

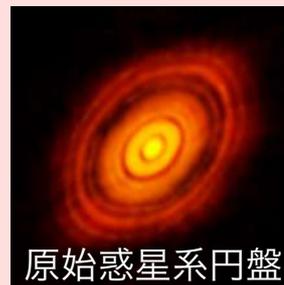
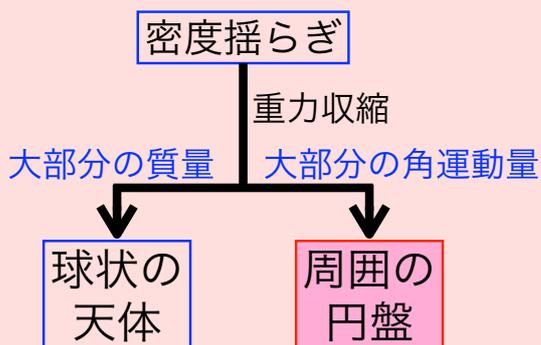
ブラックホール降着流の研究 ~これまでの成果と今後の課題~

大須賀 健 (筑波大)

高橋博之 (駒澤大), 川島朋尚 (東大), 野村真理子 (呉高専),
北木孝明, 恒任優, 水本岬希, 嶺重慎 (京大),
朝比奈雄太, 小川巧未, 荻原大樹, 井上壮大, 内海碧人, 高橋幹弥, 尾
形絵梨花, 武者野拓也 (筑波大), 都丸亮太 (Durham Univ.)

降着円盤はなぜ重要？

①宇宙の至る所で自然に形成 → 応用範囲が広い

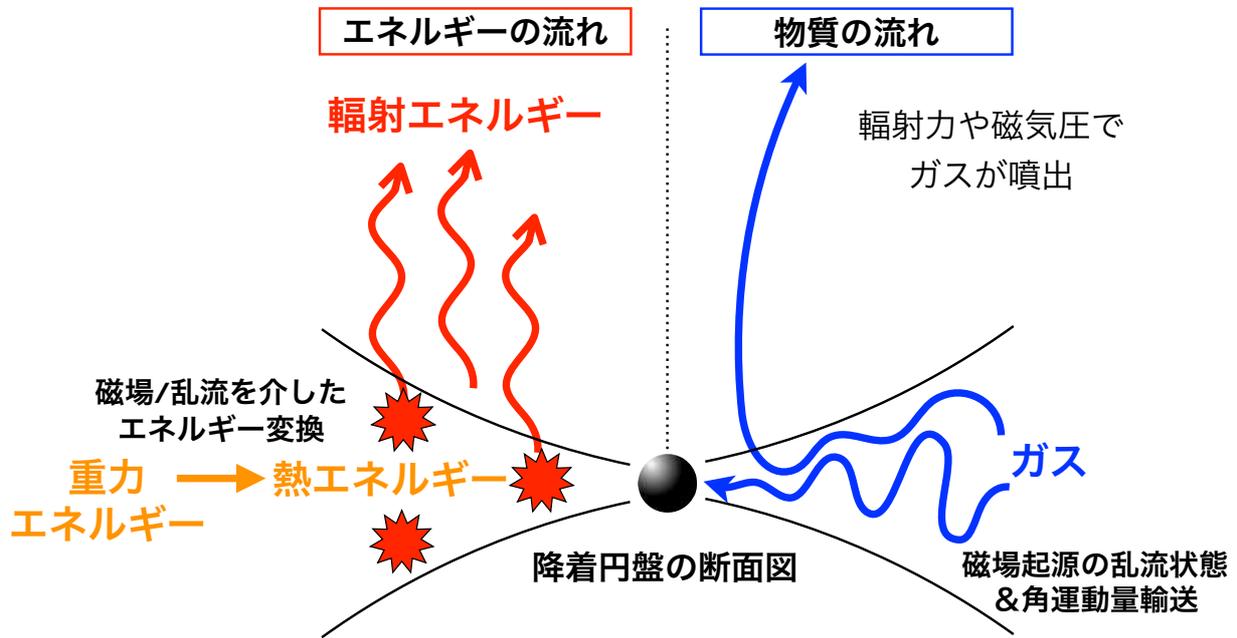


②宇宙の2大エネルギー源のひとつ → 宇宙進化へ影響大

| | 放射 | エネルギー源 | 変換効率 ← E/Mc^2 |
|-------------|------|---------|-----------------|
| 恒星 | 可視光 | 核反応 | 0.7% |
| ブラックホール降着円盤 | 主にX線 | 重力エネルギー | ~10% |

だからブラックホール天体が明るく光る ↗

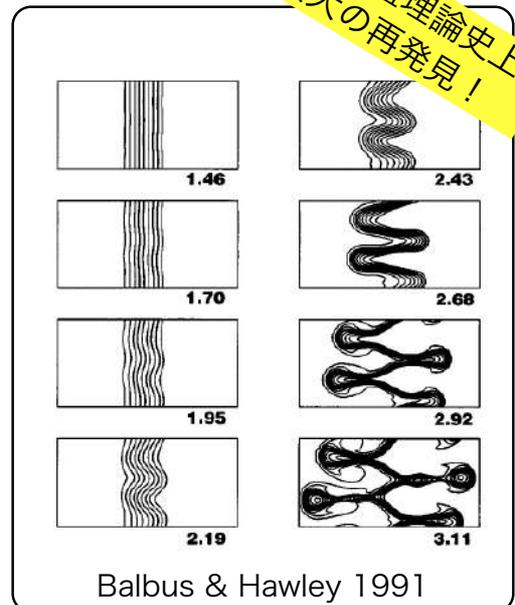
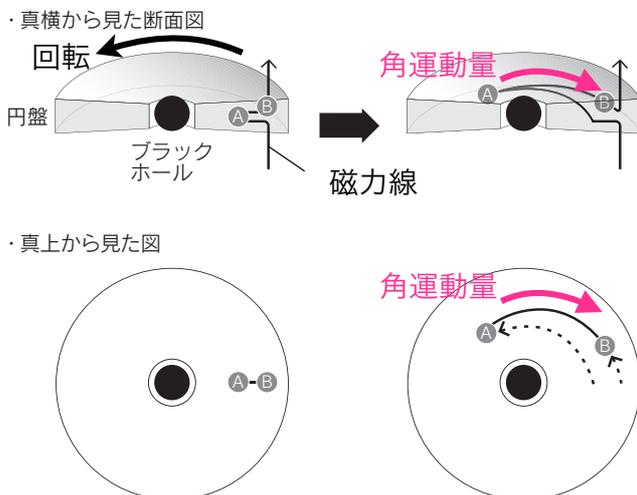
輻射と磁場の重要性



輻射と磁場の重要性

磁場の役割

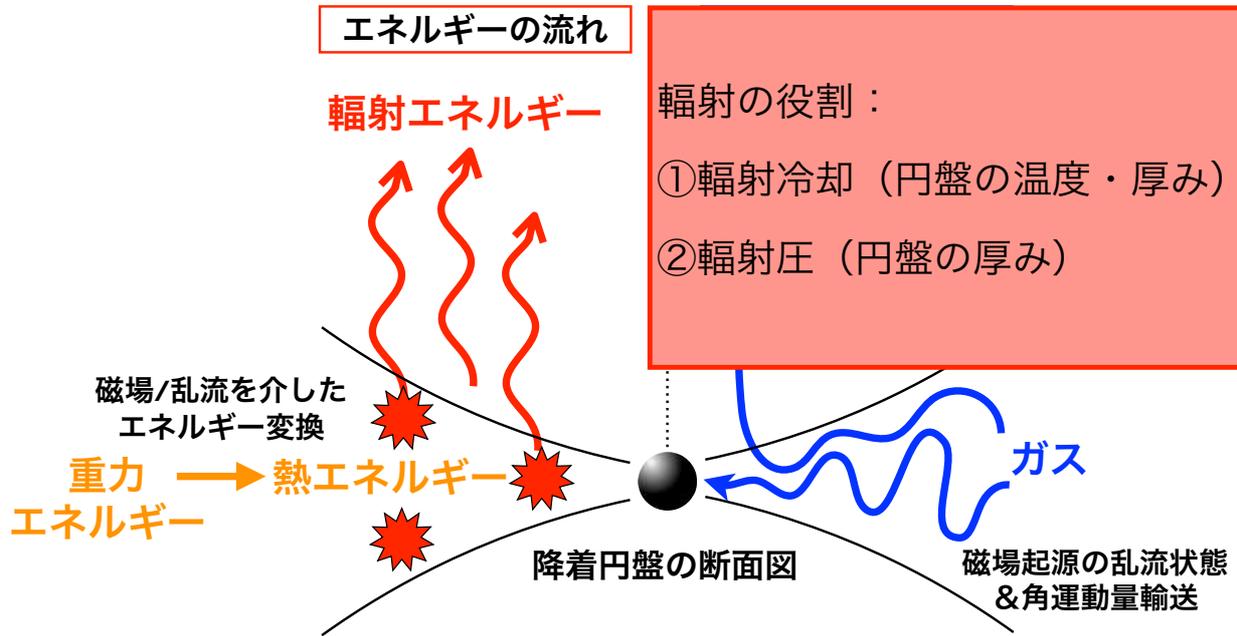
- ①磁気回転不安定 - 角運動量輸送
- ②エネルギー散逸 - 円盤加熱



Balbus & Hawley 1991

See also Velikhov 1959

輻射と磁場の重要性

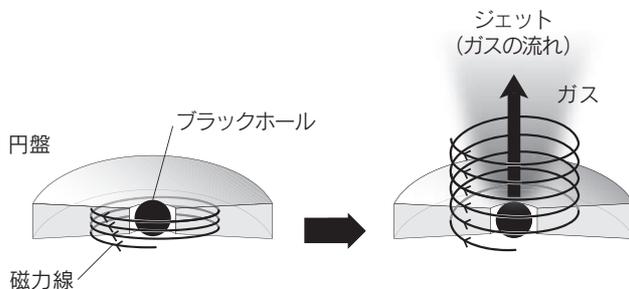


輻射と磁場の重要性

磁気加速

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**

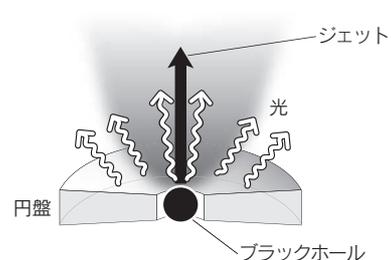
(磁気遠心力もある)



輻射加速

輻射力で**ジェット**や**円盤風**が噴出

(電子散乱やライン吸収による輻射力)

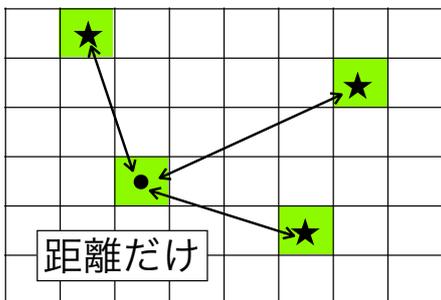


多次元**輻射****磁気**流体力学

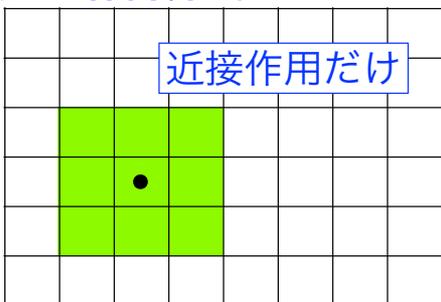
(**輻射**輸送+**磁場**+流体+重力) が必須!

磁気流体 vs 輻射輸送

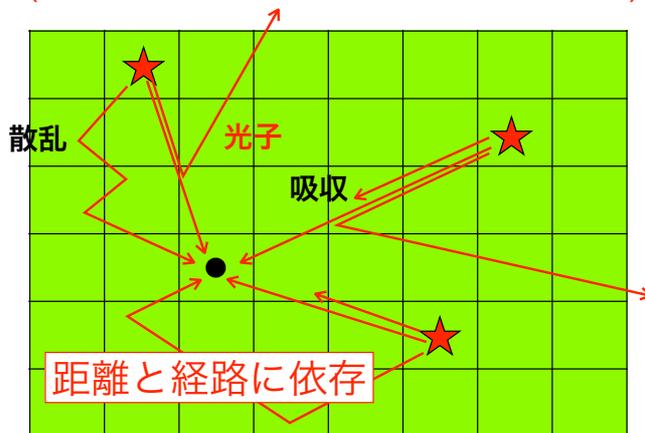
自己重力計算 (空間 3 次元)



磁気流体計算 (空間 3 次元)



輻射の計算
(空間 3 次元 + 方向 2 次元 + 振動数)



輻射の計算が最も重い

*実際は近似手法を使うが、輻射の計算が難しいことに変わりはない。

人類が観測できるのは、
宇宙から飛来する粒子と重力波を除くと電磁波
(光) のみ



輻射輸送計算/輻射流体計算は
避けて通れない (T_T)

*だからこそ理論屋の出番でもある

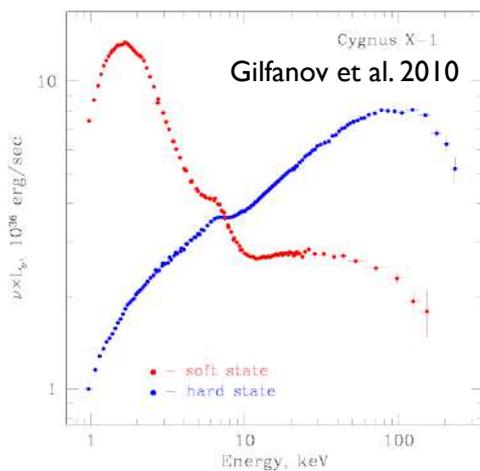
数値計算法については

宇宙物理学の基礎シリーズ

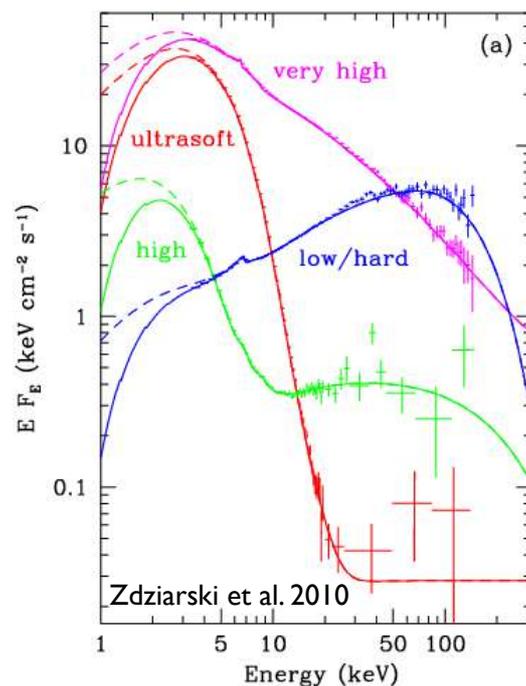


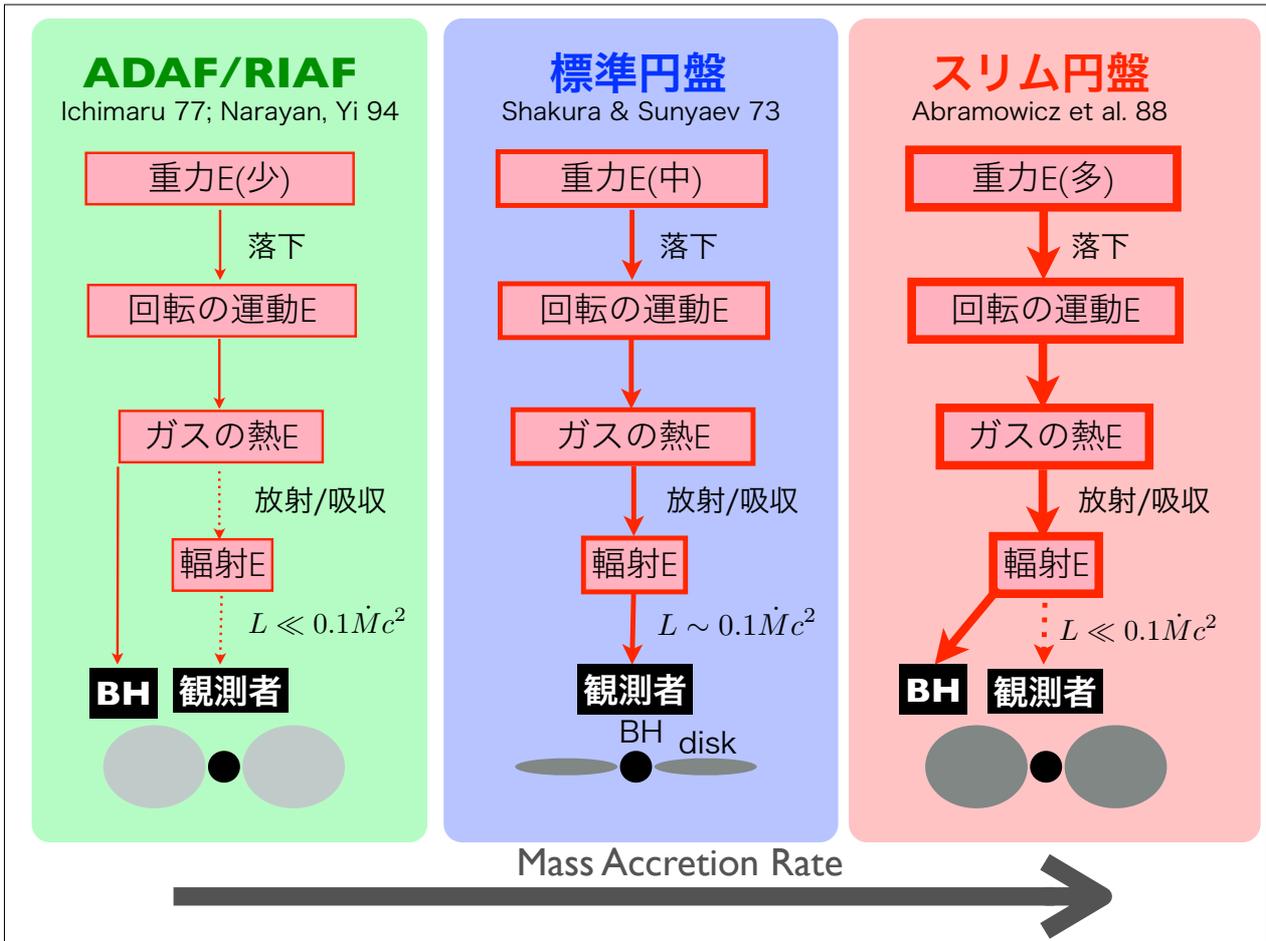
第5巻 (松本, 須佐, 大須賀 著)
を読んで下さい

円盤の多様性



BH天体は様々な
輻射スペクトルを示す
→ 降着円盤の多様性が起源?





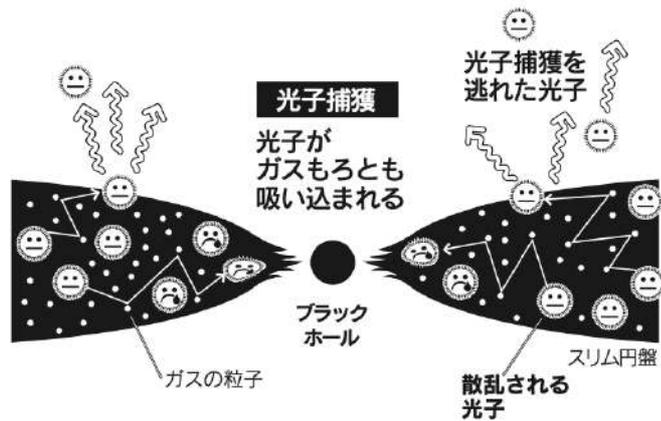
光子捕獲

拡散時間 降着時間

$$\frac{H}{c/\tau} > \frac{r}{v_r}$$

$$\begin{aligned} \dot{M} &= 2\pi r \Sigma v \\ \tau &= \sigma_T \Sigma / m_p \\ r_S &= \frac{2GM}{c^2} \end{aligned}$$

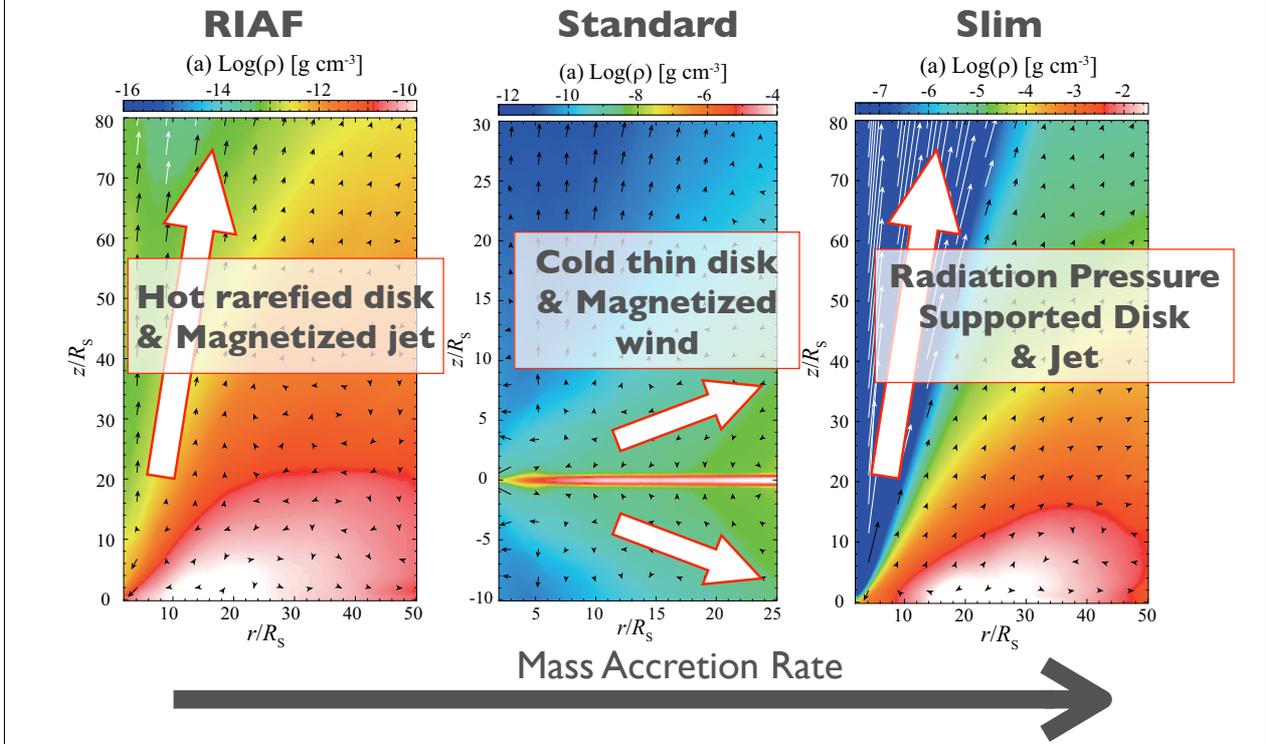
$$\frac{r}{r_S} < \frac{\dot{M}}{L_{\text{Edd}}/c^2} \left(\frac{H}{r} \right)$$



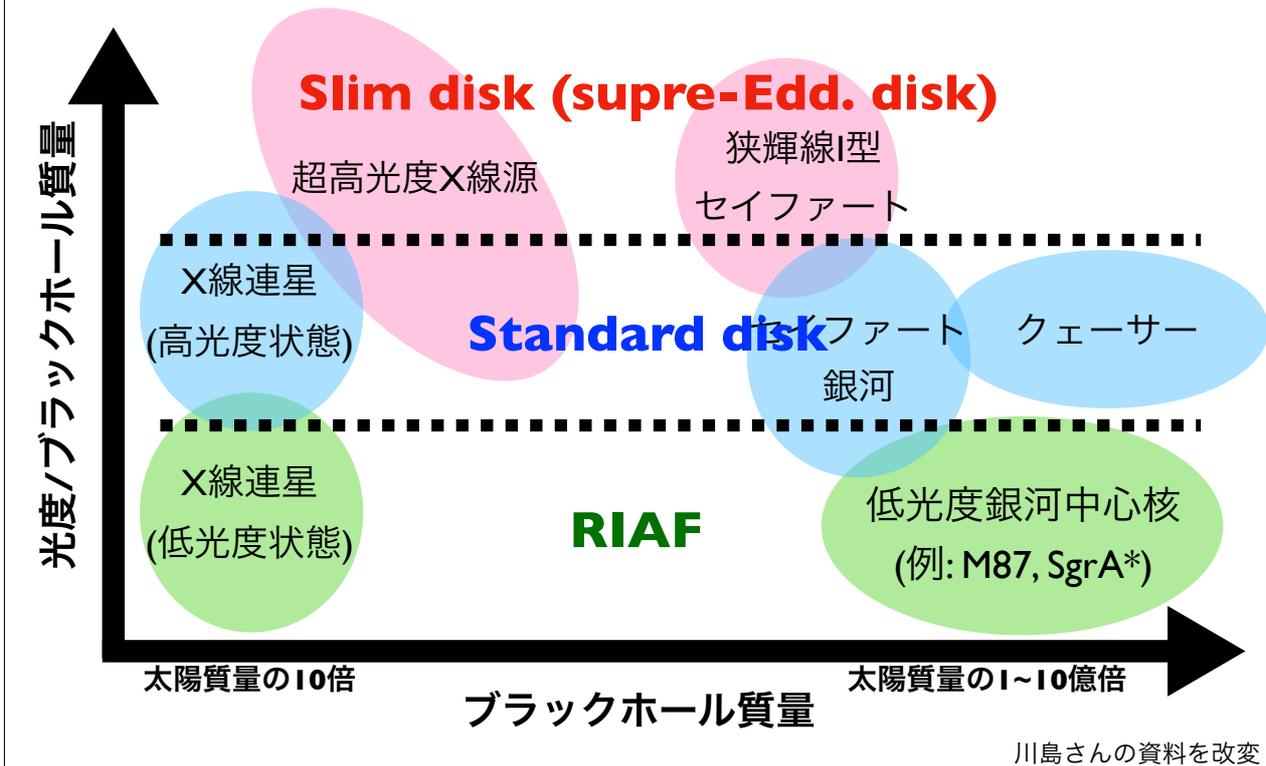
$\dot{M} > L_{\text{Edd}}/c^2$ で発生

Three accretion modes

Ohsuga et al. 2009, Ohsuga, Mineshige 2011

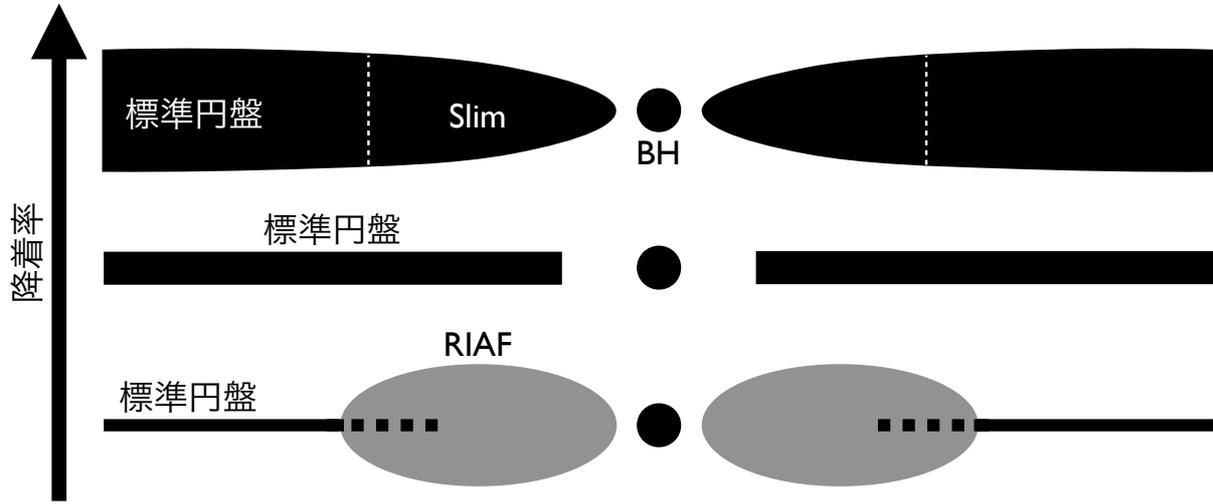


ブラックホール天体の多様性



円盤の共存

三種類の円盤は共存する！？



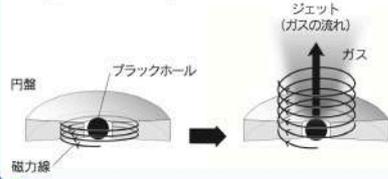
詳細はわかっていない

ガス噴出機構の多様性

輻射と磁場の重要性

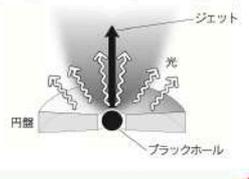
磁気加速

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
 (磁気遠心力もある)



輻射加速

輻射力でジェットや円盤風が噴出
 (電子散乱やライン吸収による輻射力)

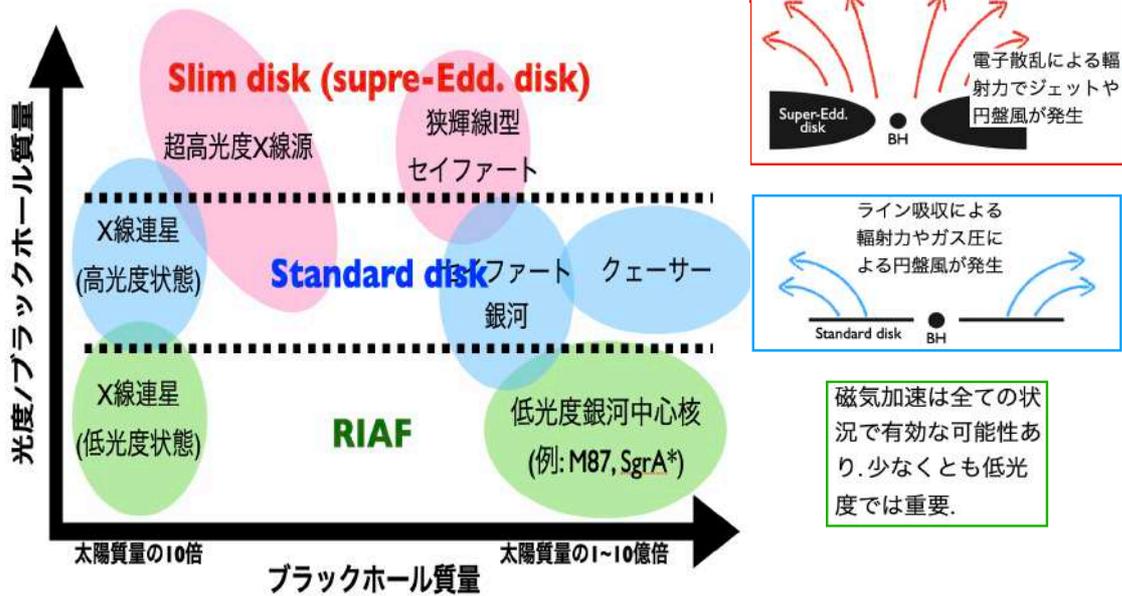


多次元輻射磁気流体力学

(輻射輸送+磁場+流体+重力) が必須！

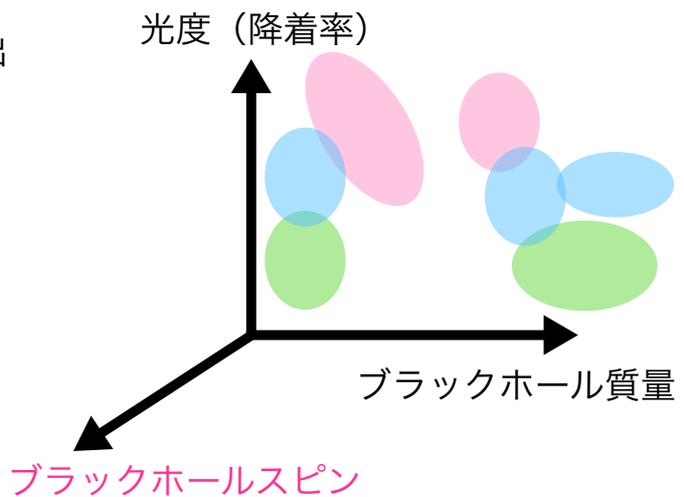
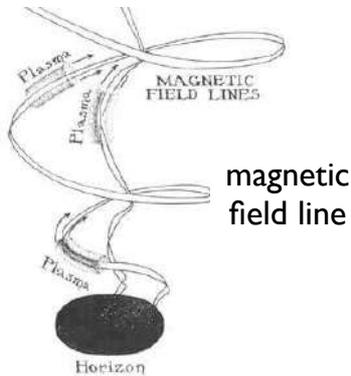
輻射や磁場がガス噴出を引き起こす。ただし、どの加速が効くかは円盤のモデルと関連している

ガス噴出機構の多様性



ブラックホールスピン

BZ効果: 磁場を介してブラックホールの回転エネルギーを抽出 (Blandford & Znajek 1977)

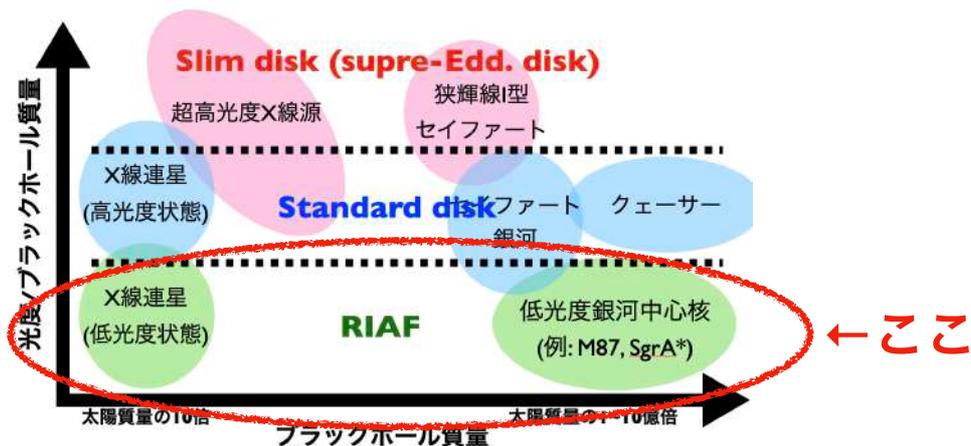


ブラックホール天体を3次元空間で考える時代の到来

ここまでのまとめ

- 降着円盤は宇宙の至るところに存在
- 理論的には3種のブラックホール降着円盤があり，分岐の原因は降着率
- 異なる円盤からは異なるアウトフローが発生するはず
- 解析モデルを基本としつつ，シミュレーション研究の時代に突入

RIAF（輻射非効率円盤）

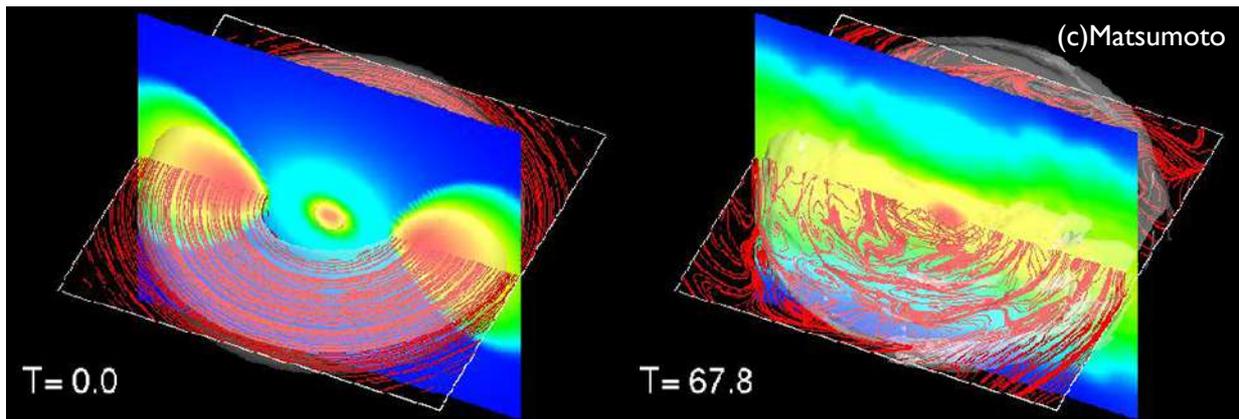


*輻射場を解く必要が無いので計算が少し楽

EHTで観測可能な2天体がどちらもRIAFなのは神様からのプレゼントか？

世界初の大局的3DMHD計算

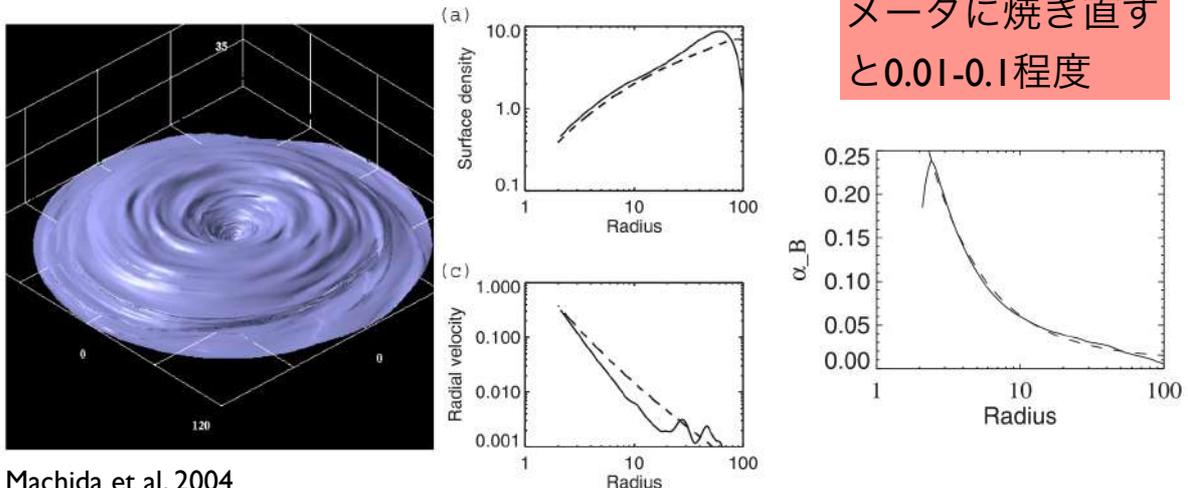
- 松元さんおよび松元さんのグループが世界初の3次元磁気流体シミュレーションに成功 (1999)
- α 粘性の時代から磁気流体計算の時代へ



3DMHDによる円盤構造

円盤の構造はおおまかに解析解と合致

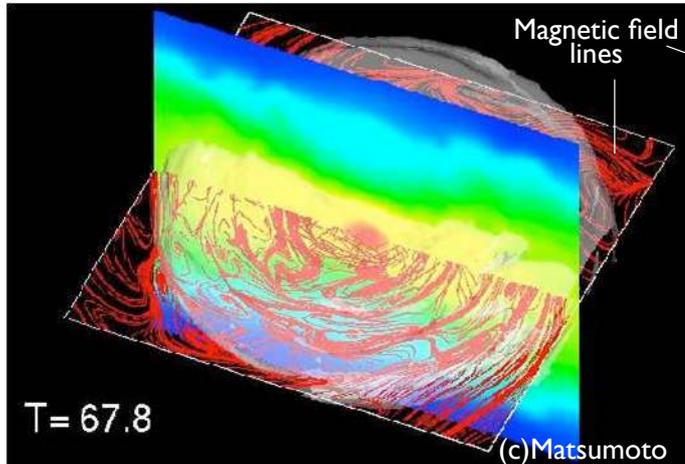
磁気トルクを α パラメータに焼き直すと0.01-0.1程度



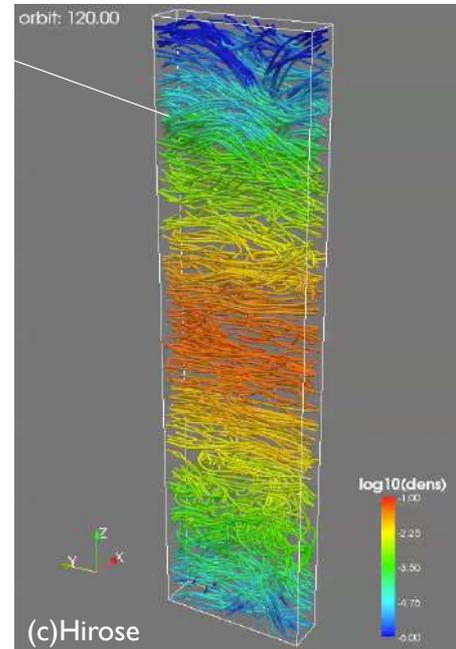
Machida et al. 2004

see also Hawley & Krolik 2001, Hawley et al. 2001, Kato et al. 2004,

局所シミュレーション

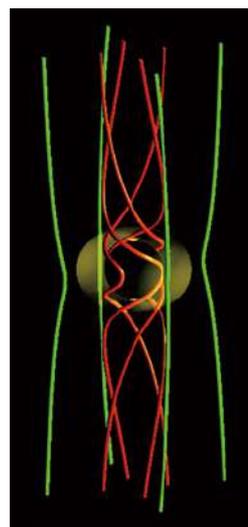
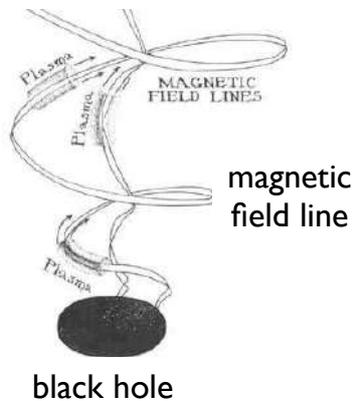


局所シミュレーションも活発に行われる。右図は廣瀬らによる輻射磁気流体計算



一般相対論的(GR-)MHDへの発展

BZ効果: 磁場を介してブラックホールの回転エネルギーを抽出 (Blandford & Znajek 1977)



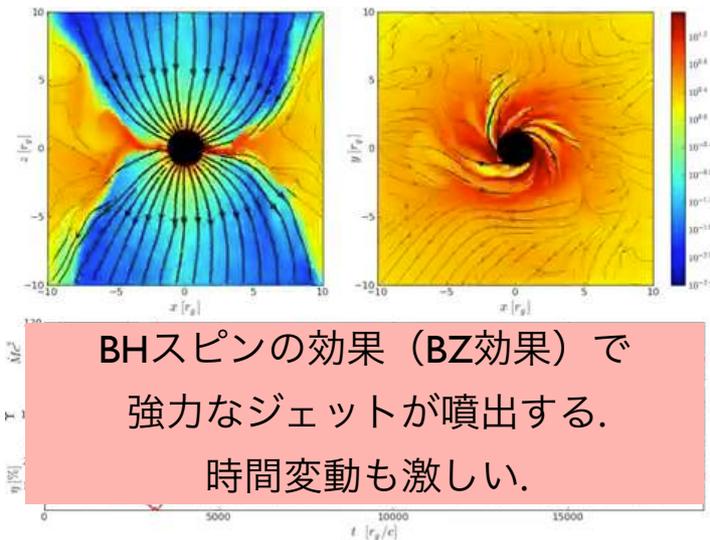
koide et al. 2002, Science

スピンによるジェット生成を再現した一般相対論的MHD計算

BHスピンの効果

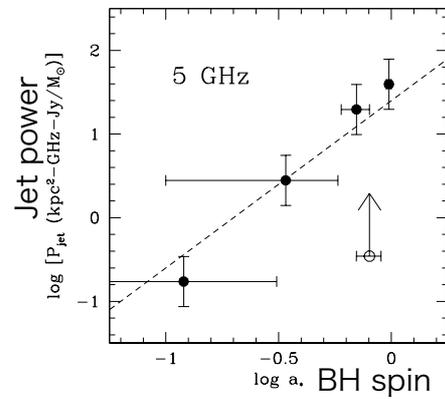
低光度円盤+磁気ジェットの
GR-MHD計算

McKinney, Tchekhovskoy, Blandford (2012)



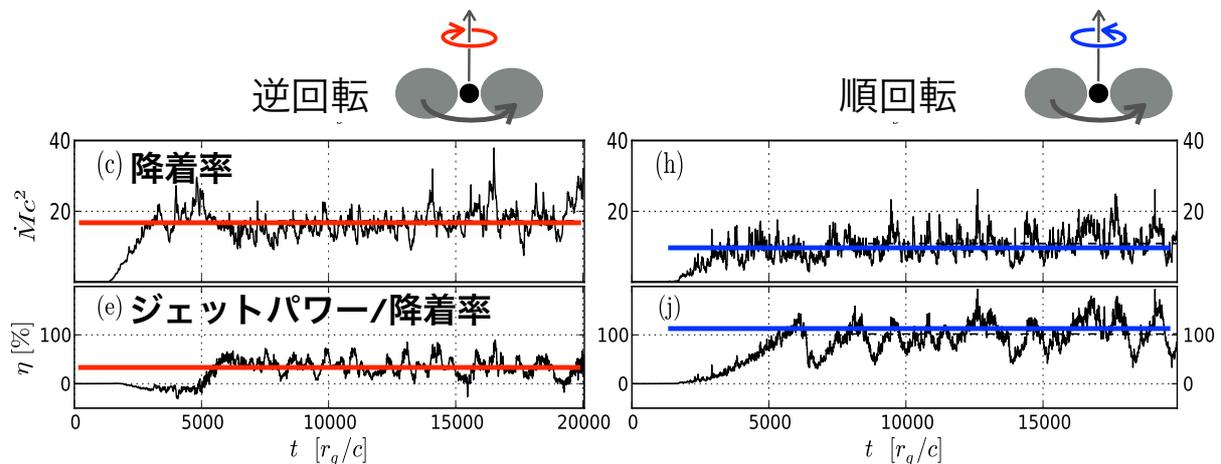
BHスピンの効果 (BZ効果) で
強力なジェットが噴出する。
時間変動も激しい。

Narayan & McClintock 2012



BHスピンとジェット
パワーが相関するとい
う観測結果! ?

BHスピンの効果

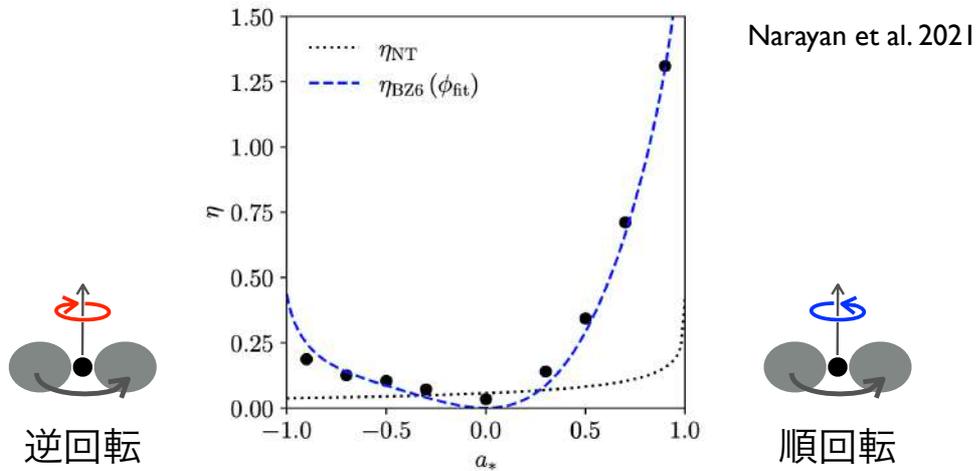


順回転の場合, 降着率は下がるがジェットへのエネルギー変換効率が上がる. BHスピンはジェットのパワーと密接に関係がある.

*ISCOがBHに近いので, 効率的にエネルギーが解放できるのかも...

Tchekhovskoy & McKinney 2012

BHスピンの効果その2

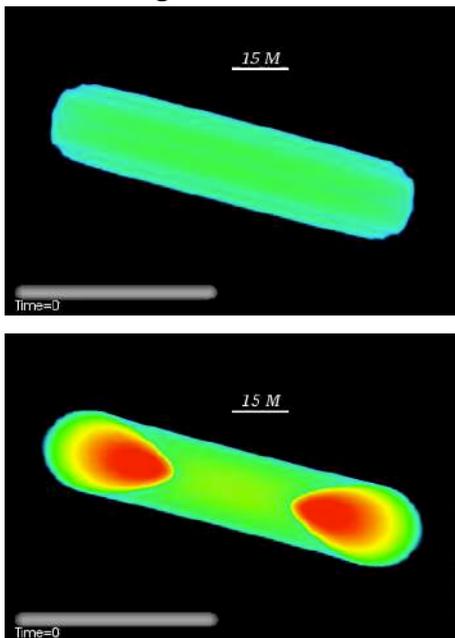


最新の研究成果も、順回転の方がジェットへのエネルギー変換効率が高いことを示す。ただし、逆回転であっても無回転BHよりはジェットが強い。 ← BZ効果

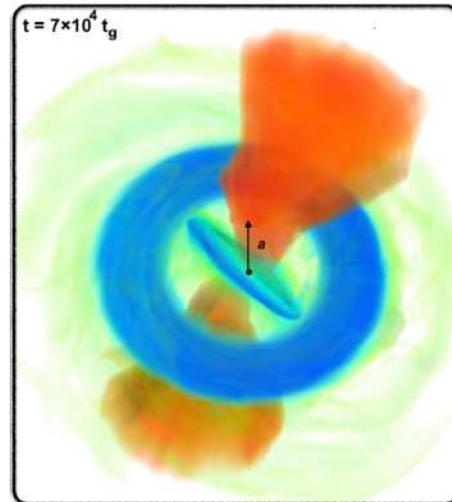
高光度降着円盤の場合は筑波大で計算中 (Utsumi et al. in prep.)

BHスピンの効果その3

Fragile et al. 2007



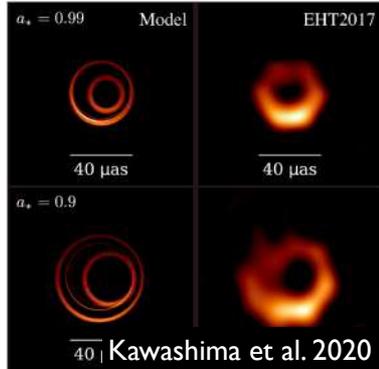
Lense-Thirring precession.
Liska et al. 2019



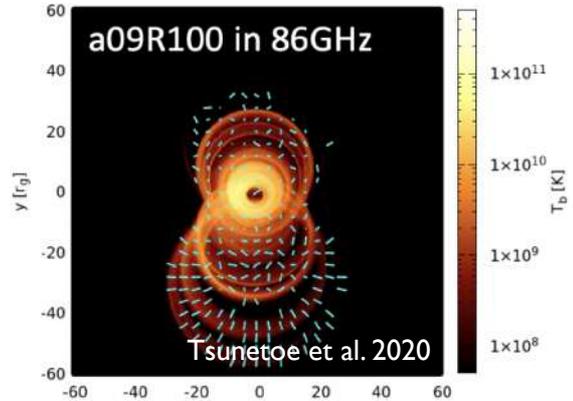
ジェットは歳差しない! ?

観測との協働に向けて

一般相対論的輻射輸送コード
RAIKOUによる計算例



一般相対論的偏光輻射輸送コード
RAIKOU+P (仮) による偏光分布



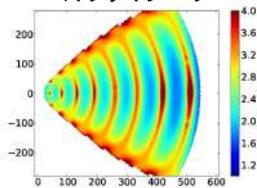
輻射輸送計算によって理論シミュレーションと観測の直接比較
→ BHスピンやジェット加速機構の解明へ

*詳細は本日午後の講演で

未解決問題

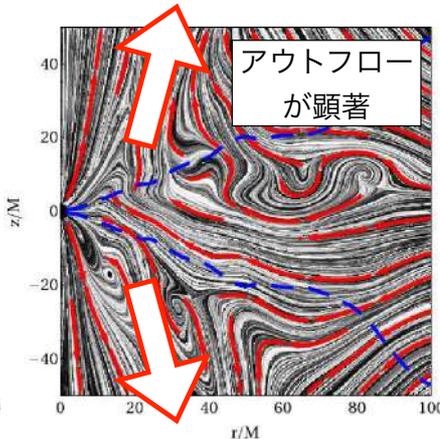
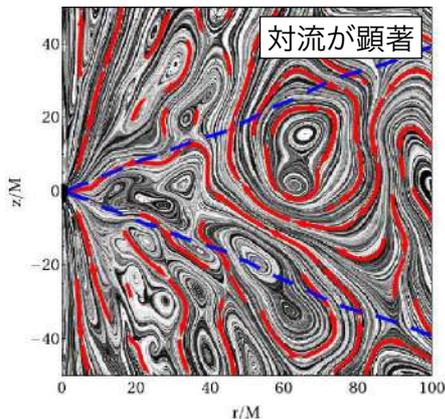
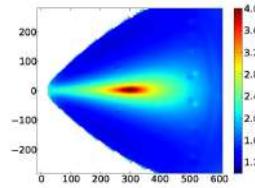
初期磁場

マルチループ



初期磁場

シングルループ



初期磁場はどこまで影響があるのか？

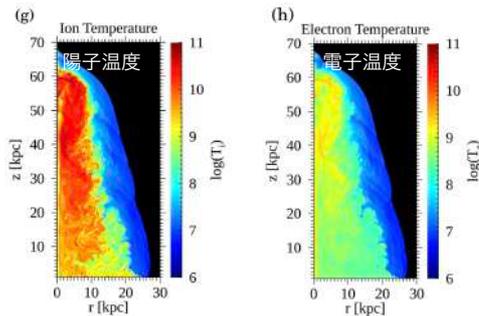
Narayan et al. 2012

未解決問題

電子温度の問題：

エネルギーを保持しているのは多分陽子だが、光を出すのは主に電子。にもかかわらず、MHD計算では電子の温度が不明

→ 2温度計算が必要 Ohmura et al. 2020

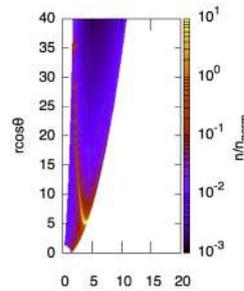


*筑波大では小川拓末氏が2温度の輻射MHD計算コードを開発中

フロア値問題：

ほとんどの降着円盤シミュレーションでは、回転軸付近で密度フロアが採用されるため、シミュレーション結果が信用できない。

→ 解析モデルを適用 Ogihara et al. 2020

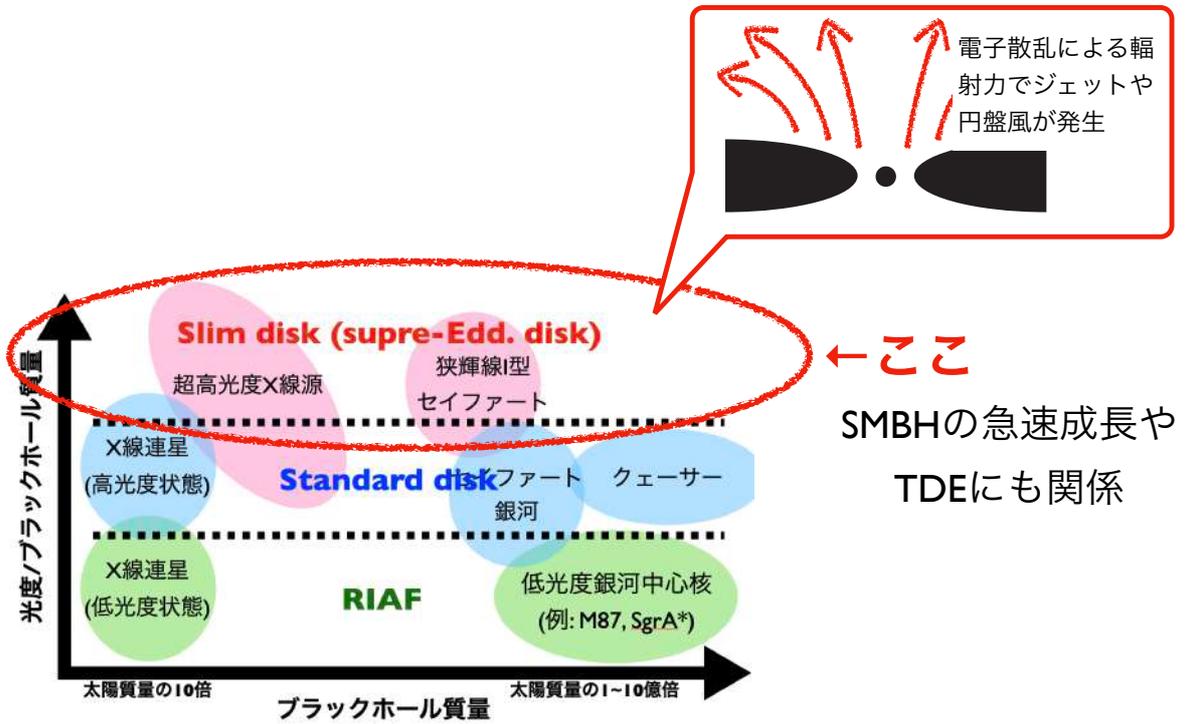


*MHD近似が成り立たない領域が生じるため、粒子的な研究も活発に行われている。(富田さん, 天野さんの講演)

ここまでのまとめ

- MHD計算によりRIAFの研究は大幅に発展した。
- BHスピンの効果（特にBZ効果）を解明するため、GR-MHD計算が盛んに行われている。
- EHTとGR-MHDの力でM87の解明し、他のBH天体のメカニズム解明につなげたい。

超臨界降着円盤 (Slim円盤)



輻射流体シミュレーション

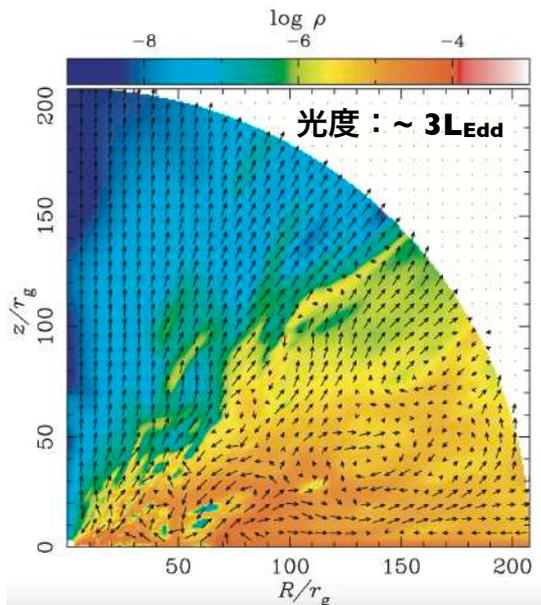
Eddington光度：

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{\sigma_T}{cm_p} \frac{L}{4\pi r^2} \rightarrow L = \frac{4\pi cGMm_p}{\sigma_T}$$

天体の最大光度のはずだった・・・

準定常なSuper-Eddington円盤
が実現可能であることを世界
で初めて実証
(Ohsuga et al. 2005)

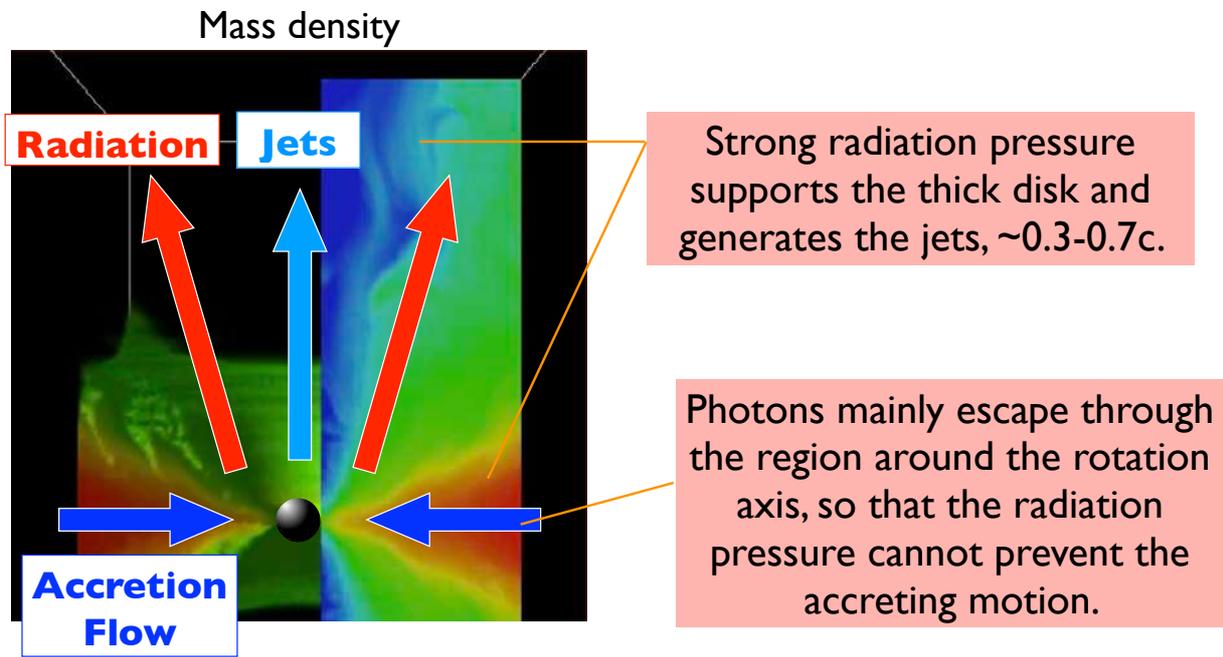
*ただし、磁場を解かずに α 粘性を採用



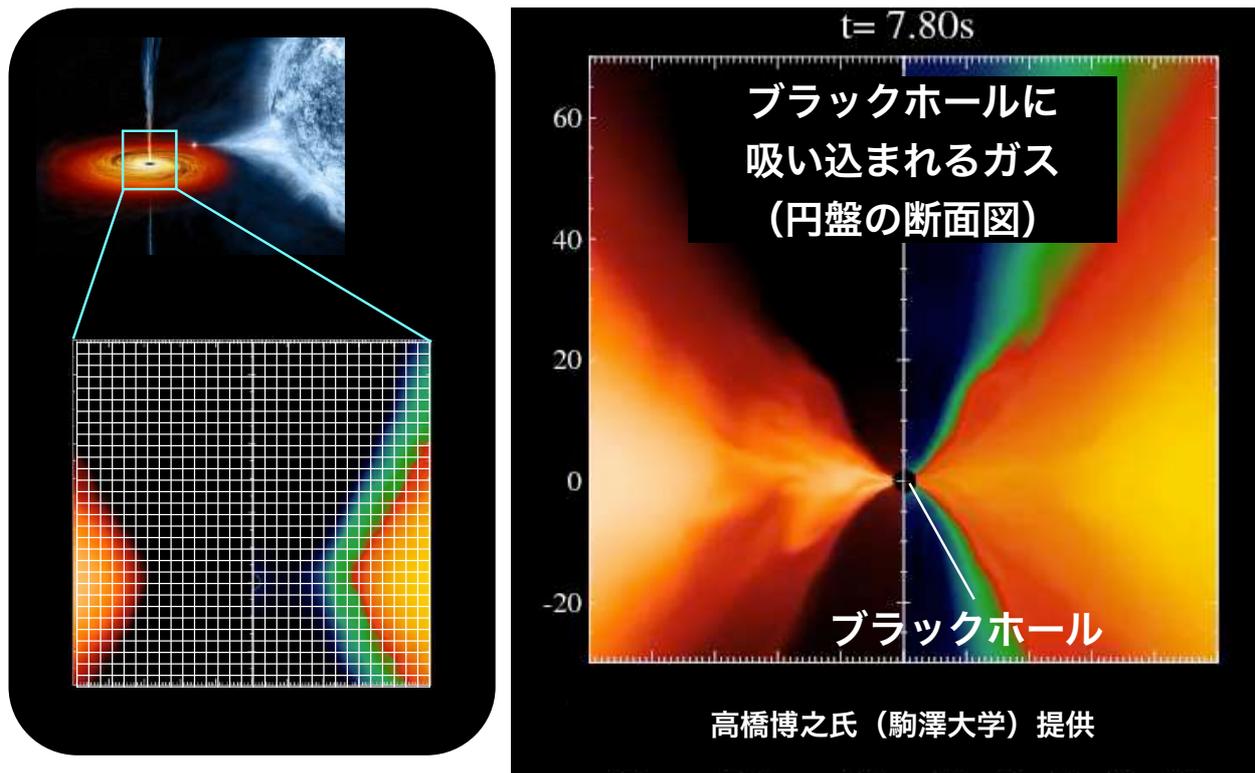
降着率：～ $150L_{\text{Edd}}/c^2$

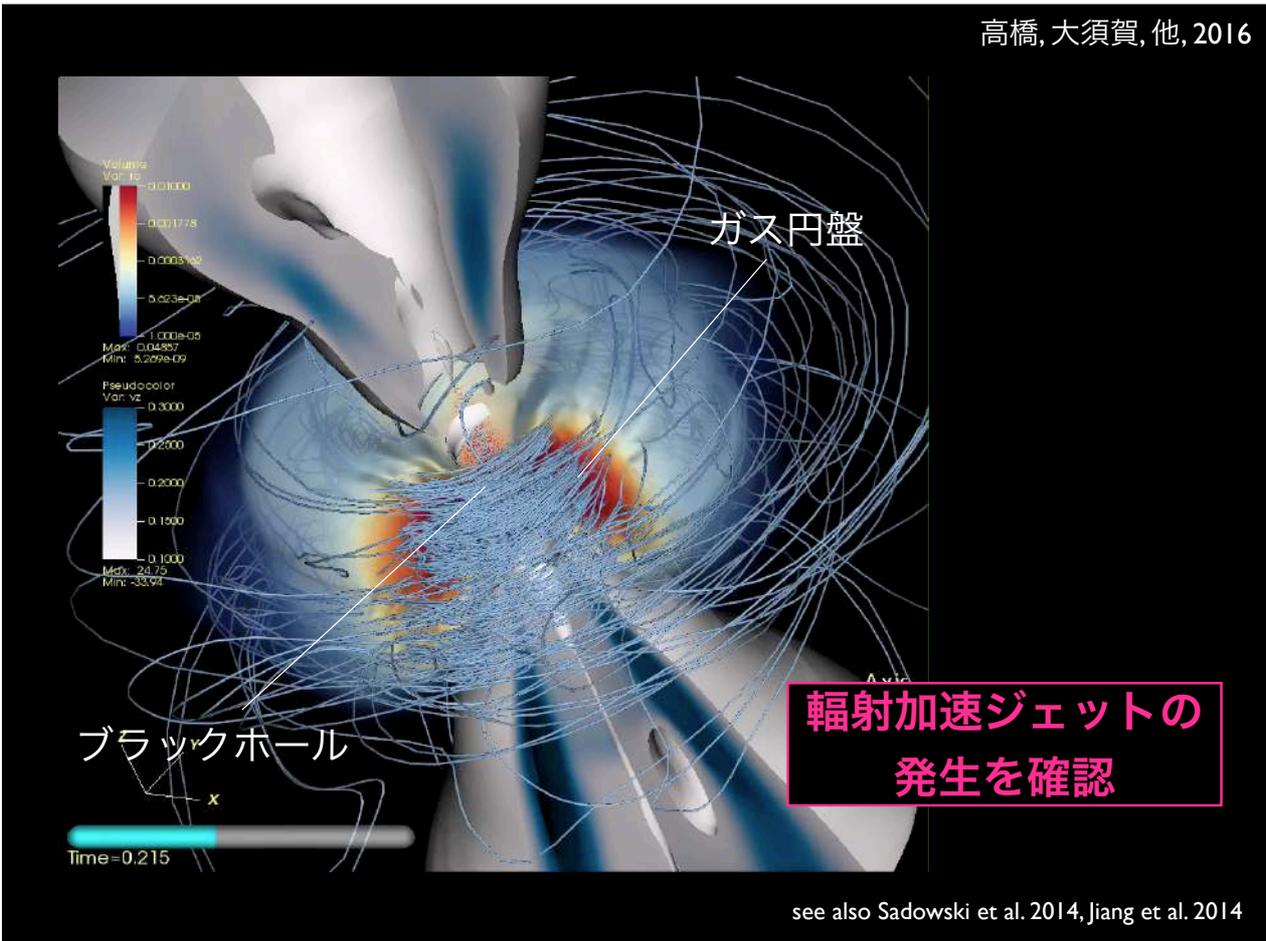
吸い込まれる光度：～ $10L_{\text{Edd}}$

SUPER-EDDINGTONはなぜ可能？

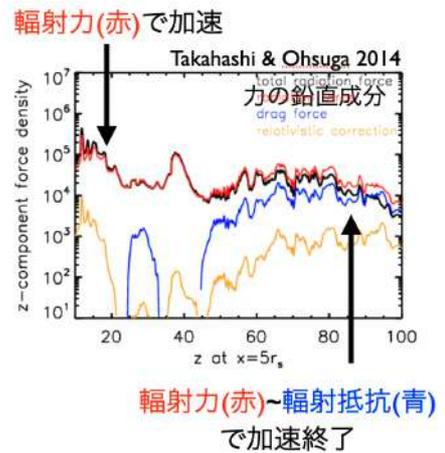
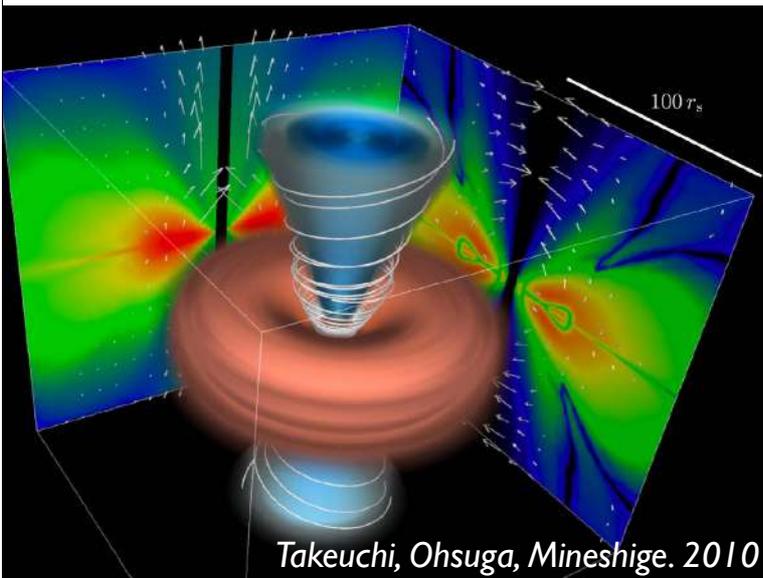


輻射流体から輻射磁気流体へ



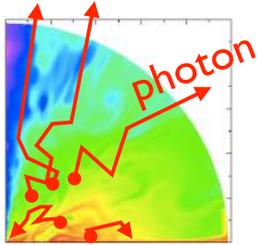


輻射抵抗

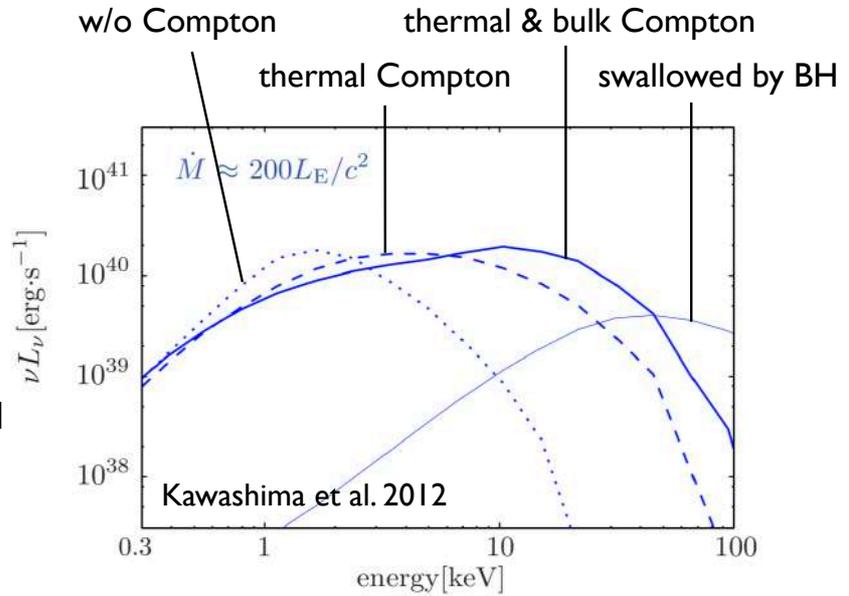


SS433のジェット（光速の約30%）と無矛盾
GRS1915+105のジェット（光速の99%超）は説明できない。
ジェットの細さ（数°以下）も説明できない。

X-RAY SPECTRA

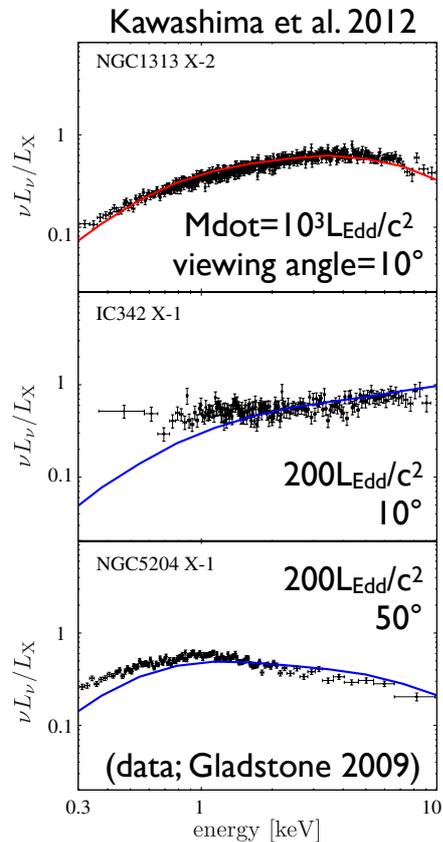
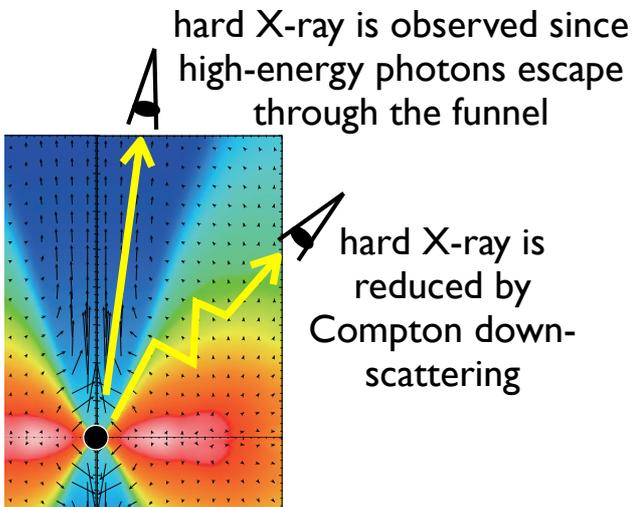


High-energy X-ray photons are produced by the thermal & bulk Comptonization.



X-ray spectra

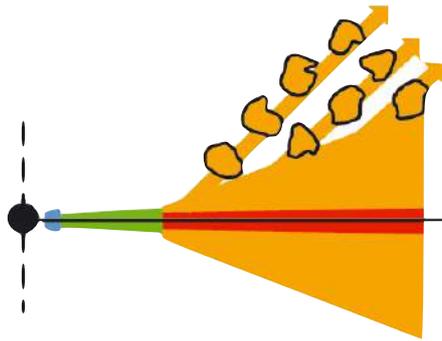
X-ray spectra, calculated by the post-processing radiation transfer, nicely fit the observations (ULXs).



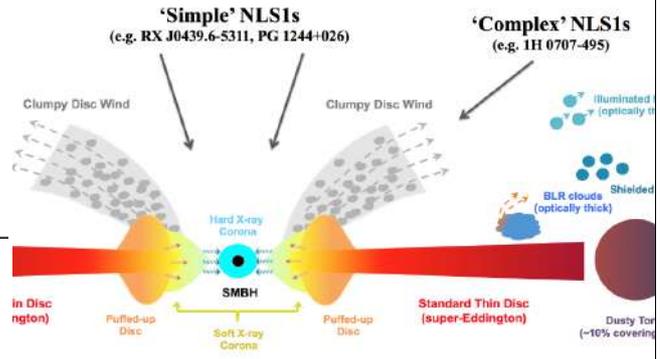
Super-Edd disk & clumpy winds

Some ULXs exhibit the time variations of X-ray luminosity, implying the launching of clumpy outflows.

Launching of clumpy winds is also reported by observations of NLS1s or V404 Cyg.



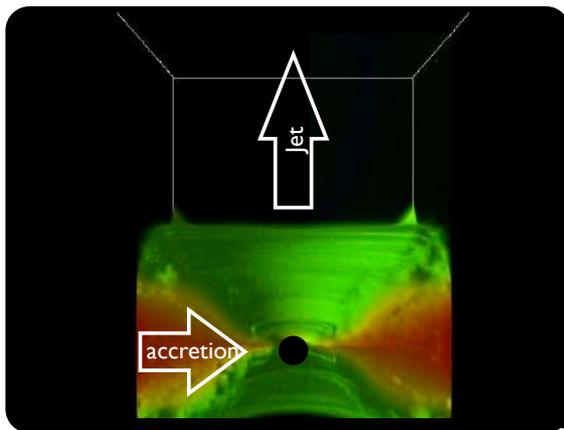
Middleton+11



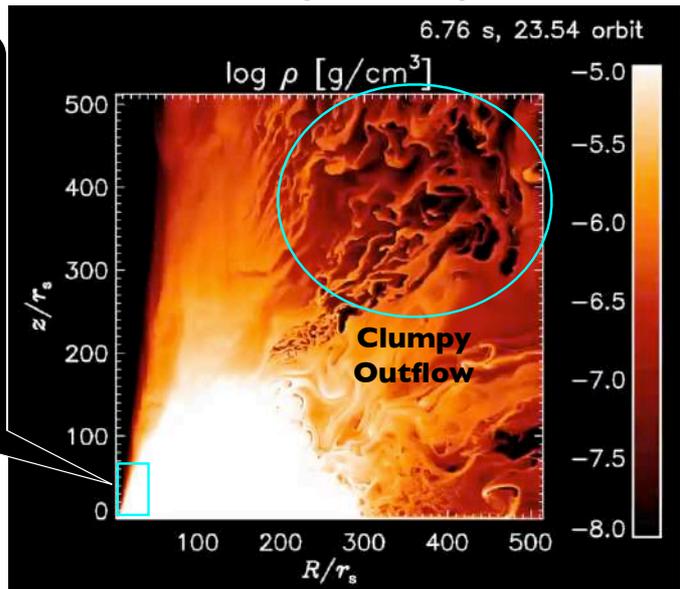
Jin+17 see also Motta+17

輻射加速円盤風の発生と分裂

Super-Eddington disk+ Jet

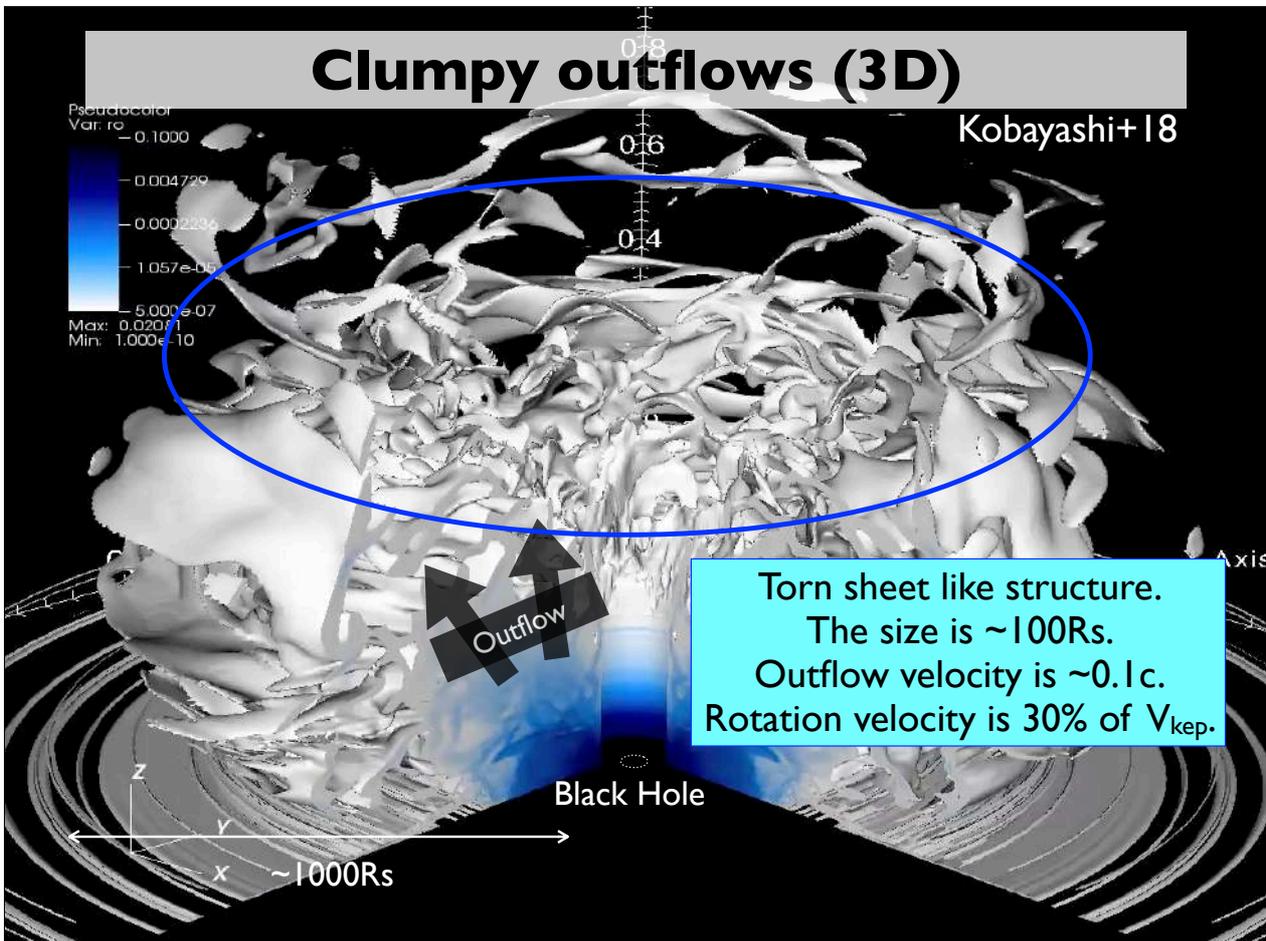
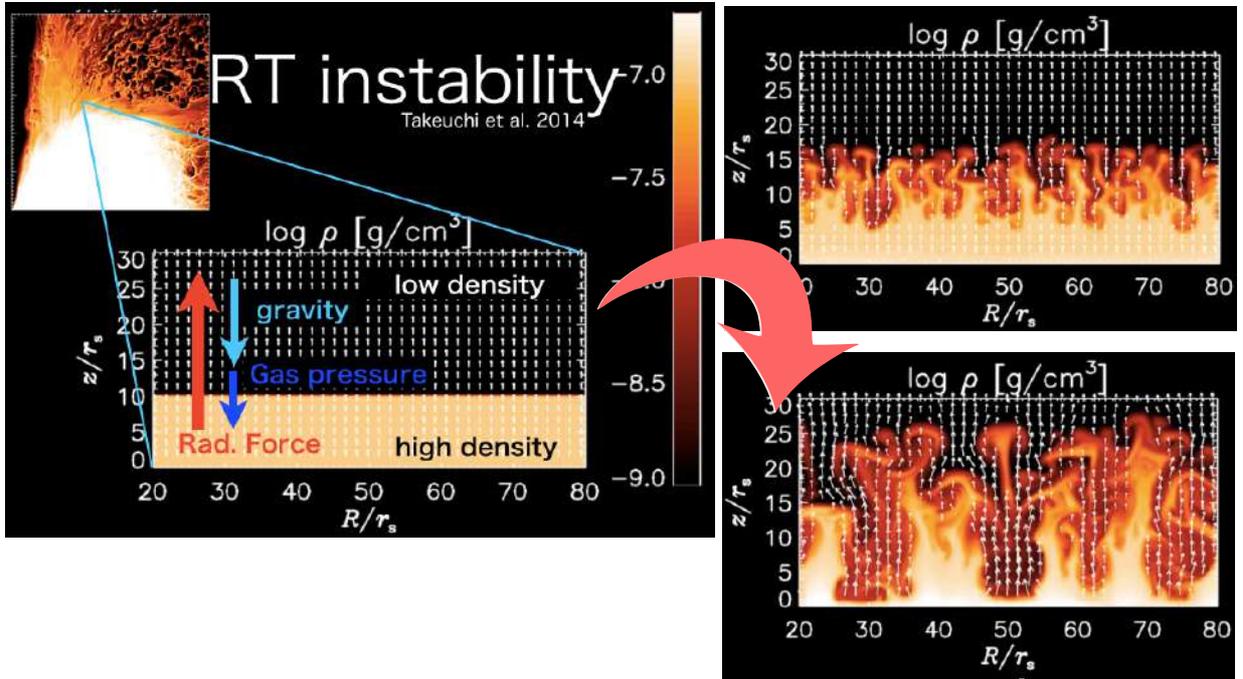


Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2013



Time-dependent, Clumpy outflow with wide angle

RT instability



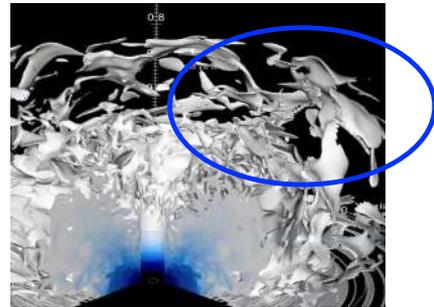
Absorption lines

Sheet like structure

Outflow velocity $\sim 0.1-0.2c$

Size (azimuthal direction) $\sim 100R_s$

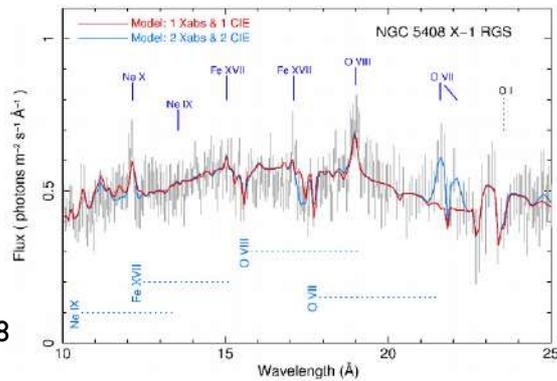
Rotation velocity $\sim 30\%$ of V_{kep}



Absorption lines

Outflow velocity of $\sim 0.1-0.2c$ agrees with the observations of blueshifted absorption lines.

Pinto+16,
see also Kosec+18



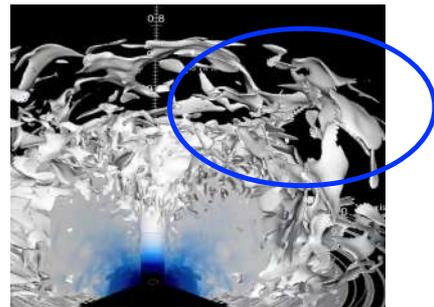
Time variation

Sheet like structure

Outflow velocity $\sim 0.1-0.2c$

Size (azimuthal direction) $\sim 100R_s$

Rotation velocity $\sim 30\%$ of V_{kep}



Time variation

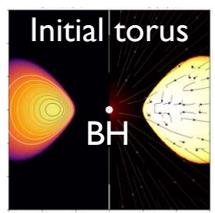
Timescale of the luminosity variation ($100R_s/0.3V_{\text{kep}}$) is

$$\sim 2.5 \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\ell_{\text{cl}}^{\theta}}{10^2 r_s} \right) \left(\frac{r}{10^3 r_s} \right) \text{s}$$

Our result is consistent with the observations of ULXs (Middleton+11) and V404 Cyg (Motta+17) in the case of $M_{\text{BH}} \sim 10-100 M_{\text{sun}}$.

Preliminary

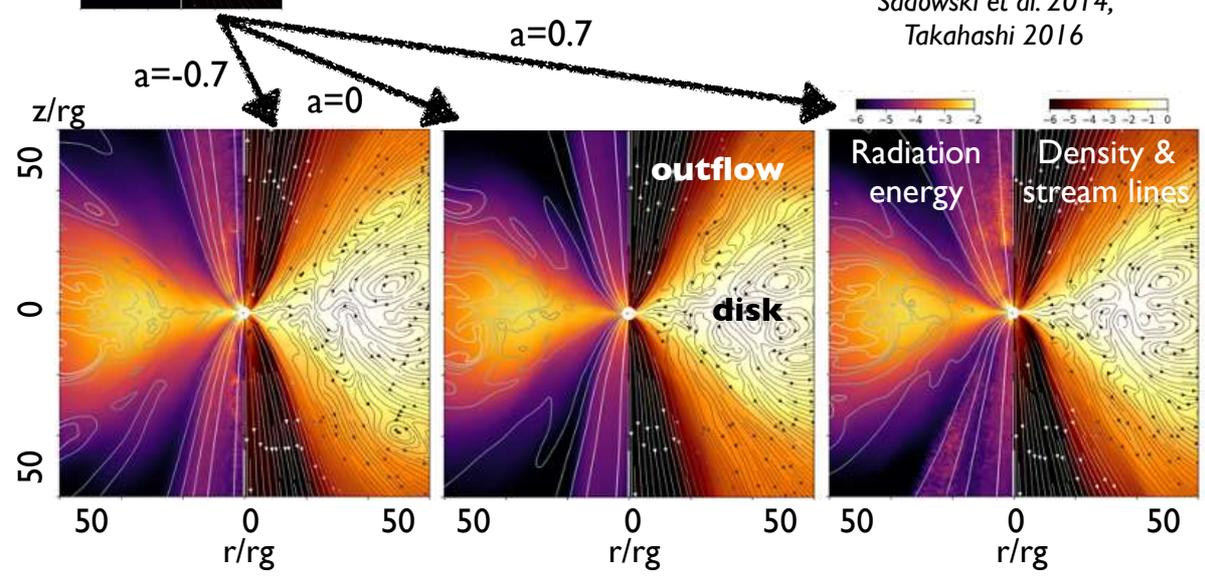
BHスピン



Single-loop poloidal magnetic fields (plasma- $\beta < 100$)

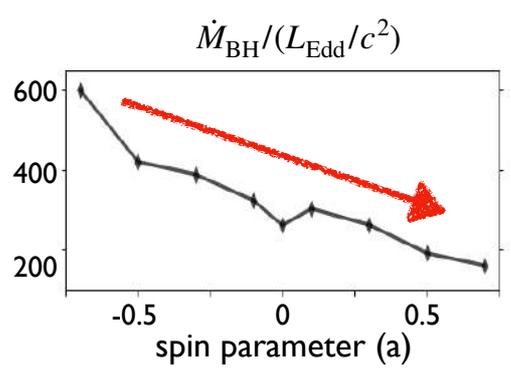
BHスピンの効果の調査

Utsumi, Ohsuga, et al. in prep
see also McKinney et al. 2014,
Sadowski et al. 2014,
Takahashi 2016

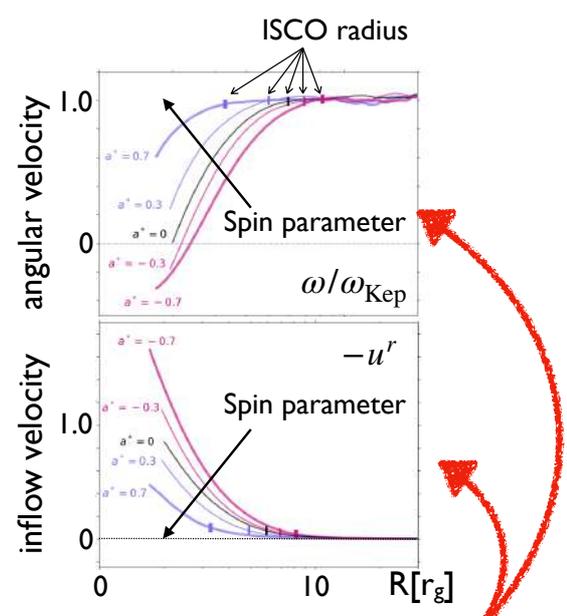


Preliminary

BHスピン

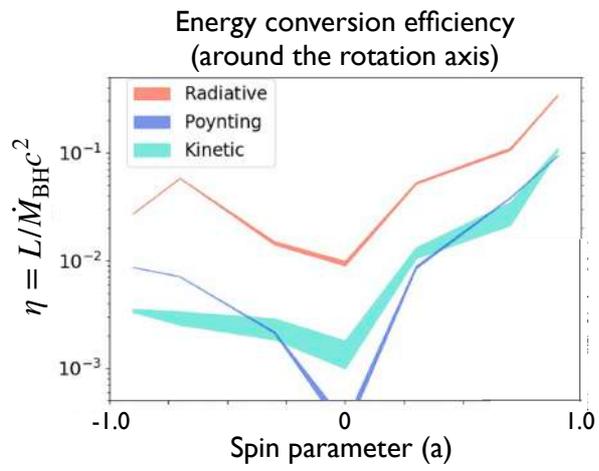


Mass accretion rate decreases with an increase of spin parameter (if the initial conditions are the same).



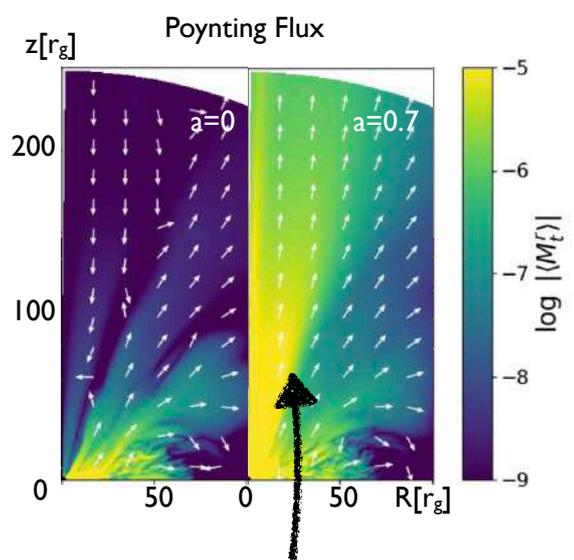
The difference of accretion rate is caused by the difference of the ISCO radius. Within the ISCO, the angular velocity drastically decreases and the inflow velocity increases.

BHスピン



Energy conversion efficiency (η) increases with an increase of $|a|$.

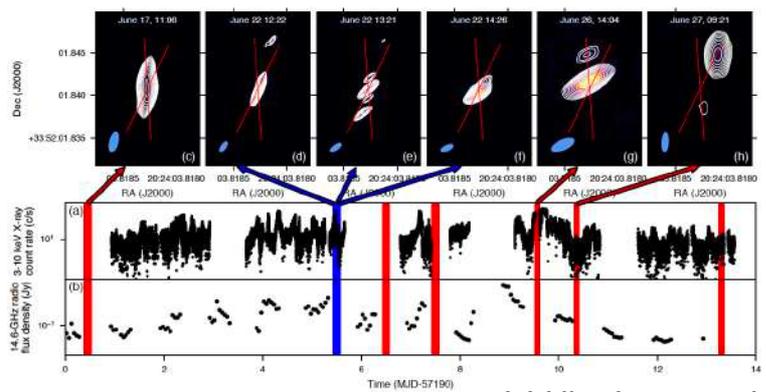
MAD (強磁場円盤) なら Poynting Flux はもっと増えるかも？



Poynting flux is drastically enhanced for the case of spinning BH. It is probably BZ effect.

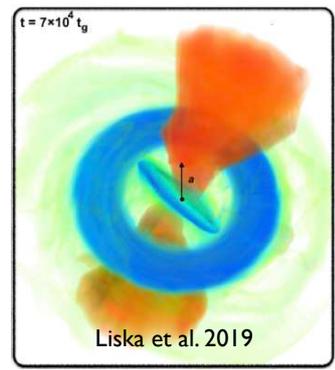
BHスピン

Radio Image (top) and Time variability of X-ray and Radio



J. Miller-Jones et al.

V404 Cygniの観測：Super-Eddington天体のジェットの方向が変わった (?)



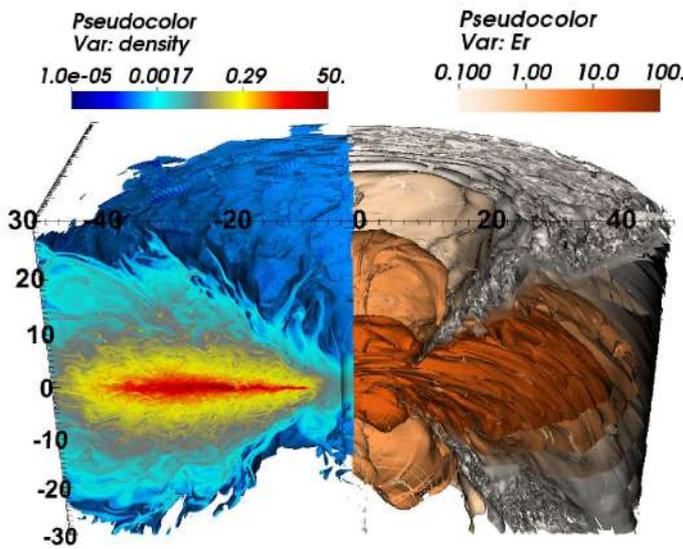
Liska et al. 2019

↑このGR-RMHD版が必要！
今後の課題

未解決問題；計算法による相違

| | | | |
|----------------------|---|---------------------------------|--|
| VET Full Transfer | Stone et al. 92 Jiang et al. 14a Jiang et al. 14b | Ohsuga, Takahashi 16 | INAZUMA コード (Asahina+ 2000) |
| 厳密 近似 | | | |
| M1 | Gonzalez et al. 07 | Takahashi, Ohsuga 17 | Sadowski+ 14,15 McKinney+ 14 Takahashi, Ohsuga+16 Takahashi & Ohsuga 17 |
| Eddington /FLD | Ohsuga et al. 09, 11 | Takahashi, Ohsuga, et al. 13 | Farris et al. 08 |
| | Newtonian or O(v/c) | Special relativity | General relativity |

未解決問題；計算法による相違



Jiang et al. 2014

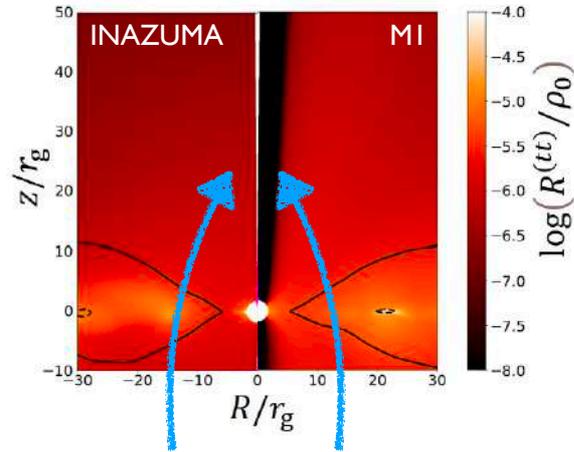
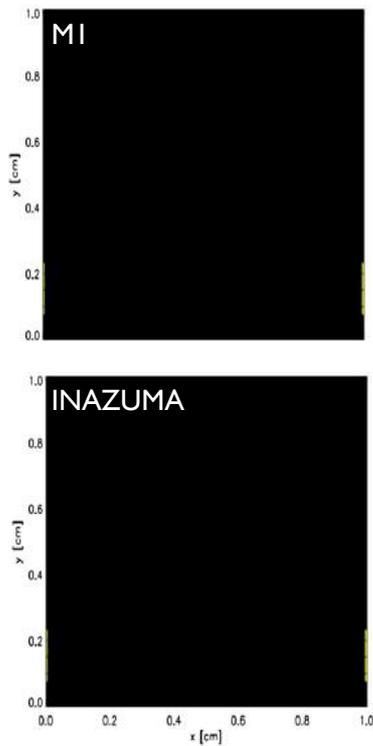
O(v/c)の輻射輸送方程式を直接解く

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

FLD近似やM1法と大筋で
同様の結果が得られた。

ただし、定量的には結果が
異なる。なぜ？

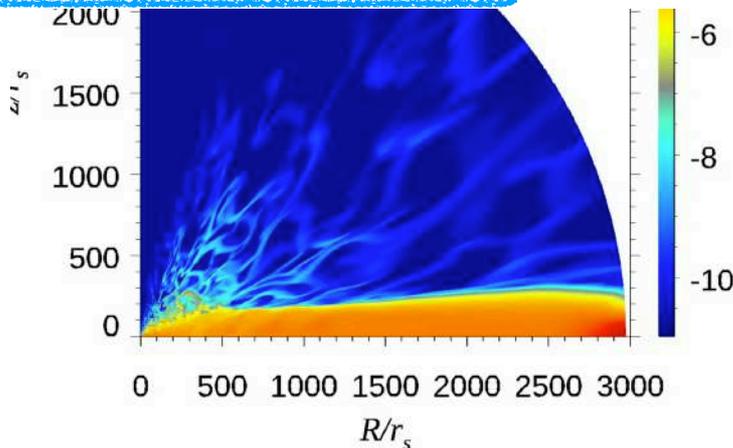
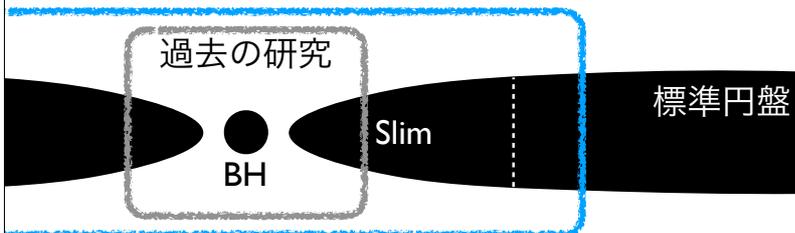
未解決問題；計算法による相違



INAZUMAだと、回転軸に光が到達しないという問題が生じない
より正確な輻射場はINAZUMAで！

未解決問題；円盤全域の構造

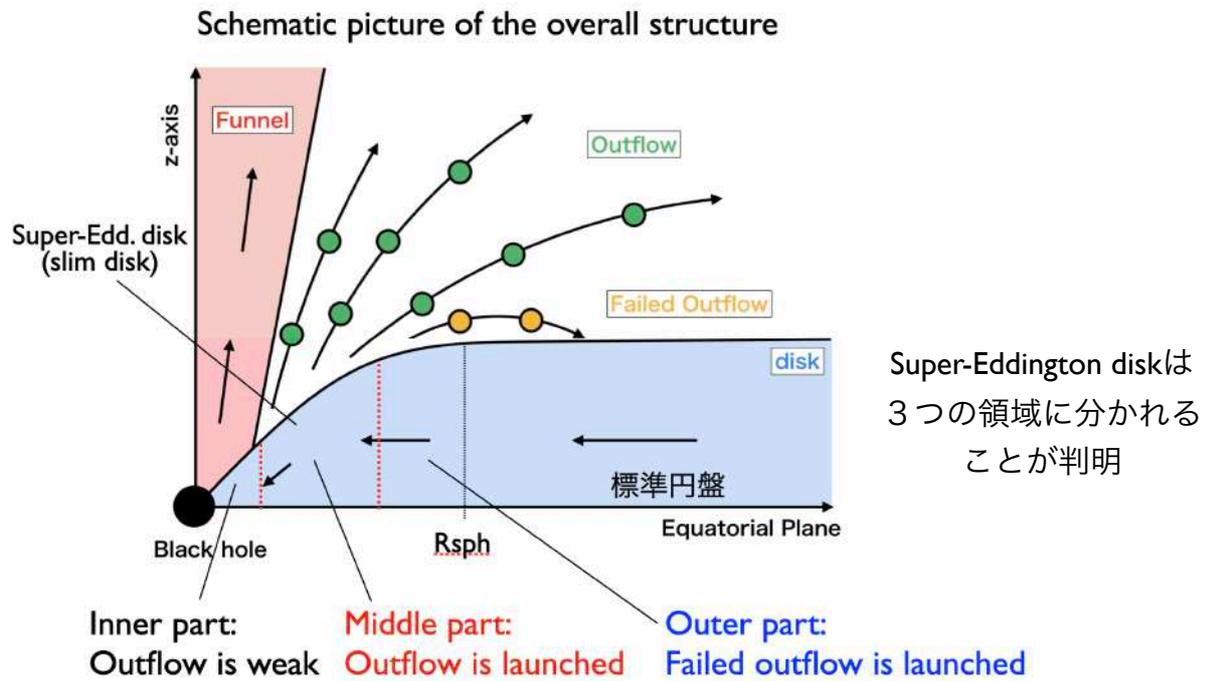
計算領域の拡大



計算領域を拡大することで、ようやく降着円盤の全体像がわかってきた。アウトフローのパワーも先行研究と違う！

Kitaki et al. 2001

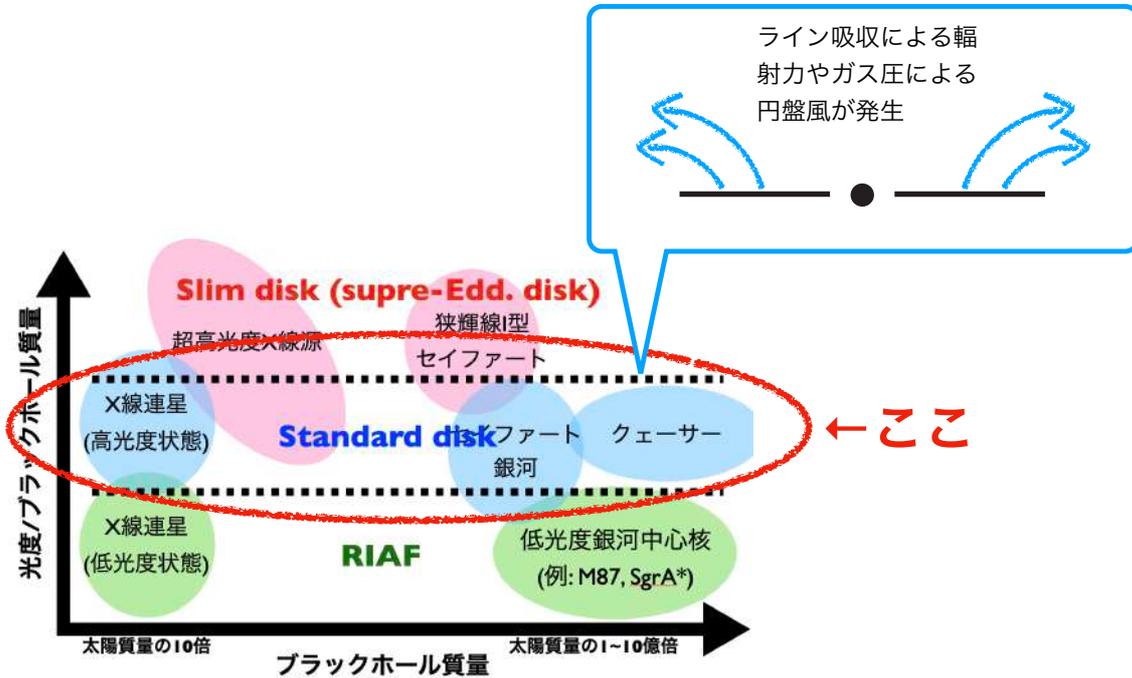
未解決問題；円盤全域の構造



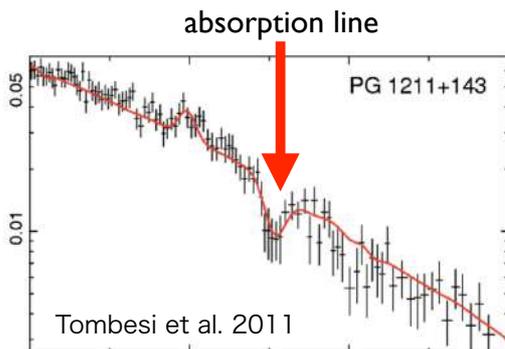
ここまでのまとめ

- NLSIs, ULXs, micro-quasarsのメカニズムや, SMBHの急速成長に深く関わるのがSuper-Eddington disk
- Super-Eddington diskの研究は, Radiation-MHD (RMHD) 計算により大幅に発展した. さらに, GR-RMHD計算による研究が進められている.
- BZと輻射, どちらがジェットを加速するのかを解明する必要あり! 計算法による違いや, 円盤の全体像を解明することも当面の課題.

標準円盤

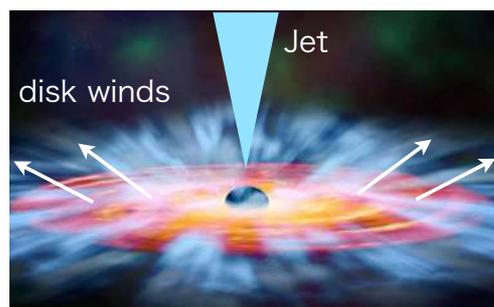


Ultra Fast Outflows (UFOs)



- Blueshifted Fe absorption lines are detected in **40% of Sy galaxies**.
- Typical velocity is **0.1-0.3c**.
- **Outflow rate ~ Accretion rate**
- **Kinetic power ~ Jet power**

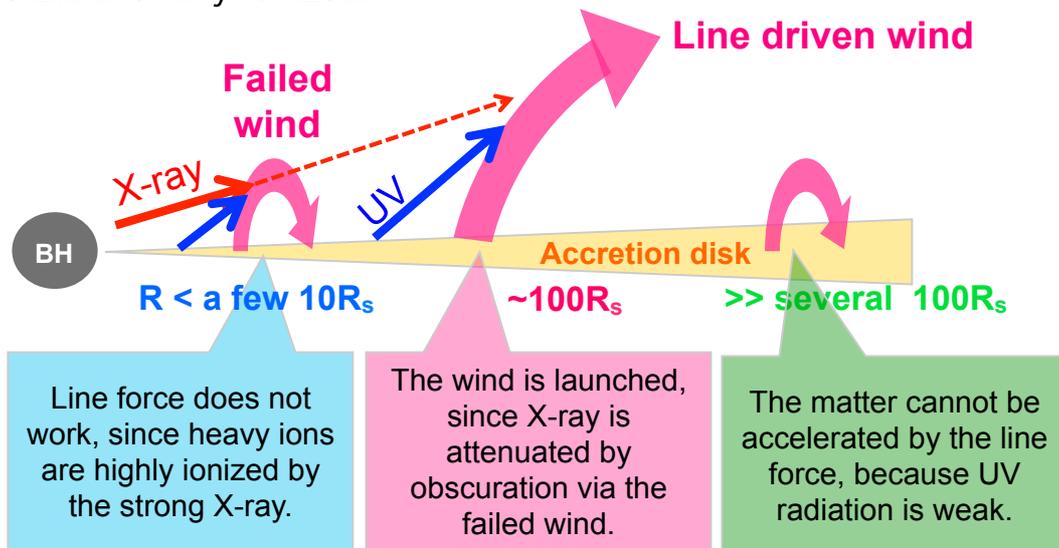
One of the important candidates of the origin of the AGN FEEDBACK



Line-driven wind

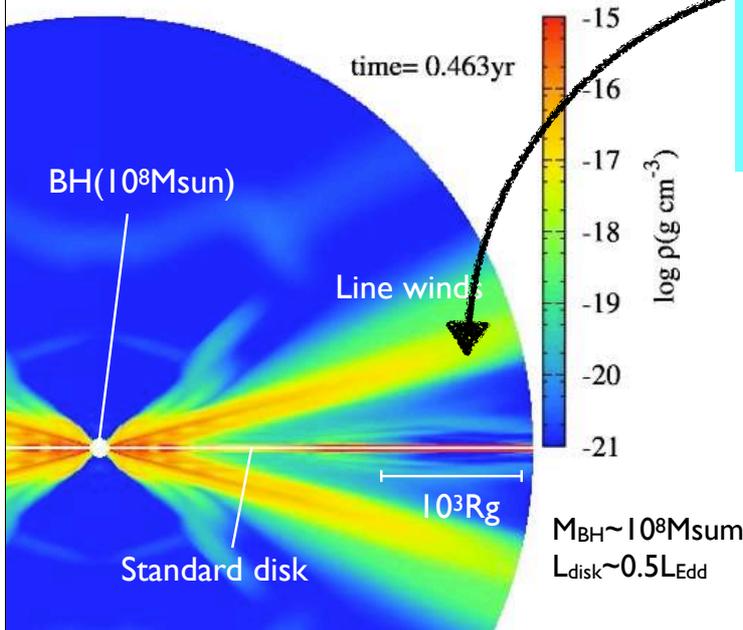
UV radiation: Matter is accelerated by the line absorption (bound-bound transition) of heavy ions with low ionization state.

X-ray: Strong X-ray irradiation prevent the outflow because the metals are fully ionized.



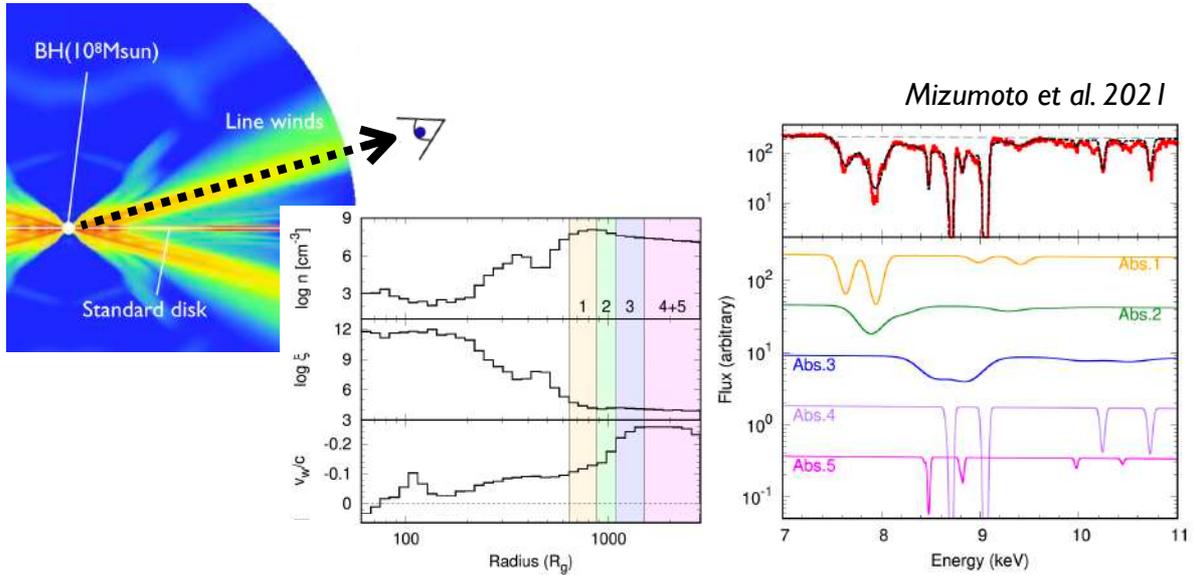
Line-winds

Nomura et al. 2016, 2017, 2020
(see also Proga et al. 00, 04)



From the standard disk, the disk wind is launched by the radiation force for spectral lines (line-force).

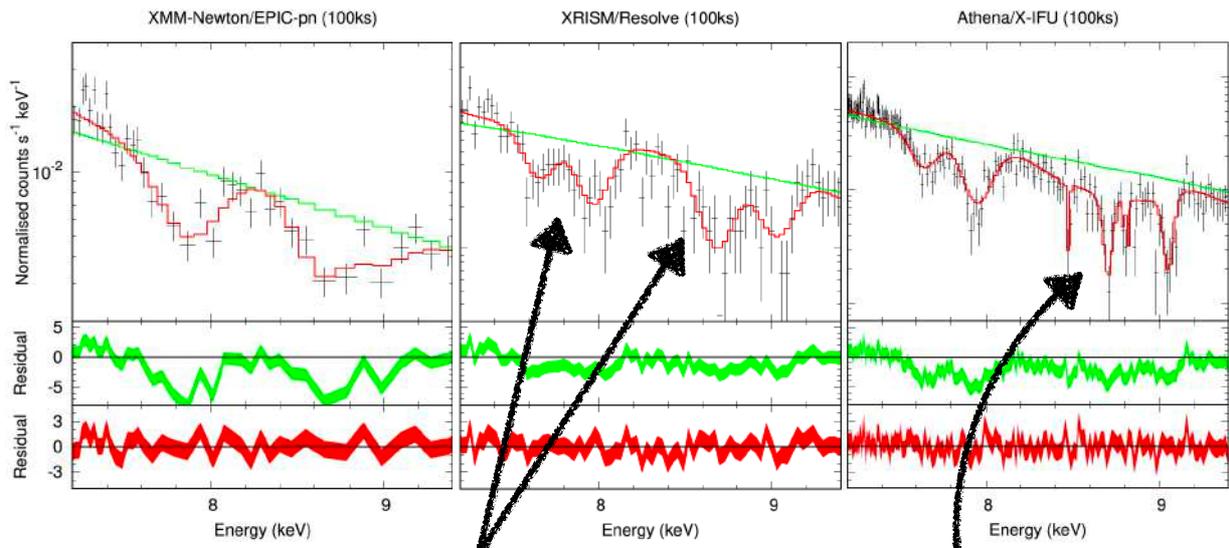
Simulated spectra



Density, ionization parameter, velocity drastically change, and there are five absorbing regions along the line of sight.

Complicated Fe absorption lines (H-like and He-like iron) would appear.

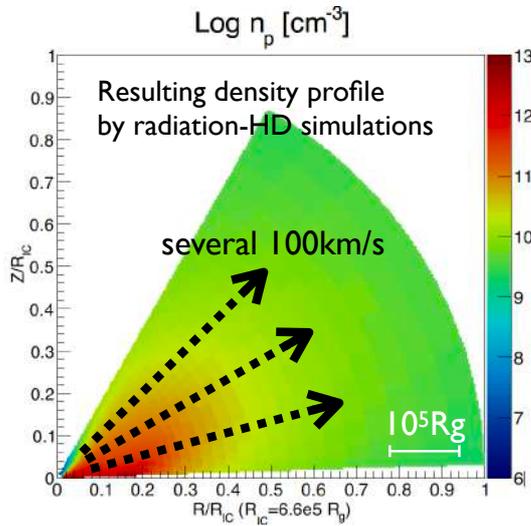
Simulated spectra



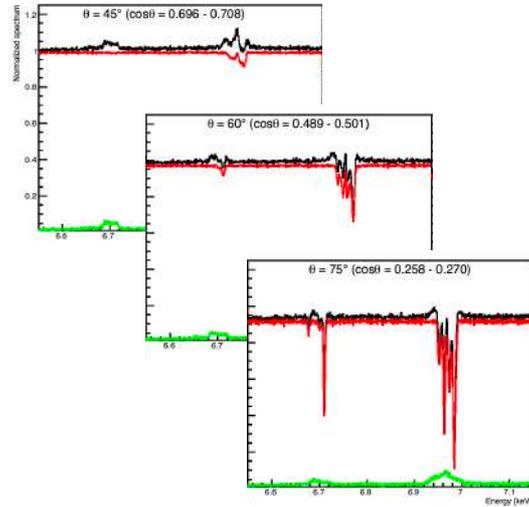
Absorption lines from H-like and He-like iron are resolved by XRISM.

More detailed absorption profiles can be understood by Athena.

Thermal-radiative wind



Gas is heated up via the Comptonization and blown away by the gas pressure force and the radiation force.

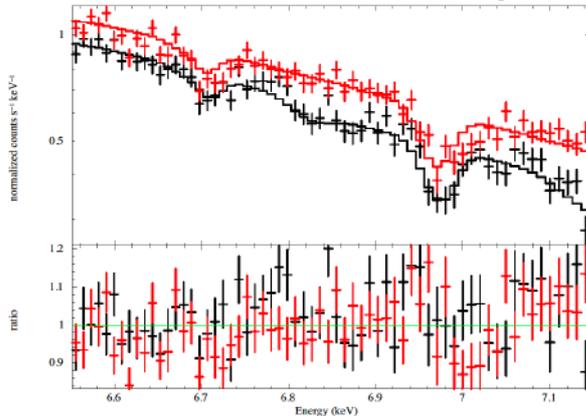


Simulated absorption features (Fe XXVI Ly α_1 & Ly α_2) are obtained by MONACO.

Tomaru et al. 2020

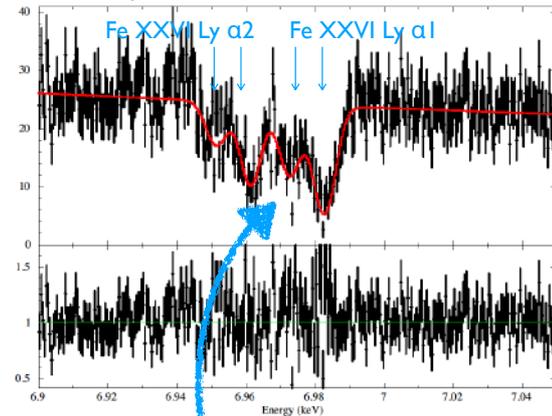
Thermal-radiative wind

Chandra/HETGS data with best-fitting model



Simulation results are consistent with observations of BH binary, H1743-322.

Simulated spectrum of a 30 ks XRISM observation



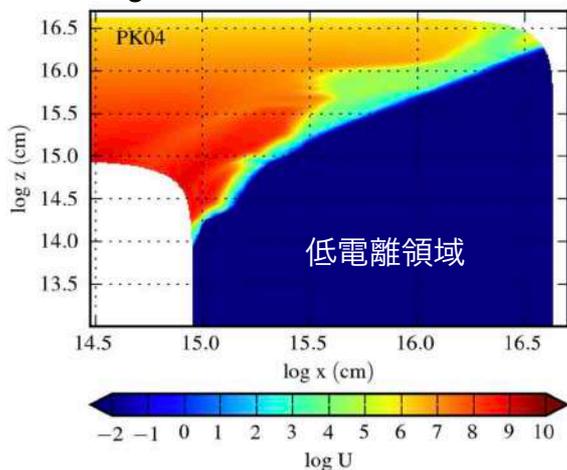
Separation of Fe absorption lines due to velocity difference would be detected by XRISM.

Tomaru et al. 2020

問題点

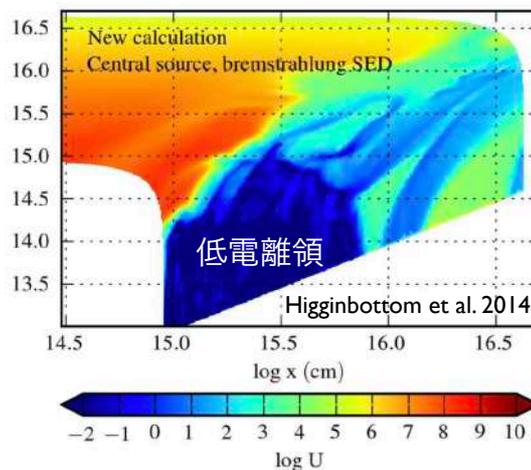
直接光のみ（散乱光などは無視）

ProgaやNomuraが採用している方法



真面目に輻射輸送

*ただし流体は止めている



散乱光を考慮すると円盤風内部の電離度がかなり変わる！

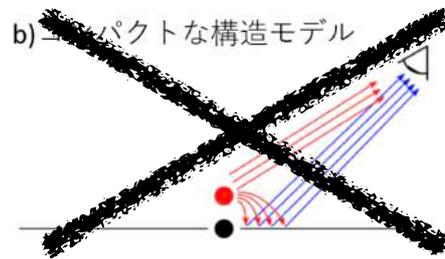
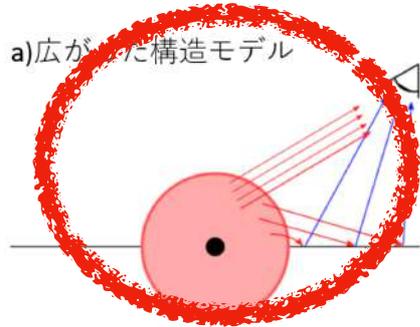
散乱光入りの輻射流体計算が必要だが計算量が・・・

ここまでのまとめ

- 標準円盤から吹き出す円盤風は,AGNやXRBの吸収線の起原と考えられている.
- 輻射流体シミュレーションによる研究が進められていて,X線観測との比較による検証が予定されている.
- 原子物理と輻射輸送をより正確に扱う必要があるが,当面は難しいかもしれない.

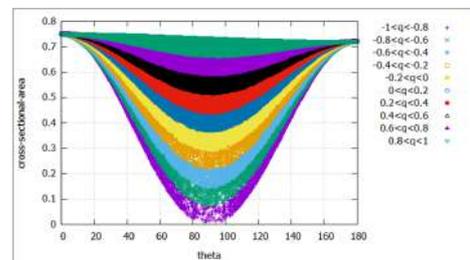
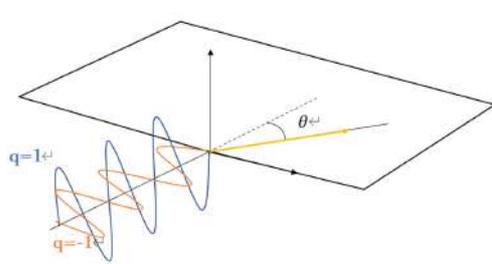
偏光X線観測

Cyg X-1の偏光度は8.6%以下（硬X線の偏光観測）



Chauvin et al. 2018

X線偏光輻射輸送計算コード開発中！

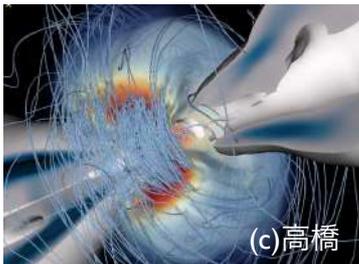


BHから銀河スケールへ

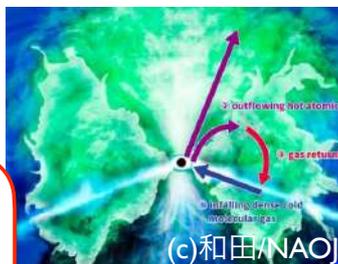
ブラックホールスケールから
銀河/宇宙論スケールへ

フィードバック

ブラックホールスケール

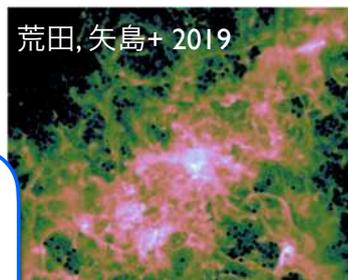


AGN/銀河スケール



銀河/宇宙論スケール

荒田, 矢島+ 2019



質量供給

銀河/宇宙論スケールから
ブラックホールスケールへ

まとめ

- 精密な円盤＋ジェット＋円盤風の構造解明のための高精度大規模シミュレーション
- 理論と観測の協働によるアプローチ
- 宇宙の進化過程の解明に向けたBHスケールと銀河・宇宙論スケールとの連結