
SS433ジェット噴出・伝搬の 2次元軸対称シミュレーション

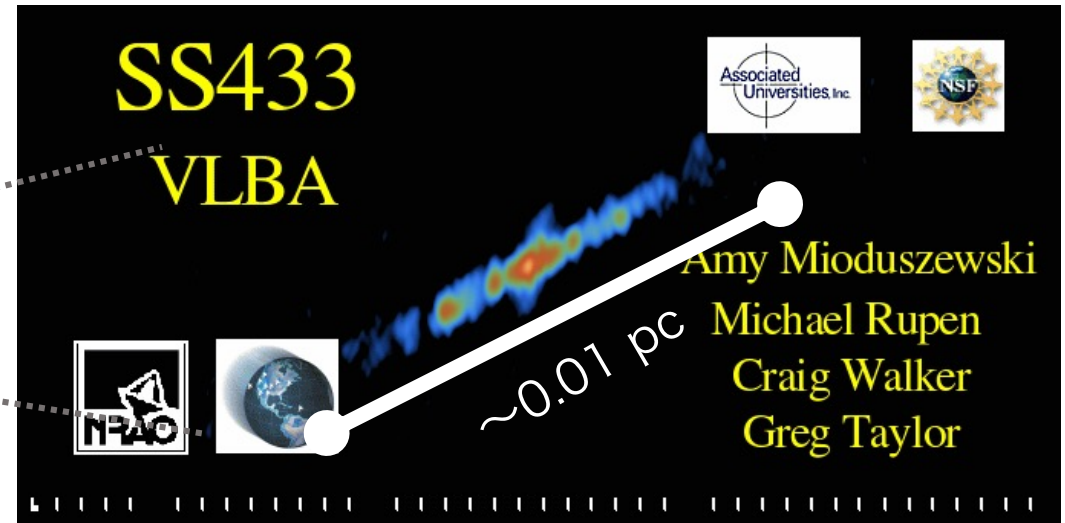
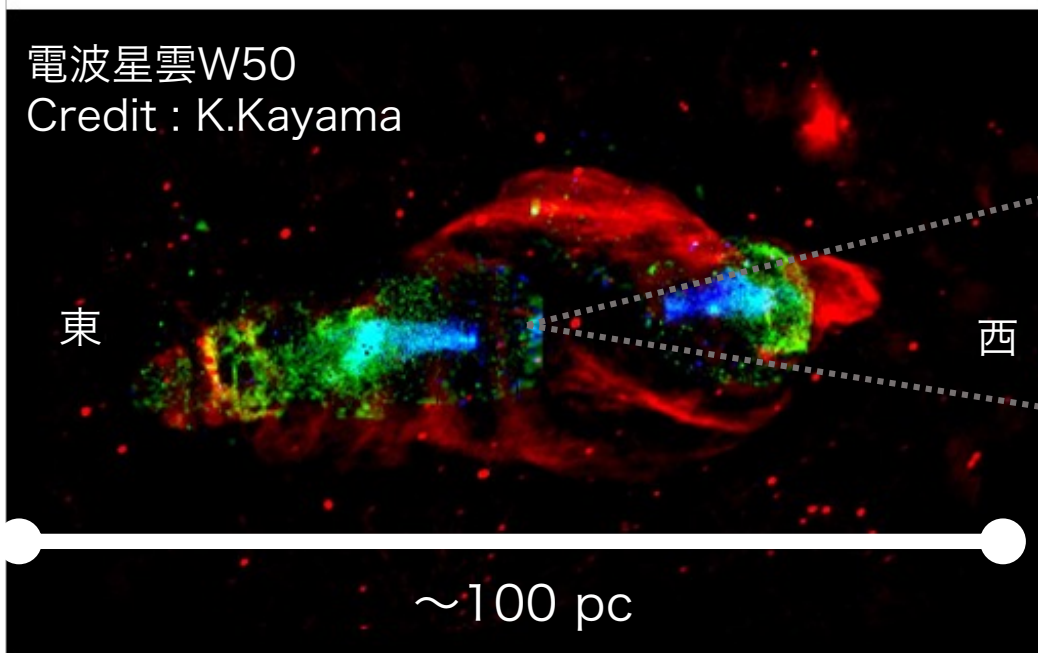
五十嵐太一

国立天文台/立教大学

町田真美(国立天文台)

ブラックホール大研究会2024 2024 2/28-3/1@御殿場高原ホテル

W50/SS433



VLBAによる、SS433から噴出する歳差ジェット

- 広がった電波星雲W50
- 中心のX線連星SS433からのジェットにより東西に引き延ばされた構造
- ジェットと相互作用することにより、電波からX線を放射
- 近年、MeV~TeVガンマ線が観測されたことから、銀河系内における粒子加速源としても注目される

SS433ジェット

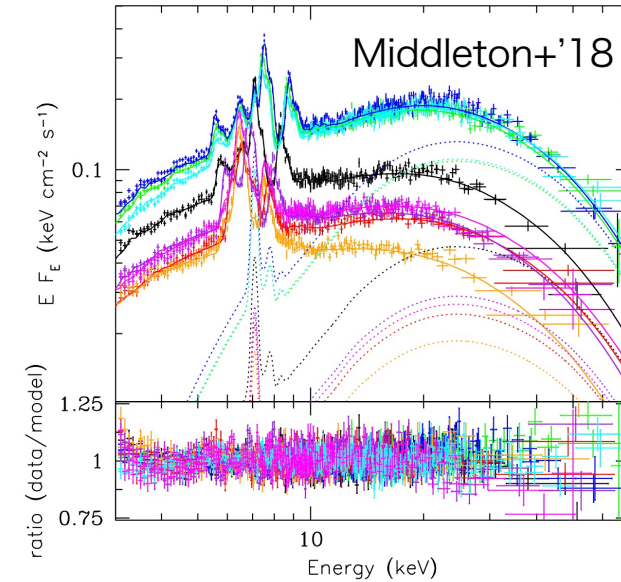
SS433

- 光速の26%程度のジェットが噴出
- ジェットは約170日で歳差
- 中心にはBH or NSとA型巨星からなる
 $10M_{\text{solar}} + 30M_{\text{solar}}$ (Cherepashchuk+'21)

謎1：中心天体は何？

伴星・主星の質量は不定性が大きい

- 主星のコンパクト天体はBH or NS?
- 伴星は？スペクトルからA型巨星 (Hillwig+'21)：
本当？降着円盤・ジェットからのコンタミは？



近づく
ジェット

遠ざかる
ジェット

謎2：ジェット

たくさんの輝線

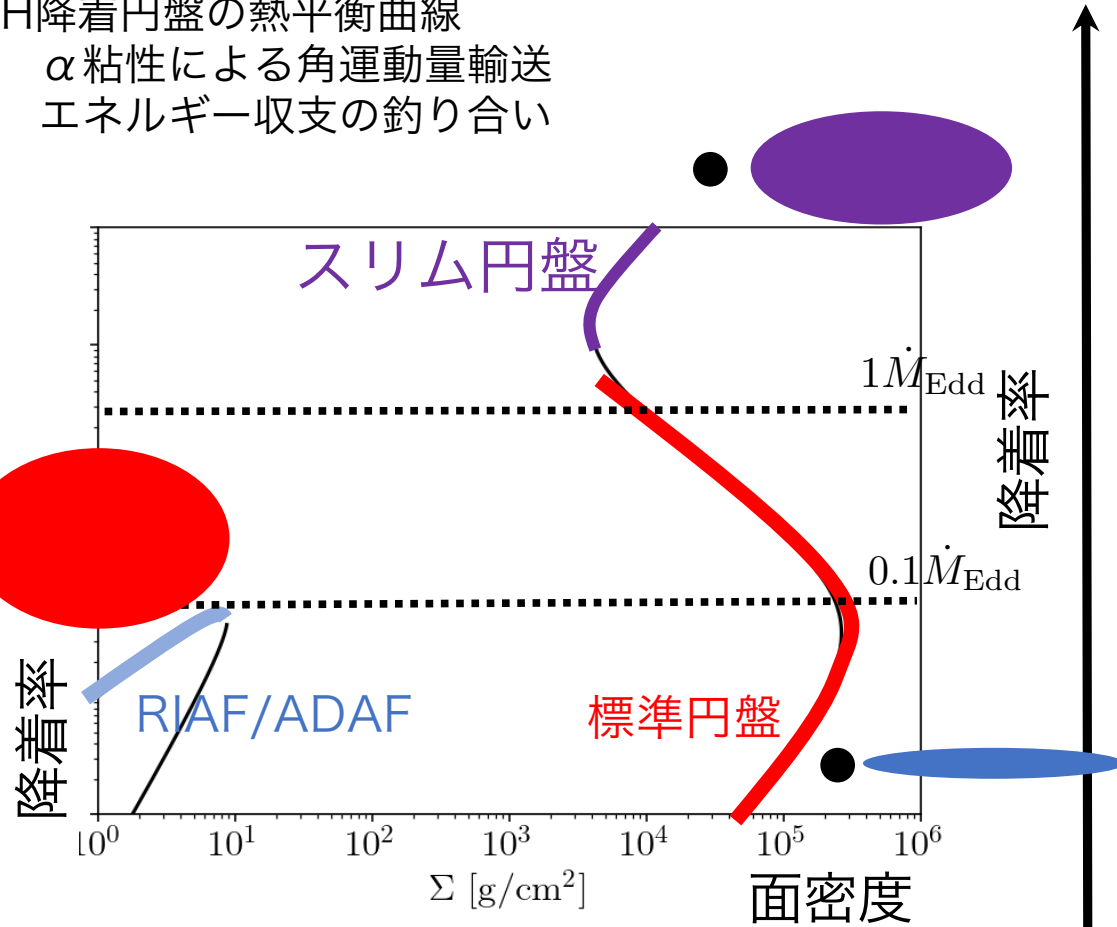
- ジェットのどの部分を見てる？
- ジェットの性質は？
- 本当に0.26c?
- ジェットとW50形成の関係は？

降着円盤の性質を調べることで、謎に迫りたい

BH降着流の状態

BH降着円盤の熱平衡曲線

- α 粘性による角運動量輸送
- エネルギー収支の釣り合い



$$\dot{M}_{\text{Edd}} = L_{\text{Edd}}/c^2 = \frac{4\pi GM_{\text{BH}}}{\kappa_{\text{es}}c}$$

スリム円盤 Abramowicz+1988

- 移流冷却 = 粘性加熱
- 中温・輻射圧優勢・明るい
- 超臨界降着流
- SS 433, ULXs

標準円盤 Shakura+Sunyaev 1978

- 輻射冷却 = 粘性加熱
- 低温・ガス圧優勢・少し明るい
- AGNの紫外線放射、ソフトステート

RIAF Narayan+Yi 1995

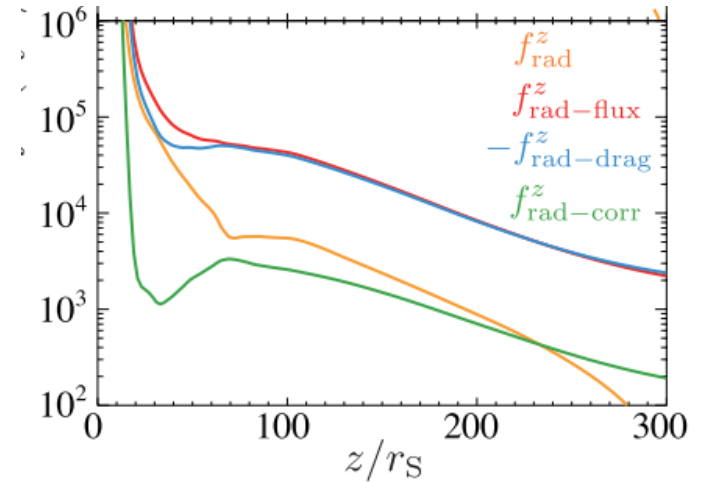
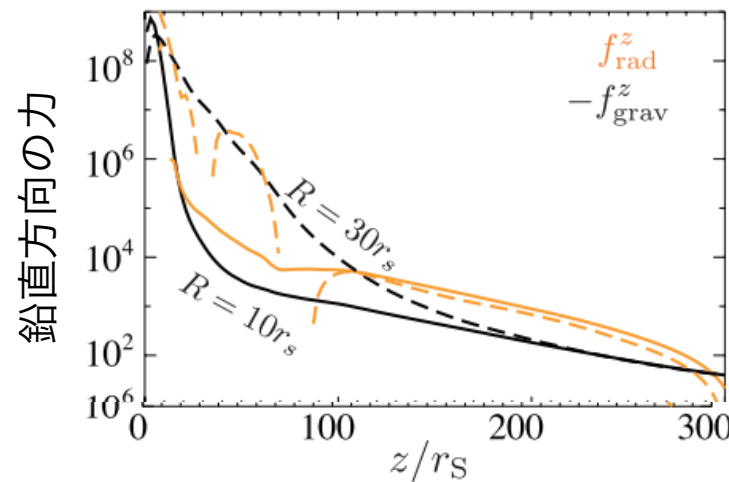
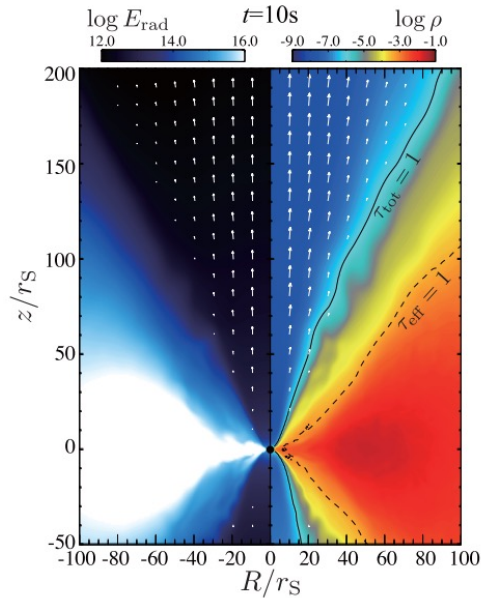
- 移流冷却 = 粘性加熱
- 高温・ガス圧優勢・暗い
- 電波銀河(M87)、ハードステート

超臨界降着流のシミュレーション

輻射流体シミュレーション w/ α 粘性 e.g., Ohsuga '06, Ohsuga '07

輻射磁気流体シミュレーション e.g., Ohsuga+ '09, Takauchi+ '10, '13

一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション e.g., Takahashi+ '16, 18, Liska+ '20,



Takahashi+'14

- 輻射圧に駆動された強力なジェット・アウトフローが噴出
 - 輻射圧～輻射抵抗になるまでジェットが加速
 - 速度は光速の数10%→SS 433の観測と大体合う
 - しかし、計算領域はBH半径の100倍程度→もっと広い範囲を調べる必要がある

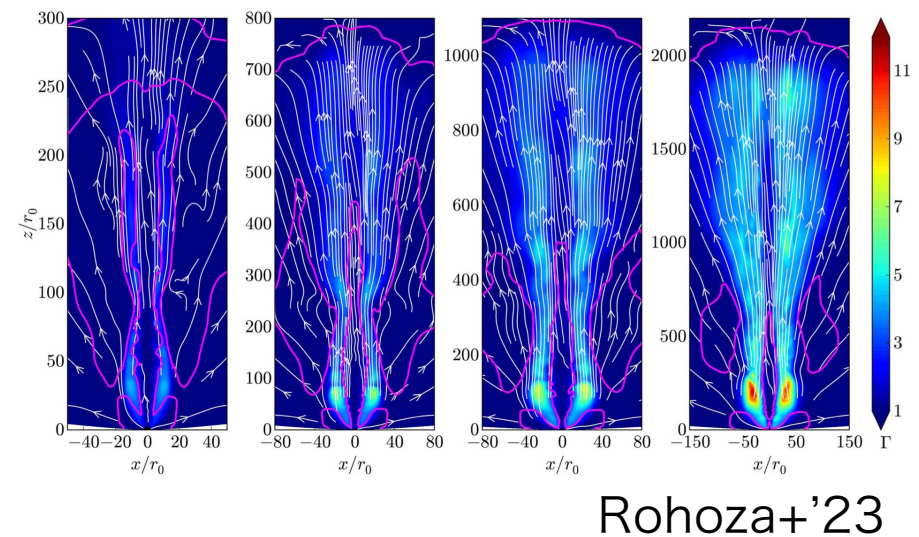
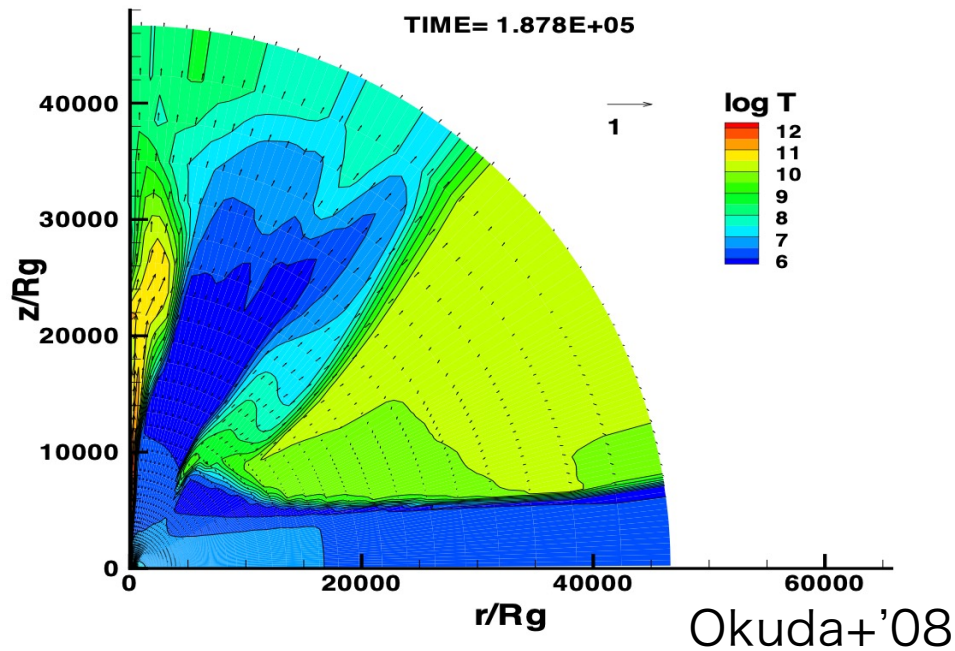
ジェット噴出・長距離伝搬のシミュレーション

輻射流体シミュレーションが実施された
(Okuda+'08, Takeuchi+'13,'14, Kobayashi+'19)

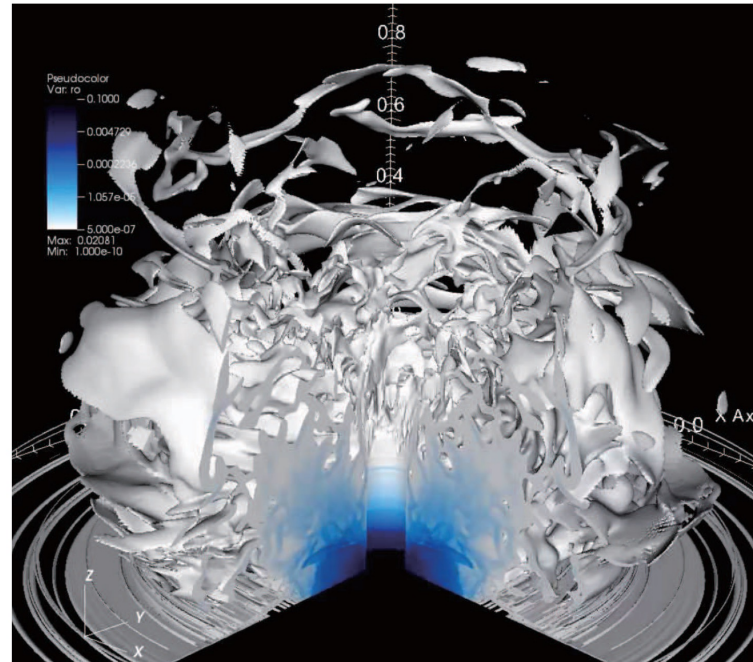
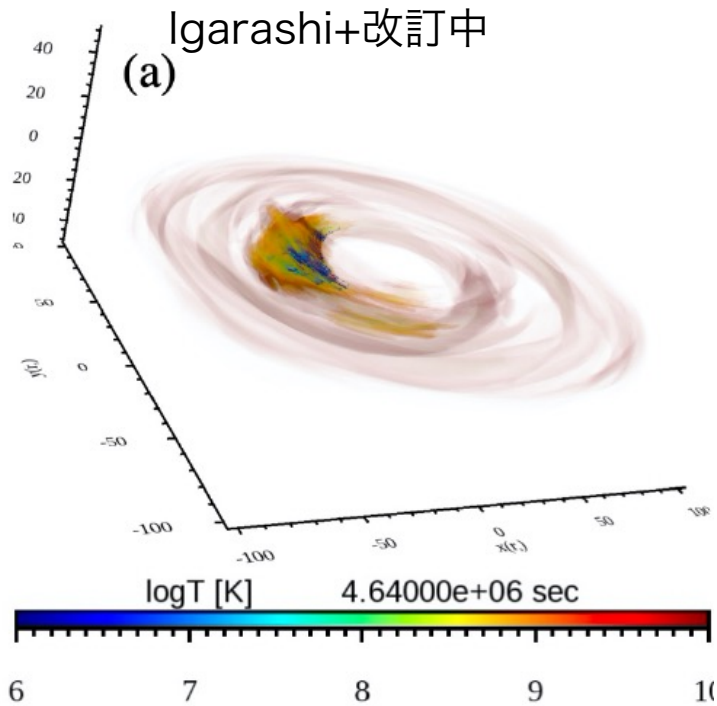
- 低解像度で乱流等が分解されていない

(相対論的)磁気流体シミュレーションでは、
ジェット噴出から伝搬を広い領域を含め実
施されている (Duran+'17, Rohoza+'23)

- M87などのジェットを想定してい
るため、輻射が考慮されていない



輻射磁気流体コード:CANS+R



Kobayashi+'19

高解像度(空間5次精度)コードCANS+Rを用い、
超臨界降着流からのジェット噴出・伝搬を計算

輻射磁気流体コード:CANS+R

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + p_t \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right] = -\rho \nabla \phi_{\text{PN}} - \mathbf{S}$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} + \nabla \cdot \left[(E_t + p_{\text{gas}}) \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})}{4\pi} \right] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \phi_{\text{PN}} - c S_0$$

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

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = c S_0 \quad 0^{\text{th}} \text{ moment}$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{P} = \mathbf{S} \quad 1^{\text{st}} \text{ moment}$$

$$c S_0 = \rho \kappa_{\text{ff}} c (4\pi B(T) - E) + \rho (\kappa_{\text{ff}} - \kappa_{\text{es}}) \frac{\mathbf{v}}{c} \cdot [\mathbf{F} - (\mathbf{v} E + \mathbf{v} \cdot \mathbf{P})]$$

$$\mathbf{S} = \rho \kappa_{\text{ff}} \frac{\mathbf{v}}{c} (4\pi B(T) - E) - \rho (\kappa_{\text{ff}} + \kappa_{\text{es}}) \frac{1}{c} \cdot [\mathbf{F} - (\mathbf{v} E + \mathbf{v} \cdot \mathbf{P})]$$

$$\kappa_{\text{es}} = \sigma_{\text{Thomson}} / m_{\text{proton}} \text{ g/cm}^2$$

$$\kappa_{\text{ff}} = 0.64 \times 10^{23} \rho T^{-7/2} \text{ cm}^2/\text{g}$$

MHD方程式

CANS+ (Matsumoto+'19)

HLLD+MP5による空間5次精度

輻射輸送方程式

M1-closure (Gonzales+'07, Takahashi + Ohsuga '13)

輻射ソース項

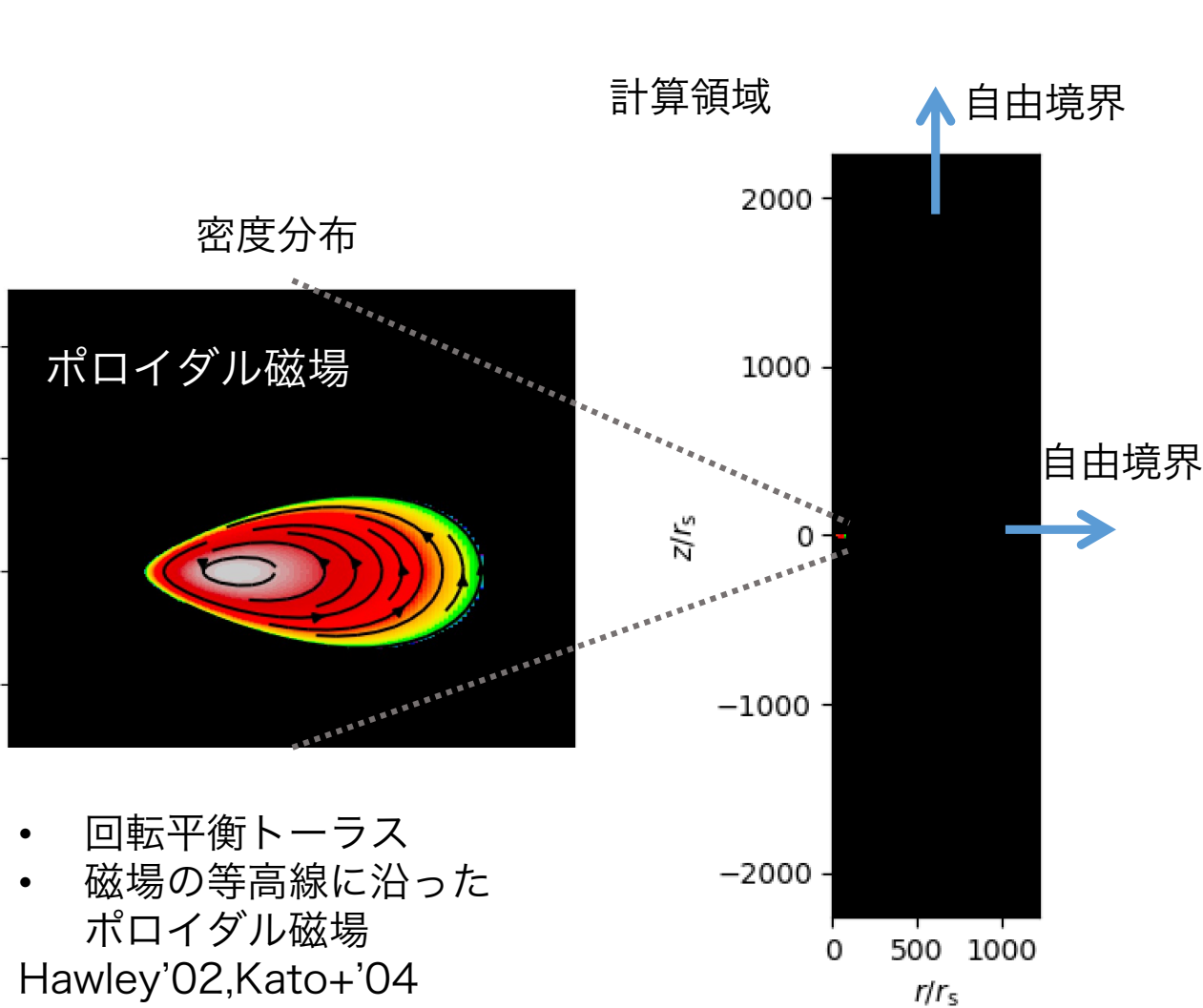
v/c の1次まで計算し、輻射抵抗などを考慮

Opacity

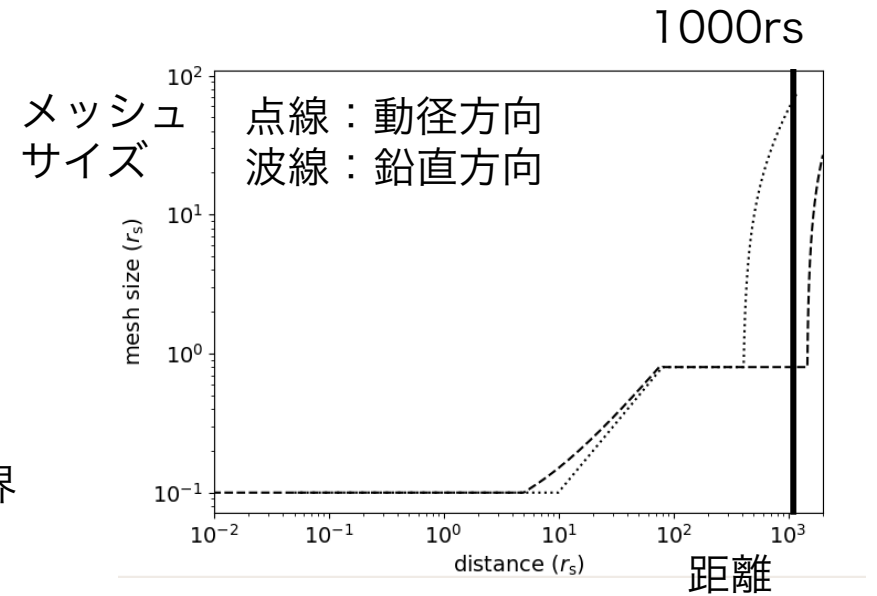
制動放射、電子散乱を考慮

逆コンプトン散乱・シンクロトロンはなし

初期条件



- 回転平衡トラス
 - 磁場の等高線に沿ったポロイダル磁場
- Hawley'02, Kato+'04



2次元軸対称円筒座標系

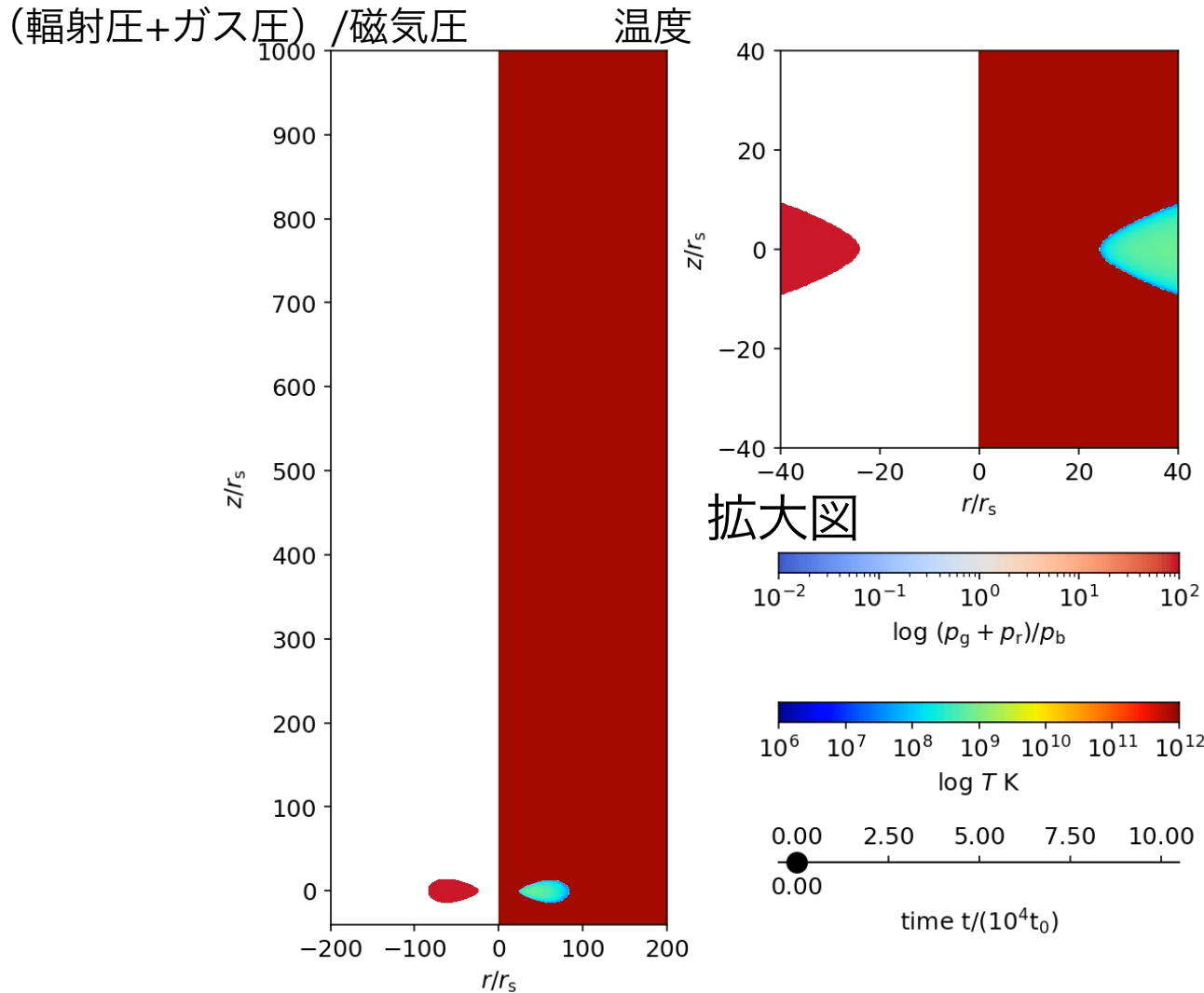
• $(N_r, N_\phi, N_z) = (384, 1, 1540)$

BH質量

• $M_{BH} = 15 M_{solar}$

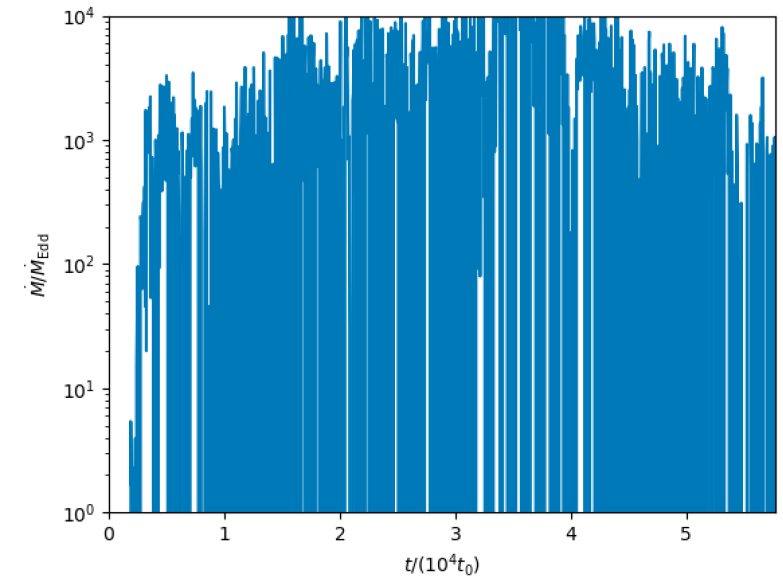
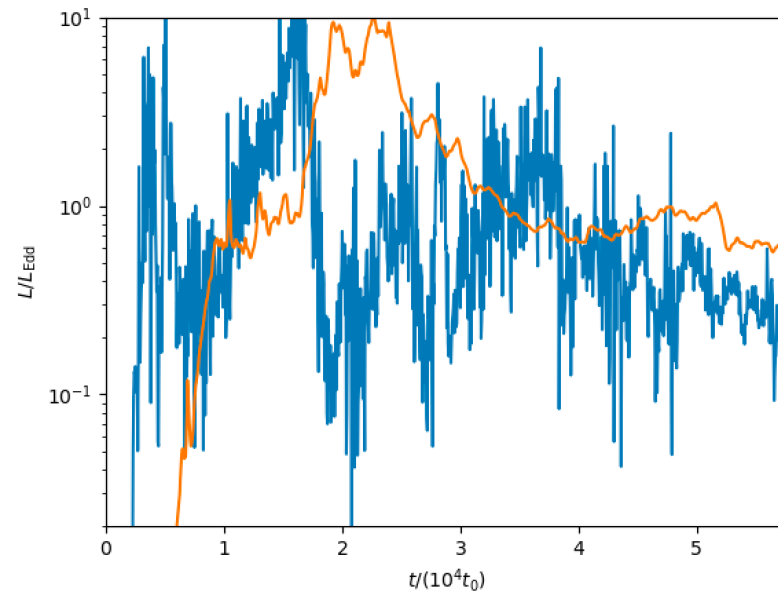
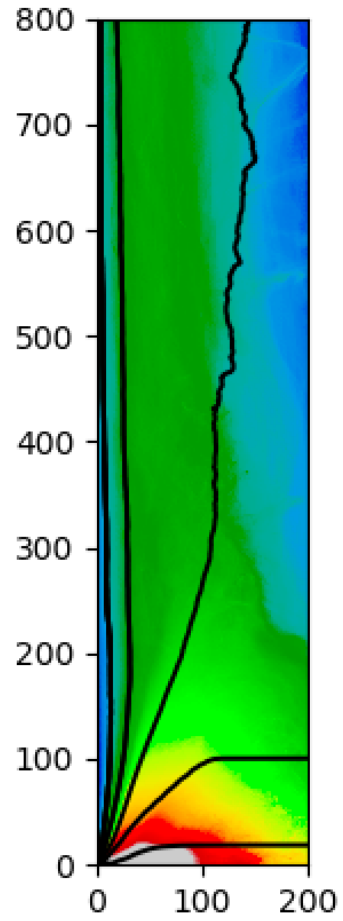
• $r_s = 45 \text{ km}$

ジェット伝搬



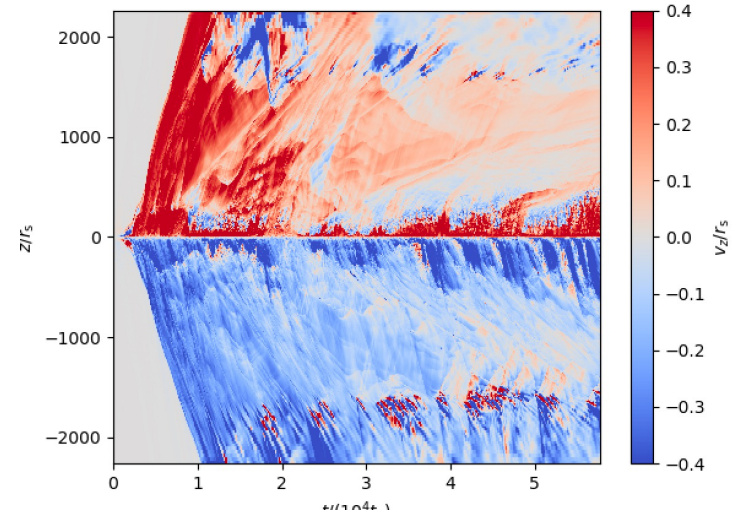
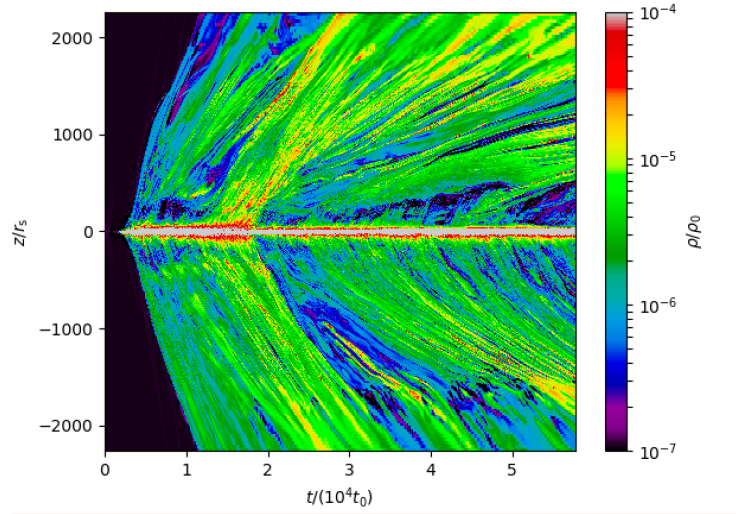
- 輻射圧に駆動された、ジェットが噴出（最初は磁気圧）
- インナートーラスが形成
- 降着率はエディントン降着率の1000倍程度
- ~10rs程度の速く、低密度・高温なジェットと、その周り~100rsくらいまで広がる少し遅く高密度なコクーン

時間変動

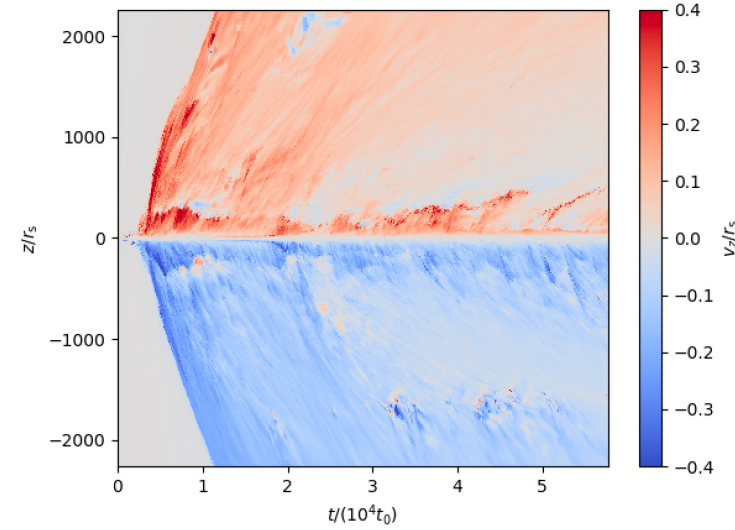
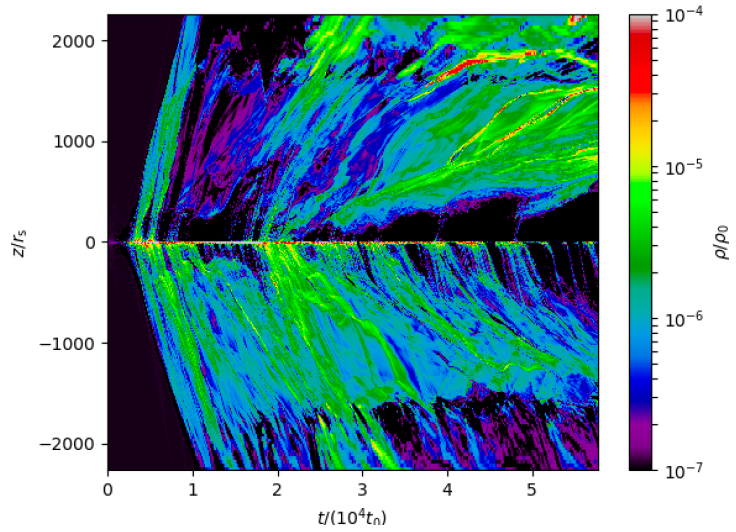


ジェット内部の構造

R=20rs



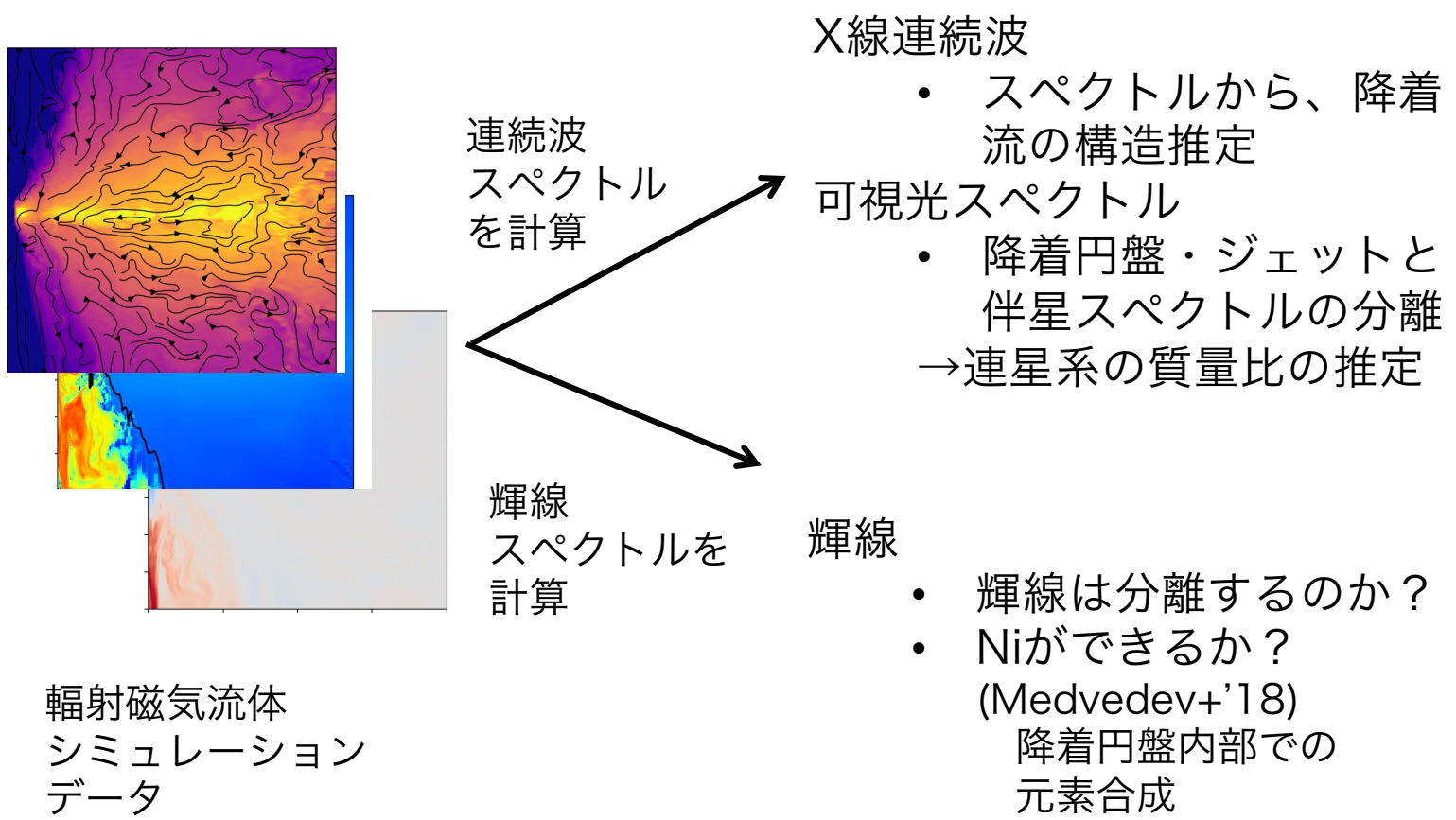
R=3rs



- SS433に向けた、BH周囲の超臨界降着流の2次元軸対称・輻射磁気流体シミュレーションを実施・超臨界降着流からのジェット噴出を再現できた
 - 輻射圧により駆動されるジェットが噴出
 - 速度は光速の~10%
 - ~1000 r_s までジェットが伝搬
- このようなシミュレーションからW50/SS433の何を調べるか？

Future work

- 降着円盤・伴星の観測的情報は空間分解できないため、基本的にスペクトルのみ

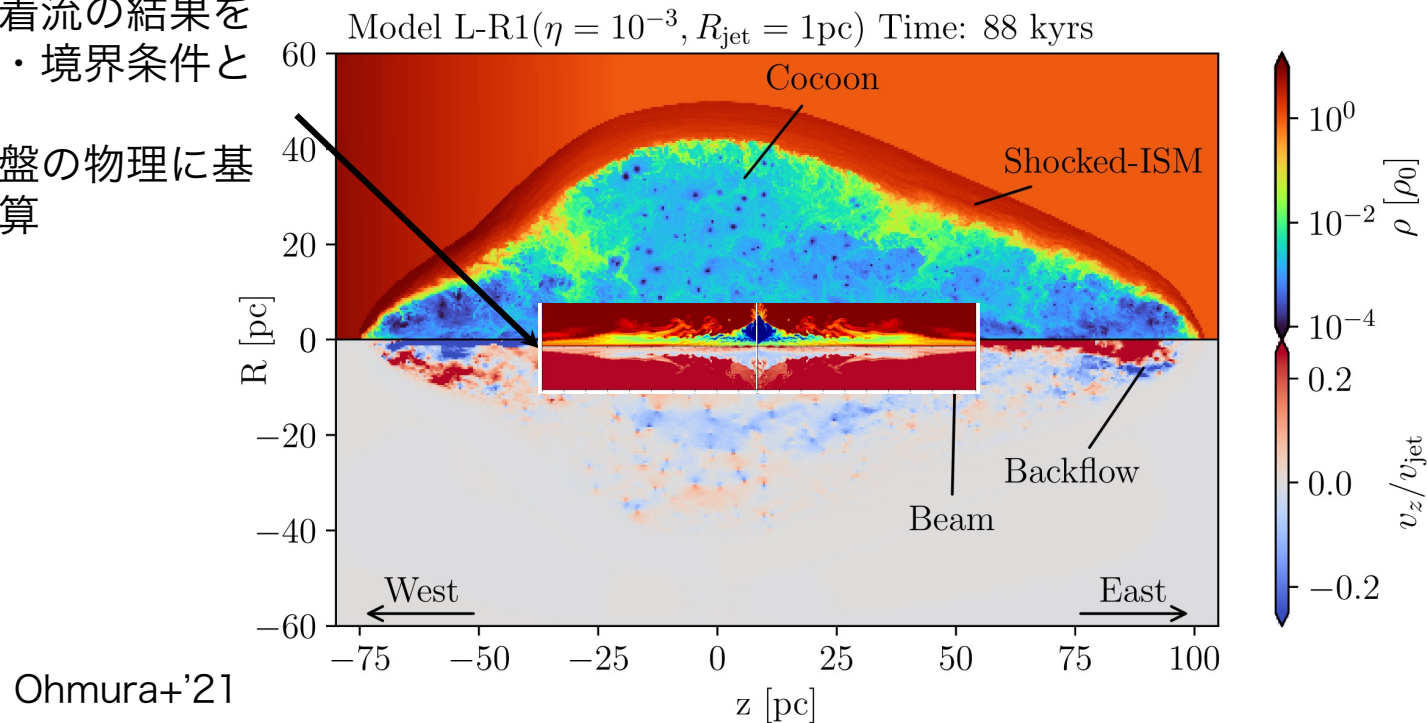


Future work

降着円盤からW50のスケールまでをシミュレーションするのは、2Dでもさすがに厳しい。。。
ジェットを注入することにより、W50形成のシミュレーションが実施されている
(e.g., Ohmura+'21)

- ジェットの注入速度や密度、磁場強度およびジェットの周りの物理量は仮定

超臨界降着流の結果を
初期条件・境界条件と
して代入
→降着円盤の物理に基づいた計算



SS433に向けた、BH周囲の超臨界降着流の2次元軸対称・輻射磁気流体シミュレーションのテスト計算を実施

広範囲・高解像度・長時間のシミュレーションができそう

今後は、

- 輻射磁気流体シミュレーションをもとにしたスペクトル解析
- ジェットの長距離伝搬
- W50とジェットの相互作用
- 降着円盤起源の時間変動