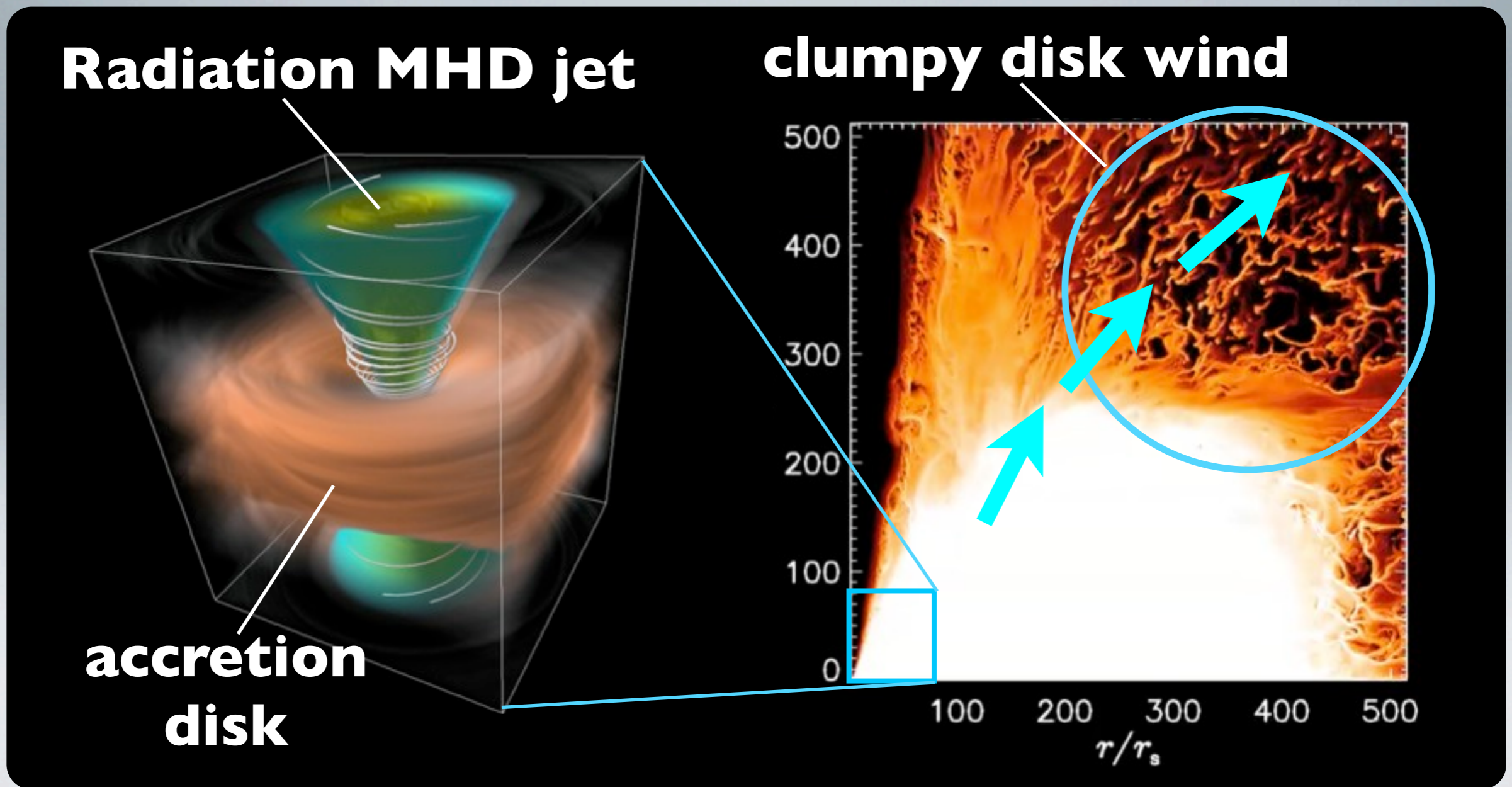


ブラックホール周囲の降着・噴出流は
どこまでわかったか？
～最新の成果と課題～



大須賀 健 (国立天文台)

自己紹介

- 生まれ；秋田県
- 大学；北海道大学工学部（電気伝導度の研究）
- 大学院；筑波大学（AGNのトーラスの研究）
- ポスドク；京都大学, パリ天文台, 立教大学, 理化学研究所
 - ブラックホールの研究はポスドクになってから
 - シミュレーションはポスドク3年目から

若手のみなさんへ

- 研究テーマは自分で決めよう！

- まず先生をちゃんと選ぼう.
- 先生にもらったテーマは研究の練習. 生涯のテーマは自分で.
- 「指導教員の名前の無い論文を書いてこそ一人前」

- 自分の専門は誰よりも深く. でも他の分野もちゃんと知ろう！

- 天文学全体の中で自分の研究がどういう意味を持つのか, どのような位置づけにあるのか, 本当に重要なテーマなのか, いつも考えよう.
- 時には研究テーマを変える勇気を持つことも大事.

今、何が問題なのか？

高エネルギー天体物理学的観点から

- ジェットの加速機構と収束機構
- 円盤風の形状と加速機構
- 円盤の構造と時間変化, ガス噴出との関係

宇宙論的天体形成論の観点から

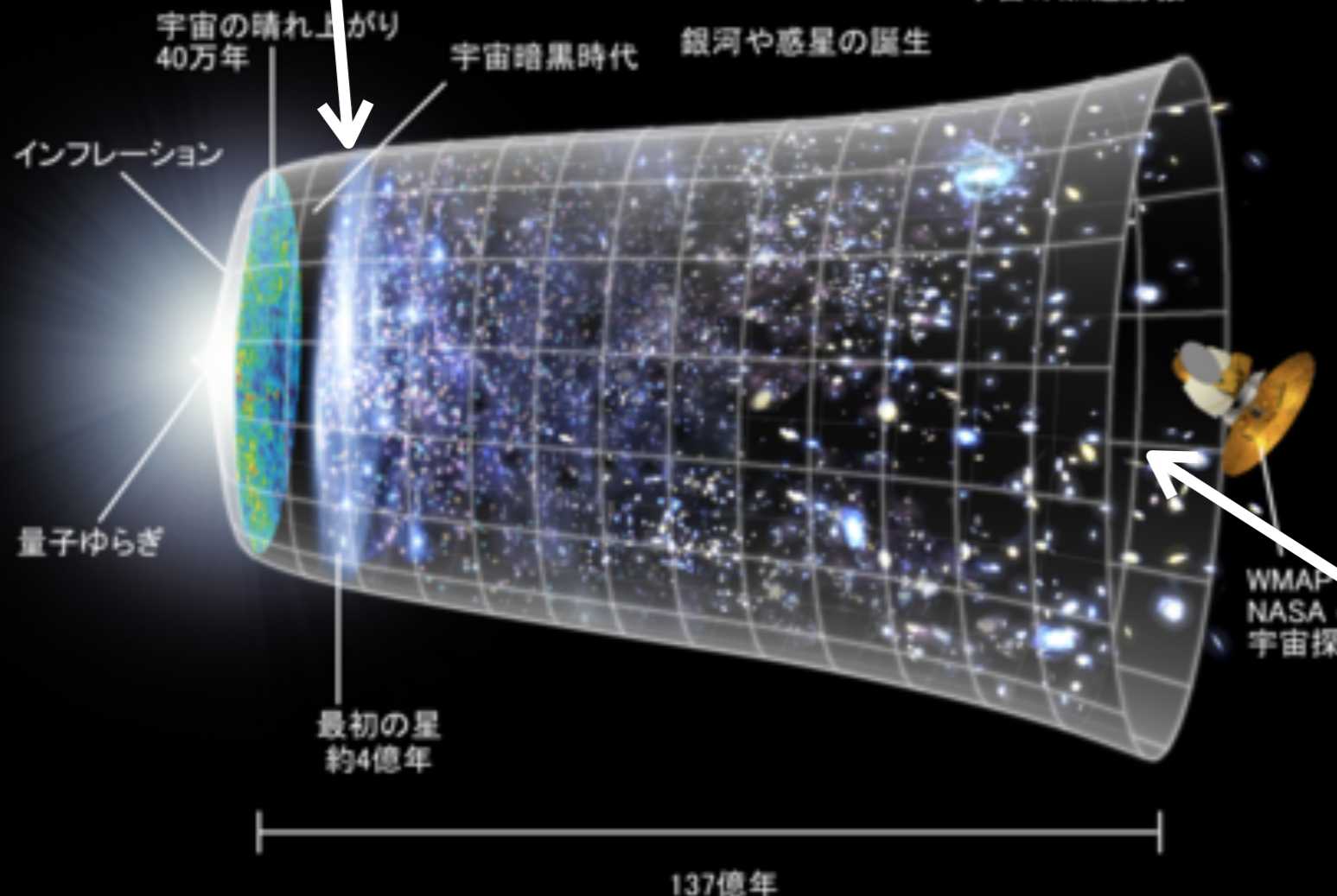
- 巨大ブラックホールの形成メカニズム, 急速成長と成長停止
- 巨大ブラックホールと銀河の共進化

巨大BHの急速成長と成長停止

$z=7.1$ のQSO

Mortlock et al. 2011

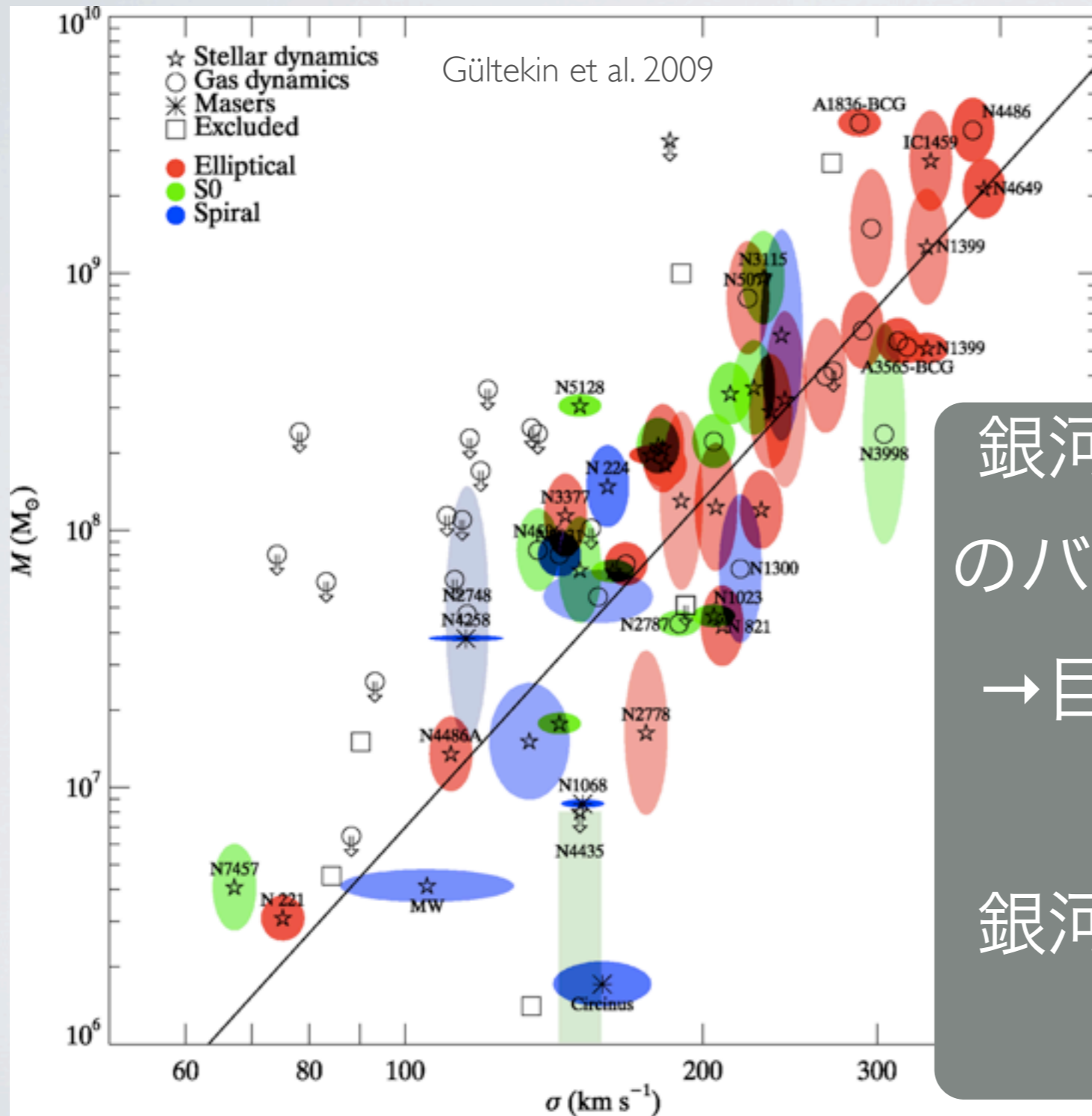
巨大ブラックホールは宇宙誕生の数億年後に既に存在
→急速成長のメカニズムは？



巨大ブラックホールはもう成長していない
→なぜ成長が止まるのか？

巨大BHと銀河の共進化

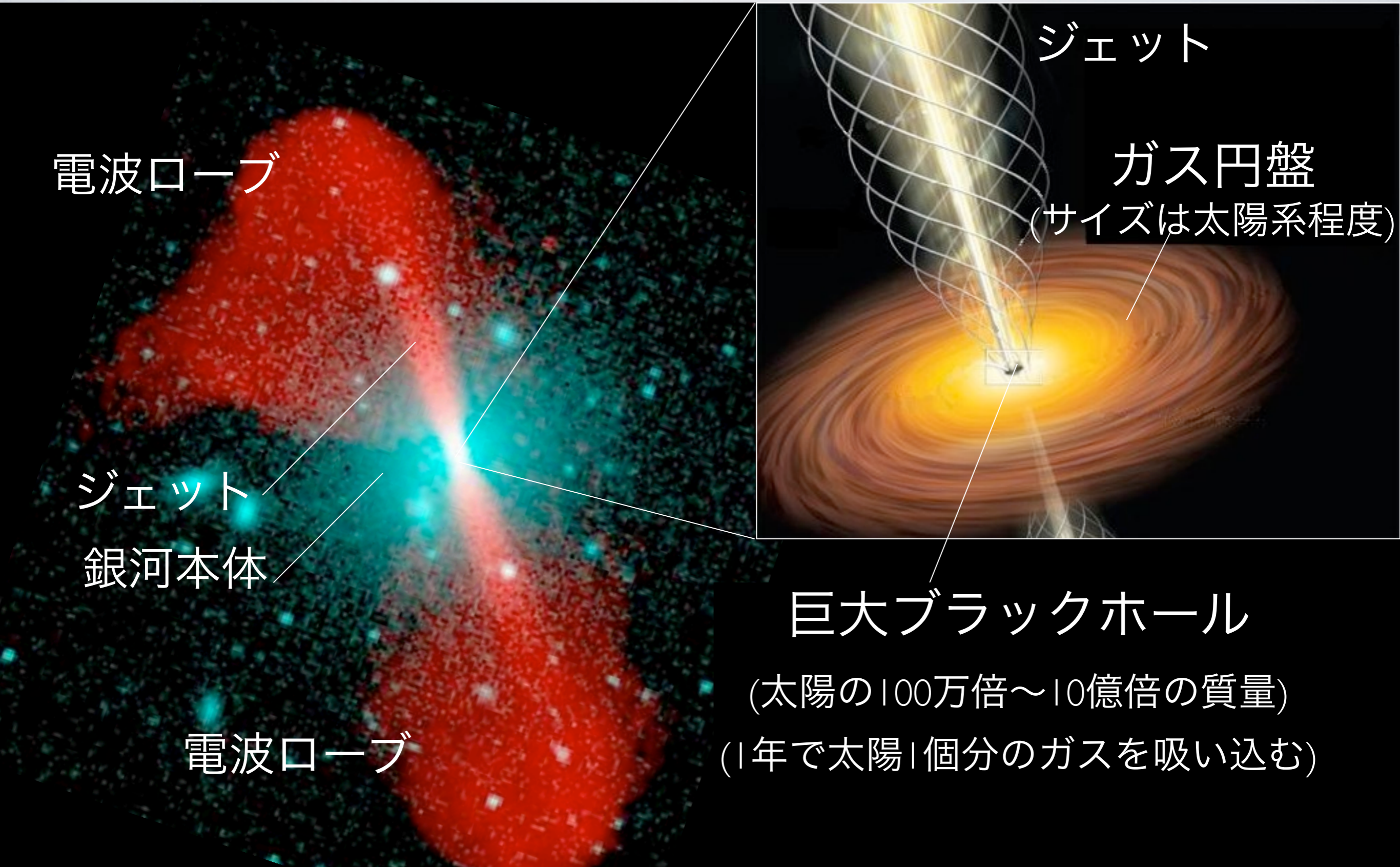
BH質量



銀河中心の巨大BHと母銀河のバルジの質量に相関がある
→ 巨大BHの形成が銀河進化を制御したのか？
銀河の進化が巨大BHを引き起こしたのか？

銀河バルジの質量

ジェット & 円盤風



電波ローブ

ジェット

銀河本体

電波ローブ

ジェット

ガス円盤

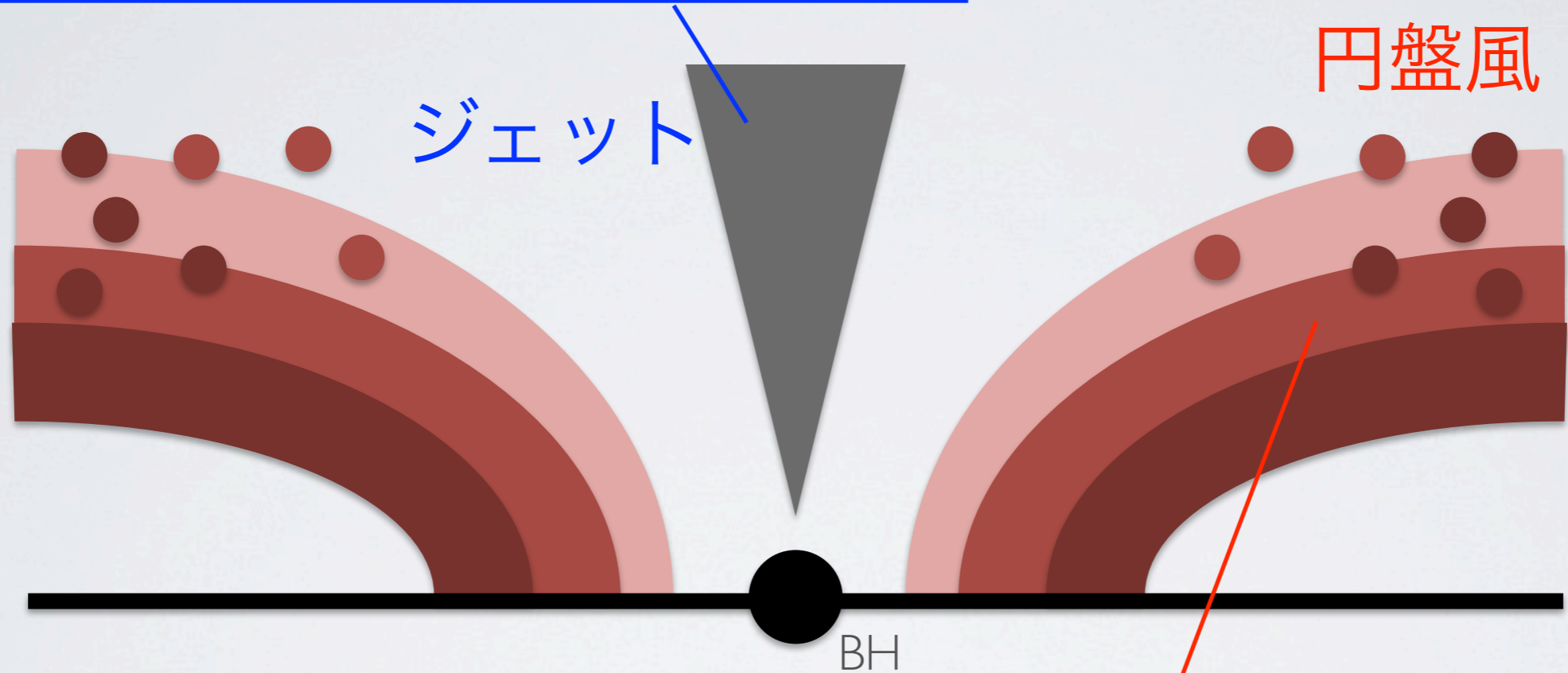
(サイズは太陽系程度)

巨大ブラックホール

(太陽の100万倍～10億倍の質量)

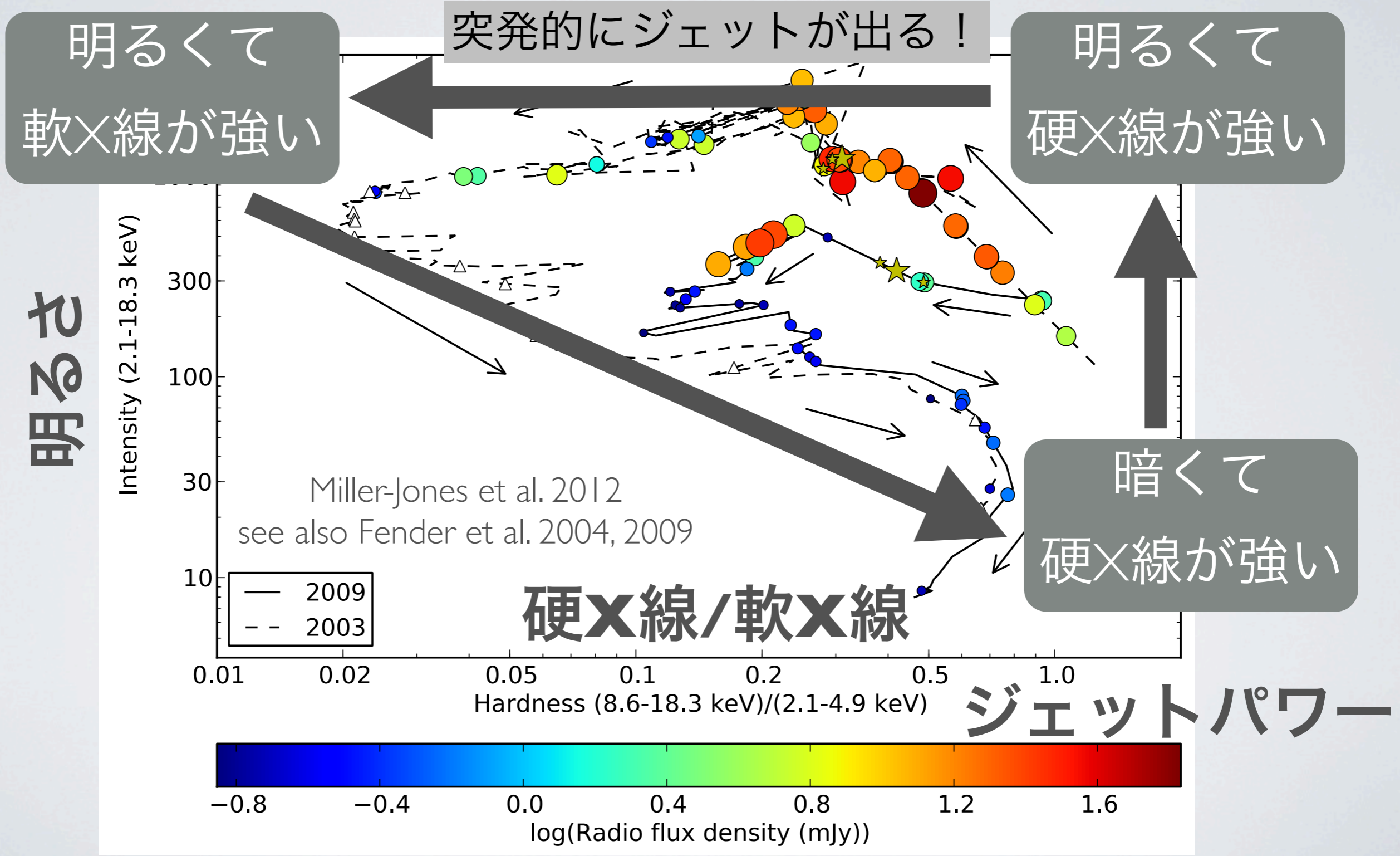
(1年で太陽1個分のガスを吸い込む)

- 磁場加速か？ 輻射加速か？
- ブラックホールのスピンは重要か？
- 成分は陽子＋陽電子プラズマか？
- なぜ細いのか？



- ライン加速か？ 磁場加速か？
- 大量のガスが噴き出すのはなぜ？
- ガス雲が存在するか？
- 分裂の原因は何か？

円盤の時間変動とジェット



ブラックホール降着/噴出現象の研究意義

宇宙物理の諸問題に深く関わる重要な研究課題！

高エネルギー天体现象の解明
(ex. ガンマ線バースト, 銀河中心核,
ブラックホール連星)

最新の観測データの解釈
次世代観測プロジェクトのサポート
(ex. Astro-H, TMT)

高エネルギー物理

輻射スペクトル計算

**ブラックホールへの
ガス降着&ガス噴出**

ガス降着

星間ガスへの
エネルギー供給

巨大ブラックホール形成論

巨大BHと銀河の共進化

輻射磁気流体シミュレーション；
三種の降着円盤およびジェット
統一的理解へ向けて

RADIATION-MHD SIM. (NON RELATIVISTIC)

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

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B}\mathbf{B}}{4\pi} \right) = -\nabla \left(p + \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} \right) + \frac{\chi}{c} \mathbf{F}_0 - \rho \nabla \psi$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{4\pi}{c^2} \eta J^2 - 4\pi \kappa B + c \kappa E_0$$

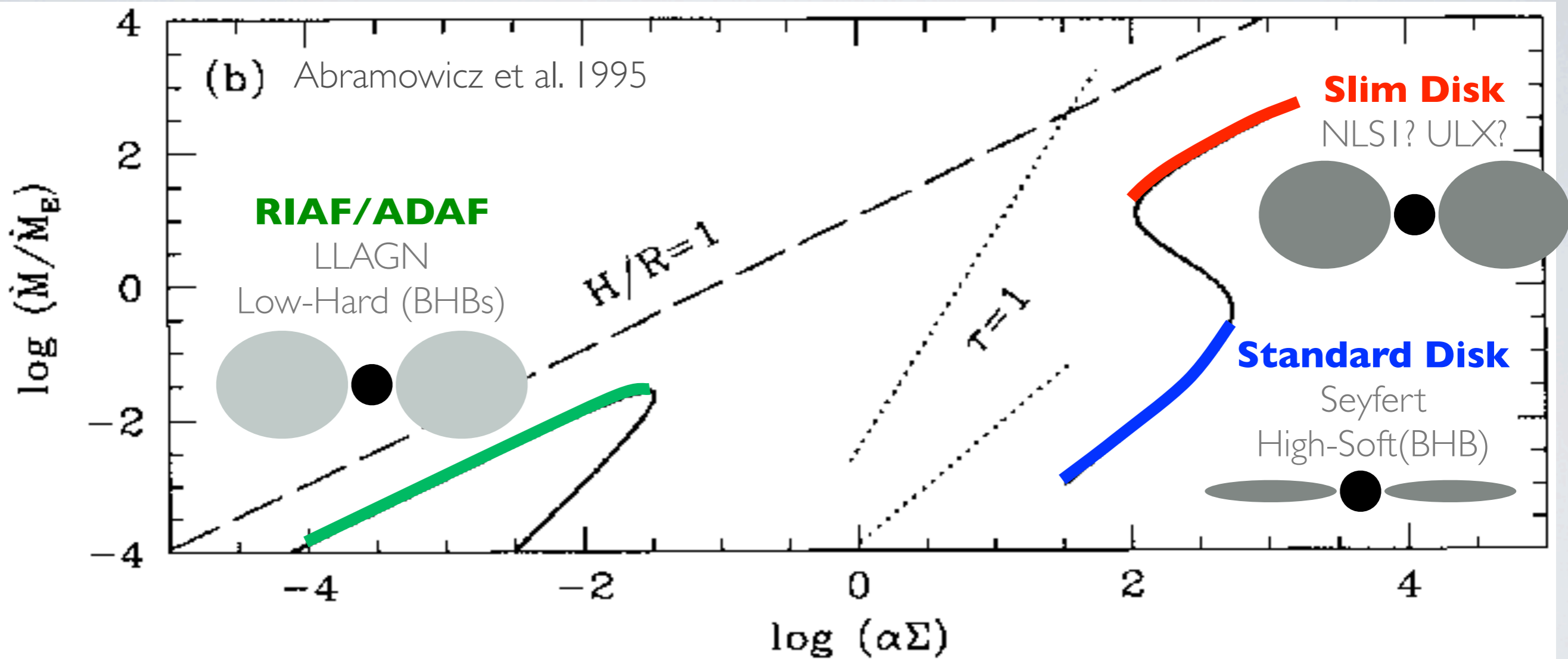
$$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_0 - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P}_0 + 4\pi \kappa B - c \kappa E_0$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \frac{4\pi}{c} \eta \mathbf{J} \right) \quad \mathbf{J} = \frac{4\pi}{c} \nabla \times \mathbf{B}$$

 RHD terms

 MHD terms

THREE DISK MODELS



	RIAF	Standard	Slim
Magnetic effects	YES	YES	YES
Radiative Cooling	NO	YES	YES
Radiation Force	NO	NO	YES

Slim Disk

Abramowicz et al. 88

重力E=大

落下

回転の運動E

MRI Reconnection

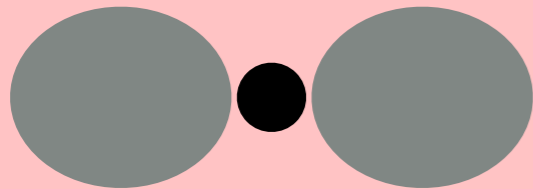
磁場E & ガスの熱E

放射/吸収

輻射E

$L \ll 0.1\dot{M}c^2$

BH 観測者



<Black body>
ULXs, NLS1s

Standard Disk

Shakura & Sunyaev 73

重力E=中

落下

回転の運動E

MRI Reconnection

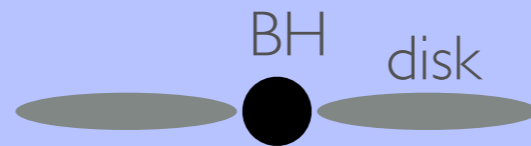
磁場E & ガスの熱E

放射/吸収

輻射E

$L \sim 0.1\dot{M}c^2$

観測者



<Black body>
high-soft state
Seyfert, QSOs

ADAF/RIAF

Ichimaru 77; Narayan, Yi 94

重力E=小

落下

回転の運動E

MRI Reconnection

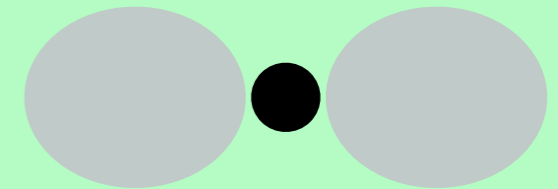
磁場E & ガスの熱E

放射/吸収

輻射E

$L \ll 0.1\dot{M}c^2$

BH 観測者



<PL emission>
low-hard state
LLAGNs

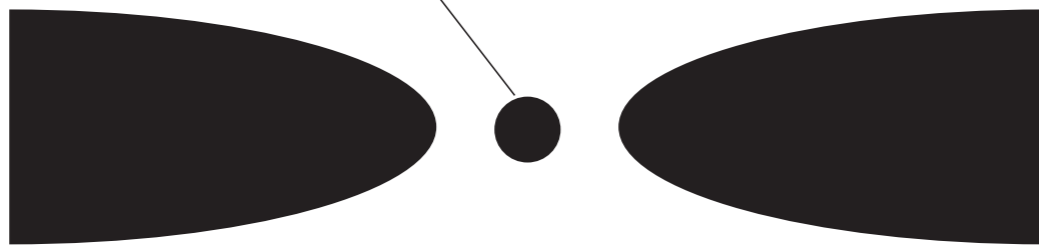
磁場と輻射の重要性(1)

輻射冷却

円盤の多様性は輻射冷却効率の違いで生まれる

断面図

ブラックホール



スリム円盤

高温高密度円盤(Slim disk)

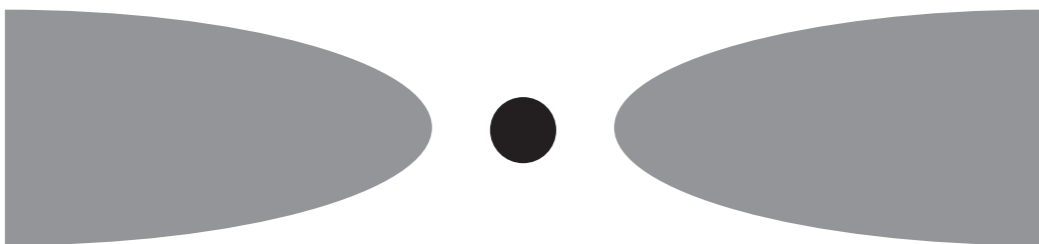
→ 高温度黒体放射を説明



標準円盤

低温高密度円盤(標準円盤)

→ 低温度黒体放射を説明



ライアフ

高温低密度円盤(RIAF/ADAF)

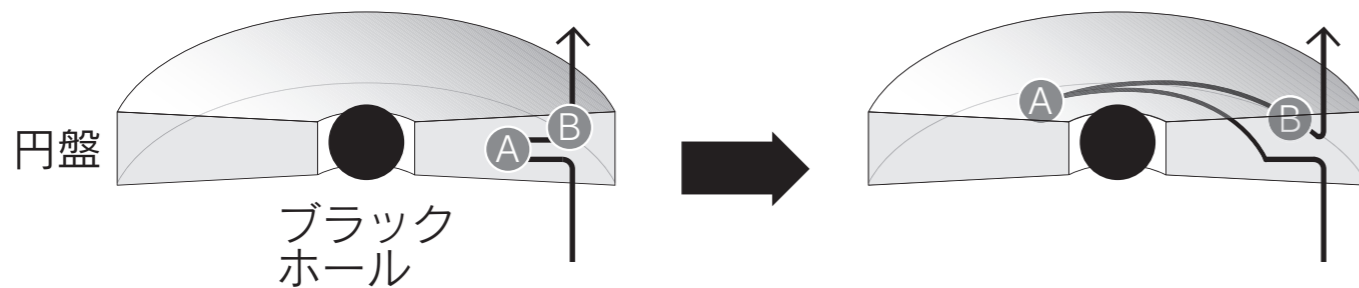
→ 高エネルギーX線放射を説明

磁場と輻射の重要性(2)

磁気回転不安定

水平方向の磁場が増幅
ガスが角運動量を失って落下

・真横から見た断面図

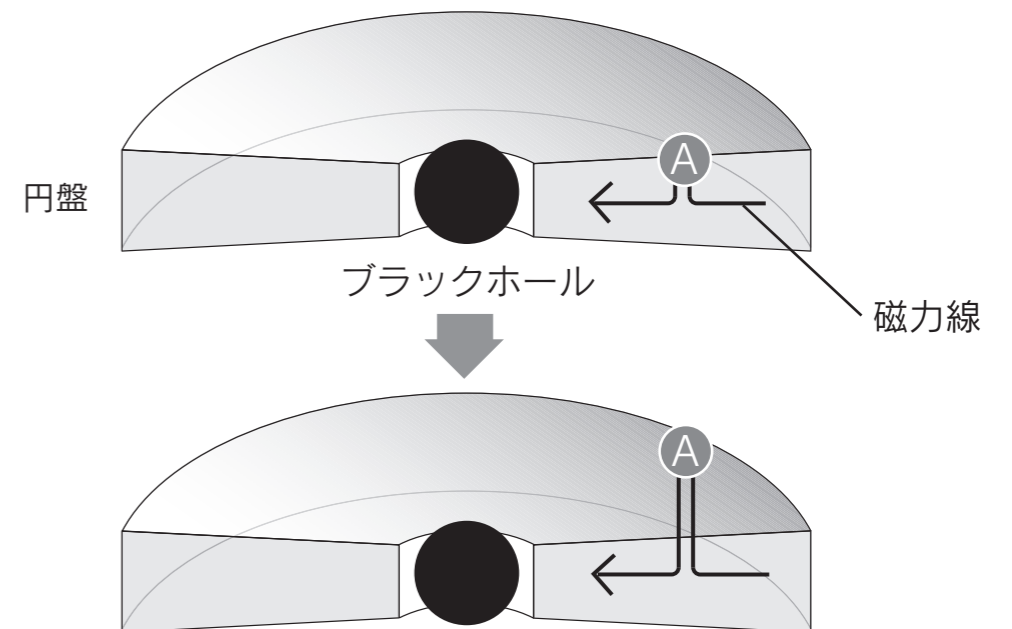


・真上から見た図



磁気浮力不安定

垂直方向の磁場が増幅



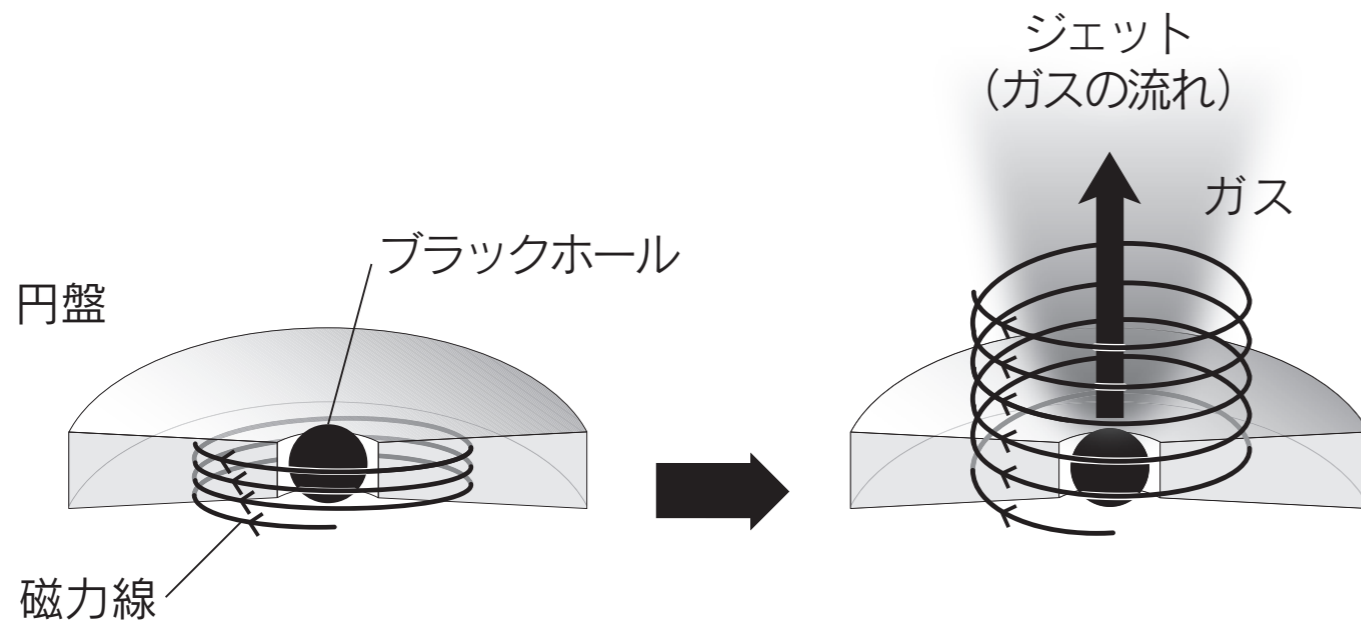
ジュール加熱

増幅された磁場が散逸し、
ガスが加熱

磁場と輻射の重要性(3)

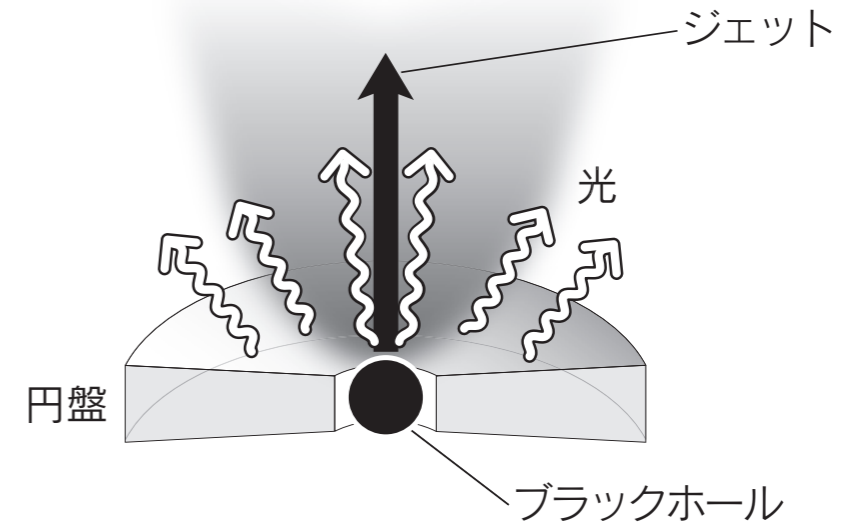
磁気圧加速

渦巻き状の磁力線構造が生み出す磁気圧でジェット噴出



輻射圧加速

光の力でジェット噴出



多次元**輻射磁気**流体計算(**輻射**輸送+**磁場**+流体+重力)

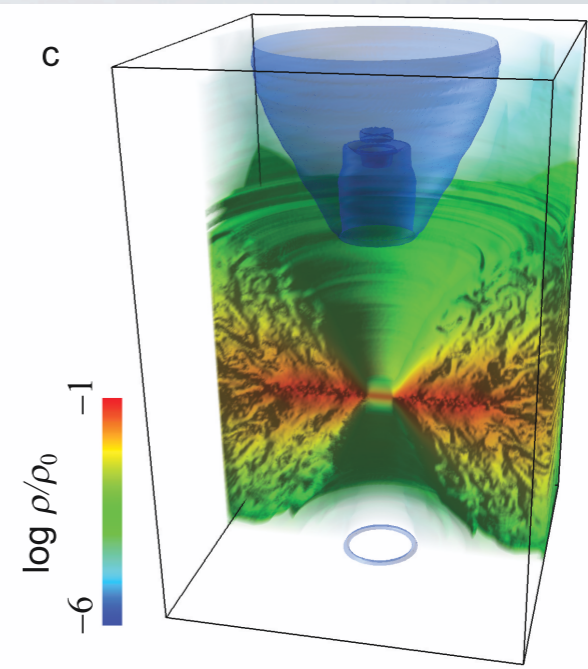
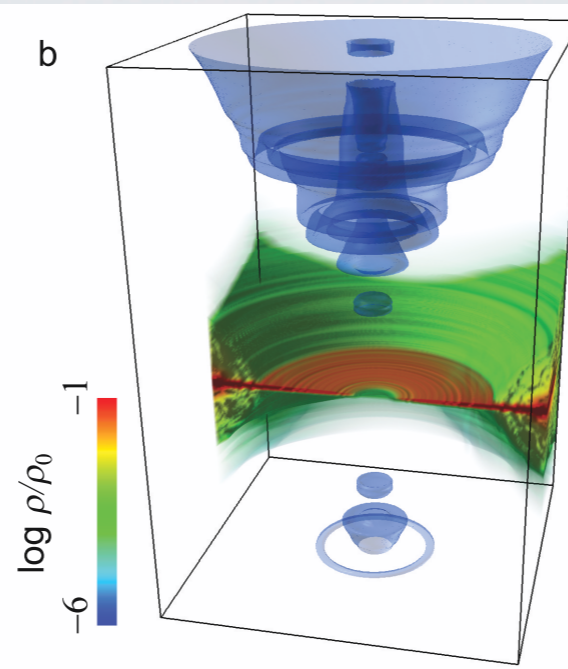
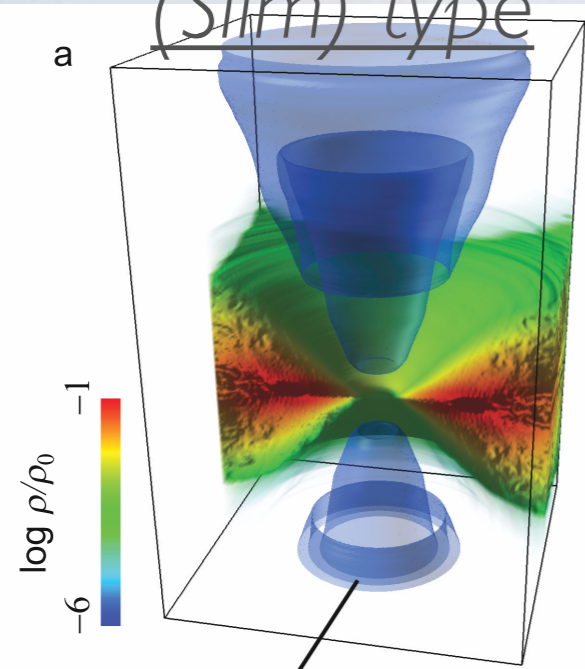
が必須!

Super-Eddington

Standard type

RIAF type

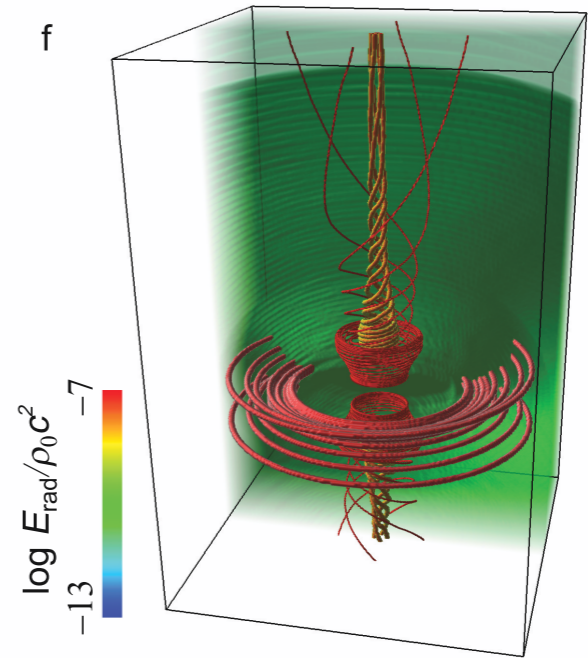
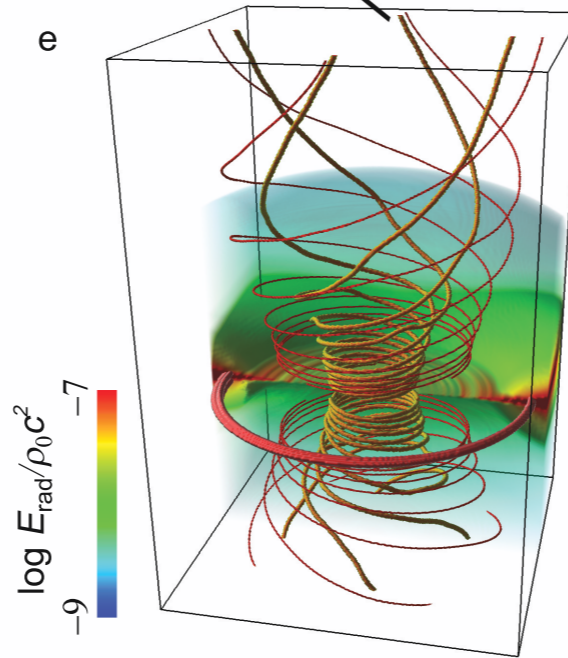
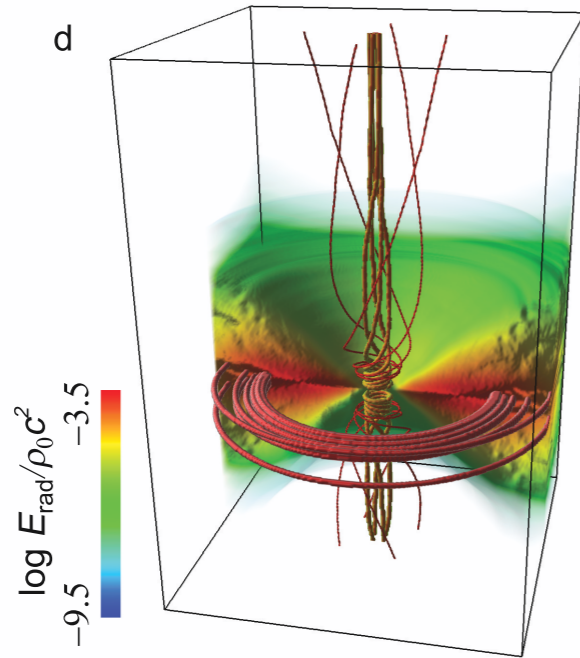
Normalized
Density



Isosurface
(outward velocity = escape velocity)

Magnetic field lines

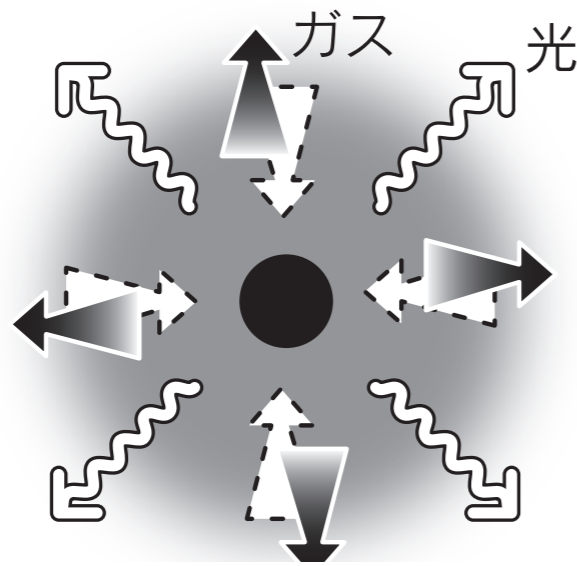
Radiation Energy
& Magnetic Fields



Our RMHD simulations succeeded in reproducing three types of flows (Super-Eddington, standard, RIAF)

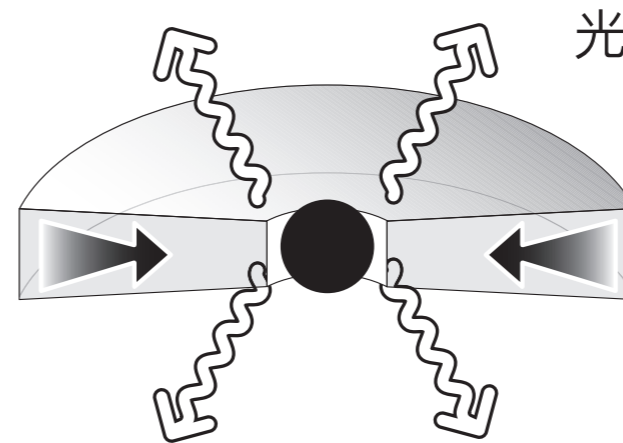
SUPER-EDDINGTON 降着

・球対称

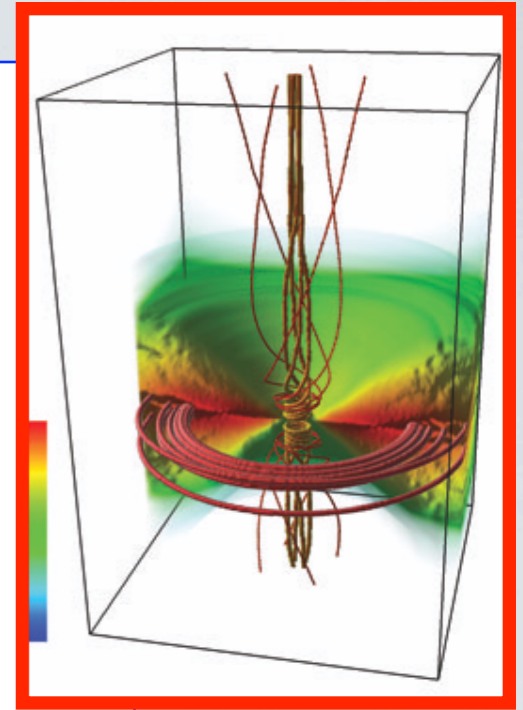


光の力 > 重力のため降着不可能

・円盤



光の力が降着を妨げないので可能？

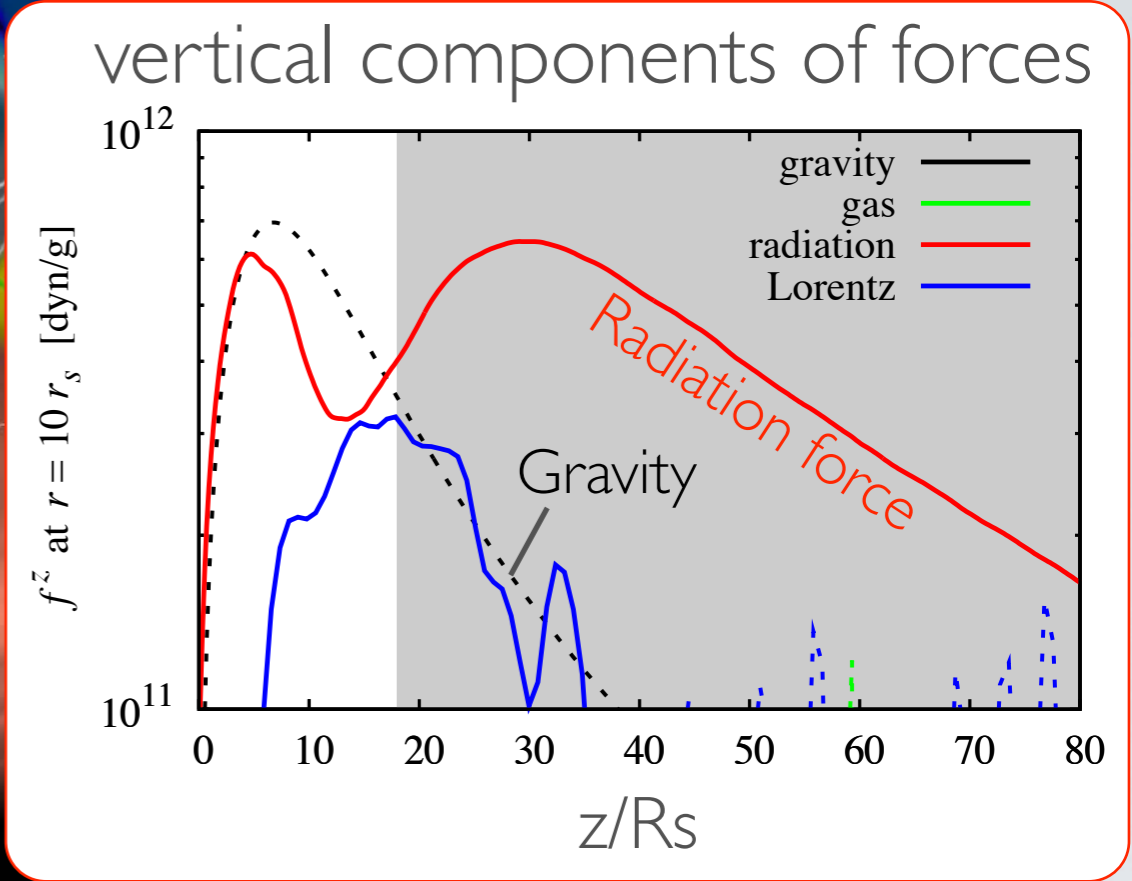
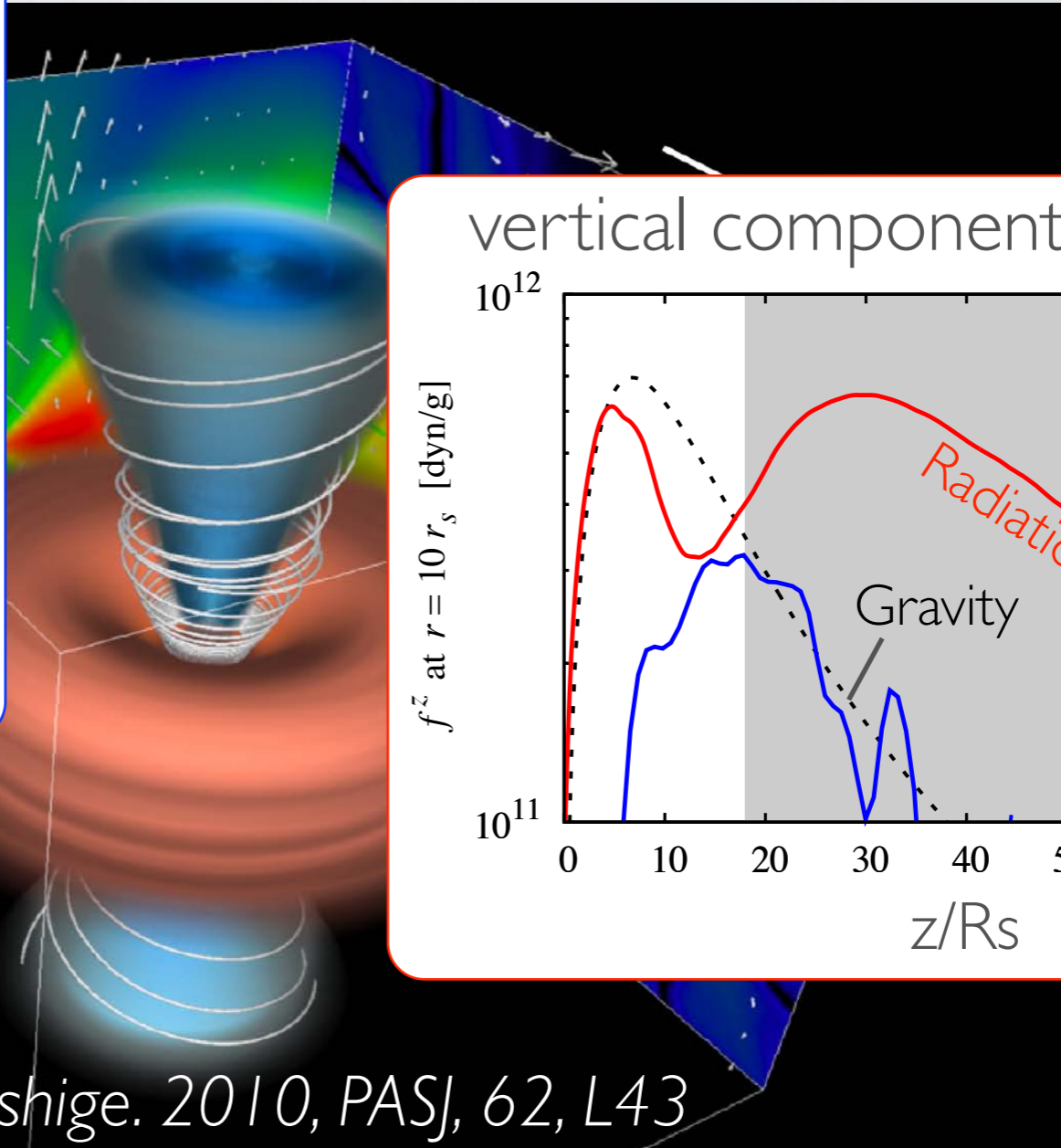
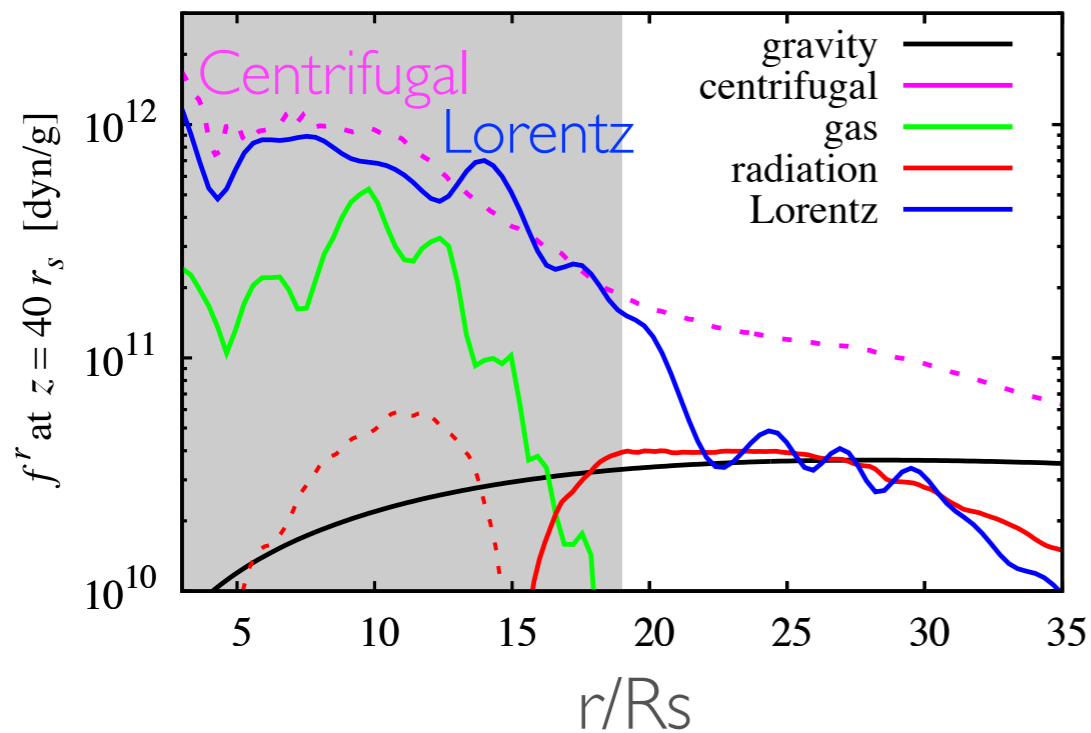


**Super-Eddington降着は可能である
(1970年代からの問題に決着！)**

→超巨大ブラックホールの急速成長はsuper-Eddington降着で説明できる

RADIATION-MHD JETS

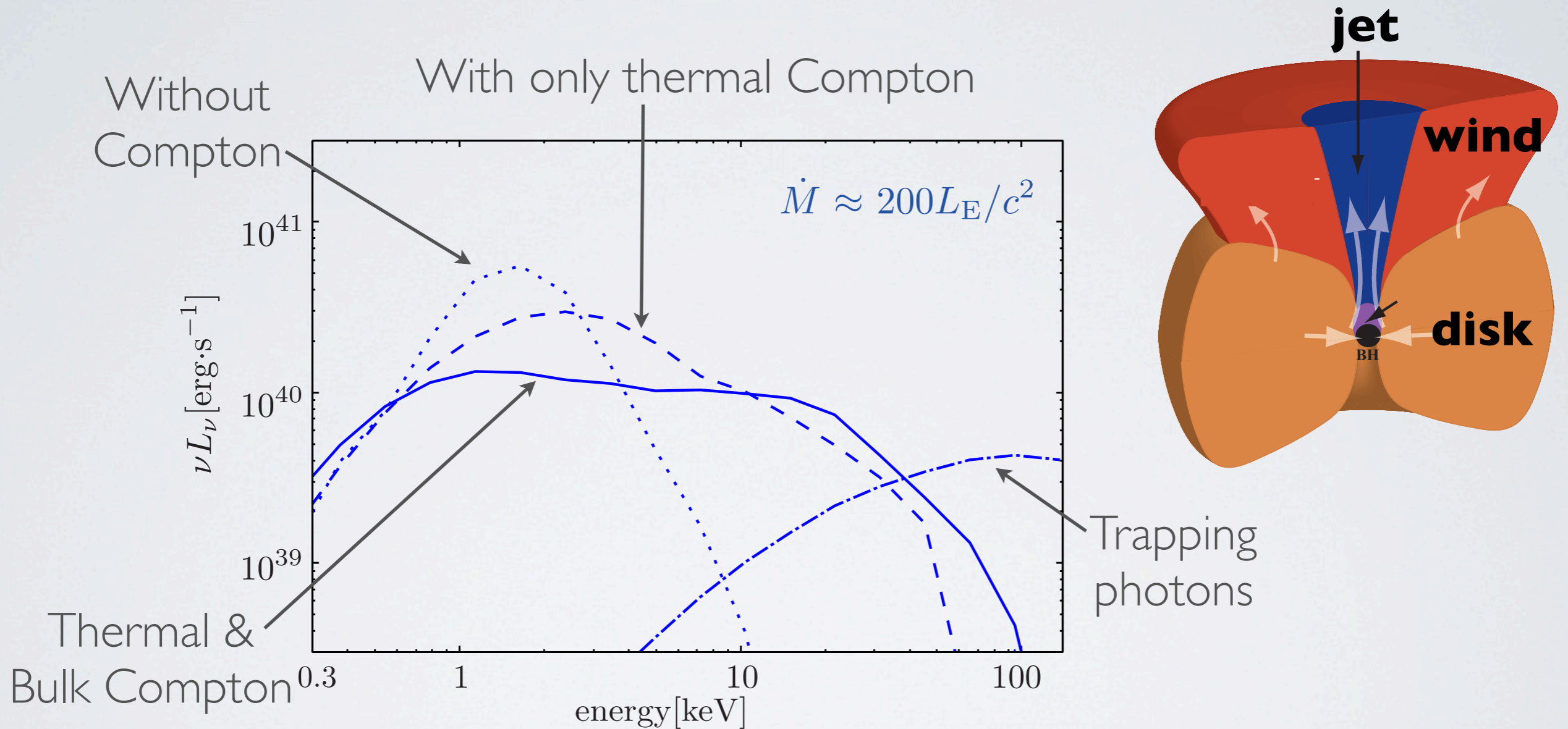
horizontal components of forces



Takeuchi, Ohsuga, Mineshige. 2010, PASJ, 62, L43

Our RMHD simulations reveal a new type of jet;
Radiatively-accelerated and magnetically collimated jet

THERMAL COMPTON AND BULK COMPTON

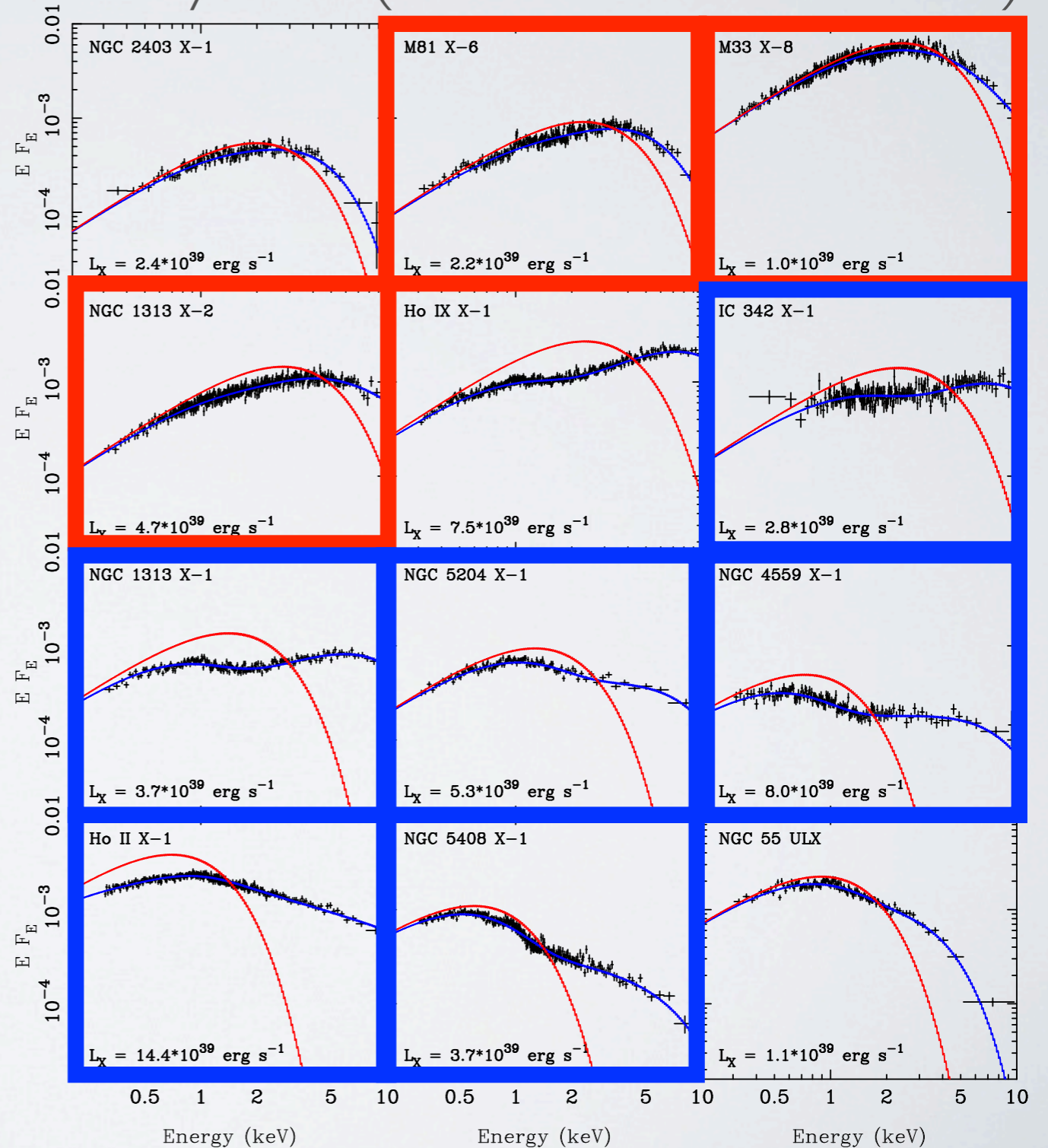
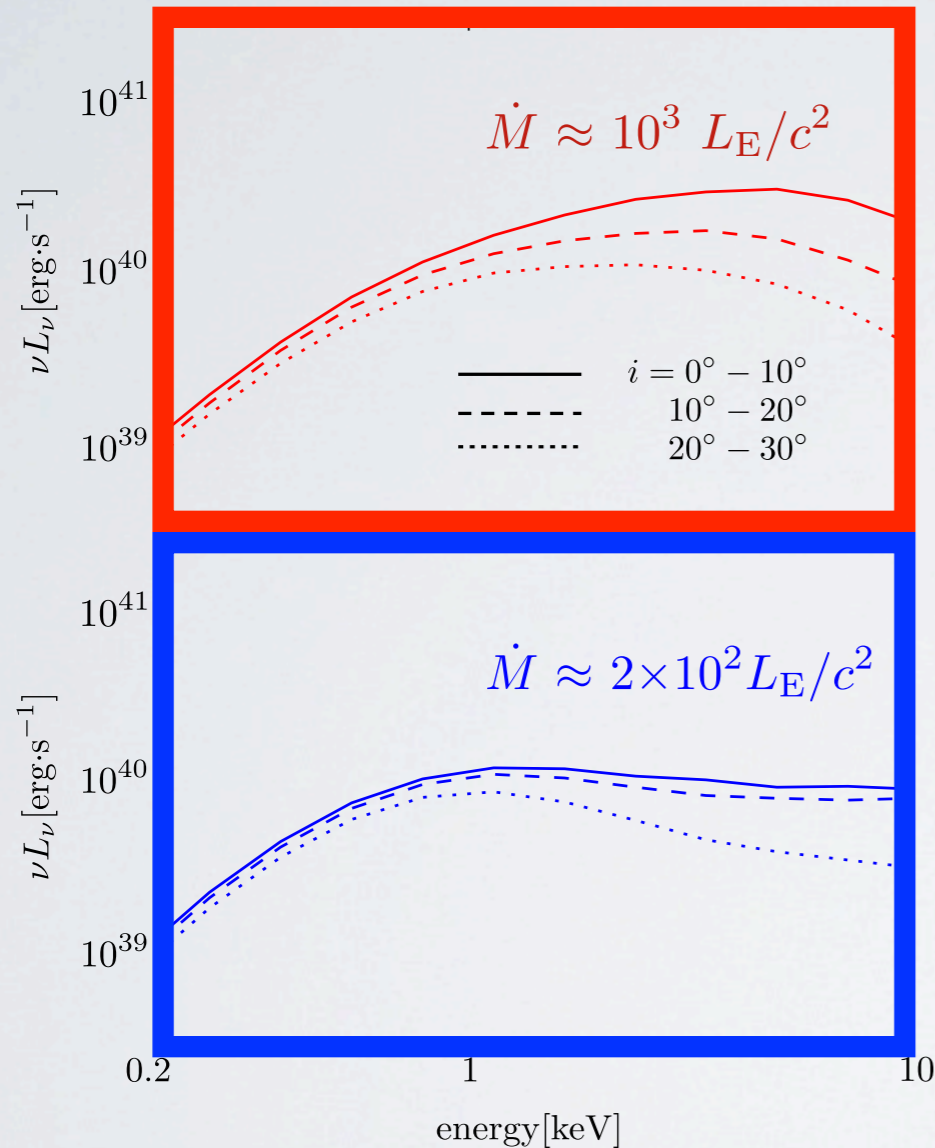


Spectra become harder by not only thermal comptonization but also bulk comptonization. Kawashima Ohsuga et al. 2012

COMPARISON WITH ULXs

Simulated SED

X-ray obs. (Gladstone et al. 2009)



Simulated SEDs are similar with observations.

相対論的輻射磁気流体方程式

質量保存則

$$\partial_t D + \nabla \cdot (D\mathbf{v}) = 0$$

誘導方程式

$$\partial_t \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0$$

ガスのエネルギー保存

$$\partial_t E_{\text{MHD}} + \nabla \cdot \mathbf{m}_{\text{MHD}} = G^0$$

ガスの運動量保存

$$\partial_t \mathbf{m}_{\text{MHD}} + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_{\text{MHD}} = \mathbf{G}$$

輻射のエネルギー保存

$$\partial_t E_r + \nabla \cdot \mathbf{F}_r = -G^0$$

輻射の運動量保存

$$\partial_t \mathbf{F}_r + c^2 \nabla \cdot \mathbf{P}_r = -\mathbf{G}$$

$$D = \rho\gamma$$

$$E_{\text{MHD}} = \rho h \gamma^2 c^2 - p_g + \frac{E^2 + B^2}{8\pi}$$

$$m_{\text{MHD}}^i = \rho h \gamma^2 c^2 u^i + \frac{c \epsilon_{ijk} E^j B^k}{4\pi}$$

$$P_{\text{MHD}}^{ij} = \rho h \gamma^2 u^i u^j - \frac{1}{4\pi} \left[E^i E^j + B^i B^j - \frac{\delta^{ij}}{2} (E^2 + B^2) \right]$$

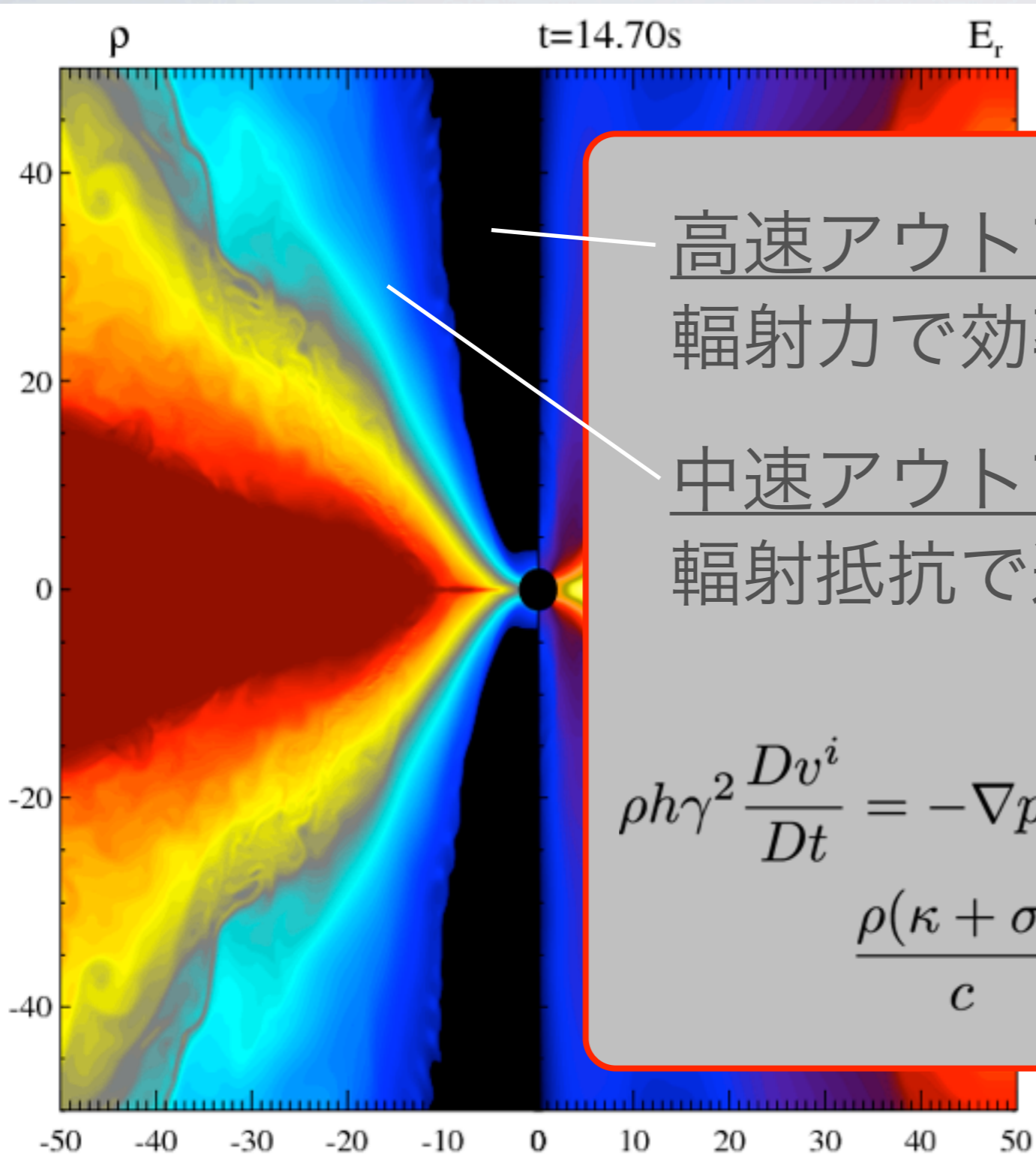
$$G^0 = -\rho\kappa \left(4\pi\gamma B - c\gamma E_r + \frac{u_j F_r^j}{c} \right)$$

$$+ \rho\sigma \left[\frac{\gamma u^2 E_r}{c} - \frac{\gamma u_j u_k P_r^{jk}}{c} - (2\gamma^2 - 1) \frac{u_j F_r^j}{c} \right]$$

$$G^i = -\rho\kappa c \left(4\pi \frac{u^i}{c} B - \gamma F_r^i + u_k P_r^{ik} \right)$$

$$+ \rho\sigma c \left[\gamma F_r^i - \gamma^2 u^i E_r - u_k P_r^{ik} + u^i \left(\frac{2\gamma u_j F_r^j - u_j u_k P_r^{kk}}{c^2} \right) \right]$$

特殊相対論シミュレーション：輻射加速と輻射抵抗



高速アウトフロー
 輻射力で効率的に加速

中速アウトフロー
 輻射抵抗で速度が抑制

$$\rho h \gamma^2 \frac{Dv^i}{Dt} = -\nabla p_g + \rho_e E^i + \frac{\epsilon_{klj}^i B^k}{c}$$

$$\frac{\rho(\kappa + \sigma)}{c} \left[\gamma F_r^i - (E_r u^i + u_j P_r^{ij}) + \frac{u^i u_k F_r^k}{\gamma c^2} \right]$$

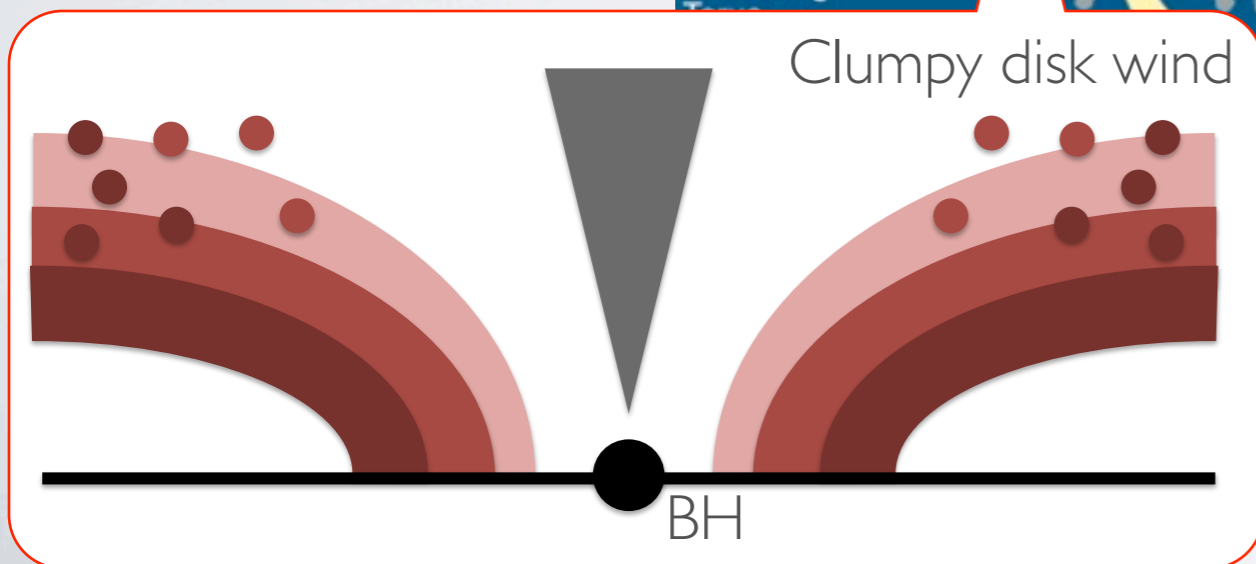
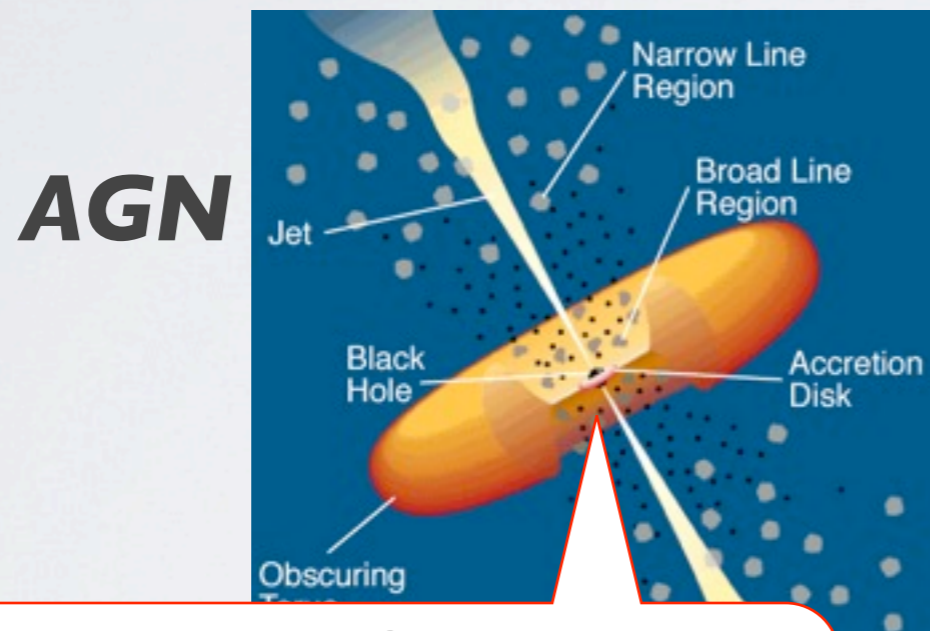
Takahashi & Ohsuga in prep.

円盤風の発生と分裂

CLUMPY DISK WIND

UFOs in AGNs

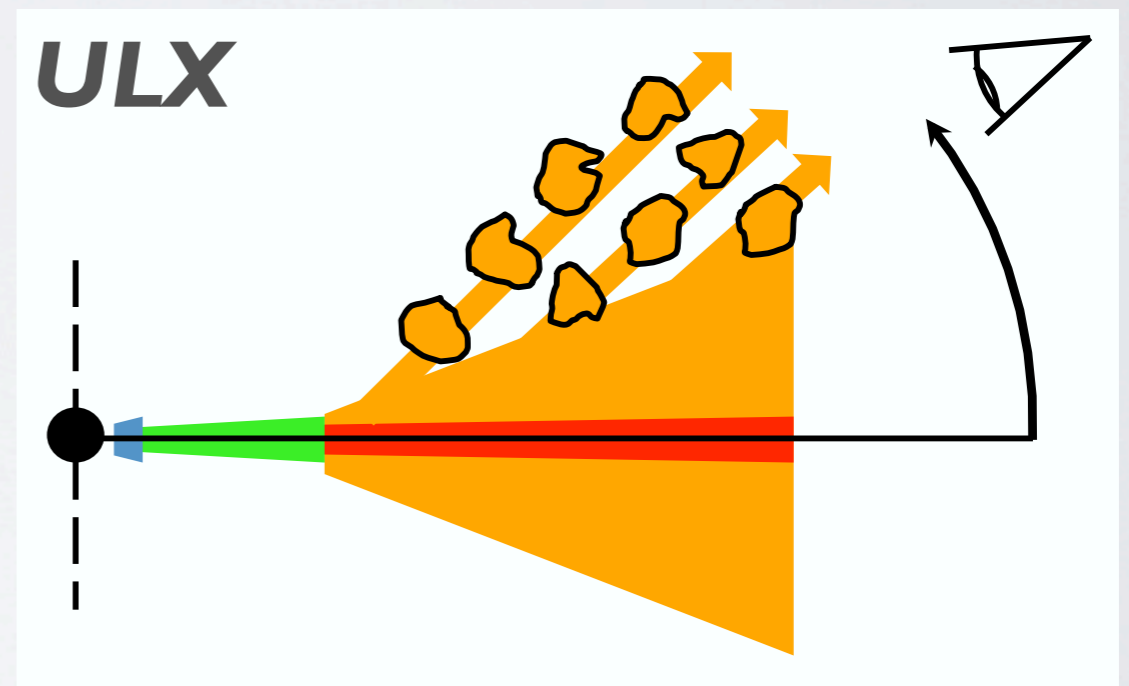
Time variation of blueshifted ($\sim 0.1c$) Fe absorption lines are observed in $\sim 40\%$ of AGNs, implying that powerful, clumpy, and high velocity outflows exist (Tombesi et al. 2010-12).



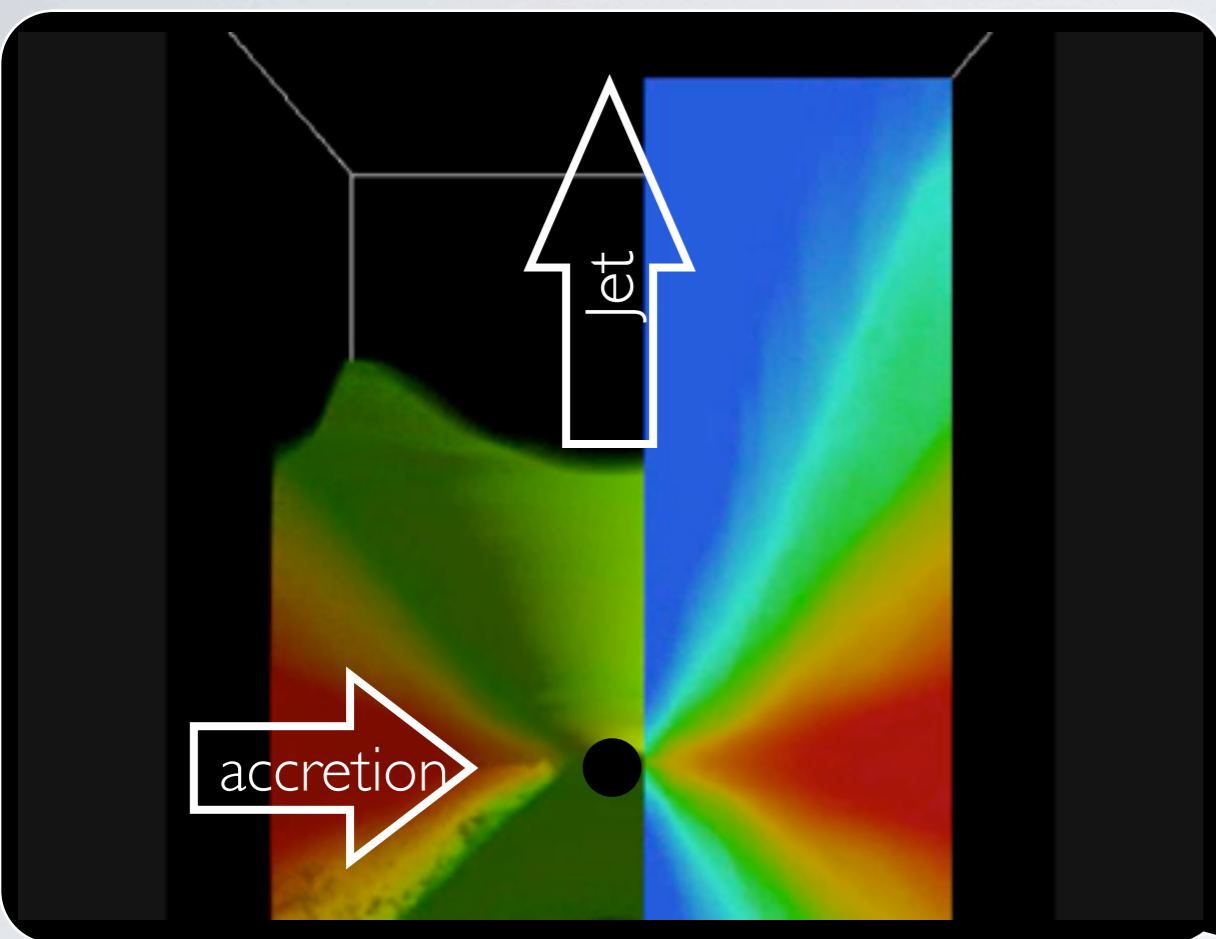
ULXs

Clumpy disk wind is suggested to explain the time variation of the ULXs.

Middleton et al. 2011

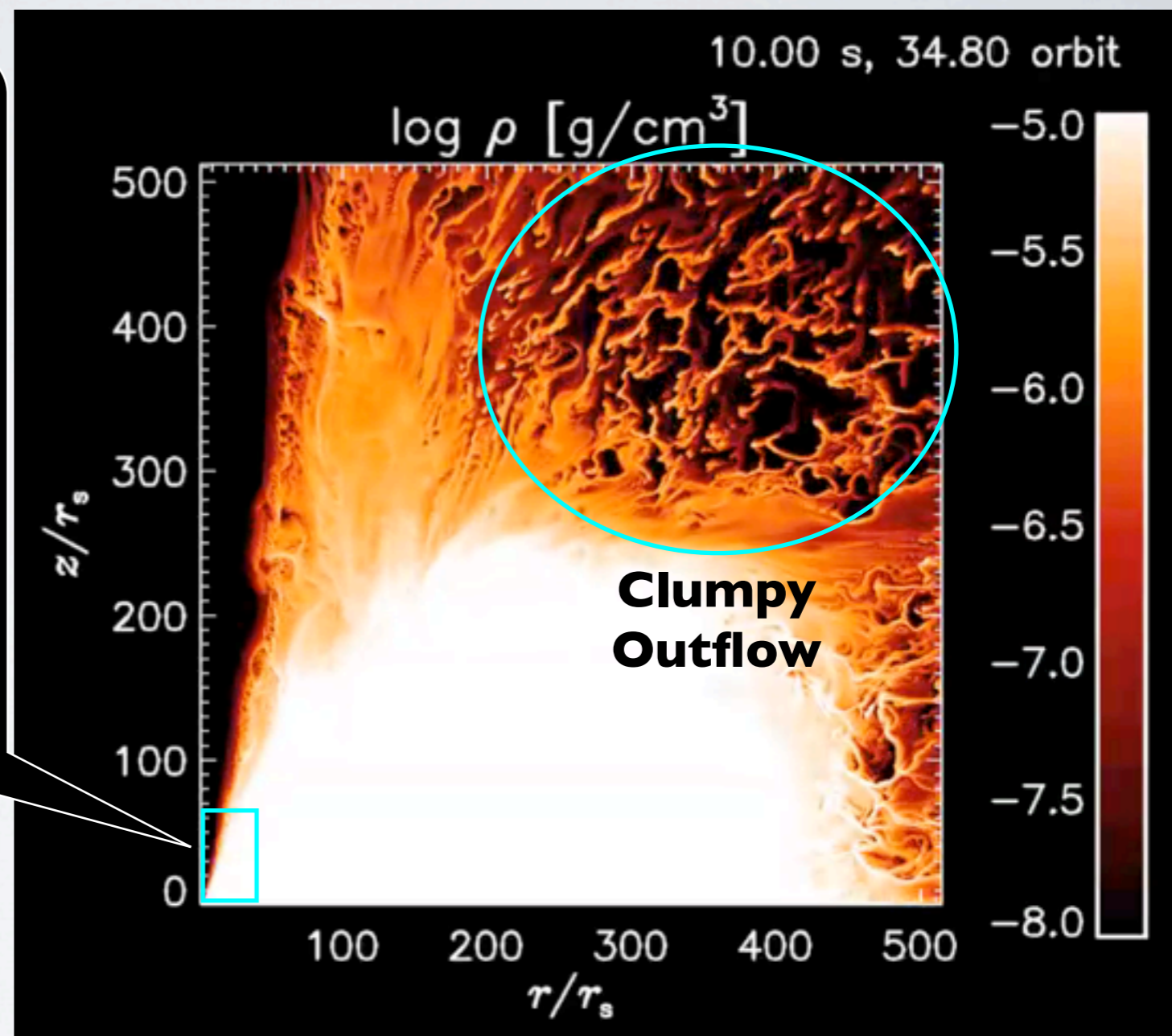


連続光による輻射加速型円盤風



**Super-Eddington disk
+ Radiation Pressure
driven, Magnetically
collimated Jet**

Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2013



**Time-dependent, Clumpy
outflow with wide angle (20°~50°)**

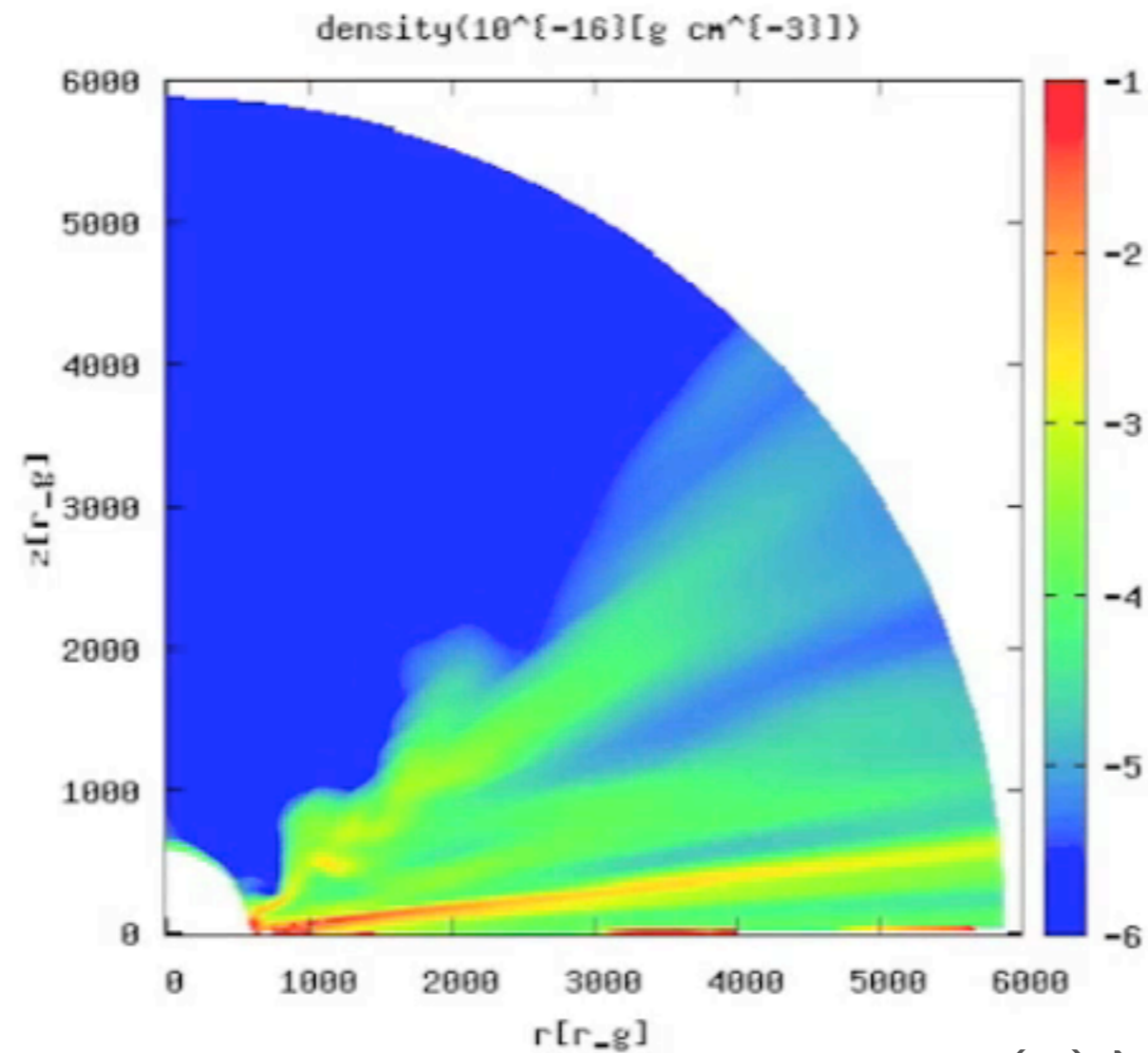
もう一つの輻射加速; LINE DRIVEN WIND

- 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.

Nomura, Ohsuga, et al. 2013



SIMULATIONS OF LINE DRIVEN WIND

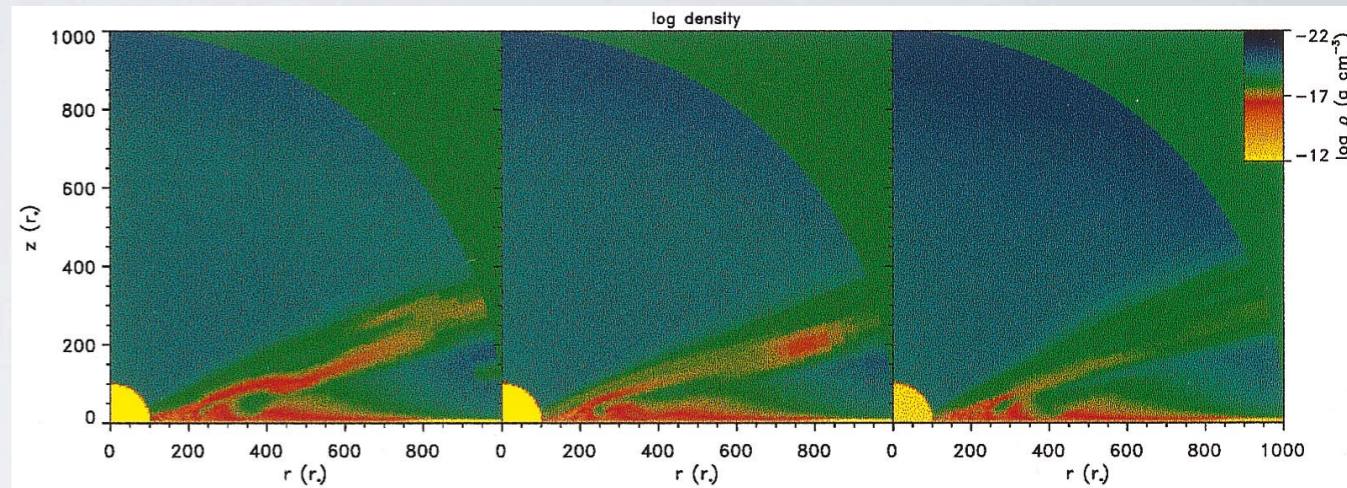
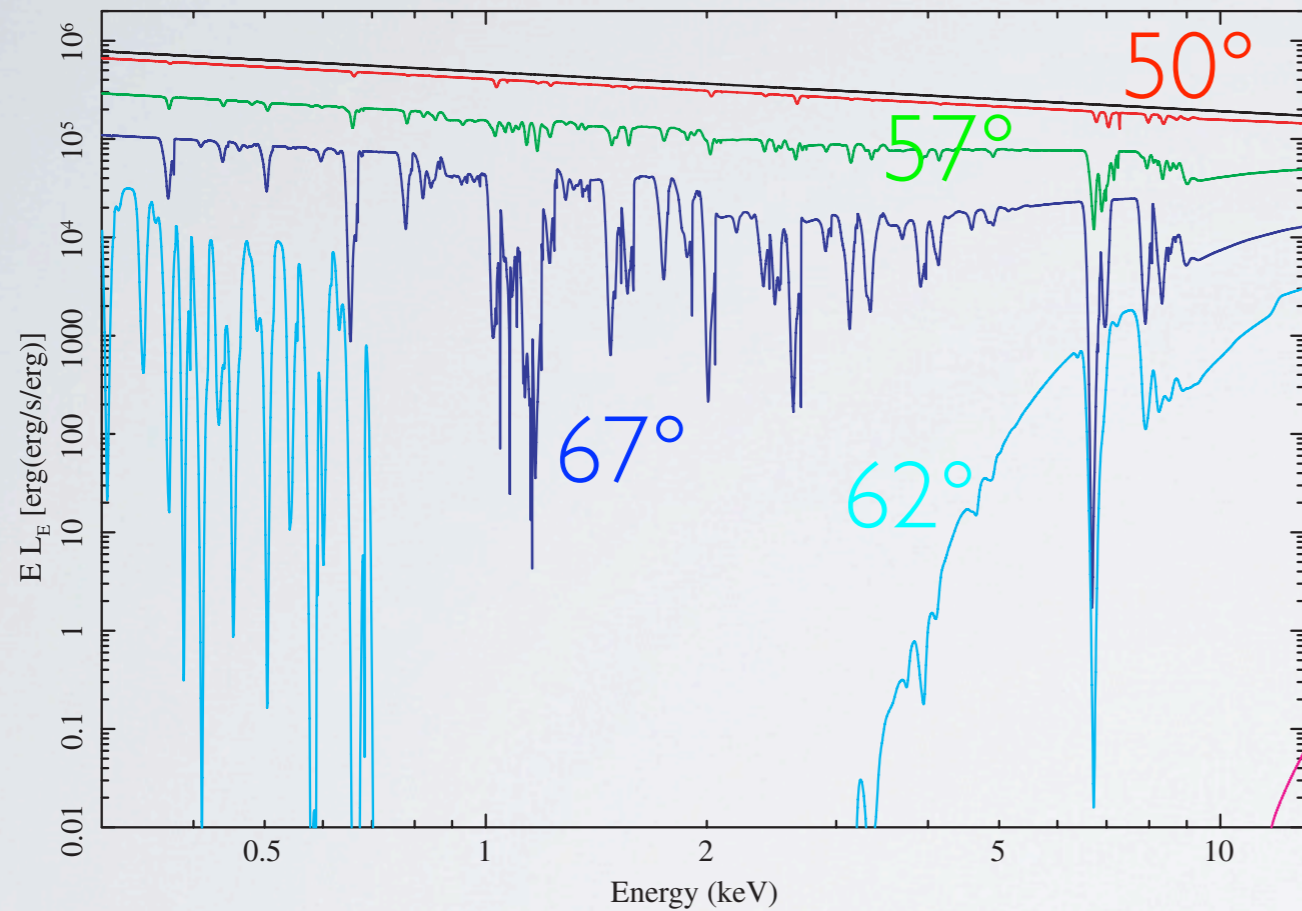


(c)Nomura

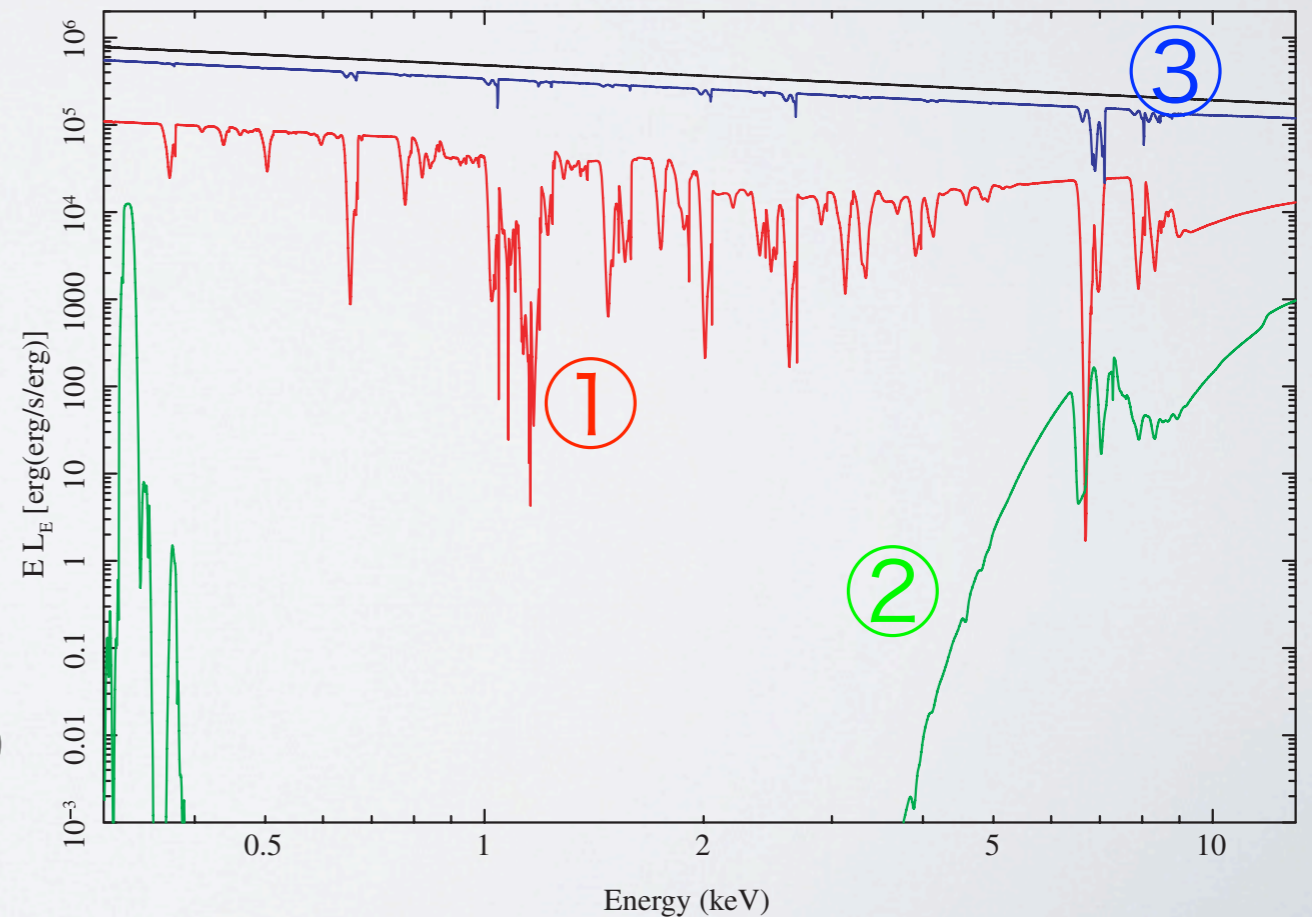
SPECTRA

Proga et al. 2000, 2004

Viewing angle-dependence



Time variation



Schurch et al. 2009

まとめと若手のみなさんへの期待

- ブラックホール周囲の高エネルギー現象を解き明かすためには多次元輻射磁気流体力学シミュレーションしか手段が無く、近年ようやく可能となってきた。
- 我々は三種の円盤, ジェット, 円盤風のシミュレーションに世界で初めて成功したが, これは統一的理解の第一歩に過ぎない. たくさんの謎が残されている。
- BHにまつわる理論研究は決して簡単ではありませんが, 始まったばかりの分野であり若手の皆さんが活躍できるチャンスがたくさんあります. 是非参入を！