

論文内容の要旨

論文題目: Direct measurement of mirror thermal noise
(鏡の熱雑音の直接測定)

氏名: 沼田 健司

本論文は、干渉計型重力波検出器の感度を観測帯域で制限する鏡の熱雑音を、短基線長干渉計を用いて直接測定した実験についてまとめたものである。

重力波とは一般相対性理論の Einstein 方程式から導かれる、光速で伝播する時空の歪みである。その存在は、Einstein 自身により、一般相対性理論を発表した翌年の 1916 年に理論的に指摘された。それから約 60 年後、1978 年、J.H. Taylor と R.A. Hulse の連星パルサー PSR1913+16 の公転周期変化の観測により、この存在は間接的に証明された。これにより、重力波の存在は確実なものとなされ、現在までその直接検出に向けて様々な実験が行われてきた。

重力波の直接検出には、一般相対性理論の直接検証という物理的な意義の他に、天文学的な意義もある。重力波の相互作用はきわめて小さいことから、連星中性子星合体や超新星爆発といった現象から放出された重力波は、電磁波やニュートリノの観測からは得られない情報を我々にもたらすと考えられている。重力波の直接検出によって、重力波を使った、新しい天文学を創生することができると期待されている。

しかしその相互作用の小ささゆえ、重力波の直接検出には、1960 年代に開始された J. Weber による共振型検出器による実験以来、現在まで成功していない。共振型検出器は、重力波によって励起された弾性体の振動を検出する装置であり、観測の周波数幅が数 Hz 程度と狭く、重力波の波形を知ることができないという大きな欠点がある。そのため、現在、精力的に開発されているのは、干渉計型重力波検出器である。干渉計型検出器においては、鏡が観測帯域で自由質点となるように懸架され、重力波による鏡の間の固有距離の変化が

干渉計により検出される。その検出器では 100 Hz から 1 kHz までの広い観測帯域で、重力波の波形や偏波の情報を得ることができる。近年のレーザ技術や極限精密計測技術の発展を受け、現在世界で 4 つの大型レーザ干渉計型重力波検出器が建設されつつあり、重力波検出の可能性が高まってきている。

しかし、干渉計型検出器の観測帯域では、原理的に避けられない雑音、鏡の熱雑音が存在する。鏡の熱雑音とは、干渉計を構成する鏡が熱浴に接していることにより熱振動し、光路長を変動させる雑音である。鏡の熱雑音は、干渉計型検出器の感度を最も重要な帯域において制限し、直接検出を困難にする要因となる。従って、その研究は干渉計型検出器の開発において最も重要な課題となっている。しかし、鏡の熱雑音の振幅も非常に小さいものであるため、その研究は理論的なものや間接的な測定実験に限られてきた。特に、検出器で問題となる帯域は鏡の共振周波数より十分低く、熱雑音の振幅も非常に小さくなる。揺動散逸定理によると、その帯域での熱雑音の振幅は鏡の機械損失に比例しているはずである。これまでに、その関係を利用した、熱雑音の理論的な計算、鏡の機械損失の測定による間接的な実験が数多く行われてきた。

しかしながら、鏡の熱雑音が共振周波数外で測定された例はなく、理論や間接的な実験による熱雑音が正しいかどうかは、鏡の熱雑音の研究における最大の課題として残されたままであった。機械系の熱雑音の直接測定という観点から見ても、共振周波数外を含む広い周波数幅での測定は、小さな板バネやねじれ振り子といった簡単な系において、一桁未満の周波数帯で行われていたに過ぎない。従って、鏡の熱雑音の直接測定は、干渉計型検出器の開発においての必須の課題であると共に、揺動散逸定理のより詳細な検証という物理的な意義も持つ。そのため、干渉計型検出器を模した実験室レベルの干渉計を構築し、鏡の熱雑音を、共振周波数を含む広帯域な周波数領域において直接測定する実験を行うこととした。

ここで直接測定を試みたのは、これまでに鏡の熱雑音として予言されていた、Brownian noise と thermoelastic noise の二つである。前者は材質の中に均一に分布しており、多くの場合一定と考えられるバックグラウンドの機械損失に由来し、現象論的に取り扱われる。後者は、熱弾性効果による機械損失に由来し、熱力学と弾性体力学からその損失の大きさが正確に予言されるものである。これらは、鏡の機械的な特性や熱的な特性によって振幅が決まると考えられる。そのために、二つの鏡材料、光学ガラス BK7 とフッ化カルシウム (CaF_2) を用意した。BK7 は、実際の検出器で使われる熔融石英と同じく、機械損失が一定であることが分かっており、Brownian noise の測定に適している。また、 CaF_2 は、次世代検出器の鏡であるサファイアと類似した熱的特性を持ち、その線膨張率の大きさから thermoelastic noise の測定に適している。

これらの特性とこれまでの理論から予言される、熱雑音の大きさを目標感度と設定し、干渉計の各部を注意深く、且つ、実際の検出器で起こる状況を再現するよう、設計、構築した。測定の原理は、周波数安定化されたレーザによって、二つの短基線長 Fabry-Perot 共振器 (test cavity) の鏡の熱雑音を測定するというものである (図 1)。レーザ光源は、その周波数が固定光共振器 (reference cavity) の長さに対して安定化され、test cavity に入

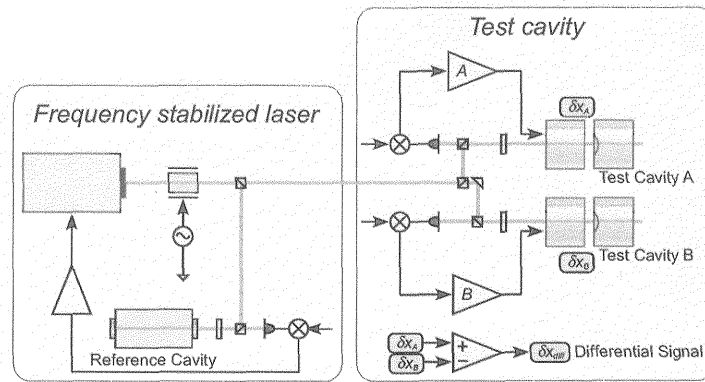


図 1: 鏡の熱雑音の直接測定実験の模式図.

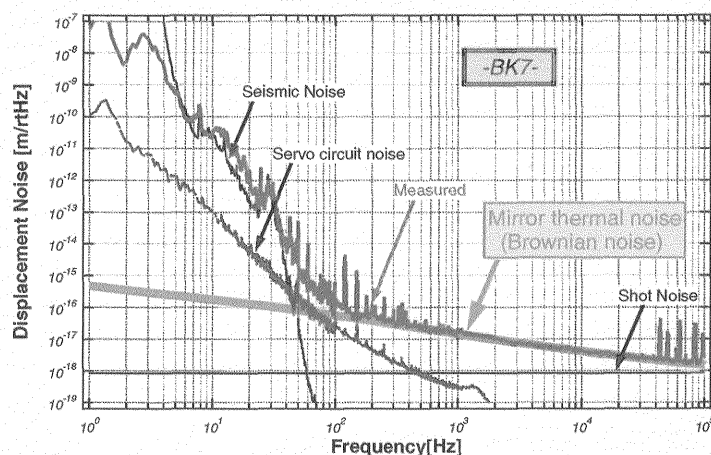


図 2: BK7 において測定された変位雑音スペクトル. 太線は理論値.

射される. Test cavity はそのレーザー光に対して位置が制御され、変位に敏感となる共振状態に置かれる. その共振器長を短くすることにより、レーザーの周波数雑音の影響を受けにくくし、且つ、熱雑音の効果を大きくすることができる. また、等価な二つの共振器からの変位信号を引き算することで、二つの共振器に同相に働く他の雑音を除き、無相関な鏡の熱雑音の信号を得ることが可能となる.

本実験では、その干渉計により、約 100 Hz から 100 kHz の 3 桁に渡り、鏡の熱雑音を測定することに、初めて成功した. それにより、鏡の共振周波数から離れた帯域での熱雑音を直接理論と比較することが可能となった. 測定された熱雑音は、Brownian noise、thermoelastic noise 共に、理論より計算されていた熱雑音と一致していることが確認された. 図 2 に BK7 で測定された熱雑音を示す. 内部損失が一定であることを反映し、Brownian noise は周波数 f に対して、 $1/f^{1/2}$ に従っている. 図 3 に CaF_2 で測定された熱雑音を示す. Thermoelastic noise の理論値と周波数依存性を含めて一致している. これらの理論値は揺

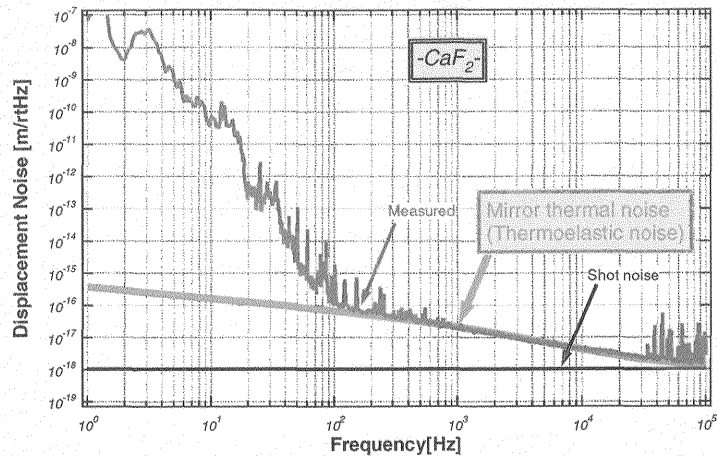


図 3: CaF_2 において測定された変位雑音スペクトル. 太線は理論値.

動散逸定理も含んでおり、このような広い帯域で機械系における揺動散逸定理が実験的に検証されたのも、この実験が最初である。高い感度によって、鏡の共振付近での熱雑音も直接測定され、これまでに単純な系でのみ行われてきた共振付近での熱雑音の議論を、実際の鏡の熱雑音を用いて行うことも可能となった。

この干渉計は鏡の熱雑音で感度が制限されている。他に考えられている雑音源は、今回測定された鏡の熱雑音より十分小さいか、容易に低減することのできるものである。これは、将来、より小さな鏡の熱雑音を、この干渉計を用いて直接評価できる可能性があることを示唆している。この干渉計は、検出器に導入する鏡のテストベンチとして、用いられていくことになる。

また、この直接測定の実験と共に、数値的な熱雑音の計算法、intrinsic な損失の測定による間接的な実験法の開発も行った。数値的な計算法とは、有限要素法を用いて運動方程式を解くことにより、一般の形状、一般の損失分布、周波数依存性をもつ損失のある系の熱雑音を、任意の周波数において計算する手法である。これまでに行われてきた鏡の熱雑音の計算は、解析的、静的であり、境界条件の変化にも弱かったが、この計算法はより一般化されており、鏡の共振付近の熱雑音も取り扱える。Intrinsic な損失の測定法とは、鏡の振動モードの不動点を点接触で支持することにより外的な損失の導入を抑え、鏡の内部損失を直接測定することのできる手法である。これらの計算や実験は正確な熱雑音の推定のためには不可欠なものであり、且つ、現在、ほぼ唯一の方法である。これらにより推定された鏡の熱雑音は、実験的に測定した熱雑音と確かに一致していることが確認された。

この研究で開発された直接測定を行う干渉計、熱雑音の計算法、機械損失の測定による間接的な実験法の三者は、相互に用いられながら、鏡の熱雑音の研究を促進し、重力波の直接検出にとって重要な役割を果たしていくと考えられる。