

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14761

研究課題名（和文）電波と可視の多波長偏光観測から探る活動銀河核ジェットの粒子加速領域の探査

研究課題名（英文）Investigation of particle-accelerated region in jets of active galactic nuclei with radio and optical polarimetry

研究代表者

笹田 真人 (Sasada, Mahito)

広島大学・宇宙科学センター・特任助教

研究者番号：10725352

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は活動銀河核ジェットの内部で発生する高エネルギー電子の加速現場の特定を目的に活動を行なった。そのため電波干渉計データを画像化するためのソフトウェアを開発し、実際のデータに適用することで従来に比べ数倍空間分解能がいい画像を取得することに成功した。複数期間によって取得されたデータに対して超空間分解画像を作成することで、ジェットの時間的変化をつぶさに捉え、そのジェットの挙動からジェットを構成する螺旋磁場の存在を特定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では電波干渉計データを画像へ再構成するソフトウェア開発の一端を担っている。開発したソフトウェアは電波干渉計データ一般に適用可能であり、過去に取得されたデータに適用することで、今まで以上の空間分解能の画像を取得することが可能となり、本研究のみならず広く応用が可能な技術となる。

研究成果の概要（英文）：Our purpose was to identify particle-acceleration regions of high-energy electrons in active galactic nuclei jets. We have developed software for imaging of a data of a very long baseline interferometry and applied it to actual data to reconstruct jet images with spatial resolution several times better than that of a conventional method. By reconstructing super-resolved images from the multi-epoch data, we were able to capture the time variation of the jet and identify a presence of a helical magnetic field that constructs the jet from the jet behavior.

研究分野：天文学

キーワード：ジェット 活動銀河核 電波干渉計 可視光

1. 研究開始当初の背景

銀河の中心には大質量ブラックホールが存在し、その重力の影響でブラックホール周囲には降着円盤や広輝線放射領域、相対論的ジェットなど複雑な構造が存在する。ジェットは銀河中心にあるブラックホール近傍からほぼ光速で噴出するプラズマの噴流である。ジェットはガンマ線放射や粒子加速などの高エネルギー現象を引き起こしており、高エネルギー天文学において重要な役割を担っている。

ジェットからは電波、可視光、ガンマ線に至る幅広い放射が観測される。観測されるスペクトルのうち、電波から可視光はシンクロトロン放射が、ガンマ線では逆コンプトン散乱起因の放射が卓越していると考えられている。これらはジェット内で加速された高エネルギー電子と磁場および光子との相互作用によって放射されると考えられているが、高エネルギー電子がジェットのどこで加速されているかはわかっておらず、ジェットの粒子加速機構における大きな謎であった。

2. 研究の目的

研究の最終目標はジェットの粒子加速機構の解明である。ジェット内における粒子の加速機構において、いくつかの説が提唱されている。例えば銀河の中心領域から発生した二つのプラズマの塊が衝突することによって衝撃波が発生し、その中で1次フェルミ加速によって粒子が加速される衝撃波加速モデルや、強い磁場が存在したときに磁場のつなぎかえによる磁気圧の解放によって粒子が加速される磁気リコネクションモデルなどが考えられる。衝撃波加速モデルの場合には総エネルギーに対して粒子のエネルギーが卓越し、ジェット内においてブラックホールから遠い場所で粒子が加速される。一方で、磁気リコネクション加速の場合には磁場エネルギーが卓越する必要があり、ブラックホールのごく近傍で粒子が加速される。このようにモデルによって予想される粒子加速の位置は異なり、粒子加速場所を特定しブラックホールからの位置を推定することができれば、提案されているモデルを制限することが可能となり、加速機構の解明につながる。

本研究の最終目標を達成するために、ジェットの粒子加速領域を超長基線電波干渉計観測 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI) 画像から特定を行う。VLBI 観測は空間分解能 (構造を分解する能力) が 0.1 ミリ秒角程度と非常に細かく、ジェットの複雑な構造を分解して画像化できる。これによりジェットの各場所を画像で分解して調べることができ、領域の特定を行うことができる。しかし、電波シンクロトロン光を放射する電子は比較的低エネルギーであり、放射による冷却時間が長い。そのため低エネルギー電子分布領域および電波放射領域が物理的に広がってしまい (光速 $c \times$ 冷却時間 $t = 1.5$ パーセク ~ 0.25 ミリ秒角 @ 赤方偏移 $z = 0.5$)、粒子加速領域から離れた場所からでも電波放射が発生してしまう。可視光観測は空間分解能が 1 秒角程度と VLBI 観測に比べ 10,000 倍悪いので、ジェットを空間的に分解することができない。しかし可視光シンクロトロン光を放射する電子は上記の低エネルギー電子に比べ、100 倍早い放射冷却時間を持つ (0.015 パーセク ~ 0.0025 ミリ秒角)。そのため可視光放射領域は粒子加速領域のごく近傍に存在するため、可視光放射領域を特定することができれば粒子加速領域を特定することができる。本研究では電波と可視光観測をつなげることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究において、電波画像の解像度は放射領域の特定精度に直結する。そのためできるだけ高空間分解された画像が求められる。電波画像は、観測された波数空間データを実空間イメージへ逆フーリエ変換することで取得される。このとき波数空間データ数は実空間画像のピクセル数に比べ少ない。つまり画像を再構成することは劣決定問題となり、再構成画像は無数に存在してしまう。そのため従来は手で波数空間データに適合する画像モデルを作成し正規分布でたたみ込むことにより画像を取得していた。近年、Event Horizon Telescope (EHT) Japan チームによって、従来とは異なるスパースモデリングを用いた正則化付き最尤推定法による再構成画像推定ソフトウェアが構築された。スパースモデリングでは最適な再構成画像を直接推定するため、従来法で行われていた望遠鏡間の基線ベクトルにおける回折限界によって定義される 2 次元正規分布でのたたみ込みを行う必要がなく、再構成画像はこれまでの 3~4 倍高い空間分解能を持つ。この研究では、スパースモデリングによる新手法イメージングの定量的検証を行い、その後実際に観測されたデータに対して新手法イメージングを適用することで超解像画像を再構成した。

ボストン大学ではアメリカ国立電波天文台によって運営されている電波干渉計装置の Very Long Baseline Array (VLBA) を用いてこの天体を含む多数のジェット天体を 1 ヶ月ごとという高頻度で観測をおこなっている。そのため天体がさまざまな状態において電波ジェット内でのどのように推移するかを調べることが可能となる。本研究では主にボストン大学が取得した VLBA データを用いて研究を行なった。

4. 研究成果

(1) スパースモデリングによる画像化手法を実観測データへ適用

本研究でははじめにVLBAによって取得されたジェット天体である 3C 454.3 の観測データをスパースモデリング手法によって画像化する方法を開発した。VLBI データのスパースモデリングでの画像化は正則化付き最尤推定法によってもっともらしい画像を推定することで行われる。罰則項にスパース性を示すハイパーパラメータを指定することで、スパース性の強さを設定できる。このようにもっともらしい画像を推定するためには、事前にハイパーパラメータを設定する必要があるが、現実には即した画像を得るためにはこのハイパーパラメータを適切な値に設定する必要があった。そこで私は実際の観測データを用いて画像化を行い、得られた画像をフーリエ変換したピジビリティデータと観測データの合い具合を差分の二乗和を計算することで評価した。図 1 は従来法とスパースモデリングによって得られた画像を比較している。従来法に比べスパースモデリングによる正則化付き最尤推定法によって再構成された画像の方が高い分解能を示した。さらに、先ほど述べた再構成画像を評価する方法を用いて、さまざまなパラメータでの画像化を評価することで、データに即する画像を抽出し、さらにはそのばらつきを比較することで、画像化によって発生する系統誤差も推定することが可能となった。

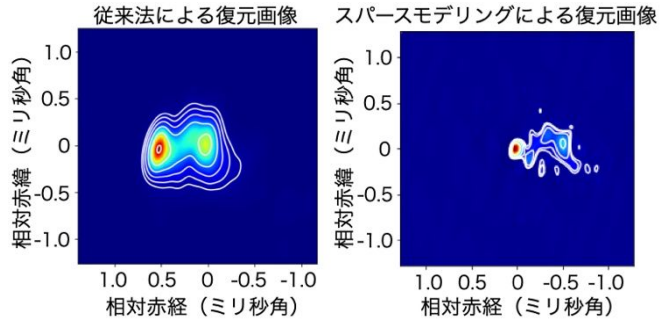


図 1: 従来法とスパースモデリングの新手法による電波干渉計データの画像化の比較。従来法に比べ、新手法による画像の方がシャープである。

そこで私は実際の観測データを用いて画像化を行い、得られた画像をフーリエ変換したピジビリティデータと観測データの合い具合を差分の二乗和を計算することで評価した。図 1 は従来法とスパースモデリングによって得られた画像を比較している。従来法に比べスパースモデリングによる正則化付き最尤推定法によって再構成された画像の方が高い分解能を示した。さらに、先ほど述べた再構成画像を評価する方法を用いて、さまざまなパラメータでの画像化を評価することで、データに即する画像を抽出し、さらにはそのばらつきを比較することで、画像化によって発生する系統誤差も推定することが可能となった。

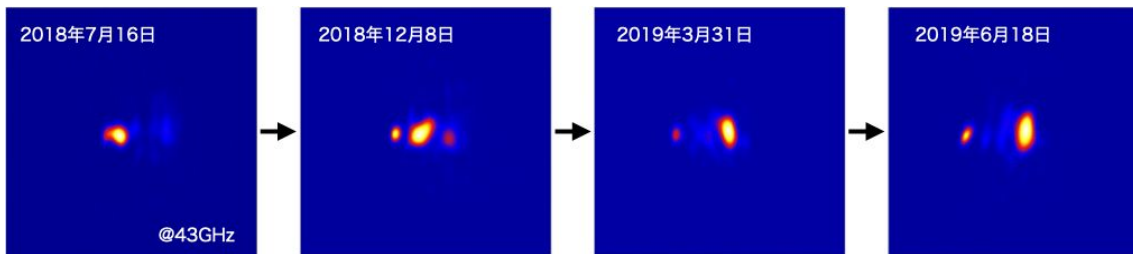


図 2: VLBA によって取得されたジェット天体 3C 454.3 のスパースモデリングによる超解像画像の時間変化。ジェット流が東から西（左から右）へ移動する様子を示している。

(2) スパースモデリングによるブレイザー 3C 454.3 ジェットのらせん運動の発見

(1)に引き続き 3C 454.3 の VLBA データからスパースモデリングを用いた画像再構成を行い、2018 年 7 月から 2019 年 6 月までに取得されたデータを解析することで、ジェットの時間変化の様子を調べた。図 2 はジェットの噴出成分が 1 年間かけて東から西方向（左から右方向）へ移動している様子を表している。

1 年間で取得されたジェットの画像群から平均画像を作成し、ジェット流の明るさの分布とジェット流の動きを調べた（図 3）。ジェット流は東から西へ移動するとともに南北（上下）方向にもふらついた。

ジェット流はブラックホール近傍の中心コアから噴出しており、プラズマであるジェット流は磁場から力を受けるため、ジェット流のふらつきも磁場が何らかの作用をしていることが考えられる。磁気流体シミュレーションによって再現されたブラックホール近傍では、降着円盤によって巻き上げられた磁場はジェットに巻きつくようにしてらせん状に分布することが予測される。今回観測されたジェット流のふらつきはこの巻き上げられたらせん

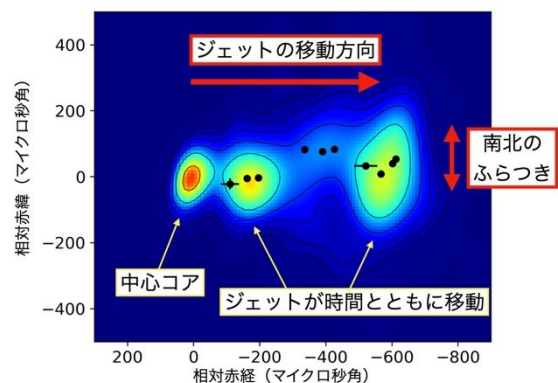


図 3: 複数期間のジェット画像を平均した画像。各観測で推定されたジェット流の位置を黒丸で表す。ジェット流は南北方向にふらつきながら移動している様子を示す。

状の磁場から力を受けることによって発生していることが考えられる。

(3) スパースモデリングによる天の川銀河中心ブラックホールのシャドウの撮像

開発されたスパースモデリングの正則化付き最尤推定法による画像化は、イベント・ホライズン・テレスコープ(EHT)による銀河系中心ブラックホールいて座 A*の撮像においても用いられた。EHT は 2017 年に地球規模の超長基線電波干渉計観測によっていて座 A*を観測し、取得されたデータを較正したのちに画像化した。画像化にはスパースモデリングによる正則化付き最尤推定法を含め 4 つの独立な手法を用いて行われた。画像化を行う前に、観測データにおけるそれぞれの画像化手法での最適なハイパーパラメータのセットを推定した。パラメータ推定にあたり、モデル画像を用いた擬似観測から画像化を行い、パラメータの妥当性を検討した。はじめにいくつかの幾何学モデル(リング、傾斜付きのリング、2 つの点源など)に加え、一般相対論磁気流体シミュレーションによって計算されたいいて座 A*のブラックホールシャドウの擬似画像を天体の位置において擬似的に観測した。得られた擬似観測データを画像化し、再構成画像と元の画像を比較することで、画像化パラメータを評価し、適するパラメータセットを抽出した。そして抽出されたパラメータセットを用いて実際のデータから画像を再構成し、得られた画像群を最終的に平均化することで、最終画像を得た。得られた最終画像は明らかなリング構造を示し、いて座 A*においてブラックホールシャドウが存在することを示した。

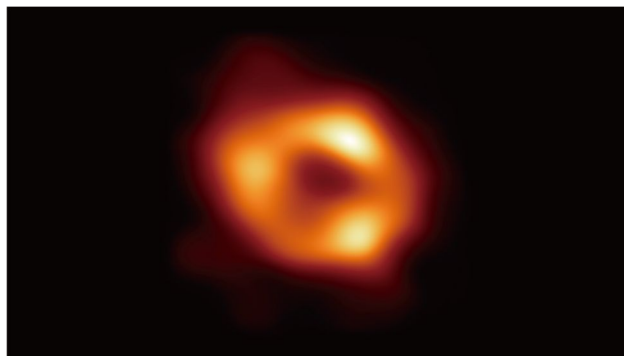


図 4: 2017 年に EHT によって観測されたいいて座 A*のブラックホールシャドウの画像。スパースモデリングによる画像再構成を含め 4 つの独立な画像復元技法を用いて再構成された画像の平均を表している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Ohgami Takayuki, Tominaga Nozomu, Utsumi Yousuke, Niino Yuu, Tanaka Masaomi, Banerjee Smaranika, Hamasaki Ryo, Yoshida Michitoshi, Terai Tsuyoshi, Takagi Yuhei, Morokuma Tomoki, Sasada Mahito, Akitaya Hiroshi, Yasuda Naoki, Yanagisawa Kenshi, Ohsawa Ryou	4. 巻 73
2. 論文標題 Optical follow-up observation for GW event S190510g using Subaru/Hyper Suprime-Cam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 350 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Algaba J. C., Anczarski J., Asada K., Balokovi M., Sasada M., et al.	4. 巻 911
2. 論文標題 Broadband Multi-wavelength Properties of M87 during the 2017 Event Horizon Telescope Campaign	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L11 ~ L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abef71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Sasada Mahito, Utsumi Yousuke, Itoh Ryosuke, et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 J-GEM optical and near-infrared follow-up of gravitational wave events during LIGO 's and Virgo 's third observing run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori, Alberdi Antxon, Alef Walter, Asada Keiichi, Azulay Rebecca, Sasada Mahito, 他340名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0ec7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori, Alberdi Antxon, Alef Walter, Asada Keiichi, Azulay Rebecca, Sasada Mahito, 他335名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2~L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c96	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori, Alberdi Antxon, Alef Walter, Asada Keiichi, Azulay Rebecca, Sasada Mahito, 他211名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L3~L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c57	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori, Alberdi Antxon, Alef Walter, Asada Keiichi, Azulay Rebecca, Sasada Mahito, 他209名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L4~L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0e85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama Kazunori, Alberdi Antxon, Alef Walter, Asada Keiichi, Azulay Rebecca, Sasada Mahito, 他215名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L5~L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0f43	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 The Event Horizon Telescope Collaboration、Akiyama Kazunori、Alberdi Antxon、Alef Walter、Asada Keiichi、Azulay Rebecca、Sasada Mahito、他208名	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L6～L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 笹田真人
2. 発表標題 スパースモデリングによるVLBAの超解像画像におけるブレーザー3C 454.3ジェットの螺旋運動の発見
3. 学会等名 日本天文学会 2022年春季年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ジェット流の不規則な噴出現象を発見 https://sites.google.com/site/mahitosasadaroom/astromy/interview Event Horizon Telescope https://eventhorizontelescope.org/ Event Horizon Telescope Japan https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/ 天の川銀河中心のブラックホールの撮影に初めて成功 https://www.titech.ac.jp/news/2022/064063</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------