

論文の内容の要旨

論文題目: Study of the thermal noise caused by inhomogeneously distributed loss

(非一様な散逸による熱雑音の研究)

氏名: 山元 一広

本研究は、干渉計型重力波検出器の熱雑音の再評価を目的として行われた。従来の熱雑音推定方法が、間違っていることを証明し、新しい方法で再推定を行った。再推定の結果は従来の推定とは大きく異なっていた。これらの研究の詳細を報告する。

重力波は、光速で伝播する時空の歪みである。その存在は、Einstein によって一般相対論から導出された。Hulse と Taylor の発見した、連星パルサー PR1913+16 の公転周期の長期観測によって、重力波の存在は間接的であるが確認されている。しかし、重力波の直接検出は未だ成功していない。重力波の直接検出は、物理学にとっても天文学にとっても、大きな意味を持つ。物理学にとって、重力波検出は重力理論の検証実験である。また、天文学にとっては、重力波は宇宙を観測する新たな手段である。なぜなら電磁波やニュートリノの観測からは得ることができない天文学的情報が、重力波によってもたらされると予想されているからである。

このため、検出を目指した大型干渉計型重力波検出器の建設計画が進められている。アメリカの LIGO 計画、イタリア、フランスの VIRGO 計画、ドイツ、イギリスの GEO 計画、

そして日本の TAMA 計画である。これらの計画で行われている研究や開発によって、21 世紀の始めには、重力波の検出が可能になると期待されている。

干渉計型検出器の原理的な雑音の 1 つとして、熱雑音がある。熱雑音とは、干渉計の構成要素が熱的に励起されることによる揺らぎである。重力波の観測帯域では、熱雑音が検出器の感度を制限すると予想されている。一例として、TAMA 計画の干渉計である TAMA300 の予想感度を図 1 に示す。将来計画では、さらに 1 ~ 2 桁の感度向上を目指すので、熱雑音

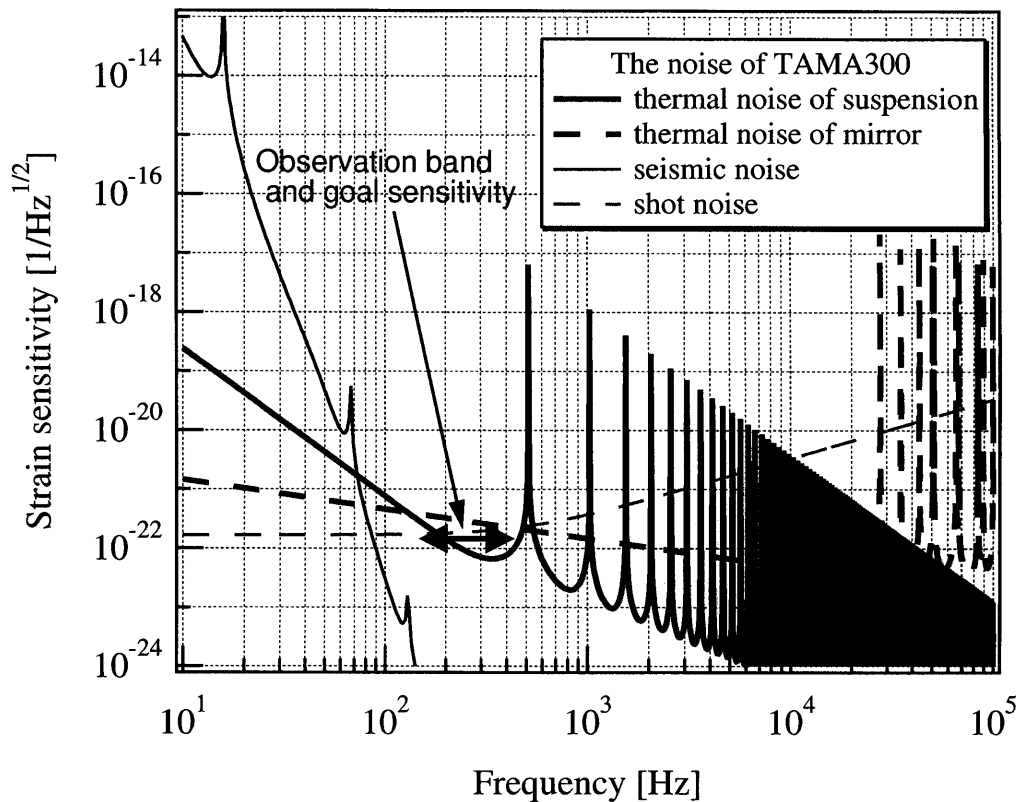


図 1: TAMA300 の予想感度。太い矢印は、観測帯域 (150 Hz ~ 450 Hz) と目標感度 ($h = 1.7 \times 10^{-22} / \sqrt{\text{Hz}}$) を表す。観測帯域では、熱雑音 (太い実線と太い点線) で感度が制限されていることがわかる。

の推定と低減は干渉計型検出器開発の必須事項である。

干渉計型検出器の熱雑音の推定において、(traditional) mode expansion という方法が、よく用いられている。図 1 も mode expansion によって見積もられた値である。これは共鳴

モードの散逸から、系の応答を求める方法である。この系の応答に揺動散逸定理を適用して、熱雑音が計算される。この方法で見積もられた値を参考にして、干渉計型検出器の開発が行われている。

しかし、最近のいくつかの理論的研究によって、散逸が非一様に分布しているときには、traditional mode expansion が正しくないことが明らかになってきた。一般的に、散逸は非一様に分布しているので、熱雑音の再推定が必要である。このような状況にも関わらず、非一様な散逸による熱雑音の研究はほとんど行われていない。direct approach という mode expansion に頼らない方法で、ごく簡単な系の熱雑音の理論的研究が行われた程度である。このため、非一様な散逸の熱雑音の一般的性質さえよくわかっていない。

そこで、干渉計型検出器の熱雑音の再評価を目標として、非一様な熱雑音の研究を行った。具体的な内容は、非一様な散逸による熱雑音の一般的性質の研究、traditional mode expansion に代わる新しい推定方法の実験的検証、そして干渉計型検出器の熱雑音の再推定である。

まず非一様な散逸による熱雑音の一般的な性質について調べた。この研究では、モード展開を非一様な場合でも適用できるように、筆者らが修正した方法 (advanced mode expansion) を利用した。traditional mode expansion によると、熱雑音は各共鳴モードの熱雑音の和として記述される。そしてモードの間に相関は存在しない。しかし advanced mode expansion によって、散逸の非一様性が、各モードの揺らぎの間に相関を生じさせることが証明された。つまり、非一様な散逸の熱雑音と traditional mode expansion の推定の差は、散逸の非一様性によって生じた相関と解釈できる。散逸の非一様性が大きいときに、traditional mode expansion との違いが大きくなるが、それは著しい非一様性によって相関が大きくなったからである。

次に traditional mode expansion に代わる新しい推定方法 (advanced mode expansion と direct approach) の実験的検証を行った。非一様な散逸をもつ板バネの熱雑音を測定し、推定の結果と比較した。測定結果は、新しい方法による推定と一致した。また traditional mode expansion の推定とは明らかに異なっていた。これは traditional mode expansion の破綻を示した最初の実験例である。

推定方法が実験によって検証されたので、干渉計型検出器の熱雑音の再推定を行った。非一様な散逸を持つ鏡の熱的な弾性振動による揺らぎを、direct approach で計算した。レーザービームが当たる付近に散逸が集中していると、熱雑音は traditional mode expansion の推定より大きいこと、逆にビームから離れているところに集中していると、traditional mode expansion の推定より小さいことが、確認された。この差はかなり大きく、従来の研究方針の変更が必要であることがわかった。例えばビームの反射膜の散逸は、今までほとんど考慮されていなかったが、熱雑音に大きく寄与することがわかった。このため反射膜の散逸の性質の研究が必要である。一方、鏡の位置の制御のために鏡には磁石が貼られるが、この接着による散逸はかなり大きく、深刻な問題になると考えられていた。しかし、普通磁石はビームの当たるところからかなり離れたところに貼られるため、ほとんど問題にならないことが判明した。以上の見積もりを実験的に検証した。実際の鏡の測定は困難であるので、測定にはプロトタイプを用いた。ビームの当たる場所の近くに散逸が集中している場合と、遠くに集中している場合の2通りについて実験を行った。結果は新しい方法（direct approach と advanced mode expansion）の推定と一致し、traditional mode expansion の推定とは異なっていた。つまり測定結果は、先の見積もりが正しいことを示唆している。

本研究により非一様な散逸による熱雑音の一般的性質、特に traditional mode expansion の推定と異なる理由が明らかになった。さらに散逸が非一様な場合には traditional mode expansion にかわる新しい推定方法が正しいことを実験によって確認した。これは traditional mode expansion の破綻を証明した初めての実験例でもある。さらに新しい推定方法を利用して、干渉計型重力波検出器の熱雑音の性質について調べた。その結果は従来の研究方針の変更が必要であることを明らかにした。今後のさらなる熱雑音の研究においても本研究の成果は有用な方法と指針をあたえるであろう。