

Event Horizon Telescopeによる M87の偏光観測



浅田



水野

浅田 圭一¹・水野 陽介²

〈¹ 中央研究院天文及天文物理研究所 〒10617 中央研究院/台灣大學天文數學館 11 樓 台北市羅斯福路四段 1 號, 台湾〉

〈² 上海交通大学李政道研究所 〒200240 上海市閔行区東川路 800 号, 中華人民共和國〉

e-mail: ¹asada@asiaa.sinica.edu.tw, ²mizuno@sjtu.edu.cn

ブラックホールシャドウの画像を史上初めて撮影した Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration が、楕円銀河 M87 の中心にある超大質量ブラックホールのごく近傍の偏光観測に成功した。本稿では、EHT による M87 の偏光観測から得られた画像とその理論的解釈、そして今後の展望について解説する。

1. M87 の EHT 偏光観測

2019 年, Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration は史上初のブラックホールシャドウの画像を公開した [1]. ブラックホールシャドウが直接撮像される以前から, 活動銀河核が生み出す莫大なエネルギーの起源はブラックホールへの質量降着現象が源であると信じられており, この質量降着にはブラックホール近傍の磁場が重要な役割を果たしていると考えられていた. また活動銀河核から噴出する活動銀河核ジェットは大きいもので差し渡しは 100 万光年以上の大きさにもなる. ブラックホールのスケールと銀河団のスケールを繋ぐほぼ唯一の単体の天体現象である. このジェット生成の物理にも磁場が深く関わっていることが理論的に予想されていた. 放射機構がシンクロトロン放射 (電子が磁場中で加速度運動する際に放つ電磁波) であることから, 偏光観測がこれらの物理の解明に大きな役割を果たすことが期待されていたが, 観測分解能不足で, これまでブ

ラックホールごく近傍での磁場の探査は行うことができなかった. 偏光とは振動方向が規則的な光のことである. EHT は, ブラックホール研究に直接撮像という新たな時代の幕開けをもたらし, 2021 年遂に偏光観測による, ブラックホールごく近傍での磁場の直接探査を可能にした [2].

電波干渉計は天体画像のフーリエ成分を取得し, それを逆変換し元の天体画像を得る装置である. 干渉計を構成する観測局を結ぶ基線の射影成分がその空間周波数に相当し, 多くの観測局を持つこと, また射影ベクトルを地球回転を使って変化させることにより, より多くのフーリエ成分を取得し, もっともらしい天体構造を推定する. はじめに各観測局で直交する 2 つの偏光^{*1}を独立に受信し, 基線をなす 2 つの観測局で受信された信号の相互相関係数を得ることによりそのフーリエ成分を取得する. この際に, 各局で 2 つの異なる偏光 (L および R) を受信するので, 相互相関係数は 4 通り (LL, RR, LR, RL) 得られる. 観測の対象が天体の総輝度分布 (Stokes I) である場合

*1 一般に左右両円偏光. またここでは左回り偏光を L, 右回り偏光を R と記述する.

には、この内の平行偏光成分のみ (LL, RR) の相互相関係数により天体構造が推定される。しかしながら偏光成分を記述するには、4つの独立な量を取得する必要があるため偏光の観測ではこれら全ての相互相関係数が天体構造の推定に用いられる。

観測の対象が天体の総輝度である場合は、各観測局での大気などによる信号の位相揺らぎや望遠鏡の感度の測定誤差等の観測装置由来の系統誤差を較正した後に、天体の総輝度分布を推定してきた。偏光観測においては、これらに加えて装置起因の偏光特性も較正する必要がある。各観測局で直交する2つの偏光成分 (LおよびR) を独立に受信するが、受信システムには目的の偏光成分とは逆の偏光成分に対する応答があり、直交する偏光成分間の漏れ込みにより、系統誤差が生じる*2。この観測装置起因の系統誤差は一般に数～10%程度であるが、検出したい天体由来の偏光成分と比べて無視できないほど強いため較正が必要となる [3]。

これまで電波干渉計を用いた直線偏光の観測では、偏光較正用の天体を一観測につき複数回観測することにより較正されてきた。天体の偏光と装置起因の系統誤差は、異なる parallax angle (視差角) 依存性を持つため、十分大きな parallax angle の範囲にわたって較正天体を観測することで、両者を分離することが可能となる。その際に較正天体は、偏光構造が比較的単純で、かつ高い信号雑音比が達成される必要があった。しかしながら世界最高分解能を持つミリ波 Very Long Baseline Interferometry (VLBI) 観測においてはそのような単純な構造を持つ較正天体は今のところ存在せず、これまでの較正手法を改良する必要があった。

そこでEHT偏光ワーキンググループ (以下WG) では、今回の偏光データの較正に際し、大

別すると3つの手法に基づく、1つの既存のソフト (AIPS/LPCAL [4]) と5つの新しく開発されたソフト (D-term Modeling Code (DMC) [5], eht-imaing [6], GPCAL [7], polsolve [8], THEMIS [9]) を用いた。とりわけ重要だったのが、偏光較正天体の構造と装置起因の偏光特性をいかに分離するかであった。そのためCASAのパイプラインの一部として開発された polsolve および、従来VLBIコミュニティーで使われてきたAIPS/LPCALの代替になる目的で開発されたGPCALでは、偏光較正天体の構造と装置起因の偏光特性の推定を反復的に求めることにより、それぞれの精度を高めていく手法がとられ、eht-imaingでは偏光較正天体の構造と装置起因の偏光特性の推定を正則化付き最尤推定法を用いて同時に行う手法が用いられた。DMC, THEMISではマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて偏光較正天体の構造と装置起因の偏光特性のみならず全ての系統誤差を同時に推定する方法がとられた。さらに、新規開発された手法では系統誤差の非線形項を含めたモデル化を行い、従来用いられていた線形モデルよりも較正を精緻化した。これらの手法は観測模擬データを用いた検証により、有用性が定量的に検討、検証された。また比較のためにVLBIコミュニティーが20年来使用してきた較正手法 (AIPS/LPCAL) も用いられた。今回の観測では、明るい較正天体も観測されたが、実際にイメージしてみると、偏光で明るく、その構造も複雑であった。そのため装置起因の偏光特性の推定にはM87が用いられ、観測された較正天体は主に較正の検証のために用いられた。この際に日本の国立天文台が中心になって開発したSMILIが較正天体の総輝度分布を推定するのに活躍した [10]。

図1に4日間それぞれの偏光分布を示す (GPCALはpolsolveとほぼ同一の手法なので、その結果には含まれない。またそれぞれの手法で得ら

*2 これは交差偏光成分もしくは干渉計の言葉ではD-termと呼ばれる。

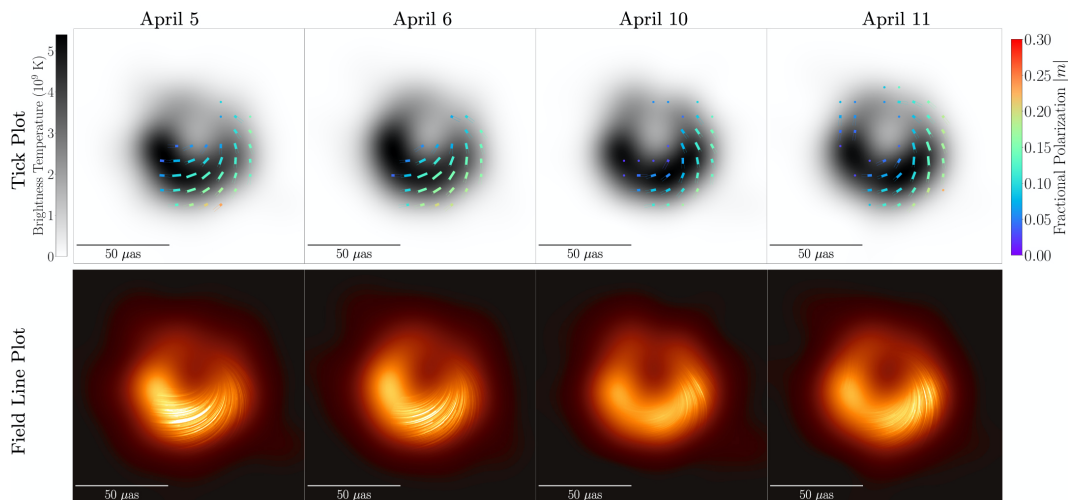


図1 4日間それぞれのM87の偏光分布の標準画像。標準画像は5つの手法で得られたそれぞれの代表画像の平均である。上下の違いは可視化手法の違い。(上図)総輝度分布をグレースケールで、偏光度および偏光角を直線で示す。ベクトルの長さは偏光強度に比例して表示されている。各ベクトルの色の濃淡は、図中の右のスケールで示した偏光度を表す。(下図)総輝度分布の上に偏光角の変化を流線で示す。また、偏光が強いところを流線の濃淡で示す。

れた偏光分布は概ね良い一致を示した。) [2]. 観測された偏光角の分布は、2019年に公開されたブラックホールシャドウ画像のリング状の構造 [1] に概ね沿っており、かつ向きは方位角方向に揃っていた。総輝度の観測では、比較的きれいなリング状の構造が見られたが、偏光においては特定の一部のみが強く偏光している様子が見られた。最も高い偏光度を示すのはリングの南西部分で、偏光度で15%にも達する。この高い偏光度はこれまでの低周波でのVLBIを用いた中心核の偏光観測で典型的に見られる<0.5%以下という偏光度と比べて有意に高い [11, 12]. また今回取得された4月5日から4月11日の4回の観測の比較で、偏光角、偏光強度の変動が見られた。

2. 理論との比較、解釈

EHT理論ワーキンググループ(WG)は、大規模シミュレーションを用いて現実的な理論モデルのライブラリを構築し、EHTの観測で得られた偏光情報を含む画像との比較からブラックホー

ル自身、またその近傍で起きている物理を理解することを目的としている。

M87は低光度活動銀河核の1つである。ブラックホール近傍には幾何学的に厚い高温の降着流が存在し、EHTの観測波長帯である1.3 mmでは、シンクロトロン放射が卓越していると考えられる。シンクロトロン放射はその放射機構により、放射領域での磁場構造についての情報を得ることができる。放射しているところで偏光度が高ければ、比較的揃った磁場が存在し、一方で、偏光度が弱ければ、方向の不揃いな乱流状態の磁場が存在することが分かる。一般的に、偏光している光の偏光方向が分かれば、磁場の方向を推定できる。ただし、ブラックホール近傍から来る光は、後述のように高密度の降着流を通過する際に発生するファラデー回転と呼ばれる効果で偏光方向の変化することに加え、ブラックホールの強い重力による曲がった時空を通ってくるため、その強い重力による歪みを考慮する必要がある。

EHT理論WGが構築した大規模シミュレーショ

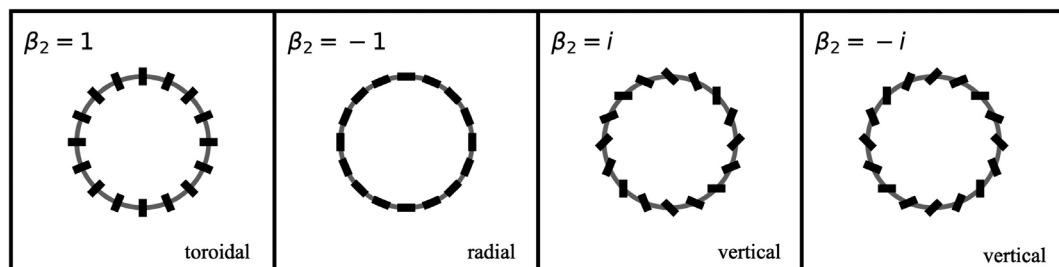


図2 特徴的な偏光方向分布とそれらを回転方向にモード分解した際の $m=2$ モード成分の値。

ンライブラリは、ブラックホール近傍の高温ガス流のダイナミクスを計算する一般相対論的磁気流体力学 (GRMHD) シミュレーションと、これを基に観測と比較するための一般相対論的輻射輸送計算 (GRRT) による理論ブラックホールシャドウ画像からなる。今回、新たに計72,000通り (120通りの異なるモデル) の偏光情報を含む理論ブラックホールシャドウ画像を作成した [13]。

今回得られたM87のEHTによる偏光画像では、偏光角分布に特徴的な渦状の構造が見られた。この偏光角分布の構造は、放射領域の磁場構造と関係がある。EHT理論WGは、3つの異なる磁場構造 (放射状磁場、回転方向磁場、回転軸方向 (ポロイダル) 磁場) を持つ解析的モデルを用いて偏光角分布の構造がどのようになるか調べた。その結果、3つの異なる磁場構造でそれぞれ特徴的な偏光角分布の構造が見られた。放射状磁場の場合、偏光角分布の構造は明るい放射リングに沿った形になる。一方、回転方向磁場では、逆に偏光角分布の構造は放射状になる。ポロイダル磁場では、放射状と方位角磁場の要素を両方含み、明るいリングに沿って渦状の偏光角分布が形成された。この結果は現実的モデルであるGRMHDシミュレーションを用いたGRRT計算とも一致している。

前回のM87の総輝度画像との比較では、EHT理論WGが構築した理論ブラックホールシャドウ

ウ画像は、2017年EHT観測で得られた非対称リング構造を見事に再現した。これはシンクロトロン放射がブラックホールの強い重力レンズ効果を受け、観測のような非対称な明るさを持つ光子リングを形成するという仮説が正しいことを示している。しかしながら、ブラックホールの回転、事象の地平面を貫く磁束量やガス流の電子温度などが異なる様々な理論画像との比較では、観測と整合的である物理モデルは多岐にわたり (全モデル60通り中51通り)、M87近傍の物理的状況に関する制限を与えることができなかった。今回、新たに偏光に関する情報が手に入り、さらなる理論モデルへの制限を試みた。

前回、EHT理論WGでは、EHTの観測で得られた総輝度分布の画像と異なるパラメータによる理論画像との直接比較を行った。今回の偏光観測では、画像の比較ではなく、偏光観測から得られた様々な観測量の積分値を用いてモデルの比較を行った。比較に用いた観測量は、イメージ全体の正味の直線偏光度 ($|m|_{\text{net}}$)、正味の円偏光度 ($|v|_{\text{net}}$)^{*3}、各ピクセルの直線偏光度に総輝度の重みを付けて平均を取った値 ($\langle |m| \rangle$)、そして直線偏光の方位角成分を分解した係数 (β_m) [14] である。ここで β_m 係数では、 $m=2$ の成分を計算する。 $m=2$ のモードは、偏光角分布に対して違いが顕著に現れ、偏光角分布を通して理論モデルとEHTの観測との比較に対して特に有効である (図2)。

*3 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) のみで得られた観測量。

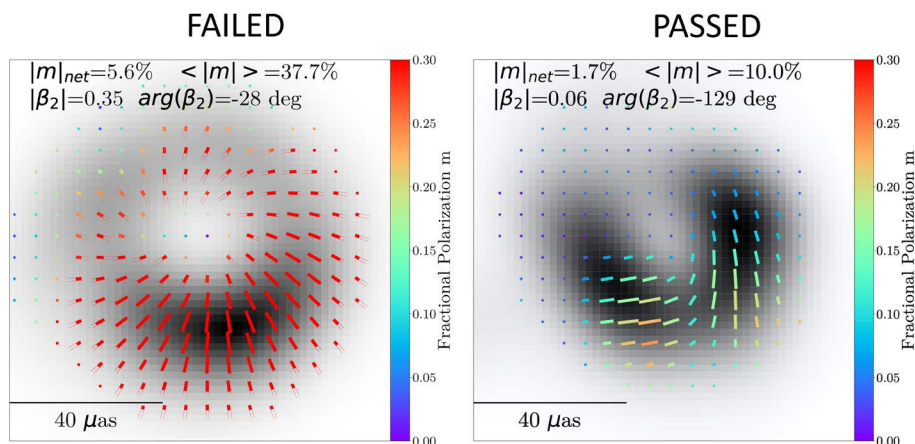


図3 GRMHD+GRRTシミュレーションによるM87のブラックホールシャドウの理論偏光画像。左：観測値の制限外の理論偏光画像 (SANE, $a=0.5$)，右：観測値の制限内の理論偏光画像 (MAD, $a=-0.5$)。背景の白黒カラーは総輝度分布，それぞれの短い線の長さは偏光度，方向は偏光角を表している。

EHTの観測から得られた制限は以下である； $1.0\% \leq |m|_{\text{net}} \leq 3.7\%$ ， $|v|_{\text{net}} \leq 0.8\%$ ， $5.7\% \leq \langle |m| \rangle \leq 10.7\%$ ， $0.04 \leq |\beta_2| \leq 0.07$ ， $-163^\circ \leq \arg(\beta_2) \leq -129^\circ$ 。これらの値を用いて計72,000通りの理論画像（120通りの理論モデル）から得られた値と比較をし，どの理論モデルが制限内に入るかを調べた。

その結果，EHTの偏光観測で得られた全ての観測値の制限内に入った理論画像はたった73通り，モデルにして全120通り中，たったの15通りのみだった。もっとも多くのモデルが除外されたのは， β_2 係数である。 β_2 係数は，偏光角分布の構造を反映している。ブラックホール近傍の降着流の物理的特性（特に磁場構造）によって偏光角分布の構造は大きく変化する。そのため，EHTの偏光観測で得られた偏光角分布構造を説明できる理論モデルは非常に限られたものになった。5つ以上の画像が全ての制限内に入ったモデルは，MAD (Magnetically Arrested Disk) モデルのブラックホールスピンパラメータ $a=0$ と $a=-0.5$ の場合である。SANE (Standard Accretion and Normal Evolution) モデルからは，73通り中たった2つの画像のみ全ての制限内に入った ($a=0$ と $a=0.94$ のモデル)。MADモデル [15] では，ブラッ

クホールの事象の地平面近傍で，局所的に降着するガスを押し返すほど強い比較的揃ったポロイダル磁場が存在している (図3b)。一方，SANEモデル [16] では，ブラックホールの事象の地平面近傍では，そこまで強い磁場を持たず，乱流構造によって比較的不揃いで，回転方向成分が卓越している (図3a)。このブラックホールの事象の地平面近傍での磁場構造の違いが，特に β_2 係数の違いとして現れ，理論モデルへの強い制限となった。5つ以下の画像ではあるが， $a=0.5$ と $a=0.94$ のMADモデルも全ての制限内に入っているため，より正確なブラックホールの回転への制限は今後の観測・理論両面の発展が必要である。

実のところ $\langle |m| \rangle$ も理論モデルへの強い制限に寄与している。これは降着流の中で起こるファラデー回転量を制限する。ファラデー回転とは，プラズマ中を直線偏光が通る際にその偏光方向が回転する現象である。M87の放射領域の大きさ，磁場の強さ，粒子数密度では，ファラデー回転が重要になりえる。その場合，異なる場所から放射されて異なる角度だけ回転してきた直線偏光を重ね合わせて観測するため，直線偏光度が下がることになる。実はこの効果を考えなければ，MAD

モデルでの $\langle |m| \rangle$ は数十%となり、観測結果と比べて高くなり過ぎるのである。つまりMADモデルにおいて、磁場の強さと粒子数密度が十分大きく、ファラデー回転量が大きくなるモデルだけが生き残るのである。

なお、ブラックホールによる強重力も2つの効果により偏光度を下げる働きをしている。1つ目は、重力による光子軌道の湾曲による効果である。光子がブラックホール近傍でその軌道を大きく曲げられながらプラズマ中を伝搬していく際、様々な方向を向いた磁場からのシンクロトロン放射成分が足し合わさることで偏光度が減少する。2つ目は重力ファラデー回転と呼ばれる効果である [17]。自転するブラックホールの周りを極角方向の運動量成分を持った光子が伝搬する際、時空の引きずり効果で偏光方向が変化し、プラズマのファラデー回転と同様に偏光度が減少する。そしてプラズマによるファラデー回転にこれら重力効果が加わることで、光子リングでは総輝度が高い一方で偏光度はその周囲より有意に減少するという性質が現れる。今回比較的高い偏光度を示している場所は、実はわずかに光子リングから外れた位置からの放射を拾っているのである。

以上の解析の結果、中心にあるブラックホール近傍では、非常に強い (~ 30 G) 比較的揃ったポロイダル磁場があることが示された。今回の偏光観測によってブラックホール近傍での降着流の物理的状況に大きな制限を与えることができた。このような強いポロイダル磁場の存在は、磁気流体力学過程によるジェット形成の理論的モデルから予測と一致している。またMADモデルは、長波長で観測されているような大規模なジェットを作る上で都合が良い [18]。2017年のEHTの観測では、感度不足のためリング周辺に存在していると考えられるジェットの根元や検出には至らなかった。しかし、今回の偏光観測の結果は、間接的ではあるが、そのジェットの存在を指し示す証拠となった。

3. 将来の展望

今回の結果に引き続き、EHTでは今後我々の銀河系中心に存在するブラックホール周辺の磁場構造も明らかにしていく。M87は大規模なジェットが存在し、銀河系中心にはそれが存在しない。この違いに磁場がどのように関わっているのかを明らかにすることは宇宙ジェット現象の研究一般にとっても大変重要である。また2018年のグリーンランド望遠鏡に続き、今年2021年4月に3年ぶりに行われた観測ではフランスのNOthern Extended Millimeter Array (NOEMA) およびアリゾナのキットピーク 12 m 望遠鏡がEHTの観測に初めて参加した。新型コロナウイルスの影響で各観測局での現地観測が困難な状況の中、入念な事前準備と現地スタッフの厚い助力により、南極点望遠鏡およびグリーンランド望遠鏡といった南北極地に存在する望遠鏡も含め概ねリモートで行われた12日間にまたがる観測を成功させた。これら新規観測局の参加により、今まで欠損していた短基線（広がった構造に感度がある低い空間周波数成分）の情報を取得することが可能となる。その結果、より多くの空間周波数成分を取得することと相まって高いダイナミックレンジでの画像の取得が可能になり、EHTで観る象徴であるM87のリング状のブラックホールシャドウの他に広がったジェットおよび降着流を捉えることができるのではと期待される [19]。今回明らかになったポロイダル磁場は準定常的なのか、またどのように大規模ジェットの磁場に繋がっていくのか、などについても大きな知見を与えるであろう。さらには今回は直線偏光に注目した研究が行われたが、円偏光に注目した研究も可能で、これにより降着流やジェットを構成するプラズマの組成やエネルギー分布についても新たな試みがなされるであろう [20, 21]。また将来観測においてより高空間分解能な偏光画像が得られると、光子リングで偏光度が有意に下がる効果を利用して光子

リングの情報のみを抽出することが可能になる [22]. これを利用することでより正確なブラックホールの質量やスピンパラメータの見積り, さらには, ブラックホールの無毛定理を検証することが可能になるだろう.

謝 辞

本稿の内容は世界中に散らばる数多くのEHTメンバーによって研究そして執筆されたEHTのM87偏光観測論文 [2, 13] に基づいている. 本稿の執筆には, EHT-Japanのメンバーである秋山和徳氏, 池田思朗氏, 川島朋尚氏, 小山翔子氏, 当真賢二氏, 永井洋氏, 中村雅徳氏, 秦和弘氏も携わった. さらに, 本稿を執筆する上で朴鍾浩氏には有益なコメントをいただいた.

参考文献

- [1] Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L1
- [2] Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2021, ApJ, 910, L12
- [3] Thompson, A. R., et al., 2017, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 3rd ed. (Berlin: Springer)
- [4] Leppänen, K. J., et al., 1995, AJ, 110, 2479
- [5] Pesce, D. W., 2021, AJ, 161, 178
- [6] Chael, A. A., et al., 2016, ApJ, 829, 11
- [7] Park, J., et al., 2021, ApJ, 906, 85
- [8] Martí-Vidal, I., et al., 2021, A&A, 646, A52
- [9] Broderick, A. E., et al., 2020, ApJ, 897, 139
- [10] Akiyama, K., et al., 2017, AJ, 153, 159
- [11] Hada, K., et al., 2016, ApJ, 817, 131
- [12] Walker, R. C., et al., 2018, ApJ, 855, 128
- [13] Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2021, ApJ, 910, L13
- [14] Palumbo, D. C. M., et al., 2020, ApJ, 894, 156
- [15] Narayan, R., et al., 2003, PASJ, 55, L69
- [16] Narayan, R., et al., 2012, MNRAS, 426, 3241
- [17] Ishihara, H., et al., 1988, Phys. Rev. D, 38, 472
- [18] Event Horizon Telescope Collaboration, et al., 2019, ApJ, 875, L5
- [19] 秋山和徳, 2021, 天文月報, 114, 184
- [20] Tsunetoe, Y, et al., 2020, PASJ, 72, 32
- [21] Ricarte, A., et al., 2021, MNRAS, 505, 523
- [22] Jiménez-Rosales, A., et al., 2021, MNRAS, 503, 4563

Polarimetric Observations of M87 by Event Horizon Telescope

Keiichi ASADA¹ and Yosuke MIZUNO²

¹*Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, R.O.C.*

²*Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, People's Republic of China*

Abstract: The Event Horizon Telescope (EHT) observed polarized millimeter-wave radio emission in the near-horizon region around the supermassive black hole at the core of M87. In this article, we summarize the obtained polarized images of M87, theoretical interpretation of them, and future prospects.