シミュレーションによる
ブラックホール降着円盤理論の進展

大須賀 健（筑波大CCS）

H.R.Takahashi, T. Kawashima, Y. Asahina, A. Utsumi, H. Kobayashi, S. Takeuchi,
T. Kitaki, S. Mineshige, M. Nomura, M, Mizumoto, R. Tomaru, C. Done

4D2Uの動画

牧野さんと私（むかし話）

私が牧野さんを知ったきっかけ

1996 大学院に入学

「牧野さんっていう　すごい~~（変な）~~人がいるよ」

と聞いた

牧野さんと私（むかし話）

<u>ファーストコンタクト</u>

2005年頃；東大でセミナー

牧野日記に「大須賀君から参加指令が来た・・・みたいな」
みたいなことを書かれました.

質問メールを頂きましたが, マシン語のため理解できず.

牧野さんと私（むかし話）

<u>国立天文台CfCA関連</u>

2008 CfCAに着任

着任時期についてメールで熱く議論

牧野さんと私（むかし話）

<u>国立天文台CfCA関連</u>

2011 牧野さんの最終講演

牧野さん「CfCAは予算の割に沢山論文を書いている. 観測はお金だけ使って成果がないよね」と笑顔で毒を吐く

＊あくまで個人の印象です
牧野さんの正確な記録のよると, 事実とは異なるようです

牧野さんと私（むかし話）

<u>富岳成果創出加速その１</u>

文科省へ（副代表として同伴）

牧野さん, 独特のプレゼン＆質疑応答で審査員を煙に巻く

牧野さんと私（むかし話）

<u>**富岳成果創出加速その２へ向けて**</u>

2021 オンラインミーティング

代表の交代が必須と判明して

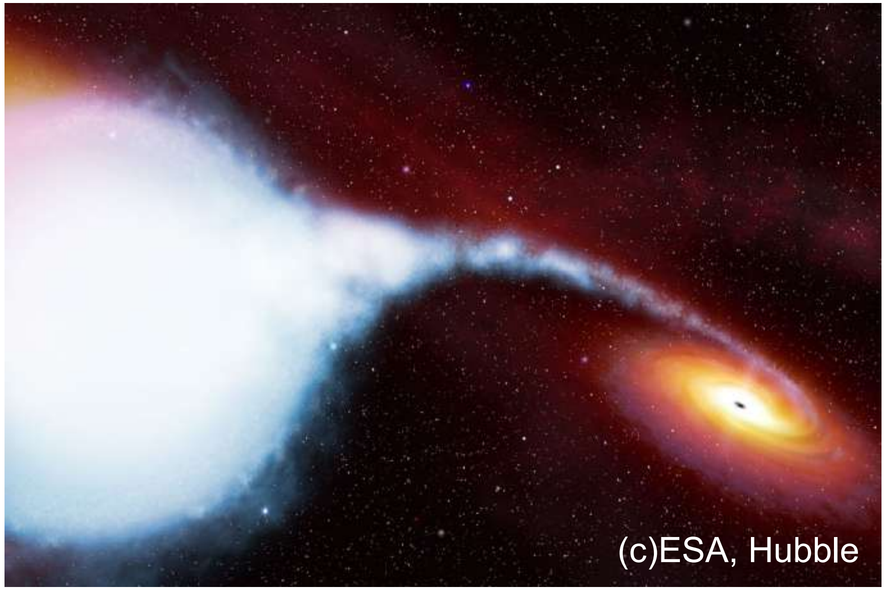
嬉しそうでした

写真はイメージです

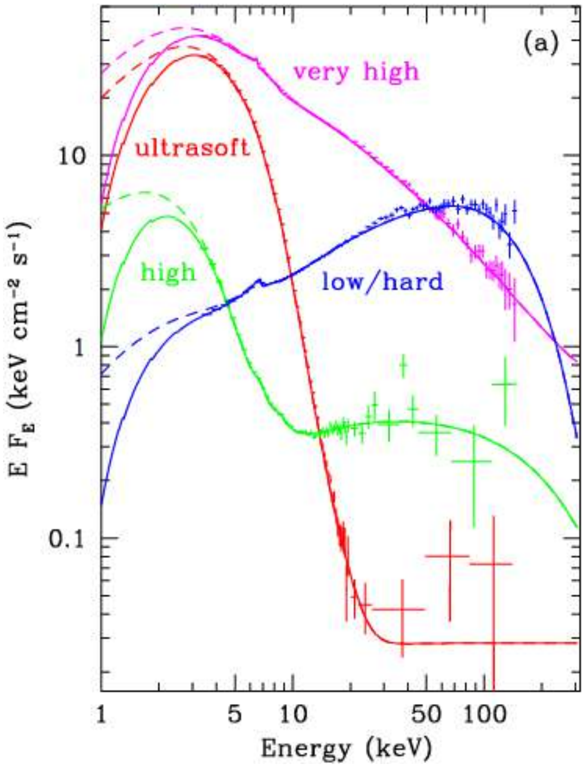
牧野さん，還暦おめでとうございます。

Black Hole Accretion Flows

Luminous compact objects such as X-ray binaries and AGNs are powered by the accretion flows onto black holes/ neutron stars.

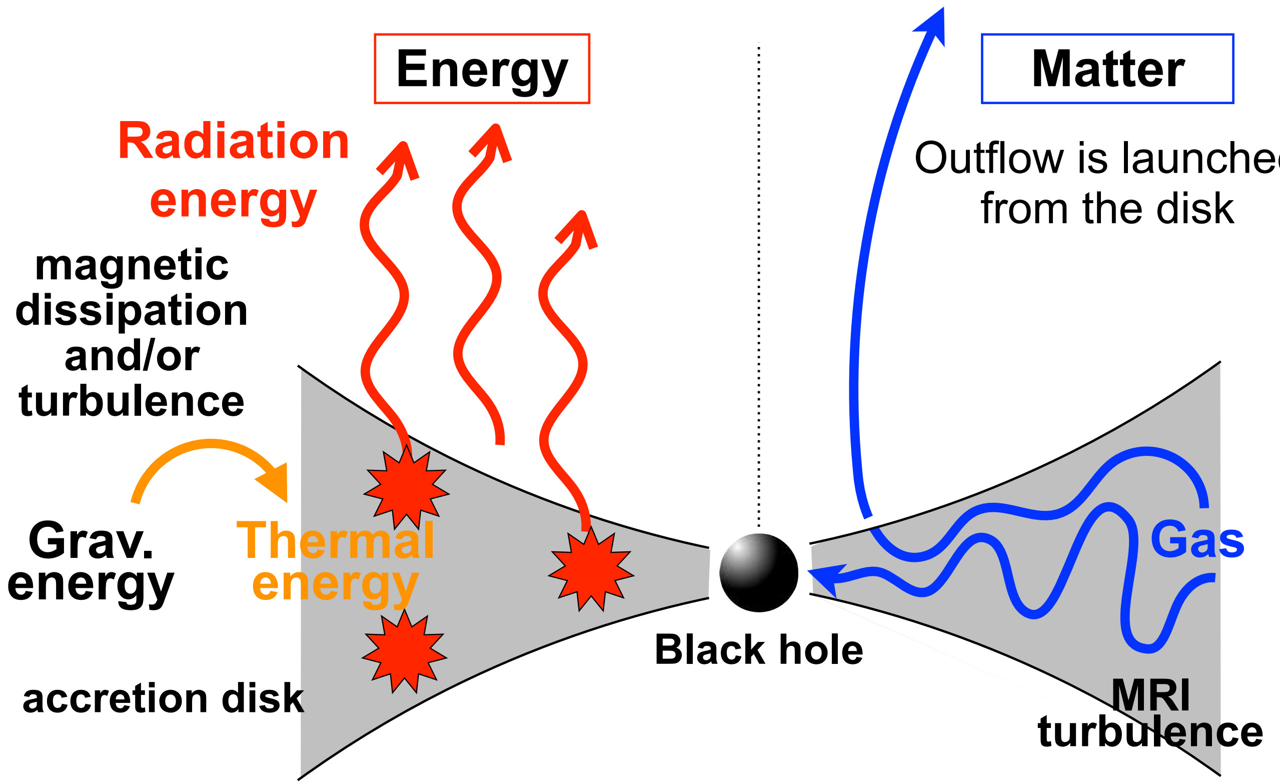


Several spectral states have been observed.



Zdziarski et al. 2010

Importance of Radiation-Magneto-HydroDynamics



Magnet Fields;

- Angular momentum is transported by MRI, leading to the **mass accretion** onto BHs.

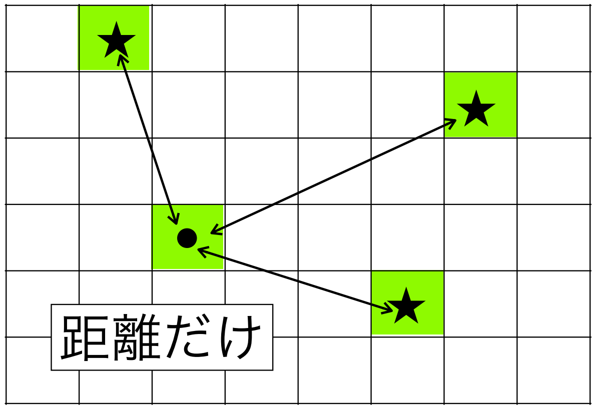
Radiation Fields;

- Disk loses the energy by emitting photons (**cooling**).
- Radiation pressure determines the thickness of the disk.
- Radiation force drives **outflows**

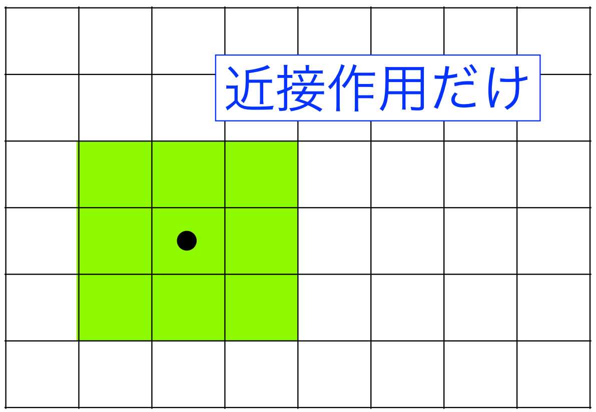
Radiation-MHD Simulations is necessary.

輻射の困難

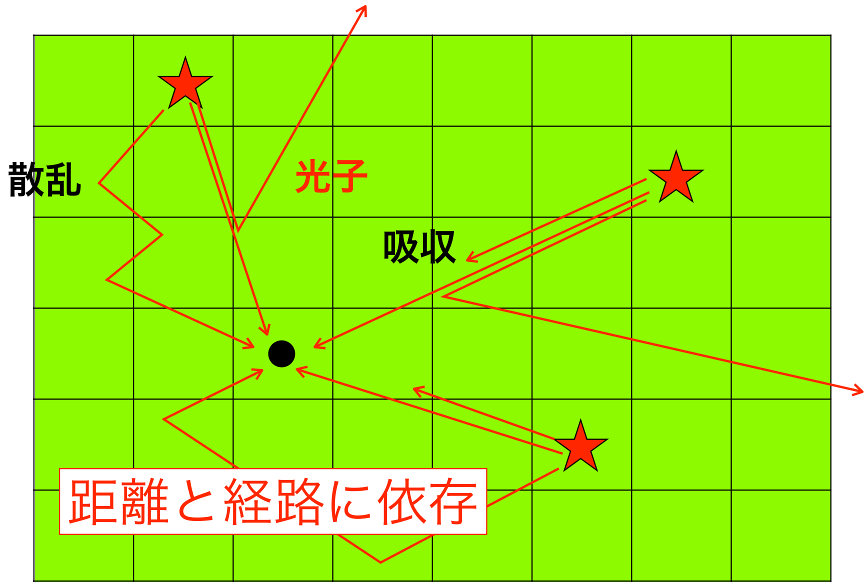
自己重力計算（空間３次元）



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

輻射の解法

輻射輸送の方程式

$\partial_t I + n^j \partial_j I = S($吸収, 放射, 散乱$)$

ボルツマン法

輻射輸送方程式を解く

$\partial_t I + n^j \partial_j I = S($吸収, 放射, 散乱$)$

厳密解が得られるが,
計算量が膨大

1次モーメント法（M1法）

0次と1次モーメント式を解く

$$\partial_t E + \partial_j F^j = G^0$$

$$\partial_t F^j + \partial_k P^{jk} = G^j$$

Pは*E*と**F**の関数で近似

$$P^{jk} = P^{jk}(E,\ F^j)$$

運動量保存は保証されるが,
非一様な構造が苦手.

流束制限拡散近似

0次モーメント式だけを解く

$$\partial_t E + \partial_j F^j = G^0$$

Fと**P**は*E*の関数で近似

$$F^j = F^j(E),\ P^{jk} = P^{jk}(E)$$

非一様な構造が苦手.
運動量保存も保証されない.

厳密だが,
計算量大

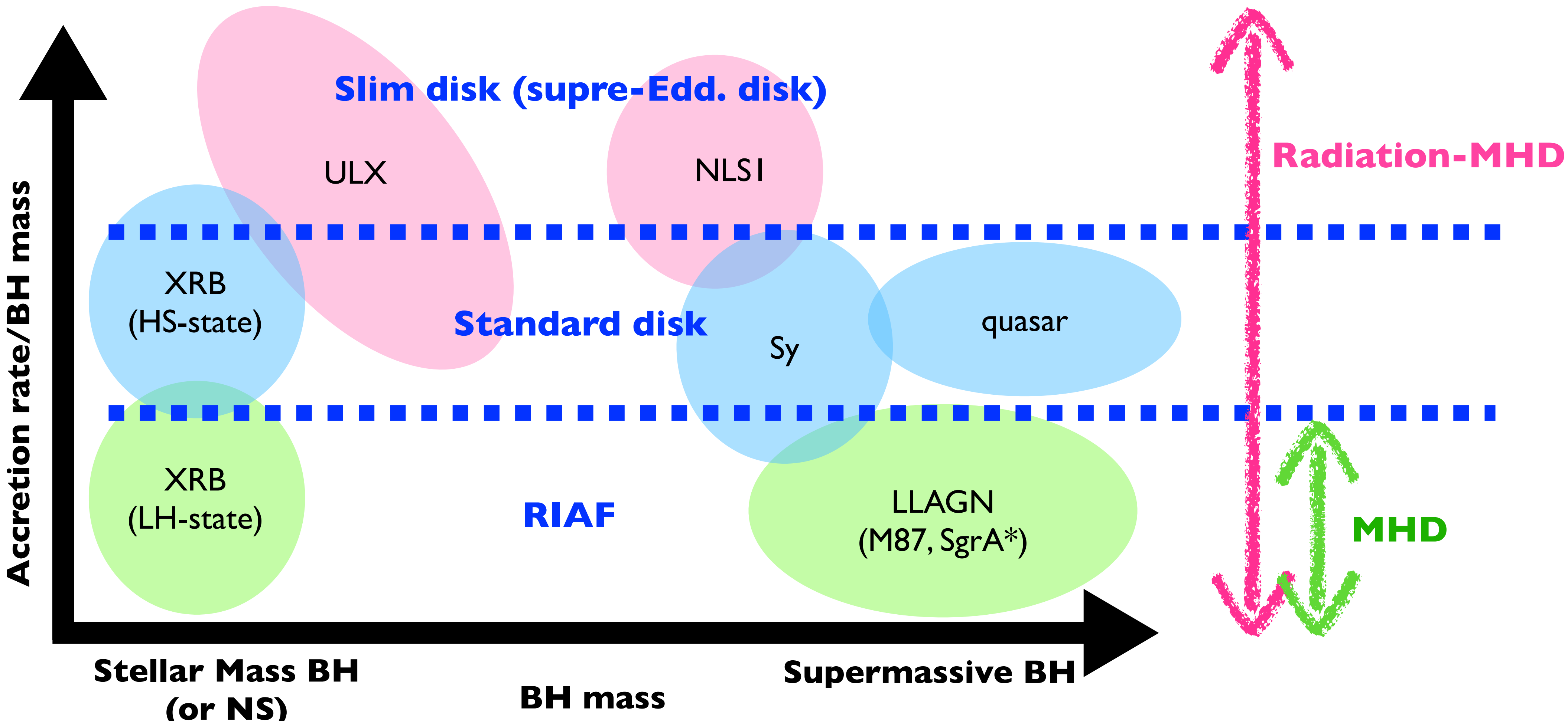
どれも, 陰解法と陽解法
を巧みに組み合わせた
ハイブリッドコード

計算は軽いが, 制限が多い

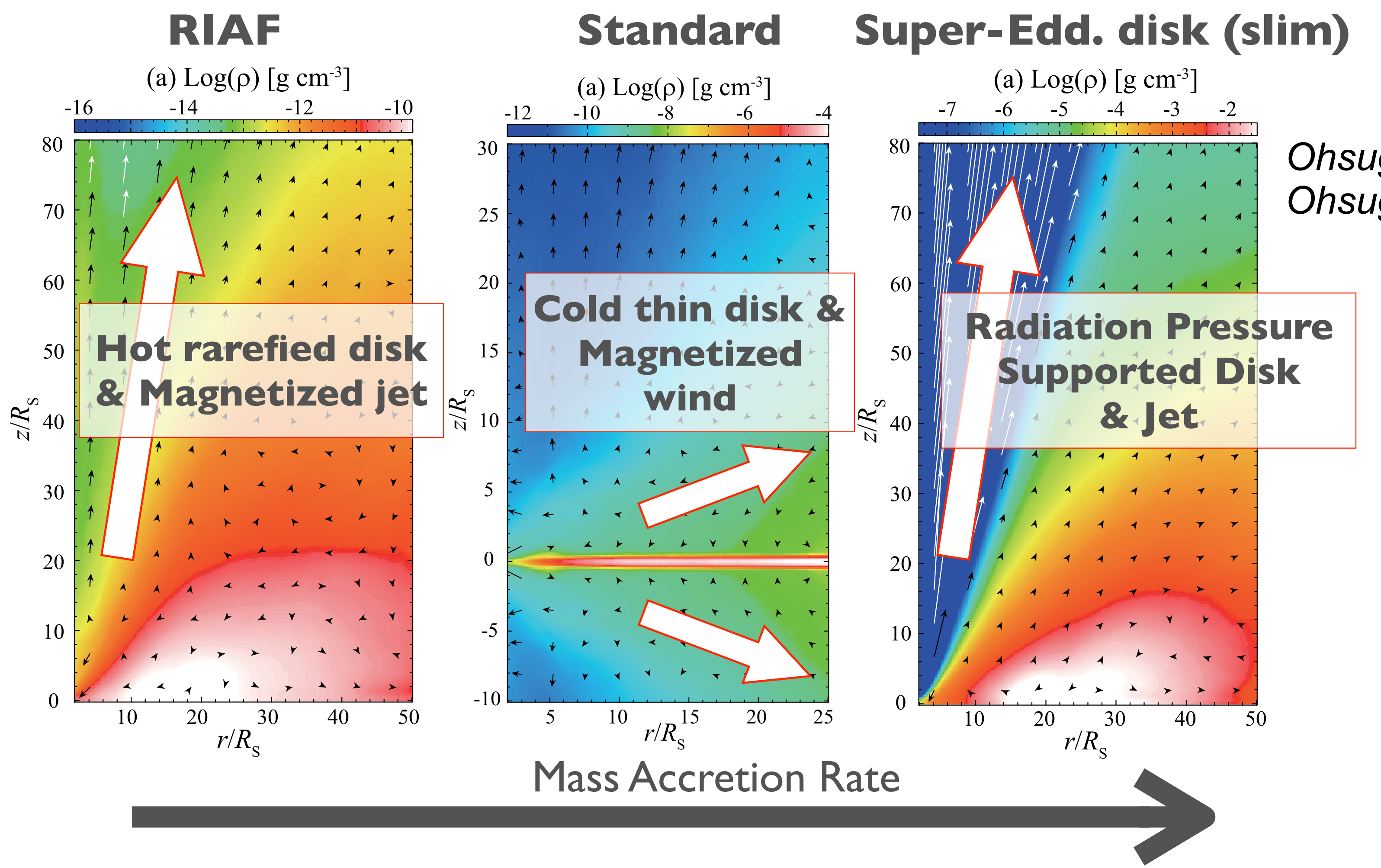
Radiation-MHDの進化

	Newtonian or O(v/c)	Special relativity	General relativity
ボルツマン法（VET法含む）	Stone et al. 92 Jiang et al. 14a Jiang et al. 14b	Ohsuga, Takahashi 16	Asahina, Ohsuga+20 White+23
厳密 / 近似			
M1	Gonzalez et al. 07	Takahashi, Ohsuga 13	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

Three modes and simulation methods



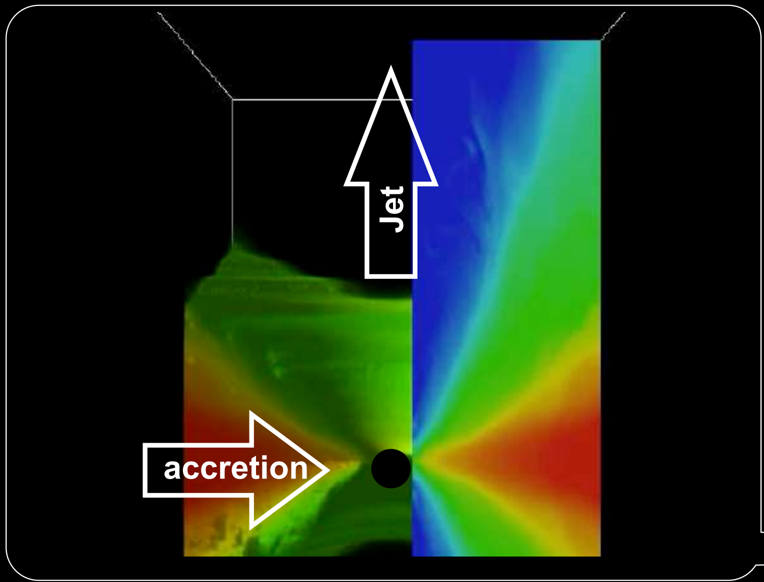
Three modes reproduced by radiation-MHD

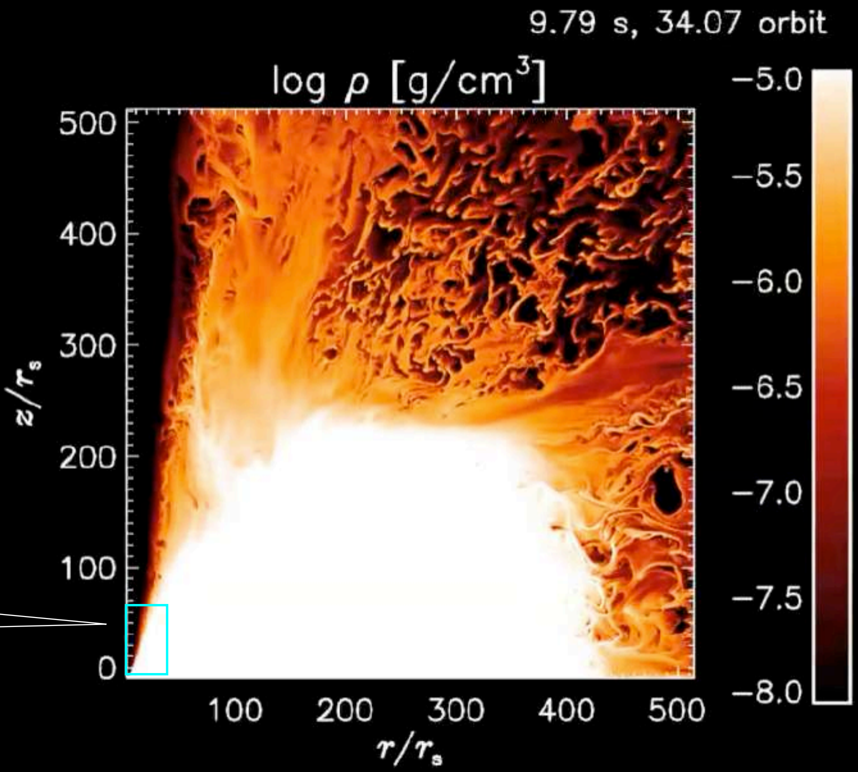


Ohsuga et al. 2009, Ohsuga, Mineshige 2011

RMHD simulations of super-Edd. flows

Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2013





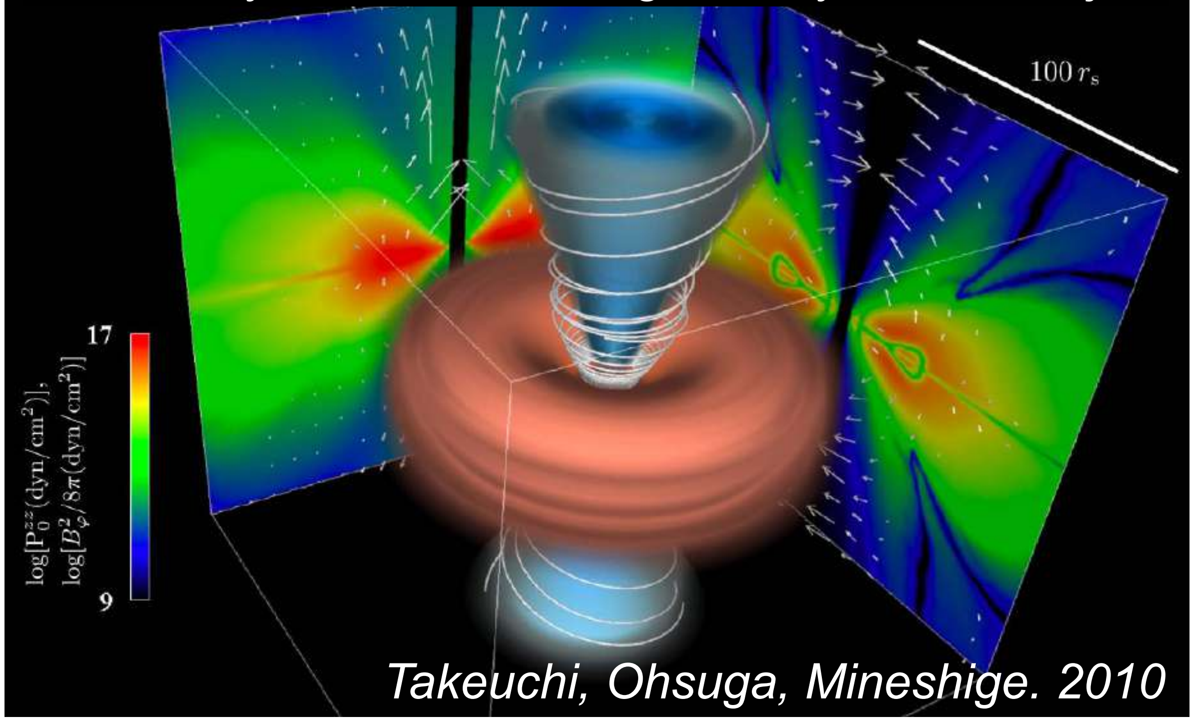
Radiation pressure-dominated disk & high-velocity outflows around the rotation axis (jets).

Radiatively-driven clumpy winds.

Radiation-MHD jets

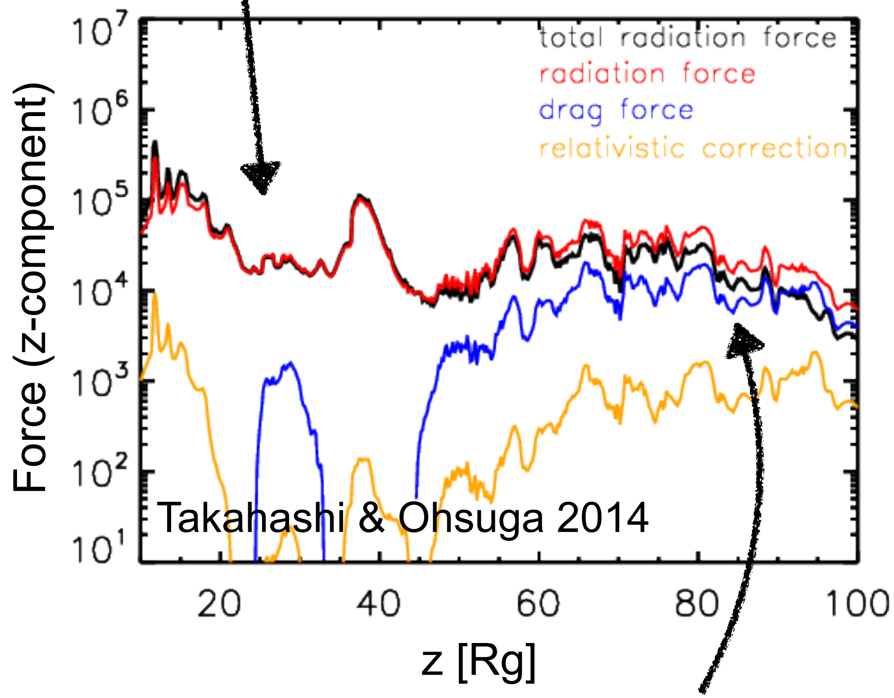
Resulting jet velocity (~0.3-0.5c) is roughly consistent with the jets in SS433.

Radiatively-accelerated, magnetically collimated jets



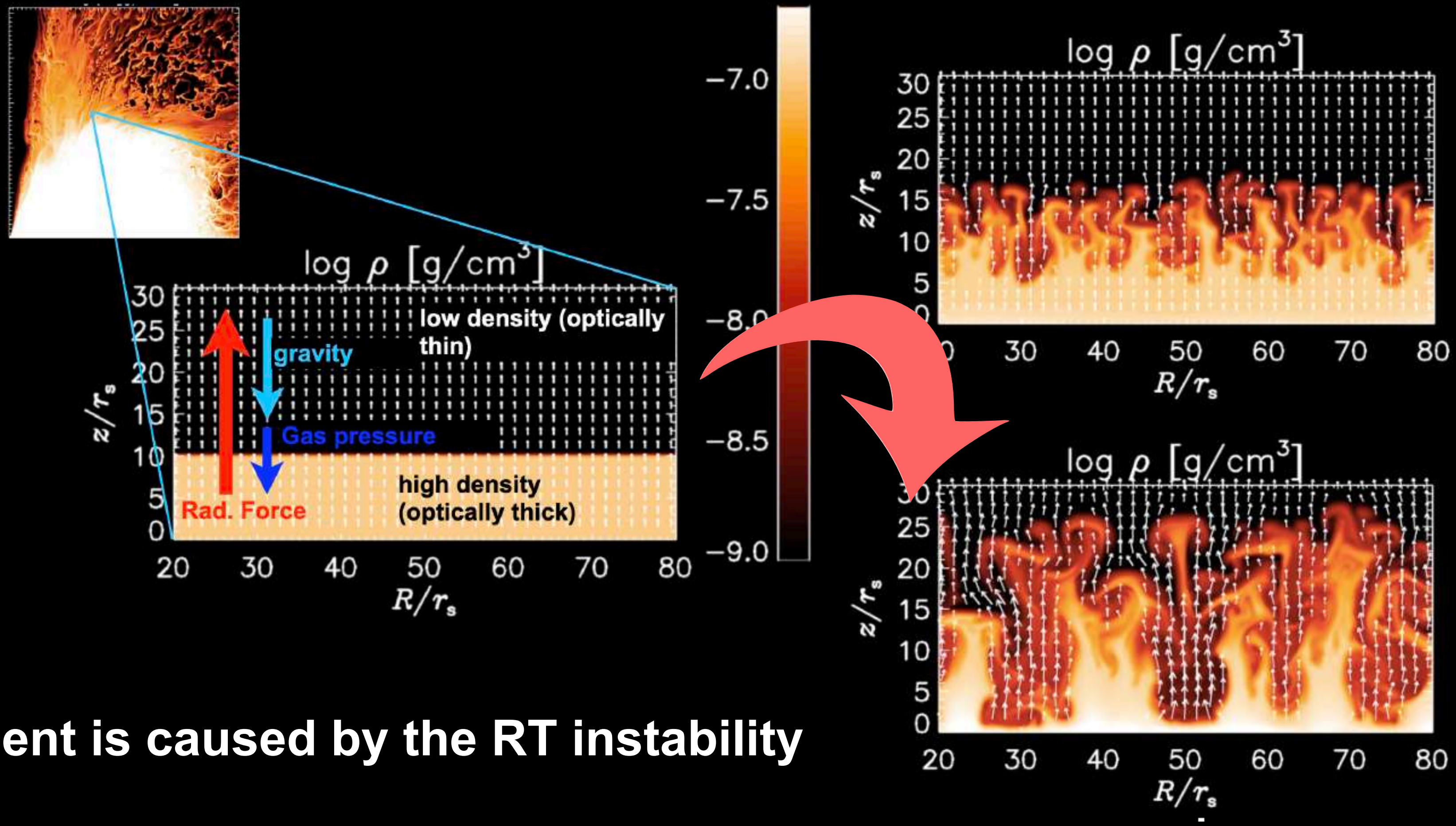
Takeuchi, Ohsuga, Mineshige. 2010

Acceleration via Radiation Flux Force



No acceleration because of Flux Force ~ Drag Force

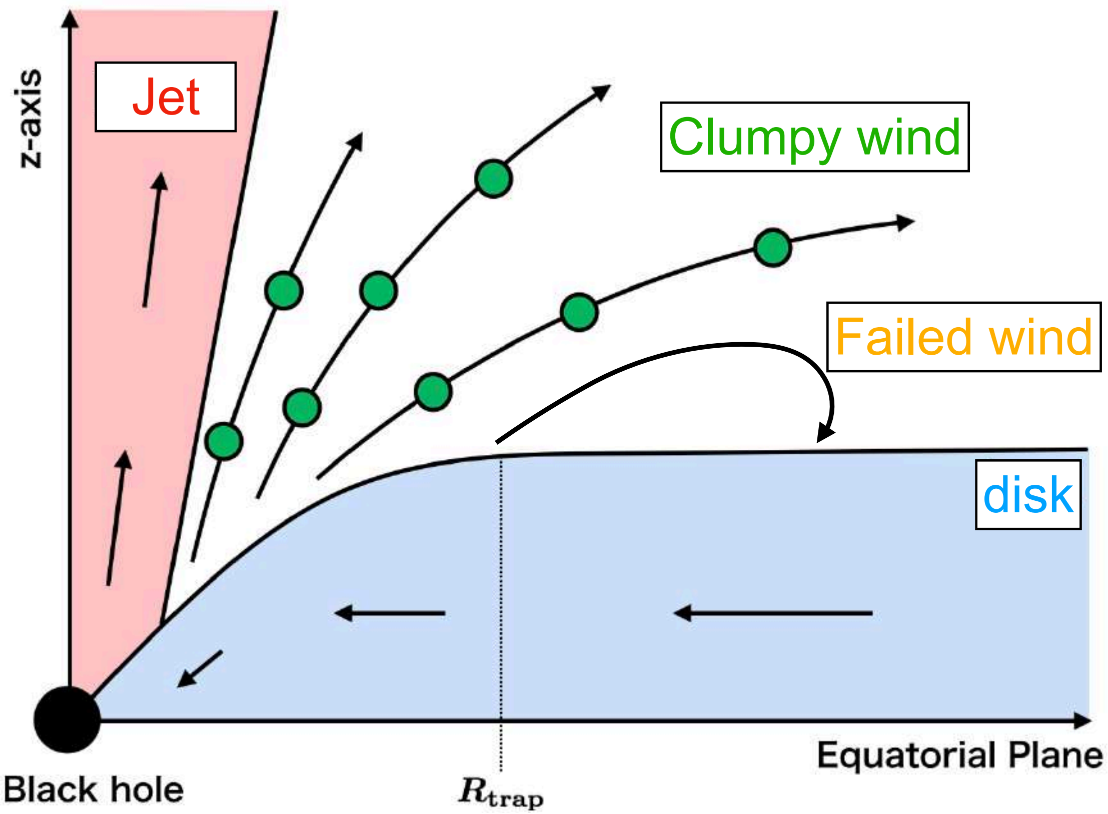
RT instability



Fragment is caused by the RT instability

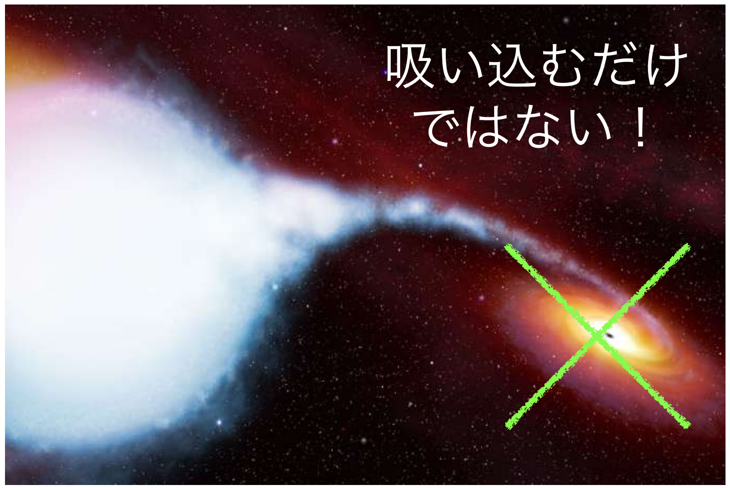
Overall structure of the super-Edd. disk

Schematic picture of the overall structure



Kitaki et al. 2021, Yoshioka et al. 2022

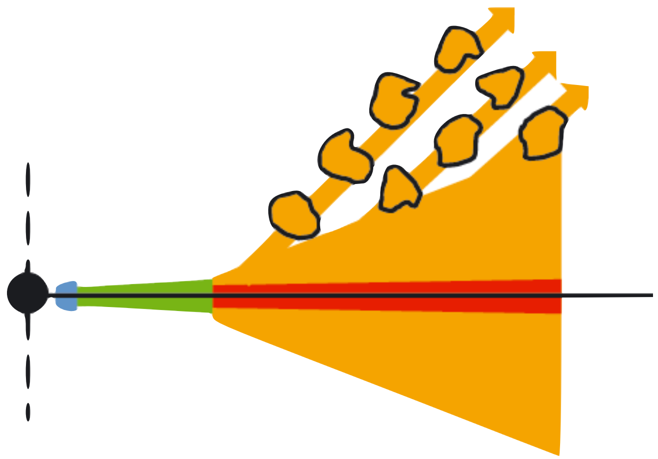
- Super-Eddington flows consist of radiation pressure-dominated disk, radiatively-driven high-velocity outflow around the rotation axis (jet), radiatively-driven clumpy disk wind.



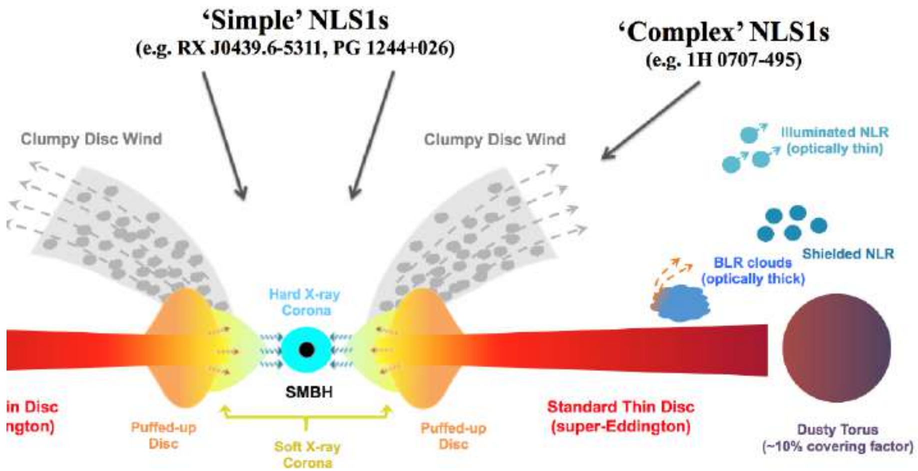
Schematic Picture based on Observations

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.



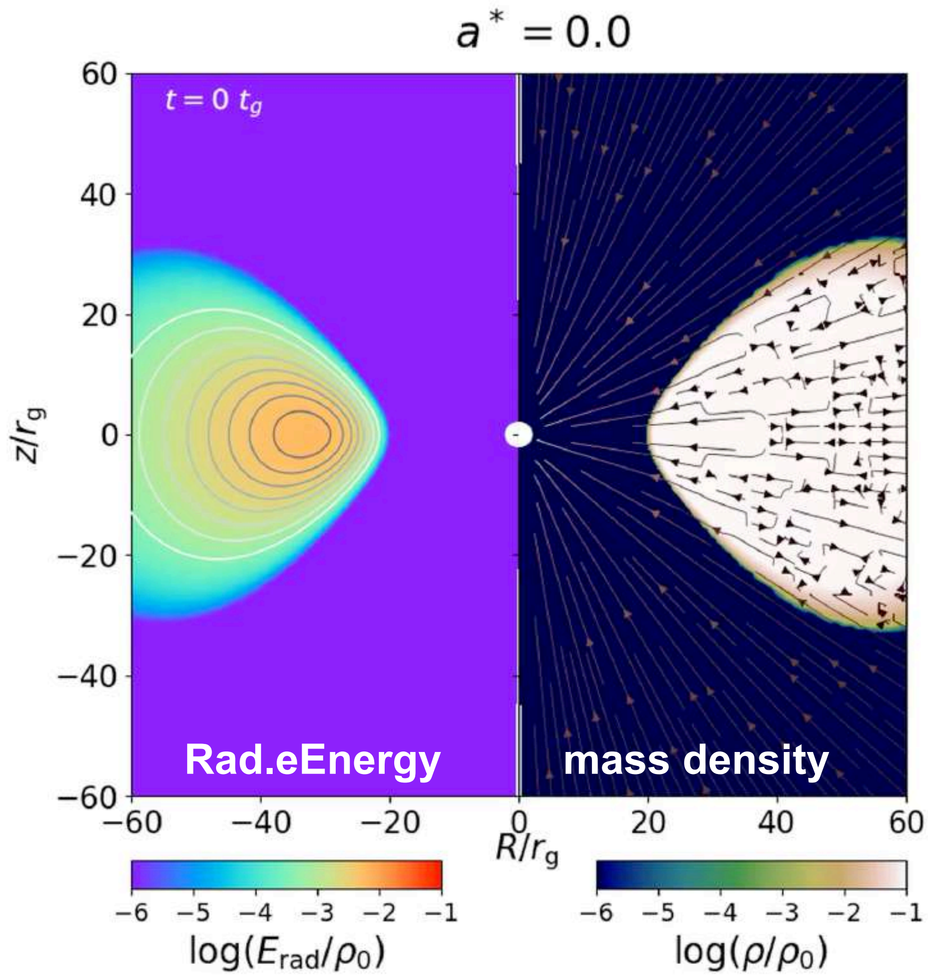
Middleton+11



Jin+17 see also Motta+17

Super-Eddington flows around Kerr BH

Utsumi, et al. 2022



<u>Setup</u>

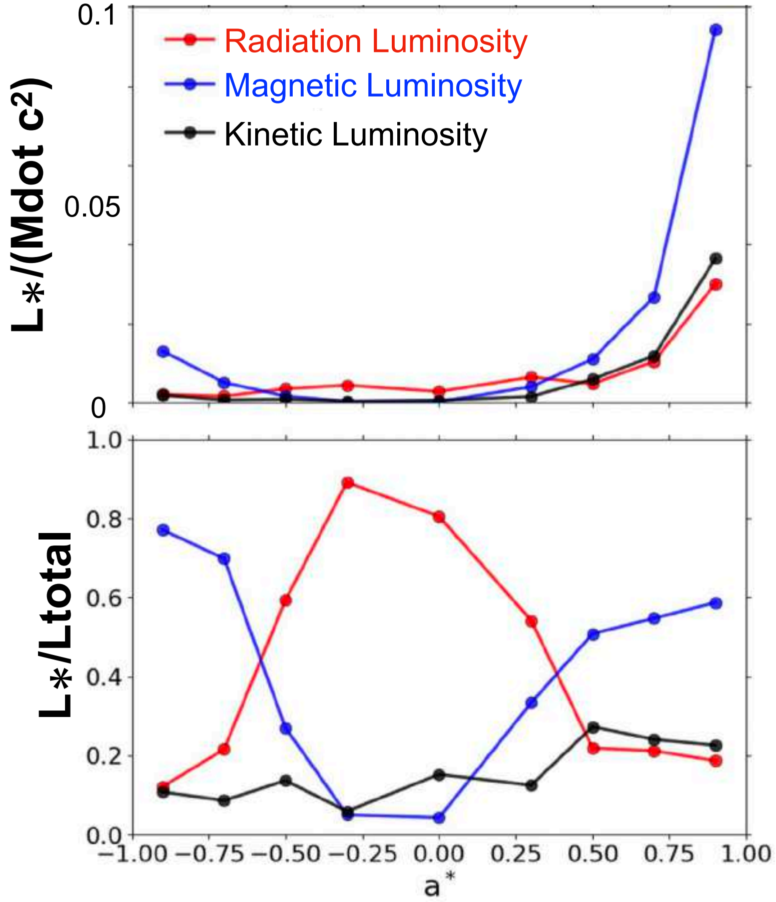
- BH mass: 10Msun
- Initial condition: equilibrium torus with embedded poloidal magnetic field (plasma-beta=100)
- Spin parameter: -0.9, -0.7, -0.5, -0.3, 0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9

<u>Quasi-steady structure</u>

- In all models, the super-Eddington disks (Mdot ~ a few 100L_{Edd}/c^2) and strong outflows are formed.

* Magnetic field is not so strong (SANE)

Energy Conversion Efficiency

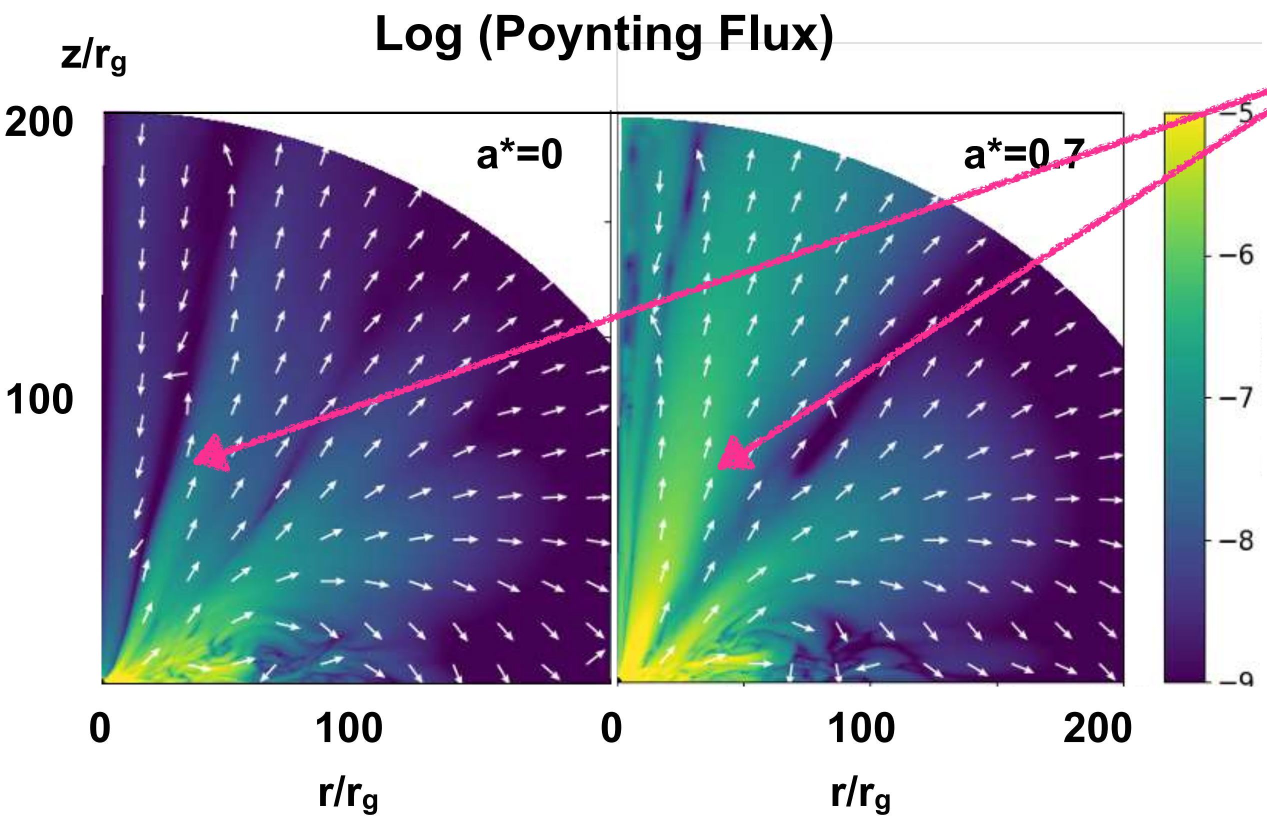


For the case of a*~0, energy is mainly released by the radiation. When |a*| is large, the energy released by the Poynting flux (Magnetic Luminosity) exceeds the Radiation Luminosity.

Radiation luminosity accounts for 80% when a* ~ 0. But the magnetic luminosity is three times larger than the radiation luminosity for the case of a* > 0.5.

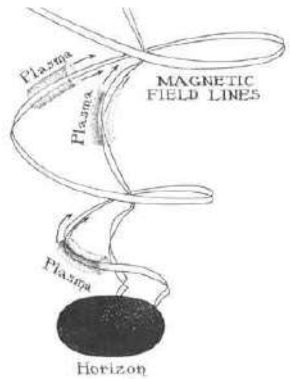
see also
Sadowski et al. 2014

Enhancement of Poynting Flux



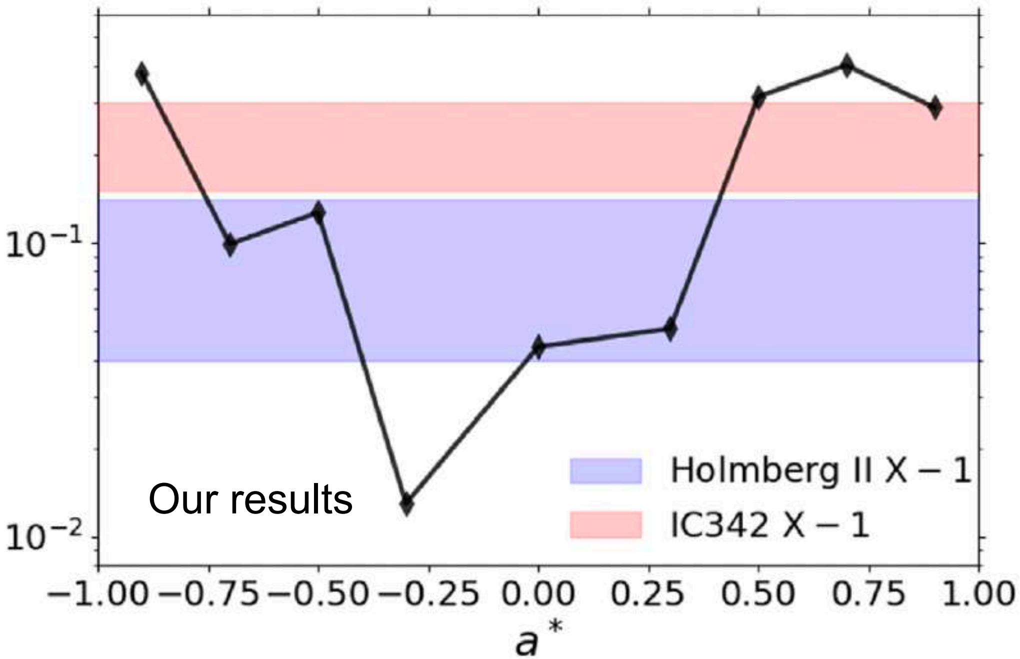
The Poynting flux around the rotation axis is stronger for larger |a*|. This is probably caused by **Blandford-Znajek (BZ) effect.**

BZ effects:
Rotating energy of black holes is extracted through magnetic fields lines (Blandford & Znajek 1977)



Are black holes in ULXs rotating?

Kinetic Luminosity/Isotropic X-ray Luminosity



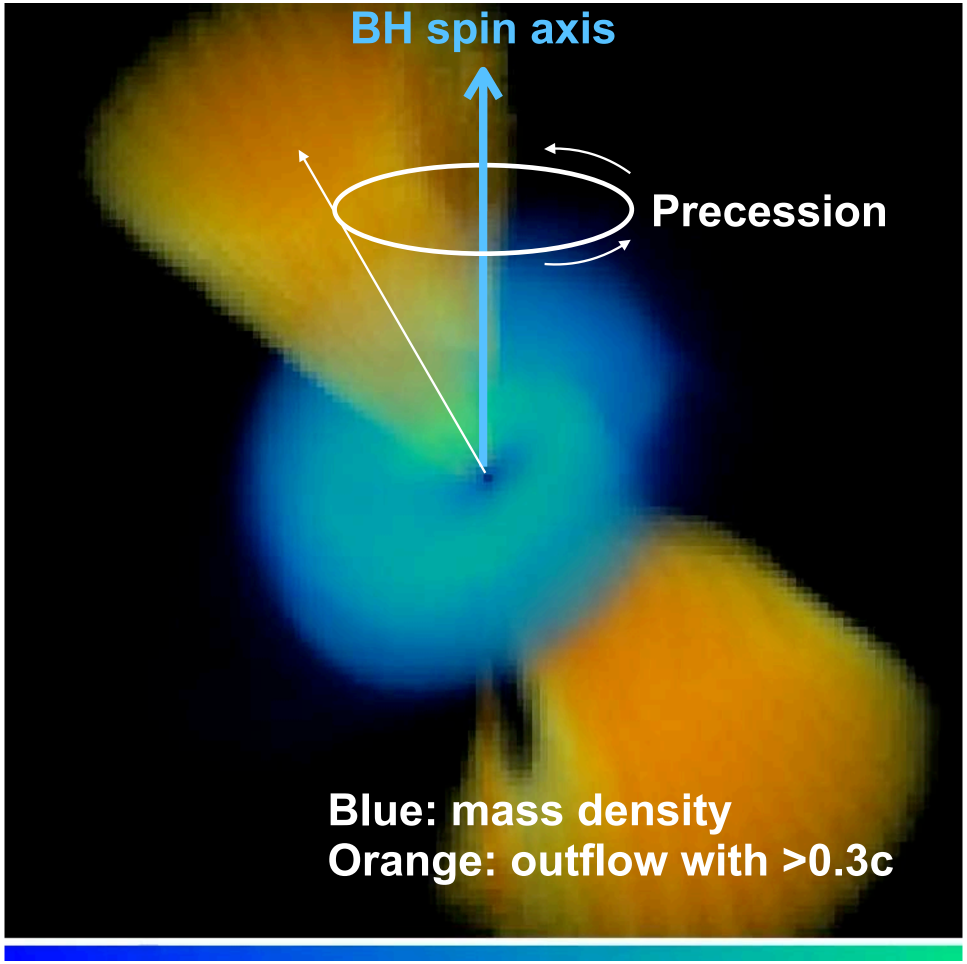
In our results, the ratio of the kinetic luminosity to isotropic X-ray luminosity tends to increase with |a*|.

Thus, rapidly (slowly) rotating black hole probably exist in IC342 X-1 (Holmberg II X-1).

Isotropic X-rau Luminosity:
Radiation luminosity observed by face-on observer.

Lense-Thirring Precession of Super-Edd. disk

Asahina, Ohsuga, submitted



Setup

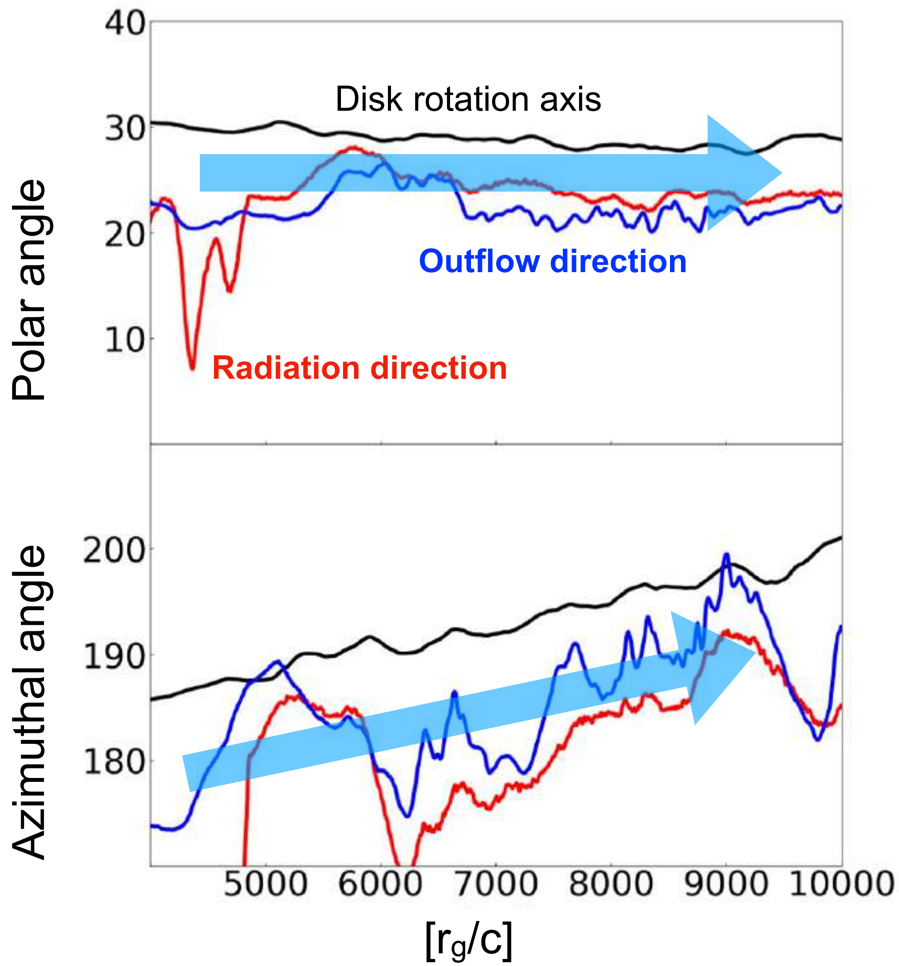
- BH mass: 10Msun
- Initial condition: equilibrium torus with embedded poloidal magnetic field (plasma-beta=100) tilted 30 degree.
- Spin parameter: 0.9

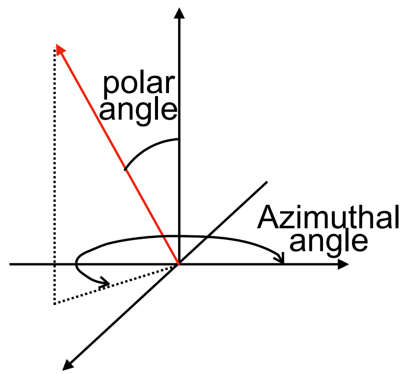
Inflow-outflow structure

- The super-Eddington disk, which is tilted and twisted, forms.
- Strong outflows are also formed.

- Accretion rate: several 100 L_{Edd}/c^2
- Radiation Luminosity: several L_{Edd}
- Kinetic Luminosity: several L_{Edd}

Precession of outflow & radiation





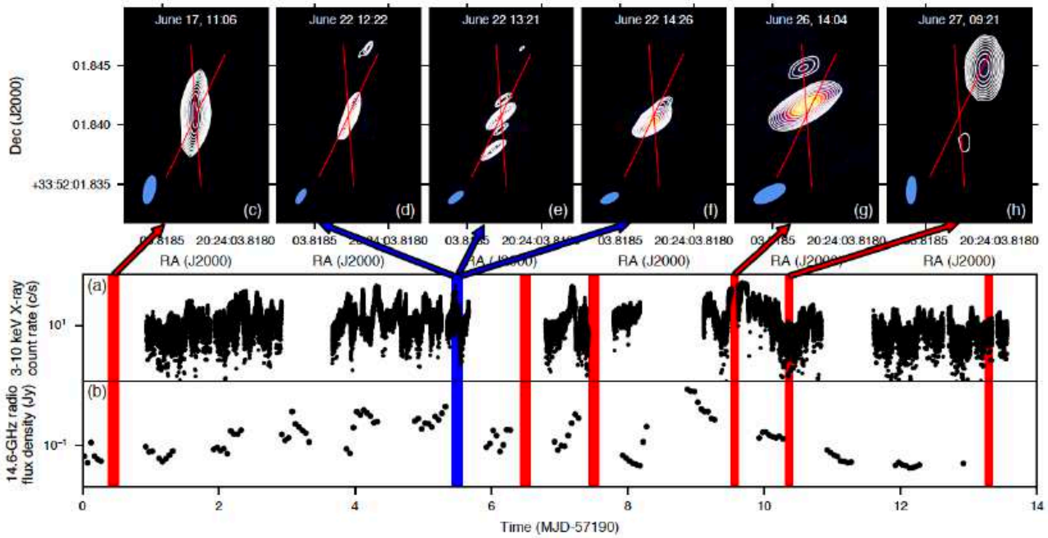
The jet and radiation are ejected in the direction of the disk rotation axis, not the BH spin axis.

We can see that the direction of outflow and radiation also changes according to the precessional motion of the disk.

Comparison with observations

[1] Quasi periodic oscillations of Ultra luminous X-ray sources:
The typical timescale of the precession is ~9sec for the case of stellar mass BH.
This timescale is consistent with the QPOs observed in some ULXs.

[2] Precession motion of jets in V404 Cygni:
The direction of jet is changing with time in V404 Cygni (Miller-Jones et al. 2019).
Such behavior is consistent with our calculations.



今後の展開：シミュレーションへのAIの導入

“シミュレーションとAIの融合で解明する 宇宙の構造と進化”

31の研究機関
92名の参加者

代表機関
筑波大学
計算科学研究センター・大須賀 健

AI班
協力機関:
東京大学, 筑波大学, 名古屋大学,
神戸大学, 理化学研究所

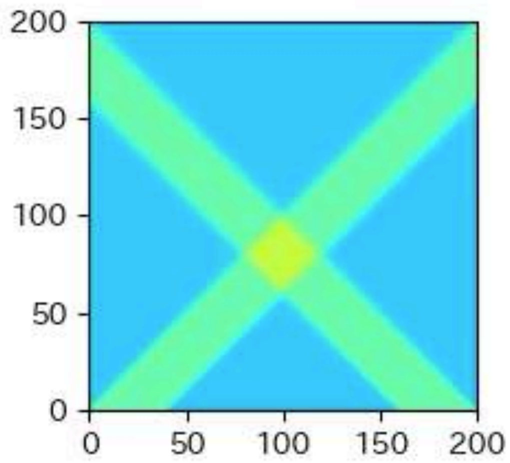
サブ課題A
大規模数値計算とAIの融合による宇宙の進化史の解明
宇宙大規模構造・銀河
協力機関:
東京大学, 千葉大学, 筑波大学
連携機関:
京都大学, 北海道大学,東北大学,
神戸大学,松江高専

サブ課題B
大規模シミュレーションで挑む星・惑星形成過程の階層横断的研究
分子雲・星・惑星
協力機関:
東北大学, 国立天文台, 北海道大学,
岡山大学
連携機関:
東京工業大学,大阪大学,東京大学,
神戸大学,京都女子大,名古屋大学

サブ課題C
ブラックホールと中性子星を核にした爆発的天体現象の解明
超新星爆発,
ブラックホール, 中性子星
協力機関:
国立天文台,千葉大学,早稲田大学,
沼津高専,東邦大学,京都大学
連携機関:
駒澤大学, 弘前大学, 東京大学, 九州大学,
東北大学, 福岡大学, KEK, 他

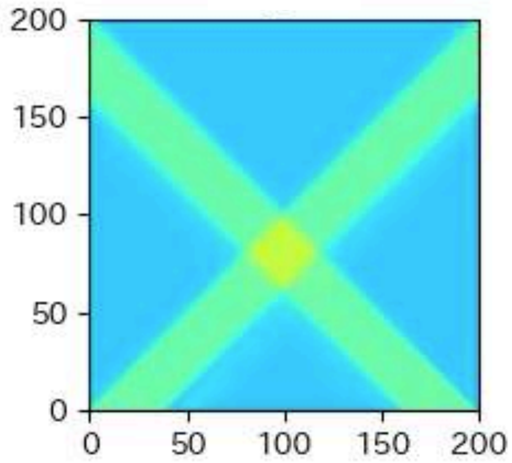
サブ課題D
恒星活動の多様性と惑星環境のダイナミクスの解明
恒星活動・惑星環境
協力機関:
名古屋大学, 神戸大学
連携機関:
東京大学, 京都大学, 国立天文台, 新潟大学, 山形大学,コロラド大学,北海道情報大学,松江高専,東北大学., 九州大学, 他

機械学習のテスト：光ビームの交差問題



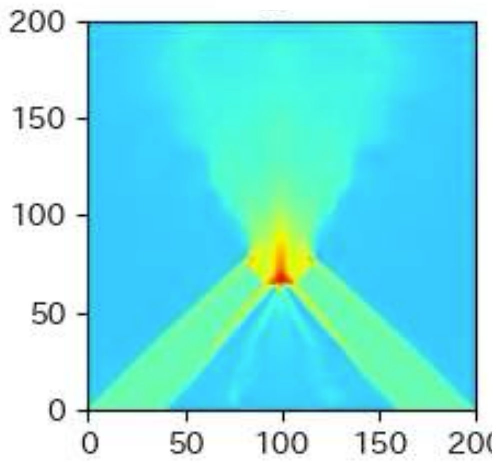
ボルツマン法（VET法）

- 正確に解ける
- 計算時間：12分



機械学習モデル

- 正確に解ける
- 計算時間：3分



近似法（M1法）

- 正確に解けない
- 計算時間：2分

上野君＠筑波大の結果

まとめ

降着円盤の理論的研究は,スーパーコンピュータシミュレーションによって大幅に進化してきました. 磁気流体, 輻射, 重力（一般相対論）が正確に解ける時代に突入しています.

ただし, より効率的な計算や観測との速やかな連携のため, 機械学習を有効利用するのが今後の課題です（GPUも大事）.

牧野さん, 今後もよろしくお願いします.