

シミュレーション天文学のこれまでとこれから
-ハードウェア・アプリケーション・サイエンス-

日程：2023年9月4日-6日
懇親会：9月4日
「富岳」見学：9月5日 15時半～
神戸大学総合研究拠点 コンベン
ションホール



ブラックホール撮像、 その間違いとこれから (Black hole imagings, the first artifacts and the future)

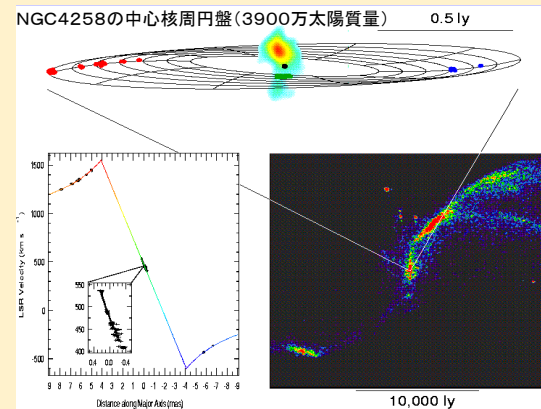
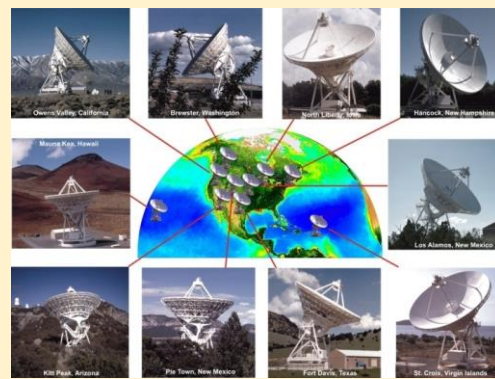
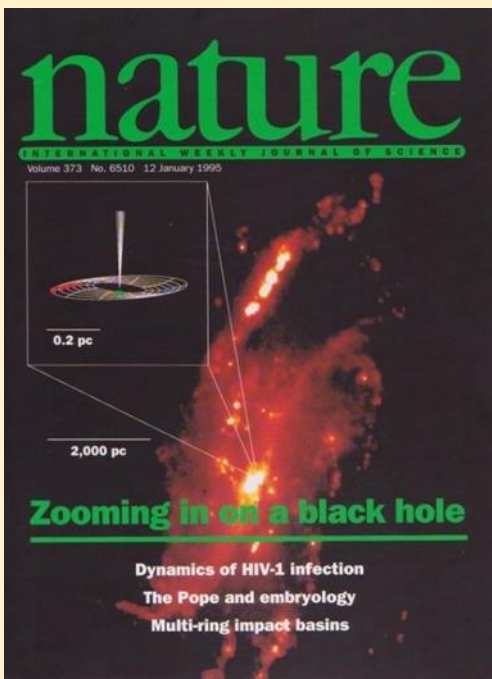
三好 真 (国立天文台)

牧野さんのおかげで幾つかやったが どれも計算機の話ではない

- 1990年頃、**なぜか**野辺山にスパコン（VP200）があった。
(本当は、電波天文の解析にスパコンなんかいらない)。
- 誰も使わないので、三好1人で好き勝手使っていた。
- 野辺山の計算機diskの15%を占有。

(森田さん、大石さんに小言は言われたが、それだけ。制限はなにもされなかった。)

- たぶん当時、**日本一計算機を無駄に使った天文関係者。**
- 近田さんと同室。**専用計算機の開発のお誘いは受けたが蹴った。**杉本さんが伊藤さんと野辺山に来たのは見た。



メーザの観測するつもりで、
なぜかブラックホールの観測研究を
してしまった(1995)。

本当にやろうと思っていた観測計画
がうまくいかないことになった (2000)。

江里口さん (高校の先輩)
ブラックホールの証拠はホライズン
@2000年ローマMG meetingの飲屋

ブラックホールのホントの証拠を観測
することを考えることにした。

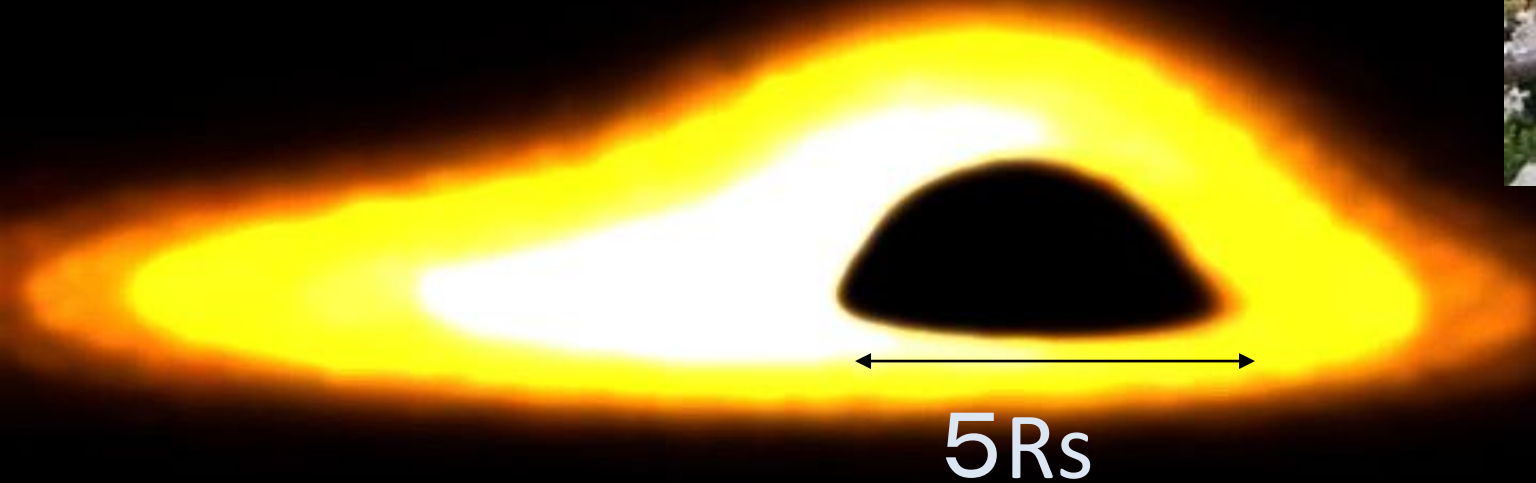


理論的計算からのブラックホール像(例)

‘80年代後半~大学院ころ

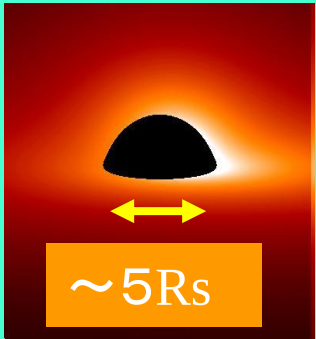


福江 純



ブラックホールそのものは見えないが、その重力による光の屈折によって、中心部分に暗がりができる。またブラックホールの周囲の円盤（＝ブラックホールに落ちてきた物質が作る）はドップラー効果で左右の明るさが変わる上、光の屈折（重力レンズ効果）のため、向こう側の円盤部分がせり上がって、見えてしまう重力による蜃気楼で向こう側が浮き上がって見える！

<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/>より。



距離が遠いと天体小さく見える（見かけの角度）。
質量が大きいと、比例してブラックホール半径も大きくなる。両方の効果をかんがえると、見かけ上最も大きいブラックホールは**SgrA***の50マイクロ秒角。

ブラックホール名	質量(太陽の)	距離	ブラックホール半径 (Schwarzschild半径)	その見かけ	黒い穴の差し渡し
太陽質量BH	1倍	3光年	3 km	0.02 μ asec	0. 10 μ asec
NGC4258	3900万倍	2300万光年	1.2×10^{11} km	0.11 μ asec	0. 55 μ asec
M87	30億倍 (最近値: 60億)	5300万光年	9.4×10^{13} km (6天文単位)	3.90 μ asec	19. 5 μ asec
Sgr A*	400万倍	2万4千光年	1.1×10^{10} km	10 μ asec	50 μ asec

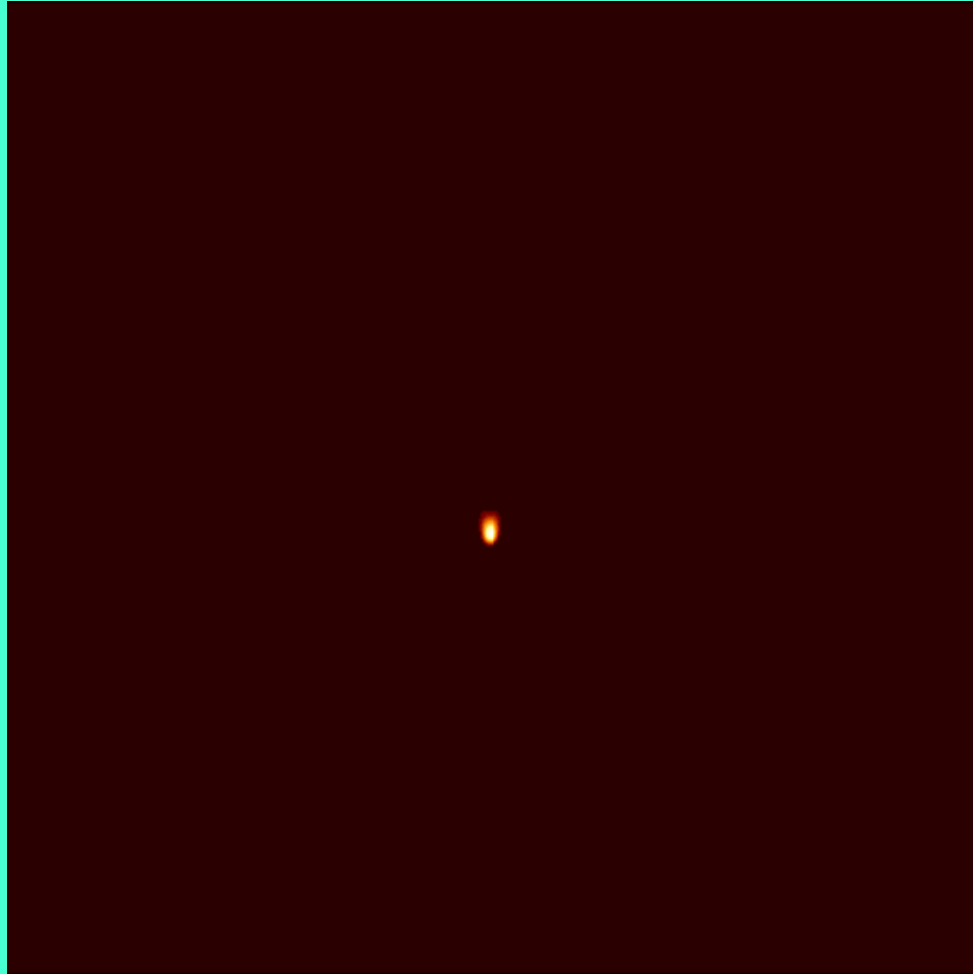
我々の銀河中心SgrA*が断然、
“見える”ブラックホールの候補。

（見かけの半径の大きさ、
1 Rs=10マイクロ秒角）

だから、これまでも重要視され、
観測されてきた。

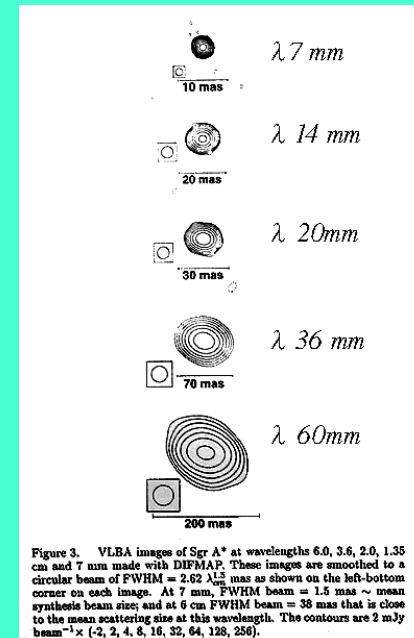
で、その結果はどうだったか？

サブミリ波なら、周囲のプラズマによる散乱を さけ、ブラックホール近傍像が、見通せる



5, 8, 15, 32, and 43 GHz でみたSgrA*の見かけの大きさ
<http://www.astro.ru.nl/~falcke/bh/sld10.html>

核周プラズマによる
電波散乱により
低い周波数では
像がぼける。ボケは観測
波長 λ^2 で効く



Lo他
1999

低周波数では散乱を受けて本来の像が見えない。高周波数、サブミリ波くらいならブラックホールは見える。

（散乱しなくなるから）

Falke他2000、Miyoshi他2004とか

Shadowの形状はブラックホールの質量、スピン、電荷が
決めている(メトリックがわかる)。(R. Takahashi 2004)

230GHz
SgrA*

Kerr

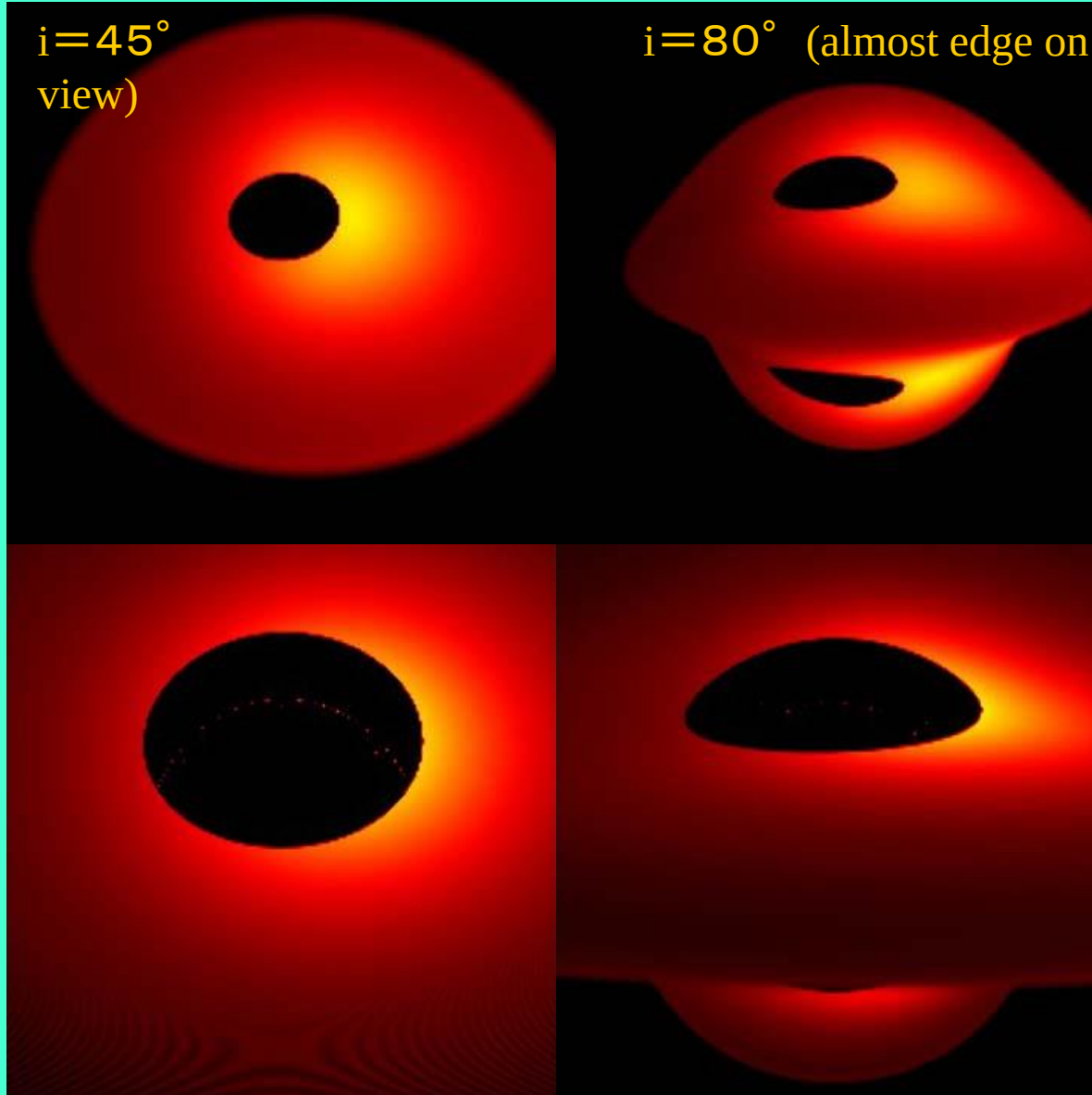
ADAF (H=1)、
Axis
symmetric

$i=45^\circ$
view)

$i=80^\circ$ (almost edge on
view)

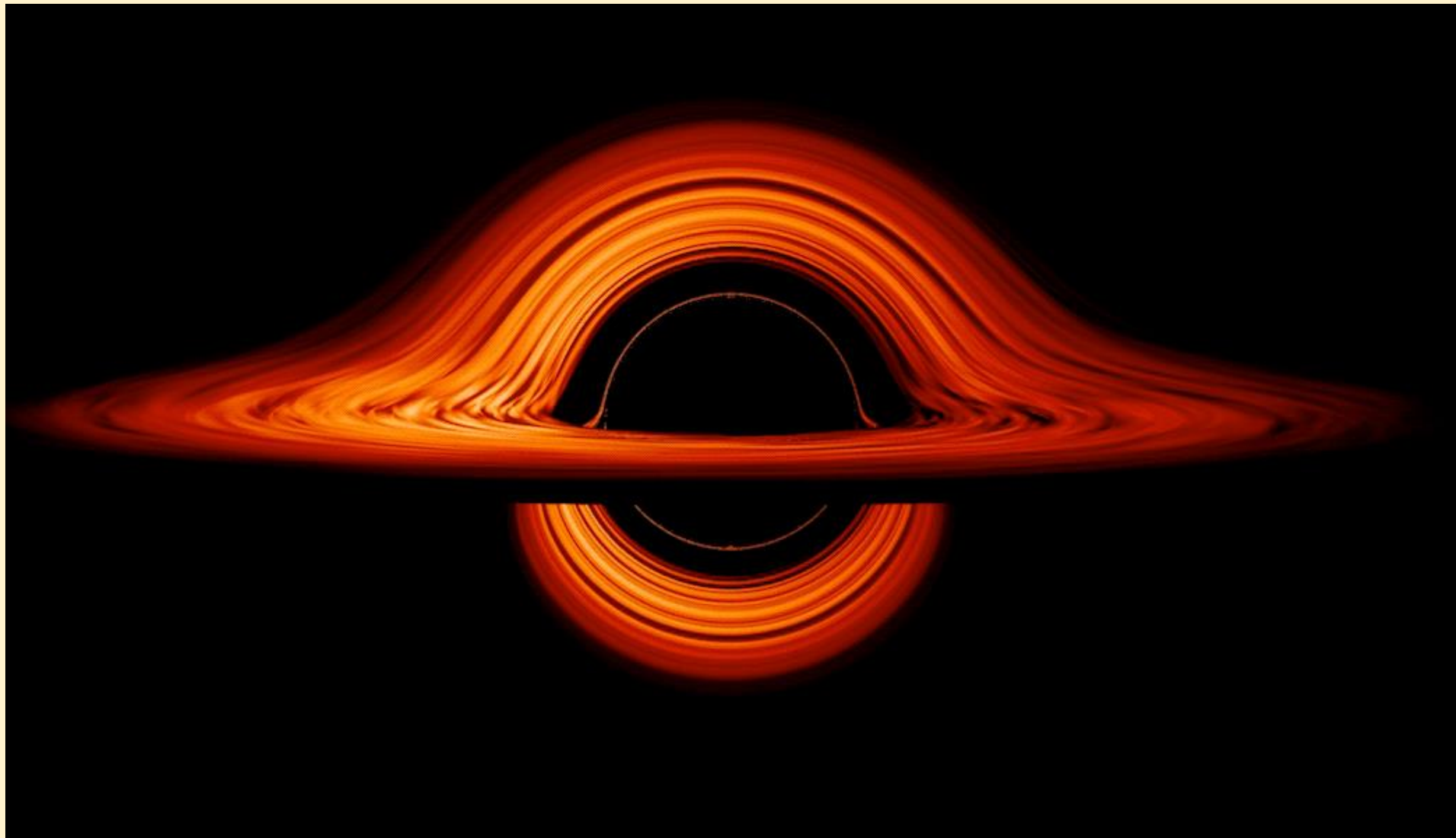
Schwarzschild
ADAF
(H=1)
Axis symmetric

Takahashi
et al. (04)



12Rs

映画「インターステラ」で使用された、ブラックホール像
(単なるCGではなく相対論に基づく計算結果を脚色)

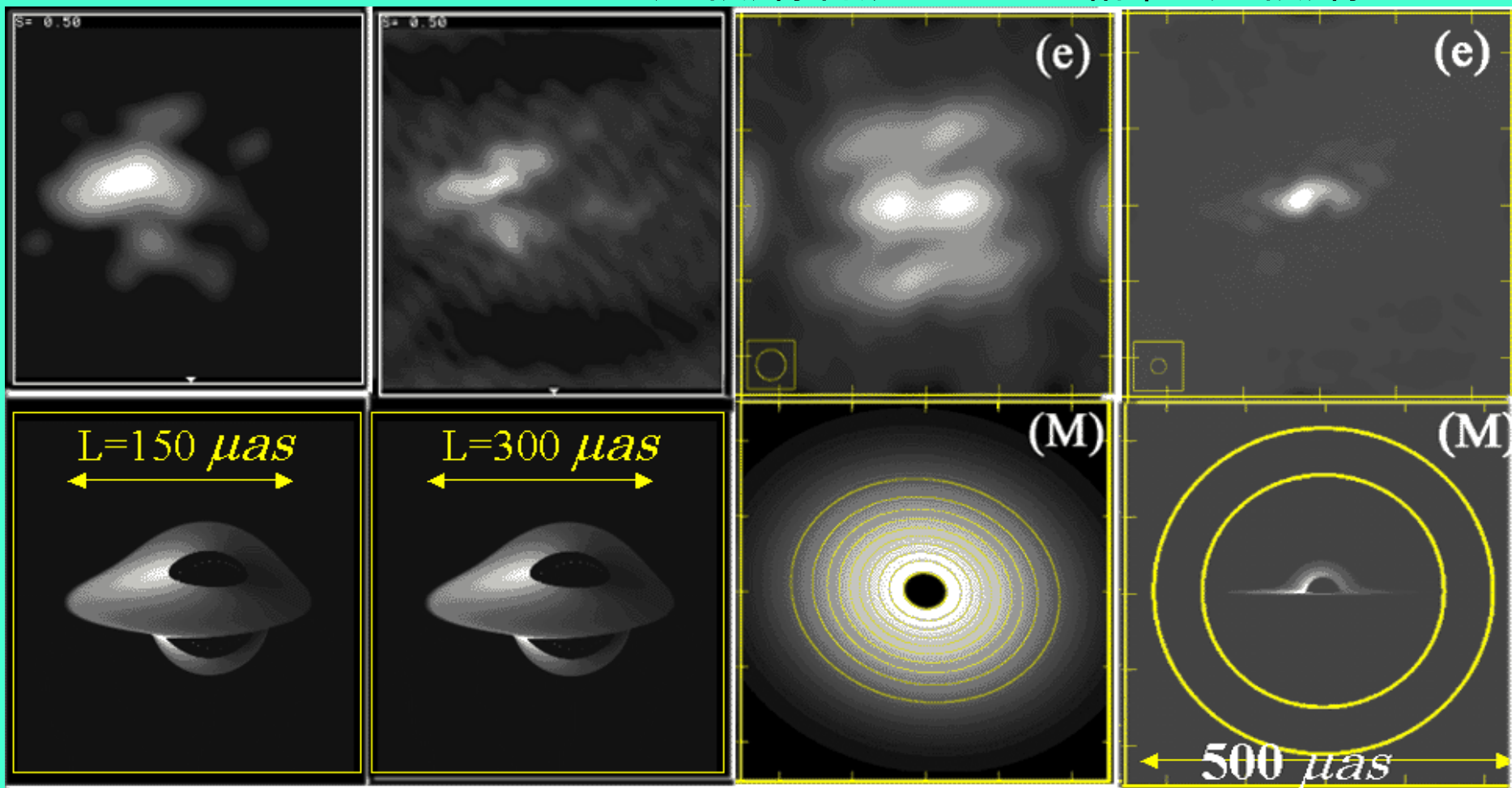




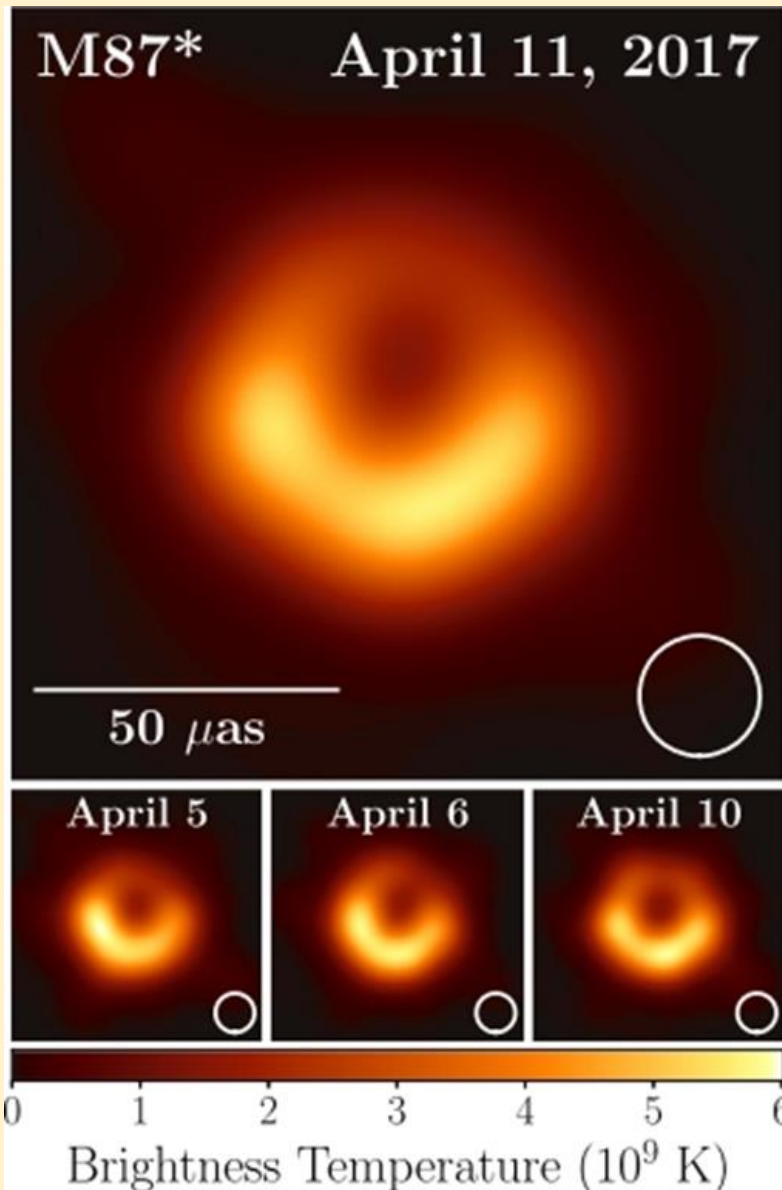
ハワイ,
CARMA,
ALMA,
SEST,
Huancayo
でのuvカバー

既存のサブミリ波望遠鏡を集めたVLBI
では、uvカバーに問題あり。(M2004)
「事象の地平線」の確認はかなり困難。

(上段) 像合成simulation結果 (下段) 像モデル



2019年4月 NSF 発表 M87のブラックホール



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 $128\mu\text{as}$ 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ーと大きさが一致するリング像**を得た。

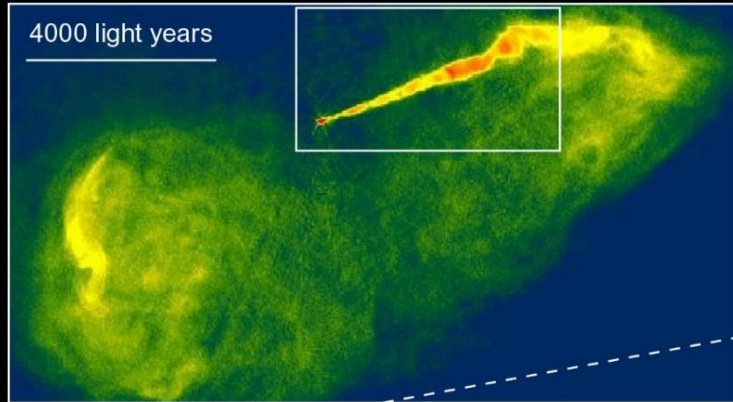
が、

- 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。

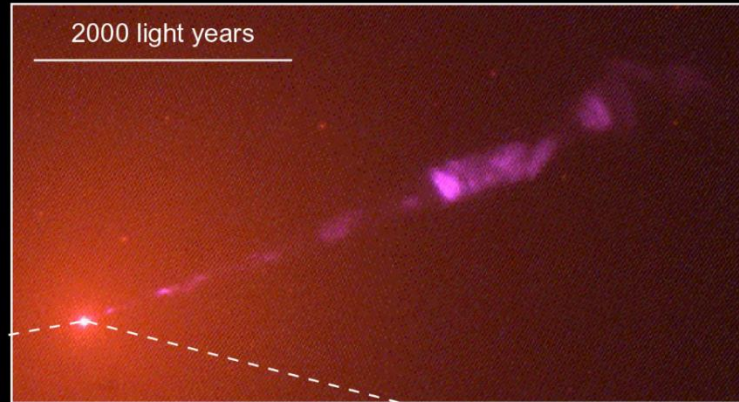
そして、

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 ($\sim 500\text{mJy}$) の再。観測データに対する残差が大きい。

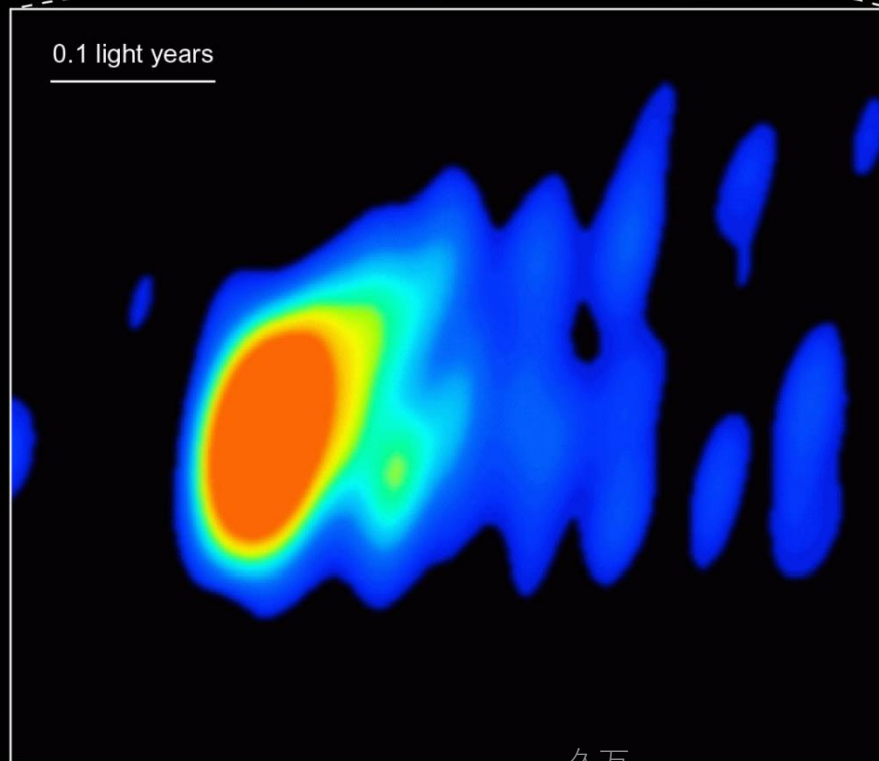
M87は「宇宙ジェット」で有名



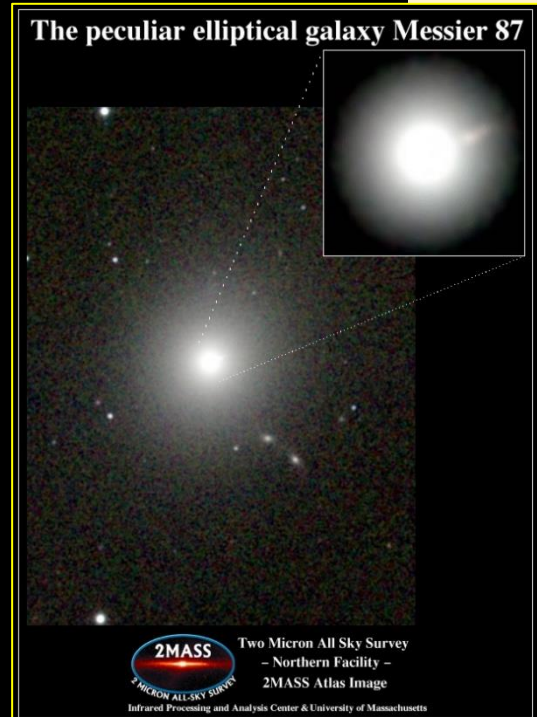
VLA
Radio



HST • WFPC2
Visible



VLBA
Radio



2020/11/22

NASA, NRAO and J. Biretta (STScI) • STScI-PRC99-43

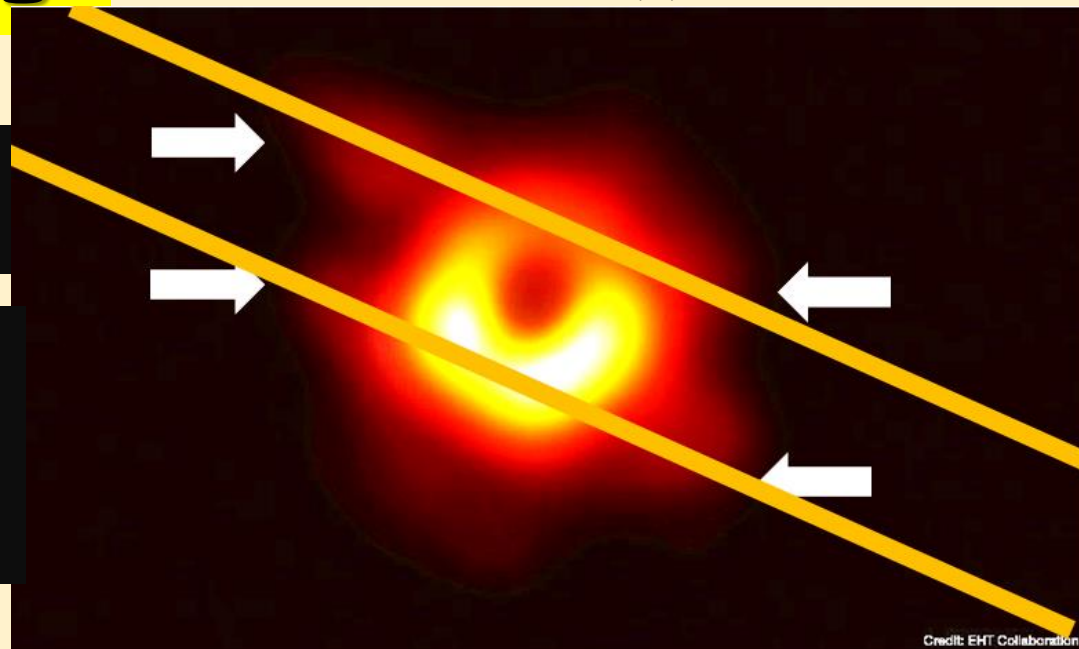
EHTCのブラックホール像, 3つの不可解な点

- (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) $40\mu\text{as}$ 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？



- 牧野氏（メール）

「大発表の結果を否定する論文を出すのはとても難しいのではないか？だが。」

- 加藤氏（電話）

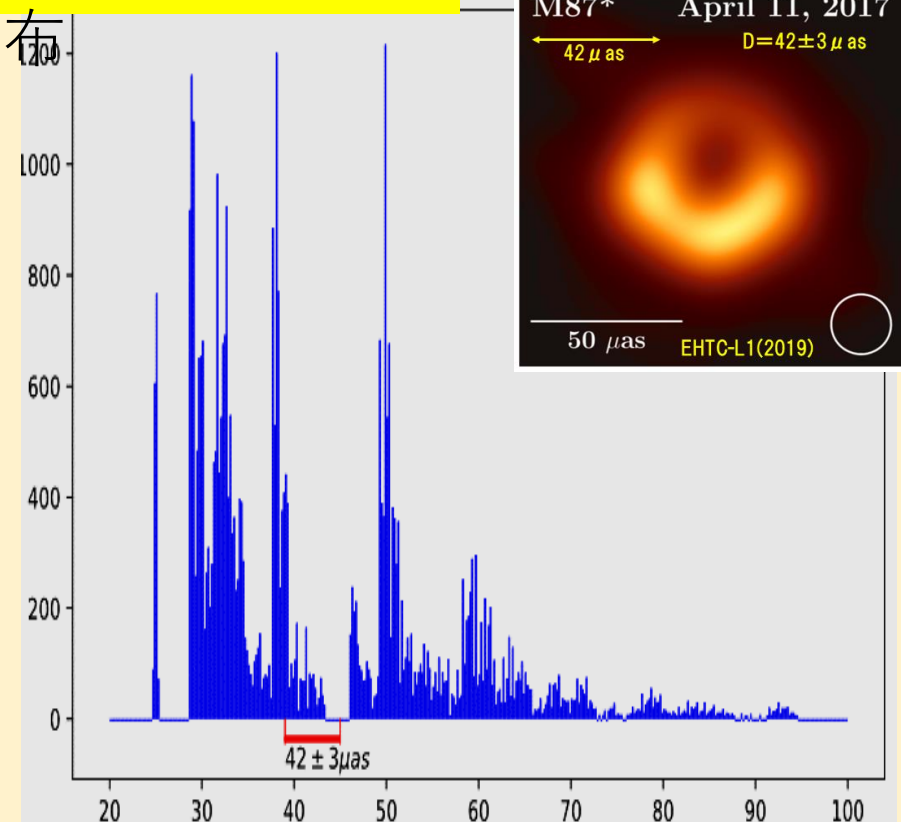
「是非、正しい結果を世界に示しましょう」

u-v カバレッジと PSF/Dirty Beam

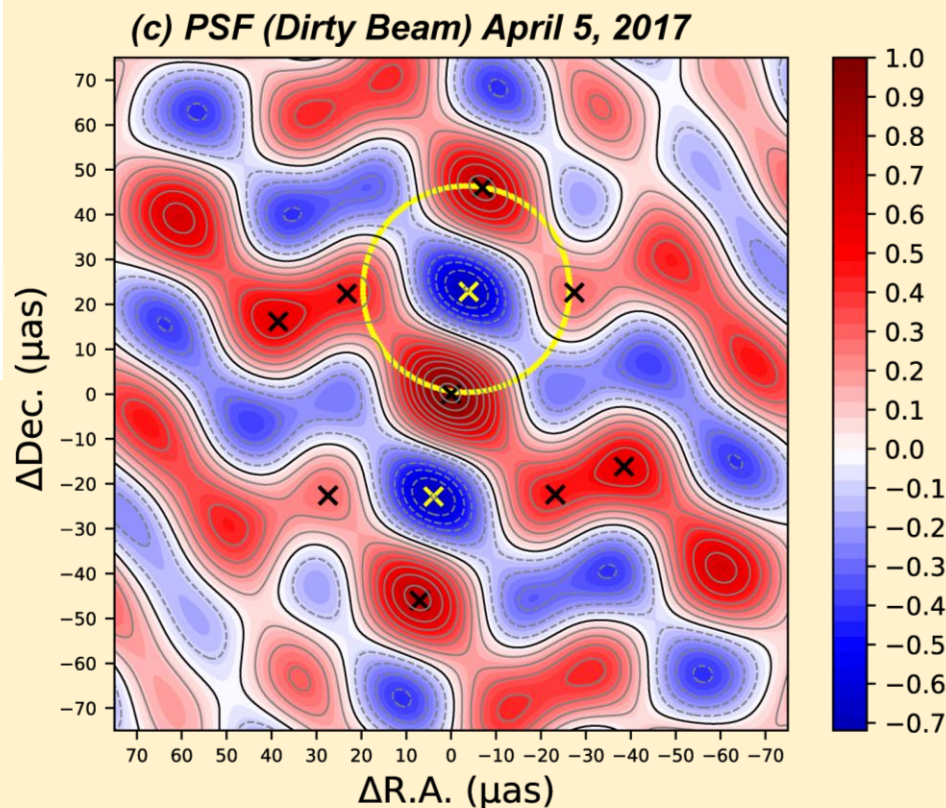
取得データには約 40μ 秒角を示す空間フーリエ成分が欠如している。そのため、約 40μ 秒角サイズの構造を誤って像に取り込みやすい。

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



空間フーリエ成分 (μas 単位) →

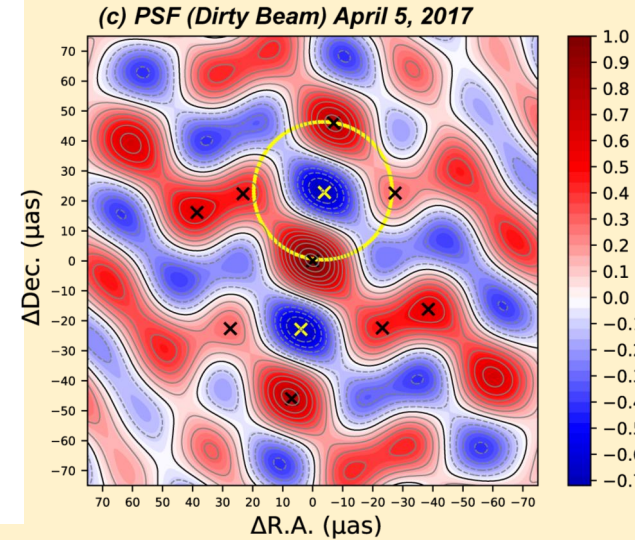
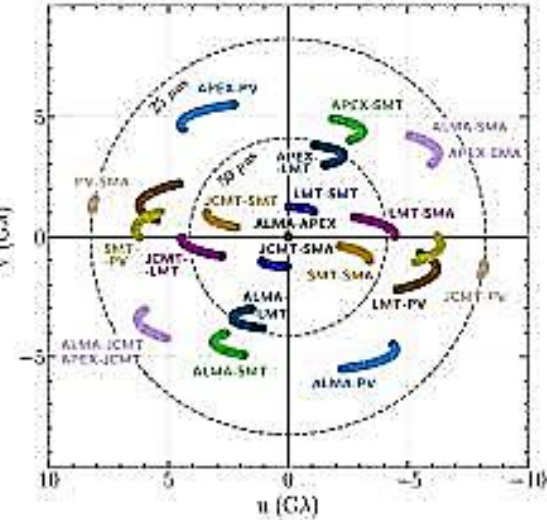
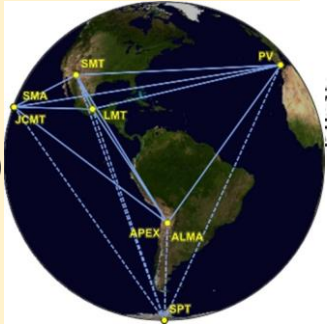


赤がプラス。青はマイナス。

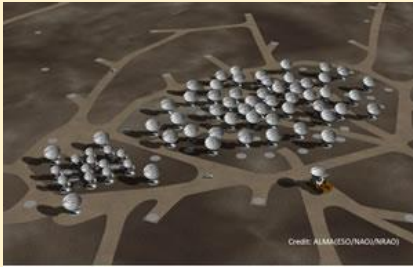
EHTのM87観測データ(u-vカバー)は少なすぎる。

EHT (2017年段階)

この観測では
5局10基線
(超短基線除く)



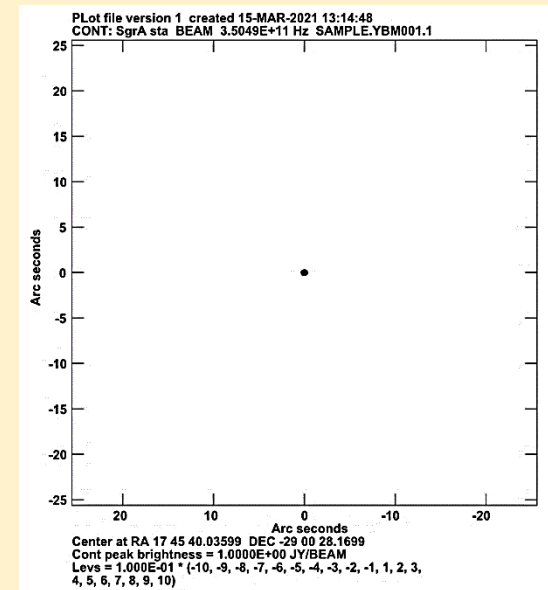
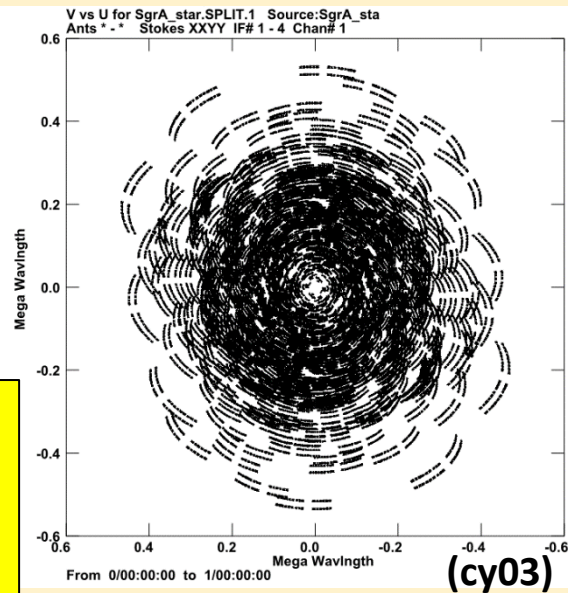
ALMA



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

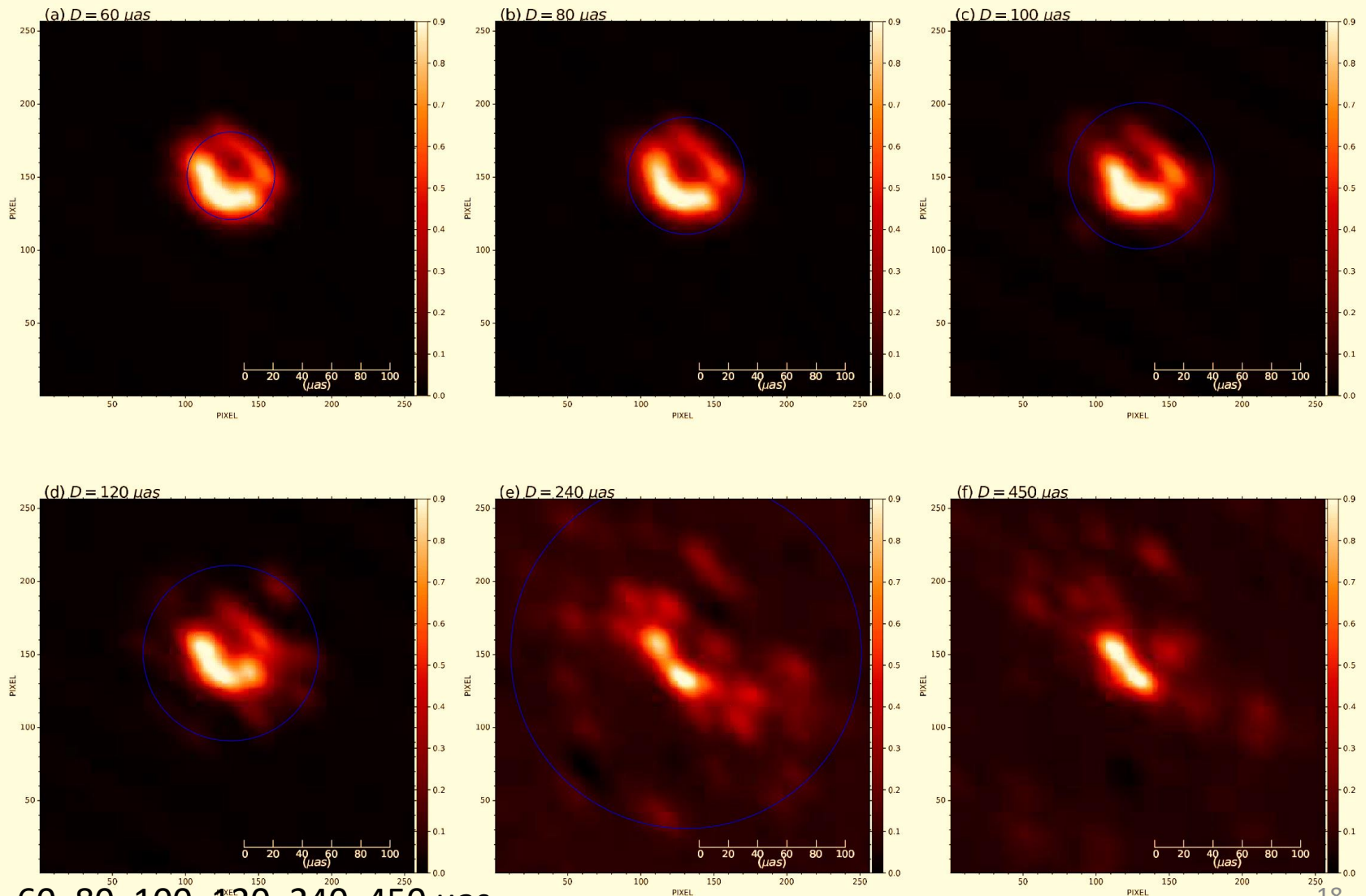


↑ u-v カバー

↑ PSF (Dirty Beam)

堅牢性（視野設定を変えて、像の変化を調べる）

EHTCのM87リングは視野設定を $100\ \mu\text{as}$ より大きくすると壊れる。

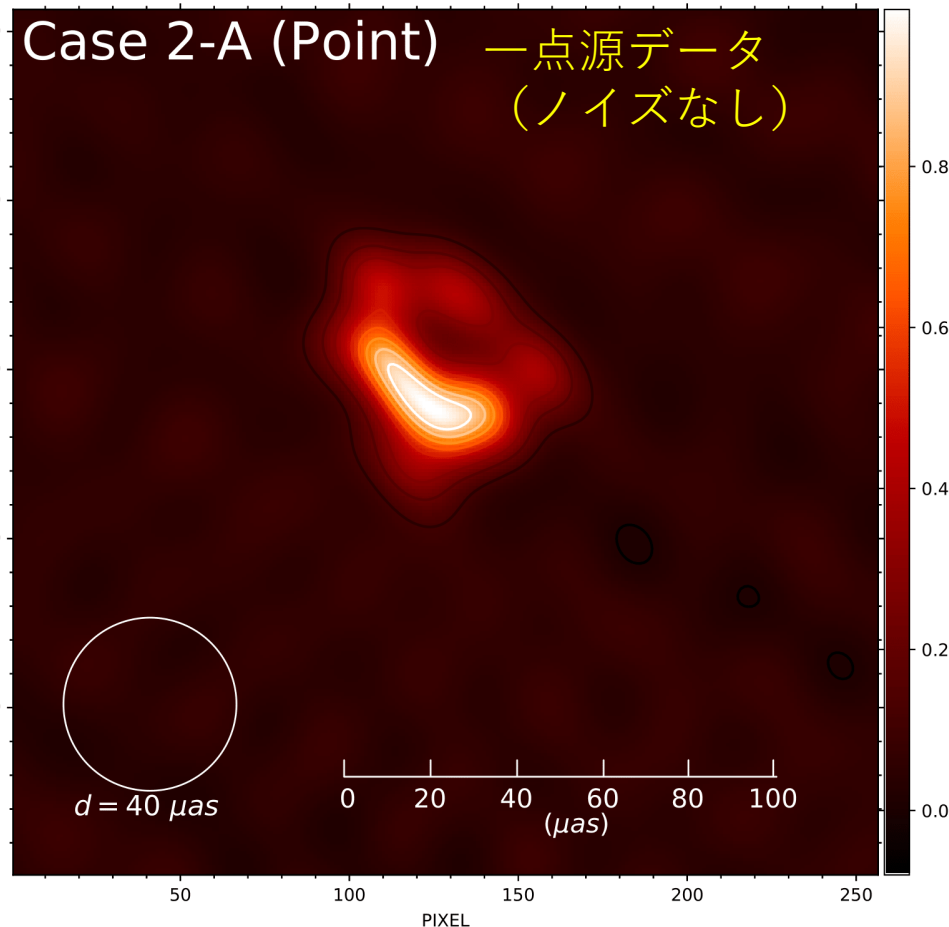
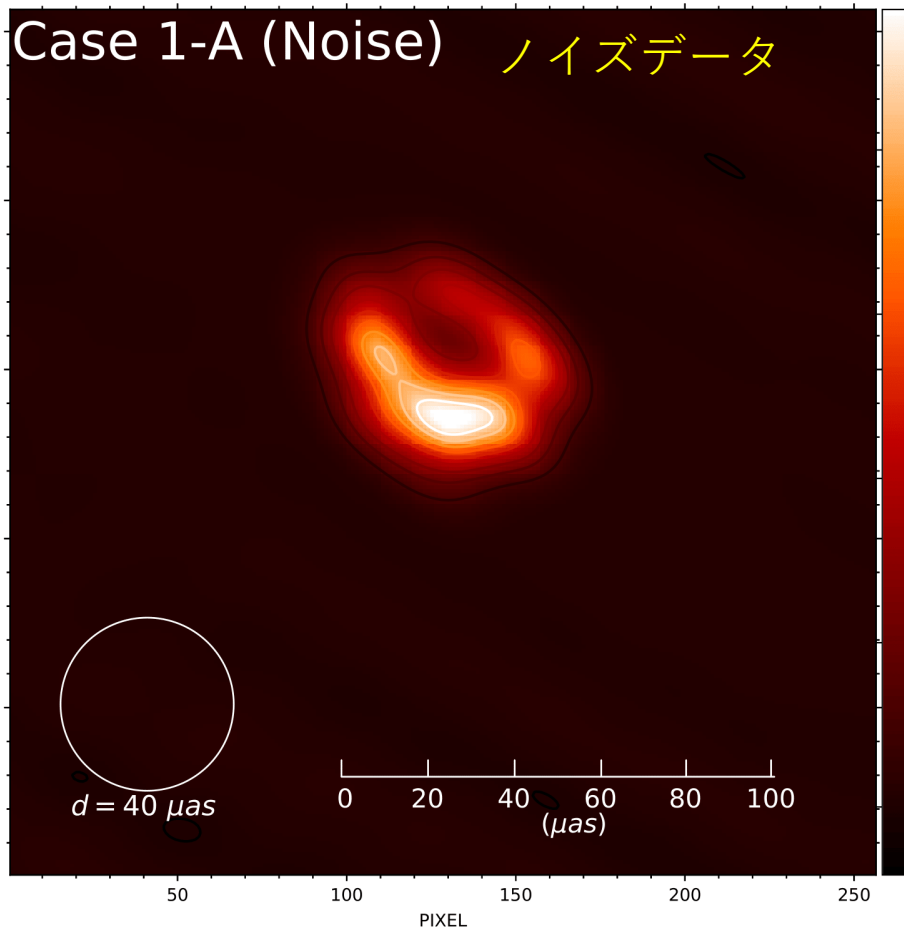


$D = 60, 80, 100, 120, 240, 450\ \mu\text{as}$

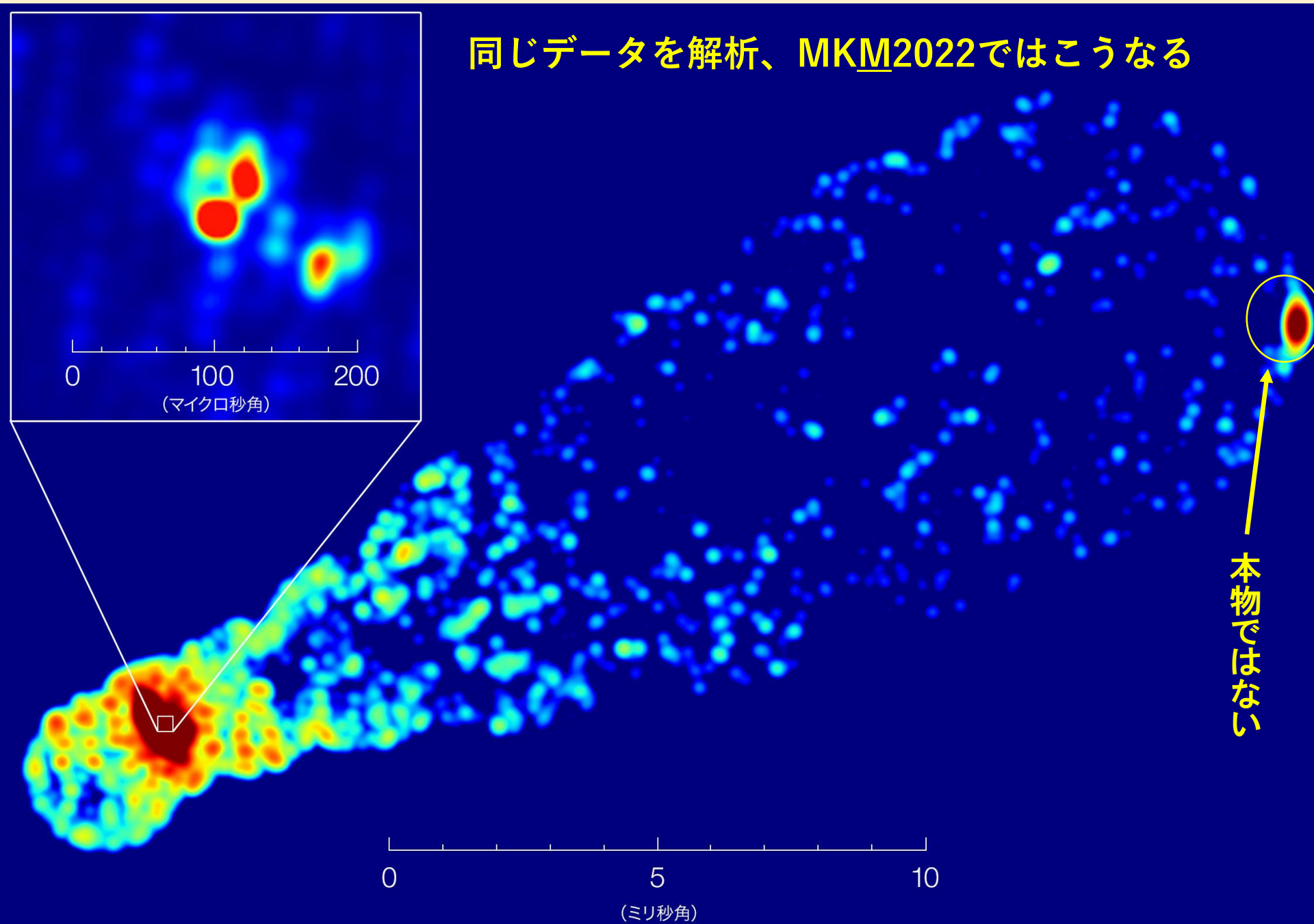
模擬データからもリングは「再現」できる

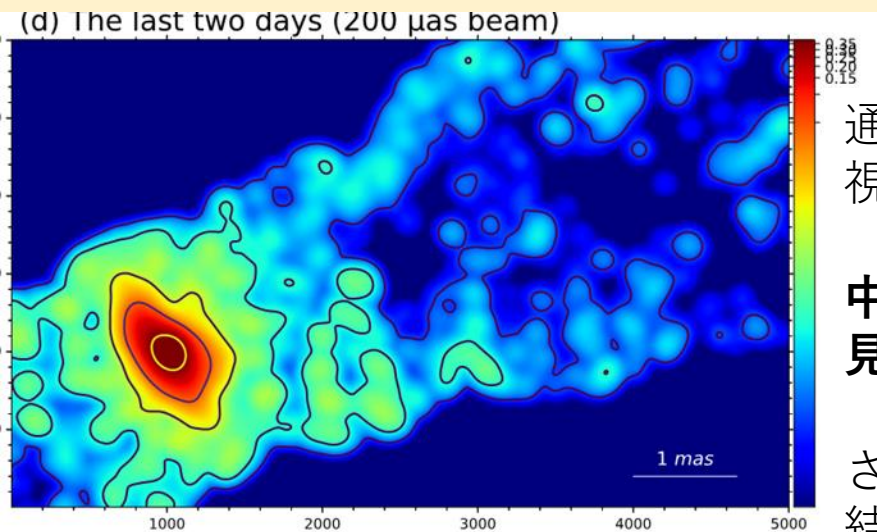
EHTによる観測データと同じサンプルの模擬データからも、EHTCの撮像結果と同じ $40\ \mu$ 秒角サイズのリングができる。

(EHTC のリングはEHTの観測局配置から”でがち”な構造である)



同じデータを解析、MKM2022ではこうなる

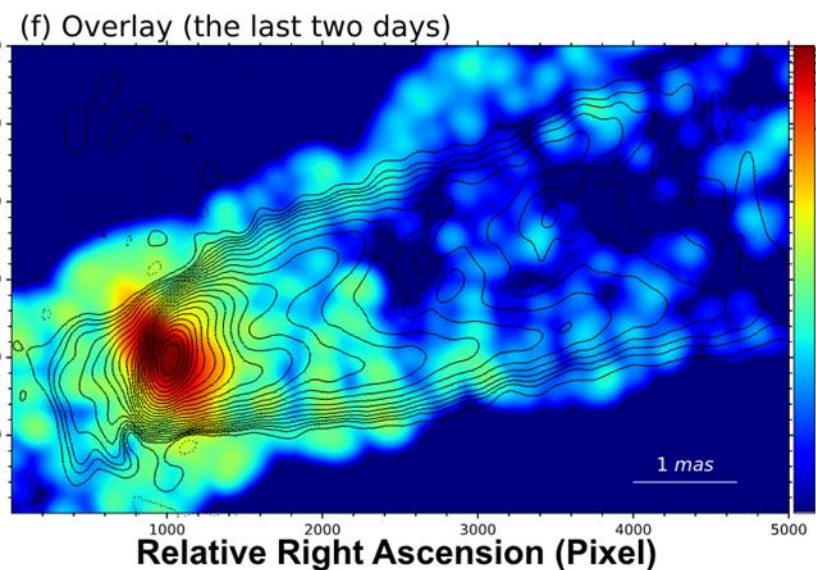




通常のCLEAN法(AIPS) を用い、ジェット領域を視野設定に含めた。

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。

さらに、有名なジェット構造を検出した。
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。



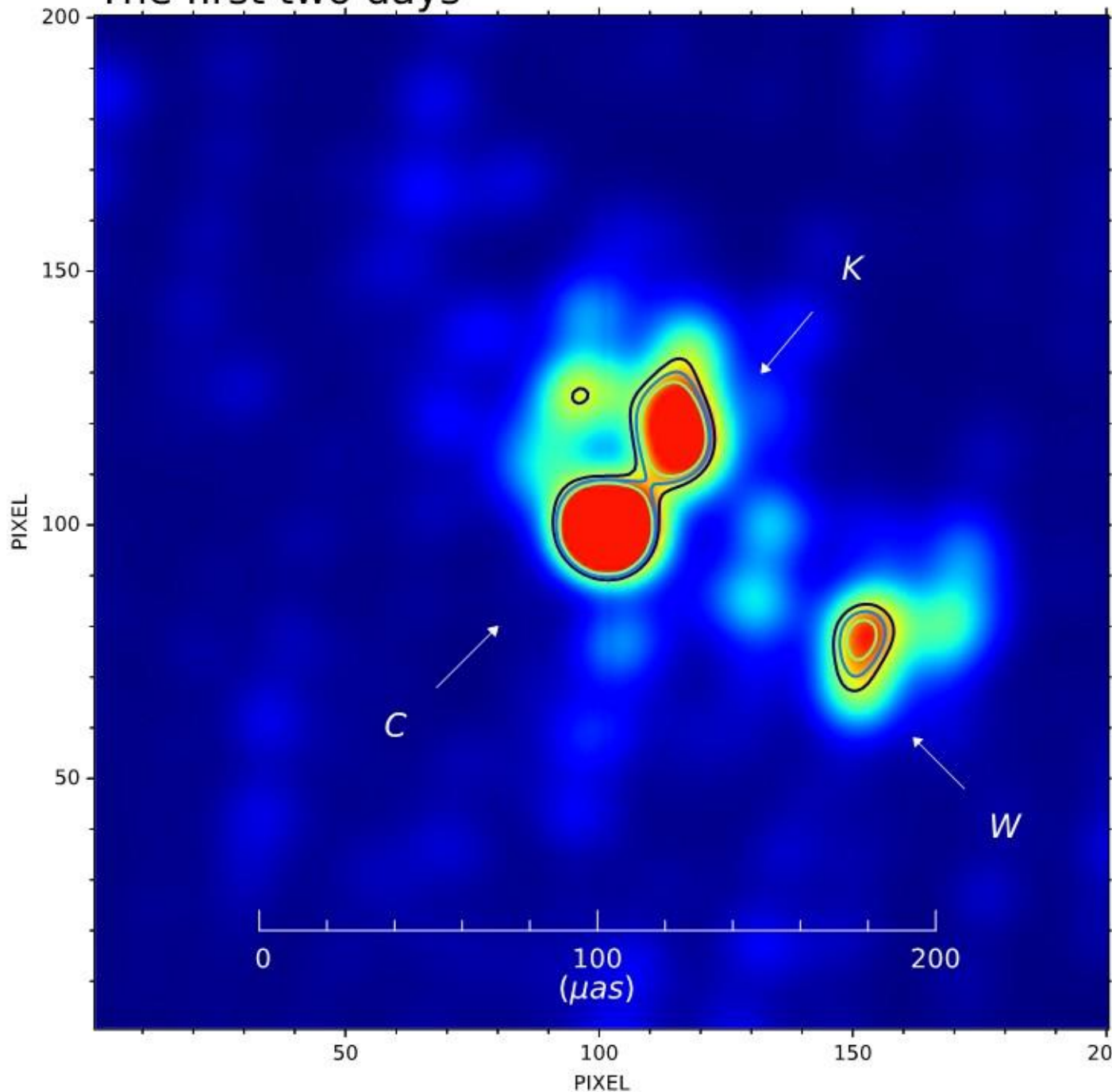
下の図の等高線は43GHzの観測での平均像を示す (Walkerら2018)

中心部分はリングじゃなくて、
コア・ノット構造。

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。

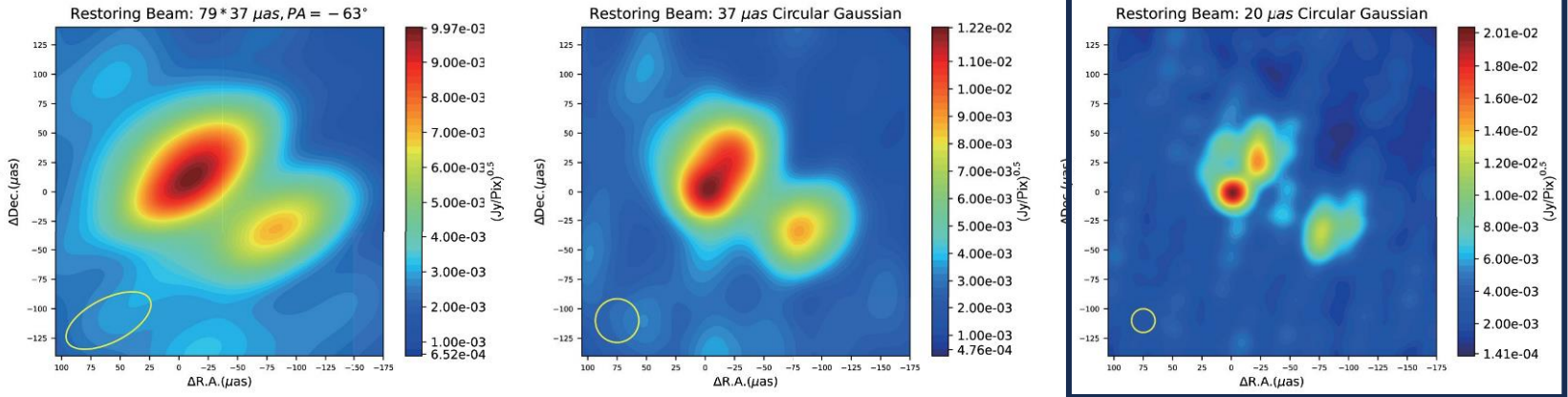
The first two days

中心部
C (Core),
K (Knot),
W (West)
の3成分

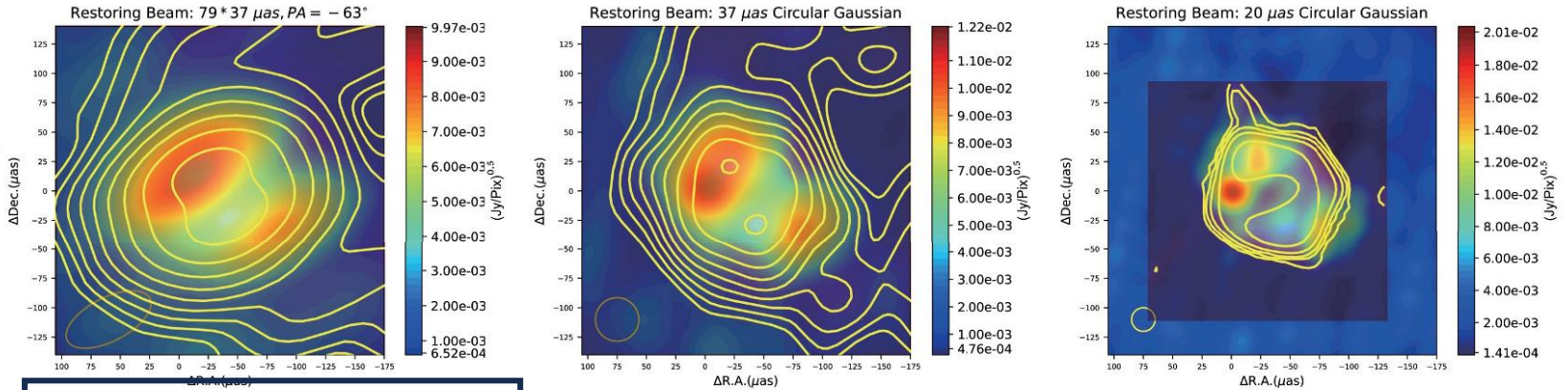


Lu 他'23(86GHz)の像とサイズ同じ

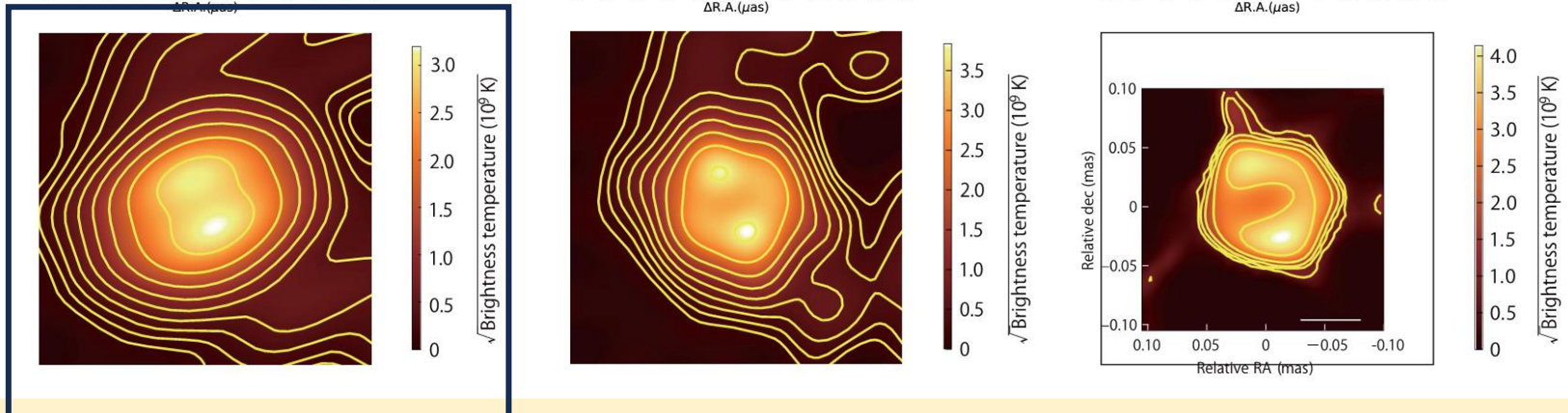
EHT 230 GHz (Miyoshi et al. 2022)



Overlay



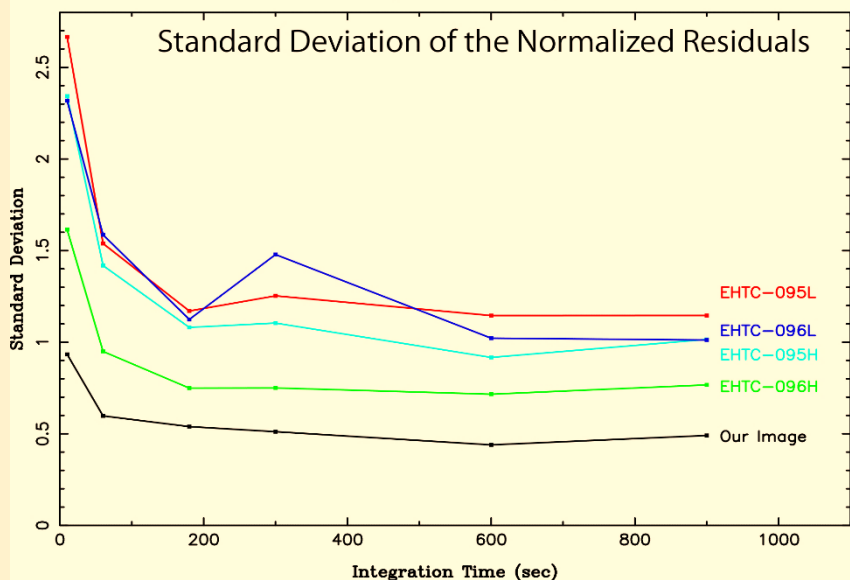
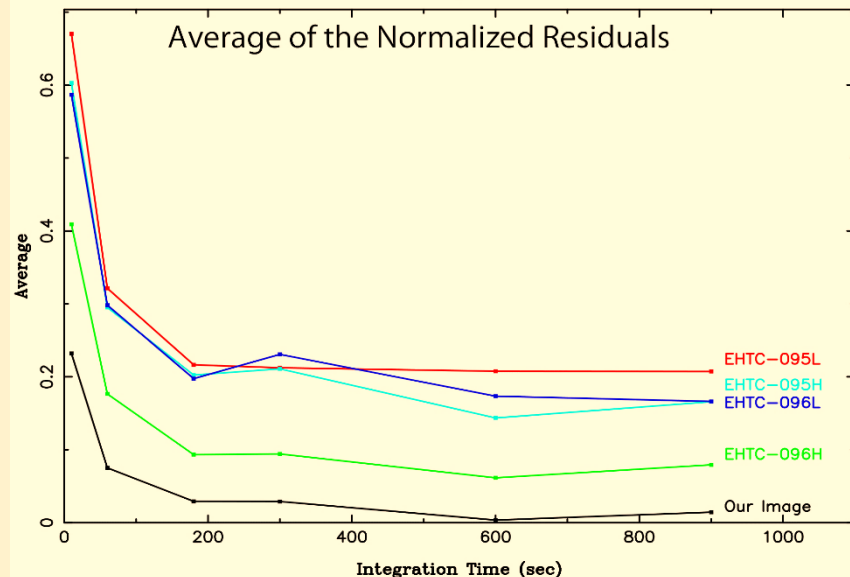
GMVA 86 GHz (Lu et al. 2023)



4. どちらの絵が「より良い」か

4-1 振幅残差（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。

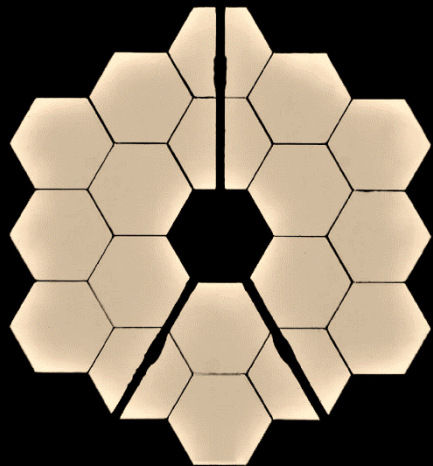
平均値、標準偏差ともに、我々の像の「残差」が一番小さく、像結果とデータの間の整合性が一番よいことがわかる。

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

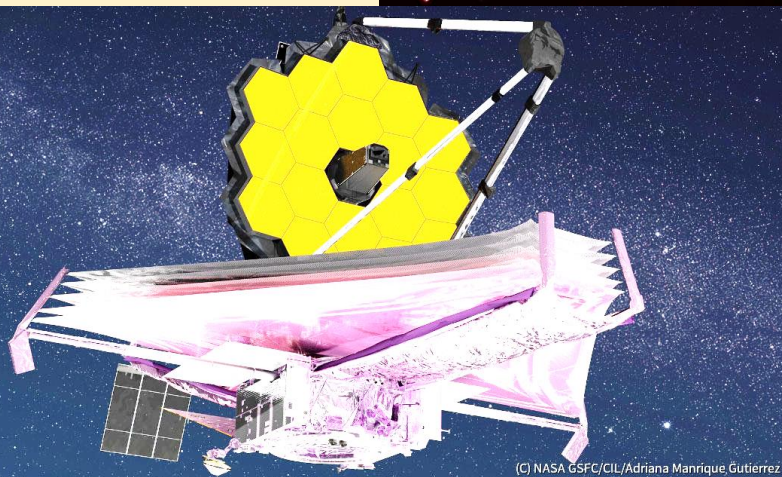
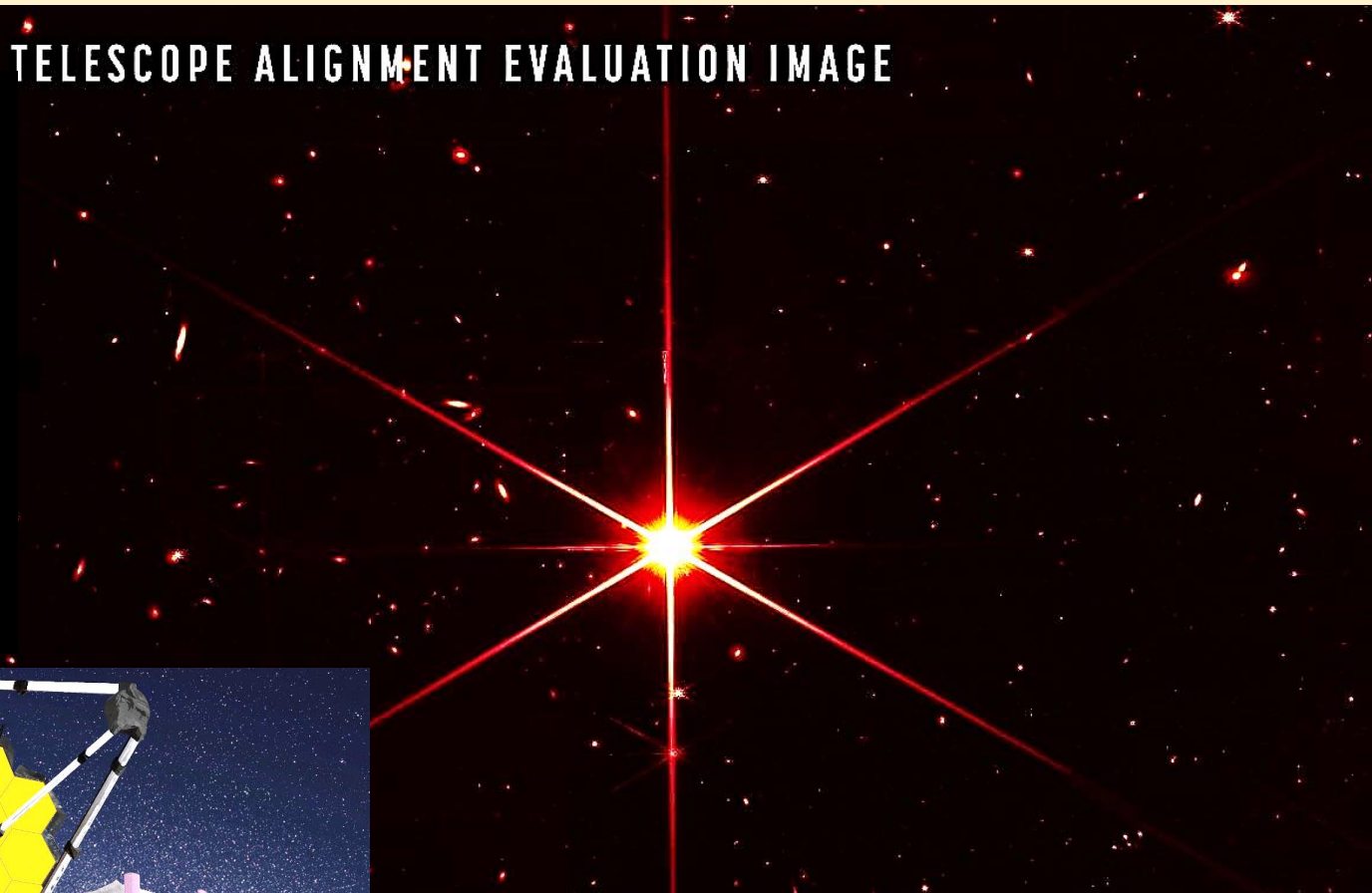
参考4. 望遠鏡の“くせ“, PSF

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。

NIRCAM ALIGNMENT SELFIE

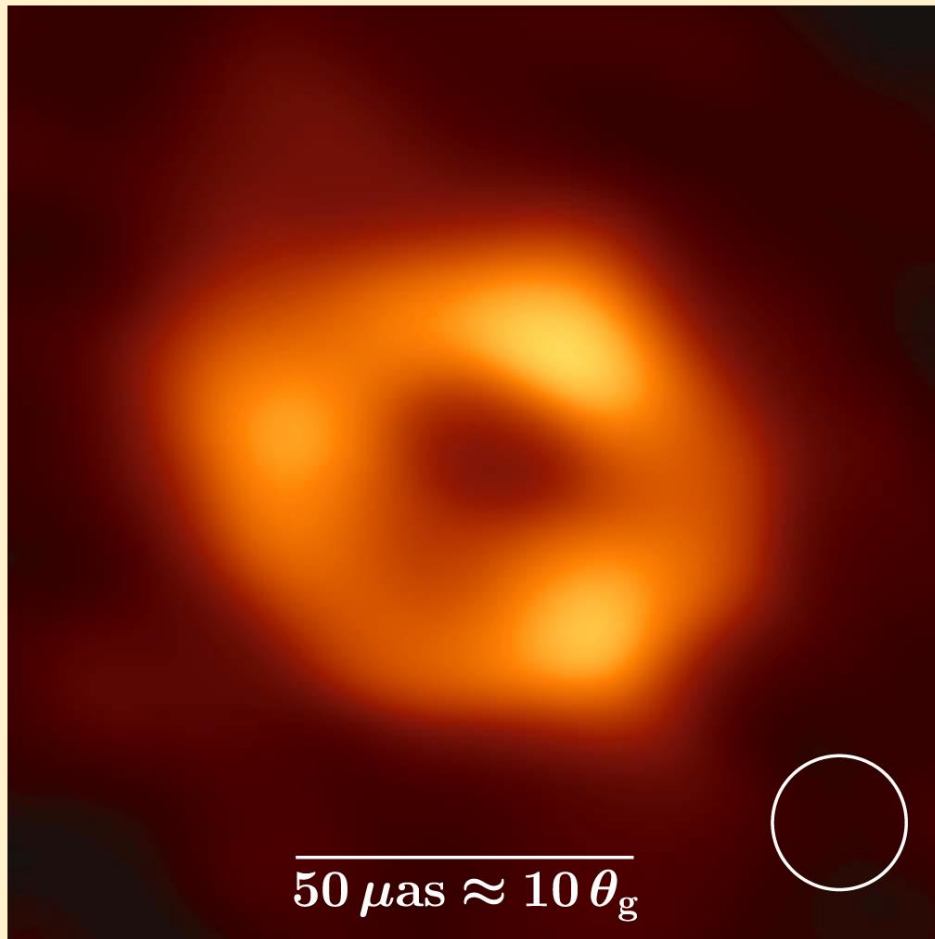


TELESCOPE ALIGNMENT EVALUATION IMAGE



図：JWSTの場合

2022年5月発表の天の川銀河系中心SgrA*のリング像



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

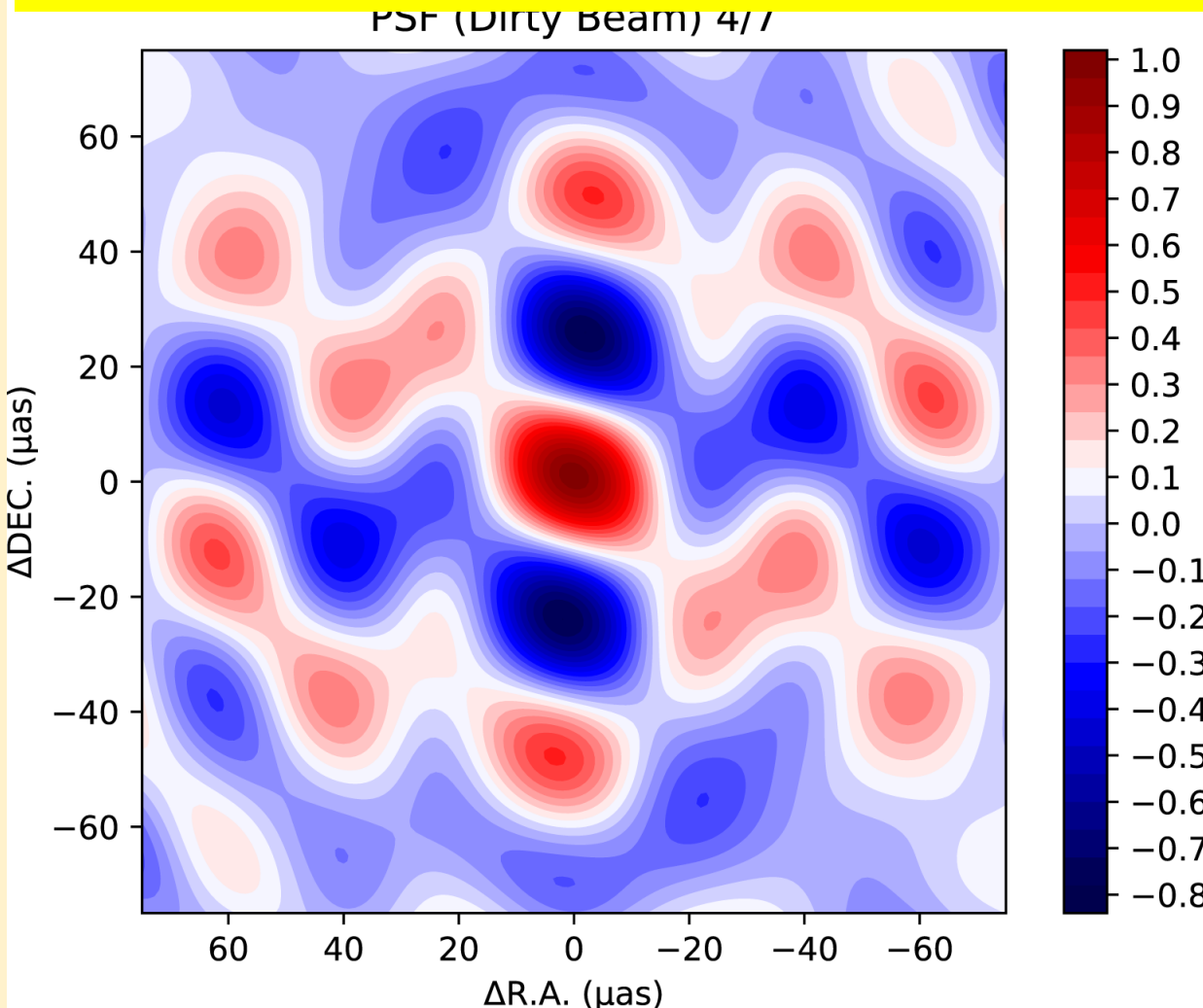
(2) PSFの中央ピーク3つがリング像の「3輝点」に対応している。

(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)

天の川銀河系中心SgrA*のEHTCリング像とPSF



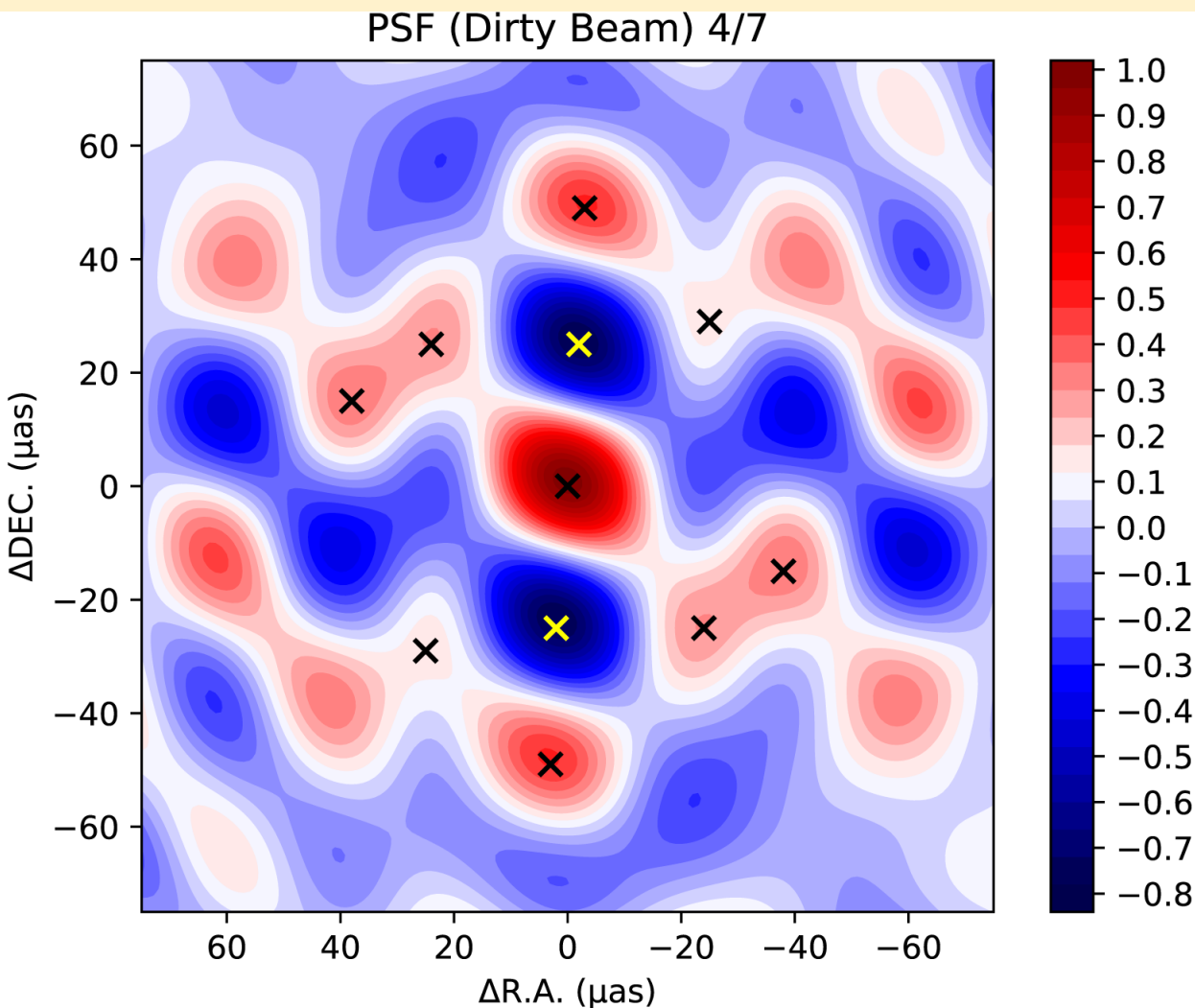
EHTのような数局のアンテナ構成の電波干渉計では、そのPSFは非常に汚くなる。

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



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FHTCリング像について

PSF (Dirty Beam) 4/7

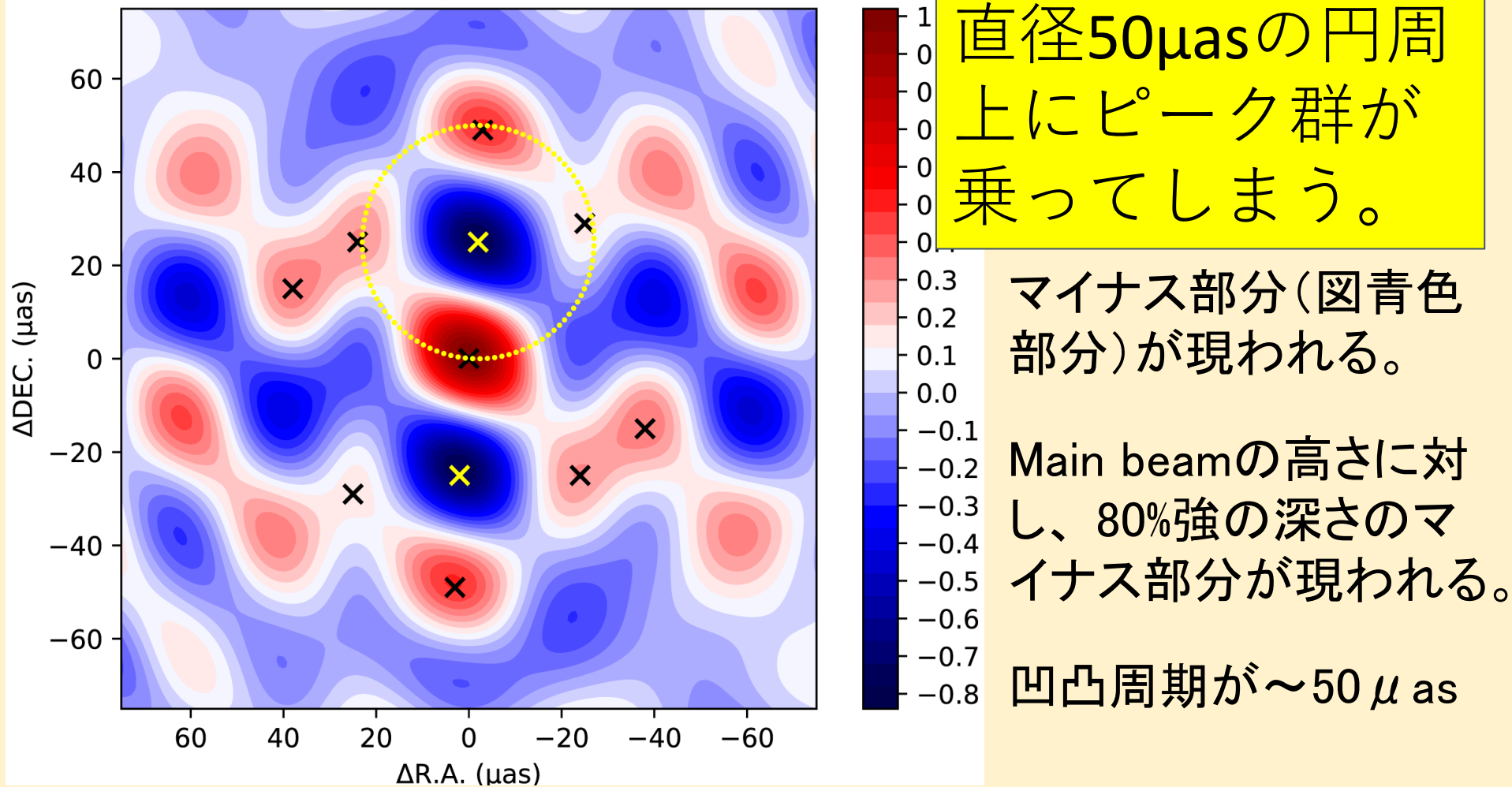
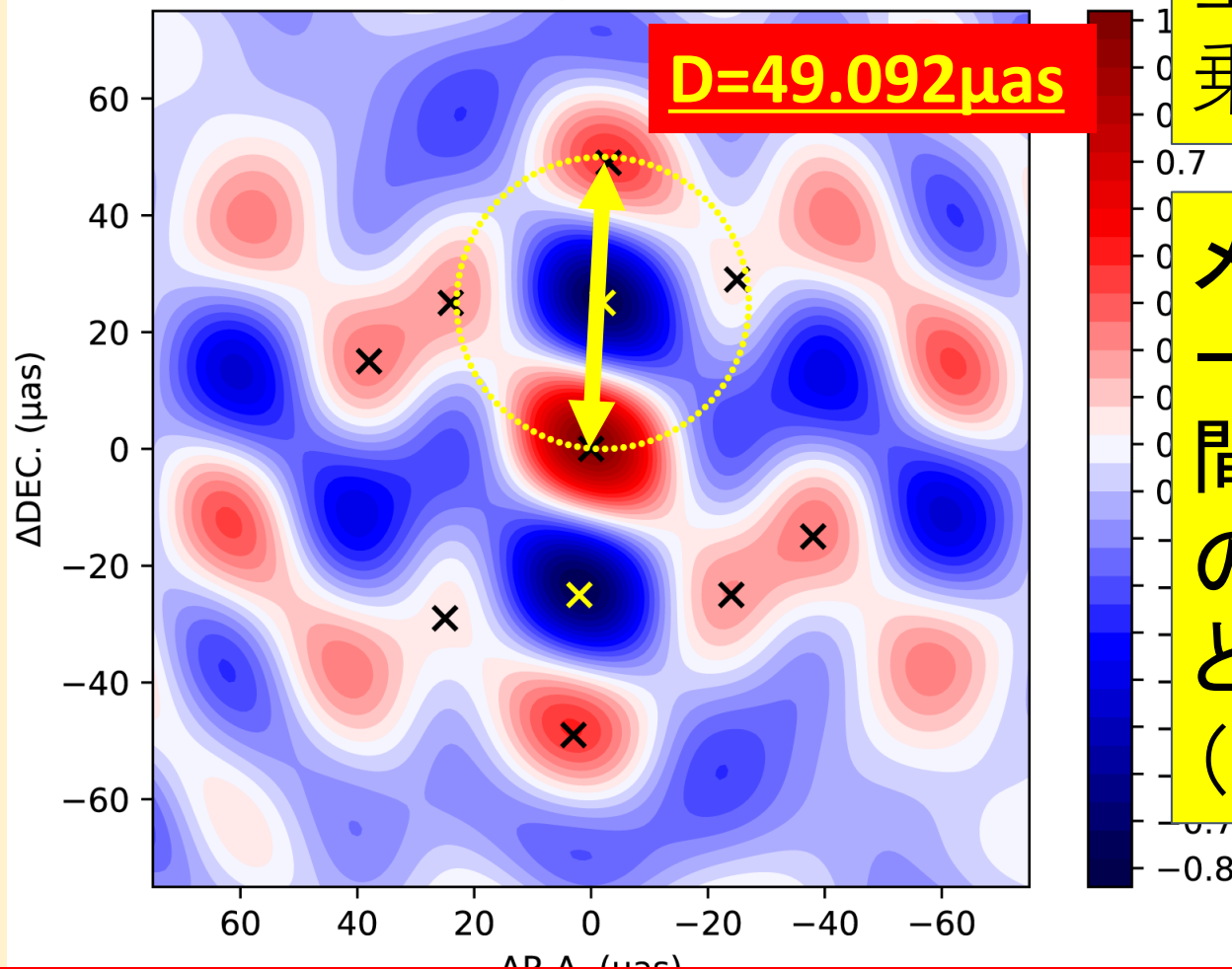


図: EHTの銀河中心 SgrA* 観測における PSF (Dirty Beam) 2017/4/7 観測の場合。公開データからAIPSを用いて作成

5 天の川銀河系中心SgrA*のEHTC I
PSF (Dirty Beam) 4/7



直径50 μ asの円周上にピーク群が乗ってしまう。

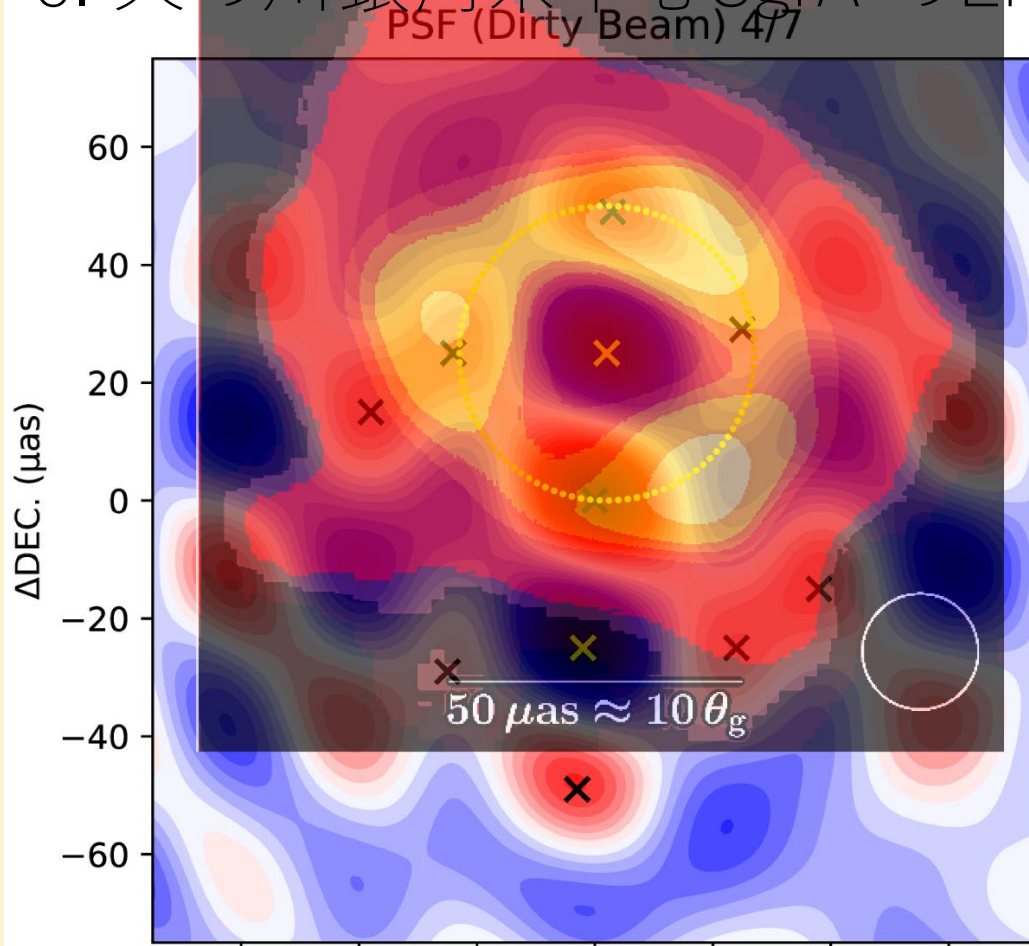
※計では、そのPSFは

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 μ as)

凹凸周期が $\sim 50 \mu$ as

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

5. 天の川銀河系中心SgrA*のEHTC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。

※計では、そのPSFは

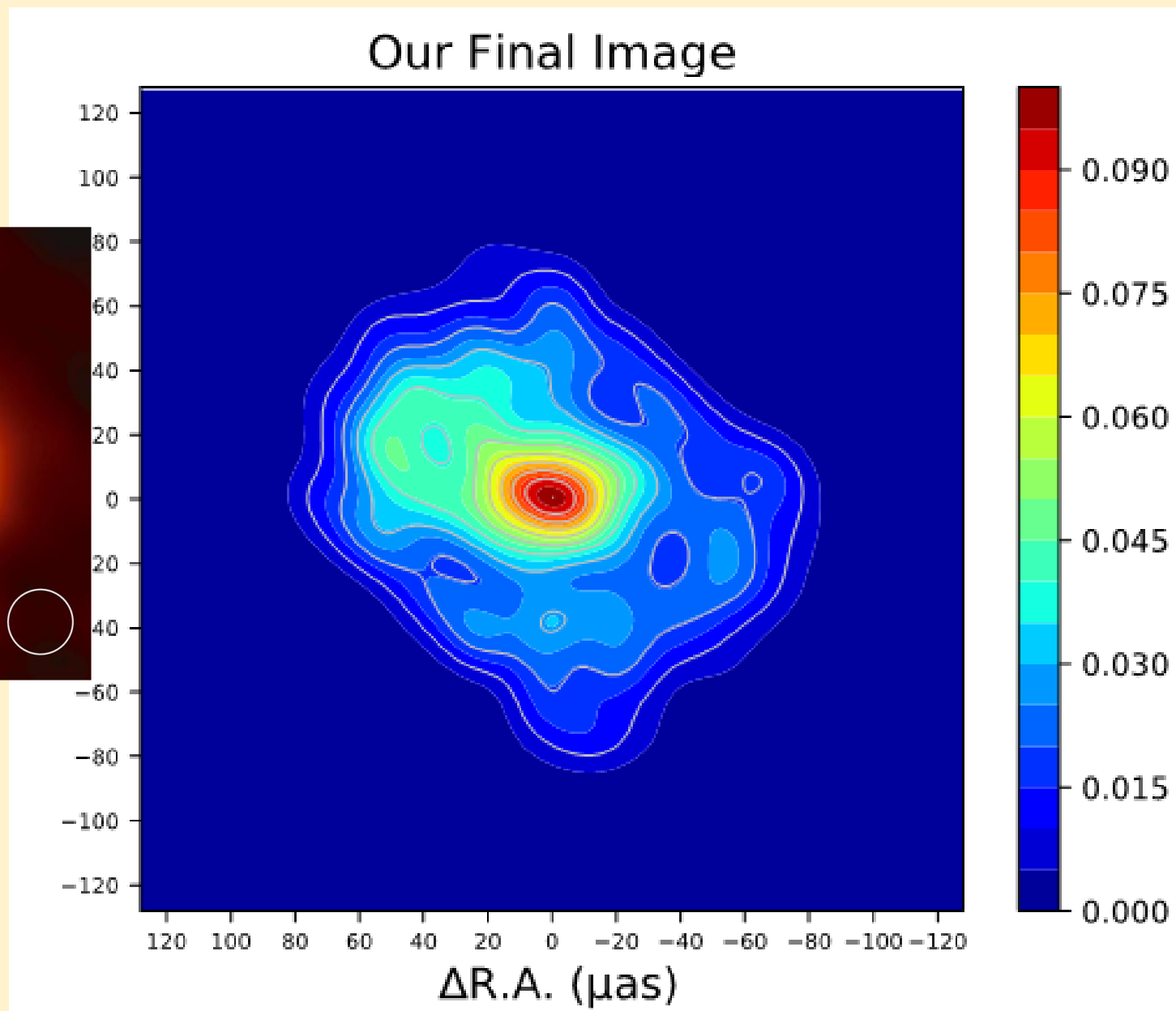
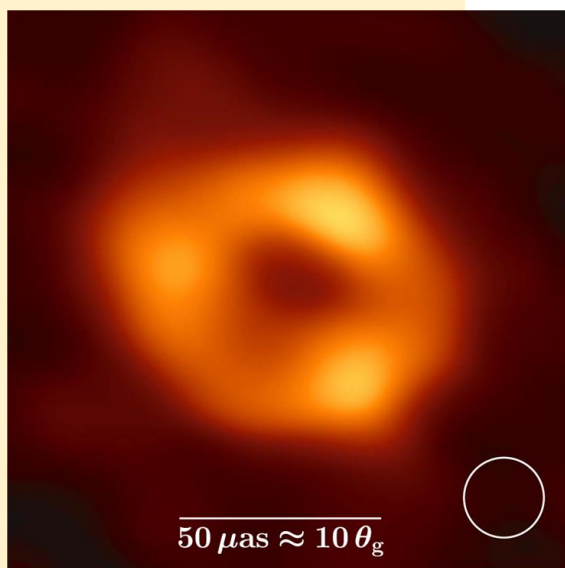
メインビームと第一サイドローブの間隔がEHTC測定
のシャドーサイズ
と完全一致する。
($=49\mu\text{as}$)

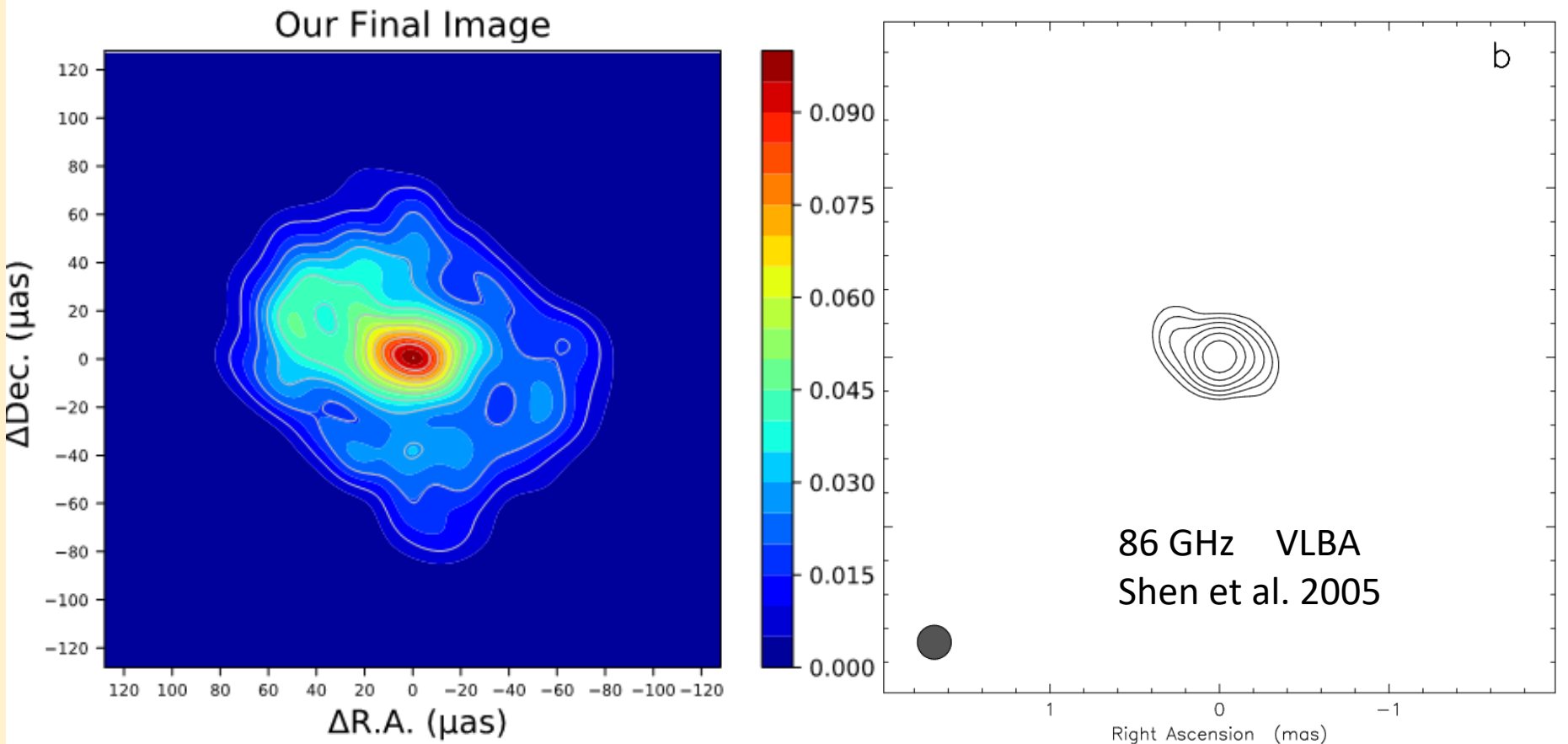
0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

EHTCリング像の3輝点はPSF上の3点
に対応している。

我々の独立解析
では？

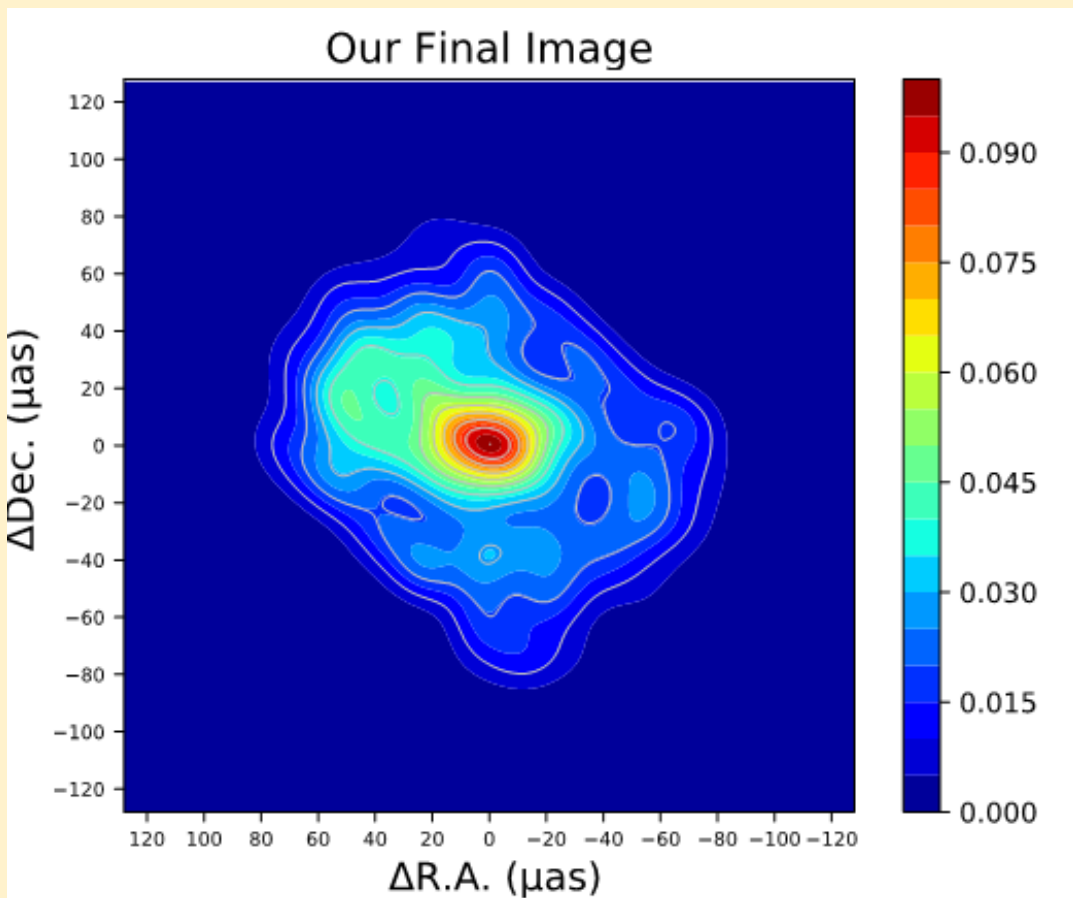
(左) 我々の通常解析による撮像結果：楕円(+ハロー)



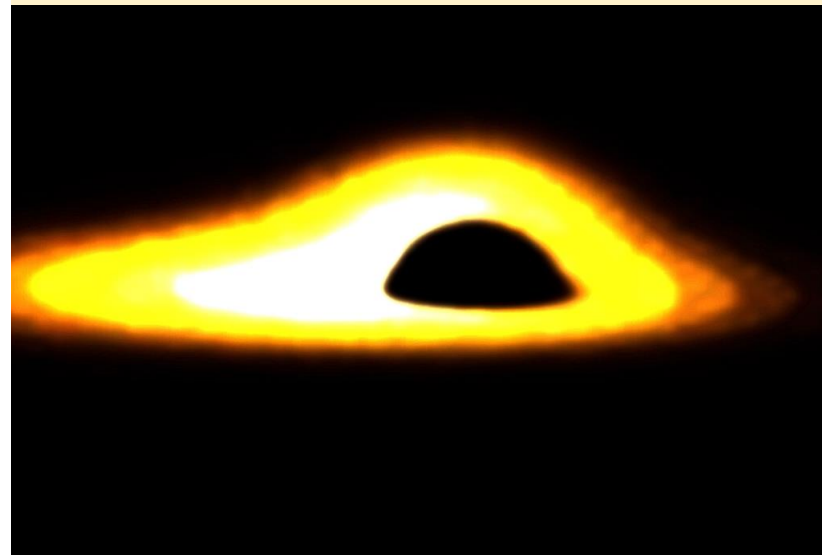


実はEHTCの先行観測は「東西異方性がある」と結論している。(Brinkerink2016)
昔の論文をみると、東西異方性を示す結果が存在する。(Shen 等2005、Miyoshi等2011など)

我々の通常解析による撮像結果：楕円(+ハロー)



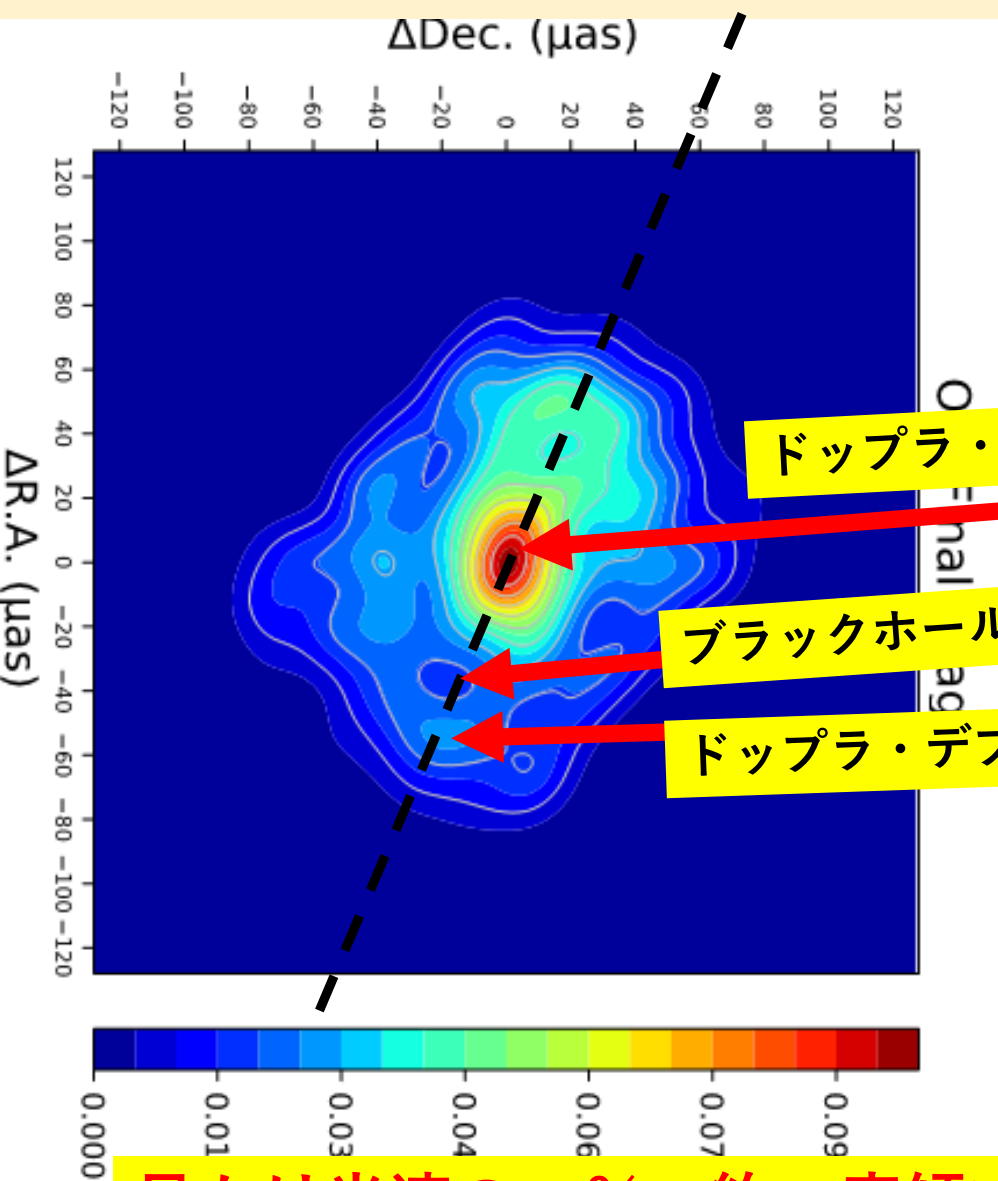
ブラックホール像(Fukue1986)



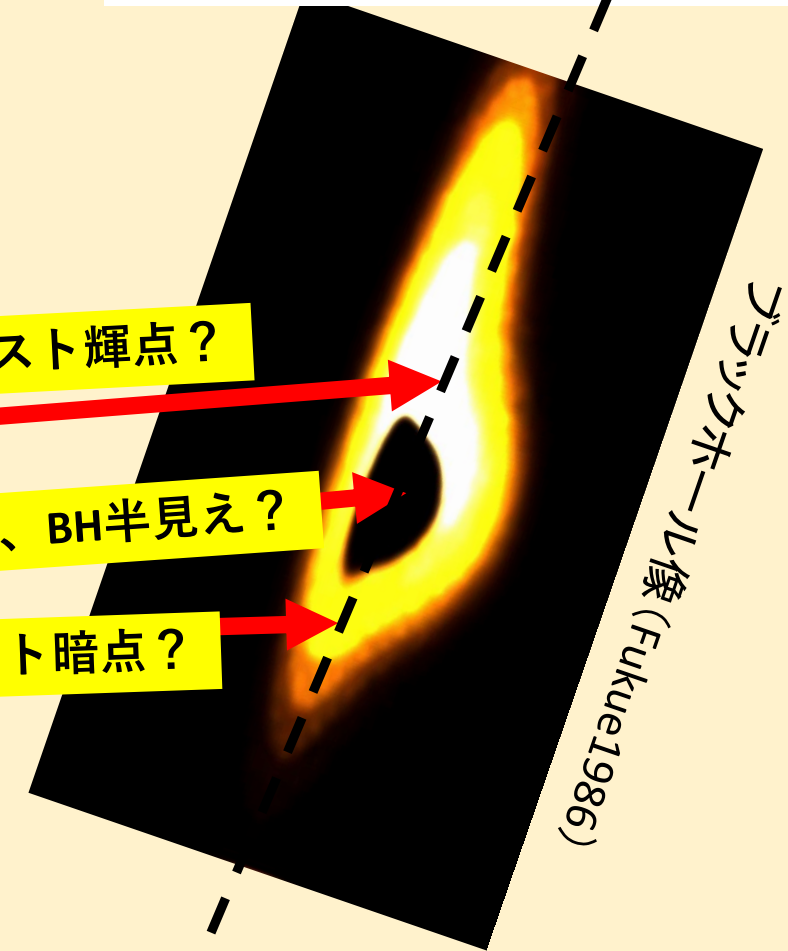
高速回転円盤はドップラー効果で輝度分布が非対称構造になる。

左：我々が得たSgr A*の像：M87同様、振幅残差がEHTCのリング像のそれよりも小さい(データとの整合性が高い)。

我々の通常解析による撮像結果：楕円(+ハロー)



Edge-onでみる高速回転円盤はドップラー効果で輝度分布が非対称構造になる。



ドップラ・ブースト輝点？

ブラックホール位置、BH半見え？

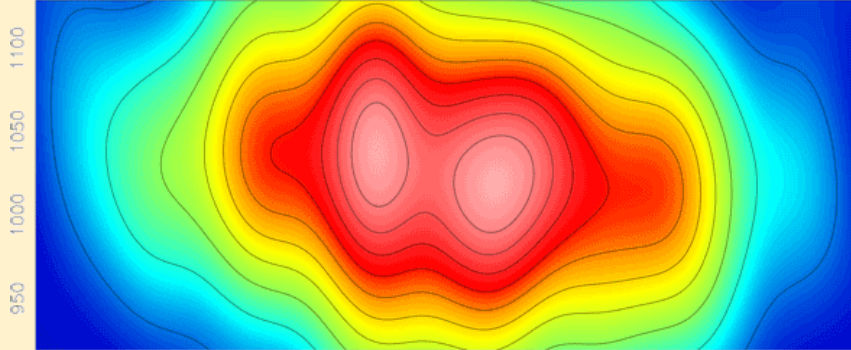
ドップラ・デブースト暗点？

見かけ光速の40%。約45度傾いた円盤の半径 $2R_s$ あたり？

もっと解析を進めてみた。

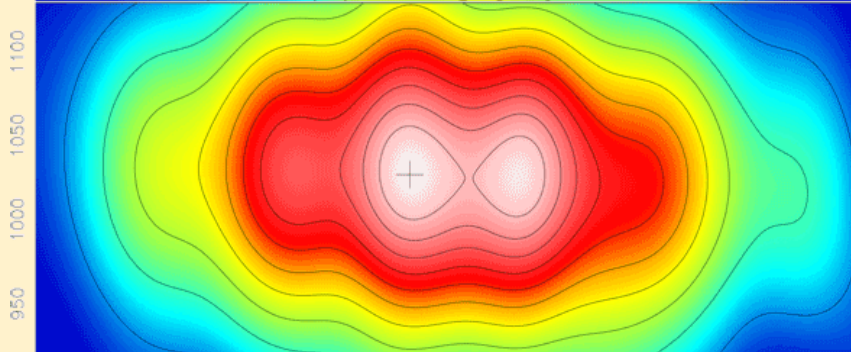
SgrA*の円盤振動@ 43GHz (Miyoshi等2011)

P=16.8min

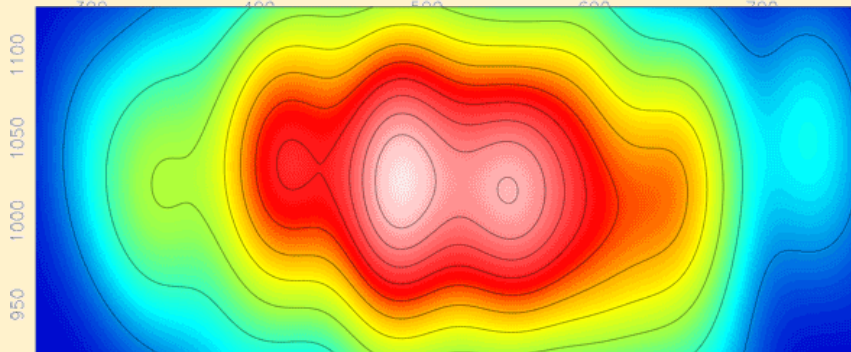


Slit Modulation Imaging
(Miyoshi 2008)による解析

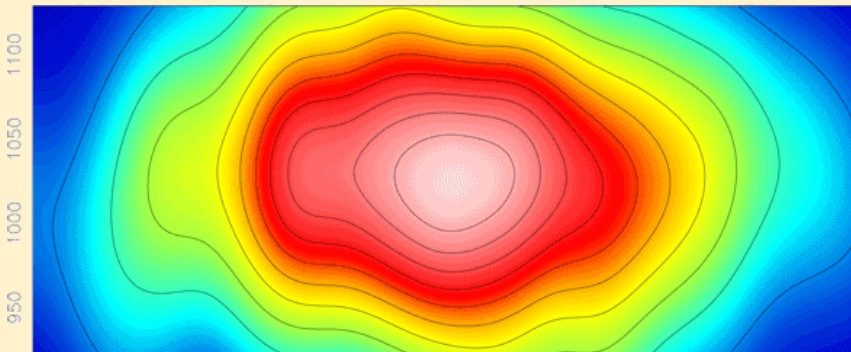
P=22.2min



P=31.35min

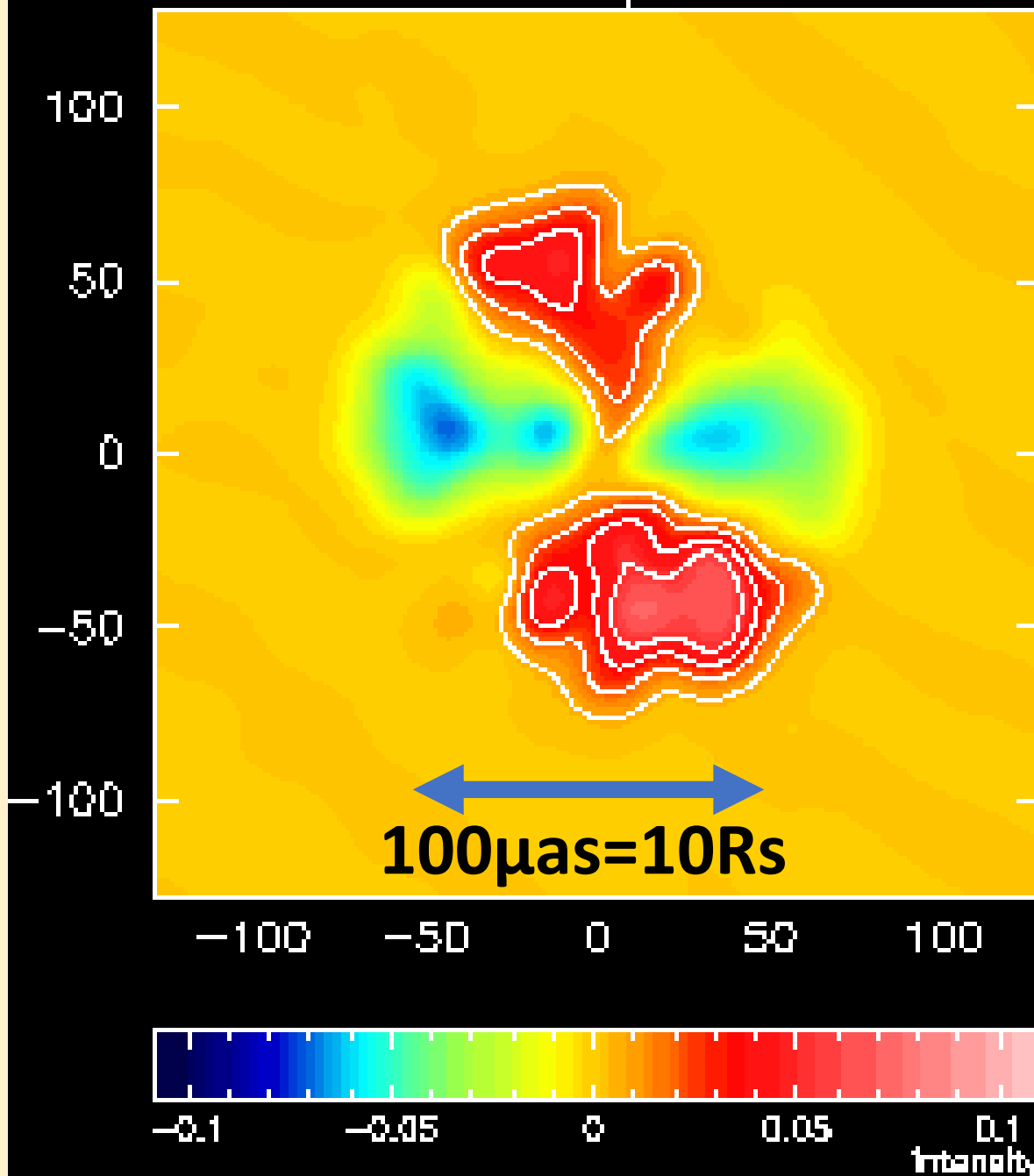


P=56.35min



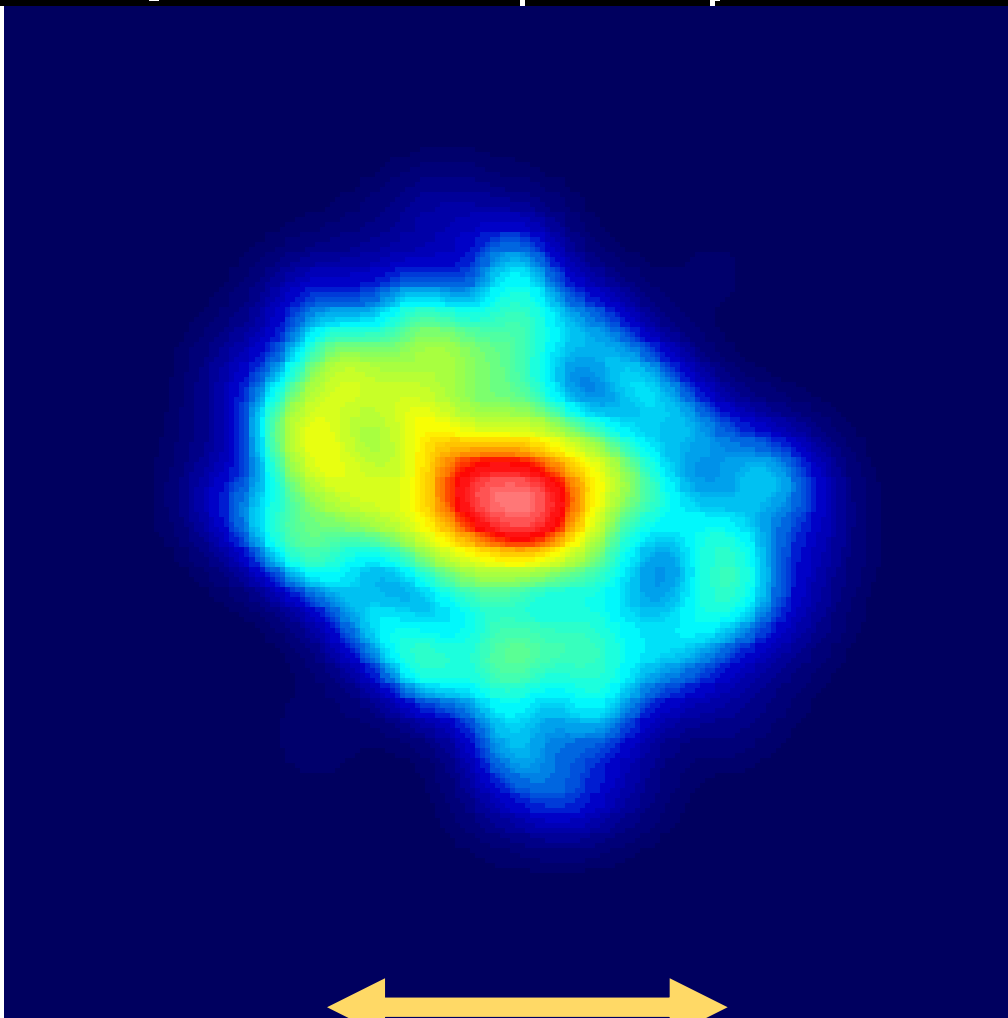
VLBA 43GHzでの解析とお
なじくSMI解析を行った。
得た各時系列成分を再合
成して、時間変動画を作
成してみた。

Time= 7770 sec (129.5 min)
Sum of Periodic Components

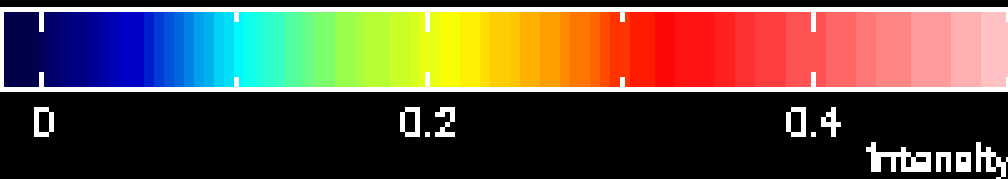


各成分を合成して
得た変動画像。
(固定成分抜き)

Base (Constant Components)



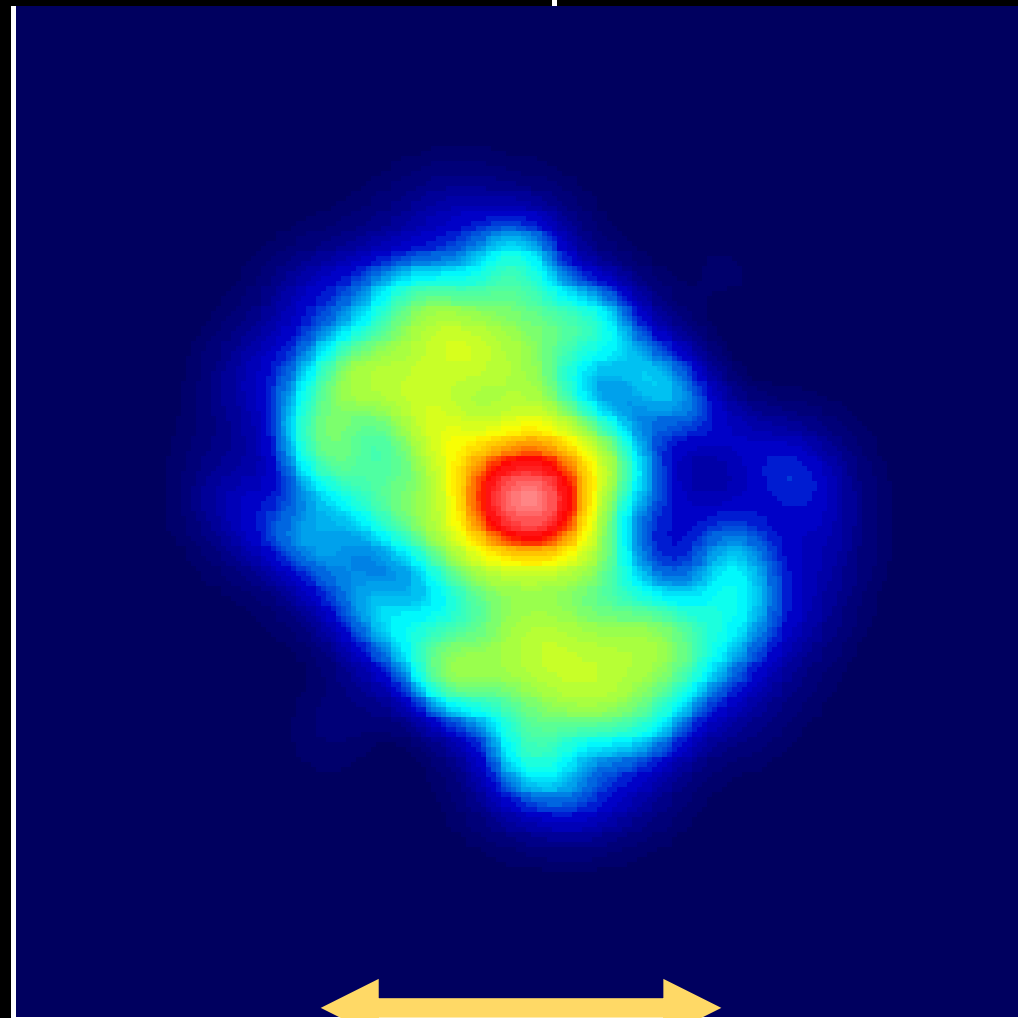
$100\mu\text{s}=10R_s$



固定成分として、
全データで得た一枚の
イメージをつかう。

Sum of Periodic Components & Base

SgrA* の時間変動動画



$100\mu\text{s} = 10R_s$



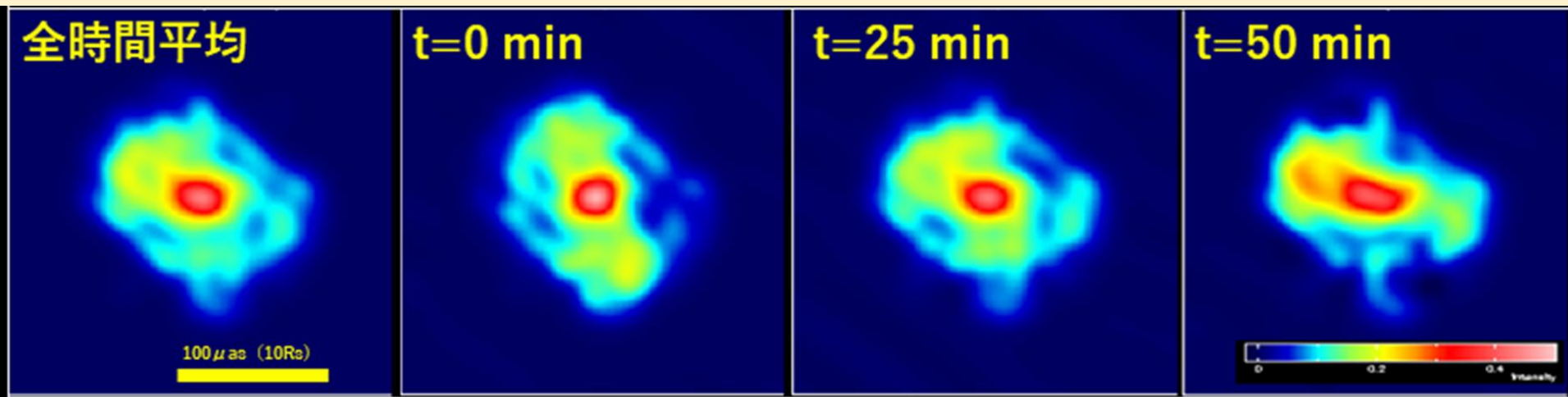
0

0.2

0.4

Intensity

回転しているように見える



見た目の印象：

1. 左から、前を通過って、右奥へ回転するように見える。
2. アームかフィラメントのような形状が現われる。
3. 時々南北(上下) 方向に吹き出すものあり。

右側が左側に比べて暗い。円盤回転速度によるドップラー効果？

中央の最大輝点から右のあたりが、時折、丸く暗くなる。この位置にブラックホールがある？

降着円盤の時間変動をとらえることができた？

ブラックホール近傍像は見えているらしい。

まだ、詳しく解析調査はまだ。

(だれかやりませんか？)

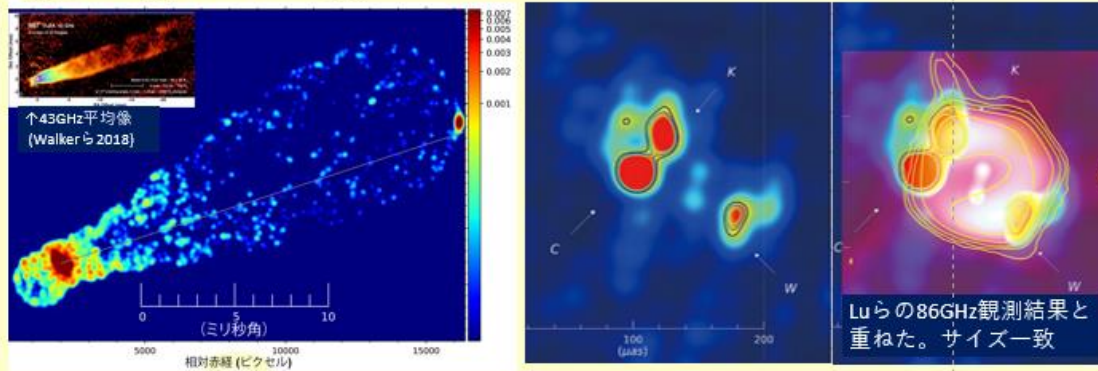
EHTC のリング像は天体像ではない

電波干渉計による撮像とは？：天体像とPSFの Convolution が観測データである。そこに観測エラーが加わる。その解析は観測エラーの較正、PSFの除去 (Deconvolution) によって、天体像を露わにする作業である。

EHTCのリング像は、PSFの形状と一致する特徴を示す。**PSFのDeconvolution**が不十分なままのリング像を天体像として採用したものである。

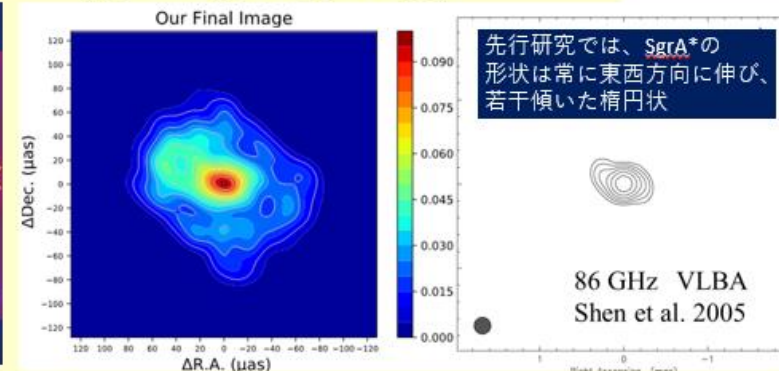
EHTCのリング像より、データと像の間の**残差量**が小さい像を我々は得ている。それらの像は**他の観測結果と矛盾がなく**、信頼できる天体像である。

我々の得た M 87 像



↑有名なM87のジェット構造を捉えた。中心部はLu et al. (2023)の報告と一致するサイズの core-knots (?) 構造がある。

我々の得た Sgr A* 像



↑従来の観測結果と同じく、東西方向に伸びた像 (サイズは異なる)。

シミュレーション天文学のこれまでとこれから
-ハードウェア・アプリケーション・サイエンス-

日程：2023年9月4日-6日
懇親会：9月4日
「富岳」見学：9月5日 15時半～
神戸大学統合研究拠点 コンベン
ションホール

An aerial photograph of a city grid, showing streets and green spaces. A red banner with yellow text is overlaid in the center.

これからの可能性はありそう

ブラックホール撮像、
その間違いとこれから
(Black hole imagings, the first
artifacts and the future)

三好 真 (国立天文台)