

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月10日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540306

研究課題名（和文） 光滞在時間の長い光FP共振器の新しい制御信号取得とその応用。

研究課題名（英文） New signal extraction technique for a Fabry-Perot cavity that has long optical storage time.

研究代表者

三代木 伸二 (MIYOKI SHINJI)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：20302680

研究成果の概要（和文）：Fabry-Perot 共振器の共振制御において常套的に使用される Pound-Drever-Hall 法による制御信号取得条件を、変調周波数と復調周波数の特殊な選択により変更することで（NQD 法、OHD 法）、線形信号領域を従来の共振線幅の 10 倍程度までに広げられる理論を実験的に検証した。また、特に光の滞在時間が長い条件の FP 共振器で問題になる、制御信号の線形性の攪乱に対しても、上記 NQD 法による信号は耐性があることが検証された。

研究成果の概要（英文）：We verified the linear range expansion of a Pound-Drever-Hall signal by setting the modulation frequency near the FP cavity resonance and by setting the demodulation phase at the different phase from normal PDH method (NQD, OHD method). In addition to this, we found and verified that the violation of the linear property of NQD signal was much smaller than that of normal-PDH signal.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：相対論、重力波、レーザー干渉計、FP 共振器、PDH 法、NQD 法、OHD 法

1. 研究開始当初の背景

新しい観察手段が発見されれば、全く新しい世界が開けることは、人類の歴史を振りかえれば疑う余地のない真実である。現代物理学においても、様々なエネルギー・波長の電磁波、様々な素粒子を発見し活用してきた。しかし、ニュートリノ以外のこれらは、非常に高温であった宇宙の始まりに近い時期を観測する手段にはなりえない。さらに、近年 WMAP の観測により、我々宇宙の主役は、

既知の物質ではなく、暗黒物質・暗黒エネルギーであることが判明し、特に前者は、重力により宇宙の構造決定に大きく影響を与えている。質量を起源とする「重力」、あるいは、その時空構造が波動となって伝搬する「重力波」は、今までそのあまりの弱さのために、観測道具としての有用性は皆無であったが、このような新発見の相次ぐ 21 世紀においては、その重要性は非常に高まり、「重力波」という新たな手段により「新しい世界」

が開けることが期待されている。

世界的には、キロメートルスケールのレーザー干渉計重力波アンテナにより、すでに重力波観測が開始されている。アメリカは、基線長が 4km の重力波望遠鏡 2 台 (LIGO 計画) をもち、2005 年~2007 年に、約 1/200 の確率を狙って (つまり、最終目標感度の約 1/10 の感度で) 重力波観測を行ったが、有意な重力波信号はなかった。しかし、いくつかのガンマ線バースト現象、自転中性子星からの重力波放出に関し、物理的上限值を与えた。イタリア、フランス、オランダも、基線長 3km の重力波望遠鏡を建設し (VIRGO 計画)、断続的に感度改善と観測を繰り返している。日本も「LCGT 計画」という km スケール重力波望遠鏡を、「地面振動の少ない、静粛安定な環境」である神岡鉱山内に建設する計画を持っている。

LCGT を含めた、1 年間の観測で、重力波の観測を確実に狙う次世代重力波望遠鏡 (改良型 LIGO、改良型 VIRGO) では、あと 10 倍の高感度化のために、3~4km もある Fabry-Perot (FP) 共振器のフィネスを 1500 前後にまで高める必要がある。しかし、その様に光の滞在時間が長い (約 10 ミリ秒) FP 共振器では、防振しきれない鏡のゆれによる (100 [ナノメートル/秒]程度)、鏡で反射するレーザー周波数のわずかな周波数ドップラーシフトでさえ、その位相への影響は大きく、鏡の位置と信号の線形関係が保たれた Pound-Drever-Hall (PDH) 信号が取得できない問題 (ビート問題という) が発生する (右下図)。ただでさえ PDH 法では、線形信号領域が狭いという問題もあり、重力波望遠鏡開発グループの世界では、その二つの問題を総称して、「FP 共振器の Lock Acquire 問題」と認識し、その解決策が模索されている。その対策としては、例えば、アメリカ LIGO 計画では、干渉計に使用する波長 1064nm の倍波である 532nm のレーザーをその基本波から生成し、FP 共振器を構成する鏡の反射膜を倍波に対しては低い反射率になるように設計することで、まず倍波で共振制御に持ち込み、その後、基本波の共振に切り替える方法が提案されている (倍波ロック)。また、日本等では、FP 共振器の透過光の強度信号を平方根演算することで、疑似線形信号を取得し、それを使って共振制御した後に、PDH 法によって得た信号に切り替える、「オフセットロック」などが提案、実証されている。これに対し、我々は、発明されて 20 余年経過した PDH 法の常識的な利用法から離れ、今まで、無価値、かつ好ましくないと思われていた利用法に着目することで、線形信号領域が狭いという常識を打ち破り、それを拡大することが可能であること、そして、ビート問題にも有効な全く新しい PDH 法の利用方

法を、2009 年 5 月に理論的に導き、その理論の最も根幹になる部分に関し、すでに簡易実験で立証した。

2. 研究の目的

本研究は、次世代重力波望遠鏡の光学的構成要素である、フィネス 1500 程度の長さ 3~4 キロメートルという、非常に長い光滞在時間を持つ Fabry-Perot 共振器を、Pound-Drever-Hall 法によって得た線形信号を利用し、かつ構成する鏡に直接に力を加えて位置制御することで共振制御する際の、その非共振状態から共振状態への導入自体の困難さ (Lock Acquire 問題) の克服を、同じ Pound-Drever-Hall 法に基づきながら、既知の常識的な変調周波数設定・復調位相を全く違う条件に設定するなどにより、その Lock Acquire 問題の原因の一つであると考えられる「線形信号領域の狭さ」を大幅に拡大することで目指す新しい手法を理論的に考案したので、それを実証し、Lock Acquire 問題を改善し、Lock Acquire 共通基盤技術を世界の重力波研究分野に提供する。

3. 研究の方法

FP 共振器を共振制御するために必要な基線長に比例した線形信号を得る常套手段の一つが PDH 法である。特に、重力波望遠鏡用レーザー干渉計における腕 FP 共振器制御における PDH 法では、変調 RF サイドバンドは、腕 FP 共振からはなれた、FSR の真ん中付近に設定し、かつ、信号処理法で言うところの、「変調位相波と同じ位相波で復調する (In-Phase 復調)」で、最も Shot 雑音レベルが低くなれる信号を取得するというのが「常識」であった。我々は、レーザー干渉計重力波アンテナとして最終感度を最良にするのに必要な以上の設定が、①必ずしも、Lock Acquire の時には必要ないこと、②RF サイドバンドが FSR の真ん中付近ではなく、共振に近い所に設定するという今まであまり想定しない状態を詳細に考察したこと、③ In-Phase 復調以外の可能性を探ったこと、の 3 点を契機として、まず、(a) RF サイドバンドを共振の裾野近くに設定し、(b) Q-Phase 復調付近をうまく選択すると、実際的な大きさの線形信号が取得でき、かつその線形領域を In-Phase 復調に比べて 10 倍程度拡大可能なことを理論的に新規に発見した。さらに、(c) 奇数倍復調の In-Phase 復調信号同士を、理論的計算から予測される適切な比率で加算してやると、先と同じように線形信号領域を 10 倍程度拡大可能なこと、さらに、第一 RF Sideband 幅よりも広い領域で線形信号を取得可能になることも理論的に発見した。こ

の理論計算自身は、PDH 法にかかわる研究者なら誰もが行ってきたはずの極めて基本的な計算手法に基づくもので、その計算を (a) (b) (c) という条件で行えば導ける帰結であった。

本提案研究では、この理論的予測の実証を、東京大学宇宙線研究所・神岡研究施設（岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山内）にある、低温レーザー干渉計重力波アンテナプロトタイプ (CLIO) を利用して行い、かつ、制御に利用することで、Lock Acquire 問題の改善を目指す。

4. 研究成果

申請時において、「PDH 法による FP 共振器制御の信号は、その線形信号領域が共振線幅に限定され、非常に狭い」という常識を打ち破り、その共振線幅の 10 倍以上広い領域にわたる線形信号が、同じ PDH 法における、変調周波数や復調位相の適切な選択 (Near Q-Pahse Demodulation (NQD) と Odd Harmonic Demodulation (OHD) と命名) で実現できるという新事実を理論的に導いていた。この信号取得解析では、重力波望遠鏡で実際に発生している現象、つまり、鏡が速度を持って移動していることにより、反射するレーザー光の周波数がドップラーシフトを起こし、結果、復調信号にいわゆるビートという乱れた成分が発生することで、信号の線形性が容易に乱れる効果を考慮していなかった。今年度は、この効果を考慮したうえで、NQD と OHD を計算しなおしたところ、NQD と OHD で得られる PDH 信号は、通常の方法で取得された PDH 信号よりも、(1) より鏡の速度に鈍感になり、ビートによる信号の線形性の乱れが小さい、(2) 通常の方法で得られた PDH 信号では、鏡の速度が増加するにつれて、本来、光共振器が共振状態であれば、復調信号がゼロでなくてはならないが、そうならず、オフセット信号が乗る不都合が発生するが、NQD、OHD では、そのオフセットがより発生しにくい、という、「FP 共振器の Lock Acquire 問題」の解決に都合の良いこの二点の定性的性質が存在することが理論的に発見された。

次に、実際のレーザー干渉計型重力波望遠鏡のように、振り子状に懸架された鏡で構成される基線長の長い FP 共振器において PDH 信号に現れる乱れ (いわゆるビート信号) も考慮した理論的考察を行い、本提案手法 (PDH 法における NQD、OHD 手法) が「共振器の共振導入制御の困難化の回避」に貢献できるさらなる利点を発見した (図参照)。

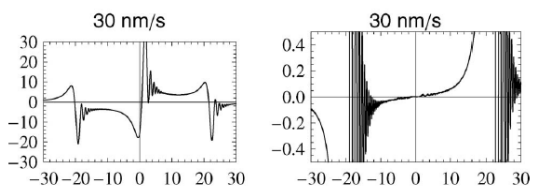
さらに、実際のレーザー干渉計型重力波望遠鏡で使用される状態を想定した実証実験を行うべく、東大宇宙線研究所が所有する低温レーザー干渉計の構成要素である、基線長 10m の Mode-Cleaner (MC) 光共振器 (フィネス

1500 程度) を利用し、FP 共振器の構成鏡が激しく振動する状態で得られる NQD による PDH 信号と、その理論的予測信号波形の比較を行うとともに、実際に、故意に鏡を激しく揺らした状態で、普通の PDH 信号を利用した時と、NQD による PDH 信号の場合の共振制御導入成功率の比較を行う準備実験を行った。

結果、PDH 信号にビート信号が現れていても、NQD を利用すれば、理論的予測通り、共振付近におけるビート信号の現れ方が弱まることが確認された。さらに、MC を構成する鏡を、約 10 μ m/sec 以上の速度で故意に揺動し、激しくビート信号が混入する NQD による PDH 信号状態でも、それを利用した共振器共振制御導入成功確率は、一般的な PDH 信号の場合の成功率に比べ圧倒的に高いことが定性的に示された。

最終年度は、基線長 100 m の低温レーザー干渉計 CLIO を利用することで、前年に利用した MC に比べて光の滞在時間を 20 倍に増大させた、より km スケール重力波望遠鏡に近い条件での NQD 信号の振る舞いを調べた。まずは、CLIO の光学的条件を用い、NQD、OHD 信号の振る舞いをシミュレートし予想波形を得た。次に、NQD 信号を得るため、MC を通過させ、かつ 100mFP 共振器の FSR の中点近傍に来るように設定した通常の変調周波数である 15.804MHz の二倍の周波数 31.608MHz で変調を行うことで、MC も通過させ、かつ 100mFP 共振器の FSR の共振近傍にこの変調周波数がたつようにした。この周波数を利用した変復調系により、信号の S/N が悪い状態ではあるが、予想に近い NQD 信号が得られることが検証でできた。さらに鏡が大きく動くことによるビートの出現も、この NQD で低減できることが判明した。

(図) : normal-PDH 法と NQD 法における、FP 共振器共振付近 (横軸 0 の位置) での線形性の乱れの様子。横軸は FP 共振器の FSR で規格化してある。FP 共振器として、基線長 3km、フィネス 1550 を想定しており、FP 共振器を構成する鏡が 30nm/sec の速度で動いている場合を想定している。左が normal-PDH 法、右が NQD 法で、normal-PDH 法では、線形領域が狭く、かつ線形性も乱れているが、NQD は線形領域が広くかつ、乱れは共振付近にない。但し、信号は小さくなる。



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 1 件)

- ① S.Miyoki, S.Telada and T.Uchiyama,
“Expansion of linear range of Pound-Drever-Hall signal”, Applied Optics, 28 (2010) pp. 5217-5225, 査読有,
<http://www.opticsinfobase.org/ao/home.e.cfm>

[学会発表] (計 7 件)

- ① 三代木伸二, KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の建設状況”, 日本物理学会 (広島大学), 2013 年 03 月 26 日, 日本・広島.
- ② 三代木伸二, KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 (KAGRA) の建設・設計状況”, 天文学会 (埼玉大学), 2013 年 03 月 22 日, 日本・埼玉.
- ③ 三代木伸二, Kyuman Cho, “Current Status of Collaboration Research I”, 3rd Korea-Japan Workshop, 2012 年 12 月 21 日~2012 年 12 月 22 日, Korea, Seoul.
- ④ 三代木伸二, CLIO and KAGRA Collaboration, “Experiments Results and Plans of CLIO and Underground Understanding”, 13th Marcel Grossmann Meeting, 2012 年 7 月 1 日~2012 年 7 月 7 日, Sweden, Stockholm. (招待講演)
- ⑤ S.Miyoki, LCGT collaboration, “Current status of LCGT”, Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC10), 2011 年 12 月 20 日, ベトナム・クイニョン. (招待講演)
- ⑥ S.Miyoki, LCGT collaboration, “Current status of Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope Project”, 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2011), 2011 年 9 月 8 日, ドイツ・ミュンヘン.
- ⑦ 三代木伸二, “重力波検出技術が拓く超巨視的量子性の物理 VI” 日本科学技術振興会・さきがけ・「光の創成・操作と展開」領域研究会, 2010 年 11 月 26 日, 茨城県つくば市.

[その他]

ホームページ等

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/GWPOHP>

[/researches.html#contents7](#)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三代木 伸二 (MIYOKI SHINJI)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 20302680

(2) 研究分担者

寺田 総一 (TELADA SOUICHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・長さ計測科・主任研究員
研究者番号: 30357545

(3) 連携研究者

内山 隆 (UCHIYAMA TAKASHI)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号: 60361656

大橋 正健 (OHASHI MASATAKE)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 80213833