

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18740132

研究課題名（和文） 宇宙背景重力波で探る宇宙の進化の探求

研究課題名（英文） Probing Evolution of the Universe with Cosmological
Gravitational wave Backgrounds

研究代表者

樽家 篤史 (TARUYA ATSUSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：40334239

研究成果の概要：本研究課題では、将来的に観測可能となる宇宙背景重力波を用いて、宇宙の成り立ちと進化を探求する新しい研究手段の確立を目指し、基礎的方法論の構築を進めてきた。背景重力波は位相がランダムで、一見すると検出器雑音と見分けがつかない。そのため、複数台の検出器間で相関をとってシグナルを検出する。こうした相関解析を基に、本研究では、背景重力波の全天強度マップの構築、非ガウス雑音にロバストな検出手法、さらに重力波の偏極・偏波特性を調べる手法を開発した。一連の研究成果より、背景重力波そのものの起源の特定や、宇宙初期に生じた様々な現象を解明する上できわめて本質的な方法論が確立できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	210,000	3,110,000

研究分野：観測的宇宙論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論・重力波・宇宙論

1. 研究開始当初の背景

重力波は、アインシュタインの一般相対論によってその存在が予言されている、空間を伝わる時空のひずみで、現在、重力波の直接検出を狙って、日本を始め、世界各地でレーザー干渉計による重力波観測が行われている。重力波には、位相がランダムで特徴的な波形をもたない「背景重力波」と呼ばれるものがあり、その起源は、たくさんの遠方天体から放射された波が重ね合わさってできた

天体起源と、宇宙初期の加速膨張期(インフレーション)や相転移期の高エネルギー現象を通じてできた宇宙論的起源の2種類に大別される。背景重力波は、宇宙の構造・進化と密接に関係しており、宇宙の成り立ちを考える上できわめて重要な情報を含んでいる。また、電磁波に比べて相互作用が極端に弱いため、光の最終散乱面である宇宙の晴れ上がりをはかのぼって、原理的にビッグバン直後の極初期宇宙をプローブすることも可能と考

えられている。その意味で、背景重力波は、宇宙論研究における“究極の観測手段”であり、従来の電磁波観測とは全く異なる新しい情報をもたらす得る。

こうした背景重力波が、将来、観測されるようになれば、宇宙論研究にとって大きなインパクトになることは間違いない。現在、地上では10Hz~1kHzの周波数帯を狙った検出器が日米で建設予定である(LCGT・LIGOII)。また米欧では、低周波帯域をターゲットに、スペース干渉計(LISA)の打ち上げが2014年ごろに予定されている。このように、重力波そのものの検出が今後10年間のタイムスケールで現実味を帯びて来ており、背景重力波の検出に向けた理論・方法論の整備を行うことは、背景重力波を用いた宇宙論研究の確立に対してきわめて重要で、急務な課題となっている。研究開始から3年が経過したが、その状況は現在でも変わらない。

2. 研究の目的

本研究では、背景重力波の検出とそれを用いて、宇宙の成り立ちと進化を探る研究「重力波宇宙論」の確立を目指し、次世代の干渉計データから宇宙論的情報を引き出すための方法論の構築、およびデータ解析手法の開発を進めてきた。具体的には、

- (1) 干渉計の1次元時系列データから、背景重力波の全天強度マップを再構成し、さまざまな周波数帯に存在する背景重力波の特性を調べる方法論の構築
- (2) 位相・振幅の統計的情報を活かした検出率の高い背景重力波のデータ解析手法の開発
- (3) 次世代レーザー干渉計から新しい宇宙論的情報を引き出すための解析手法の考案

という研究を通して、理論・観測双方の観点からデータ解析手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

背景重力波は、本来、位相がランダムなため、一見すると、検出器雑音との区別がつかない。そのため、通常、複数台の検出器間で相関をとり、シグナルの検出を図る。何種類もの背景重力波が存在する場合、こうした方法論をベースに、シグナルの位置情報や周波数依存性、さらには非ガウスの統計情報を抽出することで、個々の種類の識別と起源の特定が可能となる。本研究では、相関解析に基づく背景重力波の検出理論をベースに、「研究の目的」で挙げた(1)~(3)の課題に対し、以下のような研究を進めた。

- (1) 背景重力波の全天強度マップの構築：

重力波に対するレーザー干渉計の応答は、シグナルの取得方法、および重力波の偏極に由来して、一般に指向性を持つ。そのため、背景重力波の強度分布に非等方性があると、干渉計の固有運動(地上なら地球の自転に伴う回転、スペースなら干渉計自体の軌道運動)によって、シグナルに長周期的な時間変動が生じる。本研究では、この問題を線形逆問題として定式化することで、相関シグナルの時系列データから背景重力波の全天強度マップを再構築するアルゴリズムの開発を進めた。さらに、背景重力波入りの擬似干渉計データを作成し、全天マップの再構築のシミュレーションすることで実用性のチェックを行った。

- (2) 非ガウス雑音にロバストな検出手法：干渉計データの相関解析から背景重力波を検出する場合、通常はガウス過程を仮定し、背景重力波のスペクトル密度がどれだけ検出器の雑音スペクトルを凌駕したかで、シグナル検出の判断基準としてきた。しかしながら、現実問題として検出器雑音の非ガウス性などを考慮する必要がある。本研究では、ロングテールをもつ非ガウス雑音がある場合に、重力波シグナルの最適な検出手法についての理論的考察を進めた。相関解析で用いる標準的な統計指標を一般化し、解析的な取り扱いと数値シミュレーションによる検証から、新しい統計指標の特性と、それを用いた検出手法についての考察を行ってきた。

- (3) 背景重力波の偏極・偏波特性の測定：地上に建設予定の次世代レーザー干渉計は、日本を始め世界各地に複数台建設され、ほぼ同時観測が実現される。こうした複数台の干渉計を用いてネットワークを構成することで、2台の干渉計だけからは得られない新たな情報を引き出すことが可能となる。とりわけ、背景重力波の偏極モード、偏波特性などが観測的に測定できれば、背景重力波の生成メカニズムの解明を通じて初期宇宙の進化を知る貴重な手がかりが得られる。本研究では、干渉計の応答特性をもとに、背景重力波の偏極モード、偏波特性などの情報を引き出す研究を行い、初期宇宙起源の背景重力波の観測から、将来的にどれだけ強い制限が得られるか、定量的な見積もりを進めた。

4. 研究成果

上述の3つの研究方法から得られた成果は以下の通りである。なお、これらの成果については、以下に述べる発表論文にもまとめられ、その内容は学会発表を通じても公表されている。

(1) **背景重力波の全天強度マップの構築**：線形逆問題の定式化を応用し、背景重力波の全天強度マップが構築できることを世界で初めて示した。この成果をもとに、NASA・ESAの共同プロジェクトとして打ち上げが進められているスペース干渉計LISA (Laser Interferometer Space Antenna) に対し、具体的な2次元強度マップ作成のデモンストレーションを行うとともに、将来的に得られる全天強度マップの理論的予言を行った。銀河系内には白色矮星の連星系が多数存在することが知られており、これらが出す重力波は、LISAの格好のターゲットと考えられている。しかるに、銀河系外から来る微弱な重力波をとらえる上で、銀河系内の連星系は逆に障害となる。本研究成果にもとづき、重力波の全天強度マップを作成し、強度分布の非等方性を調べることで、重力波源の同定なしに、銀河系内外の寄与を区別することができる。図1に、LISAから得られた相関シグナルの時系列データと、それから再構築された背景重力波の全天強度マップを示す。このようなマップ作成手法成果は、重力波天文学においても本質的な役割を果たすと期待される。

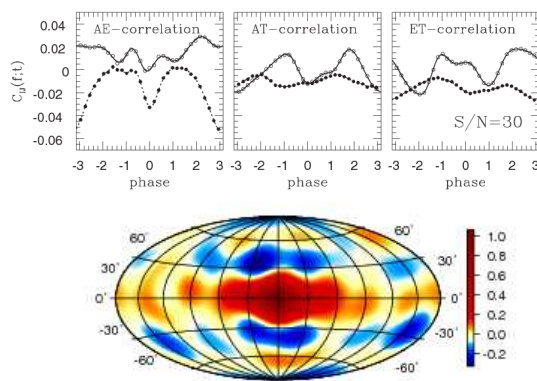


図1・スペース干渉計LISAの模擬データによる3つの相関信号の時系列変動(上パネル)とそれから再構築された背景重力波の全天強度マップ(下パネル)。強度マップは銀河座標系でプロットされており、強度は全天の積分値で規格化されている。赤い領域は放射強度が高いところで、主に銀河系のバルジ構造を反映している。

(2) **非ガウス雑音にロバストな検出手法**：背景重力波のデータ解析で標準的に

使われている相関解析の統計指標(”standard cross-correlation statistic (SCC)”と呼ばれる)を非線形に拡張した、”generalized cross-correlation statistic (GCC)”がロングテールをもつ非ガウス雑音にきわめてロバストな統計指標であることを見出した。この統計量は、検出器雑音の非ガウス性を予め較正した後に構築するもので、一般に、任意の雑音に合わせて最適な検出効率をもつ解析が可能である。SCCとGCCの検出子効率を比較した結果を図2に示す。この図では、それぞれ σ_t 、 σ_m という分布幅を持つガウス分布を重ねた非ガウス雑音に対して、背景重力波の検出効率を、分布幅 σ_t/σ_m の関数としてプロットしている(縦軸 ϵ_{detect} は検出可能な重力波振幅を検出器雑音の分布幅 σ_m で規格化したもの)。ロングテールが現れる場合でも($\sigma_t/\sigma_m \gg 1$)GCCの検出効率 ϵ_{detect} はほとんど悪化することなく、ロバストに重力波を検出できることがわかる。本研究の成果は、日本の重力波グループにも注目され、レーザー干渉計TAMA300のデータを用いたより詳細な実証テストを行うに至り、GCCが実用的にもすぐれた検出効率を持つことを示せた。今後はLCGTなどの次世代干渉計を用いた背景重力波探査への応用が期待される。

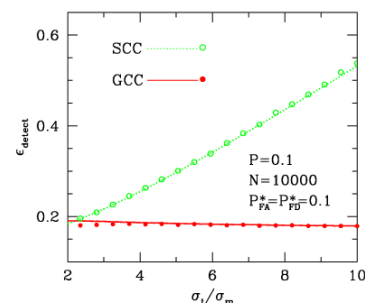


図2・検出器雑音にロングテールが現れる場合($\sigma_t/\sigma_m > 1$)のGCCとSCCの検出効率の違い

(2) **背景重力波の偏極・偏波特性の測定**：3台以上の地上の干渉計ネットワークを駆使することで、偏極モード・偏波成分を独立に分離・検出できることをはじめ明らかにした。さらに、干渉計ネットワークの最適な組み合わせを考察し、少ない統計的ロスで偏極モード・偏波成分を測定する解析方法を考案した。その結果、建設予定の次世代干渉計を5台用いることで、検出限界に近い微弱な重力波振幅でも

偏極モード・偏波成分を分離・検出できることを示した。重力波の偏極モード・偏波成分の測定は、重力理論（一般相対論）の検証や、初期宇宙のパリティ対称性の破れを検証する上でもきわめて有効な手段である。特に、宇宙の晴れ上がり以前の宇宙論的情報は、重力波を通してのみ引き出すことができる。本研究で得られた成果は、初期宇宙に関する理論的研究を進める専門家からも注目されるようになり、偏極モード・偏波成分の測定が、初期宇宙を探求する上で重要な鍵の1つとみなされるようになってきている。

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)

樽家篤史、Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with a space-based interferometer III: Reconstruction of a high-frequency skymap、Physical Review D、74巻、104022 (14 ページ)、2006年、査読あり
姫本宣朗、樽家篤史、工藤秀明、平松尚志、Detecting a stochastic background of gravitational waves in the presence of non-Gaussian noise: A performance of generalized cross-correlation statistic、Physical Review D、75巻、022003 (12 ページ)、2007年、査読あり
瀬戸直樹、樽家篤史、Measuring a parity violation signature in the early universe via ground-based laser interferometers、Physical Review Letters、99巻、121101(4ページ)、2007年、査読あり
斎藤俊、市来 淨與、樽家篤史、Probing polarization states of primordial gravitational waves with cosmic microwave background anisotropies、Journal of Cosmology and Astroparticle Physics、09巻、002 (27ページ)、2007年、査読あり
瀬戸直樹、樽家篤史、Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds from the correlation signals of ground-based interferometers: measuring a circular polarization mode、Physical Review D、77巻、103001(19ページ)、2008年、査読あり
西澤篤志、樽家篤史、端山和大、川村 静児、阪上雅昭、Probing non-tensorial polarizations of

stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers、Physical Review D、79巻、082002 (18 ページ)、2009年、査読あり

[学会発表](計4件)

樽家篤史、Probing anisotropies of gravitational-wave backgrounds with space interferometer 3、日本物理学会、2006年9月22日、奈良女子大学
姫本宣朗、Detection method for stochastic gravitational-wave backgrounds with modified cross-correlation analysis、日本物理学会、2006年9月22日、奈良女子大学
樽家篤史、Polarization analysis of gravitational-wave backgrounds、日本物理学会、2007年3月25日、首都大学
西澤篤志、重力波のスカラー・ベクトル偏極モードの検出、日本物理学会、2009年3月30日、立教大学

[図書](計1件)

川合 光、須藤 靖、樽家 篤史、千葉 柁司、二間瀬 敏史、向山 信治 (協力)、“宇宙の超未来”、ニュートン、8月号、pp.48-49、2008年

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

樽家 篤史 (TARUYA ATSUSHI)
東京大学大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 40334239

(2)研究分担者

(3)連携研究者