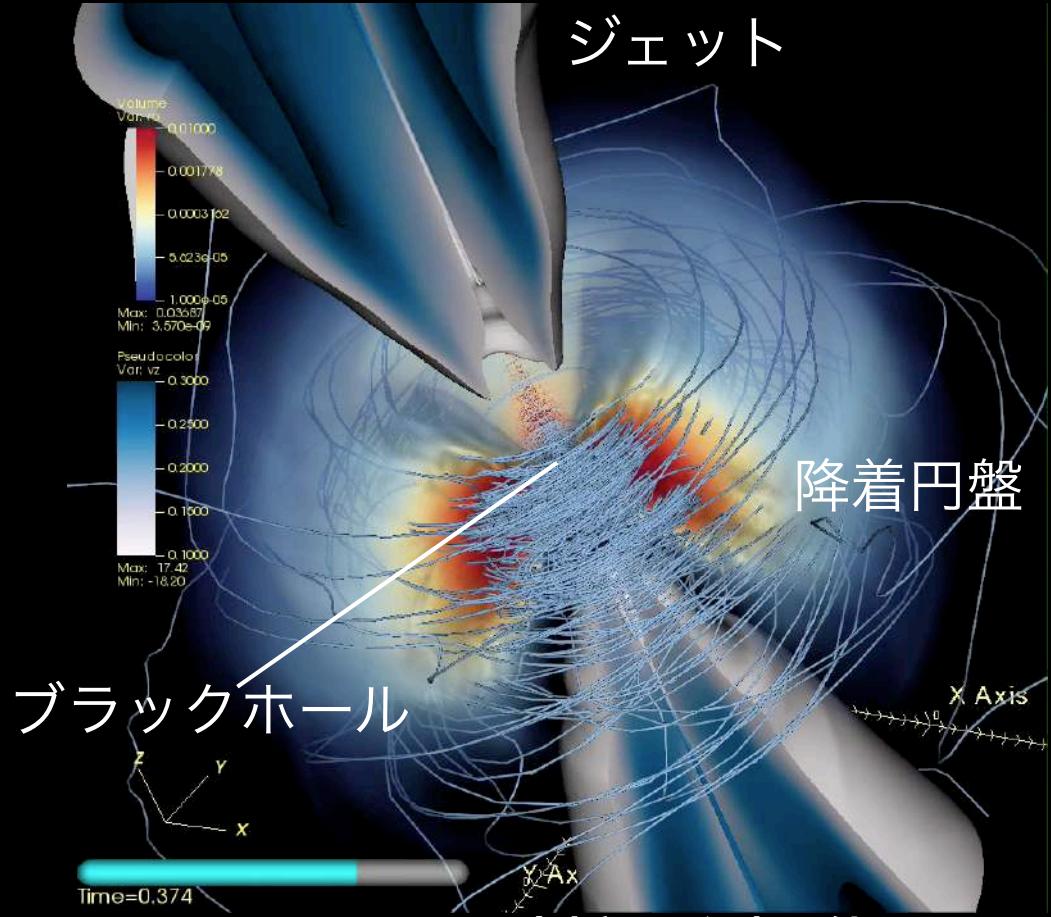
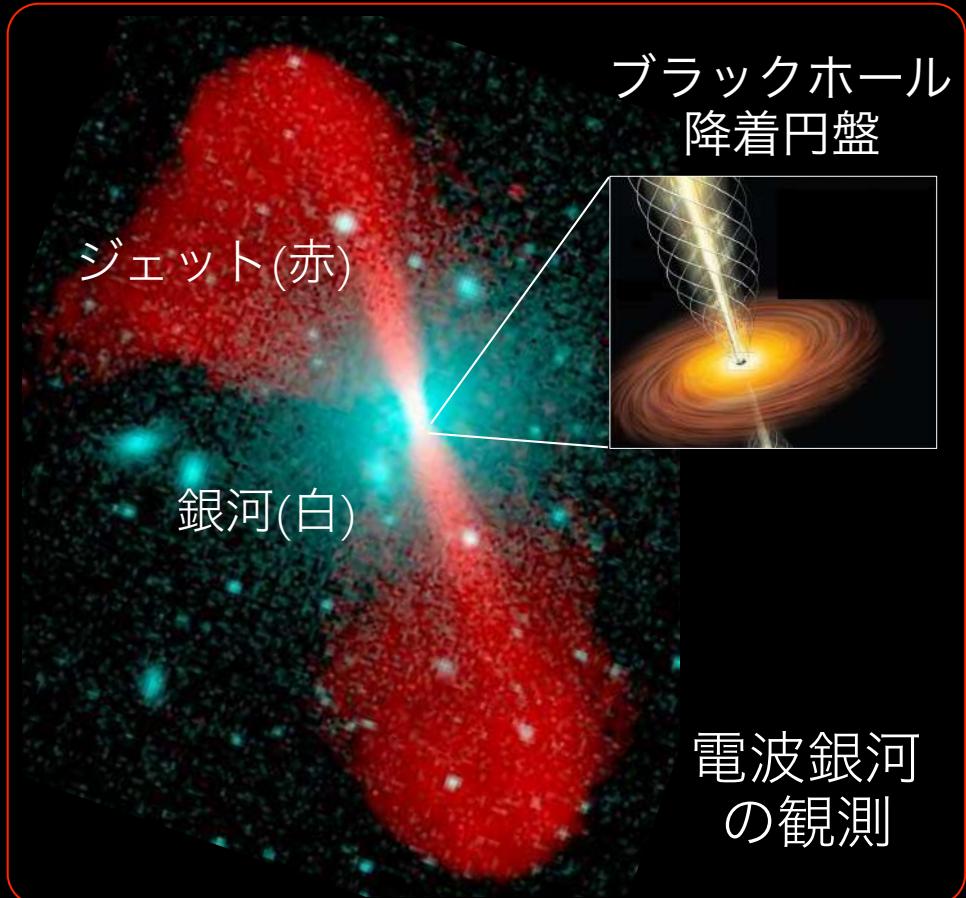


超エディントン降着の物理



大須賀 健

高橋博之, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 小林弘 (国立天文台), 野村真理子(東北大),
Chis Done(ダーラム大), 小川巧未, 北木孝明, 竹尾英俊, 恒任優, 嶺重慎(京大),
都丸亮太, 高橋忠幸(IPMU), 稲吉恒平(コロンビア大), 吉田鉄生(愛媛大)

ブラックホール；百年の歴史

1916年：
一般相対論の発表
シュヴァルツシルト時空発見

aigneau



1930年代：
チャンドラセカール質量の発見

Hoyle



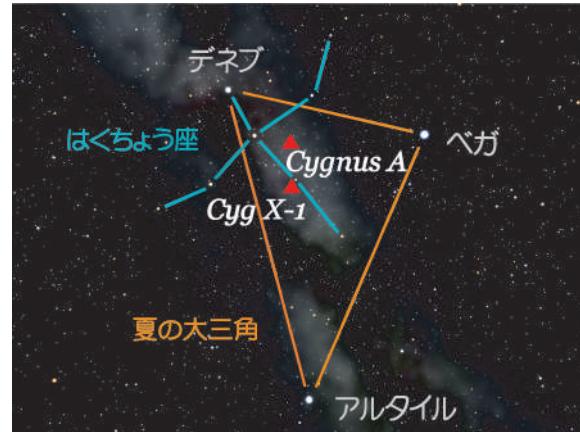
20世紀中盤：
ブラックホールが理論的に証明

Chandrasekhar

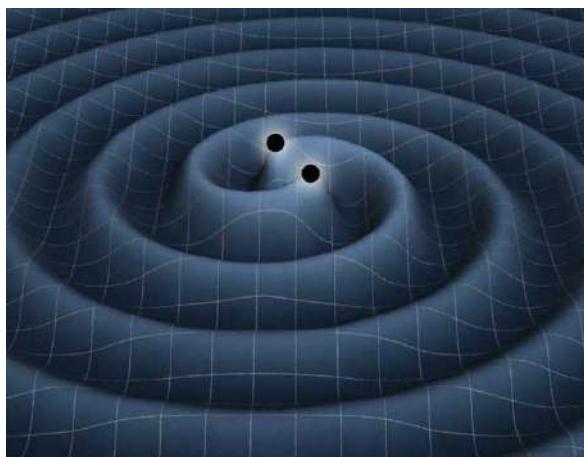


ブラックホール；百年の歴史

1970年代：
はくちょう座でブラックホール発見！

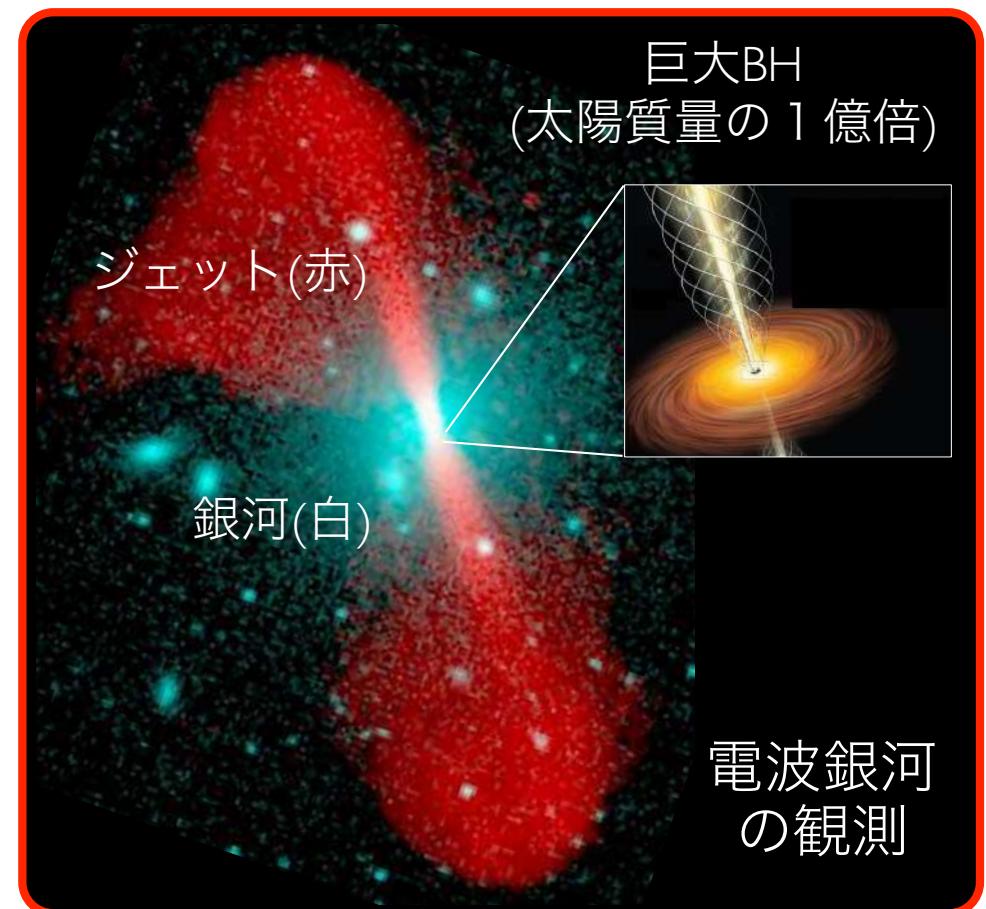
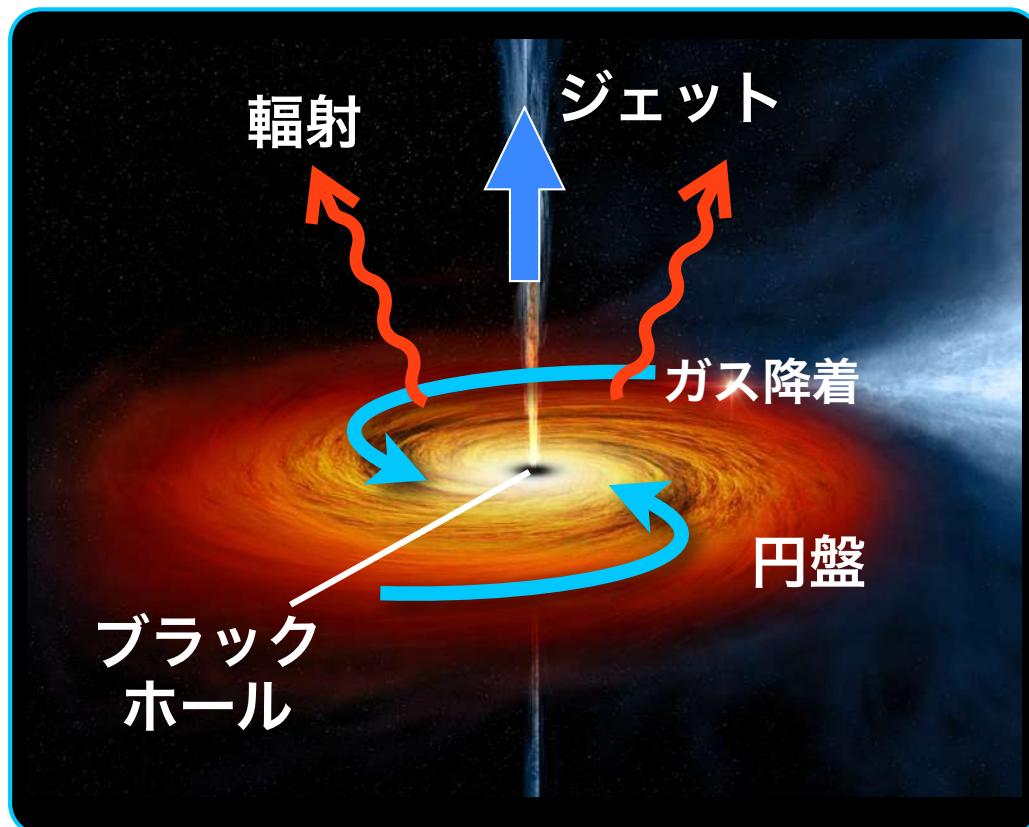


2015年：
重力波の検出でブラックホールの
存在がより確実に！



ブラックホール降着円盤

ブラックホールがガスを吸い込み、
強力なジェットや輻射が発生する



宇宙最高のエネルギー変換所

降着円盤の多様性

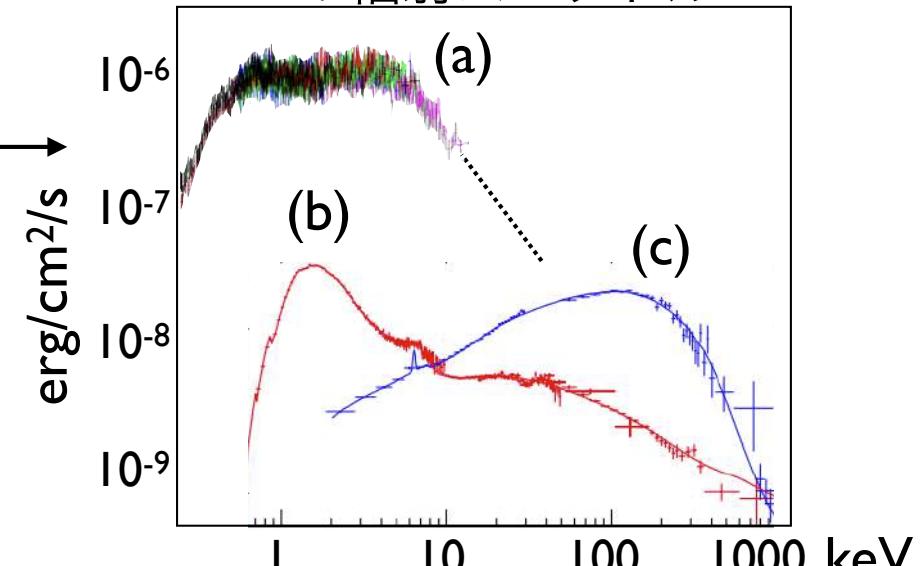
3種の輻射スペクトラルステート

見え方が全然ちがう →

多様な円盤状態が存在する！

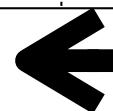
* $M_{\text{BH}} \sim 10$ 太陽質量の場合

ブラックホール天体
の輻射スペクトル



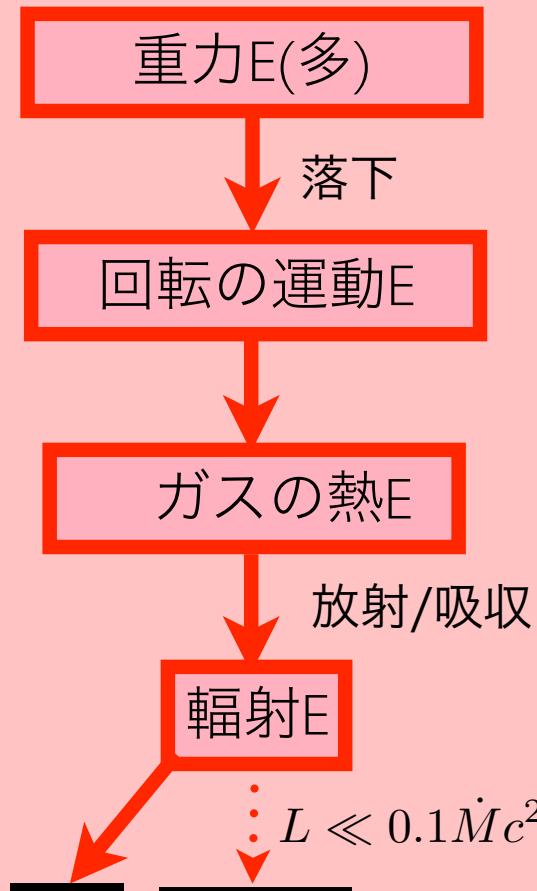
	(a)スリム円盤	(b)標準円盤	(c)RIAF/ADAF
構造の概観			
温度 (エネルギー) *	10^8K (10keV)	10^7K (1keV)	10^9K (100keV)
変換効率	$\lesssim 1\%$	10-40%	$<< 1\%$

質量降着率



スリム円盤

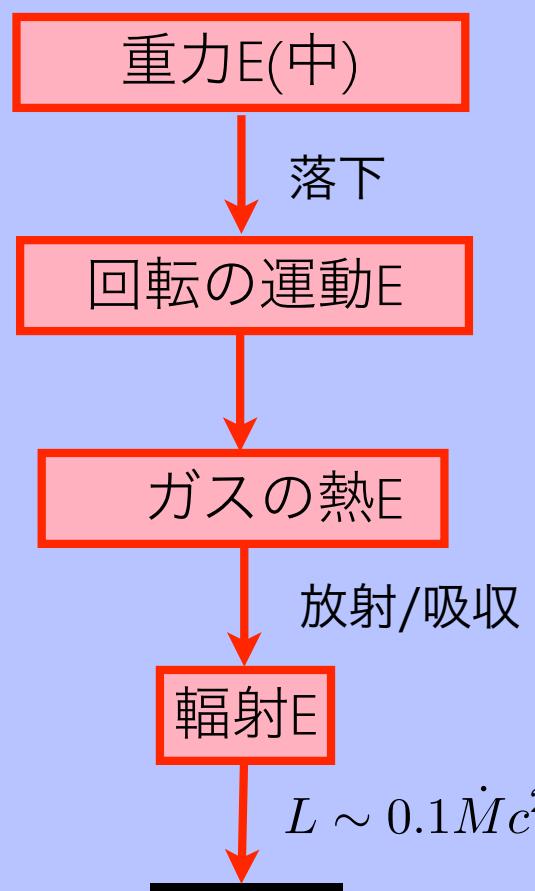
Abramowicz et al. 88



<Black body>
ULXs, NLS1s

標準円盤

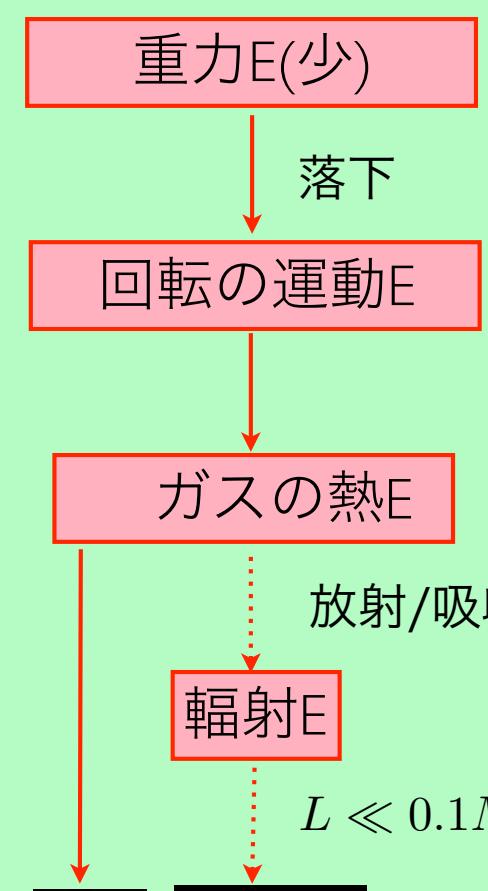
Shakura & Sunyaev 73



<Black body>
high-soft state
Seyfert, QSOs

ADAF/RIAF

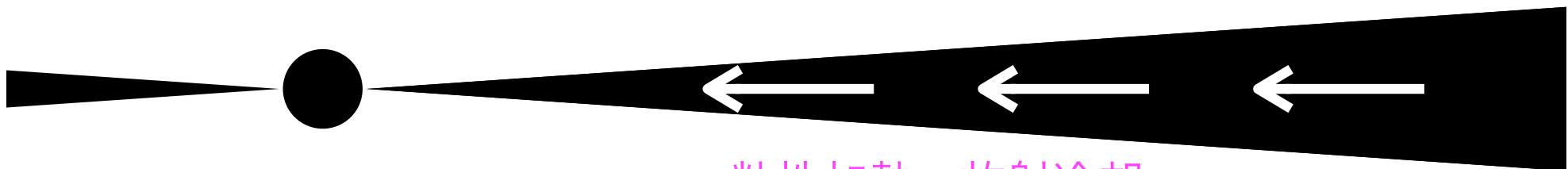
Ichimaru 77; Narayan, Yi 94



<PL emission>
low-hard state
LAGNs

標準円盤理論

幾何学的に薄く、光学的に厚い円盤モデル

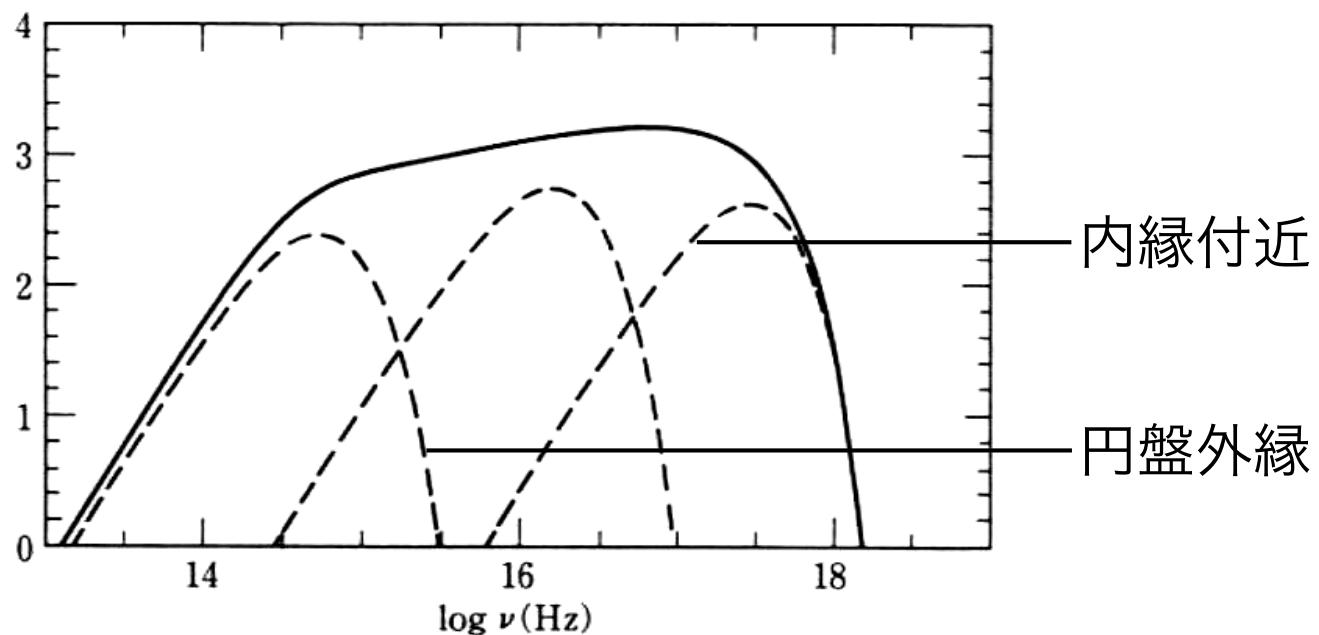


粘性加熱＝放射冷却

比較的低温（10万度～1千万度）で黒体輻射

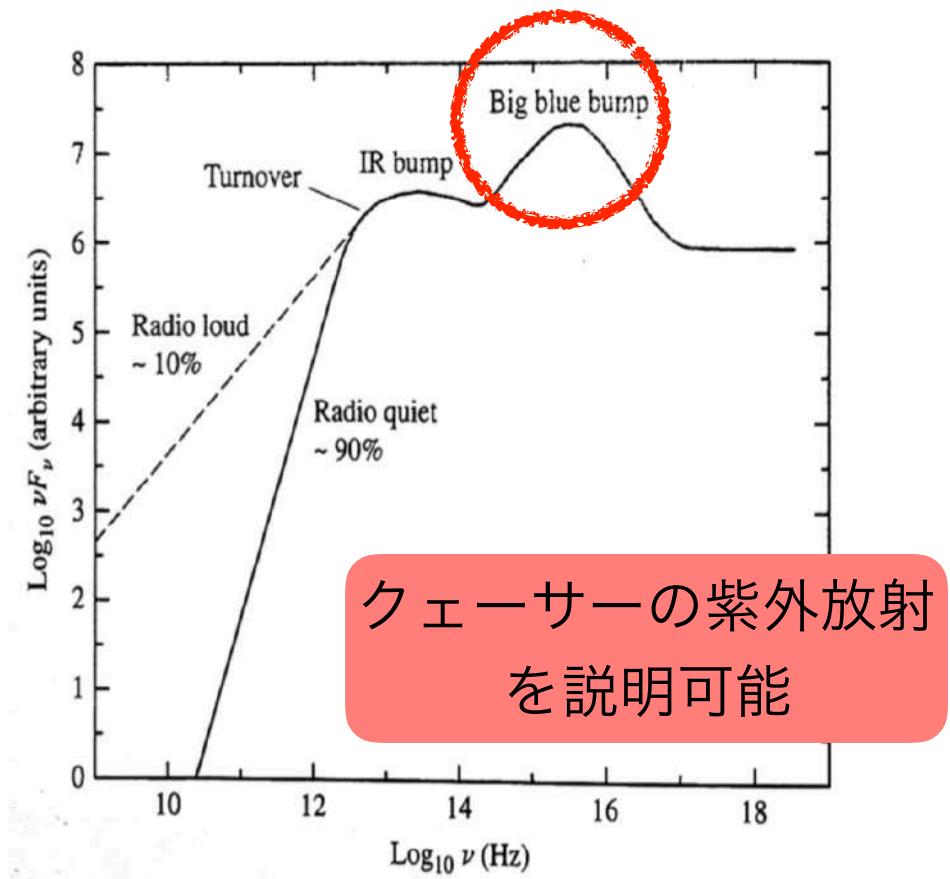
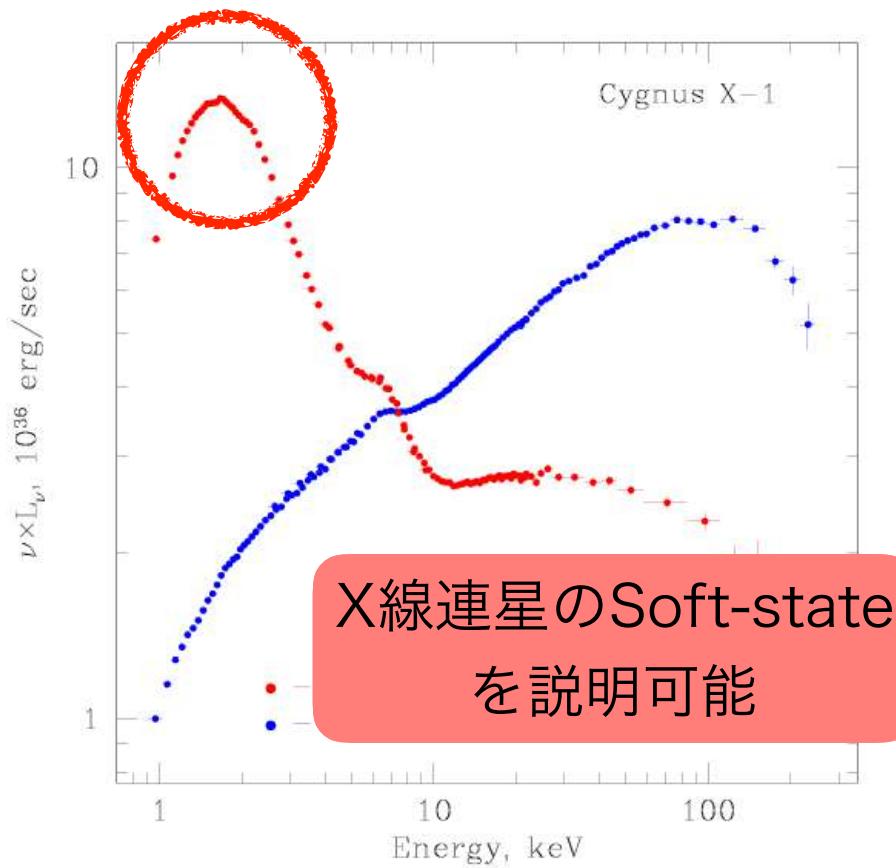
最大の特徴は
多温度黒体輻射

$$T_{\text{eff}} \propto r^{-3/4}$$



標準円盤の成功

コンパクトで明るいという特徴を説明可能！

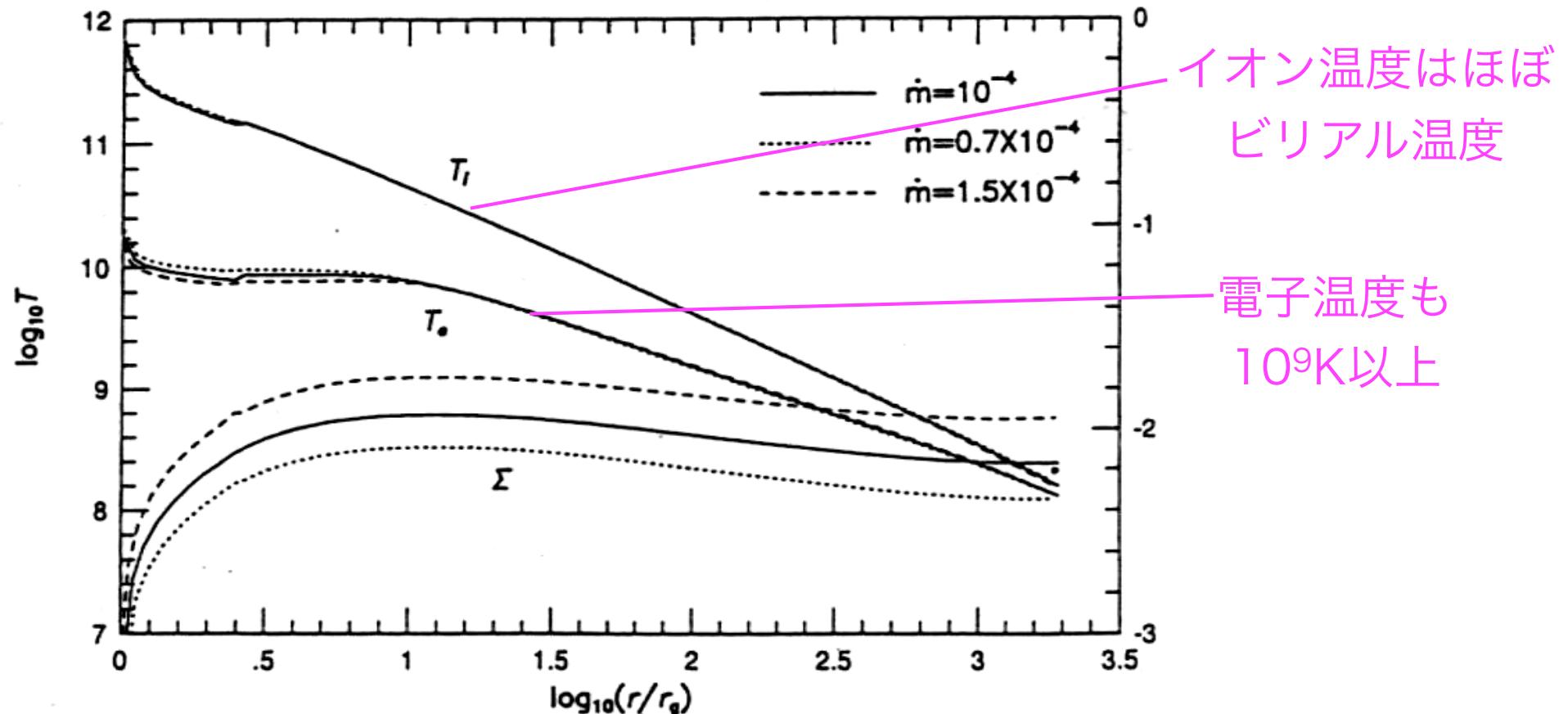


RIAFの特徴

幾何学的に厚く、光学的に薄い円盤モデル
質量降着率の小さい状況で発生

質量降着率の最大値
 $\dot{M} < 3\alpha^2 L_{\text{Edd}}/c^2$

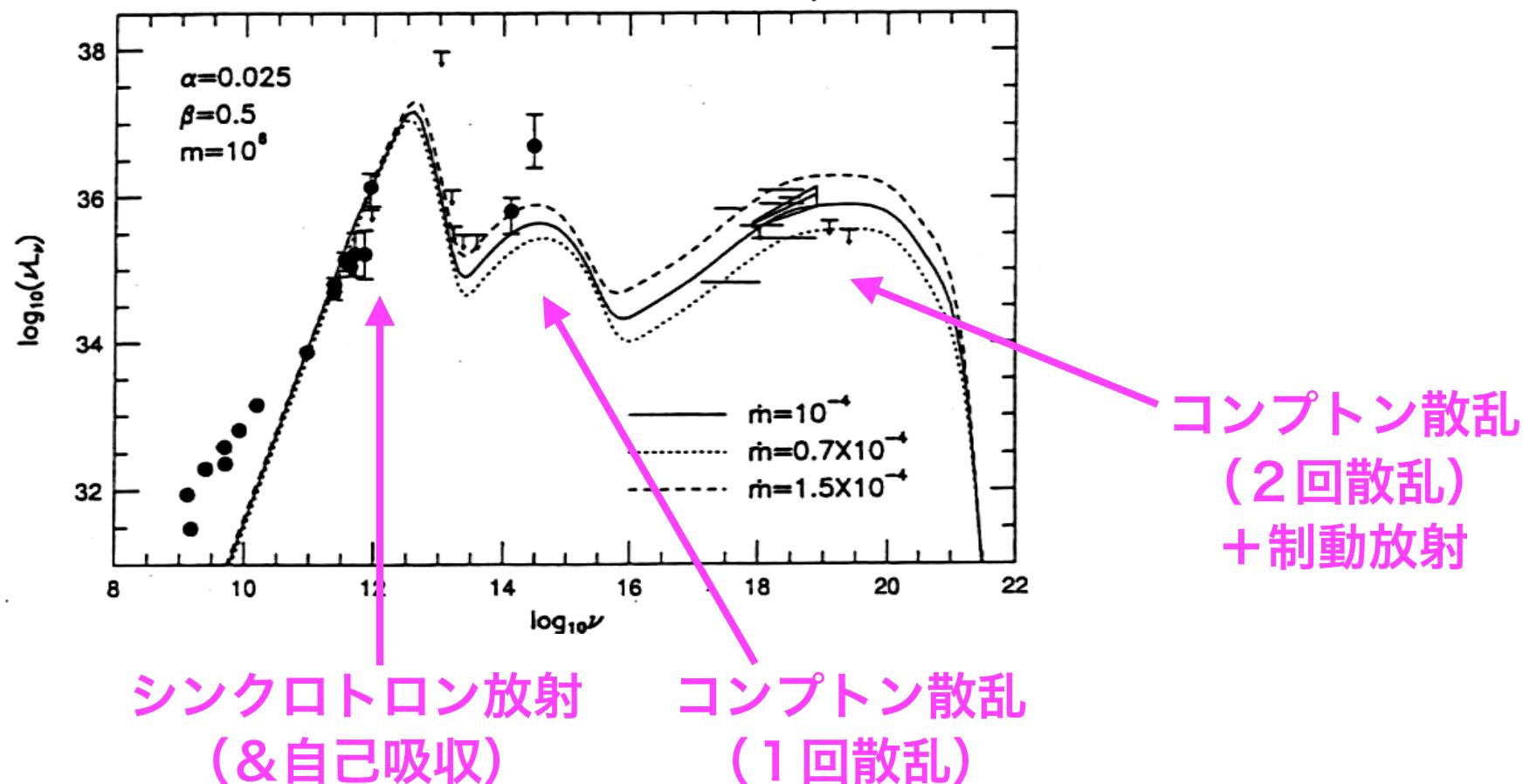
RIAFの数値解 (Manmoto et al. 1997)



RIAFの成功

SgrA*の観測データとRIAFの輻射スペクトル

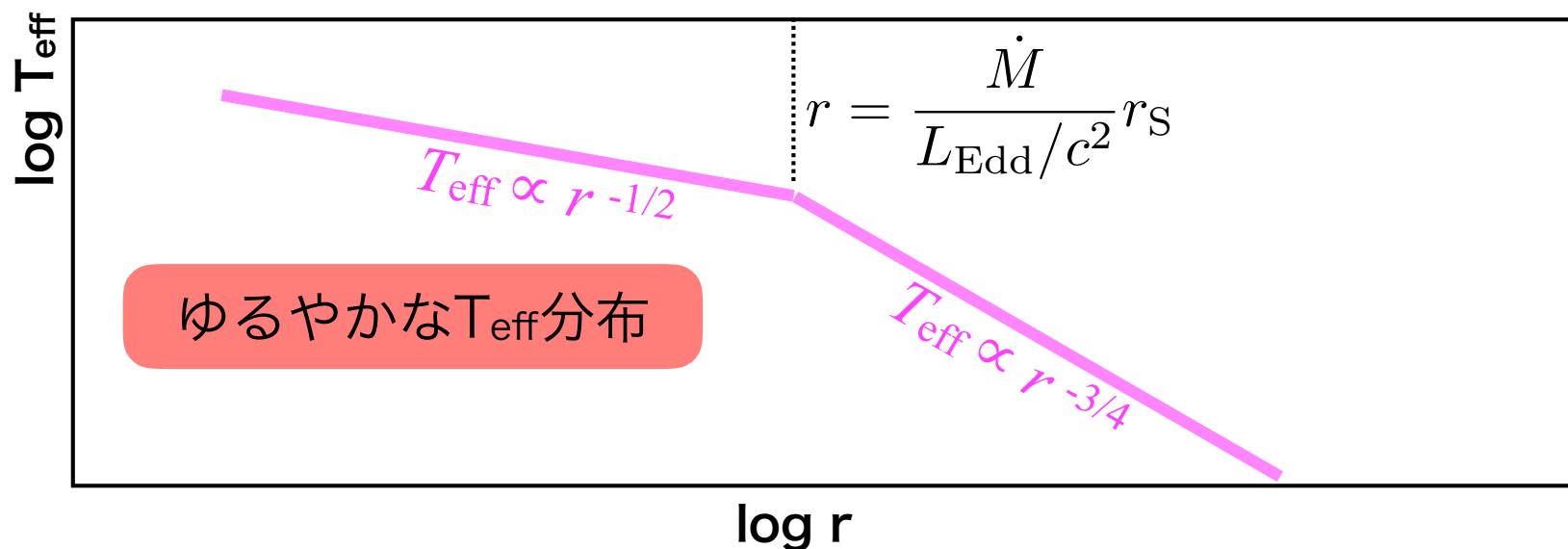
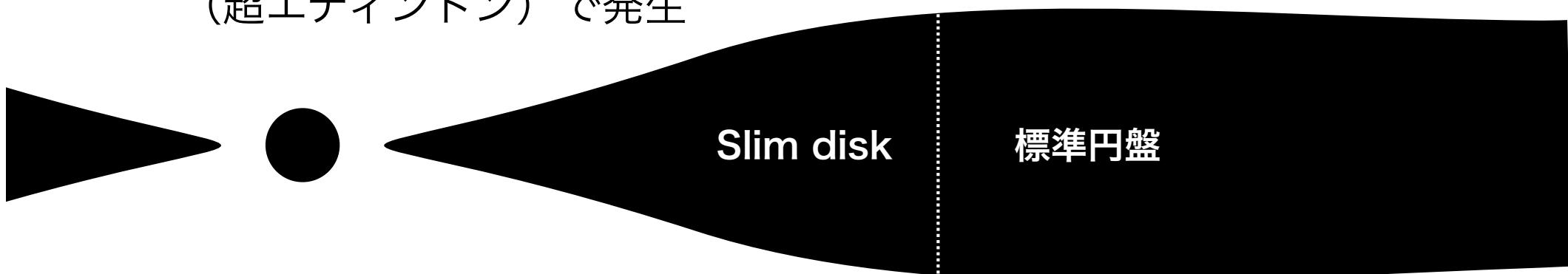
(Manmoto et al. 1997)



スリム円盤の性質

幾何学的にも光学的に厚いモデル
質量降着率の大きい状況
(超エディントン) で発生

円盤光度 > エディントン光度



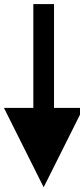
エディントン限界

エディトン限界

輻射圧が重力を超えると降着不可能

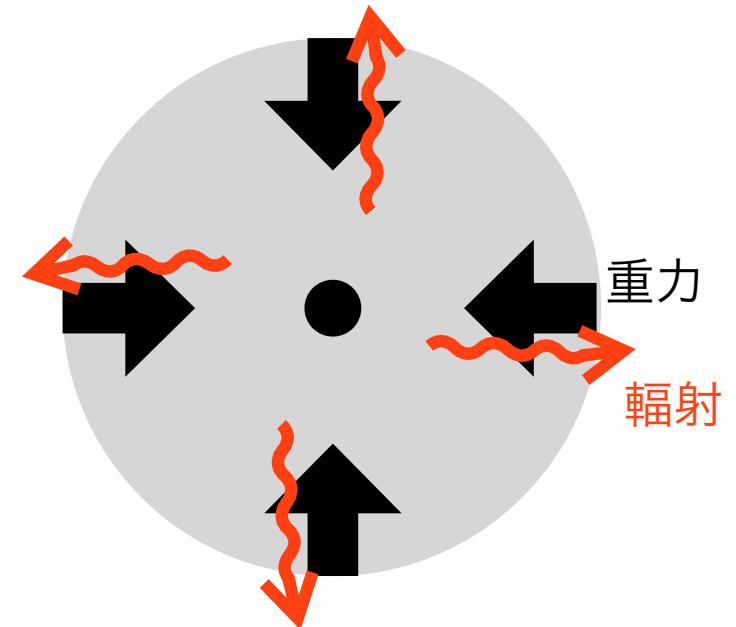
条件：(重力) (輻射力)

$$\frac{GM}{r^2} > \frac{\sigma_T}{cm_p} \frac{L}{4\pi r^2}$$



エディントン光度 (光度の上限)

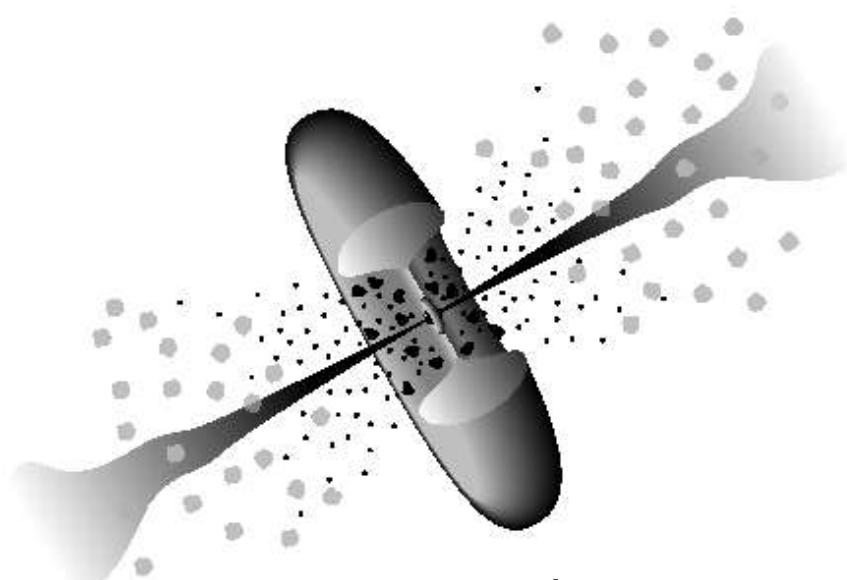
$$L < L_E = \frac{4\pi c G M m_p}{\sigma_T}$$



臨界降着率 (質量降着率の上限)

$$\dot{M} < (1 - 10) \frac{L_E}{c^2}$$

突破すると何がうれしい？



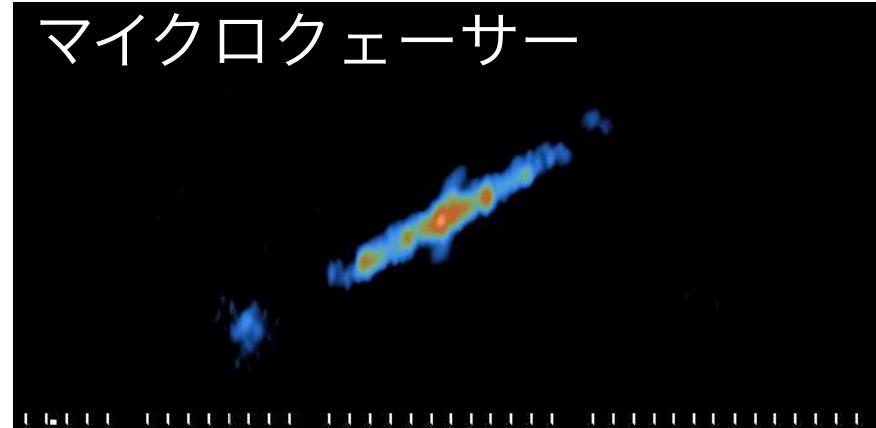
AGNの一部

(ex: 狹輝線I型セイファート)

標準円盤モデルでは説明
できない高光度天体を説
明できる



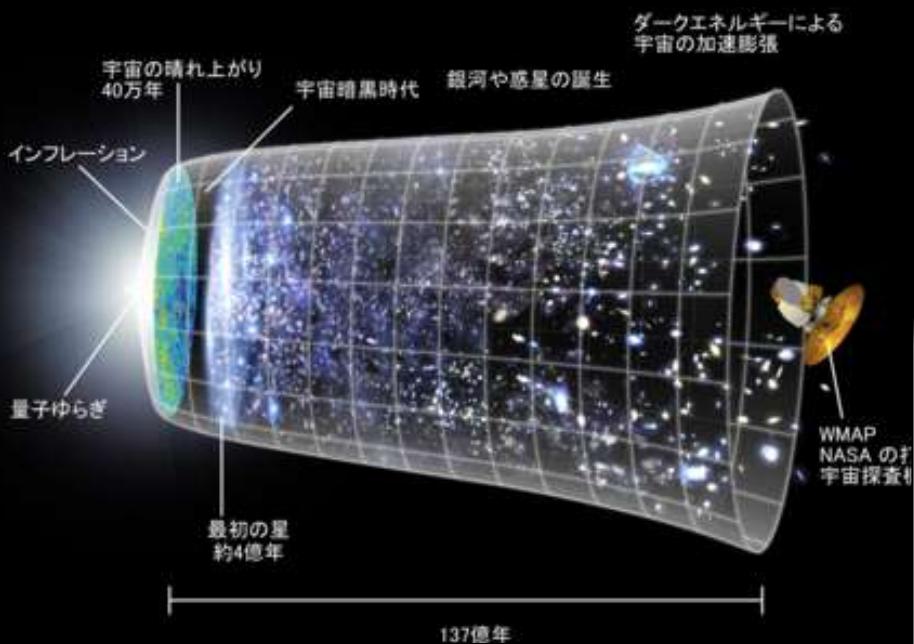
マイクロクエーサー



突破すると何がうれしい？

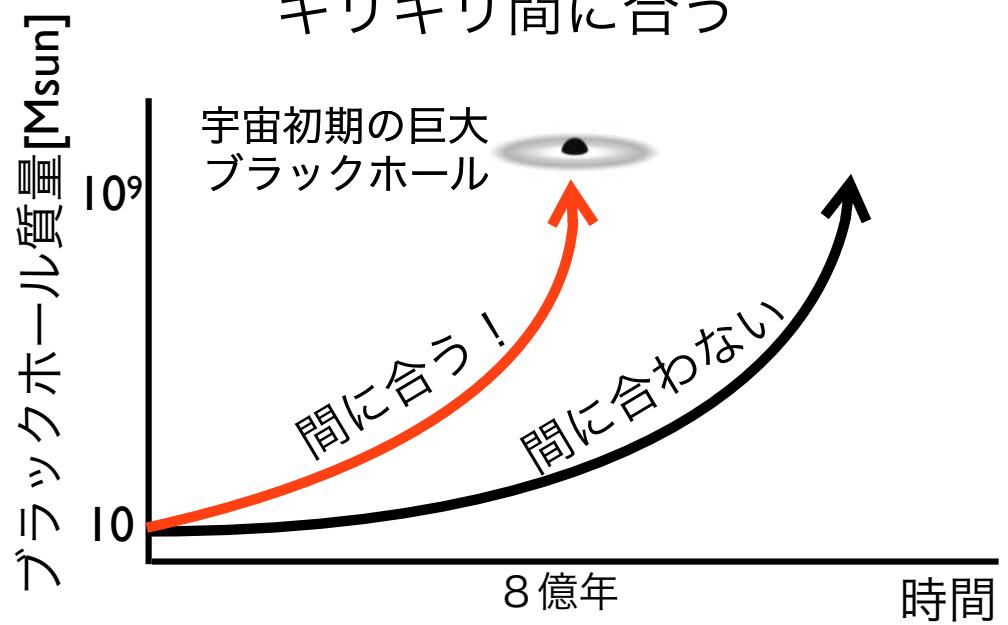
$z=7.1$ の QSO

Mortlock et al. 2011



限界を突破すれば、宇宙初期の
超巨大ブラックホールが形成可能

超エディントン降着なら
ギリギリ間に合う



研究目的・研究手法

「エディントン限界を突破できるか？」

1970年代からの論争に決着をつけたい

そのため、輻射（磁気）流体

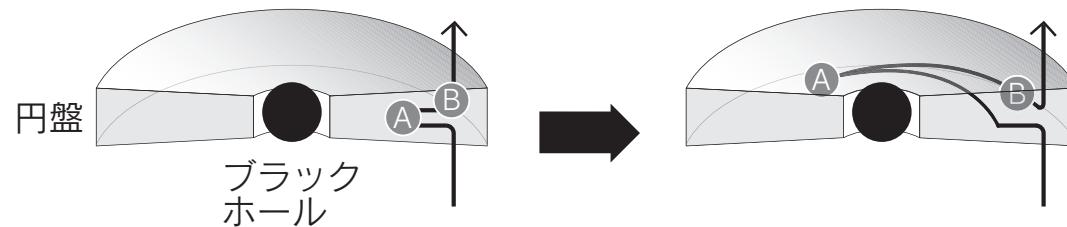
シミュレーションを実施する

降着円盤での磁場の重要性

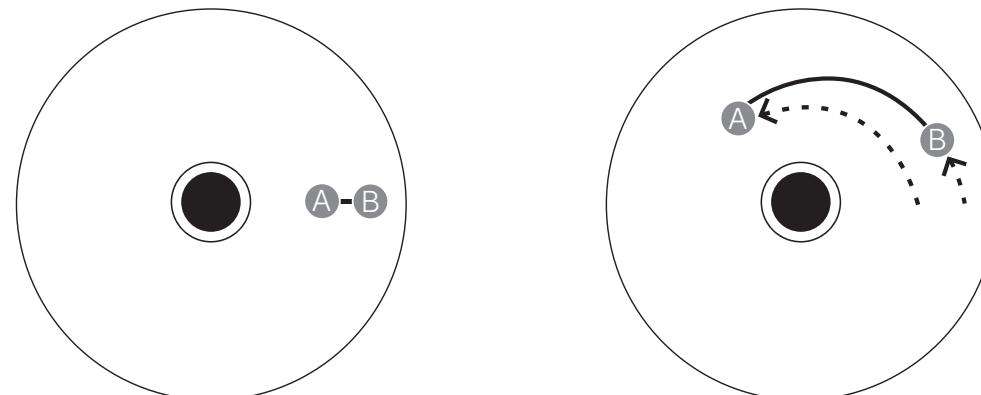
磁気回転不安定

磁場を介して、角運動量が輸送される。

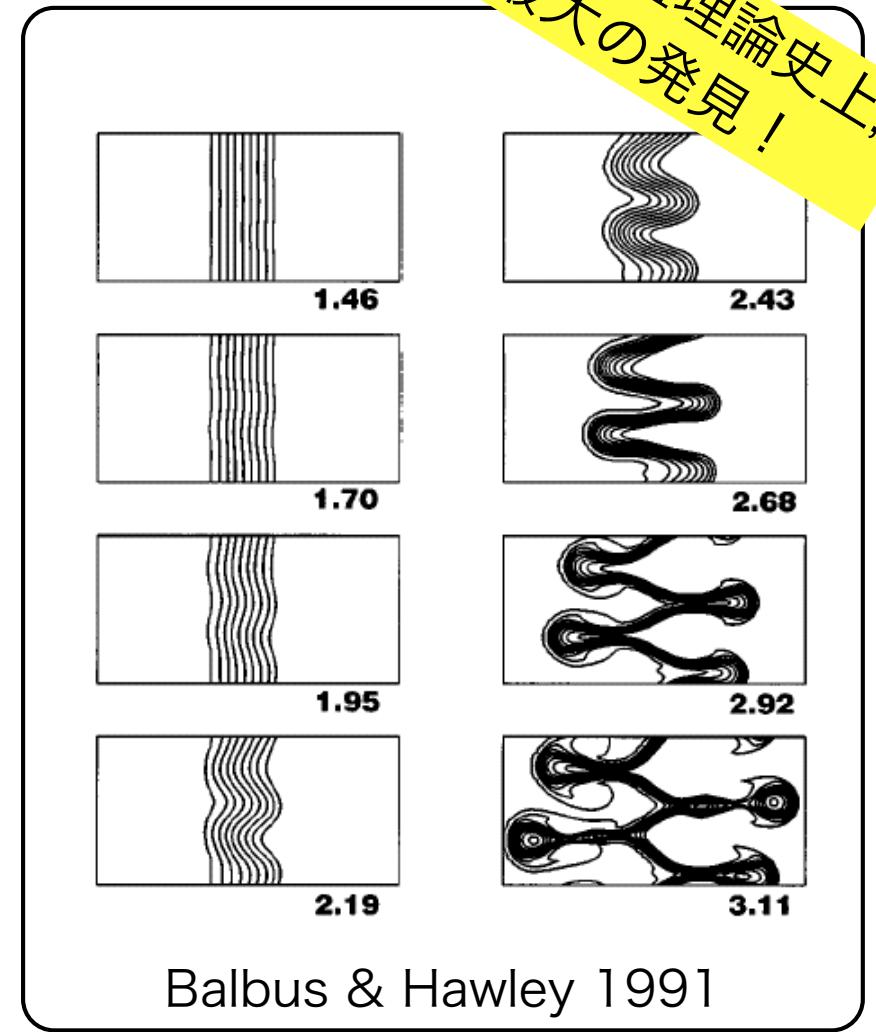
・真横から見た断面図



・真上から見た図



降着円盤理論史上、
最大の発見！



降着円盤での磁場の重要性

①角運動量輸送（ガス降着の起源）

磁気回転不安定

②磁場増幅→エネルギー散逸（円盤加熱の起源）

磁気回転不安定, 磁気浮力不安定, 磁気再結合

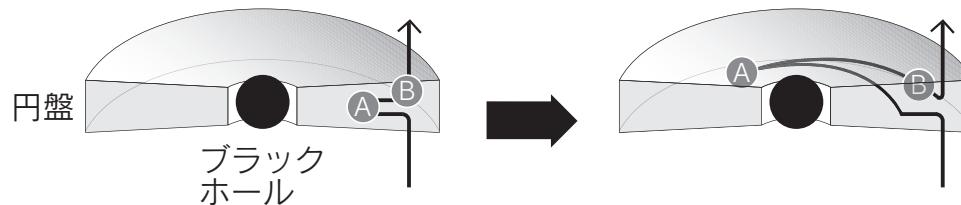
③磁場加速（ジェットの起源？）

磁気回転不安定, 磁気浮力不安定, 磁気再結合

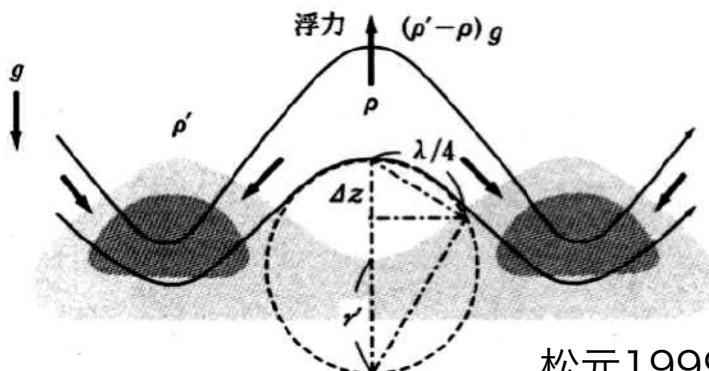
α 粘性モデルで代用
する場合もあり

磁気回転不安定：
角運動量を輸送しつつ,
回転方向の磁場を増幅

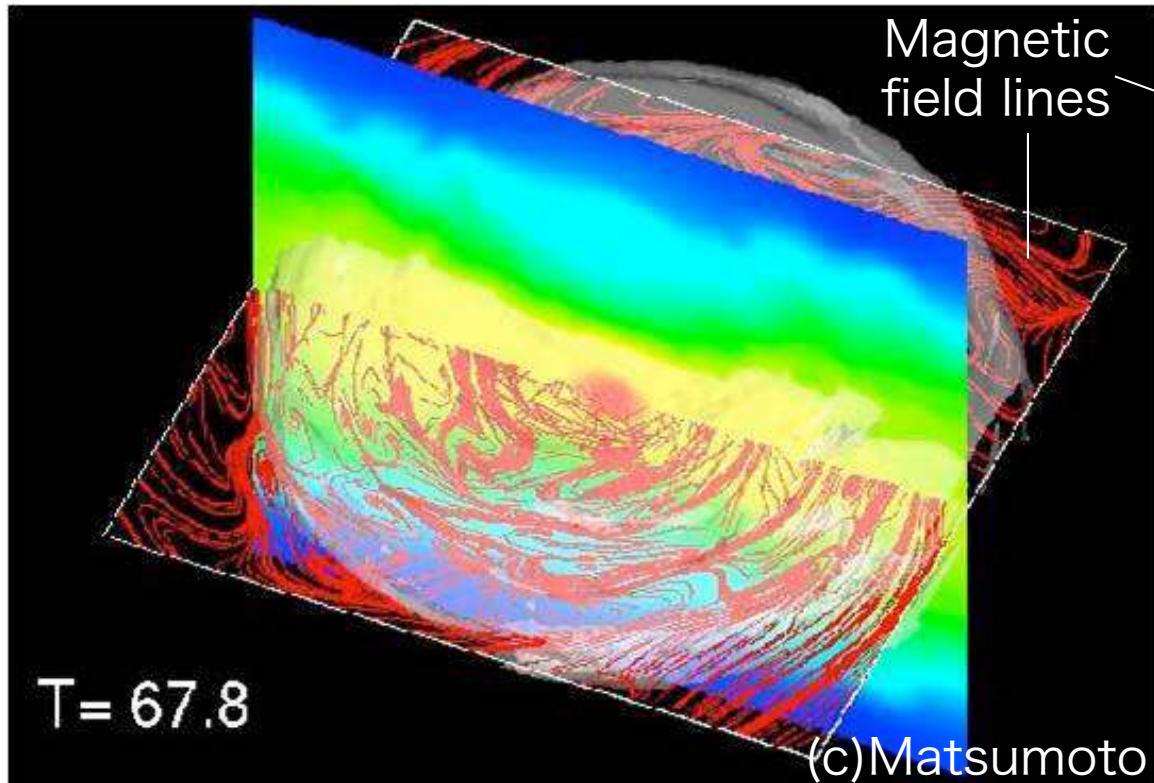
・真横から見た断面図



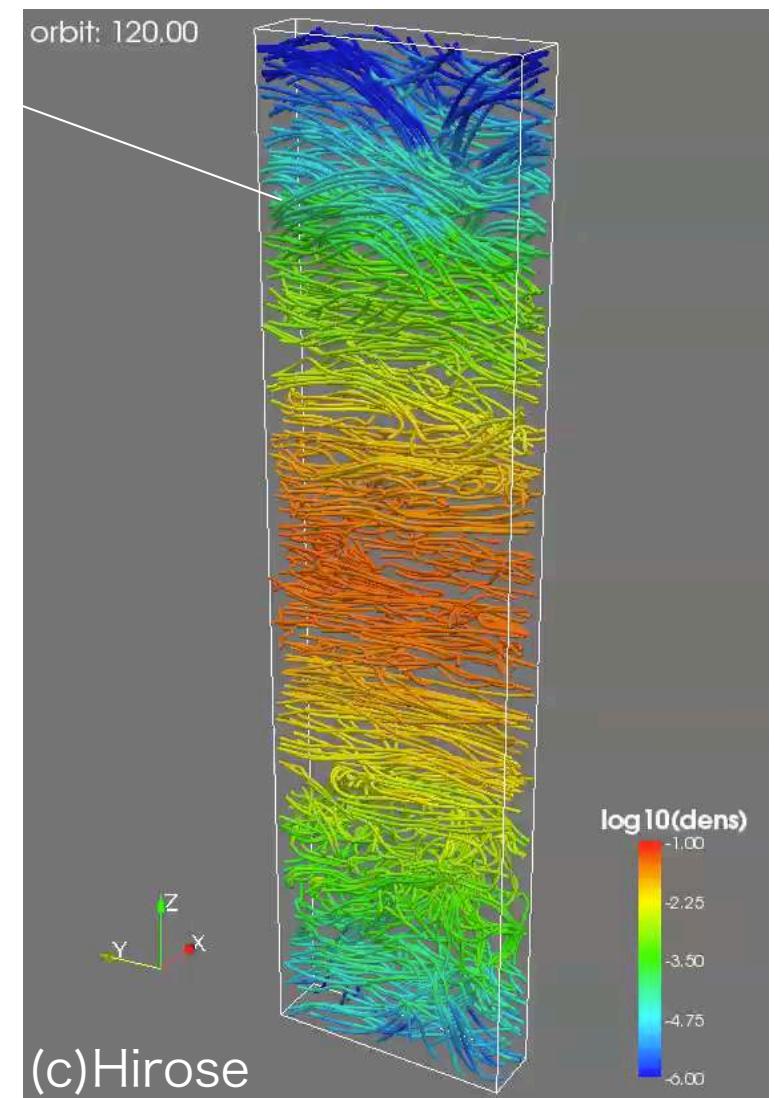
磁気浮力不安定：
鉛直方向の磁場を増幅



シミュレーションの例



MRI乱流によって磁場が増幅,
角運動量輸送によってガス降着
が発生



降着円盤での輻射の重要性

①輻射冷却
(円盤の温度・厚み)

②輻射圧
(円盤の厚み・
ガスの噴出)

エネルギーの流れ

物質の流れ

輻射エネルギー

重力
エネルギー → 磁場/乱流
を介して
エネルギー
変換 → 熱エネルギー

降着円盤の断面図

輻射力や磁気圧で
ガスが噴出

ガス

磁場起源の
乱流状態

輻射磁気流体力学方程式

ガス

<u>質量保存則</u>	<u>磁場による力および 磁場エネルギーの散逸</u>
$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$	
<u>運動量保存則</u>	<u>吸収・放射・散乱 による輻射の力</u>
$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right) = -\nabla \left(p + \frac{ \mathbf{B} ^2}{8\pi} \right) + \frac{\chi}{c} \mathbf{F} - \rho \nabla \psi$	
<u>エネルギー保存則</u>	
$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{4\pi}{c^2} \eta J^2 - 4\pi \kappa B + c \kappa E$	<u>吸収・放射による エネルギー交換</u>
<u>輻射エネルギー保存則</u>	
$\frac{\partial E_0}{\partial t} + \nabla \cdot (E_0 \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_0 - \nabla \mathbf{v} : \mathbf{P}_0 + 4\pi \kappa B - c \kappa E_0$	

マクスウェル方程式

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

一般相対論版

連続の式 $\partial_t (\sqrt{-g} \rho u^t) + \partial_i (\sqrt{-g} \rho u^i) = 0$ Kerr-Schild × トリック

Gauss's law $\partial_i (\sqrt{-g} B^i) = 0$

誘導方程式 $\partial_t (\sqrt{-g} B^i) = -\partial_j [\sqrt{-g} (b^j u^i - b^i u^j)]$

MHDエネルギー
運動量保存 $\partial_t (\sqrt{-g} T_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} T_\nu^i) = \sqrt{-g} T_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda + \sqrt{-g} G_\nu$

輻射エネルギー
運動量保存 $\partial_t (\sqrt{-g} R_\nu^t) + \partial_i (\sqrt{-g} R_\nu^i) = \sqrt{-g} R_\lambda^\kappa \Gamma_{\nu\kappa}^\lambda - \sqrt{-g} G_\nu$

輻射4元力 $G^\mu = -\rho(\kappa_a + \kappa_s)R^{\mu\nu}u_\nu - \rho(\kappa_s R^{\alpha\beta}u_\alpha u_\beta + \kappa_a 4\pi B)u^\mu$

M1-closure $R^{\mu\nu} = \frac{4}{3}\bar{E}_R u_R^\mu u_R^\nu + \frac{1}{3}\bar{E}_R g^{\mu\nu}$

operator splitting + semi-implicit法

解くべき方程式

$$\partial_t U + \partial_x F^x = S$$

移流項

$$\partial_t U + \partial_x F^x = 0$$

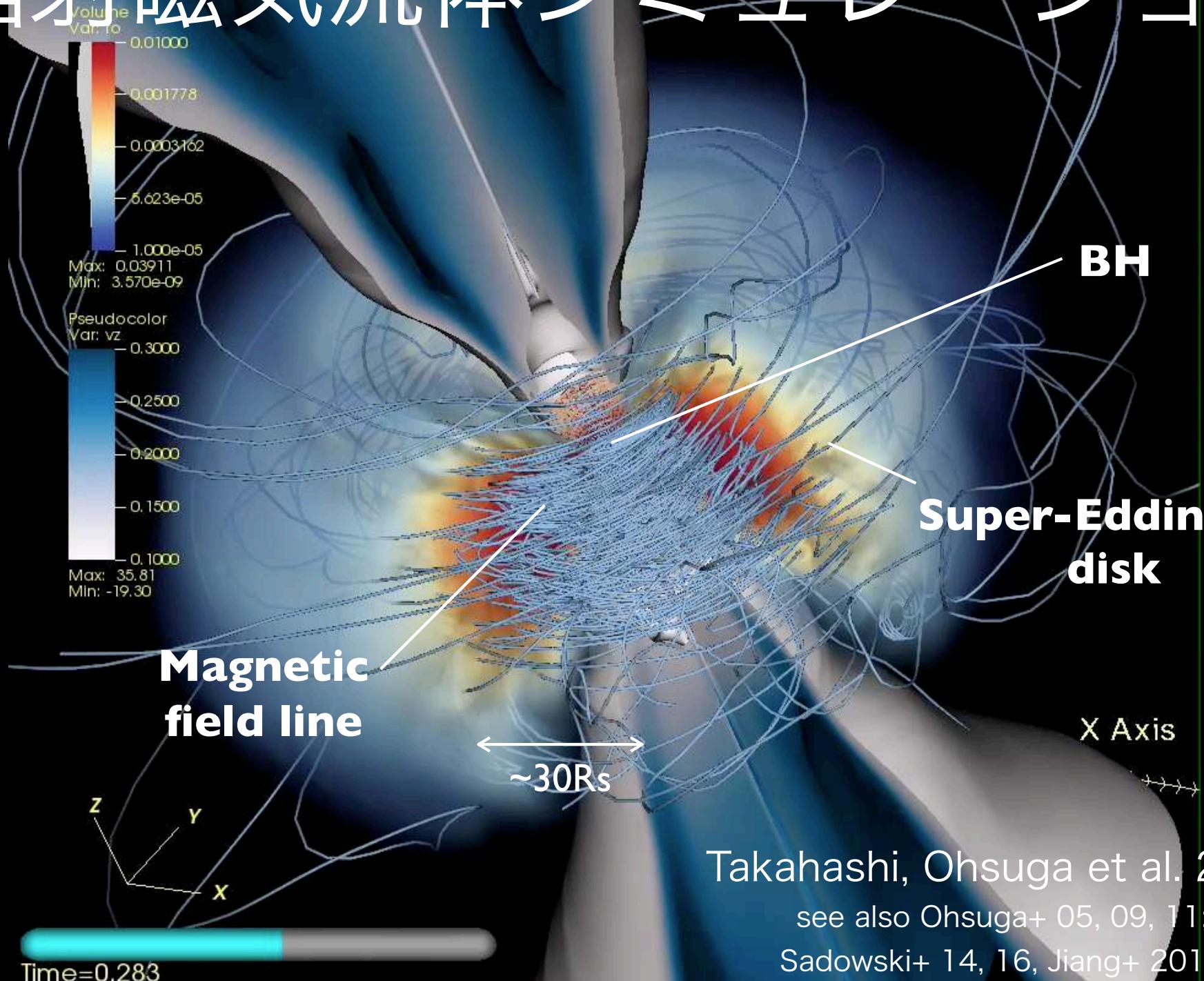
陽解法

ソース項

陰解法

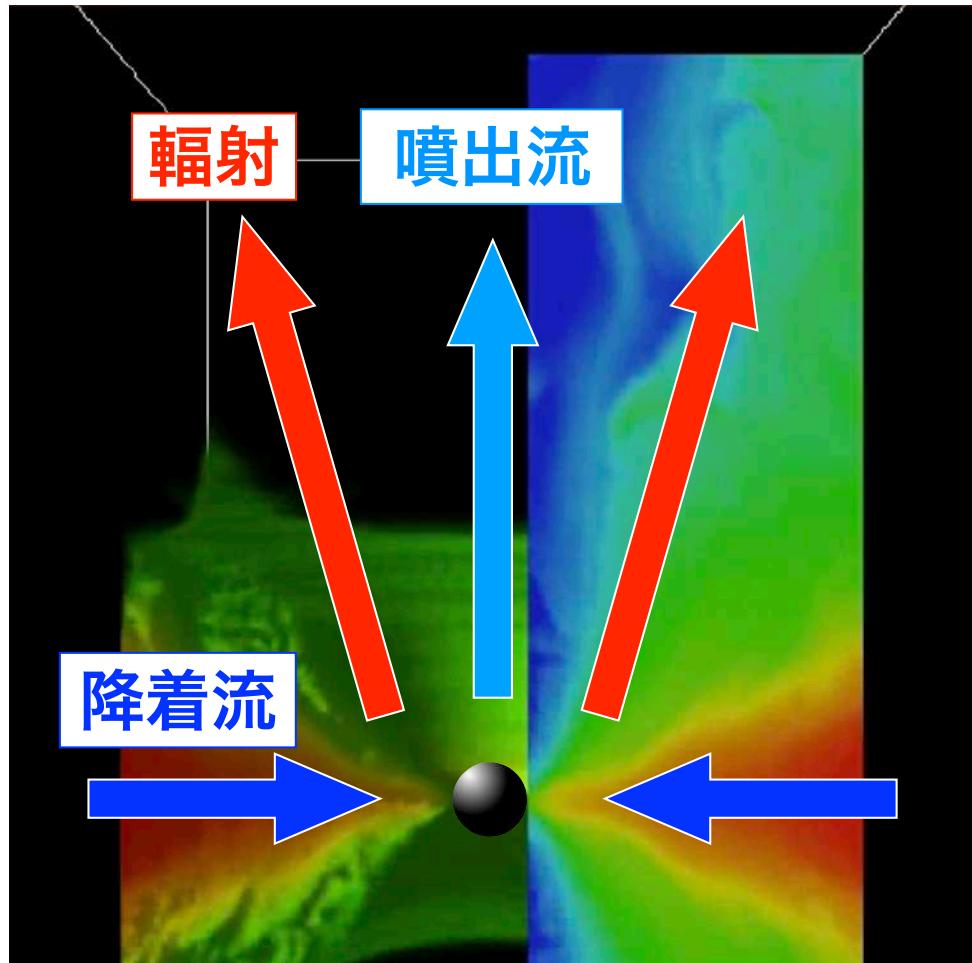
$$\partial_t U = S$$

輻射磁気流体シミュレーション



Takahashi, Ohsuga et al. 2016
see also Ohsuga+ 05, 09, 11;
Sadowski+ 14, 16, Jiang+ 2014

超エディントンはなぜ可能？

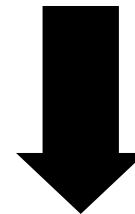


理由は？

輻射とガスの交通整理

輻射：鉛直方向に抜ける

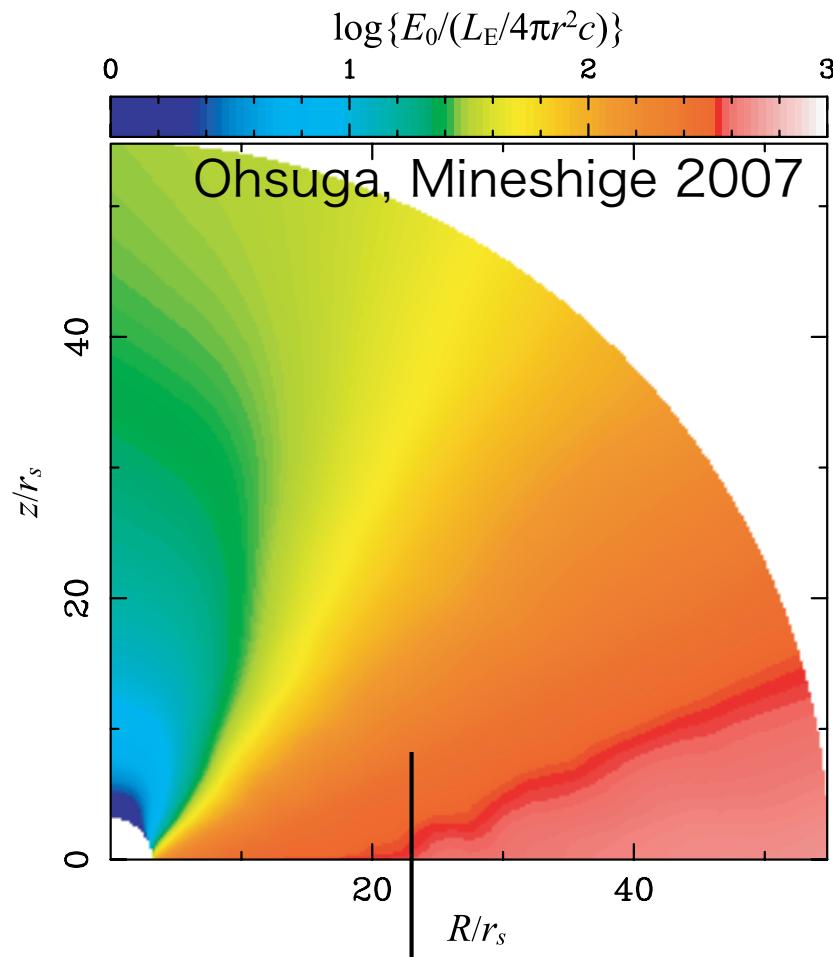
ガス：水平方向に落下



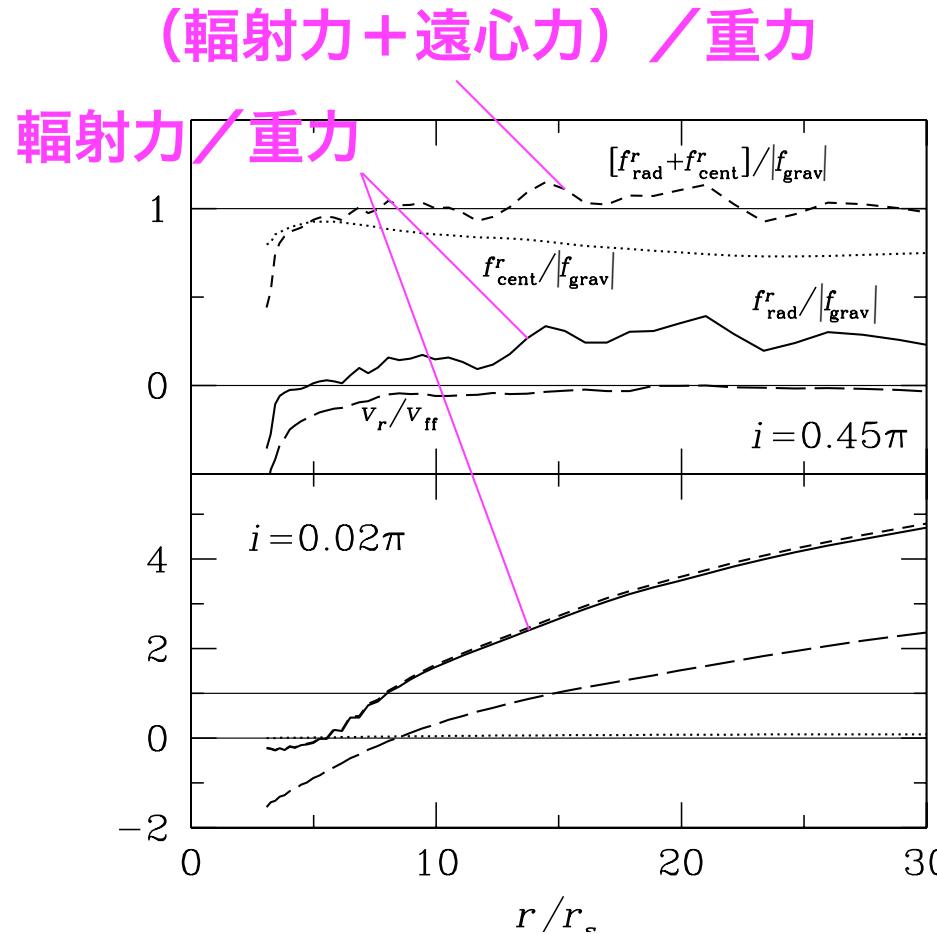
輻射がガスの落下を妨げない！

Ohsuga et al. 2005; 2009; 2011

超エディントンはなぜ可能？



$E_{\text{rad}} > L_{\text{Edd}}/4\pi r^2 c$: 輻射力 > 重力となり得るほど大量の光子が発生



円盤内部での輻射力は、たかだか重力の30%程度。ただし、円盤上空では輻射力>>重力。

もっと単純に理解しよう

球対称 $\frac{\text{輻射圧}}{\text{重力}} \propto \frac{L}{L_{\text{Edd}}} \quad (\text{thinでもthickでも})$

エディントン限界を突破できない！

非球対称

$$\frac{\text{輻射圧}}{\text{重力}} \propto \frac{L}{L_{\text{Edd}}} \frac{1 - \exp(-\tau)}{\tau}$$

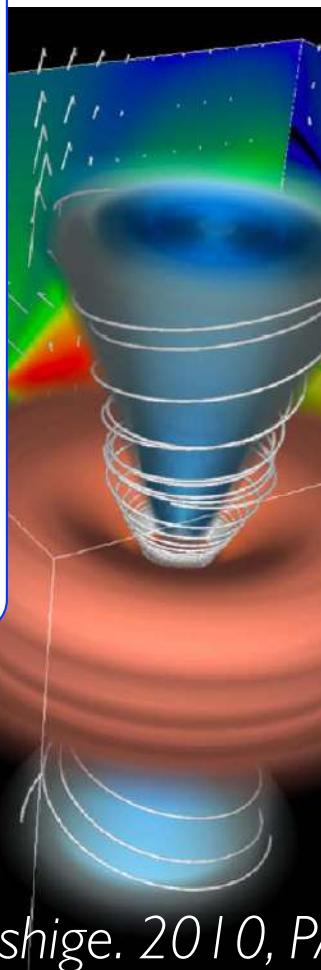
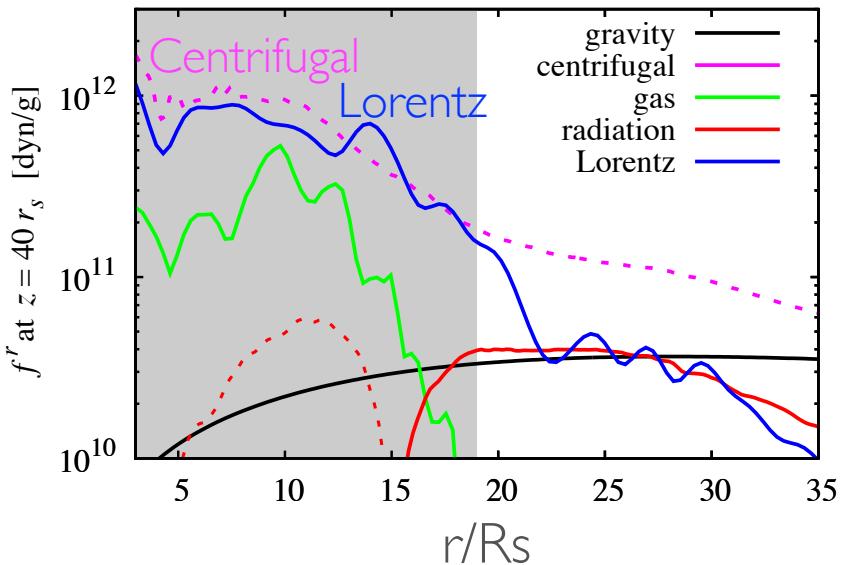
$\frac{L}{L_{\text{Edd}}} \frac{1}{\tau} \quad (\text{thick})$

$\frac{L}{L_{\text{Edd}}} \quad (\text{thin})$

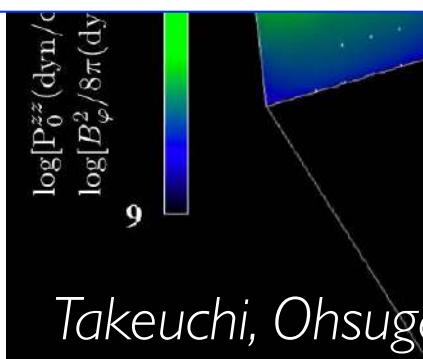
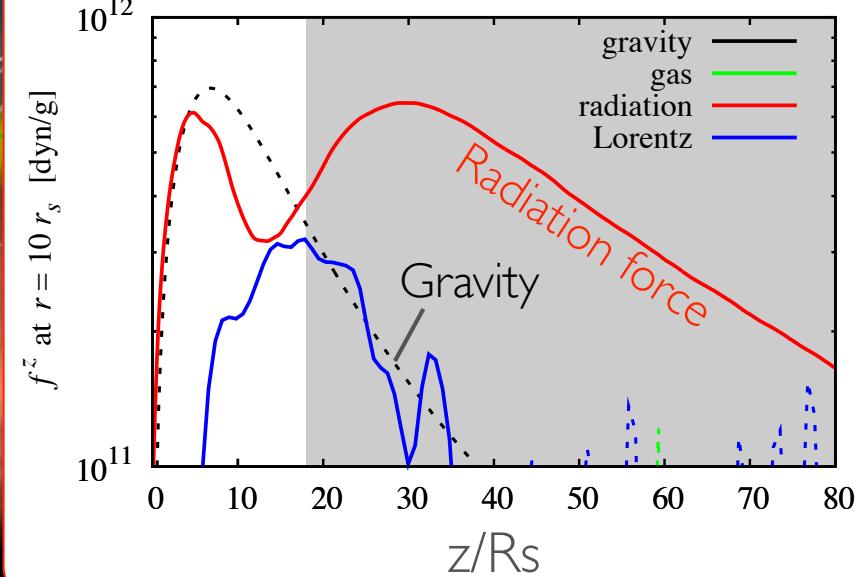
thickで非球対称なら可能性あり！

輻射磁気ジェット

horizontal components of forces

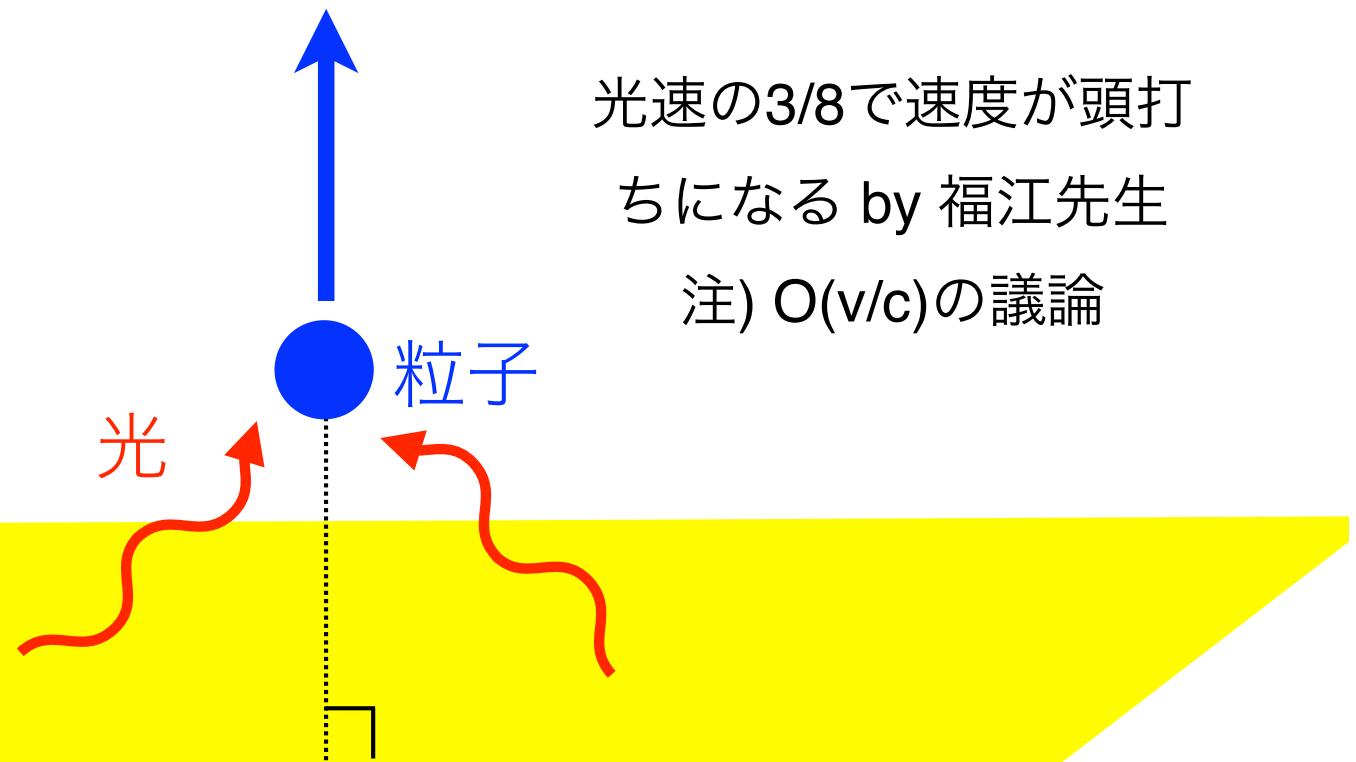


vertical components of forces



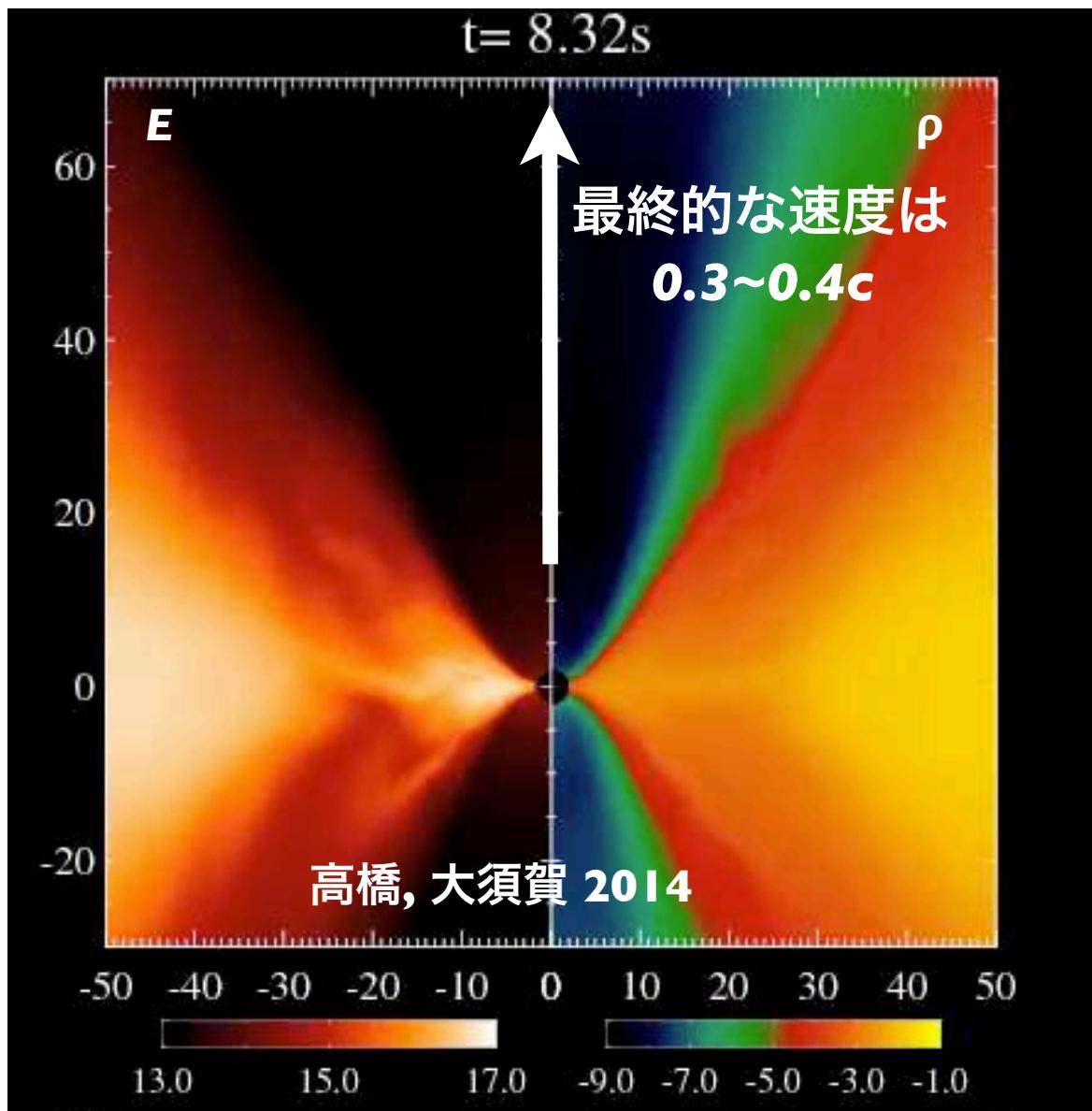
Takeuchi, Ohsuga, Mineshige. 2010, PASJ, 62, L43

輻射抵抗の補足



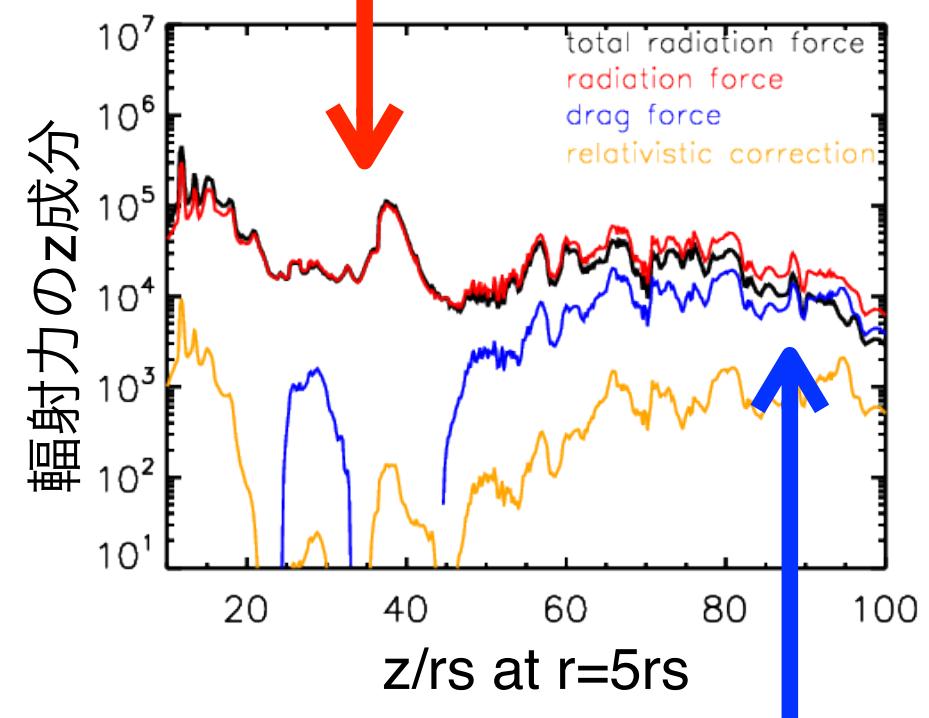
光速の3/8で速度が頭打
ちになる by 福江先生
注) $O(v/c)$ の議論

輻射加速の限界



$z < 60\text{rs}$ では輻射で加速！

flux force >> drag



flux force ~ drag

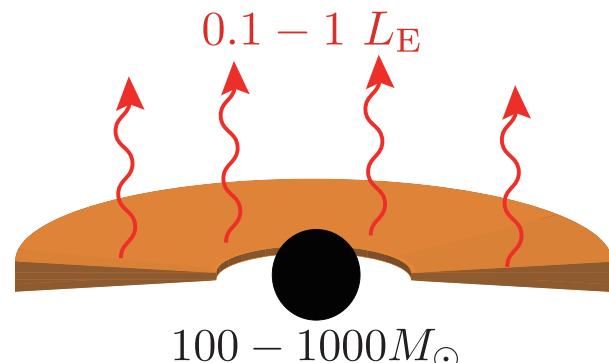
$z > 60\text{rs}$ で速度は頭打ち

超エディントン円盤をULXで検証

IMBH + sub-Eddington disk

If the IMBHs exist, sub-Eddington disk can explain the huge luminosity of ULXs;

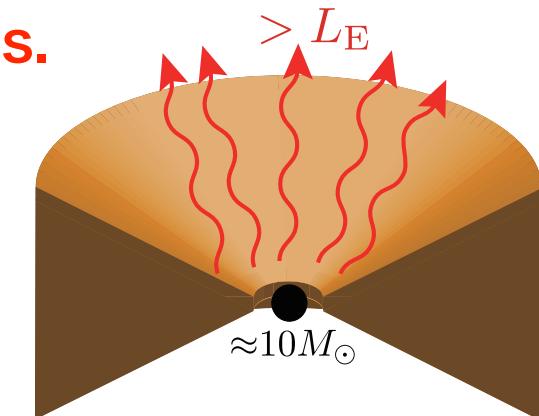
$0.1L_{\text{Edd}}(10^3 \text{Msun}) \sim 10^{40} \text{erg/s.}$



Makishima et al. 00, Miller et al. 04,
Farrell et al. 09, Servillat et al. 11, etc.

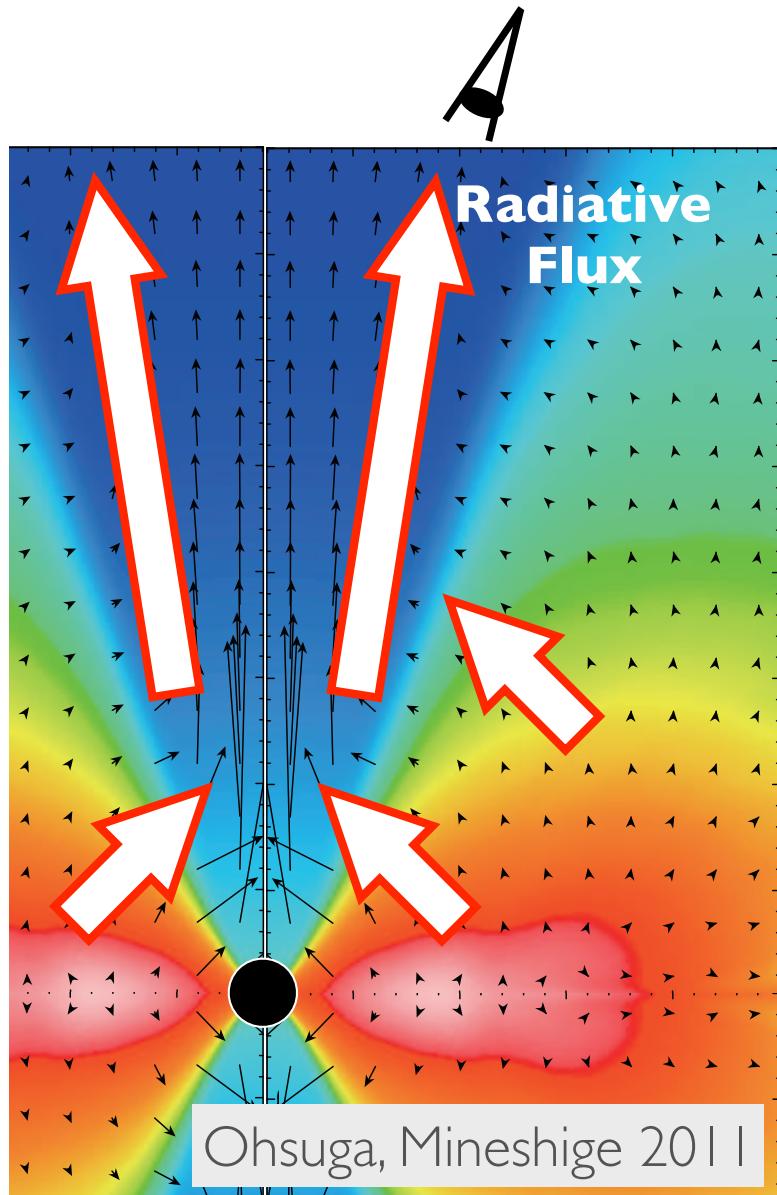
Super-Eddington Disk

Even if the BH mass is around 10Msun , super-Eddington disks can reproduce the huge luminosity; **$10L_{\text{Edd}}(10 \text{Msun}) \sim 10^{40} \text{erg/s.}$**

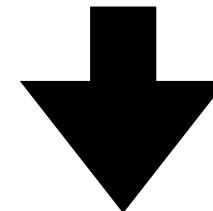


King 04, 08; Ohsuga et al. 05, 09, 11,
Gladstone et al. 09; Middleton et al. 11,
Sadowski 13, 15, Takahashi et al. 16

観測との比較；光度



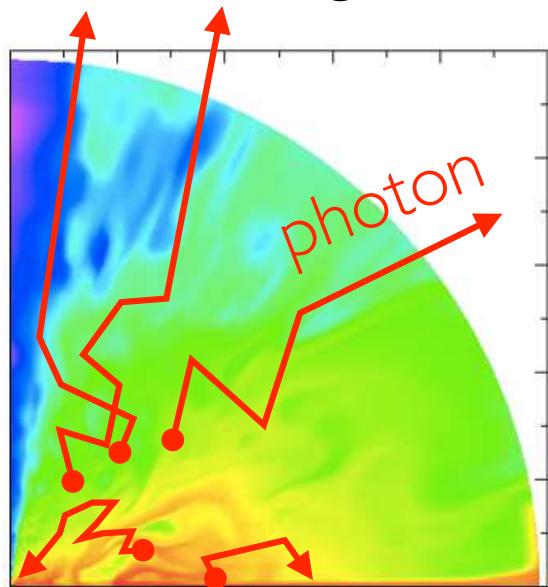
円盤光度がエディントン光度を超える。
軸方向に輻射が集中するので, face-on
での光度はさらに大きく !



ULXの大きな光度を説明可能 !

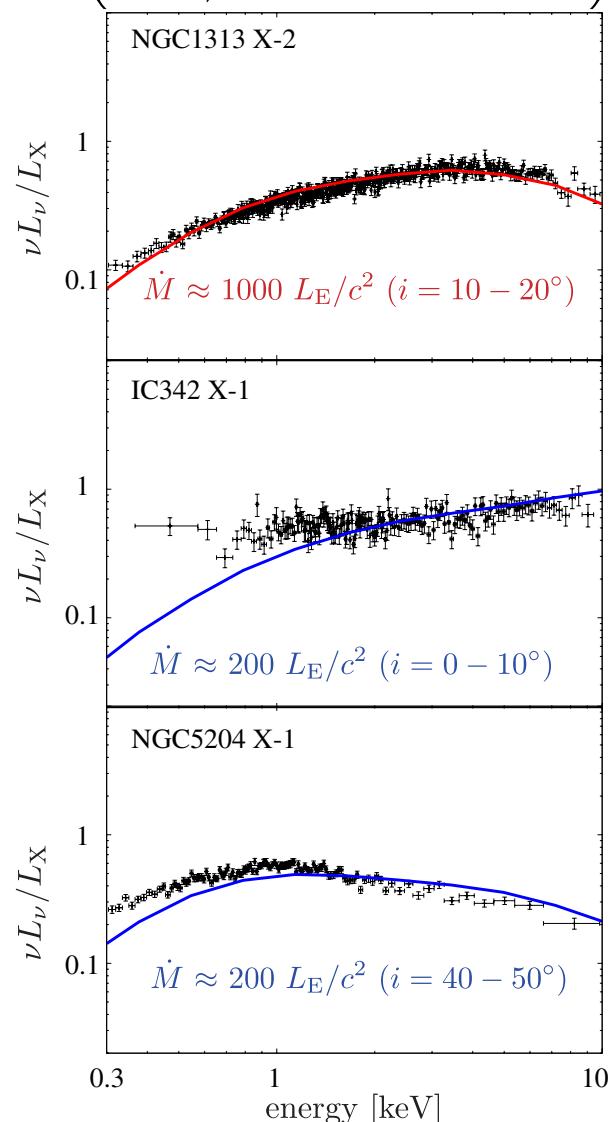
観測との比較；輻射スペクトル

Monte Carlo Radiation transfer
(fee-free, thermal & bulk compton)
Kawashima, Ohsuga et al. 2012



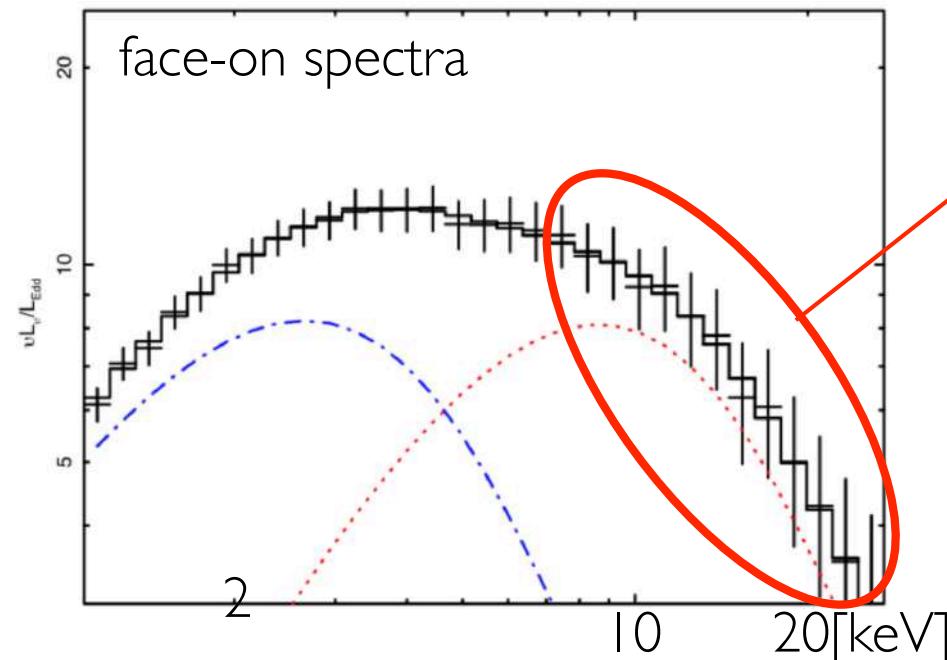
観測と一致。円盤上空でのコンプトン
散乱が、謎のX線放射の起源

Kawashima et al. 2012
(data; Gladstone 2009)



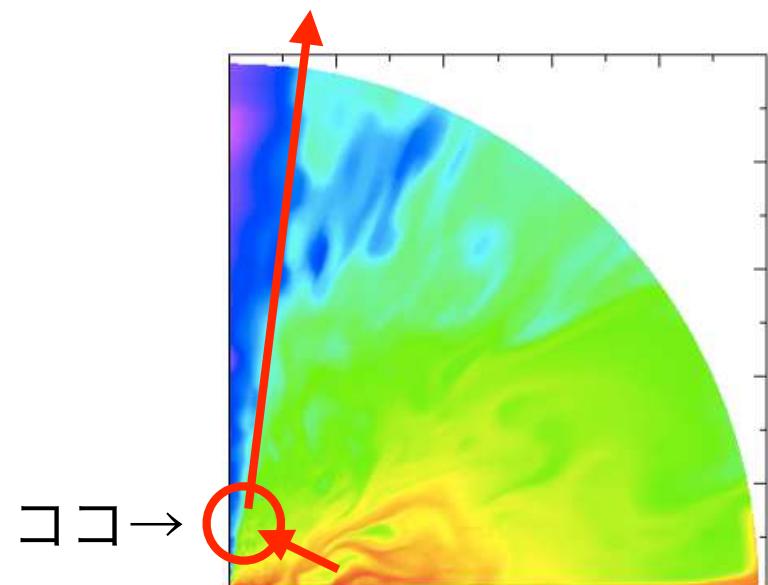
観測との比較；輻射スペクトル

Kitaki, Mineshige, Kawashima, Ohsuga+ 2017



「~2.9のべき状成分が生成
観測結果(「~3.1)とおよそ一致

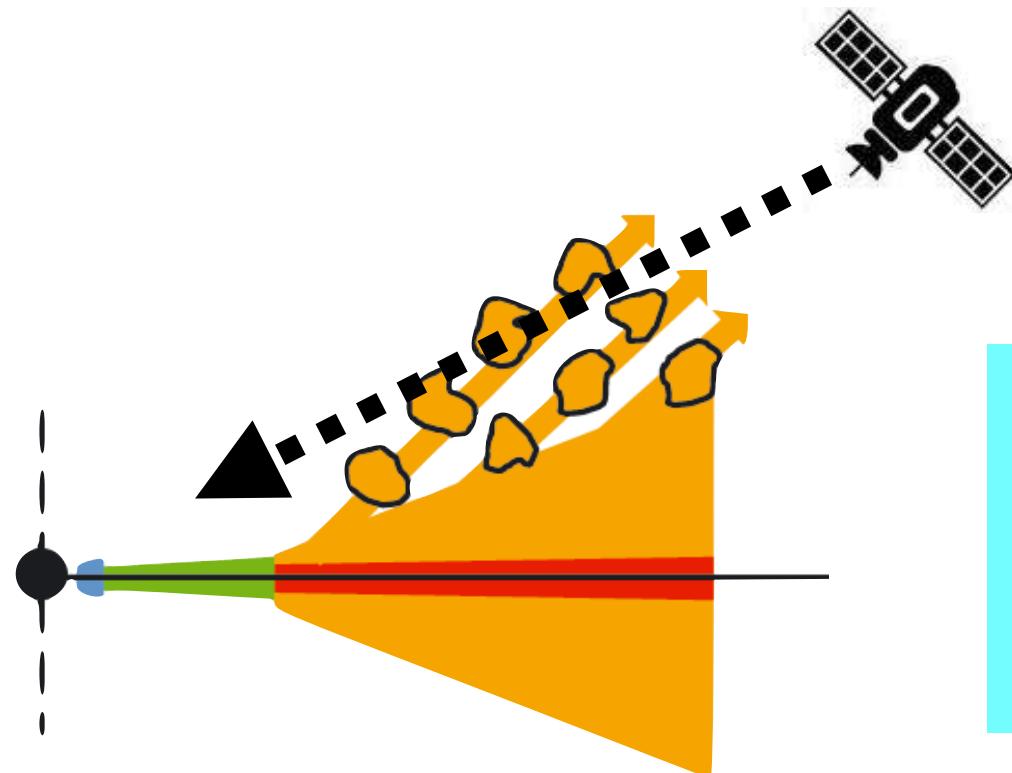
高エネルギー光子



硬X線の起源は、BH近傍の高速
ジェット領域における
コンプトン散乱

観測との比較；光度変動

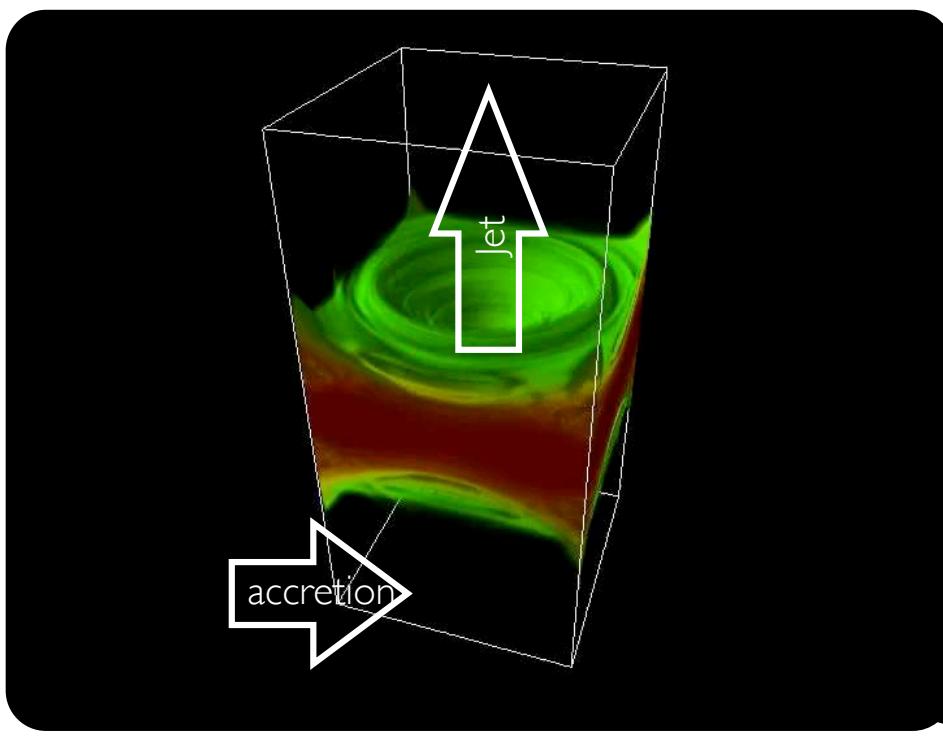
Some ULXs exhibit the time variations of X-ray luminosity, implying the launching of clumpy outflows (Middleton+2011).



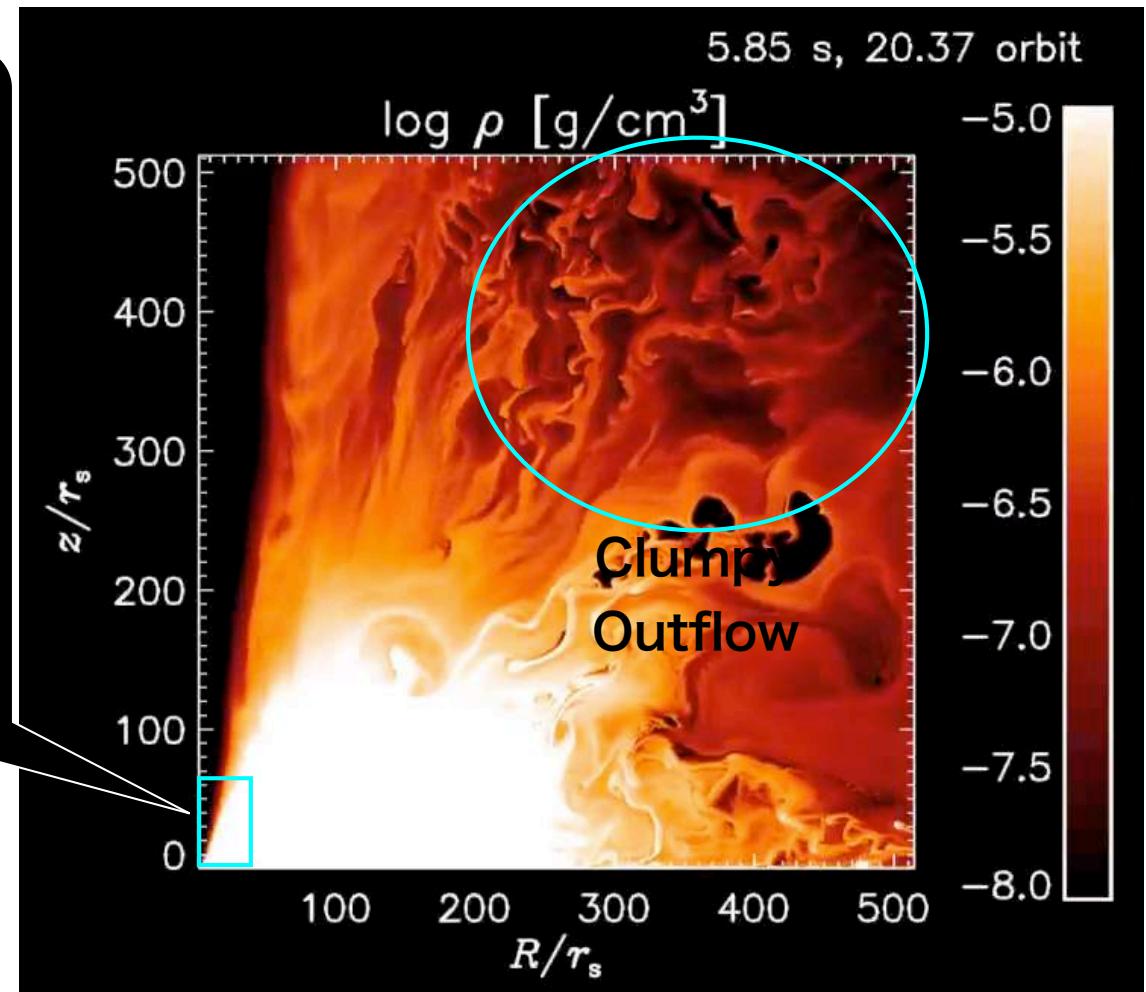
観測された光度変動をもとに
提案された現象論モデル
ただし、
形成メカニズムは不明！

観測との比較；光度変動

Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2013

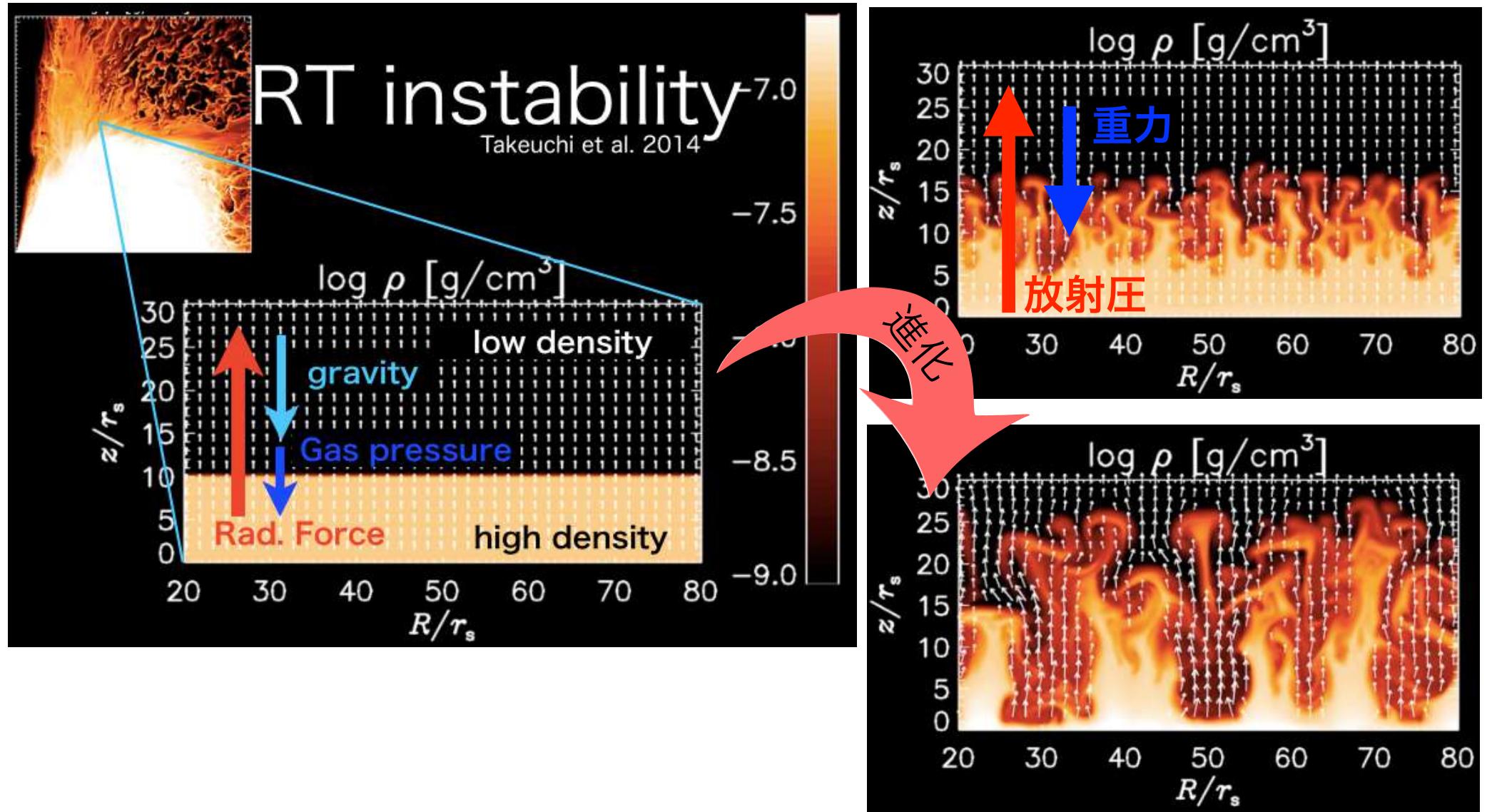


ULXの時間変動をClumpで
説明可能！



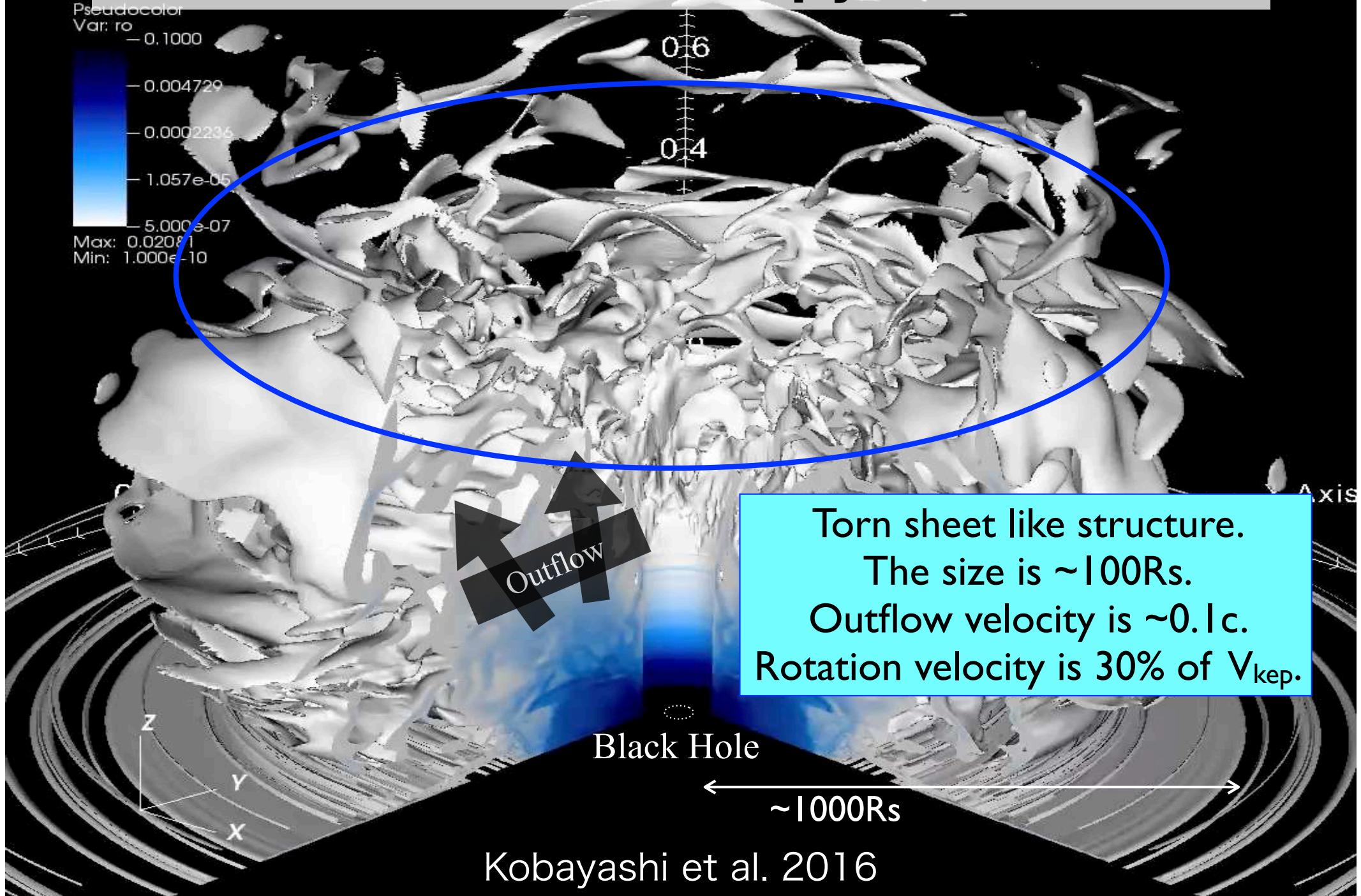
計算領域を拡大したシミュレーションで、Clumpyな円盤風が発生！

観測との比較；光度変動



Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2014

3D simulations of clumpy outflows



観測との比較；光度変動

Variation Timescale

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

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

観測されている**time scale**
は数秒～数十秒なので, **BH**
質量は太陽質量の**100倍**程
度もあり得る。

ULXの光度変動は円盤風の分裂によって説明可能！

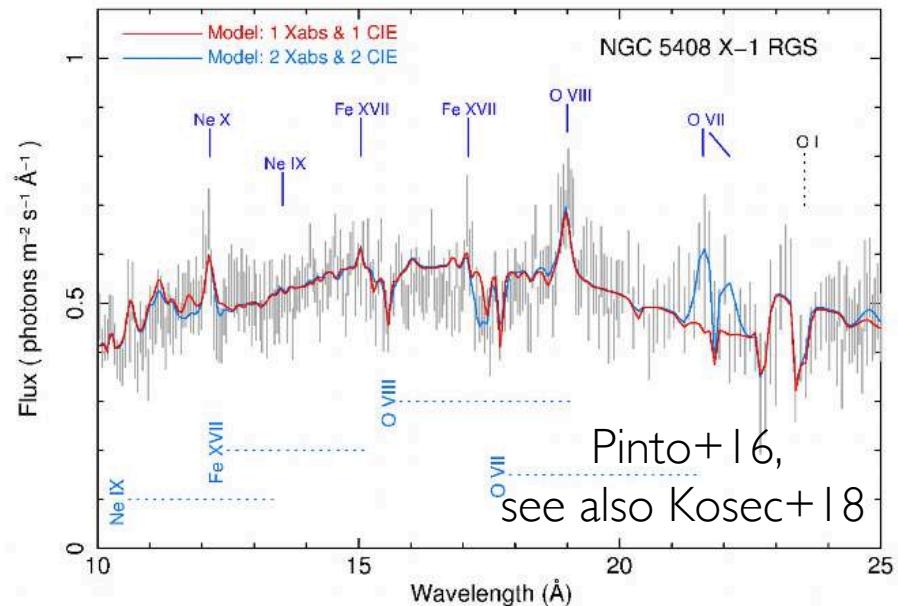
観測との比較；アウトフロー



大須賀君, ULXが超エディントンなら, アウトフローが見つからないのはおかしいじゃないか！

吸収線が発見

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

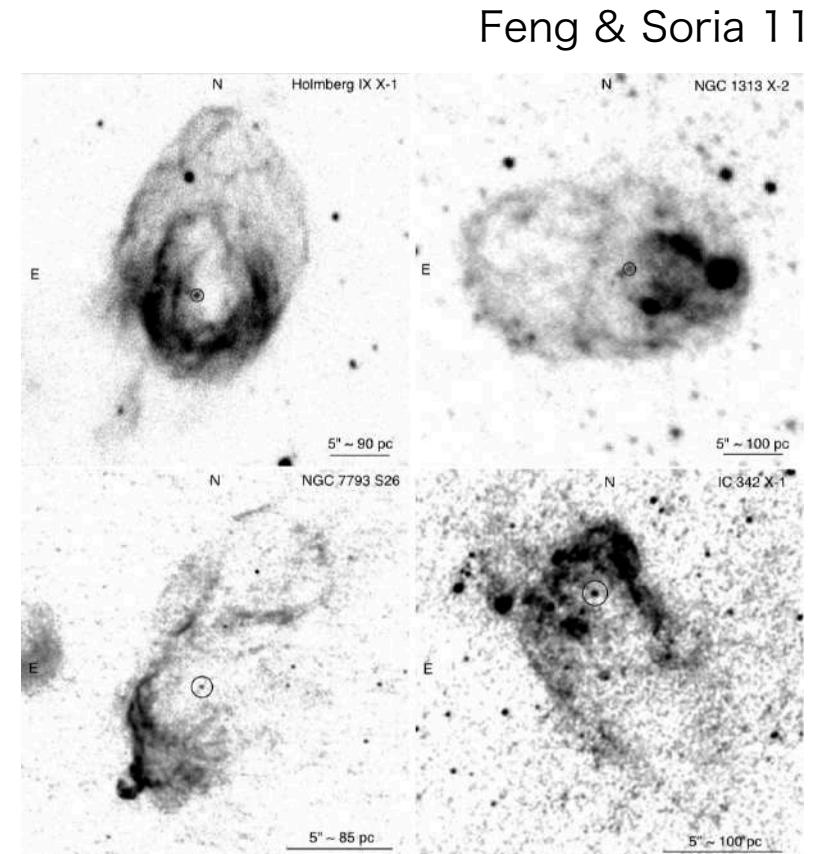
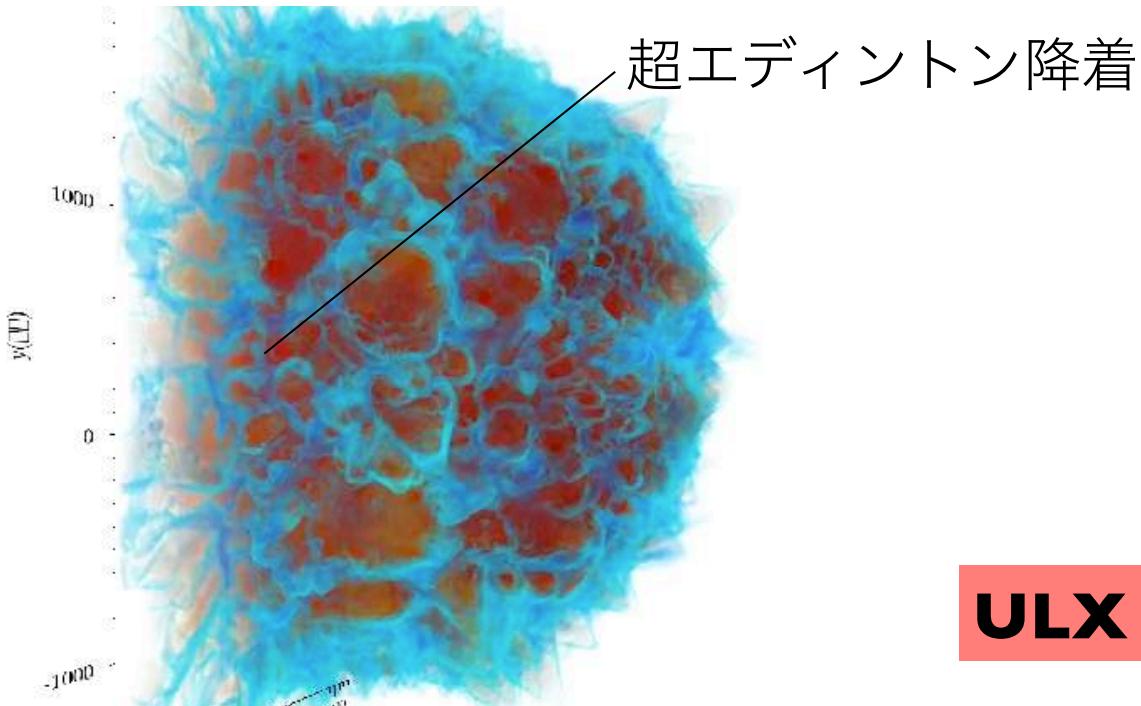


円盤からのアウトフロー
で説明可能！

観測との比較；アウトフロー

Simulated kinetic power is comparable to the X-ray luminosity ($L_{\text{kin}} \sim L_X \sim 10^{39-40} \text{ erg/s}$). Such feature agrees with the observed ULX bubbles.

Simulations of ULX Bubbles (Asahina+ in prep.)



also Pakull & Mirioni (2003),
Grise et al. (2006), Pakull et al. (2010),
Soria et al. (2010) Cseh et al. (2015)

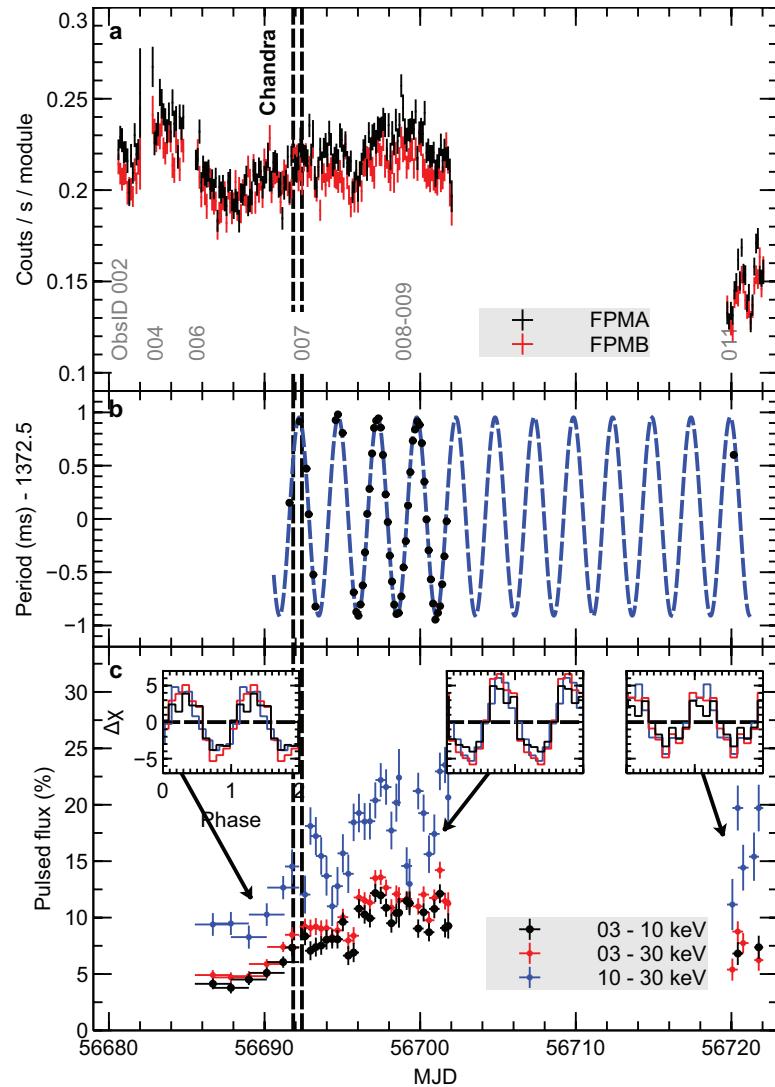
ULX bubbleも問題なし（多分）

エディントン限界は突破可能！
ULXでは超エディントン降着が実際に
起っている！

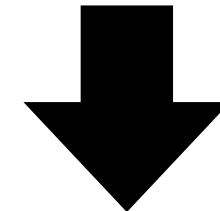
で、終わりのはずだった・・・

ULXの正体は中性子星 (NS) ?

Bachetti et al. 2014



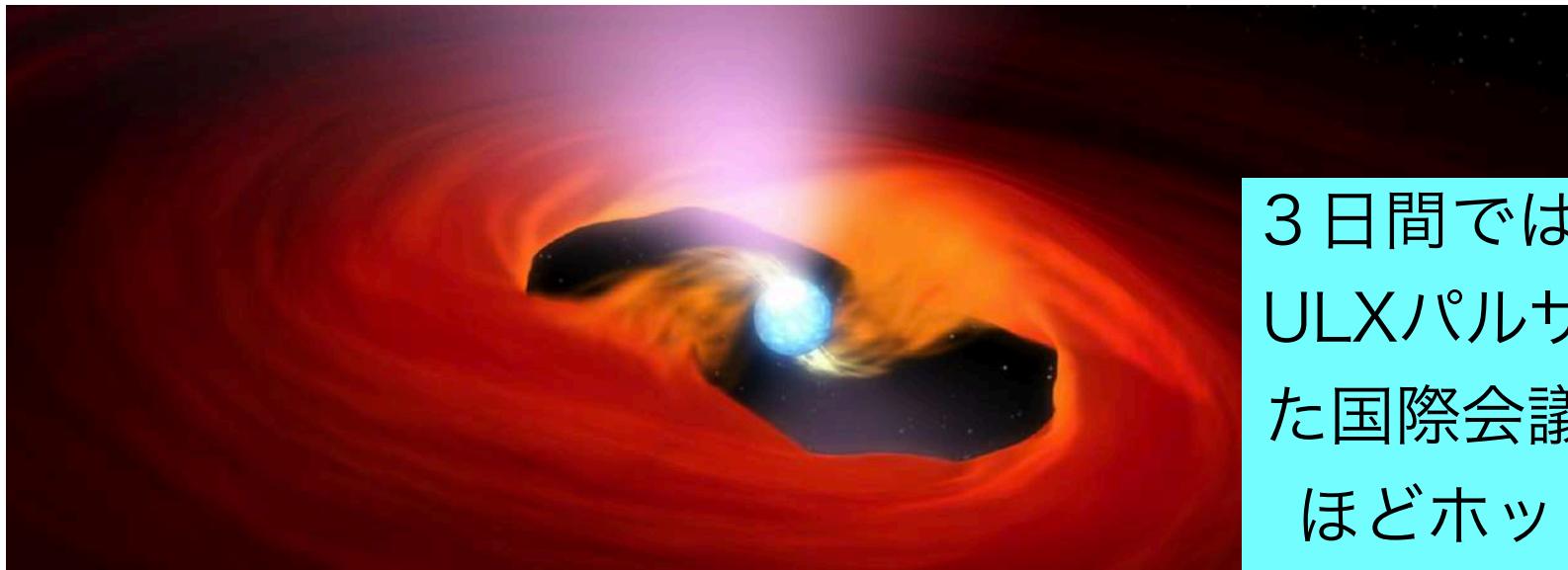
ULXでパルサーが見つかった！



少なくとも一部のULXの
正体は中性子星！

*普通に $10M_{\odot}$ 程度のBHが存在す
ると確定しているULXもあります
(ex. Motch et al. 2014)

国際会議；ULXパルサー



ULTRA-LUMINOUS X-RAY PULSARS

6 - 8 June 2018

European Space Astronomy Centre (ESAC)
Villafranca del Castillo
Madrid, Spain

ulp-workshop@sciops.esa.int

3日間ではありますが、
ULXパルサーに特化し
た国際会議が開かれる
ほどホットな話題！

私もSOC, 招待講演, 司会
として参加

SCIENTIFIC BACKGROUND

Ultra-luminous X-ray sources (ULXs) are accreting compact objects in nearby galaxies, which emit X-rays in excess of their spherical Eddington limit. Due to their brightness, most of them are believed to be black holes. However, recently a new class of ULXs was discovered, through the detection of coherent pulsations:

Ultra-luminous X-ray pulsars (ULPs)

The presence of pulsations unambiguously identifies the compact objects as neutron stars, which are typically less massive than black holes. In ULPs the neutron star accretes matter from a companion star at inferred rates much higher than previously expected.

国際会議；ULXパルサー

	June 06 (Wed)	June 07 (Thu)	June 08 (Fri)
9:00	Bus pick-up in front of Hotel EXE Moncloa	Bus pick-up in front of Hotel EXE Moncloa	Bus pick-up in front of Hotel EXE Moncloa
10:00	Observational Facts Tim Roberts	Stellar Evolution Selma de Mink	Accretion with low-B Jean-Pierre Lasota
10:15			
10:30			
10:45	Frank Haberl	McKinley Brumback	Accretion with high-B Juri Poutanen
11:00	Murray Brightman	Hannah Eamshaw	
11:15	Gianluca Israel	Elena Ambrosi	
11:30	Coffee	Coffee	Coffee
11:45			
12:00	Matteo Bachetti	Tassos Fragos	Alex Mushtukov
12:10			
12:25	Fabio Pintore	Thomas Tauris	Ken Chsuga
12:30			
12:50	Andrea Belfiore	Grzegorz Wiktorowicz	David Abarca
13:05	Filipos Koliopanos		Tomohisa Kawashima
13:20	Poster Presentation	Poster Presentation	Poster Presentation
13:30	Lunch	Lunch	Lunch
14:45			
15:00	Marianne Heida	Kyle Parfrey	Discussion / Work time
15:10			
15:25	Christian Motch	Nanda Rea	
15:35			
15:50	Jakob van den Eijnden	Discussion / Work time	
16:00	Natalie Webb		
16:30	Coffee	Coffee	Coffee
16:45			
17:00	Ciro Pinto	Discussion / Work time	Discussion / Work time
17:15	Peter Kosec		
17:30	Dominic Walton		
17:45	Andy Fabian		
18:00	Ryan Lau	Report of breakout sessions	Report of breakout sessions
18:15			
18:30	Bus back to the hotel	Bus back to the hotel	Bus to airport or hotel

主な話題：

-ULXパルサーが次々に発見

NGC2403, SMCX-3, NGC300, NGC7793, M82X2, NGC5907, ついには系内ULXパルサーも発見(Swift J0243.6+6124)

-ULXパルサーの磁場

P-Pdot, プロペラ効果による見積もり
サイクロトロン吸収線の発見

10^{10-15} Gとバラツキがあって決着つかず

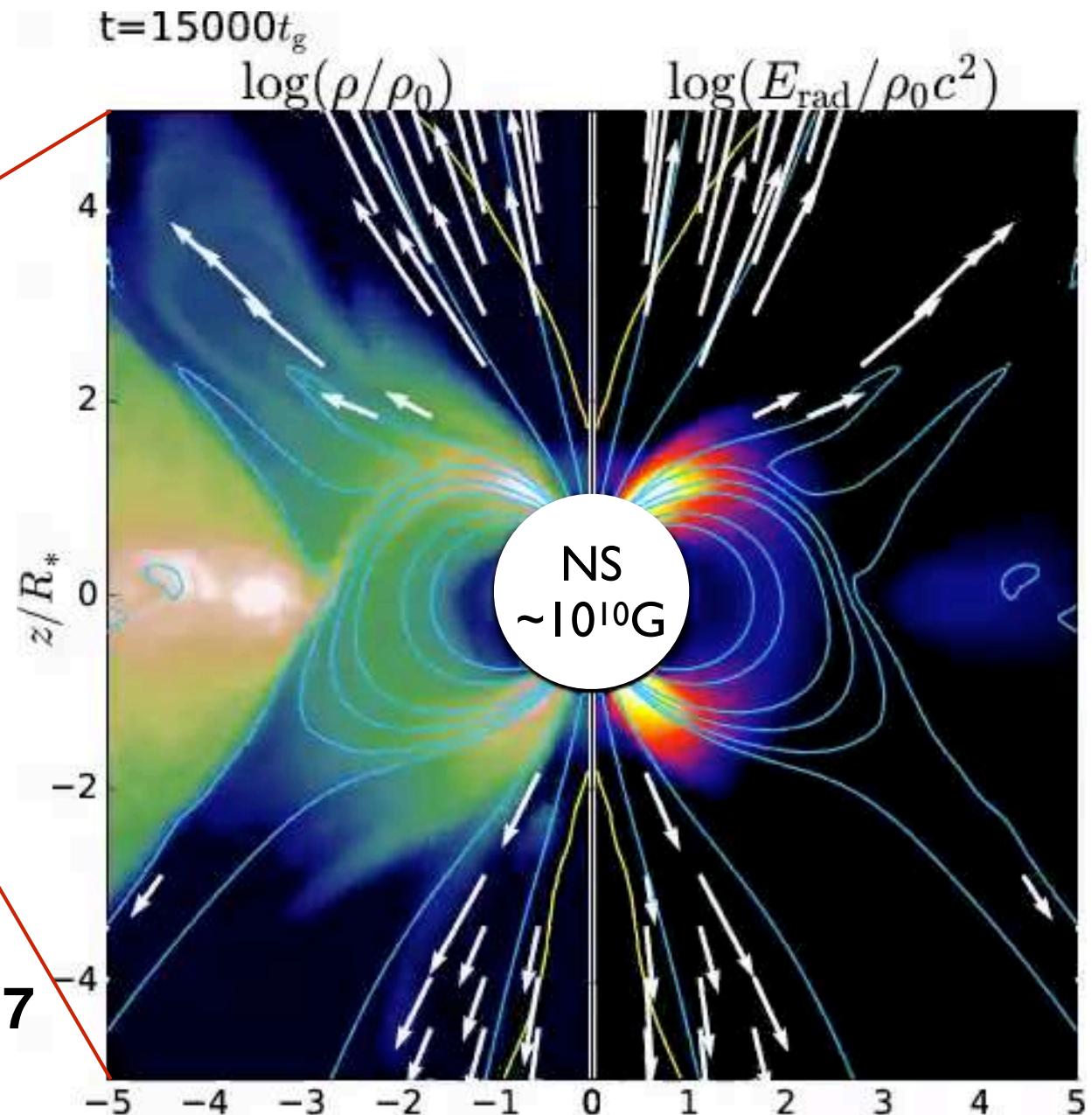
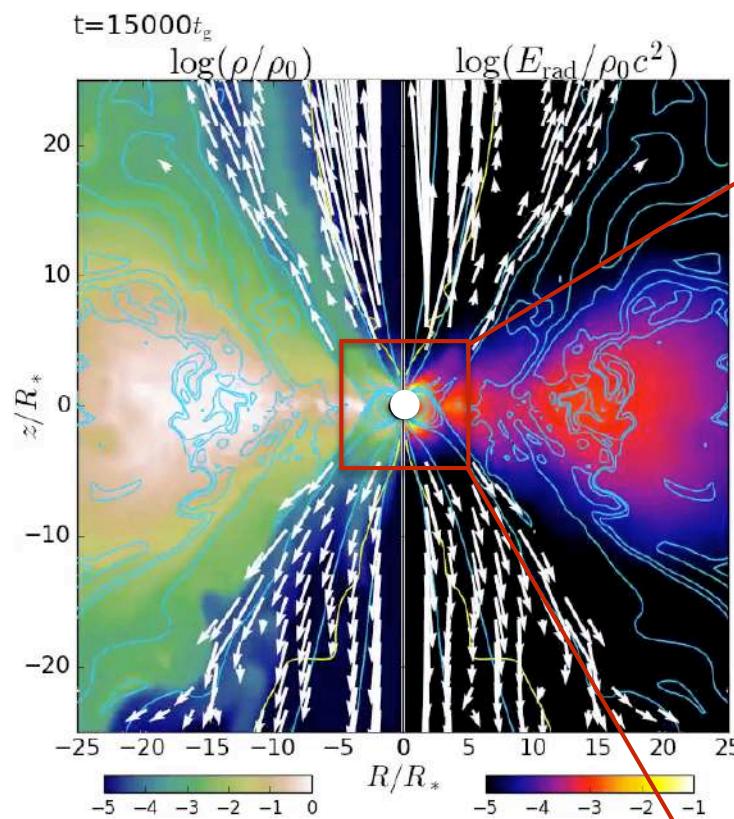
-光度と磁場の関係

明るいほど磁場が強い可能性あり
強磁場によるopacity減少効果か？

-ULXパルサーのアウトフロー

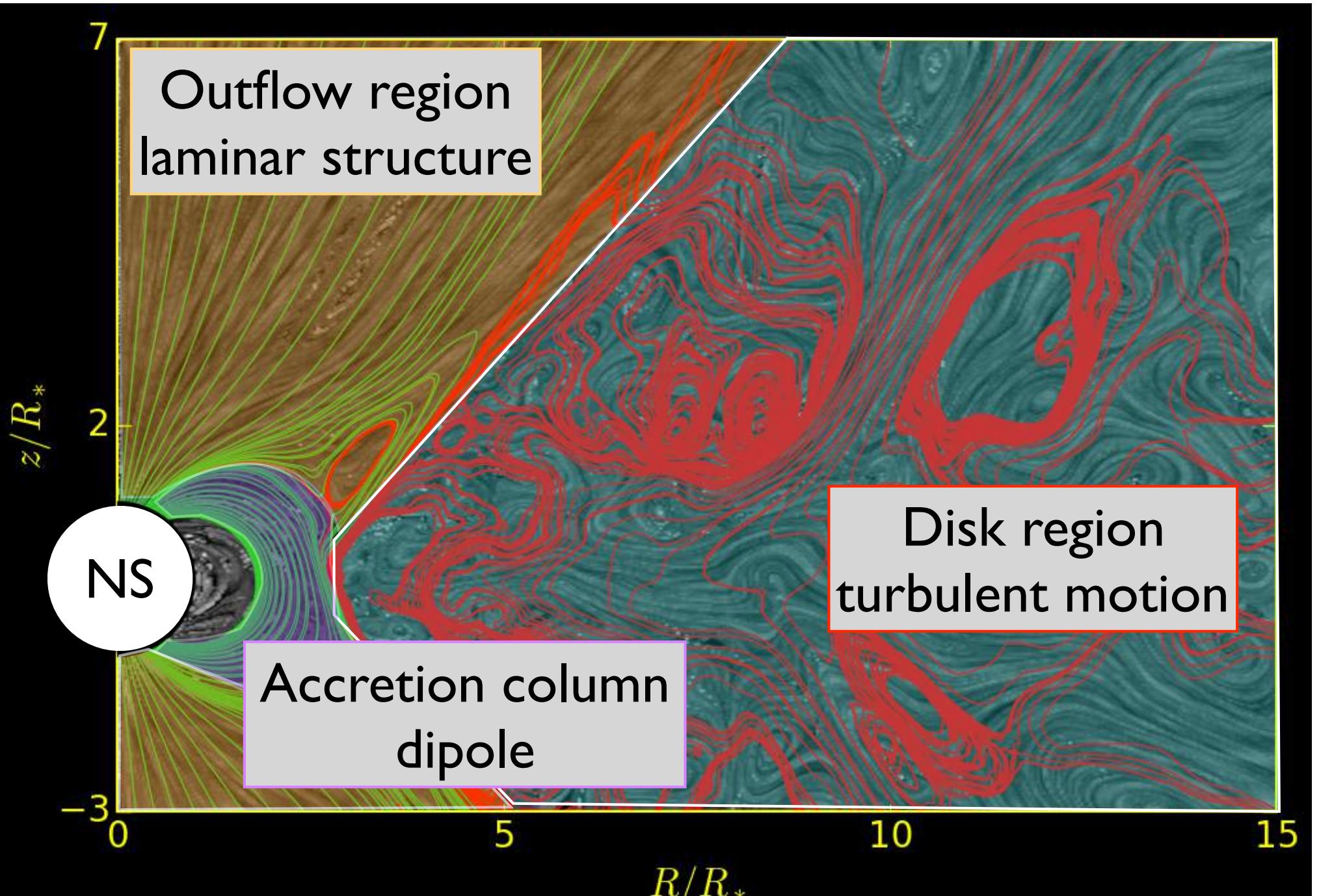
速度が0.2-0.3cでBH天体と同程度

中性子星への超エディントン降着

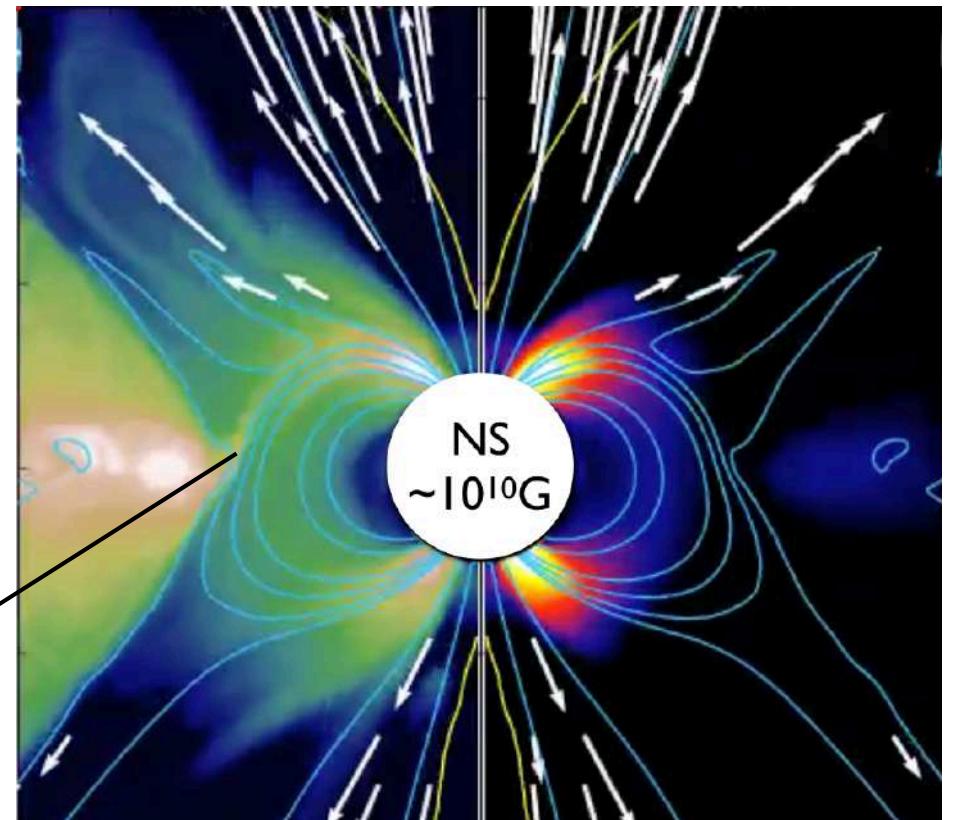
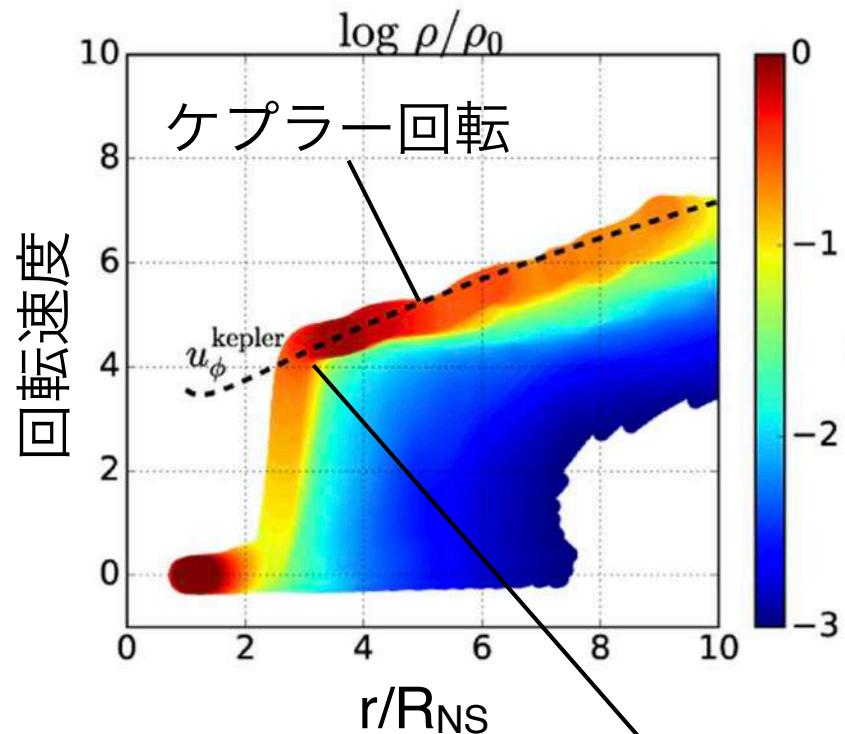


Takahashi, Ohsuga 2017

Flow structure



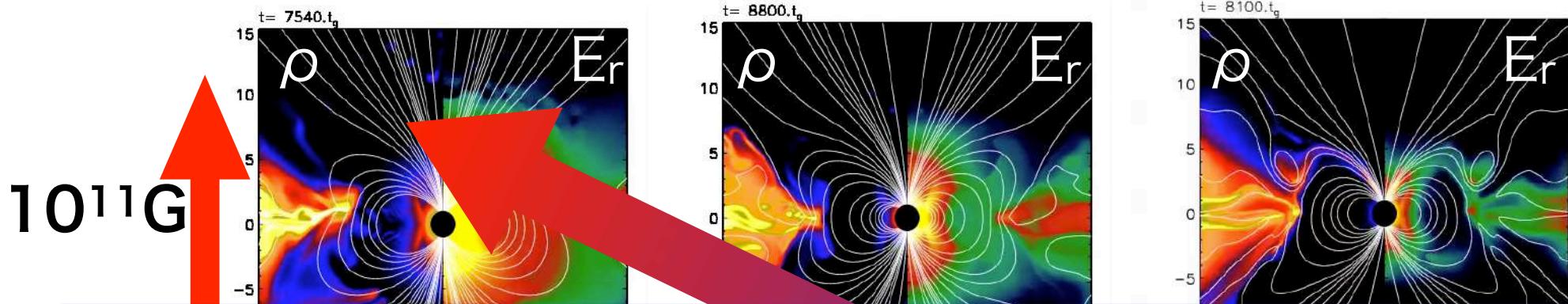
中性子星のスピンドアップ



磁気圏外縁部にガスが一旦溜まる。
角運動量を中性子星に渡すことで、
磁極から落下する。

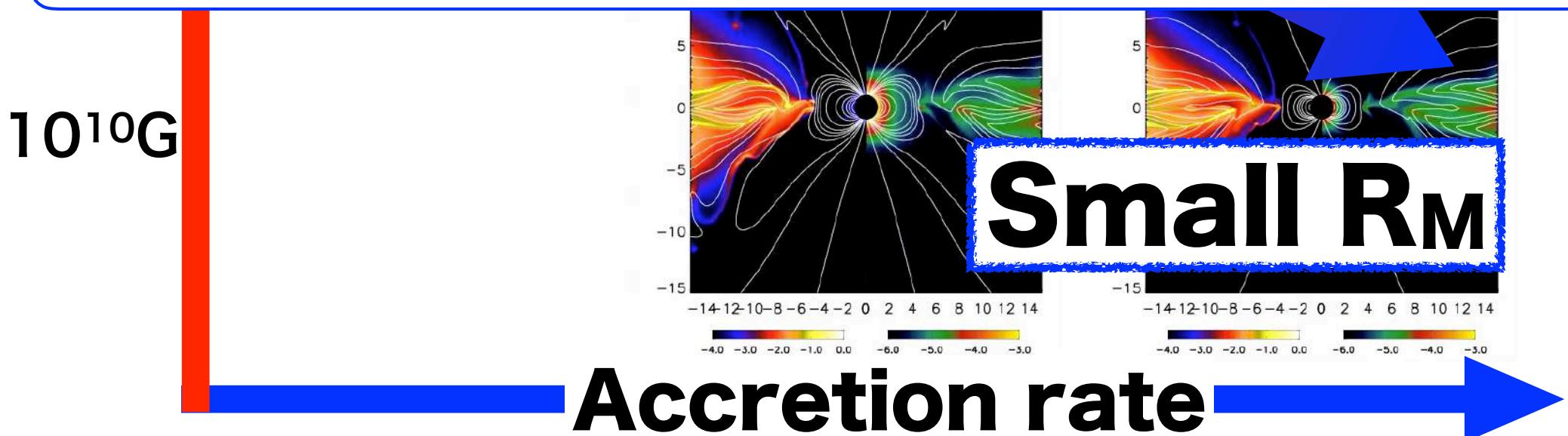
Spin-up rate は 約 $-3 \times 10^{-11} \text{s s}^{-1}$ 。
で、観測と矛盾しない。

Magnetospheric radius

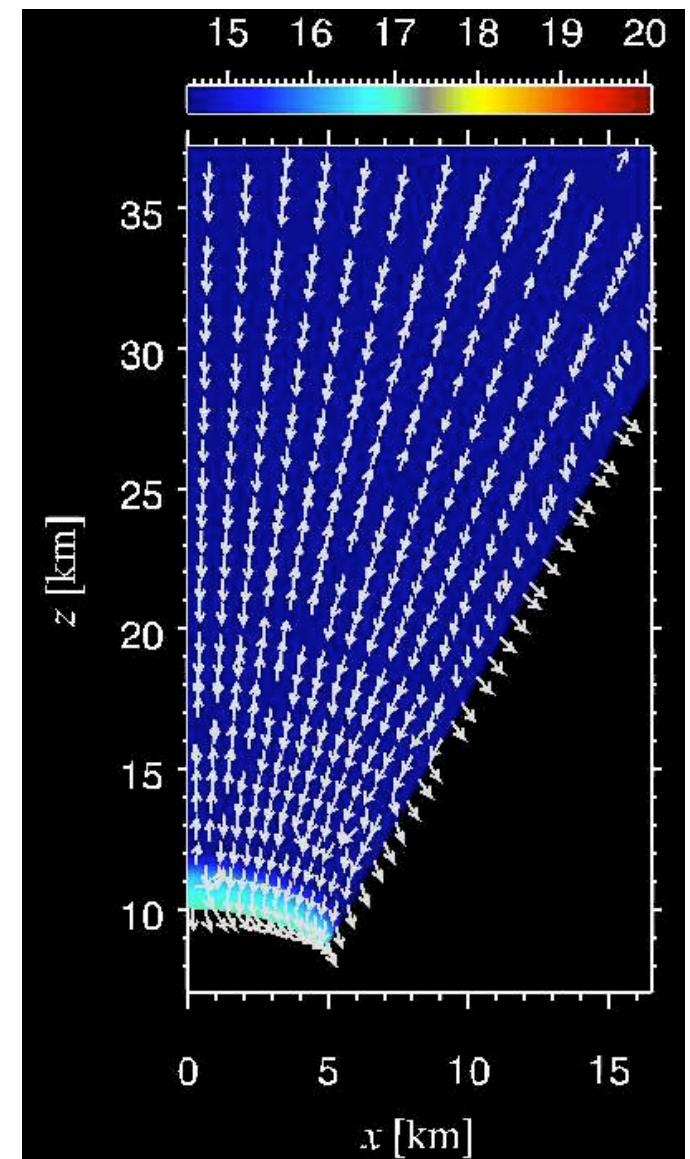
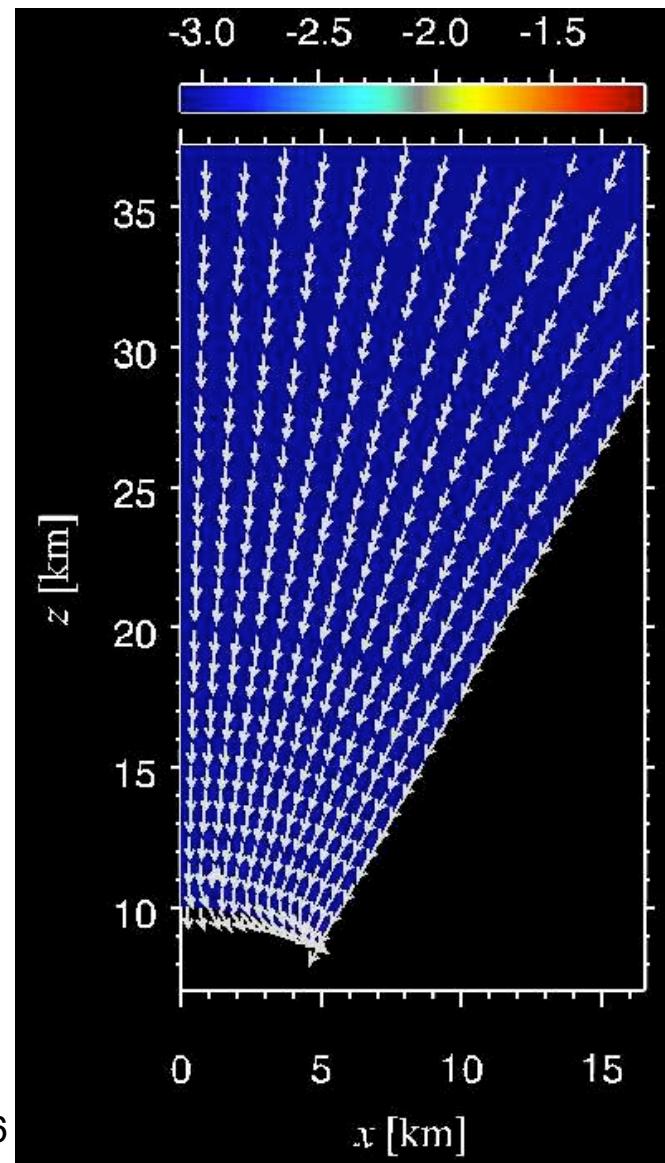


超エディントン円盤の輻射圧～中性子星磁場の磁気圧

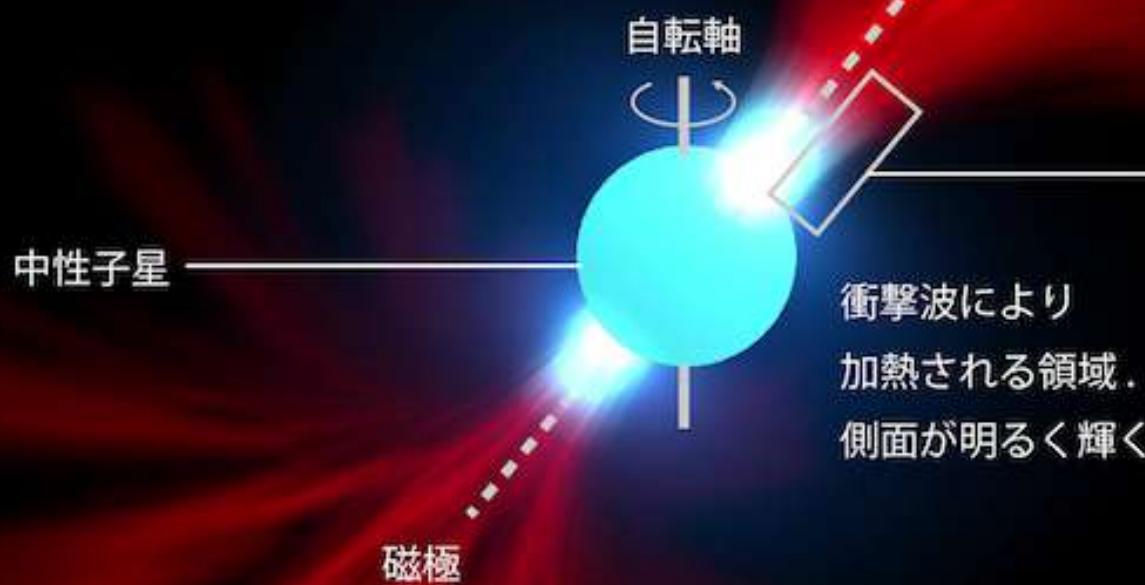
$$\frac{r_m}{R_*} \sim 1.7 \left(\frac{\alpha}{0.1} \right)^{2/7} \left(\frac{\dot{m}}{100} \right)^{-2/7} \left(\frac{B_*}{10^{10}G} \right)^{4/7} \left(\frac{M_*}{1.4M_\odot} \right)^{-3/7} \left(\frac{R_*}{10\text{km}} \right)^{5/7}$$



超エディントン降着柱

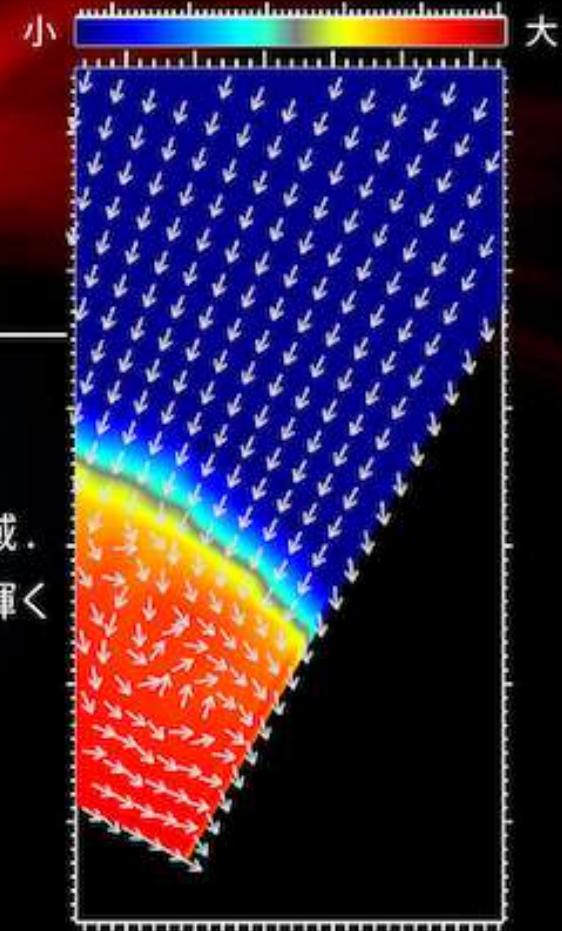


柱状に落下する
ばく大な量のガス流
(降着柱)

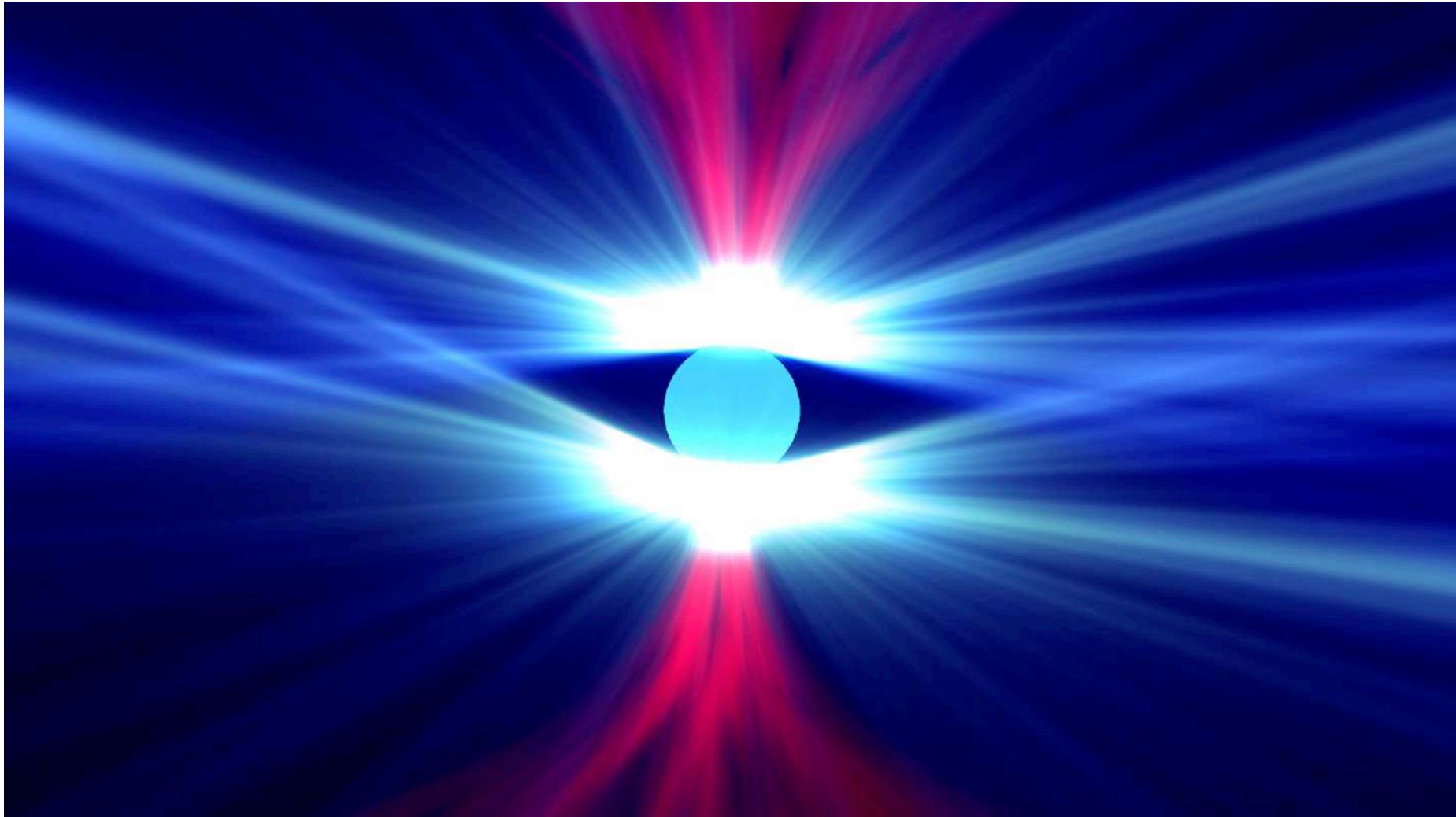


放射流体シミュレーション

光のエネルギー密度



4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0
[km]



降着柱の側面がsuper-Eddingtonで光る
ULXパルサーの正体はこれ！？

ここまでまとめ

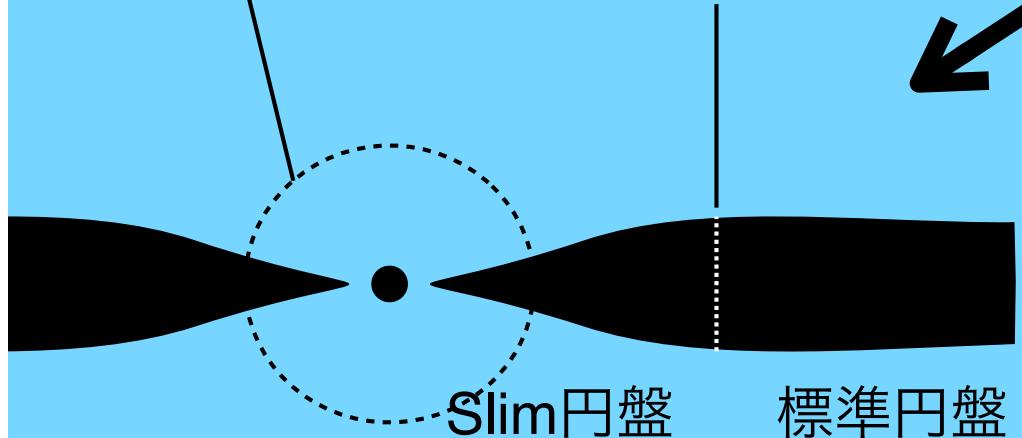
- ・ 1970年代からの問題「超エディントン降着は可能か？」の答えはYESであった.
- ・ ガス降着による超巨大BHの形成は可能である（他の説を否定しているわけではない）.
- ・ ULXの観測的性質はほぼすべて超エディントン降着で説明できる. ただし, 中心天体がBHかNSかは不明.

その他の取り組み

これまでの研究はBHの
ごく近傍にのみ着目

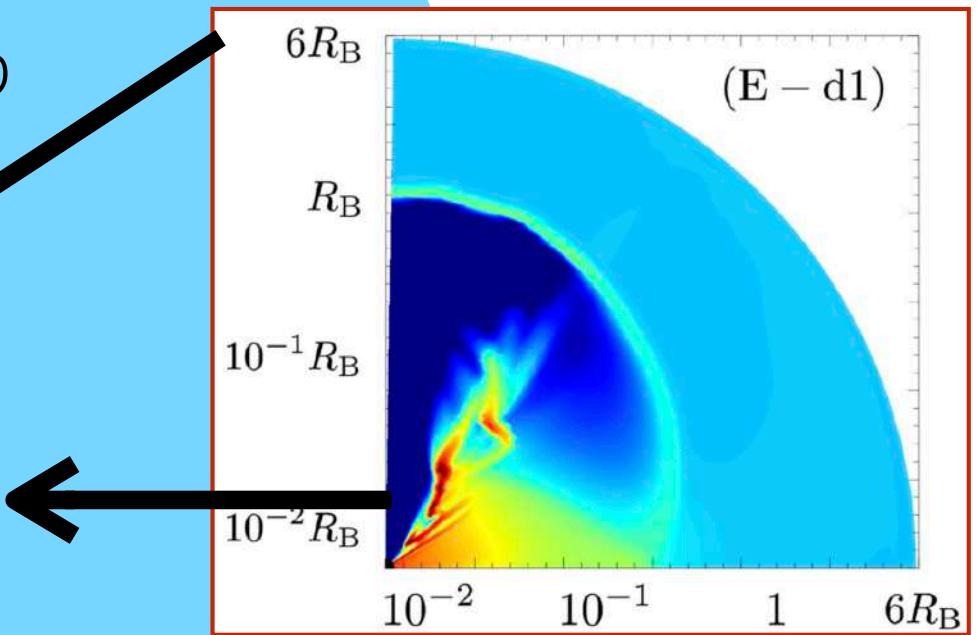
Slim円盤の外側の研究

標準円盤との境界付近で強い
アウトフローが出る可能性あり
(北木君, 他)



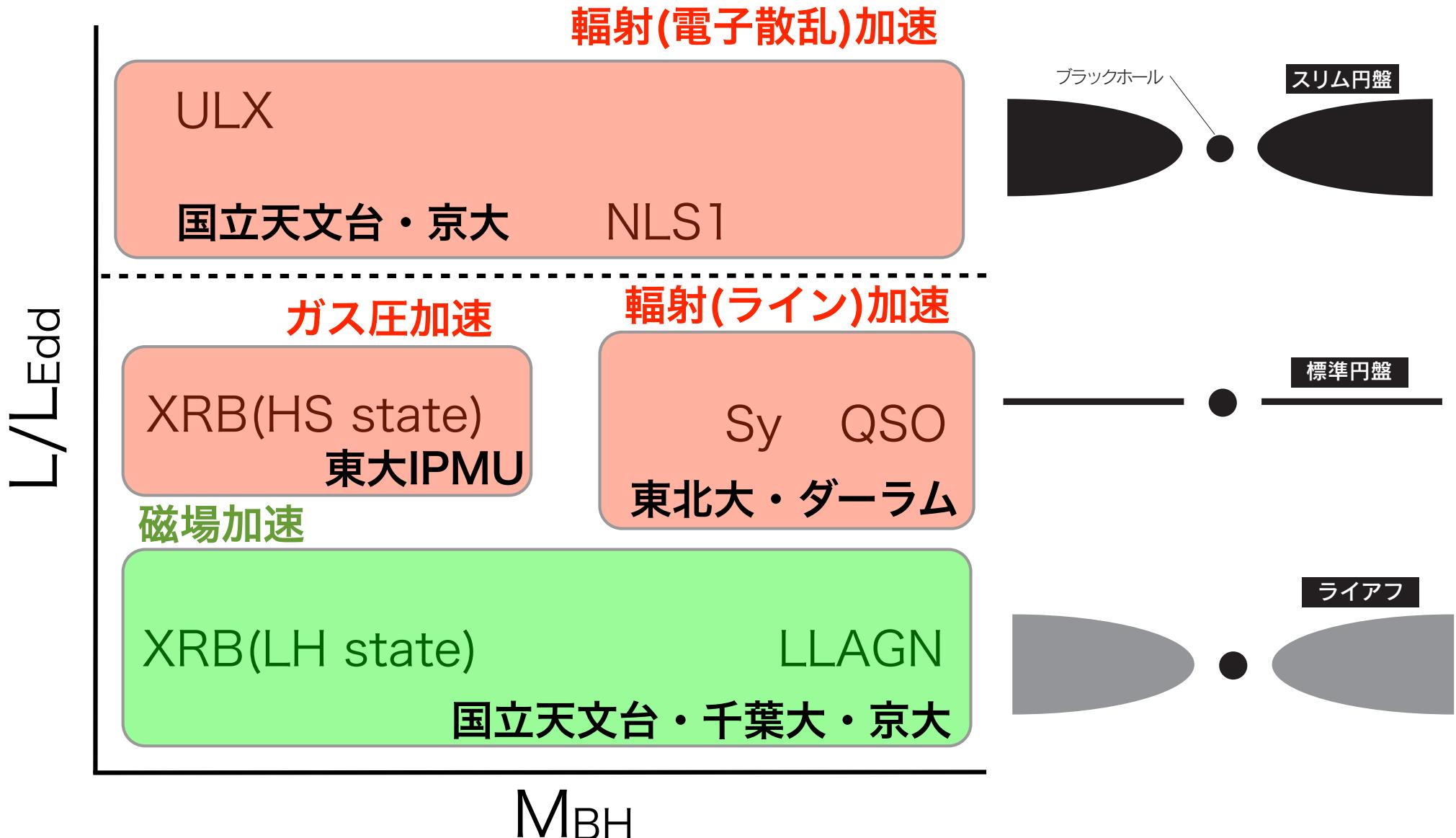
Bondi半径領域の研究

電離によって一部のガスの落下
が阻害され, アウトフローが噴出
(竹尾君, 他)



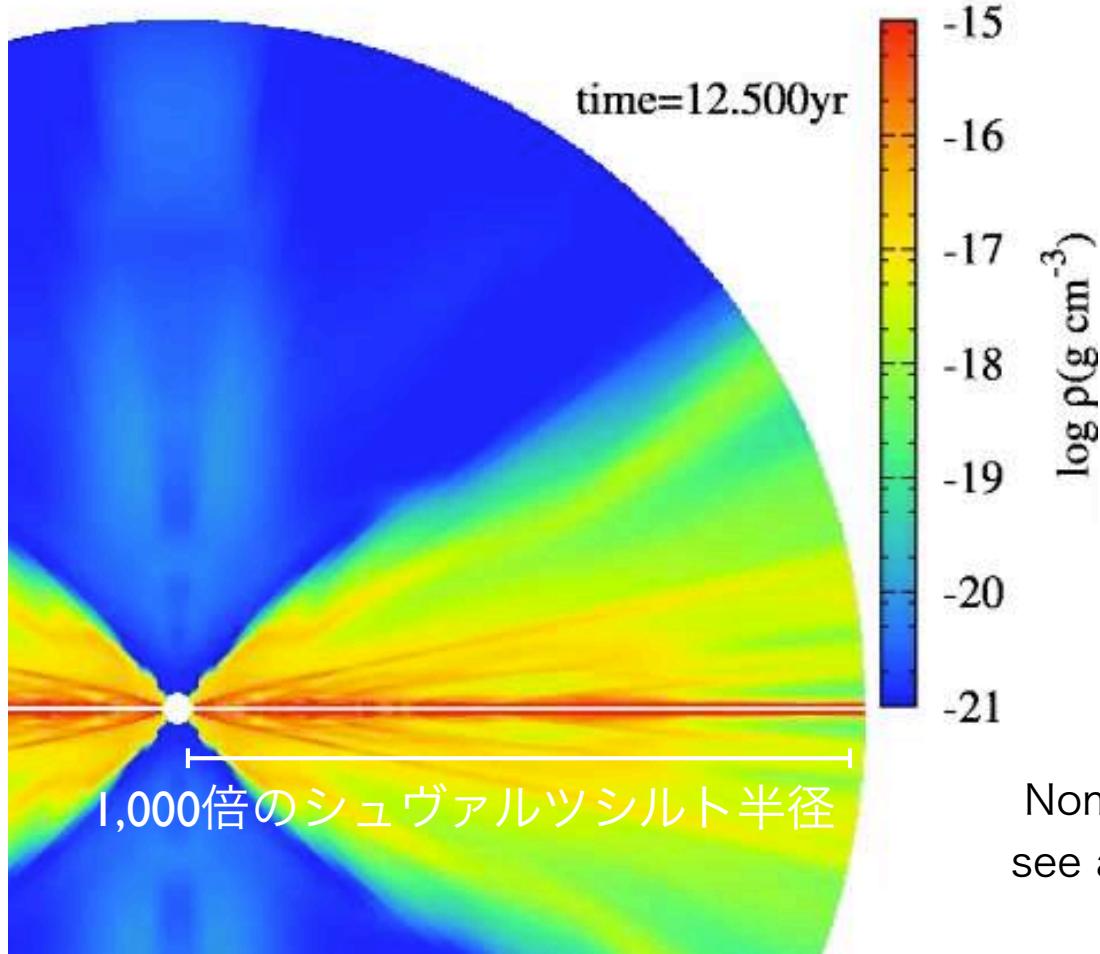
Takeo et al. 2018

多様な降着流・噴出流の研究



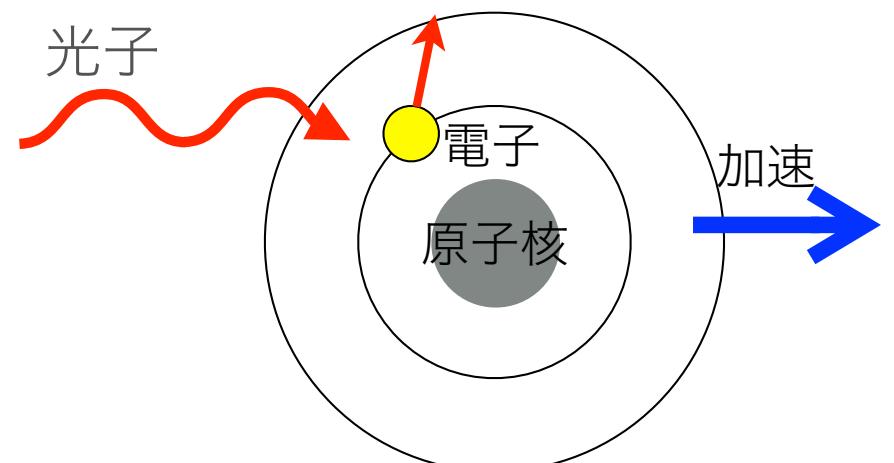
ラインフォース駆動形円盤風

約半数のセイファート銀河で観測される高速アウトフロー (UFO) の正体として注目



ラインフォース加速

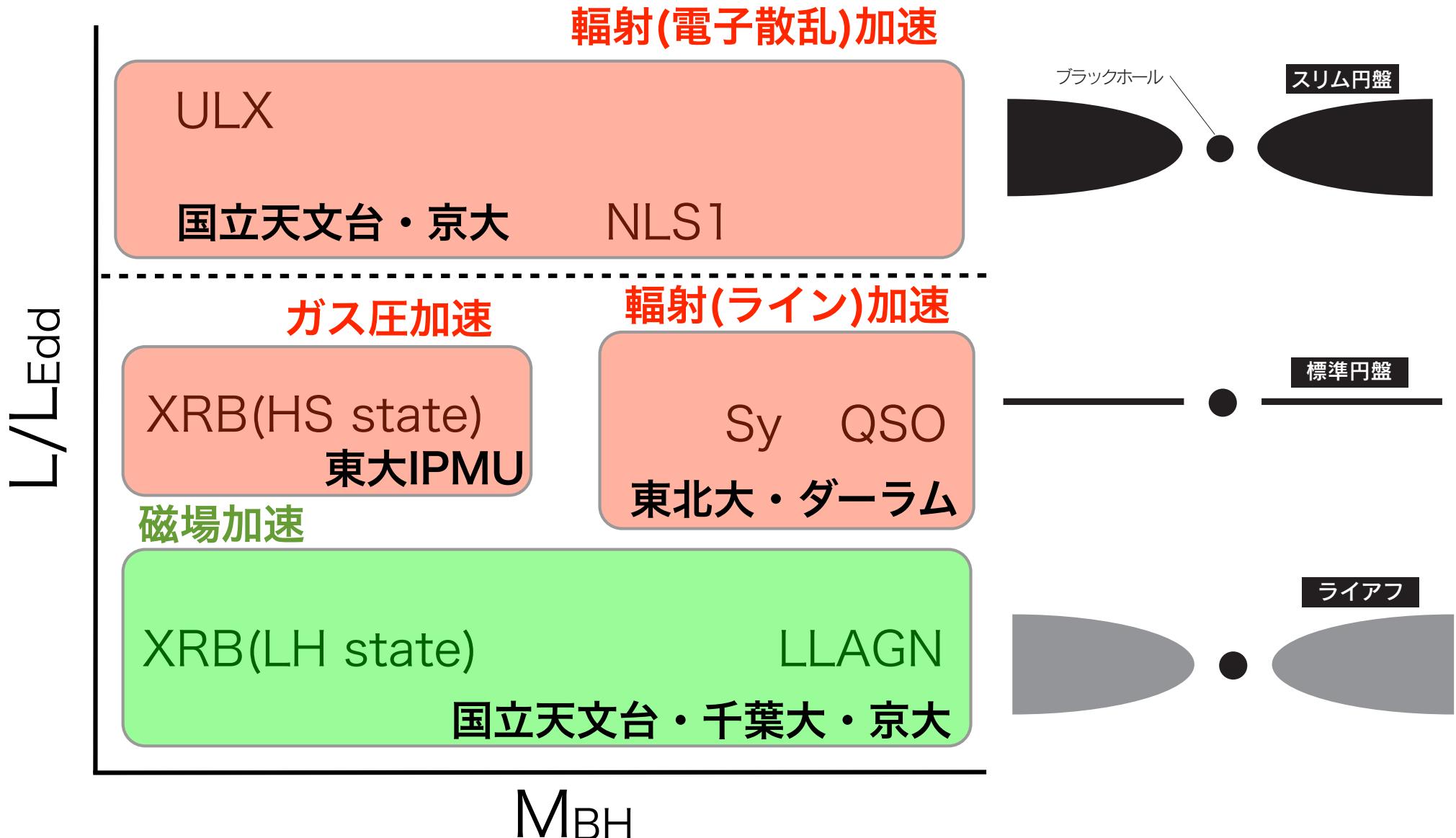
金属元素が束縛-束縛遷移によってUVを吸収して運動量を得る。



ラインフォースは密度, 温度, 速度, 電離度に依存する

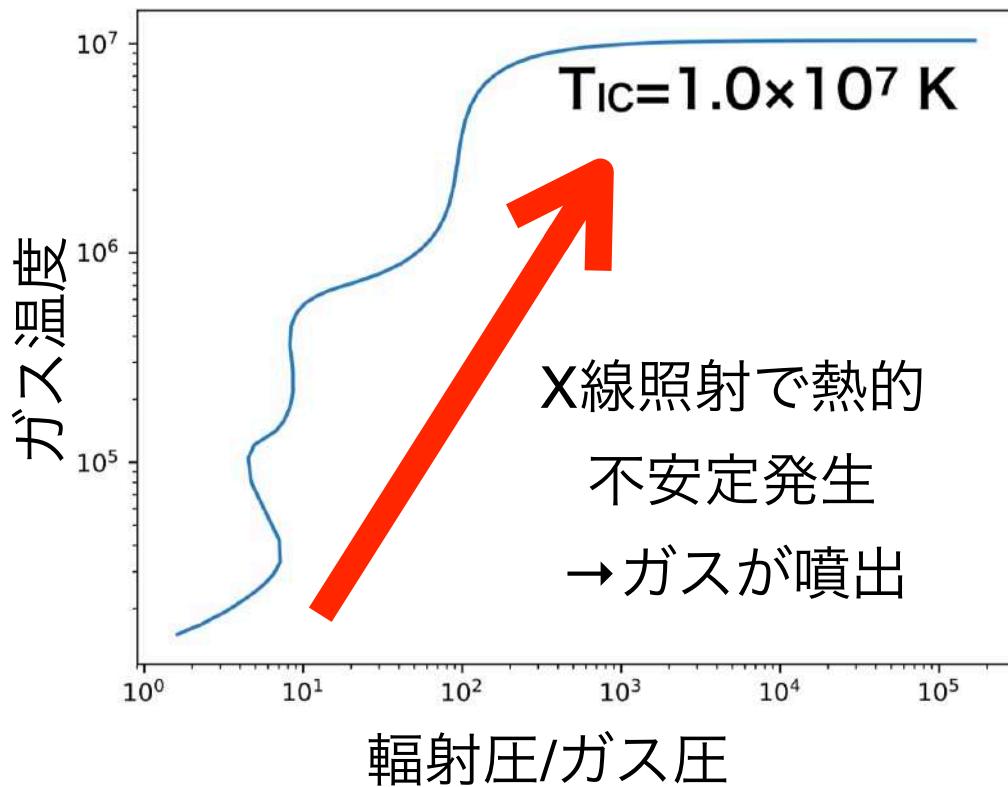
Nomura et al. 2016, 2017
see also Proga et al. 00, 04

多様な降着流・噴出流の研究

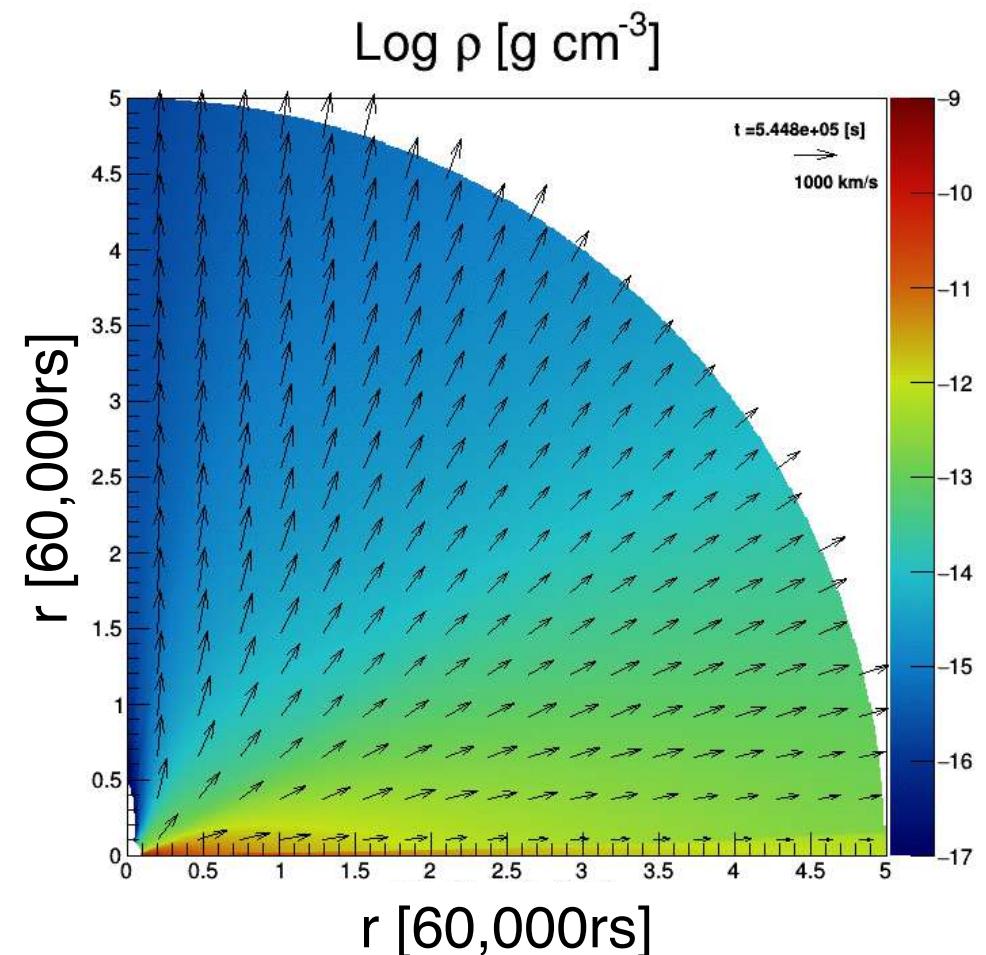


X線照射による熱的円盤風

熱平衡曲線 (by CLOUDY)

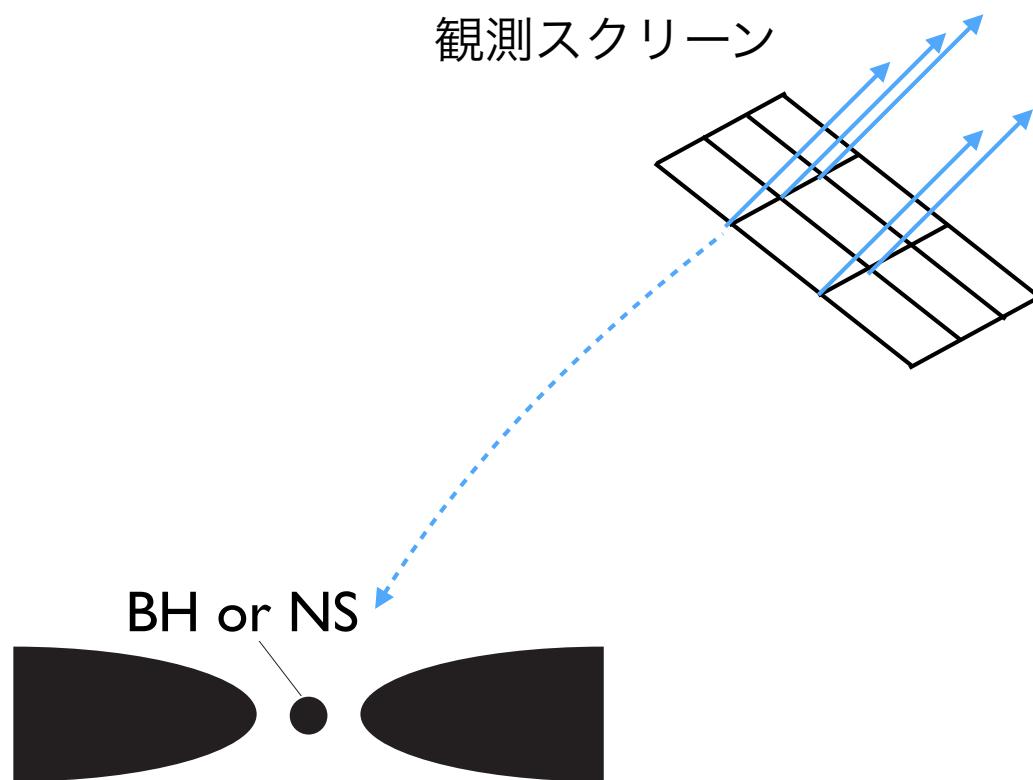


X線連星で観測される数百km/sのアウトフローを説明できるか？



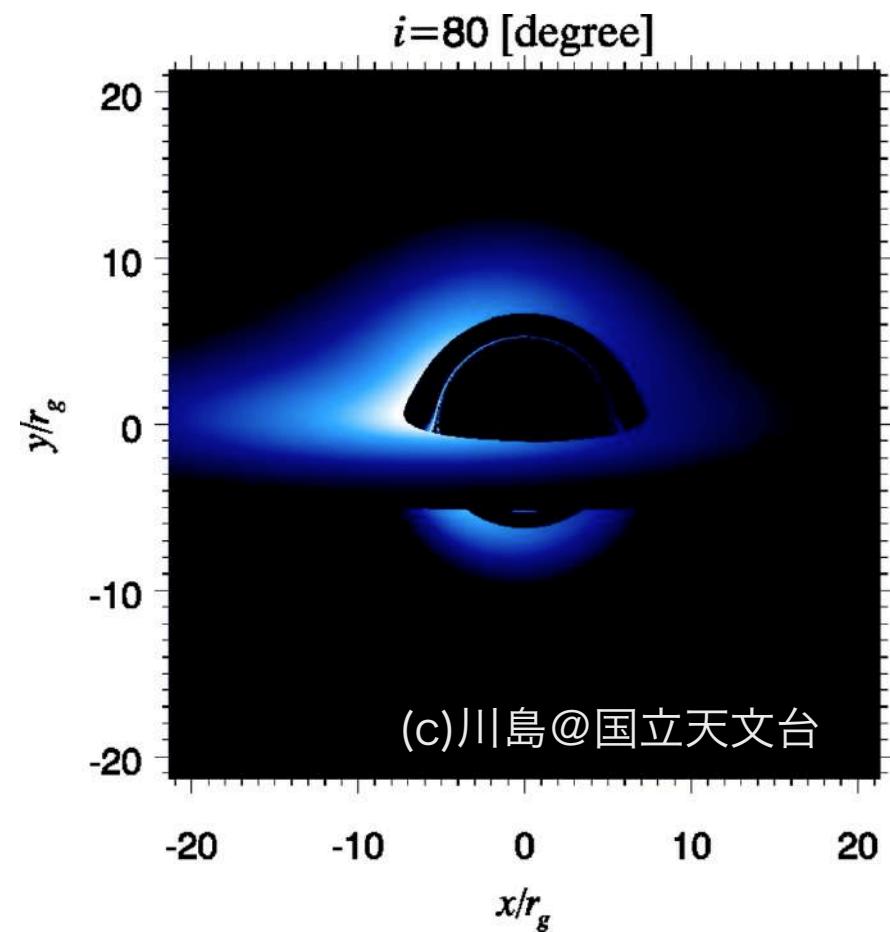
Tomaru et al. in prep.

疑似観測コード作成



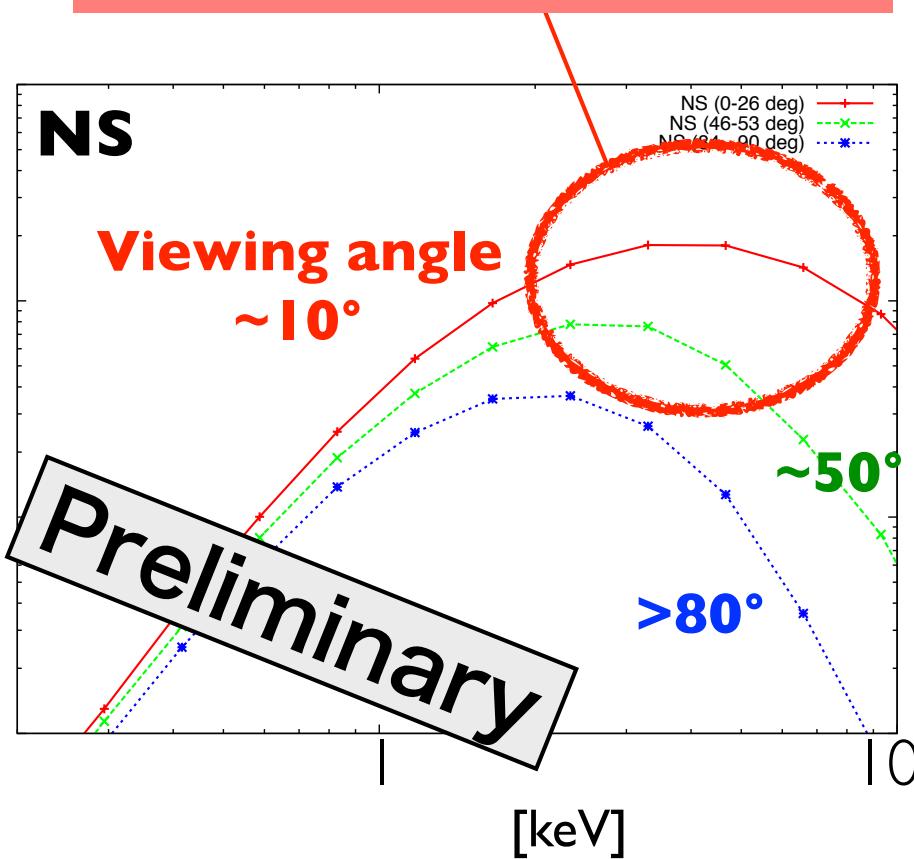
モンテカルロ法は完成 (川島君)
グリッド法は完成間近 (小川君)

観測イメージとSEDを計算
→観測と比較

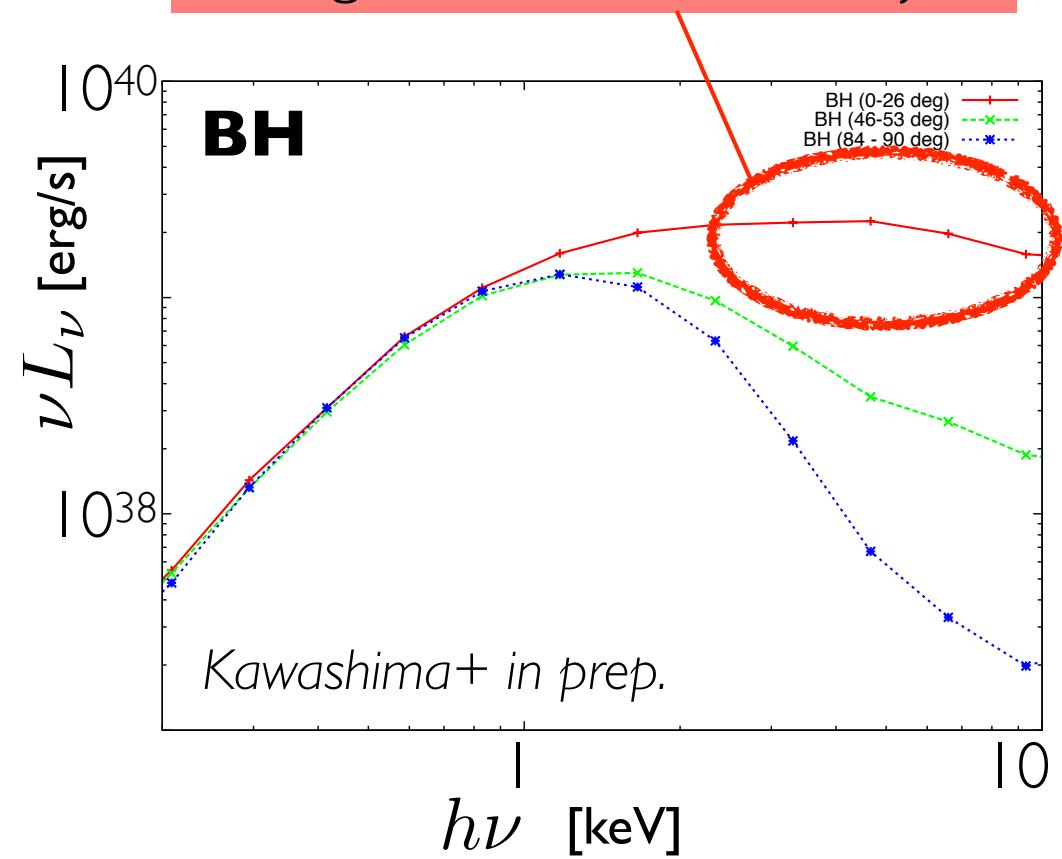


輻射スペクトルで区別？

Rollover appears via the Compton downscattering in the cold dense outflows.



Harder tail forms since the high energy photons escape through less-dense funnel jets.

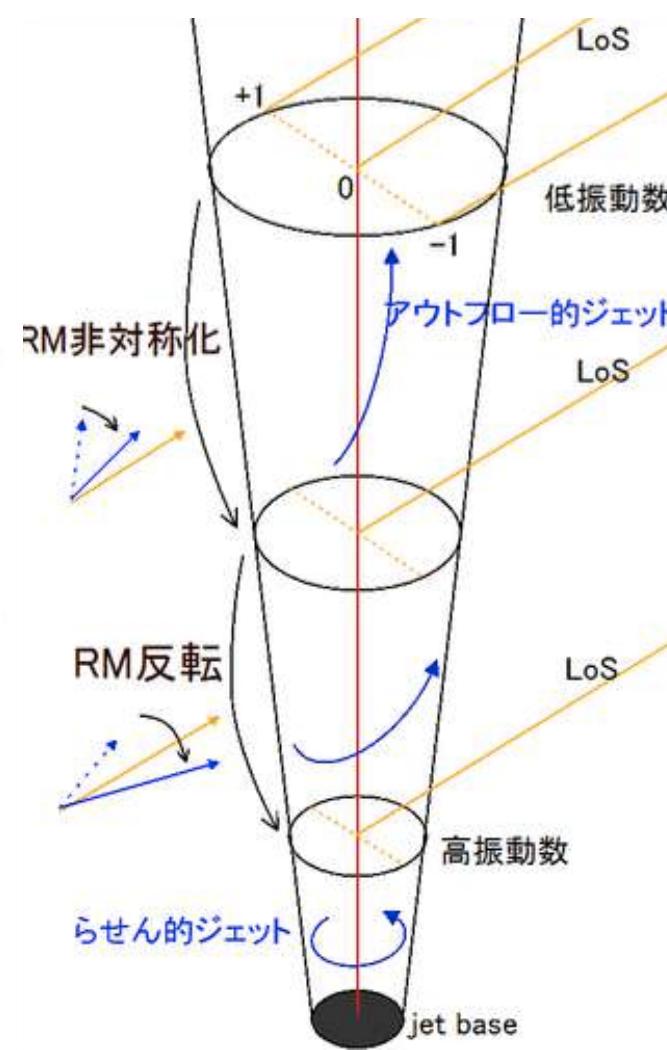
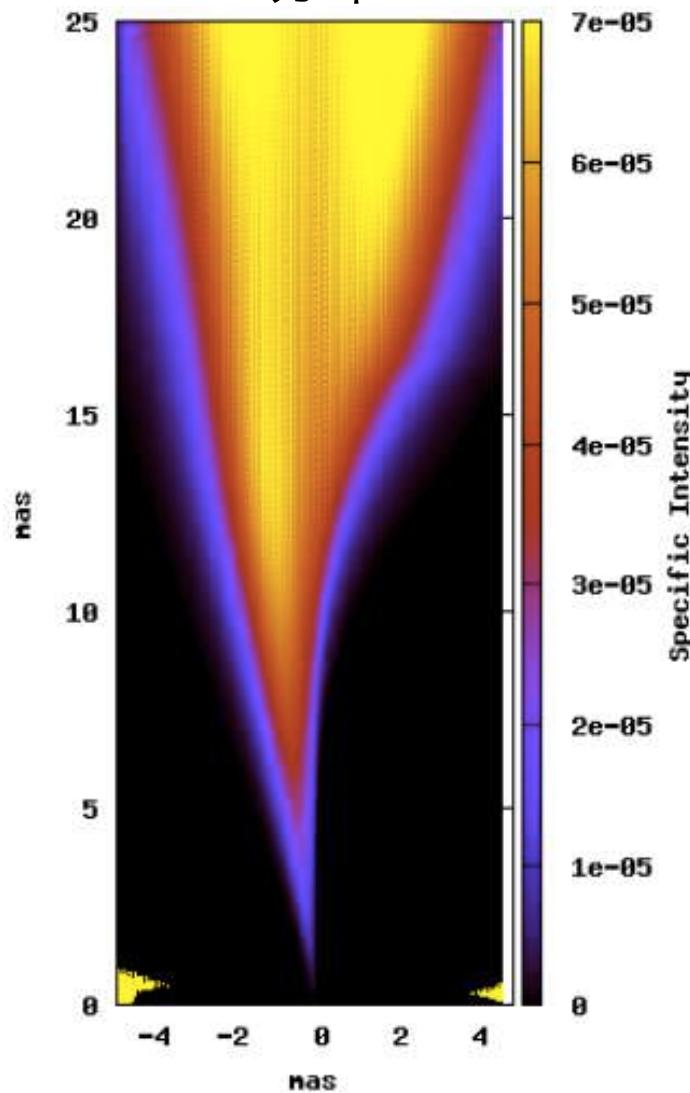


偏光輻射輸送コード作成

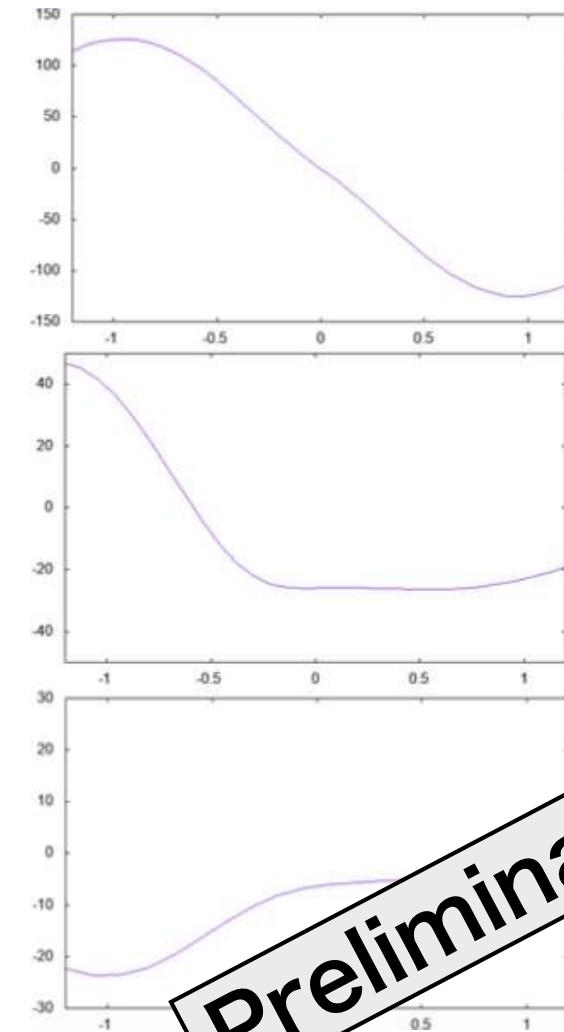
(Iだけでなく, Q, U, Vも同時に解く)

もう少しで完成 (恒任君)

I分布



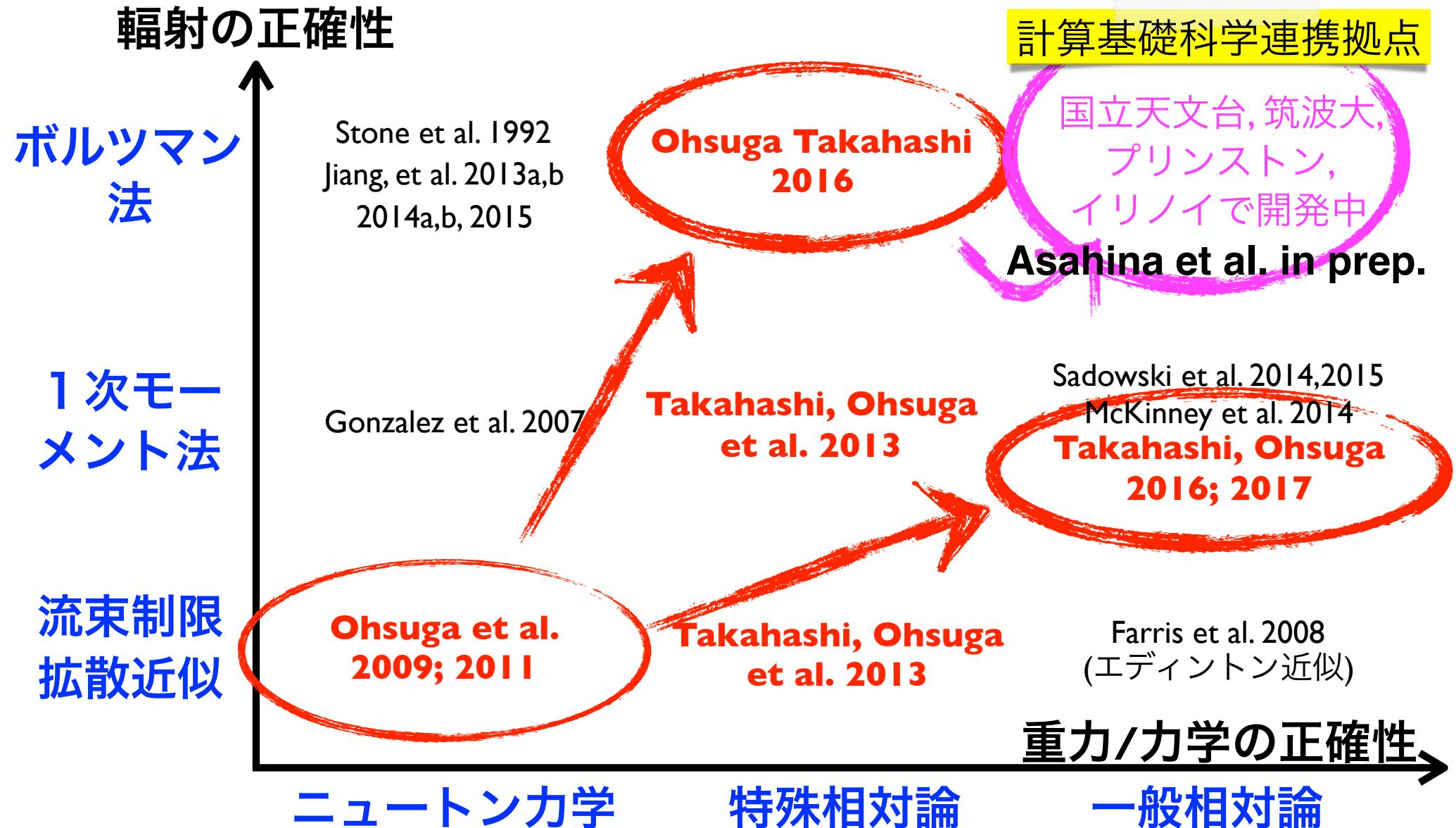
RM



Preliminary

輻射磁気流体力学コードの世界情勢

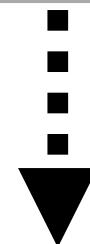
(ブラックホール降着円盤+ジェット)



輻射場の計算法

輻射輸送の方程式

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



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.

ボルツマン法

輻射輸送方程式を解く

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

厳密解が得られるが,
計算量が膨大

1次モーメント法

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.

計算は軽いが,
制限が多い

厳密だが,
計算量大

どれも、陰解法と陽解法
を巧みに組み合せた
ハイブリッドコード

まとめと今後

- ・ 輻射（磁気）流体シミュレーションや輻射輸送シミュレーションを駆使した研究が順調に進行中
- ・ BHへの超エディントン降着だけでなく，多様な降着流・噴出流の研究も進行中.
- ・ SMBH形成, AGNフィードバック, 孤立ブラックホール探査, 観測との比較といった方面に研究を拡大する予定.