

レーザー干渉計による重力波天文学

安 東 正 樹

Gravitational-Wave Astronomy by Laser Interferometers

Masaki ANDO

Thanks to the progress in precise measurement techniques with laser interferometers, detection of gravitational waves and a new astronomy with them will be realized in the near future. In this article, techniques and current status of the Japanese laser interferometric gravitational wave detector, TAMA300, are presented.

Key words: gravitational waves, laser interferometers, TAMA300, astronomy, precise measurement

1. はじめに

1.1 重力波

重力波は、「時空のさざ波」ともいわれる¹⁾。電荷の加速度運動によって電磁波が引き起こされるのと同様に、質量が加速度運動することによって引き起こされる波動が重力波である。重力波は、電磁波と同様に光速で伝搬する。また重力波が引き起こす時空の歪みは、四重極特性をもつ。つまり、重力波の進行方向に垂直な平面に配置された自由質点間の距離が、ある方向には伸び、それと垂直な方向には縮む、という変動をするのである。

重力波は、一般相対性理論から得られる帰結のひとつとして、アインシュタイン自身によって予言された。また、理論的な予言だけではなく、その存在については、間違いのない証拠がある。PSR1913+16 とよばれるパルサーの周期の観測から、この星は別の中性子星と連星系をなしており、その公転周期（約8時間）が1年に約76 μ s の割合で減少していることがわかった。この値は、公転のエネルギーが、重力波放射によって失われたとする計算値と誤差1%以内という非常によい精度で一致したのである。この結果は、重力波の存在を、間接的に証明するものとなっている²⁾。

1.2 重力波の検出

しかし、重力波は、存在が予言されてから80年以上経った今でも、直接には検出されていない。これは、重力波の効果が非常に小さいためである。重力波の振幅は、空間の歪み量（無次元量） h で表現される。重力波は、大きな質量が激しく運動するときに効率よく発生する。そこで、質量100 kg の2つの鉄球を、長さ2 m の棒でつなぎ、100 Hz の周期で回転させる実験を考える。この場合に発生する重力波の振幅は、 $h \sim 10^{-43}$ という値になる。これは、検出するには絶望的な量であり、人工的に重力波を作りだし、それを検出する、という実験は不可能なのである。

一方、天体現象に目を向けてみると、人工的なものよりはるかに大振幅の重力波が期待できる。例えば、1987年に大マゼラン雲で発生した超新星爆発SN1987Aでは、地球での振幅で $h \sim 10^{-19}$ 程度の重力波が発生したであろうと考えられている。このような大きな重力波イベントは、数十年に1度程度と見積もられているが、 $h \sim 10^{-21}$ 程度の重力波イベントなら1年に数回程度は期待されている。ただ、人工的なものよりはるかに大きな振幅とはいえ、 $h \sim 10^{-21}$ という歪み量の検出は決して容易ではない³⁾。そのため、重力波の直接検出は夢物語のように考えられてきて

東京大学理学系研究科物理学教室 (〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1) E-mail: ando@granite.phys.s.u.tokyo.ac.jp

¹⁾ PSR1913+16 を発見し、観測を行ったハルスとテイラーは1993年のノーベル物理学賞を受賞している。

表1 世界の大型レーザー干渉計重力波検出器プロジェクト。

プロジェクト名	参加国	基線長	観測開始予定
LIGO	アメリカ	4 km(2台)	2002年
VIRGO	イタリア, フランス	3 km	2003年
GEO	ドイツ, イギリス	600 m	2001年
TAMA	日本	300 m	すでに開始



図1 国立天文台の航空写真。基線長 300 m の干渉計が敷地内に設置されているのが見える。

いた。

ところが、近年のレーザーを用いた微小計測技術の発展により、重力波の直接検出も現実的なものとなってきている。重力波の直接検出は、一般相対性理論に残された大きな検証実験のひとつであると同時に、新しい天文学を拓く可能性を秘めている。途中の物質との相互作用が小さいという重力波の特質から、電磁波による観測とは質の異なった新しい情報が得られることが期待できるのである。この「重力波天文学」の創生に向け、世界各国で大型レーザー干渉計重力波検出器の建設が進められている(表1)。日本でも、国内の各研究機関が共同で、国立天文台三鷹キャンパス内に基線長 300 m のレーザー干渉計、TAMA300 を建設し、世界に先駆けて観測を開始している(図1)²⁾。以下、TAMA300 の例を挙げつつ、レーザー干渉計重力波検出器の光技術を解説していく³⁾。

2. レーザー干渉計による重力波検出

2.1 マイケルソン干渉計

干渉計を用いた精密計測実験として有名なものに、マイケルソン・モーレーの実験がある³⁾。これは、光源からの光をビームスプリッターで直交する2方向に分け、それぞれ

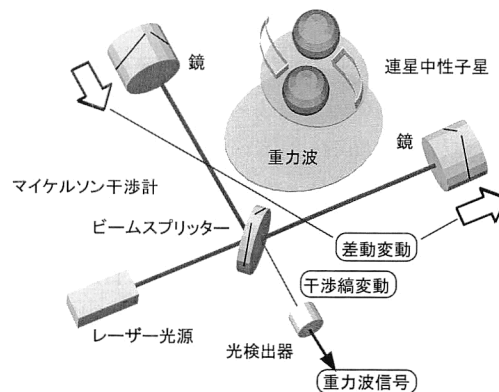


図2 レーザー干渉計による重力波検出の概念図。重力波によって生じた差動変動を干渉縞の変化として検出している。鏡やビームスプリッターは自由質点として振る舞うよう、懸架されている。

鏡で反射してビームスプリッター上で再結合させた際に生じた干渉縞から、直交する2方向の光速の差を測ろうとするものであった。当時、空間はエーテルとよばれる物質で満たされており、これが光を伝搬する媒質となると考えられていた。地球はエーテル内を運動しているため、地球の進行方向とそれと直交する方向では光速に差があるはず、というのが実験の目的であった。しかし、実験では、光速には有意な異方性はみられない、という結果が得られた。この実験結果は、エーテルの存在を否定する証拠として、後の特殊相対性理論の誕生に大きな影響を与えたのである。

上でマイケルソン・モーレーの実験という過去の実験を持ち出したのには理由がある。一般相対性理論の予言する重力波の検出には、基本的には、このマイケルソン干渉計が用いられるのである(図2)。先に述べたように、重力波は、四重極特性をもつ。地上に置かれたマイケルソン干渉計に鉛直方向から重力波が入射した場合、干渉計の一方の腕は伸び、他方の腕は縮まる。両腕の光路長差の変化によって生じた干渉縞の変化から重力波信号を得ることができるのである。ただし、重力波を捕らえるためには、鏡は自由質点として振る舞うように、振り子によって懸架されていなければならない。また、雑音の影響を避け、 $h \sim 10^{-21}$ という感度を得るためにはさまざまな工夫を凝らす必要がある。ちなみに、マイケルソン・モーレーの実験では、重力波振幅で $h \sim 10^{-10}$ 程度の感度をもっていただけである⁴⁾。

^{b)} この振幅は、地球と太陽との距離が 10^{10} m、つまり水素原子1個分程度伸び縮みする量に相当する。

^{c)} 重力波検出器の開発は、共振型とよばれる方式によって1960年ごろに始められた。レーザー干渉計型は1970年代に研究が始められ、広い観測帯域をもつという利点から、現在は主流となっている。

^{d)} 実際には、マイケルソン・モーレーの実験では鏡は吊られていなかったため、重力波検出はできない。また、筆者らが目標としている周波数帯(数百ヘルツ程度)の変動は測定できなかったであろう。

2.2 レーザー干渉計重力波検出器

干渉計の感度はさまざまな雑音の影響を受けるが、最終的には主に3種類の雑音によって制限されると考えられる。低周波数帯(100 Hz以下)の感度は、地面振動によって制限される。地面振動は防振装置によって高い周波数では抑えられるが、低い周波数帯では除去しきれずに残ってしまうためである。中間の周波数帯(100 Hz~1 kHz)では熱雑音が支配的となる。これは、干渉計を構成する鏡や懸架装置は常温に置かれているため、その弾性体振動が熱によって励起され、雑音となるものである。高周波数帯(1 kHz以上)では、散射雑音が干渉計感度を制限する。これは、光が光子の集まりであることに起因する統計的雑音である。この雑音レベルは、干渉計に入射される光量の平方根に反比例するため、光量は大きければ大きいほど高い感度が実現できることになる。

上に挙げた雑音を下げ、かつ、それ以外の雑音の影響を避けるため、実際の重力波検出器では、マイケルソン干渉計に改良が施されている。現在、建設が進められている検出器では、両腕にファブリー・ペロー共振器を用い、また、パワーリサイクリングとよばれる技術を用いたタイプが主流となっている。光源としては、高出力・高安定性をもったレーザーを用いるとともに、モードクリーナーとよばれる光共振器でビームの整形や安定化を行う。また、大気ゆらぎによる雑音の影響を除去するために、干渉計は真空槽に収められる。自由質点として振る舞うように、鏡やビームスプリッターは懸架されるが、懸架系は、また、地面振動の影響を除去するための役割も果たす。さらに、懸架された干渉計を安定に動作させるためには、鏡等の光学素子の位置や角度を制御によって静止させることが不可欠となる。

TAMA300は上に書かれたような工夫のもと、 $h \sim 3 \times 10^{-21}$ の感度をもつよう設計されている。次に、干渉計各要素の中でも光学・制御系について述べていく。

3. TAMA300の要素技術

3.1 干渉計の構成

干渉計の構成は、パワーリサイクリングを施したファブリー・ペロー・マイケルソン干渉計となっている(図3)。

マイケルソン干渉計の腕の鏡はファブリー・ペロー共振器に置き換えられている。重力波は空間を歪みとしてやってくるので、干渉計の基線長は長いほど効果的に変動を検出することができる。一方、ある基線長以上では、長くなっても重力波の効果が積分・相殺されるため、感度は向上しない。300 Hzの重力波に対する最適な基線長は約200

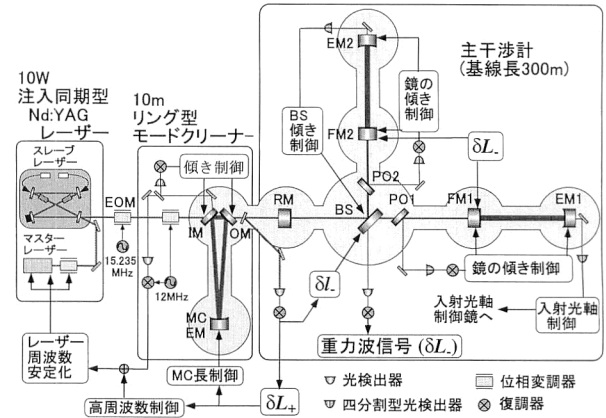


図3 TAMA300の光学・制御系。リサイクリングミラー(RM)は、近いうちにインストールされる予定である。

kmとなるが、この基線長のマイケルソン干渉計を建設することは、土地や予算の意味で現実的ではない。両腕にファブリー・ペロー共振器を用いると、光は共振器内を往復し、基線長が伸びたのと同様の効果をもたらすのである。

また、干渉計には、パワーリサイクリング技術が組み込まれている。散射雑音の影響を抑えるため、マイケルソン干渉計の検出ポートは暗縞になるように制御されている。このとき、入射されたほとんどすべての光は光源側に戻っていき、捨てられることになる。ここで、干渉計と光源の間に、パワーリサイクリングミラーとよばれる鏡を追加し、干渉計から戻ってくる光を再度打ち込むことによって、干渉計内部の光パワーを増加させることができる。干渉計の散射雑音レベルを下げるには高出力のレーザー光源が必要となるが、われわれが用いることのできるパワーには限界がある。パワーリサイクリングを導入することによって、光源のパワーを上げたのと同様の効果が得られるのである。

TAMA300では、腕共振器は基線長300 m、フィネス520(共振器内を光が約300往復することに相当する)という値に設計されている。パワーリサイクリングによる実効パワーの増大比(パワーリサイクリングゲイン)は10という設計になっている。これによって、散射雑音レベルが約3分の1に抑えられることになる。

3.2 光源部

TAMAでは、高出力・高安定という厳しい要求を満たす光源として、出力10 WのNd:YAGレーザー(波長1064 nm)と基線長10 mのモードクリーナーを組み合わせるのが用いられている。

レーザー光源には、注入同期とよばれる手法が用いられている。これは、安定だが低出力のレーザー(マスターレーザー)の光を、高出力レーザー(スレーブレーザー)に

入射させることによって、安定かつ高出力の単一モードのレーザー出力を得る手法である。マスターレーザーとしては、出力 700 mW の半導体レーザー励起の Nd:YAG レーザーを用いる。このレーザーは、YAG の単一結晶の内部にリング共振器を構成したものであり、高い安定度をもつ。スレーブレーザーは、Nd:YAG 結晶を 2 つ用いたリング共振器である。YAG 結晶は、それぞれ高出力のファイバー結合型半導体レーザーによって端面励起されている。スレーブレーザーの共振器長は、マスターレーザーと共振するように、VCM (ボイスコイルモーター) によって制御される。この注入同期レーザーの周波数は、マスターレーザー周波数の制御によって外部から安定化できるようになっている。

レーザーからの光には、通常、ミラー等が熱によって歪む影響で生じた高次モード光や、地面振動等の外乱によって生じたビームジッター (光軸のゆれ) が含まれている。これらの成分は干渉計の非対称性と結びついて雑音源となる。モードクリーナーは、これらの不要な成分を除去し、ビームを整形するために用いられる。モードクリーナーとしては、防振のために懸架された 3 枚の鏡で構成されたファブリー・ペロー共振器が用いられている。基本モード光がモードクリーナーを共振・透過するとき、高次モード光 (ビームジッターは高次モード成分量の時間変化とみなせる) は共振条件の違いから透過できず、反射される。したがって、モードクリーナーの透過光は基本モードのみを含むきれいな光となるのである。2 枚鏡の共振器ではなく、3 枚鏡のリング型共振器が用いられるのは、共振器に入らない不要な光が、レーザー光源や干渉計に戻り、雑音となる影響を避けるためである。重力波の観測周波数帯 (数百 Hz あたり) では、基線長が長く、懸架・防振されているモードクリーナーは、安定な周波数基準として、レーザー光源の周波数安定化にも用いられる。

3.3 鏡

干渉計を構成する鏡としては、合成石英基材を研磨し、低損失ミラーコーティングを施したものが用いられる⁴⁾。

鏡の基材に対して要求される条件は、基材中の吸収・散乱・屈折率ゆらぎが小さいこと、機械的損失が小さいこと、などである。また、これらの条件が大口径 (TAMA では直径 10 cm、厚さ 6 cm) に対して満たされなければならない。基材の光吸収が大きいと、その熱による歪みの影響 (熱レンズ効果) で光の波面が乱れ、干渉計の性能が低下する。また、基材中の屈折率ゆらぎも波面を乱す要因となる。

TAMA では、吸収が数 ppm/cm、屈折率ゆらぎが 10^{-6} 以下の合成石英が用いられている。低光損失に加えて、低機械的損失も基材の選択には重要な要素となる。機械的損失の逆数は Q 値とよばれる。この Q 値が大きければ、熱雑音による励起は鏡の共振周波数 (基本モードは 28 kHz) 付近にのみ集中し、観測周波数帯での雑音は小さく抑えることができる。TAMA のミラーは 3×10^6 という高い Q 値をもっている。

鏡の表面は、光共振器のモードを設計通りに保つだけのすぐれた表面形状と、深刻な散乱ロスが発生しないほどの平滑さをもつよう研磨される。TAMA では、表面形状誤差 $\lambda/40$ 程度、表面粗さ 1 Å 以下という要求を満たした鏡が用いられている。

基材の表面には、誘電体多層膜コーティングが施され、低損失・高反射率ミラーが実現されている。TAMA の鏡は、イオンビームスパッター装置で Ta_2O_5 と SiO_2 の $\lambda/4$ 膜を交互に約 30 層積み重ねて製作されている。これにより、約 100 ppm 程度の低損失が、直径 10 cm という口径に対して測定されている⁵⁾。

3.4 制御

干渉計を構成する光学素子は、それぞれ懸架されている。重力波の観測周波数帯では懸架装置は防振の役割も果たすが、一方で、その共振周波数 (約 1 Hz) 付近では、かえって大きな励起 (数 μm_{rms} 程度) を受けてしまう。干渉計が、その最高感度を達成するためには、共振器長は $10^{-12} \text{ m}_{\text{rms}}$ 以下の変動量に保たなければならない。そこで、制御によって干渉計動作を安定に保つことが不可欠となる⁵⁾。

干渉計が正常に動作するためには、2 本の腕共振器は入射光と共振する、干渉縞は検出ポートで暗縞に保たれる、リサイクリングミラーによって反射された光が光源からの光と同位相で重ねられる、という動作条件を満たす必要がある。この制御には、フロントルモジュレーションとよばれる手法が用いられる。これは、入射レーザー光に位相変調をかけ、かつ、ビームスプリッターから 2 本の腕共振器までの長さに意図的に数十 cm の差をつけることで制御に必要な 4 自由度の信号を得る方法である。得られた信号 (δL_- , δL_+ : 腕共振器の差動・同相信号, δL , δl : リサイクリングミラーから腕共振器までの距離の差動・同相信号) は、干渉計の動作点を保つよう、それぞれ鏡にフィードバックされる。鏡には小さな磁石が取り付けられており、近くに配置したコイルに電流を流すことにより鏡の位置は制

⁴⁾ これは、TAMA で測定された値であり、表面の汚れ等の影響も含んだ値と考えられる。他の測定では、この 3 分の 1 程度の損失も報告されている。また、数 cm 程度の口径のものでは数 ppm 程度の低損失も実現されている。

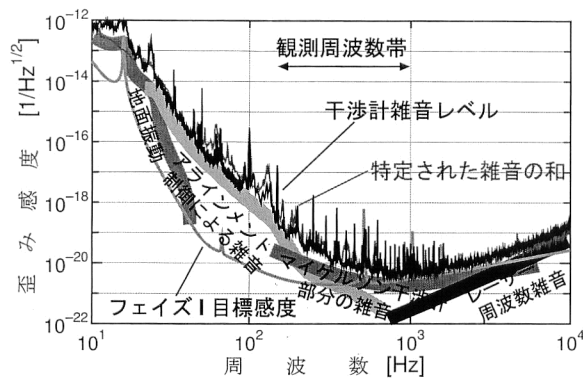


図4 TAMA300の感度曲線と雑音源。縦軸は歪み量のパワースペクトルを表し、これに観測周波数帯域幅の平方根をかけたものが、重力波振幅 h となる。現在の感度を制限する雑音はほぼすべて特定されている。

御される。

また、重力波検出器による観測を行うためには、感度だけでなく、長時間の安定度も非常に重要な要素となる。そのため、鏡の傾き制御や低周波数のドリフト制御も不可欠である。鏡の傾き（アラインメント）制御にはウェーブフロントセンシングとよばれる手法が用いられる。これは、位相変調をかけた光を共振器に入射し、その反射光を4分割型ディテクターで検出・復調することによって、各ミラーの傾き信号を取り出す手法である。さらに、低周波数での光軸のドリフトを抑えるために、腕共振器の透過光のスポット位置は4分割型ディテクターで検出され、入射光軸やビームスプリッターにフィードバックされる。

4. 天文学の創生に向けて

4.1 TAMAの現状

TAMA計画は1995年にスタートした。TAMAの建設は大きく2つの段階に分けて進められている。最初の段階（フェーズI）では、パワーリサイクリング以外のすべての要素を組み込み観測を行う。その次の段階（フェーズII）では、パワーリサイクリングを組み込むとともに各種雑音を低減し、最終目標感度を達成する。現在、TAMAはフェーズIの状態、世界に先駆けて観測を開始している。TAMAは、現在、世界で稼働している唯一の干渉計型重力波検出器であり、過去のプロトタイプ干渉計を含めても、最も高い感度と安定度を誇っている。

図4は、現在のTAMAの感度と雑音源、目標感度を描いたものである。現状ではフェーズI目標感度にはわずかに到達していないが、現在の感度を制限する雑音源は特定

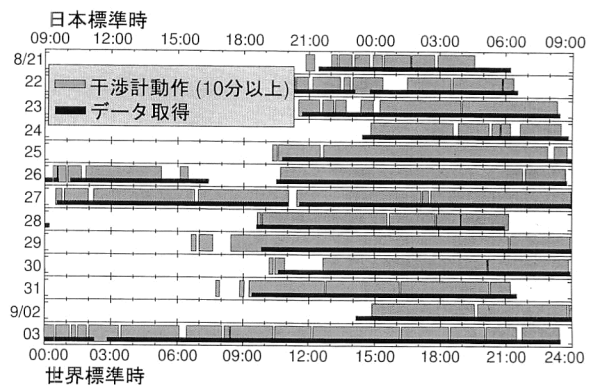


図5 2000年夏に2週間にわたって行われた観測での干渉計の動作状況。昼間は観測は行われていないが、夜間はおおむね安定に動作していることがわかる。

できており、対策が施されているところである。また、図5は、2000年夏に2週間にわたって行われた観測での干渉計の動作状況を表している。昼間は、産業活動等による外乱が大きいため、観測は行われなかったが、夜間はおおむね安定に動作していることがわかる。特に、これほど高感度な干渉計が10時間以上、連続に動作した日が数日あったことは、非常に大きな成果であった。この観測では、合計160時間以上に及ぶデータが取得され、現在、解析が進められている¹⁾。

今後、TAMAでは、感度と安定度を今以上に向上させた後、さらに長期間にわたる観測を行う予定である。その後、パワーリサイクリングを組み込み、最終目標感度を達成させ、連続観測を行う予定である。

4.2 今後の展望

現在、TAMAはすでにわれわれの銀河系内での超新星爆発や連星中性子星の合体といった重力波イベントを検出できるだけの感度をもっている。しかし、これらのイベントが起こる確率は低い(数十年に1度)。したがって、重力波の直接検出だけでなく、重力波による天文学を創生するためには、より感度を高めていく必要がある。より感度を上げ、遠くの銀河まで見ることができれば、より高いイベントレートを期待できるのである²⁾。

外国で進められているLIGOやVIRGOでは、基線長が長いという利点から、TAMAより1桁よい感度をもつことになるはずである。しかし、確実に天文学を成立させるためにはさらに感度の高い干渉計が必要になるであろう。LIGOプロジェクトは、LIGO IIとよばれる計画をもっており、世界各国の研究機関を巻き込んで各種最先端技術の研究開発を精力的に進めている。

¹⁾ この観測後、防振系の大幅な改良が施され、現在では、干渉計は昼間でも安定に動作するようになっていく。

²⁾ 重力波の振幅は波源までの距離に反比例し、見ることで銀河の数は体積に比例するため、感度が1桁向上すれば、検出確率は3桁増える。

日本でも、LCGT (Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope) とよばれる計画が進められている⁶⁾。これは、基線長 3 km の干渉計を地面振動が静かな神岡鉱山に建設するという計画である。この計画の大きな特徴は、原理的な雑音のひとつである熱雑音を下げため、鏡や懸架装置を 20 K の低温に冷却することである。同時に、ミラーの基材にサファイアを用い、高い Q 値を実現することで、熱雑音の影響はほぼ完全に除去でき、LIGO II よりも高い感度が期待できるのである。LCGT の実現に向け、鏡の低温化技術や低温での鏡の特性評価、低温プロトタイプ干渉計の建設、地下の安定性を実証するための干渉計の神岡鉱山内設置などが国内で進められている。また、光源に用いられる 100 W クラスのレーザーの開発も始められている。ただ、重力波検出器に用いるには、高出力であるというだけでなく、安定度やビームの質、また、高パワーで使用できる変調器や光検出器の開発など、さまざまな要求が課せられている。

他方で、干渉計を宇宙に打ち上げる計画もある。ESA と NASA が共同で進めている LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 計画がそれである。3 台のスペースクラフトによって、基線長 500 万 km の正三角形型をした干渉計を構成し、地上では地面振動等の影響によって検出困難な低周波数帯 (0.1 mHz ~ 1 Hz) の重力波を検出しようという計画である。この周波数帯には確実に存在する重力波源がいくつかあるといわれている。LISA は 2010 年の打ち上げを目指して準備が進められている。

重力波の波源の方向や偏光等のパラメーターを決定するには最低 3 台の干渉計が必要とされている。LCGT と 2 台の LIGO II、さらにヨーロッパに 1 台の高感度干渉計が建設され、稼動を始め、また LISA が打ち上げられるであろう 2010 年ごろ、重力波天文学が本格的に幕をあけるだろう、というのが私見である。

レーザー干渉計重力波検出器の性能は、光技術の進歩と

ともに向上してきた。これからの重力波天文学の発展にも光技術のさらなる進歩は欠かせないものになるだろう。この解説記事を読んで、少しでも重力波検出器の開発に興味をもった方がおられたなら幸いである。

文 献

- 1) 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健編: 重力波をとらえる (京都大学学術出版会, 1998)。
- 2) M. Ando, K. Arai, R. Takahashi, G. Heinzel, S. Kawamura, D. Tatsumi, N. Kanda, H. Tagoshi, A. Araya, H. Asada, Y. Aso, M. A. Barton, M.-K. Fujimoto, M. Fukushima, T. Futamase, K. Hayama, G. Horikoshi, H. Ishizuka, N. Kamikubota, K. Kawabe, N. Kawashima, Y. Kobayashi, Y. Kojima, K. Kondo, Y. Kozai, K. Kuroda, N. Matsuda, N. Mio, K. Miura, O. Miyakawa, S. M. Miyama, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagano, K. Nakagawa, T. Nakamura, K. Nakao, K. Numata, Y. Ogawa, M. Ohashi, N. Ohishi, S. Okutomi, K. Oohara, S. Otsuka, Y. Saito, M. Sasaki, S. Sato, A. Sekiya, M. Shibata, K. Somiya, T. Suzuki, A. Takamori, T. Tanaka, S. Taniguchi, S. Telada, K. Tochikubo, T. Tomaru, K. Tsubono, N. Tsuda, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Ueda, K. Waseda, Y. Watanabe, H. Yakura, K. Yamamoto and T. Yamazaki: "Stable operation of a 300-m laser interferometer with sufficient sensitivity to detect gravitational-wave events within our galaxy," *Phys. Rev. Lett.*, **86** (2001) 3950-3954.
- 3) 霜田光一: 歴史を変えた物理実験 (丸善, 1996)。
- 4) 大橋正健: "レーザー干渉計型重力波検出器用高性能ミラーの開発", *応用物理*, **68** (1999) 663-666.
- 5) 川村静児: "重力波検出器用レーザー干渉計における計測と制御", *計測と制御*, **37** (1998) 852-857.
- 6) K. Kuroda, M. Ohashi, S. Miyoki, D. Tatsumi, S. Sato, H. Ishizuka, M. Fujimoto, S. Kawamura, R. Takahashi, T. Yamazaki, K. Arai, M. Fukushima, K. Waseda, S. Telada, A. Ueda, T. Shintomi, A. Yamamoto, T. Suzuki, Y. Saito, T. Haruyama, N. Sato, K. Tsubono, K. Kawabe, M. Ando, K. Ueda, H. Yoneda, M. Musha, N. Mio, S. Moriwaki, A. Araya, N. Kanda and M. E. Tobar: "Large-scale cryogenic gravitational wave telescope," *Int. J. Mod. Phys. D*, **8** (1999) 557-579.

(2001 年 3 月 21 日受理)