

EHT 2017年観測のSgr A* データの独立ハイブリッドイメージング解析

Makoto Miyoshi^{1*}, Yoshiaki Kato^{2†}, Junichiro Makino^{3‡}

¹National Astronomical Observatory, Japan, 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo, 181-8588, Japan

²Japan Meteorological Agency, 3-6-9 Toranomon, Minato City, Tokyo 105-8431, Japan

³Department of Planetology, Kobe University, 1-1 Rokkodaicho, Nada-ku, Kobe, Hyogo 650-0013, Japan

Japanese version 2024 October 25. Accepted 2024 April 23. Received 2024 April 19; in original form 2023 October 31

ABSTRACT

EHTC (Event Horizon Telescope Collaboration)が見つけた Sgr A*のブラックホール・シャドウと思われるリング構造は、観測当時(2017年)の EHTの PSF (Point Spread Function, 点広がり関数) 構造に現われる凹凸(でこぼこ)によるアーチファクト(=間違った結果)であると、我々は発議する。サンプル数の乏しいデータの撮像解析においては、その PSFの詳細な精査をする必要がある。EHTCによって推定されたブラックホール・シャドウの直径($48.7 \pm 7 \mu\text{as}$; μas はマイクロ秒角、百万分の一秒角)は、PSFにおけるメインビームと第一サイドローブの間隔($49.09 \mu\text{as}$)と等しく、このことは直ちにEHTCの解析におけるPSFのデコンボリューションには潜在的な問題があることを示唆する。EHTCの得たようなリング状の像は、本来リング状ではない模擬データセット(雑音のみ; 点光源構造)からもつくり出すことができる。非常に狭い視野設定(FOV; Field of View)を採用し、かつリング構造だと仮定して得られるセルフキャリブレーション解をデータに与えることで作り出せることを示した。これは2017年当時のEHTから得られる u - v カバー(=観測で取得できるデータ、空間フーリエ成分の分布)ではまだ信頼できるイメージングを行うには不十分であることを示唆する。EHTCの解析過程においては、データの較正では天体のサイズと物理特性を仮定してそれを行い、最終像の選択においては観測データとの整合性ではなく、広い範囲の撮像パラメータ空間から(リング像が)もっとも多く出現する構造であったことを理由にして最終画像を選んでいる。一方、我々の独立再解析では従来からの用いられてきたハイブリッド・マッピング法を用いている。そして、Sgr A*の東西に伸びた構造を明らかにした。この構造はこれまでのSgr A*の先行観測撮像結果とも整合している。また観測データの正規化振幅値の残差(観測データとの差)がEHTCのリング像の場合に比べて半分であることから、EHTC画像よりも信頼性が高いと考えられる。

我々の得た横長の像は東半分が西半分より明るい。これはおそらく高速回転する降着円盤からのドップラーブーストによるものであろう。我々の得た像は、中心にあるブラックホールから2から数シュワルツシルト半径(シュワルツシルト半径は光でさえ脱出できなくなる半径)離れたあたりの降着円盤の部分を見ていると思われる。そこでは、降着円盤は光速の60%程度で回転していて、我々はそれを40–45°くらいの角度から眺めているようだ。

Key words: 降着、降着円盤 天の川銀河:中心 テクニック: 高空間分解能、干渉計、像合成 ケーサー: 超大質量ブラックホール

1 イントロダクション

1.1 本論文の概説

EHTCが解析してリング像を出したSgr A*の観測データ(2017年にEHTで観測したデータ)を独自に再解析した結果、東西に伸びた形をしていることがわかった(Figure 2)。データの正規化振幅における残差はEHTCリング像のそれの約半分であり、EHTCリング像よりも我々の像は信頼できる(Section 4.2.1)。ただ、クロージャー量における残差はどちらも同じくらいの残差量であった(Sections 4.2.2,4.2.3)。

私たちは、EHTCによって報告されたSgr A*のブラックホール・シャドウは、EHT 2017年観測(Figure 9)の凸凹(でこぼこ)したPSF(Point Spread Function)の不完全なデコンボリューションによって引き起こされたアーチファクト(artifact, 誤った結果)であるという仮説を立てた。このデータセットは、イメージング結果に偽の50 μas 間隔の構造を生じさせる可能性が高い。

そのPSF構造には、メインビームの強度に比肩する強度をもつ第一サイドローブがあって(メインビームに対して~49%の強度比)、それはメインビームから49.09 μas 離れたところにある。しかも、その中間の位置にはとても深いマイナスの極小値点がある(その深さはメインビームに対して-89%の強度レベル)。

つまり、EHTCの測定したブラックホール・シャドウの直径は、PSFの構造にあるメインビームと第一サイドローブの間

* Contact e-mail:makoto.miyoshi@nao.ac.jp

† email:yoshi_kato@met.kishou.go.jp

‡ e-mail:makino@mail.jmlab.jp

隔と全く同じなのである。そして、EHTC リングの細部の構造もPSFの構造と類似している。EHTC リングの上には3つの顕著な輝点がある。その位置関係は、PSF 構造におけるメインビーム、北側の第一サイドローブ、東側のサイドローブの位置関係とほぼ同じなのである (図9)。EHTCのリング像は20 μs サイズの円形の復元ビームによって生成されたものである。ところがEHTCのリング像の中央の影の部分の形はPSFのメインビーム部分の形 (正確にはメインビームに二軸不等ガウス形状をフィットして得た形) と同じ形と大きさを (なぜか) 示している (Figure 8)。

このように、EHTCのリング像とPSF 構造の間には類似点がいくつかあるのだ。このことはEHTC の行った撮像解析過程は、PSFのデコンボリューション (PSFの影響を除去する作業) に関して潜在的な問題があることを示唆している。

EHTCのデータの解析では、部分的ではあるが、観測天体の大きさを60 μs と仮定して振幅較正を行っている。また、Sgr A*の構造が時間変動する影響を緩和するために、一般相対論的磁気流体力学 (GRMHD)シミュレーションから得られた知見 (つまり天体の構造や物理についての仮定) によるデータ重み付けを行っている。さらに、EHTCの解析では、最終的な画像を選択するために彼ら独自の基準を用いた。通常は観測データと像の整合性を検討するのだが、彼らはそうではなく、広い撮像パラメータ空間の中から、最も出現率が高かった形態を選択している。我々の懸念は、上記のようなEHTCの解析方法はPSFのデコンボリューションを妨害し、結果として得られる画像が、観測天体の構造よりもPSFの構造的特徴を反映したものになってしまう可能性があることである。

一方、我々の独立解析では、伝統的なVLBIイメージング法を用い、最終的な画像を導き出した。我々は、標準的なアプローチとして広く受け入れられているハイブリッドマッピング法を用いた。つまり、CLEAN アルゴリズムによるPSFのデコンボリューションと、これまでに確立されてきた注意事項に従いながらのセルフキャリブレーション (セルフキャリブレーション) によるデータ較正を反復しながら天体像を確定してゆく方法である。さらに、得られた像はPSF 構造との比較を行い、得られた像の構造には明瞭なPSFの特徴と共通するものはないか確かめた。そして最後に、観測データとの整合性が最も高い画像を最終像として選んだ。

我々の最終結果の像は東西に伸びた形になった。そして東半分が西半分に比べて明るい。この異方性は、おそらく降着円盤の高速回転によるドップラーブースト現象によるものではないだろうか。我々の最終像は降着円盤のある部分、中心から2数シュワルツシルト半径あたりの形状であって、そこでは光速の60%程度の速度で回転をしている。それを40°から45°の角度からみていると思われる (Section 4)。

本論文で、Sgr A*のEHT観測データ (公開データ) に対する我々の解析結果を報告する。このあと、すぐさま、イントロダクションの一部として、これまでの電波観測によるSgr A*の先行研究についてまとめて紹介する (Section 1.2)。そしてSection 1.3においてEHT 2022 論文の内容について要約をしめす。EHTCの公開観測データの特徴についてSection 2で記述し、我々の行ったデータ較正と像合成過程についてをSection 3 and Appendix D で述べ、我々の撮像結果はSection 4で示す。Section 6において、我々の結果と今後のブラックホール撮像について議論する。我々の結論はSection 7にてまとめる。

Appendix Eでは2017年4月6日の観測データにおける u - v カバー (=空間フーリエ成分の分布) とそれに対応するPSF 構造について示す。この日のデータは同年4月7日のデータに比べて、50 μs サイズのリング構造は鮮明には検出できなかったとEHTCは述べているが、なぜ、EHTCがそのような困難に

遭遇したかを我々は両日のデータのPSF 構造の違いから説明したい。

Appendix Gでは、Sgr A*についてEHTCが公開した全てのデータにおける二つの同時記録チャンネル間のクロージャ量 (クロージャ位相、クロージャ振幅) に違いについて示す。二つの記録チャンネルにクロージャ量には矛盾があるようにみえる。そうであるなら、データに観測された天体構造の情報が正確に保存されていない可能性があることになる。

1.2 Sgr A*についての電波による先行研究

Sgr A*は天の川銀河の中心にある超巨大ブラックホールで、電波観測によって初めて発見された。1974年にNRAO電波干渉計 (S-Xバンド、つまり周波数2 GHzと8 GHz) によって、銀河系中心の複合電波源であるSgr A 領域の一角にコンパクトな電波源として発見された。干渉計のフリンジ強度が、干渉計の投影基線長を変えても一定であり変わらないことから、その見かけの大きさは0.1 秒角以下 (実際の大きさでは800 AU (天文単位) に相当) であり、観測された輝度温度は 10^7 Kを超え、ブラックホールであることが示唆された (Balick & Brown 1974)。

1990年代より、赤外線観測技術の発達によってSgr A*の周辺の恒星の運動が観測できるようになり、Sgr A*の質量が正確に測定できるようになった。観測された恒星群よりも内側に内包される質量密度がとても大きいことから、Sgr A*はブラックホールであると科学者は結論することになった (Eckart et al. 1996; Ghez et al. 2000; Munyaneza & Viollier 2002; Schödel et al. 2002)。

地球からSgr A*がある銀河中心までの距離は約8 kpcであり、よその銀河の中心にある大質量ブラックホールに比べれば桁違いに近いところにある。Sgr A*の質量 ($\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ 、太陽質量) を考慮にいとSgr A*がブラックホールであるとして、そのシュワルツシルト半径は見かけの角度で約10 μ 秒角に地球からは見えることになる。

しかし、超長基線電波干渉計 (VLBI) の空間分解能が高いにもかかわらず、これまでに測定されたのはSgr A*の見かけの大きさだけだった (Doelman et al. 2001; Bower et al. 1998; Yusef-Zadeh et al. 1994; Rogers et al. 1994; Alberdi et al. 1993; Krichbaum et al. 1993; Marcaide et al. 1992; Lo et al. 1985, 1998)。

これはSgr A*の電波像が我々との間に存在するプラズマによって散乱をうけ、観測像はぼけて、観測波長の二乗に比例して像サイズが大きくなるためである (Davies et al. 1976; van Langevelde et al. 1992; Bower et al. 2004; Shen et al. 2005)。散乱の影響から逃れて、Sgr A*の本当の構造を観測するためには、ミリ波からサブミリ波の高い周波数の観測が必要である。

さらに、もう一つ、観測データの較正に関する困難があった。本格的なVLBI装置として期待されて登場したVLBA (Very Long Baseline Array : アメリカのVLBI専用電波望遠鏡群) は、観測局がすべて北半球にあるため、Sgr A*を含む南天の天体を観測するためには、それぞれの観測局から低い仰角から観測するしかなかった。低仰角での観測では、大気中の水蒸気によって電波の位相変動がおりやすい。特にミリ波長では位相較正が非常に困難であった。また、赤緯 $\delta \sim -30^\circ$ に位置するSgr A*については、VLBAによって得られるデータの u - v カバーはまばらになり、良好な画像を得ることは困難であった (Zensus et al. (1999), and papers in Galactic Center Workshop 1998 (1999))。

そこで、アンテナによる観測誤差の影響は受けにくいクロージャ位相とクロージャ振幅という量を用い、観測周波

数43 GHz と86 GHzにおける Sgr A* の形状の測定が行われた。これらの測定からは、主に東西方向に伸びた楕円が観測された (Bower et al. 2004; Shen et al. 2005)。しかし、これらの結果は、まだSgr A* の固有の構造の測定ではなく、散乱によってぼやけて大きくなった像をみていると考えられていた。その後、Bower et al. (2014)は、その後、高感度化されたVLBAによる43 GHzのデータに対してクロージャー振幅の分析を行い、Sgr A* の本来の構造が南北方向よりも東西方向にずっと伸びている結果を得た。そのSgr A* の本来の構造では、長軸と短軸の長さは、 $354 \times 126 \mu\text{s}$ であり、長軸の伸びる方向は時角 95° であった。つまり、ほぼ東西方向に伸びていることになる。つまり、散乱の異方性によって散乱像は確かに東西方向に大きく伸びているのだが、Sgr A* の本来の構造も東西方向に伸長しているということになる。

これらのクロージャー量もちいた先行研究ではSgr A* の形状の計測は、非対称成分を考慮せず、楕円ガウス型などの点対称構造を仮定したモデルを visibility データ (観測された空間フーリエ成分の集合) にフィットすることで行われた。しかし、先行研究のうち、通常の像合成を行った研究のなかには点対称構造からわずかだが逸脱しているものがある。例えば、Shen et al. (2005)の図 1bが示すCLEANによる超解像画像は、東西方向に伸びた形状をしており、しかも東半分と西半分で強度が非対称になっている。東側半分が明るいのだ。

次の段階として、Sgr A* の構造が点対称構造からどのくらいずれているのかを調べる段階になる。

Miyoshi et al. (2011)はSlit-Modulation Imaging (SMD)法 (Miyoshi 2008)、この方法では撮像結果には u - v カバーの違いの影響を受けない。これを用いてSgr A* の像から周期的短期変動をさぐる試みを行った。この研究では、Sgr A* が近赤外フレアを起こした直後に43 GHzで実施されたVLBA 観測データから、ゼロではないクロージャー位相値が、計測された。天体が点対称構造から外れた構造を持つ場合、クロージャー位相はゼロではない値になる。この計測は信頼度は高いとはいえないがSgr A* の構造が点対称構造から外れていることを示すものであった。また、時間変動しない固定の像ではデータを完全に説明できないことから、Sgr A* の構造が短時間変動していることが示唆されている。またその変動周期スペクトルがSgr A* の像の東半分、西半分とで異なることも示唆している。

さらに、その後の観測と研究によって、Sgr A* の東西に伸びた形状には非対称性がありそうだという報告がされてゆく。Sgr A* 構造の非対称成分をさらに詳しく調べるため、Robert C. Byrd Green Bank Telescope (GBT) や Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano (LMT) などの大型アンテナをVLBA 観測に組み込み、感度を高めた観測が行われた。Brinkerink et al. (2016)は、クロージャー位相の解析によって86 GHzのVLBA 観測データを調査し、Sgr A* の構造の最も明るい部分から東に約 $100 \mu\text{s}$ の位置に第二の成分がある証拠を発見した。また、Fish et al. (2016)による230 GHzでの結果、Ortiz-Leon et al. (2016)による86 GHzでの結果、Rauch et al. (2016)による230 GHzでの結果においても同様な異方性の指摘がされている。言い換えると異なる観測周波数と異なる観測時期におけるSgr A* の構造に非対称が示されていた。これらの観測は低周波数である分、散乱の影響を受けてはいるがEHT 2017観測データよりもはるかに多くの u - v カバーを得た観測であった。

散乱の影響、Sgr A* 本来の形状についてJohnson et al. (2018)は以下のようにまとめている。散乱の効果は、異方性をもっているが、最大の散乱の大きさは $(1.380 \pm 0.013) \times \lambda_{\text{cm}}^2 \text{ mas}$ 最小の散乱の大きさは $(0.703 \pm 0.013) \times \lambda_{\text{cm}}^2 \text{ mas}$ である。(ここでmasは1ミリ秒角、千分の一秒角である。)最大の散乱の方向は時角 $81^\circ.9 \pm 0^\circ.2$ の方向である (つまり東西方向にき

Frequency	43	86	230 (GHz)
Broadening (Major axis)	67.2	16.8	2.3 (R_S)
(Minor axis)	34.2	8.6	1.2 (R_S)
(Position Angle)	$81^\circ.9 \pm 0^\circ.2$		
Intrinsic Size	27.9	14.0	5.2 (R_S)

Table 1. 散乱等によるSgr A* の像の広がり、推定されている本来のSgr A* の大きさを (Johnson et al. 2018)に従って計算した。ここではシュワルツシルト半径、 $1 R_S = 10 \mu\text{s}$ (マイクロ秒角)と仮定している。

わめて近い)。Johnson et al. (2018)はSgr A* 本来の形状については以下のように見積もっている。Sgr A* 本来大きさは波長1.3 mm (周波数では230 GHz) から波長1.3 cm (周波数では22 GHz) の間では、観測波長に比例する。つまり、式で示すとおよそ $\theta_{\text{src}} \sim 0.4 \times \lambda_{\text{cm}} \text{ mas}$ となる。

これに従うと、43 GHzでは散乱による拡大化はSgr A* 本来のサイズよりも大きい。86 GHzでは散乱による拡大化はSgr A* 本来のサイズと同じくらい。そして、230 GHzでは散乱による拡大化はほぼ影響しなくなって Sgr A* 本来のサイズが観測できるということになる (Table 1)。

EHTの本格的な2017年観測より以前においてSgr A* について得ていた知見は次のようにまとめることができよう。

- (i) 観測されるSgr A* のサイズは主に散乱のせいでの観測波長の二乗で大きくなる。この散乱には異方性がある。(だいたい) 東西方向にその散乱は大きい。そして、その影響は230 GHzの観測では無視できるくらいになる (Johnson et al. 2018)。
- (ii) Sgr A* の本来の形状は東西方向にのびていると推定されていた (Bower et al. 2014)。
- (iii) (Sgr A* の本来の形状は東西にのびているわけだが)、いくつかの観測、43, 86, & 230 GHzの観測から、東西異方性があると示唆されていた。

1.3 EHTC 2022が示したSgr A* のリング状構造

2022年5月、EHTCは、Sgr A* のEHT 観測によるリング状の画像を報告した。またSgr A* が1時間より短いスケールで変動を示すことも確かめた (Event Horizon Telescope Collaboration 2022a,b,c,d,e,f)。

観測天体が、観測中に時間変動すると、通常、干渉計による像合成は困難である。EHTCは、Sgr A* の変動を考慮する独自の解析手法を用いてその構造を決定した。EHTCが報告したSgr A* の構造は、基本、直径 $51.8 \pm 2.3 \mu\text{s}$ の明るく厚いリングであった。ただ、このリングは (なめらかではなく) 特定の方位角方向に明るい部分があって、非対称性を示していた。つまり3つの明るいスポットが時角 $PA \sim -140^\circ, -40^\circ$ と $+70^\circ$ に位置している。中心部分のブラックホール・シャドウの領域は完全に漆黒ではなく、輝くリング部分に比較すれば暗い程度であった (Event Horizon Telescope Collaboration 2022a)。このSgr A* の形状は、EHTCが先に報告したM87のリング状の像 (Event Horizon Telescope Collaboration 2019a,b,c,d,e,f) に似ていて、まるでブラックホールの影と降着円盤を真横からではなく真上から見たかのような像であった。

Sgr A* の短期時間変動について述べる。その電波での最初の検出はMiyazaki et al. (2004)によって行われた。彼らは、Sgr A* がミリ波帯で一日のうちに変動すること、すなわち短時間のバースト的変動を示すことを発見した。その後、同様の短期バースト的変動はX線観測 (Baganoff et al. 2001)、赤外

線観測 (Genzel et al. 2003) でも確認されて、Sgr A*の強度は決して一定ではなく変動することが明確になった。

さらに、近年の Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) 観測によってSgr A*がミリ波帯からサブミリ波帯の電波において一時間内で強度変動をすることが判った。

このSgr A*の短期変動の存在は、現在のミリ波VLBI 撮像観測によって天体構造の正確な画像を生成するための新たな大問題となっている。VLBIによって最大限の u - v カバーを達成するには、最大24時間の観測時間が必要だからだ。電波干渉計を使用して画像を合成するための基本的な前提条件は、観測されている天体の輝度分布、つまり形や明るさが観測中を通して一定であることである。同類の問題はこれまでのVLBI観測においても起きていた。SS 433のVLBI観測では観測中に観測源の強度変動が検出され、画像合成への影響が懸念された (Vermeulen et al. 1993)。しかし、Sgr A*のミリ波帯での時間変動は、SS 433の場合より激しく、時間スケールも短い。

さらに、Sgr A*が短期間に強度変動することは、Sgr A*の撮像を難しくするばかりではない。ALMAによる銀河中心領域の大規模な範囲の撮像も難しくしていて、その撮像結果には歪みをもたらす結果となっている (Tsuboi et al. 2022)。

EHTCが報告したリング形状の信頼性を判断するには、データの独立した再分析が必要だと我々は感じた。EHTCのリングの大きさは、確かに相対性理論から予想されるブラックホール・シャドウの大きさと一致しているけれど、その一方で先行研究から認識されていたSgr A*の構造とは一致していない。

2 観測データ

EHTは、2017年4月初めに、南極の観測局 (南極点望遠鏡、SPT) を含む合計8つの観測点で、Sgr A*を観測した。SPTを含めることで、その南北方向の空間分解能が向上した。Sgr A*の観測は、2017年4月5日から11日の間の5夜にわたって実施された (Event Horizon Telescope Collaboration 2022a)。EHTCはそのうち4月6日と7日の2回の観測データを公開した。合計28個のデータセットが公開されており、数が多いが、これらは以下に述べるように複数の異なる方法で較正された結果を、異なるデータセットとしたためだ。これらのデータセットの説明は、「README.md」ファイルに記載されており、https://datacommons.cyverse.org/browse/iplant/home/shared/commons_repo/curated/EHTC_FirstSgrAResults_May2022 に公開されている。

多くのデータがあるため、その構造を認識するのは難しいかもしれないが、いくつかの重要な事項を留意すれば、構造がみえてくる。まず、EHTCは2つの異なる較正方法、EHT-HOPSとrPICARD (CASA)パイプライン、を使用したため、同じ観測に対して2つの異なるデータセットができあがる。Sgr A*は観測中短期的な強度変動、おそらくその構造も変化を示していた。この変動を補正するために、EHTCはさらに「正規化」したデータセットを作成した。データの振幅を、ALMAとSMAで観測して得たSgr A*の光度変化曲線を用いて、各時間における強度を補正している。(もし、観測天体が全体的な構造は変えることなく全体が均一に光度変化する場合、このデータに施された正規化によって、正確にその天体の構造を反映できる可能性があるため、この補正をEHTCは行ったと考える。)

さらにLMT局に関しての修正を施したデータセットが追加されている。LMT局のゲインの不確かさを補うため、観測天体の角サイズを仮定して振幅較正を行っている (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)の2-2章による

と、2 Gλより投影基線長が短いデータ点 (具体的にはSMT-LMT基線のみ)に対して、Sgr A*の角サイズを60 μasと仮定してLMT局に関する振幅の変動を補正している。これらの補正の有効性は自明ではない。さらに、これらのデータ補正をした後でも観測天体の構造の本質的な情報がデータに保持されているかについて保証する具体的な証拠はない。

そして、最後に、Sgr A*の短時間スケールの動的特性を把握するために、EHTCはデータセットを100分間のデータを切り出したデータセットを作っている ('BEST' と呼ばれるデータセット)。

EHTCはこれら振幅補正に加えて、彼ら独自考案の修正を施した解析からSgr A*の静的画像、Event Horizon Telescope Collaboration (2022a)の図3に示されているもの、を得ている。

本論文において示す我々の解析は、EHTCがSgr A*の静止画像を得るために使用したデータセットに基づいている。我々が解析したデータセットは、前述のSgr A*の強度曲線から得られた結果を用いて、EHTCにより正規化されたものである。我々の今回の解析では4月7日のデータに集中する。これはEHTCが詳細に解析したデータでもある (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)。そして、二種類あるうちのHOPによって較正したものを我々は調べる。もう一方のCASAによる較正データセットは、HOP較正のものにくらべて、二つある記録チャンネル間のクロージャー振幅の違いが大きく、データの品質が劣るのではないかと考えたからである。(このクロージャーの違いについてはTable 5とAppendix Gを参照のこと)。

まとめると、我々は4月7日の観測データ、HOPによる較正、LMTに関する振幅補正を付加し、振幅の時間変化を正規化したデータを解析することにした。

我々の最初の較正、一点源像モデルを仮定して位相についてのself calibration (セルフキャリブレーション)の結果は平均するとゼロに近い値の位相値を示した (Appendix DのFigure 14を参照のこと)。EHTCの"README.md"によるとデータは相関処理のあと複雑な較正が行われたようである。Event Horizon Telescope Collaboration (2022b)では、HOP較正の過程のなかで、一点源像モデルを仮定して位相についてのセルフキャリブレーションを行ったとは明示的には述べられていない。一方のCASA較正では一点源像モデルを仮定して位相についてのセルフキャリブレーションを行ったと記載されている。HOP較正においても行われたと考えるのが自然であろう。だとすれば、その較正データに対して再び同種のセルフキャリブレーションを行えばほぼゼロの較正解になるであろう。

これは述べておく必要があるのだが、EHTCが実施したすべての較正を追跡し、完全に検証することは、我々の独立解析では不可能である。公開データは各記録チャンネルのデータには複数の周波数サブチャンネルはなく、一つのチャンネルに圧縮されているため、AIPSのFRINGなどのツールやそれに類似する他のタスクを使用してのFRINGサーチを行うことはできない。記録チャンネルの周波数バンドパスの較正についても同様である。つまり、遅延、遅延率、およびゲインエラーを独自に解析することはできない。我々が実施できる唯一の較正に関する解析は、セルフキャリブレーションによる位相および振幅の補正 (Schwab 1980; Cornwell&Wilkinson 1981)だけである。

3 我々のデータ較正と像合成

我々のデータ解析は、VLBIの撮像のためのデータ解析で最も一般的に使用されているハイブリッドマッピングに基づい

ている。まず、VLBIの撮像のためのデータ解析の概要を説明し、次に我々のデータ解析について述べる。

3.1 VLBIによる撮像

ここでは、VLBIによる撮像技術の概要を、その原理だけでなく、実際の分析で考慮すべきいくつかの問題点も含めて紹介する。

3.1.1 像合成の基礎

VLBI (超長基線電波干渉法)を含む電波干渉計による撮像の原理は、電波に限ったものではなく、光学/赤外線(X線)望遠鏡にも共通するものである。得られた画像は、観測対象の真の明るさの分布と電波干渉計の点広がり関数 (PSF)の畳み込みである。PSFは、電波干渉計では一般的に「ダーティビーム (dirty beam)」と呼ばれる。また、まず得られる画像は「ダーティマップ (dirty map)」と呼ばれる。実際のデータでは、これら2つが畳み込み (convolve)されたものに、さら観測誤差が加わっている。観測天体の真の構造を明らかにするためには、観測誤差を取り除きながら、PSFを逆畳み込み (deconvolve)する必要がある。

PSFまたは「ダーティビーム (dirty beam)」は、電波干渉計の u - v カバーによって決定される。 u - v カバーは電波干渉計で使用される専門用語で、 u - v とは空間フーリエ成分を意味する。観測によって得られる u - v の集合とPSFは互いにフーリエの双対 (Fourier duals)であり、数学的には等価である。数学的には等価であるといっても、 u - v カバーを見ただけではPSFの特性を理解することはほぼ不可能であるため、科学論文で提示すべきは u - v カバーの図ではなく、PSFの構造そのものである。

確かに、PSFの構造のなかでメインビームがサイドローブなどの他の構造を圧倒するような場合、PSF構造の負の影響を心配する必要はない。しかし、電波干渉計が少数の素子アンテナのみで構成されている場合、かつてのVLBI初期にはよく見られたことだが (現在はかなり少なくなったが)、 u - v カバーはまばらになり、対応するPSF構造は δ 関数的な単一点構造からはかけ離れたものになる。したがって、得られた画像、ダーティマップ (dirty map)は観測された天体の真の明るさ分布とは大きく異なり、天体の構造を知るためにはダーティマップからPSFを取り除く (デコンボリューション; deconvolution) 必要がある。

実際のPSFの除去、デコンボリューション処理では、十分な結果が得られず、PSF構造に由来するアーチファクト (=誤った) 構造が生成される可能性がある。したがって、PSF構造を調べることは非常に重要である。なぜなら、その構造を知ることによって、起こりうるアーチファクトを予測できるからだ。(このため、NRAOのAIPSパッケージの中の画像合成タスクでは、利便性を考慮して、デコンボリューション画像とともにPSFを自動的に生成する。)

3.1.2 CLEAN algorithm

CLEAN アルゴリズム (Clark 1980; Högbom 1974)は、PSF構造のデコンボリューションを行うために開発され、電波干渉計のイメージング分析において最も広く使用されているものだ。

CLEAN アルゴリズムは通常、以下の通りである。観測された天体の構造は複数の点源から構成されている (あるいは複数の点源によってうまく近似出来る) と仮定する。ダーティマップを調べ、その最大ピークの位置に1点があると仮定し、

観測データからその点に対応する空間フーリエ成分を除去する。ただし、1点源に対応する空間フーリエ成分を、観測データから全部除去するのではなく、その点源強度の数パーセントの強度分を除去する。残りの観測データをフーリエ変換し、次のダーティマップを作成する。そこから新しい最大ピークをまた見つけ、そのピーク位置にも一点源があると考えて、その分をデータから先ほどと同様に除去する。このような処理を残りのマップの強度がノイズレベルに達するまで繰り返す。CLEANの反復から得られた点群 (CLEAN成分の集合)に、シャープな復元ビームをコンボリューションすることでPSFの影響を取り除いた綺麗な像をえることができる。ただ、CLEAN アルゴリズム自体では、画像の解像度、つまり空間分解能を決定できない。したがって、画像の空間分解能は人が判断して決定する必要がある。一般的に、PSFのメインビームサイズと形が空間分解能であると考えられる。PSFのメインビームに二軸不等長ガウス形状をフィットさせて得られたガウス形状を復元ビームとして使用されることが多い。(PSFのメインビームサイズよりも高い空間分解能が得られる場合は、より狭いビーム形状も復元ビームとして使用できる。このような場合、そのマップは超解像マップと呼ばれる。)実際のノイズを反映させるため、CLEANのあとの残差マップを畳み込みマップに加えて、CLEAN マップが完成する。

しかし、CLEANのPSFをデコンボリューションする性能は完璧ではない。実際にはCLEAN アルゴリズムの結果として得られるCLEAN マップは、PSF構造の影響を完全に排除したものにはならない。現在のところ、PSF構造を完全にデコンボリューションできるアルゴリズムは存在しない。このことは、EHTが使用しているCLEAN以外の手法にも当てはまる。このことはSection 5.3で示す。不完全なデコンボリューションには少なくとも2つの理由がある。

まず、PSF構造にはメインビームの他に複数のピーク (サイドローブ)が存在する。その結果、ダーティマップにはサイドローブに対応する複数の対応するピークが現れる。サイドローブによるピークが誤ってCLEAN成分として選択される可能性がある。また、PSF構造にはマイナスの極小値を示す部分があり、CLEAN処理の反復中に偽の (負の)ピークが生じる。これは通常のCLEANの手順では、各ピクセルの絶対値によって最大ピークは選択されるためである。特に u - v カバーがまばらな場合は、誤ったCLEAN成分が得られる可能性があることを認識することが重要である。

次に、データ較正が不十分であると、空間フーリエ成分の振幅と位相は観測天体の構造が本来示すそれらから逸脱してしまう。すると実際のダーティマップはPSFと観測天体の構造のコンボリューション構造から逸脱する。この場合も、正確なデコンボリューションは困難になる。

3.1.3 ハイブリッドマッピング法

像合成過程において、できるだけ正しい天体構造を再現するには、観測データの較正が不可欠である。VLBIにおける像合成では、通常、事前の較正 (アンテナ性能と受信機の温度データに基づく)のみでは不十分である。十分な較正をする必要があることから、セルフキャリブレーションとPSFのデコンボリューションアルゴリズム (CLEANなど)の間での反復をおこなうハイブリッドマッピング法の開発につながった。セルフキャリブレーションは、想定されるモデル画像を仮定して各観測局の較正パラメータを決定する技術である (Readhead & Wilkinson 1978; Pearson & Readhead 1984; Schwab 1980)。ハイブリッドマッピング過程では、点源をモデル画像としてセルフキャリブレーションを開始するのが一般的である。観測天体のほぼ正確な構造が既知である場

合は、それを初期モデルとして採用することができる。ただし、「ほぼ正確な構造」が客観的に確立されたものであり、誤解に基づくものではないことを確認する必要がある。ハイブリッドマッピング過程ではセルフキャリブレーションを行う際には、最後のステップを除くすべてのステップで位相のみの解を推定するのが安全である。最後のステップのみで、位相と振幅の両方をセルフキャリブレーションからもとめて較正解とするのが安全である。セルフキャリブレーションで用いるモデル画像が観測天体構造からまだ大きく離れている初期段階で位相と振幅の両方の解をセルフキャリブレーションで推定することは、特に $u-v$ カバーが少ない場合には、非常に信頼性が低い。この事例については、Miyoshi et al. (2003)を参照するのがよい。そこで報告されているSgr A*のジェット状構造は、ハイブリッドマッピング処理中のモデル画像推定の繰り返しにおけるエラーに起因するアーティファクト(誤り)である。特に、A&Pモード(位相と振幅の両方の較正解を推定するモード)でセルフキャリブレーションを頻繁に使用すると、画像強度が上昇し、偽のジェット状のアーティファクト画像が生成されている。

セルフキャリブレーションは、仮定として用いた像モデルに従う較正解を生成する。その結果、較正したデータから得られる次の像は、観測天体の実際の構造よりも仮定として用いた像に似たものになる可能性が高い。この傾向は、 $u-v$ カバーが少ない場合、特に顕著になる(例えば、Figure 5.4.3とSection 11を参照)。セルフキャリブレーションの使用は、非常に慎重に行う必要がある。

3.1.4 BOX 掛け

CLEANなどのPSFのデコンボリューション処理では、較正が不十分で $u-v$ カバーが不足しているという問題への苦肉の解決策として、視野を制限する技術であるBOX 掛けがよく使用される。しかし、BOXの設定が本当の天体輝度分布の範囲を含んでいない場合、PSFのデコンボリューションを適切に行うことができず、アーチファクト画像が現れることがある。(例えば、Figure 5.4.3とSection 11を参照)。また、実際には構造がない位置にBOXを配置すると、その位置にアーチファクトとしての構造が現れる。

一見良さそうな画像が得られたら、次にその妥当性を客観的に確認する。

3.1.5 PSF 構造との比較

最初のステップは、得られた画像とPSF構造を比較することで、PSFのデコンボリューションがうまくいっていない兆候をチェックすることである。特に、メインビームと第一サイドローブの間隔の整数倍に相当するような明るいピークの間隔があるかどうかを確認する必要がある。もしそうであれば、PSFのサイドローブの影響が画像には残っていて、天体構造が正しく捉えられていない可能性が高い。

3.1.6 観測データと矛盾がないかのチェック

第2段階は、画像と観測データの整合性の確認である。原理的には、有限の $u-v$ カバーで得られる空間フーリエ成分の集合を満たす画像は無限に存在する(Bracewell & Roberts 1954)。しかし、実際の干渉計での画像解析では、得られるデータを完全に満たす画像ひとつを得るさえ、難しい。実際的に一番なアプローチは、データセットにできるだけ合致する画像を取得することである。解析から得られたさまざま

な画像の善し悪しは、データセットとの整合性の度合いで評価できる。得られた画像を逆フーリエ変換して、空間フーリエ成分へ変換し、観測から得られている空間フーリエ成分の位相と振幅と比較する。振幅の比較では、観測データの生の振幅ではなく、正規化振幅(Appendix A)で評価するほうが望ましい。

ここでは、観測データではなく、観測データを画像をモデルとしたセルフキャリブレーション解を用いて較正した、つまり較正後のデータセットを用いて比較を行う。VLBI 観測では、良い画像を得るためには、十分な較正を行う必要がある。較正を行わない観測データ(ビシビリティ)を使って比較すると(そこには誤差が含まれているので)、たとえ得られた画像が正しくても、両者の間に大きな食い違いが生じる可能性が高い。したがって、較正を行った観測データと画像を比較することになる。つまり、これは得られた画像が観測された天体の構造と一致しているかどうかを調べるものではなく、較正と画像合成の自己整合性を調べるものである。

3.1.7 クロージャー量に関する無矛盾性のチェック

それでは、観測天体の構造との完全な整合性を調査する方法はないのかと思うかもしれない。間接的な方法ではあるが、そのような方法はある。クロージャー位相とクロージャー振幅量の使用である。

クロージャー位相(Jennison (1958); Appendix B)およびクロージャー振幅(Felli & Spencer (1989); Readhead et al. (1980); Twiss et al. (1960); Appendix C)は、アンテナに起因する誤差の影響を受けない量であり、観測天体の構造のみによって決定される量である。クロージャー量の調査は、得られた画像を評価する上で極めて重要である。しかし、以下の3つの制限を念頭に置く必要がある。

(i) クロージャー量に合致する画像は原理的には無限にある。実際の解析ではその一つを得るのも難しい。

(ii) クロージャー量においてはアンテナに起因する系統誤差はキャンセルされるが、熱雑音は含まれている。熱雑音の影響の度合いはデータの積分時間を変えることで認識できる。

(iii) アンテナ起因ではなく基線に起因する系統誤差はクロージャー量においてはキャンセルされない。これはクロージャー量の定義から明らかである。干渉計の教科書では、基線に起因する系統誤差がないことを前提に、クロージャー量の説明している場合がほとんどであるが、基線に起因する系統誤差が存在する場合、クロージャー量は閉じられず、観測天体の構造の情報が失われている可能性がある。基線に基づく誤差の例としては、大気位相変動による非コヒーレンスがある。これはクロージャー量が閉じられない。

3.2 データに対する我々のハイブリッドマッピング過程

さて、それでは、私たちが行った具体的な解析プロセスについて説明しよう。データには2つの記録チャンネルのデータがある。それらをマージし、ハイブリッドマッピングという手法を用いて1つの画像結果を作成した。ハイブリッドマッピングはVLBIにおける像合成で一般的に使用されていて、AIPS (NRAOの天文画像処理システム (Greisen 2003))にあるタスクを用いて行える。

Sgr A*の構造における時間変動を緩和するために、EHTCがGRMHDシミュレーションに基づいて行ったようなデータ点に対する特別な重み付けは我々は適用せず、きわめて一般的なアプローチを用いた。ハイブリッドマッピングのステップごとに、CLEAN成分で構成される複数のCLEANマップを平均化して複数の画像候補を作成し、クロージャー位

相の残差、クロージャー振幅、正規化振幅を比較した。これらのうち、画像から（フーリエ変換して）得た空間フーリエ成分と観測データからのクロージャー量の差異を確認して、観測データとできるだけよい一致を示す画像を最終的に選び出した。

我々は、天体構造が不明な場合のハイブリッドマッピングの標準的な手順に従い、点源を初期画像モデルとして用い、ハイブリッドマッピングを開始した。

セルフキャリブレーションはその6ステップを位相のみ解を求めるモードで実行した。各ステップでは、複数の像パラメータ設定 (BOXの設定、AIPSのCLEANを行うタスク、IMAGRではROBUSTNESS、GAIN、NITER のパラメータ)を用いて複数の画像が生成して、比較することで次の画像モデルが選択していった。なお、CALIB (セルフキャリブレーション)における積分時間間隔 (SOLINT = 0.15)は、セルフキャリブレーションのタスクであるCALIBにおいて、コヒーレンス時間よりも十分に短い値に設定されている。このあたりは Miyoshi et al. (2022a)におけるCALIBと同じアプローチに従っている。

Sgr A*は強度の変動が著しく、データ振幅調整の意義は小さいと判断して振幅のセルフキャリブレーションを用いたデータ較正は行わなかった。最初と最後のセルフキャリブレーションと解は、Appendix Dに示した。最初のセルフキャリブレーションソリューションは点源モデルを用いて得られたものであり、2つのチャンネル間の違いは、M87の公開データの解析の場合よりも小さかった。さらに、最後の解と最初の解の差も小さかった。M87の公開データの場合と比較して、事前のデータ較正の段階で高精度な位相較正が行われたと考えられる。(比較には、Miyoshi et al. (2022a)の図2を参照のこと。)

Figure 1に4月7日の観測データのPSF (ダーティビームdirty beam) とダーティマップを示した。

2017年のEHTのPSFは、VLA (Very Large Array)やALMAのような一般的な干渉計のものとは比較できないほど凹凸が激しい。PSF構造のなかでメインビームは決して圧倒的ではなく、高レベルのサイドローブと深くぼみが多数存在する。PSFの構造からわかるように、サイドローブのレベルはメインビームと比較できる高いレベルをもっている。サイドローブのなかで最も高いものは、メインビームの49.1%にも達している。PSF構造の中の負の部分も深く、最深箇所ではメインビームの-78.1%の深さである。メインビームと第1サイドローブの間隔は、約50 μs である。このPSFは非常に凹凸の激しい構造をもっていて、数十 μs の天体構造を特定するのは難しいだろう。

ダーティマップとPSFを比較すると、ダーティマップの中心領域はPSFの主ビームよりもはるかに広く滑らかであることがわかる。これは観測天体の構造の中心部分は空間分解能 (~20 μs)よりも広がっていることを示唆しているまた、ダーティマップの中心構造は、東西方向に伸びてはいるが、かなりの点対称性を示しており、離れた複数のピークで近似されるような構造より、むしろ1つのピークを持つひとかたまりのコンパクトな構造である可能性を示している。PSFの構造については、さらにSection 5.1およびAppendix Eで議論する。

我々はCLEANにおいては1 mas四方の視野設定をした。しかし、実際には、BOX掛けによるCLEAN減算の範囲制限 (直径256 μs 内)を行っている。Sgr A*のサイズについてはSection 1で述べたように、以前から詳細観測がされていて、ジェットのような伸びた構造は検出されていない(ので、我々の設定視野は妥当なはずである)。また、Event Horizon Telescope Collaboration (2022a)の図2における u - v 距離に対する振幅の変化も、EHT 2017観測で観測されたSgr A*の大

きさが1 masよりもはるかに小さいことを示している。従ってSgr A*を撮像する際必要な視野設定は1 mas以内であると安心して仮定できる。

4 我々の像合成結果

ここではSgr A*の我々の最終像を示し、その信頼性を調査する。

4.1 我々の最終像

EHTCが報告したリング構造とは対照的に、我々のSgr A*の最終像では、東西方向に非対称に伸びた形状が示されている。東側が西側よりも明るく見える。また、その周囲にハロー状の淡い広がりも見られる。この東西方向に非対称に伸びた形状は、Section 1で述べたように、43 GHzを超える周波数での過去の観測結果と一致している。

Sgr A*の本来の角サイズが観測波長に比例する (Johnson et al. 2018)と仮定し、Sgr A*の形状をBower et al. (2014)から230 GHzに外挿した形状は、半値幅 (HPBW)で66 \times 24 μs 、その長軸の向きは時角95°となる二軸不等楕円ガウス分布形状となる。この予想形状は、我々の最終画像のピーク輝度の50%レベルにおける形状と一致している。ただ時角は20°異なる。

ここで、以下のような作業仮説を立てる。我々の最終像で観測された東西方向の輝度の非対称性は、降着円盤の高速回転によるドップラーブースト/デブースト効果によるものである。降着円盤の非対称な楕円形状は、我々は(真上からではなく)横方向から回転する降着円盤を見ていることを示唆している。すなわち、円盤は東側が我々に向かってきて、西側は我々から遠ざかるように回転している。我々の最終像がSgr A*の降着円盤の構造を正確に表していると仮定し、ここではドップラーブーストによる増光・減光モデルを用いてその解釈を試みる。ブラックホール周辺の光学的に薄い降着円盤の端面を観測する場合、円盤が相対論的速度で回転していると、ドップラー効果により非対称の明るさパターンが生じる。このような状況におけるドップラー増光/減光による明るさの比 Δ は、以下の式で与えられる。

$$\Delta = \left(\frac{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \right)^3, \quad (1)$$

ここで、 c は光速、 v は円盤の回転速度である。円盤を見る角度は θ であり、 $\theta = 0^\circ$ は円盤を真横から見る場合、 $\theta = 90^\circ$ は円盤の真上から見る場合である。

Figure 2 (a)では、東側で最も明るいスポット (強度は $2.1701 \times 10^{-4} \text{ Jy/Beam}$, 位置 (0, -2 μs))と西側にある暗いスポット (強度 $3.8635 \times 10^{-5} \text{ Jy/Beam}$, 位置 (-37, -17 μs))がある。この最も明るいスポットはドップラー効果により最も強調され、最も暗いスポットはドップラー効果により最も弱められているものと仮定する。

その強度比は $\Delta = \frac{2.1701 \times 10^{-4}}{3.8635 \times 10^{-5}} = 5.617$ なので、

$$\frac{v}{c} \cos \theta = 0.438. \quad (2)$$

銀河中心までの距離を $D_{\text{GC}} = 8 \text{ kpc}$ 、Sgr A*のブラックホール質量を $4 \times 10^6 M_\odot$ とすれば、角距離21.3 μs 、つまりブーストによる最も明るい数パーセントと最も暗くなっているスポットの間隔は~2.11 R_S に相当する。この距離は3 R_S 、つまり回転していないブラックホールの周りでの最内縁安定円軌道より

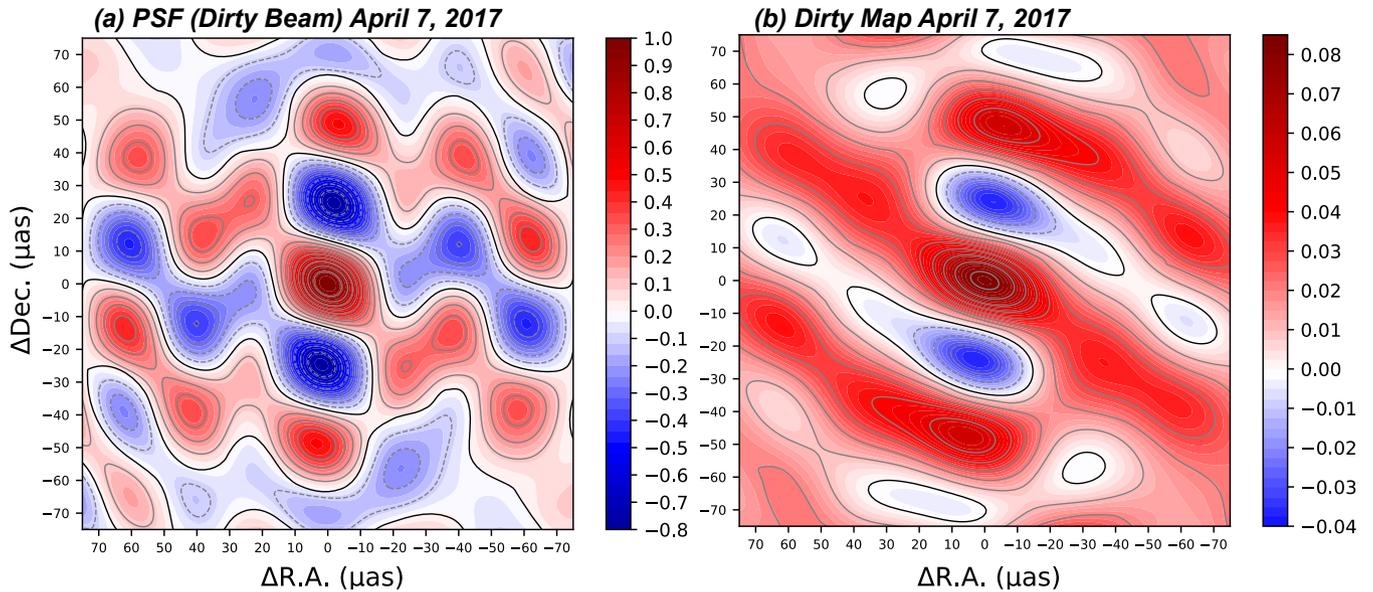


Figure 1. 4月7日の観測データに対するPSF (ダーティビーム) とダーティマップ。パネル (a)はPSFで、スケールはメインビームの高さで正規化した。パネル (b)は、一点源モデルを用いたセルフキャリブレーション (位相のみ) の解でデータを較正した後のダーティマップである。強度の単位はJy/beamである。

狭い。おそらく、これはSgr A*のブラックホールは回転するカーブラックホールであることを意味する。ブラックホールからこの距離では一般相対論的円運動速度は $v_{GR} \sim 0.607c$ であるから、我々は回転円盤を $\theta \sim 43.8^\circ$ の角度から見ているということになる。この観測データはブラックホールのそば、約2から数 R_S あたりの降着円盤の放射の情報を含んでいると思われる。

これまで、Sgr A*の降着円盤に対する我々の視線角度については真上から真横まで多様な推定がある。最近のGRAVITYの観測では $i = 160 \pm 10^\circ$ (GRAVITY Collaboration 2018)、つまりほぼ真上からと報告される一方、電波観測からはしばしば真横からと推定されている。Cho et al. (2022)は $30 \sim 40^\circ$ 以下と推定、Dexter et al. (2010), Broderick et al. (2011), そしてWang et al. (2013)は $50 \sim 68^\circ$ と推定している。Miyoshi et al. (2011)はSMI法によるピーク位置の変化から $87 \sim 87.7^\circ$ 、つまりほぼ真横からと報告している。

以上述べたSgr A*の降着円盤内側部分についての議論は、我々の最終像が正しいと仮定した上でのものである。Figure 2 (a)に見いだせる微細構造がリアルであるとしての議論であるのだが、Figure 2 (b)にはもう少し大きめの復元ビームとして $25 \mu\text{as}$ のガウス型ビームを使った場合の像を示した。この図の場合、西側の暗い点、ドップラーデブースト点であると思った点は見えなくなっている。従って、Figure 2 (a)に見いだせる微細構造はリアルでないかもしれない。

4.2 我々の最終像の信頼性

我々の最終像の信頼性を評価するために、我々は正規化振幅、クロージャー位相、クロージャー振幅の残差を計算し、EHTCのリング像の場合のそれらと比較した。EHTCのリング像については、その像を構成する各セルの座標とその座標における強度を得るために、Event Horizon Telescope Collaboration (2022a)の図3をデジタイズした。各セルの強度を読み込んだ後、全体の強度を1Jyと仮定して修正し、数値画像データをAIPSのタスクであるUVMODに入力し、EHT

2017の $u-v$ カバーと同じデータを持つビジビリティセットを作成した。¹

クロージャー位相とクロージャー振幅に関する残差を調べると、我々の最終像とEHTCリング像との間に明確な違いは見られない。正規化振幅の残差について言えば、EHTCリング像の場合にくらべ、我々の最終像では残差が半分になっている。なお、我々の最終像とEHTCリング画の両方ともで、残差がM87 (Miyoshi et al. 2022a)の場合のそれらよりもかなり大きいことは注目に値する。おそらくこれは、Sgr A*の一日のうちに起こる急速な変動の影響であろう。

4.2.1 EHTCリングと比較した、我々の最終像の正規化振幅の残差

Figure 3に正規化振幅残差 (Section 3.1.6, Appendix A)を示す。EHTCのイメージングチームも彼らの解析のなかでこれについて調べている。

我々の最終像は、積分時間 ($T_{\text{int}} = 10 \text{ sec}$ から $T_{\text{int}} = 900 \text{ sec}$ までの間)に関わらず、EHTCリング像の場合よりも、残差の平均値と標準偏差が常に小さく示されている。我々の最終画像の残差の平均は0から0.2であるのに対し、EHTCリング画像の残差は0.2から0.6である。我々の最終画像の標準偏差は1前後であるのに対し、EHTCリング画像のそれは1以上3以下である。例えば、積分時間 $T_{\text{int}} = 180 \text{ sec}$ において我々の最終像は正規化振幅残差は $NR_{\text{ours}} = 0.080 \pm 0.397$ であるが、EHTCのリング像のそれは $NR_{\text{EHTC}} = 0.862 \pm 1.552$ である。しかし、M87 (Section 5.4)の場合の残差と比較するとSgr A*では我々の最終像もEHTCのリング像も得られた正規化振幅の残差の値は著しく大きい。少なくとも、これらの大きな残差は、我々の計算ミスによるものではないと確信している。なぜなら、Event Horizon Telescope Collaboration (2022d)が記すEHTCリ

¹ M87の場合と違って、Sgr A*の撮像パイプラインをEHTCは公開していない。

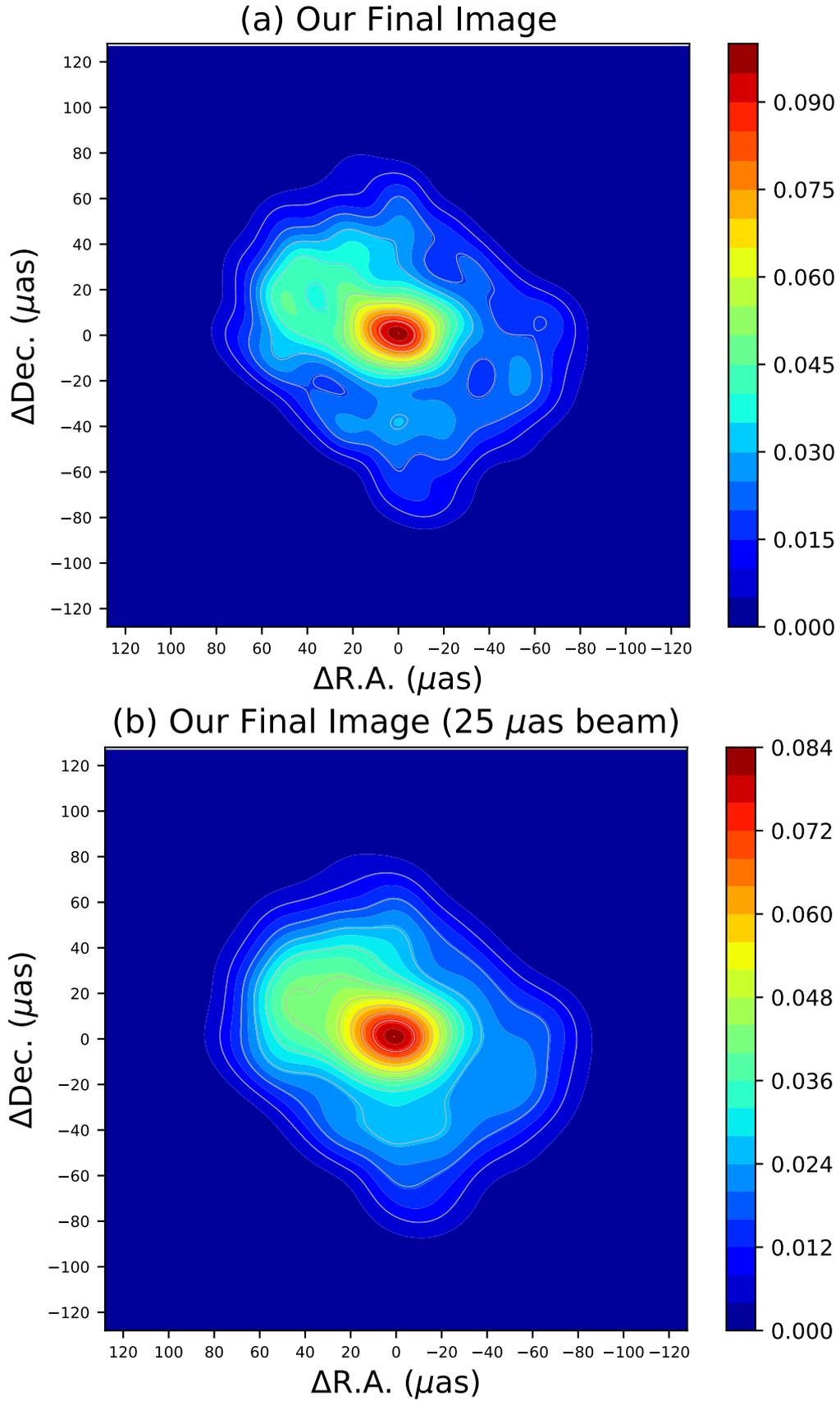


Figure 2. 我々の解析から得たSgr A* の最終像。パネル (a)は20 μas (HPBW)サイズのガウス型の復元ビームをCLEAN 成分に適用して描いたもの。パネル (b)は25 μas (HPBW)サイズのガウス型の復元ビームをCLEAN 成分に適用して描いたもの。ともに輝度の単位はJy/beam

ング像の場合の残差結果が、我々の残差分析結果と矛盾していないからだ。M87の場合の残差よりも大きな残差となる原因は、Sgr A*の強度と構造が短期変動することだろう。観測中に変動する天体構造を単一の静止画像で表現しよう(と無理を)とした結果である。

特徴的なのは、積分時間に対する残差の挙動である。我々の最終像では、積分時間を変えても値の変化は大きくないが、EHTCリング像では、平均値と標準偏差が積分時間とともに徐々に増加しているように見える。

一般的に、熱雑音による残差は積分時間とともに減少する。このデータセットではこれが観察されないため、ここでの残差は熱雑音によるものではなく、むしろ何らかの系統誤差によるものであると結論づけることができる。以下に説明するクロージャー位相とクロージャー振幅に関する残差でも同様の挙動を示しており、熱雑音以外の何らかの要因が優勢であることを示唆している。

EHTリング像の場合、積分時間を長くすると残差が大きくなる理由として、コヒーレンスの回復が不十分であることが考えられる。像が不適切なモデルである場合、セルフキャリブレーションによるデータの較正は当然不十分となる。大気中の水蒸気による位相変動の影響が十分に除去できず、データが示す振幅値が小さくなり、正規化振幅における残差が大きくなる可能性がある。

(高度角が低いほど、大気位相変動の影響が大きくなる。各局での観測高度角をしらべてみた)各観測局におけるSgr A*の観測高度角は、思ったほど高くない。チリにあるALMAとアタカマパスファインダー実験(APEX)の観測局では、最大高度角は約80°に達するが、LMT、ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡(JCMT)、サブミリ波干渉計(SMA)の観測所では、最大高度角は約40°である。アリゾナ州のサブミリ波望遠鏡観測所(SMT, AZ)とピコ・ペレタ(PV)局の高度角は30°未満である。SPT局は南極点に位置しているため、観測される仰角はほぼ30°で一定である。

4.2.2 EHTCリングと比較した、我々の最終像のクロージャー位相の残差

Section 3.1.7とAppendix Bで示しているように、クロージャー位相は、アンテナに起因する系統誤差の影響を受けない量であり、基線に基づく誤差が存在しない限り、天体構造、その輝度分布のみに依存する量である。観測データのそれと像から(逆フーリエ変換によって)導出されたその間の相違は、像と観測データの整合性を評価する上で重要な指標となる。

ここでは、我々の最終像とEHTCのリング像のクロージャー位相の残差を比較する(Figure 4)。例えば、 $T_{\text{int}} = 180 \text{ sec}$ の場合、我々の最終像の残差は $\text{Res}_{\text{cp}} = 0.2 \pm 58.1^\circ$ であり、一方、EHTCリングの残差は $\text{Res}_{\text{cp}} = -4.3 \pm 55.3^\circ$ である。

我々の最終像の残差の平均値は、積分時間に関係なくゼロに近い。一方、EHTCリング像の残差の平均値も、ゼロからそれほど離れていないのだが、標準偏差の大きさを考慮すると、積分時間に関係なく、常にゼロから数度離れている。このことから、我々の最終像は実際の天体構造にEHTCの像に比べて少しは近いのではと考えられる。

しかし、どちらの場合も、積分時間とともに標準偏差が減少しない。もし誤差が熱雑音によるものであるならば、標準偏差値は積分時間の -0.5 乗に比例して減少するはずである($\propto T_{\text{int}}^{-0.5}$)。

平均値がゼロに近く、標準偏差が約 50° で積分時間に関係なく一定である理由も、Sgr A*の構造の時間変化によるものかもしれないと推測した。この推測が正しいのか確認するた

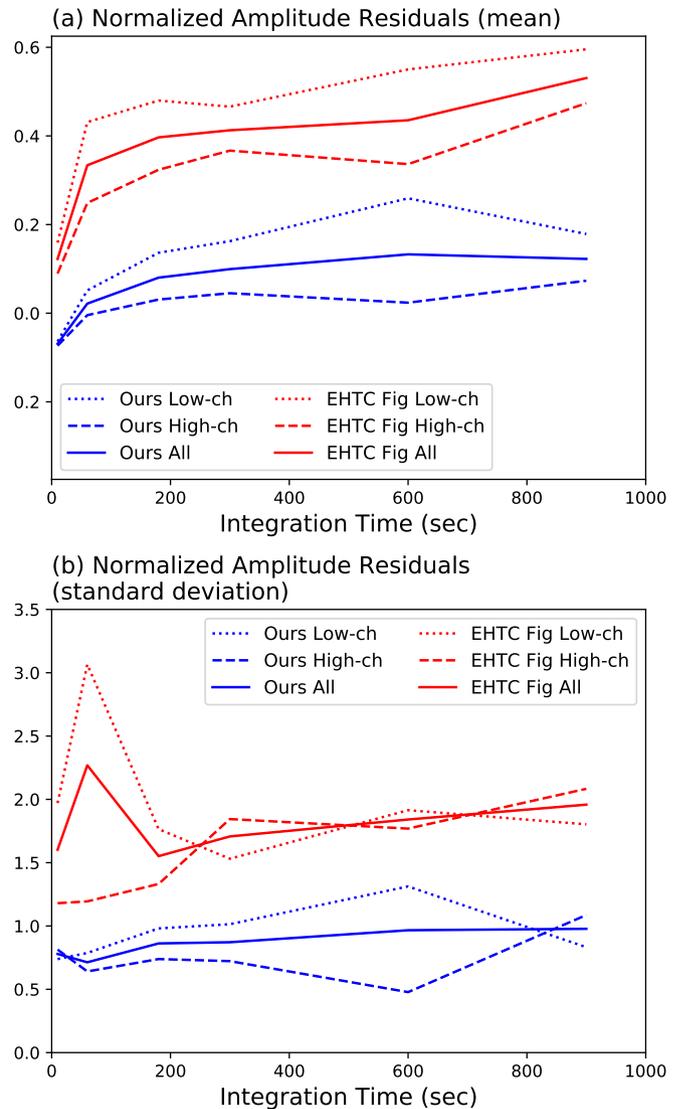


Figure 3. 正規化振幅の残差の統計。パネル(a)は正規化振幅の残差の平均を、パネル(b)はその標準偏差を示す。赤線はEHTCリング像の場合の残差統計量(平均、標準偏差)、青線は我々の最終像の場合の残差統計量である。実線は全データの残差の統計量を示し、破線は二つある記録チャンネルのうちロー・チャンネルとハイ・チャンネルのデータに限定して計算した場合の統計量を示す。

めに、2つの記録チャンネル間のクロージャー位相差を調査した。Sgr A*の強い短期的変動にもかかわらず、同時に記録されているので理論的には同じクロージャー位相値を示すはずである、したがって、記録チャンネル間のクロージャー位相差は平均するとゼロになるはずである。そして誤差として熱雑音のみが存在しているならば、標準偏差は積分時間の -0.5 乗に比例して減少するはずである。

以下の詳細な計算から、記録チャンネル間の観測周波数設定のわずかな差は無視できることがわかる。2つのチャンネルの観測周波数はわずかに異なり、周波数の差はわずか 0.88% (227.1 と 229.1 GHz)である。確かに、Sgr A*の構造には周波数依存性があるが、この周波数による違いはわずか 1% 未満である。Johnson et al. (2018)のSgr A*の大きさの推定値をここに応用すると、介在するプラズマによるサイズの広がりのはずれは $0.4 \times 0.2 \mu\text{as}$ となる。またSgr A*の本来のサイズでは、その差はわずか $0.46 \mu\text{as}$ である。これらは観測の空間分解能($\sim 20 \mu\text{as}$)よりもはるかに小さく、したがって、天

体構造や散乱の影響の周波数依存性に起因する記録チャンネル間のデータの違いは本質的に無視できることになる。

ところが、予期せぬ結果、記録チャンネルに含まれる天体情報に内部矛盾があると思われる結果がでてきた。

チャンネル間のクロージャー位相差の標準偏差は予想よりも大きい。例えば、 $T_{\text{int}} = 180 \text{ sec}$ の積分における差は $0.007 \pm 54.9^\circ$ であり、これは上に示したクロージャー位相差の値とあまり変わらない。確かに、平均値が期待通りほぼゼロであるのに対し、積分時間を変えても標準偏差はあまり減少しない。もし周波数チャンネル間の周波数の違いに依存して天体構造が大きく異なっている場合、2つのチャンネル間の差の平均値はゼロにならない。しかし、観測された平均値はほぼゼロであるため、観測天体の構造に有意な周波数依存性があるとは解釈できない。おそらく、データにはクロージャー位相に関して内部的な矛盾があることを意味している。

Figure 4には、チャンネル間のクロージャー位相差も示している。クロージャー量の不整合は、データが天体構造に関して正しく情報を含んでいない可能性を示唆している。この問題を深く掘り下げるために、EHTCから一般に公開されているすべてのSgr A*観測データを調査した。これらのデータの2つの記録チャンネル間の差異については、Appendix Gで説明した。

4.2.3 EHTC リングと比較した、我々の最終像のクロージャー振幅の残差

ここでは、クロージャー振幅の残差を調べる。クロージャー振幅は、Section 3.1.7 と Appendix C で示されているように、各アンテナからの系統誤差にはよらない量である。クロージャー位相同様、像と観測天体の実際の構造との間の整合性を評価するための尺度として機能する。Figure 5に、正規化クロージャー振幅の実際の残差を示す。

例えば、 $T_{\text{int}} = 180 \text{ sec}$ の場合、我々の最終像の正規化クロージャー振幅残差は $\text{Res}_{\text{ca}} = 0.473 \pm 3.784$ であるが、EHTC リングのそれは、 $\text{Res}_{\text{ca}} = 0.432 \pm 3.643$ である。比較参照のためにチャンネル間の正規化クロージャー振幅の差異を示す： $T_{\text{int}} = 180 \text{ sec}$ の場合、ハイチャンネルを基準にすると $\text{Res}_{\text{ca}} = 0.480 \pm 2.339$ ローチャンネルを基準にすると $\text{Res}_{\text{ca}} = 0.686 \pm 6.746$ となる。

我々の最終像とEHTC リング像の両方において、正規化クロージャー振幅の残差は無視できない。ここでも、残差値は必ずしも積分時間とともに減少するわけではないことがわかる。積分時間が300 secまでの場合、平均値と標準偏差は一般的に減少する。しかし、積分時間が300 secを超えると、両者は増加する。さらに、最大値が180 secの積分時間で得られることがあることは注目に値する。

Figure 5では、正規化クロージャー振幅の残差だけでなく、2つの記録チャンネル間の差も示している。

詳細はAppendix Fを参照してほしい。もしここで見つかったチャンネル間の正規化クロージャー振幅の差が、クロージャー振幅に何らかの系統誤差が含まれていることを意味するならば、残差量のより小さい最適な像を選択することは困難となる。

4.2.4 我々の最終像におけるPSF構造の影響

一般的に、PSF構造を完全に排除した像を得ることは非常に難しい。我々の最終像にPSF構造に起因すると思われる特徴がないか調べた。2017年のEHTアレイのPSFでは、

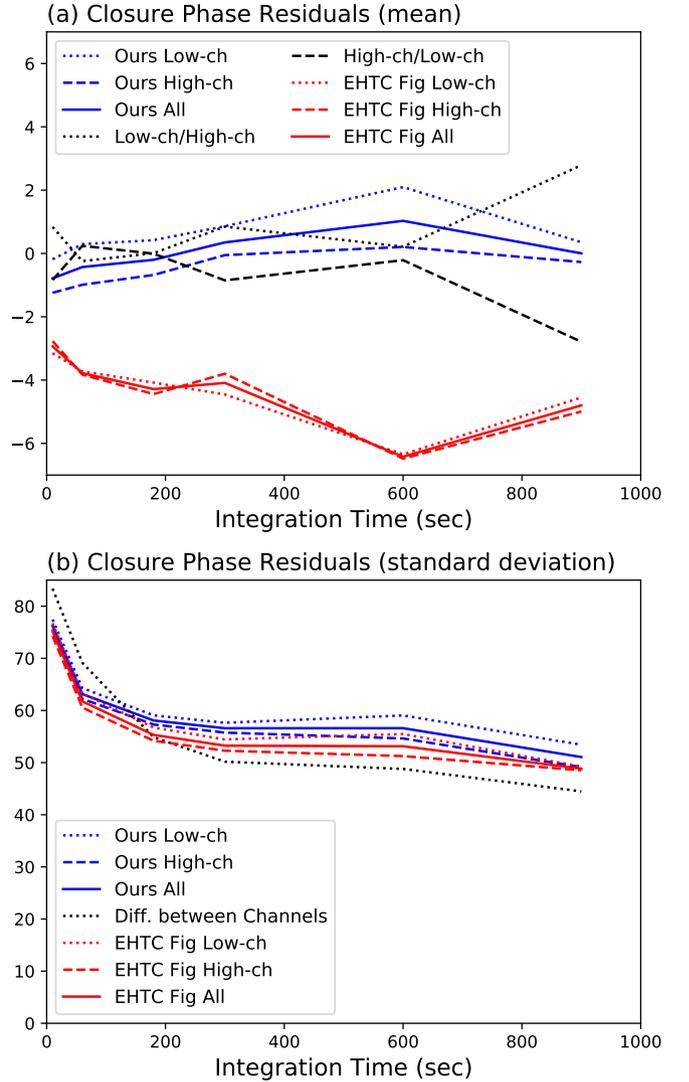


Figure 4. クロージャー位相に関する残差の統計。パネル (a)はクロージャー位相の残差の平均を示す。パネル (b)はその標準偏差を示している。赤線はEHTC リング像の場合、青線は我々の最終像の場合のクロージャー位相の残差の統計量(平均値、標準偏差)である。全データに対して計算した残差の統計量は実線で示す。2つの記録チャンネルがあるが、それぞれ別々にして計算した場合の残差の統計量を点線で示す。さらに、黒い点線は2つの記録チャンネル間のクロージャー位相の「差」の平均値、標準偏差を示す。

約 $50 \mu\text{s}$ 間隔の構造が顕著である。最も顕著なのは、メインビームと第一サイドローブの間隔であり、 $49.09 \mu\text{s}$ である。Figure 6は、等高線による表現で我々の最終像を示したものである。中心のピークから約 $50 \mu\text{s}$ 離れた位置に、いくつかの極大値が見られる。特に、P1、P2、P3、P4は、ピークから $50 \pm 2.5 \mu\text{s}$ の距離にある。これはおそらくPSF構造の影響によるものと思われる。しかし、最終像の全体的な輝度分布には大きな影響を与えていないようだ。

4.2.5 我々の最終像の信頼性のまとめ

クロージャー位相と正規化クロージャー振幅における残差から、我々の最終像の信頼性を要約すると、EHTC リングとの間に有意な差は見られなかった。しかし、我々の最終像の正規化振幅の残差はEHTC リングの場合に比べて約2倍良好で

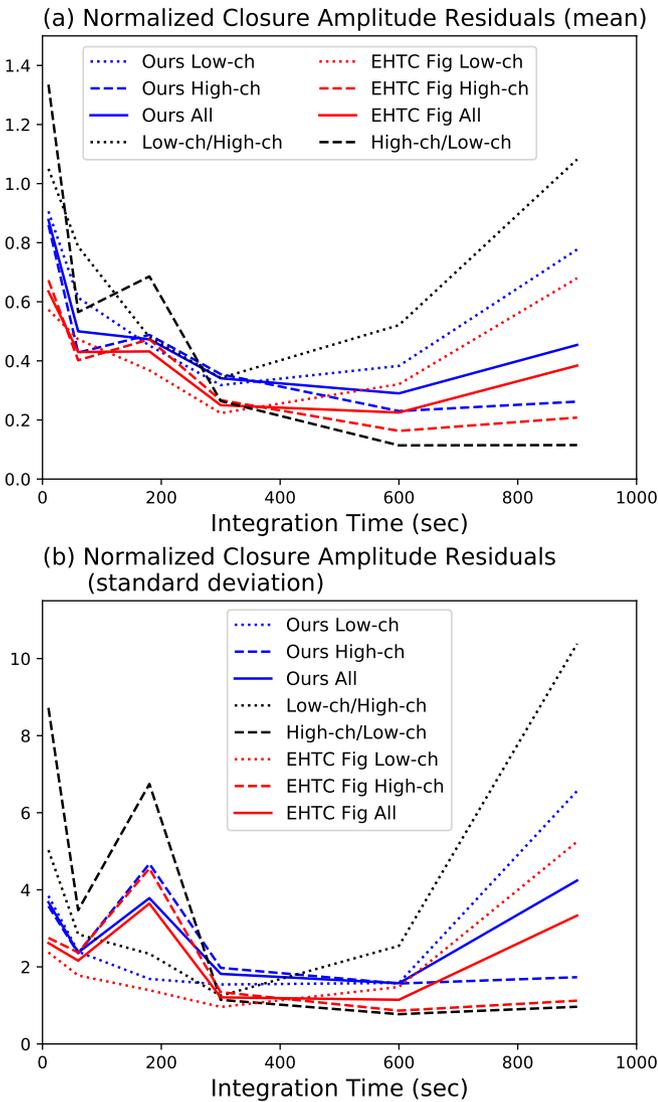


Figure 5. 正規化クロージャー振幅の残差の統計。パネル (a) は平均値を示し、パネル (b) は対応する標準偏差を示す。実線は全データの正規化クロージャー振幅の残差の統計量 (平均値と標準偏差) を示す。赤線はEHTCリング像の場合の統計量、青線は我々の最終像の場合である。点線はロー・チャンネルとハイ・チャンネルのデータのみに対するの残差統計を表す。なお黒い点線は2つの記録チャンネル間の「差」を表す。

あり、我々の最終像は比較的、観測データとの整合性のあるものであることを示している。

この調査で、Sgr A*の時間変動とは全く無関係に、観測データの品質そのものに深刻な問題がある可能性が高いことが分かった。相関処理を含むEHTデータ処理に何らかの内部的な不整合があるのかもしれない。クロージャー量が保存されていない場合、その程度は不明であるが、画像の情報が破損している可能性がある。我々の最終像とEHTCリング像の両方が同じ程度のクロージャー残差を示していることから、クロージャー量の残差解析からは50 μas 程度の大きさの形状を有無を決定できないほどデータが破損している可能性がある。Appendix Gで示されているように、EHTCデータには、記録チャンネル間に説明できないクロージャー量の不一致がすべての公開データには存在する。現在のEHT公開データのみを使用して、これらの未知のエラーの原因を特定することは極めて困難である。EHT公開データは、複数のチャンネルの平均化とマージにより、時間分解能は低下しており、記録チ

ャンネルの帯域幅と偏光特性は失われている。クロージャー量の不一致の原因を特定するには、相関器の生出力データをチェックする必要がある。観測時に記録されたデータが利用可能な場合は、相関プロセスから再現すべきである。

5 EHTC リング形状とVISIBILITYデータの関係

ここでは、2017年のEHTによるSgr A*の観測において、そのPSF構造により、直径約50 μas のリングが(誤って)発生されうすることを説明する。これは主に、PSF構造にメインビームから約50 μas の位置に最大のサイドローブがあり、かつメインビームとの中間点に最も深い負の最小値があるためである。

5.1 Sgr A*に対する2017年のEHTの $u-v$ カバーと対応するPSF

ここでは、2017年のEHTがSgr A*観測においてサンプルできる $u-v$ カバーの調査をする。EHTC論文 (Event Horizon Telescope Collaboration 2022a)では、 $u-v$ 平面における $u-v$ カバーの範囲を示している。残念ながら、通常多くの論文で示されているこのタイプの図では、データのサンプル量についてはわからない。そこで、Figure 7では、フリッジ間隔に対するデータサンプリング数の分布を示した。プロットには、最小フリッジ間隔24 μas から80 μas までのサンプリングがあるが、フリッジ間隔によってサンプル数が大幅に異なることがわかる。懸念されるのは、30 μas 以下に2つの完全な未サンプリングの空白があることだ。

Sgr A*観測データの $u-v$ 分布に基づいて、PSFには30 μas 未満の間隔での顕著な凹凸構造を持つと予想した。Sgr A*のEHTCリング像の大きさは直径50 μas と測定されていて²、30 μas の周りではない。今回のSgr A*のEHTCリング構造はPSF構造によるものではなく、実際の天体構造の特徴によるものであると期待した。実際のPSF構造には、約50 μas のスケールで顕著な上下する構造が見受けられる (Figure 9)。したがって、 $u-v$ カバーだけを調べても、PSF構造を完全に理解することはできない。学術論文では、 $u-v$ カバーの図だけでなく、PSF構造そのものを示すことが不可欠である。このPSFの詳細な特性は以下に概説する。メインビームはPSF構造の中心で形成される。メインビーム形状へのガウスフィッティングにより、デフォルトのレストリングビームとして (FWHM) = 23.0 \times 15.3 μas 、長軸の時角はPA = 66.6° (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)が得られる。このサイズ測定に基づいて、EHTCによるイメージングの空間分解能は20 μas と定義されている。これは極めて自然な測定であり、我々の分析においても適切であることが確認されている。参考までに、デフォルトの復元ビームとEHTCが使用した復元ビームの比較と、EHTCが得られた像との関係をFigure 8に示す。デフォルトの復元ビームの形状と大きさは、EHTCリングの中央の穴、ブラックホール・シャドウと思われる部分にちょうど収まっている。PSFの構造を確認する際には、メインビームの形状とサイズだけでなく、PSFに現れるその他の構造も考慮することが重要である。まず最初に考慮すべきことは、第一サイドローブの高さと、主ビームに対する位置である。Figure 9にPSF構造を示すが、

² EHTCで測定されたブラックホール・シャドウの直径は $d = 48.7 \pm 7.0 \mu\text{as}$ であり、明るく太いリングの直径は $d = 51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$ である (Event Horizon Telescope Collaboration 2022a)。

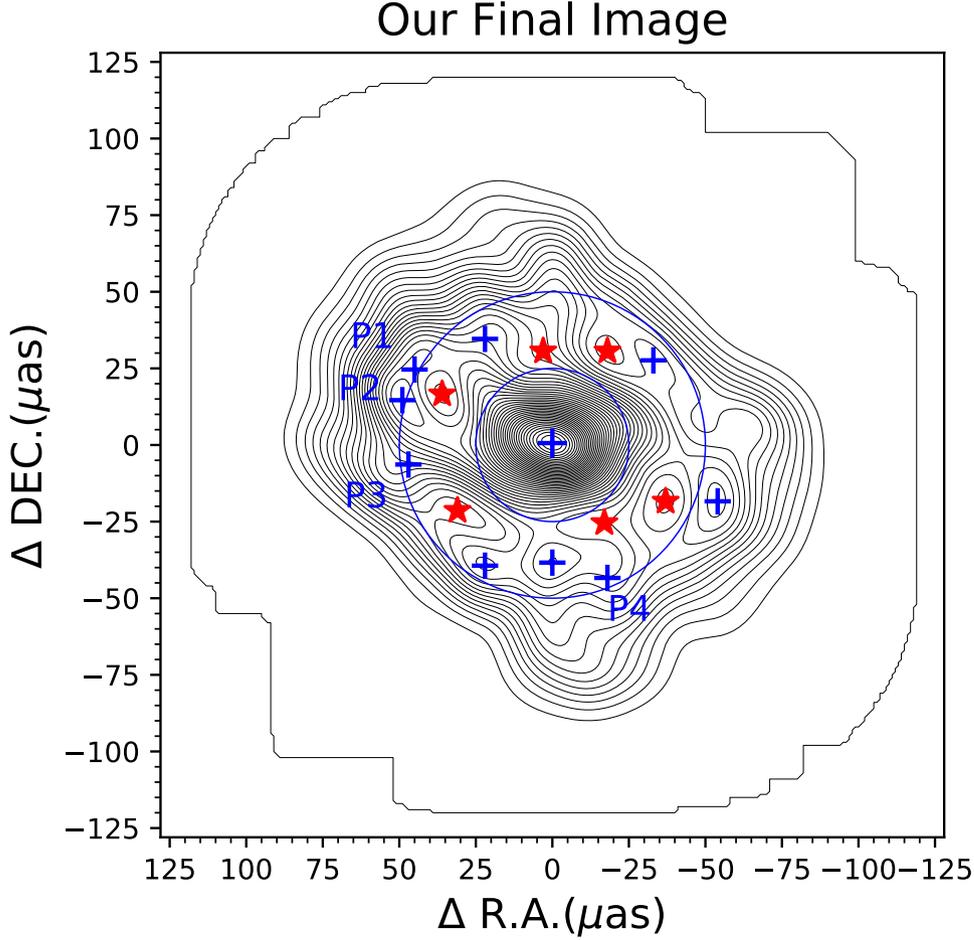


Figure 6. 我々の最終像におけるPSF構造の影響を見る。画像中の局所極大を青い十字で、局所的極小点を赤い星印で示す。P1、P2、P3、P4は中央のピークから $50 \pm 2.5 \mu\text{as}$ に位置する局所的極大点である。等値線はピークからゼロレベルまでの区間を50分割して2%ごとに刻んでいる。中央のピーク位置を中心にして、直径25と50 μas の円を参考のため描いた。

第一サイドローブはメインビームに対して $(-3, +49 \mu\text{as})$ と $(+3, -49 \mu\text{as})$ に位置する。これら2つのサイドローブはどちらも、メインビームから $49.09 \mu\text{as}$ 離れている。この距離は、EHTCリングの直径に等しい。第一サイドローブのピークの高さは、メインビームのピーク高さの+49.1%に達しており、これはきちんと設計した電波干渉計のPSFで見られるサイドローブよりも桁違いに高い。データの振幅較正が不十分な場合、メインビームとサイドローブの距離に等しい距離に、真のピークよりも高い偽のピークが現れる可能性がある。もう一つの重要な点は、PSF構造に深いマイナスの値となる部分が存在することである。これもPSF構造に寄与する空間フーリエ成分が不十分なためである。2017年のEHTでサンプリングされたデータセットでは、PSF構造には非常に深いマイナスの領域ができあがる。Figure 9の青い領域は、レベルが負である場所を示している。

PSF構造の最も深い極小値は、 $(-2, +25 \mu\text{as})$ と $(+2, -25 \mu\text{as})$ に現れ、これらのメインビームからの距離は $25.08 \mu\text{as}$ である。この距離はEHTCが測定した明るく太いリングの半径 ($r = \frac{51.8 \pm 2.3}{2} = 25.9 \pm 1.15 \mu\text{as}$) と同じである。また、最深部の極小値の深さはメインビームの高さの-78.1%に達していることが注目される。ALMAのような

多素子で構成された干渉計のPSF構造では、このような深くぼみは見られない。

まとめると、2017年のEHTのSgr A* に対するPSFは、鋭く高いメインビームを形成しておらず、サイドローブのピークが高く、広い範囲にいくつかのマイナスとなるくぼみを持ち、でこぼこした構造を形成している。また、PSFのなかで上下する構造は、その典型的な間隔がおよそ50 μas になる。Figure 9に示すように、メインビームと第一サイドローブの中間点(北側の)を中心にして直径50 μas の円を描くと、その円周上にピーク群が存在することになる。従って、2017年にEHTアレイでえたSgr A* のデータからは50 μas サイズのアーチファクト(=誤り)が撮像結果に生じる可能性が高いと我々は考えられる。

5.2 リングとは異なる構造を含む模擬データからのリング像

ここでは、EHT2017のPSF構造に起因するアーチファクト(=誤り)として、リング状構造が生じる可能性を系統的に検討する。AIPSのタスクであるUVMODを用いて2つのシミュレーションデータセットを作成した。一つは、具体的な像構造もたず単に現実的な強度のノイズのみで構成される模擬デ

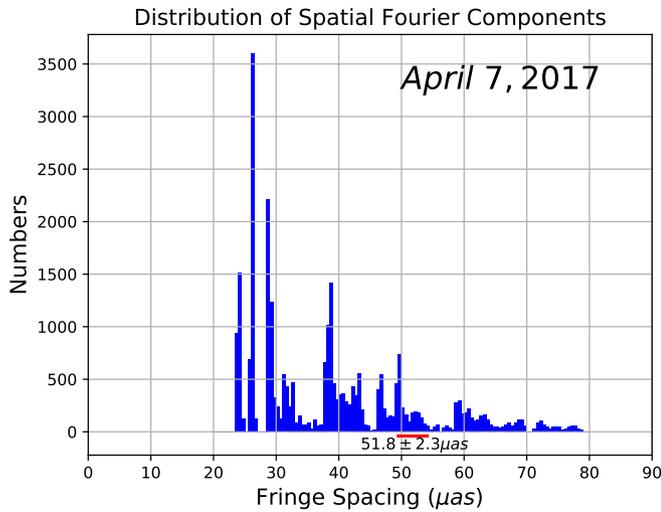


Figure 7. 全基線から得た観測データの分布 (2017年4月7日観測データ)。横軸は、取得されたvisibilityデータのフリンジ間隔を μas 単位で示す。縦軸はサンプル数である。赤い線分はEHTCで測定したリングの直径 ($d = 51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$) に相当するフリンジ間隔を示している。取得されたデータには、他に 2.2 arcsec から 3.2 arcsec 程度の空間フーリエ成分がある。ここでは、このような大きなサンプルは省略してプロットしている。

ータ、もう1つは、全くノイズのない一点源構造を持つ模擬データである。どちらも、EHTアレイ (2017) のSgr A*観測に対するのとおなじ $u-v$ カバーをもつ模擬データである。

実際の観測データは通常、有限な大きさの天体の構造に関する情報をノイズの誤差を伴って含んでいる。ここで用いた模擬データは、そのような実際の観測データから最も遠い極端なものであり、リング構造のデータとは明らかに全く異なるものだ。ノイズを含まない一点源模擬データには、非常に単純な構造に関する情報が含まれており、ノイズがないため、一点源データであることがすぐに推測できる (振幅は投影基線長に依存せず一定、クロージャ位相は常に0、クロージャ振幅は常に1)。もう一つの模擬データ、天体構造を持たず、単にノイズのみで構成されている模擬データの場合、位相の値は0から 2π の間でランダムに一律に分布している。このデータをチェックすれば、即座にノイズが支配的なデータセットであり、像合成処理をする意味がないと結論できるようなデータだ。実際のデータ解析では、像合成処理の前にデータの特性を調べる。この模擬データで (調べれば) は像合成処理をしてもリングはでてこないことはすぐに理解できる。そのような模擬データを用いて、ここで示したいのは、EHT2017のSgr A*観測データのような乏しい観測データに対し、セルフキャリブレーションと視野を制限することがどれだけ強く撮像に影響を与えるかである。

直径 $51.8 \mu\text{as}$ のオフセットリング像とEHTCのリング像を用いてセルフキャリブレーション (=位相と振幅の両方に対して) を行った。また、領域をBOX 掛けで制限してCLEANによる撮像を行った。Figure 10 にシミュレーションの結果を示す。「ノイズのみで構造なし」と「ノイズなしの一点源」の両方の模擬データから、セルフキャリブレーションで画像モデルとして用いたものと同じようなリング状の像を再現することができた³。オフセットしたリングの場合、セルフキャ

³ 面白いことに、「ノイズのみで構造なし」の模擬データのダーティマップでは、典型的なスケールが $50 \mu\text{as}$ くらいなのでこぼこした構造が見られる。

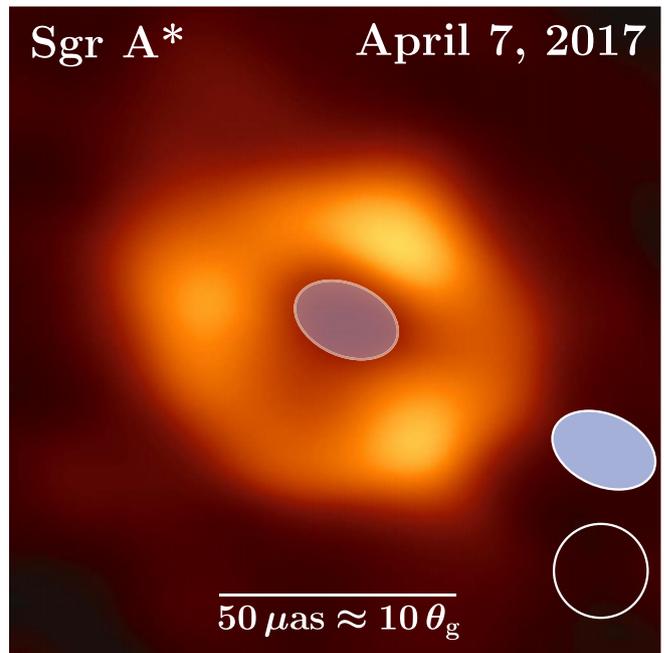


Figure 8. デフォルト (= 通常) の復元・ビームとEHTCの像の比較図。デフォルトの復元・ビームは $\text{FWHM} = 23.0 \times 15.3 \mu\text{as}$, $\text{PA} = 66.6^\circ$ の楕円状ガウシアン形状で、パネルでは青い楕円で示されている。白い円はEHTCがその画像作成に使用した復元・ビームである。オリジナルの像は、Event Horizon Telescope Collaboration (2022a)のFigure 3 である。

リブレーションにおいて与えられたモデルとほぼ同じ像が再現されている。セルフキャリブレーションにおいてEHTCリングを用いた場合の結果では、EHTCリングに似ているが、完全な再現ではない。これはおそらくデータの重み付けの違いによるものであろう。EHTCは独自のデータ重み付けをしてリング画像を得たが (これについてはSection 6で議論する)、我々のシミュレーションでは彼ら考案の重み付けは使っていない。この点を考慮すると、我々のシミュレーション結果は、基本的に非リングデータからEHTCのリング画像と同等のものを再現したと考えるのが妥当であろう。「ノイズのみで構造なし」と「ノイズなしの一点源」の両模擬データは、そのデータがオリジナルに含んでいない像 (リング) を用いたセルフキャリブレーションによって「較正」され、非常に狭いBOX 設定で撮像行為を行うことで、オリジナルの像ではなく、リング形状が得られた。この結果は、EHT 2017のSgr A*に対する $u-v$ カバ-が、観測天体の構造を正確に再現するには不十分であり、(セルフキャリブレーションなどにおいて解析者が) 想定したモデル像と一致する結果をもたらす可能性が高いことを示す重要な兆候の一つである。明らかに、セルフキャリブレーションはアンテナベースの較正解がを算出するので、それをデータに適用しても、データのクロージャ量は変わらない。もし「較正された」データのクロージャ量と、得られた画像からフーリエ変換して得たvisibilityデータのクロージャ量を比較すれば、両者は同じではない。ここで得られたリング状の画像がアーチファクト (誤った像) であることは明らかである。

別の観点から、このシミュレーション結果を検証する。Figure 11は、像空間ではなく、visibility空間での結果を示しており、リングモデルによるセルフキャリブレーションと、CLEAN処理で用いた狭いBOX 設定が、元々リングでない視認性データを大きく変化させて、リング像を創り出

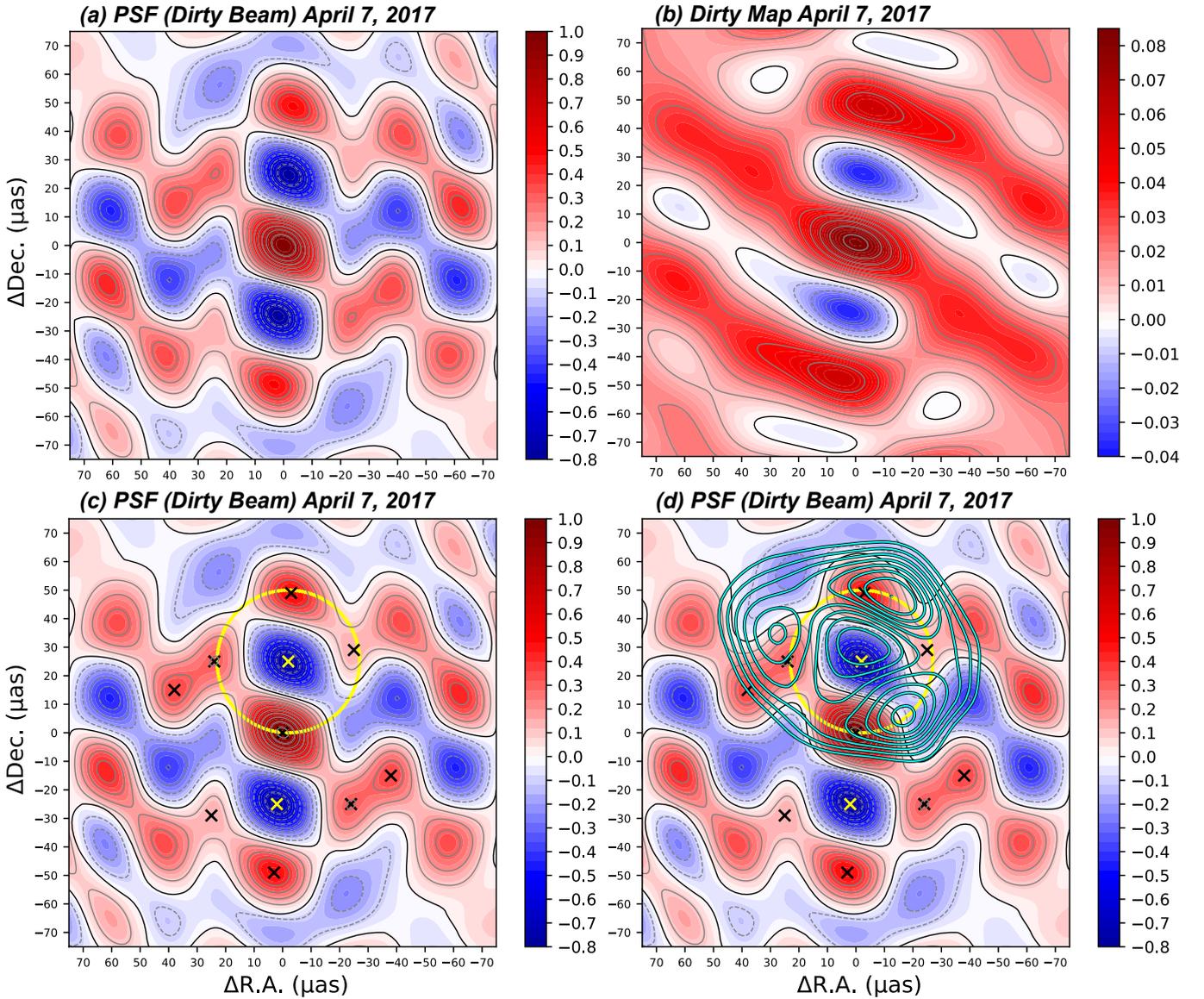


Figure 9. 2017年のEHTのSgr A* 観測(2日目)データのPSF 構造(電波干渉計の術語としてはダーティービーム)とダーティマップ(=データを単純にフーリエ変換して像にしたもの)。パネル(a)、(c)、(d)は2017年4月7日に実施した観測のPSF 構造(ダーティービーム)である。パネル(b)は、visibilityデータをフーリエ変換して得られたダーティマップである。パネル(c)では、黒のxマークが中心付近のピークとなる極大点を、黄色のxマークが(マイナスになる)最も深くぼみを表している。黄色の点線は、ダーティマップの最深部(北側のもの)の位置を中心とした直径 $50 \mu\text{as}$ の円を示す。パネル(d)では、EHTCのリング像(青い等高線)をダーティビームに重ねている。等高線の間隔はリング像のピーク値に対して10%ごとに設定した。EHTCリングの幅は、PSFの各ピークの構造よりも太い。これは、観測された天体構造が点源ではなく、かなりの大きさを持っていることを意味し、広がって太くなっていると思われる。PSFの各ピーク(または最小値)の強度の単位は、メインビームの高さと各ピークの高さの比として定義され、ダーティマップの強度の単位はJy/BEAMである(ビームサイズは $20 \mu\text{as}$)。

してゆくことを明確に示している。横軸は u - v 距離、縦軸はvisibilityの振幅と位相を示す。赤い線は1 Jyの一点源像の場合のvisibility分布、青い点はリング像の場合のvisibility分布である。黒い点は模擬データが示す値である。

Figure 11 (a)では、「ノイズのみで構造なし」模擬データのvisibilityの振幅と位相を示す。visibilityの振幅はノイズ強度に対応する平均値の周りにガウス分布し、位相は左のパネルに示すようにランダムに一樣に散らばっている。中央のパネル(self-calibrated)に示すように、「ノイズのみで構造なし」の模擬データをリング像モデルを用いたセルフキャリブレーション解によって「較正」すると、かなりデータ点がリング像の場合のvisibilityと一致する(青い点)が、もちろん一致しな

い点もある。右のパネル(CLEAN 画像)は、これらの「較正済み」模擬データに対して、狭いBOX設定でCLEAN処理を行った結果得た像のvisibilityの分布を示している。完全ではないが、リングモデルのvisibilityとほぼ一致している。

Figure 11 (b)に、「ノイズなしの一点源」模擬データの場合のvisibilityの振幅と位相を示す。左図に示すように、全ての振幅は一樣に1 Jyであり、全ての位相はゼロである。ちなみに、クロージャーの位相はすべてゼロで、クロージャーの振幅はすべて1である。中央のパネル(self-calibrated)に示すように、模擬データをリング像モデルによるセルフキャリブレーション解で「較正」すると、すべてのデータ点ではないが、多くのデータ点がリング像のvisibilityと一致する(青い

点)。右のパネル (CLEAN 画像) は、これらの「較正済み」データに対して、狭いBOX 設定でCLEAN 処理を行って得た像のvisibility分布を示している。完全ではないが、これもリング像モデルのvisibilityとほぼ一致している。

さらに、EHTC2017のSgr A* に対する u - v サンプリングデータでは、他の直径のリングよりも、直径 $50 \mu\text{as}$ のリングが最も本物らしくみえるアーティファクト (誤り) として再現されていることが注目される。セルフキャリブレーションの際に用いる像モデルのリングの直径を変えて、同様なシミュレーションを行い、異なる大きさのリングがどのように再生できるかどうかを調べた。直径が30 から $70 \mu\text{as}$ までのリング像を作成し、これらのリング像モデルを用いてセルフキャリブレーション解を求めて、模擬データをそれによって「較正」し、BOX 掛けを用いることでCLEANの像領域を制限した。リングの直径を変えての結果をFigure 12に示す。前回と同様、2つの模擬データの場合で結果には有意な差は見られず、データのSNRが無限大でも無限小でも、PSF 構造とイメージングパラメータ (特にBOXサイズ) が撮像に影響を与えることが示唆された。

直径 $D = 40, 50,$ と、 $60 \mu\text{as}$ ではリングの形がよく再現されているようである。電波干渉計の像合成では、結果に負の輝度分布が現れることも多いが、もちろんこれは不自然であると考えられている。このシミュレーションでは、負の輝度分布 (パネル中の黄色い線で囲まれた部分) が全ての画像に現れるが、その面積と深さは様々である。負の領域の大きさや深さを比較すると、 $D = 50 \mu\text{as}$ のリング像が最も負の領域が小さい。さらに定量的な比較を試みる。Figure 13は、得られたリング画像の特徴である、CLEAN 成分を合計したフラックス密度、リングの外側で測定した画像のrmsノイズ、そしてフラックス密度をそのrmsノイズで割った比を示している。この比は得られた像の尤もらしさの指標となりうる。直径 $50 \mu\text{as}$ のリング像がこの比において最も大きな値を示し、これらの中で最もそれらしい像となっていることがわかる。まとめると、リングの形成は、 $D = 50 \mu\text{as}$ の場合に最も本物らしく再現されている。これらの結果から、2017年のEHTアレイの u - v カバ-での撮像プロセスでは、得られた結果が必ずしも実像が正しく捉えられていないことが示された。また、アーチファクト (= 誤り) として $40 \sim 60 \mu\text{as}$ 直径のリング像が生成されることがあるが、特にその中でも $50 \mu\text{as}$ 直径のリング形状が最もアーチファクト (= 誤り) として生成される可能性が高い。

5.3 EHTCの撮像シミュレーションにおいて見られる、PSF 構造の特徴的な痕跡と思われる特徴。

CLEANによるPSF 構造の除去、デコンボリューションの性能は完全ではなく、結果として得られるCLEAN マップにはどうしてもPSF 構造の影響が残る。他のデコンボリューション法も、PSFの影響を完全に取り除くことはできない。EHTC撮像法もこの例外ではないだろう。Event Horizon Telescope Collaboration (2022c)の図11 (a)のEHTCの像シミュレーションの結果の中に、PSFの影響を受けていると思われる構造が見られる。「EHT-imaging」では、「単純円盤」と「楕円円盤」の再生像では、それぞれの円盤の中心領域に、直径が約 $50 \mu\text{as}$ の浅い凹みが見られる。「SMILI」で再生されたこれらの円盤像も、中央部にわずかなくぼみがある。「SMILI」ではまた、その「三日月 (環)」の再生像では、 $50 \mu\text{as}$ の特徴がより顕著である。像の中央から $PA = +45^\circ$, $PA = 0^\circ$, そして $PA = -45^\circ$ の方向に向かって3つの砂州のような構造が現れ、南側には $50 \mu\text{as}$ サイズのモデル像にあったリングの残像のような形が観察できる。

「THEMIS」による「楕円円盤」の再生像では、元の円盤像の代わりに南北方向に伸びるリング構造が見られる。「THEMIS」の結果で最も興味深い結果は「単純円盤」の再生像である。元の円盤領域内に直径約 $25 \mu\text{as}$ の4つの小さなリング構造がみえる。これらの構造が現われる理由として、 u - v サンプリングにおいて $25 \mu\text{as}$ の空間フーリエ成分がないためではないかと考えられる (Figure 7を参照)。

以上のことから、新しいCLEAN イメージング法はPSFの影響を受けないわけではなく、得られた画像を評価する際にはその影響を調べるのが不可欠であることがわかる。

5.4 EHT 2017のM 87観測データの場合

Sgr A*の場合との比較のために、EHT2017のM87の観測データに注目する。そのデータから、EHTCは直径 $42 \pm 3 \mu\text{as}$ のリング状のブラックホール・シャドウの検出を報告した (Event Horizon Telescope collaboration 2019a,b,c,d,e,f)。この直径は、推定されていたM87の超大質量ブラックホールの質量 ($6 \times 10^9 M_\odot$, Gebhardt et al. (2011))から予想される角サイズと一致する一方で、EHT2017のM87に対するPSF 構造中のメインビームと第一サイドローブとの間隔 $46 \mu\text{as}$ と一致する (Miyoshi et al. 2022a)。独立再解析の結果からは、中心部にコアノット構造があり、そこから以前から観測されているジェット構造と一致する輝度分布が西に伸びていることが報告されている (Miyoshi et al. 2022a,b, 2024)。なお、以下のに述べる記述は主に Miyoshi et al. (2022a)から引用した。

5.4.1 サンプルされた u - v データの分布

M87のデータは、Sgr A*と同じ観測セッションで得られたものであるが、南極のSPTからは観測できないため、観測局数はSgr A*観測よりも1局少ない7局である。ハワイ、チリに近接して2局ずつあるので、実質的には長基線を成すの地球上の5地点 (5局) ということになる。 u - v データの中にはEHTCが報告したリング直径に相当する空間フーリエ成分 $d = 44 - 46 \mu\text{as}$ のサンプルはなく、この範囲の直前と直後ではごく限られたサンプルしか得られていない。

5.4.2 PSFの構造

M87に対するPSF 構造も著しくデコボコしている。メインビームの太さは、約 $20 \mu\text{as}$ (FWHM)である。第一サイドローブは、メインビームに非常に接近して、南北に約 $46 \mu\text{as}$ の位置にあり、それぞれメインビームの高さの70%に達する。メインビームと各々の第一サイドローブの中間点には、メインビームの高さの-60%に相当する深いマイナスのくぼみ、極小値点がある。Sgr A*の場合と同様に、メインビーム、第一サイドローブ (2つのうち1つ)、中間点の負の極小値を含む領域の大きさはEHTCのM87のリングの大きさと同じである。

5.4.3 非リング像である模擬データからのリング像検出

Sgr A*の場合と同様に、EHTCが報告したM87のリング構造は一点源像やノイズだけの模擬データから再生することができる。リング像の再生は実際の視野設定サイズ、すなわちBOX 掛けによる視野制限に非常に敏感である。視野設定サイズが直径 $\sim 100 \mu\text{as}$ より大きいと、リング像はうまく再生できない。EHTCはこの現象に気付いたが、画像を鮮明にするために必要なパラメータ設定であるとして扱った (Event Horizon Telescope collaboration 2019d)。BOX 掛けの中心位置をメインビームと北側の第一サイドローブの中間点、すなわ

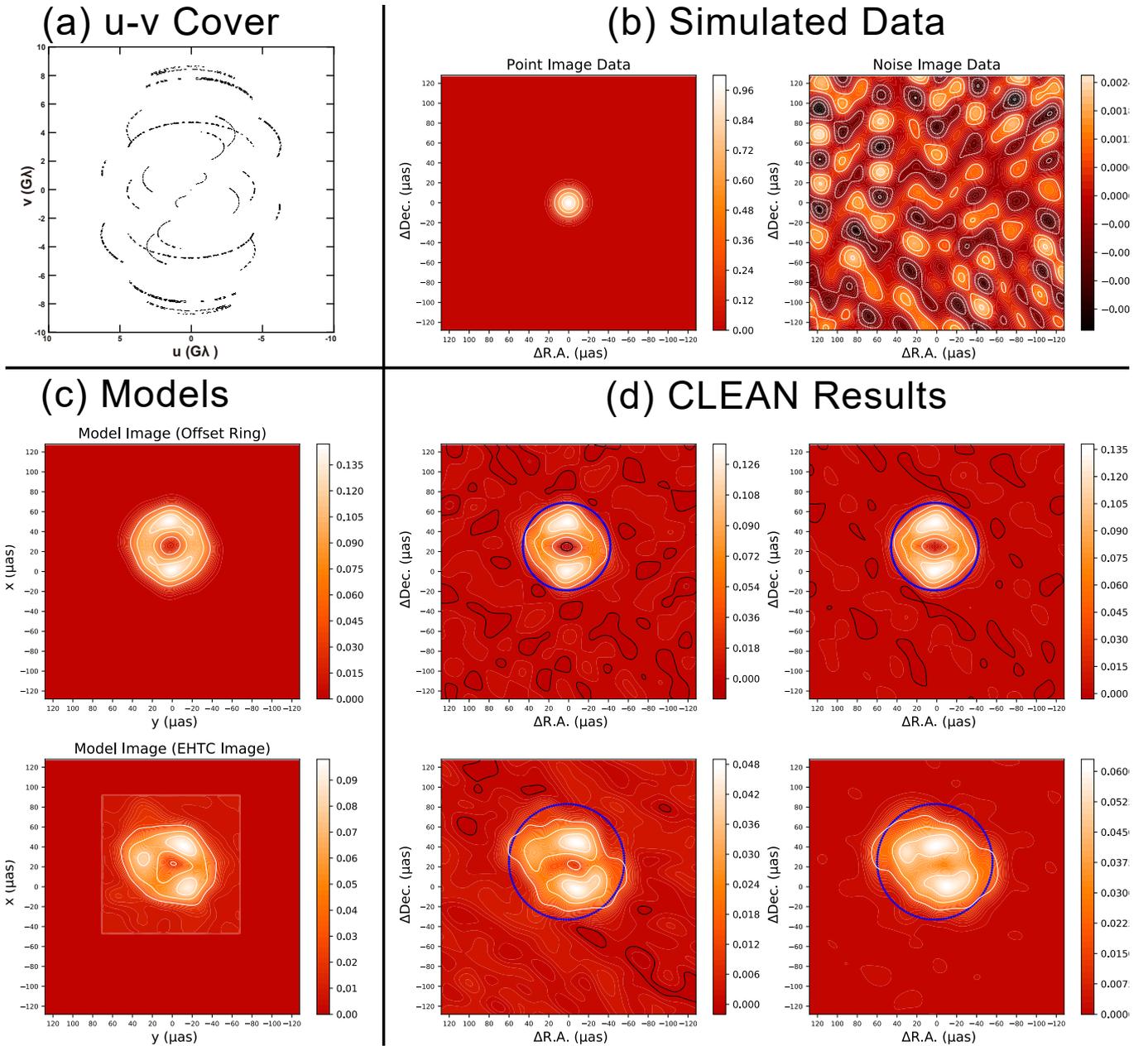


Figure 10. 模擬データ（リング構造ではないデータ）から得られたリング画像。パネル (a)、2017年のEHTアレイの実際的な $u-v$ カバーを示す（我々の解析において実際に使用されたデータ点のみによる）。パネル (b)は模擬データからの画像である。左は模擬点光源データにCLEANを行い、通常の復元ビーム ($20 \mu\text{as}$) を用いて得られた画像である。右は模擬ノイズデータを単にフーリエ変換したもの（ダーティマップ）である。こちらはCLEANは施していない。パネル (c)はセルフキャリブレーションの際に用いたモデルリング像である。上段は、直径 $51.8 \mu\text{as}$ 、リングの幅 $20 \mu\text{as}$ のリング像で（そのリング像に対応する模擬データを作り、それをCLEANして得た像である。下段はEHTCのリング像である。パネル (d)は、セルフキャリブレーションによって較正された模擬データから得られたCLEANの結果を示している。パネル中の青丸は、CLEANを行う際の視野制限域 (BOX 掛け) を示す。すべての画像の強度の単位はJy/BEAMである。

ちPSF 構造のなかでマイナスになる、もっとも深くぼみに置くと、最もそれらしくリング像が再生されることがわかった。

5.4.4 EHTCシミュレーションに見えるPSF 構造の除去が不十分だと思われる兆候

EHTC の大規模撮像シミュレーション結果でも、PSF 構造の影響が見られる。 [Event Horizon Telescope collaboration](#)

(2019d)の図10を見ると、二重像モデルに対する再生結果でも、「SMILI」と「eht-imaging」の2つの手法の結果には、直径 $\sim 40 \mu\text{as}$ の淡いリング構造が含まれている。なお、[Miyoshi et al. \(2022a\)](#)の独立解析においても約 $40 \mu\text{as}$ 間隔の構造がCLEANの結果にあまり目立たないけれども、確かに存在する。言い換えると、M87の $u-v$ データは約 $40 \mu\text{as}$ 間隔のスプリアス構造を作りやすい性質がある。

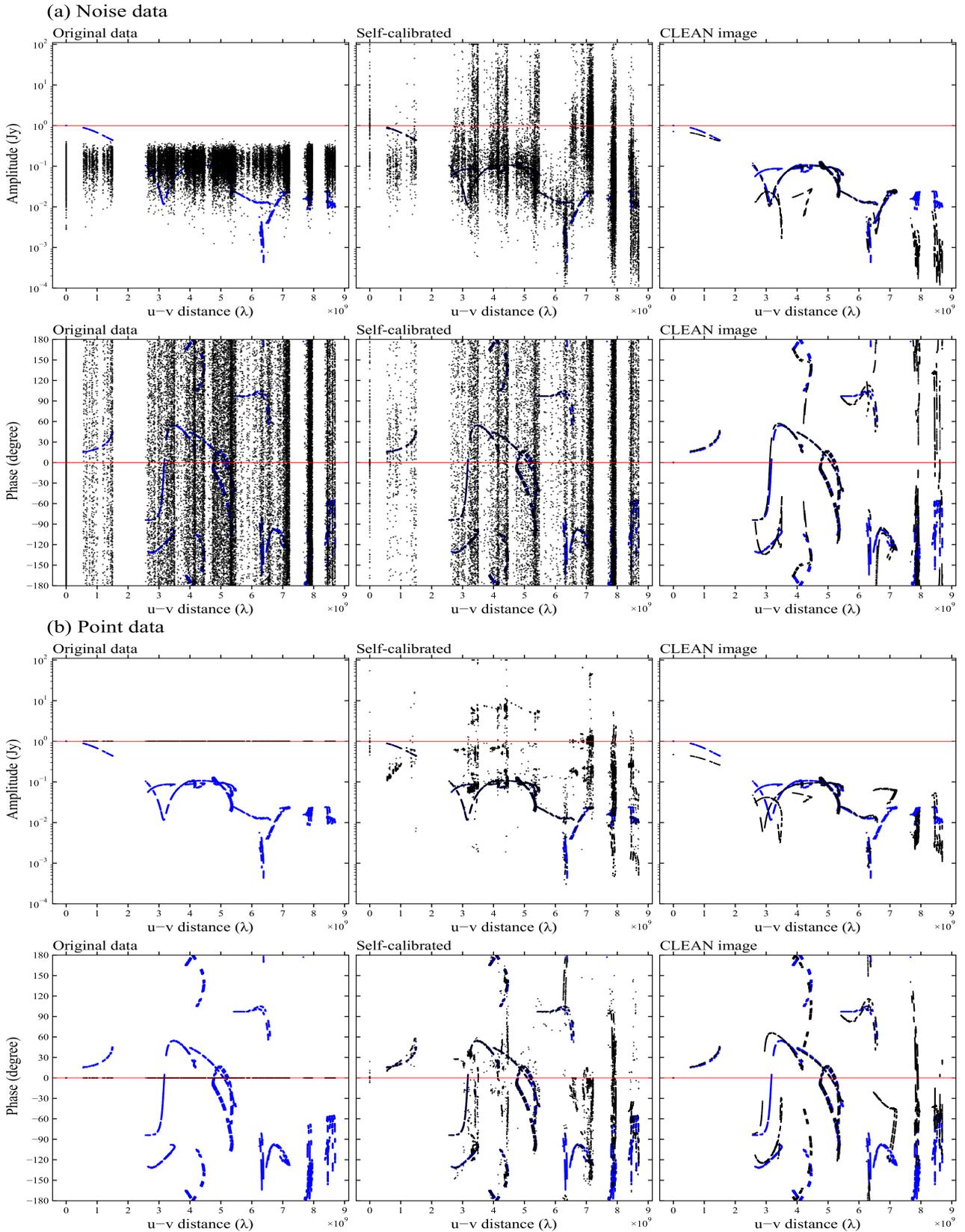


Figure 11. セルフキャリブレーションとBOX 設定が疎なデータに与える強力な影響：パネル (a)はノイズデータ（ノイズのみで構造なし）、パネル (b)はノイズのない一点源データである。これらの模擬データ分布を黒い点で示す。赤い点は一点源であった場合、青い点はモデル画像 (EHTC リング) の場合のvisibilityデータの分布を示す。左パネルは元の模擬データの分布 (振幅と位相)。中央パネルはリングモデル画像によるセルフキャリブレーションで「補正」した後の模擬データの分布。右パネルはCLEANにおいて、狭いBOX 設定をして得た画像に対応するvisibilityデータの分布である。

CLEAN Result

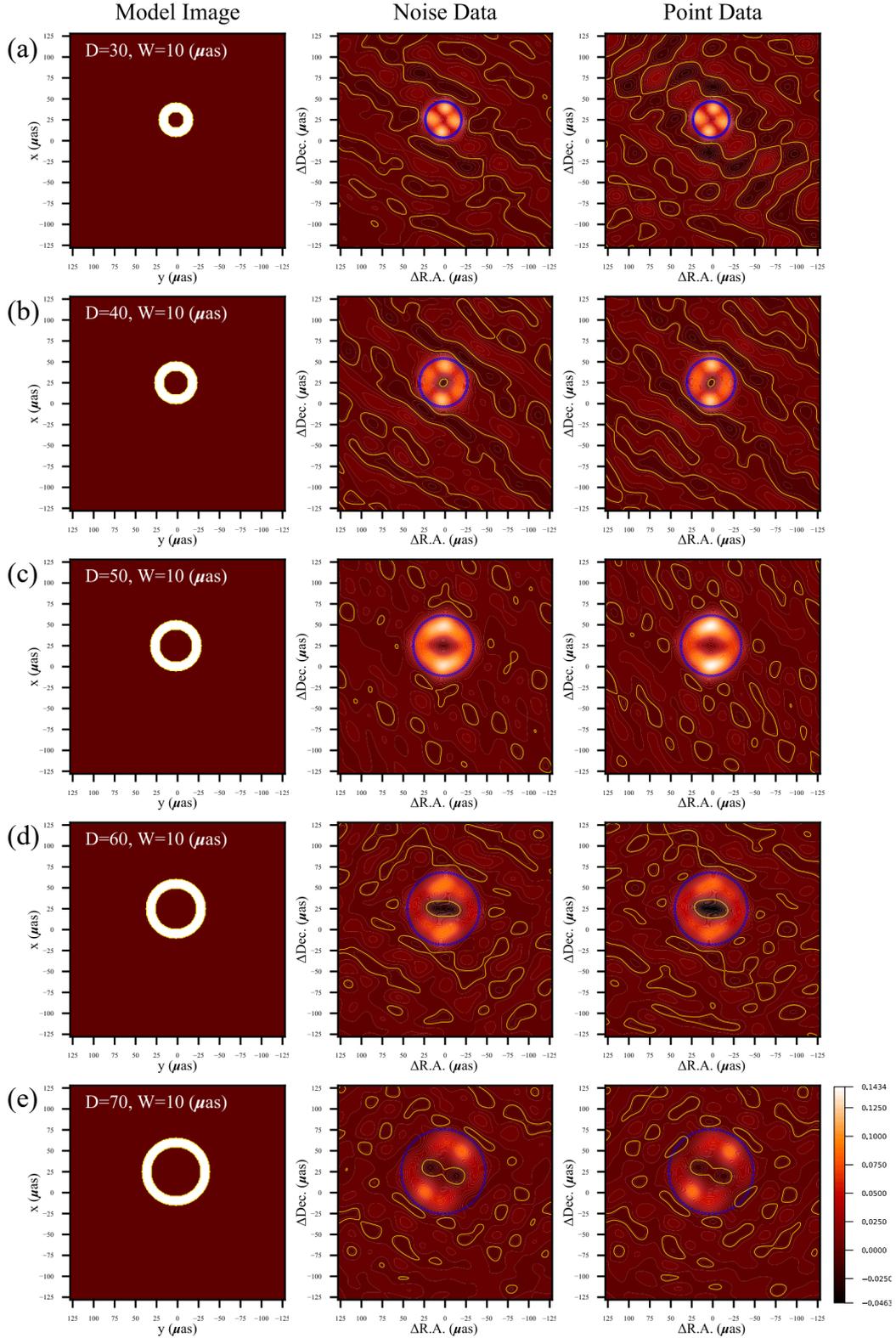


Figure 12. モデル像のリング直径を変化させた場合の結果の画像。セルフキャリブレーションにおいて用いたモデル画像(リング状)を左のパネルに示す。リングの幅は10 μas で固定し、像全体の強度は1 Jyとした。(a)から(e)まで、リングモデルの直径は順に 30, 40, 50, 60, そして 70 μas である。模擬一点源データから得られた画像を中段に、模擬ノイズデータから得られた画像を右段に示す。等高線は全画像の最大輝度から10%ごとを示す。実線は正の値、破線は負の値を示す。パネル中の青丸はCLEANの際に用いられた視野制限、BOX 掛けの領域を示す。復元ビームサイズは20 μas である。全画像の強度単位はJy/BEAMである。

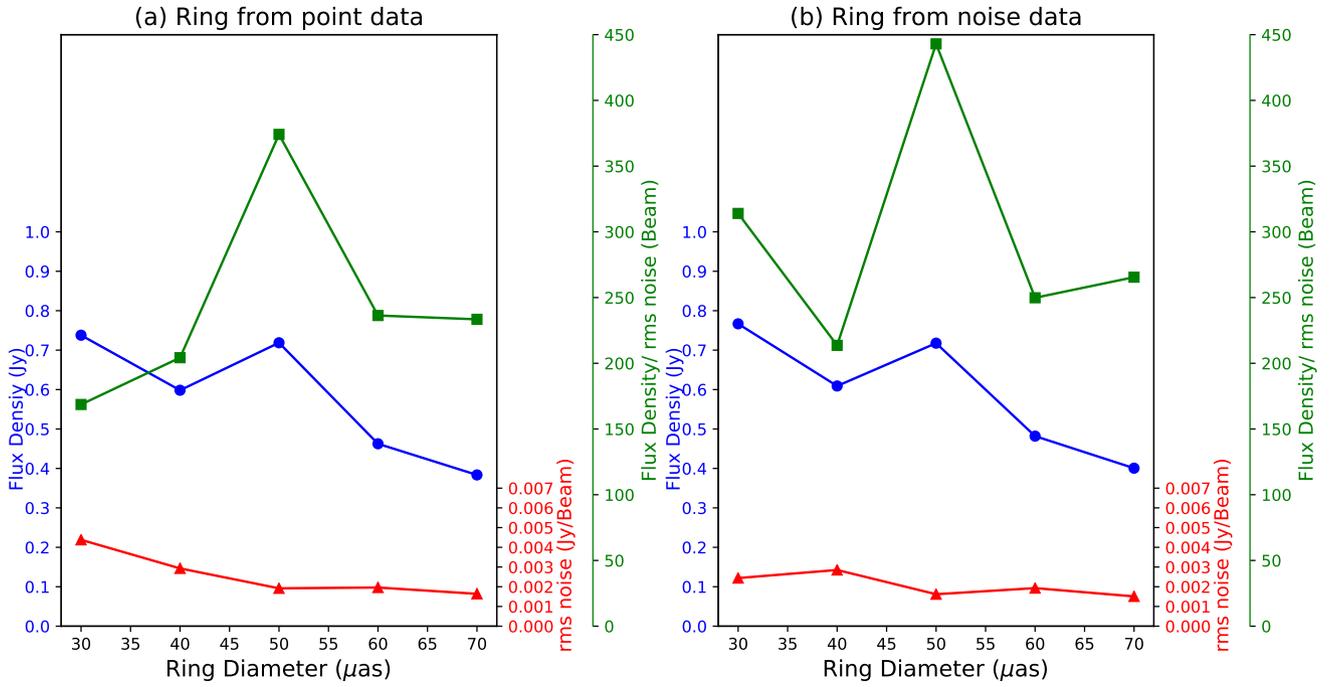


Figure 13. (セルフキャリブレーションにおけるモデル) リングの直径を変化させていった時、得られた像の品質。CLEANの成分を強度を合計した全フラックス密度 (Jy) を青いプロットで示す。セルフキャリブレーションに使用したモデル画像は全て 1 Jy であるので、得られた全フラックス密度が 1 Jy に近いほど、得られた結果の像はモデル画像に似ていることになる。得られた像のリング部分より外側の領域で測定された rms ノイズ (Jy/beam) を赤のプロットで示す。緑色のプロットは、全フラックス密度と rms ノイズの比である。この値が高いほど、画像のみかけの信憑性が高いことを表す。一点源の模擬データの場合はパネル (a)、ノイズだけの模擬データの場合をパネル (b) に示す。

5.4.5 DIFMAPを用いた撮像パイプライン

EHTCは、M87のイメージングに使用したパイプラインを公開している。そのうちのDIFMAPを使用したイメージングパイプラインに関する我々の知見は以下の通りである。彼らの手順では、視野設定のために、中心(位相中心)ではなく、北に $+22 \mu\text{as}$ だけずらして直径 $60 \mu\text{as}$ の非常に狭いBOX 掛けが使われた。このBOX 掛けは、PSF 構造に対してそのメインビームと第一サイドローブ(北)を含み、しかし第2サイドローブ以降の構造を除外するところに設定されている。この中に含まれるPSF 構造はEHTC リングの形状によく似ている。我々の見解では、このような狭く、かつ中心からオフセットされたBOX 設定が一貫してずっと適用されれば、PSF 構造の影響がはなはだしく強化され、PSF の構造が一部分が強調されてEHTC リングの形状の出現につながる可能性がある。その証拠に、彼らのパイプラインをBOX 設定なしで我々が実行したところ、リングのような画像は得られなかった。もうひとつの懸念は、ハイブリッド・マッピング・プロセスのほとんどの繰り返しで、振幅と位相の両方の解をえるセルフキャリブレーションを使用していることである。これは最終的な画像にアーチファクト(=誤り)をもたらす可能性がある。

5.4.6 正規化振幅残差

Sgr A*データに比べるとM87データの場合、EHTCのリング像に対しても、Miyoshi et al. (2022a)のコアノット構造に対しても明らかに小さい正規化振幅残差をしめす。

Miyoshi et al. (2022a) は $t = 180 \text{ sec}$ 積分の場合について以下の残差値をしめしている。M87の最初の2日間の観測では、Miyoshi et al. (2022a)のコアノット構造画像は正規化振幅の残差、 $\text{NR} = 0.030 \pm 0.539$ を示すが、EHTCリング像に対しては $\text{NR} = 0.148 \pm 0.933$ を示す。M87の最後の2日間の観測では、

Miyoshi et al. (2022a)の像に対しては、 $\text{NR} = 0.127 \pm 1.259$ を示すが、EHTCリング像に対しては $\text{NR} = 0.589 \pm 2.370$ を示す。

対照的にSgr A*データでのそれらはとても大きい値をしめす。我々の最終像に対しては $\text{NR} = 0.080 \pm 0.862$ 、EHTCのリング像に対しては $\text{NR} = 0.397 \pm 1.552$ である。

5.4.7 クロージャー位相残差

クロージャー位相残差においても、M87データは、Sgr A*データの場合に比べると、残差は小さくなる。そして、コアノット構造もEHTCリング像とほぼ同じ程度のクロージャー位相残差をしめした。180 sec 積分の場合、クロージャー位相残差の標準偏差は以下の通りである：最初の2日間のデータでは、コアノット画像は $\sigma_{\text{CK}} = 40.5^\circ$ の標準偏差を示し、EHTC像それは $\sigma_{\text{EHTC}} = 38.5^\circ$ である。最後の2日間のデータでは、コアノット像は $\sigma_{\text{CK}} = 43.2^\circ$ 、EHTC像は $\sigma_{\text{EHTC}} = 43.7^\circ$ を示している。クロージャー位相残差に関しては、両者に大きな差はないようだ。なお、Sgr A*のデータの場合、我々の最終像で $-0.68 \pm 58.08^\circ$ 、EHTCリングで $-4.29 \pm 55.31^\circ$ となり、M87の場合の残差に比べて大きくなる。

5.4.8 ジェット構造の検出

EHT2017の観測に基づくEHTCの論文 [Event Horizon Telescope collaboration \(2019a,b,c,d,e,f\)](#) では、有名なM87のジェットについての言及はない。一方 Miyoshi et al. (2024)は、データに含まれる超短基線データを像合成に使うかどうか、ジェットとコア周辺のかすかな構造の検出の可能性を決めることを示している。

6 議論

ここではSgr A* と M87のブラックホール近傍を正確に撮像するために必要な手順について一般的な議論をする。EHT2017による230 GHz観測では Sgr A* と M87の観測では、超大質量ブラックホール近傍の構造を明らかにすることが期待された。これまでの我々の検討結果から、ブラックホール・シャドウと考えられたEHTCのリング像は、PSFの構造に由来するものと結論付けるのが妥当であると考えられる。Table 2に示すように、各観測におけるPSF 構造の特徴的な大きさは、それぞれのリングの直径と一致している。我々の独立解析による像はリング構造ではなく、データとの整合性はそれぞれのEHTCのリング像と同等かそれ以上によい。Sgr A* については、これまでの観測と一致する降着円盤のような伸びた特徴が確認されたが、Sgr A* の大きな時間変動の影響でその像が、被写体ブレのように、ぼやけていると思われる。M87については、独立再解析の結果、やはり以前の観測同様に中心部にはコアノット構造が見え、ブラックホール周辺の構造は見えていない。もしそうであるなら、我々はブラックホール近傍の信頼性の高い撮像研究の旅を始めたばかりであるといえよう。これまで示したように、2017年のEHTのPSF 構造は非常にでこぼこしており、その影響がEHTCの撮像結果には現れている。また、2017年のEHTのPSF 構造は、Sgr A* とM87のそれぞれについて、微妙に $u-v$ カバーが異なるため、若干の違いがある。PSFのメインビームと第一サイドローブの間隔は、それぞれ $50 \mu\text{as}$ と $46 \mu\text{as}$ になる。どちらの観測データも、それぞれのこの間隔に対応する直径を持つアーチファクト・リング像を作りうる傾向がある。よりシャープなメインビームを持つPSFを得るためには、十分な観測局数を確保することにより、 $u-v$ カバーを密にする必要がある。Sgr A* のブラックホール近傍を、仮定なしに信頼性の高いイメージングをするに必要な観測局 (アンテナ) 数は、10 (Miyoshi et al. 2004, 2007)程度であることが示唆されていた。しかし、この研究結果はSgr A* に短期時間変動がないと信じられていた時期に行われたものである。この程度の観測局数があればM87のイメージング研究が確実に行えようが、Sgr A* の短期時間変動を正確に追跡するためには、もっと多くの観測局が必要である。Sgr A* の短期時間変動が明らかになったのはごく最近のことである。ALMAの観測から、VLBI必要な観測時間のうちに、Sgr A* の強度が大きく変化していることがわかった (Iwata et al. 2020; Miyoshi et al. 2019)。同じタイムスケールにおいてSgr A* の構造も変化していると考えるのが妥当であろう。(するとVLBIを使ってもSgr A* の撮像は困難なことになる) EHTCもこの基本的な問題を認めているように (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)、これは電波干渉計で像合成が成立するために必要な基本的な条件、すなわち、観測中、天体の構造は一定でなければならないという条件に反しているのである。これは、カメラによる写真撮影における被写体ブレと同じであり、撮影された像は、露光中の被写体の動きによって歪められる。軽度の構造の変動であれば、Sgr A* の本来の構造の許容できる近似的像が得られるかもしれないが、2017年のEHT観測データからそのような時間変動するSgr A* の正しい画像を捉えたかどうかという疑問が生じる。我々は、EHTCがSgr A* の変動を緩和するために用いた方法論を検討した。EHTCのアプローチでは、時間変動するデータからでも静止画像を作成できることを目指して、変動ノイズモデリング手法を使用している。この手法では、各データ点の曖昧さに応じて多様なウェイトを加えることで、Sgr A* の構造の変動を緩和しようとする。EHTCは、「このパラメータ化された多様ノイズモデルは汎用的なものであり、Sgr A* の複雑な物理的GRMHDシミュ

レーションを含む、幅広い天体構造の変化をよく説明できる (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)」と主張している。追加ノイズバジェットの高多様性は観測時間の関数ではなく、Event Horizon Telescope Collaboration (2022c)の式(2)が示すように、データ点の $u-v$ 長に依存する。そこではデータ点の $u-v$ 長を $4 G\lambda$ または付加parameter $u_0 G\lambda$ によって正規化している。空間フーリエ成分を $u-v$ 長に応じて正規化することは、観測データを撮像する前に、天体の角サイズが既に仮定されていることを意味する。これらの正規化パラメータは、GRMHDシミュレーション結果 (Georgiev et al. 2022)に基づいているのだから、観測天体の物理的性質についても仮定されていることになる。つまり、この方法は天体の物理的性質や大きさに大きな制約を想定し、観測天体の変動の影響を緩和しようとするもので、他の変動天体の撮像には応用することはできない。このような方法を適用して得られた結果は、観測された天体のイメージングではなく、複雑なモデルフィッティングによって得られた形状であるというべきであろう。EHTCはSgr A* の物理と大きさを最初から仮定してSgr A* の彼らの像を得ているため、そのSgr A* 像結果から相対性理論や降着円盤の物理に関する観測的な事実を探索することはできないと考えられる。時間変動する物体の正確な画像を得る最良の方法は、天体の構造の変動よりも短い時間スケールで十分な $u-v$ カバーを確保するために、十分な数のアンテナを採用し、スナップショットで像を撮影できるようにすることである。しかし、現在利用できるアンテナの数は限られており、スナップショットの撮影は困難である。SMI法 (Miyoshi 2008)は、観測天体の構造が周期的変動する場合、その周期成分を推定するため考案された。現在我々はSMI法を用いて、Sgr A* の構造の時間変動を調べる事が出来るのではないかと調査中である。だが、この方法が仮にうまくいくにしても、今後、多数のアンテナを観測に参加させることは信頼性の高い画像を得るために不可欠である。

近い将来、このような多数のアンテナを取得することは、M87やSgr A* 観測から信頼出来る撮像結果をえるためには必須である。しかし、短時間の変動の影響を受けずに信頼性の高いSgr A* の像を得るためには、スナップショット撮像のための瞬間的で十分な $u-v$ カバーが得られる必要がある。地上局10局程度ではそれに十分ではない。低軌道周回する (LEO)によるスペースVLBI衛星 (Asaki & Miyoshi 2009) が短時間で $u-v$ カバーを埋めるにはふさわしいであろう。

次期のEHTの拡張による今後の観測が待ち遠しい。そこではPSF 構造が改善されて、容易に信頼度の高い、そして鮮明なM87とSgr A* の画像が得られるであろう。

7 結論

従来からよく使われてきたハイブリッドマッピング法で、EHTCが公開している2017年のSgr A* 観測データを独立に再解析したところ、EHTCが報告したものの像とは異なる像が得られた。我々の解析では、ほぼ東西に伸びた構造を示しており、これは過去のミリ波帯VLBI 観測結果とも矛盾しない。東西の伸び方は非対称で、東側が明るく西側が暗い。我々の最終像とEHTCのリング像についてクロージャー量の残差を比較したが同程度であった。しかし正規化振幅残差に関しては我々の最終はEHTC像の残差の半分であることから、我々の像はEHTC像よりも信頼性が高いと考えられる。伸びの東側に見える明るいスポットと西側に見える暗いスポットが降着円盤の高速回転によるドップラーブーストによって生じていると仮定する。さらに中心ブラックホールの質量を $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ 、距離が8 kpcであるとすれば、両者のスポットの明るさの比から降着円盤の中心から2 から数 R_S のあたり

	M87	Sgr A*
Predicted Shadow Size	$37.6^{+6.2}_{-3.5}$ or $21.3^{+5}_{-1.7}$ μas	~ 50 μas
EHTC Measurements		
D_{ring}	42 ± 3 μas	51.8 ± 2.3 μas
D_{shadow}	-	48.7 ± 7.0 μas
EHT PSF Structure		
1 st Sidelobe Position from the Main Beam	46 μas	49.09 μas
1 st Sidelobe Intensity Relative to the Main Beam	+70 %	+49 %
Negative Minima at the Midpoint	-60 %	-78.1 %
Restoring Beam Shape		
Default		
FWHM _{major×minor}	25.4×17.4 μas	23.0×15.3 μas
Position Angle	6.0°	66°
EHTC Used		
FWHM	20 μas	20 μas

Table 2. EHTC リングの測定値とそのデータに対応するPSF構造の特性。予測されていたブラックホール・シャドウの大きさ、EHTCがその撮像結果から測定したリングの直径、彼らが用いた復元・ビームの形状はEHTCの論文による。デフォルト(通常)のビームの形状測定値はそれぞれ4月11日(M87)と4月7日(Sgr A*)のものである。それらPSF構造の値は我々の測定によるものである。

で、光速の60%の速度で回転している部分を $\sim 45^\circ$ くらいの角度で見ていると思われる。一方、EHTC解析は、観測天体のサイズや物理的性質を仮定したデータ較正に基づき、観測データとの整合性よりも撮像パラメータ空間から類似構造が高頻度で出現することを優先してその最終像を選択した。EHTCで報告された構造の基本は、直径 51.8 ± 2.3 μas の明るく太いリングである。我々の見解では、EHTCによって報告されたリングのような像はSgr A*の本質的な構造ではなく、2017年のEHTのSgr A*に対する疎な $u-v$ カバー、すなわちそのPSFに現われる50 μas スケールの構造から生じたものである。乏しい $u-v$ カバーのデータを使った像合成では、PSFの形状を注意深く精査する必要がある。EHTCが推定したブラックホール・シャドウの直径、(48.7 ± 7 μas)はPSF構造の中のメインビームと第一サイドローブの間隔(49.09 μas)と一致していて、PSFの影響除去、デコンボリューションに潜在的な問題があることを直ちに意味する。また、リング以外の構造を持つ模擬データからリング像が再生できること、そして、直径が50 μas のリング像が一番尤もらしくできあがることから、この問題は認識できる。我々は、EHT 2017観測のSgr A*データのクロージャー量には内部矛盾があり、クロージャー残差量から最も信憑性の高い像を特定することが困難であることを見つけた。この問題はSgr A*の構造の強力な時間変動とは関係ない。この現象の原因を、データの相関処理過程をも含めて究明することは、結果の画像の信頼性を高める上で極めて重要である。

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the anonymous referee for helpful comments that greatly improved the paper and the discussion. This work is supported in part by the Grant-in-Aid from the Ministry of Education, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan, No.19K03939. We thank the EHT Collaboration for releasing the network-calibrated Sgr A* data. The EHT2017 observations of Sgr A* were performed with the following eight telescopes. ALMA is a partnership of the European Southern

Observatory (ESO; Europe, representing its member states), NSF, and National Institutes of Natural Sciences of Japan, together with National Research Council (Canada), Ministry of Science and Technology (MOST; Taiwan), Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA; Taiwan), and Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI; Republic of Korea), in cooperation with the Republic of Chile. The Joint ALMA Observatory is operated by ESO, Associated Universities, Inc. (AUI)/NRAO, and the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ). The NRAO is a facility of the NSF operated under cooperative agreement by AUI. APEX is a collaboration between the Max-Planck-Institut für Radioastronomie (Germany), ESO, and the Onsala Space Observatory (Sweden). The SMA is a joint project between the SAO and ASIAA and is funded by the Smithsonian Institution and the Academia Sinica. The JCMT is operated by the East Asian Observatory on behalf of the NAOJ, ASIAA, and KASI, as well as the Ministry of Finance of China, Chinese Academy of Sciences, and the National Key R&D Program (No. 2017YFA0402700) of China. Additional funding support for the JCMT is provided by the Science and Technologies Facility Council (UK) and participating universities in the UK and Canada. The LMT project is a joint effort of the Instituto Nacional de Astrófisica, Óptica, y Electrónica (Mexico) and the University of Massachusetts at Amherst (USA). The IRAM 30-m telescope on Pico Veleta, Spain is operated by IRAM and supported by CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique, France), MPG (Max-Planck-Gesellschaft, Germany) and IGN (Instituto Geográfico Nacional, Spain). The SMT is operated by the Arizona Radio Observatory, a part of the Steward Observatory of the University of Arizona, with financial support of operations from the State of Arizona and financial support for instrumentation development from the NSF. Partial SPT support is provided by the NSF Physics Frontier Center award (PHY-0114422) to the Kavli Institute of Cosmological Physics at the University of Chicago (USA), the Kavli Foundation, and the GBMF (GBMF-947). The SPT is supported by the National Science Foundation through grant PLR-1248097. Partial support is also provided by the NSF Physics Frontier Center grant PHY-1125897 to the Kavli Institute of Cosmological Physics at the University of Chicago, the Kavli Foundation and the Gordon and Betty Moore Foundation grant GBMF 947.

データの公開について

データは要請に応じて入手可能である：オリジナルの観測データはEHTCのウェブサイトで入手できる。本論文の基礎となる観測データとセルフキャリブレーションによる最終解は、それが学術的な要請であれば、コーレポンドイングオーサーが対応する。AIPSタスクのDBCONを使って2つの記録チャンネルをマージしたFITSデータを提供できる。また、我々が得たハイブリッドマッピングの最終解も提供できる。

REFERENCES

- Alberdi, A., Lara, L., Marcaide, J. M., et al., *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 277, p. L1-L4 (1993)
- Asaki, Y., & Miyoshi, M. *Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2: Astrophysics and Technologies ASP Conference Series*, Vol. 402, proceedings of the conference held 3-7 December, 2007, at ISAS/JAXA, Sagami-hara, Kanagawa, Japan. Edited by Yoshiaki Hagiwara, Ed Fomalont, Masato Tsuboi, and Yasuhiro Murata., p.431 Bibcode: 2009ASPC..402..431A

- Baganoff, F. K. et al., Nature, Volume 413, Issue 6851, pp. 45-48 (2001). DOI: 10.1038/35092510 arXiv: arXiv:astro-ph/0109367 Bibcode: 2001Natur.413...45B
- Balick, B., & Brown, R., L., 1974, ApJ, 194, 265 DOI: 10.1086/153242 Bibcode: 1974ApJ...194..265B
- Bower, G. C., & Backer, D. C. 1998, ApJ, 496, L97.
- Bower, G. C., et al. 2004, Science, 304, 704
- Bower, G. C., Markoff, S., Brunthaler, A., et al. 2014, ApJ, 790, id. 1, 10 DOI 10.1088/0004-637X/790/1/1 10.48550/arXiv.1405.1456 arXiv:1405.1456 Bibcode: 2014ApJ...790....1B
- Bracewell & Roberts, 1954, Australian Journal of Physics, vol. 7, p.615 DOI: 10.1071/PH540615 Bibcode: 1954AuJPh...7..615B
- Broderick, A. E., Fish, V. L., Doeleman, S. S., & Loeb, A. 2011, ApJ, 735, 110 DOI: 10.1088/0004-637X/735/2/110 10.48550/arXiv.1011.2770 arXiv: arXiv:1011.2770 Bibcode: 2011ApJ...735..110B
- Brinkerink, C. D., Müller, C., Falcke, H., et al. 2016, MNRAS, 462, 1382
- Cho, I, et al., 2022, ApJ, 926, id.108
DOI: 10.3847/1538-4357/ac4165 arXiv: arXiv:2112.04929 Bibcode: 2022ApJ...926..108C
- Clark, B. G. 1980, A&A, 89, 377
- Cornwell, T. J., & Wilkinson, P. N., 1981, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 196, p. 1067-1086. DOI: 10.1093/mnras/196.4.1067 Bibcode: 1981MNRAS.196.1067C
- Davies, R. D., Walsh, D., Booth, R. S. Publication: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 177, 319-333 (1976)
- Dexter, J., Agol, E., Fragile, P. C., & McKinney, J. C. 2010, ApJ, 717, 1092 DOI: 10.1088/0004-637X/717/2/1092 10.48550/arXiv.1005.4062 arXiv: arXiv:1005.4062 Bibcode 2010ApJ...717.1092D
- Doeleman, S. S., Shen, Z.-Q., Rogers, A. E. E., Bower, G. C., Wright, M. C. H., Zhao, J. H., Backer, D. C., Crowley, J. W., Freund, R. W., Ho, P. T. P., Lo, K. Y., & Woody, D. P. 2001, AJ, 121, 2610. DOI: 10.1086/320376 arXiv: arXiv:astro-ph/0102232 Bibcode: 2001AJ....121.2610D
- Eckart et al., 1996, Nature 383, 415-417
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019a, ApJ, 875, L1
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019b, ApJ, 875, L2
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019c, ApJ, 875, L3
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019d, ApJ, 875, L4
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019e, ApJ, 875, L5
- The Event Horizon Telescope Collaboration et al., 2019f, ApJ, 875, L6
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022a, ApJ, 930, L12
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022b, ApJ, 930, L13
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022c, ApJ, 930, L14
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022d, ApJ, 930, L15
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022e, ApJ, 930, L16
- The Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2022f, ApJ, 930, L17
- Felli, M., & Spencer, R. E. (EDs), in Very Long Baseline Interferometry : Techniques and Applications (NATO Science Series C) (1989)
- Fish, V. L., Johnson, M. D., Doeleman, S. S., et al. ApJ, 820:90.
- Genzel, R., Schödel, R., Ott, T. et al., Nature, 425, pp. 934-937 (2003). DOI: 10.1038/nature02065 arXiv: arXiv:astro-ph/0310821 Bibcode: 2003Natur.425..934G
- Georgiev, B., Pesce, D. W., Broderick, A. E., et al. 2022, ApJL, 930, L20 DOI: 10.3847/2041-8213/ac6584 Bibcode: 2022ApJ...930L..21B
- Gravity Collaboration, Abuter, R., Amorim, A., et al. 2018, A&A, 618, L10 arXiv:1810.12641 Bibcode: 2018A&A...618L..10G
- Jennison, R. C., 1958, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 118, p.276
DOI: 10.1093/mnras/118.3.276 Bibcode: 1958MNRAS.118..276J
- Johnson, M. D., Narayan, R., Psaltis, D., et al., 2018, ApJ, 865, id. 104, 24 pp DOI: 10.3847/1538-4357/aadcf
10.48550/arXiv.1808.08966
arXiv: arXiv:1808.08966
Bibcode: 2018ApJ...865..104J
- Calif. : Astronomical Society of the Pacific, 1999. Astronomical Society of the Pacific conference series ; v. 186
- Falcke, H., Melia, F., & Agol, E., 2000, ApJ, 528, L13-L16
- Gebhardt, K. et al., 2011, ApJ, 729, 119, 13
- Ghez et al., 2000, Nature 407, 349-351
- Greisen, E. W. 2003, in Information Handling in Astronomy—Historical Vistas, 285, ed. A. Heck (Dordrecht: Kluwer), 109
- Högbom, J. A. 1974, A&AS, 15, 417
- Iwata, Y., Oka, T., Tsuboi, M., Miyoshi, M., & Takekawa, S., 2020, ApJ, 892, L30
- Krichbaum, T. P., Zensus, J. A., Witzel, A., Mezger, P. G., Standke, K. J., Schalinski, C. J., Alberdi, A., Marcaide, J. M., Zylka, R., Rogers, A. E. E., Booth, R. S., Ronnang, B. O., Colomer, F., Bartel, N., & Shapiro, I. I. 1993, A&A, 274, L37.
- Lo, K. Y., Backer, D. C., Ekers, R. D., Kellermann, K. I., Reid, M., & Moran, J. M. 1985, Nature, 315, 124.
- Lo, K. Y., Shen, Zhi-Qiang, Zhao, Jun-Hui, Ho, & Paul T. P. 1998, ApJL, 508, L61.
- Marcaide, J. M., Alberdi, A., Bartel, N., Clark, T. A., Corey, B. E., Elosegui, P., Gorenstein, M. V., Guirado, J. C., Kardashev, N., Popov, M., Preston, R., Ratner, M. I., Rioja, M. J., Rogers, A. E. E., & Shapiro, I. I. 1992, A&A, 258, 295.
- Miyazaki, A., Tsutsumi, T., Tsuboi, M., The Astrophysical Journal, Volume 611, Issue 2, pp. L97-L100. (2004) arXiv: arXiv:astro-ph/0407252 Bibcode: 2004ApJ...611L..97M
- Miyoshi, M., Imai, H., Nakashima, J., Deguchi, S., Shen, Z.-Q., Astronomische Nachrichten, Supplementary Issue 1, Proceedings of the Galactic Center Workshop 2002 - The central 300 parsecs of the Milky Way, p.403-406
- Miyoshi, M., Ishitsuka, J. K., Kameno, S., Shen, Z., & Horiuchi, S., 2004, Progress of Theoretical Physics Supplement, No. 155, 186-189 <https://arxiv.org/format/astro-ph/0412289>
- Miyoshi, M., Kameno, S., Ishitsuka, J., K., Shen, Z., Takahashi, R., & Horiuchi, S., 2007, Publications of the National Astronomical Observatory of Japan, 10, p.15-23
- Miyoshi, M. 2008, PASJ, 60, 1371
- Miyoshi, M., Shen, Z.-Q., Oyama, T., Takahashi, R., Kato Y., PASJ, 63, p1093-1116 (2011). Oscillation phenomena in the disk around the massive black hole Sagittarius A*.
- Miyoshi, M., Asaki, Y., Tsuboi, M., et al., 2019, in the proceedings of GCWS 2019 “New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond”, held at Keio Univ., Hiyoshi, Yokohama, Japan, Oct. 2019.
- Miyoshi, M., Kato, Y., & Makino, J. 2022, ApJ, 933, 36
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac6ddb>
- Miyoshi, M., Kato, Y., & Makino, J. 2022, eprint arXiv:2207.13279 arXiv: arXiv:2207.13279 Bibcode:2022arXiv220713279M
- Miyoshi, M., Kato, Y., Makino, J. & Tsuboi, M. 2024, ApJ, 963, L18
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ad250e>
- Munyanza, & Viollier, 2002, ApJ, 564, 274-283
- Ortiz-León, G. N., Johnson, M. D., Doeleman, S. S., Blackburn, L., Fish, V. L., Loinard, L., Reid, M. J., Castillo, E., Chael, A. A., Hernández-Gómez, A., Hughes, D. H., León-Tavares, J., Lu, R.-S., Montaña, A., Narayanan, G., Rosenfeld, K., Sánchez, D., Schloerb, F. P., Shen, Z.-q., Shiokawa, H., SooHoo, J., and Vertatschitsch, L. (2016). ApJ, 824:40.
- Patel, R., Roachell, B., Caino-Lores, S., Ketron, R., Leonard, J., Tan, N., Brown, D., Deelman, E., & Taufer, M. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2205.10267
<https://arxiv.org/abs/2205.10267>
- Pearson, T. J., & Readhead, A. C. S., 1984, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 22, 97-130.
- Rauch, C., Ros, E., Krichbaum, T. P., Eckart, A., Zensus, J. A., Shahzamanian, B., and Mužić, K. (2016). A&A, 587:A37.
- Readhead, A. C. S., & Wilkinson, P. N., 1978, ApJ, 223, 25-36
- Readhead, A. C. S., Walker, R. C., Pearson, T. J., Cohen, M. H. Nature, Volume 285, Issue 5761, pp. 137-140 (1980). DOI: 10.1038/285137a0 Bibcode: 1980Natur.285..137R
- The central parsecs of the Galaxy : Galactic Center Workshop : proceedings of a meeting held at Tucson, Arizona, USA 7-11 September, 1998 Falcke, H., Cotera, A., Duschl, W., J., Melia, F., & Rieke, M., J. Ed., San Francisco,

- Rogers, A. E. E., Doeleman, S., Wright, M. C. H., Bower, G. C., Backer, D. C., Padin, S., Philips, J. A., Emerson, D. T., Greenhill, L., Moran, J. M., & Kellermann, K. I., 1994, *ApJL*, 434, L59.
- Schwab, F. R., 1980, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* 231, 18
<https://doi.org/10.1117/12.958828>
- Schödel et al., 2002, *Nature* 419,694-696
- Shen, Z.-Q., Lo, K. Y., Liang, M.-C., Ho, P.T.P., & Zhao J.-H., *Nature* **438**, 62.-64 (2005).
- Shepherd, M. C., 1997, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*, A.S.P. Conference Series, Vol. 125, Gareth Hunt and H. E. Payne, eds., p. 77.
- Tsuboi, M., Tsutsumi, T., Miyazaki, A., Miyawaki, R., and Miyoshi, M., *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 74, Issue 4, pp.738-756 Pub Date: August 2022 DOI: 10.1093/pasj/psac031 arXiv: arXiv:2204.06778 Bibcode: 2022PASJ...74..738T
- Twiss, R. Q., Carter, A. W. L., & Little, A. G. Publication: *The Observatory*, Vol. 80, p. 153-159 (1960) Bibcode: 1960Obs....80..153T
- van Langevelde, Huib J., Frail, Dale A., Cordes, J. M., Diamond, P., J., 1992, *ApJ*, 396, 686
- Vermeulen, R. C., Schilizzi, R. T., Spencer, R. E., Romney, J. D., Fesjes, I. *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 270, p. 177-188 (1993) Bibcode:1993A&A...270..177V
- Wang, Q. D., Nowak, M. A., Markoff, S. B., et al. 2013, *Science*, 341, 981 DOI: 10.1126/science.1240755 10.48550/arXiv.1307.5845 arXiv: arXiv:1307.5845 Bibcode:2013Sci...341..981W
- Wielgus, M., Marchili, N., Marti-Vidal, I., Keating, G.K., Ramakrishnan, V., et al. 2022, *ApJ*, 930, L19 (<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6428>)
- Yusef-Zadeh, Farhad, Cotton, William, Wardle, Mark, Melia, Fulvio, Roberts, & Douglas A. 1994, *ApJL*, 434, L63.
- Zensus, J. A., & Falcke, H. 1999, in *The Central Parsecs of the Galaxy*, ASP Conference Series, Vol. 186. Edited by Heino Falcke, Angela Cotera, Wolfgang J. Duschl, Fulvio Melia, and Marcia J. Rieke. ISBN: 1-58381-012-9, 1999, p. 118

A 正規化振幅の定義

Residual of Normalized Amplitude、正規化振幅(残差)の定義の定義は以下である。

Residual of Normalized Amplitude =

$$\frac{\text{Amplitude (image)} - \text{Amplitude (observed data)}}{\text{Amplitude (observed data)}} \quad (3)$$

ここでAmplitude (image)は像をフーリエ変換して得た空間フーリエ成分(visibility)の振幅、Amplitude (observed data)は観測データの振幅である。残差が存在しない場合は0、画像で示される振幅がデータの振幅の2倍大きい場合は1となる。したがって、値が1を超える場合は、振幅に非常に大きな差があることになる。

B クロージャー位相の定義

クロージャー位相は、アンテナに起因する系統誤差の影響を受けず、観測天体の構造、輝度分布のみに依存する量である(Jennison 1958)。クロージャー位相の定義は干渉計のデータ解析ではよく知られているが、ここでは分かりやすくするために改めて定義を示す。三つのアンテナ、1, 2, and 3があるとき、その間を結ぶ基線は3つできる。クロージャー位相、 Φ_{123} はその基線3つで作られる一つの三角形に対して定義される。なおアンテナ、 i, j を結ぶ基線を ij と記載する。

$$\Phi_{123} \equiv \theta_{12}^{\text{obs}} + \theta_{23}^{\text{obs}} + \theta_{31}^{\text{obs}}, \quad (4)$$

where

$$\theta_{12}^{\text{obs}} = \theta_{12} + (\phi_1 - \phi_2),$$

$$\theta_{23}^{\text{obs}} = \theta_{23} + (\phi_2 - \phi_3),$$

$$\theta_{31}^{\text{obs}} = \theta_{31} + (\phi_3 - \phi_1).$$

ここで、 θ_{ij}^{obs} はアンテナ i と j 間の基線において観測された位相、 ϕ_i はアンテナに起因する位相誤差、 θ_{ij} は観測天体の構造による位相である。これらを式に代入すると、

$$\begin{aligned} \Phi_{123} &= \theta_{12}^{\text{obs}} + \theta_{23}^{\text{obs}} + \theta_{31}^{\text{obs}} \\ &= \theta_{12} + (\phi_1 - \phi_2) \\ &\quad + \theta_{23} + (\phi_2 - \phi_3) \\ &\quad + \theta_{31} + (\phi_3 - \phi_1) \\ &= \theta_{12} + \theta_{23} + \theta_{31}. \end{aligned}$$

となつて、クロージャー位相 Φ_{123} では、アンテナに起因する位相誤差はキャンセルされ、 Φ_{123} の値は、観測された天体の構造に起因する位相のみにによって決定される。クロージャー位相は、一点源に対してはゼロである。基線起因の誤差がある場合は、それはキャンセルされないことに注意すること。また、熱雑音もキャンセルされない。真の観測天体像と解析から得られた画像が同一であれば、観測データのクロージャー位相と、得られた画像(をフーリエ変換して得たvisibilityから)のクロージャー位相は同じ値になり、残差(両者の差)はゼロになる。しかし、原理的にはその逆が成り立つとは限らない。残差がゼロであっても、真の観測天体像が得られたことを保証するものではない。しかしながら残差が大きければ、それは真の観測天体像と異なることは確かだ。

C クロージャー振幅の定義

クロージャー振幅は、クロージャー位相と同様に、天体の構造のみにによって決定される量であり、アンテナに基づく誤差とは無縁である(Felli & Spencer 1989; Readhead et al. 1980; Twiss et al. 1960)。まず、クロージャー振幅の定義について述べる。

アンテナ i と j を結ぶ基線によって観測されたvisibilityの振幅は二つのアンテナでのゲインエラー a_i, a_j と観測天体の構造による(その空間フーリエ成分の)振幅 A_{ij} によって表される。

$$|V_{ij}^{\text{obs}}| = a_i a_j A_{ij}. \quad (5)$$

アンテナ1, 2, 3, と4があるとしよう。アンテナを結ぶ4つの基線によって観測されていて得たvisibilityの振幅、つまり $|V_{ij}^{\text{obs}}|$, where $(i, j) = (1-2), (3-4), (1-3)$, そして $(2-4)$ に対して、クロージャー振幅は以下の式で定義される

$$\text{Closure Amplitude} \equiv \frac{|V_{12}^{\text{obs}}| \times |V_{34}^{\text{obs}}|}{|V_{13}^{\text{obs}}| \times |V_{24}^{\text{obs}}|} = \frac{A_{12}A_{34}}{A_{13}A_{24}}. \quad (6)$$

この量は、観測天体の構造(のみできまる)visibilityの振幅のみにによって決定される。定義が示すように、2つの基線のvisibility振幅を他の2つの基線のvisibility振幅で割る。分母にSNRの低いデータの振幅値がある場合、その熱雑音によってクロージャー振幅値は大きく変動する可能性がある。そのため、クロージャー位相よりも不安定な値を与える可能性がある。クロージャー振幅の値を安定させるためには、SNRの高いデータだけを選んで計算すれば問題は回避できるが、別の問題が生じる。一般に、空間フーリエ成分の周波数が高いほど、SNRは低くなる。SNRの低いデータ点を除外して閉鎖振幅を計算した場合、結果として得られる値は空間分解能の低い成分の影響を受けるだけとなる。これでは、得られた画像が高空間分解能に対応する微細構造を捉えているかどうかを正確に評価することができない。クロージャー振幅は、一点源の天体構造に対して1となる。基線に起因する誤差がある場合、定義から明らかなように、それはキャンセルできない。また、熱雑音はキャンセルされない。

なお、本稿では比較のために正規化クロージャー振幅を使用する。その定義は正規化振幅と似ており、以下のように示すことができる。

Normalized Closure Amplitude =

$$\frac{\text{Closure Amplitude (image)} - \text{Closure Amplitude (observed data)}}{\text{Closure Amplitude (observed data)}} \quad (7)$$

D 我々の解析におけるセルフキャリブレーション解

本セクションでは、セルフキャリブレーションの初期解と最終解を示す。Figure 14に最初のセルフキャリブレーション解を、Table 3にセルフキャリブレーションに用いたパラメータを示す。最初のセルフキャリブレーション解は一点源モデルを用いて得られたものであり、2つのチャンネル間の解の差はM87の公開データのものとは比べて小さいことがわかった。

Figure 15は最終的なセルフキャリブレーション解を示して

Parameters		
SOLTYPE		'L1'
SOLMODE		'P' (phase only)
SMODEL	1,0	(1 Jy single point)
REFANT	1	(ALMA)
SOLINT (solution interval)	0.15	(min)
APARM (1)		1
APARM (7) (SNR cut off)		3

Table 3. AIPSのタスク、CALIBを用いてセルフキャリブレーション解をえるために用いたパラメータ

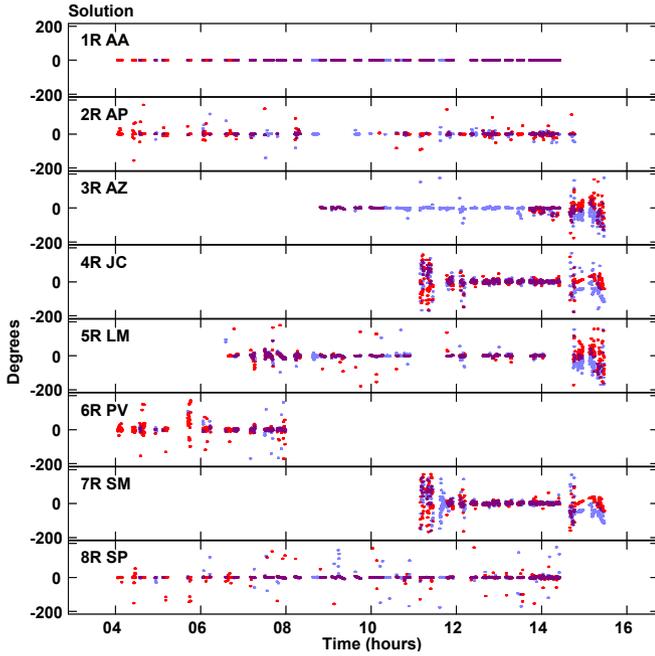


Figure 14. 最初のセルフキャリブレーション解 (AIPSのタスクCALIBによる)。点源モデルを用いて位相についてのみの解。二つある記録チャンネルそれぞれについて赤点がローチャンネル、青点がハイチャンネルに関する解を示す。

おり、画像モデルを除いてセルフキャリブレーションに用いたパラメータは一定である。最初の解と最終解の間の不一致もわずかである。これは、データ較正の段階で高精度な位相較正が行われ、それがこれらの解 (の差が小さいことに) に寄与しているのかもしれない。

E 2017年4月6日のデータにおけるPSF (ダーティビーム)

ここでは、2017年4月6日の観測における、 u - v の分布とそれに対応するPSF (ダーティビーム) 構造を紹介する。この日の撮像結果は、EHTCの論文で述べられているように、「リングの特徴はこれらの再生像のほとんどに現れるが、それはあまり顕著ではない」ことを示した。実際、4月6日のリング構造は、4月7日のリング構造ほど明確に定義されていない。これは、4月6日の静止画像の画質が悪かったためとEHTCは考えている (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)。この章では、EHTC リング構造の堅牢さの違いは、Sgr A* 自体の構造の時間変動によるものではなく、むしろ4月6日と4月7日のデータのPSF構造の違いによるものであることを示す。

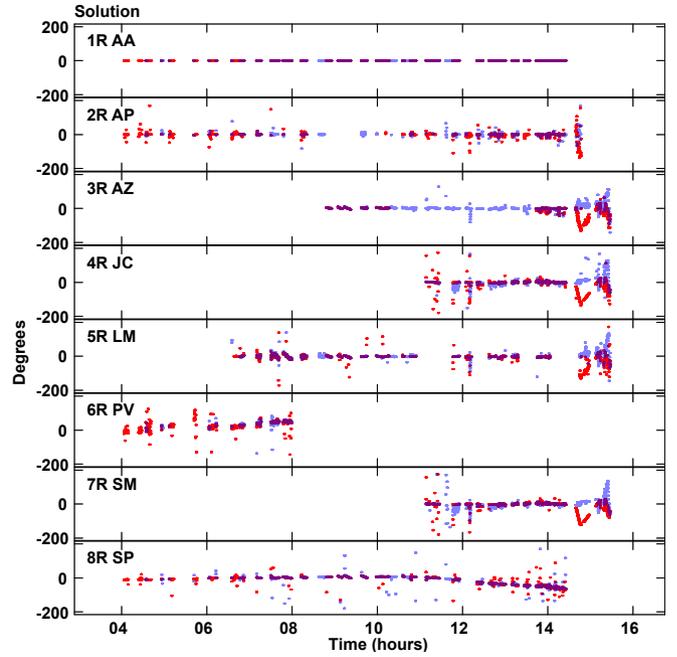


Figure 15. 最終のセルフキャリブレーション解 (AIPSのタスクCALIBによる)。点源モデルを用いて位相についてのみの解。二つある記録チャンネルそれぞれについて赤点がローチャンネル、青点がハイチャンネルに関する解を示す。Sgr A*が強度変化を示しているため、振幅に関しては、補正が困難と判断して、セルフキャリブレーション解による較正は行わなかった。

EHTCで測定されたデフォルト (=通常の) の復元ビームの形状は、どちらの観測でも非常によく似ている。

4月6日は $24.8 \times 15.3 \mu\text{as}$, $\text{PA} = 67^\circ$ 、

4月7日は $23.0 \times 15.3 \mu\text{as}$, $\text{PA} = 66.6^\circ$ (Event Horizon Telescope Collaboration 2022c)である。しかし、PSFの構造をよく見ると、両者には大きな違いがある。

Figure 16に2017年4月6日の u - v データのサンプリング分布を示す。横軸は空間フーリエ成分の大きさ、縦軸はサンプル数である。

4月6日のデータでは、いくつかの範囲でデータサンプルが欠損している。具体的には、 $25 \sim 25.5 \mu\text{as}$, $27 \sim 28.5 \mu\text{as}$, そして $34 \sim 37.5 \mu\text{as}$ 。一方、4月7日のデータサンプルの欠損範囲は、 $24.5 \sim 25.5 \mu\text{as}$, そして $27.0 \sim 28.5 \mu\text{as}$ である。4月6日のデータは、4月7日の観測に比べ、高周波の空間フーリエ成分の欠落が多い。しかし、EHTCで測定されたリングサイズ ($d = 51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$)に対応する成分は、4月7日のデータと同様にサンプリングされている。

u - v カバーの欠損はPSFの構造に影響を与える。しかし、Figure 17によると、対応するPSFで最も顕著なごぼごぼ構造は、欠落している空間フーリエ成分のスケールではなく、2017年4月7日データの状況と同様に、 $\sim 50 \mu\text{as}$ 間隔のスケールを持つ。

このことはEHTデータの分析に重要な意味を持つ：PSFの構造は、 u - v カバーのプロットだけでは推測できず、その特性を完全に理解するためには実際にPSFを計算する必要がある。 u - v データサンプリングの品質に関する混乱を避けるために、学術論文では u - v カバーのプロットではなく、PSFの構造を示すことが重要である。

Section 5.2で述べたように、PSF構造から直径 $50 \mu\text{as}$ のリングが形成される。Figure 17の左側のパネル (a)と (c)は、異なる二日のPSF構造を示している。メインビームに匹敵す

高さのサイドローブが存在し、その間に深いマイナスになるくぼみ、負の極小値が存在する。これらのうち、 $25 \mu\text{as}$ ほど北側の最も深くくぼみ「C」から約 $25 \mu\text{as}$ 離れたところに4つのピークがある。これらのピークは、「E1」、「N（最も高いサイドローブの一つ）」、「S（メインビーム）」、「W」である。これらが一緒になって、直径 $50 \mu\text{as}$ のリングを作る包絡線を形成している。おそらく、EHTC リング上で観測された明るい3つのスポットは、包絡線上の「E1」、「N」、「S」のピークに対応している。これらの特徴は、2017年4月7日のデータのPSF 構造ではとても明らかである。

一方、2017年4月6日のデータのPSF 構造は4月7日データのPSF 構造と基本的には類似しているが、4つのピークの明瞭度においては違いがある。4月6日のデータのPSF 構造におけるこれらのピークの明瞭度は、4月7日データのそれと比べて劣化している。

まず、エンベロープの東側に位置する「E1」ピークについて説明する。4月7日のデータのPSF 構造ではメインビームに対して0.305の強度を持つが、4月6日のデータのPSF 構造では強度比は0.224に減少している。それだけでなく、「E1」ピークの位置よりも東に位置している「E2」ピークは、「E1」ピークよりも実際には明るくなっている。4月7日のデータのPSF 構造では、「E1」と「E2」の強度比は1.170であり、両者は同程度の明るさである。しかし、4月6日のデータのPSF 構造では、この比は1.853に増加し、「E2」のピークは「E1」のピークよりも約2倍も明るいことになる。

そうすると「C」を中心とした直径 $50 \mu\text{as}$ の包絡線よりも東側に別の明るい構造ができていく可能性が高い。すると、直径 $50 \mu\text{as}$ のリングは、さらに東側に別構造ができてしまい、円周の東側部分は構造は非常に曖昧になるだろう。

PSF 構造のなかピーク「W」はEHTC リング円周の西側部分を担っているのだが、4月6日のデータのPSF 構造でピーク「W」は消えてしまう。その結果、直径 $50 \mu\text{as}$ のリングの西側円周の構造も非常にぼやけてしまう。このように、リング形状の東側と西側を円周部分のようになっていたPSFのピーク構造を失って直径 $50 \mu\text{as}$ のリングは形成されにくくなる。

たしかに、極端な時間変動によってSgr A*の静止画像を得ることは困難になるのは認めるけれど、2日の間でおきるEHTC リング構造の(再生の難易度の)変化は、二日の間のPSF 構造の変化によるものであり、Sgr A*の構造変化(の速さの変化)によるものではないと考えられる。

F チャンネル間のクロージャー振幅の差

ここでは、Section 4.2.3で述べた記録チャンネル間のクロージャー振幅の違いについて詳しく述べる。図 Figure 5では、正規化クロージャー振幅の残差だけでなく、2つの記録チャンネル間のそれらの差も示している。両記録チャンネルの差のひとつである「ローlow/ハイhigh」（ここではハイhighチャンネルのデータを基準としている）の値が大きくなっているが、これはハイhighチャンネルのデータのS/N比が低いためと考えられる。しかし、積分時間が長くなるにつれて、チャンネル間の差の平均値と標準偏差の両方が大きくなる理由は説明できない。一つのありそうな原因は基線に起因する誤差が存在する可能性である。我々が解析に用いたデータでは、LMT局を結ぶ基線のうち、投影基線長が2Gλ未満の基線に振幅補正がかけられている。これはデータの較正というよりむしろクロージャー振幅量を破壊する作用をしている可能性がある。一般に(アンテナではなく)基線に起因する誤差は考えにくい。もしも基線一本一本ごとに、あるいは記録チャンネルごとと別々に相関処理を行い、それぞれの相関処理でバラバラのパラメータを用いて遅延と遅延率の追尾を行えば、ク

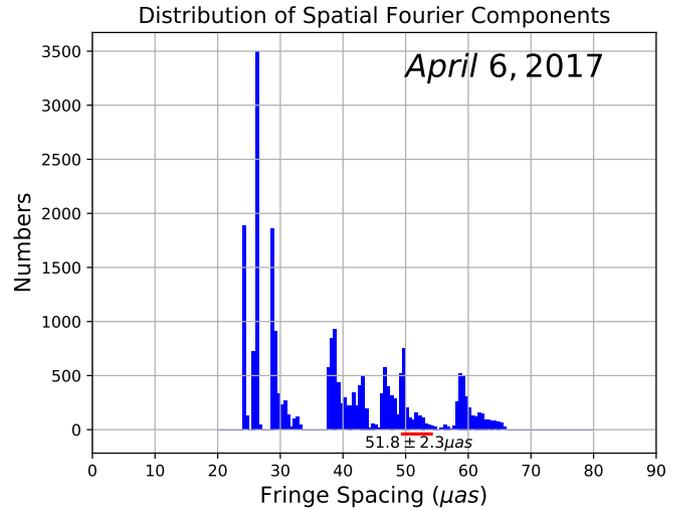


Figure 16. 全基線から得た観測データの分布(2017年4月6日観測データ)。横軸は、取得されたvisibilityデータのフリンジ間隔を μas 単位で示す。縦軸はサンプル数である。赤い線分はEHTCで測定したリングの直径($d = 51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$)に相当するフリンジ間隔を示している。取得されたデータには、他に 2.6 arcsec から 3.2 arcsec 程度の空間フーリエ成分がある。ここでは、このような大きなサンプルは省略してプロットしている。

ロージャー量にその影響が含まれることになる。また、相関器そのものがなにか未知の誤差を生んでいる可能性もある。

我々はまた、公開されているすべてのデータについて、チャンネル間のクロージャーの振幅の違いを調べた (Appendix G)。ここでも、同一であるはずのクロージャー量に有意な差が見られた。HOP, CASA という2つの異なる較正プロセスで個別のチャンネル間の差が出たということは、相関処理後のデータ処理で何らかのエラーが発生した可能性を示唆している。100分間のデータを抽出した「BEST」データセットは、クロージャー位相とクロージャー振幅の両方で、チャンネル間の差の標準偏差が、全観測期間を集めたデータセットに比べ有意に小さい。これは、長時間の処理では差が蓄積していくことを示唆している。もし、基線の一部の相関処理が誤った局位置に基づく追尾パラメータで行われ、データが長時間処理された場合、誤差は蓄積され、1恒星日以内ではキャンセルされなくなる。このような処理誤差が発生する可能性はあるが、公開されているEHTデータのみによる調査では、その原因を特定することは非常に困難である。

明らかに、データ自体に(少なくとも記録チャンネル間で)不一致がある。このため、クロージャー量の残差に基づいて最適な画像を選択することは実際には困難であると思われる。

G 二つの記録チャンネル間のクロージャー量の違い

Section, 4.2.2 and 4.2.3で、観測データのクロージャーの位相と振幅を、我々の最終像とEHTCのリング像とで比較した。その結果、我々の最終像もEHTCのリング像もかなり大きな残差を示し、積分時間を長くしてもこれらの残差を減らすことができないことがわかった。これは説明の難しい現象である。2つの記録チャンネルのデータ間のクロージャーの違いを調べた結果、この現象は画像に起因するものではなく、データに何か原因があると結論づけた。そこで、Sgr A*について公開されているEHTの全データを調査することにした。Table 5では、2つの記録チャンネル間の正規化クロージャー

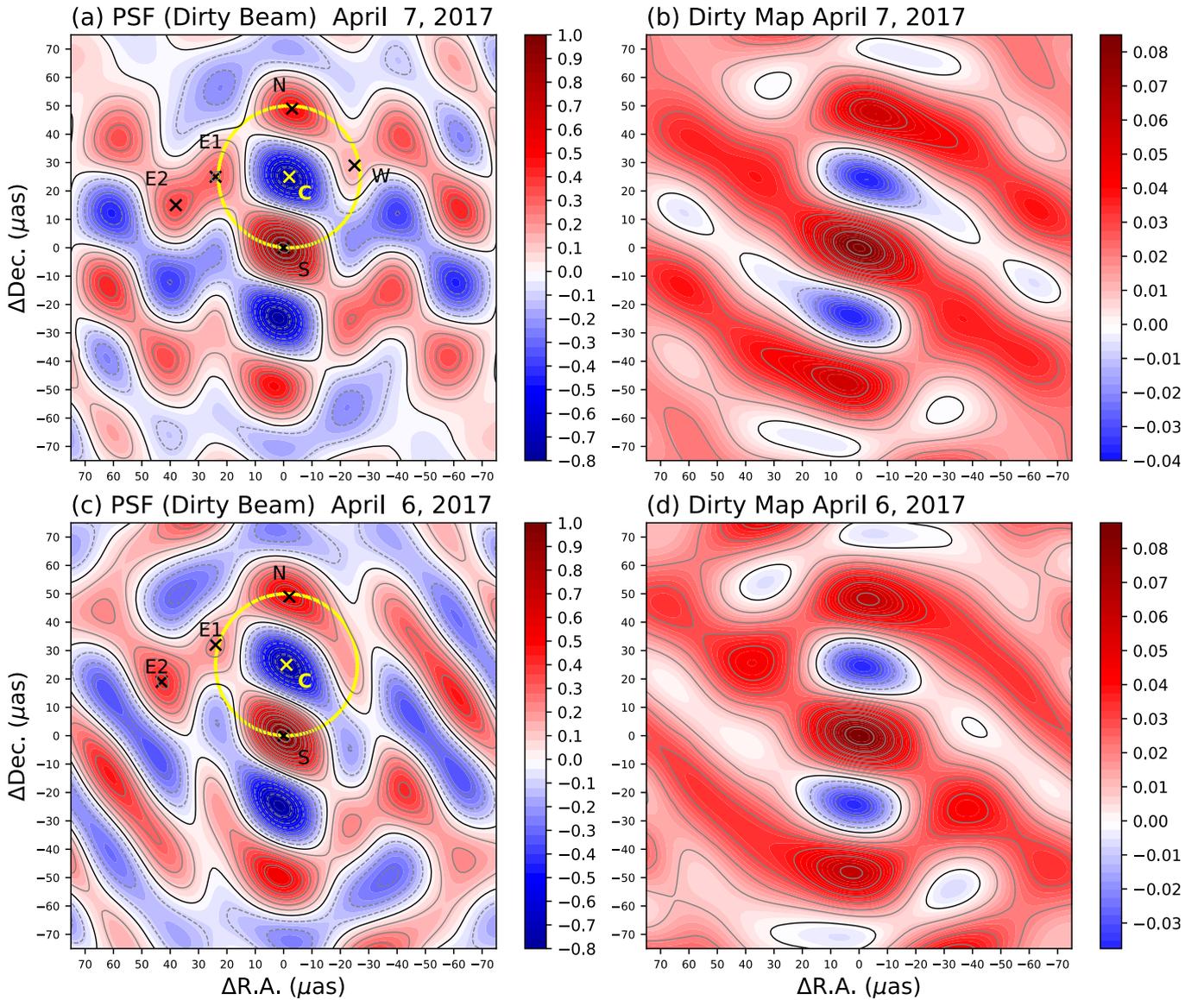


Figure 17. EHTのSgr A* 観測におけるPSF、つまり点広がり関数の構造 (電波干渉計の用語ではダーティビーム) とダーティマップ。上段のパネル、(a)と(b)は2017年4月7日観測データのもの、下段のパネル、(c)と(d)は2017年4月6日観測データのもの。左側のパネル、(a)と(c)が二つの観測データごとのPSF,点広がり関数の構造を示している。右側のパネル、(b)と(d)はそれぞれのデータが示すダーティマップである。ただし、データは点源モデルを用いたセルフキャリブレーション解(位相のみ)を用いて較正した上で、フーリエ変換して作っている。

振幅の差を示し、Table 6では、2つの記録チャンネル間のクロージャー位相の差を示す。Figure 18には両値のプロットを示す。

両チャンネル間のクロージャー振幅差に関して：もし両チャンネルのクロージャー振幅値が同一であれば、正規化クロージャー振幅差の平均値は0、標準偏差は0となるはずである。もし値が2倍違えば、正規化された閉鎖振幅差は1になる。Table 5で示されるように、最小平均は約0.25であり、片

方のチャンネルの閉鎖振幅がもう片方のチャンネルの閉鎖振幅より25%大きいことを示している。標準偏差の最小値は0.66であり、チャンネル間の閉鎖振幅に有意な自己矛盾があることを示している。

クロージャーの位相に関しては、理論から予想されるように、2つのチャンネル間の差はだいたいゼロに近い。しかし、積分時間を長くしても平均差はゼロに近づかない。標準偏差も比較的大きい。熱雑音が支配的であれば、分散は積分時

Components	7-Apr-2017		6-Apr-2017	
	Intensity	Position [μ as]	Intensity	Position [μ as]
C (deepest minimum)	-0.781	(+2, +26)	-0.778	(+1, +26)
E1	0.305	(+24, +26)	0.224	(+24, +33)
E2 (out of the circle)	0.357	(+38, +16)	0.415	(+43, +20)
(ratio of E2/E1)	1.170		1.853	
N (highest sidelobe)	0.491	(+3, +50)	0.556	(+2, +50)
S (main beam)	1.000	(0, 0)	1.000	(0, 0)
W	0.150	(-25, +29)	<i>disappeared</i>	

Table 4. PSF 構造の中で最も深い、マイナス値を示す二つのくぼみ (のうち北側のもの)、Cの付近にあるピークの位置と強度。二日の観測日の間での違いを示している。強度はメインビームの値を1として相対値で示している。

間Tの -0.5^{th} 乗だけ減少するはずであるが、実際の標準偏差の減少は大きくない。

定義から明らかなように、クロージャー量はSgr A* の構造のみによって決定され、アンテナにおいて生じる誤差とは無関係である。したがって、2つのデータが同時に取得された場合、そのクロージャー量は同じになるはずである。Sgr A* の構造が非常に速い時間変化を示す場合でも、同時に記録されたデータセット間でクロージャー量に差はないはずである。したがって、ここで得られた知見は、観測された天体ではなく、むしろデータの記録と事前較正プロセスの品質に関係している。

我々は、2017年に観測されたSgr A* の公開されている全てのEHTデータセットでクロージャーの不一致が生じていることを発見した。EHT公開データは正確には観測天体の構造を表していない可能性がある。

クロージャーが保存されていない場合、アンテナに起因する誤差ではなく、個々の基線に起因する誤差が生じている可能性がある。例えば、相反する観測局位置座標と地球回転パラメータを相関処理に用いて、個々の基線のデータを相関させた場合にこのようなことは発生する可能性がある。

詳細を調べると、次のようなことが推測できる。

(i) 4月6日と4月7日のデータを比較すると、2つのチャンネル間のクロージャー量の差に大きな変化は見られない。Sgr A*強度の時間変化は4月6日の方が強いが、その影響が少ないということは、チャンネル間のクロージャー量の差は、観測天体の短期的な強度変化とは関係なく、機器(おそらく相関器)かデータ処理によって差が起きていると考えられる。

(ii) 相関処理だけでなく、その後の較正処理においても何らかの基線ベースの補正が行われているようである。チャンネル間のクロージャー振幅の差はどちらのデータにも見られるが、その程度はHOPデータよりもCASAデータの方が大きい。チャンネル間のクロージャー振幅差の平均値も標準偏差も、CASA処理データの方がHOP処理データよりも大きい傾向がある。チャンネル間のクロージャー位相差については、標準偏差は同じだが、平均値ではCASA処理データの方がゼロからの偏差が大きい傾向がある。

(iii) EHTCがLMTに適用している振幅補正は基線ベースの補正であり、原理的にはクロージャー振幅に影響を与える。しかし、このような補正を行わないデータと比較して、チャンネル間のクロージャー振幅に有意な差は見られない。むしろ標準偏差を小さくする効果があるようだ。

(iv) visibility 振幅は、単一鏡(正確にはSMA,ALMA単体)観測で得られたSgr A*の光度曲線で正規化されているが、全ての基線データに一様に作用する。そのため、クロージャー

振幅には影響しないはずである。チャンネル間のクロージャー振幅の差にはそのような影響はない。

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.

Normalized Closure Amplitude Difference						
Tint (sec)	10	60	180	300	600	900
Apr,6;CASA	1.00 ± 4.32	0.97 ± 8.57	0.73 ± 3.81	1.58 ± 19.24	0.37 ± 1.56	0.24 ± 1.14
Apr,6;HOP	1.02 ± 4.44	0.63 ± 2.38	0.45 ± 3.41	0.41 ± 1.68	0.28 ± 1.28	0.17 ± 0.88
Apr,6;CASA;LMT	1.01 ± 3.48	1.06 ± 8.41	0.64 ± 3.36	1.12 ± 9.79	0.32 ± 1.59	0.34 ± 1.65
Apr,6;HOP;LMT	1.17 ± 5.66	0.65 ± 2.29	0.49 ± 2.50	0.39 ± 1.40	0.31 ± 1.37	0.19 ± 0.90
Apr,6;CASA;LMT;norm.	1.01 ± 3.48	1.06 ± 8.40	0.65 ± 3.39	1.12 ± 9.70	0.32 ± 1.57	0.34 ± 1.63
Apr,6;HOP;LMT;norm.	1.17 ± 5.66	0.65 ± 2.29	0.49 ± 2.52	0.39 ± 1.40	0.31 ± 1.37	0.19 ± 0.89
Apr,7;CASA	2.30 ± 23.45	0.66 ± 2.80	0.54 ± 3.74	0.31 ± 1.24	0.21 ± 0.77	0.20 ± 0.78
Apr,7;HOP	1.08 ± 5.50	0.82 ± 3.27	0.50 ± 2.23	0.33 ± 1.30	0.26 ± 0.84	0.76 ± 5.53
Apr,7;CASA;LMT	2.12 ± 14.25	0.71 ± 2.94	0.43 ± 1.78	0.27 ± 1.04	0.40 ± 1.66	0.26 ± 0.96
Apr,7;HOP;LMT	1.07 ± 5.44	0.79 ± 2.83	0.48 ± 2.30	0.36 ± 1.28	0.30 ± 0.90	1.07 ± 10.16
Apr,7;CASA;LMT;norm.	2.14 ± 14.50	0.71 ± 2.94	0.43 ± 1.77	0.26 ± 1.03	0.40 ± 1.72	0.27 ± 0.96
Apr,7;HOP;LMT;norm.	1.05 ± 5.03	0.79 ± 2.85	0.48 ± 2.34	0.34 ± 1.25	0.52 ± 2.55	1.08 ± 10.39
Apr,7;CASA;LMT;best	2.17 ± 13.22	0.75 ± 3.07	0.45 ± 1.79	0.27 ± 0.96	0.24 ± 0.70	0.23 ± 0.66
Apr,7;HOP;LMT;best	0.84 ± 3.20	0.83 ± 2.94	0.55 ± 2.65	0.30 ± 1.14	0.23 ± 0.82	0.20 ± 0.66

Table 5. 二つの記録チャンネル間の(正規化)クロージャー振幅の差(無名数) データセット名には観測日、較正法などを含んでつけた。

Closure Phase Difference						
Tint (sec)	10	60	180	300	600	900
Apr,6;CASA	-1.27 ± 81.14	-0.20 ± 67.36	-0.54 ± 58.38	-0.16 ± 55.55	0.99 ± 49.21	-0.07 ± 48.03
Apr,6;HOP	-0.15 ± 80.48	-0.49 ± 64.72	2.37 ± 57.31	0.09 ± 53.47	0.70 ± 46.30	-0.39 ± 43.81
Apr,6;CASA;LMT	-1.62 ± 81.53	-0.30 ± 65.76	-0.16 ± 59.68	0.20 ± 57.32	-0.55 ± 52.15	-1.59 ± 49.35
Apr,6;HOP;LMT	-0.94 ± 80.12	-0.45 ± 66.45	1.74 ± 58.77	-0.79 ± 53.68	0.18 ± 48.25	-0.55 ± 45.59
Apr,6;CASA;LMT;norm.	-1.62 ± 81.53	-0.30 ± 65.76	-0.10 ± 59.69	0.20 ± 57.32	-0.55 ± 52.15	-1.57 ± 49.36
Apr,6;HOP;LMT;norm.	-0.94 ± 80.12	-0.45 ± 66.45	1.74 ± 58.75	-0.79 ± 53.66	0.18 ± 48.25	-0.55 ± 45.58
Apr,7;CASA	-0.27 ± 82.95	0.90 ± 67.86	1.82 ± 55.62	2.96 ± 50.80	0.74 ± 48.22	5.52 ± 43.51
Apr,7;HOP	0.93 ± 83.00	-1.29 ± 67.95	0.56 ± 54.31	0.64 ± 50.50	-0.99 ± 48.27	1.02 ± 45.20
Apr,7;CASA;LMT	-0.21 ± 83.08	0.02 ± 68.97	1.31 ± 55.94	3.31 ± 50.83	1.89 ± 50.41	4.84 ± 42.21
Apr,7;HOP;LMT	0.84 ± 83.37	-0.24 ± 69.16	0.33 ± 54.89	1.30 ± 50.17	0.77 ± 48.76	3.46 ± 44.38
Apr,7;CASA;LMT;norm.	-0.21 ± 83.08	-0.14 ± 68.96	1.29 ± 55.93	3.32 ± 50.82	1.90 ± 50.39	4.90 ± 42.20
Apr,7;HOP;LMT;norm.	0.84 ± 83.37	-0.24 ± 69.16	0.01 ± 54.88	0.85 ± 50.18	0.21 ± 48.79	2.79 ± 44.48
Apr,7;CASA;LMT;best	-1.28 ± 81.08	0.62 ± 64.95	0.14 ± 50.38	2.30 ± 37.37	2.82 ± 35.65	1.25 ± 26.66
Apr,7;HOP;LMT;best	-0.06 ± 80.56	-1.11 ± 63.46	0.21 ± 43.91	1.35 ± 33.80	2.46 ± 35.28	1.20 ± 24.62

Table 6. 二つの記録チャンネル間のクロージャー位相の差(単位は度) データセット名には観測日、較正法などを含んでつけた。

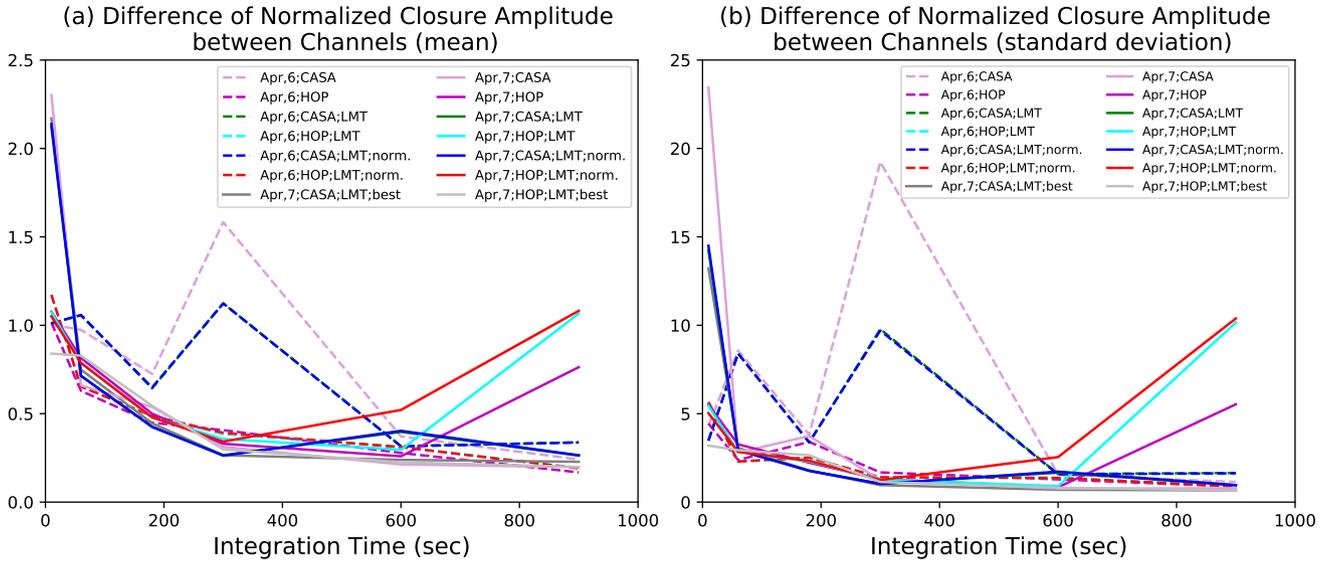


Figure 18. 二つの記録チャンネル間の(正規化)クロージャー振幅の差。パネル(a)は差の平均値、パネル(b)は差の標準偏差を示した。実線は4月7日観測のデータ、破線は4月6日観測のデータについて表している。横軸は積分時間(秒)、縦軸は正規化クロージャー振幅の差

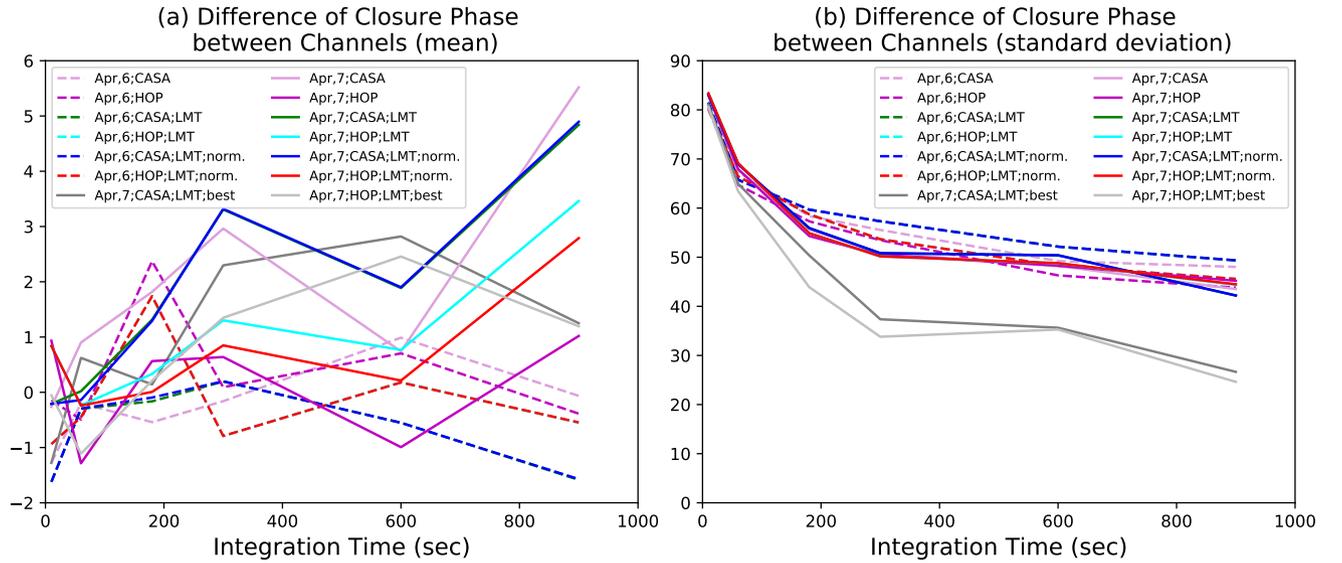


Figure 19. 二つの記録チャンネル間のクロージャー位相の差。パネル(a)は差の平均値、パネル(b)は差の標準偏差を示した。実線は4月7日観測のデータ、破線は4月6日観測のデータについて表している。横軸は積分時間(秒)、縦軸はクロージャー位相の差(度)