

High resolution imaging of the molecular torus in NGC1052 with VLBI

VLBIによる NGC1052の分子トーラスの高角分解能撮像

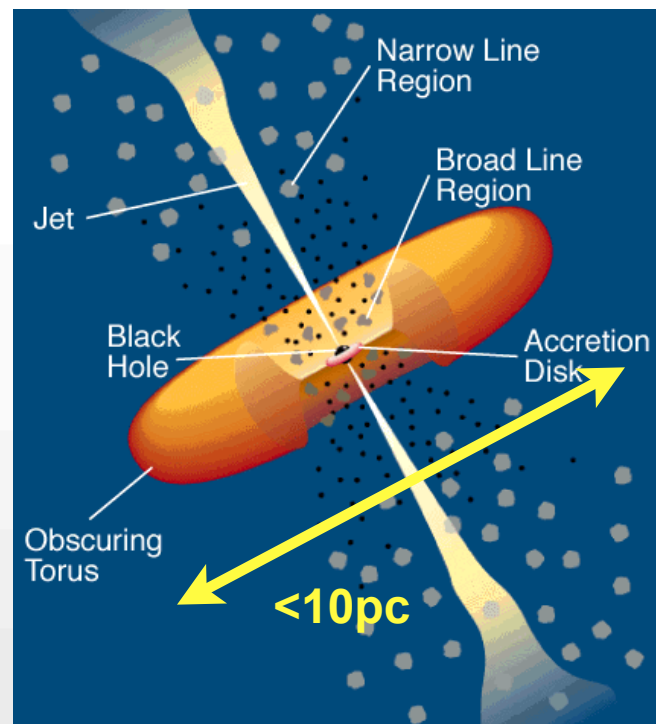
ref. Sawada-Sato et al. 2016, ApJL, 830, L3
Sawada-Sato et al. 2019, ApJL, 872, L21

澤田-佐藤 聡子 (山口大学)

トーラスとは？

- 活動銀河核 (AGN) 統一モデル
 - ブラックホールを取り囲むトーラス
 - トーラス：AGN のエネルギー貯蔵庫
 - 銀河の中の星間物質はトーラスへ落下
 - トーラスに溜まる
 - トーラスから更にブラックホールへ落下
 - 物質のエネルギーが解放
 - トーラスのサイズ：典型的に <10 pc

ブラックホールへの質量降着機構を知るために
トーラス内部の物理・化学過程の調査は重要



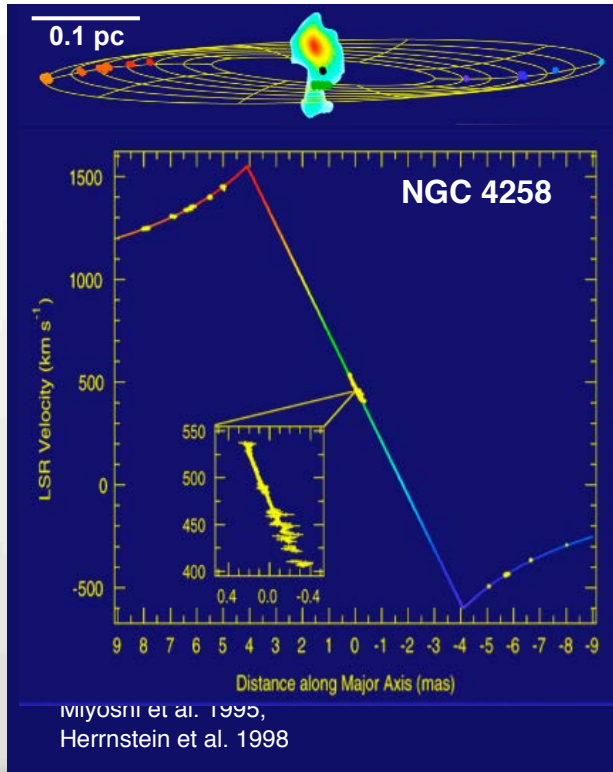
Urry & Padovani 1995

トーラスの様々なガス相

ダスト & プラズマ

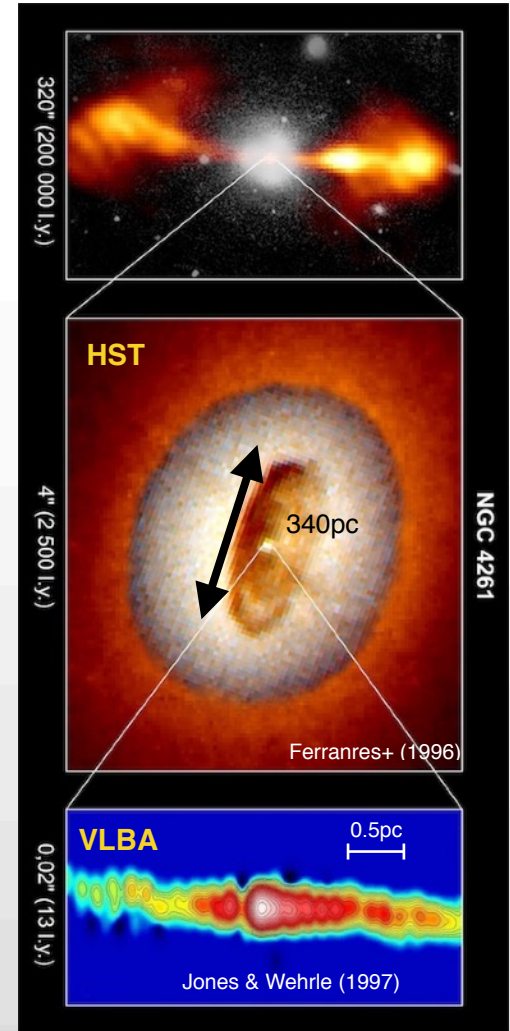
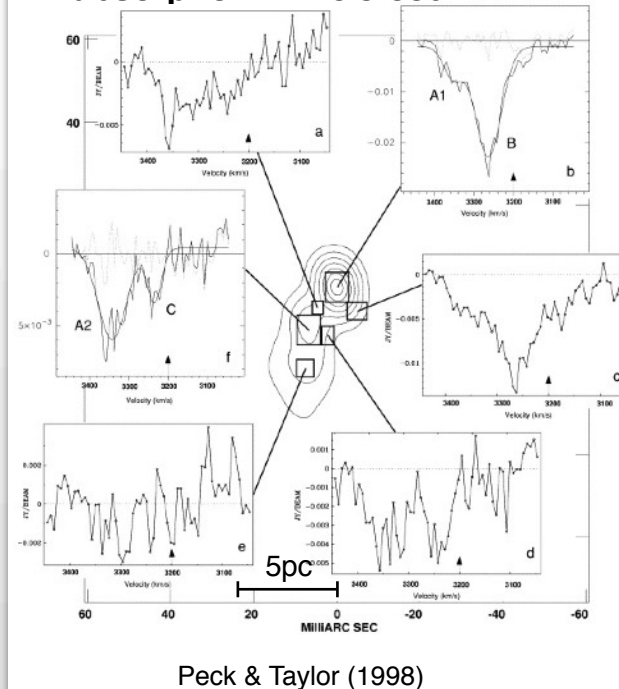
VLBIがこれまで見てきたトーラスの一部の描像

水分子(メーザー)



中性水素原子

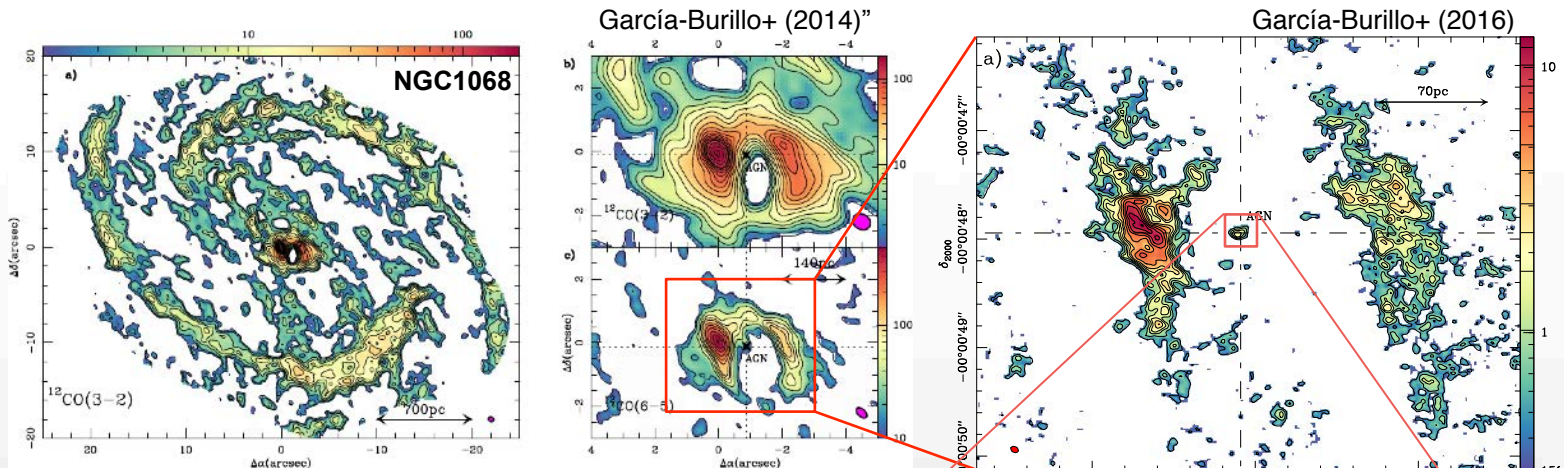
HI absorption in NGC 3894



トーラスの様々なガス相

近年の ALMA によるトーラスへのアプローチ

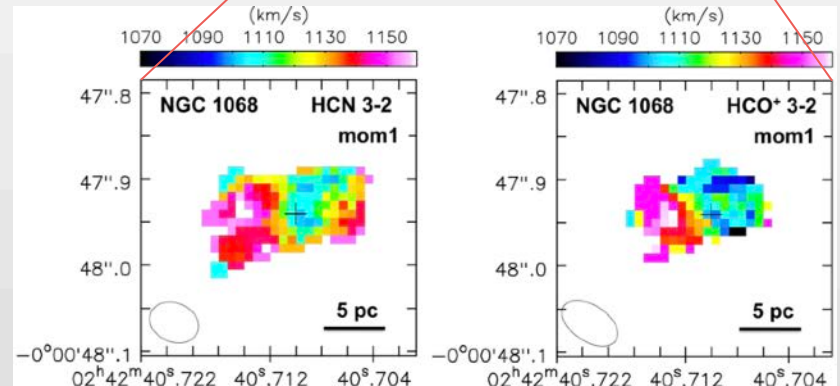
CO分子
HCN分子
HCO⁺分子



- **2016年**：トーラスからの輝線放射を周囲の明るい放射から分離できた
- **2018年**：視線方向の情報から回転が導出

トーラス内部の情報にはまだ

Imanishi+ (2018)

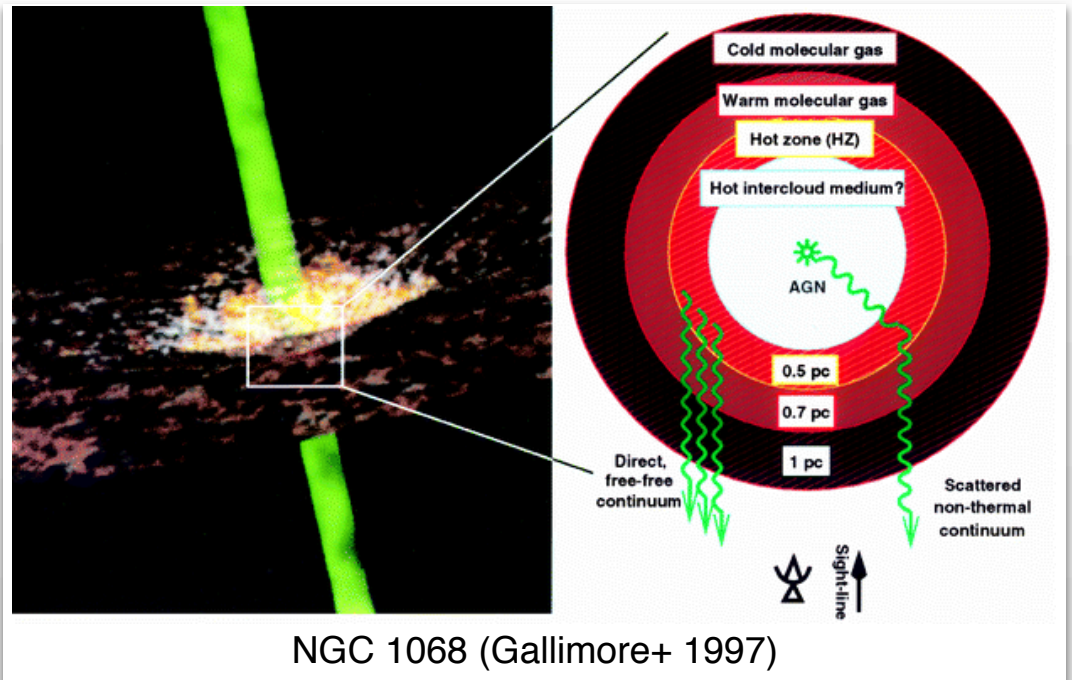
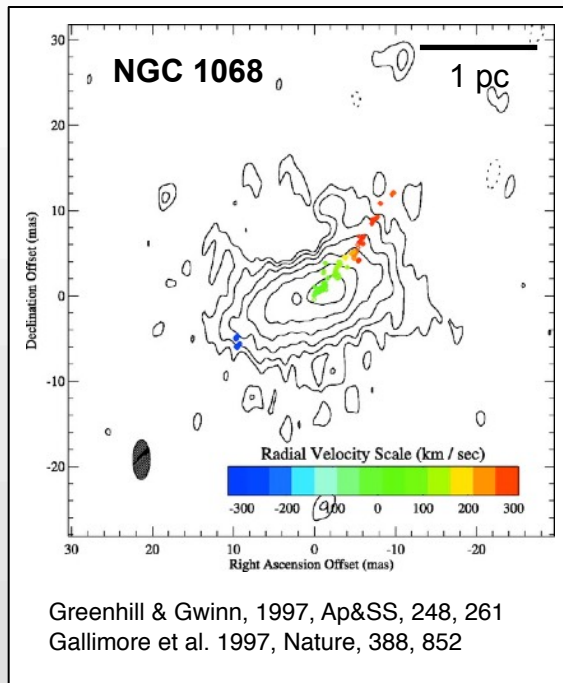


トーラス内のガスの複層の提案

電離/暖かい分子/冷たい分子の複層

● NGC1068: (Gallimore+ 1997)

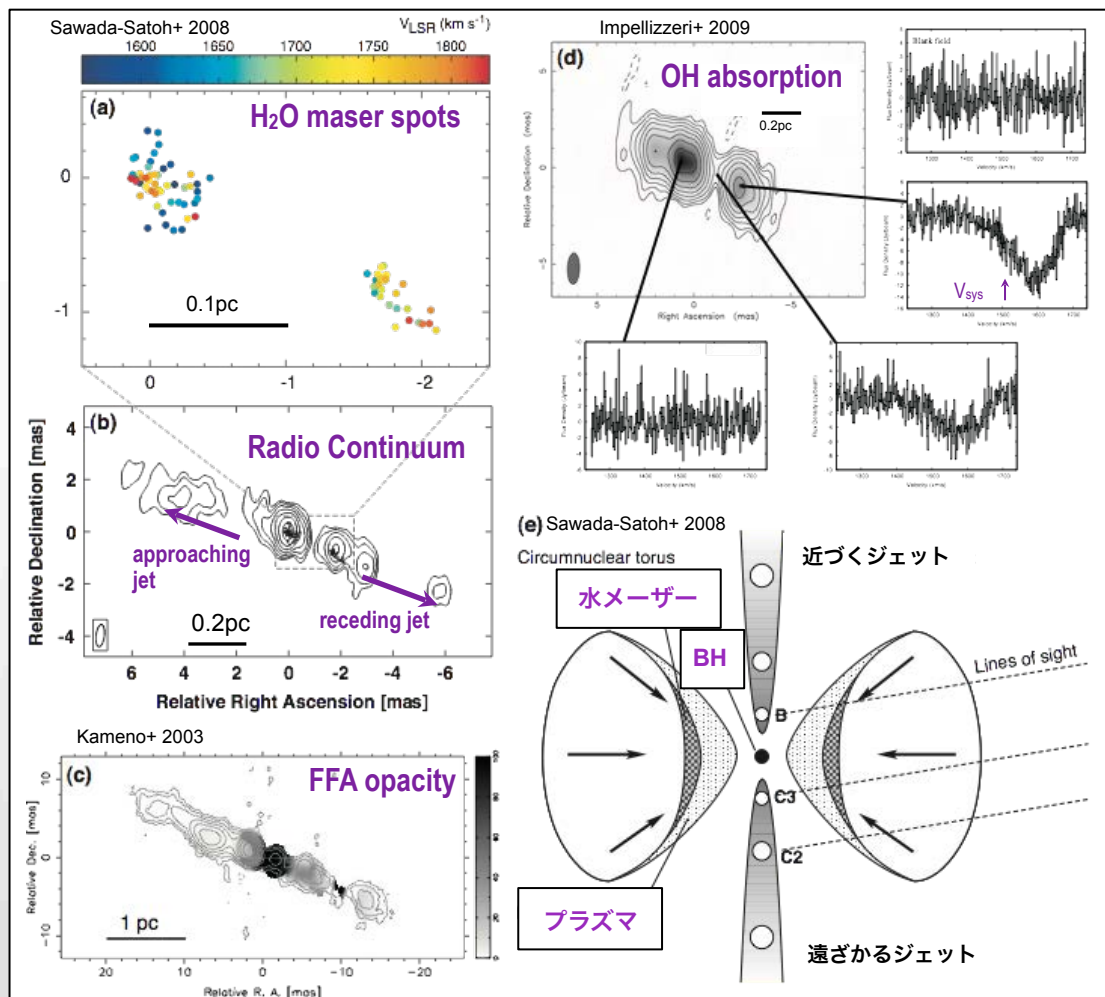
- この時、冷たい分子ガスは1pcスケールでは撮像されておらず



観測天体：NGC1052

- 近傍電波銀河
- AGN: LINER/Sy2
- 東西方向の電波ジェット
- 核周領域に様々なガス
 - プラズマ自由自由吸収
 - 密度 $\sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$
 - H₂O メーザー
 - 銀河系統速度より赤方偏移
- OH 吸収線
 - 銀河系統速度より赤方偏移

複層トーラス構造の提案

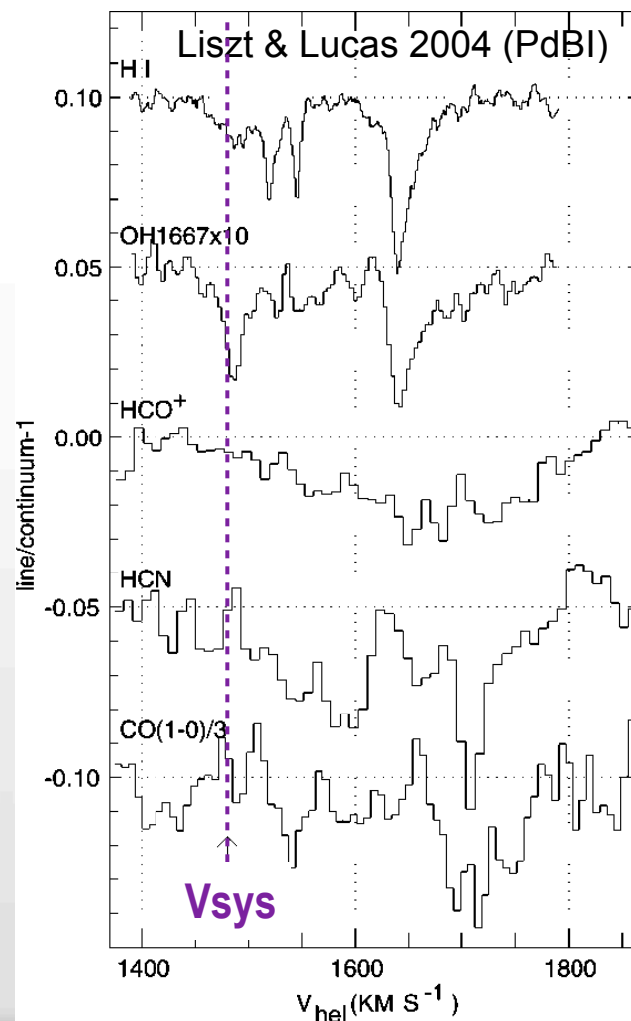


NGC1052のミリ波分子吸収線

● ミリ波帯で分子吸収線 (PdBI干渉計)

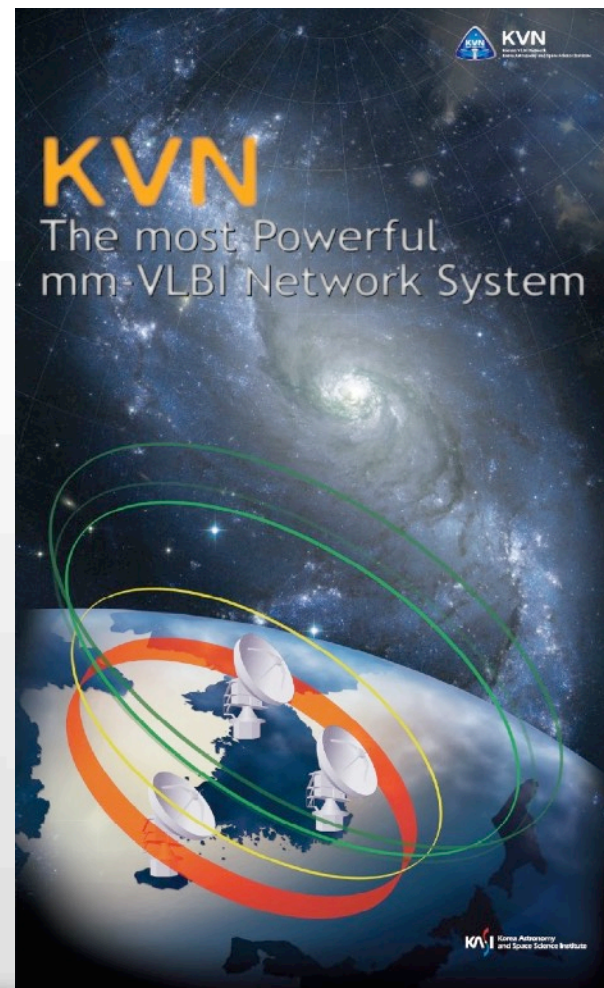
- HCO⁺(1-0), HCN(1-0), CO(1-0)
- 速度: 1400--1800 km/s
- V_{sys} より赤方偏移
 - OH や H₂O と同じ傾向
 - これらもトーラスに付随し BH に落下?
- 空間分解能は kpc レベル
 - トーラスの分離には足りない
 - pc レベルまで分解する観測が必要

ミリ波VLBI観測をやろう



韓国VLBI観測網 KVN

- 韓国国内のミリ波VLBI観測網
 - 口径：21m
 - 局数：3局 (ソウル、蔚山、済州島)
 - 基線長：300--500km
 - 吸収線の背景の連続波成分を分解し過ぎない長さ
 - 受信機：22, 43, 90, 130 GHz帯
 - 複数の周波数で同時観測が可能
 - 多周波數位相補償で高周波数帯の高感度化



観測

● 韓国VLBI観測網 (KVN) HCN J=1-0 & HCO⁺ J=1-0

Correlator	KJCC	Target	NGC 1052
Rest Frequency	88.632 [GHz]	Transition	HCN J=1-0
Beam size	1.5x0.9 [mas] (0.1pc)	Obs. date	2015/03/05
Bandwidth	128 [MHz]	On-source time	7.5 hr



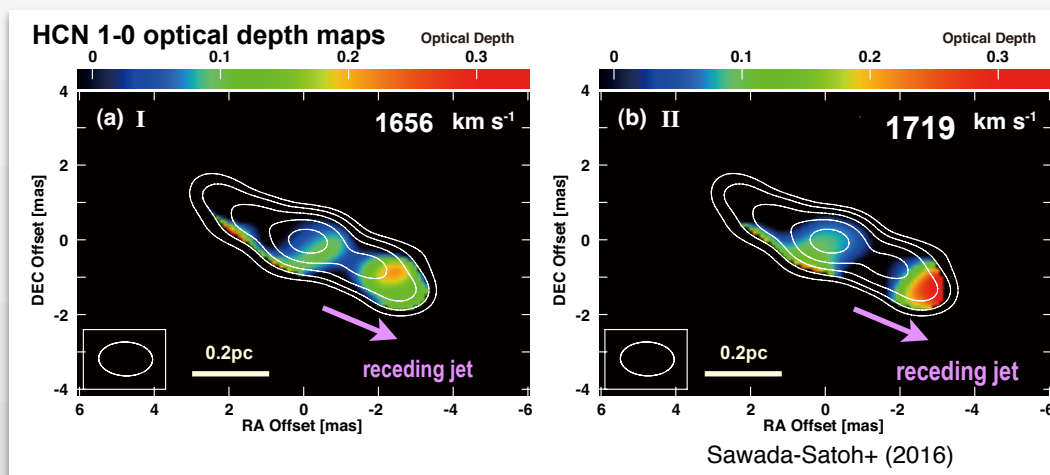
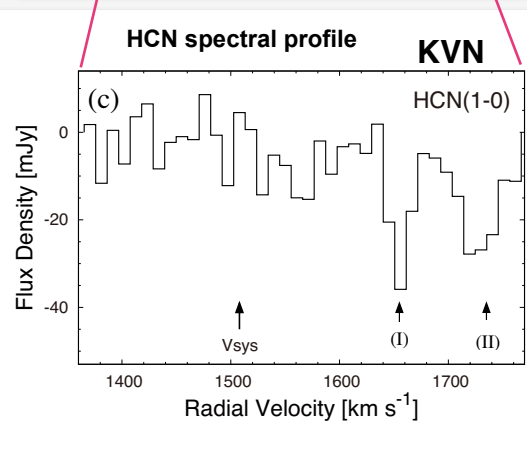
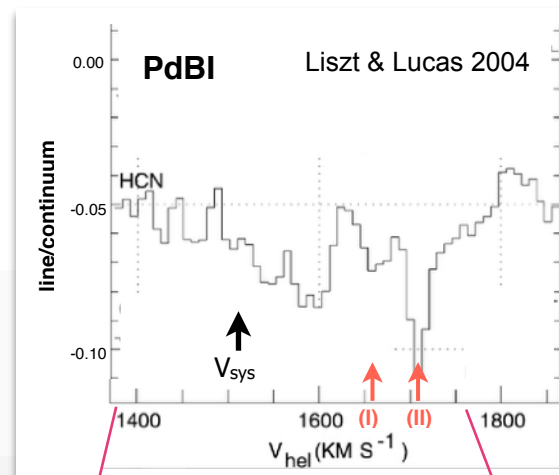
時間差 : 27ヶ月

Correlator	KJCC	Target	NGC 1052
Rest Frequency	89.188 [GHz]	Transition	HCO ⁺ J=1-0
Beam size	1.5x0.9 [mas] (0.1pc)	Obs. date	2017/06/17
Bandwidth	512 [MHz]	On-source time	7.5 hr

HCN J=1-0 観測結果

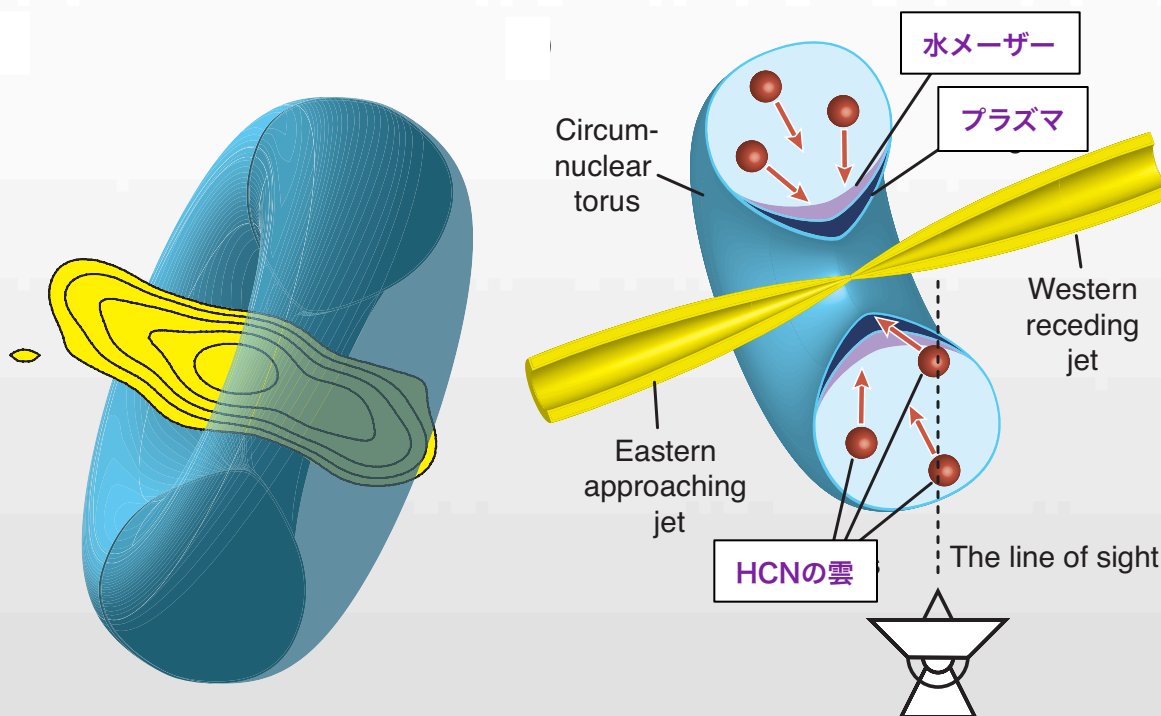
0.1pc スケールの HCN (1-0) 初検出

- 速度成分 1656 & 1719 km/s
 - どちらも銀河系統速度 (V_{sys}) より赤方偏移
- 遠ざかるジェット側に高い optical depth
 - プラズマや OH による吸収と同じ傾向

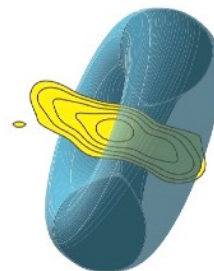


中心構造の提案

- 遠ざかるジェット側で吸収線 => 傾いたトーラス
- 最低2つの速度成分 => HCN ガスの構造は複数の雲状
- 赤方偏移の速度 => BHへ落下中



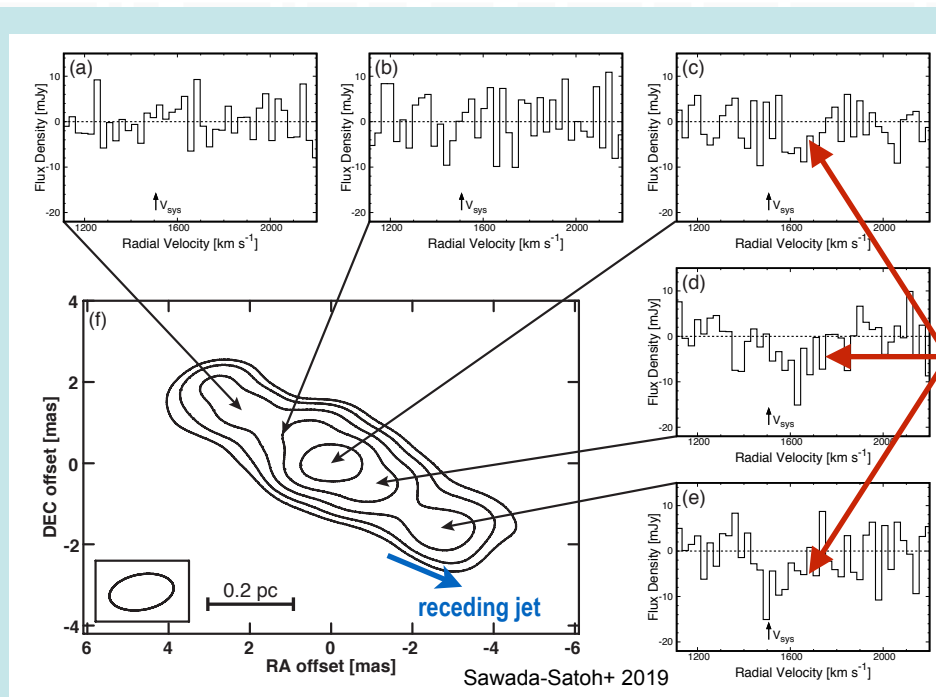
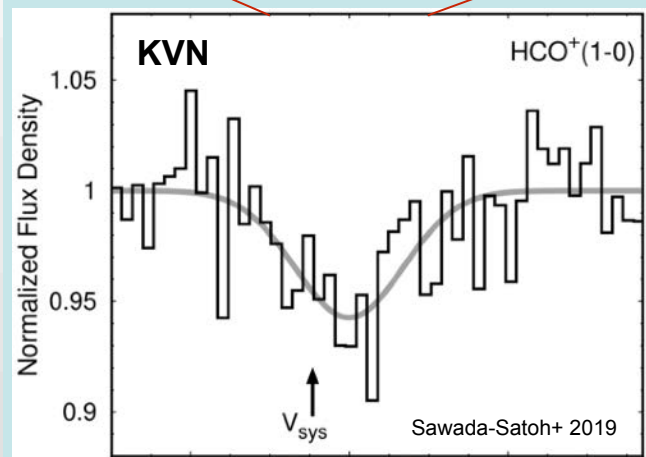
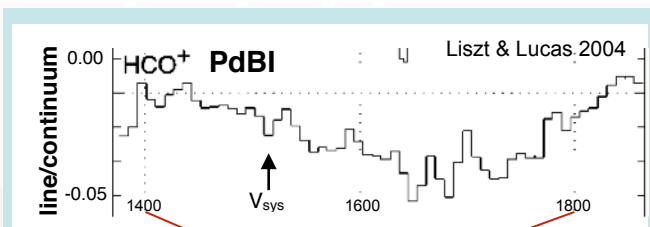
HCO⁺ J=1-0 観測結果



0.1 pc スケールの HCO⁺ (1-0) 初検出

遠ざかるジェットで強い吸収 => トーラスモデル

広い速度幅 FWHM=272 km/s => infall + turbulence + interaction ?



検出

物理量計算 (HCN)

HCN 1-0 吸収線の柱密度 (カラムデンシティ)

Label	V_p [km/s]	$V_p - V_{sys}$ [km/s]	Δv [km/s]	$N_{\text{HCN}}(T=100\text{K})$ [10^{14} cm^{-2}]	$N_{\text{HCN}}(T=230\text{K})$ [10^{14} cm^{-2}]
a	1656	149	31.7	9.5	50
b	1719	212	52.9	20	101

- $N(\text{H}_2) : 10^{24} - 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ (HCN/ H_2 比 10^9 ; Smith & Wardle 14)
- プラズマ自由自由吸収から得られた電子密度 ($\sim 10^{23}$) より1~2桁大

物理量計算 (HCO+)

HCN+ 1-0 吸収線の柱密度 (カラムデンシティ)

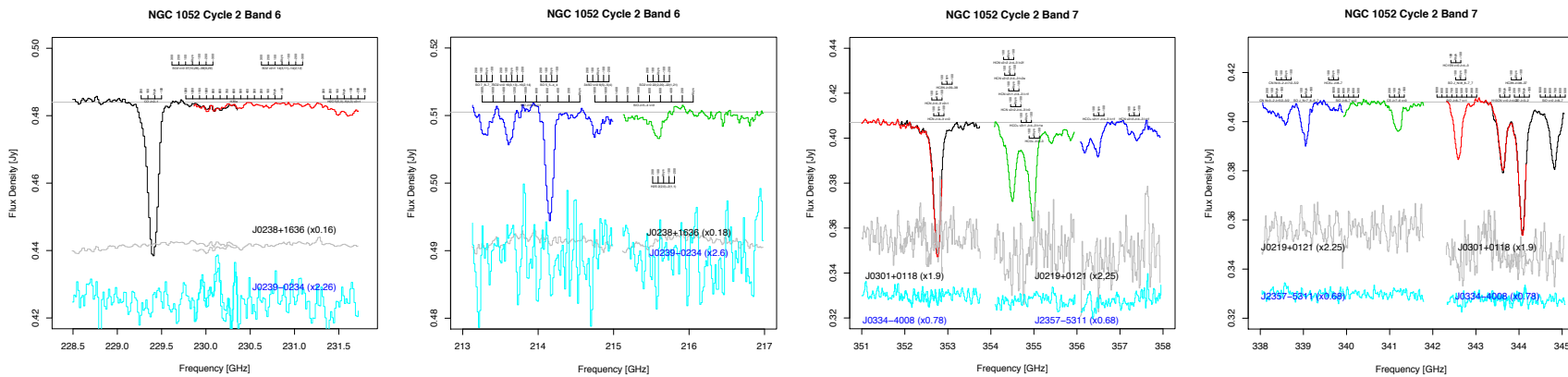
Label	V_p [km/s]	$V_p - V_{sys}$ [km/s]	Δv [km/s]	$N_{\text{HCN}}(T=100\text{K})$ [10^{15} cm^{-2}]	$N_{\text{HCN}}(T=230\text{K})$ [10^{15} cm^{-2}]
	1658	151	272	15	76

- $N(\text{H}_2) : 10^{24} - 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ (HCO+/H₂比 $2 - 3 \times 10^{-9}$; Liszt & Lucas 00)
 - HCN観測からの結果と矛盾なし
- 柱密度比 HCN/HCO+ : ~ 6.5 (HCN₁₆₅₆/HCO⁺₁₆₅₈)
 - $R_{\text{HCN}/\text{HCO}^+}$ (~ 2.5) NGC1068のCND knot (Garicia-Burillo+ 14)
 - $R_{\text{HCN}/\text{HCO}^+}$ (~ 2.0) NGC1097のAGN (Izumi+ 13)
 - ただし、HCNとHCO⁺の観測間隔は27ヶ月。この間に背景のジェット成分は0.18pc (ビームサイズ分) 動く

ALMA 観測との相乗効果

- ALMA Band 6&7 による NGC1052 観測 (P.I. 亀野)
 - いくつかの分子吸収線を新検出
 - 354GHz で $H^{13}CN/H^{12}CN$ 高い同位体比 (0.6)
 - 88GHz で $H^{13}CN$ 観測を KVN で挑戦 (2020年観測公募)

Spectra of molecular absorption with ALMA (Kameno+ in prep)



まとめ

- KVN を用いて NGC1052 の HCN(1-0) 及び HCO⁺ (1-0) 吸収線を 0.1 pc のスケールで検出し、位置を特定した。
- 観測結果は AGN トーラスで最も自然に説明可能
 - 吸収成分が赤方偏移した速度にて検出、おそらく中心に向かって落下中
 - 吸収線の深さは PdBI 干渉計の結果より深い
 - N(H₂) は 10^{24} -- 10^{25} cm⁻² という高い水素分子柱密度
 - 吸収線は遠ざかるジェット側で強く検出
 - HCO⁺ の広い線幅は infall + turbulence + interaction ?