

論文審査の結果の要旨

氏名 山元一広

本論文は、10章からなり、第1章は緒言で、第2章で重力波の伝搬、発生および検出について概観している。第3章から本論文のテーマである熱雑音の基礎について述べる。ここでは、熱雑音の基礎である散逸揺動定理について、1次元の場合、 n 次元の場合、線形システムの場合それぞれについて定式化を示し、系の伝達関数が知れば、熱雑音のパワースペクトルが求められることを説明している。これを調和振動子に適用して熱雑音のスペクトルを示し、散逸として考えられる粘性減衰と構造減衰を導入し、それぞれの場合にスペクトルを求めている。次に、減衰の大きさが熱雑音の大きさを決めることから、減衰の大きさを機械的な Q という因子から求めることを示す。散逸としては、系の外部から来る場合と内部で発生する場合があるが、前者として残留ガス、渦電流損失を挙げ、それぞれの大きさを評価している。後者として、上で挙げた構造減衰の他に熱弾性減衰を取り上げ、これを特注づけるパラメータを示す。この章の後半では、モード展開と呼ばれる伝統的な方法を導入し、これを基線長300mのTAMALレーザー干渉計に応用して懸架系、鏡それぞれの熱雑音を見積もり、目標とされる感度との違いを説明する。

第4章では、第3章で紹介した、これまで広く用いられてきたモード展開法による見積もりは損失が一様でない場合は、正しくないことを示す。モード展開法では、熱雑音は各共振モードの熱雑音の和として表され、各モード間には相関はない。これに対して、損失が一様でない、すなわち、モードごとに異なる Q を有するような系の場合、モード間の揺らぎの間に結合が生じることを証明した。これを用いて拡張モード展開法を考案した。この方法を2つのモードからなる系に適用して結合の意味と大きさを考察し、さらに一般的な系にも応用している。また、モード間の結合の大きさを測定する方法について提案している。

第5章は、モード展開法を用いないで熱雑音を推定するために生み出されたdirect approachと呼ばれる3つの方法、すなわち、Levinの方法、Nakagawaの方法、Tsubonoの方法を紹介し、損失が一様でない場合、モード展開で予測される熱雑音は、これらの予測と一致しないことを示している。第6章では、拡張モード展開法とdirect approach法を実際の板ばねのシステムに応用し、実験的に熱雑音を計ることでその実験的検証を行っている。従来のモード展開法による推定は損失の非一様性が大きいと明らかに実験を説明できなかったのに対し、新しい方法はよく説明できた。第7章では、以上の新しい方法を、レーザー干渉計鏡の熱雑音推定に適用して、これまで、

鏡の制御のために接着してつけていた小さい棒磁石によるQの低下が熱雑音にはさほど影響を与えないことを明らかにする一方で、これまでその効果があまり考慮されて来なかった光学薄膜の機械的損失がきわめて重要な影響を与えることが示された。特に、鏡の反射膜の損失によっては、これまでの推定と1桁近く感度が悪い方向に異なる可能性があることを指摘した。これは、光学薄膜の機械的損失の研究が今後重要であることを示唆している。第8章では、干渉計鏡への適用を前提とする実験により、第7章で行った推定を検証する。鏡の熱雑音レベルでの測定は通常の測定系ではきわめて困難であり、このため、非一様な損失の鏡をシミュレートするための太鼓型の共振器を作って、そのモード、損失等を測定し、伝達関数から散逸揺動定理を用いて推定を行った。この推定値は、従来のモード展開法で計算される熱雑音より新しい方法で推定される熱雑音に近いことが確認できた。第9章はこれまでの結果を整理して議論を行い、第10章で結論を与えている。

以上、本論文により、レーザー干渉計型重力波検出器の熱雑音を評価する上で、損失が一様でない場面では、従来のモード展開法は誤っていることを示し、正しい推定を行うためにモード間の相関を取り入れた拡張モード展開法を提案した。この論文の結果は、従来の熱雑音評価法に警鐘をならすと同時に、重力波実験分野で新しい手法を開拓したものであり、今後、さらに高感度な検出器を開発・設計する上で検討すべき内容を示唆する貴重な論文である。

なお、本論文は、大塚茂巳、安東正樹、河邊径太、坪野公夫との共同研究であるが、論文提出者が主体となって、解析、実験を行ったもので、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。