

# VERA 43 GHzによる銀河系中心核 Sgr A\* のモニター観測

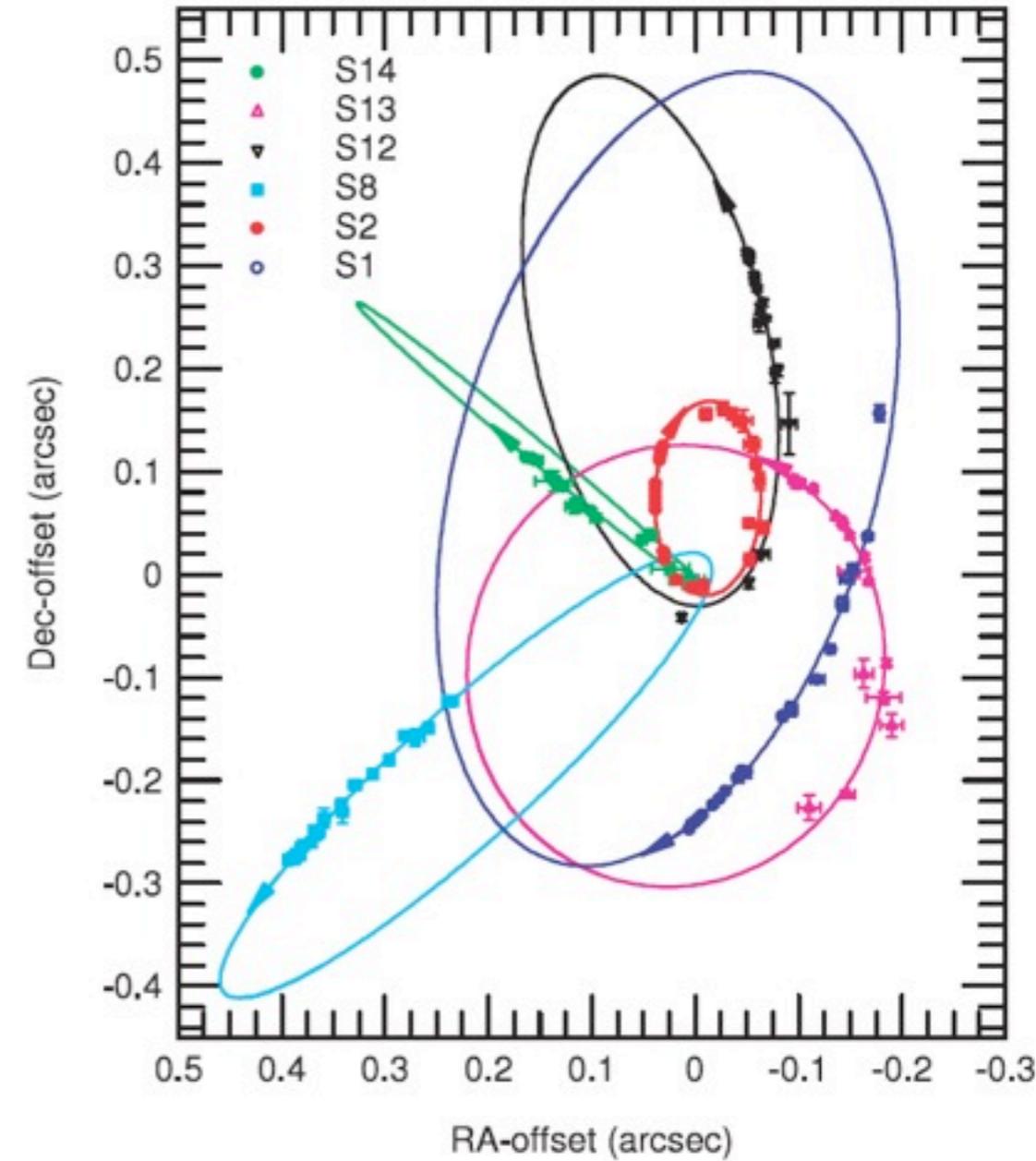
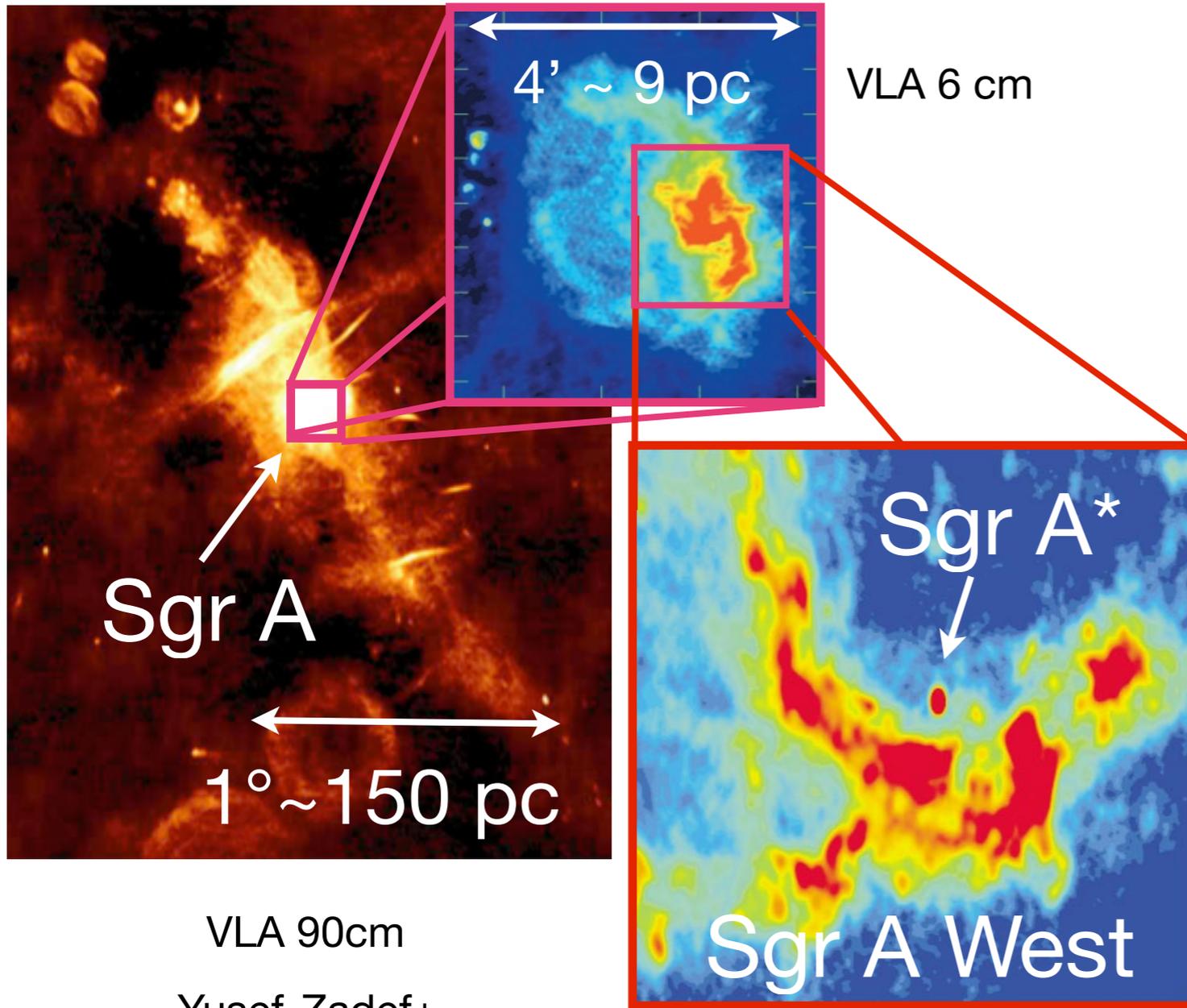
秋山 和徳

(東京大学 / 国立天文台 水沢VLBI観測所 修士2年)

## Collaborators

高橋 芳太 (苫小牧高専), 本間 希樹, 小山 友明、  
小林 秀行 (国立天文台 水沢VLBI観測所)

# Sgr A\* is the nearest AGN!

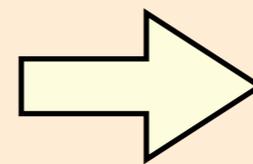


Eisenhauer+2005

コンパクトな 電波/近赤外/X線源

Distance ~ 8 kpc

Mass ~  $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$



$1 R_s \sim 10 \text{ AU}$

$\sim 10 \mu\text{as}$

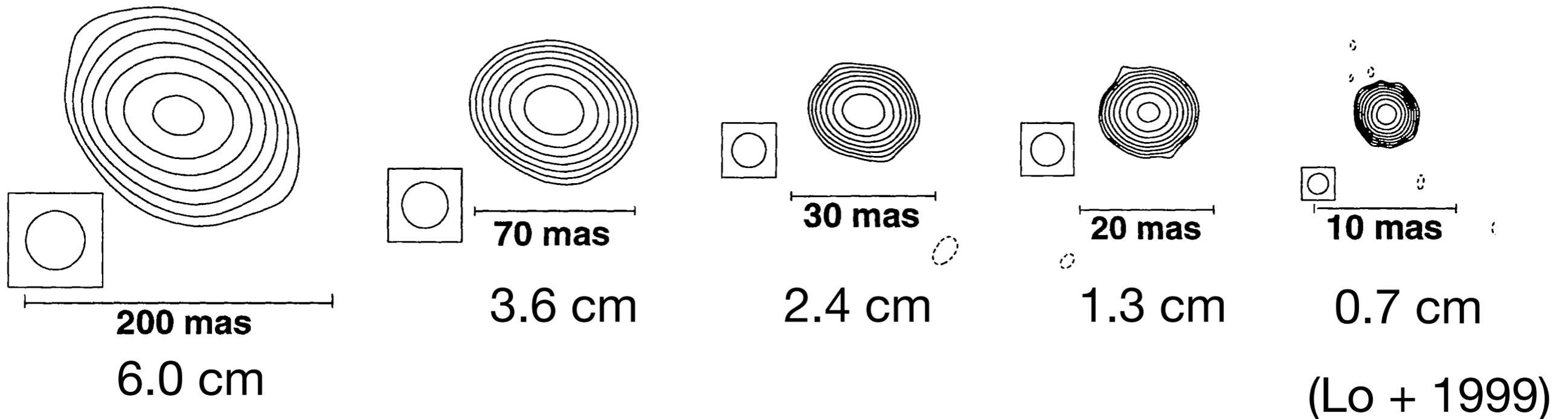
# Radiation mechanism of Sgr A\*

- ① 降着円盤 (Radiation Inefficient Accretion Flow) ? (e.g. Yuan+2003)
- ② 非熱的ジェット ? (e.g. Falcke+2001, Yuan+2002)
- ③ 熱的なアウトフロー ? (Loeb & Waxman 2007)

Still under the discussion

詳細なSgr A\*の構造はVLBIを持ってしても撮像できない

--> 星間散乱の影響で像がボケてしまう。



# Radiation mechanism of Sgr A\*

- ① 降着円盤 (Radiation Inefficient Accretion Flow) ? (e.g. Yuan+2003)
- ② 非熱的ジェット ? (e.g. Falcke+2001, Yuan+2002)
- ③ 熱的なアウトフロー? (Loeb & Waxman 2007)

Still under the discussion

詳細なSgr A\*の構造はVLBIを持ってしても撮像できない

しかし、Sgr A\*の散乱則を用いて、観測されたSgr A\*のサイズからSgr A\*本来のサイズを推定可能

(Bower+2004, 2006, Falcke+2009)

→ 電波強度 と サイズの測定が可能

6.0 cm

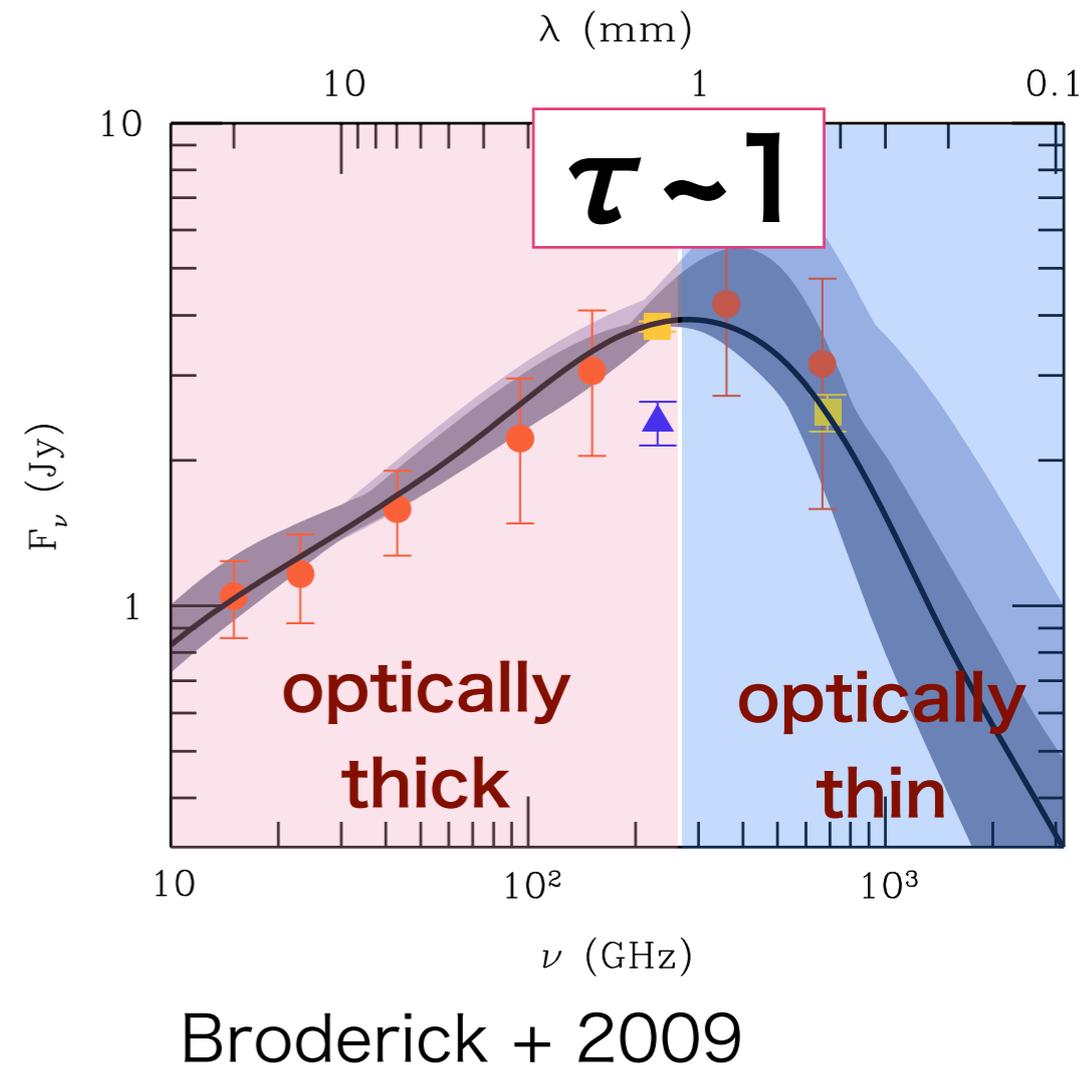
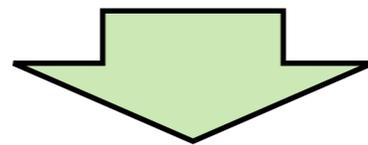
(Lo + 1999)

# Frequency dependence of the intrinsic size of Sgr A\*

Sgr A\* 本来のサイズは周波数依存性を持つ

- ~43 Rg @ 22 GHz,
- ~28 Rg @ 43 GHz
- ~13 Rg @ 86 GHz,
- ~ 4 Rg @ 230 GHz

サブミリ波より長い波長では光学的に厚い



サブミリ波より長い波長帯で見えるのは**Sgr A\*の光球面**

--> より長い波長帯で、より外側の層が見える

(e.g., Ozel+2000, Loeb & Waxman 2007, Falcke+2009)

# Variability of Sgr A\*

- intra-day scale (min ~ hour) : Sgr A\*の構造の変化に起因
- longer scale (day ~ month) : あまり研究が進んでいない。  
--> 多波長ではない + **結合型干渉計での研究が中心。**

## Long-time variation of Sgr A\*

### Previous VLBI Study

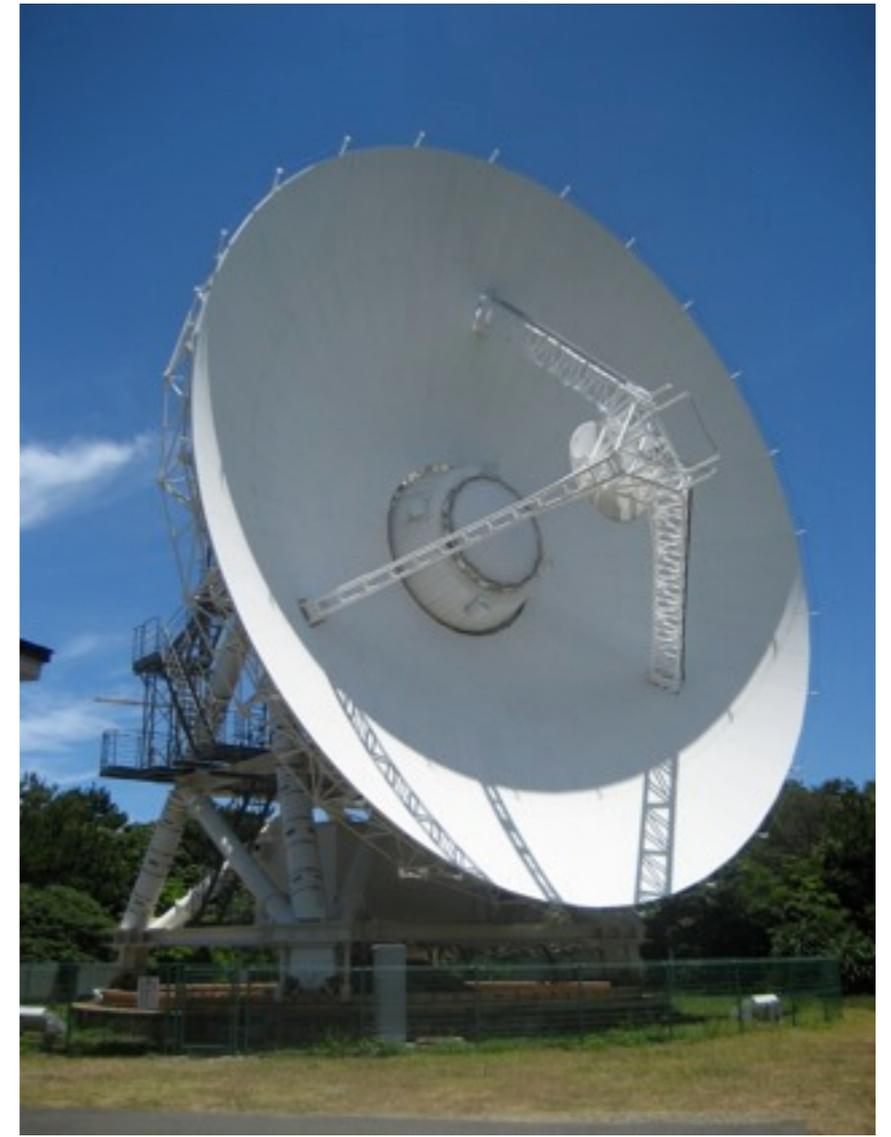
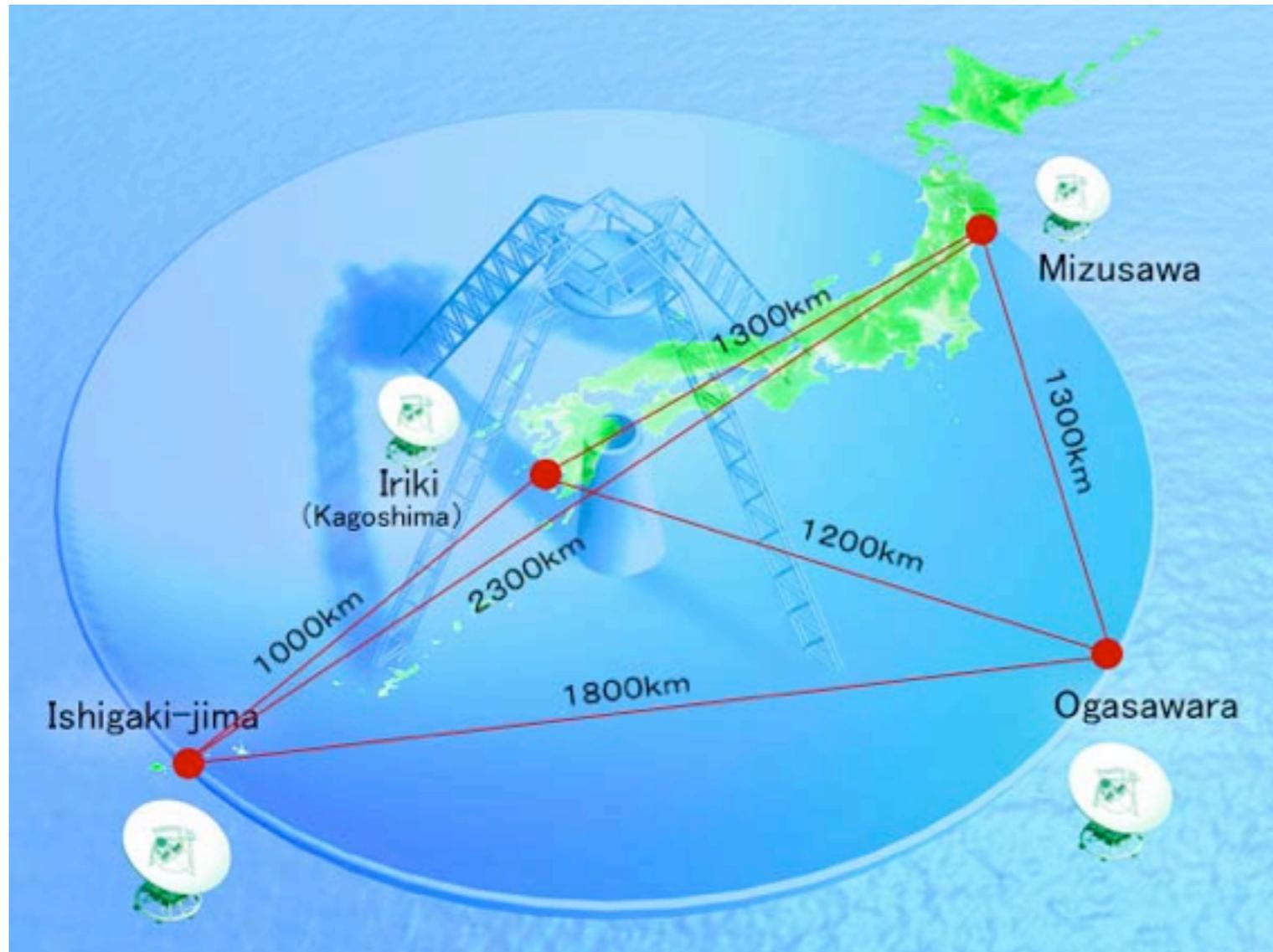
43 GHz で本来のサイズに60 %程度の変動が報告されている。  
--> 電波強度に関する情報は無し (e.g. Bower+2004)

### This Study

次の疑問：電波強度とサイズの変化の関係は？

長期スケールでのSgr A\*の電波強度とサイズの関係を探るため、  
VERA 43 GHzでモニター観測を行った。

# Observation



Array : VERA  
Frequency : 43 GHz

Spatial Resolution : 0.6 mas x 1.1 mas  
= 60  $R_g$  x 110  $R_g$   
Epoch : 10 epochs during 2005 - 2008

1年以上のタイムスケールに渡ってSgr A\*の電波強度およびサイズの時間変化をモニターしたのはこれが初めて

# Result (1/3) Observed images

## 観測されたSgr A\*のイメージ

- Sgr A\*の構造  
3年間に渡って単一成分
- Sgr A\*の電波強度@43 GHz  
標準偏差で~18%ほど変動した。

電波強度に変動が見られたにも関わらず、Sgr A\*からのジェット成分等の噴出は検出できなかった

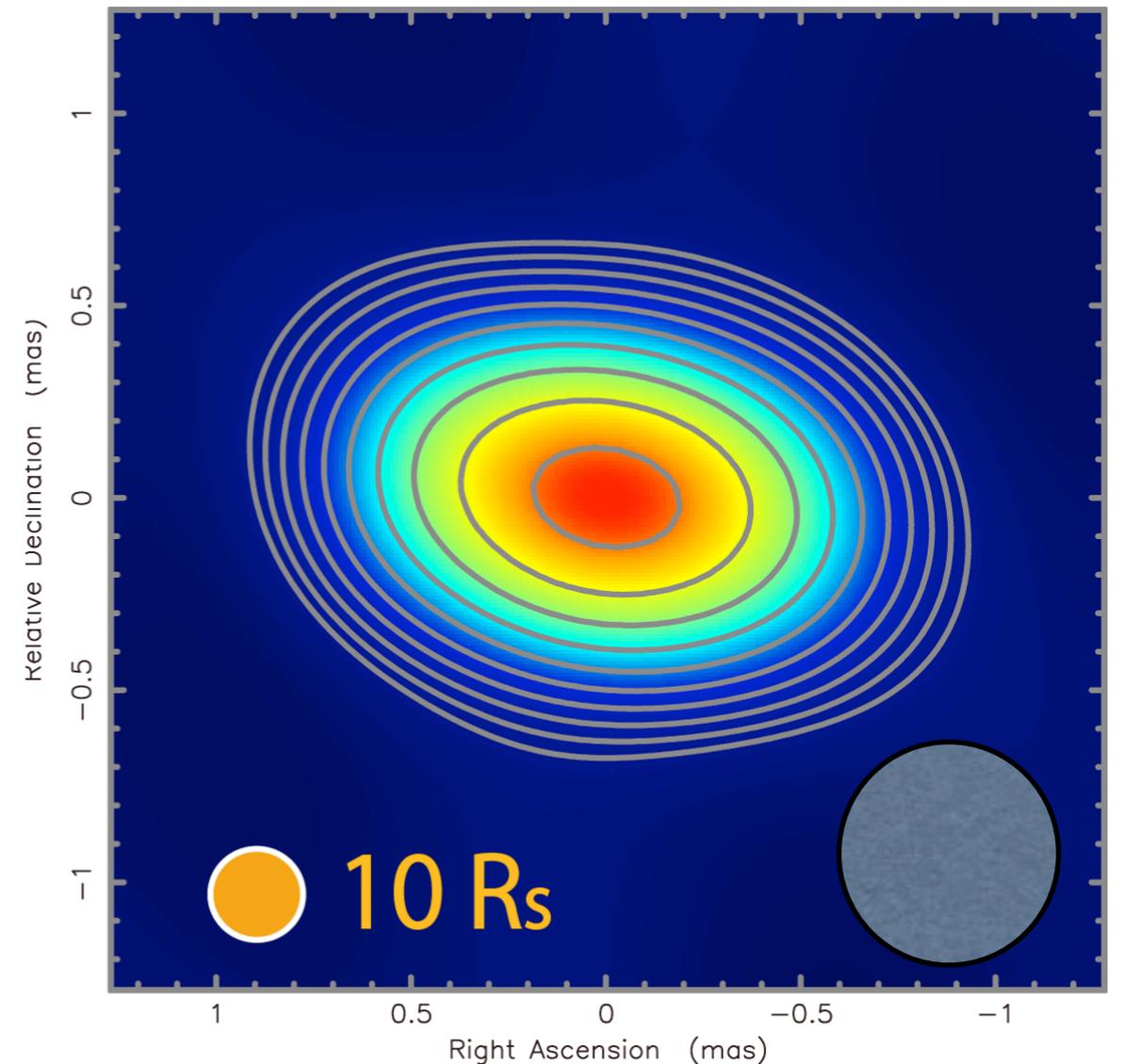


図1 VERAによるSgr A\*の43 GHzのイメージ (2008/11/5 観測)

(Akiyama et al. Submitted)

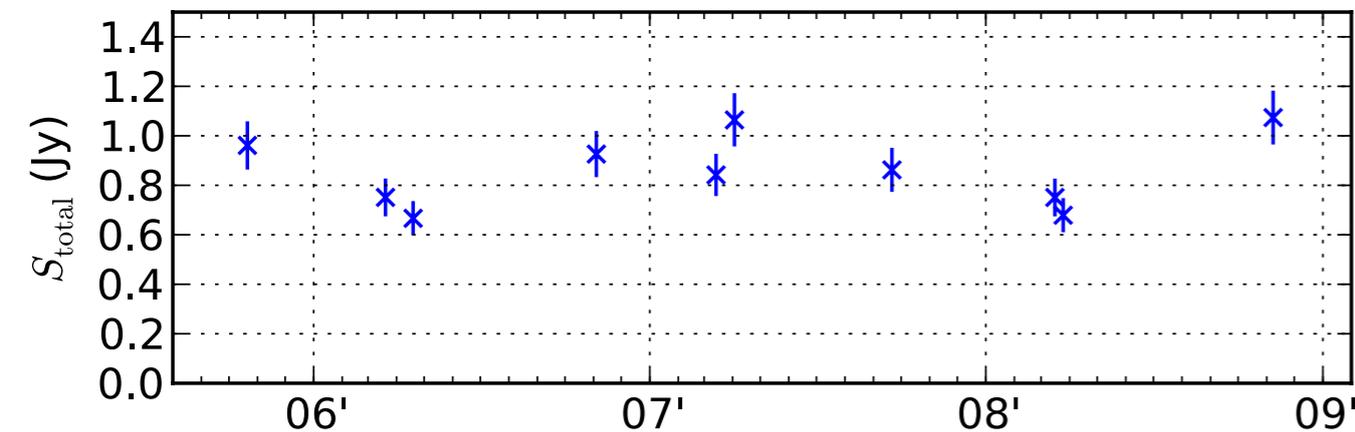
# Result (2/3) Model-fitting results

## 電波強度とサイズの変化

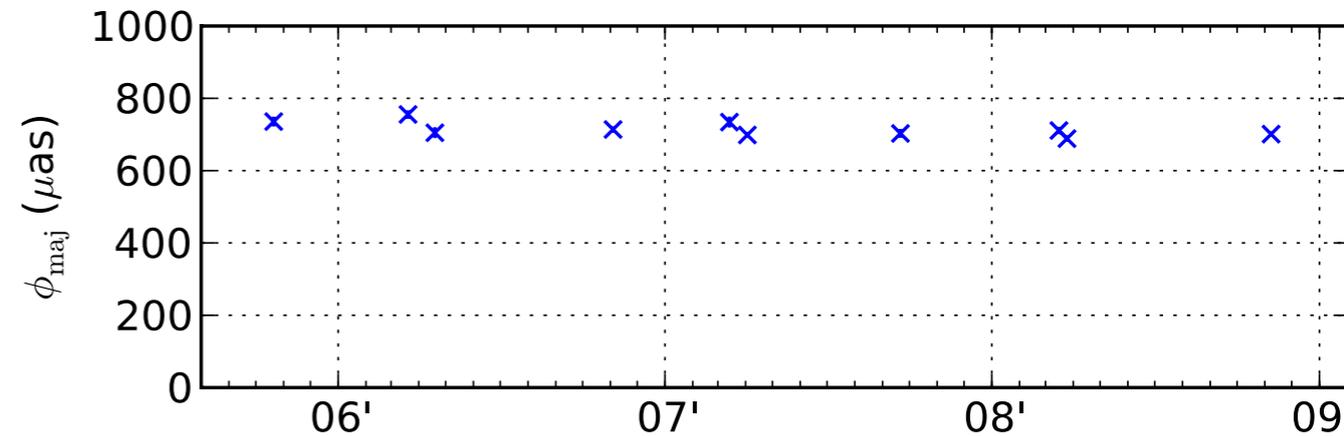
- 電波強度@43 GHzは～18 %ほど変動した。
- 見かけのサイズは～3 %ほど変動した。

電波強度とサイズの変動は、単一の輝度温度では説明が出来ない。

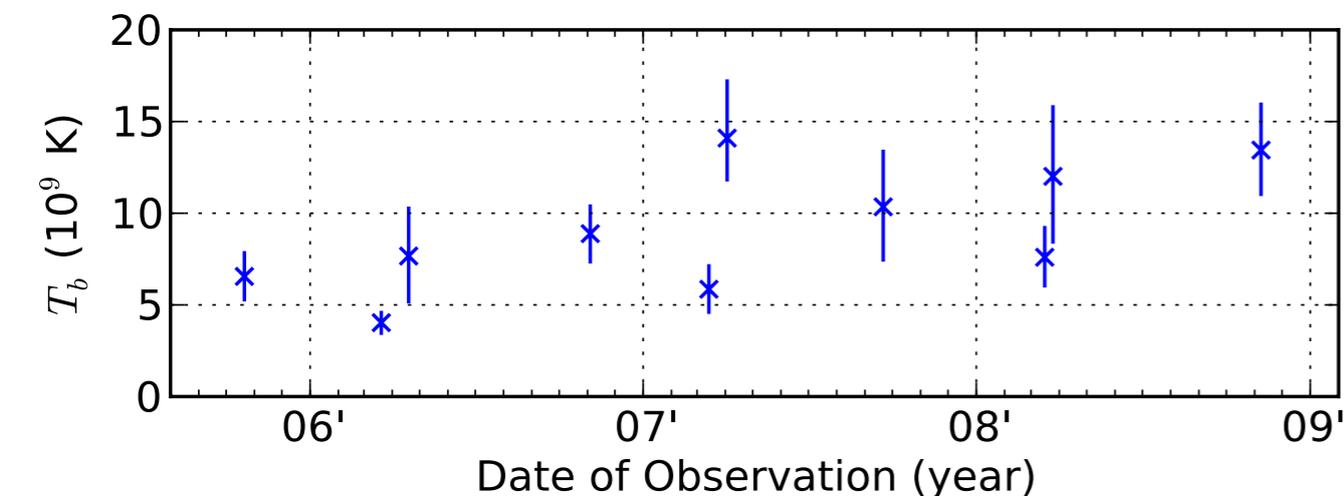
### Total flux



### Observed size



### Brightness temp.



(Akiyama et al. Submitted)

# Result (3/3) The comparison with VLBA

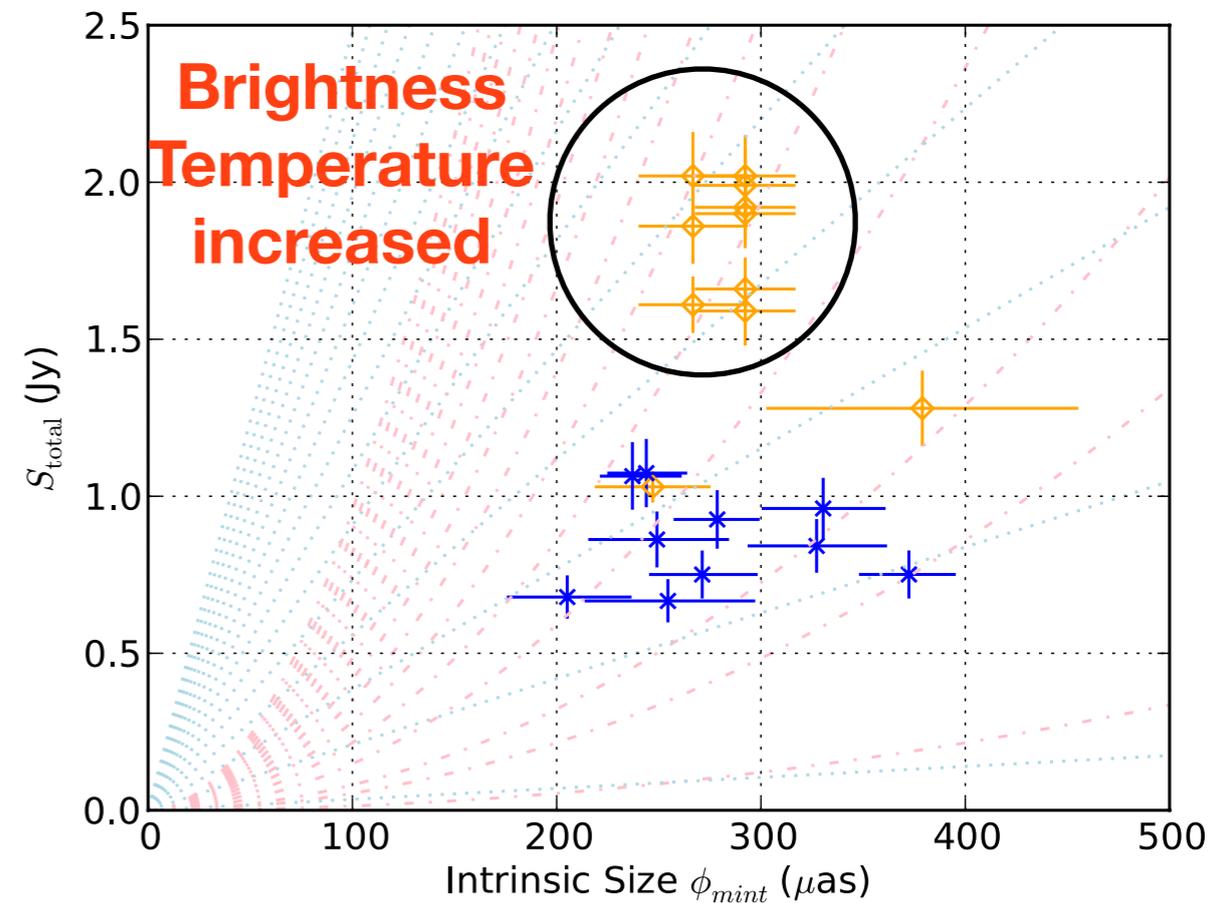
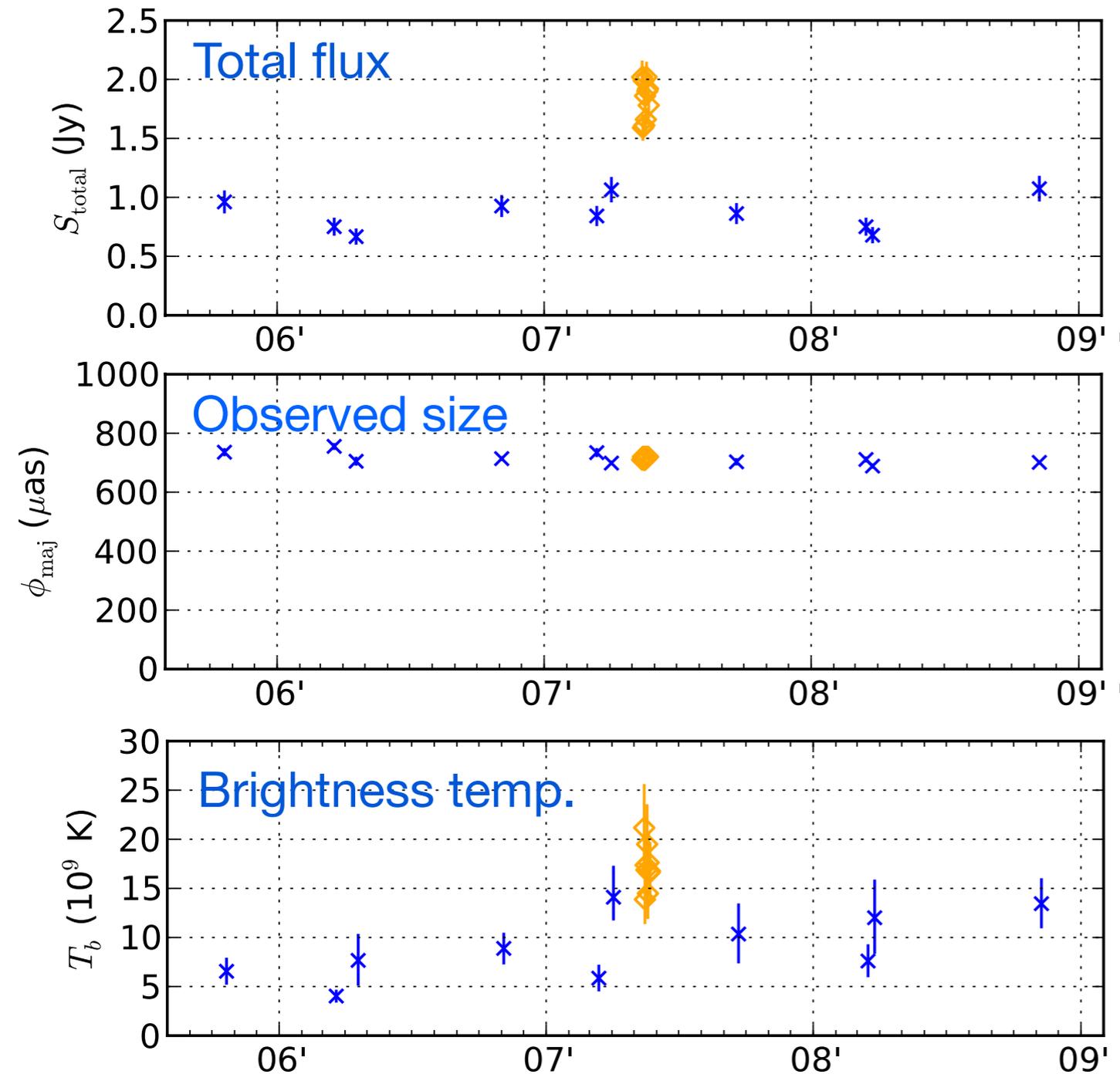
2007年に観測された電波増光 (以下 Radio-Loud State) (Lu+2011)

- 22 / 43 / 86 GHzで、過去最大の電波強度を観測
- 持続時間 >10日間

• 電波強度：2倍

• サイズ：ほぼ等しい (within ~3 %)

-> 輝度温度 ~ 2倍



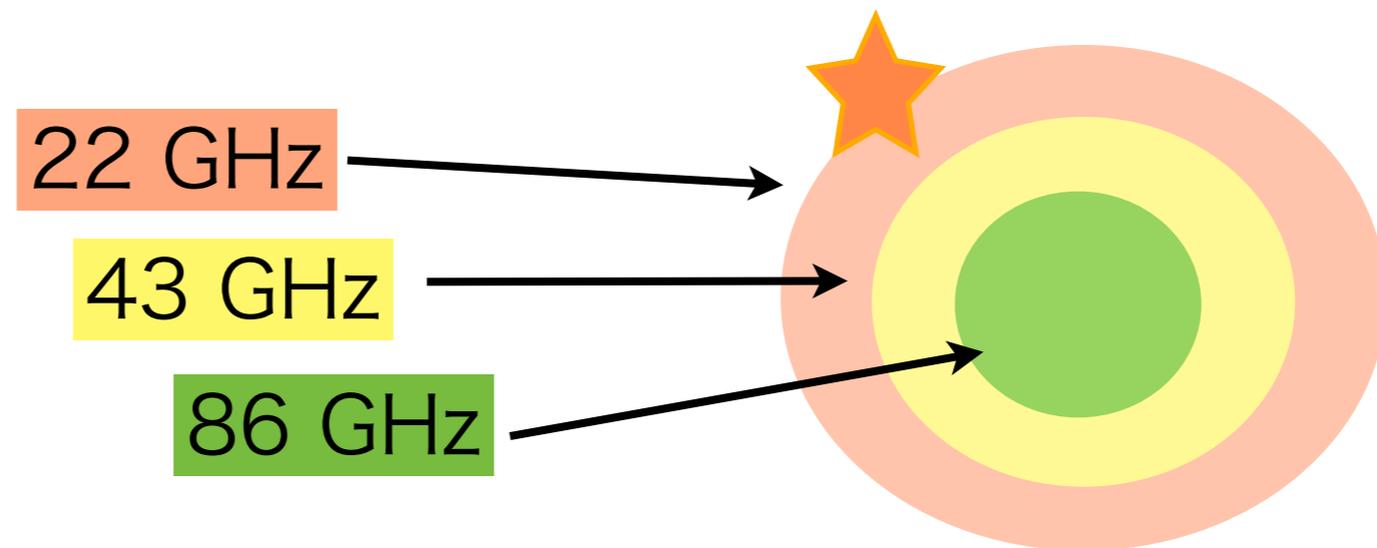
(Akiyama et al. Submitted)

## Discussion -Radio Loud State の原因は？-

粒子加速領域の噴出(Yusef-Zadef+2008, Falcke+2009)などで説明が可能か？

Sgr A\*はRadio-Loud Stateが観測された22 ~ 86 GHzでは光学的に厚く光球面を見ている。

光球面より外側で粒子加速が起きない限り増光は見えないが、サイズや構造の特徴に大きな変化は見られなかった。



Radio-Loud Stateは、Sgr A\*の定常的な構造の輝度温度の変化が原因である可能性が高い。

## Discussion -Radio Loud State の原因は？-

### 降着円盤モデルで説明が可能か？

電波帯ではOptically-thickな熱的シンクロトロン放射(=黒体放射)。

電子温度(～輝度温度@43 GHz)の変化が原因と考えるのが自然。

放射スペクトルを最も良く説明した降着円盤モデルの一つ(RIAF:Yuan+2003)に類似した自己相似解を導出し、電子温度の変化(~2倍)が降着円盤中のどのパラメータの変化によって説明できるかを調べた。

#### **RIAF (ADIOS) self-similar model (K.Akiyama & R.Takahashi)**

ADAFの自己相似解 (Mahadevan 1997)に、

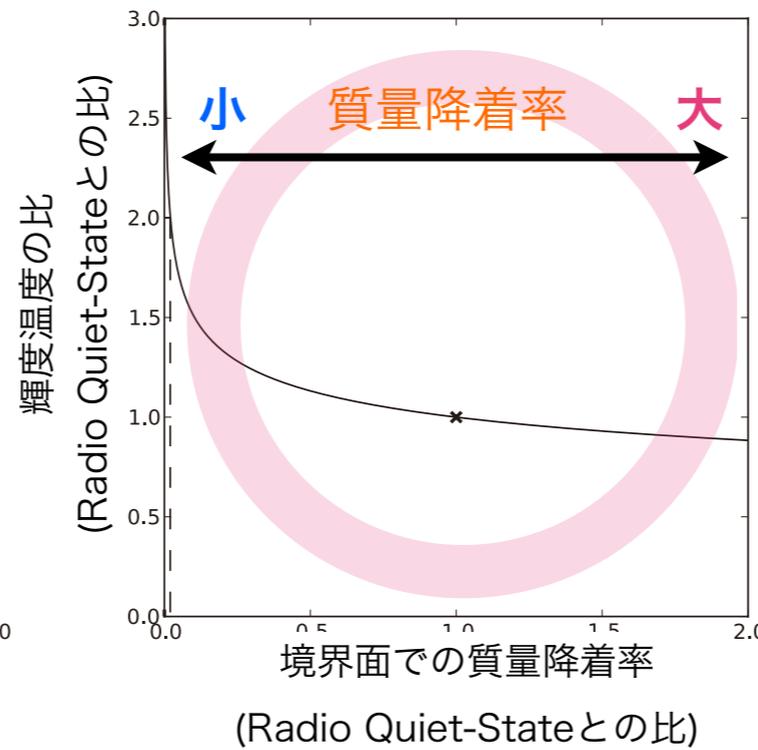
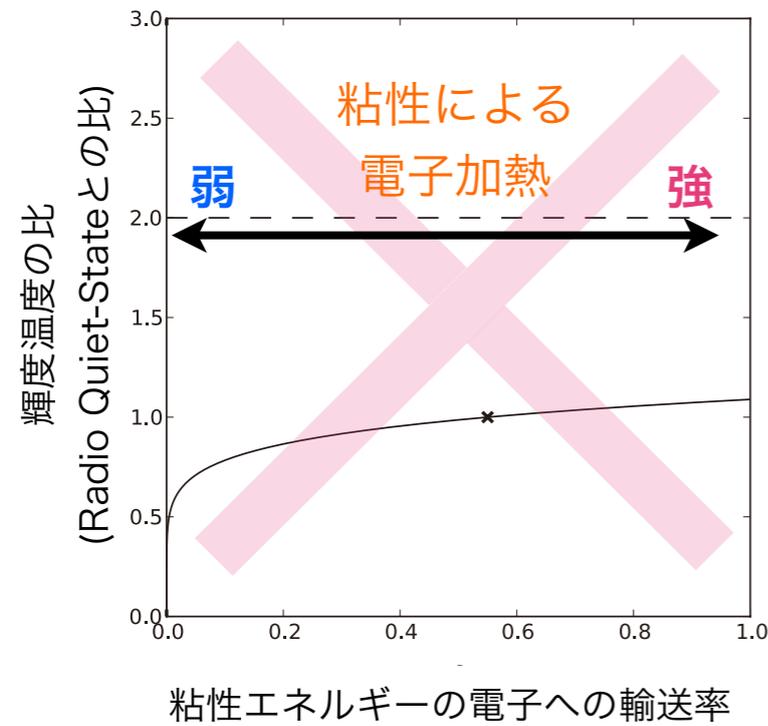
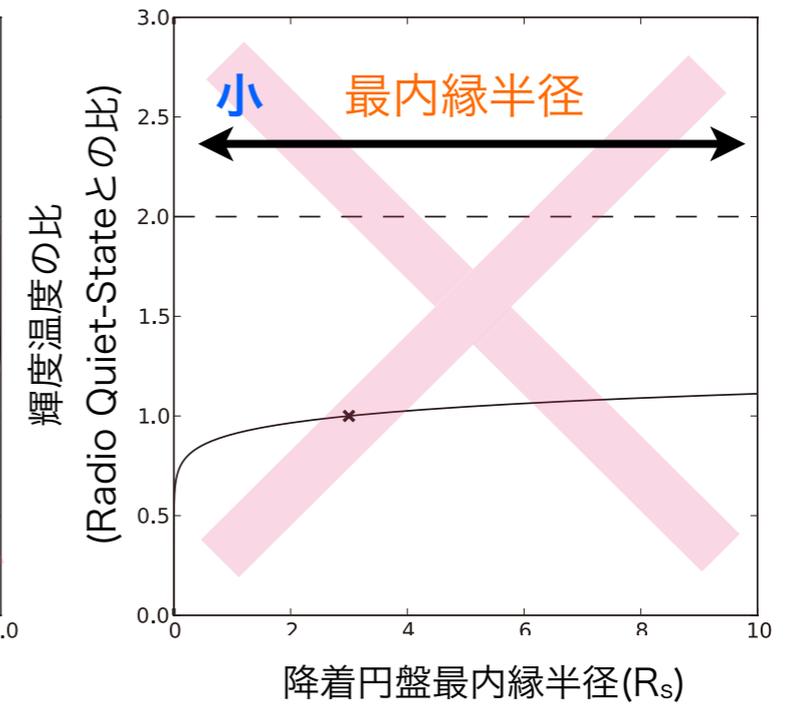
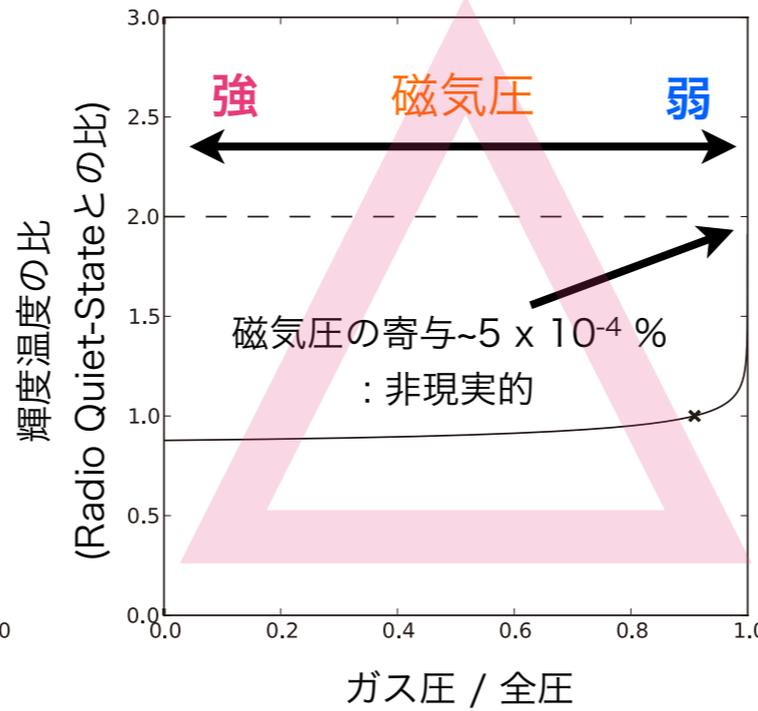
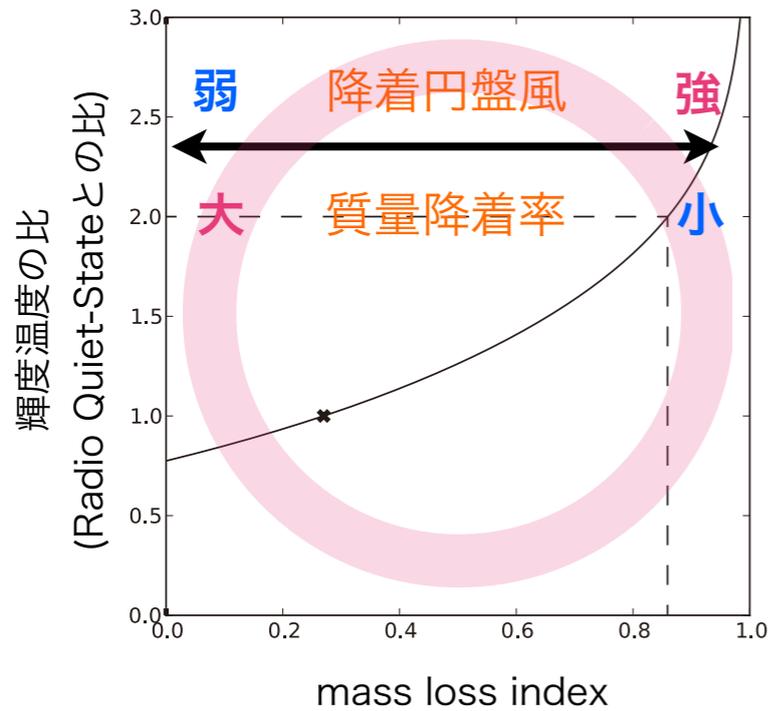
Windへのmass lossの効果を入れた。

--> 内縁部での降着率の減少

$$\dot{m} = \left( \frac{r}{r_{\text{out}}} \right)^s \dot{m}_{\text{out}}$$

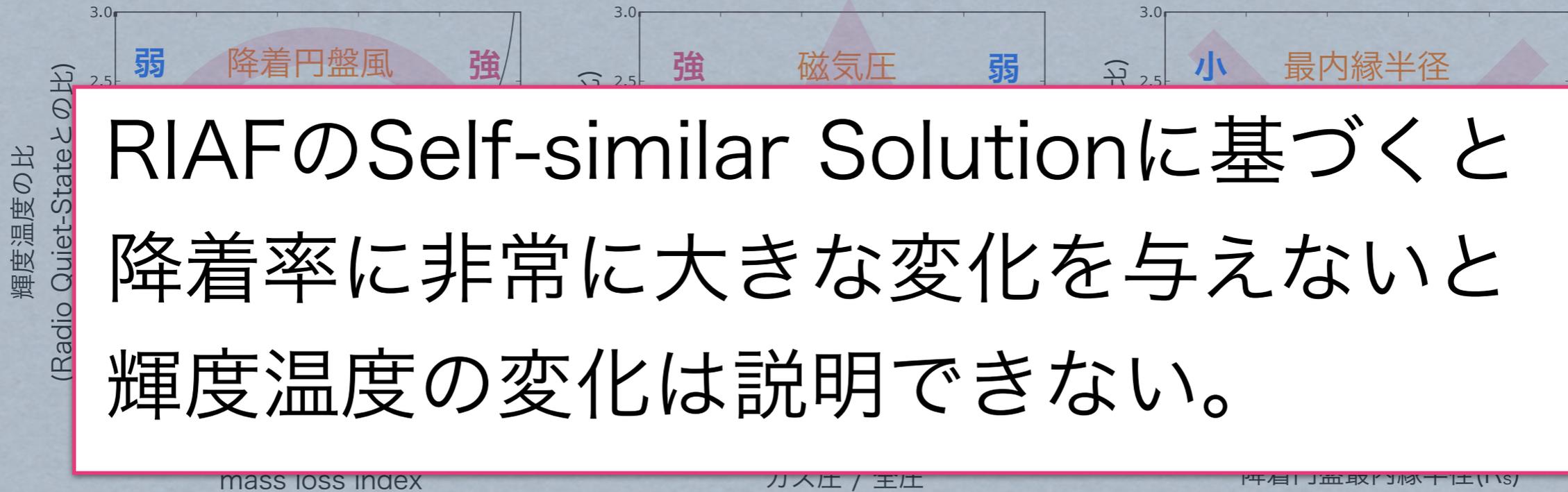
ただしYuan+2003と同様にWindへのエネルギー輸送、角運動量輸送の効果、Windからの輻射の寄与は無視

# Discussion - Radio Loud State の原因は？ -

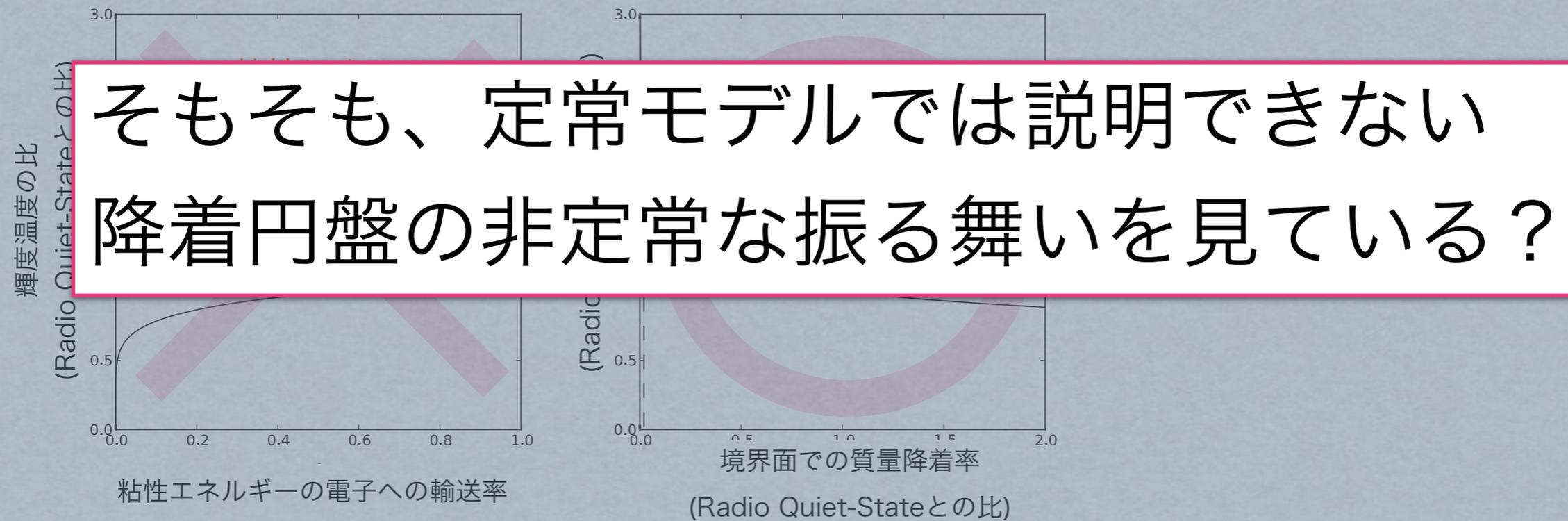


$$T_e \propto (1 - s)^{-1/7} (1 - \beta)^{-1/14} r_{\min}^{3/28 - s/14} m_{\text{out}}^{-1/14} \delta^{1/7}$$

# Discussion -Radio Loud State の原因は？-



RIAFのSelf-similar Solutionに基づくと  
降着率に非常に大きな変化を与えないと  
輝度温度の変化は説明できない。



そもそも、定常モデルでは説明できない  
降着円盤の非定常な振る舞いを見ている？

$$T_e \propto (1 - s)^{-1/7} (1 - \beta)^{-1/14} r_{\min}^{3/28 - s/14} m_{\text{out}}^{-1/14} \delta^{1/7}$$

# まとめ

## The image of Sgr A\*

- Sgr A\*は3年間に渡って、シングルコンポーネントだった。
- 電波強度に ~18 % の変動があった。

## The variation of total flux and size

- 電波強度、サイズともに変動性があった。
- **これらの変動は単一の輝度温度では説明できない事が分かった。**

## Radio loud state in radio band in 2007

- 輝度温度が2倍程度上昇した。
- **サイズが変わらなかった事やフレアの持続時間から、Sgr A\*の光球面の外側で起こった局所的な粒子加速現象では説明が困難**  
(e.g. expanding plasma, new jet component, hotspot)
- 降着円盤の場合 (RIAF/ADIOS self-similar model)

質量降着率に大きな変化がなければ説明できない