

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 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：2012～2015

課題番号：24540269

研究課題名(和文) LCGTを使った背景重力波探査にむけて

研究課題名(英文) Searching for gravitational wave backgrounds with LCGT

研究代表者

瀬戸 直樹 (Seto, Naoki)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80462191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：背景重力波そのものに対しては、インフレーション起源の背景重力波から引き出せる情報の検討を行うとともに、ライン重力波の相関解析による検出可能性を調べた。また、これと平行して、背景重力波の発生源となりうる連星系等の進化も解析した。特に、階層的な三体系に注目して、ある種の共鳴状態を通過する際の軌道パラメーターの振る舞いを解析的な枠組みで調べた。連星中性子星に関しては、古在機構による高離心率状態の実現可能性を明らかにすることに成功した。

研究成果の概要(英文)：As for gravitational wave backgrounds, I studied 1) the information that can be extracted from inflation background and 2) possibility of detecting line-like gravitational wave background by the correlation analysis. I also examined astrophysical systems (e.g. binaries) that emit gravitational waves. In particular, I studied hierarchical triple systems.

研究分野：重力波

キーワード：重力波 連星 三体系 宇宙論

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計画がアップグレード中で、日本の大型計画 KAGRA の建設も始まった。

低周波領域ではパルサータイミングアレーの感度の向上が著しい状況であった。

このような状況下で数年以内に重力波の初直接検出が達成されると期待されていた。

2. 研究の目的

KAGRA を含めた地上干渉計のネットワークを用い、特に背景重力波に関してどのようなサイエンスを展開できるか明らかにする。また天体起源の背景重力波の性質に迫るために個々の重力波天体について基本的な特性を明らかにする。

3. 研究の方法

背景重力波探査それ自体を対象にした研究については、解析的なアプローチを主に用い、効率的なデータ解析のため統計的な手法を多用した。

重力波源天体に関しては、ポストニュートン法を用いた直接計算を行うとともに、永年摂動論等天体力学的な手法も援用して系の進化に対してより深い理解を目指した。

4. 研究成果

以下、1) 背景重力波探査そのものに対する研究、2) 重力波源天体に関する研究の二つに分けて説明する。

1) 背景重力波探査に対する研究

宇宙論的な重力波に関しては種々の生成メカニズムが提唱されている。申請者は従来より、特定のモデルに依存しない形で背景重力波検出の可能性を検討するという立場をとってきた。その上で、西澤氏と行った研究[論文雑誌]では、CMB 系に対して周波数空間でライン状に背景重力波が局在していた場合、従来の相関解析法で効率的に検出できるかを研究した。

具体的には図 1 に示した状況を考えた。CMB 静止系に対する速度を $v(t)$ とすると背景重力波のスペクトルは図の角度 θ に依存する。一方、地球の自転により各干渉計に対する重力波の入射は図 1 にあるように時間変動する。

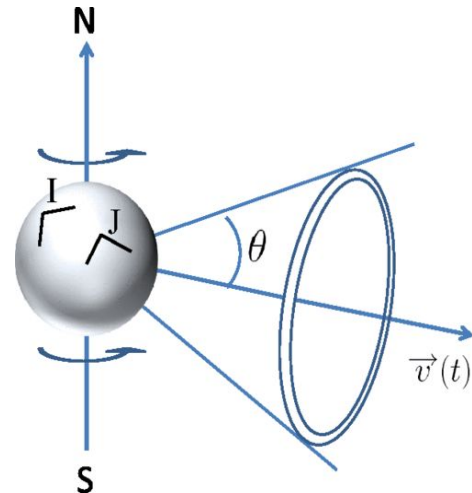


図 1 CMB 静止系に対する地球の並進運動と自転がライン重力波探査にあたる影響

このため、もしライン幅が十分小さいとすると図 2 に示したように相関信号は周波数に強く依存するようになる。また、これまで調べられてきた単純な等方信号の状況と異なり、複素数の期待値をとるようになる。

我々の論文では、ライン重力波の効率の良い検出のためには、この周波数構造をきちんと分解してテンプレートを用いて解析することが不可欠であることを明らかにした。

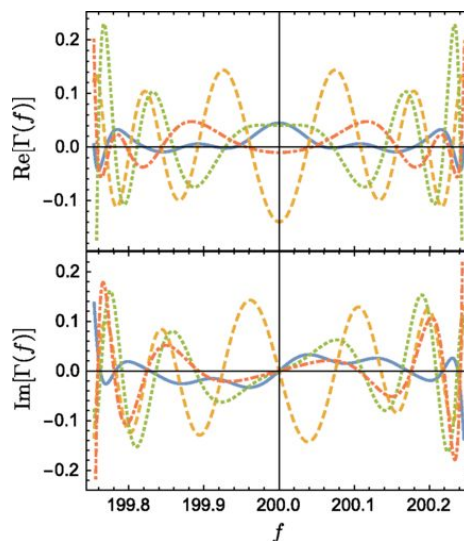


図 2 ライン重力波の相関信号。期待値は一般に複素数となる。

2) 重力波源天体に対する研究

古在機構が天体からの重力波放出を促進する可能性は古くから議論されてきた。これは軌道角運動量の移動にともなう離心率の増加により、近点距離が短くなり、効率的に重力波が放射されるためである。一方、計算の単純化のため、階層的3体の内外の軌道の相互作用を評価する際、それぞれの軌道周期で質量を平均化し、2つのワイヤー同士の相互作用として計算する永年摂動論の手法が従来多用されてきた。この手法は通常の古在機構解析においては効力を発揮してきたが、重力波天体で特に重要となる高離心率状態においては、軌道平均の妥当性が問題になる可能性があった。

[論文雑誌]では、ポストニュートン法による直接三体計算を実行して、平均化を用いたこれまでの計算法との比較を行った。

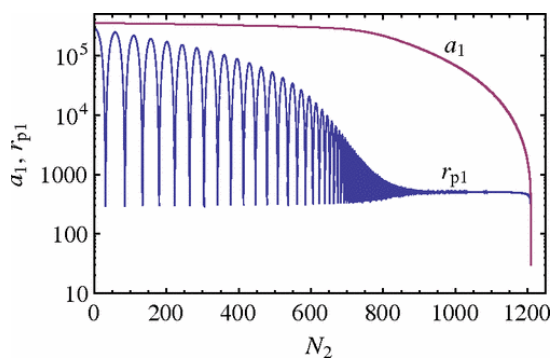


図3 起動平均法による階層的三体系の内連星の軌道長半径 a_1 および近点距離 r_{p1} の進化。後者の振動は古在機構によるもの。

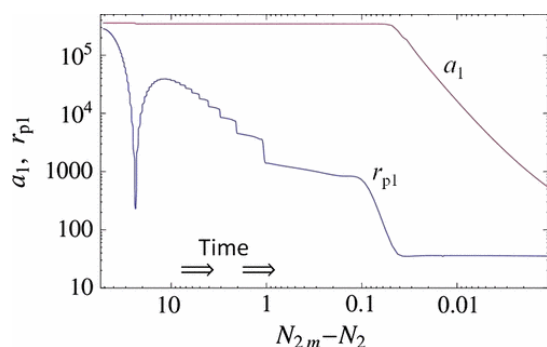


図4 ポストニュートン法による内連星の軌道進化。初期条件は図3と同一。図3に比べて短時間で小さな近点距離が実現され、重力波放出で急速に進化している。

図3, 4にこれらの比較の一部を示したが、軌道平均の妥当性が破れたため、系の進化の様子が大きく異なっていることが明確に示されている。この結果は、地上干渉計で観測する重力波にも影響を与え、従来期待されていたよりも残存離心率が大きくなる可能性が示された。このような重力波の総和によって構成される背景重力波の性質を理解する上でも[論文雑誌]の意義は大きい。

[論文雑誌]では、単純化したハミルトニアンを構成することにより、先行研究で発見された階層的三体系における共鳴現象の解析を行った。

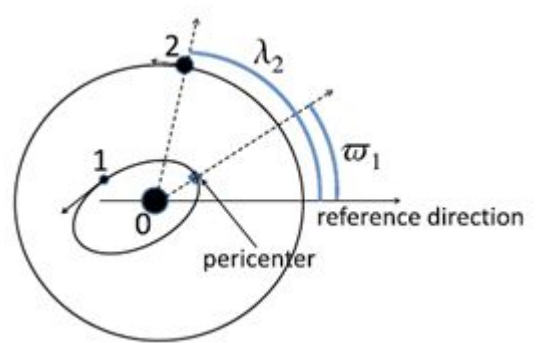


図5 解析した階層的三体系と共鳴角。2と1が共鳴関係にある。

外側の軌道長半径 a_2 をゆっくりと減少させたとき、図6, 7, 8でみられるように内連星の離心率や軌道長半径が興味深い変化を見せた。

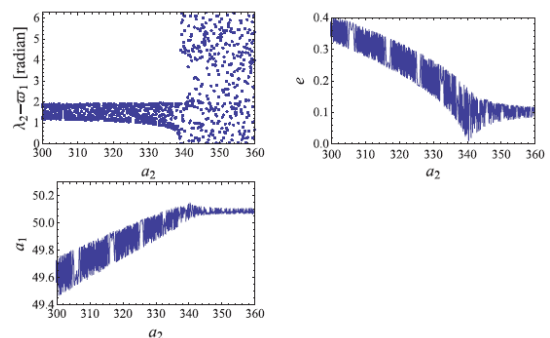


図6 外側の軌道長半径 a_2 の減少に伴う、内連星の軌道要素の進化。 $a_2=340$ 付近で共鳴状態に入ったことが分かる。

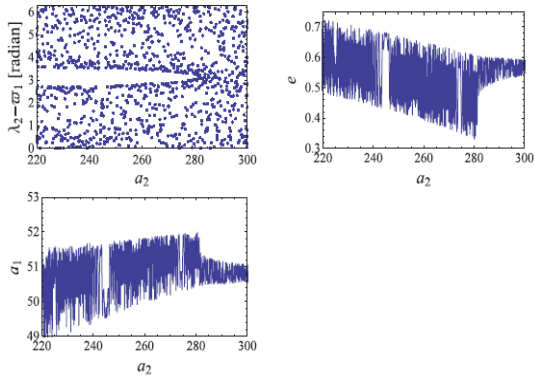


図7 外側の軌道長半径 a_2 の減少に伴う、内連星の軌道要素の進化。 $a_2=280$ 付近で共鳴状態に入ったことが分かる。

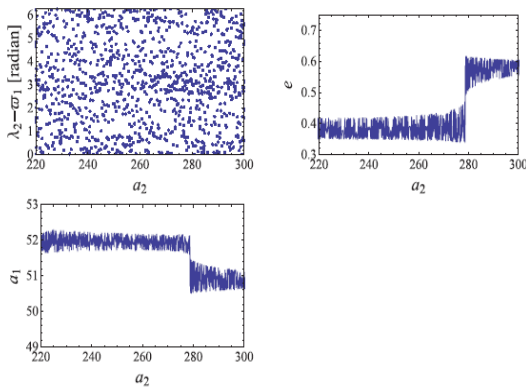


図8 外側の軌道長半径 a_2 の減少に伴う、内連星の軌道要素の進化。図8とわずかに内連星の初期位相が違っている。 $a_2=280$ 付近で共鳴状態に入らず離心率や軌道長半径にとびが発生している。

特に注目すべきは、図7と8の違いである。初期条件がわずかに異なっているだけで、その後の進化が大きく変わっている。

論文では、該当する共鳴項および外側の近点移動に関連する項を含んだハミルトニアンを構成し、解析的にこの進化を調べた。そして、図7,8の差は、位相空間上の separatrix 通過に伴う解の分岐によって引き起こされることを明らかにした。

さらに、断熱不変量を援用して、共鳴状態に捕獲される確率を解析的に見積もり、図9にあるように数値実験の結果とよい一致が得られることを示した。この共鳴状態は、一次の共鳴項と2次の共鳴項が同時に現れてくるが、実は軌道が階層的であるため、通常平均運動共鳴の場合と対照的に、二次の共鳴が支配的である。このことは図9からも読み取ることができる。

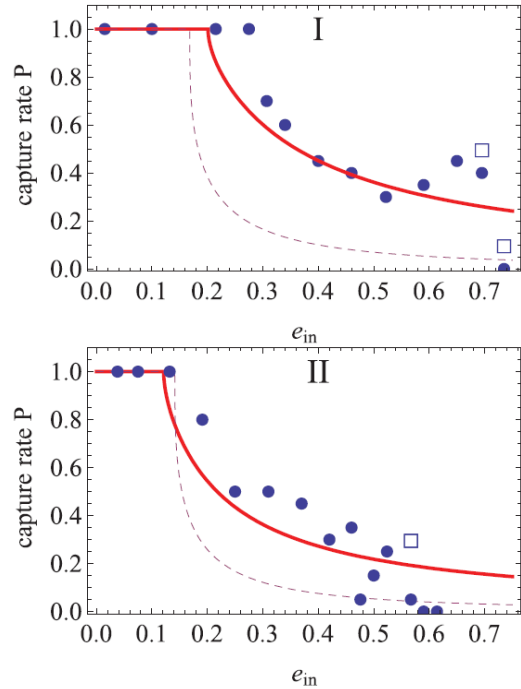


図9 二つの設定I, IIに対する共鳴捕獲確率の解析的予言(実線:二次共鳴項、破線:一時共鳴項)と数値計算の結果()。記号の違いは捕獲時間の差を表している。数値実験は各初期離心率に対して計20回の計算を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

西澤敦、瀬戸直樹、Search for an emission line of a gravitational wave background, Physical Review D, 査読有 91, 2015、122001
10.1103/PhysRevD.91.122001

瀬戸直樹、Highly Eccentric Kozai Mechanism and Gravitational-Wave Observation for Neutron-Star Binaries、Physical Review Letters 査読有 111, 2013、061106
10.1103/PhysRevLett.111.061106

瀬戸直樹、Estimating detection rates of compact binary inspirals with networks of ground-based gravitational-wave detectors、Physical Review D, 査読有 90, 2014、027303
10.1103/PhysRevD.90.027303

瀬戸直樹、Probability distribution function for inclinations of merging compact binaries detected by gravitational wave interferometers、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,, 査読有 446, 2015、2887 - 2894
10.1093/mnras/stu2183

久徳浩太郎、瀬戸直樹、Pre-merger localization of eccentric compact binary coalescences with second-generation gravitational-wave detector networks、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,, 査読有 441, 2014、1934 - 1940
10.1093/mnras/stu698

瀬戸直樹、Analyses on a relativistic hierarchical resonance with the Hamiltonian approach、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,, 査読有 430, 2013、558 - 570
10.1093/mnras/sts656

〔学会発表〕(計 2 件)

DECIGO のサイエンス(69)、瀬戸直樹、日本物理学会年会 2016 年 3 月 23 日 東北学院大学

DECIGO のサイエンス(64)、瀬戸直樹、日本物理学会年会 2015 年 3 月 24 日 早稲田大学

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：

番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
なし

6 . 研究組織
(1)研究代表者
瀬戸 直樹(SETO, Naoki)
京都大学大学院理学研究科・助教
研究者番号: 80462191

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし