

mm 波における銀河中心 Sgr A*の光度変動及び準周期的振動の検出

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻修士課程 2年

コンパクト 27c 遠藤 渉 (endo@vsop.isas.jaxa.jp)

共同研究者：坪井昌人(JAXA)、宮崎敦史(KASI)、堤貴弘(NRAO)

1. イントロダクション

Sagittarius A* (Sgr A*) は我々の銀河系の力学的中心に位置するコンパクトな電波源であり、大質量ブラックホールの候補であると考えられている。過去数十年に渡り、X線/近赤外/電波において Sgr A*からの光度変動が観測されてきた最近傍の銀河核である。この光度変動は中心ブラックホール近傍から放射されていると考えられるが、その起源については未だ詳細な解明には至っていない。また近年では準周期的振動(Quasi-Periodic Oscillation; QPO)の観測例も報告されている。QPOは振動の成分が一定に定まらず揺らぐ現象であり、これまで小質量X線連星系(Low Mass X-ray Binary; LMXB)から見つかっていたが、最近の近赤外/X線の観測によりこの

QPOがSgr A*でも報告されている(cf. Genzel et al. 2003, Yusef-Zadeh et al. 2006, etc)。観測されるQPOの周期は特にBH近傍の最小安定軌道半径でのケプラー回転周期に強く関連していると考えられ、降着円盤内縁部の物理状態を理解する上で大変重要となる。しかし近赤外/X線での観測では表1に示す通り各観測での周期はばらばらであり、また1回の観測日数が1日または数日以下と極端に少なく、統計的な議論が困難になっている。一方、電波帯におけるSgr A*のQPOの報告例はMiyoshi et al. 2011による1件のみとなっている。従って電波帯における多数の観測からQPOを探索することが極めて重要である。

観測日 (UT)	観測バンド	周期 (分)	分解能	Reference
2003 Mar. 15 - 16	NIR (2.16 μ m)	16.8, 17.1	10-20 mas	Genzel et al. 2003
2004 Mar. 09	NIR (1.60, 1.87, 1.90 μ m)	33	8 mas	Yusef-Zadeh et al. 2006
2002 Oct, 2004. Aug	X (2 - 10 keV)	22.2	1 as	Bélangier et al. 2006
2007 Apr. 04	NIR (3.8 μ m)	22.6	≥ 10 mas	Hamaus et al. 2009
2007 Jul. 22	NIR (3.8 μ m)	45.4	≥ 10 mas	Hamaus et al. 2009
2004 Mar. 08	radio (43 GHz)	16.8, 22.2, 31.2, 56.4	0.1 μ as	Miyoshi et al. 2011

表1. 過去のSgr A*におけるQPO探索の一例。

2. 観測

そこで私たちは野辺山ミリ波干渉計(Nobeyama Millimeter Array; NMA)における100GHz/140GHz帯での2003年～2007年のモニター観測データを解析した。観測の諸パラメータは右の通りとなっており、図1に観測されたSgr A*のライトカーブの一例を示した。期間中の全観測の中から、我々は以下の2つの条件によりデータを厳選した。

- (1) 1回の観測が2時間以上のもの
- (2) 天候条件の良いもの

条件(1)については、ライトカーブを周期解析(フーリエ変換)した後の成分、即ち探査するQPOの周期が表1から数十分程度と大変短い事から、元のライトカーブは長時間の観測が必要であるために設定した。この2条件により、140GHz帯では7日間、100GHz帯では6日間のライトカーブを得た。

1回の積分時間は2分または3分であり、校正用のキャリブレーター観測

を含めおよそ22分間隔でSgr A*を10～15分程度観測している。140/100GHz帯の観測日は同日ではないができるだけ近い日時になるように選択しており、両周波数帯の観測パラメータにほとんど差がないことがわかる。

	140 GHz	100 GHz
観測日時(UT)	12 Mar. 2003 – 15 Mar. 2007	2 Mar. 2003 – 23 Feb. 2007
エポック数	7	6
1日の観測時間	2 – 4 hours	
アンテナ配列	C (UV \leq 70k λ) & D (\leq 30k λ) @ 3mm	
観測周波数	134 & 146 GHz	90 & 102 GHz
Phase Calibrator	NRAO530	

表 2. 観測パラメータ

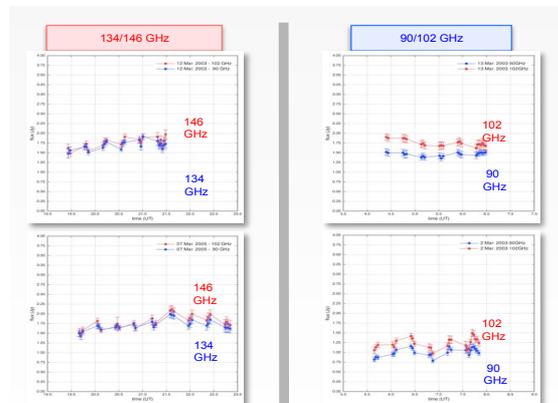


図 1. 観測された Sgr A*のライトカーブ(一例)。左側は 140GHz 帯(146GHz : 赤色、134GHz : 青色)、右側は 100GHz 帯(102GHz : 赤色、90GHz : 青色)。

3. 周期解析

これら各観測日の時系列データに対し周期解析を行った。周期解析には Lomb-Scargle Periodogramを用いた。この手法はFFTでは行えない非等間隔なデータに対して有効なものである(cf. Horne & Baliunas 1986)。これによって作成されたPower Spectral Density (PSD)を以下の図2に示す。

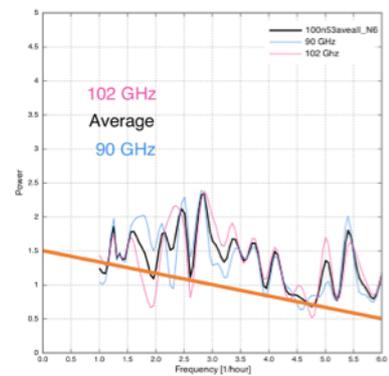
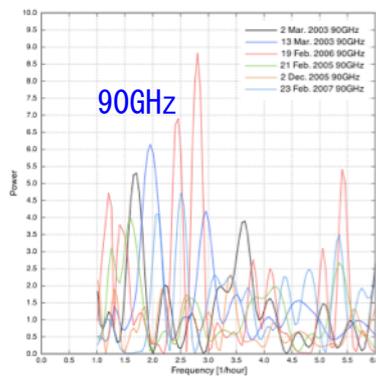
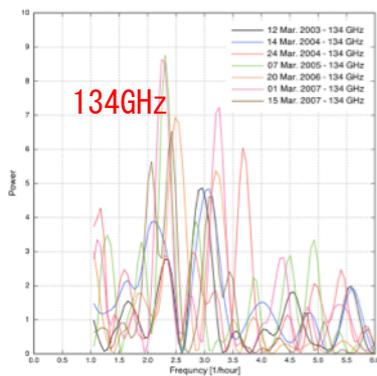
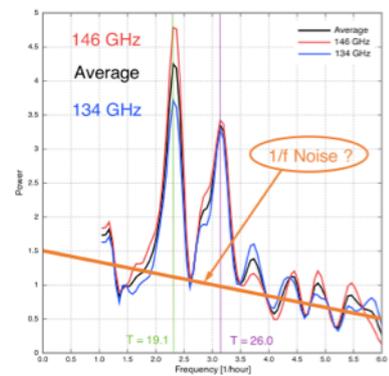
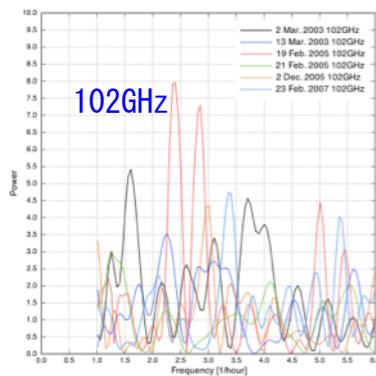
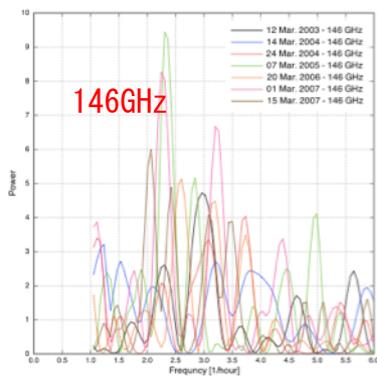


図 2. 各観測日毎の PSD。ピークが集中する場所は見えているが 1 日毎の PSD ではばらつきが多く一意に定められない。

図 3. 全観測日平均の PSD。上が 140GHz、下が 100GHz 帯。

図 2 から、どの周波数においても高いピークは見えている事がわかる。ここで横軸はフーリエ変換後の周波数(単位：1/時間)，縦軸は規格化後の PSD を表す。140GHz 帯ではピークが高い場所が 2 つの領域に集中しているように見える一方で 100GHz 帯では高ピークの場所に統一性は見られない。しかし 1 日だけの PSD からは周期性を探る事は大変困難である。このため S/N 比を高くするために周波数毎に全観測日の PSD を均一な重みで平均した。結果は図 3 に示したとおり、140GHz 帯において周波数が $f \sim 2.3, 3.1$ (周期に換算すると $T \sim 26.0, 19.1$ 分)において 2 つのピークが顕在する事がわかる。一方でほぼ同じ観測パラメータで観測された 100GHz 帯の平均からはそのような顕著なピークは見られない。これは同じ観測装置を用いてほぼ同条件の観測に関わらず観測周波数 100GHz では見えない放射を 140GHz でとらえており、両周波数の間に何らかの物理機構の境界が存在している事を示唆していると言える。しかしながら、観測において Sgr A*を観測する周期はともに 22 分程度(図 1 参照)であることから、この 26.0/19.1 分のピークがこのイレギュラーな観測サンプリングによる影響である可能性が考えられる。

4. モンテカルロ シミュレーション

そこで今回検出した 26.0/19.1 分のピークが非等間隔なサンプリングに影響によるフェイクピークでないことを確かめるため、ノイズのみの疑似データを作成して同様の周期解析を行うモンテカルロ・シミュレーションを行った。シミュレーションデータについては、図 3 からわずかに $1/f$ ノイズと思われる成分も見られたため、観測に見合う $1/f$ ノイズを 1 分毎の間隔で生成する。その際、平均フラックス密度及び標準偏差は各観測日と同じになるように調整する。

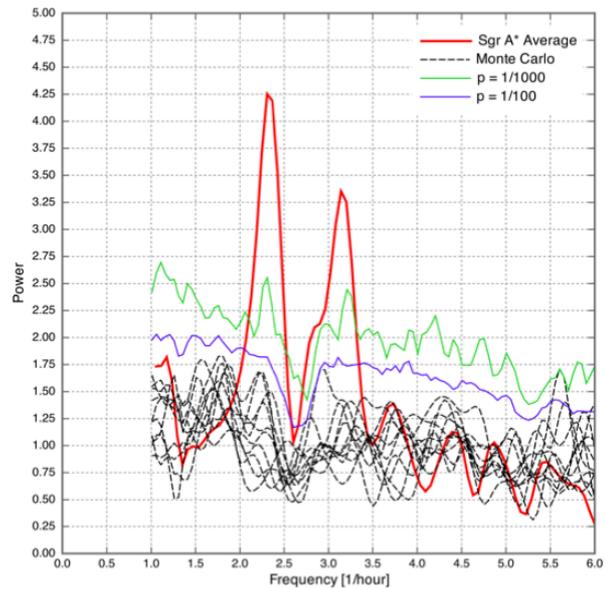


図 4. シミュレーションデータの PSD

このようにして等間隔で生成されたデ

ータから実際の観測と全く同じタイミングでサンプリングを行い、(あるとすれば)真の信号以外は全て観測と同じ時系列データを 1000 パターン生成した。その後、これらのデータに対し周期解析を行った。結果を図 4 に示す。赤い実線は図 3 における 146GHz と 134GHz の PSD を平均したものである。シミュレーションで生成したノイズデータに対する PSD の一部(10 例)を黒の点線で示してあり、ノイズのみのデータによって起こりうる PSD の確率 1/100、1/1000 の等高線をそれぞれ紫、緑の実線で示した。これからわかるように、観測と全く同じ観測サンプリングを行っているノイズのみのデータの PSD には観測で見えていた $f \sim 2.6/3.1$ 付近にピークが見えておらず、2 つのピーク周期における確率はともに 1/1000 を大きく下回っている。従って 140GHz 帯で見える 2 つのピークは非等間隔のサンプリングによる影響ではなく、ノイズではない Sgr A* からの真の信号であると結論づけられる。

5. スピンパラメータの見積り

今回の解析で得られた QPO の周期 26.0/19.1 分は過去のどの観測結果とも一致しなかったが(表 1 参照)、この 2 つの QPO の周期の比は 19.1 : 26.0 \sim 3 : 4 と整数比で表す事が出来る。本発表ではこの性質に注目し、降着円盤の共鳴振動

モデルを用いてスピンパラメータ a^* を見積もった。QPO の周期比が整数となる性質は元々 LMXB で見つかっている性質であり、共鳴振動モデルによりうまく説明ができる。詳細については割愛するが、ケプラー振動数 Ω とエピサイクリック振動数 κ が $\kappa = \Omega/2$ の際に強い共鳴を起こす (Kato et al. 2001)。そして観測される QPO の周期は、ケプラー振動数の整数倍とエピサイクリック振動数の和 (差) のモードで現れる。即ち m を整数として $m\Omega \pm \kappa$ のモードが励起される (ただし m は通常小さい値となる)。そしてこの QPO の周期は、ブラックホール (BH) の質量 M_{BH} 、スピンパラメータ a^* と関連づけられることから、逆に検出した QPO の周期によってスピンパラメータの測定が可能となる (Kato et al. 2010)。

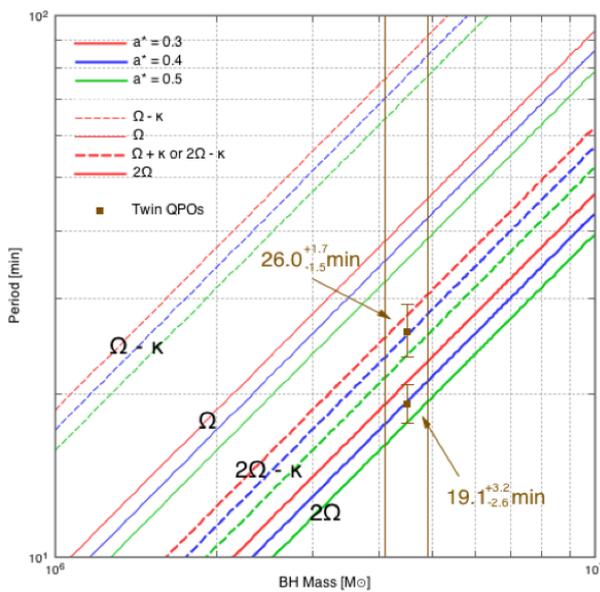


図 5. Mass-period diagram

以下の図 5 は Kato et al. 2010 で示された mass-period ダイアグラムに今回検出された QPO の結果を反映させたものである。赤・青・緑の直線はそれぞれスピンパラメータが $a^*=0.3, 0.4, 0.5$ の場合に BH 質量と QPO の周期が対応づけられる直線を表し、図に示している $m=1, 2$ の場合のモードが描かれている。なおこの関係式は回転するブラックホール、即ちカー・ブラックホールも考慮されている。図中の 2 つの点は今回検出された 26.0/19.1 分の QPO を

Ghez et al. 2008 で測定された BH 質量の値をもとにプロットされている。このように BH 質量と検出された QPO の周期から、Sgr A* のスピンパラメータを $a^*=0.4 \pm 0.1$ と見積もる事ができた。

6. まとめ

本研究では、NMA を用いた 100GHz/140GHz 帯における 2003 年～2007 年のモニター観測のデータ解析により、140GHz 帯において $T=19.1, 26.0$ 分の 2 つの QPO を検出した。100GHz との比較、及びモンテカルロ・シミュレーションの試行によりこのピークが観測装置やサンプリングの影響によるものではなく Sgr A* からの真の信号であると結論づけられる。そこでこの周期の比に着目し、

BH 質量-QPO 周期-スピンパラメータの関係式を用いる事で Sgr A* のスピンパラメータを $a^*=0.4\pm 0.1$ と計測した。今後は 100GHz/140GHz の間にあると考えられる物理機構の境界について詳細に解析する予定である。