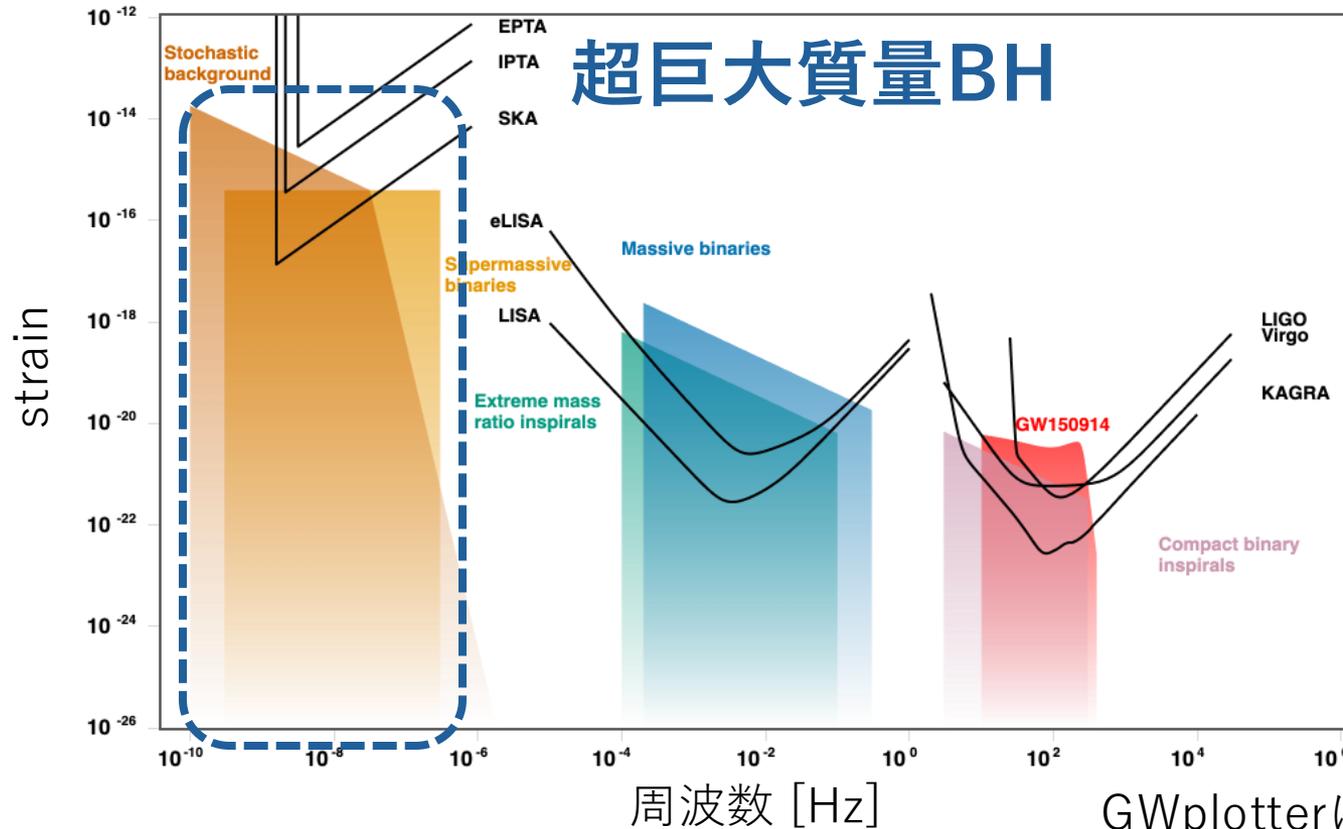
連星BH合体起源の重力波

広い質量範囲で連星BH合体からの重力波が検出される



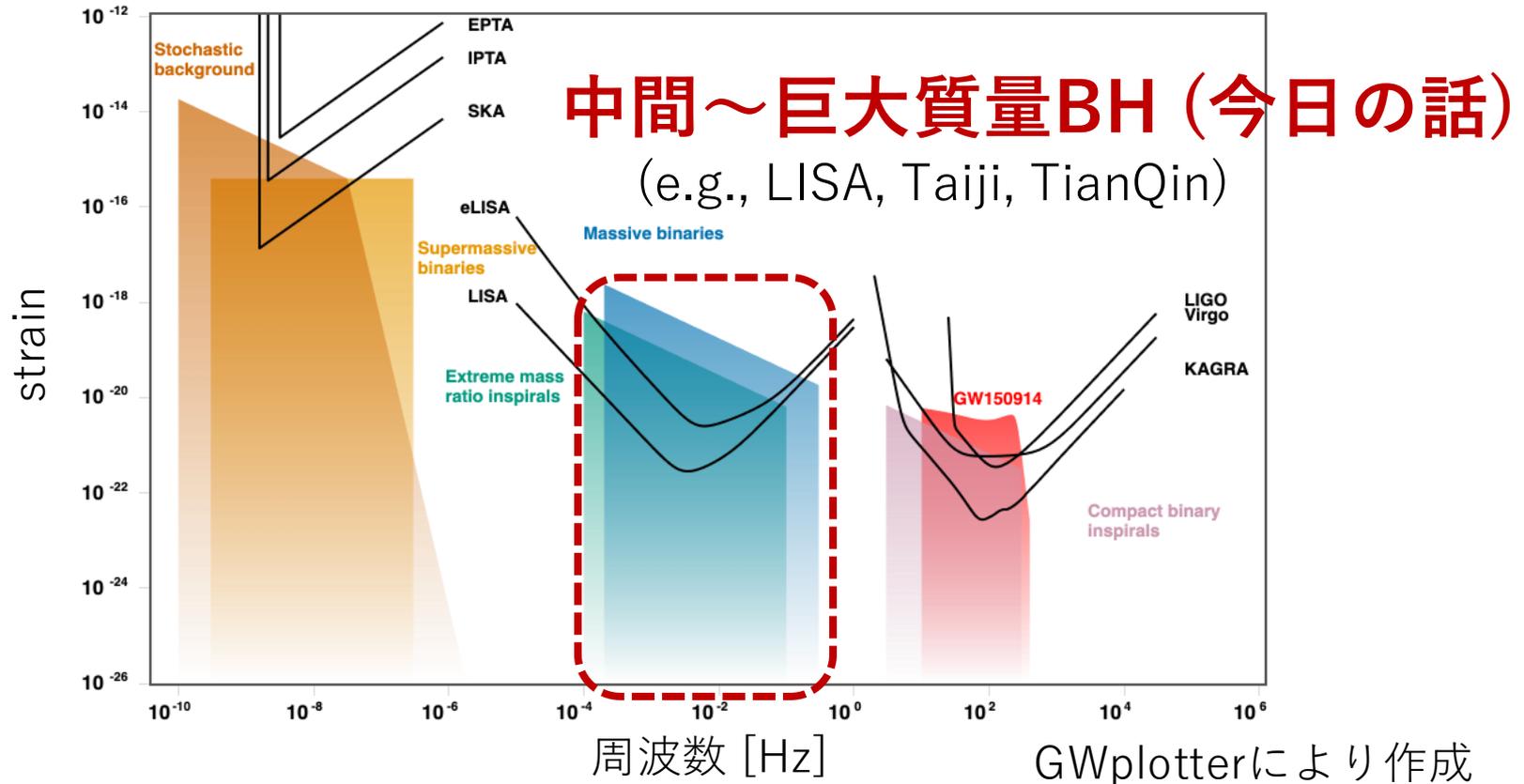
連星BH合体起源の重力波

広い質量範囲で連星BH合体からの重力波が検出される



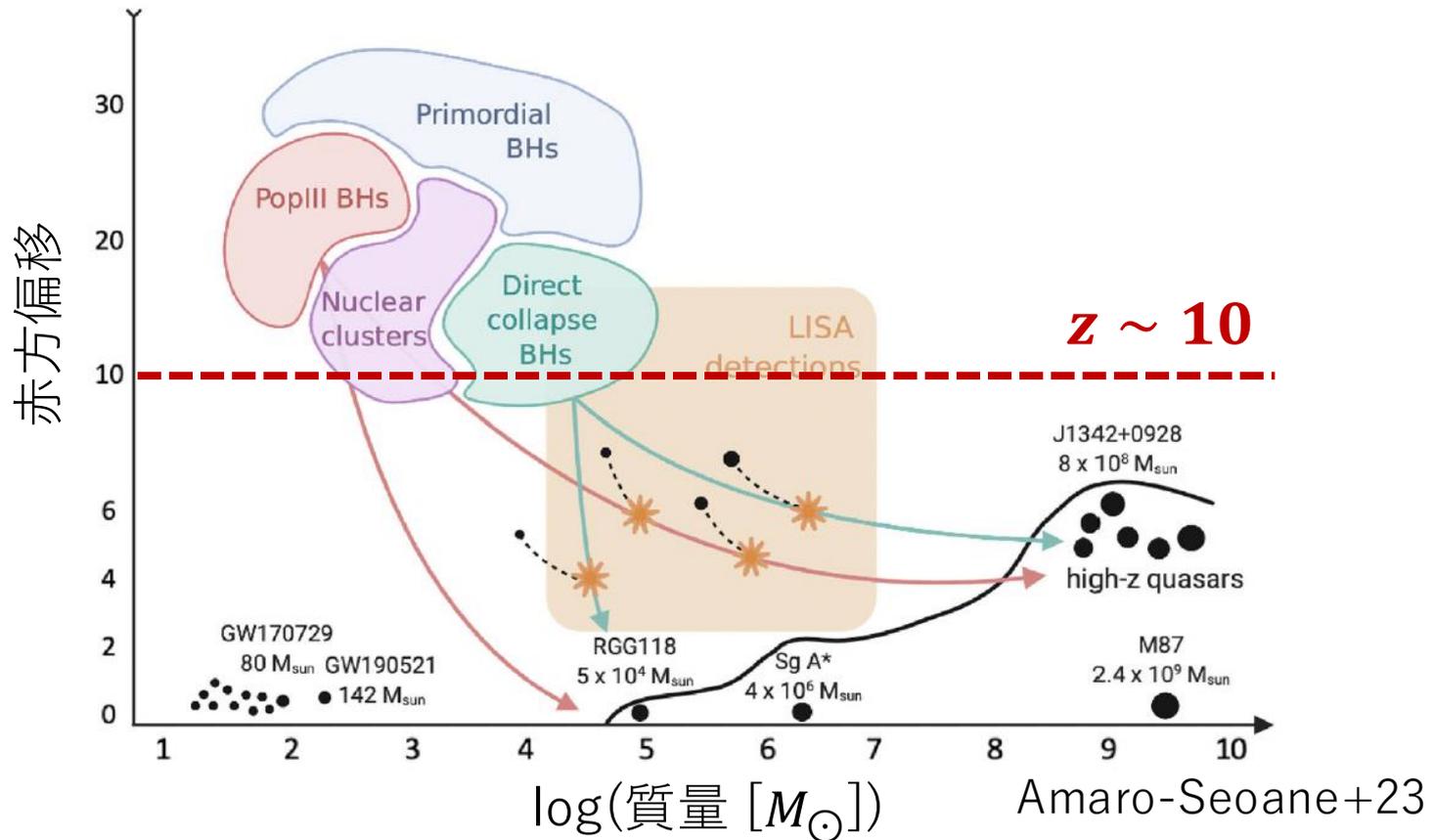
連星BH合体起源の重力波

広い質量範囲で連星BH合体からの重力波が検出される



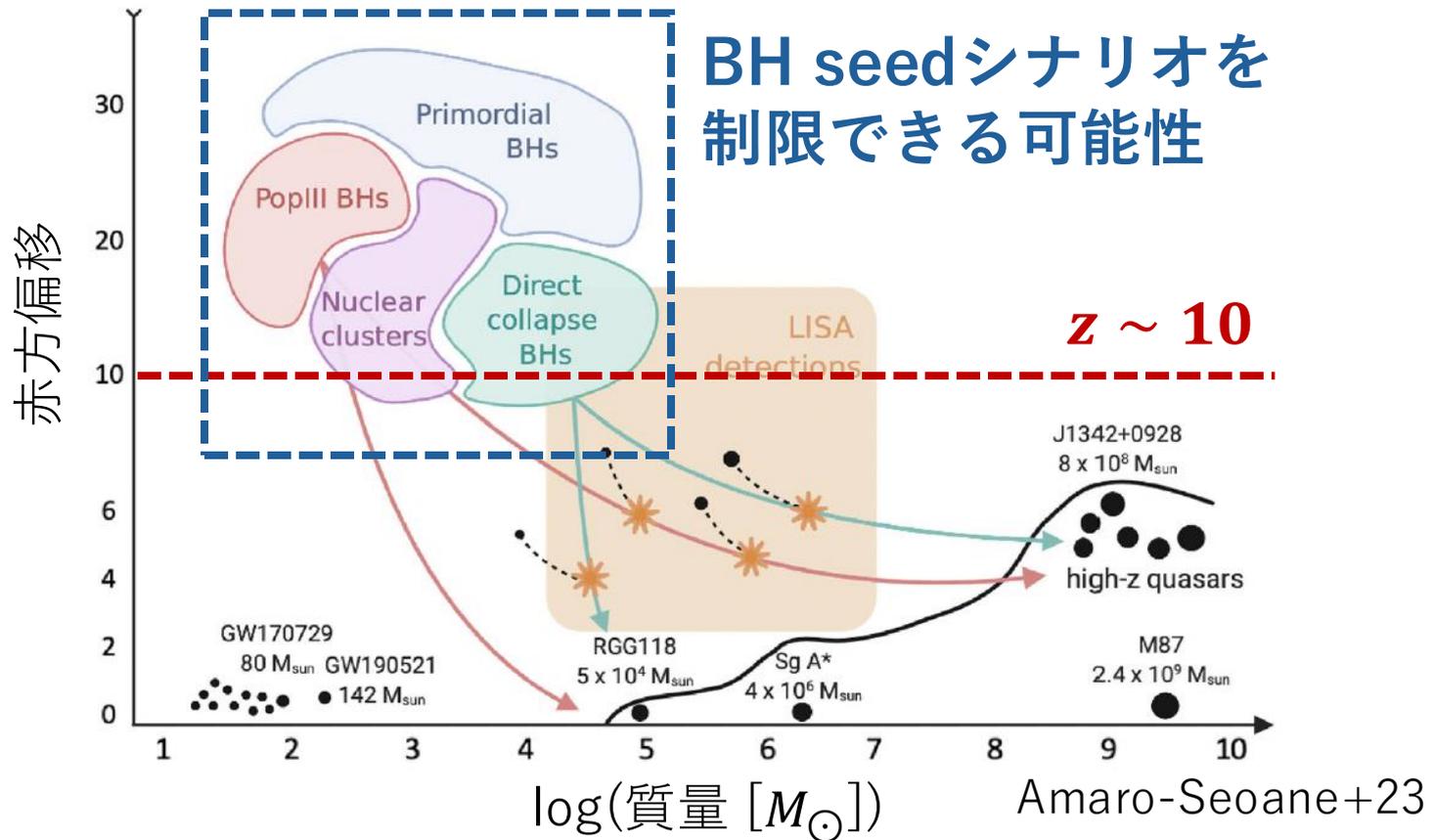
mHz帯のターゲット

$10^4 - 10^7 M_{\odot}$ の連星BH合体起源の重力波
 $z \sim 10$ くらいの高赤方偏移の源も検出できる



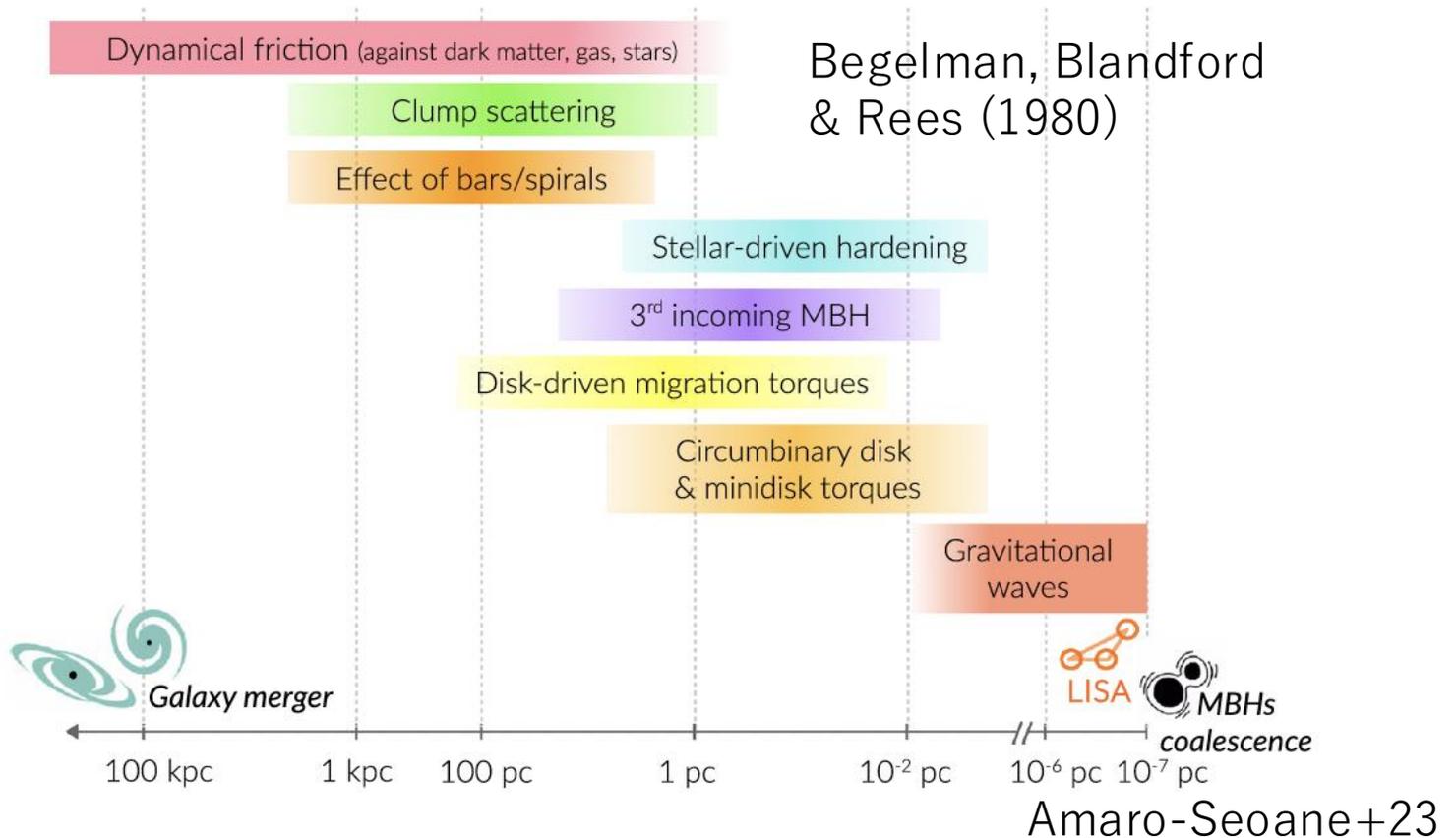
mHz帯のターゲット

$10^4 - 10^7 M_{\odot}$ の連星BH合体起源の重力波
 $z \sim 10$ くらいの高赤方偏移の源も検出できる



合体までのプロセス

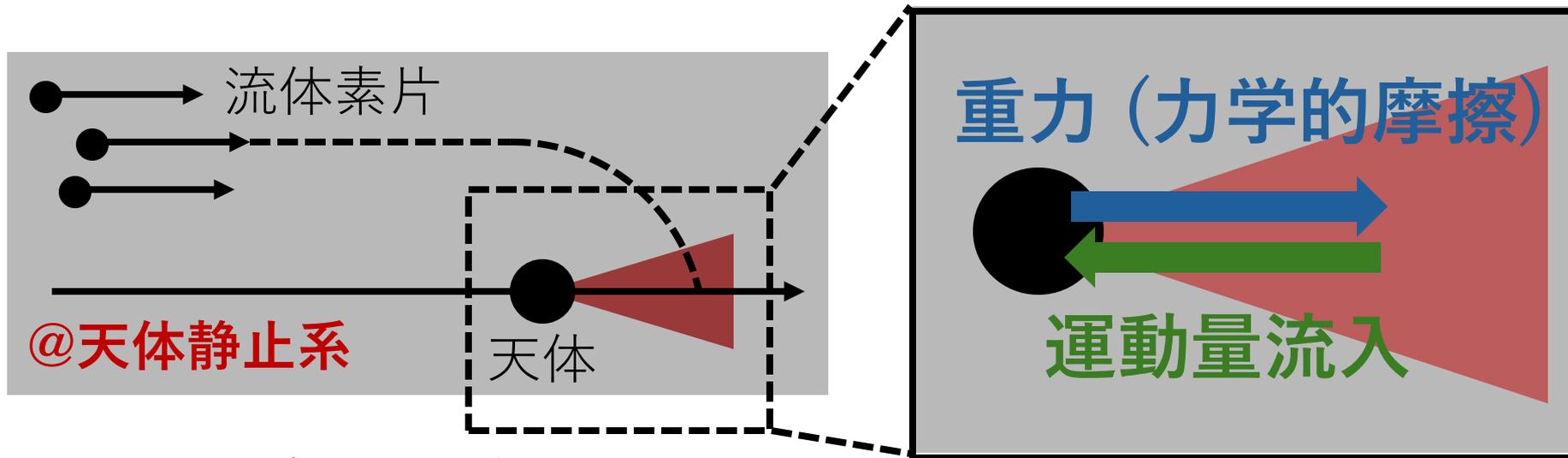
銀河の星や暗黒物質との相互作用・重力波放射による軌道減衰



ガスも寄与する（特に、初期宇宙）

ガス中を運動する降着天体

wakeによる重力+降着による運動量フラックス

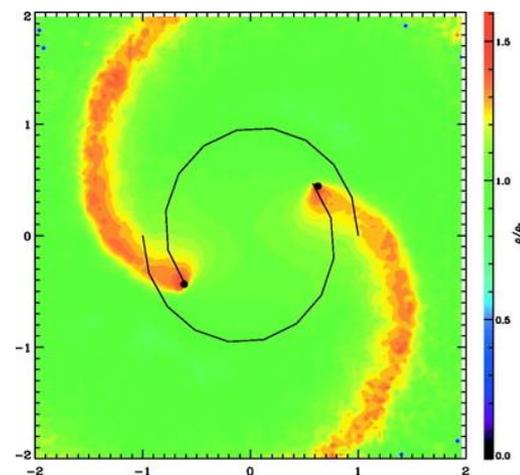


連星の場合でも同様

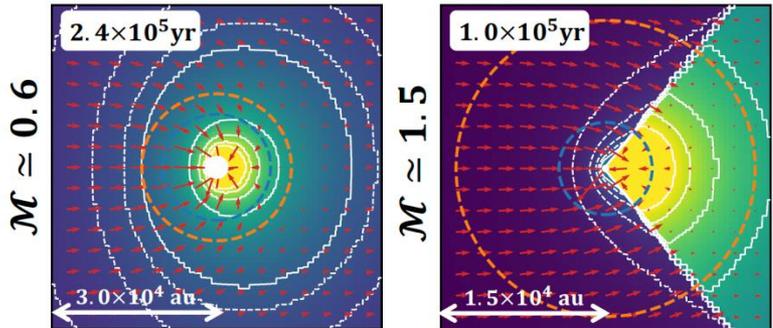
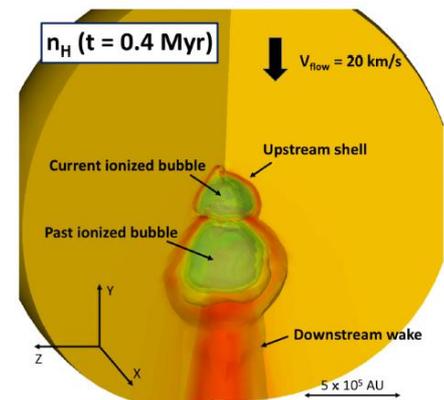
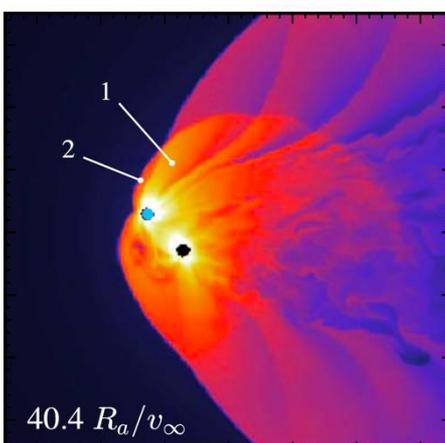
古くから研究が行われてきた

輻射フィードバックを含めた研究はほぼない

Ostriker99
Kim&Kim09
Thun+16
TS+24等



研究の位置付け

	輻射フィードバック無	輻射フィードバック有
単独	 <p> $2.4 \times 10^5 \text{ yr}$ $M \approx 0.6$ $3.0 \times 10^4 \text{ au}$ </p> <p> $1.0 \times 10^5 \text{ yr}$ $M \approx 1.5$ $1.5 \times 10^4 \text{ au}$ </p> <p>TS, Sugimura, Hosokawa & Matsumoto (2024)</p>	 <p> $n_H (t = 0.4 \text{ Myr})$ $v_{\text{flow}} = 20 \text{ km/s}$ Current ionized bubble Past ionized bubble Upstream shell Downstream wake $5 \times 10^5 \text{ AU}$ </p> <p>Park & Bogdanovic17 Toyouchi+20 Ogata+24</p>
連星	 <p> $40.4 R_a / v_\infty$ </p> <p>※重心も運動している</p> <p>Antoni+19</p>	

目標設定

将来の重力波観測に向け、gas-rich環境下にある連星BHが合体に至るまでの軌道進化を、BHから輻射フィードバックを含めて調べる

手

法

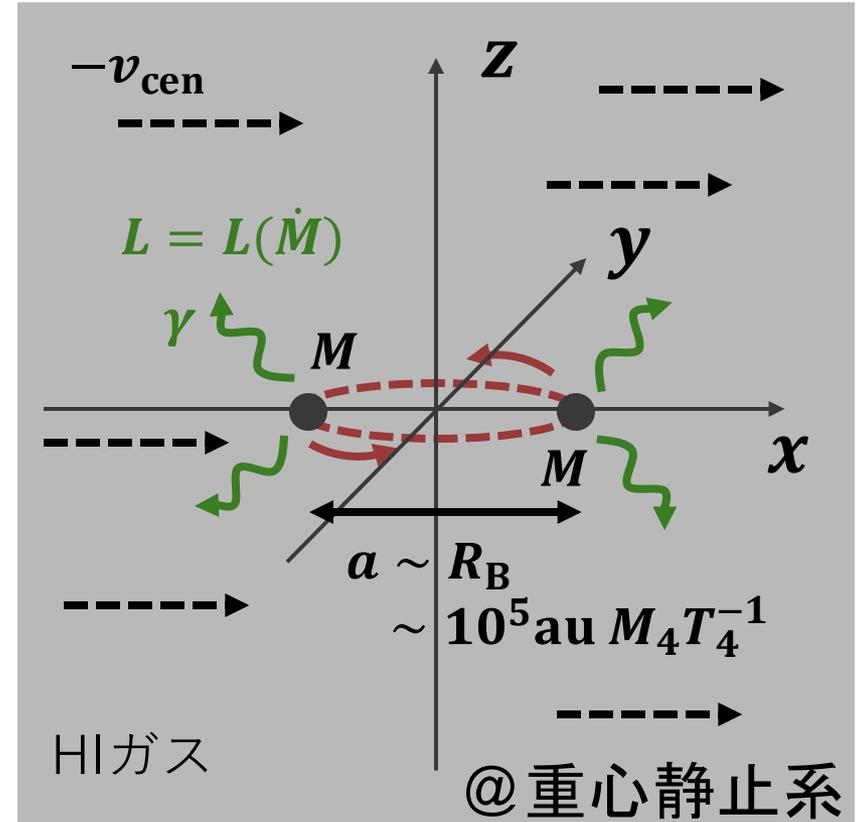
設定

3次元輻射流体シミュレーション



Matsumoto 07
Matsumoto+15
Sugimura+20,23

- + ケプラー回転 + 等速度重心
- + 等方輻射場
($L_\nu \propto \nu^{-1.5}$; Park&Ricotti 11,12,13)
- + 水素の再結合と光電離を考慮
- + 定常状態での
 - (i) 降着率
 - (ii) 重力 + 運動量フラックスを計算
- + ガスの初期密度がパラメータ
 $n_\infty = 10^5, 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$



$$L = \begin{cases} 2L_{\text{Edd}} \left[1 + \ln\left(\frac{\dot{m}}{2}\right) \right] & \dot{m} > 2 \\ L_{\text{Edd}} \dot{m} & \text{otherwise} \end{cases}$$

結界

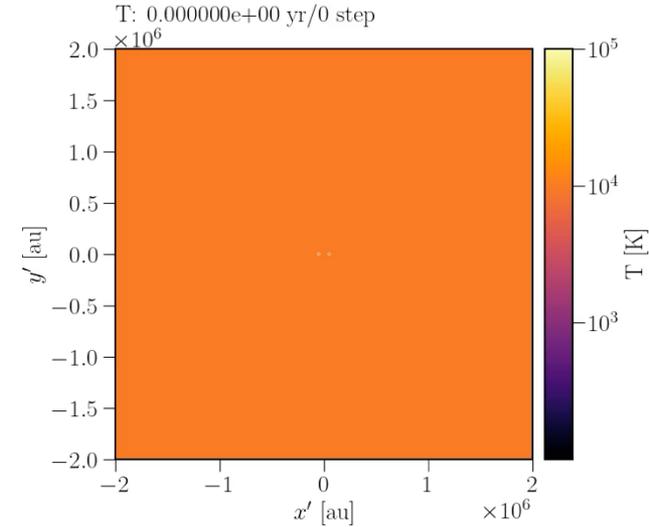
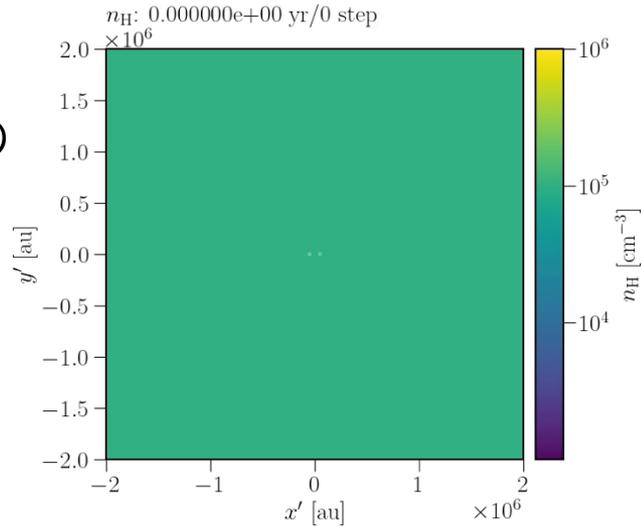
時間発展

数密度

温度

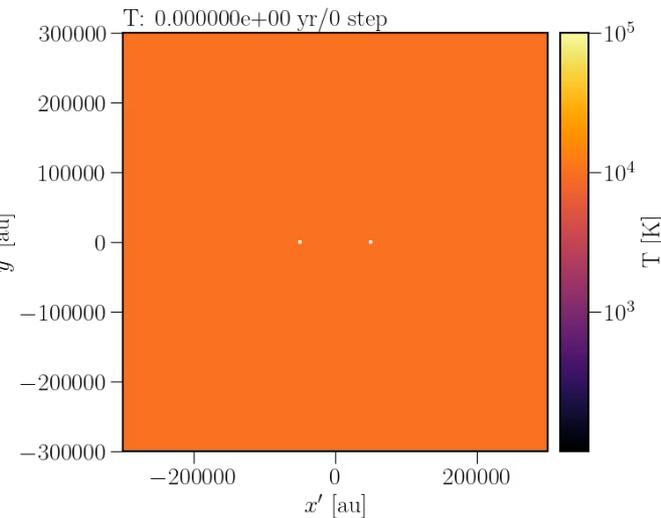
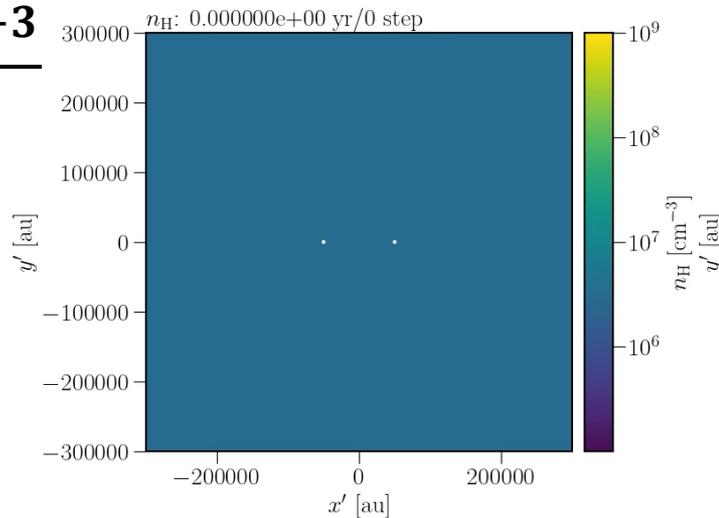
$$\underline{n_{\infty} = 10^5 \text{ cm}^{-3}}$$

電離バブルが重心の
周りに広がる



$$\underline{n_{\infty} = 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}}$$

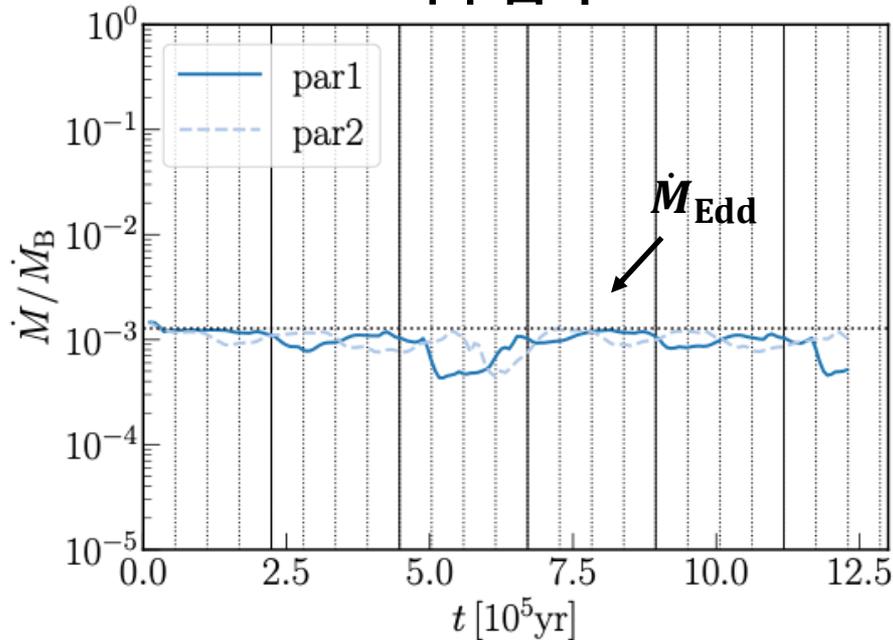
高密度殻が間欠的
に降着



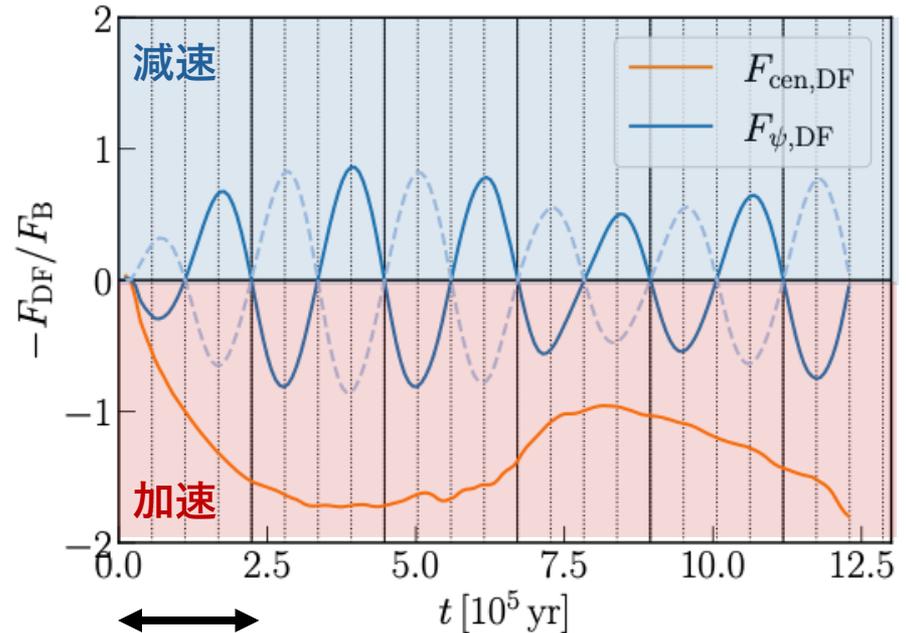
時間発展

$$\underline{n_{\infty} = 10^5 \text{ cm}^{-3}}$$

降着率



重力 + 運動量フラックス



+ $\dot{M} \sim \dot{M}_{\text{Edd}}$

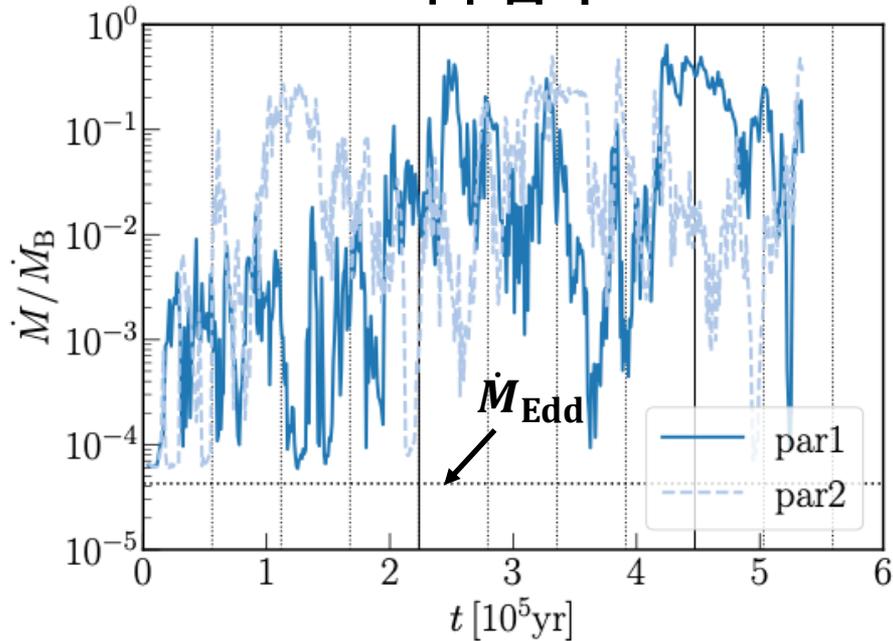
+ 重力 + 運動量フラックスはケプラー周期で振動

+ 重心は**加速**

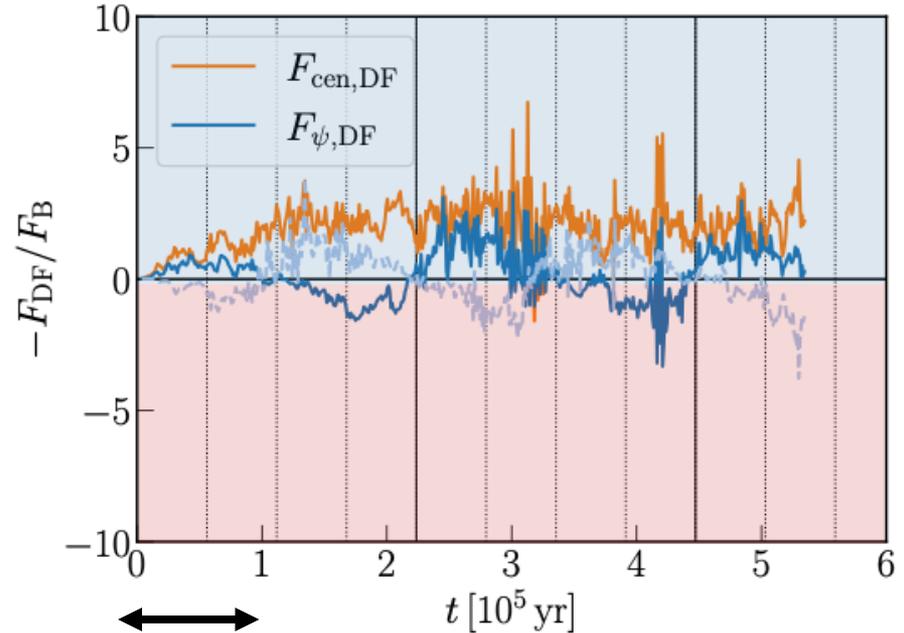
時間発展

$$\underline{n_\infty = 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}}$$

降着率



重力 + 運動量フラックス



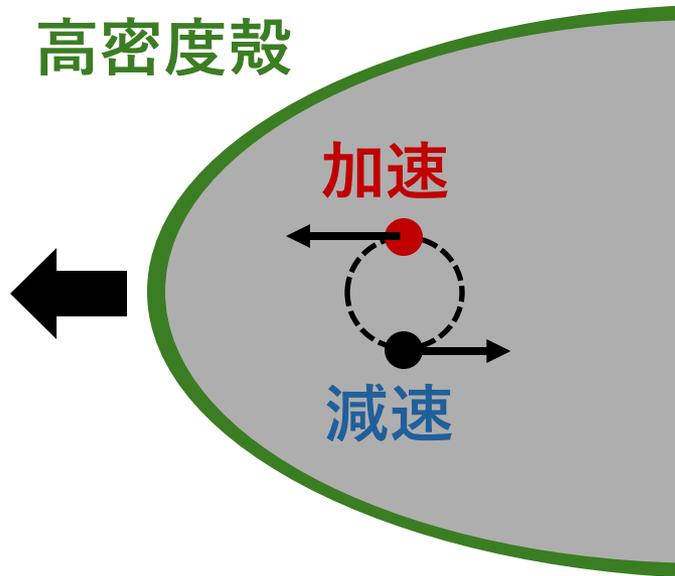
+ $\langle \dot{M} \rangle > \dot{M}_{\text{Edd}}$

+ 重力 + 運動量フラックスはケプラー周期で振動

+ 重心は**減速**

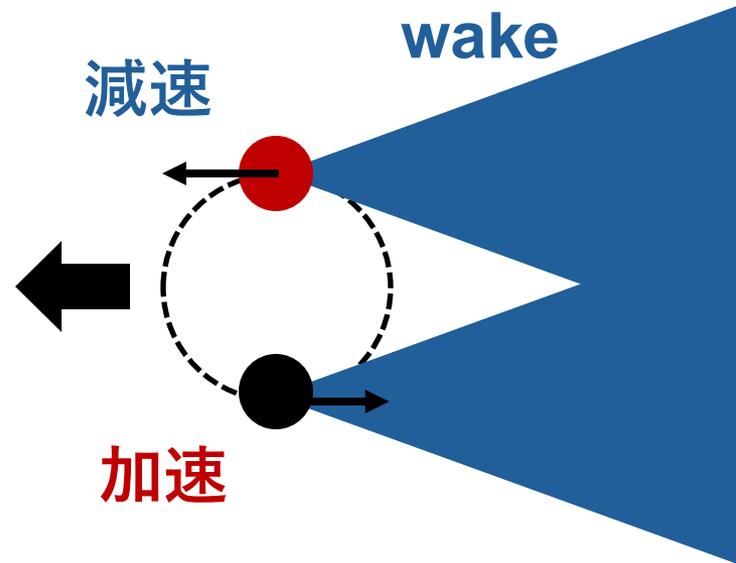
解釈

密度が小さい場合



上流側高密度殻からの重力が
支配的

密度が大きい場合



下流側wakeからの重力が
支配的

請我請刪

関連する長さスケール

ここまで…

連星の運動は超臨界降着の実現可否に影響される

- Bondi-Hoyle-Lyttleton半径

$$R_{\text{BHL}} = \frac{GM}{c_s^2 + v^2}$$

M : 天体質量 v : 天体速度
 c_s : 音速

- 電離領域のサイズ

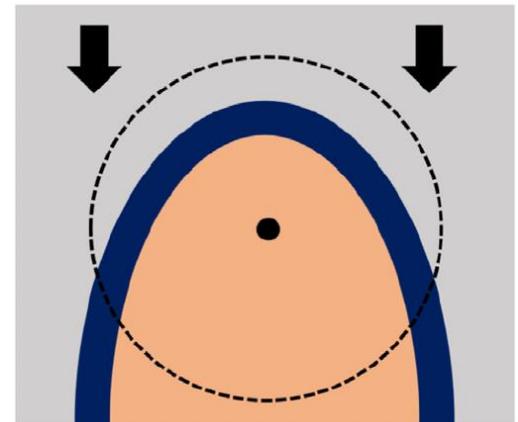
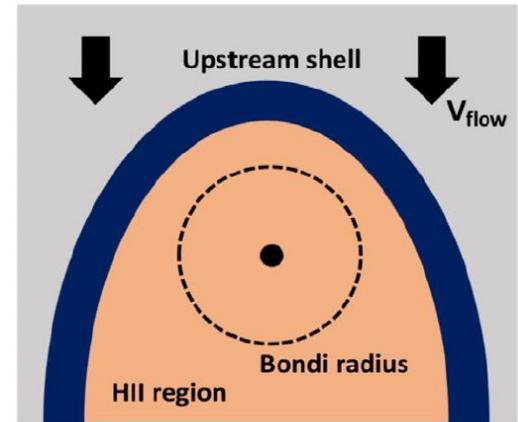
$$R_{\text{HII}} = \left(\frac{3Q}{4\pi\alpha_B n_{\text{HII}}^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Q : 電離光子の数フラックス
 n_{HII} : 電離領域の密度
 α_B : 再結合率係数

$R_{\text{BHL}} > R_{\text{HII}}$ ($\Leftrightarrow n > n_{\text{crit}}$) のとき

超臨界降着実現！

Park&Ricotti13,
Park&Bogdanovic17,
Toyouchi+20,
Sugimura&Ricotti20,
Ogata+24



超臨界降着が起こる条件

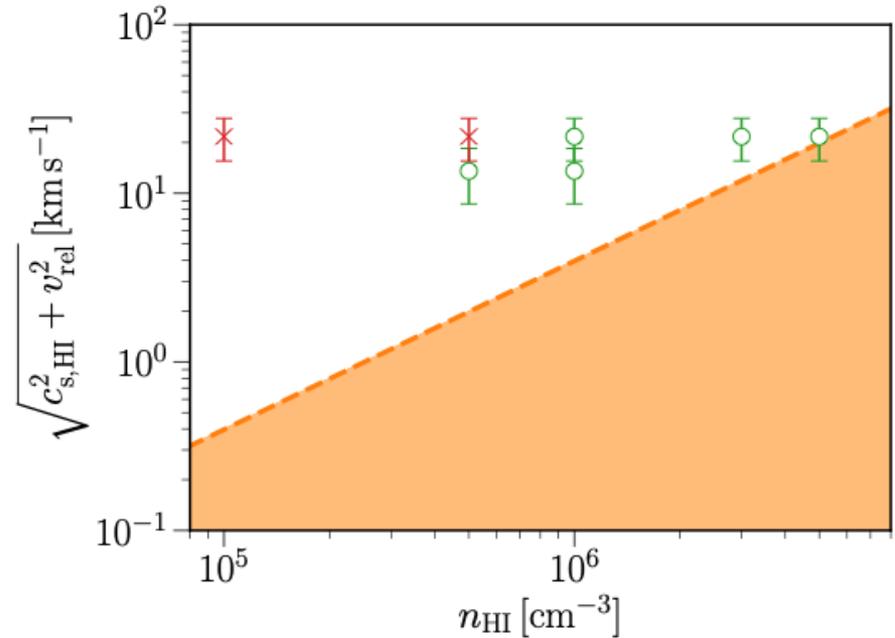
天体速度、密度を変えた計算を更に実施

$$R_{\text{BHL}} \geq R_{\text{HII}}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{M}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\text{HI}}}{10^6 \text{ cm}^{-3}} \right)$$

$$\geq 7.0 \frac{\sqrt{c_{\text{s,HI}}^2 + v_{\text{rel}}^2}}{28 \text{ km s}^{-1}} \left(\frac{T_{\text{HII}}}{5.5 \times 10^4 \text{ K}} \right)^{1.4} \left(\frac{\mu}{1.3} \right)$$

シミュレーション結果と合わない



超臨界降着が起こる条件

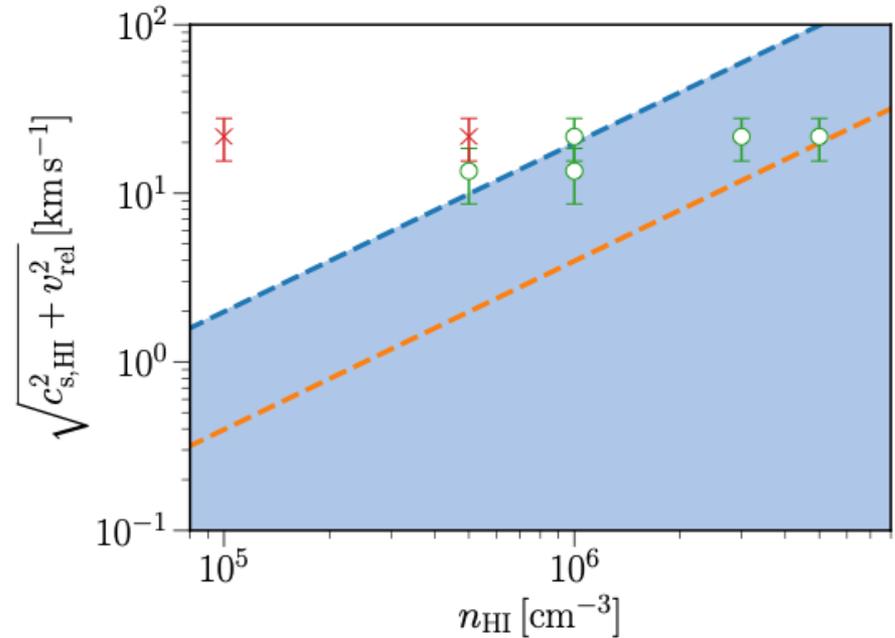
天体速度、密度を変えた計算を更に実施

$$R_{\text{BHL}} \geq R_{\text{HII}}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{M}{10^4 M_{\odot}} \right) \left(\frac{n_{\text{HI}}}{10^6 \text{ cm}^{-3}} \right)$$

$$\geq 7.0 \frac{\sqrt{c_{\text{s,HI}}^2 + v_{\text{rel}}^2}}{28 \text{ km s}^{-1}} \left(\frac{T_{\text{HII}}}{5.5 \times 10^4 \text{ K}} \right)^{1.4} \left(\frac{\mu}{1.3} \right)$$

シミュレーション結果と合わない



伴星が作るwakeによって周囲の密度が高くなることを考慮

$$R_{\text{BHL}} \geq R_{\text{HII}}(n_{\text{HII}} \rightarrow 5n_{\text{HII}}) \quad \text{結果を再現！}$$

ま と め

と 展 望

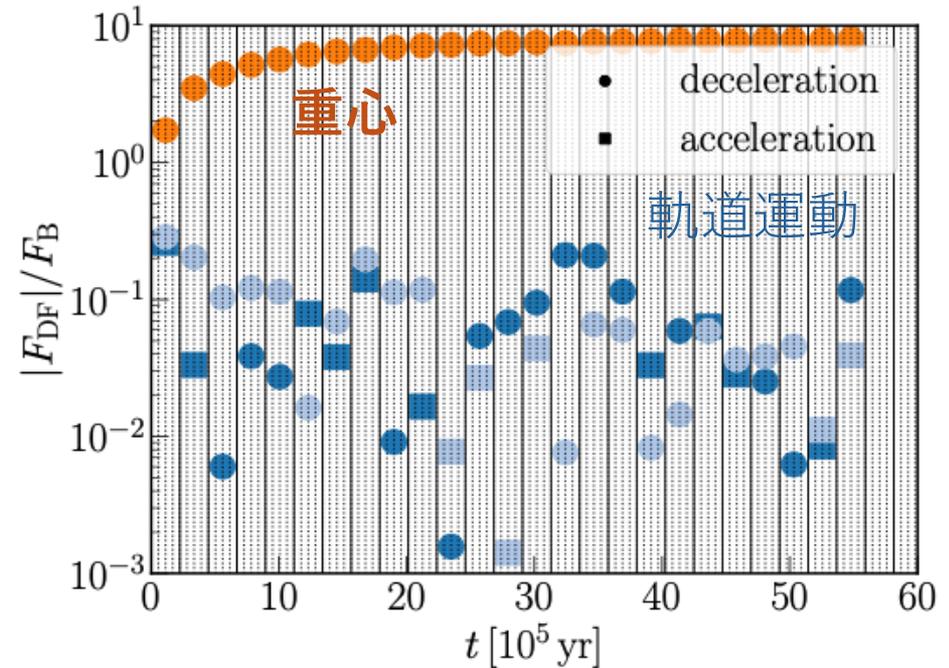
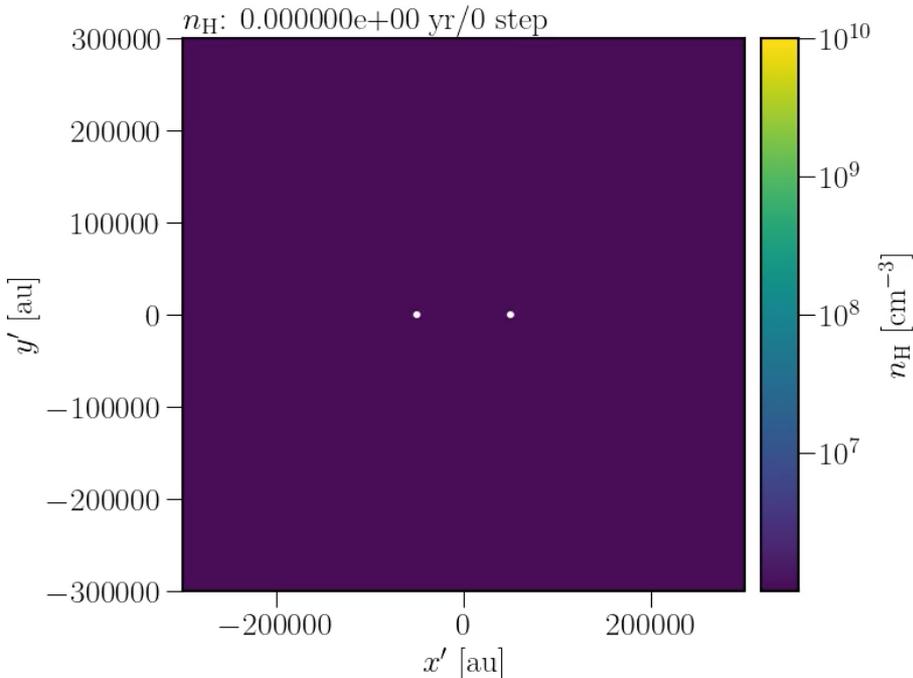
まとめと展望

- 輻射フィードバックを考慮したときに、連星BHがガスから受ける力学的摩擦について調べた
- 重心運動は概ね先行研究の通り：低密度では電離バブルによって形成された高密度殻からの重力によって加速、高密度では、下流側のwakeによって減速
- 個々のBHが受ける力学的摩擦はケプラー周期で振動
- 超臨界降着が起きる条件は、伴星が作るwakeによる実効的な密度上昇を考慮し、BHL半径と電離領域のサイズを比較することで理解できる
- 今後はより長時間の計算を行い、個々のBHが一周のうちに正味どちら向きの力を受けるかを調べる

軌道運動

結局、連星は縮むor離れる？

何周も回して、一周毎の平均をとる（とりあえず輻射なしの場合）



周期平均では加速と減速が10%くらいで打ち消し合い、ランダムになる？

まだ、境界条件の影響等を取り除けた訳ではないので未確定