

LCGT 低温設計の素

三代木伸二
東京大学宇宙線研究所

平成 13 年 5 月 21 日

LCGT 計画の特徴は、鏡と懸架ワイヤーの低温化により、その熱雑音を低減し、中性子性連星の合体からの重力波イベントを 1 年に 1 回以上の頻度で観測することにある。しかし、鏡や懸架ワイヤーの冷却は、干渉計の感度を制限する数個 (3~5) の原理的な雑音源のうち、熱雑音に対しては有効であっても、その導入は、散射雑音や地面振動を容易に悪化させうる。よって、低温化技術の導入は、単に物を冷却する技術の検討以外に、他の雑音低減システムとの親和性を十分考慮する必要がある。ただし、この冷却技術や親和性も、現存する、あるいは将来実用化されるであろう技術の形態によって、大きく変わりうるものである。そこで、本提案書においては、LCGT 計画における鏡や振り子低温化の基本的な概念、親和性について留意する点、および現在できる技術的展望について列挙する。

目次

1	低温鏡干渉計の低温部	3
1.1	低温部	3
1.2	低温鏡懸架・防振装置基本構成要素	3
2	各要素技術	3
2.1	冷凍装置	3
2.1.1	冷凍機	3
2.1.2	光冷却	4
2.2	鏡	4
2.2.1	基材	4
2.2.2	形状	5
2.2.3	物性変化	5
2.3	鏡用懸架ワイヤー	5
2.3.1	基材	5
2.3.2	形状	6
2.4	防振 Heat Link 機構	7
2.5	冷却用 Radiation Shield	7
2.6	汚染防止用 Radiation Shield	7
2.7	低温鏡防振機構	8
2.8	信号導入機構	8
2.9	低温リモートアクチュエーターおよび制御	8
3	環境への配慮	8
4	干渉計の設計での注意点	8

1 低温鏡干渉計の低温部

1.1 低温部

LCGT では、一応、Recycled Fabry-Perot Michelson 干渉計を想定しているので、腕共振器を構成する 4 枚の鏡を低温化する。ただし、ビームスプリッターの低温化の是非についても、熱レンズ効果等を検討し決断しなければならない。また、干渉計の基本スタイルが変わる場合は、そのつど考えなくてはならない。

1.2 低温鏡懸架・防振装置基本構成要素

低温鏡懸架・防振装置の基本構成要素は以下のようになると思われる。

- 冷凍機。
- 低温鏡。
- 低温鏡懸架・放熱ワイヤー。
- 防振 Heat Link 放熱機構。
- 冷却用 Radiation Shield。
- 汚染防止用 Radiation Shield。
- 低温鏡防振機構。
- 信号導入機構。

2 各要素技術

2.1 冷凍装置

2.1.1 冷凍機

LCGT は神岡鉱山内に設置されるため、ヘリウム循環液化装置による鉱山内での大量の液体ヘリウムの供給は、

- 莫大な設備投資。
- 優れた安定環境、低地面振動の維持。
- 液化ガスの蒸発による雑音。

の点から、厳しいと思われる。よって、液化ガスを主たる冷凍媒体として利用しない冷凍機が必要である。現在、市販されている冷凍機は、ギフォードマクマフォン式¹ のものが最も冷凍パワーが大きく、例えば、CLIK に使われているものは 4 [K] で 2W の熱負荷にたえられる。しかし、稼動部（膨張ピストン）や、蓄冷材、圧縮機が不可欠で、

¹ GM 方式に限らず、他の方式でも、冷凍機は基本的に冷凍ヘッドとヘリウムガス圧縮装置から構成される。ヘッドだけでなく圧縮装置も振動源になる。

- 低温部で機械振動を発生する。
- 蓄冷材の交換等などの保守による停止。
- 圧縮機から発生する熱と振動（音を含む）の処理。

の点で、問題点がある。よって、LCGT では、昨今市販化されはじめたばかりのパルスチューブ式冷凍器が望ましい。パルスチューブ冷凍器は、パルス波を導管に発生させることにより、温度勾配を発生させ、低温部を生成する方式であり、低温部に稼動部がなく、原理的に信頼性が高い。現在市販されている、10 K 以下を発生させられるパルスチューブ冷凍機は、アメリカ、Cryomech 社の PT405、PT407、PT805 で、冷凍能力は、0.5 W@4.2 K、0.7 W@4.2 K、1.5 W @10 K である。得に PT405 では、冷凍ヘッドの振動は、加速度で 10^{-5} m/s^2 であり、20000 時間（2 年強）のメンテナンスフリーがうたわれている。これらの冷凍能力は、大きいにこしたことはなく、パルスチューブ冷凍機の需要も、超伝導、NMR、赤外線望遠鏡の CCD 冷却の世界でも高いため、さらなる冷凍能力の向上は期待できると思われる。また、ヘッドの振動を実測し、結果によっては、後述する防振 Heat Link 機構の根元に簡便な防振伝導媒体を通じて接続し、直に Heat Link 系からの熱を奪う機構も可能になり、より効率良く放熱できるかも知れない。冷凍時間の短縮のために、初期冷凍のためだけの冷凍機があることが望ましい。この場合は、振動特性は問われないことになる。残る問題は、定常運転される圧縮機の振動と放出される熱であり、鉱山の低振動・安定環境を乱さない注意深い設備が必要である。

2.1.2 光冷却

近年、ある種の結晶におけるフォノンの吸収を伴う光励起と放出による光冷却技術（LASSOR）が実証され、実験では 0.5 W @ 77K での冷却能力がしめされた。もちろん、まだ基礎実験の段階のもので、LCGT への応用には遠い。しかし、結晶の製造、冷却用レーザー等も含めて、より実際的になれば、レーザーという非接触なもので対象を冷却できるので、既存の防振技術による防振性能がほとんど犯されることはなくなり、低温鏡干渉計の実現に、大きな飛躍をもたらすことは間違いない。

2.2 鏡

2.2.1 基材

低温鏡は、いうまでもなく、まず光学素子としての基本的な条件を満たさなくてはならないが、さらに、

- 基材の熱伝導がよい。
- 基材のレーザー波長付近での光学的吸収ロスが少ない。
- 屈折率、膨張変化が少ない。
- 冷却して機械的 Q 値が著しく悪化しない。

² 周波数依存性は不明。資料では 10^{-3} G と記載され、 $\text{G} = \text{Gal} (10^{-2} \text{ m/s}^2)$ として計算。ただ、会社の方針で、日本国内には不売。日本では住友重機が独自開発品を近年中に発売するとうわさもある。アイシン精機は試作に成功。

の条件をみたくなくてはならない。現在、最も有力な基材は人工サファイアであり、得に、冷却と機械的 Q 値の上昇による相乗効果により熱雑音を低減できる点では、非常に有望だが、現在、

- 光学的吸収率が大きいもの（～90 ppm/cm）しかできない。LCGT では 4.5 W/mirror の発熱になる。
- 均質素材は直径 20cm 程度のものまでしか入手できない。
- 複屈折がある。
- 他の分野での需要がないので、性能向上が遅々としている。

の点で、問題を抱えている。供給できる会社もアメリカの Crystal System 社にほとんど限られる。吸収に関しては、1600 度のアニーリングで 15ppm/cm まで低減できているが、量産の段階にはない。他の基材の可能性としてダイヤモンドも考えられるが、バルク基材の実現には程遠い³。

サファイアの問題点のなかでも、早急に解決すべき問題は、光学的吸収率の極小化である。なぜなら、吸収の大小は、発生する熱の大小を決定し、それは、鏡の懸架の形態も含めた、放熱機構の設計やそれらへの要求の厳しさを大きく左右するからである。当然、少ない程、放熱システムへの要求は低下し、従来の懸架、防振機構との親和性は高まる。基材に関しては、分野の異なる世界の話なので、その世界の専門家や企業と協力することが急務と思われる。

2.2.2 形状

低温鏡の形状は、その決定に当たり、

- 熱雑音の寄与が小さくなる形。
- SQL 雑音を悪化させ過ぎない程度の質量。
- ワイヤーの取り付け方法によっては、側面平坦研磨等が必要。

の要素を考える必要がある。サファイアは非常に固い物質であるが、現在では、研磨、加工は、ほぼ他光学素材とほぼかわりなく可能になっているらしい。

2.2.3 物性変化

低温化による、曲率半径の変化やコーティングの特性変化を正確に見積もらなければならない。コーティングの反射率の変化は、99.999% 反射率の IBS コーティング膜で最大 -10ppm 程度までが報告されている。

2.3 鏡用懸架ワイヤー

2.3.1 基材

鏡と同様に、鏡用懸架ワイヤーに要求される条件は、

³ 薄膜、粉末ダイヤモンドの研究は、民間需要（半導体基盤など）があるので進んでいる。

- 熱伝導がよい。放熱通路になれる。
- 引っ張り強度が強い。
- 膨張変化が少ない。
- 冷却して機械的 Q 値が著しく悪化しない。

である。これも、現在最も有力な基材は人工サファイアファイバーである。鏡と同様に、低温で機械的 Q 値も向上するので、振り子の熱雑音を効率良く低減できることが期待される。現在商用で入手できるサファイアファイバーは Saphikon 社の直径 425 μm が最大であり、一辺 2 mm の四角柱状のものであれば、長さ 200 mm のものまでなら京セラ社から入手可能である。直径 1 mm 程度のもものは市販ではないが、原理的問題があるわけではなく、十分作成可能と思われる。

2.3.2 形状

ワイヤーの形状を決定する場合、放熱と防振の、ワイヤー断面積とワイヤー長に対する要求は全く相反する関係にあり（太く、短く vs 細く、長く）、十分注意する必要がある。また、鏡の光学的熱吸収率の改善によって、放熱に対する要求が大きく低減されるので、その動向にも十分注視する必要がある。また、過去に、放熱通路として、懸架ワイヤーを使わないで、懸架用金属ワイヤーと、それとは別に放熱用ワイヤーまたはリボンを使用するとか、リボンで懸架するなどの色々な案も提案されているが、過去の共振型重力波アンテナのグループの論文報告によると、結局、防振と放熱を最も効率良く実現できるのは、懸架ワイヤーを放熱通路として使う方法であるという結論になっている。

現在提案されている形状は、

- 単純円柱ファイバー。直径 1 mm 以上、長さ 0.3 m (0.1 W for 4 本)。
- Flex Joint with Counter Mass (by Dr. Riccald DeSalvo)。

である。Flex Joint は、防振性能を少し犠牲にして、熱伝導を大幅に改善する点で、サファイアの吸収が下げられない場合には魅力的な方法であるが、複雑な形状のため、熱雑音の見積もりを正しく行う必要がある。

この他に、鏡や低温中段マスとワイヤーの熱接触を向上するために、様々な接合技術が提案されている。それらは

- シリケートボンディング。
- 常温接合。
- 超音波活性化接合。

などである。これらについても、性能、扱いやすさ、信頼性等を調べる必要がある。これらは、基本的に自前の作業になるが、Japan Cell 社が「光学溶着」⁴ というサファイアの接着を業務として行っているので考慮すべきと思われる。

⁴ 接着材不使用。詳細不明。

2.4 防振 Heat Link 機構

光冷却が可能ならば、物理的に結合した Heat Link は、ほぼ不必要で、Heat Link 系からの振動の混入は考えなくてよいと思われる。しかし、現状では、なんらかの物理的な結合が、Heat Anchor と低温中段マスとの間に必要で、十分防振された低温中段マスを乱さないような Heat Link 系の防振が必要である。しかも、Heat Link 系の防振機構は低温部にあり、かつ放熱通路としても機能しなければならないため、非常に厳しい要求と設計が求められる。得に、低温中間マスに接続される Heat Link 体（ワイヤーやリボン）は、その素材が純アルミや純銅の場合、機械的な Q 値が低いために、低温といえども大きな雑音源になりえるので、十分な注意が必要である。現在提案されている防振 Heat Link 機構は、

- Heat Link Wire が、放熱通路とマスのダンピングをかねる多段水平・垂直振り子。
- 多段クロスヒンジ（by Dr. Blair）と垂直防振（Mini-SAS など）。

である。多段クロスヒンジや Mini-SAS は、構造と Heat Link 通路が兼用され、放熱断面積が大きくとれることが特徴である。

最終中段マスと低温化鏡を接続する Heat Link 体は、線形純アルミまたは銅の場合、断面積一定の条件では、細くて本数が多い方がカップリングを小さくできる。しかし、細いと「サイズ効果」により、熱伝導がバルク値よりも低下したり、線同志の干渉も発生し、取り回しも悪くなるので、考慮する必要がある。形状も含めて検討する必要がある。

また、低温化による、収縮等で、常温のアライメントは必ず崩れるので、それを補正する機構が、防振 Heat Link 機構か、低温鏡防振機構に必須である。また、液体窒素温度以下では、物性変化は小さくなるとはいえ、干渉計が動き始め、熱流が安定するまでの間の温度上昇でのドリフトなどもチェックすべきと思われる。

2.5 冷却用 Radiation Shield

低温鏡や放熱中間マスは、常温部からの輻射熱の影響を避け、懸架ワイヤー等の低温部放熱機構が、鏡から発生する熱のみを効率良く取り去るようになるためには、何層かの Radiation Shield で包囲しなければならない。冷凍機の数や負担を減らすには、できるだけ包囲体積は小さい方が良いが、防振 Heat Link 機構や低温鏡懸架機構のデザインに制限される。層数は CLIK と同じ 2 層（4K と 100K）でよいと思われる。しかし、効率良い遮熱のためには、Radiation Film で各 Radiation Shield を包む必要があり、アウトガスの源になるので、アウトガスの少ない代替物を創出するか、結局層数を増やすかになると思われる。常温部から懸架する場合は、そこからの熱流入もあるので、注意が必要である。

また、常温部を必要としないシステムなら、90K シールドを逆真空タンク形状にし、イクスチェンジガスで直接鏡を冷やすことも考えられる。

2.6 汚染防止用 Radiation Shield

低温鏡は、そのままではクライオポンプと化し、鏡の反射ロスを増加させ、結果、干渉計内に蓄積される光量を減少させ、散射雑音を悪化させる。しかし、この汚染は、常温真空部の真空度を 10^{-8} torr 以下にできれば、数十 m の長さの Radiation Shield を真空ダクト側に伸ばすことで

低減することが期待される。LCGT では、この汚染防止用 Radiation Shield 用の冷凍機も必要になるため、その圧縮機の廃熱、防振は注意深く行わなくてはならない。

2.7 低温鏡防振機構

LCGT では、低周波防振装置の導入が予定されるが、物性値が変化する低温では、低温でも作動する巧妙なりモート調整系がないかぎり、その装置全体を低温部に設置できないため、最終中段マスと低温鏡のみを低温にし、それらを常温部から懸架する形になる。計算では、鏡を懸架できる程度に十分細いステンレスで懸架すれば、熱流入は十分押さえられるが、ワイヤーの収縮雑音が発生しうるので、検証した上で、設置場所の選択をしなくてはならない。

2.8 信号導入機構

低温鏡の位置、姿勢制御のため、制御信号を低温部に導入しなければならないが、信号線は、熱流入の経路になり、冷却性能を悪化させる。電圧が必要な信号の場合は、導線を細く、長くとり、熱伝導の悪いステンレスや、電気の流れるプラスチックなどで対処できる。しかし、電流を必要とする信号の場合、低温で導線の抵抗が減るとはいえ、それを上回る電流により、熱源になりうるので注意が必要である。ただ、LCGT では、アクチュエーター系からの雑音自体を小さくしなければ、目標感度に到達できない事情を考慮すると、例えば Magnet-Coil 系に流れる電流による発熱は抑えられるかもしれないが、他の駆動システムの導入時には注意しなければならない。ともに、配線は、熱を逃がすため、各 Radiation Shield でよく接触させる必要がある。

2.9 低温リモートアクチュエーターおよび制御

現在作動が確認されている低温でも使用できるリモートアクチュエーターは

- Magnet-Coil (任意のダイナミックレンジ)。
- 低温仕様の高電圧 PZT (数 $\mu\text{m}/1000\text{V}$)。

ただし、低温中では、機械的稼働部位の信頼性が低下するので、検証しなくてはならない。LCGT では、十分な防振により、低温鏡に対する直接制御量は小さいとおもわれるので、そのみ低温部で行い、それ以外は、常温部で行うスタイルになると思われるが、これも防振機構の設計による。

3 環境への配慮

くり返しになるが、冷凍機の圧縮機は、鉱山内の安定、低振動環境を犯しかねないので、その設置には十分な配慮が必要である。

4 干渉計の設計での注意点

汚染防止用の Radiation Shield の長さが最低でも数十 m ほどになるので、それを考慮した Michelson 部分のパラメーターが選ばれなくてはならない。また、エンドミラーの AR 側にも汚染防止用 Radiation Shield 用真空ダクトが必要と思われる。

真空度は、汚染防止の面では、低いほどよいが、 10^{-8} torr 以下が達成されることが必要である。