

論文審査の結果の要旨

氏名 森 匠

本論文は、7つの章と2つの補遺の章からなる。この論文では、光を用いて巨視的な質量を持つ物体の位置を極限的な感度で測定するための光共振器システムを作成し、その動作特性を評価、さらに、光のもつ放射圧と物体の相互作用から生じる力学的不安定性を回避するための手法の提案と実装、その実験結果を示し、その手法の有効性を示している。

第1章は、イントロダクションとして、本研究の背景となる物理現象を概観する。重力波検出、原理的な雑音を与える光の量子雑音の概念を紹介している。

第2章は、重力波検出について述べている。一般相対性理論に基づく重力波の概念の説明、重力波検出実験の歴史、重力波を捉えるためのレーザー干渉計型重力波検出器の原理、構造、大型計画の紹介、検出の意義などを詳細に議論した。

第3章では、その検出器のなかで、もともと原理的な限界を与える量子雑音についての説明がある。ここでの量子雑音は、光の持つ量子力学的な揺らぎに起因する雑音で、干渉光を検出する際の雑音（ショット雑音、SN）と光が干渉計を構成する鏡に与える力学的な運動量の揺らぎによる雑音（放射圧変動雑音、QRPN）を言う。まず、揺らぎ量的な推定を行いSNとQRPNの影響がどのように現れるか、それぞれの雑音の詳細な性質の議論をもとに、標準量子限界（SQL）を導くことで、測定の限界がどこにあるかの議論を深め、そのSQLが重力波検出器の感度に対して、どのような影響があるか、また、それを打破する試みを示した。このような光の持つ力学的運動量の影響が巨視的な質量の量子力学的な振る舞いに寄与する系の実験的研究はこれまでほとんど行われていない。本研究の主題は、この分野を開拓することにある。

さらに、第3章では、光の圧力が干渉計に与える影響の議論を行っている。重力波検出器を構成する干渉計では、その計測の基準となる鏡はすべて力学的には、自由質量として振る舞うように、振り子として吊り下げられている。そのため、並進の自由度以外の回転の自由度も非常に弱い拘束状態にある。そのため、外部からの揺らぎにより、回転（ヨー運動やピッチ運動）が励振される。光の圧力が鏡に与えるトルクは、光が鏡に当たる位置に依存する。重心の真上に当たればトルクは0であるが、励振された回転運動と結合して、有限のトルクが生じる。その際、回転運動をさらに増大させる方向にトルクが発生するとこの運動が不安定になる。このような光の圧力による光学系の力学的不安定性は、従来はほとんど問題にならないくらい小さな効果であった。しかし、光源の高出力化に伴って重力波検出器の動作に関して深刻な影響を持つものと考えられている。本論文では、後述するように、光の力学的影響を観察することが目的のため、非常に小さな質量の鏡を用いて光学系を利用する。そのため、全く同様の影響が表れる。こ

の影響をどのように制御していくかを実験的に示すことの必要性が議論されている。

第 4 章では、実験装置についての設計方針に関しての詳論が展開される。まず、装置の全体を概観した。また、世界各地での実験的な試みとの比較を行い、本装置の設計概念の優位性を指摘した。

第 5 章は、実際に作成した実験装置の詳細を述べている。光学系の詳細、必要なフィネスやレーザーパワーの設定、その他の雑音の影響を取り除くための方策に関して、設計の詳細が示されている。その後、実験装置の中心となる微小質量鏡の性質が記述されている。また、光共振器を構成する別の鏡の特性、アクチュエータの性質、校正などについて記載されている。そして、これらの鏡を利用したファブリペロー共振器の光学的な性質の詳細を説明した。

第 6 章では、実験結果の詳細が説明されている。まず、光共振器を動作可能な状態にするための長さ制御の実験について述べられている。動作状態へのロックの過程、ロック後の感度の測定結果について示され、変位感度で $10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} @ 1 \text{ kHz}$ が観測された。

そして、光の圧力による角度運動への影響を測定した。ヨー運動の共振モードの周波数が共振器内部の光強度で変化する効果を測定し、不安定さが発生していることを確認した。その上で、角度揺れの検出装置からの信号をフィードバック制御し、角度揺れを 5 分の 1 に抑制できることを示した。このように、光の圧力による不安定性を光の圧力で制御して例は、世界的にほとんど例のないことであり、この結果は、今後のこの分野の進展に大きな寄与が期待できる。

第 7 章では、本論文全体を総括し、今後のこの分野の展開を議論している。

補遺では、小型の水晶振動子の実験と本論文の実験で使用した電気回路の詳細が述べられている。

なお、本論文第 4 章と第 5 章は、阪田紫帆里、川村静児、宮川治、Volker Leonhardt、沼田健司、Stefan Ballmer、佐藤修一、西澤篤志、山崎利孝、福島美津広、岡田則夫、古澤明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（科学）の学位を授与できると認める。

以上 2 0 9 4 字