

氏名・(本籍)	たか 高	はし 橋	りゅうたろう 竜太郎
学位の種類	博士(理学)		
学位記番号	理博第1297号		
学位授与年月日	平成5年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻		
学位論文題目	レーザー干渉計型重力波アンテナの開発研究		
論文審査委員	(主査) 教授 田中 昌		
		教授 湯田 春雄	
		教授 河島 信樹	
			(宇宙科学研究所)

論 文 目 次

- Chapter 1 重力波とその検出
- Chapter 2 10mレーザー干渉計
- Chapter 3 10mレーザー干渉計における雑音の振舞い
- Chapter 4 Schnupp法による位相検波
- Chapter 5 10mレーザー干渉計の長時間連続運転
- Chapter 6 まとめ

論文内容要旨

序

重力波検出はこれまで金属の共鳴振動を利用した共振型と呼ばれる方法によって試みられてきたが、近年光技術の発展に伴ってレーザー干渉計を用いた干渉計型と呼ばれる方法の開発が進んでいる。本研究は宇宙科学研究所に設置されている10mレーザー干渉計型重力波アンテナを用い、主要な雑音（周波数雑音、散乱光雑音、beam jitter 雑音、レーザー強度雑音）の振舞いを定量的に検証することによる scaling 則の確立、装置の感度向上、現時点での感度による長時間連続運転を目的とするものである。また新たな検出方法（Schnupp 法）の検証実験も行った。

Chapter 1 重力波とその検出

重力波は A. Einstein の一般相対性理論によって予言される光速で伝わる重力場の波動である。相互作用が非常に小さいため未だ直接には検出されていない。将来干渉計型検出器で検出の可能性がある重力波源にはバースト波源として超新星爆発と中性子連星の合体があり、連続波源としてパルサーがある。重力波のもつ周波数帯域は超新星爆発で ~ 1 kHz、連星の合体で ~ 100 Hz であるが、 $h \sim 10^{-21}$ の感度を持つ検出器を想定するといずれも Virgo Cluster (15 Mpc) から年間数個が検出されるものと期待されている。また同じ感度の検出器で数ヶ月観測すれば CRAB パルサー (60 Hz) からの重力波が検出可能である。

$h \sim 10^{-21}$ の感度は km クラスの干渉計型重力波アンテナによって可能となるが、現在 prototype と呼ばれている数10m の規模のものが宇宙研を含め世界的に4台あり km クラス実現のための開発研究が進められている。

Chapter 2 10mレーザー干渉計

重力波検出の原理は重力波によって変化する自由質点間の距離を Michelson 干渉計によって測ろうというものである。干渉計の各腕は光路長を大きくするために2枚の球面ミラーからなるディレイラインを構成し、全光路長1 km を実現している。図1に10m干渉計の概念図を示す。光源部を除く干渉計全体は真空タンクに入れられており、 10^{-6} Torr 程度の真空中に保たれている。光源としては波長514.5 nm のアルゴンイオン・レーザーを用いており、周波数を安定化するために Fabry-perot (F.P.) 干渉計を用いた sub-system がある。レーザーから出た光は single mode fiber を通して干渉計のある真空タンク内に導入される。fiber から出た光は beam splitter (B.S.) によって2つに分けられそれぞれ Pockels cell (P.C.) を通った後、ニア・ミラーにあいた穴 (entrance hole) からディレイラインに入る。ディレイラインの中で102回折り返した光は再び entrance hole から出て行き beam splitter で重ねあわされて光検出器 (P.D.1) に入る。光検出器に入る光量は2つの腕の光路長差の関数として記述されるのでここでの光量の変化を見ればよい。片方の腕には Pockels cell によって 9 MHz の位相変調がかけられており、光検出器で得

られた信号は同じ発振器の 9 MHz で復調される (demodulation)。復調信号は適度に増幅され周波数の高い成分はもう片方の腕の Pockels cell へ、周波数の低い成分は 1 つのエンド・ミラーの制御系へと feedback される。このことにより光検出器における干渉光は dark fringe に lock される。また Pockels cell に feedback される周波数帯域には重力波の信号が含まれている可能性があり、観測の対象となる。4 つの球面ミラー、beam splitter、及び fiber の出射部は wire で吊り下げられていてそれらを観測帯域で free mass とすると共に地面の振動による影響を小さくしている。ただし吊り下げることによる振子の周波数 (~ 1 Hz) での揺れを止めるために magnet と coil を用いた制御を行なっている。これを local control といい、干渉計のアライメントや dark fringe に lock するための feedback にも用いられる。

Chapter 3 10m レーザー干渉計における雑音の振舞い

干渉計の感度は光子数の量子的揺らぎによって引き起こされる位相雑音 — shot 雑音 — によって原理的に制限され、有効光量 10mW の場合その大きさは $7 \times 10^{-16} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$ である。

周波数雑音 干渉計の出力として現れる周波数雑音 δL_{FR} は 2 つの腕における光路長差 ΔL_{ST} に比例し、 $\delta L_{FR} = \Delta L_{ST} \frac{\delta \nu}{\nu}$ と表される。ここで ν は周波数 ($= 5.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$)、 $\delta \nu$ は周波数揺らぎである。freerun レーザーの周波数揺らぎ $\delta \nu$ は 1 kHz でだいたい $10^3 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ である。よって周波数の安定化を行わずに干渉計に現れる周波数雑音が shot 雑音を下回るためには光路長差 ΔL_{ST} を $4 \times 10^{-4} \text{ m}$ 以下にする必要がある。しかし一般にはディレイライン型干渉計のような多重に折り返す光路で干渉する 2 つの光の光路長を一致させることは難しい。

これまで 10m クラスのディレイライン型干渉計 (Max-Planck-Institut für Quantenoptik の 30m や宇宙研の 10m) ではミラーの曲率半径の精度の限界から 2 つの腕の光路長を合わせる事が出来なかったが、宇宙研で 1991 年末に導入した曲率半径精度 5 mm 以下のミラーによりこれが可能となった。図 2 は光路長差と人為的に単一周波数の周波数揺らぎを加えたときに干渉計に現れる周波数雑音との関係を示したものである。それぞれのデータは最小自乗法によって 1 次関数に fit された。fit された線で周波数雑音が 0 となる点が 2 つの腕の光路長が一致しているところである。また fitting の誤差より求めた光路長を合わせる精度は 1 mm 程度であり周波数雑音に対する CMRR (Common Mode Rejection Ratio) でいうと 119dB に相当する。したがって必要とされる周波数安定性は $10^3 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ 程度に軽減される。

散乱光雑音 散乱光のもっとも大きな寄与はメイン・ビームが 102 回ミラー間を行き来した後、entrance hole から再び出ていくときにその縁で散乱して更に 102 回 (あるいはその多重回) ミラー間を行き来し、メイン・ビームと干渉するものである。特に振子の周波数でミラーが大きく揺れるとその周期の間に位相が何回転もし、その影響が kHz の領域へ up-convert する。この影響によりこれまで 3 kHz より低い周波数では感度が shot 雑音レベルまで行かなかった。

散乱光の影響を除去する方法の一つは散乱光とメイン・ビームとの間の coherence が破壊されるように、レーザー光の位相を変調することである。本研究では 10m 干渉計においてこの方法

を確立することにより干渉計の 1 kHz 以下の感度を 2～4 倍改善した (図 3)。またこれにより長時間観測時に見られる non-Gaussian 雑音をほぼ無くすることができた。

Beam jitter 雑音, レーザー強度雑音 Beam jitter 雑音に対しては干渉計の非対称性に対する依存性を, レーザー強度雑音に対しては dark fringe からのずれに対する依存性を検証した。

Chapter 4 Schnupp 法による位相検波

従来の Pockels cell の様な光変調器を用いた内部変調と feedback による fringe locking では光変調器内での損失により, recycling (干渉計から出ていく光を干渉計に戻し, 干渉計内の実効パワーを増やす技術) の gain を上げられないという問題があった。Schnupp はわざと光路長差を持たせた干渉計で光を beam splitter で分ける前に変調を行うと干渉光に変調がかかり, さらに feedback 信号をミラーの制御系だけに帰すことによって干渉計内に光変調器を必要としない方法を考察した。我々はこれを実証すべく 10m 干渉計で片方の腕の反射回数を変えて光路長差を作り, ミラーだけの制御で位相検波することに成功した。これにより recycling に必要な内部に光変調器を用いない位相検波が実験的に初めて確立した。またその位相差信号から感度は新たに作り出された光路長差による周波数雑音に支配されていることが解った。

Chapter 5 長時間連続運転

1992年 5/19～6/3 において 10m 干渉計の長時間運転を行った。今回の運転における装置の安定性 (最高10時間に及ぶ連続 locking) はこのクラスの干渉計型アンテナとしては非常に優れたものである。観測データのうち干渉計信号の雑音分布では先にも述べたように位相変調法による散乱光雑音の除去によって non-Gaussian 成分がほとんど取り除かれ, non-Gaussian 雑音は散乱光雑音以外にほとんど無いことが確認された (図 4)。またこの運転ではレーザー強度, 周波数安定性, 地面振動など多くの channel の情報を同時に記録し, わずかに残っている non-Gaussian 雑音との相関が調べられた。それによると Gauss 分布から外れた一部の信号にはレーザー強度に明らかに大きな変動が見られ, それによるデータ選択が可能であることが解った。

Chapter 6 まとめ

本研究では宇宙科学研究所に設置されている 10m のレーザー干渉計型重力波アンテナを用いて(1)主要な雑音の振舞いを定量的に検証しこのクラスでの scaling 則を確立(2)光路長合わせにより CMRR 119dB を達成(3)位相変調法による散乱光雑音の除去により 1 kHz 以下の感度を最高で 4 倍改善(4)同じ効果によって長時間連続運転における雑音特徴を大幅に改善し, non-Gaussian 雑音は散乱光雑音以外にほとんど無いことを確認(5)Schnupp 法による位相検波に初めて成功 といった成果を挙げた。

現在宇宙科学研究所では 10m 干渉計を拡張した 100m 干渉計の完成が間じかである (1993年 2 月現在)。目標感度は $\bar{n} = 10^{-20} / \sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$ で, 銀河系内からのバースト波が検出可能である。

また長時間観測の解析では GRO(Gamma Ray Observatory) ガンマー線バーストとのデータ比較が計画されている。

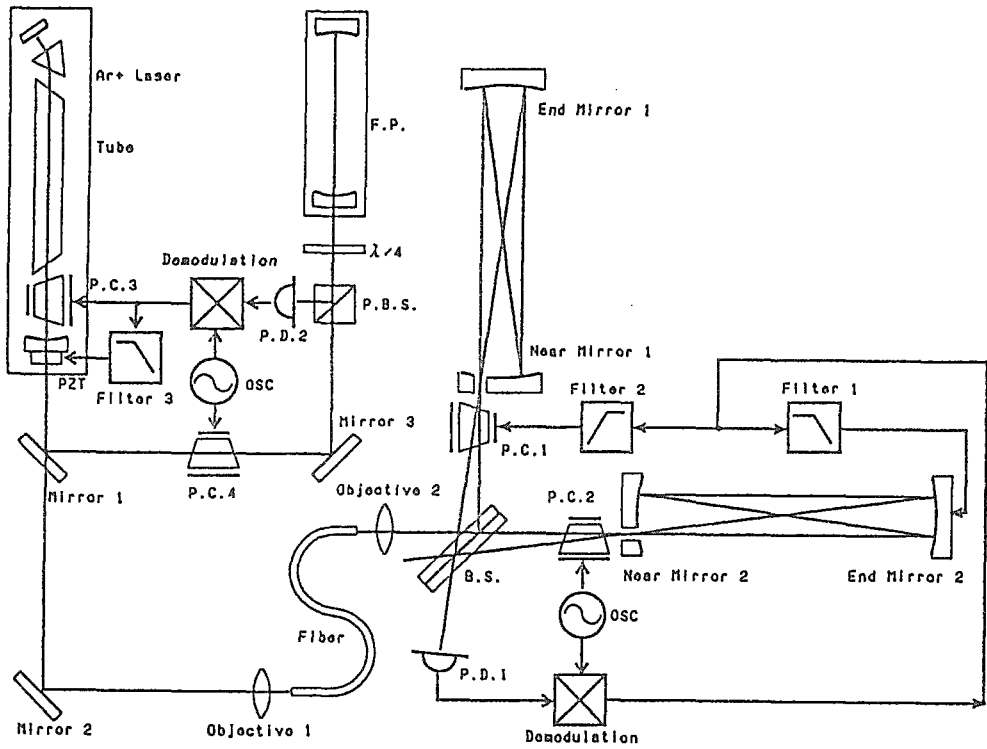


図1 10m 干渉計の概念図。

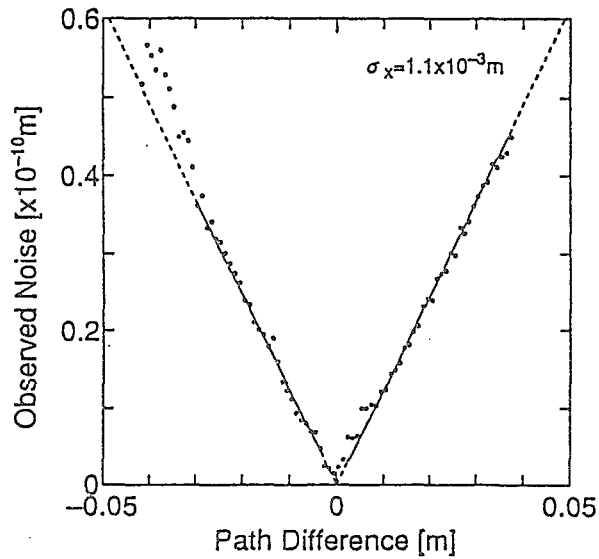


図2 光路長差と干渉計に現れる周波数雑音との関係。

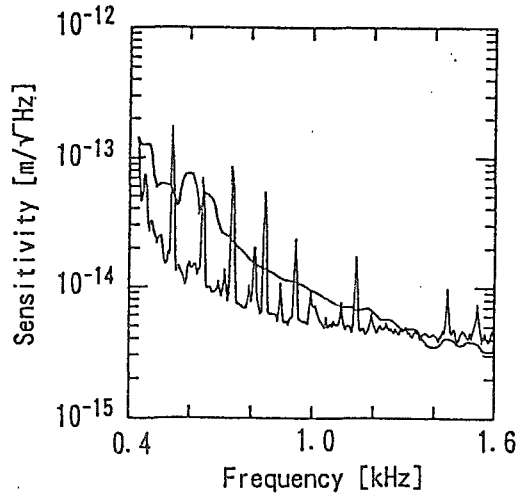


図3 1 kHz 付近の光路長差の変化に対する感度。上線は散乱光除去以前のベスト感度（1989年）。下線は散乱光除去により改善された感度。

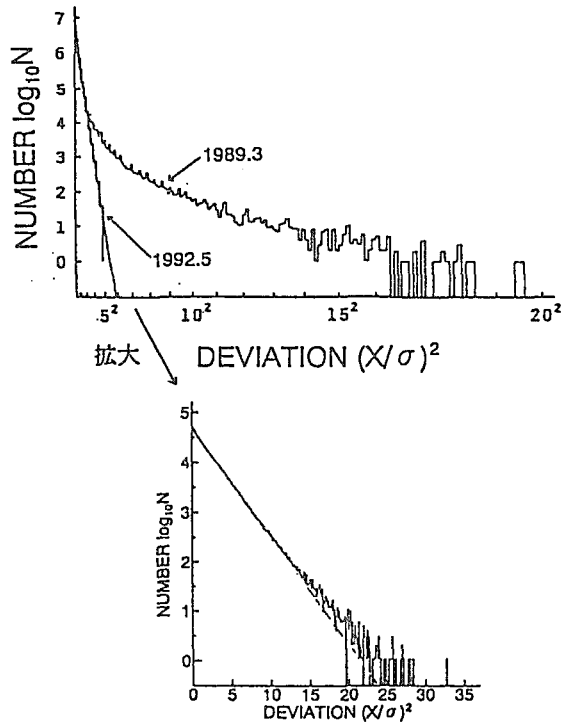


図4 1時間の1～3 kHz 付近における雑音分布。前回観測時のもの（1989年）は Gauss 分布（直線）から外れた成分が多く見られる。一方今回得られた分布（1992年）はほとんど Gauss 分布上になっている。これを拡大すると（下図）まだわずかながら non-Gaussian 成分が残っている。

論文審査の結果の要旨

高橋竜太郎提出の論文はレーザー干渉計型重力波アンテナにおける主要な雑音を定量的に検証し、基本的特性の追究、装置の感度向上について論じたものである。本研究を基礎として将来の大型レーザー干渉計型重力波アンテナ実現への道が切り開かれたと言える。

論文は6章よりなり、第1章には重力波及びその波源についての概説があり、実験的な重力波検出について述べている。

第2章は宇宙科学研究所 10m レーザー干渉計についての測定原理、その基本構成及び各構成要素の詳述である。光ディレイライン、レーザー光源、RF Dark Fringe Locking、ミラーの防振とアライメント、真空系等について説明されている。

第3章は 10m レーザー干渉計における雑音の振舞いについて実験的な追究を行ったもので本論文の中核となっている。一般に、干渉計の感度は光子数の量子的揺らぎに起因する shot 雑音によって原理的な制限を受ける。即ち、すべての雑音レベルを shot 雑音以下に押さえる必要がある。まず、周波数雑音については2つの腕の光路を合わせる精度を 1 mm 程度に押さえることに成功し、Common Mode Rejection Ratio にして 119dB を得た。散乱光雑音に対しては散乱光とメイン・ビームとの間の coherence 性が破れるようにレーザー光の位相を変調する方法を確立した。即ち 10m 干渉計の 1 kHz 以下の感度は最高 4 倍改善され、長時間観測における Non-Gaussian 雑音はほぼ消却された。

第4章は Schnupp 法による位相検波について述べている。10m 干渉計において Schnupp 法の実験の試み、初めてこの方法を実証することに成功し、recycling に適用できることを示した。

第5章では、10m 干渉計の長時間運転における装置の安定性について記述している。諸雑音への分析・対策によって長時間連続運転における雑音特性を大幅に改善することができ、Non-Gaussian 雑音は散乱光雑音を除いて殆ど消去された。

本研究は重力波検出のためのレーザー干渉計の基本的特性として諸雑音を系統的に実証し、将来の大型レーザー干渉計型重力波アンテナへの重要な布石を固めたものであり、価値の高い研究である。即ち、本論文は著者が自立して研究活動を行うに足る高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、高橋竜太郎提出の論文は博士（理学）の論文として合格と認める。