

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2005～2008

課題番号：17204018

研究課題名（和文） 超高周波重力波検出用レーザー干渉計の開発と重力波源の探索

研究課題名（英文） Development of a laser interferometer for super-high gravitational wave detection and search for gravitational wave sources

研究代表者

川村 静児 (KAWAMURA SEIJI)

国立天文台・光赤外研究部・准教授

研究者番号：40301725

研究成果の概要：超高周波重力波検出器として、2台のシンクロナス・リサイクリング干渉計を開発し、その動作に成功し、100 MHz 帯での世界最高感度を達成した。そして、1,000 秒間のデータ取得を行い、2台のデータの相関解析を行うことにより、100 MHz の背景重力波に対して過去最高の制限を与えた。また、さらに感度を上げるための新しい検出器レゾナント・スピードメーターを考案・開発し、原理検証に成功した。インフレーション起源の背景重力波の、より正確なスペクトルの計算などの理論的研究も行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2006年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2007年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：数物系科学

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：重力波、レーザー干渉計、宇宙物理、理論天文学

1. 研究開始当初の背景

世界各地で 10 Hz～10 kHz の重力波検出をめざして、中・大型レーザー干渉計型検出器の建設が行なわれており、日本の TAMA やアメリカの LIGO などは、すでに目標感度に近い感度で稼動中であった。また、宇宙空間で衛星間の距離をレーザー干渉計を用いて測るスペース重力波アンテナに関しても、欧米では 1 mHz～30 mHz での重力波検出を目指した LISA 計画が、そして日本では 0.1 Hz～10 Hz の帯域を持つ DECIGO 計画が推進されており、精力的に必要な技術の開発が行なわれていた。しかし、1 MHz 以上の重力波の検出

実験は、背景重力波に対する理論的予測は存在したにも関わらず、その実験の困難さからほぼ手付かずの状態であった。実際、Birmingham 大学の Cruise らによって行われていた導波管のループ共振器を利用したものがあただけで、干渉計を利用した実験は行われていなかった。

2. 研究の目的

これまでに行なわれてきた研究とは全く違う周波数帯 (1 MHz～100 MHz) での重力波検出実験を立ち上げ、この周波数帯に特化した検出器を開発し、それを用いて観測を行

い、超高周波の背景重力波に対する制限を与えることが本研究の目的である。また、1 MHz を超える周波数を持つ重力波源としては、初期宇宙やミニブラックホールの合体などが考えられるが、これらの重力波源から発生する重力波の理論的研究を行うことも本研究の目的である。

3. 研究の方法

超高周波の重力波に対しては従来の干渉計の方式で感度を上げることは難しい。その理由は干渉計の腕の長さを伸ばしても、光が腕の中で滞在している間に重力波の位相が変化してしまい、重力波信号がキャンセルしてしまうからである。また、地上の重力波検出器でよく行われているように光共振器を用いて重力波信号を増幅するという手段も同様な理由により効果がない。

そこで本実験ではシンクロナス・リサイクリングという方式の干渉計を用いる（図1参照）。これはマイケルソン干渉計のビームスプリッターを、90度回転させた高反射率インプットカップラーで置き換えたものであり、光は干渉計の横の腕と縦の腕を交互に何度も往復する。こうすることにより、往復の光路長と等しい波長を持つ重力波が干渉計の面に垂直な方向からやって来るとした時、時計回りの光に対しては横方向に進むときに横方向に空間が伸び、縦方向に進むときには、ちょうど重力波の位相が反転するため今度は縦方向に空間が伸びる。したがって、共振器内で光が縦方向と横方向の往復を繰り返すとき、重力波の影響はシンクロナス的に回数に応じて積算していくように増幅される。また反時計回りの光は時計回りの光とは逆位相の影響を受けるため、この2つの光の位相差を検出することにより、ある限られた周波数帯において重力波に対する感度を飛躍的に高めることが可能となる。

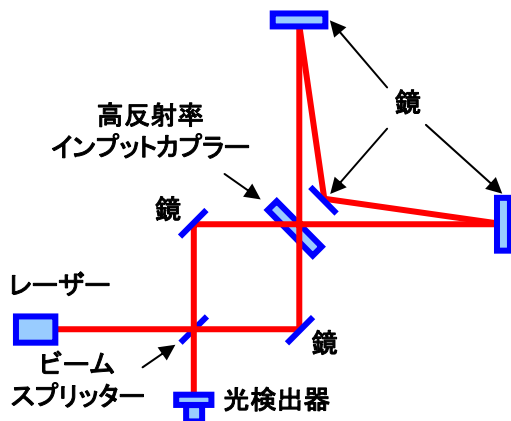


図1. シンクロナス・リサイクリング干渉計の概念図。

このシンクロナス・リサイクリング干渉計のアイデアは1980年代にDreverによって考え出されたものであるが、これまでにシンクロナス・リサイクリング干渉計に関する実験は行なわれていなかった。

本研究では、シンクロナス・リサイクリング干渉計を用いた1MHzを超える重力波検出実験の立ち上げとして、テーブルトップ実験で出来る手軽さから、75cmのアーム長を持つシンクロナス・リサイクリング干渉計で、100MHzの重力波をターゲットにして実験を行なった。また、連続した雑音様の（ストカスティックな）背景重力波信号に対して感度を高めるため、このシンクロナス・リサイクリング干渉計を2セット作り、その相関を取り、観測期間中に取得したデータの相関をとることによりさらに感度を向上させた。これにより、宇宙論起源の重力波やミニブラックホールの合体に関する重力波に対する上限値を出した。またシンクロナス・リサイクリング干渉計に関する技術的な問題点を洗い出し、これらの重力波を実際に検出するための、より本格的な将来研究の基礎を作った。

4. 研究成果

我々は、超高周波重力波検出器として2台のシンクロナス・リサイクリング干渉計を製作した。2台の干渉計は図2に示すように、100 MHzの重力波に対して相関解析が可能になるように近接して配置された。

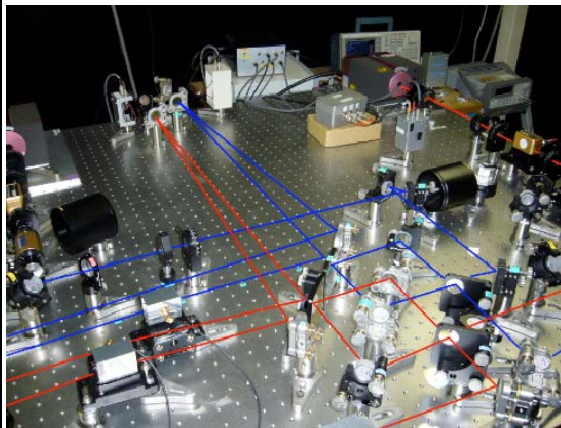


図2. 2台のシンクロナス・リサイクリング干渉計の光学配置。

シンクロナス・リサイクリング干渉計の制御の概念図を図3に示す。レーザーには1064 nmのNd:YAGレーザーが用いられており、電気光学素子（EOM）を用いて、85 MHzで位相変調された光が干渉計に入射する。光は干渉計のサニアック部を経て共振器に達しそこで共振し、再びサニアック部を経てレーザー側（ブライトポート）と検出器側（ダークポート）に帰ってくる。

ブライトポートの光検出器からの出力を 85 MHz で復調すると、光の周波数の共振器の共振周波数からのずれを表す信号が得られる。それをレーザーにフィードバックすることにより、光が干渉計の共振器内で共振するように光の周波数を制御する。サニアック部のビームスプリッターを反射率：透過率が 1：1 から少しずれたものを使うことにより、ダークポートには 100 MHz の重力波信号が 85 MHz でダウンコンバートされ 15 MHz になったものが現れる。そこでそれを 15 MHz で復調することにより 100 MHz の重力波信号をオーディオ周波数帯に落とすことが可能となる。

また、重力波に対する感度を求めるため、共振器内に置かれた EOM を用いて干渉計の感度の較正が行われた。

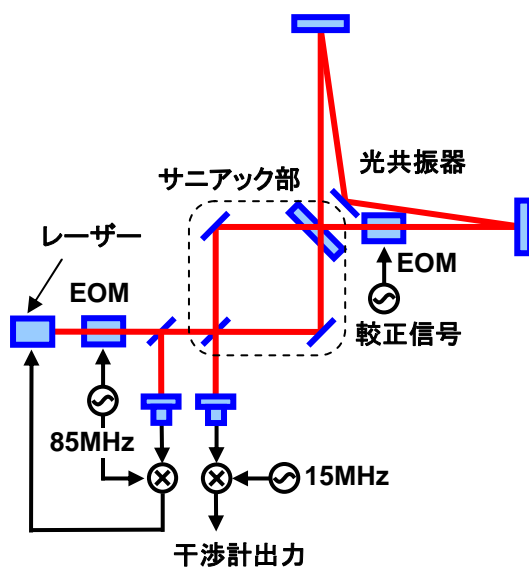


図 3. シンクロナス・リサイクリング干渉計の制御の概念図。

このようにして、2 台の干渉計の動作に成功し、重力波に対する感度が測定された。図 4 に 2 台のシンクロナス・リサイクリング干渉計の感度を示す。重力波の引き起こすストレインに対して 100 MHz 帯で $8 \times 10^{-17} \text{ Hz}^{-1/2}$ の感度が達成された。これは Birmingham 大学において、導波管のループ共振器を用いて 2006 年に得られた感度、 $1 \times 10^{-14} \text{ Hz}^{-1/2}$ より 2 桁以上高い世界最高感度 (100 MHz 帯において) であった。

次に 2 台の干渉計の 1,000 秒間のデータ取得を行い、相関解析を行うことにより、100 MHz の背景重力波のエネルギー密度比に対して $h_0 \Omega_{\text{GW}} = 6 \times 10^{25}$ の制限を与えることに成功した。

さらに超高周波重力波検出器にとって、将来的に感度を高める上で問題となるであろう、鏡の変位雑音を低減するための全く新

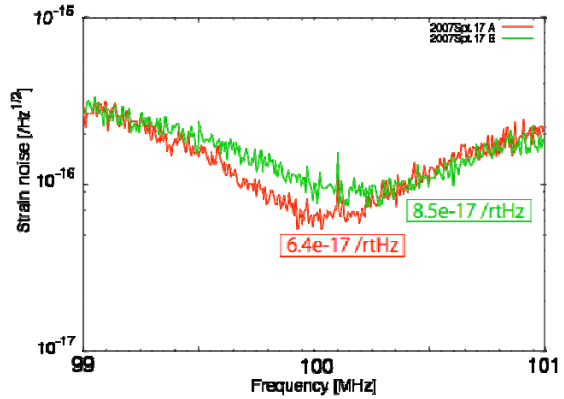


図 4. シンクロナス・リサイクリング干渉計の重力波に対する感度。

たな手法「レゾナント・スピードメーター」(図 5 参照) を考案した。このレゾナント・スピードメーターにおいては、従来のシンクロナス・リサイクリングの光共振器部を正方形形状に配置することにより、ある特定の周波数に対して重力波信号は増幅されるが、鏡の動きはキャンセルされるような構成になっている。

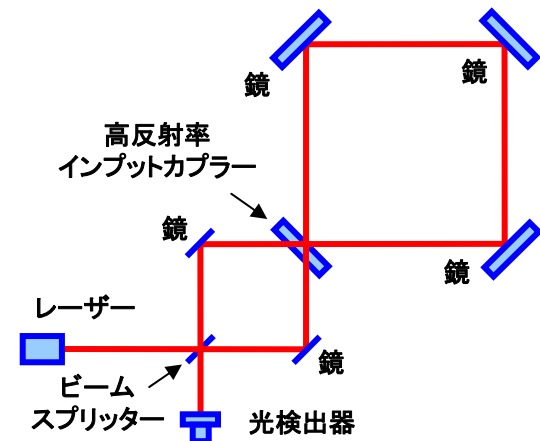


図 5. レゾナント・スピードメーター干渉計の概念図。

我々は、レゾナント・スピードメーターのテーブルトップ実験を行い、この干渉計の動作を世界で初めて成功させ、擬似重力波信号と鏡の変位信号に対する検出器の応答を測定し、この方式の原理検証に成功した。

超高周波重力波の理論の研究においては、素粒子の標準モデルでの相対論的自由度の温度依存性も正確に考慮したインフレーション起源のストカスティックな重力波のスペクトルの計算を、さまざまなインフレーションモデルと再加熱温度について行った。また相関解析によるインフレーション起源の背景重力波の検出のために有効なテンプレート形の提案した。

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9件)

- ① Tomotada Akutsu, Seiji Kawamura, Atsushi Nishizawa, Koji Arai, Kazuhiro Yamamoto, Daisuke Tatsumi, Shigeo Nagano, Erina Nishida, Takeshi Chiba, Ryuichi Takahashi, Naoshi Sugiyama, Mitsuhiro Fukushima, Toshitaka Yamazaki, Masa-Katsu Fujimoto, “Search for a Stochastic Background of 100-MHz Gravitational Waves with Laser Interferometers”, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 101101, p.1-4, 査読有
- ② Atsushi Nishizawa, Seiji Kawamura, and Masa-aki Sakagami, “Resonant speed meter for gravitational-wave detection”, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 081101, p.1-4, 査読有
- ③ Sachiko Kuroyanagi, Takeshi Chiba and Naoshi Sugiyama, “Precision Calculations of the Gravitational Wave Background Spectrum from Inflation”, Phys. Rev. D **79** (2009) 103501, 査読有
- ④ Hiroyuki Tashiro and Naoshi Sugiyama, “Constraints on Primordial Black Holes by Distortions of Cosmic Microwave Background”, Phys. Rev. D **78** (2008) 023004, 査読有
- ⑤ Atsushi Nishizawa, Seiji Kawamura, Tomotada Akutsu, Koji Arai, Kazuhiro Yamamoto, Daisuke Tatsumi, Erina Nishida, Masa-aki Sakagami, Takeshi Chiba, Ryuichi Takahashi, and Naoshi Sugiyama, “Optimal Location of Two Laser-interferometric Detectors for Gravitational Wave Backgrounds at 100 MHz”, Class. Quantum Grav. **25** (2008) 225011, p.1-14, 査読有

[学会発表] (計16件)

- ① 黒柳幸子、千葉剛、杉山直, “インフレーション起源の背景重力波から探る宇宙再加熱”, 日本天文学会, 2009. 3. 24, 大阪府立大学
- ② 西澤篤志, 川村静児, 新井宏二, 辰巳大輔, 西田恵里奈, 上田暁俊, 阪上雅昭 “Resonant speed meter における量子雑音”, 日本物理学会, 2008. 9. 22, 山形大学
- ③ Seiji Kawamura, Tomotada Akutsu, Atsushi Nishizawa, Koji Arai, Kazuhiro Yamamoto, Daisuke Tatsumi, Erina Nishida, Takeshi Chiba, Naoshi

Sugiyama, Ryuichi Takahashi, Akitoshi Ueda, “100MHz gravitational wave detection”, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, 2008. 5. 13, Elba, Italy

- ④ 阿久津智忠, 川村静児, 新井宏二, 辰巳大輔, 山元一広, 西澤篤志, 西田恵理奈, 長野重夫, 杉山直, 高橋龍一, 千葉剛, 福嶋美津広, 山崎利孝, 藤本眞克, “レーザー干渉計を用いた超高周波重力波検出器の開発 II”, 日本天文学会, 2007. 9. 28, 岐阜大学
- ⑤ Tomotada Akutsu, Seiji Kawamura, Koji Arai, Daisuke Tatsumi, Shigeo Nagano, Naoshi Sugiyama, Takeshi Chiba, Ryuichi Takahashi, Kazuhiro Yamamoto, Atsushi Nishizawa, Erina Nishida, Mitsuhiro Fukushima, Toshitaka Yamazaki, and Masa-Katsu Fujimoto, “Development of a detector pair for very high frequency gravitational waves”, 7th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2007. 7. 11, Sydney, Australia

[図書] (計1件)

- ① 千葉剛, 京都大学学術出版会, 第4章 「物理定数の時間変化」(「光と物理学」嶺重 慎・高橋義朗・田中耕一郎編), 2007, p.63-80

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 静児 (KAWAMURA SEIJI)
国立天文台・光赤外研究部・准教授
研究者番号: 40301725

(2) 研究分担者

(平成17年度～平成19年度)

新井 宏二 (ARAI KOJI)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 50321584
辰巳 大輔 (TATSUMI DAISUKE)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号: 70333276
杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70222057
千葉 剛 (CHIBA TAKESHI)
日本大学・文理学部・准教授
研究者番号: 40324602

(3) 連携研究者

(平成20年度)

新井 宏二 (ARAI KOJI)
国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：50321584
辰巳 大輔 (TATSUMI DAISUKE)
国立天文台・光赤外研究部・助教
研究者番号：70333276
杉山 直 (SUGIYAMA NAOSHI)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：70222057
千葉 剛 (CHIBA TAKESHI)
日本大学・文理学部・准教授
研究者番号：40324602