

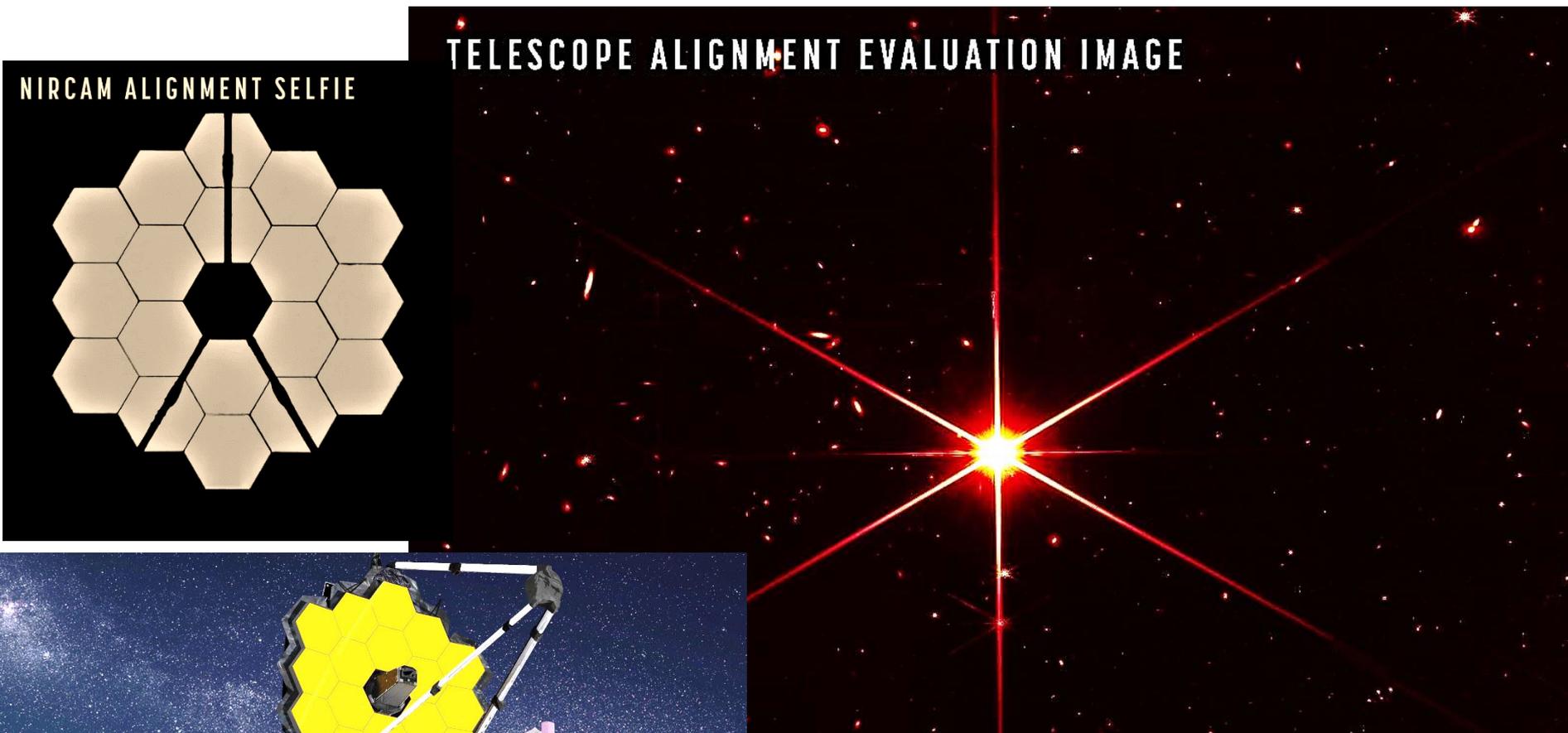
ブラックホールの「リング」像は 本物か？

--- EHTCデータ(M87)の独立解析の結果 ---

国立天文台 三好 真
(理化学研究所)・気象庁 加藤成晃
神戸大学 牧野淳一郎

望遠鏡の“くせ“, PSF

星像に光条がある。望遠鏡の“くせ“であって、天体構造ではない。



図：JWSTの場合

概要

EHTの公開データを独立再解析を行い、EHTCの示すリング像とは異なる撮像結果を得た。

* なぜ違う撮像結果になったのか？

EHTCは非常に狭い視野設定(128 μ 秒角以下)を行い、像の範囲を最初から限定している。実は、データにサンプリングバイアス(=40 μ 秒角くらいの大きさの構造を創りやすい)がある。EHTCの狭視野設定はそのバイアス効果を強め、40 μ 秒角サイズのリング像に到達した。

一方、我々は、広い視野設定(25ミリ秒角)をして、通常の撮像解析を行い、バイアス効果を受けにくい撮像解析をした。

(EHTCは広い視野は得られないと主張しているが、電波干渉計の理論計算からはEHTCの主張より広い範囲の撮像ができる。)

* どっちが正しいのか？

我々のほうが「より正しい」=EHTC のリング像はおそらく間違い

(a)我々の結果は有名なジェットを検出するなど、従来の観測結果と矛盾しない。

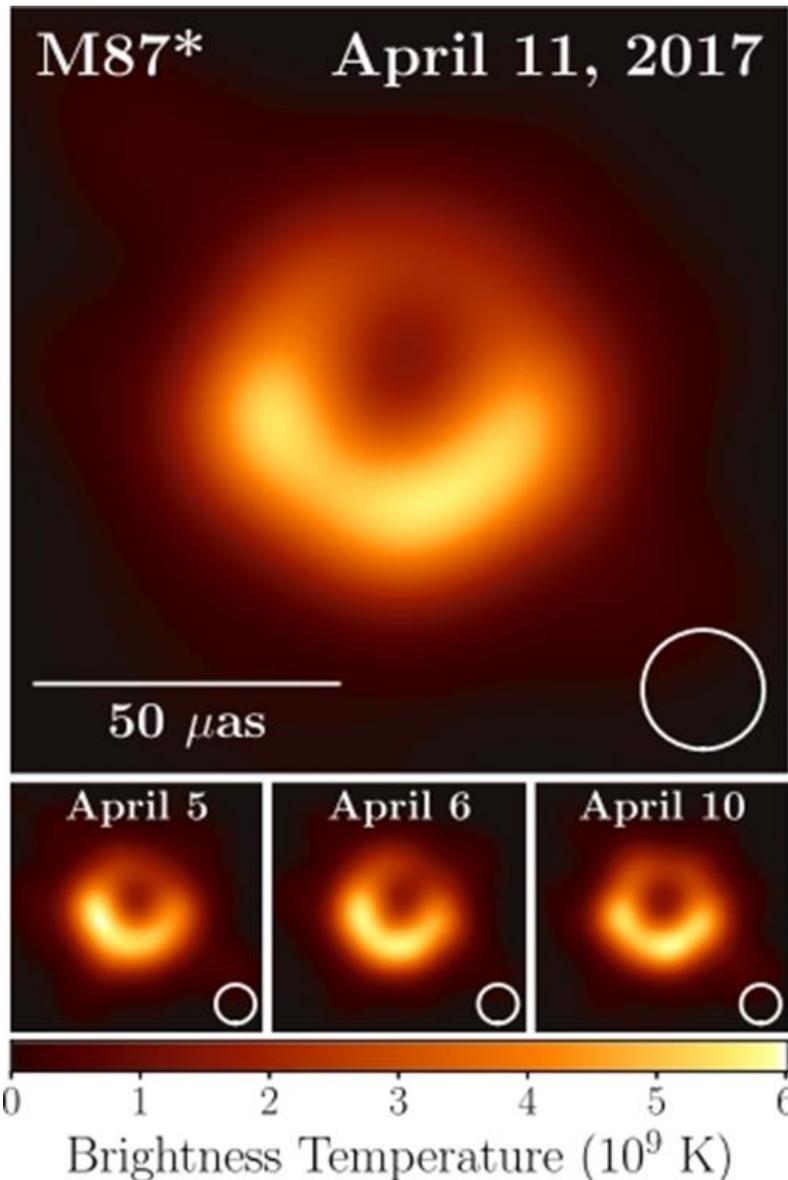
(b)我々の結果はデータと撮像結果の整合性において、EHTCのリング像よりも、はるかに良い一致度を示す。

(c) EHTC のリングはEHTの観測局配置から“でがちな”構造である。

発表の構成

1. EHTC の解析法と撮像結果
2. 我々の解析手順と撮像結果
3. 何故 EHTC はリングを得たのか
 - 3-1 u-v カバレッジと PSF/Dirty Beam
 - 3-2 我々の手順でのリングの「再現」
 - 3-3 模擬データからもリングは「再現」できる
4. どちらの絵が「より良い」か
 - 4-1 像の示す残差の大きさ
 - 4-1 像の堅牢性
 - 4-2 他周波数観測の結果との関係
5. 天の川銀河中心 SgrA* のリング像はどうか？
6. まとめ

1. EHTC の解析法と撮像結果



複数の方法 - CLEAN法 (DIFMAP), RML (regularized maximum likelihood)法, 複数のチームで解析を行った。いずれも 128μ as以下の狭いFOV設定をして、予測サイズのブラックホールシャドウと大きさが一致するリング像を得た。

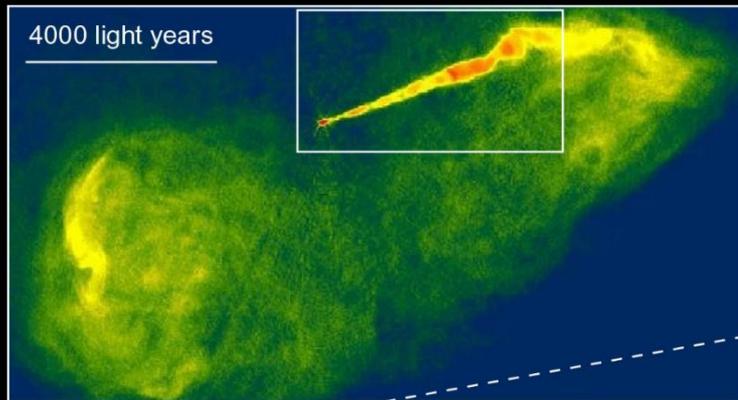
が、

- 1) 有名なジェット構造がみえない。
- 2) 最大輝度が60億K、従来の1/3と暗い。
- 3) 像をよく見ると変な形が見える。

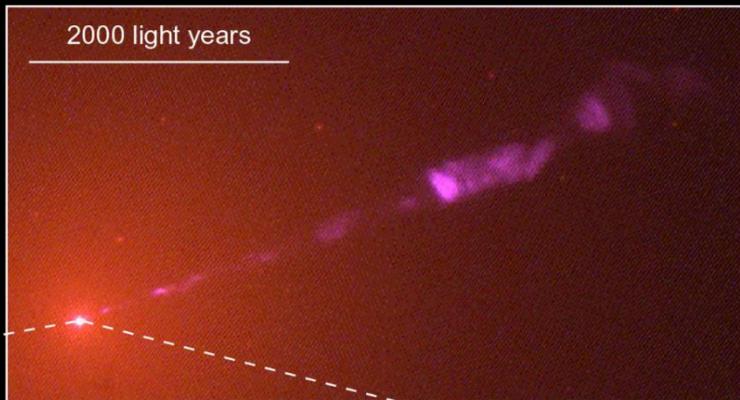
そして、

リング像の示す電波強度は観測データのそれの半分程度 (~ 500 mJy) の再。観測データに対する残差が大きい。

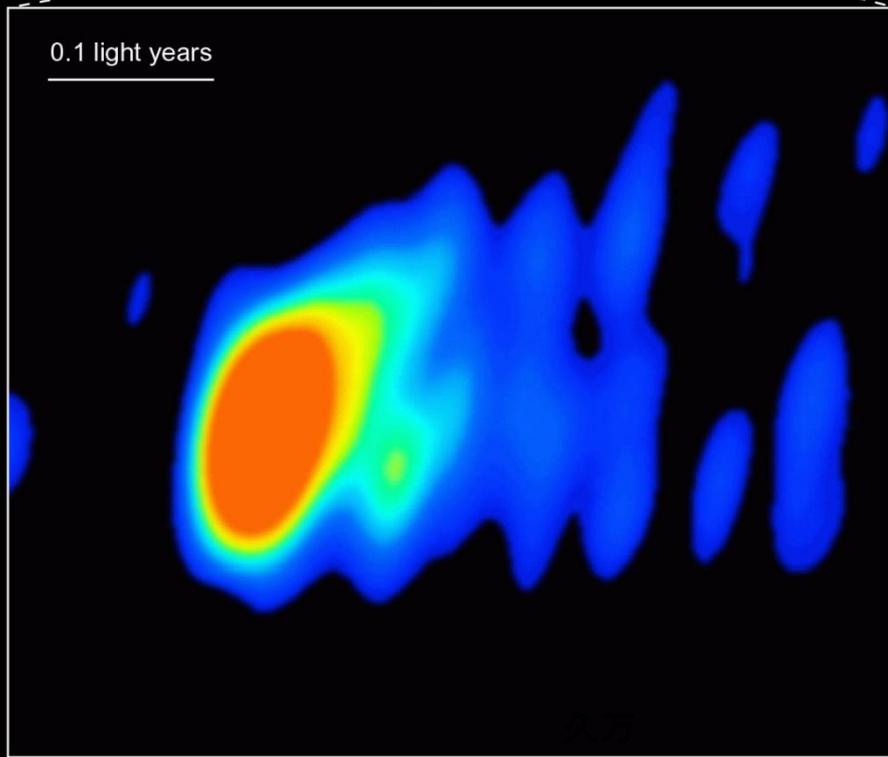
M87は「宇宙ジェット」で有名な銀河



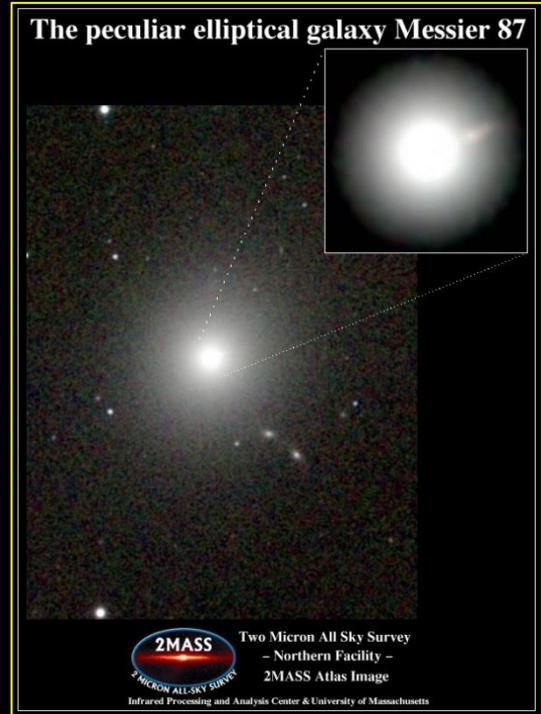
VLA
Radio



HST • WFPC2
Visible



VLBA
Radio



EHTCのブラックホール像, 3つの不可解な点を発端に公開データを調査を始めた。

(1) 有名な M87 のジェットが全く、見えてない。

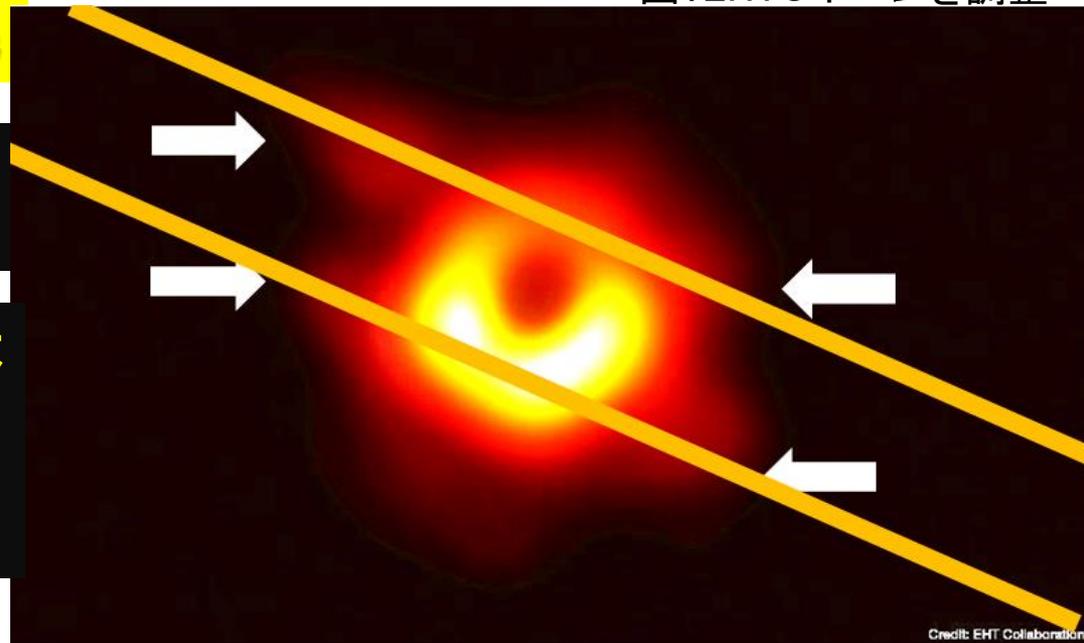
(2) 輝度温度(推定60億K), 先行観測の約1/3に低下。 対230GHz観測のAkiyamaら2015, 86GHz観測のHadaら2016と、Kimら2018)

(3) 40 μ as 間隔の尻尾

図:EHTC トーンを調整

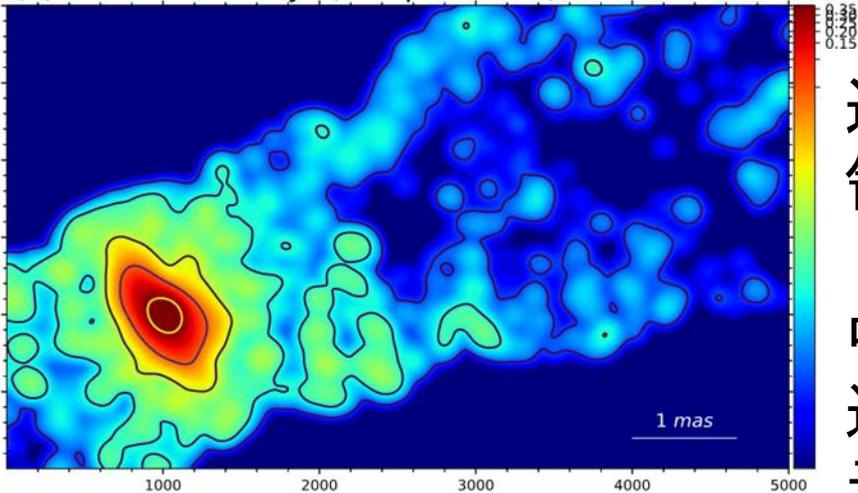
もしか、サイドローブ(回折像部分)を実像と勘違いしてない？

もしも較正不足の場合、撮像結果は暗くなり、特にコアより暗いジェット部分は検出できなくなる。そういうことが起きているのでは？



2. 我々の解析手順と撮像結果

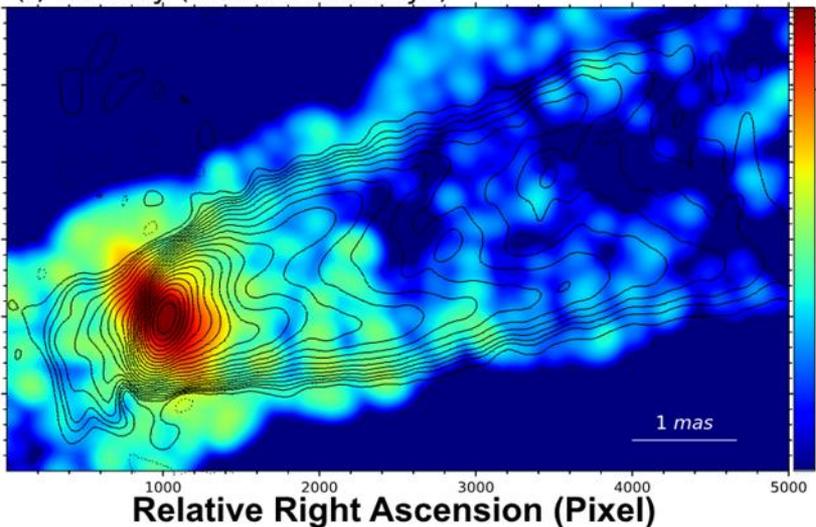
(d) The last two days (200 μ s beam)



通常のCLEAN法(AIPS)を用い、ジェット領域を視野設定に含めた。

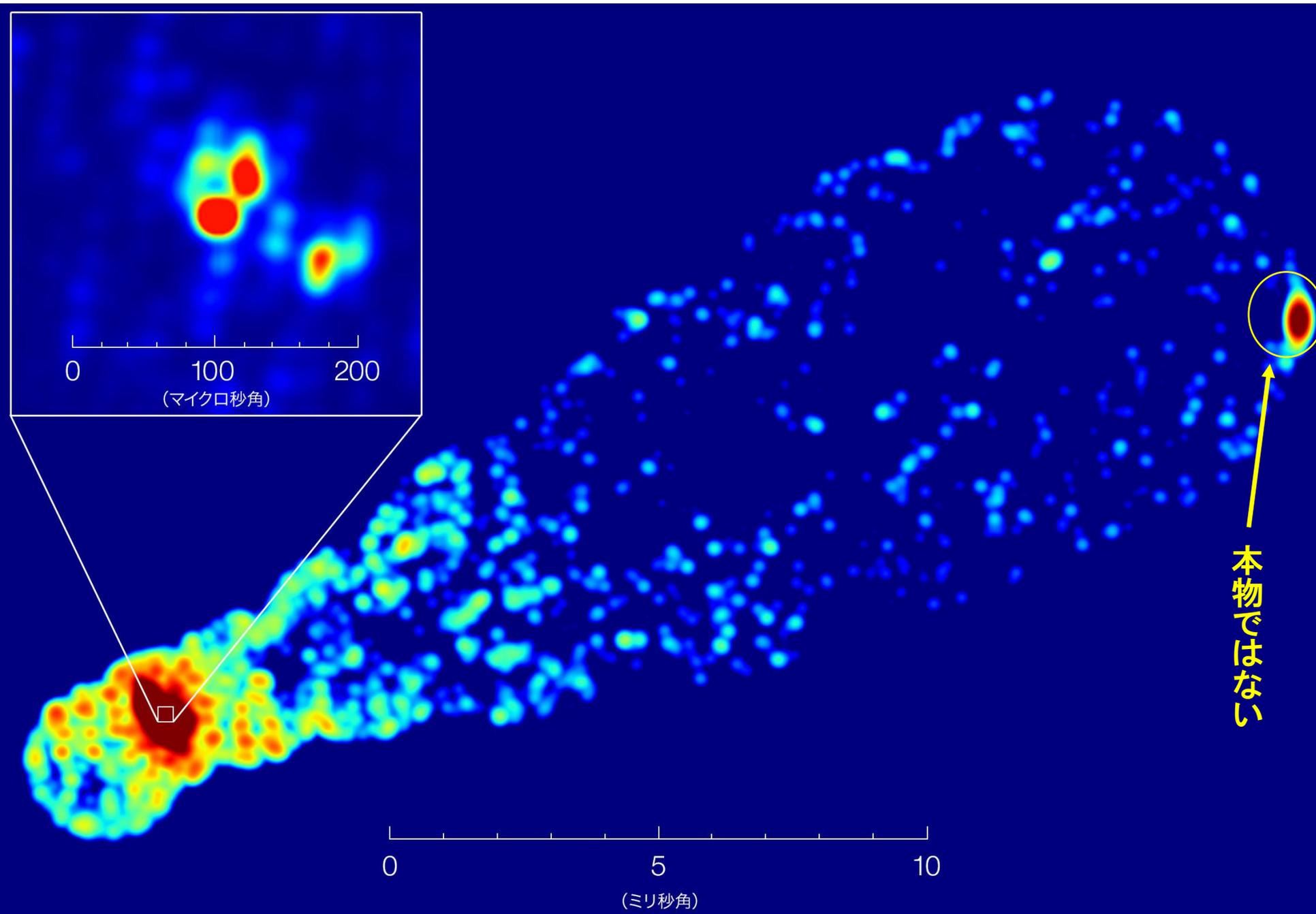
中心部にリングではなく、コア、ノット構造を見いだした。輝度は従来測定値と矛盾しない。

(f) Overlay (the last two days)



さらに、有名なジェット構造を検出した。最大輝度は従来観測結果と一致。結果の像の示す電波強度は観測データの70%以上を再現した。

下の図の等高線は43GHzの観測での平均像を示す (Walkerら2018)



本物ではない

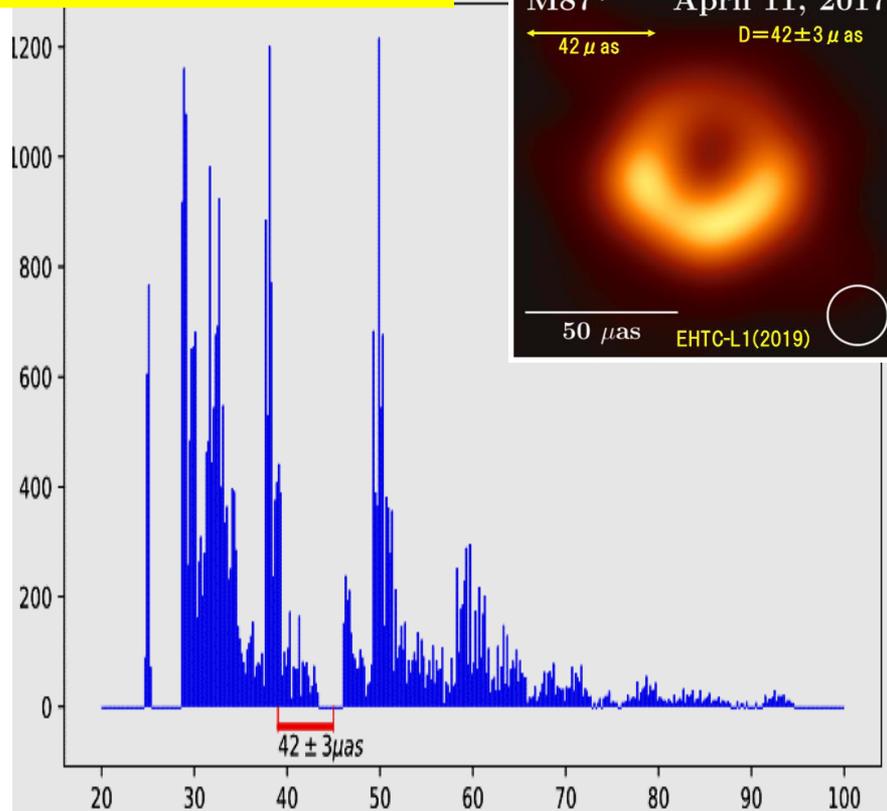
3. 何故 EHTC はリングを得たのか

3-1 u-v カバレッジと PSF/Dirty Beam

取得データには約40 μ 秒角を示す空間フーリエ成分が欠如している。
そのため、約40 μ 秒角サイズの構造を誤って像に取り込みやすい。

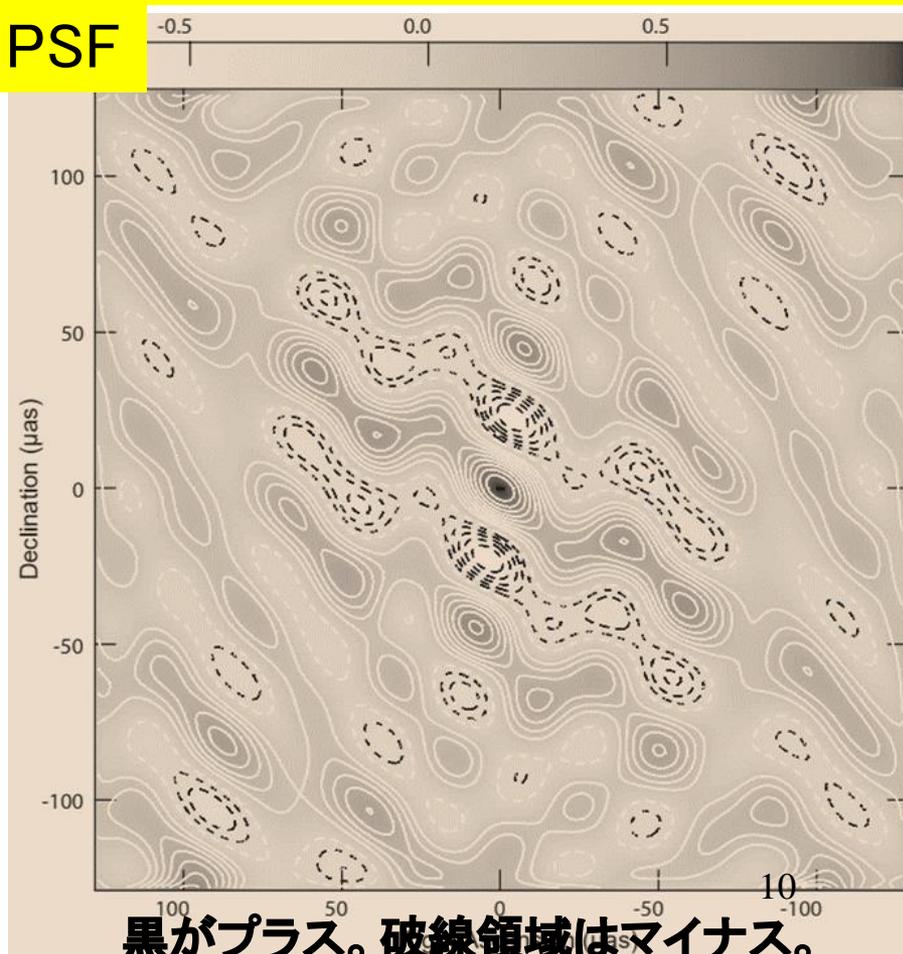
メインビーム強度に対して70%のマイナス部分発生

取得データ分布



空間フーリエ成分 (μ as 単位) \rightarrow

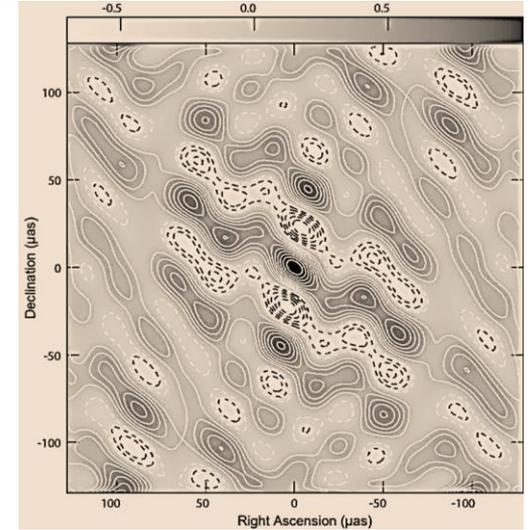
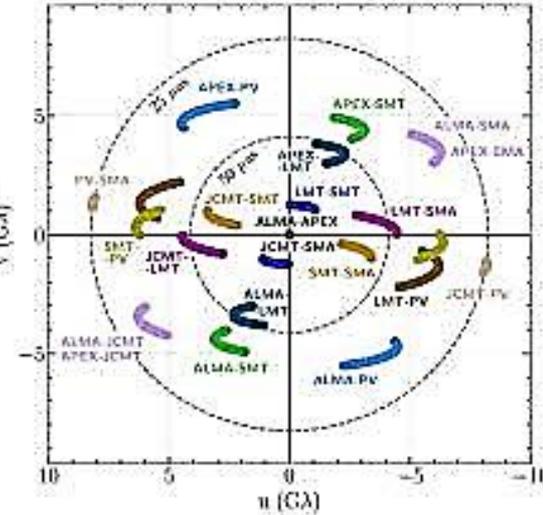
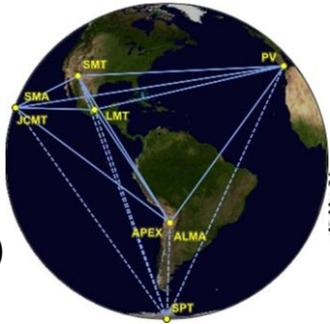
PSF



EHTのM87観測データ(u-vカバー) は少なすぎる。

EHT (2019)

この観測では
5局10基線
(超短基線除く)



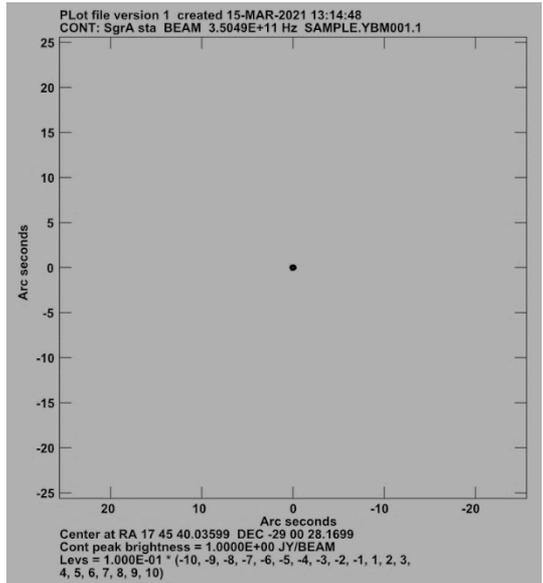
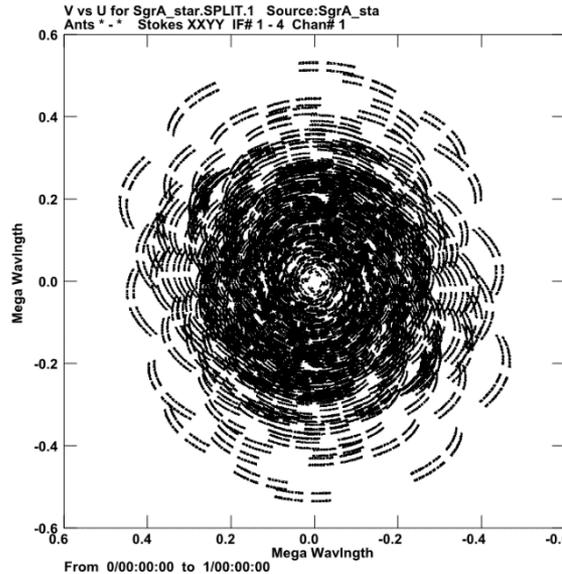
ALMA (図はcy03)



64局2016基線

PSFの描写は
対ピーク10%間隔の等高線
(-100% ~ +100%)

ALMAではマイナス部分はほぼ無いが、EHTでは深いマイナス部分(点線部分) 有り



↑ u-v カバー

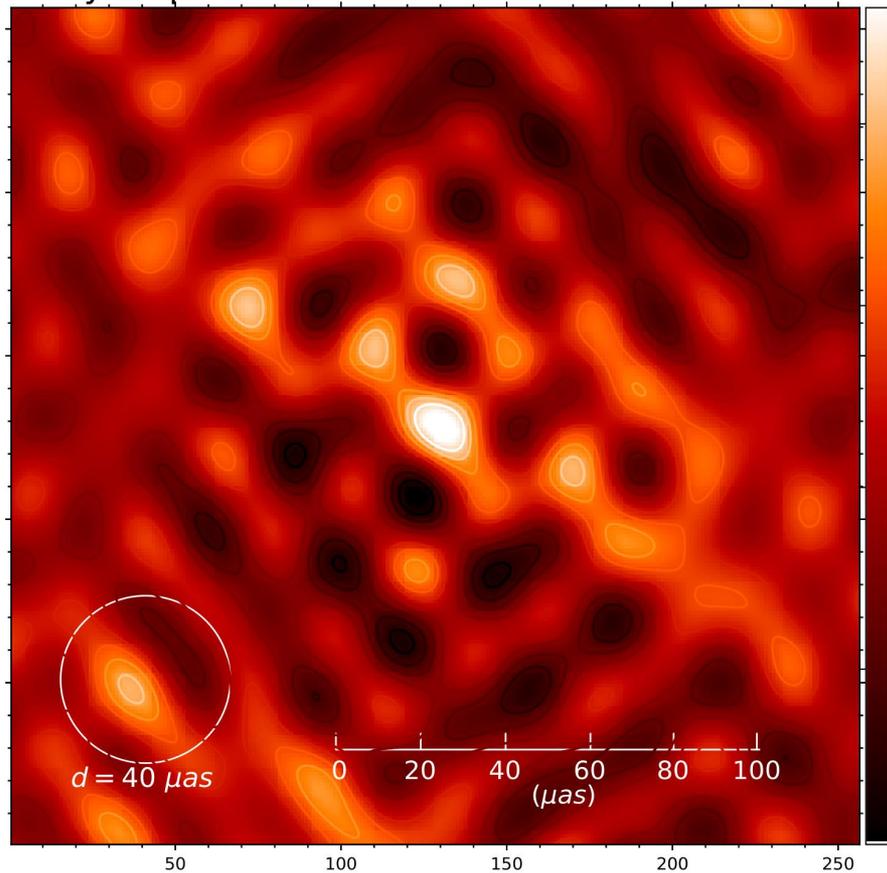
↑ PSF (Dirty Beam)

3. 何故 EHTC はリングを得たのか

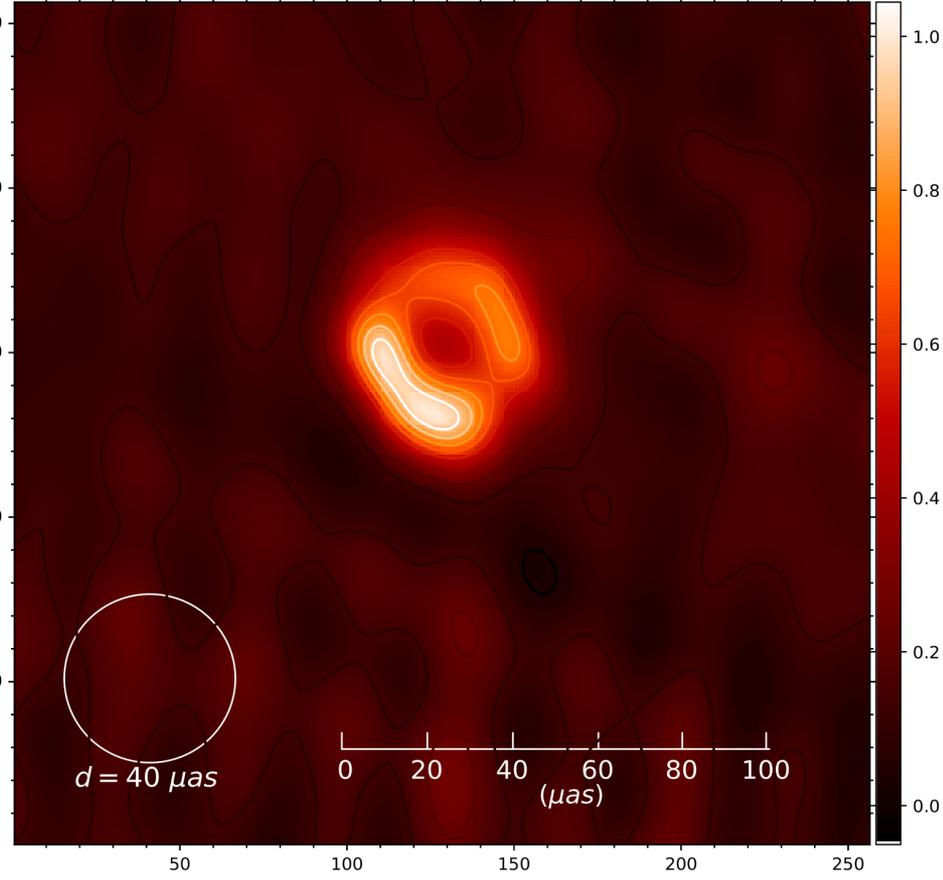
3-2 我々が(間違った)手順で行ったリングの「再現」

取得データを単純に像変換すると取得データの”くせ”と実像が合わさった形になる(dirty map; 左図)。これを初期像モデルとして利用すると、「くせ」を取り込んで、 40μ 秒角サイズのリング(右図)ができる。(EHTC の解析手法は結果的に同様なことを行ってしまうように思われる。)

Dirty map



By dirty map as the model

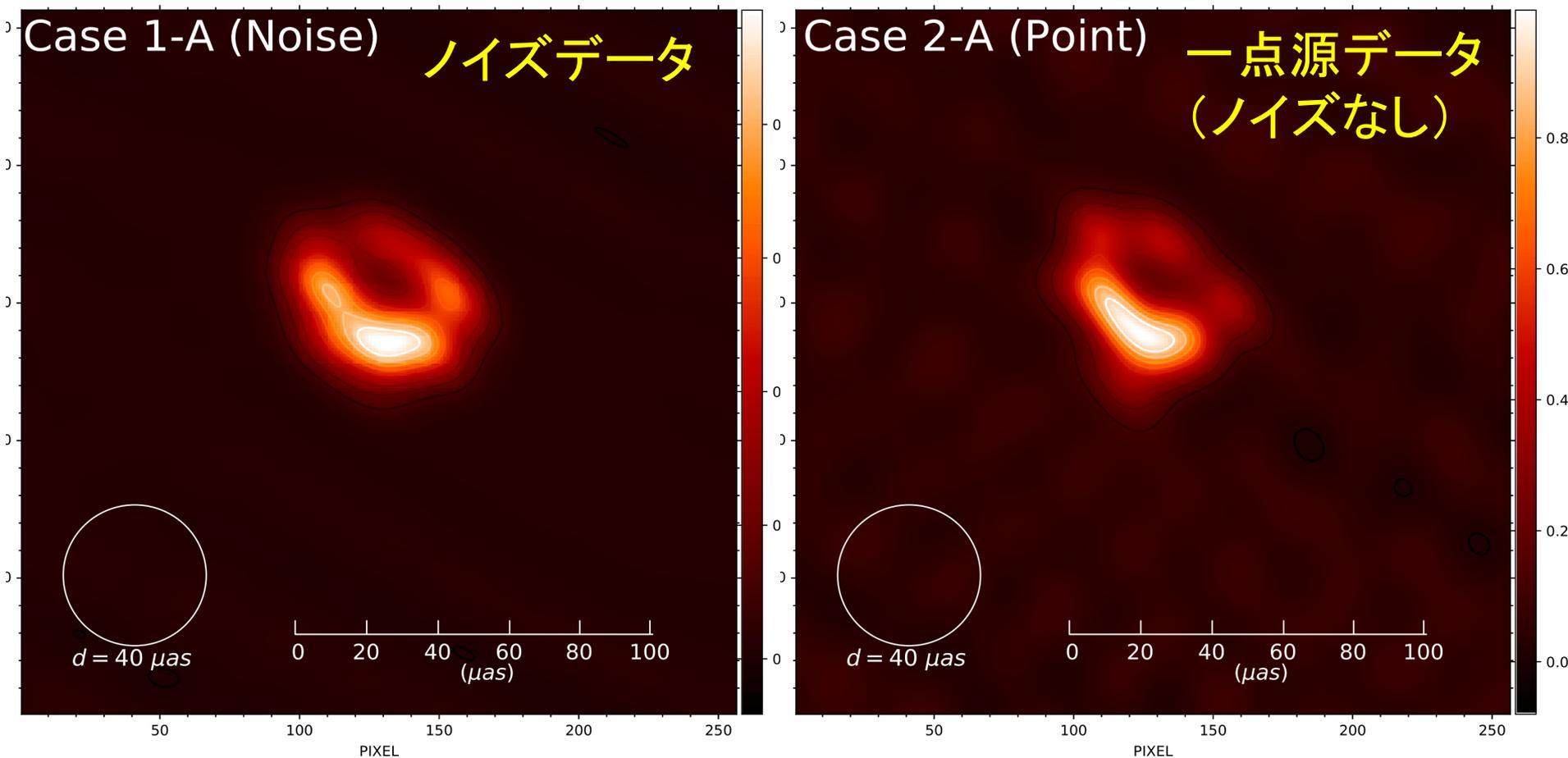


3. 何故 EHTC はリングを得たのか

3-3 模擬データからもリングは「再現」できる

EHTによる観測データと同じサンプルの模擬データからも、EHTCの撮像結果と同じ 40μ 秒角サイズのリングができる。

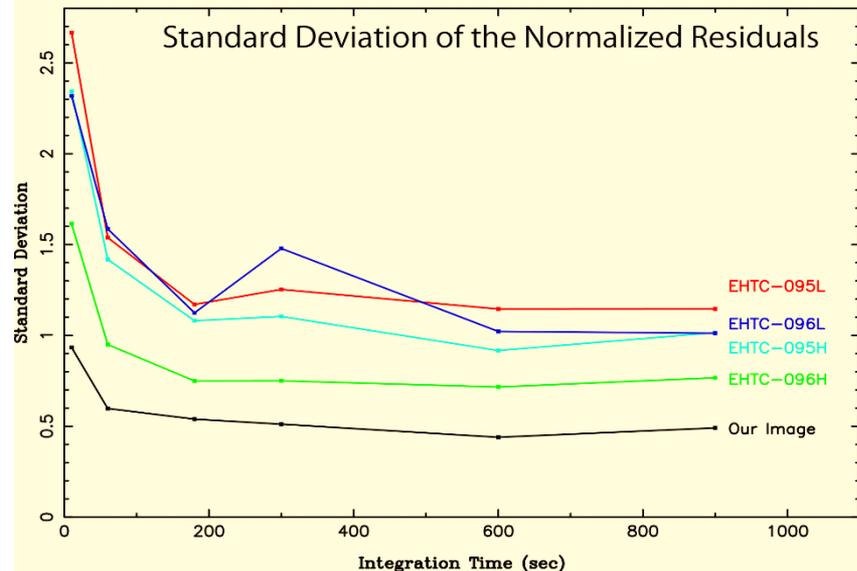
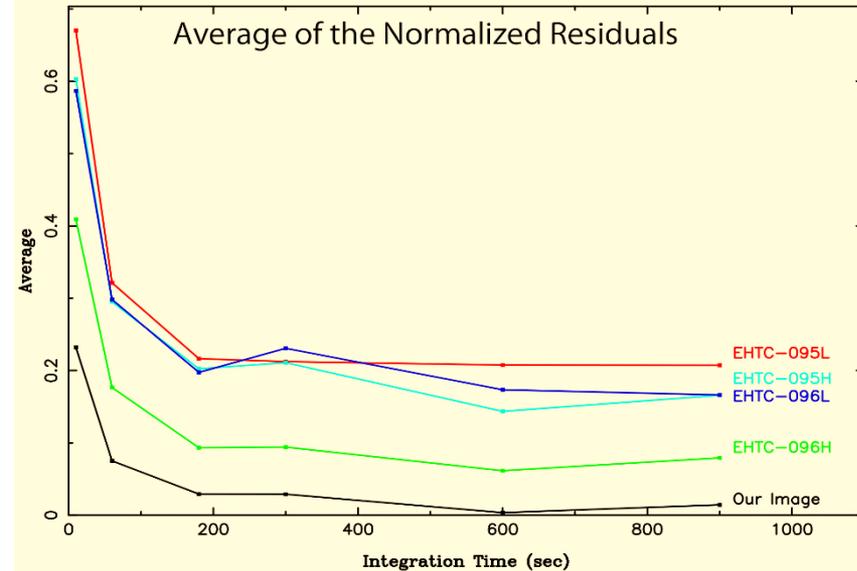
(EHTC のリングはEHTの観測局配置から”でがち”な構造である)



4. どちらの絵が「より良い」か

4-1 残差(元のデータと撮像結果の間の違い)

the first two days



データ振幅について、撮像結果のそれと元データのそのの差を比べたもの。グラフの底辺に近い方が平均値、標準偏差とも小さく、残差が小さいことになる。

色つきの線がEHTCのリング像の場合。黒線が我々の得た像の場合。

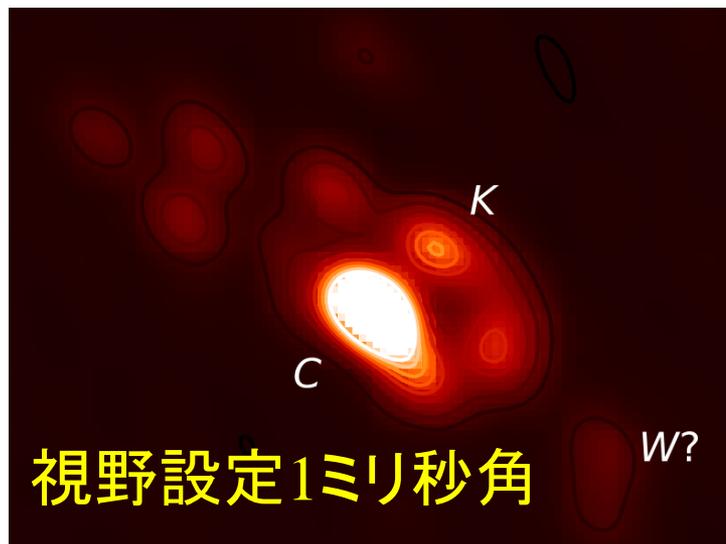
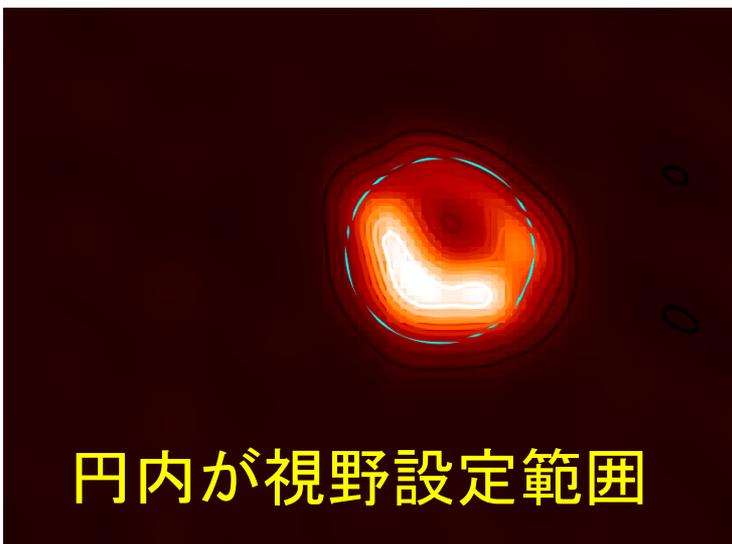
平均値、標準偏差ともに、我々の像の「残差」が一番小さく、像結果とデータの間の整合性が一番よいことがわかる。

(注) リング像はEHTCのDIFMAPパイプラインで作り、それらから残差を計算

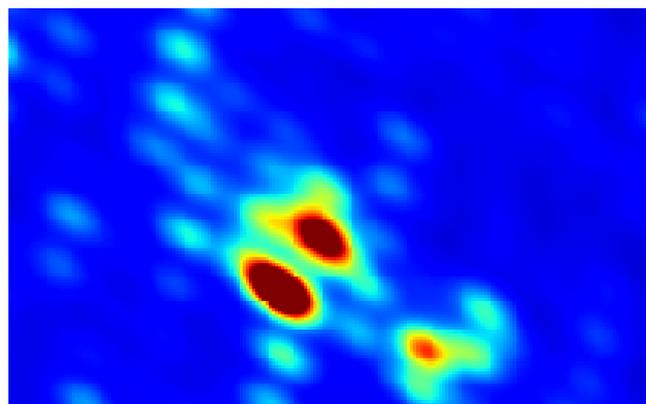
4. どちらの絵が「より良い」か

4-2 堅牢性(視野設定を変えて、像の変化を調べる)

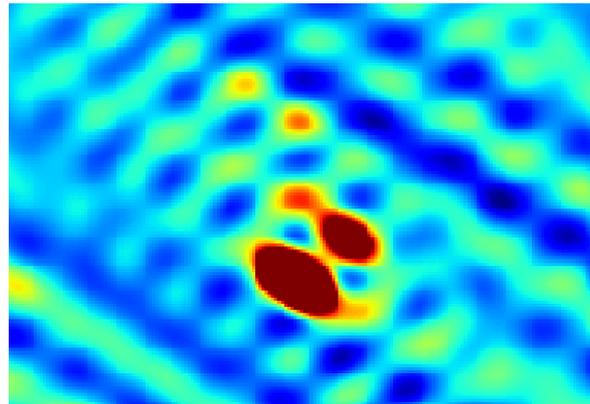
EHTCリングは視野設定を除外するとリングは壊れる(DIFMAP)



我々の中心像、コア(C)ノット(K)の構造は生き残る(AIPS)



8つの大円で視野設定



視野設定25ミリ秒角

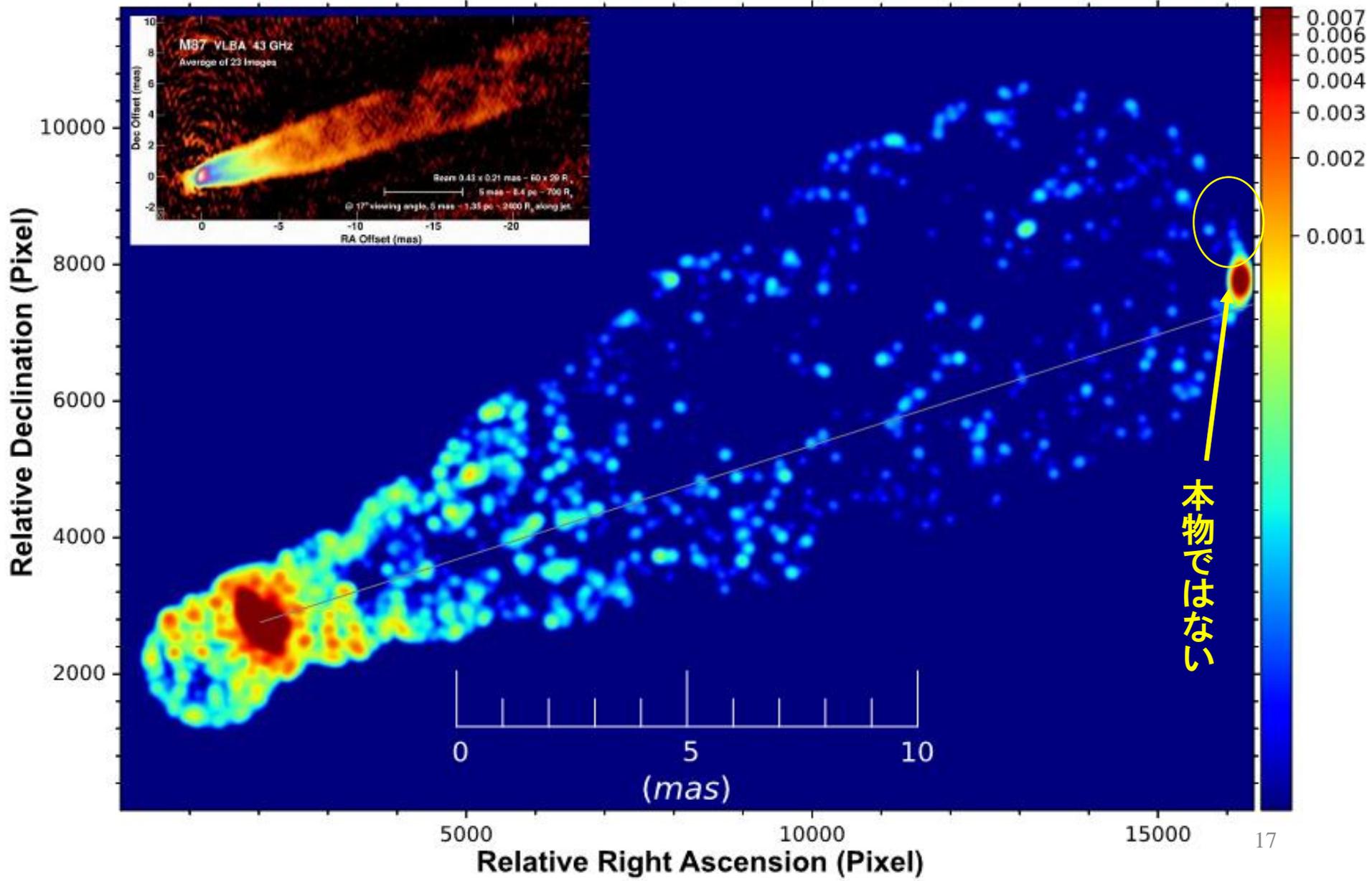
4. どちらの絵が「より良い」か

4-3 これまでの観測（他周波数）との関係

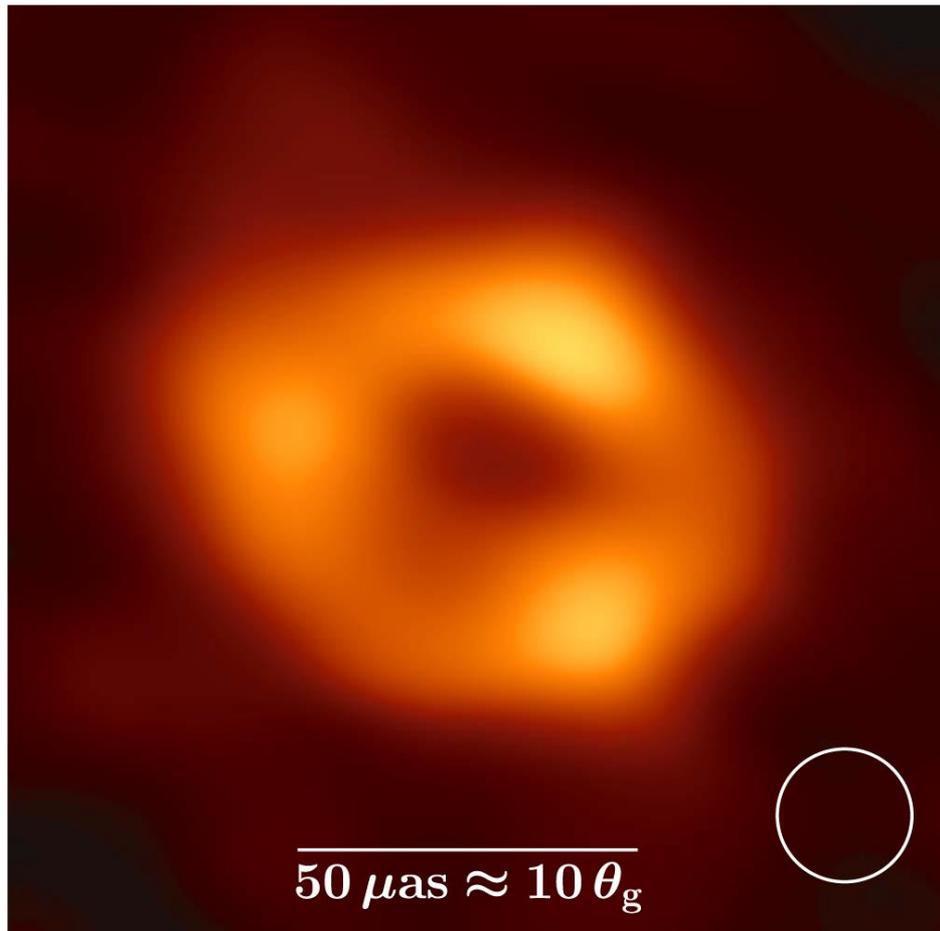
	M87の従来の観測結果	EHTCの撮像結果	我々の再解析結果
大規模構造	西に伸びるジェット構造	検出せず (論文にジェット探索の記述がない)	43/86GHzで観測された規模のジェットを確認
中心部分の構造	100 μ 秒角程度での分解能であり、詳しい観測はできていない。	40 μ 秒角直径のリング像	コア、ノット構造 (従来推定されていたジェット噴出角と同じく 70度 の開口角)
中心核(コア)の最大輝度	100~300億度 (86GHz観測) 約130億度 (230GHz観測)	従来より暗い 60億度 (230GHz観測)	従来とほぼ同じ 100~120億度 (230GHz観測)

我々が得た全体像

43GHzの像(左上; Walkerら2018)と矛盾しないジェットを検出



5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像 (EHTC,5/12発表)も。



(1) PSFのメインビームとサイドローブ間隔が、「シャドウサイズ」と完全に一致する。

(2) PSFの中央ピーク3つがリング像の「3輝点」に対応している。

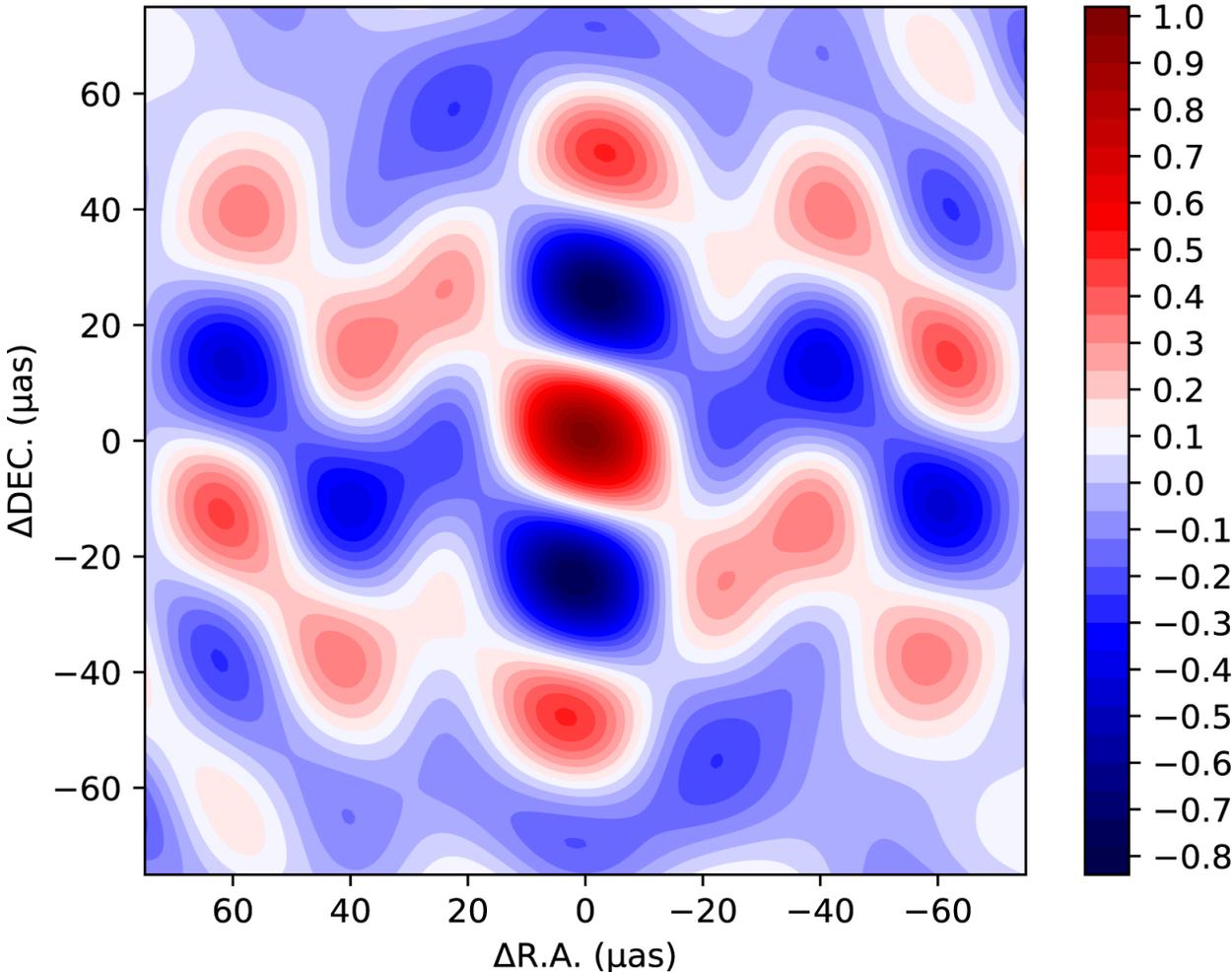
(3) 通常の解析では楕円になる。

M87の場合と同じく、PSFの形状と共通するサイズ、特徴のリングである。天体像ではなく、望遠鏡のPSFの形状起源のリング像。

Bright thick ring with a diameter of $51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$ (68% credible interval)
Angular shadow diameter $48.7 \pm 7.0 \mu\text{as}$ EHTC2022-1 (L12)

5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像 (EHTC,5/12発表)も。

PSF (Dirty Beam) 4/7



EHTのような数局のアンテナ構成の電波干渉計では、そのPSFは非常に汚くなる。

マイナス部分(凹、青色部分)が現われる。

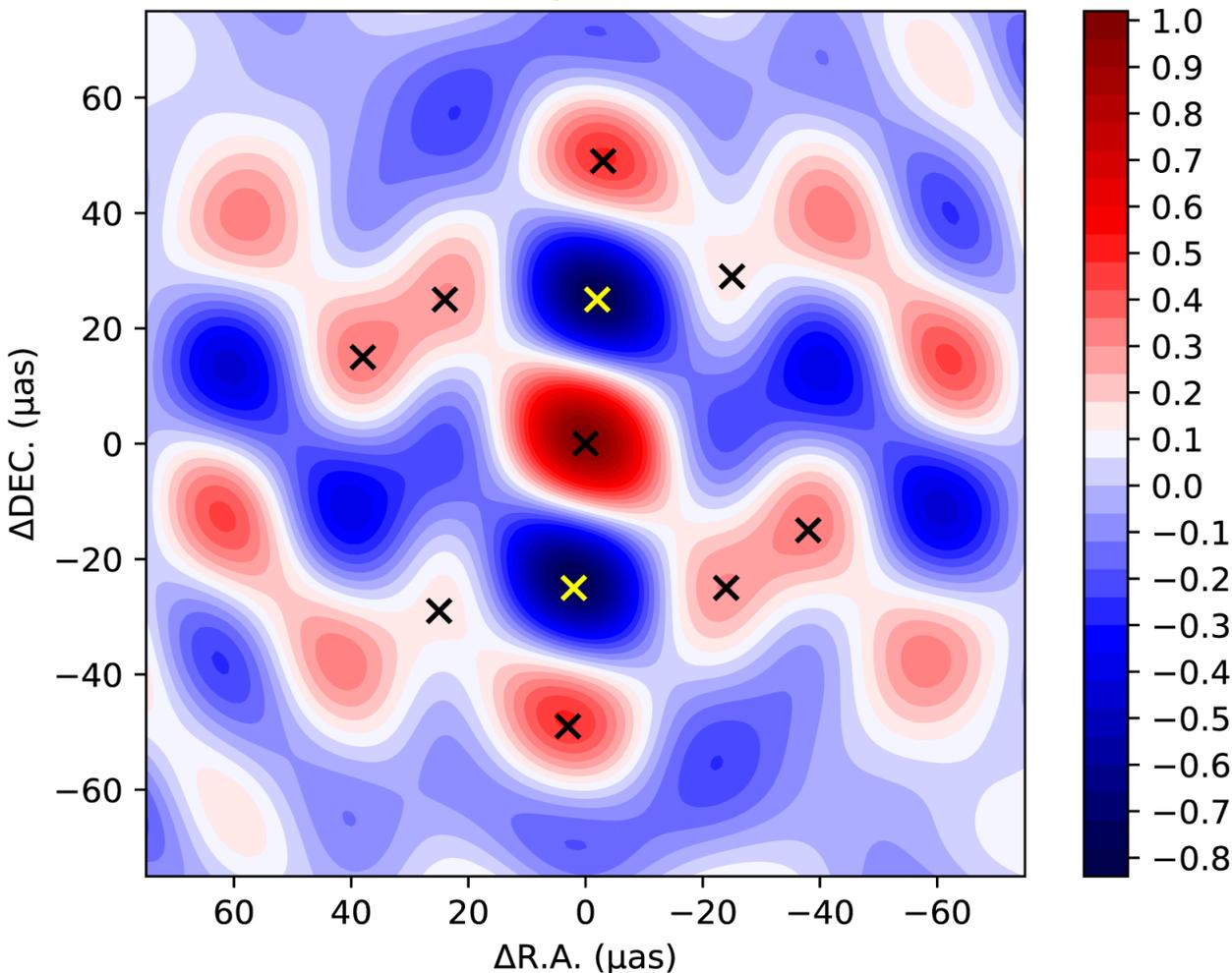
Main beamの高さに対し、80%強の深さのマイナス部分が現われる。

凹凸周期が $\sim 50 \mu\text{as}$

図: EHTの銀河中心 SgrA* 観測における PSF(Dirty Beam) 2017/4/7 観測の場合。公開データからAIPSを用いて作成

5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像(EHTC,5/12発表)も。

PSF (Dirty Beam) 4/7



EHTのような数局のアンテナ構成の電波干渉計では、そのPSFは非常に汚くなる。

マイナス部分(図、青色部分)が現われる。

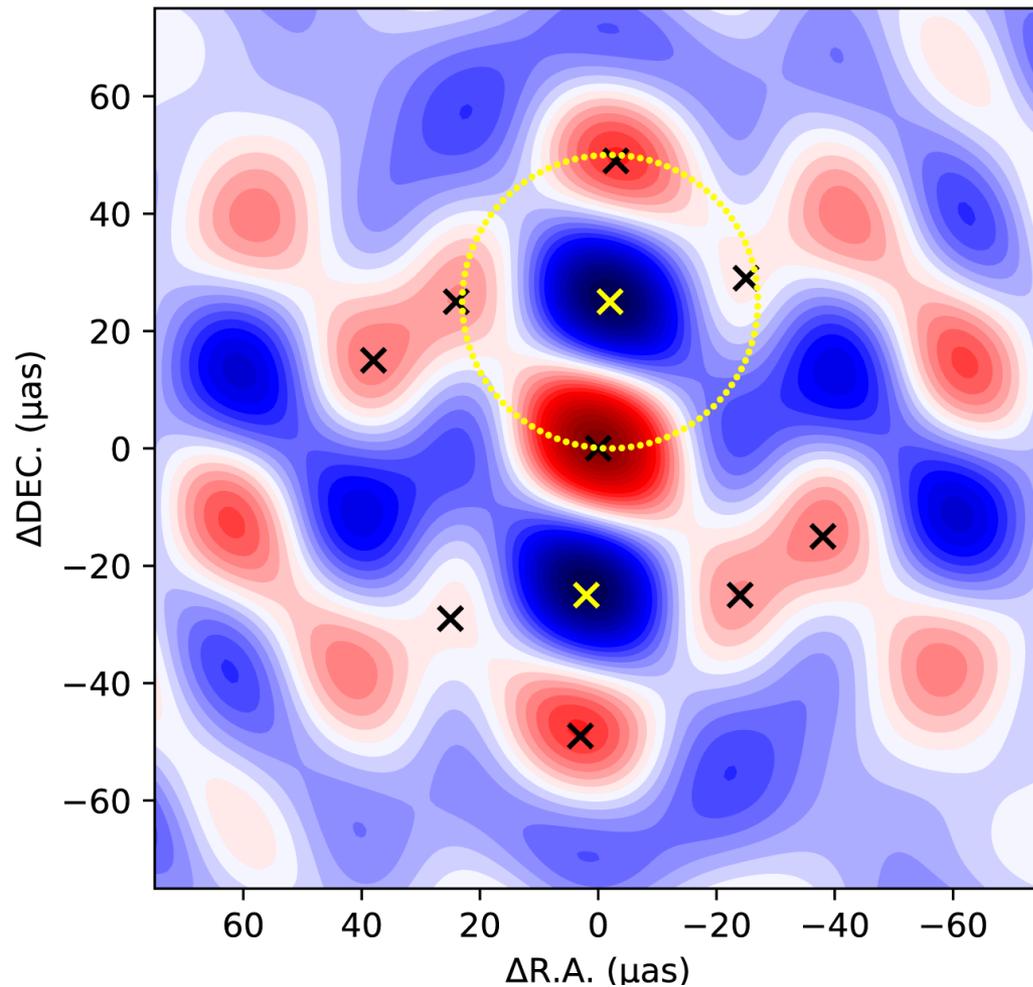
Main beamの高さに対し、80%強の深さのマイナス部分が現われる。

凹凸周期が $\sim 50 \mu\text{as}$

図: EHTの銀河中心 SgrA* 観測における PSF(Dirty Beam) 2017/4/7 観測の場合。公開データからAIPSを用いて作成

5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像 (EHTC,5/12発表)も。

PSF (Dirty Beam) 4/7



直径50 μas の円周上にピーク群が乗ってしまう。

マイナス部分(図青色部分)が現われる。

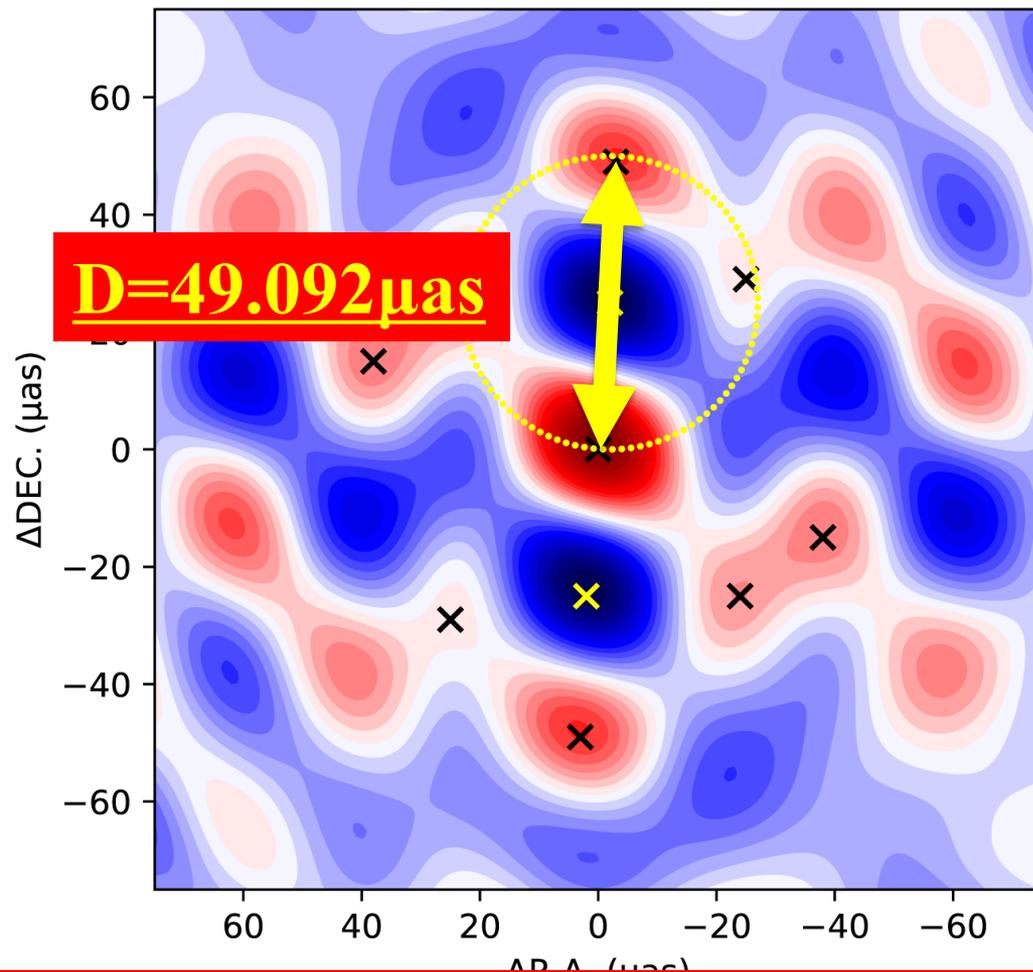
Main beamの高さに対し、80%強の深さのマイナス部分が現われる。

凹凸周期が $\sim 50 \mu\text{as}$

図: EHTの銀河中心 SgrA* 観測における PSF(Dirty Beam) 2017/4/7 観測の場合。公開データからAIPSを用いて作成

5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像

PSF (Dirty Beam) 4/7



D=49.092 μas

直径50 μasの円周上にピーク群が乗ってしまう。

※ 添訂では、そのPSFは

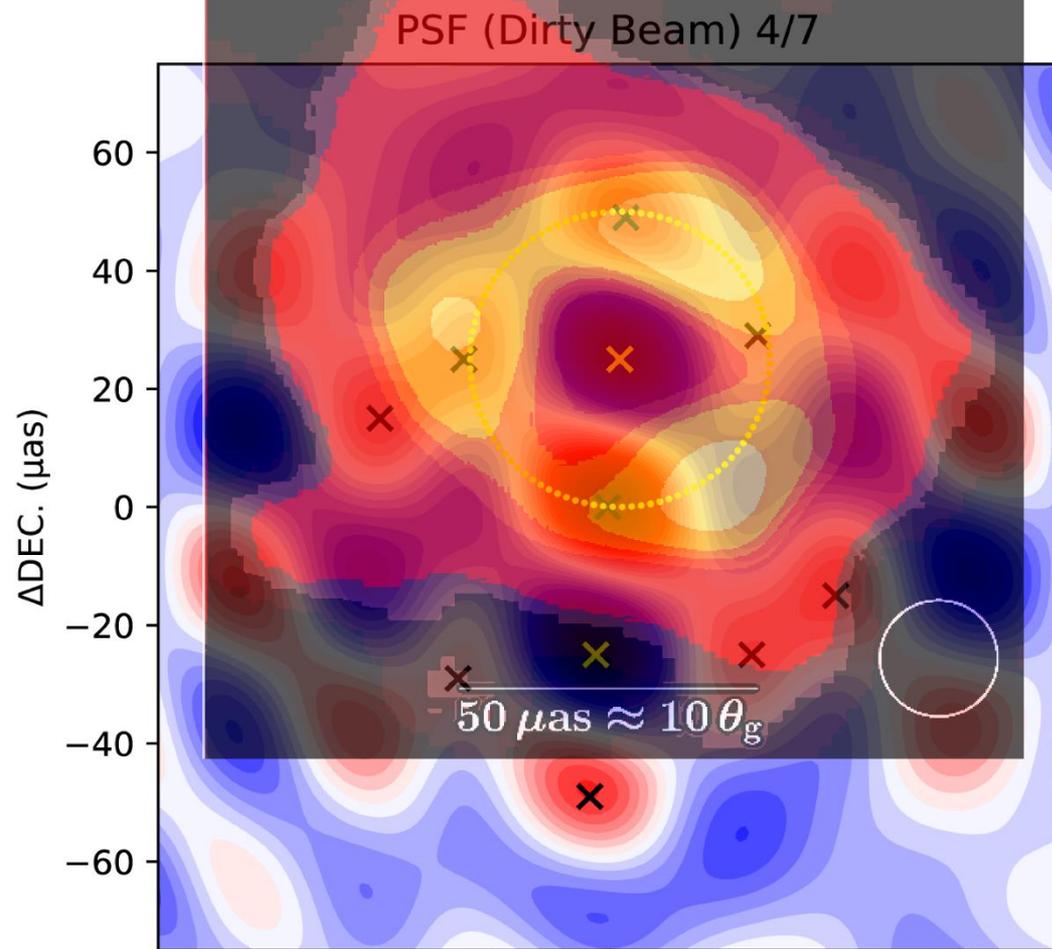
メインビームと第一サイドローブの間隔がEHTC測定
のシャドーサイズと完全一致する。
(=49 μas)

凹凸周期が ~ 50 μas

Bright thick ring with a diameter of $51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$ (68% credible interval)

Angular shadow diameter 48.7 ± 7.0 μas EHTC2022-1 (L12)

5. 天の川銀河系中心SgrA*のリング像



直径 $50\mu\text{as}$ の円周上にピーク群が乗ってしまう。

0.7 添訂では、そのPSFは

メインビームと第一サイドローブの間隔がEHTC測定
のシャドーサイズと完全一致する。
($=49\mu\text{as}$)

-0.7
-0.8 凹凸周期が $\sim 50\mu\text{as}$

最後にEHTCのリング像を乗せた。

Angular shadow diameter $48.7 \pm 7.0 \mu\text{as}$ EHTC2022-1 (L12)

6. まとめ

EHTの公開データを独立再解析を行い、EHTCの示すリング像とは異なる撮像結果を得た。

*なぜ違う撮像結果になったのか？

EHTCは非常に狭い視野設定(128 μ 秒角以下)を行い、像の範囲を最初から限定している。実は、データにサンプリングバイアス(=40 μ 秒角くらいの大きさの構造を創りやすい)がある。EHTCの狭視野設定はそのバイアス効果を強め、40 μ 秒角サイズのリング像に到達した。

一方、我々は、広い視野設定(25ミリ秒角)をして、通常の撮像解析を行い、バイアス効果を受けにくい撮像解析をした。

(EHTCは広い視野は得られないと主張しているが、電波干渉計の理論計算からはEHTCの主張より広い範囲の撮像ができる。なお、「広い視野はノイズが増す」わけでもない。)

*どっちが正しいのか？

我々のほうが「より正しい」=EHTC のリング像はおそらく間違い

(a)我々の結果は有名なジェットを検出するなど、従来の観測結果と矛盾しない。

(b)我々の結果はデータと撮像結果の整合性において、EHTCのリング像よりも、はるかに良い一致度を示す。

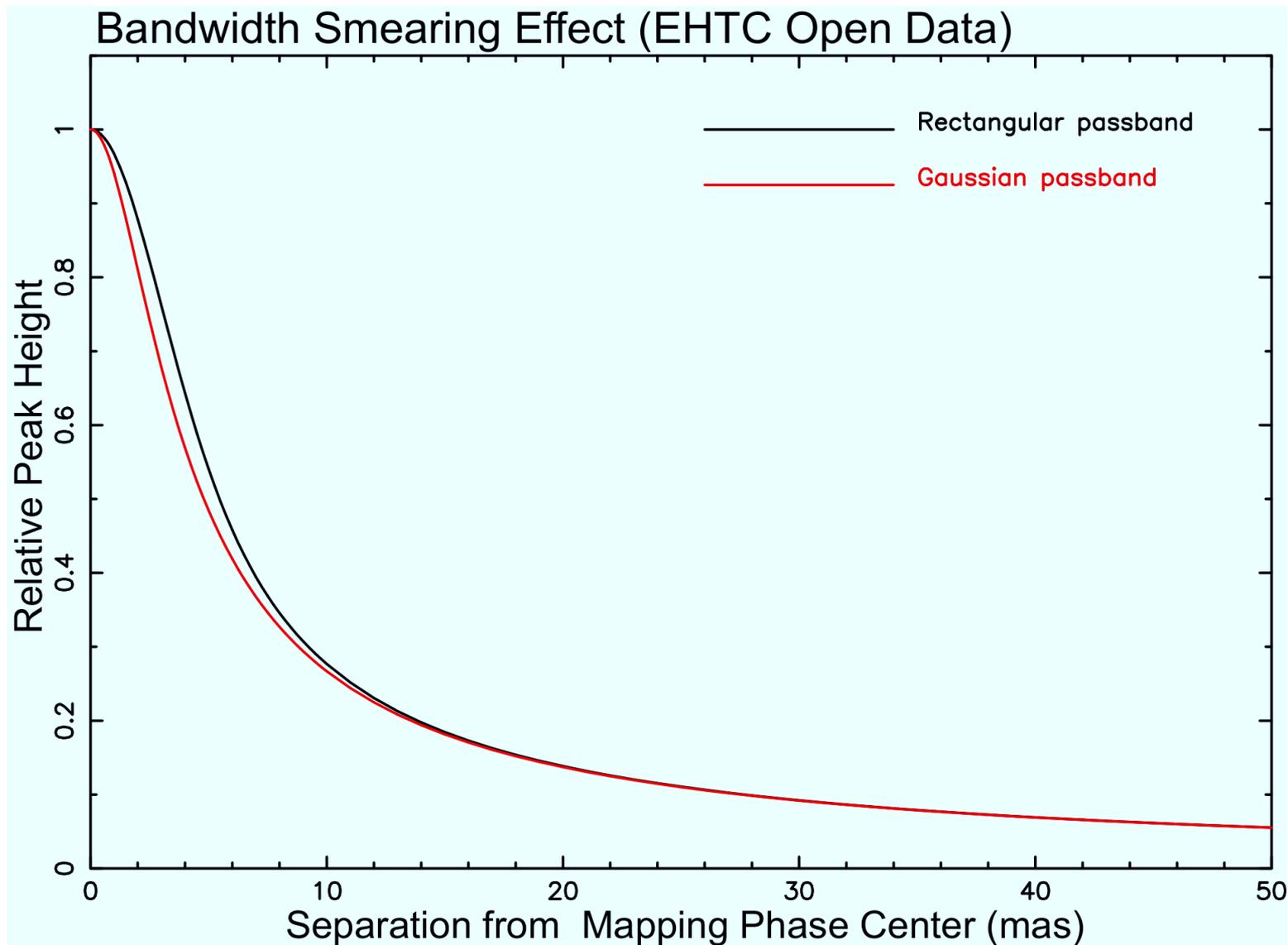
(c) EHTC のリングはEHT の観測局配置から“でがちな”構造である。

「独立にリング像を得ている」とEHTCが示した 4論文の内容

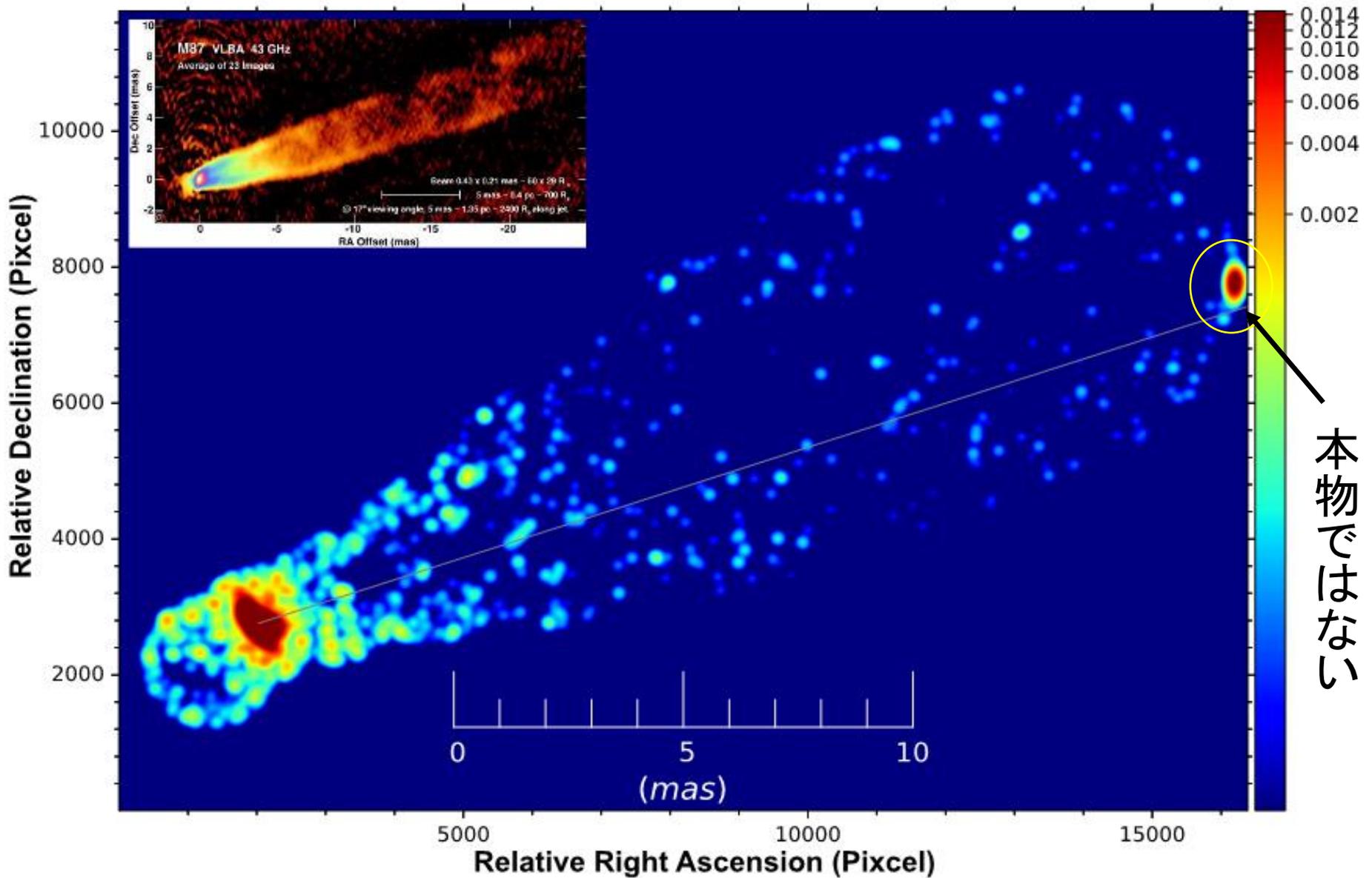
論文名	内容
Arras et al. (2022)	ベイジアンモデルによる。初期モデルが「丸いガウシアン円板」。EHT-Imaging と似た方法なので同じような結果になる。
Carilli & Thyagarajan (2022)	Hybrid mappingによる。初期モデルが円板かリングでないとし、リングにならない。ガウス型の方がリング像よりクロージャ位相残差が小さくなっている。(初期モデルで答が変わる、というのは我々の解析と同じ。コア・ノット構造が現われる点でも同じ。
Lockhart & Gralla (2022)	はじめからリングを仮定し、そのリングの幅などを推定するもの。独立にリングだということを示したわけではない。
Patel et al. (2022)	査読・投稿論文ではない。「EHTCの撮像パイプラインをつかうと同じ結果がでる」、という検証。

Makoto Miyoshi, Yoshiaki Kato, Jun Makino, Comments on "Imaging Reanalyses of EHT Data" <https://arxiv.org/abs/2207.13279> 及び https://twitter.com/jun_makino/status/1543262094753415169 の連続tweet 参考のこと.

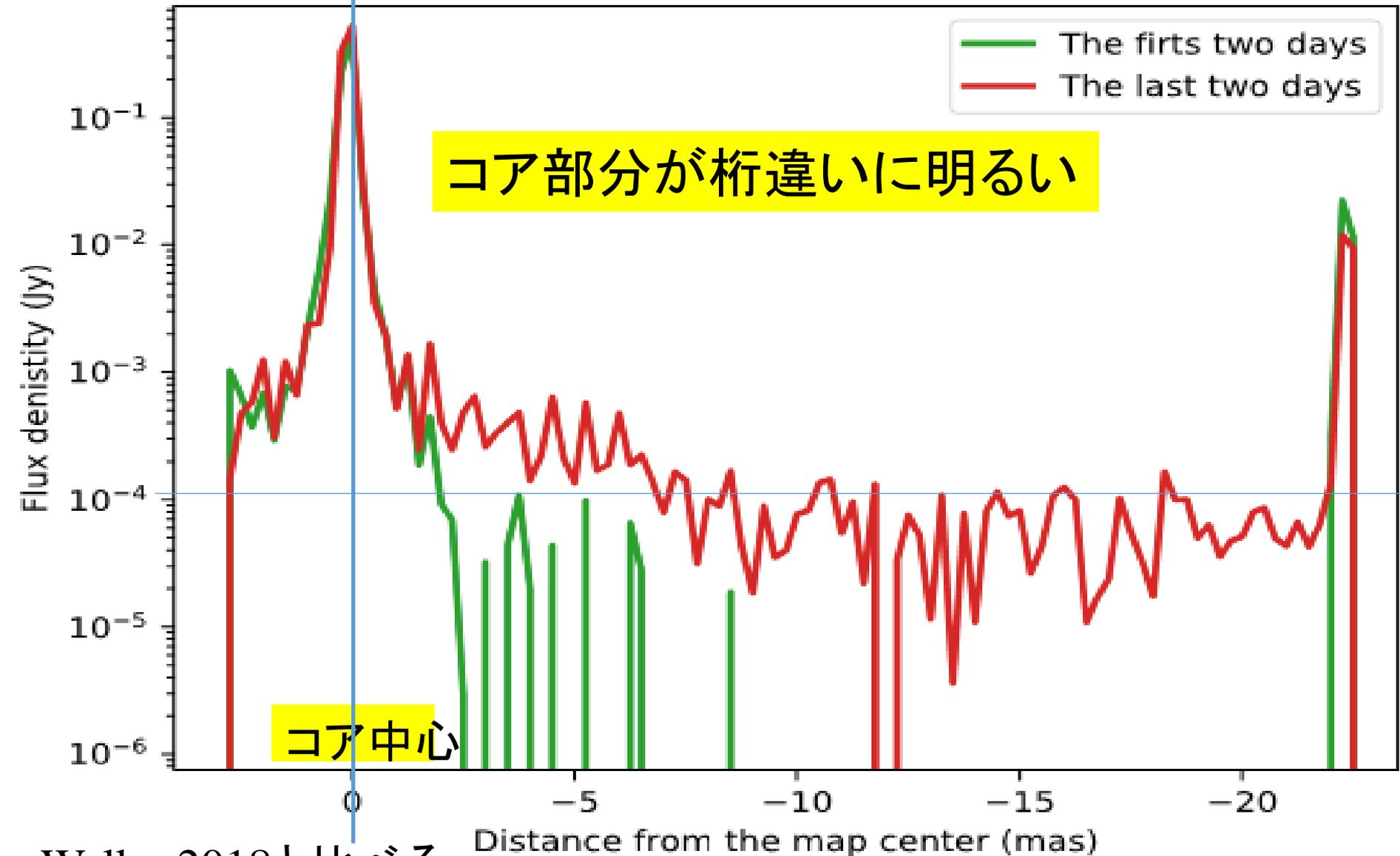
参考6. EHTで確保できる視野



43GHzでの平均画像と、輝度分布領域は一致



Distribution of flux density along the jet direction

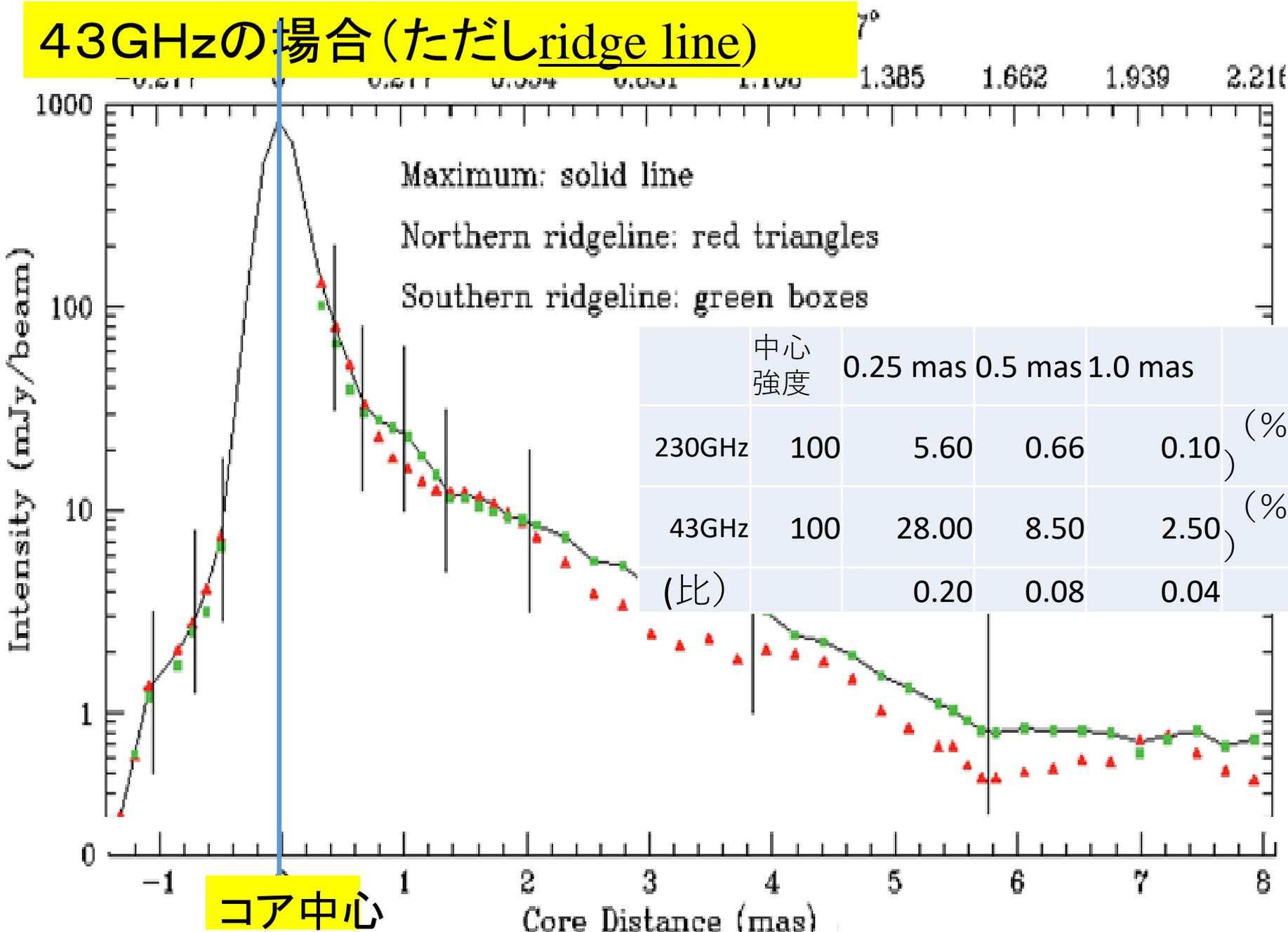


Walker2018と比べる

2021/9/13

2日の積分で得られる画像感度は？だが、0.1 mJy

43GHzの場合(ただしridge line)

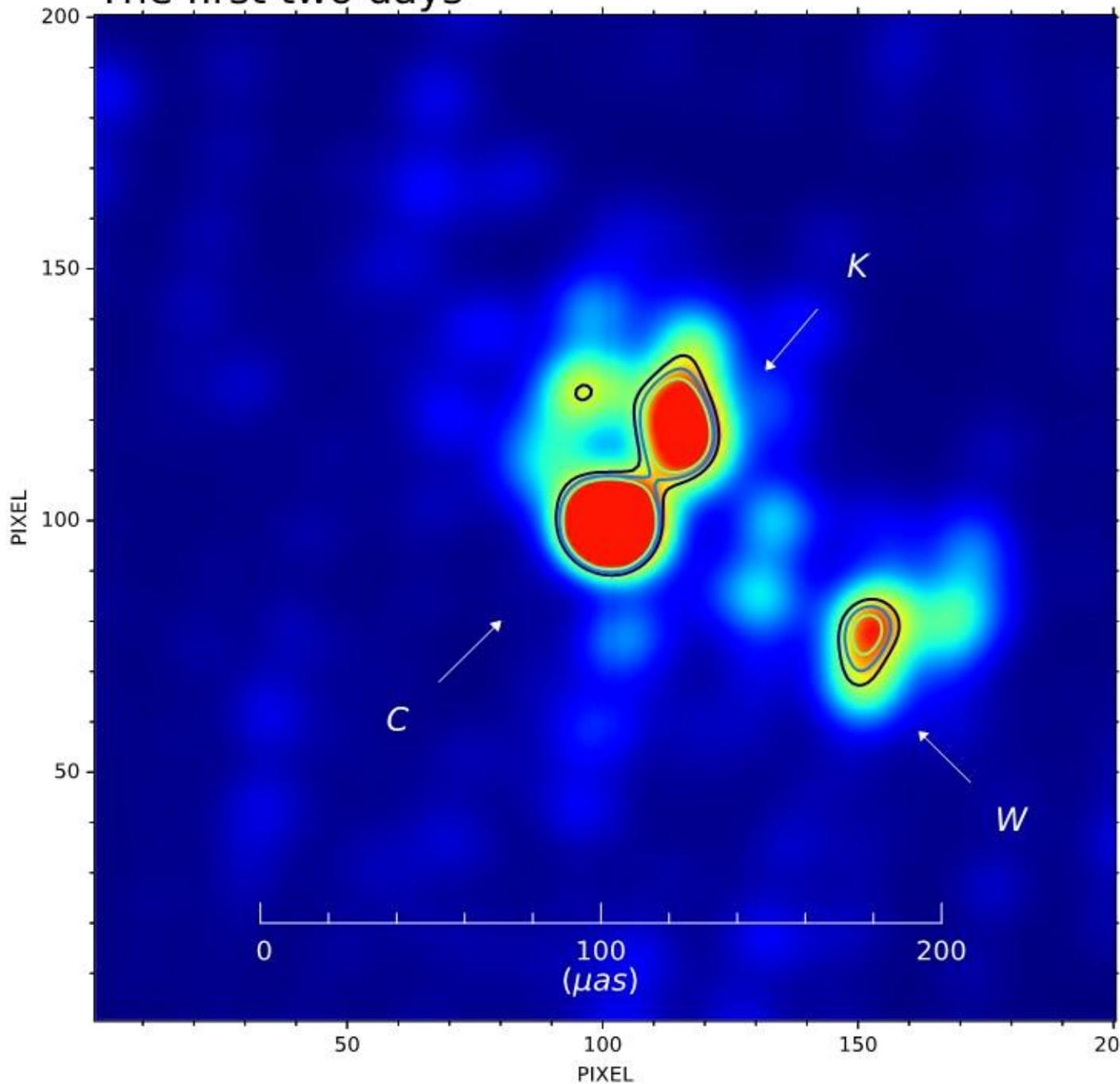


参考7. 中心部分の構造はなにであるか？

ジェットの初期生成段階の様子を示していると思われる。

The first two days

中心部
C (Core),
K (Knot),
W (West)
の3成分



43GHz平均画(Walker2018)

Walker2018では
「初期のopening angle $\sim 70^\circ$ 」
と言っている

Relative Dec (mas)

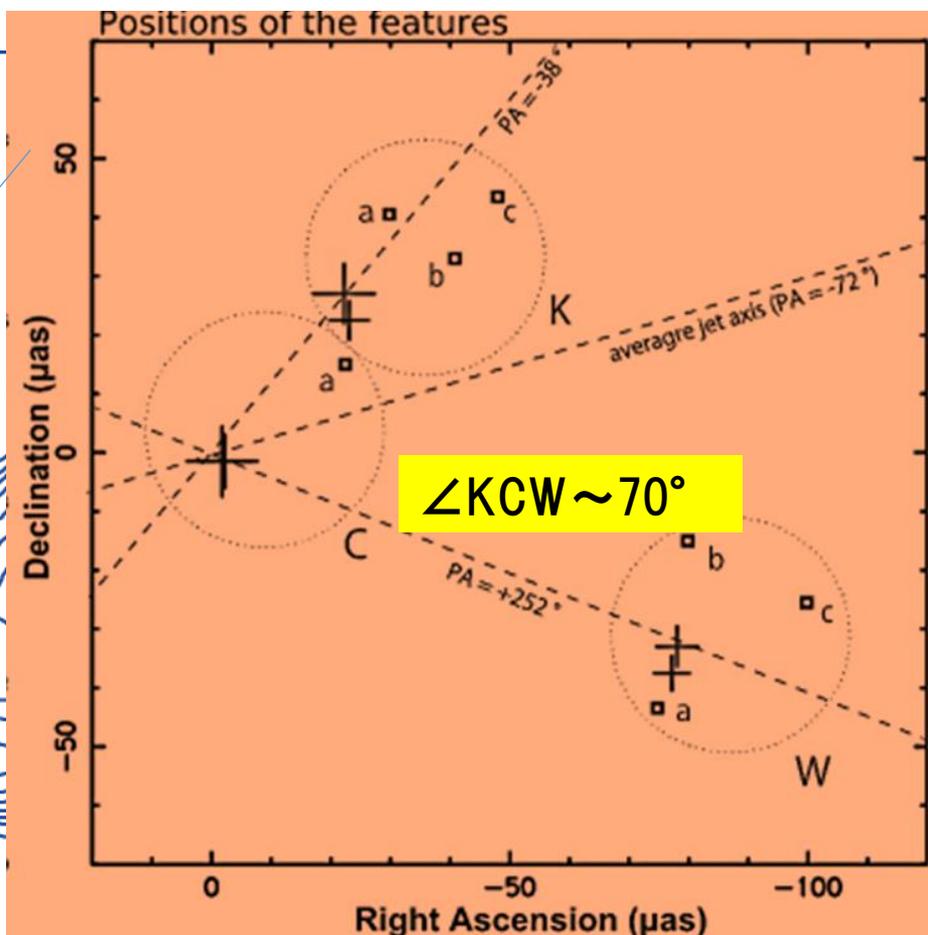
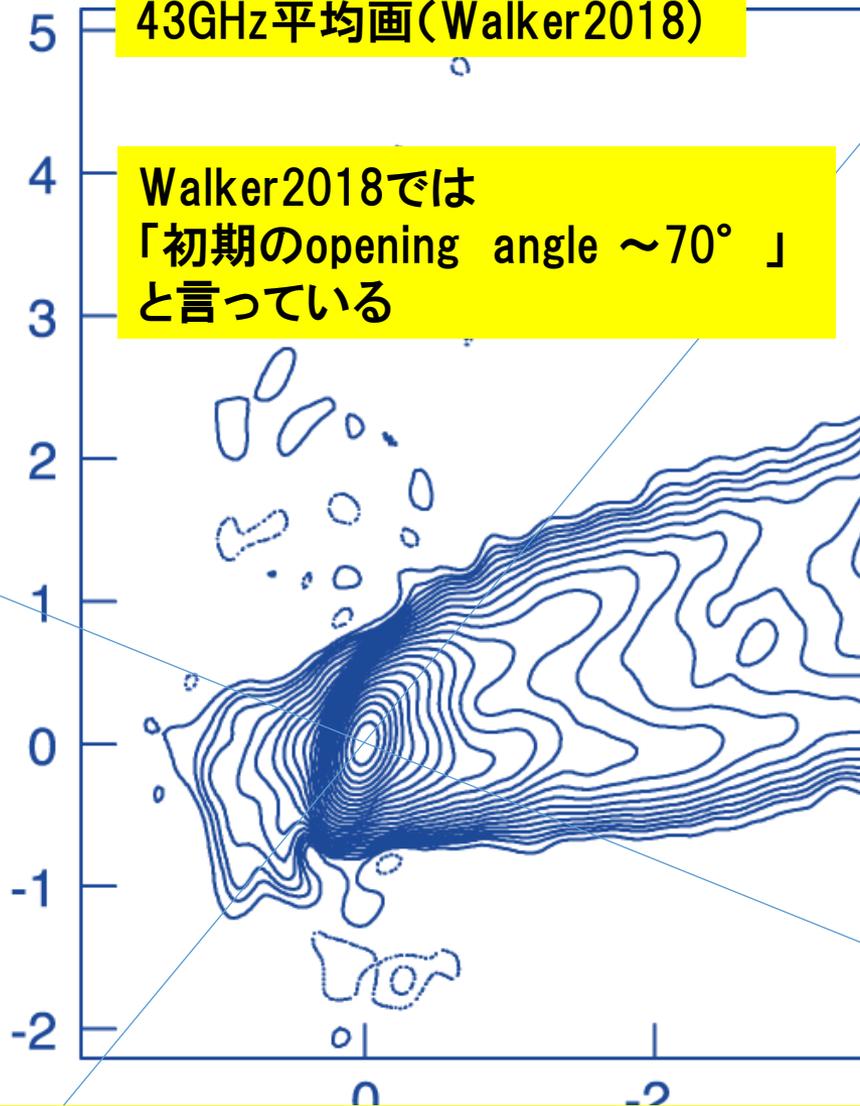


Figure 3 in Walker 他 2018

“opening angle ~ 70 度 (43GHz, Walker 2108)”と角度が一致。
向きもだいたい一致。