

# 論文審査の結果の要旨

氏名 沼田 健 司

本論文は、未だ直接的には検出されたことのない重力波を超高感度レーザー干渉計によってとらえようとする場合に問題となる熱雑音を実験的に検証したものである。これまで熱雑音については様々な検討が重ねられ、鏡の熱雑音がレーザー干渉計においてどの程度の雑音となるかが、ようやく定量的に示されるようになってきた。しかし実際にレーザー干渉計の観測帯域で熱雑音が広い帯域で測定されたことがなく、理論的な予想曲線のまま留まっていた。本論文では、鏡の熱雑音を 3 桁の周波数帯域にわたって測定し、それが予想曲線に一致することを初めて示している。

本論文は 7 章からなり、第 1 章と第 2 章でレーザー干渉計による重力波検出について解説している。一般相対論から導かれたアインシュタイン方程式には光速度で伝播する波動解が存在する。これを重力波と呼び、時空の歪みの伝播としてとらえられている。重力波の直接検証が行われれば、一般相対論の検証という意義にとどまらず、従来行われてきた電磁波による情報以外の新しい情報をもたらすものとして、重力波観測は天文学の新しい観測の窓になると考えられている。しかし重力波と物質の相互作用はきわめて小さく、空間の歪みそのものをとらえる提案は多くあったが、現実には不可能に近いと考えられていた。しかし近年、極限技術の高度化により性能が飛躍的に向上したレーザー干渉計が建設されるようになり、LIGO (米) や TAMA300 (日本)、および GEO600 (英独) など数台の大型レーザー干渉計型重力波検出器が実際に観測を始めている。

第 3 章では次世代の大型レーザー干渉計の感度を制限すると予想されている鏡の熱雑音を議論している。鏡の熱雑音とは、レーザー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。これはレーザー干渉計型重力波検出器の感度を最も重要な帯域で制限し、重力波の直接検出を困難にする要因になる。しかし、その振幅が非常に小さいため、熱雑音の研究は理論的なものや間接的な測定実験に限られていた。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、振幅が極端に小さい。遥動散逸定理によれば、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り、これを根拠とする間接的な実験が数多く行なわれてきたのである。熱雑音には Brownian noise と thermoelastic noise の 2 種類がある。前者は材質の中に均一に分布している機械損失に由来し、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正確に予想することができる。その計算には、鏡の機械的特性や温度特性が用いられる。以上の 2 種類の熱雑音を別々に測定するために、測定材料として光学ガラス BK7 とフッ化カルシウム ( $\text{CaF}_2$ ) を選んだ。BK7 は、実際の検出器で使われている合成石英と同様に機械損失が一定であることがわかっており、Brownian

noise の測定に適している。一方、 $\text{CaF}_2$  は、次世代検出器の鏡とな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 の測定に適したものである。この2つの基材、BK7 と  $\text{CaF}_2$  の熱雑音を測定するための実験装置について説明しているのが第 4 章である。他の雑音の影響を抑えるために、非常に短いファブリーペロー共振器を構成し、高安定化レーザーを用いて鏡の振動を測定する実験装置となっている。ファブリーペロー共振器のフィネスは 600-800 であり、コーティングされている誘電体多層膜の機械損失は無視できる。

第 5 章では上記の実験装置で得られた測定結果を示している。予想どおりに BK7 では Brownian noise、 $\text{CaF}_2$  では thermoelastic noise が約 100Hz から 100kHz の 3 桁の周波数帯域にわたって測定され、理論計算による曲線と一致した。このような広い帯域で遥動散逸定理を機械系において検証したのは初めてである。第 6 章ではこの結果について詳細な解析を行っており、これまで行われてきたバルクの機械損失から熱雑音を推定する方法の問題点を明らかにするとともに、その解決策が示されている。結びの第 7 章では鏡の熱雑音の測定がまとめられ、今後の展望が解説されている。

以上のように、本研究により次世代レーザー干渉計型重力波検出器で問題となる鏡の熱雑音の実験によって検証されたと考えられ、重力波物理学の進展に貢献大と認められる。なお、本論文は坪野公夫・安東正樹との共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。