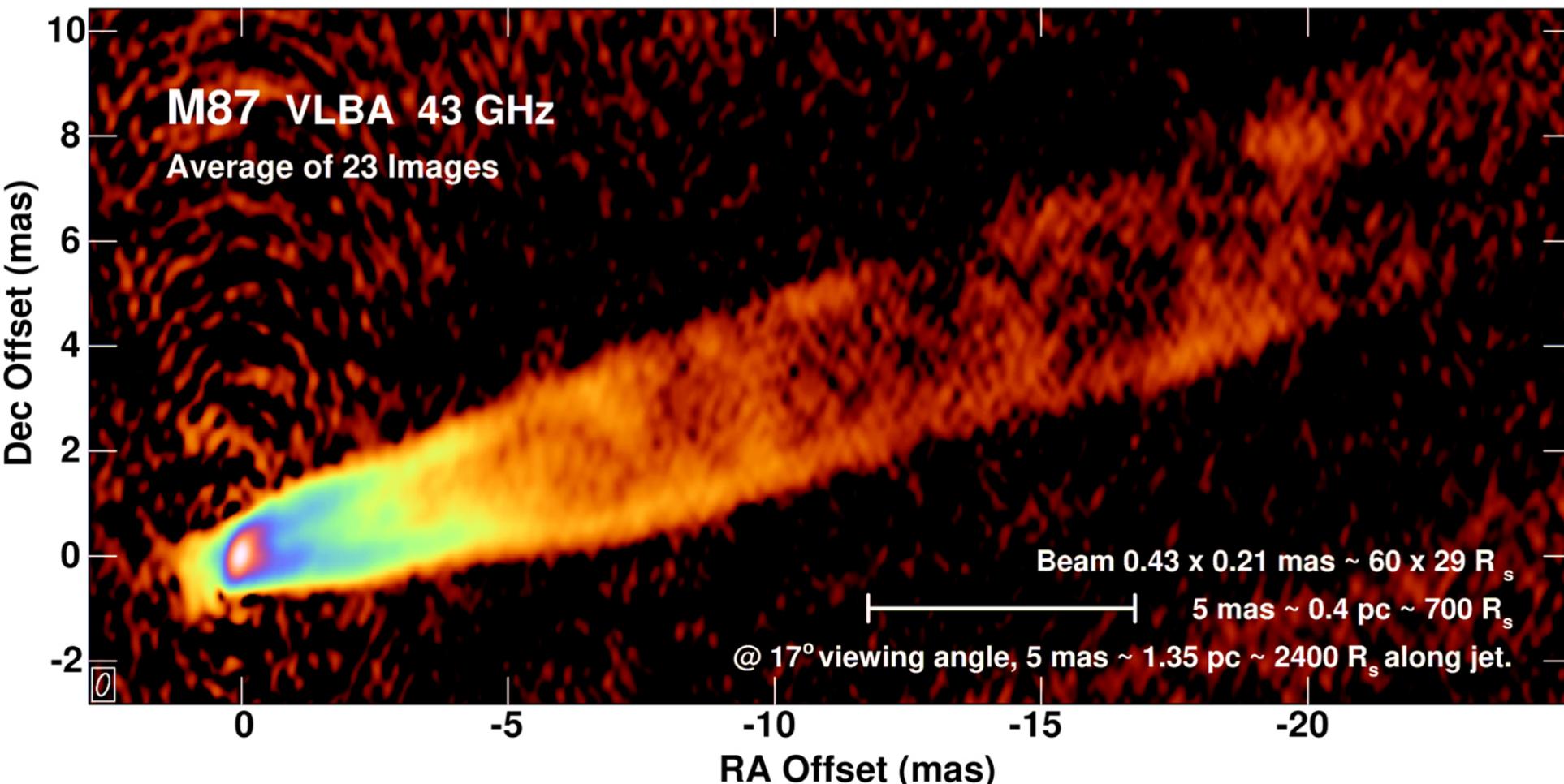


# The jet and resolved features of the central supermassive black hole of M87 observed with EHT data

M. Miyoshi (NAOJ), Y. Kato (RIKEN), J. Makino (Kobe Univ.)



[https://science.nrao.edu/science/highlights/images/2018/jet\\_formation.jpg](https://science.nrao.edu/science/highlights/images/2018/jet_formation.jpg)

M 87 (NGC 4486)

# M87 典型的な楕円銀河



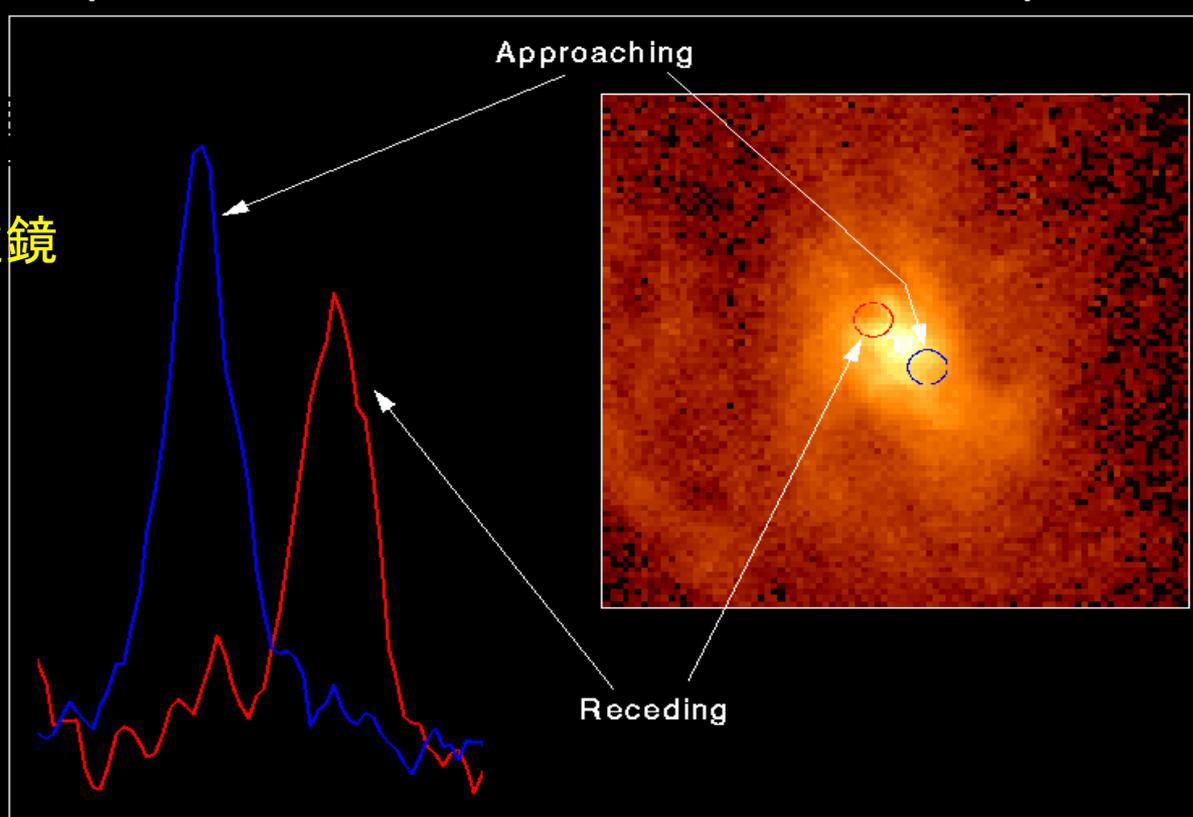
# M87

(おとめ座銀河団の盟主)

ハッブル宇宙望遠鏡



## Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



## ハッブル望遠鏡によるSMBH存在検証観測 (Harms 1994)

ハッブル宇宙望遠鏡はおとめ座にあるM87を観測、銀河の中心部分のガスの速度を測定、そのドップラー効果から周辺のガスの運動を調べ、太陽質量の約30億倍の巨大ブラックホールがあることを突き止めた。M87は電波や光の観測から、中心からジェットを噴出していることがわかっている。なお、ハッブル宇宙望遠鏡は数十個の銀河を観測、その巨大ブラックホールの質量を測定している。

4486 12 25.8 +12 57 Exceedingly bright; the sharp nucleus shows well in 5<sup>m</sup> exposure. The brighter central portion is about 0.5 in diameter, and the total diameter about 2'; nearly round. No spiral structure is discernible. A curious straight ray lies in a gap in the nebulosity in p.a. 20°, apparently connected with the nucleus by a thin line of matter. The ray is brightest at its inner end, which is 11" from the nucleus. 20 s.n.

# M87

(NGC 4486)

Curtis, H. D. 1918, PLicO, [13, 9](#) カタログ。写真は別のなにかから

最初に発見された宇宙ジェット



ハッブル  
宇宙望遠鏡  
が捉えたジェット



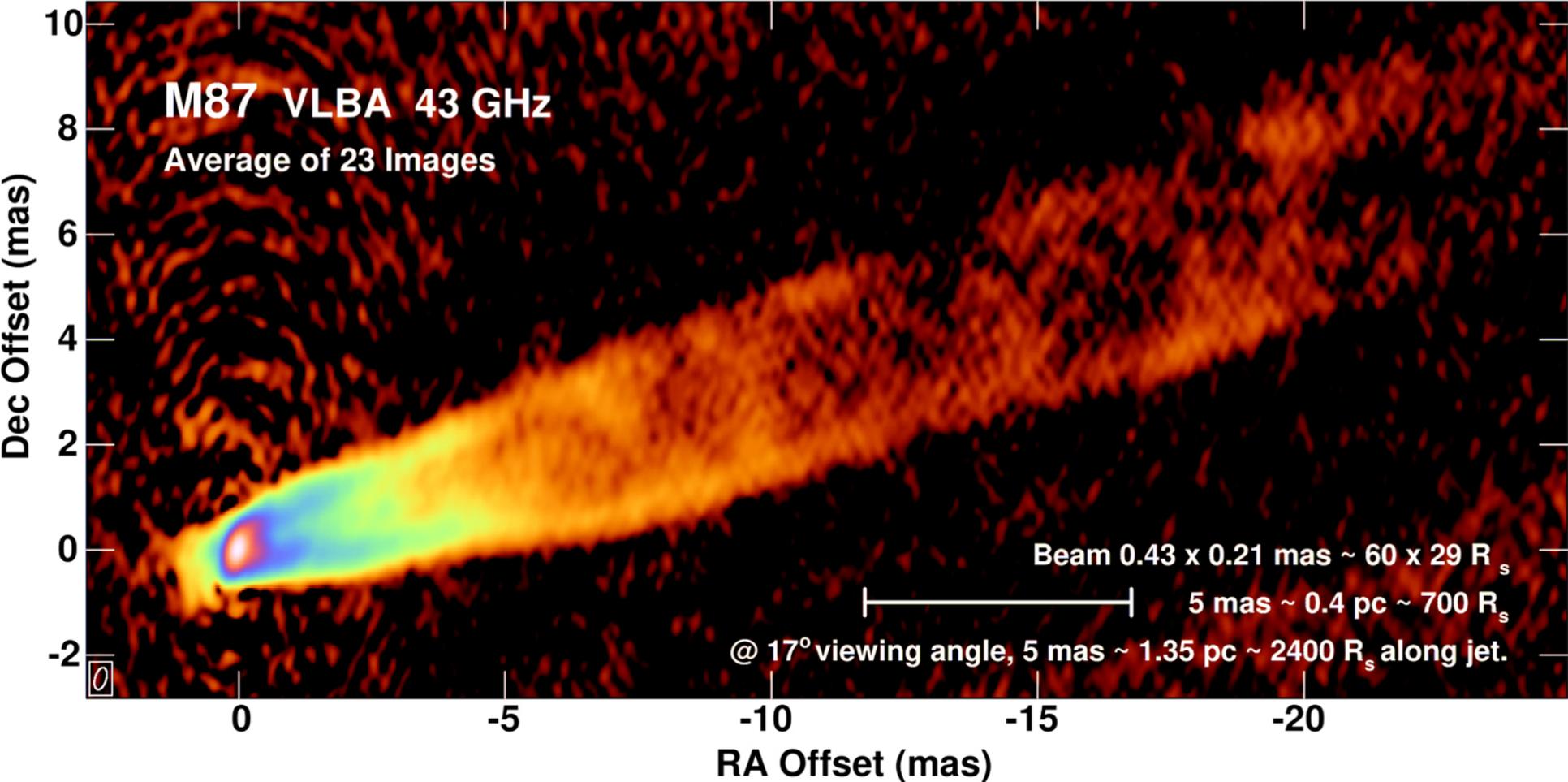
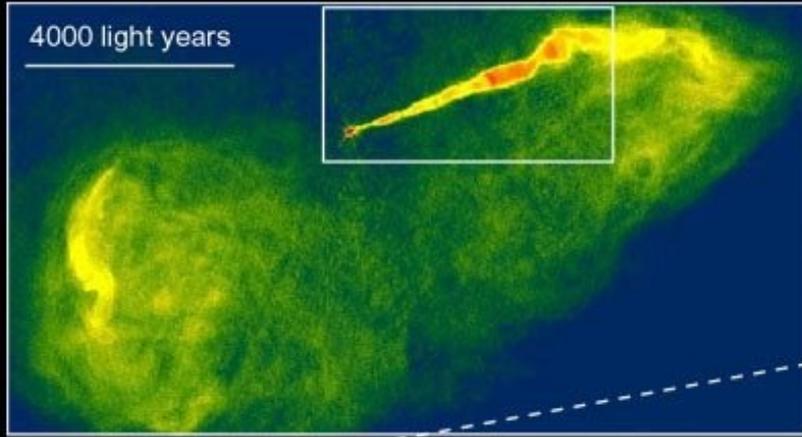


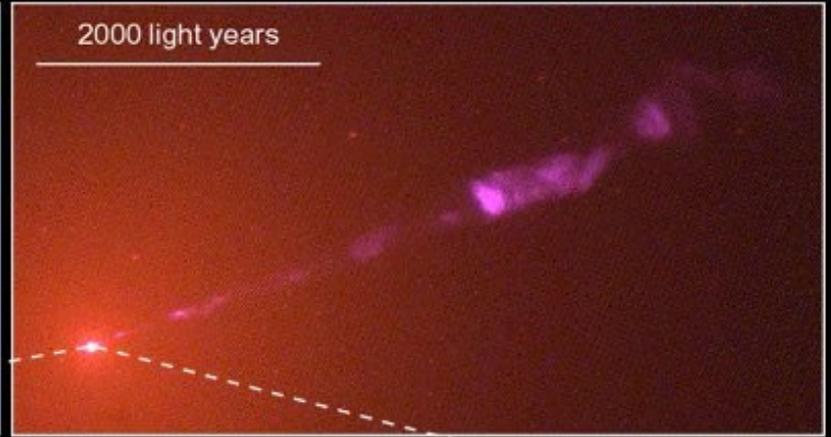
Image: The 23-epoch average radio image of the jet and counter jet in M87 based on data from 2007 and 2008. Angular to linear scales (in parsecs and Schwarzschild radii,  $R_s$ ) are indicated for distances in the sky plane and for distances along the axis of the jet assuming that it is oriented at  $17^\circ$  to the line-of-sight. The beam with resolution  $0.43 \times 0.21$  milliarcsecond elongated in position angle  $-16^\circ$  is at lower left. The off-source noise level is  $62 \mu\text{Jy}/\text{beam}$ ; the image peak is  $0.83 \text{ Jy}$ .

[https://science.nrao.edu/science/highlights/images/2018/jet\\_formation.jpg](https://science.nrao.edu/science/highlights/images/2018/jet_formation.jpg)

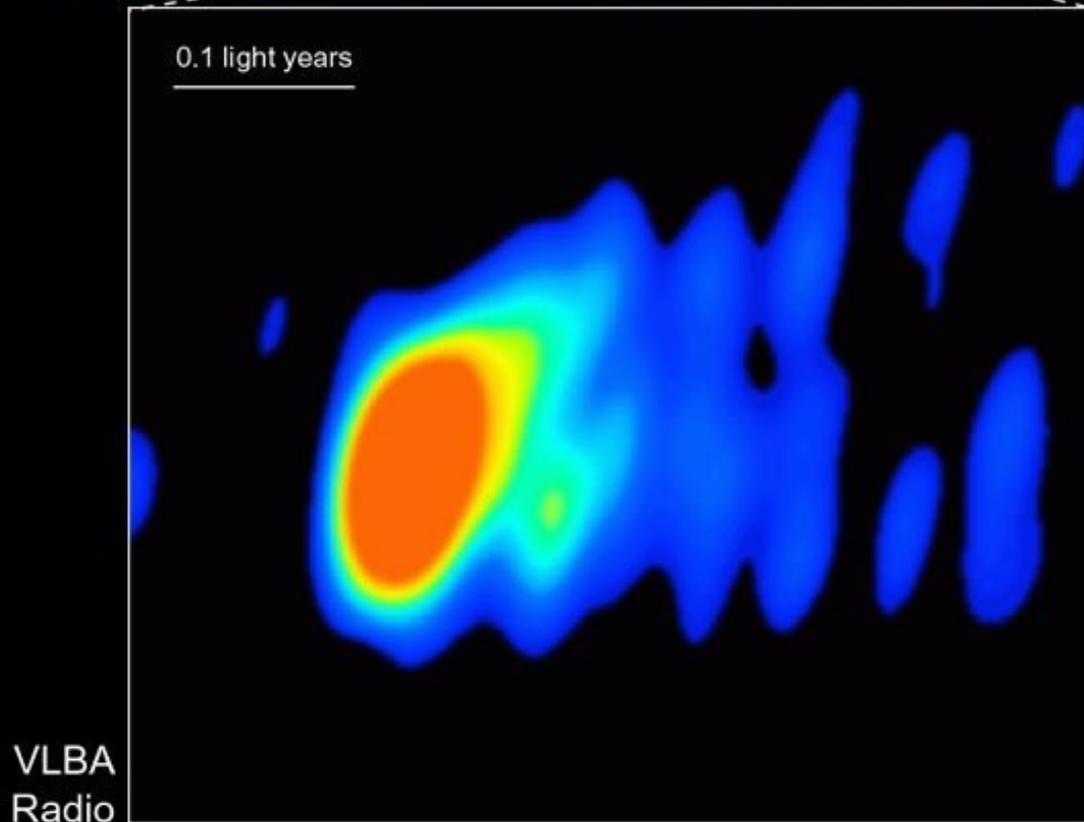
# Galaxy M87



VLA  
Radio



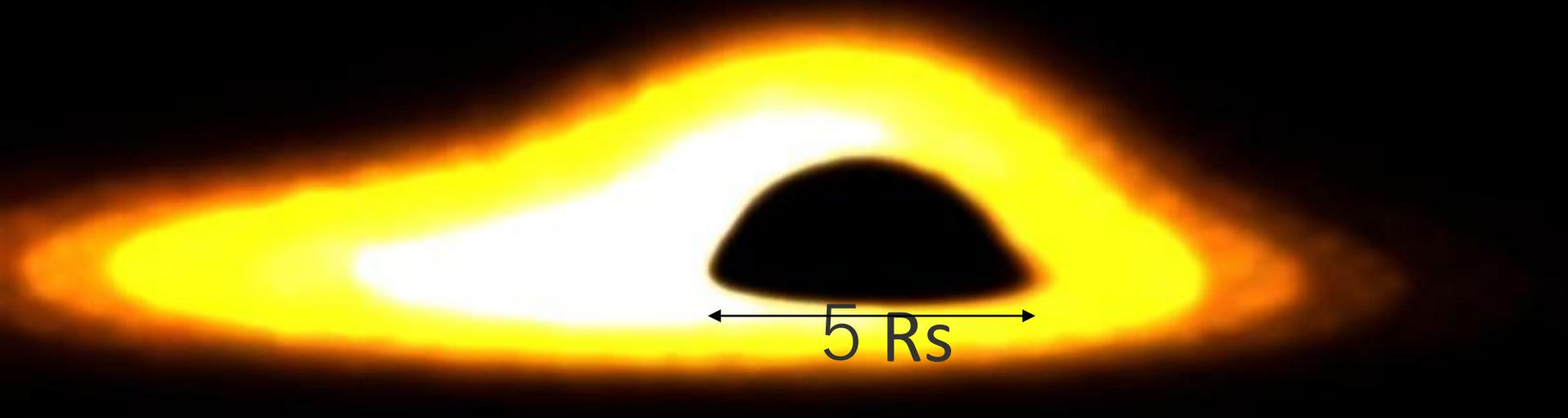
HST • WFPC2  
Visible



VLBA  
Radio

ブラックホール シャドー

なお、高橋 労太がシャドー形状から、メトリックが計測できることを明らかに(2004)

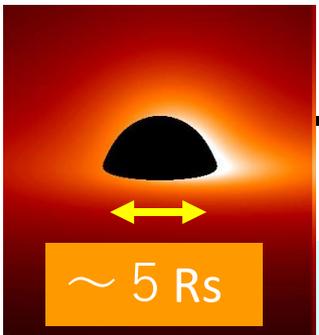


理論的計算からのブラックホール像 (例)

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に降着円盤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。

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

~ 5 Rs



	Mass (Msun)	D (kpc)	(m)	Rs (au)	( $\mu as$ )	Shadow Size ( $\mu as$ )
StellarBH@pc	1.00E+00	0.001	2.95E+03	1.97E-08	0.02	0.10
M82	1.00E+06	3700	2.95E+09	1.97E-02	0.01	0.03
SgrA#@GC	2.60E+06	8	7.67E+09	5.11E-02	6.39	31.96
SgrA#@GC	3.70E+06	8	1.09E+10	7.28E-02	9.10	45.48
M31	3.50E+07	800	1.03E+11	6.88E-01	0.86	4.30
NGC4258	3.90E+07	7200	1.15E+11	7.67E-01	0.11	0.53
M87	3.20E+09	16100	9.44E+12	6.29E+01	3.91	19.54

M87 恒星の速度観測から60億太陽質量(Gebhardt 2011)→ Shadow Size 40  $\mu as$

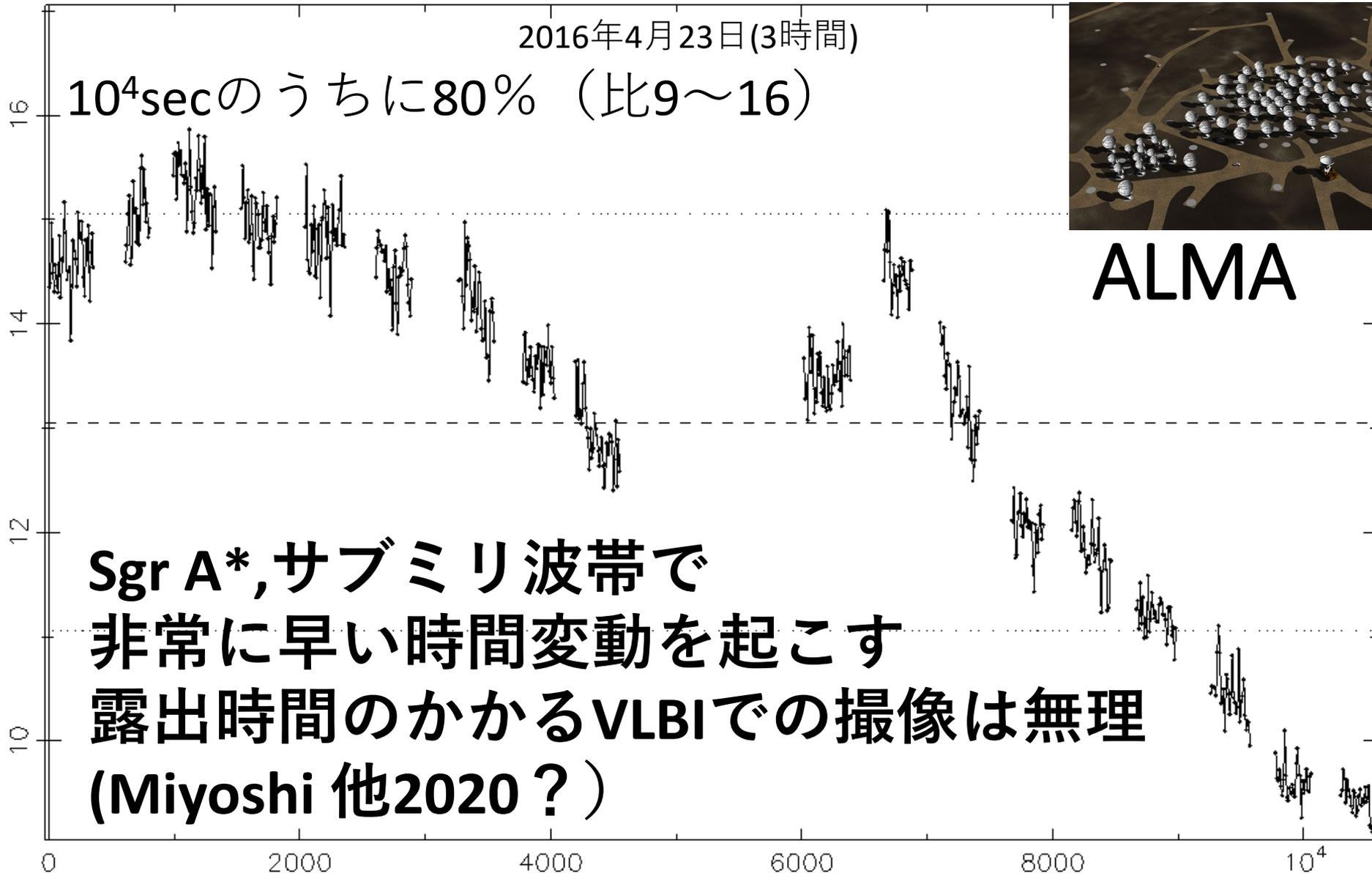
2016年4月23日(3時間)

10<sup>4</sup>secのうちに80% (比9~16)



ALMA

Ratio



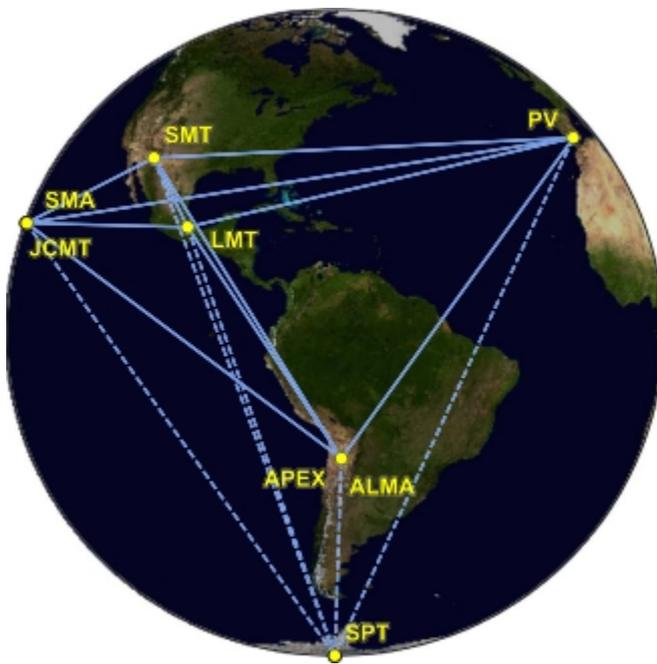
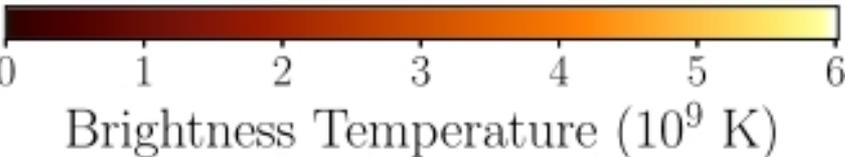
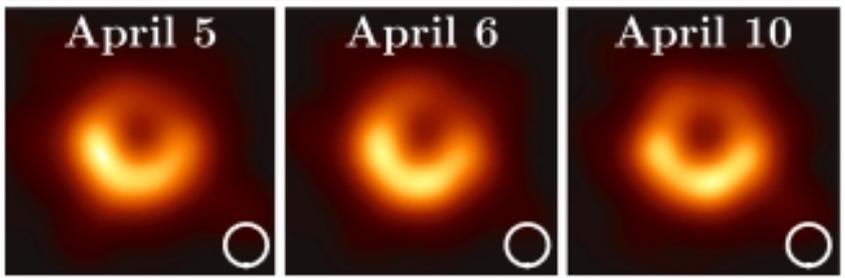
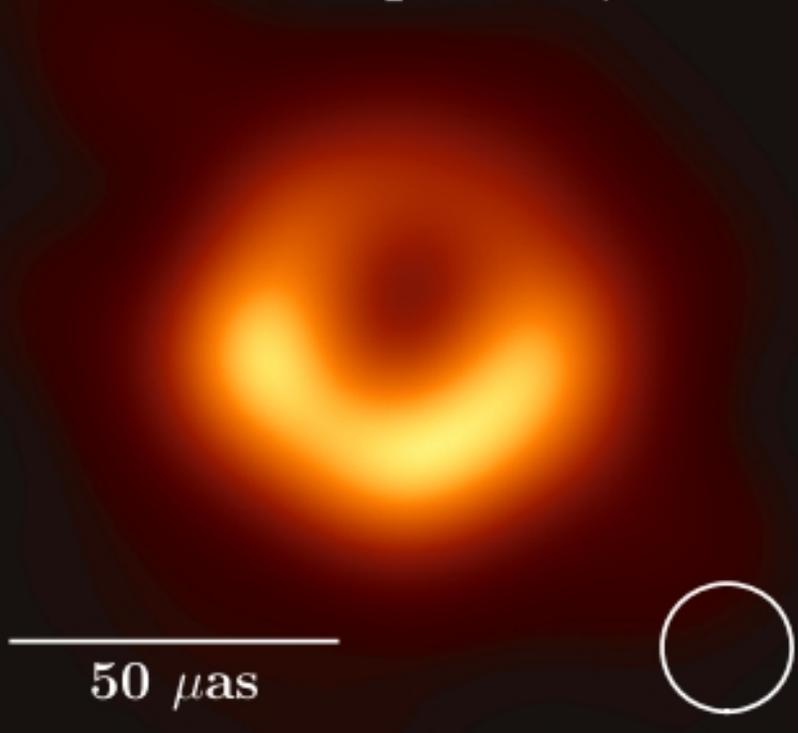
**Sgr A\*,サブミリ波帯で  
非常に早い時間変動を起こす  
露出時間のかかるVLBIでの撮像は無理  
(Miyoshi 他2020?)**

Time (span= 10600. sec)

# 電波干渉計

- 天体輝度分布の空間フーリエ成分をサンプルする。  
全取得データを逆フーリエ変換すれば、像になるはず  
ただし：
  - \* 取得データは、**較正**が必要。
  - \* 足りない空間フーリエ成分がある。**工夫**が必要。

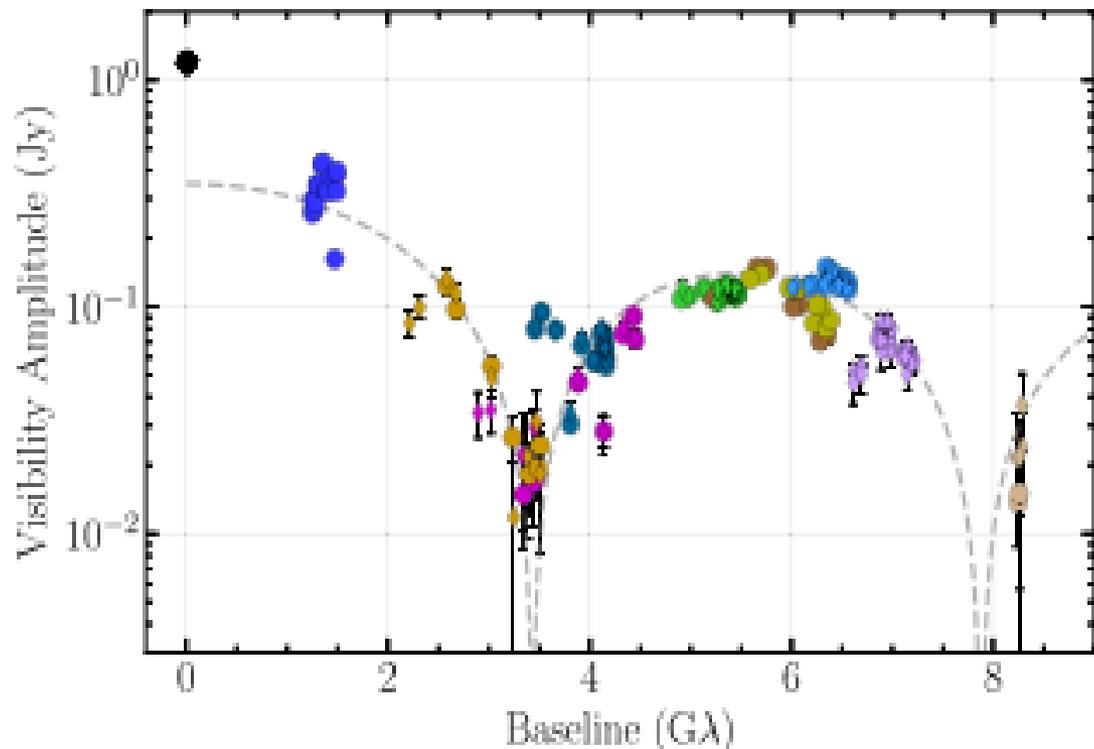
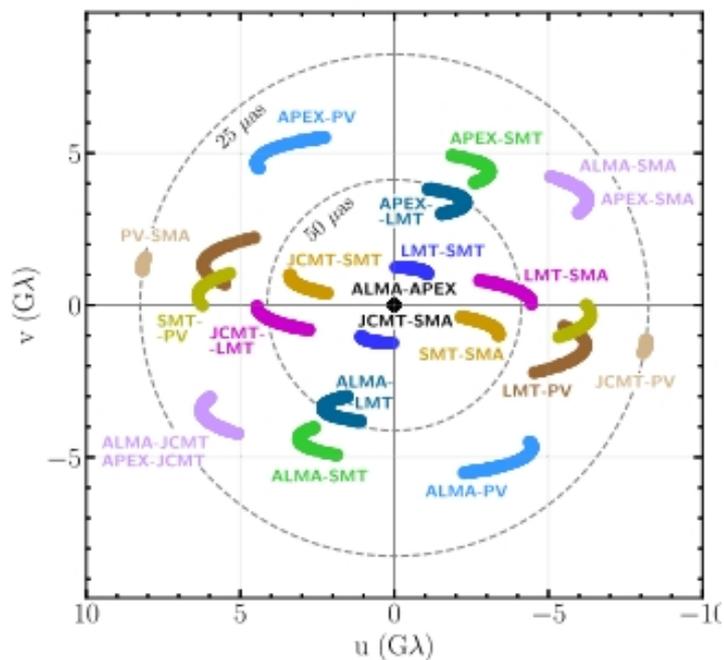
M87\* April 11, 2017



230GHz帯VLBI観測から  
直径  $42 \pm 3 \mu\text{as}$  のリング.  
対応質量  $(6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\text{太陽}}$   
SMBHのイメージ撮像成功と  
EHTCは発表 (2019.4.10)

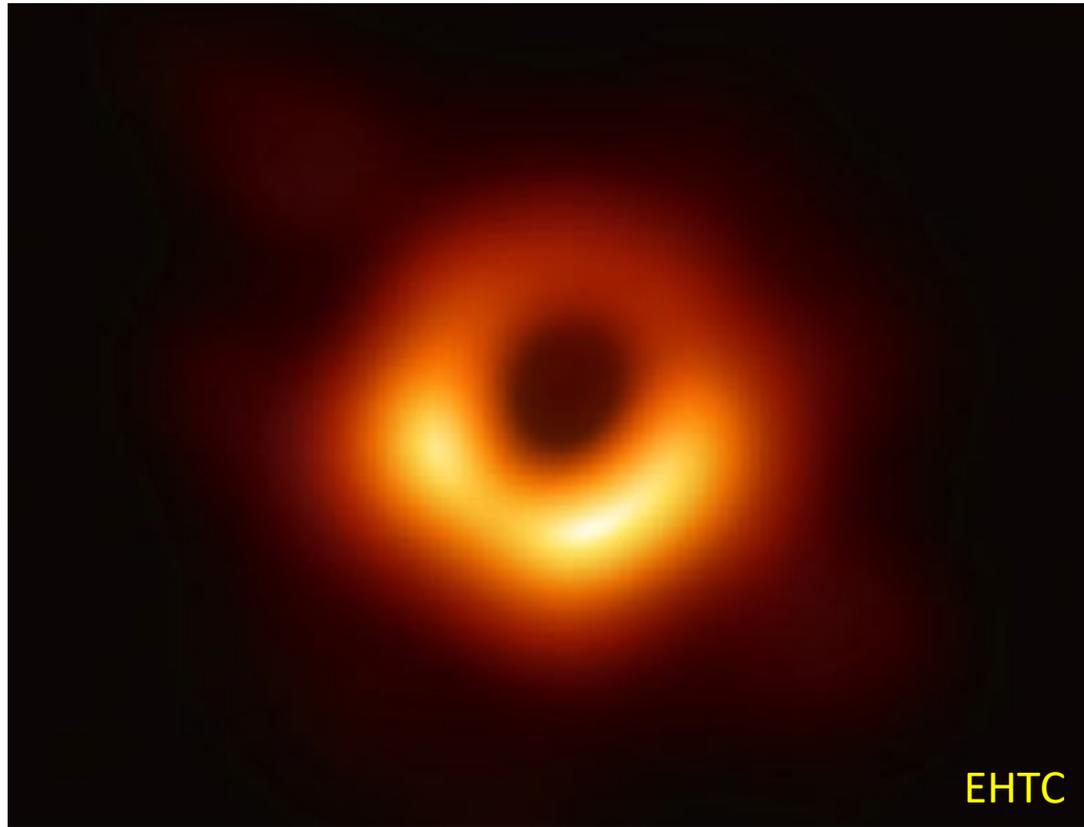
# Data Sampling

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 875:L1 (17pp), 2019 April 10



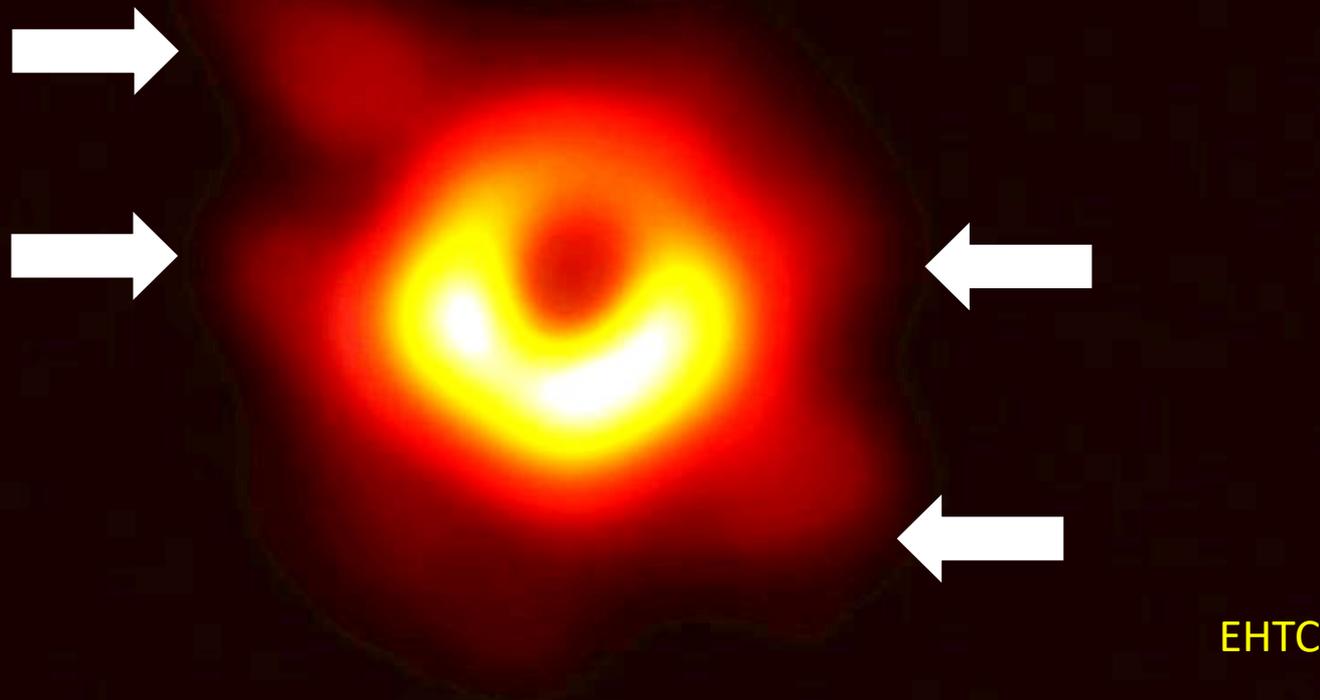
**Figure 2.** Top:  $(u, v)$  coverage for M87\*, aggregated over all four days of the observations.  $(u, v)$  coordinates for each antenna pair are the source-projected baseline length in units of the observing wavelength  $\lambda$  and are given for conjugate pairs. Baselines to ALMA/APEX and to JCMT/SMA are redundant. Dotted circular lines indicate baseline lengths corresponding to fringe spacings of 50 and 25  $\mu\text{as}$ . Bottom: final calibrated visibility amplitudes of M87\* as a function of projected baseline length on April 11. Redundant baselines to APEX and JCMT are plotted as diamonds. Error bars correspond to thermal (statistical) uncertainties. The Fourier transform of an azimuthally symmetric thin ring model with diameter 46  $\mu\text{as}$  is also shown with a dashed line for comparison.

# EHTCの結果：不可解な点が三つある。



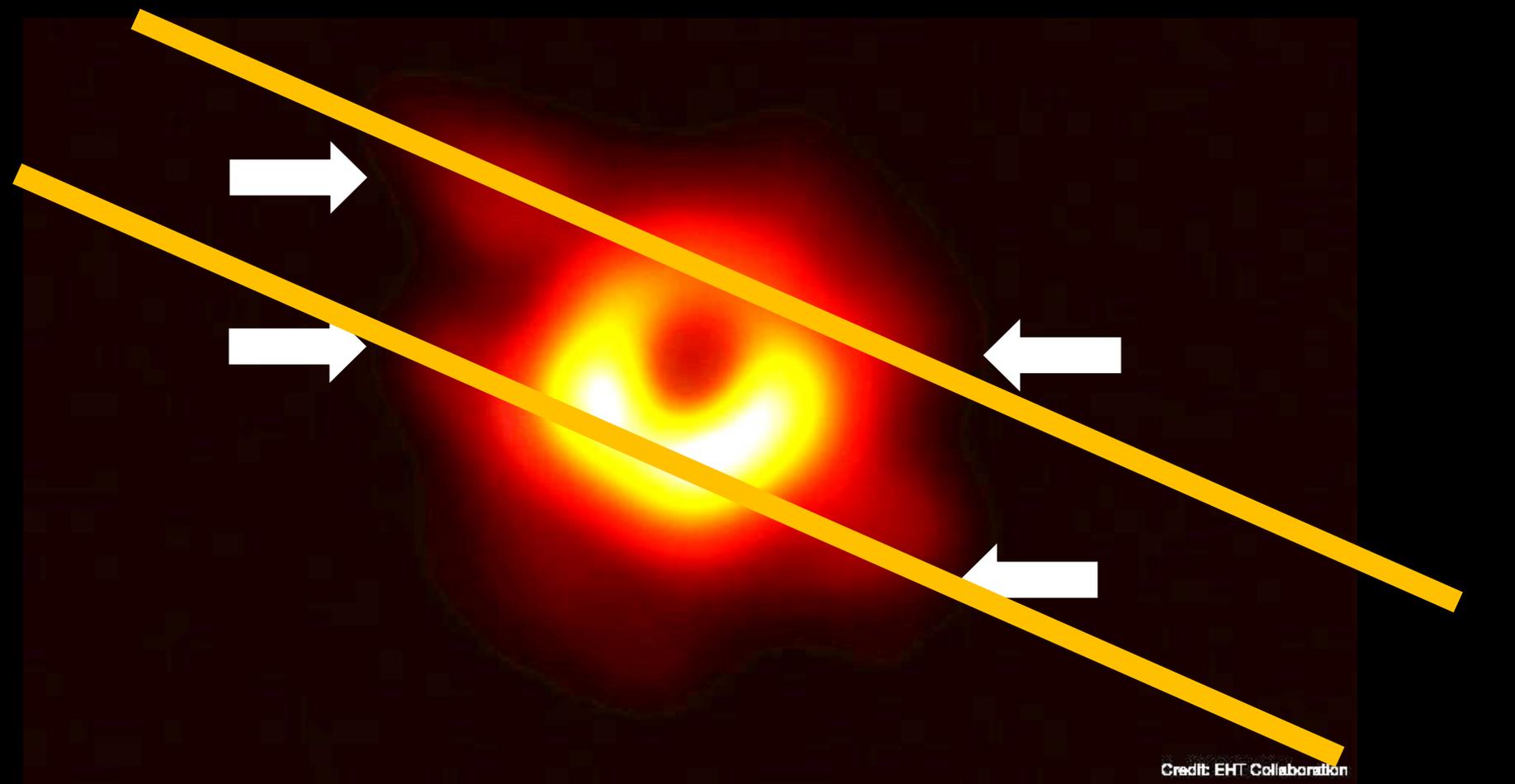
較正の不足によって、ジェット成分を見逃してしまった。  
ジェット成分を見逃したため、較正が正しい方向に進まなかった。  
代わりにデータサンプルのバイアス効果を見てしまった

EHTCの結果：不可解な点がある。  
(1) なぞの尻尾



矢印部分、カタツムリの尻尾みたいなの。何？  
(トーンカーブいじった)

EHTCの結果：不可解な点が三つある。  
(1続き) 謎の尻尾、 $40\mu\text{as}$ 間隔の平行線が引ける。



平行線を引くと、その間隔は40マイクロ秒角くらい。  
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？

EHTCの結果：不可解な点が三つある。

(2) 輝度温度 (推定60億度) が先行観測に比べ、低すぎ。

空間分解能が向上し、emission領域が正確に把握できれば、輝度温度は観測的に上昇するはず。(なぜ下がる?)

以前のVLBI観測でのM87コア部分の輝度温度報告値：

1) Akiyamaら2015 (基線数少ないが230GHzのEHT観測) は要約では $TB=1 \times 10^{10}$  K、本文では

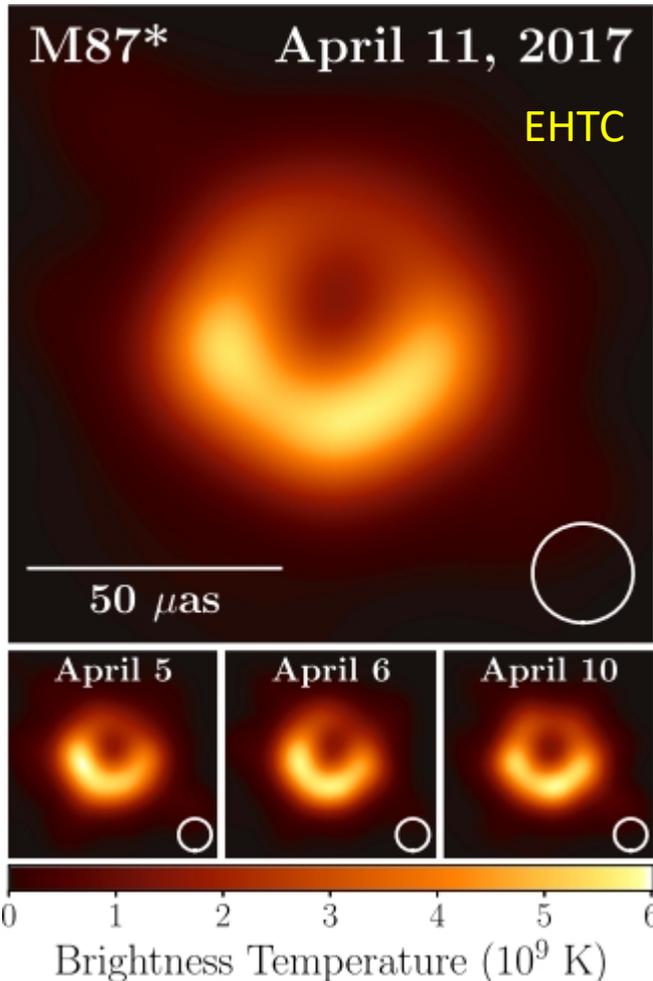
The effective brightness temperature is  $1.42 (+0.10-0.10) \times 10^{10}$  K for the 2009 model and  $(1.23 \pm 0.11) \times 10^{10}$  K for the 2012 model, where errors are  $3\sigma$ .

2) Hadaら2016 (86GHzでのVLBA観測) では

Adopting the parameters derived with the combined data, the brightness temperature of the 86 GHz core is estimated to be  $TB=1.8 \times 10^{10}$  K.

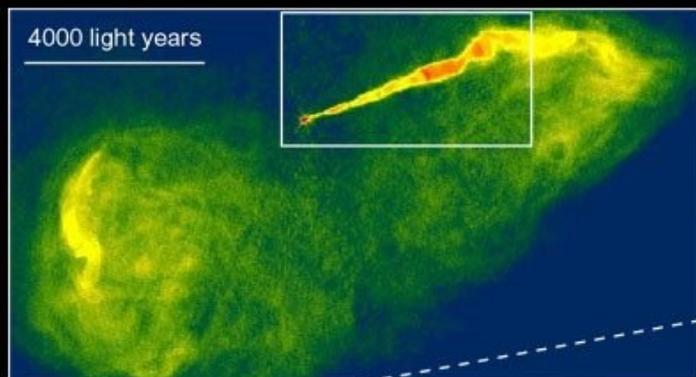
約1/3 に低下している。

データ較正が不十分な場合、像が実際より暗くなることもある。



EHTCの結果：不可解な点が三つある。

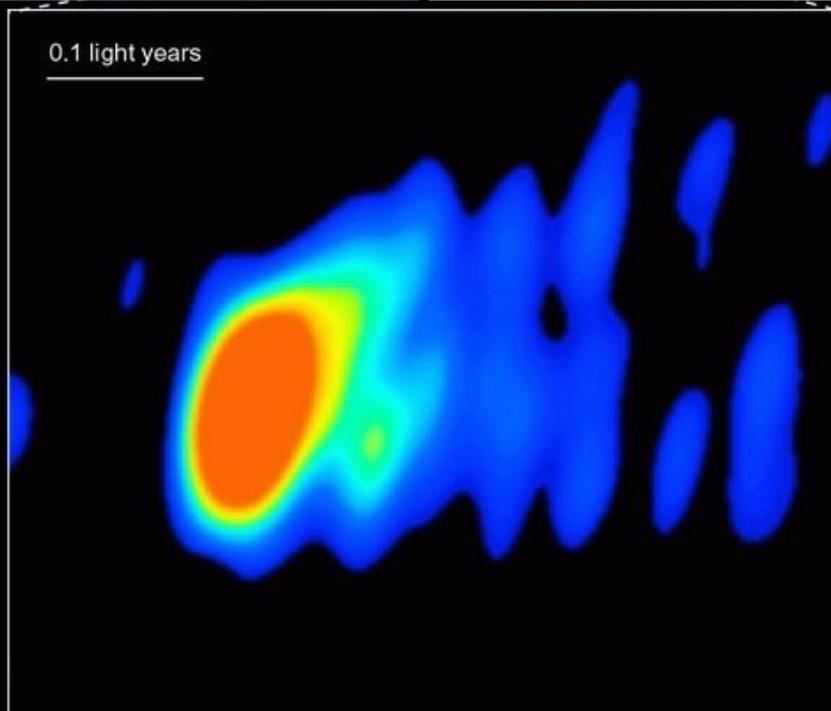
(3) M87のかの有名なジェットが230GHzでは見えない？



VLA  
Radio



HST • WFPC2  
Visible



VLBA  
Radio

- **と言うような3点を中心に（他にも疑問はある） EHTCの報告したリング像は、大変、怪しく思えた。**
- **幸い、データが公開されたので、データだけ見て、データ較正・像合成を、独立に行った。(AIPSによる)**

230GHzで見える構造は  
基本、コアとジェット

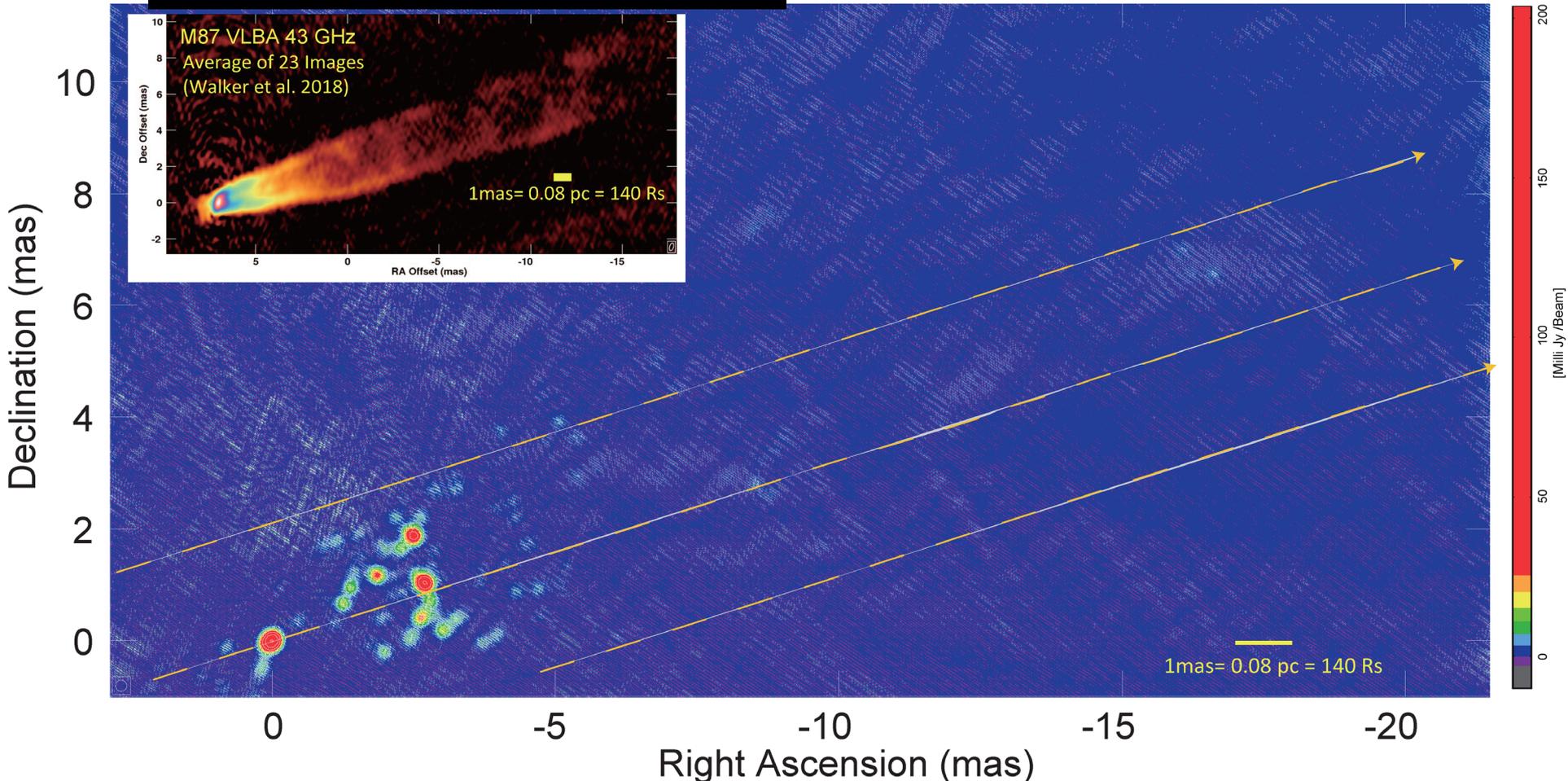
ただし、  
コアとジェットが分離  
コアには内部構造

とりあえず、撮像結果から。

- と言うような3点を中心に（他にも疑問はある） EHTCの報告したリング像は、大変、怪しく思えた。
- 幸い、データが公開されたので、データだけ見て、データ較正・像合成を、独立に行った。(AIPSによる)

見やすくするため  
ビーム太くした：200 $\mu$ s

20mas スケール



Cont peak brightness = 2.0348E-01 JY/BEAM Levs = 2.035E-02 \* (0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 4.8, 9.6)

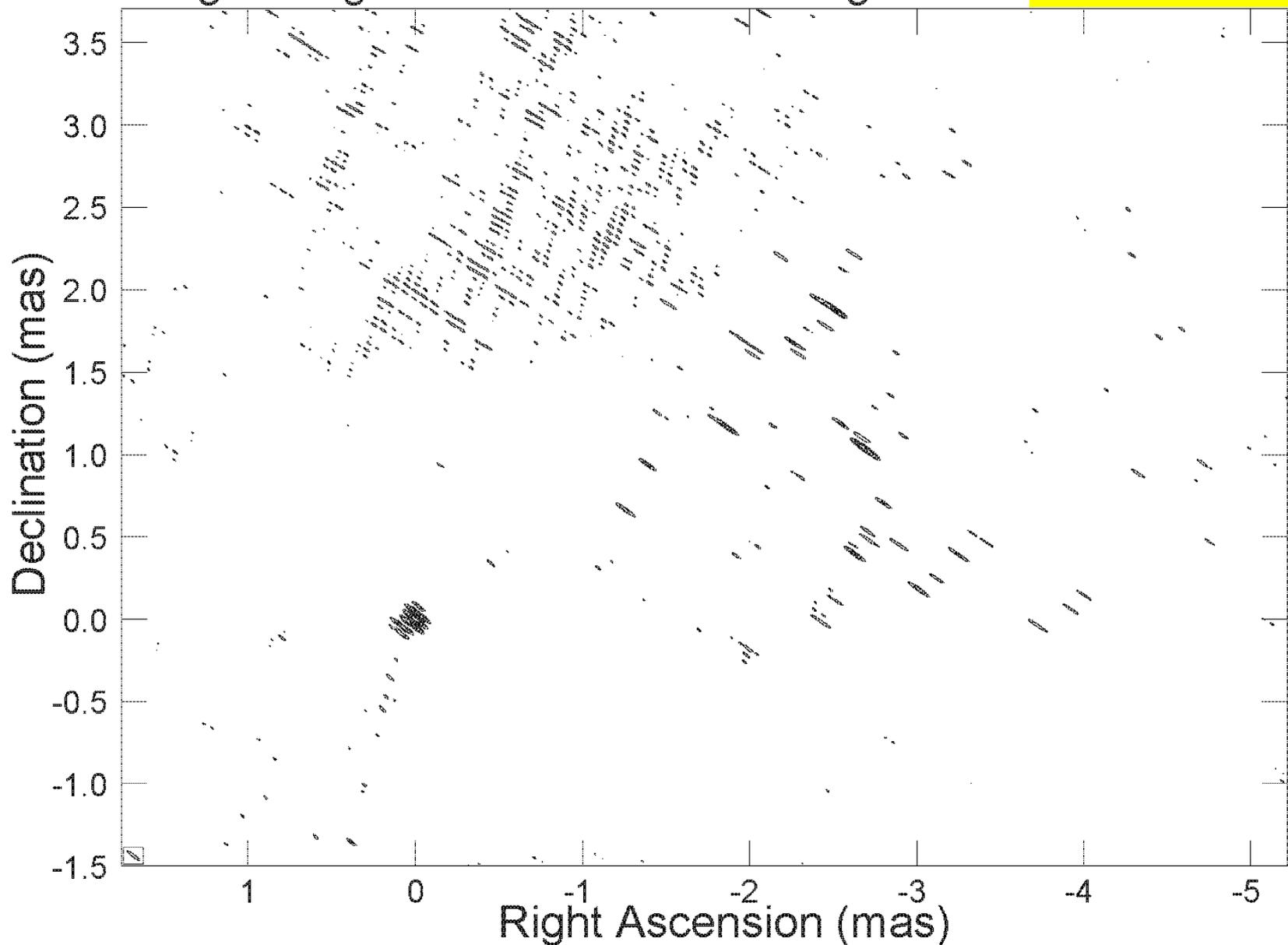
230GHzでも、従来の特徴が見えている：

20mas程度の広がり（VLBI）。カウンタージェット（二股）。

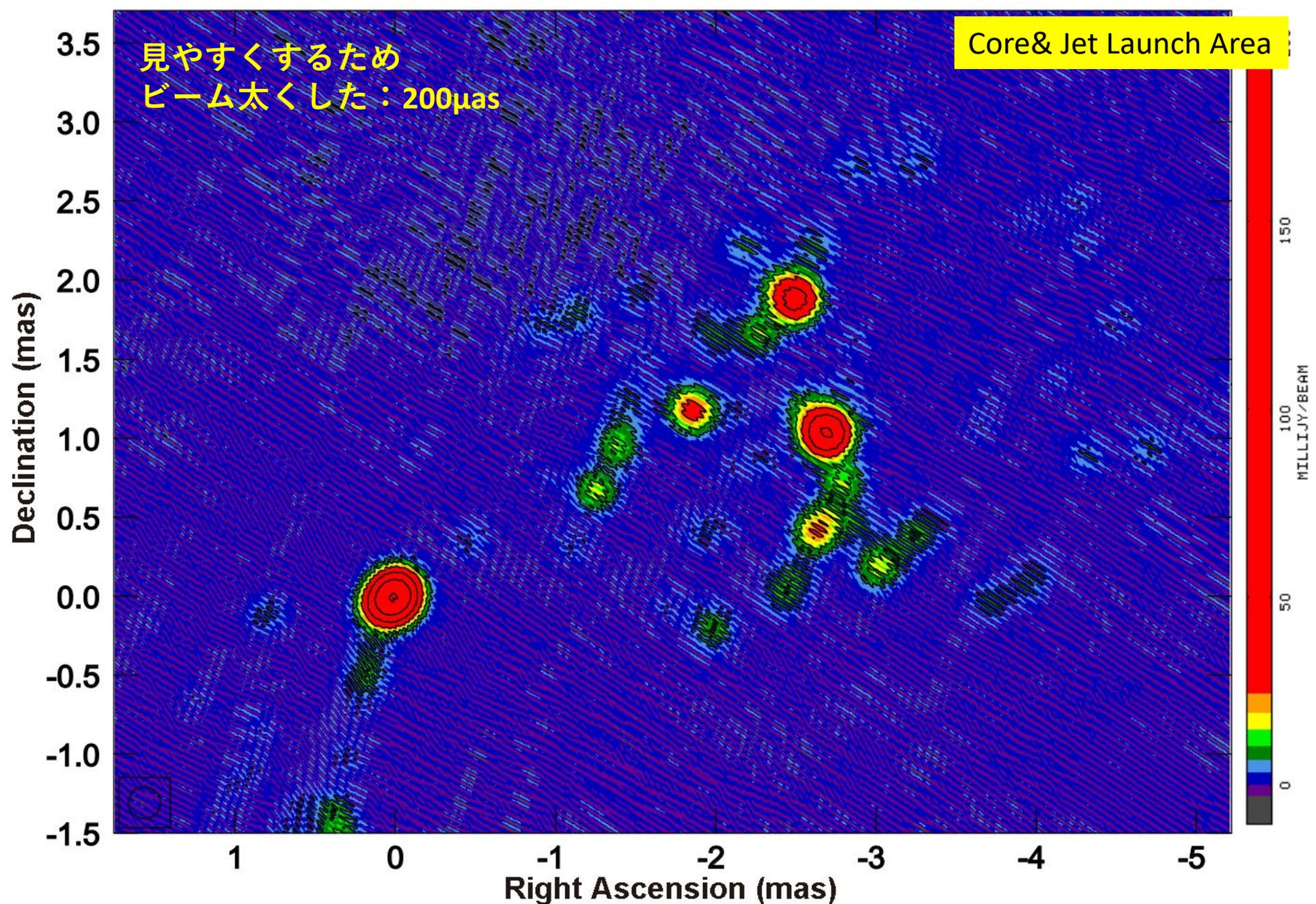
リム？が明るい。

Image using the default size restoring beam

Core& Jet Launch Area

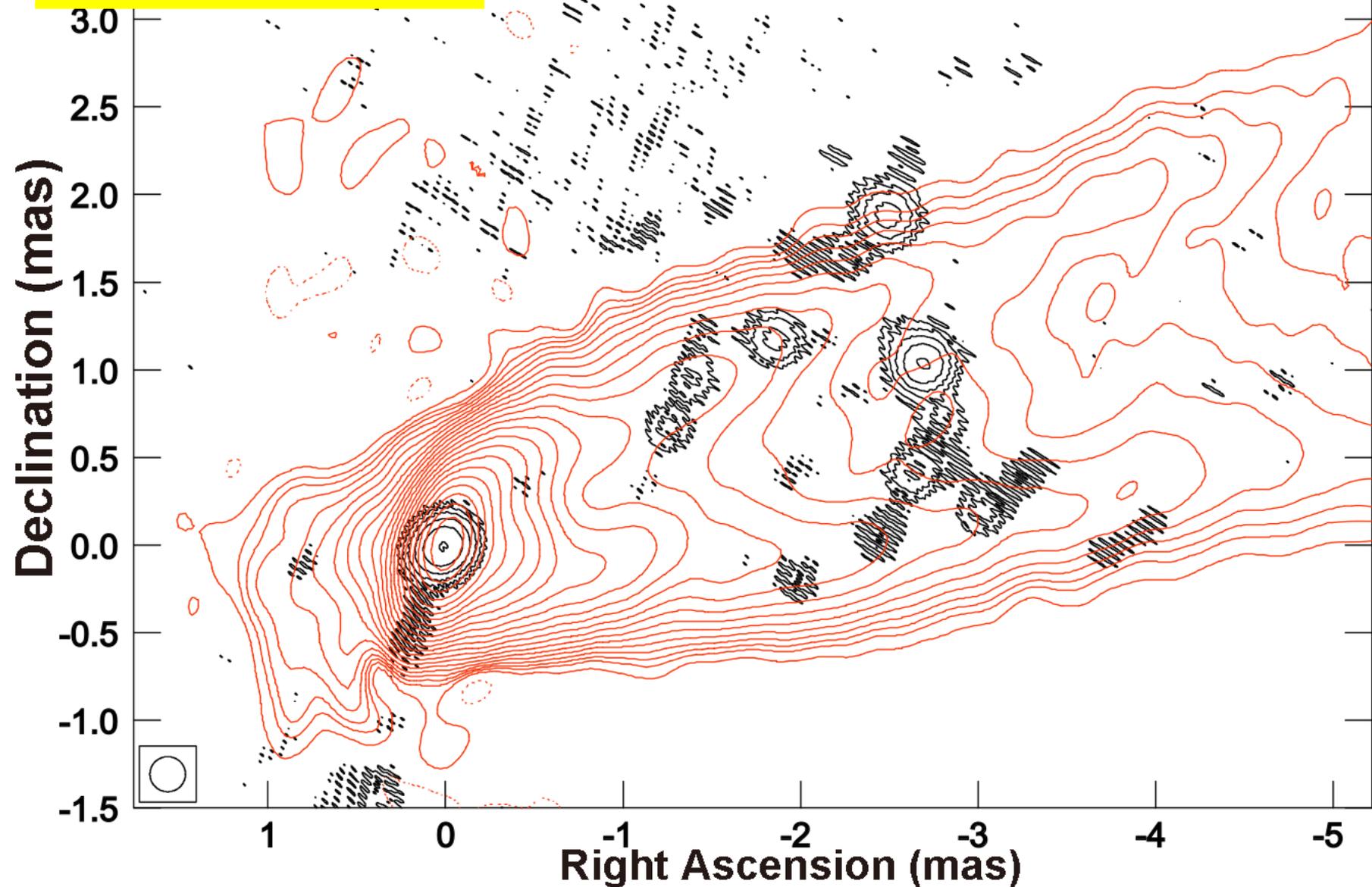


Cont peak brightness =  $8.9525 \times 10^{-2}$  JY/BEAM  
Levs =  $8.952 \times 10^{-3} * (0.600, 1.200, 2.400, 4.800, 9.600)$



見やすくするため  
ビーム太くした：200 $\mu$ as

Core& Jet Launch Area

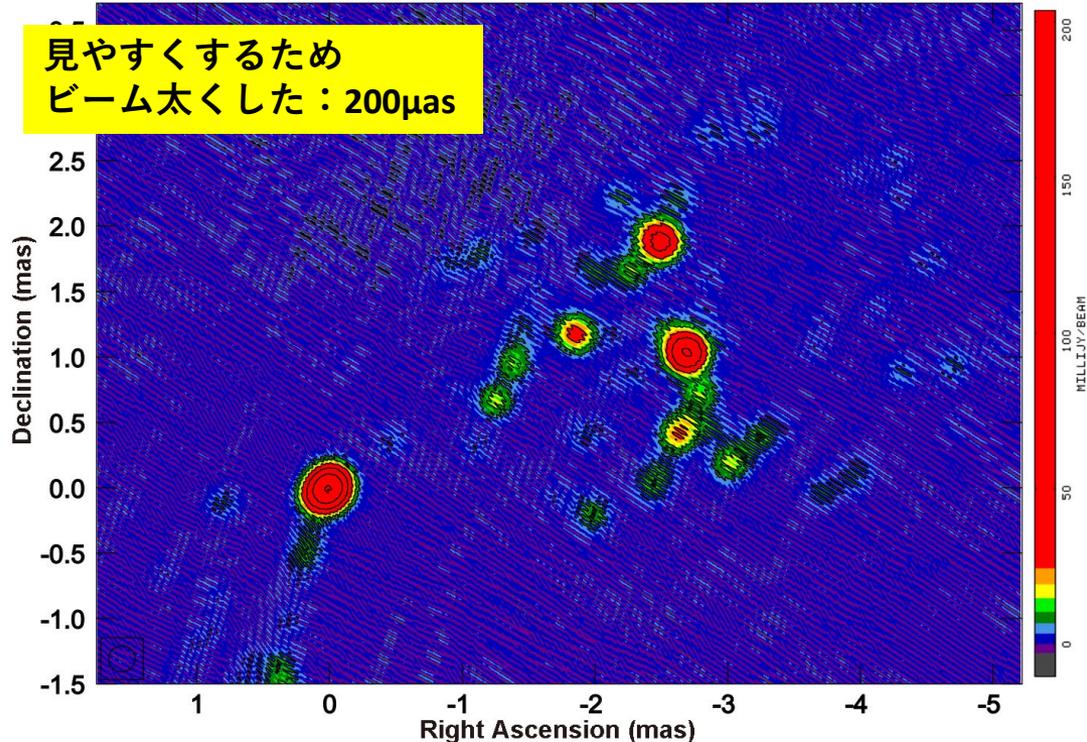


Cont peak brightness = 2.0348E-01 JY/BEAM

Levs = 2.035E-02 \* (0.300, 0.600, 1.200, 2.400, 4.800, 9.600)

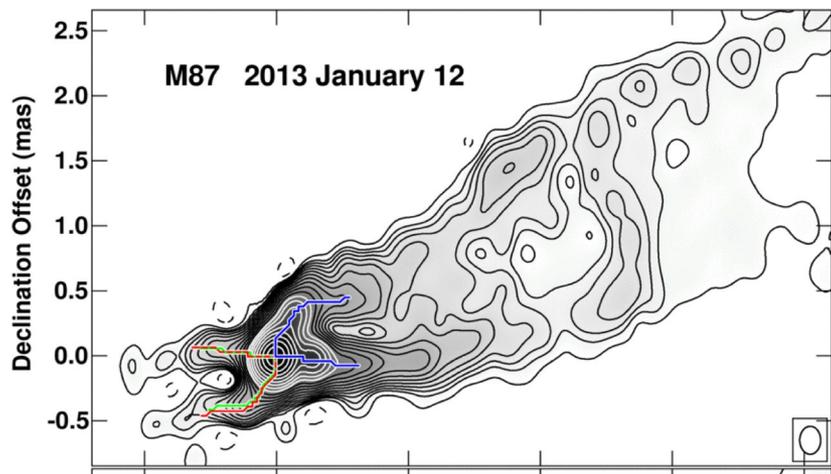
見やすくするため  
ビーム太くした：200 $\mu$ as

Core& Jet Launch Area



Cont peak brightness = 2.0348E-01 JY/BEAM  
Levs = 2.035E-02 \* (0.300, 0.600, 1.200, 2.400, 4.800, 9.600)

コアとジェットの明るい部分が離れている。  
類する結果は以前からある。

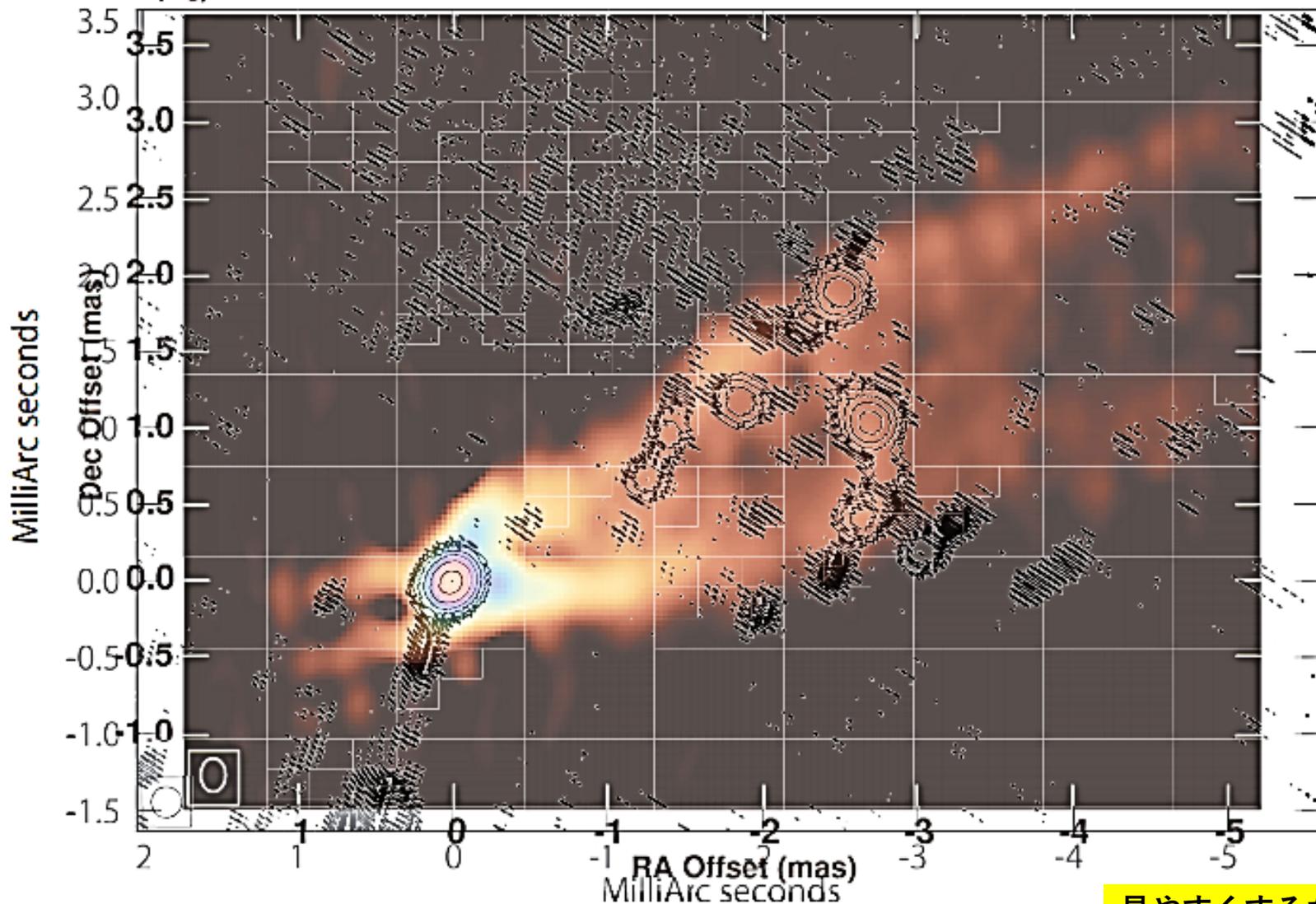


43GHz  
Enhanced image (walker et al. 2018)

# 43GHz観測の一つ (Walker2018)とよく似ている

0.324  
549

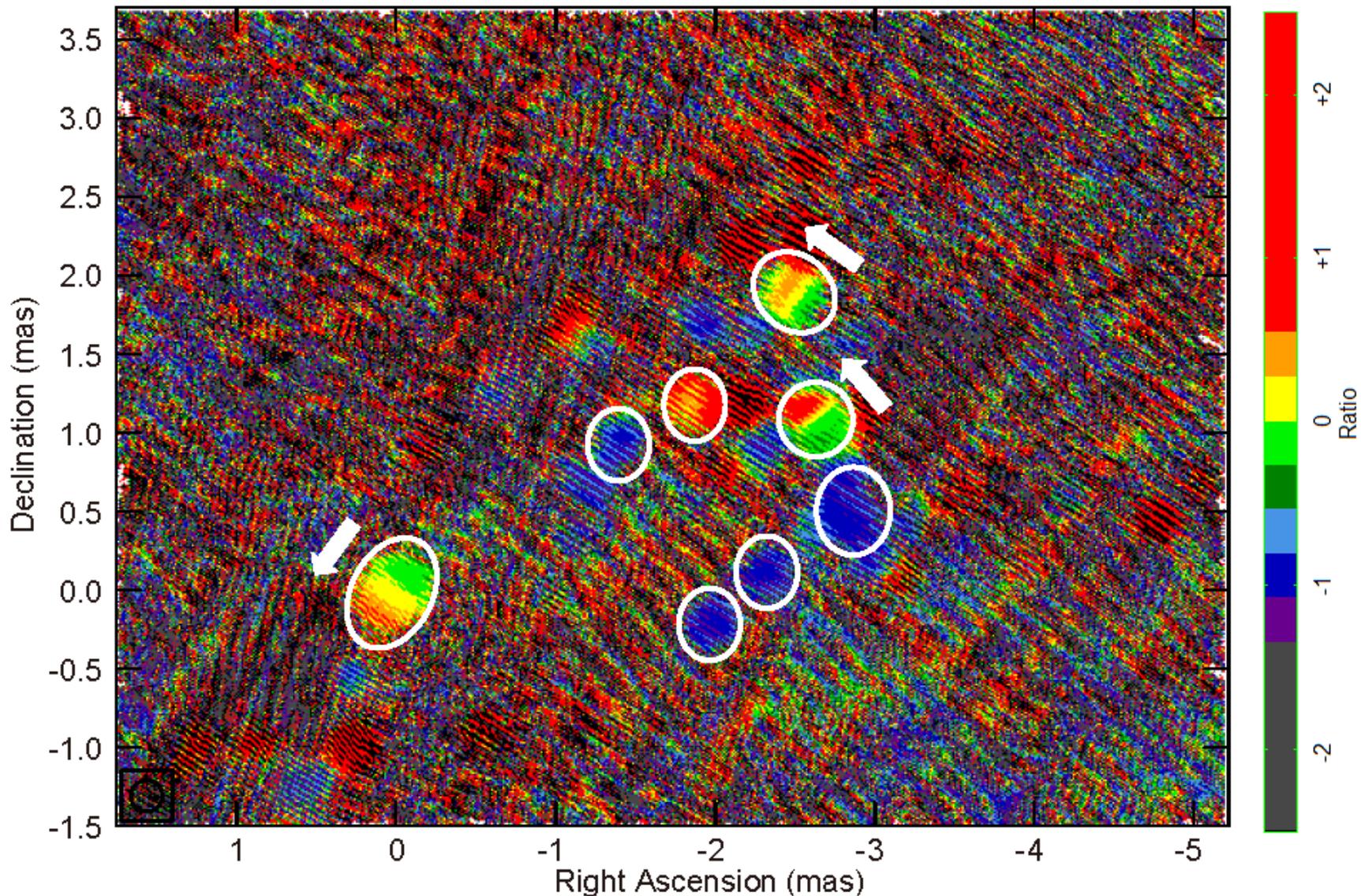
0.405  
687



Center at RA 12 30 49.42338192 DEC 12 23 28.0436611  
Cont peak brightness = 2.0348E-01 JY/BEAM  
Levs = 2.035E-02 \* (0.225, 0.450, 0.900, 1.800, 3.600, 7.200, 9.990)

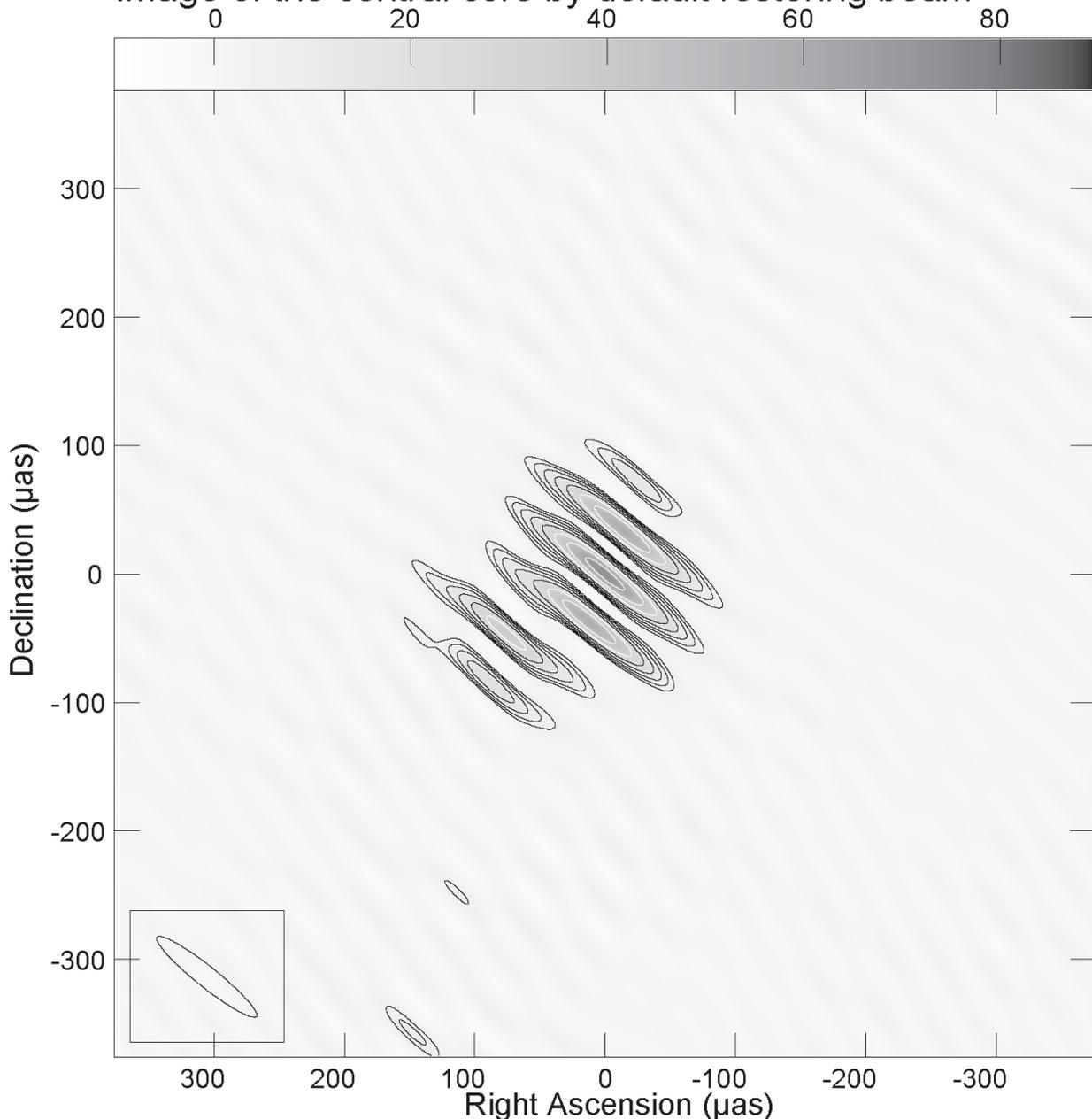
見やすくするため  
ビーム太くした: 200 $\mu$ as  
43GHzの方は細くしている

# Walker指摘のジェット Helical Motion検出？



見やすくするため  
ビーム太くした：200 $\mu$ as

Image of the central core by default restoring beam



Grey scale brightness range = -9.98 89.53 MilliJY/BEAM  
Cont peak brightness = 8.9525E-02 JY/BEAM  
Levs = 8.952E-03 \* (0.625, 0.890, 1.250, 1.760, 2.500, 3.540, 5, 7.100, 9.900)

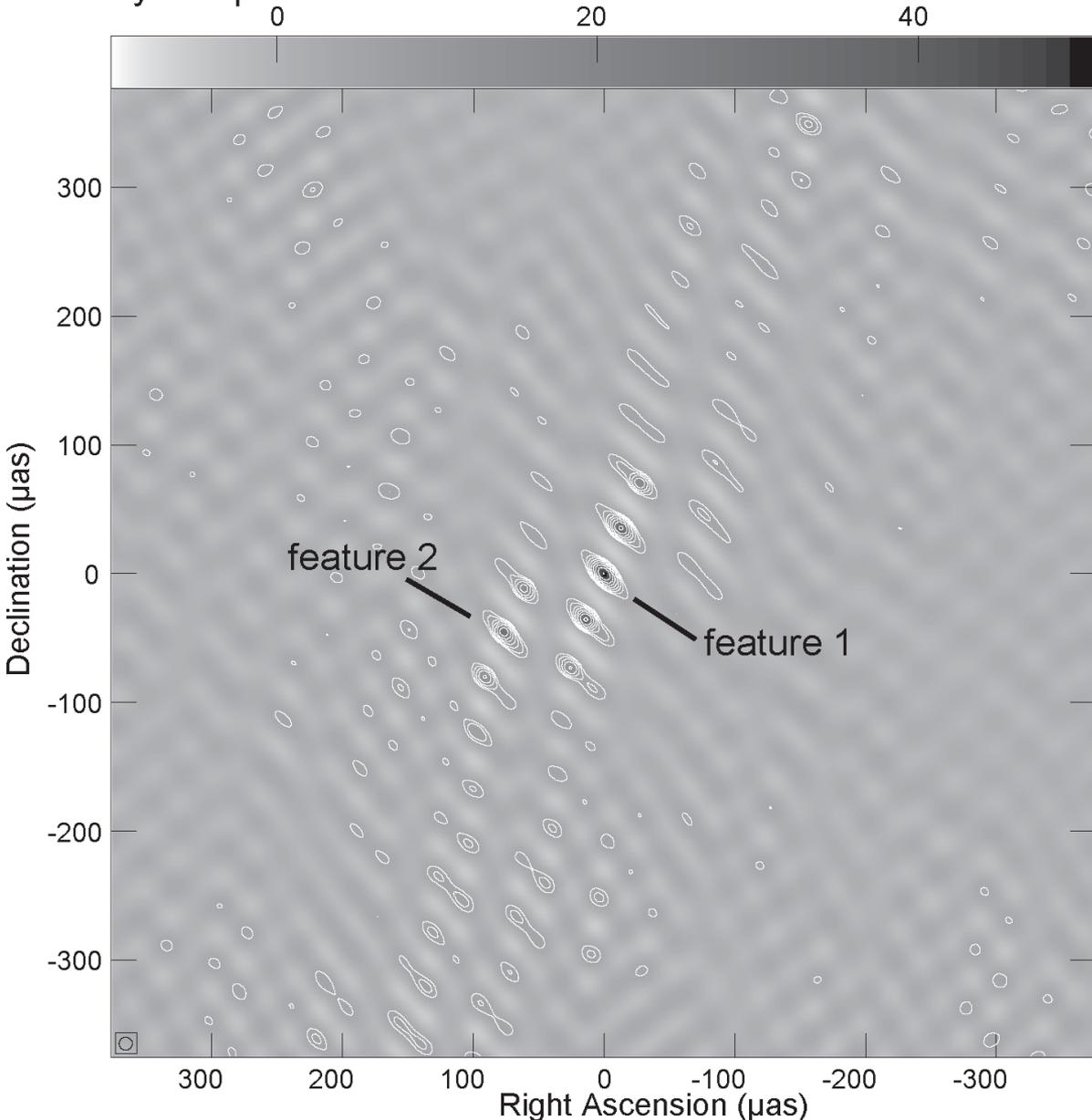
## Core 拡大

コア部分だけを拡大  
(default beam)  
200 $\mu\text{as}$ 以内に  
クリーンコンポーネント  
は集中。

# 実像と 周りの残存 回折像

# 実物部分 は？

Image of the central core using the all baseline data  
by a super resolution with 10 micro-asec beam



Grey scale brightness range= -10.19 50.92 MilliJY/BEAM  
Cont peak brightness = 5.0924E-02 JY/BEAM  
Levs = 5.092E-03 \* (0.625, 0.890, 1.250, 1.760, 2.500, 3.540, 5, 7.100,  
9.900)

# Core 拡大

10 $\mu$ s beamによる  
超分解画像  
(全基線データ使用)

離角88.8  $\mu$ s (1480 au、 12.4 Rs)  
(jet viewing- angle 17 $^\circ$  =>3.24倍)

単純なRIAF円盤の温度、説明可

10<sup>11</sup> Kの高輝度なので  
カウンタージェットではない。

ブラックホール連星??

奥行きあるとすると、10年周期  
程度で円軌道しうる間隔。  
Cf: ジェット軸の正弦的揺らぎ  
(8~10年周期) Walker2018

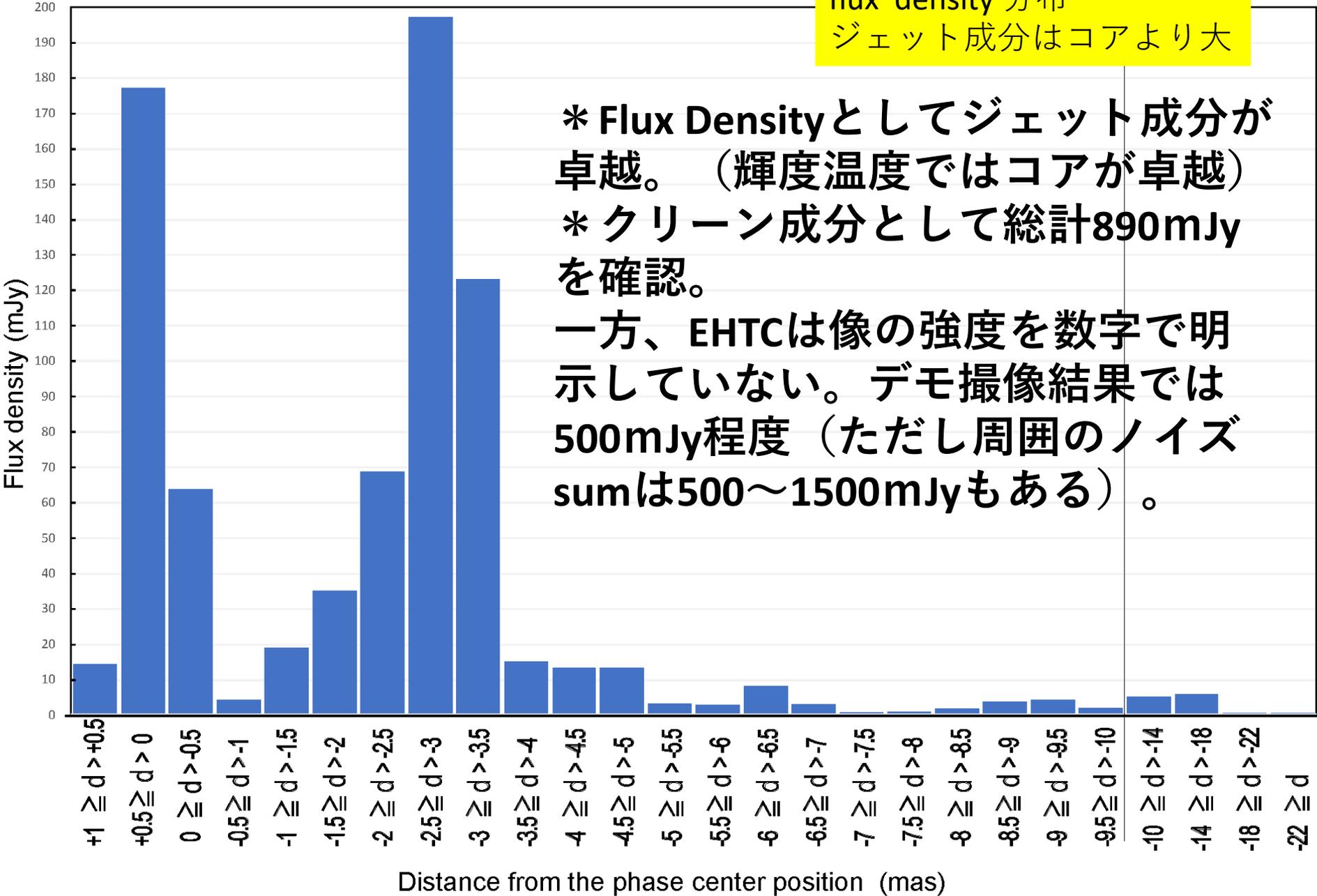
Feature	R.A. offset( $\mu\text{as}$ )	$\delta$ offset( $\mu\text{as}$ )	Flux Density(mJy)	$T_b$ (K)
counter jet north	$796.5 \pm 0.7$	$-113.0 \pm 0.7$	3.5	$4.1 \times 10^{10}$
counter jet south	$196.0 \pm 0.7$	$-547.0 \pm 1.2$	4.1	$2.8 \times 10^{10}$
core feature 2	$88.0 \pm 0.7$	$-84.0 \pm 0.7$	15.9	$1.9 \times 10^{11}$
core feature 1	$1.3 \pm 0.8$	$1.3 \pm 0.8$	68.0	$6.1 \times 10^{11}$
jet feature 1	$-1254.5 \pm 0.7$	$667.5 \pm 0.7$	14.9	$1.8 \times 10^{11}$
jet feature 2	$-1863.3 \pm 0.8$	$1168.3 \pm 0.8$	27.4	$2.5 \times 10^{11}$
jet feature 3	$-2506.9 \pm 7.3$	$1881.9 \pm 4.9$	45.3	$7.3 \times 10^9$
jet feature 4	$-2625.3 \pm 1.7$	$399.1 \pm 1.2$	21.5	$6.1 \times 10^{10}$
jet feature 5	$-2706.3 \pm 5.2$	$1023.7 \pm 3.4$	68.3	$2.2 \times 10^{10}$
total CLEAN components (720 points)			892.9	

Table 1: Properties of main features: positional offsets from the map phase center in micro arc second, flux densities in mJy, and the maximum brightness temperatures in Kelvin calculated from obtained CLEAN components.

輝度ではコアがジェットより大。が、flux density ではジェット部分の方が大

EHTCの撮像結果の2 ? 倍程度のflux densityがトータルで拾える

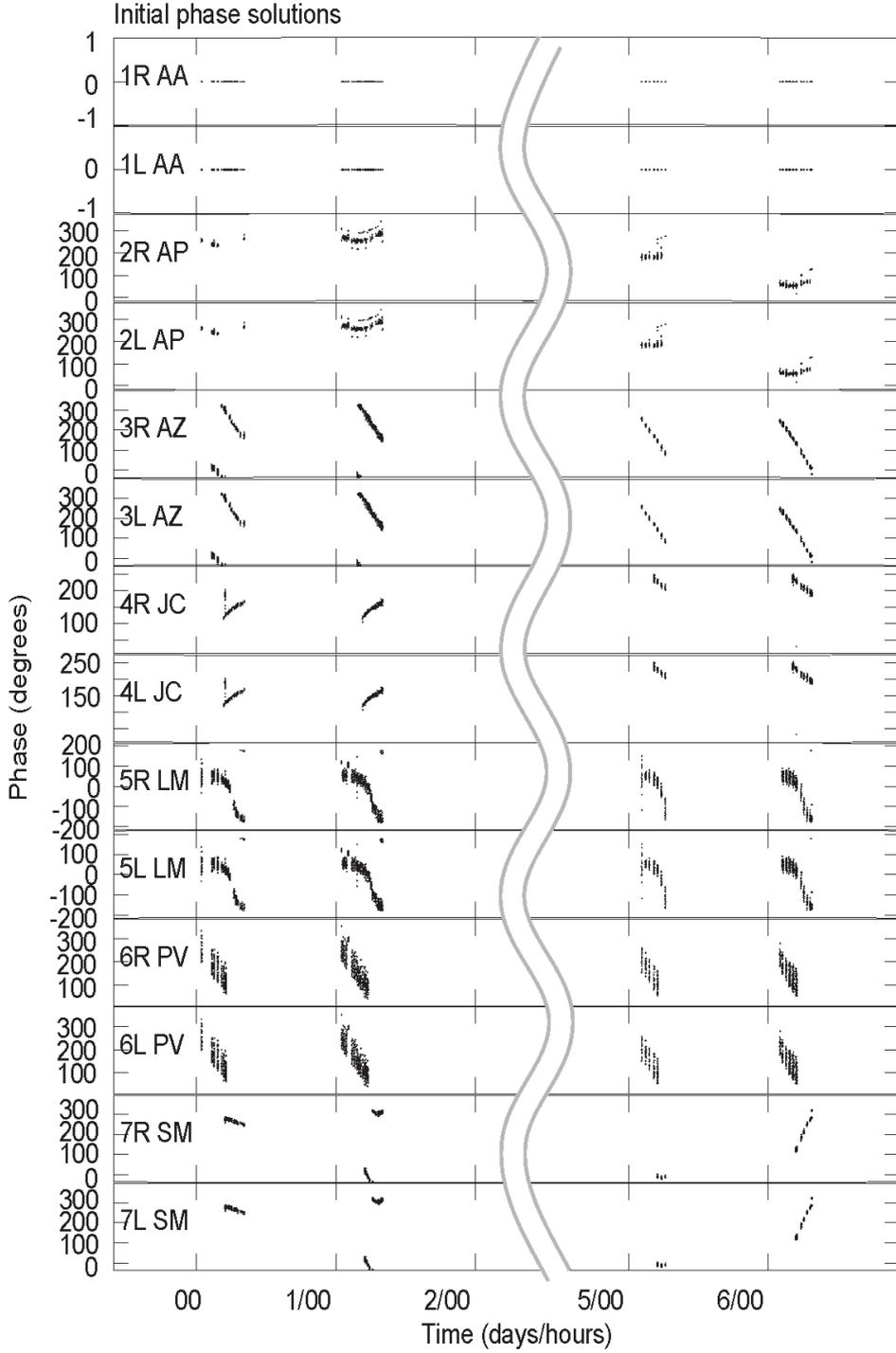
flux density 分布  
ジェット成分はコアより大



\* Flux Densityとしてジェット成分が卓越。（輝度温度ではコアが卓越）  
\* クリーン成分として総計890mJyを確認。  
一方、EHTCは像の強度を数字で明示していない。デモ撮像結果では500mJy程度（ただし周囲のノイズsumは500～1500mJyもある）。

# Hybrid Mapping Method

- データに正しい較正を施し、正しい像がほしい。
- 正しい像が既知ならば、修正すべき較正量はわかる。
- が、不明。像が既知なら観測なんか要らない。
- で、最初、簡単な像（1点源など）を仮定、最小自乗法的に較正量を計算、それを適用し次の像を作り。...と繰り返し、「正しい較正」「正しい像」に迫る方法。像合成では**CLEAN**など使い、汚い**PSF**の影響を取り除くよう努力する。

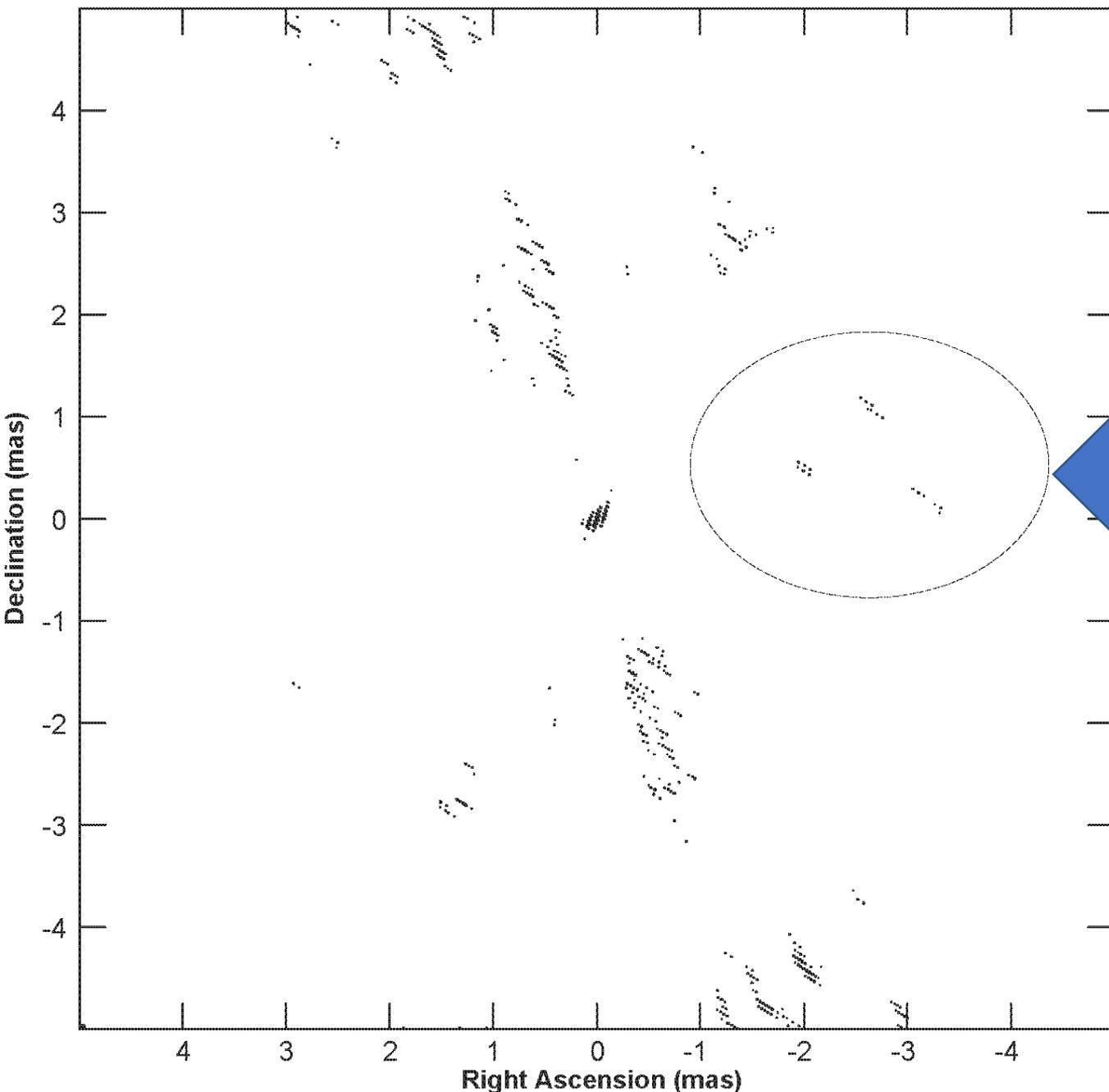


**1-pointモデルによる、  
セルフ・キャリブレーション位相解：**

**有意に較正残差が見える。  
同じ変動を4日間、繰り返す局あり。局位置誤差？**

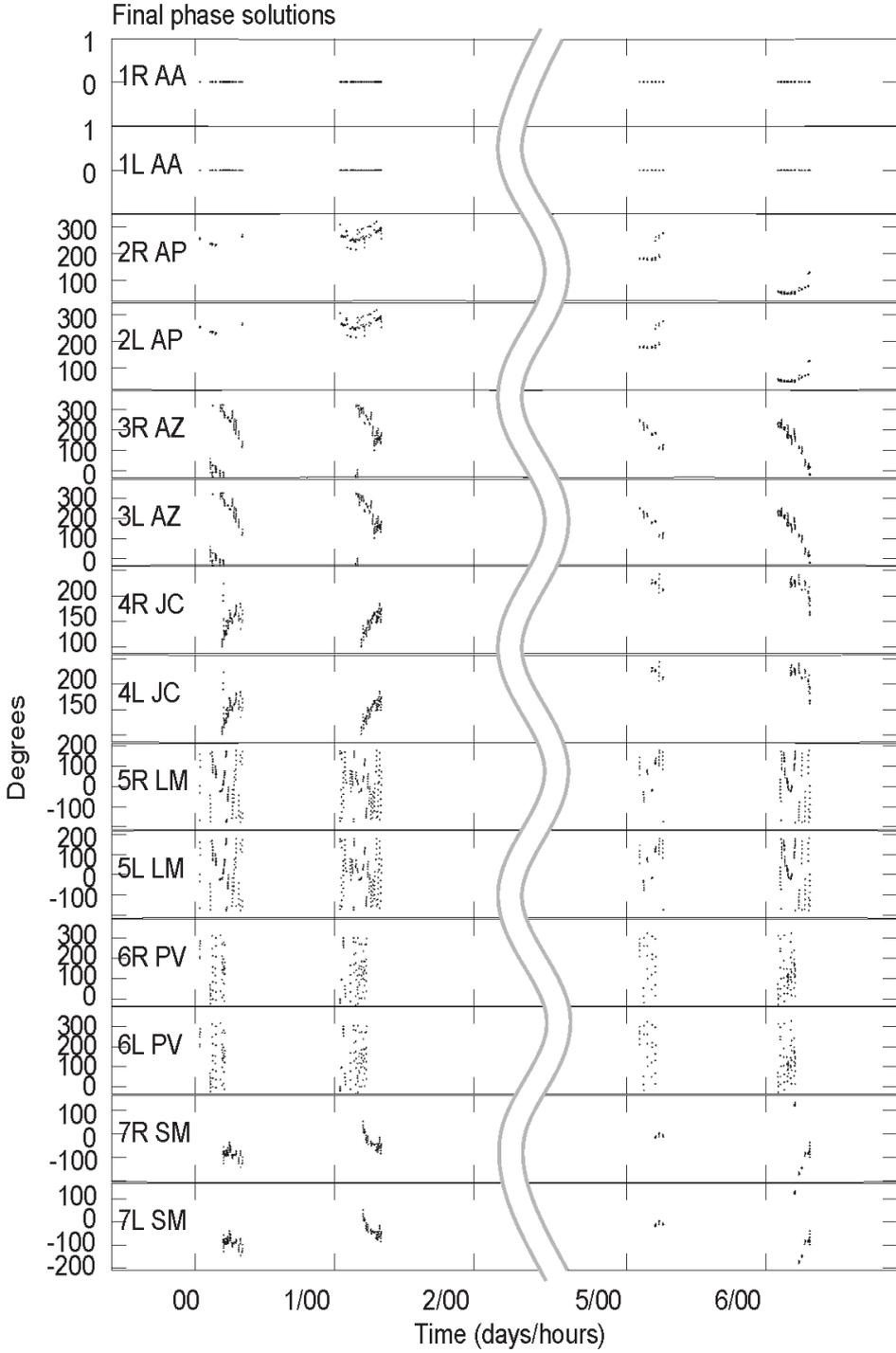
EHT公開のCalibrated Dataは、完全に較正が施されたデータではない。  
(前段階の較正のみ？)

# The first image in the hybrid mapping process

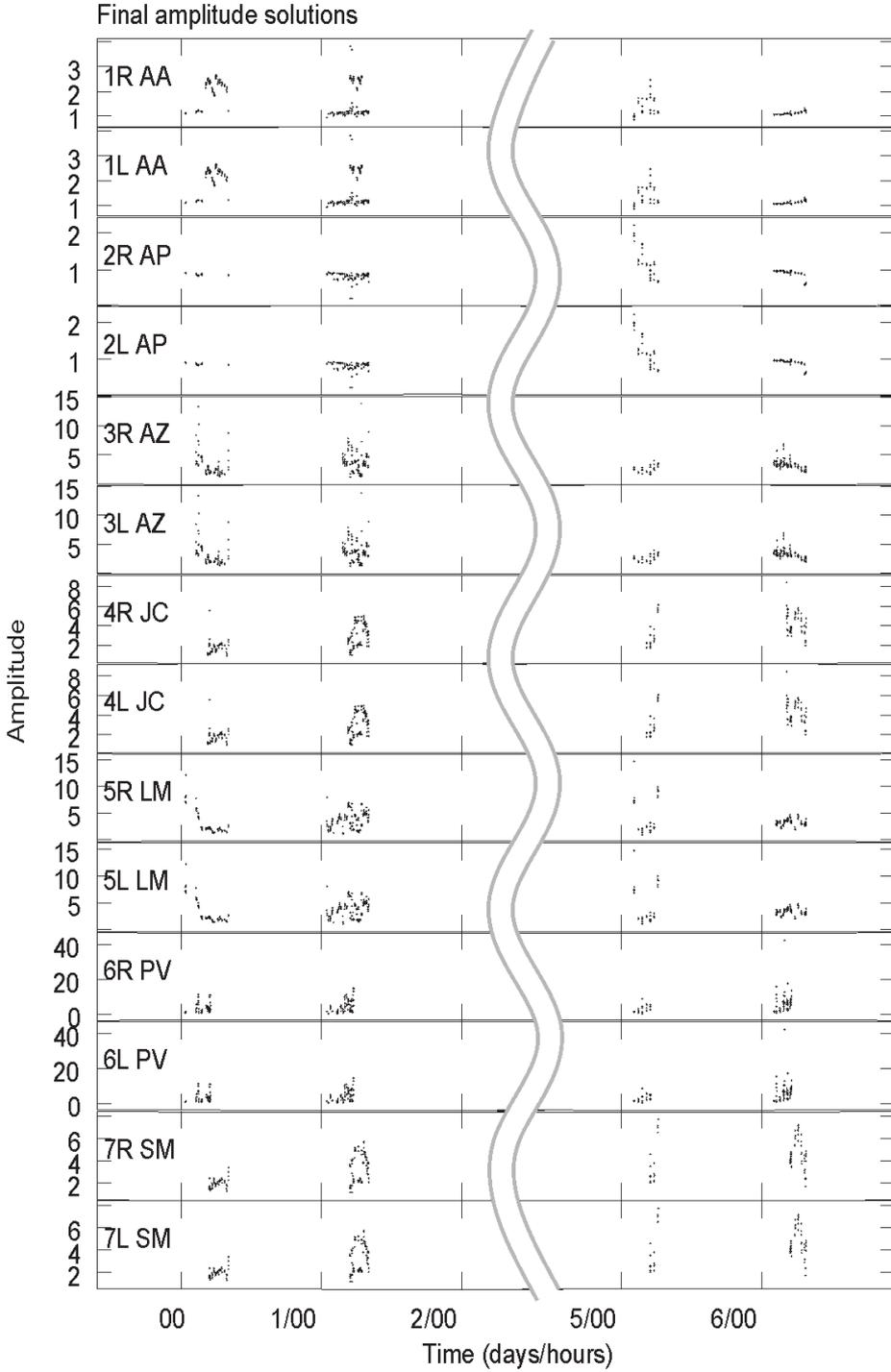


Hybrid Mapping  
第一回目から  
既にjetは見える：  
**ピーク比40%**  
**の輝度**  
(楕円内)

最初から  
ジェット成分の  
一部が撮像できた。



**Hybrid Mappingによる  
最終セルフキャリブレーション  
(位相解) :**



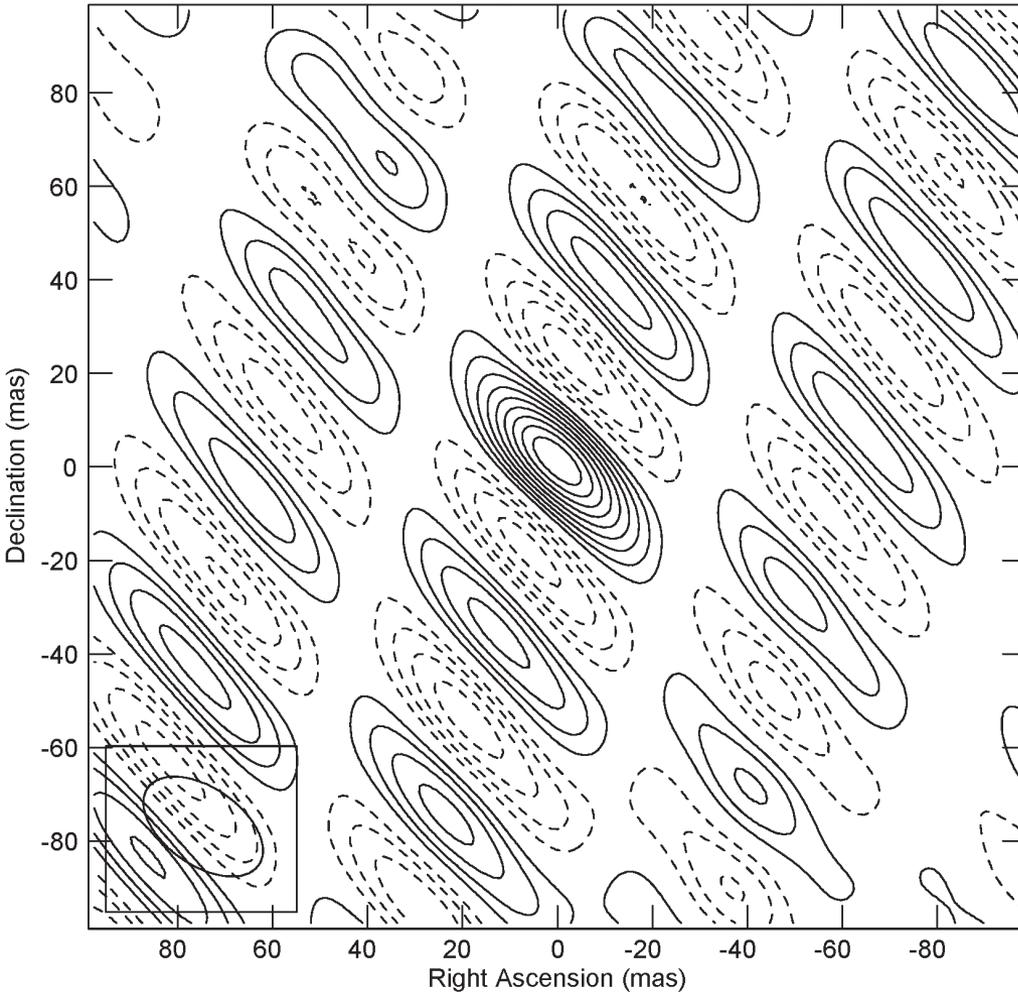
**Hybrid Mappingによる  
最終セルフキャリブレーション  
(振幅解) :**

リングも作成できる。

(が、それは正しくない像)

- 以下、2つの作例を示す。

The center of the first image in the hybrid mapping process

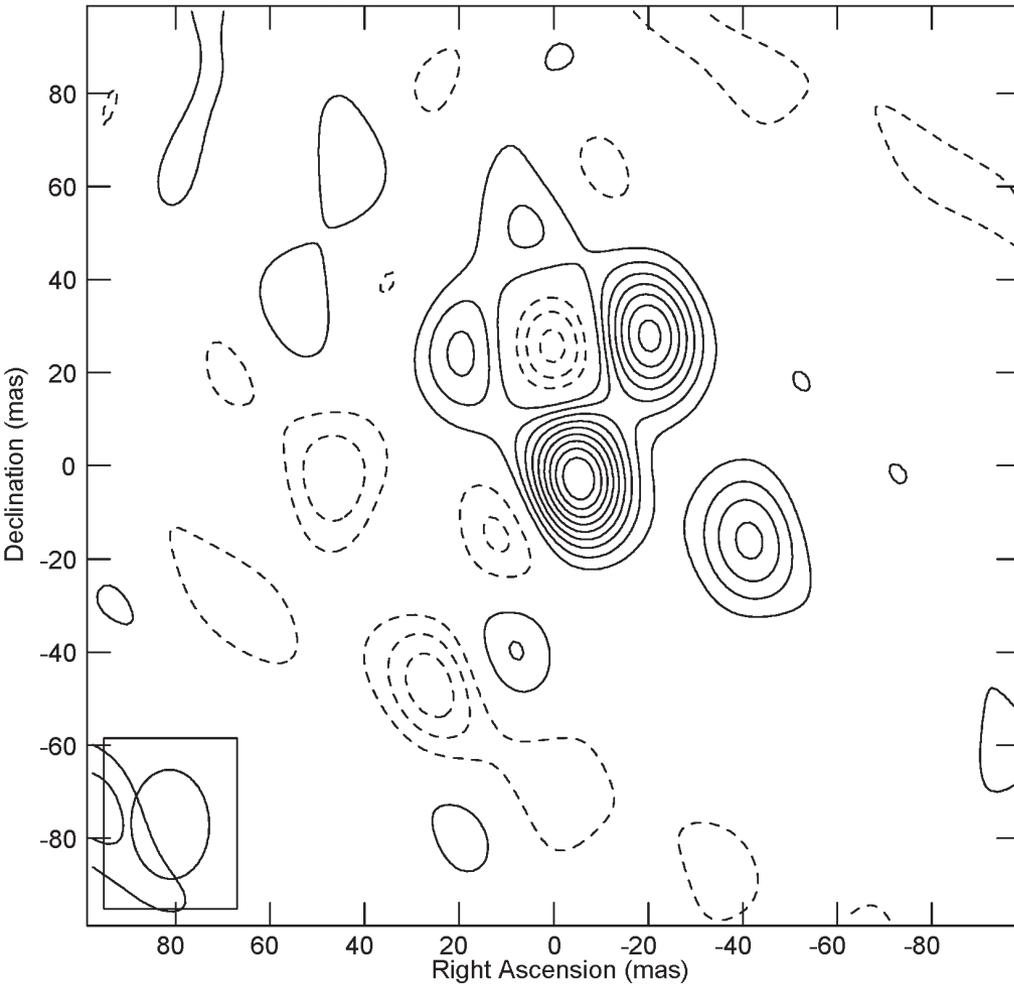


Cont peak flux =  $3.1365\text{E-}02$  JY/BEAM

Levs =  $3.137\text{E-}03$  \* (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

第1回hybrid mappingにおける像の中心部分。

The center image after over iterations of CLEAN

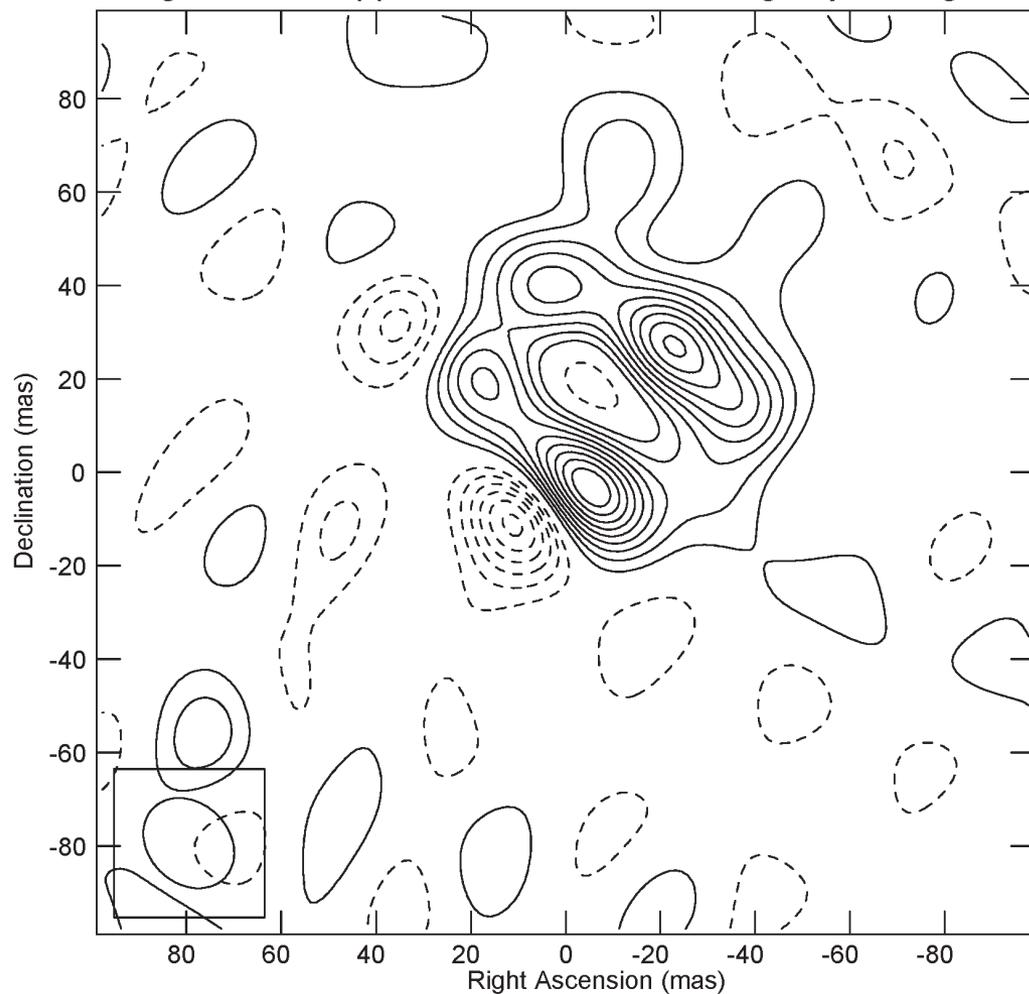


Cont peak flux =  $1.9310\text{E-}02$  JY/BEAM  
Levs =  $1.931\text{E-}03 * (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$

第1回 hybrid mapping における像合成  
**(クリーン) を過度  
に進めると  
リング状の構造が中  
心部分に現れる。**

(こういう手法でできた像が正しい  
はずがないが、とにかく、やった)

Ring structure appeared at the center image by boxing



Cont peak flux =  $2.3232\text{E-}02$  JY/BEAM  
Levs =  $2.323\text{E-}03 * (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$

現れたリング状の構造を正しいと仮定して、像モデルとして使って、セルフキャリブレーションを行い、その解を用いてクリーンする。  
(ただしクリーンを行う範囲を極端に狭める)

リング状構造が強まって現れる。

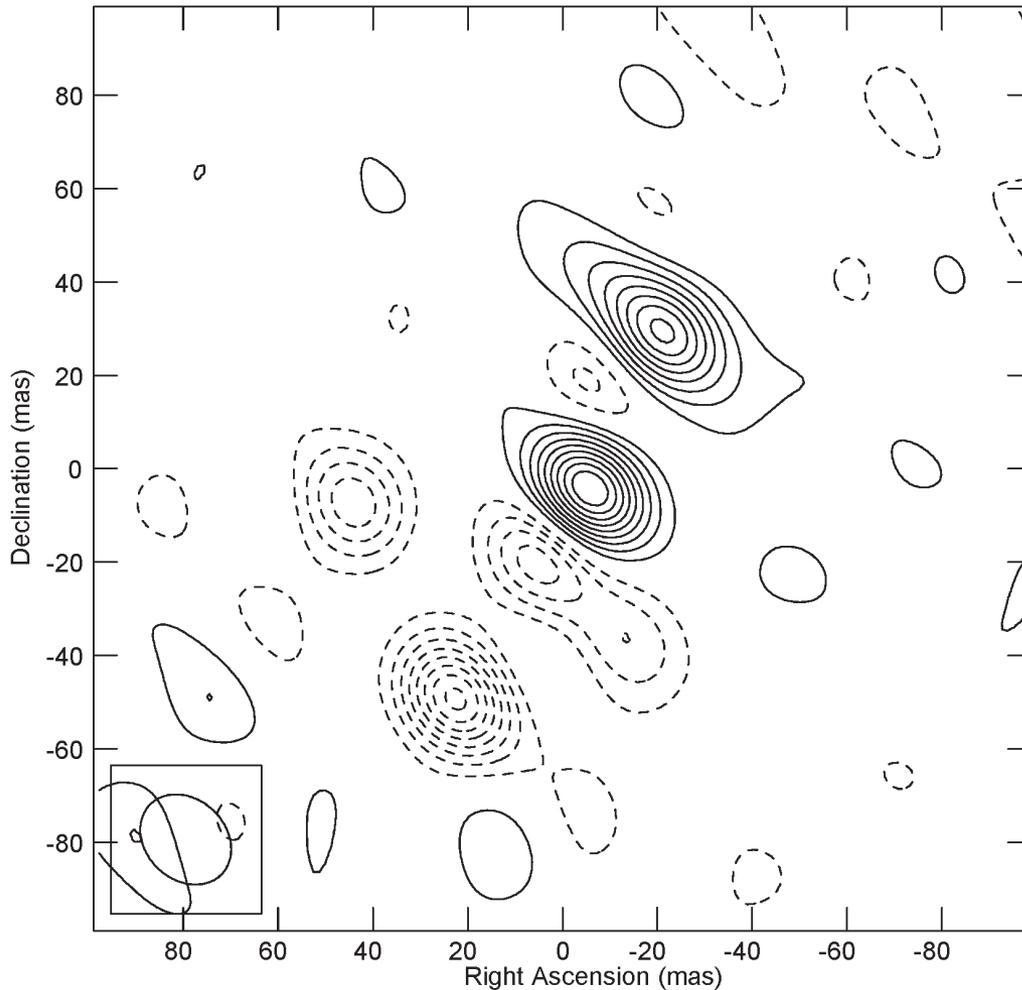
現れたリング状の構造を像モデルとして、セルフキャリブレーションを行い、その解を用いてクリーン。  
(ただしクリーンを行う範囲を極端に狭める)

リング状構造が強まって現れる。

ただし、クリーン領域を広げて、再度クリーンを試行すると

**リングは壊れる。**

Center image without boxing

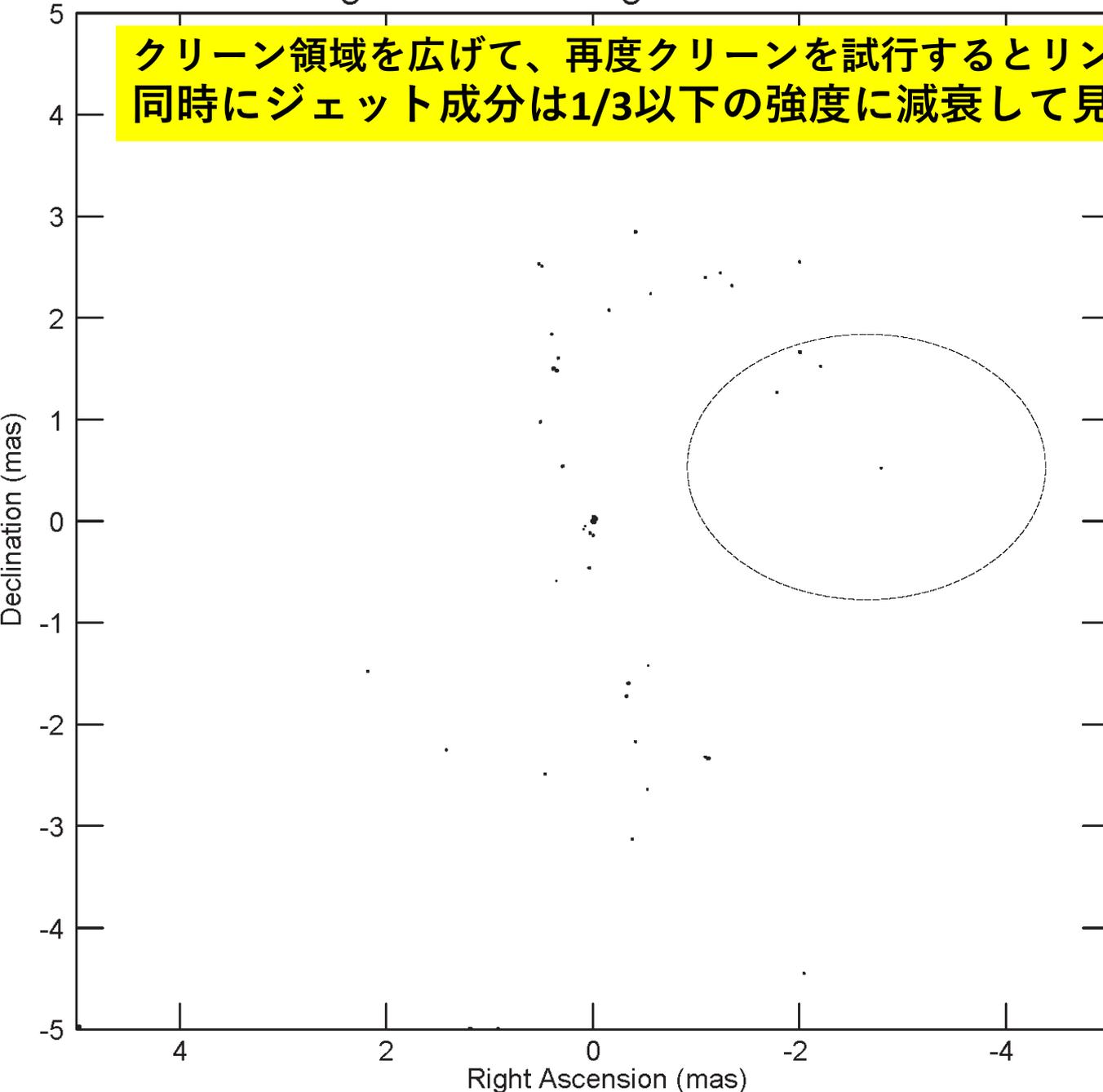


Cont peak flux = 1.6987E-02 JY/BEAM

Levs = 1.699E-03 \* (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

# The whole image without boxing

クリーン領域を広げて、再度クリーンを試行するとリングは壊れる。  
同時にジェット成分は1/3以下の強度に減衰して見えなくなる。

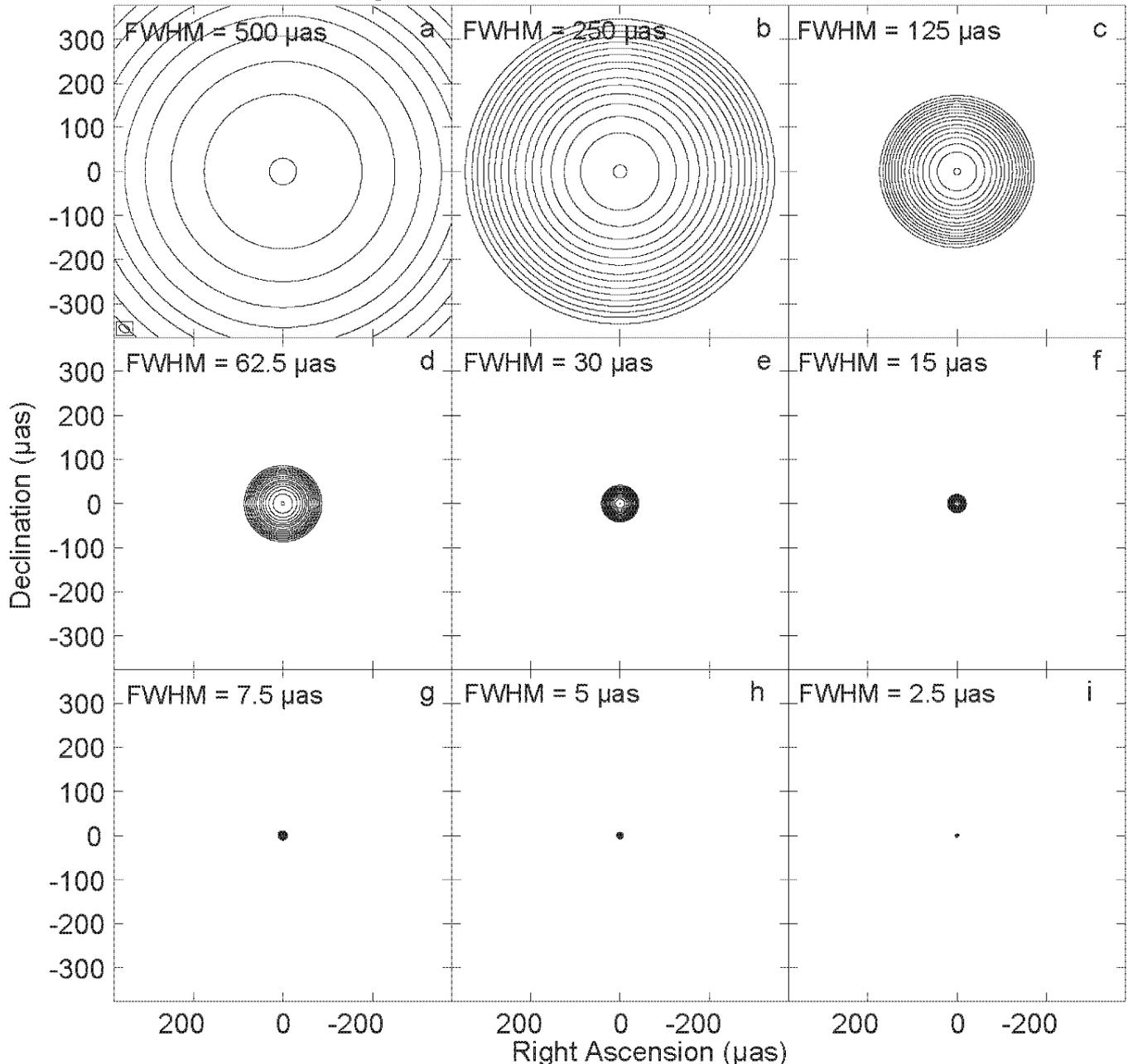


Cont peak flux = 1.6987E-02 JY/BEAM, Levs = 1.699E-03 \* (2)

付記：EHTでは $30\mu$ 秒角より  
大きな構造は検出できない。

- まあ、一般にVLBIはそういう性質の観測装置。  
(例えば太陽面を観測してもなにも見えない)

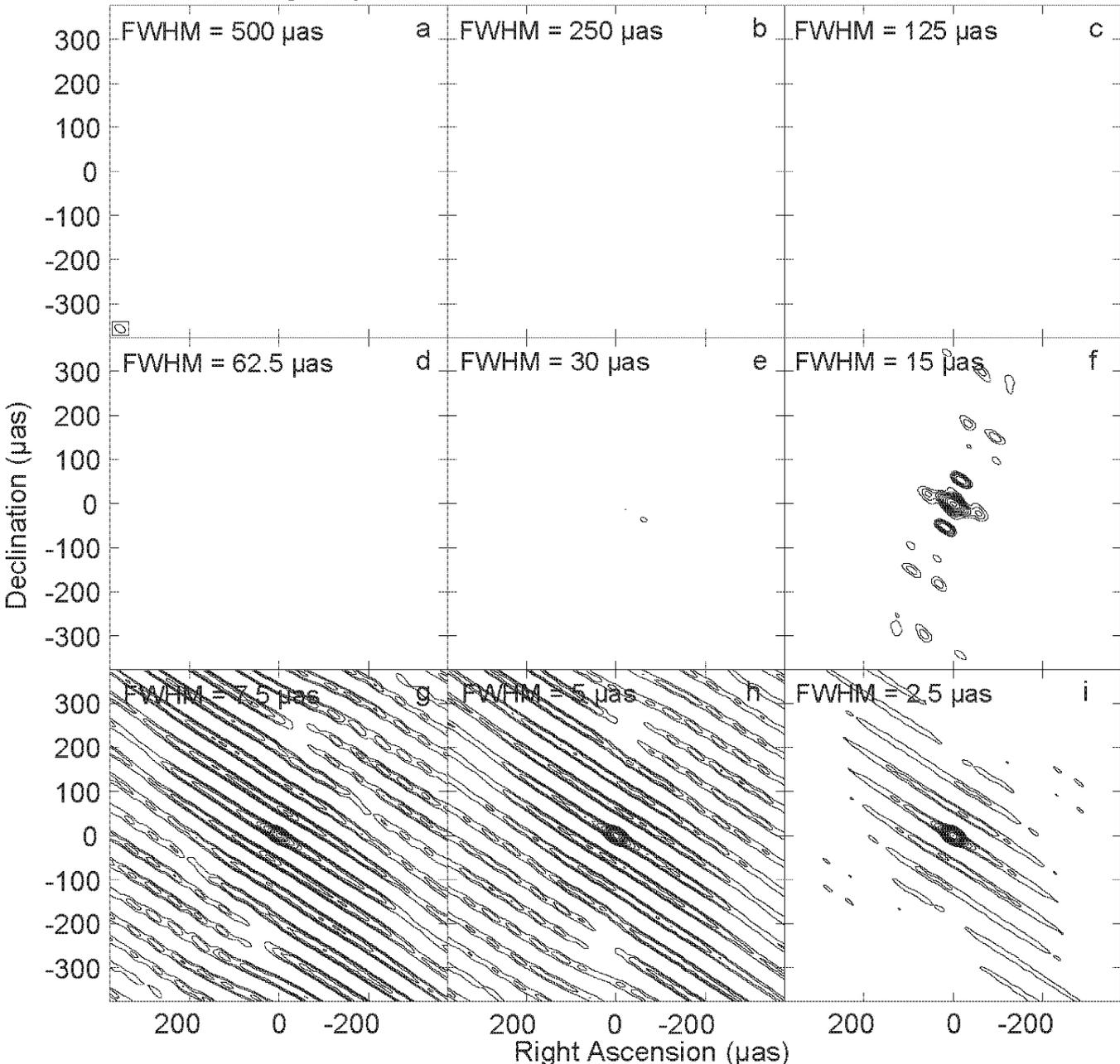
Gaussian model images



像モデル：  
サイズを変えた  
円形ガウス輝度分布

Cont peak brightness = 1.0000E+00 JY/BEAM  
Levs = 1.000E-01 \* (0.050, 0.078, 0.110, 0.160, 0.220, 0.313, 0.440,  
0.640, 0.890, 1.350, 1.800, 2.500, 3.500, 5, 7.100, 9.900)

Resultant Images by CLEAN method



各像モデルに対する撮像simulationの結果：  
HPBW = 30 $\mu\text{as}$ より大に  
ガウス輝度は見えなくなる。

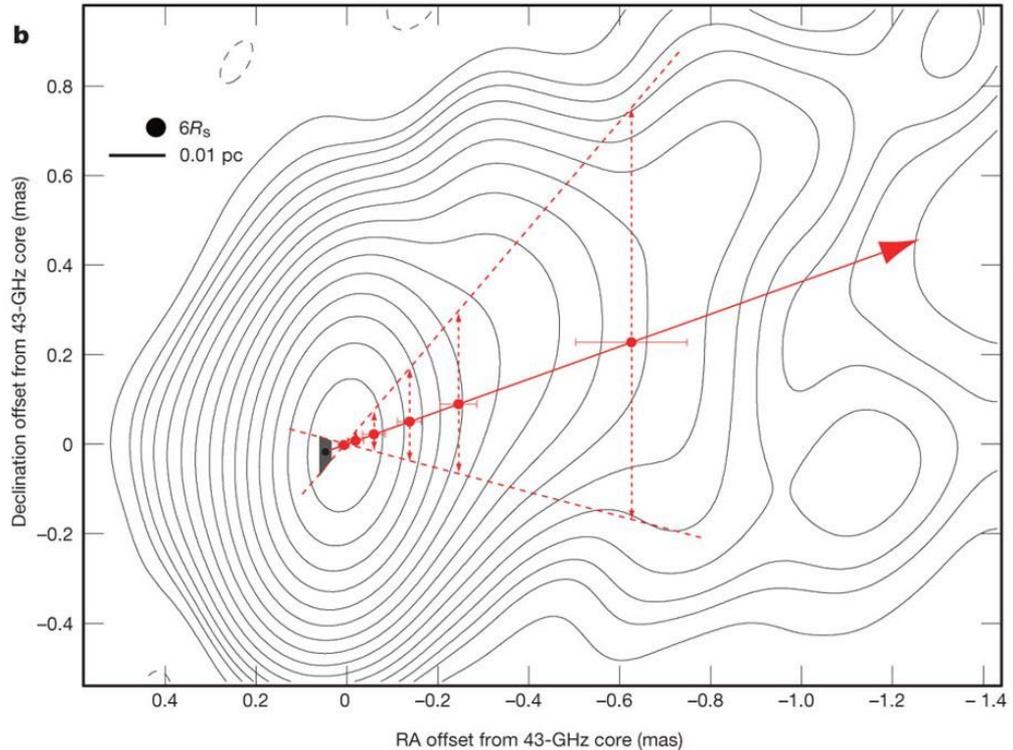
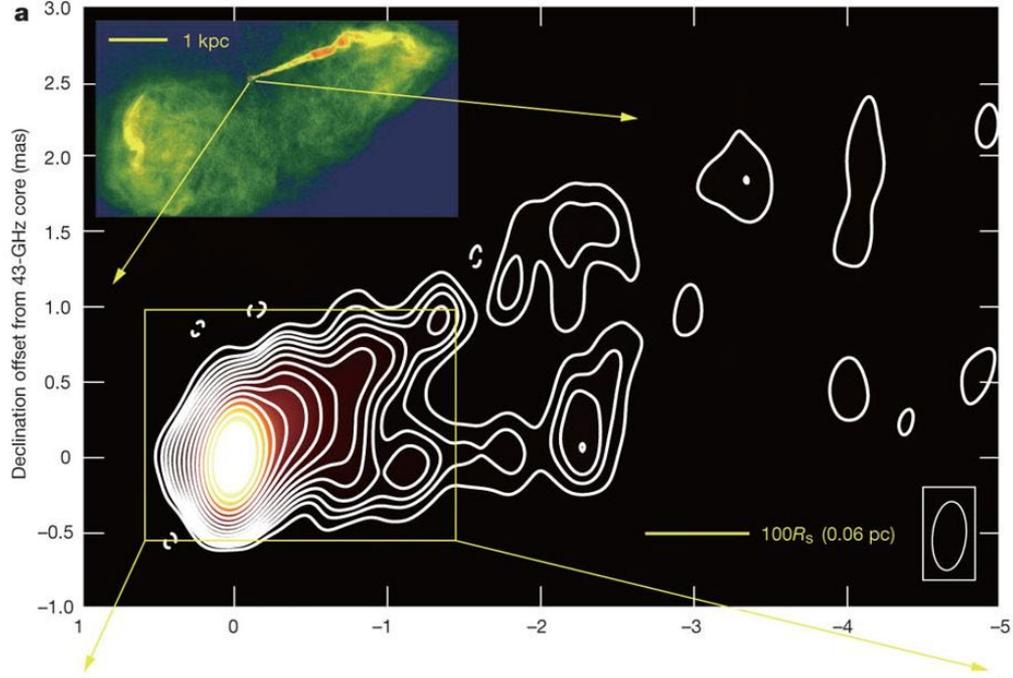
Cont peak brightness = 9.2896E-01 JY/BEAM  
Levs = 9.290E-02 \* (0.050, 0.078, 0.110, 0.160, 0.220, 0.313, 0.440, 0.640, 0.890, 1.350, 1.800, 2.500, 3.500, 5, 7.100, 9.900)

付記：EHTでは $30\mu$ 秒角より大きな構造は検出できない。

- まあ、一般にVLBIはそういう観測装置です。  
(例えば太陽面を観測してもなにも見えない)
- (検出できないけど)本当は、M87のこの領域に大きな構造があるはず。
- 従って、見える構造はその程度のサイズblob構造であると予想できる。

なのに....

- もしEHTCが、それに気がつかず、「広く淡くべったりした」ジェット構造を期待して搜索していたら、「ジェットは見えない」と彼らが誤るのは当然の結果。



M87ジェット、  
従来のVLBI観測。  
そこでは、  
ジェットは  
「のっぺり」

中・下図：43GHz  
Hada et al. 2011

もしEHTCが、それに気がつかず、「広く淡くべったりした」ジェット構造を期待して搜索していたら、「ジェットは見えない」と彼らが思うのは当然の結果。

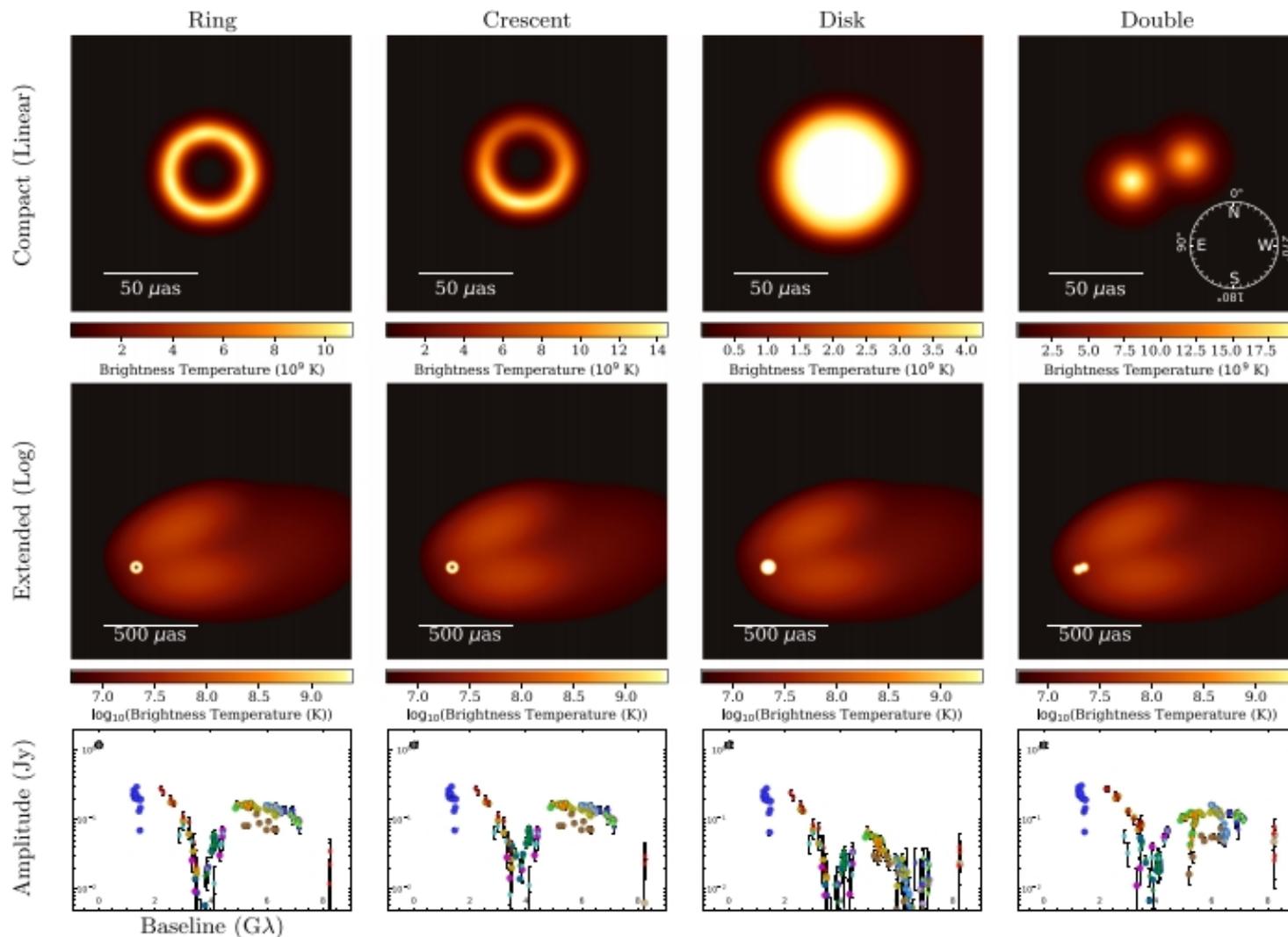
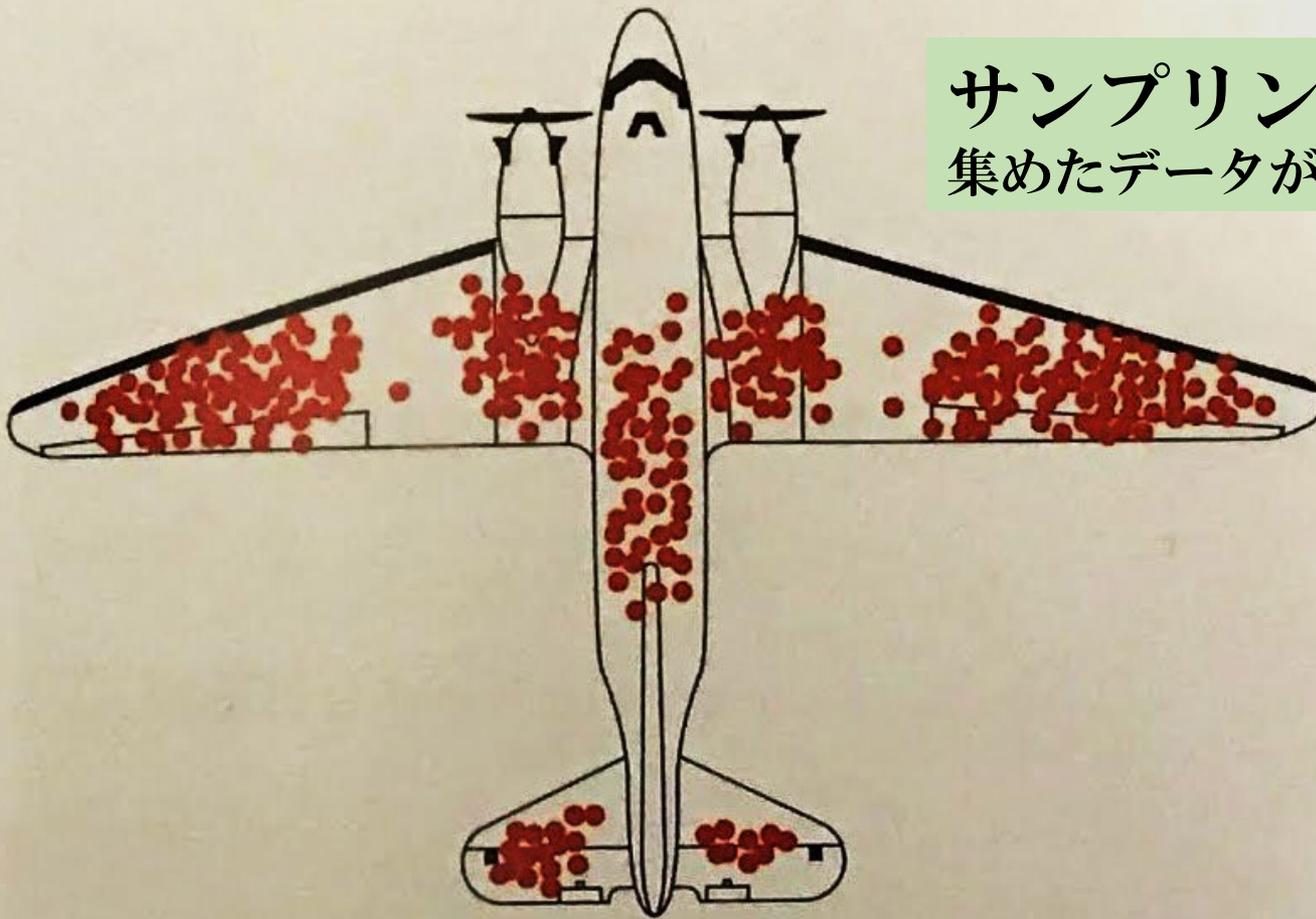


Figure 5. The four simple geometric models and synthetic data sets used in the parameter surveys (see Appendix C for details). Top: linear scale images, highlighting the compact structure of the models. Middle: logarithmic scale images, highlighting the larger-scale jet added to each model image. Bottom: one realization of simulated visibility amplitudes corresponding to the April 2011 observations of M87. We indicate the conventions for cardinal direction and position angle used throughout this Letter on the upper-right panel. Note that east is oriented to the left, and position angles are defined east of north.

# EHTCはなぜ間違えたか？

- 初期段階でジェット成分を見落とした。
- すると、間違ったモデル像でセルフキャリブレーションを繰り返すことに。(local minimumに、はまり込む)
- 結果、較正は不十分となり、データのコヒーレンスが回復できないまま、「暗いリング像」を撮像結果としてしまった。
- で、なんで40 $\mu$ asサイズのリングになるかという、それはデータ・サンプリングバイアスが作用したため。
- しかも総勢40名の撮像チームは、1名を除き「M87のBH像は40 $\mu$ as程度のサイズ」と期待してデータに取り組んでいた。(独立の複数のチームといっても、その性質は共通)。ジェットの研究者や実績ある熟練古手を含んでいない(ようである)。

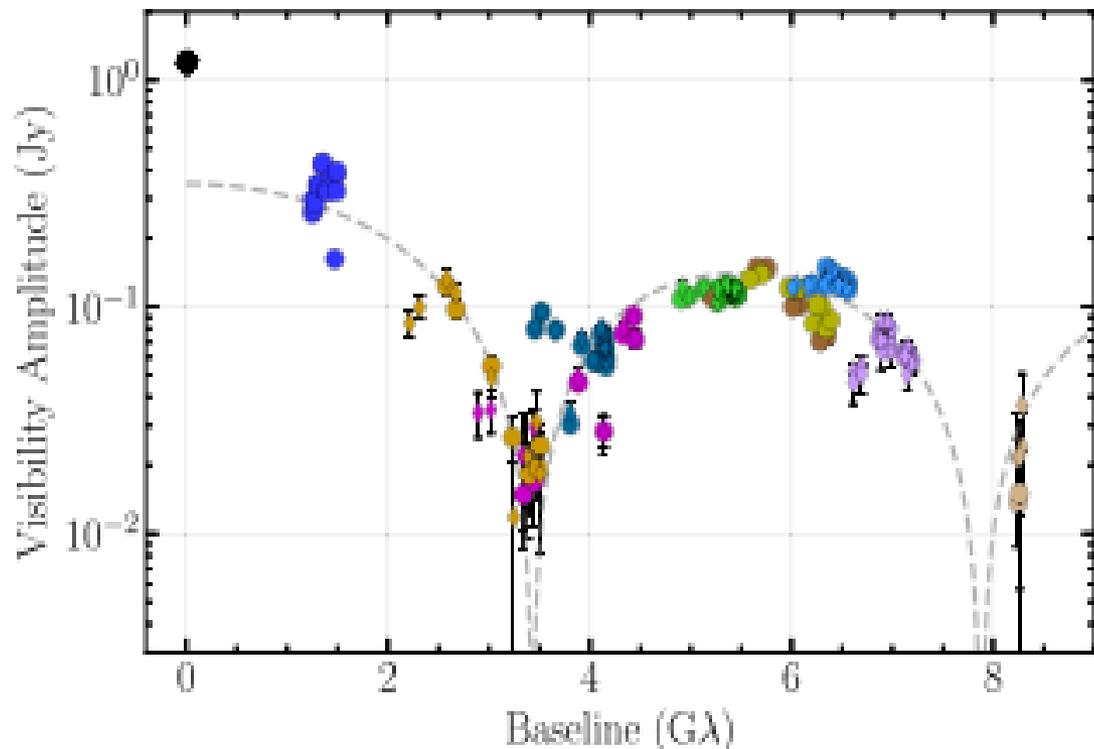
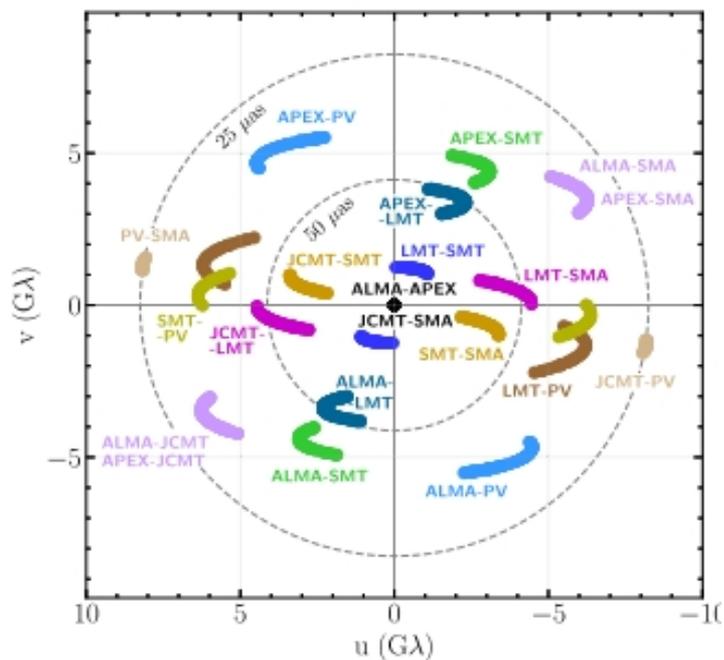
## サンプリングバイアス 集めたデータが偏っていたら？



赤のドットは、第二次世界大戦で帰還した爆撃機が、機体のどの部分に戦闘ダメージを受けていたかを示すしるしだ。帰還率を高めるために、あなたなら防護のための装甲板をどこに追加するだろうか？ 統計学者、エイブラハム・ウォールドは、ダメージの“ない”部分を強化するよう忠告した。データを収集することができたのは、帰還した爆撃機だけであり、ドットがない部分を攻撃された機体は帰還できなかったということだからだ。

# Data Sampling

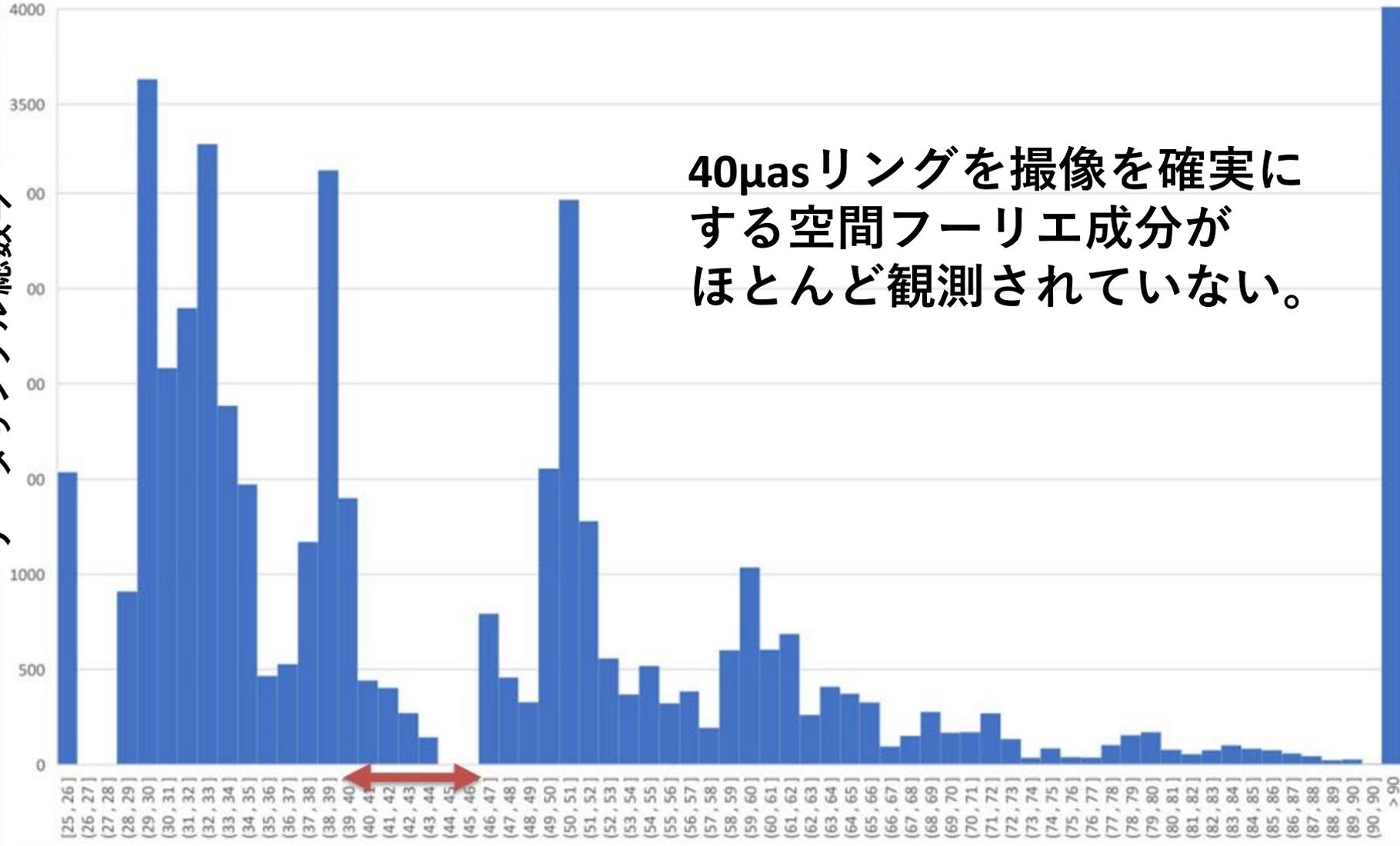
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 875:L1 (17pp), 2019 April 10



**Figure 2.** Top:  $(u, v)$  coverage for M87\*, aggregated over all four days of the observations.  $(u, v)$  coordinates for each antenna pair are the source-projected baseline length in units of the observing wavelength  $\lambda$  and are given for conjugate pairs. Baselines to ALMA/APEX and to JCMT/SMA are redundant. Dotted circular lines indicate baseline lengths corresponding to fringe spacings of 50 and 25  $\mu\text{as}$ . Bottom: final calibrated visibility amplitudes of M87\* as a function of projected baseline length on April 11. Redundant baselines to APEX and JCMT are plotted as diamonds. Error bars correspond to thermal (statistical) uncertainties. The Fourier transform of an azimuthally symmetric thin ring model with diameter 46  $\mu\text{as}$  is also shown with a dashed line for comparison.

uvd(フリッジ間隔の分布)

データサンプル総数→



40μasリングを撮像を確実にする空間フーリエ成分がほとんど観測されていない。

$Dring = 42 \pm 3 \mu as$   
(39 - 45)

空間フーリエ成分・フリッジ間隔 (μas 単位) →

40 $\mu\text{s}$ リングを撮像  
を確実にする空間  
フーリエ成分が  
ほとんど観測され  
ていない。

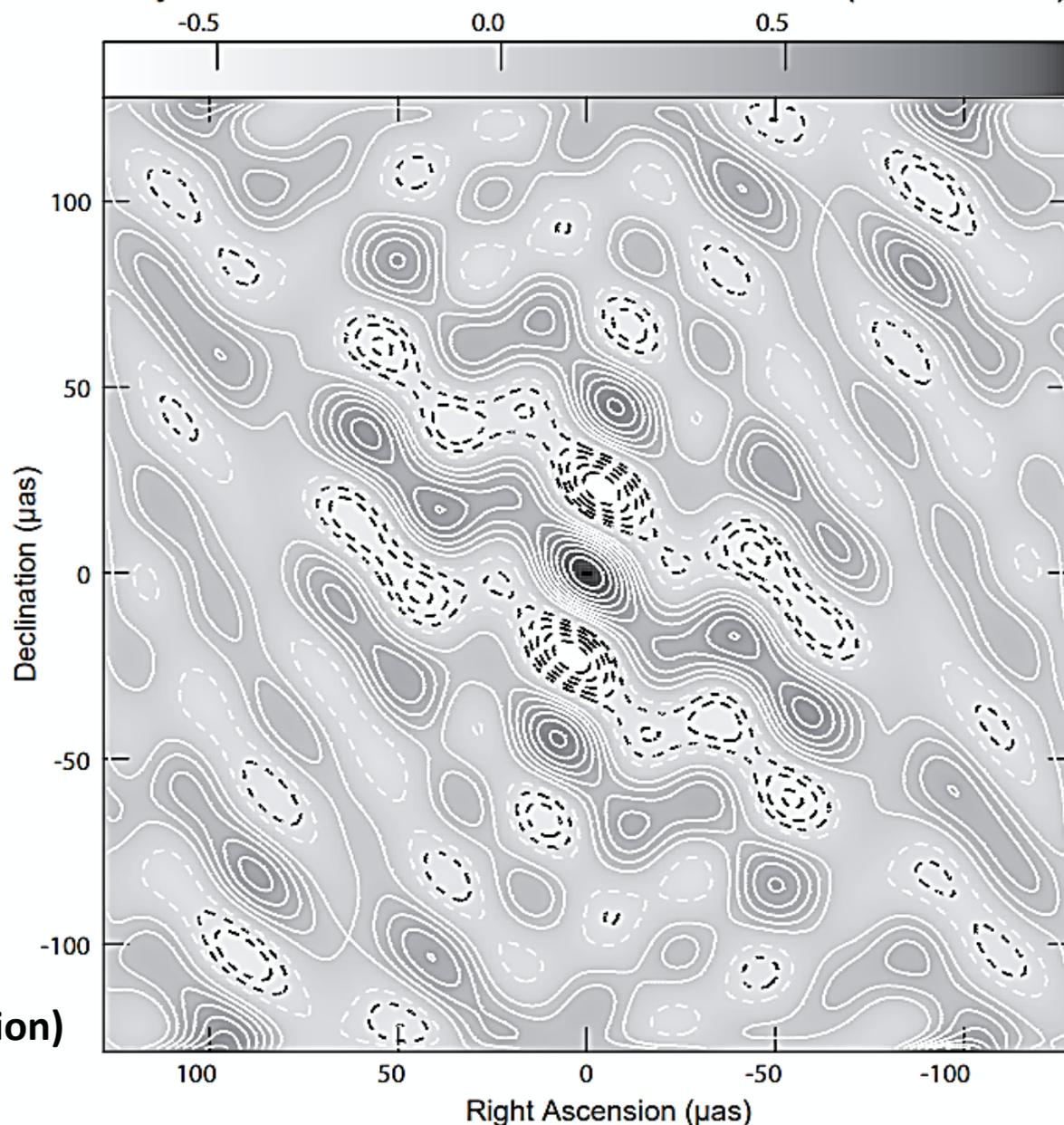


~40 $\mu\text{s}$ 間隔の  
構造が無いのに、  
存在するように  
見えてくる！

今回、初めて気がついた！

右図：  
Dirty Beam (point spread function)  
Pointを観測したとき、  
データをフーリエ変換して  
画像にしたもの

Dirty Beam of the EHT for M 87 Observation (229.07 GHz)



Grey scale brightness range= -0.693 1.000 JY/BEAM  
Cont peak brightness = 1.0000E+00 JY/BEAM  
Levs = 1.000E-01 \* (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

40 $\mu$ sリングを撮像  
を確実にする空間  
フーリエ成分が  
ほとんど観測されて  
いない。

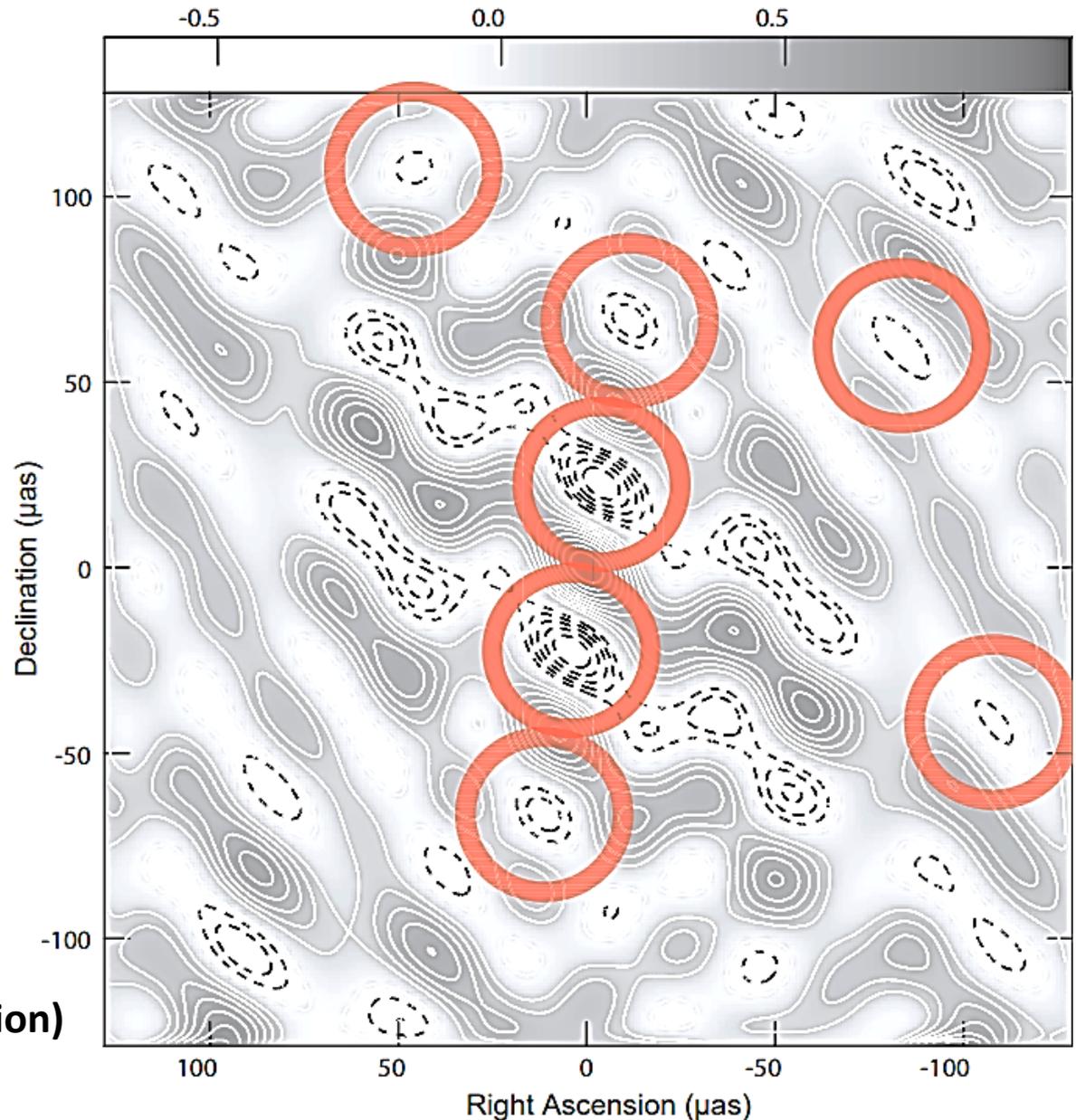


~40 $\mu$ s間隔の構造  
が無いのに、存在  
するように見えて  
くる！

今回、初めて気がついた！

右図：  
Dirty Beam (point spread function)  
..... Pointを観測したとき、  
データをフーリエ変換して  
画像にしたもの

Dirty Beam of the EHT for M 87 Observation (229.07 GHz)



Grey scale brightness range= -0.693 1.000 JY/BEAM  
Cont peak brightness = 1.0000E+00 JY/BEAM  
Levs = 1.000E-01 \* (-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

万一、dirty map（の一部）を初期像モデルとしたhybridmappingを行うと、もっと簡単にringが見えてしまう。

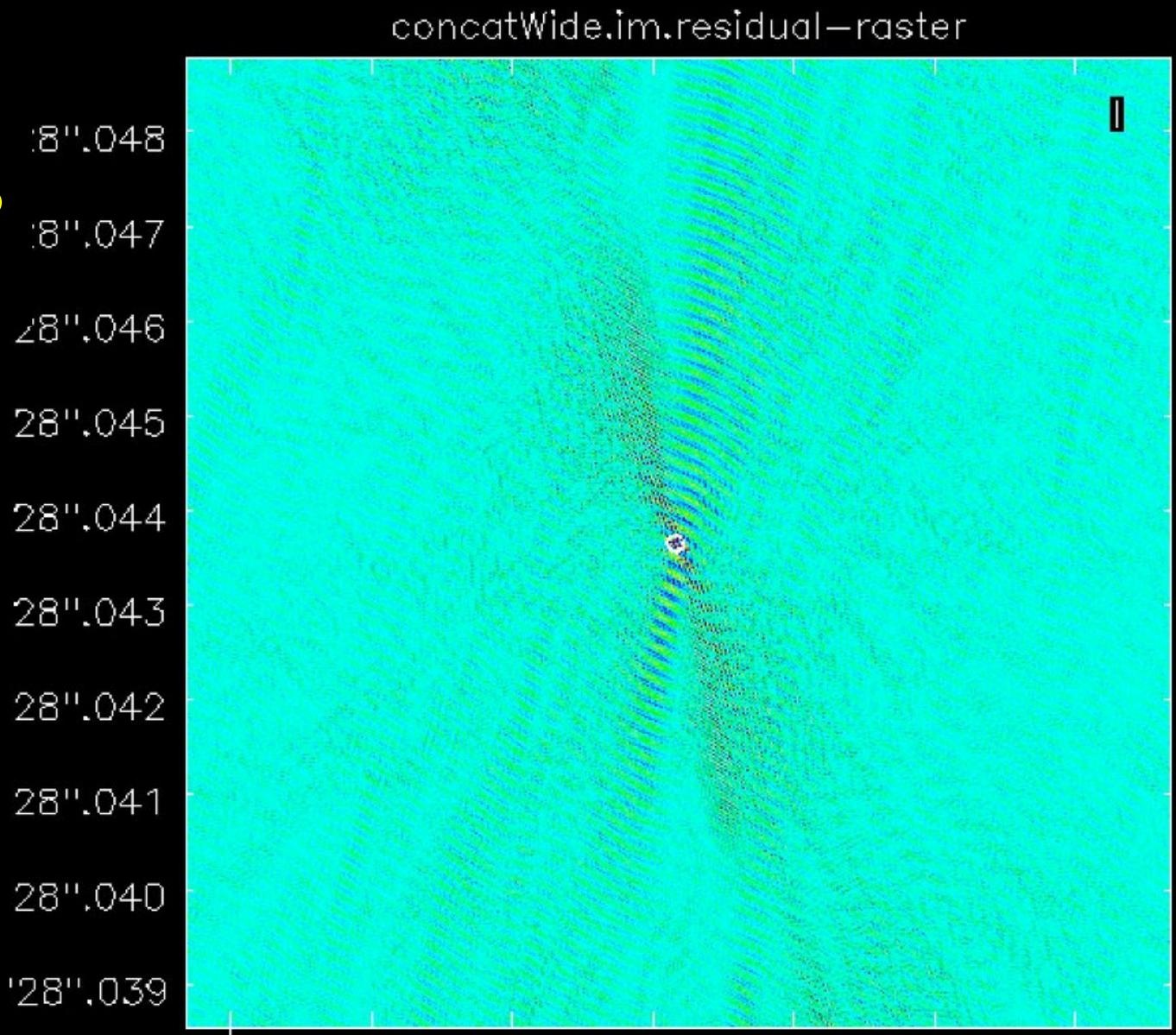
- dirty map：データとして得た空間フーリエ成分を用いて、画像にする。
- PSFと実像のconvolvedされた画像になっているので、そこには、「データサンプルの特性（バイアス）」が含まれる。  
(PSFが点とは大きく違う場合、大変やばい)

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

データサンプリング  
バイアスはこうして  
拾える。

Dirty Mapから  
始めた場合



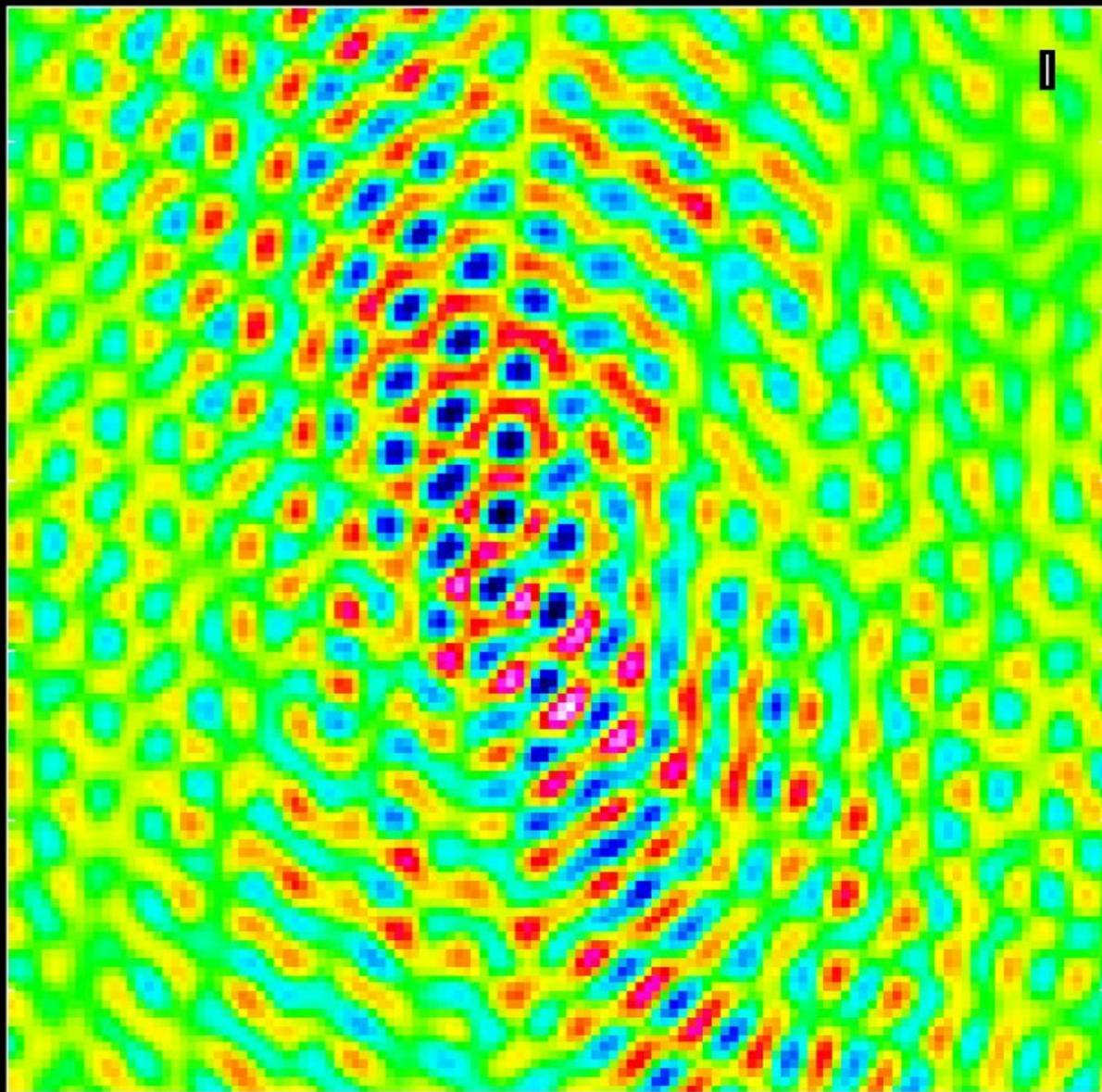
12<sup>h</sup>30<sup>m</sup>49<sup>s</sup>.4237 49<sup>s</sup>.4235 49<sup>s</sup>.4233 49<sup>s</sup>.4231  
Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9時間  
EHTデータの最初のフーリエ逆変換イメージ(dirty map)。見事にぐちゃぐちゃですがVLBI  
ってこんな感じなのか、という感想。視野中心付近に強いemissionが集まってるのだけは  
わかるのでその辺を雑に丸くマスク

# 実際の EHTデータの Dirty Map

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

concatWide.im.residual-raster

'0439  
'0438  
'0437  
'0436  
'0435  
'0434



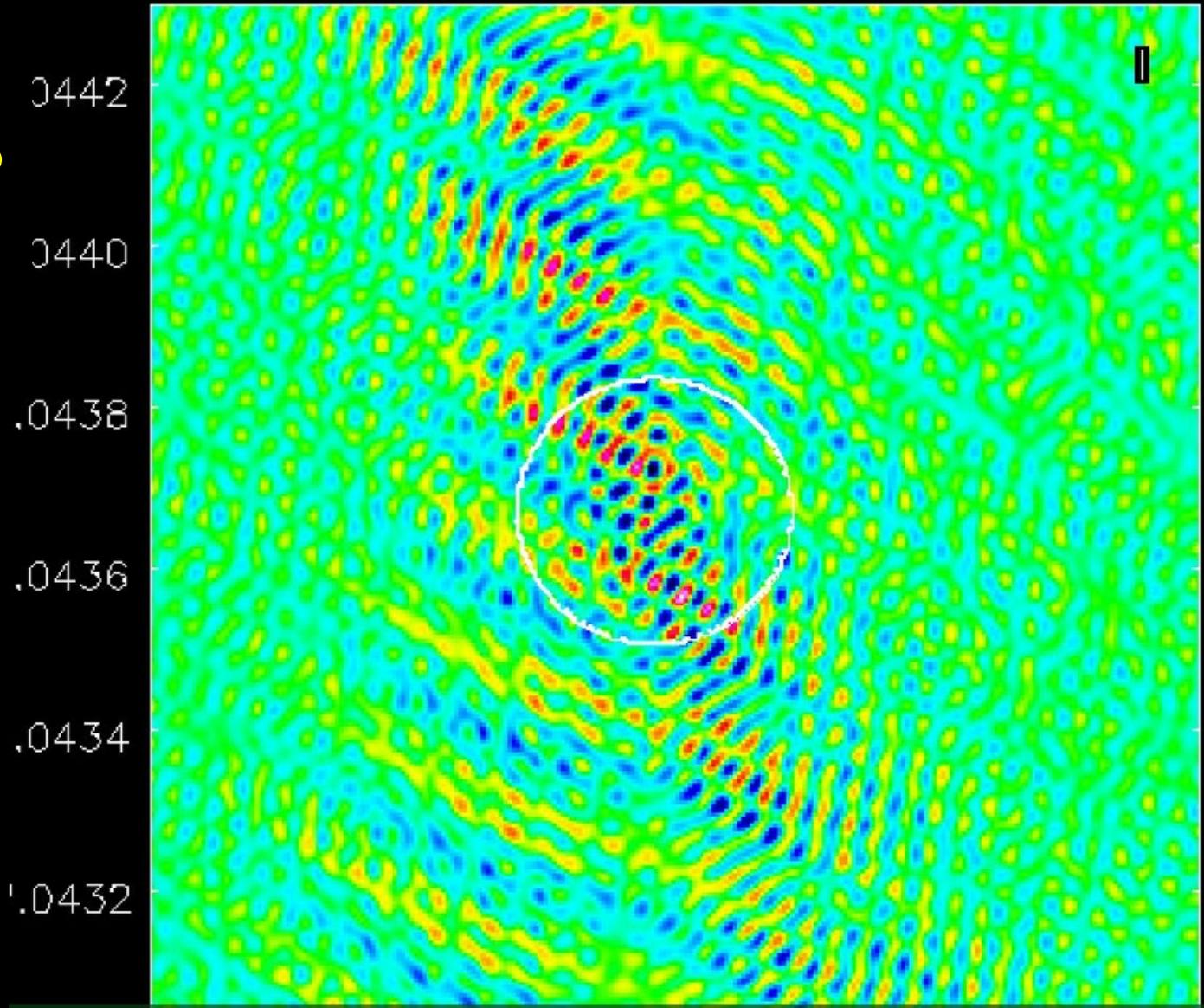
**Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2** · 9 時間

「真ん中あたりが明るい」というさっきの仮定が正しいとして位相情報を修正。明るい部分の拡大図はこんな感じ。集合体恐怖症の人はここで脱落します。

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

concatWide.im.residual-raster



**Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間**  
修正ループを続けます。あのあたりに何かリングが、という心霊写真的誘惑に打ち勝って大雑把なマスクを続けます。視野を大きく横切る斜めの線状の構造が見えますが、細かい構造が綺麗に点对称分布。明らかに偽物です。

# 実際の EHTデータの Dirty Map から

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

439

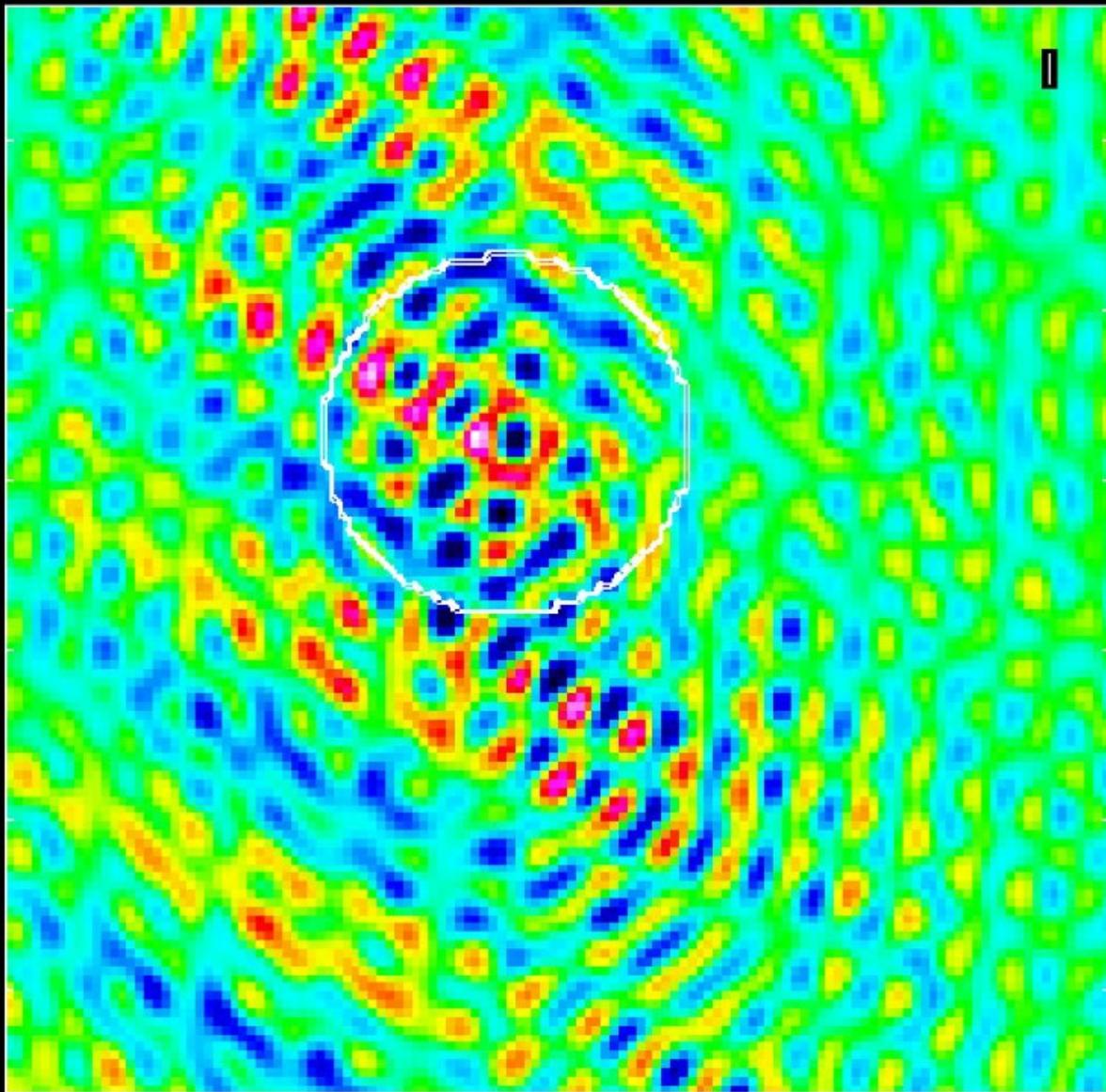
438

28".0437

6

5

3'28".0434



本当の像である  
なら、シフトは  
しないと思う。

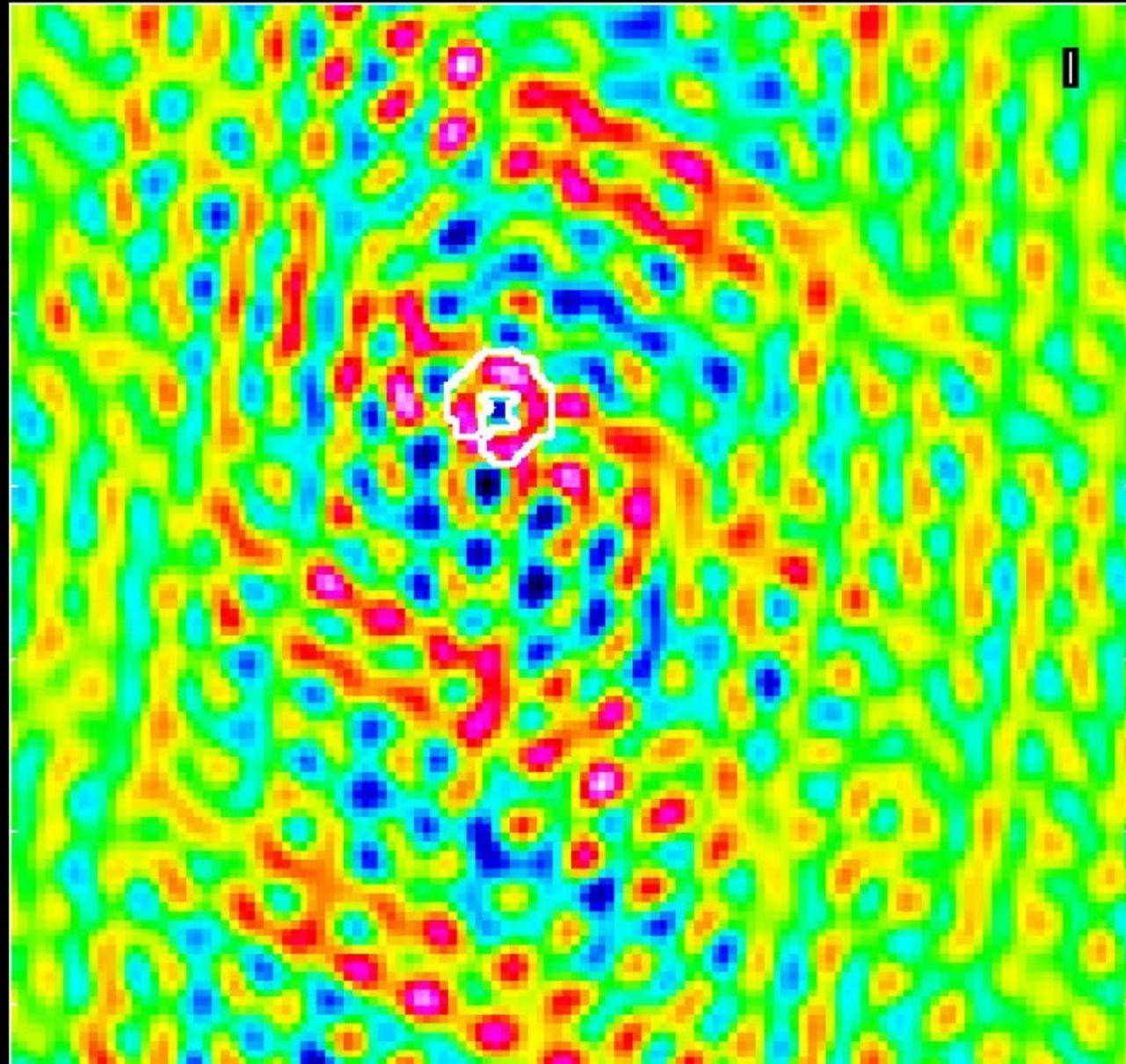
Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間

もう少し続けると明るくなってきた構造があったのでマスクの中心をそちらに移動

concatWide.im.residual-raster

実際の  
EHTデータの  
Dirty Mapから  
by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

28".0438  
28".0437  
28".0436  
28".0435  
28".0434



Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間

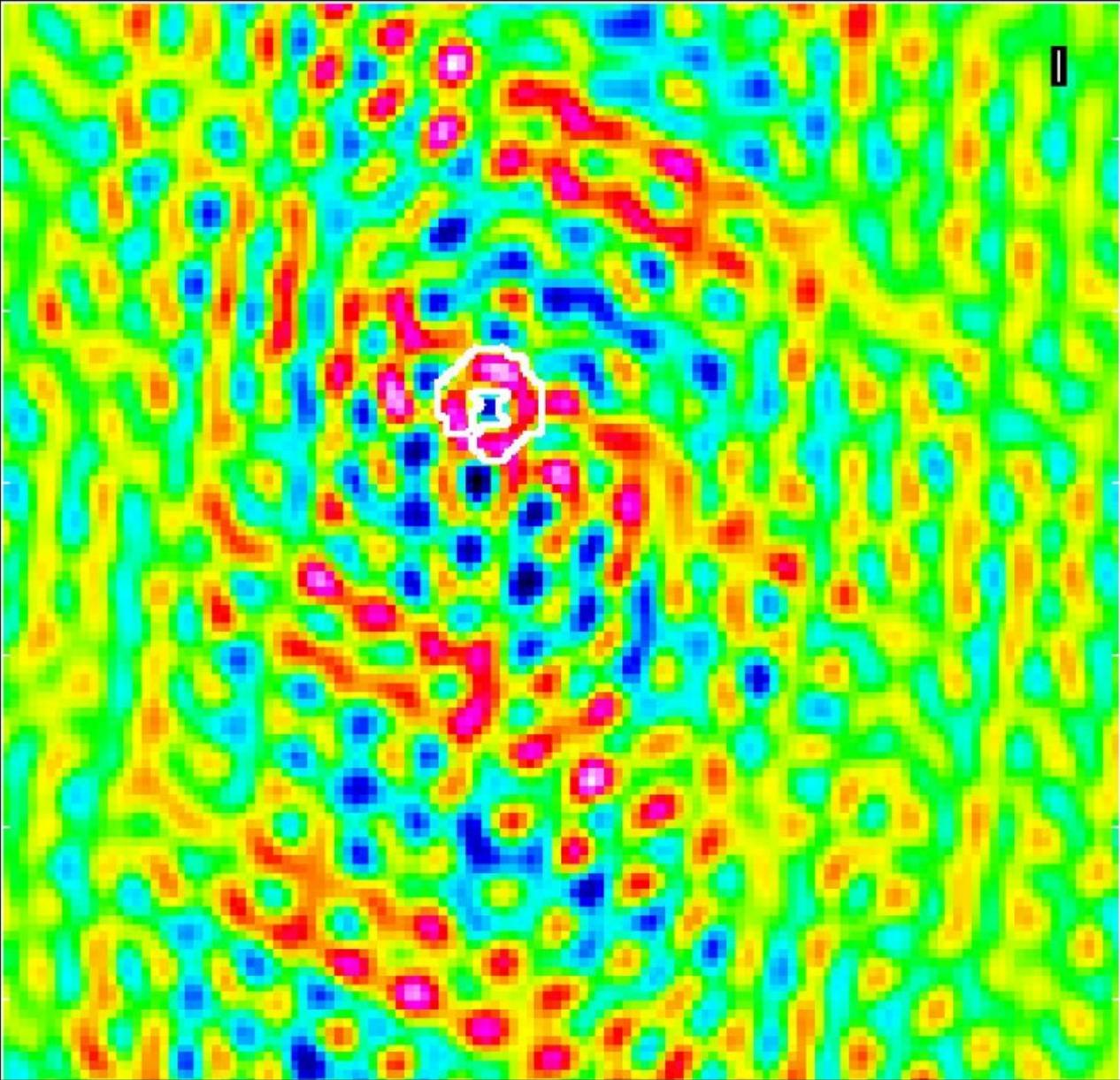
この辺りからは化石職人の慎重さで、目立って明るい点だけにマスクをかけていきます。

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

concatWide.im.residual-raster

3".0438  
3".0437  
3".0436  
3".0435  
8".0434

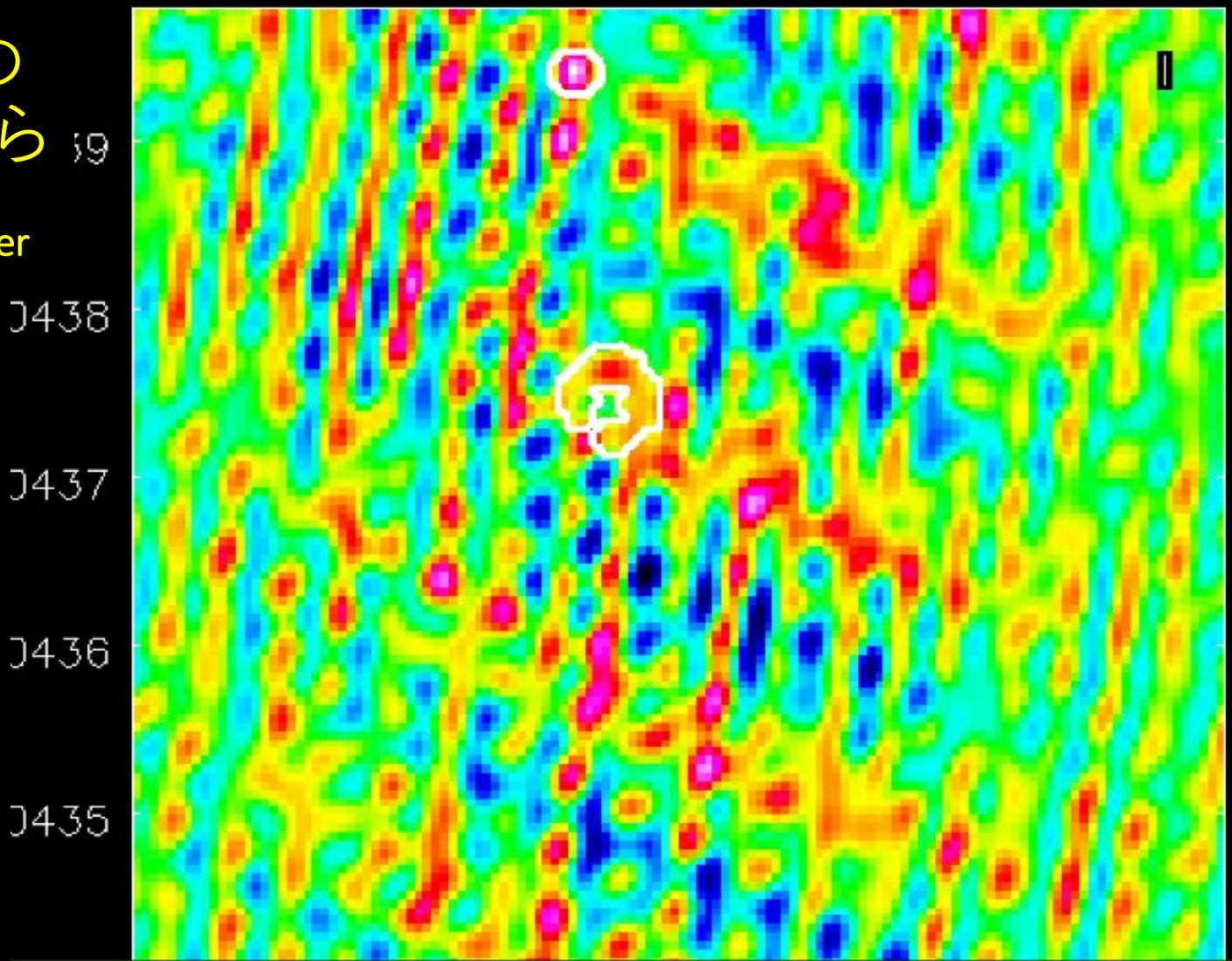


Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間  
この辺りからは化石職人の慎重さで、目立って明るい点だけにマスクをかけていきます。

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

concatWide.im.residual-raster



0434  
**Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2** · 9 時間  
たくさんあった円状の構造は消えて、縞々の幾何学模様が目立ち始めました。ほとんどノイズと思われますが、明るい点は拾っていきます。ここまでは多分やりすぎなのでもう少し浅いcleanで止めておくのが大人かもしれません

実際の  
EHTデータの  
Dirty Mapから  
by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

concatWide.im.residual-raster

"0439

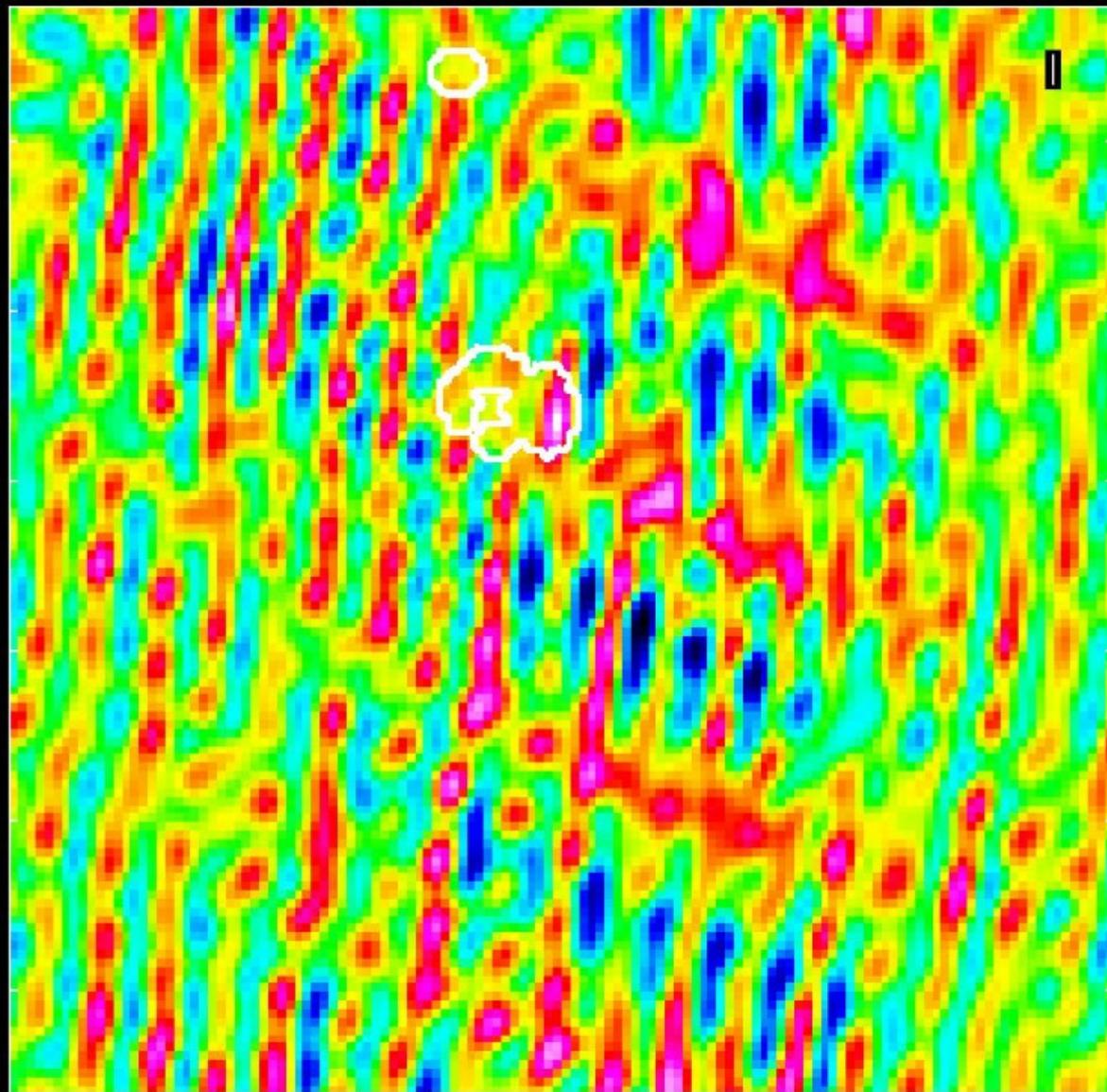
"0438

"0437

"0436

"0435

"0434

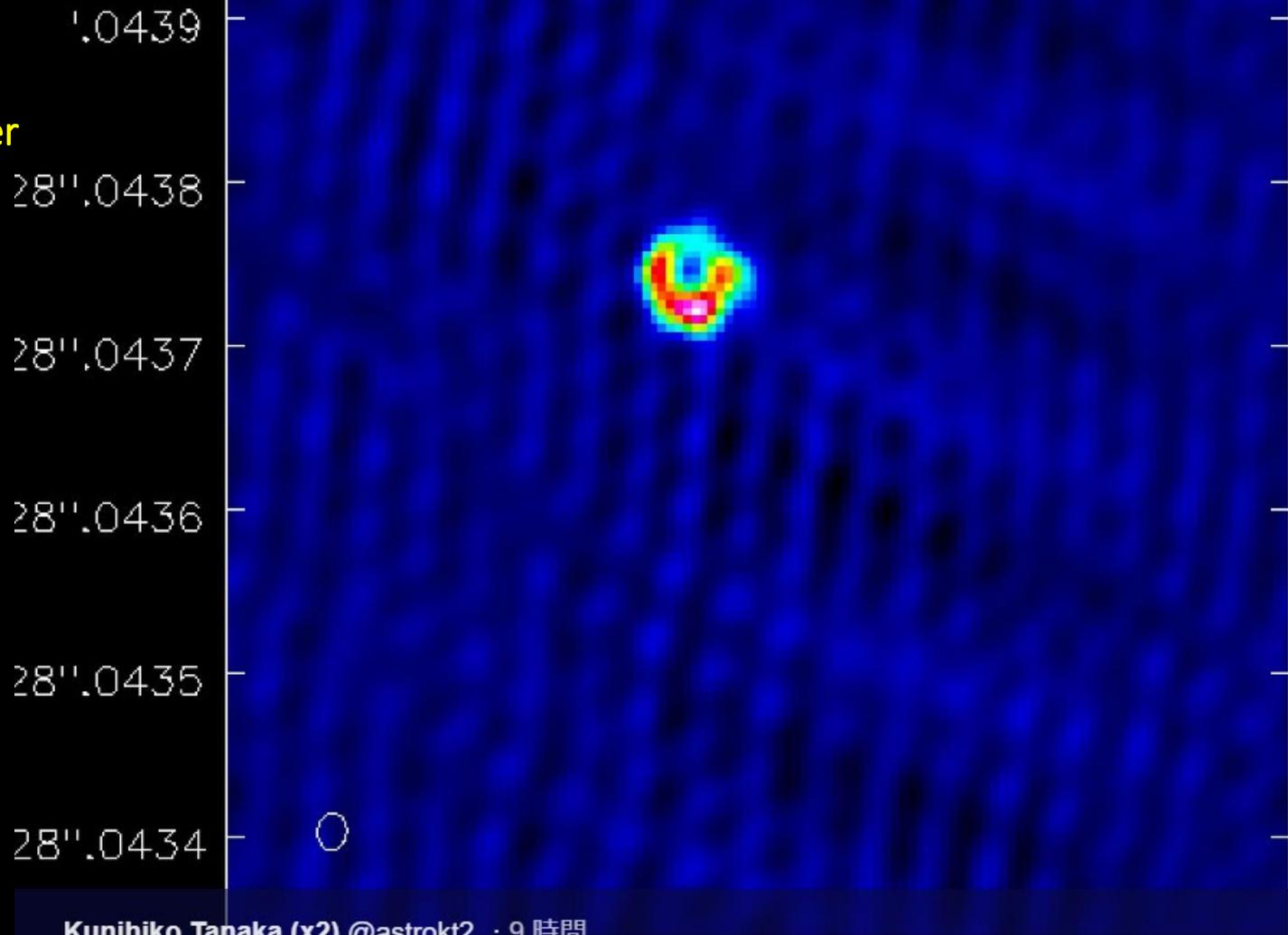


Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間

たくさんあった円状の構造は消えて、縞々の幾何学模様が目立ち始めました。ほとんどノイズと思われますが、明るい点は拾っていきます。ここまでは多分やりすぎなのでもう少し浅いcleanで止めておくのが大人かもしれません

# 実際の EHTデータの Dirty Map

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter



Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2 · 9 時間

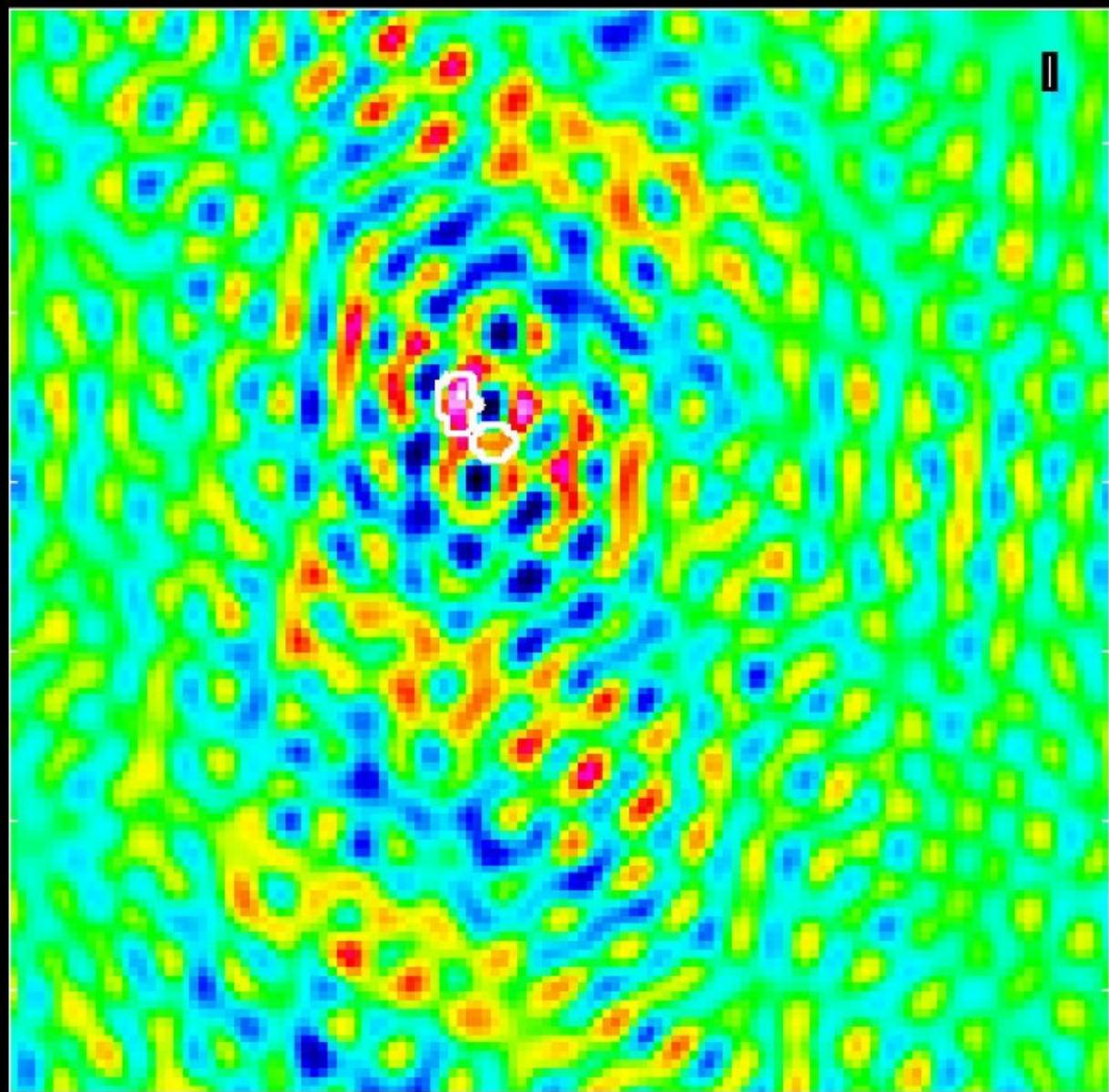
ドーナツ美味しい！ 縞模様から拾った点はほとんど意味がなかったようです。昼間の結果とは輪の上の強弱分布が多少結構異なっており、修行の足りなさが露呈しています。この辺は主観がまじるcleanの泣き所でしょうか。

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.  
using CASA on twitter

.0439  
28".0438  
28".0437  
28".0436  
28".0435  
23'28".0434

concatWide.im.residual-raster



**Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2** · 9 時間  
この辺りからは化石職人の慎重さで、目立って明るい点だけにマスクをかけていきます。

# 実際の EHTデータの Dirty Mapから

by Tanaka/Keio Univ.

using CASA on twitter

3".0439  
3".0438  
3".0437  
3".0436  
3".0435  
3".0434  
3".0433

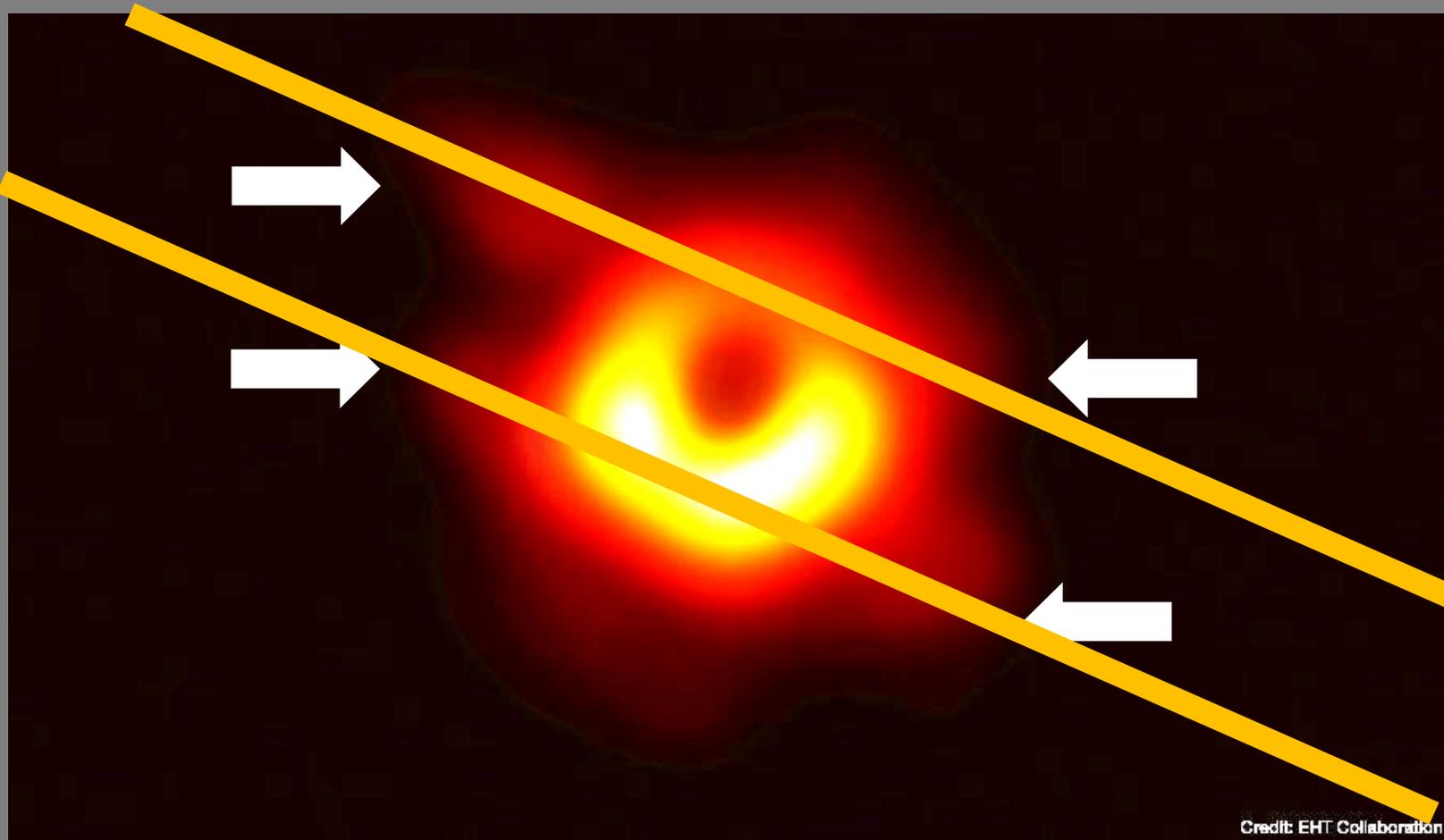
データ・サンプリング・バイアスを  
ひろって40 $\mu$ asサイズのリングが  
できた (Dirty Mapから始めた場合)。



**Kunihiko Tanaka (x2) @astrokt2** · 19 時間

そんな場合じゃない気もするんですが、EHTの公開データで遊んでました。結構ざっくりマスクして適当にやってもこれくらいのリングが。いやそんなことやってる場合じゃない気もするんですが(2回目)

EHTCの結果：不可解な点の一つ  
(謎の尻尾、 $40\mu\text{as}$ 間隔の平行線が引ける。



“データ サンプリング バイアス”の見事な例。  
サイド・ローブ(回折像部分) を実像に混ぜてしまった。

# まとめ

- EHTCによる報告「 $40\mu\text{as}$ サイズのリング」と「ジェット resolved-out(消失)」は較正不足とデータサンプリングバイアスが原因のartifacts.
- ジェットについて全く新しい観測結果あり。230GHzにおいて、
  1. ジェットはもちろん存在 ( $43,86\text{GHz}$ と同じ広がり)
  2. ジェットとコアは完全分離 (途中に暗いgap)
  3. ジェットのヘリカル運動も検出したみたい。
  4. コアには少なくとも二つの輝点。Binary SMBH ?

注： $30\mu\text{as}$ より大きな構造はEHTでは検出できない。きっと広がった構造があるはずだけど。230GHzにおいてOptically thin になったのではない。