

降着円盤の非等方性放射が活動銀河核の ダストトーラス内縁構造に与える影響

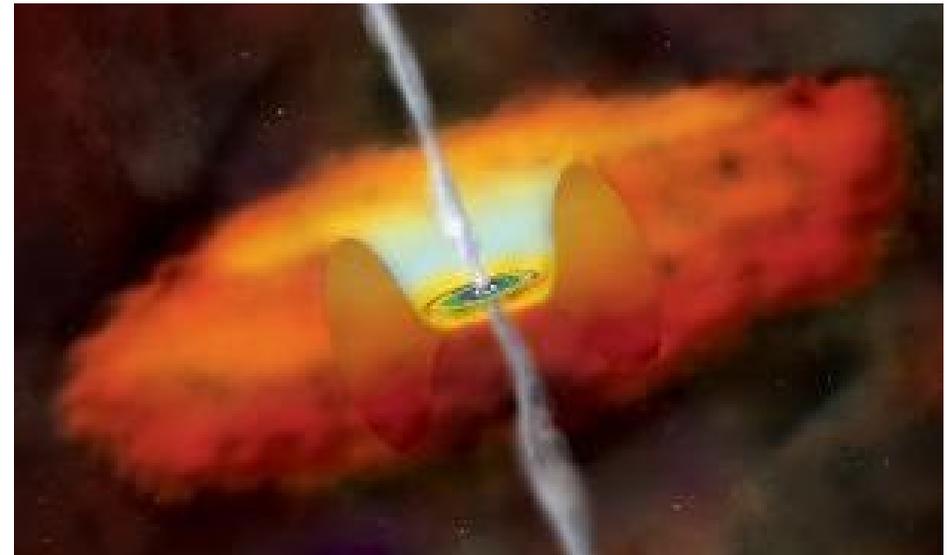
川口 俊宏

森 正夫

(筑波大 計算科学研究センター)

2010年9月3日(金)

銀河のダスト研究会@神戸大



(© CXC/Melissa Weiss)

1. AGNのダストトーラスとは:
形状、ダスト sublimation、最内縁半径 (理論と観測の不一致)
2. 計算結果① トーラスの最内縁構造
3. 計算結果② 円盤の紫外線放射に対する、
トーラスの近赤外線光度変動応答
4. まとめ

1、AGNのダストトーラスとは：

AGN: 降着するガスの重力エネルギーを開放して銀河100個分くらいの光度で光るモンスター。

トーラス: 降着円盤へのガス供給体 (ため池)。
ダストを含むclumpがドーナツ状に分布し、
中心ブラックホール(BH)と降着円盤を取り囲んでいる。

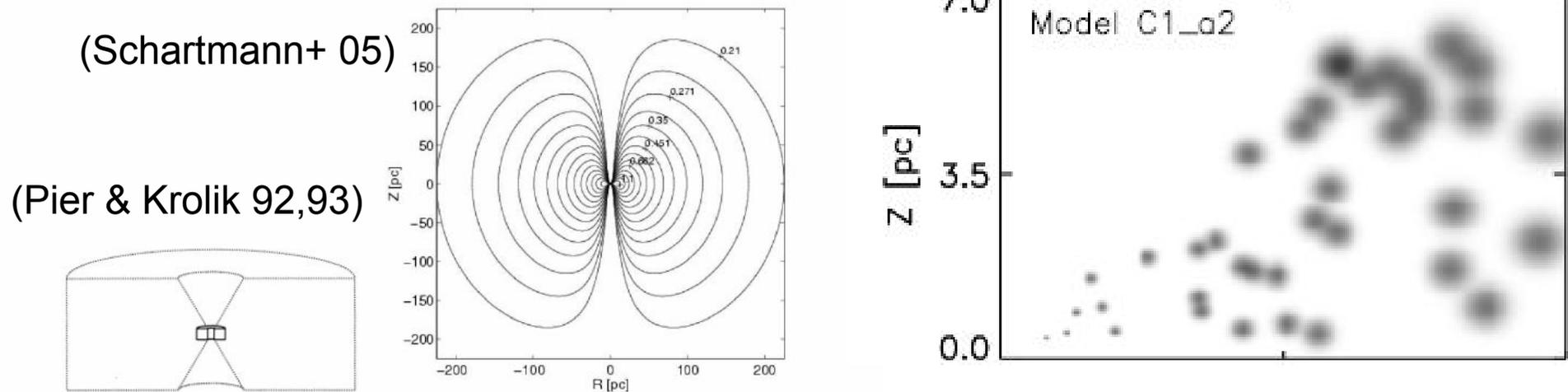
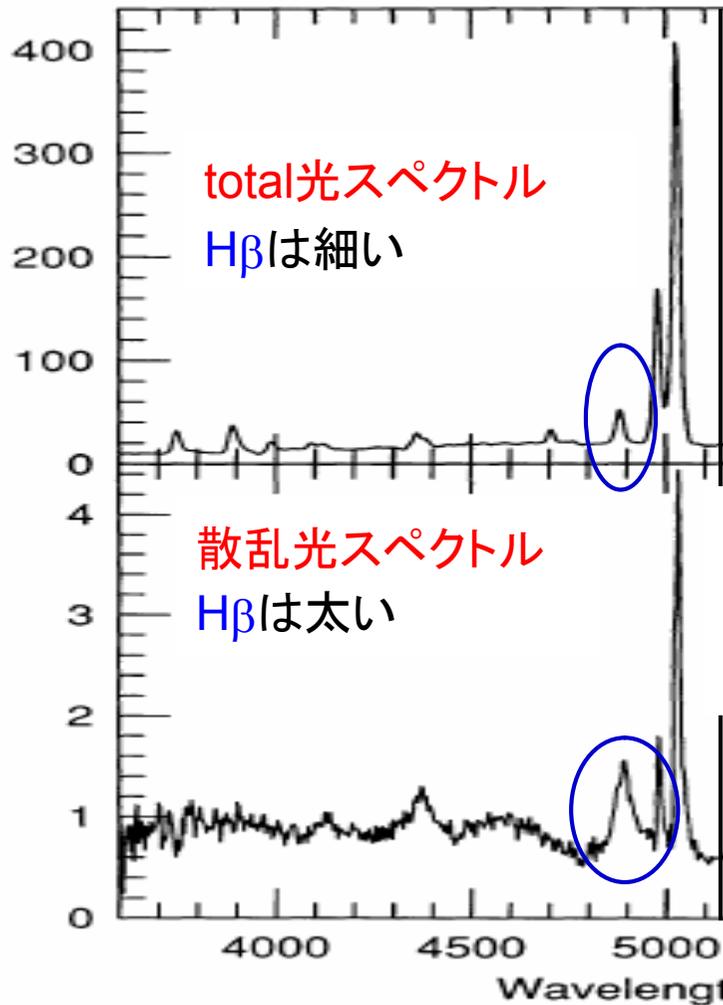


Figure 1.4.: Geometry of smooth dust distributions. *Left:* The pioneer work of Pier & Krolik (1992, 1993) used a compact torus with high dust density which is embedded in a larger torus with lower dust density. *Right:* Schartmann et al. (2005) studied a dust distribution which was motivated by a physical model for the formation of the torus.

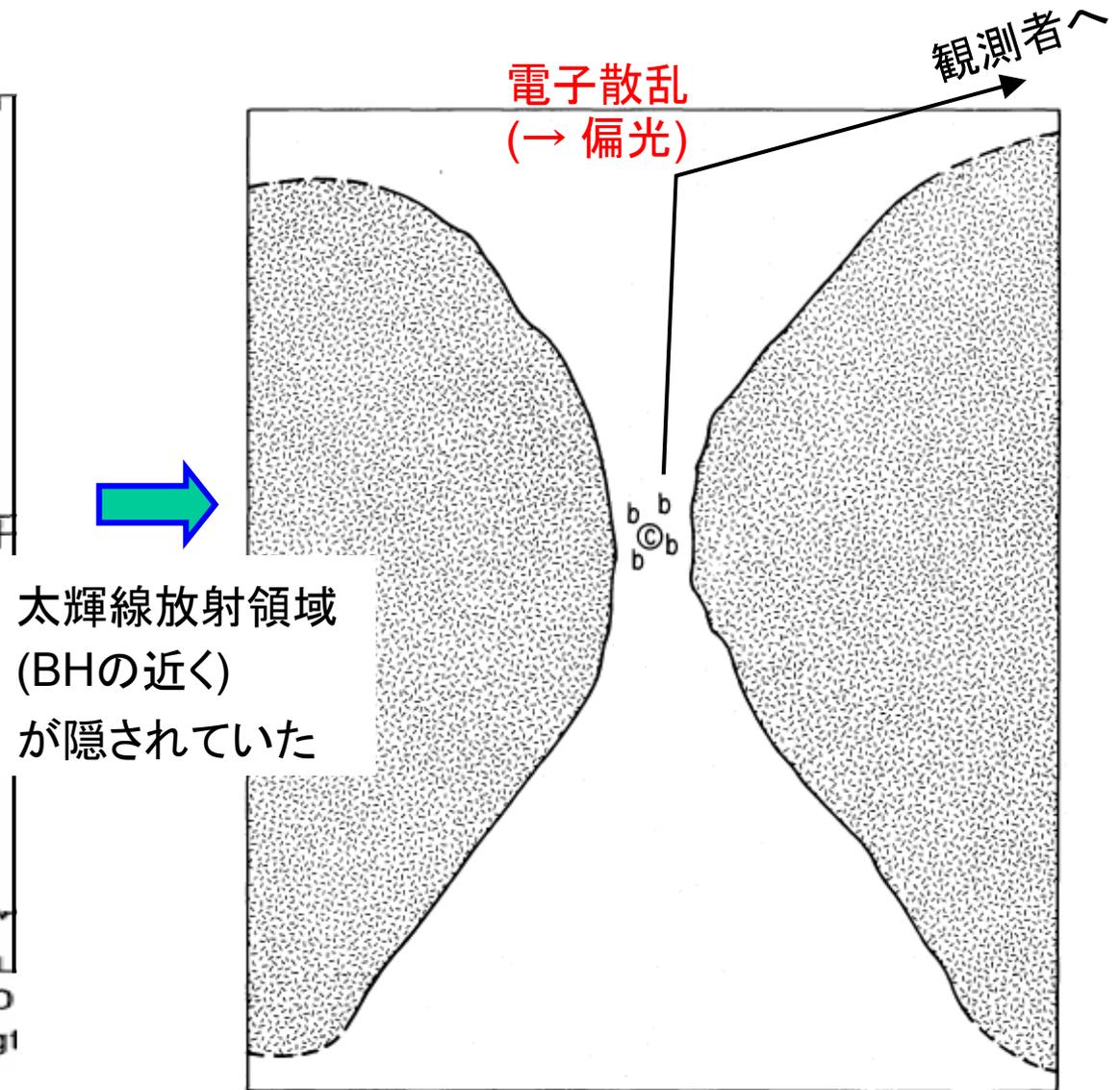
(Dullemond & van Bemmelen 05)

1、AGNのダストトーラスとは：形状 (←可視光偏光観測結果)

2型セイファート銀河、NGC1068



(Miller et al.)



(Antonucci & Miller 1985)

1、AGNのダストトーラスとは: clump の集まり (Krolik & Begelman1988)

偏光度が大きい、1型2型AGNの数比

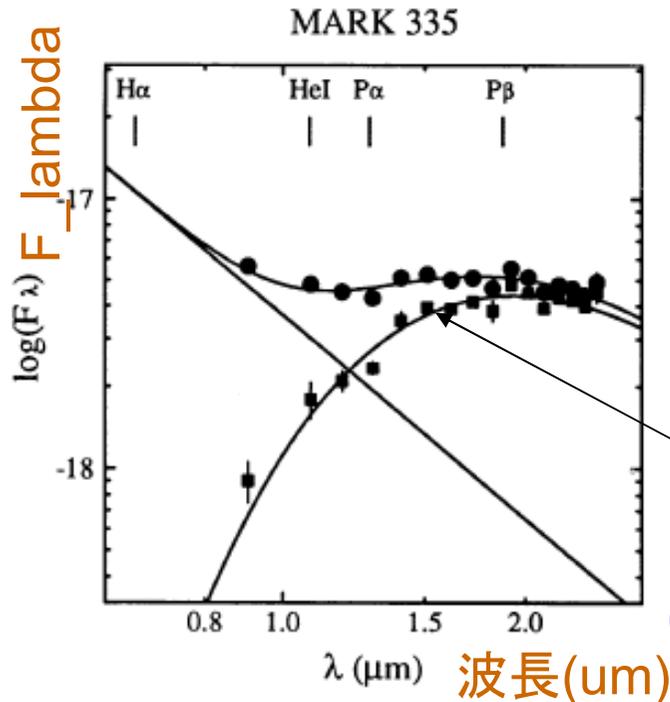
- ⇒ torus の厚み(aspect ratio = H/r)大
- ⇒ 厚み方向の速度分散が大を示唆 (~回転速度)
- ⇒ ダストには、存在できる上限の温度(~1500K)があるので、熱速度でこの速度分散を出すのは無理
- ⇒ Dust torus 中のガス・ダスト分布は、smooth ではなく、clumpy
clump内温度は $<1500\text{K}$, clump間速度分散が大

* 現在: clumpy torusの3D輻射輸送計算 など

1. AGN dust torus の近赤外線放射: トーラス最内縁のclumpから

* 近赤外線スペクトル

Kobayashi+1993



●: observed

■: observed – power law (accretion disk)
の残差 (3ミクロンbump)

■への黒体放射fit → 1500K

~ ダスト(graphite grain)

のsublimation (昇華)温度

(近赤外線 = 降着円盤からの光の吸収再放射)

* トーラス内縁とBHとの距離

(a: 吸収体(球)の大きさ)

$$\frac{L}{4\pi r^2} \pi a^2 = \sigma T^4 4\pi a^2 \quad \Rightarrow \quad r_{subl} = 0.18 \text{ pc} \left(\frac{L}{10^{45} \text{ erg / s}} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{subl}}{1500 \text{ K}} \right)^{-2}$$

~0.5光年

中心核の光度変動から~months遅れて近赤外線が変動するはず
→ モニター観測 (次頁)

* 近赤外線・可視光モニター観測

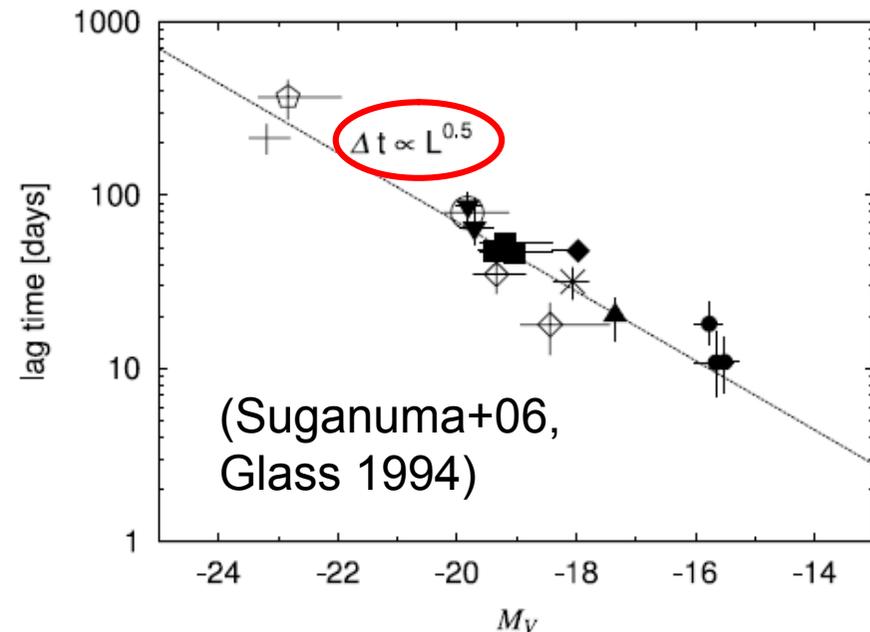
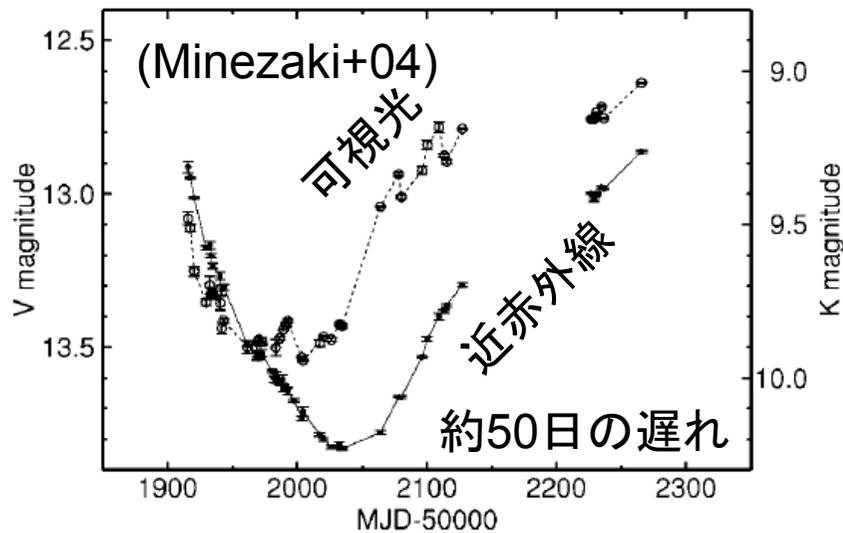
- 近赤外線は約10-100日遅れて変動 (e.g. Magnumグループ)
- timelag/光速がsublimation半径とほぼ一致 かつ $L^{0.5}$ に比例

⇒ 「トーラス内縁部は中心に照らされて、sublimationでコントロール」説が広く受け入れられている

$$r_{subl} = 0.18 \text{ pc} \left(\frac{L}{10^{45} \text{ erg / s}} \right)^{0.5} \left(\frac{T_{subl}}{1500 \text{ K}} \right)^{-2}$$

遅延の光度依存性

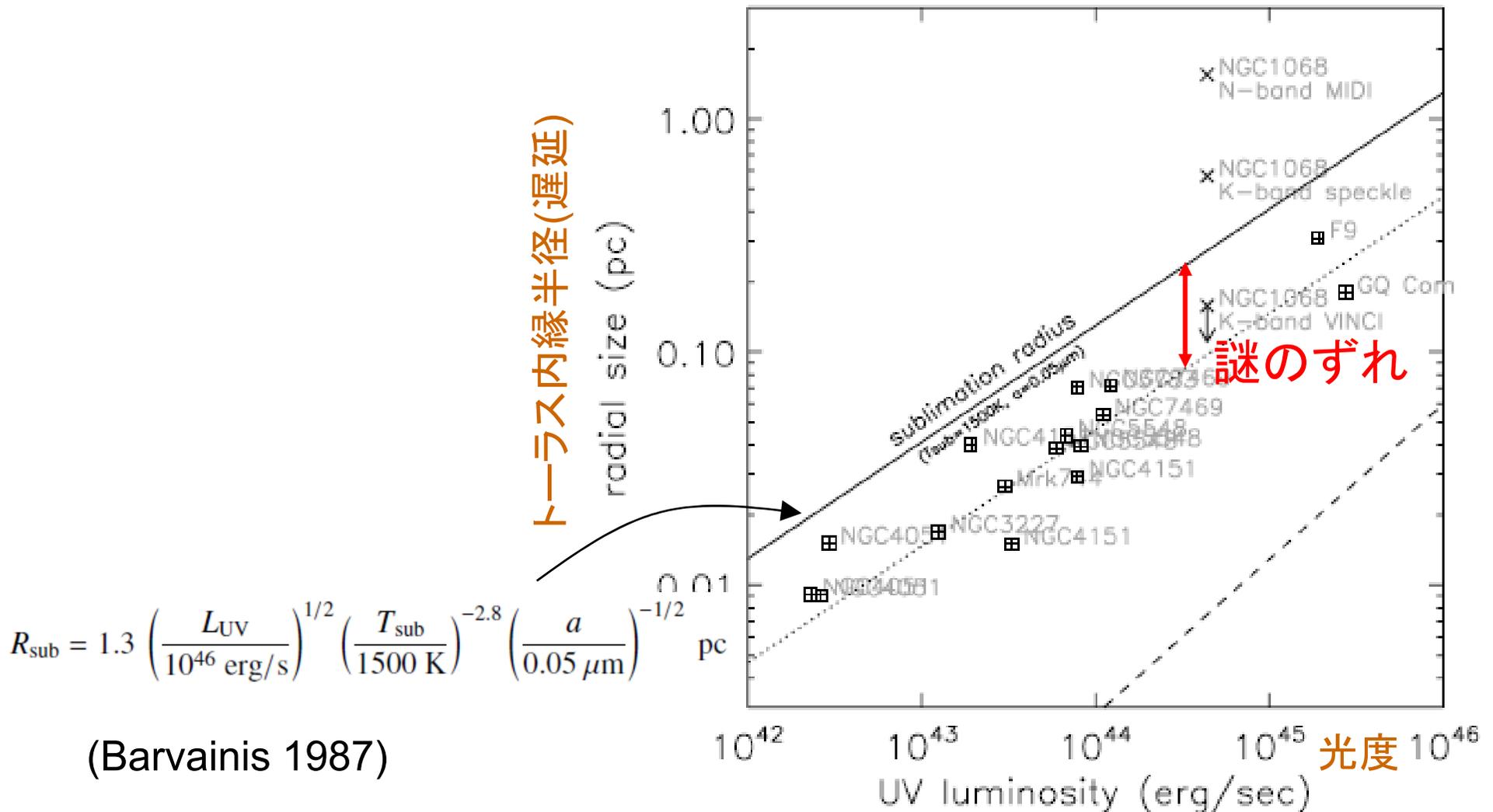
光度変動



1、トーラス内縁半径：理論と観測の不一致 この研究の問題意識

理論的に予測されるsublimation半径(実線) に比べ、観測値(□) は約1/3程度、**系統的に小さい**

(Kishimoto+07; Nenkova+08)



2.0 この研究の方向性のまとめ

目標:

トーラス半径(近赤外線・可視光に対する変動の遅れ)について、理論と観測結果の間にある系統的ずれを説明したい。

着眼点:

理論予測値は、等方放射を仮定している。

降着円盤からの紫外線・可視光は、等方放射ではない。

(cf. 原始惑星系円盤)

つまり、観測者が1型AGNの円盤を観る角度と、トーラスが観る角度には系統的に差がある。

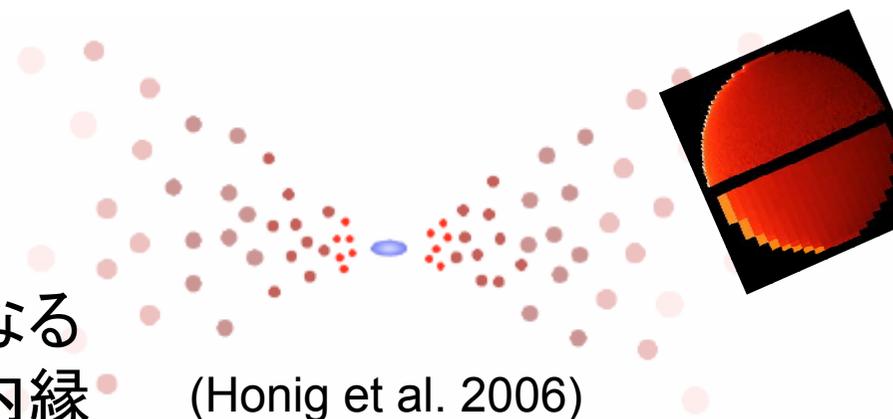
この効果が、ダストトーラスの構造や変動特性に与える影響を調べる。

状況設定:

clumpy torusモデル

clumpのうち、最大温度が1500Kになる

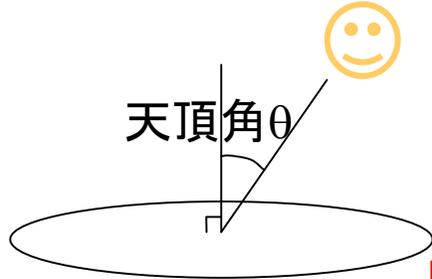
clumpの位置が、トーラス最内縁



(Honig et al. 2006)

2、トーラス最内縁構造の計算

2.1: 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 $\varphi+d\varphi$ 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 $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$ として

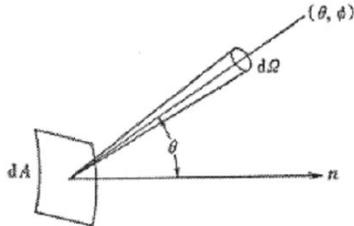


図 3.2 面 dA を通る光束 n は面 dA の法線

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

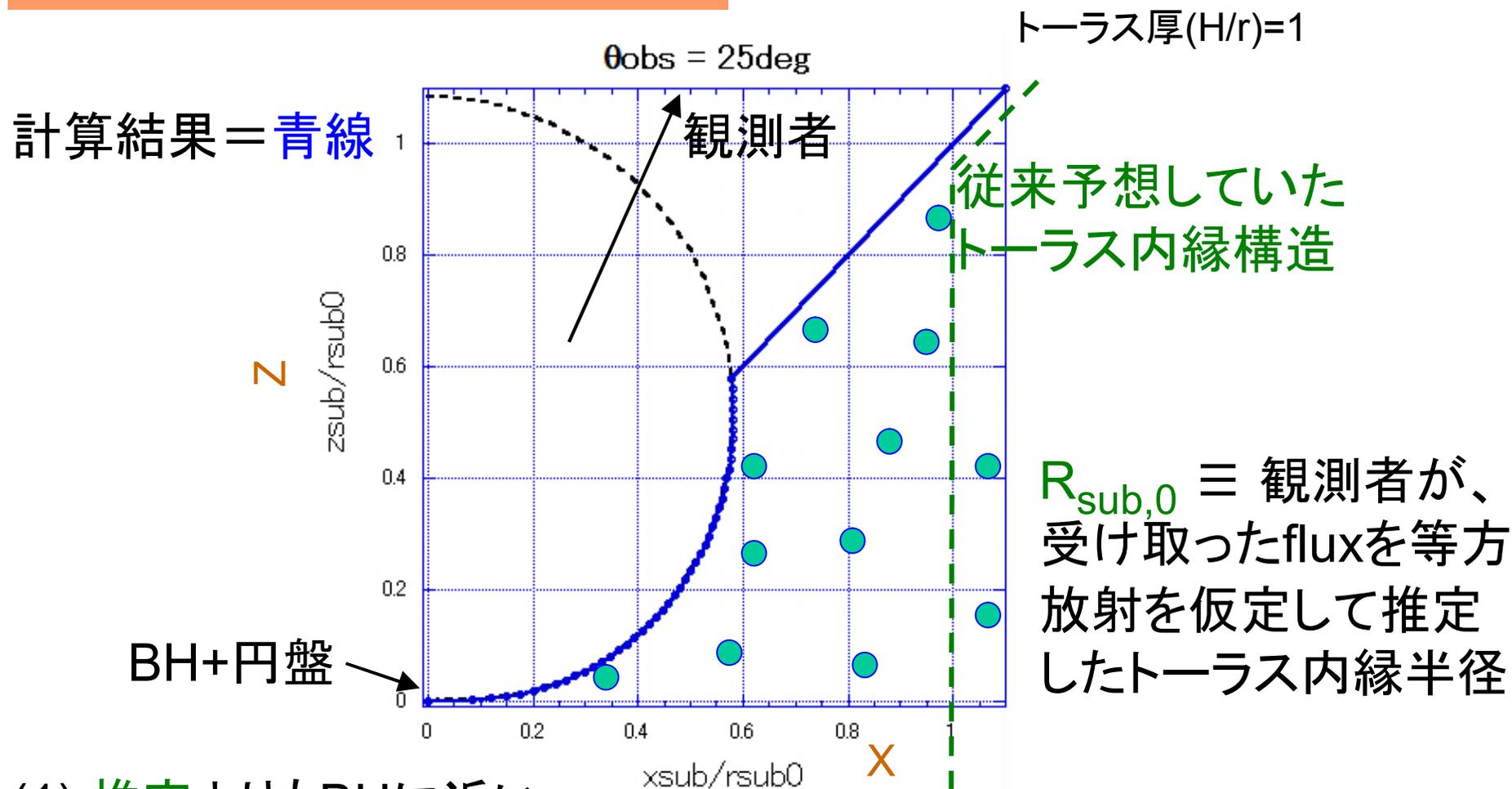
と表わされる。ここで I をエネルギー強度 (energy intensity) といい、単位は $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}\cdot\text{ster}^{-1}$ である。 $\cos \theta$ は今考えている方向への垂直断面積が $\cos \theta dA$ で表わせることから出てくる。 F と I の関係は

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

佐藤 & 原「宇宙物理学」



2. トーラス内縁構造：計算結果



(1) 推定よりもBHに近い

(2) すり鉢型, お椀型 (赤道面付近でさらに、円盤にせりだしている)

理由: 円盤・トーラスの赤道面に近い(θ 大)程、照射光弱い

→ より近づける

(3) $\theta=88$ 度でトーラス内縁半径(x_{sub})が降着円盤外縁半径($0.1 \times r_{\text{sub},0}$)

2、トーラス最内縁の直接撮像観測可能性

赤外線観測は干渉計時代に入り空間分解能が上がってきている
とはいえ、空間分解観測から直接、トーラスの形状、円盤&BHとの
距離を測るのはまだ無理 (cf. 干渉計のvisibility)

TMT with AO (0.01" @ NIR)でも1桁くらい足りない:

近傍1型AGN: NGC4051, 4151, 3227 @ $z=0.002-0.004$

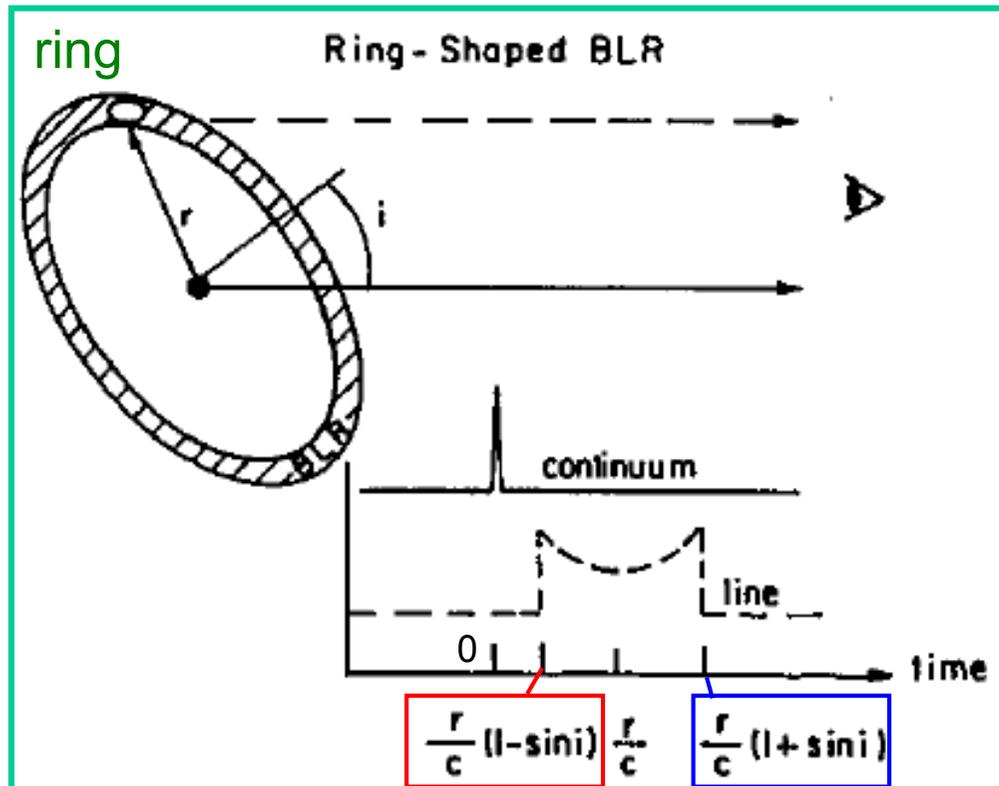
0.01" = 0.4pc @ $z=0.003$

これら低光度AGN($\nu L_{\nu(B)} \sim 42.5$)の $r_{\text{subl}} \sim 0.03\text{pc} \ll 0.01''$

→ 円盤放射の時間変動に対するトーラスの光度変動応答観測と
モデル計算結果を比較 (§ 3)

3. 光度変動応答(transfer function) $\Psi(t)$ の例

(Netzer 1990)



ring → 2本角
thin shell → 長方形
thick shell → 台形

- Reprocess放射の変動は、照射光の光度曲線と $\Psi(t)$ のconvolution
- 観測で計測されるtime lagは、 $\Psi(t)$ の重心
→ 理論的に $\Psi(t)$ を求める

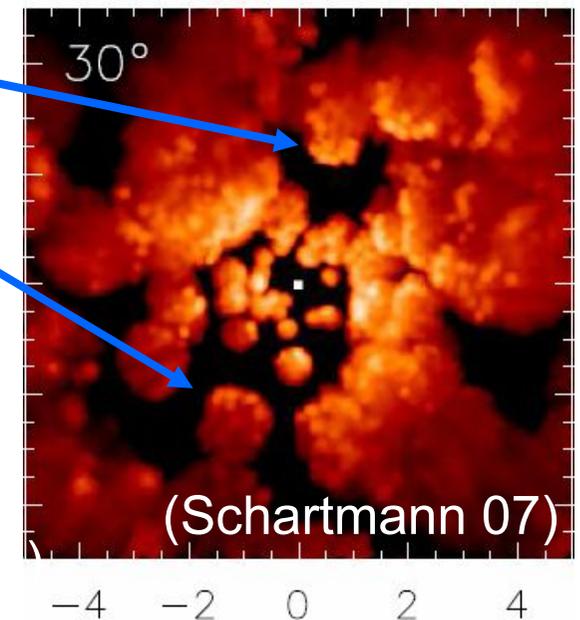
3. 円盤の紫外線放射に対する、 トーラスの近赤外線光度変動応答 $\Psi(t)$

$\Psi(t)$ の計算に必要な材料 (各1頁)

1、光路差($\theta, \varphi; \theta_{\text{obs}}$)の計算

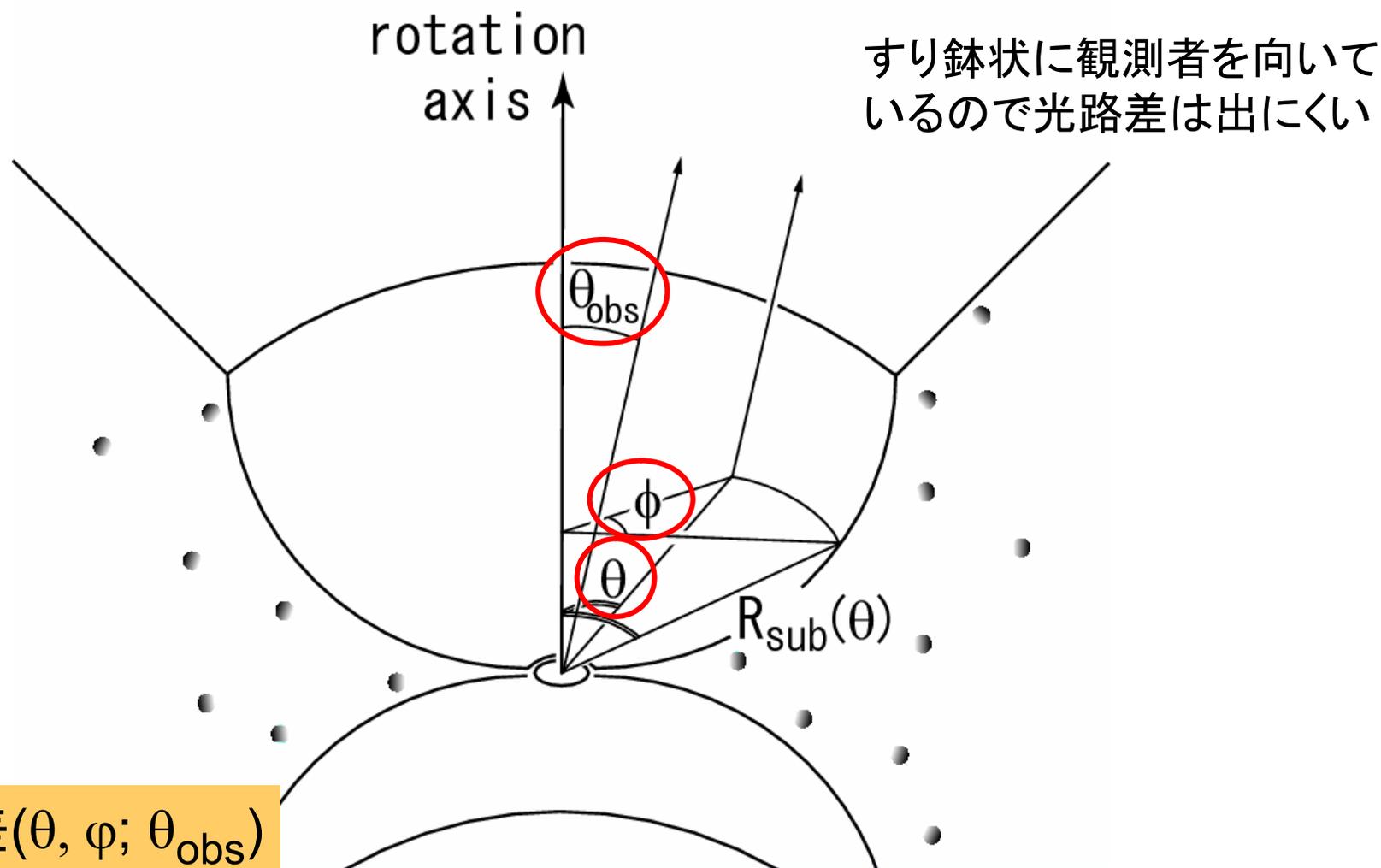
2、emissivity(θ)

3、各clumpからの放射の非等方性
(照らされている面が観測者を向いているかどうか)



3.1 光路差($\theta, \varphi; \theta_{obs}$)の計算

observer
($\phi=0$)



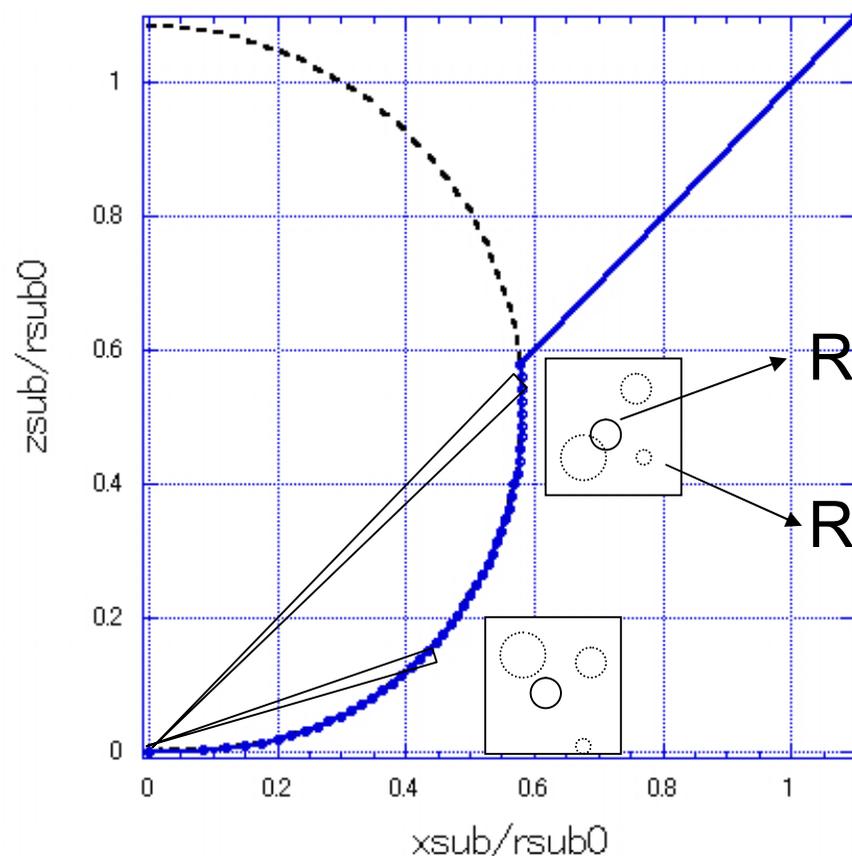
光路差($\theta, \varphi; \theta_{obs}$)

$$= R_{sub}(\theta) \times \left[1 - \left\{ \cos \theta_{obs} \cos \theta + \sin \theta_{obs} \sin \theta \cos \varphi \right\} \right]$$

3.2 トーラス内縁の単位面積あたりのemissivity(θ):

理論的によくわかっていない: この計算での仮定

- $d\Omega$ あたりのcloud数 = 一定
- $d\Omega$ に占めるトーラス最内縁cloudの視野角が一定
(BHに近いほど潮汐力大 (潮汐半径 $\propto R$)
→ 小さいcloudしか生き残っていない)



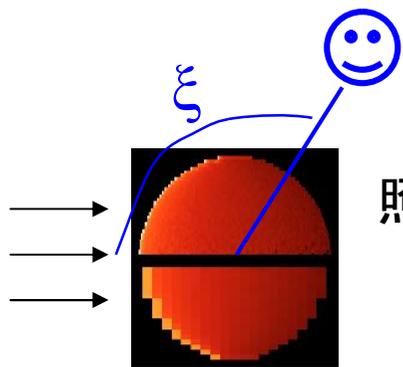
$$\text{emissivity}(\theta) \propto R_{\text{sub}}(\theta)^2 d\Omega$$

を仮定

$R_{\text{sub}}(\theta)$ にあるcloud → 近赤外線放射

$R_{\text{sub}}(\theta)$ より遠くにあるcloud
→ 中間赤外線放射

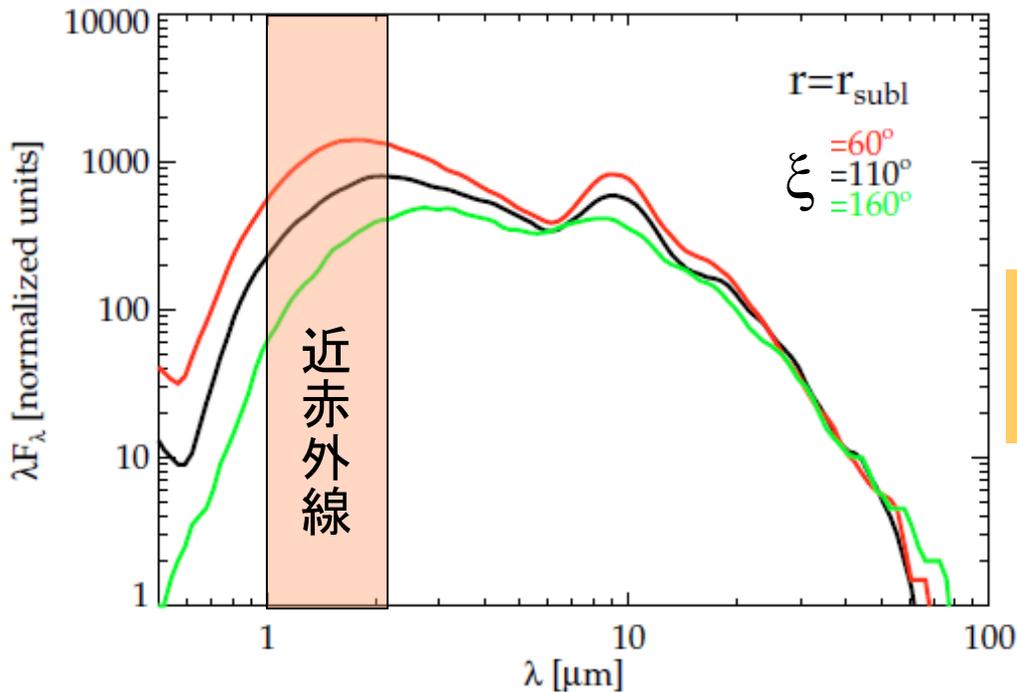
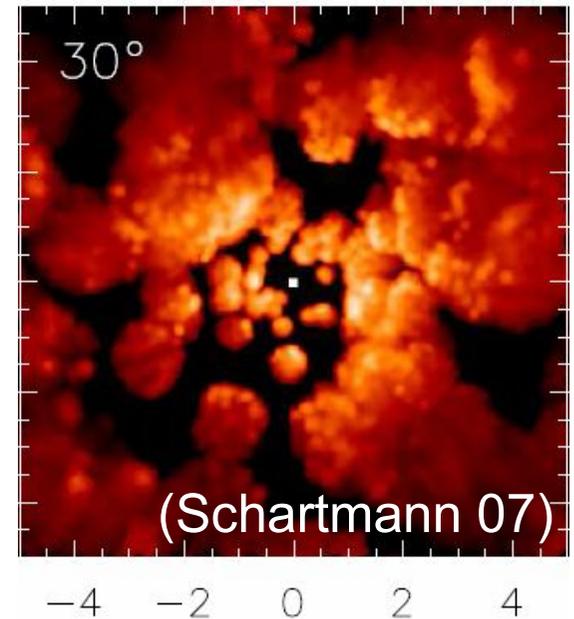
3.3 各clumpからの放射の非等方性



照らされている面が観測者に向いているかいないかが重要

照らされたcloudの高温部分
 ~ 月の満ち欠け
 (Honig et al. 2006)

月の満ち欠けなら
 放射の非等方性 $\propto (1 + \cos \xi) / 2$

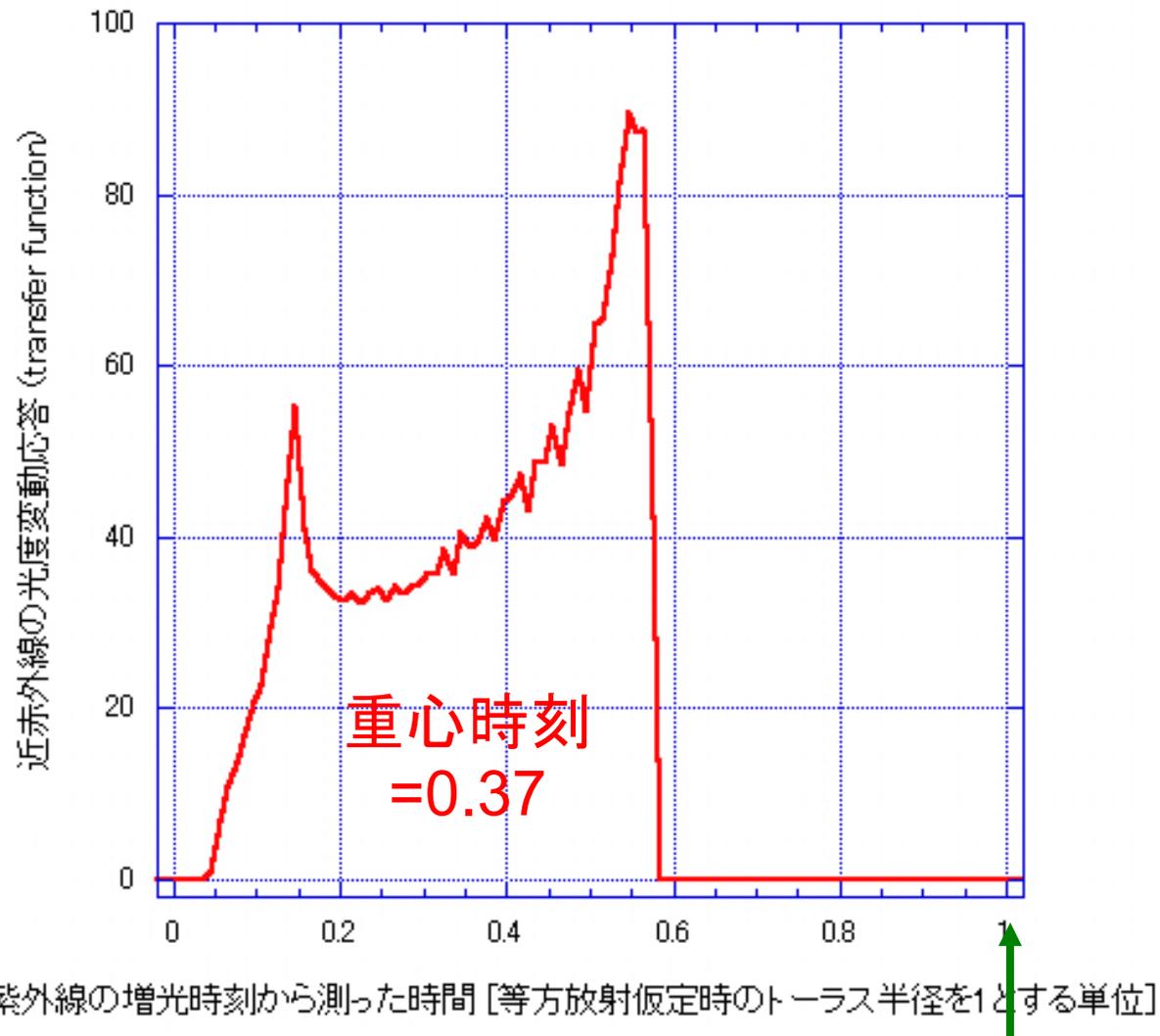


cloud内の光の浸透などを
 考慮して

放射の非等方性
 $\propto \min\{1, (1.2 + \cos \xi) / 2\}$ と仮定

(左の計算と合う)

3. 計算結果: トーラスの光度変動応答 $\Psi(t)$



トーラス放射は、**等方放射を仮定して予測される時間遅れの約1/3**で照射光に反応することがわかった。

→ 謎のずれが説明できた

まとめ

- 降着円盤からの放射の非等方性を考慮し、ダストトーラス最内縁の構造を求めた。
 - ①等方放射を仮定して推定した位置よりもBHに近い
 - ②すり鉢型の形状が得られた (光路差が出にくい)
 - ③降着円盤外縁に接続しているかもしれない
- 近赤外線fluxの計算手法を開発した。
- Transfer functionを計算した結果、①と②の効果により、lag-L関係での理論と観測の謎のずれを説明できることがわかった
- 様々な依存性 (今日は省略)
 - 4. θ_{obs} 依存性: type 1.5, 1.8
 - 5. ガス降着率依存性:
 - 降着円盤の影(自己掩蔽)
 - 6. トーラスの厚み依存性:
 - 妙にぶ厚いトーラスを持つAGN

