2018年7月24日 第48回 天文・天体物理若手夏の学校

# ミリ波サブミリ波観測で挑む 活動銀河中心核サイエンスの最前線

泉拓磨 (国立天文台/NAOJ Fellow)

#### 自己紹介

- Takuma IZUMI (泉拓磨)
- 2016 Sept. Ph.D (Univ. of Tokyo)
  - Prof. Kohno's group
- NAOJ Fellow@NAOJ/Hawaii observatory
  - 2017 Apr.~
- Research interest:
  - SMBH feeding and feedback
  - cold ISM properties (w/ ALMA)
  - SMBH-galaxy co-evolution
  - early galaxy formation

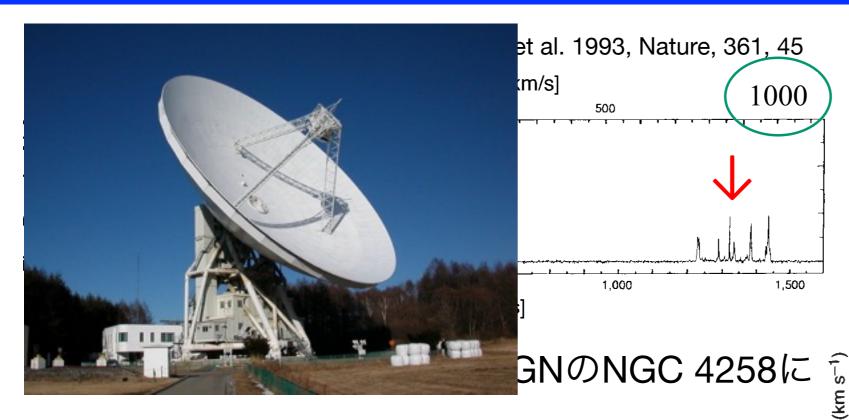
#### 目次

- 1. AGNとは?
- 2. ミリ波サブミリ波観測の意義
- 3. ALMAと迎えた大学院時代
- 4. ポスドクになりまして その1一迎えた高分解能時代
- 5. ポスドクになりまして その2一多波長間連携
- 6. まとめ:生々流転

# 1. Active Galactic Nucleus (AGN)

- 超巨大ブラックホール (SMBH) への質量降着で輝く
  - $M_{\rm BH} = 10^6 10^{10} M_{\rm sun}$
- 莫大なエネルギー (L > 10<sup>12</sup> L<sub>sun</sub>: quasar) が、非常にコンパクト (< 0.1 pc) な領域から放出されている</li>
- しばしば (bi-conicalな) ジェットやアウトフローを伴う
  - → 母銀河にも影響を与える? (銀河進化と関係)
- z = 7.54の宇宙に既に存在(最遠方記録)

### (memo) SMBHは本当に存在するのか?

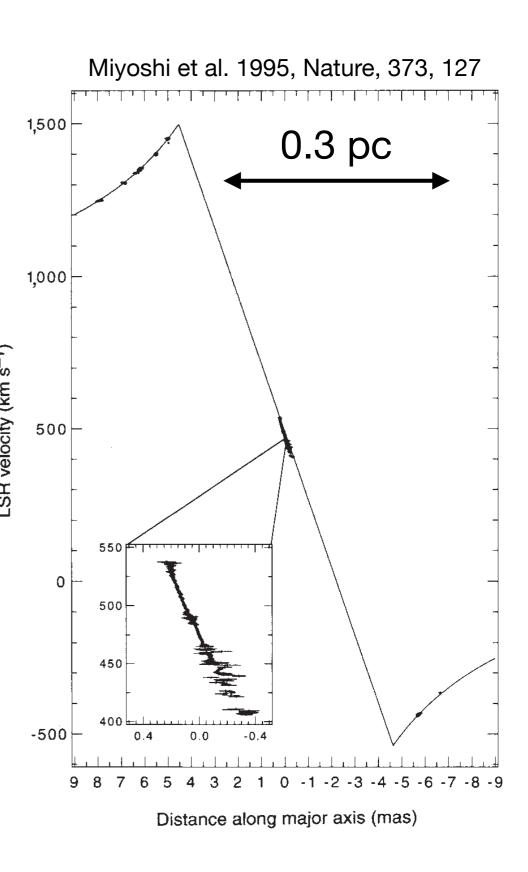


おける、H<sub>2</sub>Oメーザーの高速度成分の発見

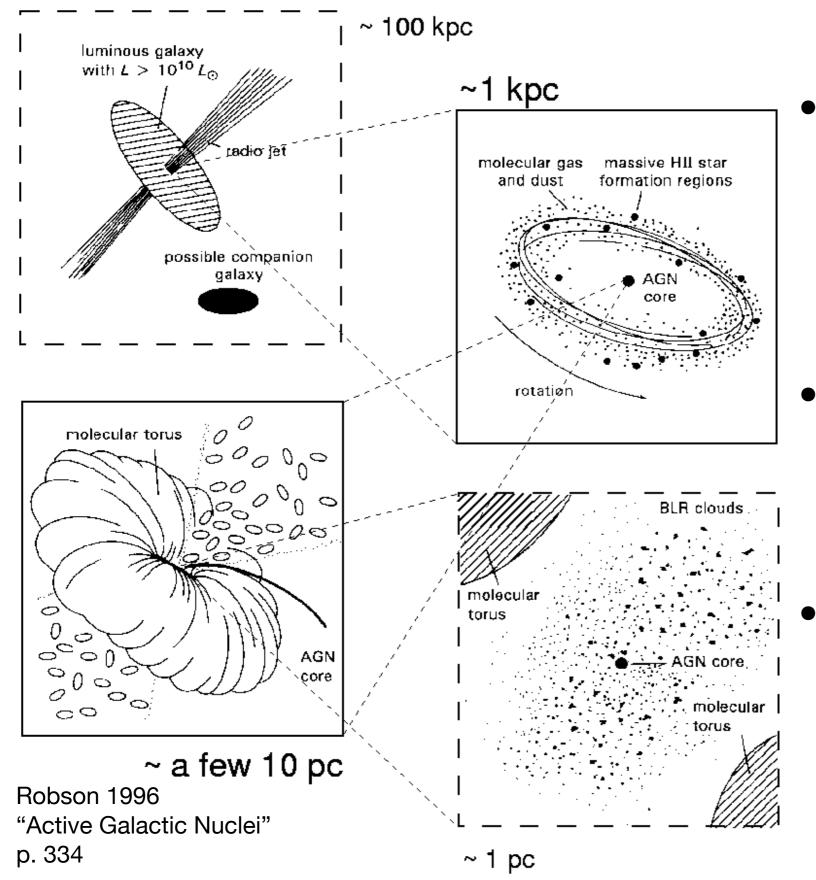
- 続く、VLBI干渉計による超高空間分解能観 測によるサイズ測定
- Enclosed mass ~ 4 × 10<sup>7</sup> M<sub>sun</sub>

  → 密度 (>4E9 M<sub>sun</sub>/pc³) が恒星では説明不可

能 → SMBH!?

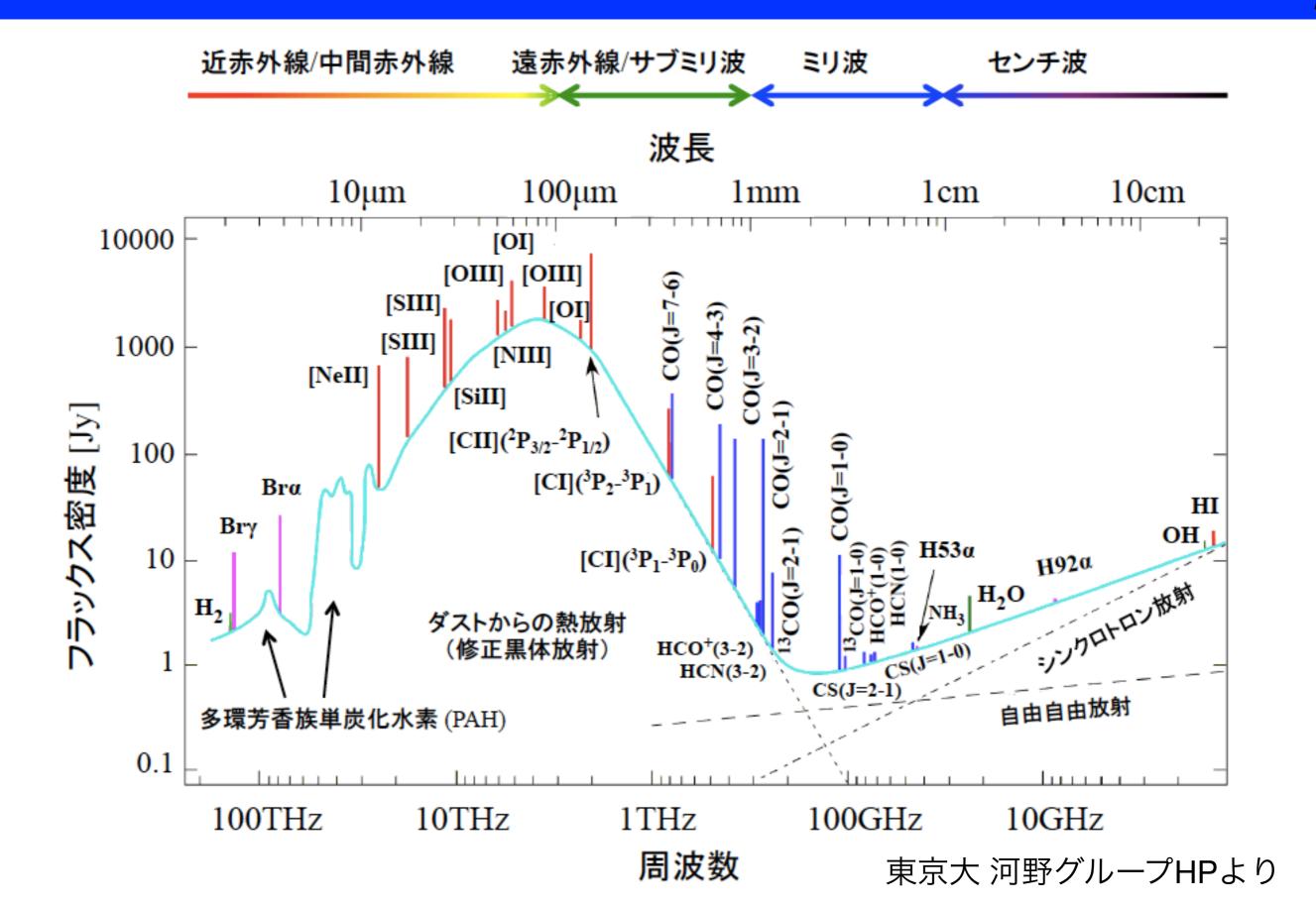


# From <1 pc to >kpc



- "銀河への影響"まで考える と、AGNサイエンスとして 考慮すべき空間スケールは 数桁に及ぶ。
- ミリ波サブミリ波観測を使って、>10 pcの領域でのアレコレを研究してきた。
  - 本講演ではその内容を(泉の個人的な昔話?をしながら)概観。

### 2. ミリ波サブミリ波観測の意義

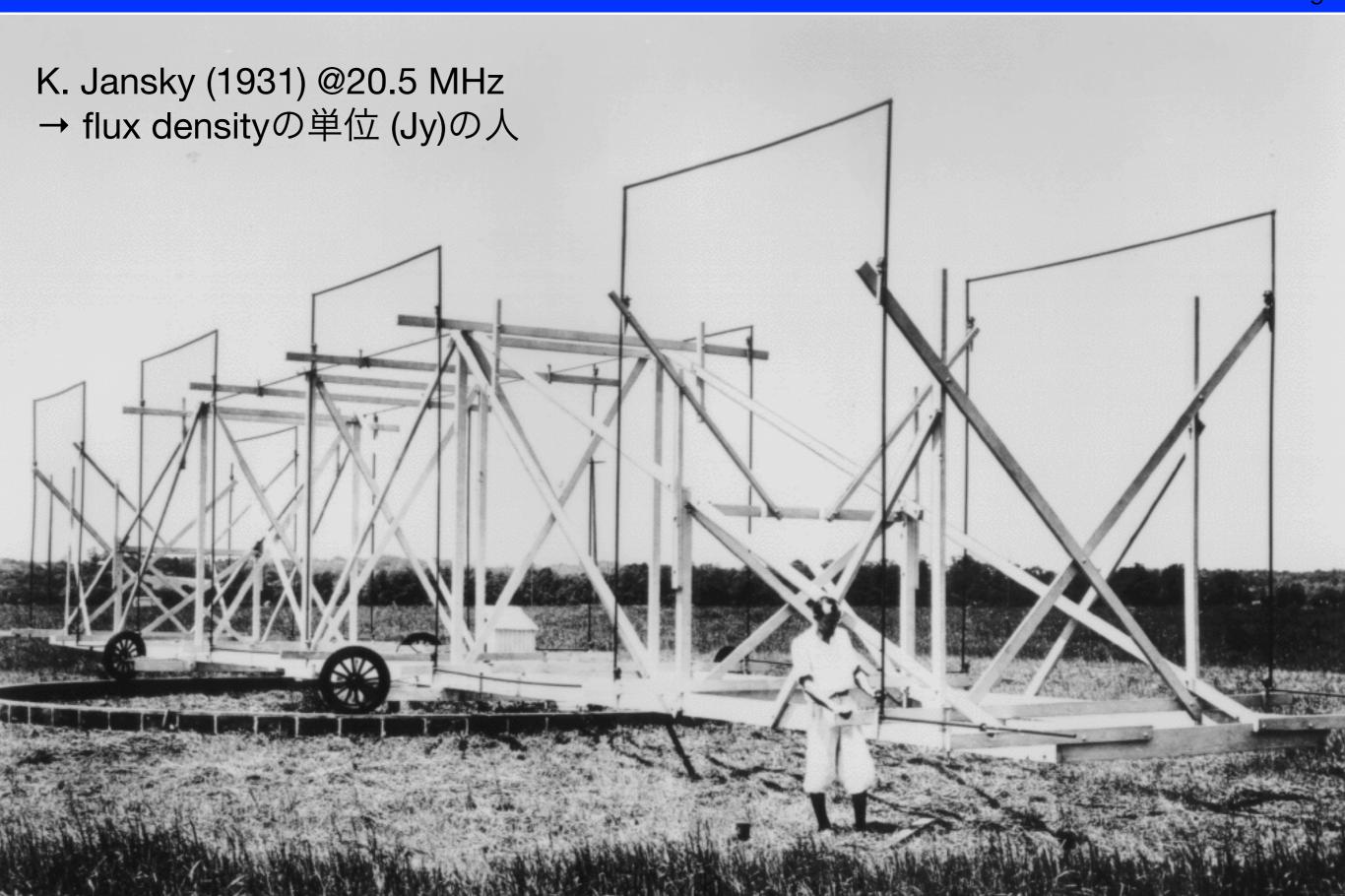


## 2. ミリ波サブミリ波観測の意義

- 低温物質(特に分子ガス)は、銀河中心 < 1kpcの"ガス質量"の大半を担う
  - → SMBHへの降着物質の供給源であり、星形成活動の母体でもある。
- 長波長ゆえ、星間塵(ダスト)による減光を受けない。
  - → ダストに埋もれた活動現象(AGN、爆発的星形成)の観測に威力を発揮
- ALMAの登場により、高感度・高分解能が達成可能に。
  - → <10 pc@nearby, ~kpc@high-z
- というか、mm/submmはやっている人が少ない!AGNは本当に少ない! (世界的にもレア;ある天体の研究者割合は、その天体のcosmic fraction に比例?)  $\rightarrow$  レア  $\times$  レア = スーパーレア = 独壇場! ...鶏口牛後!

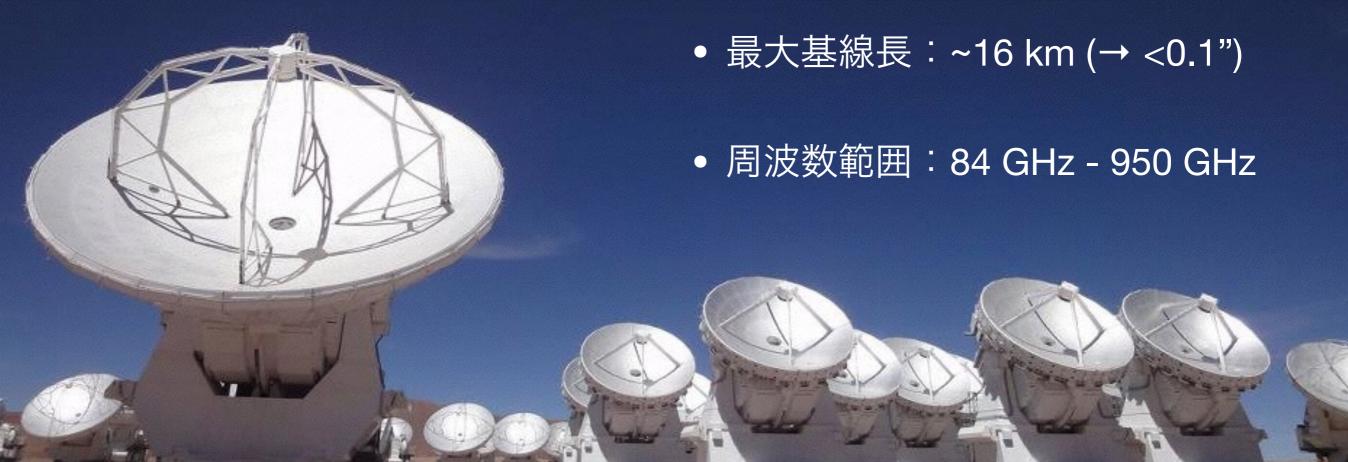
独創性かつ優位性の高い仕事をするのが大事(スタートアップ)

# 電波干渉計 …そしてALMAへ



## 電波干渉計 …そしてALMAへ

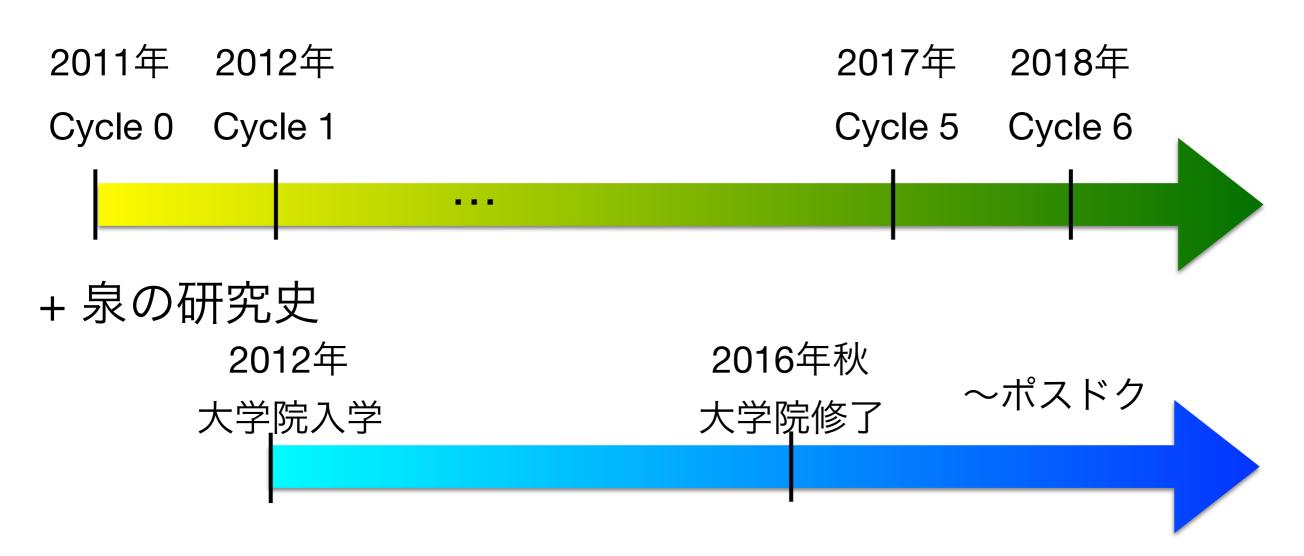
- Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)
- チリのアタカマ砂漠(標高5000m)に設置。世界最大の電波干渉計。
- EA (incl. Japan), NA, EU, and Chile collaboration
- 54 x 12m + 12 x 7m のアンテナ群(移動可能)





#### **ALMA-native?**

#### + ALMAの科学運用 Phase

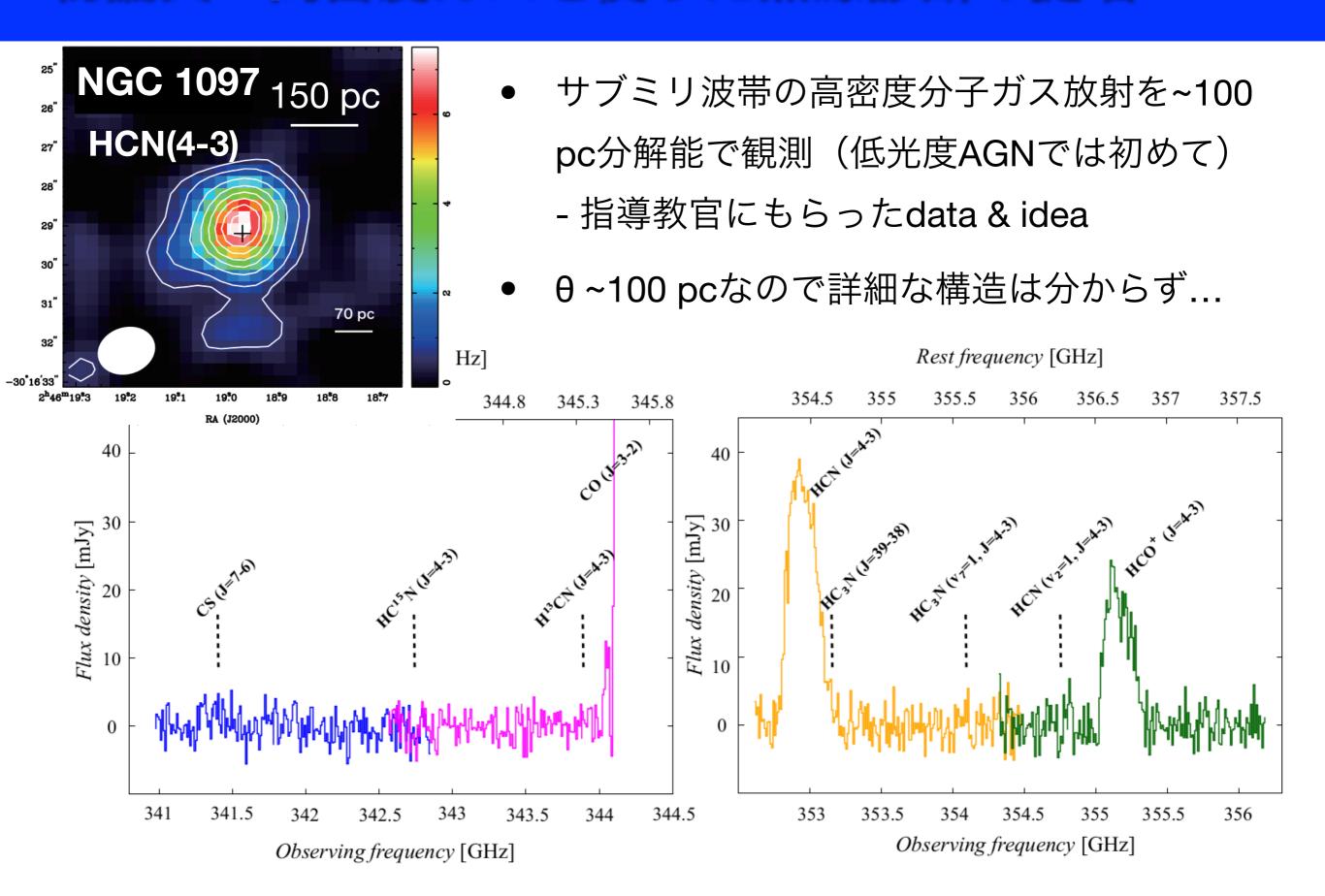


ほぼほぼALMAの登場と共に研究を開始。

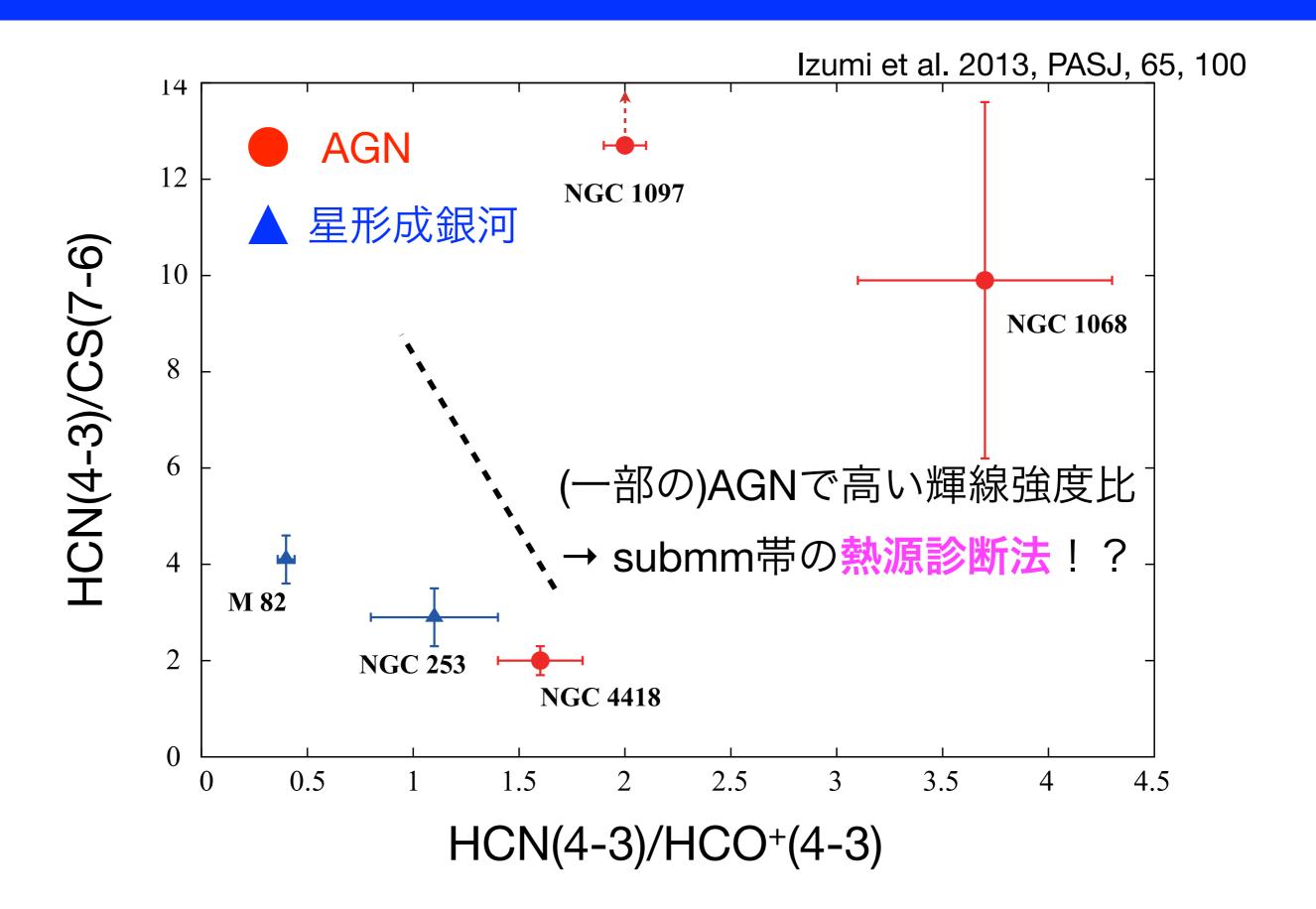
物心ついたときからALMAがある世代 = ALMA native!

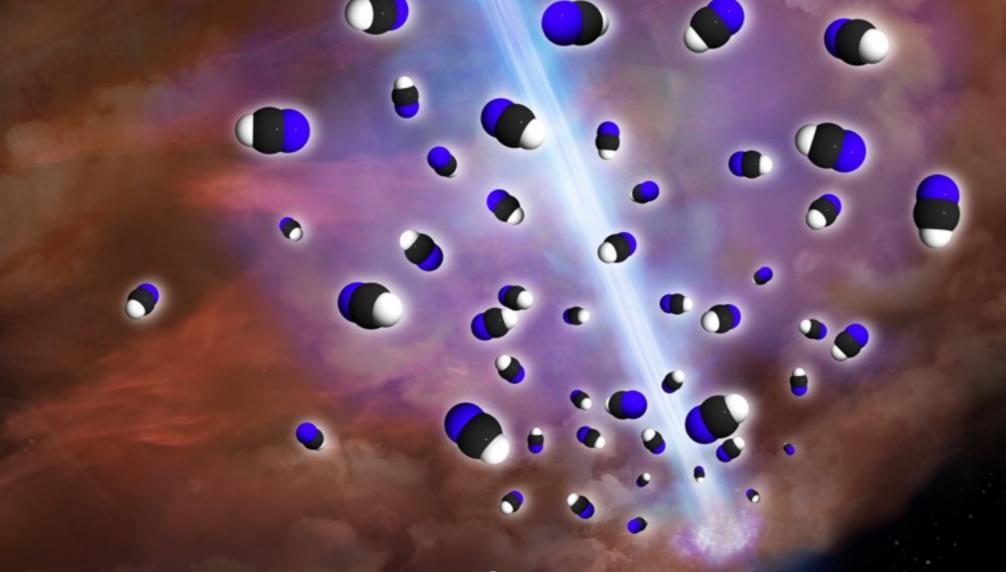
それは空間分解能の向上の歴史でもある → 研究内容に反映

#### 初論文:高密度ガスを使った熱源診断の提唱



#### 初論文:高密度ガスを使った熱源診断の提唱





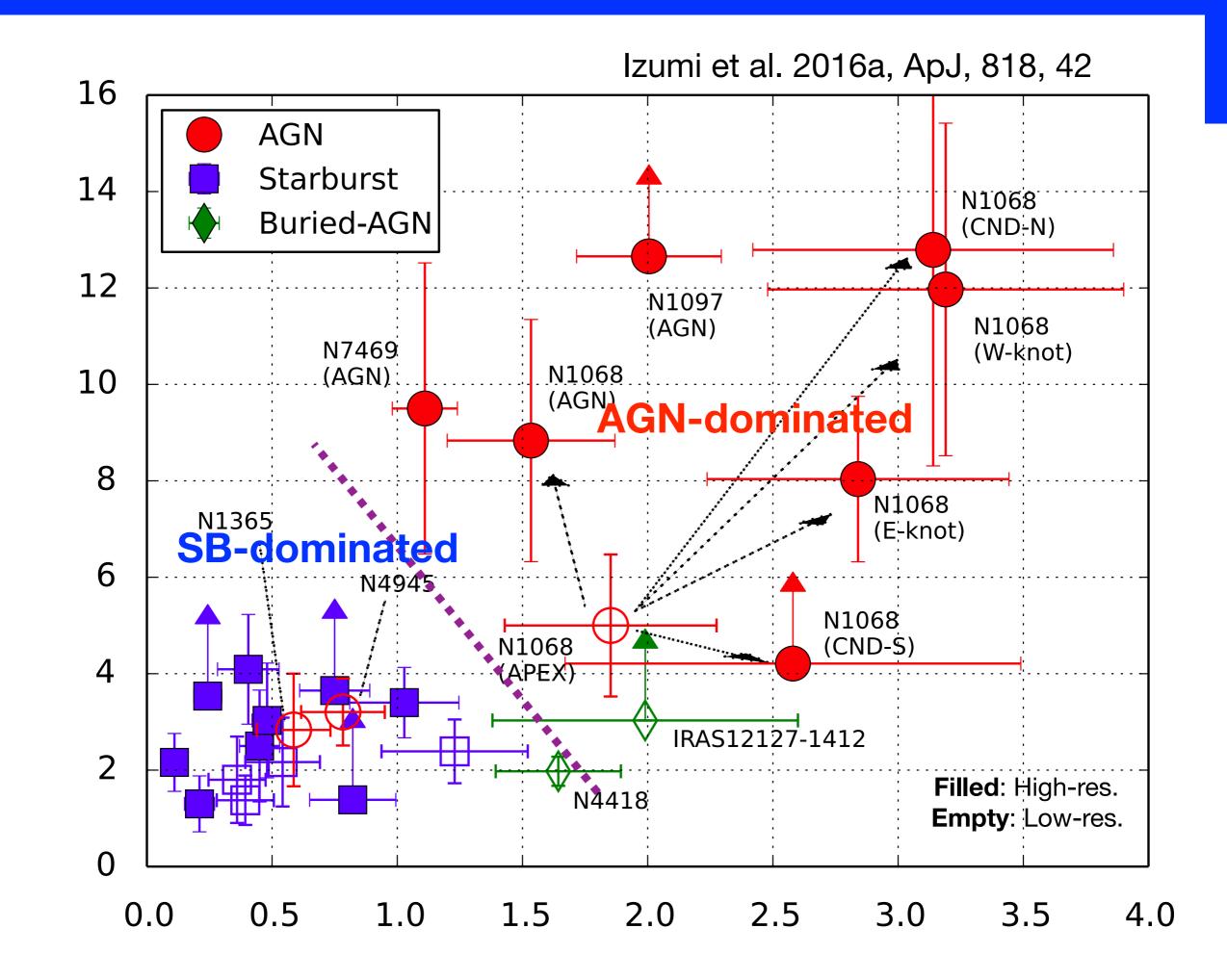
AGN周辺環境におけるHCN分子の大量合成

→極限環境での星間化学

#### 初論文:高密度ガスを使った熱源診断の提唱

- 星間化学の知見を活かして天体物理に貢献する(熱源診断etc)という ことから、案外このネタは**受けた(国際的にも)**。
- 以降、パラメータスペースを拡げたりサンプルを増やしたりと、その後~2-3年(今も)このネタを追求。
  - Izumi et al., 2015, 2016a, 2018d in prep.
- 解析手法(データの整約、モデル技法等)に習熟 + 星間化学の知識を深めた → いざというときに頼れる"地面"を早く作る!

良き指導教官に出会う。学生の特権を活かし、色々教えてもらう!とにかくそれなりの成果の出る、上手いスタートアップを切る。 (その後の研究人生へのモチベーションが全然違う!…と思う)

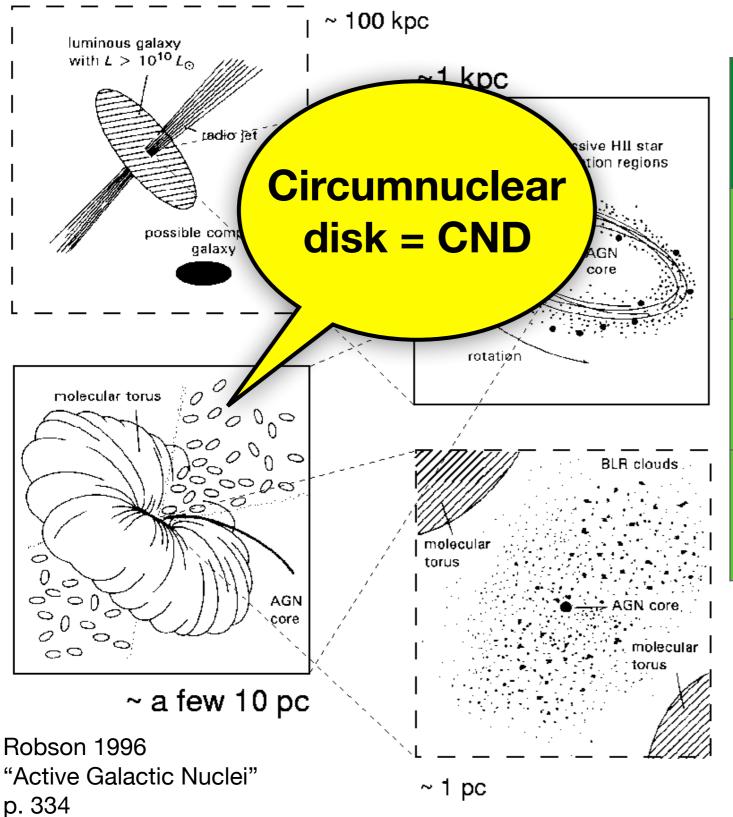




- 自分で研究テーマを設定するの が研究の第一歩(にして、おそ らく最も重要な項目)。
- 自分から新しい課題に挑戦した い!と思うのは非常に健全。
- ・ 幼年期が終わり、独り立ちへの 準備をする大事な期間。
- ・ (ただし、一人で勝手に暴走するのは避けましょう!)

与えられたテーマは面白い。 だけど他のこともやってみたい!

## AGN質量降着の研究(2015~)

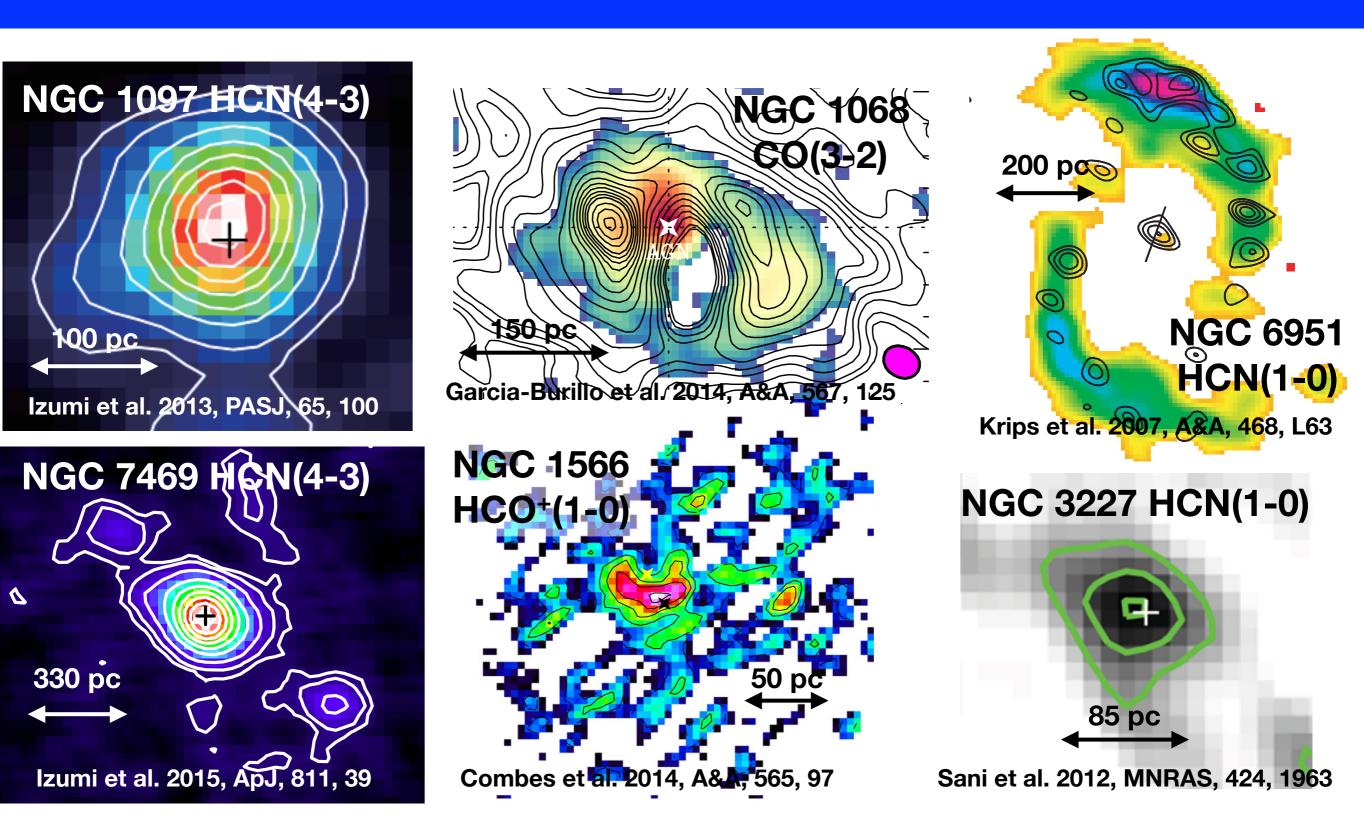


	合体銀河	孤立系
Host → ~100 pc	衝突合体	棒状構造 etc
100 pc → ~1 pc	?	?
sub-pc	降着円盤	

銀河中心の~*100pc*領域の降着過程 はろくに研究されていない!

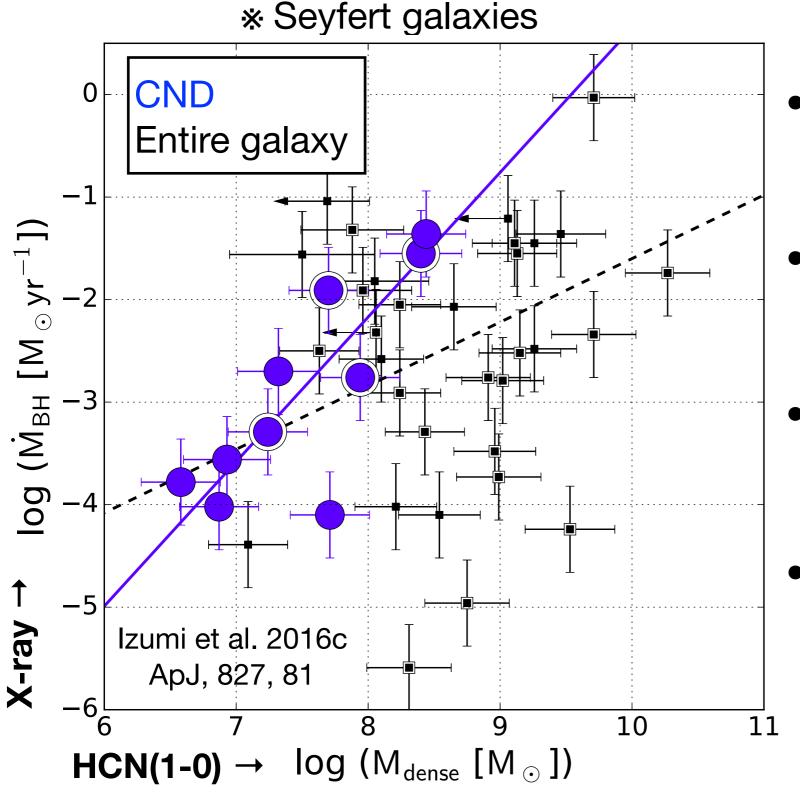
→ <u>ALMA</u>ならいけるやろ!

# AGN質量降着の研究(2015~)



空間スケール: ~100 pc (\*依然として分解はされていない)

# AGN質量降着の研究(2015~)



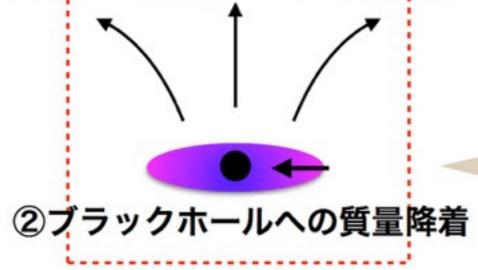
- 降着率とCND-scaleガスの間 に正の相関。
- 銀河スケールのガスでは相関は弱い(ほぼ無相関)。
- CND = 降着物質の直接的な 供給源
  - ということで、CNDスケールで降着モデルを色々試すのは本質的に重要と主張できた。

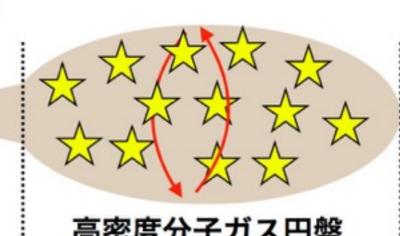
## 降着モデルの検証 (case study!)

予測: 1 = 2 + 3

Kawakatu & Wada 2008, ApJ, 681, 73







高密度分子ガス円盤 (超新星爆発で乱流状態)

~100 pc

$$\dot{M}_{\rm acc}(r) = 2\pi v_t \Sigma_{\bf g}(r) \left| \frac{d \ln \Omega(r)}{d \ln r} \right| \qquad \begin{array}{c} v_t \text{ :viscous parameter} \\ \Omega \text{ :angular velocity} \\ \Sigma_{\bf g} = 2h\rho_{\bf g} \text{ :surface density} \\ \end{array} = \mathbf{M}_{\rm density}$$

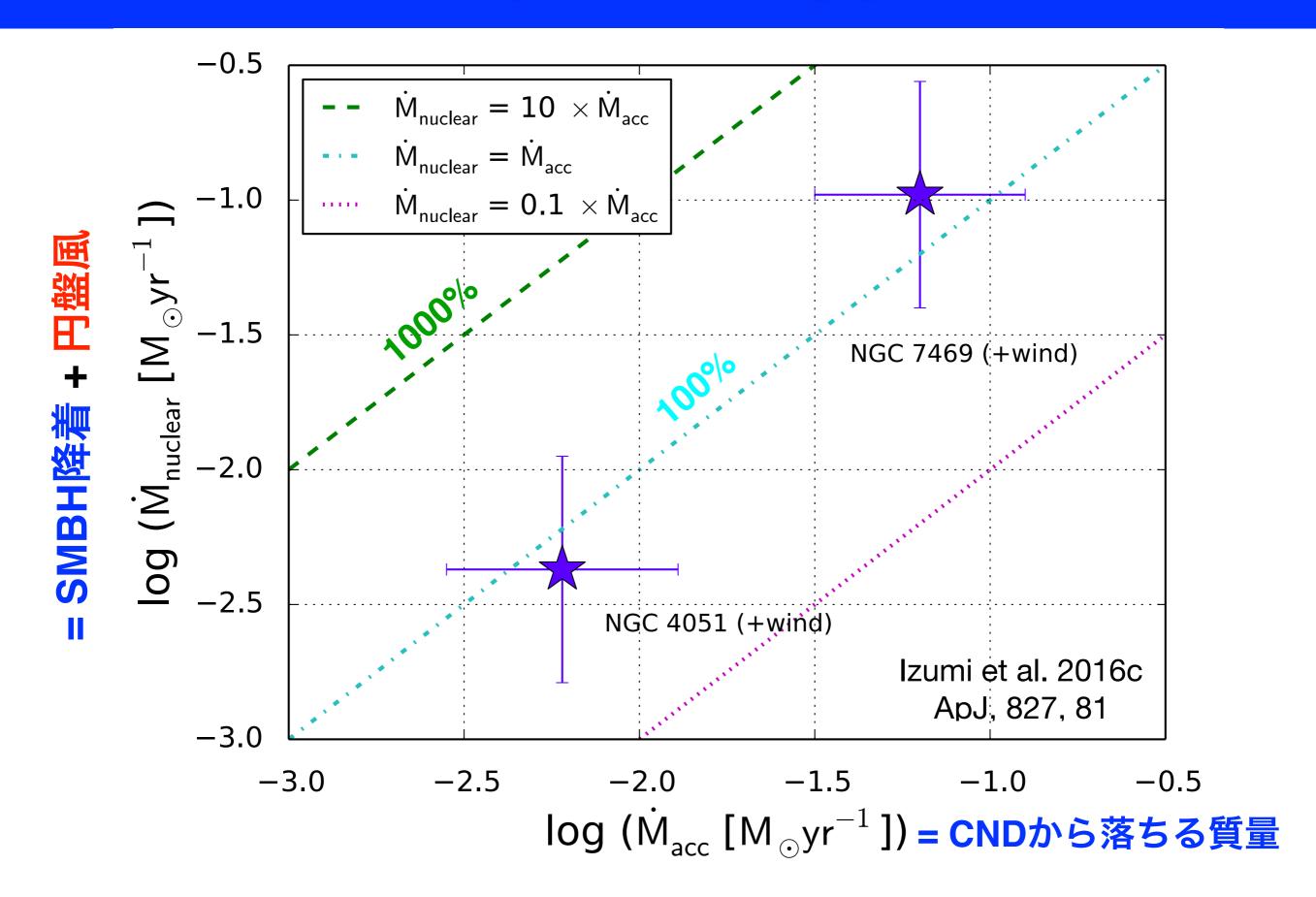
$$\dot{M}_{\rm acc}(r) = 3\pi\alpha_{\rm SN}\eta E_{\rm SN}C_*\Sigma_{\bf g}(r_{\rm in}) \left( \frac{r_{\rm in}^{-3}}{GM_{\rm BH}} \right) = 0.13\alpha_{\rm SN,1}r_{\rm in,3}^3C_{*,-7}\Sigma_{\bf g,1}M_{\rm BH,7}^{-1}[M_{\odot}/{\rm yr}]$$

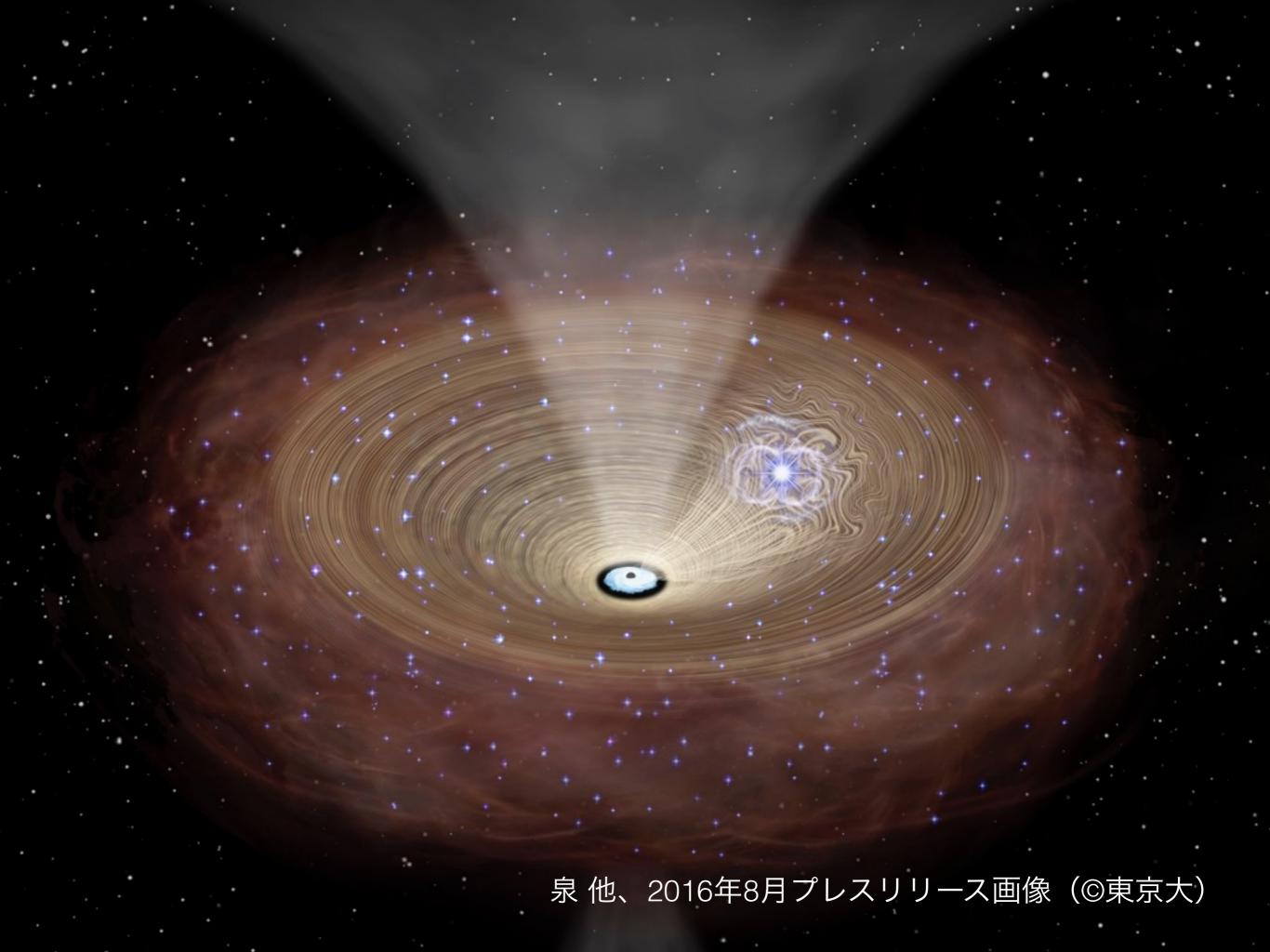
 $V_t$ : viscous parameter :angular velocity  $\Sigma_{\rm g} = 2h\rho_{\rm g}$  :surface density

Gas surface density = M<sub>dense</sub>/area **BH** mass

$$=0.13\alpha_{\rm SN,1}r_{\rm in,3}^3C_{*,-7}\Sigma_{\rm g,1}^{\rm M}M_{\rm BH,7}^{-1}[M_{\odot}/\rm yr]$$

# 降着モデルの検証 (case study!)

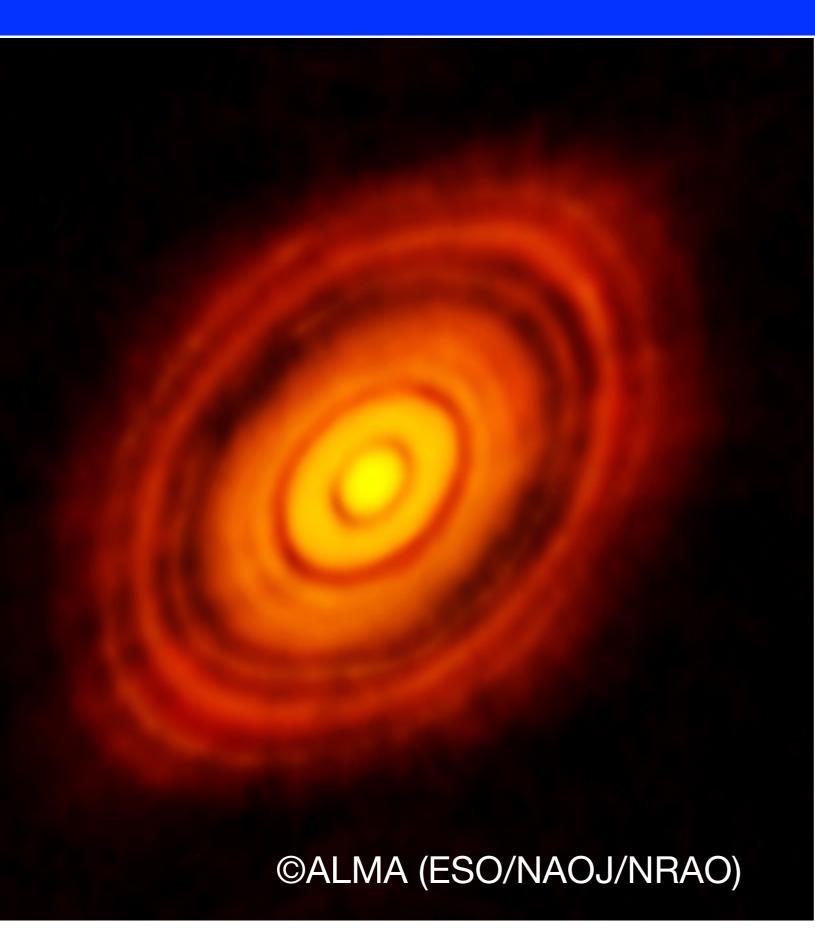




- "mm/submmでAGN"という主軸は維持しつつ、 これまでと違う毛色のテーマをやってみた。
- 新しい研究をする or 新しい論文を書く、という ことくらいでしか、おそらく別テーマの勉強を じっくりすることはない。
  - → 見聞を広める良い機会
- "観測と理論の協働"の重要性・威力を痛感
  - → 今に至る研究スタイルの土壌となった

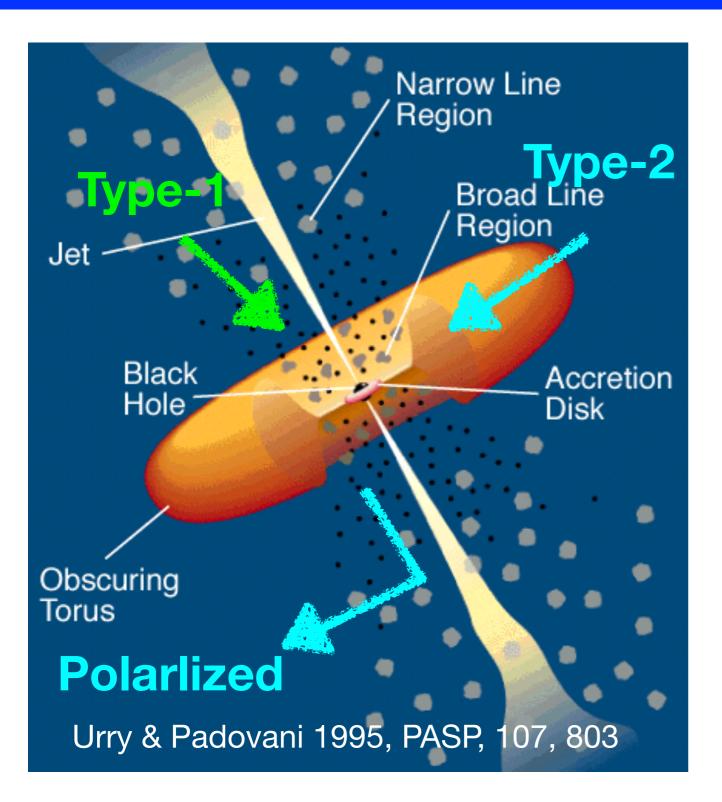


#### ALMAの本気



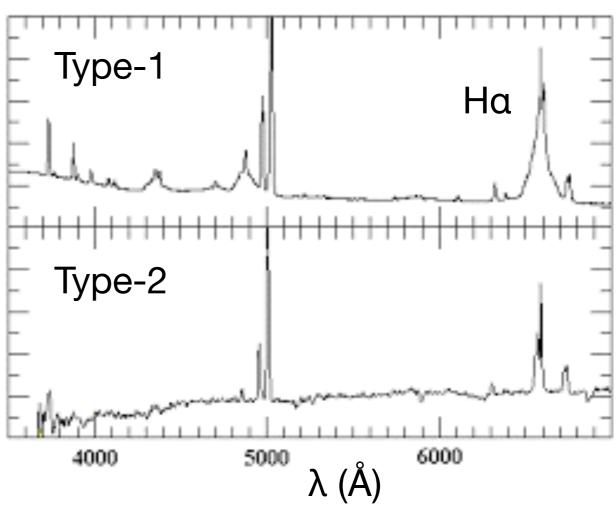
- 高分解能観測の幕開けは、 やはりHL Tau(2014冬; 研 究会にて激震が走る)
- PDになった頃 (2017年) には、ALMAの高分解能観測は"当たり前"に行われるような時期だった。
  - → AGN環境でも、高分解能 観測が始まりつつあった。
- AGN&分子ガス&高分解能 とくれば、狙うはAGNトー ラスの直接撮像!

# SMBH遮蔽現象: AGNトーラス

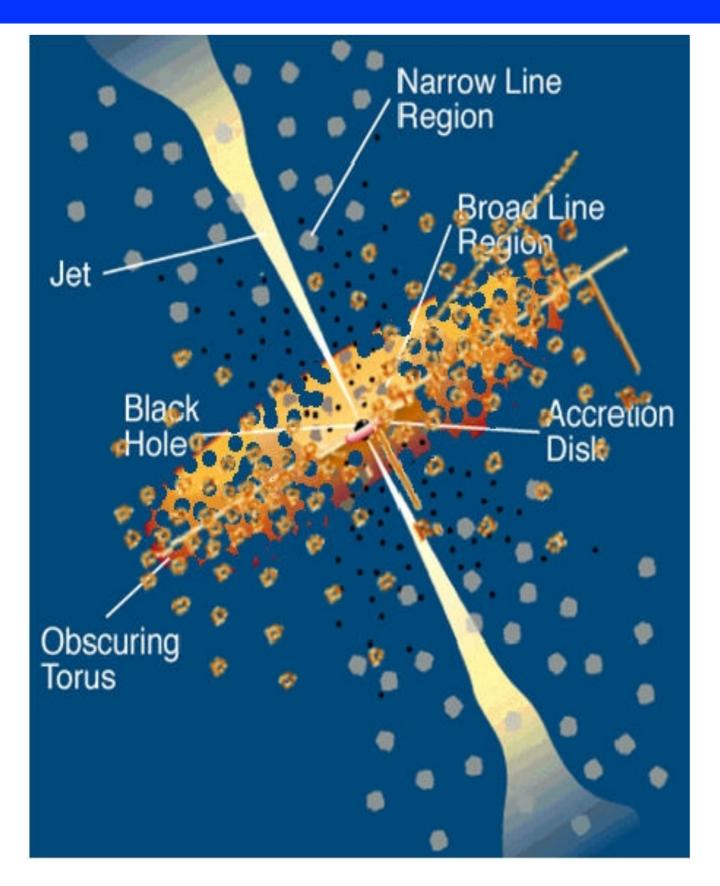


#### <u>統一モデル</u>

(e.g., Antonucci 1993, ARA&A, 31, 473)

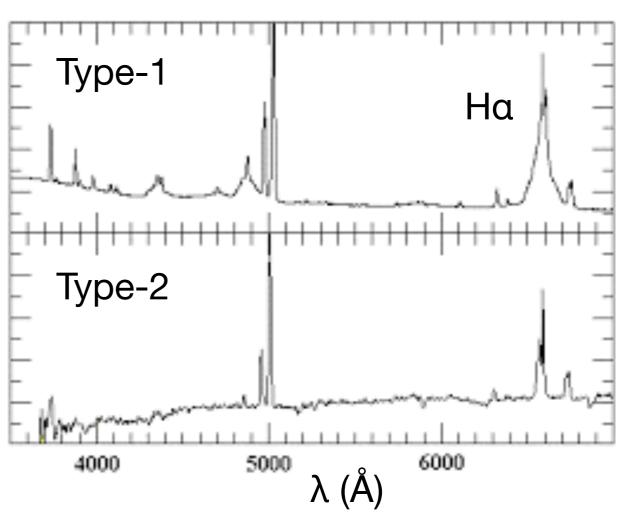


# SMBH遮蔽現象: AGNトーラス



#### 統一モデル

(e.g., Antonucci 1993, ARA&A, 31, 473)



### ALMAで挑むトーラスサイエンス

#### 直接撮像

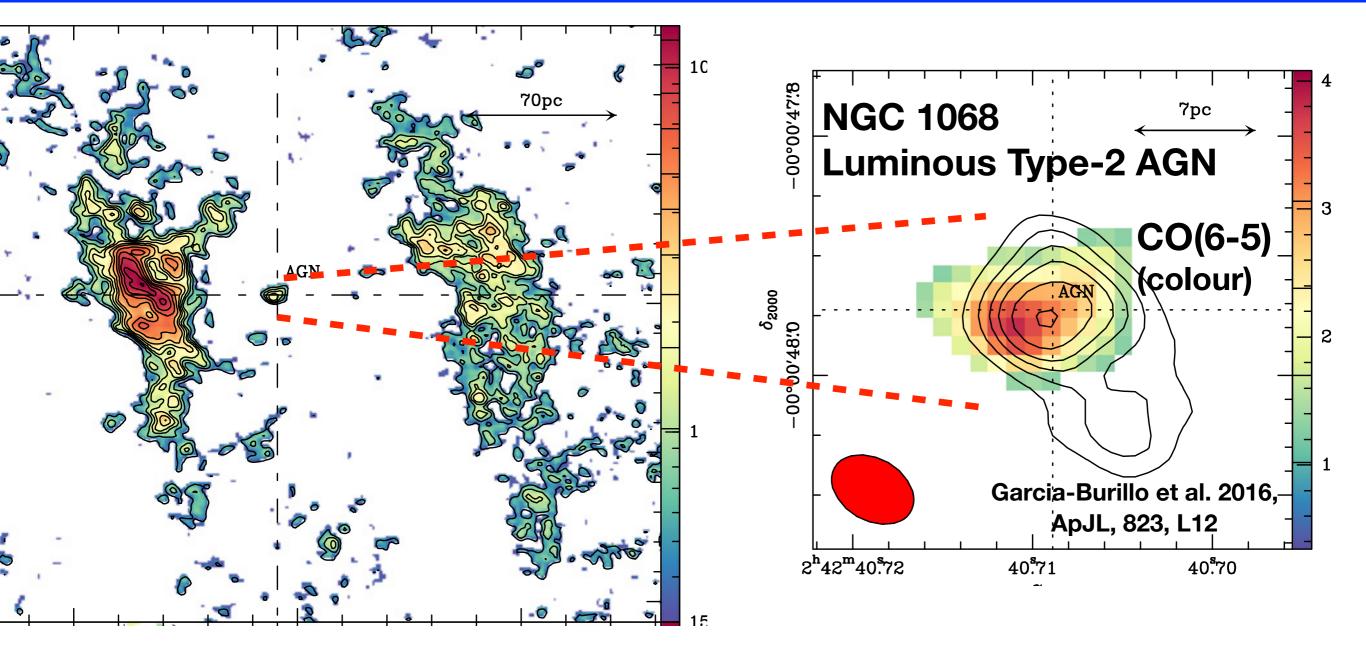
- 本当に分子・ダストのコンパクトな構造が存在するか?
- → 高空間分解能 = ALMA

#### • 力学状態の測定

- 回転が支配的?速度分散が支配的?
- 幾何構造の指標になる (σ/V<sub>rot</sub> ~ H/R; 静水圧平衡)
- → 高速度分解能 = ALMA

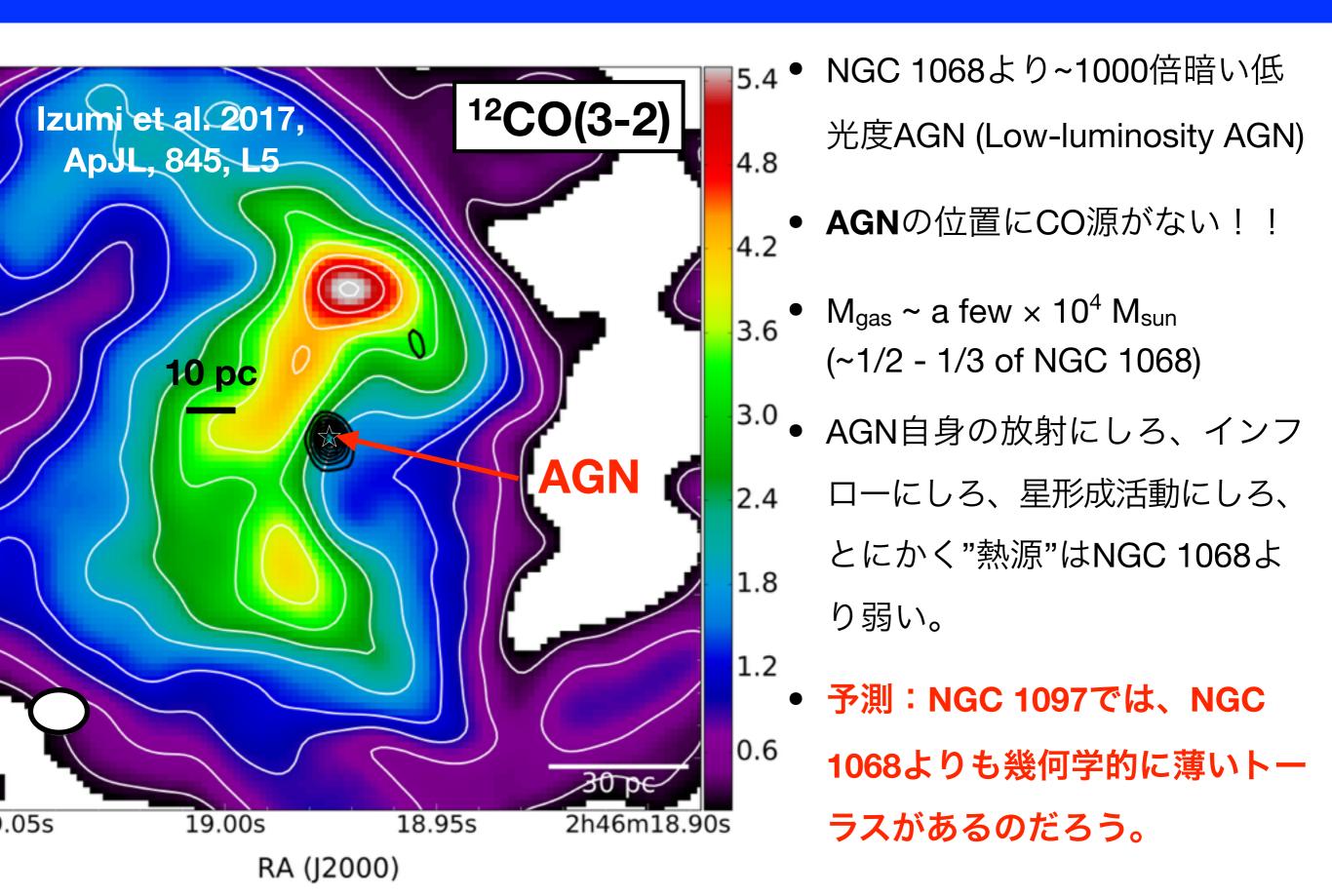
#### • トーラスの物理的起源の探査

- いったいどうやって分厚い構造を宇宙で作るのか?
- 構造の各種物理パラメータへの依存性の調査

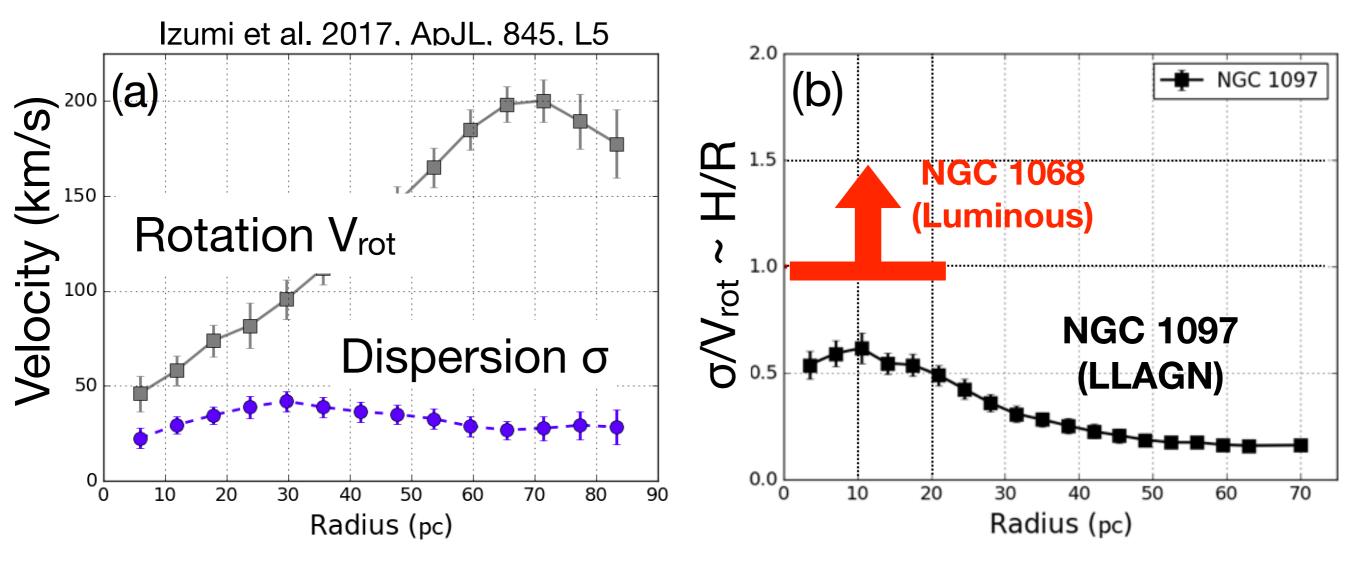


- COガスが明確に中心集中している (サイズ ~ 7 pc)
  - Mgas ~ 1e5 Msun; σ/Vrot > 1 (幾何学的に厚い) → トーラス
- (Memo: σ/V<sub>rot</sub> ⇌ scale-height to radius = H/R; 静水圧平衡)

### COトーラス in NGC 1097? (L<sub>Bol</sub> ~ 8e41 erg/s) <sup>27</sup>

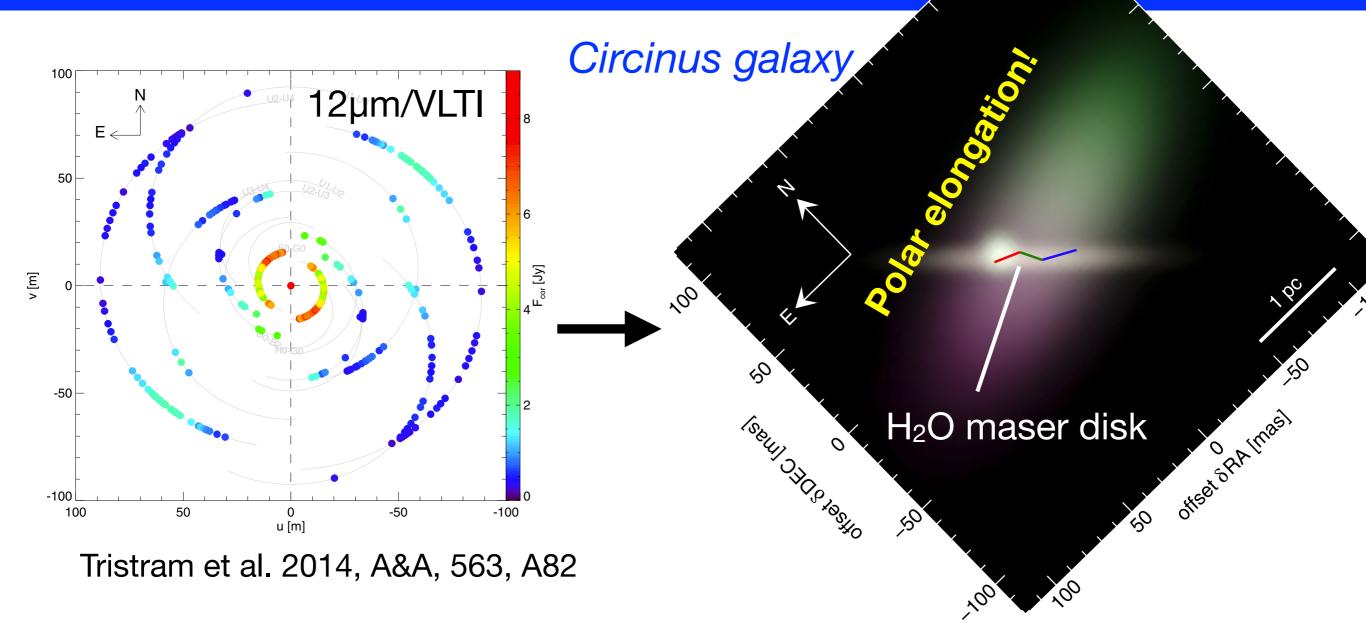


#### 有為転変は世の習い? — AGNトーラスの消失



- $\sigma/V_{rot} = 0.5$  in NGC 1097 (LLAGN) vs. >1 in NGC 1068
- 確かにNGC 1097の方が薄い…!
- AGNトーラスは決して定常的ではなく、動的に構造を変えるのだろう。
  - → 多くの理論予測と整合する。

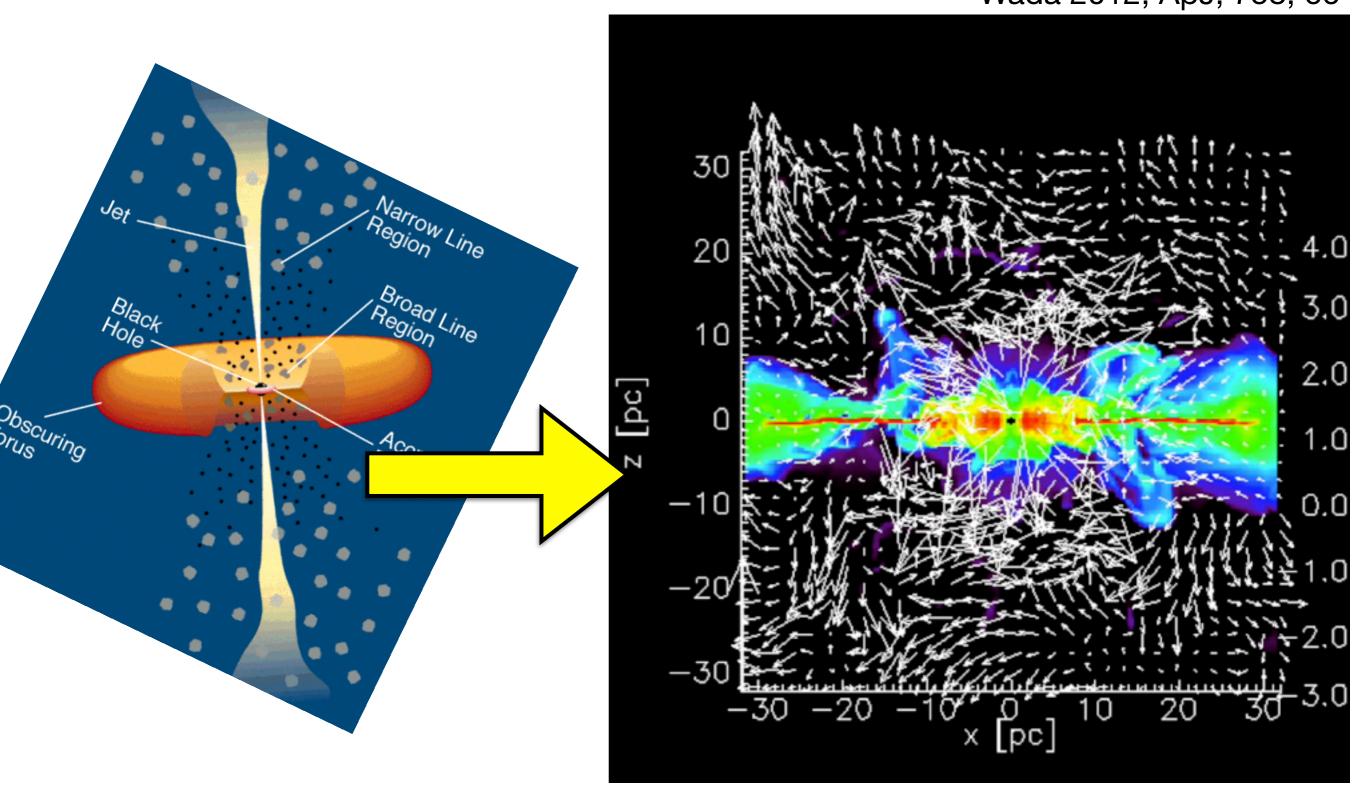
### トーラスパラダイムへの挑戦



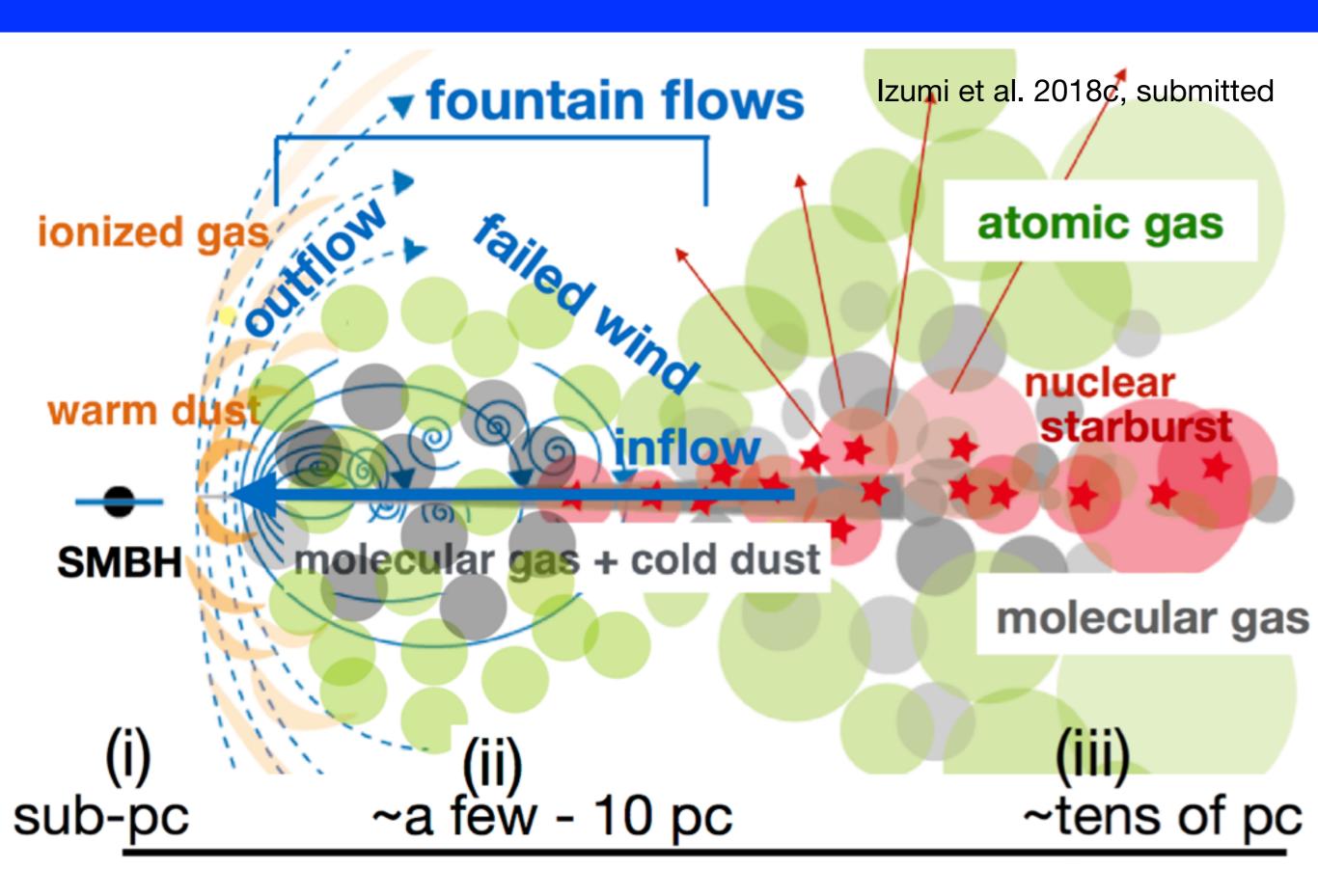
- 最近のVLTI観測で、Polar方向に伸びたダスト放射が確認された。古典的なトーラスの描像に反する構造。
- 単なるインフローや星形成活動では、この構造を再現するのは難しいのでは…??トーラスの物理的起源とはいったい…?

### Multi-phase Dynamic Torus model

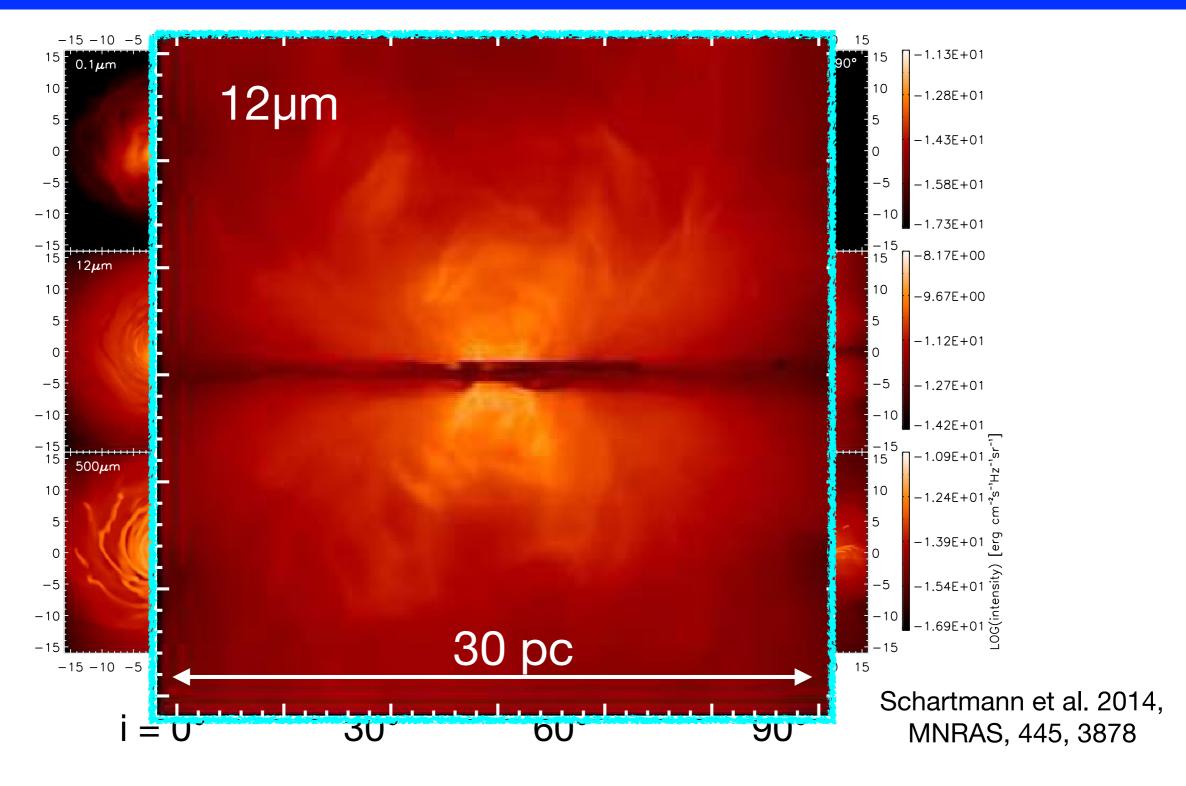
Wada 2012, ApJ, 758, 66



#### Multi-phase Dynamic Torus model

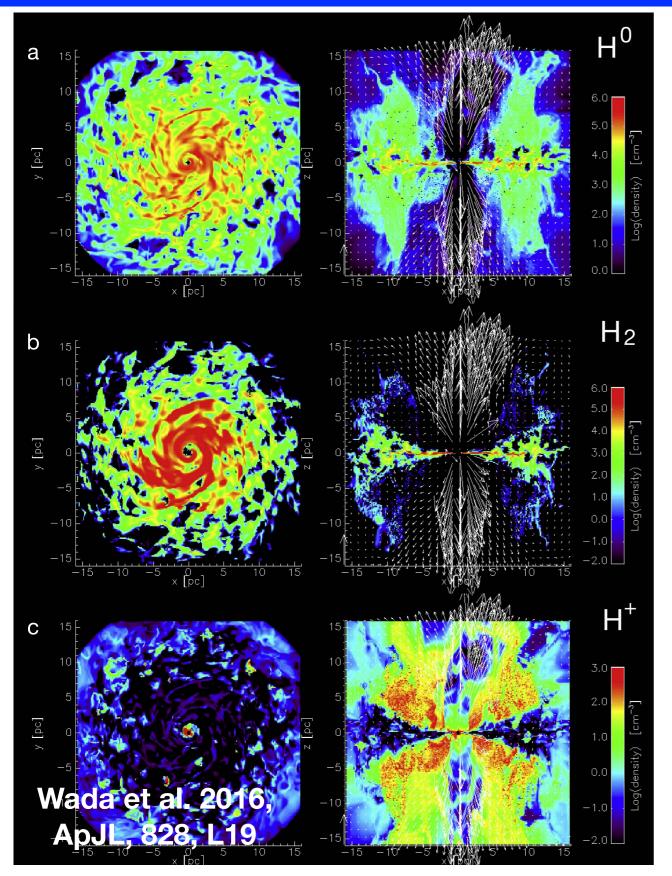


## "Fountain"でダスト分布は再現可能

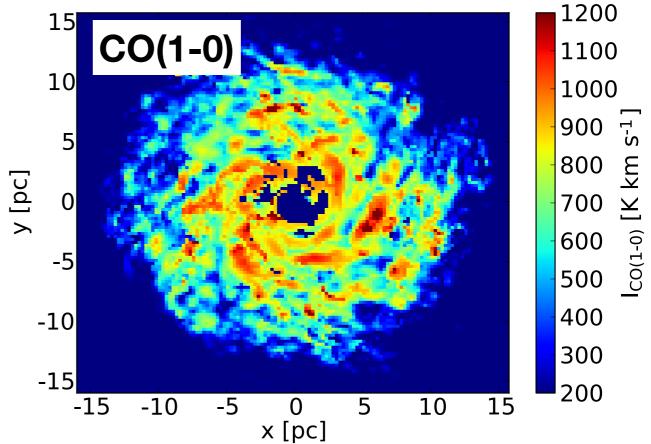


Successfully reproduced the MIR polar elongation!

### Our study(1): ガス分布の理論予測

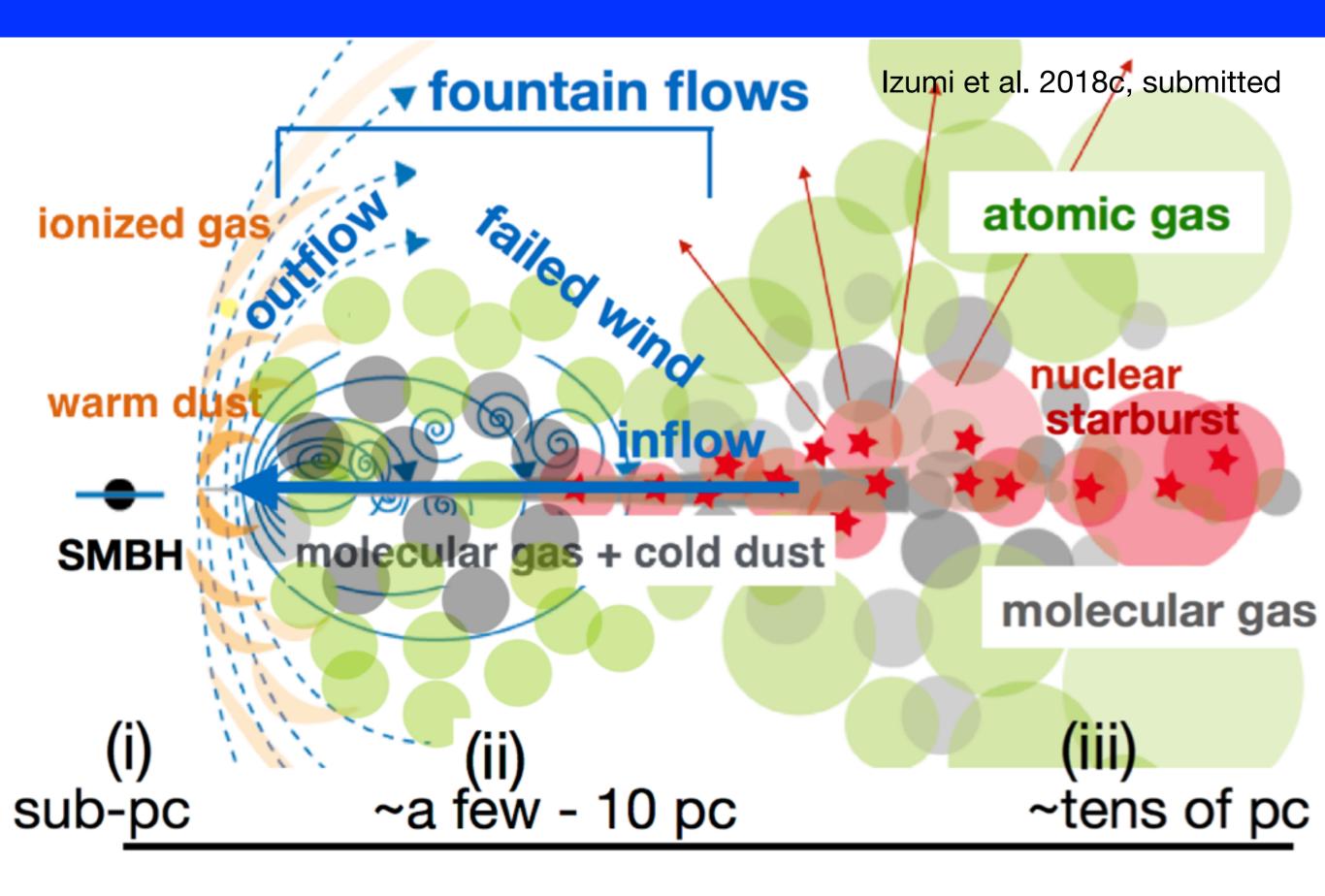


Wada, Fukushige, TI, et al. 2018, ApJ, 852, 88



- Target: The Circinus galaxy
- Hydrodynamic simulation + Chemistry + radiative transfer
- ALMA観測と直接比較できる量を用意

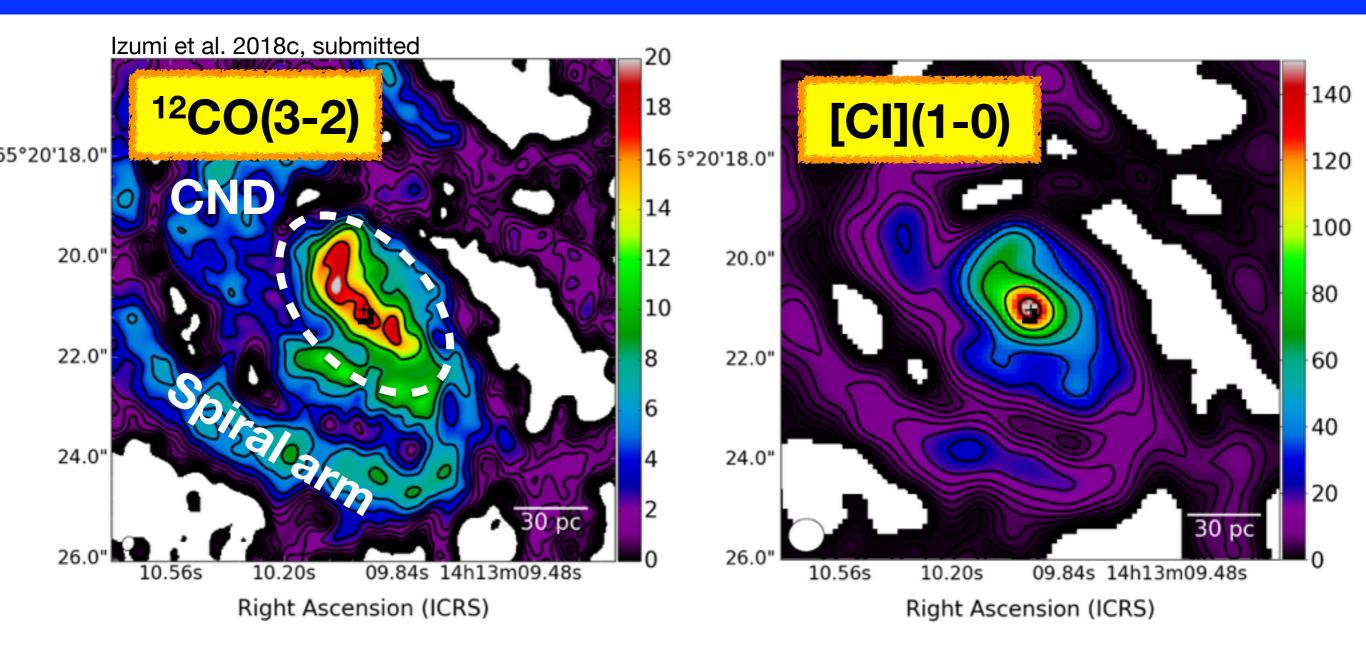
### Our study(1): ガス分布の理論予測



## Out study(2): トーラス領域における多相星間物質の力学探査

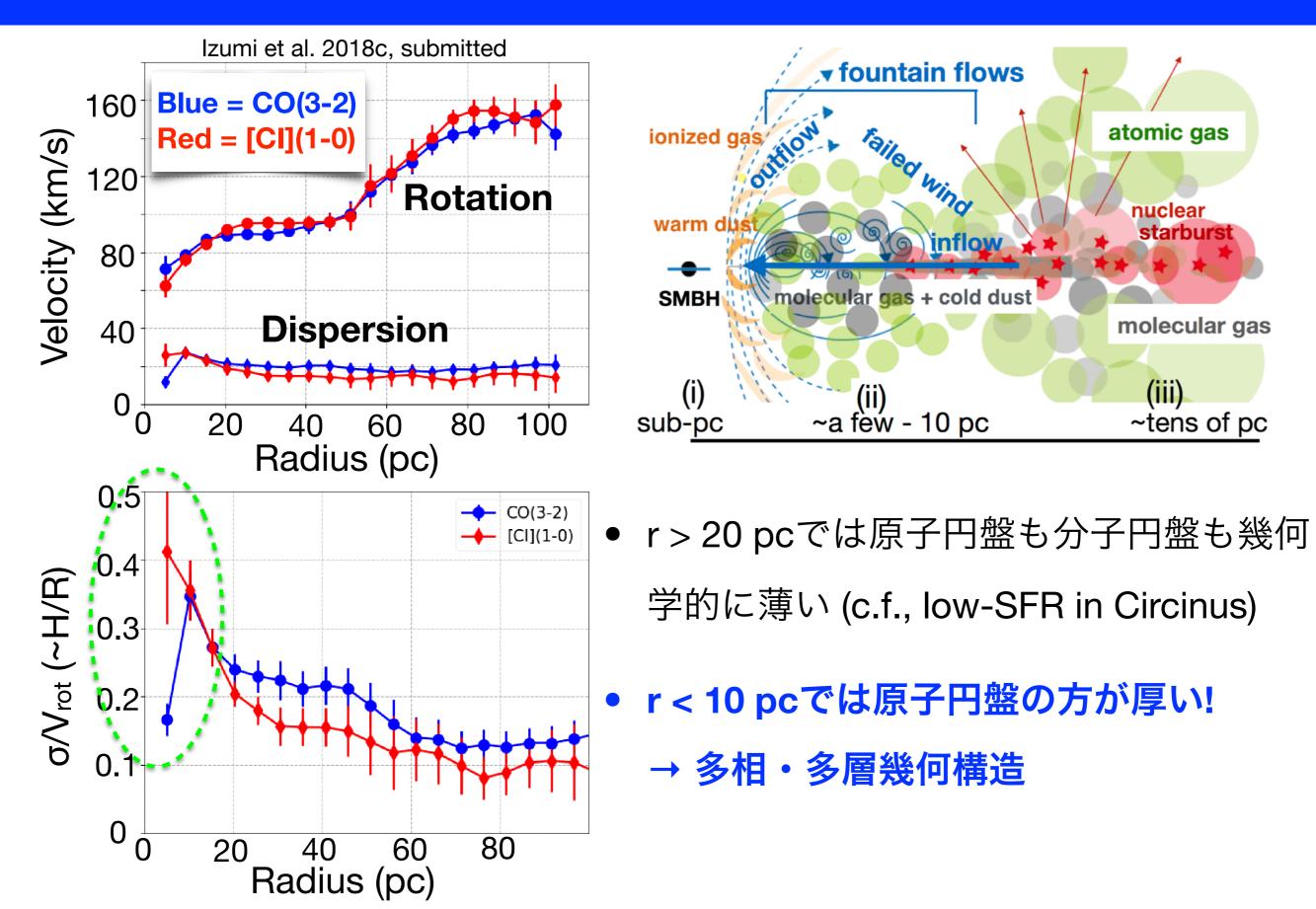


### 新しいパラメータスペースを求めて

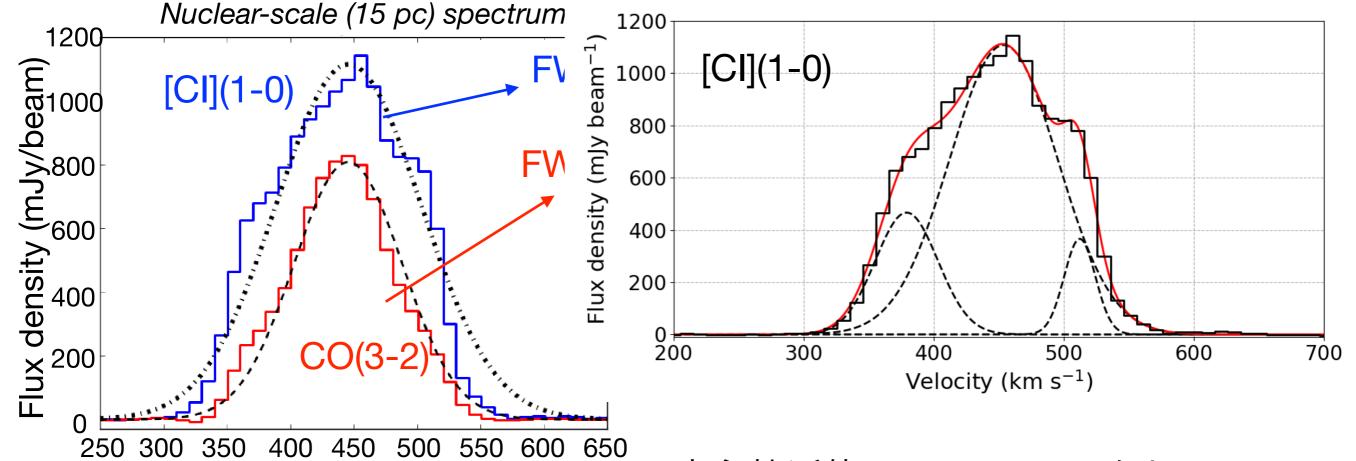


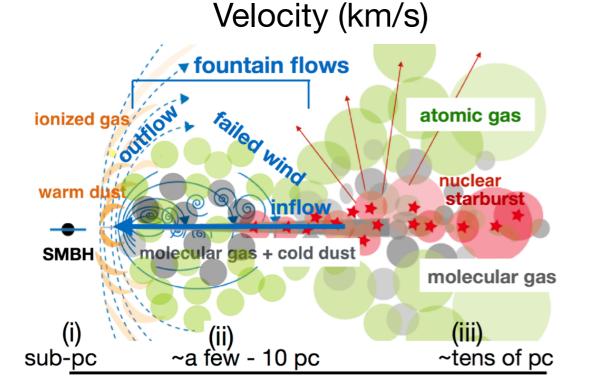
- "多相ガス間の力学状態の違い"が、fountain modelの重要な予測
- いつものCOだけでなく、炭素原子ガス CI も観測
  - → 新しいパラメータスペースの開拓

### CI vs CO: Multi-phase Torus Dynamics



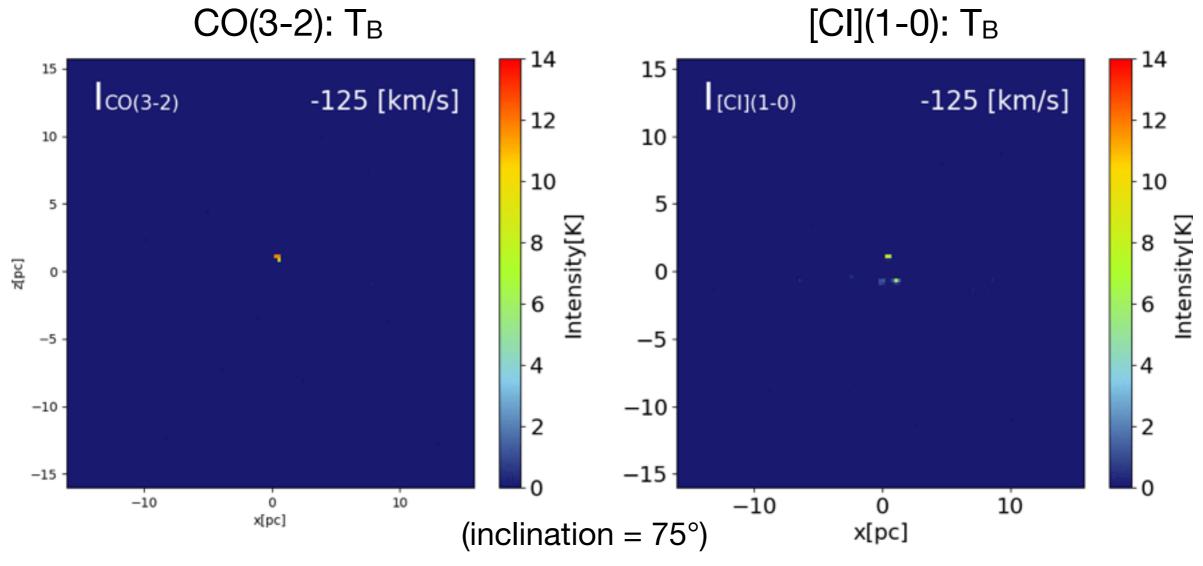
#### 幾何学的厚みの起源は何か?





- ・中心核近傍の[CI](1-0)スペクトルは、 CO(3-2)に比べて線幅が広い。
- ▶ Multi-Gaussianフィットで再現可能
- アウトフローのようなcoherent motionを強く示唆- fountain modelの出番!?

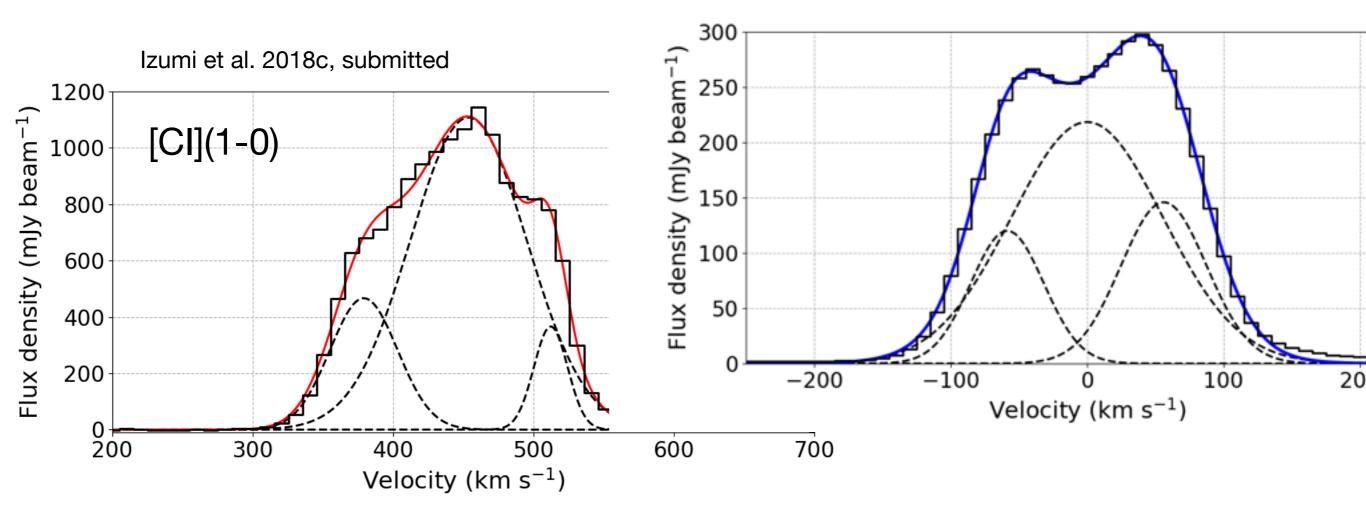
### モデルとの"定量"比較



Izumi et al. 2018c, submitted

- M<sub>BH</sub>, Eddington ratio, CND-scale M<sub>gas</sub>: Circinus銀河に合わせた値
- Hydrodynamic simulation + XDR chemistry (Wada+16) + rad. transfer
- CO(3-2) → 中心面 (i = 75°)
- [CI](1-0) → 中心面 + アウトフローで吹き上げられた成分

## モデルとの"定量"比較

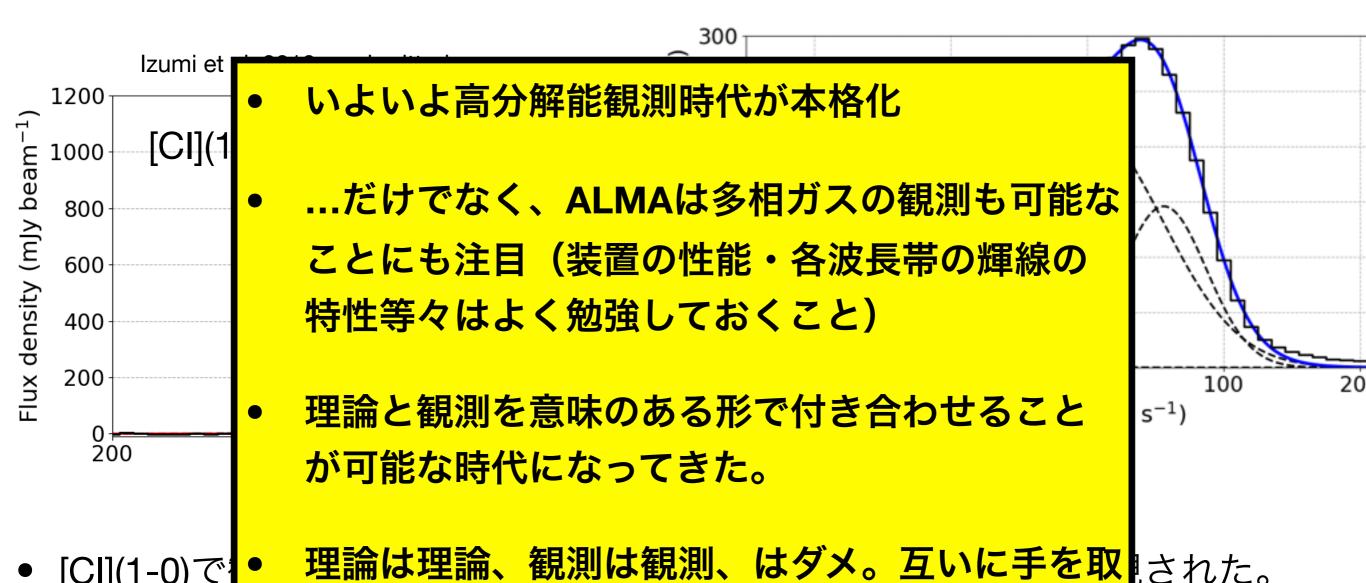


- [CI](1-0)で観測された特異なline profileは、確かにモデルでも再現された。
- ALMA観測結果と、(それに向けて準備した)simulation結果が整合
  - → fountain schemeで、30年来にわたる問題であるAGNトーラスの起源は説明できそう!

#### モデルとの"定量"比較

[CI](1-0)で

ALMA観測

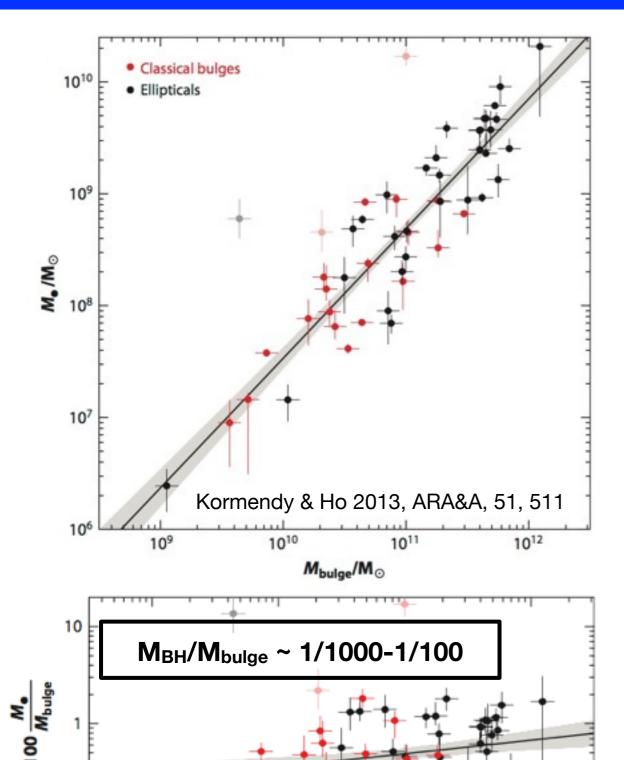


→ fountain schemeで、30年来にわたる問題であるAGNトーラスの起源は説 明できそう!

り合って課題に挑むべし。



# SMBH-galaxy co-evolution



1010

1011

M<sub>bulge</sub>/M<sub>⊙</sub>

 $10^{12}$ 

0.1

 $10^{9}$ 

- M<sub>BH</sub> is tightly correlated with M<sub>bulge</sub> and σ<sub>\*</sub> → Co-evolution
- Why do they know each other despite ~10 orders of magnitude difference in spatial scale…?
- Favoured scenario: Merger-induced starburst & AGN, and subsequent "AGN feedback" to regulate the star formation (e.g., Hopkins et al. 2008; Fabian 2012, ARA&A, 50, 455)
- When, how, and where the relation has arisen/established?

Trace (i) SMBH feeding/feedback and (ii) galaxy growth over the cosmic time

# (c) Interaction/"Merger"

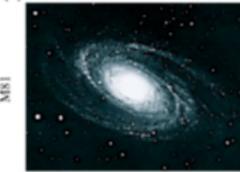
- NGC 4676
- now within one halo, galaxies interact & lose angular momentum
- SFR starts to increase
- stellar winds dominate feedback
- rarely excite QSOs (only special orbits)

#### (b) "Small Group"



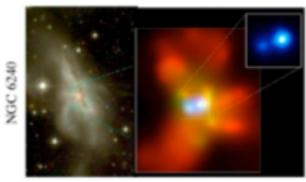
- halo accretes similar-mass companion(s)
- can occur over a wide mass range
- Malo still similar to before: dynamical friction merges the subhalos efficiently

#### (a) Isolated Disk



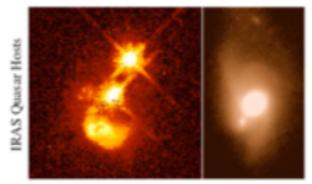
- halo & disk grow, most stars formed
- secular growth builds bars & pseudobulges
- "Seyfert" fueling (AGN with Me>-23)
- cannot redden to the red sequence

#### (d) Coalescence/(U)LIRG



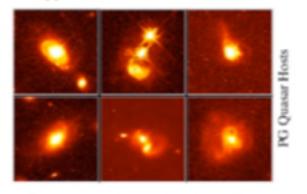
- galaxies coalesce: violent relaxation in core
- gas inflows to center: starburst & buried (X-ray) AGN
- starburst dominates luminosity/feedback, but, total stellar mass formed is small

#### (e) "Blowout"



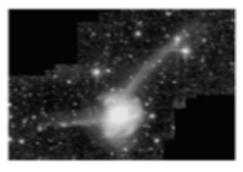
- BH grows rapidly: briefly dominates luminosity/feedback
- remaining dust/gas expelled
- get reddened (but not Type II) QSO: recent/ongoing SF in host high Eddington ratios merger signatures still visible

#### (f) Quasar



- dust removed: now a "traditional" QSO
- host morphology difficult to observe: tidal features fade rapidly
- characteristically blue/young spheroid

#### (g) Decay/K+A



- QSO luminosity fades rapidly
  - tidal features visible only with very deep observations
- remnant reddens rapidly (E+A/K+A)
- "hot halo" from feedback
  - sets up quasi-static cooling

## 1000 [M<sub>0</sub> yr<sup>-1</sup>] 100 10 def log 10 Luso -2 -1Time (Relative to Merger) [Gyr]

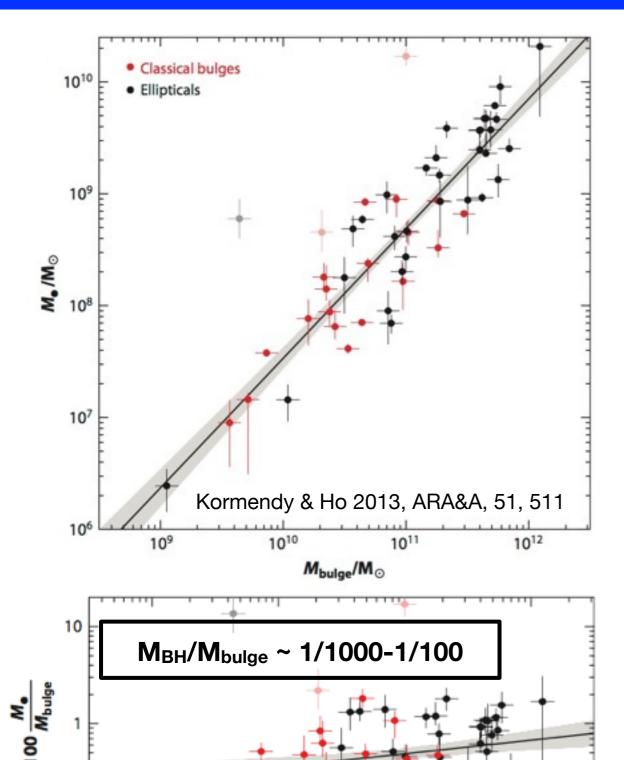
Hopkins et al. 2008, ApJS, 175, 356

#### (h) "Dead" Elliptical



- star formation terminated
- large BH/spheroid efficient feedback
- halo grows to "large group" scales: mergers become inefficient
- growth by "dry" mergers

# SMBH-galaxy co-evolution



1010

1011

M<sub>bulge</sub>/M<sub>⊙</sub>

 $10^{12}$ 

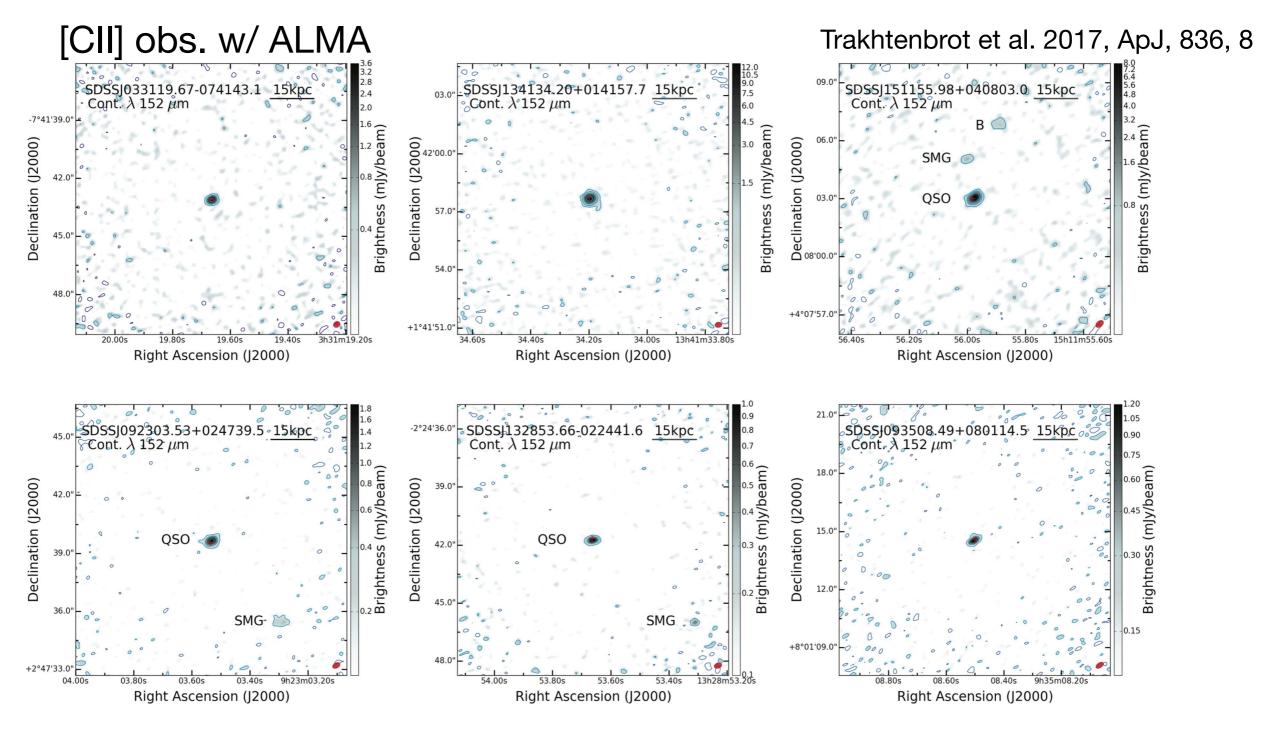
0.1

 $10^{9}$ 

- M<sub>BH</sub> is tightly correlated with M<sub>bulge</sub> and σ<sub>\*</sub> → Co-evolution
- Why do they know each other despite ~10 orders of magnitude difference in spatial scale…?
- Favoured scenario: Merger-induced starburst & AGN, and subsequent "AGN feedback" to regulate the star formation (e.g., Hopkins et al. 2008; Fabian 2012, ARA&A, 50, 455)
- When, how, and where the relation has arisen/established?

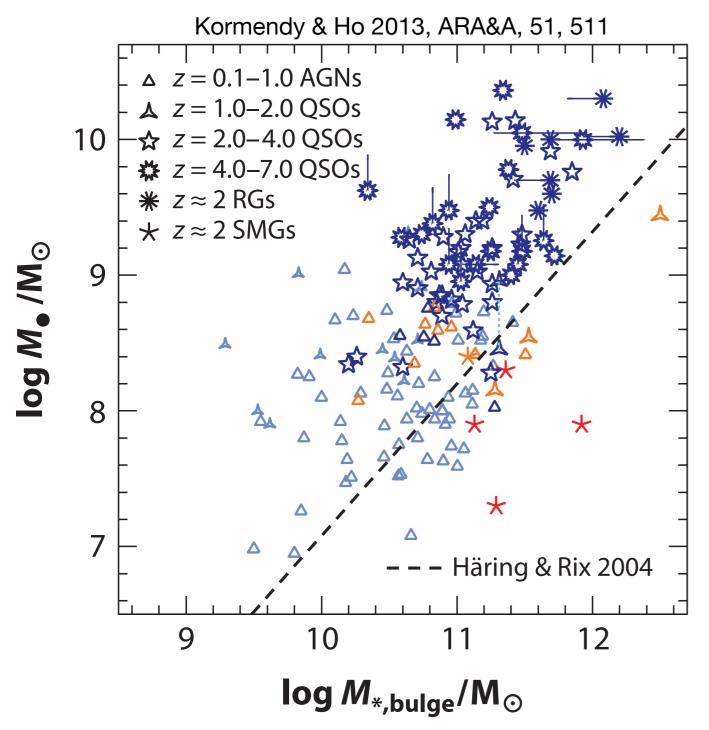
Trace (i) SMBH feeding/feedback and (ii) galaxy growth over the cosmic time

## Enhanced merger-frequency at high-z?



- Associated SMGs in 3/6 luminous quasars at z ~ 5 (50%!!)
- Strongly support "merger-induced" SMBH growth

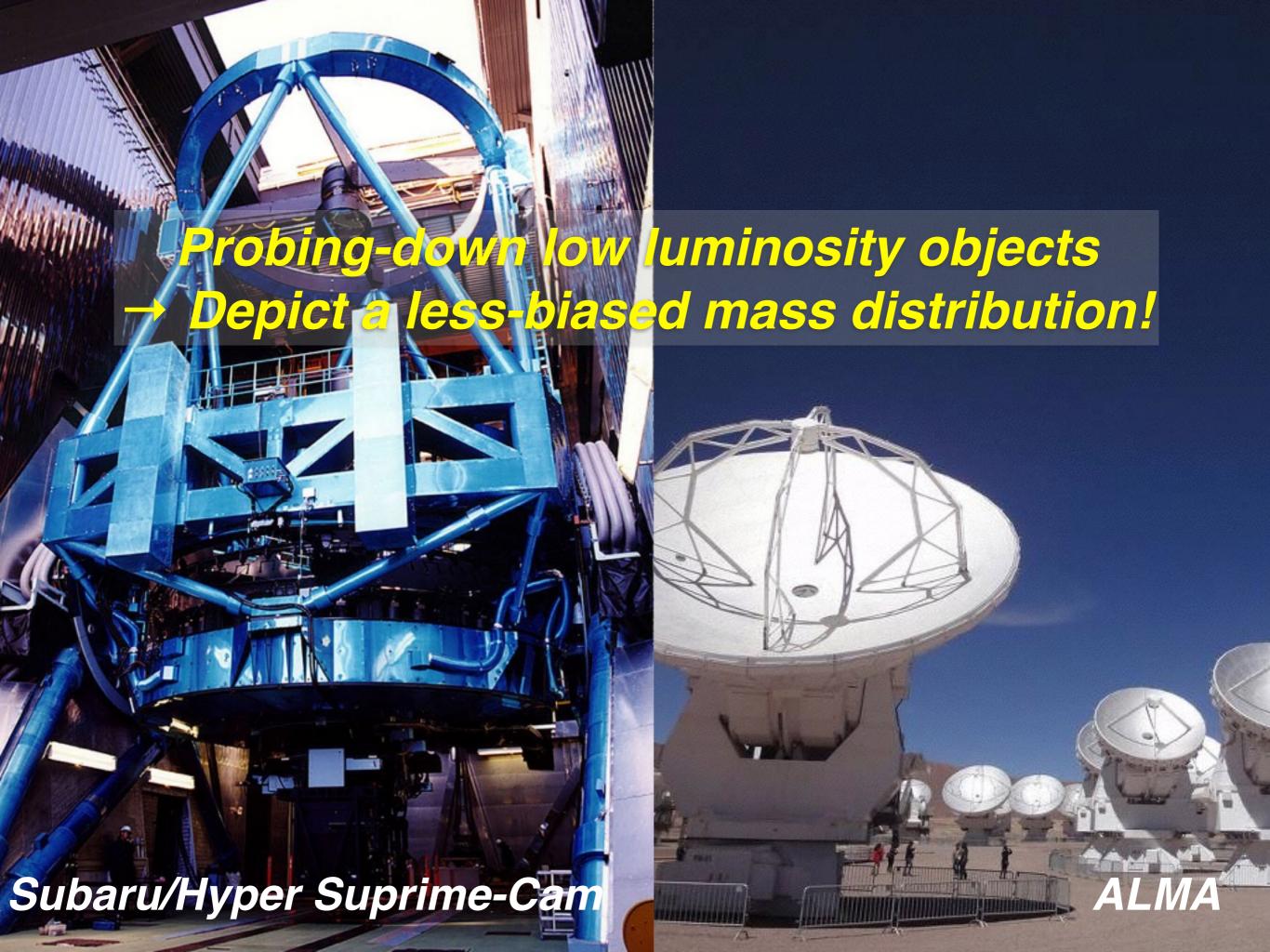
### Early co-evolution: biased view?



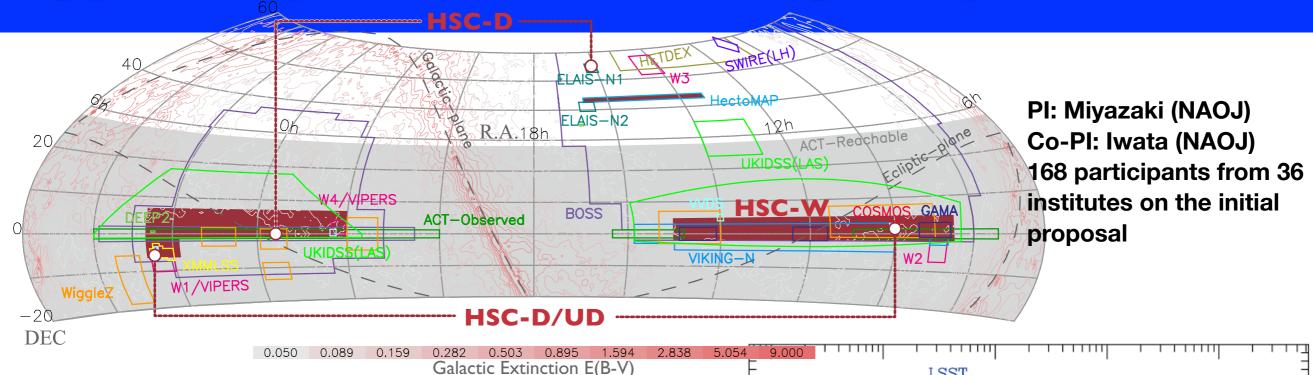
- M<sub>BH</sub> of (some) optically-luminous
   z > 6 quasars are over-massive
   → SMBH earlier, galaxies later?
- But we should care about a selection bias to prefer luminous (~ massive) objects



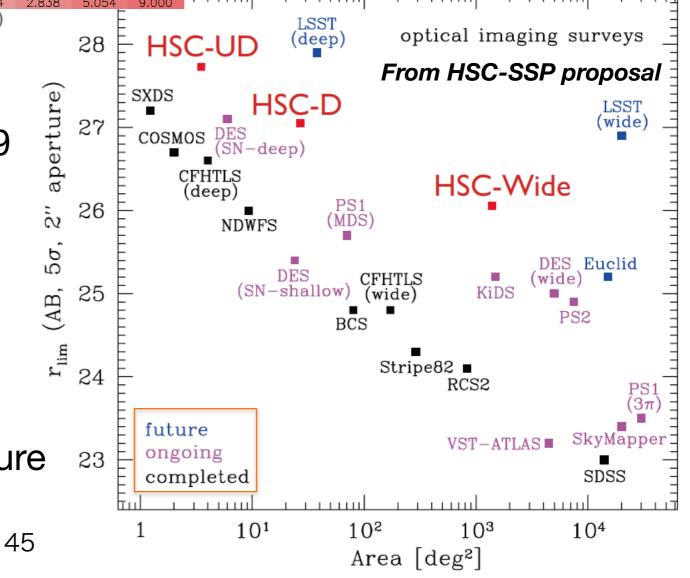
\* M<sub>dyn</sub>~M<sub>star</sub> is usually assumed in quasars



### **Hyper Suprime-Cam Survey of quasars**

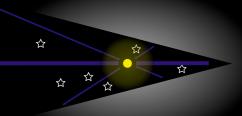


- First <u>1000deg<sup>2</sup> class</u> survey with an 8m class telescope
  - 300 nights: Feb. 2014 Jan. 2019
  - *g,r,i,z,y* bands
  - **~2 mag deeper** than previous surveys (e.g.,  $r_{AB} < 27.1$  mag in the Deep 27 deg<sup>2</sup>)
- Will discover many less-luminous quasars at z > 6 → less-biased picture of early SMBH evolution



#### **SHELLQs**

#### Subaru High-z Exploration of Low-Luminosity Quasars





#### **Members**

#### Y. Matsuoka<sup>1</sup> (PI)

M. Akiyama², N. Asami³, S. Foucaud, T. Goto⁴, Y. Harikane⁵, H. Ikeda¹, M. Imanishi¹, K. Iwasawa⁶, T. Izumi⁵, N. Kashikawa¹ T. Kawaguchiⁿ, S. Kikuta¹, K. Kohno⁵, C.-H. Lee¹, R. H. Lupton⁰, T. Minezaki⁵, T. Morokuma⁵, T. Nagao⁶, M. Niida⁶, M. Oguri⁵, Y. Ono⁵, M. Onoue¹, M. Ouchi⁵, P. Price⁰, H. Sameshima¹⁰, A. Schulze⁵, T. Shibuya⁵, H. Shirakata¹¹, J. D. Silverman⁵, M. A. Strauss⁰, M. Tanaka¹, J. Tang¹², Y. Toba⁶ ¹NAOJ, ²Tohoku, ³JPSE, ⁴Tsinghua, ⁵Tokyo, ⁶Barcelona, ¬Sapporo Medical, ⁶Ehime, ⁰Princeton, ¹⁰Kyoto Sangyo, ¹¹Hokkaido,

<sup>1</sup>NAOJ, <sup>2</sup>Tohoku, <sup>3</sup>JPSE, <sup>4</sup>Tsinghua, <sup>3</sup>Tokyo, <sup>6</sup>Barcelona, <sup>7</sup>Sapporo Medical, <sup>6</sup>Ehime, <sup>9</sup>Princeton, <sup>10</sup>Kyoto Sangyo, <sup>11</sup>Hokkaido <sup>12</sup>ASIAA

# HSC-project (#123): Submm follow-up observations toward HSC-detected high-z quasars with ALMA



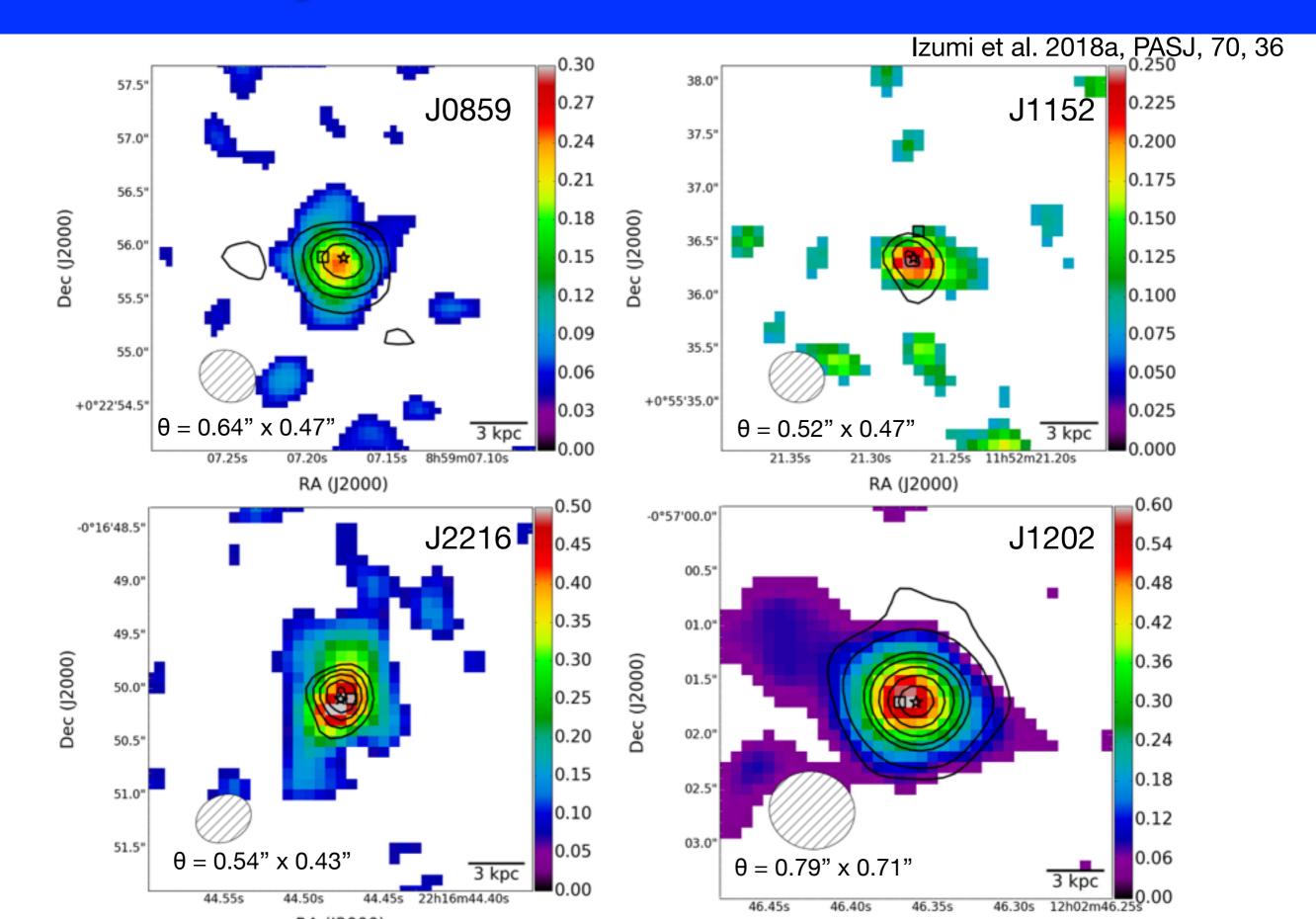
Izumi et al. 2018a, PASJ, 70, 36 Based on: ALMA Cycle 4 (2016.1.01423.S)

What happens to the early, but representative quasar host galaxies?

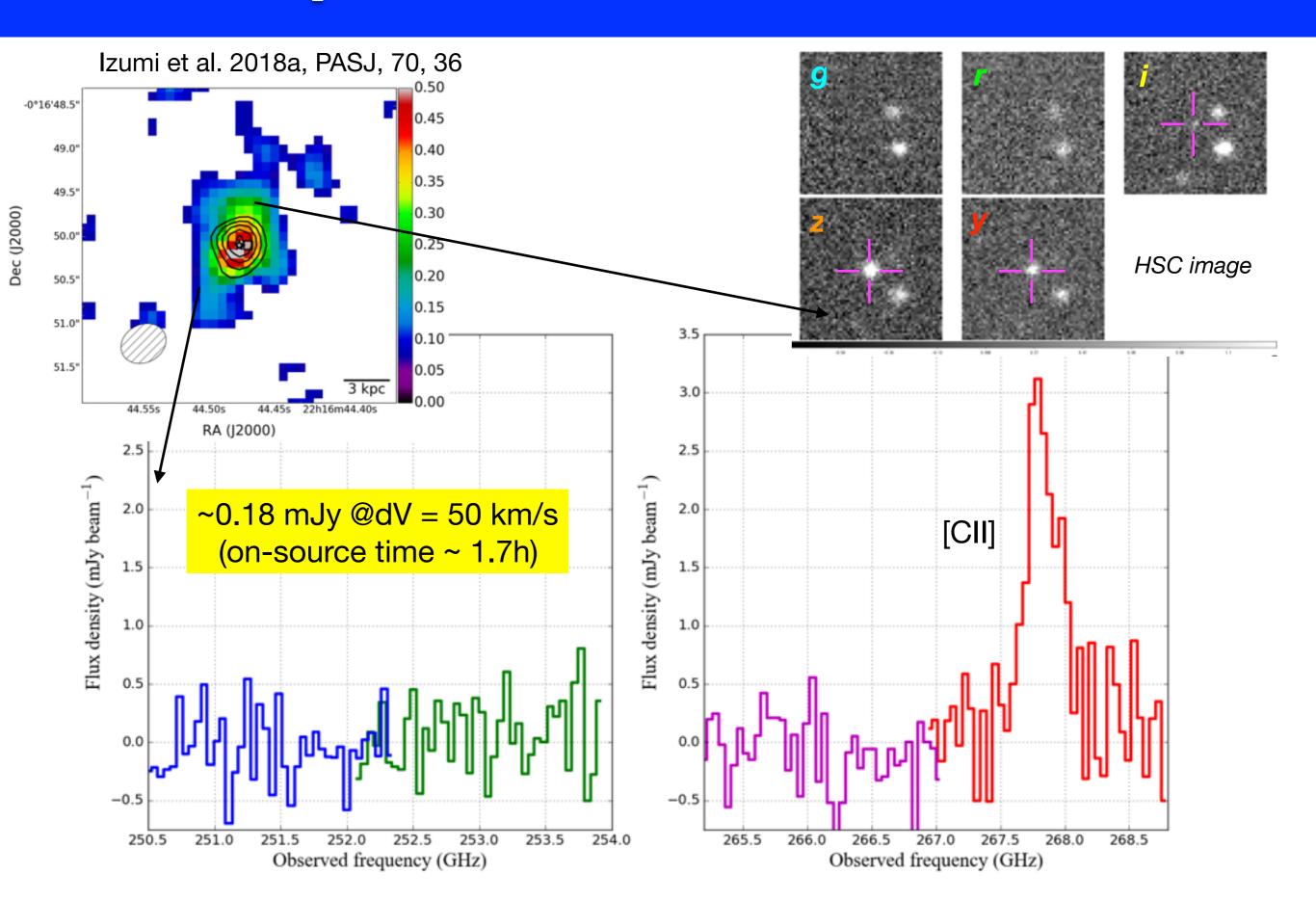
→ SFR, M

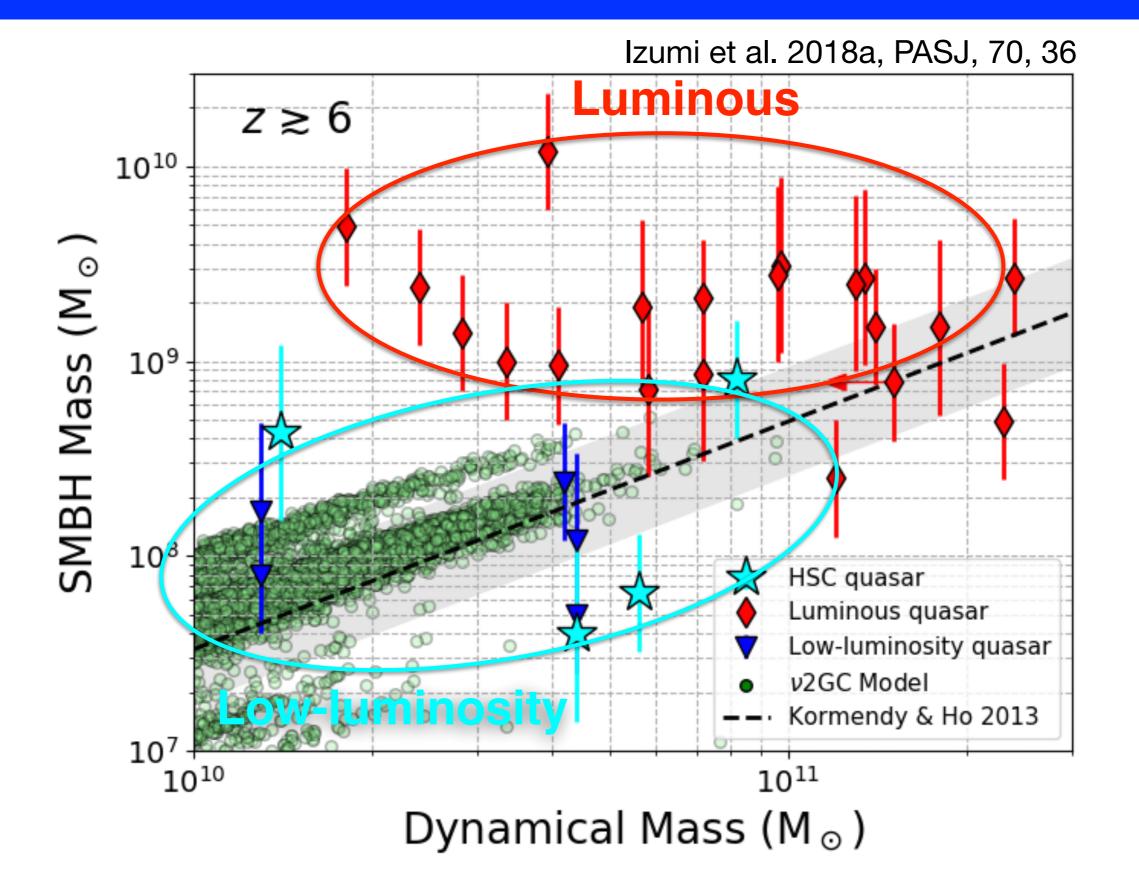
What is the bias-corrected co-evolutionary relationship at z ~ 6?

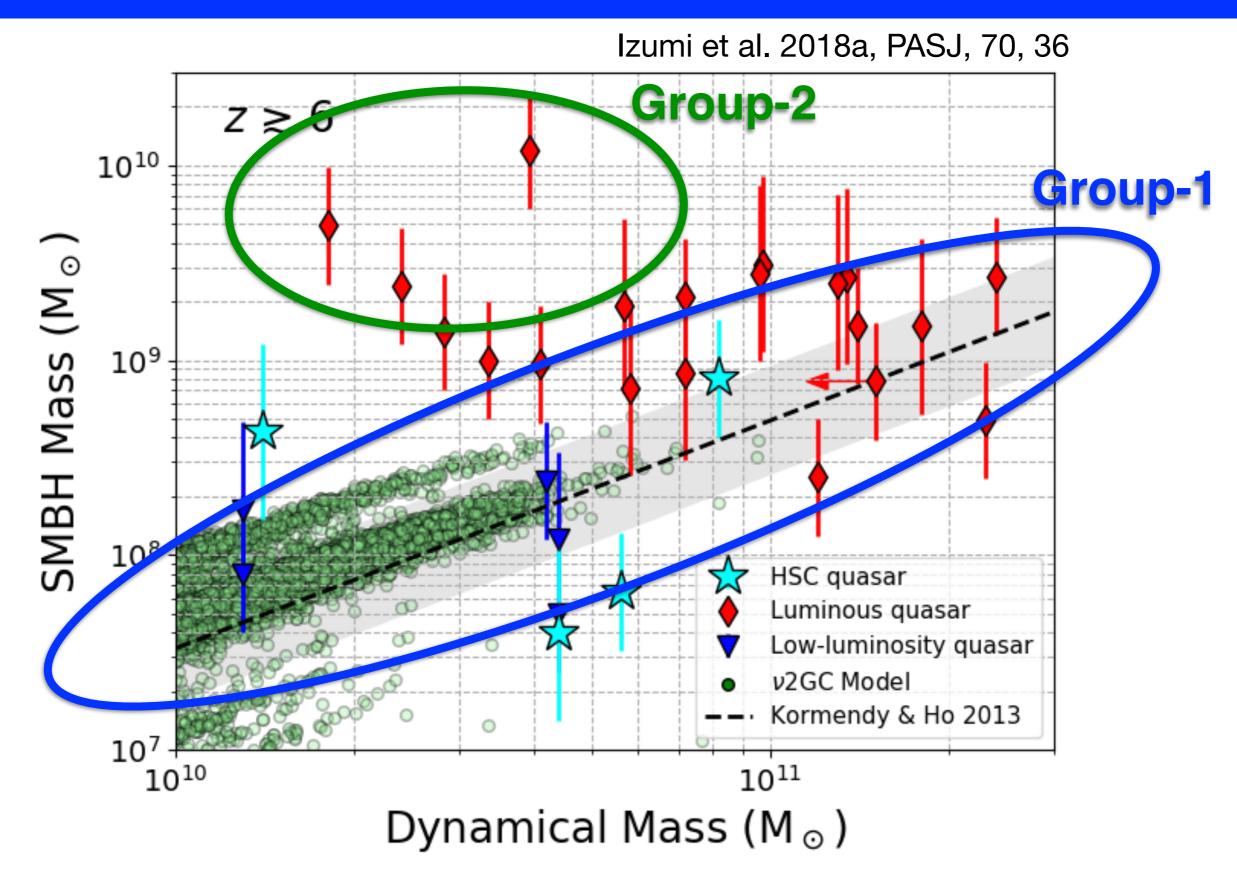
# Color = [CII] Contour = FIR continuum



## **Band 6 spectrum: J2216-0016**





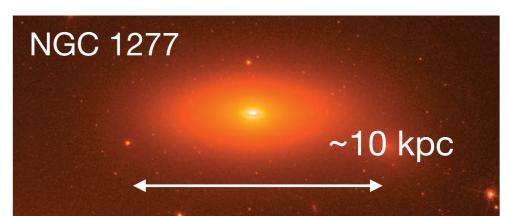


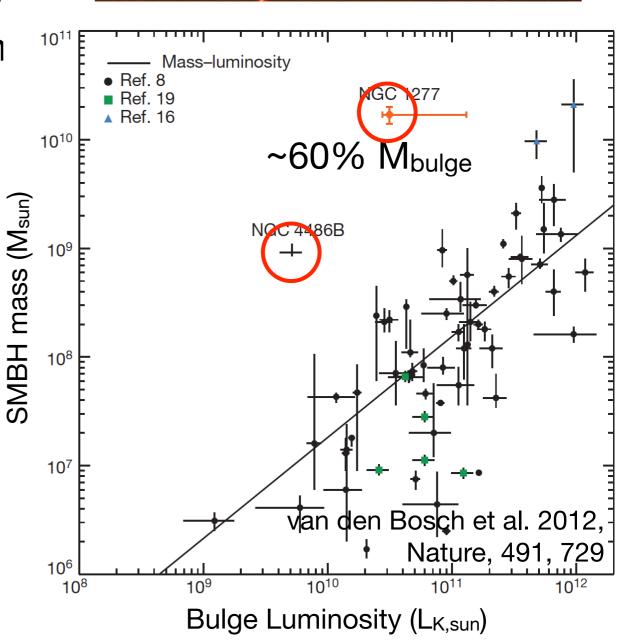
#### **Group-1**

- Roughly <u>follow</u> the local relation
  - → Standard merger-induced SMBH-galaxy evolution model may explain (although many of them must live in quite massive halos)

#### **Group-2**

- Quite hard to reproduce with the v2GC scheme; another paths??
- Will appear as over-massive M<sub>BH</sub>
   at z ~ 0? (like NGC 1277)
- Or get closer to the local relation via dry mergers?





#### **Group-1**

- Roughly <u>follow</u> the local relation
  - → Standard merger-induced SMBH-galaxy evolution model may

NGC 1277

~10 kpc

M<sub>bulge</sub>

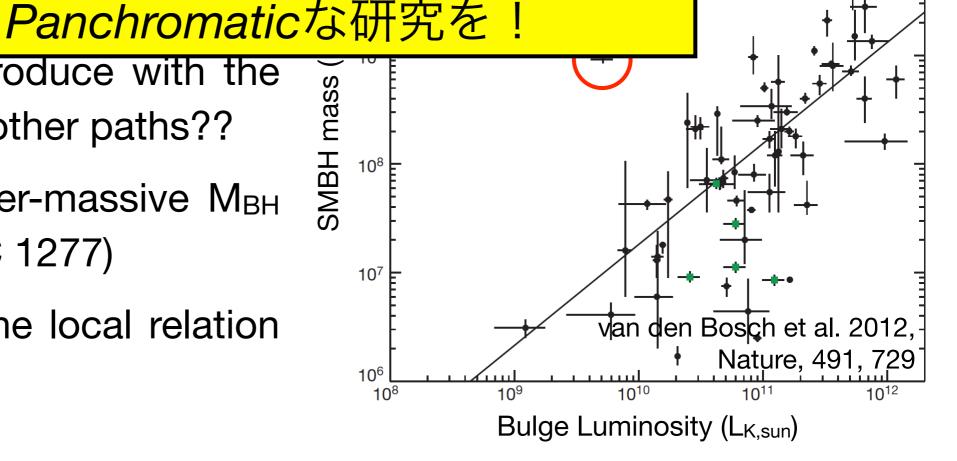
explain ( must live

**Group-2** 

多波長連携が威力を発揮し、銀河形成に物申す時代!ぜひ同士を集めて

 Quite hard to reproduce with the v2GC scheme; another paths??

- Will appear as over-massive M<sub>BH</sub>
   at z ~ 0? (like NGC 1277)
- Or get closer to the local relation via dry mergers?



#### まとめ:生々流転

- 大学院時代から、"ミリ波サブミリ波でAGN"という内容で、色々な研究をしてきた。
  - この人と言えばこれ!という武器を持つと強い!
  - その武器を手に、様々なテーマに挑戦すると良い。
- 院生時代に、何かこれは!という軸足を持っておく (で、さっさと論文にする)。
  - 良いスタートアップを切るのは(精神衛生・実務両面で)大事。
- 幼年期の終わりは研究者として成長してきた証拠!
  - どんどん研究の幅を広げよう。
- 時代は理論と観測の協働、多波長連携!
- アーカイブデータを含め、最新の研究をすぐに始められる環境が整ってきている。
  - いろんな方と積極的に話して、どんどん新しいことに挑戦しよう!