

Electron dynamics surrounding the X-line in magnetopause-type asymmetric reconnection

*銭谷 誠司¹、長谷川 洋²、長井 嗣信³

*Seiji Zenitani¹, Hiroshi Hasegawa², Tsugunobu Nagai³

1. 自然科学研究機構国立天文台、2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、3. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. NAOJ National Astronomical Observatory of Japan, 2. Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

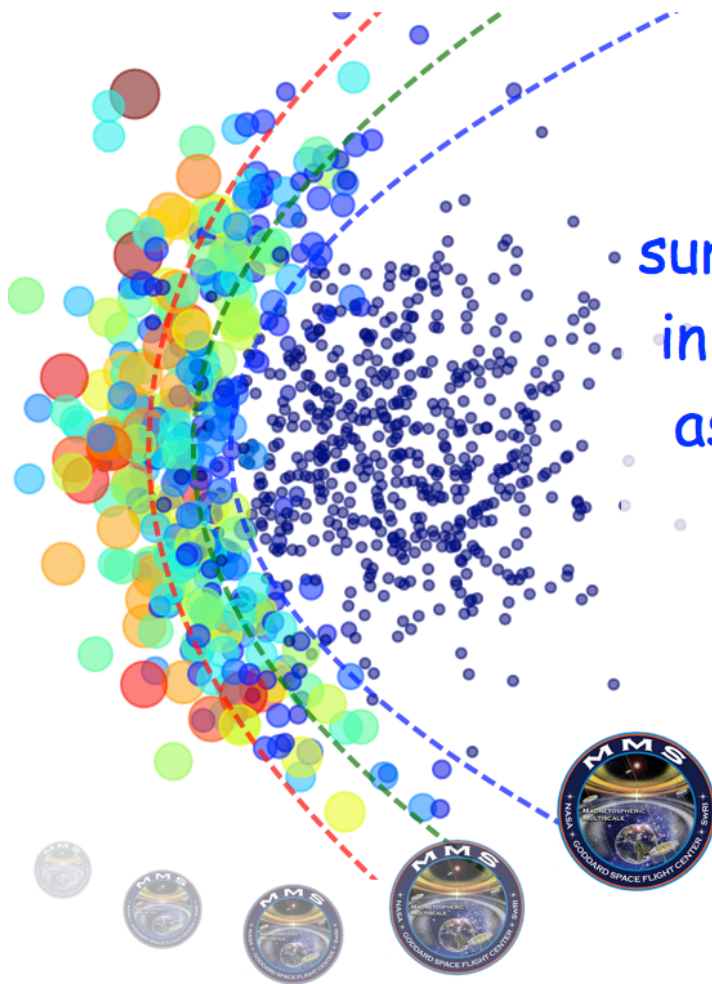
Electron dynamics surrounding the X-line in magnetopause-type asymmetric reconnection is investigated using a two-dimensional particle-in-cell (PIC) simulation. We study electron properties of three characteristic regions in the vicinity of the X-line. The fluid properties, velocity distribution functions (VDFs), and orbits are studied and cross-compared. In the low-beta side of the X-line, the normal electric field enhances the electron meandering motion from the high-beta side. The motion leads to a crescent-shaped component in the electron VDF, in agreement with recent studies. In the high-beta side of the X-line, the magnetic field line is highly stretched in the third dimension. As a result, its curvature radius is comparable with a typical electron Larmor radius. The electron motion becomes chaotic, and therefore the electron idealness is no longer expected to hold. Around the middle of the outflow regions, the electron nonidealness is coincident with the region of the nonadiabatic motion.

Reference:

- Zenitani, S., H. Hasegawa, and T. Nagai, submitted to *J. Geophys. Res.* (MMS special issue)

キーワード：磁気リコネクション、マグネトポーズ、粒子ダイナミクス

Keywords: magnetic reconnection, magnetopause, particle dynamics



Electron dynamics
surrounding the X-line
in magnetopause-type
asymmetric magnetic
reconnection

Seiji ZENITANI

with H. Hasegawa, T. Nagai

Triggering fast tearing: from MHD to kinetic effects

*Marco C M Velli¹, Fulvia Pucci², Anna Tenerani¹

1. University of California Los Angeles, 2. NIFS-Princeton

One of the main questions about magnetic reconnection concerns how this mechanism may account for fast magnetic energy conversion to kinetic and thermal energies, resulting in explosive events in astrophysical and laboratory plasmas. Over the past decade progress has been made on the initiation of fast reconnection via the plasmoid instability and what has been called "ideal" tearing, which sets in once current sheets thin to a critical aspect ratio: as shown by Pucci and Velli (2014) once the thickness reaches a scaling $a/L \sim S^{-1/3}$, the time scale for the instability to develop becomes of the order of the Alfvén time and independent of the Lundquist number. However, given the large values of the Lundquist number in natural plasmas, this transition might occur for thicknesses of the inner, singular layer, approaching the ion inertial length. When this occurs, Hall currents produce a three-dimensional quadrupole structure of magnetic field, and the dispersive waves introduced by the Hall effect accelerate the instability. Here we present a linear study showing how an "ideal tearing mode" is achieved when Hall effects are taken into account, including scaling laws for sheet aspect ratios and growth rates. We show that for an appropriate scaling of the aspect ratio in the parameter space $(S, d_i/L)$, the instability develops on ideal timescales and the associated growth rate does not depend on the parameters, suggesting a revision of the phase diagrams describing different regimes for magnetic reconnection in space and laboratory plasmas.

Keywords: Plasma, Magnetic Reconnection, Heliosphere

Macroscopic quasilinear kinetic model for electrons and protons instabilities in homogeneous and in inhomogeneous solar wind plasmas

*Muhammad Sarfraz¹, Peter H. Yoon^{2,3}

1. Department of Physics, GC University Lahore, Katchery Road, Lahore 54000, Pakistan, 2. University of Maryland, College Park, Maryland 20742, USA, 3. School of Space Research, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi 446-701, Korea

Solar wind species like electrons, protons and alpha particles are detected to possess temperature anisotropies with respect to ambient magnetic field. Microinstabilities driven by these anisotropies are responsible for an upper check of higher values of temperatures at different radial distances of solar wind. For a homogeneous and non-collisional medium, we employed a macroscopic quasilinear kinetic model to display asymptotic variations and saturations of temperature anisotropies and wave energy densities for electromagnetic electron cyclotron (EMEC) and electron firehose (EFH) instabilities. A bi-Maxwellian form of particles distribution adopted all the time except that temperatures may vary in time t . We showed that, in $(\beta_{\parallel}, T_{\perp}/T_{\parallel})$ phase space, the saturations stages of anisotropies associated with core and halo electrons lined up on their marginal stability curves for EMEC instability. For case of EFH instability, the electrons and protons dynamics saturated at firehose and proton cyclotron marginal stability curves, respectively. Next, we interpreted the outstanding issue that most of observed proton data resides in nearly isotropic state in phase space. Here, in quasilinear frame-work of inhomogeneous solar wind system, we formulated a set of self-consistent quasilinear equations to show a dynamical variations of temperatures with spatial distributions. On choice of different initial parameters, we showed that, interplay of electron and proton instabilities provided an counter-balancing force to slow down the protons away from marginal stability states. Our present approach may eventually be incorporated in global-kinetic models of the solar wind electrons and ions.

Keywords: solar wind, instabilities

経路積分を使った相対論的拡散の計算

Proper time Path Integral for Relativistic Diffusion

*中村 匡¹

*Tadas Nakamura¹

1. 福井県立大学

1. Fukui Prefectural University

時間に関して一回微分の拡散方程式の解は、速度が無限大の成分をもっていることが知られている。たとえば、一番単純なガウス型の解になるような方程式の場合、 $t=0$ での初期条件が δ 関数でも、 $t>0$ では無限遠でゼロにならない成分がでてくる。非相対論の計算では、多くの場合これは無視できるくらい小さい値なので無視してよいが、相対論では因果律をやぶることになるので問題になってくる。例えば、このタイプの拡散方程式の解には、物理的にはありえない増大するモードがあらわれることが報告されている。

速度無限大の成分が必要なのは、マルコフ的酔歩問題では N ステップの移動距離が一ステップの距離の \sqrt{N} のオーダーでしか増えないのが理由である。この状況で有限時間で有限の移動距離を確保するためには、一ステップで無限大移動しなければならないことになる。したがって、マルコフ的（時間に対して一回微分）な方程式では因果律をやぶることは不可避である。

この問題を克服するため、Israel & Stewart (1970) は時間に関して二階微分の項を含む理論を提唱した。この路線はその後因果的熱力学 (Causal Thermodynamics) と呼ばれ、21世紀に入ってから多くの論文が書かれている。しかしながら、因果的熱力学での2次以上の時間微分の項は物理的な散逸過程の考察から得られたものではなく、無限大の速度をおさえるために技術的に導入されたものであるため、得られた解が物理過程を正しく記述している保証はない。たとえば、Israel & Stewart の理論から熱伝導方程式を導出すると、いわゆる電信型の方程式になり、伝搬速度が大きくなると波動方程式に漸近して速度の上限を保証するが、波動方程式が散逸をあらわしているとは言えない。

この困難をの解決するため、本研究では固有時を使って粒子の拡散を計算する。たとえば、時空間 (x,t) の二次元平面内を固有時 τ に沿って拡散する粒子の分布 $f(x,t;\tau)$ を考えよう。この二次元時空間内での拡散は、 t 方向には前進しかしないので、普通の拡散方程式の形にはかけない。そこで、経路積分の表現を利用し、一ステップごとに energy-shell の条件を δ 関数の形ではさむことによって時間発展を追った。量子力学の経路積分では、 δ 関数による制限がゴースト粒子を生むなど難しい問題があるが、拡散方程式の場合は簡単な表現にまとめられることがわかった。

キーワード：相対論的拡散、経路積分、固有時

Keywords: Relativistic Diffusion, Path Integral, Proper time

Cyclic self-reformation of perpendicular shocks in two-dimensional particle-in-cell simulation

*梅田 隆行¹、大長 勇輝¹

*Takayuki Umeda¹, Yuki Daicho¹

1. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

1. Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

The cyclic self-reformation of perpendicular collisionless shocks was first identified in one-dimensional (1D) kinetic particle-in-cell simulations. In early studies, the reformation was defined as the cyclic accumulation and release of ions. The release ions toward upstream (ion reflection) takes place periodically at the ion gyro period of the downstream, which forms the shock foot region. Later, the cyclic self-reformation of perpendicular shocks was also identified in two-dimensional (2D) full particle-in-cell simulations with a simulation domain shorter than the ion inertial length in the shock tangential direction. However, some of recent 2D full particle-in-cell simulations with a large simulation domain argued against the evidence of the cyclic self-reformation of perpendicular shocks due to rippled structures at the shock front. In the previous studies, the cyclic self-reformation was identified from the cyclic oscillation of the magnetic field at overshoot, since the magnetic field and the ion density are well correlated in 1D simulations and 2D simulations with a small simulation domain. In the present study, we analyze ion particle data obtained from large-scale 2D full particle-in-cell simulations with different ion-to-electron mass ratio, and discuss the effect of the mass ratio to the evidence of the cyclic self-reformation of perpendicular shocks.

キーワード：無衝突衝撃波、粒子シミュレーション

Keywords: collisionless shock wave, particle-in-cell simulation

宇宙線の異常輸送拡散モデル

Anomalous convection diffusion model of cosmic rays

*羽田 亨¹

*Tohru Hada¹

1. 九州大学大学院総合理工学研究院流体環境理工学部門

1. Earth System Science and Technology, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

乱流場中の宇宙線（高エネルギー荷電粒子）輸送は、天体物理学や数理科学の観点から重要な問題である。特に、乱流が大振幅の磁気流体乱流の場合、非ガウスの統計性質を持った輸送があらわれる。このような異常輸送を表現する自然な数理モデルとして、時間微分または空間微分項にフラクショナル（分数）微分を含んだ輸送拡散方程式を考えることができる。講演ではまず、フラクショナル微分および積分について簡単に紹介し、その数値評価の方法を説明する。次に、重要な応用として、フラクショナル衝撃波拡散方程式の数値解を求め、準拡散および超拡散を行う粒子によるテスト粒子計算の結果と比較議論する。本モデルが適用可能な他の高エネルギー天体現象についても言及する。

キーワード：宇宙線、拡散

Keywords: cosmic rays, diffusion

球領域内部での流れを伴うMHD緩和 MHD relaxation with flow inside a sphere

*山本 晃平¹、陰山 聡¹

*Kohei Yamamoto¹, Akira Kageyama¹

1. 神戸大学

1. Kobe University

完全導体の球状容器内部に閉じ込められたMHD (Magnetohydrodynamics, 磁気流体力学) 流体の緩和現象は古くから研究されてきた。磁気ヘリシティ保存という拘束条件の下で磁気エネルギーが最小となるというWoltjer-Taylor理論によれば、緩和状態は(電流と磁場が平行な)スフェロマクと呼ばれるforce-free状態である。スフェロマクが安定な磁場配位であることは実験で確認されているだけでなく、その安定性を利用した様々なプラズマ実験(例えばリコネクション実験)も行われている。しかし、Woltjer-Taylor理論では最終状態での流れのエネルギーが無視できることが仮定されている。我々はこの仮定が成り立たない場合を探求するため、流れがあるMHD緩和状態がどのようなものかを球を計算領域としたMHDシミュレーションで調べた。基本方程式は圧縮性のMHD方程式である。原点を含む全球でのMHD方程式の時間発展を、最近開発したYin-Yang-Zhong格子 [Hayashi & Kageyama, JCP, 2016] を使った数値的に追跡した。古典的なMHD緩和のシミュレーションと本シミュレーションの最も大きな違いは、本研究では(原点も含めた)全球ジオメトリでのMHD方程式を高解像度で(すなわち低粘性率で)計算できるという点である。一般的なスフェロマク解は、半径方向の固有関数(球ベッセル関数)の固有値 n と緯度経度方向の固有関数(球面調和関数)の固有値 (l, m) で特徴付けられる。本研究では、高次モード $l, m > 1$ に弱い摂動を加えたものを初期条件としてその時間発展を追跡した。なお、初期の圧力、密度は一様、速度場はゼロとした。不安定性のため、高次モードのスフェロマク磁場は計算直後に崩れ始め、流れが生じる。流体の粘性が十分低いため、この流れは長時間(散逸時間)維持される。この(準)定常状態における流れの運動エネルギー E_k は、磁気エネルギー E_M と比較してそれほど大きくない [$E_k/E_M = O(10^{-3})$] もの、緩和状態における流れの存在は無視できないことがわかった。特に、緩和後の電流と磁場が平行ではない、つまりWoltjer-Taylor理論が予測するforce-free状態ではないことがはっきりした。講演では、様々な初期条件からの緩和過程と緩和後の構造について報告する。

キーワード : 磁気流体力学、緩和現象、Yin-Yang-Zhong格子

Keywords: magnetohydrodynamics, plasma relaxation, Yin-Yang-Zhong grid

定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの遷移に関するシミュレーション研究

Simulation study of transition from steady Petschek reconnection to dynamical Petschek reconnection

*與那覇 公泰¹、草野 完也¹、柴山 拓也¹

*yonaha hiroyasu¹, Kanya Kusano¹, Takuya Shibayama¹

1. 名古屋大学宇宙地球環境研究所

1. Institute for Space-Earth Environmental Research

磁気リコネクションは磁気エネルギーを熱、運動エネルギーに変換する過程である。しかし、古典的な定常リコネクションモデル（Sweet-Parkerモデル）では、太陽コロナで観測された高速リコネクションを説明することができない。定常的なペテックモデルリコネクションは高速リコネクションを説明することはできるが、電流シート中に異常抵抗を局在化させる必要があることが指摘されている。一方、抵抗が空間的に一様な場合、薄い電流層の不安定性によっていわゆるプラズモイドリコネクションが生じることで、リコネクションが高速化する。近年、Shibayama et al. (2015)は、一様抵抗におけるプラズモイドリコネクションが、スローショックを伴った新しいタイプの高速リコネクションとして現れることを見出し、「動的ペテックリコネクション」と呼んだ。我々は、空間的に局在化した異常抵抗の大きさに対するリコネクションの依存性に着目し、定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの遷移を調べる目的で、二次元MHDシミュレーションを行った。その結果、定常ペテックリコネクションと動的ペテックリコネクションの間に、振動するペテックタイプの新たなリコネクション解があることを見出した。本研究ではその振動場を電流層に対する対称性から二つの異なるパリティ成分に分離することで、振動するペテックリコネクションの磁場構造を解析し、定常ペテックリコネクションから動的ペテックリコネクションへの解構造の包括的な理解を試みる。

キーワード：磁気リコネクション、ペテック・リコネクション、シミュレーション、スローショック

Keywords: magnetic reconnection, Petschek reconnection, simulation, slow shock

Persistence of Precursor Waves in Two-dimensional Relativistic Shocks

*岩本 昌倫¹、天野 孝伸¹、星野 真弘¹、松本 洋介²

*Masanori Iwamoto¹, Takanobu Amano¹, Masahiro Hoshino¹, Yosuke Matsumoto²

1. 東京大学大学院理学系研究科、2. 千葉大学大学院理学研究科

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Graduate School of Science, Chiba University

The origin of high energy cosmic rays ($>10^{15.5}$ eV) has not been fully understood, and the acceleration mechanism is still controversial. Recently Chen et al. (PRL, 2002) proposed the particle acceleration by the large-amplitude Alfvén waves at gamma-ray bursts as a model of the generation of ultra-high energy cosmic rays ($>10^{18}$ eV), based on the wakefield acceleration mechanism which was initially proposed by Tajima and Dawson (PRL, 1979) in the context of laser-plasma interactions in the laboratory. The wakefield acceleration in laboratory is induced by an intense laser pulse (or transverse electromagnetic waves) propagating in a plasma. The mechanism may also operate in relativistic shocks in nature because it is known that large-amplitude electromagnetic precursor waves are excited by synchrotron maser instability driven by the particles reflected off the shock-compressed magnetic field in relativistic shocks (Hoshino and Arons, PoP, 1991). In fact, Hoshino (ApJ, 2008) demonstrated the generation of the non-thermal electrons by the wakefield induced by the ponderomotive force of the electromagnetic precursor waves in relativistic magnetized shocks by means of one-dimensional Particle-In-Cell (PIC) simulation.

The wakefield acceleration has been discussed only in one-dimensional shocks so far. It is not known very well whether or not the same mechanism can operate in more realistic multi-dimensional systems. In multi-dimensional shocks, the inhomogeneity may appear in the transverse direction of the shock, and the waves emitted from different positions at the shock may overlap with each other. Consequently, the wave coherency which is essential for the ponderomotive force may be broken and the wakefield acceleration may not occur. Another possible problem is the competition between the synchrotron maser and Weibel instability. The Weibel instability occurs near the shock front due to effective temperature anisotropy generated by the reflected particles in the shock transition region. Since both the instabilities are excited from the same free energy source, the efficiency of the precursor wave emission may be affected or even completely shut off.

To solve these subjects, we investigated in this study the properties of the precursor wave emission in relativistic shocks by using the two-dimensional PIC simulation. Since the growth rate of the synchrotron maser instability at high harmonics are significantly large, the precursor waves are high-frequency electromagnetic waves and thus may easily be damped. Therefore, our simulations were performed with high spatial resolution to resolve the precursor waves well. We observed that large-amplitude, coherent precursor waves were excited in two-dimensional shocks, and found that the amplitude of the precursor waves was large enough to induce the wakefield acceleration even if the Weibel instability occurs. In addition, the amplitude of the precursor wave remains finite and has reached a quasi-steady state by the end of the simulation. In this presentation, we quantitatively evaluate the efficiency of the precursor wave emission in both one-dimensional and two-dimensional shocks, and then discuss the possibility of the wakefield acceleration model for the production of non-thermal electrons in an astrophysical shock.

キーワード：粒子加速、無衝突衝撃波、宇宙線

Keywords: acceleration of particles, collisionless shock, cosmic rays

デカメータ電波パルスの観測に基づき我が銀河系中心に発見された巨大ブラックホール・バイナリーの存在の確証

Verification of Super Massive Black Hole Binaries Discovered at the Center of Our Galaxy by Observations of Decameter Radio Wave Pulses

*大家 寛¹

*Hiroshi Oya¹

1. 東北大学理学研究科地球物理学専攻

1. Department of Geophysics Graduate School for Science Tohoku University

序 本研究では主として、東北大学デカメータ電波長距離干渉計システムを用い、我銀河系中心部のデカメータ電波パルス観測を実施してきていて、1984年、電波源が巨大ブラックホールにあることを認めた。その後1999年の時点では、その周期が最長130secから最短0.3secに至る23系列、したがってほぼ周期に比例する質量比をもつ巨大ブラックホールから中間質量ブラックホールにいたる、23個以上のブラックホール群を提唱することもあった。2010年以降再観測を実施し、特に、2014年からデジタル方式干渉計へと改良し2016年には本格的追試観測に入り、周期20sec以上のパルス電波源と対応する巨大ブラックホール群について精査した。その結果従来の提言を大幅に修正することとなった

2. 観測 今回、東北大学長距離基線デカメータ電波干渉計観測は、2016年2月2日より28日にわたる、銀河中心部の出現前と2016年3月15日から6月30日にわたる銀河中心部の直接観測期間に実施した。干渉計の観測点はYoneyama, Zao、およびKawataniの3局よりなり、最長83km,最短44kmの3基線が設定されるが、21.860MHzにて全帯域幅1kHzで観測された受信信号は仙台局にテレメータ伝送される。各信号は900Hz, 1000Hz および1100Hzにおいて帯域幅100Hzの狭帯域信号に分割され、各々サンプリングレート3 kHzでA/D変換された後干渉データとして処理される。

3. パルス周期探索のためのFFT解析 干渉計処理後のデータは到来方位決定のため方位検出用テンプレート・フリンジと相関を取ったのち周期10secから8200secにわたりFFT解析を実施し、背景雑音の0.1%から1%のパルス成分を抽出している。解析結果から対象とするパルス群は銀河系中心部の出現と明確に対応し ± 0.5 度の精度で我が銀河系中心に源を持つことが確証された。パルス群を示すスペクトルは基底スペクトルの中心がGaaに対する156.6secとGabに対する130.8secにあり、それぞれ第3高調波まで展開していてそれぞれに2200secの周期変調(周波数変調)があり、中心スペクトルの上下にそれぞれ(1/2200)Hzの周波数変調を反映する3~5個の側帯波スペクトルの存在を示して、GaaとGabは互いに2200secで公転するバイナリーを構成していると結論された。

4. シミュレーション結果との対比 ここで、本研究では、円軌道視線速度を光速の16%と仮定しGaaおよびGabは同レベルの強度で、それぞれの基底スピン周期から、第2、第3高調波までのパルス電波を放射するとした正弦波群からなる関数に対しFFT解析を試みたが、シミュレーション結果と観測データのFFT解析結果は良く一致した。この結果は従来5組のそれぞれ異なる周期変動を持つバイナリー系としてきた仮定が大幅に修正され、巨大ブラックホール・バイナリーのうち最大級の1対のみ存在し、その他には中間質量ブラックホールが存在するという結果となった。

5. 同期相関解析(Box Car法解析)によるパルス波形および軌道運動の確認 FFT解析で得られたスペクトルによって示される周期を起点にその変化率 4×10^{-5} のステップで周期探索をしつつ干渉計出力の時系列

データに対し周期同期相関法でパルス波形の検出を行った。本研究ではGaaおよびGabの公転運動に伴って起こるドップラー効果に基づく周期変動に同期した周期変動型のBox Car法を新たに開発して実施している。従って完全な同期相関を実現するにはGaa及びGabの固有スピン周期の探索と並行して公転周期、軌道運動速度、公転軌道上の位置情報（周期変動関数の位相）を探索する必要がある。解析の結果、公転周期のより詳細な周期は2205secで公転軌道は円軌道に近く観測されるGaaおよびGabに対し観測される電波源位置は赤道域を中心とする低緯度とされるが、直接可視領域と共役的にブラックホールの裏側が同時観測されることが判明した、この裏側に出現する共役点は自転するKerブラックホールの周辺を取り巻くErgo-sphereの回転空間においてRay Pathがスパイラル状に曲げられることによって生ずる現象として理解される。

6. 結論 本研究の結果、従来報告してきた5組以上のブラックホール・バイナリー群の存在は否定され、これまでGaaとGabと命名してきた1対のブラックホール・バイナリーの存在に収斂することが判明した。得られたパラメータにKepler-Braheの法則を適用するとGaa,およびGabの公転速度が0.16cおよび0.19cの場合質量はそれぞれ168万および140万太陽質量となる。

キーワード：ブラックホールバイナリー、銀河中心、デカメータ波電波
Keywords: Black Hole Binary, Galaxy Center, Decameter Radio Wave