

激しく変動する電波で見た 銀河系中心 Sgr A*

坪井 昌人

〈JAXA 宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: tsuboi@vsop.isas.jaxa.jp



坪井



宮崎

宮崎 敦史

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星ガ丘町 2-12〉
e-mail: amiya@miz.nao.ac.jp

われわれは銀河系中心核 Sgr A*を野辺山ミリ波干渉計を使い 100/150 GHz 帯で 13 年間モニター観測して、週単位から時間単位までのフレア現象を発見した。特に短時間変動はミリ波フレアが 70 シュワルツシルト半径以下の領域で起こっていることを証明した。これはミリ波 VLBI から得られる結論と一致するものである。

1. 銀河系中心 Sgr A*時間変動観測 前史

1993 年夏、筆者(坪井)は大学院生から助手までの 10 年間近く過ごした野辺山宇宙電波観測所から茨城大学に新設された極限物質学研究室に移動した。極限物質学が何を意味するかは物理学教室主任の石塚先生から説明を受けたと思うが全くわからなかった。でも野辺山とは違う天文学をしようという気持ちはあった。同じ学問をすれば主従関係や依存関係などを作るのではないかと恐れたからでもある。そこで当時野辺山では相手にされていなかった銀河系中心と宇宙論の観測的研究をテーマにすることにした。二つにしたのはいわゆるハイローミックスで研究の失敗防止と効率を考えたからである。そんな時に東大の祖父江先生からピーター メッツガーさん(水素電波再結合線の発見者)の還暦記念の研究会がドイツのミュンヘンで開かれるので行かないかと誘われた。大学には予算がなかったが自腹でも行くべきとだ考

え出席した。

英国のマーチン リースさんらの理論の話は難しく時差もあり睡魔におそわれたが、米国の دونالد バッカーさんらとドイツのトーマス クリヒバムさんの発表は印象的であった(図 1 参照)。前者は Sgr A*の 1 GHz から 86 GHz までのスペクトルを 3 回、時期を変えて観測したところ高周波数での変動が大きいようであるというものであった。Sgr A*の時間変動は当時までに VLA を使ってジュンヒュイ ツァオさんによって 10 年観測されたが、確定的なことはまだわからない(と思われる)状態であったが、今度の結果は変動振幅も大きく何がわかるという期待をもたせるものであった。一方、後者は 43 GHz の VLBI 観測を行ったところ『ジェットが出ていることがわかった。』というものであった¹⁾。Sgr A*のジェットは多くの人が探したがそれまで見つかっていなかったものである。それがついに VLBI によって発見されたかと感動した。ただし、このジェットには多少疑問もあった。ジェットの方向が斜め右上に

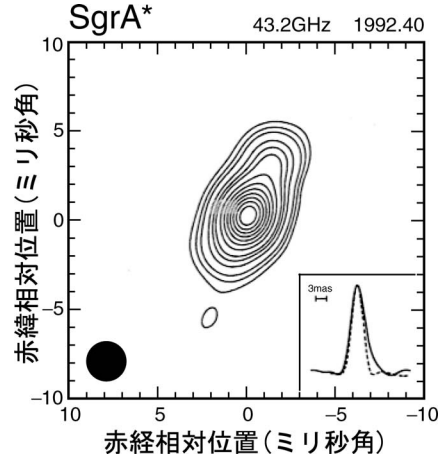
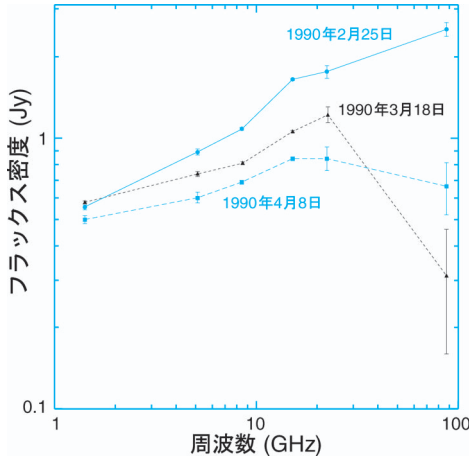


図1 (左) バッカーらが VLA と BIMA ミリ波干渉計を使って求めた Sgr A* の 1–86 GHz の月間隔のスペクトル変化²⁾。高い周波数で大きく変化しているように見える。(右) クリヒバムらが 43 GHz VLBI で観測した Sgr A* のジェット³⁾。後の詳細な解析では検出できなかった。

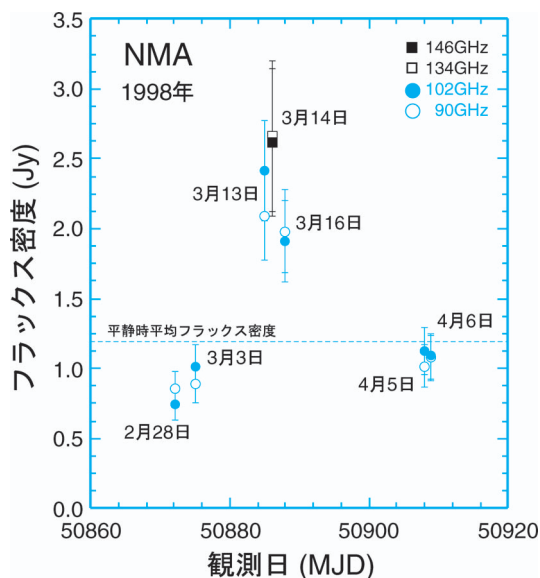
向かっているのだが、UV の切れ目に向いているようにも見えた。そこでクリヒバムさんに『ジェットが UV の切れ目に向いているようにも見える。そこには大きなサイドローブはなかったか?』と質問した。彼は『サイドローブには近いが、それを考えてもジェットはリアルである。』と答えてくれた。『本当かな』とも思ったがさらに質問する証拠もないので引き下がった(このジェットは後日消えた)。ミリ波 VLBI は発展途上でもあり用意すべき装置の規模も大きく茨城大坪井研究室ではとても参加できないと考えた。しかし、Sgr A* の時間変動ならば野辺山ミリ波干渉計の共同利用観測でモニターできると考えた。Sgr A* は 100 GHz で 1Jy 程度である。単一鏡である 45 m 鏡の観測では周辺構造の寄与が大きく Sgr A* に向けたときは 4–5 Jy 程度で観測された。観測されたフラックス密度の 8 割が周辺からのもので Sgr A* 自体の変動の検出は難しい。野辺山ミリ波干渉計でも短基線データは取り除き周辺の広がった成分の寄与を抑制することにした。

2. 銀河系中心 Sgr A* は時間変動するの?

銀河系中心 Sgr A* のミリ波の時間変動モニ

ターの野辺山ミリ波干渉計へのプロポーザルは 2 年間不採用であった。このころ野辺山干渉計は星生成領域や銀河の観測が精力的に行われていた。時間変動モニターという一見古風で地味な観測には観測時間が配分できなかったのかもしれない。でも 3 年目に採択され 100 GHz で観測を開始した。メンバーは茨城大院生であった宮崎、野辺山の堤さんと坪井であった。坪井は講義もあり長期に大学を離れられないのでこのモニター観測は宮崎と堤さんが行った。しかし次の年も含めて観測期間中には Sgr A* はほとんど変動せず、『やっぱり変動しないじゃないの』と言う人もいた。(追記) 坪井ならばこう言われるとすぐに気分がしぼむのであるが、もの静かな 2 人ではあるが彼らの気力はすばらしく観測だけは淡々と進行していった。また 2 人同士では低い声の静かな話であるが、結構会話されているのを発見して驚いたりした(堤さん、ごめんなさい、変なことを書きました)。

3 シーズン目の 1998 年 3 月の観測中、宮崎は 10 日間で Sgr A* のフラックス密度が 3 倍になっているのに気がついた。そして『これって、変動ですか?』と坪井のところにデータをもってきた。そしてさらに Sgr A* のフラックス密度は 20 日で元の状態に戻ったように観測された。ミリ波



のフレアの発見の瞬間である(図2左)。当時非同視観測のデータの比較から『ミリ波バンプ』というスペクトルの盛り上がりが議論されていたが、われわれの発見したフレア成分で1 GHz-100 GHzはべき乗則で説明できた。われわれは以降わくわくしながら解析を進めた。この結果は7月に名古屋で行われたCOSPARで宮崎が、9月の米国ツーソンでの銀河系中心研究会で坪井がそれぞれ発表した^{4), 5)}。銀河系中心研究会での反応は『フレアは本当かな? 他の波長では観測されていないのに』というものであった。しかし93年のバックカーの発表の共著者であるパークレイのメルビン ライトさんからは『時間間隔の短い観測でわれわれのつけた変動がフレアであることを証明したね。』とお祝いのメールをもらった。われわれの短ミリ波(100, 150 GHz)の観測はSgr A*ブラックホールの近傍の活動性をとらえているという自負があったが、Ann. Rev. A&Aの2001年版⁶⁾には『ミリ波の強度較正は難しいが、坪井らとライト&バックカーはミリ波のフレアを観測している。』という記述があるように、観測事実も半ば疑いの目で見られていたし査読論文もなかなか通らなかつた。しかしながら、2000年3月にはさらに激しい変動もとらえ、その後もSgr A*のミリ波変

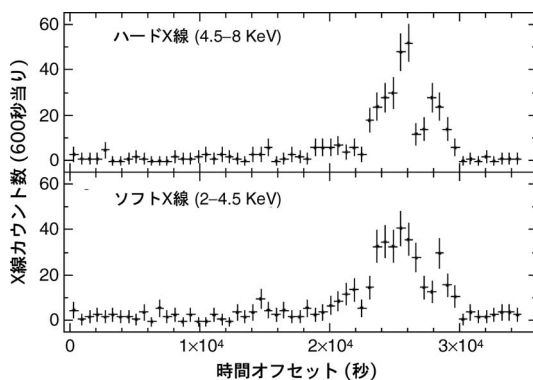


図2 (左) 野辺山ミリ波干渉計で検出したSgr A*の週スケールでのフレア。(右) X線衛星チャンドラで検出したSgr A*の数十分スケールでのフレア⁷⁾。

動のデータを積み重ねていった。

一方、2000年にMITのフレデリック バガノフさんたちがX線観測衛星チャンドラを用いたSgr A*のX線フレアを発見した⁷⁾(図2右)。X線では通常はSgr A*はほとんど見えないのであるが、この短時間での劇的な変動はとてはっきりしており驚きであった。また電波では2001年にCfAのツァオさんが、ハワイのマウナケア山にある当時立ち上げまもなくであったサブミリ波干渉計(SMA)を用いて、波長1 mmでSgr A*フレアを検出した⁸⁾。こうして、徐々にミリ波などの電波での変動は受け入れられるようになっていったと思う。

3. より短時間の変動へ：IDVの発見

先ほども述べたように、2000年にバガノフさんたちがX線観測衛星チャンドラを用いてX線フレアを発見した。この数十分で1,000倍以上もの増光を起こして燦然と輝く様子は非常に画期的であった。一方、ドイツのライトハルト ゲンツェルさんのグループが2003年に南米のVLTを用いた近赤外線観測でSgr A*を検出し、近赤外線でも短時間の非常に激しい変動があることを発見した⁹⁾。この結果、ミリ波帯でもそんなことはある

だろうということで、われわれの検出したミリ波変動についてもいつの間にか疑問を言われなくなったし、フレアの観測数も増加していった。われわれは何とかこの時間変動から Sgr A*の物理量に制限を与えようと考えていた。これには天体の時間変動スケールと光速の積は天体の構造の上限値を与えるという、古典的ではあるがモデルに依存しない原理を使う。Sgr A*には周囲の電子の散乱による『視直径が観測波長の2乗に比例する』という法則があり、ミリ波 VLBI でも少なくとも波長 7 mm 程度までは Sgr A*自身の構造は観測できていなかった。

X線に引き続き近赤外線でも Sgr A*の数時間スケールの激しいフレア検出の報告を聞き、われわれはミリ波でもより短い時間スケールの変動があるのかもしれないと感じるようになった。もし1日以内の変動が明らかになれば、前述のように変動の時間スケールから Sgr A*の構造に対する制限が与えられるかもしれない。はじめわれわれ

は野辺山ミリ波干渉計のように6素子しかない干渉計では1日の観測中にUVが変化するので、Sgr A*のように構造が複雑なものではフラックス密度の測定誤差が大きくなり、その1日平均は意味があっても短時間のビンに分けるのは難しいと勝手に思いこんでいた。しかし、まずは連続する日々の観測を短時間のビンに分けてみたところ、予想したほどはばらつくことはなく十分観測できそうであった。こうした解析の結果、2000年3月に図のような150 GHz帯で1日内変動(IDV)を

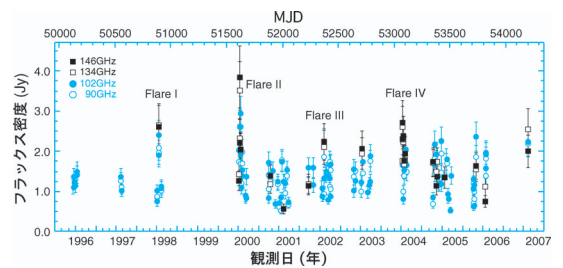


図3 野辺山ミリ波干渉計による Sgr A*のミリ波時間変動モニター

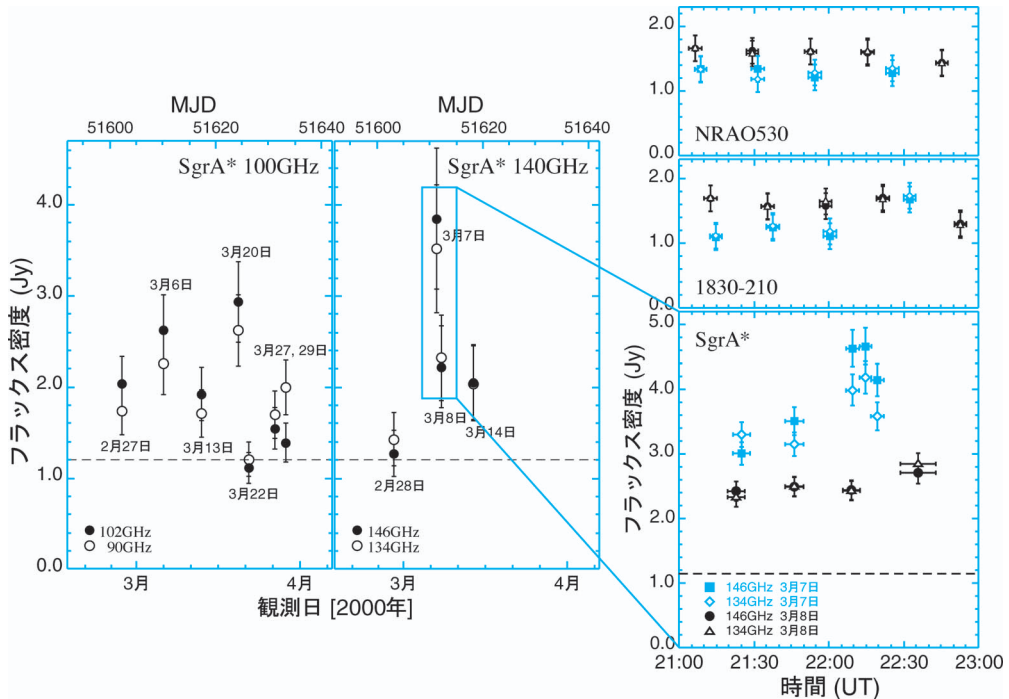


図4 2000年に初めて観測された Sgr A*の1日内変動 (IDV)¹¹⁾。

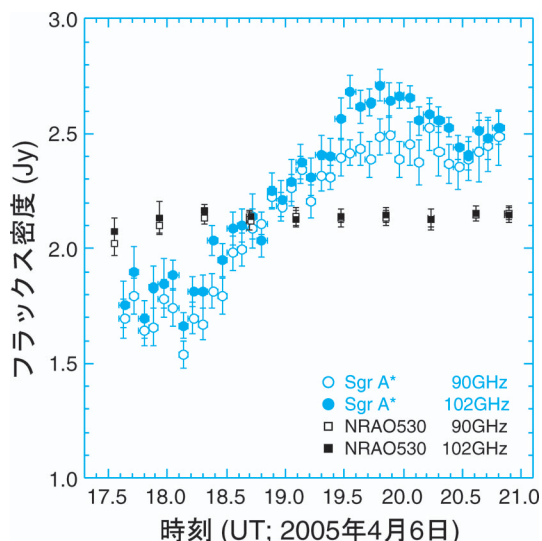


図5 ぞくぞくと発見される Sgr A*の1日内変動 (IDV) の例¹⁶⁾。

見つけた。また、UCLA のマーク モーリスたちのグループもオーエンスバレー電波干渉計 (OVRO) を用いた 2002 年の 100 GHz の観測で IDV を検出し¹⁰⁾、彼らの検出した時間変動もわれわれの結果と矛盾しないものであった。当時、われわれが論文を投稿したすぐ後に彼らの論文が投稿されたので、先を越されまいと急いで改訂したことを覚えている (結局、彼らより半年以上早く出版までこぎつくことができた)。われわれの野辺山ミリ波干渉計の結果から、Sgr A*の強さが 2 倍の強さになる時間スケールは 1 時間半であり、大きさの上限値が 12 天文単位となる。これは IDV が 150 シュワルツシルト半径以内の現象であることを示す。これは 7 mm で VLBI で観測できる Sgr A*の大きさ程度であり、時間変動の観測はその中を攻める有効な手段と考えられた。その後、このモニターは 1 日内変動に軸足を移して 2007 年まで (2008 年も限定的に観測) 続けられ、解析手法を改良しつつ過去にさかのぼった再解析も行い、多数の IDV を見つけることになった。

これらの結果は、Sgr A*が 150 GHz で 70 シュワルツシルト半径以下の大きさであることを示し

ている。これが本当にブラックホールからの距離を表すのかは注意が必要だが、Sgr A*の放射領域の大きさの上限値であることは確かに言える。そして 150 GHz での輝度温度の下限値は 2×10^9 K となり RIAF (放射非効率降着流) モデルが予想する温度と矛盾はせず、この物理量は 3 mm 帯の VLBI 観測から求めた値と極めて良い一致をしているように思える。

一方でわれわれは上海天文台のグループと共同で、2005 年から南半球にあるオーストラリア電波干渉計 (ATCA) でも Sgr A*の IDV に注目した観測を始めた¹²⁾。Sgr A*を中心とする銀河中心領域は南天にあり、野辺山からは 1 日に 4~5 時間しか観測できないが、ATCA からは銀河系中心はほぼ天頂を通過し 1 日の間に非常に長い 8~9 時間の観測が可能になる。したがって、IDV によるフラックス変動の詳細に見るためには、この長い観測時間は有効になる。折しも ATCA では 100 GHz 帯受信機の 5 台のアンテナへの設置が完了し共同利用に公開されるときで、この新受信機を使って Sgr A*を観測するために ATCA へ乗り込もうとした。プロポーザルは始めは通らなかったが、2 度目に数日の短い観測が認められ、2005 年 10 月の観測で激しい変動を検出した。しかしながら ATCA サイドからは強度較正に不安があることを指摘され信じてもらえなかった。その後、追観測が認められ、強度較正がうまくできるように観測手法を改良し、2006 年 8 月に IDV とと思われる変動が検出され、1 日のうちに複数の増減光を繰り返すミリ波 IDV のプロファイルが明らかになってきた¹³⁾。現在、野辺山ミリ波干渉計はその運用を原則停止してしまっていたが、今後 Sgr A*の電波観測は、現在まだ建設中の ALMA とともに、ATCA による観測が重要になっていくであろう。

Sgr A*からの放射のメカニズムを理解するうえで、多波長観測からの Sgr A*のスペクトルを知ることが非常に重要になる。そのための国際的に複数の観測装置を用いた多周波キャンペーン観測は

古くは1996年頃から行われてきたが¹⁴⁾、当時はSgr A*のIDVは知られていなかった。すでに述べてきたようにSgr A*には数時間スケールの速い変動があることから、実際には“スペクトルの変化”を知る必要があり、多波長間での観測の同時性が重要になる。ここ数年X線から電波までの多波長でのキャンペーン観測が何度か企画され、野辺山ミリ波干渉計も2007年・2008年と参加してきた(われわれが参加した観測のPIはアメリカノースウェスタン大学のフェルハド ユゼフ ザダー)¹⁵⁾。こうしたキャンペーン観測によりX線・近赤外線および電波でのフレアに相関がありそうなことが徐々にわかってきた。Sgr A*の数時間スケールのIDVフレアの理論的解釈については詳しくはここでは述べないが、現在、降着円盤上のホットスポットモデルや、降着円盤上から高温プラズマが放出される膨張プラズマモデルなどが提唱されている。電波での多波長の比較から長波長側で変動の遅れが示唆されており、この遅れは後者のモデルのほうが容易に説明できるとされている。今後もこうした多波長の観測が行われ、フレアのメカニズムが明らかにされていくであろう。

4. さらに

VLBI観測は2008年に米国シェパード・ドールマンさんらが1 mmでのSgr A*の観測を成功させ¹⁷⁾、その内部の構造を議論している。時間変動観測は細かい構造までは決定できないが、活動性の観測はこれからも重要と考える。ALMAでは天頂近くをSgr A*が通過するので長時間観測でその周期変動成分の検出などが試みられるはずである。周期性は降着円盤等の回転するものにはつきものだからである。(追記)坪井はミリ波スペースVLBI衛星ASTRO-Gの計画に参加している。この衛星は7 mmの観測が可能であるが、前述の『視直径が観測波長の2乗に比例する』法則を考えれば撮像は無理と予想される。でも本当にいつ

も曇りなのだろうか？ たまには晴れ間があるのではないかとも思っている。無事に衛星が上げられれば何回かは観測すべきであろう。

参考文献

- 1) Krichbaum T. P., et al., 1994, Proc. of The Nuclei of Normal Galaxies, Kluwer, pp. 414
- 2) Wright M. C., Backer D. C., 1993, ApJ 417, 560
- 3) Krichbaum T. P., et al., 1993, A&A 273, L37
- 4) Miyazaki A., Tsutsumi T., Tsuboi M., 1999, Adv. Space Res. 23 (No. 5/6), 977
- 5) Tsuboi M., Miyazaki A., Tsutsumi T., 1999, Proc. of The Central Parsecs of the Galaxy, ASP Conf. Ser. 186, 105
- 6) Melia F., Falcke H., 2001, ARAA 39, 309
- 7) Baganoff F. K., et al., 2001, Nature 413, 45
- 8) Zhao J.-H., et al., 2003, ApJ 586, L29
- 9) Genzel R. et al., 2003, Nature 425, 934
- 10) Mauerhan J. C., et al., 2005, ApJ 623, L25
- 11) Miyazaki A., Tsutsumi T., Tsuboi M., 2004, ApJ 611, L97
- 12) Miyazaki A., et al., 2009, Proc. of Approaching Micro-Arcsecond Resolution with VSOP-2, ASP Conf. Ser. 402, 376
- 13) Li J., et al., 2009, ApJ 700, 417
- 14) Falcke H., et al., 1998, ApJ 499, 731
- 15) Yusef-Zadeh F., et al., 2009, ApJ, submitted
- 16) Miyazaki A., et al., 2006, Proc. of the GC Workshop J. Phys.: Conf. 54, 363
- 17) Doeleman S. S., et al., 2008 Nature 455, 78

Violent Variability of Sgr A* at mm-Wave

Masato Tsuboi

*Institute of Space and Astronautical Science,
JAXA*

Atsushi Miyazaki

Mizusawa VLBI Observatory, NAOJ

Abstract: We found many flares of Sgr A* from the monitoring observation in the 100/150 GHz bands for 13 years using Nobeyama Millimeter Array. The time scale of the flares is from weeks to hours. The violent variability with short-time scale flares prove that the mm-wave flares happen in the area within 70 Schwarzschild radius. This is corresponding to the conclusion obtained from millimeter wave VLBI.