解 説

低温鏡の実証

-Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) の成果-

内山 隆^{*,†}, 三代木 伸二^{*}

Experimental Demonstration of Cryogenic Mirror Technique

-Achievements of CLIO-

Takashi UCHIYAMA^{*,†} and Shinji MIYOKI^{*}

Synopsis: The thermal noise of mirrors in laser interferometric gravitational wave (GW) detectors is inevitable, fundamental noise and is crucial to whether a sufficiently high sensitivity to detect GWs is reached. The cryogenic mirror technique is one method to reduce the thermal noise. Japanese GW collaboration started in a study of the cryogenic mirror technique in 1997 and continues now through the Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) project, which started in 2002. The CLIO interferometer was completed in an underground site of the Kamioka mine in 2006 as the first cryogenic interferometer for GW detection. We investigated and reduced noise of the CLIO interferometer. The cryogenic technique will be adopted for the Large-scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope (LCGT) project, which started in 2010. This article describes the development of the CLIO interferometer and a plan for macroscopic quantum measurement using the CLIO interferometer.

Keywords: gravitational wave(s), laser interferometer, thermal noise, general relativity

1. はじめに

鏡の熱雑音はレーザー干渉計型重力波検出器（以後、重力波干渉計と呼ぶ）の感度を制限する原理的ノイズの一つである。その低減は、重力波の直接検出の為に必要な検出器の高感度化に向け、避けて通れない重要な課題である^{1,2)}。「低温鏡」は、鏡そのものを 20 K 以下に冷却することにより、鏡の熱雑音を低減する技術である。2010 年より建設を開始した大型低温重力波望遠鏡 (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope : LCGT)³⁾にも導入される技術である。Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO)⁴⁾は LCGT に先立ち建設された、世界初の低温鏡を実装した重力波干渉計である。1997 年から始まった低温鏡に関する数多くの要素技術開発を集約し、2002 年より神岡の地下に建設を開始した。最大の目標は低温鏡の実証、すなわち、鏡の冷却による熱雑音の低減とそれに伴う感度の向上を示すことである。本解説記事では、CLIO の概要を説明し、そして年度ごとの感度向上への取り組みについて紹介していく。最後に CLIO を用いた標準量子限界を目指す研究の可能性について言及する。

2. CLIO

CLIO は神岡鉱山地下に設置された片腕 100m の重力波干渉計である。CLIO は 2006 年 2 月 18 日に完成し、干渉計として運用できるようになった。しかし、良好な感度の実現には更なる年月が必要であった。運用できることと感度が出ることの間に極めて大きなギャップがあるのが重力波干渉計である。本節では、建設地である神岡を紹介した後、装置関連（干渉計、冷却系、懸架系）の概要を説明する。後半はノイズハンティングの歴史を回顧する。

2.1 神岡

神岡鉱山（池の山）は岐阜県飛騨市神岡町にあり、東京から北西約 220 km に位置する。ノーベル賞を受賞した小柴昌俊東大名誉教授のカミオカンデが建設された場所として有名であり、現在もスーパーカミオカンデ、カムランド（旧カミオカンデ）、Xmass そして CLIO などの実験装置が坑内で活発な研究活動を行っている。LCGT の建設地も神岡鉱山地下である。神岡地下実験施設へ行くには、富山県富山市にある富山空港から車で 50 分程、国道 41 号を南下し、脇道から川沿いの細い道を進んだ先にある跡津坑口を目指す必要がある。坑口で坑内車に乗り換え、まっすぐな坑道を 1.8 km ほど進めば、そこはスーパーカミオカンデの正面である。さらにそこから 100 m 程離れたところに CLIO 実験室の入り口がある。山頂はスーパーカミオカンデのほぼ真上 1000 m に位置する。坑道は年間を通じて約 15 度で安定して

Received May 23, 2011

*東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

† E-mail: uchiyama@icrr.u-tokyo.ac.jp

おり、夏は涼しく、冬は暖かい。湿度は非常に高く何もしなければほぼ100%に達すると思われる。坑内という特殊な環境であるため、研究者の安全管理の必要上、入坑には制限がかけられている。我々研究者は特別な事情が無い限り、原則として、平日朝8時に入坑し、夕方5時に出坑するという態勢で進めている。

神岡地下を選択した理由は(1)小さい地面振動、(2)神岡宇宙素粒子研究施設、(3) LISM⁵⁾である。神岡地下の地面振動は東京のそれと比べて1/100の大きさである。このような小さい地面振動は感度だけでなく、安定な干渉計制御の為に効果的である。神岡宇宙素粒子研究施設は、神岡鉱山内にある実験施設スーパーカミオカンデなどを運営・管理しており、研究棟、宿泊棟、インフラ設備、安全管理システムなど研究活動を進める上で必要な要素を完備している。これ程充実した設備を誇る地下実験施設は世界的に見ても多くない。実際、神岡施設のサポートがあって初めて、我々は坑内という特殊環境において極めてスムーズに研究活動が来ている。LISMは世界初の地下に設置された重力波干渉計である。1999年から2003年にかけて行われたプロジェクトである。干渉計本体は東京三鷹の国立天文台にあった20m干渉計だったが、それを神岡地下へ移設した。そして、低周波感度の大幅な改善を実現し、地下施設利用の効果を世界に先駆けて実証した⁵⁾。以上のように神岡地下は我々にとって優れた環境・経験・実績の有る場所である。

2.2 CLIO 干渉計

Fig. 1 に示すのが CLIO 実験室のイメージである。約10m × 20mの中央実験室から幅4.5m × 高さ5m、長さ100mのトンネルが互いに垂直な方向に2本(Inline arm、Perpendicular arm)延びた構造になっている。CLIOは11個の真空容器(図中銀色)が真空ダクトで繋がれて一つの巨大な真空系を構成している。銀色の真空系の内側に配置された銅色の真空系には、地球物理のための干渉計がインストールされている⁶⁾。空間の歪みを測定する重力波干渉計が、鏡を慣性系に置くためにそれを懸架するのと対照的に、地球物理干渉計は地面の歪み測定が目的であるため、鏡を地面に固定している。

Fig. 2 に示すのが CLIO の光学系の概要図である。レーザー光源はドイツ Innolight 社製の波長1064nm、最大出力2Wの連続波出力が可能な Mephisto タイプである⁷⁾。光源から出力したレーザーは光学部品(図中FI、EOM1、EOM2、WBEOMと記載)を経て、3枚鏡で構成される光共振器、Mode Cleaner(MC)に打ち込まれる。MCからはPhoto Detector(PD)を除いて、全て同一の真空中に置かれている。MCはレーザー周波数の安定化と同時に、100m Fabry-Peort cavity(FP cavity)に必要なモード形状(TEM₀₀)のみを選択し透過する。MCを透過したレーザーは、Beam Splitter(BS)で二分割され、各FP cavityに打ち込まれる。FP cavityを構成する2枚の鏡の内、BSに近い側をニア鏡(Fig. 2中NM1、NM2)、遠

Fig. 1 Schematic view of CLIO.

Fig. 2 Optical configuration of CLIO.

い側をエンド鏡(Fig. 2中EM1、EM2)と本解説記事では呼ぶこととする。

個々の光共振器(MC、2 × FP cavity)はその共振状態を維持する(「ロック」する)ために制御が必要である。CLIOではその制御方法として Pound-Drever-Hall 法⁸⁾を用いている。レーザーにはEOM(electrooptic modulator)によって周波数変調がかけられており、PDで取得した信号を変調周波数で復調することで誤差信号が得られる。その誤差信号をアナログ回路を組み合わせたフィルターに入力して制御信号を得る。ロック引き込み時と、感度測定時で復調位相やフィルターの形、ゲインを変える必要があり、それらの最適な設定を見つけることも感度を引き出すために重要である。大気中に置かれたPDは防音、防振のために防振台を内蔵したステンレス製のタンクの中に収められている。

CLIO干渉計全体の制御方式はLocked Fabry-Perot方式である。この方式では、片方のFP cavityがレーザーの周波数制御によってロックされるのに対し、もう片方のFP cavityは自身の光路長を制御してロックする。この光路長の制御信号の中に、両腕のFP cavityで検出された重力波や雑音が含まれている。残念ながら、通常はCLIOの雑音のみが測定

されている。この制御信号に、制御ループゲイン、アクチュエーター効率を用いることで変位感度を求めることができる。本解説記事で示している感度曲線の導出に用いた制御信号に関しては、10分強の測定時間を要した。

2.3 クライオスタットと鏡懸架装置

さて、Fig. 1 に示される CLIO の真空容器の中で一回り大きい4台がクライオスタットである。それぞれに FP cavity を構成するサファイア鏡が懸架され冷却が可能である⁹⁾。Fig. 3 に CLIO 低温系の概念図、Fig. 4 に写真を示す。低温系はクライオスタットと低温ダクトで構成される。クライオスタットは大きさ約 1300 mm × 900 mm × 2500 mm の直方体の真空容器であり、総重量は約4トンである。クライオスタットの中には懸架装置の基礎が置かれる光学定盤が上層に置かれ、2層の低温シールド（アウターシールド、インナーシールド）がその下部に置かれる。各低温シールドは2段の4 K パルス管冷凍機（4 K: 0.5 W、40 K: 15 W）によって冷却される。各低温シールドとコールドヘッドは熱伝導で繋がっている。低温ダクトは、直径 400 mm の真空ダクトの中に直径 300 mm の低温シールドを持ち、1段のパルス管冷凍機（80 K: 50 W）によって冷却される。CLIO を構成するビームダクトの全てが冷却されるのではなく、ニア鏡用クライ

Fig. 3 Schematic view of the CLIO cryogenic system. 1: cryostat, 2: cryogenic beam duct, 3: Two-stage 4 K pulse-tube refrigerator, 4: 80 K pulse-tube refrigerator, a: optical bench for a mirror suspension system, b: radiation shields (outer shield and inner shield), c: radiation shield.

Fig. 4 CLIO cryostat and a 100 m arm tunnel.

オスタットには長さ 5 m と 4 m の低温ダクトが両サイドを挟むように取り付けられる。エンド鏡用クライオスタットには、Fig. 3 のように 5 m 長さの低温ダクトが片側に接続する。従って、CLIO 全体で4台の4 K 2段パルス管冷凍機と6台の80 K パルス管冷凍機が導入されたことになる。全てのパルス管冷凍機が KEK と住友重機械工業によって開発された低振動型である¹⁰⁾。真空引きはターボ分子ポンプとドライポンプの構成で行った。冷却完了後は真空ポンプを停止したままで、 10^{-5} Pa 台に到達する。

クライオスタットや鏡の冷却では 300 K 輻射に悩まされ続けた。その最も深刻なケースが常温ビームダクトから入射する輻射である。開発当初、低温ビームダクトの低温シールドの常温側は直径 300 mm の開放端になっていた。それでもクライオスタットから見た立体角は十分絞られているため、輻射熱は低温ダクトに落ち、クライオスタット自身の冷却に問題はないと考えられていた。しかしながら予想を越える 3 W もの入熱がインナーシールドに落ち、到達温度は目標温度を遙かに超えていた。この時、宇宙線研究所の黒田和明教授から、300 K 輻射が低温ダクト内面を反射しインナーシールドに到達している可能性が指摘された。その指摘を受け、低温ダクトやクライオスタットの内部にバッフル板を取り付けた。この対策の結果、入熱は十分下げられ、クライオスタットの冷却が可能になった。その後、CLIK（東大宇宙線研柏キャンパスに設置された7m低温プロトタイプ⁵⁾のクライオスタットを使った検証実験も行われ、投稿論文としてまとめられた¹¹⁾。

Fig. 5 はクライオスタットの内部を撮影した写真である。その中に、全長約 1.5 m、6 段構成の鏡懸架装置を見ることができる⁹⁾。最終段は直径 100 mm × 厚さ 60 mm、重さ約 1.8 kg の単結晶サファイアを基材に用いた鏡である。鏡を懸架することは重力波干渉計で重力波を検出するために必要な条件である。しかし、懸架装置に求められる機能はそれ以外にも多岐にわたる。常温干渉計の場合でも地面振動の防振、振り子運動のダンピング、鏡の方向・位置調整、そして、FP cavity をロックするための光路長制御等が必要である。さらに CLIO の場合には、鏡の熱をインナーシールドに流すヒートリンクが必要である。防振性能と振り子の熱雑音は重力波干渉計の感度に直結する要素であり、プロジェクトの要求に従って設計される必要がある。

神岡坑内の地面振動は既述の通り極めて小さいが、さらなる防振無しでは CLIO の目標を達成することはできない。防振装置の基本形は弾性体と重りで構成される振動子である。防振性能を高めるには、振動子の共振周波数を下げる、あるいは段数を重ねることが効果的である。CLIO では後者を選択し、板バネを用いた共振周波数約 6 Hz の単純な振動子4段と、ワイヤーによる振り子2段を連結した6段構成の懸架装置を独自に設計・開発した。懸架装置は 20 Hz で約-120 dB の防振性能を発揮し、良好な低周波感度の実現に寄与した。

Fig. 5 Side view of the cryostat and the mirror suspension system.

Fig. 6 はクライオスタット上層の光学定盤に置かれた懸架装置3段階 (3 stages vibration isolation) を写した写真である。やぐら構造から3段の重りが板バネでつり下げられ、その3段目から長さ約 800 mm、直径 100 μm のボルファワイヤー¹²⁾ でインナーシールド内部の重りをつり下げている。上層の3段目には、5セットのピコモーター付きの光学ステージが組み合わされた微調機構 (Mirror alignment control stage) が置かれ、ワイヤーのクランプを真空容器外部からの信号入力により移動可能にしている。この機構により、懸架装置最終段の鏡は、操り人形のように、5自由度の方向・位置調整が可能になっている。

Fig. 7 はインナーシールド内部の懸架装置下層部の写真である。上部に見える穴を通して、懸架装置の上下層部を繋ぐワイヤーが張られる。横に見える穴からはレーザーが鏡に向けて入射する。上層部からたどると、2つの重り (上から Cryo-base、Upper mass)、そして鏡の順で懸架される。Cryo-base と Upper mass は板バネで繋がる。鏡は、Upper mass から「U」の字型に張った2本のワイヤーに乗せられるように懸架される。Upper mass のクランプ点から鏡の重心までの長さは約 400 mm である。さらに、磁石 (SmCo) を取り付けた重り (Magnet stage) が Cryo-base の直上に位置するように、上層から別のワイヤーによって懸架されている。この磁石は Cryo-base に対してマグネットダンピングを加えることを目的としている。マグネットダンピングとは、導体と磁石の間で相対運動が生じた際に、導体内部で発生する渦電流が散逸することで機能するダンピングシステムである。懸架装置の実態は振動子であるため、共振周波数で振動振幅が増大することは避けられない。特に CLIO では約 0.5 Hz に振り子運動が存在する。この振り子運動をダンピングを加えずに放置すると、鏡は目で見える程の大きな振幅で揺れ続ける。このような状態では、光路長制御のためのアクチュエーターのダイナミックレンジを越えてしまい、FP cavity をロックすることは不可能である。この問題を回避するた

Fig. 6 Upper part of the mirror suspension system.

Fig. 7 Lower part of the mirror suspension system.

め、無酸素銅製の Cryo-base に対してマグネットダンピングを加え、問題となる振り子運動をダンピングしている。そして、光路長制御には磁石とコイルで構成されるマグネットコイルアクチュエーターを用いている。鏡に磁石を取り付け、その背後にコイルを配置し、そのコイルに流す電流量・極性を調整することで、光路長制御が可能になる。磁石 (SmCo) は、鏡の裏面、中心から 45 mm の円周上の4箇所に直径 1~2 mm、長さ 10 mm の小さい物が接着してある。コイルはインナーシールド底面に固定された一段の防振台に乗せられている (Fig. 5、Fig. 7 には写されていない)。

鏡を冷却する際には、鏡の熱をインナーシールドへ流さなければならぬ。熱伝導を担うのは、鏡懸架ワイヤー、各重りの間を繋ぐ「C」字型ヒートリンク、重りとインナーシールドを繋ぐ「U」字型ヒートリンクである⁹⁾。鏡懸架ワイヤーにはサファイアファイバーでなく、直径 0.5 mm の純アルミ線 (純度 99.999 %) を用いた。純アルミ線による振り子の熱雑音が実験の目的を満たしていたことと、安価に入手でき

Table 1 Heat links for cryogenic operation in 2009.

Heat link	Number	Length [mm]
Inner shield – Magnet stage	1	150
Inner shield – Cryo-base	1	315
Cryo-base – Upper mass	1	115
Upper mass – Mirror	2 loops	400

Fig. 8 Cooling of a cryogenic system in CLIO.

ることを評価した。ヒートリンクにも同じ純アルミ線を用いた。実際に鏡を冷却し感度測定していた2009年度のヒートリンクの設定をTable 1にまとめ、冷却曲線の一例(Inline near: NM1)をFig. 8に示す。この測定例に関して見てみると、インナーシールド(青実線)の冷却は165時間余りで完了し、約11.5 Kに冷却された。そして、鏡や懸架装置(赤実線)は約250時間で冷却が完了し、鏡の温度は約16.4 Kに冷却され目標の20 K以下を達成している。鏡への入熱量は約18 mWと評価でき、そのほとんどが300 K輻射だと考えている。クライオスタットのアウターシールド(緑実線)、4 m低温真空ダクト(緑一点鎖線)、5 m低温真空ダクト(緑点線)の到達温度はそれぞれ、69 K、41 K、49 Kであった。

2.4 ノイズハンティング：2006～2007 年度

CLIOは2006年2月18日に初めて両腕のロックに成功した。それがCLIO完成の瞬間だったが、目標感度を目指した地道なノイズハンティングの始まりでもあった。2006年度は鏡の冷却は行わず、常温のままでもノイズハンティングを行った。Fig. 9に2006年度の感度向上の様子を示す。7月8日に測定した感度(青実線)と比べ、12月13日に測定されたベスト感度(赤実線)では大幅な感度改善があったことが分かる。改善の要因は、アクチュエーターノイズの低減、制御パラメーターの最適化、PDの防音・防振、エンド鏡を透過するレーザーの散乱光対策等であった。しかしながら、常温の目標感度(黒点線)や鏡の熱雑音(青点線)には届かず、課題を残した。特に、20 Hzから300 Hzを支配している f^{-2} の周波数依存性を持つノイズフロアが当時は大きな壁とし

Fig. 9 CLIO sensitivity improvement in 2006.

て残った。しかしながら地面振動で制限されている20 Hz以下の感度は極めて良好で、CLIOよりも40倍長い基線長を持つアメリカのLIGO¹³⁾に匹敵する「重力波」感度を達成した。この結果は、CLIOが20 Hz以下では、LIGOと比べて40倍以上優れた変位感度を出したことに相当する。これにより、神岡の地下環境の優位性をLISMに引き続いて示した¹⁴⁾。この低周波感度を活かし、2007年2月に約80時間の観測を行った。そして約22 Hzの重力波を放出するVela pulsarを対象に観測データの解析を行い、その重力波振幅に上限値を与えるという成果を残した¹⁵⁾。

2007年度は、一転して、全ての鏡を冷却して感度測定を行った¹⁴⁾。Fig. 10に全ての鏡を冷却して得られた感度曲線(赤実線)と2006年度のベスト感度(青実線)の比較を示す。冷却に関しては全ての鏡の温度が13～14 Kに到達し、成功した。その一方で、測定された感度は全体的にノイズフロアが悪化し、細かいラインノイズが隙間なく立ち上がっている。実験は失敗し、新たな技術的課題を浮かび上がらせた。それは、冷却完了後のビームセンタリングとダンピングの弱体化である。

感度を出すためには、レーザービームを鏡の反射面中央に入射・反射させることが重要である。鏡の反射面中央とビーム軸がずれている状態で、鏡の回転振動が励起されると、光路長変化を生じる。これは重力波干渉計にとって雑音になる。回転振動の励起源としては地面振動と熱雑音の両方が考えられる。CLIOの場合は垂直方向のずれが大きく影響する。このずれを調整し、合わせ直す作業をビームセンタリングと言う。鏡を冷却した2007年、そして2009年ともに、鏡は直径0.5 mmの純アルミ線で懸架した。振り子の長さは400 mmである。この振り子を常温から約10 Kまで冷却すると当たり前のように懸架ワイヤーが熱収縮する。つまり常温で鏡を適切な位置に懸架していても、冷却完了後にはその鏡はワイヤーが収縮した分ずれた高さに移動する。純アルミ線の熱収縮のみ考慮すると、約2 mmの変化が見込まれたが、常温付近では鏡の荷重のために純アルミ線が延びる

Fig. 10 CLIO sensitivity with cryogenic mirrors in 2007.

事があり、冷却完了後の鏡位置の予測は困難だった。いずれにせよ、冷却完了後はビームセンタリングを行う必要が常にあった。しかし、鏡の位置を外から確認することはできない。我々は、懸架装置上層に設けた微調機構を用いて鏡の高さを一定量動かしては、感度を測定し、最適な高さを探すという地道な作業を行った。この調整作業には、再現性の高い感度測定が安定に行えることが重要である。しかし、鏡を冷却するとダンピングが弱くなる現象が、干渉計制御そのものを困難にした。追い打ちをかけるように、年度中盤から始まった坑内の発破工事とレーザーの不調も重なり感度測定が実質不可能になった。結果、Fig. 10 以上の感度を得ることができなかった。

2.5 ノイズハンティング：2008～2009 年度

発破工事も終了した2008年度は、まずレーザーを修理し、そして常温でのノイズハンティングに立ち返った。冷却による鏡の熱雑音の低減を見るには、常温において鏡の熱雑音に届くことが前提条件として重要である。その認識の下、常温の鏡の熱雑音到達を目標にノイズハンティングを再開した。そして常温ベスト感度が11月5日に測定され、目標は達成された。Fig. 11 に常温ベスト感度(赤実線)と2006年度のベスト感度(青実線)との比較を示す。国立天文台(三鷹)の川村静児准教授の指摘により、2006年度の測定で低周波を支配していた f^{-2} の周波数依存性を持つ雑音の原因が判明し、低減できたことが重要なステップとなった。雑音の原因は、コイルを保持している枠にあった。当時のコイルは純アルミ板に穴をくりぬき、その穴に銅線で作成したコイルを入れ、スタイキャストで固定した物を使っていた。結果として、鏡に付けた磁石と純アルミ製の枠の間でマグネットダンピングが発生していた。これは、鏡の振り子運動に対して想定外の大きな散逸源となり、振り子の熱雑音を増大させる要因になった。我々は純アルミ板を排除し、コイルボビンに不導体であるマコールやピーク材を用いることでこの問題を解決し、雑音の低減に成功した。この雑音に関しては、検証実験を行い、投稿論文としてまとめられてい

Fig. 11 CLIO sensitivity improvement in 2008.

る¹⁶⁾。ベスト感度はビームセンタリングを合わせ込むことで達成され、その重要性も再認識された。ベスト感度測定後、国立天文台(三鷹)のメンバーの協力により、様々な雑音の大きさが測定評価された。その結果、CLIOの常温感度が地面振動、振り子の熱雑音、鏡の熱雑音、レーザーショットノイズという、原理的な雑音に届いていることが確認された¹⁷⁾。画期的な成果だった。

2008年度の成果を受け2009年度は鏡の冷却を再開した。目的は、当然のことながら、鏡の熱雑音の低減による感度向上を見ることである。当時LCGTは予算化されておらず、そのためにもCLIOの成果が強く望まれていた。また、2007年度の経験から鏡を冷却して感度を出すには、クリアすべき課題が多く残されていた。その様な状況を考慮した結果、2007年度のように闇雲に全ての鏡を冷却をするのではなく、「ニア鏡」2枚のみの冷却に集中し、鏡の熱雑音低減を見るまでノイズハンティングを行うという方針を立てた。ニア鏡のみを冷却する理由は、ニア鏡の持つ常温の鏡の熱雑音の振幅が、エンド鏡のそれよりも約2倍大きいからである。この振幅の差は、鏡の熱雑音が、鏡の反射面でのビームスポットサイズに依存性を持つことに起因している¹⁸⁾。そして、より大きな熱雑音源であるニア鏡のみを冷却するだけで、トータルの鏡の熱雑音は常温から大きく低減し、感度向上を見ることができると考えた。以上の方針の下、2009年5月から2010年3月までにのべ9回の冷却・昇温を2枚のニア鏡に対して行い、感度向上を目指した。そして2010年3月21日の日本物理学会にて、良好な感度が測定されたことが東大宇宙線研究所の三代木により発表された。また内山の手により投稿論文の準備が現在進行中である。そのため、本解説記事で結果を示すことは差し控えさせていただく。その代わりとして、Fig. 12を示す。Fig. 12に示された感度曲線(赤実線)は、両ニア鏡がそれぞれ15K、16Kに冷却された状態で測定された。この感度曲線そのものは「目標未達」であるため無価値だが、2007年度の結果と比較し大きな改善が有ることに注目して欲しい。なお、120Hzとその高調

Fig. 12 CLIO sensitivity with near mirrors at 15 K and 16 K.

波は懸架ワイヤーの共振であり理解できている。2007 年度の課題だったビームセンタリング、ダンピングの弱体化そしてラインノイズの問題に対し、どのように対処したのか。それらを紹介し、CLIO の章を終わる。

ビームセンタリングの問題は、全ての鏡にマグネットコイルアクチュエーターを取り付けることで対応した。FP cavity をロックした状態で、ビームセンタリングの対象である鏡の回転振動をアクチュエーターを用いて、単一の周波数で励起する。ビームが反射面中央からずれていると、FP cavity の制御信号中に励起周波数のピークが立つ。このピークがビームセンタリングの指標になる。2007 年度は毎回感度を測定し、そのノイズフロアを使って調整作業を行っていたが、このピークを立てる方法は作業効率の飛躍的な改善に繋がった。

鏡の冷却によりダンピングが弱体化し、干渉計の制御が困難になる問題に対しては、二通りのアプローチを試みた。一つは、Local Suspension Point Interferometer (LSPI) である。LSPI とは Cryo-base の動きを別途用意した干渉計で測定し、FP cavity の制御を困難にしている振り子運動を、Cryo-base に取り付けたマグネットコイルアクチュエーターへフィードバックすることで能動的にダンピングするシステムである。LSPI が完成すると、マグネットダンピングは不要になる。しかしながら、開発が間に合わなかったため、もう一つの簡易な方法が試された。そもそも、冷却によってダンピングが効きにくくなる原因が明確に理解できていなかったが、逆説的に「効き過ぎてオーバードンピングになっている」のではないかと考えた。実際、Cryo-base の素材である無酸素銅の電気伝導率は低温で増大する。その一方で磁石の特性は大きく変化しない。この場合、低温でのマグネットダンピングは常温より強化する傾向を持つ。試みとして、常温では十分なダンピングを得られない程弱い磁石に交換し、冷却した。結果としてこの試みは成功し、低温では丁度良いダンピングが得られるようになり、安定に制御をかけることが可能になった。

2009 年度の感度測定においても、2007 年度の感度曲線上に現れていたようなラインノイズが多数存在し、ノイズフロアを隠す障害となっていた。散乱光やヒートリンクの振動などが要因として考えられたが、最終的にアクチュエーターのコイルに用いていた銅線に原因があることが分かった。鏡に付けた磁石とコイルの銅線の間でまたもや想定外に強力なマグネットダンピングが発生していたのである。マグネットダンピングは既述の通り、マグネットと導体の相対運動によってダンピング力が生じる。状況を整理すると、鏡に付けた磁石は防振されて静止している一方で、インナーシールド上のコイルは、一段防振されているとはいえ、鏡に対して激しく振動している。このコイルの振動に対応したダンピング力が鏡に作用し、揺らしていたことがラインノイズ発生の背景である。このノイズの嫌らしいところは、ダンピング弱体化の問題と同様に、冷却が完了して初めて問題が発生する点である。ラインノイズが生じていた際に使っていたコイルの銅線も冷却によって電気伝導度が増大する(実測で RRR144)。この温度依存性を持つ物性値の変化により、低温において常温よりも遙かに強いマグネットダンピングが発生していた。そして、常温ではノイズフロアの下に埋もれていたラインノイズを顕在化していた。アクチュエーターはビームセンタリングに欠かせないため、取り外すわけにはいかない。そこでコイル線を米国 Lakeshore 社のリン青銅線に交換することで対策とした¹⁹⁾。このワイヤーは常温から低温に至るまで抵抗値がほとんど変化しない特性を持つ。この対策によって問題のマグネットダンピングは十分に弱体化しラインノイズは激減した。その結果、感度曲線の 40 Hz 以上でノイズフロアを見ることが可能になった。

3. 標準量子限界感度を目指して

さて、重力波望遠鏡では、周波数 100 Hz 付近において、 $10^{-20} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ という極限的な精度でレーザー干渉計を構成している鏡の位置計測を行わねばならない。その究極の変位感度は、高周波側が光のショット雑音、低周波側が光圧で鏡が押されることによる輻射圧雑音という、共に光の量子不確定性で決定される雑音源である。これは、レーザー干渉計がレーザーという光を利用する計測装置であることに起因する原理的な限界感度であり、特に 2 つの雑音が交差する周波数帯域は、鏡の位置決定精度の量子力学的限界、つまり標準量子限界に達している。昨今の研究により、この標準量子限界感度を達成したレーザー干渉計により、従来、原子(数十個)やボーズアインシュタイン凝集程度 (10^9 個) のスケールでしか観察することのできなかった物質の量子力学的ふるまいを、人間スケール (10^{23} 個) の物体においても観測する研究、つまり「(超)巨視的量子計測 (Macroscopic Quantum Measurement)」が可能になることが示され、注目を集めている。

巨視的物体の量子的観測が可能になることを表す指標としては、運動のモードの量子数があり、大雑把にはその量子数が1付近以下に低減することが目標になる。巨視的量子観測の研究は、2000年頃に本格的に追及され始め²⁰⁻²²⁾、当初は、MEMS等の技術で作成された微小機械共振系の共振周波数での物体の共振運動をダンピングし、その振動の変位量とばね定数によって決定される運動エネルギーを下げることで、それと関連付けられたモードの量子数を下げる戦略で行われていた。そして2010年、ついに、カリフォルニア大学・サンタバーバラグループが、共振周波数6.17GHzのサブナノグラムスケールの共振ドラムの「量子的息吹」の観察に成功し、いわゆる「シュレディンガーの猫」をこのスケールで確認した²³⁾。この成果は、IOP誌の選ぶ2010年度物理学における注目すべきブレークスルーのトップ10に選出されている。

一方、レーザー干渉計型重力波望遠鏡では、レーザー干渉計を構成するキログラムスケールの鏡が巨視的量子計測の観測対象となる。標準量子限界感度が達成されている周波数帯域では、鏡の運動を量子状態・スクイズド状態に追い込むことが可能になる。そしてそのスクイズドされた状態から鏡を解放してやれば、解放直後は、新しい光バネ周波数もしくは振り子の周波数で、スクイズとアンチスクイズを繰り返す量子的息吹が観測され、かつ、時間経過とともに、環境によるデコヒーレンスが大きくなると量子状態が破壊され、息吹が見えなくなると予測されている。これが、レーザー干渉計における巨視的量子計測の戦略であるが、まだ実現されていない²⁴⁾。そこで、CLIOでは、レーザー干渉計として、すでに $2 \times 10^{-19} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ の変位感度を実現している高い精密変位計測技術を活用し、かつ、CLIOで現在使用されている鏡をすべて1.8kgから200g程度に変更することで標準量子雑音レベル自身を上昇させる一方、CLIOの特徴である低温化技術により、古典雑音である振り子の熱雑音と鏡の熱雑音を低減することで、標準量子限界感度を200Hz付近で実現し、この巨視的量子観測を行う計画が提案されている。

参 考 文 献

- 1) 中村卓史、三尾典克、大橋正健 編著: 「重力波をとらえる－存在の証明から検出へ－」, 京都大学学術出版会, 京都 (1998)
- 2) P. R. Saulson: "Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors," World Scientific, Singapore (1994)
- 3) K. Kuroda, et al.: "Status of LCGT," Class. Quantum Grav. **27** (2010) 084004 (8pp)
- 4) K. Agatsuma, et al.: "Thermal-noise-limited underground interferometer CLIO," Class. Quantum Grav. **27** (2010) 084022 (10pp)
- 5) M. Ohashi, et al.: "Design and construction status of CLIO," Class. Quantum Grav. **20** (2003) S599-S607
- 6) S. Takemoto, et al.: "A 100 m laser strainmeter system installed in a 1

- km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan," J. Geodynamics **38** (2004) 477-488
- 7) InnoLight GmbH, Garbsener Landstr. 10, 30419 Hannover, Germany
- 8) R. W. P. Drever, et al.: "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," Appl. Phys. B **31** (1983) 97-105
- 9) T. Uchiyama, et al.: "Cryogenic systems of the Cryogenic Laser Interferometer Observatory," J. Phys.: Conf. Ser. **32** (2006) 259-264
- 10) Y. Ikushima, et al.: "Ultra-low-vibration pulse-tube cryocooler system - cooling capacity and vibration," Cryogenics **48** (2008) 406-412
- 11) T. Tomaru, et al.: "Conduction effect of thermal radiation in a metal shield pipe in a cryostat for a cryogenic interferometric gravitational wave detector," Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 1771-1774
- 12) UNITIKA Advanced Materials Division, UNITKA LTD., 4-1-3, Kyutaro-machi, Chuo-ku, Osaka, Osaka 541-8566, Japan
- 13) B. Abramovici, et al.: "LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory," Science **256** (1992) 325-333
- 14) K. Yamamoto, et al.: "Current status of the CLIO project," J. Phys.: Conf. Ser. **122** (2008) 012002 (8pp)
- 15) T. Akutsu, et al.: "Search for continuous gravitational waves from PSR J0835-4510 using CLIO data," Class. Quantum Grav. **25** (2008) 184013 (10pp)
- 16) K. Agatsuma, et al.: "Direct measurement of thermal fluctuation of high-Q pendulum," Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 040602 (4pp)
- 17) K. Arai, et al.: "Status of Japanese gravitational wave detectors," Class. Quantum Grav. **26** (2009) 204020 (9pp)
- 18) V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky and S. P. Vyatchanin: "Thermodynamical fluctuations and photo-thermal shot noise in gravitational wave antennae," Phys. Lett. A **264** (1999) 1-10
- 19) Lake Shore Cryotronics, Inc., 575 McCorkle Blvd, Westerville, OH 43082-8888 USA
- 20) P. F. Cohadon, et al.: "Cooling of a mirror by radiation pressure," Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 3174-3177
- 21) C. H. Metzger, et al.: "Cavity cooling of a microlever," Nature **432** (2004) 1002-1005
- 22) D. Kleckner, et al.: "Sub-kelvin optical cooling of a micromechanical resonator," Nature **444** (2006) 75-78
- 23) A. D. O'Connell, et al.: "Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator," Nature **464** (2010) 697-703
- 24) T. Corbitt, et al.: "An all-optical trap for a gram-scale mirror," Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 150802 (4pp)

内 山 隆 昭和45年9月4日生。平成7年京都大学理学部卒業。平成12年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。平成15年東京大学宇宙線研究所助手。現在同研究所助教。専門は重力波物理学。日本物理学会会員。博士（理学）。

三代木 伸 二 昭和43年9月17日生。平成3年東京大学理学部物理学科卒業。平成8年東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。日本学術振興会特別研究員を経て平成10年東京大学宇宙線研究所助手。現在同研究所助教。専門は重力波物理学。日本物理学会・天文学会・応用物理学会会員。博士（理学）。