

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05075

研究課題名(和文)階層的三体系からの重力波

研究課題名(英文)gravitational waves from hierarchical triple systems

研究代表者

瀬戸 直樹 (Seto, Naoki)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：80462191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：階層的三体系に対する永年摂動論の効果の研究の柱に据えて、銀河中心ブラックホール周りの星団を想定し、第2の巨大ブラックホールが断熱的に落下してくる状況考えた。系の物理効果を反映した競合する三項からなるハミルトニアンを用いて解析的にも研究を進めた。計画の初期段階で数値的に発見した星の離心率等の特異な遷移、およびこの遷移が軌道要素の初期条件にきわめて敏感であることに対して説明を与えた。具体的には断熱不変量を援用して、位相空間および個々の軌道要素の時間発展を追い、発見した特異な現象がseparatrix通過時の確率分岐によるものであることを突き止めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

歴史的な重力波直接観測が成功して今後はSN比の高いデータも取得され、重力波天文学が急速に進展していくことが期待される。コンパクト連星は引き続き重要な重力波源であると考えられるが、3体目が付随していた場合、系の進化は複雑かつ豊かなものになる。本研究計画はこのような3体系を扱うための基礎となる研究成果を生み出しており、高い学術的価値を持っている。またSchellingポイントの議論をはじめ境界領域への波及効果も期待することができる。

研究成果の概要(英文)：I studied the secular perturbation effects on hierarchical three-body systems a. as a concrete astrophysical system, I took a cluster around the galactic center black hole. I analyzed the situation where the second massive black hole is adiabatically infalling. The research was also conducted analytically using a three-term Hamiltonian reflecting the physics of the system. We provided an explanation for the singular transitions of the eccentricity of the inner stars, which were numerically discovered at the early stages of this project. This transition is extremely sensitive to the initial conditions of orbital elements. I used the adiabatic invariant to follow the time evolution of individual orbits in the phase space. an I found that the strong dependence on the initial conditions was due to the probabilistic bifurcation at the time of the passage of separatrix.

研究分野：重力波

キーワード：重力波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

LIGO や Virgo をはじめ海外の大型地上干渉計のアップグレードが間もなく終了することが予定され、数年以来に重力波の直接検出が十分に期待できる状況であった。重力波信号に織り込まれている様々な物理効果を予言し、観測データから効率よくそれらを抽出する手法の開発が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、階層的三体系における内連星の重力波放出による進化を多角的に探究することを目的としている。具体的には数値実験および伝統的な天体力学的手法を用い、内側のコンパクト連星の軌道要素の進化を多様な初期条件に対して解析し、重力波形上に階層的三体系の効果がどのように現れるかを明らかにする。次に必要なデータ解析法、付随する電磁波対応天体現象など関連する問題に対して様々な観点から検討を加えることを目的とする。

## 3. 研究の方法

申請者が開発したポストニュートンコードを用いて様々な数値実験を行い、興味深い天体力学的現象を探る。次に観測された現象に対して本質を保ったまま極力単純化するモデルを構築し、系のより深い理解を目指す。

関連する問題に関しては重力波観測、データ解析法の進展を追いつつ、マルチメッセンジャー天文学も視野に入れて新規の切り口の提案を目指す。

## 4. 研究成果

銀河の中心には大質量ブラックホールが広く観測されているがその周りに存在するコンパクト星団は力学的にも興味深く、また潮汐破壊現象や重力波源の生成などにも深く関与するシステムである。銀河が合体した後それぞれの銀河の中心に存在するブラックホールが適当な時間において合体するものと考えられている。この合体に伴う上記星団の進化は天体力学的の観点から、同時に天文観測との関連においても特に関心が持たれてきた。この研究計画ではまず論文において二つの巨大質量ブラックホールとその一方を回る一つの星から構成される階層的な3体系に対してポストニュートン展開に基づいた直接三体計算を行った。ブラックホール間の距離は内軌道の永年摂動的なタイムスケールと比べて十分ゆっくり縮めていった。この計算途上に、図 1A において例示したように、軌道要素が急激に時間変化する現象を数値的に発見した。ここで上段は内軌道の離心率を示しており、下段は内軌道の近点指数を示している。

この興味深い現象を説明するために我々は代表的な物理効果を取り入れたハミルトニアンを構成した。このハミルトニアンは通常古在機構で議論されている外天体起源の四重極項、内側のブラックホールの相対論効果を反映した1次のポストニュートン効果項の二つから構成されている。

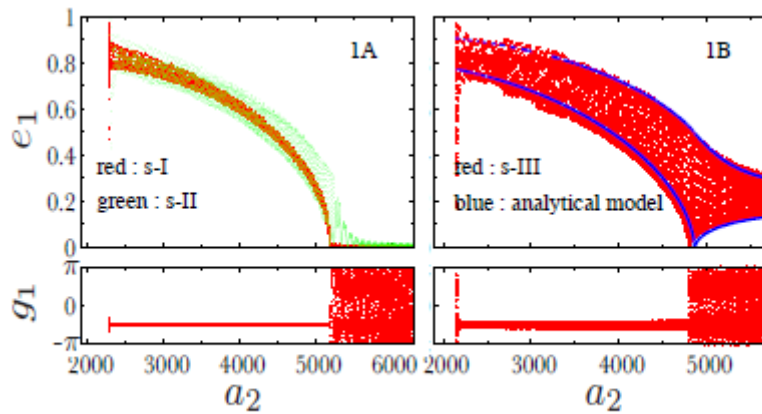


図1 ブラックホール連星間の距離  $a_2$  を縮めた時に見られる内軌道要素の時間進化。初期の内軌道の離心率は s-I, II では 0, s-III では 0.3 に設定している。下段は近点引数を表している。右側の図の青い線は解析モデルの予言を示している。

ブラックホール間距離の断熱的な変化を解析的に取り扱うために我々は断熱不変量に注目した。そうして内軌道要素が位相空間上でどのように進化していくかが幾何学的に追跡した。ここでポイントとなったのはハミルトニアンの中の二つの効果の競合によって 図 2 に示したように位相空間の構造が時間とともに大きく変わっていく点である。とりわけ注目すべきなのは不動点や分岐線の振る舞いである。パラメーターによっては図 2 で示したようにある特定の時刻に位相空間上で回転部分が消滅し、全領域が稗動的な軌道を示すようになった。これが数値的に観測された興味深い力学的な進化と深く関連しておりまた重力波源や潮汐破壊現象の起点となる可能性も存在している。

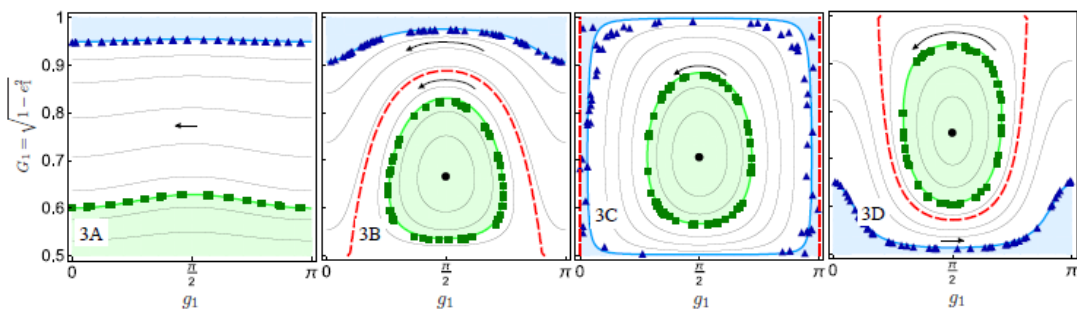


図 2 外軌道の縮小に伴う内軌道の位相空間の変化。実線はハミルトニアンの等高線を表している。点線は分岐線を示している。青い領域と緑色の領域は異なる初期条件のサンプルを示している。分岐線を通る時以外は断熱不変量が保存されるために位相空間上の面積が一定となる。3 番目の図ではそれ以外の図の上下においてみられる回転領域が消滅しており、全軌道が中心の安定不動点の周りに稗動している。

論文 においてはブラックホールの周りの星団自身が作るポテンシャルの効果は取り入れられていなかった。上述の位相空間の特異な振る舞いは ハミルトニアンが非常に単純な構造を持つことを反映している可能性があった。これを受けて論文 ではこのポテンシャルの効果も新

たなハミルトニアンとして取り込んだ。そうして正準方程式を数値的に積分して軌道要素の長期的な時間進化を観察した。そして、事前に予想していなかったことであるが軌道要素の進化が初期条件に非常に強く依存することを発見した。このメカニズムの解明が次の研究テーマとなった。解析的な道具としては論文と同様に位相空間の詳細な構造解析とともに、断熱不変量を利用し幾何学的に系の時間発展を捉えることにした。

この結果、中心部分の秤動領域の面積変化率と上下の回転領域の面積変化率が重要な役割を果たしていることが分かった。前者は常に増大するのであるが、後者のうち一方が増大する場合、分岐点通過時に軌道は確率的な分岐をすることが可能になる。この結果として数値実験で見られた強い初期条件依存性が発生したことが理解された。

研究期間中の GW 150914 の発見を受けてマルチメッセンジャー関連の検討も行った。特にブラックホール連星の場合、系が非常にシンプルであり、重力波放射によるキックを含めて一般相対論のみを用いて合体後の状態が原理的に精密に予言できる。第三体が主系列星または白色矮星であった場合、キックの向きによってはブラックホール合体後、時間を置いて第三体の潮汐破壊に伴う電磁波信号が観測される可能性がある。第三体の存在やその軌道要素は、ブラックホール連星の中心のふらつきから推定することができる。論文では LISA などの重力波観測からこの潮汐破壊の予言がどの程度の精度でできるか議論した。

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 11 件 )

岩佐真生、瀬戸直樹 Eccentricity boost of stars around shrinking massive black hole binaries, Phys.Rev.D 93, 124024 2015 査読あり

瀬戸直樹 Prospects of eLISA for detecting Galactic binary black holes similar to GW150914, MNRAS, 460, L1, 2016 査読あり

中村卓史 他 Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP, 9. 093E01 2016 査読あり

久徳浩太郎、瀬戸直樹 Concise estimate of the expected number of detections for stellar-mass binary black holes by eLISA MNRAS, 463, 2177 2016 査読あり

久徳浩太郎、瀬戸直樹 Gravitational-wave cosmography with LISA and the Hubble tension Phys.Rev.D, 95, 083525, 2017 査読あり

瀬戸直樹、久徳浩太郎、 Forecasting Tidal Disruption Events for Binary Black Holes with an Outer Tertiary, Phys.Rev.Lett, 118, 151101, 2017 査読あり

岩佐真生、瀬戸直樹 Probabilistic eccentricity bifurcation for stars around shrinking massive black hole binaries MNRAS 472 1600, 2017 査読あり

瀬戸直樹、久徳浩太郎 Prospects of the local Hubble parameter measurement using gravitational waves from double neutron stars MNRAS 475, 4133, 2018 査読あり

瀬戸直樹 Orbital synchronization capture of two binaries emitting gravitational waves 475 1392 2018 査読あり

西野裕樹 瀬戸直樹 The Search for Extra-Galactic Intelligence Signals Synchronized with Binary Neutron Star Mergers ApJL 862 L21 2018 査読あり

久徳浩太郎 西野裕樹 瀬戸直樹 How to detect the shortest period binary pulsars in the era of LISA MNRAS 483 2615 2018 査読あり

〔学会発表〕(計 2 件)

Search for Extra-Galactic Intelligence Signal Synchronized with a Binary Neutron Star Merger GWADW メリーランド大 2018.12.2

スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(101) :DECIGO のサイエンス 日本物理学会年会 2019 年 3 月 16 日 九州大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 なし

(2)研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。