

レーザー干渉計を利用した共振型重力波検出器

坪野 公夫*・三尾 典克*

レーザー干渉計を組み込んだ円板型重力波アンテナは、これまでにない高感度、広帯域な共振型重力波検出器を室温で実現する可能性をもっている。ここで提唱する検出器の最小検出可能なバースト重力波の振幅は $k_{\min} = 4 \times 10^{-18}$ であり、中心周波数 1.2 kHz のまわりで 80 Hz のバンド幅をもつ。このような常温検出器が建設されれば連続運転が可能になり、今後我々の銀河で起きるかも知れない超新星爆発に備えることができる。

これまでの共振型重力波検出器では、弾性体アンテナの機械的振動を電気信号に変換するトランスデューサーの性能によって全体の感度が制限されているというのが現状である。これまでに SQUID や超伝導マイクロ波 cavity を利用した高感度トランスデューサーがいくつか開発されている。しかしいずれも液体ヘリウム温度 (4.2K) で動作するタイプであるため、低温維持の問題によって、これらを仕組み込んだ重力波検出器の連続運転はなされていない。これに対してレーザー干渉計を変位計として利用したトランスデューサーは室温でも量子限界を達成できるので、検出器のメンテナンスが低温に比べて飛躍的に容易になる。また、もともとのアンテナの共振幅は非常に狭いが、信号対雑音比を考えたときのバンド幅はレーザー干渉計の超高感度性によって、大幅に改善することが可能である。実際、レーザー干渉計を用いた振動検出器はこれまでにない高感度低雑音な特性を有していることが示される。円筒型の重力波アンテナ (いわゆる Weber bar) にマイケルソンタイプのレーザー干渉計を組み込むことは容易ではないが、これまでに東大理学部で開発してきた円板型のアンテナは図 1 に

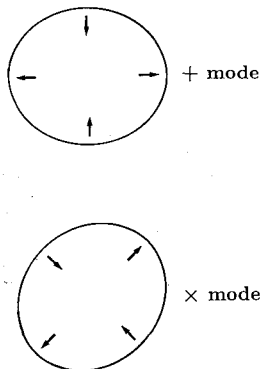


図 1 円板の 2 つの独立な 4 重極振動モード。

示すような 2 つの基本 4 重極振動モードをもち、レーザー干渉計のマウントに最適である。つまり 4 重極振動につれて、直交する 2 本の干渉計のアームのうち 1 本は長さが伸ばされ他方は縮むように配置することにより、アンテナの振動をレーザー光の位相差として検出することが可能である。

現在計画されているのは図 2 に示したように、2 つのフュブリー・ペロー共振器を用いたレーザー干渉計を円板型アンテナの上に配置するものである。共振器を構成する 2 枚の鏡のうち一方が機械的に振動すると反射光の位相が変化する。そこで変調法を利用してそれぞれの共振器からの反射光を検出し、この 2 つの信号を引き算することにより振動を検出することができる。機械振動に対する反射光の応答が伝達関数の形で計算されている。検出器の感度を定めるいくつかの原理的な雑音源がある。まずレーザー光のショット雑音が感度を制限する。この限界はレーザーのパワーを増すことや、フュブリー・ペロー共振器に高反射率の鏡を使用してフィネスを上げることにより改善が可能である。さらに光源のもつ周波数ゆらぎが出力に現れるので高安定なレーザーが必要となる。もし干渉計の 2 つのアームが非常によくバランスがとれていれば周波数ゆらぎはコモンモード雑音となるので原理的には除去することが可能である。また

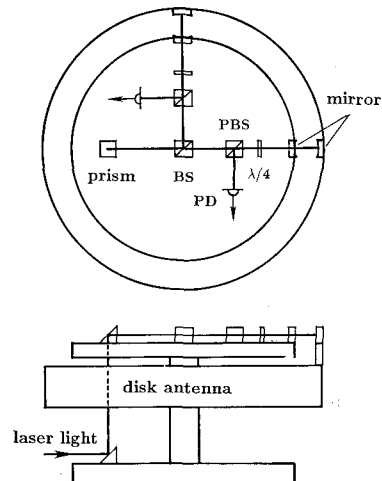


図 2 レーザー干渉計の組み込まれた円板型重力波アンテナ。2 つの光検出器 (PD) の出力を差し引くことにより、信号は 2 倍になりコモンモード雑音は消える。BS はビームスプリッター、PBS は偏光ビームスプリッター、 $\lambda/4$ は $1/4$ 波長板を表す。

* 東大理 Kimio Tsubono, Norikatsu Mio: Laser Transducer

共振器の長さをできるだけ短くすることにより相対的に周波数ゆらぎの効果を小さくすることができる。検出器のもう一つの主な雑音源は熱雑音によるアンテナのブラウン運動であるが、これはアンテナに働くホワイトなスペクトルをもった外力として扱うことができる。設計の指針としては、レーザーのショット雑音とアンテナのブラウン運動の2つによって決まる感度をまず想定し、その他の雑音源はこれに対して無視できるような設定を考える。次に具体例でこれを示そう。アンテナは直径 2 m、質量 1,700 kg のアルミ製とする。共振周波数 1.2 kHz で Q 値は 2×10^5 とし、これを室温 (300K) で運転する。レーザー干渉計の光源は波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーとし、各共振器に 100 mW のパワーを入射する。光検出器の量子効率率は 0.8、ファブリー・ペロー共振器に用いる鏡の反射率が 99.9%、間隔は 1 mm を予定する。この様なパラメータで計算すると、まずショット雑音で決まる等価雑音変位は 1.3×10^{-19} m/Hz^{1/2}

であり、ブラウン運動による雑音力としては 7.4×10^{-10} N/Hz^{1/2} となる。この2つの雑音をもとに検出器の感度を計算すると、最小検出可能な重力波パルスの振幅として $h_{\min} = 4 \times 10^{-18}$ 、このときのバンド幅として 1.2 kHz のまわりに 80 Hz が得られる。これ以外の雑音の寄与も計算されるが、これを上の感度の計算に効いてこないように抑えることは現在の技術でもそうむずかしくないと思われる。さらにもしアンテナをヘリウム温度まで冷やす場合には、 h_{\min} として室温と比べて約 1 桁の感度向上が予想される。

現在、東大理学部ではこれまで述べたような原理の重力波検出器のプロトタイプを製作して実験中である。直径 60 cm のアルミ製の円板型アンテナにレーザー干渉計を組み込み基本的な動作と特性の研究を行っているが、ほぼ計算通りの性能が得られている。今後これを発展させて銀河系内モニター用の室温重力波検出器を実現する計画である。

共振型検出器

鈴木 敏 一*

1. 共振型検出器の構成

地上の実験室における共振型の検出器で対象とする重力波は通常数 10 Hz~数 kHz である。検出器の大きさは、精々 10 m 以下であるから、重力波の波長は検出器に比べて十分に大きい。また、地球の重力場は一定で、時空の曲率半径にして約 1 光年であり、このことから、実験室内の一点を原点を取った固有基準座標系における記述を用いて、重力波と検出器の相互作用を Newton 力学的に扱うことが可能になる。重力波は検出器に対して、時間的に変化する潮汐力の外場としてはたらく。

共振型の検出器は、1960 年代に J. Weber が開発して以来今日まで発展を続けており、アンテナとトランスデューサー (以後 TRD と略記) から構成される。アンテナは、質量 M 、共振周波数 $\omega_0/2\pi$ 、有効面積 A_G 、振動の Q 値、温度 T の諸量によって特徴付けられる振動子で、重力波の作り出す潮汐力を受けて振動を起こす。TRD はアンテナと電気系を結合する。アンテナが潮汐力の場を感じるためには、振動によって、あるモードの質量四重極能率の変化することが必要である。通常そのような重力波に活性なモードのみに着目するので、アンテナの振動を散逸を持った1つの調和振動子として扱う

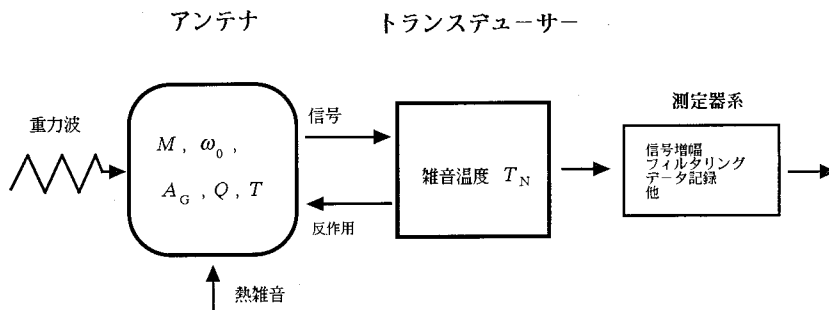


図 1 共振型検出器の基本的構成

* 高エネルギー物理学研究所 Toshikazu Suzuki:
Resonant Mass Detector