

論文内容の要旨

論文題目 Study of pendulum thermal noise

in gravitational wave detectors

(重力波検出器における振り子の熱雑音の研究)

氏名 我妻 一博

重力波の存在はA. Einstein によって1916年、一般相対性理論から予言された。重力波は時空の変化がさざなみのように空間を光速で伝播する現象で、荷電粒子の運動が電磁波を放出することから類推されるように、質量を持った物質の運動により放出される。R. A. HulseとJ. H. Taylorらは連星パルサーPSR1913+16の軌道周期観測により、重力波の放出によってエネルギーが失われ軌道周期が短くなる現象を捉えた。この周期変化が一般相対性理論からの計算値と高い精度で一致し、間接的に重力波の存在を証明した。この功績により彼らは1993年にノーベル賞を受賞している。

このように間接的に重力波の存在は証明されているが、いまだ直接観測には至っていない。この重力波が直接観測されれば、一般相対性理論の実験的証明となるだけでなく、重力波天文学への新たな道を拓くことになる。重力波の発生源として連星中性子星の合体や超新星爆発、ブラックホールや宇宙初期のインフレーション起源などが考えられており、重力波でなければ観測できない現象も数多く存在する。この中でも地上の検出器が初観測を目指しているのは連星中性子星の合体であり、それによって生じる重力波の周波数は10 Hz~1 kHzが予想されている。

現在までにこの重力波を捉えようとする研究は世界各国で進められ、重力波検出器の感度は徐々に上がっており、観測可能と考えられる銀河の数も増えてきている。現在、レーザー干渉型重力波検出器が最も高感度かつ広帯域を実現しており、世界にはこのような干渉計がいくつか存在する。アメリカにはLIGO、イタリアのピサにはVIRGO、ドイツのGEO600、計画段階ではあるがオーストラリアのAIGOなどがある。日本には2台の干渉計が存在する。ひとつは東京都三鷹市の国立天文台に建設されたTAMA300であり、もうひとつが本論文の舞台になっている「CLIO」である(図1)。CLIOは日本の次期大型干渉計計画LCGTのプロトタイプであり、LCGTの建設予定地である岐阜県の神岡宇宙素粒子研究施設(神岡鉱山)に建設された。ここは地下1000 mにあるため、地面振動雑音が少ないという利点が得られる。CLIOは「地下」と「鏡の冷却」という他の干渉計にはない特徴を持っており、これらは熱雑音の研究にとって重要な要素になっている。

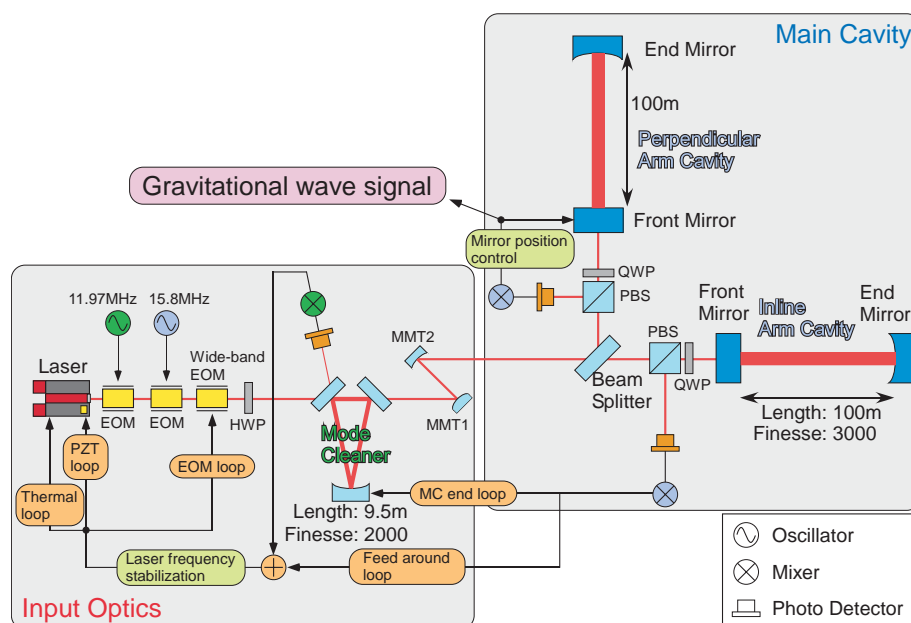


図1: CLIOの光学系概略図。基線長100 m の、ロックドファブリペローと呼ばれる干渉計スタイルである。

感度に影響を与える雑音を全て把握し、重力波の検出できる感度を設計・実現することが重力波検出器にとって究極の目標である。重力波による時空の変化は極めて小さいため、重力波検出の妨げとなる様々な雑音が存在する。観測帯域(10 Hz - 1 kHz)において、低周波側は地面振動雑音で制限され、高周波側は散射雑音と呼ばれる量子的な雑音によって制限される。そして、観測の中心付近は近い将来、熱雑音で支配されると考えられる。重力波検出器にとって二つの熱雑音が関心事となっている。それは干渉計を構成する「鏡の熱雑音」と、鏡を自由質点にするために懸架する「振り子の熱雑音」である。CLIOの主な目的は、次世代干渉計用に開発してきた技術である鏡の冷却によって、熱雑音(振り子の熱雑音も含む)が下がることを実証し、常温では到達出来ない感度を達成することである。

熱雑音を下げするためには、理論と実測の一致を検証する必要がある。雑音量を正確に把握することで、確実な感度設計を行えるようにすることが不可欠である。これまでに、鏡の熱雑音の直接測定とその定量的なノイズ同定の実験的検証が東京大学での沼田氏の実験やカリフォルニア工科大学でのBlack氏の実験によって行われた。一方、重力波検出器の振り子にとって、共振周波数以上の観測帯域を含む広帯域での熱雑音はこれまで検証されることがなかった。これについては、重力波検出器に限らない一般的な振り子に拡張した場合でも同様のことが言える。

この論文には、振り子の熱雑音の検証実験、特に共振周波数以上の広帯域での検証について書いてある。熱揺らぎの量は揺動散逸定理によって予言され、この理論値と測定量の一致を見た。振り子の熱雑音がこの領域で検証されたのは世界初のことである。さらに、理論として用いた揺動散逸定理にとっても、共振周波数以上の広帯域での実験との一致は初めてのことであり、この理論が共振周波数以上でも成立するということの初検証にもなった。

振り子の熱揺らぎは、振り子全体に生じるエネルギー散逸によって引き起こされる。それは、鏡を吊るワイヤーのみならず、空気抵抗や、鏡の位置制御を行うコイルマグネットアクチュエーターで生じる渦電流といった外的要因も含まれる。これは、振り子と散逸源が互いにエネルギーをやり取りすることによって一体系を成すためである。重力波検出器 CLIO において、コイルマグネットアクチュエーターのコイル回路と、そのコイルを支える電導性のコイルホルダーに生じる渦電流が振り子の熱雑音となり、感度を制限していたことを検証した。熱雑音のエネルギーは共振付近に集中するため、共振以外で検証することは通常は困難であるが、CLIO は神岡鉱山の地下に建設した利点を生かし、このような微弱な熱揺らぎの検証実験ができた。

コイルホルダーの交換によってCLIOの低周波の感度が改善されたことに関して、改善前のノイズスペクトルの量が、コイルホルダーに発生した渦電流による散逸で引き起こされることをモデル計算によって示した。また、ホルダーのみを交換した実験によってそれを確認した。さらにコイルマグネットアクチュエーター自身のコイル回路に生じる渦電流も振り子の熱雑音として十分測定されることを示し、垂直方向エンド鏡(図1のPerpendicular Arm の End Mirror)のアクチュエーター回路の抵抗を変えることによって散逸量のみを操作する実験を行った。その測定された微少な振り子の熱揺らぎ(100Hzでの変位感度で $10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度)は、理論から予測されるノイズ量と良く一致した(図2)。散逸量の変化に伴い見える雑音レベルが変動したことで、熱揺らぎを測定したことは疑う余地も無い。

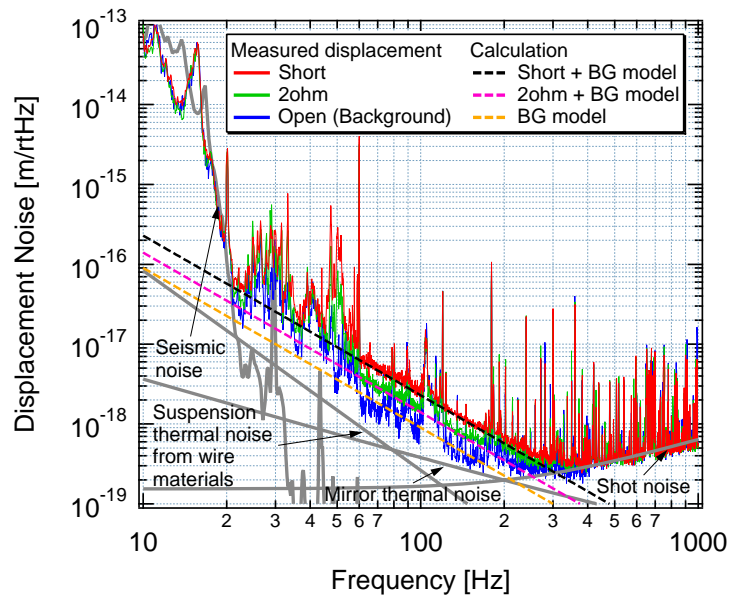


図2：コイル回路の抵抗はShort（赤），2ohm（緑），Open（青）の3通りで試した。Open はコイル回路を空気で絶縁しているため、抵抗が最大になりバックグラウンドノイズ（実験時のGLI0の感度）が見える。Short と2ohmのスペクトルの差を取り、バックグラウンドノイズの影響を除いて広帯域（20Hz～400Hz）での一致も確認できた。

本研究によって得られた知見をもとに、コイルホルダーを絶縁物質へ変更し、コイルマグネットアクチュエーターにも再設計を施した。これにより、これらの熱雑音がGLI0の冷却実験を阻害しないレベルまで下げることが出来たという確信を得た。また、コイルマグネットアクチュエーターは干渉計駆動にとって必須の装置である。特に高感度化が必要な次世代の干渉計型重力波検出器において、アクチュエーター設計の面でこの研究は貢献することができる。