

# 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

大家 寛\*・西 阪 飛 鳥\*\*

## Studies on Spectra Characteristics of Radiations from Super Massive Black Holes at Center of the Our Galaxy -Results from Cosmic Radio Observation System at Awara FUT Including X band Radio Wave Observations

Hiroshi Oya and Asuka Nishizaka

**Abstract** 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 show that there are pulse components of radio waves in the observed data in the decimeter and the centimeter wavelength range. The detected pulse periods in the decimeter radio wavelength range show both the same and different components of the periods from the case of the pulse periods of decimeter radio pulses from the center region of our Galaxy which have been identified to be radiated from the rotating super massive black holes; the pulses in the centimeter wavelength range indicate different periods with the case of decimeter radio waves. It has been clarified that the features of frequency dependence of pulse periods reflect the positions of sources of corresponding frequency range that are located in the region close to the event horizon of Kerr black holes.

### 1. 序

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±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>(1)</sup>。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>(2)</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。この研究ではしかし、電波源位置がブラックホール表面近くにあつて、放射される電波が電波源の回転と同期してパルスを形成することに関わっていて、したがって、ブラックホールの直近傍を直視する観測となっている。このことは、パルス周期からブラックホールの半径が判明し、ひいては質量が決定される。すなわち、デカメータ電波パルスの観測から求められた24種類のパルス群は24個の巨大ブラック・ホールに対応していて、最大65万太陽質量、最小1500太陽質量が求められている<sup>(1)(3)</sup>。この点、天文学界では永く銀河系中心部に唯一

\* 宇宙通信工学科 \*\* 電気工学専攻・修士過程・宇宙情報分野

の超巨大ブラック・ホールが存在することのみを仮定して議論していたが、最近やっと中間質量ブラック・ホールがあることに気づきはじめた。しかし本研究とは異なり、傍証による推論で、その大きさ、数、位置はまだ莫としていると良い。初期の研究<sup>(1)</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おいていた。ここでは、時間の特異点であり放射電波の周波数が低下することは理解されるが自転はブラックホールの自転と同期してブラックホール周辺で回転する磁場の存在を仮定する必要がある。しかしブラック・ホール表面と云うことの出来る Event Horizon と静止限界 (Static Limit) との間には中心からの距離に関連して周期の異なる空間回転を行っている Ergosphere がある。従って Static Limit での磁場回転周期とブラック・ホールの自転が一致する仮定は成り立たなくなってくる。この電波源位置の決定にはデカメータ電波に限らない広い周波数帯でパルス観測することが重要になってくる。そこで本研究の新しい段階としてデシメータ波帯の観測研究に着手した。

観測研究は福井工業大学に設置された、10m φ パラボラアンテナ系の L (1.4-1.5GHz 帯) 周波帯にわたってまず実施され、1.4GHz および 1.6GHz 帯のパルス成分の周波数スペクトル解析から、すでに同定しているデカメータ電波源と同じ電波源のうち巨大順に Gaa, Gab および Gac 三体のブラック・ホールからの電波パルスが同定された<sup>(4)</sup>。こうした背景にあって、本研究では電波が巨大カーブラックホールの表面付近の如何なる源から放射されているを明らかにすることを目的とし、観測対象をさらに Xバンド(8GHz) 帯に拡張し、パルス現象も併せて究明された。

## 2. 観測システム

本研究目的の実現のため、福井工業大学あわら校地に設立された 10 m φ パラボラアンテナと対応する L、S、及び Xバンド受信機よりなる既存設備部を活用し、システムのバックエンドを目的に沿って整備し、銀河中心部の観測に備える。1.4GHz から 1.6GHz にかかる Lバンド および 8-8.5GHz における Xバンドではともに主受信機として 20MHz-2GHz 帯を受信可能にする広帯域高周波受信機 4 台を配置してシステムを構成した。図 1 に L (1.4GHz-1.6GHz) の場合、および X (8-8.5GHz) の場合の設備構成のブロック図を示す。なお S バンド系は本研究では使用していない。

### 2.1 L-バンドの場合

Lバンドの場合、図 1 に示すように、既設部であ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、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、設定する 4 周波数を中心に、2.5 kHz 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 PC を通じて行なわれている。

### 2.2 X-バンドの場合

X-バンドの受信に際しては図に示すように既設部であるアンテナおよび前置増幅器を経て 200 m ケーブルにて受信室に伝送される信号は同じく主受信機にて増幅される。ただし、8GHz-8.5GHz 帯の X-バンドにおいては前置増幅器において 720MHz に周波数変換が行われていて、主受信機の中心周波数は 720MHz 前後に 4 周波が設定される。すなわち、高周波受信機 4 系統をもって、2.5 kHz 帯域内で強度測定を行う。同じく、観測信号は中央 PC の制御にて AD 変換後、ハードディスクに収納する。この観測システムで特徴のある点はデータ取得と並行して行われる時刻記録である。これは Box-Car 法を適用するに際して、3ヶ月程度隔たっても受信されたデータにおいて銀河中心

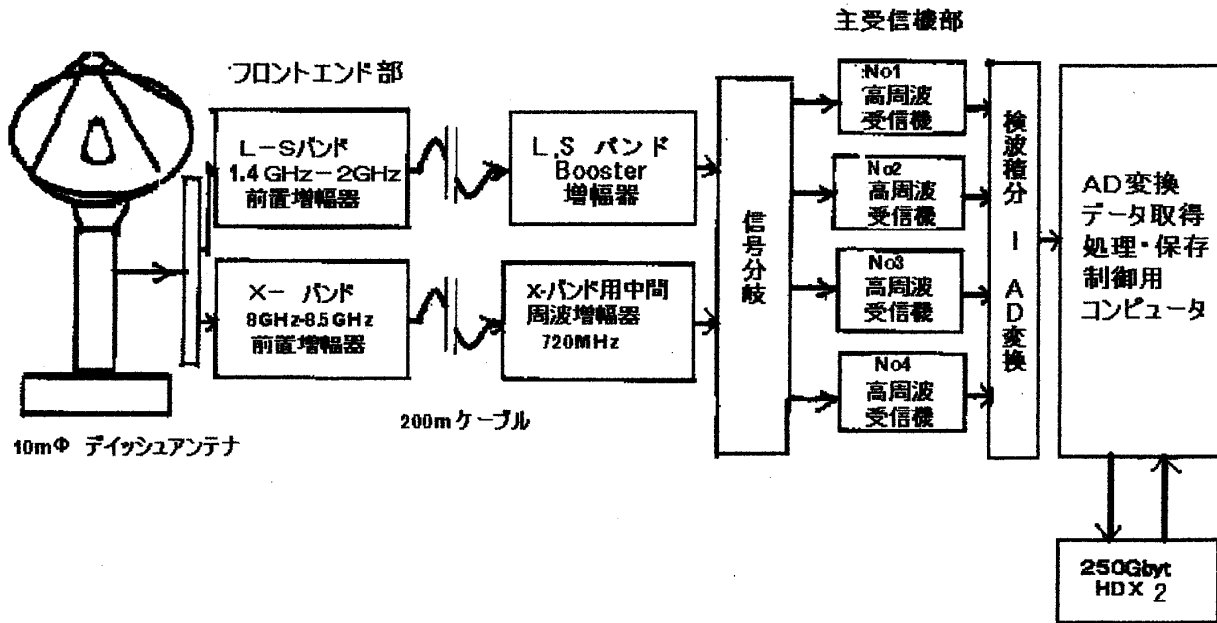


図1 あわら電波受信設備を用いた銀河中心電波1.4GHz帯、1.6GHz帯（Lバンド系）および8.4GHz（Xバンド系）受信システム

より観測されるパルスの位相の時刻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。

### 3. 観測

本研究に関連する観測は 1400MHz および 1600MHz 帯、即ちデシメータ波帯では 2005 年 7 月 25 日より 8 月 26 日までと 2006 年 2 月 26 日から 7 月 31 日にわたる期間に実施され、8400MHz 帯の観測が 2006 年 8 月 22 日から 9 月 7 日にかけて実施された。

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° 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° 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。

### 4. データ解析

#### 4.1 方式

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にある。デカメータ電波パルスはその結果がかなり明確であるが、しかし、最大のレベルである Gac パルスの場合でも背景放射の 0.8%、即ち 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る。まずパルスの周期の概数を求めるには FFT を用いるが 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

んで、すでにその内容が報告されている<sup>(1),(3) (4)</sup>。

FFT 解析によって得られる周期は最大3桁の精度である。したがってパルス波形と6桁までの精度で周期を決定するためには Box-Car 法が適用される。この場合時刻付けが観測日単位の場合は時系列長さは観測時間が限度となり、誤差の大きな状態での結果となるが、多数日にわたる重ね合わせは、存在するパルスの位相の一致性と解析対象の2周期分の波形の対称性が最も良くなるよう位相調整をして実施する。2005年7月25日から2006年4月6日までのデータに対する解析法はこの方式をとってきた<sup>(4)</sup>。よりシンプルで誤差混入の可能性の少ない方法は観測日ごとのデータに絶対時刻を対応させることで、これにより最大3か月にわたる時系列長さを設定することが出来る。すでに述べたように2006年4月6日以降のデータに対する解析はこの長時系列の方法をとった。

#### 4.2 FFT 解析結果

図2に2006年4月6日から2006年7月25日にわたる期間のデータに対するFFT解析結果を示す。この結果は銀河中心部に対し26観測日分、 $3.3 \times 10^7$ 、銀河中心方向から $5^\circ$ 西方向に対し15観測日分  $1.6 \times 10^7$ 、そして銀河中心方向から $5^\circ$ 東方向に対し14観測日分  $1.4 \times 10^7$  データを解析した結果である。表示されているスペクトルのレベルは、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  $4.88 \times 10^{-4}$  Hz~0.0976Hz (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。ここには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。

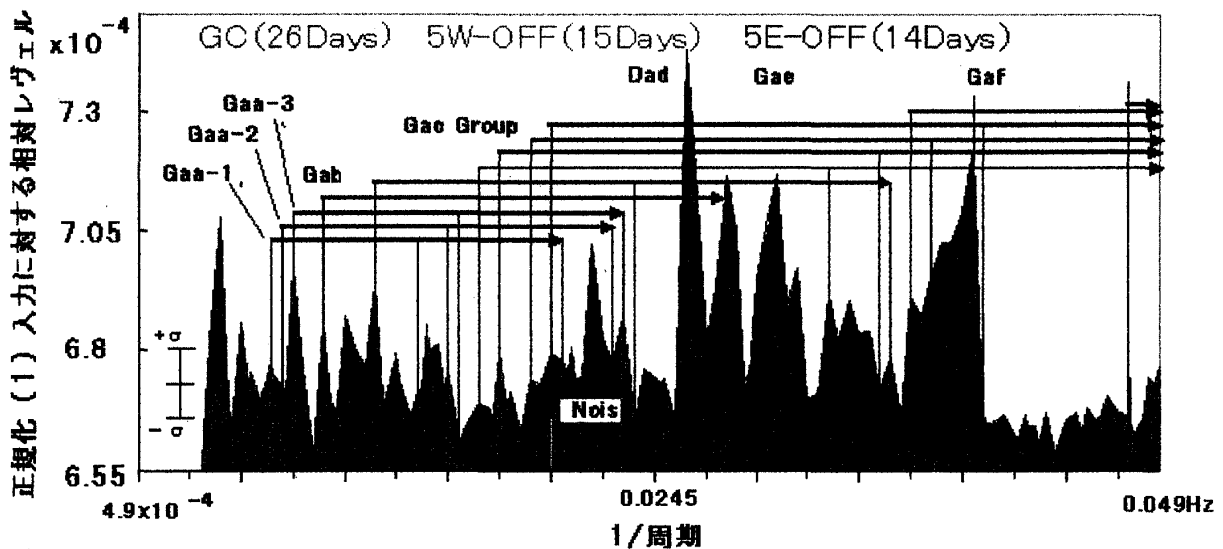


図2, 2007年4月6日より2007年7月31日の期間に観測された銀河中心方向(26観測日)中心より $5^\circ$ 西および東方向(それぞれ15観測日及び14観測日)に対するFFTの結果。平均レベルより上に出る成分を示す。

得られたスペクトルは銀河中心方向の観測結果が $5^\circ$ 西及び東に対して得られる結果より $1\sigma$ 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認されているデカメータ電波パルスにたいする FFT 結果と対比したときの 1 例を図 3 に示す。ここに対比される結果は明らかに一対一対応ではない。しかし、電波源が周波数ごとに別に存在するのではなく観測周波数

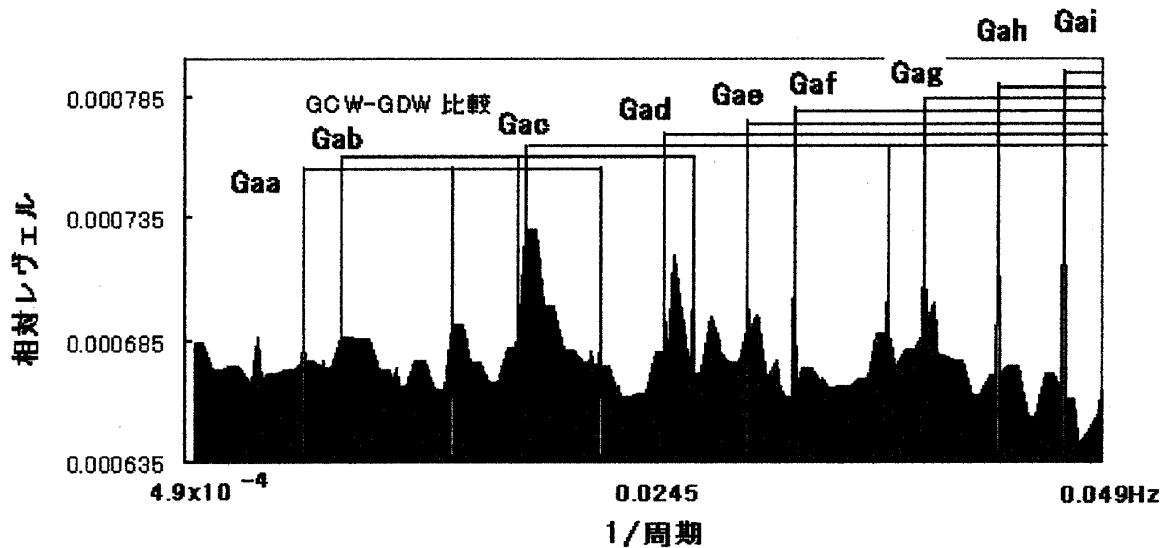


図 3 デカメータ電波（ピンク）およびデシメータ電波（草色）に対する銀河中心電波の変動成分スペクトル Gaa から Gai まではデカメータ電波パルスの電波源として決定されているものでそれぞれが対応する周期で自転する超巨大ブラックホールである。

によって周期が異なってくることが示唆される。こうした背景から図 2 にはデカメータ電波観測で決定された電波源と対比して Gaa1、Gaa2、Gaa3、そして Gac Group と命名している。図 4 に 8.4GHz 帯で観測された銀河中心電波の変動周期の FFT 解析結果をすでに求めてきたデカメータおよびデシメータ電波パルスに対する FFT 解析結果と対比して示す。この表示法は周期の比較が可能なように 8.4GHz の場合相対レベルを下げて示している。正確なパルスレベルは Box

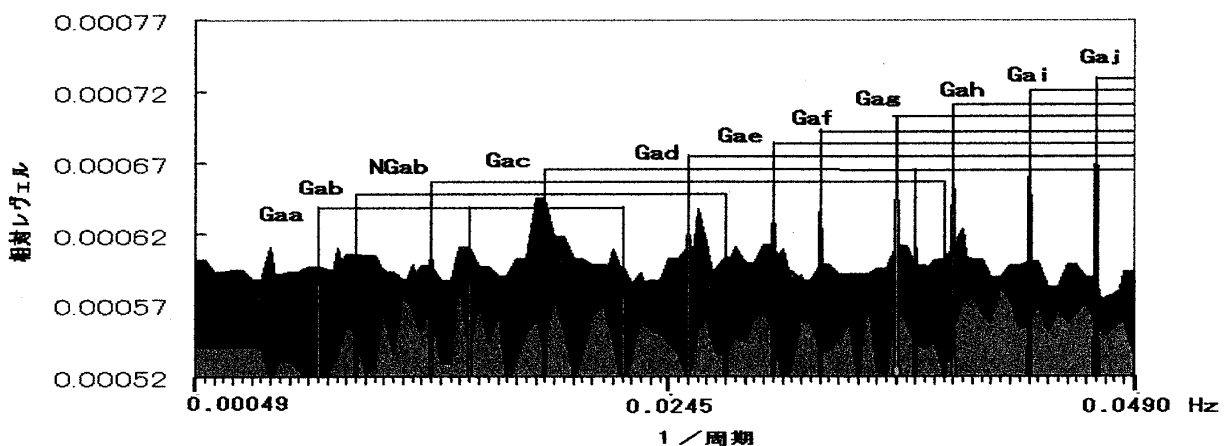


図 4 8.4GHz 帯で観測された銀河中心方向の電波強度の変動スペクトル（浅青：最下段）結果はデカメータ波（青：最上段）デシメータ（赤：中段）と対比して示されている。

-Car 法によって求められるが、デシメータ電波パルスと 8.4GHz でのパルスレベルは背景電波強度との比で表すとほぼ一致している。周期はしかしデカメータとデシメータの間にある多少の類

似性を超え大幅に異なっていることが明らかにされた。表1に各観測周波数当たりの電波源と対応するパルス周期を示す。表中 22MHz の場合は Box-Car 法により決定された正確な周期で 1400MHz および 8400MHz は FFT 解析結果より得られた中間精度の結果である。この結果からデカメータ電波で決定された電波源に対し、周波数が増大するのに対応し異なった周期に移動し、ときに複数の周期が出現することが判明する。これは理論の節で取り上げるように自転するブラックホールのもつ特徴と理解される。

表1 銀河中心電波の変動周期と観測周波数

電波源	22MHz	1400MHz	8400MHz
Gaa	129.992sec	145.77, 130.0 127.55 sec	190 Sec
Gab	104.55 sec	104.5 sec	115, 95 87, 77, 70sec
Gac	2.0605sec	52.00 sec	65, 61, 46sec
Gad	37.5762sec	37.57 sec	37sec, 35sec
Gae	1.9498sec	31.94 sec	33 sec 31sec
Gaf	9.5405sec	29.54 sec	29sec
Gag	4.2883sec	24.8 sec	
Gah	2.3406sec	22.3 sec	
Gai	20.8682sec	20.9 sec	

### 4.3 8.4GHz におけるパルス波形

デカメータ電波パルス波形<sup>(1)(3)</sup>、ならびにデシメータ電波パルスの波形<sup>(4)</sup>は既に発表したとうりパルサーの波形とは異なり特徴ある Dip 構造をとっているこの Dip はデカメータ電波の場合標準的に 3 点存在し中でも主 Dip となる

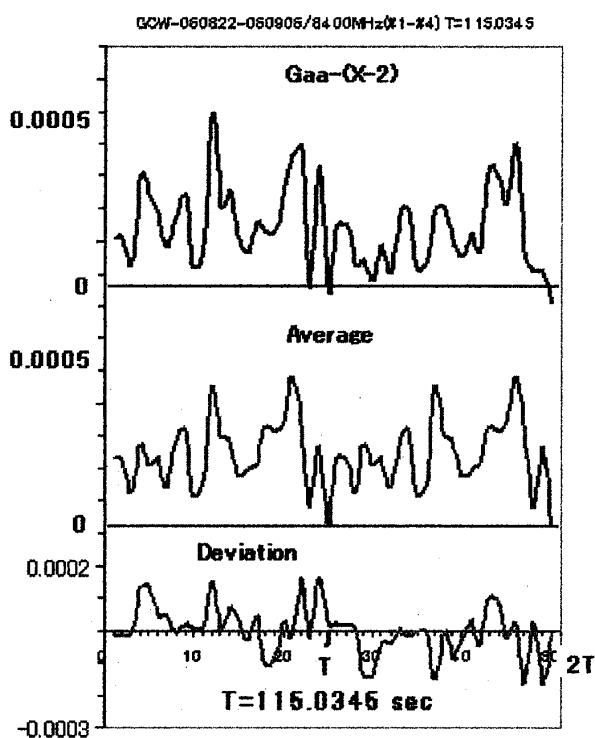


図5 8.4GHz 帯で観測された銀河中心センチメータ波帯電波パルス波形デカメータ波帯 Gaa に対応する。

最大の Dip が一つ存在している。しかしデシメータ波になると最大 Dip は明確であるが副 Dip がデカメータの場合のように明確でなくなるが、図5 (縦軸は背景放射に対する電界強度換算の相

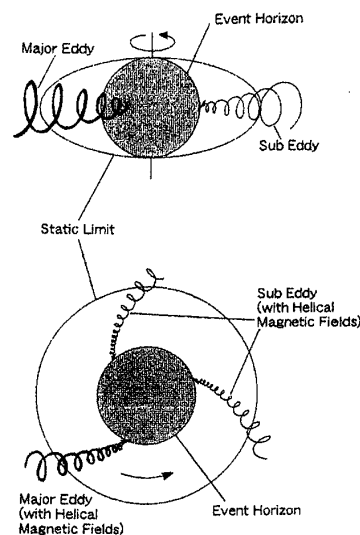


Figure 6

図6 銀河中心より到来するパルス電波源となる自転するブラック・ホールのモデル

対レベル値で、横軸はパルス周期内時間を示す)に見られるようにセンチ波の場合もデカメータ波の場合のようには明確な3箇所Dipが結論づけられない。

### 5. 理論的考察<sup>(5)</sup>

図6に自転するブラック・ホール周辺からパルス電波が放射される状況を説明するモデルを示す。この場合ブラック・ホールはKerr時空が取り巻いているが、周囲プラズマが回転しながら中心天体であるブラックホールに流れ込んでいる。この時空に形成される磁場および磁場に大きな影響を受けるプラズマ構造に経度方向の不均一性があるとき、自転に呼応した放射電波強度の変動としてパルス電波が形成される。放射される電波の任意の周波数でパルス周期を検出すればその周波数の電波源の自転周期が判明する。Kerr時空を示す計量から自転角速度 $\Omega$ は

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

となる。ここで、Kerr時空に関連し $r$ はブラックホール中心からの距離 $r_g$ は自転のない場合に求められるブラックホール半径で質量 $M$ 、重力常数 $G$ および光速 $c$ に対し $r_g = 2GM/c^2$ となる。また $\theta$ は極軸からの離角である。さらに、Kerr時空を記述する諸量として

$$\Delta = r^2 - r \cdot r_g + a^2, \quad \Sigma = r^2 + a^2 \cos^2\theta, \quad a = J/Mc$$

となるが、 $J$ は自転しているブラックホールの角運動量である。なお、(1)式の表現において重要なパラメーター $K_r$ がある。これは

$K_r = (\Sigma/\Delta) \cdot (v_r/c)^2 + K^2$  で $v_r$ はブラックホールに向かって流入するプラズマの半径方向の速度、そして $K$ はブラック・ホール時空に固定している(したがって一定半径の位置で回転する時空の周期で回転している)系での時間経過 $dt$ とMinkowsky空間(たとえばブラックホール周辺の空間を周回する人工衛星に乗った人の観測する時間経過) $dt'$ との比で

$$dt' = Kdt \dots\dots\dots(2) \quad \text{となる。したがってブラックホール周辺に設定される}$$

Minkowsky時空で周波数 $f_M$ で観測される現象は、Kerrブラックホールの時空では周波数 $Kf_M$ として観測されている。

以上、Kerrブラックホール周囲は角速度 $\Omega(r, \theta)$ となって、位置 $(r, \theta)$ の関数として無数の自転周期があり特殊な位置を除いて明確なパルスは観測されないことになる。しかし本研究ではEvent Horizon、即ち

$$\Delta = 0 \quad \text{and} \quad K_r = 0 \dots\dots\dots(3) \quad \text{の位置では} \quad \Omega = ca/rr_g \dots\dots\dots(4)$$

となり、Event Horizonの位置に相当する $r$ 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ことが見いだせる。このEvent Horizonの極く近傍では、現象の変化時間が長くなり(時間がゆっくり進み)、例えばデカメータ電波では明確なパルスが観測されることが理論づけられる。いっぽうEvent Horizonから離れる程度が大きくなると、 $K$ が次第に1に近づくため時間の進みが速くなり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。

## 6. 結論

デカメータ波帯での発見について 1.4GHz 帯、1.6GHz 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。本研究では 2006 年 4 月より 7 月にわたって、1.4GHz 帯で銀河中心を対象として 1 チャンネル毎に 26 観測日分、 $3.3 \times 10^7$  データ点、銀河中心方向から  $5^\circ$  西方向に対し 15 観測日分  $1.6 \times 10^7$  データ点、そして銀河中心方向から  $5^\circ$  東方向に対し 14 観測日分  $1.4 \times 10^7$  データ点、都合 4 チャンネルのデータを取得してきた。FFT 解析の結果、銀河中心方向の観測結果が  $5^\circ$  西及び東に対して得られる結果より  $1\sigma$  以上大きく、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。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、観測される周期はデカメータ電波の場合と一致する場合と数パーセントから 10 数パーセント変化する場合とが混在している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た。結果はデカメータ、及びデシメータ波帯で観測されている周期のパルスは存在しない事を示し、また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。

以上の事実が明らかになることによって、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る。すなわち最も 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、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とになる。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り、明確なパルスが観測されなくなると結論される。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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、

(平成19年 3 月 24 日受理)