

pcスケール前後のガス降着
-- トーラス・降着円盤・巨大ブラックホールの成長 --

川口 俊宏 (札幌医科大学)

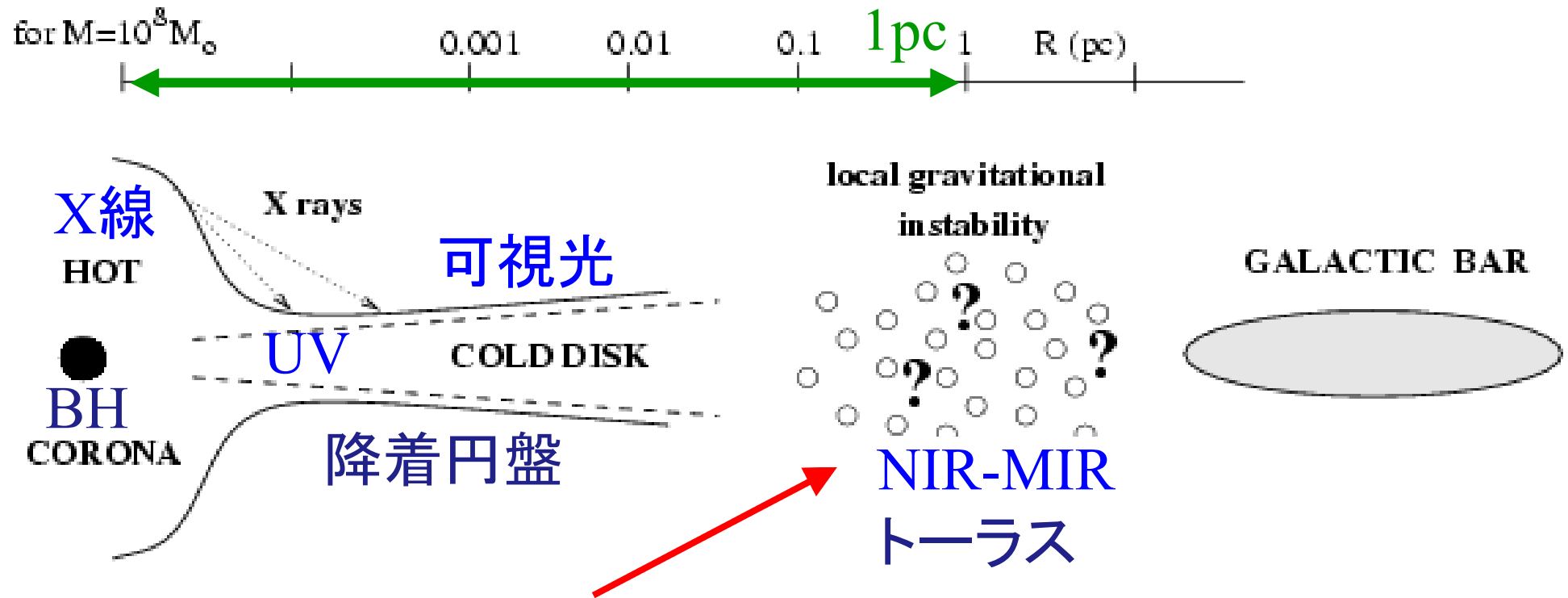
2015年 12月21日(月)

Toshihiro Kawaguchi (Sapporo Medical Univ.)

- ① パーセクスケール・トーラス外縁部の概観
- ② トーラス最内縁部・降着円盤最外縁部、
輝線診断への提言
- ③ 超臨界ガス降着によるブラックホールの成長・分子ガス

① トーラス外縁・最内縁・降着円盤外縁部

Collin (2001): AGN中心部の構造模式図 (~log スケール)

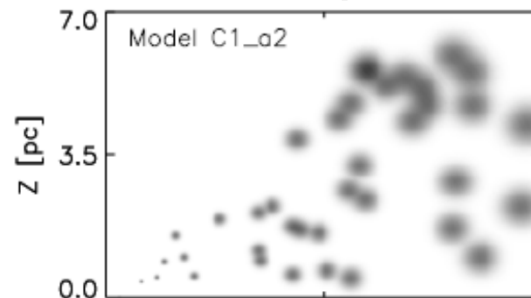


“トーラス” (Toroidal Obscuring Region):
円盤へのガス供給のため池・ダム? BH成長を支配?

①. AGNのダストトーラス = clump の集まり (Krolik & Begelman 1988)

- 偏光度が大きい、狭輝線領域がコーン形状、
1型2型AGNの数比、近・中間赤外線-to-紫外線光度比

- ⇒ torus の厚み大 (aspect ratio = $H/r \sim 1$) ... 少なくともBH近傍で
- ⇒ 厚み方向の速度分散が大を示唆 (\sim 回転速度 $\sim 100\text{km/s}$)
- ⇒ ダストには、存在できる上限の温度($\sim 1500\text{K}$)があるので、
熱速度でこの速度分散を出すのは無理
- ⇒ Dust torus 中のガス・ダスト分布は、smooth ではなく、clumpy
(clump内温度 $\leq 1500\text{K}$, clump間速度分散が大)



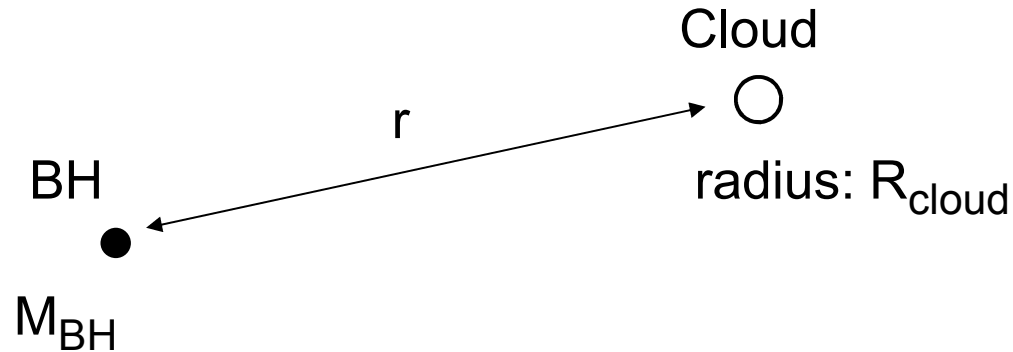
(Dullemond & van Bemmelen 05)

- 中間赤外線光度の等方性も、smoothよりもclumpyを支持

(市川さん)

Clumps in Dusty Torus (1/2)

(Vollmer, Beckert & Duschl 2004; Honig & Beckert 2007)



Conditions:

self grav \geq thermal pressure $\rightarrow M_{cloud} \geq M_{Jeans}$

self grav \geq tidal force by central BH $\rightarrow R_{cloud} \leq R_{tidal}$

marginal clumps:

$$R_{cloud} = \frac{\pi}{3\sqrt{G}} \frac{c_s r^{1.5}}{\sqrt{M_{BH}}} \approx 0.01 pc \left(\frac{c_s}{3 km/s} \right) \left(\frac{r}{1 pc} \right)^{1.5} \left(\frac{M_{BH}}{10^7 M_{\text{太陽}}} \right)^{-0.5}$$

$$M_{cloud} = \frac{\pi}{3G} c_s^2 R_{cloud} \approx 20 M_{\text{太陽}} \left(\frac{c_s}{3 km/s} \right)^3 \left(\frac{r}{1 pc} \right)^{1.5} \left(\frac{M_{BH}}{10^7 M_{\text{太陽}}} \right)^{-0.5}$$

トーラス外縁半径 (1/3): 中間赤外線干渉計観測の結果 (VLTI)
 Size ($12\mu\text{m}$ half-light radius) $\sim 1\text{--}10\text{pc}$ ($1\text{--}100\text{pc}$)

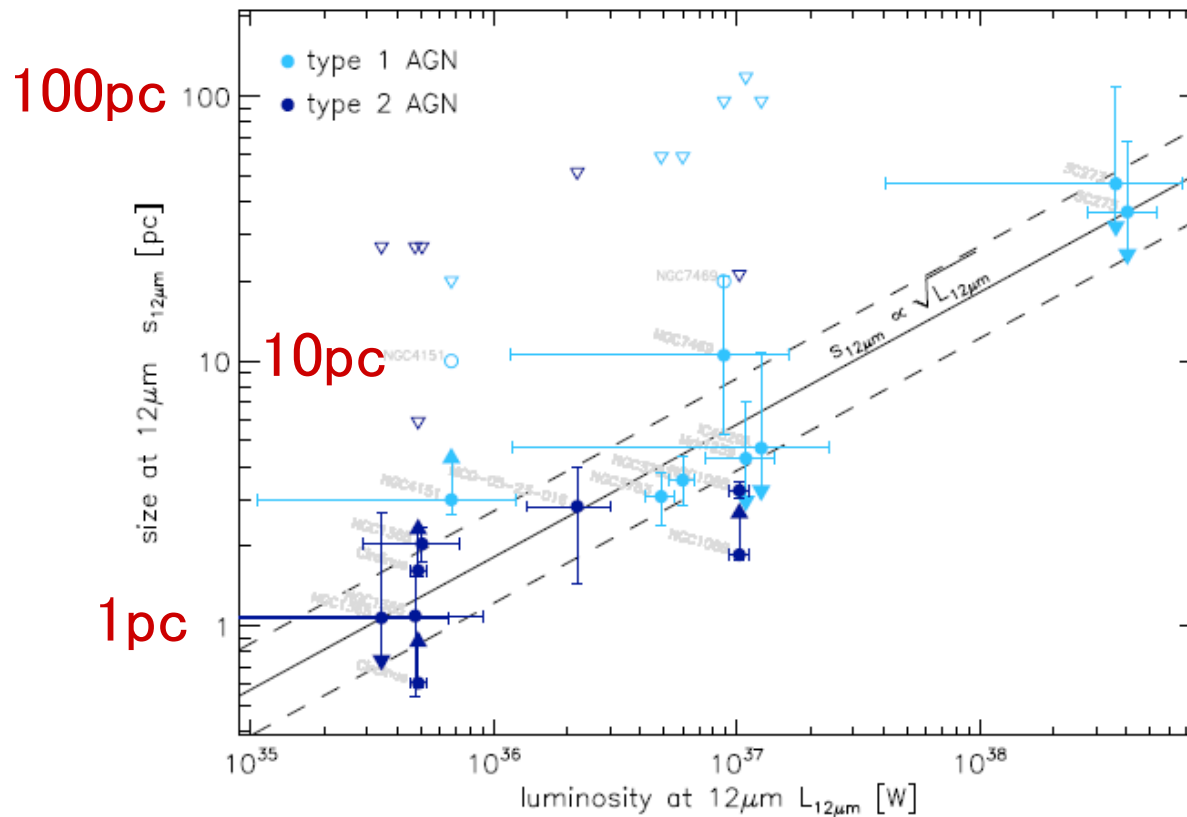
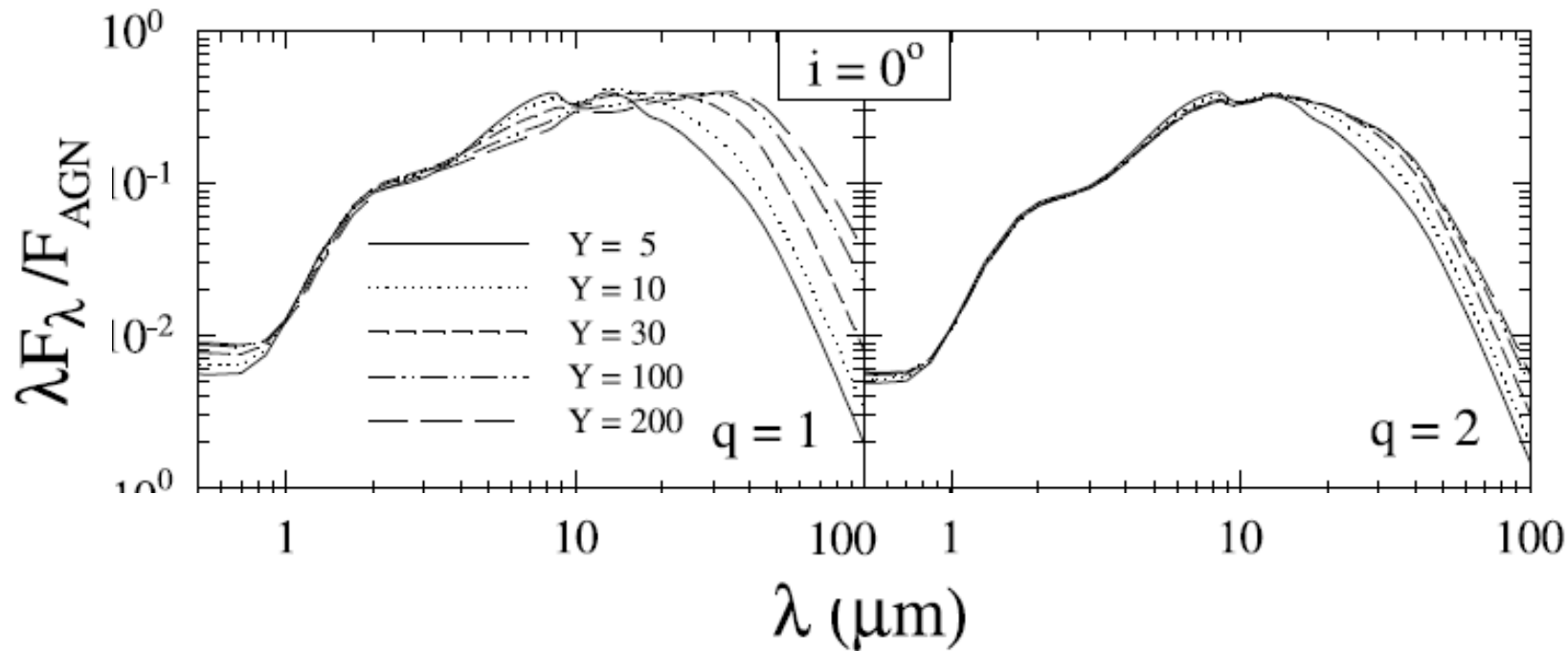


Fig. 8. Size of the mid-infrared emitter as a function of its monochromatic luminosity in the mid-infrared for the AGN studied with MIDI (filled circles with error bars). Upper and lower limits on the size estimates are marked by arrows. The fitted size-luminosity relation for $p = 1.8 \times 10^{-18} \text{ pc (W)}^{-0.5}$ is traced by the black line. The scatter of the measurements around this relation is 0.6 dex (black dashed lines). The physical scales in the respective galaxies corresponding to an angular resolution of 0.3 arcsec (diffraction limit of an 8 m class telescope at $12 \mu\text{m}$) are labelled by open triangles. The size of the resolved emission in NGC 4151 (10 pc) from Neugebauer et al. (1990) and in NGC 7469 (~ 20 pc) from Soifer et al. (2003) are shown by open circles.

(Tristram et al. 2009)

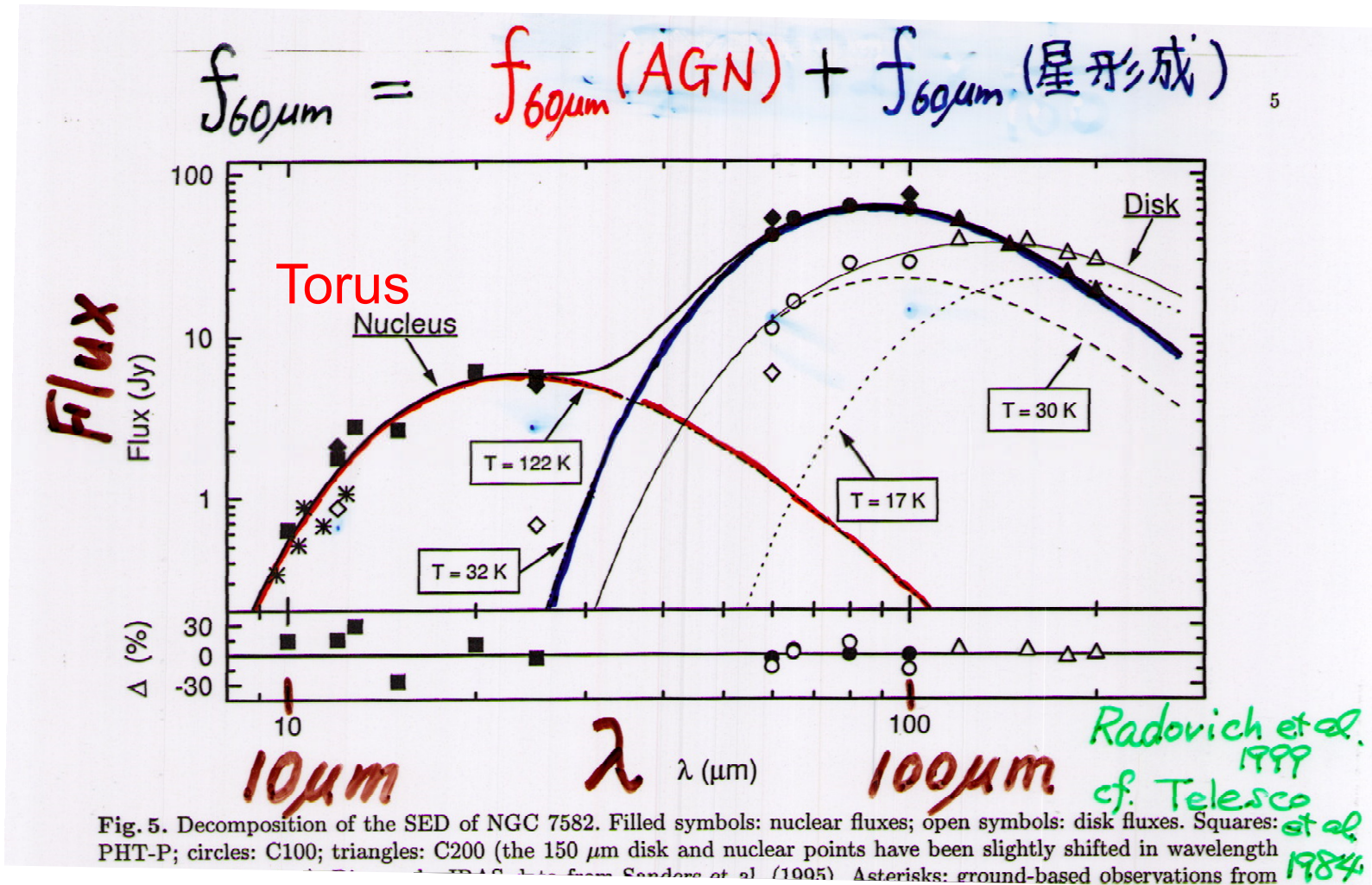
トーラス外縁半径への他の制限は？

Y: 外縁半径/内縁半径の比: 5-200で計算
⇒ > 20 μm のSEDに差が出る



(Nenkova+08)

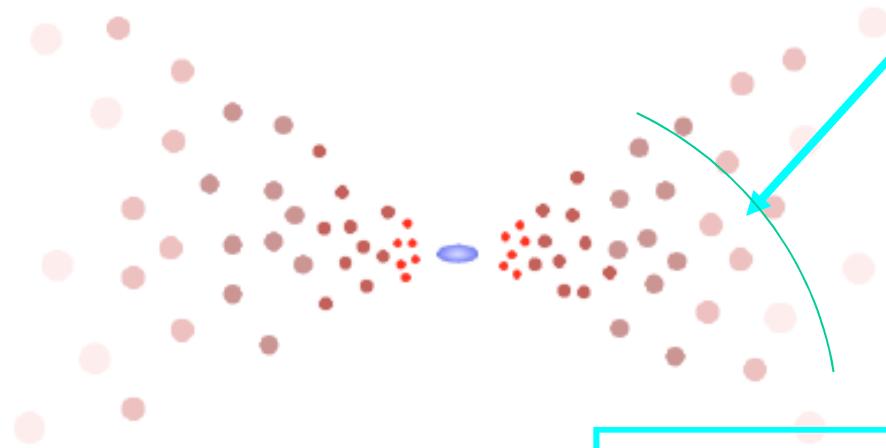
トラス外縁半径 (2/3): SED からは制限付かない
 (>~30 μm では星形成からの赤外線放射が卓越するから)



モデル計算で仮定される外縁半径(以遠にガス置かない)の例:
 56pc (Honig+06), 12pc (Nenkova+08)

トーラス外縁半径は何が決めるか: 視線上クランプ数 = 1 の位置

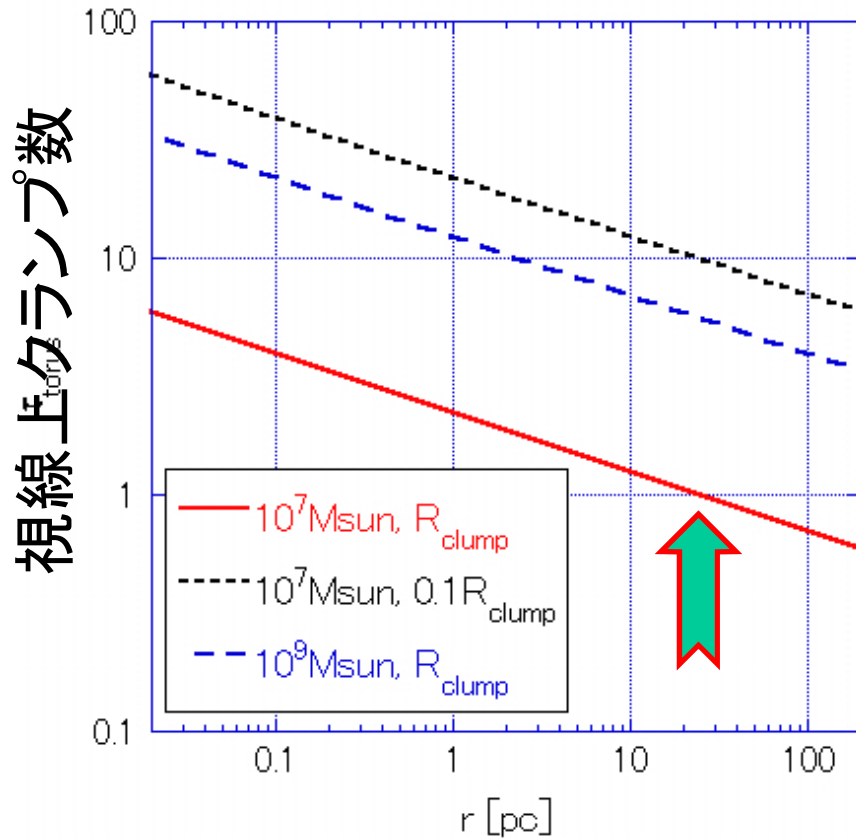
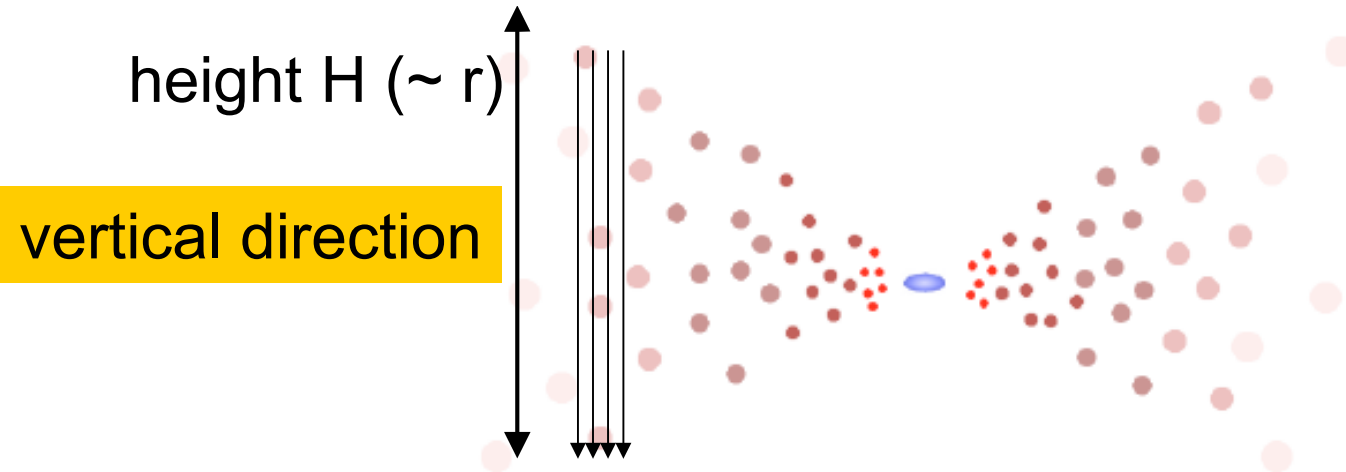
(TK+Mori 11)



観測者から測って、
視線上クランプ数が1以下の
位置を観る ($\tau < 1$)

トーラス外縁半径は何が決めるか: 視線上周径数 = 1 の位置

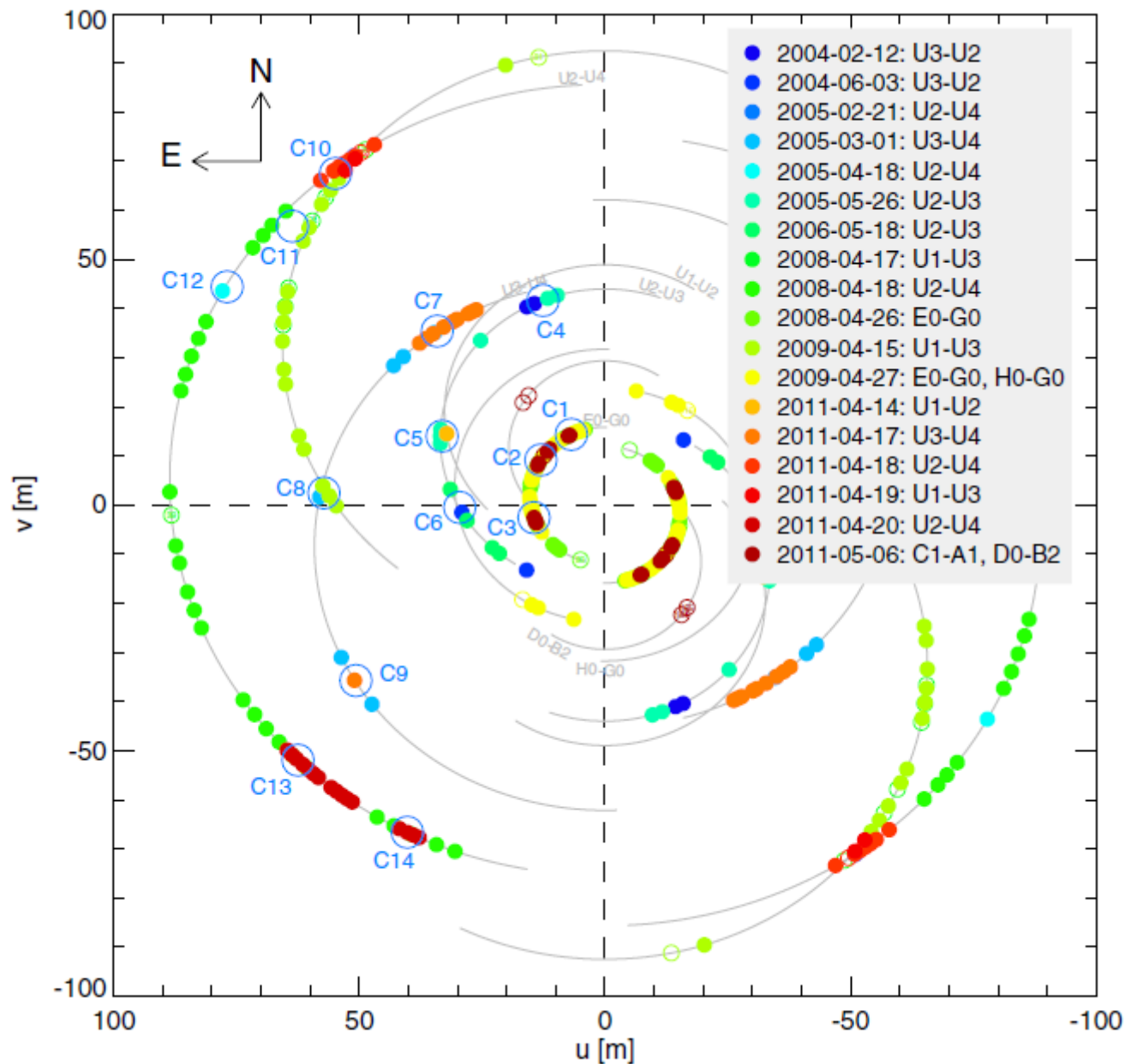
(TK+Mori 11)



Seyfert 銀河の場合:
視線上周径数 = 1
at $r = 20$ pc

中間赤外線干渉計観測+モデル結果の例: Circinus (Tristram+14)

干渉基線のuv面の
カバー状況
(くまなく覆っている
ほど良い)



中間赤外線干渉計観測+モデル結果の例: Circinus

(Tristram+14, Netzer 15)

8, 10.5, 13 μ m 放射: 3 Gaussian componentsでモデルフィット

1. 広がった放射(可視光[O III]の電離コーンと同じ方向, τ は小さい)

(和田さん講演)

2. Disk-like source

(maser diskと同じPosition angle)

3 Point source

後の2つは”トーラス”起源??

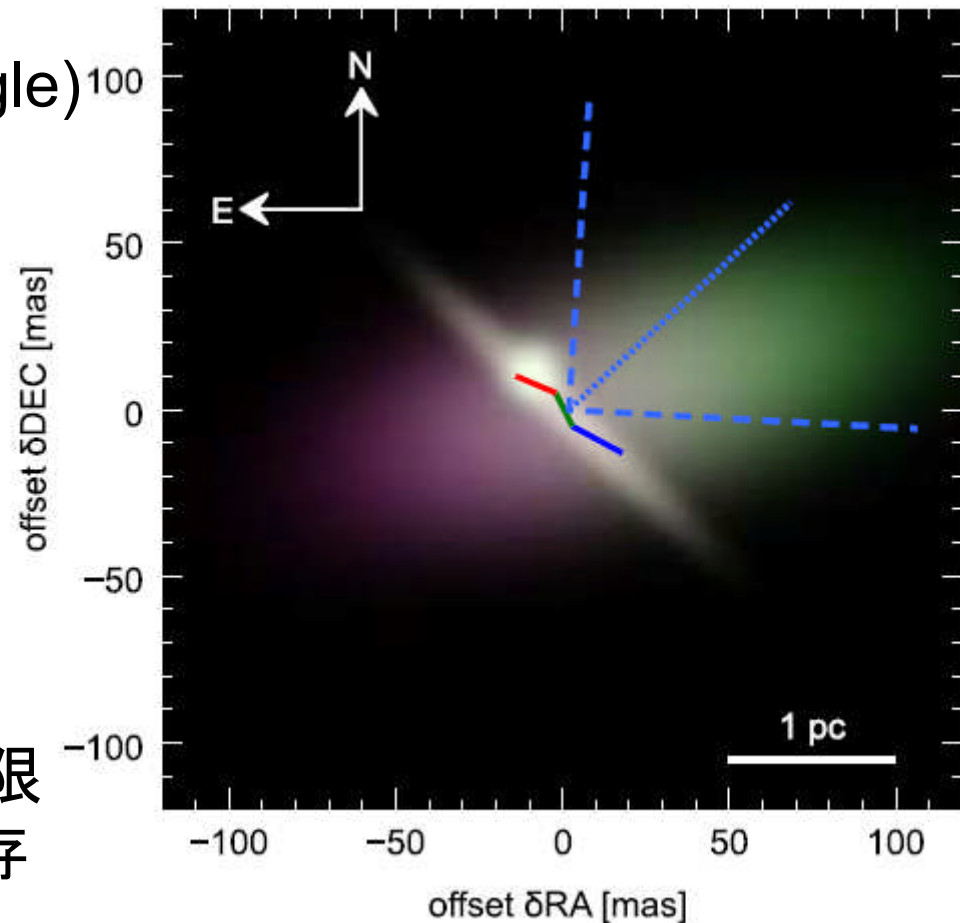
薄い...

* >10 μ mで観る必要?

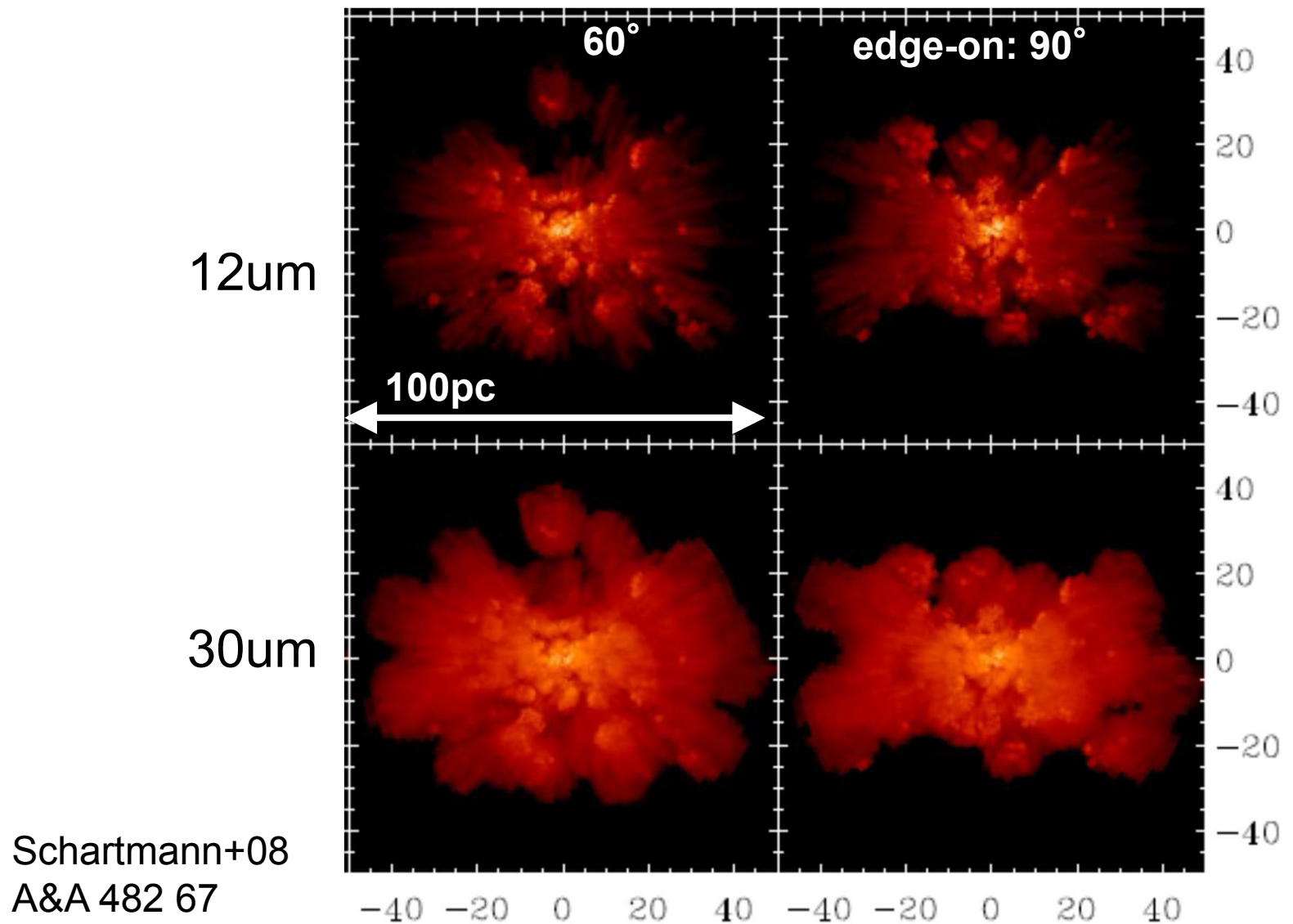
* uv面のカバー不足?

* H/R ~ 1 (電離コーン形成...)

は、トーラス最内縁部への制限
であり、Clumpと円盤状の共存
は可?



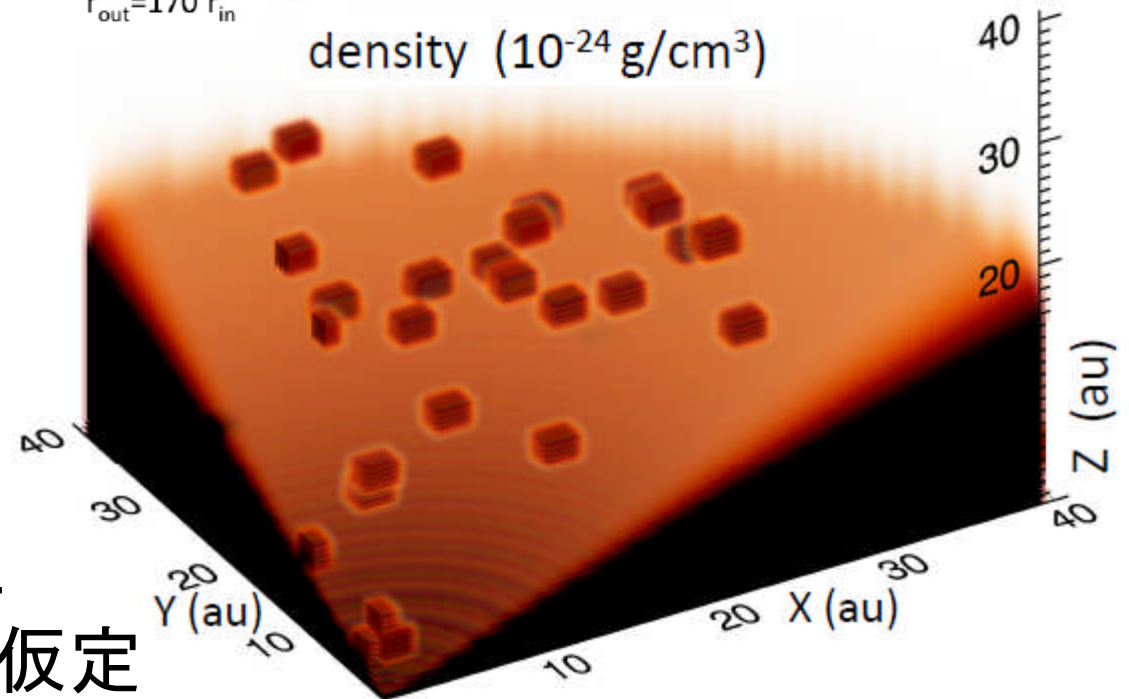
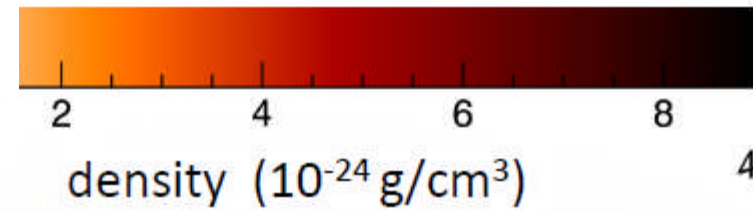
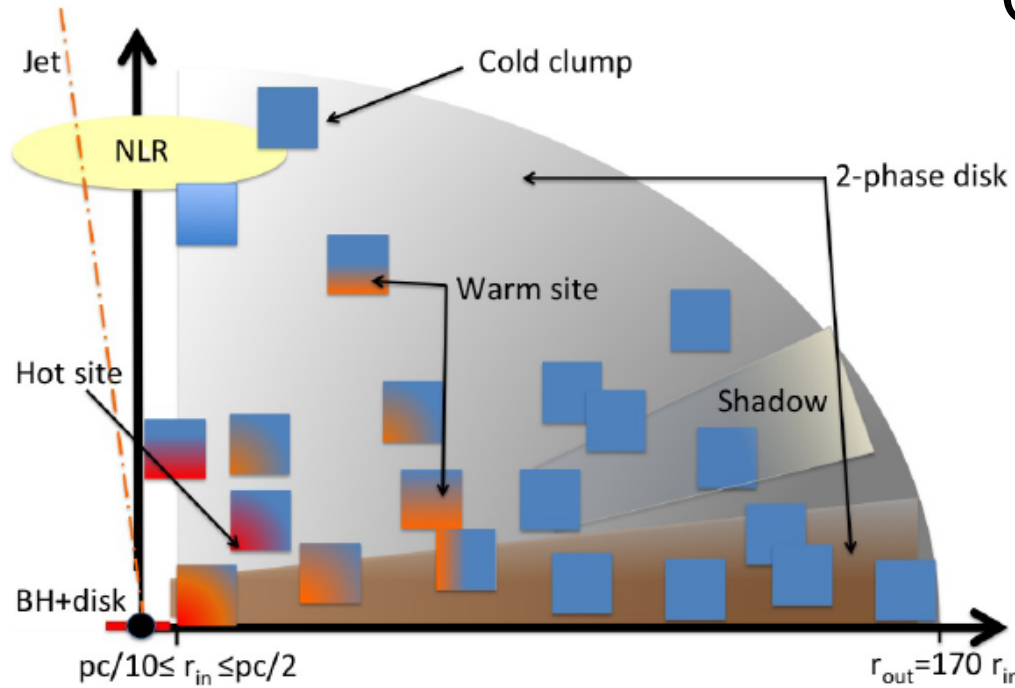
従来の外縁部まで膨らんだclumpモデルの像計算例：
細長い像を造るのは困難？



Clump

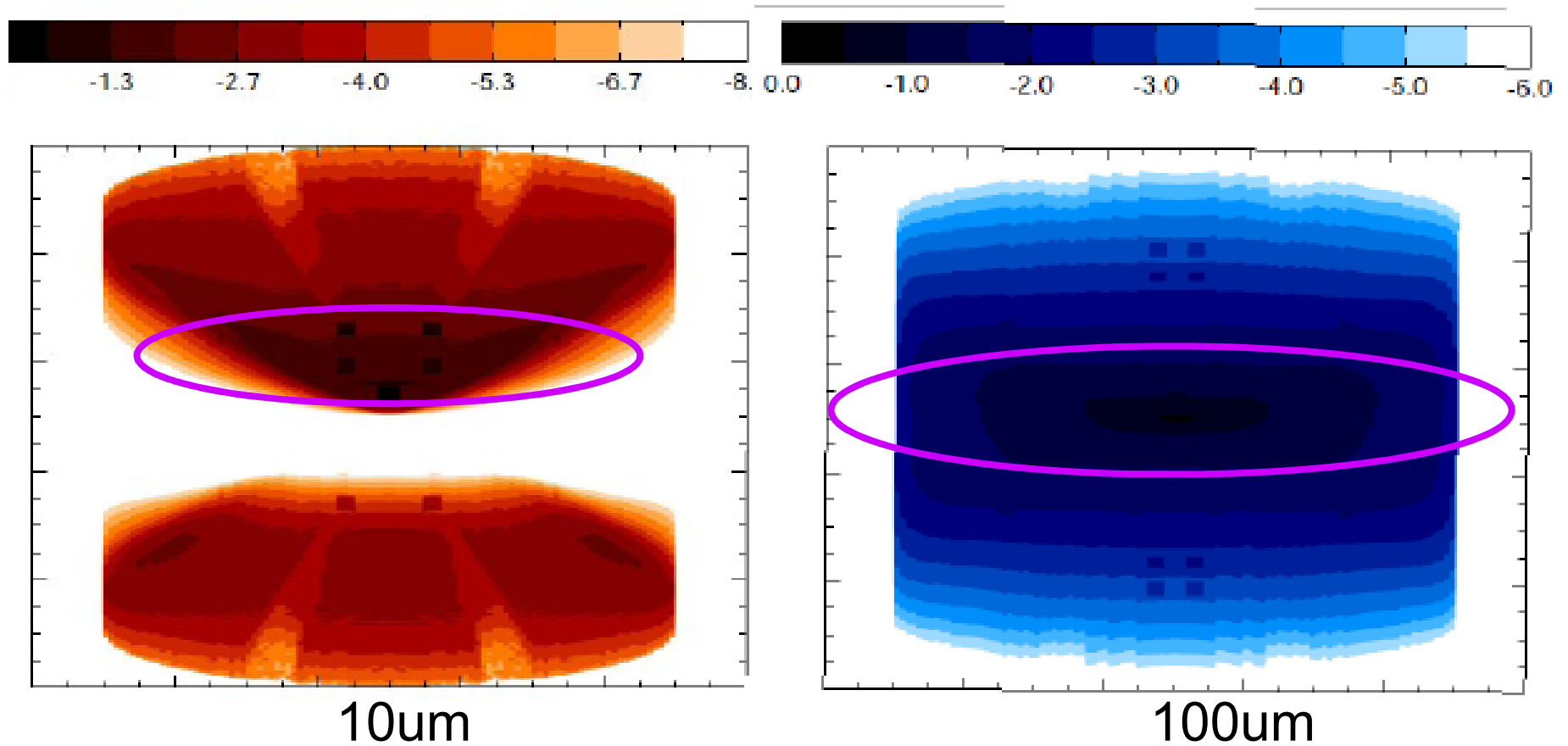
+ 赤道面にsmoothな
dusty gas円盤

(Siebenmorgen+15)



円盤: わずかに
flaringを仮定

Clump + 赤道面円盤モデルの像: 75° (~ edge-on) view (Siebenmorgen+15)



Elongation??

中間赤外線干渉計結果(放射体の幾何学的薄さ)の
理論的解釈はまだまだ進んでいない

目次と小まとめ

- ① パーセクスケール・トーラス外縁部の概観
 - * 中間赤外線干渉計で、およその**トーラスサイズ**は制限
 - * 中間赤外線放射領域の**形状**
 - * ⇒ **ALMA**の威力に期待

- ② トーラス最内縁部・降着円盤最外縁部、
輝線診断への提言

- ③ 超臨界ガス降着によるブラックホールの成長・分子ガス

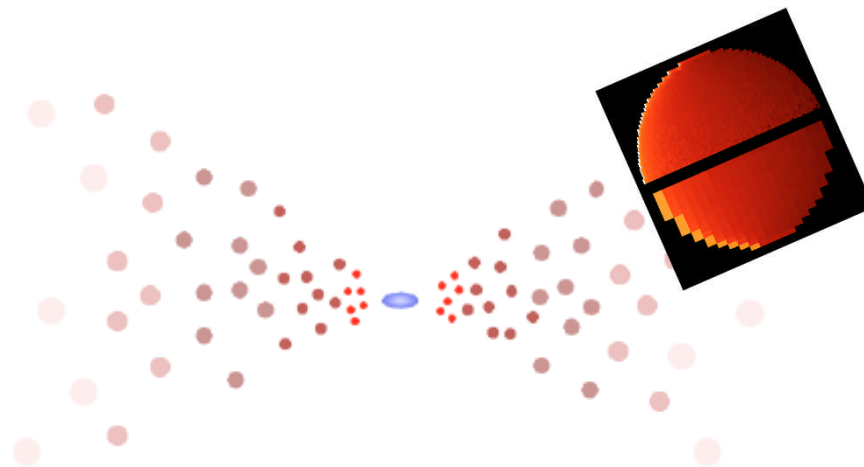
ダストトーラスの最内縁半径： ダスト sublimation

ダストが融けずに存在できる臨界温度、flux density F_{crit} が存在する
flux density \propto (照射体からの距離) $^{-2}$

F_{crit} まで薄まる距離がトーラス最内縁半径

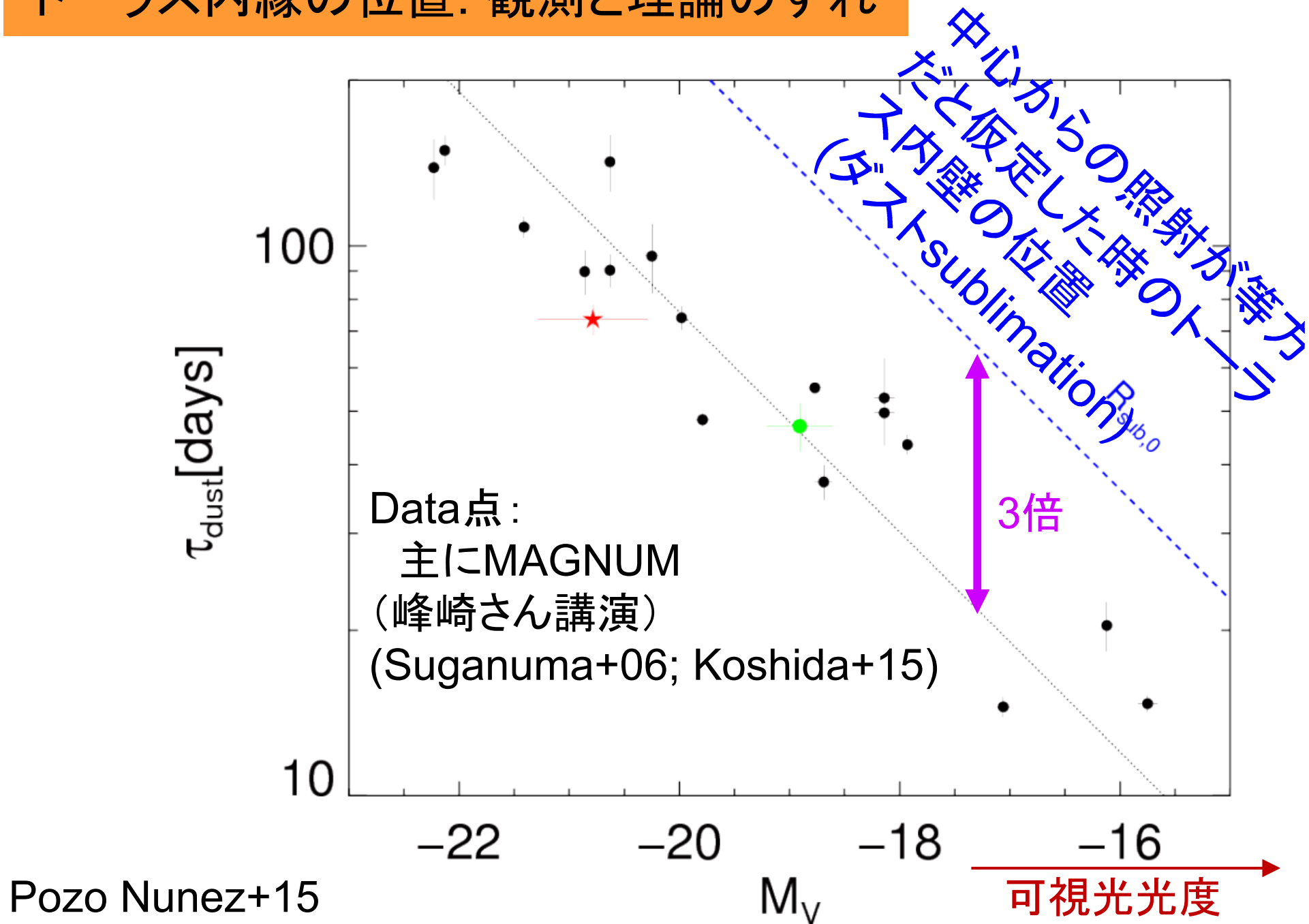
$$R_{\text{sub}} = 1.3 \left(\frac{L_{\text{UV}}}{10^{46} \text{ erg/s}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{\text{sub}}}{1500 \text{ K}} \right)^{-2.8} \left(\frac{a}{0.05 \mu\text{m}} \right)^{-1/2} \text{ pc}$$

(Barvainis 1987)



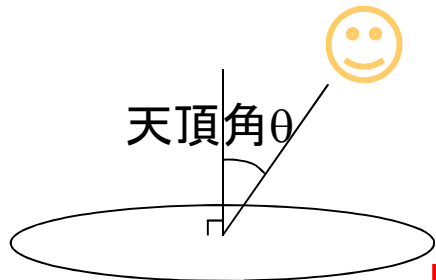
(Honig et al. 2006)

トーラス内縁の位置: 観測と理論のずれ



放射の基礎特性： 光学的に厚い円盤の非等方放射

-- 円盤は横を照らさない -- (たとえ厚みゼロでも)



円盤単位面積の
 θ 方向への放射 Flux $\propto \cos \theta (1 + 2 \cos \theta)$

放射面が斜めになり
 射影面積が減る効果

周縁減光(limb darkening)効果
 (電子散乱よりも吸収が効く場合は、
 2ではなく、1.5)

面積 dA を時間 dt の間に通過するエネルギーが

$$FdAdt \quad (3.51)$$

で表わされるとき、 F をエネルギーフラックス (energy flux) という。単位は $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ である。光は直進するから、方向 (θ, ϕ) を決めれば1本の光線が決まる。いま面積 dA を θ と $\theta+d\theta$, ϕ と $\phi+d\phi$ の間の方向に時間 dt の間に通過するエネルギーは、光線の束の広がり
 を表わす立体角を $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ として

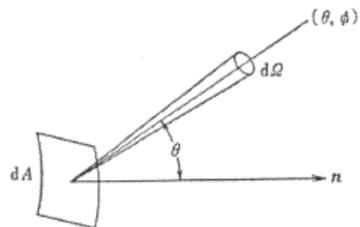


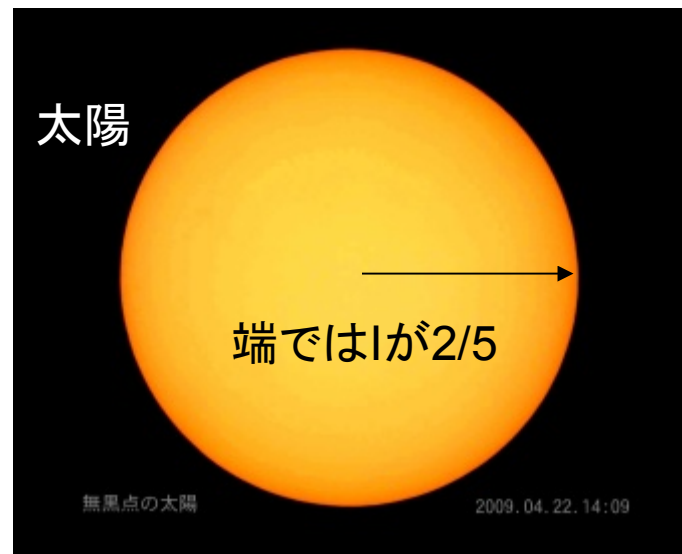
図 3.2 面 dA を通る光束 n は面 dA の法線

$$I \cos \theta dAd\Omega dt \quad (3.52)$$

と表わされる。ここで I をエネルギー強度 (energy intensity) といい、単位は $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{ster}^{-1}$ である。 $\cos \theta$ は今考えている方向への垂直断面積が $\cos \theta dA$ で表わせることから出てくる。 F と I の関係は

$$F = \int I \cos \theta d\Omega. \quad (3.53)$$

佐藤 & 原「宇宙物理学」



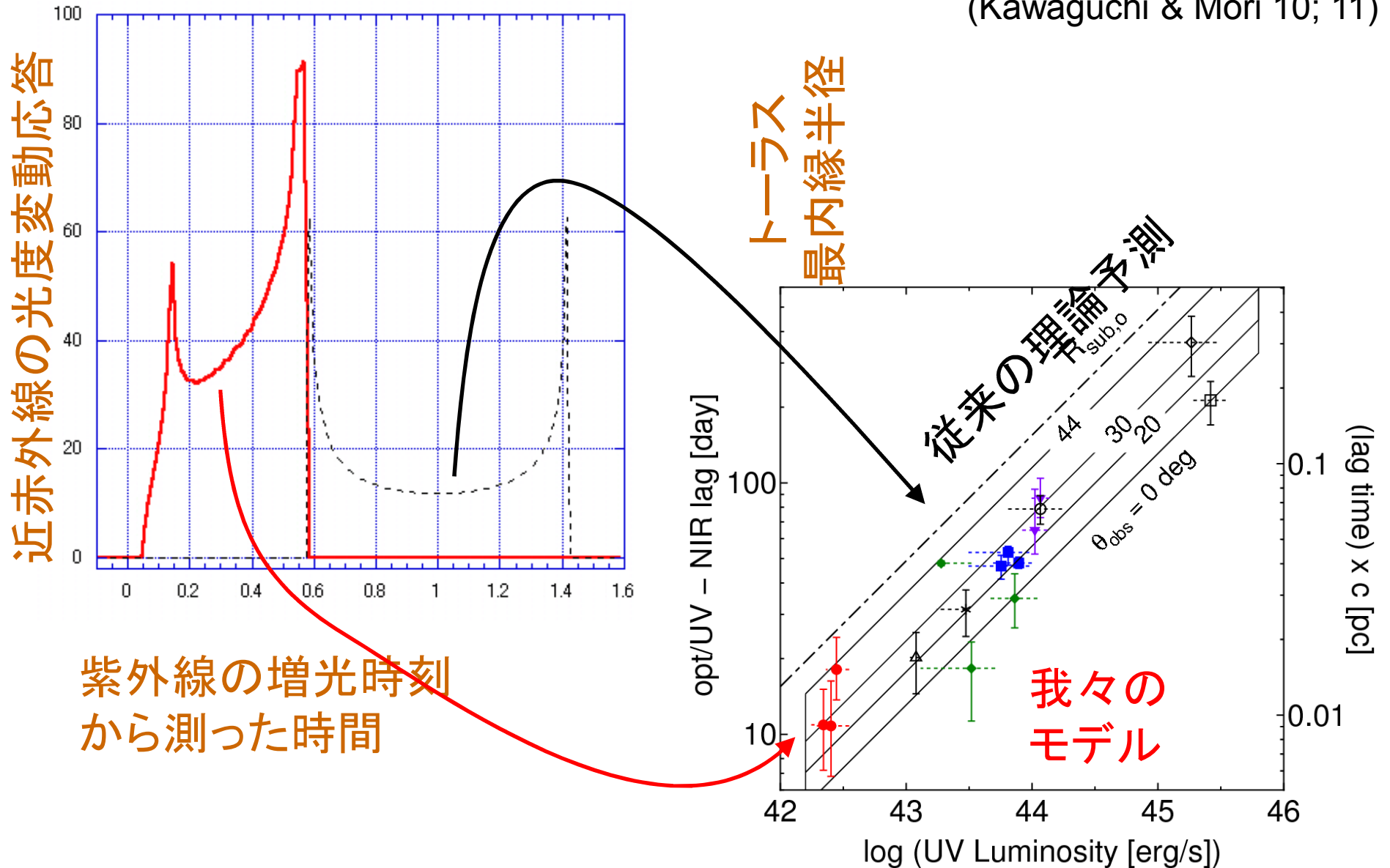
無黒点の太陽

2009. 04. 22. 14:09

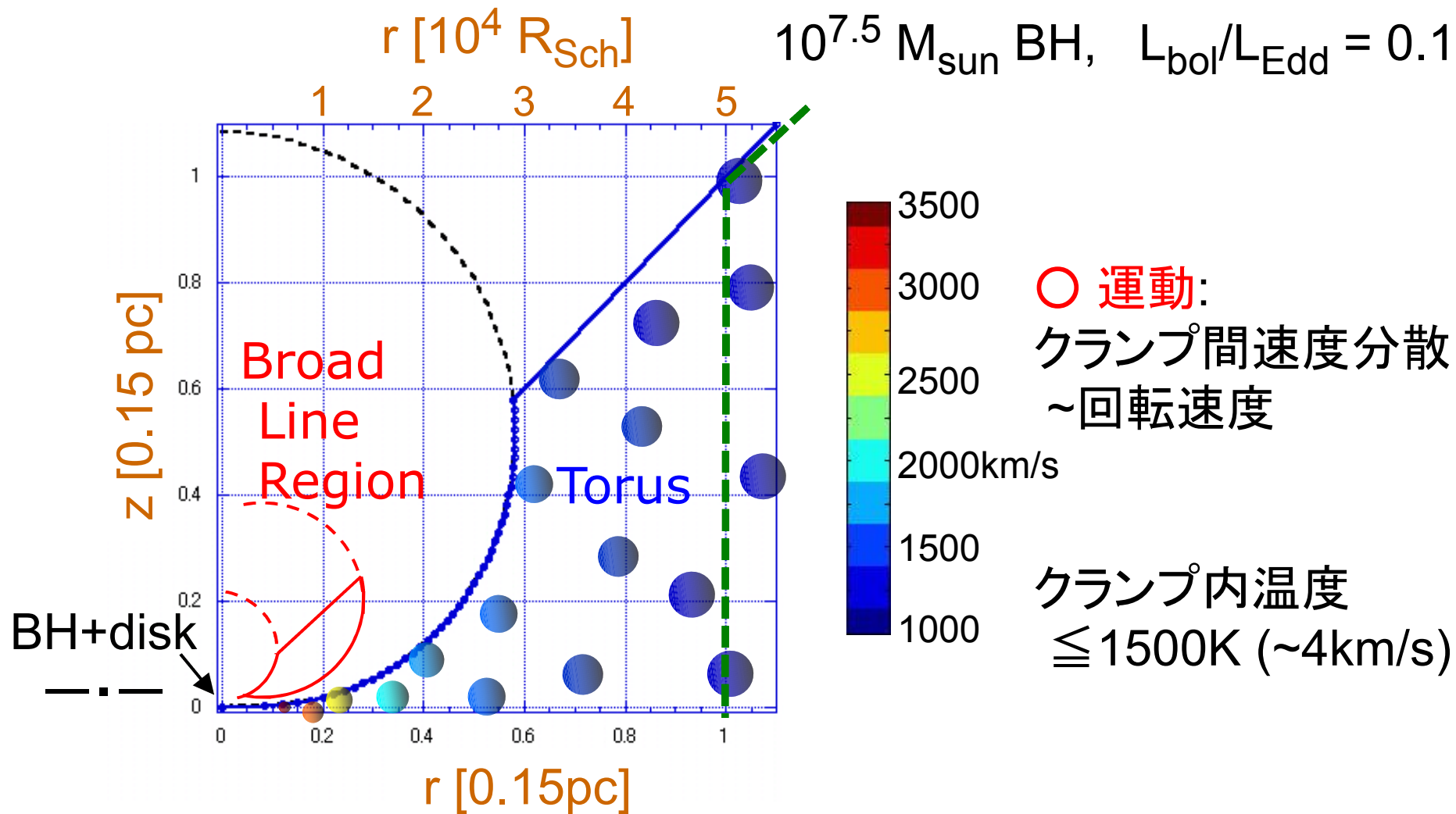
「円盤は横を照らさない」 ⇒ トーラス最内縁は予想よりもBHに近い

降着円盤の最外縁半径 (円盤自己重力)と繋がる

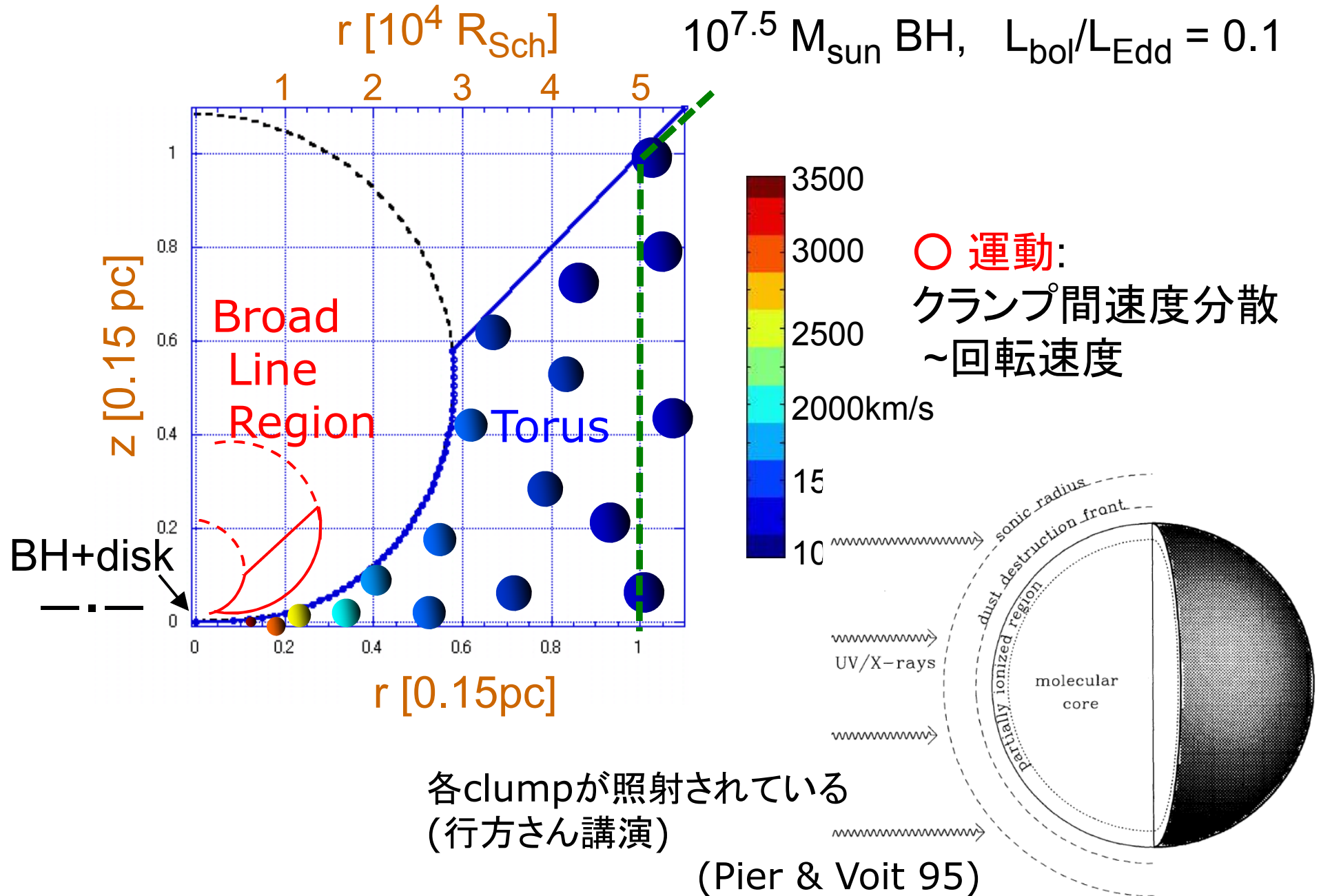
(Kawaguchi & Mori 10; 11)



トーラス最内縁部の円柱座標表示 (Kawaguchi 13)

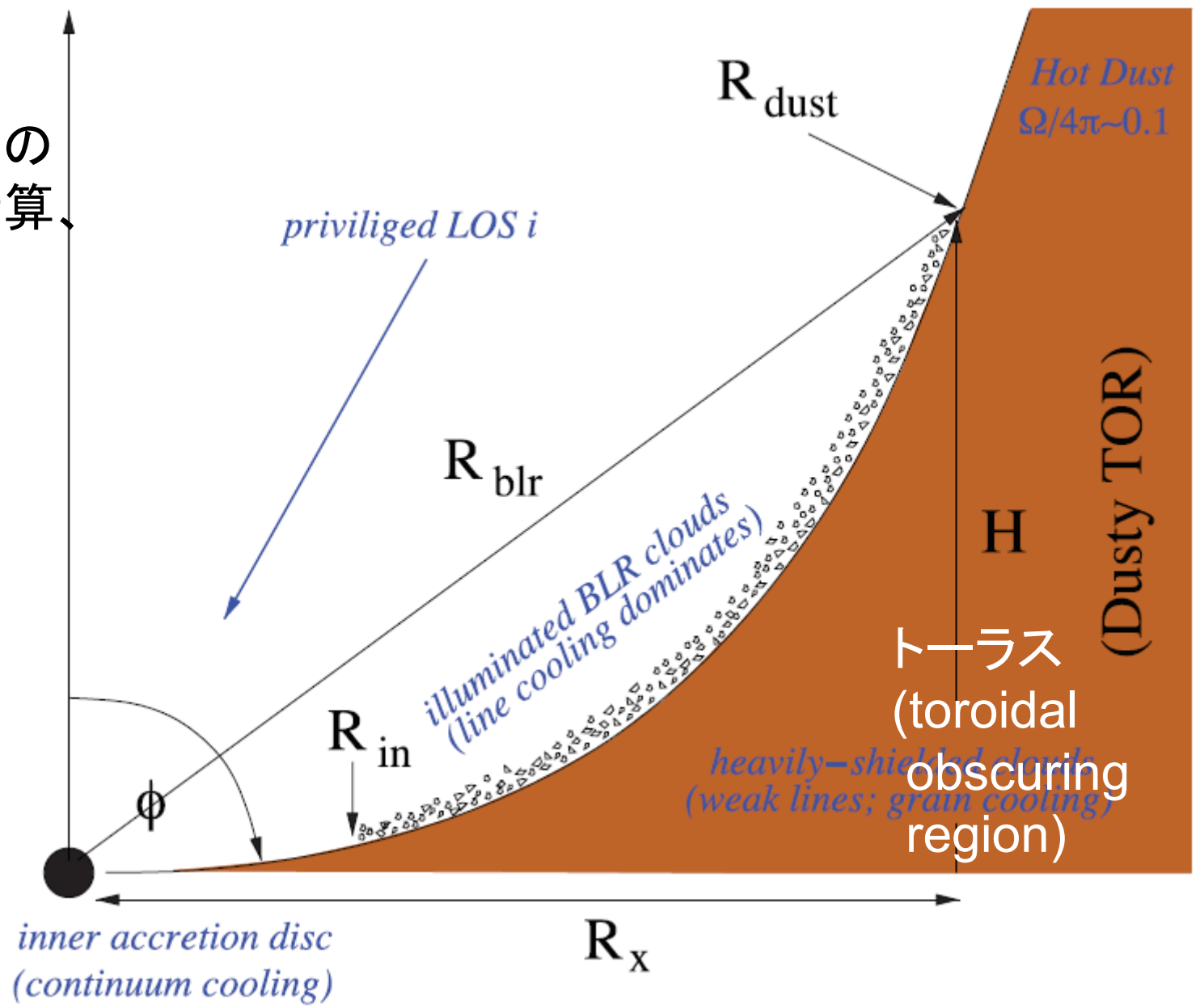


トーラス最内縁部の円柱座標表示 (Kawaguchi 13)



トーラス内縁から円盤外縁へ繋がっている領域の研究発展例 (Goad + 12)

→ 広輝線領域の
時間変動の計算、
観測との比較

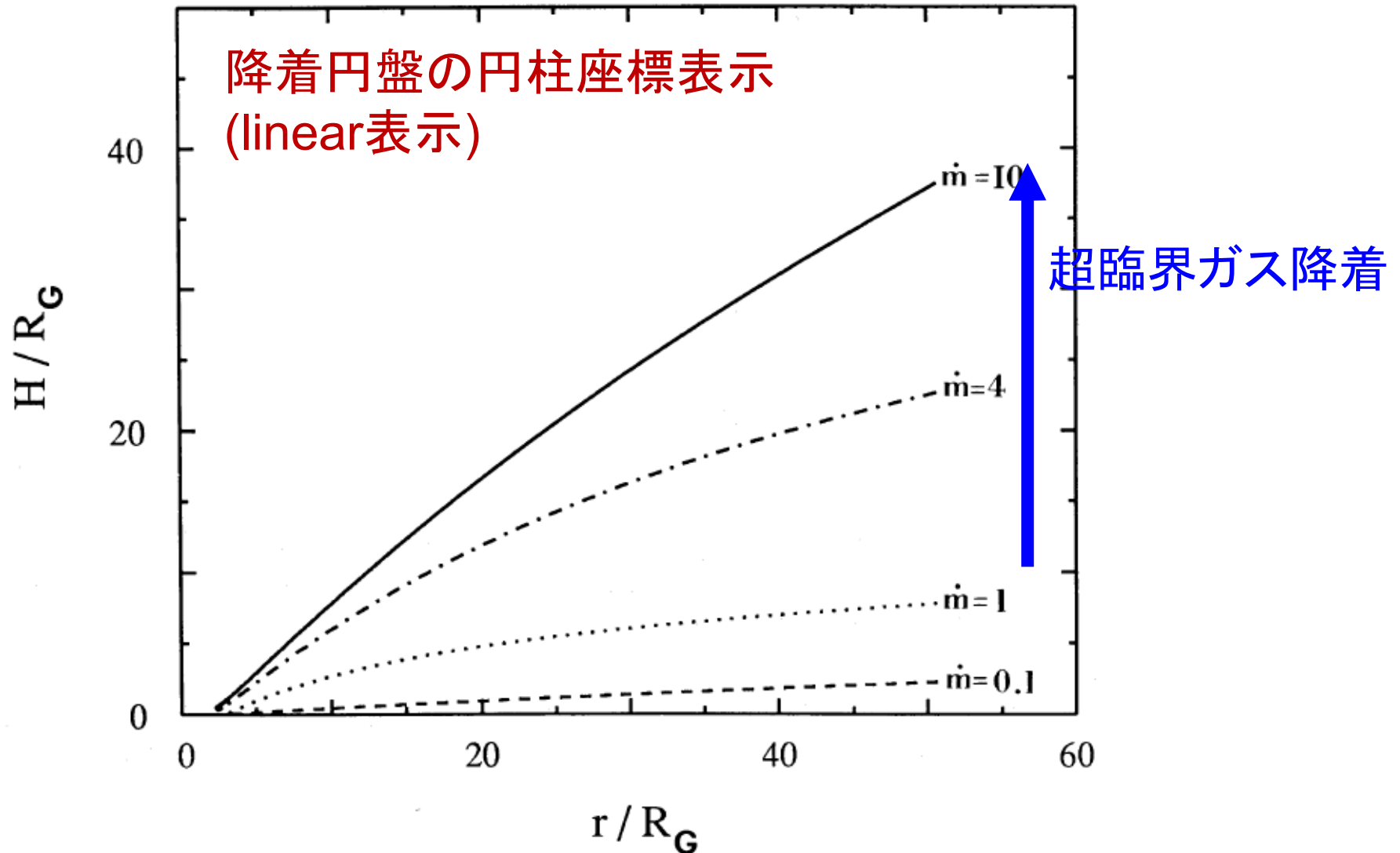


トーラス
(toroidal
obscuring
region)

ガス降着率が大きい時に予想される輝線診断への影響

ガス降着率が臨界降着率よりも大きくなると

- * 降着円盤が幾何学的に厚くなる, 赤道面 ± 45 度 (Abramowicz+88)

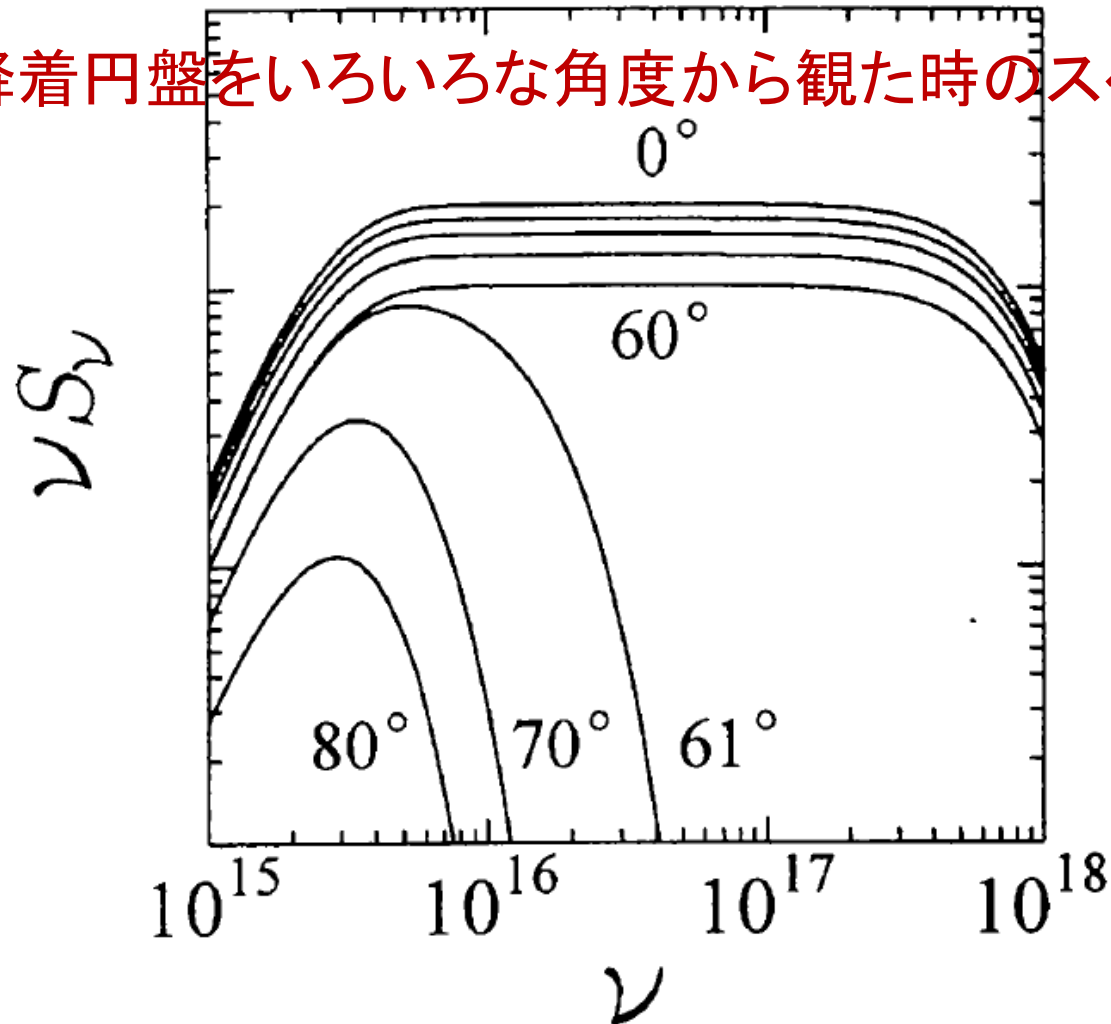


ガス降着率が大きい時に予想される輝線診断への影響

ガス降着率が臨界降着率よりも大きくなると

- * 降着円盤が幾何学的に厚くなる, 赤道面 ± 45 度 (Abramowicz+88)
- * 赤道面 ± 45 度からは観えなくなる (Fukue 00)

超臨界降着円盤をいろいろな角度から観た時のスペクトル

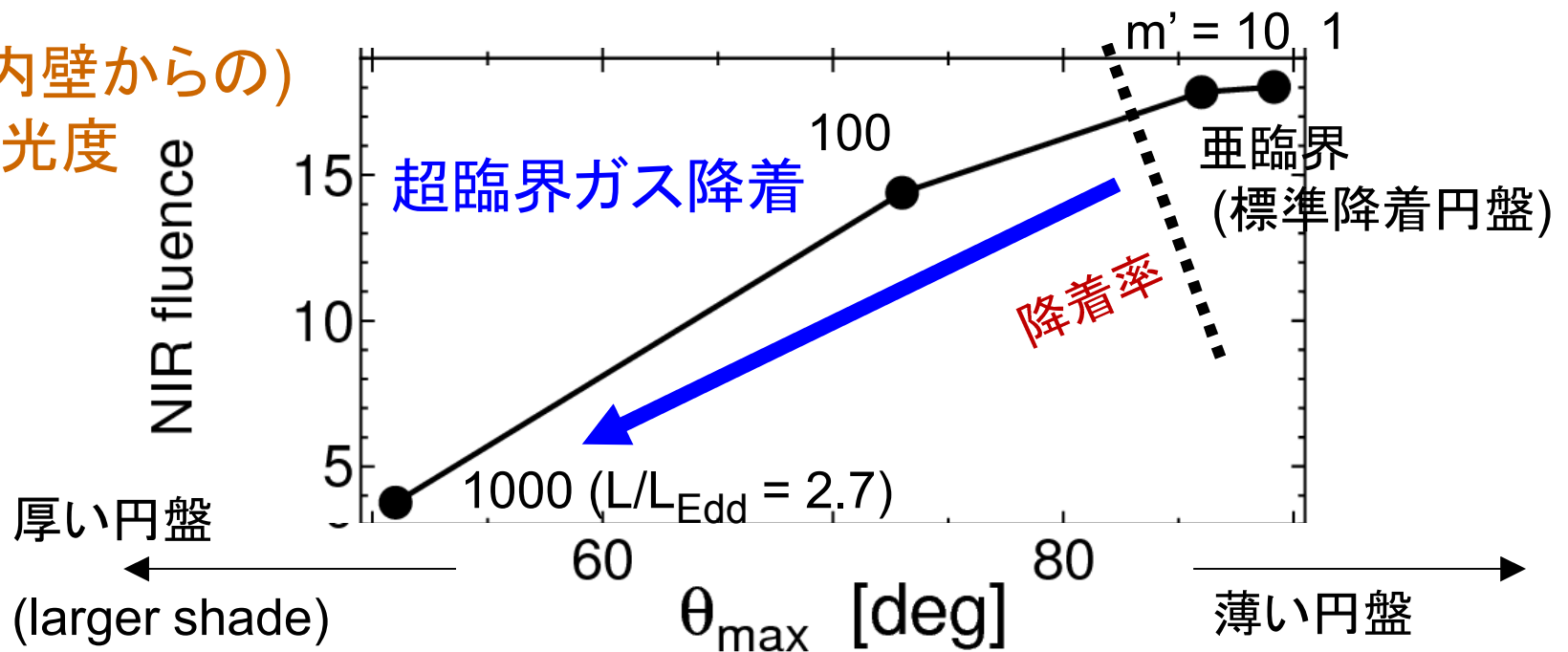


ガス降着率が大きい時に予想される輝線診断への影響

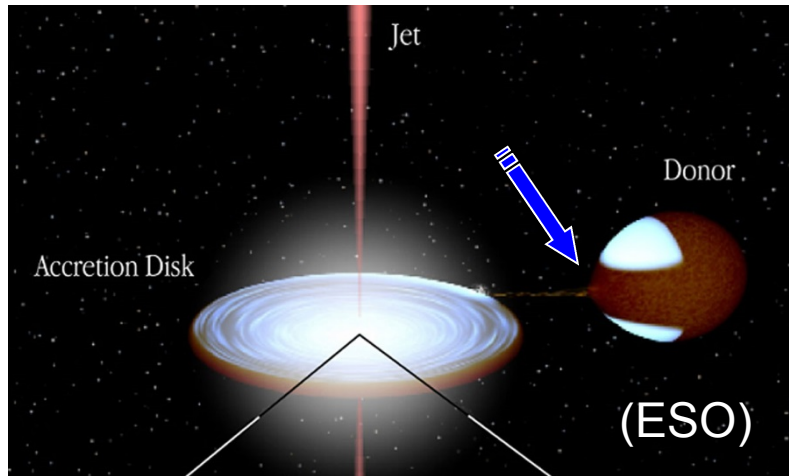
ガス降着率が臨界降着率よりも大きくなると

- * 降着円盤が幾何学的に厚くなる, 赤道面 ± 45 度 (Abramowicz+88)
- * 赤道面 ± 45 度からは観えなくなる (Fukue 00)
- * 赤道面 ± 45 度方向へは照らせられなくなる (Kawaguchi+10,11)
→ Gas Feedingにもおそらく貢献

(トラス内壁からの)
近赤外線光度



ガス降着率が大きい活動銀河核は、本当に近赤外線が弱いのか？



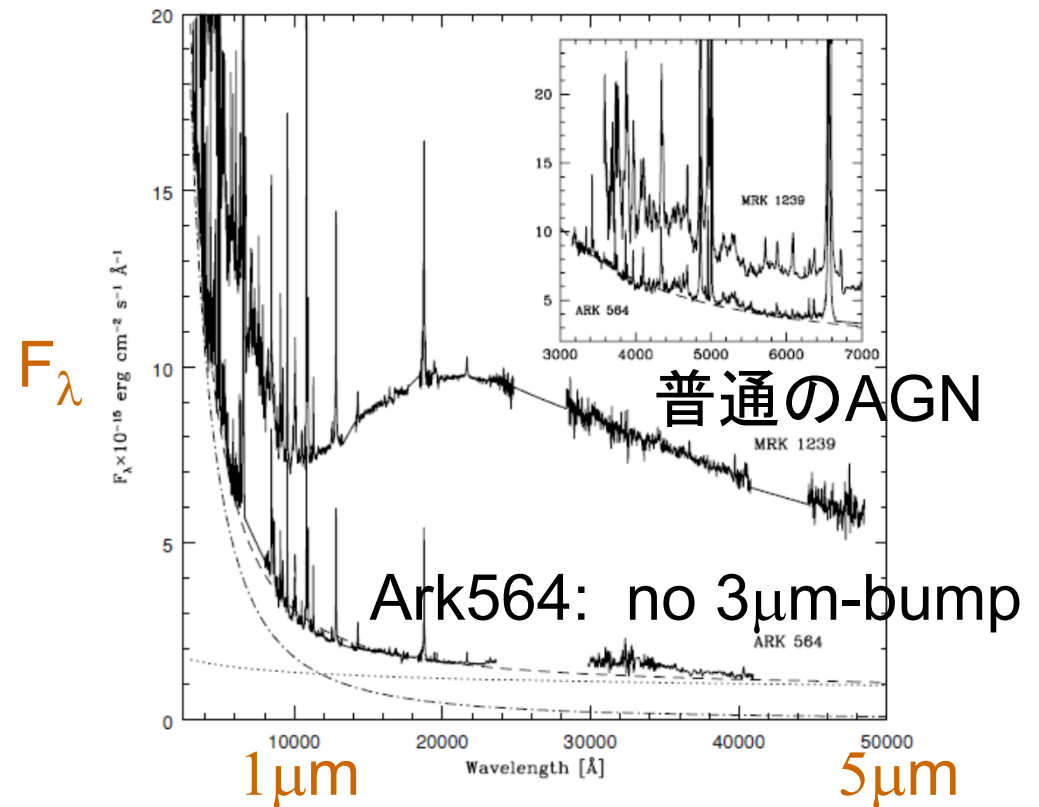
Yes:

TonS180(TK+04), Ark564,
Jiang+10

No: Hao+ 2010

観測結果は混沌

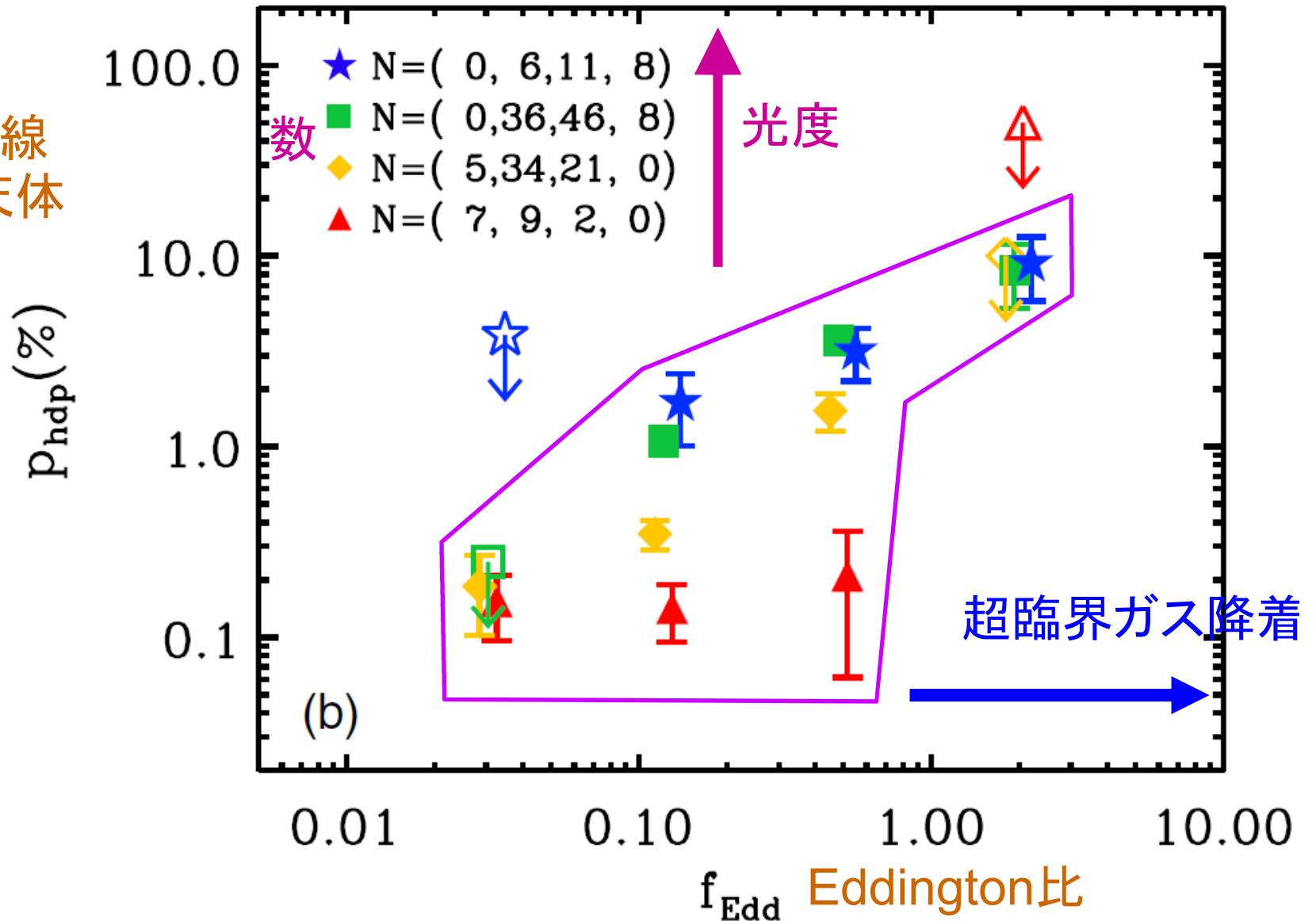
- まず、理論予測をはっきりさせる方針を採り、計算を行った (前頁の図)。
- 現状は？ (次頁)



(Rodriguez-Ardila & Mazzalay 2006)

トーラス内壁からの放射が弱い活動銀河核の統計 (Jun +13)
 rest近赤外線が弱いAGNは、Eddington比が大きい天体が占める
 (=理論予測と同じ傾向)

近赤外線
 weak天体
 の割合



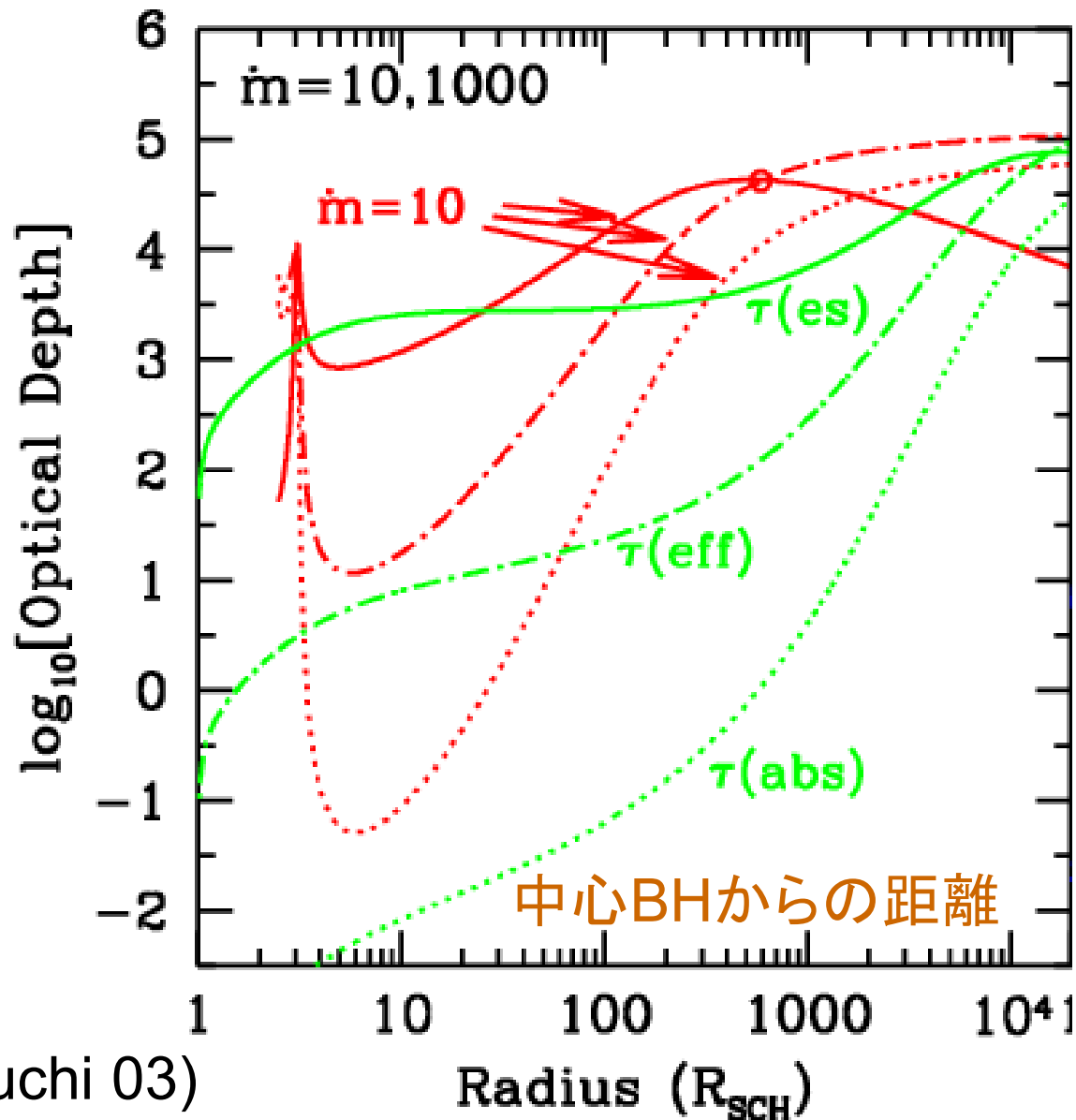
輝線診断への影響？： 降着円盤は Compton-thick

実線で描いている τ (es) = $NH / 10^{24} \text{ cm}^{-3}$

標準降着円盤

超臨界降着円盤

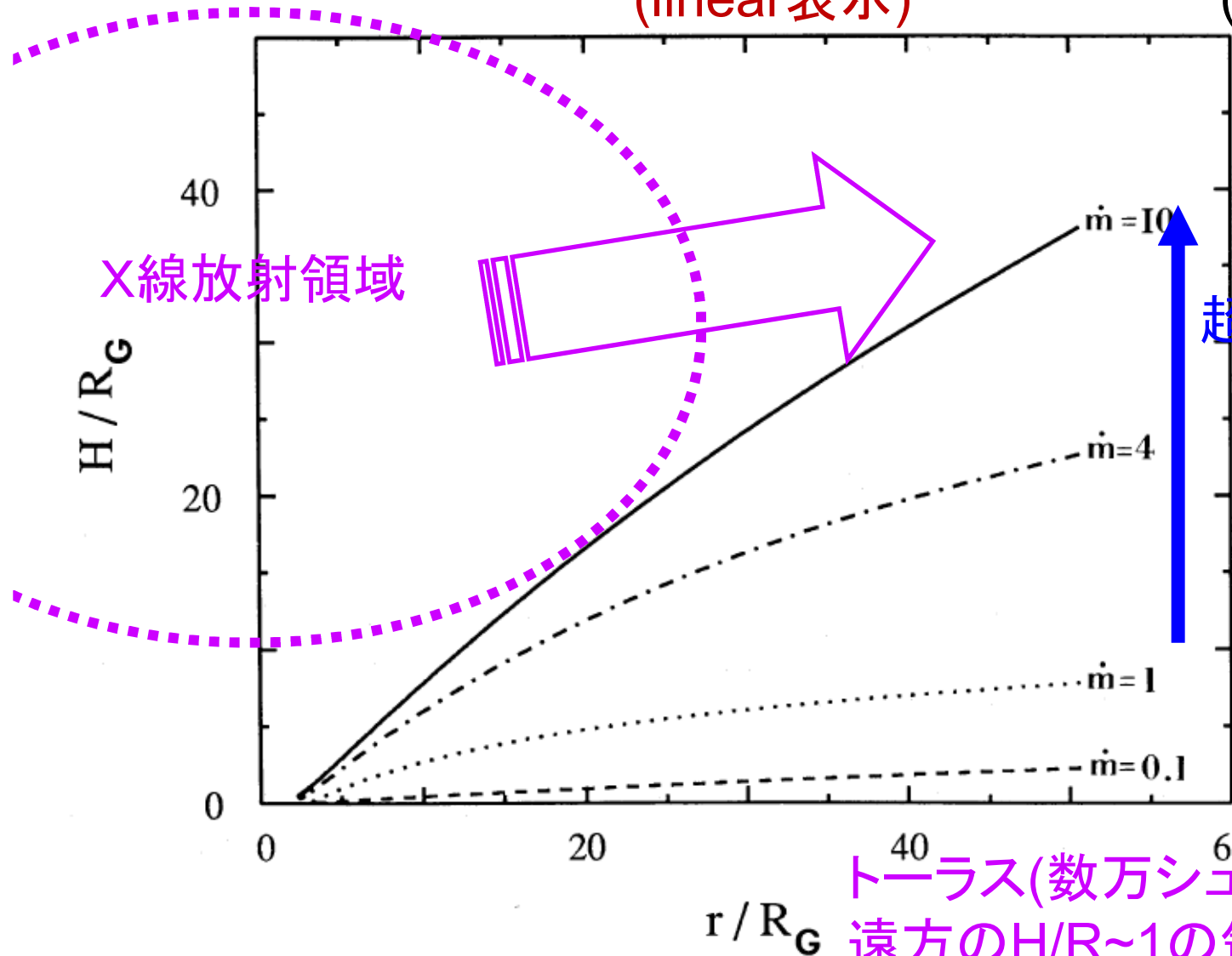
円盤の縦
方向の光
学的厚み



ガス降着率が大きい時に予想される輝線診断への影響

降着円盤の円柱座標表示
(linear表示)

(Abramowicz+88)



X線放射領域

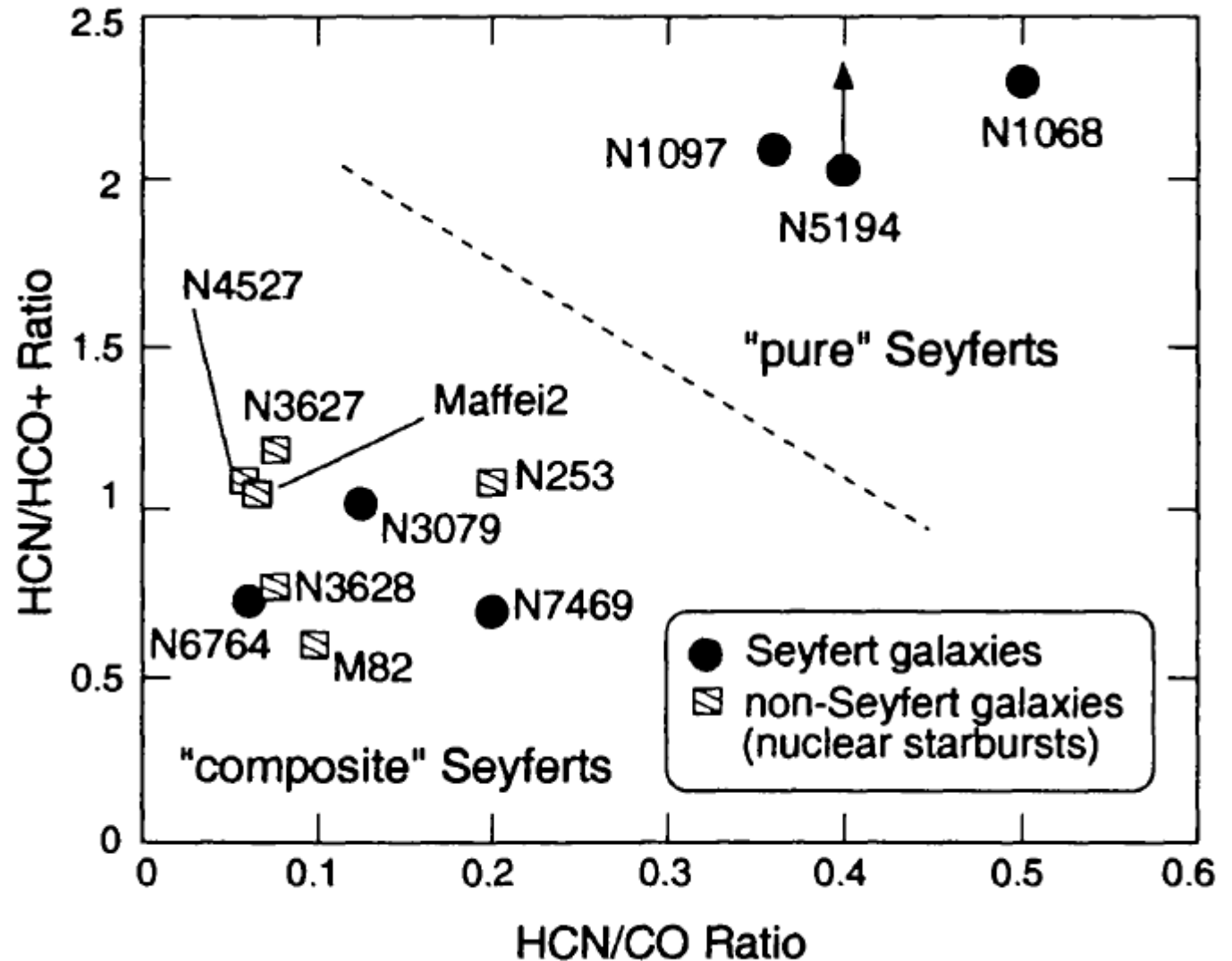
超臨界ガス降着

トラス(数万シュバルツシルト半径
遠方の $H/R \sim 1$ の領域)にX線が照射
されない(はず)

ガス降着率が臨界降着率よりも大きくなると

* 赤道面±45度方向へは照らせられなくなる (Kawaguchi+10,11)

→ 中心核に照らされたガスからの輝線を使った診断が、
Eddington比で変化する(はず)



目次と小まとめ

① パーセクスケール・トーラス外縁部の概観

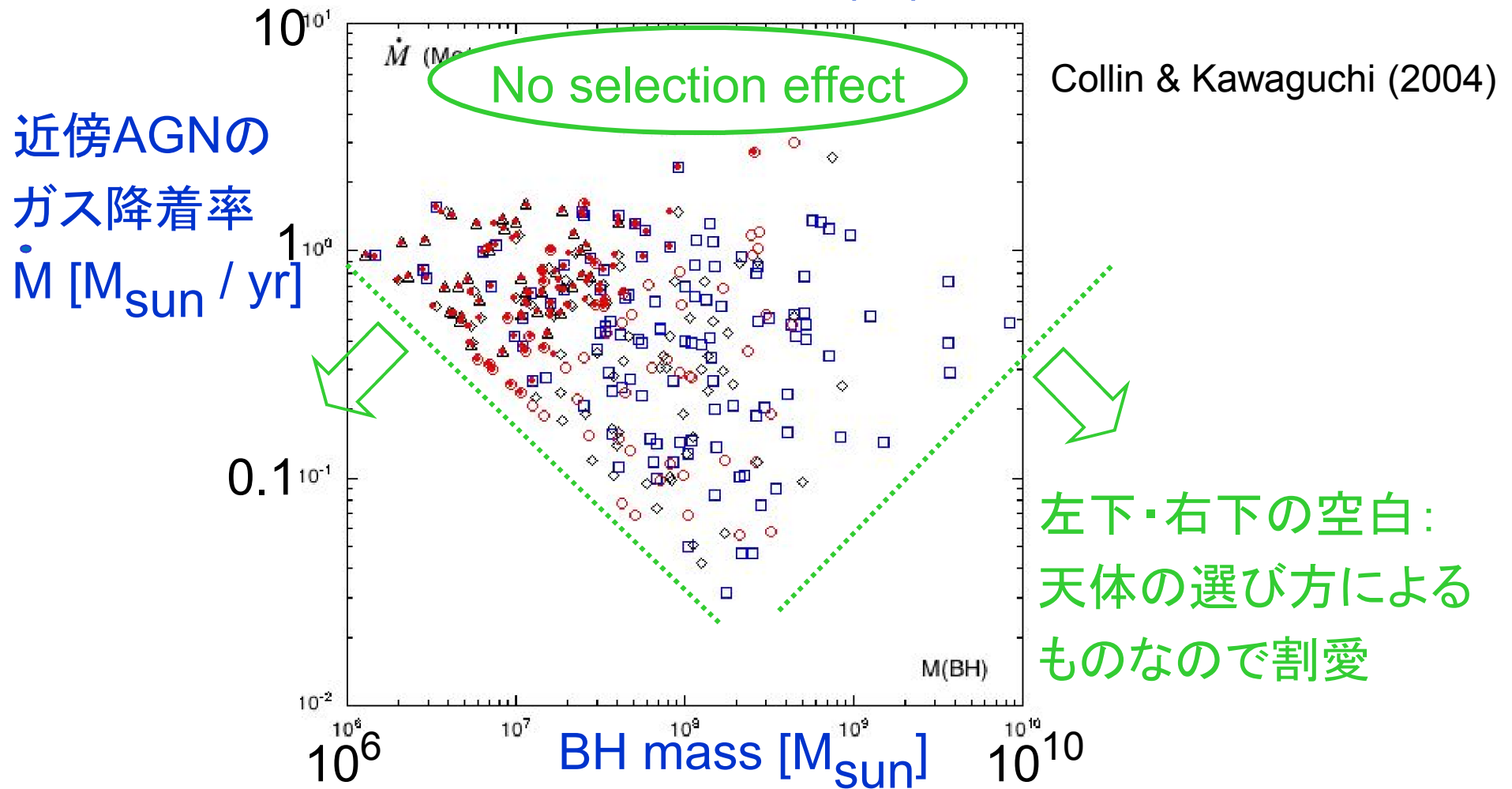
② トーラス最内縁部・降着円盤最外縁部、

輝線診断への提言

- * 円盤放射の非等方性は必ず発生(が、無視されてきた)。
- * トーラス最内縁部は従来予想よりもBHに近い。
円盤外縁部に繋がっている。
- * 超臨界ガス降着では、X線で照射されたガスの輝線診断に影響が出るはず。

③ 超臨界ガス降着によるブラックホールの成長・分子ガス

何が活動銀河核のガス降着率(\dot{M})を決めるか？



最大 \dot{M} [$M_{\text{sun}} / \text{yr}$] がどのBH質量域でもほぼ同じ。

⇒ - \dot{M} はEddington limitでコントロールされている訳ではない。

- 中心BH質量に依存しない別の何かが \dot{M} を決めている。

超臨界ガス降着による巨大ブラックホールの成長

(Kawaguchi, Aoki, Ohta, Collin 2004b)

BH質量増加量 ~ 寿命 x 降着率

超臨界降着フェーズの寿命推定:

* 活動銀河核の寿命 (複数回発現していれば、その合計)の推定:

銀河中のAGNの割合 (~2%)、ジェット長さ・電子の年齢 etc.

⇒ $\sim 3 \times 10^8$ yr (Martini 2004 for a review)

* 近傍 ($z < 0.5$) radio-quiet AGNs の

11--57%が NLS1s(大降着率AGN):

(割合は計数する波長・選び方に強く依存. 以下、10, 30%使用)

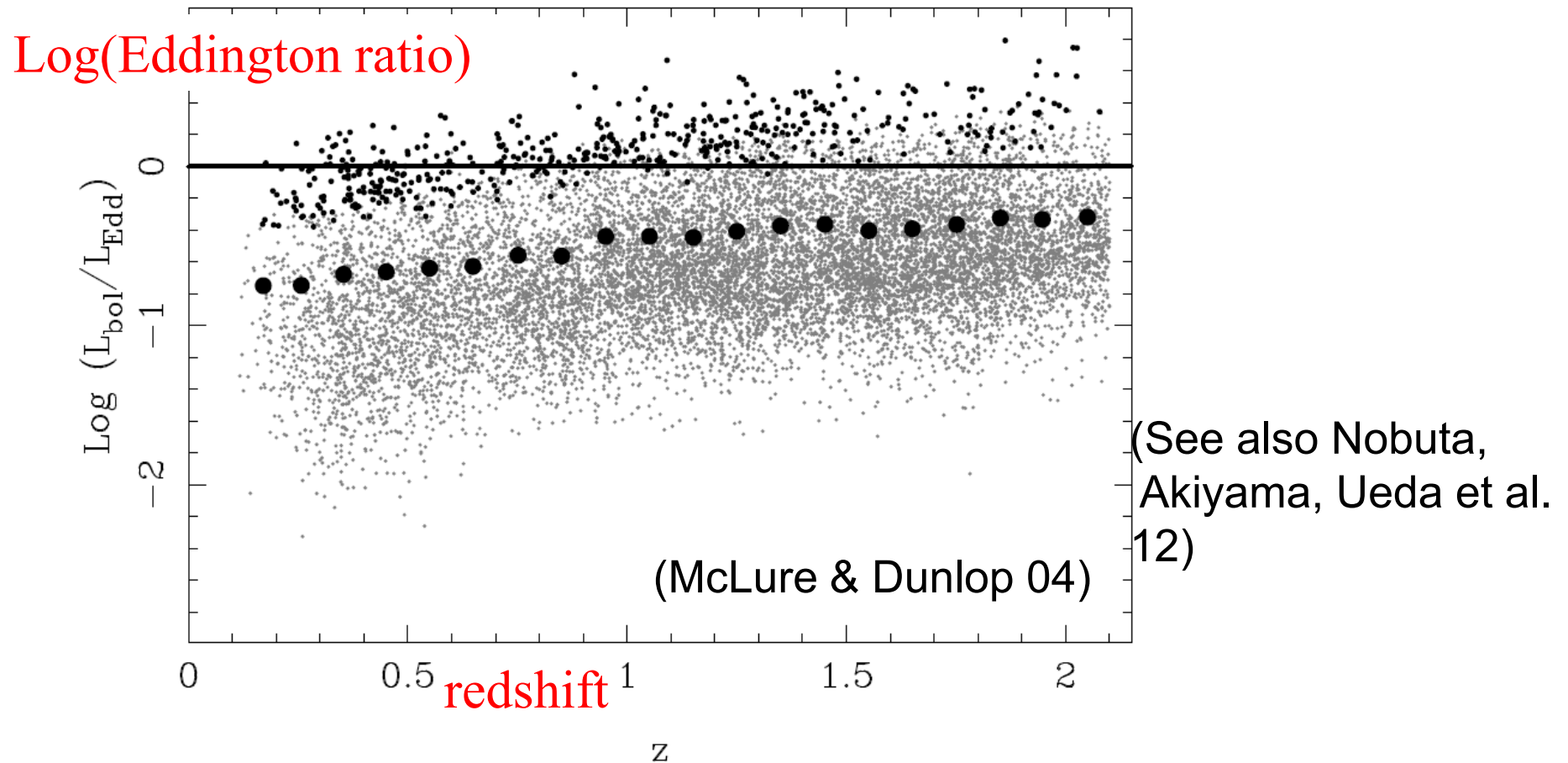
* 各フェーズの寿命は相対割合に比例、と仮定する (e.g. 原始星).

すると、NLS1s の寿命 $\sim 3 \times 10^7$ yr (if 10%)

$\sim 10^8$ yr (if 30%).

$1 M_{\text{sun}}/\text{year} \times 10^8 \text{ year} = 10^8 M_{\text{sun}} \rightarrow 10^8 M_{\text{sun}} \text{ BHの形成可能}$

◎ 超臨界ガス降着は高赤方偏移でより頻繁に起こっている

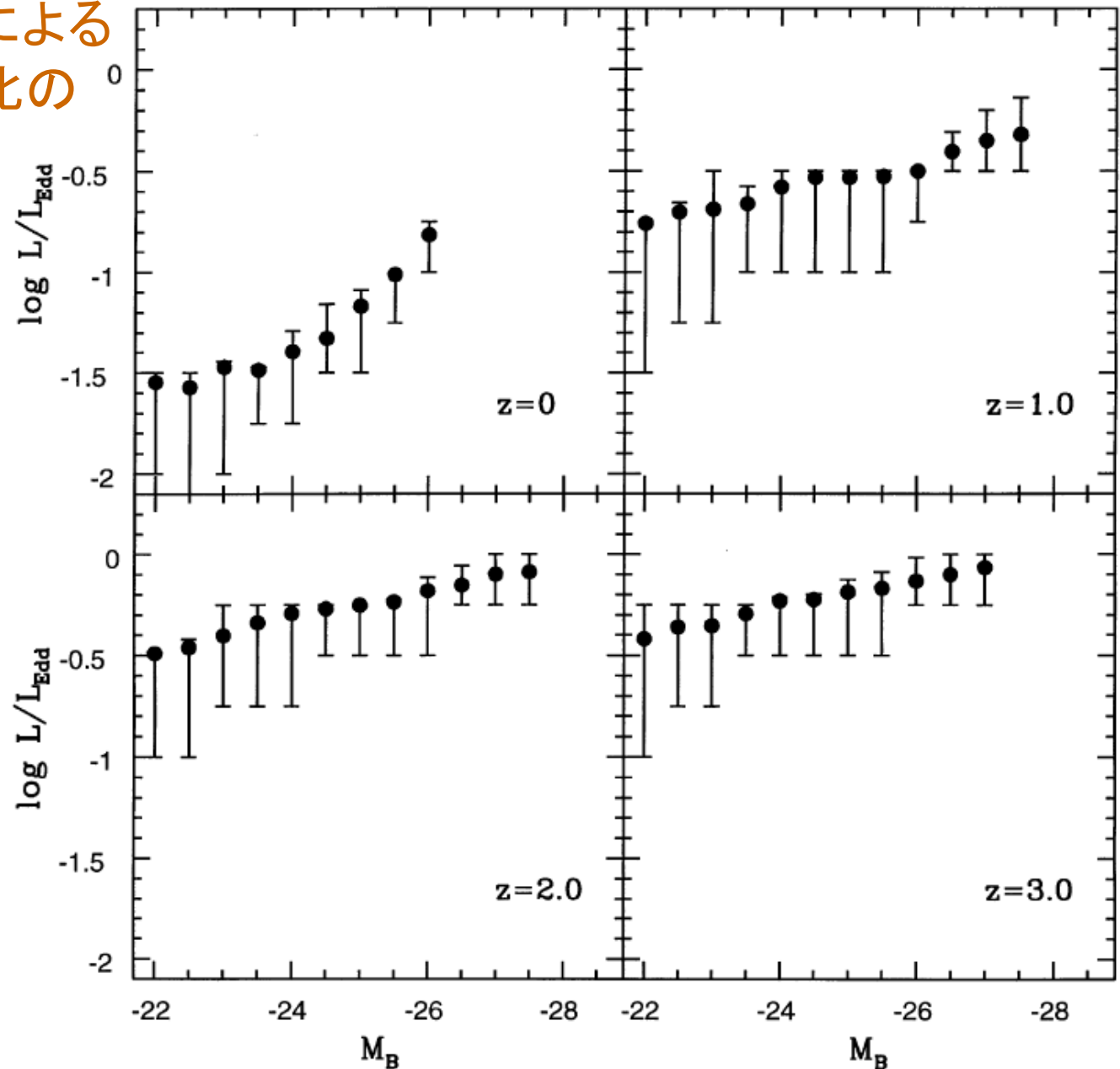


⇒ 「巨大ブラックホールは高赤方偏移での超臨界ガス降着で造られた」 (Kawaguchi et al. 04b)

◎ 準解析的モデルでも、過去の宇宙ほど超臨界ガス降着が頻繁
(白方さん講演)

モデル計算による
エディントン比の
分布予想

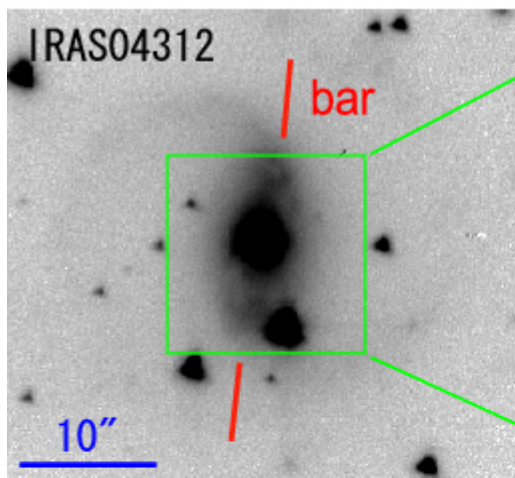
Kauffmann &
Haehnelt 00



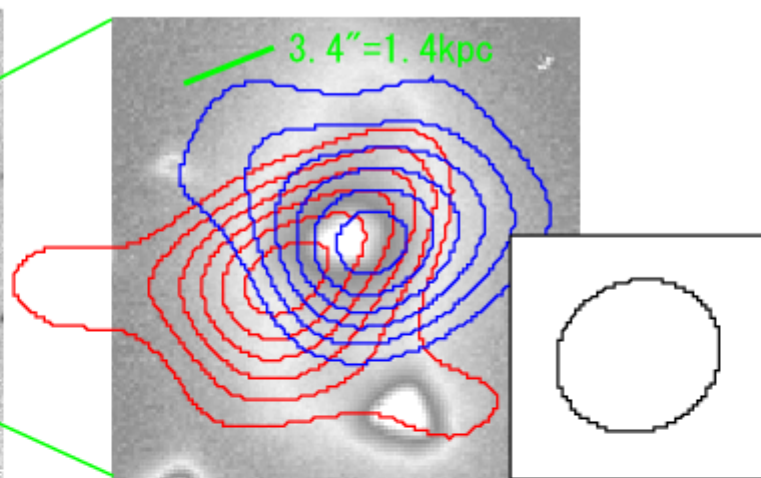
まずは近傍宇宙での
超臨界ガス降着・
Gas Feedingの様子
を探る必要

NLS1の中で2,4番目に分子ガスを多く持つ天体の発見 (Kawaguchi+ 08a)

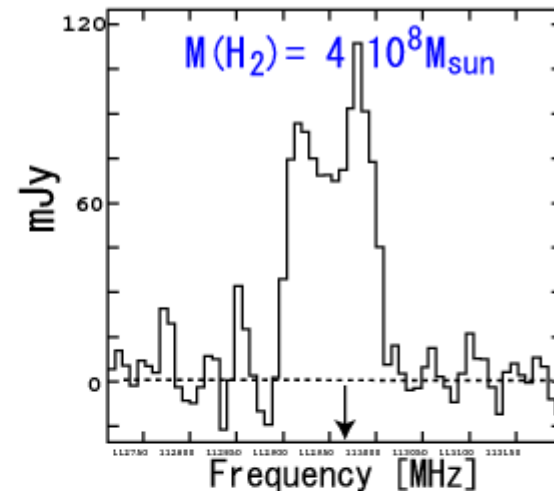
可視光イメージ



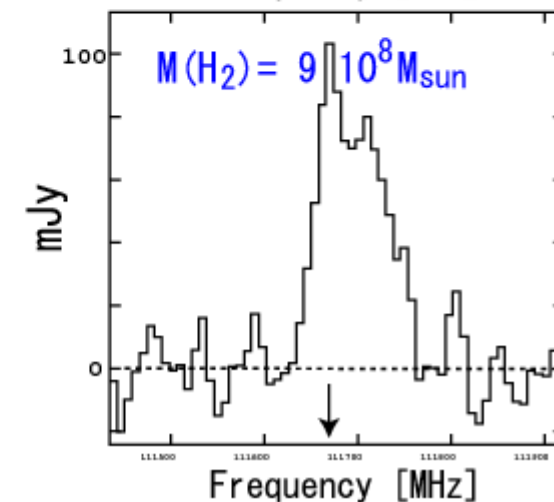
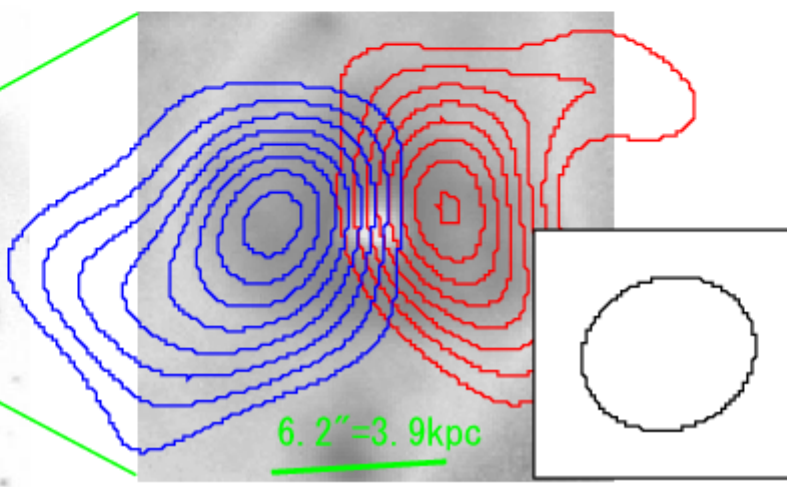
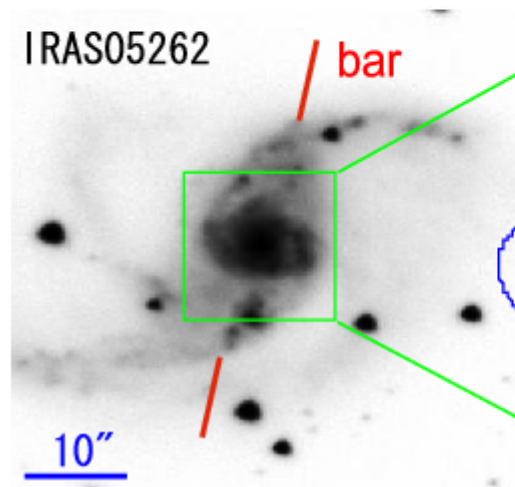
可視光 + NMA-D配列



NMA-D配列 スペクトル



IRAS05262



⇒ ALMA時代に何が
できるか勉強したい

まとめ

- ① パーセクスケール・トーラス外縁部の概観
 - * 中間赤外線干渉計で、おおよその**トーラスサイズ**は制限
 - * 中間赤外線放射領域の**形状**などについて、まだ
しばらく**不明瞭**
 - * ⇒ **ALMA**の威力に期待

- ② トーラス最内縁部・円盤最外縁部、輝線診断への提言
 - * トーラス最内縁部は従来予想よりもBHに近い。
円盤外縁部に繋がっている。
 - * 超臨界ガス降着では、X線で照射されたガスの**輝線診断**
に影響が出るはず。

- ③ 超臨界ガス降着によるブラックホールの成長・分子ガス
 - * 超臨界ガス降着で巨大BH形成。 **Feeding**要調査。