

論文審査の結果の要旨

氏名 都丸 隆行

重力波レーザー干渉計における熱レンズ効果の研究

本論文は全10章からなり、以下の様な章の構成となっている。

- 第1章 (序章)
 - 第2章 重力波の一般論と検出原理
 - 第3章 干渉計の鏡と熱レンズ効果問題
 - 第4章 熱レンズ効果による波面歪みの計算モデル
 - 第5章 熱レンズ効果による波面歪みの計算の検証
 - 第6章 サファイアの光吸収率測定
 - 第7章 サファイヤ基材の熱伝導率測定
 - 第8章 サファイヤ鏡基材の屈折率温度係数測定
 - 第9章 Fabry-Perot干渉計型重力波検出器における熱レンズ効果
 - 第10章 (結論)
- 付録

アインシュタインの一般相対性理論でその存在が予言された重力波は、未だその直接観測は行われていない。本論文は、序章で重力波観測の意義とその検出までの技術的問題点を議論し、本研究の位置づけを示した。第2-3章は本論文の主題である重力波の特性とレーザー干渉計型重力波検出器の原理、検出感度限界について議論したものである。想定する重力波の発生源と種類、それらの発生頻度と検出頻度を議論した後、世界各地で現存する或いは、計画されている重力波検出器の比較検討特徴付けを行った。その中で、中性子連星合体や超新星の爆発などの現象による重力波を高頻度で観測する為の条件を検討した(第2章)。

既に、干渉計型重力波検出器の熱雑音を取り除く事の重要性は検討され、極低温にレーザー干渉計型重力波検出器を冷やす事は、「低温レーザー干渉計型重力波望遠鏡(LCGT)計画」での検討が重ねられているが、これまで熱レンズ効果についての検討はされなかった。この解明が本論文の主たる課題である。

熱レンズ効果とは、レーザー干渉計型重力波検出器の干渉計鏡で生じる光吸収が鏡内に温度分布を生じさせ、この結果鏡内に屈折率分布を引き起こしてしまう現象である。

熱レンズ効果による波面のひずみの大きさ δs は

$$\delta s \sim (dn/dT) \varepsilon / \kappa \quad (1)$$

と表される。ここで ε は鏡の光吸収率、 κ は熱伝導率、 dn/dT は屈折率の温度係数である(第3章)。これから明らかなように熱レンズ効果は、鏡材質の $\varepsilon, \kappa, dn/dT$ などの物性に依存する。各種鏡材質の比較検討を行い、サファイヤが、大きな結晶が得られないダイヤモンドなどを除外した物質中、現時点で、唯一の現実的材質である事を確認した(第3章)。

熱レンズ効果の影響を定量的に見積もるため、本論文ではレーザー干渉計型重力波検出器のレーザー回路の波面解析を行った。これは、熱レンズ効果によってビーム波面の歪みが検出器の感度にどの様に影響を与えるかを調べるもので、波面追跡シミュレーション(FFTシミュレーション)をこの目的のため世界に先駆けて行った。この方法は、複雑な形状の波面を空間周波数成分に展開し、各空間周波数成分の伝搬を追跡することで干渉計内の光の様子を調べるものである。この波面解析は、米国の共同研究者が開発した特殊なprogrammを使いこなす事で実現したが、実際の実験条件に合わせて解析を行う事は、容易ではなく本論文提出者の技術と経験によってはじめて実現した(第4章)。この波面解析計算手法の正当性は、実験と見積計算が容易に比較できる、即ち明らかに熱レンズ効果が起こることが想定されるアクリルサンプルを用いて検証した(第5章)。

実際に計画している低温度でのサファイア鏡の場合にどの様になるかを調べるため、実際の物理パラメータ、即ち、光吸収率、熱伝導率、屈折率の温度係数を実際の干渉計を動作させる極低温温度領域で実測し(第6,7,8章)、極低温での熱レンズ効果の影響を上記波面解析によって具体的に見積もった(第9章)。この結果、低温に干渉計鏡を冷却する事によって熱レンズ効果も問題ではなくなり、低温レーザー干渉計型重力波検出器の総合的感度曲線を10-1,000 Hzの広範な周波数帯で見積もることが出来、これで中性子連星の合体や超新星の爆発による重力波の観測が現実期待されることを示した。

なお、本論文第6章の内容は、別にPhysics Letters A (2001)に出版見込みである。本論文提出者、都丸隆行の他 Takashi Uchiyama, Daisuke Tatsumi, Shinji Miyoki, Masatake Ohashi, Kazuaki Kuroda, Toshikazu Suzuki, Akira Yamamoto, and Takakazu Shintomi,との共同研究であるが、第1著者である本論文提出者が主体となって実験、解析、著述を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断された。

又、本論文の他の部分も別に同様の出版予定との報告があった。ここでも本論文提出者の寄与が十分であると判断された。

従って、本審査委員会は、本論文提出者、都丸隆行に対し、博士(理学)の学位を授与できると認める。

主査	久保田 実
副査	勝本 信吾
副査	川村 静児
副査	藤本 眞克
副査	坪野 公夫