

輻射磁気流体シミュレーション

高橋博之
国立天文台

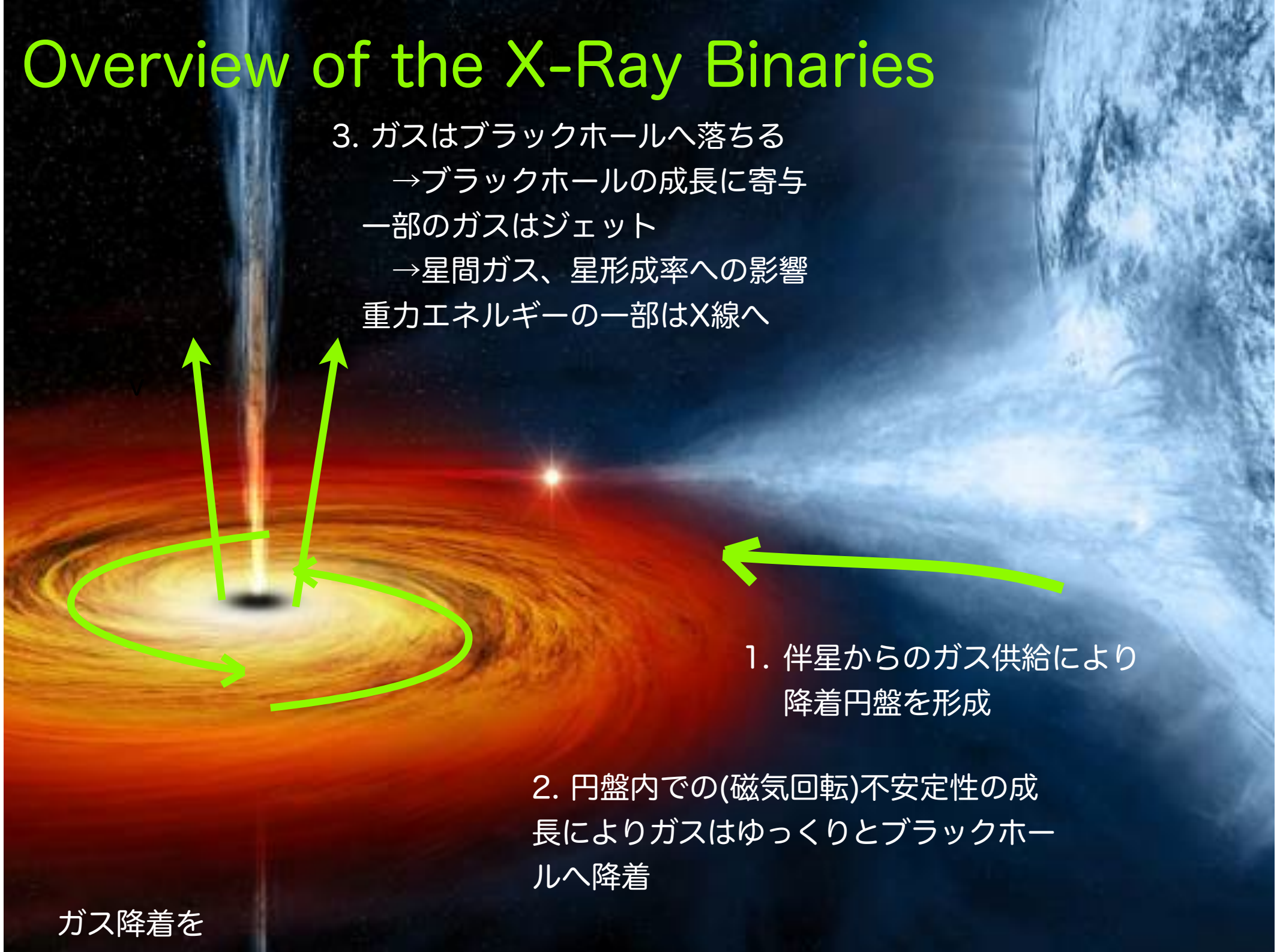
Overview of the X-Ray Binaries

3. ガスはブラックホールへ落ちる
→ブラックホールの成長に寄与
一部のガスはジェット
→星間ガス、星形成率への影響
重力エネルギーの一部はX線へ

1. 伴星からのガス供給により
降着円盤を形成

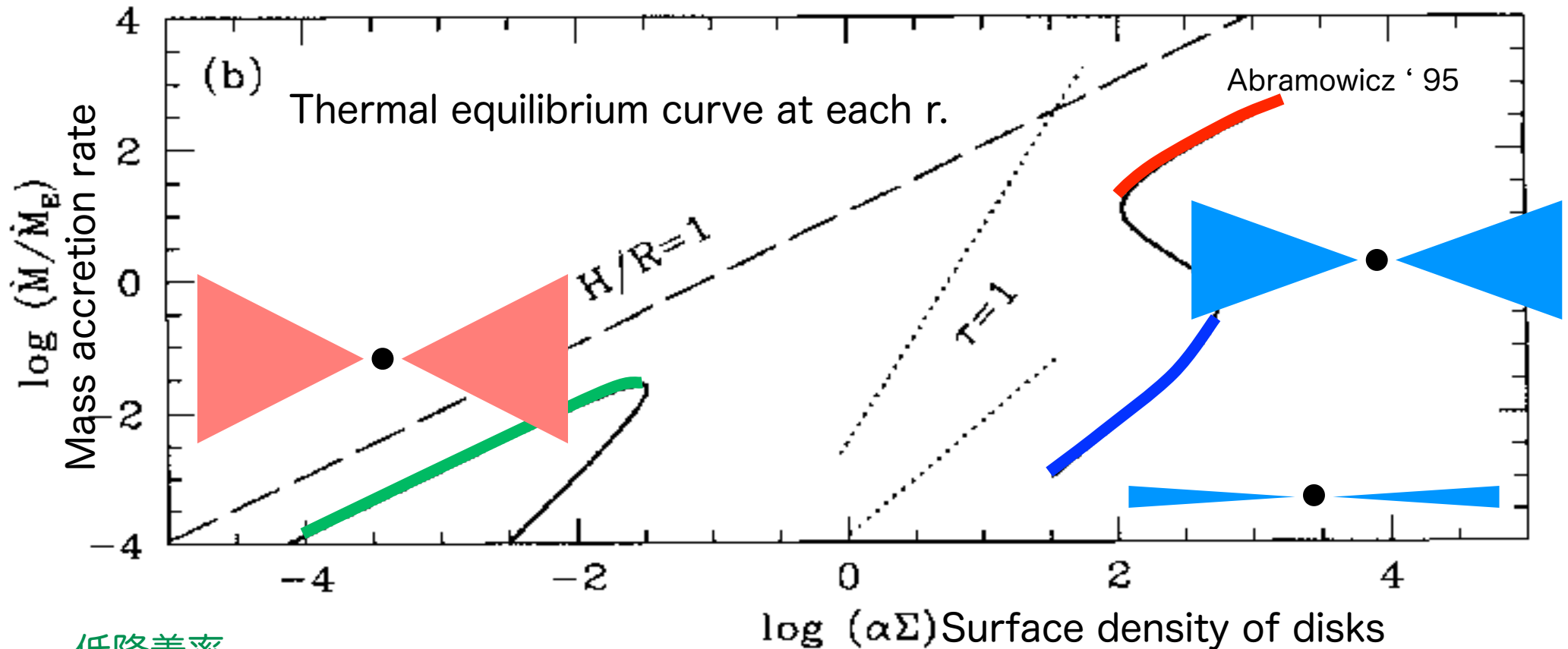
2. 円盤内での(磁気回転)不安定性の成長によりガスはゆっくりとブラックホールへ降着

ガス降着を



Three States of Accretion Disks

Theoretically, there are three distinct accretion mode.



低降着率

光学的に薄く、幾何学的に厚い。光の影響は少ない

中降着率

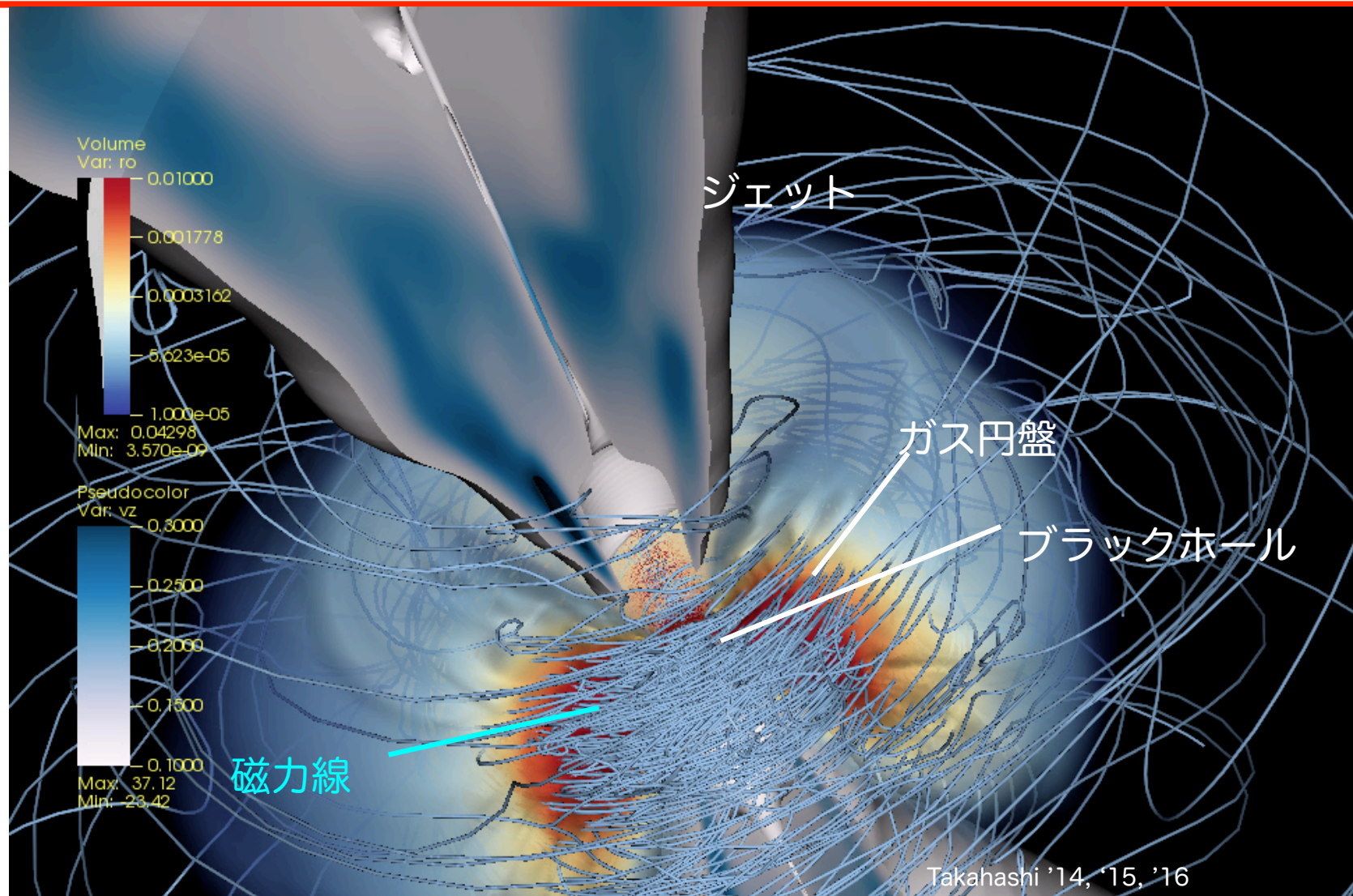
光学的に厚く、幾何学的に厚い。光がエネルギーを持ち出す

高降着率

光学的にも幾何学的にも厚い。光とガスはエネルギー運動量をやり取り->ULX?

ガス+磁場+輻射+一般相対論を含めたグローバル計算が必須

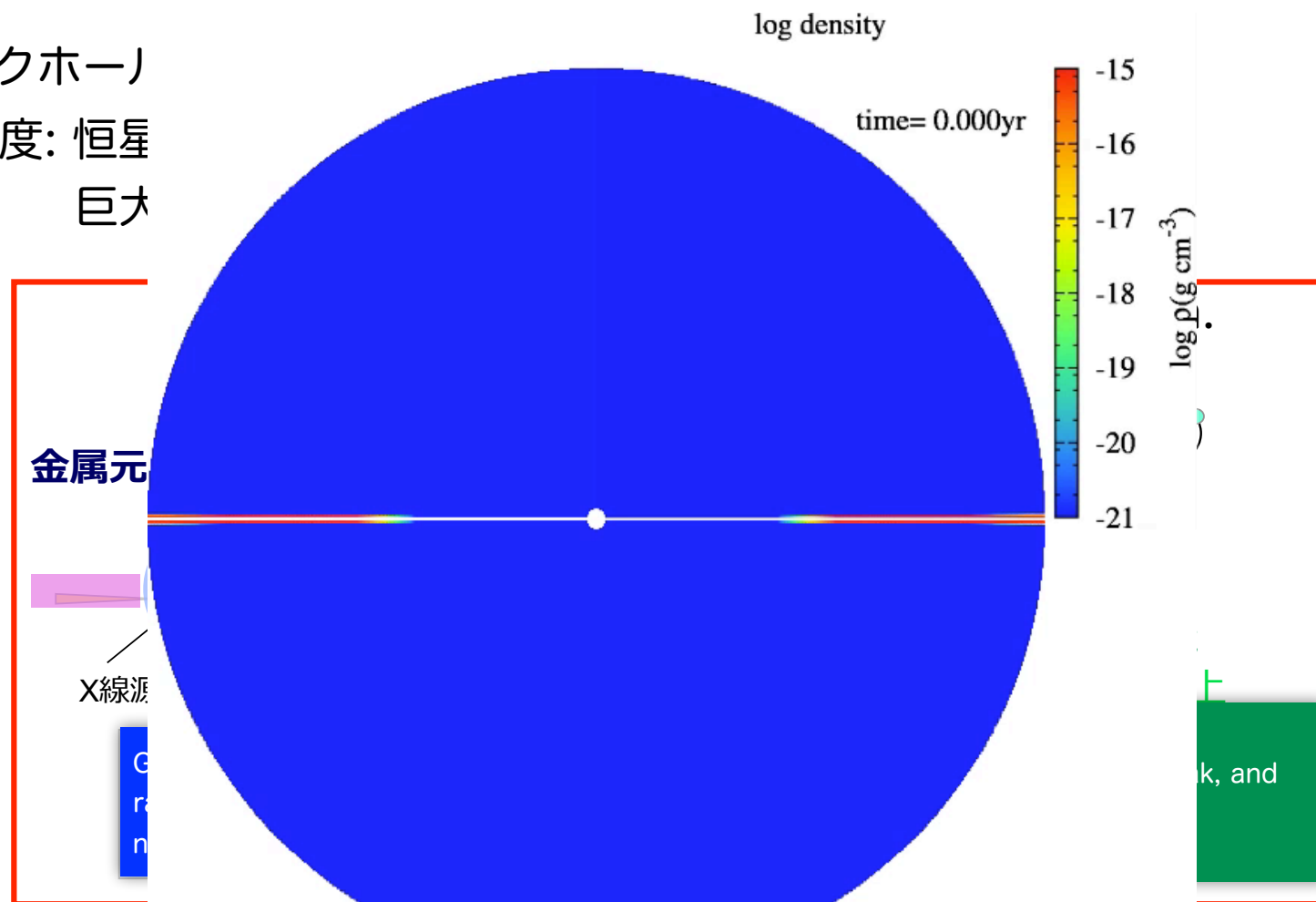
ブラックホール降着円盤の輻射磁気流体計算



- パワフルなジェットが形成される→光速の40%
 - 銀河系最強のジェット天体'SS433'を説明出来る
- ブラックホールは急速にガスを吸い込むことが出来る
 - 超巨大ブラックホールは100万年で形成可能(従来の理論では10億年)

巨大ブラックホールからの円盤風

巨大ブラックホール
円盤温度: 恒星
巨大



©Nomura
Nomura, Ohsuga, Imai, Wada '15

- Matter is accelerated by (UV) line absorption by metals
 - X-ray works to prevent the launching the wind since the metals are over-ionized.
- Line driving is efficient for the case of super-massive BHs.

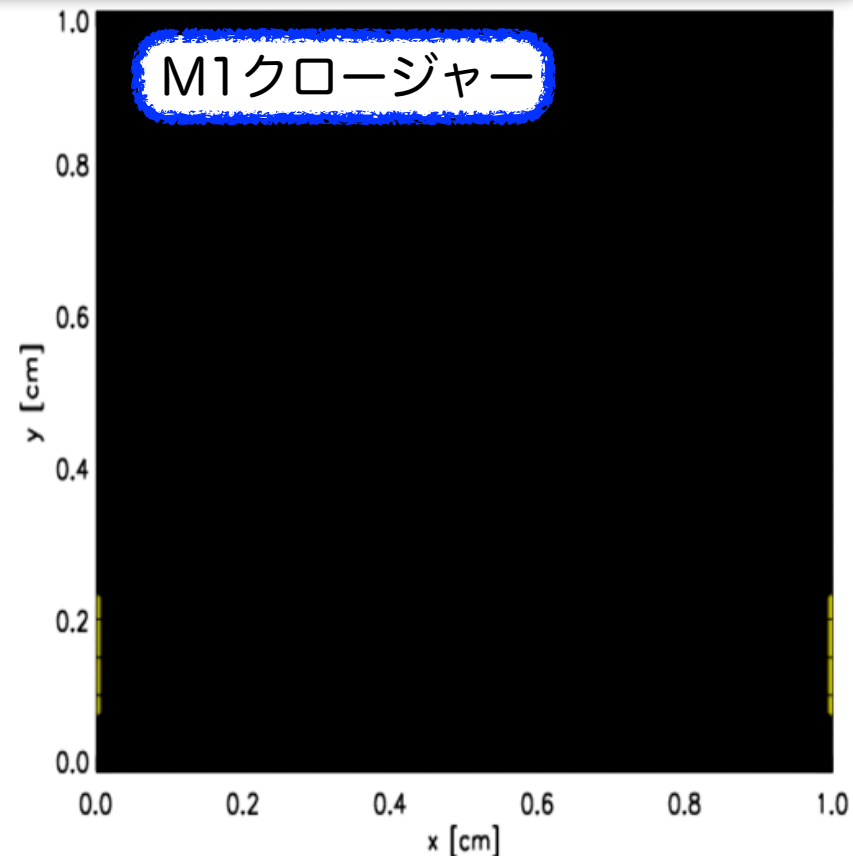
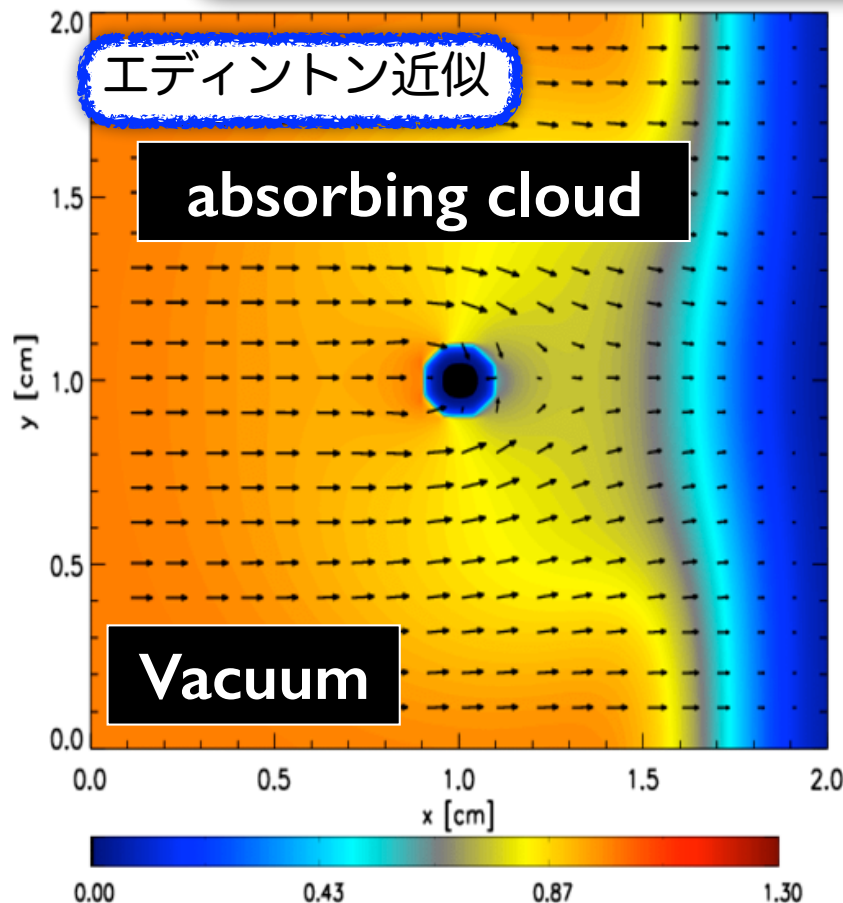
モーメント法の問題点

輻射のモーメント式

$$\partial_t E_{\text{rad}} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} = -S_{\text{ene}}(\rho, \mathbf{v}, p_g, E_{\text{rad}}, \mathbf{F}_{\text{rad}}, \mathbf{P}_{\text{rad}})$$

$$\partial_t \mathbf{F}_{\text{rad}} + \nabla \cdot \mathbf{P}_{\text{rad}} = -S_{\text{mom}}(\rho, \mathbf{v}, p_g, E_{\text{rad}}, \mathbf{F}_{\text{rad}}, \mathbf{P}_{\text{rad}})$$

$$\mathbf{P}_{\text{rad}} = \mathbf{P}_{\text{rad}}(E_{\text{rad}} \text{ or } E_{\text{rad}} \ \& \ \mathbf{F}_{\text{rad}}) \leftarrow \text{モデルが必要}$$



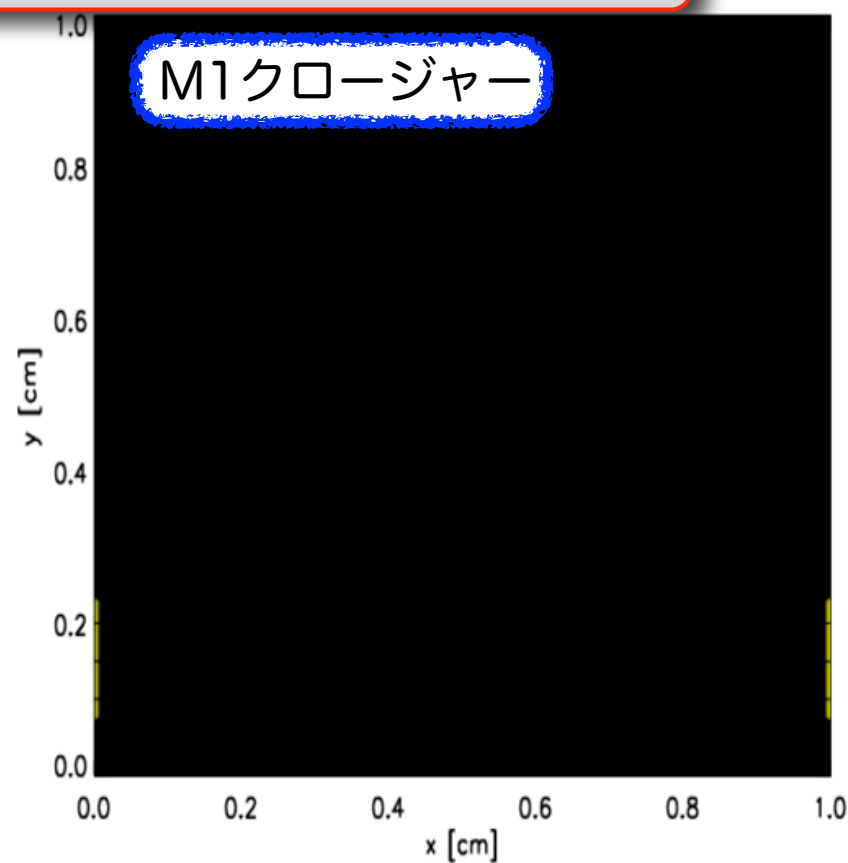
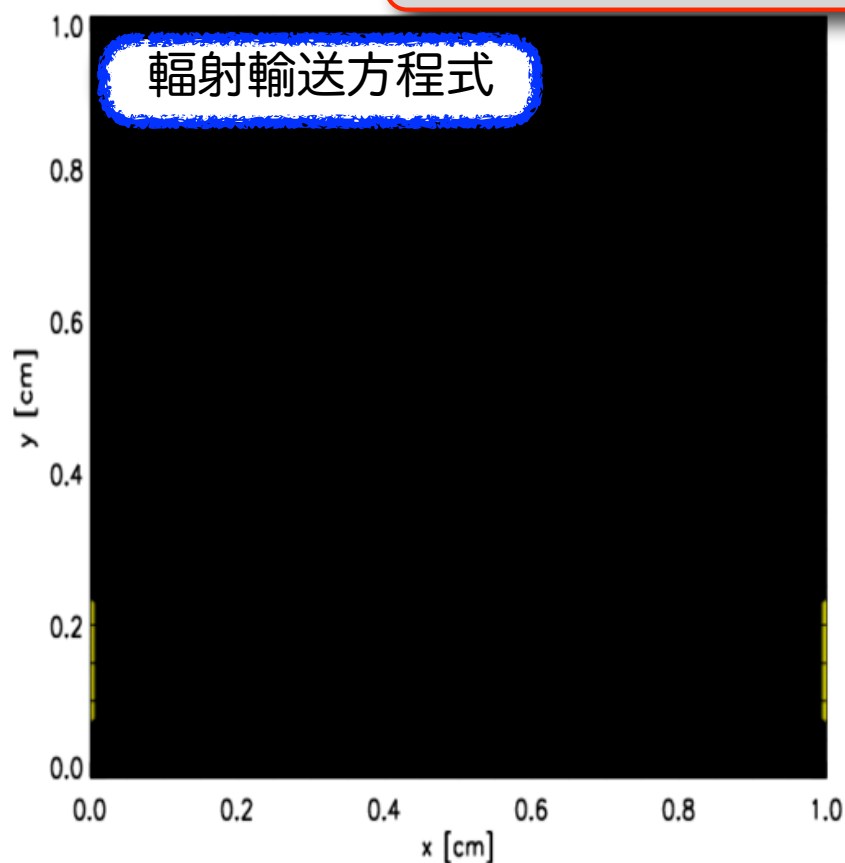
モーメント式には限界がある

輻射輸送方程式の直接解法

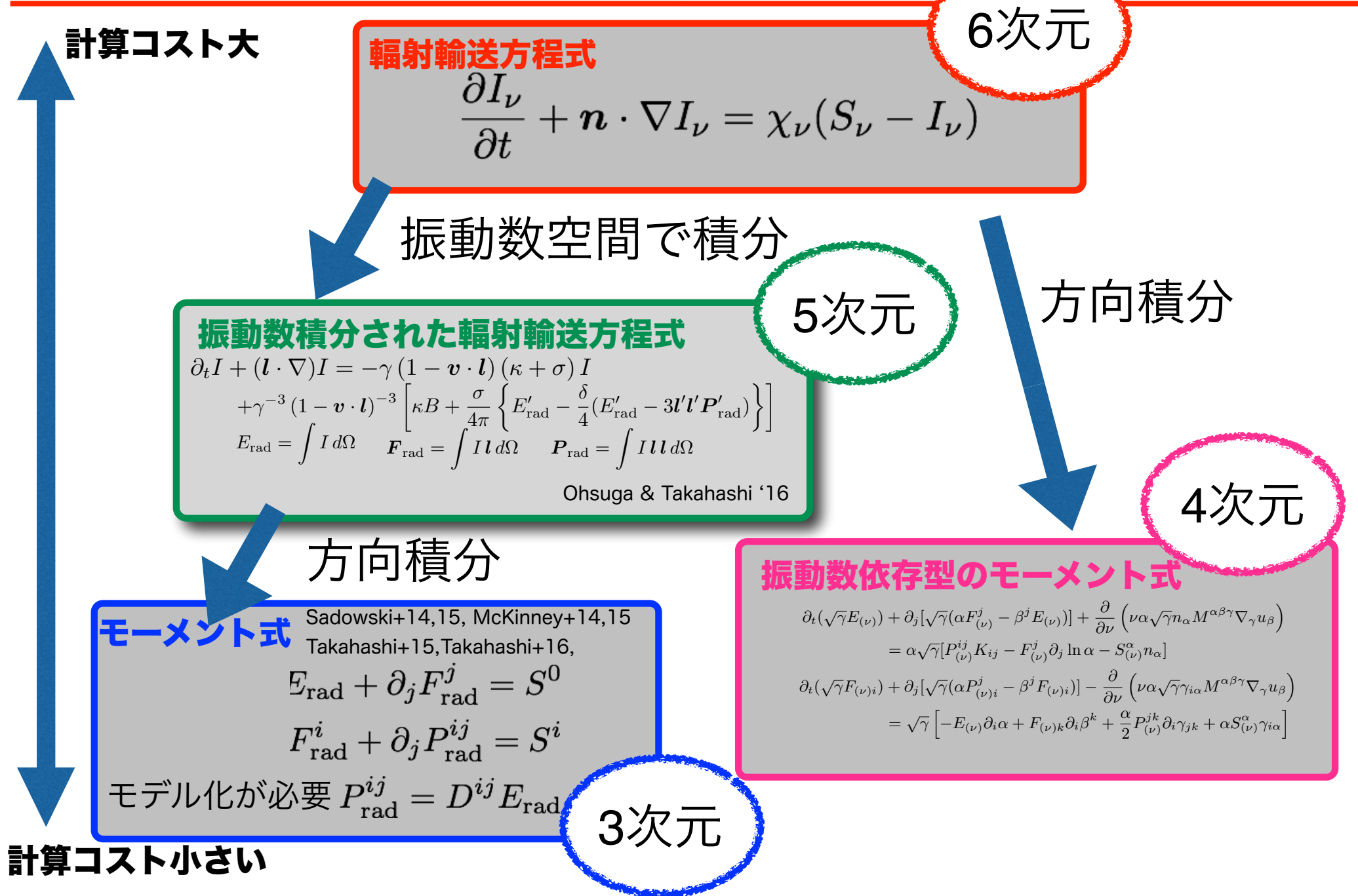
振動数積分された輻射輸送方程式(モデルなし)

$$\partial_t I + (\boldsymbol{l} \cdot \nabla) I = -\gamma (1 - \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{l}) (\kappa + \sigma) I \\ + \gamma^{-3} (1 - \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{l})^{-3} \left[\kappa B + \frac{\sigma}{4\pi} \left\{ E'_{\text{rad}} - \frac{\delta}{4} (E'_{\text{rad}} - 3\boldsymbol{l}'\boldsymbol{l}'\boldsymbol{P}'_{\text{rad}}) \right\} \right]$$

$$E_{\text{rad}} = \int I d\Omega \quad \boldsymbol{F}_{\text{rad}} = \int I \boldsymbol{l} d\Omega \quad \boldsymbol{P}_{\text{rad}} = \int I \boldsymbol{l} \boldsymbol{l} d\Omega$$



輻射輸送計算のこれまでと今後



研究計画：観測と直接比較を目指した数値計算

目標

- コンプトン散乱によるガスと輻射のエネルギー交換・運動量輸送が円盤やジェットの影響が解明する

振動数依存型一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射モーメント式(～流体近似)を解く

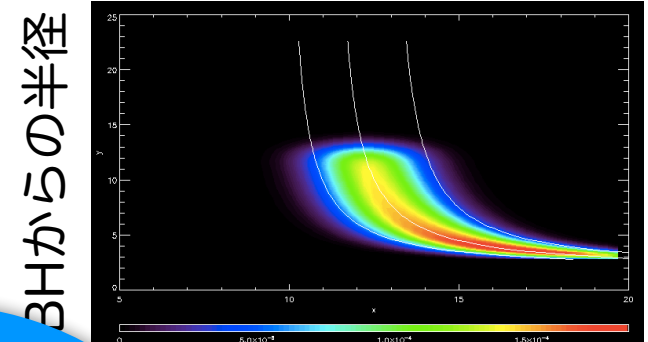
- 光の伝搬を近似的に解く
- 計算コストは比較的小さい

輻射輸送を直接解く一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射輸送方程式を解く

- 光の伝搬を厳密に解く
- 計算コストは非常に大きい

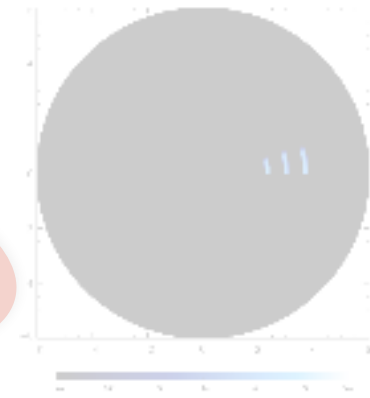
ブラックホールに落下する光の重力赤方変位



光のエネルギー ©Ogawa

発展版

ブラックホール周りの光の運動



©Makino

どちらも従来の近似計算とは
一線を画す計算

ホール降着円盤の理解

発展版

振動数依存型の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション

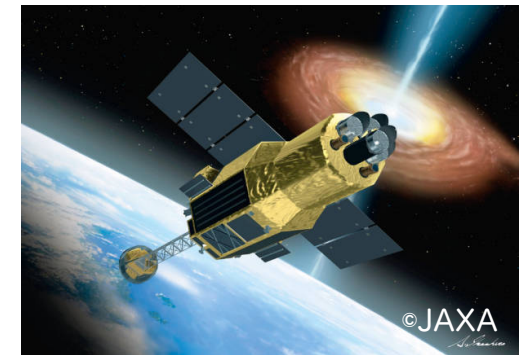
輻射スペクトルを予言→X線観測との直接比較

ひとみ、AthenaによるX線観測の発展

これまでより10-100倍のエネルギー分解能

→これまで観測されていない輝線や吸収線を検出可能→シミュレーションと比較

- **ジェットの情報(速度, 密度, 温度, 電離度)** が得られる
- 速度場の情報から**ブラックホールの情報(質量, 回転)**が得られる
- **一般相対性理論の検証**



ブラックホール時空、円盤、ジェットが解明できる

研究計画：観測と直接比較を目指した数値計算

目標

- コンプトン散乱によるガスと輻射のエネルギー交換・運動量輸送が円盤やジェットの影響が解明する
- 輻射輸送方程式(ボルツマン方程式)を解くことにより、降着円盤の第一原理計算が初めて可能

ブラックホールに落下する光の
重力赤方変位

発展版

©Ogawa

振動数依存型一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射モーメント式(～流体近似)を解く

- 光の伝搬を近似的に解く
- 計算コストは比較的小さい

ブラックホール周りの光の運動

最終版

輻射輸送を直接解く一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射輸送方程式を解く

- 光の伝搬を厳密に解く
- 計算コストは非常に大きい

どちらも従来の近似計算とは
一線を画す計算

ブラックホール降着円盤の理解

最終版

輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体シミュレーション

撮像イメージを予言→電波観測と比較

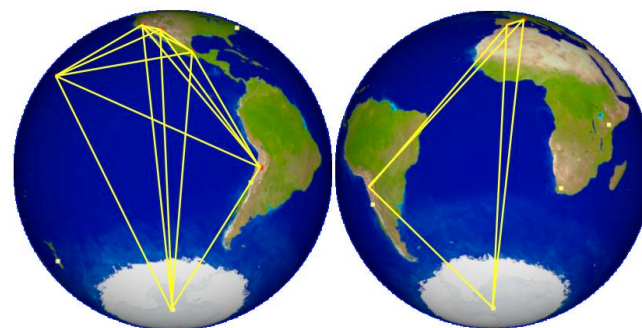
映画「インターステラー」より
降着円盤のイメージ図



これまでよりはるかに高い空間分解能

→これまで観測されていないブラックホールの黒い穴が観測可能に→シミュレーションと比較

Event Horizon Telescope(EHT)
世界各地の電波望遠鏡を用いた電波干渉計



- **ジェットの根元の情報(速度, 密度、磁場強度)** が得られる
- 黒い穴の形から**ブラックホールの情報(質量、回転)**が得られる
- **一般相対性理論の検証**

ブラックホール時空、円盤、ジェットが解明できる

研究計画：観測と直接比較を目指した数値計算

目標

- コンプトン散乱によるガスと輻射のエネルギー交換・運動量輸送が円盤やジェットの影響が解明する
- 輻射輸送方程式(ボルツマン方程式)を解くことにより、降着円盤の第一原理計算が初めて可能

ブラックホールに落下する光の
重力赤方変位

発展版

振動数依存型一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射モーメント式(～流体近似)を解く

- 光の伝搬を近似的に解く
- 計算コストは比較的小さい

ブラックホール周りの光の運動

最終版

輻射輸送を直接解く一般相対論的輻射磁気流体計算

輻射輸送方程式を解く

- 光の伝搬を厳密に解く
- 計算コストは非常に大きい

どちらも従来の近似計算とは
一線を画す計算

今後の研究のまとめ

○振動数依存型の一般相対論的輻射磁気流体計算

振動数に依存する散乱の効果がジェットの形成や温度分布に与える影響を調べる

→シミュレーションから得られるスペクトルを観測と合わせることで

アウトフローや降着円盤、ブラックホール情報を引き出す

振動数20binで3次元計算→1ヶ月程度の計算量

○輻射輸送方程式を直接解く一般相対論的輻射磁気流体計算

ブラックホール周辺の光子の詳細な運動を考慮することでブラックホール近傍の円盤構造、ジェットの根元の物理を引き出す

→シミュレーションによるブラックホールの直接撮像を行い、

観測と比較する事で降着円盤の情報を引き出し、一般相対性理論の検証を行う

6次元計算はすこし厳しい→ポストK

振動数積分された輻射輸送方程式→2ヶ月程度の計算量

空間2次元で振動数、方向を解く→2ヶ月程度の計算量

シミュレーション結果と観測の直接比較を目指した研究