

ブラックホールの 「リング」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

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マイクロ秒角以下)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マイクロ秒角くらいの大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マイクロ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。

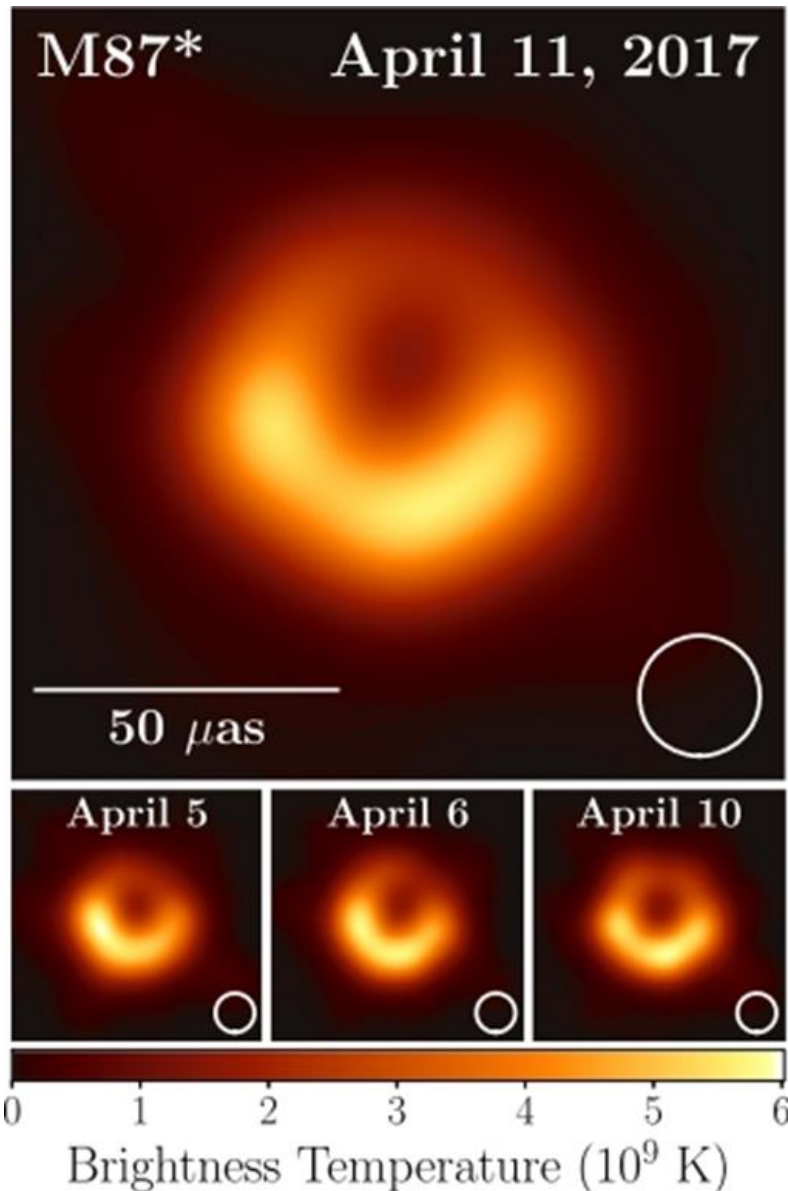
(b)我々の結果はデータと撮像結果の整合性において、EHTCのリング像よりも、はるかに良い一致度を示す。

(c) EHTC のリングはEHTC 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 PFS/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 残差
 - 4-1 ~~頑健性~~堅牢性
 - 4-2 他バンドとの関係
5. まとめ

1. EHTC の解析法と撮像結果

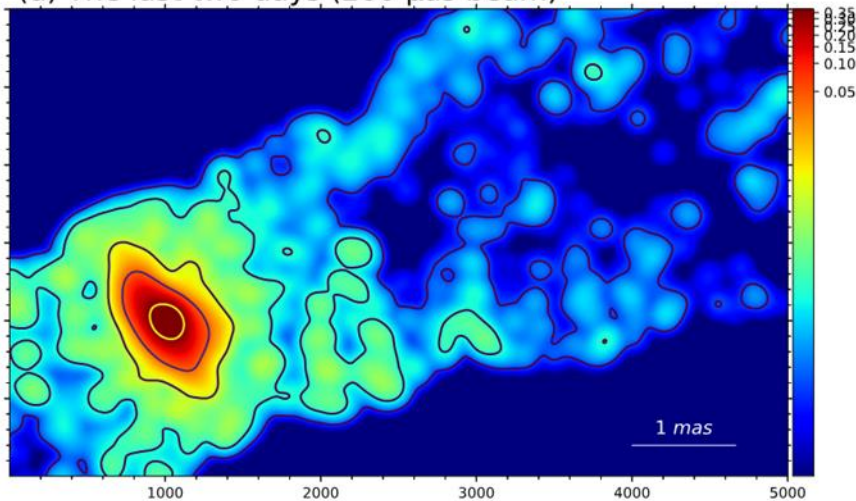


複数の方法 - CLEAN法 (DIFMAP), RML (regularized maximum likelihood)法, 複数のチームで解析を行った。
予測サイズのブラックホールシャドウと大きさが一致するリング像を得た。

有名なジェット構造がみえない。
最大輝度が60億度、従来の1/3と暗い。
結果の像の示す電波強度は観測データのその半分程度 (~ 500 mJy) しか再現されない。

2. 我々の解析手順と撮像結果

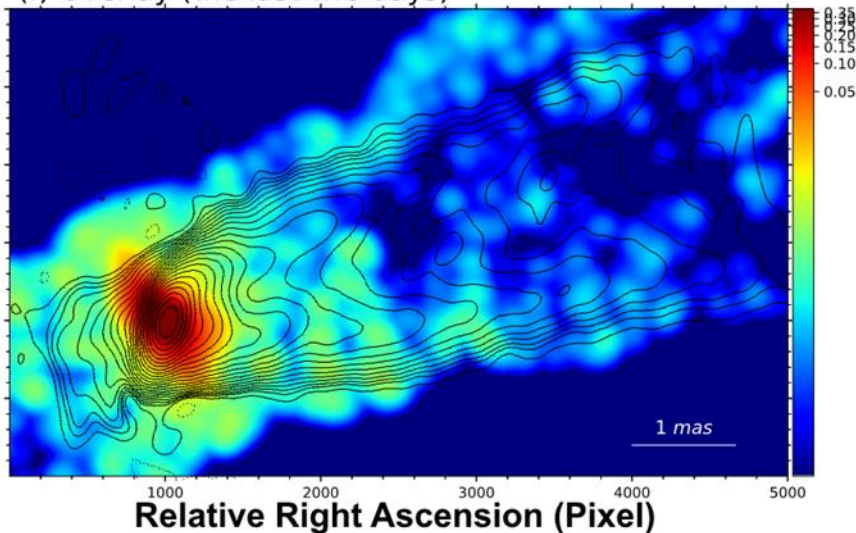
(d) The last two days (200 μ s beam)



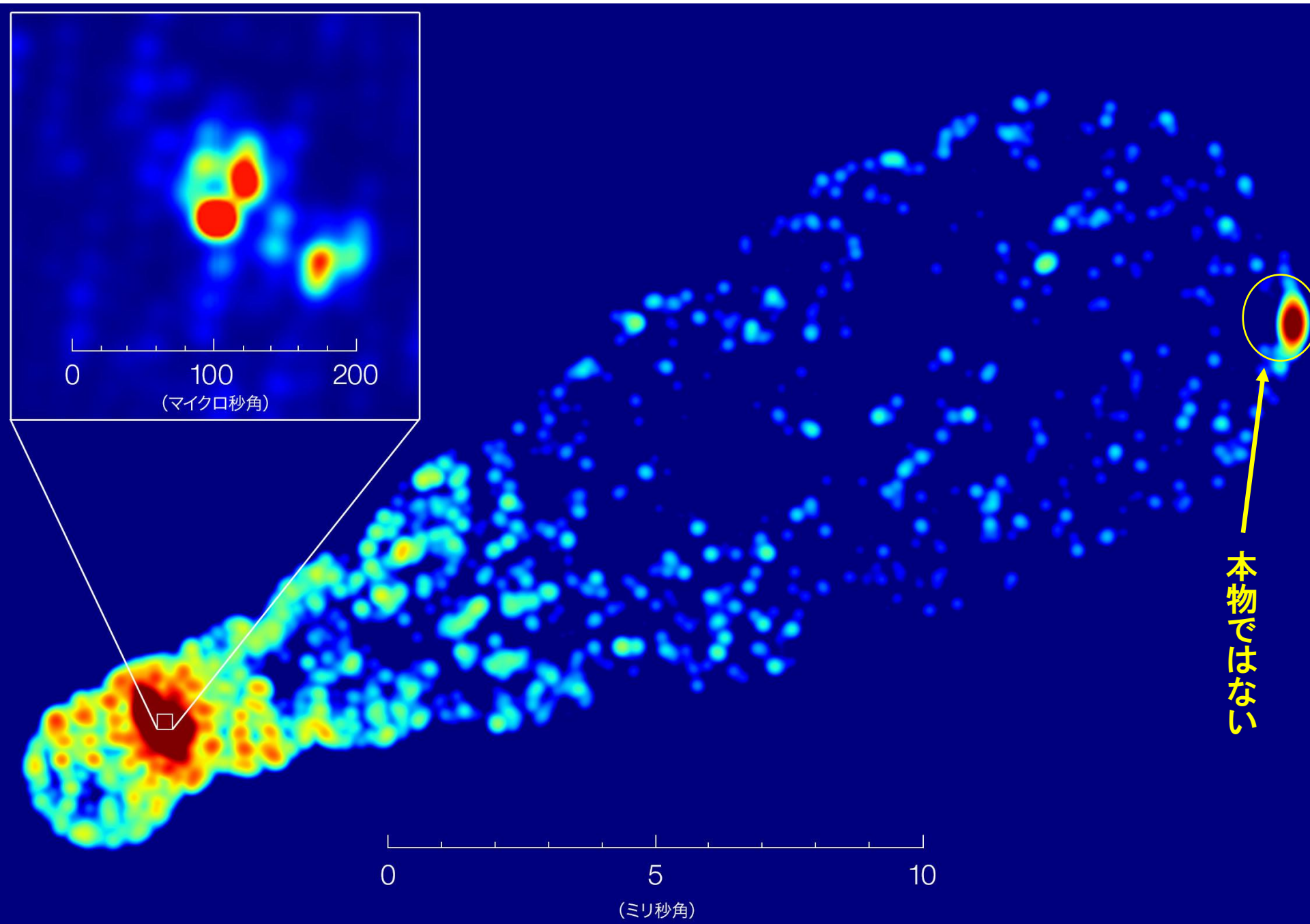
CLEAN法(AIPS)を用いた。
中心部にリングではなく、コア、ノット
構造を見いだした。

さらに、有名なジェット構造を検出した。
最大輝度は従来の観測結果と一致。
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。

(f) Overlay (the last two days)



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

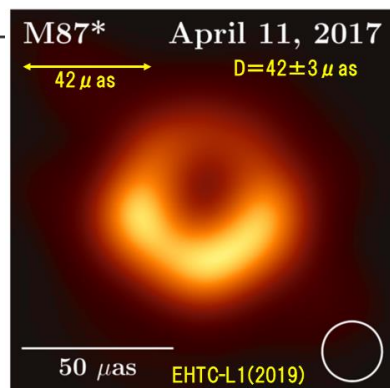


3. 何故 EHTC はリングを得たのか

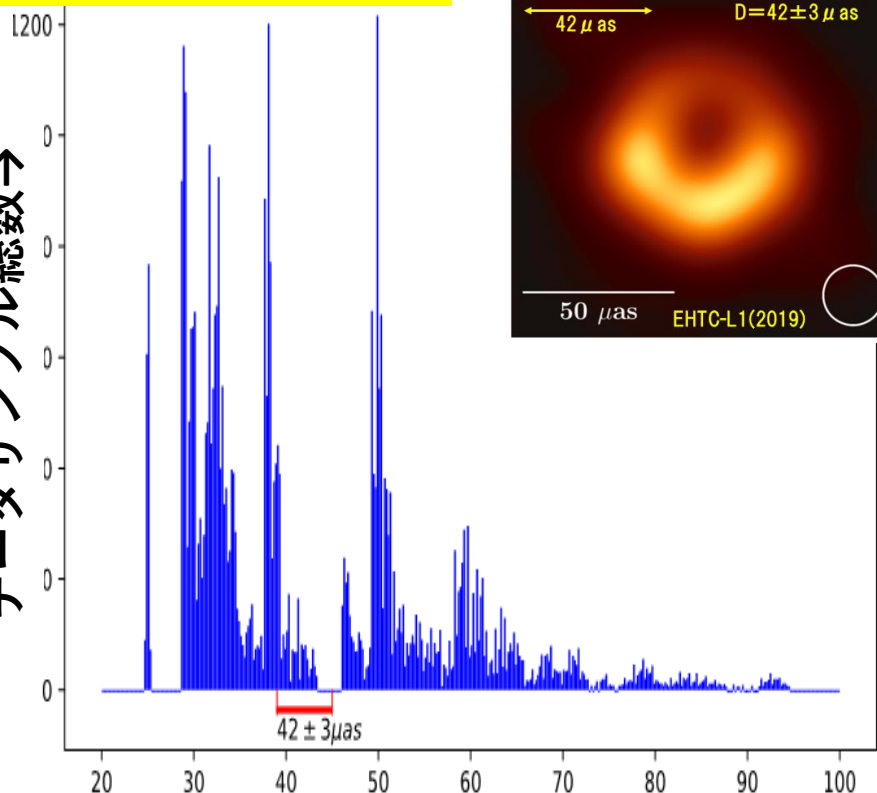
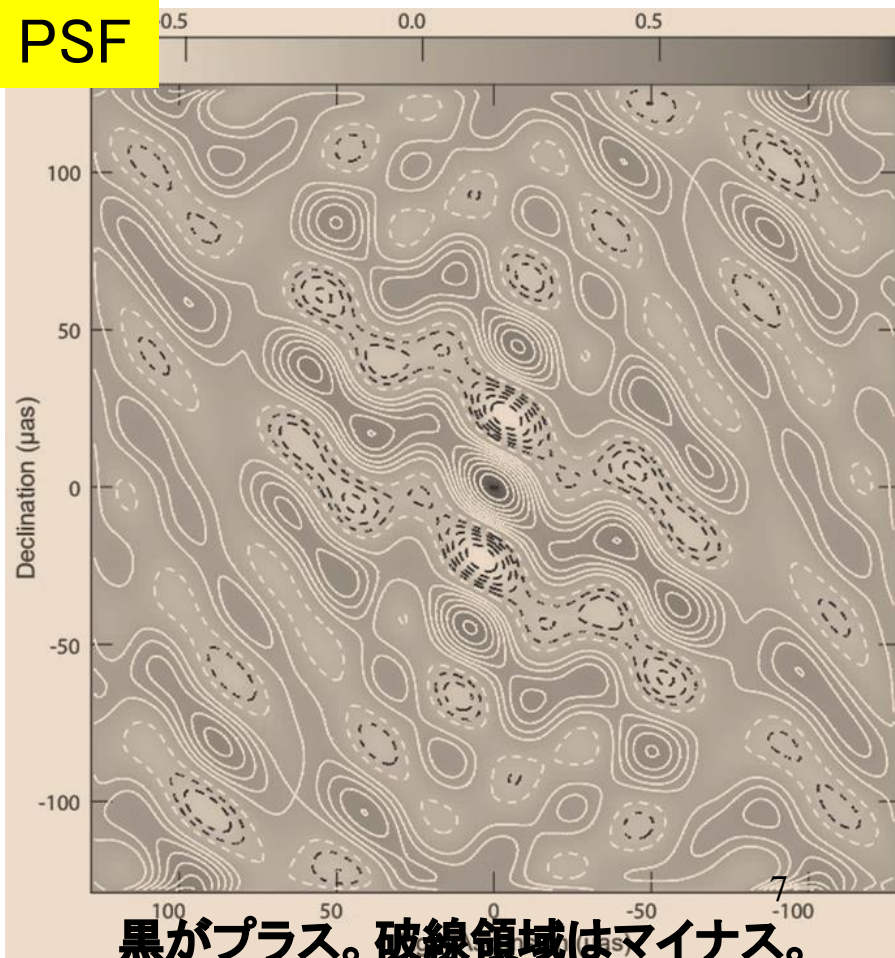
3-1 u-v カバレッジと PSF/Dirty Beam

取得データには約40マイクロ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マイクロ秒角サイズの構造を誤って像に取り込みやすい。

取得データ分布



PSF



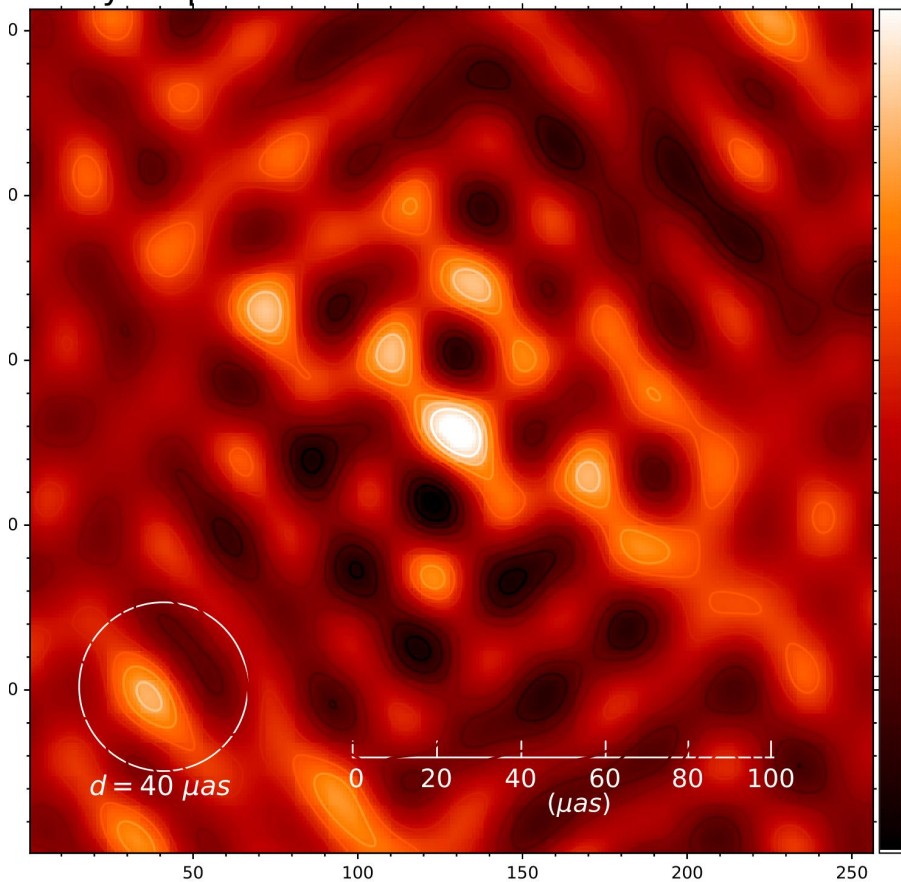
空間フーリエ成分 (μas 単位) →

3. 何故 EHTC はリングを得たのか

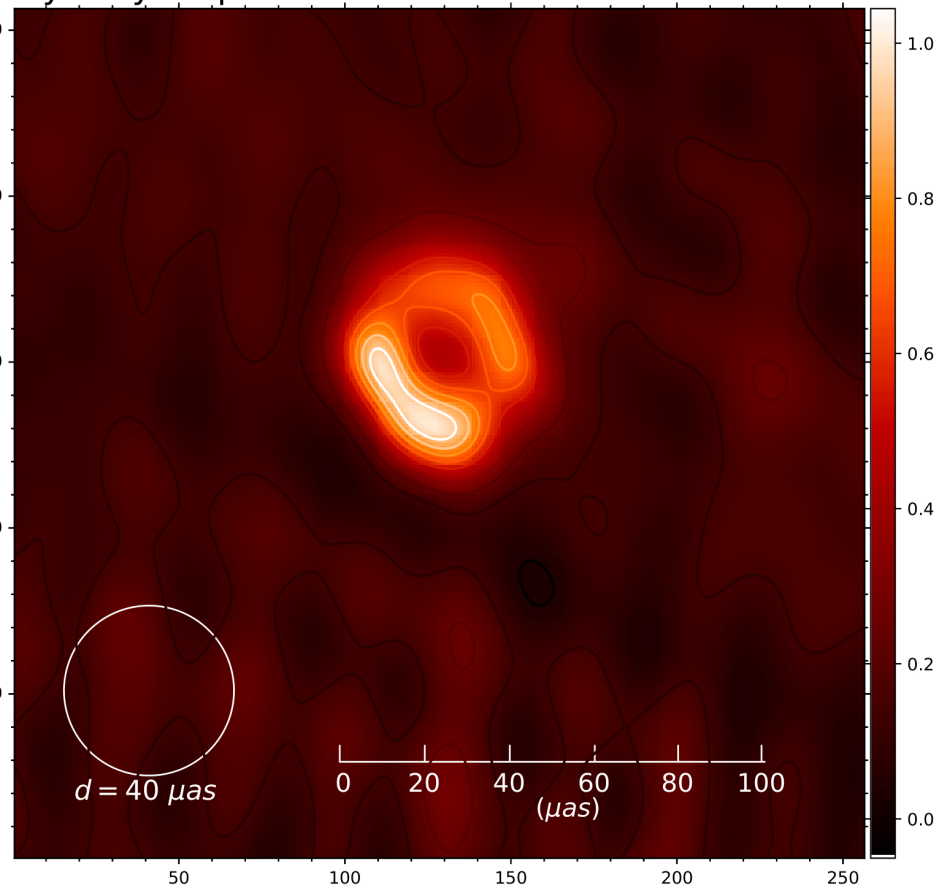
3-2 我々が(間違った)手順で行ったリングの「再現」

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、40マイクロ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

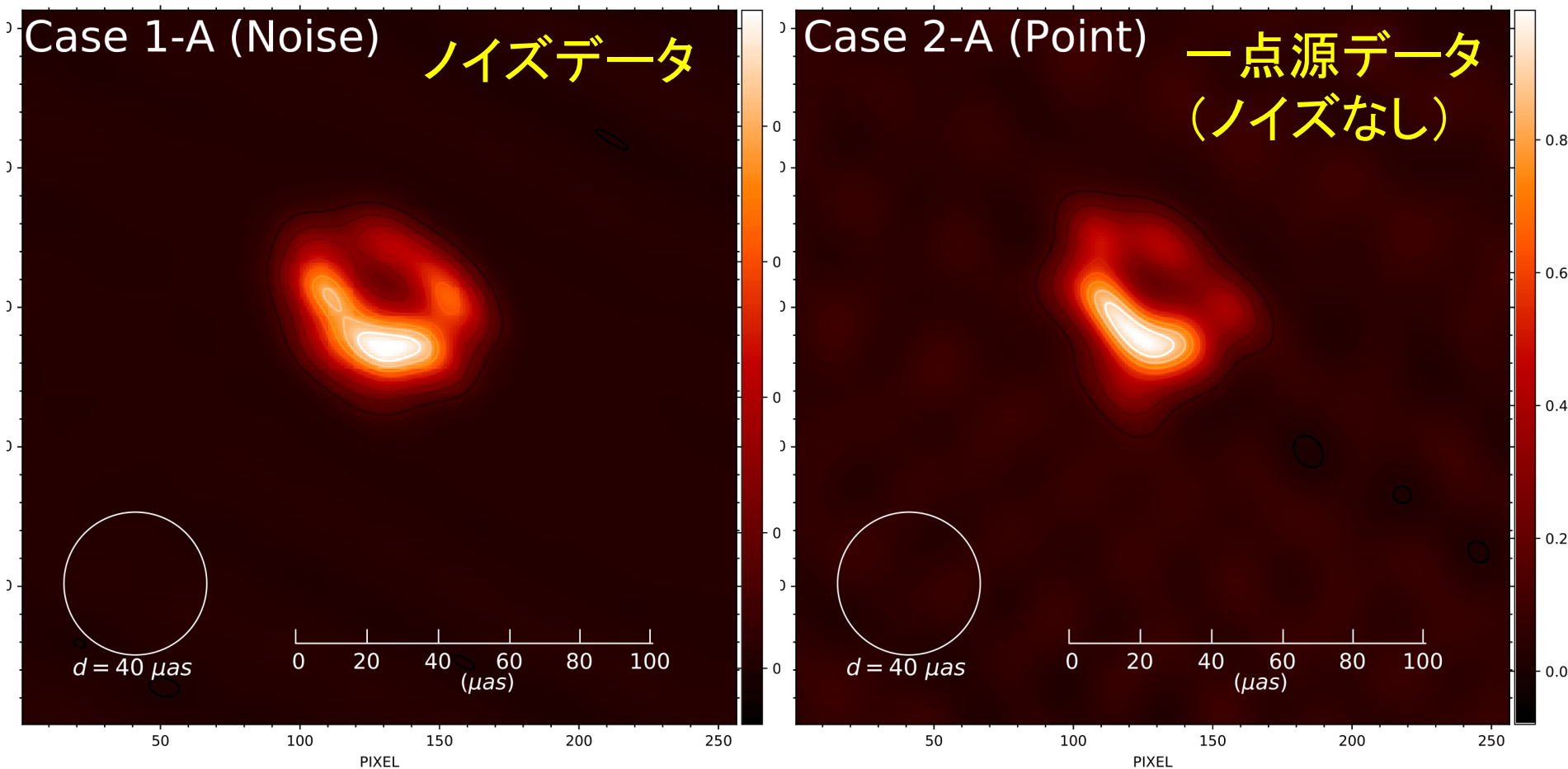


3. 何故 EHTC はリングを得たのか

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40マイクロ秒角サイズのリングができる。

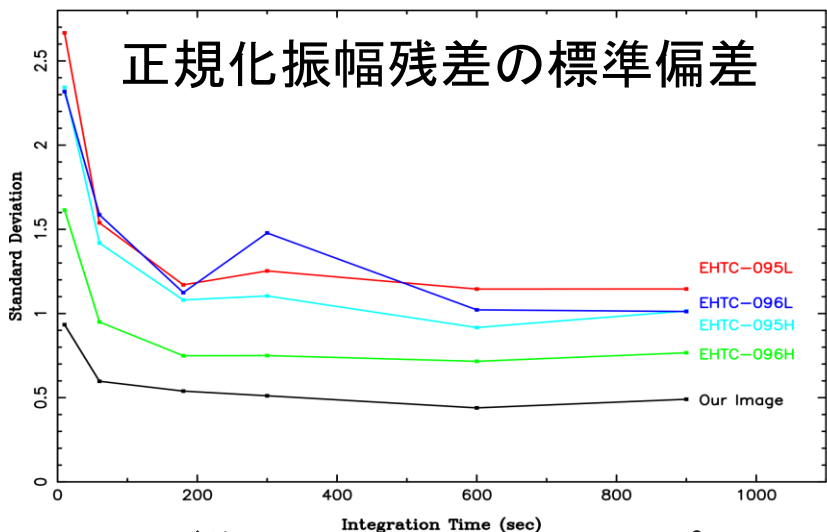
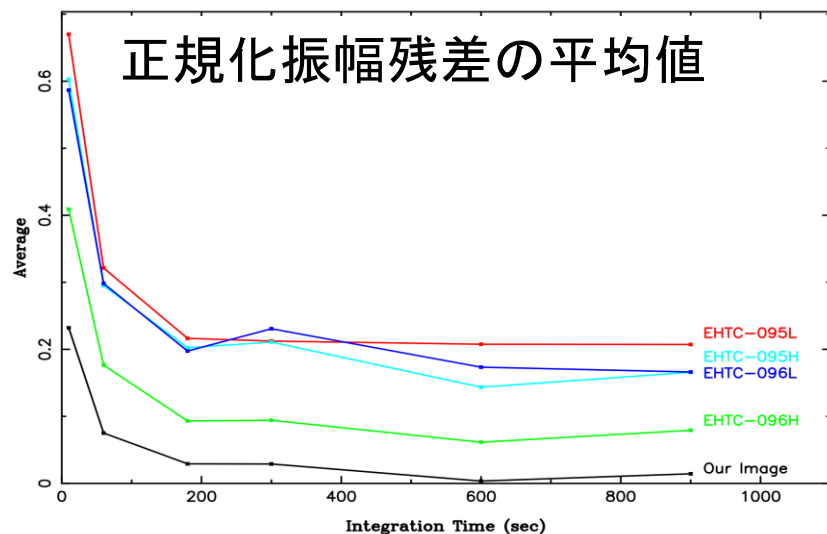
(EHTC のリングはEHTの観測局配置から”でがち”な構造である)



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)

(第1日、2日のデータに対して)



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。

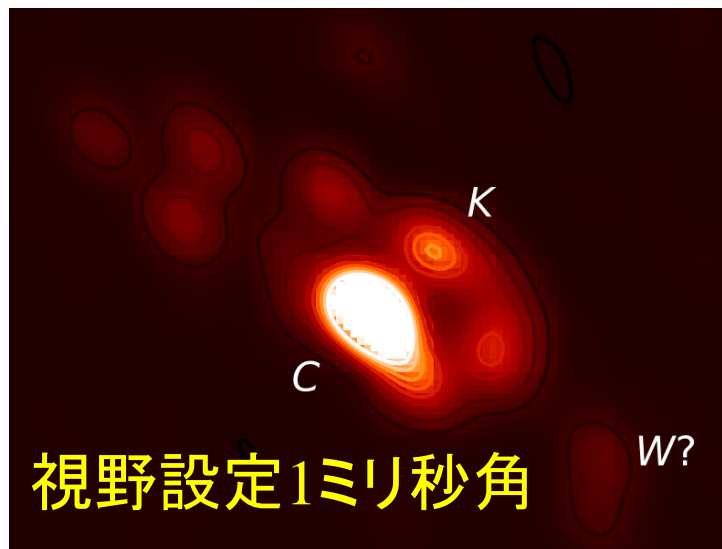
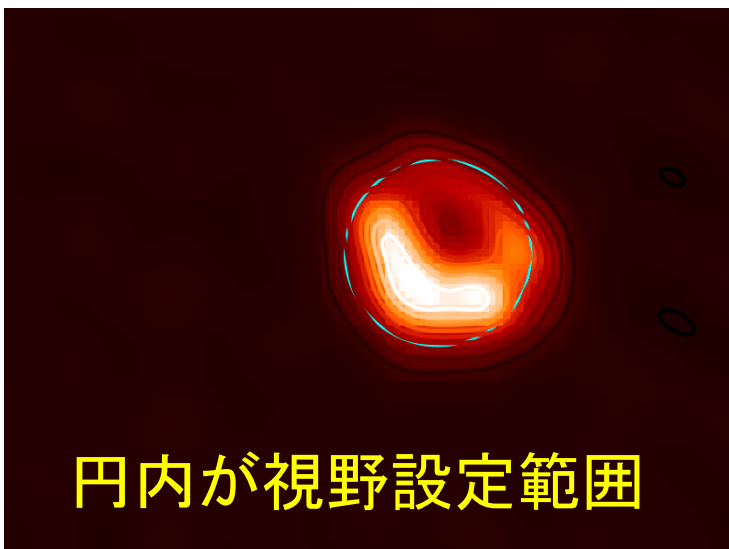
平均値、標準偏差ともに、我々の像の「残差」が一番小さく、像結果とデータの間の整合性が一番よいことがわかる。

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

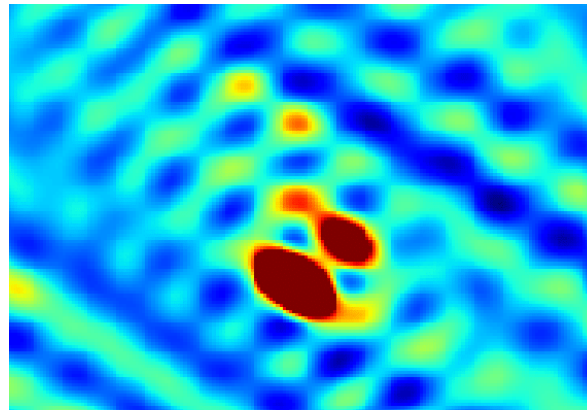
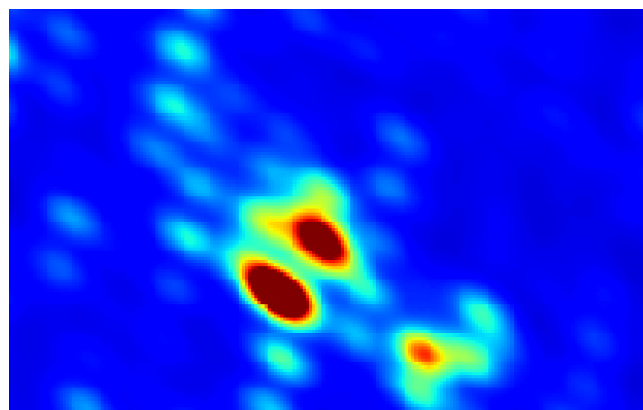
4. どちらの絵が「より良い」か

4-2 ~~頑健性~~堅牢性 (解析する視野を変えて、像は生き残るか)

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マイクロ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マイクロ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)

M87 VLBA 43 GHz
Average of 23 Images

Beam $0.43 \times 0.21 \text{ mas} \sim 60 \times 29 R_s$

5 mas $\sim 0.4 \text{ pc} \sim 700 R_s$

@ 17° viewing angle, 5 mas $\sim 1.35 \text{ pc} \sim 2400 R_s$ along jet.

0 100 200
(マイクロ秒角)

本物ではない

43GHzの像(左上; Walkerら2018)と矛盾しないジェットを検出

5. 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マイクロ秒角以下)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マイクロ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マイクロ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EHTC の観測局配置から“でがちな”構造である。

以下のページは参考資料として。
実際のプレスリリースでは使わなかった。

参考1.

ブラックホールの観測研究

- 小田稔(X線天文学)が最初の研究者。
- 20世紀末に宇宙におけるブラックホールの存在は観測的に証明された。
- 野辺山45m電波望遠鏡が重要な観測をした。
- 2020年にはノーベル物理学賞の対象となる。

観測からブラックホールの存在を 初めて言ったのは小田稔

(1923年2月24日 - 2001年3月1日)

ジャッコーニ博士が中心となって「ウフル」衛星が打ち上げられると、さっそく小田先生たちは、この衛星を使って「はくちょう座X-1」を観測しました。すると1秒ほどの短い時間で、バタバタとそのX線の強度が変動していたのです。小さいハツカネズミはちょこちょこ動き、大きなゾウはゆっくりと歩きます。そこで、これほど速く変動する天体は、きっと小さいだろうと想像できます。しかも普通なら出ないX線がここからは出ている……となれば、単に小さいだけでなく、特別な天体でありましょう。そこで1971年に小田先生たちは、「はくちょう座X-1はブラックホールかもしれない」という論文をお書きになりました。これが、実在の天体とブラックホールを結びつけた、世界で初めての成果になったわけです。



20世紀末には
ブラックホールの存在が
確認された。

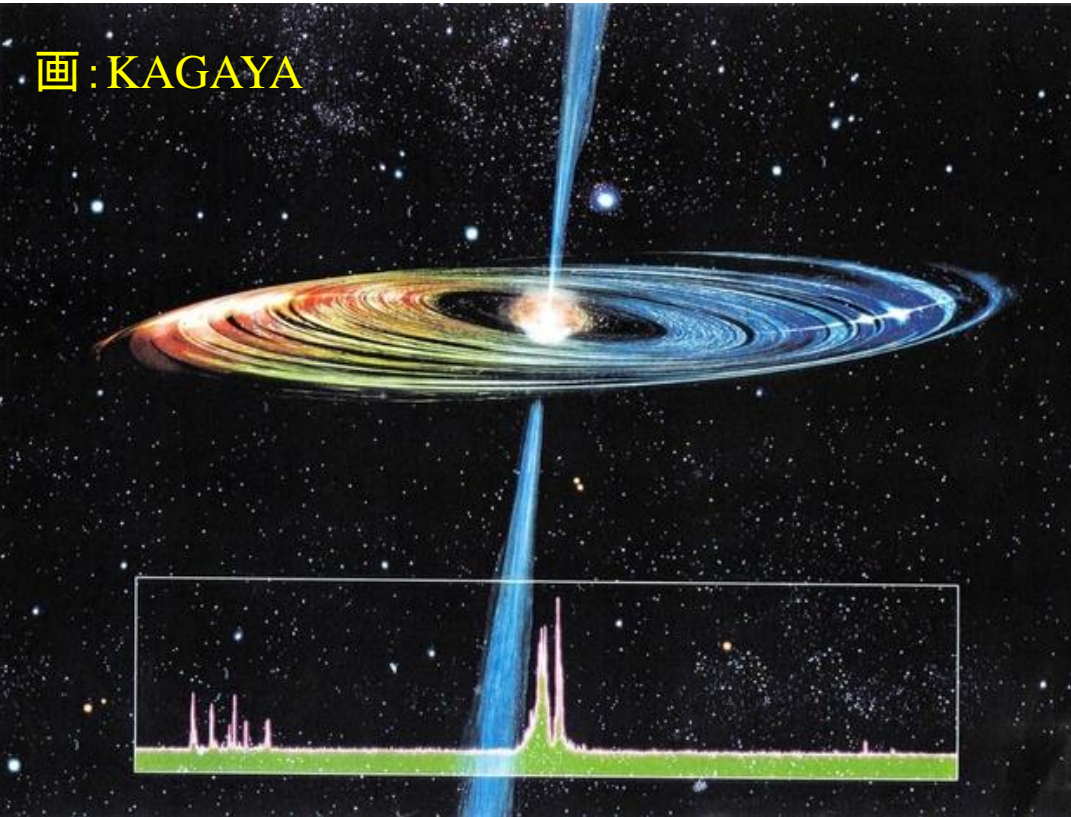
NGC4258 (りょうけん座の銀河)

SgrA* (我々の銀河系中心)

M87 (おとめ座銀河団の盟主)

りょうけん座の銀河、NGC4258中心核
の水分子ガス的高速回転円盤。
中心にブラックホールがある（想像図）

画:KAGAYA



国立天文台野辺山45m電波望遠鏡
による、高速水メーザの発見が契機
となる。(Nakai他1993)



SgrA*

(我々の銀河系中心)

地上の望遠鏡による赤外線観測でとらえた我々の銀河中心像。

(CGではありません。観測結果です！)

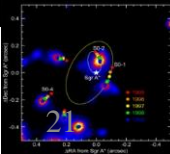
秒速千kmを越える高速で星が軌道運動していることがわかった。これにより、我々の銀河中心SgrA*は400万太陽質量のブラックホールであることがわかった。

1992

10 light days



我々の銀河中心での星の運動(Genzel et al.03)



科学雑誌Newton (ニュートン) 公式 @Newton_Science · 10月6日
《2020年ノーベル物理学賞は「ブラックホールに関する研究」へ!》
今年のノーベル物理学賞は, Roger Penrose博士, Reinhard Genzel博士,
Andrea Ghez博士の3氏に決まりました!


THE NOBEL PRIZE
The Nobel Prize
@NobelPrize

(2020/10/6)

BREAKING NEWS:
The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the 2020 #NobelPrize in Physics with one half to Roger Penrose and the other half jointly to Reinhard Genzel and Andrea Ghez.

Illustrations: Niklas Elmehed

THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2020



Roger Penrose
“for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

Reinhard Genzel **Andrea Ghez**
“for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy”

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

参考2.

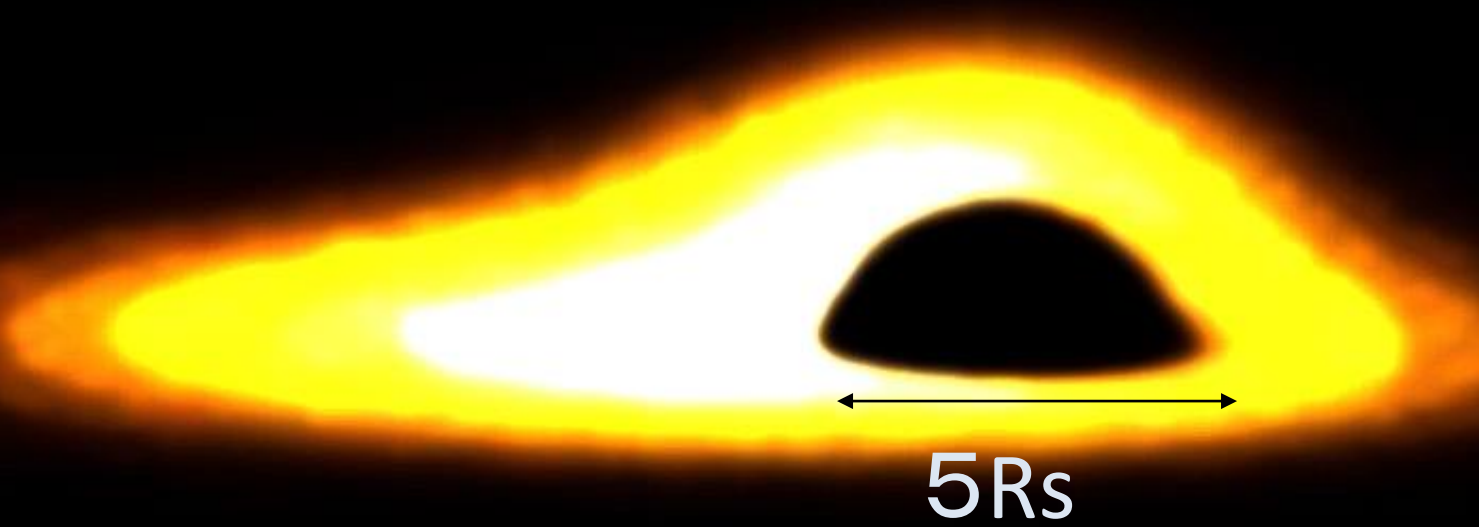
ブラックホールの見え方

- EHTCが示すようなリングとは限りません。
- ブラックホールの回転軸、ブラックホールを取り巻く降着円盤の種類、それを我々がどの方向から見るか、で形は変わる。
- その理論研究では古くから日本人が寄与。

理論的計算からのブラックホール像(例)



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。

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

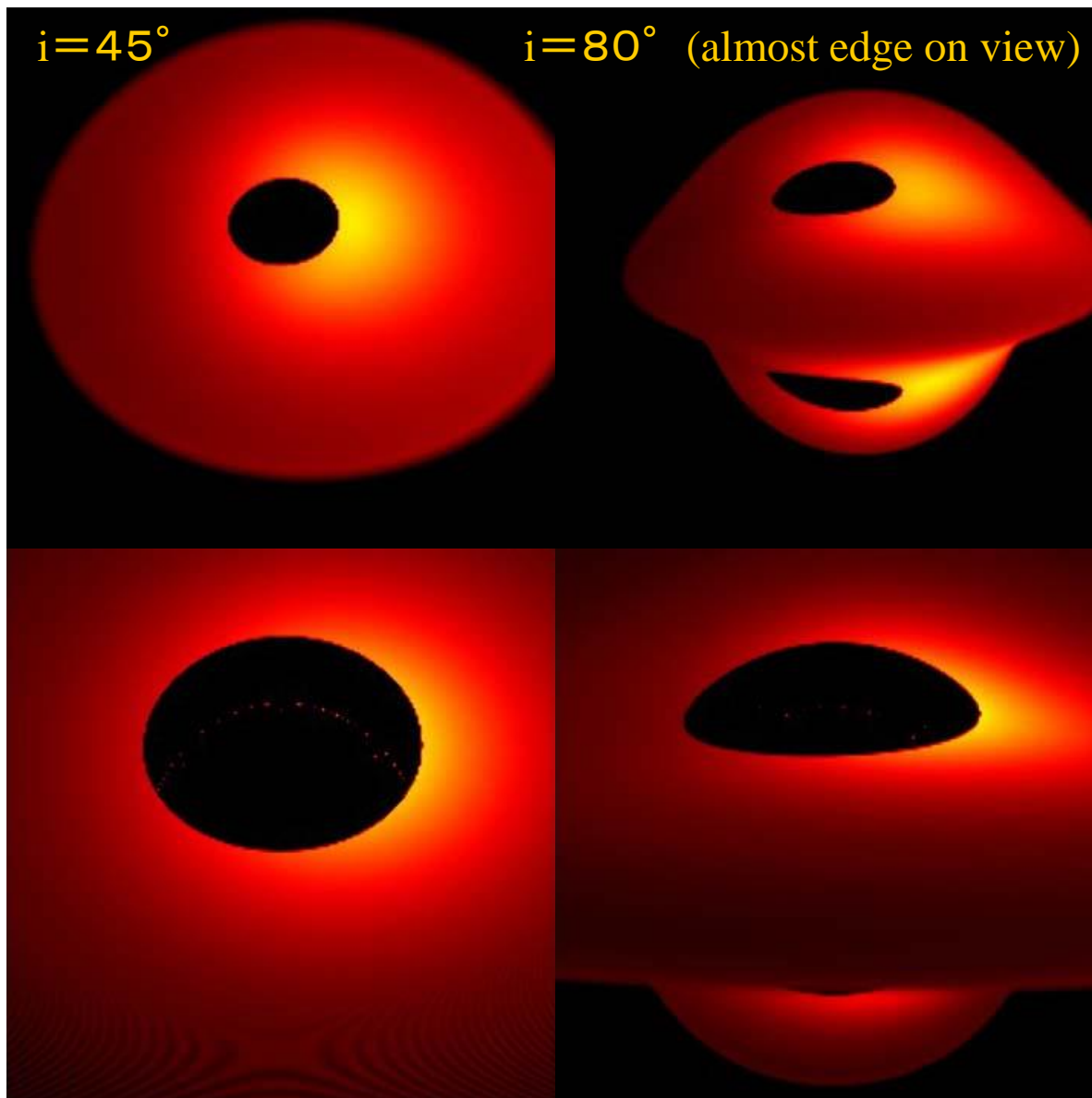
SgrA*

Kerr

ADAF(H=1)、
Axis
symmetric

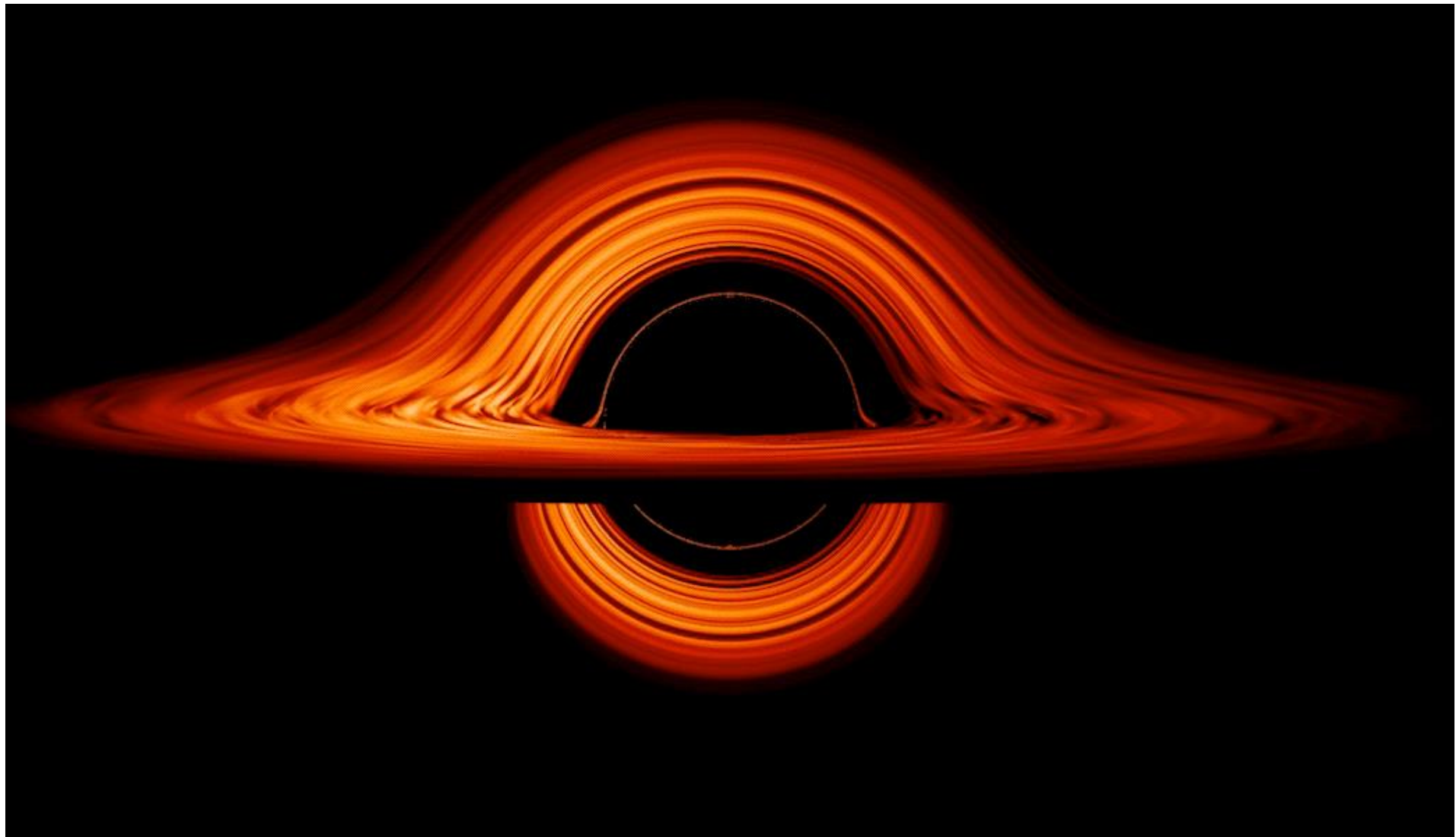
$i=45^\circ$

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



12 R_s

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によるもの)



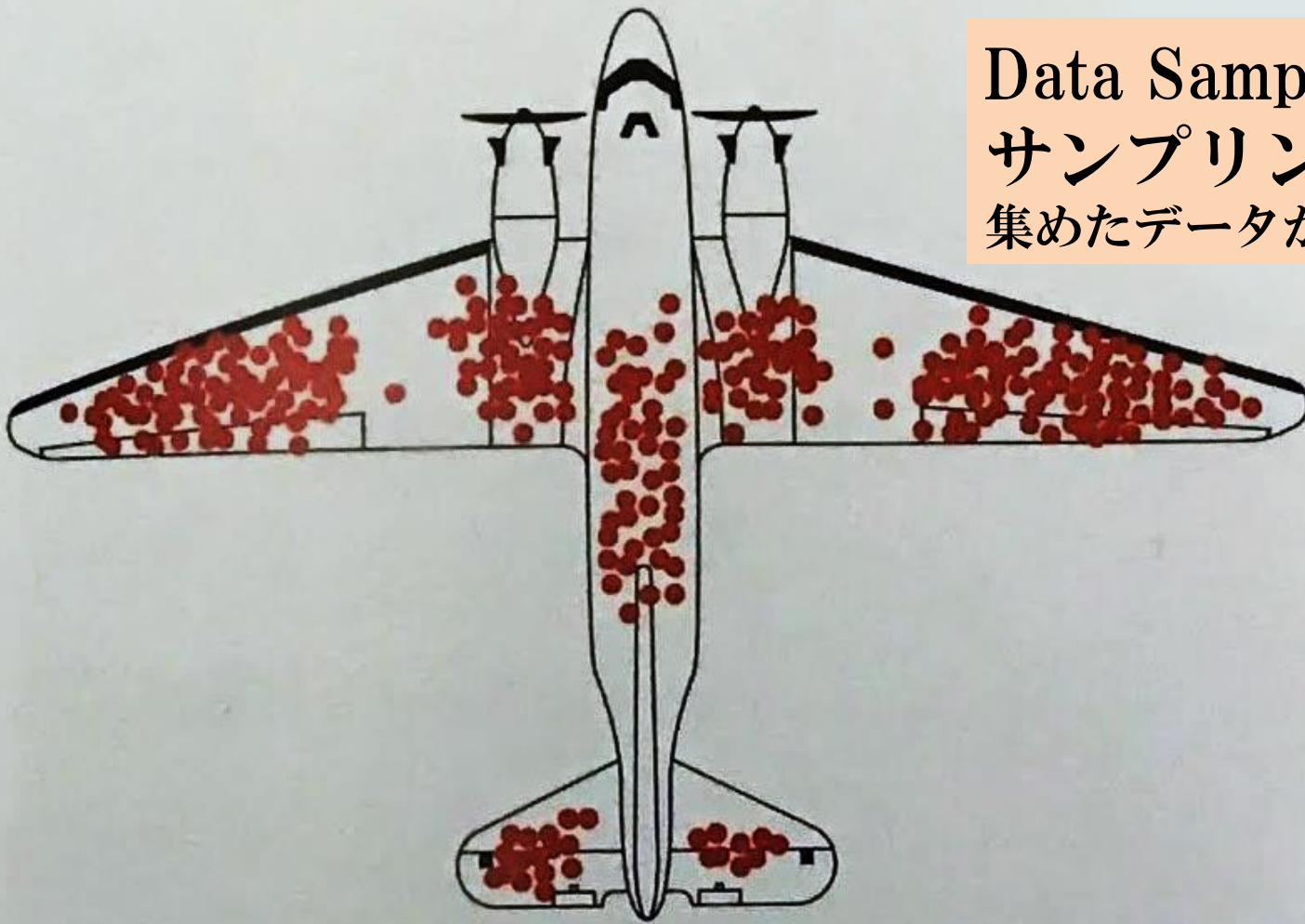
参考3.

サンプリングバイアス

Data Sampling Bias

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。

Wald, Abraham. (1943). A Method of Estimating Plane Vulnerability Based on Damage of Survivors. Statistical Research Group, Columbia University.

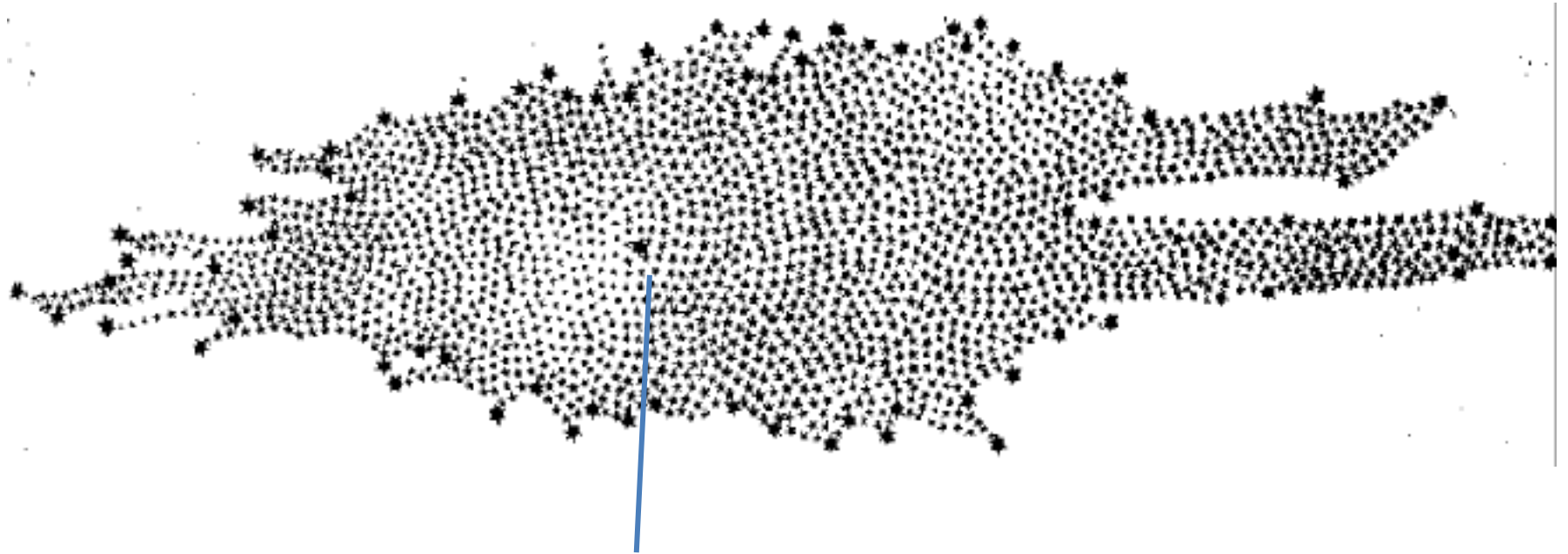
天文学史上、もっとも有名なサンプリング・バイアス

ハーシェル：星の分布を調べ、宇宙の構造を考えた。

「我々の太陽系が宇宙の中心」

---星間ダストの吸収によって遠方の星は見えず、近隣の星のみ観測した---
もし、当時の他の天文学者の誰が観測をやっても、ハーシェルと同じ結論が得られたはず。みんな、同じサンプリングバイアスを捉えてしまう。

--- 「複数チームが独立に同じ結果を出した」からといって正しい結果であるとは限らない。



太陽

参考4. 望遠鏡の“くせ”、PSF

星像の十字ができることがある。十字は望遠鏡の“くせ”であって、星に本当に十字があるのではない



参考5. u-vカバレッジとPSF。

PSF = Point Spread Function

点像分布関数

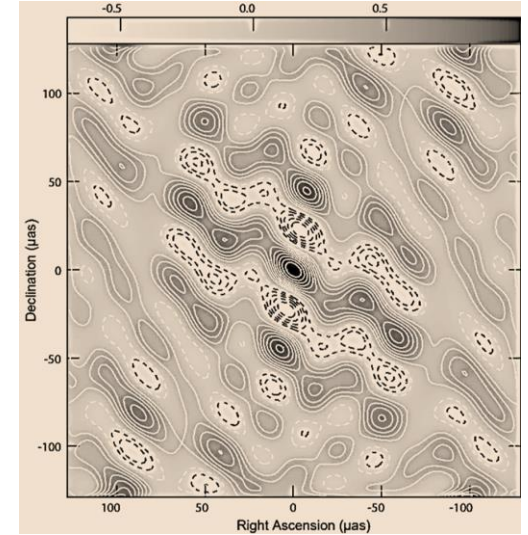
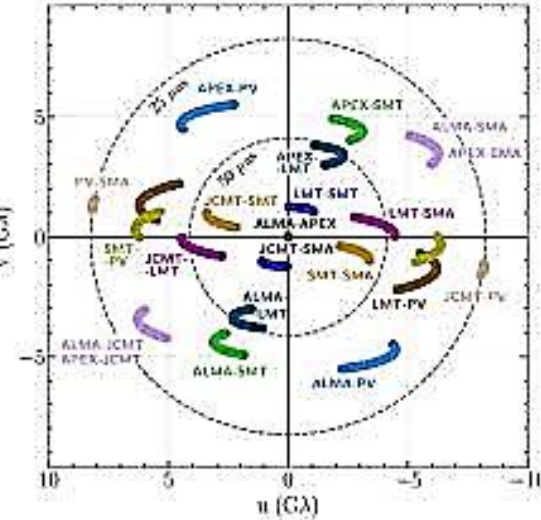
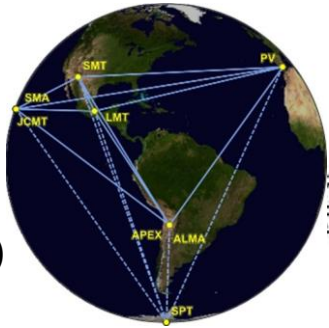
(電波干渉計ではdirty beamと呼ばれる)

一点源(一つのポイント)の光源を
その望遠鏡はどんな形に撮像するか、を
示すもの

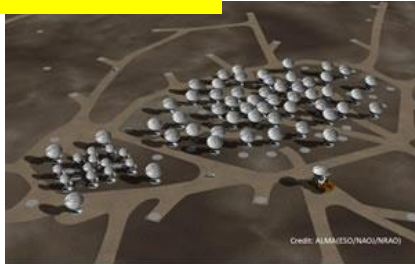
EHTのM87観測データ(u-vカバー) は少なすぎる。

EHT (2019)

この観測では
5局10基線
(超短基線除く)



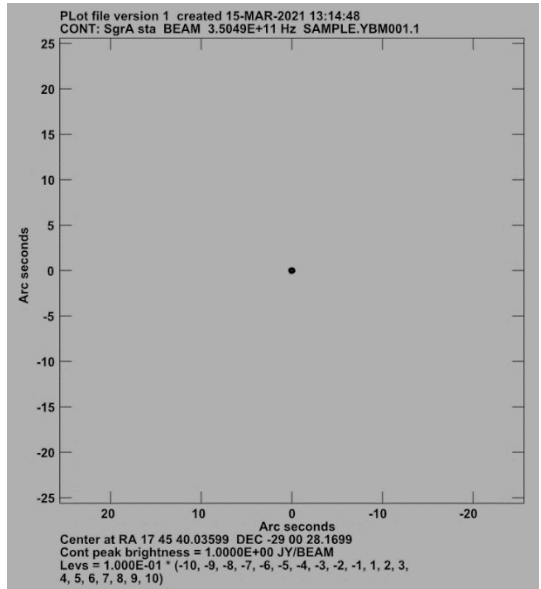
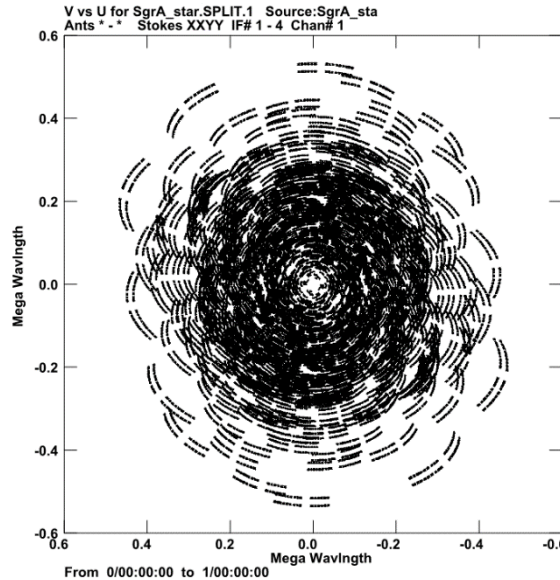
ALMA (図はcy03)



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

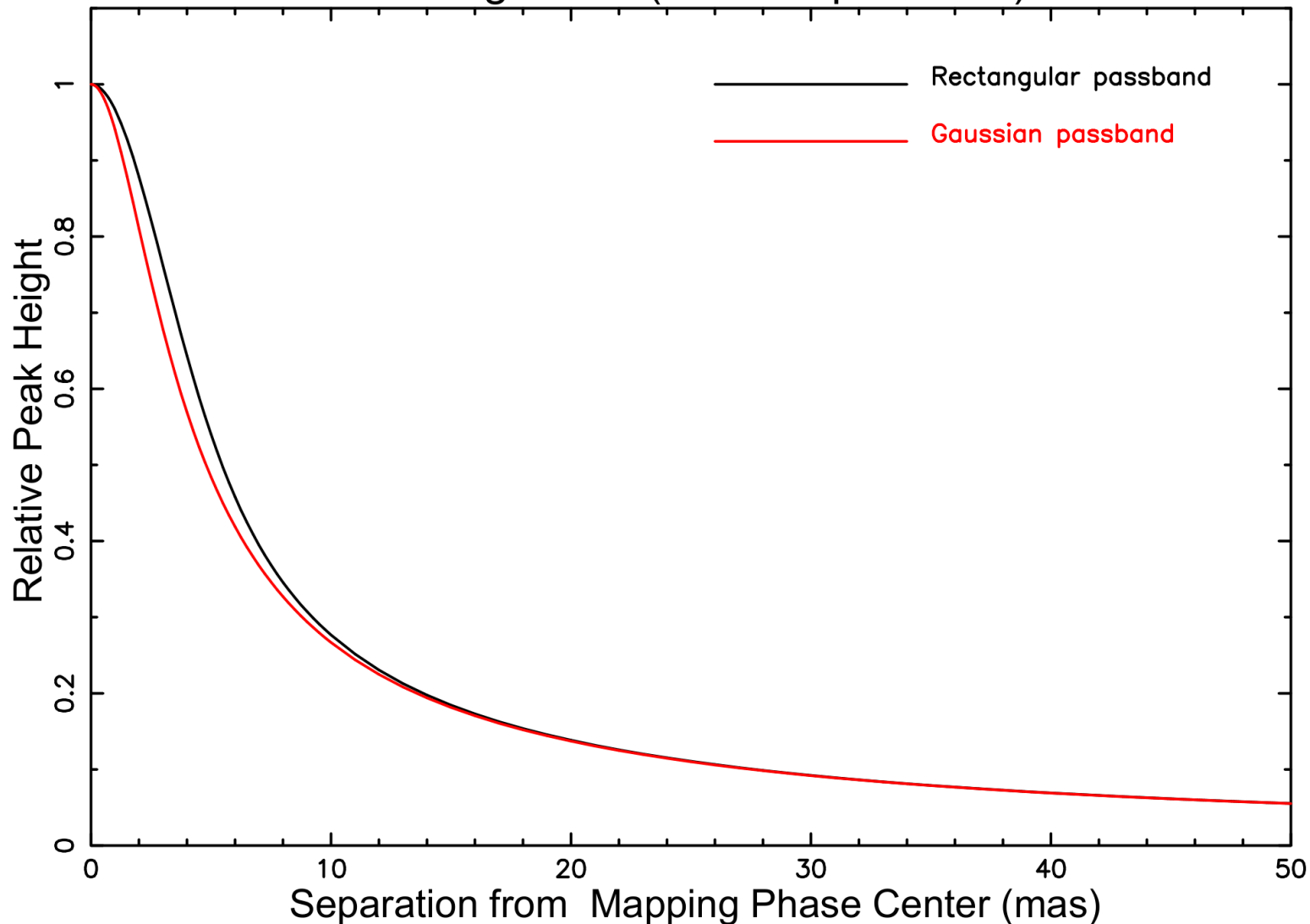


↑ u-v カバー

↑ PSF (Dirty Beam)

参考6. EHTで確保できる視野

Bandwidth Smearing Effect (EHTC Open Data)

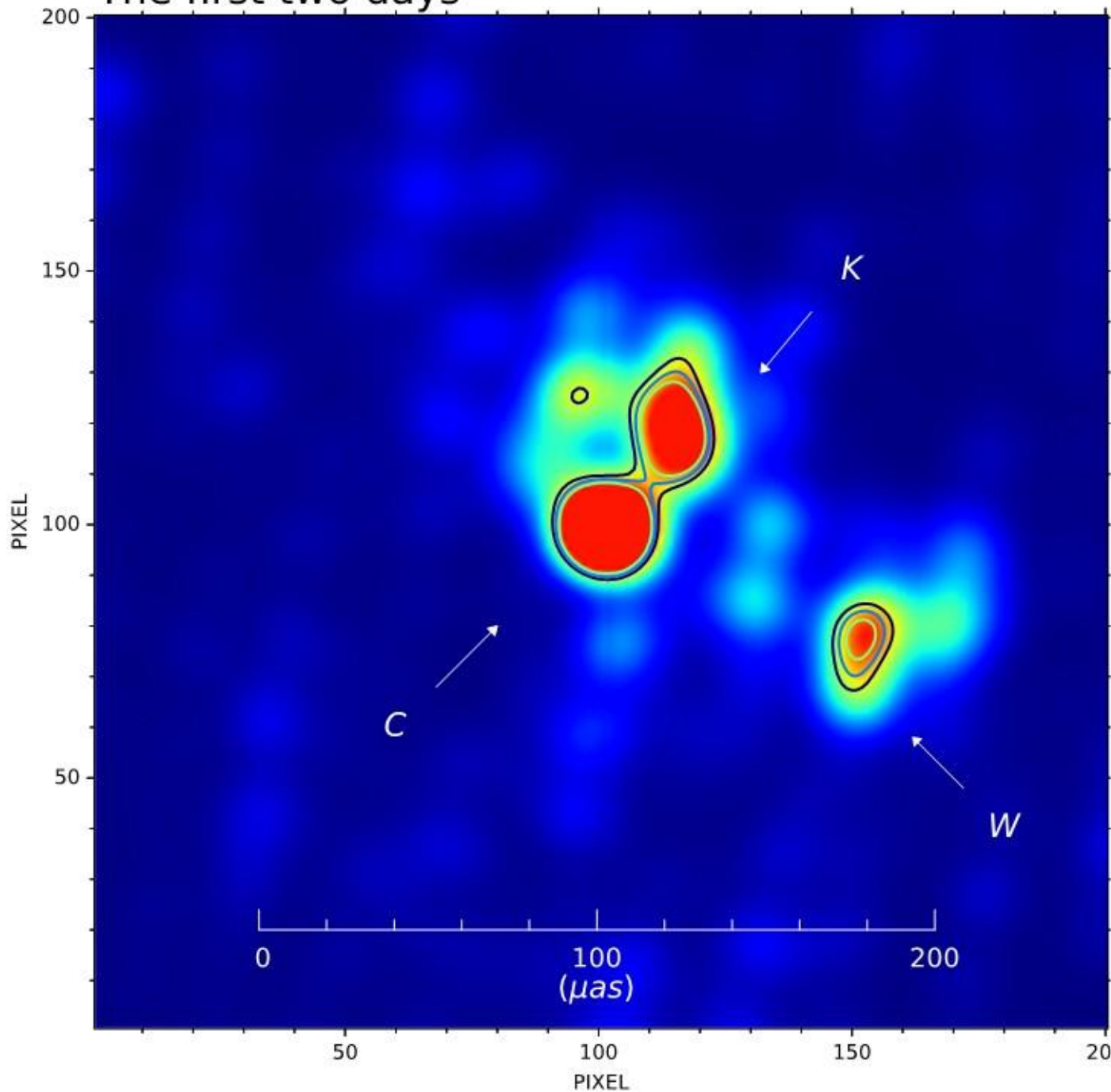


参考7. 中心部分の構造はなにであるか？

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

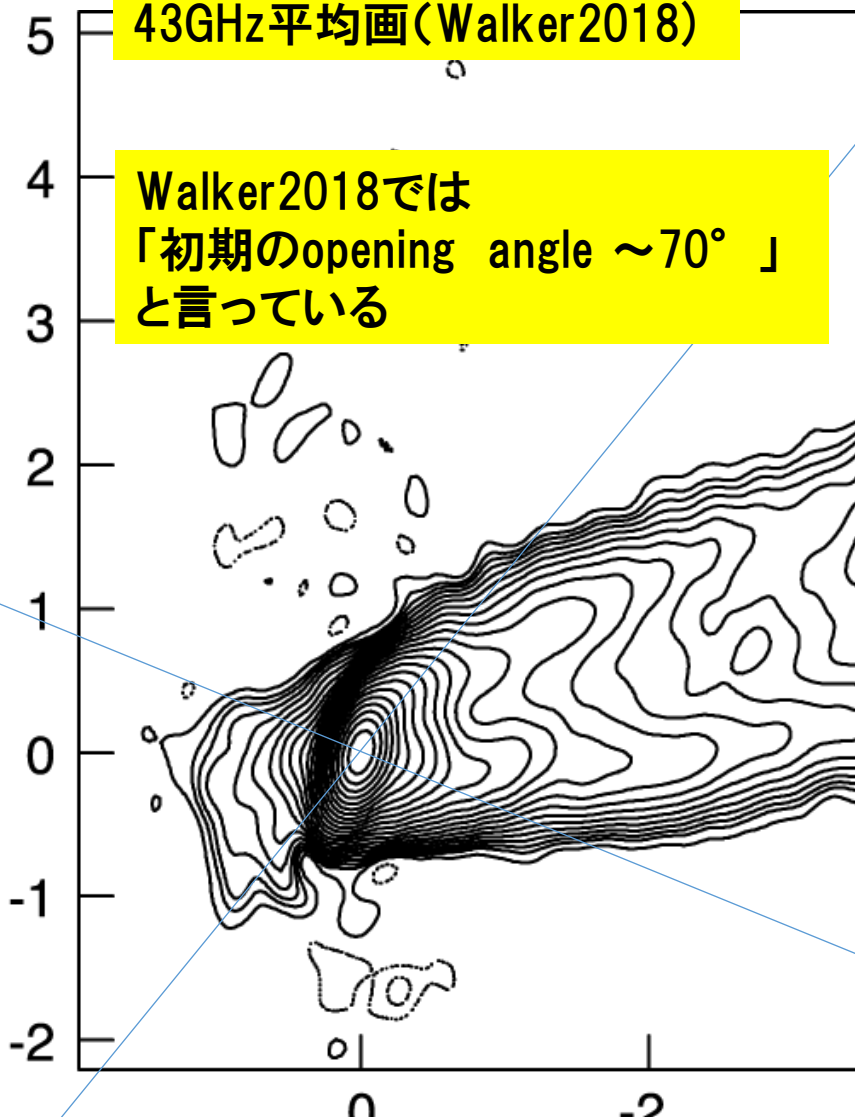
中心部
C (Core),
K (Knot),
W (West)
の3成分



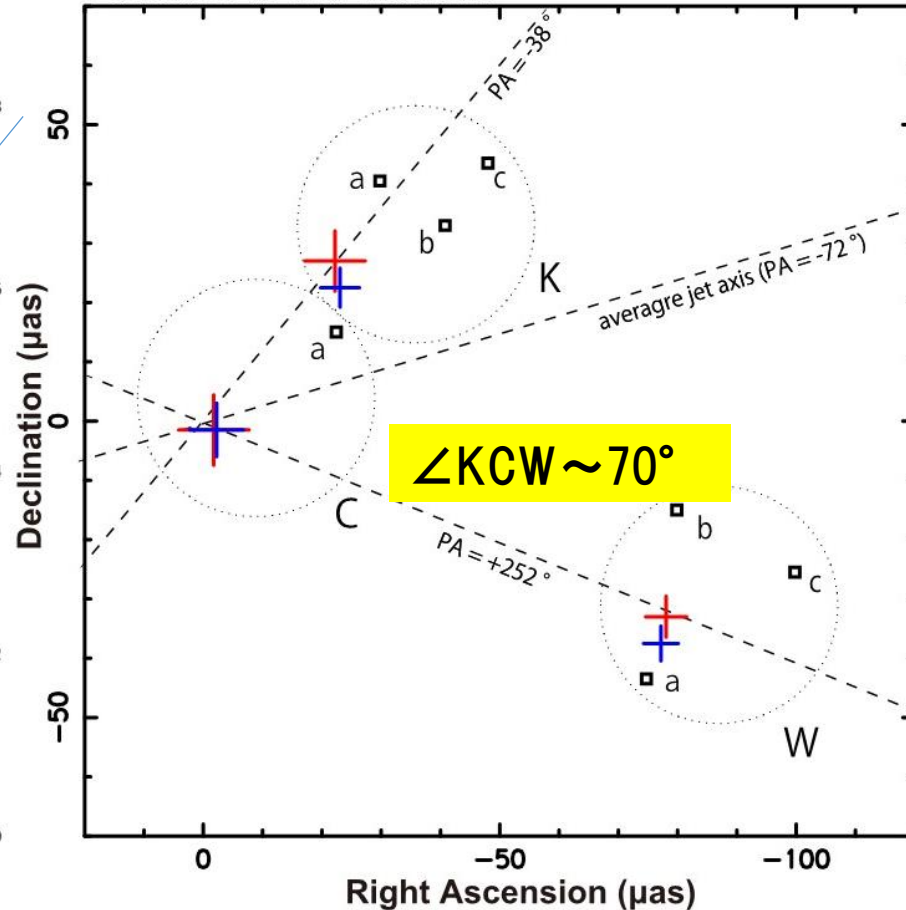
43GHz平均画(Walker2018)

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

Relative Dec (mas)



Positions of the features



$\angle KCW \sim 70^\circ$

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。