

EHTによるM87*の ブラックホール画像化



田崎



小山



森山

田崎 文得¹・小山 翔子²・森山 小太郎³

〈^{1,3} 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢星ガ丘町 2-12〉

〈² 中央研究院天文及天文物理研究所 〒10617 台北市羅斯福路四段 1 號中央研究院 / 台灣大學天文數學館 11 樓〉

〈³ マサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所 99 Millstone Rd, Westford, MA 01886, USA〉

e-mail: ¹ fumie.tazaki@nao.ac.jp, ² skoyama@asiaa.sinica.edu.tw, ³ kotaromo@mit.edu

2019年4月10日、Event Horizon Telescope (EHT) による史上初のブラックホールの画像が世界中を駆け巡った。本稿ではこの画像が如何にして得られたかを簡単に紹介したい。

1. はじめに

EHTによる近傍銀河M87の本観測成果を象徴するのは、初めて人間の目に見える形で捉えられたブラックホールM87*の画像である。特定のモデルを仮定せずに天体構造を導く「画像化」の過程は、科学的に重要である。本稿ではそのM87*の画像化¹⁾について簡単に紹介する。

2. 画像化の原理と手法

電波干渉計は天体画像のフーリエ成分を取得する。その空間周波数は電波干渉計を構成する望遠鏡間を結ぶ基線を天体方向に対して垂直に射影したベクトルに相当する。局数を増やしたり、地球回転により射影が変化したりすることで、様々な空間周波数の情報が集められる。フーリエ成分から天体画像を復元する画像化では、観測される空間周波数上の点数が画素数よりも少なく条件が足りないため、一般的に観測データからは画像が一意に決まらない。画像化では無数の解の中から事前知識をもとに画像を選び出すことになる。

歴史上、最も幅広く使われてきたのはCLEANと呼ばれる手法である。これは観測されていない空間周波数上のフーリエ成分を0と仮定して観測データを逆フーリエ変換し、画像空間上においてより少ない点源で構成されるスパースな解を導く手法である。CLEANは半世紀に渡ってその性能がよく検証されている一方、画像化の際にデータに乗る系統的誤差を数理的に取り入れることが難しく、使用者の経験が必要とする。

一方、EHTで新たに開発されてきたのは、スパースモデリングを代表とする正則化付き最尤推定法 (regularized maximum likelihood; RML) と呼ばれる手法である。これは画像を観測方程式に基づき観測量に順変換し、観測データと比較して尤度を最大化する画像を導く。無数にある解から画像を選び出すために、輝度分布は非負、スパース、滑らかといった事前知識を数理的に記述する正則化項が用いられる。RMLは多様な誤差を尤度に取り入れ、様々な事前知識のもと、柔軟な画像化を実現する。

3. M87* 画像化の過程

EHTではまだ観測局が少なく、データ較正後も系統誤差が残り、画像の事前情報が全くない。これがEHTの画像化を困難にする。画像化を慎重に進めるため、CLEANを実装する既存ツールのDIFMAP、RMLを実装する米国のeht-imaging及び日本のSMILIの3つのソフトウェアを用いた。SMILIは秋山・田崎・森山・笹田・池田らにより開発された。

各手法やそれを実装したソフトウェアは全て、EHTの本観測が始まる前の2016年から2年間かけて、擬似観測データやEHTの実際の較正天体データを用いて繰り返し試験された。そして待望のM87*の観測データが2018年6月に秋山らが主導する画像化作業班に配布された。画像化作業班には70名を超える干渉計の専門家が集い、以下のように慎重に画像化を行った。

まずは班全体が最初の画像に影響されるのを避けるため、作業班を4チームに分け、各チームは外部と一切情報を共有せずに画像化を行った。チーム1は米国のeht-imaging開発メンバーを中心とし、秋山らが主導した日米蘭のチーム2はSMILIを用いた。水野(陽)を含む欧米のチーム3と、小山が率いた浅田・永井を含む東アジアのチーム4はDIFMAPを用いた。各チームは、データが配布されてから7週間、独立に画像化を行った。7月末に初めて画像を比較し、全チームが南側の明るいリングを復元したことを確認した。一方でそれぞれのチームの画像間には細かな差異が見られ、画像化の過程で下した様々な選択が最終的な画像に与える影響を精査する必要があった。

そこで、各ソフトウェアを使って計5万通りもの方法で画像化を行うパイプラインを生成した。フーリエ空間上でM87*の観測データと類似した特徴を持つ4つの画像(リング、南側の明るいリング、ディスク、明るさの異なる2つの光源)を

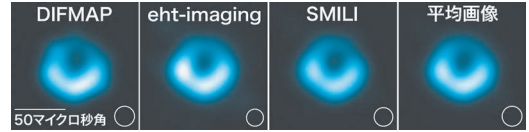


図1 M87*の3つの手法を代表する画像とそれを平均して得られた最終画像。

用いた擬似観測データから画像を復元し、5万通りの中から4つの画像すべてをよく再現する方法を選んだ。この方法を用いてM87*の画像を復元し、観測データによく一致した画像を選んだ。最終的に選ばれたおよそ2千枚の画像すべてで、南側が明るい直径およそ40マイクロ秒角のリング構造が確認された。M87*の代表的な画像として発表されたのは、ソフトウェア毎に最も性能のよかった方法で得られた画像をEHTの典型的な空間分解能で畳み込み平均した画像である(図1)。

我々は画像化が劣決定問題であるという原理に立ち返り、複数の手法で何万通りもの方法で画像化を行い、ブラックホールシャドウの検出を確認した。一つの手法・方法で画像化し解析するのが一般的な電波干渉計観測の歴史において、我々のアプローチは革新的だったと言えよう。また論文中でRMLが安定して優れた結果を示すことは、電波干渉計の画像化が新時代へと突入したことを感じさせる。画像化に用いたデータとプログラムはEHT公式ウェブサイト²⁾で公開しているので、ぜひ皆さんも画像化に挑戦してみてください。

本稿の執筆には秋山和徳(MIT)、笹田真人(広島大)、永井洋、本間希樹(国立天文台)、池田思朗(統数研)、浅田圭一(ASIAA)も携わった。

参考文献

- 1) EHT Collaboration, 2019, ApJ, 875, L4
- 2) <https://eventhorizontelescope.org> (2019.05.29)