

# 電波によるSgr A\*/M87イベントホライズンスケールの観測的特徴

コン15b 齊藤 秀樹 (京都大学理学研究科・D1)

## 概要

近年の観測技術の発達により、今まで多くの研究者たちが待ち望んでいたブラックホールの存在を直接確認できるかもしれないという期待が高まりつつある。その中で**我々の銀河中心Sgr A\***は近年のミリ波、サブミリ波VLBI観測より、**ブラックホールシャドー/ブラックホールシルエット**を直接撮像するのに最も適した観測対象だと言われている。そのSgr A\*やおとめ座にある楕円銀河**M87**は**光学的に薄い降着流**を周囲にまとっていると考えられ環境は似ているようだが、もともとM87からはかなり遠方にまでしぼられたジェットが噴き出しているのに対して、Sgr A\*にはジェットのようなアウトフローを直接観測したという報告は今までのところまだない。しかし最近の電波観測の結果より**Sgr A\*からアウトフローが吹いている可能性**があると報告されている今日、ブラックホールシャドーの直接観測と合わせて、**ブラックホール天体の観測的な特徴**というテーマは非常に重要になってくる。

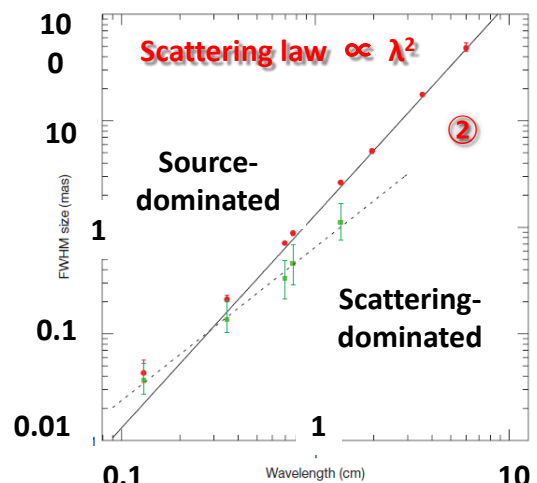
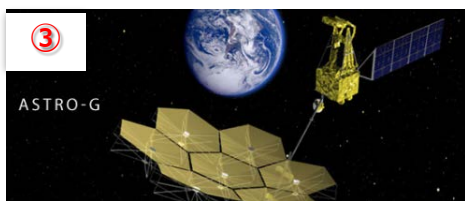
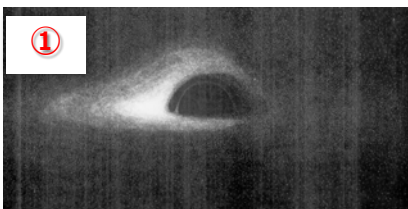
今回は、このような未解決な問題があるということを知ってもらい、今後私たち若手がどのようなアプローチでこの分野に取り組むべきなのか、短い時間ではあるが議論したい。

## Q 1. ブラックホールシャドーの観測実現可能性

今まで**誰も見たことがなかった**ブラックホールを、近い将来直接観測することができる可能性がある今日、ブラックホールまわりの強重力場の働きを解明することは宇宙物理学の中で**今世紀最大の挑戦のひとつ**である (e.g., Luminet 1979 see ①) . 電波干渉計の技術の進歩が著しいことで、銀河中心でブラックホールシャドーの存在が明らかになる日も近いと思われる。

### ▶ **Ground-based Obs. : Sgr A\***

ブラックホールシャドーを直接観測するという事は、極めて高い分解能が必要になってくるために地上からは**VLBI**という技術を使う。しかし、ただ単純に観測すれば良いというものでもない。Sgr A\*の周囲を取り巻くプラズマによりブラックホールからの電波放射が散乱されて、電波像がぼけてしまう。これは先行研究 (e.g., Lo+ 1998; Doeleman+ 2001, 2008 see also ②; Falcke+ 2009; 2010) から、**Scattering law  $\propto \lambda^2$**  という関係が得られている。実際に今のところDoeleman+ (2008)が観測した、**230 GHz が 37  $\mu$ s が最高の分解能**である。しかしまだまだ intrinsic な描像は見えていないので、やはり 350 GHz は必要であろうとされる。理論的にはそのくらいで散乱が晴れると思われるが、現実的にブラックホールシャドーをとらえたという報告を聞くのはまだ数十年はかかるかもしれない。また近い将来の可能性について、Doeleman+ (2008)で用いられた3局に加え、日本が設置し、運用するASTE、2012年から本格運用になるALMAなど4~5局によるVLBI観測である。南半球のVLBI望遠鏡が加わり、基線長倍増による高分解能で良質なデータが得られることが見込まれる。先行研究ではSgr A\*のシャドーまでは分解できなかったが、ひょっとするとこの新たな観測提案がシャドーの分解を現実的にし、さらにブラックホールの**スピンパラメータ**を決めることができるほどの高分解能の観測になり得るかもしれないと期待している。



### ▶ **Space Telescope : M87**

つい先日、ASTRO-G計画が開発中止になったというニュースが公の場で発表されたが、業界内では去年~今年の頭くらいには分かっていたことである。ここでは今後の電波天文衛星に期待する気持ちを込めて、ASTRO-G (VSOP-2) を振り返ることにする。スペースVLBIである**VSOP-2の最高の空間分解能は 43**

**GHz に達した時の 38  $\mu$ s** であり (see ③)、これはM87の見かけ上のシャドーの直径が 20  $\mu$ s (VSOP-2 Science Goals 2007) や 22  $\mu$ s (Broderick & Loeb 2009) であると、確認することが可能であると思われる。ここで重要なのはM87はSgr A\*のようにプラズマによって散乱され、**イメージがぼけるという観測的な証拠はない**という点である (Broderick & Loeb 2009)。しかしながらM87は質量や距離がまだ正確に決まっていないため不定性が大きい (e.g., Takahashi 2009; Takahashi & Mineshige 2011)。そしてプラズマの散乱がないとはいえ正確にはどのくらいなのか、どのくらい電波像がぼけるのか、など周りの環境がまだはっきりしていないので、今後の観測が待たれている。

## Q 2. Sgr A\*から相対論的アウトフローが吹いている可能性

そもそもSgr A\*は電波からガンマ線までの広帯域にわたってスペクトルを持っているわけであるが、電波領域はシンクロトロン放射が卓越しているジェットからの寄与であるということが考えられる。電波の観測データを持つが、アウトフローの観測事実はないという矛盾が生まれる (e.g., Yuan+ 2003)。また近年の電波観測の構造からも分かるように、M87からはよくしぼられたジェットが噴き出しているのに対して (e.g., Dodson+ 2006)、Sgr A\*からは周囲のプラズマにより構造がぼやけているが、ジェットのようなアウトフローは見られない (e.g., Shen+ 2005)。

しかし、multi-frequency campaigns による電波の **"time lags"** をはじめとする観測から**アウトフローの間接的な証拠**が報告され始めている (e.g., Yusef-Zadeh+ 2006, 2008; Falcke, Markoff, & Bower 2009; see also Falcke+ 2011; Maitra+ 2010; Yuan 2010)。

まず、ジェットのようなシンクロトロン放射のスペクトルはさまざまな領域からの寄与が重なりあって形成され、中心から外部領域へ伝搬していくにつれて低振動数側へシフトする傾向がある (e.g., Marscher 1995; Massi 2010; Falcke 2011)。これを踏まえて、Yusef-Zadeh+ (2006) の結果をみると、電波振動数のピークについて**43 GHz と22 GHz の間で20 ~ 40分の time lags が見つかり**、きれいに相関関係になっていることが分かった。さらに過去数回にわたって電波で time lags が受かった観測結果が報告されている。またFalcke, Markoff, & Bower (2009)はScattering lawから散乱のサイズが、

$$\phi_{scatt} = (1.36 \pm 0.02) mas \times \left(\frac{\lambda}{cm}\right)^2$$

となることが見積もられる。これによりSgr A\*の予想されるサイズは、

$$\phi_{SgrA^*} = (0.52 \pm 0.03) mas \times \left(\frac{\lambda}{cm}\right)^{1.3 \pm 0.1}$$

となる。最終的に time lags と観測される波長との関係 (see ⑩)、観測からSgr A\*の予想されるサイズ、

$$s = \phi_{SgrA^*} \times D_{GC}$$

から、伝搬速度に制限を付けると、 **$\beta=0.5\sim0.9$ の速度**を持つことが明らかになった。

これら全体から判断できることは、Sgr A\*からジェットのような相対論的なアウトフローが吹いている可能性を示唆する。よって私たちは**見えないアウトフロー (ジェット/ウインド) が吹いている**と考える。

## 今後の展望

30年以上前にコンピュータの中で計算されて現在まで、誰一人としてブラックホールの姿を見たという研究者はいない。この事実が多くの研究者たちの動機になり、ここ数年で観測技術が発達してきたことで、近い将来ブラックホールが架空の天体ではないということが直接観測されることにより棄却できるかもしれないとする期待が高まりつつある。ブラックホール影の撮像が現実味を帯びてきた今日、次のステップである、影絵から物理量を引き出し、それが観測と一致するのか、それとも全く違った結果を示すのか、**観測との比較**がはじまると考えられる (例えば、スピンパラメータなど)。またブラックホール影が精度よく観測されることにより**一般相対性理論の検証**にも使われるだろう。今後さらに観測技術が向上することにより、Sgr A\*やM87のような光学的に薄い降着流をまとったブラックホールだけではなく、幾何学的に薄く、光学的に厚い**標準降着円盤** (see ①)、さらにガスが大量に降ってくる**超臨界降着流**などブラックホールの見え方はさまざまであり、**中心からアウトフローが吹いている場合**も考えられ、理論モデルをさらに構築する必要があるかもしれない。中心が**バイナリーブラックホール**である場合も考慮していただろう。ようやく観測が理論に追いついてきた面白い分野であることに間違いはない。