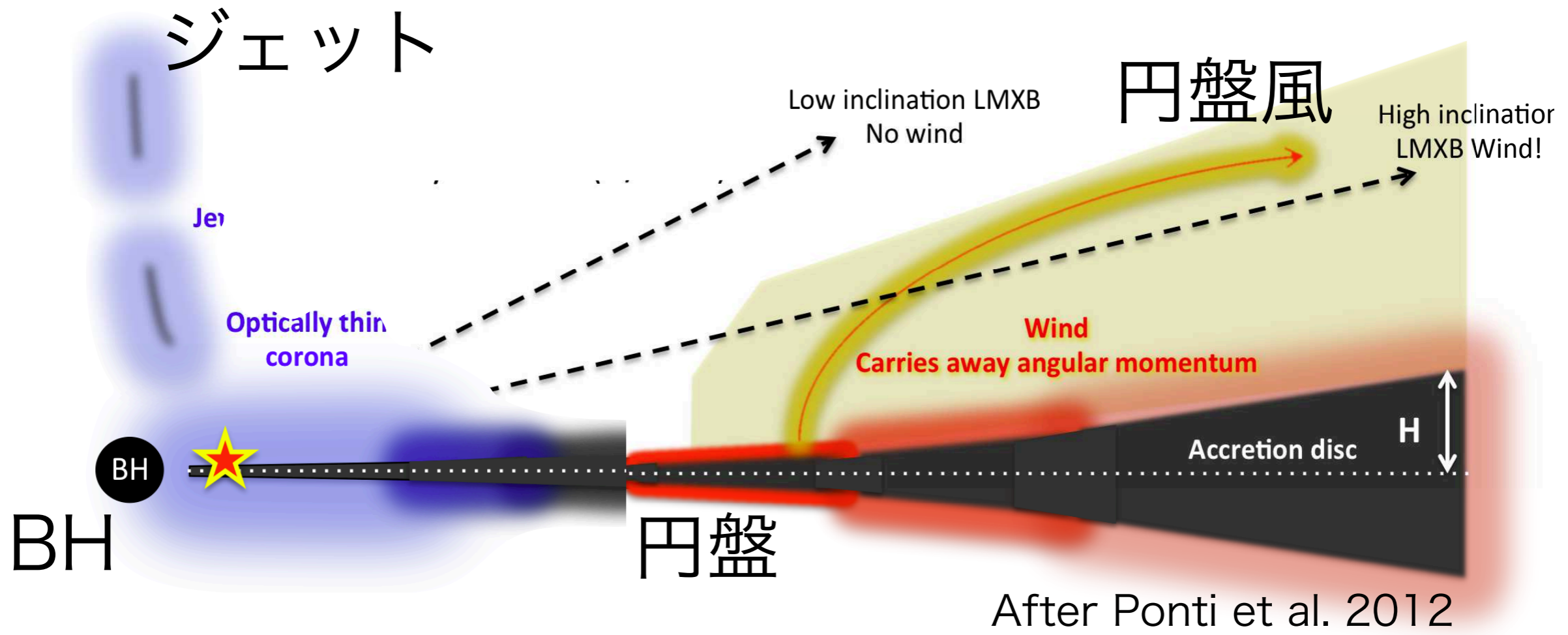


ブラックホール降着円盤からのアウトフロー； 最近の成果と今後の課題



大須賀健 (国立天文台/総研大)

高橋博之, 川島朋尚(国立天文台), 野村真理子(筑波大),
橋詰克也(元総研大), 竹内駿(元京都大学), 嶺重慎(京都大学)

今、なにが問題か？

(1) ブラックホールの質量獲得メカニズム

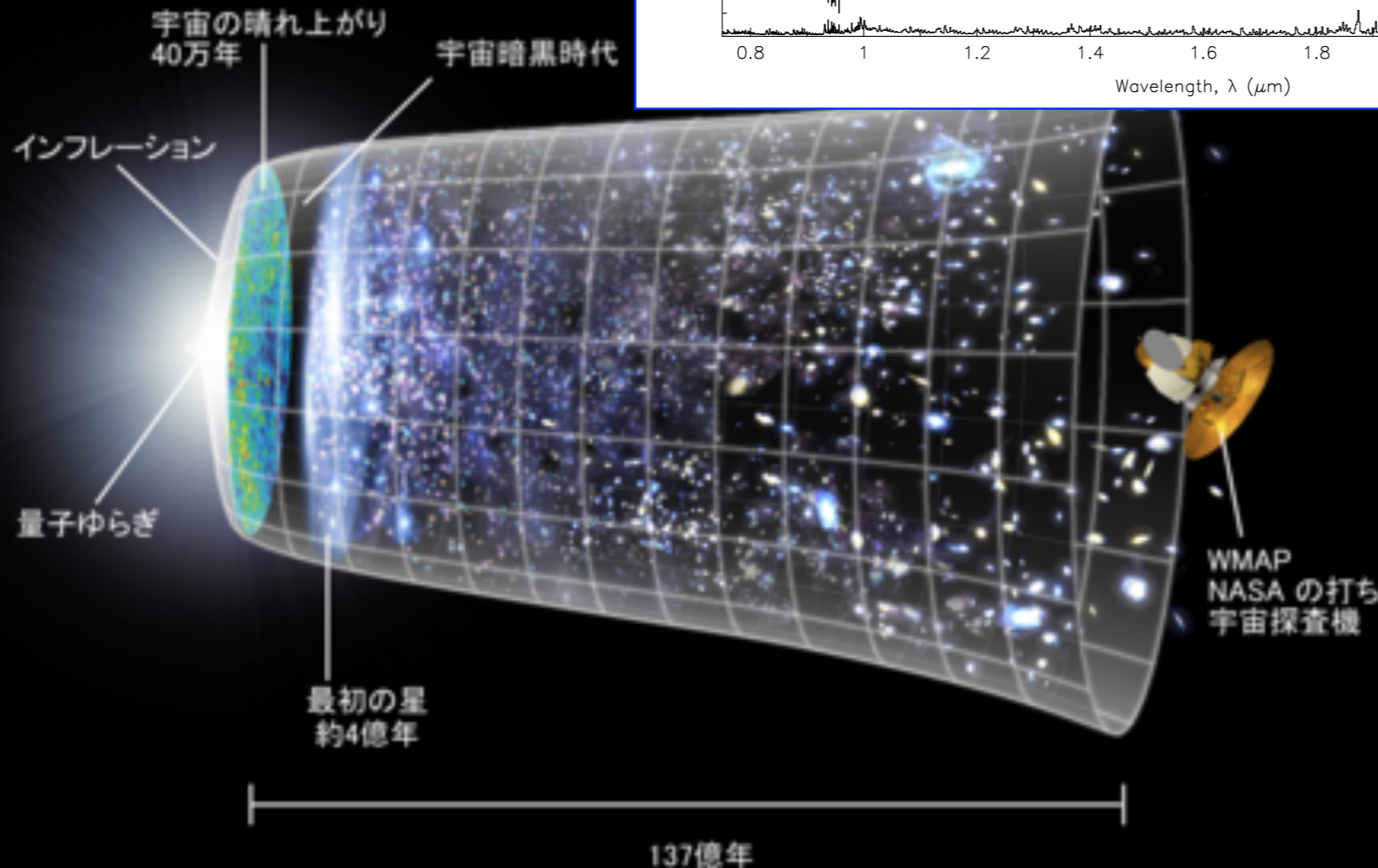
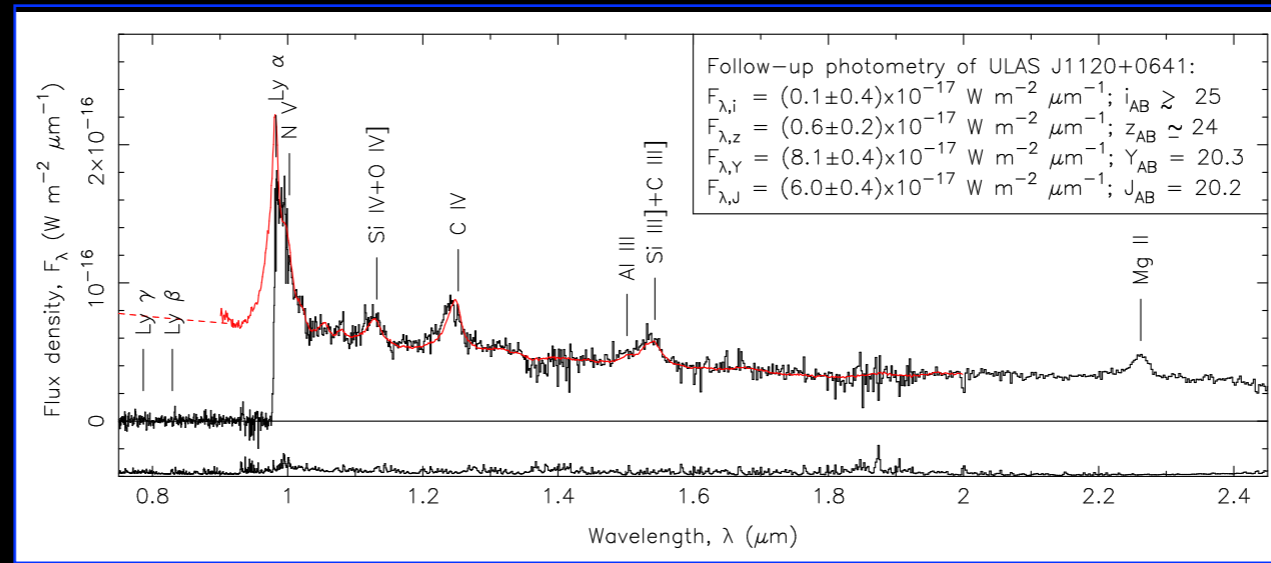
巨大ブラックホールはどう成長したのか？

(2) フィードバックメカニズム

ブラックホールが成長する際、周囲で何が起こるのか？

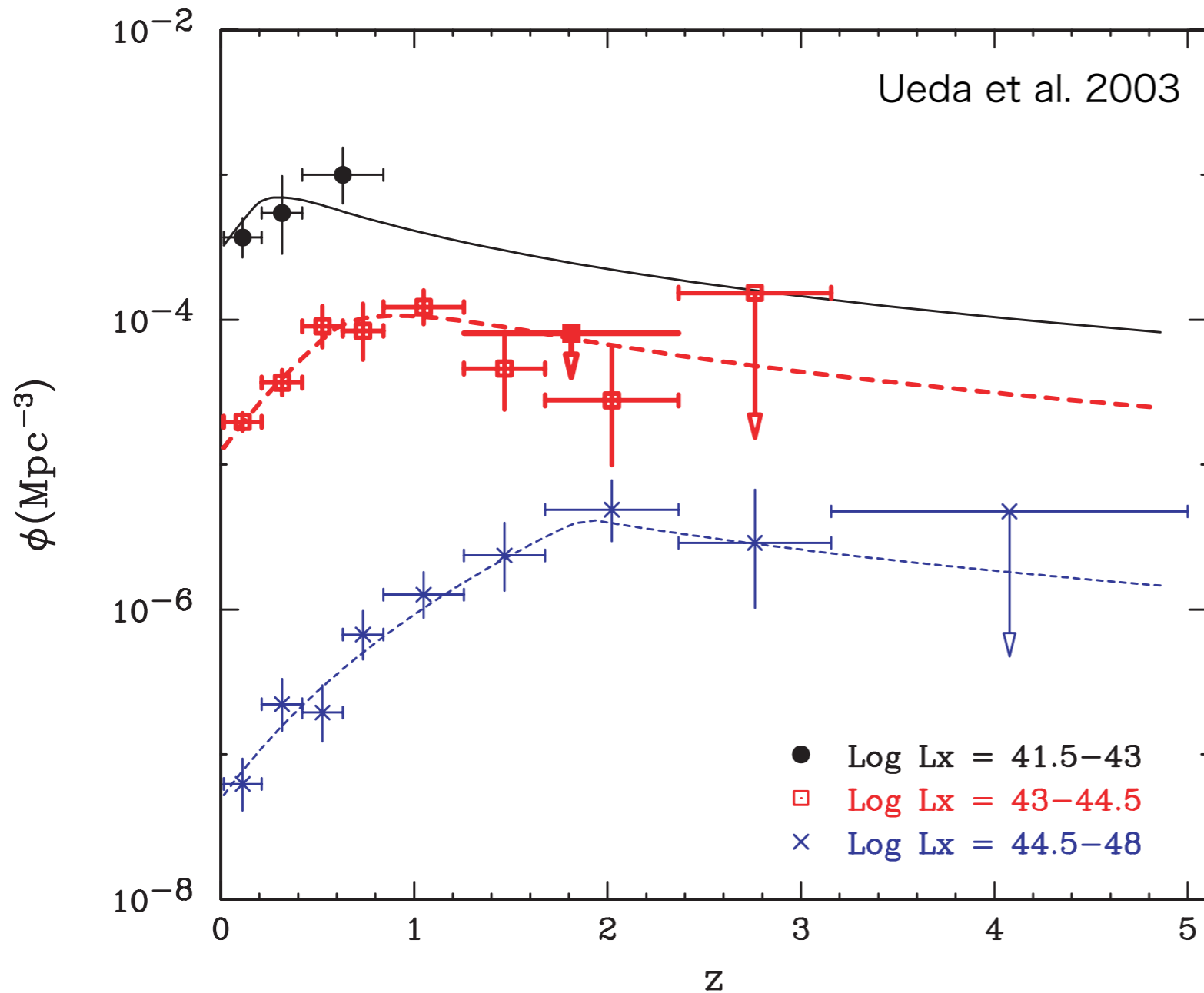
巨大BHの成長問題

$z=7.1$ のQSO
Mortlock et al. 2011



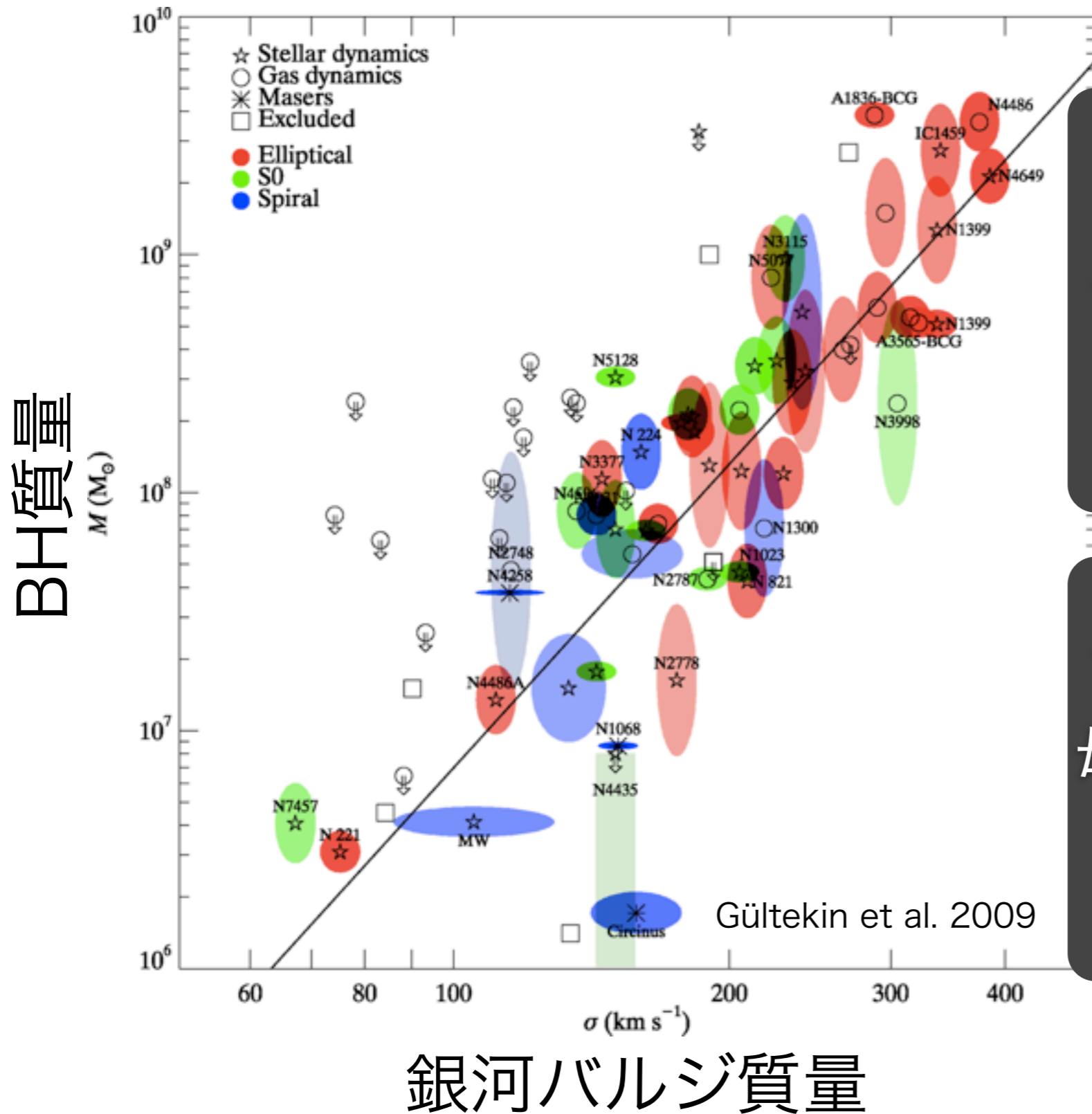
巨大BHは宇宙誕生
の数億年後に既に
存在
→急速成長のメカ
ニズムは？

巨大BHの成長問題のつづき



Downsizing
質量の大きなBHほど
先に成長
↓
成長速度がBH質量に
依存するメカニズム
はなにか？

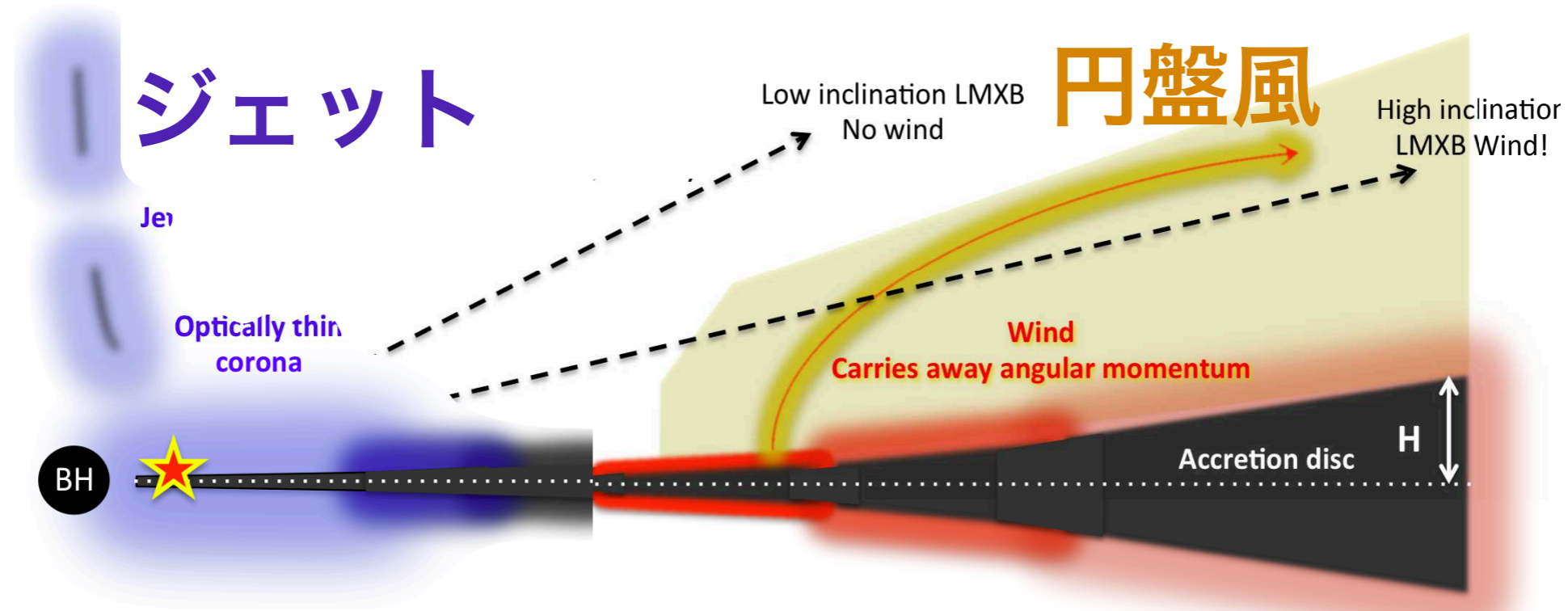
フィードバックの問題



謎の比例関係
→ 巨大BHが母銀河の進化に影響を与えた! ?

→ 巨大BHの最終質量は母銀河によって制御されている! ?

BHアウトフローの研究意義



①BH近傍での高エネルギー現象を知る鍵.

②BHの成長を抑制する可能性あり！

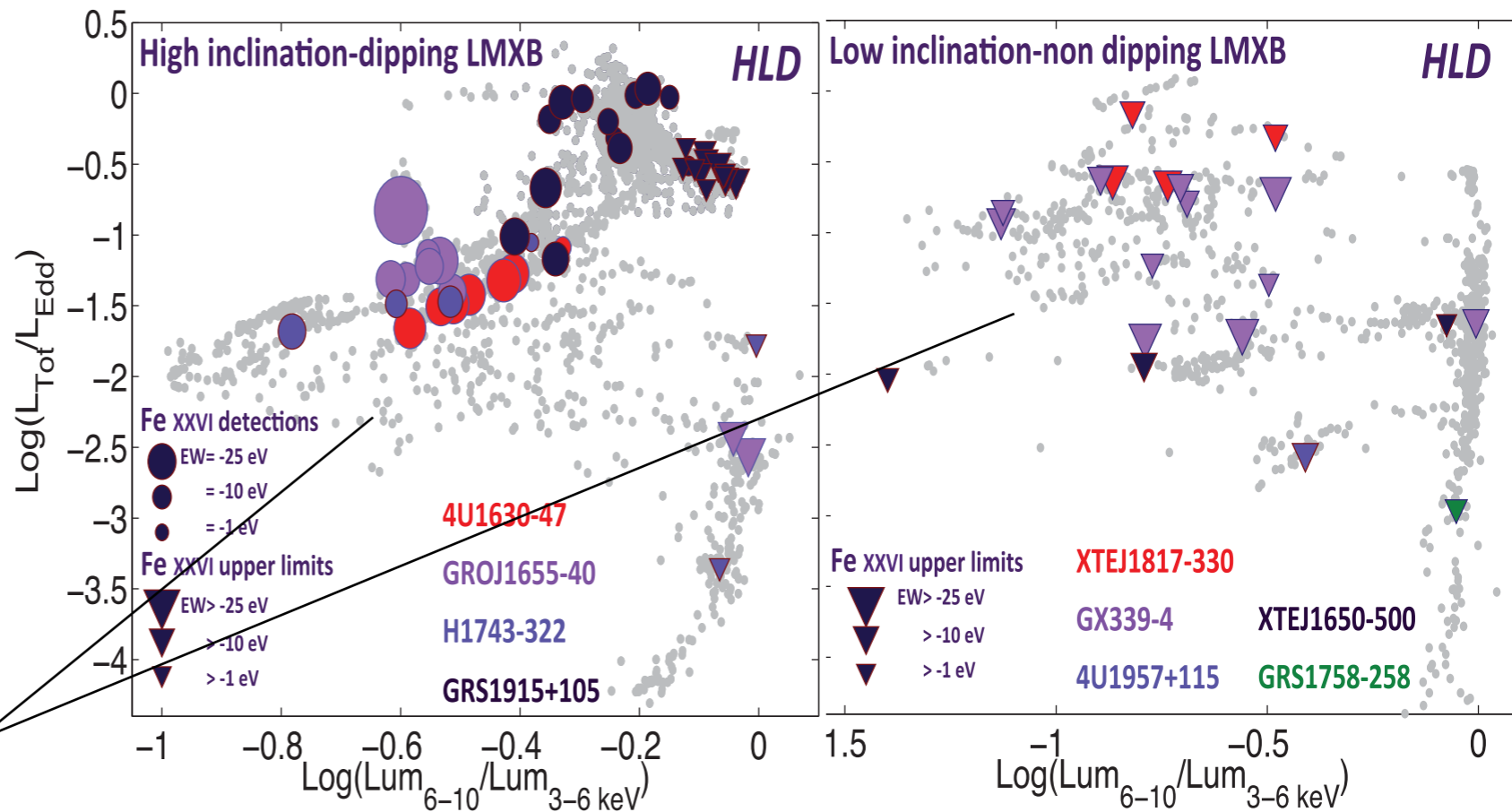
③母銀河の進化に影響を与える可能性あり！

円盤風; XRB

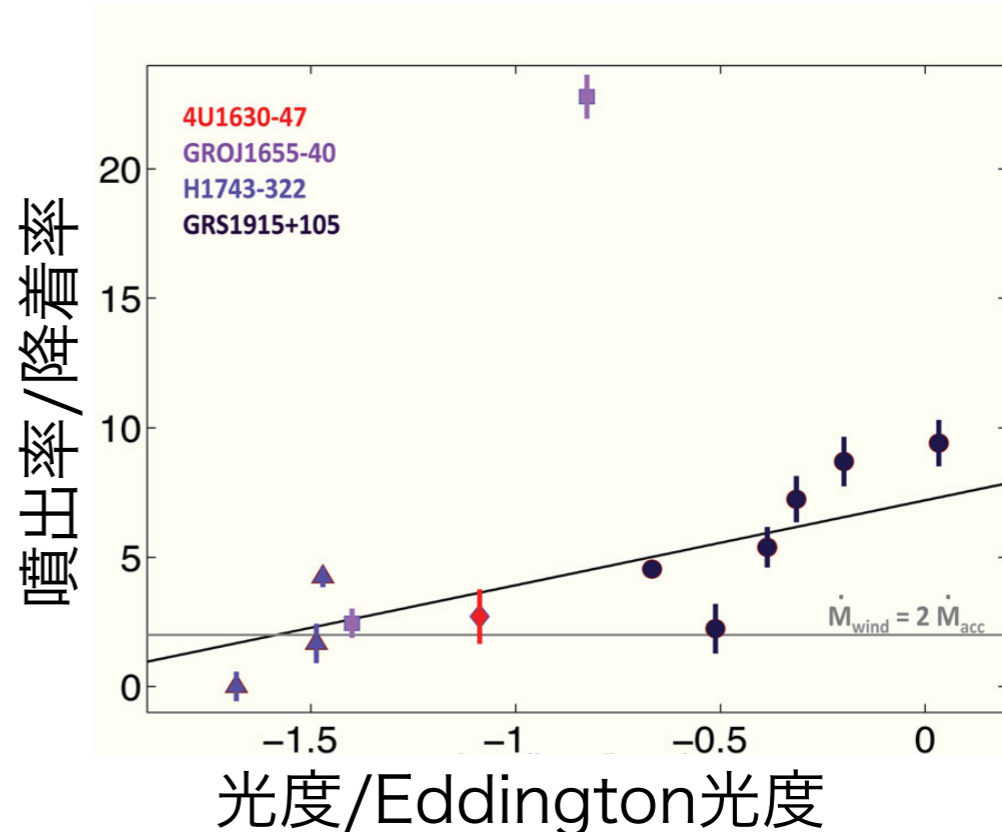
見込み角度の大きな
XRBに強い吸収あり
→赤道面方向のアウト
フローが存在

High inclination angle

Low inclination angle

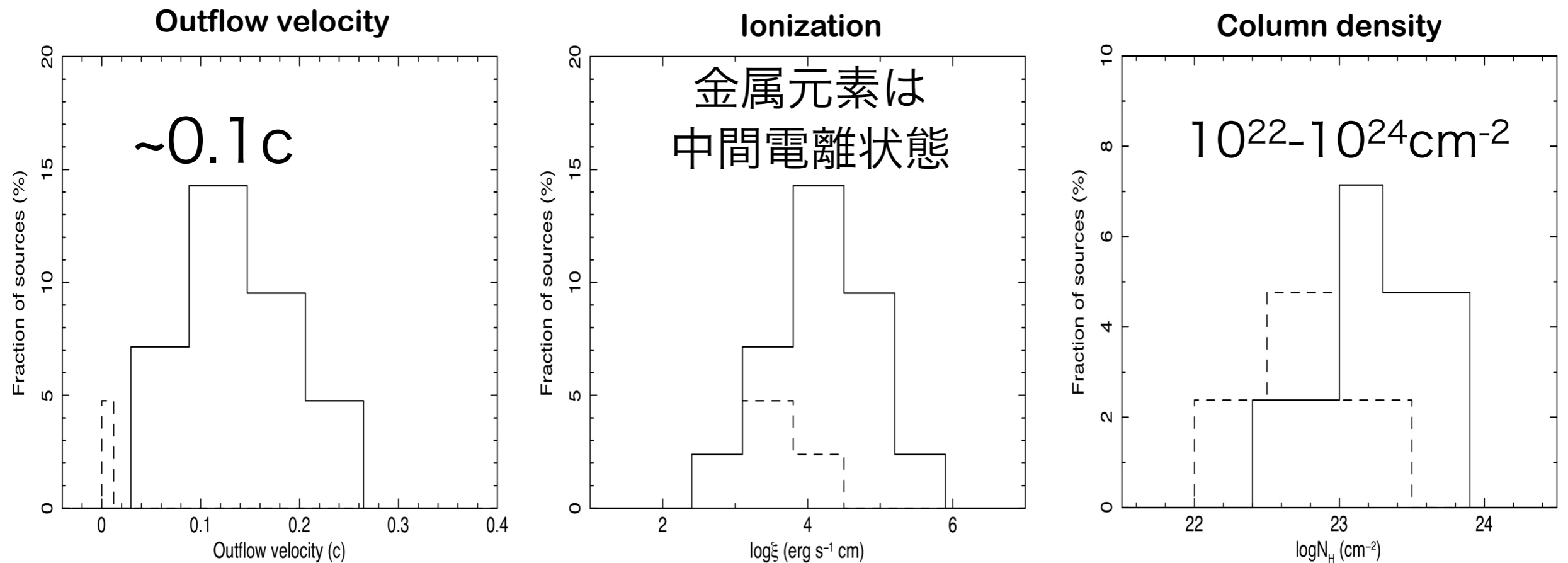


質量噴出率は降
着率を超える！



円盤風; AGN (ultra fast outflow)

Tombesi et al. 2011



40%のAGNで検出 → 細くはなく広角

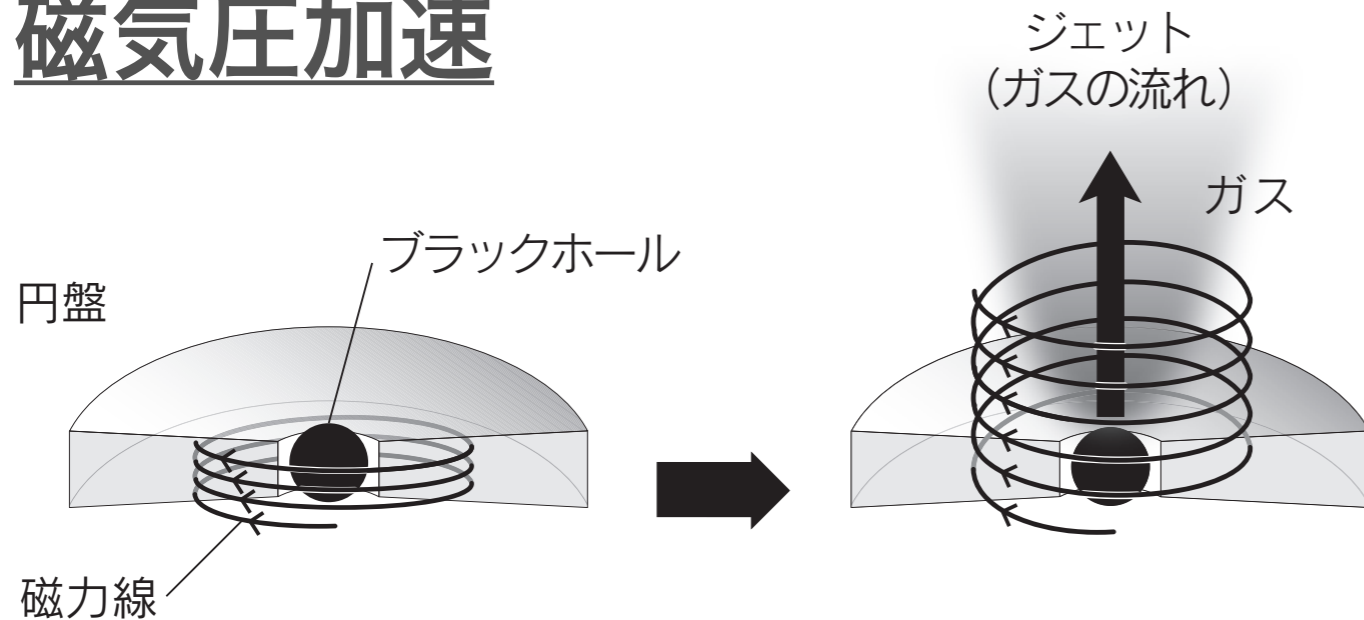
距離は 10^2 - $4R_s$ → 噴出源は降着円盤

$P_{UFO} \sim 0.1L \sim P_{jet}$ → とてもパワフル

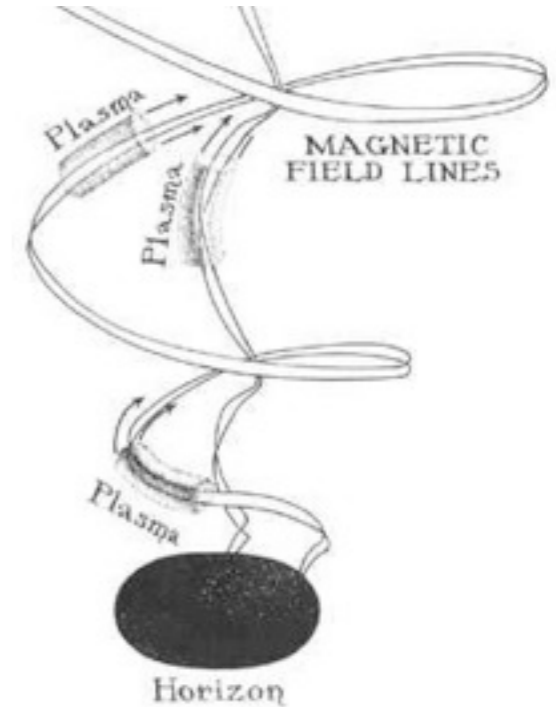
ジェットは別にパワフルな円盤風が存在！

アウトフローのメカニズム

磁気圧加速



円盤内でポロイダル磁場が
増幅され, その磁気圧で加速



Blandford-Znajek

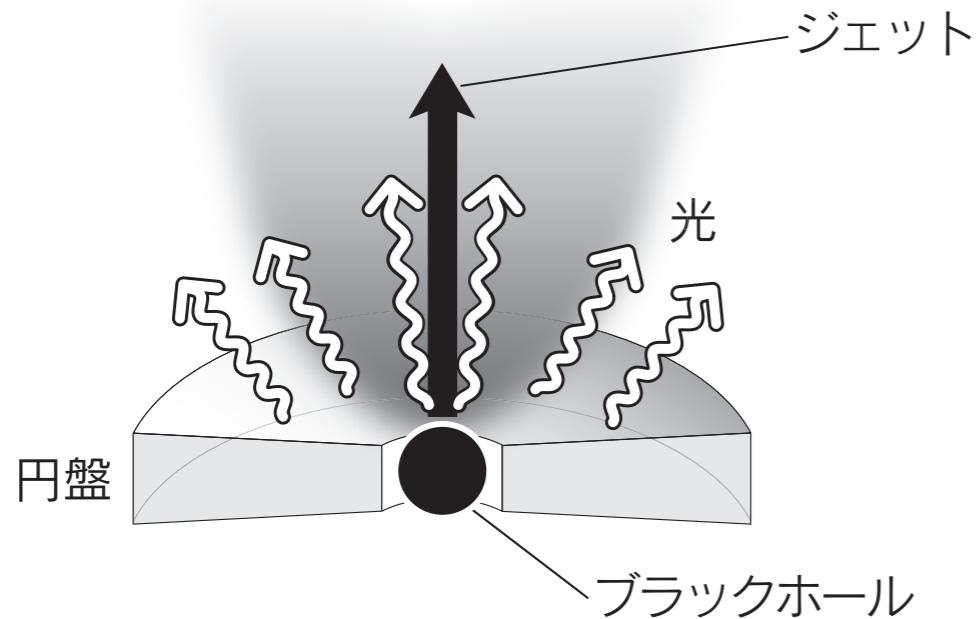
BHのスピンエネルギー
を磁場を介して利用

多次元MHD計算でMRIと同時に扱う研究が主流.

GR-MHDでBZを取り入れた計算も盛ん.

→この後の高橋さん、水田さんの講演

アウトフローのメカニズムのつづき

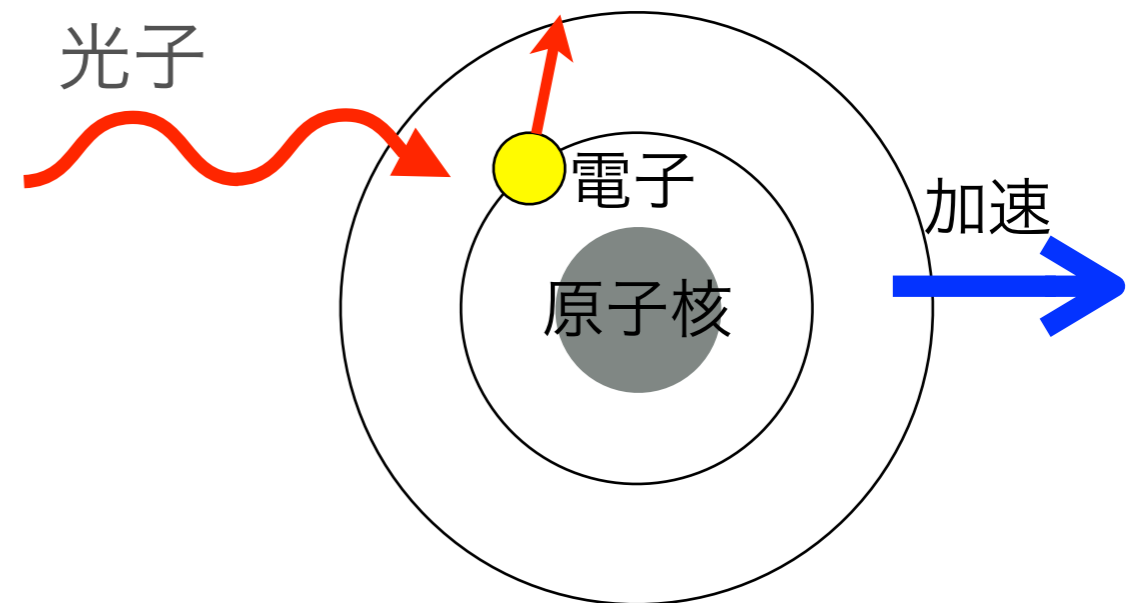


電子散乱加速

自由電子が光子を散乱し、
その際に生じる輻射力で
加速.

ラインフォース加速

金属元素が束縛-束縛遷移によっ
てUVを吸収して運動量を得る.

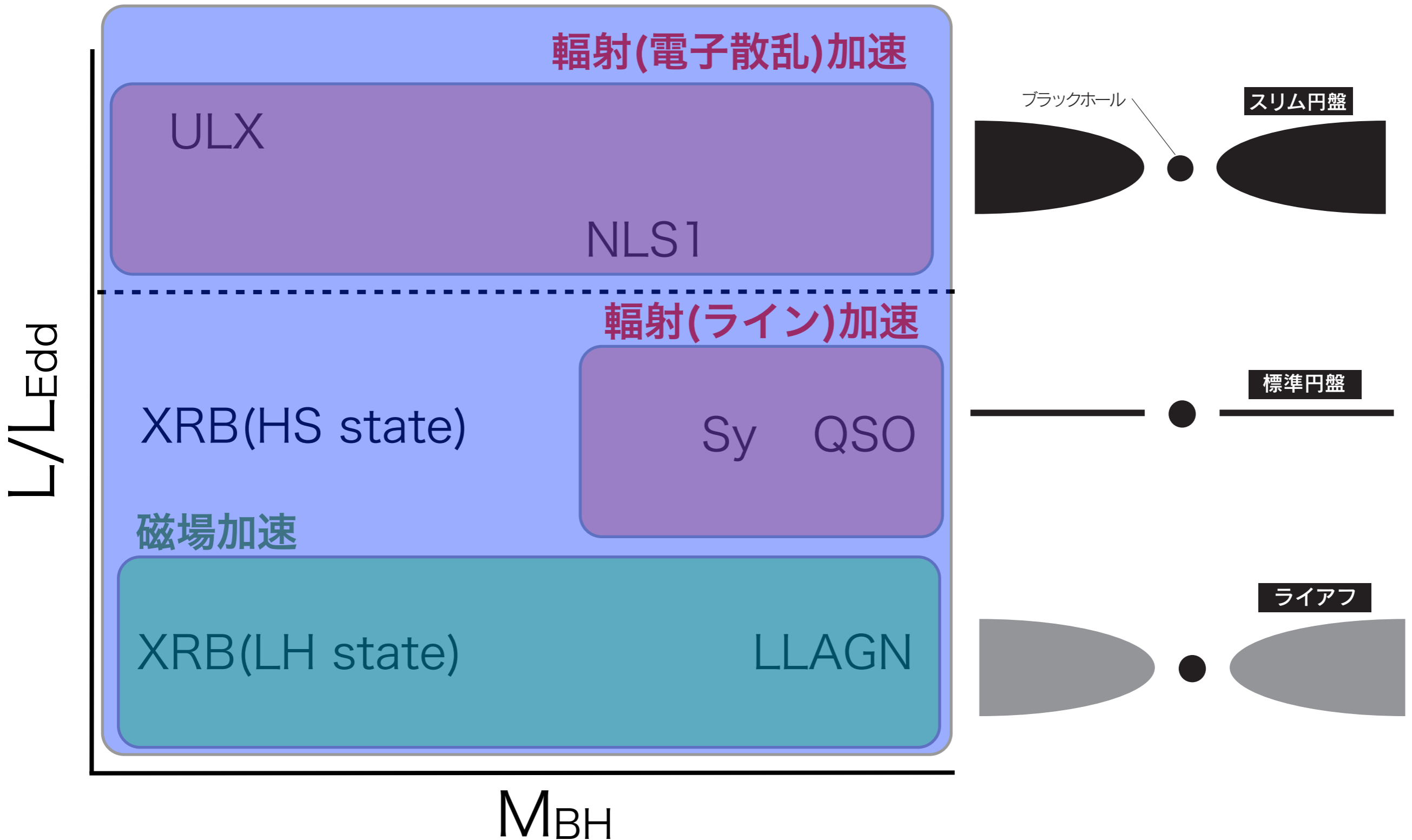


ラインフォースは密度, 温度, 速度,
電離度に依存する

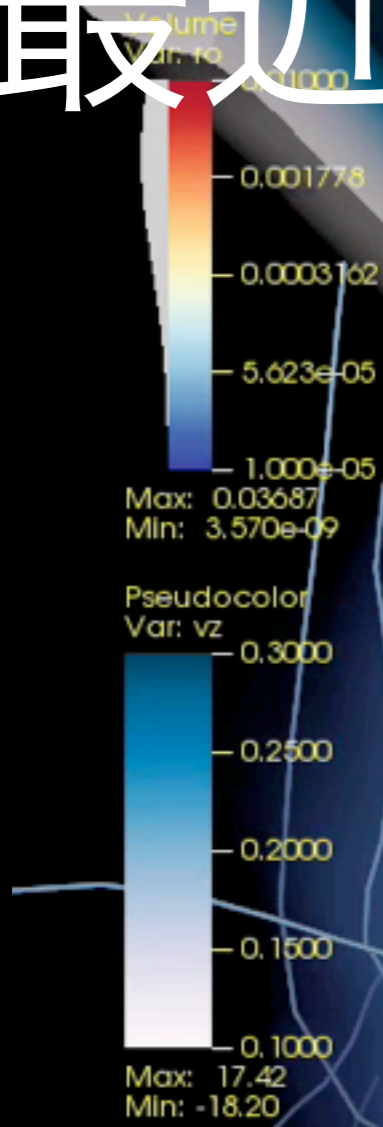
Radiation-MHD計算/GR Radiation-MHD計算が世界最先端
ラインフォース加速は今後の注目株！？→萩野さんの講演

アウトフローの円盤状態

BHスピン?



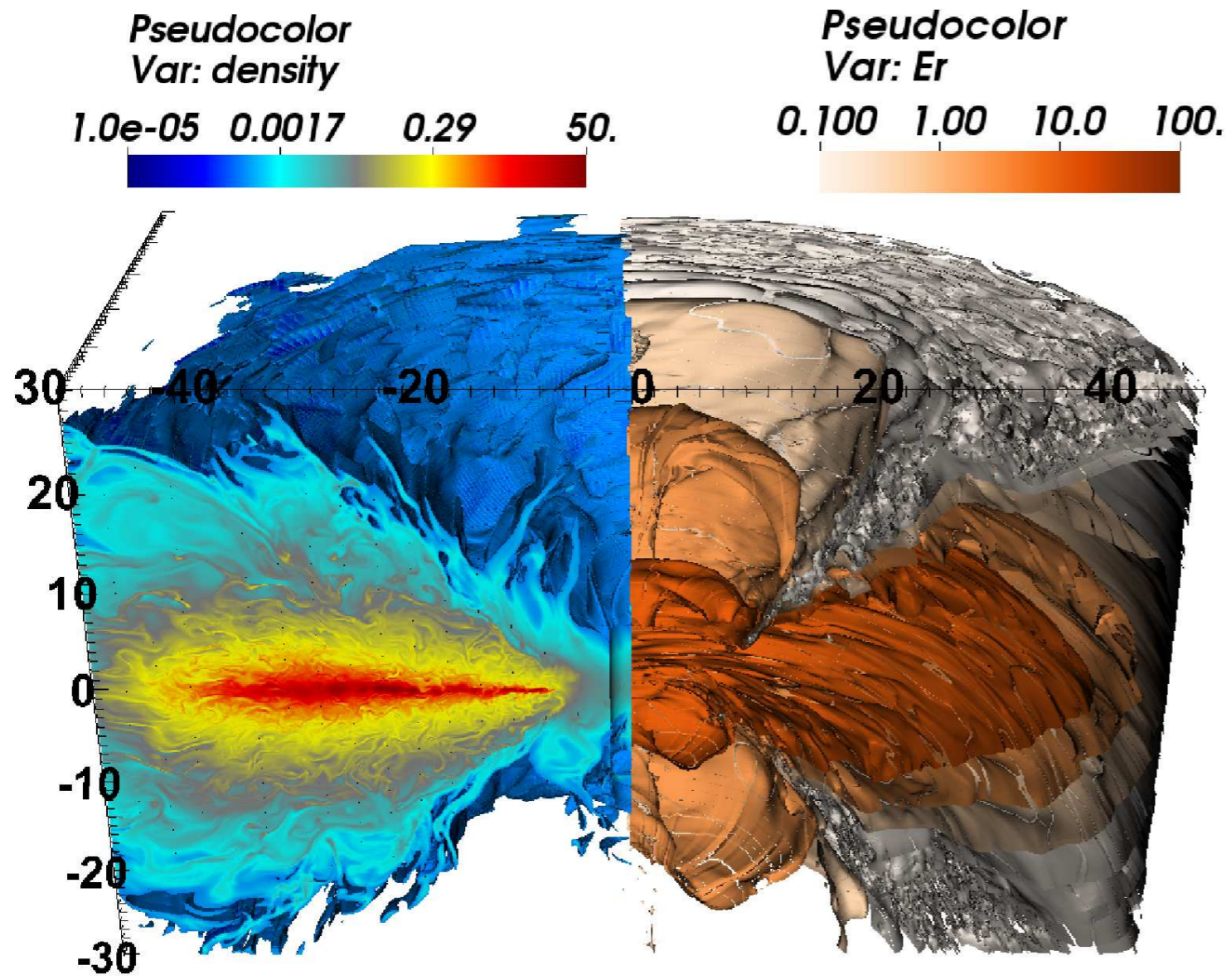
最近の成果; GR-RMHD



GR Radiation-MHD計算
超臨界円盤+ジェット
(この計算ができるのは世界で我々と
Princetonのグループだけ)

H.R.Takahashi et al. in prep.





Jiang et al. 2014

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial I}{\partial t} + c\mathbf{n} \cdot \nabla I &= c\sigma_a \left(\frac{a_r T^4}{4\pi} - I \right) + c\sigma_s (J - I) \\
 &+ 3\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \sigma_a \left(\frac{a_r T^4}{4\pi} - J \right) \\
 &+ \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} (\sigma_a + \sigma_s) (I + 3J) - 2\sigma_s \mathbf{v} \cdot \mathbf{H} \\
 &- (\sigma_a - \sigma_s) \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{c} J - (\sigma_a - \sigma_s) \frac{\mathbf{v} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{K})}{c}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

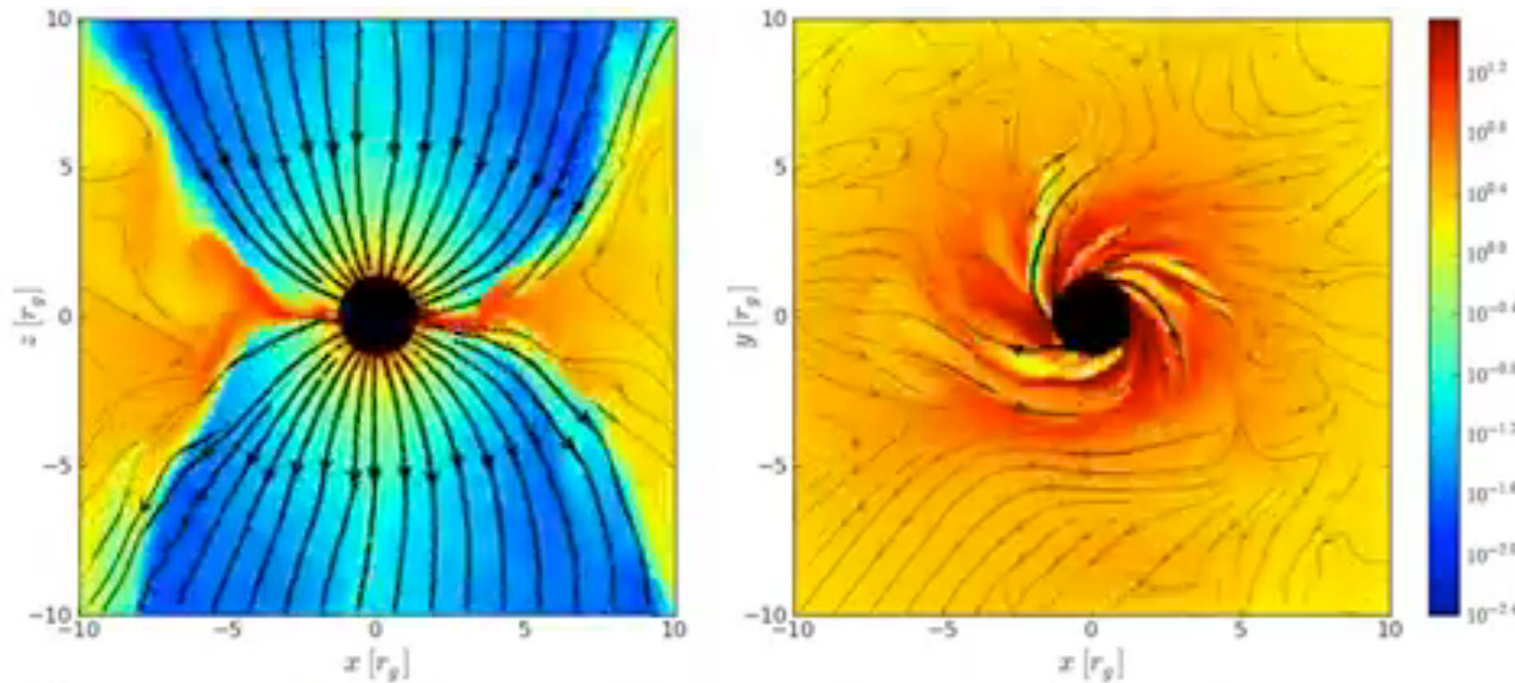
Radiation-MHDの解放はまだまだ発展の余地がある。

輻射輸送方程式を直接解く手法も行われつつある。

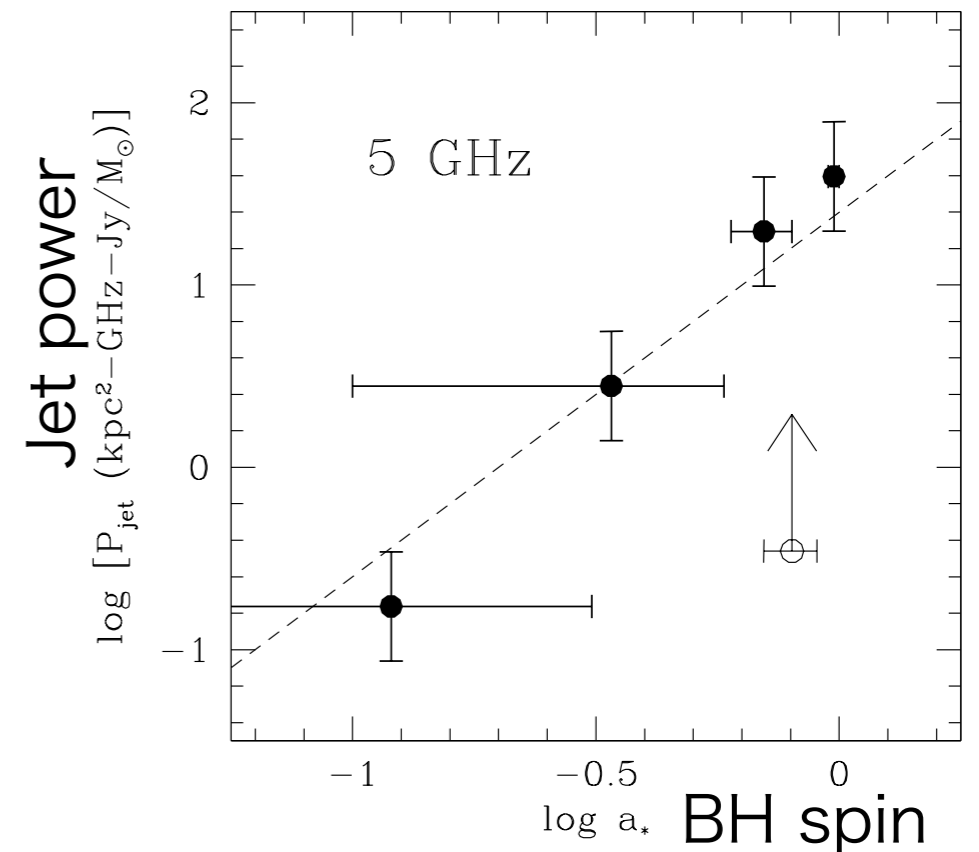
最近の成果; GR-MHD

低光度円盤＋磁気ジェットとの
GR-MHD計算

McKinney, Tchekhovskoy, Blandford (2012)



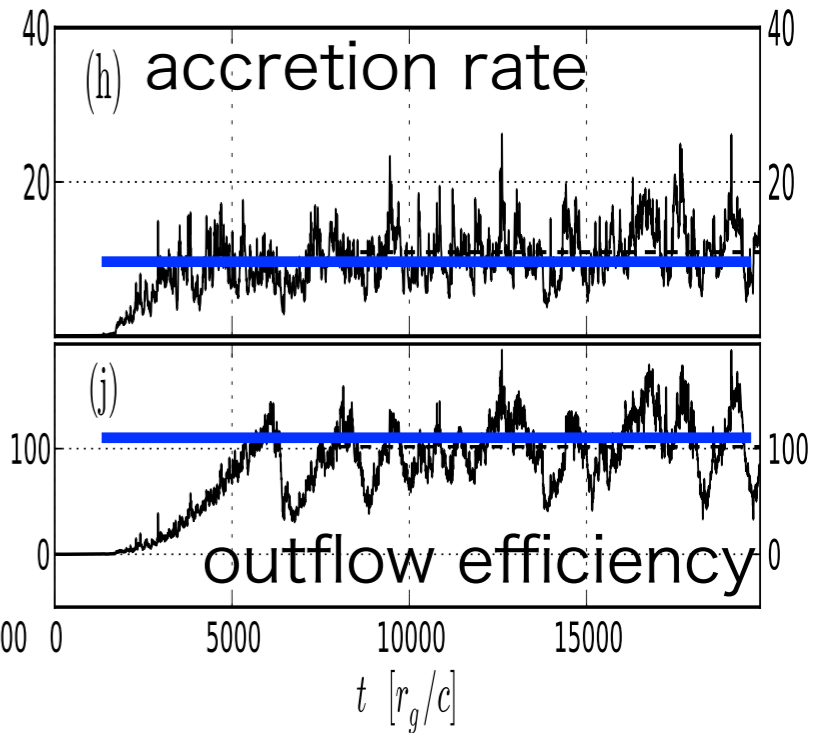
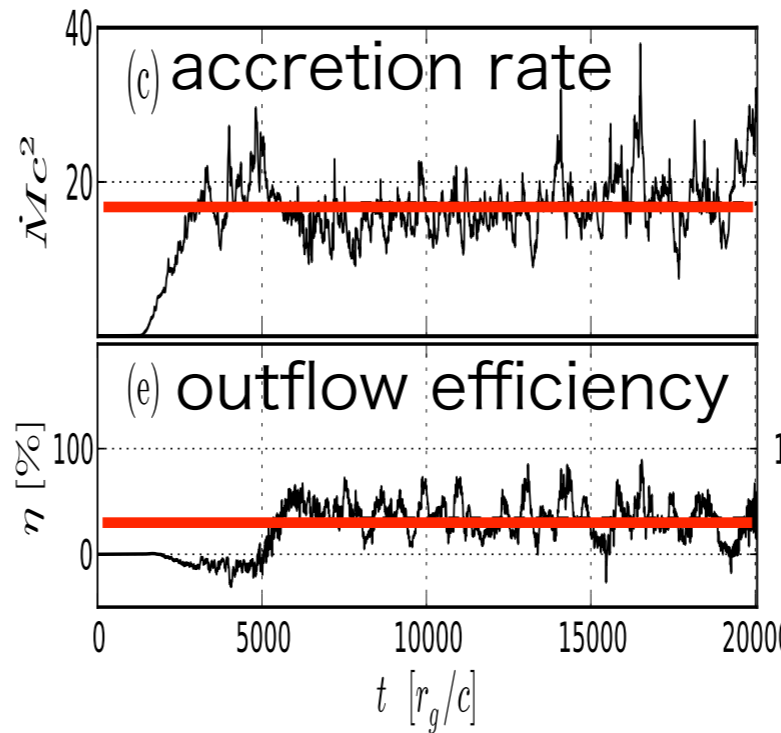
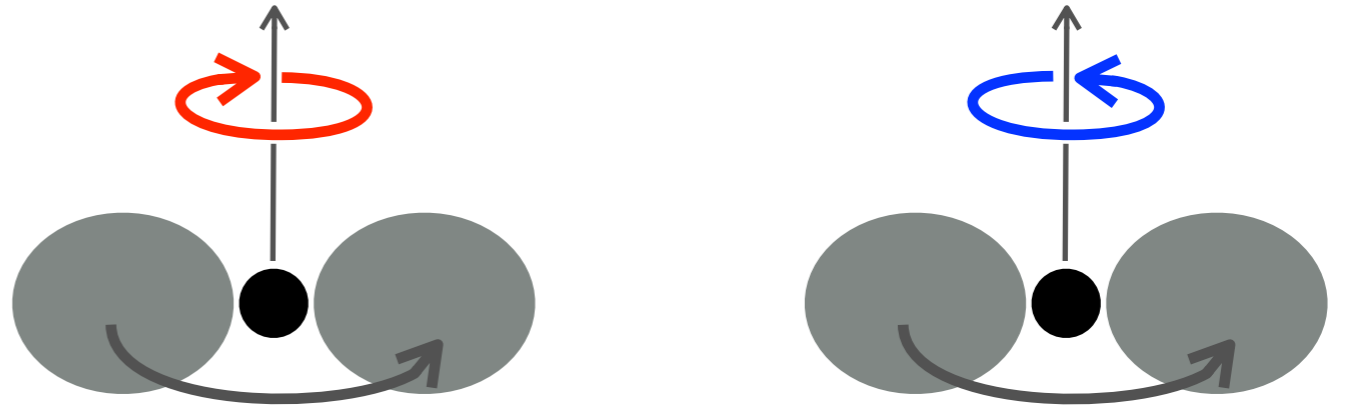
Narayan & McClintock 2012



強力なジェットが噴出し、また、
激しい時間変動が起こる。

観測的にもBZ効果が重
要という示唆もある？

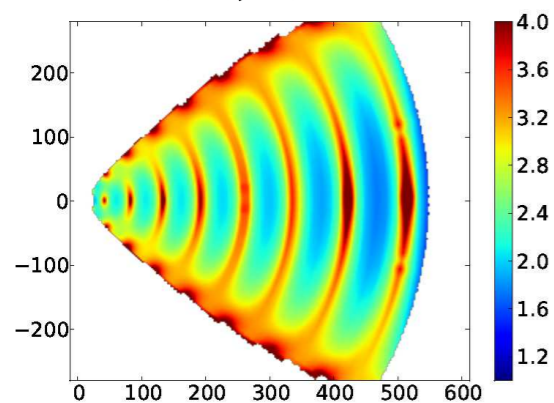
BHと円盤が逆回転だと降着率が高くなり、順回転だと効率的にアウトフローが出る



Tchekhovskoy & McKinney 2012

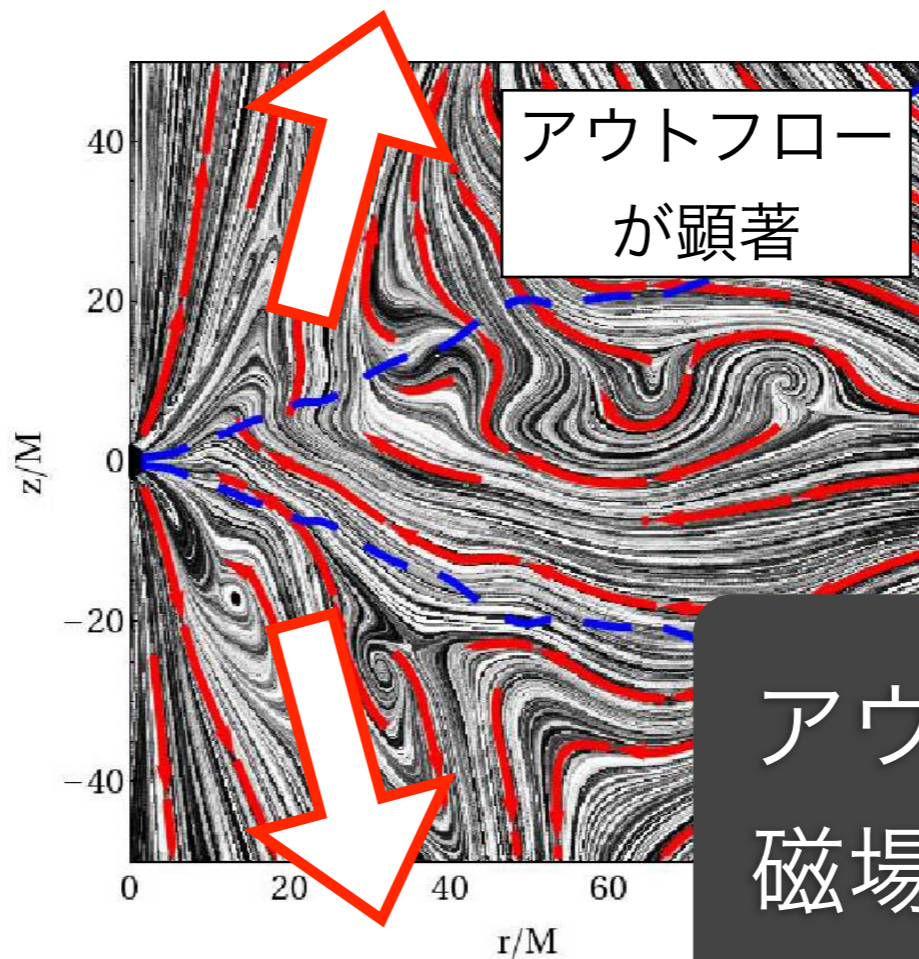
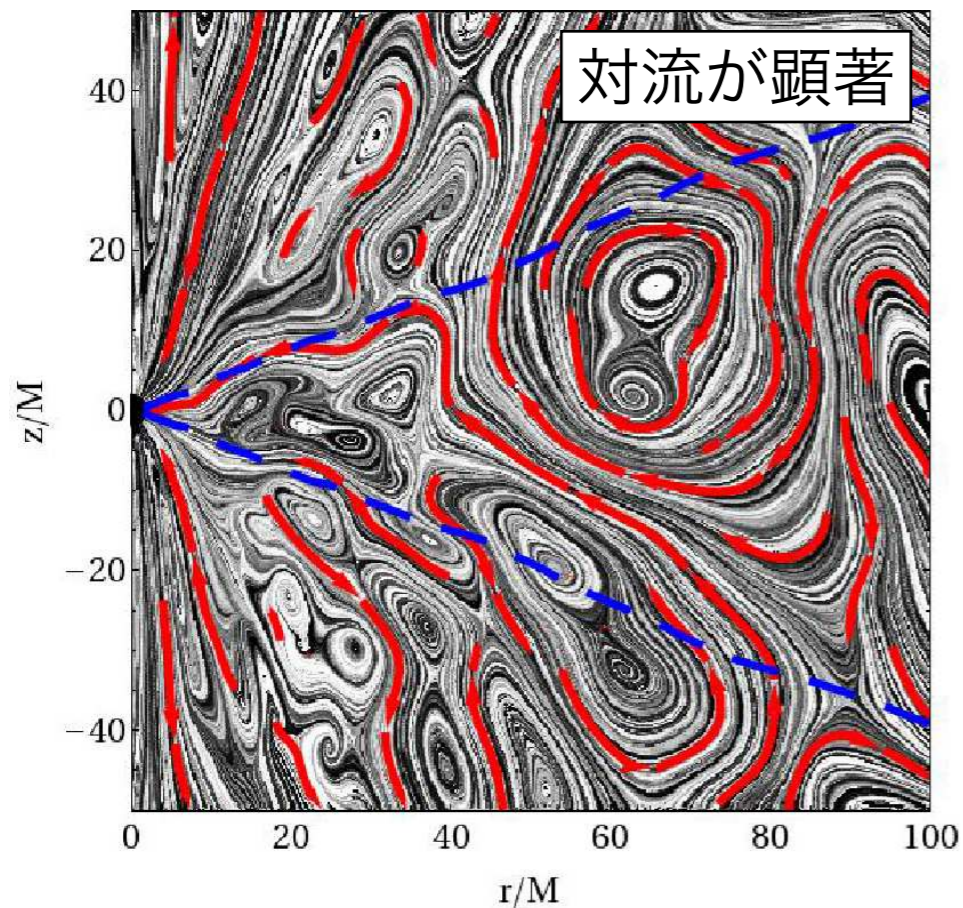
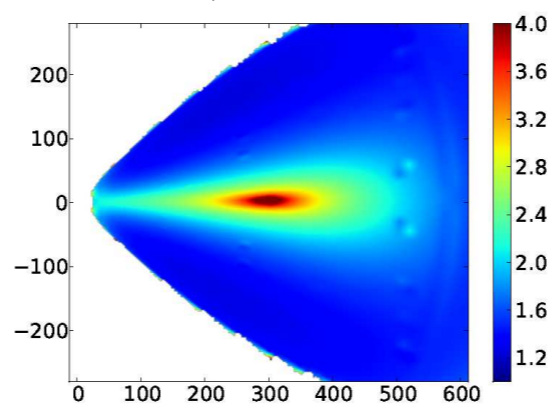
初期磁場

マルチループ



初期磁場

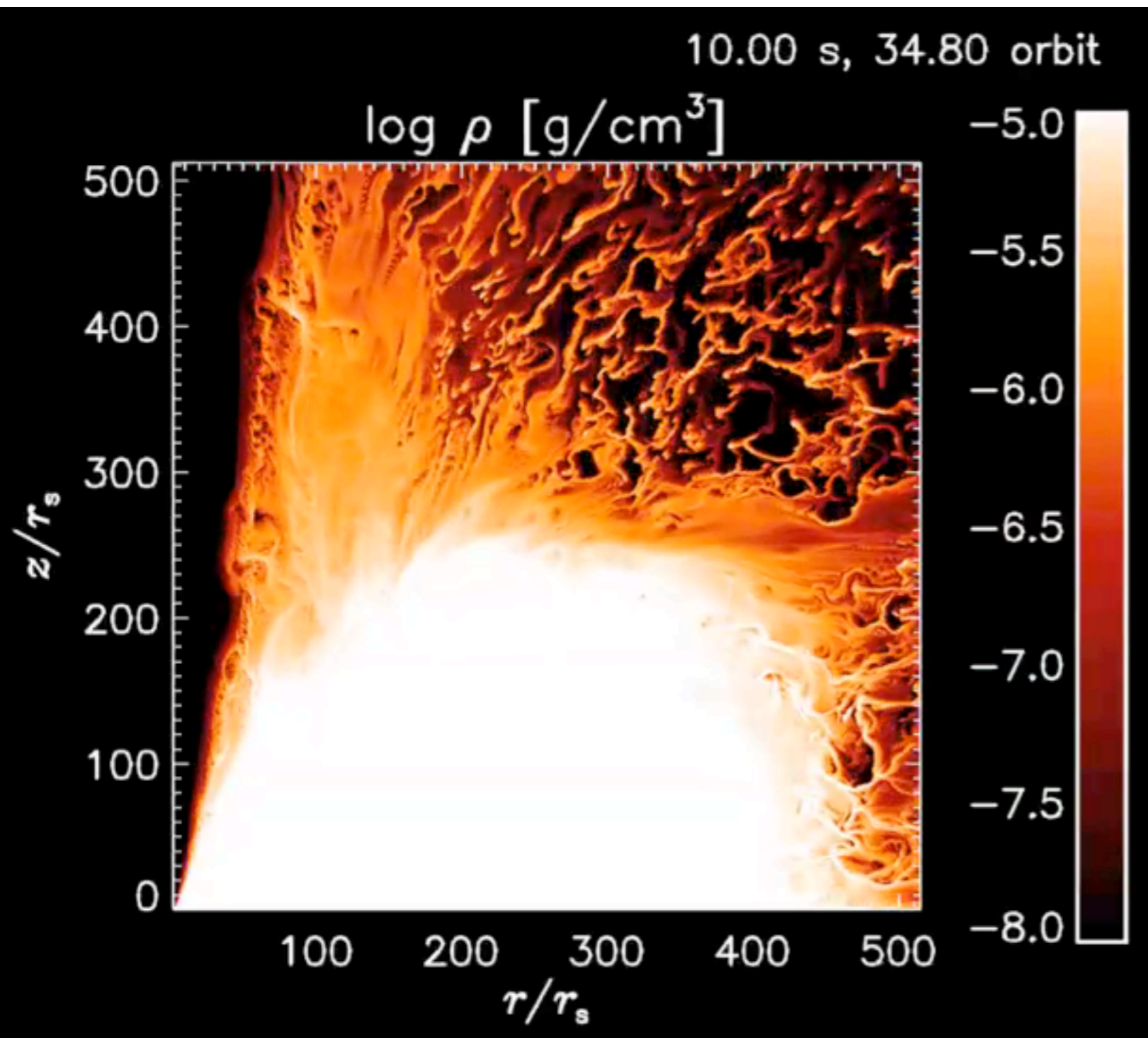
シングルループ



Narayan et al. 2012

アウトフローは初期
磁場に依存している
かもしれない! ?

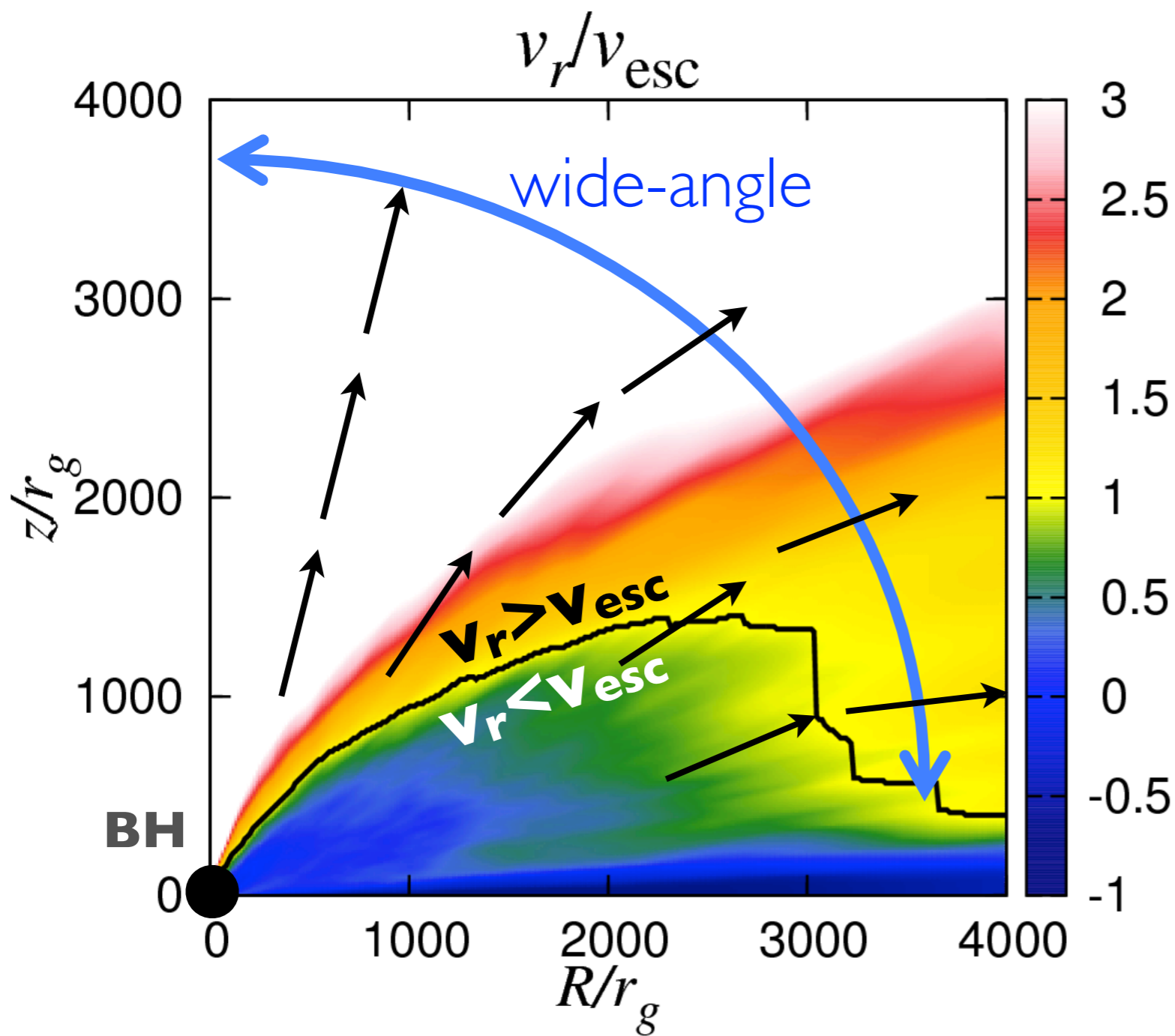
最近の成果：広角アウトフロー



計算ボックスを拡大してアウトフローの大局構造を計算

→軸方向のジェットに加え、広角に広がるClumpy outflowが発生

Takeuchi et al. 2013



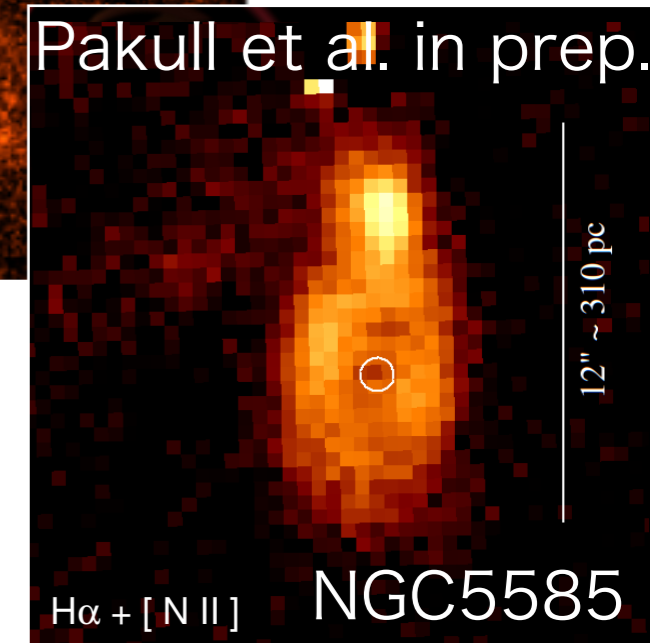
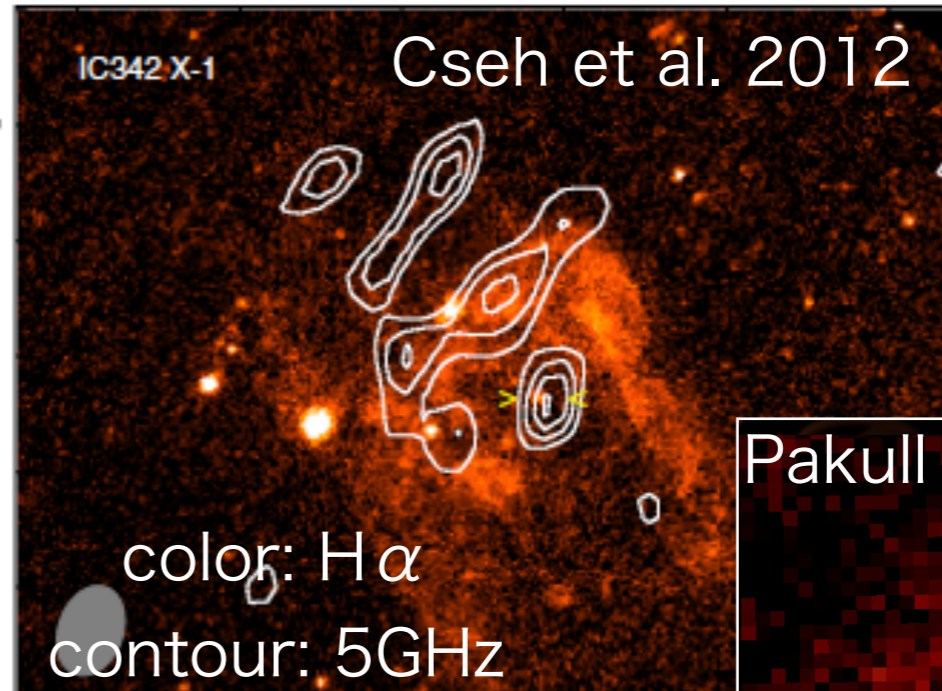
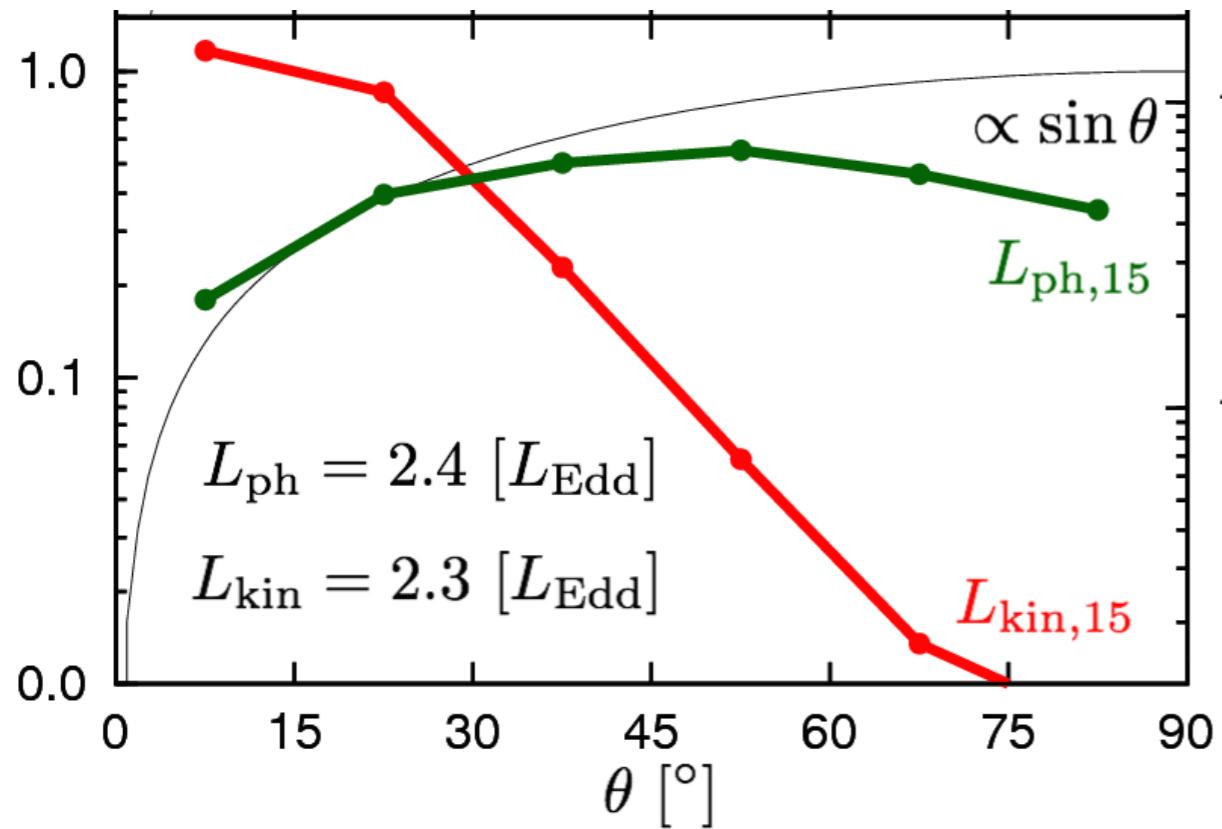
BH近傍(<100Rs)では
軸付近だけに高速
ジェット

輻射加速で徐々に加速

遠方領域(>3,000Rs)では、
ほぼ全方向で脱出速度
を超える。

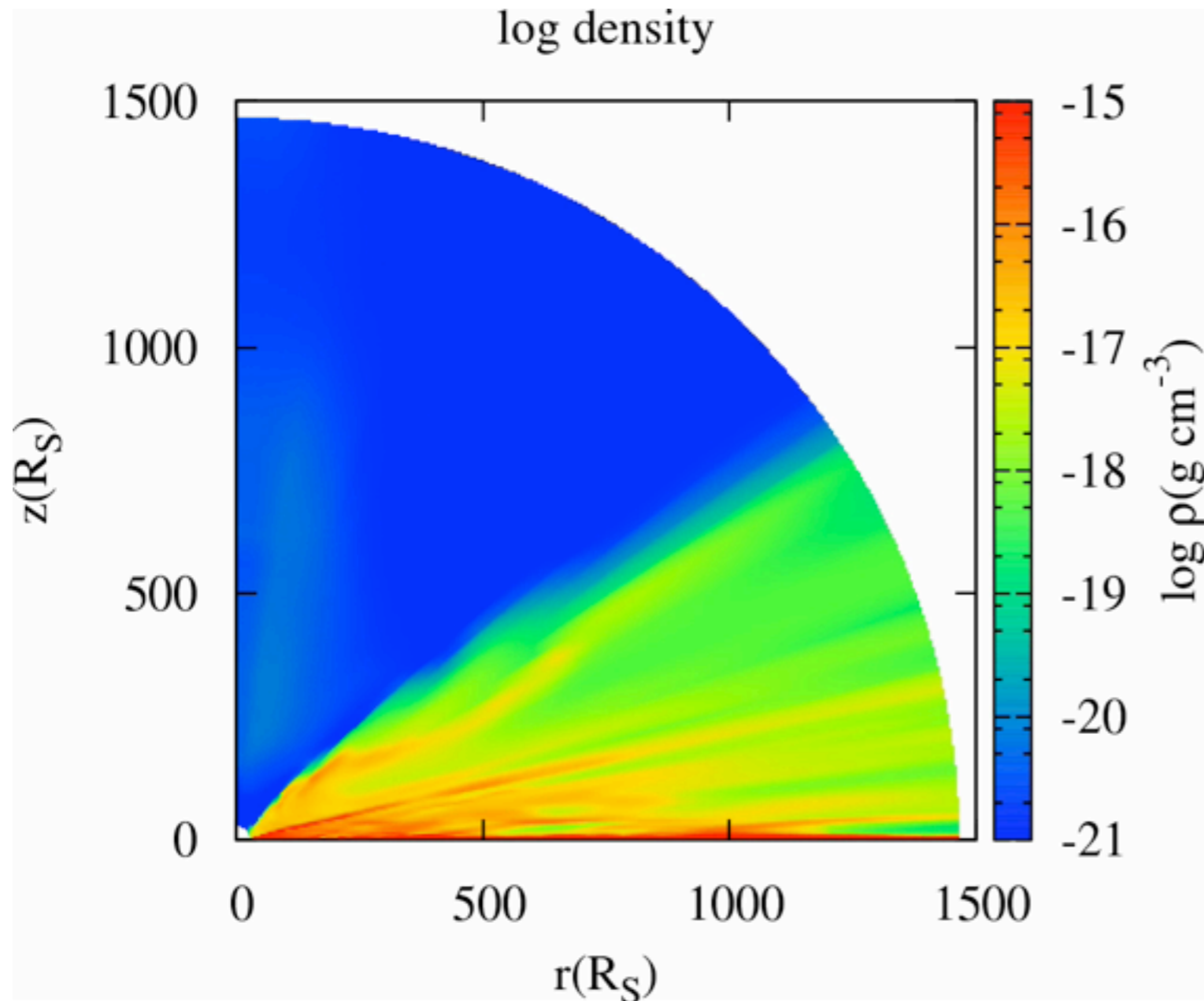
Hashizume, Ohsuga, Tanaka,
Kawashima, 2015

ULX bubbles;
 $L_{\text{kin}} \sim 3-5 \times 10^{39} \text{ erg/s}$ のoutflow
 が引き起こすと考えられる
 shock-excited bubble !



アウトフローは広角に広がり, そのKinetic Powerは \sim several 10^{39} erg/s で光度と同程度
 \rightarrow ULX bubbleの観測と合致!

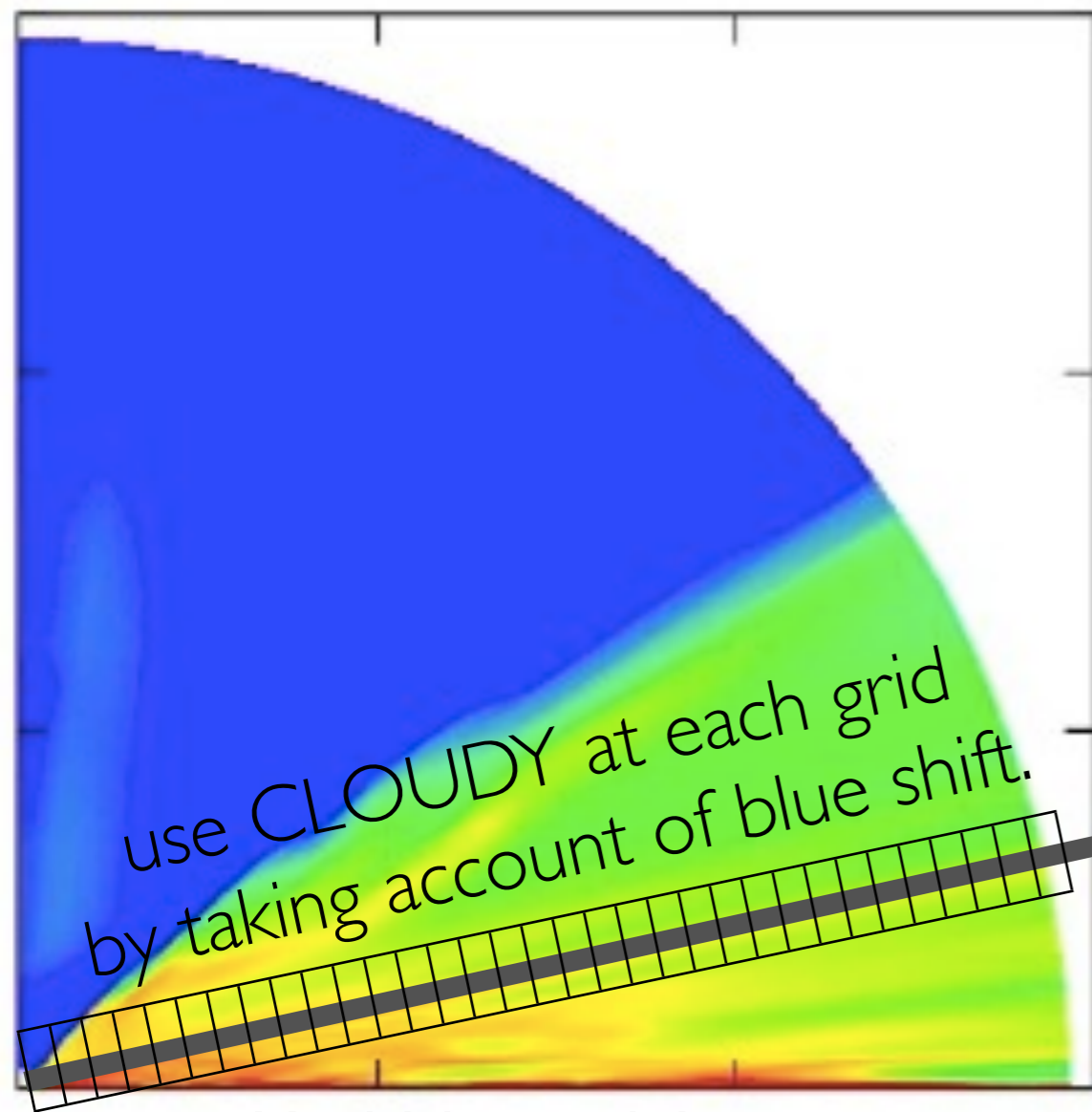
最近の成果；ラインフォース駆動型円盤風



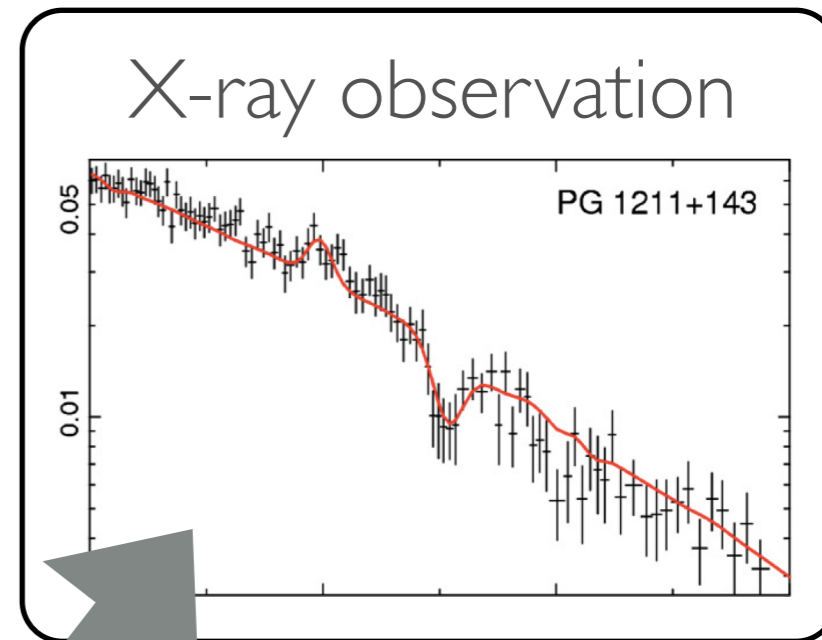
0.1c程度の速度で、
funnel型のアウトフ
ローが噴出。

中間電離状態の重元素
を含む → 青方偏移した
吸収線を作る！

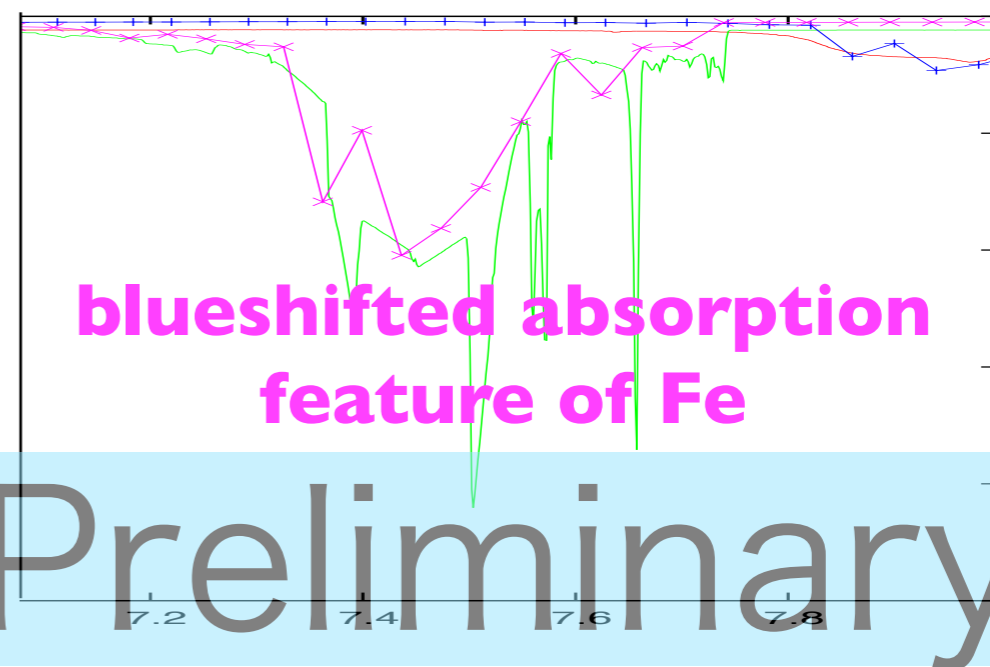
Nomura et al. submitted
see also Proga et al. 2000, 2004



Yoshida et al. in prep.
see also Schurch et al. 09, Sim et al. 10,
Higginbottom et al. 14



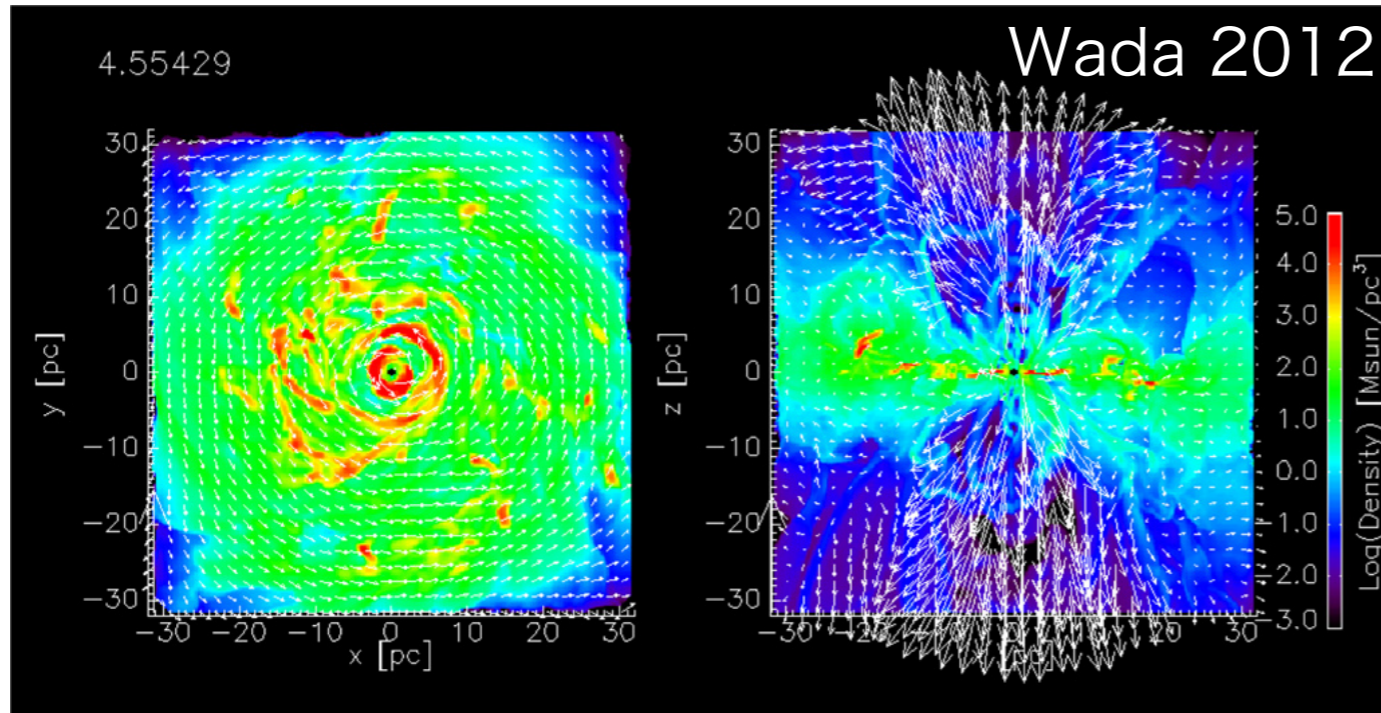
simulated spectra



Feの吸収線を詳細観測し、円盤風の構造を解明できるはず！
ASTRO-Hの最重要ターゲットのひとつ。

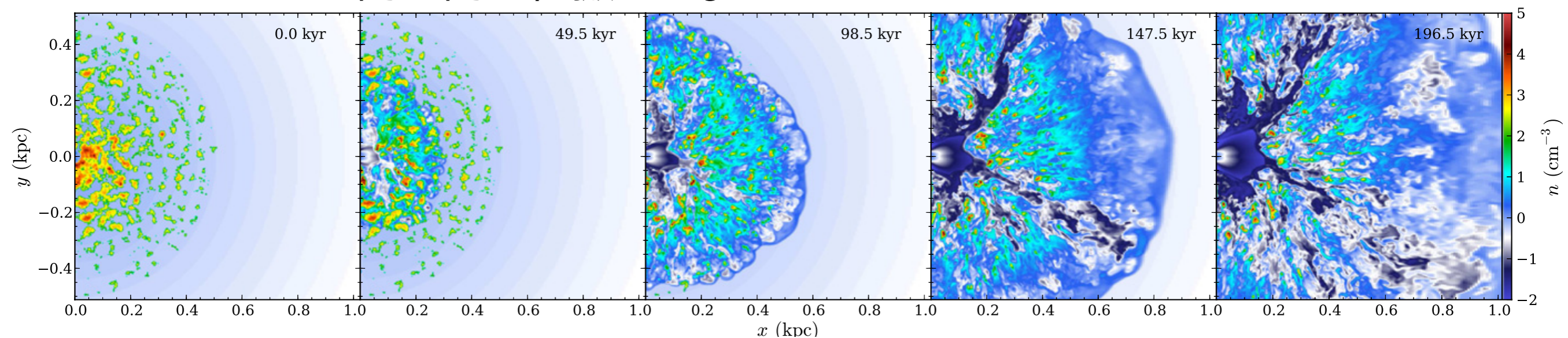
BHから銀河スケールへ

BH近傍からの輻射でTorusが形成



BHと銀河の中間スケールの研究は、今後重要になるだろう！

Outflowが星間空間を伝搬 Wagner et al. 2013



まとめと展望

BHアウトフロー（ジェット and/or 円盤風）の問題は、**BHの質量獲得史**や**母銀河へのフィードバック**に直結する宇宙物理学の最重要課題のひとつである。

いくつかの加速メカニズムが有力視され、精力的に調べられている。

- ① 輻射（電子散乱）加速・・・超高 L/L_{Edd} 天体[ULX, NLS1]
- ② 輻射（ライン）加速・・・高 L/L_{Edd} 天体[Sy, NLS1]
- ③ 磁場加速・・・低 L/L_{Edd} 天体[LLAGN, LH-state of XRB]
- ④ BZ効果・・・BHがスピンしてればいつでも？

数値シミュレーションがめざましい成果を出しているが、まだまだ未解明な問題が山積している。

BH近傍(disk-jet領域)

GRを入れたシミュレーション（ひとつのゴール）が可能に. 次なる課題は

- ①Radiation-MHDでは**振動数依存型**の計算, **コンプトン散乱**の導入
- ②MHDでは**二温度プラズマ**の扱い, **比熱的電子**の扱い, **熱伝導**の導入

ちょっと外側(disk wind領域)

簡易的なラインフォースを使った円盤風の計算は成功. 次なる課題は

- ①輻射輸送計算法の改良し, **ライントランスファー**を扱う
- ②流体計算と**XSTAR**や**CLOUDY**を**結合**できるか？

もっと外側(AGNトールラス～銀河バルジ)

中心エンジンを（おおざっぱに）モデル化した研究しかない.

- ①physically motivatedな中心エンジンモデルを導入し, **星間ガスの進化**や**中心部へのガス供給率**を計算
- ②**BH近傍領域との相互フィードバック**を導入した自己矛盾の無い理論の構築