

2020年度 第50回 天文・天体物理若手夏の学校

次世代の ブラックホール天文学（入門）

筑波大学計算科学研究センター
大須賀 健

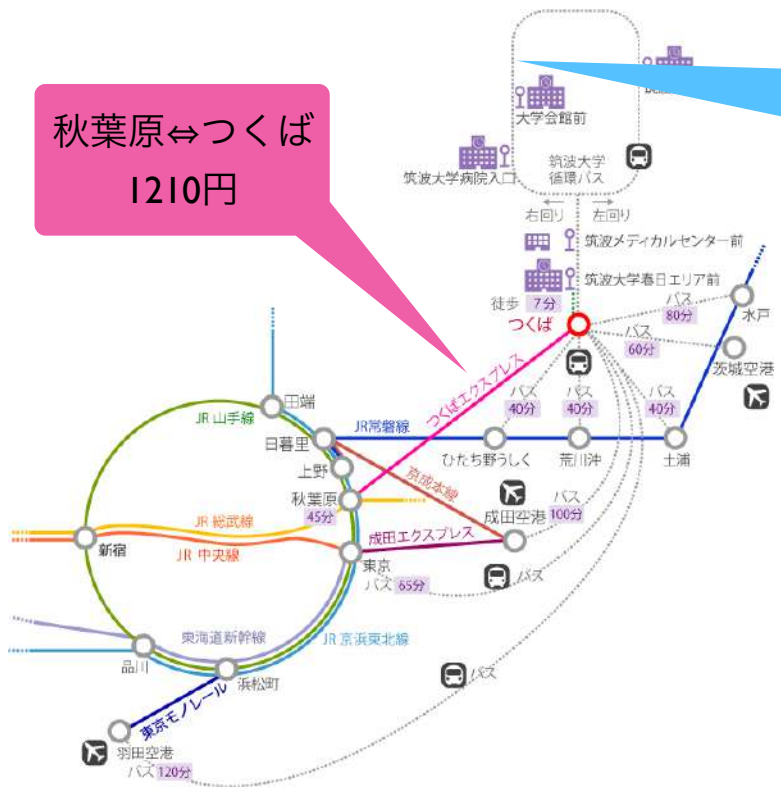
Credit: EHT Collaboration

自己紹介

- 筑波大学計算科学研究センター所属
- ブラックホール（理論）が専門
- 京大, 東大, 千葉大, ダーラム大などと共同研究



筑波大宇宙物理理論研究室



秋葉原⇔つくば
1210円



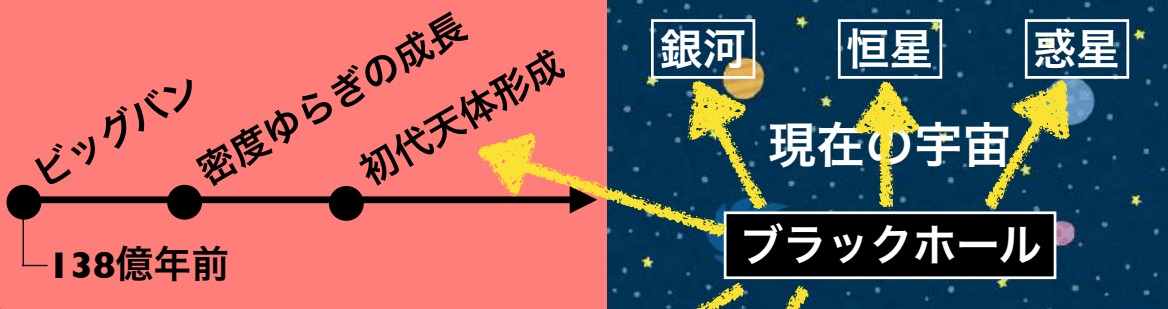
構成員～40名
(うち教員6名)

研究テーマ

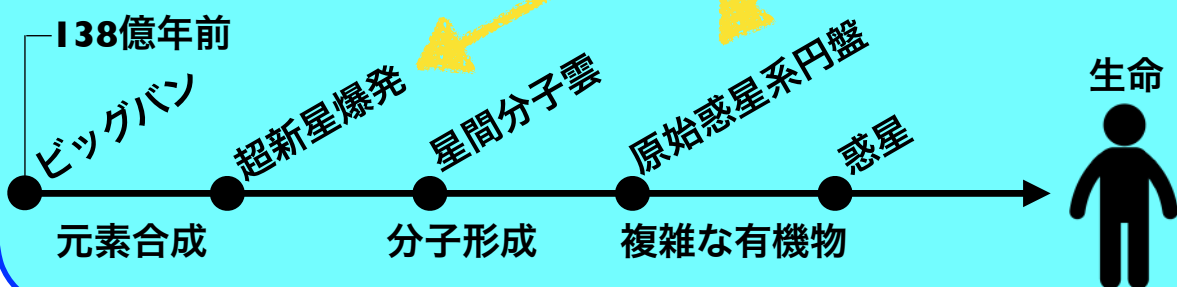
宇宙論・銀河・星・惑星・
ブラックホールなどなど

天文学のグランドチャレンジ

構造の起源



物質の起源



ブラックホール天文学の課題

ブラックホールの何を解明すべきなのか？

(1) ブラックホールは存在するのか？

(2) ブラックホールはどう形成され、どう成長するのか？

(3) 宇宙の進化にどう影響を与えるのか？

解明の第一歩となるのが

ブラックホール降着円盤+アウトフロー

ガス降着および輻射&アウトフロー

ブラックホールの百年史

1915-16年：

一般相対性理論発表
ブラックホールの予言

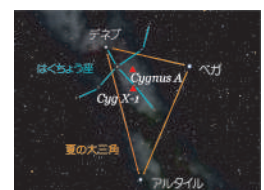


1930年代~1960年代：

ブラックホールの実在に関する論争
(エディントン, チャンドラセカール,
オッペンハイマー, ホイラー, etc)

1970年代：

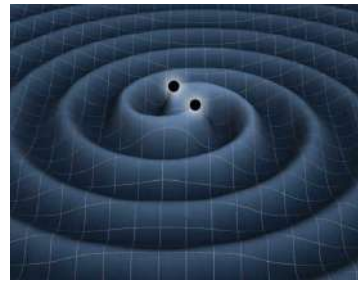
はくちょう座X-1を
ブラックホールと同定



ブラックホールの百年史

2016年：

- 重力波初検出（発表）
ブラックホールの存在がほぼ確実に



2019年：

- ブラックホールの撮影に成功（発表）



ブラックホールの存在は証明された

Accretion disks around BHs;

one of the most powerful energy source in the Universe.

Black hole

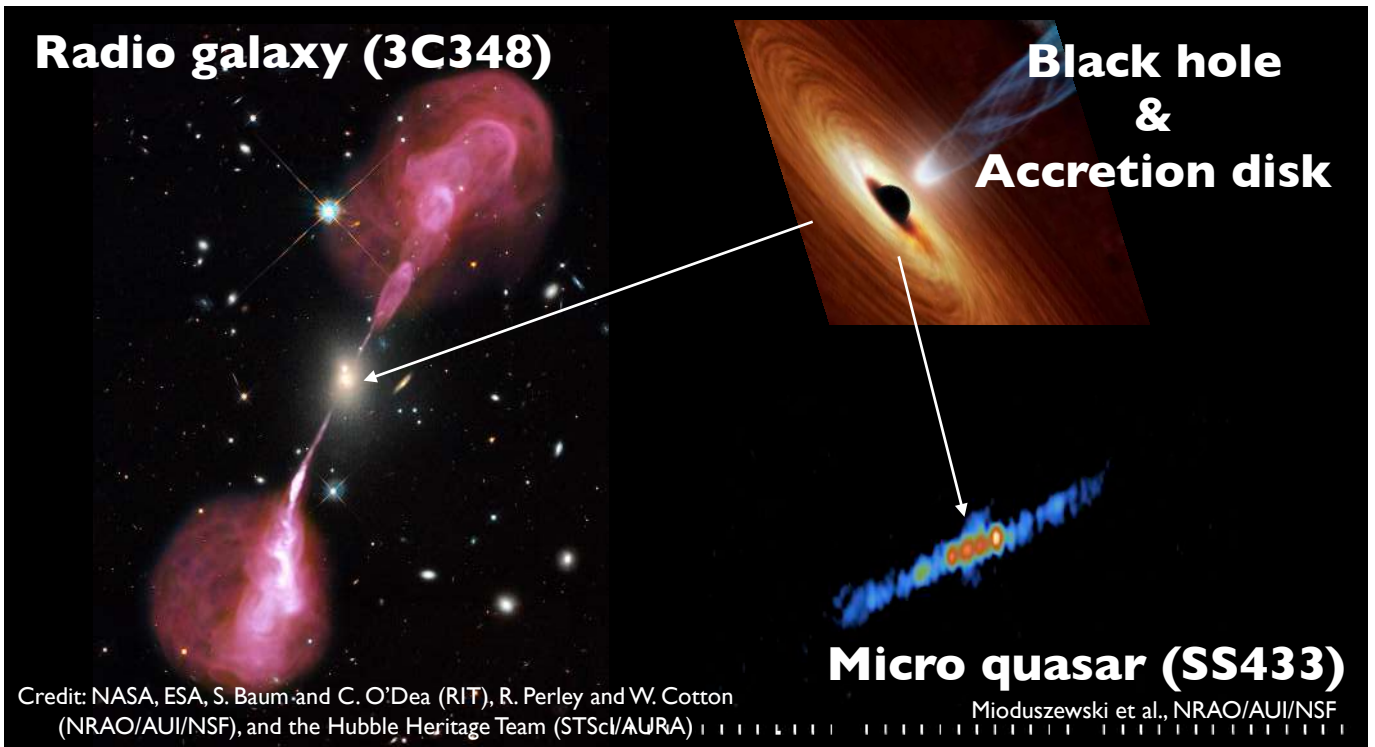
Gas

**Outflow
(jet and/or disk wind)**

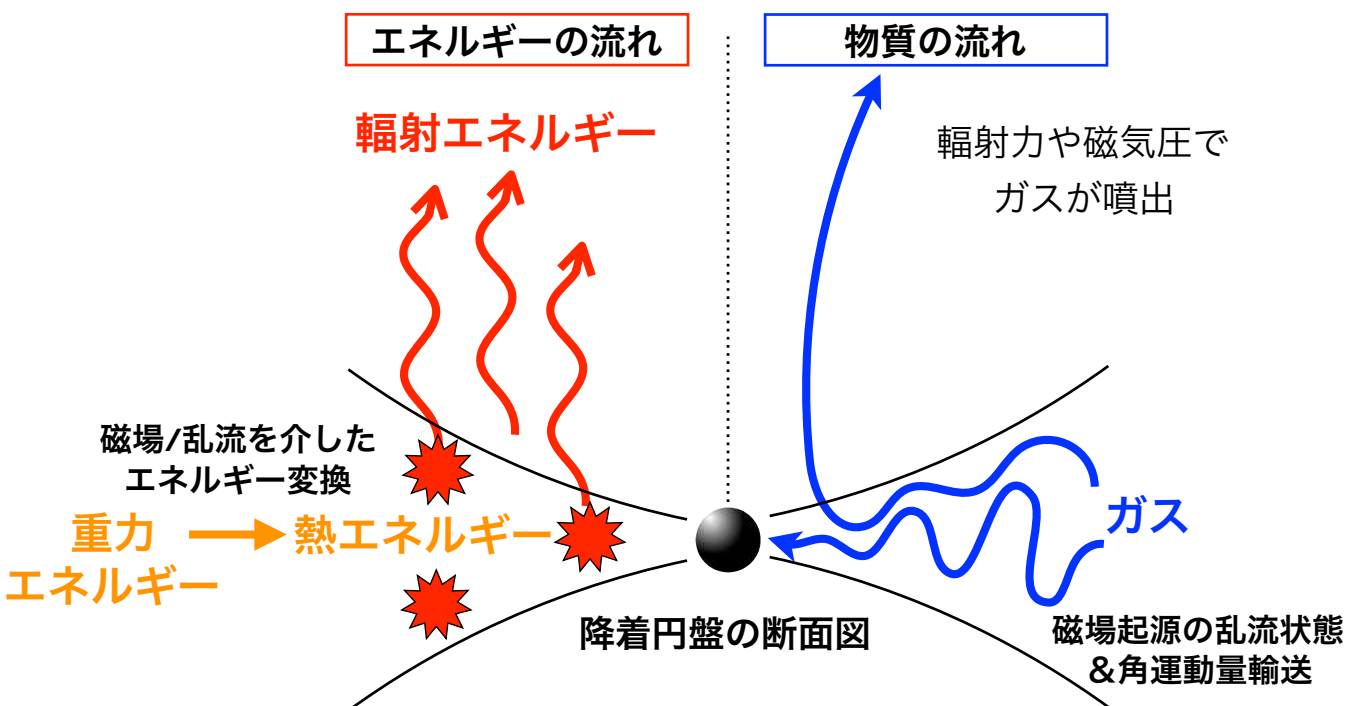
Accretion disk

Disk emits a large amount of photons. Sometimes, powerful outflows are launched

降着円盤 + アウトフロー



輻射と磁場の重要性

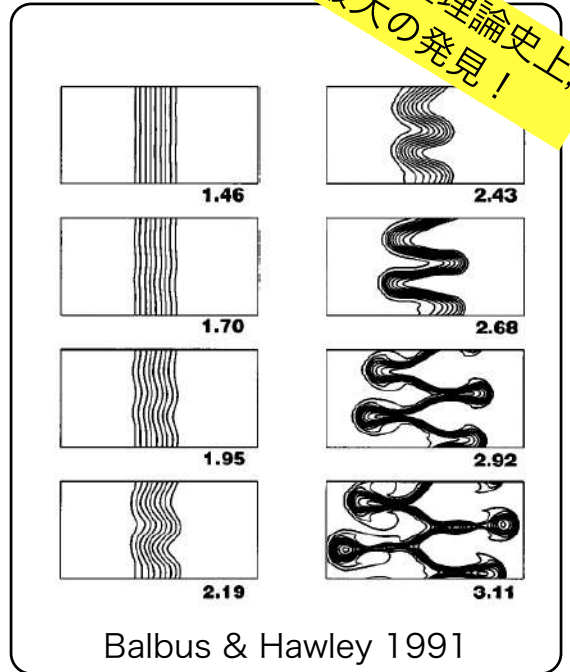
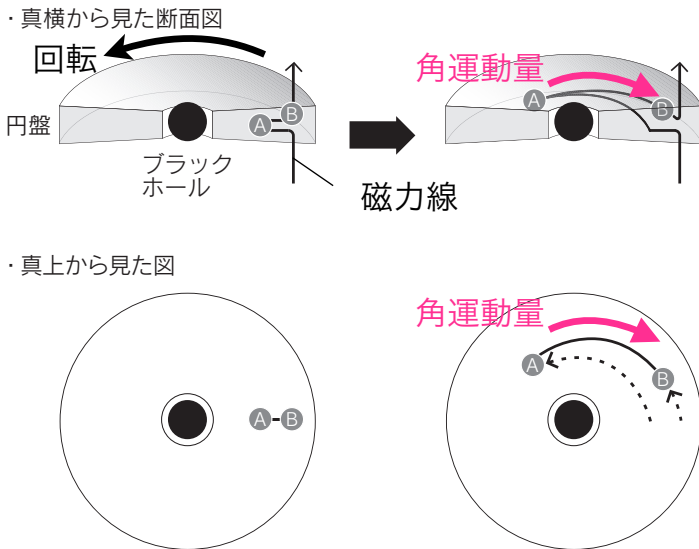


輻射と磁場の重要性

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

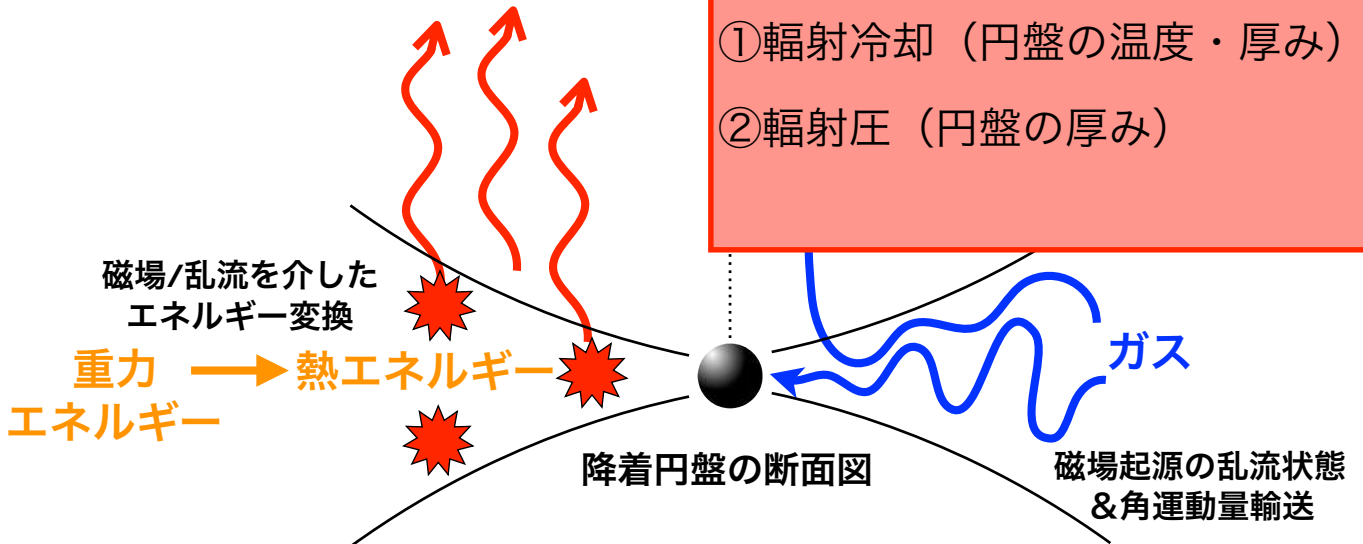
降着円盤理論史上、最大の発見！



輻射と磁場の重要性

エネルギーの流れ

輻射エネルギー



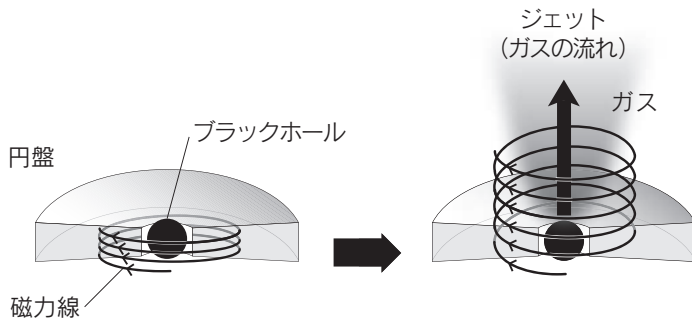
輻射の役割：

- ①輻射冷却（円盤の温度・厚み）
- ②輻射圧（円盤の厚み）

輻射と磁場の重要性

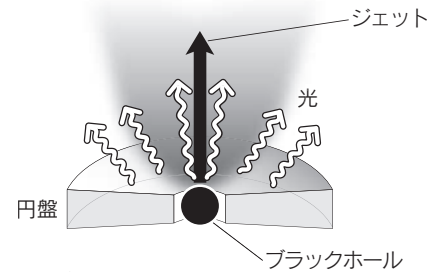
磁気圧加速

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

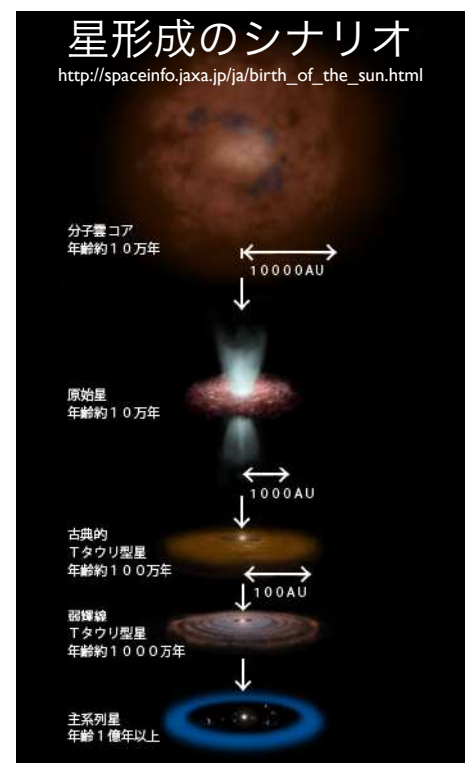
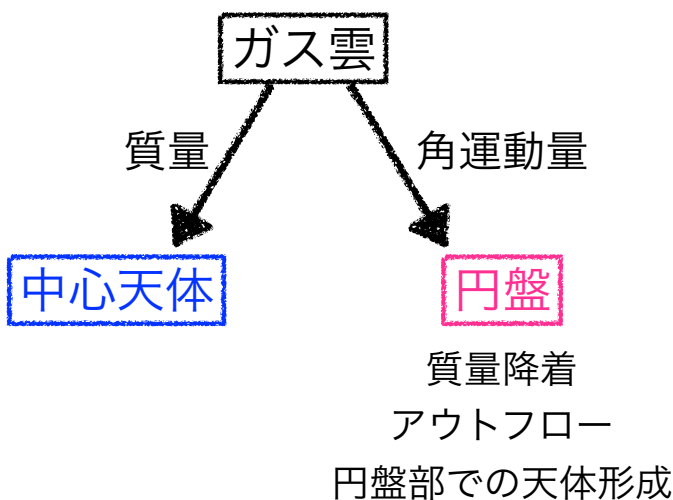
輻射力でジェット噴出



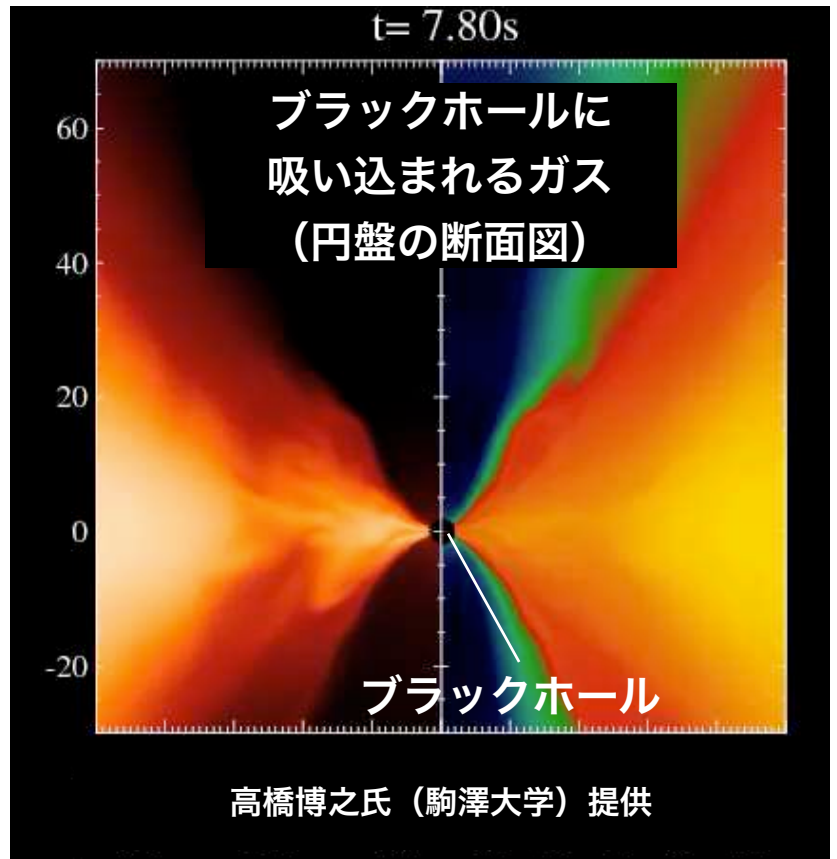
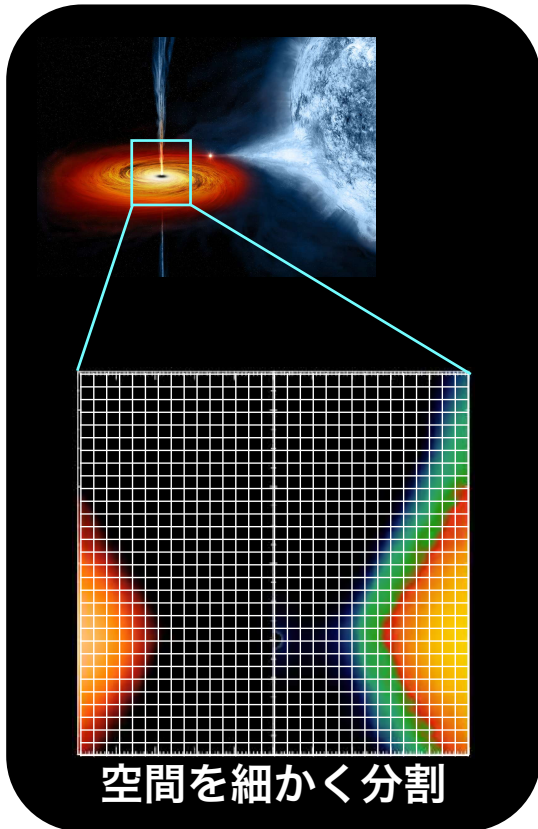
多次元**輻射****磁気**流体力学
 (輻射輸送+磁場+流体+重力) が必須!

輻射と磁場の重要性

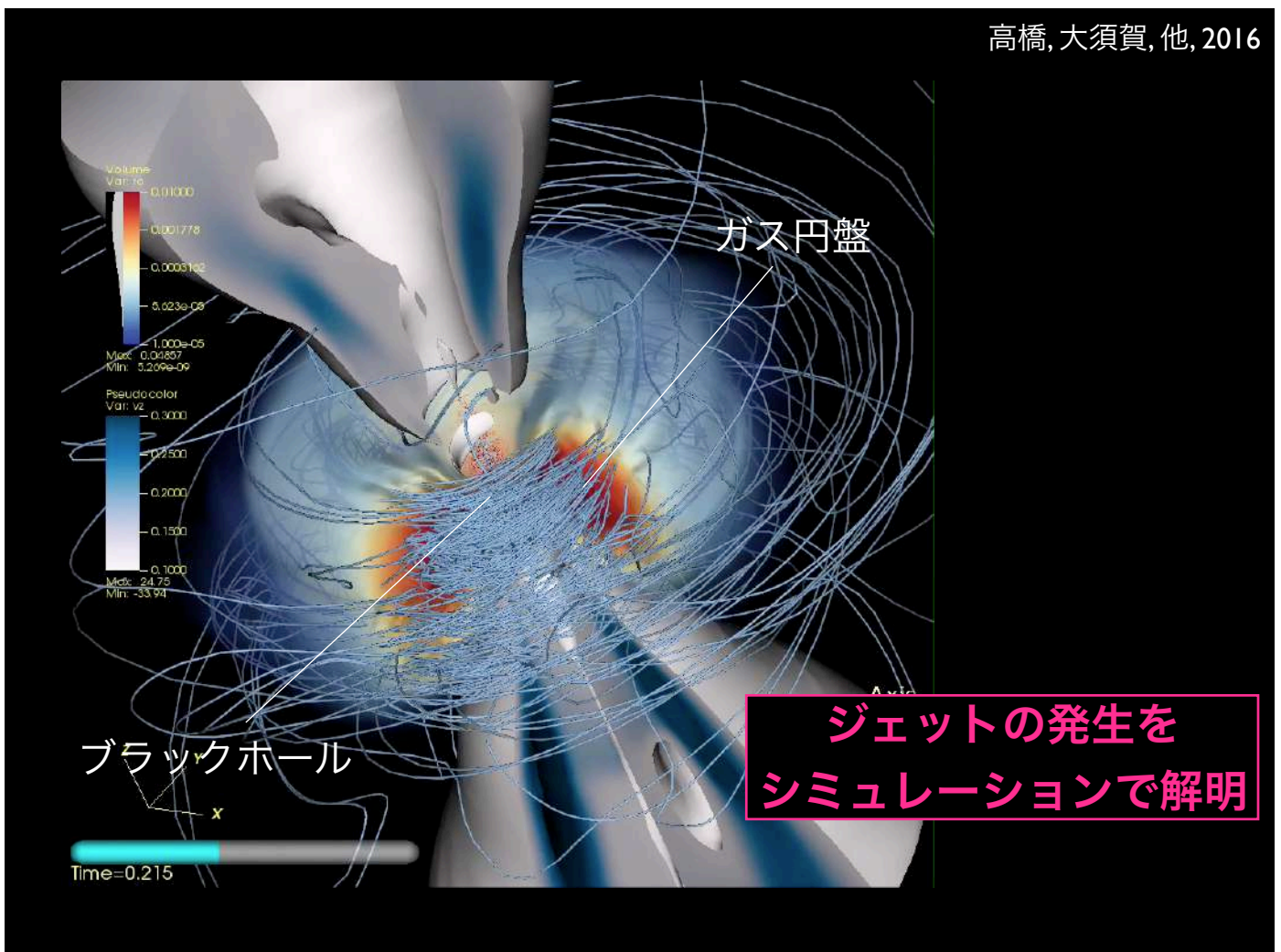
円盤の物理は天体形成の要
 ブラックホールだけではない

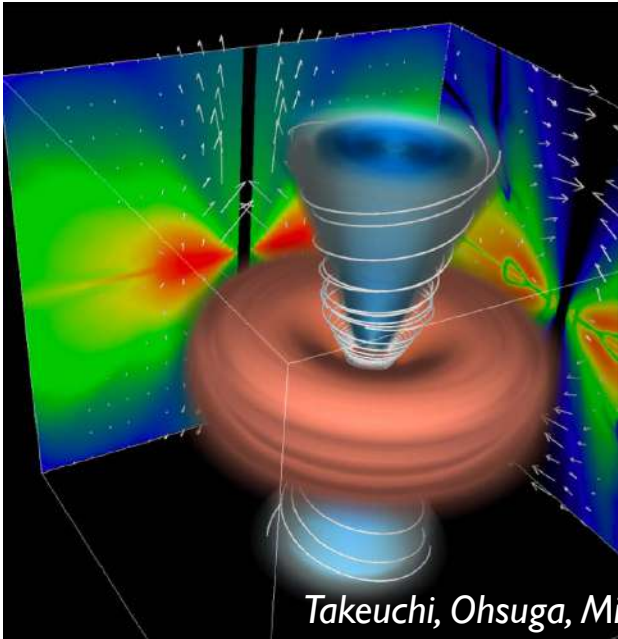


スパコンでシミュレーション

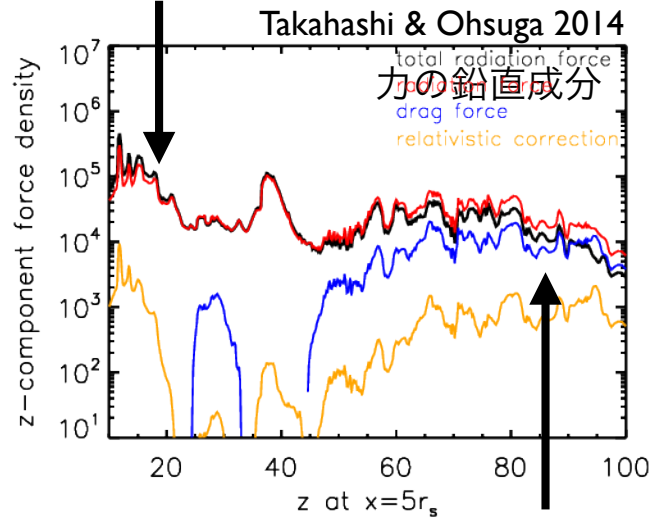


高橋, 大須賀, 他, 2016





輻射力(赤)で加速

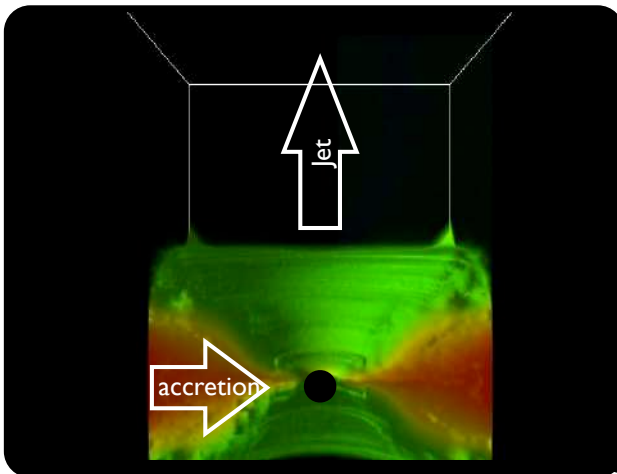


輻射力(赤)~輻射抵抗(青)で加速終了

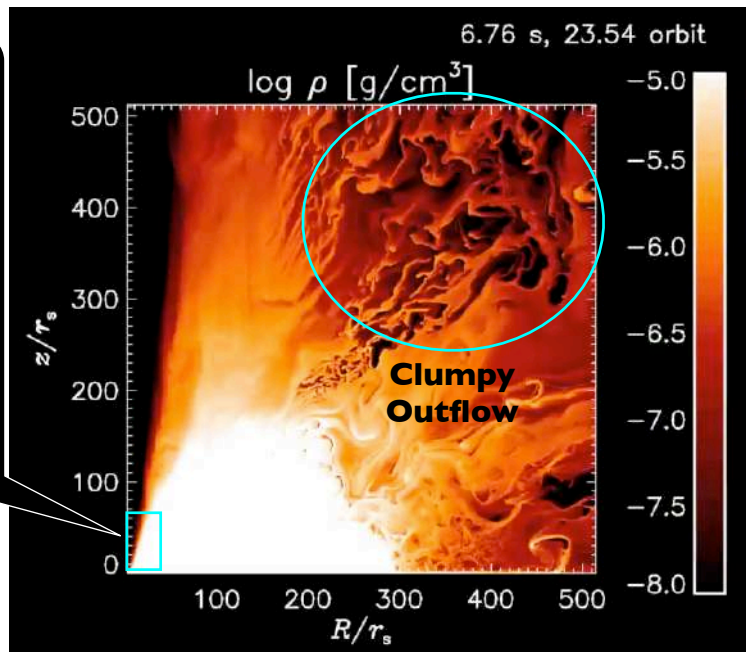
SS433のジェット (光速の約30%) と無矛盾
GRS1915+105のジェット (光速の99%超) は説明できない。
ジェットの細さ (数°以下) も説明できない。

円盤風の発生と分裂

Super-Eddington disk+ Jet



Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 2013

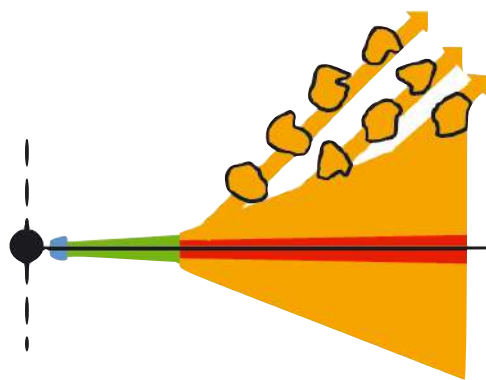


Time-dependent, Clumpy outflow with wide angle

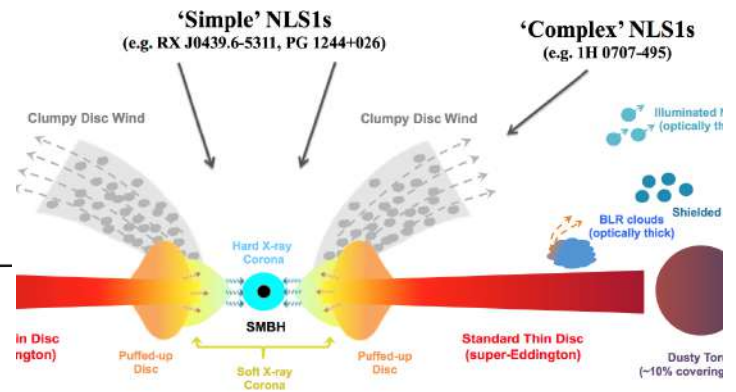
CLUMPY OUTFLOWS

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

シミュレーションと観測の協力

シミュレーション

流体力学計算

- 円盤/ジェット
の構造と変化

輻射輸送計算

- 観測したらど
うなるのか？

観測

- EHTおよび近未
来の望遠鏡

数値データ
引き渡し

観測と理論
の比較

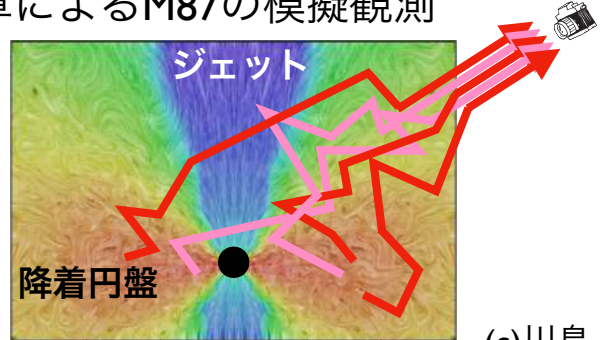
理論と観測の融合による研究の推進

次世代天文学の
中心に！

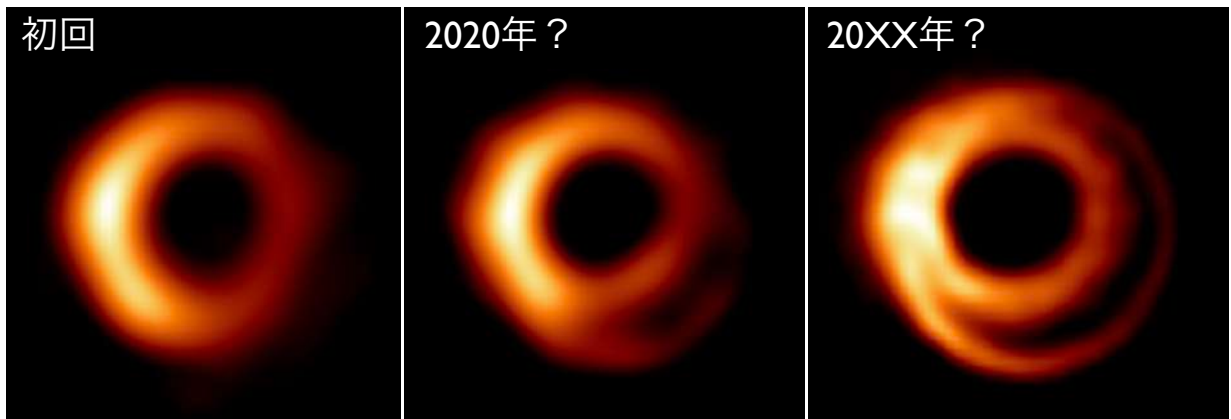
次世代観測を見据えて(EHT)

一般相対論的輻射輸送計算によるM87の模擬観測

今回のEHT観測の再現に成功し、
近未来のEHT観測を予言



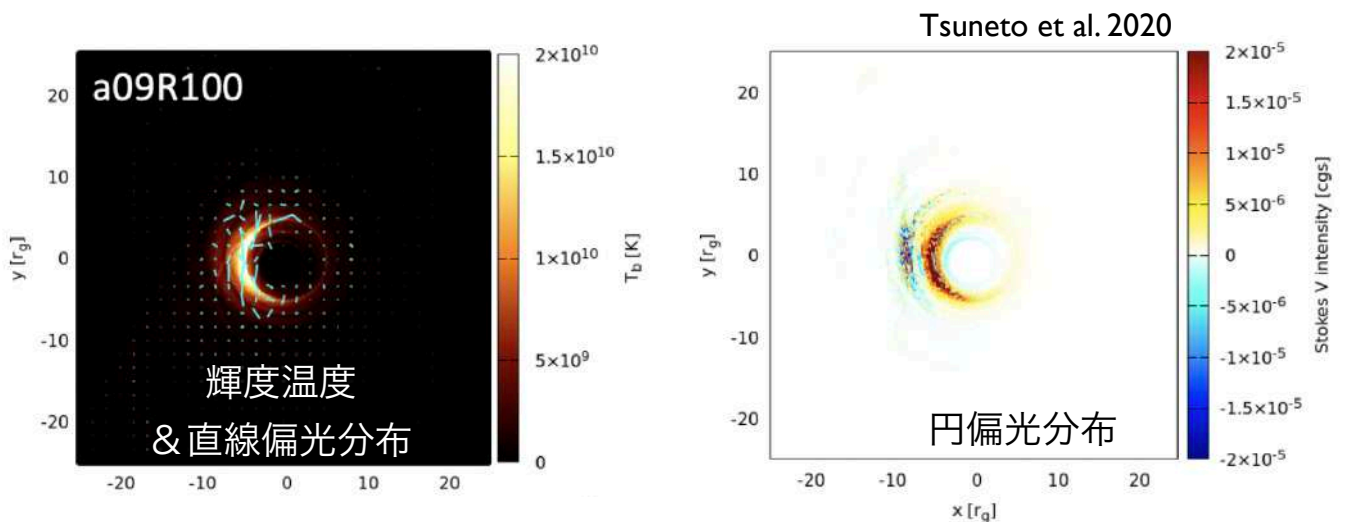
(c)川島



次世代観測を見据えて(EHT)

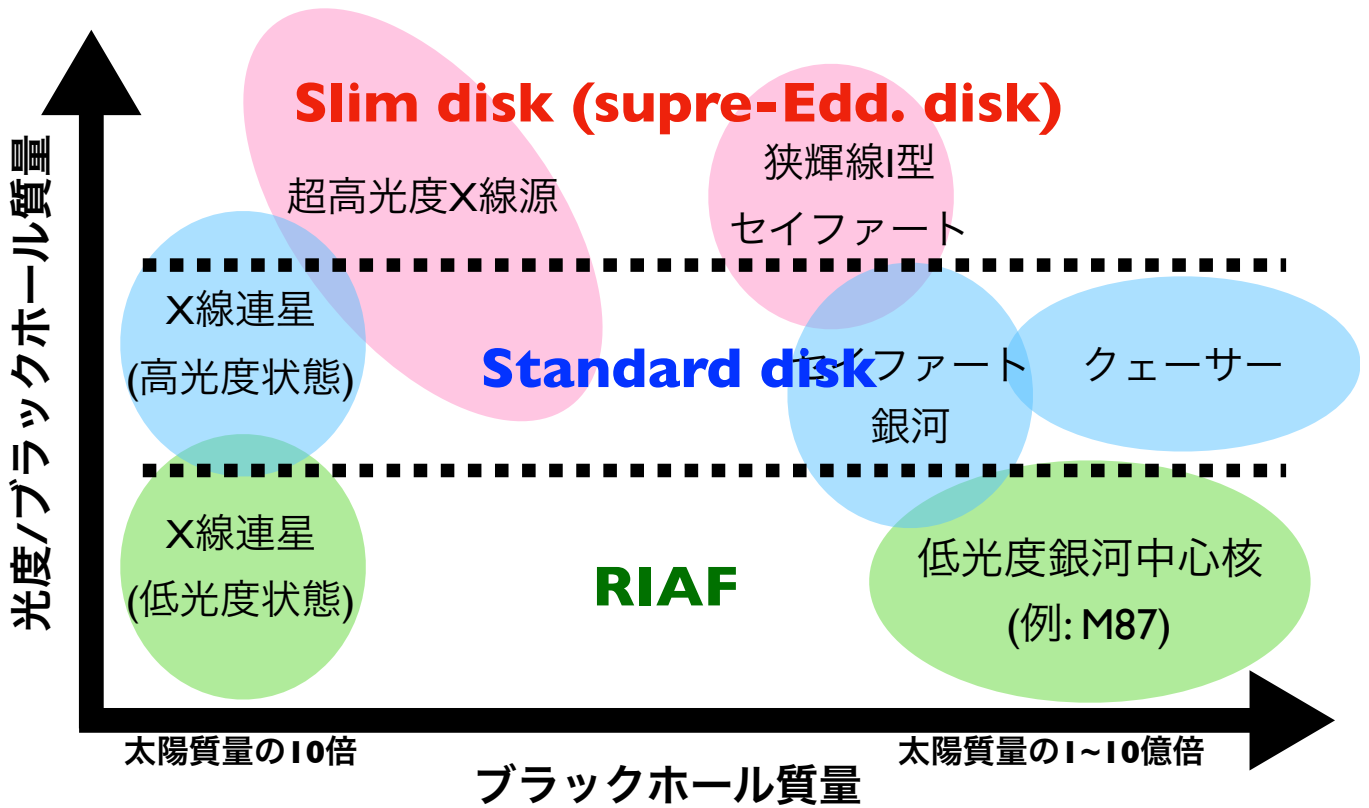
一般相対論的輻射輸送計算によるM87の模擬観測

偏光観測から相対論的ジェットの磁場構造の解明を目指す

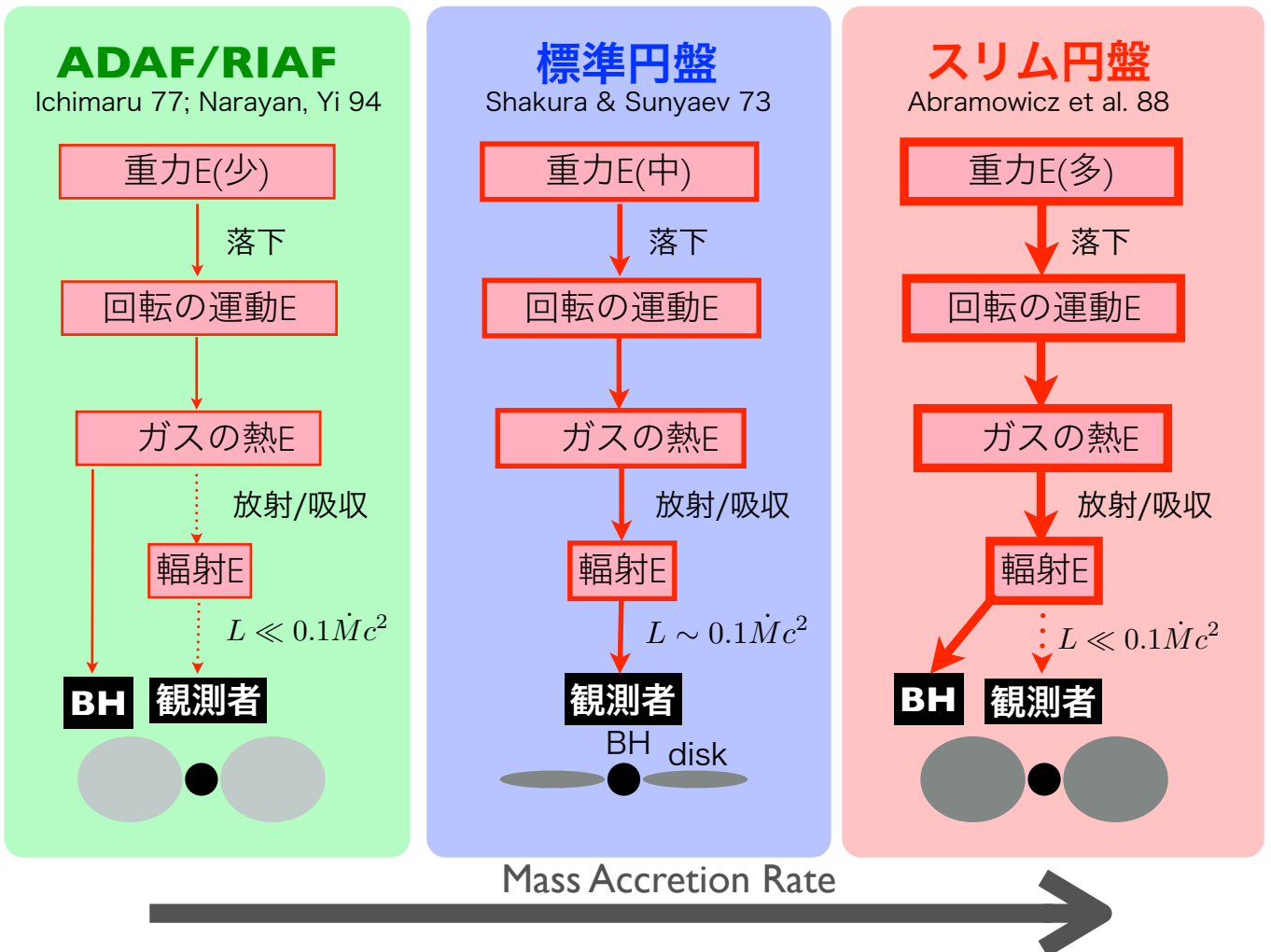


理論予言と観測が一致すれば新たな知見が得られる！

ブラックホール天体の多様性

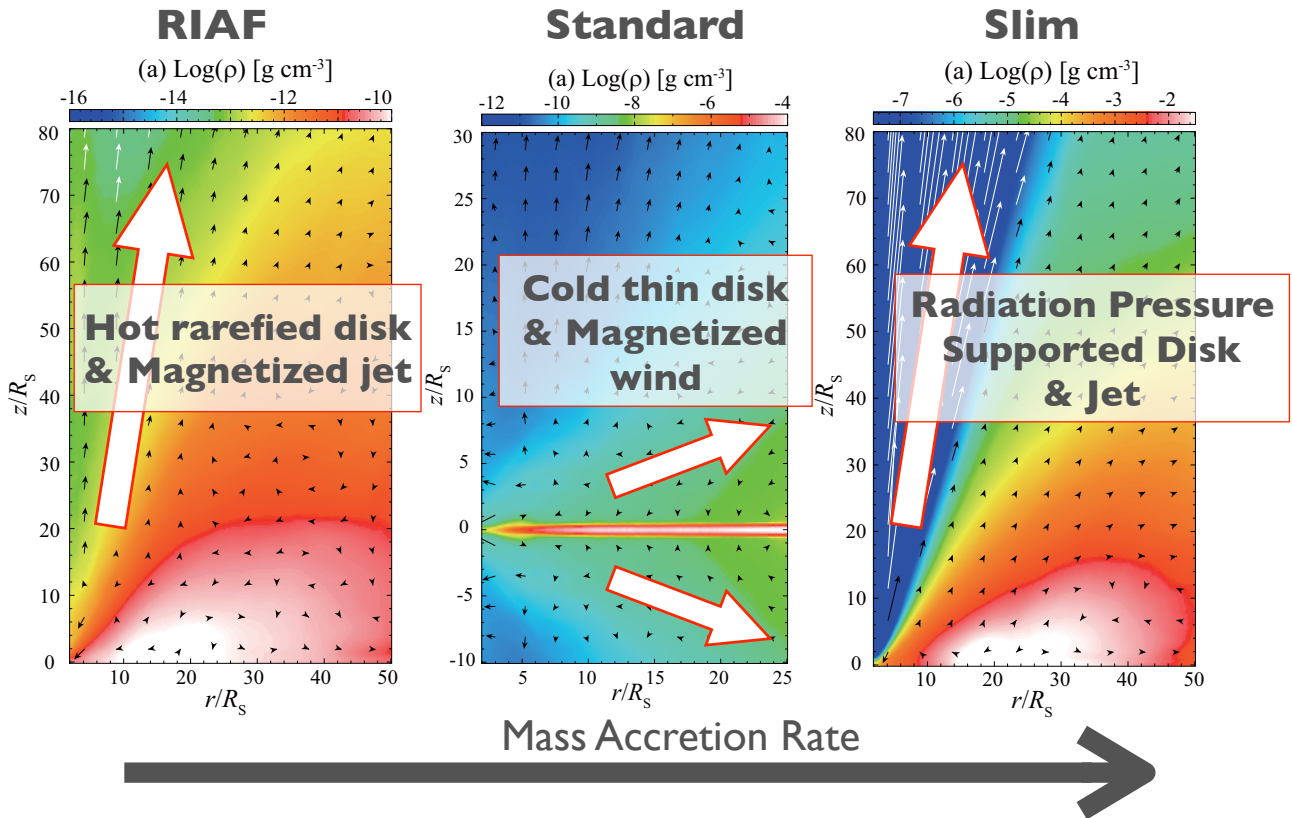


川島さんの資料を改変



Three accretion modes

Ohsuga et al. 2009, Ohsuga, Mineshige 2011

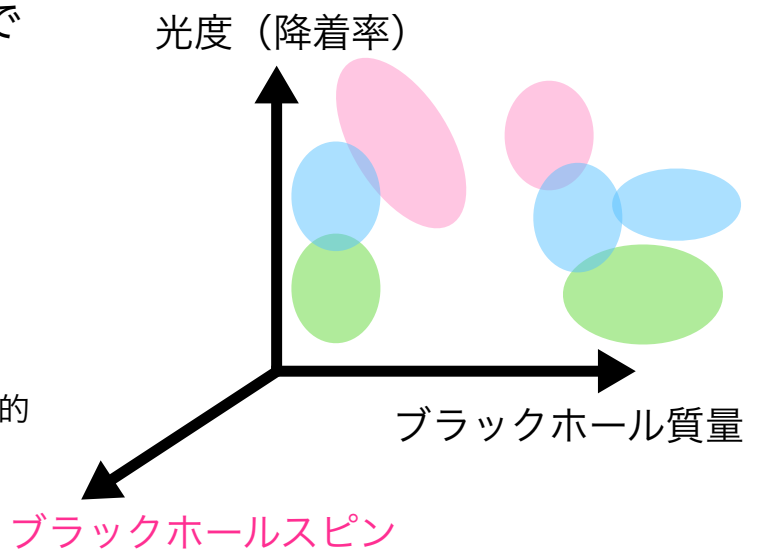


ブラックホールスピン

3つのパラメータスペースで考える必要がある！

- ①ブラックホール質量
- ②降着率
- ③ブラックホールスピン

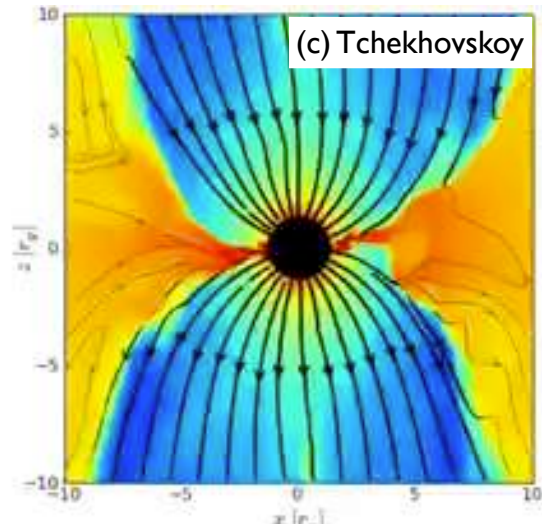
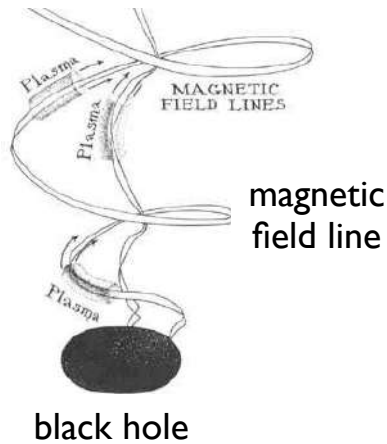
*ブラックホール天体を特徴づける基本的パラメータ



ブラックホール天体を 3次元空間で考える時代の到来

スピンによるジェットの生成

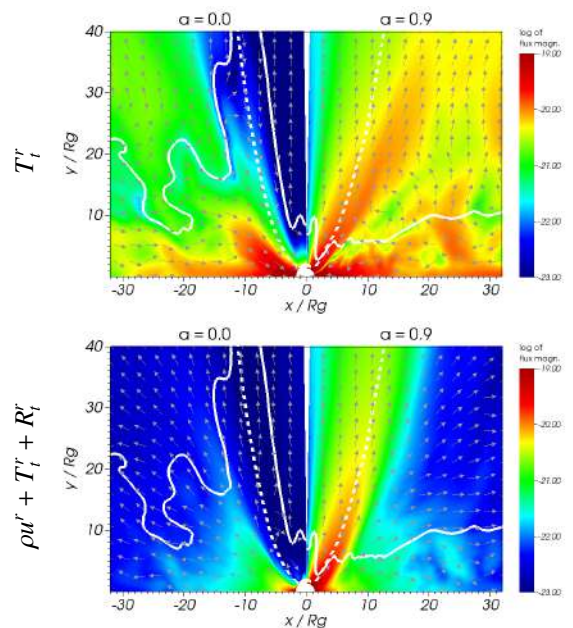
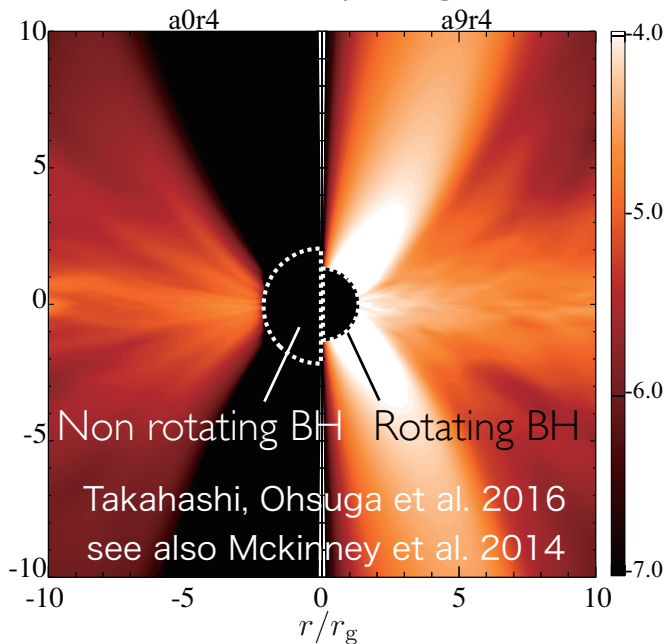
BZ効果: 磁場を介してブラックホールの回転エネルギーを抽出
(Blandford & Znajek 1977)



スピンによるジェット生成を再現した
一般相対論的（輻射なし）磁気流体力学計算

スピンによるジェットの生成

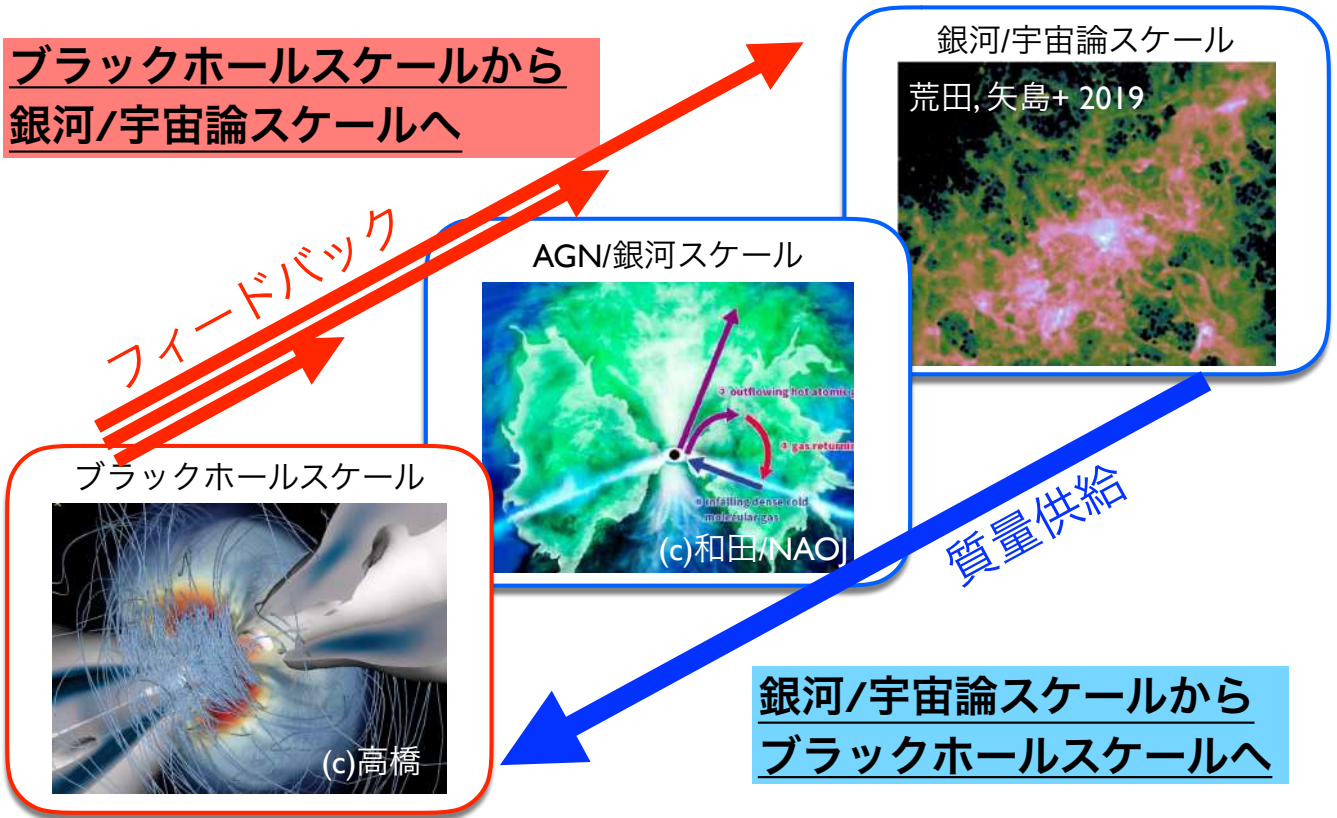
Outward Poynting Flux



Sadowski et al. 2014

一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション
による研究も進行中

天文学全体への波及効果



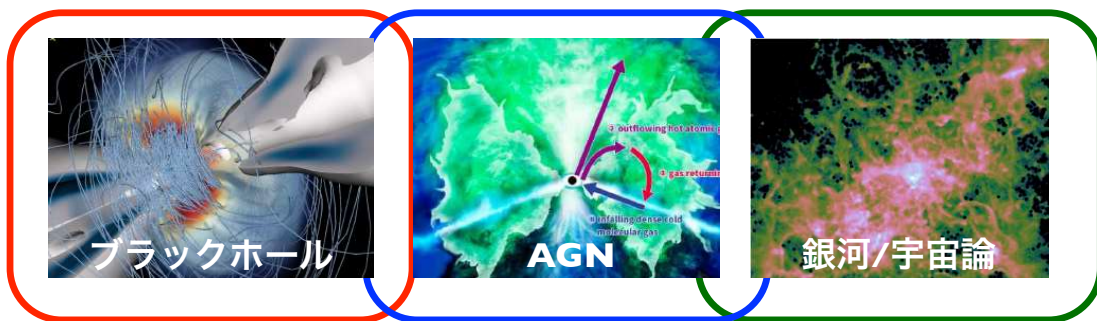
まとめ

- コンピュータシミュレーションや観測の発展により、ブラックホールの新たな姿が解明されつつあります。この流れは今後さらに加速されるでしょう。
- 理論と観測の融合による研究がますます盛んになるでしょう（理論と観測が個別に研究する時代の終焉）



まとめ

- 特定の天体だけの研究では、天文学を大きく発展させることはできないでしょう。
- ブラックホール, 星, 銀河など, 個々の天体の理解を土台としつつ, 宇宙全体を理解するための研究が求められるでしょう。



若手のみなさんへ

- スーパーコンピュータや最新の観測装置によって、天文学は大いに発展してきました。
- しかし, どんなに機器が高性能になっても人間の力なくして宇宙を理解することはできないでしょう。
- 若いみなさんの力こそが, 科学と人類を発展させると信じています。