河野研Journal Club

# Multi-phase Nature of a Radiationdriven Fountain with Nuclear Starburst in a Low-mass Active Galactic Nucleus (Wada et al. 2016, ApJ, 828, L19) +α

# 泉拓磨 (学振PD/東京大)

# 1. Introduction-(1) General Background of AGN Tori

# The Idea of AGN Dusty/molecular Torus



広輝線を持つ1型と、持たない2型を「統一」
 して考えるための概念。

(Antonucci 1993 ARA&A, 31, 473; Urry & Padovani 1995, PASP, 107, 803)

- AGN降着円盤 (Shakura & Sunyaev 1973, A&A, 24, 337) のUV光を吸収し、IRに変換する機能 を持つ (Barvainis 1987, ApJ, 320, 537)

# The Idea of AGN Dusty/molecular Torus



- 1型 vs 2型の数比 (Maiolino & Rieke 1995, ApJ, 454, 95) を説明するため、H/R ~1を 要請
- モデルが満たすべき要件は、
  (1) 力学的安定性
  (2) Scale heightの維持
  これらをself-consistentに説明できるモデ ルが必要!
- さらに、circumnuclear disk (CND) のcold materialによるadditional obscurationも議 論されている。

# 近年の観測の進展 (1/3): 赤外線干渉計観測



- VLTI/MIDIによる超高空間分解能観測@12μm
- ダスト放射は、(薄い円盤に加えて)torus
  polar axis方向に伸びていることが判明

(e.g., Tristram et al. 2014, A&A, 563, A82; Lopez-Gonzaga et al. 2014, A&A, 565, A71; Honig et al. 2013, ApJ, 771, 87; Lopez-Gonzaga et al. 2016, A&A, 591, A47)

- 最も高品質なデータがあるのはCircinus

- 古典的なトーラスの描像とは<u>全く異なる</u>分布!
- その起源は?AGNに付随するionized gasの double hollow coneとの関係は??

# 近年の観測の進展 (2/3): 光度依存性



高光度側のobs. fraction低下は、receding torus model (Laurence 1991, MNRAS, 252, 586)の描像と一致するものの…。

#### 近年の観測の進展 (3/3): CND領域のH<sub>2</sub>ガス



# 1. Introduction-(2) Wada et al. series 概観

- TI's comment - Hydrodynamical simulationを駆使した"self-consistent"なモデルとして注目されている。

# Supernova-driven turbulent model

Wada & Norman 2002, ApJ, 566, L21; Wada et al. 2009, ApJ, 702, 63



- CND領域での超新星爆発で、ガスのscale heightをあげてH/R ~1を実現。
- Rotationally-supported thin disk → Turbulent-supported thick disk
- 星形成円盤のclumpinessが、そのままtorus clumpinessとなる。
- 疑問:もっと中心核近傍での遮蔽がほしい?SEDの整合性は?



- CND領域での超新星爆発で、ガスのscale heightをあげてH/R~1を実現。
- Rotationally-supported thin disk → Turbulent-supported thick disk
- 星形成円盤のclumpinessが、そのままtorus clumpinessとなる。
- 疑問:もっと中心核近傍での遮蔽がほしい?SEDの整合性は?

# **Radiation-driven fountain model**

Wada 2012, ApJ, 758, 66; Wada 2015, ApJ, 812, 82; Schartmann et al. 2014, MNRAS, 445, 3878



- 自己重力円盤に対するAGNからのX線放射 (H-chemistry) と輻射圧の影響を計算。
- Supernova feedbackは含めていない。
- 準定常的なガスのcirculationが、実効的なtoroidal structureとなる。Polar elongationも再現。
- Obscured fractionのAGN光度依存性も再現 (Wada+15)

#### Radiation-driven fountain model: 問題点



- 円盤をほとんどedge-onで見ないかぎり、9.7µmのsillicate featureがtoo strong emissionで 見えてしまう (観測はweaker emission or absorption)
   → fountainで高温ダストが上空まで巻き上げられることによる
- Colder materialによる追加の遮蔽を導入したい。→ 次の研究へのmotivation !



#### MULTI-PHASE NATURE OF A RADIATION-DRIVEN FOUNTAIN WITH NUCLEAR STARBURST IN A LOW-MASS ACTIVE GALACTIC NUCLEUS

KEIICHI WADA<sup>1,4</sup>, MARC SCHARTMANN<sup>2</sup>, AND ROWIN MEIJERINK<sup>3</sup> Kagoshima University, Kagoshima 890-0065, Japan; wada@astrophysics.jp

<sup>2</sup> Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology, P.O. Box 218, Hawthorn, VIC 3122, Australia <sup>3</sup> Leiden Observatory, P.O. Box 9513, NL-2300 RA Leiden, The Netherlands

Received 2016 July 20; revised 2016 August 19; accepted 2016 August 24; published 2016 September 9

The structures and dynamics of molecular, atomic, and ionized gases are studied around a low-luminosity active galactic nucleus (AGN) with a small  $(2 \times 10^6 M_{\odot})$  black hole using three-dimensional (3D) radiationhydrodynamic simulations. We studied, for the first time, the non-equilibrium chemistry for the X-raydominated region in the "radiation-driven fountain" with supernova feedback. A double hollow cone structure is naturally formed without postulating a thick "torus" around a central source. The cone is occupied with an inhomogeneous, diffuse ionized gas and surrounded by a geometrically thick  $(h/r \gtrsim 1)$  atomic gas. Dense molecular gases are distributed near the equatorial plane, and energy feedback from supernovae enhances their scale height. Molecular hydrogen exists in a hot phase (>1000 K) as well as in a cold (<100 K), dense  $(>10^3 \text{ cm}^{-3})$  phase. The velocity dispersion of H<sub>2</sub> in the vertical direction is comparable to the rotational velocity, which is consistent with near-infrared observations of nearby Seyfert galaxies. Using 3D radiation transfer calculations for the dust emission, we find polar emission in the mid-infrared band (12  $\mu$ m), which is associated with bipolar outflows, as suggested in recent interferometric observations of nearby AGNs. If the viewing angle for the nucleus is larger than 75°, the spectral energy distribution is consistent with that of the Circinus galaxy. The multi-phase interstellar medium observed in optical/infrared and X-ray observations is also discussed.

> The authors are grateful to the anonymous referee for constructive comments and suggestions. We thank Dr. Takuma Izumi for his valuable comments. Numerical computations

# **Numerical Methods**

- 3D multi-phase hydrodynamic simulation (Eulerian)
   256<sup>3</sup> grid = 64<sup>3</sup> pc (0.125 pc resolution: uniform)
- 中心AGNからのradiative feedback: ray-tracing methodで追う。
   ダストへの輻射圧
  - ガスへのX-ray heating/ionization (XDR; Meijerink & Spaans 2005, A&A, 436, 397)
- 中心AGNからの放射はnon-spherical: 256<sup>3</sup>本のrayをもって各点でのfluxを計算。
- Cold gas (CND)では、
  - 超新星爆発のfeedback
  - 20 < T [K] < 1e8 でのradiative cooling w/  $Z_{sun}$
  - Uniform FUV radiation field of 1000 Go (光電加熱)
- ダストとガスの運動は同期させている。
- Meijerink & Spaans 05のchemical networkを用いて、いくつかの代表的なイオン/原子 /分子存在量を計算:H,H<sub>2</sub>,H<sup>+</sup>,H<sub>3</sub><sup>+</sup>,C,C<sup>+</sup>,CO,H<sub>2</sub>O,H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, HCO<sup>+</sup>, etc.

### 初期条件: Circinus galaxy

- MBH = 2e6 M<sub>sun</sub>
  → 比較的小さいM<sub>BH</sub>、ALMA観測も視野に入れてCircinusをモデル化。
- Mgas of the CND = 2e6 Msun
- 一様密度の軸対象回転円盤を作成し、力学的に落ち着いたら各種
- feedback (AGN radiation, SNe) を作用させ始める。
- AGNの性質: L<sub>Bol</sub> = 5e43 erg/s, λ<sub>Edd</sub> = 0.2
  - → (1) Fuv :cosθ(1+2cosθ)の角度依存性あり
  - (Netzer 1987, MNRAS, 225, 55) → (2) L<sub>x</sub> (等方的): 今の場合は、~3e42 erg/s

#### **Results: Gas Distribution (Density)**



 $H_2$ 

#### **Results: Gas Temperature**



円盤midplaneの分子ガスの温度は<100 K程度







![](_page_20_Figure_1.jpeg)

17

![](_page_21_Figure_1.jpeg)

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

![](_page_26_Figure_1.jpeg)

![](_page_27_Figure_1.jpeg)

![](_page_28_Figure_1.jpeg)

### **Results: Column density vs Viewing angle**

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

- CO → H<sub>2</sub>, Cl → HIと分布が似ていることが分かる。ALMAを用いた構造探査に期待。
- Meijerink & Spaans 05のXDRモデルを利用している点に注意。

### **Comparison with the Circinus galaxy: IR-SED**

![](_page_30_Figure_1.jpeg)

- SN-feedbackのおかげでmol. gasのscale heightが上がり、高温ダスト放射を隠す。
- 過去の研究同様に、bipolar outflowがdust emissionのpolar elongationを作り出している。

# まとめ

- 近年の観測技術の進展に伴い、古典的なトーラスモデルでは説明のできない現象が近傍AGNで発見されている。
- モデルの峻別には力学情報を加味することも必須。
- 力学的情報も含めた、self-consistentなモデル構築と観測との綿密な比較 が重要!
- 一例として、Wada et al.による一連の仕事を紹介。
- 現状、モデル結果は観測を"かなりよく再現"
  - → fountainの存在の証明など、ALMA観測への期待がかかる。
  - → Chemistryも考慮して、望みの構造をtraceするのに適したlineを判断。