

2020年代の光赤外天文学 活動銀河核サイエンス班 検討状況

松岡良樹（国立天文台／プリンストン大学）

on behalf of

活動銀河核サイエンス検討班

活動銀河核サイエンス検討班：メンバー

- ・ 秋山 正幸（東北大学）
- ・ 今西 昌俊（国立天文台ハワイ観測所）
- ・ 大須賀 健（国立天文台理論部）
- ・ 鮫島 寛明（JAXA/宇宙科学研究所）
- ・ 長尾 透（編集委員；愛媛大学）
- ・ 松岡 健太（京都大学／ソウル大学）
- ・ 松岡 良樹（班長；国立天文台／プリンストン大学）
- ・ 三澤 透（信州大学）
- ・ 諸隈 智貴（東京大学）

活動銀河核サイエンス検討班：活動状況

2014年

- ・ 前年12～2月：メンバー募集、検討班立ち上げ
- ・ 2月14日：第1回検討班会議（顔合わせと方針の確認）
- ・ 4月23-24日：キックオフ研究会「活動銀河核ワークショップ」（国立天文台すばる棟大セミナー室；参加者 ~60名；国立天文台研究集会）
招待講演者… 伊藤洋介氏（東京；重力波）、上田佳宏氏（京都；X線）、梅村雅之氏（筑波；理論）、柏川伸成氏（国立天文台；地上大型計画）、河野孝太郎氏（東京；赤外線～電波）、寺島雄一氏（愛媛；X線）、土居明広氏（宇宙研；電波VLBI）、西山正吾氏（宮城教育；銀河系中心）、吉田道利氏（広島；地上中小計画）
- ・ 4月24日午後：第2回検討班会議（キーサイエンスの選定）
- ・ 5月上旬：各班員へ検討項目の割り振り
～検討作業期間1～
- ・ 7月22日：第3回検討班会議（検討状況の報告）
～検討作業期間2～
- ・ 9月1日：ここまでの検討結果の取りまとめ
- ・ 9月8-10日：光赤天連シンポジウム
- ・ 9月9日：第4回検討班会議（検討結果の議論、他分野との境界領域）

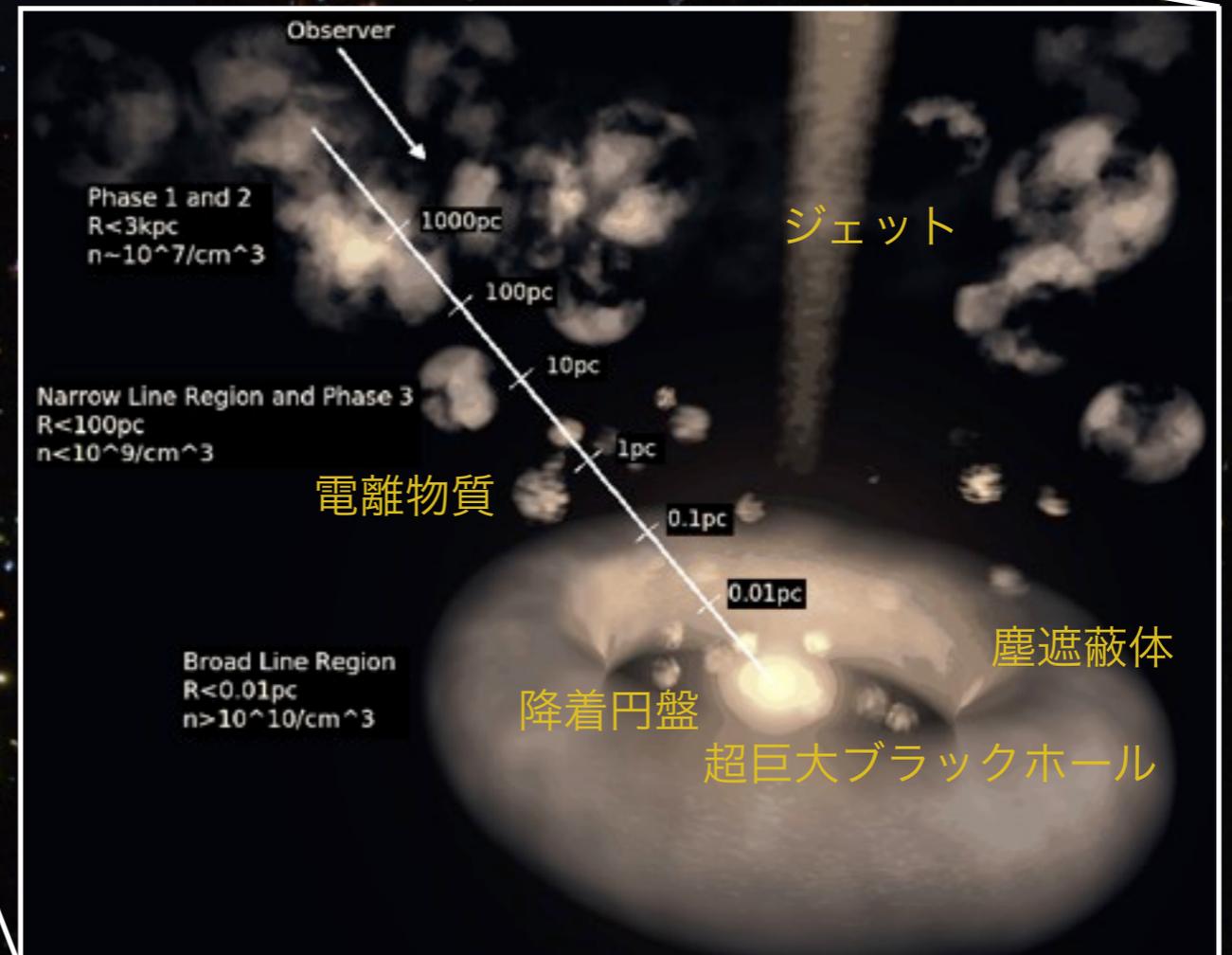
検討状況

活動銀河核：何がおもしろいのか？

母銀河の
星・星間物質

暗黒物質ハローの
銀河間物質

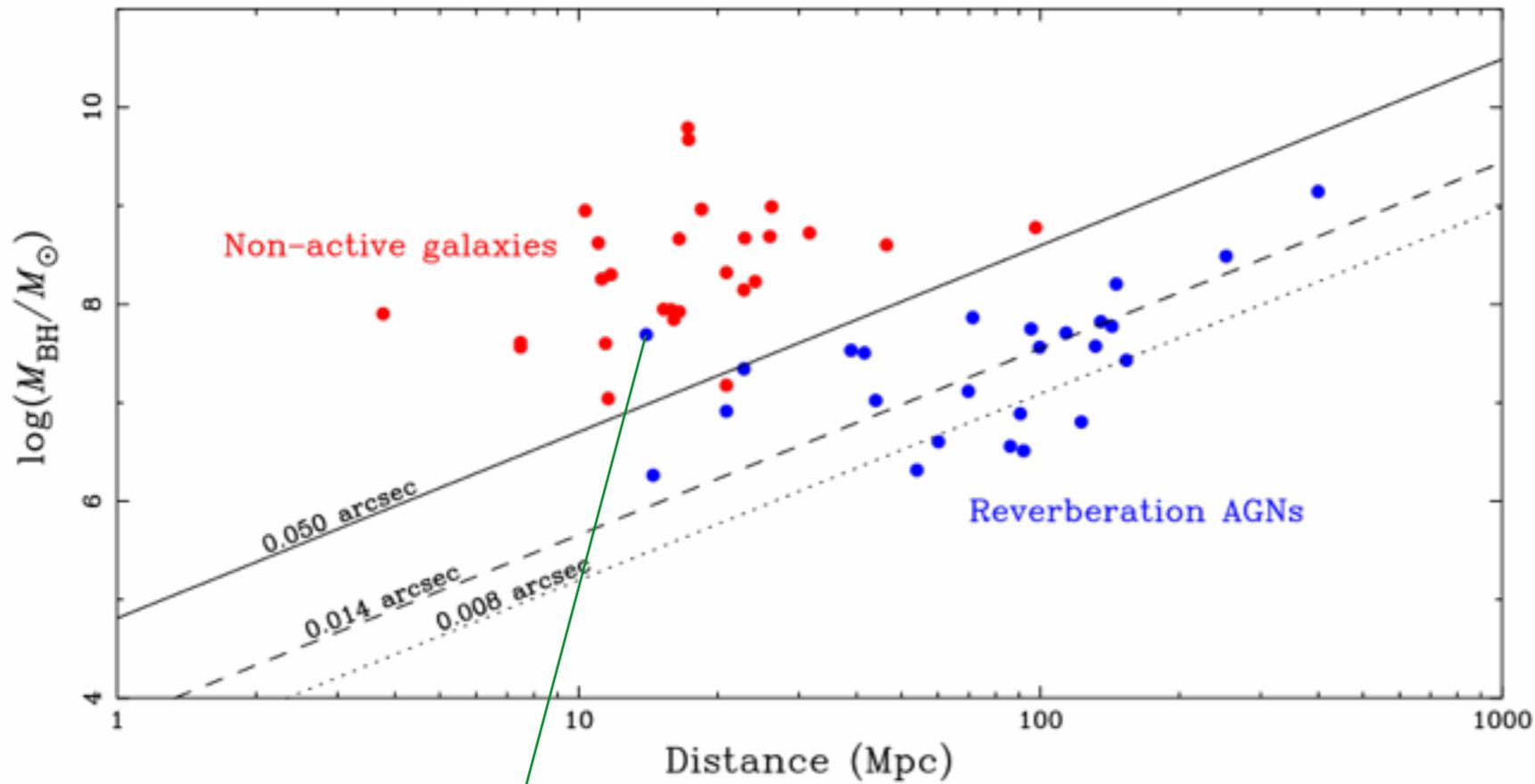
宇宙論的進化



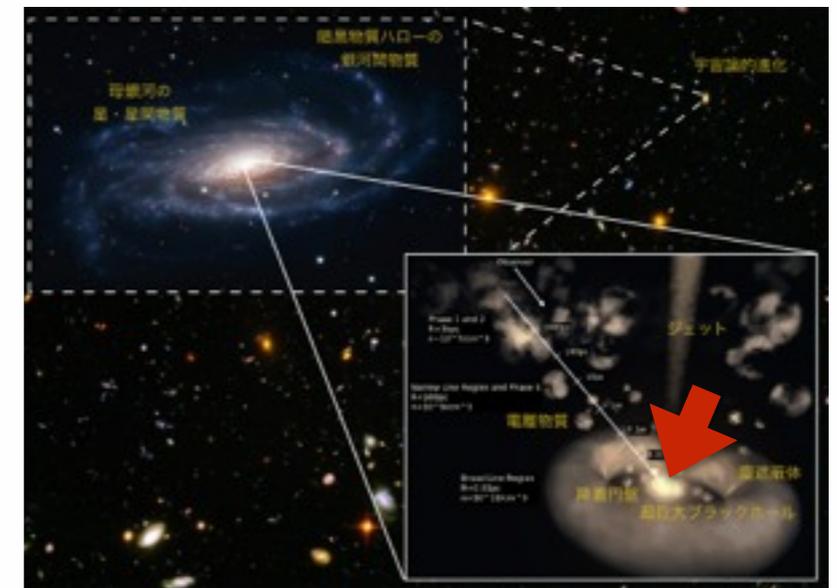
現在の検討項目 (≡ キーサイエンス)

1. First Quasarsを発見する (seed BH?) : y松岡
2. 近傍宇宙のIMBHを発見する : 諸隈
3. BH質量/Eddington比関数の宇宙論的進化を“完全に”解明する : 秋山
 - ... そのためにBH質量測定の精密化を図る : k松岡
 - ... 塵に埋もれたSMBH成長期をあばく : 今西
4. $M_{\text{BH}} - \sigma_{\text{star}}$ 関係の形成と進化を解明する : k松岡
5. SMBH近傍の物質の流れを解明する
 - ... 塵遮蔽体 (トーラス) の形態・速度構造を空間分解によって解明する : 今西
 - ... 降着円盤からSMBHへの質量供給機構を解明する : 大須賀
 - ... SMBH近傍からのアウトフロー (UFO, BAL, NAL) の全貌を解明する : 三澤
6. 母銀河へのAGN feedback (有無と頻度、規模、etc.) を完全に理解する : y松岡
 - ... 母銀河の星形成効率とそのAGN活動との関連性を導き出す : k松岡
7. 降着円盤から電離ガスにかけての構造をRMにより明らかにする : 長尾
 - (7a. 遠方宇宙までのRMの応用により、宇宙論パラメータを決定する : 鮫島)
8. 時間変動観測で突発的質量降着を捉え、静穏SMBHの性質に迫る : 諸隈
9. 電離ガスの金属量から、宇宙史に渡るAGN (母銀河) の化学進化を解明する : 鮫島
 - ... Zero-metal Quasarsは (どこに) あるか?

SMBH質量の精密測定 (k松岡)



現在の10m望遠鏡で力学的BH質量測定が可能な活動銀河NGC 4151。RM的BH質量と力学的BH質量は矛盾しない (e.g., Onken et al. 2014, ApJ, 791, 37)。



$$M_{\text{BH}} = \frac{f \sigma_{\text{BLR}}^2 R_{\text{BLR}}}{G}$$

RM法は静穏銀河と活動銀河が同じ $M_{\text{BH}}-\sigma$ 関係に従うという仮定の下で成り立っているが、活動銀河の力学的BH質量測定によってこの仮定の真偽を調べる事ができる (静穏銀河と活動銀河の $M_{\text{BH}}-\sigma$ 関係の直接比較)。これは高赤方偏移天体に用いられるSE法のレシピにも密に関係しており、SE的BH質量測定の精度向上にも繋がる。

RM天体の力学的BH質量を測定することでf factorの観測的決定が可能となる。例えば、velocity-resolved RM法 (VRRM法) によって示唆されたf factorと傾斜角の関係 (Pancoast et al. 2013, arXiv:1311.6475) を用いることで、BLR構造に制限を加えることができる。

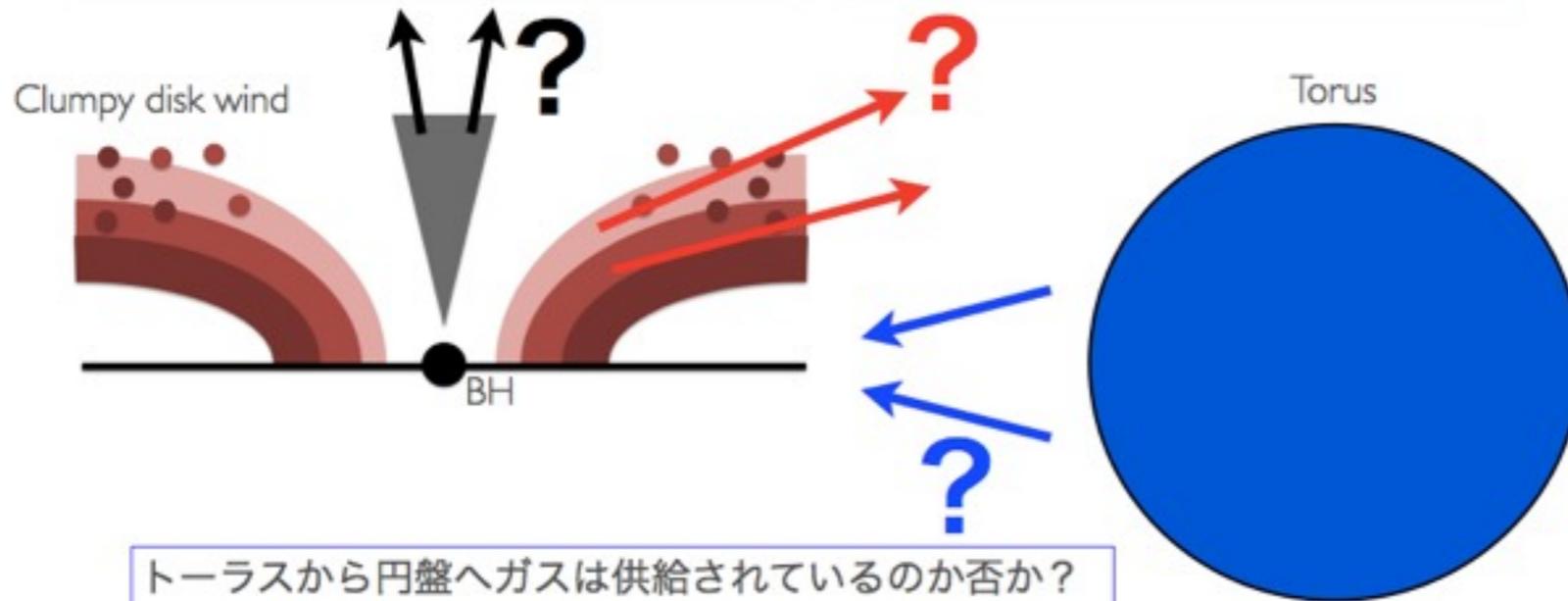
SMBH近傍の物質循環 (大須賀)

2020年代

物質の流れ(下図の矢印)をどこまでちゃんと書けるようになるか。
 矢印の脇に数値、時間変化、物理を補足できるようになるか？

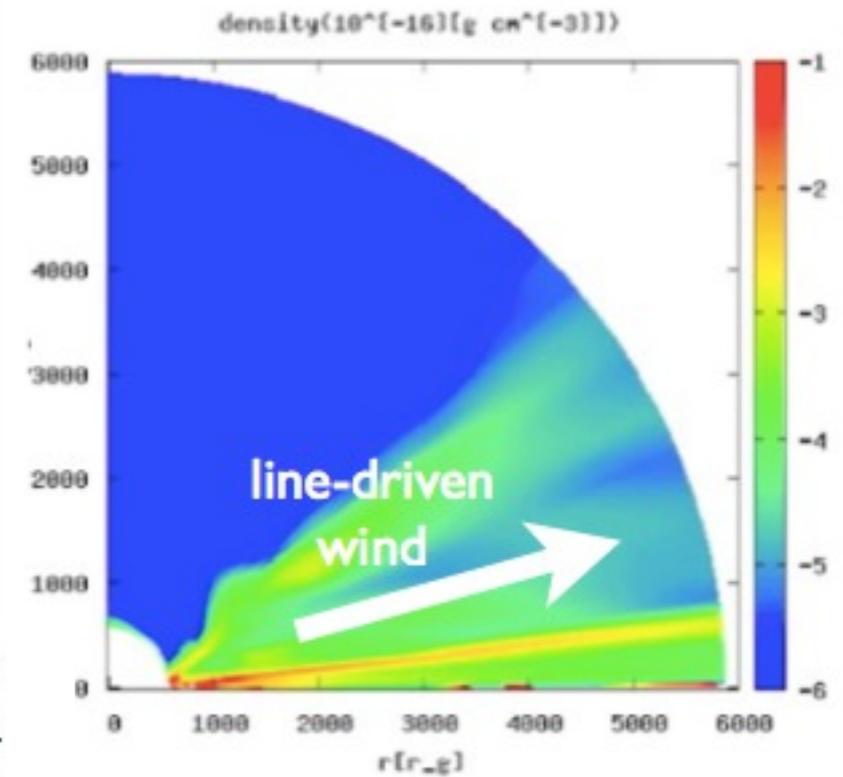
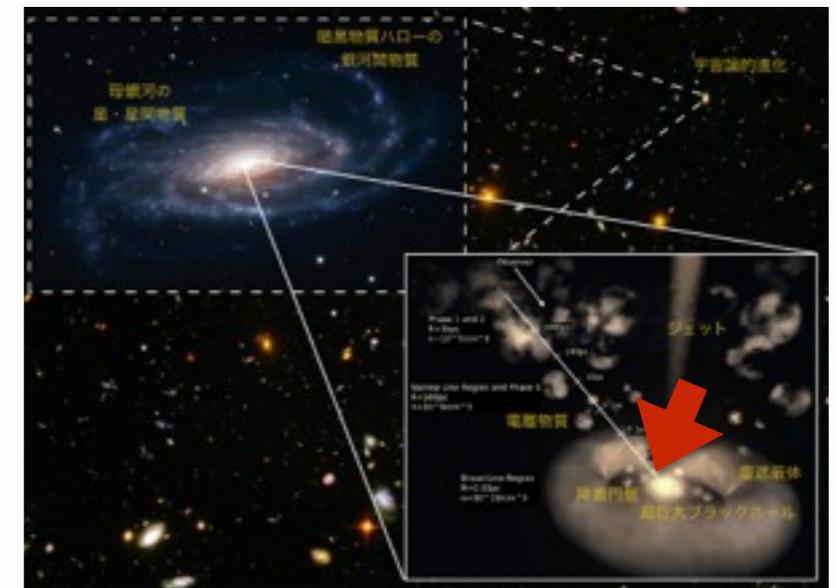
質量噴出率はいくらか？
 AGNフィードバックに効くのか？
 円盤の状態や円盤風との関係はなにか？

質量噴出率はいくらか？
 噴出ガス&Clumpはどこに行くのか？
 AGNフィードバックに効くのか？



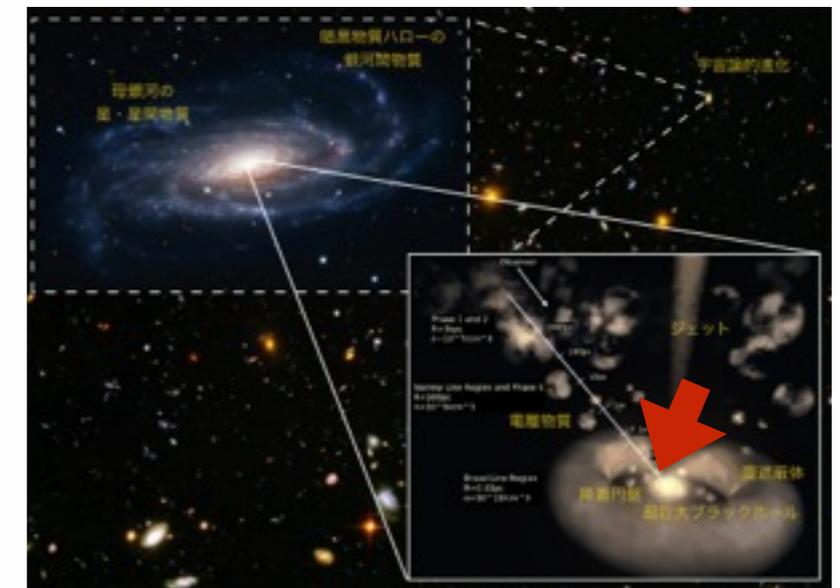
トーラスから円盤へガスは供給されているのか否か？
 供給量は中心核のパワーを説明するのに十分な量か？

- この円盤風はUFOやBALといった吸収線の起源であり、主要なフィードバックメカニズムかもしれないが、まだよくわかっていない。
- X線, UV, 可視光観測で吸収線を観測することで速度や密度を調べられるか？



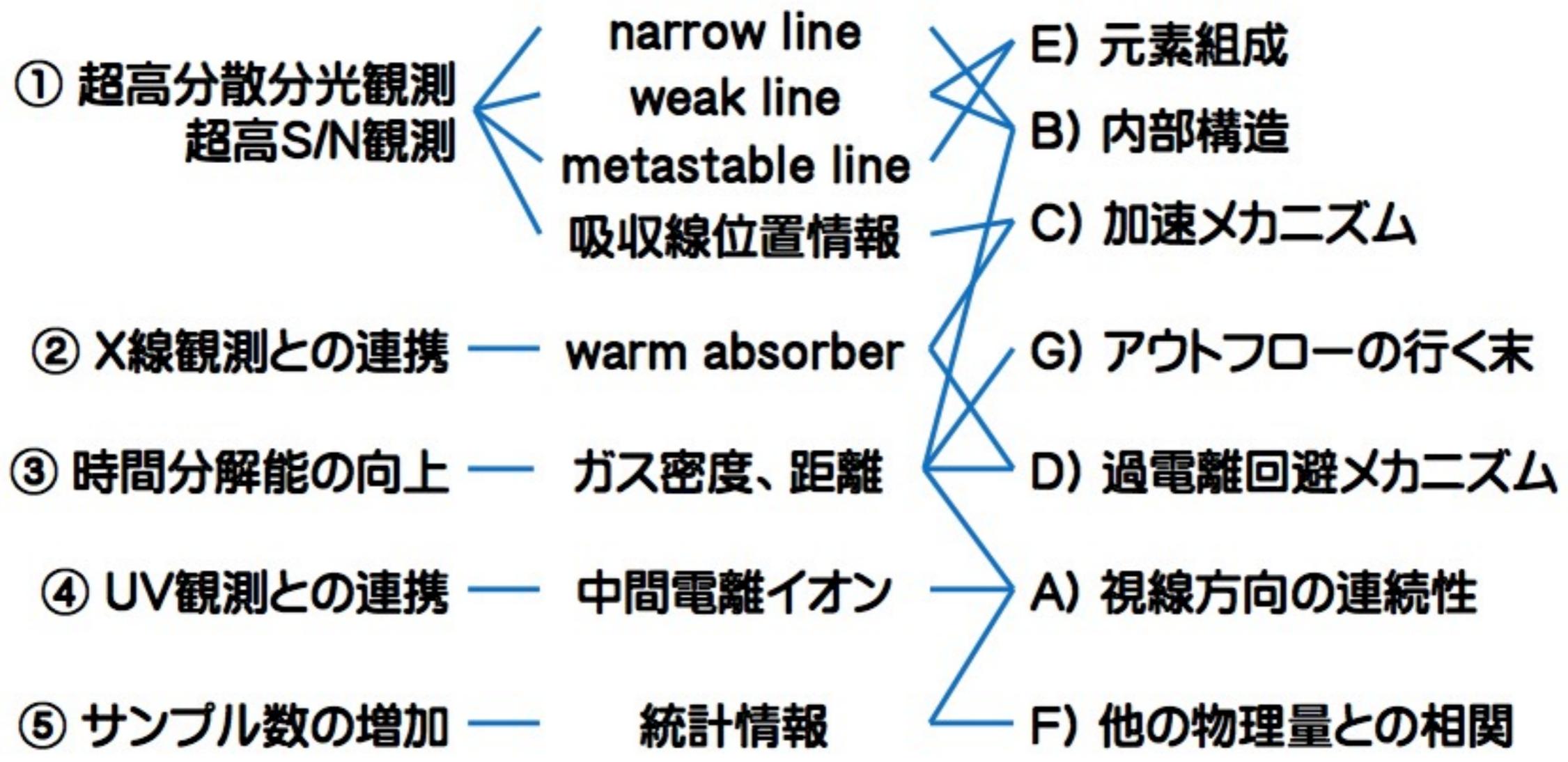
Simulated line-driven wind
 (Nomura et al. in prep.
 see also Proga et al. 00, 04)

2020年代のアウトフロー研究に求められる
観測能力と未解明の課題



観測

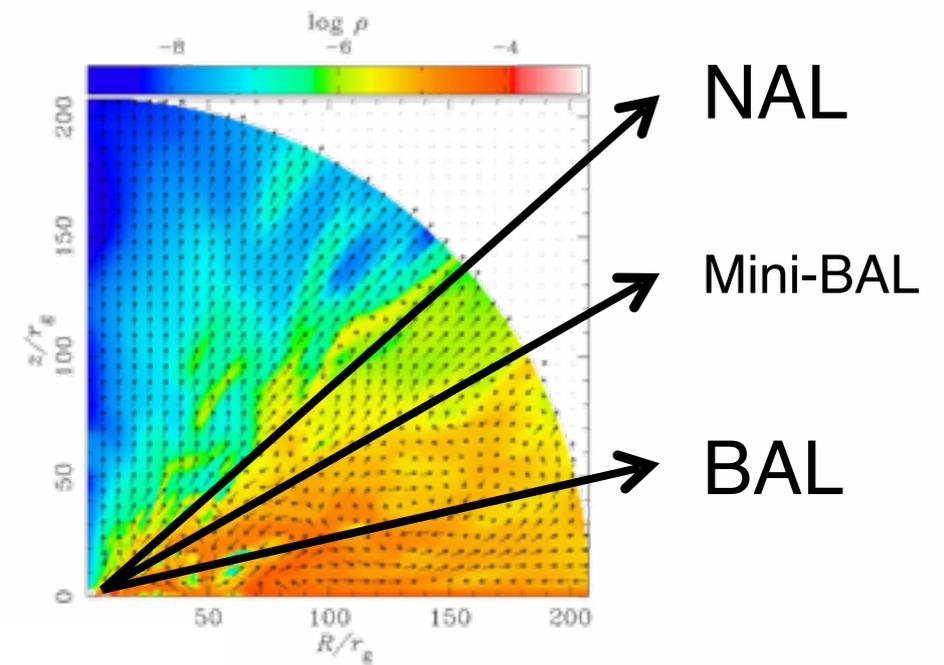
課題



SMBH近傍の物質循環：アウトフロー（三澤）

観測①：超高分散分光観測・超高S/N分光観測

吸収線モデルフィットによるパラメータ（柱密度, 掩蔽率, 放出速度, 速度幅）の評価が可能。分解能 $R \sim 40,000$ 、S/N比 >30 程度の観測で分解を試みる。また、 $R \sim 100,000$ 程度の超高分散分光により、内部構造の微細内部構造に迫る



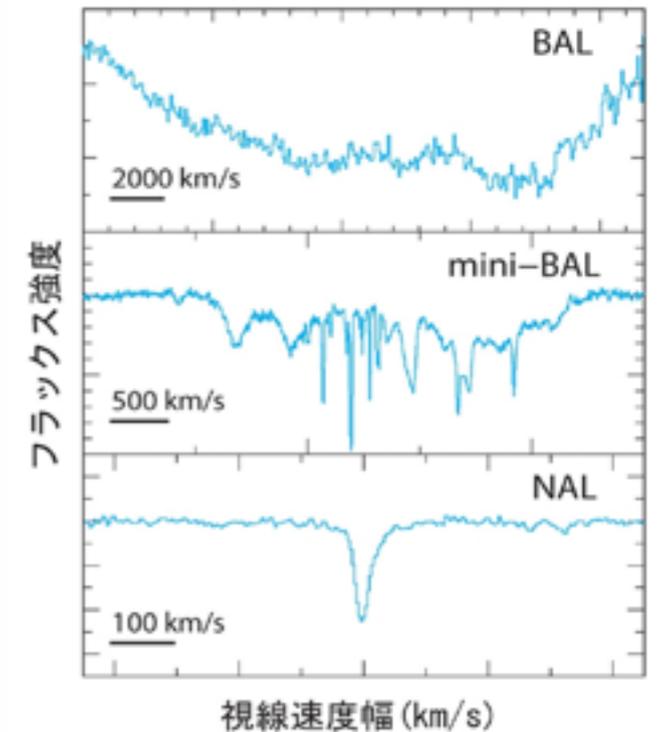
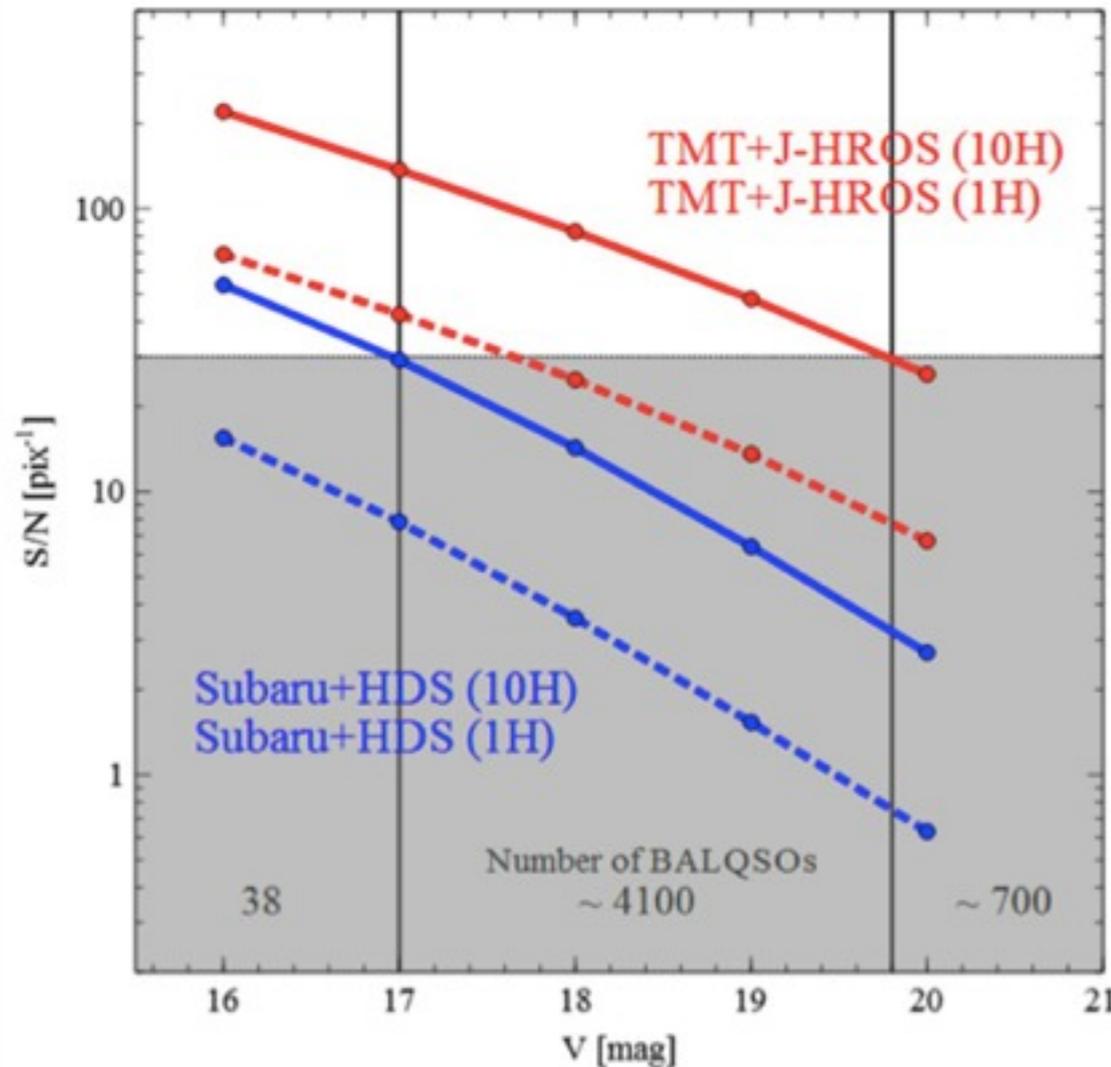
参考) Subaru/HDS と TMT/J-HROS の積分時間の比較

($R \sim 45,000$, $\lambda \sim 5000 \text{ \AA}$)

BAL内部において
S/N $\sim 30 \text{ pixel}^{-1}$ が目安

TMT+J-HROS では、10H
積分でS/N ~ 30 を達成できる
BALQSOは約4000天体
(Trump+ 2006)
(吸収線内部で2mag減光と仮定)

- ⇒ 統計解析が可能
- ⇒ 明るいBALQSOを対象としたBALの内部構造の変動モニターも可能



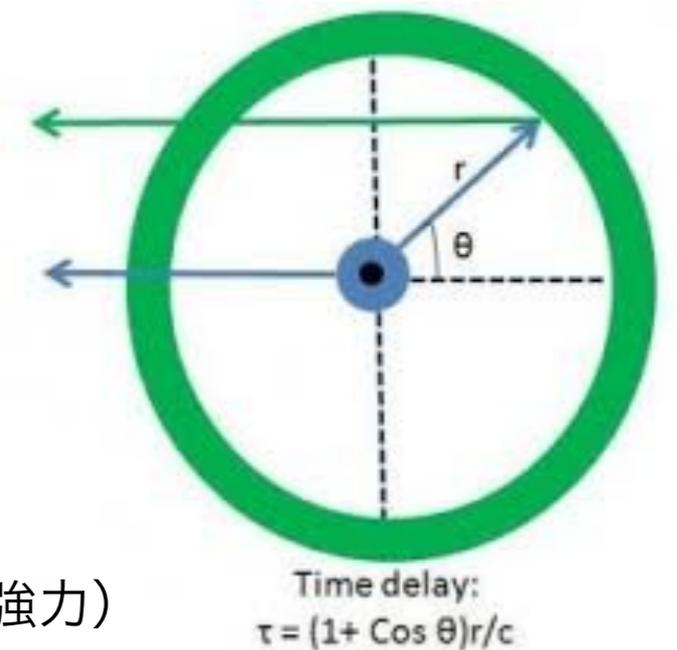
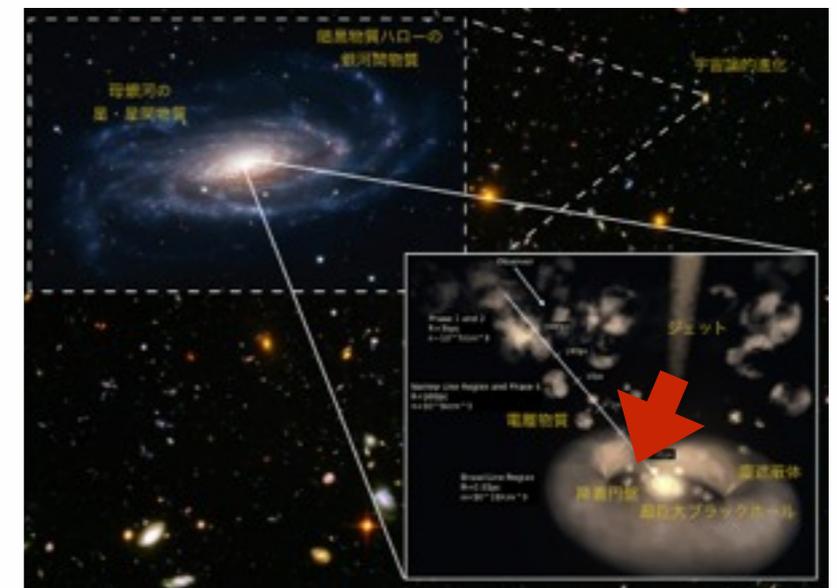
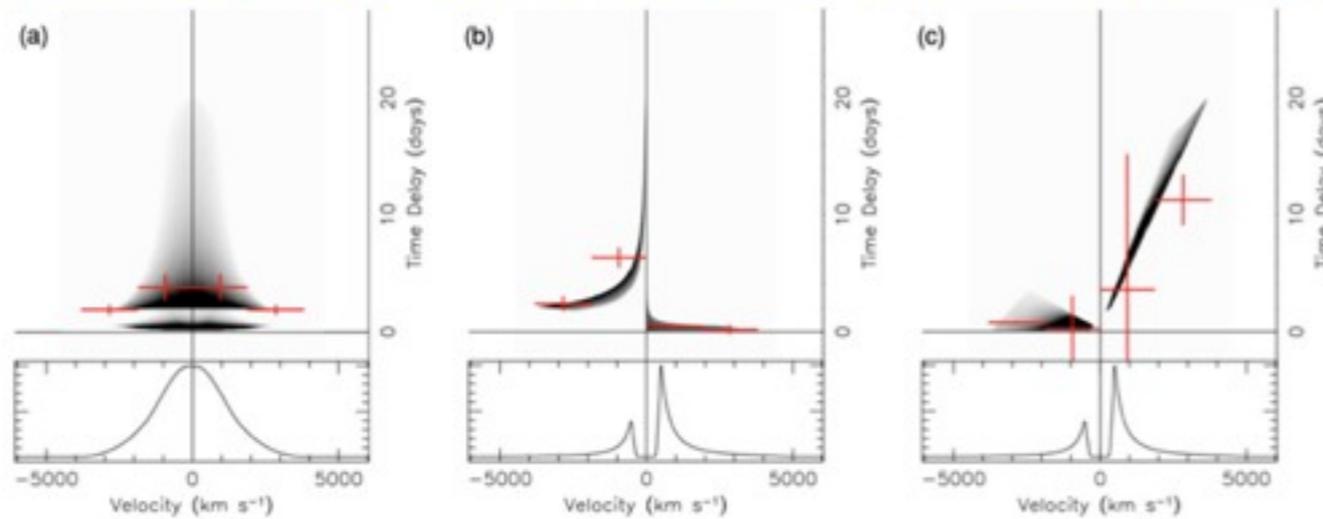
得られる情報：BALに対する吸収線パラメータ、weaker/narrower line の検出、meta-stable line の検出、視線速度情報、など

電離ガス領域の構造 (長尾)

1. 速度分解光反響マッピングによる中心核近傍領域の調査

【理論的予測】

[circular Keplerian] [free-fall inflow] [const. accel. outflow]



京都3.8m/IFU可視分光装置

- ~ 可視中分散分光の限界等級: $m_{AB} \sim 19.5$ (5 sigma, 1 hour)
- ~ **IFU mode** → スリットロスのない観測が可能 (本トピックとの関係では強力)
- ~ 感度面では十分、十分な望遠鏡時間を用いて大規模モニタリング観測へ
- ~ 現状よりも**サンプル数を拡大** (monitoring obs. for 20-30 objects or more)

TAO 6.5m/第1期装置: 近赤外撮像装置 SWIMS

- ~ 近赤外分光観測の限界等級: $K_{AB} \sim 22.2$ (5 sigma, 1 hour, R~1000)
- ~ **MOS mode** → 正確な相対キャリブレーションが可能 (これも強力)
- ~ 赤方偏移したバルマー輝線を調査可能 ($z \sim 0.6 - 3.5$)
- ~ 現状よりも**赤方偏移レンジ、BH質量レンジ、エディントン比レンジを拡大**

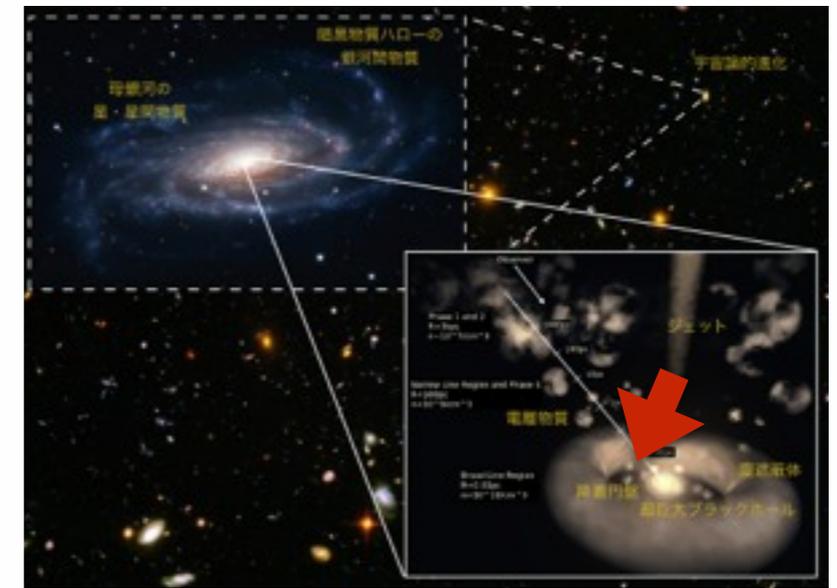
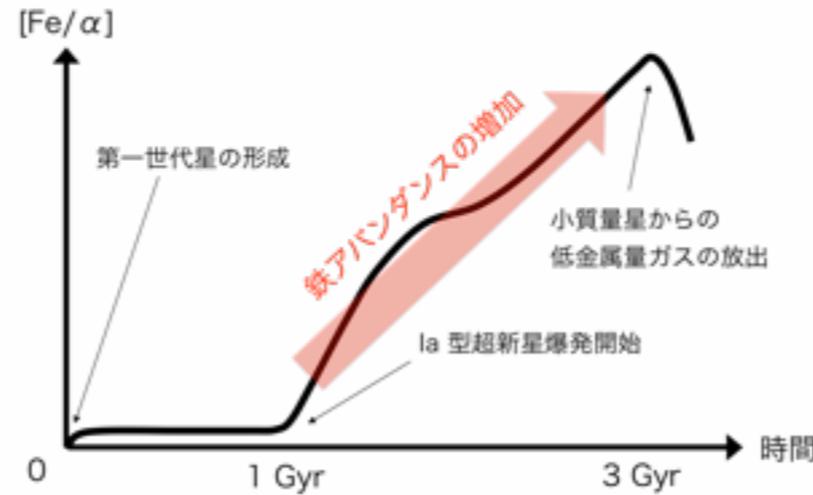
$$M_{BH} = \frac{f \sigma_{BLR}^2 R_{BLR}}{G}$$

電離ガス領域の金属量 (鮫島)

[α /Fe] の進化

• Cosmic Clock

- SN Ia と SN II の寿命の違いにより、ガス中の鉄の増加は α 元素に比べて ~ 1 Gyr 遅れる。
- [Fe/α] が急激に増加する時期を観測的に求めることができれば、その ~ 1 Gyr 前が第一世代星形成時期だと推定できる。

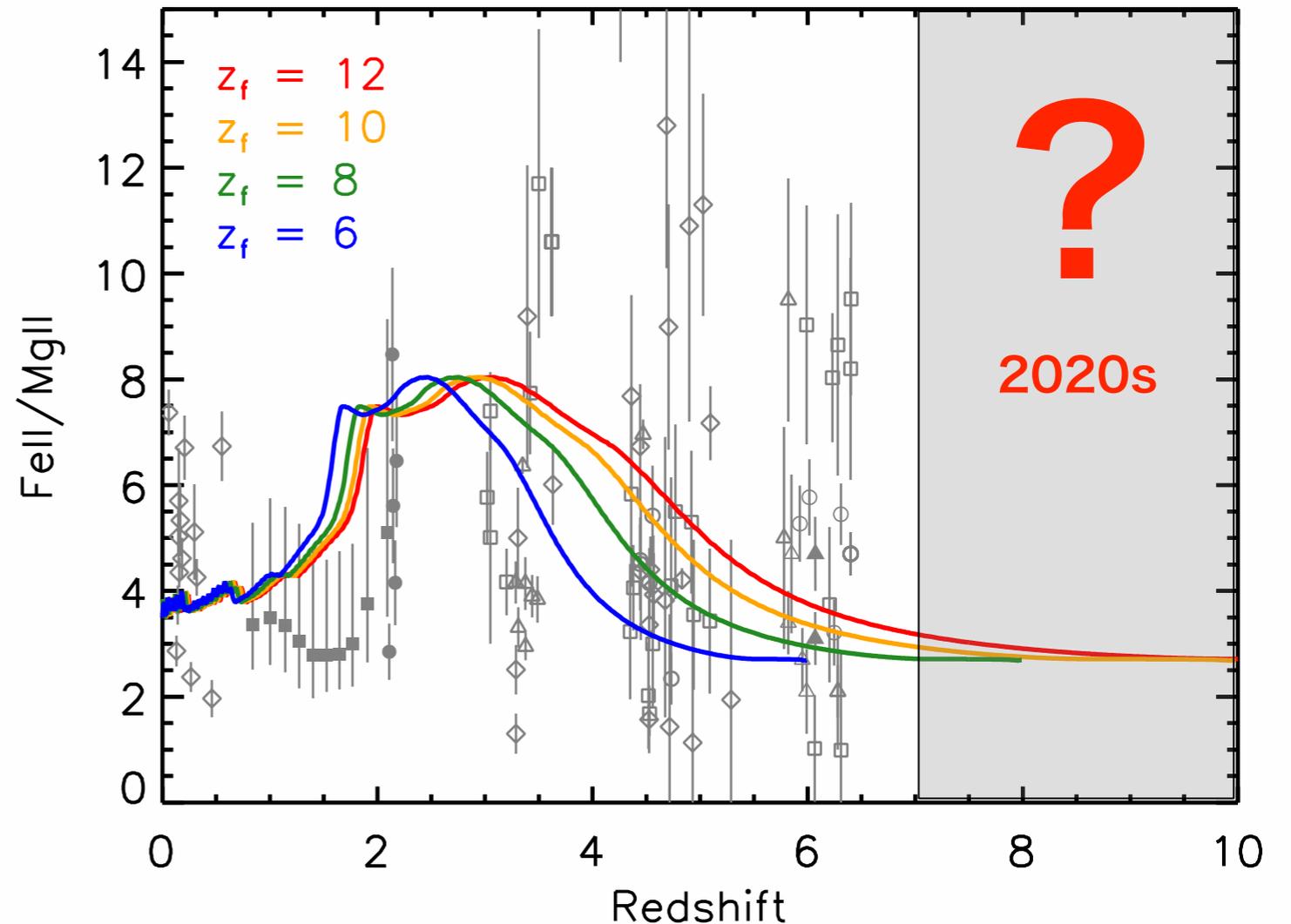


• ケーサーの FeII/MgII フラックス比

- FeII/MgII フラックス比を [Fe/α] の指標として使う。
- $z \sim 6$ までいってもフラックス比の急激な増加の兆候は見られていない。
- $z = 7$ ケーサー (Mortrock+11) にも FeII の兆候が見られる。

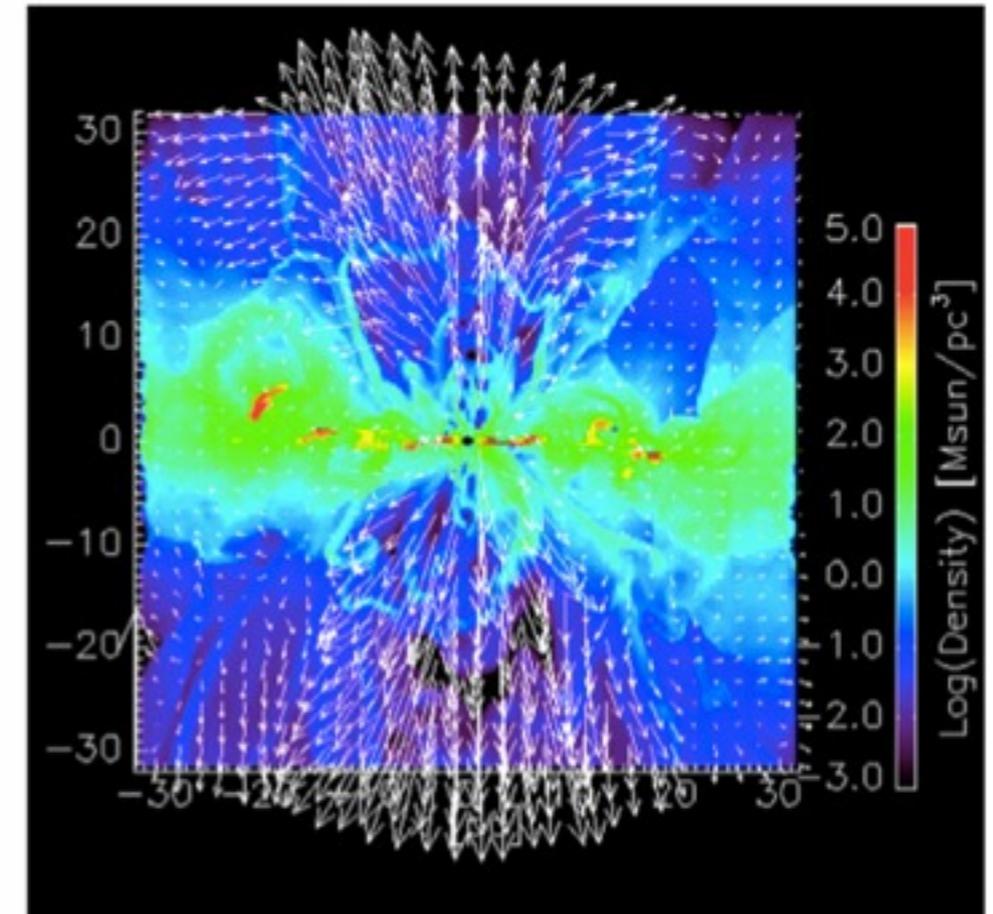
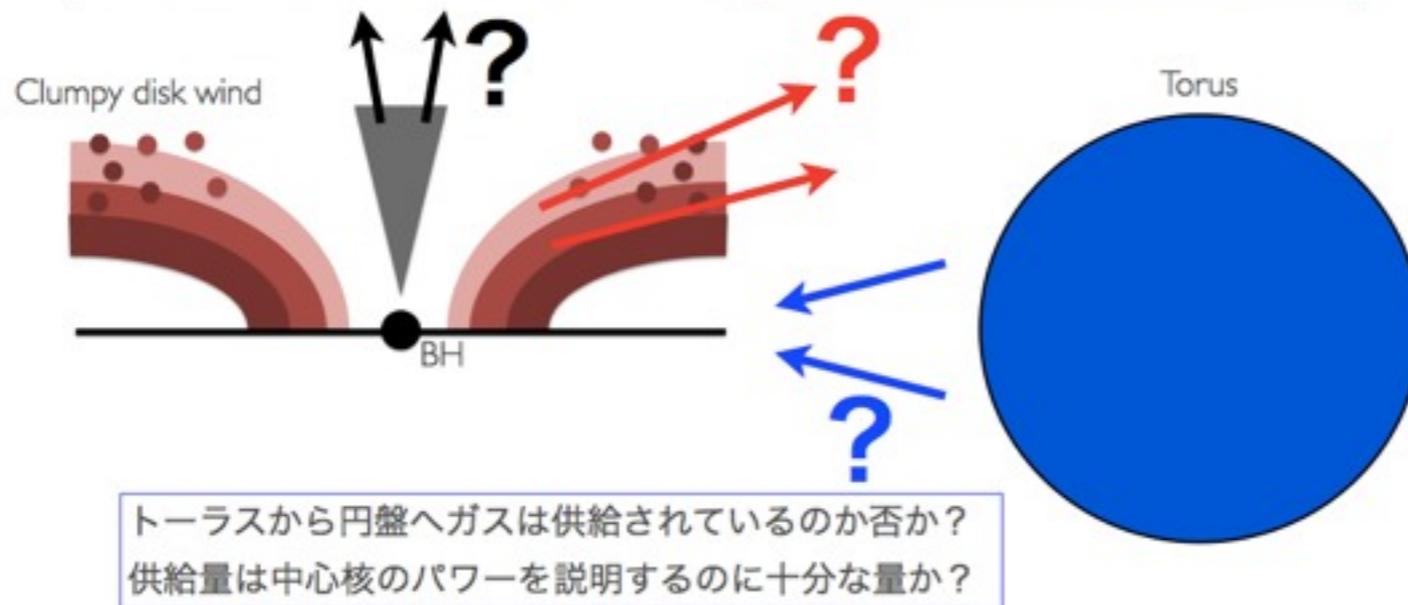
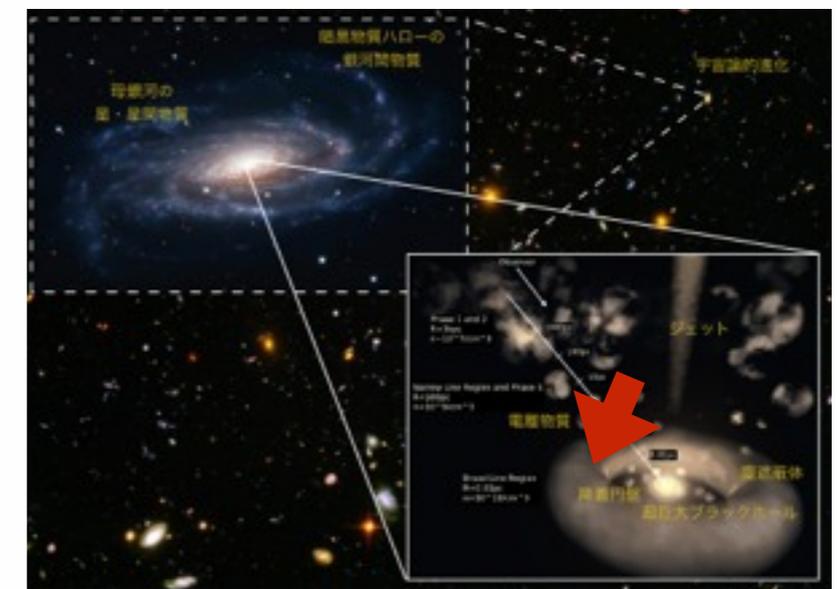
• $z > 7$ の世界

- 宇宙年齢 $t < 0.77$ Gyr.
- SN Ia はほとんど起こっていないはず。
- SN II の [Fe/α] と異なっている場合、Pop III 星による金属汚染



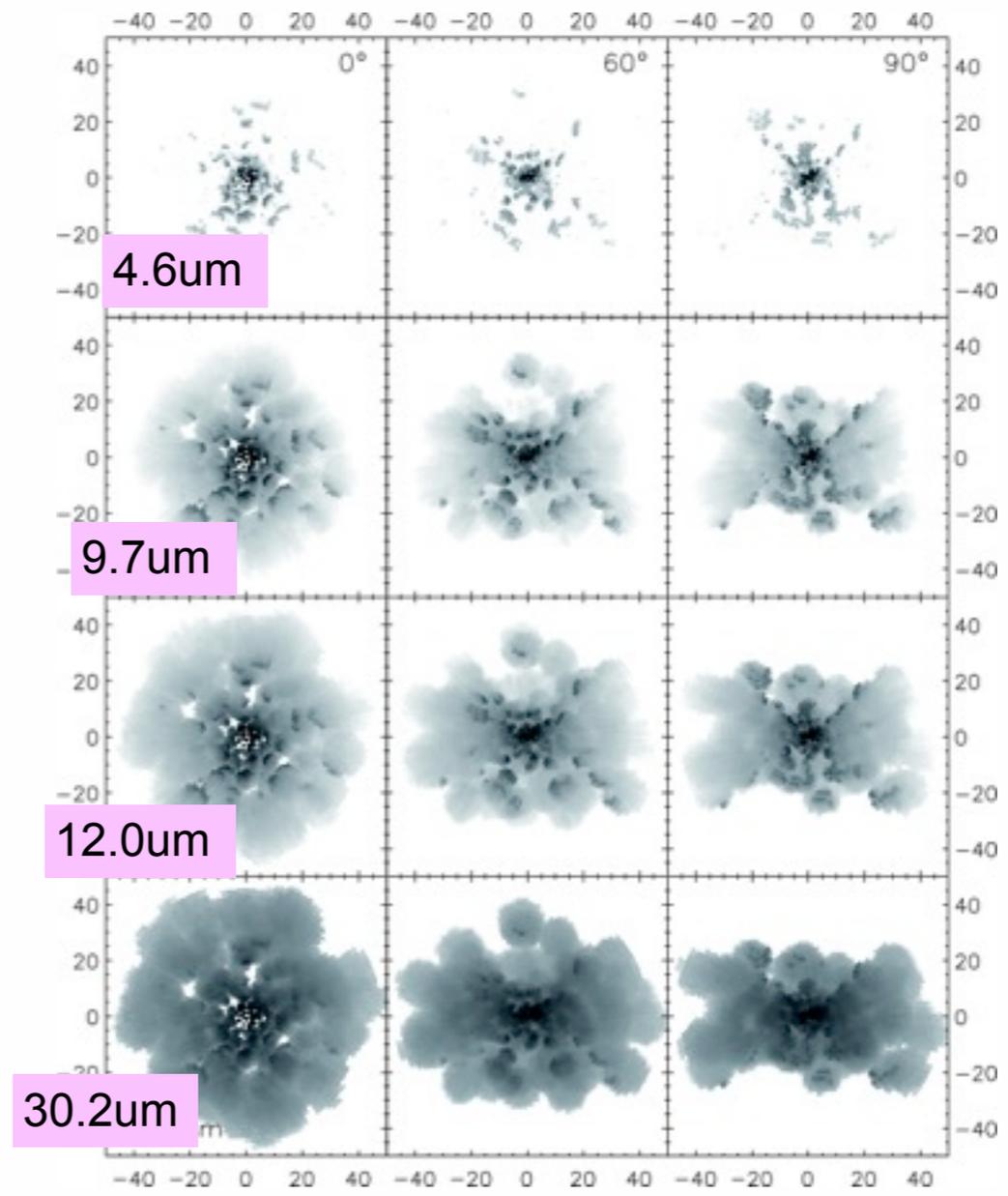
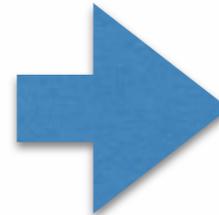
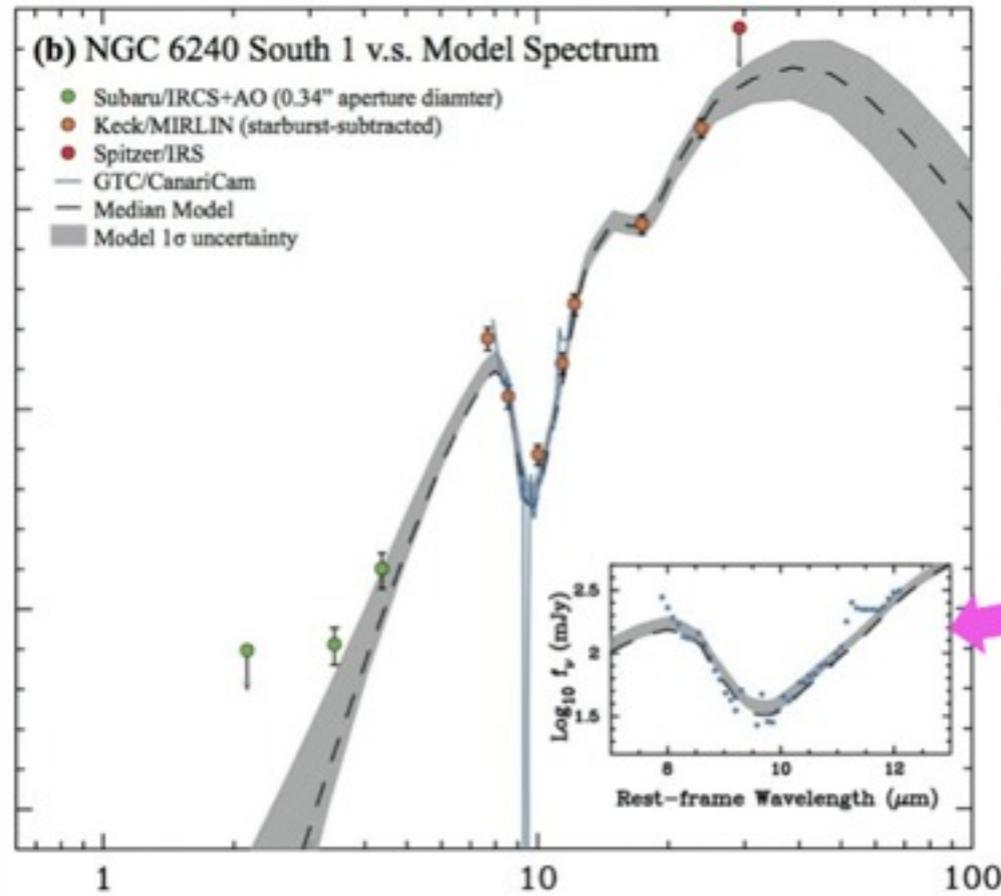
分子雲／塵遮蔽体の正体（大須賀）

- 降着円盤はトーラスからガス供給を受けているのか否か（親子説？他人説？）。
- 親子説が正しいなら、トーラス内縁から中心へ向かう質量降着率の大きな流れ($\dot{M} > 0.1 L/c^2$)があるはず。他人説なら別のルートがあるか、もしくは中心核の燃料は円盤ガスのみということ。



Radiatively supported torus
(Wada 12, see also Ohsuga & Umemura 01, Shi & Krolik 07)

分子雲／塵遮蔽体の正体（今西）



TMT + MICHI 20um + MIRA0

• TMT/MICHIは、Qバンド（18-23um）をカバーし、MIRA0により、Qバンドで回折限界像（0.13"）が達成される

z~0.007のAGNに対し、Qバンドで20pcスケール



TMT + MICHI 20um(+10um) + MIRA0は、AGNトーラスの空間分解、構造（サイズの波長依存性）などの解明に非常に強力で、ユニークである。空間分解能が重要で、積分時間は短めであるため、現実的な観測時間で科学目的を実現できる。

必要な観測時間

TMT/MICHIは、Subaru/COMICSに比べて、約1桁の感度向上（点源に対して）

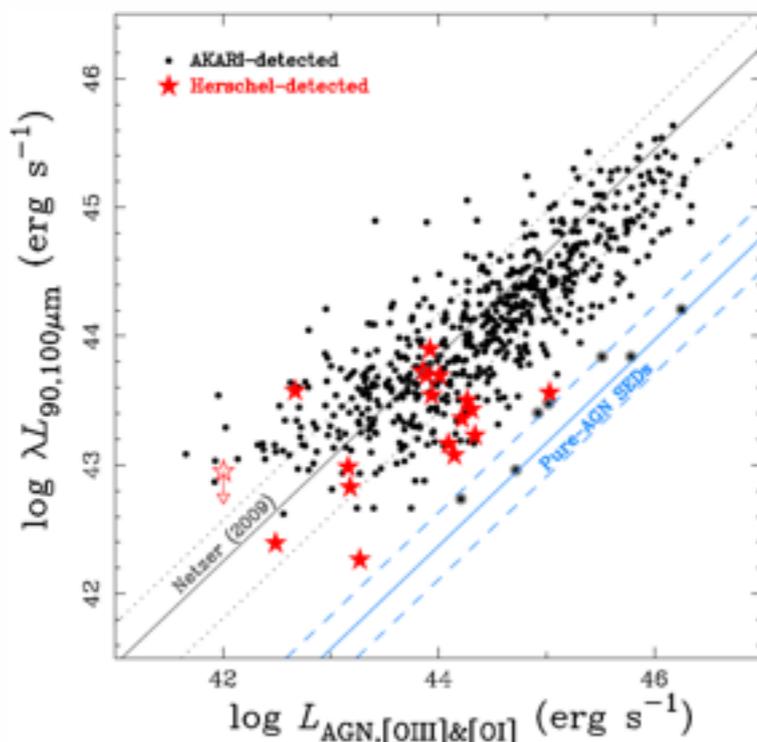
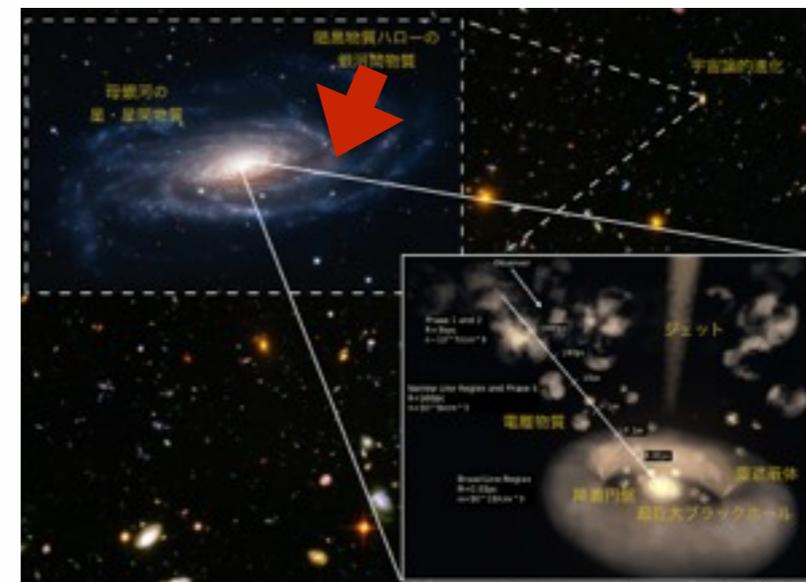
10um	10分、15σ	→	5mJy
20um	10分、15σ	→	20mJy

数10時間（MIR観測のオーバーヘッド数倍を仮定）で、多くの興味深いAGNを観測し、MIR撮像観測によるトーラスの理解が飛躍的に進むはず。

母銀河：AGN-SF connection (k松岡)

[0] AGN活動と星形成の関係

近年の研究によって、AGNの活動性とその母銀河の星生成率の間には正の相関があることがわかってきた。この関係は言い換えるとSMBH成長と銀河進化の関係であり、銀河とSMBHの共進化の理解において重要な鍵となる。



現在の主なFIR観測装置では近傍宇宙でさえpure-AGN領域に到達することができない

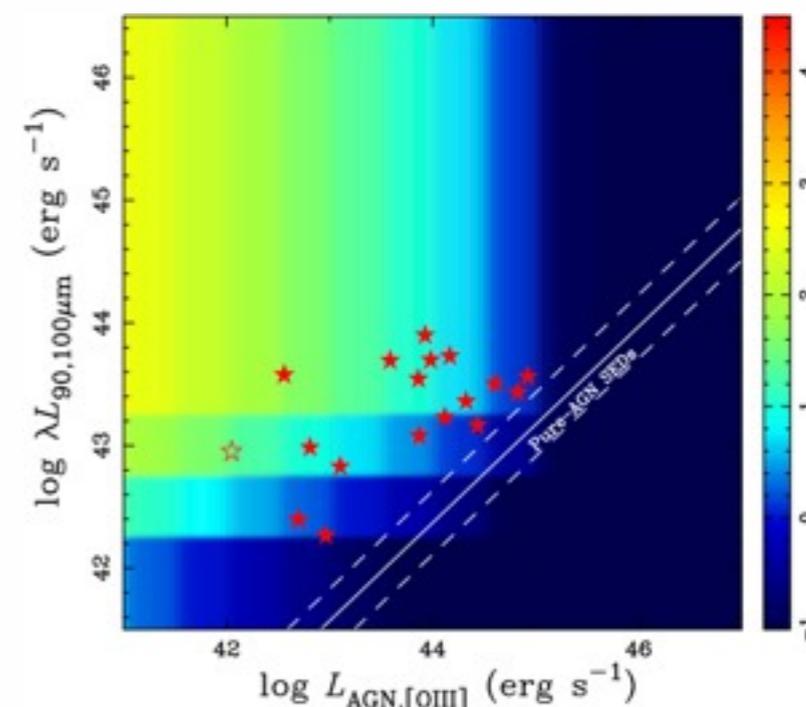
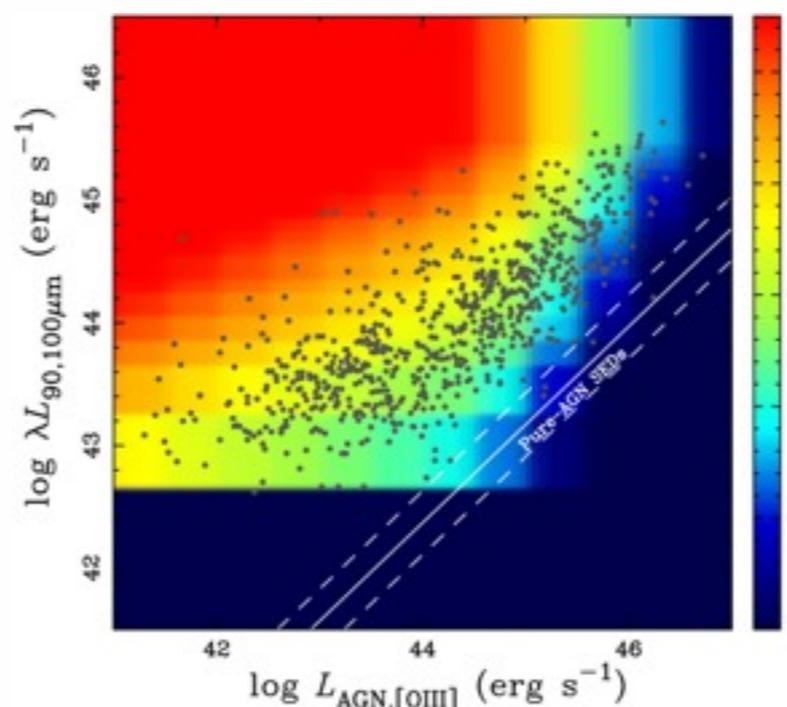
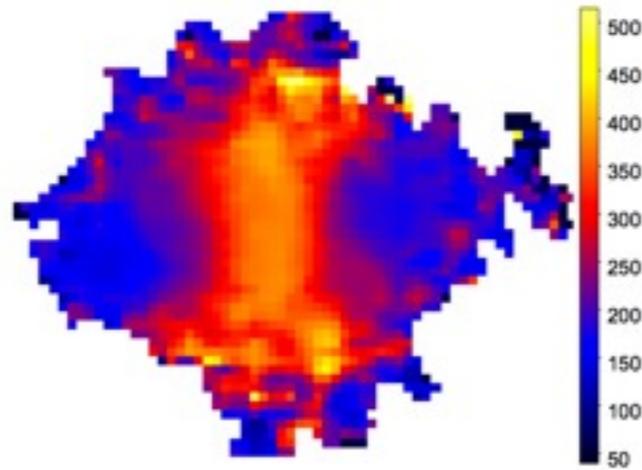
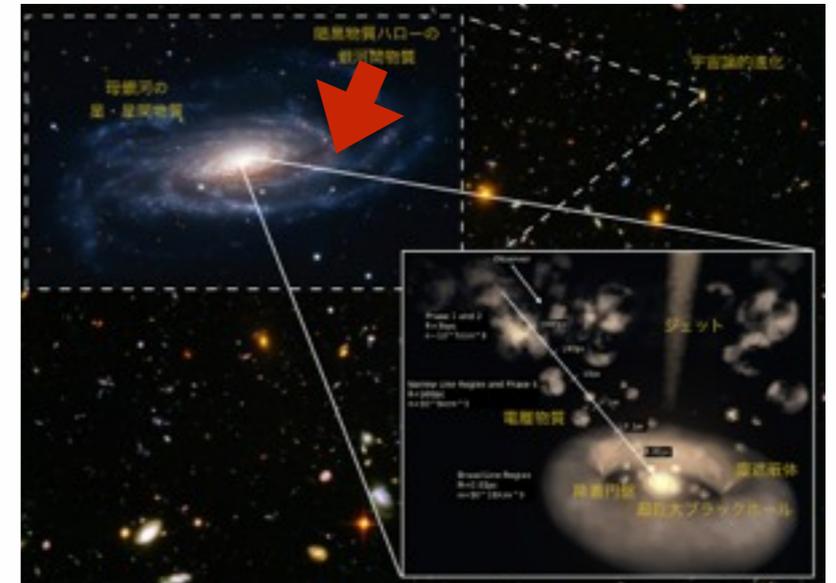


図13：現在の主要なFIR観測装置（左図：AKARI/FIS、右図：Herschel/PACS）で探査可能な天体分布のシミュレーション ($0.01 < z < 0.22$)。丸印と星印はそれぞれAKARI/FIS全天サーベイ、PEPサーベイ (COSMOS) によってFIRで検出されたtype-2 AGNを示す。また、白線はpure-AGN領域を示している (Matsuoka et al. 2014, submitted to ApJ)。

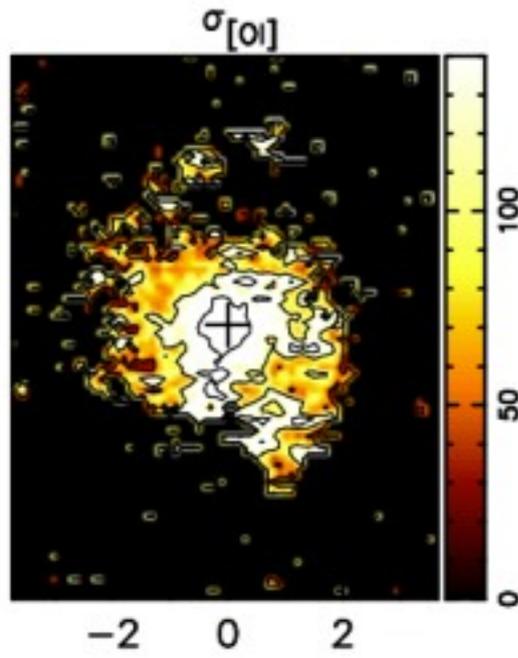
SPICA/SAFARIによる高感度広視野FIR観測 (e.g., 10 deg²: on-sourceで0.2 hours) によって初めてpure-AGN天体の探査が可能になる (赤方偏移： $0.01 < z < 0.22$ 、AGN光度： $41 < \log L_{AGN} < 45$)。

母銀河：星間ガスの性質 (y松岡)

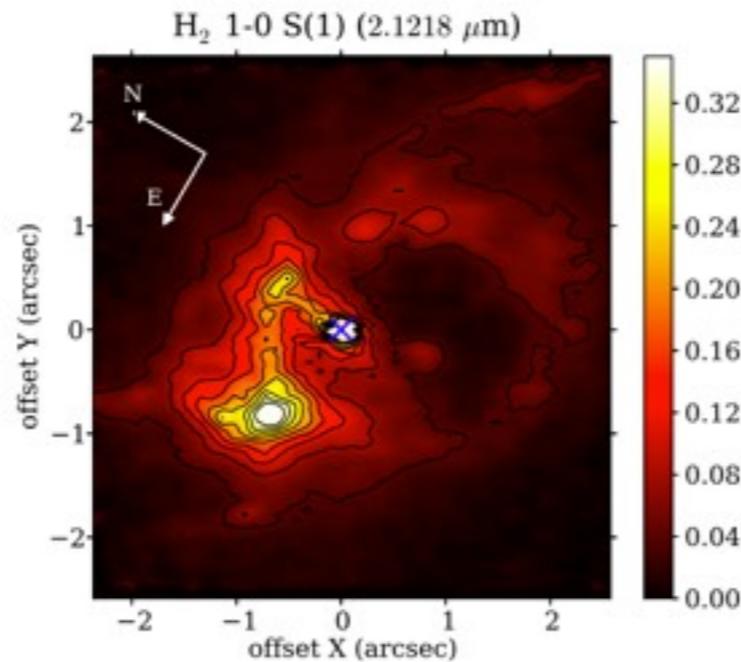
超巨大ブラックホールは、宿主である銀河の進化にどのような影響を与えたのか？ $M_{BH} - \sigma_{bulge}$ 関係は何を意味するのか？



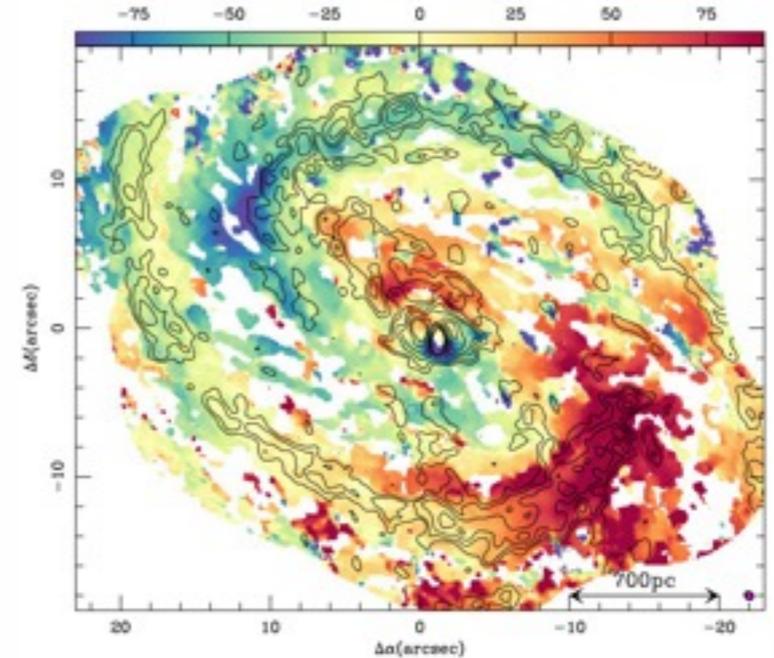
現状：明るい電離ガス輝線の観測
↓
高速のガス・アウトフローが母銀河全体に広がっている。
頻度？質量？空間スケール？
中心AGNとの関係？



中性ガス？



(温かい) 分子ガス？



(冷たい) 分子ガス？

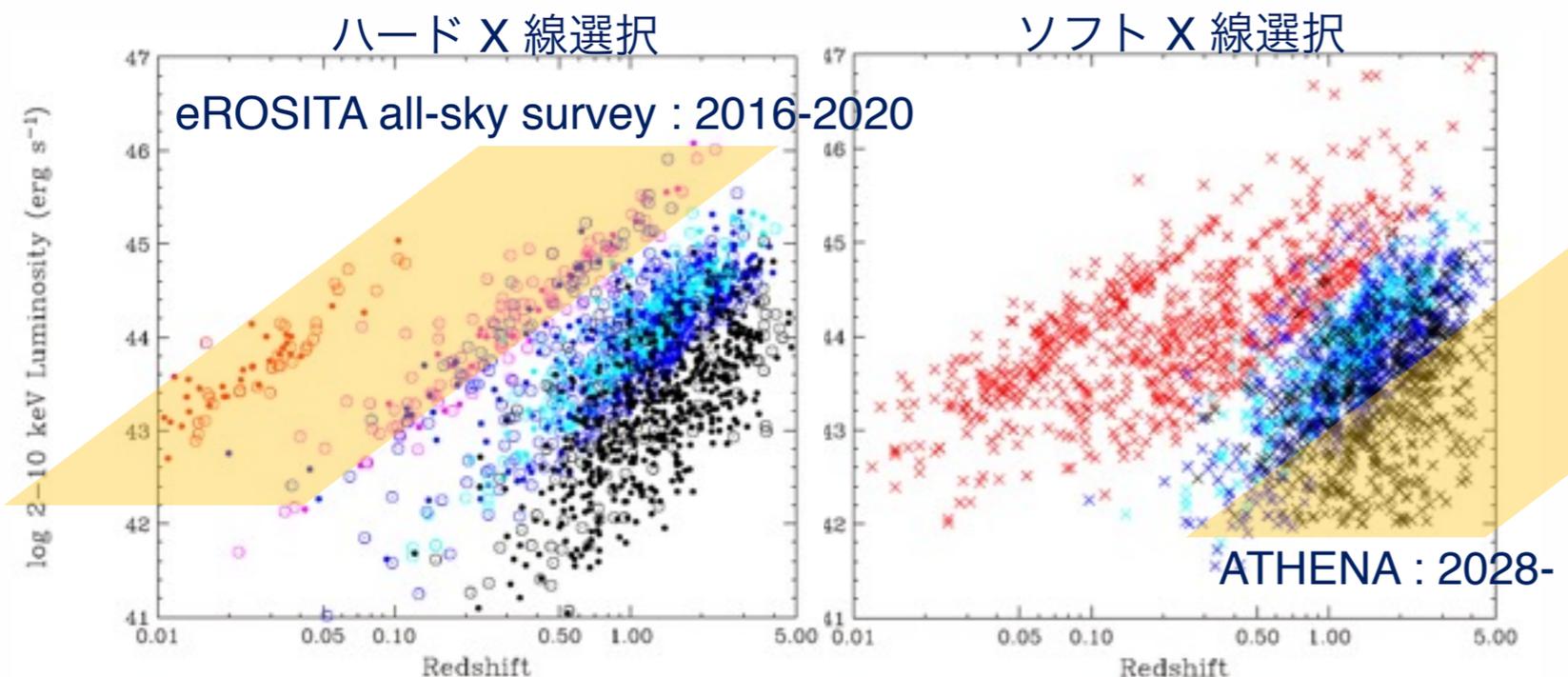
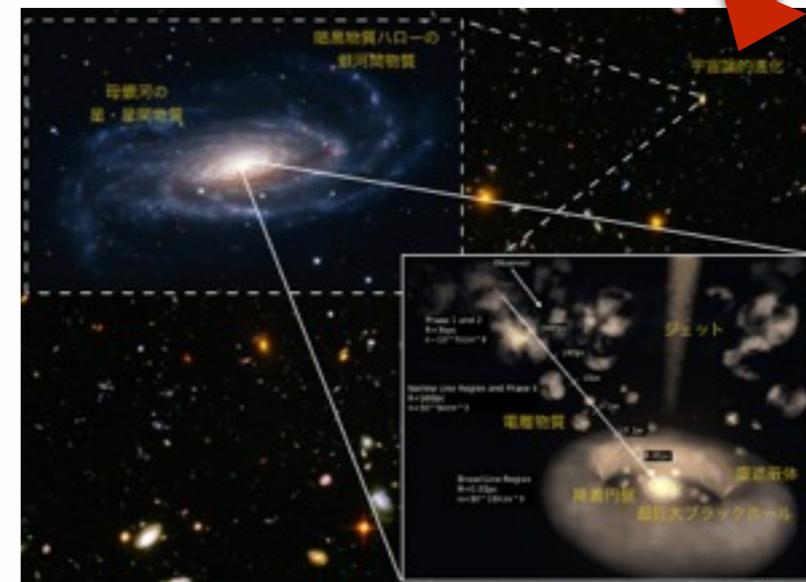
⇒ 補償光学 + 面分光観測の独壇場

- より暗く、細かく、遠くへ… TMT (~100 pc res. @ z ~ 2; 電離・中性・分子ガス)
- 大規模観測による電離ガス・アウトフローの系統調査… すばるなど8m望遠鏡

宇宙論的進化：SMBH質量・Eddington比関数（秋山）

X線選択 + 可視赤外測光/分光 サンプル

- X線選択は現状で最もクリーンなAGNの選択法である。
- AGN光度関数の宇宙論的進化を明らかにするためには光度赤方偏移面をまんべんなくカバーするサンプルが必要であり、これまでのさまざまな探査観測でサンプルは広がってきた。2020年代にはより広い範囲のカバーが可能になり、近傍宇宙の吸収を受けた種族の理解や最遠方宇宙の種族の理解が進む。



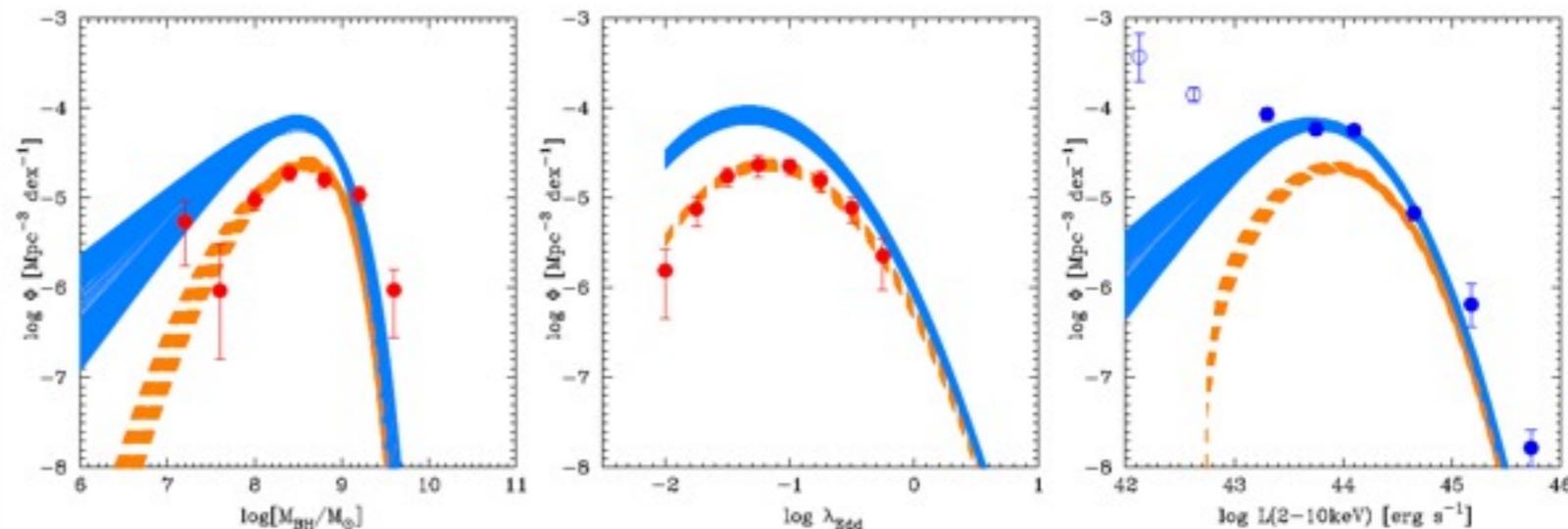
Ueda et al. 2014

+ SPICAなど赤外線観測による、塵に埋もれたAGNの探査 (今西)

AGN 種族全体としての
ブラックホール質量関数、
エディントン比分布関数

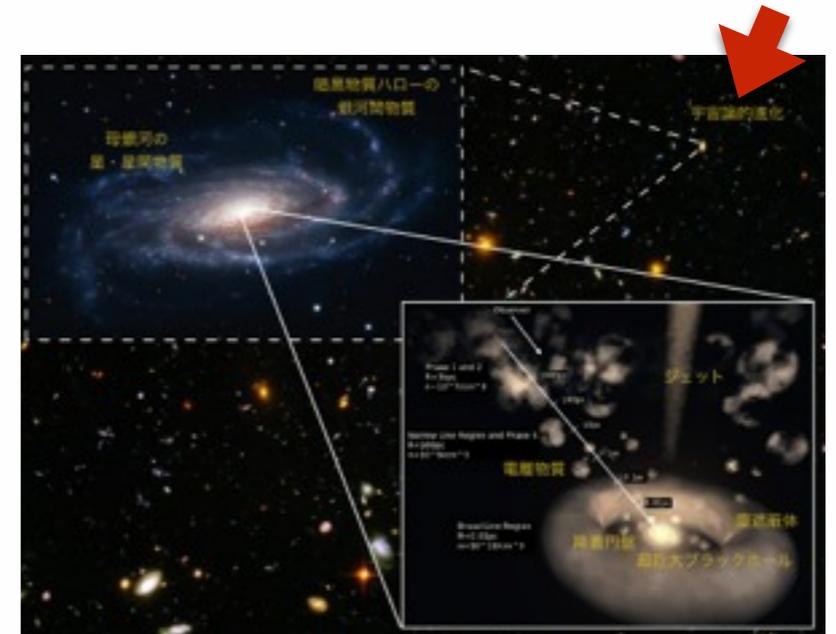
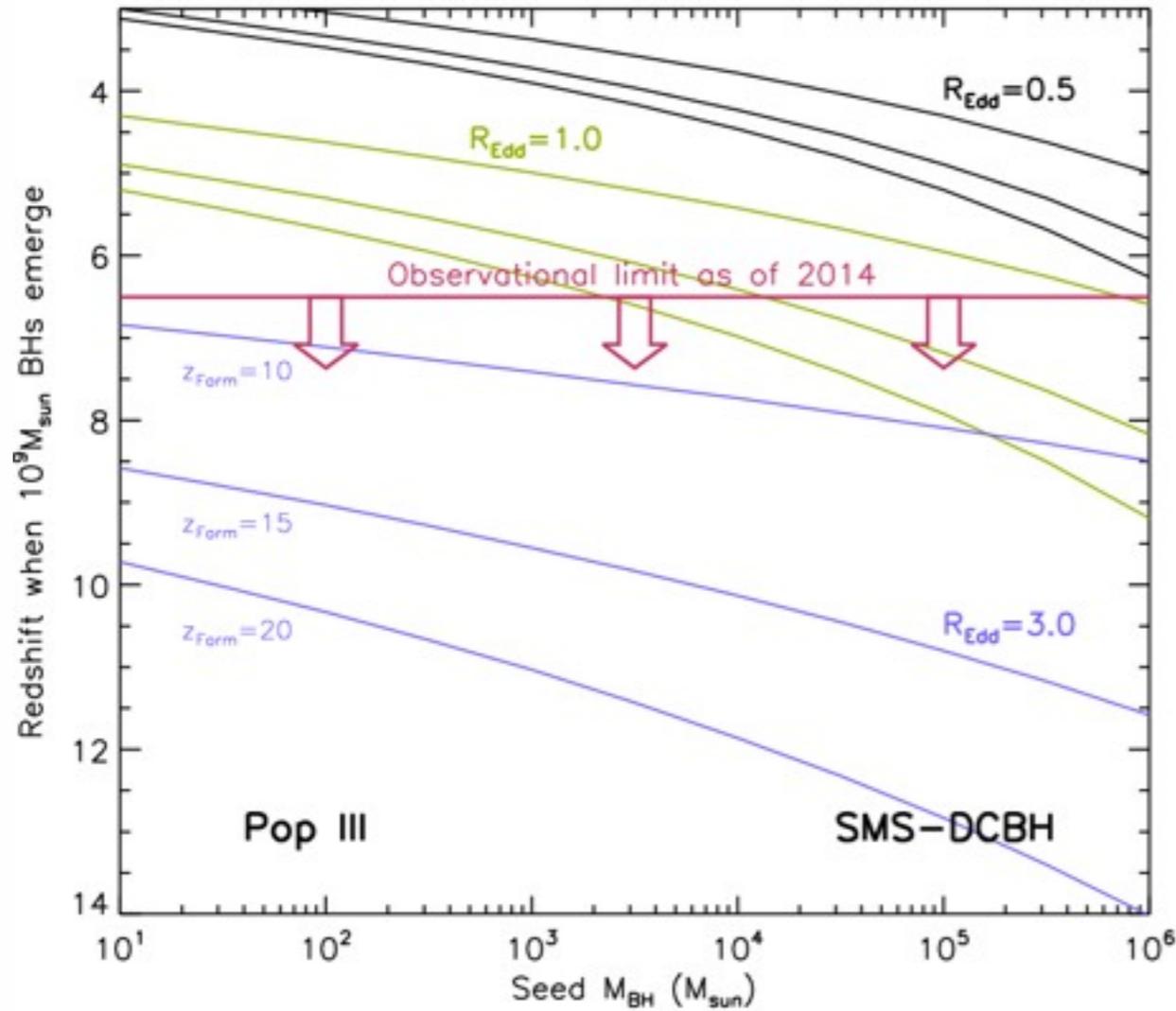
赤方偏移 $1.18 < z < 1.68$ のAGNのブラックホール質量関数、エディントン比分布関数、X線光度関数の同時フィット

Akiyama et al. in preparation

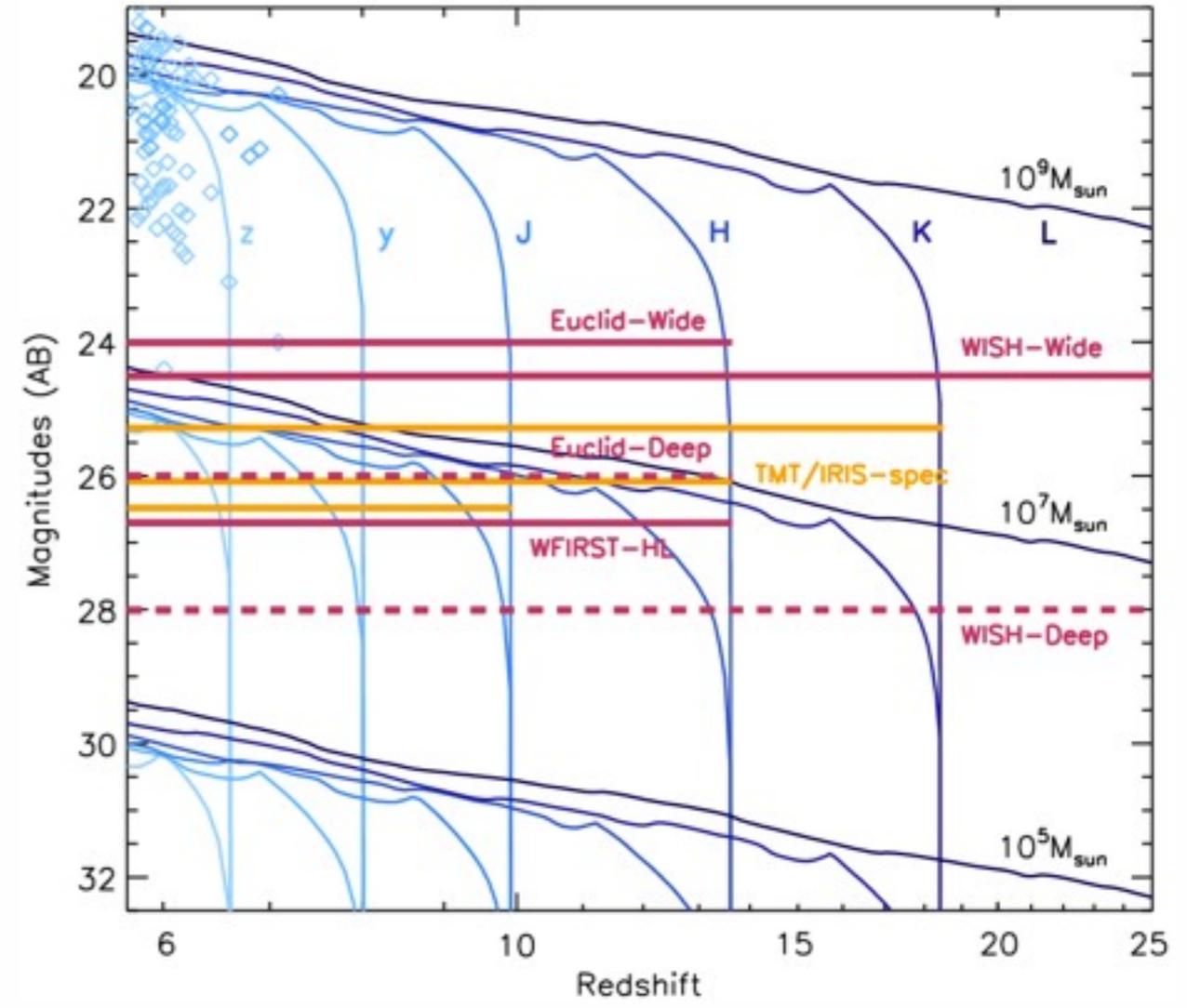


宇宙論的進化：SMBHsの誕生 (y松岡)

最初の $10^9 M_{\text{sun}}$ BHが生まれる赤方偏移



L_{Edd} で光るSMBHの各バンド等級



Euclid/WFIRST/WISHとTMT分光で、
 $10^9 M_{\text{sun}}$ SMBHは $z \sim 20$ まで観測可能;
 ($M < -23$ 等, $M_{\text{BH}} > 10^7 M_{\text{sun}}$ という意味での)
 First Quasarsは $z \sim 15$ まで探索可

TMT/IRIS-spec: $R=1000$, $S/N=5$, $t=5\text{hrs}$

活動銀河核研究は、2020年代に新たなステージへ

母銀河の
星・星間物質

暗黒物質ハローの
銀河間物質

宇宙論的進化

