

銀河中心巨大ブラックホール周りの 新しい天体種族形成の可能性

和田桂一

鹿児島大学 天の川銀河研究センター

月形成の巨大衝突仮説について(KW, Kokubo, Makino 2006)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 638:1180–1186, 2006 February 20
© 2006. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

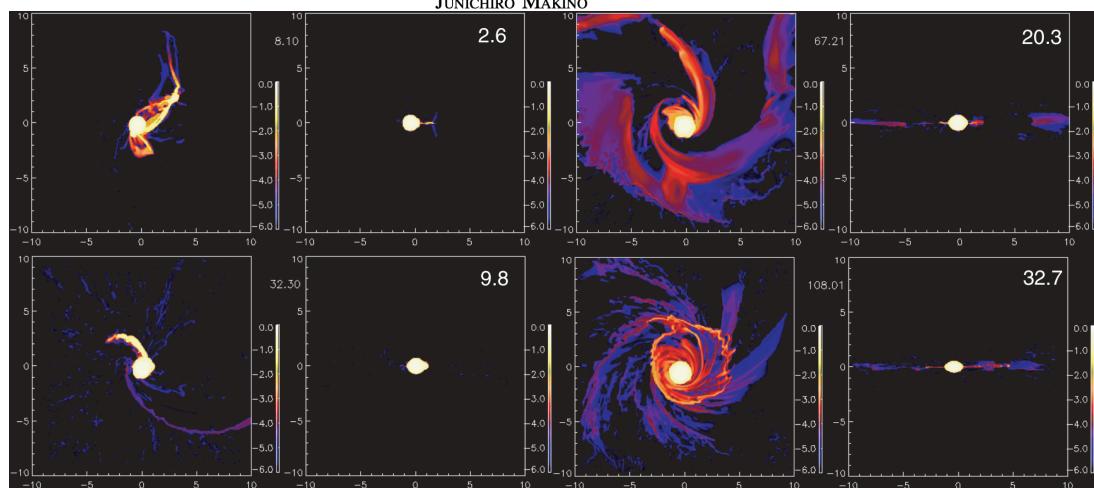
HIGH-RESOLUTION SIMULATIONS OF A MOON-FORMING IMPACT AND POSTIMPACT EVOLUTION

KEIICHI WADA AND EIICHIRO KOKUBO

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan; wada.keiichi@nao.ac.jp, kokubo@th.nao.ac.jp

AND

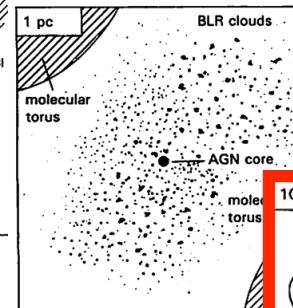
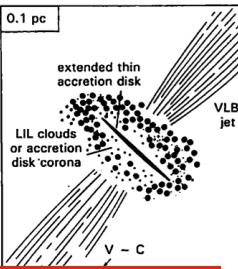
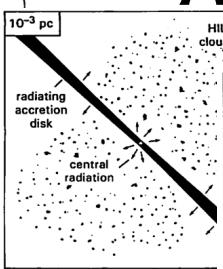
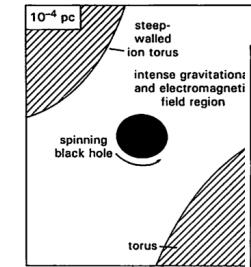
JUNICHIRO MAKINO



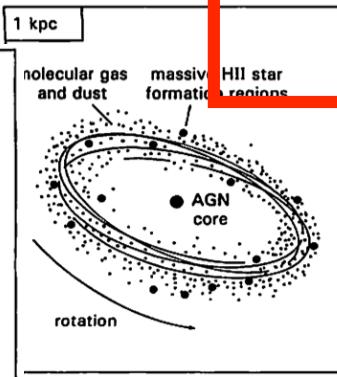
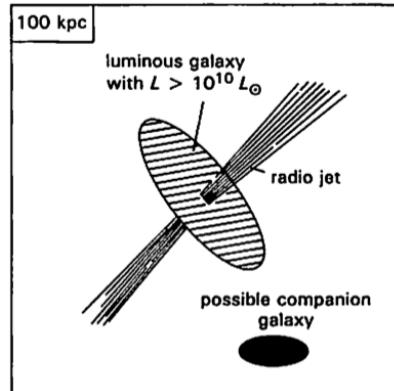
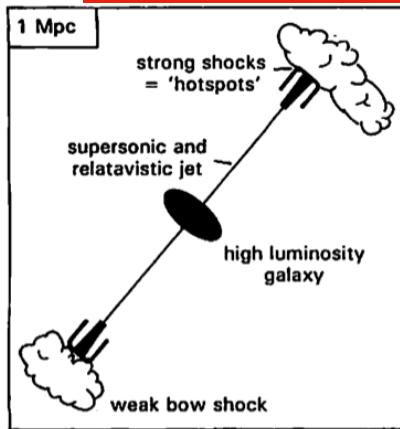
Active Galactic Nucleusの構造

宇宙でも最も明るい天体

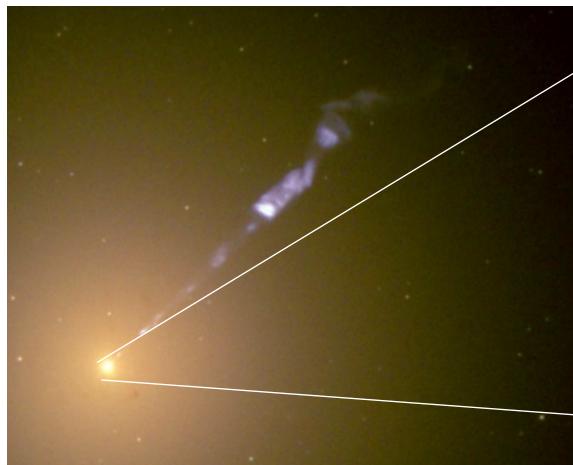
Blandford 1990



スケールで10桁ほどにもわたる

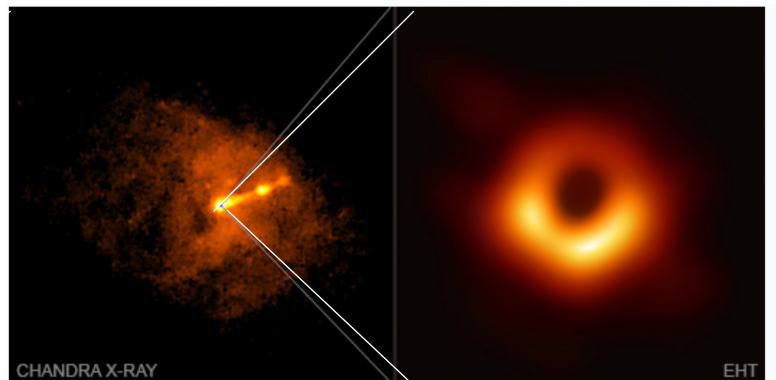


3



M87: Hubble宇宙望遠鏡

Credits: NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



Credit: X-ray: NASA/CXC/Villanova University/J. Neilsen; Radio: Event Horizon Telescope Collaboration

X線

電波



M87 (巨大な橙円銀河、距離0.5億光年)

太陽質量の

70億倍の巨大ブラックホール

わりと近い

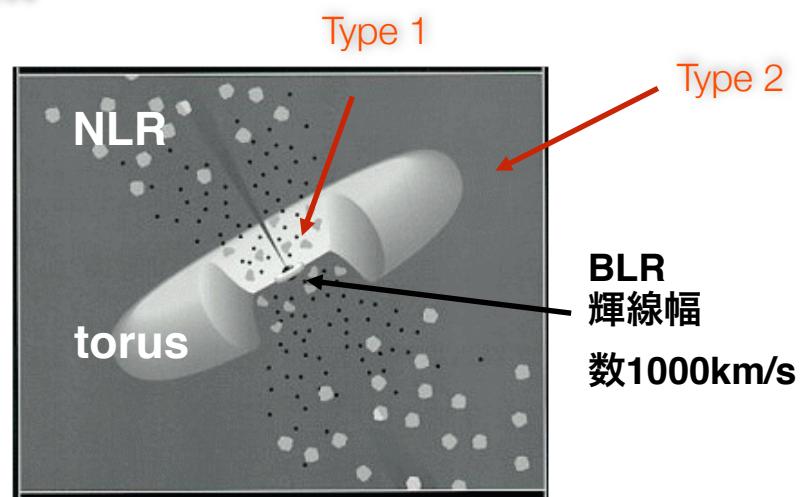
Active Galactic Nuclei (活動銀河核)



The “donut paradigm”

「統一モデル」

a few-10 pc?

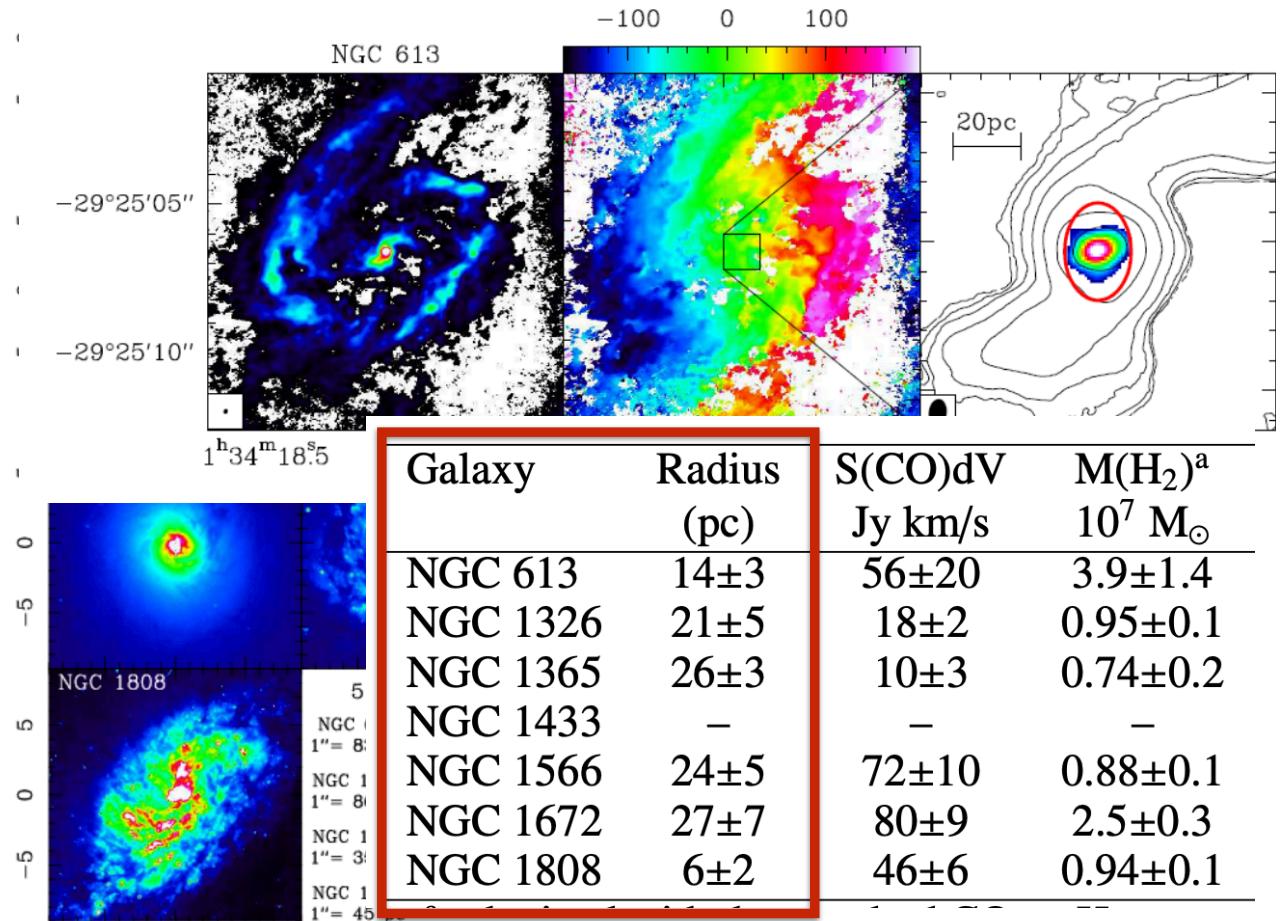


Urry & Padovani (1995)

AGN =

- central BH + accretion disk + broad line region + narrow/coronal line region + obscuring dusty “torus” + (jet)
- A thick torus is proposed to explain AGNs’ spectroscopic features (type-1 and type-2 dichotomy)

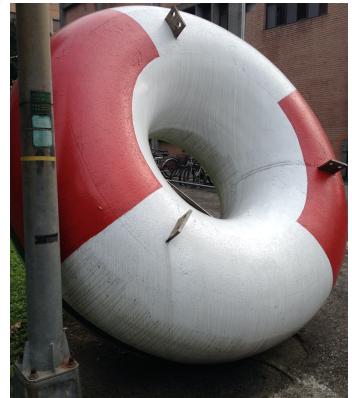
Fraction of type-2 (obscured AGNs) to type-1 (unobscured AGNs) \Rightarrow
the opening angle of the torus



We need to explain the origin of the multi-components & multi-wave length observations of AGNs

Beyond the *donut* paradigm: we suppose that

- The various components in AGNs should be reproduced by **solving basic equations**, by appropriate methods.
- Then, **multi-wave length observational properties** (e.g., intensity distributions, SEDs, obscured fraction etc.) should be naturally reproduced from the numerical results

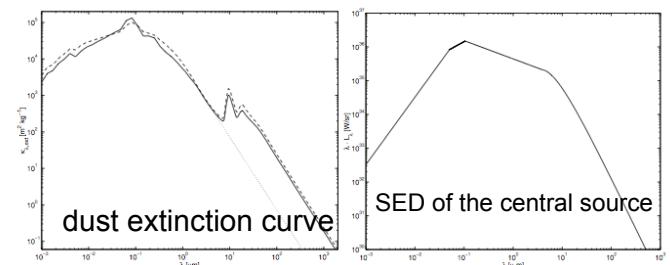


-
- 1) 3-D, time-dependent Radiation-Chemo-Hydrodynamic simulations
 - 2) post-process “pseudo” multi-wave length observations using RT codes
 - 3) Comparison with ALMA and other observations

Gas dynamics irradiated by a central source

Wada '12, '14

- **Non-spherical Central source:**
 - $L_{AGN}(\theta) \propto \cos(\theta)$
 - $L_{AGN} = \{0.01-0.5\} L_{Edd} = 10^{43-46} \text{ erg/s}$
- **3D Cartesian, uniform grid +Ray tracing with 256^3 rays**
 - No symmetry is assumed.
 - direct radiation only (e.g IR emission from dust).
- **Radiation pressure** for dusty gas (Schartmann+05)
 - Frequency dependent dust absorption and AGN SED (for $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$)
- **X-ray heating** (Maloney+96, Meijerink & Spaans06, Blondin94)
 - Coulomb heating
 - photo-ionization for H and H₂
 - Compton heating
- * **Non-equilibrium XDR chemistry w/ 20 species]**



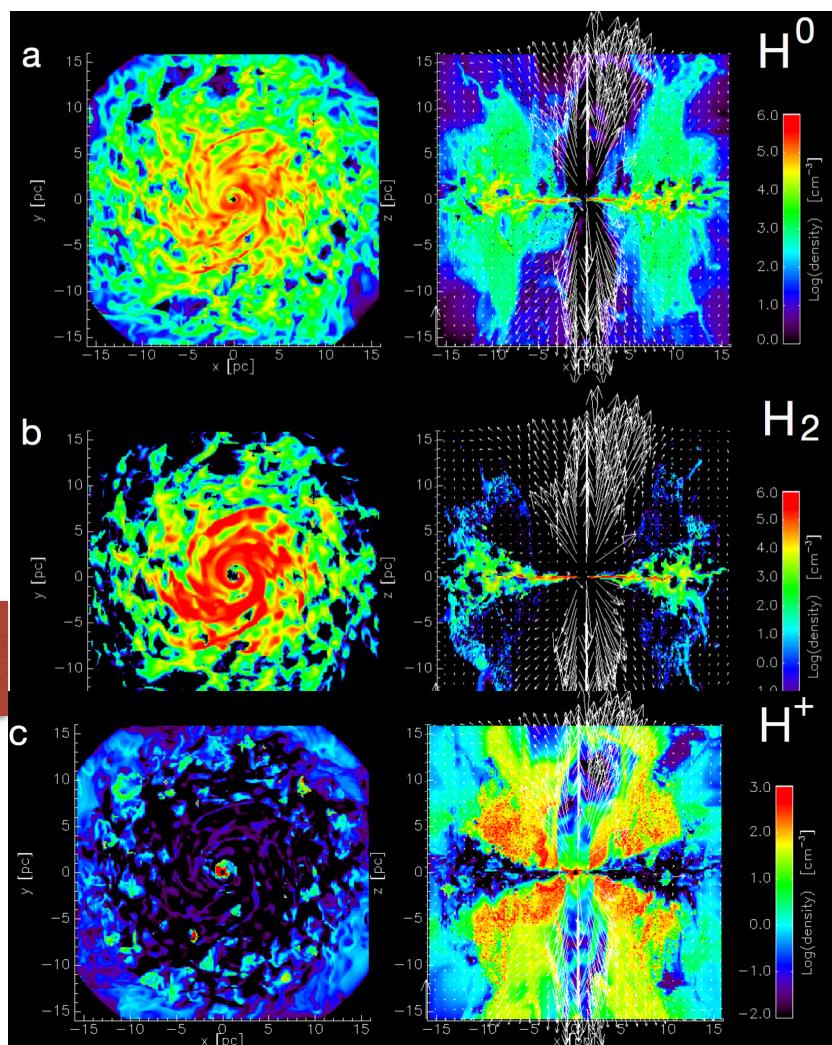
Three phases of hydrogen in “radiation-driven fountain”

Model for Circus galaxy

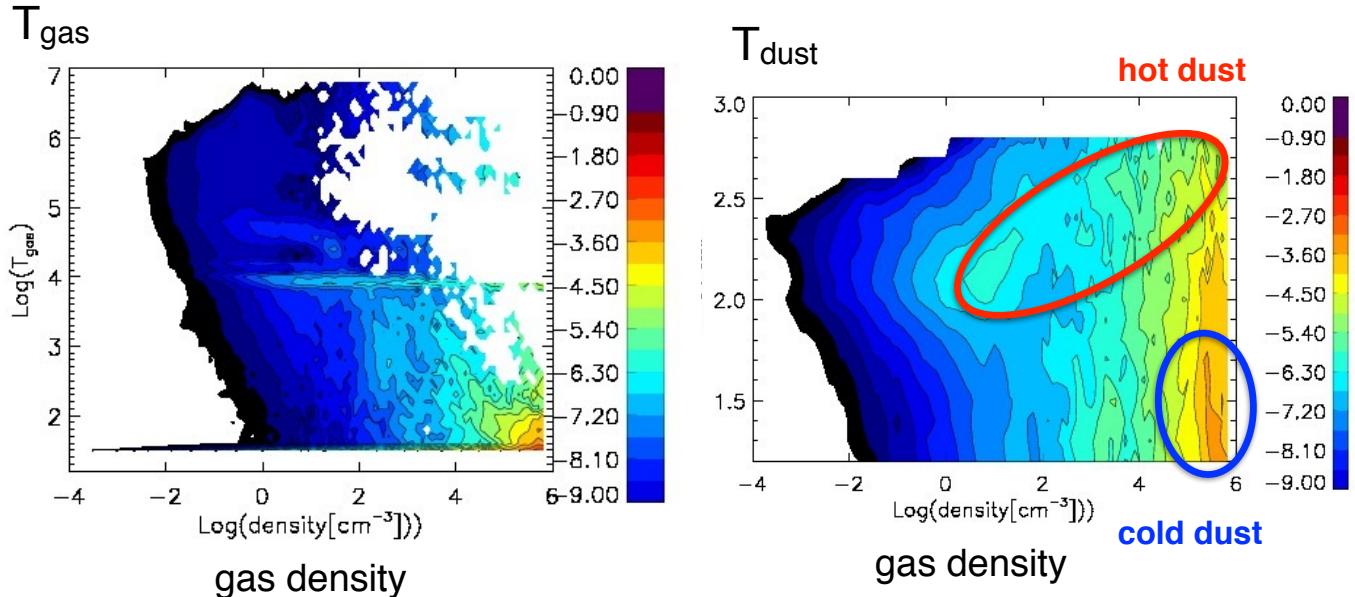
XDR chemistry is included

分子、中性、電離ガスは分布もkinematicsも異なる

KW, Schartmann,
Meijerink (2016)



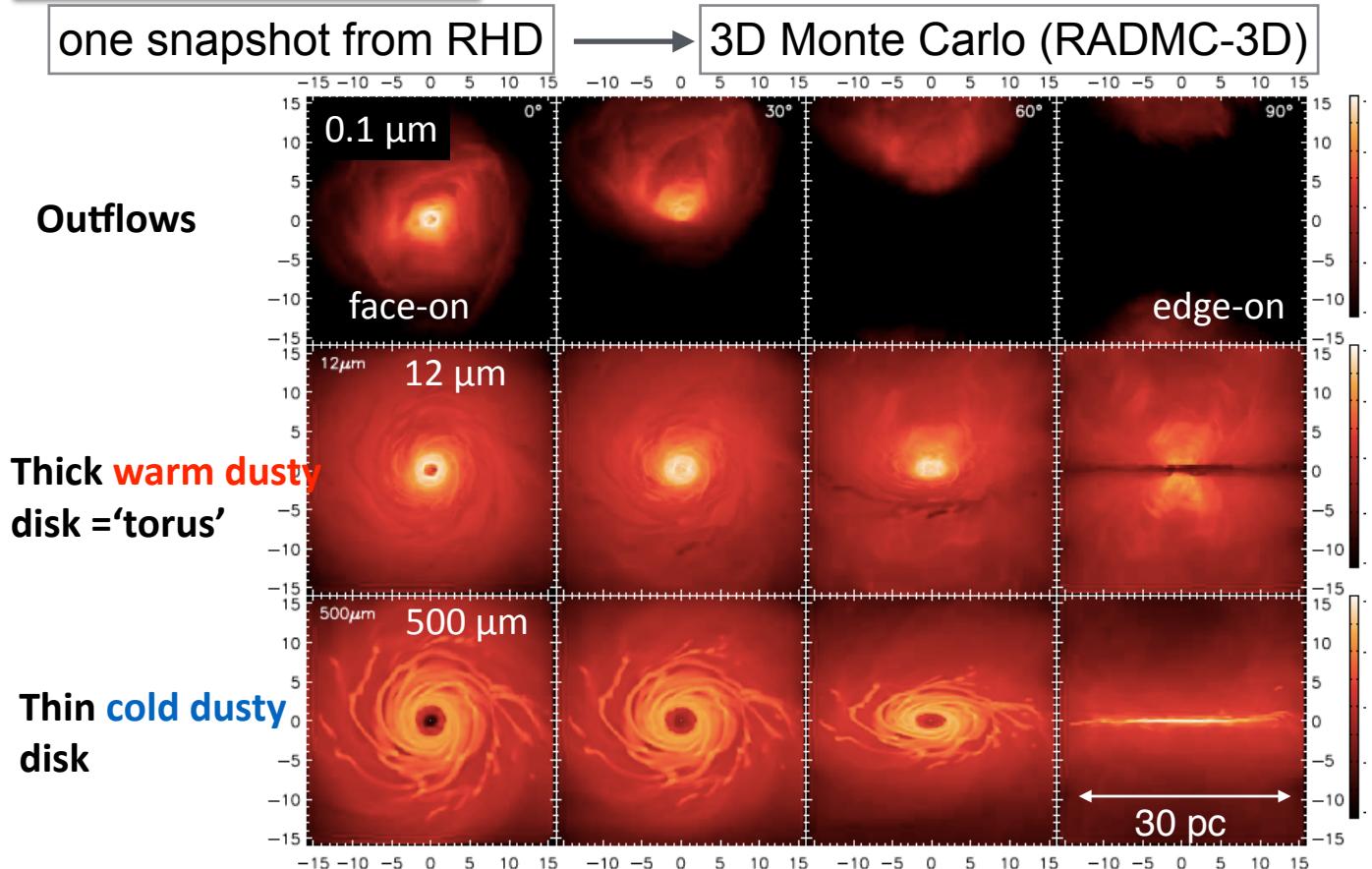
ISM in the fountain is multi-temperature over a wide range of density



11

Observing the fountain

Schartmann, KW, Prieto, Tristram, Burkert (2014)



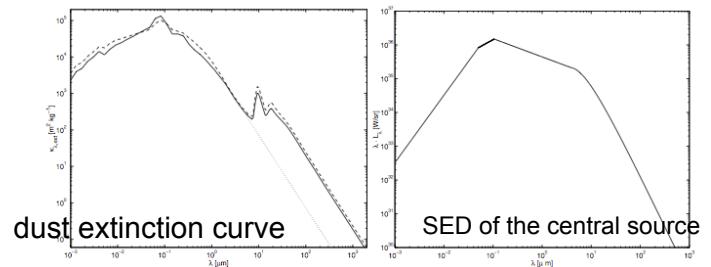
12

dust model

a typical galactic dust model (Schartmann et al. 2005)

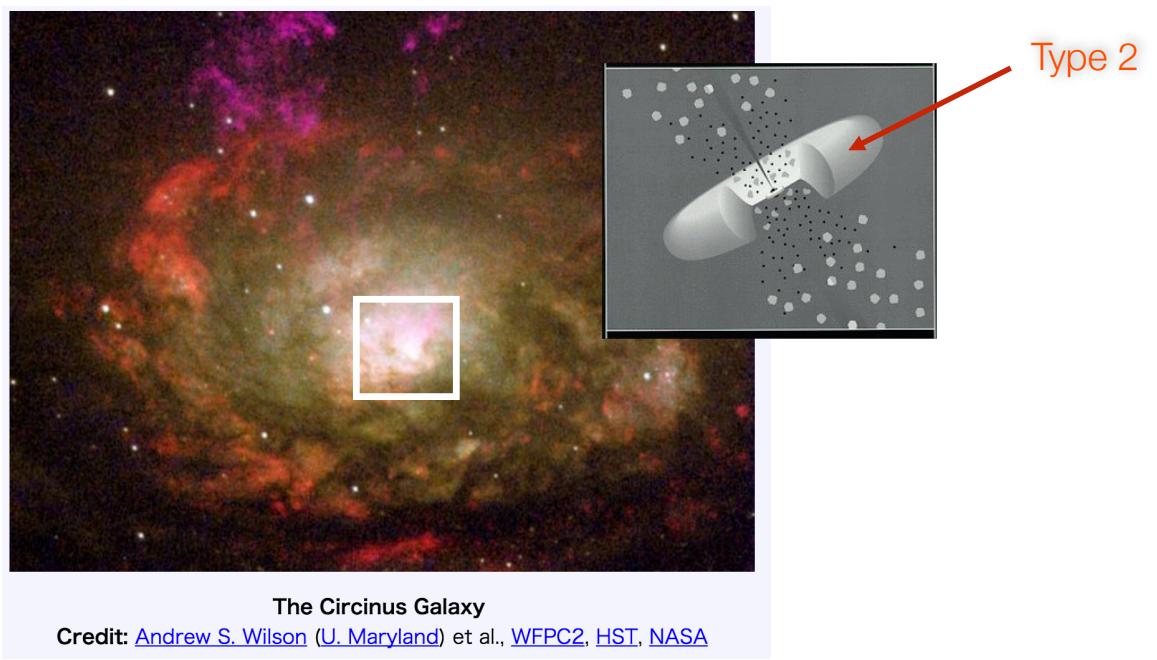
5 different grain sizes for 3 different grain species each:

silicate and the two orientations of graphite grains with optical properties adapted from Draine & Lee (1984), Laor & Draine (1993) and Weingartner & Draine (2001).



Circinus galaxy (type 2 Seyfert galaxy at 4Mpc)

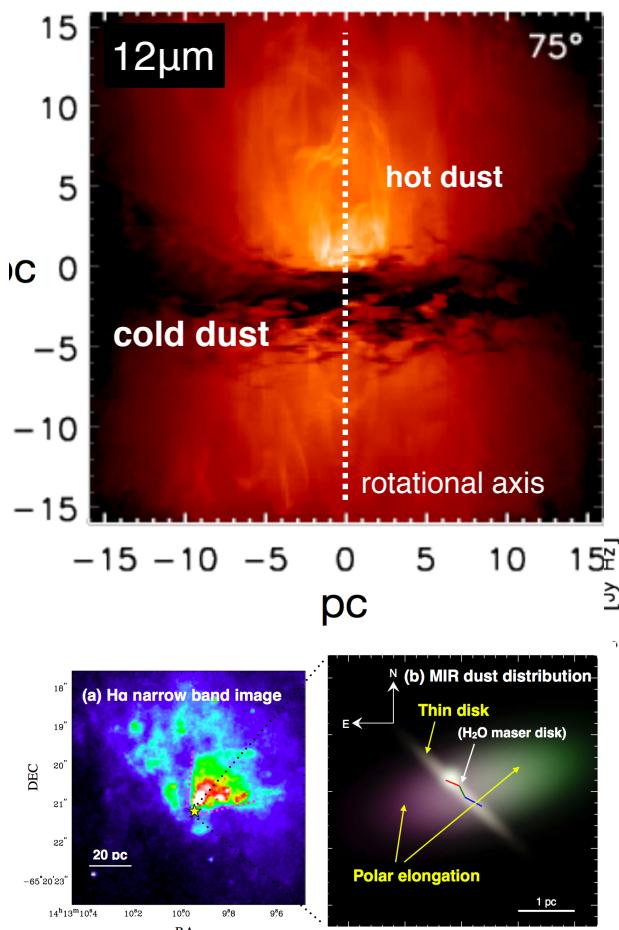
$M_{\text{BH}} = 2 \times 10^6 \text{ Msun}$



yellow: i-band
red: H α

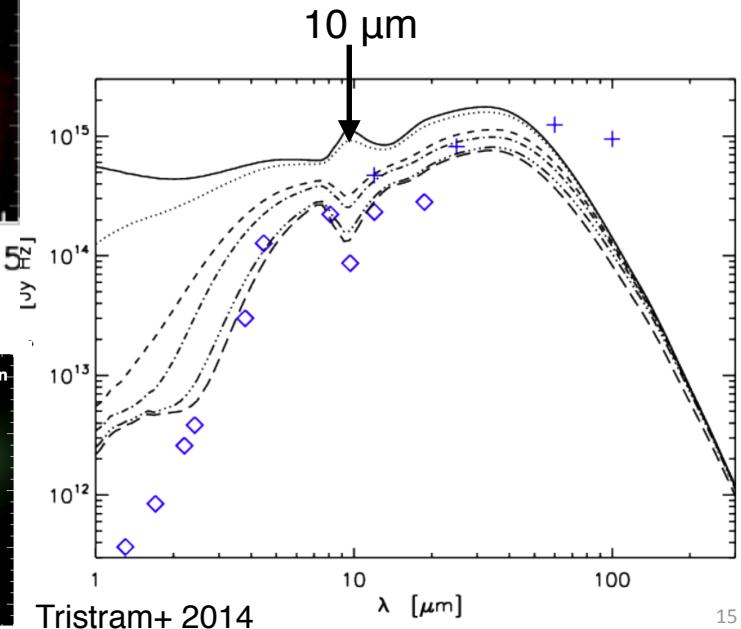
Case study: Circinus galaxy

KW, Schartmann, & Meijerink (2016)



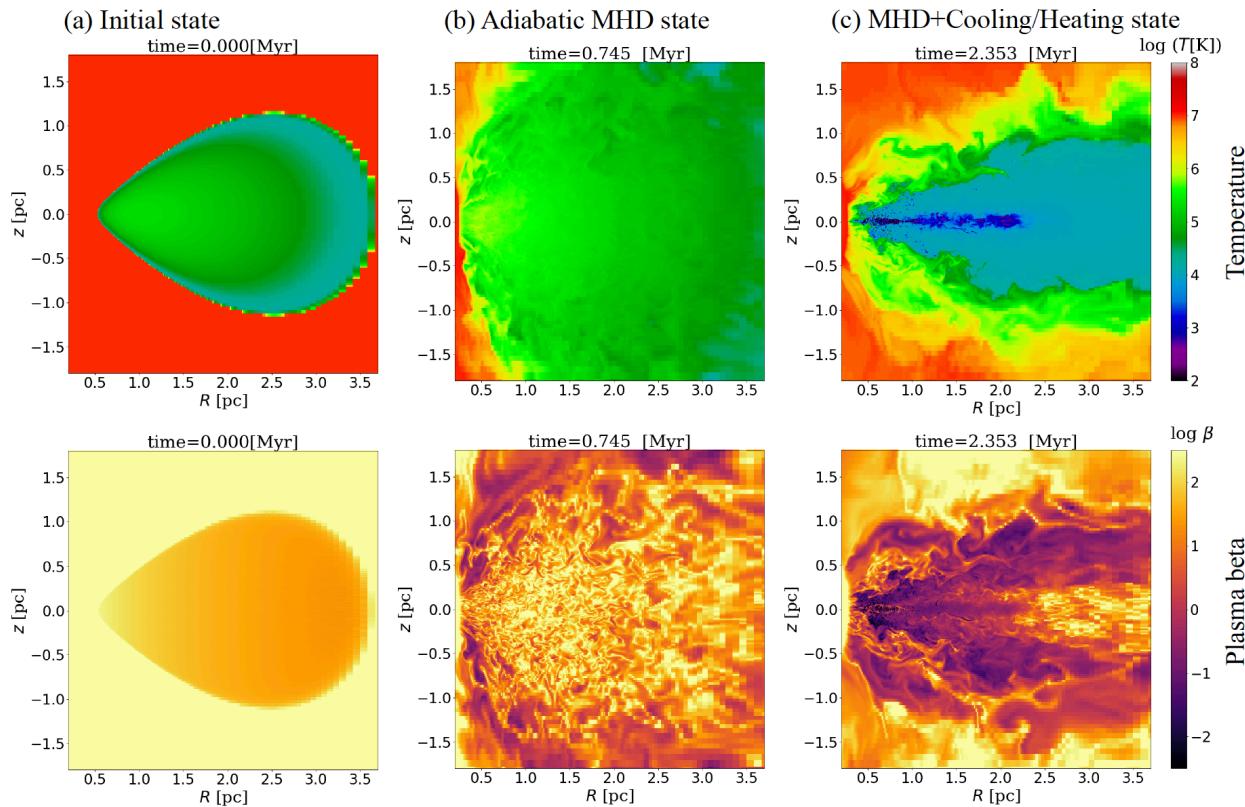
SED and 10 μm absorption are reproduced for **viewing angle** $> 75\text{deg}$

Nuclear disk should be close to edge-on!

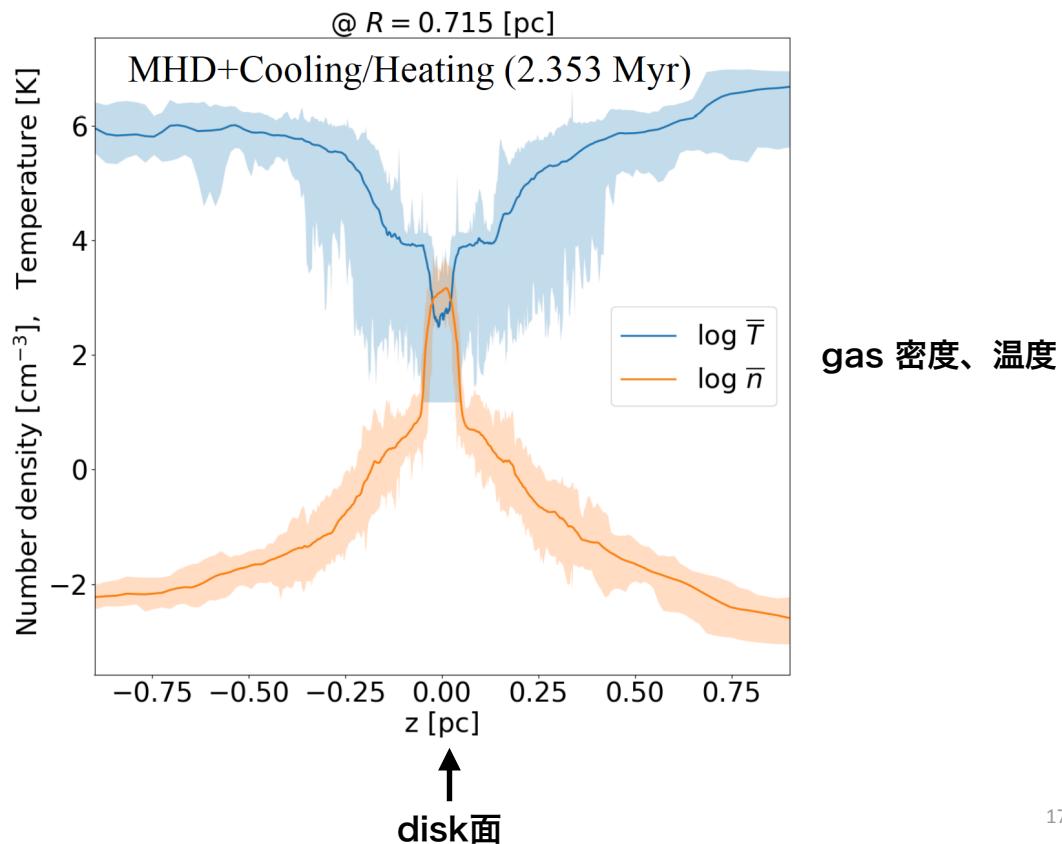


3D MHD simulation of the torus

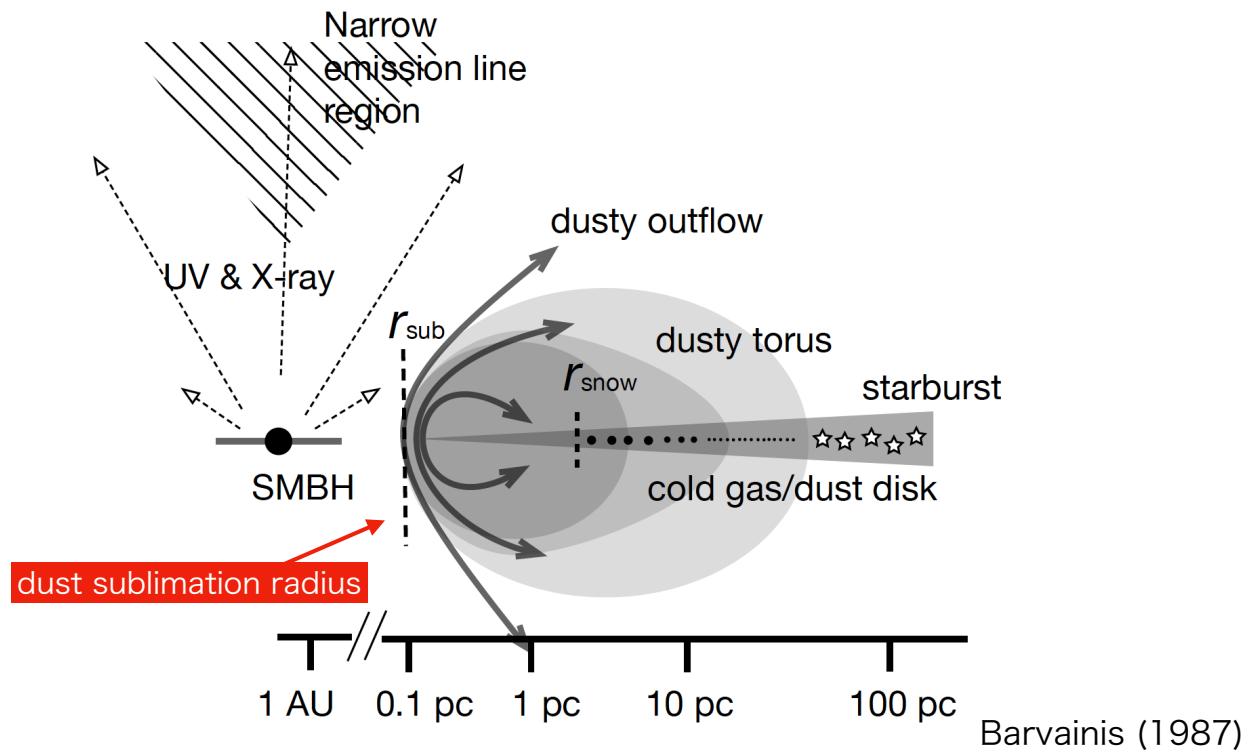
Kudoh, KW, Norman, in prep.



torus赤道面付近に cold, dense layer



structure of the AGN torus



$$r_{snow} \approx 4.7 \text{ pc} (L_X / 1.3 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1})^{1/2} (T_{ice} / 170 \text{ K})^{-2.8} a_{d,0.1}^{-1/2}$$

accretion diskからの輻射=非等方 \Rightarrow 円盤部分は $T_{dust} < 100 \text{ K}$

原始惑星系円盤（星の周り）での惑星形成の標準シナリオ

- 1) $0.1 \mu\text{m}$ ($\sim 10^{-15} \text{ g}$) のダスト (monomer) が衝突合体
- 2) mm- cm サイズまで成長、円盤面に沈殿
- 3) 沈殿層の自己重力分裂 or 合体成長
- 4) kmサイズ微惑星(planetesimal)形成
- 5) 微惑星同士の衝突・合体 or 微惑星円盤の自己重力不安定

=> $\sim 10^{3-4} \text{ km}$ ($M_E = 6 \times 10^{27} \text{ g}$) 岩石・氷惑星

質量で40桁以上も成長！

さまざまな"barrier"

- ・ダスト面の乱流巻き上げ
- ・メートルサイズ（巨視的）のダストの中心星への落下
- ・巨視的ダスト同士の衝突で合体できるのか？

⇒ 実際に惑星はできている！

x

原始惑星系円盤とAGN円盤の共通点 = ダスト円盤がある

星の周りで起こっているミクロプロセスは、別の環境でも起こるはず！

相違点

Table 1. Differences between the proto-planetary disk and AGN

	proto-planetary disk	circumnuclear disk
mass of the central object	$M_\star \sim M_\odot$	$M_{BH} \sim 10^{6-9} M_\odot$
luminosity of the central source	$\sim L_\odot$	$10^{10-12} L_\odot$
spectrum of the central source	black body	power law
size of the dusty disk	10-100 AU	0.1 pc - 100 pc
inner edge of the dusty disk	-	dust sublimation radius (sub pc ~ pc)
gas mass	$\sim 0.01 M_\star$	$\sim 0.1 M_{BH}$
dust mass	$\sim 10^{-4} M_\odot$	$\sim 10^3 - 10^6 M_\odot$
rotational period	$\sim 100 \text{ yr}$	$\sim 10^6 - 10^8 \text{ yr}$
life time	$\sim 10^6 \text{ yr}$	$10^7 - 10^8 \text{ yr}$
drag law	Epstein/Stokes	Epstein
mean free path of gas	$\sim 1-100 \text{ cm}$	$\sim 10^{12} \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \text{ cm}$



Planet Formation around Supermassive Black Holes in the Active Galactic Nuclei

Keiichi Wada^{1,2,3} , Yusuke Tsukamoto¹ , and Eiichiro Kokubo⁴ ¹ Kagoshima University, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima 890-0065, Japan; wada@astrophysics.jp² Ehime University, Research Center for Space and Cosmic Evolution, Matsuyama 790-8577, Japan³ Hokkaido University, Faculty of Science, Sapporo 060-0810, Japan⁴ National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka 181-8588, Japan

Received 2019 August 17; revised 2019 October 2; accepted 2019 October 9; published 2019 November 26

dustの付着成長による

growth time scale (Tsukamoto+ 2017; Okuzumi+2012; Ormel&Cuzzi 2007)

$$t_{grow} \equiv (d \ln m_d / dt)^{-1}$$

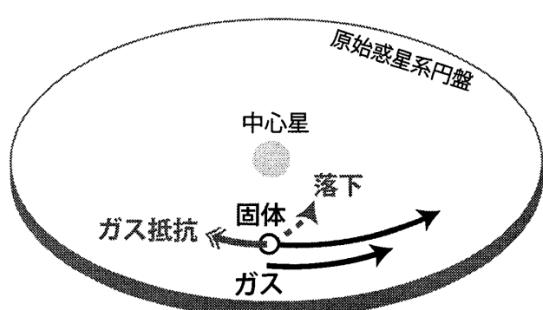
$$= \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} \frac{H_d \rho_{int} a_d}{\Delta v \Sigma_d} = \frac{8(2\pi)^{3/2}}{3} \frac{H_g}{\sqrt{\alpha} R_e^{1/4} c_s f_{dg}}$$

$$\sim 6.3 \times 10^7 \text{ [yr]} c_{s,1}^{-1} \left(\frac{f_{dg}}{0.01} \right)^{-1} \left(\frac{H_g}{0.1 \text{ pc}} \right) \left(\frac{\alpha}{0.1} \right)^{-1/2} \left(\frac{R_e}{10^4} \right)^{-1/4}$$

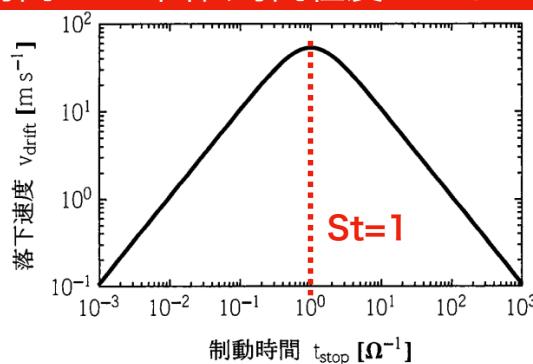
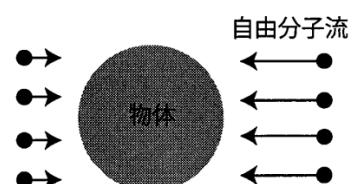
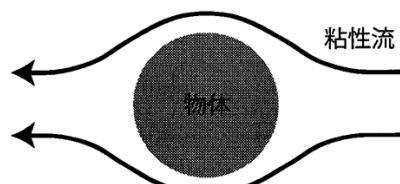
AGN life time程度、宇宙年齢よりは短い

ダストはガスによる抵抗（風）を受けて
速度が落ちる => 終端速度に達する時間 = 制動時間

奥住 (2014)

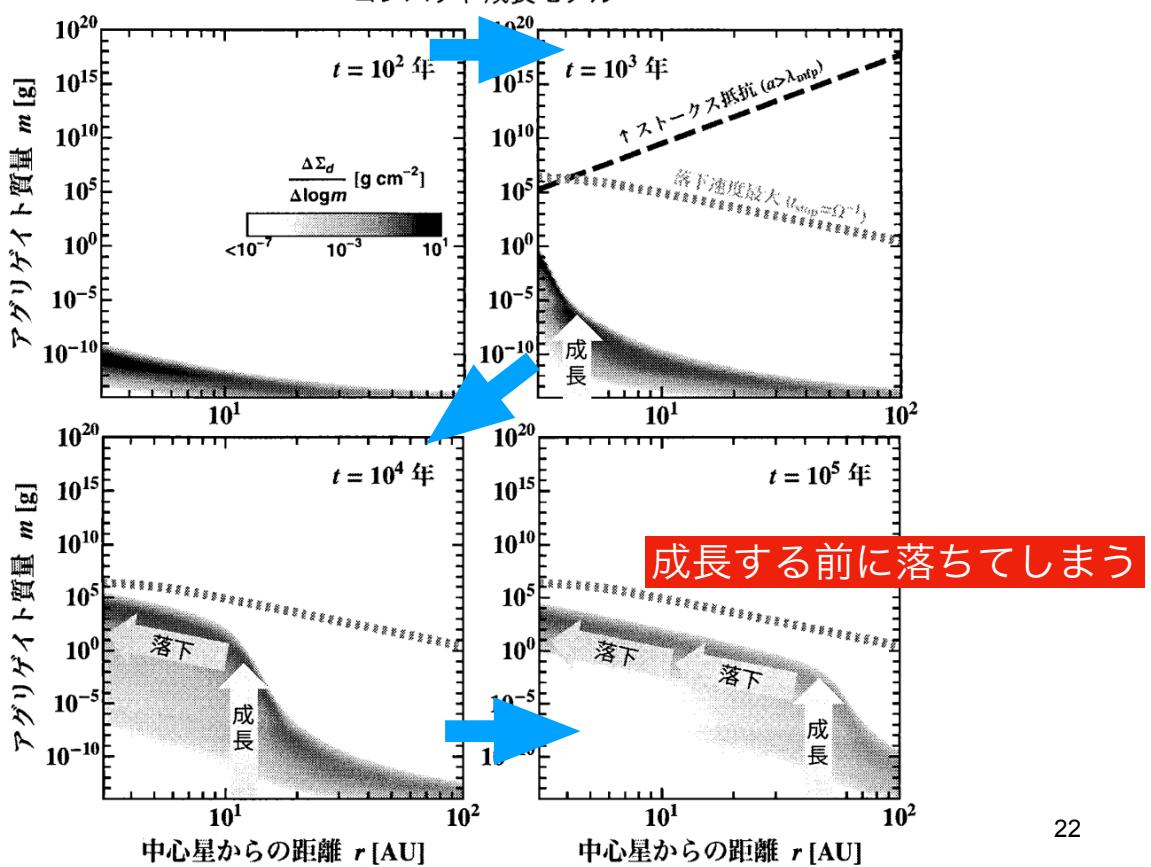


制動時間 = 回転時間程度のときに、一番落下する

図1：上図：原始惑星系円盤におけるダストの中心星方向の落下を表す概念図。下図：ダストの落下速度 v_{drift} をダストの制動時間 t_{stop} の関数として表したもの。制動時間はケプラー角速度の逆数 Ω^{-1} で規格化している。(a) エプスタイン抵抗 ($a \ll \lambda_{\text{mfp}}$)制動時間 \propto 内部密度 \times 半径(b) ストークス抵抗 ($a \gg \lambda_{\text{mfp}}$)制動時間 \propto 内部密度 \times (半径) 2 図2：物体にかかるガスの抵抗を表す概念図。ガス抵抗は、(a) 物体のサイズ a がガス分子の平均自由行程 λ_{mfp} に比べて小さいときはエプスタイン則に従い、(b) 逆の場合はストークス抵抗に従う。

dust内部密度=一定 (~1g/cc)のモデル

Okuzumi+2012



22

実際に惑星は多くの星できているのだから、
「バリア」はない？ 何か回避する手段があるはず



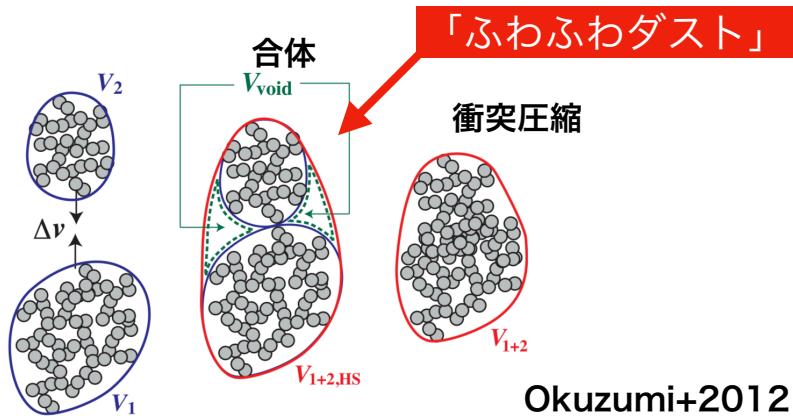
近年の理論的進展

「低密度ダストアグリゲイト」の形成
(Okuzumi+ 2012 ; Katayama+2012)

$$\text{Epstein law: } t_{stop} \propto \rho_{int} a_d$$

内部密度が小さい

- stopping time 小さい (ガスと一緒に運動)
- 中心星に落下しにくい
- 時間が稼げる
- km sizeの微惑星に成長できる



Okuzumi+2012

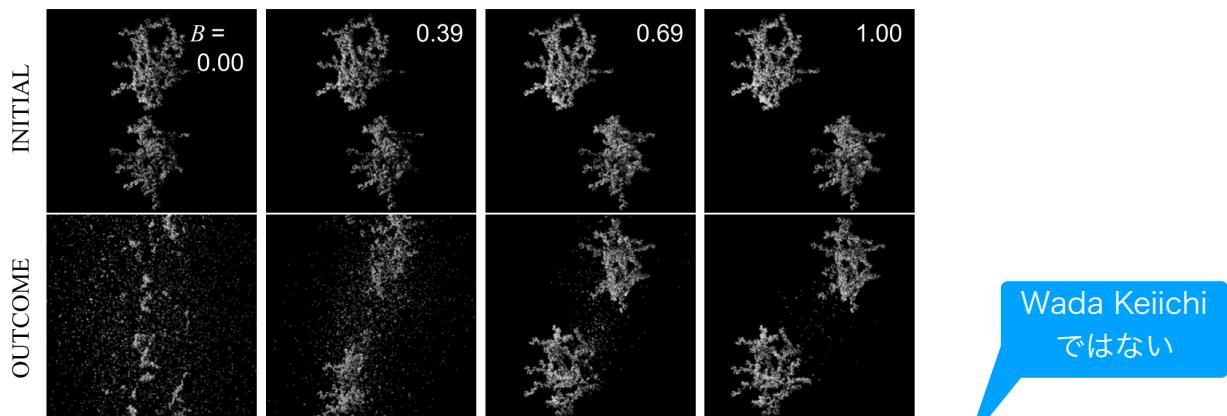
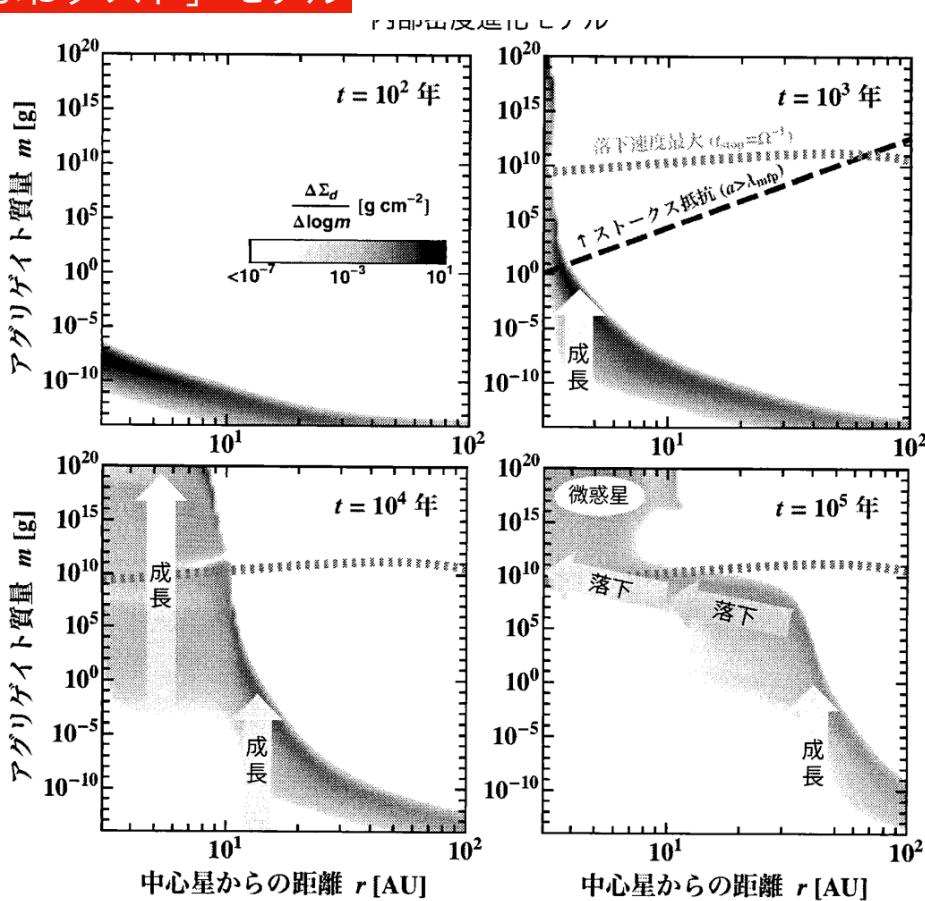


Figure 3. Same as Figure 2 but for BCCA clusters consisting of 8192 ice particles.

Wada, Koji+2009

内部密度が進化するモデル 「ふわふわダスト」モデル

Okuzumi+2012



AGNの場合 → ずっとEpstein

$$\begin{aligned}
 S_t &= \frac{\pi \rho_{int} a_d}{2 \Sigma_g} \\
 &= \frac{\pi \rho_{int} a_d (\pi G Q_g)}{2 c_s \Omega_K} \\
 &\sim 1.5 \times 10^{-5} \rho_{int,1} a_{d,0.1} c_{s,1}^{-1} r_1^{3/2} M_{BH,6}^{-1/2} Q_g,
 \end{aligned}$$

$t \sim 10^7$ yr
 $St \ll 1$

$$\begin{aligned}
 v_{r,d} = \frac{2S_t}{1 + S_t^2} \eta v_K &\ll v_K \\
 \eta \equiv -\frac{1}{2} \frac{c_s^2}{v_K^2} \frac{d \ln P}{d \ln r} &\sim 2 \times 10^{-5} M_{BH,7}^{-1} c_{s,1}^2
 \end{aligned}$$

radial velocity 非常に小さい & disk 大きい
 \Rightarrow porousでなくとも落下があまり問題にならない

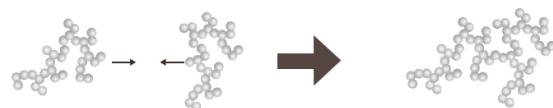
ミクロプロセス ⇒ (主に日本の) 惑星形成理論論文を参考に

- Tsukamoto, Okuzumi, Kataoka 2017
- Okuzumi et al. 2000, 2012
- Kataoka et al, 2012; 2015
- Ormel & Cuzzi 2007
- Suyama et al. 2012
- Michikoshi & Kokubo 2016, 2017
- Wada, Tanaka, Suyama 2009
- Sato, Okuzumi, Ida 2016
- ...

ダスト(塵)の4つの成長モード

Kataoka+2013

(a) Hit-and-stick ぶつかってくっつく



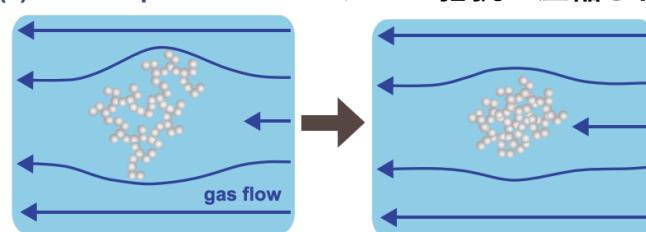
(b) Collisional compression ぶつかって圧縮される



(c) Gas compression

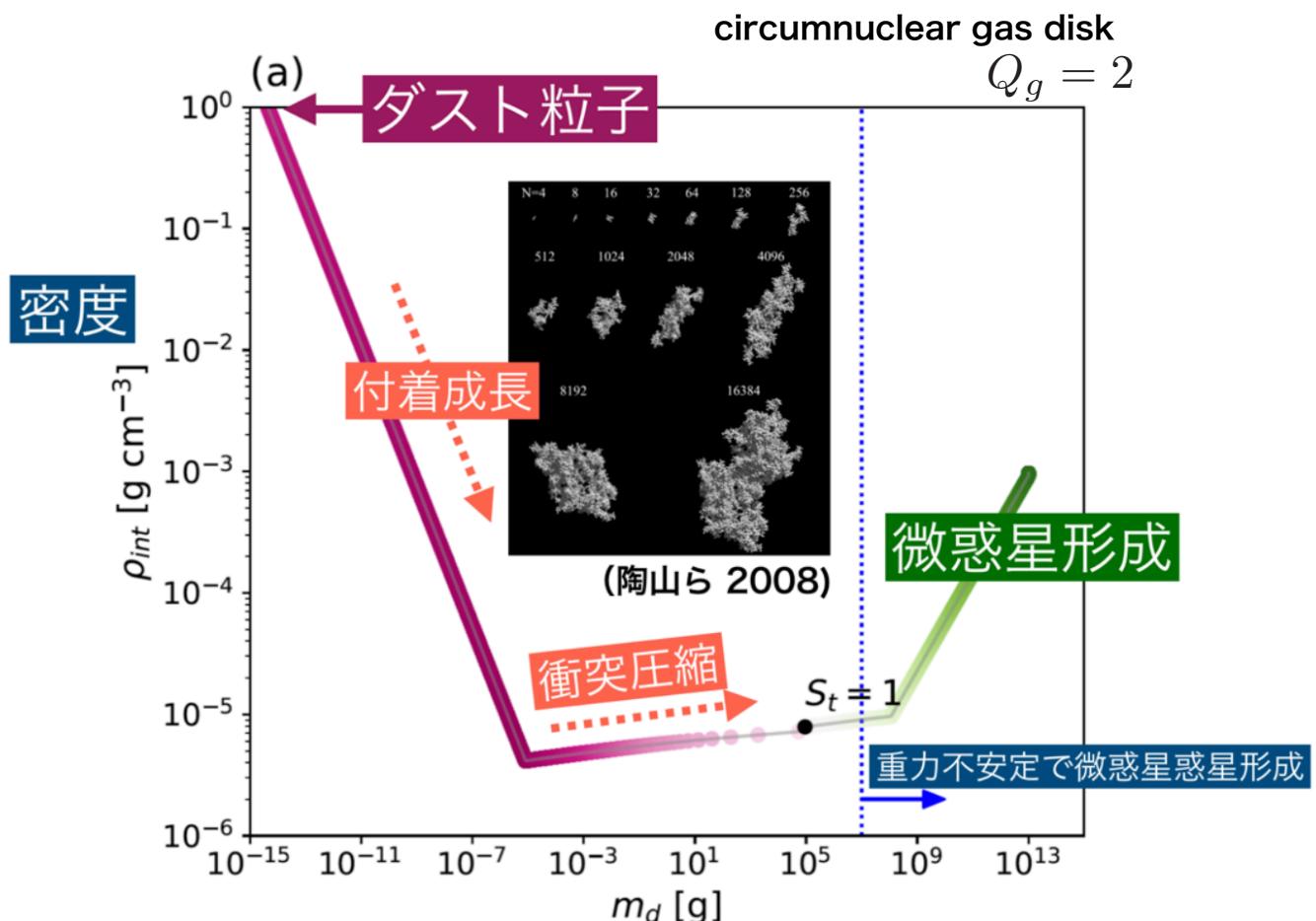
ガスの抵抗で圧縮される

⇒ AGN環境では
あまり効かない



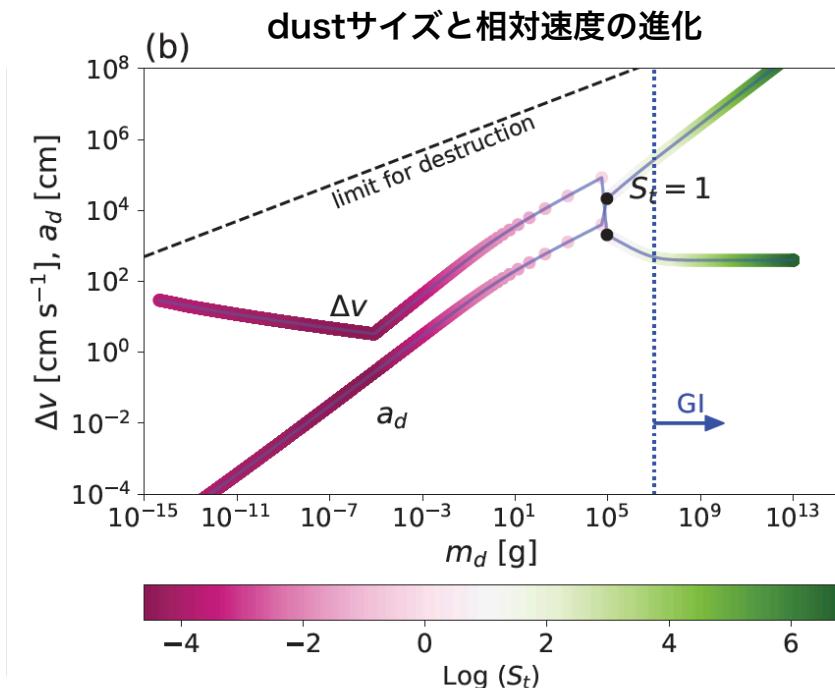
(d) Self-gravitational compression

自己重力でつぶれる



ダスト集合体の質量

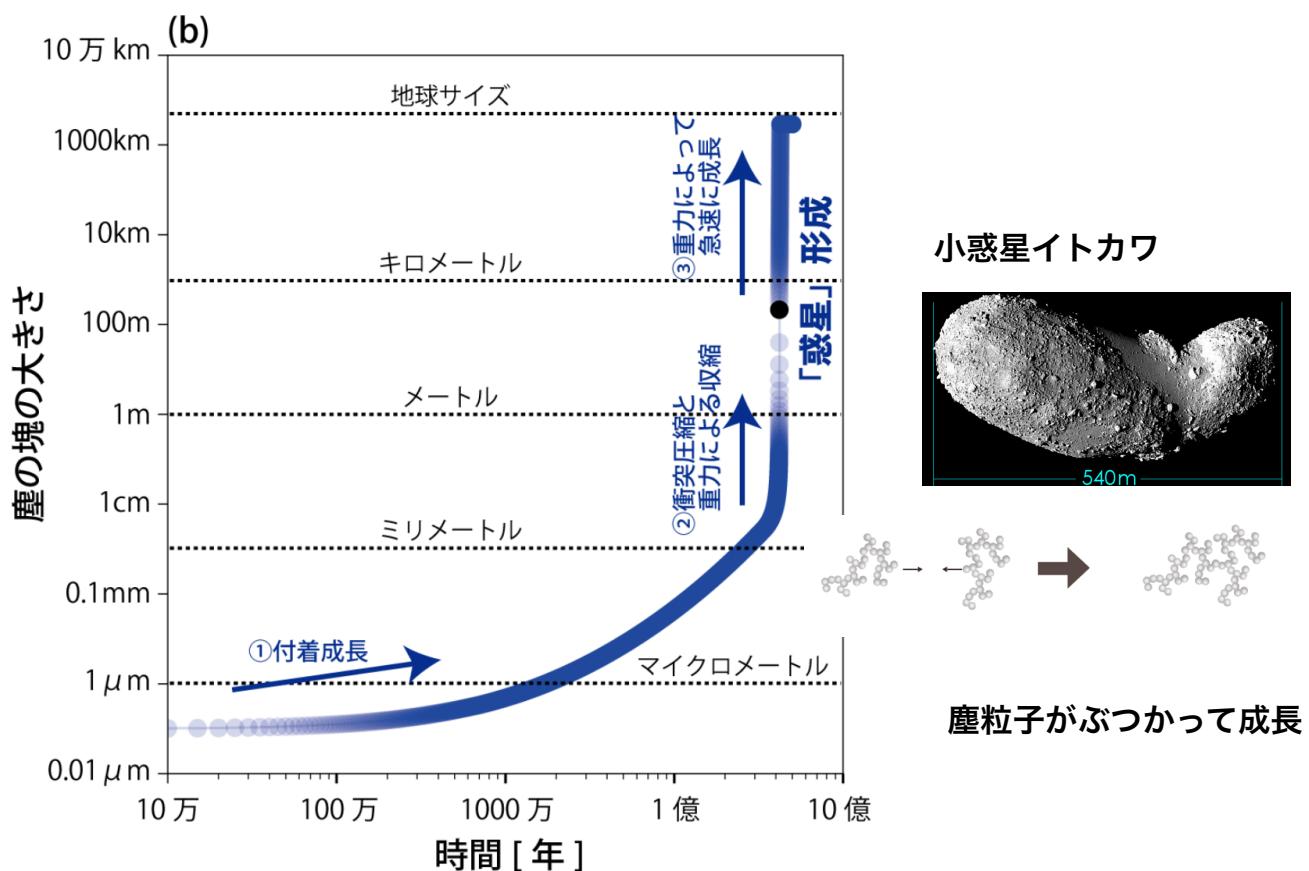
KW, Tsukamoto, Kokubo (2019)

$M_{BH} = 10^7 M_\odot, \alpha = 0.1$


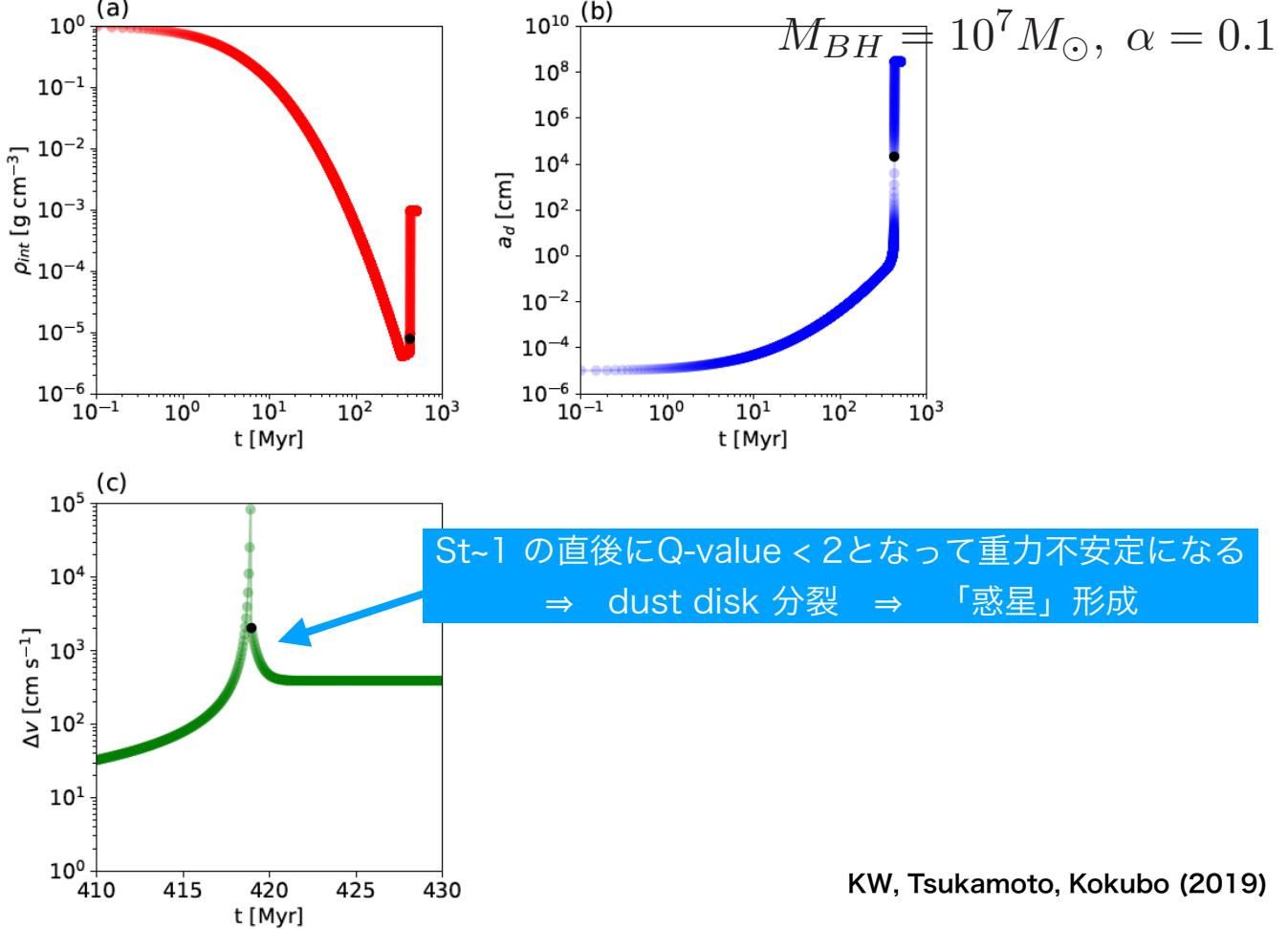
$$\alpha \equiv \frac{\dot{M}_g}{3\pi \Sigma_g c_s^2 / \Omega_K} = \frac{\dot{M}_g G}{3c_s^3} Q_g$$

alpha-parameter: diskの乱流度を表すパラメータ (Sakura & Sunyaev 1973)

ミクロンサイズのダストから「惑星」へ



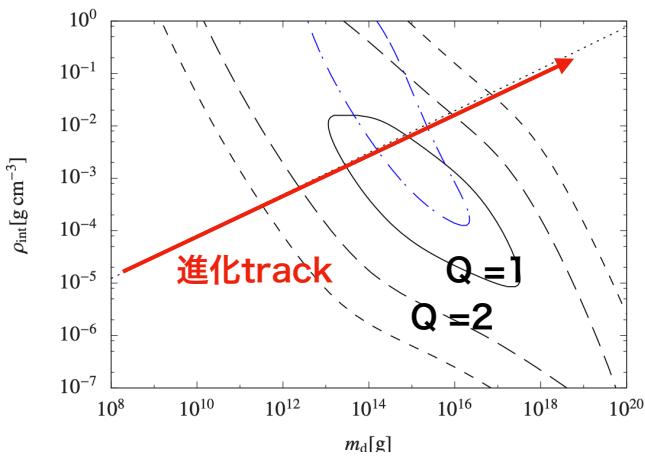
dust 内部密度、サイズ、相対速度の時間進化 (r_{snow} の外側)



Evolution of aggregates' velocity

Michikoshi, Kokubo 2016,2017

$$\frac{dv_d^2}{dt} = \left(\frac{dv_d^2}{dt} \right)_{\text{grav}} + \left(\frac{dv_d^2}{dt} \right)_{\text{turb,stir}} + \left(\frac{dv_d^2}{dt} \right)_{\text{turb,grav}} - \left(\frac{dv_d^2}{dt} \right)_{\text{coll}} - \left(\frac{dv_d^2}{dt} \right)_{\text{drag}} = 0.$$



Michikoshi, Kokubo 2016,2017

“Planet” formation followed by the gravitational instability of the aggregate disk

$$\lambda_{GI} = 4\pi^2 G \Sigma_d / \Omega_K^2 \sim 10^{-3} \text{ pc}$$

$$m_{pl} \simeq \lambda_{GI}^2 \Sigma_d \sim 10 M_E$$

$$N_{pl} \sim 2\pi r / \lambda_{GI} \sim 10^4 \text{ 個} \quad \text{r_snow付近の軌道上に}$$

10 地球質量くらいの氷「惑星」が多数形成？

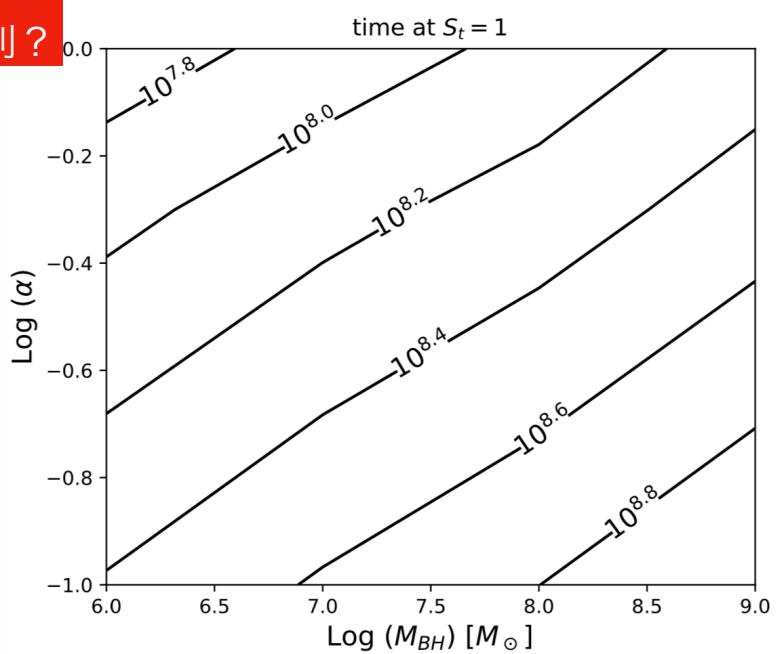
「惑星」形成までの時間(≈ St~1になる時間) の α 、M_{BH}依存性

10⁶ Msun SMBH, $\alpha \sim 0.5 \rightarrow 10^8$ yr以下

低光度AGN

あるいは形成中のSMBHが有利？

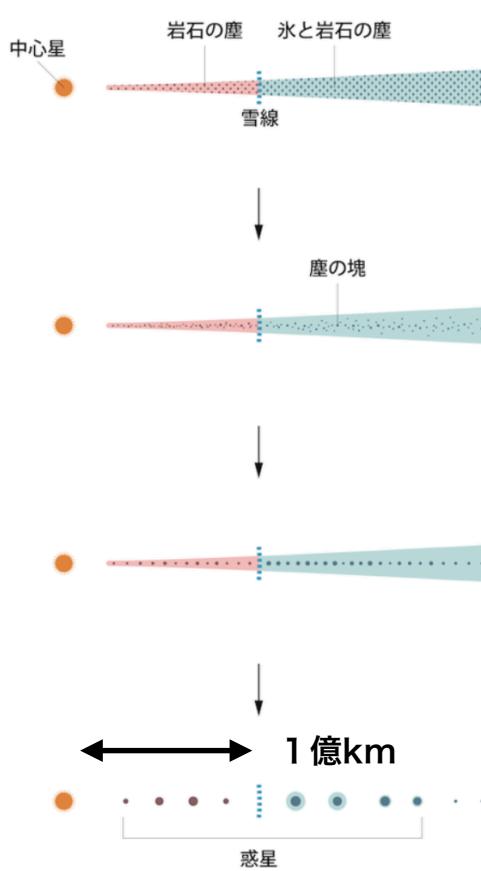
$$\alpha \equiv \frac{\dot{M}_g}{3\pi \Sigma_g c_s^2 / \Omega_K} = \frac{\dot{M}_g G}{3c_s^3} Q_g$$



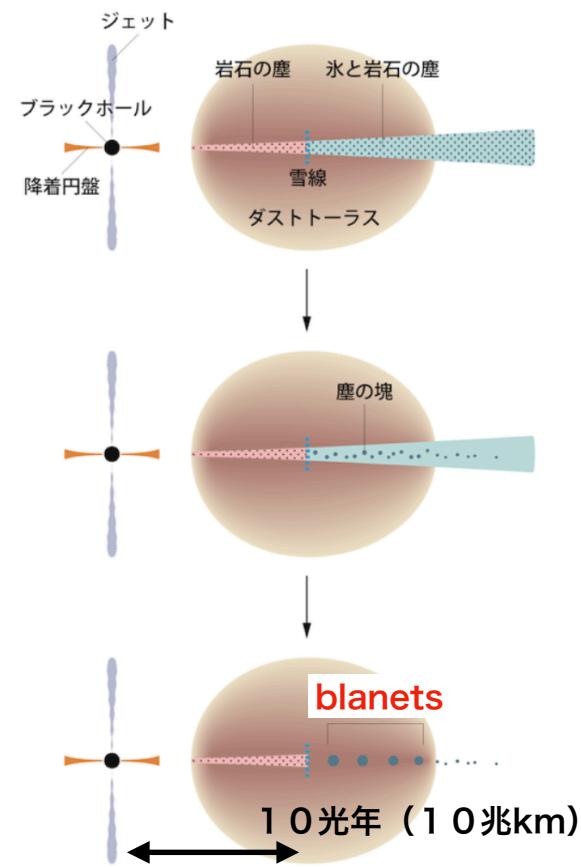
名前を付けてみた planet = black hole planet プラネット



プラネットの形成



プラネットの形成



まとめ

- 系外惑星は普遍的 (>4000個発見)
⇒いろいろ困難はあっても、普遍的な形成プロセスがあるはず
⇒ミクロプロセス（ダストの合体成長）はどこでも同じなはず
⇒AGN環境にはダストがたくさんある
⇒現状の「有力そうな」惑星形成理論を適用してみた

⇒新しい天体種族 (planets) がSMBHのまわりにあるかも！？

惑星までできなくても、dust 進化はありそう (AGN業界ではあまり考えられていない)

課題

- radial/z 方向のgas/dust advection の影響?
(形成を促進する方向?)
- 亂流の影響? (形成を阻害する?)
- St~1付近、衝突 (数100m/s)で破壊されないか?
(普通の惑星形成でも問題)
⇒ 最後はGIなら破壊されてもよい?
- 「ふわふわダスト」以外の素過程の場合には?

課題：どうやって見つける？

- accretion disk 掩蔽？ (大口径X線望遠鏡・干渉計)
- (遠赤外) SED変化？
- Floating Planetで、銀河中心を通る軌道のものを探す？
“planet系”の力学安定性