

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 —

大 家 寛*

Bases for the Research of Groups of Radio Pulses from Origins at the Center of Our Galaxy : Toward confirmation of the existence of groups of super-massive black holes

Hiroshi Oya

In 1999, it has been discovered, by observing decameter radio pulses from rotating Kerr black holes, that there are more than 24 super massive black holes in the center of the Galaxy. Data analyses to confirm the discovered evidences have been made by utilizing new computer environments on Windows XP for the data observed by 100km class base-line decameter radio wave interferometer cooperating with Tohoku University. The present results give confirmations to the righteousness of the methods to detect decameter radio pulses and to the existence of groups of the super massive black holes in the region of Galaxy center.

1. 序

我銀河系の中心部にブラックホールの存在を、最初に推論したのは Lynden-Bell 及び Ree で 1971 年のことである⁽¹⁾。その後幾多の研究成果を連ね、現在、我銀河系中心部には太陽質量の 250 万倍に相当する一つの超巨大ブラックホールが存在するとの結論に至っている⁽²⁾。この究明の道筋では Sgn West (さそり座 West) とよばれる銀河系中心部に位置する電波星雲にプラズマが流入する過程が波長 6cm の電波の放射の様相から明らかにされ⁽³⁾、その後、銀河中心部で運動する恒星群の運動を詳細に観測し、恒星群の軌道面分布を統計によって与えることによってそれらの恒星群の運動を支配している中心天体の質量を求めるようになった⁽²⁾。厳密にはこの中心部において計算された質量に相当する恒星群からの光量に相当する光が放射されていないときここにブックホールが存在すると推論している。

本研究は以上に述べてきた現在の天文学界の常套的な概念と方法とは全く異なりブラックホールを源とする電波の受信により直接自転するブラックホールを観測することに関わるもので、しかも従来言われてきた来たような超巨大ブラックホールは 1 個ではなく、複数個それも銀河中心の場合 24 個以上を数えることが判明してきた⁽⁴⁾。

パルサーの発見後、宇宙 X 線研究者は通常ブラックホールの自転にとうなう数 m 秒周期の速い周期を示す X 線パルサーをブラックホールの実証としようとして探索をはじめた、しかし本研究は逆に極めて低い周波数の電波こそブラックホール起源であるとの立場にたっている。すなわちブラックホールの特異点近傍から大きな赤方偏移をうけて低周波となって放射される電波をしかも超巨大ブラックホールに焦点をおくことのため、ゆっくりした周期のパルスを対象に究明する試み

* 宇宙通信工学科

からはじまった。

1984 年その第一の兆候を得、詳細に究明した結果、銀河中心部に 22MHz から 35MHz にかけて、0.421565 sec 周期のデカメータ電波パルスの存在が確認された⁽⁵⁾。Box-Car 法を適用して得られたパルス波形は、そのパルスレベルが、ダイポール・アンテナで受信する場合背景銀河電波レベルの 1/1000 から 8/1000 程度と判明した。

銀河系中心部のデカメータ電波パルスの究明の本格化は 1998 年より東北大学飯舘観測所にブラックホールからのデカメータ電波を究明する目的で開設された 100m 級 9 基線デカメータ電波干渉計によって始まった。その結果最大 129.992 sec から最小 0.327214 sec に至る 24 種の周期を持つパルス群を発見している⁽⁴⁾。これらのパルス周期は 6 桁以上の精度をもち季節に対応し最大 1/10000 の Doppler 偏移をしめすが、パルスの形状、レベル等、通常のパルサーからのパルス電波とは全くことなり、最終的に自転するブラック・ホール、即ちカー・ブラックホールからの放射電波と結論し、1999 年成果を発表している⁽⁴⁾。

この成果に対し、福井工業大学にては、あわらキャンパスに新たに 100m 級 3 基線干渉計が完成され、木星電波を対象に始まった観測実績からシステムの動作確認が終了し、次に銀河中心からの PBH (Pulses from Black Hole) の探求を 2005 年より開始する計画の他、10m 反射鏡アンテナを擁する L(1.5GHz 帯)、S(2.2GHz 帯)、及び X(8GHz 帯)の受信システムを開発し、PBH のスペクトルが高周波帯でどこまで伸びて存在するかを、PBH 存在の検証の骨子として計画している。そこで、本論は主としてこれらの検証計画の前段階として行われてきた 2000 年から 2004 年にかけて、進めてきた基礎的検証に関わる。この段階の検証は主として東北大学の 100km 級デカメータ電波干渉計を用いて開発されたシステムによる観測とそのデータ処理で、ここで確認されるものは、今後の本格検証の基礎としても重要となる。

2. 観測システム

2. 1 システムの概要

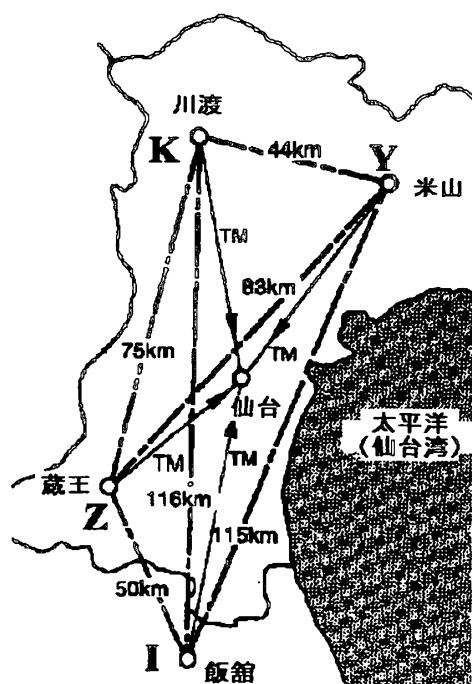


図1 100km 級干渉計の配置

図1に東北大学 100km 級干渉計の4局の配置と表1にそれぞれの位置と関連するテレメーター局のデータを示す。米山 (Yoneyama) 川渡 (Kawatabi), 蔵王 (Zao), 飯舘 (Iitate) の4局は最短44km, 最長116kmに至る干渉計の基線を実現していて 100km 級干渉計と公称される。

システムの基本は図2に示す様に上記4局において広帯域 ログペリオディック・アンテナによって受信された信号を前置増幅部を経た後、3段スーパーヘテロダイン方式で周波数変換しつつ増幅し、最終信号は中心周波数 1kHz 帯域幅 300Hz となって、表1に示すテレメーター周波数を搬送波として FM 変調され仙台局（東北大学大学院理学研究科・物理棟に設置）に伝送される。

表 1 東北大学 100km 級デカメータ電波干渉計構成局とテレメーター

干渉計局	緯度	経度	高度	テレメーター周波数・送信電力	
K:Kawatabi	38°44' 54"	140°45' 57"	224.53m	43.85MHz	10W
Z:Zao	38°06' 17"	140°32' 45"	705.23m	59.69MHz	1W
Y:Yoneyama	38°36' 52"	141°14' 37"	61.01m	44.87MHz	1W
I:Iitate	37°42' 44"	140°40' 22"	593.37m	42.89MHz	1W

干渉計の主要機能の実現には各観測機器、特に周波数変換過程における位相の安定性にあり、観測局で周波数変換用の局部発信の源振、テレメーター電波搬送波の源振等、すべては、セシウム周波数標準器を用いていて短時間精度 10^{-12} が保証されている。各局の信号に対し、アンテナ

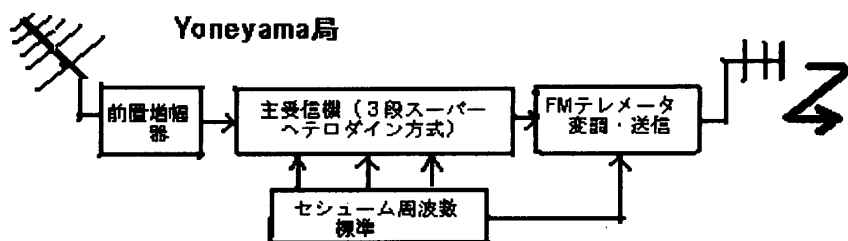


図 2 デカメータ干渉計観測局（全ての局に共通となる）

の位相差の校正（較正）はカシオペア A 電波源を用いて実施している。この較正法は通常電波干渉計法において採用されている直接比較法ではなく、本研究に関連して新たに

開発された“フリンジ相関

法”を適用している⁽⁶⁾。このフリンジ相関法ではカシオペア A 電波星雲のような2'角にわたる広がりのある電波源を利用しても方位決定精度 1"角に対応すべく干渉計局間の位相差を決定しうる特徴をもっている。

図 3 に主局干渉計システムの構成を示す。ここに示されるように位相校正システムとパルス電波源観測系とは並行動作となっている。したがってパルス電波源観測系は位相追尾方式をとっている点が特徴である。

2. 2 位相追尾方式干渉計

この方法は従来、干渉計の出力として相関値の平均強度を求めているのとは異なりパルス変動の歪を極力抑えながら検出する点に留意したもので、信号の到来方向を決定しつつ、干渉計の各副局（干渉計観測点）から送られる信号レベルの線形和（単純加算）を求める方式として開発された。この原理は、いま、干渉計の一対局として A 及び B 局を選んで検討すると以下のようなになる。すなわち、この対局において

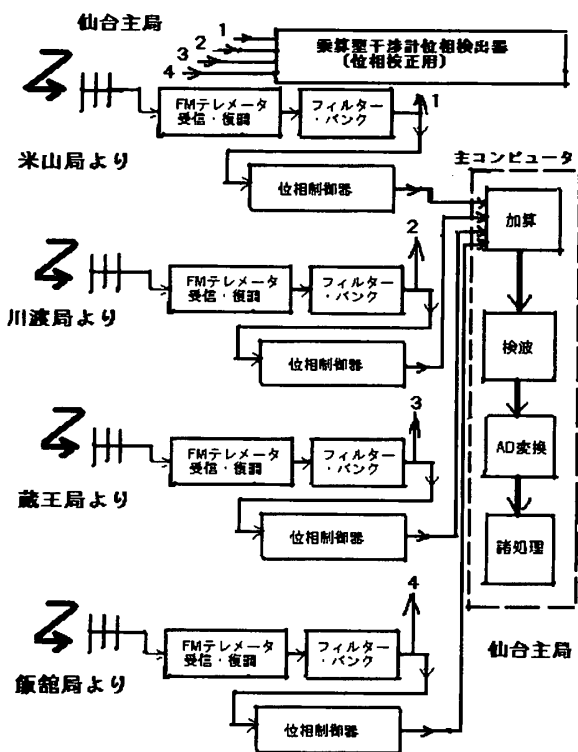


図 3 干渉計中心局における受信、位相制御データ取得制御部

一つの電波源から到来する電波の波数ベクトル \mathbf{k} に関し各局の位置ベクトル $\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B$ を考慮するとき、各局の出力はそれぞれ

$$E_A = E_{A0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_A + \theta_A) \quad \dots\dots\dots (1)$$

および

$$E_B = E_{B0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_B + \theta_B + \Phi_{AB}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。以上で、 $E_{A0}, E_{B0}, \omega, \theta_A, \theta_B$ そして Φ_{AB} はそれぞれ、A局からの信号レベル、B局からの信号レベル、周波数変換後の最終角周波数、A局からの信号の位相差、B局からの信号の位相差そしてA-B局間の位相制御量である。ここで、この位相制御量 Φ_{AB} を

$$\Phi_{AB} = \mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) + \theta_A - \theta_B \quad \dots\dots\dots (3)$$

と設定するときA局およびB局からの信号の位相 Ψ はともに

$$\Psi = \omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_A + \theta_A \quad \dots\dots\dots (4)$$

と整えられる。このことは他の3局との間についても同様に、位相制御によって全て(4)式で示される位相 Ψ にそろえられることを示す。同じく図3に示す様に本論における干渉計システムでは最終的には4局からの信号の和を自乗検波し積分処理を行っている。ここで4局をA, B, CおよびD局とすると各局からの信号の振幅 E_A, E_B, E_C , および E_D に対し位相制御を正確に行った

出力レベル E_{COUT} と位相制御対象とならなかった場合の出力レベル E_{NOUT} とを対比すると、

$$E_{COUT} = E_A + E_B + E_C + E_D \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$E_{NOUT} = (E_A^2 + E_B^2 + E_C^2 + E_D^2)^{(1/2)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、全局の信号レベルを合わせると二種の信号出力、 E_{COUT}, E_{NOUT} はそれぞれ

$$E_{COUT} = 4 \cdot E_A \quad \text{および} \quad E_{NOUT} = 2 \cdot E_A \quad \text{となり、レベル差が明確に出現}$$

する。即ち、この原理により干渉計として方位を明確にできることになる。また掛け算型の干渉計と異なり出力は振幅の線形和となりパルス波形を忠実に検出できる特徴をもつ。

2. 3 位相制御システム

位相制御を実現するシステムの中心になるのは移相器であるが中心周波数1kHzの信号の位相をアナログ段階で制御する場合にとられる最も効果的な方法としてオペレーション・アンプを使った一次遅れ回路を要素とした位相推移アレーを組み、必要とする移相量を満たすようリレー制御によってアレーの中から素子を選択する方式をとっている。

この移相制御のためコンピューターより制御信号を0.5sec毎に発生している。したがって受信信号に2Hzの変調を加えることとなるため、信号S/N比1/1000~8/1000の程度の微弱パルス扱う場合、データ解析に充分注意する必要がある。

2. 4 狭帯域フィルターバンク

観測システムの第2の特徴は狭帯域受信方式をとっている点である。これは、銀河系空間を長距離伝播するデカメータ電波が Multi-Path 効果によりパルス性を失うことを避けることと、周期の早いパルスが銀河系プラズマの分散効果によってパルス性を失うことを補償する目的をもっている。本研究で使用しているフィルター群は中心周波数 950Hz から 1200Hz にいたる6チャンネルで各チャンネルはアクティブ・フィルターを採用し 50Hz の帯域幅となっている。データ処理に際してはそれぞれのチャンネルからのデーターを独立のものとして扱うことが出来る。

2. 4 データ処理システム

1998 年頃より IT 革命の結果がコンピューター利用の世界にも顕著になってきた。Window の登場は様々なアプリケーションを生みソフトウェアのみならずコンピューターで制御される諸機器の構成性能にも少なからざる影響を及ぼしてきた。これらの環境変化を受けて、本研究でもデーター処理システムと方式を Pc98 系とスーパーコンピューターの組み合わせから Windows への切り替えに入った。まず、スーパーコンピューターによる処理部分を通常のデスクトップ・コンピューターに切り替えることから開始している。デスクトップ・コンピューターのクロックは最近 3 GHz 近くに上がり、かなり高速化しているが、まだ、スーパーコンピューターに比べ処理能力は低い。しかし、デスクトップ・コンピューターを専用機として常時作動することによってほとんど同等の仕事量を果たしている。そこで、デスクトップ・コンピューターのメリットは詳細処理、結果の表示、転送、等 Windows の豊富なツールを利用できる点にある。現在全システムを Windows による制御に切り替え中であるが、その間データー変換が重要になっている。

3. データ処理法の基本

銀河中心からのデカメータ電波パルスの探索にあたっては二段のステップを踏んでいる。即ち、パルス周期を探索するため Fourier 変換を行い、確認された周期にたいして、Box-Car 法を適用し潜在するパルス波形をうる。すでに触れてきたようにパルスレベルは背景となるデカメータ電波の電力にして 1/1000~8/1000 程度であり、Fourier 変換では 100 万回の平均そして Box-Car 法では 300 万回から 1000 万回の重ね合わせが必要となる。

3. 1 MEFAM

100 万回以上の平均を求める Fourier 変換法の適用は本研では MEFAM (Mega-times Fourier Analyses Method)とよんでいる。この平均はデーターの時系列に沿って適用している。銀河系中心の探索の場合、具体的には2. 4節で述べたフィルター・バンクからの6チャンネルの信号をサンプリング周期 4 msec で AD 変換しコンピューターにて自乗検波処理を行う。これはサンプリングデータ $D(i, j)$ (ただし i は時系列で j はチャンネル番号 (1-6) を示す) に対し時系列データー $ND(i, j)$ を以下のように求めている。即ち

$$DN(i, j) = \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \sum_{k=i}^{i+5} D(k, j)^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

である。この処理の結果、銀河中心1日分約9時間の観測に対し各 j チャンネルにつき 8,136,000 点の時系列データーとなる。

すでに2. 3節で述べたように位相制御を 0.5sec で行っているので、0.5N (N 任意整数) のアーティフィシャルな脈動を持ち込んでいるため 0.5N に同期する信号を除去する必要がある。このため Fourier 変換に先立って解析周期のウィンドウより速い周期をもつ信号は積分によるフィルターをかける。すなわち近似的に

$$DN(t, j) = DN(i, j) \dots\dots\dots(8)$$

のように連続化して表すと Fourier 変換の対象となる信号 $DF(t, j)$ は

$$DF(t, j) = \left(\frac{1}{T}\right) \cdot \int_{-T}^{+T} DN(t, j) dt \dots\dots\dots(9)$$

となる。従って求めるべき Fourier 変換関数 $F(\omega)$ とは

$$DN(t, j) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \left[\left(\frac{1}{T}\right) \cdot \int_{-T}^{+T} \exp(i\omega t) dt \right] d\omega \dots\dots\dots(10)$$

の関係にあるので、求められる Fourier 関数 $G(\omega)$ は

$$G(\omega) = \frac{\sin(\omega T/2)}{(\omega T/2)} \cdot F(\omega) \cdot \exp[i(-(\omega T/2) + \pi/2)] \dots\dots\dots(11)$$

となる。したがって限界周波数 ω_0 に対し $T < (\pi/2\omega_0)$ の範囲の周期については充分 $F(\omega)$ に近い $G(\omega)$ が得られる。厳密には (9) 式に基づき補正することにより $G(\omega)$ より正しい $F(\omega)$ を得ることができる。

3. 2 Box-Car 法

MEFAM によって決定された周期 T を起点として、時系列データに対し周期 $T \pm \Delta T$ とし、 ΔT を微調整しつつ時系列データを区切って重ねてゆくいわゆる Box-Car 法を適用し、パルス波形を検出する。この場合そのレベルはバック・グラウンドとなる銀河系電波放射レベルに対し、1/1000 から 8/1000 程度となり Box-Car の重ね合わせが 100 万回以上必要となる。また結果の確認には 2 サイクル分をとることにより、S/N が非常に小さな場合でもパルスの存在を確認することが出来る。

4. 観測概要とデータ処理例

4. 1 観測概要

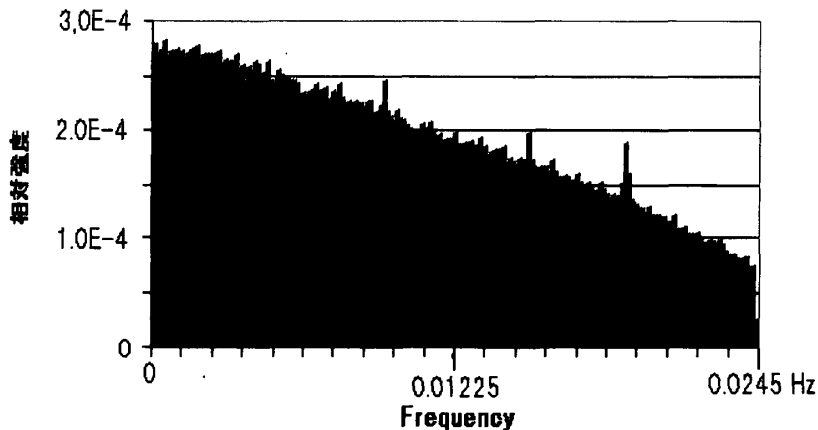
システムの完成後 2001 年 10 月よりアンドロメダ星雲中心部の観測に着手し、2002 年 3 月から 6 月にかけて銀河系中心の観測 2002 年 9 月より再度アンドロメダ星雲の観測そして 2003 年 1 月より三角座星雲の観測に入り、2003 年 4 月から 7 月にかけてはシステム動作の診断をかね、パルサー PSR0329+54 の観測を実施している。ここでは、本論の主題として我銀河系中心部にたいする観測データの処理結果に焦点をおいて述べる。

4. 2 最長周期レンジに対する MEFAM

銀河系中心からのデカメータパルスの最大周期を含む範囲として最小周波数 0.0001225Hz 最大周波数 0.0245Hz を選び分解能 0.0001225Hz で平均 189 万回の場合の MEFAM 解析を行ったがその結果を図 4 に示す。

観測例は 2002 年 3 月 28 日、9 時間にわたり行われ、この結果は(11)式に示される様に本来のスペクトル $F(\omega)$ がフィルター効果を受けた $G(\omega)$ に対応している。したがって (11) 式にしたがって $F(\omega)$ を求め、特に変化分を拡大すると図 5 に示す結果となる。この場合の誤差は 1/1370 であり現れるピークは全て 2 - 3 σ 以上のレベルを持ちそれぞれが意味をもっている。

図5には同時に高調波関係を示すスケールを付しているが Gaa, Gab, 及び Gac のパルスがそれ



ぞれ基本周期 130 ± 2 sec, 104 ± 1.5 sec 及び 52.0 ± 0.7 sec で示されている。これらの結果はスーパーコンピュータの解析の後 PC-98 による Basic によるプログラムによる結果と対応していて、今後新しいコンピューター環境でデータ処理の実施が可能であることを実証している。

なお、パルス周期 T とブラックホール質量 M との関係は 1999 年の結果⁽⁷⁾を修正し、 M を太陽質量を単位とし、 T を sec 単位として表すとき $M=5000T$ となっている。

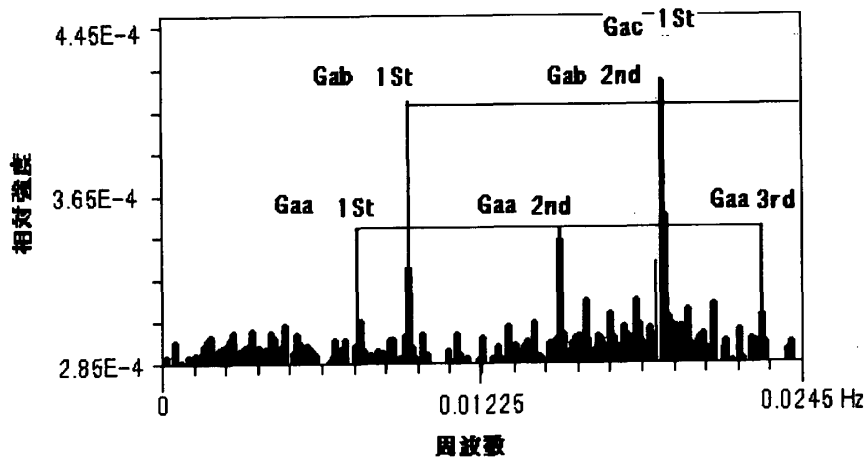


図5 スペクトルの変化部分、高調波関係は直線で結ばれている。

行われた。Gac の場合周期 51.77934sec で 9 時間につき 974,028 回の重畳が可能で、観測は既に述べたように 6 チャンネル独立に行われているため、最終的には 584 万回の Box-Car 集積が行われた。また干渉計追尾方向を銀河系中心を中心として北東、北西、南西、および南東の各方位に $5''$ 角離れた位置に向け Gac のパルス強度変化を求めた。まず全方位したがって 2420 万回の集積による Box-Car 解析の結果を図6に示す。最大レベルは背景銀河デカメータ電波放射の 0.6% であるが分散 σ に対し 12σ を示し、25 万太陽質量を持つ超巨大ブラックホール Gac から放射されるデカメータ電波パルスが明確に存在していることを示している。さらに各方位における Gac からのパルスのレベルをデルタグラフによりプロットすると図7の結果となる。この結果は Gac パルスが銀河中心から到来していること、即ち超巨大ブラックホール Gac は銀河中心に存在することを明確に示している。

図4 MEFAM による周波数分析結果、Galaxy center からのパルス周波数探測に関し最大周期のレンジ $1.225E-4$ Hz、から $2.245E-2$ Hz まで 189 万回の平均解析で分解能は $1.225E-4$ Hz

4. 3 Box-Car 法の結果ーGac の例

MEFAM の結果をうけて、周期を詳細に検索しつつ Box-Car 法を適用してパルス波形を求めるが、ここでは、Gac を例として取り上げる。

Box-Car 解析は 2002 年 3 月 19 日より 4 月 2 日まで 1 日 9 時間当り

全 4 5 時間分について

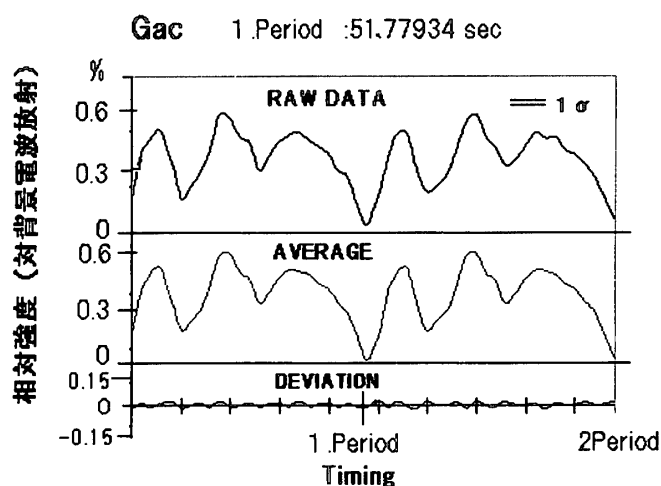


図6 Box-Car 法により求められたパルス Gac、結果は 2420 万回の Box-Car 集積で得られ 12σ の確かさを示す

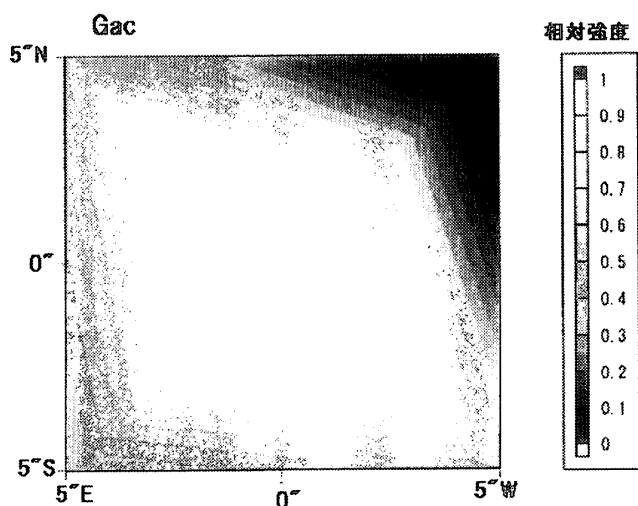


図7 観測された Gac の電波源位置、中心は GalaxyCenter
グレイコードは到来電波強度で最も強い方向に電波源が存在する。

参考文献

- 1) Lynden-Bell, D., and M.J.Rees On quasars, dust and the Galactic centre, Mon.Not.R.Astron.Soc., 152, 461-475(1971).
- 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) Lo, K.Y., and M.J.Clausen, High-resolution observations of ionized gas in the central parsec of the Galaxy: possible evidence for infall, Nature, 306, 647-651(1983).
- 4) Oya, H., and M. Iizima, Clusters 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 Geophys.Journ.(Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser.5), 35, 1-78(1999).
- 5) Oya, H., M.Iizima, A.Morioka, Possible detection of a pulsar of decameter radio waves in the direction of the Galactic center, J. Geomag. Geoelectr., 41, 331-369(1989).
- 6) Oya, H., and M. Iizima, Mapping of the decameter radio sources of Cassiopeia A using a 100km range long-baseline interferometer: verification of a new method of phase calibration of Astron. Soc. Japan, 55, 527-534(2003).

(平成 16 年 12 月 2 日受理)