

LCGT 設計の素

— 草稿 —

安東正樹

東京大学理学系研究科物理学教室

平成 13 年 5 月 7 日

LCGT について、「基線長 3km、神岡鉱山に建設、低温化する」という基本方針は決定されているが、より具体的な設計はまだされていない。レーザー干渉計重力波検出器は、仕様・要求値の決定、それを満たすような基本デザインの決定、それらの要素技術の研究開発、建設、シェイクダウン、という手順で作られていく。本稿の目的は、この中でも、仕様・要求・基本設計を決定する際に重要な事柄を列挙し、議論すべき点を明確にすることである。従って、当然と思われる事柄だけでなく、最終設計にはおそらく入らないであろう事柄が記述されている部分もある。

目 次

1	目標	4
1.1	ターゲットとする重力波	4
1.2	目標感度	4
2	主干涉計	4
2.1	構成	4
2.2	干涉計方式	4
2.3	光学配置	5
3	レーザー光学系	5
3.1	レーザー源	5
3.2	入射・出射光学系	6
3.3	変調器、光検出器	7
4	光学素子	7
4.1	主干涉計用光学素子	7
4.2	その他の光学素子	8
5	防振・懸架装置	8
5.1	防振装置	8
5.2	懸架装置	9
6	信号取得・制御系	9
6.1	光路長制御	9
6.2	アライメント制御	10
6.3	その他、各種制御系	10
7	低温化装置	10
7.1	冷却方式	10
7.2	冷却器	11
8	真空装置	11
8.1	真空槽設計と配置	11
8.2	散乱光対策	11
9	施設・環境	12
9.1	振動環境	12
9.2	大気環境	12
9.3	電氣的環境	12

9.4 作業・操作性	13
10 観測・データ取得	13
10.1 信号の取得	13
10.2 データの保管・配信	14
11 データ解析	14
11.1 重力波解析	14
11.2 干渉計解析	15
12 むすび	15

1 目標

1.1 ターゲットとする重力波

TBD。

1.2 目標感度

TBD。

2 主干渉計

2.1 構成

目標を達成するための干渉計はどのような構成にするべきか。観測にとっては台数は多いにこしたことはないが、現実的には予算と時間による制約が大きい。非定常な雑音の影響を効率的に除去し、確信を持って重力波と判定するためには複数台が望ましい。複数台の場合、基線長は必ずしも等しくする必要性はない。また、複数台建設する場合はそれらの指向性を揃えるべきか否かも考慮すべきである。台数は、低温化時に鏡に吸着する気体分子を除去する際などのメンテナンスによって観測を途絶えさせないこと、大重力波イベントによるレンジオーバー (高感度ゆえに起こり得る) なども考慮して決定すべきである。

- サイトの数
- 1 サイトでの干渉計台数
- 複数台の場合の相対配置、基線長

2.2 干渉計方式

干渉計の構成としては、TAMA 方式か、それ以外か、の2つに大別して考慮される。TAMA 方式を踏襲するならば、干渉計建設に関する基本的な部分は既にほぼ確立していると考えることができる。RSE や SR を用いる場合には、国内外での今後の研究成果を十分に吟味する必要がある。干渉計方式を段階的に拡張していくという戦略も取り得る。

- 干渉計方式
 - TAMA 方式 (Power-recycled Fabry-Perot-Michelson 干渉計)
 - RSE (Resonant sideband extraction)

- SR (Signal recycling)
 - その他 (Locked Fabry-Perot, Sagniac, etc.)
- 干渉計建設の流れ、段階

2.3 光学配置

干渉計方式に応じて、光路長や光学配置は設計される。その際、光源部、信号取得・制御に必要な光学部品、信号取得系までのステアリングやレンズ系、AR 面での反射光の処理なども十分に考慮しておくことが必要である。どの部分まで真空や低温にすべきか、防振はどの程度必要かは、干渉計の性能を決める重要な点となり得る。また、十分なスペースと作業性を考慮して配置することは、効率的な干渉計建設につながる。

- 主干渉計配置
- 入射光学系配置
- 出射光学系配置

3 レーザー光学系

レーザー光学系は、レーザー光源、モードクリーナーを含む入射光学系、出射光学系、光検出系からなる。高出力・高安定なレーザー源だけでなく、制御や安定化に用いる変調器、光検出器等も高パワーに耐えられるものが必要となる。波長は Nd:YAG レーザーの 1064 nm がデフォルトとなっているであろうが、現段階では他の波長の可能性も否定はできない。

3.1 レーザー源

レーザー源に対する要求としては高出力パワー、単一モード、直線偏光、高い周波数や強度安定度、光軸安定度などが挙げられる。これは、注入同期、アンプによる光増幅、光のコヒーレント加算といった技術とその組み合わせによって実現されるであろう。それぞれにおいて、スラブ結晶/ロッド結晶、エンドポンプ/サイドポンプ、プレモードクリーナーの有/無などの手法の選択肢がある。現状では、三菱のロッドタイプかアデレード大のスラブタイプの注入同期チェーンが有力である。また、レーザー源は外部信号によってさらに安定化されるよう設計されなくてはならない。

- レーザー源の方式

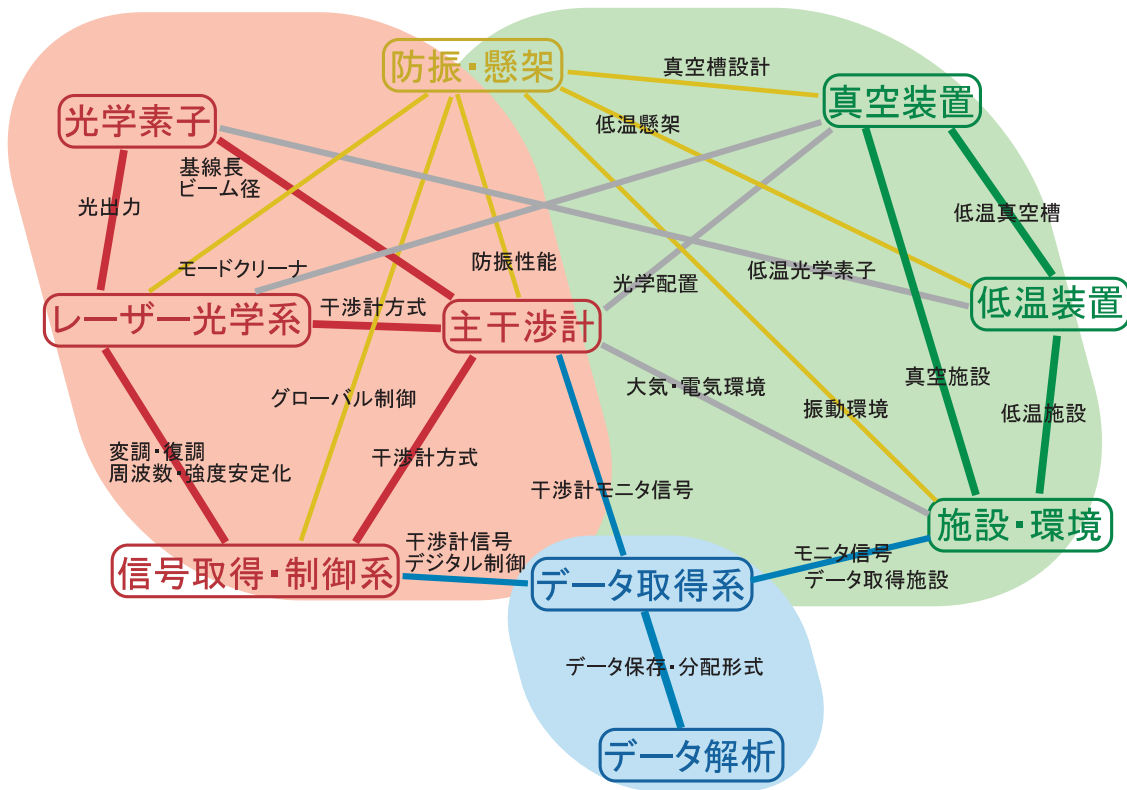


図 1: 各要素の相関図。

- 周波数・強度雑音
- 外部信号による安定化の方式
- 長期安定性・LD 交換等の保守

3.2 入射・出射光学系

モードクリーナーの設計は、レーザー源自身の性能に強く依存する。高次モードの量、ビームジッター、周波数安定度、RF 強度雑音などの要求を考慮し、基線長やフィネス、防振特性などを設計する必要がある。場合によっては、モードクリーナーを多段にする必要がある可能性もある。入射・出射光学系は、光損失を極力抑えると共に、散乱光にも配慮して設計する必要がある。

- モードクリーナー
 - － 共振器構成、基線長、フィネス、透過率
 - － 防振特性、ビームジッター
 - － モードクリーナー段数

- 入射光学系
- 出射光学系

3.3 変調器、光検出器

高出力レーザーの設計だけでなく、それを重力波検出器に用いるためには、変調器や光検出器などの設計も不可欠である。位相変調に関しては、強度変調との結合を抑えるための温度制御や、ドリフトや周波数雑音の小さい RF 信号源 (場合によっては安定化) が必要となる。どれほどの強度雑音が許されるかは、干渉計の動作点周り RMS 振幅で決められるが、設計次第では、高パワーに耐えられる AF 帯の低雑音光検出器も必要となる。メインの信号を取得するための RF 光検出器には、低雑音・高耐光強度はもちろん、広いダイナミックレンジを持つことも要求される。

- 位相変調器、変調用の安定な RF 信号源
- 強度変調器、AF 光検出器
- RF 光検出器

4 光学素子

干渉計の大型化に伴い、ビーム径が太くなることから、主干渉計用の光学素子だけでなく、モードクリーナーモードマッチングテレスコープ、さらには光軸ステアリングミラーやレンズなどの精度やコーティングにも十分配慮すべきである。

4.1 主干渉計用光学素子

干渉計を構成する光学素子は、基材・研磨・コーティングに対しての要求を考慮して選択される。主干渉計用には、高パワーを干渉計内部に蓄えられるよう、また、低温に保てるよう、より低光損失 (散乱と吸収) の光学素子が求められる。また、散乱光が感度に影響を与えない事も重要である。さらに、低温化するといえど、熱雑音が問題にならないよう、基材やコーティングの機械的損失にも配慮すべきである。

- 鏡・ビームスプリッター径
- サファイア基材の特性評価と品質改良
- 単結晶基材の研磨、熱レンズ効果の評価

- 低光・機械損失コーティング
- 低温状態での光学特性の変化・劣化

4.2 その他の光学素子

モードクリーナーを低温化しない場合には、光学素子の熱雑音はきちんと評価しておく必要がある。また、モードクリーナー透過率は鏡の出来で決まるため、目標をどこに設定するかを議論しておく必要がある。入射・出射光学系を構成する光学素子は、散乱光が問題にならない程度の表面平滑度と AR コーティングの性能を持つ必要がある。

- モードクリーナー用鏡
- モードマッチングテレスコープ
- レンズ、ステアリングミラー

5 防振・懸架装置

神岡鉱山内という立地条件の利点を最大限に生かすためにも、よりよい防振・懸架装置が必要となる。重力波観測周波数帯下限で、地面振動の影響が十分小さいこと、鏡の RMS 振幅が大きくとも波長程度であること、制御性がよく広いダイナミックレンジを持つこと、などが重要な要素となる。また、懸架装置の熱雑音についても考慮に入れておく必要はある。さらに、防振・懸架装置単体の性能だけでなく、真空や低温とのすり合わせについては、注意深い研究開発が必要となる。

5.1 防振装置

LCGT が低周波数で感度を持つためには、数百 mHz あたりからの低周波防振装置が必要であろう。この防振装置は必ずしも冷却されている必要はないため、これまでの技術をそのまま用いることが出来る部分も多いと思われる。また、主干涉計以外の部分の防振についても十分検討しておくべきである。

- 防振方式 (X 振り子、SAS、アクティブ防振、懸架点干渉計、スタックなど)
- 防振性能 (光軸方向、その他の並進方向、角度揺れ、カップリング)
- 制御性とダイナミックレンジ、ローカルコントロール
- 真空対応
- 設置・調整時の扱い易さ

5.2 懸架装置

主干渉計の懸架装置部分は、低温にされる。そのため、上記の防振装置に必要な事項に加えて、低温化に必要な熱リンク方式、低温化による雑音の導入などを考慮する必要がある。冷却のためにはワイヤー径は太い方が望ましいが、その場合、防振比が損なわれる可能性もあるため、最適な懸架法を探る研究が不可欠である。

- 鏡の懸架方式 (ワイヤー材質や径、接続法)
- 冷却方式、熱リンクの取りまわし
- アクチュエータの雑音とダイナミックレンジ
- 振り子などの熱雑音、バイオリンモード周波数

6 信号取得・制御系

制御系の役割は、干渉計の感度と安定度を保つことである。干渉計感度を保つためには、信号検出系の雑音、回路の雑音、制御帯域を十分に考慮する必要がある。また、低雑音のアクチュエータが必要となるため、ダイナミックレンジを考慮すると、複数のアクチュエータを用いることは必須となるであろう。高い安定度を保つためには、振動環境や防振性能はもちろん、十分なダイナミックレンジ、アンロック時の自動復帰機能を持たせることによる無人運転も重要な要素となる。

6.1 光路長制御

観測帯域や信号検出法によっては、 δl_- , δl_+ (δl_s) 制御系については、制御帯域はせいぜい数 Hz しか取れないと思われ、防振・懸架系と併せて特別の工夫が必要になることが予想される。また、ロックアクイジション法の確立とその自動化は、無人運転を目指す上で重要な要素であり、アナログ・デジタル制御の混在法を含めて予め検討しておく必要がある。さらに、各光学定盤、アクチュエータ、制御盤間の距離が長くなることが予想されるため、信号の伝送法についても配慮が必要となる。

- 信号取得方式と雑音
- 制御方式、特に周波数安定化系
- 制御系・アクチュエータの雑音とダイナミックレンジ
- ロックアクイジションと運転の自動化
- アナログ・デジタル制御の切り分け、信号伝送

6.2 アライメント制御

雑音を導入しないためには、アライメント制御の帯域は、せいぜい数 Hz になると思われる。また、急峻な制御フィルターも必要になるはずであり、変動に対してロバストな制御系の設計が肝要となる。デジタル制御を行うという選択肢もあるが、雑音特性を十分に考慮して決定すべきである。

- 信号取得方式と雑音
- 制御系の雑音とダイナミックレンジ
- ロック・アンロック時の自動スイッチング
- アナログ・デジタル制御の切り分け、信号伝送

6.3 その他、各種制御系

高い感度を連続的な観測時に保つためには、各種の補助的な制御系が必要となる。また、調整者の経験に頼らずとも、常に最高の性能を発揮できるような自動調整機能も必要と思われる。自動調整機能は、観測のデューティ比の向上にも役立つであろう。

- 光軸制御
- 強度安定化
- 自動オフセット調整・制御 (光路長方向、アライメント、光軸)

7 低温化装置

低温部は LCGT の最も大きな特徴であり、最も研究開発が必要な部分でもある。単に冷却するだけでなく、防振・懸架系、真空系、光学系、制御系のそれぞれについて配慮が必要となる。また、冷却器自身の振動や騒音についての対策、メンテナンスや運転の容易さも考慮する必要がある。

7.1 冷却方式

どのように鏡と冷却器を接続するか。冷却のためには熱リンクは太い方が望ましいが、その場合、硬くなる影響で防振比の低下や冷却器の振動の導入、制御性の悪化などの可能性もある。

- 鏡と熱リンクの接続法

- 熱リンク形状の最適化、防振

7.2 冷却器

冷却器の選択に際しては、冷却能力だけでなく、振動や騒音の小ささ、信頼性が重要な要素となる。特に、保守の容易さは、検出器全体のデューティー比に影響を及ぼしかねないので注意が必要である。

- 必要な冷却能力
- 発生する振動、騒音とその除去
- 信頼性、保守・運転の容易さ

8 真空装置

真空装置は、後から変更することが困難であり、建設やシェイクダウン作業性に大きな影響を与えるため、拡張性やスペースに余裕を持って設計されることが望ましい。ただ、真空装置は建設費のなかで大きな割合を占めるため、現実的な制約との兼ね合いで決められるであろう。

8.1 真空槽設計と配置

どのような真空槽の配置にするか等は干渉計の設計に強く依存する。また、常温部と低温部それぞれでの真空特性とその結合は、防振・懸架装置とのすり合わせを考慮する必要がある。真空槽の接地や信号線の導入法によっては、余分な電氣的雑音を生み出す可能性も有るため、配慮が必要である。

- 真空槽の設計、到達真空度、低温・防振装置とのすり合わせ
- 真空槽の配置
- 作業性、拡張性、真空槽内のモニタシステム
- 設置・接地法、信号線の導入法

8.2 散乱光対策

散乱光による雑音は、電氣的なグラウンドノイズと同様に、後からの対処には多大の労力を要する。従って、真空槽の設計に際しては散乱光の影響を十分に考慮しておく必要がある。

- ダクト径とバッフル
- 真空槽の内面処理、光学窓での反射

9 施設・環境

施設は、単なる「干渉計の入れ物」ではなく、検出器の最終性能や、建設効率に大きく影響する重要な要素である。施設は、大きく分けて、振動、大気、電気の3つの環境を保つことを考慮して設計されるべきである。また、検出器の無人運転を可能にするモニタ施設も必要である。

9.1 振動環境

神岡という非常に振動環境にすぐれたサイトの利点を最大限に生かすための施設設計は不可欠である。振動や音を発生する機器は極力用いない、隔離する、防振・防音する、といった措置が必要となる。

- 冷却装置の振動
- 空調機の振動
- コンプレッサー、測定機器のファンなどの振動
- 有人運転が必要な場合の人工的振動の隔離

9.2 大気環境

大気の状態によっては、干渉計の雑音源やドリフトの要因となり得る。大気の温度・湿度をコントロールすることはもちろん、大気の流れの影響、防塵にも配慮する必要がある。加えて空調機は極力、振動や音を抑えたものにする必要がある。

- 温度・湿度環境
- クリーン環境

9.3 電氣的環境

電源の交流周波数成分の雑音は、干渉計やデータ取得系のダイナミックレンジを制限し、雑音源となり得る。また、ひどい場合には、干渉計の安定度に影響を与える可能性もある。また、グラウンドノイズの影響は、後から除去することは多大な労力を要するので、十分に考慮して設計すべきである。従って、高安定化

電源の開発や測定器の配置まで考慮に入れた、安定な電氣的環境を作ることが必要となる。

- 安定な交流・直流電源
- グラウンドノイズの除去

9.4 作業・操作性

検出器の建設やシェイクダウンの際の作業性は、感度向上の効率、さらには検出器自身の性能にも大きな影響を与える。従って、作業性を十分に考慮した施設設計が必要となる。また、観測中は、振動や温度変化の影響を抑えるため、できるだけ無人化、または、人を隔離することが望ましい。遠隔操作やモニターができる施設配置が望ましい。

- 建設の作業性
- 遠隔操作性・モニター設備

10 観測・データ取得

データ取得部は、重力波ポート信号を含む高速部と、その他の干渉計診断情報を得るための中速・低速部に分けられる。それぞれについて、取得すべき信号をリストアップして仕様を決める必要がある。また、取得したデータを保管・配信・解析する際のデータの効率的な流れ、ソフトウェア群の仕様の決定と整備も重要である。デジタル制御の方式によっては、データ取得部とのすり合わせも必要となるであろう。人的配置を含めた観測・モニタ体制についても議論しておく必要がある。

10.1 信号の取得

データをコンピュータに取りこみ、保存する部分の仕様。取得すべき信号のリストアップと、白色化、必要なサンプリングレートと分解能の決定が必要。また、信頼性と操作性、セキュリティも重要な要素である。

- 取得すべき信号数
- 信号の伝送、白色化、アンチエイリアシング等の前処理
- A/D コンバータのサンプリングレート、分解能

- データの保存形式、保存法
- システムの信頼性、操作性、データのセキュリティ
- デジタル制御系との兼ね合わせ
- 観測体制、モニタシステム

10.2 データの保管・配信

保存されたデータをどのように取り扱うか。データをサイトで集中管理するか、各地に配信するかの方針によってリソースの投入法が変わってくる。他のプロジェクトや研究機関との付き合い方も含めて議論をする必要がある。

- データの保管方針、アーカイブシステム
- 配信の方針、ネットワークシステム
- システムの信頼性、操作性、データのセキュリティ

11 データ解析

取得されたデータをどのような方針で解析していくのか。新しい解析法などは、後からでも出てくるものだが、基本的なターゲットに対しての解析方針は決めておくべきである。また、各種信号を用いて検出器の状態を把握する解析システムも必要である。

11.1 重力波解析

LCGTがターゲットとする重力波源それぞれについて、どのような解析を行うのか、どのように結果を評価するのか、は予め議論しておくべきである。

- 連星中性子星、連星 MACHO-BH の合体
- 超新星爆発等のバースト波
- パルサーなどからの連続波
- 解析手法、コインシデンス

11.2 干渉計解析

重力波信号ポートやその他のチャンネルの信号を評価し、干渉計の状態を把握するための解析部。得られたデータの質を評価し、その信頼性を高めるとともに、干渉計開発の段階において有用になるような設計が望ましい。干渉計開発や観測の効率化のため、データ取得部と連携して、オンラインで処理すべきである。

- 干渉計主信号の解析・評価
- 干渉計状態の把握
- サイトの環境の把握
- オンライン化にあたってのデータ処理の流れ、操作性

12 むすび

本稿は、現段階では、安東一人の理解のみで書かれており、不完全な点や偏りも多くあると思われるが、議論を始めるにあたってのきっかけとなれば幸いである¹。

¹なお、議論の早期立ち上げを期待して、本稿は日本語で書かれている。LCGT デザインレポートの段階になるまでに英語化されることが望ましい。