

# “あわら”宇宙電波受信システムによる巨大ブラックホール起源・銀河中心デシメータ及びセンチメータ波帯電波パルスの観測研究

大 家 寛\*・西 阪 飛 鳥\*\*

## Observational Studies on the Pulses of Decimeter and Centimeter Wavelength Range Radio Waves from Large Black Holes at the Center of Our Galaxy by Using Cosmic Radio Wave Observation System at Awara Campus of Fukui University of Technology

Hiroshi Oya\* and Asuka Nishizaka\*\*

**Abstract** The second year program of observations of radio wave pulses from super massive black holes located in the center region of our Galaxy have been made by cosmic radio observation system at the Awara campus of Fukui University of Technology, in the frequency range of the decimeter (1.4GHz bands) and centimeter waves at 8.4 GHz (X band). Analyses of the data utilizing the FFT and box-car methods give further confirmation to the results that the detected pulse periods correspond to rotations of radio sources located in regions close to the event horizon of the rotating black holes. The radio sources for longer wavelength radio waves are located closer portions with respect to the event horizon of the Kerr black hole compared to the sources for shorter wavelength range, due to general relativity effects. New three pulses with periods of 270.083 sec, 210.080 sec and 145.773 sec have been found; adding these new sources, the ratio of transformation of rotation periods of black holes to the mass, in terms of the solar mass unit, is deduced to be  $2240T$  for the period of  $T$  sec.

### 1. 序

従来、銀河中心のブラックホール研究は光学的に周辺の恒星群の運動からケプラー運動を統計的に適用して中心天体の質量を推論する方法<sup>(1)</sup>がとられ、並行して周辺からのプラズマの流入、あるいは強いX線放射という傍証的なアプローチをとっている。しかし、本研究では自転するブラックホールそのものに迫る観測として、世界に先駆けて推進されてきた。本研究の起源は、20~35MHz帯のデカメータ波帯で我々の銀河系中心部 $\pm 8''$ 以内に電波源が同定された24種の電波パルス群が、対応するパルス周期で自転する超巨大ブラックホールであるとの発見に関わる<sup>(2)</sup>。すなわち、デカメータ波帯において銀河中心より到来する、24種類のパルス群が確認されているが、これが24個の巨大ブラック・ホールに対応していることが示唆される事実が示されていた。

関連して2005年より福井工業大学あわら宇宙電波受信システムで10m $\phi$ パラボラアンテナ

\* 宇宙通信工学科 (Department of Space Communication Engineering) \*\* 電気工学専攻・修士課程・宇宙情報分野

をもつ、Lバンド およびXバンド(8GHz)帯受信系を活用し、1400MHz から 8000MHz 帯において、デカメータ波で同定された我が銀河系の中心部の電波源に対し観測を開始した<sup>(3)(4)(5)</sup>。

初期の研究<sup>(2)</sup>ではパルス電波の電波源位置を Kerr ブラック・ホールの静止限界に仮定していた。しかし、2006年、2007年の報告(2006年度研究に対する)に示す<sup>(5)(6)</sup>ように、本研究を通じ、デカメータ電波より周波数が70倍前後高い1400MHz帯のデシメータ電波、さらに360倍近いセンチメータ波でのパルス周期の広がり、パルス高さの低下から Kerr 時空における自転状況が実証され、電波源はほぼブラック・ホール表面と言うことの出来る Event Horizon 近傍にあることが、判明した。

本研究では新たにデカメータ波では明確でなかった、長周期のパルス現象が確認されることになり、270.083sec, 210.080sec そして 145.773sec のパルスが加わることとなった。こうした、状況で周期からブラックホールの半径を決定するパラメーターがより実際の場合に近づいてきた。しかし、このパラメーターの決定には、自転角速度の極限状況をアприオリに仮定することは出来なくなり、ブラックホール群の総質量が、従来の方法で決定されている必要も明らかになってきた。なお、2006年度の結果の検討を踏まえ、アンテナ制御データ取得方式等の改良の上に結果の信頼性は一層増している。

## 2. 観測

### 2.1 システム

システムの詳細は2007年紀要<sup>(6)</sup>に述べているので、ここでは基本をまとめ再録する。アンテナ及びフロントエンドを経て200mケーブルを介して送られた信号は20MHz~2GHz帯・受信用高周波受信機にて直接受信される。この場合、X-Bandでは前置増幅器において720MHzに周波数変換が行われている。受信機は、本観測の特質である狭帯域観測を実現するため、1MHz間隔で設定する4周波数を中心に、2.5kHzの帯域巾をもって行われている。その後AD変換を通しデータはハードディスクに収納する。これらの基本操作は観測制御データ取得のためのPCを通じて行なわれている。この観測システムで特徴のある点はBox-Car法を適用するため、3ヶ月程度隔たって受信されたデータにおいてもパルスの位相の絶対時刻はずれを起こさないよう配慮されている。時刻標準はGPS信号を利用するが、各観測日時毎にデータ取得の時刻を0.02秒精度で刻みこむようにしている。

### 2.2 アンテナ方位の校正

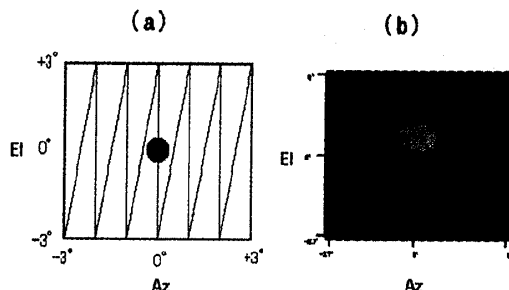


図1 アンテナ方位校正の実際。(a) カシオペアA電波源位置(中心の赤丸)に対し発生させたアンテナの方向制御指令で仰角方向に $-3^{\circ}$  から $+3^{\circ}$  掃引させつつ水平方位方向に $1/6$ の速度で $-3^{\circ}$  から $+3^{\circ}$  まで掃引する。(b) 実際にアンテナが捉えたカシオペアA電波源位置で、実現方向と指令方向には仰角方向に $+0.8^{\circ}$  のずれを示す。

あわら宇宙電波受信システムではアンテナ制御は衛星テレメータ電波受信を目的としていて、天文学的目的に際しては制御指示と実際指向方位との差を改めて校正する必要がある。本研究ではカシオペアA電波源およびかに星雲M1を用いて校正をしている。図1にアンテナ方位のAz-EIの指定方式とそれに対応してカシオペアA電波源を観測した場合を対比して示す。この場

合、指令方向と実現するアンテナ方向は仰角方向に $+0.8^\circ$ ずれていることが判明するが、銀河の中心を正確に捉えるためには、指令はあたかも銀河中心部が $-0.8^\circ$ シフトしているように与える必要がある。このほかアンテナ制御コンピューターのデータ制御量の限界が4時間分であるなど、局所的な問題も2006年観測の結果判明し、1日8時間の連続観測における制御時間を4時間づつの2期間制とし、方位制御の正確さを徹底させている

### 3. 観測

本研究に関連する観測は1400MHzおよび1600MHz帯のデシメータ波帯では2005年7月25日より8月26日まで、2006年2月26日から7月31日、そして2007年4月16日より8月27日にわたる期間に実施されている。2007年には3月24日より4月15日までも観測されているが、Box-Car法を正確に求める立場からは予備データとして扱っている。8400MHz帯の観測は2006年8月22日から9月7日、そして2007年には9月15日より9月22日の間、実施された。

デシメータ波帯電波観測では2006年4月6日までは時刻付けは相対値すなわち観測開始からの時間で対応したが2006年4月6日以降は絶対時刻付けでデータ取得を行った。従ってパルス波形を求めるBox-Car法の適用に際し、二つの観測法に対し異なる方式をとっている。観測は4チャンネル同時に行われるが4月6日以降銀河中心方向に対し各チャンネルとも26観測日にわたり、合計 $3.3 \times 10^7$ データ点を得、 $5^\circ$ 西方向に対し各チャンネルとも15観測日に対し、合計 $1.6 \times 10^7$ データ点、 $5^\circ$ 東方向に対し各チャンネルとも14観測日に対し、合計 $1.4 \times 10^7$ データ点を得ている。

2007年では銀河中心に対しては、銀河中心方向の観測は全32観測日で、特に方位の校正が正確になったため、銀河中心方向を確定するために、 $2^\circ$ 東、西、北および南と方位を変更し、合計14日の観測を実施している。なお1観測日は約8時間からなる。また、この年の観測では6月9日を境にそれ以前50Hzで行ってきたデータサンプル率を100Hzにあげている。

### 4. データ解析

#### 4.1 方式とデータ数

すでに2007年3月の報告<sup>(6)</sup>で述べたように、本研究の大きな特徴は強い銀河電波放射背景の中から相対的に微弱な電波パルスを検出することであり、それはデカメータ電波パルスのように結果がかなり明確な、最大レベルにある $G_{av}$ がS/N比8/1000であり、デシメータ波ではS/N比2/10000の場合も多く存在する。こうした微弱な信号の検出の原理はパルスの繰り返し性質を利用し多数回の平均を求めることにあり、S/N比1/1000のパルスの場合、FFT解析の誤差が平均回数 $N$ の $\sqrt{}$ に比例することを考慮すると100万回の解析回数が必要となる。この方式はMEFAM(Mega-times Fourier Analyses Method)と呼び、この内容も既に報告している<sup>(1),(3),(4)</sup>。2006年観測の解析に引き続き2007年観測では銀河中心方向の観測に対し4月16日から6月9日までの12観測日（この間50Hzのデータ・サンプリング）を選択し、各チャンネル96時間分 $1.689 \times 10^7$ のデータを用いている。また $2^\circ$ 東、西、北および南と方位を偏移させた場合、6月28日より8月27日までの14観測日を選んだ。この場合データ・サンプリング周期は100Hzになり、合計80時間の観測に対し各チャンネル $2.745 \times 10^7$ となっている。各チャンネル同一現象を追求しているためFFT解析では4チャンネルのデータの平均を求めることができ、全体ではそれぞれ4倍のデータ数になる。

## 4.2 FFT 解析結果

図2に銀河中心方向と2° 東、西、北および南と方位を偏移させた場合に対するFFT解析結果を示す。正規化観測電圧の平均値 1Volt に対応して、積分効果により対背景放射揺らぎ幅は0.06が観測されている。このとき時系列データの積分時間に対応して定まる有効周波数 5Hz に対し本研究の解析周波数帯域  $4.88 \times 10^{-4} \text{ Hz} \sim 0.0976 \text{ Hz}$  (図2の表示範囲はその1/2)であることを考慮するとFFT解析の対象となる相対電圧は0.0084となる。周波数分解能の200Binに対し各周波数 Bin 割り当て平均レベル電圧換算値は従って  $5.93 \times 10^{-4}$  となる。図2の結果はこの平均値を  $6.2 \times 10^{-5}$  から  $1.37 \times 10^{-4}$  超えた範囲に現れる成分である。 $1.37 \times 10^{-4} / 5.93 \times 10^{-4} = 0.5$  として相対値で表現し、パルスの存在を示唆する高調波関係を水平の結合線をもって表現している。得られたスペクトルは銀河中心方向の観測結果が2° 東、西、北および南と方位を偏移させた場合の結果より1σ以上大きくこのFFT解析から示唆されるパルス群は銀河中心方向から到来していることを示している。この結果をすでに巨大ブラックホールに電波源をもつことが確証されているデカメータ電波パルスに対して得られた周期と対比すると図2,及び3に示すとおり、明確な一致が示される。これは2006年観測結果が「デカメータ波パルスの場合とかなり異なり Gaa1、Gaa2、Gaa3、そしてGac Group と命名する」としていた点は誤りであり、

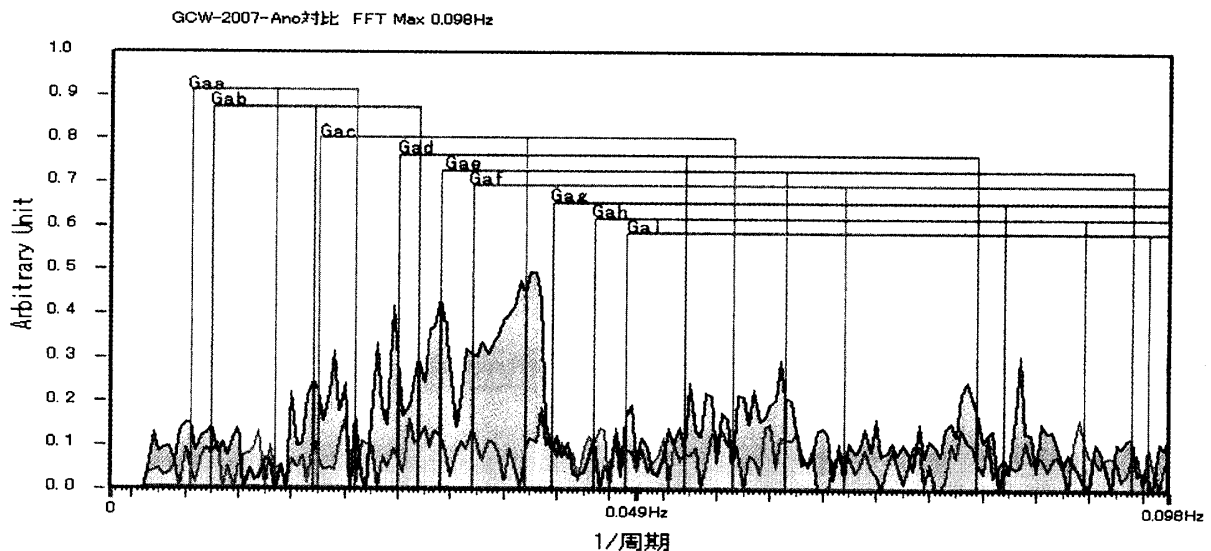


図2, 2007年4月16日より2007年6月9日の期間に観測された銀河中心方向に対する12観測日の解析結果(青)及び、中心より2° 東、西南、および北方向(全体で14観測日)に対するFFT解析の結果(ピンク)。

平均レベルより上に出る成分を示し最大変化値を0.5とした相対レベルで示す

訂正を要する。2006年観測結果が充分でなかった点はアンテナの方位制御の校正が不十分でS/Nのかなり低い状態のデータが混入していたことに原因することが判明している。

図4に8.4GHz帯で観測された銀河中心電波の揺らぎ周期のFFT解析結果を、2006及び2007年の両観測について示す。特徴的なのは、2006年及び、2007年でのスペクトルのピーク値が一致していることである。しかし、第1表に示すように、8GHz帯での結果はデカメータ波パルスとデシメータ波パルスの関係の場合と異なり、デカメートル波パルスの周期とは異なっている。なお第1表では図4中、スペクトルピークの第1番周期190secを省略しているのは、1999年時点におけるデカメータ波パルスの解析結果に該当する周期が見いだせないためである。

## 5 長周期パルスの存在

デシメータ波に対する2007年観測においては130sec以上の長周期現象の変動の存在を問題と

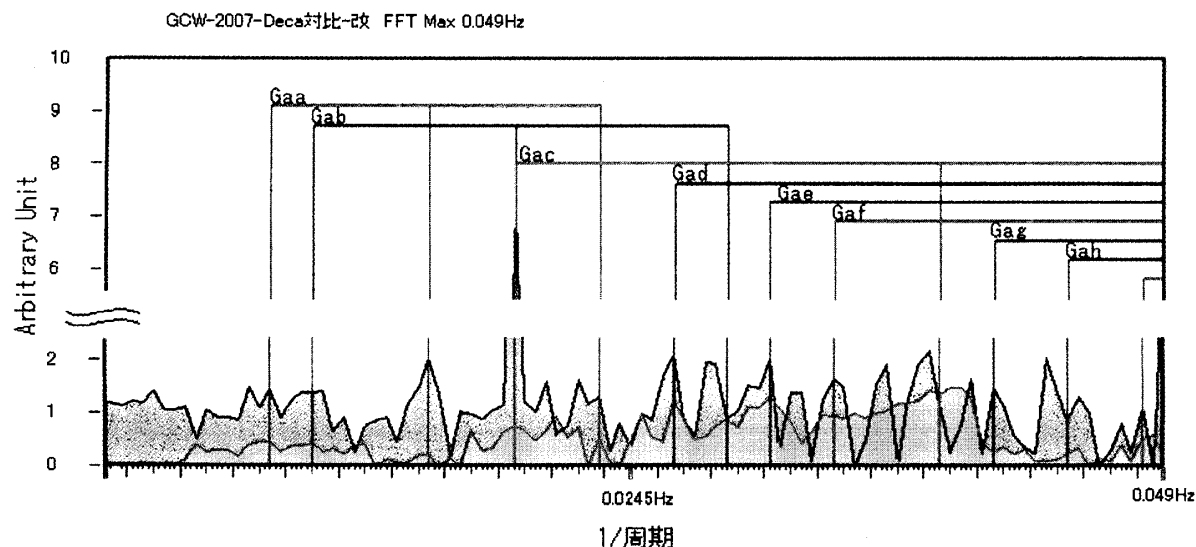


図3 デカメータ電波（青）およびデシメータ電波（ピンク）に対する銀河中心電波の変動成分スペクトル Gaa から Gai まではデカメータ電波パルスの電波源として決定されている周期

第1表 観測周波数帯とパルス周期の幅

電波源	22MHz	1400MHz	8431MHz	電波源	22MHz	1400MHz	8431MHz
Gaa(2)	129.99sec	130.0sec	115・145sec	Gad(5)	37.576 sec	37.57 sec	35—40sec
Gab(3)	104.55 sec	104.5 sec	95・115sec	Gae(6)	31.9498 sec	31.94 sec	29—33 sec
Gac(4)	52.06 sec	52.00 sec	46・57sec				

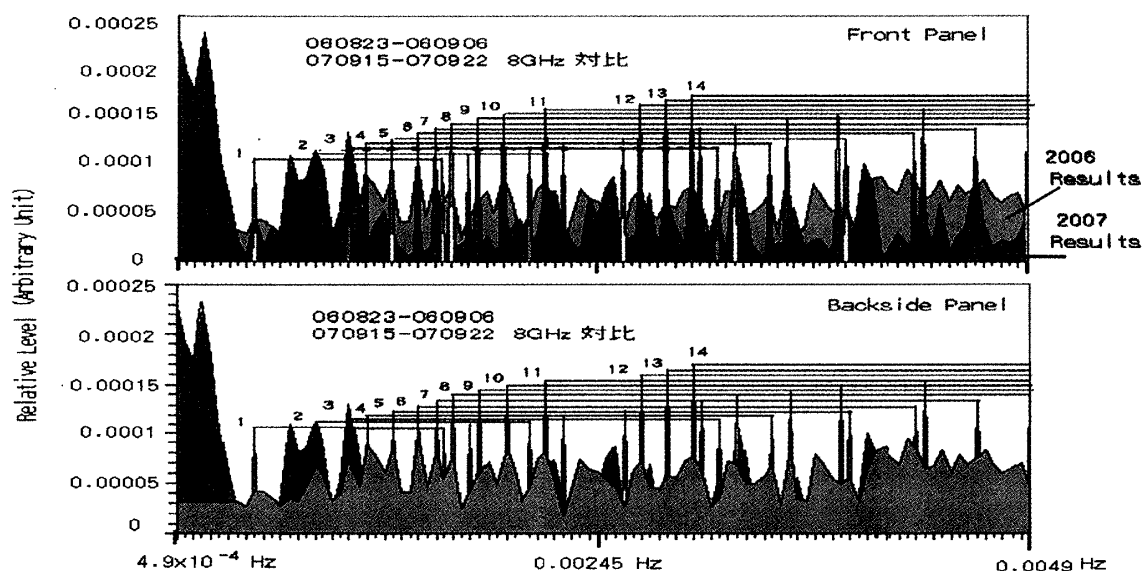


図4 8.4GHz 帯で観測された銀河中心方向の電波強度の変動スペクトル。2006年の結果（青）と2007年（えんじ色）を重ねて表現し、スペクトル・ピークの対比をみるため上パネルに表、下パネルに裏の状態を示す。

した。まず図5に長周期ゆらぎを問題にしたFFT解析の結果を示す。ここには過去のデカメータ波に対するFFT解析結果<sup>(3)</sup>を同一の揺らぎ周波数帯について対比している。ここには図題に示すように、新たに GaaIIS、GaaIIS, および GaaS, の存在が示唆される。これらの示

唆にしたがって Box-Car 法により、パルス波形をを確認し、図 6 に示す。

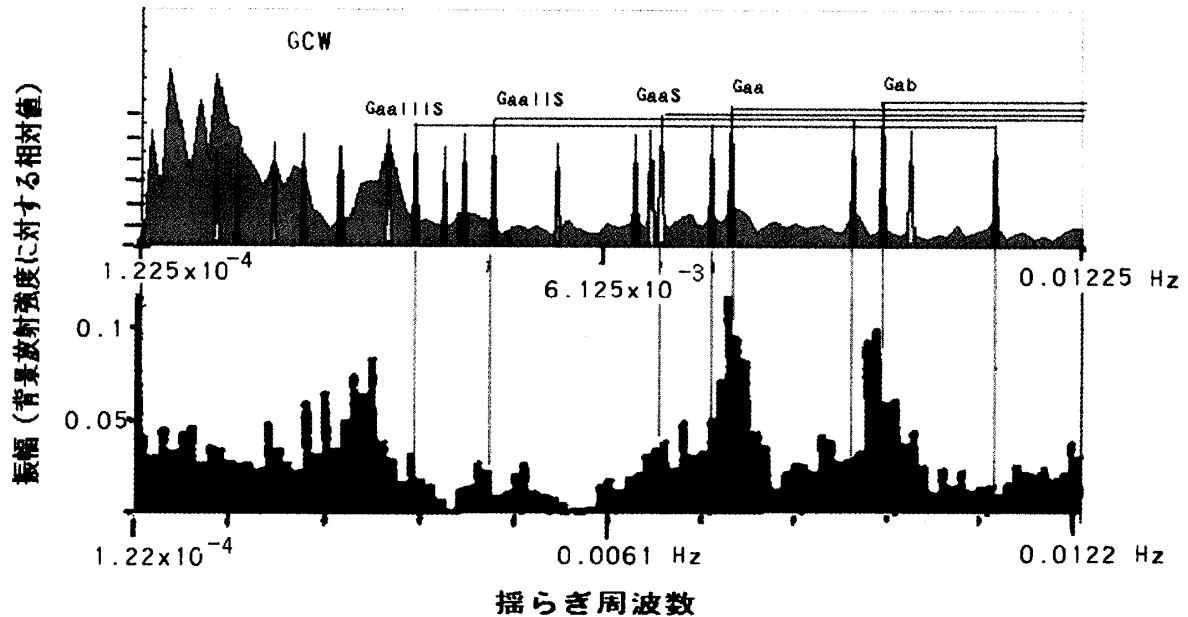


図5 Gaaより長周期のパルスの存在を示す揺らぎスペクトル。上パネルは1.4GHz帯に関するFFT解析結果で下パネルは過去に実施していたデカメータ電波の揺らぎスペクトル解析の同一周期帯結果で、新たにGaaS, GaaIIS, およびGaaIIIS、それぞれ、270sec, 210sec および145sec, の基本周期の存在が示唆される。

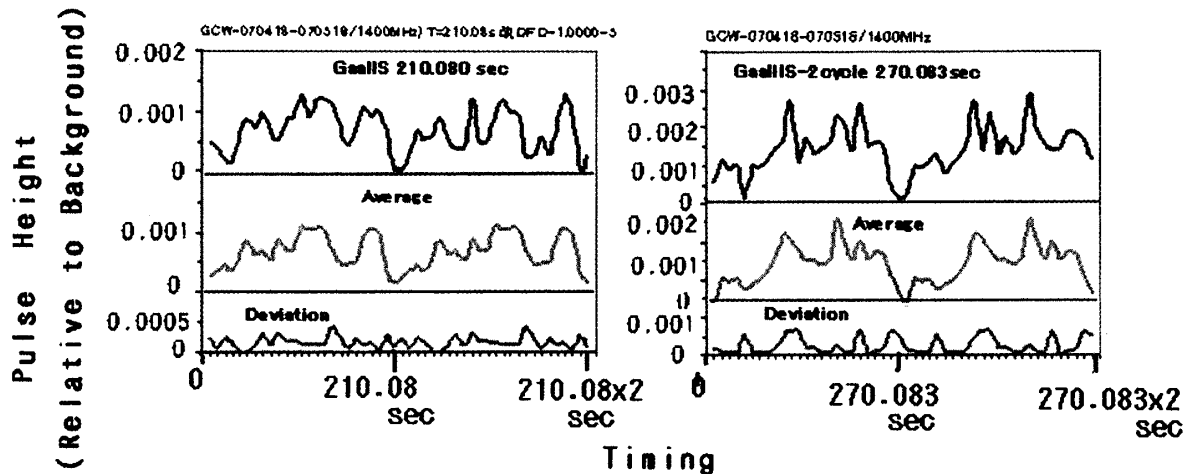


図6 発見されたGaaIIIS (右), およびGaaIIS (左) のパルス波形。各図最上パネルは生2 cycleデータで中段パネルは両者の平均、最下段は平均からの差の絶対値を示す。パルス高さは背景放射電力との相対値

## 6. 検討—デカメータ波パルスとの対比と電波源位置の確認

今回デシメータ波帯で発見された長周期パルスは改めてデカメータ波帯にて2002年3月末に観測<sup>(3)</sup>されているデータに対しボックス・カー解析を開始した。中間結果ではあるが、デカメータ波帯ではGaa以下の周期の短いパルス列が多数連なったときに対するビート乃至は変調と判断される波形を示す。したがってGaaIIIS, GaaIIS, およびGaaSの独自の長周期をもったブラックホールが別に存在するとの判断は現時点で保留されねばならない。長周期現象は場合によって、デシメータ電波に起こる特殊性を考慮する必要がある。即ち、デシメータ電波源では以下に述べ

る自転周期の広がりによって異なる周期との相互干渉により長周期変動が生ずる可能性がある。

2007 年 3 月の報告<sup>(7)</sup>においてパルスの形成にかかわるモデルを示し、Kerr 時空を示す計量から自転角速度  $\Omega$  は極角  $\theta$  および Event Horizon からの距離の関数となり

$$\Omega = \frac{carr_g \sin \theta \pm c\Sigma \sqrt{\Delta(1-K_r) - (K_r/\Sigma)rr_g(r^2 + a^2)}}{[\Delta \cdot (rr_g + \Sigma) + (rr_g)^2] \cdot \sin \theta} \quad \dots\dots\dots(1)$$

で表されることを示した（各記号については同報告参照）。しかし Event Horizon、即ち

$\Delta = 0$  の位置では  $\Omega = ca/r_{ev}r_g$  となり固有の自転が存在し、この近傍の電波源がパルス

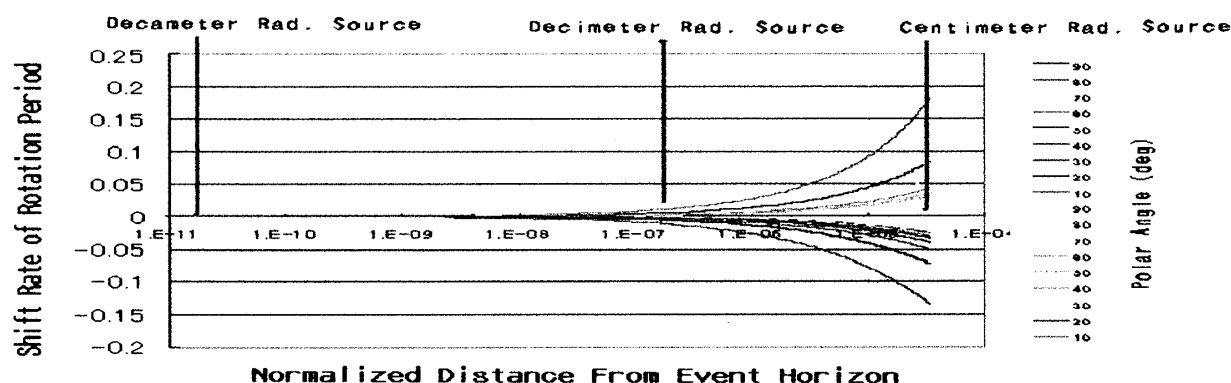


図 7 Event Horizon 極近傍で、外側における空間自転周期の広がり (After H. Oya, 2006(4))

として観測されることを述べてきた。(1) 式の  $\Omega$  は図 7 に示す結果となる。これは同一現象にたいする Minkowsky 空間での時間経過と Kerr 時空での時間経過の比の二乗を表す  $K_r$  が Event horizon からの距離パラメター  $\delta$  をシュヴァルツシルド半径  $r_g$  に対し  $\delta = (r - r_{ev})/r_g$  とした時

$$K_r = \alpha\delta^2 \quad (\alpha: \text{比例定数}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表されるモデルによっている。2007 年におけるデシメータ波パルス周期の解析結果は基本的にデカメータ波パルスの周期と一致するが、デシメータ波パルスはその周期に  $\pm 0.05\%$  程度の広がりがあることが判明し、また 8 GHz 帯では  $\pm 10\%$  を越える分散があることが 4 節で見えてきた。これらの事実は図 7 に示す Event Horizon 近傍での Kerr 時空の性質を反映していることが判明する。

即ち Event Horizon の位置に相当する  $r_{ev}$  の球殻上ではブラックホール全域で一定の角速度、即ち同一の周期で自転している。一方、この Event Horizon の極く近傍では、現象の変化あたりの時間が長くなり、デカメータ電波として観測される。したがって、Event Horizon から離れる程度が大きくなると、デシメータやセンチメータ波の放射域となる。この場合  $\Omega(r, \theta)$  効果が起こり一定周期のパルス成分が得にくく、パルス周期の変化とともにそのレベルが低下することが示される。

## 7. 結論

デカメータ波帯での発見について 1.4GHz 帯、8GHz 帯にて我が銀河中心部より到来する電波パルスの存在が発見されてきた。1.4GHz 帯では 2006 年 4 月より 7 月、2007 年 4 月から 8 月にわたつ

て、また 8GHz 帯では 2006 年は 8 月から 9 月、また 2007 年では 9 月の各 1 週間、銀河中心を対象として観測を実施してきた。観測結果を検討するとき、2006 年ではアンテナ制御方向の校正が充分でないことが判明し 2007 年観測では校正を充分実施し、より信頼度の高い結果を得ている。特に 2007 年観測に対する FFT 解析の結果、 $\pm 2^\circ$  の精度でデシメータ電波が銀河中心方向から到来していることを示している。デカメータ電波パルスが明確に、銀河中心に存在する自転するブラック・ホールから放射されることが示されていることを考慮するとき、デシメータ電波パルスも同じ電波源をもつことが帰結される。しかし、観測される周期をデカメータ電波の場合と対比するとき 2006 年に得られた結論<sup>(5)</sup>は修正され、デカメータ波パルスとデシメータ電波パルスの周期は基本的に同じであるが、デシメータ波パルスは $\pm 0.05\%$ までの広がりをもつことが明らかとなった。本研究では続いて XBand での銀河中心電波パルスの存在を示す観測に成功しているが、2006 年及び 2007 年の結果は同じスペクトルを示し、デカメータ、及びデシメータ波帯で観測されている周期のパルスから $\pm 10\%$ に及ぶ大きな偏移を示し、パルスレベルも銀河中心背景放射に対し 0.05%以下でデシメータ波パルスと同等またはそれ以下となっている。

以上の事実は 2006 年度<sup>(6)</sup>の結果をより精度の高い形で支持するものとなっている。即ち銀河中心に電波源をもちデカメータ波からセンチメータ波帯の広い周波数帯で観測された電波パルスは自転するブラック・ホール、すなわち Kerr 時空において、Event Horizon の極めて近傍にあることを裏付けていて、最も Event Horizon 近くに源をもつ電波は大きな赤方偏移の結果デカメータ波帯電波として観測される。ここでは空間がブラックホール全表面で同一の周期で回転し明確なパルスを形成する。他方 Event Horizon から多少はなれた電波源から放射される電波は赤方偏移率が少なくなり、デシメータ、そしてさらに外方に位置する電波源からの放射はセンチメータ波帯電波パルスとして観測される。この場合、Event Horizon から離れる割合が大きくなるにしたがい、多様な周期で空間が回転しパルス電力は固定した周期に集中しなくなる。

#### 謝辞

本研究は福井工業大学学内特別研究一般 B, の支援を得て実施された。深い謝意をもって報告する。

#### 参考文献

- 1) Genzel, R., N. Thatte, A. Krabbe, H. Kroker, and L. E. Tacconi-Garman, The dark mass concentration in the central parsec of the milky way, *Ap. J.*, 472, 153-172, 1996
- 2) Oya, H., M. Iizima, Cluster of super massive black holes in the central region of our Galaxy observed by decameter radio wave pulses-Discovery of 24 super massive black holes and their motions. *Tohoku Geophysical Journal Series 5*, 35, 1-78, 1999
- 3) 大家 寛、銀河中心起源電波パルス群究明の基礎—自転する超巨大ブラックホールの実証に向かって、福井工業大学研究紀要、35, 303-310, 2005
- 4) Oya, H., Discovery of decameter radio wave pulses from super massive black holes in the center region of our Galaxy-First preliminary results, *Memoirs of Fukui Univ. Tech.*, 36, Part I, 221-228, 2006
- 5) 大家 寛、我が銀河系中心部・電波パルス放射のスペクトル特性—多数の巨大カー・ブラック・ホール起源、日本天文学会 2006 年秋季年会（9 月於 九州国際大学）講演予稿集 P178、
- 6) 大家 寛、西阪飛鳥、銀河中心巨大ブラックホール群の放射スペクトル特性の究明—Xバンドを含む“あわら”宇宙電波受信システムによる成果、福井工業大学研究紀要、37, 327-334, 2007

(平成 20 年 3 月 31 日受理)