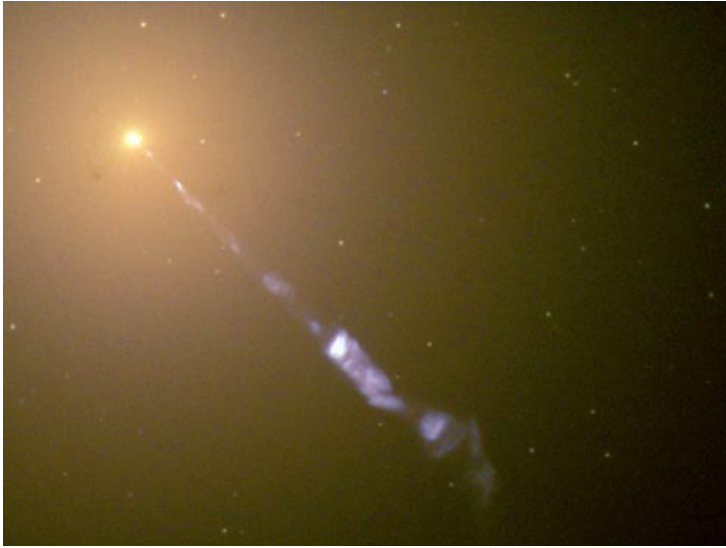


分子ガス流から知る 銀河とブラックホールの共進化

大西響子 (愛媛大学宇宙進化研究センター)

ブラックホール(BH)と銀河



ブラックホールが
銀河中心に存在する。

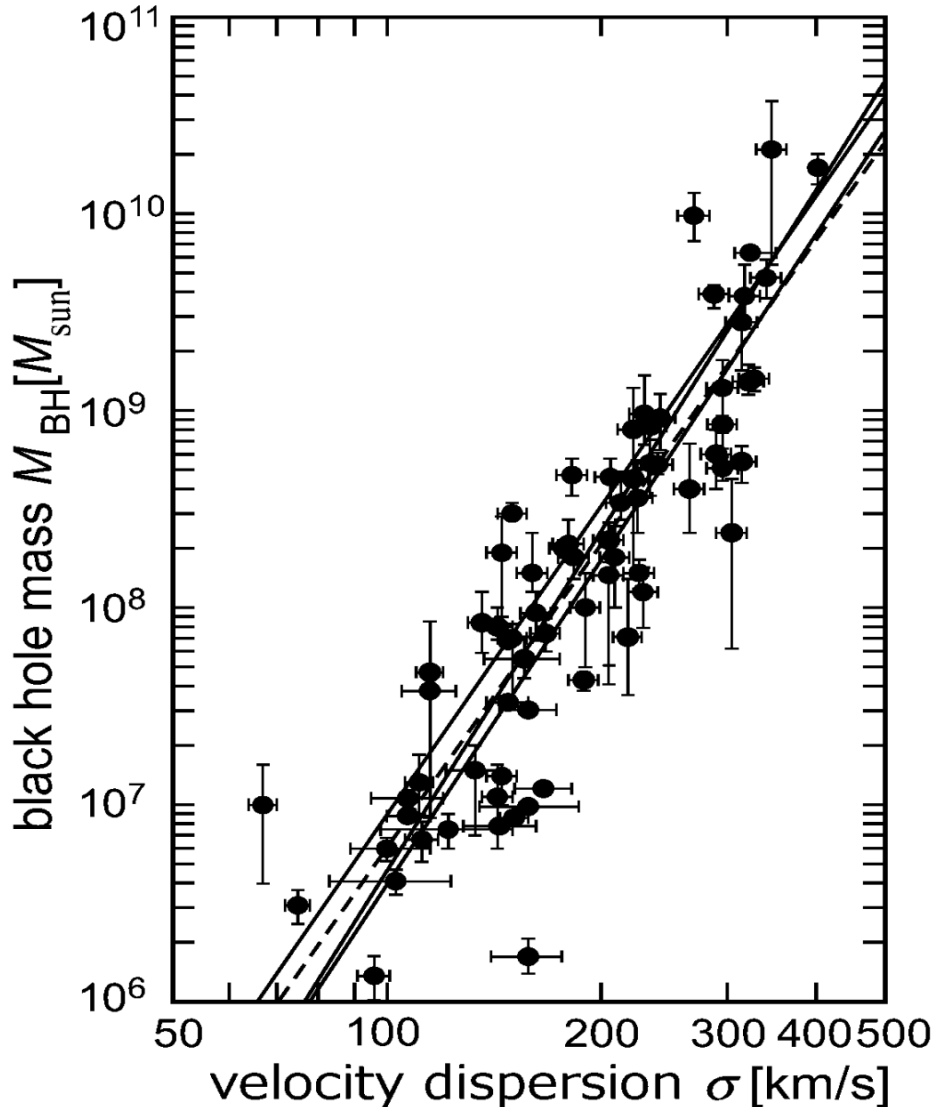
(Ferrarese & Ford 2005, etc.)

銀河は衝突合体し
BHを含んで成長する。

(Kormendy & Ho 2013, etc.)



ブラックホール(BH)と銀河



BHと母銀河の相関

例： $M_{\text{BH}}-\sigma$ 関係

BH質量大だと、星(バルジ内)の速度分散大

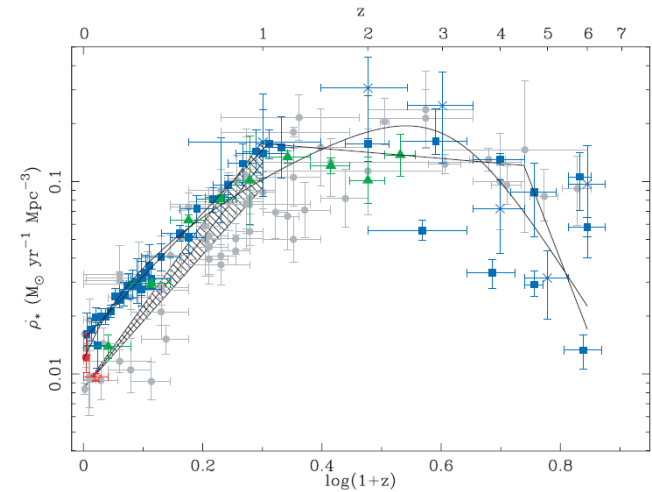
(Ferrarese & Merritt 2000,
McConnell & Ma 2013,
Graham & Scott 2014,
van den Bosch 2016 etc.)

BHと銀河の共進化？

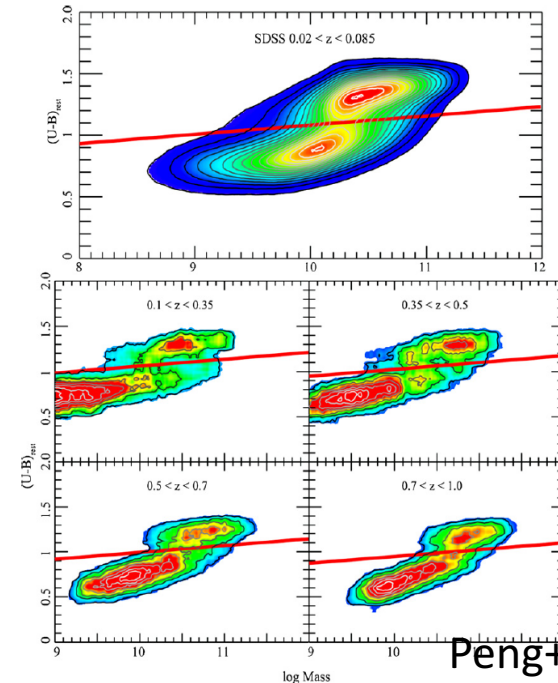
銀河の進化

- 星形成による質量増加
- 衝突合体による形態進化
- 星自体の進化による色や光度の変化
- まわりの環境からの影響
- AGN/Supernova feedback

...など様々



Hopkins & Beacom 2006



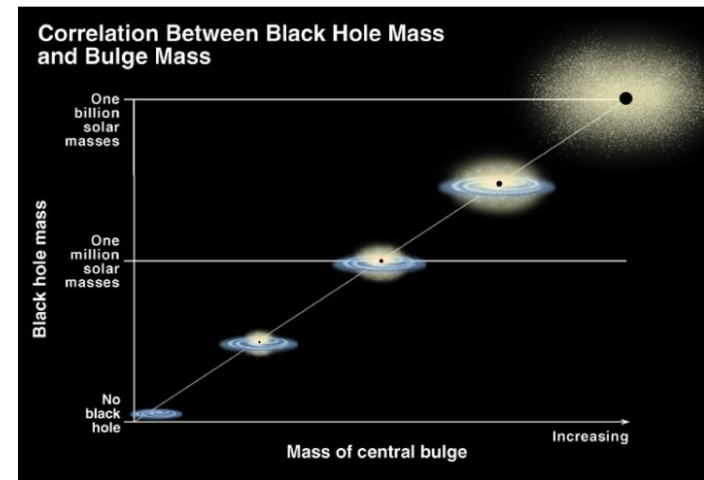
Peng+ 2010

ブラックホール(BH)の成長

- BHどうしの衝突合体
- 銀河の内容物の吸い込み
- AGN feedback による自己規制を伴う成長

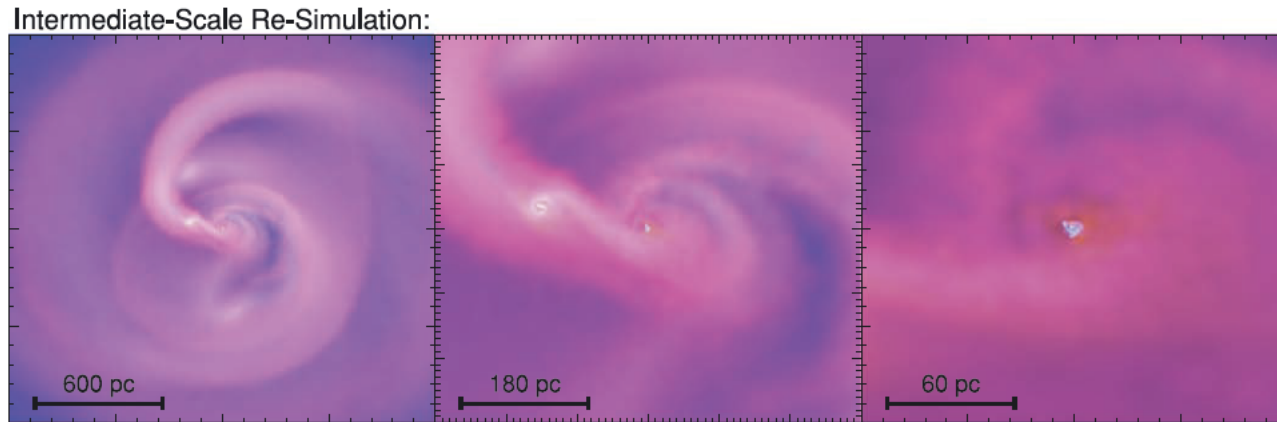


直接観測が難しく、銀河進化とカップルしづらい。



ブラックホール(BH)の成長

ガス吸い込み

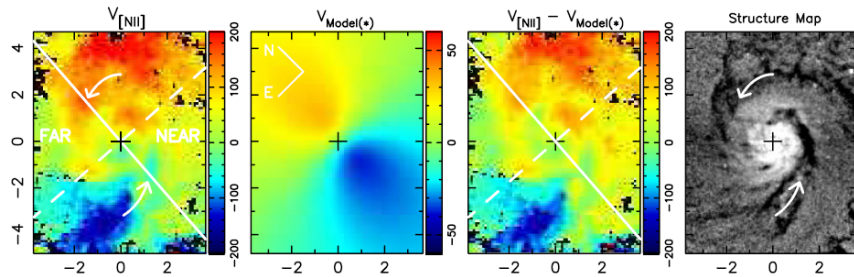


銀河衝突後、数100から数10pcスケールでガス流入
<0.1pcではあまり流入していない？

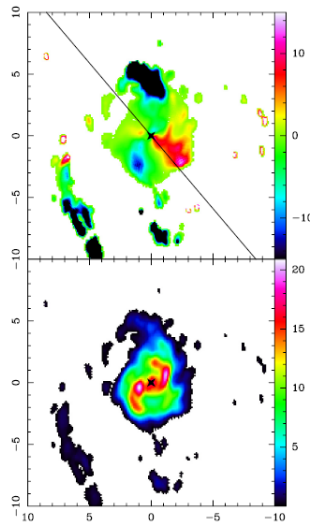
(Hopkins&Quataert 2010、流体シミュレーション)

→BH 周辺で~10pc スケールのガス運動を観測したい。

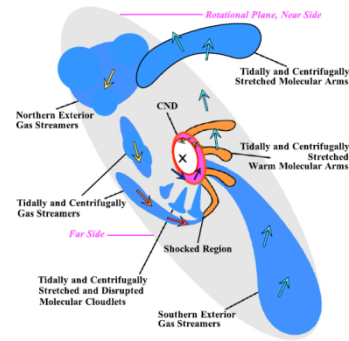
ブラックホール(BH)の成長 ガス吸い込み運動(含むBH周り)の観測



Schnorr-Muller+2014



Combs+2014



Liu+2012

line profile の時間変動観測

(Storchi-Bergmann+2003)

SgrA*

AGNIFS (S-B et al.)

NUGA (Combes et al.)

Onishi et al. (WISDOM)

Barth et al.

他色々(主にgas properties)

ブラックホール(BH)周囲のガス運動の観測

Gas inflow/outflow の観測は様々ある。

これまでの観測的研究で欠けているのは...

- ・ 色々な観測機器を用いて同じ銀河を観測する事
- ・ 統一した空間スケールでの流入・流出量の比較
- ・ 100pcより下のスケールでのガス非回転運動の検出
(nuclear spiral/bar 構造で流入させるが、例外もある)

ブラックホール(BH)周囲のガス運動の観測

Gas inflow/outflow の観測は様々ある。

これまでの観測的研究で欠けているのは...

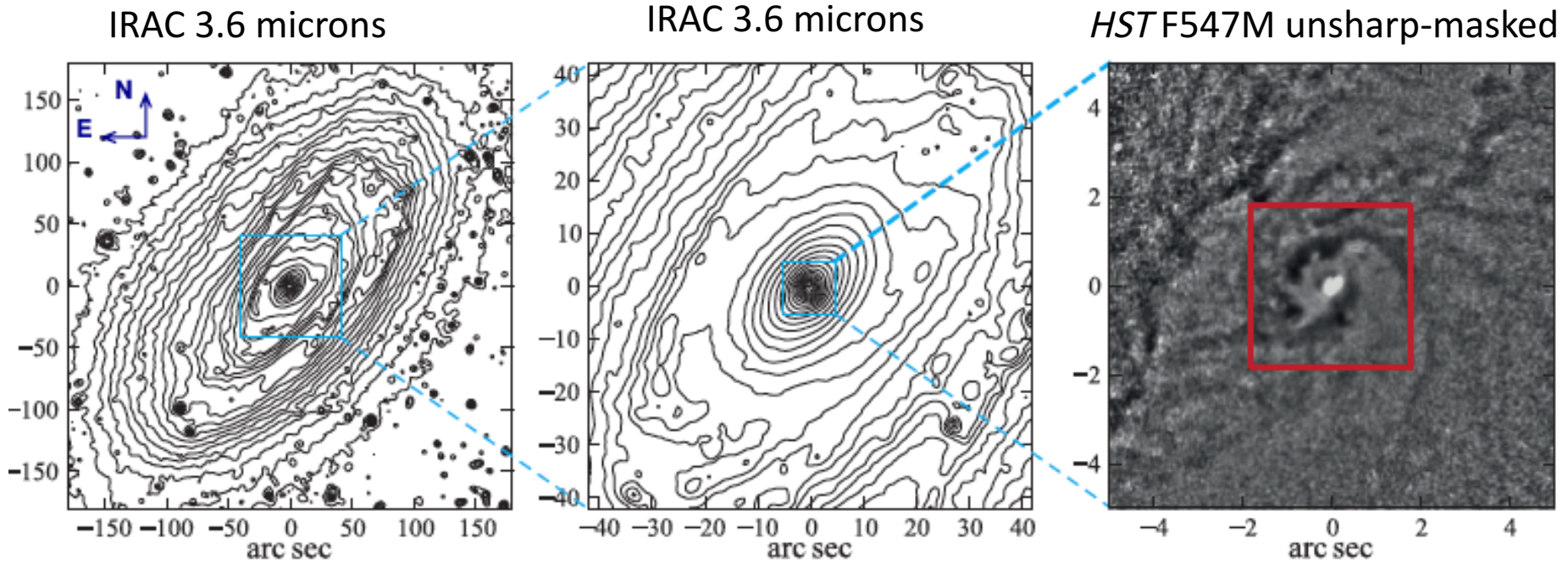
- ・ 色んな観測機器を用いて同じ銀河を観測する事
→IFSと電波干渉計で観測する
- ・ 統一した空間スケールでの流入・流出量の比較
→干渉計の configuration で空間分解能調整
- ・ 100pcより下のスケールでのガス非回転運動の検出
(nuclear spiral/bar 構造で流入させるが、例外もある)
→~10pc スケールでの観測 (~0".1 @ 20Mpc)

BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

Target: NGC 4501 (M88)

Virgo cluster 内の渦巻銀河, 距離16.1 Mpc ($1'' \sim 78\text{pc}$)のSy2銀河。

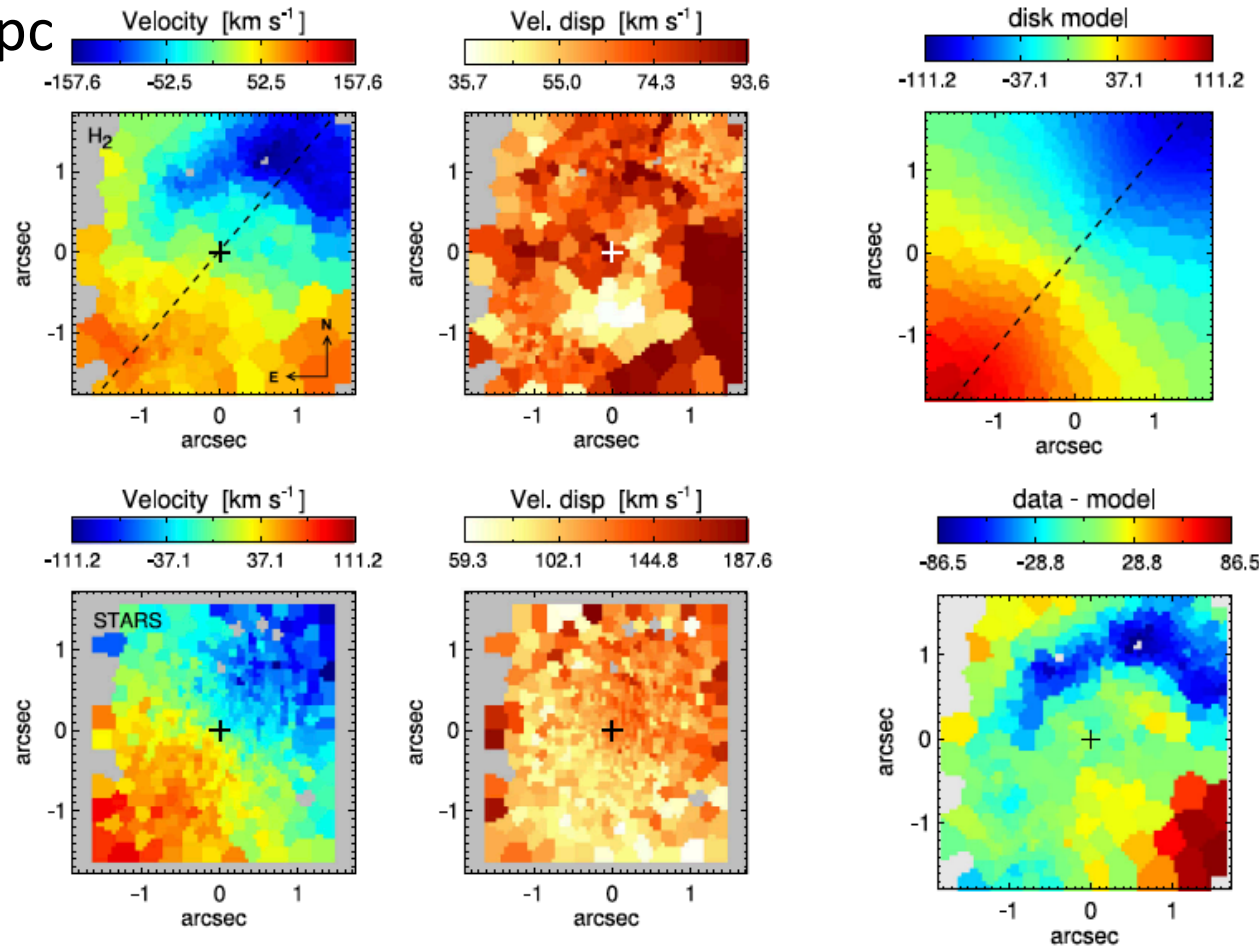
H_2 , stars (Mazzalay+14 w/ SINFONI), $[\text{N II}]$, $\text{H}\alpha$ (Repetto+17 w/ GMOS), $\text{CO}(2-1)$ (Onishi+ in prep. w/ ALMA) の運動を比べる。



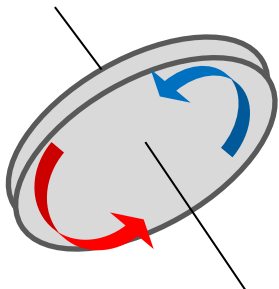
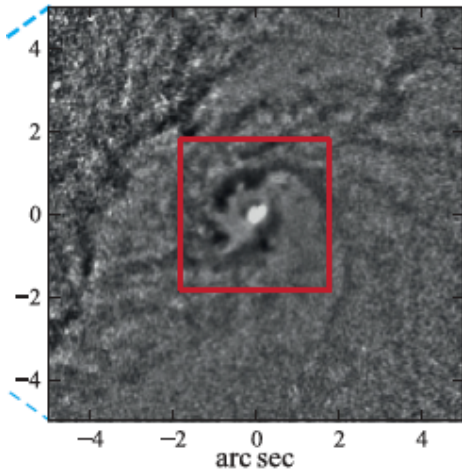
BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

H₂, stars (Mazzalay+14 w/ SINFONI)の運動

空間分解能 0".2~16pc



HST F547M unsharp-masked



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

H₂, stars (Mazzalay+14 w/ SINFONI)の運動

同じ速度成分をもったH₂ガスがnuclear spiral arm上に分布（NW to E; 青）。

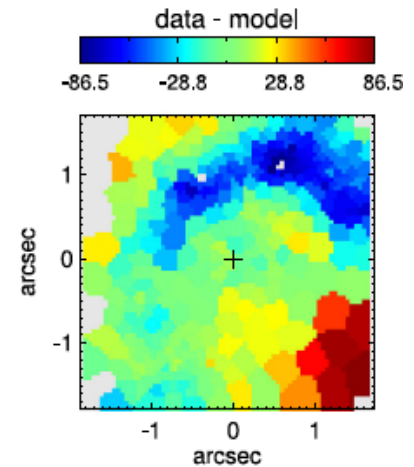
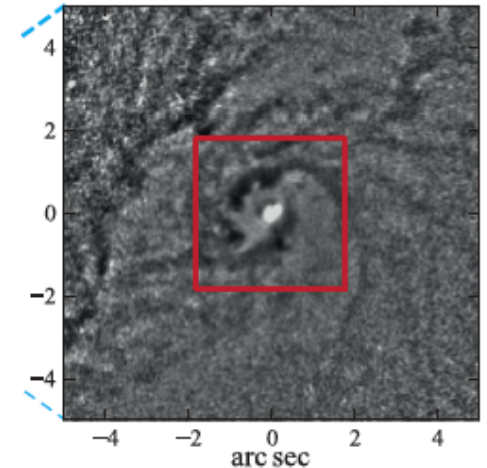
密度波ではなく真の非回転運動。

理由1. S側の腕構造が見えない

2. H₂の輝度高い場所と一致する

3. NE が手前なので outflow であり、ディスクとは離れたフィラメント状の構造を見ている。

HST F547M unsharp-masked



Mazzalay+14

BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

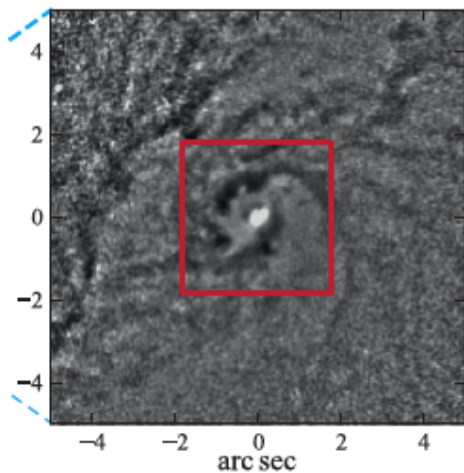
[N II], H α (Repetto+17 w/ GMOS)の運動

空間分解能 $0''.77\sim 60$ pc

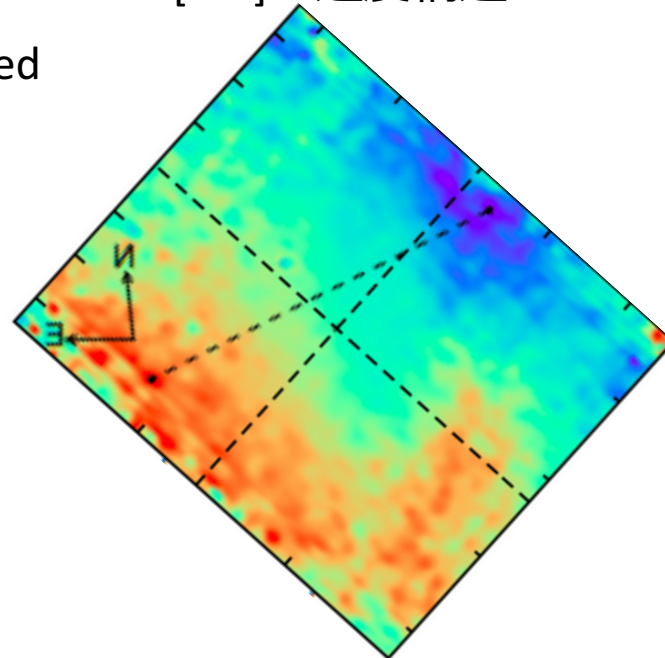
[N II]の速度構造

H α の速度構造

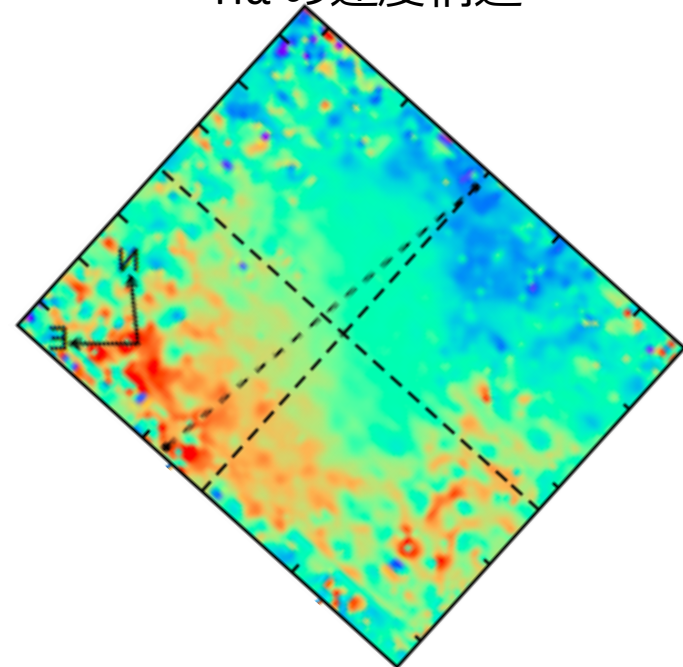
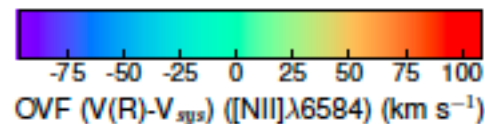
HST F547M unsharp-masked



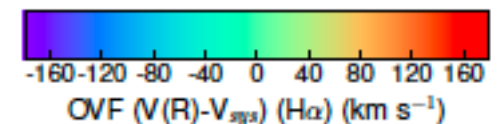
Mazzalay+14



Repetto+17



Repetto+17



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

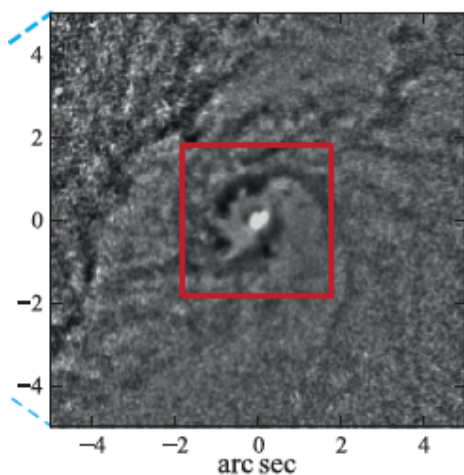
Na I D λ 5893 吸収の分布=inflow/outflowが起きる場所

(Phillips 1993; Heckman+00; Rupke&Veilleux15 etc.)

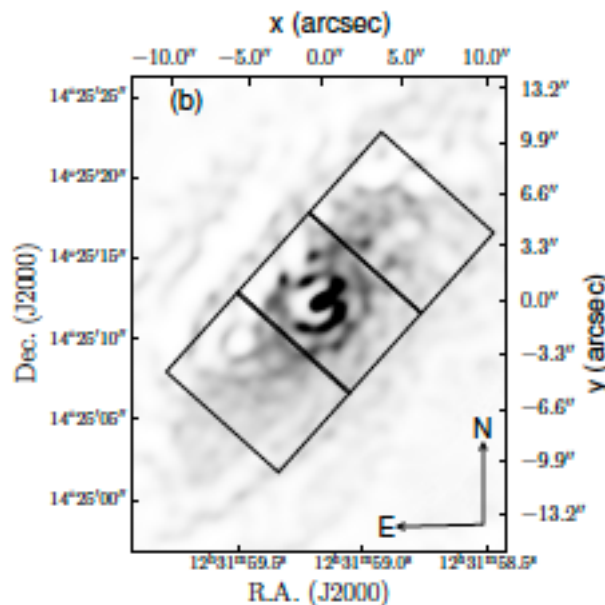
Na I D 5893 吸収 (白)
とdeconv. 図 (color)

Deconvolved Image
(GMOS image r-G0303)

HST F547M unsharp-masked

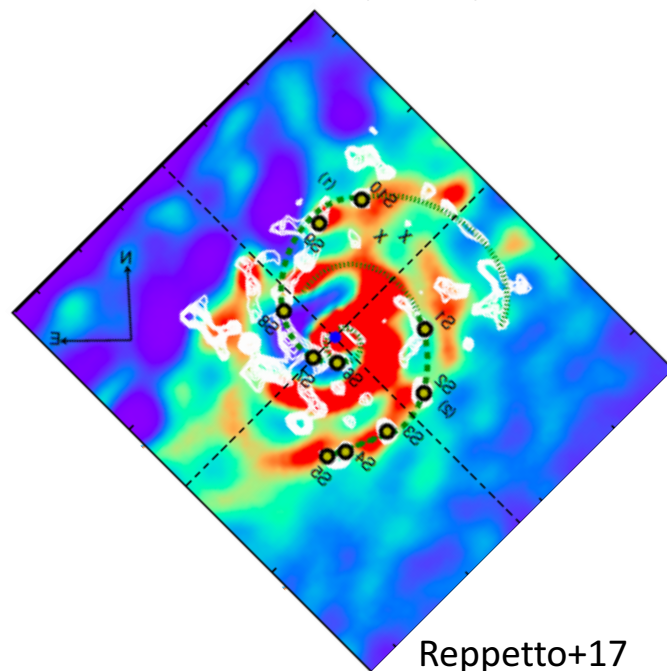


Mazzalay+14



Lucy Richardson Decovolution

Repetto+17



NaI λ 5893 OVF white contours superposed to Lucy-Richardson (Counts)

Repetto+17

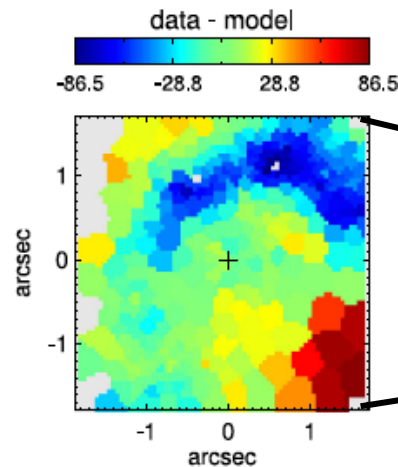
BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

Na I D λ 5893 吸収の分布=inflow/outflowが起きる場所

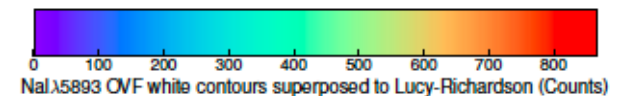
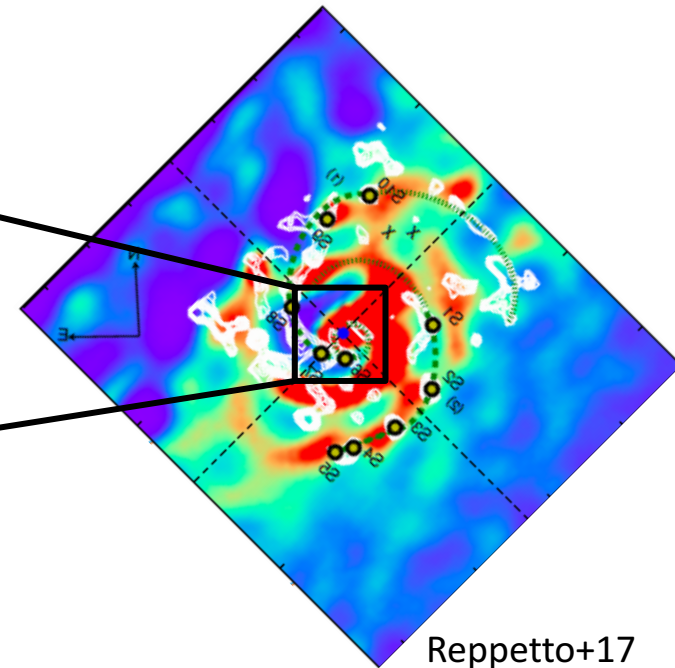
(Phillips 1993; Heckman+00; Rupke&Veilleux15 etc.)

Na I D 5893 吸収 (白)
とdeconv. 図 (color)

H₂の非回転運動

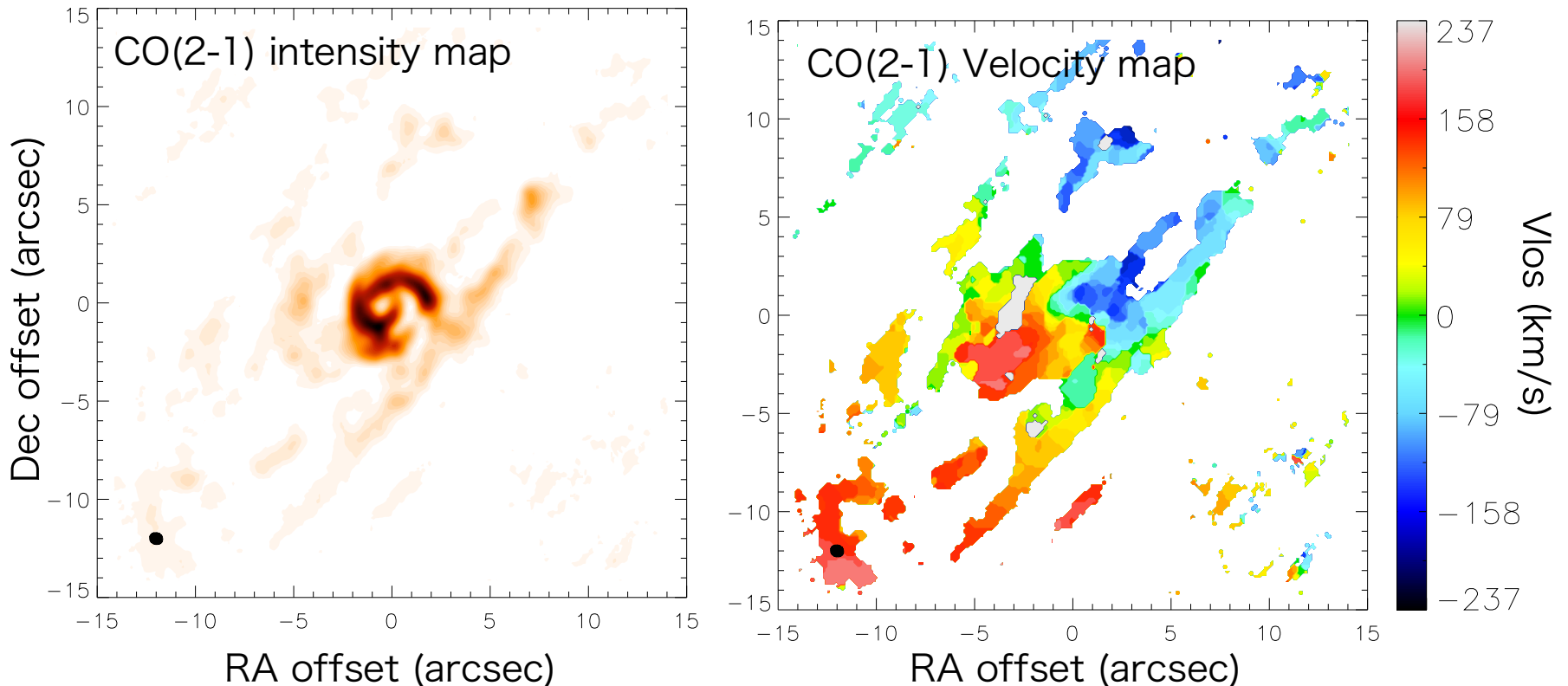


Mazzalay+14



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

CO(J=2-1) (Onishi+in prep. ALMA Cy3)の輝度分布と運動



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

ALMA Cycle 3 (PI: K. Onishi)

CO(J=2-1) 輝線を $0''.67 \times 0''.59$ beam ~ 50 pc の空間分解能で観測

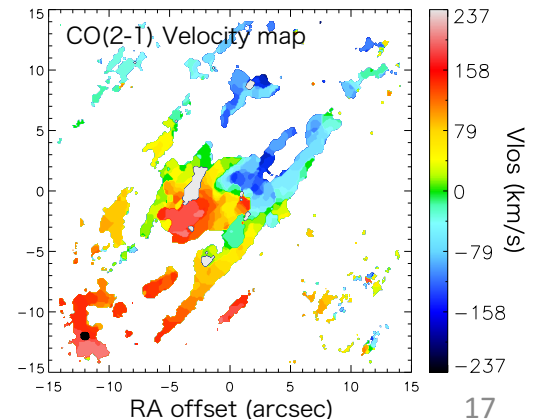
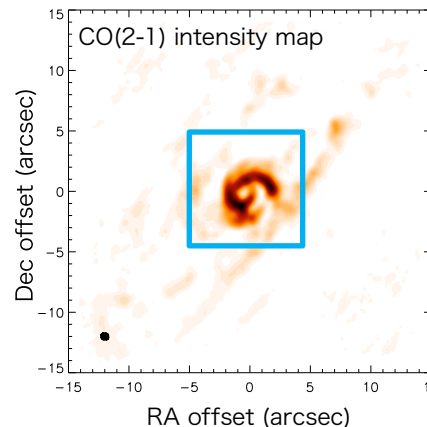
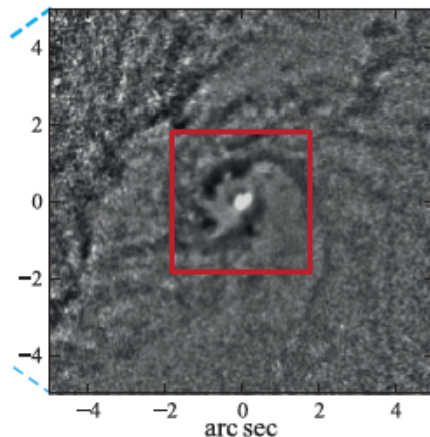
baseline: 15.1-600.7m(2016/04), 867.2m(2016/07)

on-source: 4 min 2016/04, 07

phase center: RA=12:31:59.216, Dec=+14:25:13.480

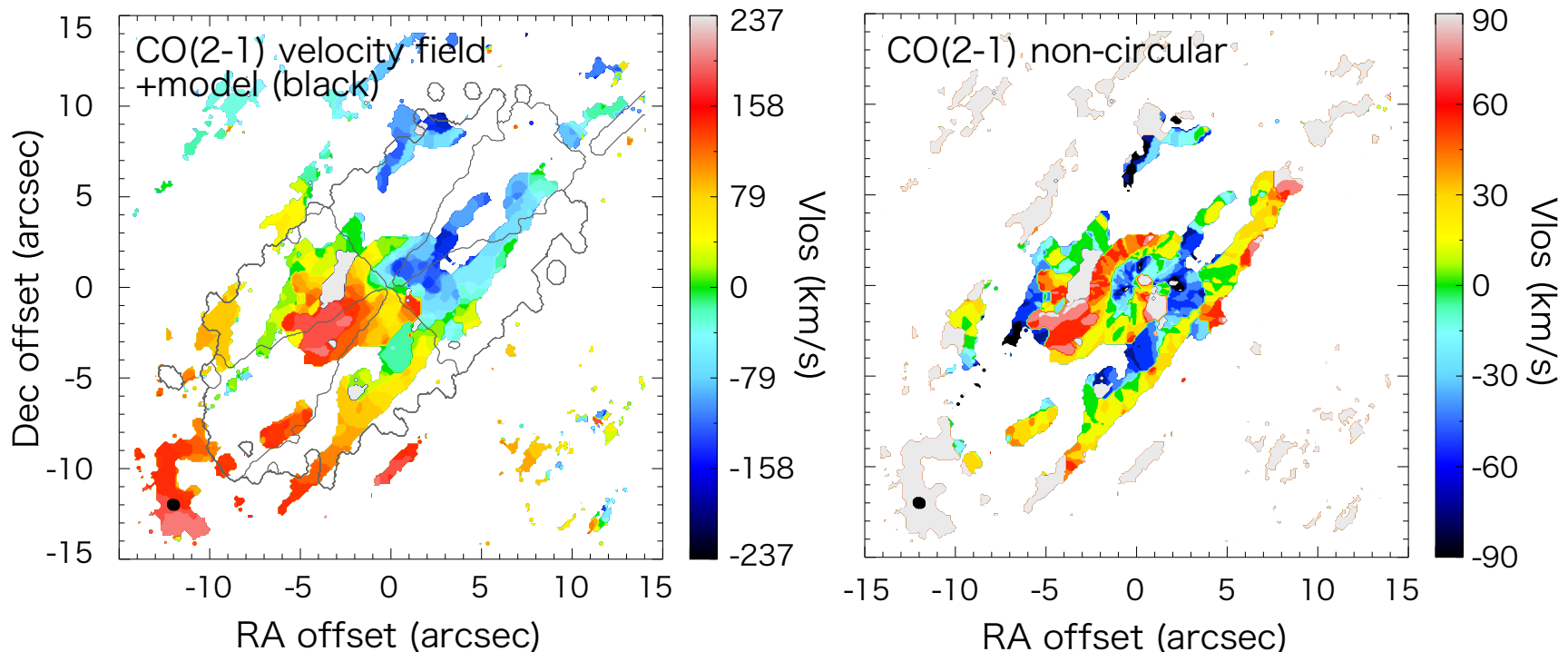
vel. resolution: 15 km/s

calibrators: J1229+0203 (bandpass, flux), J1243+1622 or J1215+1654(phase)



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

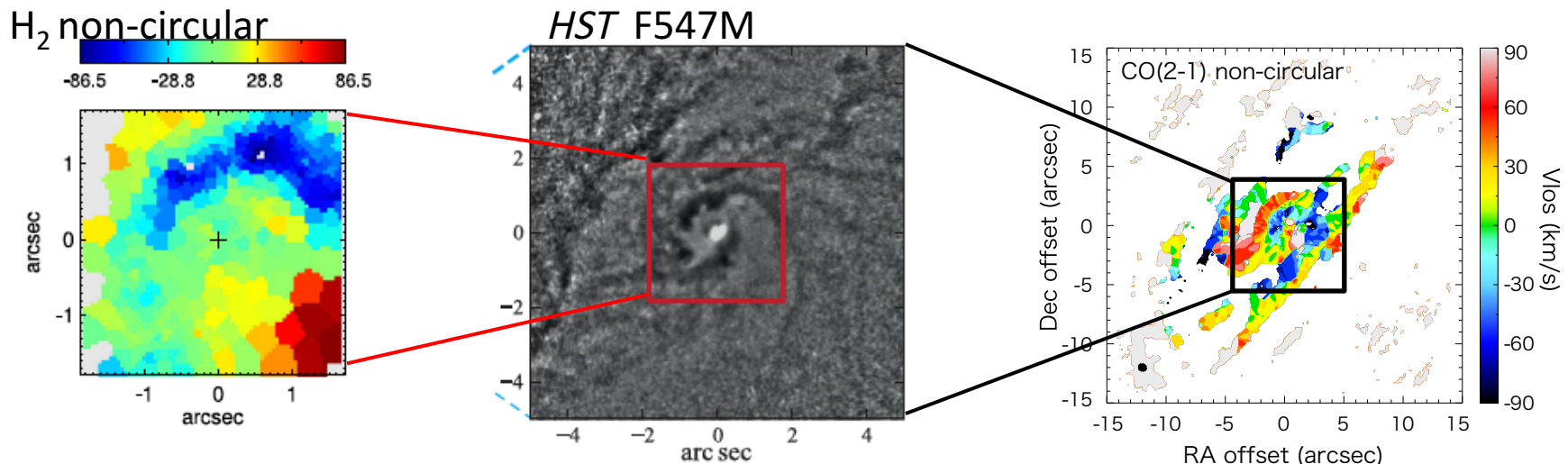
星とBHを含む質量分布モデルから運動方程式を解いて作った回転運動モデル（左黒）を差し引き、非回転運動（右）を検出した。



BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

GMOS([N II],H α)では観測されずSINFONI(H₂輝線)で観測された腕状の速度構造を検出した。

赤い腕構造は双極アウトフローの片割れ？ダスト腕に沿ったガス流出@100-500pcスケール。根元を見るために分解能を上げたい。(0".1 beam~8pc を目指している)



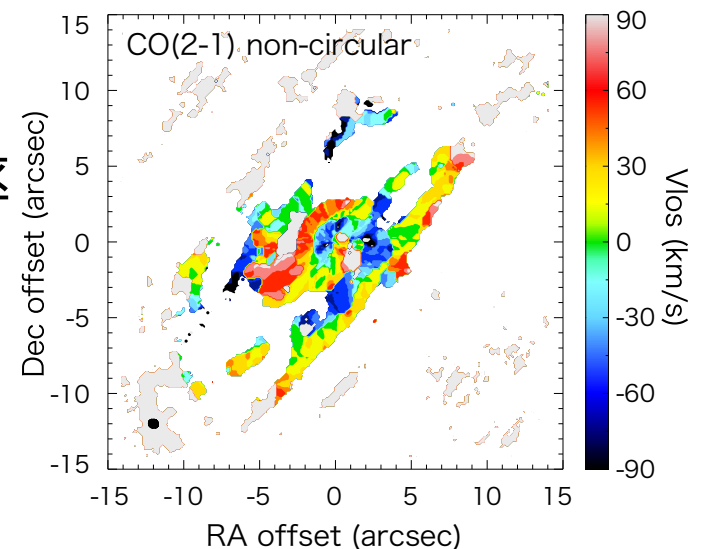
NB:非回転運動検出の是非は回転運動モデルに依存する。

BH近傍のガス運動– NGC 4501 (M88)

ここまでをまとめると、

NGC 4501 (Sy2 spiral galaxy) では H_2 やCOでなぞられる冷たいガスの非回転運動が検出され、電離ガス([N II]や $\text{H}\alpha$)は回転ドミノの運動をしている。非回転運動(アウトフロー)はダストの形態と一致する。

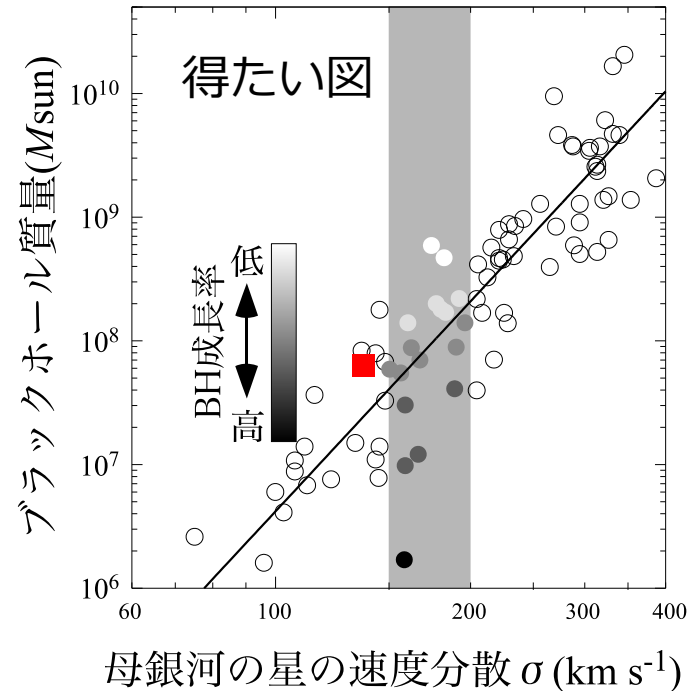
ガス密度を仮定すればアウトフロー率が求まるが、回転運動モデルをより綿密に調べる必要がある。



ガス高分解能観測からどこまで共進化を明らかにできるか？

ガスの密度を仮定して求まるinflow /outflow rateと、 $M_{\text{BH}}-\sigma$ など上での位置との間に関係があれば、銀河進化とBH成長を直接関連づけられて、共進化の有無を調べられる。

NGC 4501 の例(右図赤)では
BH近傍への流入が少ないことを
予想させる位置で、しずしずと
アウトフローが起きていた。
これから精度を上げ、天体数を
増やして関連性を調べる。



まとめ

- ・ 銀河とBHは共進化している？
- ・ BH近傍<100pcでのガス流入がBH成長の鍵を握る
- ・ 電離ガス(かH₂)の非回転運動検出されているが、視野不足(回転運動の精度にも疑問)。
- ・ IFUで非回転運動を検出されていた近傍銀河NGC 4501についてALMAでも同様の運動が検出できることを示した。
- ・ NGC 4501 では電離ガスの非回転運動は検出しにくく、分子ガスで冷たいアウトフローが見える。
- ・ M- σ 上の位置からはBH近傍へのガス輸送の必要なさそう。
- ・ 今後、より高い分解能でアウトフローの根を押さえたい。