

大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画

—設計文書 (第3版)—

LCGT Collaboration

November 25, 2009

第 3 版への序文

本書は、Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (L C G T) の計画の設計書の改訂第 3 版である。L C G T の設計に関しては、L C G T の設計文書第一版 (2003 年 12 月) に基本原則となる指針がまとめられ、その改訂版 (第二版、2007 年 4 月) において、その間に行われた研究開発の成果が取り込まれている。第一版では、建設開始時までに決定されることを前提として可能な選択肢として列挙するに留めてあった干渉計の変調方式、低温部の冷却方法など幾つかの課題について、第 2 版で改訂が行われており、冷却の輻射シールドの機能について新たな知見が得られたことを受け、詳細設計に反映させるべく Appendix に追加された。この改訂第 2 版を基礎として、最新の技術を盛り込んで改訂したものが本書である。第 2 版との大きい変更は、一つの真空ダクト内に 2 本の干渉計を設置するとしたものを、第 1 版と同じく 1 本の干渉計に戻したことである。これに伴う、相関観測における感度低下をカバーすべく、Detuned RSE 方式を選択肢として取り上げている。

執筆者一覧

第 1 章	LCGT に至る道	中村卓史
第 2 章	LCGT の重力波源	田越秀行、田中貴浩
第 3 章	LCGT 計画の目標と概要	山元一広
第 4 章	LCGT の干渉計基本設計	安東正樹
第 5 章	Resonant Sideband Extraction	川村静二、佐藤修一、安東正樹、 宗宮健太郎
第 6 章	LCGT におけるレーザー光源に関して	三尾典克、武者 満
第 7 章	入射・出射光学系と周波数・強度安定化	森脇 成典、長野 重夫、寺田聡一
第 8 章	超高性能ミラー	大橋正健、上田暁俊
第 9 章	サファイア鏡	都丸隆行
第 10 章	冷却系	内山隆
第 11 章	低振動冷凍機	都丸隆行、鈴木敏一
第 12 章	懸架	三代木伸二
第 13 章	LCGT の防振系	高森昭光
第 14 章	Suspension Point Interferometer	麻生洋一
第 15 章	真空系	齋藤芳男、高橋竜太郎
第 16 章	観測システム	新井宏二
第 17 章	データ取得	辰巳大輔
第 18 章	データ解析	神田展行
第 19 章	施設・環境	佐藤修一
Appendix A	Detuned RSE	宗宮健太郎
Appendix B	熱輻射伝搬効果を考慮したクライオスタットの熱負荷	都丸隆行
Appendix C	LCGT 実験における宇宙線の影響	常定芳基

目次

1	LCGT に至る道	1
2	LCGT の重力波源	3
2.1	連星中性子星, ブラックホールの inspiral	3
2.1.1	イベントレート	3
2.1.2	Inspirational, Merger, and Ringdown	6
2.2	回転中性子星	7
2.3	重力崩壊型超新星爆発	9
2.4	ガンマ線バースト	9
2.5	宇宙ひも	10
2.6	背景重力波	12
3	LCGT 計画の目標と概要	17
3.1	LCGT 計画がめざすもの	17
3.2	LCGT 計画の目標感度	17
3.3	LCGT 干渉計の原理的な雑音と対策	19
3.3.1	Optical readout noise	19
3.3.2	Thermal noise	21
3.3.3	Seismic noise	23
3.3.4	その他の雑音対策	23
3.4	LCGT 計画の parameter	23
4	LCGT の干渉計基本設計	27
4.1	LCGT 干渉計の光学系デザイン	27
4.1.1	主干渉計	28
4.1.2	レーザー光源	34
4.1.3	入出射光学系	36
4.1.4	主光学素子	40
4.2	LCGT 干渉計のテストマス支持	42
4.2.1	テストマス低温懸架	44
4.2.2	常温防振部	49
4.3	干渉計制御	53
4.3.1	主干渉計光路長制御	53

4.3.2	懸架点干渉計の役割	54
5	Resonant Sideband Extraction	59
5.1	レゾナント・サイドバンド・エクストラクションとは?	59
5.2	レゾナント・サイドバンド・エクストラクションの利点	61
5.3	最適なゲイン配分	62
5.4	信号取得	62
5.4.1	長さ信号	62
5.4.2	アラインメント信号	66
6	LCGT 計画におけるレーザー光源に関して	69
6.1	LCGT 干渉計用レーザー光源が満たすべき要求	69
6.2	レーザー光源システムの概要	70
6.3	周波数雑音	71
6.4	強度雑音	71
6.5	干渉計とのインターフェース	71
6.5.1	周波数・位相制御	72
6.5.2	強度制御	72
6.5.3	全体の構成	72
7	入射・射出光学系と周波数・強度安定化	75
7.1	入射・射出光学系の概要	75
7.2	モードクリーナーの基本設計	77
7.2.1	モードクリーナーの概要	77
7.2.2	モードクリーナーに要求される性能	77
7.2.3	モードクリーナーの光学デザイン	78
7.3	LCGT のためのレーザー周波数安定化	81
7.3.1	光源の周波数雑音	81
7.3.2	周波数安定化のサーボポロジ	82
7.3.3	周波数基準	83
7.3.4	周波数安定化のサーボ設計	86
7.3.5	Excess ノイズとの関係	90
7.4	アウトプットモードクリーナーの基本設計	90
7.4.1	アウトプットモードクリーナーの概要	90
7.4.2	アウトプットモードクリーナーに対する要求	90
7.4.3	アウトプットモードクリーナーの光学デザイン	92
7.5	光共振部のモードパラメータとモードマッチング・テレスコープ	93
7.6	LCGT のためのレーザー強度安定化	95
7.6.1	光源の強度雑音	95
7.6.2	ポンプ光 LD 電流による強度安定化	95
7.6.3	強度安定化のサーボポロジ	96
7.6.4	強度安定化のサーボ設計	97
7.7	変調素子	97
7.8	光検出器	99

7.9	光アイソレーター	100
7.10	入射・射出光学系の構成要素の配置	101
8	超高性能ミラー	105
8.1	ミラー基材	105
8.2	基板の研磨	106
8.3	コーティング	108
8.4	ミラー損失の測定	109
8.4.1	共振器特性の測定法	110
8.4.2	超高品質ミラーの2次元性能評価	111
8.4.3	大口径ビームに対するミラーロス	113
9	サファイア鏡	117
9.1	サファイア結晶の製造	117
9.2	熱雑音	118
9.2.1	サファイア基材のQ値	118
9.2.2	熱膨張率と Thermoelastic Noise	118
9.3	発熱問題	119
9.3.1	サファイア鏡基材の光吸収	119
9.3.2	熱レンズ効果	123
9.3.3	冷却問題	123
9.4	その他の光学的性質	125
9.4.1	Rayleigh 散乱	125
9.4.2	屈折率一様性	125
9.4.3	複屈折	125
9.4.4	研磨	126
10	冷却系	129
10.1	低温システム	130
10.2	ヒートリンクデザイン	133
11	低振動冷凍機	139
11.1	仕様と設計	139
11.1.1	要求される冷凍能力	140
11.1.2	冷凍機の振動レベル	141
11.2	既存技術の概観	141
11.2.1	市販の小型冷凍機	141
11.2.2	CLIO 用低振動冷凍機システムの開発	141
11.2.3	高性能伝熱体	144
11.3	LCGT 用冷凍機システム	146
12	懸架	149
12.1	低温鏡用懸架	149
12.1.1	鏡の冷却と懸架の形態	149
12.1.2	懸架ワイヤー素材への要求	150

12.1.3	熱伝導率	151
12.1.4	低温における機械的 Q 値	157
12.1.5	脆性・耐久性	160
12.1.6	サファイア接合	161
12.1.7	ファイバーを使用しない懸架	162
12.2	常温からの懸架	163
13	LCGT の防振系	167
13.1	防振系の概要	167
13.1.1	LCGT 設計感度と防振特性	167
13.1.2	低周波における防振	168
13.2	SAS による低周波防振	168
13.2.1	SAS の機械系	168
13.2.2	SAS の制御	171
13.3	SAS 開発の現状	172
13.4	LCGT SAS の防振特性と LCGT の感度	172
13.5	LCGT-SAS の設計指針	172
13.5.1	冷却・低温環境	173
13.5.2	制御系	174
13.5.3	その他の考慮事項	175
14	Suspension Point Interferometer	179
14.1	Introduction	179
14.2	SPI の基本性能	181
14.3	ヒートリンクからの振動混入の見積り	182
14.4	考慮すべき点	184
14.5	まとめ	188
15	真空系	191
15.1	真空ダクト	192
15.2	真空槽	193
15.3	排気装置	194
15.4	光学特性	195
15.4.1	各干渉計のダクト形状と散乱光対策	195
15.4.2	散乱光雑音の見積り	196
15.4.3	バッフルの配置と効果	199
15.4.4	バッフルの材質と表面処理	199
16	観測システム	203
16.1	自動ロックシステム	203
16.2	モニタと診断システム	204
16.2.1	診断/モニタシステム	205
16.2.2	その他のモニタ系	206
16.3	干渉計調整	206

17	データ取得	207
17.1	Main DAQ system	210
17.2	Frame Maker	210
17.3	Detector Diagnosis	211
17.4	Environment Monitor	211
17.5	Time Keeper and Global Positioning System	212
17.6	Raw Data Archive	213
17.7	Pre Analysis Server	213
17.8	Data Distribution	213
17.9	Summary of ADC Specification	214
18	データ解析	215
18.1	はじめに	215
18.1.1	全体の流れ	215
18.1.2	干渉計からの信号	216
18.1.3	イベントの大きさ Event Significance	216
18.2	ソースとイベント選別手法	217
18.2.1	連星合体イベント	217
18.2.2	バースト重力波 (超新星)	222
18.2.3	連続波	223
18.3	国際的な検出器ネットワークでの同時観測	224
18.3.1	複数台の検出器	224
18.3.2	離れたサイトとの同時観測	225
18.4	検出の有為性と観測上限値	226
18.4.1	観測上限値：イベント候補数が少ない (数個) 場合	227
18.4.2	有為なイベント検出： N_{obs} 中に N_{ev} を肯定する	227
19	環境・施設	231
19.1	干渉計のサイト選び	231
19.1.1	干渉計感度の観点から	231
19.1.2	干渉計安定度の観点から	232
19.2	神岡の概略	232
19.3	神岡地下の優位性	234
19.3.1	地面振動	234
19.3.2	温度環境	235
19.4	地下環境の特殊性	235
19.4.1	サイト調査	235
19.4.2	断層・破砕帯	236
19.4.3	地下水	236
19.4.4	湿度・空気	238
19.4.5	電気・接地	238
19.4.6	クリーン環境	238

A	Detuned RSE	239
A.1	Detuning について	239
A.2	QND について	239
A.3	Detuned RSE の量子雑音	241
B	熱輻射伝搬効果を考慮したクライオスタットの熱負荷	245
B.1	熱輻射の伝搬効果	245
B.1.1	問題提起	245
B.1.2	低温パイプ内の輻射伝搬モデル	246
B.1.3	実験的検証	248
B.1.4	輻射伝搬効果を考慮した場合の LCGT の熱輻射量	249
B.2	バッフルによる輻射伝搬効果の低減	249
B.2.1	バッフルによる輻射低減率の計測	249
B.2.2	バッフル導入時の LCGT の輻射熱負荷の見積	250
C	LCGT 実験における宇宙線の影響	251
C.1	大気中の宇宙線とミュオン	251
C.1.1	宇宙線と空気シャワー	251
C.1.2	荷電粒子のエネルギー損失	252
C.1.3	地表付近での宇宙線ミュオン	253
C.1.4	地中での宇宙線ミュオン	253
C.2	神岡観測所におけるミュオン	255
C.2.1	Kamiokande-II の μ イベント頻度	255
C.2.2	LCGT 実験に用いる鏡への宇宙線ミュオンの入射頻度	255
C.3	LCGT 実験に対する宇宙線ミュオンの影響	256
C.3.1	宇宙線ミュオンの影響による鏡の熱振動	256

第1章

LCGTに至る道

中村卓史¹

我国に於けるレーザー干渉計による重力波の研究は1988年9月 京都大学基礎物理学研究所モレキュール型研究会「重力波天文学」が第1歩でした。1989年度には早川幸男代表の総合研究(B)がはじまり、早川幸男先生を中心にして将来の本格的な検出装置の概念設計がスタートしました。重点領域「重力波天文学」は早川幸男先生が名古屋大学学長であったため、中村卓史(京大基研)が代わりに代表者となって、総額約6億円の予算で認められ、1991年に始まりました。

急に実験のことはあまり判っていない理論屋が代表者にされただけでなく、上のほうからは、代表者の責任に於て何か世界に勝てる独特な物を成果として出すように言われて早速概念設計書を真剣に読み始めました。するとどうやら、鏡の熱雑音が、最も重要であることが理論屋にも分りました。「それじゃ、鏡の熱雑音を下げる独特な方法を考えれば良いのだ、簡単じゃないか。」熱雑音による変位は鏡の温度の平方根に比例し質量と Q 値の平方根に逆比例するから低温で大きい質量で Q 値の大きい鏡を考えればよいということが分りました。もし、液体ヘリウム温度近くに鏡を冷すことが出来れば、10倍近い感度の向上が期待できます。これだと思って、技術検討会や運営委員会等で提案してみましたが、反応は冷いものでした。

「超高真空中に吊ってある鏡をどのようにして冷すのですか？ガスを流すのですか？それでは、真空度が悪くなるので、別のところから吸引するのですかね。むずかしいな。」

「それに、レーザー光の一部は必ず鏡に吸収されるから、むしろ鏡は暖められますよ。まわりの真空チューブを液体ヘリウム温度にしても鏡は200Kになるのが、関の山かな。これじゃ大して有難くないな。」

「大体我々は、アルミの棒を冷すのに苦労して来たんだ。今度は冷さなくてもいいから、ということで始めたのに、また冷せというのですか？」

「いやいや、そもそも、重力波を計るということは、如何にして重力波以外の物から自由なFree Massを作るかということだから、レーザー干渉計とアルミの棒を冷やすことは違ったものではなく、同じことの別の側面なのだ。レーザーの先に巨大な低温の鏡がついているのが、最も感度が良い最終装置なのだ。簡単に冷すのを諦めないで、何か知恵を出そうよ。」

当時は冷やすことに関しては、これ以上は進まなかった。それは、冷すための熱伝導の良い材料がなかった為でもある。しかし、11年後に、実験屋が絞りだした知恵がこのLCGTデザインとして結実しました。Working Groupの大変な努力に敬意を表します。

¹京大理

第2章

LCGTの重力波源

田越秀行¹ (2.1-2.4)

田中貴浩² (2.5-2.6)

地上におけるレーザー干渉計重力波検出器のターゲットとなりうる重力波源についてのレビューは、Cutler and Thorne[1] や Sathyaprakash and Schutz[2] などがあり、より詳しくはそれらを参照してほしい。

ここでは、特に合体するコンパクト連星、回転中性子星、重力崩壊型超新星、ガンマ線バースト、宇宙ひも、そして宇宙背景重力波について最近の研究をまとめた。また、いくつか LCGT の感度曲線を使った評価も行う。用いたノイズカーブは、2008 年の段階のものである。

2.1 連星中性子星，ブラックホールの inspiral

2.1.1 イベントレート

質量が数 $10M_{\odot}$ 以下のブラックホール (BH) や中性子星 (NS) からなる連星が合体する直前の数十秒から数分間の間に発する重力波は、LCGT の周波数帯域に入る。表 2.1 に、最新の研究結果に基づく、LCGT で期待されるイベントレートをまとめる。現在の LCGT には、これまで通り広帯域を維持できる干渉計方式 (Broadband RSE (BRSE)) と、狭帯域にはなるが、より連星合体に特化した感度曲線に調節可能な干渉計方式 (Detuned RSE (DRSE)) の 2 つの選択肢がある。これらの 2 つの場合についてイベントレートを載せる。

中性子星連星

中性子星連星の合体率は、観測されている中性子星連星を用いた評価がなされている。表 2.2 に、発見されている連星中性子星で、 10^{10} 年以内に合体するものをまとめる。

合体率の評価には、銀河系内で発見されている連星中性子星の中で 10^{10} 年以内に合体する、PSR1913+16 及び 1534+12 が重要な役割を果たしていた。Kalogera et al. [7] では、評価に影響を与える様々な効果を評価し、銀河系での合体率 R を計算した。中性子星分布モデルの詳しい評価や最新のパルサー探査の

¹ 阪大理

² 京大基研

	NS-NS	BH-NS	BH-BH
銀河系での合体率 [1/yr]	$83.0^{+209.1}_{-66.1} \times 10^{-6}$ (CI=95%)	$10^{-7} - 10^{-4}$	$10^{-7} - 10^{-5}$
LCGT(BRSE) での最大観測可能範囲	231Mpc($z=0.0522$)	475Mpc($z=0.103$)	1.10Gpc($z=0.222$)
LCGT でのイベントレート [1/yr]	$3.9^{+9.90}_{-3.13}$	0.036 - 36	0.32 - 32
LCGT(DRSE) での最大観測可能範囲	312Mpc($z=0.0697$)	662Mpc($z=0.141$)	1.50Gpc($z=0.292$)
LCGT でのイベントレート [1/yr]	$9.2^{+23.2}_{-7.35}$	0.087 - 87	0.70 - 70

表 2.1: コンパクト連星系の銀河系での合体率と LCGT で観測可能な範囲内でのイベントレート. NS-NS については, ビーム補正と暗いパルサーからの寄与の補正を取り入れたもの. J1906+0746 の寄与は入っていない. 最大観測可能範囲は, 最適方向・角度の場合に $S/N=8$ となる距離とした. また, 最適方向・角度からのずれによる観測可能体積の減少率を $(0.44)^3 = 0.0852$ として, LCGT でのイベントレートは計算した. 光度距離と赤方偏移 z の関係は WMAP 5year の結果である, $\Omega_M = 0.274$, $\Omega_\Lambda = 0.726$, $H_0 = 70.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を用いた.

PSR name	P_s (ms)	P_b (hr)	e	τ_{life} (Gyr)
B1913+16 ^a	59.03	7.75	0.617	0.37
B1534+12 ^a	37.90	10.10	0.274	2.93
J0737-3039A ^a	22.70	2.45	0.088	0.23
J1756-2251 ^a	28.46	7.67	0.181	2.03
J1906+0746 ^b	144.14	3.98	0.085	0.082
J2127+11C ^{bcd}	32.76	8.047	0.681	0.32

表 2.2: 10^{10} 年以内に合体する連星中性子星. P_s :パルス周期, P_b :公転周期, e :離心率, τ_{life} :寿命, $\tau_{\text{life}} = \tau_{\text{sd}} + \tau_{\text{mrg}}$, τ_{sd} : spin down age, τ_{mrg} :重力波放出による合体までの時間. J1906+0746 は伴星が WD である可能性もある. J2127+11C は球状星団 M15 にあるもの. それ以外は銀河円盤内にあるもの. 引用文献, ^aO'Shaughnessy et al.(2008)[3], ^bKim et al.(2006)[4], ^cThe ATNF Pulsar Catalogue[5], ^dPhinney(1991).[6]

selection 効果を取り入れた評価によって, $\mathcal{R} = 2 - 4 \times 10^{-7} [\text{yr}^{-1}]$ という結果を得た. この値は合体率の下限値を与えていると考えられ, 実際の値は, 以下の 2 つの因子の補正を更に受ける. 一つ目はパルサーのビーム因子 f_b で, これは, $4\pi/(\text{beam が自転しながら覆う立体角})$ として定義される. Kalogera et al. では, PSR1913+16 及び 1534+12 ではビームの形状の解析が進んできていて, それぞれ $f_b = 5.8, 6.5$ という値が得られていることから, 典型的な値として $f_b = 6$ を採用した [8]. もう一つの効果は, 暗くて観測されないパルサーからの寄与をどの程度取り入れるかである. Kalogera et al. では, パルサーの光度関数を用いた評価により, \mathcal{R} は最大 200 倍程度大きくなる可能性があると思積もっている. これは他の不定性に比べて最も大きな不定性となっている. これらの効果を取り入れ, 上記の \mathcal{R} を $6 \times (1 \sim 200)$ 倍することで, 最終的な合体率として, $10^{-6} \leq \mathcal{R} \leq 5 \times 10^{-4} [\text{yr}^{-1}]$ を得た.

Kim et al. [9] は, 以上に加えて, Bayes 統計を導入して合体率の再評価を行った. その結果として, 最頻値は $\mathcal{R} = 8 \times 10^{-6} [\text{yr}^{-1}]$ で, 上限下限は CI=68% で $(3 - 20) \times 10^{-6} [\text{yr}^{-1}]$, CI=99% では $(0.7 - 40) \times 10^{-6} [\text{yr}^{-1}]$ という結果を得た. なおこれはビーム因子や暗いパルサーの寄与の効果はすべて含まれた結果である. もし採用されているビーム因子 ($f_b \sim 6$) の効果を取り除くと, 中心値は $\mathcal{R} = 1.3 \times 10^{-6} [\text{yr}^{-1}]$ で, 上限下限は CI=99% で $(0.11 - 6.6) \times 10^{-6} [\text{yr}^{-1}]$ となる. 暗いパルサーの寄与は, パルサーの光度関数として空間分布と共に解析の中に取り入れられており, 論文の結果からその効果だけを引き去ることはできない. しかし, 暗いパルサーの光度関数が, 合体率の評価に大きな影響を与えている点は以前までの解析とは同じである. そのような系統誤差は, この評価とは別に与えるべきであると考えられるべきである.

2003 年頃発見された PSR J0737-3039 は, 軌道周期がそれまでのものより短く、従って合体までの時

間が、PSR B1913+16 より 3.5 倍短い連星パルサーである [10] . この連星パルサーを取り入れ、Kalogera らは [11] $83.0^{+209.1}_{-66.1} \times 10^{-6} \text{ [yr}^{-1}\text{]}$ という合体率を得た . これは model 6 という、最も標準的とされたパルサー光度関数などのモデルを用いた値であり、モデルを変えた場合のイベントレートは図 2.1 に載せる .

2005 年頃発見された PSR J1756-2251 は銀河円盤内で 10Gyr 以内に合体する 4 番目の連星パルサーとなった . しかしながら、Kim et al.(2006)[4] によると、この連星パルサーの特徴は B1913+16 に似ているために、合体率評価への影響は小さく、合体率を 4%程度増加させるだけであるとされている . また、最も最近発見された J1906+0746[13] は、まだ、伴星が中性子星なのか、重い白色矮星なのかが確定していない [3] . しかし、スピンドウン率から計算される characteristic age が 112kyr と非常に若いパルサーで、また連星の寿命推定値も 82Myr と非常に短く注目される . Kim[14] は、J1906+0746 を入れた銀河系での合体率は $118^{+174}_{-79} \text{ Myr}^{-1}$ (CI=95%) としている (Ref.[15] の Lorimer のレビュー (p.32) も参照のこと) . なお、以上の評価には、球状星団中にある J2127+11C は、形成過程が違ふと考えられるため取り入れられていないが、合体率への影響は小さいと考えられる [6] .

TABLE 1
ESTIMATES FOR GALACTIC IN-SPIRAL RATES AND PREDICTED LIGO DETECTION RATES (AT 95%
CONFIDENCE) FOR DIFFERENT POPULATION MODELS

MODEL ^a	\mathcal{R}_{tot} (Myr ⁻¹)	IRF	\mathcal{R}_{det} of LIGO ^b	
			Initial (kyr ⁻¹)	Advanced (yr ⁻¹)
1	$23.2^{+59.4}_{-18.5}$	6.4	$9.7^{+24.9}_{-7.7}$	$52.2^{+133.6}_{-41.6}$
6	$83.0^{+209.1}_{-66.1}$	6.3	$34.8^{+87.6}_{-27.7}$	$186.8^{+470.5}_{-148.7}$
9	$7.9^{+20.2}_{-6.3}$	6.6	$3.3^{+8.4}_{-2.6}$	$17.7^{+45.4}_{-14.1}$
10	$23.3^{+57.0}_{-18.4}$	5.8	$9.8^{+23.9}_{-7.7}$	$52.4^{+128.2}_{-41.3}$
12	$9.0^{+21.9}_{-7.1}$	6.0	$3.8^{+9.2}_{-3.0}$	$20.2^{+49.4}_{-15.9}$
14	$3.8^{+9.4}_{-2.8}$	5.8	$1.6^{+3.9}_{-1.2}$	$8.5^{+21.1}_{-6.2}$
15	$223.7^{+593.8}_{-180.6}$	7.1	$93.7^{+248.6}_{-75.6}$	$503.2^{+1336.0}_{-406.3}$
17	$51.6^{+135.3}_{-41.5}$	6.9	$21.6^{+56.7}_{-17.4}$	$116.1^{+304.4}_{-93.4}$
19	$14.6^{+38.2}_{-11.7}$	7.0	$6.1^{+16.0}_{-4.9}$	$32.8^{+86.0}_{-26.3}$
20	$89.0^{+217.9}_{-70.8}$	6.2	$37.3^{+91.2}_{-29.6}$	$200.3^{+490.3}_{-159.3}$

^a Model numbers correspond to KKL. Model 1 was used as a reference model in KKL. Model 6 is our reference model in this study.

^b Increase rate factor compared to previous rates reported in KKL. $\text{IRF} \equiv \mathcal{R}_{\text{peak,new}}/\mathcal{R}_{\text{peak,KKL}}$.

図 2.1: 様々なモデルによる銀河系での合体率と、LIGO での検出レート . Kalogera et al. (2004) [11] より .

以上の結果を用いて、LCGT(BRSE) で検出可能な中性子星連星の最大の距離 (正確には光度距離 (luminosity distance)) を 231Mpc として、イベントレートを見積もる (表 2.1) . このやり方には、銀河の個数の推定値を用いるやり方と、宇宙の B バンド光度密度を用いるやり方がある . ここでは、Phinney[6] に従い B バンド光度密度を用いて評価する . 宇宙の B バンド luminosity density は $\mathcal{L}_B = 1.5 \times 10^8 h L_\odot \text{ Mpc}^{-3}$ (h は無次元ハッブル定数, L_\odot は太陽光度) , 我々の銀河の B バンド luminosity は $L_B = 9 \times 10^9 L_\odot$ という値が Kalogera et al. [7] では使われている . 銀河系での合体率に、 \mathcal{L}_B/L_B をかければ、宇宙での共動体積あたりの合体率が導かれる . ここでは、この因子としては、Kalogera[11] で採用されている $\mathcal{L}_B/L_B = 1.25 \times 10^{-2} \text{ Mpc}^{-3}$ という値を用いることにする .

LCGT でのイベントレートは、銀河系での合体率を \mathcal{R} とすると、 $\mathcal{R} \times \mathcal{L}_B/L_B \times (4\pi/3) \times D^3/(1+z)^3 \times \epsilon$ で与えられる . (D を光度距離とすると、平坦な宇宙での赤方偏移 z までの共同座標体積は $V(z) = (4\pi/3) \times D^3/(1+z)^3$ である .) ここで、 ϵ は、最適な方向・角度出ない場合を考慮した時の、最大観測体積からの減少

率である．ここでは，モンテカルロシミュレーションによる， $\epsilon \simeq (0.44)^3$ を用いる [16]． $D_{\max} = 231\text{Mpc}$ 以内で LCGT (BRSE) の場合，J1906+0746 の寄与を取り入れない場合， $3.9^{+9.90}_{-3.13}[\text{yr}^{-1}]$ となる．J1906+0746 の寄与を取り入れる場合には， $5.6^{+8.24}_{-3.74}[\text{yr}^{-1}]$ となる．これらの導出には WMAP 5year の結果である， $\Omega_M = 0.274$, $\Omega_\Lambda = 0.726$, $H_0 = 70.5\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ という宇宙論的パラメータを用いた．

また，これらは Kalogera ら [11] の論文の model 6 というモデルに基づいた値である．もし，図 2.1 の表にあるなかで一番合体率が低い model 14 を採用した場合は LCGT (BRSE) でのイベントレートは $0.18^{+0.445}_{-0.336}[\text{yr}^{-1}]$ ，もし最も高い model 15 を採用した場合， $11^{+28.1}_{-8.55}[\text{yr}^{-1}]$ となる．

ブラックホール中性子星連星，ブラックホール連星

中性子星ブラックホール連星や，連星ブラックホールの合体率の見積りに関しては，観測されているそのような連星系がないために，理論的推察しか方法がない．理論的に得られている，NS-BH 連星の銀河系での合体率は $10^{-7} \leq \mathcal{R} \leq 10^{-4}[\text{yr}^{-1}]$ ，BH-BH 連星は $10^{-7} \leq \mathcal{R} \leq 10^{-5}[\text{yr}^{-1}]$ となっている [12]．ブラックホールの質量を $10M_\odot$ とすると，LCGT ではおおよそ 380Mpc 以内の NS-BH 連星，0.9Gpc 以内での BH-BH 連星の検出が可能となる．先ほどと同様の方法で，この範囲内でのイベントレートを求めると，NS-BH 連星は $0.036 - 36[\text{yr}^{-1}]$ ，BH-BH 連星は $0.32 - 32[\text{yr}^{-1}]$ となる．球状星団中での多体効果によって形成される連星ブラックホールの合体率は $1.6 \times 10^{-7} [\text{yr}^{-1}\text{Mpc}^{-3}]$ となるという研究もある [17]．これを LCGT に適用するとイベントレートは $0.5[\text{yr}^{-1}]$ となる．

2.1.2 Inspiral, Merger, and Ringdown

コンパクト連星の合体に伴い発生する重力波は，発生する時期により，公転運動期 (inspiral)，衝突合体期 (merger)，そして減衰振動期 (ringdown) という 3 つに分けられる．inspiral 期の波形は構成されるコンパクト星が何であるかにはほとんどよらない．最低限必要であるとされている 3.5 次のポストニュートニアン近似による計算が出来ている [18]．ringdown 期の重力波は，ブラックホール摂動によって重力波の周波数，減衰率は良く知られている．そして，数値相対論計算の進展により，inspiral 期，merger 期，そして ringdown 期を一度に取り扱う数値シミュレーションが中性子星連星だけでなく，ブラックホール連星やブラックホール・中性子星連星についてもできるようになってきた．しかしながら，シミュレーションは時間がかかり，質量などのパラメータ領域も少なくないため，個々のシミュレーション波形を直接重力波探査に用いるのはまだ難しい．実際のデータ解析でどのように有効にシミュレーション波形を用いるかは今後の課題である．[19]

ここでは，オーダー評価のレベルで merger と ringdown 期からの重力波がレーザー干渉計でどの程度の S/N になるかを Flanagan and Hughes[20] をもとに評価する．ブラックホール摂動の結果の外挿や，いくつかのシミュレーションの結果から，merger 期に放出される重力波は，エネルギーが連星の全質量 $M = m_1 + m_2$ の 10% とし，スペクトラムは inspiral 期の最後の周波数 (Innermost Stable Circular Orbit) から ringdown 周波数まで一様に分布するとした．また，Ringdown 期に放出される重力波のエネルギーは $0.03M$ とした．ここでは，それらの値を採用した場合に，LCGT で検出する際の S/N を評価してみる (図 2.2)．その結果，連星の全質量が $50M_\odot$ 以上の連星では，merger 重力波が inspiral 重力波より S/N は高くなり， $200M_\odot$ 以上では ringdown 重力波が inspiral を上回るという結果となっている．merger 重力波は， $600M_\odot$ 付近で最大の S/N となる．

以上の結果は，merger と ringdown で放出される重力波のエネルギーについての仮定にももちろんよる．ここで得られた S/N は理論的上限に近いと考えた方がよい．しかしながら，merger と ringdown も考慮すれば，より広い質量のブラックホールが LCGT の対象となるということは，LCGT を使った重力波天文学を議論する上で重要になるであろう．

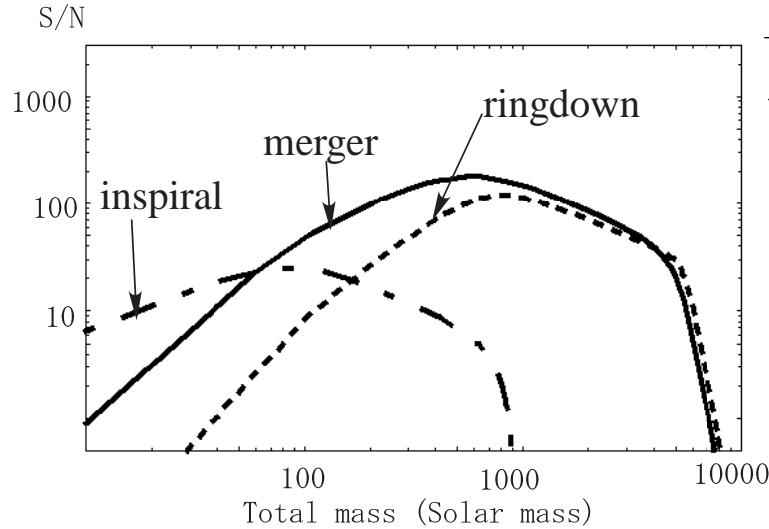


図 2.2: 1Gpc の距離にある連星の inspiral, merger, ringdown を matched filter で検出した際に得られると期待できる S/N. 縦軸は連星の全質量 (太陽質量単位). 横軸は S/N.

2.2 回転中性子星

回転中性子星からの重力波放出メカニズムはいくつか考えられている．1つは回転中性子星の歳差運動 (wobble) である．これは、星の角運動量ベクトルと星の慣性主軸とがずれている場合に起こる．ずれの角度が小さい場合には、放出される重力波の周波数 f は星の回転周波数 f_{rot} と歳差運動周波数 f_{prec} を用いて $f = f_{rot} + f_{prec}$ と表されるが、 $f_{rot} \ll f_{prec}$ であるため、 $f \sim f_{rot}$ となる．しかしながら、中性子星内部での散逸効果により歳差運動は消えるタイムスケールが短いために、このメカニズムにより発生する重力波検出の可能性は小さい [21]．

2つ目は、中性子星の r-mode などの振動モードが励起された場合である．r-mode という重力波放出により回転星が不安定性となる効果が、新しく生まれた中性子星で重要であると指摘された 1998 年以来、盛んに研究されてきている．しかしながら、それ以来、その不安定性を弱める様々な効果が指摘されている．それらは、非線形モード結合効果 [22] や、中性子星内部での様々な散逸効果 [23] である．そのため、銀河系外での超新星爆発によって新たに生まれた中性子星からの重力波を検出することは難しいという状況である．しかしながら、銀河内の LMXB のような連星中で伴星からの降着を受ける中性子星では、r-mode によって発生する重力波は、LCGT でも検出可能かもしれない．

3つ目は、中性子星の非軸対称性により発生する重力波である．回転軸周りの慣性主軸モーメントを I_3 とし、それ以外の成分を $I_{1,2}$ とし、楕円率 $\epsilon = (I_1 - I_2)/I_3$ を定義すると、発生する重力波の振幅は $h \sim \frac{4\pi^2 G}{c^4} \frac{I_3 f}{r} \epsilon$ ($f = 2f_{rot}$ は発生する重力波の周波数、 r はソースまでの距離) となる．従って、重力波周波数の高いソースがより振幅が大きくなる． ϵ を作り出す原因として、中性子星の固体表面での shear stress を考えた計算では $\epsilon_{max} \sim 5 \times 10^{-7} (\sigma_{max}/10^{-2})$ (σ_{max} は crust yield strain と呼ばれる量で不定性が大きい) となっている [24]．この他に、内部トロイダル磁場によって非軸対称性が生じるというモデルなどがある [25]．図 2.3 には、 $\epsilon = 10^{-5}$ と 10^{-8} の場合について、ソースが 10kpc にある場合の characteristic amplitude (検出器に対する方向について平均したもの) を示してある．

さて、重力波によって観測可能な回転中性子星としては、(a) 回転周期が数 10 から数 100Hz の若いパルサー、(b) 回転周期がミリ秒台の古いパルサー、(c) 連星中にあり low-mass X-ray binaries (LMXB) とし

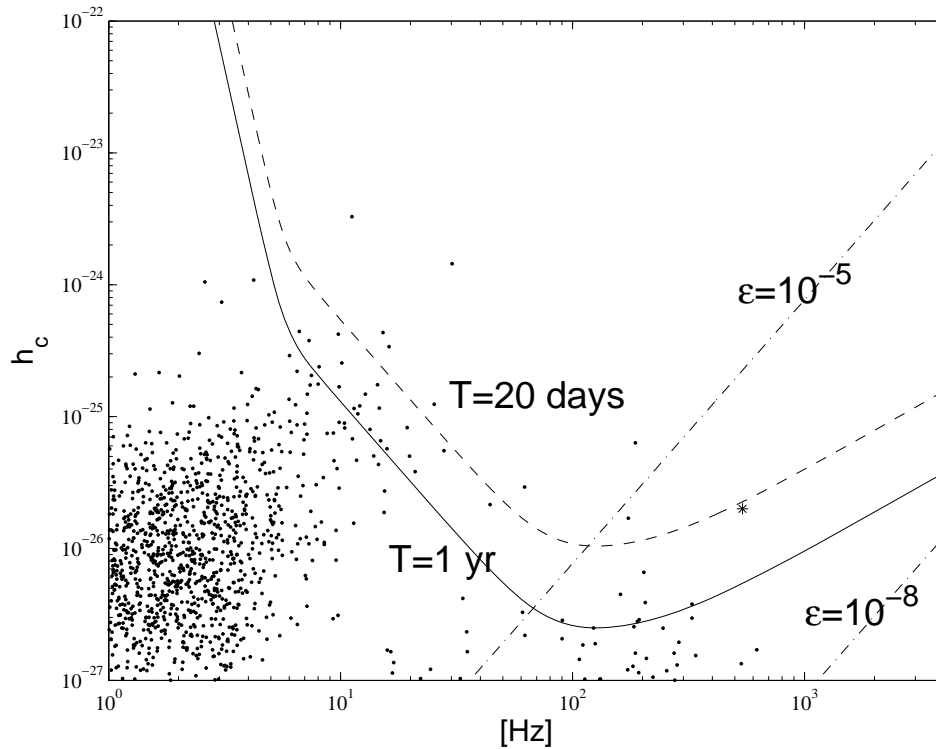


図 2.3: LCGT のノイズカーブ $k\sqrt{S_n}/T$, (積分時間 $T=20$ days と 1 年) と, パルサー及び LMXB で期待される重力波の characteristic amplitude . 2 つの点線は $\epsilon = 10^{-5}$, 10^{-8} の場合 . * は Sco X-1 . 黒点は, 既知のパルサーについて, スピンダウンレートから推定される重力波振幅の上限値をプロットしたもの . パルサーデータは The ATNF Pulsar Catalogue[5] から取った . ノイズカーブは $k = 3.6$ としてあり, この曲線以上にあるパルサーは, false alarm 確率が 1% 以下で検出される (Sco X-1 の場合や, 未知のパルサーでは, 探査パラメータが増えるために, 実際には 1% より悪くなる) .

て観測されている中性子星, がある . (a) 若いパルサーは非軸対称性を持っている可能性が高いが回転周波数が低いのが問題である . (b) ミリ秒パルサーは, 過去に LMXB 期を経験し, 伴星からの降着により角運動量を得てミリ秒パルサーになったと思われる . ミリ秒パルサーは回転周波数は高いが, 非軸対称性がどれくらい残っているかが問題である .

(c) の LMXB 中の中性子星からの重力波は, (a)(b) に比べて強い重力波を発生している可能性が指摘されている . LMXB は, 中性子星が伴星からの降着によってトルクを受けていると考えられる . X 線観測から示唆されている回転周波数が 300 から 600 Hz の間に収まっている . この理由の説明として, 重力波による角運動量放出が降着トルクと平衡状態にあるというものがある [26] . もしこの説が正しいとすると, 重力波の characteristic amplitude は, 観測される X 線フラックス F_x および回転周波数 f_{rot} と

$$h = 4 \times 10^{-27} \left(\frac{R}{10^6 \text{cm}} \right)^{3/4} \left(\frac{m_{NS}}{1.4 M_\odot} \right)^{-1/4} \left(\frac{F_x}{10^{-8} \text{ergcm}^{-2}\text{sec}^{-1}} \right)^{-1/2}$$

という関係がある (R は星の半径, m_{NS} は星の質量) . このソースは, 降着率が変化すると, 回転周波数も変化するため, せいぜい 20 日間程度しかデータをコヒーレントに積分する事ができない [27] . 20 日間のコヒーレントな積分では, Sco X-1 が LCGT でぎりぎり観測可能な振幅となる . データ解析上は, このほかに軌道運動によるドップラー効果を取り入れる必要があるため, 未知パラメータの数が単独パルサーの

場合より非常に多くなることが問題となる [28] .

2.3 重力崩壊型超新星爆発

重力崩壊型超新星爆発と中性子星やブラックホールの形成過程については、長年にわたる数多くの研究にも関わらず、詳細については不明な点が多い。しかし、数値相対論の進歩により、一般相対論の重力を取り扱った重力崩壊シミュレーションはなされるようになってきている。最近の軸対称シミュレーションでは [29, 30] , 発生する重力波の振幅は 10kpc で 10^{-21} から 10^{-20} となっている。従って、LCGT が観測可能な重力崩壊はせいぜい我々の銀河を含む局所銀河群の距離までであることになる。

パルサーの速度分布を調べた研究には、パルサーの半数程度は超新星爆発時に 500km/s 以上、15%程度は 1000km/s の kick を受けて誕生しているというものがある [31] 。このような kick 速度を生み出す原因として、重力崩壊における回転の影響が効いているのであれば [32] , 少なくともいくつかの中性子星は高速回転しながら誕生した可能性はある。回転が効いていると、非軸対称性が生み出される可能性がある。最近の 3 次元の数値相対論によるシミュレーションでは、回転が重要である場合には、新しく生まれた中性子星が遠心力によって通常より大きな半径で生まれ、そして不安定性により棒形状に変形して重力波を放出するという可能性が言われている [33] 。この重力波の振幅は 10Mpc で 5×10^{-22} 程度となる。また周波数は 1kHz 付近である。これらのシミュレーションによって波形を十分正確に計算するというのはまだ先の話である。従って、最適なデータ解析法を検討する必要があるが、もしこのような重力波が観測できれば、中性子星に関する多くの情報が得られるものと期待される。

2.4 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (GRB) は、 10^{-3} 秒から 10^3 秒という短い時間だけガンマ線 (~ 100 keV) が地球に日に 1、2 回到達する現象である。発生方向の天球上の分布はほぼ一様である。GRB は、継続時間が約 2 秒以下でスペクトラムがより hard なショート・ガンマ線バースト (SGRB) と、継続時間がそれより長くスペクトラムがより soft なロング・ガンマ線バースト (LGRB) という 2 種類がある。

SGRB を発生させている母天体の有力候補として考えられているのは連星中性子星 (NS-NS) または中性子星ブラックホール連星 (NS-BH) の衝突合体である [34][35] 。衝突合体の結果、中心にブラックホールがあり、その周りに中性子星の残骸物質による降着円盤が形成され、そこで何らかの機構によりガンマ線バーストを発生させるジェットが発生するという説である。これが有力になっているのは、観測されている SGRB に伴って超新星爆発が発見された例がない、母天体の寿命が数 Gyr と推定され大質量星の重力崩壊では説明できない、などの理由がある。理論的にも降着円盤の期待される寿命が 1 秒以下と短いため、ショートバーストを説明しやすい。もし SGRB が NS-NS 連星や NS-BH 連星の合体によるものであるなら、これは inspiral の節で述べた通り、LCGT の有力な重力波源となる。SGRB の観測により、重力波の到達時刻が数分以下の精度で分かれば、偽イベント数を大幅に減らすことができる。従って観測可能な signal-to-noise 比を小さくでき、より遠方までターゲットになり得る。また連星の個々の星の質量が分かるので、NS-NS であるか NS-BH であるのか、ということも決めることが可能である。もし、SGRB の母天体が NS-NS や NS-BH でなかった場合でも、LCGT によって連星合体説を否定することができる。このように、LCGT による重力波観測は、SGRB の母天体を決定するための有力な手段であると言える。

LGRB の母天体については、超新星 SN1998bw と GRB980425、SN2003dh と GRB030329 など、ほぼ同時に超新星爆発と LGRB が起こった例があるため、多くのロング・ガンマ線バースト (LGRB) は重力崩

壊型超新星爆発と関連があると考えられている [36]. この場合の GRB 発生モデルとしては Collapsar モデルと呼ばれるものが考えられている. これでは, 大質量星のコアが高速回転しており, その崩壊の結果形成される Kerr BH に落ちきらない物質がその周りに降着円盤を作り, それによって GRB jet にエネルギーが渡されるというモデルである. 重力波発生機構としては, 回転がある場合の重力崩壊型超新星に相当する. 従って, コンパクト連星合体に比べると強い重力波の発生はあまり期待できない. しかしながら, GRB によって重力波の到達時刻がある程度は分かると期待されるために, 複数の検出器の cross-correlation によって重力波を検出する, あるいは検出できない場合も重力波の振幅にかなり良い制限をつけることが可能である. また, 個々の GRB に付随する重力波が検出できない場合でも, 多くの GRB の時刻で 2 台の重力波検出器の cross-correlation をとり, その分布と, GRB が起こっていない時刻での cross-correlation の分布と比較することで, GRB と重力波バーストとの相関があるかないかを調べることも可能である. [37]

以上のように, ガンマ線バーストに伴い発生する重力波探査は, LCGT によるサイエンスの中で最も重要なものの一つであると言える.

2.5 宇宙ひも

宇宙において対称性の破れにともなう相転移が何度も繰り返されてきたと考えられる. その際に破れた後の真空が唯一つではなく多様な真空が許される場合, 真空の集合は真空多様体をなす. この真空多様体のトポロジーが非自明であると位相欠陥が生成される. 特に, 真空多様体上に可縮でないループが存在する (=真空多様体のホモトピー群 $\pi(1)$ が非自明な) 場合には宇宙ひもが生成される. 宇宙ひもは空間的には, 1 次元的に対称性の回復した相が広がった構造である.

宇宙ひもの時間発展は自身の張力による力の作用と宇宙ひも同士の衝突によるつなぎかえのために非常に複雑なものであるが, 統計的にみればスケーリング解と呼ばれるものに近づく. スケーリング解は各時刻のホライズンスケールに数本の長い宇宙ひもと多くの宇宙ひものループが存在する準定常状態である. 共動座標で見ると, ホライズンサイズは大きくなるが, 宇宙ひも同士のつなぎかえが起こるために常に長い宇宙ひもの本数が一定に保たれるのである. 宇宙ひもは自身の慣性質量に等しい張力をもつので, 平均的には互いに光速に近い速度で動いている. したがって, おおよそハッブル時間の間にホライズンサイズを横断する. ホライズンサイズに数本の宇宙ひもが存在するとハッブル時間程度でつなぎかえが起こることになり, これがスケーリング解における長い宇宙ひもの本数を決めている. 衝突におけるつなぎかえの結果, 小さな宇宙ひものループが生成され, 生成されたループは振動して重力波放出でエネルギーを失い消えていく.

スケーリング解における宇宙ひものエネルギー密度は, 宇宙ひもの線密度を μ として $\rho_{cs} \approx \mu H^{-1} / H^{-3}$ 程度である. したがって, 宇宙ひもが宇宙のエネルギー密度全体に占める割合は $G\mu$ 程度の一定値に近づく. この $G\mu$ という量は宇宙ひものまわりで光がどれだけ曲げられるかの角度, にも対応している. 宇宙ひもの生成を引き起こした対称性の破れのエネルギースケールを η とすると $\mu \approx \eta^2$ で与えられるので, $G\mu \approx \eta^2 / M_{pl}^2$ のようにプランクスケールと η の比によって $G\mu$ は与えられる. η を GUT スケールにとると $G\mu \sim 10^{-6}$ 程度という値が得られる. 一方, 観測からは, パルサータイミングやマイクロ波宇宙背景放射 (CMB) のゆらぎに対して宇宙ひもからの寄与が卓越してしまっては矛盾することから, $G\mu \lesssim 10^{-7}$ という制限が得られている [38]. 観測されたほぼスケール不変な初期密度ゆらぎのスペクトルは, 完全に宇宙ひもによる構造形成のシナリオとは矛盾するが, 初期密度ゆらぎに対して宇宙ひもによる寄与が 10% 程度存在したとしても観測と矛盾しない. 観測の精密化に伴ってそのような小さな補正も観測可能となりつつある. また, 宇宙背景放射の精密観測からは, すでに宇宙ひもに対する示唆が得られているかも知れないという主張もある [39].

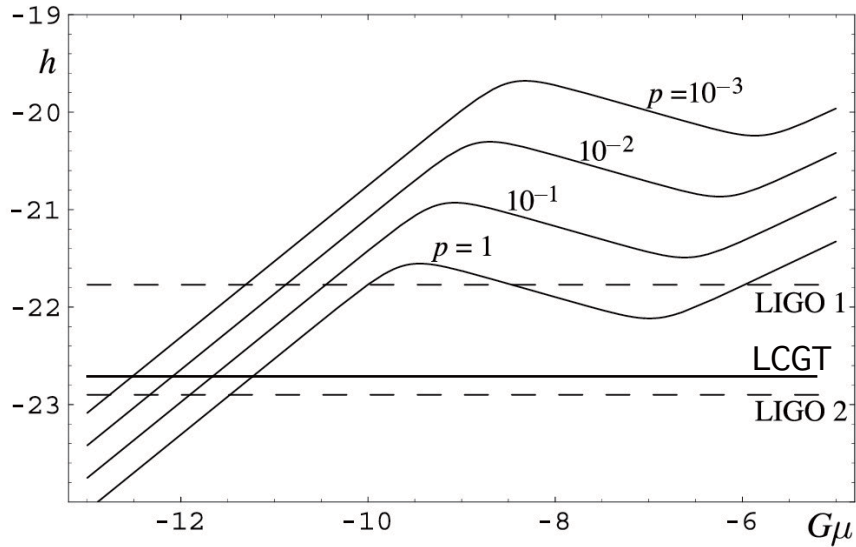


図 2.4: Damour & Vilenkin [38] の Fig. 1。 $10^{-3} \leq p \leq 1$ の場合に期待される宇宙ひものカスプからの 150Hz 帯における重力波の振幅の 10 を底とした log-log プロット。横軸は $G\mu$ 、縦軸は無次元化されたバースト重力波の振幅。カスプの生じる頻度については宇宙ひもループが一回振動する毎にカスプが一回生じるとして評価している。LIGO I や LIGO II となっているのは、それぞれ、初期、及びアドバンスド LIGO における 1σ ノイズレベルでの検出限界を表わしている。LCGT の場合の感度を書き加えた。

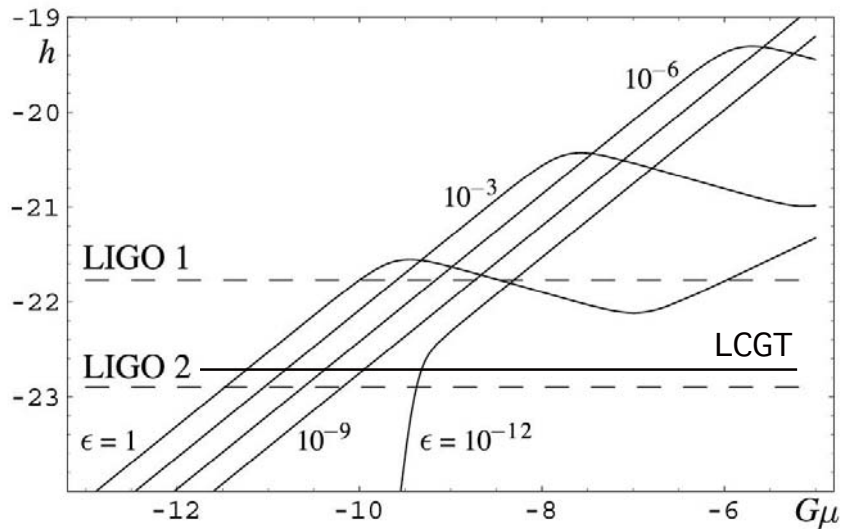


図 2.5: Damour & Vilenkin [38] の Fig. 3。 $10^{-12} \leq \epsilon \leq 1$ の場合の同様のプロット。

加えて、超弦理論からも新しい興味もたらされた。超弦自身やそれに関する D -ブレーンのような広がったオブジェクトが余剰次元の方向に巻きついたものなどが新しい宇宙ひもの候補として注目されている。 D -ブレーンは超弦理論における開弦の端点となるような $D+1$ 次元時空方向に広がったオブジェクトであるが、我々 4 次元時空に住む観測者の観点からは $D-1$ 次元方向が余剰次元方向に巻きついてい

ると宇宙ひものように見える [40]。このような高次元時空中を運動する宇宙ひものを考えると、宇宙ひも同士が衝突した際につなぎかえの起こる確率 p が 1 より小さい可能性がある。広い余剰次元中を運動する宇宙ひもは 4 次元的には衝突しているようにみえても、高次元時空中ではすり抜けることが可能だからである。この為、実質的な衝突確率が減り、同じだけのつなぎかえが起こるためには高い密度の宇宙ひもが必要となる。結果、スケーリング解がより高い宇宙ひもの密度で実現される。

宇宙ひもからの重力波を評価する上でのモデルの不定性としては、 ϵ というパラメータもある。これは長い宇宙ひもから衝突によってちぎれて、宇宙ひもループが形成されるときに典型的なループの長さを $l(t) \approx 50G\mu ct$ とあらわしたときに現れるパラメータである。ここで t はその当時の宇宙年齢である。 $\epsilon \approx 1$ が標準的なモデルと考えられていたが、 $\epsilon \ll 1$ である可能性も指摘されている。

宇宙ひもはその運動を通じてカスプやキックと呼ばれる特異な形状をしばしば生じ、指向性を持ったバースト状の重力波を放出する。ヨーロッパとアメリカで研究開発が進行中の、宇宙空間レーザー干渉計 LISA では、そのバーストを重力波検出器で探査することで、 $G\mu \lesssim 10^{-12} \sim 10^{-14}$ であっても検出可能であるといわれている。地上の検出器で 150Hz 帯を観測域とする解析によるとノイズレベルが $h_n \approx 10^{-23}$ 程度であれば、多くのパラメータ領域で $G\mu \lesssim 10^{-10}$ までが観測可能域に入ってくる。図 2.4 及び 2.5 は Damour & Vilenkin[38] の Fig.1, 及び Fig.3 に LCGT の場合を書き加えたもの。ここで縦軸はカスプからの重力波バーストの期待される振幅を表わす。重力波波形のフーリエ成分に振動数の絶対値 $|f|$ をかけて無次元化したものは $h(f) = A|f|^{-1/3}e^{2\pi f t_c}$ のような波形をとる。この振幅を $f = 150\text{Hz}$ において評価したものである。(ここで引かれている水平な線は 1σ のノイズレベルを表わす。)

2.6 背景重力波

背景重力波を議論する際には、単位 \log 振動数あたりの重力波のエネルギー密度を宇宙の臨界密度 $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G_N$ に対する比としてあらわした量

$$\Omega_{GW}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{GW}}{d \log f}$$

を用いてその振幅をあらわすことが多い。背景重力波は特徴的な波形を予測することによってフィルタリングすることができない種類の重力波信号で、また、バースト重力波のようにひとつひとつの信号が間欠的に到来するのでもない重力波信号である。このような重力波は、重力波干渉計にとってノイズと区別が付きにくい、複数台の干渉計の相関をとることで重力波干渉計固有のノイズと区別することが可能となる。背景重力波には特徴的な波形は存在しないため、観測可能な量はそのスペクトル(といくつかの統計的な指標)に限られてはいるが、宇宙初期の得難い情報を運んできている可能性をもっている。したがって、背景重力波を検出するには LCGT を含めた重力波観測の世界的なネットワークの構築が必要である。

LCGT 級の感度を持つ重力波干渉計のネットワークがターゲットとすることのできる背景重力波の振幅は $\Omega_{GW} \approx 5 \times 10^{-9}$ 程度である。それに対してビッグバン元素合成からの制限は $\int d \ln f h_0^2 \Omega_{GW}(f) \lesssim 10^{-5}$ である ($H_0 = 100h_0 \text{ km/s Mpc}$)。また、パルサータイミングからは [42] $h_0^2 \Omega_{GW}(1/8\text{yr}) \lesssim 2.0 \times 10^{-8}$ などの制限が得られている。

背景重力波の起源は大別すると

- 1) インフレーション起源
 - 2) 再加熱や相転移起源
 - 3) フォアグラウンドの重ね合わせ
- がある。

インフレーション起源

インフレーション起源の重力波は、GUT スケール付近でおこる高エネルギーインフレーションのモデルであれば、マイクロ波宇宙背景放射 (CMB) から観測が可能である。マイクロ波宇宙背景放射における重力波の振幅は通常、ゆらぎのスペクトルにおけるスカラーゆらぎの2乗振幅と重力波による寄与の比 T/S を用いて表わされる。標準的な宇宙論を仮定すると、重力波のエネルギー密度 Ω_{GW} と T/S の間の関係は [41]

$$\Omega_{GW} h_0^2 = 5 \times 10^{-16} \left(\frac{T/S}{1 + (T/S)} \right) \exp(42n_T) \left(\frac{f}{1\text{Hz}} \right)^{n_T}$$

で与えられる。ここで、 n_T はスペクトルの傾きの指数をあらわす。 n_T は標準的な一成分スカラー場からなるスローロールインフレーションにおいては、 T/S と $n_T = -(T/S)/7$ の関係にある。予想される振幅は LCGT において観測可能な振幅に比べると随分小さい。したがって、インフレーション中に生成された重力波が LCGT を含むネットワークによって観測される可能性は標準的でないシナリオを考えた場合に限定される。

まず、CMB によって観測できる大スケールと LCGT で観測される 100Hz 帯を比較するとおよそ 19 桁の差がある。わずかなスペクトルの傾きでも振幅の予想には大きな誤差を生じえる。しかしながら、100Hz 帯域で大きな重力波振幅をインフレーション中に生成することは困難である。インフレーション中に生成される重力波の振幅は、基本的にインフレーション中にゆらぎがホライズンスケールを横切った際のエネルギー密度を反映している。より長波長のモードがよりエネルギー密度の高い時期に先にホライズンスケールを横切る。そのため、生成時において重力波干渉計のターゲットとなる短波長モードの重力波振幅が CMB で観測されるものに比べて非常に大きくなることは考えにくい。また、低エネルギーでインフレーションがおこるモデルにおいてはインフレーション中に生成される重力波の振幅はずっと小さくなる。

しかし、その後の進化の過程で短波長の重力波の振幅が増幅される場合がある。重力波のエネルギー密度は波長がホライズンスケールよりも短くなると輻射場と同様に a^{-4} に比例して減衰する。ここで a は膨張宇宙のスケール因子である。各時期において宇宙のエネルギー密度を支配する成分が a^{-4} よりも早く減衰すれば、その時点でホライズンスケールよりも短波長の重力波成分については Ω_{GW} が増加する [43]。たとえば、スカラー場の運動項が宇宙のエネルギー密度を支配する時期にはエネルギー密度が a^{-6} で減衰するが、このような時期に Ω_{GW} は a^2 に比例して増加する。逆に、物質優勢の時期が間にはさまると、その間は Ω_{GW} は a^{-1} に比例して減衰する。

再加熱や相転移起源

再加熱や相転移の時期にホライズン内のスケールで生成される激しい非一様性を種として生み出される重力波は低エネルギーでインフレーションを起こすモデルにおいても生成されうる。特に、超対称性の破れが重力的に媒介されるモデルにおいては超対称性の破れのスケールが 10^{10}GeV 程度と考えられるが、この時期に生成される重力波の振動数はちょうど地上の重力波干渉計の観測域になる。

再加熱の前段階としておこるプレヒーティングは、インフレーションを起こす場であるインフラトンの振動がパラメータ共振を通じて他の場を共鳴的に励起する現象である。共鳴励起はもっとも成長の早い波長のゆらぎの振幅が密度ゆらぎ $\delta\rho/\rho$ で $O(1)$ になるくらいまで継続する [44]。また、一次相転移がおこる場合には真の真空泡が生成される。これらの真空泡の膨張、衝突、合体によって相転移が完了する。偽真空内に生成した真の真空泡が広がるにつれて体積に比例した余剰エネルギーが生じる。この余剰エネルギーは真空泡の運動エネルギーに転嫁されるしかなく、結果として真空泡の膨張速度はすぐに光速近くにまで加速される。やがて、これらの真空泡は互いに衝突して、全領域が真の真空に落ち着く際に、に大きな密度ゆらぎが発生し重力波を生成する。この場合も衝突時の真空泡の大きさを典型的なスケールとして、このスケールで見た密度ゆらぎは $O(1)$ になる [45]。

一番話が単純で考えやすいのは、インフレーション後の輻射優勢期になってから重力波が生成された場合である。このとき、生成される重力波の典型的な波長 λ を $\lambda = \epsilon H_*^{-1}$ のようにその当時のホライズン長 H_*^{-1} を用いて表すことにする。ホライズン長よりも長波長のゆらぎを生成することはほとんど不可能であると考えられるので、常識的に考えられる全てのプロセスにおいて ϵ は 1 より小さい。多くの場合、 ϵ は 1 より相当に小さいのが普通である。このとき生成された重力波を現在観測した際に振動数に翻訳するには、当時と現在のスケールファクターの比をかけるだけでよい。すなわち、

$$f \approx \frac{260}{\epsilon} \left(\frac{T_*}{10^9 \text{GeV}} \right) \left(\frac{g_*}{100} \right)^{1/6} \text{ Hz}$$

と与えられる。 T_* と g_* は、それぞれその当時の温度と相対論的粒子の自由度の数を表す。簡単なオーダー評価でわかることだが、重力波が最大限生成されたとしても、その生成時のエネルギー密度は $\rho_{GW} \approx \epsilon^2 \rho$ である。したがって、このときの重力波のエネルギー密度を重力波生成の効率 e_{GW} を用いて $\Omega_{GW} = e_{GW} \epsilon^2$ のように表すことにする。プレヒーティングでも真空泡の衝突でも (あるいは、乱流でも) 効率は 1 に近い値をとりえる。

この重力波の生成後 (再びインフレーションが起こらなければ、) 考えている波長は常にホライズンスケールよりも短波長となるため、重力波のエネルギー密度は単純に a^{-4} に比例して変化する。その結果、現在観測される重力波の振幅は

$$\Omega_{GW} h^2 = 1.6 \times 10^{-11} e_{GW} \left(\frac{\epsilon}{10^{-3}} \right)^2 \left(\frac{g_*}{100} \right)^{-1/3} \quad (2.1)$$

と見積もられる。

インフレーション後のプレヒーティング期に重力波が生成される場合を考えると、輻射優勢になる前のスカラー場の長波長成分がエネルギー密度の大部分を担っている時期に重力波生成が起こると考えるのが自然である。その場合にはスカラー場の振動エネルギーが卓越し、エネルギー密度は物質優勢の場合のように a^{-3} に比例して減衰する。このようなスカラー場の振動優勢の時期が続いたのちに再加熱が起こり、温度が T_r になったとすると、ピークの振動数は

$$f \approx \frac{260}{\epsilon} \left(\frac{\rho_*^{1/4}}{10^9 \text{GeV}} \right)^{2/3} \left(\frac{T_r}{10^2 \text{GeV}} \right)^{1/3} \text{ Hz}$$

となる。ここで ρ_* は重力波が生成される時期のエネルギー密度である。この場合には、スカラー場の振動エネルギーが卓越する時期に重力波が相対的に減衰するため (2.1) 式は適用できない。この場合には重力波振幅は

$$\Omega_{GW} h^2 = 2 \times 10^{-16} e_{GW} \left(\frac{\epsilon}{10^{-3}} \right)^2 \left(\frac{\rho_*^{1/4}}{10^9 \text{GeV}} \right)^{-4/3} \left(\frac{T_r}{10^2 \text{GeV}} \right)^{4/3}$$

と見積もられる。

フォアグラウンドの重ね合わせ

フォアグラウンドの重ね合わせも背景重力波をつくる。代表的なものには白色矮星連星や中性子星連星等があるが、それぞれ振動数が低いため、あるいは、頻度が低いため地上の干渉計にとっては背景重力波とはならない。POP-III の大質量星の超新星爆発からの重力波は頻度を最大に見積もると 100Hz 帯での観測においても連続的な背景重力波となりえる。振幅は最大で $h_0^2 \Omega_{GW} \approx 10^{-11}$ に達するという評価があるが [46]、それでも LCGT の観測可能な程に大振幅になることはないと考えられる。

参考文献

- [1] C. Cutler and K.S. Thorne, gr-qc/0204090.
- [2] B.S. Sathyaprakash and Bernard F. Schutz, Living Rev. Relativity, **12**, 2 (2009).
Online Article: cited June 11, 2009, <http://www.livingreviews.org/lrr-2009-2/>.
- [3] R. O’Shaughnessy, C. Kim, V. Kalogera, and K. Belczynski, Astrophys. J., **672**, 479 (2008).
- [4] C. Kim, V. Kalogera, and D. Lorimer, astro-ph/0608280.
- [5] The ATNF Pulsar Catalogue. <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>. R.N. Manchester, G.B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, AJ, **129**, 1993-2006 (2005).
- [6] S.E. Phinney, Astrophys. J., **380**, L17 (1991).
- [7] V. Kalogera, R. Narayan, D.N. Spergel, and J.J. Taylor, Astrophys. J., **556**, 340 (2001).
- [8] PSR1913+16 に関してより新しい解析結果は Weisberg and Taylor (Astrophys. J., **576**, 942 (2002)) によって報告されており, その結果を用いても $f_b \sim 6$ という値を得る.
- [9] C. Kim, V. Kalogera, and D.R. Lorimer, Astrophys. J., **584**, 985 (2003).
- [10] M. Burgay et al., Nature, **426**, 531 (2003).
- [11] V. Kalogera et al., Ap.J. **601**, L179 (2004). Erratum: Ap.J. **614**, L137 (2004).
- [12] V. Kalogera and K. Belczynski, astro-ph/0101047.
- [13] D.R. Lorimer et al., Astrophys. J., **640**, 428 (2006).
- [14] C. Kim, in ”40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More”, C.G. Bassa, Z. Wang, A. Cumming and V.M. Kaspi eds., AIP Conference Proceedings, **983**, pp. 576-583, (American Institute of Physics, Melville, 2008).
- [15] D.R. Lorimer, Living Rev. Relativity, **11**, (2008), 8.
- [16] D. Tatsumi, LCGT internal document (2008).
- [17] S.F. Portegies Zwart and S.L.W. McMillan, Astrophys. J. **528**, L17 (2000).
- [18] L. Blanchet, T. Damour, G. Esposito-Farese, B. R. Iyer, Phys.Rev.Lett. **93** 091101 (2004).
- [19] データ解析への応用という観点での研究も始まっている. B. Aylott et al., arXiv:0901.4399v1 参照.
- [20] É.É. Flanagan and S.A. Hughes, Phys. Rev. D, **57**, 4535 (1998).
- [21] D.I. Jones and N. Andersson, Mon. Not. R. Astron. Soc., **331**, 203 (2002).
- [22] P. Arras et al. Astrophys. J. **591**, 1129 (2003).

-
- [23] L. Lindblom and B.J. Owen, *Phys. Rev. D*, **65**, 063006 (2002).
- [24] G. Ushomirsky, C. Cutler and L. Bildsten, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **319**, 902 (2000).
- [25] C. Cutler, *Phys. Rev. D*, **66**, 084025 (2002).
- [26] see e.g., L. Bildsten, astro-ph/0212004.
- [27] G. Ushomirsky, L. Bildsten and C. Cutler, asgro-ph/0001129.
- [28] S.V. Dhurandhar and A. Vecchio, *Phys. Rev. D*, **63**, 122001 (2001).
- [29] H. Dimmelmeier, J.A. Font and E. Müller *Astro. Astrophys.*, **393**, 523 (2002).
- [30] H. Dimmelmeier, C.D. Ott, A. Marek, and H.-T. Janka, *Phys. Rev. D* **78**, 064056 (2008).
- [31] Z. Arzoumanian, D.F. Chernoff, and J.M. Cordes, *Astrophys. J.* **568**, 289 (2002).
- [32] see e.g., D. Lai, D.F. Chernoff, and J.M. Cordes, *Astrophys. J.*, **549**, 1111 (2001).
- [33] M. Shibata, T.W. Baumgarte, and S.L. Shapiro, *Phys. Rev. D*, **61**, 044012 (2000).
- [34] E. Nakar, astro-ph/0701748.
- [35] W.H. Lee and E. Ramirez-Ruiz, astro-ph/0701874.
- [36] S.E. Woosley and J.S. Bloom, astro-ph/0609142.
- [37] L.S. Finn, S.D. Mohanty, J.D. Romano, *Phys. Rev. D* **60**, 121101 (1999)
- [38] T. Damour and A. Vilenkin, *Phys. Rev. D* **71**, 063510 (2005) [arXiv:hep-th/0410222].
- [39] L. Pogosian, S. H. Tye, I. Wasserman and M. Wyman, arXiv:0804.0810 [astro-ph].
- [40] J. Polchinski, arXiv:hep-th/0412244.
- [41] M. S. Turner, *Phys. Rev. D* **55**, 435 (1997) [arXiv:astro-ph/9607066].
- [42] F. A. Jenet *et al.*, *Astrophys. J.* **653**, 1571 (2006)
- [43] M. Giovannini, *Phys. Rev. D* **60**, 123511 (1999) [arXiv:astro-ph/9903004].
- [44] T. Suyama, T. Tanaka, B. Bassett and H. Kudoh, *Phys. Rev. D* **71**, 063507 (2005) [arXiv:hep-ph/0410247].
- [45] A. Kosowsky, M. S. Turner and R. Watkins, *Phys. Rev. D* **45**, 4514 (1992).
- [46] Y. Suwa, T. Takiwaki, K. Kotake and K. Sato, *Astrophys. J.* **665**, L43 (2007) [AIP Conf. Proc. **990**, 142 (2008)] [arXiv:0706.3495 [astro-ph]].

第3章

LCGT 計画の目標と概要

山元一広¹

この章の目的は LCGT 計画 [1] の概略の紹介である。まず具体的な LCGT 計画の目標とそれに到達するために要求される検出器の目標感度を提示する。その後重力波検出器の原理的な雑音とそれを目標まで低減する技術について議論する。

3.1 LCGT 計画がめざすもの

LCGT 計画の目的は重力波天文学という新しい天文学の分野の創生である。つまり LCGT 計画で建設される検出器は少なくとも年に数回の割合で重力波を捕らえなければならない。多くの重力波 event を捕らえるためには、感度を向上させてより遠くからくる重力波を検出できるようにする必要がある。LCGT 計画では特に $1.4M_{\odot}$ の連星中性子星合体から放出される重力波の検出を目指す (重力波源の詳細は第 2 章参照。)。地球から 200Mpc 以内の領域でこのような連星合体は年に 1 回以上生じると考えられている [1]。そこで LCGT 計画の具体的な目標として

- 200Mpc 離れた $1.4M_{\odot}$ 連星中性子星合体から発生した重力波を $S/N > 8$ で捕らえる

を掲げることとする。このためには 100Hz 付近で $h = 3 \times 10^{-24} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の感度をもつ干渉計を建設しなければならない。これは TAMA300 の目標感度より 2 桁良い。

3.2 LCGT 計画の目標感度

以上の目標に到達するために、LCGT 計画においては図 3.1 で示された感度を持つ干渉計の建設を目指す。干渉計の原理的な雑音として、干渉計という観測装置の量子力学的限界である optical readout noise (これは shot noise と radiation pressure noise の和)、干渉計構成要素が熱的に振動する thermal noise、そして地面振動によって揺らされる seismic noise がある。LCGT 計画においては、

¹Institut für Gravitationsphysik, Leibniz Universität Hannover and Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)

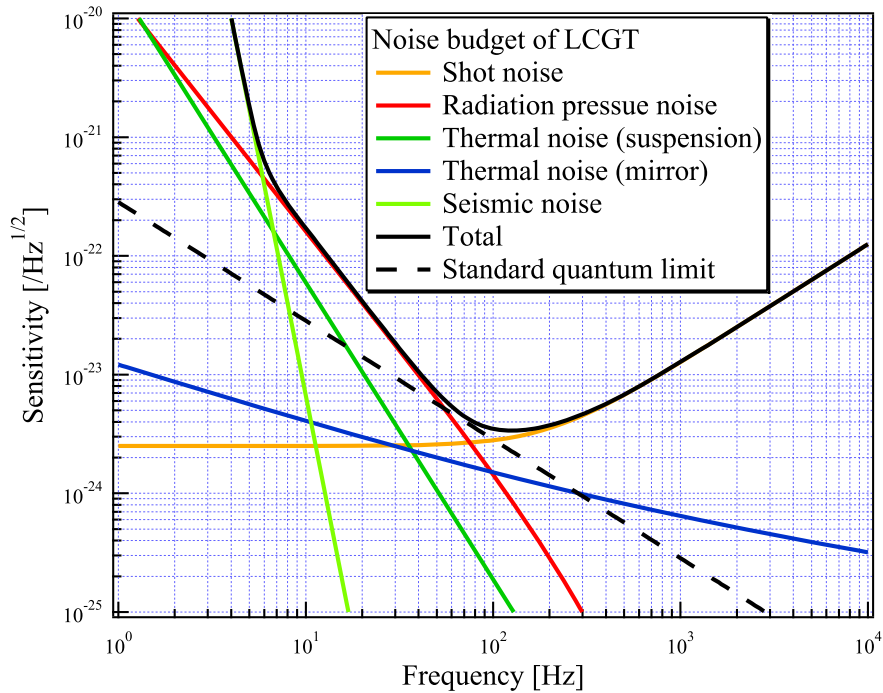


図 3.1: LCGT 計画の目標感度: 干渉計の原理的な雑音である optical readout noise (shot noise と radiation pressure noise からなる) と thermal noise と seismic noise を示した。これらの総和 (total) が LCGT 計画の目標感度になる。ほぼ全ての帯域で optical readout noise で目標感度は決まっている。optical readout noise は特殊な技術を使わない限り、不確定性原理に対応する standard quantum limit より小さくなることはないが、LCGT 計画の目標感度はその standard quantum limit に接している。

- 基線長を TAMA300 より 1 桁大きい 3km
- 地面振動が静かな神岡鉱山に干渉計を設置
- 優れた防振系を導入
- 鏡やその懸架系を冷却する

ことによって seismic noise や thermal noise を大幅に低減する。よって図 3.1 のように、LCGT 計画の目標感度はほぼ全ての帯域で optical readout noise のみで制限される。レーザーのパワーや干渉計の構成によって optical readout noise は変わるので LCGT 計画の目標感度設定にあたって、 $1.4M_{\odot}$ の連星中性子星合体からの重力波の S/N に対して最適化をおこなった。その結果が図 3.1 であり、このとき 231Mpc 以内で起きた event からの重力波を S/N > 8 で捕らえることができる²。なお最適化された optical readout noise を実現するためには 75W の光を干渉計に入射する必要がある、

- 高出力レーザー及びそれに対応しうる光学系の開発

が必須となる。

LCGT 計画の目標感度を本設計よりさらによくすることは極めて困難であることをここで指摘しておく。通常 optical readout noise は不確定性原理に対応する standard quantum limit より小さくすること

²但しこれは最も感度のいい方向から重力波がやってきた場合である。全方向に対して平均すると 0.44 倍になる。

はできない。図 3.1 でもわかるように LCGT 計画の目標感度は standard quantum limit に接している。standard quantum limit 自体を下げる方法は鏡の質量を増やすか基線長を伸ばす以外ないが、現実問題としてどちらもこれ以上大きくすることは難しい。また standard quantum limit より感度をよくすることは detuned RSE や input squeezing のような先端的干渉計技術を使用しない限り不可能である。

3.3 LCGT 干渉計の原理的な雑音と対策

ここでは干渉計型重力波検出器の原理的な雑音 (optical readout noise、thermal noise、seismic noise)[2, 3, 4, 5] と LCGT 計画における雑音対策を紹介する。これは LCGT の特徴のまとめにもなっている。詳細事項が本書のどの章に述べられているかも明示した。具体的な parameter は 3.4 節にまとめた。

3.3.1 Optical readout noise

概略

optical readout noise とは観測機器としての干渉計の量子力学的な限界であり、shot noise と radiation pressure noise の和である。干渉計は 2 つの光の位相差を検出する装置であるが、この位相の量子的な揺らぎが shot noise である。また鏡は光を反射するとき反作用として輻射圧を受けるが、光子数が量子的に揺らぐため輻射圧も揺らぎ、鏡の位置が振動してしまう。これが radiation pressure noise である。光のパワーを上げることで shot noise を下げることができるが、radiation pressure noise は大きくなる。このため両者の和には有限の最低値が存在する。これは不確定性原理に相当する観測限界で standard quantum limit と呼ばれる。これより小さい重力波は detune された Resonant Sideband Extraction(RSE) (Appendix A 参照) などのような特殊な技術を使わない限り観測することはできない。

先ほど述べたように LCGT の目標感度は optical readout noise のみで制限されているので重力波に対して S/N をよくするためにはパワーと干渉計の構成を変えて optical readout noise を調節すればよい。LCGT の目標感度は $1.4M_{\odot}$ 連星中性子星合体からの重力波に対して最適化されている (第 4 章参照)。

現在の技術で得られるレーザーパワーでは shot noise が radiation pressure noise よりはるかに大きいため、実際問題としてはパワーをあげるにより LCGT 計画の目標に到達することができる。LCGT では高出力レーザー (第 6,7 章参照) を用いて干渉計に入射するパワーを 75W にする予定である。さらに干渉計の構成を改良することで実効的なパワーを増大させる (第 4 章参照)。最も標準的な方法が power recycling と呼ばれる方法である。しかしこの方法ではかなり大きな熱が鏡内部で発生する。LCGT では鏡を冷却するのでこれは大きな問題である。そのため Resonant Sideband Extraction(RSE) という手法 (第 5 章参照) を採用する。この方法を取り入れることで optical readout noise を power recycling の場合と変えることなく、鏡内部の発熱を低減させることができる。

Shot noise

ここで optical readout noise の公式を紹介しておく。LCGT の parameter (3.4 節参照) で規格化した場合もあげておく。shot noise を低減させるため光検出器には光の入らない dark fringe の状態で干渉計は運転する。話しを簡単にするために power recycled Fabry-Perot Michelson interferometer の shot noise を

まず考える。この場合の低周波数域の shot noise は光検出器の検出効率を 1 とすると [2, 3, 4, 5]、

$$h_{\text{shot}} = \sqrt{\frac{\hbar\lambda}{4\pi c G_{\text{power}} P_0} \left(\frac{1}{\tau^2} + \omega^2 \right)} \quad (3.1)$$

$$f_{\text{cavity}} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{c}{4L\mathcal{F}} \quad (3.2)$$

となる。 $\hbar, \lambda, c, G_{\text{power}}, P_0, f_{\text{cavity}}, \tau, L, \mathcal{F}$ はそれぞれ Planck 定数、光の波長と速さ、power recycling gain, 干渉計に入射する光の power、main cavity の cut-off 周波数とそれに対応する緩和時間、cavity の長さとし finesse である。式 (3.2) によると f_{cavity} は FL に反比例する。これを考慮すると式 (3.1) から f_{cavity} より充分低い周波数では shot noise は FL に反比例し、充分高い周波数では FL に依存しない。

式 (3.1)、(3.2) は power recycling のみを採用した場合であり、RSE まで含めるとこれより複雑になる。しかし両腕の cavity 内部の power、 P_{cavity} 、と干渉計の帯域幅、 f_{cut} 、が同じならば (RSE が無いときは f_{cut} は式 (3.2) の f_{cavity} に等しい。)、optical readout noise は変わらない (第 4 章参照) ので式 (3.1) を $P_{\text{cavity}}, f_{\text{cut}}$ で書き換えれば RSE の有無に関わらず成立する式になる。ちなみに

$$P_{\text{cavity}} = \frac{2\mathcal{F}}{\pi} G_{\text{power}} P_0 \quad (3.3)$$

$$f_{\text{cut}} = G_{\text{width}} f_{\text{cavity}} \quad (3.4)$$

である。 G_{width} は signal bandwidth gain。書き換えた式は以下の通り。

$$\begin{aligned} h_{\text{shot}} &= \sqrt{\frac{\hbar\lambda f_{\text{cut}}}{2LP_{\text{cavity}}} \left(1 + \frac{f^2}{f_{\text{cut}}^2} \right)} \\ &= 2.5 \times 10^{-24} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{0.597\text{MW}}{P_{\text{cavity}}} \right)^{1/2} \left(\frac{f_{\text{cut}}}{200\text{Hz}} \right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{\lambda}{1064\text{nm}} \right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{cut}}} \right)^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

低周波で $\sqrt{f_{\text{cut}}/P_{\text{cavity}}}$ に、高周波で $\sqrt{1/f_{\text{cut}}P_{\text{cavity}}}$ に比例する。

Radiation pressure noise

radiation pressure noise は power recycling を行った Fabry-Perot Michelson 干渉計の場合で振り子の共鳴より高い周波数域では以下ようになる [4, 5]。

$$h_{\text{radiation}} = \frac{2}{L} \frac{1}{m\omega^2} \frac{2\mathcal{F}}{\pi} \sqrt{\frac{16\pi\hbar G_{\text{power}} P_0}{c\lambda}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (3.6)$$

但し m は鏡の質量で τ は式 (3.2) と同じである。式 (3.2) によると f_{cavity} は FL に反比例する。これを考慮すると式 (3.6) から f_{cavity} より充分低い周波数では radiation pressure noise は F/L に比例し、充分高い周波数では L^{-2} に比例する。

これも shot noise 同様 RSE の場合でも対応できるように拡張すると

$$\begin{aligned} h_{\text{radiation}} &= \frac{2}{L} \frac{2}{m\omega^2} \sqrt{\frac{2\hbar P_{\text{cavity}}}{\lambda L f_{\text{cut}}}} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\text{cut}})^2}} \\ &= 1.6 \times 10^{-22} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{P_{\text{cavity}}}{0.597\text{MW}} \right)^{1/2} \left(\frac{200\text{Hz}}{f_{\text{cut}}} \right)^{1/2} \left(\frac{30\text{kg}}{m} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{1064\text{nm}}{\lambda} \right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{10\text{Hz}}{f} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{\text{cut}})^2}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。低周波で $\sqrt{P_{\text{cavity}}/f_{\text{cut}}}$ に、高周波で $\sqrt{f_{\text{cut}}P_{\text{cavity}}}$ に比例する。

Standard quantum limit

shot noise と radiation pressure noise の和の最小値が standard quantum limit である [2, 3, 4, 5, 6]。相加平均と相乗平均の大小から SQL は以下ようになる。

$$\begin{aligned} h_{\text{SQL}} &= \sqrt{2h_{\text{shot}}h_{\text{radiation}}} = \frac{1}{L\omega} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}} \\ &= 2.8 \times 10^{-24} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{30\text{kg}}{m}\right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L}\right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

h_{SQL} を下げる方法は鏡の質量を大きくするか基線長を長くする以外にない。

3.3.2 Thermal noise

概略

干渉計の温度は有限である。このため熱浴からエネルギーが与えられ、干渉計の構成要素は振動し、雑音となる。これが thermal noise である。thermal noise として 2 種類考えられる。1 つは懸架系の thermal noise である。重力波検出器の鏡は自由質点として振舞うようにするために懸架されている。この懸架系の熱揺らぎによる鏡の重心の振動が懸架系の thermal noise である。もう 1 つは鏡の thermal noise である。これは鏡自身の弾性振動が熱的に励起されることによる鏡の表面の揺動である。thermal noise のエネルギーは温度と機械的散逸の積に比例する。そこで LCGT では thermal noise の低減のために鏡を 20K まで冷却し、さらに鏡及び鏡を懸架するファイバーの材質として低温で散逸の小さい sapphire を採用する (第 8,9,10,12 章参照)[7, 8, 9, 10]。これにより従来不可能であったレベルまで thermal noise を低減することができる。

Thermal noise of suspension

thermal noise の公式について紹介する。まず懸架系の thermal noise を考える。散逸は structural damping[11] (経験的にその存在が知られている周波数に依存しない散逸で Q 値の測定から得ることができる。) とし、振り子の共鳴 (約 1Hz) より高い周波数のみ考える。cavity を構成する鏡は 4 つあることに注意すると [11]

$$\begin{aligned} h_{\text{sus}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{4k_{\text{B}}T_{\text{p}}(2\pi f_{\text{pen}})^2}{mQ_{\text{pen}}\omega^5}} \\ &= 1.9 \times 10^{-25} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{9.4 \times 10^7}{Q_{\text{pen}}}\right)^{1/2} \left(\frac{T_{\text{p}}}{20\text{K}}\right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{30\text{kg}}{m}\right)^{1/2} \left(\frac{f_{\text{pen}}}{0.7\text{Hz}}\right) \left(\frac{3\text{km}}{L}\right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f}\right)^{5/2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

となる。 $k_{\text{B}}, T_{\text{p}}, f_{\text{pen}}, Q_{\text{pen}}$ は Boltzmann 定数、懸架系の温度、共鳴周波数、Q 値である。Q 値は wire の loss によって決まると仮定して、wire の loss の測定 [10] から見積もった。一般に振り子の Q 値は wire の自体の Q 値より高い。これは振り子のポテンシャルエネルギーのほとんどが散逸のない重力エネルギーが担い、wire の弾性エネルギーの割合は小さいからである。Q 値は以下の式から導かれる [11]。

$$Q_{\text{pen}} = \left(\frac{n\sqrt{TE_{\text{wire}}I}}{2mgl_{\text{sus}}}\phi_{\text{wire}}\right)^{-1} \quad (3.10)$$

但し $n, E_{\text{wire}}, l_{\text{sus}}, \phi_{\text{wire}}$ は wire の本数、Young 率、長さ、loss angle である。 T は wire1 本当りの張力で

$$T = \frac{mg}{n} \quad (3.11)$$

となる。 I は wire の断面 2 次モーメントで

$$I = \frac{\pi d_{\text{wire}}^4}{64} \quad (3.12)$$

である。 d_{wire} は wire の直径。以上のことから

$$Q_{\text{pen}} = \left(\frac{\sqrt{\pi n E_{\text{wire}} d_{\text{wire}}^2}}{16 \sqrt{m g l_{\text{sus}}}} \phi_{\text{wire}} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

$$= 9.4 \times 10^7 \left(\frac{4}{n} \right)^{1/2} \left(\frac{4.0 \times 10^{11} \text{Pa}}{E_{\text{wire}}} \right)^{1/2} \left(\frac{1.8 \text{mm}}{d_{\text{wire}}} \right)^2 \quad (3.14)$$

$$\times \left(\frac{m}{30 \text{kg}} \right)^{1/2} \left(\frac{l_{\text{sus}}}{0.5 \text{m}} \right) \left(\frac{2 \times 10^{-7}}{\phi_{\text{wire}}} \right) \quad (3.15)$$

となる。

Thermal noise of mirror

次に鏡の thermal noise について考える。鏡を等方的弾性体として扱い、鏡の共鳴 (基本モードは 10kHz 強) より低い周波数を考える。鏡の thermal noise は基材 (sapphire) 自体の散逸と反射膜 coating の散逸で決まると考えられている [12]。基材自体の散逸は structure damping と thermoelastic damping の和で表されると考えられている。structure damping による thermal noise は以下の通り [13]。

$$\begin{aligned} h_{\text{mirror(structure)}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{4k_{\text{B}}T_{\text{m}}(1-\sigma^2)}{\sqrt{\pi}E_0w_0Q_{\text{mirror}}\omega}} \\ &= 5.4 \times 10^{-25} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{10^8}{Q_{\text{mirror}}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{\text{m}}}{20\text{K}} \right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{3.5\text{cm}}{w_0} \right)^{1/2} \left(\frac{4.0 \times 10^{11} \text{Pa}}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

但し、 $T_{\text{m}}, \sigma, E_0, w_0, Q_{\text{mirror}}$ は鏡の温度、Poisson 比、Young 率、ビーム半径³、鏡の Q 値である。Q 値の測定は [9] 参照。

thermoelastic damping は物質の非一様な歪みによって生じる温度勾配の緩和によって生じる散逸で理論的に計算することができる [14, 15]。低温で緩和時間が短い場合には thermoelastic damping による thermal noise は以下のようなになる [15]⁴。

$$\begin{aligned} h_{\text{mirror(thermo)}} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \alpha^2 (1+\sigma)^2 k_{\text{B}} T_{\text{m}}^2 \frac{1}{(\kappa \rho C)^{1/2}} \frac{1}{\omega^{1/2}}} \\ &= 9.4 \times 10^{-25} [\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{\alpha}{5.6 \times 10^{-9} / \text{K}} \right) \left(\frac{T_{\text{m}}}{20\text{K}} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{1.57 \times 10^4 \text{W/m/K}}{\kappa} \right)^{1/4} \left(\frac{4.0 \text{g/cm}^3}{\rho} \right)^{1/4} \left(\frac{0.69 \text{J/kg/K}}{C} \right)^{1/4} \\ &\quad \times \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f} \right)^{1/4} \end{aligned} \quad (3.17)$$

³ここでのビーム半径の定義は振幅の 2 乗が e^{-2} 倍になるところである。計算の都合上 e^{-1} 倍を定義にしているものが多いので注意。

⁴実はここにあげた式は低周波で成立する近似式である。LCGT においては 300Hz を越えると実際の値はこの近似式より小さくなり始める。但し 300Hz 以上では thermal noise より shot noise の方がずっと大きいので議論に影響はしない。

但し α, κ, ρ, C は鏡の線膨張率、熱伝導率、密度、比熱である。この式は物性値と温度のみに依存していることは注目すべきである。つまり温度と鏡の材質を決めた時点で、干渉計の限界が1つ決まることになる。

反射膜 coating の機械的散逸による thermal noise は以下のように表される [16, 17, 18]。但し coating の散逸は structure damping に従うとする。

$$\begin{aligned} h_{\text{mirror}(\text{coating})} &= \frac{2}{L} \sqrt{\frac{8k_B T_m (1 + \sigma)(1 - 2\sigma) d_{\text{coating}} \phi_{\text{coating}}}{\pi w_0^2 E_0 \omega}} \\ &= 1.0 \times 10^{-24} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{\phi_{\text{coating}}}{4 \times 10^{-4}} \right)^{1/2} \left(\frac{d_{\text{coating}}}{5 \mu\text{m}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_m}{20\text{K}} \right)^{1/2} \\ &\quad \times \left(\frac{3.5\text{cm}}{w_0} \right) \left(\frac{4.0 \times 10^{11}\text{Pa}}{E_0} \right)^{1/2} \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{100\text{Hz}}{f} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

但し $\phi_{\text{coating}}, d_{\text{coating}}$ は coating の loss angle と厚さである。loss angle の測定は [19] 参照。

鏡の thermal noise は式 (3.16)(3.17)(3.18) の 2 乗和の平方根になる。

3.3.3 Seismic noise

地上に干渉計を建設する場合、地面振動から逃れることはできない。この地面振動による干渉計の構成要素の振動が seismic noise である。seismic noise 対策としては、静かな場所に建設、防振系の導入、という 2 つの方法がある。前者は干渉計の安定な運転ということからも有効な選択である。LCGT では地面振動が東京より 2 桁小さい神岡鉱山内に干渉計を建設する (第 19 章参照)。神岡の地面振動のパワースペクトルは [20]

$$G_{\text{seismic}} = \frac{10^{-9}}{f^2} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (3.19)$$

である。さらに非常に優れた防振系、Seismic Attenuation System (SAS)(第 13 章参照)[21] と Suspension Point Interferometer (SPI)(第 14 章参照)[22]、の導入により seismic noise を低減する。SAS の防振比 $H_{\text{isolation}}$ は

$$H_{\text{isolation}} = \frac{10^{-3}}{f^{10}} \quad (3.20)$$

である [21]。以上のことから seismic noise は以下ようになる。

$$\begin{aligned} h_{\text{seismic}} &= \frac{2}{L} H_{\text{isolation}} G_{\text{seismic}} \\ &= 6.7 \times 10^{-16} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{3\text{km}}{L} \right) \left(\frac{1\text{Hz}}{f} \right)^{12} \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.3.4 その他の雑音対策

重力波検出は干渉計にとって歪みの測定に相当するので thermal noise や seismic noise のように実際に鏡が振動するような雑音は基線長が長くすることによって低減できる。LCGT 計画では TAMA300 の 10 倍の基線長を持つ 3km の干渉計を建設する予定である。

3.4 LCGT 計画の parameter

LCGT に関する parameter をまとめておく。

- Laser
 - wavelength : $\lambda = 1.064 \times 10^{-6}$ [m]
 - power into interferometer : $P_0 = 75$ [W]⁵
- Main cavity
 - length of cavity : $L = 3$ [km]
 - finesse : $\mathcal{F} = 1250$
 - storage time of cavity : $\tau = 2L\mathcal{F}/\pi c = 7.96$ [msec]
 - cut-off frequency of cavity : $f_{\text{cavity}} = 1/2\pi\tau = 20$ [Hz]
 - beam radius at mirrors⁶ : $w_0 = 3.5$ [cm]
- Recycling and RSE
 - power recycling gain : $G_{\text{power}} = 10$
 - signal bandwidth gain : $G_{\text{width}} = 10$
 - storage power in both cavities : $P_{\text{cavity}} = (2\mathcal{F}/\pi)G_{\text{power}}P_0 = 0.597$ [MW]
 - cut-off frequency of interferometer : $f_{\text{cut}} = G_{\text{width}}f_{\text{cavity}} = 200$ [Hz]
- Suspension
 - length of wire of final stage : $l_{\text{sus}} = 0.5$ [m]
 - diameter of wire : $d_{\text{wire}} = 1.8$ [mm]
 - number of wires : $n = 4$
 - Young's modulus of wire : $E_{\text{wire}} = 4.0 \times 10^{11}$ [Pa]
 - resonant frequency of pendulum : $f_{\text{pen}} = \sqrt{g/l_{\text{sus}}}/2\pi = 0.705$ [Hz]
 - temperature of suspension : $T_p = 20$ [K]⁷
 - loss angle of wire [10] : $\phi_{\text{wire}} = 2 \times 10^{-7}$
 - Q-value of final stage of suspension : $Q_{\text{pen}} = 9.4 \times 10^7$
- Mirror
 - density : $\rho = 4.0$ [g/cm³]
 - radius : $r = 12.5$ [cm]
 - width : $H = 15$ [cm]
 - mass : $m = 30$ [kg]

⁵光源自体のパワーは 150W である。

⁶ここでのビーム半径の定義は振幅の 2 乗が e^{-2} 倍になるところである。計算の都合上 e^{-1} 倍を定義にしているものが多いので注意。

⁷これは sapphire wire の下端、つまり鏡の温度である。上端の温度は 16K である。

- temperature of mirror : $T_m = 20$ [K]
- Young's modulus : $E_0 = 4.0 \times 10^{11}$ [Pa]
- Poisson's ratio : $\sigma = 0.29$
- Q-value of mirror [9] : $Q_{\text{mirror}} = 10^8$
- thermal expansion coefficient at 20 K : $\alpha = 5.6 \times 10^{-9}$ [/K]
- specific heat at 20 K : $C = 0.69$ [J/kg/K]
- thermal conductivity at 20 K : $\kappa = 1.57 \times 10^4$ [W/m/K]
- thickness of coating : $d_{\text{coating}} = 5$ [μm]
- loss angle of coating [19] : $\phi_{\text{coating}} = 4 \times 10^{-4}$

参考文献

- [1] K. Kuroda et al., Int. J. Mod. Phys. D 8 (1999) 557.
- [2] 三尾 典克、大橋 正健 編、重力波アンテナ技術検討書 (1992)
- [3] 中村 卓史、三尾 典克、大橋 正健 編、重力波をとらえる、京大出版会 (1998)
- [4] P.R. Saulson, *Fundamentals of Interferometric gravitational wave detectors*, World Scientific (1994).
- [5] 山元一広、ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/LCGT_design/sensitivity/yamamoto/LCGTgoal.zip
- [6] A. Buonanno et al., Phys. Rev. D 64 (2001) 042006.
- [7] 内山隆, 博士論文, 東京大学 (2000).
- [8] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A 242 (1998) 211.
- [9] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A 261 (1999) 5.
- [10] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A 273 (2000) 310.
- [11] P.R. Saulson, Phys. Rev. D 42 (1990) 2437.
- [12] K. Yamamoto, Ph.D.thesis, University of Tokyo (2001).
- [13] F. Bondu et al., Phys. Lett. A 246 (1998) 227.
- [14] V.B. Braginsky et al., Phys. Lett. A 264 (1999) 1.
- [15] M. Cerdonio et al., Phys. Rev. D, 63 (2001) 082003.
- [16] N. Nakagawa et al., Phys. Rev. D 65 (2002) 102001.

- [17] K. Yamamoto et al., Phys. Lett. A 305 (2002) 18.
- [18] K. Yamamoto et al., Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1689.
- [19] K. Yamamoto et al., Phys. Rev. D 74 (2006) 022002.
- [20] A. Araya et al., Rev. Sci. Instrum. 64 (1993) 1337.
- [21] A. Takamori, Ph.D.thesis, University of Tokyo (2003).
- [22] 麻生洋一、修士論文、東京大学 (2002).

第4章

LCGTの干渉計基本設計

安東正樹¹

この章では、その干渉計の基本設計を、光学系、テストマス支持系、干渉計制御系のそれぞれに分けて概観する。

4.1 LCGT 干渉計の光学系デザイン

LCGTのうち、干渉計の光学系の概要は、図 4.1 のようになっている。²レーザー光源としては、出力 150 W の Nd:YAG レーザーが用いられている。光源からの光は 2 つのモードクリーナー (Mode Cleaner, MC) を含む入射光学系を透過した後、主干渉計に導かれる。MC や変調素子での光ロスの結果、主干渉計への入射レーザー光量は 75 W となる。

最初の MC (MC1) は、3 枚の鏡で構成された、基線長 10 m のリング型共振器となっている。MC1 は、レーザー光源に含まれる高次の空間モード成分や、RF 周波数帯での強度雑音を除去するフィルターの働きと共に、レーザー周波数の安定化にも用いられる。二番目の MC (MC2) は、基線長 180 m のリング型共振器である。主干渉計において、重力波信号や制御信号を取得するための変調は、主に MC1 の後で掛けられる。この変調の際に、位相変調器などで生じた波面の歪みは、MC2 で除去される事になる。ここで、変調周波数は、MC2 のフリー・スペクトラル・レンジ (Free Spectral Range, FSR) の整数倍に合わせられ、MC2 を透過できるようになっている。

主干渉計は、基線長 3000 m の腕共振器を持っている。腕共振器を構成する鏡はサファイアで出来ており、熱雑音の影響を小さくするため、20 K という低温に冷却される。さらに、この鏡は、低周波防振装置で懸架され、地面振動の影響を避けるように設計される。また、主干渉計には、感度向上のために、パワーリサイクリング (Power Recycling, PR) と、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション (Resonant Sideband Extraction, RSE) と呼ばれる技術が用いられている。腕共振器のフィネスは 1250 であり、PR による光増幅率 (Power Recycling gain, PRG) と RSE による信号帯域増加率 (Signal Band Gain, SBG) は、共に 10 である。その結果、干渉計内光量は約 800 kW (片腕内光量は約 400 kW)、信号帯域幅は約 200 Hz となっている。

¹京大理

²最終的なパラメーターは Appendix ?? に掲げた図に示す通りで共振器内のパワーなどずれがある。

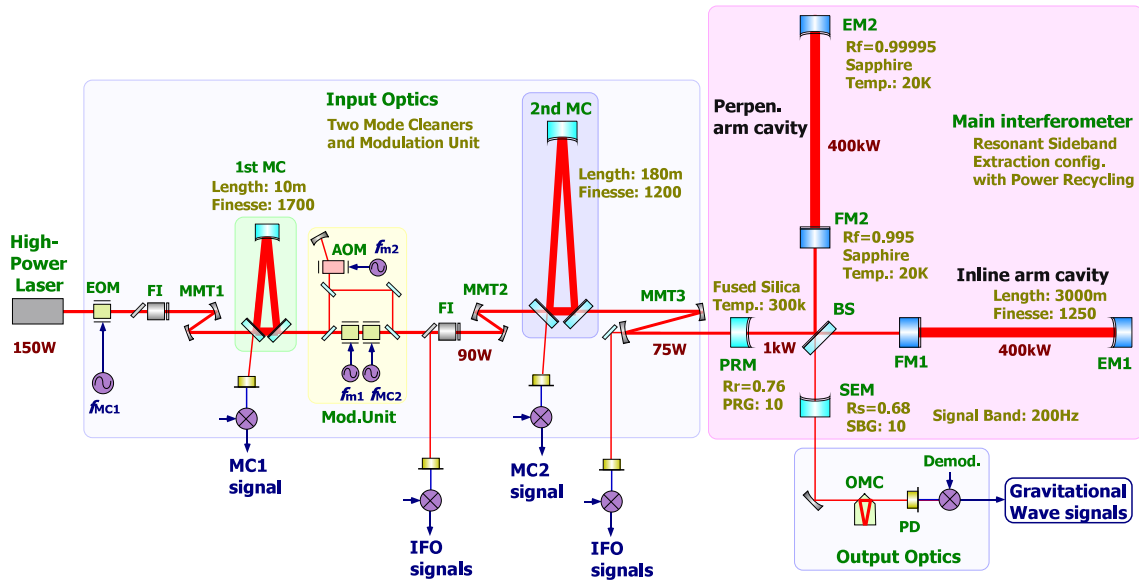


図 4.1: LCGT 干渉計の光学系概要図。レーザー光源としては、出力 150 W の Nd:YAG レーザーが用いられている。光源からの光は 2 つのモードクリーナー (MC) を透過した後、主干渉計に導かれる。2 つの MC はそれぞれ、3 枚の鏡で構成された、基線長 10 m (MC1) と 180 m (MC2) のリング型共振器となっている。主干渉計は、基線長 3000 m の腕共振器を持っており、パワーリサイクリング (PR) と、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション (RSE) の技術が用いられている。Dark Port にもれた光は、アウトプット・モード・クリーナー (OMC) を透過した後、光検出器 (PD) に入射される。この出力信号を復調する事で、重力波信号が得られる。2 つの MC や主干渉計の前には、光のモードを共振器のモードに一致させるためのモードマッチング・テレスコープ (MMT) が配置されている。また、信号取得や戻り光の影響などの除去のために、ファラデー・アイソレータ (FI) が共振器間に配置されている。

重力波は、主干渉計の 2 つの腕共振器内の光に位相差を生じさせる。この成分の光は、ビーム・スプリッタ (Beam Splitter, BS) で干渉する際に強めあい、図 1 の下側 (ダークポート, Dark Port) へ漏れ出てくる。Dark Port にもれた光は、アウトプット・モード・クリーナー (Output Mode Cleaner, OMC) で不要な成分を除去された後、光検出器 (Photo Detector, PD) に入射される。入射レーザー光にあらかじめ掛けられた変調光もこの PD に到達できるようにしておけば、PD の出力には重力波信号と変調光のビート信号が現れる。従って、PD 出力を復調することで、重力波信号を得る事ができる。

2 つの MC や主干渉計の前には、光のモードを共振器のモードに一致させるためのモードマッチング・テレスコープ (Mode Matching Telescope, MMT) が配置されている。これはそれぞれ、2 枚の凹面鏡で構成されている。また、信号取得や戻り光の影響などの除去のために、ファラデー・アイソレータ (Faraday Isolator, FI) が共振器間に配置されている。波面の乱れの影響を極力避けるために、MC2 の後には FI は置かず、MC2 前で主干渉計信号を取得する構成になっている。

4.1.1 主干渉計

LCGT の主干渉計は、基線長 3000 m の腕共振器を持っている。また、パワーリサイクリング (Power Recycling, PR) と、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション (Resonant Sideband Extraction, RSE) と呼ばれる技術が用いられている。腕共振器のフィネスや、PR による光増幅率 (Power Recycling gain, PRG), RSE による信号帯域増加率 (Signal Band Gain, SBG) は、 $1.4 M_{\odot}$ の連星合体に対する干渉

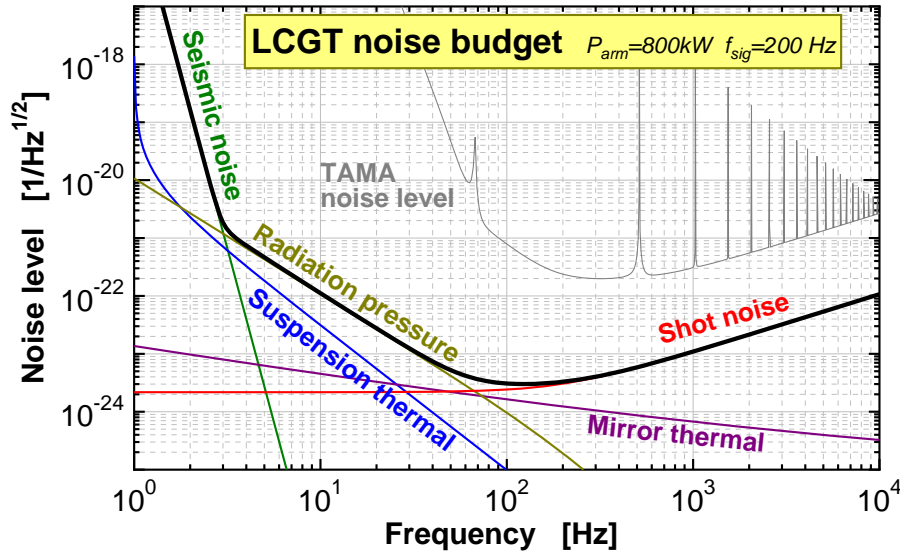


図 4.2: LCGT の目標感度曲線．最も感度が良い周波数帯 (100 Hz 付近) で、 $3 \times 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$ という感度になる．3 Hz 以下の低周波数帯は地面振動 (Seismic noise) で制限されている．それ以外の周波数帯では、3 Hz から 70 Hz までは輻射圧雑音 (Radiation pressure noise)、70 Hz 以上では、散射雑音 (shot noise) と、感度はほぼ量子雑音 (Optical readout noise) のみで制限されている．

計の感度を参考に、現実的なパラメータを選択することで決定された．

量子雑音

LCGT では、神岡鉱山跡地という静寂な環境と高性能の防振装置、さらに鏡の低温化技術のため、地面振動レベルや熱雑音レベルは大幅に抑圧されている．従って、LCGT の感度は、光が光子の集合である事に起因した原理的な雑音 (量子雑音, Optical Readout Noise) で、主に制限されている (図 4.2)．従って、干渉計のパラメータは、この雑音の影響を極力減らすよう設計されなくてはならない．

量子雑音は、散射雑音 (Shot Noise) と輻射圧雑音 (Radiation Pressure Noise) の 2 つの雑音で決まり³、その影響は、干渉計内部 (腕共振器内) の光強度と、重力波信号の帯域幅に依存する量になる (図 4.3)．散射雑音は、光検出時の光子数揺らぎに起因する雑音である．この揺らぎの量は、検出器に入射する光強度⁴の平方根に比例するのに対して、重力波信号の大きさは、干渉計内部の光強度に比例する．従って、散射雑音の影響は、光強度の平方根に比例して小さくすることができる．一方、輻射圧雑音は、光子が反射される際に鏡に与える運動量が光子数揺らぎによって変動することに起因している．この揺らぎの量は、鏡にあたる光強度の平方根に比例して大きくなる．散射雑音と輻射圧雑音の影響は、重力波信号が干渉計内に滞在する時間で決められる信号帯域幅の影響も受け、高周波数帯では、散射雑音の影響が大きくなり、輻射圧雑音の影響は小さくなる．

連星合体の検出効率

³ 散射雑音と輻射圧雑音が無相関として量子雑音レベルを求める (2 つの雑音の二乗和の平方根をとる) とき、その値は、2 つの雑音の相乗平均に関係する量より小さくなる事は無い．その値は、標準量子限界 (Standard Quantum Limit, SQL) と呼ばれる．散射雑音レベルは光強度の平方根に反比例するのに対して、輻射圧雑音は光強度の平方根に比例するため、それらの相乗平均は光強度には依存しない量となる．干渉計の感度を特定の周波数帯に狭帯域化した場合には、これらの 2 つの雑音に相関が生じ、SQL より良い感度での観測が可能になる場合がある．

⁴ 一般に、この量は干渉計内の光強度に比例する．

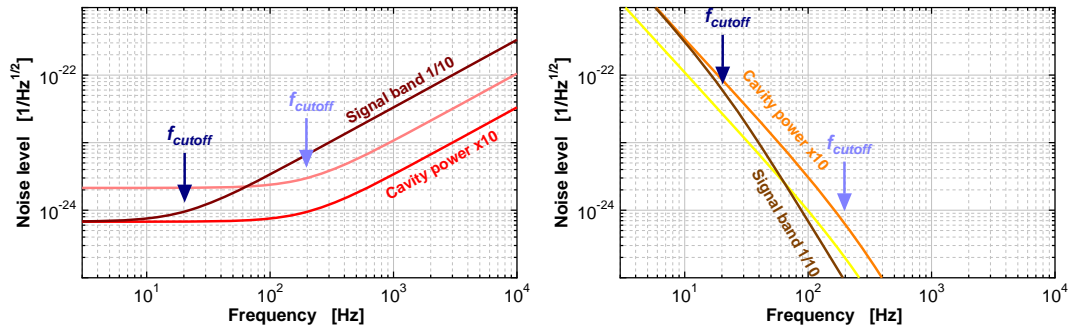


図 4.3: 量子雑音のスペクトル. 散射雑音 (左), 輻射圧雑音 (右) のそれぞれについて, 干渉計内の光強度 (cavity power) と信号帯域幅 (f_{cutoff}) を変化させた時の様子もプロットされている.

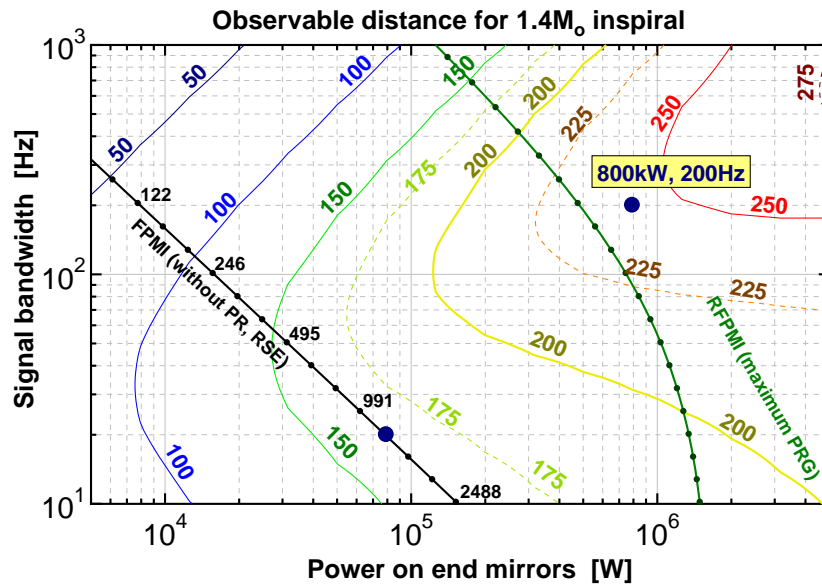


図 4.4: $1.4M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$ の連星合体からの重力波に対する観測可能距離. 重力波源の方向と偏波成分としては, 干渉計の感度が最も高くなるものを仮定している. 従って, 全天平均すると, この距離は $1/\sqrt{5}$ になる. 横軸は, 干渉計内光強度 (両腕共振器内光強度の和) で, 縦軸が信号帯域幅となっている. 干渉計内光強度 800 kW, 信号帯域幅 200 Hz の点が LCGT のデザイン値を表す. LCGT では, SNR 10 を検出の閾値とすると, 185 Mpc の距離で起きた連星中性子星合体現象まで捉えることができる.

LCGT で観測できると考えられる最も有望な重力波源は, コンパクト連星の合体である. 特に, $1.4M_{\odot}$ 程度の質量を持った連星中性子星の合体を第一のターゲットとしている. このイベントが, 185 Mpc 遠方で発生した時, 信号・雑音比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 10 で検出することを LCGT では目標としている. ただ, 検出器の指向性による感度の低下などを考慮すると, より遠方の現象まで検出できるように設計されている事が望ましい. そこで, この検出効率をできる限り大きくするように干渉計内パワーや信号帯域幅を決定する.

連星合体時に放出される重力波の波形は非常によく予測されているため, 検出器の感度曲線から, その検出効率を概算する事ができる. 干渉計内の光パワーと信号帯域幅を決めれば, 検出器の感度曲線が決まるので, 重力波の検出効率も計算する事ができる. 図 4.4 は, $1.4M_{\odot}$ の連星中性子星合体からの重力波を, 信

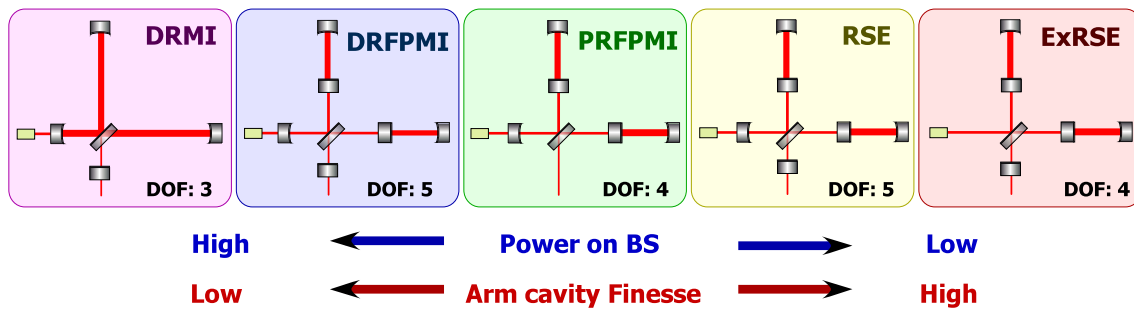


図 4.5: 様々な干渉計方式. 左から順に, Dual-Recycled Michelson Interferometer (DRMI), Dual-Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer (DRFPMI), Power-Recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer (PRFPMI), Power-Recycled Resonant-Sideband-Extraction Interferometer (RSE), Extreme Resonant-Sideband-Extraction Interferometer (ExRSE) となっている. 干渉計内光強度と信号帯域幅を同じにした場合は, 理想的にはどの方式でも同じ感度を実現することができる. その時, この図の右側の方式ほど, 腕共振器のフィネスは高く, BS に当たる光強度は小さくなる. 光路長方向に制御が必要な自由度 (Degree of Freedom, DOF) は干渉計方式によって違ってくる.

号・雑音比 10 で検出する事のできる距離を計算した結果である. この図より, 干渉計内光強度が大きいほど, 遠くの現象まで検出する事が出来ることが分かる⁵. 干渉計内強度が高い方がよいのは, この範囲では散射雑音の影響の方が大きいためである. また, この等高線図には, 左下から右上に尾根状の線があることも見て取れる. これは, 干渉計内光強度を決めた時には, 最適な信号帯域幅があることを意味している.

干渉計方式の概観

干渉計の方式としては, デュアルリサイクリングされたマイケルソン干渉計方式から, パワーリサイクリング無しのレゾナント・サイドバンド・エクストラクション方式まで, いくつか提案されている (図 4.5). 光学素子のロスがなく, 干渉効率が 100% である, など理想的な条件のみで考えれば, 図に書かれたどの干渉計方式でも, 任意の干渉計内光強度と信号帯域幅を実現することができる⁶. ただ, 実際は, 有限のロスや干渉効率が存在するため, より高い検出効率を, より現実的なパラメータで実現できる干渉計方式を選択することになる.

干渉計方式を特徴付ける量としては, 腕共振器のフィネス (Finesse), パワー・リサイクリング・ゲイン (Power recycling Gain, PRG), シグナルバンド・ゲイン (Signal Band Gain, SBG)⁷ の 3 つがある. ビームスプリッター (BS) と, 両腕のエンドミラー (EM) の間に鏡 (フロントミラー, FM) を置く事で腕共振器が形成される. 腕共振器は, 干渉計内光強度を高めると共に, 信号帯域幅を絞る働きをする. 干渉計内光強度はフィネスに比例し, 信号帯域幅は反比例する. 一方, レーザー光源部と BS の間に鏡 (パワー・リサイクリング・ミラー, PRM) を置く事でパワーリサイクリングが実現される. PRM によって, PRG だけ干渉計内の光強度が増幅される事になる. また, Dark Port の鏡 (シグナル・エクストラクション・ミラー, SEM, もしくは, シグナル・リサイクリング・ミラー, SRM) によって, SBG 倍だけ信号帯域幅を大きく (もしくは SRG 倍だけ小さく) することができる. 従って, このフィネス, PRG, SBG の組み合わせによ

⁵これは, この図の光強度の範囲 (数 MW 以下) での話である. より高強度になると, 輻射圧雑音の影響が大きくなり, かえって検出効率は低下する. また, $10M_{\odot}$ や $100M_{\odot}$ など, より大質量の連星合体からの重力波を目標とする場合には, 数 MW あたりでも検出効率の低下が見られる.

⁶シグナル・リサイクリング (SR), もしくは RSE 方式では, 特定の周波数のみに対して感度を高めるディチューニング (Detuning) を行う事ができる. ただ, LCGT においては, 広い周波数帯でよい感度を実現する方が望ましいということで, ここでは Detuning については考えていない. しかし, 将来的に観測オプションを増やす手法の一つとしては念頭に置いておく.

⁷もしくは, シグナル・リサイクリング・ゲイン (Signal Recycling Gain, SRG)

て、理想的には任意の干渉計内光強度と信号帯域幅を実現する事ができる。

図 4.5 の各干渉計方式の違いは、PRG と腕共振器フィネスでの光増幅率の配分にある。与えられたレーザー光源部の光強度から、要求される干渉計内光強度を実現するために、一番左の DRMI 方式では PRG のみで光増幅を行っているのに対して、一番右の ExRSE 方式では、腕共振器のみで光増幅を行っている。その間に描かれた方式では、PRG と腕共振器の双方で光増幅を行っており、右に行くほど腕フィネスが上がる並びになっている。信号帯域幅は、SBG (もしくは SRG) を調整する事で目標値に設定する事になる。

干渉計方式とパラメータの決定

連星合体に対する検出効率を計算した図 4.4 中で、左下方の直線は、PRM と SEM を持たない干渉計が、腕共振器のフィネスを変える事でとる値をプロットしたものである。この計算では、入射レーザー光は 100W としている。フィネスを高くするとともに、信号帯域幅が小さくなっていく様子が見て取れる。ここで、PRM を含めると、信号帯域幅は変化せずに、PRG 分だけ干渉計内光強度が増加することになる。これは、図において、点を右に移動する事に対応する。干渉計にロスがある場合⁸には、取り得る PRG の値には限界がある。図 4.4 の上方から右下方にかけての曲線はその限界の PRG を取った時の値である。一方、干渉計に SEM を含めると、干渉計内光強度は変化せずに、信号帯域幅のみが増加する事になる。これは図中の点が上方に移動する事に対応する。これらを元に、干渉計のフィネス、干渉計内光強度、信号帯域幅を決定する。

図 4.4 より、より高い干渉計内光強度を実現し、より高い検出効率を目指すためには、腕共振器のフィネスを高くした RSE (もしくは ExRSE) 方式が有利であることが分かる。また、鏡の冷却の問題⁹や、実現の容易さを考慮して、腕共振器フィネス 1250, PRG=10, SBG=10 の RSE 方式を LCGT の基本設計値とする¹⁰。その結果、干渉計内光強度は約 800 kW (片腕内光量は約 400 kW)、信号帯域幅は約 200 Hz となっている (図 4.4 の黒点)。これらの値を実現するための鏡の反射率は、FM 反射率 99.5%、EM 反射率 99.995%、PRM 反射率 76%、SEM 反射率 68%となる。

主干渉計基線長

変位雑音の影響を受けにくくするためには、主干渉計の腕共振器の基線長は長いほど有利になる。ただ実際は、用地や建設費用といった現実的な問題から制限されることになる。LCGT では、3 km の基線長を持つように設計されている。この時、共振器のフリー・スペクトラル・レンジ (Free Spectral Range, FSR) は、約 50 kHz となる。また、光子の腕共振器内での平均滞在時間は 8 msec になる。一方、PRM と FM 間の基線長 (リサイクリング共振器長)、SEM と FM 間の基線長 (シグナル・イクストラクション共振器長) は信号取得のための変調サイドバンドの共振条件を満たすように設計される。LCGT では、 $f_1 = 15$ MHz と $f_2 = 50$ MHz の 2 つの変調が用いられることになっている。変調周波数 f_1 は、PRC に共振するように設計される。このとき、PRC 長 (l_+) は約 15 m となる¹¹。一方、変調周波数 f_2 は、マイケルソン干渉計基線長の非対称性のため、全て SEM 側に透過していき、PRC-SEC に共振するように設計される。従って、

⁸ここでは、EM 反射率 99.999%、鏡面でのロス 10 ppm、基材透過時のロス 1000 ppm、両腕干渉時のコントラスト 99.5% として計算している。

⁹サファイア基材の熱吸収は比較的大きく、大光量が FM の基材を透過すると、鏡の冷却能力 (1 W) を超えてしまう。LCGT では、サファイア基材の熱吸収は、20 ppm/cm を目標値としている。FM 基材の厚さ 18cm という値から、FM への入射光量は 1400 W 以下でなければならないという計算になる。また、干渉計への入射光強度は 100 W というデザインになっていることから、これは、PRG は 28 以下という条件に対応する。

¹⁰RSE 方式の原理は、いくつかのプロトタイプ実験によって確認されている。また、懸架された干渉計の制御実験も行われ、動作が確認されている。

¹¹FM-BS 間の距離については、FM 冷却に必要な輻射シールド (低温パイプ) 基線長に対して余裕を持った設計にする必要がある。腕共振器内部では、約 20 m の輻射シールド長が必要とされているが、BS-FM 間に関しては、光損失がさほど問題とならないため、口径を小さくして 5-10 m 程度に輻射シールド長を短くする事ができる。

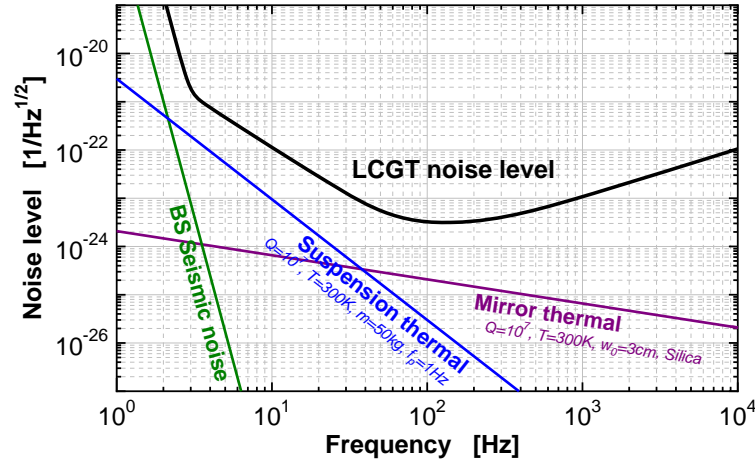


図 4.6: ビームスプリッタ (BS) 変動の影響。BS 変動の約 $1/80$ が、テストマス変位雑音への影響となる。この図より、BS の熱雑音などは、常温 (300 K) でも問題無いことが分かる。

共振条件は、PRC 長と SEM 長 (l_s) を併せて満たされる。その結果、SEC 長は約 18 m となる。また、マイケルソン干渉計基線長の非対称 (l_-) は、重力波信号に対する SN 比と、 f_2 の変調成分の透過率を最適化するように設計され、約 1.5 m となる。

鏡の曲率

腕共振器を構成するテストマスの鏡面は、光共振器の安定条件を満たすよう、適切な曲率を持つ必要がある。また、この曲率によって、鏡面でのビーム径や高次横モードに対する影響のされ易さが決まることになる。

フロントミラーを平面鏡とするとき、エンドミラー曲率半径が共振器基線長より大きければ、腕共振器の安定条件が満たされる¹²。ただ、曲率半径が極端に長い場合や、共振器長に近い場合には不安定状態に近くなったり、鏡面でのビーム径が大きくなりすぎる影響がある。また、 TEM_{00} モード以外の横モードが共振条件を満たすと、余剰な雑音源となることがある。そこで、LCGT では、エンドミラーの曲率半径を基線長の 1.5 倍の 4500 m とする¹³。このとき、20 次までの横モードは腕共振器にはほとんど共振しないことになる¹⁴。また、リサイクリング共振器での横モード間隔を広げ、変調サイドバンドを安定に共振させて、アライメント制御信号の分離取得を容易にするために、FM の裏面 (AR 面) に曲率を付け、PRM の曲率半径を数百 m 以下にすることが検討されている¹⁵。

テストマス以外の主光学素子

熱雑音の影響を避けるために、主干渉計のテストマスはサファイアを基材として製作され、20 K の低温に保たれる。一方、その他の光学素子 (BS, PRM, SEM) は、溶融石英製で常温に設置される。

¹² 光共振器の安定条件や、横モード間隔を考慮するには、共振器長と曲率半径で決まる g パラメータ (Geometric factor) という量が用いられる。光共振器長を L 、共振器を構成する鏡の曲率半径をそれぞれ R_1, R_2 とすると、 g パラメータは、それぞれ $g_1 = 1 - l/R_1$, $g_2 = 1 - l/R_2$ と表される。共振器の安定条件は、 $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$ で表され、横モード間隔は、 $1/\pi \times \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} \times \nu_{FSR}$ で記述される。ここで、 ν_{FSR} は、共振器のフリー・スペクトラル・レンジであり、 $\nu_{FSR} = c/2L$ で与えられる。

¹³ フロントミラーを平面鏡、エンドミラーの曲率半径を基線長の 1.5 倍とする設定は、TAMA など、多くの干渉計型重力波検出器で採用されている。

¹⁴ 腕共振器のフィネスは 1250 と比較的高い値であることから、共振周波数から FSR の 1% 程度でも周波数がずれていれば、ほとんど共振しない。

¹⁵ この設定にしない場合、パワーリサイクリング共振器が安定になるためには、PRM の曲率が 100 km 近くになると予想される。

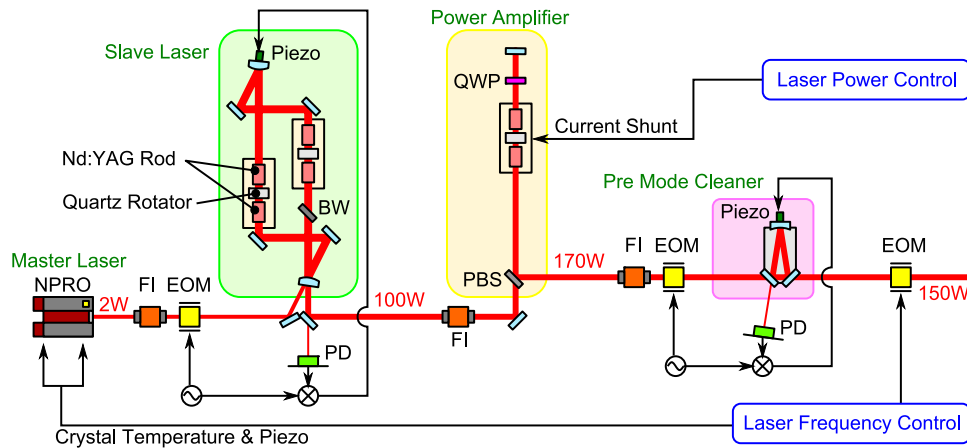


図 4.7: LCGT 用 150 W レーザ光源の概略．出力 2 W のマスターレーザー (Master Laser) からの光は出力 100 W のスレーブレーザー (Slave Laser) に入射される．このマスター・スレーブレーザーでは、注入同期 (Injection Locking) が行われ、マスターレーザーの高安定度と、スレーブレーザーの 100 W という出力を兼ね備えた光出力を得る．その出力光は、飽和型の 50 W 光増幅器によって、150 W に増幅され、出力される

図 4.6 は、BS の熱雑音などが干渉計感度に与える影響を表している．BS の変位雑音は、その約 $1/80$ (信号の折り返し数に相当) のテストマス変位雑音に相当する．BS 基材の機械散逸による影響、BS 懸架用振り子の熱雑音は、それぞれ、Q 値 10^7 、300 K、基材の質量 50 kg、振り子の共振周波数 1 Hz として計算されている．また、BS に対する地面振動の影響は、テストマスと同等の防振系性能を仮定して見積もられた．図より、これらの雑音は、干渉計感度に影響を与えていないことが分かる．

一方、PRM や SEM の変動は、干渉計が対称に作られていれば 2 次の効果としてしか現れない．ただ、様々な非対称性や復調位相のずれなどから干渉計出力に影響を与える可能性もある．従って、これらの光学素子に対しても BS と同様に常温中に設置し、同程度の防振を行う事が望ましい．

4.1.2 レーザ光源

レーザー光源の出力としては 150 W^{16} ．また、出力光量だけでなく、長期観測に十分耐え得る安定度・信頼性を備え、単一モード・単一発振周波数、直線偏光を持つ光源が必要となる．さらに、外部の信号による安定化のためには、良い制御特性を持っている必要もある．これらの条件を満たすものとして、LCGT では半導体レーザー (Laser Diode, LD) 励起の Nd:YAG レーザー (波長 1064 nm) を採用する．レーザー光源のシステムは図 4.7 のようになっている．出力 2 W のマスターレーザー (Master Laser) からの光は出力 100 W のスレーブレーザー (Slave Laser) に入射される．このマスター・スレーブレーザーでは、注入同期 (Injection Locking) が行われ、マスターレーザーの高安定度と、スレーブレーザーの 100 W という出力を兼ね備えた TEM_{00} モード光出力を得る．その出力光は、飽和型の 50 W 光増幅器 1 段によって、150 W に増幅され、出力される．光源からの出力光は入射光学系を透過され、不要な光の成分や雑音を除去してから主干渉計に入射される．ただ、入射光学系や制御で実現することができる抑圧比には限界があるため、光源単体でもある程度の安定度が必要となる．

¹⁶ 入射光学系の透過率は 50% と設計されているので、主干渉計に入射されるレーザー光量は 75 W となる．

注入同期レーザー

安定化レーザー光の源となるマスターレーザー光は、注入同期 (Injection Locking) により、100 W に増幅される。注入同期は、高出力のレーザー媒質を含む光共振器 (スレーブレーザー, Slave Laser) に外部から低出力ながら安定なレーザー光 (マスターレーザー, Master Laser) を入射することでレーザー間の位相同期を引き起こし、安定かつ高出力のレーザー光を得る技術である。

マスターレーザーとしては、LZH 社製の 2 W NPRO レーザーを用い、スレーブレーザーには 4 つの Nd:YAG モジュール (後述) が含まれており、100 W の出力が得られる。このとき、同期範囲は 1 MHz 以下となるが、実験ですでに十分安定な注入同期が実現できるが示されている。安定な注入同期を保証するためには、各レーザー共振器長を制御する必要がある。この制御は、パウンド・ドレーパー法を用いて信号を取得し、共振器の鏡に取り付けられた PZT¹⁷ にフィードバックすることで実現される。

光増幅器

注入同期によって得られた 100 W の光は、光増幅器によって、150 W に増幅される。光増幅器と、第 2 スレーブレーザー内のレーザー媒質としては、高輝度半導体レーザー励起の Nd:YAG モジュールが用いられる。これは、三菱電機が開発されたシステムであり、1 つのモジュールは、2 つの Nd:YAG 結晶を複数の半導体レーザーで側面励起したものである。この励起には、CIDER と呼ばれる技術が用いられ、拡散反射を利用してロッドは均一に励起される。また、高励起による熱の影響を、2 つのロッドと偏光回転子を用いて補償する HIPER と呼ばれる技術を併用する事で、高品質な出力光が実現されている。ただ、光増幅器構成時には、どうしても避ける事は出来ない波面の乱れが残る。そこで、増幅器出射後にプレモードクリーナーが必要になる¹⁸。もしくは、位相補償光学系によって、波面を制御して乱れを補償することも検討されている。

LCGT の基本デザインでは、注入同期によってえられた 100 W の光を光増幅によって 150 W にする方式が取られている。

周波数雑音・強度雑音

レーザー光源の周波数雑音は、外部共振器による安定化を行わない (フリーラン, Free Run) 状態で $3 \times 10^4 / f \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ を目安として設計を行う¹⁹。注入同期レーザーの周波数は、マスターレーザー周波数に追従する。従って、外部信号による発振周波数安定化は、主にマスターレーザーの周波数を制御する事によって実現される。制御は、周波数帯に応じて、マスターレーザー結晶の温度調節、マスターレーザー励起用の LD 電流、マスターレーザー出射光に対する位相変調器の 3 つを併用して行う²⁰。外部信号による制御帯域は 1 MHz 程度になる (4.1.3 節)。主干渉計の腕共振器の同相変動成分は、レーザー周波数の制御で追従する事になる。この同相成分の長期的なドリフトが 1 mm あるとすると、レーザー発振周波数には、最低でも 100 MHz の可変幅が必要となる。

一方、強度雑音に関しては、 $1 \times 10^{-5} / f^{1/5} / \sqrt{\text{Hz}}$ を光源単体に対する目安とする²¹。外部信号による強度安定化に関しては、スレーブレーザーや光増幅器励起用 LD の電流調節によって行う。この制御帯域

¹⁷ もしくは、ヴォイス・コイル・モーター (Voice Coil Motor, VCM)。

¹⁸ 入射光学系の第 1MC がこのプレモードクリーナーの役割も果たしている。波面の乱れや RF 帯域の強度雑音量によって、レーザー光源部に更に付加的なモードクリーナーが必要かどうかが決まる。

¹⁹ この値は、市販のレーザーの典型的な雑音レベルを参考に決められた。

²⁰ ただし、LCGT のレーザーでは注入同期を行っているため、高い周波数では 1 次の位相遅れが生じる。それを補償するために、レーザーの最終段透過後に位相制御を行う必要が生じる可能性もある。その場合、耐光強度の大きな位相変調器を用いる必要がある。

²¹ この値は、やや厳しい値となっている。ただ、これよりも安定な光源も市販されている。フリーラン時の強度雑音を抑えるには、励起用半導体レーザーの電源を低雑音化が不可欠であると考えられている。実際は、得られた雑音レベルに対して制御系を設計することになるため、これらの値より大きい場合に干渉計感度が直接影響を受ける、というわけではない。

は 100 kHz 程度になる (4.1.3 節) . ただ, 全ての LD の電流を制御する事が現実的ではない場合は, 独立したレーザーモジュールを用意して励起 LD 電流の制御を行うことになる可能性が高い .

変調周波数での強度雑音成分は, 復調信号に直接現れる . これは高周波数帯での雑音であるため, 制御によって抑える事は困難であり, 光源出力時に十分抑えられている必要がある . この強度雑音が光検出器での散乱雑音レベルよりも十分小さいという条件を与えると, レーザー光源出力時の強度雑音が, 変調周波数 (10 MHz 以上) で $1 \times 10^{-5} / \sqrt{\text{Hz}}$ 以下, という要求値が与えられる²² . 光増幅器で付加される強度雑音によっては, 変調周波数帯での強度雑音を除去するためのプレモードクリーナーが必要となる場合も考えられる .

レーザー光源の設置環境

レーザー光源では, 周囲の環境変化に敏感に反応し, 雑音が増加したり, 不安定になったりすることが起こり得る . 従って, 光源の設置環境には十分な配慮を行う必要がある . 高出力レーザーでは, 排熱は重要な要素となる . その一方で, 冷却システムによる振動の影響は避けなくてはならない . また, 長期観測のためには, 光源付近の地面のドリフトの抑圧や室温の安定化なども不可欠であろう . さらに, 長期的な性能の維持のためには, クリーン環境の維持が極めて重要である . そのため, 独立したクリーンルームを用意する必要がある .

4.1.3 入出射光学系

一般に, 高出力レーザー光源から出た光には, 不要な空間モードや雑音成分が含まれる . また, 主干涉計において重力波信号や制御信号を取得するために, 変調が必要となる . そこで, レーザー光源からの光は, 入射光学系を通し, 不要な空間モードや雑音成分 (周波数雑音・強度雑音) を除去し, 変調を加えた後に, 主干涉計に入射される . また, 主干涉計に光が入る前に, 重力波観測周波数帯での周波数雑音・強度雑音を安定化することも, 入射光学系の重要な役割である .²³ LCGT の入射光学系は, これらの目的を達成するように, 3 枚の鏡で構成されたリング型光共振器 (モードクリーナー, MC1, MC2) 2 本を中心に, 変調器, モードマッチング・テレスコープ (MMT) や光アイソレーター (FI) などからなっている .

基線長 10 m の MC1 (フィネス 1700) は, レーザー光に含まれる高次モード成分を除去するとともに, 変調周波数帯 (数 MHz から数十 MHz あたり) の周波数帯の強度・周波数雑音を除去するフィルターとしての働きをもつ . また, 入射レーザー光と MC1 の共振周波数の差 (誤差信号) は, パウンド・ドレーバー法 (Pound-Drever 法) によって取得される . 1 MHz 以下の周波数帯の信号はレーザー光源にフィードバックされ, 周波数安定化に用いられる . MC1 の後には, 主干涉計での信号取得用の変調が掛けられる . 主干涉計では, 位相変調 (10 MHz) とシングル・サイドバンド (SSB, 60 MHz) の 2 つの変調成分が必要となる . そのため, 光を分割して変調をかけた後, 再結合する方式が取られている . 変調器で生じた波面の乱れや, 再結合しきれなかった光の成分は MC2 (基線長 180 m, フィネス 1000) で除去される . レーザー光源, 2 つの MC, 主干涉計の間にはモードマッチング・テレスコープ (MMT) が配置され, レーザー光のモードを各共振器モードに合わせるようになっている .

一方, 主干涉計から出てきた光は, 干渉せずに残った光成分や, 迷光を伴う場合がある . これらの光が光検出器に入り, 散乱雑音レベルを悪化させることを防ぐために, 干渉計からの光は出射光学系を通り, 不要な光成分を除去した後, 光検出器に入射される . 光検出器には, 高耐光強度と低雑音の両方が要求され

²² 主干涉計の重力波検出用の光検出器には, 動作時には 2.5 W の光が入射される . この光量に対応する散乱雑音レベルは, $3.6 \times 10^{-10} / \sqrt{\text{Hz}}$ となる . 一方, この強度雑音成分は, MC1 (遮断周波数 4.5 kHz, フィネス 1700) で 3.2×10^{-6} に減衰される (MC1 に対して反共振の場合) ため, 安全係数を 10 とすると, 光源出力部での強度雑音の要求値は $1 \times 10^{-5} / \sqrt{\text{Hz}}$ となる .

²³ 入出射光学系の詳細は第 7 章を参照のこと . 最終的な設計値で第 7 章と異なる場合, 15 第 7 章が優先される .

る。また、変調周波数帯で十分な応答特性を持っている必要もある。一般に口径の大きいフォトダイオードは、周波数特性が悪いため、LCGT では、口径 1mm 程度のフォトダイオード複数に光を分割して入射するデザインになる予定である。これらのフォトダイオードに光を入射するためにはビーム径を絞る必要がある。ただ、通常の透過型のレンズを用いると散乱光を増加させる恐れがあるため、入射光学系と同様の反射型のレンズ系を用いる。

周波数安定化

LCGT では、重力波観測帯域において $4 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ という周波数雑音レベルが要求される²⁴。これを実現するためには、約 10 桁の制御ゲインが必要となる。そこで、LCGT では、2 つの MC と主干涉計の腕共振器を用いた多段式周波数安定化システムを採用する。周波数安定化に用いる共振器の基線長は、それぞれ、MC1 が 10m、MC2 が 180m、主干涉計が 3000m と次第に長くなっており、より安定な周波数基準として用いる事ができる²⁵。

制御に用いる各誤差信号の取得には、パウンド・ドレーバー法 (Pound-Drever 法) が用いられる。これは、光共振器への入射レーザー光に位相変調を掛けておくことで、入射レーザー周波数と、光共振器の基線長から決まる周波数の差の情報を得る手法である。この変調は、MC1 用のものは MC1 前に、MC2 と主干涉計用のものは MC2 の前で掛けられる。また、信号取得には、各光共振器からの反射光が用いられる。多段の制御系としては、まず、入射レーザー光と MC1 の誤差信号をレーザー光源にフィードバックする事で、 $1 \times 10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで周波数雑音を抑える。次に、MC1 で安定化された光と MC2 の誤差信号を、MC1 共振器長にフィードバックすることで、MC1 経由でレーザー周波数を安定化し、 $2 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ を実現する。最後に、主干涉計への入射レーザー光と腕共振器の誤差信号を MC2 共振器長にフィードバックする事で、MC2 を安定化する。これによって、最終的には、 $1 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の安定度が実現される。

MC1 ループの制御帯域は、1MHz と設計されており、制御信号は、DC から 0.1 Hz まではマスター光源の YAG 結晶に付いている温度調節端子に、0.1 Hz から 50 kHz まではマスター光源の励起用 LD 電流に、50 kHz から 1 MHz までは外部 EOM にフィードバックされる²⁶。MC2 ループの制御帯域は 100 kHz であり、低周波数から数 kHz までは MC1 鏡にフィードバックされ、それ以上の周波数帯では、MC1 制御ループへのフィードアラウンド²⁷信号として注入される。 L_+ ループは制御帯域 10 kHz という設計になっている。1 kHz 以下の低周波数帯は、MC2 の鏡にフィードバックされ、1 kHz 以上の信号は、主に MC2 制御ループにフィードアラウンドされる。制御ゲインは、各段それぞれ、低周波数で $10^5 - 10^6$ 程度となっている。

強度安定化

強度雑音としては、LCGT では、主干涉計入射の時点で、 $2 \times 10^{-8} 1/\sqrt{\text{Hz}}$ という安定度が要求される²⁸。これを実現するために、MC2 の透過光で強度変動を検出し、レーザー光源にフィードバックする強度安定化を行う。

²⁴ LCGT の目標感度 $3 \times 10^{-24} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、同相雑音除去比 (CMRR) 40dB、腕共振器の基線長 3000m といったパラメータと安全係数 10 を考慮して求められた。

²⁵ 基本設計では、2 つの MC と主干涉計という、懸架された光共振器を周波数基準として安定化を行うシステムを用いる事になっているが、場合によっては、短基線長の固定鏡共振器 (Rigid Cavity) を併用する可能性もある。

²⁶ マスターレーザーに取り付けられた PZT 素子をアクチュエータとして用いる可能性も残しておく。

²⁷ MC2 制御ループと、主干涉計 (L_+) 制御ループではフィードアラウンド (Feed Around) と呼ばれる手法が用いられている。MC1 や MC2 の共振器長へのフィードバックでは、鏡の内部共振によってせいぜい 1 kHz 程度に制御帯域が制限されてしまう。そこで、誤差信号の高周波数成分を前段制御ループの誤差信号に直接加える事で制御帯域を広げることができる、というのがフィードアラウンドの利点である。ただ、フィードアラウンドによって、前段制御ループの動作点が少しずれることになるので、フィードアラウンド量には十分注意して設計する必要がある。

²⁸ 干涉計制御後の残留揺れが、 $\delta L_{\text{-RMS}} = 10^{-13} \text{ m}$ である、というパラメータから求められた。この要求値には安全係数 10 が含まれている。

MMT 鏡を透過した光のうち、約 20 mW ($6 \times 10^{-9} \text{ 1}/\sqrt{\text{Hz}}$ の散乱雑音レベルを得るのに必要な光量) 程度の光を真空槽内に収められた光検出器 (Photo Detector, PD) で検出する。PD を真空槽内に収める事で、埃による散乱 (Air Jitter) や、音響雑音の影響を避けることができる。一方、PD からの脱ガスが真空槽内を汚染する事を防ぐため、PD は、小型のチェンバー内に封入される。この際、排熱や光学窓の品質には十分注意を払う必要がある。検出された強度雑音は、フィルターを通った後、レーザー光源にフィードバックされる。LCGT では、外部 AOM などを利用した強度変調器は用いず、レーザー光源の励起用 LD の電流を制御する事によって、強度を変化させる。この方式では、外部素子による波面の乱れや光量損失を抑える事ができる、外部素子使用時に問題となる大光量による変調素子の損傷を考えなくて良い、などの利点がある。その一方で、励起用 LD に高い周波数までを含む変動信号が入力されることになるため、LD の損傷には十分配慮する必要がある。

非制御時のレーザー光源の強度雑音が、 $10^{-5} - 10^{-6} \text{ 1}/\sqrt{\text{Hz}}$ (周波数帯による) 程度であるとすると、制御帯域 100 kHz, 制御ゲインは 10^3 程度あればよい。ただ、制御ループ内に 2 つの MC が入っており、それらのローパスフィルター特性を制御系で補償する事は必要になる。

一方、数十 MHz の変調周波数帯での強度雑音は、制御によって抑える事は困難であるため、MC の受動的なフィルタ効果を利用する。第一 MC は、遮断周波数 4.5 kHz であり、変調周波数帯では、ほぼ反共振とみなすことができる²⁹。共振器のフィネスは 1700 であることから、ほぼ反共振となる周波数成分の光量は、透過時には、 3.2×10^{-6} に減衰される。

光変調器

主干渉計の信号取得のためには、入射レーザー光に変調を掛けることが必要となる。LCGT では、主干渉計に RSE 方式を採用しており、信号取得には、10 MHz の位相変調と、60 MHz のシングル・サイドバンドという 2 つの変調成分を用いる事になっている。一方の変調の高調波が、他方の変調によって元の周波数に戻る、といった多重変調の影響を避けるため³⁰、光を 2 つに分割して、それぞれ変調を掛けてから重ね合わせる、という手法が用いられる。分割された一方の経路には位相変調器 (Electro-Optical Modulator, EOM)、他方の経路には音響光学変調器 (Acousto-Optical Modulator, AOM) が置かれる。AOM では、透過光 (高次光) に周波数シフトを生じさせることができる。ただ、同時に、変調周波数の変動に応じて光軸の変動 (ビームジッター) を生じる。そのため、凹面鏡で反射し、AOM 二回透過させることで、その影響を除去している。

2 つに分割された光は、それぞれ変調を受けた後、再結合される。この際、2 つの光の光路長が変動すると、復調して得られた信号に余剰の雑音が付加されることになる。従って、2 つの光の位相差が一定に保たれるように、結合してできた干渉縞を制御する事が不可欠となる。この制御の帯域やゲインは、非制御時の位相変動量に依存して、主干渉計の感度に影響を与えないように決定される。また、2 つの光が効率良く重ね合わされるよう、アラインメント・モードマッチングの制御や調整が必要になる。

上に書かれた主干渉計のための変調器は、MC2 の前に置かれる。これによって、変調器透過時の波面の乱れや、再結合時に干渉しきれなかった光の成分は、MC2 で除去することができる。また、MC の信号取得用の位相変調器も、それぞれの MC の前に置かれる。従って、MC2 の後には、波面を乱す変調器は一切置かれないデザインになっている。このようなデザイン上、変調器は真空槽内に収められる必要があり、排熱や温度制御には十分注意する必要がある。また、耐パワーや変調効率を考慮して、材質や、透過光の

²⁹ 基線長 10 m は、FSR 10 MHz 付近に対応するため、第一 MC の基線長と変調周波数の選択には注意が必要である。

³⁰ 2 つの変調周波数成分は、ともに MC2 を透過する必要があるため、MC2 の FSR (833 kHz) の整数倍の周波数に選ばれる。従って、2 つの周波数のそれぞれの高調波は、比較的低い次数で同じ周波数を持つ可能性がある。10 MHz と 60 MHz の組み合わせでは、60 MHz の 3 倍波である 180 MHz で、それぞれの変調の高調波周波数が重なる。この状況は変調周波数を多少変更する事で改善することもできるであろう。

ビーム径を決める必要もある³¹。

モードマッチング・テレスコープ

レーザー光源、2つのMC、主干渉計の間にはモードマッチング・テレスコープ(MMT)が配置され、レーザー光のモードを各共振器モードに合わせるようになっている。散乱光の影響を極力避けるため、MMTを構成するレンズは透過型のものではなく、反射型のものを用いる。また、MC1後のMMTでは、新たなビームジッターを導入しないよう、レンズは懸架されている必要がある。このレンズは、光軸制御のためのアクチュエータの働きも果たし、主光源光やローカル光源による光でこの信号を用いて角度制御される。

また、干渉計からの出射光学系にもビーム径を扱い易い大きさに絞るテレスコープが必要となる。さらに、アライメント制御に用いるウェーブ・フロント・センサーでは、レンズ系を用いて基本モードと高次横モード間の位相差を調整する必要があり、その用途にもテレスコープが用いられる。

アウトプット・モードクリーナー

一方、主干渉計から出てきた光は、干渉せずに残った光成分や、迷光を伴う場合がある。これらの光が光検出器に入り、散乱雑音レベルを悪化させることを防ぐために、干渉計からの光は、アウトプットモードクリーナー(OMC)を通される。OMCは、必要な信号成分を除去してしまわないよう、重力波観測帯域より十分に高い遮断周波数を持っている必要がある。その一方で、不要光の除去効率を高めるためには、ある程度のフィネスを持っている必要もある。さらに、主干渉計信号取得のための変調成分はOMCを透過する必要がある。そこで、主干渉計のダークポート用のOMCとしては、基線長数cm程度の短い共振器で100程度のフィネスを持ったものを用いる³²。また、除去された光が干渉計に戻るのを防ぐために、OMCは3枚鏡のリング型共振器とし、一つのスペーサーに鏡を接着して製作する。基線長7cm、フィネス14とする。この時、FSRは、4.28GHz、遮断周波数152MHzとなる。一方、ブライトポート用のOMCとしては、MC2を用いる。主干渉計から光源側に反射された光は、MC2を透過し、光アイソレータで取り出す事ができる。これによって、MC2の後に光アイソレータを置く必要がなくなり、波面の乱れを減らす事ができる。ただ、このデザインでは、信号の高周波数成分もMC2で除去されるため、信号をレーザーの周波数安定化(L_+ 制御系)に用いることは難しい。そこで、周波数安定化には、MMT鏡の透過光を用いる。

OMCの透過率は、信号周波数帯で、ほとんど周波数特性を持たないため、共振器長制御に対する要求は、さほど厳しいものにはならない。そのため、ごく低周波数の温度フィードバックを行えば十分と考えられる。制御信号取得法としては、主干渉計から出てきた変調成分を用いるものや、機械変調を用いるものなど、様々な可能性がある。

光検出器

光検出器としては、重力波信号や制御信号取得用のRF用光検出器、アライメント信号取得用の分割型光検出器、強度安定化やモニタ用の光検出器などが必要となる。

主干渉計の光検出器には、高耐光強度と低雑音の両方が要求される。また、50MHz程度までの変調周波数帯で十分な応答特性を持っている必要もある。一般に口径の大きいフォトダイオードは、周波数特性が悪いため、LCGTでは、口径1mm程度のフォトダイオード複数に光を分割して入射するデザインになる予定である。

干渉計のダークポートに出てくる光量は、約2.5Wになる³³。LCGTで用いられているフォトディテクター(Photo Detector, PD)は、口径1mmのInGaAsフォトダイオード(Hamamatsu G3476-10)を用

³¹ 光学結晶を利用した変調器が、LCGTで要求される光強度に耐えられない場合には、補助レーザー光源を用いて、もしくは一部の光を取り出して信号取得用のサイドバンドを生成する手法を検討することになる。

³² 光ファイバーによるモードクリーニング効果を利用する手法もある。

³³ 主干渉計のBSに当たる光強度が1000W、干渉のコントラストが99.5%として、光損失が無いとして見積もった値。アウトプットモードクリーナーの使用によって不要な光が除去され、数分の1程度の光量に抑えられることも期待できる。

いたもので、最大 100mW の光量までを受光することができる³⁴。従って、光を、同様の PD 25 台に分割して入射する事で、2.5 W の光を検出することができる。ただ、多数の PD を用いる場合には、PD 面からの反射光や、分割用 BS での散乱光が問題となり易いため、十分な配慮が必要である。

一方、アラインメント信号取得用には、4分割型のフォトディテクターが用いられる。このディテクターは、大きな口径を持ち、かつ RF 周波数帯で十分な応答特性を持つ必要がある³⁵。そのため、多少効率が落ちるが、Si フォトダイオードが用いられることになる。また、強度安定化用、モニタ用の光検出器についても、取り扱いの容易さから大口径のものが望ましく、Si フォトダイオードが用いられることになる。

光アイソレーター

光アイソレーター透過時には、10%弱の光が吸収されることが起こりえる。光アイソレーターには、光源からの全光量を入射する必要があるため、高耐光量の結晶を選択することと、冷却は不可欠となる。特に、第一 MC と第二 MC の間の光アイソレータは、空気揺らぎを避けるために真空中に収められることが望ましいため、冷却は深刻な問題となる。そこで、真空中に特別な冷却機構を導入する、もしくは、この部分だけ真空槽外に出す、といった対処が必要となる。

光学系の配置

干渉計の各光学素子で発生した散乱光や迷光は、真空槽などで反射された後、干渉計に再導入される場合がある。この散乱光や迷光の影響は、干渉計の感度を直接制限する原因となり得るのに対して、定量的に評価する事が困難であるため、十分に配慮する必要がある。そこで、光学素子裏面の AR 面などで反射された光は、全てきちんとダンプするように設計する必要がある。また、光学素子間にバッフルを配置する事も必要となる。

4.1.4 主光学素子

テストマスとして用いるには、腕共振器内の光の回折損失や輻射圧雑音の影響を避けるため大口径・大質量の基材が要求される。LCGT では、実現可能な大きさ³⁶として、直径 30 cm、高さ 18 cm の円柱形のものを用いる。このとき、質量は約 50 kg となる。干渉計に対する熱雑音の影響を避けるため、このテストマスは 20 K の低温に冷却される。

テストマス基材

LCGT ではテストマス基材として 20 K の低温に冷却されたサファイアが用いられる³⁷。LCGT の大きな特徴は低温化による熱雑音の低減であるが、現在の重力波検出器で用いられている熔融石英は、低温で Q 値が低下するため、低温化の利点を受用できない。その一方で、サファイアは、元々小さい機械的散逸が低温ではさらに減少するという特徴を持つ。実測された結果では、20 K の低温で 10^8 という Q 値が報告されている。また、常温では問題になる、熱弾性効果による雑音も低温における線膨張率の減少と熱伝

³⁴冷却方法を工夫する事で、PD 一台あたりの最大受光量を増やす事も可能と思われる。

³⁵TAMA では、PerkinElmer 社 (旧 EG&G 社) 製の口径 11 mm の Si フォトダイオード (YAG-444-4A) が用いられている。

³⁶米国の Crystal System 社 (CSI) では、直径 33 cm、高さ 20 cm、質量 65 kg という大きさの高品質なサファイア結晶が製作されている。ただし、屈折率一様性や散乱光量、不純物量を抑えた最高品質の CSI Hemex White と呼ばれるグレードの結晶はこのサイズでは実現されていない。

³⁷他の候補としては、5 K まで冷却されたフッ化カルシウム (CaF_2) が挙げられる。フッ化カルシウムは、望遠鏡のレンズに用いられるなど良好な光学特性を持つという特徴がある。特に、フッ化カルシウムの光熱吸収率は非常に小さく、発熱の問題は大幅に緩和される事が期待できる。また、低温で熱伝導率が増加し、機械損失が減少するといった点では、サファイアと同じ特徴を持っている。ただ、この低温での機械的損失や熱伝導率がサファイアよりやや劣り、5 K 程度まで冷却しないと利点が少ない点から、サファイアが選択されている。

導率の増加の効果で無視できるようになる。従って、冷却されたサファイアを用いる事で、鏡の熱雑音は、LCGT の感度にはほとんど影響しなくなる。ただ、鏡の基材に対しては、幾つかの問題を解決しなければならない。

干渉計の鏡基材に対して課せられる要求としては、良好な光学特性であることが挙げられる。LCGT では特に、低温化するために、光吸収による発熱が小さい事が重要となる。LCGT の干渉計方式では、腕共振器の入射側の鏡 (Front mirror, FM) の基材をレーザー光が透過することになる。この際、基材内で光が吸収されると、光を損失するだけでなく、その熱による熱レンズ効果³⁸や、鏡を低温に保てないなどの問題が生じることになる。従って、基材の光吸収は極力抑えられなくてはならない。そのため LCGT では、サファイア基材の光吸収率を熱に変換される量として 20 ppm/cm という値を要求値としている。このとき、FM 1 枚あたり 0.36 W の熱が発生する事になる³⁹。

一方、基材における散乱光は真空槽内を伝播して干渉を起こし、雑音源となる可能性がある。サファイア基材内の Rayleigh 散乱は 13-18 ppm/cm という値が報告されている。ただ、熱吸収量と散乱量は、ともに基材内の不純物に起因していると考えられているため、熱吸収量を減らすために不純物を減少させる過程で、散乱量も数分の 1 に改善される事が期待できる。基材の屈折率一様性に関しては、FM 透過時の波面の歪みを $\lambda/20$ 以下とすると、 3×10^{-7} rms が要求される⁴⁰。また、サファイアは 1 軸性結晶であり、複屈折を持っている。結晶軸 (*c* 軸) と光軸のずれは光損失を生むため、極力抑える必要がある。複屈折による光損失を 10 ppm 以内にするためには、0.04 度以内に光軸をあわせる必要がある。さらに、基材裏面の反射光が干渉を起こさないよう、光学素子間の距離を考慮したウェッジ角設計にする必要がある。

鏡基材の表面研磨

鏡基材の表面は、鏡の曲率に応じて研磨される。基材表面の研磨の性能としては、形状誤差と平滑度が重要となる。また、これらの性能は 20 K の低温で実現されなくてはならない。

LCGT のような大型干渉計においては、鏡の曲率は数 km にも及ぶ。この鏡表面の形状に誤差があると、腕共振器内に十分な光を蓄える事ができなくなり、干渉計の感度を実現する事ができなくなる。LCGT の要求値である腕共振器内光強度 400 kW を実現するためには、鏡表面誤差は $\lambda/100$ 以下に抑えられていることを目標とする。これまでに、干渉計型重力波検出器用の大型鏡としては、 $\lambda/40$ 程度の形状精度は実現されている。これは、合成石英の例であるが、サファイアに関しても同様の研磨が報告されている。低温化の際には、冷却による鏡の曲率の変化に注意を払う必要がある。曲率半径の変化率は、ほぼ収縮率と同じであり、冷却によって 0.1% 程度変化すると考えられる。また、熱収縮率の非一様性や、結晶軸 (*a* 軸と *c* 軸) による熱膨張率の相違も考慮する必要がある。従って、あらかじめ熱収縮を考慮に入れた研磨しておく必要がある。

一方、鏡表面の平滑度は、鏡表面での光散乱を抑えるために必要である。また、高性能のミラーコーティングを行う際には、十分な平滑度が実現されている必要もある。LCGT の鏡の表面平滑度としては、 $3 \text{ \AA}_{\text{rms}}$ 以下という値を要求値とする⁴¹。この値は、超平滑研磨 (Super Polish) と呼ばれる研磨法によって実現可能である。この時、全散乱量 (TIS, Total Integrated Scattering) は 14 ppm となる。この手法は、現

³⁸ 熱レンズ効果は、光吸収に起因する温度分布が屈折率分布を生み、レンズがあるかのように振舞って波面を歪めてしまう現象である。ただ、低温のサファイア鏡では、熱レンズの効果はほぼ無視できる。これは、低温では熱伝導率が約 2 桁増加する (20 K で $4.3 \times 10^3 \text{ W/m/K}$) とともに、屈折率の温度係数が 2 桁小さくなる ($9 \times 10^{-8} / \text{K}$ 以下) ためである。

³⁹ 干渉計への入射光 100 W, PRG 10, 基材の厚さ 18 cm という LCGT のパラメータから算出されている。BS で光が半分になる効果、基材内を光が往復する効果も考慮に入っている。テストサンプルによるサファイアの光吸収率としては、50-100 ppm/cm 程度の報告が多く、熔融石英の典型的な光吸収 (数 ppm/cm) よりは一桁程度大きい値となっている。ただ、国外では、3-16 ppm/cm という測定例もある。測定結果は、サンプルや測定法に依存性するため、より精密な測定と結晶製法の研究が必要とされている。

⁴⁰ 基材の厚さ 18 cm, 光の波長 $\lambda = 1064 \text{ nm}$ として求められている。品質の良いサファイア (CSI Hemex) では、屈折率一様性として 2×10^{-7} rms という合成石英と同等の値が報告されている。

⁴¹ この値は、CSI 社の平面基材 (superpolish されたもの) の実測値 (光散乱量から逆算したもの) として得られている。

在の重力波検出器用の合成石英の鏡の研磨に用いられているが、サファイア結晶に対しても同様の研磨が報告されている。

ミラーコーティング

研磨された基材表面には、高反射率面がコーティングされる。このコーティング面には、低光損失・低機械損失の双方が要求される。

共振器内には 400 kW という大光量が蓄えられるため、鏡面の小さな光損失率でさえも、大きな光損失になる。また、コーティングの欠陥による光散乱が、干渉計の性能を制限する事も考え得る。さらに、干渉計のパワーリサイクリングゲインを十分にとるためには、腕共振器のエンドミラー (End Mirror, EM) 反射率はできるだけ高いほど望ましい。そこで、LCGT の鏡での光損失率としては、50 ppm 以下 (反射率で 99.995% 以上) という値が要求される。直径数 cm の小さな鏡では、光損失率 1 ppm 以下という実測結果が得られている。ただ、LCGT のように 30 cm という大口径を持った鏡のコーティングでは、30 ppm 程度の光損失が予測されている。従って、基材表面での散乱損失とあわせて、50 ppm 以下の光損失は実現可能と考えられる。ただ、散乱光雑音の影響を考えると、損失は少なければ少ないほどよいため、可能な限り良いコーティングが望ましい。

鏡のコーティング面は光を直接反射する面であるため、その部分での熱雑音は干渉計感度に直接の影響を与える可能性がある。LCGT においてコーティングの熱雑音が問題とならないためには、その機械損失が 4×10^{-4} 以下 (Q 値にして 2.5×10^3 以上) である必要がある。これは、これまでの実測結果で、既に実現されている値である。この損失は、誘電体多層膜を構成する Ta_2O_5 (もしくは SiO_2) の機械損失、もしくは、多層膜間のストレスや摩擦で生じていると推測されている。そのため、さらにコーティングの熱雑音を低減するためには、膜の物質を変更することなどによって改善される事も期待されている。

干渉計用光学素子

腕共振器用の低温サファイア鏡以外にも、干渉計には、ビームスプリッタ (BS)、パワーリサイクリングミラー (PRM)、シグナル・イクストラクションミラー (SEM) といったさまざまな光学素子が用いられる。干渉計が十分な感度を持つためには、これらの性能に対しても高い要求値が課せられる。ただ、これらの光学素子は、常温に置かれ、熔融石英を基材として用いるため、これまでの干渉計型重力波検出器で開発されてきた技術の延長として製作することが可能である。ただ、口径が大きくなったことと、曲率半径が大きくなったことから、製作上の困難さは増している。有効口径はサファイア鏡と同様に 30 cm、形状誤差 $\lambda/100$ とし、表面平滑度に関しては 1 \AA (光散乱損失率 1.5 ppm)、コーティングの光損失率 30 ppm を要求値とする。

これらの光学素子の熱雑音の影響は、干渉計出力には直接の影響を与えにくいだが、常温に設置される事もあって、極端に大きな機械損失は雑音源ともなりかねない。そこで、機械的損失は 1×10^{-7} 以下 (Q 値で 1×10^7 以上) を要求値とする。このとき、BS の熱雑音の影響は、LCGT 目標感度の一桁下のレベルになる。また、BS は常温に置かれ、熔融石英で製作されるため、熱レンズ効果が問題となり得る。BS には、1000 W の光が入射することを考慮し、熱レンズ効果の影響を避けるよう、5 ppm/cm 以下という光の熱吸収損失が要求される⁴²。

4.2 LCGT 干渉計のテストマス支持

地上の干渉計型重力波検出器においては、干渉計を構成する主鏡 (テストマス) は、観測周波数帯域において自由質点として振舞わなくてはならない、という原理的要請から、振り子によって懸架される。こ

⁴² この値は、実現可能な量として設定されている。詳細な値は、熱レンズ効果を考慮した計算から求める必要がある。

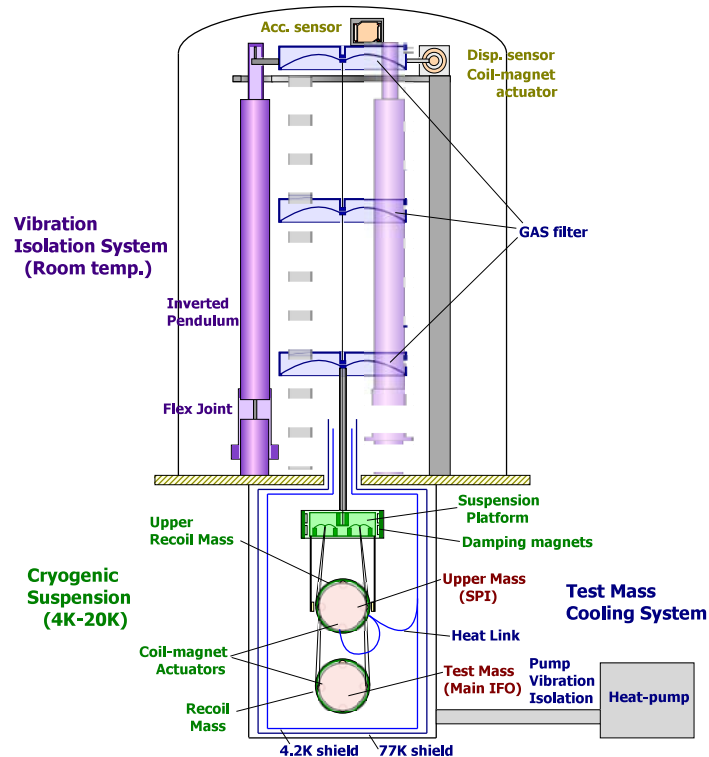


図 4.8: 干渉計テストマス支持装置概略図。テストマスは、懸架プラットフォームから 2 段振り子によって懸架されている。この懸架プラットフォームは、倒立振り子と 3 段の低周波縦防振装置で構成された常温防振系から、断熱性の高いワイヤー 1 本で吊られている。防振・懸架装置の機械共振は、倒立振り子での能動制御と、懸架プラットフォームでの渦電流によってダンブされる。懸架プラットフォーム以下は 4 K シールド内に収められている。また、上段マスとラディエーションシールド間は、ヒートリンクで結ばれ、テストマスで発生した熱の冷却経路となる。上段マスでは懸架点干渉計が構成され、地面振動やヒートリンクからの振動を能動的に抑圧する役割を担うことになる。また、ヒートリンク経由の振動は、上段マスに接続される前に、ヒートリンク系自身によっても防振されている。

のテストマス支持装置は、地面振動など外来の振動からの防振の働きも併せ持つことになる。防振に関しては、観測帯域での十分な抑圧だけでなく、懸架系共振周波数での RMS 振動を抑えることも重要となる。また、この支持装置での熱雑音が過剰なテストマス振動を引き起こさないこと、テストマスの位置制御が可能であること、超高真空対応であること、などが要求される。また、LCGT においては、テストマスは 20 K の低温に保たれている必要がある。従って、テストマス支持系は、冷却のためのヒートリンクを備えていなくてはならない。この際、ヒートリンクからの振動（冷却器の振動、地面振動）が、過剰なテストマス振動を引き起こさないような設計が重要となる。

LCGT では、これらの要請を満たすテストマス支持装置として、図 4.8 のようなものを用いる。LCGT のテストマスは、懸架プラットフォームから 2 段振り子によって懸架されている。この 2 段振り子部は 4 K シールド内に収められ、低温に保たれる。また、上段マスとラディエーションシールド間は、ヒートリンクで結ばれ、テストマスで発生した熱の冷却経路となる。一方、懸架プラットフォームは常温防振系から断熱性の高いワイヤー 1 本で吊られている。常温防振系は、倒立振り子と 3 段の低周波縦防振装置 (GAS filter, Geometric Anti-Spring filter) で構成されており、低周波数帯からの防振の働きを担っている。この常温防

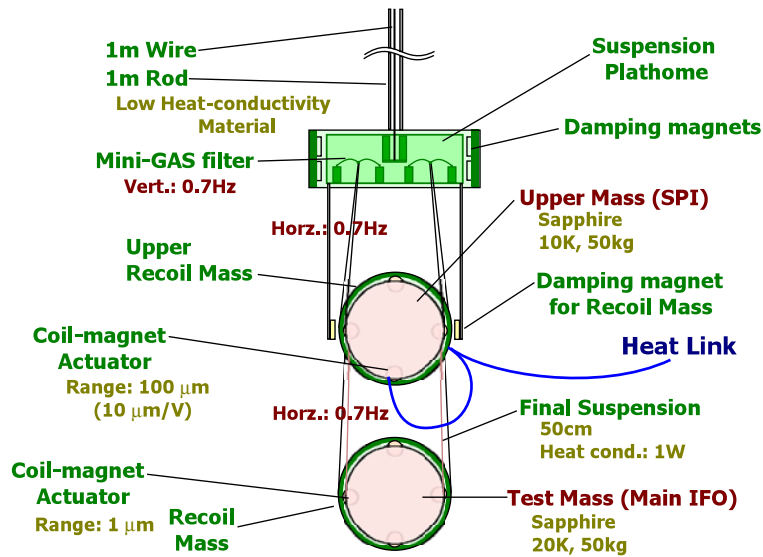


図 4.9: テストマス低温懸架装置. 2 段振り子の構成になっており, 懸架点干渉計による能動防振効果も含めて, 3 Hz で 10^{-3} の防振比が期待できる. テストマスで発生した熱は, 上段マスとヒートリンクを経由して 4 K シールドへと逃がされる.

振部と低温懸架部をあわせて, 3 Hz で -190 dB という防振比の要請値⁴³を満たす設計になっている. 防振・懸架装置の機械共振は, 倒立振り子上部に配置されたセンサーとアクチュエータによる能動制御と, 懸架プラットフォーム周りに配置された永久磁石による渦電流でダンブされる. また, 上段マスでは懸架点干渉計が構成され, 地面振動やヒートリンクからの振動を能動的に抑圧する役割を担う. また, ヒートリンク経由の振動は, 上段マスに接続される前に, ヒートリンク系自身によっても防振されている.

以下, 低温懸架部分 (4.2.1 節) 及び常温での防振装置 (4.2.2 節), ヒートリンクによる冷却について述べる.

4.2.1 テストマス低温懸架

温度 20 K のサファイアのテストマス (Test Mass) は, 16 K に保たれた上段の低温マス (Upper Mass) から懸架される. この懸架装置 (主振り子, Final Suspension) は, テストマスを自由質点として振舞わせるとともに, 地面振動からの防振の働き, 鏡で発生した熱の冷却経路としての働きも持つ.⁴⁴ 上段低温マスは, さらに上段の懸架プラットフォーム (Suspension Plathome) から, 縦防振用の小型の GAS フィルターを介して懸架される. 各テストマスの低温上段マスでは, 懸架点干渉計が構成され, 外来雑音の除去や, 主干渉計共振器長の変動抑圧に用いられる. また, この上段低温マスは, ヒートリンク (Heat Link) を介して, 4 K のラディエーションシールド (Radiation Shield) と結ばれている. 懸架プラットフォームの周囲には永久磁石が配置され, 渦電流によって, 共振周波数での変動を受動的に抑圧している. 懸架プラットフォームと周囲の永久磁石は, 常温部の懸架プラットフォームから, 断熱性の高いワイヤーで懸架されている. テストマス, 上段低温マスの周囲には, リコイルマスが配置されている. 各マスの制御は, このリコイルマスに取り付けられたコイルと, 各マスに取り付けられた磁石によるアクチュエータで行われる.

⁴³ LCGT が設置される神岡鉱山内の地面振動レベルは, 3 Hz で $1 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ と測定されている. 一方, LCGT では, 3 Hz では, $3 \times 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の変位雑音レベルが要求されている. 従って, 3×10^{-9} の防振比が要求される.

⁴⁴ 機構的な側面は第 10 章, 第 12 章に詳述.

この低温懸架装置では、懸架点干渉計による能動防振効果も含めて、3 Hz で 10^{-3} の防振比を目標とする⁴⁵。このとき、懸架プラットフォームの変動に対する要求値は、水平方向・鉛直方向共に、 $3 \times 10^{-15} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ (3 Hz) となる。一方、ヒートリンクの振動は、上段低温マスへ直接導入される。この振動は、水平方向・鉛直方向共に、1/100 されてテストマスの光軸方向への振動となるものとする⁴⁶。このとき、3 Hz で $6 \times 10^{-16} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ が上段低温マス光軸方向へ導入される振動への要求値となる。

テストマス懸架最終段

サファイアのテストマスを上段低温マスから懸架する主振り子 (Final Suspension) は、テストマスを自由質点として振舞わせるとともに、地面振動からの防振の働き、鏡で発生した熱の冷却経路としての働き⁴⁷ ももつ。また、懸架装置の熱雑音は、干渉計の感度を直接制限する可能性もあるため、懸架ワイヤーの機械的特性や取り付け方法についても十分考慮する必要がある。これらを満たす懸架ワイヤーとしては、低温 (20 K) で十分な熱伝導率を持ち、1 W の熱を鏡から放熱できること⁴⁸、懸架装置の熱雑音の影響を避けるために十分高い Q 値 (10^8 以上) であり、熱弾性効果が問題にならない程度に低膨張率であること、50 kg のテストマスを支えるのに十分な引っ張り強度を持つこと、テストマスへの巻きつけや接着に問題がないこと、などが要求される。

上記の要求を満たす懸架ワイヤーとしては、円柱形の人工サファイアファイバーが最も有力と考えられている。長さ 500 mm、直径 1.8 mm の円柱形ファイバー 4 本で、16 K の上段マスから 20 K のテストマスを懸架する場合、LCGT の要求値である 1 W の冷却能力を満たすことができる⁴⁹。ただ、この径のファイバーは硬く、直線状のワイヤーを自然に半円形に曲げる事で、直径 30 cm というテストマスを巻いて懸架することはできない。そこで、熱処理によって曲げ整形する、もしくは、テストマスに接合・溶着・接着するための技術開発が必須となる⁵⁰。サファイアファイバーによる振り子の Q 値は、実験結果から、20 K で 1.2×10^8 と見積もられている。また、熱弾性効果の影響も低温では問題無いことから、LCGT の熱雑音に関する要求値は満たされているといえる。

以上のように、サファイアファイバーは有力な候補ではあるが、1.8 mm という太さのファイバーで懸架する場合、ワイヤーの弦共振 (バイオリンモード, Violin mode) が、観測帯域内に多数たつことになる⁵¹。これは、観測や制御に問題を与える事はないと考えられるが、改良案としてヒンジによる懸架法も提案されている。その一つはニオブヒンジであり、幅 10 mm、厚さ 0.5 mm、長さ 10 mm のヒンジで 50 kg のテストマスを支持する事ができる。このとき、0.5 W の熱伝導能力が実現できる。実験では検証されていない

⁴⁵ 3 Hz 辺りの周波数帯では、テストマスの振動は、上段冷却マスに導入される振動の 1/100 程度であるとする (後述)。上段冷却マスが、懸架プラットフォームから、水平方向・鉛直方向ともに共振周波数 0.7 Hz の振り子で懸架されているとすると、単純な計算では、3 Hz では $(0.7/3)^2 = 5 \times 10^{-2}$ の防振比となる。従って、3 Hz で 5×10^{-4} の防振比が得られる事になる。

⁴⁶ 光軸方向の振動は、懸架点干渉計で能動防振され、さらに振り子によって受動防振されるのに対して、鉛直方向の振動は、縦横カップリングによって光軸方向に現れる。光軸方向の振動に関しては、懸架点干渉計で十分に抑圧され、それと垂直な方向の振動に関しては、1%のカップリングでテストマスの光軸方向にもれると仮定して計算。

⁴⁷ 鏡の冷却方法としては、輻射、伝導、対流の 3 つが原理的には考えられる。しかし輻射量は温度の 4 乗に比例し、LCGT での鏡の温度 20 K では輻射による冷却はほとんど期待できない。また、干渉計は高真空中に収められなければならないという要請から、導入されたガスの対流による冷却も実用的ではない。

⁴⁸ サファイア基材の熱吸収 20 ppm/cm、主干渉計への入射レーザー光 100 W、パワーリサイクリングゲイン (PRG) 10 という LCGT のパラメータでは、冷却能力の安全係数 2.8 に対応する。

⁴⁹ 市販品で 500 μm 以上の径のサファイアファイバーを手に入れることは難しいが、設備さえ整えば製作すること自体は可能ということである。また、断面が正方形のサファイア柱では、断面が 2 mm 角、長さ 200 mm の物が現在入手可能である。

⁵⁰ 常温接合 (Surface Activate Bonding)、溶融接合 (Hydroxide-catalysis Bonding)、超音波接合が候補となっている。ただ、これらは、サファイアと金属の接合に成功した段階であったり、サファイア同士の接合の場合には強度が弱かったりなど、開発途上の段階である。

⁵¹ テストマスは十分重いので、振り子として運動するとして差し支えない。ワイヤー弦共振の最低次のモードは 111 Hz にあり、その整数倍 (n_{violin}) の周波数に共振が現れる。これらのモードの Q 値を 6×10^7 とすると、ピークの振幅は、 $1.2 \times 10^{-17} \times n_{\text{violin}}^{-5/2} / \sqrt{\text{Hz}}$ となる。

ものの、計算上は 10^8 以上の Q 値が期待されている。ただ、振り子の共振周波数が高くなるため、防振性能がやや劣る、という欠点がある。一方、サファイアによるヒンジも提案されており、ニオブによるものより防振性能を向上させつつ、5 W 程度の熱伝導能力が期待されている。

懸架点干渉計による能動防振⁵²

LCGT においては、主干渉計のテストマスは、ヒートリンクによって冷却装置と結ばれ、20 K へ冷却される。このヒートリンクは、冷却能力を損ねないように、できるだけ短く、太い伝熱体である必要がある。しかし、そのようなヒートリンクでは、極端な多段化や低周波数化が困難となり、大きな防振比が取りにくくなる。そこで、LCGT では、高い冷却能力と防振能力を両立させる手法として、懸架点干渉計 (Suspension Point Interferometer, SPI) による能動防振を採用している。

懸架点干渉計は、上段冷却マスによって構成された、主干渉計と同じ基線長を持った干渉計のことである。この懸架点干渉計を制御する事によって、各光学素子間の光路長変動が抑えられ、ヒートリンクからの振動は、能動的に抑圧されるのである。この制御による防振効果を、懸架点干渉計の能動防振比と呼ぶ。通常、能動防振装置の性能は、センサーの雑音で制限される。しかし、懸架点干渉計は、主干渉計に匹敵する感度を持ち得るため、センサーの雑音が主干渉計感度に影響を与えないようにすることができる⁵³。

懸架点干渉計による能動防振比は、主振り子の対称性と、懸架点干渉計の制御ゲインで決められる。LCGT の懸架点干渉計では、30 Hz 以下で 10^{-2} (-40 dB) の能動防振性能を実現することを目標値として設計される。主干渉計の主振り子長に非対称性があると、それが能動防振比を制限する。LCGT の主振り子長は 50 cm であり、-40 dB の防振比を得るためには、長さの差は 5 mm 以内でなければならない。また、振り子の非対称性によって生じる、縦振動から横振動へのカップリングは、1% 以内であることが必要となる。能動防振比に直接関係するため、30 Hz 以下で 40 dB 以上のゲインが必要となる。これは、1 kHz 程度の制御帯域を取れば十分実現できる値である。

懸架点干渉計において、散乱雑音・輻射圧雑音や、信号読み取り回路の雑音は、制御ループを介して、上段マスを直接振動させる。この振動は、主振り子による受動防振の効果で除去される事になる。安全係数を 10 とすると、主干渉計よりは 700 倍大きな雑音レベル ($2 \times 10^{-21} 1/\sqrt{\text{Hz}}$, 図 4.10 の SPI sensing noise) が許されており、主干渉計より 5 桁程度小さなレーザー光量でも実現できる値になっている⁵⁴。

上段冷却マス

上段冷却マスは、テストマス同様にサファイアが用いられ、テストマス同様に研磨・鏡面コーティングがされる予定である⁵⁵。このマスの熱雑音は、低温に保たれて低減される上に、主振り子の受動防振効果があるため、主干渉計には影響を与えにくい。よって、必要とされる基材の Q 値は 1×10^2 程度以上と、緩

⁵² 機構的な部分は第 14 章に詳述。

⁵³ この懸架点干渉計は、重力波にも感度を持つため、主干渉計とコインシデンス解析を行う事も期待されている。ただ、そのためには、ここに書かれている要求値よりも高い感度を持つように設定する必要がある。観測周波数を限るなどの設計次第では、主干渉計と同等もしくはそれ以上の感度を持つことも不可能ではなく、将来の観測オプションの一つとして考えられる。

⁵⁴ 懸架点干渉計の腕共振器として、主干渉計と同じフィネスのものをを用い、パワーリサイクリングを行わない場合、光源としては、10 mW の出力パワーがあればよいことになる。ただ、取り扱いの容易さなどを考慮して、2 W 程度の出力をもつレーザー光を用いる事が望ましい。光源としては、主干渉計用のマスターレーザー光源と同等のもの、もしくは、主干渉計用の光を一部ピックアップして用いる事が検討されている。この場合、懸架点干渉計用の光周波数は、主干渉計のものとは一定の周波数だけ離れるように制御されている必要がある。もしくは、YAG レーザーの倍波を用いるなど、周波数が大きく違うものを用いる可能性もある。これは、懸架点干渉計からの散乱光や迷光が主干渉計の雑音源となること、また逆に、主干渉計の大強度の散乱光が懸架点干渉計の誤動作をまねくことを防ぐためである。

⁵⁵ 予算や光吸収、熱伝導性を考慮して、アルミニウム製のマスに鏡を接着した物、基材としてフッ化カルシウム (CaF_2) を用いたものが採用される可能性もある。

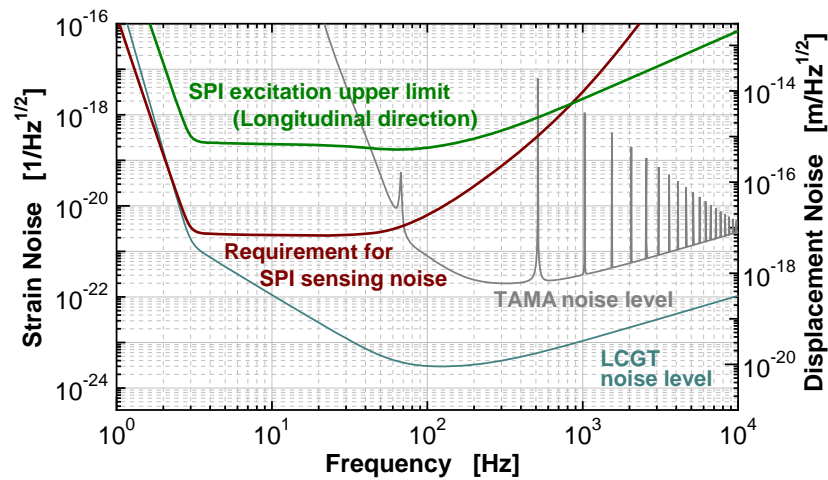


図 4.10: 懸架点干渉計 (SPI), 上段冷却マス振動に対する要求値. LCGT 感度の一桁以下に雑音を抑えるためには, SPI の各雑音は, この上限値以下である必要がある. ヒートリンクや熱雑音など, 上段冷却マスに導入される雑音は, 制御による能動防振の効果で制限が緩和されている.

やかな要求値となる⁵⁶. 上段冷却マスには, 防振系上流からの地面振動と, ヒートリンクからの振動, アクチュエータの雑音や, 懸架点干渉計制御による雑音が混入してくる. これらの雑音に対しては, 主干渉計の感度に影響を与えないための要求値がそれぞれ与えられる (図 4.10). 雑音の混入経路によって主干渉計に与える影響が異なるため, 要求値を示す際には, ヒートリンクや熱雑音など懸架点干渉計に導入される変位雑音と, 前述の散射雑音などの読み取り雑音とは分けて考える必要がある.

ヒートリンクやアクチュエータからの光軸方向の振動, 振り子や鏡の熱雑音などの変位雑音は, 懸架点干渉計によって能動防振 (30 Hz 以下の低周波数帯で -40 dB の防振比) された後, 主振り子による受動防振の効果を受ける⁵⁷. それらの 2 つの防振効果と, 安全係数 10 を仮定して計算した結果, 上段マスに導入される外乱に対する要求値は図 4.10 の上部の曲線となる. 具体的には, 3 Hz で $6 \times 10^{-16} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という変位雑音値になる. 一方, 光軸と垂直な方向の変位雑音に対しては, 違った要求値が与えられる. 水平面内で光軸と垂直な方向の変動は, 振り子の受動防振効果と, 1/100 という光軸方向へのカップリング効果を受け, 結局, 数十 Hz 以下の周波数帯では, 光軸方向に対する要求値と同じ値となる. 一方, 鉛直方向に関しては, 主振り子の縦方向への共振周波数が水平方向とは違った値であるために, 受動防振効果が違ってくる. 縦横カップリングを 1% としていることから, 3 Hz で $3 \times 10^{-17} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ (安全係数 10) という変位雑音値になる.

懸架プラットフォーム・受動ダンピング

上段マスは, 低温部にある懸架プラットフォームより 4 本のワイヤーで懸架される. 各ワイヤーの懸架点には, 縦防振のための小型の GAS フィルター (Mini-GAS フィルター) が用いられている⁵⁸. この共振周波数は 0.7 Hz 付近に設定されており, 縦方向に対して, 水平方向と同等の防振比を持つことになる. 低温

⁵⁶ 主干渉計感度に影響を与えないためには, 変位雑音は 3 Hz で, $6 \times 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下である必要がある. これは, テストマスより Q 値が 6 桁悪い値に相当する.

⁵⁷ 計算では, 能動防振効果は最善で -40 dB とし, 数十 Hz 以上の周波数は制御ゲインで制限される. 図 4.10 では, 制御帯域は 1 kHz とし, $f^{-3/2}$ でゲインが変化するループを仮定している. 主振り子による受動防振効果は, $(0.7/f)^2$ の防振比として計算されている. 安全係数 10 を仮定すると, 10 Hz では, LCGT 感度より 2000 倍大きい値が要求値となる.

⁵⁸ この小型 GAS フィルターは, 低温中, もしくは温度勾配のある中で用いられる可能性があるため, 材質や共振周波数の調整法には十分な配慮を払う必要がある.

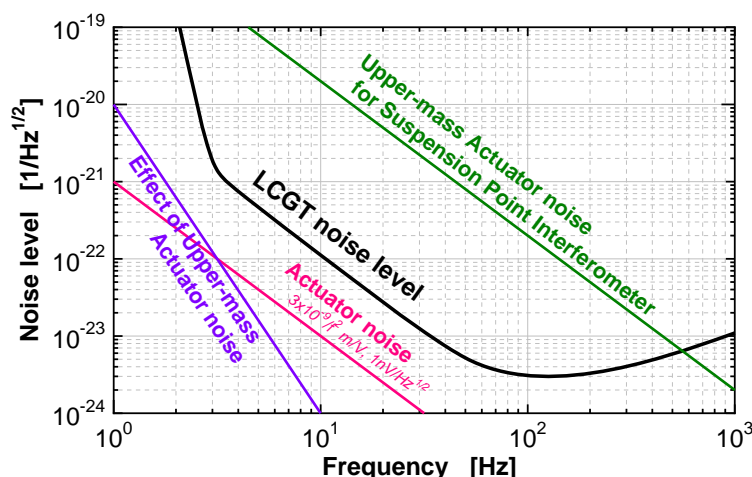


図 4.11: テストマス用のコイル・マグネット・アクチュエータの雑音の影響．上段のアクチュエータの影響は，懸架振り子によって防振されるとともに，懸架点干渉計によって抑えられる．

部の懸架プラットフォームは約 16 K に保たれ，常温の低周波防振装置 (300 K) から 1 本のワイヤー (長さは 1 m 程度) で懸架される．この部分は，低温マスへの熱流入を抑えるために低熱伝導である必要があり，また，温度差による振動励起の少ないものが望ましい．現在のところ，有力なワイヤー候補は見つっていないが，擬弾性ワイヤー，超弾性ワイヤー，制振合金 M2052 ワイヤーが候補として考えられている．

一方，懸架プラットフォームの周囲には，永久磁石が配置され，渦電流 (Eddy current) による受動ダンピングが行われている．これらの磁石は，上段の常温部防振系からワイヤーまたは細いロッドで支持されており，余分な地面振動を導入しないようになっている．この懸架部分も，低熱伝導である必要がある．

リコイルマス・アクチュエーター

主干渉計・懸架点干渉計の光路長制御，姿勢制御や初期アラインメントには，マスに取り付けられた磁石と，その周囲に配置されたコイルによるアクチュエータで行われる⁵⁹．コイルの振動は，信号の DC 成分やアクチュエータの非線形性とカップルして干渉計の雑音となり得る．そこで，これらのコイルは鏡付近のリコイルマスに取り付けられ，防振される．リコイルマスは，アクチュエータの制御応答を単純化する役割も持っている．このアクチュエータは直接テストマスを動かす部分であるため，磁石取り付けによる熱雑音の増加，アクチュエータの電気雑音には十分注意する必要がある．アクチュエータ用の磁石は，鏡面と反対側の面に取り付けられるため，取り付けによる機械的損失は，干渉計感度に影響を与えにくい．しかし，極端に大きな散逸を導入する取り付け法や磁石は避けなくてはならない．

干渉計感度に影響を与えないためには，テストマス用のコイル・マグネット・アクチュエータの雑音は，安全係数を 10 として，10 Hz で $1 \times 10^{-23} \text{ 1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下 (変位雑音で $3 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下) である必要がある (図 4.11)．一方，腕共振器を動作点に保つためには，アクチュエータは最低でも $1 \mu\text{m}$ 程度の可動範囲を持っている必要がある (後述)．このダイナミックレンジを実現するのは容易ではなく⁶⁰，コイルドライバに高電圧電源を利用したり，アクチュエータに周波数特性を持たせる，懸架振り子の共振周波数を下げ

⁵⁹ コイルは低温中に置かれることになる．このコイルには制御用に AC 成分を含む電流が流れる事から，超伝導コイルは用いる事は出来ないと考えられる．そのため，コイルによる発熱が問題にならないように磁石の形状やコイルの抵抗値，コイルの冷却には十分に配慮して設計する必要がある．

⁶⁰ コイルドライバの雑音が $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるとする，アクチュエータ効率は， $3 \times 10^{-9}/f^2 \text{ m/V}$ となる．コイルドライバの最大出力を 10 V，懸架振り子の共振周波数を 0.7 Hz とすると， $6 \times 10^{-8} \text{ m}$ の可動範囲しか持たないことになる．従って， $1 \mu\text{m}$ の可動範囲を持たせるためには，アクチュエータに周波数特性を持たせる，高電圧回路を使用するなど，何らかの工夫が必要となる．

る、多数のアクチュエータを並列化してダイナミックレンジを稼ぐ、などの工夫が必要となる。また、このアクチュエータのダイナミックレンジの制限から、非制御時のテストマスの変動は $1\mu\text{m}$ 以内、という要求値が与えられる⁶¹。

一方、上段冷却マスにも懸架点干渉計用のアクチュエータが取り付けられる。このアクチュエータの雑音は、振り子による防振の効果を受けた後、テストマスを振動させることになる。ただ、この雑音の影響は懸架点干渉計によって抑え込まれるため、その分、要求値は緩和される。上段冷却マスへの変位雑音に対する前述の要求値 (3Hz で $6 \times 10^{-16} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下) から、上段冷却マス用のアクチュエータ効率は、テストマス用のものの 2×10^3 倍以内でなければならない、という要求値となる (図 4.11)⁶²。このとき、コイルドライバ最大出力を 10V 、雑音レベルを $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ とすると、可動範囲は約 $100\mu\text{m}$ に対応する。

初期アラインメント

主干渉計と懸架点干渉計の初期アラインメントはそれぞれのアクチュエータに直流信号を加える事で実現できる。この際、上段低温マスからテストマスが平行に懸架されていない場合には、懸架点干渉計のアラインメントを取った時に主干渉計のアラインメントが取れない、という問題が生じ得る。そこで、主干渉計のアラインメント用に、並進用のアクチュエータより 100 倍大きい効率を持ったものを用いて調整を行う。この強力なアクチュエータの雑音は、コイルを直列につなぐ事によって、並進方向にもれにくいように設計されている。このとき、1%程度が並進方向にもれるとすると、雑音の影響が問題にならないためには、可動範囲は 10^{-3}rad 程度以下に制限される⁶³。従って、上段低温マスからテストマスを懸架する際の平行度は、 10^{-3}rad 以下である必要がある。

また、懸架点干渉計を動作点に制御した状態では、主干渉計の光路長方向への変動は、レーザー光源へのフィードバックだけでなく、主干渉計の光学素子に取り付けられたアクチュエータで抑え込む必要がある。光路長方向についての干渉計動作点は、用いている光 (波長 1064nm) の半波長毎に存在し、この精度で懸架を行う事は不可能であることから、主干渉計光学素子に取り付けられたアクチュエータは、最低でも $1\mu\text{m}$ 程度の可動範囲を持っている必要がある。

4.2.2 常温防振部

LCGT の目標感度を実現するためには、低温懸架装置による防振だけでは不十分である。そこで、常温部にも防振装置を組み込み、地面振動を減衰させる。この常温防振系での防振比としては、 3×10^{-6} (-130dB) が要求されている。また、観測周波数帯の防振だけでなく、低周波数帯での RMS 振動が小さい事が干渉計の安定動作や、確実なロックアクイジション、無理のない制御系設計に不可欠である。そこで、LCGT では懸架プラットフォームの変動量が $1 \times 10^{-7} \text{m}_{\text{RMS}}$ を目標とする。

常温防振部分は、倒立振り子と、鉛直方向の防振装置である GAS (Geometric Anti-Spring) フィルター 3 段 (それぞれ、フィルター 0, 1, 2 と呼ばれる) で構成され、真空槽内に収められる。⁶⁴倒立振り子は、約 30mHz の共振周波数を持ち、低周波数からの水平方向防振を担う。3 本の脚からなる倒立振り子の先端には、ワイヤーで支持されたフィルター 0 が取り付けられる。倒立振り子の高さは約 2m であり、比較的小型ながら十分な防振性能が実現されている。GAS フィルターは、機械系の反バネ力を利用して低共振周波数化した縦防振装置であり、縦方向の共振周波数は約 200mHz に設計される。フィルター 1, 2 のそれぞれ

また、懸架点干渉計に入射される光の周波数を変えることによって、ダイナミックレンジを稼ぐことも考えられる。ただし、そのためには、懸架点干渉計の両腕共振器に入射する光周波数を独立に変えることができない。また、そのためには、懸架点干渉計の両腕共振器に入射する光周波数を独立に変えることができない。

⁶¹ 実際は、干渉計のロック・アクイジションといった、他の観点からもっと厳しい要求値が与えられる。

⁶² ただ、懸架点干渉計による重力波観測を考慮すると、より低雑音のアクチュエータが望ましい。

⁶³ 振り子の角度方向 (Yaw 方向, Pitch 方向) での共振周波数は 0.3Hz 、最大駆動電圧は $\pm 10\text{V}$ 、安全係数 10 として求められた。

⁶⁴ 常温防振部の機構的側面は第 13 章に詳述。

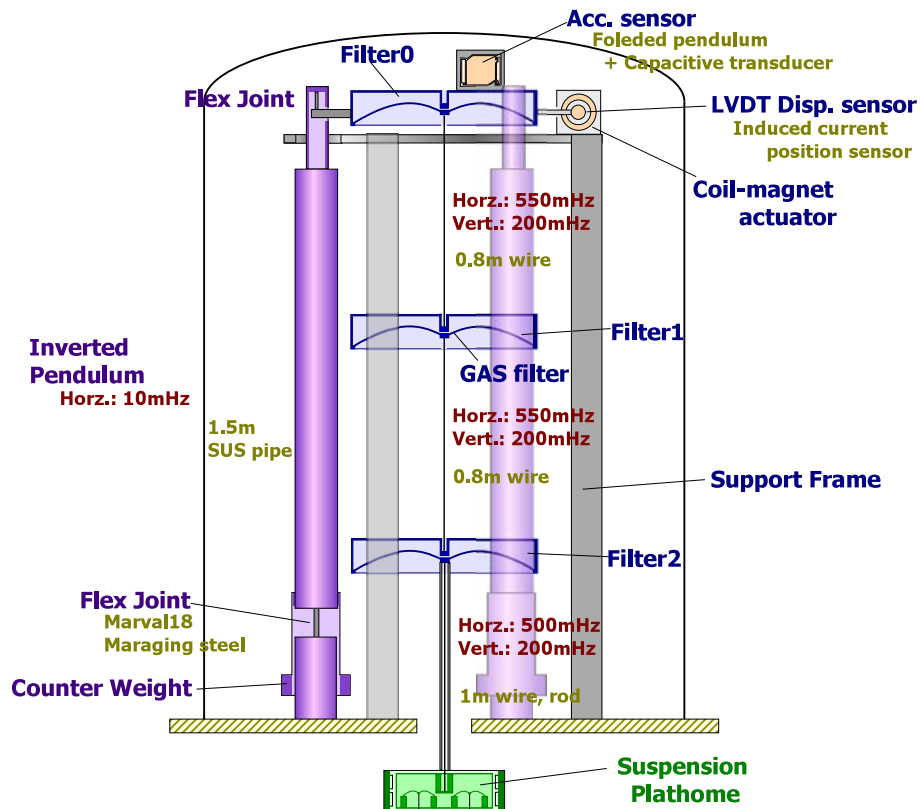


図 4.12: テストマス支持装置の常温防振装置部分．常温防振部分は，倒立振り子と，鉛直方向の防振装置である GAS (Geometric Anti-Spring) フィルター 3 段 (それぞれ，フィルター 0, 1, 2 と呼ばれる) で構成され，真空槽内に収められる．3 本の脚からなる倒立振り子の先端には，ワイヤーで支持された GAS フィルター (フィルター 0) が取り付けられる．フィルター 1, 2 のそれぞれは，約 80 cm のワイヤーで懸架されている．フィルター 0 には，加速度計・変位計と，コイル・マグネットアクチュエータが取り付けられ，機械系の共振のダンピングや，初期アラインメントの用途に用いられる．倒立振り子先端，フィルター 0 の周囲には，補助枠が設置され，変位計やアクチュエータの一部が取り付けられると共に，防振・懸架が倒れないための安全枠の働きも果たす．

は，約 80 cm のワイヤーで懸架され (共振周波数 0.55 Hz)，水平方向の防振も実現されている．フィルター 0 には，加速度計・変位計と，コイル・マグネットアクチュエータが取り付けられ，機械系の共振のダンピングや，初期アラインメントの用途に用いられる．倒立振り子先端 (フィルター 0 の周囲) には，補助枠が設置され，変位計やアクチュエータの一部が取り付けられると共に，防振・懸架が倒れないための安全枠の働きも果たす．

このシステムで，地面から低温部の懸架プラットフォームまでの 3 Hz における防振比は水平方向については，4 段で約-160 dB，鉛直方向に対しては，3 段で約-140 dB となり，要求値を満たす設計になっている．また，LCGT の設置される神岡鉱山内では，0.1 Hz 以上の地面振動の RMS 振幅は， $1 \mu\text{m}$ 程度と見積もられている．この防振装置では，その値を $1/10$ にした， $1 \times 10^{-7} \text{ m}_{\text{RMS}}$ が実現されることになる．

倒立振り子

倒立振り子は，細い棒状のパネ (フレックス・ジョイント, Flex Joint) を用いて鉛直方向に立てられた棒と，その先端の荷重によって構成される．パネによる復元力と，先端の荷重にかかる重力による反パネ

力をほぼ等しくする事によって、100 mHz 以下の低共振周波数を実現することができる⁶⁵。

LCGT では、倒立振り子 3 本が初段の防振装置となる。直径数 cm のジョイントによって、長さ 1.5 m 程度のステンレス製円筒でできた倒立振り子が支持されている。この円筒部分の内部共振は、アクティブダンピング系の設計時に問題とならないよう、60 Hz 以上の高周波数になるように設計される。ジョイントのバネ材としては、高い弾性力と強度を持つマレージン鋼 (Marval 18 maraging steel) が用いられる。共振周波数は、荷重に対して敏感に変化するため、倒立振り子先端から懸架されているものの総重量を正確に見積もってバネ力を設計する必要がある。倒立振り子の回転中心位置とジョイント位置がずれている事による防振効果の劣化⁶⁶の影響を低減するために、倒立振り子下部にはカウンターウェイト (Counter Weight) が取り付けられている。設計では、共振周波数 30 mHz、防振限界 (プラトー・レベル, Plateau Level) の設計目標値を -70 dB とする。このとき、約 1 Hz で防振比はプラトー・レベルに達する。この倒立振り子によって、3 Hz で -70 dB の水平防振比が期待できる。また、0.1 Hz 以上の積分値で、テストマスの RMS 振動を 1/100 にすることができる。

GAS フィルター

LCGT では、鉛直方向の防振装置としては、GAS (Geometric Anti-Spring) フィルターが用いられる。これは、図に描かれているような弧状に変形させた板バネに、横方向から圧縮力を加える事で、縦方向の反バネ力を実現するものである。低共振周波数化のためのアクティブ制御や、磁石による反バネ力を利用した物に比べてシンプルで、高い安定性を持つことが期待されている。

LCGT では、この GAS フィルターを 3 段用いる。初段 (フィルター 0) は、3 本の倒立振り子の先端から懸架される。そこから、それぞれ 1 本のワイヤーで、二段目 (フィルター 1)、三段目 (フィルター 2) が懸架される。1 つの GAS フィルターは、直径約 50 cm、高さ約 15 cm 程度と比較的小型なものとなっている。フィルターを構成する板バネと、その間を結ぶワイヤーは、十分な強度を持つマレージン鋼 (Marval 18 maraging steel) で作られている。フィルターの回転と水平方向の変動のカップリングの影響を抑えるため、ワイヤーはフィルターの重心近くで固定するように設計されている。各 GAS フィルターの鉛直方向の共振周波数は、200 mHz に調整されており、低周波数からの防振が実現されている。ただし、フィルターの縦防振性能は、板バネ自身の質量による影響で、-60 dB で限界となる。これは、約 6 Hz でプラトー・レベルに達することに対応している。

3 Hz での鉛直方向防振比は、1 段あたりで -47 dB となり、3 段で合計 -141 dB の防振比が実現される。一方、フィルター間を結ぶワイヤー長は約 80 cm と設計されており、水平方向の共振周波数は約 0.55 Hz となる。このとき、水平方向の防振比は各段で -29.5 dB となる。また、フィルター 2 と低温部の懸架プラットフォームは約 1 m のワイヤーで結ばれており、この段での水平防振比は -31 dB となる。従って、フィルター 0 から懸架プラットフォームまでの防振比は、水平方向については、3 段で約 -90 dB、鉛直方向に対しては、3 段で約 -140 dB となる。

センサー・アクチュエータ

LCGT の防振系は、多段振り子で構成されており、多数の振り子共振を持っている。これらの共振は、その周波数付近での干渉計安定動作を妨げる可能性があるため、ダンブされなくてはならない。LCGT の常温防振部では、加速度計・変位計とコイルマグネット・アクチュエータを用いた能動ダンピングが用いられる予定である⁶⁷。

⁶⁵ プロトタイプ実験では、10 mHz 程度の低共振周波数も実現されている。ただ、荷重の変化やフレックス・ジョイントのバネ定数のドリフトの影響で性能が低下し易くなるため、やや余裕を持った設計にする事が望ましい。

⁶⁶ 物理的には、Center of Percussion Effect と関係しており、防振比の限界は、倒立振り子部の回転中心とジョイントの幾何的位置関係のみで決まる。カウンターウェイトがない場合には、倒立振り子の回転中心はジョイント位置からは大きくずれている。一方、カウンターウェイトの荷重を調整することで、回転中心とジョイント位置を一致させる事ができる。

⁶⁷ この構成では、ダンピングだけでなく、さらに制御を強くして能動防振を行うことも可能である。これによって、低周波数帯で

センサーとしては、加速度計と、LVDT (Linear Variable Differential Transducer) と呼ばれる変位計が用いられ、倒立振り子先端のフィルター 0 上部に取り付けられる。加速度計は、ベリリウム銅合金 (Beryllium-copper) 材を切り抜くことで一体成型されたフォールド振子 (Folded pendulum) と、変動を読み取るための静電型トランスデューサ (Capacitive transducer) から成っている。加速度計の共振周波数は 500 mHz で、その周波数帯で $10^{-9} \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ という高い感度を持つ。一方、LVDT 変位センサは、フィルター 0 に取り付けられた第一コイルと、倒立振り子周りにある補助枠に取り付けられた第二コイルから成っている。第一コイルに変調された電流を流し、その変化を第二コイルで読み取ることで、コイル間の相対変位を読み取っている。コイルの形状や配置を工夫する事で 20 mm という広い線形領域と、約 $10^{-8} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という感度が実現されている。懸架系の共振のダンピングのためには、感度の高い加速度計が用いられ、倒立振り子の低周波数の位置制御の用途には、DC に感度をもつ LVDT が用いられる。

制御信号のフィードバックには、フィルター 0 に取り付けられたコイルと、補助枠に取り付けられた永久磁石からなるアクチュエータが用いられる。永久磁石の形状を工夫する事で、20 mm 以上の広い線形動作領域が確保されている。センサー、アクチュエータはそれぞれ 3 組が設置されており、水平方向 2 次元と、水平面内回転の合計 3 自由度の制御が行われる。また、GAS フィルターでは、板バネの弾性変化により動作点が変動する。鉛直方向の動作点の温度依存性は 1 mm/K と見積もられており、適切な温度制御や、DC での動作点制御が必要となる。これは、GAS フィルターに適切なアクチュエータを取り付ける事によって解決される。

また、倒立振り子上部には、ステッピングモーターも設置されており、水平方向の初期アライメントに用いられる。また、フィルター 1 の懸架点にモーターが設置され、水平回転方向 (Yaw 方向) の粗調整ができるようになっている。

安定性・ローカル制御

干渉計が安定に動作するためには、主干渉計非制御時の鏡の変動がより小さいことが望ましい。また、干渉計が正しい動作点で動作するためには、非制御状態から制御状態に引き込む (ロック・アクイジション) 必要がある。この際、動作点周りの狭い範囲でしか正しい制御信号が得られないため、外乱が大きい場合には制御点に引き込めない恐れがある。それらの理由により、LCGT では非制御時変動の RMS 振動として、0.1 Hz 以上の積分値で $0.1 \mu\text{m}_{\text{rms}}$ を要求値とする⁶⁸。鏡の RMS 変動は、主に地面振動の低周波数成分と支持装置の共振によって占められるため、この値を満たすためには、低周波数防振装置と共振のダンピングが不可欠となる。低周波数の防振は主に、共振周波数 30 mHz の倒立振り子によって行われ、ダンピングは、倒立振り子先端の能動制御と、懸架プラットフォームでの受動ダンピングによって実現されている。

の RMS 振幅をさらに抑圧することも検討されている。その一方では、永久磁石による受動ダンピングも検討されている。受動ダンピング化することによって、常温防振部の構成が大幅に簡略化され、安定度が増すことが期待されている。ただ、この場合は、能動制御による防振比の向上は期待できない。

⁶⁸ ロック・アクイジションが容易にできる目安として、鏡が、光子の滞在時間の間は共振幅内にあるとしたときの値を用いて考える。腕共振器の共振幅は、 $\lambda/2F = 4.3 \times 10^{-10} \text{ m}$ 、また光子の共振器内での平均滞在時間は、 $2LF/\pi c = 8 \times 10^{-3} \text{ sec}$ となる。従って、少なくとも光子の滞在時間の間は共振幅内にあるとすると、非制御時の鏡の変動速度は、 $5 \times 10^{-8} \text{ m/sec}_{\text{rms}}$ 以下である必要がある。鏡の変動の RMS 値が、主に低周波数成分 (0.1 Hz) で占められているとすると、この速度は $9 \times 10^{-8} \text{ m}_{\text{rms}}$ 以下の変位変動に相当する。

4.3 干渉計制御

4.3.1 主干渉計光路長制御

LCGT では主干渉計として RSE 方式を採用している。この干渉計で高い感度での観測を行うためには、(1) 両腕共振器が入射レーザー光に対して共振している。(2) 干渉縞が、重力波信号検出ポートで暗縞 (Dark fringe) である。(3) 入射レーザー光が、パワーリサイクリング共振器 (Power Recycling Cavity, PRC) で共振する。(4) 腕共振器内で生じた信号が、シグナル・エクストラクション共振器 (Signal Extraction Cavity, SEC) で共振。という条件を満たしている必要がある⁶⁹という動作条件を満たしている必要がある。干渉計は地面振動などの外乱の影響を受けるため、その動作点を保つためには光路長方向の制御をする必要がある。上に挙げた動作条件を保つためには、5 自由度の光路長制御 — 両腕共振器長の差動変動と同相変動 ($\delta L_{-}, \delta L_{+}$), PRM から 2 本の腕共振器までの差動変動と同相変動 ($\delta l_{-}, \delta l_{+}$), さらに 2 本の腕共振器から SEM までの平均距離の変動 (δl_s) — を行う必要がある。

この制御を行うための 5 つの信号は、2 つの変調を用いて得られる。入射レーザー光には、15 MHz の位相変調と、50 MHz のシングル・サイドバンドが付加されている。これらの変調成分は、ともに腕共振器とは共振しないように周波数が選ばれている。また、PRC の共振器長は 15 MHz の変調成分が共振するように、SEC の長さは、50 MHz の変調成分が PRC-SEC の結合共振器と共振するように選ばれている。

アクチュエーター

テストマス位置制御は、テストマスに磁石を取り付け、その近くに配置されたコイルに電流を流す事で行う。このアクチュエータは直接テストマスを動かす部分であるため、その雑音には十分注意する必要がある。アクチュエータ用の磁石は、鏡面と反対側の面に取り付けられるため、取り付けによる機械的損失のは、感度に影響を与えにくい。しかし、極端に大きな散逸を導入する取り付け方や磁石は避けなくてはならない。

干渉計感度に影響を与えないためには、テストマス用のコイル・マグネット・アクチュエータの雑音は、安全係数を 10 として、10 Hz で $1 \times 10^{-23} \text{ 1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下 (変位雑音で $3 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下) である必要がある (図 4.11)。一方、腕共振器を動作点に保つためには、アクチュエータは最低でも $1 \mu\text{m}$ 程度の可動範囲を持っている必要がある⁷⁰。このダイナミックレンジを実現するのは容易ではなく⁷¹、コイルドライバに高電圧電源を利用したり、アクチュエータに周波数特性を持たせる、懸架振り子の共振周波数を下げる、多数のアクチュエータを並列化してダイナミックレンジを稼ぐ、などの工夫が必要となる。また、このアクチュエータのダイナミックレンジの制限から、非制御時のテストマスの変動は $1 \mu\text{m}$ 以内、という要求値が与えられる。

一方、上段冷却マスにも懸架点干渉計用のアクチュエータが取り付けられる。このアクチュエータの雑音は、振り子による防振の効果を受けた後、テストマスを振動させることになる。ただ、この雑音の影響は懸架点干渉計によって抑え込まれるため、その分、要求値は緩和される。上段冷却マスからのテストマス懸架振り子の共振周波数を 0.7 Hz、懸架点干渉計の抑圧比を -40dB、3 Hz で干渉計感度の一桁以下に雑音レベルがあるように設定すると、上段冷却マス用のアクチュエータ効率、テストマス用のものの 2×10^3

⁶⁹ 腕共振器が無い PRC と SEC のみを考えた場合、キャリア光に対して、PRC はに反共振、SEC は共振、という条件に対応する。

⁷⁰ 使用するレーザーの波長が $1.064 \mu\text{m}$ であり、動作点は半波長毎に存在する。懸架点干渉計を動作点に保つために、上段冷却マスより上段にフィードバックすることは出来ない。

⁷¹ コイルドライバの雑音が $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるとすると、アクチュエータ効率は、 $3 \times 10^{-9}/f^2 \text{ m/V}$ となる。コイルドライバの最大出力を 10 V、懸架振り子の共振周波数を 0.7 Hz とすると、 $6 \times 10^{-8} \text{ m}$ の可動範囲しか持たないことになる。従って、 $1 \mu\text{m}$ の可動範囲を持たせるためには、何らかの工夫が必要となる。

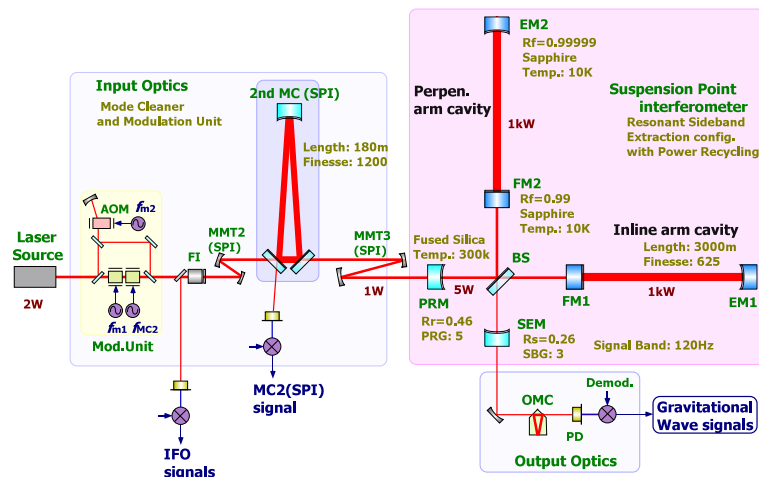


図 4.13: 懸架点干渉計光学系概要図。レーザー光源としては、出力 2 W の Nd:YAG レーザーが用いられている。光源からの光はモードクリーナーを透過した後、懸架点干渉計に導かれる。MC は主干渉計用第二 MC の上段共振器 (基線長 180 m) を持ちいる。懸架点干渉計は主干渉計同様に、基線長 3000 m の腕共振器を持っており、パワーリサイクリング (PR) と、レゾナント・サイドバンド・エクストラクション (RSE) の技術が用いられている。

倍以内でなければならない、という比較的緩やかな要求となる。ただ、懸架点干渉計による重力波観測を考慮すると、より低雑音のアクチュエータが望ましいため、テストマス用のものより 2×10^2 倍強いアクチュエータを設計値とする (図 4.11)⁷²。

4.3.2 懸架点干渉計の役割

LCGT では、主干渉計を構成テストマスは上段冷却マスからサファイアファイバー (主振り子) によって懸架される。この上段冷却マスによって、主干渉計と同じ基線長を持った干渉計を構成したものは懸架点干渉計 (Suspension Point Interferometer, SPI) と呼ばれる (図 4.13)。この干渉計は、テストマス冷却用のヒートリンクを経由して導入される振動を抑える能動防振系として用いられる。通常、能動防振装置の性能は、センサーの雑音で制限される。しかし、懸架点干渉計は、主干渉計に匹敵する感度を持ち得るため、センサーの雑音が主干渉計感度に影響を与えないようにすることができるのである。また、アクチュエータの雑音など、ヒートリンクからのもの以外の振動も、懸架点干渉計によって抑圧されるため、主干渉計のロック・アクイジションや動作の安定度向上にも役立つと考えられる。さらに、懸架点干渉計は重力波に対する感度を持つことから、この干渉計を用いた観測や解析による効果も期待されている。

懸架点干渉計用のレーザー光としては、主干渉計用とは別の低出力 (2 W 程度) の光源を用い⁷³、主干渉計用のものとは一定の周波数だけ離れるように制御を行う⁷⁴。これは、散乱光や迷光が主干渉計に混入して雑音となるのを防ぐためである。発熱の影響が問題にならないように、懸架点干渉計用の光強度は、

⁷² コイルドライバ最大出力を 10 V、雑音レベルを $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ とすると、可動範囲は約 $10 \mu\text{m}$ に対応する。

⁷³ 主光源のマスターレーザーと同等のものでよい。別光源を用いるのは懸架点干渉計の独立性を高めるためである。干渉計の安定度を高め、ロック・アクイジションを容易にするためには、主干渉計の動作状況に関係なく懸架点干渉計が動作する事が望ましい。また、懸架点干渉計と主干渉計の同時観測を行う際には 2 つの干渉計が、より独立である方が望ましい。ただ、別光源を準備する手間を省くため、主干渉計用の光を分けて周波数シフトさせる方法も考え得る。光源や入射光学系をどの程度まで独立に準備するのは、懸架点干渉計にどこまで望むか、どこまで独立にするべきかと言った判断で、決められる事になる。

⁷⁴ もしくは、YAG レーザーの倍波を用いるなど、大きく周波数の違う光を用いる。

主干渉計のものより小さくされている。光源からの光は、第二 MC 上段の干渉計を透過した後、懸架点干渉計用のモードマッチング・テレスコープ (MMT) に通して懸架点干渉計に導かれる⁷⁵。干渉計制御用の変調はこの MC 前に掛けられる。懸架点干渉計は、基本的には主干渉計と同じ方式 (PR, RSE が組み込まれた FPMT 方式) とし、主干渉計とほぼ同等な制御系を用いて動作点に保たれる。これによって、腕共振器だけでなく、主干渉計では制御帯域を広げることが難しい $\delta l_-, \delta l_+, \delta l_s$ の自由度の変動も抑え込む。また、光路長制御だけでなく、アライメント制御も組み込み、鏡の角度方向への変動も制御によって抑える。ただ、動作の安定度を高めるために、腕共振器のフィネスや PRG, SBG といった干渉計パラメータは主干渉計のものとは違った値を取るようにする。

ヒートリンク等からの防振の効果のみを考慮した時の懸架点干渉計に対する要求値は、比較的緩やかなものとなる。しかし、原理的に重力波に感度を持つという利点を最大限に生かすためには、外乱は懸架点干渉計に導入される前にできる限り除去されている事が望ましい。ただ、懸架点干渉計は、主干渉計動作の安定度を保つという役割も持っているため、デザインに際しては、感度と安定度を両立できる適当なパラメータを選択することになる。

懸架点干渉計による能動防振

主干渉計の光学素子を懸架している上段マスで懸架点干渉計を構成し、制御をかけることで、主干渉計の各光学素子間の光路長変動が抑えられる。この制御による防振効果を、懸架点干渉計の能動防振比と呼ぶ。

懸架点干渉計による能動防振比は、主振り子の対称性と、懸架点干渉計の制御ゲインで決められる。LCGT の懸架点干渉計では、100 Hz 以下で 40 dB の能動防振性能を実現することを目標値として設計される。主振り子長に非対称性があると、それが能動防振比を制限する。LCGT の主振り子長は 50 cm であり、40 dB の防振比を得るためには、長さの差は 5 mm 以内でなければならない。また、振り子の非対称性によって生じる、縦振動から横振動へのカップリングは、1% 以内であることが必要となる。能動防振比に直接関係するため、100 Hz 以下で 40 dB 以上のゲインが必要となる。これは、1 kHz 程度の制御帯域を取れば十分実現できる値である。

懸架点干渉計に対する要求値

主干渉計の感度に影響を与えないための、懸架点干渉計に対する要求値は、比較的緩やかなものとなっている (図 4.10)。雑音の混入経路によって主干渉計に与える影響が異なるため、要求値を示す際には、ヒートリンクや熱雑音など懸架点干渉計に導入される変位雑音と、散乱雑音などの読み取り雑音とは分けて考える必要がある。

ヒートリンクやアクチュエータからの振動、振り子や鏡の熱雑音などの変位雑音は、懸架点干渉計によって能動防振 (数十 Hz 以下の低周波数帯で 40 dB の防振比) された後、主振り子による受動防振の効果を受ける⁷⁶。それらの 2 つの防振効果と、安全係数 10 を仮定して計算した結果、上段マスに導入される外乱に対する要求値は図 4.10 の上部の曲線となる。具体的には、3 Hz で $2 \times 10^{-19} 1/\sqrt{\text{Hz}}$ (変位に換算する

⁷⁵ 光源の雑音レベルによっては、第一 MC にも上段干渉計を必要とする可能性もある。また、主干渉計用の光を分けて周波数シフトさせる場合には、どこで光を分けるかによって、いくつかのオプションが考えられる。それらを以下に挙げておく。(1) 第一 MC 後に分けて、第二 MC の上段干渉計に入射。(2) 第一 MC 後に分けて、周波数シフト・変調をかけ、偏光を 90 度回転させてから、元の光に重ねる。第二 MC と MMT を透過後、偏光ビームスプリッターで光を分けて、懸架点干渉計に入射。(3) 第二 MC 透過後に光を分けて、懸架点干渉計に入射。適切なレンズ系でビーム径を一旦絞ってから変調などをかける必要がある。(4) 第一 MC 前に光を分け、第一、第二 MC の上段干渉計を透過させる。その出射光を、懸架点干渉計に入射。変調や、MMT は主干渉計とは独立なものを用いる。

⁷⁶ 能動防振効果は、最大で 40 dB とし、数十 Hz 以上の周波数は制御ゲインで制限される。図 4.10 では、制御帯域は 1 kHz とし、 $f^{-3/2}$ でゲインが変化するループを仮定している。主振り子による受動防振効果は、 $(0.7/f)^2$ の防振比として計算されている。安全係数 10 を仮定すると、10 Hz では、LCGT 感度より 2000 倍大きい値が要求値となる。

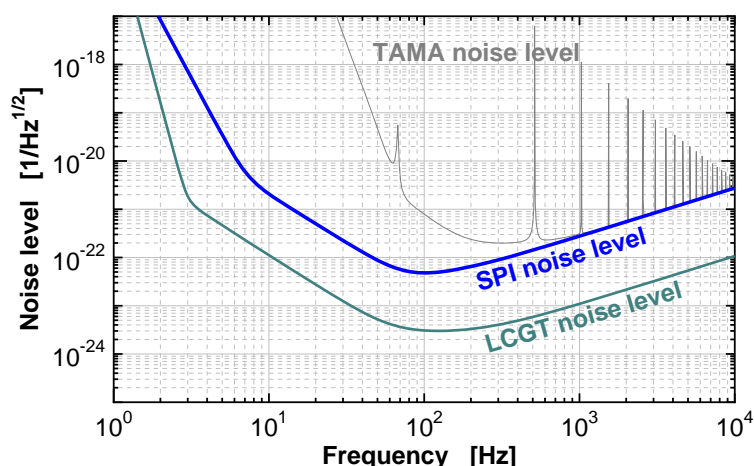


図 4.14: 懸架点干渉計 (SPI) の重力波に対する感度。主干渉計よりほぼ 20 倍大きな雑音レベルとなっている。1 kHz 以上の高周波数帯では TAMA と同等の感度を持つことになる。

と $6 \times 10^{-16} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ という値になる。主振子において、光軸と垂直な方向から光軸方向への振動の混入が 1% であるとしていることから、これらの方向の外乱に対する要求値も、数十 Hz 以下では光軸方向と同じ値になる。

一方、散乱雑音・輻射圧雑音や、信号読み取り回路の雑音は、制御ループを介して、上段マスを直接振動させる。従って、主振子による受動防振の効果のみしか期待できず、ヒートリンク等からの外乱よりは厳しい要求値となる (図 4.10 の左中央辺りの曲線)。ただ、主干渉計よりは 700 倍大きな雑音レベル ($2 \times 10^{-21} \text{ 1}/\sqrt{\text{Hz}}$) が許されており、主干渉計より 5 桁程度小さなレーザー光量でも実現できる値になっている。

懸架点干渉計のパラメータと感度

懸架点干渉計は、重力波観測のためにできるだけ高い感度を持つこと、主干渉計の高感度・安定動作のための補助干渉計となること、という 2 つの役割を持つ。この 2 つをできるだけ両立する干渉計パラメータとして、補助干渉計が、主干渉計より約 20 倍大きな雑音レベルを持つものとして、設計を行う。その結果、得られる感度曲線を図 4.14 に示す。また、図 4.15 では、この感度を制限する雑音や原理的な雑音を示されている。この時の各雑音の影響を示す。主干渉計に影響を与えないための懸架点干渉計に対する要求値も併せて描かれており、これらの各雑音の影響が要求値を満たしている事が図より分かる。

まず、懸架点干渉計における原理的な雑音を考える。補助干渉計への入射光量は 1 W とする。光学パラメータは、主干渉計よりも安定に制御できるように低めの値に設定し、腕共振器のフィネスが 625、PRG は 5、SBG は 3 とする。この時、干渉計内光強度は 2 kW (主干渉計の 1/400)、信号帯域幅は 120 Hz (主干渉計の 0.6 倍) となる。一方、熱雑音に関しては、温度 10 K、鏡の Q 値 10^7 、振子の Q 値 2×10^7 とした。これらの Q 値は、主干渉計の 1/10 の値となっている。鏡の基材としては、テストマスと同じ大きさのサファイアを仮定している。また、地面振動レベルは、主干渉計より振子一段の防振効果が少ない分だけ大きくなっている。以上の原理的な雑音の大きさは図 4.15 左に示されている。

一方、低周波数帯では、原理的な雑音よりも、外乱による寄与が大きくなっている (図 4.15 右)。7 Hz から 70 Hz の周波数帯では、コイル・マグネットアクチュエータからの雑音の影響が支配的となっている⁷⁷。

⁷⁷ これは、 $10 \mu\text{m}$ の可動範囲を持ち、周波数特性を持たせず、 $\pm 10 \text{ V}$ で駆動する比較的単純なコイルドライバを仮定した物である。ドライバの改良や、可動範囲を小さくすることで、さらに改善できる可能性はある。

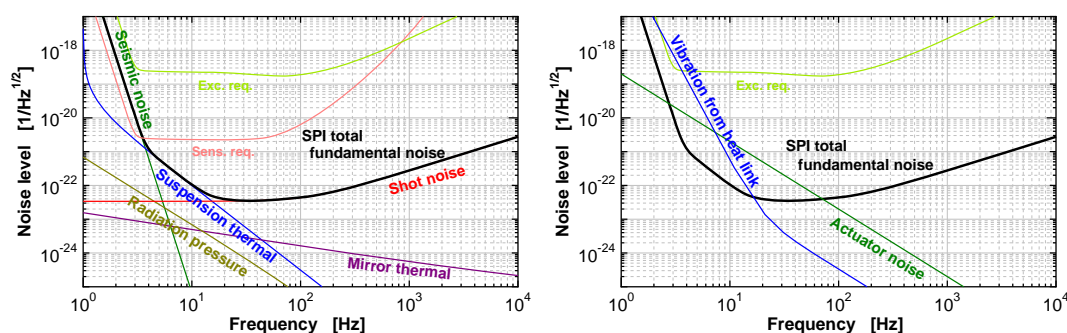


図 4.15: 懸架点干渉計 (SPI) に対する予想雑音レベル。左図は、原理的に避けられない雑音 (地面振動、熱雑音、量子雑音) を示し、右図は、アクチュエータ雑音やヒートリンクからの振動などの外乱を示している。

さらに低周波数帯では、ヒートリンクからの雑音の影響が、地面振動による影響などよりも大きくなっている⁷⁸。ただし、必要に応じて、アクチュエータの特性やヒートリンクの防振を改善すれば、これらの雑音の影響をさらに抑える事は可能であろう。

懸架点干渉計を組み込む際の注意点

懸架点干渉計を組み込むにあたっては、主干渉計と懸架点干渉計の初期アラインメントが問題となり得る。上段低温マスからテストマスが平行に懸架されていない場合は、懸架点干渉計のアラインメントを取った時に主干渉計のアラインメントが取れなくなってしまうからである。そこで、主干渉計のアラインメントは、主干渉計用のアクチュエータで調整する事になる。ただ、このアクチュエータの雑音の影響を避けるためには、可動範囲は 10^{-3} rad 程度以下になる⁷⁹。従って、上段低温マスからテストマスを懸架する際の平行度は、 10^{-3} rad 以下である必要がある。

また、懸架点干渉計を動作点に制御した状態では、主干渉計の光路長方向への変動は、レーザー光源へのフィードバックだけでなく、主干渉計の光学素子に取り付けられたアクチュエータで抑え込む必要がある。光路長方向についての干渉計動作点は、用いている光 (波長 1064 nm) の半波長毎に存在し、この精度で懸架を行う事は不可能であることから、主干渉計光学素子に取り付けられたアクチュエータは、最低でも $1 \mu\text{m}$ 程度の可動範囲を持っている必要がある。

⁷⁸ここでは、共振周波数 0.2 Hz のヒートリンク 2 段によって、地面振動レベルにあるラディエーションシールドと結ばれているとして計算している。地面振動レベルは、 $10^{-9}/f^2 \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ と仮定している。また、ヒートリンクの防振効果は 20 Hz 以上では平坦になるものとしている。

⁷⁹並進用のアクチュエータと別に 100 倍の効率を持ったものを使用する事を前提としている。振り子の角度方向での共振周波数は 0.3 Hz、最大駆動電圧は $\pm 10 \text{ V}$ 、安全係数 10 として求められた。

第5章

Resonant Sideband Extraction

川村静児、佐藤修一¹、安東正樹²、宗宮健太郎³

5.1 レゾナント・サイドバンド・エクストラクションとは？

レゾナント・サイドバンド・エクストラクション (RSE) 干渉計とは、パワー・リサイクリング・ミラー (PRM) 付きファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計、すなわちパワー・リサイクルド・ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (PRFPMI) のアンチシンメトリック・ポートに、シグナル・エクストラクション・ミラー (SEM) を加えたものであり (図 5.1) SEM とアーム・キャビティーのフロント・ミラーとで構成される共振器、すなわちシグナル・エクストラクション・キャビティー (SEC) は単体で光の共振条件を満たすように設定されている。RSE 干渉計では、同様な感度を持つ PRFPMI と比べて、アーム・キャビティーのフィネスは高く、パワー・リサイクリング・ゲイン (PRG) は低い。以下、RSE 干渉計の原理を直感的に説明する。

RSE 干渉計においては、アーム・キャビティーのフィネスは高く設定されているので、アーム・キャビティー内での光のパワーは高く、重力波によって生じる光の位相変調信号もそれに応じて大きくなる。しかしこれだけだと、光のアーム・キャビティー内での滞在時間が長いため、重力波信号が干渉計のアンチシンメトリック・ポートに抜け出てくる前に重力波の位相が変化し、信号同士のキャンセルが起こってしまう。このキャンセル効果を防ぐのがアンチシンメトリック・ポートに置かれた SEM である。重力波信号は全てアンチシンメトリック・ポートに抜け出てくるので、フロント・ミラーの代わりに SEC で反射されると考えてよい。SEC は単体で光の共振条件を満たすように設定されているので、SEC の反射率をフロント・ミラー単体の反射率よりも低く設定することが可能である。この条件のもとでは、重力波信号にとってのアーム・キャビティーのフィネスが実効的に小さくなる。したがって重力波信号はキャンセルが起こる前に、アンチシンメトリック・ポートに抜け出ることができる。ところで光のキャリアは全てシンメトリック・ポートに返っていくため SEM の影響は受けず、アーム・キャビティー内での光のパワーは依然として高く、重力波によって生じる光の位相変調信号も大きいというメリットは維持されている。以上の

¹法政大工

²京大理

³Caltech

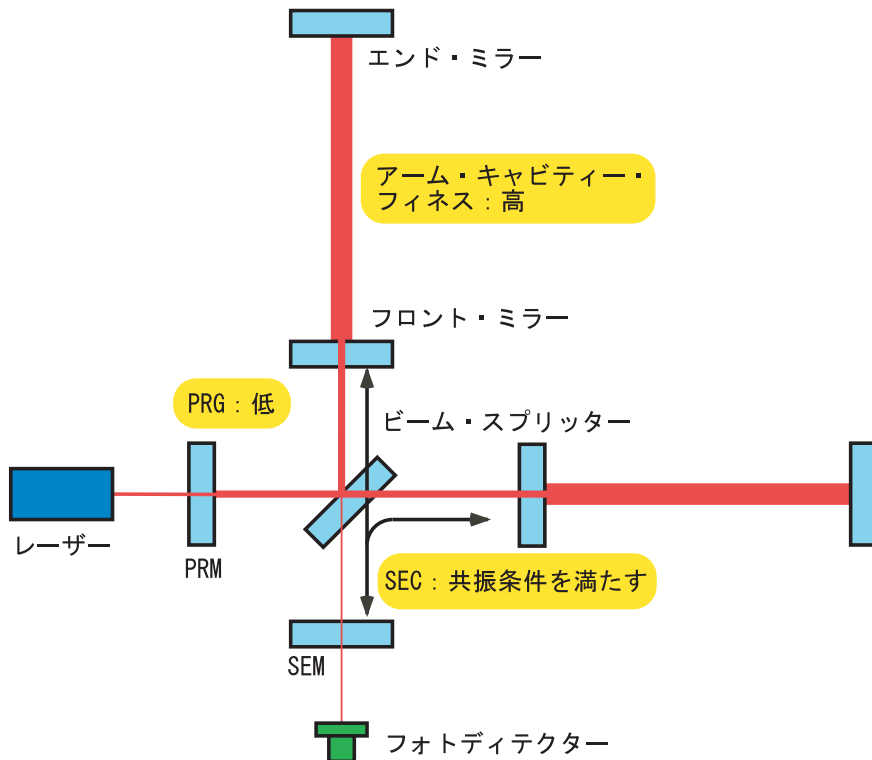


図 5.1: RSE 干渉計の構成

メカニズムにより RSE 干渉計は重力波信号に対する感度を高めることが可能となる。

一般に RSE 干渉計は一般に次の 3 つのパラメタにより表される。

1. アーム・キャビティーのフィネス
2. パワー・リサイクリング・ゲイン (PRG)
3. シグナル・バンド・ゲイン (SBG) : SEM による重力波信号の帯域の増大

アーム・キャビティーのフィネスを高く設定すると、それだけ SEM により重力波信号にとっての実効的なフィネスを小さくする、つまり SBG を大きく取る必要がある。またアーム・キャビティー内でのロスなどを考慮すると、フィネスが高いほどアーム・キャビティーから帰ってくる光のパワーは小さくなるので、可能な PRG は小さくなってしまう。

RSE 干渉計を、アーム・キャビティーのフィネスを低く、PRG を高く設定した PRFPMI と比べてみよう (図 5.2 参照)。パラメタを適切に選ぶことにより、重力波信号に対するキャビティー・ポールとキャリアーのアーム・キャビティー内でのパワーを、RSE 干渉計と PRFPMI とで同じにすることができる。一般に干渉計の量子雑音 (ショット・ノイズと輻射圧雑音) は、重力波信号に対するバンド幅とキャリアーのアーム・キャビティー内でのパワーによって決まるので、この 2 つの干渉計は同等の感度を持つ。ただし PRG が違うため、ビーム・スプリッターやフロント・ミラー内での光のパワーについては RSE 干渉計の方が PRFPMI より小さい。

詳しい解析によると RSE 干渉計の重力波ストレインに対する量子雑音のパワー・スペクトル S_h は以下のように表されることが分かっている。

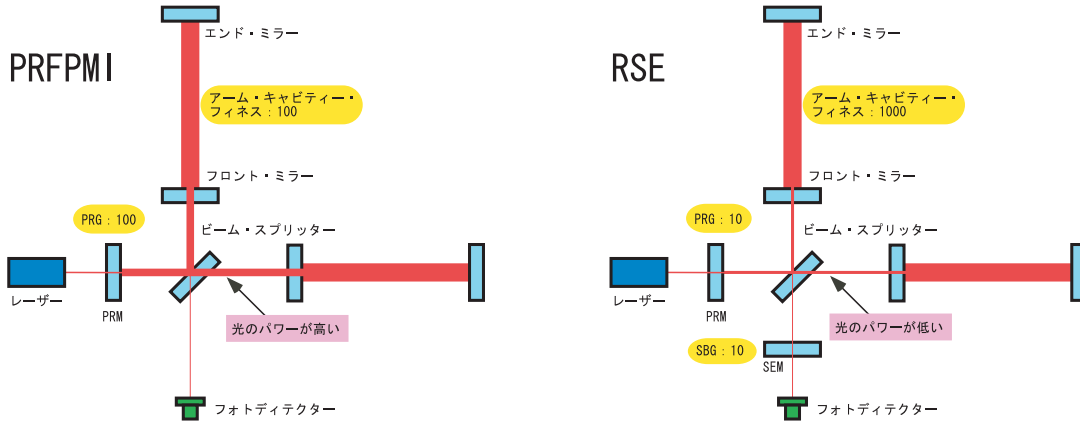


図 5.2: PRFPMI と RSE のパラメーターの比較例

$$S_h = \frac{S_h^{SQL}}{2} \left(\frac{1}{\bar{K}} + \bar{K} \right) \quad (5.1)$$

ここで

$$S_h^{SQL} = \frac{8\hbar}{m\Omega^2 L^2} \quad (5.2)$$

は、いわゆる標準量子限界であり、 \hbar はプランク定数、 m はテスト・マスの質量、 Ω は周波数、 L は干渉計のアーム長である。また、

$$\bar{K} \equiv \frac{K\tau^2}{1 + \rho^2 + 2\rho \cos 2\beta} \quad (5.3)$$

であり、さらに

$$K = \frac{2(I_0/I_{SQL})\gamma^4}{\Omega^2(\gamma^2 + \Omega^2)} \quad (5.4)$$

は、テスト・マスの動きを干渉計の出力に結びつける実効的な係数であり、 I_0 は入射パワー（ただしここではパワー・リサイクリングによる実効的なパワーの増大も含めている）、 I_{SQL} は SEM なしの状態で $\Omega = \gamma$ の周波数で標準量子限界に達するために必要な入射パワー、 $\gamma = Tc/4L$ はアーム・キャビティの半値幅（ T はアーム・キャビティのフロント・ミラーのパワーに対する透過率）である。また τ と ρ はそれぞれ SEM のアンプリチュードに対する透過率と反射率であり、 $2\beta = 2 \arctan \Omega/\gamma$ は周波数 Ω における位相である。

量子雑音のスペクトルは、低周波領域の f^{-2} の依存性を持つ雑音（輻射圧雑音）と高周波領域のホワイトあるいは f^1 の依存性を持つもの（ショット・ノイズ）から成り立つ。

ところで上述の結果は、干渉計が理想的な場合であり、また信号取得の方式にもホモダイン・ディテクションが仮定されている。したがって、現実的なパラメータを持つ干渉計に変調復調法を用いて信号取得を行なった際の量子雑音は幾分違ってくると考えられる。

5.2 レゾナント・サイドバンド・エクストラクションの利点

RSE 干渉計を用いる利点は何であろうか？それは、同等の感度を持つ PRFPMI と比べ、ビーム・スプリッターやフロント・ミラー内の光のパワーが小さいため、発熱に伴う問題が軽減されることである。特

に LCGT においては、ミラーを極低温に維持するためミラーの光の吸収によって生じる熱をサスペンション・ファイバーなどのつり下げ機構を通じて逃がしてやる必要がある。つり下げ機構は熱雑音を低減するため、なるだけ微細な構造が要求されるので、発熱量が大きいとミラーを極低温に維持することが不可能となる。また、冷却しない予定のリサイクリング・ミラーやビーム・スプリッターは、光の吸収によって生じる熱レンズ効果により、光のモード・マッチングが乱され、アームキャビティーにカップルする実効的なレーザー・パワーが減少し、結果としてショット・ノイズの悪化を招く恐れもある。RSE 干渉計ではビーム・スプリッターやフロント・ミラー内の光のパワーが小さいため、これらの問題点を最小限に抑えることができる。

5.3 最適なゲイン配分

RSE 干渉計では同等の感度を持つ PRFPMI と比べて、アーム・キャビティーのフィネスを高く、PRG を低く設定することにより、ビーム・スプリッターやフロント・ミラーでの光のパワーを小さくできることは述べた。ではアーム・キャビティーのフィネスと PRG の最適な配分はどうであろうか？発熱の問題のみを考えると、完全にパワー・リサイクリングを取り除きアーム・キャビティーのフィネスをアーム・キャビティー内でのパワーが最大になるように高めておき、SEM により重力波信号を適切な帯域が実現されるように取り出してやれば、ビーム・スプリッターやフロント・ミラーでの光のパワーは最小となるので、この設定が最適であると考えられるかもしれない。しかし実際には、SEC 内での光のロスやコントラスト・ディフェクトが存在することから、極度にフィネスの高いアーム・キャビティーに対して、SEM により重力波信号を適切な帯域に持ってくることは不可能である。さらに現実的な問題としては、極度にフィネスの高いアーム・キャビティーをロックすることは簡単ではなく、またミラーの反射率のわずかな劣化によりフィネスが減少し既定の感度が実現できなくなる恐れもある。

最適なゲイン配分を求めるには理論・実験両面からのさまざまな検討が必要となる。それは今後の研究を待つこととし、これまでの経験から考えられる最も適切であろうパラメータとして、アーム・キャビティーのフィネスを 1250、PRG を 10、SBG を 10 としたものを LCGT のための現時点でのデフォルト・デザインとする。

5.4 信号取得

5.4.1 長さ信号

RSE 干渉計は PRFPMI と比べてミラーが 1 枚多いため、制御すべき自由度は、1 自由度増え、アーム・キャビティー長のコモン・モード成分 ($L_+ = (L_1 + L_2)/2$)、アーム・キャビティー長の差動成分 ($L_- = (L_1 - L_2)/2$)、パワー・リサイクリングの共振器長 ($l_+ = (l_{p1} + l_{p2})/2$)、マイケルソンの差動長さ ($l_- = (l_{p1} - l_{p2})/2$)、そして SEC の共振器長 ($l_s = (l_{s1} + l_{s2})/2$) の 5 つとなる (図 5.3 参照)。

これらの制御信号の取得方法にはさまざまなものが考案されているが、ここでは以下に述べる信号取得方式を基本設計として説明する。

まず RSE 干渉計において、各種共振器長及びマイケルソンの差動長さはキャリアーに対して以下の条件を満たすように制御されているものとする。

1. アーム・キャビティーで共振。

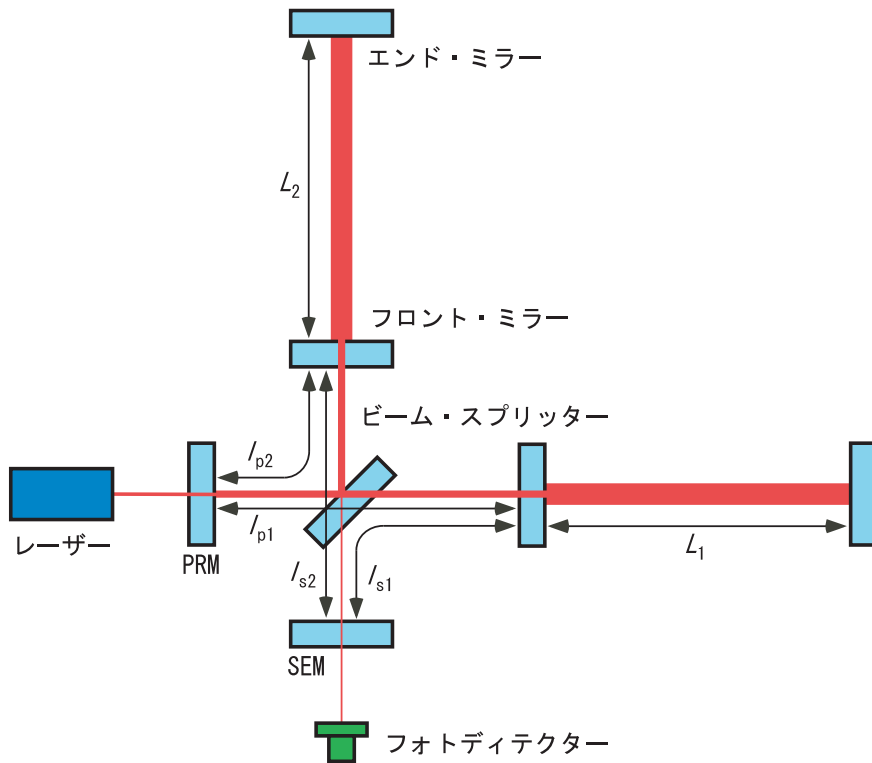


図 5.3: RSE 干渉計における長さ信号

2. パワー・リサイクリング・キャビティー (PRC) 単体では反共振。(実際はアーム・キャビティーからの反射光の位相が π 反転するため共振となる。)
3. SEC 単体では共振。
4. マイケルソンのアンチシンメトリック・ポートではダーク・フリンジ。

この条件のもと図 5.4 に示すように入射光に f_1 で位相変調を、 f_2 で強度変調をかけて 2 組のサイドバンドを用意する。干渉計の各種共振器のマクロな長さ及びマイケルソンのマクロな差動長さ (アシンメトリー) とこれらのサイドバンドの周波数を以下の条件を満たすように設定する。

1. f_1 、 f_2 サイドバンドはともにアーム・キャビティーで非共振。(なるべく高次のサイドバンドがアーム・キャビティーで共振しないように、 f_1 、 f_2 サイドバンドはアーム・キャビティーでの反共振の条件から適当にずらす。)
2. マイケルソンのアシンメトリーのため、 f_1 サイドバンドはアンチシンメトリック・ポートでブライト・フリンジ。(アンチシンメトリック・ポートに進んだ f_1 サイドバンドはその後 SEM で反射され、干渉計に再入射され、今度は全てシンメトリック・ポートに進み PRM で反射される。) このときマイケルソンの差動長さ l_- と f_2 は次の関係を満たす。

$$l_- = \frac{c}{4f_1} \quad (5.5)$$

ここで c は光速。

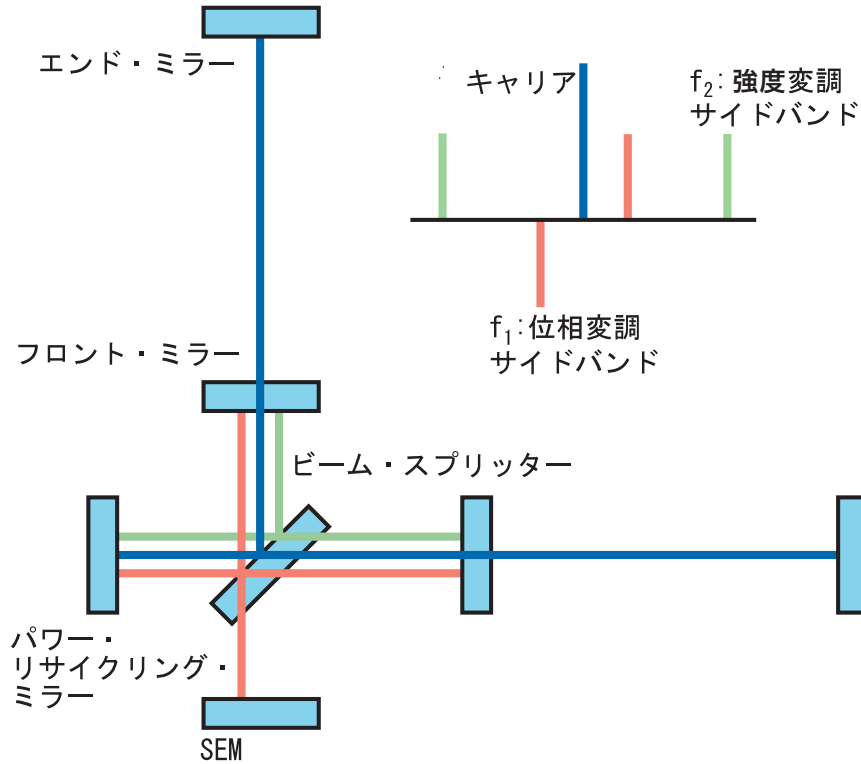


図 5.4: 位置信号取得に用いられる RF サイドバンドと干渉計におけるその共振状態

3. f_1 サイドバンドは PRC と SEC をあわせたキャビティーの中で共振 (例えば図 5.5 に示すように、 f_1 サイドバンドが PRC 単体で反共振、SEC 単体で共振であれば、2 つあわせた共振器内でアシンメトリーによる $\pm\pi/2$ の位相変化を 2 度経験することとあわせてこの条件が満たされる。) 条件 2 及び 3 のもと PRC の長さ l_+ 及び SEC の長さ l_s は f_2 に対して次の関係を満たす。

$$l_+ + l_s = \frac{c}{2f_1} \times N \quad (5.6)$$

ここで N は整数である。

4. マイケルソンのアシンメトリーのため、 f_2 サイドバンドはアンチシンメトリック・ポートでダーク・フリンジ。このときマイケルソンの差動長さ l_- と f_2 は次の関係を満たす。

$$l_- = \frac{c}{2f_2} \times N' \quad (5.7)$$

5. f_2 サイドバンドは PRC で共振 (図 5.5 参照。 f_2 サイドバンドが PRC 単体で反共振であれば、マイケルソンの反射率が -1 であることと併せてこの条件が満たされる)。このとき PRC の長さ l_+ と f_1 は次の関係を満たす。このとき f_2 サイドバンドはダーク・ポートに漏れないため SEC の共振条件は関係なくなる。

$$l_+ = \frac{c}{2f_2} \times N'' \quad (5.8)$$

例えば表 5.1 に示すような例はこの条件を満たす。

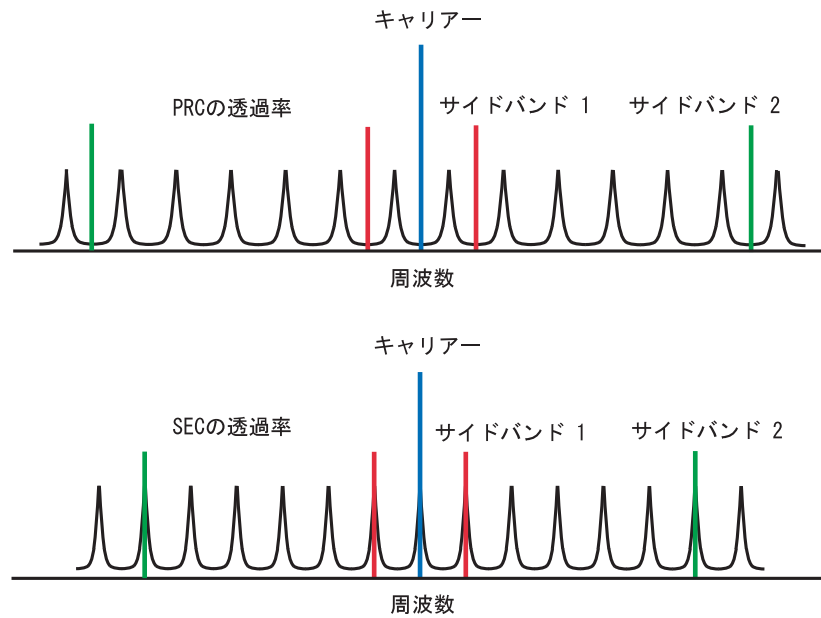


図 5.5: PRC と SRC の透過曲線

パラメタ	値
サイドバンド 1 の周波数 f_1	9.98125 MHz
サイドバンド 2 の周波数 f_2	59.8875 MHz
PRC 長 l_+	45.0845 m
マイケルソンの差動長さ l_-	7.51409 m
SEC 長 l_s	45.0845 m

表 5.1: RSE 干渉計のマクロな長さとサイドバンドの周波数の例

この条件のもと、干渉計の3つの検出ポート（図5.6参照）、シンメトリック・ポート（SP）、アンチシンメトリック・ポート（AP）、ピックオフ・ポート（PO）での適当な周波数による復調信号から上述の5つの長さ信号が取得できる。 L_+ と L_- は通常の f_1 をもちいた基本波復調によって、それぞれシンメトリック・ポートとアンチシンメトリック・ポートから非常に分離度のよい信号が得られる。 l_+ 、 l_- 、 l_s の各信号は、 f_1 と f_2 がアーム・キャビティに非共振であり、一方はPRCとSECをあわせたキャビティの中で共振、一方はPRCの中でのみ共振であることから、これらの応答の違いを利用して f_1 と f_2 のビート信号から得られる。 f_1 と f_2 で2回復調するダブル・デモジュレーションは「 $f_2 - f_1$ を用いた差周波復調」と「 $f_2 + f_1$ を用いた和周波復調」との和に等価である。必要な信号の最大値からの低下を最小限にする復調位相を選ぶと例えば表のようになる。 l_+ 、 l_- 、 l_s の全てについてそれぞれ完全に対角化された信号を得ることは難しいが、 l_- が単体で独立な信号が取れることと、 l_+ 、 l_s についてはほぼ直交化されていることから、演算により容易に l_+ 、 l_s の信号を対角化することができる。なおこの信号取得メトリックスは、解析的に、およびシミュレーションソフトの Finesse (Andreas Freise 作) を使って得られたものであり、その両者による結果が完全に一致したことより非常に信頼性の高いものであると考えられる。

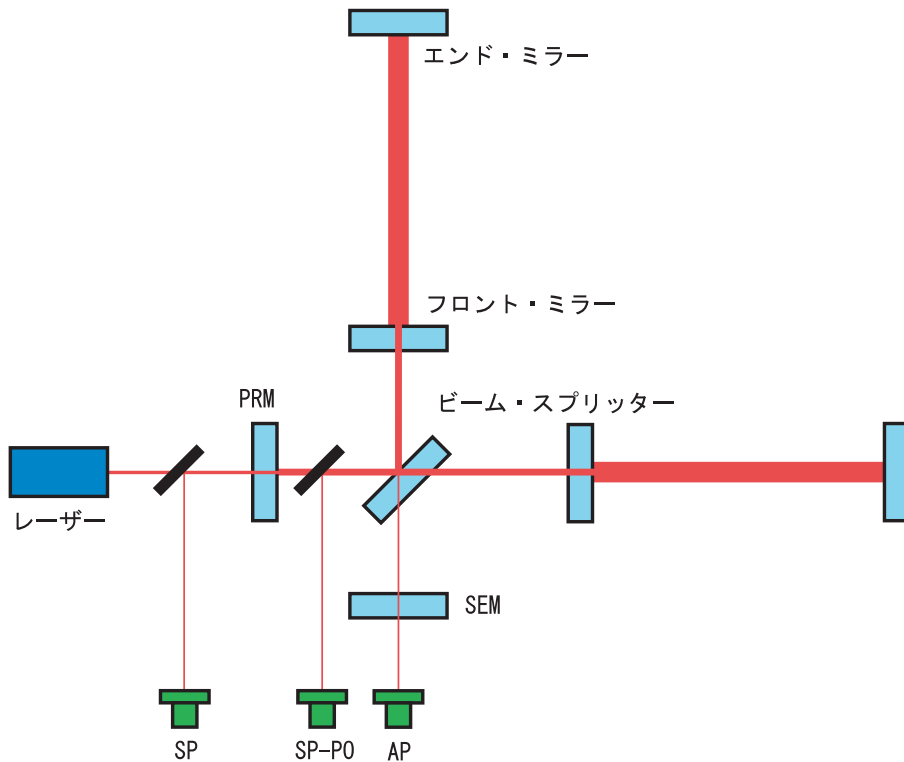


図 5.6: RSE 干渉計の検出ポート

5.4.2 アラインメント信号

RSE 干渉計のアラインメントに関して制御すべき信号は、フロント・ミラー (ITM) の同相成分、差動成分、エンド・ミラー (ETM) の同相成分、差動成分、そして PRM と SEM のアラインメント信号があり、それぞれについてピッチとヨーの2成分を考える⁴。これらの信号に関して、前述の長さ信号取得方式で用

⁴これらとは独立して干渉計への入射光軸制御、ビームスプリッターの反射光軸制御が必要となる

ポート	復調方法	復調位相	L_+	L_-	l_+	l_-	l_s
SP	f_1	0	1	0	3.6×10^{-3}	0	2.6×10^{-3}
AS	f_1	90	0	1	0	1.0×10^{-3}	0
SP	$f_1 \otimes f_2$	$0 \otimes 0$	1.7×10^{-3}	0	1	0	7.3×10^{-1}
AS	$f_1 \otimes f_2$	$90 \otimes 0$	0	1.0×10^{-3}	0	1	0
PO	$f_1 \otimes f_2$	$0 \otimes 0$	-3.2×10^{-4}	0	-1.3×10^0	0	1

表 5.2: RSE 干渉計の長さ信号取得マトリックス

いられた変調、および干渉計にはいらず PRM で反射される非共振サイドバンドの併せて 3 種類の変調を利用して信号取得を行う。

この際、通常の共振器の幾何設計を採用すると、PRM は曲率の大変大きい 2 枚の鏡からなる不安定共振器に近い設計となる。このモードの縮退した共振器の場合、Gouy 位相の変化が小さい事に起因して 2 枚の鏡の姿勢に関する信号も縮退することが知られている。これを避けるために PRC での幾何設計を工夫し、適当な Gouy 位相を確保することにより独立な信号を得ることを想定する。

ポート	復調方法	ITMD	ETMD	ITMC	ETMC	PRM	SEM
SP	$f_1 \otimes f_2$	1	-2×10^{-4}	-2×10^{-3}	4×10^{-6}	2×10^{-4}	5×10^{-4}
AP	f_1	6×10^{-1}	1	5×10^{-5}	3×10^{-5}	-1×10^{-4}	0
AS	$f_1 \otimes f_2$	4×10^{-5}	-7×10^{-8}	1	-2×10^{-3}	-6×10^{-1}	-4×10^{-1}
PO	f_1	-3×10^{-3}	-8×10^{-3}	6×10^1	1	-2×10^{-2}	0
SP	f_2	-2×10^{-4}	0	-1×10^0	2×10^{-4}	1	0
SP	f_3	-7×10^{-4}	-9×10^{-4}	-2×10^0	1×10^{-2}	1×10^0	1

表 5.3: RSE 干渉計のアラインメント信号取得マトリックス

第6章

LCGT計画におけるレーザー光源に関して

三尾典克¹、武者満²

6.1 LCGT 干渉計用レーザー光源が満たすべき要求

LCGT では、100 Hz 付近の周波数で

$$\tilde{h} \sim 4 \times 10^{-24} \sqrt{\text{Hz}} \quad (6.1)$$

を実現する必要がある。LCGT 干渉計は、低温環境下で動作するため、光吸収による発熱量などで厳しい条件がつく。特に、鏡の基材（サファイア）に関する状況を考慮すると、等価出力（レーザーの有効利用出力とリサイクリングゲインの積）として、780 kW が妥当な値と考えられる³。さらに、リサイクリングゲインを考えることでレーザーに対する要求が決まるから、ここでは、ゲイン 11 の実現を前提する⁴。その場合、レーザーの有効出力、すなわち、干渉計で実際に利用できる出力としては 75 W が必要で、レーザーの出力の約 2 分の 1 が有効利用できると仮定すると、出力 150 W 程度のレーザーが必要となる。そして、この出力レベルで長期観測に十分耐えうる安定性、信頼性を備えた単一モード、単一周波数発振を実現しなければならない。もちろん、周波数や強度、ビームの幾何学的形状などの安定度は、できうる限り高いものが必要である。

現時点でこれらの条件を満たす可能性がもっとも高いシステムは半導体レーザー-励起 Nd:YAG レーザーであろう。以下は、これを採用することを仮定する。

¹ 東大新領域

² 電通大

³ この値で、レーザーの輻射圧揺らぎとショット雑音限界が最適化されている。

⁴ LCGT では RSE が導入される予定であり、各腕の共振器のフィネスは、現在の大型干渉計に比べると大きな値をもつ。そのため、リサイクリングゲインは大きくできない。

6.2 レーザー光源システムの概要

現時点で考えているレーザー光源のシステムを図 6.1 に示す。レーザー本体は小出力のマスターレー

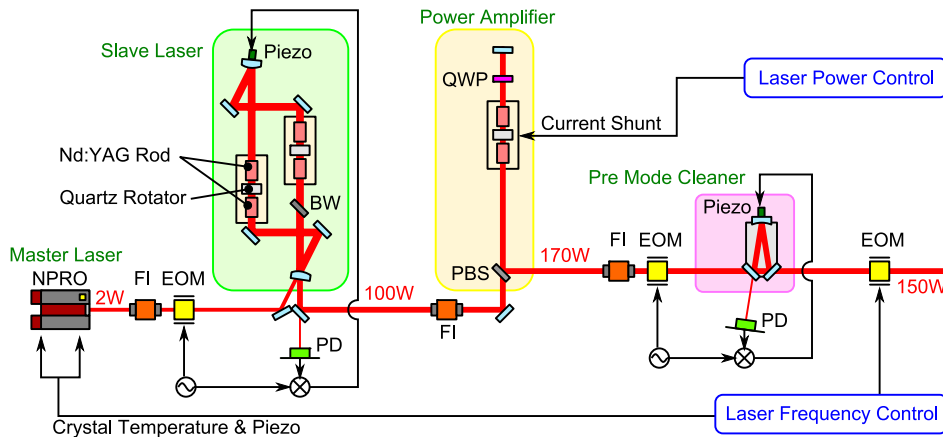


図 6.1: レーザーシステム

ザー、大出力のスレーブレーザーからなる発振器、及びその出力を増幅するためのパワーアンプからなる。

発振器では、これまで TAMA のシステムで開発してきた注入同期の技術により、マスター・スレーブを一体の高安定レーザーとして動作させる。発振器の出力としては、100W の TEM₀₀ モード発振が実現されている。この出力は、1 段の飽和増幅器で増幅されて合計 150 W の出力を発生させる。

この高出力システムの基本を成すのは、高輝度半導体レーザー励起 Nd:YAG モジュールである。発振器部分で 4 台のモジュール、増幅器 1 段につき、4 個のモジュールを利用する。1 つのモジュールは 1 個の YAG ロッドを複数の半導体レーザーで側面から励起する構成であり、拡散反射を利用して均一励起を実現しているものである (CIDER と呼ばれている)。さらに、高強度の励起によって生じる熱の影響を、2 つのモジュールと偏光回転子の組み合わせで補償する HIPER という技術を用いて、加工用のレーザーとしては極めて高いビーム品質を実現している。

注入同期のマスターレーザーには、NPRO (2W 出力を利用する)。このレーザーを使ってスレーブレーザーを制御する。

増幅器に関しては、TEM₀₀ モードを保ったまま、100 W の入力を 200 W に増幅した例が報告されている。この領域の増幅は基本的に飽和増幅になるため、LIGO で用いられているような非飽和増幅型 MOPA に比べ、特性は良好になると推定される。しかし、実際に増幅を行うと波面の乱れは必ず存在する。M² パラメーターで評価した場合に、報告例に従えば、100 W の発振器 (ランダム偏光、縦モードは制御なし) の出力では、M² = 1.08 であったものが、増幅後には M² = 1.34 まで劣化している。このような劣化は、増幅器構成を用いる限り不可避であろう。そのため、プレモードクリーナーが必要になる。このモードクリーナーは、短い共振器構成にすると内部パワーの問題が発生する。したがって、1 m 以上の共振器長をもつ共振器を利用することになると思われる。このようなモードクリーナーは、干渉計の制御信号を作り出す変調信号の周波数帯域での揺らぎを抑える効果がある。

6.3 周波数雑音

周波数雑音に関しては、波長 $1\mu\text{m}$ の光を用い、両腕のバランスで周波数雑音の影響が $1/100$ ($\gamma_{\text{CMRR}} = 10^{-2}$) になっていると仮定する。また、安全係数 F_{safety} を 10 とすると、

$$\delta\nu < \nu\tilde{h}/\gamma_{\text{CMRR}}/F_{\text{safety}} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (6.2)$$

となる。現在、TAMA で達成されている周波数安定度は、 $\delta\nu = 3 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるので、現状の設計から、さらに 1.5 桁の安定度改善が必要である。TAMA での周波数安定化の手法自身は非常に優れたものであるため、必要とされる要素は

1. 高いショット雑音限界
2. より大きなゲインと帯域をもつ制御系

であるが、前者では光検出器と復調器、後者では、光変調素子（光学結晶等）に関して技術的な詰めを必要とする。また、上記の見積りには、リサイクリング、RSE の影響は考慮していない。理論的にさらに検討する必要がある。

6.4 強度雑音

強度雑音の影響は干渉計の制御性能と関係しているため、単純に値を設定できない。その影響は

$$\delta x_{\text{AM}} = \Delta x_{\text{rms}} \frac{\delta I}{I} \quad (6.3)$$

で表される。

$$h_{\text{AM}} = \delta x_{\text{AM}}/L < \tilde{h}/F_{\text{safety}} \quad (6.4)$$

で $F_{\text{safety}} = 10$ とすると、

$$\delta x_{\text{AM}} < 1.2 \times 10^{-21} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (6.5)$$

現在、TAMA では、 $\Delta x_{\text{rms}} = 1.2 \times 10^{-12} \text{ m}$ が達成されている。神岡では外乱が三鷹の 100 分の 1 と推測されるので、

$$\frac{\delta I}{I} < 1 \times 10^{-7} \left(\frac{\Delta x_{\text{rms}}}{1.2 \times 10^{-14} \text{ m}} \right)^{-1} \left(\frac{F_{\text{safety}}}{10} \right)^{-1} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (6.6)$$

という関係が得られる。TAMA の強度安定化システムでは、 $\delta I/I = 3 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ が得られているので達成は困難ではない。

6.5 干渉計とのインターフェース

干渉計用の光源として重要な点は、干渉計とのインターフェースである。特に、干渉計から得られる種々の制御信号をいかに利用するかという点で、レーザーの持つ役割は大きい。レーザーとして、制御すべき点は、周波数・位相、強度とビーム品質である。このうち、最後のビーム品質は、干渉計に供給する所で一定になっていれば十分で、干渉計からの情報で制御されることはない。以下、周波数・位相と強度に関して述べることにする。

6.5.1 周波数・位相制御

レーザーの周波数制御は、共振器長を制御することで実現される。TAMA の構成では、源発振器の NPRO の同調機能（ピエゾ素子と温度制御）と注入同期による周波数の引き込みを利用している。ピエゾ素子の制御帯域は 100kHz 程度あり、十分な同調範囲（数 10 MHz）を持っている。また、温度制御ではかなり低い周波数に限られるが、さらに大きな同調範囲（GHz を越える）が得られる。そのため、注入同期されるレーザー（従レーザー）に関しては、注入同期を維持できる同調範囲と制御帯域が実現できればよい。

その上で、最終的には制御は、高速位相変調器を利用した光位相制御による。上述の理由により、位相制御は、レーザーの最終出力段の通過した後で行う必要がある。そのため、位相制御素子に関しては、高い光エネルギー密度に耐えうるものが必要である。この点に関して、一番の問題点は、位相変調を行う素子であったが、定比組成ニオブ酸リチウムを用いた変調器の開発に成功した。この素子を用いて、制御帯域 500kHz 以上で、100Hz における制御ゲインで 300dB 以上が実現可能である。

6.5.2 強度制御

現時点は、100W 超える出力のレーザーの強度揺らぎがどの程度になるのか、はっきりしたデータがない。ひとつはっきりしている点は、励起用半導体レーザーの強度揺らぎの影響が非常に大きいことである。しかも、その電源の揺らぎの影響が大きいということが報告されているので、電源関係の低雑音化が必要である。その上で、強度の制御を行うことが重要であろう。可能性として、

1. 電気光学素子
2. 音響光学素子
3. 注入電流制御

の 3 つの方法がある。このうち、電気光学結晶は効率の問題があるので音響光学素子が注入電流制御という選択になる。TAMA では、現在、音響光学素子が使われているが 100 W を超える光強度を扱うことは難しい。大出力を扱う場合には、レーザーパワーの密度を下げるため、光学モードの口径を大きくしなければならない。そのような場合には、音波が光学的な口径を通過する時間で決まる周波数帯域が厳しい制限となる。むしろ、半導体レーザーの励起光強度を制御する方法が望ましい。ただし、発振にかかわるすべての LD の電流を制御するのは現実的と思われないので、増幅器として用いられているレーザーモジュールの励起 LD の制御を行う方式となる。直接、光で制御するので応答速度は LD の方で決まると考えられる。実験的な検証では十分使用が可能であることがわかっている。

6.5.3 全体の構成

上記の議論を踏まえて、全体の構成を考えてみる。図 6.1 に書かれている構成を制御の観点で書き直した。これらのパラメータの実現性に関しては、ほぼ、実験で実証されている。

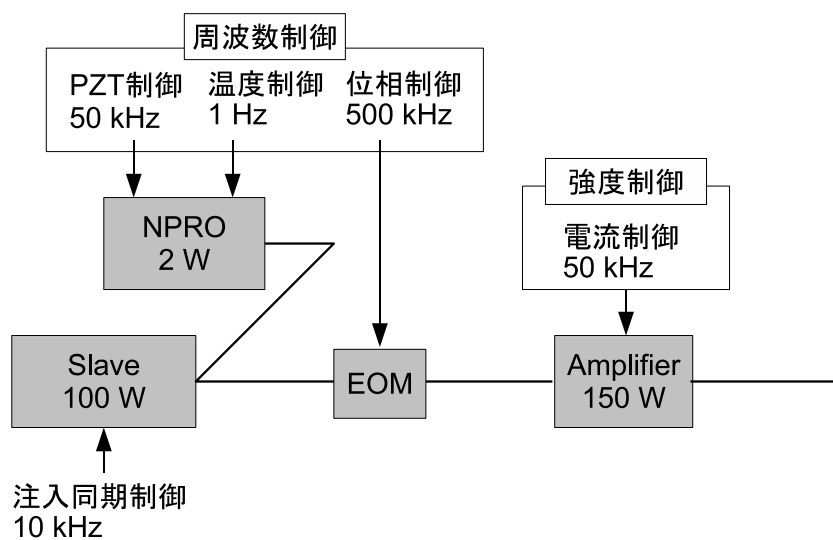


図 6.2: レーザーシステムと制御系

第7章

入射・射出光学系と周波数・強度安定化

森脇成典¹，長野重夫²，寺田聡一³

入射光学系の設計はレーザー光源，特に周波数と強度の安定化と密接に関連している．本章では，入射光学系の役割を，その前後に配置されるレーザー光源・主干涉計との関連を概観した後，モードクリーナー，周波数安定化，出力光モードクリーナー，モードマッチング系，強度安定化，変調素子，光電変換器，光アイソレータという順で構成指針を述べ，最後に光学要素の配置に関する問題に触れる．

7.1 入射・射出光学系の概要

入射光学系は，レーザー光源部から出力される光に対して，安定化・変調・モード整形などを施してから主干涉計に導く部分を指す．レーザー光源部の構成は，注入同期レーザー系を基本とするものが用いられる予定であり，多段注入同期，光アンプ増幅，コヒーレント加算などを組み合わせて高出力化を達成する．注入同期系は光共振器を持っているので，光アンプ系の場合と比較して，得られるビームの品質を向上させたり，Shawlow-Towns 雑音限界の比率を下げたりするのが容易である．しかし，LCGT で要求されている 150 W という大きな出力を注入同期系だけで得るのは難しいと考えられるので，レーザー光源系の最終段への光アンプの導入を予定しており，単純な注入同期レーザー系の出力光より自然放出雑音や高次モード成分が増えてしまうことが予想される．一般に，干涉計型重力波検出器では，レーザー光源の出力光をモードクリーナー (mode cleaner, MC) と呼ばれる内部にゲイン媒質のない光共振器を通して，周波数雑音・強度雑音・空間モード品質を改善するという手法が常套手段となっているが，LCGT でもこのような対策が必須であると考えられる．TAMA300 では，懸架鏡 3 枚で構成されたリングモードクリーナーが用いられている．LCGT での MC の形状も，TAMA300 のものと基本的には同じにする予定であるが，変調周波数近傍での強度雑音の改善を狙って，独立懸架 MC を二段にし，位相変調器を第一 MC の直後に置く構成を採用する⁴．モードクリーナーの構成に応じて慎重に配置を選ばねばならない光学要素に，変調器・光アイソレータがある．これらの配置として図 7.1 の構成を予定している．変調器については 7.7 節

¹ 東大新領域

² 通総研

³ 産総研

⁴ MC を二段にしてその間に位相変調器を置く構成は，GEO600 干涉計で実績がある．

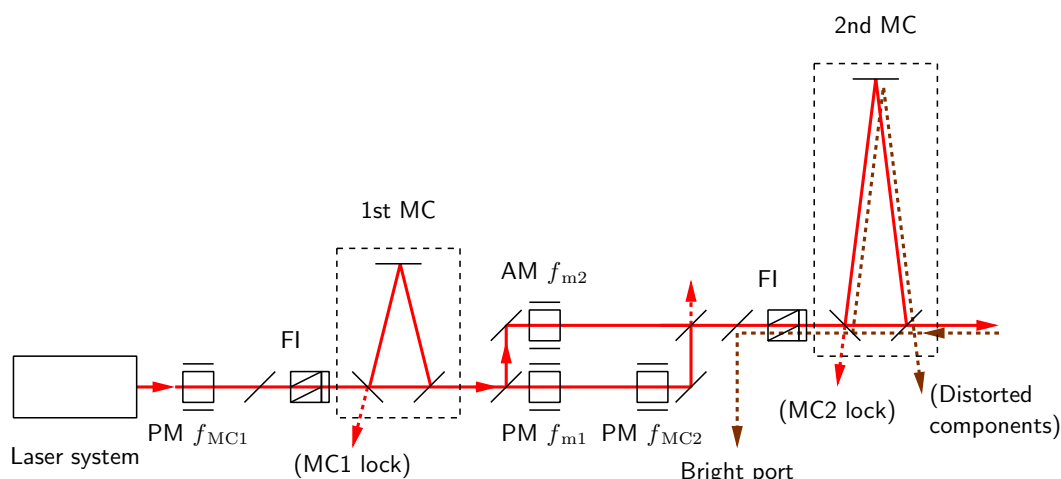


図 7.1: 入射光学系のモードクリーナー・変調器・光アイソレータの配置．モードマッチング・テレスコープを省略してある．

で、光アイソレータについては 7.9 節で詳細にふれる．主干渉計からの反射光は干渉計制御のための重要な情報を含んでいるが、これを第二 MC の直前のアイソレータで分離する構成にしている．これは、第二 MC が主干渉計反射光に対してもモードクリーニング効果を発揮することを期待しているためである．

入射光学系に課せられる主な要請は以下のようにになっている．

- 主干渉計には、10 MHz の位相変調、60 MHz の強度変調を伴った、安定で制御性の高いコヒーレント光を供給する．基本波長は Nd:YAG レーザーでよく利用される 1064 nm とし、サイドバンドを含めたトータルパワーは主干渉計入射直前で 75 W 以上となることを目指す．
- 入射光学系の全光学要素を含めた透過率は 50% 以上となることを目標とする．レーザー発振光源部のパワーの目標値は、150 W なので、これで主干渉計入射パワー 75 W を実現できることになる．但し、75 W もの光パワーを入射光学系で損失させる状況は、光学素子・光電変換器の熱の問題からみて好ましいことではないので、損失を減らす技術は惜しみなく投入しなければならない．入射光学系の低損失化が功を奏して透過率が増加した場合には、レーザー発振光源部の出力パワーへの要求を緩和して光源を 150 W 以下の設定で運転することもあり得る．

これらの要請を考慮に入れ、入射光学系の構成要素の主パラメータを以下のように設定する．

- 第一 MC の基線長 l_{MC1} は約 10 m (周回光路長 20 m)、フィネス \mathcal{F}_{MC1} は約 1700 とする．これにより共振の半値全幅 ν_{c1} は 9 kHz、遮断周波数 f_{c1} は 4.5 kHz となる．これは TAMA300 の 10 m MC と同じパラメータとなっている．しかし、全く同じにすると 10 MHz 近傍での雑音が透過してしまい、強度雑音の受動フィルタとしての役割が果たせないので、基線長の 2~3 桁目は TAMA300 MC とは異なったものとする．
- 第二 MC は、約 10 MHz、約 60 MHz の二種類のサイドバンドを透過させる必要があるので、free spectral range (FSR) の整数倍が 10 MHz になる必要がある⁵．これには周回光路長を 30 m の整数倍にすればよい．そこで、基線長 l_{MC2} を 180 m に選ぶ (周回光路長は 360 m となる)．ただし、第二 MC の FSR が、腕共振器 3 km の FSR の整数倍と重ならないようにするために、基線長 l_{MC2} は

⁵非平面リング共振器を用いて、この制限を取り払うことは原理的には可能である．

180 m からわずかにずらす必要がある (これについては次節で詳細を述べる)。従って FSR は 832 kHz になる。フィネス F_{MC2} は約 1000 とする。これにより共振の半値全幅 ν_{c1} は 832 Hz, 遮断周波数 f_{c1} は 416 Hz となる。

以上のような長さや周波数のパラメータ配分の考察から, 二台の MC が単に多段の効果で性能を稼いでいるというよりは, 別々の機能を担っているという描像の方が的を得ていることが分かる。モードクリーナーの名称の由来となっている空間モード整形の機能は, LCGT では主に第二 MC が担当しており, 第一 MC は「RF サイドバンド バックグラウンドクリーニング」とも言うべき機能を主目的としている。第一 MC を省略すれば光源の RF サイドバンド雑音が 100% の割合 (対キャリア比) で主干渉計に流れ込んでしまい, 第二 MC を省略すれば変調器によって導入され得る波面の乱れやビーム径/波面曲率の RF 同期変調の成分がすべて主干渉計に入ってしまう。次の節では, 高次モードのフィルタリングと周波数安定化, 強度安定化のより詳しい議論を交えて, モードクリーナーの設計パラメータについて解説する。

7.2 モードクリーナーの基本設計

LCGT では 2 段のリング型モードクリーナーを採用する。各モードクリーナーは入射レーザー光の高次モードとビームジッターを低減する。また, 第一モードクリーナーは位相変調周波数帯域のレーザー強度雑音を除去する役目も持つ。

7.2.1 モードクリーナーの概要

主干渉計の制御には 2 つの位相変調が必要になる。その 2 つの変調周波数の選び方にはいくつかの選択肢がある⁶。ここでは, その選択肢の中の一つである 10 MHz と 60 MHz 付近の 2 変調周波数が選ばれたときのモードクリーナーの光学設計について説明する。

10 MHz と 60 MHz 付近の 2 変調周波数を選ぶ場合の注意点はいくつかあるが, ここでは最も重要なこととして, 2 変調周波数が主干渉計の腕共振器に共振しないという条件のみを考慮する⁷。腕共振器の長さは 3 km であるので, その FSR は 50 kHz になる。従って, ここでは変調周波数を $f_1 = 9.98125$ MHz と $f_2 = 59.8875$ MHz に選んでモードクリーナーの光学設計を行った。この 2 つの変調周波数は, $f_1 : f_2 = 1 : 6$ となっている。他の変調周波数の組み合わせが選択された場合にも以下に述べる設計手順は同様になると考えられるので, パラメータの変更のみで対応できるはずである。

7.2.2 モードクリーナーに要求される性能

モードクリーナーに要求される性能は,

- (1) 入射レーザー光の高次モードを低減する。
- (2) ビームジッターを低減する。

⁶例えば, 9 MHz と 180 MHz と使う場合, 15 MHz と 50 MHz を使う場合, 10 MHz と 60 MHz を使う場合が挙げられる。詳しくは干渉計制御の章と RSE の章を参照。

⁷次の条件としては変調周波数が完全に腕共振器の反共振に来ないことが挙げられる。さらに, 変調周波数の高調波が腕共振器で共振しないようにするなどの付加的な要求が挙げられる。

の2つである。前者は干渉計のコントラストを向上させることに寄与し、結果として検出器感度に現れるショット雑音レベルを減少させる。モードクリーナーによる高次横モードの基本モードに対する suppression ratio は

$$S_{m,n} = \left[1 + \left(\frac{2F}{\pi} \sin[(m+n)(\cos^{-1}g)/2] \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (g = 1 - \frac{L/2}{R}) \quad (7.1)$$

で与えられる。ここで、 L は周回光路長 (round trip length)、 g は共振器の幾何学形状で決まるパラメータで geometric factor と呼ばれる [1]。また、 F はフィネスであり、これが高ければ suppression ratio が上がることになるが、実際には共振器のロック条件とミラー損失による効果を考慮して、フィネスは1000程度に設計されるのが一般的である [1][2]。後者のビームジッターはビーム方向の角度揺らぎであり、基本モードに混合する高次モード振幅が時間変動したものとみなせるので、これに対する性能も同様に考えればよい。従って、フィネスが高いほどモードクリーナーの性能が高いことになる。ビームジッターは主干渉計の鏡の角度揺れと結合して検出器感度に雑音として表れてくる。そのためモードクリーナーの性能要求を示すためには、レーザー光源のビームジッターだけでなく、主干渉計の鏡の角度揺れや鏡の中心からのビーム位置のずれなどの要求が示されなければならない。これらの量はレーザー光源と主干渉計の性能と密接に関係しているため、安全を見込んで2段のリング型共振器でモードクリーナーを構成する計画もある [5]。LCGT の目標感度を考慮すると2段モードクリーナーを採用することは、非常に有効であると考えられる。また、2段モードクリーナーを採用することで、初段モードクリーナーを位相変調周波数帯域の強度雑音フィルターとして使うことが可能となる。これにより、変調周波数帯域での強度雑音をショット雑音レベルまで低減させることができ、復調信号への強度雑音の影響を除去することで、ショット雑音限界の制御が可能になる。

LCGT のモードクリーナーには3枚鏡で構成されるリング型共振器を採用する。これは共振器からの戻り光が直接レーザーに返って optical feedback の原因となることを防ぐ目的のためであり、現在ある大型干渉計ではすることは、全てこのタイプを採用して [3][4][5][6]。リング型共振器の場合、2枚鏡の共振器に対して、光アイソレータ1個を省略でき、共振器の制御信号取得も楽になる利点を持つ。さらに、偏光選択性も有しており、片方の偏光に共振すると、直交するもう一方の偏光はほとんど反射される特性を持つので、透過光の偏光度を向上させることができる。リング型共振器で注意することは、共振器が3角形であるために基本モードが完全な円にならないことである。そのために、直線的な鋭角3角形を構成することでその影響を小さくしなければならない。

また光学設計で考慮すべきこととして、干渉計の制御に必要な変調サイドバンドの透過が考えられる。そのために、後段のモードクリーナーのFSRが変調周波数と等しくなるように共振器長を決めなければならない。

7.2.3 モードクリーナーの光学デザイン

第一モードクリーナー

第一モードクリーナー (1st MC) は共振器長10m程度のリング型共振器が採用される。主干渉計の制御で使う位相変調周波数付近の強度雑音を除去する役目があるために、FSRが2変調周波数と一致しないように設計しなければならない。位相変調周波数 f_1 、 f_2 で40 dB以上の強度雑音除去比を持つように設計する⁸。1st MCのFSRを15.525 MHzに選んだ場合の仕様を表7.1に示す。

⁸ RF変調周波数帯域での強度雑音の大きさはレーザーの構成や性能に依存する。ここでは100倍の利得を持つ光アンプを使って要求されるレーザーパワーを実現したような場合を想定した。

表 7.1: 第一モードクリーナーの仕様

反射率	平面鏡 (S 偏光)	0.9982
	球面鏡 ($R = 15$ m)	>0.9999
フィネス		1720
ミラー間隔	平面鏡間	0.2 m
	球面鏡と平面鏡	9.555 m
球面鏡への入射角		10.5 mrad
FSR		15.525 MHz

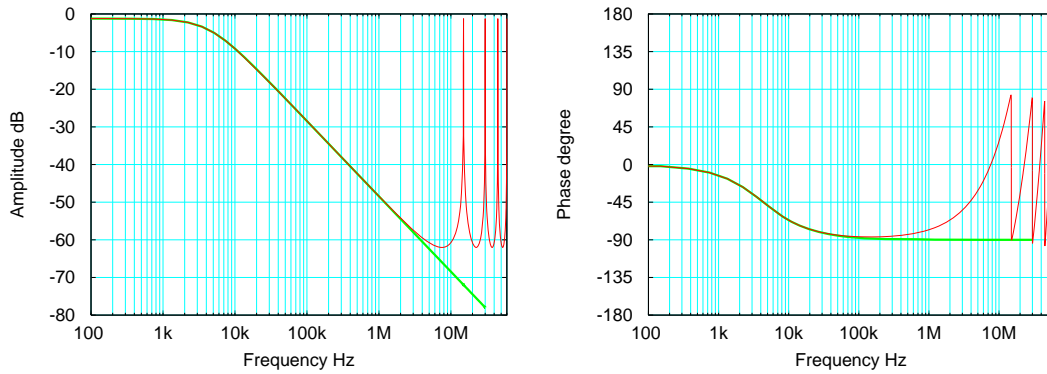


図 7.2: 第一モードクリーナーの強度変調に対する伝達関数 (細線)。FSR の $1/3$ 以下の周波数では単純なローパスフィルター (太線) とみなすことができる。

光周波数 ν の光波に対する伝達関数 $H_{\text{opt}}(\nu)$ で特徴づけられる光学系に強度変調の掛かった光が入射するとき、入射光と透過光の小振幅強度変化の比で定義される伝達関数 $H_T(f)$ は

$$H_T(f) = \frac{1}{2} H_{\text{opt}}^*(\nu) H_{\text{opt}}(\nu + f) + \frac{1}{2} H_{\text{opt}}^*(\nu - f) H_{\text{opt}}(\nu) \quad (7.2)$$

で計算される。ここで f は強度変化のフーリエ周波数である。これを用いて、キャリア共振条件の下での、モードクリーナーの強度変調に対する伝達関数は

$$H_T(f) = \frac{t_i^2 t_o^2}{1 - r_i r_o r_e} \cdot \frac{e^{-2\pi i l f / c}}{1 - r_i r_o r_e e^{-2\pi i L f / c}} \quad (7.3)$$

で表される。ここで、 r 、 t は鏡の電場反射率と透過率、 i 、 o 、 e はそれぞれ入射、出射、エンドミラーを表し、 L は round trip length、 l は入射-出射ミラー間距離である。位相変調周波数 f_1 、 f_2 付近の強度雑音はこのモードクリーナーで除去され、それぞれの周波数での除去比は式 (7.3) から 41 dB と 56 dB となり要求を満たせることが分かる。図 7.2 に 1st MC の強度変調に対する伝達関数を示す。これから、FSR が 15.525 MHz のとき、5 MHz 程度までは単純なローパスフィルターとみなせることが分かる。

リング型共振器では、共振器が 3 角形であるため基本モードが原理的に完全な円にならない。3 枚鏡で構成される共振器ではビームウェストは 2 枚の平面鏡の間にあり、そこでの水平、垂直方向のビーム径は

$$\omega_{0x} = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi}} \left(\frac{2R \cos \theta}{L} - 1 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7.4)$$

$$\omega_{0y} = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi}} \left(\frac{2R}{L \cos \theta} - 1 \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (7.5)$$

表 7.2: 第一モードクリーナーの共振器性能。球面鏡の曲率半径は 15 m として計算した。

ビーム半径	ウェスト	1.560 mm (水平)
		1.560 mm (垂直)
	球面鏡	2.613 mm (水平)
		2.613 mm (垂直)
Geometric factor		0.35629 (水平)
		0.35636 (垂直)
Higher-mode interval		4.60160 MHz (水平)
		4.60124 MHz (垂直)
Suppression ratio	S_{10}	58.8 dB
	S_{20}	60.3 dB

で表せる。ここで、 λ はレーザー波長、 L は round trip length、 R は球面鏡の曲率半径、 θ は球面鏡へのビームの入射角である。球面鏡上でのビーム半径は

$$\omega_{\alpha}(L/2) = \omega_{0\alpha} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L/2}{\pi \omega_{0\alpha}^2}\right)^2}, \quad (\alpha = x \text{ or } y) \quad (7.6)$$

から計算される。

Geometric factor は

$$g_{\alpha} = 1 - \frac{L/2}{R_{\alpha}} \quad (7.7)$$

から計算される。ここで、 R_{α} は球面鏡にビームが入射したときに感じる実効的な球面鏡の曲率半径で、 $R_x = R \cos\theta$ 、 $R_y = R/\cos\theta$ である。ここで得られた Geometric factor を使うと高次モード間隔が計算できて、それらは

$$\Delta\nu_{l_{\alpha}} = \nu_{\text{FSR}} \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left[\sqrt{\left(1 - \frac{L/2}{R_{\alpha}}\right)} \right] \quad (7.8)$$

から得られる。ここで、 $\nu_{\text{FSR}} = c/L$ である。

式 (7.1) および式 (7.4) から (7.8) に 1st MC の幾何学パラメータを代入すると表 7.2 に示すような結果が得られる。得られた高次モード間隔から、FSR との周波数差が計算できる。10 次の高次モードまでの計算では、FSR と 10 次の高次モードの周波数差が約 560 kHz になるが、それ以外のモードでは周波数差は 1 MHz 以上になっている。従って、低次のモードに対しては十分な suppression ratio を持つことができると期待される。

第二モードクリーナー

第二モードクリーナーは、主干渉計を制御するのに必要な変調サイドバンドを透過させる必要がある。そのため、1st MC とは逆に 2nd MC の FSR は変調周波数と一致しなくてはならない。2nd MC の FSR を 831.771 kHz に選べば、9.98125 MHz および 59.8875 MHz の位相変調サイドバンドは透過することが可能である。決定された 2nd MC の仕様を表 7.3 に示す。

2nd MC の幾何学パラメータから表 7.4 に示すようなビーム径と光共振器性能が得られる。10 次の高次モードまで、FSR との周波数差が小さいのは 3 次、7 次と 10 次のモードである。それぞれの周波数差は 72 kHz、109 kHz と 36 kHz である。

表 7.3: 第二モードクリーナーの仕様

反射率	平面鏡 (S 偏光)	0.9969
	球面鏡 ($R = 300$ m)	>0.9999
フィネス		1000
ミラー間隔	平面鏡間	0.5 m
	球面鏡と平面鏡	179.963 m
球面鏡への入射角		1.39 mrad
FSR		831.771 kHz

表 7.4: 第二モードクリーナーの共振器性能。球面鏡の曲率半径は 270 m として計算した。

ビーム半径	ウェスト	6.564 mm (水平)
		6.564 mm (垂直)
	球面鏡	11.382 mm (水平)
		11.382 mm (垂直)
Geometric factor		0.332542 (水平)
		0.332544 (垂直)
Higher-mode interval		253.153 kHz (水平)
		253.152 kHz (垂直)
Suppression ratio	S_{10}	54.3 dB
	S_{20}	55.6 dB

7.3 LCGT のためのレーザー周波数安定化

LCGT の同相雑音除去比 $\text{CMRR} = 40$ dB を仮定するとパワーリサイクリング共振器に入射する光のレーザー周波数雑音 $\delta\nu = 3.9 \times 10^{-8}$ Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (@100 Hz) が要求される。このような周波数安定度を実現するために LCGT では多段式周波数安定化システムを採用する。

7.3.1 光源の周波数雑音

光源の周波数雑音は、主干涉計の非対称性と結合して検出器感度に現れる。干涉計の目標感度 h_{sens} が与えられたときに要求される相対周波数雑音は

$$\frac{\delta\nu(f)}{\nu} = \frac{H_{\text{signal}}(f)h_{\text{sens}}(f)}{H_{\text{noise}}(f)} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.9)$$

で表される。ここで、 ν はレーザー周波数、 $\delta\nu$ は主干涉計への入射光の周波数雑音である。また、 $H_{\text{signal}}(f)$ は重力波信号に対する主干涉計のダークポートまでの伝達関数、 $H_{\text{noise}}(f)$ は主干涉計入射点からダークポートまでの周波数雑音に対する伝達関数である。 $H_{\text{signal}}(f)$ 、 $H_{\text{noise}}(f)$ は主干涉計の構成により変化する。FPMI の場合は $H_{\text{signal}}^{\text{FPMI}}(f)/H_{\text{noise}}^{\text{FPMI}}(f) = 1/\epsilon$ であり、この場合はよく知られた $h = \epsilon \delta\nu/\nu$ が成立する。ここで ϵ は同相雑音除去比 (CMRR) である。RSE を行った PRFPMI では

$$\frac{H_{\text{signal}}(f)}{H_{\text{noise}}(f)} \approx \frac{1}{\epsilon} \frac{f_c}{f_{cc}} \frac{1 + i(\frac{f}{f_{cc}})}{1 + i(\frac{f}{f_{sc}})} \quad (7.10)$$

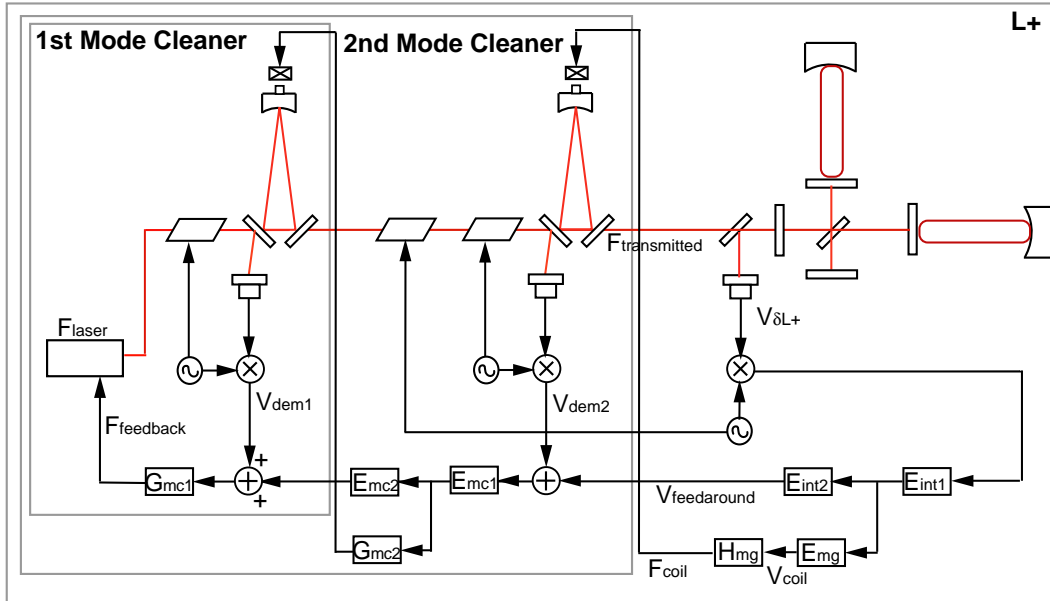


図 7.3: LCGT のサーボポロジ: レーザー周波数安定化に必要な変調と制御ループのみを表している。

となる⁹。 f_c と f_{cc} はそれぞれ腕共振器のカットオフ周波数とパワーリサイクリングミラーで構成される結合共振器のカットオフ周波数である。また、 $f_{sc} = f_c \times SBG$ であり、 SBG は RSE によるシグナルバンドゲインである。

LCGT の目標感度は $\tilde{h} = 3.0 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$ である [7]。この感度を実現するためにパワーリサイクリング共振器への入射光の周波数雑音は $\delta\nu = 3.9 \times 10^{-8} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}} (\text{@}100 \text{ Hz})$ となる。腕共振器カットオフ周波数 20 Hz とリサイクリングゲイン 10 とシグナルバンドゲイン 10 を考慮したとき、

$$\frac{H_{\text{signal}}(100)}{H_{\text{noise}}(100)} = 4.47 \times \frac{1}{\epsilon} \quad (7.11)$$

となり、同相雑音除去比 $\epsilon = 40 \text{ dB}$ を仮定すると、

$$h = 10^{-2} \times \frac{H_{\text{noise}}(100)}{H_{\text{signal}}(100)} \frac{3.9 \times 10^{-8}}{3 \times 10^{14}} = 3.0 \times 10^{-25} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.12)$$

となり、安全係数 10 で目標感度を実現できる。このような周波数安定度を実現するために LCGT では多段式周波数安定化システムを採用する [8][9][10]。

7.3.2 周波数安定化のサーボポロジ

LCGT で要求される周波数安定度 $\delta\nu = 3.9 \times 10^{-8} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ を実現するために多段式周波数安定化システムを採用する。図 7.3 に LCGT の周波数安定化システムを示す。このシステムでは第一モードクリーナー (1st MC)、第二モードクリーナー (2nd MC) と干渉計の腕共振器を周波数基準とする。それぞれの光共振器はレーザーから見て後段に配置されるほど共振器長が長くなっており、結果として周波数安定度

⁹ここでは、粗い近似の元で解析的に計算されたものを示したが、より正確な要求値を得るためには数値計算を行う必要がある。

が向上している。このシステムは LCGT で要求される周波数安定度を達成するのに必要な制御利得を実現できるとともに、スプリアスな負帰還経路により生じる制御利得の減少を防止することができる。

レーザー周波数は共振器長 10 m の 1st MC を周波数基準器としてパウンド・ドレーバー法を用いてプレ安定化される [11]。このとき得られた誤差信号は全てレーザーに負帰還される。1st MC を透過したレーザー光は共振器長 180 m の 2nd MC によってさらに周波数安定化される。このとき 1st MC ループと同様にパウンド・ドレーバー法を用いるが、位相変調は 1st MC の後ろに置かれた変調器 (EOM) を使う。取得された誤差信号の低周波成分は 1st MC の共振器長制御に使用し、高周波成分は 1st MC ループの誤差点に注入する。変更された 1st MC の共振器長は、1st MC ループのサーボによりレーザー周波数に反映される。一方、誤差点に注入された信号は 1st MC ループの誤差信号を直接修正することによってレーザー周波数を変調する。2nd MC で安定化されたレーザー周波数は、最終的に主干渉計の両腕のファブリー・ペロー共振器の同相信号 (δL_+) を用いた周波数安定化ループ (L_+ ループ) により安定化される¹⁰。主干渉計の制御に必要な位相変調は 2nd MC の前に置かれた EOM によって生成され、その変調サイドバンドは 2nd MC を透過する。これにより EOM によるビーム波面の乱れを除去することができる。同相信号の低周波成分は 2nd MC 共振器長の安定化制御に使われ、高周波成分は 2nd MC ループの誤差点に注入される。よって、主干渉計への同相信号の負帰還が全くないため、主干渉計の鏡に取り付けられたアクチュエータのアンバランスによる差動信号への影響を完全に除去することが可能である。

また、第一モードクリーナーは周波数基準器としては使用しない可能性もあるため、レーザー周波数のプレ安定化用に固定共振器も用意しておくことにする。

7.3.3 周波数基準

レーザー周波数安定度を決定するものは基準共振器安定度である。ここでは周波数基準器として使用される 1st MC、2nd MC と主干渉計の安定度を評価する。

周波数安定化における雑音源

基準共振器安定度を制限する雑音源として、地面振動、鏡と振り子の熱雑音、ショット雑音、輻射圧雑音と電気雑音を考慮する。それぞれの雑音の周波数安定度への影響は以下ようになる。

A. 地面振動

$$\delta\nu_{\text{seismic}} = \left(\frac{\partial\nu}{\partial x}\right) \times \alpha \times \frac{10^{-7}}{f^2} \times H_{\text{iso}}(f)^n \quad (7.13)$$

α は土地依存の係数で、 $H_{\text{iso}}(f)$ は一段振り子の支点に対する鏡の振動の伝達関数で n は防振振り子の段数である。また、

$$\left(\frac{\partial\nu}{\partial x}\right) = \frac{\nu}{l} \quad (7.14)$$

で、 ν 、 l はそれぞれレーザー周波数と共振器長である。

B. 鏡の熱雑音

$$\delta\nu_{\text{mirror}} \sim \left(\frac{\partial\nu}{\partial x}\right) \times \sqrt{\frac{4k_B T}{\omega} \frac{1}{mQ_{\text{mirror}}(2\pi f_{\text{mirror}})^2}} \quad (7.15)$$

¹⁰ここでは、パワーリサイクリング共振器の外で光を検出することにした。リサイクリング共振器内でピックアップした光を δL_+ 信号取得に使用すれば、後述するショット雑音に関する問題が解決するかもしれない。RSE を考慮した検討を要する。

ここで、 m は鏡の質量、 f_{mirror} は機械共振周波数、 Q_{mirror} は鏡の Q 値である。

C. 振り子の熱雑音

$$\delta\nu_{\text{sus}} \sim \left(\frac{\partial\nu}{\partial x} \right) \times \sqrt{\frac{4k_B T (2\pi f_{\text{pen}})^2}{m\omega^5 Q_{\text{pen}}}}. \quad (7.16)$$

f_{pen} は振り子の共振周波数、 Q_{pen} は振り子の Q 値である。

D. ショット雑音

パウンド・ドレーバー法を用いた場合のショット雑音は

$$\delta\nu_{\text{shot}} = \Delta\nu_C \sqrt{\frac{\hbar\omega(1 - J_0(\beta)^2 M V_0)}{16\eta P_0}} \frac{1}{M J_0(\beta) J_1(\beta)} \frac{1}{1 + \sqrt{1 - V_0}} \sqrt{1 + \left(\frac{2f}{\Delta\nu_c} \right)^2} \quad (7.17)$$

で表される。ここで、 $\Delta\nu_C$ は基準共振器の線幅、 P_0 は光検出器への入射光量、 η はフォトダイオードの量子効率、 β は変調指数、 V_0 はビジビリティーで、 M はモードマッチング率である。

E. 輻射圧雑音

鏡は入射したレーザー光により反跳を受ける。これは、鏡の位置を変化させるため、共振器の周波数安定度に影響を与える。Fabry-Perot 共振器における輻射圧雑音は

$$\delta\nu_{\text{rad}} = \left(\frac{\partial\nu}{\partial x} \right) \times \frac{2}{m\omega^2} \frac{2\mathcal{F}}{\pi} \sqrt{\frac{16\pi\hbar P_{\text{inside}}}{c\lambda}} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} \quad (7.18)$$

で与えられる [12]。ここで、 \mathcal{F} は共振器のフィネス、 P_{inside} は共振器内パワーである。

F. 電気雑音

ここでは、アクチュエータであるマグネットコイルの電気雑音のみを考慮する。その電気雑音の影響は

$$\delta\nu_{\text{elec}} = \left(\frac{\partial\nu}{\partial x} \right) \times \left(\frac{\partial x}{\partial V} \right)_{\text{coil}} \times V_n \times H_{\text{iso}}(f) \quad (7.19)$$

で表される。 $\left(\frac{\partial x}{\partial V} \right)_{\text{coil}}$ はマグネットコイル効率、 V_n はコイルドライバーの入力換算電圧雑音である。マグネットコイルは振り子の最終段に装備されているとして一段振り子の伝達関数をかけている。

第一モードクリーナー

1st MC に現れる地面振動の影響は式 (7.13) を使って、

$$\delta\nu_{\text{seismic}} = \frac{7.4 \times 10^4}{f^{-6}} \text{Hz} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.20)$$

となる。ここで、神岡鉱山内での地面振動の測定値から $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ とした。また、1st MC は 2 段振り子で懸架され、その共振周波数は 1 Hz と仮定した。

鏡の熱雑音は式 (7.15) を用いて、

$$\delta\nu_{\text{mirror}} = 2.3 \times 10^{-4} \times f^{-\frac{1}{2}} \text{Hz} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.21)$$

と計算される。ここで、鏡の質量 $m = 1$ kg、機械共振周波数 $f_{\text{mirror}} = 28$ kHz、 $Q_{\text{mirror}} = 10^3$ とした。一方、振り子の熱雑音については、共振周波数 $f_{\text{pen}} = 1$ Hz、 $Q_{\text{pen}} = 10^3$ を式 (7.16) に代入して

$$\delta\nu_{\text{sus}} = 6.4 \times f^{-\frac{5}{2}} \text{Hz} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.22)$$

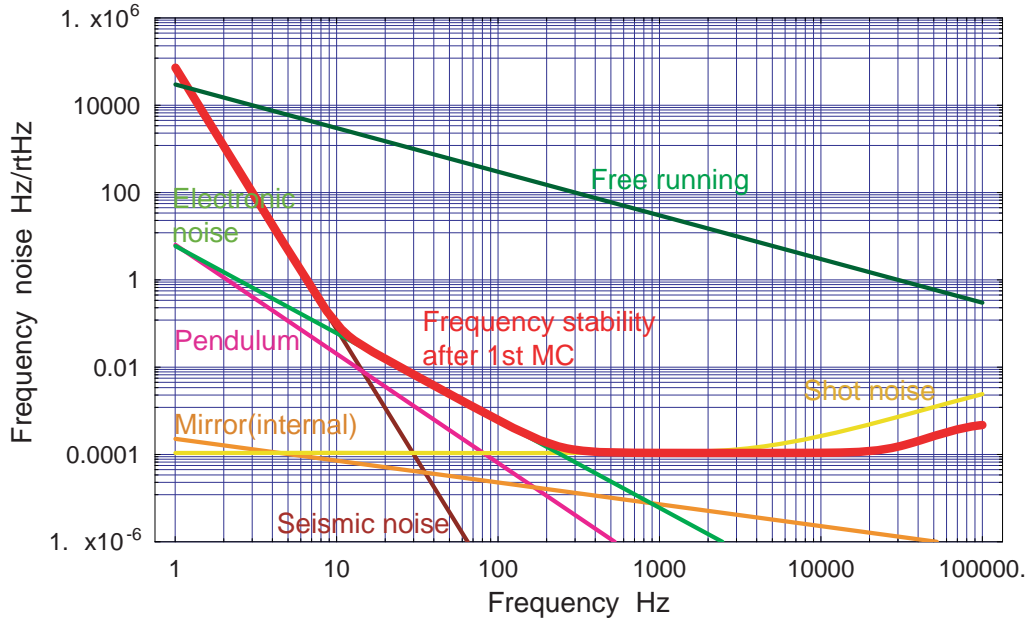


図 7.4: 第一モードクリーナーの周波数安定度: 太線は 1st MC 透過後の周波数安定度。

と計算される。ここでは、サーボフィルターの設計を容易にするために鏡と振り子の Q 値を低く設定した。

ショット雑音は光検出器への入射光量 $P_0 = 15 \text{ mW}$ ¹¹、変調指数 $\beta = 0.05 \text{ rad}$ 、共振器線幅 $\Delta\nu_C = 4.5 \text{ kHz}$ 、ビジビリティ $V_0 = 90\%$ 、モードマッチング率 $M = 95\%$ として、式 (7.17) から

$$\delta\nu_{\text{shot}} = 1.1 \times 10^{-4} \times \sqrt{1 + \left(\frac{f}{4500}\right)^2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.23)$$

と計算される。変調指数を低く設定した理由は、TAMA 300 で問題になった位相変調によってアップコンバートされる RF 帯域の強度雑音の影響を低減するためである。

輻射圧雑音については、ここでは問題にならないので無視した。以上から、1st MC の周波数安定度は図 7.4 のようになる。

第二モードクリーナー

2nd MC には 3 段振り子を使用する。そのときの地面振動の影響は

$$\delta\nu_{\text{seismic}} = \frac{2.3 \times 10^3}{f^8} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.24)$$

となる。振り子の共振周波数は 1 Hz とした。

鏡と振り子の熱雑音は式 (7.15)、(7.16) を用いて

$$\delta\nu_{\text{mirror}} = 3.9 \times 10^{-6} \times f^{-\frac{1}{2}} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.25)$$

$$\delta\nu_{\text{sus}} = 4.4 \times 10^{-2} \times f^{-\frac{5}{2}} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.26)$$

¹¹ レーザーに含まれる高次モードが 10% であるとすれば、実際に要求される入射光量は 50 mW 程度になることが予想される。

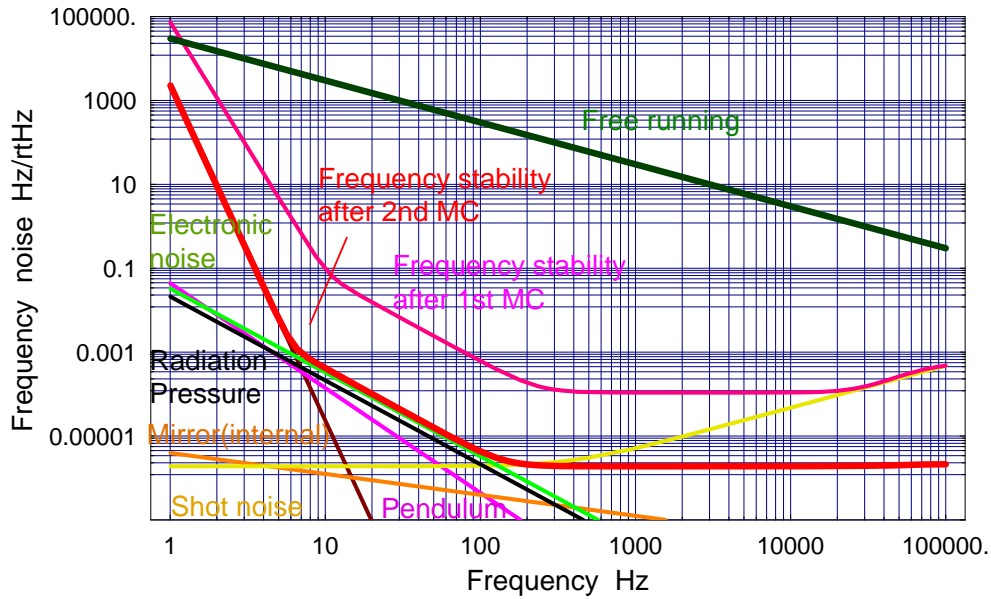


図 7.5: 第二モードクリーナーの周波数安定度: 太線は 2nd MC 透過後の周波数安定度。

となる。ここで、鏡の質量 $m = 1 \text{ kg}$ 、機械共振周波数 $f_{\text{mirror}} = 28 \text{ kHz}$ 、 $Q_{\text{mirror}} = 10^4$ とした。また、振り子の共振周波数 $f_{\text{pen}} = 1 \text{ Hz}$ 、 $Q_{\text{pen}} = 10^4$ を採用した。

ショット雑音は、 $P_0 = 10 \text{ mW}$ 、 $\beta = 0.1 \text{ rad}$ 、 $\Delta\nu_C = 800 \text{ Hz}$ 、 $V_0 = 90\%$ 、 $M = 95\%$ とすると

$$\delta\nu_{\text{shot}} = 1.9 \times 10^{-6} \times \sqrt{1 + \left(\frac{f}{400}\right)^2} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.27)$$

と計算される。

輻射圧雑音は、 $\mathcal{F} = 1000$ 、 $P_{\text{inside}} = 40000 \text{ W}$ とすると

$$\delta\nu_{\text{rad}} = 2.1 \times 10^{-2} \times f^{-\frac{1}{2}} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (7.28)$$

となる。

以上から 2nd MC の周波数安定度は図 7.5 になる。

主干渉計

主干渉計においては相対周波数雑音のみが問題となる。よって、ショットノイズの計算のみ行えばよい。主干渉計の反射ポートで得られた同相信号 (δL_+) を用いてレーザー周波数安定化を行う場合には、図 7.6 に示された安定度が要求される。このとき、反射ポートで要求されるショット雑音レベルは $\delta\nu_{\text{shot}} = 6.0 \times 10^{-10} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ となる。

7.3.4 周波数安定化のサーボ設計

第一モードクリーナループ

1st MC ループの誤差信号はレーザーにのみ負帰還され、制御利得は全てレーザー周波数安定化に使用される。制御帯域を 1 MHz と仮定すると図 7.7 のような利得配分が可能である。これにより、 100 Hz で

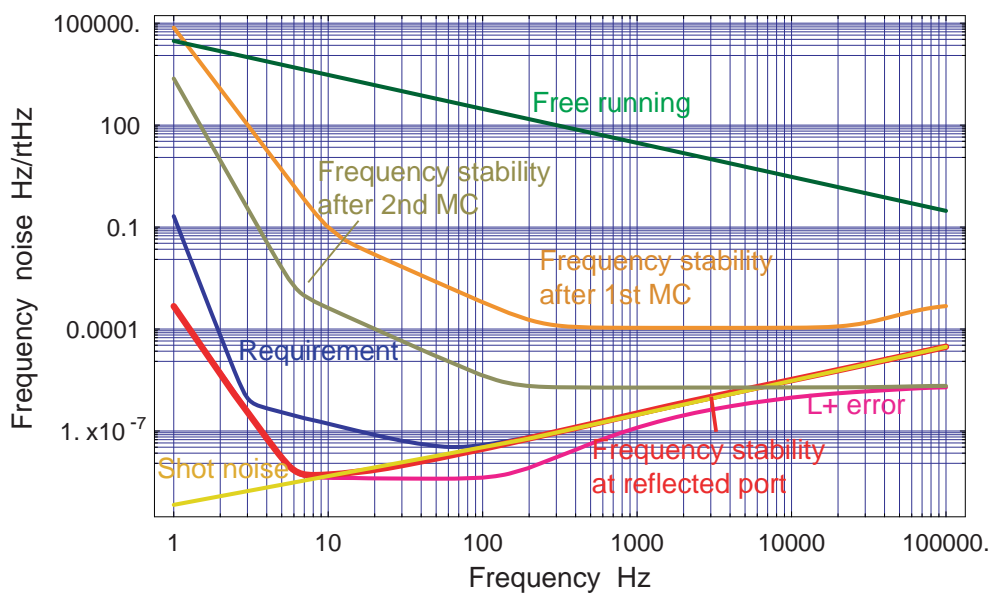


図 7.6: 主干渉計の反射ポートでの周波数安定度: 太線は主干渉計の反射ポートでの周波数安定度。要求される周波数安定度は主干渉計の反射ポートでの値であることに注意する。

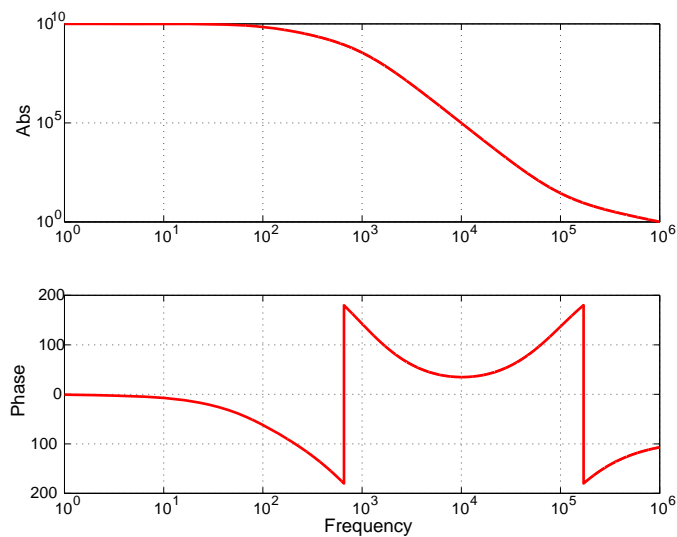


図 7.7: 1st MC ループのボード線図

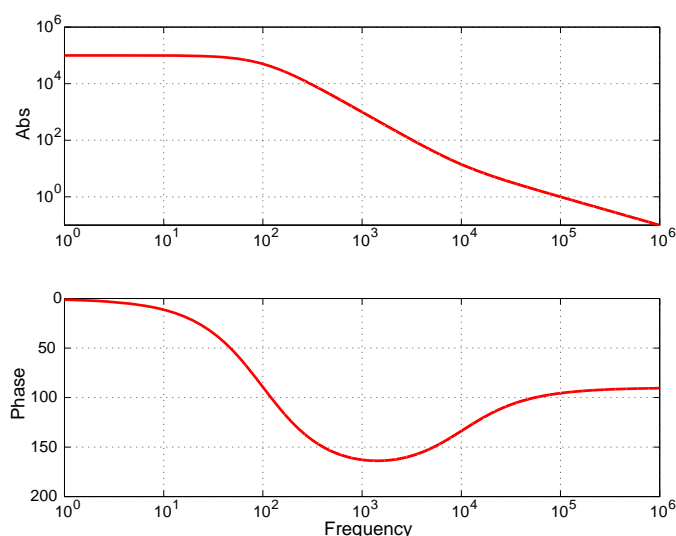


図 7.8: 2nd MC ループのボード線図

200 dB、1 kHz で 170 dB の制御利得を得ることができる。このとき達成される 1st MC 透過後の周波数安定度は、図 7.4 の太線のようになる。

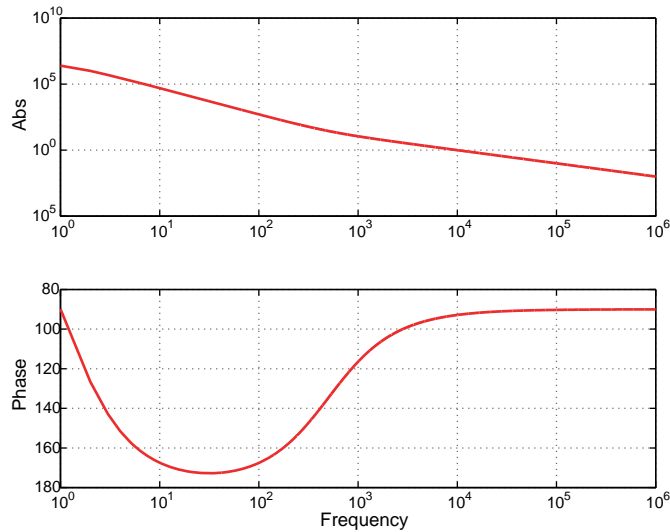
周波数変調アクチュエータにはレーザー結晶温調、マスターレーザーのポンプ光 LD 電流と外部 EOM を用いる。LD 電流による周波数変調は、従来使用されるレーザー結晶に取り付けられた PZT 素子と同程度の周波数応答を持ちながら、変調信号と結合したビームの幾何学的揺らぎを抑制できる利点を持つ。また、原理的にはマスターレーザーの強度雑音を低減することが可能である [13]。ただし、基本的には LD 電流周波数変調とマスターレーザーの強度安定化は両立しないためにマスターレーザーの緩和発振を抑圧できない可能性があるため、PZT 素子とレーザー結晶温調も周波数変調アクチュエータの可能性として残しておくべきである。LD 電流による周波数変調と外部 EOM のクロスオーバー周波数は 50 kHz 程度とし、 $f < 50 \text{ kHz}$ では LD 電流による周波数変調が受け持ち、 $50 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$ では外部 EOM が受け持つこととする。また、 $f < 0.1 \text{ Hz}$ では結晶温調を使用する。

1st MC のロックアキュイジションを考慮すると、アクチュエータのダイナミックレンジは 1 Hz で数 MHz 程度必要となることが予想される。Ref. [13] によれば、LD 電流による周波数変調の効率は 1 MHz/mA 程度であるので、この要求を満たすことができる。また、LISM のデータ解析から神岡鉱山内の地殻歪みは 1 日で 50 nm/m、一週間で 200 nm/m 程度と予想される。これは、レーザー結晶温調で十分に追従できる値である。

第二モードクリーンアップループ

2nd MC ループのアクチュエータには 1st MC のエンドミラーに取り付けられたマグネットコイルと 1st MC ループの誤差点へのフィードアラウンドを使用する。1st MC ループのユニティゲイン周波数が 1 MHz であることから、2nd MC ループでのユニティゲイン周波数は 100 kHz とする。これにより、フィードアラウンドループで生じる本質的な位相遅れを無視して制御系の設計を行うことが可能である。設計された制御利得を図 7.8 に示した¹²。このときで得られる制御利得は 100 Hz で 93 dB、1 kHz で 60 dB である。また、1st MC のエンドミラーの Q 値を低く設定したため、鏡の機械共振の影響を除去するのに課せ

¹² この設計では 300 kHz 程度から生じるフィードアラウンドによる位相遅れは無視した。

図 7.9: L_+ ループのボード線図

られる要求が緩和されるのでマグネットコイルループとフィードアラウンドループのクロスオーバー周波数を数 kHz にすることが可能である。結果として、フィードアラウンドにより 1st MC ループに注入される信号量を減少させることができ、フィルター回路設計に関する要求が緩和されることが期待できる。要求されるショット雑音を達成するのに必要な光検出器への入射光量は 10 mW なので、2nd MC の制御には TAMA 300 で使用されているフォトダイオードを 1 つ使用すれば十分である。2nd MC ループで達成されるレーザー周波数安定度を図 7.5 に示す。

長期安定度は 1st MC のマグネットコイルのダイナミックレンジに依存する。一週間の地殻歪み量 200 nm/m に追従するには 1st MC の共振器長は数 μm ほど掃引できなくてはならない。コイルドライバーの入力換算電圧雑音 $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ を仮定するとき、図 7.4 の電気雑音レベルを満たすには、マグネットコイル効率 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m/V}$ が許される。従って、 $\pm 15 \text{ V}$ 駆動の OP アンプをドライバーに使用することで、要求されるダイナミックレンジを十分に達成できる。

L_+ ループ

主干渉計の腕共振器の FSR が 50 kHz であるので、 L_+ ループの制御帯域は 17 kHz 以下でなくてはならない。アクチュエータとして 2nd MC マグネットコイルと 2nd MC ループへのフィードアラウンドを使用する。2nd MC ループのユニティゲイン周波数が 100 kHz であったので、 L_+ ループの制御帯域が 17 kHz 以下である場合には、フィードアラウンドによる位相遅れの効果を無視してサーボフィルターの設計を行うことができる。図 7.9 に設計された制御利得を示す。ユニティゲイン周波数は 10 kHz であり、得られる制御利得は 100 Hz で 54 dB、1 kHz で 21 dB である。マグネットコイルとフィードアラウンドとのクロスオーバー周波数を 1 kHz とする。さらに鏡の機械共振周波数は 28 kHz になるが、その周波数で利得が 10^{-4} 以下になるようにマグネットコイルループにはローパスフィルターとノッチフィルターが必要となる。図 7.6 に達成される周波数安定度を示す。その安定度は LCGT で要求される周波数安定度を満たしている。

アクチュエータのダイナミックレンジに関しては、2nd MC のマグネットコイルドライバーの入力換算電圧雑音が $3 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるとき、マグネットコイル効率 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m/V}$ まで許容できる。要求されるダイナミックレンジは $2 \times 10^{-5} \text{ m}$ であるため、 $\pm 15 \text{ V}$ 駆動の OP アンプを使用可能である。

7.3.5 Excess ノイズとの関係

LCGT では EOM によるビーム波面の乱れを除去するために、2nd MC の後ろには EOM を置かない。よって、主干涉計の制御に必要な位相変調サイドバンドは 2nd MC を透過することになる。LCGT においても TAMA 300 の変調周波数制御法を採用する場合には、 L_+ ループのフィードアラウンドによって 2nd MC ループに注入される周波数揺らぎ量を考慮する必要がある。これはフィードアラウンドによって 2nd MC の共振周波数付近でレーザー周波数が揺らされ、その揺らぎが 2nd MC を透過する変調サイドバンドの周波数揺らぎと結合して、変調周波数帯域に付加的な強度雑音を生成するためである [14][15]。注入される周波数揺らぎ量が 2nd MC の共振線幅の 0.1% 以内でなければならないと仮定すれば、許容される注入誤差信号量は rms 振幅で $1.5 \text{ Hz}_{\text{rms}}$ 程度と計算される。このような要求を満たすことは、 L_+ ループのマグネットコイルとフィードアラウンドのサーボフィルターの設計を適切に行うことで十分可能である。

7.4 アウトプットモードクリーナーの基本設計

7.4.1 アウトプットモードクリーナーの概要

ダークポートに漏れる基本モードのパワーは、主干涉計の非対称性に依存し、そのパワーは非常に小さい。一方、LCGT のような高出力レーザーを採用する干涉計においては、干涉計内で発生する熱レンズ効果を無視することができなくなり 1 次の Laguerre-Gaussian モードが大量にダークポートに漏れてくると予想される¹³。この熱レンズ効果によって悪化する主干涉計のコントラストは RSE を採用することで緩和されることが報告されているが (mode healing effect) [25][26][27][28]、その効果を考慮しても高次モードは基本モードよりもパワーが大きいと予想される。そのため、ダークポートに漏れ出る高次モードを除去することにより、主干涉計のコントラストを向上させ、ショット雑音の増加を抑制するために LCGT ではアウトプット・モードクリーナーを採用する。また、主干涉計のロックが落ちると同時にアウトプット・モードクリーナーのロックも落ちるのでダークポートに置かれた光検出器を大光量から保護するのにも役立つと考えられる。

7.4.2 アウトプットモードクリーナーに対する要求

LCGT の目標感度は $\tilde{h} = 3.0 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$ である [7]。ここでは、その目標感度を達成するためにアウトプット・モードクリーナーに課せられる要求について述べる。

(1) 形状

キャリアーと位相変調サイドバンドが同じ共振曲線を透過するようにするために共振器長が数 cm と短く、フィネスの低いファブリー・ペロー共振器を採用する (図 7.10 参照)。また、主干涉計において散乱光雑音の原因となる戻り光の影響をなくするためにリング型共振器を採用する。

共振器長制御と信号取得でかける機械変調のために PZT を付けられる幾何学的設計になっていなければならない。PZT を使うことは温調を使った共振器長制御よりもロックアクイジションが早くなる利点を持つ [29][30]。

¹³ 1 次の Laguerre-Gaussian モードは 2 次の Hermite-Gaussian モードの線形結合で表される。ダークポートでの 1 次の Hermite-Gaussian モードはアライメントコントロールによって抑圧される。また、3 次以上の高次モードは鏡の表面粗さで生じるので、十分に高品質の鏡を使用すべきである。

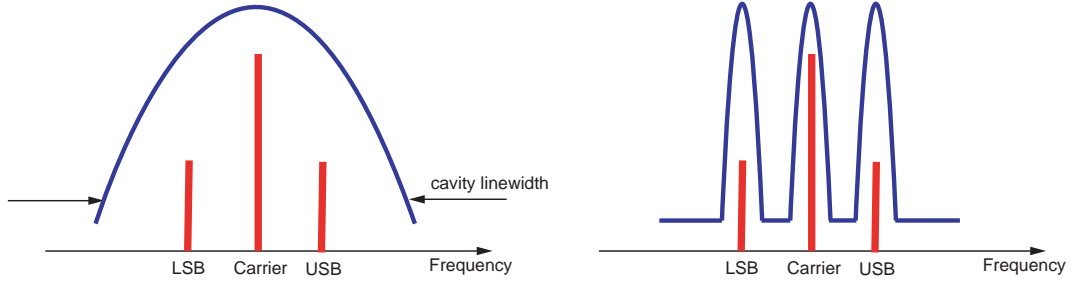


図 7.10: (図左) アウトプットモードクリーナーにおける位相変調透過のメカニズム。キャリアーと変調サイドバンドは同じ共振曲線を透過する。図右 入射モードクリーナーで採用される位相変調透過のメカニズム。位相変調周波数を共振器の FSR と一致させることによって、キャリアーと異なる共振曲線を透過する。

(2) 変調サイドバンド透過率

重力波信号に対する S/N を悪化させないように 10 MHz の変調サイドバンドに対する共振器透過率はパワーで 99% 以上が満たされなければならない。このときショット雑音レベルの増加は 1% 以下になる。また、60 MHz の変調サイドバンドに対してはパワーで 90% 以上の透過率が要求される。

(3) 高次モード抑圧比

ショット雑音レベルの増加を防ぐために、主干涉計のダークポートに漏れ出る高次モードは十分に抑圧されなければならない。ダークポートにおいて支配的であると予想される 2 次 Hermite-Gaussian モードに対して 20 dB の抑圧比を満たさなければならない。

(4) 変位雑音

アウトプットモードクリーナーの共振器長変化は、その透過光に位相と強度変化を生成する。これは、共振器長が変化したとき、キャリアーから見た位相変調サイドバンドの位相変化が等しくないためである。従って、共振器長変動による雑音の影響が主干涉計の目標感度以下であるように共振器長を制御しなければならない。

LCGT では重力波信号は以下ようになる。

$$S_h(f) \approx -2i \frac{2\mathcal{F}_{FP}}{\pi} \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h(f)L}{1 + i\frac{f}{f_{sc}}} E_{rec} E_{+0} \quad (7.29)$$

ここで、 \mathcal{F}_{FP} は腕共振器のフィネス、 λ はレーザー波長、 L は腕共振器長である。 $f_{sc} = f_c \times SBG$ で、 f_c は腕共振器の cut-off 周波数、SBG はシグナルバンドゲインである。また、 E_{rec} 、 E_{+0} はそれぞれ

$$E_{rec} = \frac{t_r}{1 + r_r r_0} \cdot \frac{t_s}{1 + r_s r_e} E_0 \quad (7.30)$$

$$E_{+0} = \frac{t_r t_s}{1 - r_r \cos(\frac{\Omega\delta}{c}) + r_s \cos(\frac{\Omega\delta}{c}) - r_r r_s} \frac{i\Gamma}{2} \frac{\Omega\delta}{c} E_0 \quad (7.31)$$

である。 r 、 t は電場振幅反射率と透過率、添字 r、s、e はそれぞれリサイクリングミラー、シグナルリサイクリングミラー、腕共振器のエンドミラーを表す。 r_0 は腕共振器反射率である。 $\Omega = 2\pi\nu_m$ で ν_m は位相変調周波数、 δ は主干涉計の 2 枚のフロントミラーまでの距離の差を表している。

一方、アウトプットモードクリーナーの共振器長が δl 揺らいだときに透過光に生じる雑音の大きさは、

$$S_{\delta l}(f) = i \frac{2}{\pi} \mathcal{F}_{MC} \frac{4\pi}{\lambda} \delta l_{MC}(f) E_{rec} E_{+0} \sqrt{\frac{1-C}{2}} \left[i \left(\frac{\nu_m}{\Delta\nu} \right) - \left(\frac{\nu_m}{\Delta\nu} \right)^2 \right] \quad (7.32)$$

表 7.5: Specification of output modecleaner for LCGT

Descriptions		Values
round trip length		70 mm
finesse	\mathcal{F}_{MC}	14
FSR		4282 MHz
Cavity bandwidth	$\Delta\nu$	304 MHz
reflectivity	input and output (flat) end (R = 230 mm)	0.80 >0.99995
mirror spacing	flat-flat flat-concave	10 mm 30 mm
incident angle	on end mirror	0.167 rad
beam size	waist (horizontal) waist (vertical) on end mirror (horizontal) on end mirror (vertical)	166.5 μm 167.9 μm 181.1 μm 182.1 μm
geometric factor	horizontal vertical	0.691 0.699
mode interval	horizontal vertical	0.1285 0.1266
Suppression ratio	first-order modes second-order modes	> 16 dB > 19 dB

と書ける [29]。ここで、 \mathcal{F}_{MC} はアウトプットモードクリーナーのフィネス、 C はアウトプットモードクリーナー透過後の干渉計のコントラスト、 $\Delta\nu$ はアウトプットモードクリーナーの共振器線幅である。

$S_h(f) > S_{\delta l}(f)$ が成立すればよいから、

$$\delta l(f) < \frac{\mathcal{F}_{FP}}{\mathcal{F}_{MC}} \left(\sqrt{\frac{1-C}{2}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta\nu}{\nu_m} \right)^2 \frac{h(f)L}{1 + i\frac{f}{f_{sc}}}, \quad (7.33)$$

が要求される。右辺の具体的な数値は次節で見積もる。

7.4.3 アウトプットモードクリーナーの光学デザイン

アウトプットモードクリーナーに対する要求を満たすために、FSR と共振器線幅をそれぞれ 4.28 GHz、304 MHz とする。対応する round-trip 長は 70 mm であるため、共振器長制御と長さ信号取得のための機械変調を行うために PZT を使うことは幾何学的なデザインの観点から十分に可能である。入射・出射ミラーは平面鏡で反射率 80%、エンドミラーは曲率半径 230 mm で反射率 99.995% 以上とする。表 7.5 に設計されたアウトプットモードクリーナーのパラメータを示す。また、図 7.11 に表 7.5 中のパラメータに従ったデザインの一例を示す。

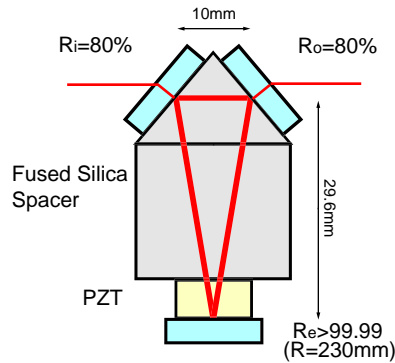


図 7.11: LCGT のためのアウトプットモードクリーナー

LCGT での主干渉計のパラメータは以下ようになる。

$$\begin{aligned} \tilde{h}(f) &= 3 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}} \quad \text{at } 100 \text{ Hz} \\ L &= 3000 \text{ m} \\ 1 - C &= 5 \times 10^{-3} \\ \nu_m &= 10 \text{ MHz} \\ \mathcal{F}_{\text{FP}} &= 1250 \end{aligned}$$

これらと表 7.5 に示された値を式 (7.33) に代入するとアウトプットモードクリーナーの変位雑音に対する要求値は

$$\delta l < 6.6 \times 10^{-16} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}} \quad \text{at } 100 \text{ Hz.} \quad (7.34)$$

となる。これは周波数安定度で $\delta\nu < 2.7 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ に相当する。要求される変位雑音を達成するためには 100 Hz で 53 dB の防振が必要となる¹⁴。従って、アウトプットモードクリーナーは真空中で共振周波数 1 Hz の 1 段振り子で懸架されなくてはならない。主干渉計とアウトプットモードクリーナーの間には反射型モードマッチングテレスコープとピックアップミラーが置かれ、ピックアップミラーからの光はアライメントコントロールと主干渉計のロックアクイジションに利用される。

7.5 光共振部のモードパラメータとモードマッチング・テレ スコープ

光共振器は、第一 MC, 第二 MC とともに、入射コブラを平面鏡, エンドミラーを凹面鏡とし、凹面鏡の曲率半径を周回光路長の 3/4 の長さとする。これにより、光共振の固有モードの高次モード間隔の主要な整数倍が自由スペクトル間隔の整数倍と近くならなくなるので、高次モード共振による望ましくない効果を避けることができる。

¹⁴Junk light パワーが大きいとショット雑音の影響を passive なローパスフィルターで十分に落とさなければならないため、制御帯域を上げることができない。よって、ユニティゲイン周波数が数 Hz になることも考えられるので、記述したような防振比が必要となる。

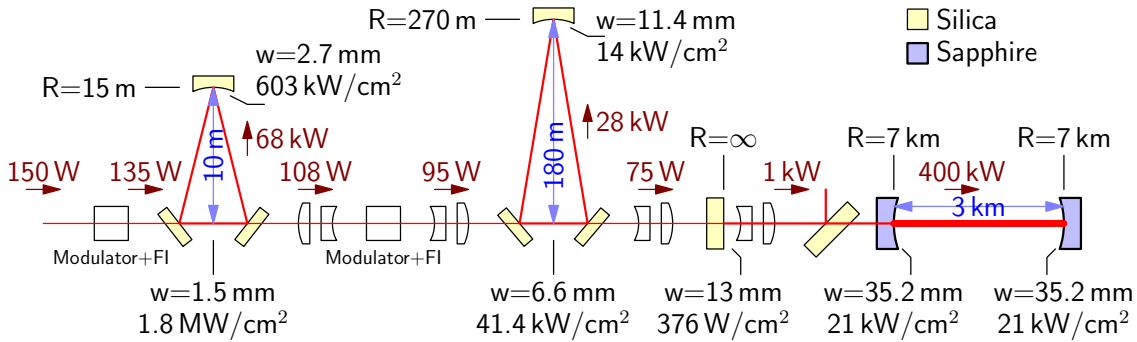


図 7.12: 入射光学系のモードクリーナーと主干涉計でのビーム半径 w とパワー密度. なお, モードマッチングテレスコップには図示の都合で凹凸レンズが描いてあるが, 実際には散乱光を低減する目的で凸面反射鏡, 凹面反射鏡を用いる.

アーム共振器の基線長を $L = 3000\text{ m}$ とし, 入射ミラー (front mirror, FM) とエンドミラー (end mirror, EM) が曲率半径 $R_F = R_E = 9000\text{ m}$ の凹面鏡とすると, FM 上でのビーム半径 w_F は

$$\frac{\pi w_F^2}{\lambda} = R_F \left(\frac{2R_F}{L} - 1 \right)^{-1/2} \quad (7.35)$$

により $w_F = 35.2\text{ mm}$ となる. 変調周波数の要請から, リサイクリングミラー (power recycling mirror, PRM) を FM から 15.0 m 離れた場所に置き, シグナルエクストラクションミラー (signal extraction mirror, SEM) を FM から 18.0 m 離れた場所に置くという設計になっている. このとき, FM の両面に曲率を設けない通常のデザインでは, FM に対して PRM, SEM が近いために, アライメント制御に必要な高次モードの位相シフト (Gouy phase) が小さくなりすぎて, 信号分離が難しくなる. そこで, FM の AR 面に曲率をつける方法 [23], 主干涉計ビームスプリッタとリサイクリングミラーの間に反射型テレスコップを導入する方法などにより, リサイクリング共振器長が短い場合でも効率良く Gouy 位相を回す手法が提案されている.

モードクリーナー内部を巡回する光のパワーは, 主干涉計のアーム共振器の内部パワーに比べると数分の一で済む. しかし, モードクリーナーを構成する鏡の面上では, ビーム半径がそれほど大きくないため, アーム共振器内部のレベルを上回るような大きなパワー密度に曝されることになる. MC の固有モードのビーム径が小さすぎる場合, 熱変形によるモードのずれが起こると予想され, 最悪の場合には鏡コーティングの損傷が起こる. そこで, 鏡の上でのパワー密度を確認しておく必要がある. 前節で述べたモードクリーナーのパラメータでは, 第一 MC のキャリア透過率は 0.85 , 強度エンハンス比 497 , 第二 MC のキャリア透過率は 0.91 , 強度エンハンス比 302 となる¹⁵. 光源レーザーからの供給パワー 150 W の下で主干涉計入射パワー 75 W を確保するには, 入射光学系の透過率が 0.5 以上である必要があるが, これを満たすために, 第一 MC 手前の変調器・Faraday アイソレータ系の透過率 0.9 , 第一 MC 透過率 0.8 , 第二 MC 手前の変調器・Faraday アイソレータ系の透過率 0.88 , 第二 MC 透過率 0.79 を目標とする. このような仮定の下で求められる, ビーム径の推移とパワー密度の概算値を図 7.12 に示す. 典型的な誘電体多層膜鏡の耐パワー密度は, 1 MW/cm^2 程度となっており, 第一 MC を構成する鏡の上では, この値を越えていることが分かる. 光学コーティングに耐パワー向上の工夫を施すなどの配慮が必要となる.

モードマッチングテレスコップを構成する光学素子は, TAMA300 の初期では凹レンズと凸レンズを組み合わせたガリレイ型屈折望遠鏡の構成をとっていた. その後, ノイズハンティングの過程で, このレンズの AR コーティングの残反射または散乱光が雑音源になっているのではないかと疑いが持たれ,

¹⁵ 入出力カブラの損失 100 ppm , エンドミラーの反射率 99.99% を仮定.

軸外し放物面鏡を用いた反射型望遠鏡に交換された LCGT では、やはり散乱光雑音の対策として、反射型望遠鏡を利用する予定であるが、製作の容易さを考えて、放物面鏡ではなく、通常の球面鏡を用いることにする。この場合、球面鏡への斜入射は非点収差を生じるので注意しなければならない。その対策としては、凸面と凹面の反射鏡を組にして、波面形状関数の 4 次の項がキャンセルするように両者で異なる入射角を設定するという方法もある [24] が、LCGT では単に入射角を小さくするというアプローチをとる。この方式は LCGT に先立ち、CLIO 100 m 干渉計に導入されて動作確認済みである。

7.6 LCGT のためのレーザー強度安定化

主干渉計の鏡の残留 RMS 振動が $x_{\text{RMS}} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}_{\text{rms}}$ であるとき、パワーリサイクリング共振器に入射する光の相対強度雑音は $\delta P/P = 1.8 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ (@100 Hz) が要求される。このような強度安定度を実現するために LCGT ではレーザーのポンプ光 LD 電流による強度安定化システムを採用する。

7.6.1 光源の強度雑音

干渉計の制御で抑えきれない鏡の RMS 変動は、光源の強度雑音を結合して検出器感度に現れる。強度雑音の影響は、

$$h_{\text{int}} = \frac{x_{\text{RMS}}}{L} \frac{\delta P}{P} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.36)$$

で表される。ここで、 $\delta P/P$ は光源の相対強度雑音、 L は主干渉計の基線長、 x_{RMS} は残留 RMS 振動である。

LCGT の目標感度は $\tilde{h} = 3.0 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$ である [7]。この感度を実現するためにパワーリサイクリング共振器直前で要求される相対強度安定度は $\delta P/P = 1.8 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ となる。パワーリサイクリングおよびシグナルリサイクリング共振器のフィルター効果によりビームスプリッター上での強度雑音 $\delta P/P = 8.3 \times 10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$ (@100 Hz) が達成されるので、主干渉計の鏡の残留 RMS 振幅 $\Delta L_{\text{rms}} = 1 \times 10^{-13} \text{ m}_{\text{rms}}$ を仮定すると、

$$h_{\text{int}} = \frac{1 \times 10^{-13} \text{ m}}{3 \text{ km}} \times 8.3 \times 10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}} = 2.7 \times 10^{-25} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.37)$$

となり、安全係数 10 で目標感度を実現できる。このような強度安定度を実現するために LCGT ではレーザーのポンプ光 LD 電流による強度安定化システムを採用する [16][17][18][19][20]。

7.6.2 ポンプ光 LD 電流による強度安定化

ポンプ光 LD 電流制御によって強度安定化を行う方法は強度変調用光学素子を用いる方法と比較して以下のような利点を持つ。

- A. 構成が簡単である。
- B. 強度変調用光学素子による光量損失を除去できる。
- C. 強度変調用光学素子によるビーム波面の乱れ、強度変調から位相変調への結合や偏光特性の劣化などを避けることができる [2]。
- D. 強度変調用光学素子のパワー密度に対する要求がないので大出力レーザーに適應できる。

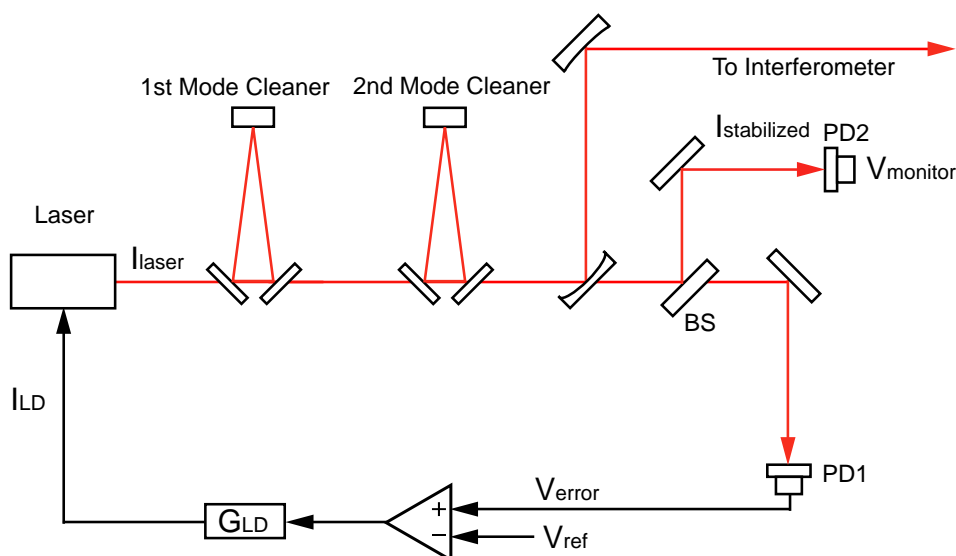


図 7.13: LCGT の強度安定化サーボポロジ。

一方、問題点としては、

- A. ポンプ光に対するレーザー出射パワー特性が線形もしくは連続的でなくてはならない。
- B. 高速変調を実現するために LD ドライバーと並列に電気回路を接続するため、LD の保護を考慮しなければならない。

が挙げられる。問題点 A に関しては、光源の熱特性やモードホップ特性等を考慮に入れた設計を行うことで実現できる。問題点 B に関しても、十分に考慮された電気回路を設計することにより問題はない。

7.6.3 強度安定化のサーボポロジ

図 7.13 に LCGT のレーザー強度安定化システムを示す。LCGT では第二モードクリーナー透過光の一部を真空中で検出してレーザー強度安定化に使用する。真空中で光を検出することにより、埃による散乱や音響雑音の影響を除去することができる。ただし、光検出器の廃熱や密封に使うチャンパーに取り付けられた光学窓の品質等を考慮する必要がある。チャンパーで密封された光検出器は 2 台使用し、一方は制御に、他方はモニターに使用することにする。また、リサイクリング共振器内の強度雑音を真空中でモニターするための光検出器を用意しておくことも必要である。このモニターにはリサイクリング共振器内に置かれたピックアップ鏡からの反射光を使用する。

図 7.13 では省略したが、レーザーの構成次第では多段式の強度安定化を行う可能性もある。その場合には、レーザーのパワーステージ以前でプレ強度安定化を行っておき、さらにパワーステージのポンプ光 LD 電流を利用して第二モードクリーナー透過光による強度安定化を行う。

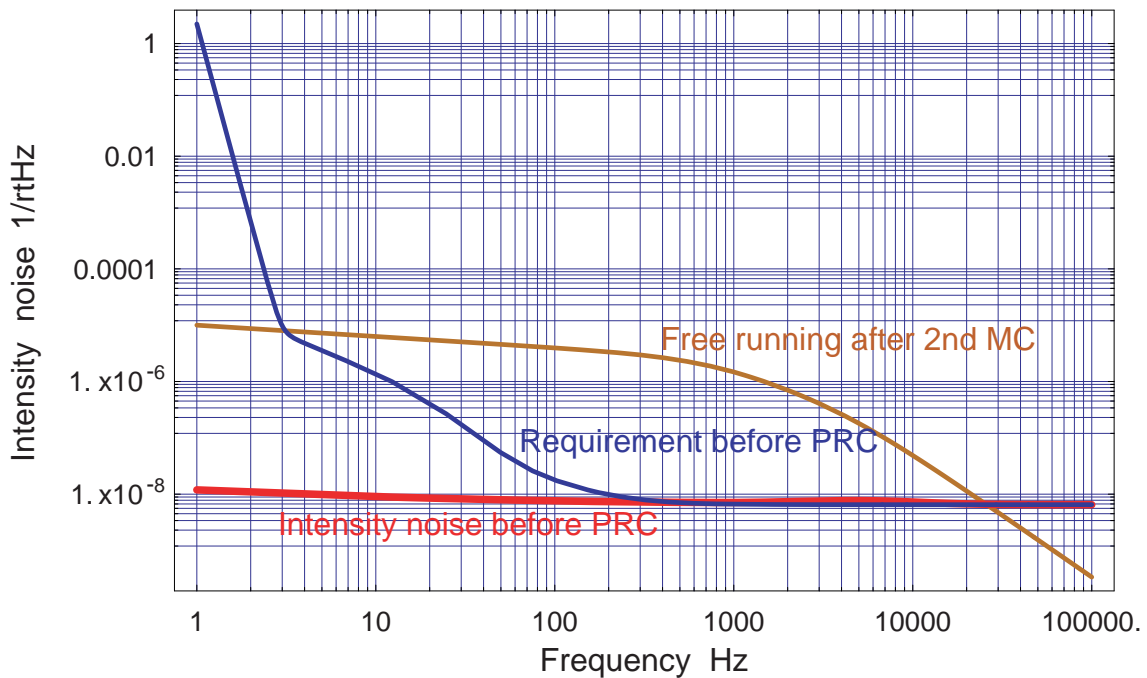


図 7.14: パワーリサイクリング共振器入射光に要求される強度雑音レベル

7.6.4 強度安定化のサーボ設計

フリーラン時のレーザー強度雑音に対する要求値を

$$\frac{\delta P}{P} = \frac{10^{-5}}{f^{1/5}} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (7.38)$$

とする。2 台のモードクリーナーは強度雑音に対してローパスフィルターとして働くため、第二モードクリーナー透過後のフリーラン時の強度雑音は図 7.14 に示したようになる。

図 7.14 のリサイクリング共振器入射光に対する強度安定度を達成するために、図 7.15 のような制御利得を考える。ユニティゲイン周波数は 100 kHz で、100 Hz、1 kHz の制御利得はそれぞれ 60 dB と 50 dB となる。強度安定化システムのショット雑音レベルを $\delta P/P = 6.5 \times 10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$ とすると、このとき達成されるリサイクリング共振器入射光の強度安定度は図 7.14 の太線のようになり、要求を満たせることがわかる。また、要求されるショット雑音レベルを達成するのに必要なレーザーパワーは 1 光検出器あたり約 19 mW となる¹⁶。

7.7 変調素子

LCGT の主干渉計の TAMA300 との大きな違いとして RSE ミラーの追加が挙げられる。これに伴い、RSE 制御信号の取得のために入射光源に強度変調が導入される。その他の位相変調は、標準的な Pound-Drever-Hall 法で行われるのと同じく、電気光学変調器 (electro-optical modulator, EOM) を使う。従って、LCGT で用いられる変調素子を列挙すると、以下の 5 種類となる。

¹⁶ フォトダイオードの放射感度を 0.8 [A/W] と仮定した。

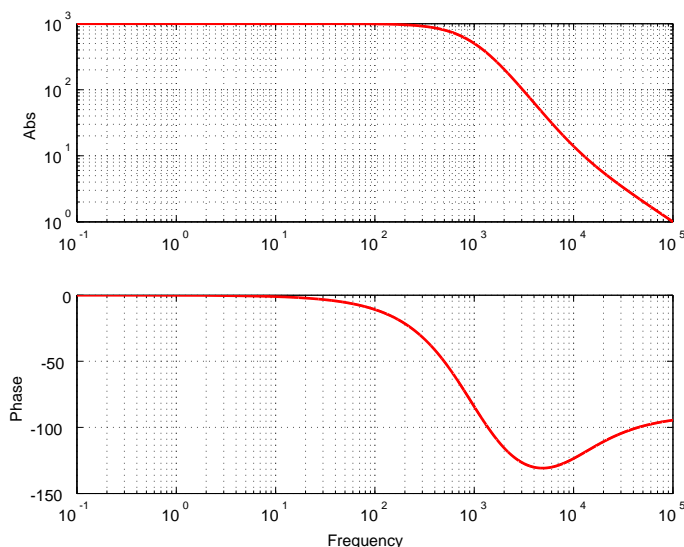


図 7.15: レーザー強度安定化システムのボード線図

主レーザー-従レーザー間 位相変調 EOM 従レーザーの直前に配置される．従レーザーの個数が増えた場合には，周波数を違えつつこの EOM も増やす必要がある．その変調周波数は，第一 MC を透過しないように選ぶ¹⁷．詳細は光源レーザーの章に譲る．

レーザー-第一 MC 間 位相変調 EOM この EOM が LCGT で使われる変調器の中でもっとも大きな光パワーを透過させる必要がある．レーザー光源の直後に配置する．しかし，光学結晶の耐パワー密度が厳しい場合には，後続の MMT1 と配置を入れ替えることも検討する．変調周波数 f_{MC1} は，そのサイドバンドが第一 MC を透過しないように選びさえすれば特に精密な要請はない

第一 MC-第二 MC 間 位相変調 EOM この EOM の変調周波数 f_{MC2} も，そのサイドバンドが第二 MC を透過しないように選ぶ．

主干渉計 位相変調用 EOM 第一 MC と第二 MC の間に配置する．変調周波数 f_{m1} は約 10 MHz で，そのサイドバンド，高次サイドバンドが主干渉計アーム共振器に共振しないように，3 桁目以降を調整する．また，このサイドバンドが透過するように第二 MC の長さを制御する必要がある．

主干渉計 強度変調用 EOM 変調周波数 f_{m2} は約 60 MHz で，こちらもサイドバンドが主干渉計アーム共振器に共振しないように，調整を必要とする．また， f_{m1} との混調が起きないように，Mach-Zender 干渉計を構成し，その片側に強度変調用 EOM を配置する．

変調器の種類毎に変調周波数・設置場所の選択指針を列挙した．周波数については，さらに安全のために，変調周波数 f_{MC1} , f_{MC2} とその倍波・サブハーモニクスが， f_{m1} の整数倍にならないことが望ましい．

光学結晶を利用した変調器の開口径・耐パワー性・制御特性等が，LCGT 計画で要求される光パワーに対して技術的に適合困難であった場合には，光学変調器を使わずに，かわりにサブレーザー光源と部分反射鏡を用意して，周波数オフセットつきコヒーレント加算によってサイドバンドを生成するという手法

¹⁷TAMA300 では master-slave 間の周波数差を得るのに 20 MHz の位相変調を用いている．この変調によるサイドバンドは 10 m 懸架 MC により除去されている．

も検討する．特に位相変調の場合には，変調器で生じる高次サイドバンドが主干涉計の信号分離の際に悪影響を及ぼす場合がある [21] が，サイドバンドのコヒーレント加算によって生じた変調には原理的に高次サイドバンドが発生しないため，信号分離の観点からは非常に有利である．しかし，この手法では，光源の周波数・強度・空間ジッター等の雑音キャリア，サイドバンド毎に無相関で入るために，通常の位相変調器を用いる場合に比べて雑音特性が悪化することが懸念されるので，さらに調査が必要である．

また，リング共振器の周波数誤差を得る場合に限って，入射光偏光を楕円に逸脱させ，反射光を PBS で分けて差信号をとることで，位相変調なしに誤差信号を得ることができる [22]．これによって，さきの 5 種類の EOM のうち前者 3 種を排除することができる．しかし，第二 MC 信号取得用の EOM をこの方法で排除すると，ブライトポートの出力光 MC としての機能と背反するかもしれない，こちらもさらに調査が必要である．

7.8 光検出器

光検出器は，光の強度変化をそれに比例する電気信号に変換する．これは入射光学系，射出光学系に限らず，レーザー光源，主干涉計でも多用される要素であるが，入射・射出光学系部門の開発項目の柱の一つと位置付けている．光検出器は干涉計の光取り出しポートに配置され，その機能に応じて全く異なる構成をとる．大別すると以下の 4 種類となる．

RF 同期検波用 光検出器 変調周波数 (10~60 MHz), あるいはそれらの高調波といった高周波の強度変化を電気信号に変換する．DC 光量もモニタできる必要がある．高周波対応のため，受光面の小さいフォトダイオードを選ばねばならない．フォトダイオード単体で受けられるパワーは 100mW 程度である．

アラインメント信号取得用 4 分割 光検出器 光共振器の反射光を，前節の Gouy 位相テレスコープに通したのち，この光検出器に導く．アラインメント信号取得法として Word 法を利用する場合，クワドラントの各セグメントが独立に，RF 周波数帯域での光強度変化を電気信号に変換できなければならない．

強度安定化用 光検出器 DC から数 MHz までの強度変化を広帯域に電気信号に変換する．空気中の塵のゆらぎの影響を受けないように，真空槽の中に置くことが望ましい．

モニタ用 光検出器 アーム共振器の透過光など DC 光量をモニターし，ロック・アンロックの判定に用いられる．RF 周波数に対応する必要がない代わりに，変換係数の長期安定性が特に求められる．

温度 300 K において Si のバンドギャップは 1.11 eV で，これは波長 $1.15 \mu\text{m}$ に相当する．波長 $1.064 \mu\text{m}$ の光の光子エネルギーはこのバンドギャップに近いので，量子効率が低下しがちで，放射感度の温度特性も良くない．これに対し，GaAs と InAs のバンドギャップは 1.42 eV, 0.36 eV となっており，InGaAs 系ではその組成，構造を制御することにより，可視域から赤外までの波長の光に対して特性を最適化することができる [31]．このため，波長 $1.064 \mu\text{m}$ 近辺の光を電気信号に変換するフォトダイオードには，化合物半導体の InGaAs を用いたものが有望視される [32]．LCGT においても，量子雑音の制限近くまで SN 比を高める必要がある部分には，InGaAs フォトダイオードが採用される予定である．TAMA では，Hamamatsu G3476-10 が用いられている [33]．

一方で，Si を利用したフォトダイオードも，補助的に多用される．Si には，加工技術が枯れており大口径のものが得られる，安価である，などの利点に加え，化学的に極めて安定な SiO_2 保護膜を表面に形

成することにより、特性を長期間安定させることができることが大きな特徴となっている。市販のハーメチックシールされた Si フォトダイオードでは、酸素暴露下での加熱（はんだづけ等）にさえ留意すれば、窓板除去後も特性が維持される。これに対して、InGaAs フォトダイオードは窓板を除去して酸素や水分に触れると、速やかに劣化が始まるといわれている。この特性のために、フォトダイオードからの散乱光を低減することが最優先となる強度安定化用光検出器において、窓板を除去した Si フォトダイオードが利用されるかもしれない。

フォトディテクタからの後方散乱光が主干渉計に戻ることで生じる雑音は、光路長の変動量に対して著しく非線形なのでアップコンバート・ダウンコンバート過程が起こり、広い周波数に渡って干涉計の感度を悪化させ得る。前節のアウトプット・モードクリーナーはこの効果を低減させるが、フォトディテクタ自身の後方散乱を低減させることも重要である。

7.9 光アイソレーター

主干渉計はリニア型共振器の構造を持っているので、主干渉計からの反射光は入射光と同一の光軸上を逆行する。この反射光は、現在 LCGT で考えられている変調スキームでは、制御自由度の分離のための重要な情報を持っているので、分離して光検出器に導く必要がある。このため、Faraday アイソレータが必要となる。また、この Faraday アイソレータで除去されず、より上流にさかのぼる光は、入射光学系や光源レーザーの制御特性を損なったり、散乱により再び方向を逆転して入射光と干渉し、いわゆる散乱光雑音となる。このため、Faraday アイソレータの逆行透過率を小さくすることが特に重要となる。

一般には、Faraday 素子に軸磁場を印加することで 45 度の Faraday 回転子を作り、これを偏光子で挟むことにより FI を構成する。Faraday 回転子には干涉計への光の全パワーが通過する。耐パワーの要請を満たすには開口は広い方が楽になるが、強い軸磁場を結晶内に均質に分布させるのが難しくなり、アイソレーション比など他の性能が下がりやすくなると考えられる。

波長 1064nm の場合には素材は TGG 結晶が用いられることが多い。TAMA300 では、開口直径 15mm の TGG 結晶を用いている。これを上回る開口をもつ TGG 結晶を作るのは、現在の結晶製作技術では難しい。また、TGG 結晶は $1\mu\text{m}$ 帯で $60\sim 110\text{rad/Tm}$ と比較的高い Verdet 定数を持つ [34]。同じ波長帯で Faraday 回転子の候補となる光学材料の中で、TGG の光の吸収係数は比較的小さい方であるが、それでも $1.5\times 10^{-3}/\text{cm}$ 程度の吸収係数を有しており、Verdet 定数自体が温度の関数であるため、入射光量によって Faraday 回転の量が変わってしまう。特に強い光の下では、Faraday 結晶内にビームの中心からの距離に応じた温度分布が生じ、空間的に不均一な Faraday 回転が起こってしまう [34] ので注意を払う必要がある。

また、レーザー共振器内で Faraday アイソレーターを使用する場合で、水冷を施して耐パワー性を持たせる事例が報告されている。これに類似の方法で Faraday アイソレーターを冷却し、アイソレーション比が確保されるように大まかな温度制御する必要があると考えられる。真空内の光学素子に対して防振と冷却を両立させるのは TAMA300 では未経験の領域であり、必要な技術を開発しておかなければならない。

第二 MC の直前の Faraday アイソレータは、主干渉計からの反射光を単に光源に戻らないようにするだけでなく、分離して制御のための信号を取得するという重要な機能を負っている。もし、LCGT の求める高パワー透過の要請と Faraday 回転子の熱特性の問題とが両立できなかった場合には、Faraday アイソレータを廃して別の方式で反射光を分離する必要がある。一つは、第二 MC の鏡の一部に磁気 Kerr 効果をもつ鏡を用いる方法で、別の一つとしては、第二 MC の Sagnac 効果を利用する方法がある。いずれの対案でも、反射光は第二 MC に共振せずにカブラで反射されるので、反射光に対するモードクリーニング効果は期待できない。第二 MC の Sagnac 効果については、積極的に利用しないという場合でも、もとも

と望ましくない効果を持っているので、次節でその量を試算する。

7.10 入射・射出光学系の構成要素の配置

光学素子の配置の変更に伴う重力波検出の感度の差異は、腕共振器の方位以外に本質的な影響はない。しかし、補助的な光学素子とそれを収める真空タンクの配置によっては、干渉計の運転が始まってからの感度向上の調整に支障が生じることもある。このため、LCGT に先立つプロトタイプ干渉計の現場で配慮されてきたことを回顧することは重要である。ここでは、これらの要件に加えて、LCGT で初めて導入されようとしている懸架系干渉計 (SPI) やアウトプットモードクリーナーなどの新要素も考慮しながら、光の変調周波数、空間モードパラメータ等の設定と矛盾しないための光学素子・真空タンクの配置について検討する。

以下、いくつかの点について注意すべき項目を挙げる。

ピックオフ光と真空対応光学窓板 ピックオフ光取り回しについては現時点では詳細な設計はなされていないが、もし真空槽外に導いてフォトディテクタに入射させる場合には、真空窓板についても考慮する必要がある。このとき、ゴースト光 (光学素子の AR 面の残反射光) の処理にも注意を払う必要がある。干渉計アームで用いられる散乱光対策用バッフルと同様、低後方散乱、低アウトガスの特性を備えたビームストップを要所に配置しなければならない。過去のプロトタイプ干渉計では、窓板での散乱光が主干渉計の雑音源の候補となったことがあった。このため、窓板での入射角を工夫したりウェッジ角をつけてゴースト光を処理するといった配慮をする予定である。

真空槽内のターゲット TAMA300 では、ターゲットと呼ばれる光路遮断の板が、調整の際に活躍している。これは、真空を破ることなく真空槽外から位置・傾きを動かせる遮光板で、近傍には光学窓が用意され、遮断したビームの形状を観察できる。LCGT でも同様の機構を準備する予定になっている。

第二 MC の Sagnac 効果 第二 MC の入力カプラ・出力カプラの間隔は、小さくすると真空ダクトの直径も小さくできる。また、エンドミラーの入射角も小さくなるので、MC 固有モードの非点収差も小さくなる。しかし、エンドミラーでの後方散乱が逆周回モードと結合する率が高くなるので、注意が必要である。また、光路の面積が増えると、地球自転の Sagnac 効果により順周回モードと逆周回モードの周波数がずれる。これは通常の MC では問題とならないが、ここで考えているような干渉計反射光のモードクリーナーとしての利用がある場合にはサイドバンドの位相ずれを見積もっておく必要がある。リング共振器において、順周回と逆周回のモードに生じる共振周波数の差 $\Delta\nu_S$ は

$$\Delta\nu_S = 4A\Omega \cdot \hat{A}/(\lambda L) \quad (7.39)$$

で表される [35]。ここで A はリング面積、 \hat{A} はリング面の単位法線ベクトル、 Ω はリングの回転角周波数ベクトル、 L はリングの光路長を表す。また、共振点から $\Delta\nu_S$ だけずれた周波数の光が受ける位相回転 θ_S は

$$\theta_S = \arg[1 - r_i r_o r_e \exp(-2\pi i \Delta\nu_S L/c)] \quad (7.40)$$

となる。表 7.6 に TAMA300 10 m MC と LCGT 180 m MC の例における Sagnac 効果の予測値を示す。順周回光と逆周回光の間の周波数シフトは、LCGT の場合でも TAMA300 10 m MC と大差ないが、長さが長いので、キャリアの位相角のずれでみると 10 倍 (\sim 光路長の倍数 \times フィネス倍数)

	TAMA300 10 m MC	LCGT 180 m MC (narrow)	LCGT 180 m MC (wide)
latitude	35°40′	36°25′	36°25′
finesse	1700	1000	1000
IC-EM distance	9.7 m	179.8 m	179.6 m
IC-OC distance	0.2 m	0.2 m	0.5 m
frequency difference $\Delta\nu_S$	7.9 Hz	8.1 Hz	20.3 Hz
carrier phase shift θ_S	0.1 deg	1.1 deg	2.8 deg

表 7.6: Sagnac 効果の比較 . MC のリング光路のうち入力カブラ (IC)-出力カブラ (OC) 間の辺が他の二辺より短いので , カブラとエンドミラー (EM) の距離が長くなっても Sagnac 感度 (順周回と逆周回の共振周波数の差) はほとんど変わらないが , カブラ間距離が長くなるとほぼ線形に Sagnac 感度が大きくなる .

程度大きくなっている . これらが信号分離に悪影響を及ぼさないように配慮しなくてはならない . 実現可能な最低の IC-OC 間距離でもまだ位相回転が問題になる場合には , 第二 MC を bow-tie 型にしてヌルリング化することなどを検討しなければならない .

SPI の入射光学系 SPI の入射光学系についてもモードクリーナー等が必要であるが , 180 m MC も主干涉計と同様の SPI 構成にするとトータルの性能を上げられる可能性がある . しかし , SPI 用レーザーの雑音により主干涉計の特性が悪化する場合も考えられるので , 定量的な検討が必要である .

参考文献

- [1] A. Araya, N. Mio, K. Tsubono, K. Suehiro, S. Telada, M. Ohashi, and M-K. Fujimoto, Appl. Opt. **36**, 1446 (1997).
- [2] S. Nagano, et al., Rev.Sci.Instrum. **73**, No 5, 2136 (2002).
- [3] A. Abramovici, W. E. Althouse, R. W. P. Drever, Y. Gürsel, S. Kawamura, F. J. Raab, D. Shoemaker, L. Sievers, R. E. Spero, K. S. Thorne, R. E. Vogt, R. Weiss, S. E. Whitcomb, and M. E. Zucker, Science **256**, 325 (1992).
- [4] The VIRGO collaboration, VIRGO Final Design Report (1997).
- [5] K. Danzmann, et al., *Proposal for a 600m Laser-Interferometric Gravitational Wave Antenna*, Max-Planck-Institut für Quantenoptik Report 190, Garching (Germany) (1994).
- [6] Masaki Ando, et al., Phys. Rev. Lett **86**, 3950 (2001).
- [7] K. Kuroda et.al., Int. J. Phys. D, **8**, 557 (1999).
- [8] D. Shoemaker, R. Schilling, L. Schnupp, W. Winkler, K. Maischberger and A. Rüdiger, Phys. Rev. D, **38**, 423 (1988).
- [9] S. Kawamura, A. Abramovici, M. E. Zucker, Rev. Sci. Instrum. **68**, 223 (1997).

-
- [10] S. Nagano, dissertation (1999).
- [11] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, *Appl. Phys.* **B 31**, 97 (1983).
- [12] K. Yamamoto, ‘Goal sensitivity of LCGT ver.2.0’, in Japanese (2001).
- [13] B. Willke, S. Brozek, K. Danzmann, V. Quetschke and S. Gossler, *Opt. Lett.*, **25**, 1019 (2000).
- [14] DeVoe and R. G. Brewer, *Phys. Rev. A* **30**, 2827 (1984).
- [15] S. Telada and the TAMA collaboration, *Gravitational waves and experimental gravity*, Proc. of XXXIVth Rencontres de Moriond, 213 (1999).
- [16] K. Tsubono, S. Moriwaki, *Jpn.J. Appl. Phys.* **31**, 1241 (1992).
- [17] D. J. Ottaway, P. J. Veitch, C. Hollitt, D. Mudge, M. W. Hamilton, J. Munch, *Appl. Phys.* **B71**, 163 (2000).
- [18] R. S. Abbott and P. J. King, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, No5, 1346 (2001).
- [19] M. Musha, T. Kanaya, K. Nakagawa, K. Ueda, *Appl. Phys.* **B73**, 209 (2001).
- [20] I. Zawischa, M. Brendel, K. Danzmann, C. Fallnich, M. Heurs, S. Nagano, V. Quetschke, H. Welling and B. Willke, *Classical and Quantum Gravity*, **19**, No.7, 1775 (2002).
- [21] K. Arai, M. Ando, S. Moriwaki, K. Kawabe and K. Tsubono, *Phys. Lett. A* **273**,15 (2000).
- [22] 竹野 耕平, 東京大学工学部 卒業論文 (2000).
- [23] 佐藤 修一, 特定技術検討会 資料 (2002 年 11 月).
- [24] P. Hello and C. N. Man, *Applied Optics*, **35**, 2534 (1996).
- [25] B. J. Meers and K. A. Strain, *Phys. Rev.* **D43**, 3117(1991).
- [26] D. E. McClelland, C. M. Savage, A. J. Tridgell and R. Mavaddat, *Phys. Rev.* **D48**, 5475 (1993).
- [27] R. Mavaddat, D. E. McClelland, P. Hello and J. Y. Vinet, *J. Optics (Paris)* **26**, 145 (1995).
- [28] G. Heinzl, Dissertation, Universität Hannover (1999).
- [29] Dominjon Agnès, dissertation, Université de Savoie (1996).
- [30] The VIRGO Collaboration, *Class. Quantum Grav.*, **19**, 1857 (2002).
- [31] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley and Sons (1991).
- [32] B. Caron et al., *Nuclear Instruments and Method in Physics Research A*, **360**, 379 (1995).
- [33] N. Mio, M. Ando, G. Heinzl and S. Moriwaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 426 (2001).

- [34] Wynands et. al., Rev. Sci. Instrum. **63**, 5586 (1992).
- [35] H. Statz, T. A. Dorschner, M. Holtz and I. W. Smith, p.246 in “*Laser Handbook*,” edited by M. L. Stitch and M. Bass, Elsevier (1985).

第8章

超高性能ミラー

大橋正健^A・上田暁俊^{B 1}

LCGTで使用するための超高性能ミラーを実現するためには、良質な基板、超平滑研磨 (superpolish)、超低損失光学薄膜コーティング、低形状誤差加工が必要である。鏡に要求される性能の詳細については、干渉計の章を参照されたい。一例の概略値を示すと、直径 300mm、厚さ 180mm、基板の損失としては 20 ppm 以下、面形状誤差は $\lambda/100$ 、マイクロラフネスは 3\AA 、反射率 $R=99.995\%$ 以上が必要とされている。干渉計共振器内のフィネスや使用するレーザーの出力を考慮すると、 $1-R$ の値が、ほぼ透過率に等しくなる必要がある。これは、モードクリーナーの透過効率の観点からも非常に重要である。以下の節では、基板、研磨、コーティングについて解説する。

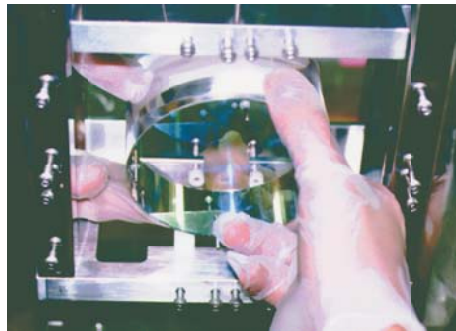


図 8.1: 懸架装置にインストールされる TAMA300 用ミラー

8.1 ミラー基材

基材に要求されるのは、まず、大口径ということである。レーザー干渉計型重力波アンテナ用ミラーは ppm オーダーの低損失でなければならないので、基線長が 3km のファブリーペロー共振器の回折損失を

¹東大宇宙線研^A, 国立天文台^B

考えれば、直径 30cm 以上が必要である。しかも、基板中の散乱・吸収・屈折率揺らぎが非常に小さいことが必須である。鏡の表面散乱を極力抑えるためには、極限的な研磨に適していなければならない。更に LCGT では、鏡の熱雑音を低減するために 20K 程度まで冷却する。従って極低温域で特性の良いサファイアを使用する。現在は全ての重力波アンテナで合成石英がミラー基材として採用されている。合成石英は、光損失に関しては光ファイバ、また屈折率揺らぎに関してはステップ用レンズを例にとれば、その高性能さは一目瞭然である。TAMA300 用ミラー基板の形状は、熱雑音を考慮して直径 10cm、厚さ 6cm と決められた。予想される回折損失は 1ppm 以下である。この形状の合成石英では、最低次の機械的共振周波数が 28kHz、Q 値が約 10^6 であることが報告されている [4]。基板の厚さを ℓ 、屈折率揺らぎを δn とすれば、透過したときに波面は $\ell \delta n$ 程度崩れていることになる。これが $\lambda/10$ 以下になるという条件から $\delta n < 10^{-6}$ であることが要求される。我々は、この要求を充分満たしているものとして、ステップ用レンズに使われる合成石英を選定し鏡を作成した。作成した鏡は損失 1ppm 程度、反射率 99.99 % 以上の世界最高品質と言っても過言では無い物が出来、TAMA-300 干渉計に実装された。LCGT では、TAMA-300 の鏡作成の時より更に、基材の吸収に配慮する必要がある。基材の吸収は、重力波分野では主にミラージュ法 [5] と言われる方法で測定されてきた。これを簡単に説明すると、吸収による基材の温度上昇が引き起こす屈折率歪を、そこを通過するプローブ光の曲がりから見積もるというものである。精度は非常に高いと報告されているが、LCGT 用鏡では、もっと直接的な測定（温度上昇を直接測る）を試行して、温度分布を 3次元計測する必要があるのではないかと考えている。

冷却する観点からは、サファイアは優良な基材であるが、ミラー基板としては使いづらい点がある。サファイアは一軸性結晶であり、光軸、複屈折を考慮しなければならない。結晶であるがため、冷却時の基材、成膜の振る舞いについても精細に知っておく必要がある。また、レーリー散乱、製作工程における、クロムやチタン等不純物の混入、大口径のものがない等の問題もある。これらについては精力的な研究が進んでおり、合成石英と同程度に使えるようになることが期待される。

8.2 基板の研磨

研磨によって作られる鏡面に関する要求は、ファブリーペロー共振器内に光子を充分蓄えることができるほど球面形状が優れており、かつ、表面散乱が無視できるほど平滑なことである。前者に関しては、仏伊共同計画 VIRGO（基線長 3km）で先鞭がつけられ、米 LIGO（基線長 4km）計画で進展した FFT 光学シミュレーションにより詳細に解析されてきた。これは FFT を用いた光伝播シミュレーションであり、実際の表面形状を入力してレーザー干渉計の性能がどれほど劣化するかを評価するものである。TAMA300 のように曲率半径が 1km 以下の場合には、高々 $\lambda/20$ 程度で充分であり、作成された鏡は、平均で $\lambda/40$ [6] 程度になっている事を確認している。形状誤差については専らフィゾー干渉計で測定されており、通常は基準面（原器）の精度で測定限界が決まっている。LIGO 計画では、まず $\lambda/100$ 以上の精度を持つ基準面を製作し、それを用いて高性能フィゾー干渉計で測定している。TAMA300 用ミラーの基板は、全て LIGO と同様の装置で測定を行った。図 8.2 は、この測定装置で計測された TAMA300 用ミラー基板の表面形状を 256×256 メッシュに変換したものである。これを用いて FFT シミュレーションを行い、鏡面形状の乱れによるコントラストの悪化（図 8.3）という観点では、TAMA300 の目標感度が達成可能であることを確認した。しかし、基線長が km の干渉計では、表面形状の許容値は非常に厳しい値であり、形状誤差が、マイクロラフネスによる損失を超え干渉計損失を決める可能性が高い。従って、km 程度の曲率をいかに、設計に沿うように作るかが、TAMA 300 で開発された研磨技術へ、更に付加されることとなる。この問題を解決するために、イオンビームスパッタを使った曲率制御方法を考案し、実験を行っている [7]。また、LMA 等でも Corrective Treatment の技術を開発している。ここで重要な開発事項となるのは、リアルタイムで

膜を観測し、イオンビームスパッタ内部に入れられているマスクを制御し、理想的な曲率や膜を作成する技術である。また、上記方法では成膜中に生ずる膜の欠陥や吸収が問題になっており、今後まだ技術を成熟させる必要がある。

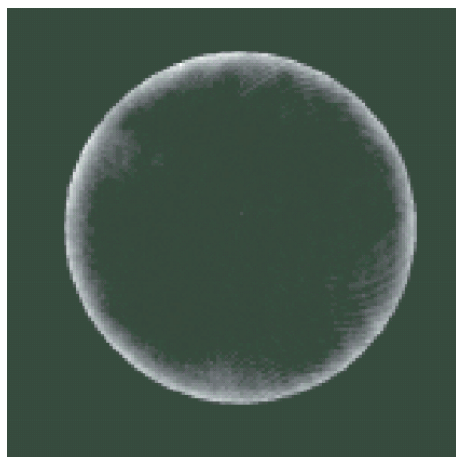


図 8.2: 高精度フィゾー干渉計により測定した TAMA300 用ミラー基板の表面形状データ。研磨面の形状誤差が基準面の精度 (PV 値 $\lambda/40$ 以下) に近いことがわかる。

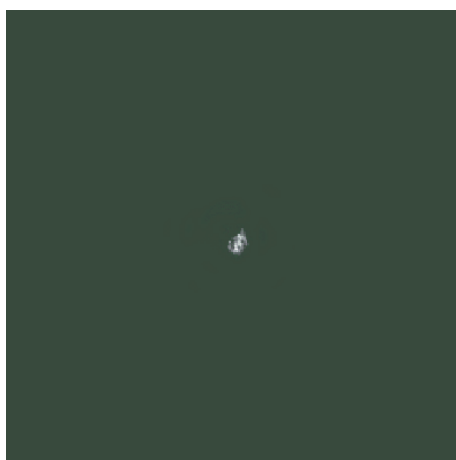


図 8.3: 表面形状データを入れて FFT シミュレーションした結果。干渉計のダークポートに漏れてくる光強度を示したもの。

後者に対しては、リングレーザージャイロ用ミラーに使われるような超平滑研磨 (superpolish) が必須となるが、表面形状の記述で触れたように、鏡面散乱を防ぐためというよりは、寧ろ高性能コーティングを実現するために必要と考えられるようになってきた。実際に LIGO 計画では、表面粗さ 6\AA_{rms} が許容値とされており、 1\AA_{rms} 以下の superpolish 面よりは緩やかな制限となっている。この表面粗さでは全散乱 (Total Integrated Scattering)

$$TIS = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (8.1)$$

が 50ppm 程度となるが、それよりは形状誤差が大事なのである。ただしこの表面粗さでは、点欠陥がでやすくなる可能性があり、将来的には更なる検討が必要である。

表面粗さは、触針式や光学式（干渉計）の測定器，そして AFM 等で測定されているが，通常は触針式測定器のデータで比較されることが多い．ここで，コーティングの前後での測定例を図 8.4 に示しておく．また，TIS を積分球で直接測定することにより表面粗さを見積もる方法も有効である（図 8.5 参照）．

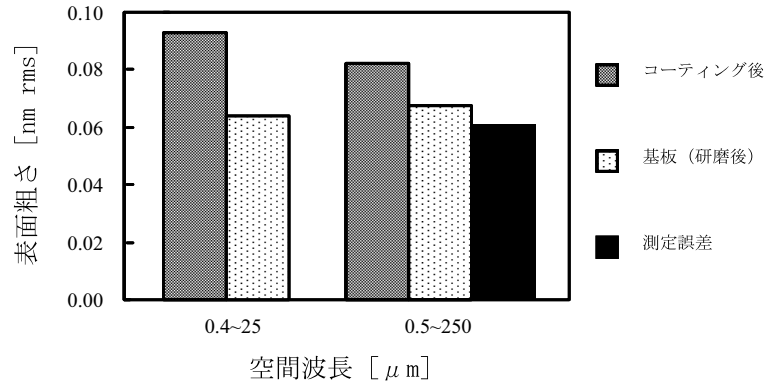


図 8.4: 触針式表面粗さ計による superpolish 面の測定例 .

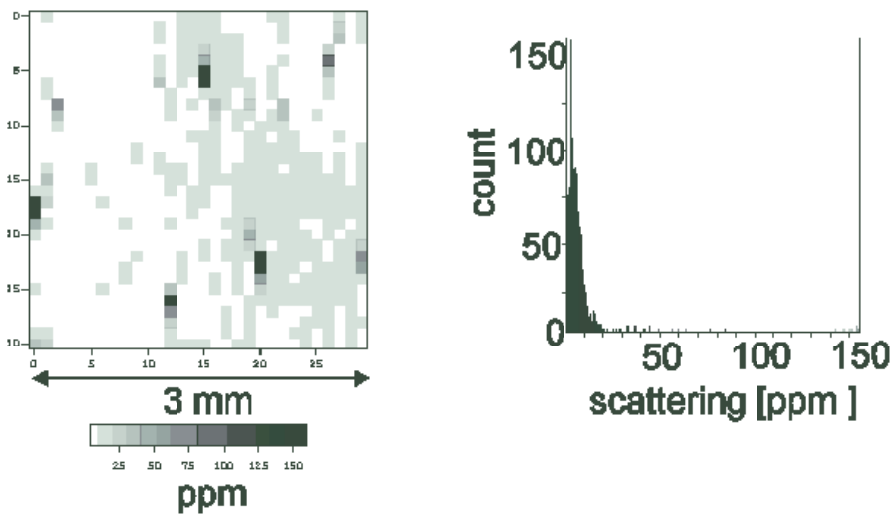


図 8.5: 積分球型散乱計による superpolish 面の測定例 .

8.3 コーティング

鏡の性能を決めるコーティング技術については，リングレーザー gyro 用ミラーをはじめとする高性能光学素子を製作するためにノウハウが蓄積されてきた．現在は欠陥が直径 8cm の領域にわずか一つというものができるようになっている [8]．このような高性能薄膜はイオンビーム工学の発展の賜物である．膜厚制御が鍵となる広帯域反射防止コーティング例（図 8.6）から明らかのように，イオンビームスパッタ法

では膜厚誤差が非常に小さく (\AA オーダーの制御が可能), 重力波検出器のように反射率を高精度 (4桁程度) に設定する必要がある場合には圧倒的な利点となるのである。また, この利点を活かして反射率制御を精密に行えるように, 誘電体膜の屈折率を評価する方法を考案した [9]。

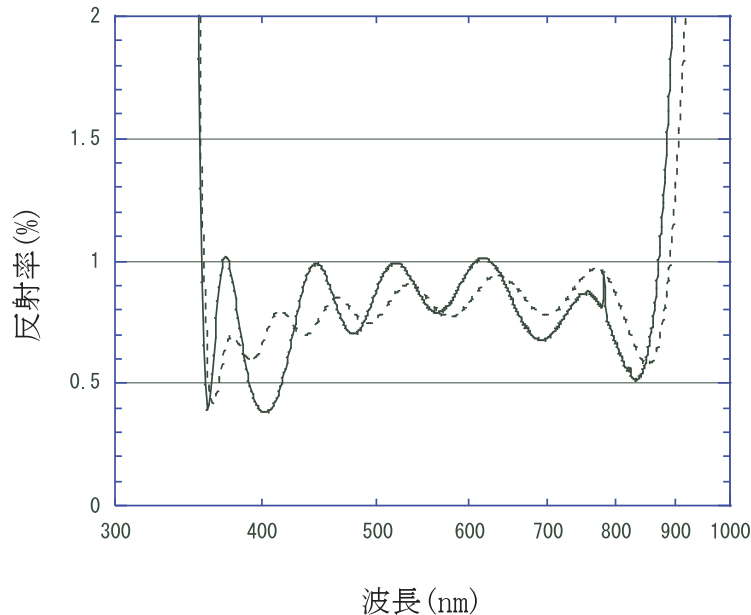


図 8.6: イオンビームスパッタ装置による広帯域反射防止コーティングの製作例 (17 層)。点線はデザインで, 実線が実測値を示す。膜厚制御がかなり精度良く行われていることがわかる。また, 再現性は非常に良い。

LIGO, VIRGO および TAMA300 というレーザー干渉計用のミラーは, 全てイオンビームスパッタ装置でコーティングされている (イオンビームアシストを併用しているものもある)。そこではノウハウを重視するために専らカウフマン型のイオンガンが使われてきたが, フィラメント不要という意味で将来性の高い RF イオンガンも実用段階に入っている。高反射ミラーは, 光学膜厚が $\lambda/4$ の低屈折率膜と高屈折率膜を交互に積み重ねて製作されるが, 重力波で必要となる反射率 99.99% 以上の場合, 膜物質として Ta_2O_5 と SiO_2 のペアを選べば, 総膜数は 30 層を超えることになる (図 8.7 参照)。このような場合, 途中でフィラメント交換しなくても良い RF 型が最終的には有利なのである。確かに論文報告されている最も低損失 (1.5ppm) なミラー [12] はカウフマン型イオンガンでコーティングされている。一方, RF 型イオンガンの場合, 膜欠陥の発生やビームの均一性といった問題があり, カウフマン型の場合のような高品質な光学薄膜が当初は得られなかったが, 損失測定結果を成膜工程へフィードバックすることで, RF 型イオンガンでも反射率 99.9967%, 損失 4.8ppm のミラー [13] が製作できるようになった。

8.4 ミラー損失の測定

作成された鏡を干渉計に導入するためには, その性能を厳密に評価する必要がある。反射率が 99.99% 以上, 損失 ppm 程度の鏡の性能パラメータを分離する事は, 容易では無い。干渉計に導入する事を考えれば, 一枚ずつ鏡の個性が判明している必要がある。また, 大口径な鏡に対して, いかに鏡全表面の性能を保証するための検査を行うかが, 重要である。

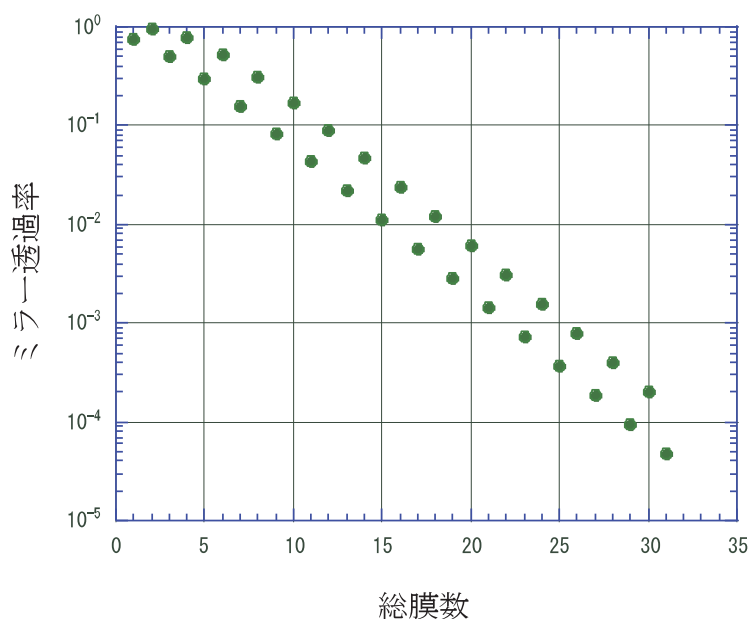


図 8.7: ミラーの膜数と透過率の関係. $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ でコーティングする場合.

8.4.1 共振器特性の測定法

作製されたミラーについて分離すべきパラメータは、反射率 (R)、透過 (T)、損失 (A)、の 3 つである。これらの量を分離するためには、Fabry-Perot (FP) 共振器を評価対象ミラーで構成し、そのフィネスと共振器の透過効率を測定することにより行なう。これは、測定対象が反射率 99.99 % 以上で、なおかつ損失が ppm 程度であり、これらの値を高精度に直接測定することは不可能なためである。共振器を組むと測定感度はフィネス倍だけ増幅され、それぞれのパラメータを高精度に分離することが可能となる。ただし、この場合共振器の安定度や光源の安定度が非常に重要となってくる、99.99 % 以上の反射率をもつミラーで共振器を構成した場合、その共振線幅は数 10kHz 以下であり、その共振器内光子寿命は μs 以上となる。したがって、使用するレーザーの線幅は十分に狭窄化されている必要がある、測定法によっては線幅を数 Hz まで狭窄化した光源を用い測定精度の向上に努めている。現在、測定時に構成している共振器の長さは 200 mm であり、これは共振器の安定性と光子寿命の二つより決めた長さである。共振器長を 200 mm としたとき、反射率が 99.99 % 以上になったとき、その測定感度は急激に向上する。フィネスの測定法として、AM サイドバンド法、伝達関数測定法 [10]、リングダウン法 [11] の 3 種類を開発した。AM サイドバンド法は周波数マーカーとして、入射光に強度変調をかけ、同時にレーザーの発振周波数を掃引する。このとき得られる、二つのサイドバンドのピークをマーカーとして、共振器の透過曲線から共振線幅を求めフィネスを決定する。この方法はレーザーの強度変化の影響を受けないが、使用するレーザーの線幅が共振器の線幅に比べ十分に狭窄化されている必要がある。また、超高フィネスの共振器の場合、その共振器内の光子寿命の影響により実際の共振線幅よりも広くなる。共振器伝達関数測定法は、共振器にレーザー光を安定化し、その光に強度変調をかけ、強度変調の変調周波数を掃引して共振器の透過伝達関数を求める。レーザーは常に、共振器の共振周波数にロックされているため、非常に高精度に共振線幅を求めることができる。現在、この測定の測定限界を与えているのは、FFT アナライザーの分解能である。共振器が不安定である場合は透過光強度が変化し、結果として正しい伝達関数が求められない。したがって共振器が十分に安定であることが必要である。リングダウン法は共振器内部に光が蓄積された状態の時に入射レーザーを切り、その時の共振器出射光の減衰時間を観測する。この方法は観測時間が μs 程度であり、

外乱の影響を受けにくい。しかしレーザーの遮断時間や検出器の応答速度が十分でない場合、得られる値は実際の性能より良くなる可能性がある。透過と損失の分離は共振器の透過効率より求める。透過効率は $P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = T^2/(A+T)^2$ で与えられる。ここで P_{in} は共振器に入射している光パワー、 P_{out} は共振器を透過する光パワーである。したがって、共振時の光透過を測定すれば、損失と透過を分離することができる。しかし、最大透過パワーを得るためには、レーザーの周波数が十分に長い間共振点に止まっていなければならない。そのため、透過パワーを測定する場合は共振器にレーザー光が安定化されている必要がある。特に高透過率、高反射率ミラーの場合、レーザー安定化時と非安定化時では、透過パワーにして10%程度の差を生ずる。

8.4.2 超高品質ミラーの2次元性能評価

共振器を用いてミラーの評価を行なった場合得られる値は、2つのミラーの性能の平均値である。実際にミラーを使用する場合、常に同時成膜した2枚を1組として使用するわけではない。したがって、ミラー性能の2次元分布及び1枚のミラー当たりの性能を知る必要がある。ただし、99.99%といった値を共振器を用いた時と同じ精度で測定する方法はなく、共振器を用いて得られる値をなんらかの方法で1枚当たりの値に分離する必要がある。ミラーの反射率分布を求めるには、1枚のミラーを参照ミラーとし、別のミラーを動かして反射率分布を求めればよい。ミラー性能の2次元評価を行なうには、ミラーをスキャンするための機構が必要となる。そのため、ミラーをスペーサーの両端に固定することができないので、共振器の安定性が失われる。アルミロッドの両端にミラーを固定した場合、片側のミラーを自立型のミラーホルダーに装着した場合、両側のミラーをミラーホルダーに装着した場合の3つの状態の共振器に、同一のサーボ回路でレーザーをロックした場合の周波数安定度を示したのが図-8.8である。アルミロッドの場合に比べ1枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は1桁、2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は3桁、安定度が劣化しているのが分かる。20kHz付近で一旦すべての安定度が一致しているのは、共振器の応答のためである。共振器に持ち込まれるノイズが白色雑音である場合、周波数安定度は2つの状態で1桁づつ悪化するはずであるが、1枚のミラーをミラーホルダーした場合と2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は2桁の周波数劣化がみられる。これは共振器を構成するミラー間に持ち込まれているノイズが相関を持っているためと考えられる。共振器の安定度が低下した状態では、共振器の伝達関数やAMサイドバンドでフィネスを求める事は不可能である。しかし、リングダウン法は測定時間が μs と短く、この時間内で共振器が安定とみなせると仮定すれば測定可能である。共振器が安定であるかどうかを知るためには、実際に測定を行い、その波形が単一時定数となっている事を確認すればよい。図-8.9に2つのミラーホルダーで共振器を構成した場合の計測波形例を示す。波形は単一時定数で減衰しており、計測時間において共振器が十分に安定である事を示している。図-8.10はミラーの反射率面分布について測定を行なった結果である。測定は、 $5 \times 5 \text{ mm}$ で0.5 mm毎に行なっている。反射率の平均値は99.9780%でありその分散は8 ppmであった。このミラーはカウフマン型イオンビーム・スputタリング(IFS)装置で作製された。この計測系の測定誤差は5 ppmほどであり、それに比して顕著な反射率面分散は認められなかった。この計測の反射率は共振器を構成する2枚のミラーに対する値であり、1枚当たりの反射率面分布を求める必要がある。共振器を構成するミラーの反射率を1枚毎に求めるためには、新たに1枚のミラーを加えすべてのミラーの組み合わせについての反射率を求めればよい。この時、それぞれのミラーの振幅反射率を r_1, r_2, r_3 、計測により求めた r_1r_2, r_1r_3, r_2r_3 の組み合わせに対する反射率

を a, b, c , とすると, それぞれのミラーに対する反射率は

$$r_1 = \sqrt{\frac{ab}{c}} \quad (8.2)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{ac}{b}} \quad (8.3)$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{cb}{a}} \quad (8.4)$$

で与えられる. 今回実験に用いたミラーの曲率は, 平面 1 枚 (M_1), $R=1000$ mm の球面鏡が 2 枚 (M_2, M_3) である. 共振器長は M_1M_2, M_1M_3 の組み合わせに対し 200 mm, M_2M_3 の組み合わせに対し 400 mm である. M_2 については, 一旦ミラーを取り外す必要があるため, ミラーの反射率面分布を測定しておく必要がある. 今回測定を行なったそれぞれの組み合わせに対するミラーの反射率と, 各々のミラーの反射率を表 - 8.1 に示す. この測定をおこなったミラーは, 1 枚毎の反射率が分かっており, 反射率基準ミラーとなる. これらのミラーのうち 1 枚を参照ミラーとし, 未知の反射率を持つミラーと組み合わせて共振器を組み, 反射率面分布の測定を行なえば, 1 枚のミラーについての値を知ることができる. その測定結果を図 - 8.11 に示す. 測定領域は 5×5 mm で測定は 0.5 mm 毎に行なっている. 反射率の平均値は 99.9915 % であり分散は 15 ppm であった. このミラーは, RF 型イオンガンで作製された. RF 型では, 同時成膜サンプルにおいても 0.5 % 程度反射スペクトル中心がばらつくことが確認されており, 屈折率にばらつきあると考えられる. このような効果の影響により, カウフマン型よりも若干大きな反射率面分布が "現状" では生じている. もちろん, これらはコーティング条件を最適化することで, 近い将来解決されると期待できる.

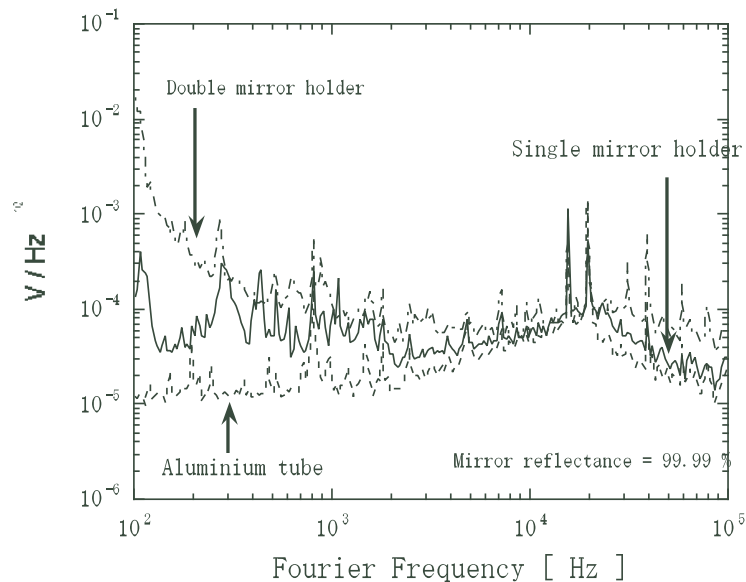


図 8.8: Pound-Drever-Hall 法により FP 共振器にロックされたレーザーの周波数安定性. アルミロッドの両端にミラーを固定した場合, 片側のミラーを自立型のミラーホルダーに装着した場合, 両側のミラーをミラーホルダーに装着した場合を比較している.

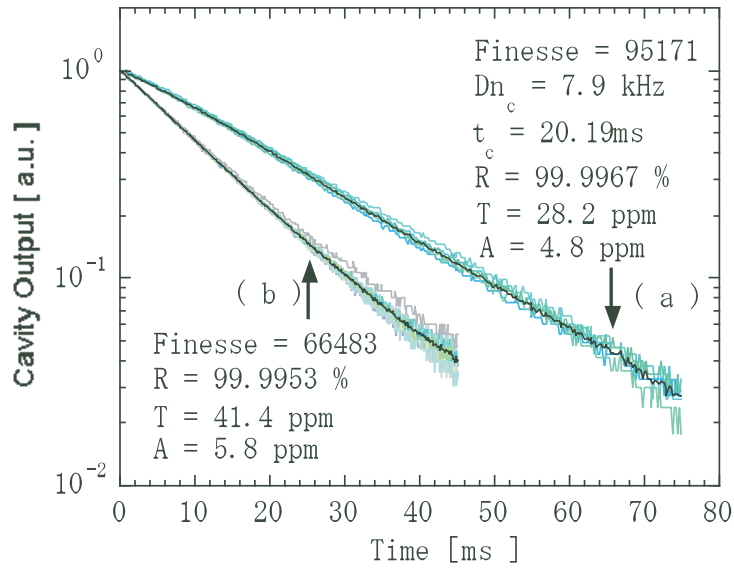


図 8.9: リングダウン法で測定した光子寿命．共振器の安定性は光子寿命に比べて充分長い．

Two-dimensional mapping of reflectance

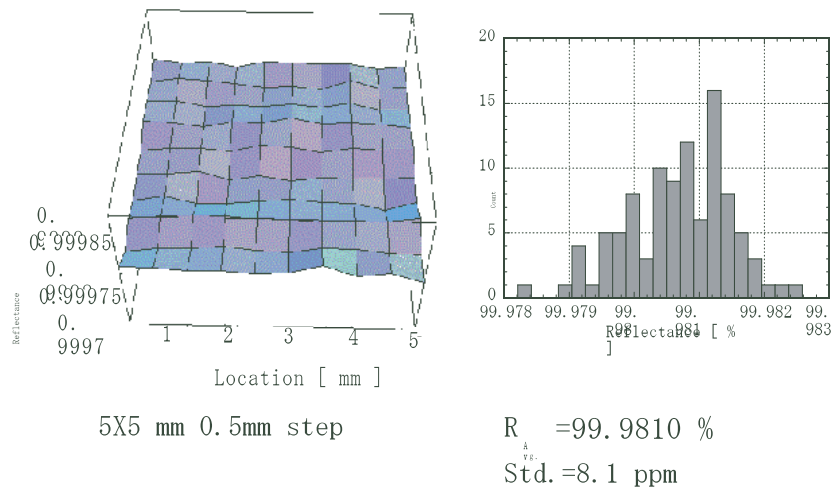


図 8.10: カウフマン型イオンガンで製作されたミラーの反射率の 2 次元マップ．5×5 mm の領域を 0.5 mm ステップで測定しており，平均反射率は 99.9780% ，標準偏差は 8 ppm である．

8.4.3 大口径ビームに対するミラーロス

最後に国立天文台の基線長 20m のレーザー干渉計で行った測定について報告する²．この干渉計は重力波検出器のプロトタイプであり，数々の光学デザインを実証してきた高性能なものである．今回は，1cm 程度の大きなビーム径に対するミラー損失測定に使用したのである（図 8.12 参照）．測定において最も苦

²20m 干渉計は 2000 年に神岡の地下へ移設した．この研究によって、地下に設置された干渉計の優位性を実証した。

表 8.1: The reflectance of $r_1r_2, r_1r_3, r_2r_3, R_1, R_2,$ and R_3 .

	r_1r_2	r_1r_3	r_2r_3
Cavity life time (μs)	5.973 ± 0.174	5.851 ± 0.465	12.158 ± 0.822
Reflectance	$0.999892 \pm 3\text{ppm}$	$0.999886 \pm 5\text{ppm}$	$0.999890 \pm 7\text{ppm}$
	R_1	R_2	R_3
Reflectance	$0.999884 \pm 16\text{ppm}$	$0.999893 \pm 16\text{ppm}$	$0.999880 \pm 24\text{ppm}$

Two-dimensional mapping of reflectance

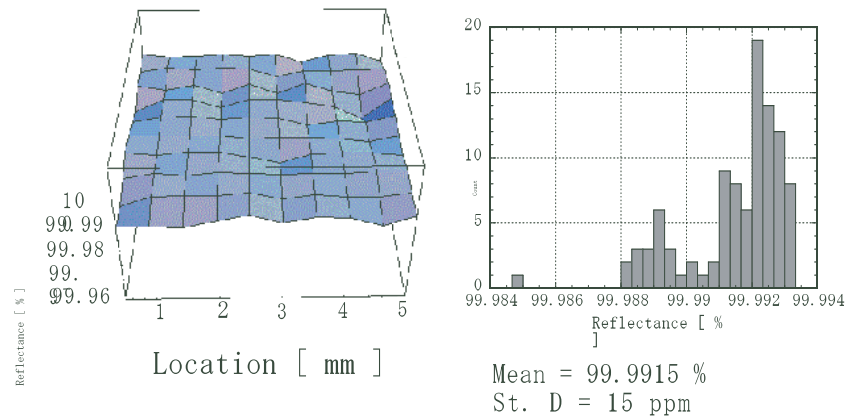


図 8.11: RF イオンガンで製作されたミラーの反射率の 2 次元マップ. 平均反射率は 99.9915% , 標準偏差は 15 ppm である .

労したのは、真空タンク内にミラーを設置する際、如何にミラーを汚すことなく作業を行うか、ということであった。結局は真空タンクをビニールテントで覆い、 N_2 ガスを流しながら手早く作業を行うことで実現したのであるが、タンクの開閉に数人を要する環境での作業は厳しいものであった。さらに、長さが 20m もあり、フィネスも 25,000 と高い（光子寿命は 1msec を越える！）ファブリーペロー共振器の測定は、地面振動が落ち着く深夜に行われた。得られたデータを図 8.13 に示す [15]。ここからミラー損失は約 30ppm と見積もられたが、驚くべきことに、この値は小さなビーム径で別に測定したミラー損失の 2 次元マップ [16]（図 8.14 参照）の平均値と良く一致したのである。つまり、このスケールまでは波面乱れ等による損失は効いていないということであり、ミラー性能は鏡面形状（研磨）ではなくコーティングで決まることが確認されたことになる。

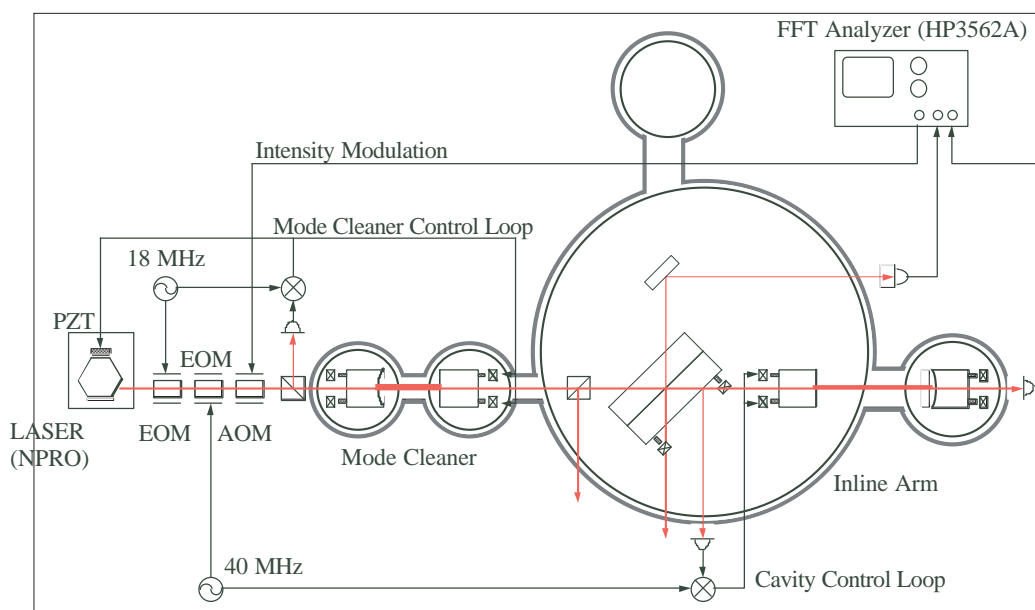


図 8.12: 基線長 20m のレーザー干渉計を用いたミラー損失測定のプロックダイアグラム。レーザー出射光を、長さ 4m の光共振器でモードクリーニングしているため、高次モードの影響はほとんど無い。

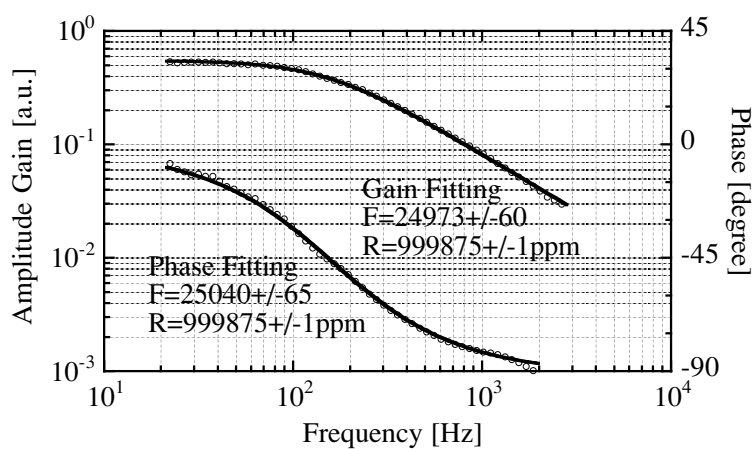


図 8.13: 基線長 20m のレーザー干渉計で測定した共振器の周波数応答。これよりフィネスは約 25,000，反射率 99.9875%，損失 28ppm となる。

参考文献

- [1] 中村卓史，三尾典克，大橋正健編: 重力波をとらえる (京都大学学術出版会, 1998)
- [2] 植田憲一: 応用物理 **67**, 513 (1998).
- [3] 三尾典克: 応用物理 **66**, 939 (1997).

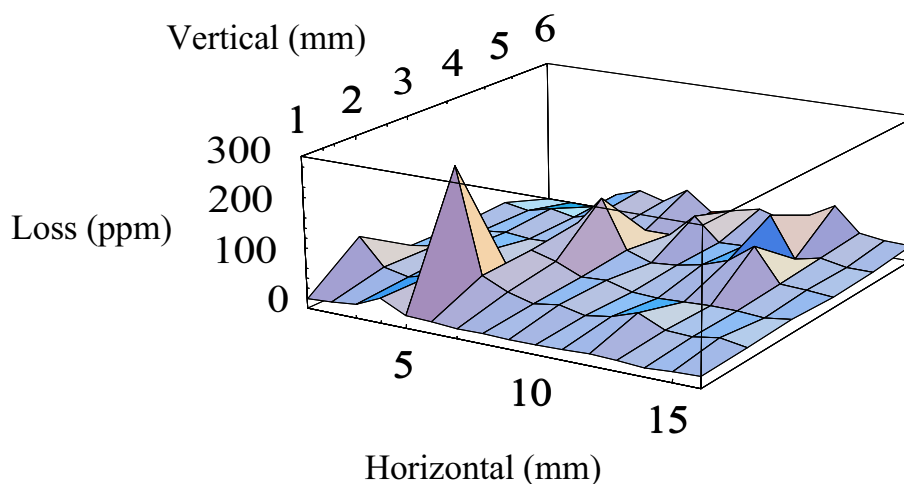


図 8.14: ミラー損失の 2 次元マッピング. 全体の平均値は 40ppm であるが, 特異点を除くと 27ppm となる. 測定時のビーム直径は 0.6mm である.

- [4] N. Ohishi, K. Kawabe and K. Tsubono: *Gravitational Wave Detection*, 369 (Universal Academy Press 1997).
- [5] P.Y. Baures and C.N. Man, *Optical Materials***2**, 241 (1993).
- [6] 渡邊晃司, 中村憲司, 伊藤和彦, 江藤和幸, 渡邊昌彦, 北島直哉: *航空電子技報* **22**, 62 (1999).
- [7] S. Miyoki, M. Ohashi, K. Waseda, H. Karoji, and T. Tomaru: *Optics Lett.* **30**, 1399, 2005
- [8] 渦岡泉, 伊藤和彦, 関根啓一, 江藤和幸, 西田恵美子: *応用物理* **66**, 1345 (1997).
- [9] S. Miyoki, S. Sato, M. Ohashi and M.-K. Fujimoto, *Opt. Rev.* **5**, 17 (1998).
- [10] N. Uehara, K. Ueda, *Appl. Phys.* **B61**, 9 (1995).
- [11] N. Z. Anderson, J. C. Frisch, and C. S. Masser, *Appl. Opt.* **23**, 1238 (1984).
- [12] A. Ueda, N. Uehara, K. Uchisawa, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima and I. Kataoka, *Opt. Rev.* **3**, 369 (1996).
- [13] 上田暁俊, 植田憲一, 佐藤修一, 三代木伸二, 大橋正健, 伊藤和彦, 渡邊晃司, 中村憲司, 北島直哉, 渦岡泉: *レーザー研究* **27**, 116 (1999).
- [14] 上田暁俊, 植田憲一: *光学* **27**, 530 (1998).
- [15] S. Sato, S. Miyoki, M. Ohashi, M.-K. Fujimoto, T. Yamazaki, M. Fukushima, A. Ueda, K. Ueda, K. Watanabe, K. Nakamura, K. Etoh, N. Kitajima, K. Ito and I. Kataoka, *Applied Optics* **38** No.13 (1999).
- [16] A. Ueda, H. Yoneda, K. Ueda, K. Waseda, and M. Ohashi, *Laser Physics* **8**, 697 (1998).

第9章

サファイア鏡

都丸隆行¹

干渉計型重力波検出器で使用される鏡基材には以下のような要請が課される。

- $1\mu\text{m}$ の光を透過 (FP の場合)
- 大きなサイズ
- 大きな Q 値
- 低光損失 (吸収・散乱・屈折率一様性・研磨・コーティング)
- 大きな熱伝導率と小さな熱膨張率

LCGT 計画では熱雑音低減のため、極低温で Q 値が大きく、熱伝導率も大きいサファイア鏡基材の採用を計画している²。この章ではサファイア鏡の利点および技術的課題について述べる。

9.1 サファイア結晶の製造

人工サファイア結晶は、ウィンドウ材や青色 LED 基板、レーザーロッドなど、広く産業上で使用されている。このためサファイア結晶のメーカーは数多く存在する。重力波検出器用鏡では、回折損失を減らすためやラディエーションプレッシャーノイズを減らすために大きなサイズの鏡が必要であり、LCGT では直径 30 cm 程度の大きさが必要となる。

米国の Crystal Systems 社 (CSI) [1] は、 $\phi 330 \times 200 \text{ mm}$ 、65 kg と世界最大級のサファイア結晶製作が可能であり、なおかつ結晶のクオリティーも高い。CSI のサファイアは Heat Exchange 法 (HEM) で製作されており、これは溶融炉に熱交換ガスを送り込み、冷却中の炉内の温度分布をコントロールして結晶

¹高エネルギー加速器研究機構

²ヨーロッパで計画されている第3世代の検出器 Einstein Telescope (ET) 計画では、シリコンの低温鏡を検討している。また Advanced LIGO 計画では、光のビーム径を大きくして室温でありながら熱雑音を下げる事を検討している。

の均一性を高める方法である。原材料にはベルヌーイ法で製作された時計窓の材料が使用されており、純度は99.996%である。原材料を炉に入れて熔融させ³、種結晶を素にゆっくりと冷却して結晶成長させる。この時、He ガスを炉に流し温度勾配が小さくなるように温度コントロールを行う。また、一旦固化を行った後 1600°C まで温度を上昇させてアニールを行っている。

CSI のサファイア結晶は、屈折率一様性および散乱光量により 5 ランクに品質分けがなされており、高品質の順に、Hemex, Hemlux, Hemlite, Hemcor, Hemverneui となっている [2]。さらに、不純物を特に抑えたものとして、White グレードがラインナップされている。

CSI Hemex White が重力波検出器用鏡基材としては有望であるが、現在までのところ $\phi 330$ mm サイズの結晶でこのグレードは達成されておらず、開発途上にある。しかし、小さくとも十分クオリティーの高い結晶を製作できれば、これを種結晶にクオリティーの高い大型結晶を育成可能であり、大型化に期待がもてる。

9.2 熱雑音

9.2.1 サファイア基材の Q 値

サファイアは極低温で Q 値が増大し、鏡の低温化と合わせて大幅な熱雑音の低減が見込める。

サファイア基材の Q 値測定は、 $\phi 100 \times 60$ mm の CSI Hemlite グレードのサンプルを用いて行った。結晶の c 軸はサンプルの円柱軸方向である。サンプルは、実際の干渉計で使われる鏡と同様に $\phi 250 \mu\text{m}$ のサファイアファイバーを用いて 2 ループで懸架し、リングダウン法により測定した。共振の励起には PZT のピックアップを用い、励起後の自由減衰の様子は静電トランスデューサーを用いて計測した。測定振動モードは、干渉計の熱雑音に大きく寄与する軸対象モードの低周波側から二つを、有限要素法を用いたシミュレーションから識別して取り上げた。測定温度領域は 4.2 K から 300 K までである。測定結果を図 9.1 に示す。Q 値の最高値は 4.2 K での 2.5×10^8 であり、LCGT の鏡の温度 20 K でも 10^8 に近い値が得られた [3]。この値は LCGT の要請値として十分な値であり、鏡の熱雑音は LCGT の感度より小さくなると見積もられる⁴。

9.2.2 熱膨張率と Thermoelastic Noise

サファイアは極低温で非常に小さい熱膨張率を持ち、20 K 以下で

$$\alpha_c = 7.5 \times 10^{-13} T^3 \quad [\text{K}^{-1}] \quad (9.1)$$

と表される [4]。LCGT の鏡の温度 20 K では室温より約 3 桁小さい。このため、Thermoelastic Noise も LCGT の感度以下に抑えることが可能となる⁵。

³ サファイアの融点は 2040°C。

⁴ 詳しくは熱雑音の章を参照されたい。

⁵ 正確には Thermoelastic Noise が LCGT の感度以下になるよう鏡の温度 20 K は決められている。

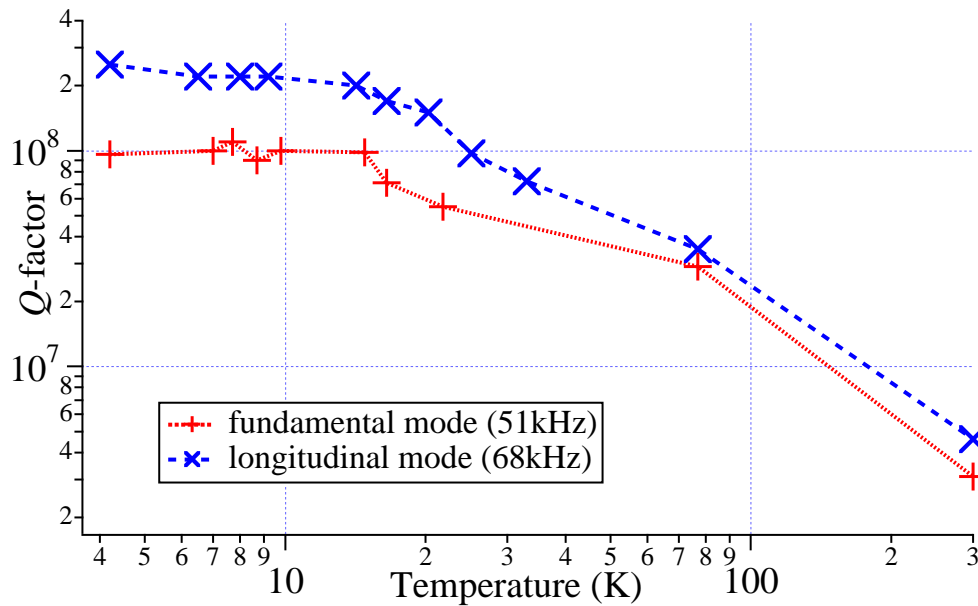


図 9.1: シリンダーの Q 値の温度依存性

9.3 発熱問題

鏡における光吸収損失は、熱レンズ効果を引き起こすため重要な問題である。また、低温干渉計の場合には、鏡の冷却の障害にもなる。ここではサファイア鏡基材の光吸収と熱レンズ効果、冷却問題について述べる。

9.3.1 サファイア鏡基材の光吸収

光吸収率の測定

サファイアや合成石英のような透明体の微小な光吸収・発熱を測定するにはいくつかの方法がある。(表 9.1。) LCGT の R&D では、極低温でも効率の良いレーザーカロリメトリー法を採用した。図 9.2 に低温レーザーカロリメトリー法のセットアップを示す [5]。測定原理は、クライオスタットの外部からサンプルに Nd:YAG (波長 1.064 μm) レーザーを入射し、吸収熱量とヒートリンクワイヤーの伝熱量が平衡に達した時のサンプル温度を測定するものである。このセットアップでは、サンプルから輻射シールドへの熱輻射が小さくなり、吸収された熱の流出経路をヒートリンクの細いアルミワイヤーに限定することが出来るため、十分な SN を期待できる。また、極低温ではサファイアの熱伝導率が大きいため、サンプル内の温度分布は無視できる。つまり、この測定はアルミワイヤーの熱抵抗を測定しているのと等価である。サンプルの温度上昇と発熱量の関係は、ヒーターを用いてキャリブレーションされるため、サンプルの物性値に依存しない測定が可能である。

表 9.2 に我々の測定結果と他グループの測定結果をまとめる。我々の測定では、φ10 × 150 mm の CSI White および φ100 × 60 mm の Hemlite について測定を行ったが、どちらも約 90 ppm/cm であり、光吸収率に大きな差は見られなかった。また、同一サンプル内の異なる場所についても光吸収率を測定したが大きな差は見られなかった。CSI のサファイアは大型の結晶を育成して良い部分を切り出しているため、大

表 9.1: 光吸収率測定法

測定法	長所	短所
Photothermal 法	変調法が利用できる 表面と基材の吸収を分離できる	reference 物質が必要 キャリブレーションが難しい 外乱に弱い
Photoacoustic 法	変調法が利用できる 表面と基材の吸収を分離できる	reference 物質が必要 キャリブレーションが難しい 外乱に弱い
Laser Calorimetry 法	reference がいない 外乱に強い キャリブレーションが容易	散乱光に弱い 表面と基材の吸収を分離するのが難しい

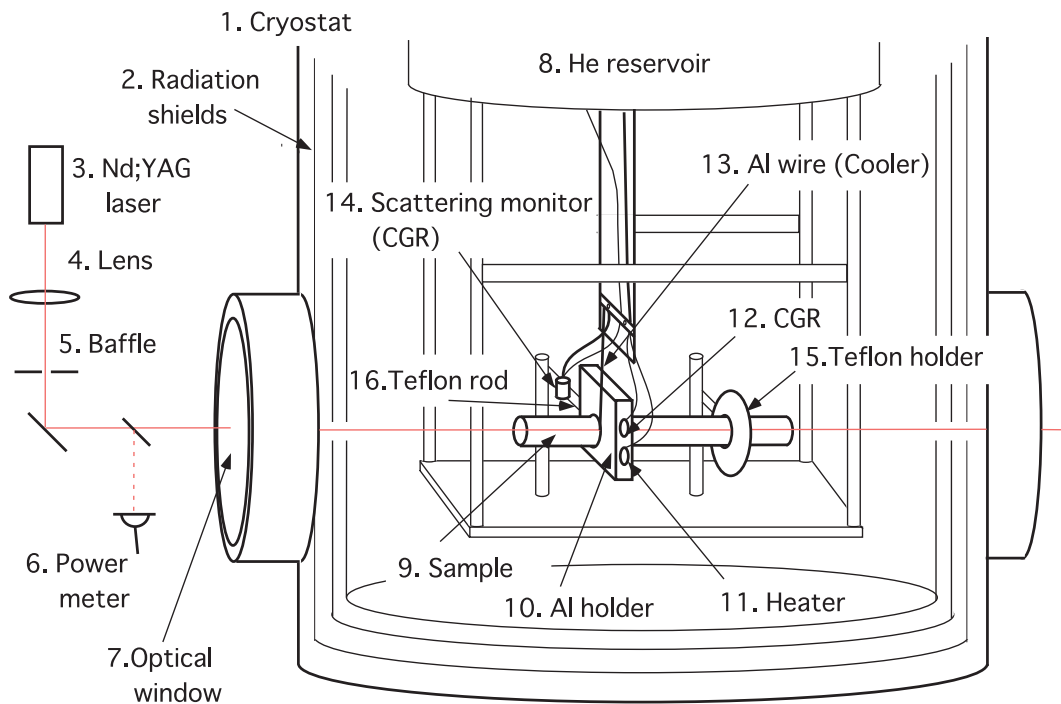


図 9.2: 低温レーザーカロリメトリー法のセットアップ

表 9.2: サファイアの光吸収率測定結果の一覧。本測定と AIST の測定は Laser Calorimetry 法、UWA、Stanford、VIRGO の測定は Photothermal 法である。単位は ppm/cm。a : CSI White、b : Hemlite、c : Union Carbite、d : Melles-Griot、e : RISC, China、f : CSI Hemex Ultra。

サンプル	LCGT (5 K)	AIST (300 K)	UWA (300 K)	Stanford (300 K)	VIRGO (300 K)
サンプル A ^a	88 - 93	168 ± 24	-	-	-
サンプル B ^b	90 - 99	-	-	-	-
サンプル 1 ^c	-	-	16 - 22	-	-
サンプル 2 ^d	-	-	11 - 16	-	-
サンプル 3 ^e	-	-	200 ± 20	-	-
サンプル 4 ^f	-	-	55 ± 4	140	-
サンプル 5 ^a	-	-	3.1 - 3.5	120	-
サンプル 6 ^a	-	-	-	68	142 ± 15
サンプル 7 ^a	-	-	-	58	90 ± 10
サンプル 8 ^a	-	-	-	41	-
サンプル 9 ^a	-	-	-	25	-

きなサンプルになるとグレードの混合が起こり、このため光吸収率に差が現れなかった可能性がある。

産総研 (AIST) の測定は低温レーザーカロリメトリーで使用した CSI White を長さ 100 mm にカットし、室温で断熱レーザーカロリメトリー法 [6] により測定したものである。この測定法はサンプルの温度と Thermal Enclosure の温度が等しくなるよう温度コントロールし、サンプルから周囲への熱輻射ロスを抑えて SN を良くした方法である。室温での光吸収率は 168 ± 24 ppm/cm であり、5 K での値の約 2 倍という結果が得られた。低温と室温でこのような光吸収率の差が存在する理由はまだ明らかになっていない。

いずれにしても、サファイアの光吸収率は 50 ppm/cm ~ 100 ppm/cm 程度の報告が多く、現段階では合成石英の典型的な光吸収率 (数 ppm/cm) に比べて 1 桁程度光吸収率が大きいようである。

アニールによる光吸収率の低減

サファイアのクオリティーは年々改良が進んでおり、数 cm^3 程度の小さいサンプルでは Stanford の結果のように 25 ppm/cm という値も報告されている [7]。結晶の一部では 10 ppm/cm という結果もある。このような光吸収率の低減は主としてアニールの改良による。

Stanford グループでは、様々な条件下でアニールしたサファイアサンプルの光吸収率を測定しており、 $1450^\circ\text{C} \sim 1600^\circ$ の酸素または空気雰囲気中で 48 時間程度のアニールが効果的であると報告している。対照的に、水素雰囲気などでは光吸収率の低減が見られない。また、これより高い温度でアニールするとかえって光吸収率が增大してしまうことも報告されている。

アニールによりかなりの光吸収率の低減が期待できるが、まだいくつか問題も残っている。1 つはサンプル表面の汚染により表面付近での光吸収率が增大してしまう問題であり、もう一つはアニールにより散乱光が増えてしまう問題である。これらの原因はまだ解明されていないが、アニール法を最適化して表面汚染や散乱光の低減を目指す研究が進められているところである。

サファイア中の不純物・欠陥

Flourescence spectrum for CSI white hight purity (Hemex)

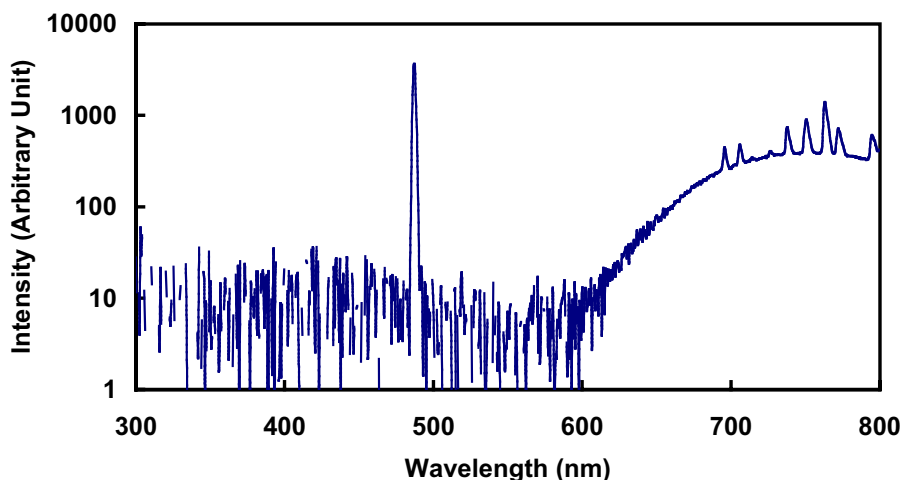


図 9.3: 可視光領域でのサファイアの蛍光スペクトル。励起光は波長 488 nm の Ar レーザー。サンプルは CSI White である。

残念ながら $1\ \mu\text{m}$ の光吸収メカニズムについては、まだ特定できていない。しかし、光吸収スペクトル分析や質量分析などにより、いくつかの光吸収候補が指摘されている。

まず、可視光領域での蛍光スペクトルを測定し、 Ti^{3+} および Cr^{3+} が存在する事を確認した。CSI White と Hemlite では、CSI White の方が Ti^{3+} による蛍光が小さいが、光吸収率に大きな差が見られない。このことから、 Ti^{3+} は $1\mu m$ の光の主要な吸収源ではないと考えられる。吸収スペクトル表で調べてみても、 Ti^{3+} 、 Ti^{4+} などは $1\mu m$ 付近に吸収ピークを持っていない。 Cr^{3+} の吸収ピークは 695 nm でやはり、 $1\mu m$ の吸収には寄与しないと思われる⁶。この他、Sc、Fe、Mo などの不純物が確認されている [8]。これらの不純物を取り除くことで、光吸収を低減できる可能性はある。

次に、真空紫外から紫外域でのスペクトル分析では、F-Center の存在が確認されており、この影響も指摘されている [7, 9]。F-Center はハロゲン化物の短波長域でよく見られる吸収源で、ハロゲンの欠陥などに電子がトラップされ、特定の波長の光を吸収・発光するものである。酸化物でも同様の効果が考えられ、その裾が $1\mu m$ の光吸収に影響を与えている可能性がある。Stanford のアニールによる R&D では、酸素を含む雰囲気中でのみ光吸収の低減が見られることから、酸素の欠陥の影響は十分考えられる。

9.3.2 熱レンズ効果

熱レンズ効果は屈折率の温度依存性に起因するもので、吸収された光が作る鏡内の温度分布にしたがって屈折率分布を生じ、レンズが挿入されたように波面を歪めてしまう現象である。熱レンズ効果による波面歪みの大きさ δs は

$$\delta s \propto \frac{\alpha\beta}{\kappa} P_{in} \quad (9.2)$$

で表される。ここで α は光吸収率、 β は屈折率の温度係数、 κ は熱伝導率、 P_{in} は鏡への入射光パワーである。

都合の良いことに、極低温のサファイア鏡では熱レンズ効果はほとんど無視できる [10]。これは極低温でサファイアの熱伝導率が非常に大きく、屈折率の温度係数が小さいためである。光吸収率測定で使用した $\phi 10 \times 150\text{ mm}$ の CSI White の熱伝導率を Longitudinal Heat Flow Method で測定したところ、熱伝導率のピークは約 20 K で、 $\kappa = 4.3 \times 10^3\text{ W/m/K}$ であることが分かった。この値は室温でのサファイアの熱伝導率より 2 桁大きい値である。次に $\phi 100 \times 60\text{ mm}$ の Hemlite を用いて、屈折率の温度依存性を調べた。測定方法は、極低温でサンプルの温度を変化させ、プローブビームの屈折角変化を測定するもので、 5 K から 40 K までの平均で $\beta < |9 \times 10^{-8}| \text{ K}^{-1}$ という結果が得られた。室温でのサファイアの屈折率温度係数は 1.3×10^{-5} であるので、極低温では 2 桁以上屈折率温度係数が小さくなることが明らかになった。以上の測定結果から波面の歪みを求めると、極低温では室温より約 4 桁波面歪みが小さくなり、光吸収率が 90 ppm/cm であっても熱レンズ効果は事実上無視できるようになる。

実際、上記測定結果をパラメータに鏡内の屈折率分布を計算し、FFT シミュレーション [11] で波面歪みの影響を調べてみると、ほとんど干渉計感度への影響は見られなかった⁷。対照的に室温のサファイア鏡を用いた場合は熱レンズ効果が問題となり、何らかの波面歪みの補正が必要となる結果が得られた。(図 9.4 参照。) このように極低温サファイア鏡は熱レンズ効果に対して非常に有効である。

9.3.3 冷却問題

低温干渉計の場合には、鏡での発熱は冷却系への負担に直結する。鏡の冷却は、細いサファイアサスペンションファイバーやアルミヒートリンクワイヤーの伝熱で行われるため、冷却パワーには制限がある。

⁶ イオン価数の異なる Cr^{4+} の吸収ピークは $1.2\mu m$ 付近にあるが、 $1\mu m$ の光吸収への影響は分かっていない。

⁷ ここではビームスプリッターも極低温サファイアとしてある。

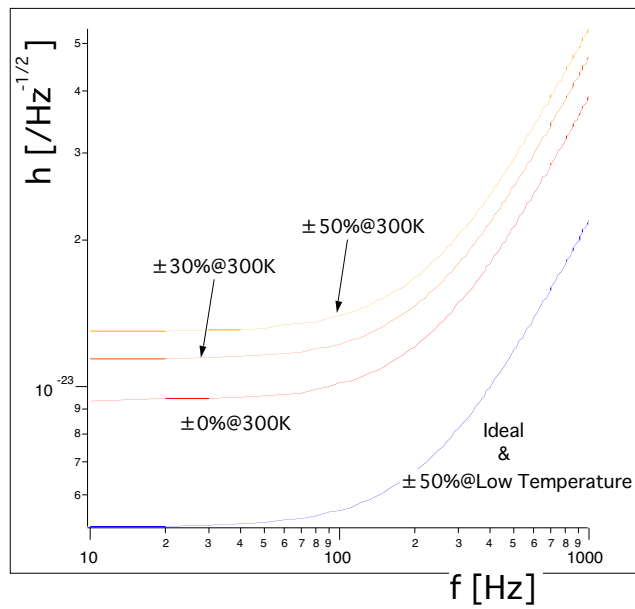


図 9.4: 熱レンズ効果によるショットノイズの変化。光吸収率は 90 ppm/cm とした。±50 % 等は両アームでの光吸収率の非対称性を表す。

サファイアファイバーの熱伝導率を Longitudinal Heat Flow Method で測定した結果、40 K 以下では熱伝導率がサイズ効果により制限されることが明らかとなった [12]。これにより LCGT の鏡の温度 (20 K) 付近では伝熱量は直径の 2 乗ではなく 3 乗に比例する。

LCGT のデザインでは冷却能力を 1 W とし、若干の安全ファクターを考慮に入れて伝熱ファイバーの直径を $\phi 1.8$ mm としている。この時要求されるサファイア鏡基材の光吸収率は約 20 ppm/cm であり、更なるサファイア基材の光吸収率低減の研究が必要である。

9.4 その他の光学的性質

9.4.1 Rayleigh 散乱

基材における散乱光は真空ダクト等を伝搬して光検出器に入射し、ノイズとなりうる。サファイア基材における光吸収率が大きいことから、Rayleigh 散乱についても調べられており、 $1 \mu\text{m}$ の光に対する CSI White の Rayleigh 散乱は 13~18 ppm/cm であることが報告されている [13]。この値を用いて検出器感度への影響も見積もられており、ノイズレベルは $h \approx 10^{-25}$ と報告されている [14]。この計算ではダクトにバツフルを取り付けることを前提にしており、最適なバツフルの設置が必要である。

9.4.2 屈折率一様性

ニアミラーでは、屈折率の不均一さによる波面歪みも問題となりうる。合成石英の屈折率一様性は $\leq 5 \times 10^{-7}$ rms. 程度であり、10 cm の鏡を透過した光波面は $\lambda/20$ 程度の歪みを受けることになる。ここで λ は $1 \mu\text{m}$ とした。一方サファイアの屈折率一様性は、 $\phi 50 \times 10$ mm 程度のサンプルに対し、

- Hemex: 2×10^{-7} rms.
- Hemlite: 4×10^{-7} rms.

と、合成石英と同等の結果が報告されている [2]。

9.4.3 複屈折

サファイアは 1 軸性結晶であり、複屈折を持っている。屈折率の大きさは、波長 $1 \mu\text{m}$ の光に対し、

- 常光線 (n_o): 1.754
- 異常光線 (n_e): 1.747

である。このため、結晶の c 軸と光軸が異なると光の損失源になってしまう。光の損失率を δP 、c 軸と光軸のズレを θ とすると、

$$\delta P = 10^{-3} \left(\frac{d(n_o - n_\theta)}{\lambda/100} \right)^2 \quad (9.3)$$

$$n_\theta \approx n_o - \frac{n_o(n_o^2 - n_e^2)\theta^2}{n_e^2} \quad (9.4)$$

となる [9]。ここで d は基材の厚さである。光損失を 10 ppm 程度許すと、 c 軸と光軸のズレは 0.06° 程度まで合わせる必要がある。

また、ミクロな複屈折や光弾性効果による複屈折についても報告されている [9]。これ等に関してはサファイア基材では合成石英の半分程度で、数 10 ppm の光損失を生むと見積もられている。

9.4.4 研磨

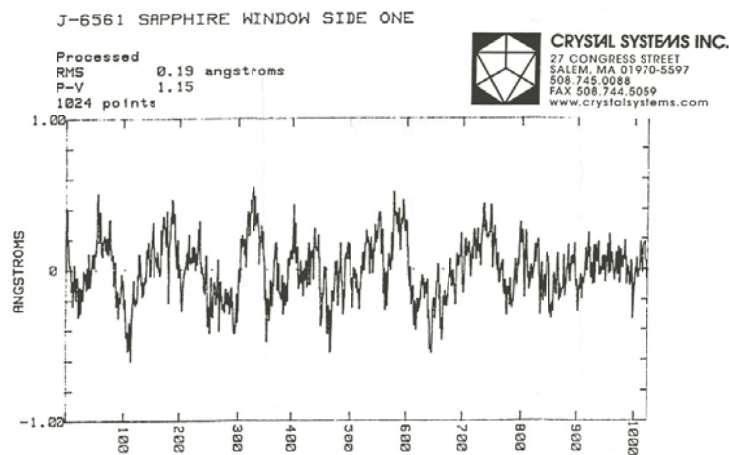


図 9.5: サファイア基材の研磨データ。クリスタルシステムズ社提供。サンプルは Hemlite。

TAMA の鏡では散乱光を減らすため SuperPolish が採用され、マイクロラフネスに対しサブ Å の研磨が達成されている。サファイアに関しても同様の研磨が報告されている。図 9.5 にデータを示す。

低温サファイア鏡で注意すべき点は、 a 軸と c 軸で熱膨張率が異なる点である。室温から 20 K まで冷却すると 20% 程度収縮長が異なる。つまり鏡の曲率半径が 20% 程度小さくなり、あらかじめ熱収縮の影響を考慮した設計が必要となる。

参考文献

- [1] <http://www.crystalsystems.com/>
- [2] C. P. Khattak et al., SPIE Proc. 3060 (1997)
- [3] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A 261 (1999) 5.
- [4] C. T. Taylor et al., Opt. Comm. **131** (1996) 311.

-
- [5] T. Tomaru et al., Phys. Lett. A **283** (2001) 80.
- [6] E. Kawate et al., Proceedings of SPIE, Vol. 4103 (2000), 133.
- [7] R. K. Route et al., LSC meeting, Aug. (2001), LIGO-G010352-00-Z
- [8] R. K. Route et al., LSC meeting, Aug. (2002), LIGO-G020374-00-2
- [9] F. Benabid, Ph.D. Thesis, UWA (2000)
- [10] T. Tomaru et al., Class. Quantum Grav. **19** (2002) 2045.
- [11] B. Bochner, Ph.D. Thesis, MIT (1998)
- [12] T. Tomaru et al., Phys. Lett. A **301** (2002) 215.
- [13] F. Benabid et al., Opt. Commun. **167** (1999) 7.
- [14] F. Benabid et al., Opt. Commun. **170** (1999) 9.

第10章

冷却系

内山隆¹

LCGT の鏡は熱雑音低減のために 20 K に冷却される。そのためには低温環境と鏡内の熱を流すための伝熱系が必要である。まず、図 10.1 に LCGT 用鏡懸架装置の概略図を示し、概要を説明する。LCGT の鏡懸架装置は、SAS 防振装置 (常温中に置かれる) と低温懸架装置で構成される。全体がクライオスタットと呼ばれる真空装置内に内蔵される。SAS 防振装置については「LCGT の防振系」、クライオスタットについては「低温システム」にて後述する。クライオスタットは、二層構造の輻射シールドを内部に持つ。輻射シールドは低振動型パルス管冷凍機によって外側は 100 K、内側が 8 K に冷却される。冷凍機は第 11 章を参照。この輻射シールドに囲まれた領域が低温環境になる。

低温懸架装置は低熱伝導率ワイヤによって SAS からクライオスタット下部の輻射シールド内につり下げられる。その第一候補は、直径 1.5 mm のボルファ (Bolfur) [1] ワイヤである。すでに直径 0.1 mm のボルファワイヤが Cryogenic Laser Interferometer Observatory (CLIO) の懸架装置内でテストされている。低温懸架装置は 6 つのマスで構成される。それらは、サスペンションプラットフォーム (suspension platform)、ダンピングマグネットステージ (damping magnet stage)、アップーマス (upper mass)、アップーマス用リコイルマス (recoil mass for the upper mass)、テストマス (test mass)、テストマス用リコイルマス (recoil mass for the test mass) である。

テストマスの基材は直径 250 mm、厚さ 150 mm の大きさを持つ円柱状の単結晶サファイアを用いる。質量は 30 kg になる。基材は適切に研磨され、反射膜が付けられる。低温下 (20 K) では、基材の持つ機械的な Q 値 [2]、反射膜の散逸 [3] はそれぞれ実測で 10^8 、 4×10^{-4} になる。この実験結果より、20 K に冷却された鏡の熱雑音の大きさは、LCGT の要求値を満たすことが確認された。サファイアの光学特性についても調査が進められている。それは、第 9 章を参照。研磨、反射膜の成膜技術は、CLIO 用鏡制作に伴い、確立されている。サファイア基材は米国 Crystal Systems Inc. より購入する。

鏡は 4 本のサファイアファイバーによりアップーマスから懸架される。低温において 5×10^6 [4] という高い Q 値を持つサファイアファイバーにより、振り子の Q 値は 10^8 に達する。鏡にはレーザー吸収による発熱が常に存在する。熱量は概算で 290 mW になる。詳細は 10.2 節を参照。サファイアファイバーは高 Q 値 (低散逸) かつ高熱伝導率 (10^4 W/m/K) を兼ね備えている。鏡中の熱はサファイアファイバーの熱伝導によりアップーマスへ流れる。サファイアファイバーの長さは 400 mm、直径は 1.8 mm を使用する。

¹ 東大宇宙線研

サファイアファイバーは鏡に「サファイア - サファイア ボンディングテクニック」を使って固定される。詳細は第 12 章を参照。

コイルマグネットアクチュエーターにより、鏡間距離、鏡姿勢制御が行われる。コイルは、リコイルマスに内蔵される。リコイルマスは鏡と同じ 30kg の質量を持ち、アップーマスよりサファイアファイバーか純アルミニウム線で懸架される。レーザー吸収の無いリコイルマス中の熱は、鏡のそれに比べきわめて小さい。よって、アップーマスとの温度差は無視できる量になる。

アップーマスはサファイアを基材とした鏡で、Suspension Point Interferometer (SPI) を構成する。SPI は Fabry-Perot cavity をセンサーに用いたアクティブ防振である。詳細は「SPI」を参照。懸架装置内、特に鏡で吸収された熱は「ヒートリンク」と呼ぶ熱伝導の高い高純度アルミニウム線をクライオスタットの輻射シールドにつなぐことで低温側へ流される。SPI の重要な役割は、そのヒートリンクによって導入される振動の防振である。SPI の重要性は「ヒートリンクデザイン」を参照。SPI 用レーザーのパワーは微小であるため、アップーマス内のレーザーの吸収による発熱はテストマスに比べ無視できる量になる。

アップーマスの大きさはテストマスと等しく、直径 250mm、厚さ 150mm になる。アップーマスはサスペンションプラットフォームから低周波縦防振用バネ MGAS に取り付けられた懸架ワイヤによりつり下げられる。懸架ワイヤの第一候補は直径 1.0mm のボルファワイヤである。振り子長は 400mm になる。MGAS の共振周波数は 0.7Hz を実現し、ヒートリンクによる振動の縦成分を防振する。MGAS については「LCGT の防振系」を参照。MGAS の熱伝導率は小さいので、アップーマスとサスペンションプラットフォーム間をつなぐ高純度アルミニウム線を使ったヒートリンクが必要になる (図 10.1 中の heat link B)。

アップーマスも Fabry-Perot cavity を組むため、コイルアクチュエーターによる制御を必要とする。そのためのコイルを内蔵したリコイルマスが、サスペンションプラットフォームから、サファイアファイバーか純アルミニウム線を用いて懸架される。質量は 30kg になる。

サスペンションプラットフォームとダンピングマグネットステージは SAS の GAS スプリングより独立に懸架される。サスペンションプラットフォームは既出のように低熱伝導ワイヤによって懸架される。ダンピングマグネットステージは G10 パイプによりつり下げられる。G10 も低熱伝導率を特徴とした素材である。サスペンションプラットフォームの動きは、エディカレントダンピングによってダンプされる。

サスペンションプラットフォームと輻射シールド間にヒートリンクが必要である (図 10.1 中の heat link A)。輻射シールドの振動レベルは地面振動相当なので、その振動を鏡に伝えないためには、ヒートリンクの剛性を十分小さくする必要がある。よって heat link A は十分な熱伝導と弱い剛性の両特性を満たした設計をする必要がある。このヒートリンクにも高純度アルミニウム線が用いられる。マグネットダンピングステージは別のヒートリンクによって冷却される (図 10.1 には明記されていない)。鏡中で吸収された熱は、サファイアファイバー、heat link B、heat link A を伝わって、8K に冷却された輻射シールドへ流される。現設計では十分な防振性能を満たしながら、1W の熱を流すヒートリンクの設計がなされている。詳細は 10.2 節を参照。

10.1 低温システム

LCGT 低温システムは、クライオスタット、低温真空パイプ、冷凍機の三つの要素で構成される。

LCGT は熱雑音低減のために鏡を 20K 以下に冷却する。鏡はクライオスタットと呼ばれる低温環境を内蔵した、直径約 3000mm、高さ 7200mm の円柱形をした真空タンク内に納められる。LCGT 用クライオスタットは 2 層の輻射シールド (アウターシールドとインナーシールド) を内部に持つ。これら 2 層の輻射シールドは 2 台の 1W4K2 段パルス管冷凍機に純アルミニウム、あるいは、無酸素銅の熱伝導を使って

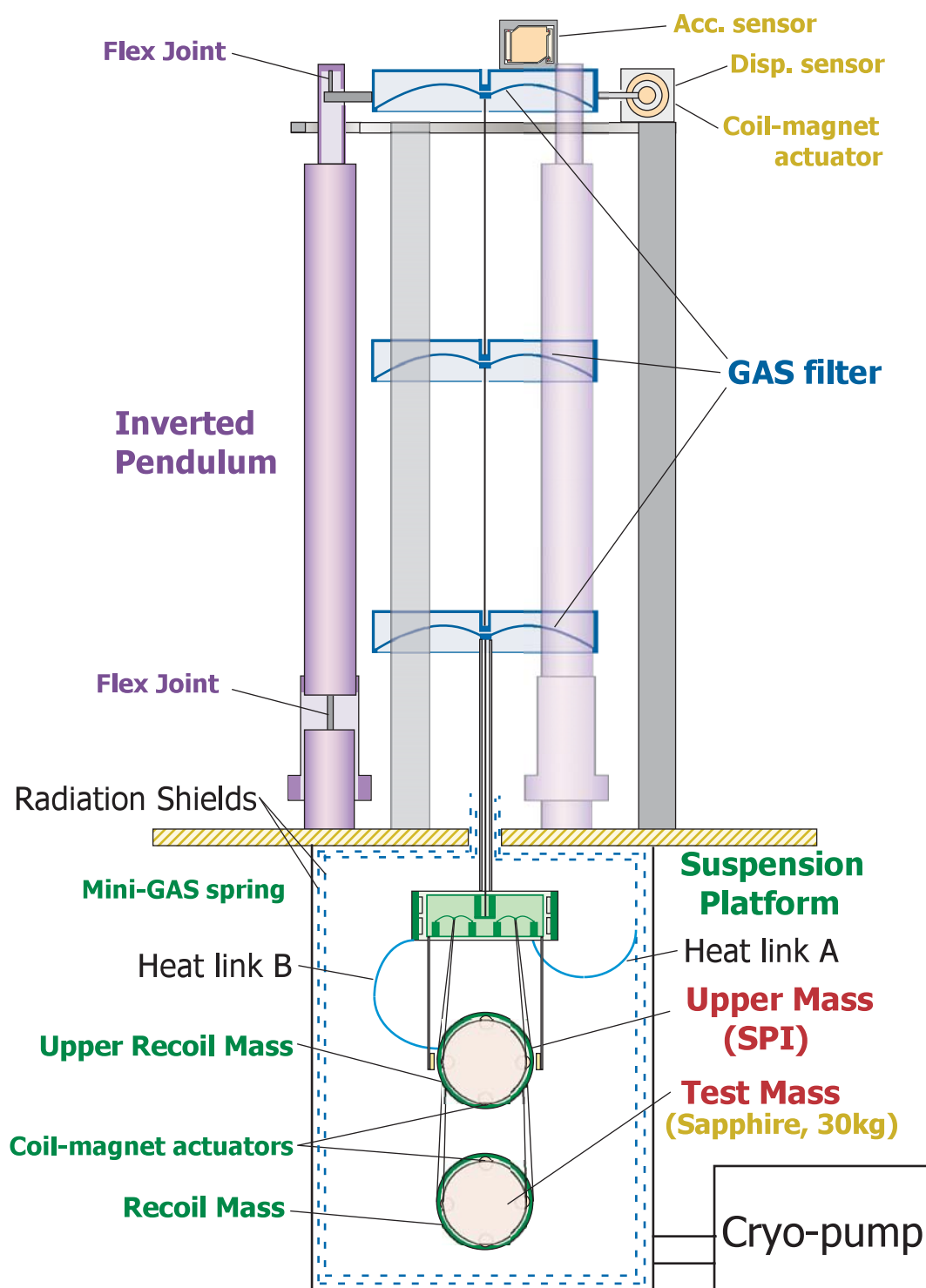


図 10.1: LCGT 用懸架装置概略図

Item	temperature
Inner shield	8 K
Outer shield	100 K
Cryogenic pipe	100 K

表 10.1: 冷却システム内輻射シールドの目標温度

Item	Value of LCGT	Value of CLIO
Height of the cryostat	7200	2500
Diameter	3000	
Width		1500
Depth		920
Height of the inner shield	2000	800
Width	1460	
Depth	1000	
Diameter		800
Diameter of the cryogenic pipe	300	400
Diameter of the radiation shield	250	300
Length of the cryogenic pipe	20 m	5 m
Height of the beam axis	1000	800

表 10.2: 冷却システム寸法

接続し、冷却される。輻射シールドは純アルミニウム板を多層断熱材²で覆った物である。冷凍機には低振動化がなされ、クライオスタットと細いダクトでつながった小型真空タンクに取り付けられる。冷凍機のコールドヘッドとクライオスタット内輻射シールドは、細いダクト内に通された熱伝導帯によって熱的に接続される。冷凍機については「冷却システム」を参照。輻射シールドの設計温度は、表 10.1 にあるように、アウターシールドが 100 K、インナーシールドが 8 K である。

図 10.4 に LCGT 用低温システムのイメージ図を示す。クライオスタットは上部に SAS 防振装置が設置される常温部と、その下部に輻射シールドで囲まれた低温部を持つ。常温部と低温部は同一の真空である。低温懸架装置は、クライオスタットのインナーシールドに囲まれた低温部に SAS からつり下げられる。SAS はクライオスタット内に組まれたステージ上に構築される。

低温真空パイプは 20 m の長さの、輻射シールドを内蔵する、真空パイプである。真空パイプの外径は 300 mm、内蔵される輻射シールドの直径は 250 mm である。一本のパイプにつき一本のビームが通る。この真空パイプは長さ 3 km のビームダクトの一部になる。低温真空パイプの目的は、常温部からの輻射と、鏡に吸着して鏡面を汚染するコンタミ粒子の低減である。輻射シールドの設計温度は 100 K である。輻射シールドは 2 台の低振動化された 80 K 100 W パルス管冷凍機によって冷却される。LCGT はヒートリンクによって導入される振動を低減するために SPI を用いている。つまり、インナーシールド内にレーザーが上下 2 本 (SPI 用+主干涉計用) ある。低温真空パイプはクライオスタットの両サイドに必要、かつビームが 2 本あるので計 4 本が取り付けられる。なお、主干涉計用ビーム高さは床上 1000 mm、SPI 用ビーム高さは床上 1400 mm になる。

² CLIO のアウターシールドではマイラーシートにアルミ蒸着した物を 60 層重ねて使っている。

Item	CLIO	LCGT
Inner shield	0.6 - 0.9 W	2 W = 1 W + 1 W
Outer shield	16 - 20 W	80 W = 20 W × 4
Cryogenic pipe	22 - 25 W	83 W = 25 W × 3.3

表 10.3: CLIO 低温システム入熱量と LCGT 低温システム入熱量概算。CLIO の入熱量は冷凍機コールドヘッドの温度より求めた。インナーシールドの入熱は、支持サポートからの熱伝導による CLIO から大きく変化しない成分 1 W と低温懸架装置で発生する 1 W を加えた 2 W が相当する。アウターシールドと低温パイプ内輻射シールドは輻射によって支配されるので表面積比を CLIO の入熱量にかけて得られた値が概算値になる。表面積比はアウターシールドで 4 倍、低温真空パイプで 3.3 倍 (輻射シールド直径 250 mm、長さ 20 m 分について) になる。

Refrigerator	cooling power	number for each system	Total number for LCGT
4K 2 stage pulse-tube refrigerator	1 W at 4 K	2	8
4K 2 stage pulse-tube refrigerator	30 W at 40 K		
80 K pulse-tube refrigerator	100 W at 80 K	4	16

表 10.4: 冷凍機パラメータ。台数は入手可能な冷凍機のパワーに依存して適宜調整される。

LCGT 用低温システムの基礎技術は CLIO 用低温システムで実践されている。図 10.2 に CLIO の冷却試験の結果を示す。また、表 10.3 に CLIO 用低温システムの結果を用いて概算した LCGT における入熱量を示す。CLIO の冷却において、低温真空パイプ開口部から入射する 300 K 輻射について新たな知見が得られた。一つは、輻射が低温真空パイプ内の輻射シールド内を反射してインナーシールド内部に導入されてしまうことである。もう一つは、鏡に付けた反射膜の輻射率が 1 に近いため、インナーシールド内に入った輻射を吸収しやすく、結果として鏡の入熱量が増えてしまうことである。これらの課題については別の場所で述べられている。LCGT の入熱量は CLIO のそれと比べ大きくなる。そのため、複数台の冷凍機を用いて冷却する。表 10.4 に冷凍機についてまとめて示す。

図 10.3 は CLIO で冷凍機を動かした際の、クライオスタット内に設置されたステージ上の振動である [5]。冷凍機の振動の影響がほとんど無く、干渉計運転に問題ないことが確認された。真空に関してはターボ分子ポンプ (排気速度 1000 L/sec) により 10^{-5} Pa が冷却時に達成されている。

10.2 ヒートリンクデザイン

図 10.4 に LCGT 懸架装置の概略図と記号表記した物を示す。LCGT の鏡は常時、発熱している。従って、20 K を維持するにはその熱を常に取りだし続けなければならない。熱伝導はそのための唯一の手段であるため、鏡から輻射シールドへ熱を流すヒートリンクが必要である。しかしながら輻射シールドは地面振動と同等の振動レベルを持つため、ヒートリンクを通じて防振された懸架系にその振動を導入してしまう。振動混入を避けるためにはヒートリンクを長く細くして剛性を下げることが有効である。長さ一定の場合、剛性はワイヤの半径を r とした時に r^4 に比例する。剛性を下げるために細いワイヤを利用すると、熱伝導も下がるが、それは剛性とは異なる r^2 の依存性を持つ。よって、一本の太いヒートリンクではなく、断面積の合計が等しくなるように、細いワイヤの束を用いた方が熱伝導を変えずに剛性を下げることができる。いずれにせよ、ヒートリンクを設計するには、熱伝導量と鏡に加える振動導入量を知る必要がある。

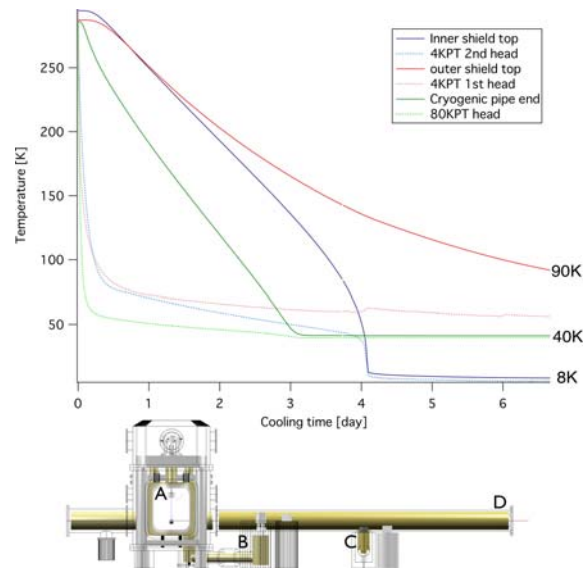


図 10.2: CLIO 冷却試験結果。下図は冷却システムの内面図を示す。「Inner shield top」、「outer shield top」は各シールドの図中「A」点、「4KPT 1st head」、「4KPT 2nd head」は「B」点にあるクライオスタット用冷凍機、「80KPT head」は「C」点にある、低温真空パイプ用冷凍機、「Cryogenic pipe end」は「D」点が相当する。到達温度は仕様を満たしている。

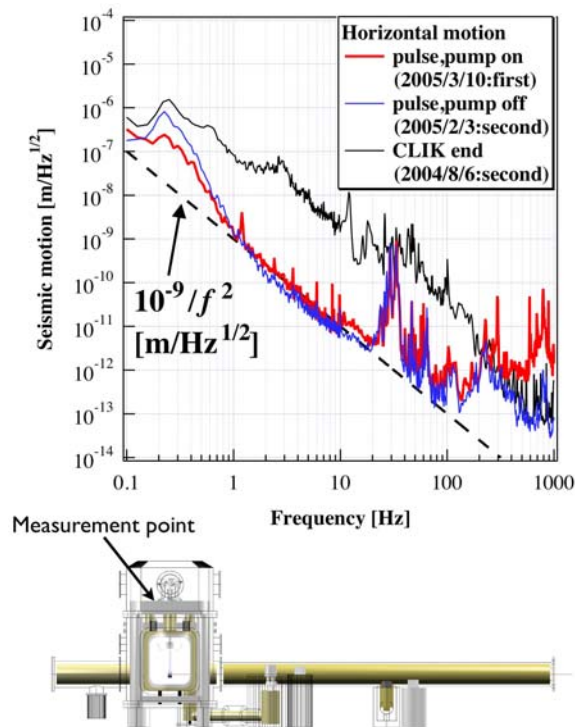


図 10.3: 神岡鉱山内に設置された CLIO 用クライオスタット内に設置されたステージ上の振動レベル。赤線: 冷凍機を入れた時の振動レベル。青線: 冷凍機を切ったときの振動レベル。黒線: CLIK 用クライオスタット内振動。CLIK は千葉県柏市にある宇宙線研究所に設置された低温プロトタイプ。

Item	Value
Diameter of the mirror	250
Thickness	150
Laser absorption ratio	20 ppm/cm
Laser absorption in the coating	0.1 ppm
Laser power before the power recycling mirror	75 W
Power recycling gain	11
Finesse	1550
Absorption in the substrate	250 mW
Absorption in the coating	40 mW
Heat in the near mirror	290 mW
Heat in the end mirror	40 mW

表 10.5: 鏡内発熱量

レーザーの吸収がもっとも支配的な鏡の発熱源である。吸収にはサファイア基材中と反射膜中でなされる物に別けることができる。表 10.5 に関連するパラメータと、熱量を示す。エンドミラーは透過する光量はわずかなため、反射膜中の吸収のみを考慮している。当然のことながら、ニアミラーの方が発熱量が大きいので、ニアミラーについて設計を行う。ヒートリンク用線材には高純度アルミニウム線 (純度 99.9999%) を用い、本数、直径、長さを設計する。図 10.5 に高純度アルミニウム線の熱伝導率を示す [6]。

図 10.6 にヒートリンクデザイン、懸架装置内温度分布を示す。そして、図 10.7 に LCGT の地面振動レベルを示す。図 10.4 の記号表記された懸架系モデルに準じて質点モデルを作成して、並進 3 自由度について計算した。各自由度のカップリングは 1% を仮定している。神岡サイトの地面振動レベルとして、 $10^{-9}/f^2[\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$ を用いた。SPI は Fabry-Perot cavity をセンサーに使った能動防振システムで、ヒートリンクから導入される地面振動に対して大きな役目を果たしている。図 10.8 に SPI の有無による地面振動レベルの差を示す。SPI の性能として光軸方向に 40 dB の防振効果があるととらえている。

参考文献

- [1] UNITIKA LTD.
- [2] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A. **261**, 5 (1999).
- [3] K. Yamamoto et al., Class. Quantum Grav. **21**, S1075 (2004).
- [4] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A. **273**, 310 (2000).
- [5] K. Yamamoto, Private communication.
- [6] K. Kasahara et al., J. Cryo. Soc. Japan. **39** 25 (2004).
- [7] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A. **242**, 211 (1998).
- [8] T. Tomaru et al., Phys. Lett. A. **301**, 215 (2002).

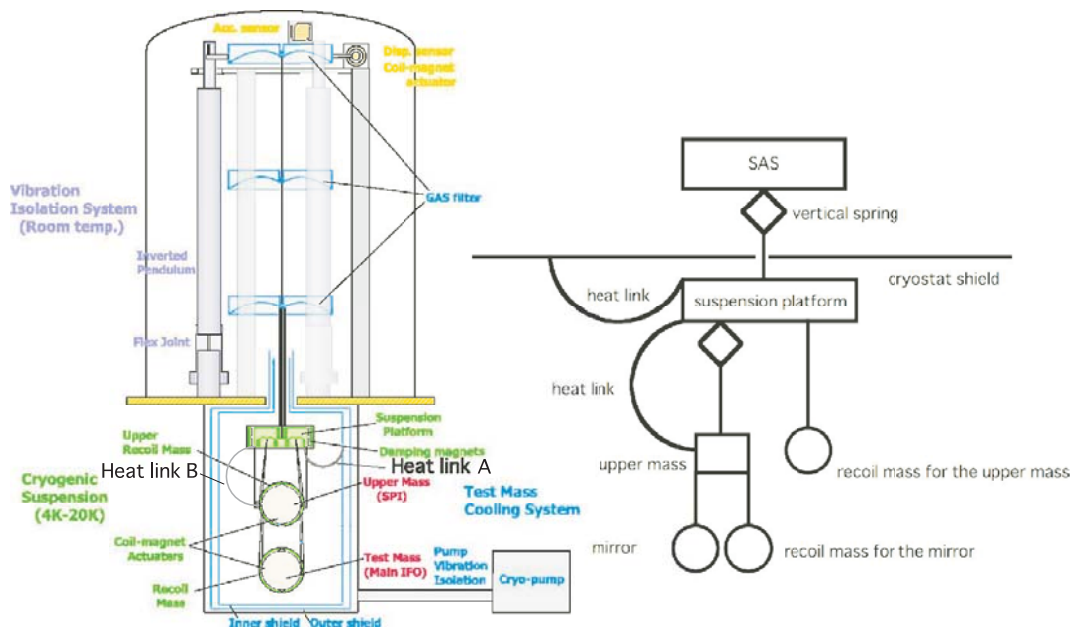


図 10.4: LCGT 用鏡懸架装置概略図。6 つのマスで構成された、3 段の鏡懸架装置が、常温部の SAS 防振装置より低温部につり下げられている。記号表記にある菱形は縦防振バネを示す。テストマス (mirror) の基材は直径 250 mm、厚さ 150 mm の大きさを持つ円柱状の単結晶サファイアを用いる。質量は 30 kg になる。この鏡は 4 本のサファイアファイバーによりアッパーマスから懸架される。アッパーマスもサファイアを基材とした、テストマスと同サイズの鏡で、SPI を構成する。テストマスとアッパーマスには位置、姿勢制御が必要のため、それぞれに、コイルアクチュエータが取り付けられる。そのためのコイルは各コイルマスに内蔵され上段よりつり下げられる。サスペンションプラットフォームとダンピングマグネットステージは SAS の GAS スプリングより独立に懸架される。記号表記中にダンピングマグネットステージは省略されている。鏡で発生した熱はサファイアファイバー、「C」または「U」字型のヒートリンクを経てクライオスタットインナーシールドへ流れる。鏡の設計温度は 20 K、インナーシールドの温度は 8 K である。

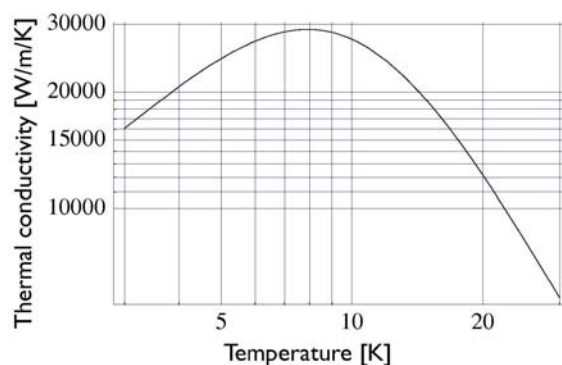


図 10.5: 高純度アルミニウムワイヤ (99.9999%) の熱伝導率。

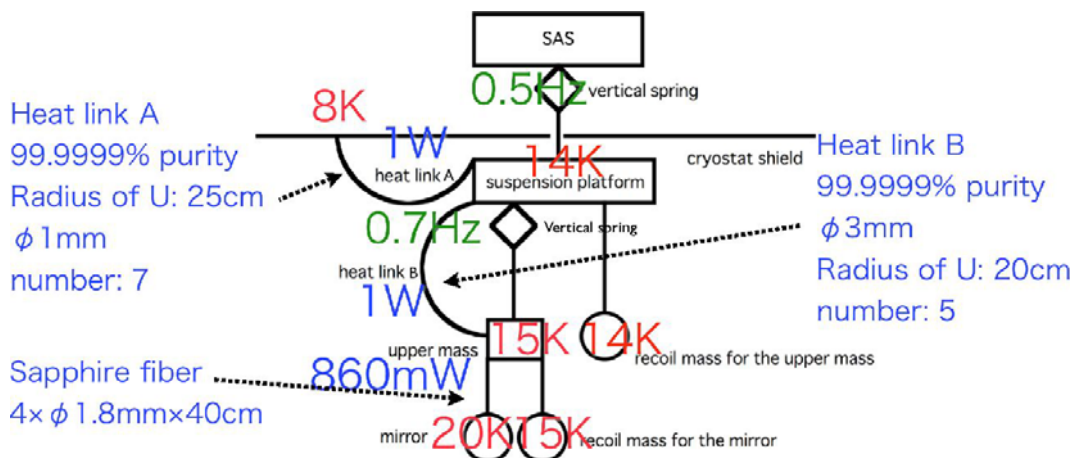


図 10.6: ヒートリンクデザイン。鏡で発生した熱は直径 1.8 mm、長さ 400 mm の 4 本のサファイアファイバーを伝わってアップパーマスへ流れる。サファイアファイバーを用いることで Q 値の高い振り子 ($Q = 10^8$) [4] と高い熱伝導 [7][8] の両方を実現できる。予想の 3 倍にあたる 860 mW の発熱がニアミラー中にあっても鏡の温度を 20 K が達成できるように設計されている。アップパーマスの上流には「C」または「U」字型のヒートリンクが張られている。このような形で張るのは、ヒートリンクの剛性を下げ、振動の伝達を低減するためである。このヒートリンクは高純度アルミニウム線（純度 99.9999%）を用いる。ここでも予想の約 3 倍の 1 W の熱が流せるように設計されている。

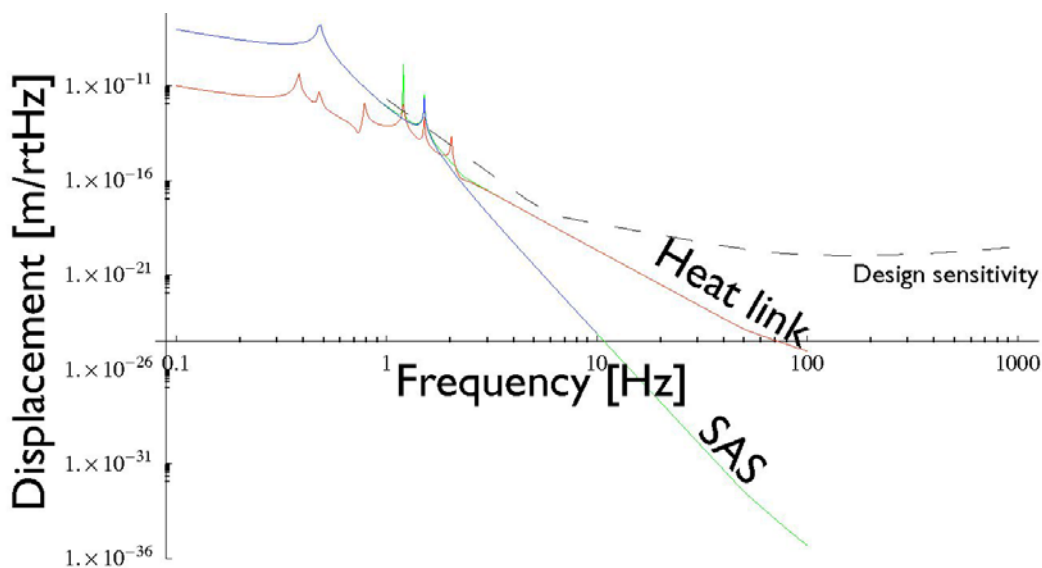


図 10.7: LCGT の地面振動レベル。二つの地面振動伝達路がある。一つは、SAS を通る物ともう一つがヒートリンクを伝わる物である。それぞれの伝達経路について、並進方向のみ鏡の地面振動レベルを計算している。縦振動、光軸に垂直な方向の振動の、光軸方向へのカップリングは 1% を仮定している。図中 SAS とある物が、前者のルートを経て鏡を光軸方向に振動させる成分である。図中 Heat link とあるのが、後者のルートであり、LCGT の地面振動の主要成分であることがわかる。ヒートリンクのつながるインターシールドの振動レベルは神岡サイトと同等と仮定している。さらに SPI の防振性能は光軸方向のみ 40 dB を仮定している。トータルの地面振動レベルは 10 Hz で $2 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ になる。目標感度は、 $6 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ なので約 30 倍小さい値が設計できている。

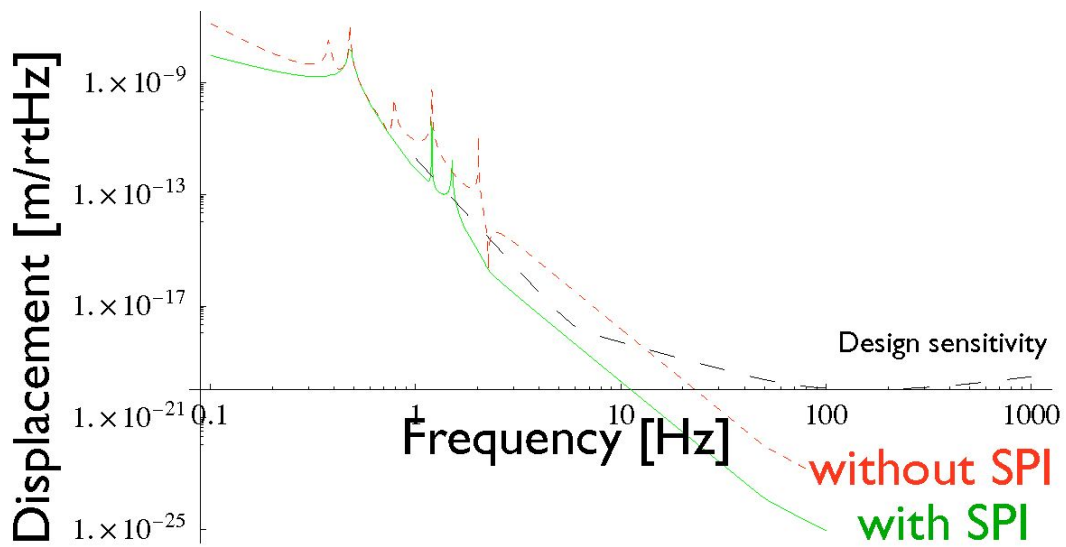


図 10.8: SPI の有無による地面振動レベルの変化。SPI の防振性能は光軸方向のみ 40 dB を仮定している。

第11章

低振動冷凍機

都丸 隆行¹、鈴木敏一²

11.1 仕様と設計

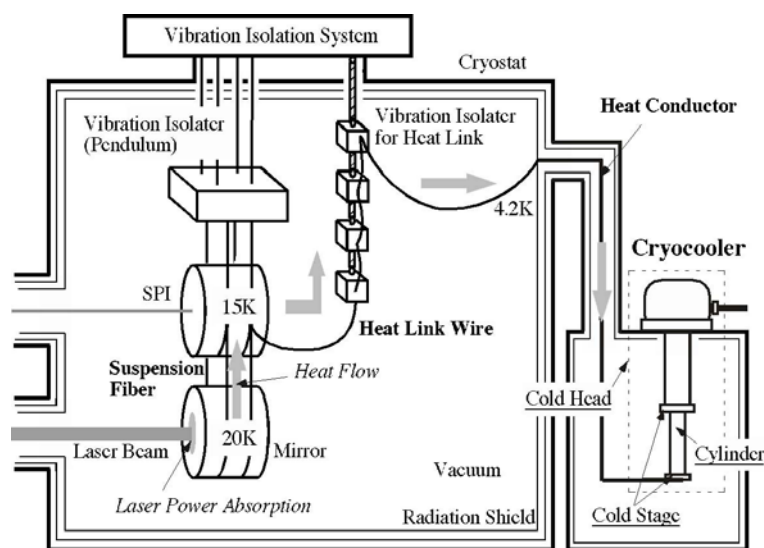


図 11.1: LCGT 冷却系の模式図。

冷却系の課題は鏡の効率的な冷却と防振を両立させることにある。LCGT 冷却系を図 11.1 に示す。鏡は高真空中で振子状に支えられ、伝導冷却により 20 K 以下に冷却される。伝熱体としてサファイア（単結晶 α アルミナ）のファイバーが用いられ [1, 2]、純金属の細線を用いた熱リンク [3] が中段振子に取り付

¹ 高エネルギー加速器研究機構

² 高エネルギー加速器研究機構

けられる。振り子による外来振動減衰性能の劣化を防ぐために Suspension Point Interferometer (第 14 章を参照) と熱リンクの防振系が併せて使用される。(第 12 章を参照)。

LCGT では定常的な長時間連続観測を実現するために、鏡冷却には小型冷凍機を用いる。冷凍機に対しては十分な冷却能力は勿論のこと、振動発生源とならないための低振動性能が併せて要求される。以下に LCGT 用冷凍機に要求される仕様を述べる。

11.1.1 要求される冷凍能力

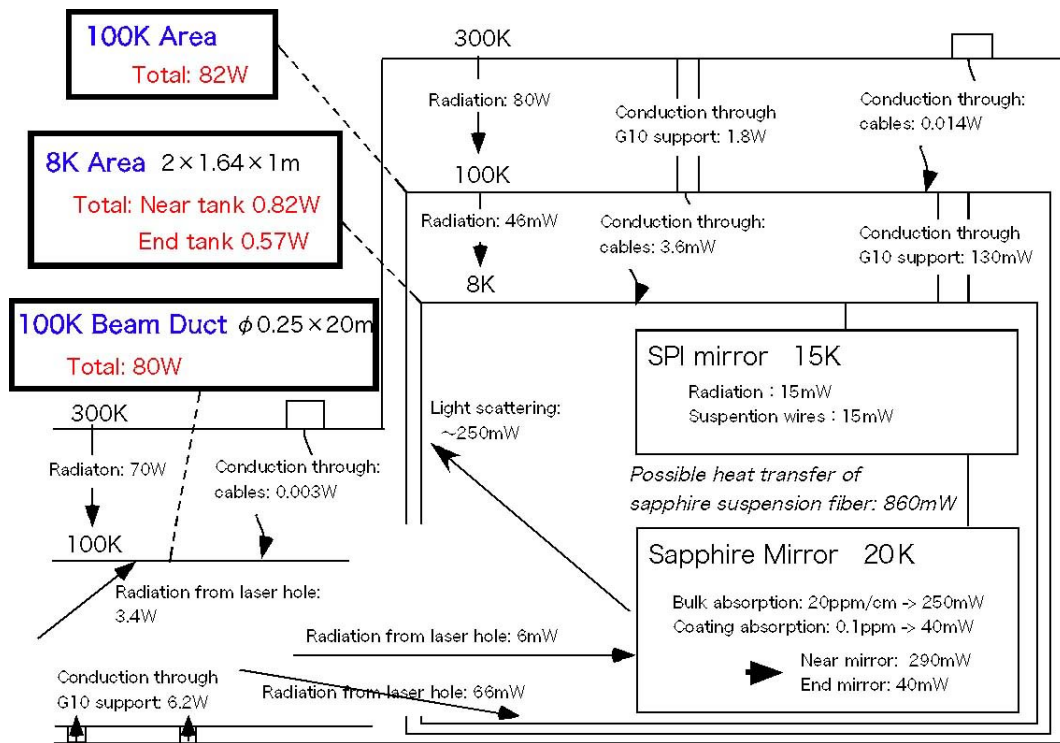


図 11.2: クライオスタット内の熱負荷推定

LCGT の低温部分での熱負荷を推定して図 11.2 にまとめた。図に示してあるようにクライオスタット 8 K シールド (一番内側のシールド) への熱負荷は 0.82 W、クライオスタット 100 K シールドへの熱負荷が 8.2 W、ビームダクト 100 K シールドへの熱負荷が 80 W と推定されている。これらから、安全係数として 2 倍の余裕を持たせた場合の冷凍機への熱負荷は各々、8 K シールドからは 2 W、100 K シールドからは 100 W、ビームダクト 100 K シールドからは 160 W、が要求される。2 段型の 4 K 冷凍機を用いれれば 8 K シールドの冷却には第 2 コールドステージ (4 K ステージ) を、100 K シールドの冷却には第 1 ステージ (40 K ステージ) を冷却に当てるのが可能であろう。ビームダクト 100 K シールドの冷却は熱負荷が大きいので専用の冷凍機が必要になるであろう。

11.1.2 冷凍機の振動レベル

実験装置にとって冷凍機の存在が余分な外来振動源とならないためには、冷凍機が実験装置の設置されている場所の地盤常時微動に比べて低振動であればよい。LCGT が設置される神岡鉱山トンネルの地盤常時微動の大きさは 1 Hz 以上の領域でほぼ $10^{-9}/f^2$ [m/Hz^{1/2}] のスペクトルを持つ。これから冷凍機の振動レベルに対する仕様は $10^{-9}/f^2$ [m/Hz^{1/2}] に定まる。この振動レベルは、都市部の典型的な地盤常時微動の大きさの約 1/100 であり、冷凍機にとっては厳しい数字であるが、LCGT が神岡鉱山トンネル内に設置される優位性を活かすために必要な仕様値である。

11.2 既存技術の概観

11.2.1 市販の小型冷凍機

到達温度 4 K の小型冷凍機としては、ギフォード・マクマホン (Gifford-McMahon : GM) 型 [4] とパルス管 (Pulse-Tube: PT) 型 [5] が広く使われている。GM 型冷凍機は科学分野や工業分野で数多く使われており、歴史的にも長い運転実績がある。GM 型 4 K 冷凍機の冷凍能力は 4 K ステージ (第 2 ステージ) で 1 W、40 K ステージ (第 1 ステージ) で 40 W が典型的な値である。

PT 型冷凍機は GM 型冷凍機に比べると実用化された歴史は浅い。GM 冷凍機がコールドヘッド内ディスプレイサーと呼ばれる固体で作られた機械的な運動部分を持つのに対して、PT 冷凍機のコールドヘッド内で運動するのはヘリウムガスであるという特徴のため、低振動を要求される応用には GM 型冷凍機より有利であろうと期待されている。冷凍能力としては、2009 年時点での市販 2 段 PT 型冷凍機において 4 K ステージ (第 2 ステージ) で 1.5 W、45 K ステージ (第 1 ステージ) で 40 W まで達成されている。

LCGT の冷却系設計に必要なデータは市販の複数機種的小型冷凍機の系統的振動測定により集積したデータを解析し、小型冷凍機の振動は起源の異なる 2 つに分けて捉えるべきであることが明らかになった。[6]. 一つは機械的部品の運動に伴う慣性力を起源として、主にコールドヘッド全体の振動を引き起こす。GM 型でのディスプレイサー、GM 型 PT 型両者におけるバルブユニットと駆動モーターがこれに相当する。二つめは作動ガスの圧力脈動に応じた管状部分の弾性伸縮に起因し、構造物の幾何学形状が変化することで生じる振動である。このメカニズムは GM 型と PT 型に共通で冷凍管 (ディスプレイサー管、あるいはパルス管と蓄冷管) が振動源となったコールドステージ振動、ガス供給のフレキシブルホースが振動源となったコールドヘッド振動を引き起こす。GM 型と PT 型で振動の大きさを比較すると、コールドヘッドの振動では PT 型は GM 型の約 1/100 であるが、コールドステージ振動においては PT 型も GM 型とほぼ同じ 10 μ m のレベルであった。このように市販の小型冷凍機は、通常の使用目的にとっては低振動と考えられていた PT 型冷凍機であっても、先に挙げた LCGT 用冷凍機の振動に関する仕様値の約 1000 倍の振動レベルであることが判明したので重力波検出器への応用可能な低振動冷凍機の開発が必要となった。

11.2.2 CLIO 用低振動冷凍機システムの開発

開発の方針

小型冷凍機の振動に関する研究に基づいて、市販のパルス管冷凍機をベースとして適切な振動防除対策を行った結果、神岡鉱山トンネルの地盤振動と同レベルの振動しか発生しない冷凍機システムの開発に成

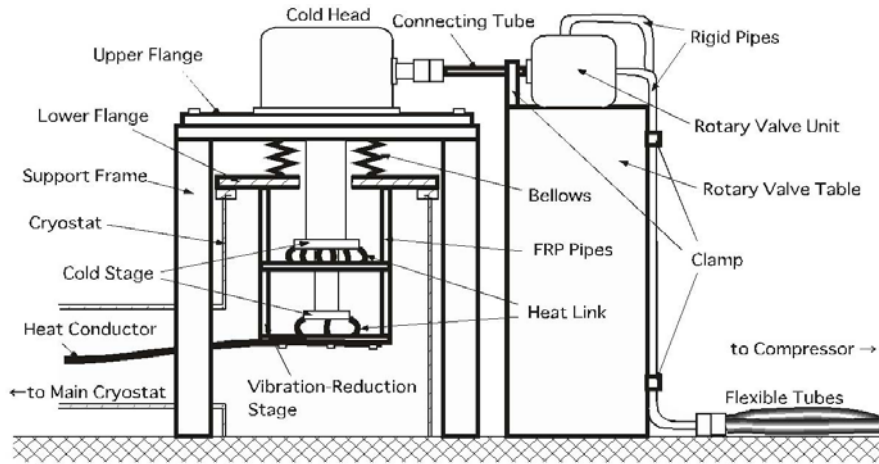
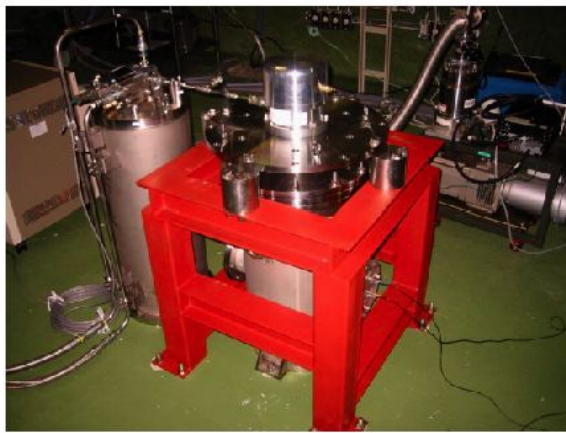


図 11.3: 市販のパルス管冷凍機をベースとした低振動冷凍機システムの模式図



(a)



(b)

図 11.4: 低振動冷凍機システムの外観。(a) 冷凍機コールドヘッド (Support Frame は赤色) とバルブユニット。(b) 減振ステージと熱リンク。吊り上げのため、ベローズ部分に固定具が入っている。

功した。[7, 8] 開発した冷凍機システムは、10 台が LCGT のプロトタイプである CLIO の冷却に使用されている。図 11.3 に冷凍機システムの模式図、図 11.4 に全体構成と減振ステージの外観を示す。

ベース冷凍機としては住友重機製 SRP-052A パルス管冷凍機を選択した。

振動防除の基本方針は以下にまとめられる。

- 神岡鉱山トンネルが強固な岩盤の中にある事を利用して、床に固定が可能な部品はできる限り強固に固定する。
- 振動伝達を防止すべき部品の間は柔軟な構造物で結合する。
- 圧力による弾性変形を受けやすい部分はできるだけ剛性を上げる。

なおここで対象としたのは、冷凍機システムの構造体からクライオスタットへ直接伝搬する数 10 Hz 以下の周波数成分の振動である。冷凍機システムで発生する数 10 Hz 以上の振動成分は空中を音波として伝搬する成分が主となるため、此处で述べる振動防除対策は有効性を失う。雑音音波による振動環境悪化についての詳細な検討はまだ行われていないが、冷凍機からの振動発生で支配的なものは冷凍機への作動ガス供給の脈動周期である約 1 Hz の成分で、数 10 Hz を上限とする低周波成分は地盤振動と同じ伝達経路でクライオスタットへ侵入すると考えられるので、上記のような方針を採った。実施した具体的対策は以下ようになる。

パルス管冷凍機のコールドヘッドからパルプユニット（ロータリバルブ+モーター）を分離し、各々剛性の高い構造物を介して床に固定した。図 11.3 の Support Frame がコールドヘッドの固定、Rotary Valve Table がパルプユニットの固定を行っている。分離したコールドヘッドとパルプユニットの間は肉厚のステンレス配管とし、Rotary Valve Table に沿う部分も肉厚のステンレス配管に換えて固定した。圧縮機からの Flexible 管と肉厚のステンレス配管との接続部も床に固定する。

冷凍機コールドステージの振動に対しては、冷凍機のクライオスタットと一体で床に緊結した減振ステージ構造を設けて、かつ冷凍機コールドステージと減振ステージを柔軟な熱リンクで結び、減振ステージを実効的冷却ステージとする振動防除対策を採った。[9] 冷凍機コールドヘッドと減振ステージ間（図 11.3 の Upper Flange と Lower Flange の間）での振動流入を避けるため、両者をベローズで結合して、冷凍機クライオスタットの真空気密を確保した。ベローズには溶接ベローズを用いた。減振ステージは高機械剛性と低熱伝達性を兼ね備える必要があるので、アルミナ繊維強化プラスチック (AFRP) の管と銅板を使用した構造とし、冷凍機の各コールドステージとの間に 40 本の純 Al 燃細線の熱リンクを設けた。AFRP を用いる理由はガラス FRP と比較して 4 K での熱伝導率が小さく、ヤング率は約 2 倍大きいことによる。

低振動冷凍機システムの振動レベル

低振動冷凍機システムの振動測定結果を図 11.5 に示す。作動ガス供給の圧力脈動に起因する 1 Hz の振動は減振ステージの導入により、ベースとなったパルス管冷凍機のコールドステージ振動に比べて 3 桁小さい値に抑えられている。

コールドヘッド振動はバルブ分離、Support Frame の導入、ベローズの使用によって床振動と遜色ないレベルまで押さえ込むことができた³。コールドヘッド振動に見られる 100 Hz 付近のピークは、加速度計取り付けのための治具の共振であることがわかっている。

³ベースとなったパルス管冷凍機のコールドヘッド振動の低周波部分は測定に使用した加速度計の雑音レベルを表している。これは、測定に際して振動が大きかったため加速度計の高感度レンジが使用できなかった事による。

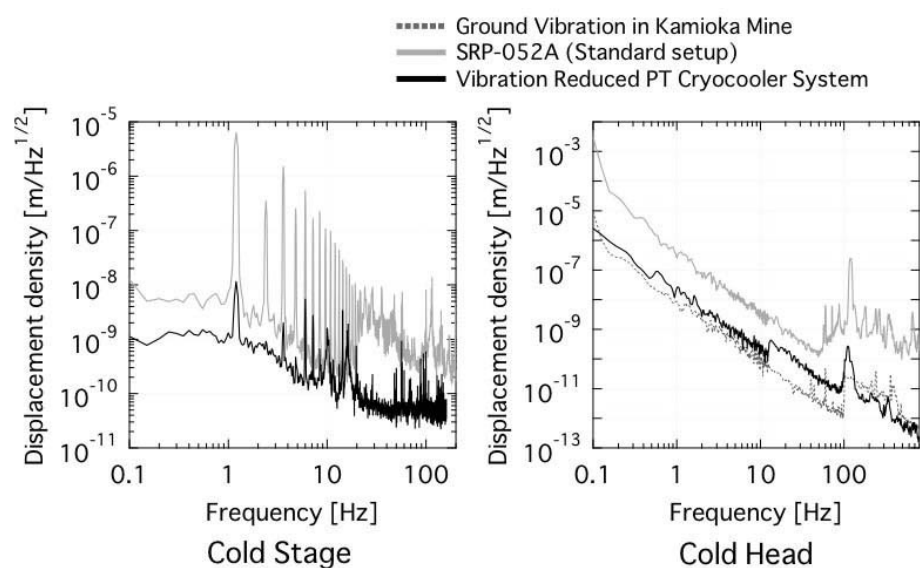


図 11.5: 低振動冷凍機システムの振動スペクトル。黒実線：低振動冷凍機システム。灰色実線：ベースとなったパルス管冷凍機 (SRP-052A)。点線：神岡鉱山トンネルの地盤振動スペクトル。

これらから、開発した冷凍機システムの振動レベルは、神岡鉱山の地盤振動にほぼ匹敵するものを達成したと言って良い。

低振動冷凍機システムの冷凍能力

低振動冷凍機システムの冷凍能力を図 11.6 に示す。ベースとなったパルス管冷凍機は典型的な熱負荷条件 (第 2 ステージに 0.5 W、第 1 ステージに 15 W) のもとで、第 2 ステージ到達温度が 4.0 K、第 1 ステージ到達温度が 42 K であった。低振動冷凍機システムの減振ステージでは、第 2 ステージ到達温度が 4.4 K、第 1 ステージ到達温度が 44 K を示した。第 2 ステージがクライオスタット 8 K シールド、第 1 ステージがクライオスタット 100 K シールドの冷却に用いられることを考慮すれば、低振動冷凍機システムの冷凍能力はベースとなったパルス管冷凍機の冷凍能力と遜色ないと見なすことができる。

100 K 冷凍機システム

真空ダクトのシールド冷却にも 100 K パルス管冷凍機システムが必要とされる。動作温度領域は高いが、大きな冷凍能力が要求される。先に述べた 4 K の低振動パルス管冷凍機システムと同様の振動防除対策を施した単段冷凍機システムで、冷凍能力 60 W (減振ステージ温度 100 K) と、神岡鉱山トンネルの地盤と同レベルのステージ振動を達成した。

11.2.3 高性能伝熱体

冷凍機システムとクライオスタット内の被冷却物との間の伝熱体は大きな熱輸送能力を持ち、かつ柔軟でバネ定数が小さいことが要求される。この条件を満たす伝熱体は既に開発済みであり、図 11.7 にその外観を示す。この伝熱体は、直径 $\phi 0.15$ mm の純 Al 製 (純度 99.999%) 細線 735 本を撚り合わせたケーブルである。低温における金属材料の熱伝導率は純度に強く依存することが知られており、高純度 Al を素材とし

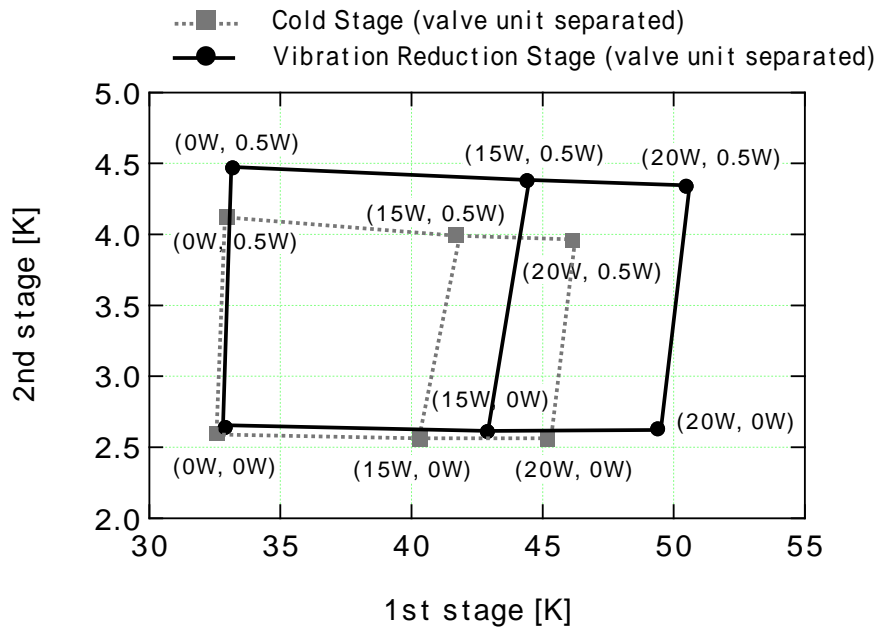


図 11.6: 低振動冷凍機システムの冷凍能力。凡例は、黒丸：低振動冷凍機システムでの測定値。灰色四角：ベースとなったパルス管冷凍機。縦軸は第 2 ステージの温度、横軸は第 1 ステージの温度を表す。各測定点の括弧内の数字は、左側が第 1 ステージへの熱負荷、右側が第 2 ステージへの熱負荷を示している。



図 11.7: 大きな熱輸送力を持つ柔軟な伝熱ケーブル。撚り合わせた純 Al 細線で構成される。

た伝熱ケーブルの 10 K における熱伝導率は 2×10^4 W/m/K に達する。素線におけるサイズ効果が問題にはならなければ、熱輸送量は全断面積に比例している。

素線の曲げに対するバネ定数は、円形断面の素線の場合、面積の 2 乗に比例するので、熱輸送量を一定に保って柔軟なケーブルを得るには素線を細くして、全断面積が変わらないように素線数を増やせばよい。開発した伝熱ケーブルの Al 素線の直径は、純 Al 材料を細線に引く工程の技術的限界で決まっているが、10 K 付近の直径 $\phi 0.15$ mm Al 線ではまだサイズ効果の影響は現れない。

この伝熱ケーブルは、冷凍機システムの減振ステージとベース冷凍機のコールドステージの間の熱リンクにも用いられている。

11.3 LCGT 用冷凍機システム

CLIO 用の低振動冷凍機システム開発を通じて、LCGT 用の冷凍機システム構築に必要な基礎技術は獲得された。[10] 振動レベルに於いては、CLIO 用低振動冷凍機システムで LCGT に必要な仕様は既に満たしている。

LCGT 用冷凍機システムで残された課題は、1 台の冷凍機システムあたりの冷凍能力向上であるが、これは冷凍機システム全体での台数を減らして簡素化と信頼性を上げるための課題と考えられる。ベースとなるパルス管冷凍機に冷凍能力の大きな機種を選ぶことが解となるが、そのときコールドヘッドとバルブユニットが分離可能であることが条件になる。先に書いたように 2009 年の時点で第 2 ステージ 4.2 K で 1.5 W、第 1 ステージ 45 K で 40 W の冷凍能力を持つ 2 段 PT 型冷凍機が市販されており、この機種はバルブ分離可能であるから、既存の CLIO 用低振動冷凍機システム碑比べて一台あたり約 3 倍の冷凍能力は実現可能である。

ダクトシールド用の単段冷凍機についても現在の技術で対応可能なレベルに達している。[10] 簡便化を目指した減振ステージを用いない振動防除法についても開発中である。[11]

以上のように、LCGT で必要とされる冷凍機の技術に関しては、何時でも建設に入れる段階に達している。

参考文献

- [1] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A **242** (1998) 211.
- [2] T. Tomaru et al., Phys. Lett. A **283** (2001) 80.
- [3] K. Kasahara et al., J. Cryo. Soc. Japan **39** (2004) 25.
- [4] Y. Ikeya et al., Cryocoolers **12**, Proc. of the 12th Int. Cryocooler Conf., (2003) 403.
- [5] Xu M. Y. et al., Cryocoolers **12**, Proc. of the 12th Int. Cryocooler Conf., (2003) 301.
- [6] T. Tomaru et al., Cryogenics **44**, (2004) 309
- [7] T. Tomaru et al., Cryocoolers **13**, Proc. of the 13th Int. Cryocooler Conf., (2005) 695.
- [8] R. Li et al., Cryocoolers **13**, Proc. of the 13th Int. Cryocooler Conf., (2005) 703.

- [9] C. Lienerth et al., Proc. of ICEC **18**, (2000) 555.
- [10] Y. Ikushima et al., Cryogenics **48**, (2008) 406
- [11] T. Suzuki et al., <http://xxx.lanl.gov/list/physics/0611>.

第12章

懸架

三代木伸二¹

LCGT 計画において、低温鏡の上段低温マスからの懸架、および、上段低温マスの常温からの懸架は、単に物体を振り子状に懸架し地面振動を防振する機能だけではなく、熱の散逸・遮断を行う機能をもたなくてはならない。特に、第9章にあるように、現在市販されているサファイア基材の光吸収率は高く、鏡で発生する熱も多いため、懸架素材の熱伝導特性は重要である。さらに、低温鏡に直接ふれる懸架素材は、それ自身の熱振動が干渉計の雑音源でもあるため、その機械的特性も重要な選定要素となる。この節では、このような機能を果たす懸架ワイヤーの選定、および、その特性を最大限に生かす取り付け方法についての考察を、今までの研究を元に紹介する。

12.1 低温鏡用懸架

12.1.1 鏡の冷却と懸架の形態

鏡の冷却のみに限っていえば、以下のような方法が原理的に考えられる。

- 熱アンカーとなる物体に熱伝導のよいもので接続し伝熱で冷却
- 黒体輻射で冷却
- Exchange Gas で冷却

鏡の冷却効率上、鏡は常温部からの直接的熱輻射をさけるため、必ず何らかの低温シールド (5[K] から 40 [K] 程度) で包囲されなければならない²。真空中において、それらの間での熱交換量は、計算ではほとんどゼロなので、輻射冷却は不可能である。一方 Exchange Gas を使用する場合は、分子量がおおきく、

¹ 東大宇宙線研

² 輻射量は温度の4乗に比例し、300Kの黒体輻射は単位面積あたり460[W]にもなる。またサファイアの Emissivity (輻射熱をどれだけ吸収してしまうかの指標) は 0.05@4[K] 前後。

妥当な値段の不活性ガスとしてネオンガス³が有望だが、高真空を必要とする干渉計では明らかに使用できない。また、初期冷却にのみガスを使用する案もあるが、ガスそのものによる超低口ス鏡の汚染や、真空中で、鏡周辺のみならずガスを閉じ込める孤立系を必要とするシステムの複雑さから、実用的ではない。以上の考察から、伝熱による冷却に限定される。

次に、伝熱路は懸架用ワイヤーと共有すべきか否か、また懸架素材の最適形状はなにかという問題がある。この件に関しては、共鳴型重力波アンテナの冷却と防振の最適化に関する論文 [1] を参考にすると、結局、伝熱路と懸架ワイヤーを共有する方法が最適とされている。形状に関しては、よくリボンや箔が、円柱ワイヤーの対抗として上げられるが、熱雑音の指標となる機械的 Q 値が高くなく、また、後述するサイズ効果により、断面積が同じでも、厚みの薄さで熱伝導を損する可能性があり、利点は少ないと思われる。また、ヒンジ [2], [4] で引っ掛ける案も研究されており、一部では高い機械的 Q 値が報告されているが、防振との兼ね合いは、まだ研究されていない。

このような考察から、LCGT では、従来と同じような円柱状ワイヤーのよる懸架と伝熱を第一懸架形態とし、その取り付けに関しては後ほど考察する。

12.1.2 懸架ワイヤー素材への要求

低温鏡用懸架ワイヤーに要求される条件は、以下のとおりである。

- 低温で熱伝導率が大きく、鏡で発生するレーザー光吸収熱の放熱通路になる。
- 冷却して機械的 Q 値が高くなり (10^8 以上) 熱雑音を下げられる。
- 引っ張り強度が強い。
- 膨張変化が小さい。
- 鏡に巻きつけられる、または、接着できる。

後述する検証結果により、現在最も有力な素材は人工サファイアファイバーであり、最後の項目以外はすべて要求を満たすか、あるいは考えられる物の中で最適である。表 12.1 にサファイアの一般的特性を示しておく。

現在商用で入手できるサファイアファイバー（円柱形）は Photran 社（旧 Saphikon 社）と Micromaterial 社の二製品である。製法は EFG 法（引き上げ法）が主流で、種結晶を溶融したサファイアに接触させ、結晶成長に合わせて引き上げ冷却していく方法である。通常ファイバー軸が C 軸である。2002 年現在、Photran 社で入手できるファイバーの最大径は $425 \mu\text{m}$ であるが、直径 1mm 以上のファイバーも、設備さえ整えれば作成可能であるとの報告を受けている。ファイバー側面は光学研磨されている。断面が四角のサファイア柱としては、2mm 角で長さが 200mm の物が特注で入手可能であるが、これは研削により整形するので、アニールによる内部へのダメージの修復が必要である。

次項目から、サファイアファイバーの各要求に対する具体的な検証結果、およびその結果からもたらされる制限の考察を行う。

³ヘリウムは、排気しにくいので普通使用しない。昇温の加速を行う場合も同じ理由で避けられる。

属性	値	属性	値
密度	3.98 [g/cm ³]	屈折率	$N_e:1.768, N_o:1.760$
ヤング率	470 [GPa] (300 ~ 470)	複屈折	0.008 ($N_e - N_o$)
横弾性率	145 [GPa]	dN/dT	1.3×10^{-5} @300 [K] < 10^{-7} @20[K]
体積弾性率	2.4 [GPa]	輻射率	~0.05 @ 4.2[K] ~0.17 @ 77 [K] ~0.6 @ 300 [K]
破壊靱性	2.0 [MPa]	融点	2310 [K]
圧縮強度	2.0 [GPa]	熱伝導率	40 [W/m/K] @ 300[K] ~20000 [W/m/K] @ 30[K]
抗折強度	900 [MPa]	線膨張率	4.5×10^{-6} [1/K] @ 300[K] < 10^{-7} [1/K] @ 30[K]
弾性係数	c11=496, c12=164 c13=115, c33=498, c44=148	比熱	780 [J/K] @ 300[K] 2.5 [J/K] @ 30[K]
引っ張り強度	275-400 [MPa]	抵抗	$10^{16} \Omega$
ポワソン比	0.29	絶縁	48 [kV/mm]
格子数	a=0.477 [nm], c=1.3 [nm]	誘電率	C:9.4, \perp C:11.6
音速	10 [km/s]	電磁波障害耐力	-0.23×10^{-6}

表 12.1: サファイアの特性 (厳密な特性は、メーカーによる)

12.1.3 熱伝導率

低温での熱の輸送は、金属の場合は主に電子が担い、サファイアのような誘電体 (絶縁体) では主にフォノンが担う。熱伝導率 (κ) は、

$$\kappa = \frac{1}{3} C_V \frac{v^2}{\tau} \quad (12.1)$$

で表される。 C_V は体積比熱、 v は音速、 τ は緩和時間であり、 v/τ は平均自由行程とも言われる。図 12.1 に典型的なサファイアの熱伝導率温度依存性グラフを示す。熱抵抗が発生するには、フォノン同士の衝突による散乱過程が、逆格子ベクトルと運動量を授受し、進行方向とは逆の方向に散乱されるウムクラップ過程 (Umklapp-Process) でなくてはならない。デバイ温度 (Θ) より十分高い温度領域 (サファイアでは ~1000 [K]) では、体積比熱がほぼ一定である一方、すべてのフォノンが励起されており、ウムクラップ過程の発生率はその数の逆数、すなわち $1/T$ に比例するので、熱伝導率も $1/T$ に比例する。ウムクラップ過程に寄与するフォノンのエネルギーは $k_B \Theta/2$ であるので、その存在確率は $e^{\beta \Theta/2}$ になり⁴、よって、中温度領域 (1000[K] ~ 30[K]) での熱伝導率は $e^{\beta \Theta/2}$ に比例する。さらに低温領域では、ウムクラップ過程は減少し、式から明らかなように熱伝導はそのまま無限になるように見えるが、平均自由行程に結晶サイズ (D) が制限を与え、また、デバイの公式から導かれる体積比熱 C_V の低温近似が、

$$C_V = \frac{5\pi^4}{12} N k \left(\frac{T}{\Theta} \right)^3 \quad (12.2)$$

のように表せるので、結果 DT^3 に比例することになる。

⁴ β は $1/2$ や $3/2$ のような分数で、サファイアは $1/2$ 。

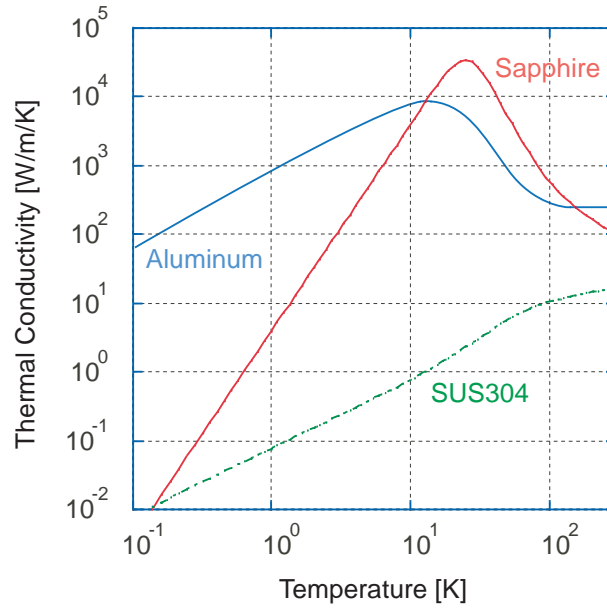


図 12.1: 低温実験で良く使う物質の熱伝導率

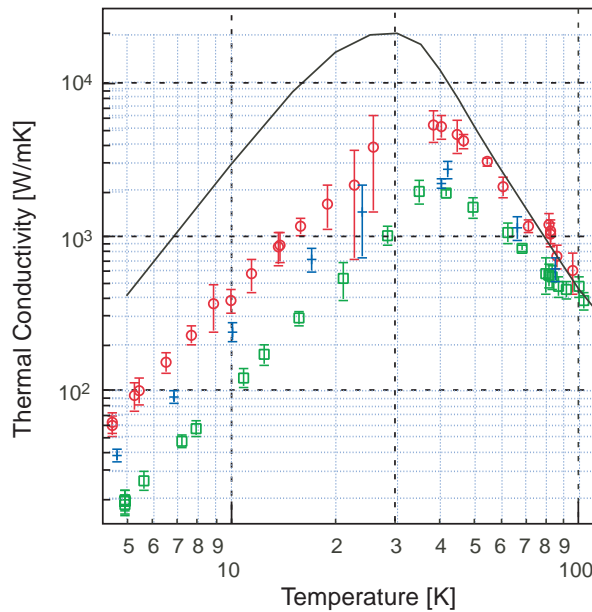


図 12.2: Saphikon 社製サファイアファイバーの熱伝導率の直径依存性

丸点、棒点、角点はそれぞれ直径 $390\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 $160\mu\text{m}$ のファイバーを表し、実線はデータブックに掲載されているサファイアの熱伝導率の最良値である。

さらに、格子欠陥や不純物が存在する場合は、レイリー散乱 (Rayleigh Scattering) を起こし、平均自由行程が短くなるため、中温度領域での熱伝導率は $T^{-3/2}$ に比例するようになり、結果、ピーク熱伝導率は下がることになる。

図 12.2 に実測された Photran 社製のサファイアファイバーの熱伝導率とその直径との関係、およびデー

属性	$\phi 160\mu\text{m}$	$\phi 250\mu\text{m}$	$\phi 390\mu\text{m}$
直径比	0.64	1	1.6
熱伝導率比	0.45	1	1.8

表 12.2: サファイアファイバーの直径比と熱伝導比

タブックに記載されている最良の熱伝導データを示す [5]。測定は Longitudinal Heat Flow 法でありそのセットアップ図を図 12.3 に示す。4.2 [K] の熱アンカーにしっかり固定し熱リンクされたファイバー（断面積 S [m²]）の中間 2 点（距離 ℓ [m]）に温度計（Carbon Glass Sensor）をつけ、アンカー部と、ファイバー端につけたヒーター（熱量 P [W]）で温度差をわずかに発生させ、温度計の温度差 (ΔT [K]) を見ることにより熱伝導率は、

$$\kappa = \frac{P\ell}{S\Delta R} \quad [\text{W/m/K}] \quad (12.3)$$

のように計算される。

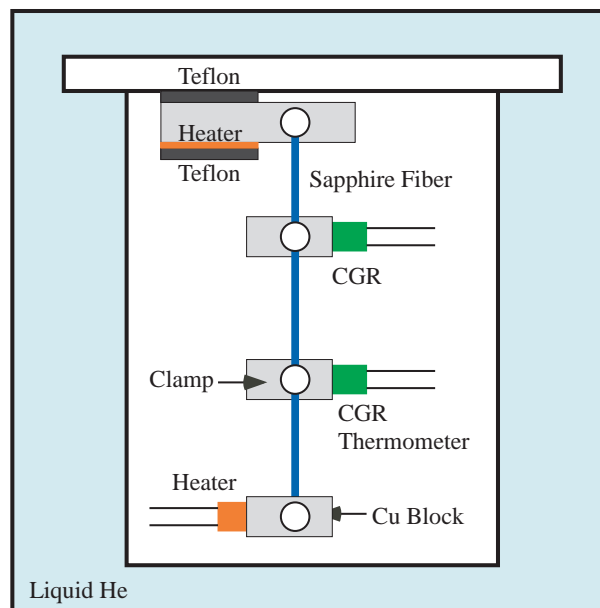


図 12.3: 熱伝導測定の実験装置図

内側の容器内は真空中に保たれ、低温液体を封入するデュアーに浸される。ファイバーは 4 箇所でもクランプされ、上下二つのヒーターで微小な温度差を作り、中間二つのクランプ部の温度差を計測する。

測定されたファイバー径は、160 μm 、250 μm 、390 μm で、表 12.2 にファイバー直径比と 40 [K] 以下の熱伝導率の比をまとめたが、二つの比はほぼ一致し、予想通りサイズ効果が確認された。これより、実測された低温部での熱伝導率は、

$$\kappa = 5.27 \times 10^3 DT^{2.24} \quad (12.4)$$

のようにモデル化できる。

また三者とも、ピーク値付近の変化がシャープなので、レイリー散乱は少ない、つまり、不純物は少ないことが見て取れる。一方、図 12.4 に直径 10 [mm] の Crystal Systems 社のサファイア基材 (CSI White グレード) の熱伝導率を示す。この基材は 532 [nm] のレーザー光に対し、不純物のクロムの吸収と思われる赤い蛍光が観察されている物だが、図に示すピーク値付近での熱伝導率のなまりからも、不純物の影響が見て取れる。

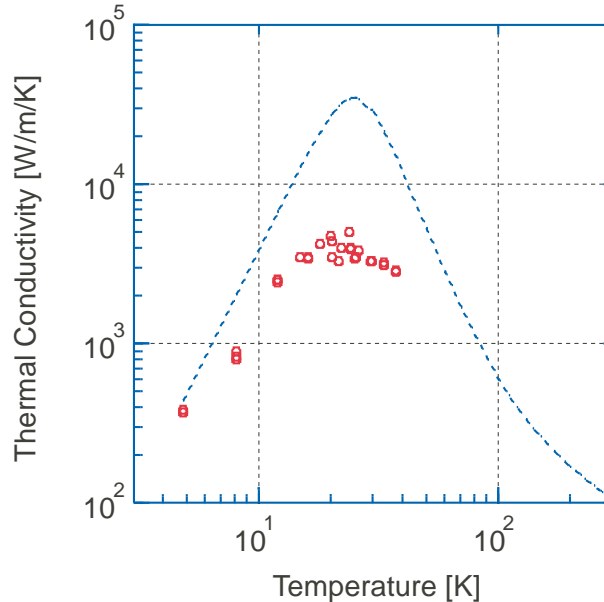


図 12.4: Crystal Systems 社製 CSI White グレードのサファイアの熱伝導率

この Crystal Systems 社製 CSI White グレードのサファイアサンプルは、532 [nm] のレーザーを入射すると、Ti によるものと思われる赤色の発光が観察される。その不純物のレイリー散乱によると思われる熱伝導のピークのなまりが見られる。

低温での熱伝導率は結晶サイズに比例するが、結晶表面の研磨によっては、フォノンが反射し、その反射回数分熱伝導がよくなることがある [6]。図 12.5 に側面研磨と傷をつけた直径 250 μm のファイバーの熱伝導率を示す。図 12.6 は傷の様子の写真である。40 [K] 以下の温度で 2.3 倍の熱伝導の減少がみられる。つまり、研磨状態のファイバーでは、最低でも 2.3 回のフォノンの反射が起きていたといえる。

以上の知見から、サファイアファイバーで逃がせる鏡の熱量とファイバー径、および懸架形状の考察ができる。LCGT での鏡の冷却を、鏡が 20 [K]、直上のマスが 10 [K]、懸架ファイバー長を ℓ [m] とし、計 4 本のファイバーで懸架すると仮定すると、合計で、

$$K = D^3 \int_{10}^{20} \frac{\pi}{\ell} 5.27 \times 10^3 T^{2.24} dT \quad (12.5)$$

の熱が流せることになる。図 12.7 に、腕共振器のレーザーパワー量を常に 160 [kW]⁵を保った状態での、フィネスとサファイア基材の光吸収率から計算される 1 個の鏡からの発熱量、および、その発熱を流せる 4 本のサファイアファイバーの直径の関係を示す。鏡の厚みは 10 [cm]、コーティングでの光吸収は 0.1 [ppm] と仮定してあるので、コーティングからは必ず 0.016 [W] 発熱していることになる。また Near

⁵最初の LCGT 計画の設計 [7]、つまり 100 [W] のレーザー光量、リサイクリングゲイン 50、フィネス 100 の時の腕共振器内のレーザー光量に相当。

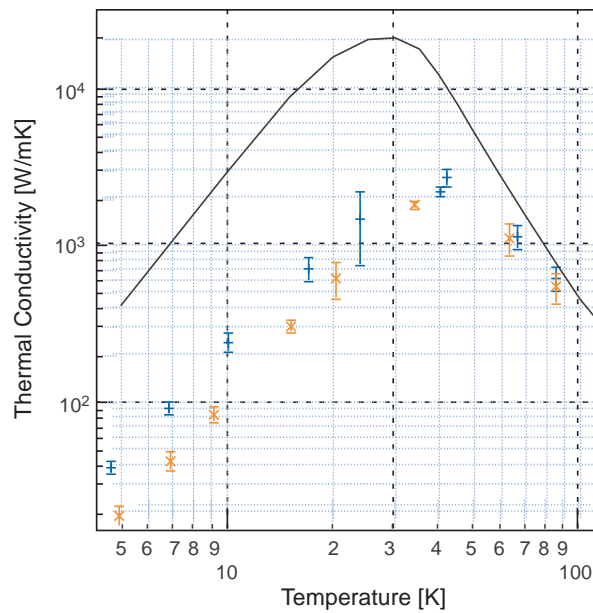


図 12.5: フォノンの反射による熱伝導率の変化

棒点が研磨面、×点が側面に傷をつけたファイバーの熱伝導率である。直径は $250\text{ }\mu\text{m}$ のものを使用している。ダイヤモンドペストで傷をつけることにより、フォノンの反射が低下し、熱伝導が下がっている。

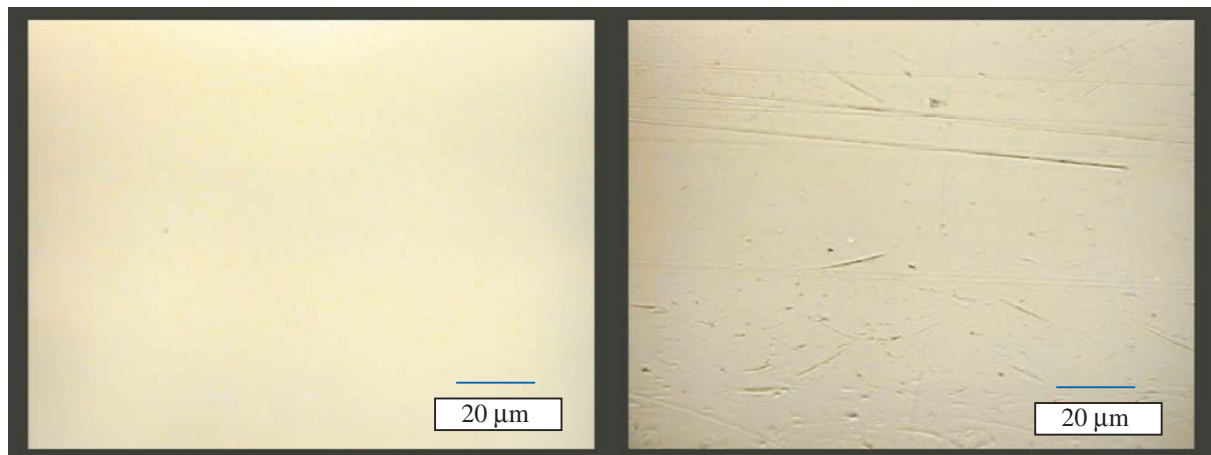


図 12.6: サファイアファイバー側面の傷

鏡内で光は往復するので、鏡での発熱は2倍してある。図のように、当然のことながら、フィネスをあげた分リサイクリングゲインは落とせるので、基材の許容吸収率は上げられるが、この場合 RSE(Resonant Sideband Extraction) 法を使用し、リサイクリングのみの場合と同じ干渉計感度を得ることを前提とする。

図 12.8 に、ファイバー直径 (D) と最小曲げ半径 (R_f)⁶ との関係を示す。LCGT の鏡の直径を 30 [cm] と仮定すると、それをファイバーの曲げで懸架する場合、ファイバーの最大直径は $600\text{ }\mu\text{m}$ となり、長さ

⁶ 直線状ファイバーを自然に曲げることを仮定する。

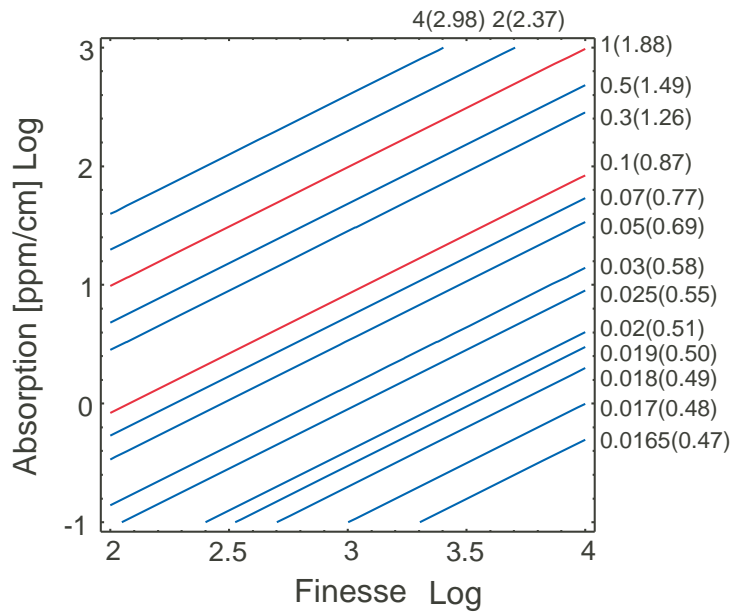


図 12.7: 許容発熱量 (使用サファイアファイバー直径) から決まる干渉計のフィネスとサファイア基材の許容熱吸収率の関係
鏡の厚さは 18 [cm] と仮定し、腕共振器内のレーザーパワーは 160 [kW] に保って計算している。よって許容熱吸収率はフィネスに比例する。上辺、右辺の値は、発熱量とそれを流せるサファイアファイバーの直径 (括弧内) を表す (単位は [W] と [mm]) 。

を 50 [cm] とすると、流せる熱量は 4 本で 33 [mW] しかないので、現状の 90 [ppm/cm]⁷ の光吸収で熱を逃がすには、フィネスを 58000 にし、将来の技術で 20 [ppm/cm] になると期待すると、フィネスは 11000 にし、共に RSE 法を併用する必要がある。

より太いファイバーで懸架する場合、

- サファイア同士の接合・溶着・接着。
- ファイバーを熱処理で、鏡の側面曲率付近まで曲げ整形する。

を行う必要があるが、各技術に関しては後述する。ファイバー径 1 [mm] の場合、0.15 [W] の熱を流せるので、現状の 90 [ppm/cm] の光吸収で熱を逃がすには、フィネスを 6200 にし、RSE 法を併用する必要があるが、将来の技術で 20 [ppm/cm] になると期待すると、フィネスは 1350 で、ともに RSE が必要になる。

一方、共振器の腕に蓄積されるパワーも変数にし、横軸に共振器内の蓄積レーザーパワー、縦軸にバンド幅 (フィネス) をとった場合の、1.4-1.4 M_{\odot} 中性子星連星合体に対する S/N が 10 になる距離の等距離曲線 (赤-緑のグラデーション) と、鏡の基材での吸収を 90 [ppm/cm]、コーティングでの吸収を 0.1 [ppm/cm] と仮定した時の、RSE がない時と、RSE で Signal Band Gain を 10 とした時の、鏡一個の等発熱量曲線 (青) を図 12.9 に示す。懸架するファイバーで最大熱流量がきまり、それと一致する等発熱量曲線が基材やコーティングでの熱吸収率に基づいて等距離曲線上に引けることになり、その等発熱量曲線に接する最大の等距離曲線との接点が、ベストなパラメーターということになる。Signal Band Gain を 10 とすると、腕共振器内パワー一定の条件で、Near 鏡内のパワーは、RSE なしにくらべて 1/10 にできるので、発熱問題を同じ感度を保ちながら改善できる。

⁷ この値は、1998年に購入したロットの値であり、2003年購入のロットでは50 [ppm/cm] と改善されている。

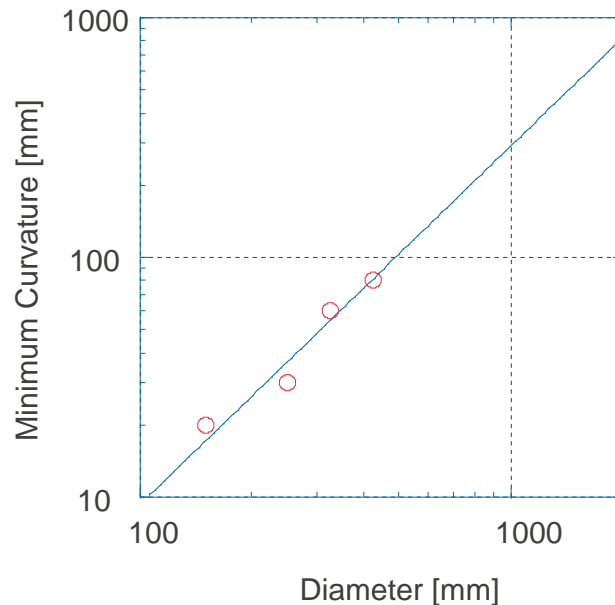


図 12.8: サファイアファイバー直径と最小曲げ半径

Photran 社のデータをもとに、直径のべきでフィット。 $R_f = 292 \times D^{1.5}$ となる (単位は mm)。

共振器内レーザーパワー可変の場合、現在の技術、つまり、90 [ppm/cm] の吸収があり、0.6 [mm] のサファイアファイバーの自然な巻き付けによる懸架で到達できる (つまり、0.033 [W] の発熱まで許せる) $1.4-1.4 M_{\odot}$ による重力波を $S/N=10$ で受けられる最大距離は、RSE なしだと、フィネスが約 2500 で両腕共振器内パワー 10[kW] の条件で 80Mpc 程度になる。これは、入射レーザーパワー 7[W]、リサイクリングなしで可能である。RSE を使うと、フィネス 6250、共振器内パワー 60 [kW] で 160Mpc になる。これは、入射レーザーパワー 10[W]、リサイクリングゲイン 1.5 で可能である。

1 [mm] のファイバーの場合、0.15 [W] まで可能なので、図から、RSE なしでは 140Mpc (共振器内パワー 40 [kW]、フィネス 833) まで、RSE を使うと 180Mpc (共振器内パワー 200 [kW]、フィネス 3570) までみえることになる。将来的に、20[ppm/cm] で、1mm のファイバーになった時は、RSE なしでは、185Mpc (共振器内パワー 140 [kW]、フィネス 310) RSE を使うと、220Mpc (共振器内パワー 500 [kW]、フィネス 1900) まで見えることになる⁸。

12.1.4 低温における機械的 Q 値

鏡を懸架するワイヤーの熱雑音は、レーザー干渉計の感度を 100 [Hz] 以下で制限する重要な雑音源であり、LCGT では、ワイヤーの熱雑音がレーザーの輻射圧雑音以下になることが要求されている。その熱雑音は、主に Structure Damping と Thermoelastic Damping(熱弾性効果) による散逸から計算される。熱弾性効果とは、断熱的で非一様な伸縮により発生した温度勾配の緩和(熱の対流)によりエネルギーが散逸される効果であり、特に、ファイバーやリボンのような形状では顕著に現れることが知られている [8] [9] [10]。熱弾性効果によるファイバーの Q 値は、

⁸2009 年現在の設計では、共振器内パワーは 400kW である。

S/N=10 Distance of 1.4-1.4 Neutron Star Binary [Mpc]

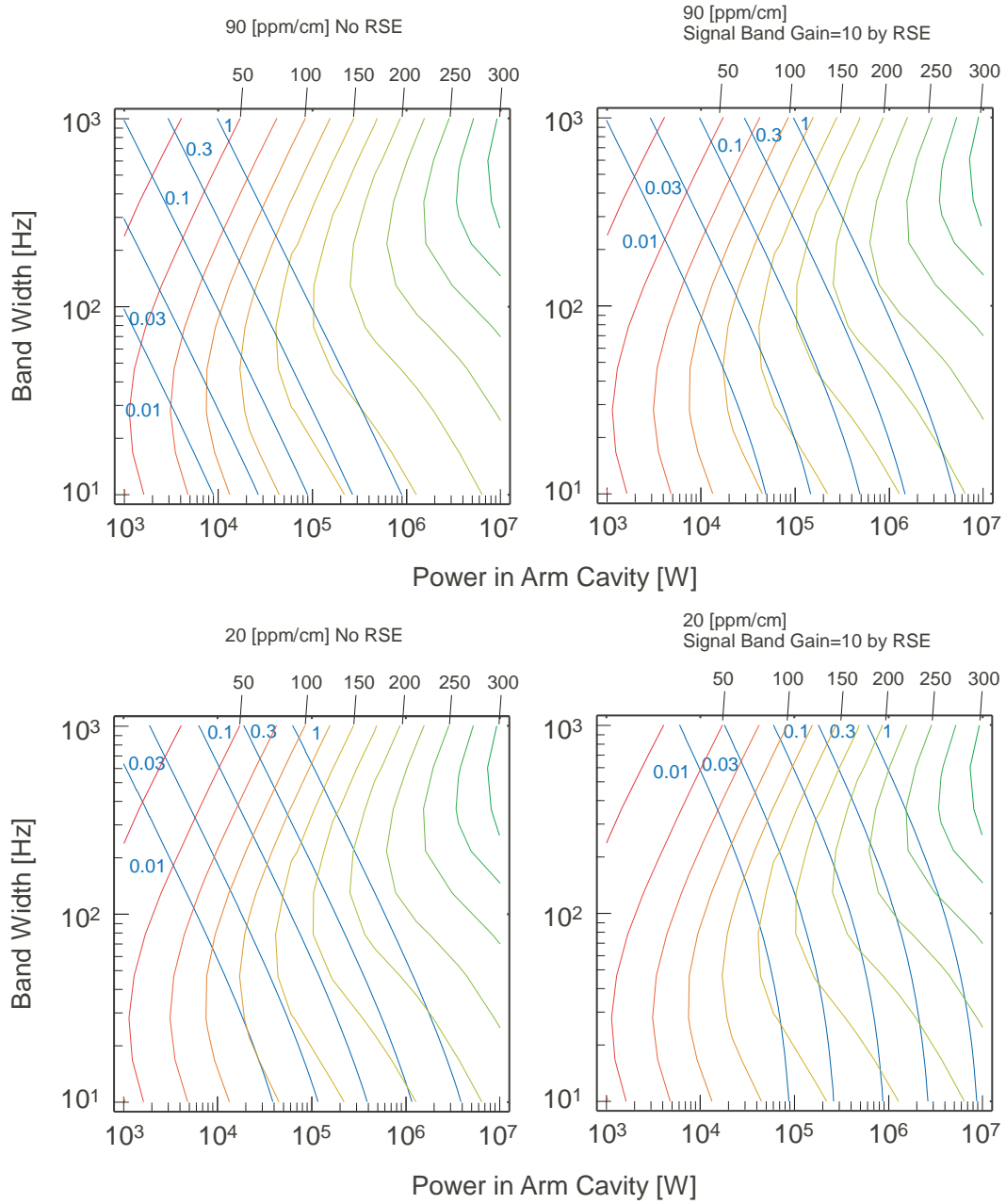


図 12.9: 1.4-1.4 M_{\odot} 中性子星連星合体による重力波を S/N=10 で受けられる距離の等距離曲線と鏡の等発熱量曲線
 鏡の熱吸収率は、90 [ppm/cm] (上) と 20 [ppm/cm] (下) と仮定し、左が RSE なしで、右が RSE による Signal Band Gain=10
 の時である。赤-緑のグラデーションが等距離曲線で、青が等発熱量曲線 (単位は [W])。RSE ありのグラフで、等発熱量曲線がまがって
 いるのは、コーティングからの発熱が、相対的に無視できなくなっているからである。

$$Q = \frac{2.16\kappa + \frac{(f\rho d^2 C_V)^2}{2.16\kappa}}{\alpha^2 d^2 f E T} \quad (12.6)$$

$$f_0 = 2.16 \frac{\kappa}{188 C_V d^2} \quad (12.7)$$

のように計算される。ここで、 E はヤング率、 α は線膨張率、 T は温度、 C_V は体積比熱、 ρ は密度、 κ は熱伝導率、 d はファイバー直径、 f は周波数である。 f_0 は散逸がもっとも大きくなる周波数に相当する。図 12.10 に、室温でのサファイアファイバーの Q 値の実測値を示す [11]。振り子の周波数は、 f_0 より十分に小さいので、

$$Q = \frac{2.16\kappa}{\alpha^2 d^2 f E T} \quad (12.8)$$

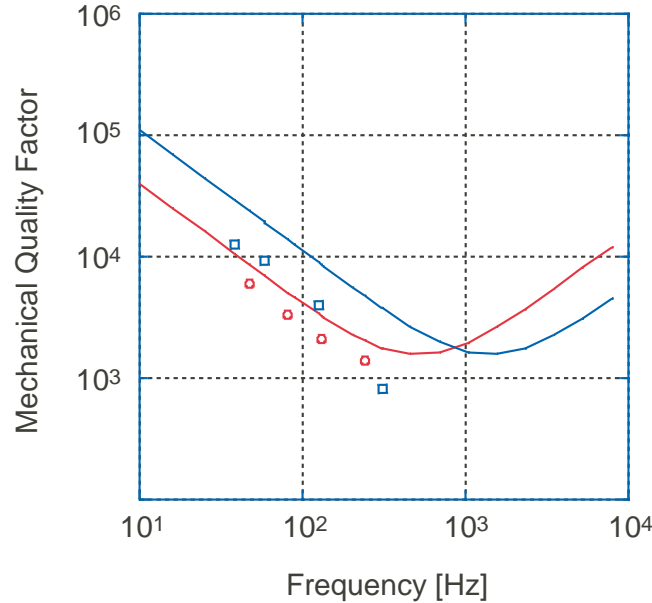


図 12.10: 室温でのサファイアファイバーの機械的 Q 値

丸点、角点はそれぞれ直径 250 [μm]、150 [μm] のサファイアファイバーを示す。実線は理論値である。

と近似される。直径 1 [mm] のサファイアファイバーの場合、300 [K] で、 $Q \sim 5 \times 10^3$ となり、LCGT の要求値 10^8 に遠く及ばないが、低温 (20 [K]) で、 $\alpha \rightarrow 10^{-7}$ 、 $\kappa \rightarrow 5 \times 10^3$ と変化し [12]、 2×10^9 にもなり、まったく問題ないことが予想される⁹。

一方 Structure Damping によるワイヤーの熱雑音は、

$$\delta x = \sqrt{\frac{4k_B T f_p^2 \psi_p}{(2\pi)^3 M_m f^5}} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (12.9)$$

となる。 k_B は、Boltzman 定数、 ψ_p は散逸、 f_p は振り子の共振周波数、 M_m は鏡の質量である。振り子の共振周波数以上では、 $T^{1/2} M^{1/2} f^{-5/2}$ に比例するのが特徴であり、LCGT の要求値は 10^8 以上になる。

表 12.3 に、温度 78 [K] と 6 [K] での異なる長さの直径 250 [μm] のサファイアファイバーの共振周波数 (190 [Hz] ~ 525 [Hz]) と Q 値の関係を示す [13]。6 [K] での 195 [Hz] 前後の二つのモードの Q 値の平均値は 7.7×10^6 であるが、熱弾性効果を仮定した場合に計算される Q 値 $\cdot 3 \times 10^{10}$ とかけ離れているので、ここで見えている Q 値は Structure Damping によるものと考えるのが妥当である。実験結果から逆算される 20 [K] でのファイバーの Q 値は 2.9×10^8 となり、LCGT の要求は満たされる。ただし、この実験において、この Q 値が取得されたのは、サファイアファイバーを同じくサファイアの薄片でクランプした時であ

⁹ 膨張率は Upper limit の値。

ファイバー長さ [mm]	共振周波数 [Hz]	Q at 78 [K]	Q at 6 [K]
43.0	199	1.2×10^6	1.1×10^7
	192	1.6×10^6	4.4×10^6
38.4	253	1.7×10^6	1.0×10^7
	245	6.8×10^5	4.8×10^6
35.5	296	1.4×10^6	7.6×10^6
	287	8.8×10^5	7.4×10^6
31.0	374	2.2×10^6	6.5×10^6
	362	9.4×10^5	1.5×10^6
26.6	525	1.1×10^6	2.4×10^6
	508	8.2×10^5	1.6×10^6

表 12.3: 78 [K] と 6 [K] におけるサファイアファイバーの共振周波数と機械的 Q 値

一つの長さに対し二つの共振周波数があるのは、ファイバーが真円でないため、縮退が解けているものと推測される。

り、銅のような金属の場合は低い値が得られたので、その意味でもロスを導入しにくいサファイアファイバーの接合・接着が望まれる。

12.1.5 脆性・耐久性

サファイアは、 H_2O や NH_3 を強く吸着する性質をもつ。 H_2O の場合の吸着には、電子の授受を伴う強い「化学吸着」と分子間結合や、水素結合のような弱い「物理吸着」がかかわる。図 12.11 のように、表面に酸素の極性基が存在し、そこに H_2O が飛来、化学吸着をおこし水酸基の生成により元の結合が切れる。さらにそれが、 H_2O を水素結合のかたちで物理吸着させ水分子を呼び込んでいく。このような Al 原子と O 原子の解離が表面の亀裂の発生・進展の原因になり、実際に絶対湿度が多いほど、ファイバーの亀裂進展速度が速いことが実験で示されている [14]。よって、サファイアファイバーを扱う場合、十分な湿度の管理が必要である。

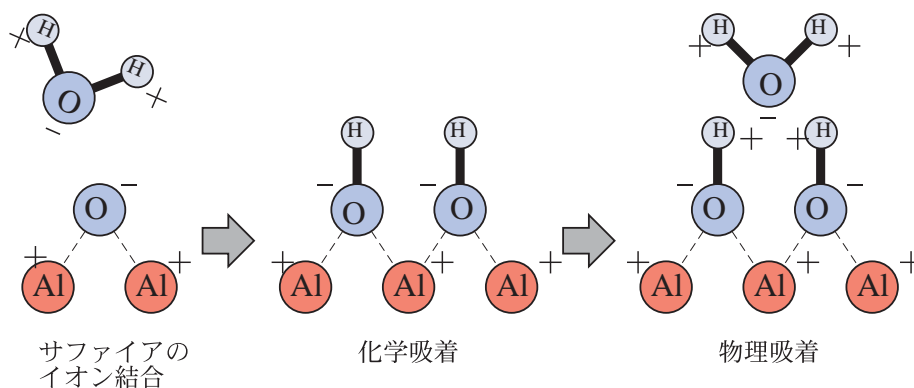


図 12.11: サファイア表面への水分子の影響

サファイア表面に水分子がくると、化学吸着により、元のアルミと酸素原子の結合がきれ、できた水酸基にさらに水分子が水素結合し水分をよびこんでいく。

12.1.6 サファイア接合

先にも述べたように、低温におけるサファイアファイバーの機械的 Q 値として、 10^8 以上が要求されるが、それ犯さぬように低温鏡や上段マスへの固定は慎重に行わねばならない。低温では、熱伝導をとるため、低温鏡直上の上段マスとして、銅やアルミ、あるいはサファイアやフッ化カルシウム (CaF_2) を使用せざるを得ない。しかし、ファイバーの Q 値測定で明らかなように、銅やアルミへの圧着固定では、変形により Q 値が悪化する。またサファイアやフッ化カルシウムでは逆に圧着固定ができない。そこで、サファイア同士やサファイアと金属間での様々な接合・接着技術が提案されている。それらは

- 常温接合 (Surface Activate Bonding)。
- Hydroxide-catalysis bonding。
- 超音波接合。

などである。

常温接合は、異種無機材料同士を界面反応物質なしで、しかも常温で接合する技術であり、東大生産技術研究所の須賀教授¹⁰により開発された技術である。一般の無機素材の表面は、酸化や有機物などの吸着により安定化しているため、単に素材同士を接触させただけでは接合は起きない。そこで、超高真空中 (10^{-8} [Pa] 以下) でアルゴン高速原子ビームを接合表面に照射することでこれらの安定層をはがし、原子の結合相手がいない不安定にした上で、同じように表面活性化された面と加圧接触させ、結果電子の混成軌道が形成されることにより、はじめて接合がおこる。よって、その結合は化学吸着に近い強度を持ちうる。接合予定面はよく平面研磨されている必要があるが、原子層レベルでの段差は残存している。しかし、一旦どこかが接合すると、その段差を表面原子の移動によって補いながら接合が広がってゆく一方で、それが内部応力となり、結合力とバランスする所で結合が止まると考えられている。ただし、接合を実際に行うには、結晶方位、表面の構造変化、表面粗さやうねり、面積、厚み、雰囲気、原子間エネルギーなど考慮すべき点が非常に多く、最適な条件だしが重要になる [15]。現在の所、サファイアとアルミの接合は成功しており [16]、十分な強度が証明されている。しかし、サファイア同士の常温接合は成功していない。その最大の理由は、サファイアがアルミ原子と酸素原子が電子を共有しあう共有結合ではなく、アルミ原子の電子が電気陰性度の高い酸素原子に奪われてできるイオン同士のクーロン力で結合しているイオン結合で成り立っているためだと考えられている。接合するには、クーロン力で反発しないように原子の配列面を合わせる必要があり、かなり難しいといえるが、継続的に研究は行われている。

Hydroxide-catalysis bonding は、もともと、溶融石英同士の強靱かつ温度変化の少ない接着としてスタンフォード大学で開発されたものである。接着のメカニズムは [17]、まず、水酸化カリウム (KOH) や水酸化ナトリウム (NaOH) を接着したい溶融石英表面に適量塗布すると、水和作用により $\text{Si}-\text{OH}$ に対応して $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ が配列し、結果 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ の弱いネット層を形成する。その状態で面同士を合わせると、今度は脱水和作用により $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 層が接着面として機能する。接着面はあらかじめ $\lambda/10$ 程度に研磨され、できる限り吸着分子や粒子のない清浄な面であることが必要である。最大接着力は、処置後数週間で得られ、30 から 40 分以内なら、接着の位置直しが可能である。4 [Mpa] 程度の引っ張り強度が確認されており [18]、すでに GEO 計画や VIRGO 計画で利用されている。水酸化ナトリウムでの Hydroxide-catalysis bonding では、脱水和の促進としてベイクングを行った結果、総じて 20 % ほどの引っ張り強度の向上がみられている。サファイアの Hydroxide-catalysis bonding も成功しているが、引っ張り強度が溶融石英の接合に比べて約 $1/3$ ととどまっている [19]。今後は、さらに低温環境における性能評価が必要である。

¹⁰ <http://www.su.rcast.u-tokyo.ac.jp/>。

超音波接合は、被接合体上に置かれた接合体に圧力を加えながら超音波振動 (~ 10 [kHz]) によりこすりつけ、酸化皮膜等を破壊することで露出する活性化された基材原子同士が結合することにより得られる結合である。摩擦程度の温度で接合可能で、残留応力が少ない接合であり、通常数秒以下で完了する。接合を行う上で、振幅、加圧量、振動エネルギーの調整が重要である。主に、金属同士で行われ、最近サファイアとアルミ (Al 1050) の接合も成功している [20] が、これもまだサファイア同士で行われた例はなく、SAB と同じで共有結合が必須ならば厳しい。同じ超音波接合でも、いわゆる半田に相当するものを使用し接着することは可能である。

以上のように、サファイアと金属 (アルミや銅) の接合は見込めるが、現状ではサファイア同士の接合はかなり難しく、研究途上である。サファイアに何かコーティングし、それを介して接合する必要があるかもしれない。

12.1.7 ファイバーを使用しない懸架

今まで、ファイバー状のもので鏡を懸架することを想定してきた。しかし、防振と熱伝導の要求は、ファイバーに関し、方や長く・細く、方や短く太く、とトレードオフの関係にある。しかし、近年のサファイアバルクも対象に含む超精密加工技術の発展を背景に、サファイアバルクに溝を掘ったり、出っ張らせたりして、その溝やでっぱりに形を合わせて成型されたヒンジを挿入し、懸架方向に対して物理的に抜けにくいようなひっかけ構造で懸架する案も提案されている。ヒンジのメリットは、短いヒンジ部位以外は太くでき、その熱伝導は実質上ヒンジ部位のみで決まり、その短さから熱伝導を大きく取れる点にある。



図 12.12: ニオブヒンジと対向する溝穴

全体で 7 [mm] 角の大きさしかない。上下の V 溝が、バルク上に彫られた同形の溝に挿入され懸架される。

そのひとつは、例えば [2] [3] で紹介されているニオブヒンジである (図 12.12)。その機械的 Q 値は、

$$Q_p = \frac{L}{t} \sqrt{12\delta\ell \frac{Y}{E} Q_0} \quad (12.10)$$

$$\delta\ell Y = \frac{mg}{at} \quad (12.11)$$

と、もとまる。 L は懸架部から鏡の中心までの距離、 t と a はヒンジ部の厚みと幅、 E はヤング率、 Y は金属の耐力¹¹、 Q_0 はヒンジの Intrinsic な機械的 Q 値、 g は重力加速度である。

熱伝導量 (W_{total} [W/K]) は、ヒンジ内部熱抵抗 (W_{int} [W/K]) と接触面での Kapitza 抵抗 (W_{kap} [W/K]) で計算され、

¹¹多くの非鉄金属は降伏点を示さないため、降伏点のかわりに耐力という用語を使う。これは応力を抜いても元に戻らず 0.2% の永久伸びが生じたときの応力を試験前の材料片の断面積で割った値である。[N/m²]

$$\frac{1}{W_{\text{total}}} = \frac{1}{W_{\text{int}}} + \frac{1}{W_{\text{kap}}} \quad (12.12)$$

$$W_{\text{kap}} = \frac{AT^3}{\beta} \quad (12.13)$$

となる。 A は接触面積、 β は熱伝導効率で、金属ではおおよそ $10^{-3} \sim 10^{-4}$ [$\text{m}^2\text{K}^4/\text{W}$] の間をとる。50 [kg] の鏡の懸架に、幅 10 [mm]、厚み 0.5 [mm] の長さ 10 [mm]、接触面積 5×10^{-7} [m^2] のヒンジを使用すると仮定し、ニオブの 30 [K] 付近での熱伝導率はだいたい 100 [$\text{W}/\text{m}/\text{K}$] なので、計算される総熱伝導量は、 $0.05 \times \Delta T$ [W] であり、Kapitza 抵抗による低下は無視できる。計算では、振り子としての Q 値として 10^8 以上が期待されるが、まだ低温で検証されていない。一方、懸架された溝付きのサファイアバルクの Intrinsic な Q については 7×10^6 の値が得られている。ただ、この構造では 1 軸方向への防振しかできず、かつ振り子の共振周波数も普通の振り子よりは高いので、防振性能が劣る。

そこで、防振特性も改良したのが、文献 [4] で紹介された Flex Joint である (図 12.13)。ここでは、サファイアの棒の両端にヒンジをもうけ、熱伝導は太さで、防振性能はヒンジ間の長さで稼いでいる。ただし、剛体振り子であるため、高い周波数で防振比の飽和が発生するため、できるだけ飽和周波数をあげるために、カウンターマスも設ける工夫も提案されている。ヒンジ部の直径を 1 [mm] 長さ、10 [mm]、棒部の直径を 5 [mm]、長さ 250 [mm] として予想される熱伝導量は 30 [K] で、 $0.5 \times \Delta T$ [W] である。

両デバイスとも、機械的な研磨による基材へのダメージが予想されるが、研削によるバルクの Q 値の低下は、アニーリングにより回復することが実験的に示されているので、ヒンジにも応用できると考えられる。

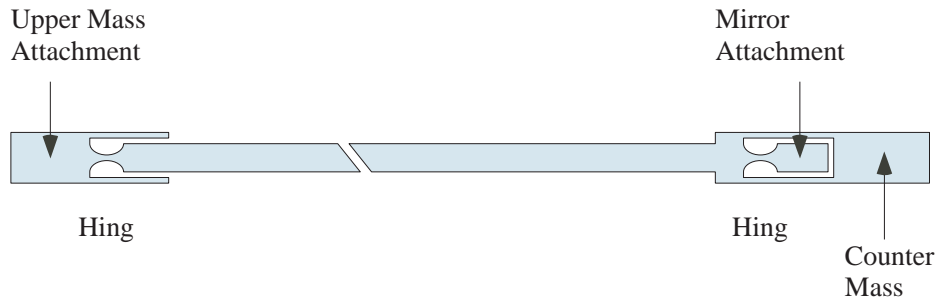


図 12.13: サファイアヒンジ

両端にヒンジがあり、鏡や Upper Mass にはアタッチメント部の出っ張り、同様な出っ張りを施した鏡や Upper mass に引っ掛ける。鏡の方の懸架部位には、剛体振り子による防振比の飽和周波数を伸ばすためのカウンターマスが付いている。

12.2 常温からの懸架

将来導入される低温鏡の低周波防振装置は、その複雑さから、それをすべて低温にすることは極めて非実用的である。よって、常温の低周波防振装置 (300 [K]) から、低温のマス (10[K]) を懸架する構造が必要になるが、当然、低温マスへの熱流入は最小に抑えねばならない。強靱かつ熱伝導が悪いものとして、グラスファイバー (G10) 線、プラスチック光ファイバー線、SUS などがあるが、そのように大きな温度差が生じているワイヤーでは、熱膨張・収縮による振動励起が発生することが、共鳴型アンテナの経験から

わかっている。現在のところ、確実なワイヤー候補は見つかっていないが、擬弾性、超弾性ワイヤー、あるいは高制振素材・M2052 がその振動を自己吸収する素材として期待される。

超弾性は、形状記憶特性の一種で、変態温度以下で負荷された外部応力による母相（オーステナイト相）からマルテンサイト相へ相変化を伴う変形を、変態温度以上に昇温することで母相に戻るのが形状記憶特性であるのに対し、変態温度以上での二相間変化を利用するのが超弾性である。よって、室温での使用を仮定した超弾性においては、その変態温度は低く設定されるのが普通である。素材としては Ni-Ti 合金が主流で、その特性は、

- 回復ひずみ (伸び) は 7-8 %。
- 弾性係数が小さい (70 [GPa])。
- 降伏応力が比較的高く、ひずみも大きい。
- 負荷時と除荷時の応力-変位ヒステリシスがある。

である。最近、ひずみ (伸び) は半分程度だが、3 倍ほど高剛性な超弾性線も開発されている。

擬弾性効果のあるワイヤー線としては、ボルファ (ユニチカ) があり、共鳴型アンテナの懸架で使用された実績があるが、単体特性は不明である。

M2052 は制振合金といわれ、対数減衰率が 0.72 を示す、自己制振効果を持つ金属である。マンガンをベースにした、 $Mn - 20Cu - 5Ni - 2Fe - X$ 系の構造を持つ。制振効果は、双晶の発生・運動により、振動エネルギーを熱エネルギーに変換することで達成される。その詳しい機械的特性は低温領域も含めて文献 [21] で詳しく調べられている。

以上の素材に関し、その特性評価、低温での防振・制振性能評価が必要である。

参考文献

- [1] E.Coccia, V.Fafone, I.Modena, “ Suspension and thermal link of an ultralow temperature gravitational wave antenna ”, Review of Scientific Instruments 63, pp5432-5434 (1994).
- [2] Li Ju, M.baker, David G. Blair, I.Bilenko, D.Paget, “ High Q niobium membrane flexure pendulum ”, Physics Letters A 280, p182 (2001).
- [3] Li Ju, David G. Blair, I.Bilenko, D.Paget, “ Low Loss Niobium flexure Suspension Systems ”, Classical Quantum Gravity 19, pp1703-1708 (2002).
- [4] R.Desalvo, “ Cryogenic Laser Interferometr Ideas ”, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, Aspen, Colorad, USA (2000).
- [5] T.Tomaru, T.Suzuki, T.Uchiyama, A.Yamamoto, T.Shintomi, C.T.Taylor, K.Yamamoto, S.Miyoki, M.Ohashi, K.Kuroda, “ Maximum heat transfer along sapphire suspension fiber for the Large-scale Cryogenic Gravitational wave telescope ”, Accepted to Physics Letters A.
- [6] H.M.Rosenberg, “ Low temperature solid state physics ”, Oxford Clarendon Press (1963).
- [7] K.Kuroda *et.al.*, “ Japanese large-scale interferometers”, Classical Quantum Gravity 19, pp1237-1245 (2002).
- [8] J.Kovalik, P.R.Saulson, Review of Scientific Instruments 64, 2942 (1993).
- [9] S.Rowan, R.Hutchins, A.McLaren, N.A.Robertson, S.M.Twyford, J.Hough, Physics Letters A 227, 153 (1997).
- [10] G.Cagnoli, L.Gammaitoni, J.Kovalik, F.Marchenioni, M.Punturo, Physics Letters A 255, 230 (1999).
- [11] N.Ohishi, Doctor Thesis (2001).
- [12] T.Tomaru, T.Suzuki, S.Miyoki, T.Uchiyama, C.T.Taylor, M.Ohashi, K.Kuroda, A.Yamamoto, T.Shintomi, “Thermal lensing in cryogenic sapphire substrates”, Classical Quantum Gravity 19, pp2045-2049 (2002).
- [13] T.Uchiyama, T.Tomaru, D.Tatsumi, S.Miyoki, M.Ohashi, K.Kuroda, T.Suzuki, A.Yamamoto, T.Shintomi, “ Mechanical quality factor of a sapphire fiber at cryogenic temperatures ”, Physics Letters A 273, pp310-315 (2000).
- [14] T.Sakawa, “ 重力波レーザー干渉計鏡の懸架ワイヤーの強度について ”, Master Thesis (1999).
- [15] T.Suga, “ ダイヤモンドと金属の常温接合 ”, NEW DIAMOND 16, pp18-19.
- [16] T.Akatsu, G.Sasaki, N.Hosoda, T.Suga, “ Microstructure and strength of Al-sapphire interface by means of surface activated bonding method ”, Journal of Materials Research 12, pp852-856 (1997).

- [17] S.Rowan, S.M.Twyford, H.Hough, D.-H.Gwo, R.Route, “ Mechanical losses associated with the technique of hydroxide-catalysis bonding, of fused silica ”, Physics Letters A 28, pp471-478 (1998).
- [18] P.Amico, L.Bosi, L.Carbone, L.Gammaitoni, M.Punturo, F.Travasso, H.Vocca, “ Fused silica suspension for the VIRGO optics ”, Classical Quantum Gravity 19, pp1669-1674 (2002).
- [19] H.Armandula, P.Willems, “ Silicate Bonding Research at Caltech ”, LIGO-G010267-R (2001).
- [20] H.Armandula, P.Willems, “ アルミニウムとアルミナの超音波接合 ”, 軽金属 50, Vol.12 (2000).
- [21] R.Tanji, Master Thesis (2001).

第13章

LCGTの防振系

高森昭光¹

本章の目的は、LCGTに必要な防振性能、防振系の設計指針について述べることである。ここでいう防振系とは、光学素子を懸架するサスペンションおよび、サスペンションと地面とのインターフェイスをさす。サスペンションは強力な防振システムであるから、防振系を設計するにあたってはその効果も考慮する。LCGTのサスペンションには、防振の他に、冷却や補助干渉計(SPI)といった新技術が含まれるので、それらについては対応する章を参照してほしい。[第10章、第14章]

13.1 防振系の概要

13.1.1 LCGT設計感度と防振特性

LCGTの建設予定地である神岡鉱山は様々な理由で重力波検出器を設置するのにふさわしい場所である。特に環境の安定度は非常に優れており、50 Hz以下の地面の定常振動はTAMA300サイトに比べて1/100から1/1000程度となっている。また、神岡鉱山で実測された地面振動のスペクトルには、多くの場所で観測されるような構造(ピーク)が存在せず、100 mHz以上数十 Hz以下では次式で良くモデル化できるようである [??(佐藤)章]。

$$x_s = \frac{10^{-9}}{f^2} [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}] \quad (13.1)$$

ここで、 f は周波数、 x_s は地面振動のスペクトル密度を表す。また、この値は100 mHz以下ではほぼ周波数によらず一定とするモデルが多い。

地面振動を除くと、LCGTの重要な重力波検出帯域である10 Hz以上の帯域では、干渉計腕部のFabry-Perot共振器でのレーザー光の輻射圧が原理的かつ支配的な雑音源となる設計である [??(山元)章]。ここでは、地面振動を防振することによってこの条件を保つ、すなわち、数 Hzから10 Hz以上の帯域で、輻射圧雑音に比べて地面振動雑音が充分小さいことを防振特性の目標として設定する。具体的には、10 Hz

¹東大地震研究所

で地面振動雑音が輻射圧雑音の $1/100$ となり、地面振動雑音の周波数依存性が輻射圧雑音 ($1/f^2$) よりも急峻であることが目標である。この目標を満たすためには、10 Hz での神岡鉱山の地面振動が $10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、輻射圧雑音が $3 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ であることから、2 段以上の受動防振系で、10 Hz での防振比が -150 dB 必要である。

13.1.2 低周波における防振

前節では、LCGT の設計感度を実現するために必要な防振特性について簡単に述べた。ここでは、重力波に対する感度に直接影響しない低周波 (10 Hz 以下) における防振特性について考察する。前節で示したモデルのように、地面振動のパワーは低周波に集中している。また、振り子などの防振系によって高周波 (10 Hz 以上) で優れた防振特性を得ることは容易である。したがって、防振された光学素子の慣性系に対する絶対変動量は低周波成分の寄与によって決定される。一般的には特に 200 mHz 300 mHz に存在する、海洋活動に起因する特徴的な振動 (micro seismic peak) が支配的な成分である。しかし、これまでのところ、神岡鉱山で得られた地面振動スペクトルにはこのような特徴的な構造はみられず、100 mHz 付近での地面振動レベルはおよそ $10^{-6} \text{ m}/\text{rtHz}$ であり、これは micro seismic peak の存在する場所の $1/10$ 程度である。優れた低周波防振を導入することにより、このきわめて安定した環境の利点を最大限に引き出し、干渉計の稼働率を高い水準で維持することが可能となる。例えば、干渉計の光共振器をロックするのに必要な時間を最長 10 秒程度とすると、100 mHz 以上で積分した鏡の速度が一定の閾値を下回らなくてはならない。特に、LCGT では共振器のフィネスが比較的高めに設定されているので、この閾値は小さくなり、Nd:YAG レーザーの使用、腕の制御帯域 100 Hz 程度を仮定すると、 $0.5 \mu\text{m}/\text{s}$ 程度が要求される。補助干渉計の使用などによって閾値を緩和することも可能であるが、防振系単体でこの程度の値が実現できれば、制御設計に関する要求が緩和されるなど、様々な点で有利になる。仮に防振系の設計目標を、100 mHz 以上での鏡の残留速度振幅が $1 \mu\text{m}/\text{s}$ 以下になる、ことに設定すると、100 mHz でおよそ -20 dB 程度の防振特性が得られれば充分である。また、機械系の共振などによって閾値を超える振動が励起されないよう、共振を有効にダンピングする手法が必要である。

13.2 SAS による低周波防振

Seismic Attenuation System (SAS) は、前節で述べたような低周波防振特性を実現するために開発された装置であり、低周波受動防振装置とローカル制御系により構成される。

13.2.1 SAS の機械系

低周波防振は倒立振り子とその下に懸架される複数の Geometric Anti-Spring フィルター (GAS フィルター) の連成振り子によって実現される (図 13.7 の模式図参照)。倒立振り子は水平方向の超低周波防振装置である。その模式図を図 13.1 に示す。地面に設置された弾性ジョイントには梃子となる脚を取り付けられ、脚の上端から防振対象となる荷重が懸架される。荷重の水平移動に伴い、脚がジョイントの屈曲点を中心に回転し、脚と垂直な方向に、ジョイントによる復元力と、重力の分力が発生する。重力の分力は脚の傾斜に比例し、常にジョイントによる力を打ち消すように作用するため、実効的なバネ定数は、次式で表される。

$$k_{eff} = \frac{k_{\theta}}{l^2} - \left(\frac{m}{2} + M \right) \frac{g}{l} \quad (13.2)$$

ただし、 k_{θ} はジョイントの回転バネ定数 (N/rad)、 M は荷重の質量、 m は脚の質量、 l は脚の長さ、 g は重力定数である。荷重の質量や脚の長さを調節することにより、実効的なバネ定数を小さくすることができる。原理的には復元力の働かない、いわゆる無共振の状態にすることが可能であるが、実際の装置では、ある程度共振周波数を下げると機械の摩擦などにより非線形性が顕著になり取り扱いが困難になる。これまでの開発試験の結果では、共振周波数はおよそ 30 mHz 程度まで下げることが可能である。これにより、100 mHz で約-20 dB 程度の水平防振が実現でき、防振系単体で干渉計のロックのしやすさを確保することが可能となる。倒立振り子では、荷重に対する支持体である脚の質量比が比較的大きいため、高周波で受動防振特性が飽和する現象がみられる。この問題は、脚の質量分布を適当に調節することによって緩和することが可能であり、従来の試験では 30 40 mHz に共振を持つ装置で、およそ 5 Hz 程度まで理想的な振り子として動作可能、水平防振特性の飽和レベルを-70 dB 程度にすることが可能であることがわかっている。また、倒立振り子の超低周波共振によって、低周波で優れた受動防振特性を得られるだけでなく、光学素子の低周波での位置制御を効率良く行えるという利点もある。

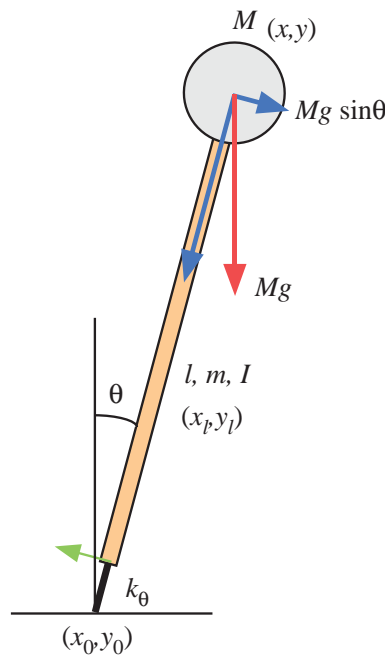


図 13.1: 倒立振り子の模式図。

倒立振り子からは、全自由度低周波防振装置の GAS フィルターが懸架される (図 13.2)。GAS の模式図を図 13.3 に示す。GAS は板バネを利用した単純な装置であり、板バネが水平方向へ圧縮されていることが特徴である [4]。これによって、板バネは鉛直、水平方向に力を生じる。荷重は対向した板バネによって支持される。比較的大きな荷重を支持する必要があるため、板バネはあらかじめ適当な仰角をもって取り付けられており、つりあいの位置 (動作点) は板バネの非線形領域にあるが、動作点付近の微小領域では線形バネとして近似できる。荷重が動作点から上下に移動すると、板バネ力の鉛直成分は復元力として働くが、水平成分の鉛直写像は荷重の移動量に比例して移動を増大させる方向に働く。すなわち、板バネを圧縮する力が反バネ力として作用し、実効的な鉛直方向のバネ定数を減少させ、低周波共振を実現している。

倒立振り子と同様、試作機においては、摩擦の効果などで共振周波数の下限値は 200 mHz 程度であった。

鉛直方向へのドリフトは、板バネに加えられる応力と、温度変化によって引き起こされる。応力によるドリフトを抑制するために、材料としてひずみ強度の高い (73 GPa) Marval18 マレージング鉄を利用している。加えて、バネの形状を工夫して応力分布を均一化してひずみ強度を超えないようにしている。温度の変動の効果は、材料のヤング率の変化によるものが支配的で、これまでの実験では 0.5 mm/K 程度の鉛直ドリフトが観測されている。神岡鉱山の温度安定性を考慮すると 0.5 mm 以下のドリフトが予想されるが、これは通常のビームセンタリングの精度よりも小さな値である。なお、ドリフトによる共振周波数の変化は無視できることがわかっている。GAS フィルターは、中心をワイヤー 1 本で懸架される。また、ワイヤー固定点をフィルターの重心近くに設定することにより、全 6 自由度にわたって共振周波数を 1 Hz 以下にすることが可能であり、完全に受動的な低周波防振を実現する。また、必要な防振特性を得るためには、フィルターを複数用いる、いわゆる多段化をおこなえば良い。倒立振り子と同様に、GAS の板バネやワイヤーの内部モードによって防振特性の周波数依存性が理想的な調和振動子のものからずれる効果があるが、これまでの実験やモデルによると、鉛直方向では 10 Hz 程度で防振特性が飽和する (飽和レベル: 約 -60 dB)。水平方向には数十 Hz に最低次のワイヤー内部モードが存在し、これ以上の周波数での防振特性が悪化する。



図 13.2: MGAS。

干渉計の光学素子を懸架するサスペンションは、倒立振り子と GAS フィルターからなる低周波防振系の下に位置する。サスペンションは、最下段に主干渉計の光学素子、その 1 段上に補助干渉計の光学素子を配置した多段振り子である。GAS フィルターとサスペンションのインターフェイスにはサスペンションプラットフォームが配置される。補助干渉計光学素子を吊るワイヤーは、サスペンションプラットフォームに組み込まれた小型の GAS (ミニ GAS) に取り付けられ、鉛直防振を行うことが可能になっている。冷却の問題から主干渉計光学素子を吊るワイヤーはサファイアファイバーが想定されているが、補助干渉計光学素子を吊るワイヤーについては、タンゲステンなどの金属を用いることができると考えられる。サスペンションプラットフォームと補助干渉計光学素子からは、それぞれ 1 段の振り子が懸架される。この振り子のシリンダー状のマスをリコイルマスといい、上下の光学素子の軸上に位置する。リコイルマスには、主・補助干渉計の光学素子の位置制御に用いるアクチュエータを組み込む。リコイルマスを懸架するワ

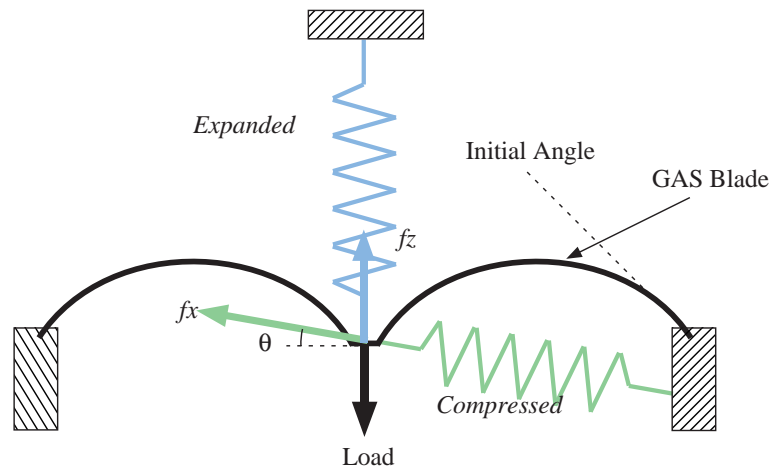


図 13.3: MGAS の模式図。

イヤの長さやリコイルマスの質量などを適当に調節することによりサスペンションの対称性を高めると、位置制御に伴う作用・反作用が相殺し、サスペンションプラットフォームより上部のマスに力が漏れることを防ぐことができる。これにより、光学素子の位置制御応答が単純化され、制御系の設計が容易になる。また、サスペンションプラットフォーム、2つのリコイルマスには、TAMA300で実績のある、永久磁石を利用した受動ダンピング機構が組み込まれ、サスペンションの剛体モードが全自由度にわたって有効にダンピングされる。光学素子の傾斜(ピッチ・ロール角)の初期調整はサスペンションプラットフォームのミニGASを上下させることによって行う。

13.2.2 SASの制御

SASの機械系の共振は低周波に多数存在するので、適切にダンピングしないと光学素子のr.m.s.変動が大きくなり、干渉計の動作安定性を損なってしまう。そのため、SASでは先に述べたサスペンションの受動ダンピングに加えて、倒立振り子を利用した能動ダンピングを行う。SASは多段振り子系であり、初段の倒立振り子が最低の共振周波数を持つため、GASフィルターやサスペンションマスの並進および一部の回転モードは効率よく倒立振り子に反跳する。したがって、倒立振り子の振動を検出し、打ち消すような制御を行えば、これらの剛体モードのエネルギーを吸収することができる。振動検出に加速度計を用いることにより、慣性系をリファレンスとした制御を行うことができ、光学素子のACでの振動振幅を抑制することが可能である。ただし、加速度計は等速度運動に対する感度がなく、低周波で比較的感度が悪いため、ドリフト制御などを行うのには向かない。そのため、補助的に位置センサーを用いてDCから超低周波での制御を行うことにより、系の長期安定性を確保できる。アクチュエータとしては、ボイスコイルアクチュエータを用いることが適当である。なお、サスペンションの一部の剛体モードは倒立振り子に反跳しないが、それらはサスペンションの受動ダンピング機構によって適切にダンピングされる。以上のような、ダンピングを目的としてSAS単体で行うローカル制御に加えて、SASを干渉計制御系に組み込むことも必要である。SASでは、倒立振り子、鏡に加えて、サスペンションプラットフォームにアクチュエータが組み込まれており、干渉計信号の一部をフィードバックすることが可能である。特に、倒立振り子の共振周波数は高次の剛体モードの周波数に比べて十分小さいため、数十mHzから数百mHz程度までを制御する制御系を容易に設計することが可能である。これにより、補助・主干渉計の制御レンジを減少

させ、重力波観測帯域での制御雑音を抑制することが可能である。

13.3 SAS 開発の現状

SAS は LCGT や LIGO の次世代干渉計のために立ち上げられた、LIGO を中心とする海外のグループと TAMA との共同研究プロジェクトである。基本的な設計方針は VIRGO の Super Attenuator (SA) を踏襲しているが、機械・制御系の両面にわたって改良が加えられている [5, 2, ?][6]。2000 年に TAMA300 への組み込みを前提にした TAMA SAS の開発がカリフォルニア工科大学にて立ち上げられ [7]、翌年には東京大学で 2 台の TAMA SAS プロトタイプから独立に懸架された鏡からなる 3 m Fabry-Perot 光共振器を動作させることによって性能評価を行った (図 13.4)[1]。この研究で所期の低周波受動防振性能、能動ダンピングの有用性が確認された。2005 年には TAMA300 テストマスの防振装置をすべて SAS に入れ替えての運用に成功するに至った [9]。その結果、1 Hz 以上での地面振動ノイズのきわめて大きな改善、IP による常時微動 (100 mHz 帯域) での防振特性改善によるテストマス変位・速度の抑制 (干渉計の安定性・信頼性向上に寄与する) などの効果を実証した。これらの効果は主に SAS の優れた受動防振特性と TAMA300 用に最適化された能動ダンピングによるものであるが、DC から低周波 (数十 mHz) までの干渉計の距離信号を IP にフィードバックするグローバル制御も実現した。これら一連の研究開発を通じて LCGT で用いる SAS (LCGT SAS) の機械・制御系設計にきわめて有用な知見を得ることができた。

13.4 LCGT SAS の防振特性と LCGT の感度

LCGT に組み込む SAS の例を示したのが図 13.7 である。倒立振り子、3 段の MGAS フィルター (上から、フィルター 0, フィルター 1, フィルター 2 とよぶ)、補助干渉計用光学素子を含んだサスペンションからなっている。フィルター 2 からは、マレージング鋼でできた 1 本のワイヤーでサスペンションプラットフォームが懸架されると同時に、ワイヤーを囲むように配置された管状の部品により、サスペンションプラットフォームのダンピング、制御に利用するコイルボックスが取り付けられている。このような構成の LCGT SAS の受動防振特性を、剛体モデルを利用して求めた結果が図 13.8 である。この例では、倒立振り子は水平並進方向に 30 mHz, MGAS フィルターの鉛直周波数は全て 500 mHz を仮定している。これらを含めて、全てのパラメータは最適化されていない。また、このモデルには能動ダンピングは含まれていない。図 13.8 に示されているのは、地面から鏡への水平-水平, 鉛直-鉛直伝達特性、および鉛直-水平カップリング伝達特性である。カップリング係数には 0.1 % の定数を仮定している。地面振動の等方性を仮定すると、図からわかるように、数 Hz より高周波でカップリングによる振動が支配的である。

上記のカップリングも考慮して、SAS の伝達関数と式 (??) を利用して地面振動雑音を見積もったものと、LCGT の他の雑音とを比較したものが図 13.9 である。10 Hz 以下で地面振動雑音が光の輻射圧の効果を下回ることが見て取れる。10 Hz での安全率はおよそ 50 であるが、これは 0.1% という比較的低いカップリング率を仮定して求められた値である。MGAS フィルターを 1 段追加することにより、より大きな安全率を得ることができる。

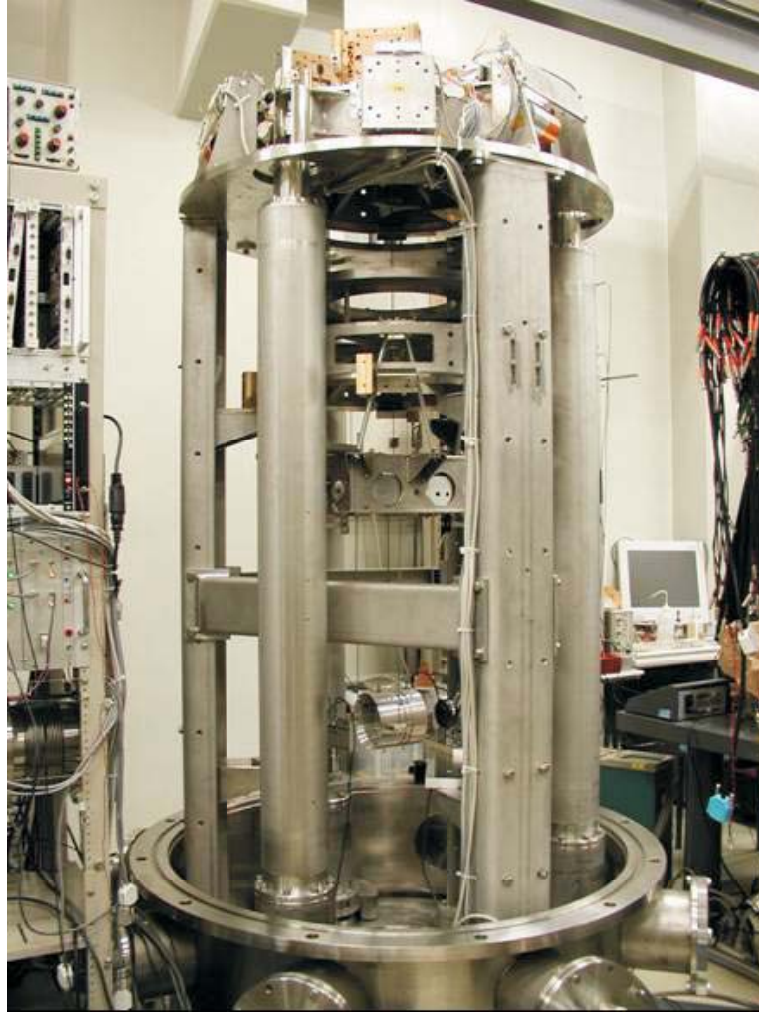


図 13.4: 3m Fabry-Perot 実験に用いられた TAMA SAS 試作機。

13.5 LCGT-SAS の設計指針

SAS の技術を LCGT に導入する際、これまで述べたような防振・制御特性以外にも考慮すべきことがある。ここでは現時点で考えられる問題について述べる。

13.5.1 冷却・低温環境

SAS 全体を冷却する必要はないため、SAS の大部分は常温下に設置するべきである。冷却用のヒートリンクは補助干渉計の鏡に取り付けられるので、原理的には補助・主干渉計の鏡が輻射シールド内に収まっていれば十分であるが、運用の容易さを考えるとサスペンションプラットフォームも同一のシールド内に置く方が良いと思われる。また、ヒートリンクの取り回しには、いくつかの方法が考えられる。もっとも単純な方法は、4.2K 輻射シールドと補助干渉計光学素子を直接ヒートリンクで結ぶ方法である。しかし、この方法では、ヒートリンクの振動が直接光学素子に伝達するので、防振の観点からは望ましくない。このような問題を避けるためには、ヒートリンクを防振されたマスにアンカーすればよい。アンカー



図 13.5: TAMA300 に組み込まれた SAS (右側のタンク)。

するマスとしては、主干涉計・補助干涉計のリコイルマス、サスペンションプラットフォームが考えられる。マスを懸架する振り子に比べてヒートリンクが十分軟らかいという前提のもとでは、ヒートリンクをまず主干涉計のリコイルマスにアンカーし、補助干涉計リコイルマス、サスペンションプラットフォームを経て補助干涉計光学素子に導入すると、輻射シールドの振動による干涉計の雑音を最小限に抑えることができる。他には、補助干涉計リコイルマスのみアンカーする方法なども考えられる。最終的にどの方法を取るかは、リコイルマスの振動が光学素子アクチュエータの非線形性を介して雑音となる効果や、補助干涉計の制御設計、輻射シールドの振動レベルなどを考慮して決定するべきであろう。また、散乱光等によってリコイルマスが加熱される可能性を考えると、アンカー部には断熱材料を使用することが望ましい。サスペンションと SAS 常温部を接続するワイヤーには、熱伝導効率の低い材料を使う必要がある。マレージング鋼の熱伝導率 (約 25 W/m/K) は、ステンレス (約 16 W/m/K) とさほど変わらず、金属としては比較的低い。引張り強さに関しては、マレージング鋼の方が約 2 倍ほど高いようであるから、マレージング鋼を用いるのが適当であろう。このワイヤーに発生するような大きな温度勾配による機械的特性への影響については今後研究を要する。サスペンションプラットフォーム、光学素子の制御に用いるアクチュエータに必要な絶縁材料に関しては、セラミックス系、プラスチック系が考えられる。低温下で使用するためには熱収縮や脆弱性、実装方法を考慮する必要がある。

13.5.2 制御系

TAMA SAS では、ピサ大学と共同開発した専用の加速度計を用いて能動ダンピングを行っている [3]。この加速度計は優れた機械精度 (単軸性) と、高感度をもつことが特徴であるが、LCGT SAS で用いる加速度計では、三鷹の TAMA サイトに比べて桁違いに小さな神岡サイトの地面振動に対応する必要が

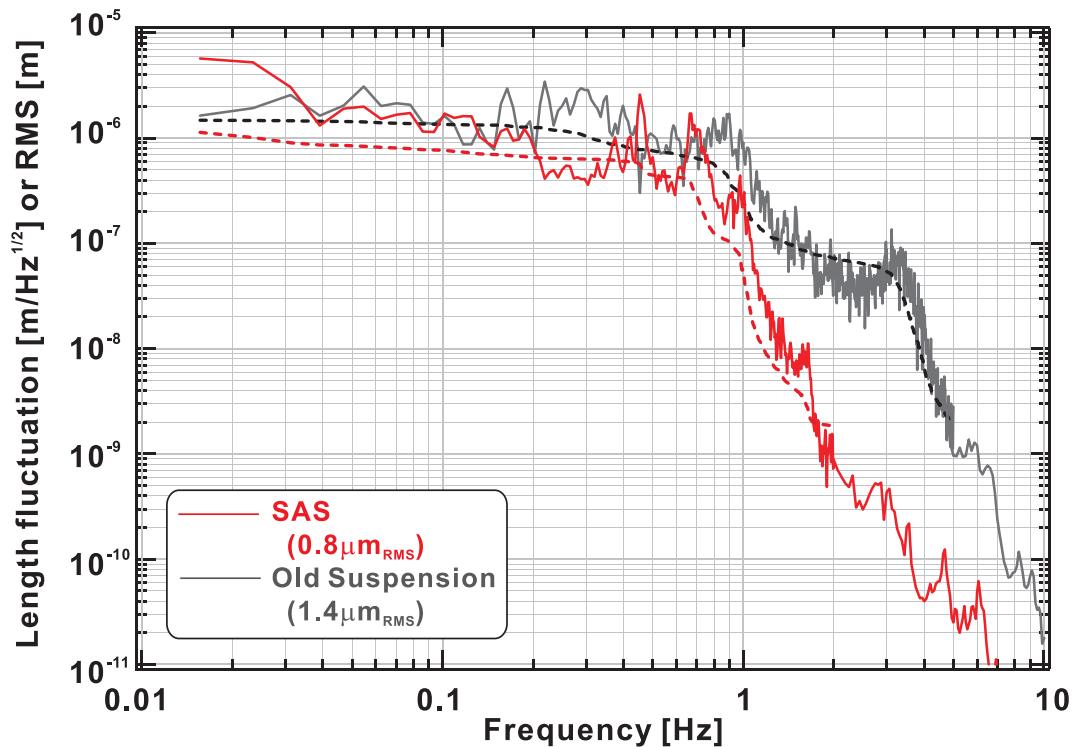


図 13.6: SAS 導入前後の TAMA300 変位スペクトル。1 Hz 以上での大幅な改善と、rms 振幅の低減が実証された。

ある。そのため 2009 年現在、より高感度の加速度計の評価が神岡サイトで進められている。 SAS の制御に用いる信号処理系については、東京大学でのプロトタイプ実験では、VIRGO で独自開発されたデジタル信号処理系を用いたが [?, 2]、TAMA300 では市販のデジタル信号処理系を用いた制御をおこなった。これは当時高性能化・低コスト化が急速に進んだ市販のシステムが実用レベルに達したことを受けた変更である。市販システムを用いることで、研究資源の有効活用、実際のシステムの信頼性の改善といった効果が期待できる。そのため、LCGT SAS においても基本的に市販システムの利用を前提としているが、具体的な構成については干渉計全体の制御との親和性も含めて検討中である [9]。

13.5.3 その他の考慮事項

真空対応: SAS を構成する材料は、大部分がステンレス、バネ部にマレージング鋼、若干の絶縁素材である。表面処理や面積によるが、これらは基本的に高真空対応材料と考えられる。また、SAS の大部分は常温部に設置されるので、光学素子が存在する低温部とはある程度の差圧が許容されることが期待できる。SAS の制御に用いられる装置への配線については、セラメッキ線などが使用できる。これらは、ヒートリンクと同様に MGAS フィルターなどに適当にアンカーする必要がある。また、メンテナンス性を考慮すると、アンカー部にコネクタを用いるのが有利であるが、コネクタの種類と数については、雑音特性などを考慮して決定するべきである。 **保護:** 光学素子の脱落を防止するために、安全機構を組み込む必要がある。これには、光学素子の落下距離を最小限にするための措置と、脱落の発生を未然に防ぐ機構の両面に対応する必要がある。前者は、TAMA300 で用いられているようなキャッチャーを組み込むことで実現できる。また、後者のためにはレーザーによる金属ワイヤーの切断を避けるためのバッフルや、制御系

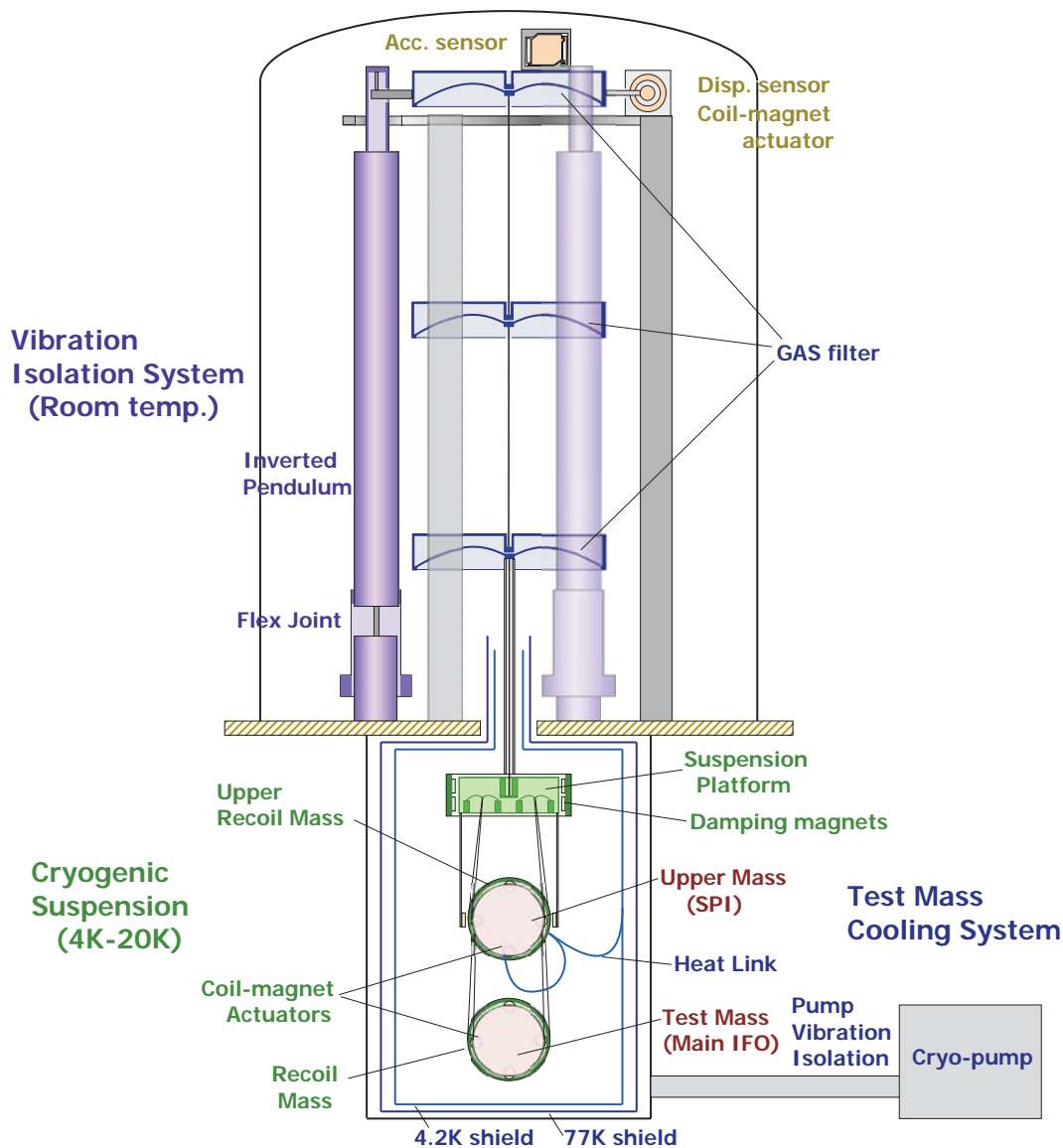


図 13.7: LCGT SAS の構成例。倒立振り子と 3 段の MGAS フィルター、サスペンションからなる。

の発振による光学素子の振動を検出し、自動的に制御を停止するようなシステムなどを導入するべきである。メンテナンス・アクセス: SAS は基本的にはメンテナンスを必要としないが、可能性を完全に排除することはできないので、SAS や光学素子にアクセスするための手段を考慮するべきである。これについては、真空系や冷却系の設計時に考慮されるべきである。補助光学系: 現在のところ、干渉計の主要な光学素子を防振するための SAS が設計されている。干渉計の入・出射光学系の振動が干渉計感度に影響することがわかっているので、これらを支持する装置として SAS を導入することも検討するべきである。

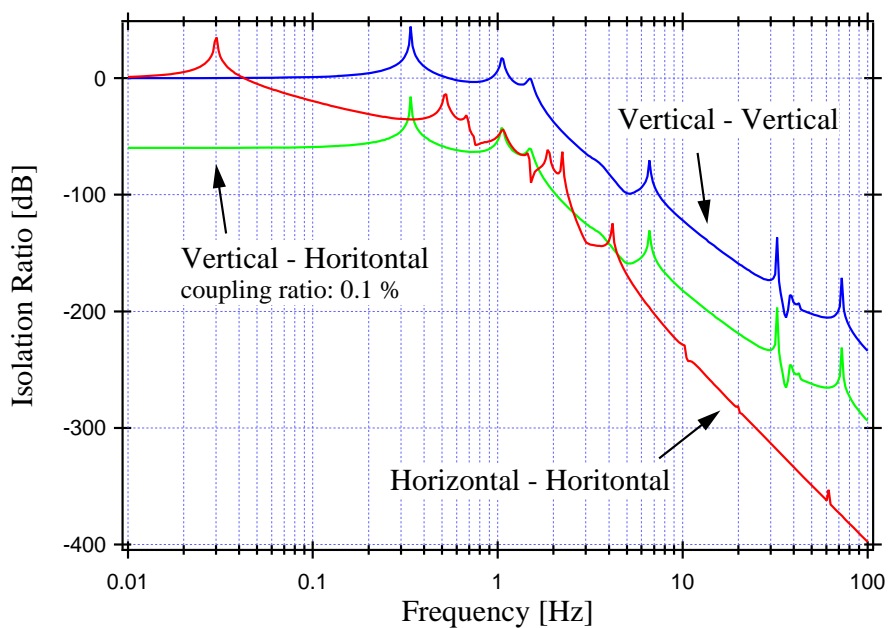


図 13.8: LCGT SAS の伝達関数。剛体モデルによる、地面から鏡への伝達関数の計算値。

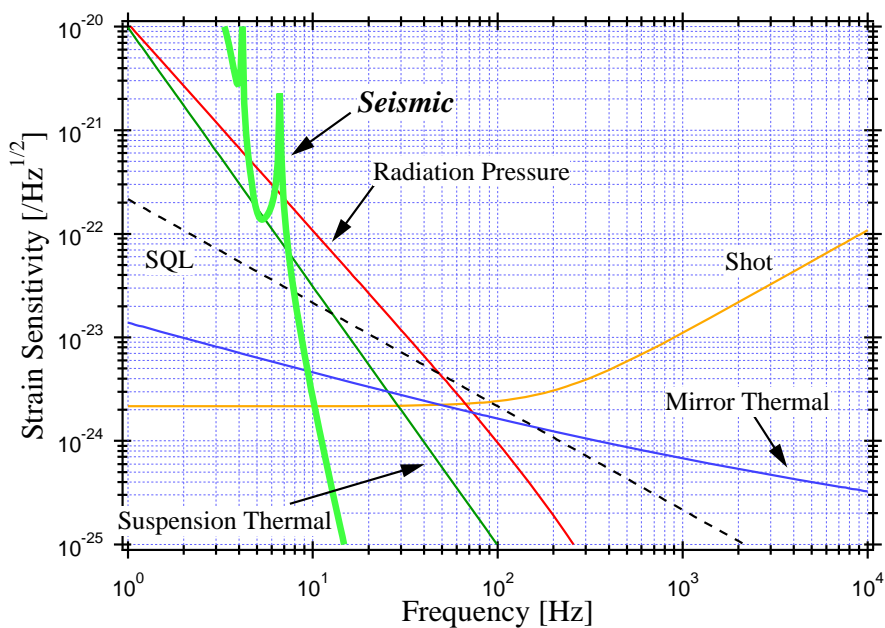


図 13.9: LCGT の各種雑音の比較。地面振動については、剛体モデルの結果を用いて計算している。

参考文献

- [1] 高森 昭光, 博士論文 東京大学, (2002).
- [2] G. Losurdo, PhD Thesis, Scuola Normale Superiore di Pisa, (1998).

- [3] A. Bertolini, PhD Thesis, Università ' di Pisa, (2000).
- [4] G. Cella, R. DeSalvo, V. Sannibale, H. Tariq, N. Viboud, and A. Takamori, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **487**, 652, (2002).
- [5] M. Beccaria, *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth. A*, **394**, 397. (1997).
- [6] M. Barton, *et al.*, *LIGO Internal Document*, **T990075-00**, (1999).
- [7] A. Takamori *ed.*, *LIGO Internal Document*, **T000009-00**, (1999).
- [8] G. Losurdo, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 3653. (2001).
- [9] R. Takahashi, *et al.*, *Class. Quantum. Grav.*, **25**, 114036. (2008).

第14章

Suspension Point Interferometer

麻生洋一¹

14.1 Introduction

ここでは、干渉計を用いた能動防振機構である Suspension Point Interferometer (SPI) について述べる。LCGT において SPI は鏡冷却用のヒートリンクから導入される振動を抑える方法として利用される。また、SPI を利用したコインシデンス解析など、重力波に対する S/N 向上の可能性も持っている。

SPI の基本的な構成は、図 14.1 に示す通り。重力波を検出するための主干渉計は、SPI と呼ばれる補助干渉計から懸架される形になる。SPI を制御して共振点に保つことにより、サスペンションワイヤーを通して伝わってくる振動は SPI で抑えられ、主干渉計には伝わらない。これが SPI による能動防振の基本的な考え方である。

この方法が他の能動防振装置に比べて優れている点は、センサーとして干渉計を用いているという点である。通常能動防振装置の性能はセンサーのノイズレベルで制限される。しかし SPI は基本的に主干渉計と同等の感度を持つセンサーであり、そのノイズが主干渉計に悪影響を与えることは無い。

また、SPI が超低雑音の能動防振装置であるということは、ヒートリンクから導入される振動の防振という点で重要な意味を持つ。ヒートリンクは冷却効率を高めるために、主干渉計の鏡からできるだけ近い点に接続するのが望ましい。従って、この振動を能動的に抑えるするためには、能動防振装置も鏡の近くに設置されることになるが、通常の加速度計などを用いた能動防振装置では、センサーの雑音が逆に主干渉計の雑音レベルを悪化させてしまう。上述のように SPI ではこのような問題が存在しないため、ヒートリンクからの振動混入問題を解決する方法として期待されるわけである。

さらに、SPI はヒートリンクからの振動が無視できるようになる高周波 (数十 Hz 以上) では、ほぼ主干渉計と同じ感度を持つ干渉計として用いることができる。従って、主干渉計との間でコインシデンス解析を行うことで重力波サーチ時の S/N を上げることができると期待される。

なお、東京大学に於いて Fabry-Perot 干渉計を用いた SPI の実証実験が行われ、その有用性が確認されている [2, 6]。

¹東大理

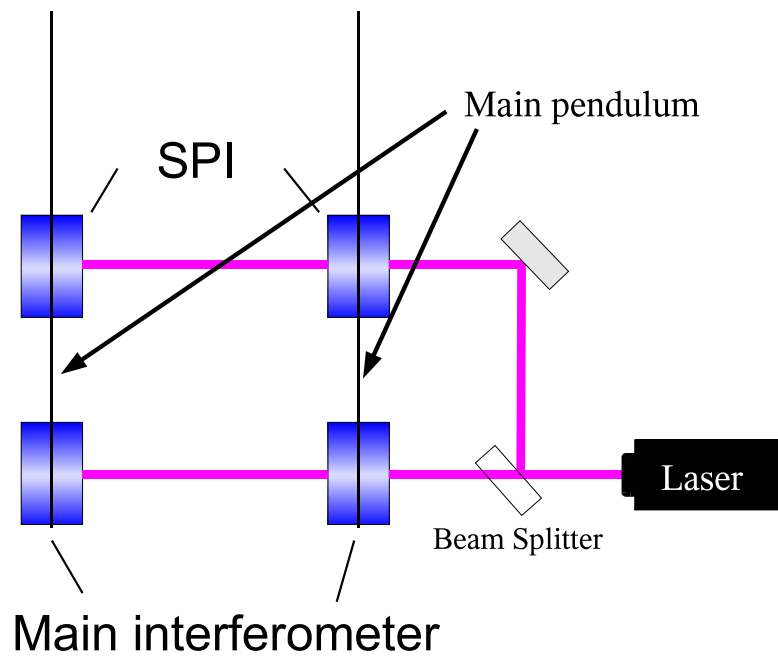


図 14.1: SPI の基本構成。この図は干渉計の片腕を表している。主干渉計は SPI から懸架される。SPI をロックすることで地面振動が主干渉計に伝わるのを抑える。

14.2 SPI の基本性能

次節以降ではヒートリンクからの振動抑制について、具体的に議論するが、その前に SPI の理論的な性能について述べておく。まず、SPI は能動防振装置であるから制御ゲインが防振性能の限界となる。しかし、LCGT で地面振動が問題になるのはだいたい 10Hz 以下の周波数帯であり、そこでの制御ゲインは普通十分高くとれる (100dB 以上)。従って現実的に SPI の性能限界を設定するのは次に説明する同相雑音除去比 (CMRR) である。

SPI では、SPI を構成する鏡の相対距離の変動 (差動変動) を抑えることができるが、2 つの鏡が同相で動くような変動は抑えることができない。通常 SPI の同相変動は主干渉計にも同相変動として伝わり、主干渉計も同相変動に対して感度を持たないことから、雑音とはならない。しかし SPI から主干渉計を吊す振り子 (主振り子と呼ぶ) に非対称性が存在すると、SPI の同相変動の一部が主干渉計の差動変動へと変換されてしまい、防振性能の悪化を引き起こす。この同相変動が差動変動へと変換される割合を CMRR と呼んでいる。理想的な懸架状態では CMRR は 0 である。主振り子の共振周波数以上の帯域で CMRR を決めるのは主振り子の長さの非対称性である。主振り子の長さの平均を l 、2 の主振り子の長さの差を Δl とすると、 $CMRR \approx |\Delta l / l|$ となる [2]。例えば l に 1% の非対称性があれば、SPI の防振性能は -40dB になる。従って、SPI の性能を向上させるためには対称性良く主干渉計を懸架すること重要となる。

SPI は水平方向の防振性能を有するが、縦方向の振動に対しては無効である。しかし地面は等方的に振動しており、縦方向の振動も水平方向と同程度存在する。縦方向の振動は懸架装置の非対称性と結合して水平方向の振動へと変換されてしまう (縦横カップリング)。SPI は自身よりも上の段において水平振動に変換されたものは抑えることができるが、主振り子の非対称性によって縦振動が水平振動へ変換されるのを抑えることはできない。この変換効率は通常 1% 程度と考えられており、これは SPI では抑えることができない。また、ビームと直角な方向の水平振動 (以下 Transverse 振動と呼ぶ) からのカップリングも縦振動と全く同様に問題となる。なお次節では、これら SPI では抑えることのできない自由度の振動を低減させるひとつの方法として、Local Suspension Point interferometer について述べてある。

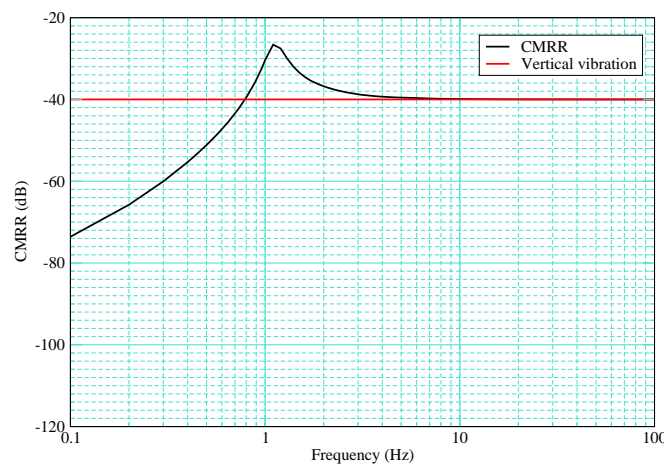


図 14.2: SPI の性能限界

図 14.2 はこの節のまとめとして、SPI による防振性能をプロットしたものである。黒い線は CMRR を

表し、SPI によって振動を何 dB 抑えることができるのかを表す。このグラフでは、主振りの非対称性が約 1% の場合を計算した。また、縦振動による性能の制限を示すのが赤い線である。縦横カップリングも 1% を仮定した。現実のサスペンションにおける非対称性もこの程度であると考えられるので、SPI による防振性能は全帯域でだいたい -40dB 程度であると考えられる。これは逆に言えば、ヒートリンクの性能や冷凍機の振動レベルに対する要求が 100 倍緩和されるということの意味する。これが LCGT に SPI を導入する最も大きな理由である。

14.3 ヒートリンクからの振動混入の見積り

LCGT に於てヒートリンクをどのように接続するののかに関しては、ヒートリンクの防振性能と熱伝達性能の兼ね合いで決まる。これらの値は計算による見積りだけではなく、実験的に求める必要があるが現時点ではあまり具体的なデータが得られていない。従って以下の節では簡単なモデル計算によってヒートリンクからの振動混入量と、SPI の効果について見積もる。計算に用いた仮定は以下の通りである。

- 神岡鉱山の地面振動レベルは、

$$X_{\text{seis}} = \frac{10^{-9}}{f^2} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (14.1)$$

- 地面振動の防振に使われる SAS の防振比は、

$$H_{\text{SAS}} = \frac{10^{-3}}{f^{10}} \quad (14.2)$$

- ヒートリンクからの振動混入を計算する際、SAS のモデルとして図 14.3 のような 4 段振り子サスペンションを考え、その途中にヒートリンクが接続されているとする。
- ヒートリンクの伝達関数は、0.2Hz から $\propto 1/f^2$ で下がっていき、20Hz で平坦になる。
- 4k シールドの振動レベルは神岡鉱山の地面振動レベルと同じで、等方的である。
- その他のパラメータ。レーザーパワー 100W, リサイクリングゲイン 10, RSE ゲイン 10, 鏡の質量 50Kg, 主振りの $Q=10^8$, 主振りの長さ 25cm 及びその非対称性 0.5mm。ビーム方向の振動と他自由度とのカップリング 1%。

以上の仮定の元、図 14.3 のようにヒートリンクを接続した場合の雑音を見積もる。

図 14.4 がその計算結果である。SPI を使わない場合のヒートリンクから導入される振動は、茶色の点線である。7Hz 以下ではこの雑音が支配的になっている。しかし SPI を用いると、この雑音は赤い線へと変化し、全帯域で元々の雑音²を下回っている。ヒートリンクから導入される縦振動成分は、2Hz から 5Hz で僅かに元々の雑音を上回るが、深刻な問題を引き起こす程ではないと考えられる。

上の計算からは、図 14.3 の構成で SPI を用いればヒートリンクからの振動は十分防振されるということが出来る。しかしここで仮定したヒートリンクの防振性能及び 4k シールドの振動レベルは非常に理想的な場合である。現実にはこれより悪化する可能性もある。例えば図 14.4 から全体の振動レベルが 10 倍大きくなった場合を考える。その場合でも、ヒートリンクから伝わる光軸方向の振動は地面振動や輻射圧雑音より下にある。問題は縦振動であるが、10Hz 以上ではほとんど問題にならない。LCGT が目標とす

²SAS からの地面振動及び、輻射圧雑音、熱雑音

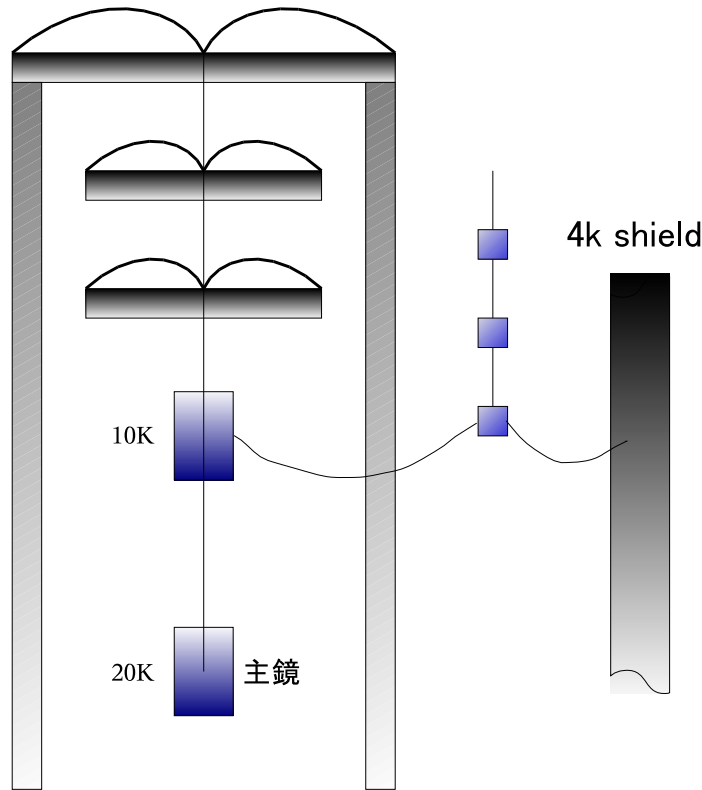


図 14.3: モデル計算に用いた懸架系。

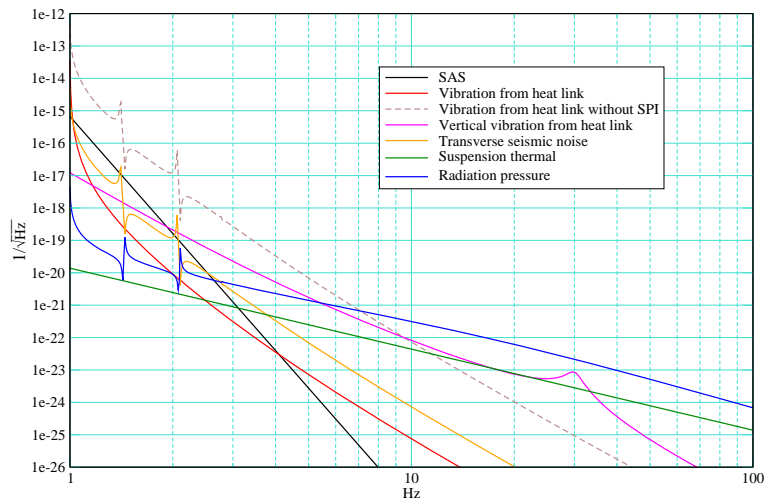


図 14.4: 主干渉計の 1 段上に 2 段のヒートリンク経由で接続した場合の主干渉計の雑音スペクトル。縦軸は歪み換算スペクトル。横軸は周波数。黒い線は SAS によって防振された元々の地面振動。赤い線は、ヒートリンクから混入される振動の水平成分。ピンクはヒートリンクから導入される縦振動。オレンジの線は Transverse 振動。青い線は輻射圧雑音で、緑の線はサスペンション熱雑音。茶色の点線は SPI を使わなかった場合のヒートリンクから導入される振動である。

る $1.4M_{\odot} \times 1.4M_{\odot}$ 中性子星連星からのチャープ信号に対する S/N はほぼ 10Hz 以上で決まるので、その意味では縦振動も問題ではないと言える。また、10Hz 以下の振動は干渉計の安定度に大きな影響を与えるが、LCGT の目標感度は元々その意味でセーフティーファクターを大きく取ってあると考えることができる。よって縦振動による 10Hz 以下の振動レベル悪化はそのセーフティーファクターの範囲内であるということもできる。

ヒートリンクの性能や 4k シールドの振動レベルが 10 倍よりもさらに悪くなったとしても、光軸方向の振動に関しては SPI のおかげで 10Hz で 100 倍以上のセーフティーファクターがあり、問題にならない。しかし、縦振動は干渉計の観測帯域での感度を損なう可能性が出てくる。その場合、図 14.5 に示すようにローカルな干渉計を使って縦振動を能動防振するという方法が考えられる [3]。これを Local Suspension Point Interferometer (LSPI)³ と呼ぶ。A, B 間の距離を干渉計で測り、それを B にフィードバックすることで B に導入される振動を抑えることができる。ただし、B に対するフィードバックだけでは DC 的な干渉計のコントロールができないので、DC 付近では A にもフィードバックを行う。なお、図 14.5 では縦振動のみならず、Transverse 振動を抑制するための干渉計も描かれている。LSPI は、構成が複雑になるため主干渉計のサスペンションに導入するのはためらわれる。従って、ヒートリンクの中継点に導入するのが良さそうである。

LSPI のような能動防振装置は、静電型トランスデューサーをセンサーとして用いて実験が行われた例が以前からあり [4, 5]、また Fabry-Perot 干渉計を用いた垂直防振も筆者によってデモンストレーションされている [6]。なお、Fabry-Perot 干渉計を用いる理由は、センサー雑音を低減するためである。また、ヒートリンクの伝達関数は、各自由度間のクロスカップリングが大きいと思われるので、ヒートリンクの中継点で LSPI を用いる場合、全自由度を制御しなければならない。これは 3 つの干渉計を組み込まなければならないことを意味する。このようなことが本当に可能であるのかどうかは、実験的に検証をする必要がある。

極端な場合として、ヒートリンクの中継点のみで能動防振を行い、主干渉計には SPI を組み込まないという方法も考えられる。これは LSPI がどの程度の性能を発揮できるのかにかかっており、実験で検証する必要がある。また、主干渉計に組み込んだ SPI には、低周波での CMRR 向上に伴う RMS 振幅の減少、Wave Front Sensor と併用した場合のアラインメント揺れの低減など、ヒートリンク中継点における LSPI には無いメリットがある。また、中継点の LSPI のみを用いる場合、SPI を重力波検出用に用いるということもできない。

14.4 考慮すべき点

実際に、SPI を干渉計に組み込む際にはいくつか考慮しなければならない点がある。その一つは、鏡のアラインメントである。SPI では 2 つの鏡が一つのサスペンションに懸架されるため、それらのアラインメントを独立に調整することが難しい。基本的には、鏡に取りつけられたアクチュエータにオフセットを加えてアラインメントを調整することになるが、大きく調整するためには強力なアクチュエータが必要になる。しかし強力なアクチュエータは電気系の雑音とカップルして逆に雑音を導入してしまうことになるので使用を避けたい。そこで、鏡の Pitch 及び Yaw 回転の共振周波数を低くして、弱い力でも大きく鏡の姿勢を変えられるようにすることが考えられる。ただし現実的に必要な調節範囲を得るためには、この共振周波数は 0.1Hz 付近にすることが必要であり、かなり厳しい。

鏡の回転方向の共振周波数を下げる以外の対策として、アクチュエータを鏡の側面にも取りつけるという方法が考えられる (図 14.6)。例えば鏡の上部と下部に取りつけられたアクチュエータは Pitch 方向のト

³仮称。良い名称を募集中

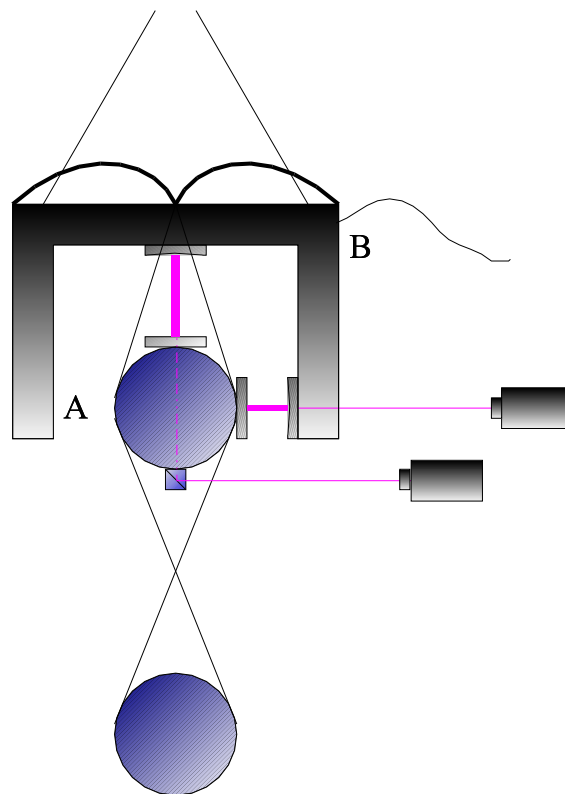


図 14.5: Local Suspension Point Interferometer。A,B 間の相対変動を B にフィードバックして能動防振を行う。

ルクを発生させるが、ビーム方向への並進力は基本的に発生しない。従ってこれらのアクチュエータは鏡背面に取りつけられたアクチュエータに比べて干渉計に雑音を導入する可能性が低い。ただし図 14.6 のように多くのマグネットを鏡に張り付けることによる熱雑音の悪化が許容範囲であるのかを見積もる必要がある。別の解としては、並進と回転の駆動用コイルを別のものにするという方法がある。回転用の大きなコイルは並進用の小さなコイルを収容するように、鏡背面に設置される。回転用コイルは 2 個一組として、ひとつの電流ドライバーで駆動する。2 個のコイルは互いに逆向きの磁場を発生するように取り付けられるため、雑音電流が載っても並進方向の雑音は生じにくい。従ってより強力なコイルを使うことができるわけである。またこの場合、鏡に張り付けるマグネットの数が増えることもない。

ここで、回転方向の調節可能範囲と、アクチュエータ雑音の関係について定量的に考察してみる。注目している自由度の回転軸周りにおける鏡の慣性モーメントを I_m 、その自由度の共振周波数を ω_0 、アクチュエータの間隔を r (図 14.7 参照)、アクチュエータの入力電圧から発生する力への変換係数を α (単位は N/V)、アクチュエータドライバの最大出力電圧を V_{\max} とすると、調節可能な最大あおり角 θ_{\max} は、

$$\theta_{\max} = \frac{4r\alpha V_{\max}}{I_m \omega_0^2} \quad (14.3)$$

となる。ここで、アクチュエータは図 14.7 のように 4 つ配置されていると仮定している。

ところで、 α は、アクチュエータノイズの許容値から決められる。アクチュエータノイズ $x_{\text{act}}(\omega)$ (単位は $m/\sqrt{\text{Hz}}$) は、アクチュエータドライバの電圧雑音 $V_n(\omega)$ ($V/\sqrt{\text{Hz}}$) を用いて、

$$x_{\text{act}}(\omega) = \frac{4\alpha V_n(\omega)}{m\omega^2} \quad (14.4)$$

である。ここで、 m はミラーの質量。従って、ある特定の周波数 ω_1 における、 $V_n(\omega_1)$ とアクチュエータ雑音の許容値 $x_{\text{act}}(\omega_1)$ を用いて、

$$\alpha = \frac{x_{\text{act}}(\omega_1) m \omega_1^2}{4V_n(\omega_1)} \quad (14.5)$$

より、

$$\theta_{\max} = r x_{\text{act}}(\omega_1) \frac{m \omega_1^2}{I_m \omega_0^2} \frac{V_{\max}}{V_n(\omega_1)} \quad (14.6)$$

と書ける。

具体的な値を代入してみる。感度目標は 100Hz で $x_{\text{act}} = 9 \times 10^{-21} m/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $V_{\max} = \pm 15V$ 、 $V_n = 1nV$ 、 $\omega_0 = 2\pi \times 1 \text{ rad/sec}$ 、 $m = 50.9\text{kg}$ 、 $I_m = 0.42\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $r = 10\text{cm}$ 、を用いると、 $\theta_{\max} = \pm 1.6 \times 10^{-5} \text{rad}$ 。もし、姿勢制御用のコイルとして別のものを使い、そのコイルと並進とのカップリングが 1/100 だとすると、 α が 100 倍になって、 $\theta_{\max} = \pm 1.6 \times 10^{-3} \text{rad}$ 。さらに、 ω_0 を 0.3Hz にすると、 θ_{\max} がさらに 10 倍になって、 $\pm 1.6 \times 10^{-2} \text{rad} \simeq 1 \text{度}$ 、となる。これは十分な大きさと言える。

上下干渉計の独立なアラインメントを可能にする全く別の方法として、SPI の鏡を複合鏡とするという案もある。これは、図 14.8 に示すように、SPI のマスからピエゾなどのアクチュエータを介して鏡を保持するというもので、これによって SPI と主干渉計の完全独立なアラインメント調整が可能になる。もちろんこの方法では当然 SPI 鏡の熱雑音が増大してしまう。しかしもとも SPI 鏡に対する Q 値の要求は主干渉計の 1/10000 程なので、かなり荒っぽいことをやっても大丈夫であると考えられる。もう一つ考慮しなければならないのは、鏡を保持するアクチュエータの雑音で、これは SPI の防振性能を直接悪化させるので、アラインメント調整時以外は外部からのエネルギーを必要とせず静止しているようなアクチュエータを使う必要がある。また、低温で動作することも必須条件である。最後にこの方法を用いた場合、SPI の絶対的感度は主干渉計と比較してかなり低下するので、重力波の相関探査などへの有用性は損なわれてしまう。

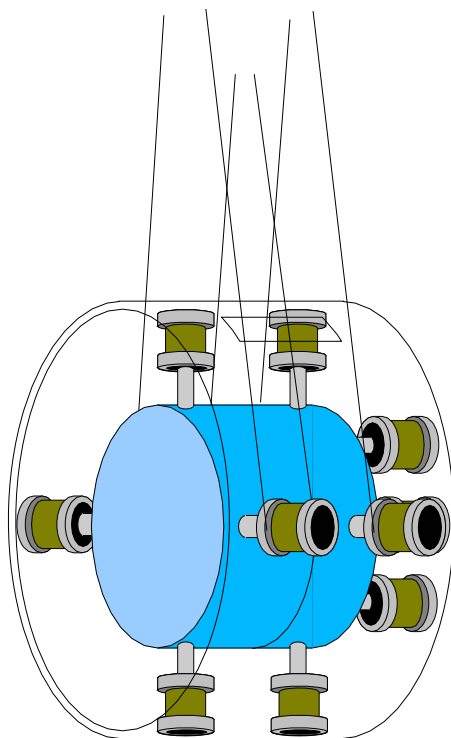


図 14.6: 主鏡のアクチュエータとリコイルマス

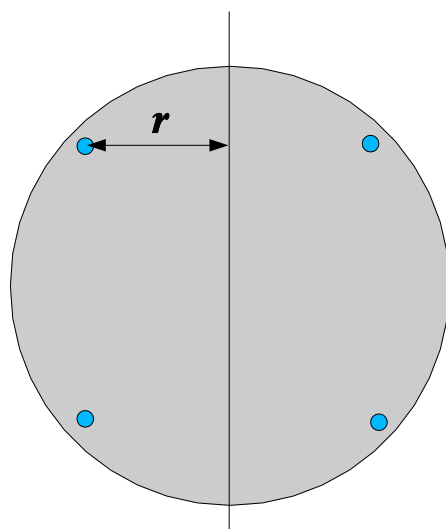


図 14.7: Actuators on the mirror

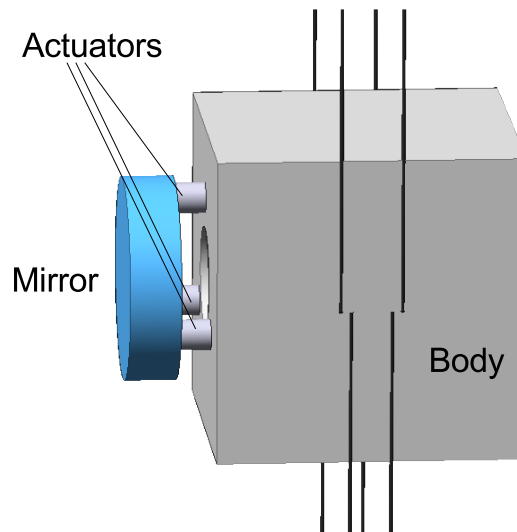


図 14.8: SPI に複合鏡を用いた場合

次に考えなければならないこととして、散乱光の問題がある。SPIからの散乱光が主干涉計に入射して雑音源となるというのがこの問題で、まずその雑音がどの程度の大きさなのかを見積もる必要がある。また、散乱光を防ぐためには、真空パイプに仕切りを入れたり、2つの干涉計でレーザー周波数を変えたりする必要がある。

14.5 まとめ

これまでの見積りから、SPIはヒートリンクからの振動を抑える方法として有効であると言える。しかし、今回の計算ではヒートリンクとして、共振周波数 0.2Hz でプラトーレベルが-80dB というかなり良いものを仮定した。また、4k シールドも神岡の地面振動と同レベルと仮定した。現実にはより悪条件となることがありうるので、その場合 LSPI 等の手段を使わなければならない。

実際に用いるヒートリンクの長さや太さ、LSPIを利用するかしないか等は、冷却効率及びどの程度の感度悪化を許容するか、そしてサスペンションの複雑化をどこまで許すかなどの兼ね合いで決定される。また、それらの決定には更なる実験による検証、データ収集が必要である。

参考文献

- [1] K.Yamamoto, *LCGTの目標感度 ver2.0*,
ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/LCGT_design/sensitivity/yamamoto/LCGTgoal.zip
- [2] Y.Aso, 東京大学修士論文 (2002),
http://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/theses/aso_m.pdf
- [3] R.W.P. Drever, S.J. August, *Class. Quantum Grav.* **19**, 2005 (2002)

- [4] P.R.Saulson, Rev.Sci.Instrum. **55**(8),1315 (1984)
- [5] P.G.Nelson, Rev.Sci.Instrum. **62**(9),2069 (1991)
- [6] Y. Aso, 東京大学博士論文 (2006),
http://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/theses/aso_d.pdf

第15章

真空系

齋藤芳男¹、高橋竜太郎²

LCGT の目標変位感度は 100 Hz で $1 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。TAMA300 を用いて行なわれたキセノンガス注入による残留ガスの影響を調べた実験の結果 [1] は三尾の考察 [2] に基づく見積もりとよく一致していた。残留ガスとして水を仮定すると LCGT のパラメータを用いた計算では $2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ の圧力で $1 \times 10^{-21} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり、安全係数 10 を得られる。

真空系は予算の大きな割合を占め、また作り直しがきかないため慎重に検討する必要がある。ダクト径は単一干渉計であれば 0.5 m 程度でも可能であるが、補助干渉計用ビームも含めて 2 本のビーム通すため、1 m 程度は必要となる。以下に LCGT 真空系の仕様を示す。

¹高エネルギー加速器研究機構

²国立天文台

到達圧力	2×10^{-7} Pa	
真空ダクト		
全長	3 km	2
直径	1 m	
ユニット長	12 m	
材質	ステンレス鋼	
接続	フランジ締結	
真空槽		
Type-A	$2\text{ m}\phi \times (3.5\text{ m} + \text{クライオスタット } 3\text{ m})$	4
Type-B	$2\text{ m}\phi \times 4.5\text{ m}$	5
Type-C1	$2\text{ m}\phi \times 3\text{ m}$	1
Type-C2	$1\text{ m}\phi \times 2\text{ m}$	3
材質	ステンレス鋼	
排気装置		
初期排気	ルーツポンプ ($100\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$)	10
主排気ユニット		67
	ターボ分子ポンプ ($1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$)	
	イオンポンプ ($1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$)	
	ドライポンプ ($15\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$)	
バッフル		
高さ	50 mm	
設置間隔	12 m	
表面	DLC	

15.1 真空ダクト

超高真空を得るために通常行われる組み立て後のベーキングによる脱ガス工程は、直径 1 m、長さ 3 km の LCGT の光路用ダクトに施すことは容易でなく、また安全上問題も多い。組み立て前のユニットダクトの長さは一般交通道路での搬送や坑道への搬入作業を考える場合、12 m が限界となる。ユニットダクトの現地での組み立て前に施す脱ガス処理方法、あるいはガス放出低減化処理方法としては、電解複合研磨 [3]、電解研磨 [4]、化学研磨 [4]、TiN-coating [5] などが、ステンレス鋼を素材として用いる場合には表面変質層を除去する効果大きい。とくに電解複合研磨法は大型の液槽を必要としない実用的なものであり、実際にこれを施した TAMA300 のダクトでは、ベーキングを行わないで 10^{-7} Pa 台の圧力に到達している [6]。

ステンレス鋼のこのような処理において、更に詳しい表面状態の調査から、表面変質層の除去の後に形成される酸化膜の厚さや性質が残留ガスの主成分である水分子に対する吸着性、つまりガス放出特性に影響を与えていることが分かった。とくに、これらの処理の後にさらに真空中で 250 の熱処理を行うことにより、酸化膜の不動態化が進みガス放出速度を低減できることが明らかになった。従って、TAMA300 より大きい表面積を有する LCGT では、ステンレス鋼をダクト材料として用いる場合には、より確実、迅速に超高真空領域に到達させるために、ユニットダクトでの加熱処理を研磨、洗浄工程の後に行うことが重要であると結論できる。

現場でのユニットダクトの接続には、フランジを介しての機械的締結によるか、あるいは溶接による直接接合が考えられる。現場での直接接合は坑内の環境コントロールや安全管理上の問題があるため、フランジ締結による接続が妥当であろう。もちろん、ユニットダクトの搬入から締結まで塵埃の付着や水分の

吸着は避けなければならないので、ユニットダクトは密閉シールで現場に搬入するなど注意が必要である。

3 km 長のダクトを水平な直線上に精度よく設置するのは容易ではない。TAMA300 でのダクトの設置精度は 300 m で 5 mm だが、これを単純にスケーリングすると 50 mm となる。LIGO では基準 GPS 系 (WGS-84) と GPS ローバーを用いたシステムにより 10 mm 以下の精度をだしているが、許容量は 60 mm としている [7]。LCGT でも 50 mm 程度の精度は必要である。残念ながら LCGT の場合地下のため GPS は使用できない。レーザートラッカーを使用する場合 20 m で ± 0.1 mm の精度は可能である。この値を外挿すると 3 km で 15 mm となり十分許容できるレベルである。

15.2 真空槽

LCGT では 4 種、13 基の真空槽が使用される。各真空槽の間は DN1000 あるいは DN400 のゲートバルブによって仕切られる。各々の真空槽のサイズは中に組み込まれる防振装置の構造に依存する。Type-A には SAS と低温ミラー懸架装置が、Type-B には SAS とミラー懸架装置が、Type-C にはスタックとミラー懸架装置がそれぞれ組み込まれる。図 15.1 に真空槽、ゲートバルブ、排気装置の配置を示す。1-2 m 径の大型真空槽の材質としてはステンレス鋼が適している。

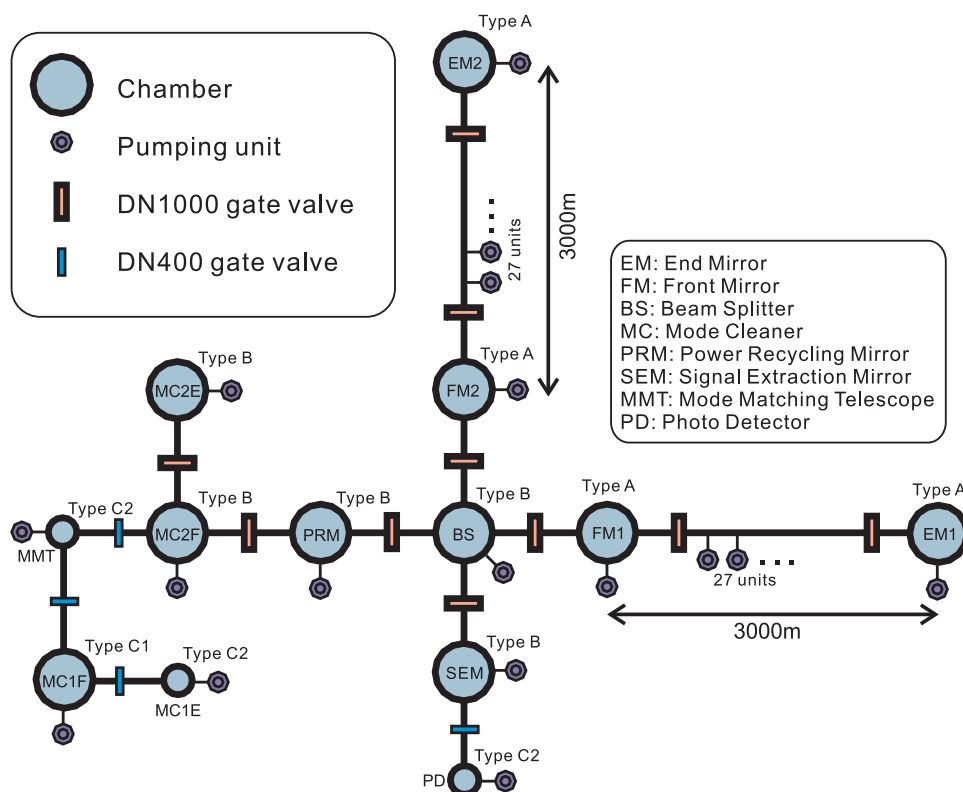


図 15.1: LCGT 真空系の構成。

15.3 排気装置

直径 D (1 m)、長さ L (3 km) のダクトに、等しい間隔で N 箇所排気速度 S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] のポンプを取り付けた時の圧力分布を、単位長さあたりのコンダクタンス c [$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}$] を用いて見積ってみる。 c は、

$$c = \frac{\pi D^2 \bar{v}}{4} \frac{4D}{3} \quad (15.1)$$

で与えられ、 \bar{v} は残留ガス分子の平均速度である。

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (15.2)$$

ダクトの全表面積を A [m^2]、そこからの一様に単位面積当り q [$\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$] のガス放出速度があるとすれば、ポンプ間の圧力は、

$$p(x) = -\frac{qAL}{2cN^2} \left(\frac{x}{L/N}\right)^2 + \frac{qAL}{2cN^2} \left(\frac{x}{L/N}\right) + p_{\min} \quad (15.3)$$

で与えられる。ここで、 p_{\min} はポンプ位置での圧力である。

$$p_{\min} = \frac{qA}{SN} \quad (15.4)$$

また、ポンプの中間の位置で圧力は最大 (p_{\max}) となり、最小値との比は、

$$\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{SL}{8cN} + 1 \quad (15.5)$$

となる。 $q = 1 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ と仮定し、 $S = 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $N = 30$ (つまり 100 m おき)、温度 300 K、空気の分子量を 29 とすれば、

$$p_{\min} = 3.1 \times 10^{-6} \text{ Pa}, p_{\max}/p_{\min} = 1.1 \quad (15.6)$$

を得る。なお、TAMA300 では、75 m 間隔で $S = 0.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ のイオンポンプが設置されているが、同様なガス放出速度を仮定した場合、

$$p_{\min} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ Pa}, p_{\max}/p_{\min} = 2.0 \quad (15.7)$$

となる。TAMA300、LCGT とともに、このように $S = 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ というような排気速度の大きいポンプをかなり長い間隔で設置しても圧力分布が一樣に近いのは、直径が大きくダクトのコンダクタンスが大きいからである。

ここで仮定したガス放出速度の値は、ステンレス鋼の 50 時間排気した後のものであるが、排気時間がさらに経過すれば全体の圧力は低下する。一般に、ガス放出速度は排気時間に反比例して減少して行くことが経験的に知られており、例えば 500 時間後にはさらに一桁低い圧力に到達することが期待される。もちろん、さらにガス放出速度の低いチタンを用いれば、より早い時期に所定の圧力に到達する。イオンポンプは現実的にはこれより大きい排気速度を持つものはないので、全体の圧力を下げるためにはポンプの数をさらに増やすことが必要であるが、費用や保守の面から大幅に数を増加させることはそれほど効率的でない。

干渉計を用いた観測時には、振動抑止や停電等の事故対策の観点から、イオンポンプによる排気が最も適している。イオンポンプを作動させるまでの排気システムとしては、ターボ分子ポンプあるいはクライオポンプの使用が考えられる。

ターボ分子ポンプは、排気速度が数 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の大型のものまで市販されているが、高速回転するロータの材料強度の問題から大型になるほど圧縮比を大きくすることが難しくなり、取り付け口径も大きくなり大型ゲートバルブが必要となる。さらに大型ターボ分子ポンプは重量や体積の観点からもその取り扱いが容易でなくなってくる。その意味では、 $1 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 程度の排気速度を持つものが最も扱い易いが、その場合、上の計算から 30 台以上の設置数が要求される。

クライオポンプは、これに比べ、同一口径では排気速度が数倍大きく得られるため (例えば $5 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ の排気速度が 250 mm 程度の直径の口径で得られる)、10 台程度の設置で十分イオンポンプの動作領域まで到達すると考えられる。しかしながら、掃出し型のターボ分子ポンプに対し溜込み型のクライオポンプでは、排気積算量 (スループット量) が大きくなると排気速度が低下する、いわゆる飽和現象が生じる。したがって、排気のごく初期における高圧力領域での使用を避け、また、排気の途中で一端活性化作業を行うなど、排気過程を工夫する必要がある。

大気圧からの初期排気過程 (ターボ分子ポンプやクライオポンプなどを動作させるまでの段階) には、容積移動型の機械ポンプの使用が適している。体積の大きい真空容器の場合、従来は揺動式キニーポンプなどがよく使用されてきた。しかしながら、干渉計の観測の事前排気とはいえそれが発生する振動は大きく、精密アライメントなどに与える影響は致命的と予想される。また、回転式機械ポンプであっても、排気速度の大きい大型ポンプの場合は偏心回転による振動が大きいものも多い。したがって、ある程度の大きさに制限した範囲で機械式ポンプを選択しなければならない。油回転ロータリーポンプは、長時間の排気が要求される大体積容器には、その油蒸気の拡散による汚染が無視できず適さない。このような油汚染を抑えたドライポンプとして、ピストン、スクロール、スクリュウ、ルーツなどの構造を持つものが市販されている。このうち、容積移送用ロータ部に摺動構造を持たないルーツポンプは保守の容易性の点で LCGT に適している。多段ルーツポンプにさらに前段補助ルーツポンプを組み合わせたものは、小型のものでも $100 \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ 以上の排気速度を持ち、また到達圧力も 30 Pa と低い。

体積 V [m^3] の容器を排気速度 S [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] のポンプで排気する時、その時定数 τ は V/S で表される。仮に $S = 100 \text{m}^3 \text{h}^{-1}$ とを持つルーツポンプ 1 台で系全体を排気する ($\tau = 24 \text{h}$) と、圧力を 1 桁下げるのに 54 時間を要することになる。 10^5Pa の大気圧から 10 Pa の圧力までに到達するには 1 週間と見積もれるが、実際には、空間の水分子は再吸着して排気過程を遅らすことになるので更に長い粗排気過程を考えなくてはならない。したがって、この小型のルーツポンプを 10 台程度設置するのが、現実的な排気システムと考えられよう。

15.4 光学特性

15.4.1 各干渉計のダクト形状と散乱光対策

LIGO、VIRGO、GEO の真空ダクトはステンレス鋼にベーキングを施したものであり、特殊な材料や表面処理は使われていない。従ってそれらの表面は反射的粗い面であり、そのままでは迷光が多いと考えられる。このため多数の遮光バッフルがダクト内に配置されている。表 15.1 に各干渉計のダクトとバッフルの仕様を示す。VIRGO グループはダクト内の散乱光の影響を解析的に計算し [8]、必要な数のバッフルを効率的に配置している。バッフルにはガラスに AR コーティングを施したものをを用いているため、散乱光の吸収性能はかなり高いと思われる。他のグループにおいてもある程度の計算がなされているようであるが、ともかく可能な限り多数のバッフルを配置しているという感じである。

表 15.1: 各干渉計のダクトとバッフルの仕様。

	LIGO	VIRGO	GEO
ダクト形状 (径 [m] × 長さ [m])	1.2 × 4,000	1.2 × 3,000	0.6 × 600
バッフル高さ [cm]	6	10	3
バッフル角度 [°]	55	45	25.7
バッフル表面	酸化膜	AR	エポノール
バッフル枚数	222	18	128

15.4.2 散乱光雑音の見積

ミラーに再入射する散乱光のがメインビームとどのように干渉し、最終的な位相雑音としてどう現れるかまでを見積る。以下の仮定をおいた。

1. ダクト表面は TAMA 仕様とする。すなわちステンレス鋼 + 電解複合研磨である。
2. メインビームはダクトの中心を通るものとする。
3. ミラー表面で散乱し直接ミラーに入射する光はメインビームとみなす。

まず図 15.2 のように 2 つのミラーの中心で共振状態にあるパワー P_0 のビームを考える。ミラー表面で散乱して距離 R の微小エリア dF を通る光のパワー dP は以下の式で表される。

$$\frac{dP}{P_0} = \text{BRDF}(\phi) \frac{dF}{R^2} \quad (15.8)$$

微小エリア dF は微小散乱角 $d\phi$ を用いて

$$dF = 2\pi R^2 \phi d\phi \quad (15.9)$$

であるから 2 つの散乱角 $\phi_{max} > \phi_{min}$ ではさまれた角度に散乱する光量比は

$$\frac{P_{scat.}}{P_0} = \int_{\phi_{min}}^{\phi_{max}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi \phi d\phi \quad (15.10)$$

で与えられる。 ϕ は散乱角で、ダクト表面への入射角 θ とは $\phi = \pi/2 - \theta$ の関係になる。BRDF³ はミラーの散乱強度分布を示す ϕ の関数で、ミラーの表面粗さや形状誤差に依存する。LCGT 用ミラーに対するこの関数は明確ではないので、ここでは LIGO Pathfinder mirror の式 [9]

$$\text{BRDF}(\phi) = \frac{1000}{(1 + 5.302 \times 10^8 \phi^2)^{1.55}} \quad (15.11)$$

を用いた。

次に式 (15.10) を使ってミラー表面で散乱した光がどのような割合でミラーに再入射するかを計算した。最初に計算に必要なパラメーターを定義しておく。

波長	$\lambda = 1.064 \times 10^{-6} \text{ m}$
キャビティ-長	$L = 3,000 \text{ m}$
ミラー半径	$r_{mirror} = 0.125 \text{ m}$ ($\phi_{mirror} = r_{mirror}/L$)
ダクト半径	$r_{duct} = 0.5 \text{ m}$ ($\phi_{duct} = r_{duct}/L$)
ビームウェスト半径	$\omega_0 = 0.033 \text{ m}$

散乱光の行方はその角度 ϕ に従い以下のように分類される (図 15.2 参照)。

³ bi-directional reflection distribution function

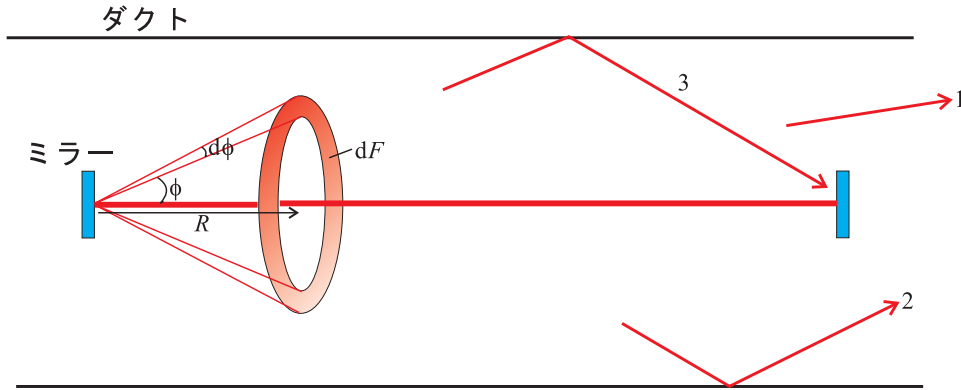


図 15.2: 散乱光の概念図。2つのミラーの中心で共振状態にあるビームがミラー表面で散乱して距離 R の微小エリア dF を通る。

1. ダクトに当たらずミラー後方へぬける。
($\phi_{mirror} < \phi < \phi_{duct}$)
2. ダクトで i 回反射してミラー後方へぬける。
($\phi_i + \phi_{mirror} < \phi < \phi_i + \phi_{duct}$ or $\phi_i - \phi_{duct} < \phi < \phi_i - \phi_{mirror}$)
3. ダクトで i 回反射してミラーに再入射する。
($\phi_i - \phi_{mirror} < \phi < \phi_i + \phi_{mirror}$)

ここで $\phi_i = 2i\phi_{duct}$ である。ほとんどがミラー後方へぬけるので、フロントミラーとビームスプリッターの間にはミラー径弱の遮光板が必要かも知れない。3の場合を考えるとダクトで i 回反射して遠いミラーに入射する散乱光の光量比 P_i/P_0 は

$$\frac{P_i}{P_0} = R(\phi_i)^i \int_{\phi_i - \phi_{mirror}}^{\phi_i + \phi_{mirror}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi \quad (15.12)$$

となる。金属表面の s 偏光、p 偏光に対する振幅反射率 R_s 、 R_p はダクト表面への入射角 θ を用いて以下の式で表される。

$$R_s = \frac{\cos(\theta) - n \cos(\theta')}{\cos(\theta) + n \cos(\theta')} \quad (15.13)$$

$$R_p = \frac{\cos(\theta') - n \cos(\theta)}{\cos(\theta') + n \cos(\theta)} \quad (15.14)$$

$$\sin(\theta') = \frac{1}{n} \sin(\theta) \quad (15.15)$$

ここで n は材質の屈折率で、一般に複素数である。図 15.3 に Nd:YAG レーザー (1,064 nm) に対するステンレス鋼 + 電解複合研磨表面の反射率の測定結果を示す。この結果から最小二乗法を用いて式 (15.13)、(15.14) をフィットさせると、 $n = 2.5 - 4.1i$ という値を得る。ダクト表面でのエネルギー反射率 $R(\phi)$ は事象が軸対称であることを考えてこれらの平均値を用いた。ダクト表面で反射して遠いミラーに入射した散乱光は再び BRDF に従い散乱しメインビームと干渉する。この時メインビームの広がり角 $\phi_{main} (= \sqrt{\lambda/\pi\omega_0})^4$ が有限なので最終的に干渉計に影響を与える散乱光量比は

$$\frac{P_i}{P_0} \int_{\phi_i - \phi_{main}}^{\phi_i + \phi_{main}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi \quad (15.16)$$

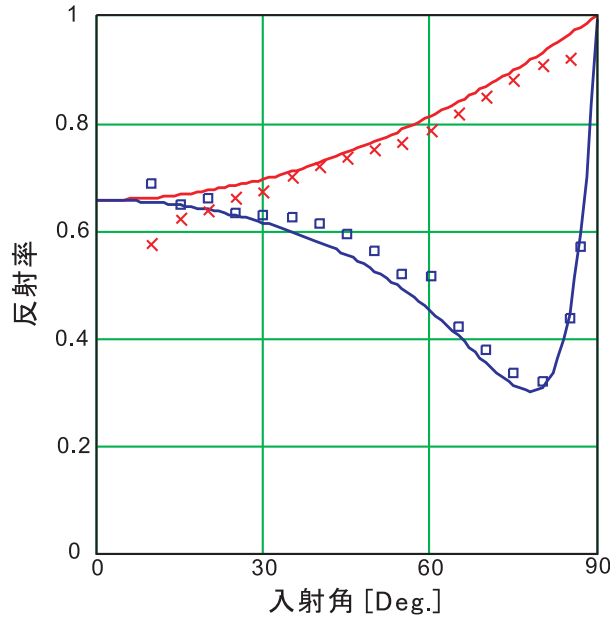


図 15.3: Nd:YAG レーザー (1,064 nm) に対するステンレス鋼 + 電解複合研磨表面の反射率。測定値を ×(s 偏光) 及び □(p 偏光) で、最小二乗法を用いてフィットさせた計算値を実線を示す。

となる。

最後にメインビームと散乱光の干渉過程を考える (図 15.4)。この 2 つの光の光路長差は TAMA の場合の 1 回反射でも 133λ 以上あり、静的位相差 $\Delta\Phi_{scat}$ がどの値をとるかは定かではない。そこで散乱光ベクトル E_{scat} の位相揺らぎ $\delta\Phi_{scat}$ が干渉光 E_{comb} の位相揺らぎ $\delta\Phi_{comb}$ として最も大きく現れる場合を想定する。すなわち $\Delta\Phi_{scat} = n\pi$ ($n \gg 1$ は整数)。このとき

$$\delta\Phi_{comb} = \frac{E_{scat}}{E_{main}} \delta\Phi_{scat} \quad (15.17)$$

E_{scat}/E_{main} の 2 乗が式 (15.16) で表される光量比に他ならない。今散乱光が反射するダクト表面が面と垂直方向に δz_i だけ揺らいでいるとすると、 i 回反射によって生じる散乱光の光路長揺らぎは

$$\phi_i \sqrt{\sum_{k=1}^i (\delta z_k)^2} \quad (15.18)$$

である⁵。従ってこれによって現れるミラー変位雑音 δx_i は式 (15.17) の関係から

$$\delta x_i = \sqrt{\frac{P_i}{P_0} \int_{\phi_i - \phi_{main}}^{\phi_i + \phi_{main}} \text{BRDF}(\phi) 2\pi\phi d\phi} \cdot \phi_i \sqrt{\sum_{k=1}^i (\delta z_k)^2} \quad (15.19)$$

となる。全ての散乱光の影響は反射回数 i が 1 から無限大になる場合までを足し合わせる (二乗和のルート) によって得られる。LCGT でこの雑音が最も効くのは 30 Hz 以下の帯域である。LCGT のサイトである神岡鉱山での地面振動レベルは 30 Hz で $1 \times 10^{-11} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ であるのでダクト表面の変位 δz としてはこれを用いる。

⁴ 厳密にはビームウェストの位置による

⁵ ダクト表面が各反射点で無相関に揺れている場合

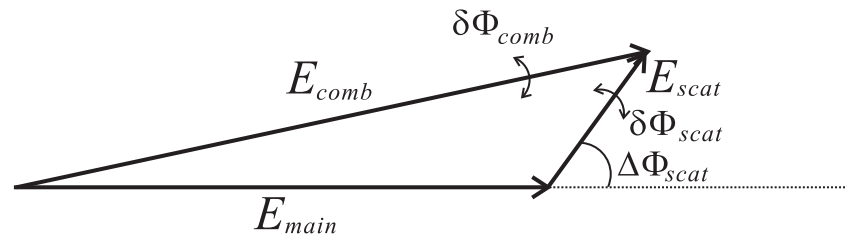


図 15.4: メインビーム E_{main} と散乱光 E_{scat} の関係。静的位相差 $\Delta\Phi_{scat}$ がどの値をとるかは定かではない。

ここまでの計算ではメインビームはダクトの中心を通ると仮定した。実際には同一ダクト中に 2 本のビームを通すので、メインビームの位置は 0.2 m だけオフセットされる。この場合上記の計算を光軸周りに積分する必要がある。その結果ダクト径 1 m、オフセット 0.2 m での散乱光雑音は $3 \times 10^{-21} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられる。一方 LCGT の目標変位感度は 30 Hz で $6 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。従って安全係数として 20 が期待できる。

以上のモデルを検証するために我々は TAMA300 を用いてダクト散乱光雑音の直接測定をおこなった [10]。腕の中間地点でダクトの表面を加振器で励起し、1 回反射散乱光の影響を干涉計で測定した。その結果 776.5 Hz、 $5.6 \times 10^{-6} \text{ m}_{\text{rms}}$ の加振に対しミラー変位雑音換算で $1.2 \times 10^{-17} \text{ m}_{\text{rms}}$ の excess が観測された。前章の計算によると $5.6 \times 10^{-6} \text{ m}_{\text{rms}}$ の振動による 1 回反射の散乱光の影響は最大で $6.3 \times 10^{-17} \text{ m}_{\text{rms}}$ となり測定値は静的位相差を考慮するときわめて妥当である。

15.4.3 バッフルの配置と効果

バッフルはダクトの 1 ユニット (12 m) に 1 つ取り付けるのが製造上都合がよい。この場合片腕で 250 枚のバッフルが配置されることになるが、このうち実際に有効なのはダクト全長を L 、ダクト半径を R 、バッフル高さを h 、バッフル間隔を d として

$$N = \frac{h L}{d R} \quad (15.20)$$

で定義される枚数 N だけである。この N を有効バッフル枚数と呼んでいる。LCGT のパラメータを用いるとこの枚数は 25 となる。

図 15.5 はダクト径 1 m、ビームのオフセット 0.2 m の場合の散乱光雑音の大きさをこの有効バッフル枚数の関数として示したものである。 $N = 25$ の場合、散乱光雑音は $5 \times 10^{-22} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となり 100 以上の安全係数が期待できる。

15.4.4 バッフルの材質と表面処理

バッフルの材質とその表面は LCGT に必要な超高真空に適したものでなければならない。

表面としては光を吸収してくれるものすなわち「黒い」ものがよく、また粗い表面によって散乱させるよりもきれいに反射させる方が効率的である。赤外吸収体としては日本カニゼンのカニブラックやアンリツの UB-NIP などがある。共に無電解メッキであるが、前者は自己触媒により後処理が不要であり複雑形状への適用が可能である。後者は加熱エッチングによる酸化処理が必要であるが、全反射率が波長 $1 \mu\text{m}$ に対し 0.2% 程度と極めて低い [11]。しかしいずれも液浸処理であり、多孔質面であることを利用しているため一般的には超高真空に適していない。

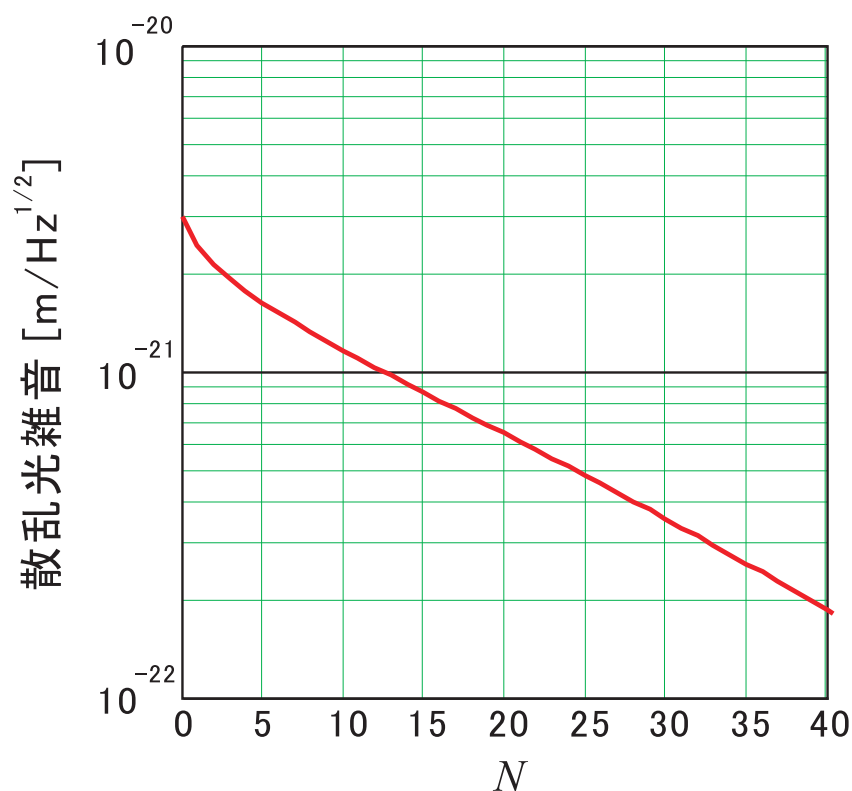


図 15.5: ダクト径 1 m、ビームのオフセット 0.2 m の場合の散乱光雑音の大きさを有効バッフル枚数 N の関数として示したもの。

我々は Diamond Like Carbon (DLC) の適用を考えている。DLC は蒸着によって生成されたカーボン膜で波長 $1\mu\text{m}$ に対する反射率が 5% 程度であり、超高真空中に適合する素材としては小さい(見た目に黒い)。アモルファス構造のため表面が平滑(平均 7\AA)で、損失のほとんどが散乱ではなく透過吸収によって起こる。またガス放出速度を測定したところ [12]、ベーキングした SUS316 よりもよい結果が得られており、超高真空用表面としてもきわめて優れている。

参考文献

- [1] R. Takahashi, Y. Saito, M. Fukushima, M. Ando, K. Arai, D. Tatsumi, G. Heinzl, S. Kawamura, T. Yamazaki, and S. Moriwaki *J. Vac. Sci. Technol.* **A20** 1237-1241(2002).
- [2] 三尾典克: 京都大学出版会 重力波をとらえる 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健 編著, 224-228(1998) .
- [3] Y. Saito, Y. Ogawa, G. Horikoshi, N. Matuda, R. Takahashi, M. Fukushima: Vacuum system of the 300m gravitational wave laser interferometer in Japan (TAMA300), *Vacuum*, 53, 353-356(1999).
- [4] 稲吉さかえ, 斎藤一也, 佐藤幸恵, 塚原園子, 原泰博, 天野繁, 石澤克修, 野村健, 嶋田晃久, 金澤実: 化学研磨したステンレス鋼のガス放出特性, *真空*, 41, 96-99(1998).
- [5] Y. Saito, N. Matuda, Y. Ogawa, G. Horikoshi: Vacuum system design for the 300m gravitational wave laser interferometer in Japan (TAMA300), *Vacuum*, 47, 609-611(1996).

-
- [6] Y. Saito, G. Horikoshi, R. Takahashi, M. Fukushima: Operational status of the vacuum system of the 300m gravitational wave laser interferometer, TAMA300, *Vacuum*, 60, 3-8(2001).
- [7] W. E. Althouse, S. D. Hand, L. K. Jones, A. Lazzarini, and R. Weiss: Precision alignment of the LIGO 4 km arms using the dual-frequency differential global positioning system, *Rev. Sci. Inst.*, 72, 3086-3094(2001).
- [8] J.-Y. Vinet, V. Brisson and S. Braccini: Scattered light noise in gravitational wave interferometric detectors: Coherent effects, *Phys. Rev. D*54, 1276-1286(1996).
- [9] M. Smith: Scattered light phase noise in TAMA due to glint from tube surface, internal report, 1-11(2001).
- [10] R. Takahashi, K. Arai, S. Kawamura, and M. Smith: Direct measurement of the scattered light effect on the sensitivity in TAMA300, *Phys. Rev. D*70, 062003(2004).
- [11] 都丸隆行、齊藤芳男、久保富夫、佐藤吉博、徳成正雄、高橋竜太郎、鈴木敏一、東保男、新富孝和、山本明、内藤悦伸: ニッケル - リン光吸収体の真空特性と光学特性評価, *真空*, 48, 301-303(2005).
- [12] R. Takahashi, Y. Saito, T. Kubo, T. Tomaru, M. Tokunari, T. Sumiya, K. Takasugi, and Y. Naito: Application of Diamond-Like Carbon (DLC) coatings for gravitational wave detectors, *Vacuum*, 73, 145-148(2004).

第16章

観測システム

新井宏二¹

観測システムとは、干渉計の各サブシステムの連携をとって、干渉計開発や長時間の観測の遂行を司るシステムである。図 16.1 に観測システムの概要を示した。観測システムは自動ロックシステム、干渉計モニタ/診断システム、干渉計調整システムによって構成されており、これらを用いながら開発・観測担当者が干渉計を運用する。

自動ロックシステムは、干渉計を自動的に重力波信号が取得可能な状態に移行させるものである。開発・観測担当者はモニタ/診断系を利用して検出器の動作をチェックし、不具合箇所の判断や調整が必要かどうかなどの判断を行う。調整が必要と判断されると、検出器にあらかじめ用意した調整機構を用いて干渉計の性能を最大限引き出すよう調整を行う。場合によってはこの調整は自動で行われる。

このような観測システムをデジタル制御・データ取得系に統合して実現する。以下では、自動ロックシステム、モニタ/診断系、干渉計調整について順に述べる。

16.1 自動ロックシステム

自動ロックシステムは、干渉計のロック、ロック直後のサブシステム(アラインメント系など)の起動、観測用信号源への制御信号切替などの作業を自動的に行うものである。干渉計運用の確実性の向上、また省力化と効率化のためにこのようなシステムが不可欠である。

自動ロックシステムはサブシステムとマスターコントローラから構成される。サブシステムは、周囲からの入力信号により状況を判断しながらそれ自体が自律的に動作するハードウェアもしくはソフトウェアで、干渉計のロックアクイジション・アラインメント制御・光軸制御・各モードクリーナー制御などがサブシステム化される。

マスターコントローラは、サブシステムと連携を取りながら、全体のロック作業を統括している。一部のサブシステム化されていない制御回路の調整に関してもマスターコントローラが担当している。ハードウェアはPCにADC, DAC, Digital I/O, デジタル制御のリレーなどの拡張カードを取り付けて、デジタル制御とハードウェア制御を統括する。

¹ 国立天文台

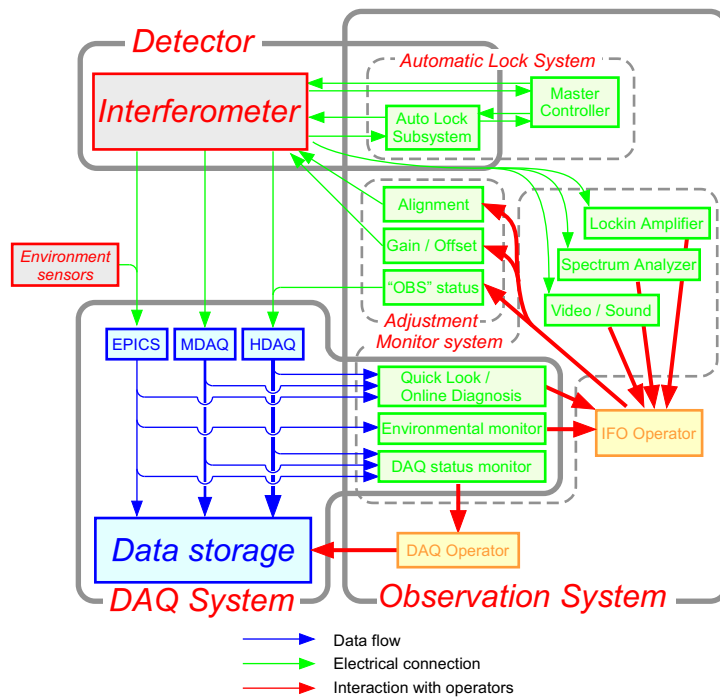


図 16.1: 観測システム

16.2 モニタと診断システム

レーザー干渉計重力波検出器は非常に精密な観測装置であるため、その感度は、地面振動や音など、様々な外乱の影響を受け易い。また、長期観測時には、気温や大気圧といった環境の変化によるドリフトの影響を受けることもある。防振装置や真空槽、制御系等は、これらの影響をできる限り抑圧するように設計されているが、それでも抑えきれない残留成分も残ってしまう。また、干渉計の状態のみならず、データ取得系も観測中滞りなくデータを記録し続けなければならない。従って、長期観測時には、これらのシステムや周囲の環境の状態をリアルタイムに把握することが不可欠となる。

このようなモニタ/診断システムは、大別して次に述べる3つの役割を担う。

1. 長期観測時の検出器各システムの状態モニタ。

長期観測運転中に、干渉計の状態をリアルタイムで把握し、干渉計やデータ取得系の不具合の発見とそれに応じた調整を行う用途に用いる。

2. 干渉計改良に役立つ情報。

現在、検出器の感度は、目標感度にはまだ到達していない。従って、干渉計の状態を解析・把握して、干渉計の問題点・改良点の特定に役立てる。特に、間欠的または非定常的に発生する雑音源を特定する際に効果的である。

3. 重力波データ解析の基礎的な情報。

重力波解析を行い、重力波が存在した場合に、その検出を疑い無いものとして報告するためには、観測時の検出器の状態を把握しておくことは重要な意味を持つ。

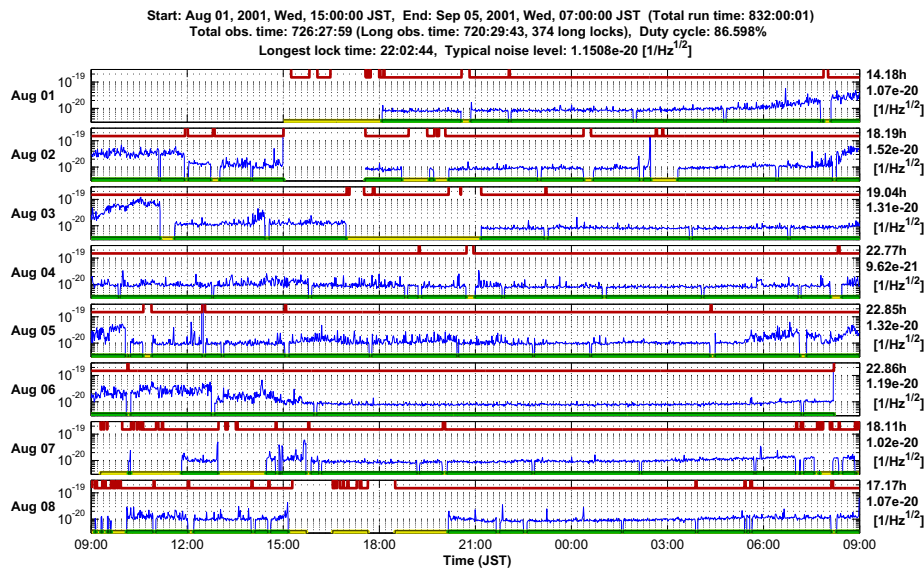


図 16.2: TAMA300 第 6 次観測の観測状況モニタプログラムの表示例。この図では、1 週間分の干渉計雑音レベル、観測状況、データ取得状況、干渉計の動作状況などが表示されている。

以上のような役割を満すために、診断/モニタシステム・観測状態フラグ・データ取得系モニタが必要となる。さらにそれらを補完するために、CCD ビデオ画像のモニタ・ δL 信号の音声・FFT アナライザなどを観測中に使用する。

16.2.1 診断/モニタシステム

観測中や観測実施へ向けた干渉計開発の際には、干渉計の状態を評価して診断、モニタするシステムが必要となる。干渉計の状態の評価は、干渉計主信号を用いるものと、補助的なデータを用いるものの 2 つに大別できる。主信号は、重力波信号を含む可能性のある信号である。重力波が無く、検出器が安定に動作している場合には、この信号は定常的でガウス分布に従う雑音として現れるはずである。しかし、実際のデータは各種外乱やレーザー光源の不安定性などの影響で、大きな非定常雑音・非ガウス雑音を含んでいる。従って、この非定常性・非ガウス性は、データの質や検出器の動作状態を評価する重要な基準となる。補助的なデータとは、重力波信号と同時に取得する、干渉計の制御信号や、干渉計各部の光強度、地面振動や温度といった各種環境データなどのことである。これらの信号を用いることによって、干渉計の動作が不安定になったり、感度が低下した場合、その原因を知り、干渉計の改良や重力波解析結果に反映させることができる。

干渉計の主信号を用いるものでは、データ取得システムが正常に動作しているかどうかをチェックし、データの品質をリアルタイムに評価することを目的とするものである。重力波信号の時系列、ヒストグラム、パワースペクトルなどによりデータの基本的な状態を把握し、重力波信号の周波数領域表示 $h(f)$ 、スペクトラムの履歴、試験的な matched-filter 解析 (単一のテンプレートを使用) の結果により、データの品質とその履歴の把握を行う。また、一定時間 (たとえば約 1 分) 毎に、干渉計出力の平均ノイズレベルや、ガウス性をリアルタイムに評価するものも必要となる (図 16.2)。

補助信号を用いたものとしては、補助信号の主要チャンネルについて、入力電圧 (またはそれを物理量に換算したもの) と、それらの異常時に警告を示すランプをリアルタイムで表示するモニタシステムが必要

となる。これは干渉計本体や各サブシステムの動作状態を把握するために重要な情報を提供する。必要に応じて、各信号の時系列およびスペクトル表示を呼び出す機能も必要となる。

16.2.2 その他のモニタ系

- 観測状態フラグ:

国立天文台に設置されている TAMA300 の観測では観測中を示す「OBS」と呼ばれる信号があり、この信号の状態を表示するモニタが用意していた。この信号が OFF(0V) であるときは干渉計が動作していない、または干渉計の調整中であることを示すことになっている。LCGT ではこの信号を拡張して、干渉計の様々な状態に対応した複数ビットのフラグを使用するのが望ましい。

- データ取得系モニタ:

データ取得系の不具合によりデータの取得が停止してしまう事態に備えて、各データ取得系の運転状況を示すモニタを用意する。このモニタには、記録中のファイル番号やフレーム番号が表示されるようになっており、ログの記録時に参考にするようになっている。

- ビデオ画像:

現実のサイトで作業できる時間は限られていることが予想されるため、相当量の作業はサイト外から行うことが予想される。そのため、両腕の透過光、ダークポート・反射ポートなどのスポットの様子は、サイト内外のどこからでも動画として見る事が可能になっていることが望ましい。このようなシステムは CCD カメラの出力を市販のビデオサーバーで転送することで実現可能である。

- δL 信号の音声:

重力波信号を含むことになる δL 信号の音声を聞くことは、干渉計の状態を診断するための重要な情報となる。この信号はデータ取得系にいったん取り込まれたものを適当なフィルタを通して、サイト内外のネットワーク から利用可能になっていることが必要である。なおサイトの現場では干渉計の調整作業のためリアルタイム性の高いモニタが必要とされるので開発時にはその点に留意する。

- ロックインアンプ・FFT アナライザ:

干渉計の診断の際にデジタル制御・データ取得系の帯域外での信号を取得する必要がある場合があるため、ロックインアンプや FFT アナライザなどの装置群をデジタル制御系に統合して使用する。

16.3 干渉計調整

干渉計ロックが自動的に終了したとしても、干渉計の感度が最高の状態にあるとは限らない。また、長時間連続運転することにより干渉計の調整が徐々にドリフトし、感度が劣化してしまうことがある。そのため、干渉計調整システムを用いて、観測データの品質維持を図る。観測は可能な限り完全無人運転へ向けて、自動ロックシステムと自動調整機能を整備していくのが望ましい。

調整項目としては、干渉計のアラインメントの調整・各種のオフセット調整・アクチュエータバランスの調整・制御系ゲインの調整などがある。これらの調整項目はデジタル制御系のパラメータ調整として実現される。

第17章

データ取得

辰巳大輔¹

ここで取り扱うデータ取得の範囲は以下の通りで、神岡実験施設に設置すべきシステムを対象とする。

1. Main DAQ system
2. Frame Maker
3. Detector Diagnosis
4. Environment Monitor
5. Time Keeper and Global Positioning System
6. Raw Data Archive
7. Pre Analysis Server
8. Data Distribution

システム全体の概念図は図 17.1 に示した通りで、神岡鉱山内に設置される重力波検出器からデータを取得し、共同研究者へデータを配信するシステムである。基線長 3 km の重力波検出器では、取得すべき信号源は広範囲に分散している。このため、検出器の各所に設置された DAQ station と呼ぶフロントエンドにおいてデータを取得し、データを Raw Data Archive と呼ぶコンピュータに集積する。集積されたデータは Diagnosis Server と呼ばれるコンピュータにて検出器の動作状況のモニターならびに診断に使われる。

一方、重力波検出に重要な信号として選別されたデータは、Main system と呼ばれるコンピュータにて集積され、Pre-analysis server と呼ぶコンピュータにて、様々な重力波源探査に適した形式にデータが処理される。Pre-analysis server およびデータ配信用の Data distributor は神岡坑外の研究施設に設けられた計算機室に置かれる。

重力波探査に参加する共同研究者は、上記 Data distributor よりデータを受け取ることが出来る。

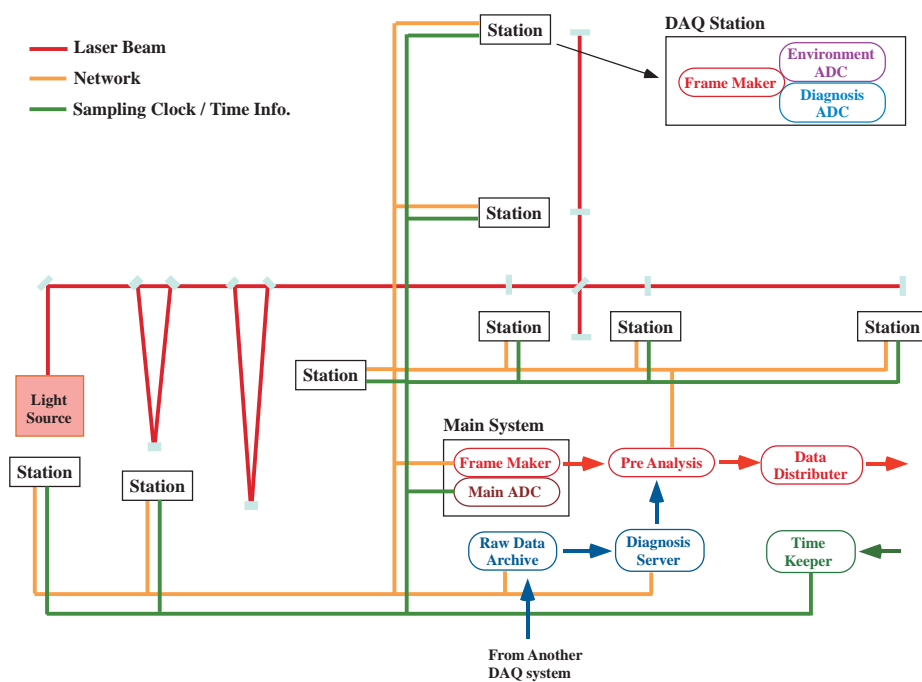


図 17.1: データ取得概念図: 2 台の干渉計それぞれに独立したデータ取得システムを構築する。共通システムは Raw Data Archive、Diagnosis Server、Time Keeper and Global Positioning System である。

また、データ取得の際の時刻同期を目的とした Time Keeper and Global Positioning System もデータ取得グループの担当するシステムとする。

重力波信号探査のための国際的な相関解析については、国外の検出器ネットワークにアクセス出来ること、予め重力波信号選別が行える計算能力がを有することなどが必要であるので、神岡実験施設に設置すべきシステムとせず、別途解析システムとして議論する。

¹ 国立天文台

17.1 Main DAQ system

ここで取り扱う信号は、主に重力波信号探査に用いられるものに限定する。このシステムの一番大切な仕様は観測帯域の上限周波数で、Compact binary objects の inspiral だけを考えて場合は、 $0.1 M_{\odot}$ の連星では Inner-Most Stable Circular orbit での公転周期から、重力波の上限周波数が 5 kHz 程度と見込まれる。しかし LCGT project では、inspiral phase のみならず合体直前、直後の波形解析から星の内部情報に関する研究も期待されている。このような研究のことも考慮して、観測帯域の上限を 10 kHz と設定した。これに伴う Analog-to-Digital Converter、Frame Formatted Data File の仕様は、表 17.1、17.2 の通りである。

Sampling Clock	$32768 \text{ Hz} = 2^{15}$
Number of Channels	32 CH
Bit Resolution	24 bit = 4 byte integer
Anti-alias Filter	Digital Filter with 10 kHz cutoff
Data Rate	4 MB / sec

表 17.1: Main DAQ system: Analog-to-Digital Converter (ADC) 仕様

Frame Length	1 second = 32768 samples
File	64 frames / file

表 17.2: Main DAQ system: Frame Formatted Data File 仕様

17.2 Frame Maker

Main DAQ system と違い以下の Detector Diagnosis と Environment Monitor は、検出器の各部を監視するという目的上、実験施設内に分散して設置せざるを得ない。このため Frame Maker と Detector Diagnosis ADC、Environment Monitor ADC の 1 セットを DAQ station とし、実験施設の 8 つの区域をそれぞれ分担することにした。

Frame Maker の役割は

1. 各 ADC からデータを読み出す。
2. データを Frame Formatted Data File として記録する。
3. 記録したデータを Raw Data Archive へ転送する。
4. 記録したデータを用いて干渉計の動作状態を診断する。

で、このためのハードウェア仕様は以下の通りである。

Operation System	UNIX
Hard Disk	14.4 GB / hour × 70 hours = 1 TB
Network Interface	Gigabit Ethernet with optical fiber link

表 17.3: Frame Maker: ハードウェア仕様

17.3 Detector Diagnosis

Detector Diagnosis は干渉計の動作状態を診断するために、各制御系のコントロール信号をモニターするのが主な役割である。これらの信号の制御帯域は、場合により大きく異なり ADC の性能を一意に決定することが難しい。このためハードウェアの仕様として Sampling Clock は最大限を想定し、干渉計診断ソフトウェアで必要な帯域をフィルタリングすることとした。

Detector Diagnosis の Analog-to-Digital Converter 性能は以下の通りである。

Sampling Clock	16384 Hz = 2^{14}
Number of Channels	512 CH = 64 CH × 8 stations
Bit Resolution	16 bit = 2 byte integer
Anti-alias Filter	Digital Filter with 5 kHz cutoff
Data Rate	2 MB / sec × 8 stations

表 17.4: Detector Diagnosis: Analog-to-Digital Converter (ADC) 仕様

干渉計診断のためのデータ処理の大部分は、前述の Frame Maker と呼ぶコンピュータ上で各 DAQ station 毎に行うこととする。検出器全体の状態把握や、過去の履歴情報の検索機能などについては、別途を設置するコンピュータ (Diagnosis Server) でこれを行う。これは一見冗長なシステムと見えるが、干渉計診断システムは建設期に特に重要で、検出器全体もしくはデータ取得システム全体が稼動していなくとも建設に伴い各 DAQ station 単独で動作することを優先することを考慮した構成である。

17.4 Environment Monitor

Environment Monitor は主に、レーザー光源、冷凍システム、真空システムなどの温度、湿度、圧力をモニターすることが目的である。このため有効帯域は 10 Hz とする。

Environment Monitor の Analog-to-Digital Converter 性能は以下の通りである。

Sampling Clock	32 Hz = 2^5
Number of Channels	512 CH = 64 CH × 8 stations
Bit Resolution	16 bit = 2 byte integer
Anti-alias Filter	Analog Filter with 10 Hz cutoff
Data Rate	2 kB / sec × 8 stations

表 17.5: Environment Monitor: Analog-to-Digital Converter (ADC) 仕様

17.5 Time Keeper and Global Positioning System

実験データを記録する上で、時刻情報は欠かせない。現在では Global Positioning System (GPS) を利用することで容易に $1 \mu\text{sec}$ 以下の高精度を得ることが可能である。問題は神岡実験施設が地下に建設されるため、GPS アンテナを坑外に設置しなければならないこと、高精度を保ったまま時刻情報を坑内に伝送しなければならないことである。

このためのシステムを図 17.2 に示す。坑外に設置されたアンテナ部と時刻情報を伝送する光伝送システム、さらに坑内の Sampling Clock 発生器と、各 ADC への sampling clock 分配器から成る。Sampling Clock 発生器は、万一 GPS signal の送信が中断しても数日から数週間安定した clock の供給が維持できるように、ルビジウム原子時計を内蔵オプションを付加することとする。ルビジウムを選択したのは、その価格と安定度から判断してセシウム原子時計までは必要なしと判断したからである。

この他に、Trigger Signal を送るとその時刻をアスキーデータとして返してくれる GPS Time decoder も坑内に設置する。

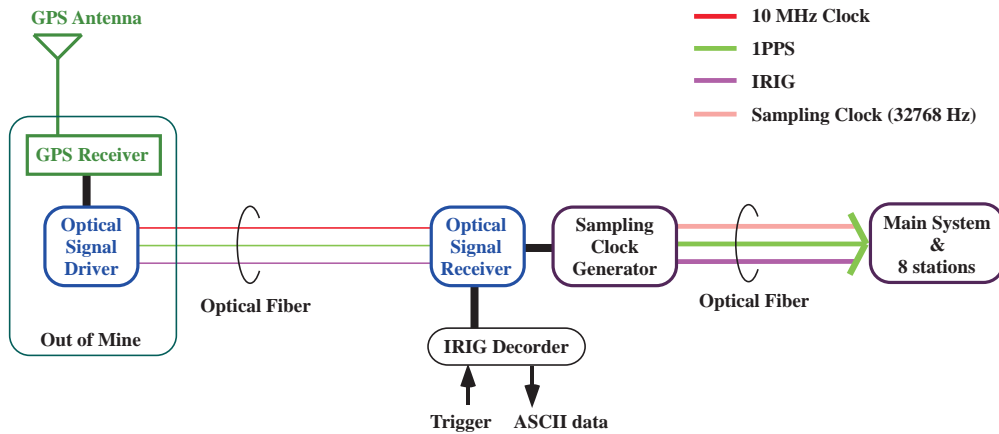


図 17.2: 時計システムと GPS の概念図: 坑外に設置されたアンテナ部と時刻情報を伝送する光伝送システム、さらに坑内の Sampling Clock 発生器と各 ADC への sampling clock 分配器から成る。

17.6 Raw Data Archive

各 DAQ station で作られた Frame Formatted Data File は、Raw Data Archive へ送られて蓄積される。ユーザーの利便性を考えると 30 日分のデータがハードディスク上に蓄積されていて、簡単にアクセス出来ることが重要で、このためのハードディスク容量は 100 TB となる。また、長期データ保存のためには、テープ記録装置と大量のテープを扱えるテープアーカイバも必要であるが、この装置を神岡実験施設に設置するかそれとも実験施設とは別の柏キャンパスに設置するかは、維持管理を踏まえて別途議論が必要と思われる。

	From Each Station	On Data Archive
Main DAQ system	4 MB / sec	14.1 GB / hour
Detector Diagnosys	2 MB / sec × 8	56.3 GB / hour
Environment Monitor	2 kB / sec × 8	0.05 GB / hour
Total	20 MB / sec	70.4 GB / hour

表 17.6: データ転送レートと Raw Data Archive 上での蓄積データ量

17.7 Pre Analysis Server

Raw Data は解析以前に Calibration により時空歪みなどの物理量に変換され、且つ重力波信号探索のための pre-selection もしくはデータ圧縮されることが必要で、以下に示すような Pre Analysis が、実時間で処理できなければならない。

1. Detector Calibration
2. Averaging of Noise Spectrum
3. Phase-space mesh specification for compact binary objects inspiral search
4. Data compression for continuoius signal search
5. Burst Noise Selection

このために Pre Analysis Server は前述の Raw Data Archive と連携して大量のデータを高速に処理できなければならない。このようなシステムとしてコンピュータクラスタによる並列計算機が考えられる。

17.8 Data Distribution

前処理されたデータは、本格的な重力波探索のために研究協力者の元に分配される。このため高速ネットワークが必要であるが既に稼動始めた Super-SINET などは、上記で必要とされる 100 MB/sec のデータ転送能力を有しているため、十分に実現可能であると予想される。

また、重力波検出器の国際ネットワークとも連携する必要もあるがこれは解析システムにより実現するものとする。

17.9 Summary of ADC Specification

以上より、Analog-to-Digital Converter に要求される仕様は以下の通りである。

	Sampling Clock (Hz)	Number of Channels	Bit Resolution	Effective Band-width (Hz)
Main DAQ system	$32768 = 2^{15}$	32	24	10 k
Detector Diagnosys	$16384 = 2^{14}$	$512 = 64 \times 8$	16	5 k
Environment Monitor	$32 = 2^5$	$512 = 64 \times 8$	16	10

表 17.7: 各 Analog-to-Digital Converter の仕様一覧

第18章

データ解析

神田展行¹

18.1 はじめに

レーザー干渉計型重力波検出器のデータ解析の目的は、干渉計の信号中に含まれるであろう重力波イベントを探索することである。そのためには、重力波の波形やスペクトルといった性質を利用してイベントの同定を行う手法が不可欠である。また、イベントの確からしさをや観測上限を議論するといった統計的ないし系統的な解析の評価のためには、データの較正や雑音などのデータの質を評価する内容も必要である。

18.1.1 全体の流れ

図 18.1 に、検出器以降のデータの流れと代表的な処理のつながりを図示する。この図には、データ取得部におけるオンラインでの処理も含まれている。基本的には、検出器の生のデータ”raw data”が大本であり、最も重要であることはいうまでもない。raw data は検出器の電圧信号を ADC で変換したものであり、これを重力波相当への換算をおこなうのが較正”calibration”処理である。”pre-process”処理では、raw data を calibration し、スペクトル $h(f)$ の計算を行い、普段の解析で使わないチャンネルをのぞいたり、後の処理の都合の良いようにデータ形式²を整えたりする。こうして、いくつかのイベント探索について共通の処理をおこなって解析しやすい形式にしたものが”processed data”である。この”processed data”を用いてイベント探索が行われる。ある種のイベント探索では他と処理がことなり”raw data”から独自に処理するものがあるし、検出器の状態評価等は”raw data”を用いることがある。

¹大阪市立大理

²TAMA では VIRGO,LIGO と統一した frame 形式で記録・処理してある。

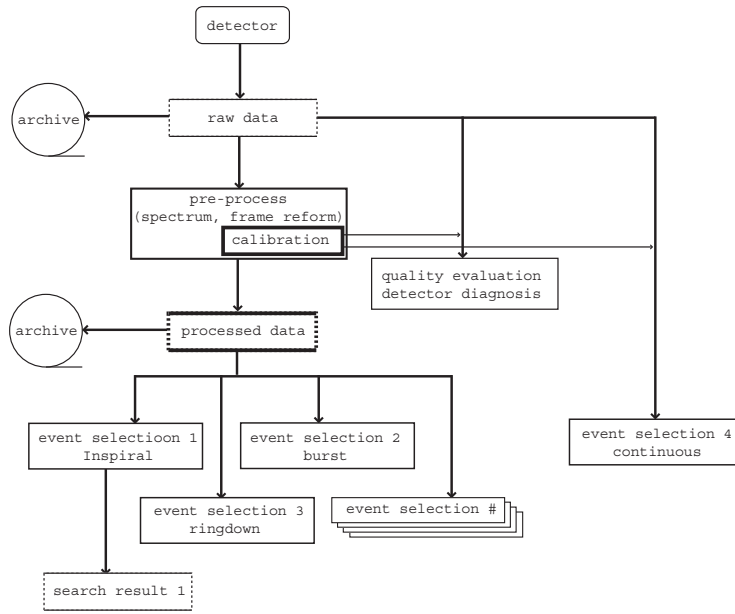


図 18.1: 解析におけるデータの流れと代表的な処理

18.1.2 干渉計からの信号

重力波源から検出器に入射した重力波を、2つの偏極成分を h_+ と h_\times とする。干渉計に重力波が入射した場合、まず重力波の入射方向によってそれぞれの偏極成分に対する感度パターン F_+, F_\times がことなるので、観測される重力波 $h_{obs}(t)$ は

$$h_{obs}(t) = F_+ h_+ + F_\times h_\times \quad (18.1)$$

となる [1]。実際の検出器の出力 $s(t)$ は雑音 $n(t)$ と重力波の重ねあわせ

$$s(t) = h_{obs}(t) + n(t) \quad (18.2)$$

である。

18.1.3 イベントの大きさ Event Significance

重力波信号 h がどのようなものかは、重力波源によってきまる。連星合体の重力波などは時系列 $h(t)$ として予想可能であり、また別な波源についてはスペクトル $h(f)$ での予想しかない場合もある。そこで、重力波信号の大きさを、イベントの有為さに延長できるように信号雑音比 (SNR) で定義する。単純には、

$$\text{SNR} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{h(t) \cdot h(t)}{n(t) \cdot n(t)} dt \quad (18.3)$$

または周波数領域で、

$$\text{SNR} = \int_{f_{min}}^{f_{Max}} \frac{\tilde{h}(f)^* \cdot \tilde{h}(f)}{\tilde{n}(f)^* \cdot \tilde{n}(f)} df \quad (18.4)$$

となる。ここで、 $[t_1, t_2]$ と $[f_{min}, f_{Max}]$ はイベントを探索するために処理するデータの時間間隔および周波数帯域である。もちろん、これらは重力波波形と雑音スペクトルによって最適な範囲がことなる。

この定義では SNR は 1 以下になりうるが、実際には信号 h は常に雑音 n とともにしかあらわれないので、現実的な指標としては、

$$N^2 \equiv \sqrt{\langle (n \cdot h(t))^2 \rangle} \quad (18.5)$$

$$S^2 \equiv |s \cdot h(t)| \quad (18.6)$$

とし、

$$\text{SNR} \equiv \sqrt{\frac{S^2}{N^2}} \quad (18.7)$$

と定義する [2]。すなわち、SNR は雑音の大きさを平均 1 としたときの重力波信号の大きさである。重力波信号がなく、完全なガウス性雑音の場合は、期待値 $\langle \text{SNR} \rangle = 1$ であり、 N の標準偏差は 1 になる。ガウス性雑音の場合は、SNR は直接に信号の有為さをガウス分布における ' $n\sigma$ ' として与えることになるので、これは信号の大きさの指標として考えやすい³。

一方で、実際の検出器の雑音は非ガウス成分があり、 1σ から大きくはなれた雑音の割合はガウス分布では正しくないので、SNR を直接にイベントの統計的有為さ (statistical confidence) とするのは避けなければならない。

18.2 ソースとイベント選別手法

18.2.1 連星合体イベント

中性子星、ブラックホール - 中性子星、ブラックホールなどの連星は、重力波を放出して、徐々に軌道半径を小さくしてゆき、最後には合体すると考えられている [3]。放出される重力波は合体の瞬間が最も大きく、これを捉えるのが TAMA のような地上のレーザー干渉計重力波検出器のもっとも重要な目的である。合体にいたるまでに、1) ポストニュートン近似によって波形の理論予想がなされている [4] インスパイラルフェーズ (inspiral phase)、2) 2 つの星が接触し星の有限な大きさや内部構造などの複雑な要素が波形を決める合体フェーズ (merger phase)、3) 合体の結果が落ち着きブラックホールの固有振動による重力波が輻射される準定常状態フェーズ (QNM: quasi-normal mode phase)、に大別される。

インスパイラルフェーズ

波形が時系列、スペクトルともに精度の高い予想がなされているので、この重力波をもちいて連星合体を探索するのがもっとも期待できる。インスパイラルフェーズには、連星軌道が小さくなるにつれて周期が短くなり、このため重力波も周期が短く、振幅は増大していき、「チャープ」と呼ばれる図 18.2 の波形が予想されている。この波形の振幅と周波数発展は連星の質量で決まる。この連星からの重力波を 2 つの星の質量 m_1, m_2 と到着時刻 t_0 の関数として

$$h_+(t; m_1, m_2, t_0), \quad h_\times(t; m_1, m_2, t_0) \quad (18.8)$$

と記せる。

³式 18.5 では雑音 n が明示的に与えられているが、実際の計算では重力波信号を含まない(であろう)信号 s をもってする。また積分範囲などは式 18.3, 18.4 に準ずる。

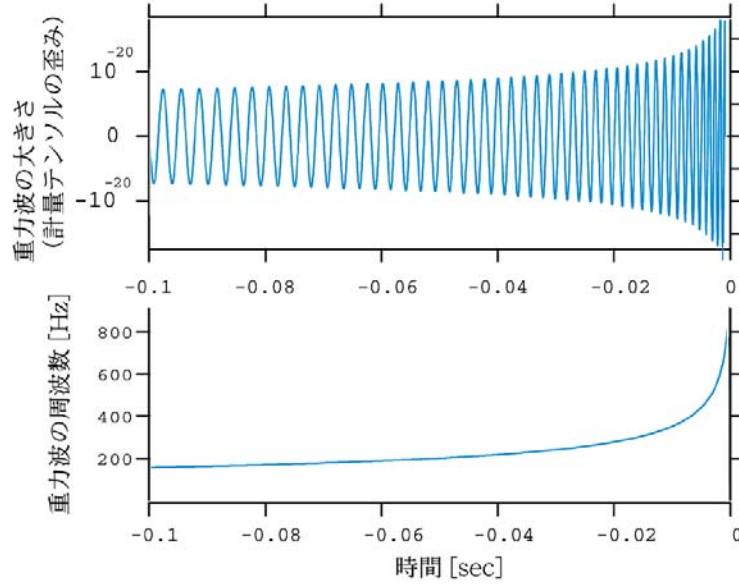


図 18.2: インスパイラルフェーズの連星合体の重力波波形

雑音スペクトル S_h がわかれば、得られるはずの SNR は連星の質量と距離によって計算できる。インスパイラルフェーズであれば、スペクトルは $f^{-7/6}$ に比例し、SNR は、

$$\text{SNR} = \sqrt{2} A \left[4 \int \frac{f^{-7/6}}{S_n(f)} df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18.9)$$

ここで、

$$A = T_\odot \frac{c}{d} \left(\frac{5\mu}{96M_\odot} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M}{\pi^2 M_\odot} \right)^{\frac{1}{3}} T_\odot^{-\frac{1}{6}}, \quad (18.10)$$

とできる。

LCGT のデザイン雑音スペクトル (図 18.3) から求めた、 $\text{SNR} = 8$ で観測できる範囲を質量の関数として図 18.4 に示す。この図は LCGT のイベント探索可能範囲を端的に示しており、図 18.3 のスペクトルが連星中性子合体の観測レンジで約 231Mpc に達する⁴ことがわかる。

準定常状態フェーズ (QNM:quasi-normal mode phase)

連星合体後にブラックホールが形成された場合、正弦波が減衰する波形 (リングダウン波形) の重力波をだすことが、ブラックホール時空の線形摂動により予想されている。この準定常モードを、quasi-normal mode とよぶ (以下 QNM)。リングダウン波形の中心周波数と減衰はブラックホールの質量と角運動量 (Kerr パラメター) で決まる。最低次のモード ($l = m = 2$) では、

$$f_c \simeq 32[\text{kHz}] \times \left[1 - 0.63(1 - a)^{0.3} \right] \left(\frac{M}{M} \right)^{-1} \quad (18.11)$$

$$Q \simeq 2.0(1 - a)^{-0.45} \quad (18.12)$$

⁴図 18.4 で、横軸の質量が $1.4M_\odot$ での値

となる [5] 摂動計算は振幅については予想しないが、適当な仮定の下 [6] で予測は可能である。インスパイラル同様に質量の関数として探索可能範囲を図 18.4 に示す。

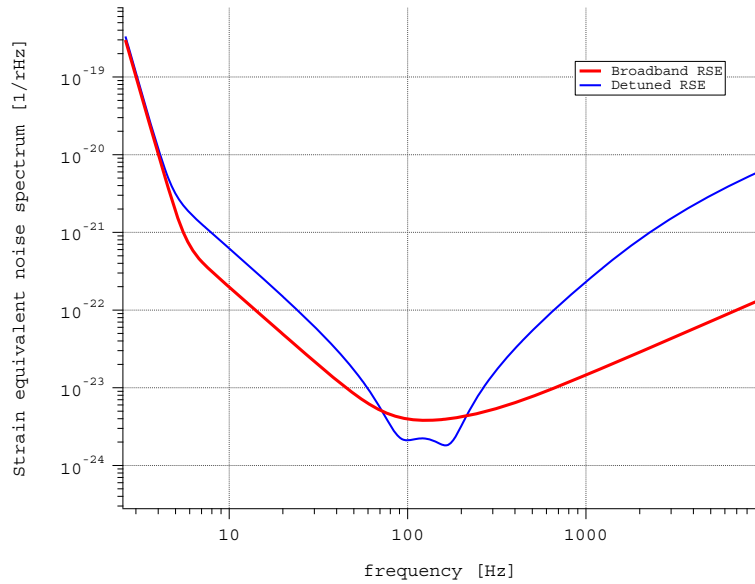


図 18.3: LCGT のデザイン雑音スペクトル

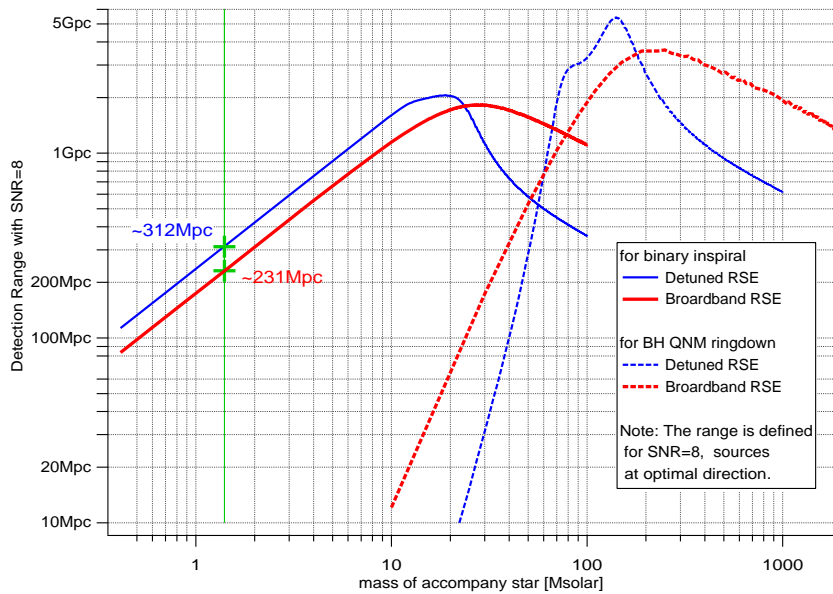


図 18.4: SNR = 8 で観測できる範囲

マッチドフィルター

重力波の波形予想が可能であれば、信号を選別するには検出器信号と予想波形 $h(t)$ (以下テンプレートと記す) の相関をとればよい。

2つの信号の相関は、信号の時間差 τ の関数として、

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) \cdot s(t) dt \tag{18.13}$$

とできる。この相関計算は τ をすこしずつ動かして行う必要があるが、これをフーリエ変換を用いれば、時間差 τ は位相に押し込めて、信号とテンプレートのフーリエ変換、およびそれらの積の逆フーリエ変換によって相関が求まる。

$$c(\tau) = \int_{f_1}^{f_2} \tilde{h}^*(f) \cdot \tilde{s}(f) e^{-i2\pi f\tau} df \tag{18.14}$$

この数値演算には高速フーリエ変換 (FFT) が用いられる。図 18.5, 18.6 に、この例を示す。

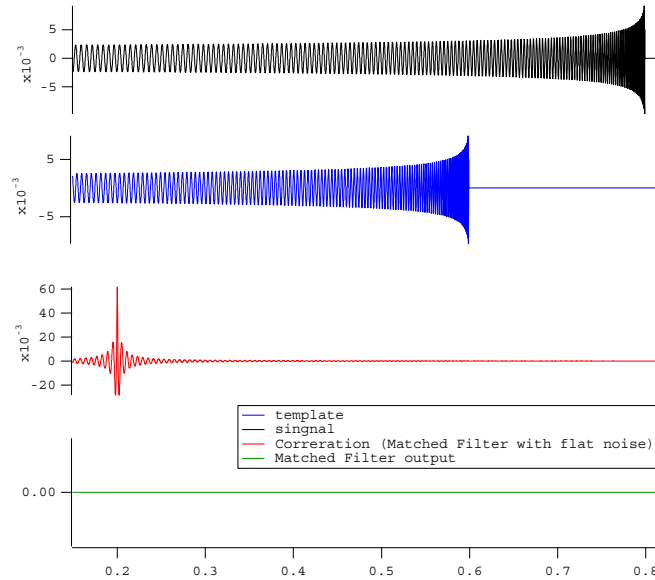


図 18.5: 相関計算例 (チャープ、雑音なし)

さらに、雑音のパワースペクトル $\tilde{S}_h(f)$ で重みをとって

$$c(\tau) = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}^*(f) \cdot \tilde{s}(f)}{\tilde{S}_h(f)} e^{-i2\pi f\tau} df \tag{18.15}$$

と求められる。図 18.5, 18.6 に、雑音 $\tilde{S}_h(f)$ がある場合の例を示す。雑音スペクトルによる最適化がはっきりと見てとれる⁵。

重力波の位相、および偏極成分の相対的強さが前もってわからないので、 h_+ と h_\times のテンプレートで求めるそれぞれの相関 c_+ と c_\times について 2 乗和

$$\rho(\tau)^2 = c_+^2 + c_\times^2 \tag{18.16}$$

⁵ここでは、雑音として TAMA300 検出器 DT6 の雑音スペクトラムを帯域を切って持ちいた。

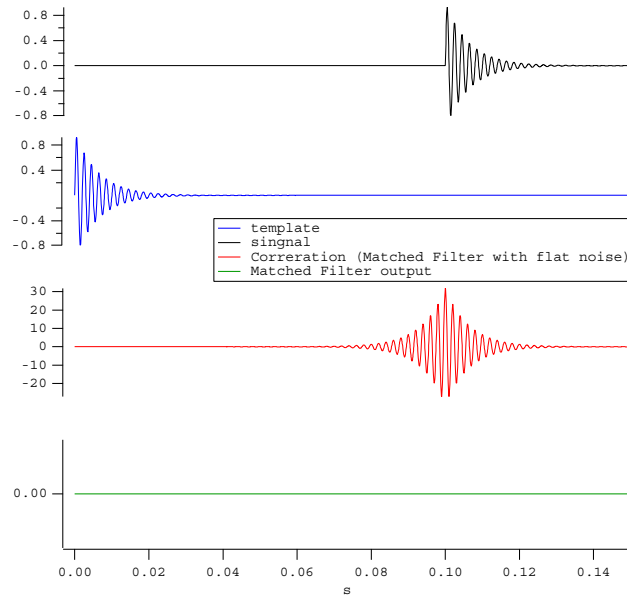


図 18.6: 相関計算例 (リングダウン、雑音なし)

を指標にする。重力波の雑音信号比 SNR は

$$SNR = \rho(\tau) / \sqrt{2} \quad (18.17)$$

で与えられる。

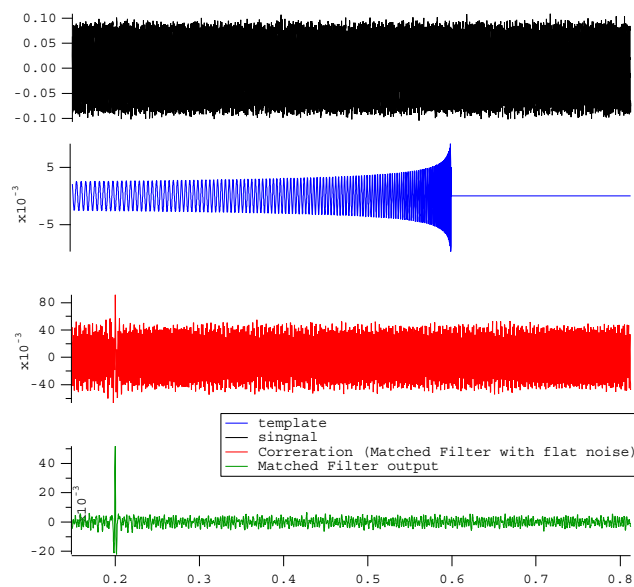


図 18.7: 相関計算例 (チャープ、雑音あり)

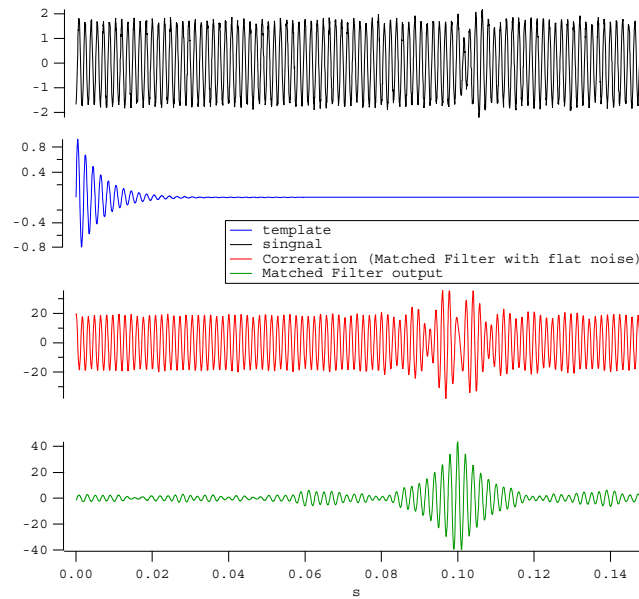


図 18.8: 相関計算例 (リングダウン、雑音あり)

テンプレートと干渉計信号の相関を、ウィナーの最適化フィルターで求める手法であり、これをマッチドフィルターとよぶ。チャープ波の解析であれば、星の質量をすこしづつかえて、多くのテンプレートを準備し、それら全てについて検出器信号と相関を取る。QNM リングダウンの場合も同様に、質量と Kerr パラメータについてテンプレートを準備する。多くのテンプレートのうち、もし検出器信号中に含まれる重力波と同じパラメータのものがあれば、 $\rho(\tau)^2$ が大きな値を持つ。そうして、SNR がある閾値を超えた場合を、イベント候補とする。

閾値の設定であるが、雑音が確率的に閾値を超えて現れる数 (バックグラウンド数) が、問題となるイベントよりも十分に小さくなるように閾値を設定する。例えば、図 18.9 は、TAMA Data Taking 2 のインスパイラルサーチの結果である [7]。横軸は $\text{SNR}^2 = \rho^2/2$ をとってある。ここでは $\text{SNR}^2 > 50$ をイベント候補として上限値を決めた。

18.2.2 バースト重力波 (超新星)

II 型の超新星爆発は、コア崩壊の際に重力波を放出すると予想されている。そのスペクトル等についても多くの予想がある [8] が、コアのダイナミクスを解くことの困難さ (状態方程式、初期条件なども含めて) から、連星合体の場合のような時系列での波形がきちんと予想されてはいない。しかし超新星爆発は多くの観測例がある天体現象で、これを重力波観測の対象とするのは最もである。

超新星からの重力波は、バースト的であり、スペクトルや持続時間についての予想はなされている。⁶そこで、いくつかのバーストフィルターが考えられている。

TAMA の場合では [9]、時系列で信号を細かく分割し、ガウス性とドリフトを見ることによってバースト同定を試みている。

⁶時系列ないし位相情報での予想は、計算途中で出てきているものもあるが、探索に使えるような一般性や確定性をもっていない。

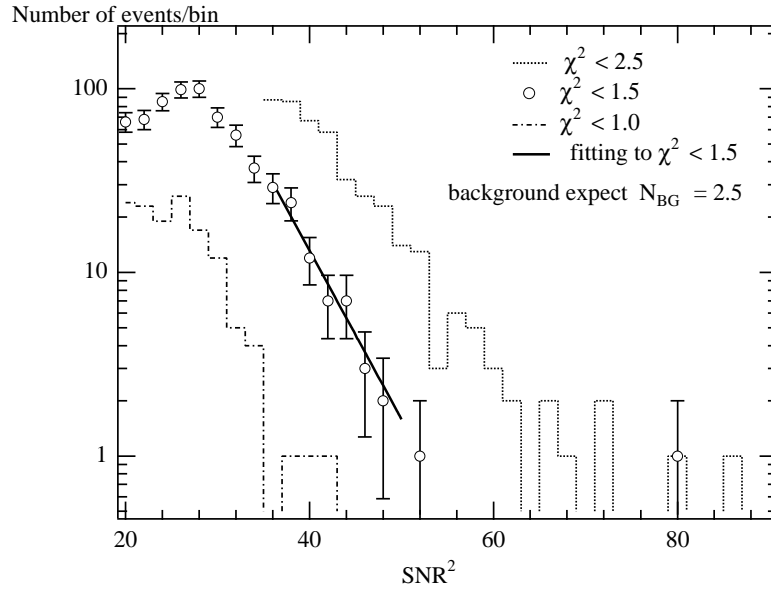


図 18.9: TAMA DT2 でのインスパイラル探索

$$c_1 = \frac{\langle P_i \rangle}{P_0} - 1 \quad \text{and} \quad c_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\langle P_i^2 \rangle}{\langle P_i \rangle^2} - 2 \right), \quad (18.18)$$

ここで、 P_i は i 番目の分割のパワー、 P_0 はより長い時間間隔での平均値である。 c_1 はパワー平均値のドリフトを与え、 c_2 ガウス性の指標である。(パワー分布の、1次、2次のモーメントをとっている。) $c_1 - c_2$ 平面上に、データをプロットすると、検出器雑音の平均的な変化は c_1 軸にそって、短い時間でのスパイク状の雑音は c_2 軸方向へ分布する。時系列の分割時間を適当に選ぶことによって、検出器の雑音とはことなる時間的发展をする信号を”バースト”として同定できる。

バースト波の解析は、ソース波形の予想の不確定さゆえに、イベント探索としては確定的な結果を得にくい。しかしソースの頻度は連星合体よりも約束されており、探索のための手法や選別の条件を複数用意すべきである。

18.2.3 連続波

パルサーのような回転天体は、周波数の一定した連続的な重力波源の候補として考えられてきた。TAMA では SN1987a の残滓のパルサー [10] を仮定して探索がなされている [11]。

連続波の探索は、周波数の一定した重力波を探索するので、手法の原理は単純であるが、

- 長時間積分
理論予想に比して十分にするには数カ月から 1 年以上
- ドップラー補正
- アンテナパターン補正
- 時刻精度の安定性

といった、解析（およびデータ）の精度が必要になる。

18.3 国際的な検出器ネットワークでの同時観測

重力波イベントを観測するためには、より多くのソースを探せるように検出器を高感度にして探索レンジを広げることはいうまでもないが、イベント候補の信頼性をあげることも重要である。特に少数イベントでの議論や確実な観測を目指すのであれば、統計的な有為性を保証しなくてはならない。

それには、LCGT と他の実験グループの検出器とをあわせて、複数台からなる検出器ネットワークを用いる。また重力波源の方向や偏極の決定のためには、すくなくとも 4 か所の離れた検出装置が必要であり、到来方向決定精度は検出器間の距離に強く依存する。このためにも LCGT を含む国際的な検出器ネットワークでの同時観測は重要である。

18.3.1 複数台の検出器

検出の有為性は、最終的に選別のためのパラメーター (ρ や χ^2 等) の分布における、雑音によるバックグラウンドの量で決まる。ある選別条件を通過する（と期待される）バックグラウンド数が、観測イベント数よりも有為に少なければイベント検出は信頼できる。イベント選別のためのパラメーターを計算する処理は決まっているので、検出器雑音のスペクトルや安定性が分かれば、それらからバックグラウンドの量や分布は予測できる。雑音がガウス性のものだけであれば容易に最終選別に残るバックグラウンド数の期待値が求められる。⁷

関連のない雑音については、2 台以上の干渉計を用いてイベントの同時性を要求することにより、バックグラウンド数を劇的に減らすことができる（後述）。

また前述のように、実際の干渉計の信号には、非ガウスの、非定常的な雑音が存在する。これら、例えば人工的なものも含む偶発的な外乱などは、雑音の頻度や分布を確定して、シミュレーションや解析計算によりバックグラウンド数を予想するのは難しい。このような雑音であっても、複数の検出器の情報をつかって雑音状態の評価に相補性をもたせることが対策として考えられる。重力波信号相当に補正したデータには、振り子や電気系のフィルターなどの違いによって雑音は複数の干渉計で同じにはならない。

複数台の干渉計の同時観測を用いることが、検出の信頼性の上から重要なことである。

偶然に一致する頻度

2 つ以上の検出器の出力のバックグラウンドは時間的に無相関であるとする。しかし、偶然、他の検出器と同時⁸にバックグラウンドが発生し得る。このようなものを、Accidental Coincidence と呼ぶ。

2 台の場合を考えよう。

- 検出器 A のバックグラウンド頻度は f_A [個/sec] である。
- 検出器 B のバックグラウンド頻度は f_B [個/sec] である。
- $f_{A,B} \ll 1$ [個/sec] とする。

⁷ あるいは非ガウスであっても、確率分布がきちんと予想できるものであればよい。例えば放射線計測などでは、ランダウ分布のようなテールを引く分布が現れるが、素過程や定式化が分かっているので、バックグラウンドを定量評価できる。

⁸ 許容する時間ウインドウ内に、という意味。

- A,B の2つのイベントが Δt [sec] 以内にあるとき、この2つのイベントは同時イベントとする。

Accidental Coincidence の頻度は、検出器 A の”窓”がバックグラウンドにより $f_A \cdot \Delta t$ [sec] 開いている間に、B が偶然バックグラウンドを出す確率であるから、

$$f_A \cdot f_B \cdot \Delta t$$

である。2つの検出器が同じ頻度であれば、

$$f^2 \Delta t$$

で与えられる。これに総観測時間 T [sec] をかけたものが同時観測で期待されるバックグラウンド数 $\langle N_{BG} \rangle$ である。

TAMA などの解析で、典型的な時間ウインドウ ΔT は 1msec 程度である。1年間 ($\sim 3 \times 10^7$ [sec]) の観測で $\langle N_{BG} \rangle < 3 \times 10^{-3}$ 個におさえるとすると、

$$f^2 \times 1 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^7 < 3 \times 10^{-3}$$

となる。1年間に1イベントを有為に観測するための $\langle N_{BG} \rangle$, f の値について表に示す。

有為さ	許容バックグラウンド数 [個/年]	1台の許容頻度 [個/sec]
3σ	2.7×10^{-3}	3.0×10^{-4}
4σ	6.3×10^{-5}	4.6×10^{-5}
5σ	5.7×10^{-7}	4.4×10^{-6}

18.3.2 離れたサイトとの同時観測

重力波源の特定

複数の離れた場所で観測することによって、重力波源の方向を特定することができる。天球上で方向を決めるには、最低4か所の検出サイトが必要である。

インスパイラルのような波形がコヒーレントに扱える場合はより洗練された定式化がある [12] が、バースト等の場合も考慮して各検出器の到達時刻の誤差 ΔT で、重力波源の方向の精度 $\delta\theta$ を計算してみる。TAMA, LIGO(Hanford, Livingston), GEO の4か所を用いると、平均的に

$$\delta\theta [\text{deg}] \simeq \sqrt{\Delta T [\text{msec}]} \times \begin{cases} 3.5 & (\text{whole sky average}) \\ 4.4 & (\text{galactic event}) \end{cases} \quad (18.19)$$

のようになる [13]。観測重力波の帯域がせいぜい 10kHz (=1/0.1 msec) であることを考えると、重力波観測で決められる線源の方向は1度を切る程度であろう。

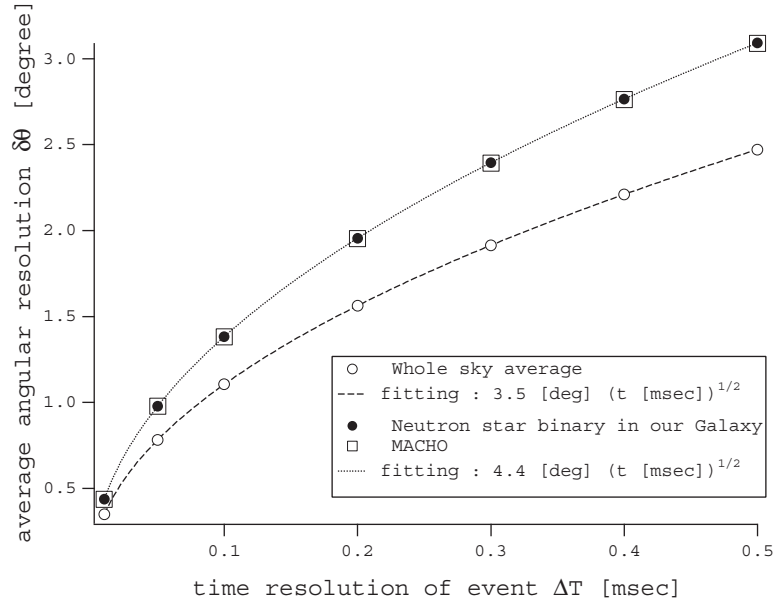


図 18.10: 重力波源方向の決定精度

18.4 検出の有為性と観測上限値

イベント観測を肯定的に結論する場合でも、観測上限値を求める場合でも、イベント候補 (candidates) は少数である。適当なイベント選別の方法でデータを解析し、時間的にランダムに起きる事象を選別したとする。

- N_{obs} 個のイベント候補⁹を得た。
- N_{ev} の本当のイベントが今回の結果に含まれている。なんども測定を繰り返したときの、真の平均は $\langle N_{ev} \rangle$ 個¹⁰。
- $\langle N_{BG} \rangle$ 個のバックグラウンド数が混入すると期待され、実際には N_{BG} 個が混入している。¹¹バックグラウンドの予想は系統誤差をもつ¹²ので、 $\langle N_{BG} \rangle \pm \delta_{\langle N_{BG} \rangle}$ となる。¹³
- N_{ev} や N_{BG} は、時間的にはランダムな事象であり、Poisson 分布の確率密度関数 P

$$Poisson: P(n; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$$

に従い、統計的ゆらぎをもつ。つまり、

$$Poisson: P(N; \langle N \rangle \pm \delta_{\langle N \rangle})$$

⁹ “candidates” であって、全てが本物のイベントとは考えない。 N_{obs} の本物の割合を純度 “purity” という。

¹⁰ N_{ev} も $\langle N_{ev} \rangle$ 0 個である場合も含む。 $\langle N_{ev} \rangle$ が 0 でなくても N_{ev} は 0 がありうる。

¹¹ やはり本当の数 N_{BG} は知らない。しかし $\langle N_{BG} \rangle$ は我々は求める。

¹² $\langle N_{BG} \rangle$ はシミュレーションなどの何らかの独立な方法で推定するのであるが、それには計統誤差がともなう。系統誤差は、この取扱の統計誤差よりも十分小さいくなければならない。

¹³ ただし、系統誤差は小さくできたとして以降記述から省く。実際に上限値に系統誤差を考える場合は誤差伝搬を計算すれば良い。

ということである。平均値 μ の Poisson 分布の標準偏差は $\sqrt{\mu}$ である。 μ が増加すると、Poisson 分布は Gauß 分布：

$$\text{Gaussian: } P(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

にちかづく。すなわち、 $\langle N \rangle \gg 1$ では

$$\text{Gaussian: } P\left(N; \langle N \rangle \pm \delta_{\langle N \rangle}, \sqrt{\langle N \rangle \pm \delta_{\langle N \rangle}}\right)$$

と考えると良い。

これら、 N_{obs} や $\langle N_{ev} \rangle$ がいずれも数個~10 数個と少ない場合を議論する。この場合は、イベントの上限値を決めるか、数個しか期待されない本物を探すかであり、有為性の議論となる。2 つのケースのいずれの立場になるかは、 $\langle N_{BG} \rangle$ をどれだけ保障できるかによる。

18.4.1 観測上限値：イベント候補数が少ない (数個) 場合

N_{BG} が N_{obs} と同程度の数で、 N_{obs} にイベントは含まれないか、あっても N_{ev} は特定できないという立場である。 N_{obs} と $\langle N_{BG} \rangle$ が数個の状態、 $\langle N_{ev} \rangle$ を推定する。

$\langle N_{ev} \rangle$, $\langle N_{BG} \rangle$ それぞれが独立に Poisson 分布に従い、結果として N_{obs} の個数が選別に残ったと考える。 $\langle N_{ev} \rangle$ 上限値を信頼度 (Confidence Level, C.L. と記す)90%で与えるというのは、測定は10%ぐらいの”運の悪さ”で少なく観測されてしまったと仮定する。

$$C.L. = 1 - \frac{e^{-\langle N_{BG} \rangle + \langle N_{ev} \rangle} \sum_{n=0}^{N_{obs}} \frac{(\langle N_{BG} \rangle + \langle N_{ev} \rangle)^n}{n!}}{e^{-\langle N_{BG} \rangle} \sum_{n=0}^{N_{obs}} \frac{\langle N_{BG} \rangle^n}{n!}}$$

これは Figure18.11 に示すような関係に成る。

18.4.2 有為なイベント検出： N_{obs} 中に N_{ev} を肯定する

N_{BG} が N_{obs} に比べて小さく、真のイベント N_{ev} が確定できるという立場である。 N_{ev} がイベントであると有為に述べるには、期待されるバックグラウンドによって N_{obs} が説明できてしまう可能性がすくなければよい。

バックグラウンド・フリー バックグラウンドがほとんどなく、1、2 のイベント候補 N_{obs} が真実のイベントであることを示すには、

$$\int_{N_{obs}}^{\infty} P(x; \langle N_{BG} \rangle) dx$$

が十分小さければよい。(わかりやすくいえば、分布がある閾以上に「滲み出す」確率。図 18.12 参照。)

$\langle N_{BG} \rangle$ が 0 に近く、その確率分布には Poisson 分布を適用とすると、 $N_{obs} = 1, 2$ がバックグラウンドで説明できる確率は表 18.2, 18.3 のようになる。

たとえばバックグラウンドの期待値 $\langle N_{BG} \rangle = 0.01$ 個ならば、1 個のイベント候補がバックグラウンドによる偽物である確率は 1/100、2 個のイベント候補が 2 つとも偽物である確率は 1/20000 ということになる。逆にいえば、この場合は 100 個に 99 個は真のイベントである。

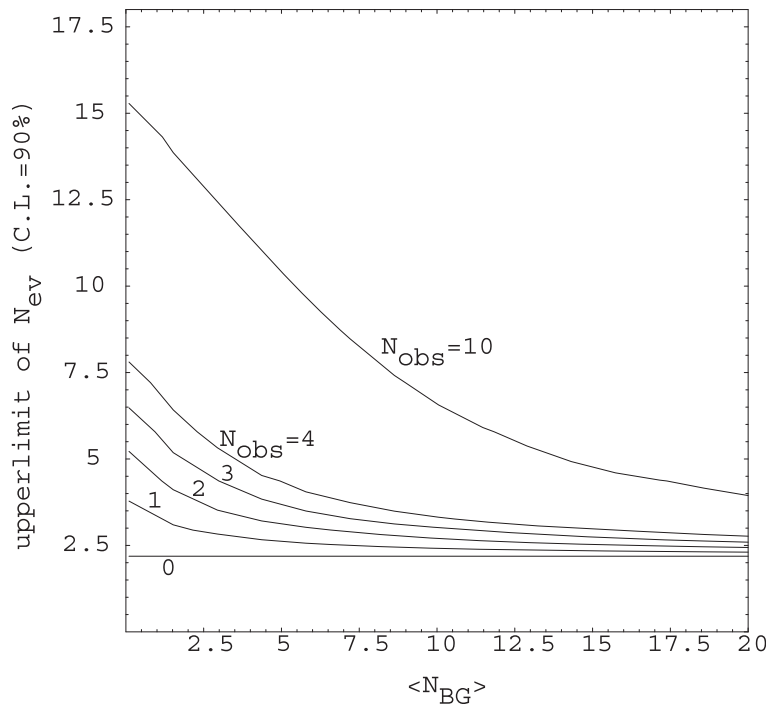


図 18.11: イベント上限値と観測数、バックグラウンドの関係

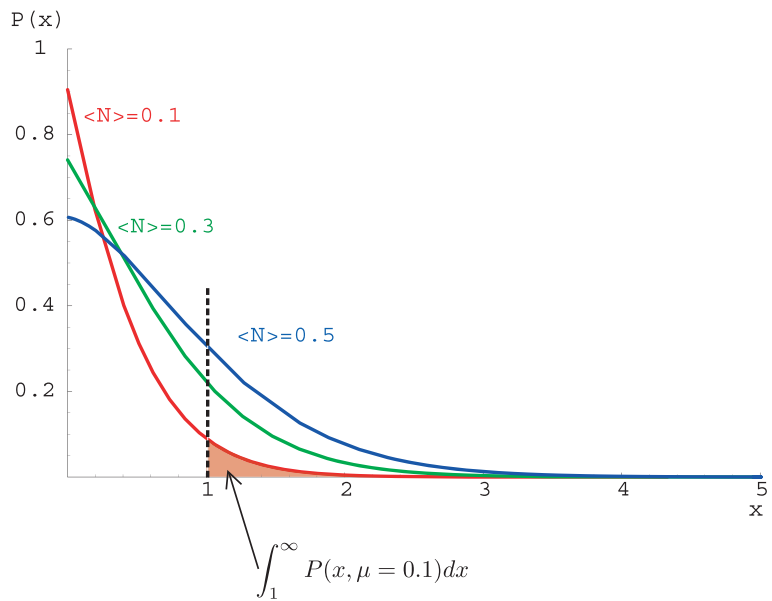


図 18.12: バックグラウンドの「滲み出し」

表 18.2: Poisson 分布の滲み出し確率

Poisson の平均値: $\langle N_{BG} \rangle$	$N_{BG} \geq N_{obs}$ の確率	
	$N_{obs} = 1$	$N_{obs} = 2$
0.1	0.095	0.0047
0.01	0.010	5.0×10^{-5}
1×10^{-3}	1.0×10^{-3}	5.0×10^{-7}
1×10^{-4}	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-9}
1×10^{-5}	1.0×10^{-5}	5.0×10^{-11}
1×10^{-6}	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-13}

表 18.3: Poisson 分布の滲み出し確率 (2)

Poisson の平均値: $\langle N_{BG} \rangle$	$N_{BG} \geq N_{obs}$ の確率	
	$N_{obs} = 1$	$N_{obs} = 2$
0.3817	0.3173	0.0567
0.04657	0.0455	0.00105
2.7×10^{-3}	0.0027	3.7×10^{-6}
6.3×10^{-5}	6.3×10^{-5}	2.0×10^{-9}
5.7×10^{-7}	5.7×10^{-7}	1.6×10^{-13}

別な表現では、たとえば1 イベントの候補に対して0.27%の確率でバックグラウンドが出るには $\langle N_{BG} \rangle = 2.7 \times 10^{-3}$ 個である。後述の Gauß分布について示すように、0.27%の確率でバックグラウンドがでるのは 3σ である。そこで、バックグラウンド期待値 $\langle N_{BG} \rangle = 2 \times 10^{-3}$ 個にたいして1 イベントを「 3σ の(確からしさの)観測」と表現する¹⁴。

¹⁴表 18.3 の $N_{obs} = 1$ の欄は表 18.2 の Gauß分布と対応させているので参考にされたし。

参考文献

- [1] Thorn K, "Three hundred years of Gravitation", ed. Hawking and Israel, Cambridge University Press
- [2] P.R.Saulson, "Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors", World Scientific
- [3] Cutler C., et al., Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2984
- [4] Blanchet L. and Damour T., Phys.Rev. D46 (1992) 4304
- [5] Echeverria F, Phys. Rev. D40 (1989) 3149
- [6] Flanagan E and Hughes S, Phys. Rev. D57 (1998) 4535
- [7] Tagoshi H, Kanda N, Tanaka T, Tatsumi D, Telada S and the TAMA collaboration, Phys. Rev. D63 (2001) 062001
- [8] 例えば Zwerger T, Müller E, Astronomy & Astrophysics, 320 (1997), 209. など
- [9] Ando M et al., submitted to Class.Quant.Grav.(2003)
- [10] Middleditch, et al., New Astronomy, Vol 5 (2000) 5.
- [11] Soida K et al., submitted to Class.Quant.Grav.(2003)
- [12] Pai A, Dhurandhar S, Bose S, Phys.Rev. D64 (2001) 042004
- [13] Kanda N et al., submitted to Class.Quant.Grav.(2003)

第19章

環境・施設

佐藤修一¹

19.1 干渉計のサイト選び

重力波検出のためのレーザー干渉計は、極微小計測を実現するために、本来外乱の影響を大変受けやすい観測機器である。それは目的とする相対的な長さ変動の測定精度が $10^{-20}m/rHz$ (@100Hz) 程度と、超高感度測定装置であることに由来している。したがって、ありとあらゆる外乱に対して敏感であり、干渉計の計測装置としての安定度はもとより、干渉計を動作点に引き込めるかといった稼働の可否に至るまで、外乱の大きさが決めるといっても過言ではない。ここでいう外乱とは、地面振動、温度変化などの外的要因による攪乱または雑音のことをさす。このため、可能な限り外乱の少ないサイトに装置を設置することが観測装置としての干渉計の質を左右する重要なポイントである。

19.1.1 干渉計感度の観点から

LCGT の場合、干渉計の感度は低周波から地面振動雑音、輻射圧雑音 + 散射雑音 (量子雑音) が設計感度を定める。これらの原理的雑音を究極まで下げて干渉計感度を最適化する技術として、地面振動 + 防振懸架機構、高出力レーザー開発 + 干渉計方式がそれぞれ対応する。量子雑音に関しては別の章に譲るとして、環境擾乱が大きく影響する地面振動起源の雑音に話を限る。地面振動を低減するには、原理的にはローパス特性をもつ機構を利用して、地面振動の高周波成分を低減する手法をとる。目指す重力波の帯域で地面振動が十分低減されていれば良いわけである。周波数領域で考えると、観測帯域に入る 3Hz 付近で防振懸架機構による 180dB 以上の低減率が必要である。機械的制約などから遮断周波数を任意には下げるのは難しい事情を勘案すると、100mHz 前後から非常に急峻なローパス特性で高周波成分を落とすことになり、この周波数領域での干渉計雑音スペクトルは「地面振動の壁 (Seismic wall)」を形成する。この壁を如何に低周波に持って来ることができるかは、特にコンパクト連星からの重力波探査をする場合の信号雑音比 (Signal to Noise Ratio) に重要な意味を持っており、世界中の干渉計計画が工夫を凝らしている部分

¹法政大工

でもある。したがって、適切な防振懸架機構を設計することと共に、そもそもの雑音源である地面振動が小さい、干渉計に「適したサイト」を選択することは非常に重要である。

19.1.2 干渉計安定度の観点から

もう一つ、感度への影響に並んで重要な点は、干渉計の安定性の観点から、観測帯域以下の周波数帯域で地面振動レベルが小さいことは、やはり非常に重要であるということである。

レーザー干渉計のテストマス（鏡）は、鏡であると同時に重力波のプロープでもある。したがって、観測帯域では地球の重力に垂直な水平面内で十分によく自由質点で近似される必要がある。そのために、テストマスは振り子もしくは高周波遮断特性を持つ防振機構によって支持（懸架）されている。しかし、その遮断周波数以下では防振効果が期待できないため、遮断周波数以下の低周波の外乱は減衰することなく鏡を揺らすことになる。この結果、干渉計は

- 揺れが大きすぎて、レーザー光を干渉計の光共振器に共振させ稼働状態に引き込むこと（ロックアキュイジション）が困難になる
- 光の波長のオーダーで長さが制御されている共振器が制御範囲以上の大きな外乱を受けることにより、共振器が理想的な共振状態から外れて干渉計が安定稼働できなくなる
- 鏡の姿勢を乱すこと（ミスアラインメント）により共振器動作が不安定になる
- 低周波の揺れが何らかの機構を通じて観測帯域の雑音として現れる効果（アップコンバージョンノイズ）

といった深刻な影響を受ける。

したがって、観測帯域での振動レベルが小さいことが干渉計感度にとって重要であると共に、低周波域で地面振動レベルが小さいということは、干渉計の安定稼働には欠くべからざる重要な要素である。

19.2 神岡の概略

干渉計の設置候補場所は東京から西北西へおよそ 220 km、岐阜県神岡町の「池の山」山中にある（図 19.1）。神岡はニュートリノの検出器として知られる Super Kamiokande があることで有名な地でもある。地下に伸びるトンネルのネットワークは、もともとは鉛、亜鉛等を産出する神岡鉱山の坑道である。現在は採鉱のための活動はほとんど行われなくなっており、その跡地の一部を利用していくつかの宇宙線実験が行われている。Super Kamiokande をはじめ KamLAND、暗黒物質探索、重力波プロトタイプアンテナなどがそうである。いずれも地上における雑音（たとえばバックグラウンド宇宙線など）を避けるために遮蔽効果を期待して地下に設置場所を求めた実験ばかりである。そのため、これら実験施設群は山頂下 1000m の深い地下に設置されている。にもかかわらず、山岳を利用しているために施設までのアクセスはほぼ水平で、かつ周辺の河川の水位より高いレベルに施設を建設することができている。

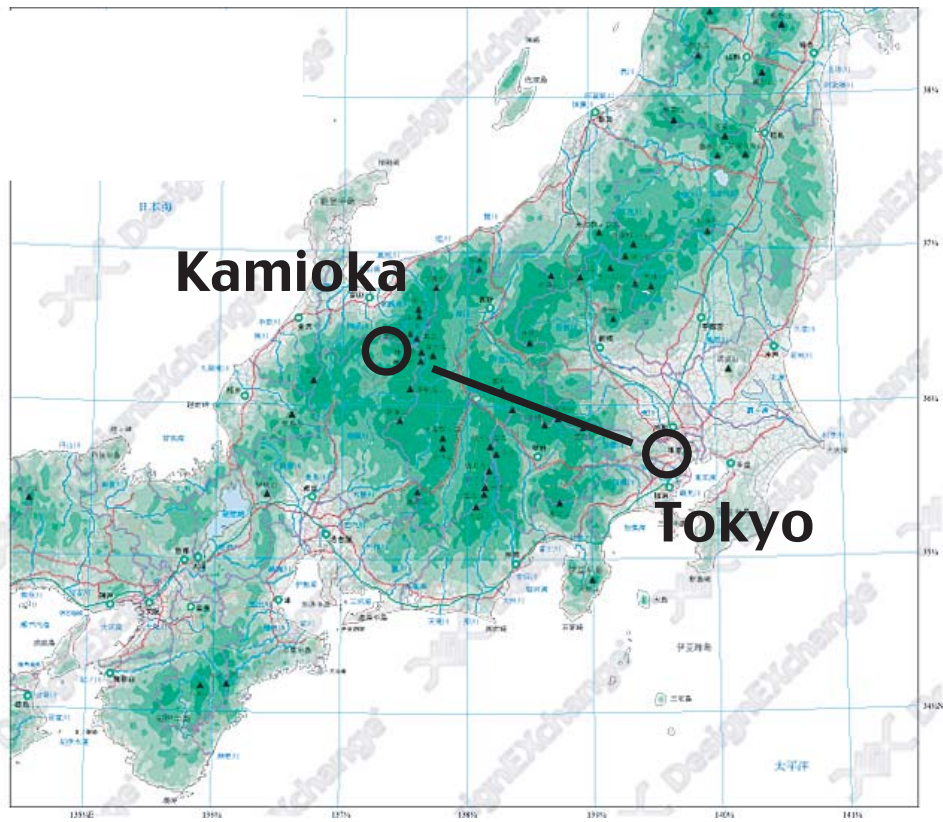


図 19.1:

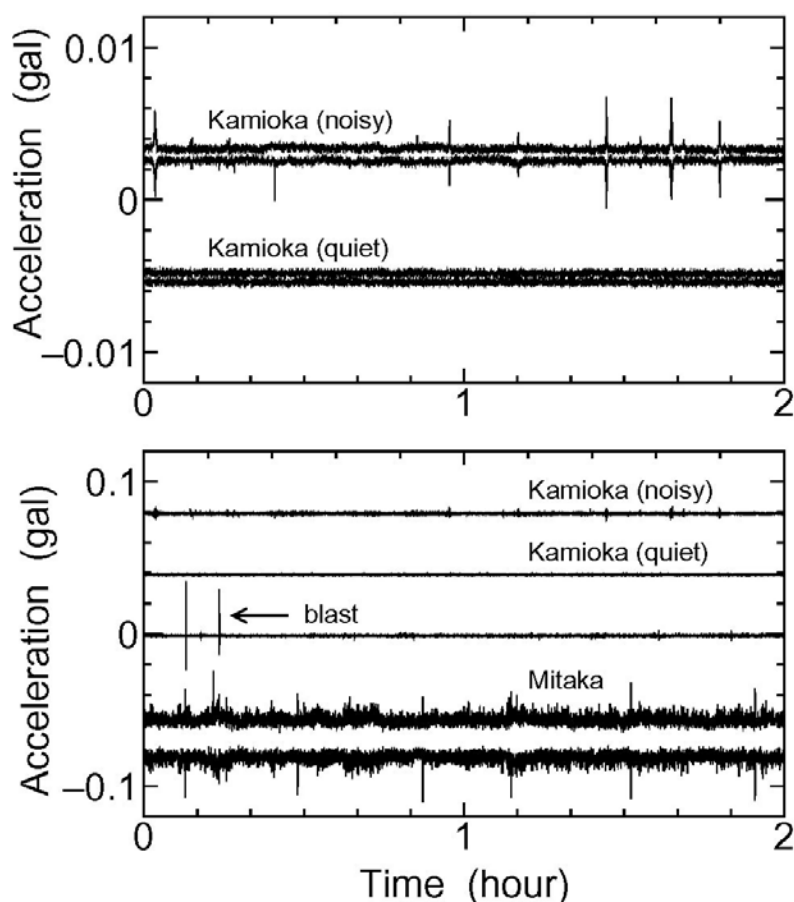


図 19.2: 神岡における地面振動加速度の例。坑内での比較的静かな場合とうるさい場合の例（上）。神岡と三鷹における加速度の比較（下）。発破によるスパイク状の加速度は三鷹の定常状態に対応することがわかる

19.3 神岡地下の優位性

19.3.1 地面振動

この地を選んだ最大の理由は、都市部に比較して圧倒的に地面振動が静かであるという利点のためである。図 19.2、19.3 に地面振動の加速度（時系列）、および変位スペクトル（周波数領域）を示す。加速度を比較すると、神岡の坑内実験室の地面振動レベルは定常的に三鷹の地面振動レベルよりも平均振幅で 2 桁程度小さい。坑内ではこれまで採鉱等のために火薬を用いた岩石の発破作業が定期的に行われていた。図に示されている加速度のバーストは、実験室から数 100 m ほど離れた場所における発破に対応している。これによると三鷹の常微動は、坑内の発破による振動レベルに相当することがわかる。周波数領域で見ると特に低周波域で 2-3 桁スペクトル成分が小さいことが分かる。

実験室の地面振動レベルが小さいということは、数 Hz 以下の低周波領域については神岡という地が日本の中でも地域的に外乱の少ない静かな領域にあることと、それ以上の高周波領域では実験室が地表からおよそ 1000 m はなれた大深度地下にあるために、地表層からの振動が減衰することによっていると考え

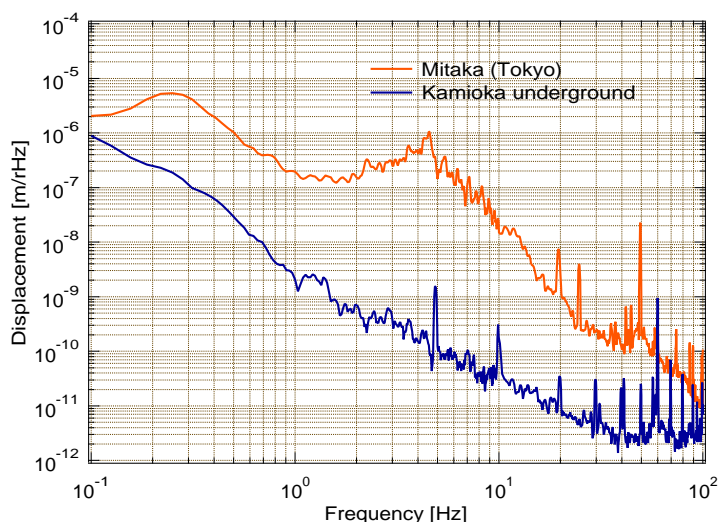


図 19.3: 神岡と三鷹における地面振動のスペクトルの比較

られる。従って、サイトが「神岡であること」と、「地下であること」の両方の効果が寄与している。

19.3.2 温度環境

さらに地下では一般に地上に比べて気温変化が小さい。実際の坑内は豎坑を利用して常時自然換気が行われているが、通風経路が長いためにサイト付近の風の通り道となる坑道では通年およそ気温 14-5 である。このため、実験室の気温も温度調整機能なしで一年を通してほぼ一定に保つことができる。実験室内の気温変化率は、空調がなくても無人であれば、干渉計の稼働状態で1週間あたり ± 0.1 度程度である。これだけ安定なのはまさに地下環境の恩恵であり、不用意に空調を整備するよりも安定かもしれない。

一般に、施設に大きな温度変化がある干渉計の場合、懸架系のドリフトによってテストマスの位置や姿勢が変化する、あるいはレーザーの光周波数やビームの方向が変化するなど、多様なドリフト現象を引き起こす。これらのドリフトは、原理的には制御によって補償することができるが、現実的には制御のダイナミックレンジの問題、制御系の複雑化の問題など、多くのデメリットを抱えている。したがって、温度変化も含めて環境が安定であるということは、重力波のレーザー干渉計にとっては重要な因子であり、その意味で神岡の地下という環境は、干渉計の長期運転には非常に適した場所であると考えられる。

19.4 地下環境の特殊性

19.4.1 サイト調査

地下環境が重力波のレーザー干渉計のサイトとして非常に優れている面を持っていることは実験的にも証明されており明らかであるが、そのメリットを十分に享受するためには具体的なサイト選びを慎重に行う必要がある。前述のように、優れた地面振動特性を示すのは、「神岡であること」と「地下深い」ことが

両立していることによる。重力波アンテナのプロトタイプが設置されている場所は池の山のほぼ中央付近、もっとも条件のよい場所といえる。この同じ山中に 3kmx3km の L 字の施設を設置する場合、

- 池の山は周囲 10km 程の比較的小さな山である
- 現在より深いところに施設を作ることは技術的には可能であるが、周囲の河川の水位より低くなる

などの問題から、テストマスが格納される L 字の中央部と端部は地表から比較的近い場所になる可能性がある。実際のサイトの決定にあたっては、既存のトンネルを使うなどして、地表からの距離と地面振動の関係を実測し、慎重に検討する必要がある。

19.4.2 断層・破砕帯

日本は環太平洋火山帯に属する地震立国であるため、地震の影響は避けようがない。これに関して、不運なことに神岡の候補地は周囲に多くの活断層がある一帯に位置している。図 19.4 のように池の山も跡津川断層と茂住・祐延断層に挟まれた幅 5km ほどの帯状地帯にある。断層が動いた場合、地表に較べて地下における影響は小さいといわれているが、両断層とも頻繁に活動している活断層なので、断層を避けて施設を設置する必要がある。

池の山の深部の地層は飛騨偏磨岩という堅い岩石質である。しかしながら当然一枚岩ではないのでところどころに破砕帯という、岩盤と岩盤の隙間が存在する。この隙間には、通常小さな岩等の擦がつまっております。経年で沈下、ズレ等の変位をおこす場合がある。プロトタイプ干渉計のサイトまでの 2km のアクセストンネルも数カ所の破砕帯を横切っており、そのうち最も大きなものは数年で数 10cm 沈下したそうである。干渉計の基線が建設後に動いてしまうのは深刻な問題なので、ボーリング調査等で可能なかぎり大きな破砕帯は避けてトンネルを掘削する必要がある。

19.4.3 地下水

プロトタイプ干渉計（基線長 20m）の設置サイトでは、比較的開削体積が小さいこともあり、幸運にも地下水の湧水はなかったが、一般には地下水が出ることが想定される。坑内のトンネルネットワークにもところどころに地下水が出ており、アクセストンネルに平行した側溝にまとめられた湧水は、自然流下で坑外に排出されている。Super Kamiokande の純水槽はおよそ直径 40m 高さ 40m の円柱状の岩盤の空間に設置されているが、この部分からはおよそ毎分 2 トンの地下水が排出されている。LCGT の場合も、開削体積としてはこれにならぶ 100000m³ 程度と見積もられるので、相当量の湧水の可能性は覚悟しておかなければならないと考えられる。防水工事を施すことは可能であるが、完全に止めることは難しいそうである。地下水が出ること自体は大きな問題ではなく、むしろ冷凍機の冷却水に使える等利用価値があるが、問題はその処理方法である。

- 振動源となるような揚水ポンプ等は使わない
- L 字の長さ 3km にわたって自然流下のための勾配をつけることは難しい

などの制約があるためである。実際には、自然流下で数カ所に集めた地下水を離れた場所の吸水ポンプで排出するといった手法が現実的ではないかと考えられる。

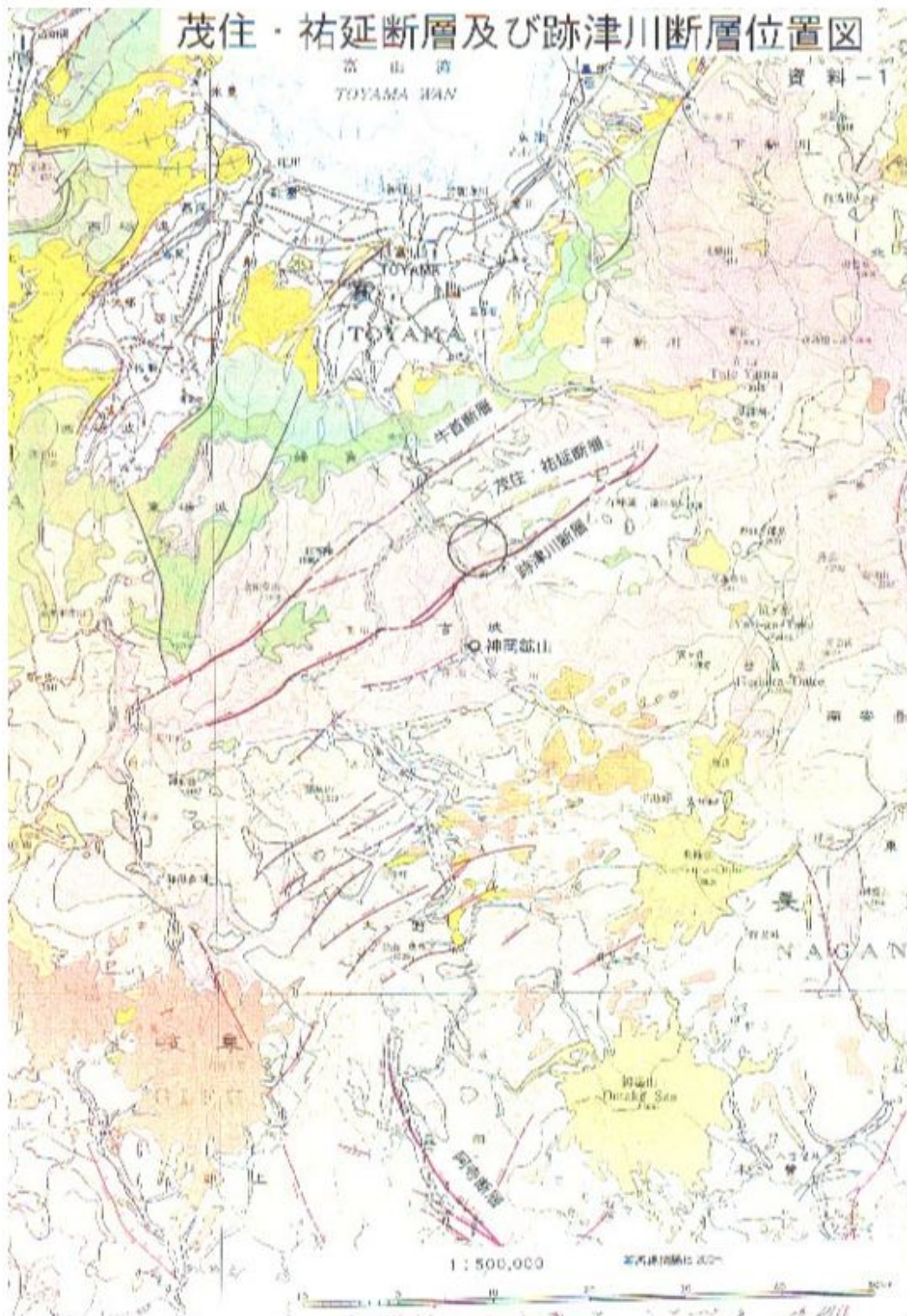


図 19.4: 神岡付近の断層図。図中、円で書かれた部分が池の山で、2本の断層に挟まれた狭い部分に位置する

19.4.4 湿度・空気

坑内の基幹トンネルは前述のように通風換気されているが、それでも湿度は飽和に近い。定期的にこれだけ湿度が高いと、結果として金属が錆びる、黴が繁茂する等の問題がおきる。プロトタイプ干渉計では、実験室を封じきって、中を除湿することで対応した。LCGT では施設全体を除湿することは現実的ではないかもしれないが、少なくとも電気系、光学系を設置する部分には対策が必要である。さらに高い湿度に曝される部分に関しては、防水対策、防錆対策が肝要である。

設置サイトの詳細によるが、L 字の中央部、端部のうちすくなくとも 1 つは行き止まり構造になる可能性が高い。この場合、トンネルネットワークの既存の通風換気を利用することができないので、安全管理のために酸素を供給する別途換気機構を設置する必要がある。可能ならば坑外の乾燥した外気を直接取入れることが湿度の観点からも望ましい。

19.4.5 電気・接地

坑内の電気は基本的に 60 サイクルの商用電源を利用している。坑外から 6kV の高圧線で電力を取り込み、実験施設付近のキュービクルの変圧器を通して 200V および 100V 系を作っている。高圧電源自体の変動に起因して、降圧後の電源周波数、電圧ともに 5% 程度の変動が定常的にあることが分かっている。LCGT では数 10Hz まで観測帯域に入り、かつ低周波ほど重要な意味を持つので、60Hz の電源ラインのスペクトルが不安定であることは将来問題になるかもしれない。そのときはインバーター電源を用いる等、根本的な電源改善策が必要になるかもしれない。

坑内の主な地質は飛騨片麻岩と類似の岩石類である。これらは電気伝導性に乏しいため、良質の接地にはなりにくい。そのため、例えば Super Kamiokande の高圧保安用の接地線は坑外から 3km 引き込んでいる。重力波の施設では保安用の設置に加えて、電気回路系のために弱電用のよい接地が必要であり、特別第三種の接地線を坑外から引き込む等、十分な設計・対策が必要である。

19.4.6 クリーン環境

重力波のレーザー干渉計には、その性能を引き出すために超高性能な光学素子が用いられる。その代表は共振器を構成するモノリシックミラーである。これら鏡の品質は、光損失が 1ppm のオーダーで管理されており、製作から実機での使用に至るまで性能を落とさない工夫が必要である。なかでも特に重要なのが埃対策である。埃が鏡の表面に付着すると光散乱の原因になり、容易に鏡の反射率、透過率を落としてしまう。これを防ぐために、埃のない環境、クリーン環境が非常に重要である。坑内の典型的な清浄度は、クラス 1000000 で、三鷹の外気よりも多少悪いくらいである。プロトタイプ干渉計では実験室を区切り、その中にクリーンブースを設置することで、最大の埃源である人が作業している場合においてもクラス 100 以下の清浄度を達成している。

これまでは特に鏡のインストール時などを想定し、真空槽ごとに小さなクリーンブースを設置する方式が取られてきたが、

- 真空槽の開閉前後を通して常にクリーン環境を保てるようにする
- 真空槽外の光学素子についてもクリーン環境におくべき

という観点から、プロトタイプ干渉計のように、比較的広い範囲をまとめてクリーンルーム化するような、包括的な対策が必要である。地上の施設と違って、地下の場合は「掘り増し」はできないので、重力波天文台施設として十分な性能を持つように設計する必要がある。

Appendix A

Detuned RSE

宗宮健太郎¹

A.1 Detuning について

Bright Port に mirror を置いて DC 光を干渉計に戻して増幅する Power Recycling と同様に、Dark Port にも mirror を置いて信号を増幅してやる手法が Dual Recycling である [1]。後者の方法だけをとって、(Broadband な)Signal Recycling=SR と呼ぶ。主干渉計と SR mirror で構成される SR cavity で信号の DC 成分が共振するように設定しておく SR に対し、反共振になるように設定しておくのが RSE である [2]。DC 成分を反共振にしておくことで、信号は高周波になるほど共振状態に近づいていき、増幅されることになる (図 A.1)。SR mirror を置かなかった場合の Fabry-Perot Michelson 干渉計が示す差動信号の応答と比べて、SR および RSE の場合はそれぞれ、低周波および高周波の signal gain を上げていることになり、すなわち cavity pole をそれぞれ低周波側および高周波側に移動させる効果を得る。大型干渉計においては、arm cavity の finesse をある程度の値にすることですでに cavity pole は目標とする周波数まで下がっているので、さらに finesse を上げて光量を増した上で cavity pole を元の周波数に戻すことができる RSE の方が有効である。

そして、Broadband な状況から detune させると、差動信号は upper sideband もしくは lower sideband のどちらかが、中間帯域で共振状態となり、signal gain はある周波数で極大になる。これを元に shot noise の spectrum を計算すると、ある帯域で noise が小さくなることになり、予測される重力波の周波数に合わせておくことで SN を改善することができるのである。アメリカで計画されている Advanced-LIGO では、この Detuned RSE 方式を採用することが決まっている [3]。

A.2 QND について

図 A.1 に示した spectrum は、量子雑音のうち shot noise だけを計算したものであるが、実際には radiation pressure noise が存在し、このような spectrum は得られない。光の粒子性と波動性から生じる

¹Caltech

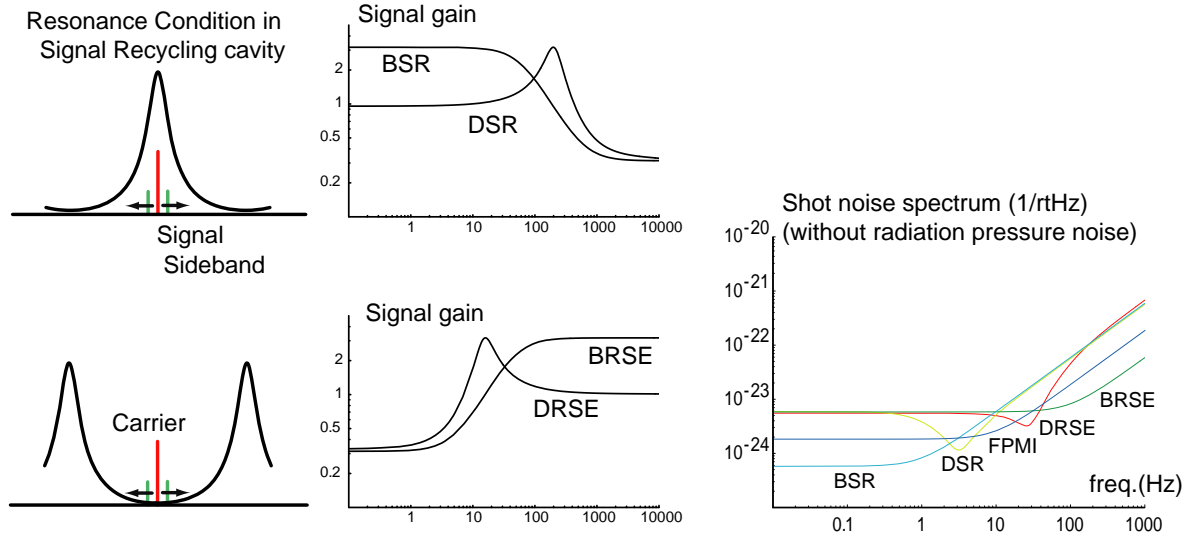


図 A.1: SR、RSE、および Detune した場合の signal gain と noise spectrum。

これら 2 つの noise は、不確定性原理により標準量子限界以下に抑えることはできないと言われてきたが、量子非破壊測定 (Quantum Non-Demolition=QND) をすることでそれを越えることができる [4]。RSE などを用いて量子雑音の議論を進めていく上で、QND の研究は避けて通ることはできないのである。

光子数揺らぎを Δn 、光の位相揺らぎを $\Delta\phi$ とすると、入射される LASER 光の揺らぎは次式で表される。ここで \sqrt{N} は入射する電場に存在する平均光子数である。

$$\begin{aligned} E_{\text{in}} &= \sqrt{N + \Delta n} e^{-i(\Omega t + \Delta\phi)} \\ &\simeq \left(1 + \frac{\Delta n}{2N} + i\Delta\phi\right) \sqrt{N} e^{-i\Omega t} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

LASER は coherent 光であるから、これら 2 つの揺らぎは、最小不確定性関係 $\Delta n \cdot \Delta\phi = 1/2$ を保ちながら、互いに直交する成分の量子雑音として存在する。ここで統計学的に $\Delta n = \sqrt{N}$ であり、そこから $\Delta\phi = 1/2\sqrt{N}$ も得られるから、2 つの揺らぎは LASER パワーに関係なく $1/2$ であることが分かる。これは LASER が入射しない Dark Port からも、揺らぎの素だけは入射することを意味する。揺らぎの素の正体は生成消滅演算子で構成される真空場揺らぎというものである [5][6][7]。Dark fringe に保たれている Michelson 干渉計では、LASER 側から入射した真空場は Bright Port に戻っていくから、問題となるのは Dark Port から入りこむ真空場ということになる (図 A.2)。差動信号が現れる b_2 軸方向には、 a_2 として入射した位相揺らぎ、すなわちこれが shot noise であるが、その他に a_1 として干渉計に入射し、LASER と coupling して差動で mirror を動かす輻射圧雑音が存在する。ここで a_1 と a_2 は独立ではないので、出力は次式に従って変形された真空揺らぎとなる [8]。ここで $\kappa(\omega)$ は arm cavity 内に蓄積する光量に比例した parameter で、 β は干渉計を往復する間の位相変化である。

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\kappa(\omega) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} e^{2i\beta} \quad (\text{A.2})$$

この楕円変形を ponderomotive squeeze と呼ぶ [9]。量子雑音の大きさは楕円を b_2 軸上に落とした射影と信号の比で決まり、LASER のパワーを上げて shot noise を減らしても、一方で輻射圧雑音が増えてしまい、ある限界を超えられない。

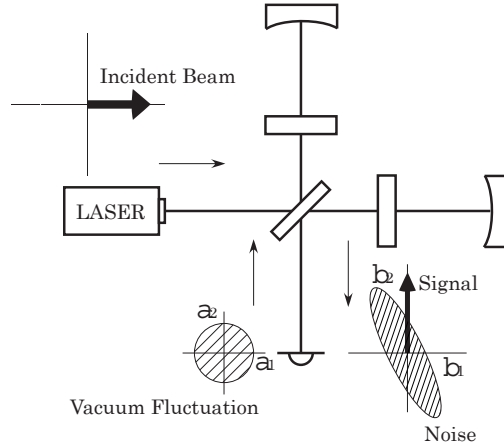


図 A.2: 量子雑音の源である真空場揺らぎ。Dark Port から入射する成分だけが問題となる。

しかし、local oscillator と signal の間に位相差をつける homodyne detection[10] や、入射する真空場を非線形光学素子などで squeeze しておき、出力をある周波数で最適化する input squeezing[11] といった QND の方法が提案されてきており、標準量子限界を超えることは可能である。

A.3 Detuned RSE の量子雑音

Dark Port に mirror を置く RSE では、ponderomotive squeeze された真空場が再入射することになるが、Broadband の場合は輻射圧の源である a_1 が変わらないので、何も起こらない。しかし、Detuned RSE の場合は (b_1, b_2) が位相シフトして再入射するので、SR mirror と arm cavity の間で電場を媒体とした巨大なバネが形成される。これを Optical Spring と呼び [12]、元々あった DRSE の dip と合わせて、noise spectrum は 2-dip を示すようになる (図 A.3)。これは一種の input squeezing 状態であり、標準量子限界を超えることができる。このバネはバネ定数が負であるため、放置しておくとも不安定になってしまうが、制

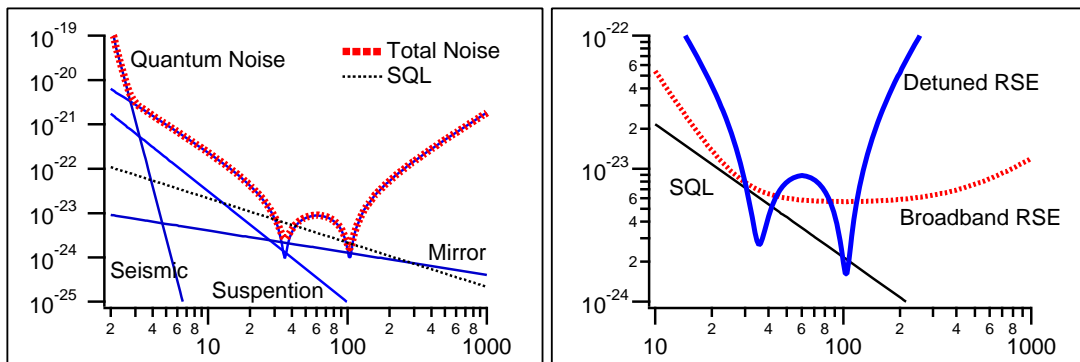


図 A.3: 輻射圧の効果をふまえた場合の Detuned RSE の量子雑音 spectrum。同じ 1kW の光を用いた Broadband RSE(Finesse=500, $r_{RSE} = 0.82$) と Detuned RSE(Finesse=300, $r_{RSE} = 0.98$, detuning=0.65rad from Broadband RSE) の比較。

御帯域内に dip が来るようにすることで問題を防ぐことができる [13]。

LCGT は低温化により熱雑音が軽減されており、観測帯域の感度を制限するのは量子雑音だけと言える。たとえば chirp 信号に対する SN は、最高感度が優れていることで大いに改善するので、RSE を detuning することの効果は大きいと考えられる。NS-NS binary の chirp に対する SN は detune phase や SR mirror の反射率などを最適化した上で求められるべきで、現在計算中である。

上記の spectrum は DC readout scheme[14] という技法を用いた場合で計算してある。これは Advanced LIGO で採用が検討されているもので、周波数雑音の低減などの利点を持つが、Optical Spring の形を変えることができる homodyne phase[10] は $\pi/2$ で固定されることになる。一方、現在の変調復調法に近い Unbalanced Sideband Detection[15] を用いると homodyne phase は選択でき、さらに異なる phase からの spectrum を統合することもできるが、復調の際に nonstationary shot noise[16][17][18] が生じるという難点がある。

Readout scheme や制御方法 [19] などは、今後数年で包括的な判断の下に決定される。そして、現在行なわれている Glasgow 10m や国立天文台 4m RSE、そして今後予定されている Caltech 40m における prototype 実験で detuned RSE の利点が証明されてくれば、LCGT の configuration が変更される可能性もあるかもしれないわけである。

参考文献

- [1] R.W.P.Drever, *Gravitational Radiation*, edited by N.Deruelle and T.Piran (North-Holland, Amsterdam, 1983)
- [2] J.Mizuno, "Comparison of optical configurations for laser interferometric gravitational-wave detectors," Ph.D. thesis (1995)
- [3] LIGO II Proposal
- [4] V.B.Braginsky, F.Ya.Khalili, "Quantum Measurement", ed. K.S.Thorne, Cambridge University Press, 1992
- [5] C.M.Caves, Phys. Rev. Let. **45** 75 (1980)
- [6] C.M.Caves, Phys. Rev. D **23** 1693 (1981)
- [7] C.M.Caves and B.L.Schumaker, Phys. Rev. A **31** 3068 (1985)
- [8] H.J.Kimble, Y.Levin, A.B.Matsko, K.S.Thorne and S.P.Vyatchanin, Phys.Rev.D **65**, 022002 (2002)
- [9] V.B.Braginsky, Sov. Phys.-JETP, **26**, 831 (1968)
- [10] S.P.Vyatchanin and A.B.Matsko, JETP **82**, 1007(1996)
- [11] W.G.Unruh, in *Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory*, eds. P. Meystre and M.O.Scully,(Plenum, 1982),p.647.
- [12] A.Buonanno and Y.Chen, Phys. Rev. D **64**, 042006 (2001)

-
- [13] A.Buonanno and Y.Chen, Phys. Rev. D **65**, 042001 (2002)
- [14] AIC group report at LSC meeting 2002 in Hanford
- [15] K.Somiya, gr-qc/020829
- [16] T.M.Niebauer, R.Schilling, K.Danzmann, A.Rüdiger, and W.Winkler, Phys. Rev. A **43**, 5022 (1991)
- [17] B.J.Meers and K.A.Strain, Phys. Rev. A **44**, 4693 (1991)
- [18] N.Mavalvala et al, work in progress.
- [19] J.Mason, "Signal Extraction and Optical Design for an Advanced Gravitational Interferometer," Ph.D. Thesis (2001)

Appendix B

熱輻射伝搬効果を考慮したクライオスタットの熱負荷

都丸隆行¹

神岡に建設されたプロトタイプ低温干渉計型重力波検出器 CLIO の性能解析により、300 K から 4 K への熱輻射量が設計値より 1000 倍近く大きい事が明らかになった。詳細な解析の結果、これは重力波検出器用クライオスタットの特殊な構造に起因した輻射伝搬現象によることが明らかとなった。本章では、輻射伝搬効果による LCGT クライオスタットへの熱負荷と、これを低減させた低温シールドパイプのデザインについて記述する。

B.1 熱輻射の伝搬効果

B.1.1 問題提起

一般に、クライオスタットを設計する際の熱輻射量は、ステファン-ボルツマン則

$$P = \epsilon' \sigma_B A (T_2 - T_1)^4 \quad (\text{B.1})$$

を用いて計算される。ここで、 σ_B はステファンボルツマン定数で、 $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ 、 A は輻射面の面積、 T_1 、 T_2 は輻射面の温度である。 ϵ' は合成輻射率で、それぞれの面の輻射率を ϵ_1 、 ϵ_2 とした時に、

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (\text{B.2})$$

で与えられる。

式 B.1 のステファンボルツマン則は、図 B.1 のように面と面の間でのエネルギーのやりとりを記述したものである。一般的な低温壁で囲まれたクライオスタットの場合には、ステファンボルツマン則に基づ

¹高エネルギー加速器研究機構

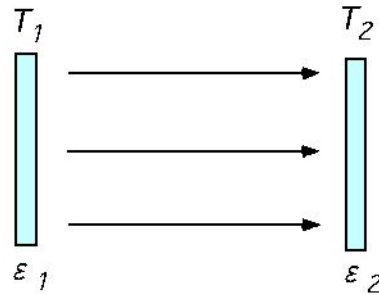


図 B.1: ステファンボルツマン則に基づく面と面との間の熱のやりとり。

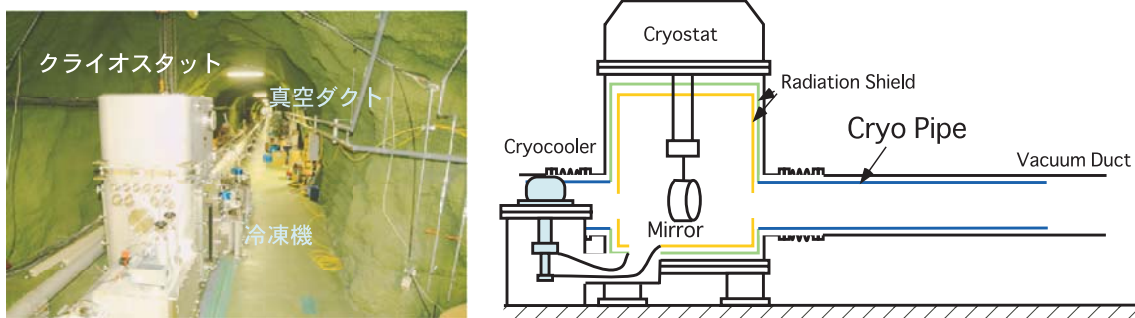


図 B.2: 低温干渉計型重力波検出器用クライオスタットの模式図と写真。

いた輻射量見積りで十分である。しかし、低温干渉計型重力波検出器のクライオスタットは、レーザーを導入するための大きな開口部を持たなければならないという制限があり、図 B.2 のような特殊な構造をとる。LCGT の場合、散乱光ノイズなどの対策も考慮すると、クライオスタットの開口部の直径は 1 m ほどにもなり、これでは輻射による熱負荷が大きすぎて低温を維持できなくなってしまうので、図 B.2 にあるような低温（数 10 K）のシールドパイプをビームダクト内に挿入して、300 K 側からクライオスタット内部を見込む立体角を小さくする措置が採られる。LCGT のデザインでは、低温パイプの直径は 0.8 m、長さは 20 m であるので、ステファンボルツマン則で考えた場合の熱負荷は数 mW 程度にしかならない。

しかし、最近の研究により低温パイプ内を 300 K 輻射が伝搬して侵入する現象が明らかとなった。実際に CLIO のクライオスタットでは設計値より 1000 倍近く大きい熱輻射が確認されている。この節では、輻射伝搬効果の概要と LCGT に当てはめた場合の熱負荷についての見積を与える。

B.1.2 低温パイプ内の輻射伝搬モデル

図 B.3 は 300 K の黒体輻射スペクトルである。このグラフから、300 K の熱輻射は波長 $10 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ （ピーク波長 $\sim 20 \mu\text{m}$ ）の赤外線として考えて良いことが分かる。また、図 B.4 よりこの波長域でのアルミの反射率は、光沢面で 97~98% 程度とかなり大きい。

以上より、低温パイプ内では赤外線が Ray Trace 的な伝搬をすることが可能で、図 B.5 のようなモデル計算を行った。ここで、パイプの半径を a 、長さを L 、内壁面の反射率を R とした。300 K の開口から等方的に赤外線が放射されるとして、角度 θ 方向の赤外線の伝搬を考える²。この赤外線がパイプの長さ dx

²正確には 300 K から 80 K への輻射量と 300 K から 4 K への輻射量は異なるが、ステファン-ボルツマン則から計算してみると

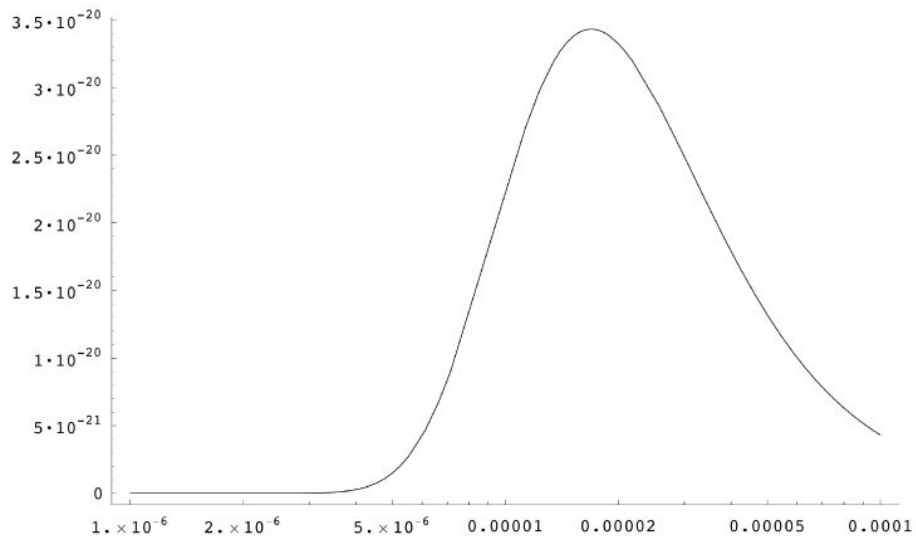


図 B.3: 300 K の黒体輻射スペクトルの計算値。横軸は波長で単位は m。

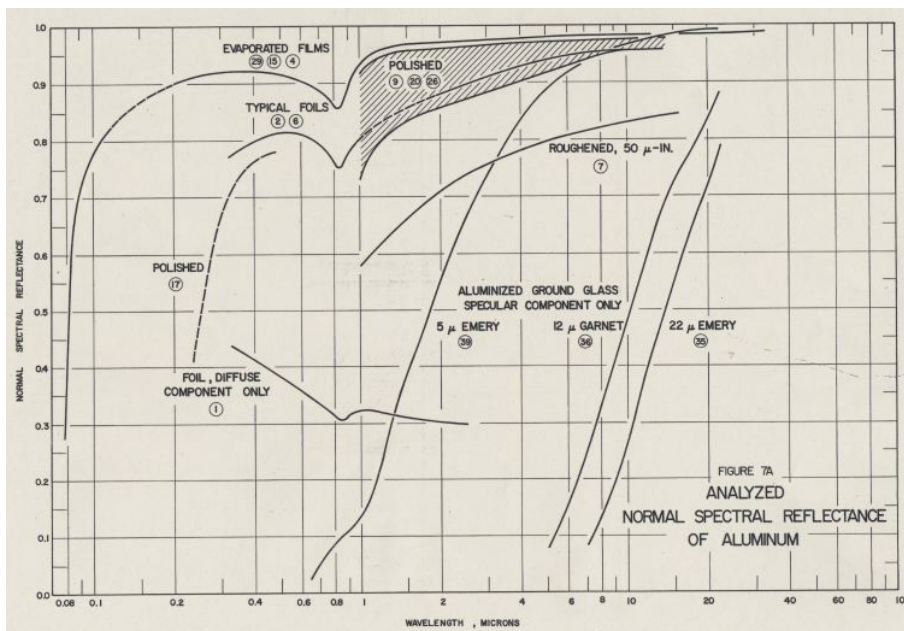


図 B.4: アルミニウムの反射率スペクトル。

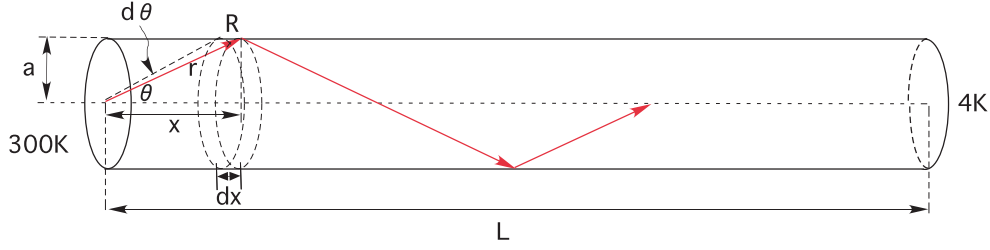


図 B.5: 輻射伝搬のモデル。

の領域を見込む立体角は

$$d\Omega = \frac{2\pi r \sin\theta \, dx \cos(\pi/2 - \theta)}{r^2} = \frac{2\pi a^2 \, dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{B.3})$$

である。次に $0 < x < L$ の領域内で赤外線が壁面で反射される回数 $N(x)$ を考えると、

$$N(x) = 1 + n\left(\frac{L-x}{2x}\right) \quad (\text{B.4})$$

となる。ここで、 $n()$ は、小数点以下をカットし整数化する関数である。これらを用いると、低温パイプ内を反射して 4 K 開口部へ入射する輻射のパワーは

$$P_{ref} = P_0 \int_0^L R^{N(x)} \frac{d\Omega}{2\pi} = P_0 \int_0^L R^{N(x)} \frac{a^2}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \, dx \quad (\text{B.5})$$

となる。ここで P_0 は 300 K 輻射の全パワーである。

また、4 K 開口部へダイレクトに入射する輻射パワーは

$$P_{th} = P_0 \frac{d\Omega_{th}}{2\pi} = P_0 \frac{a^2}{2L^2} \quad (\text{B.6})$$

となる。

B.1.3 実験的検証

上記輻射伝搬モデルは、東大宇宙線研の低温干渉計プロトタイプ CLIK を用いて検証された。図 B.6 は検証実験のセットアップである。低温パイプの長さやパイプ直径はほぼ CLIO や LCGT と相似の関係になるように設計されている。測定方法は、輻射源（紙、輻射率 0.9）から放射された熱輻射を、低温パイプ出口に設置されたボロメータ（Ultra-Black NiP 黒色コーティング、赤外吸収率 80%）で計測するものである。

この実験の結果、輻射による熱負荷は 394 mW で、ステファンボルツマン則からもとめた熱負荷 0.53 mW の 740 倍の大きさになることが示された。この結果は、B.1.2 節のモデル計算で、低温パイプの内壁面反射率を 95.0% とした場合に一致する。

さらに、東京理科大学赤外自由電子レーザー（FEL）研究センターの光源を利用し、波長 $8.3 \mu\text{m}$ での低温パイプ内壁の反射率を実測したところ、 $> 90\%$ という結果が得られ³、実験とモデルの整合性が確認された。

ほとんど同じ値であるため、300 K 開口からは一定値 P_0 で等方的に輻射が生じると仮定した。

³FEL 光源の安定性とディテクターの精度の問題で約 10% 程度のエラーが生じている。

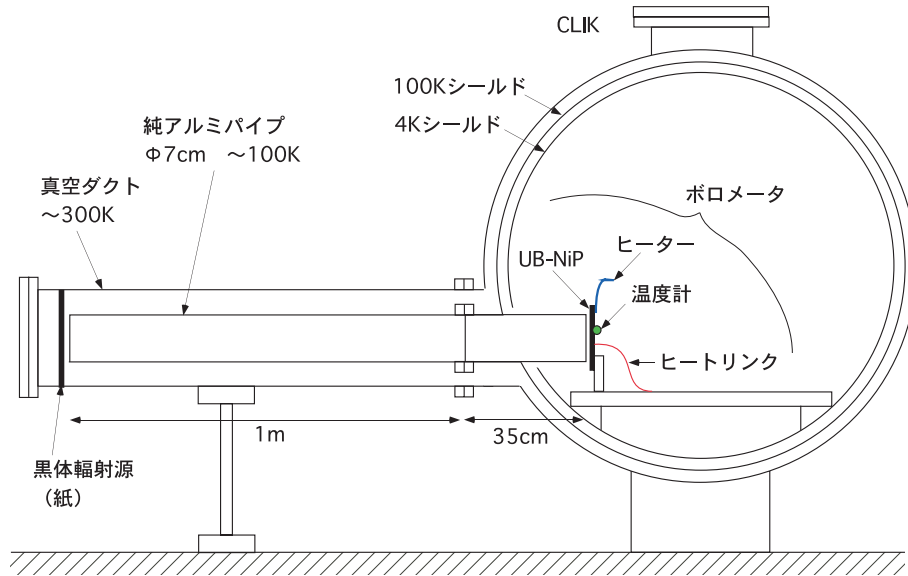


図 B.6: CLIK による輻射伝搬効果検証実験のセットアップ。

B.1.4 輻射伝搬効果を考慮した場合の LCGT の熱輻射量

B.1.2 節の計算モデルと、B.1.3 節の実験結果を用いると、輻射伝搬効果まで含めた LCGT クライオスタットへの熱輻射量を計算することができる。低温パイプの直径は 0.8 m、長さは 20 m、内壁面の反射率は B.1.3 節の実験で得られた 95.0 % とし、輻射源としては SUS 製の真空ダクト（輻射率 0.1）を考える。このような条件で得られた計算結果を表 B.1 にまとめる。結果として 4 W 以上の熱負荷が予想され、LCGT の初期デザインを維持するためには輻射伝搬効果低減策が必要となる。

表 B.1: LCGT のスペックで輻射伝搬効果を含めた場合のクライオスタットの熱負荷計算値。

300 K の全輻射量 P_0	23.1 W
輻射伝搬による熱負荷 P_{cond}	4.48 W
ダイレクトに入射する輻射量 P_{dir}	0.00462 W
伝搬成分とダイレクト成分の比 P_{cond}/P_{dir}	970

B.2 バッフルによる輻射伝搬効果の低減

B.2.1 バッフルによる輻射低減率の計測

低温ダクト内を伝搬する輻射を阻害する方法として、バッフルによる輻射の打ち返しがある。バッフルは輻射に対して有効であるだけでなく、レーザー散乱光ノイズを低減するのにも有効であり、一石二鳥となる。バッフルを導入した場合のシミュレーションモデルはバッフル間での多重反射を考慮する必要があり、バッフルの枚数が多くなると複雑化してしまう。このため、B.1.3 節と同様に、CLIK を用いて実験

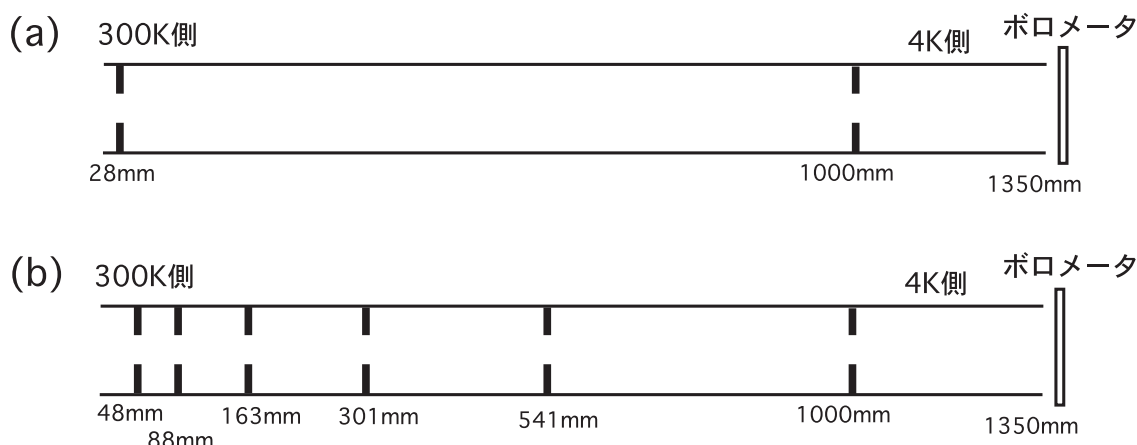


図 B.7: 輻射伝搬効果低減率計測時のバップルの配置図。(a) バップル 2 枚の時のセットアップ、(b) バップル 6 枚の時のセットアップ。

的に低減率を求めた。実験では、低温パイプの直径の $1/3$ サイズの口径を有したバップルを使用した。これはちょうど重力波検出器の鏡サイズに対応する。バップルの配置は、図 B.7 のようにした。特に (b) のセットアップでは、低温パイプ内壁をバップルの陰がほぼ覆う配置とし、壁面へ入射する輻射成分が 1 度はバップルにより打ち返されるようにした。

表 B.2 はバップルによる輻射伝搬効果の低減率実測値のまとめである。バップル 2 枚の導入でも、低減率 98% とかなりの効果が見込めることがわかる。しかし、ダイレクトな入射成分と比べるとまだ 15 倍ほどの大きさとなる。バップル 6 枚の場合は CLIK での計測限界以下まで低減された。表 B.2 の数値は、計測精度を考慮して低減率の下限を求めたものであり、99.4% 以上の低減が実現されている事が明らかとなった。これはダイレクト入射成分の 4 倍程度である。

表 B.2: CLIK を用いたバップルによる輻射伝搬効果の低減率実測値。

バップル 2 枚の場合	バップル 6 枚の場合
98%	> 99.4%

B.2.2 バップル導入時の LCGT の輻射熱負荷の見積

CLIK と LCGT の低温パイプはほぼ相似関係にあるため、上記 CLIK の実測データより、バップル導入時の LCGT の輻射熱負荷を見積もることが可能である。バップル 6 枚を図 B.7(b) のような間隔で配置した場合の輻射伝搬効果低減率は 99.4% 以上であるから、LCGT の場合の輻射熱負荷は、大きく見積もっても 30 mW 程度となる。LCGT で使用する冷凍機の冷凍能力は 2 W であるので、熱伝導やレーザーによる鏡の発熱等の他の熱負荷を考慮しても、十分冷却が可能となる。

参考文献

T. Tomaru et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47**, (2008) 1771.

Appendix C

LCGT 実験における宇宙線の影響

常定 芳基¹

地球上にある検出器・観測装置は、すべからく自然放射線や宇宙線にさらされている。その影響が問題になるかどうかの判断基準は、検出器の感度、測定対象によって様々である。現在、世界数ヶ所でレーザー干渉計による重力波観測が始まっているが、干渉計の感度が上がり、また極低温の下で行われる実験において、宇宙線が原因となって引き起こされるノイズが問題となるかどうかは、必ずしも自明ではない。実際、共鳴型重力波アンテナによる実験では、宇宙線イベントに同期した重力波検出器からの大きな信号の存在が報告されている。ここでは、レーザー干渉計実験に用いる鏡に入射した宇宙線が、どのような影響を及ぼすかについて考察する。結論としては、宇宙線が原因となるノイズが干渉計の出力に及ぼす影響は、無視してもさしつかえなさそうである。

C.1 大気中の宇宙線とミュオン

C.1.1 宇宙線と空気シャワー

宇宙線 (cosmic rays) は宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子 (一般に GeV 以上のものを指す²) であって、その主成分は陽子をはじめとする原子核である。大気に入射した宇宙線 (一次宇宙線) は、大気中の原子核との相互作用によって粒子カスケードを起こすが、これを空気シャワー (air showers) と呼んでいる。宇宙線と大気原子核との相互作用断面積は、ほぼその幾何学的断面積 $\sigma \simeq 270 \text{ mb}$ の程度であり³、平均自由行程にして $80 [\text{g cm}^{-2}]$ に対応する⁴ [1]。これは全大気の厚さ $\sim 1000 [\text{g cm}^{-2}]$ と比べると十分小さく、したがって大気に入った宇宙線は、地上に届くまでに必ずシャワーを起こすと考えてよい。つまり、地上や高山で観測される「上から降ってくる高エネルギー粒子」は、実は一次宇宙線ではなく空気シャワー粒子 (二次宇宙線) である。

¹ 国立天文台在籍中の報告。現在は東工大理で宇宙線研究に従事。

² $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

³ 大気は近似的に $A = 14.5$ の分子からなるとみなせる。 $[\text{mb}] = 10^{-27} [\text{cm}^2]$

⁴ 単位 $[\text{g cm}^{-2}]$ は幾何学的な距離に大気密度をかけて積分したものの。

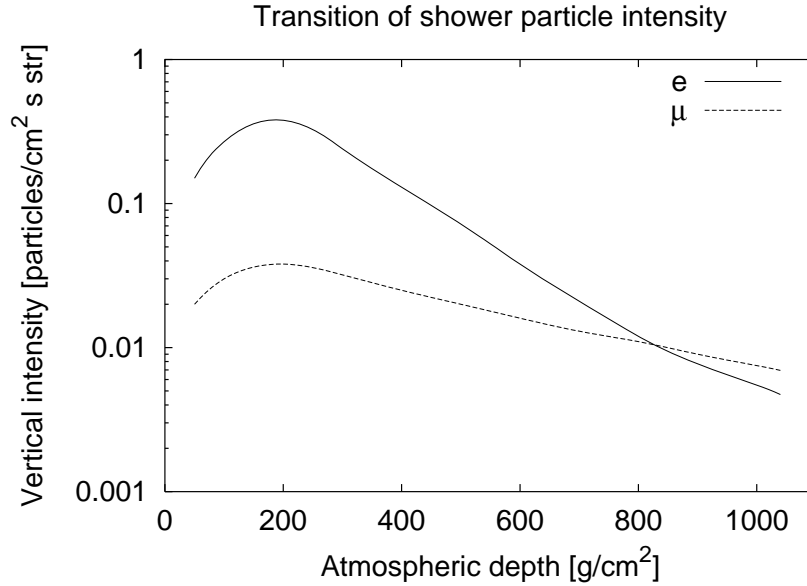


図 C.1: 大気中の空気シャワー粒子強度の高度変化

一次宇宙線と大気原子核との相互作用によって作られる粒子は主に π^\pm, π^0 であろう。原子核相互作用によって作られた π^0 は直ちに 2γ に崩壊し、電子対生成・制動輻射を繰り返すことにより電磁カスケードを生ずる。一方 π^\pm は、大気原子核との次の相互作用に寄与するか、もしくは崩壊してミューオン (μ^\pm) を作る。これら二次粒子の大群が空気シャワーである。空気シャワーは、始めは大気中を伝播するにしたがって、カスケード現象によってその粒子総数を増やしていくが、大気による吸収が効き始めると、ある高度で最大発達を迎え、以後粒子数は減少に転ずる。高山、地表で観測される空気シャワー粒子の主成分は e^\pm, γ, μ^\pm であり、数 1000m 級の高山では電磁軟成分 (e^\pm, γ) が卓越している。ただし、電子・陽電子は制動輻射によるエネルギー損失が大きく、地表付近では逆に電子成分は減少して μ 粒子が多く、全体の約 3/4 を占める (図 C.1)。したがって、地上での実験において宇宙線の影響を議論する場合、その対象は主として μ を考えることになる。

C.1.2 荷電粒子のエネルギー損失

空気シャワーの主成分は荷電粒子 e^\pm, μ^\pm であり、これらは (1) 電離損失 (2) 制動輻射 (3) 電子対生成 (4) 原子核との相互作用 (5) チェレンコフ輻射などによってエネルギーを失う。このうち重要なのは電離損失と制動輻射であり、この 2 つと比べると他の過程の影響は相対的に小さく、以下では e, μ のエネルギー損失は電離と制動輻射によるもののみを考える。

定性的には、エネルギーの高い荷電粒子は制動輻射でエネルギーを失い、エネルギーの低い粒子は物質を電離することによってエネルギー損失する。電離による単位長さあたりのエネルギー損失は、エネルギーによらずほぼ一定値 $dE/dx = 2$ [MeV/g cm⁻²] であるが、制動輻射によるエネルギー損失はそのエネルギーに比例して大きくなる。空気中の電子では、制動輻射と電離によるエネルギー損失が等しくなるエネルギー (臨界エネルギー) は $E_{\text{crit}} \sim 80$ MeV であり、 $E > 80$ MeV の電子は制動輻射 (と電離) によって急激に $E \sim E_{\text{crit}}$ にまでエネルギーを失い、以後は電離のみによって dE/dx のゆるやかなエネルギー損失をしながら大気中を伝播する。一方 μ の場合は、制動輻射によるエネルギー損失が m^{-2} に比例する

ことから、電子の場合に比べてその影響は小さい。したがって、 μ のエネルギー損失は実質的には電離によるもののみであり、大気を伝播する間のエネルギー損失は、電子のそれに比べて非常にゆっくりしている。高山と地上において e, μ 成分の強度が逆転する理由はこれである。すなわち、 μ はそれが作られたときのエネルギー GeV \sim TeV のまま地表に達するのに対し、電子は大気中の伝播の早い段階で $E \sim E_{\text{crit}}$ にまでエネルギーを失い、地表に達することができたとしても、そのときのエネルギーは高々数 10 MeV になっているのである。したがって、地表での宇宙線粒子のうち、 μ の遮蔽は難しいが、数 10 MeV のエネルギーしかない電子は、数 10 cm の厚さの物質で十分に遮蔽が可能である⁵。例えば、建物の中に置いた粒子検出器にかかる宇宙線粒子は全て μ と考えてよい。

C.1.3 地表付近での宇宙線ミュオン

地表付近における μ のエネルギースペクトルは、親である π のスペクトル形状を反映し、また高エネルギー側では π の寿命の伸びのために、低エネルギー側のスペクトルに比べ $1/E$ の程度急になっていると考えられる。観測では、このスペクトルは近似的に

$$I_{\mu}(> E) [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}] = \begin{cases} \frac{3}{E_{[\text{GeV}] + 80}} (E_{[\text{GeV}] + 2})^{-1.55} & (E < 1 \text{ TeV}) \\ 5.0 \times 10^{-8} (E_{[\text{TeV}]})^{-2.6} & (E > 1 \text{ TeV}) \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

で表される (図 C.2 [2])。宇宙線の直接観測・空気シャワー実験によって得られた一次宇宙線のスペクトルと、地表で観測された μ のスペクトルから逆算した一次宇宙線のスペクトルは、観測精度の範囲で良く一致することが知られている。地表における (二次) 宇宙線強度は $\sim 1.14 \times 10^{-2} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}]$ の程度であり、このうち μ は $0.83 \times 10^{-2} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}]$ を占める。

C.1.4 地中での宇宙線ミュオン

物質中における μ のエネルギー損失に寄与する主だった物理過程は、C.1.2 節で見たように電離と制動輻射である。大気中での制動輻射は無視しうが、(密度の高い) 物質中では必ずしもそうではない。Standard rock ($A = 22, \rho = 2.65 [\text{g}/\text{cm}^3]$) 中での μ のエネルギー損失の式 (物質中を厚さ x 進んだときのエネルギー損失 E) を書くと

$$-\frac{dE}{dx} [\text{MeV}/\text{g cm}^{-2}] = a + b E_{[\text{MeV}]} \quad (\text{C.2})$$

ここで $a \sim 1.9 [\text{MeV}/\text{g cm}^{-2}]$ 、 $1/b \sim 0.25 \times 10^6 [\text{g cm}^{-2}]$ である [3]。図 C.3 に地中での μ のエネルギー損失とエネルギー-深さの関係を示す。また、 μ はエネルギーを失うにつれ $\mu \rightarrow e + \nu_{e,\mu}$ の崩壊確率が高くなり、これによって低エネルギー側のエネルギースペクトルはフラットになる。三宅らは、インドのコラー金鉱における地下 μ の測定により、深さ h [m.w.e.] - μ 強度の関係式⁶

$$I_{\mu}(h [\text{m.w.e.}]) = \frac{174}{400 + h} (h + 11)^{-1.53} \exp\left(-\frac{h}{1.25 \times 10^3}\right) [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}] \quad (\text{C.3})$$

を与えている [2]。

⁵ 歴史的に、地表で観測される宇宙線粒子を 10 cm 程度の鉛を通過するかどうかで硬成分、軟成分と大別してきたが、硬成分は μ 、軟成分は電子と考えてよい。

⁶ m.w.e.: meters of water equivalent、物質の厚さを水に換算したもの。

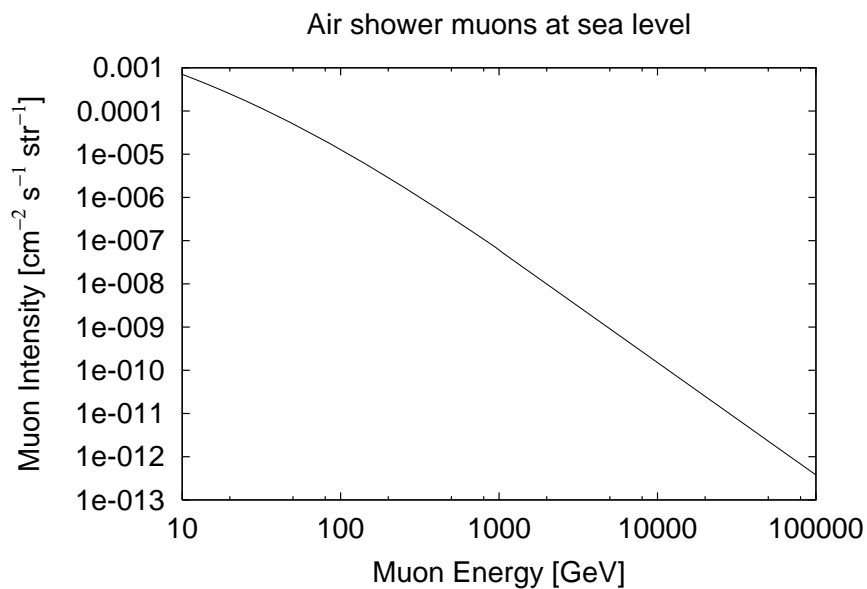


図 C.2: 地表における μ のエネルギースペクトル

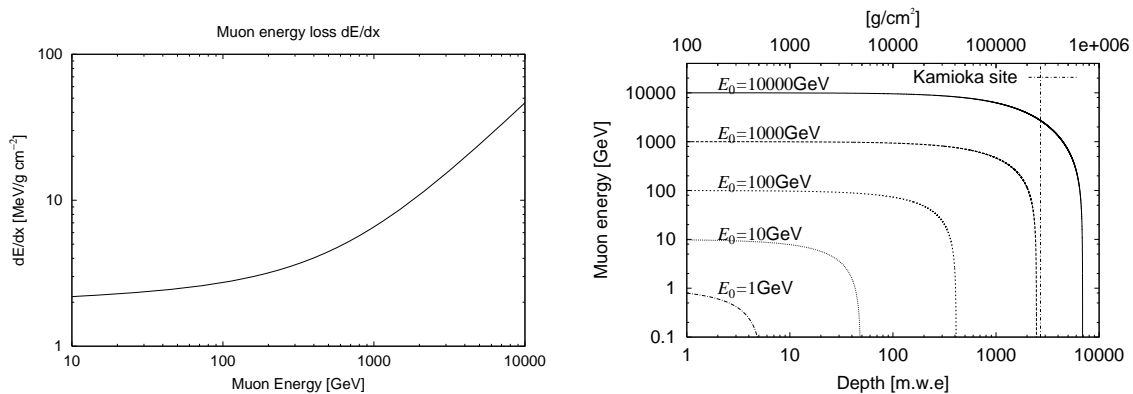


図 C.3: 左: 地中での μ のエネルギー損失、右: 深さ-エネルギー関係

C.2 神岡観測所におけるミュオン

C.2.1 Kamiokande-II の μ イベント頻度

神岡実験は地下約 1000m にて行われており、宇宙線粒子のうち電子成分はほとんど吸収され、実験施設内にまで貫通してくる粒子はほとんど μ のみである [4]。この厚み（地下 1000 m、2700 m.w.e.）を通過できる μ のエネルギー閾値は $E_{\text{th}} = 1.2 \text{ TeV}$ であり [5]、式 (C.1) から期待される μ の強度は

$$I_{\mu}^{\text{K-II}}(> 1.2\text{TeV}) = 3.1 \times 10^{-8} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}] \quad (\text{C.4})$$

となる。また式 (C.3) の深さ- μ 強度の関係式を神岡の場合 $h = 2700 \text{ m.w.e}$ に当てはめると

$$I_{\mu}^{\text{K-II}}(h = 2700) = 3.6 \times 10^{-8} [\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{str}^{-1}] \quad (\text{C.5})$$

が得られる。

Kamiokande-II のタンクは直径 14.4 m、高さ 13.1 m の円柱型である。この検出器の acceptance a を大雑把に計算すると、検出器側面からの入射は少なく、頂上面から立体角 2π で入射するものと考えて

$$\begin{aligned} a^{\text{K-II}} &\sim \pi(7.2 [\text{m}])^2 \times 2\pi [\text{str}] \\ &= 1.6 \times 10^6 [\text{cm}^2 \text{str}] \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

これと (C.4) から、Kamiokande-II における期待される μ イベントの頻度は

$$\begin{aligned} R_{\mu}^{\text{K-II}} &= I_{\mu}^{\text{K-II}} \times a^{\text{K-II}} \\ &= 0.58 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

となる。

実際の Kamiokande-II におけるトリガーレートは 0.6 Hz であるが、そのうち 0.23 Hz は ^{222}Rn とその娘核である ^{214}Bi の崩壊によるもの、0.37 Hz が宇宙線 μ によるものと見積もられている。これはここでの概算と大きく矛盾しない。

C.2.2 LCGT 実験に用いる鏡への宇宙線ミュオンの入射頻度

LCGT 実験に用いる鏡の直径を 30 cm とすると、鏡の acceptance は大体

$$\begin{aligned} a^{\text{mirror}} &\sim 2\pi(15 [\text{cm}])^2 \times 2\pi [\text{str}] \\ &= 8.9 \times 10^3 [\text{cm}^2 \text{str}] \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

の程度である。これと (C.4) を用いると、神岡の地下 1000 m での実験において、宇宙線 μ の鏡への入射頻度は

$$\begin{aligned} R_{\mu}^{\text{mirror}} &= I_{\mu}^{\text{K-II}} \times a^{\text{mirror}} \\ &\sim 3 \times 10^{-4} \text{ Hz} \sim 1 \text{ hr}^{-1} \end{aligned} \quad (\text{C.9})$$

となる。図 C.4 に、地中深さごとの μ 強度と、 μ の鏡への入射頻度を示した。地上では μ の入射頻度は数 100 Hz であり、神岡サイトでは 6 桁程度宇宙線 μ の影響を減少させることができる。

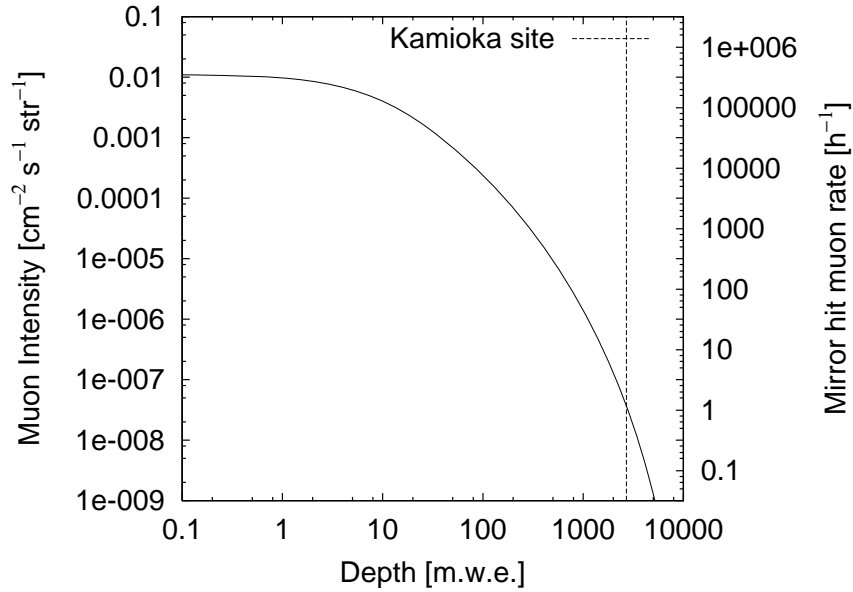


図 C.4: 地中深さ- μ 強度の関係: 鏡の大きさを $30 \text{ cm } \phi$ としたときの、鏡への μ 入射頻度もあわせて示した。

C.3 LCGT 実験に対する宇宙線ミューオンの影響

C.3.1 宇宙線ミューオンの影響による鏡の熱振動

ミューオンが energy deposit することで鏡の温度が上がり、熱振動を起こすことによって生ずる干渉計ノイズを考える。

ミューオン入射の影響の及ぶ範囲

高エネルギー荷電粒子が物質に入射したとき、その影響が及ぶ（電子が散乱される）のは粒子の軌跡に沿った領域である。これが軌跡からどの程度の距離に及ぶかは、粒子と電子の「相互作用している時間」によって決まる。ローレンツ因子 γ の荷電粒子が、距離 b にある物質中の電子と相互作用している実効的時間は、相対論的な電場の圧縮により $\tau \sim b/2\gamma c$ の程度である [6]。これに対し、電子は原子核のまわりを周期 $T \sim 10^{-15} \text{ s}$ 程度で回転しており、相互作用時間 τ がこれより長いと、効率的に電子へエネルギーを受け渡すことができなくなる。したがって、 $\tau \sim T$ が入射粒子の影響の及ぶ範囲の上限を与えるであろう。ここから $b_{\text{max}} \sim 0.1 \text{ cm}$ が得られ、面積にして $\sigma_{\text{max}} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ の程度である。したがって、宇宙線入射の影響が鏡全体に及ぶのは、入射粒子に対する鏡の実効面積を数 100 cm^2 とすれば、 $\sim 10^4$ 個の粒子が同時に入射した場合である。ただし、レーザー干渉計では Q 値が $10^6 \sim 10^8$ と高い鏡を用いるため、サファイアミラー $Q \sim 10^8$ の場合では、共振周波数 $\sim 50 \text{ kHz}$ での振動の減衰時間は $\sim Q/\pi f \sim 10^3 \text{ s}$ と長くなる。したがって、同時入射でなくとも 10 Hz 以上の頻度で鏡に入射してくれば影響してくる可能性はある。地上における鏡への μ 入射頻度 $\sim 10^2 \text{ Hz}$ に対し、神岡サイトでは $\sim 10^{-4} \text{ Hz}$ の程度であるので、LCGT 実験はこの点において有利である。

宇宙線 μ の入射による鏡の温度上昇

サファイアの密度は $\rho = 3.96 \text{ g cm}^{-3}$ 、比熱は $C_m = 7.9 \times 10^2 \text{ [JK}^{-1} \text{ kg}^{-1}]$ であるので [7]、直径 30 cm、厚さ 10 cm の鏡では $C = 2.2 \times 10^4 \text{ JK}^{-1}$ である。鏡を 20 K にまで冷却した場合、これと同程度の熱雑音を励起するには、鏡に $\sim 10^5 \text{ J}$ のエネルギーを与える必要がある。1 個の宇宙線 μ によるエネルギー付与は $\sim \text{GeV} \sim 10^{-10} \text{ J}$ であるから、宇宙線の影響によるノイズが問題になることは考えにくいことがわかる。また、共振周波数 ω_0 において振動が励起された場合の、 $\omega \ll \omega_0$ における振動は

$$\langle x(\omega)^2 \rangle \sim \frac{4k_B T}{m\omega_0^3 Q} \quad (\text{C.10})$$

で与えられるので [8]、 $\omega_0 \sim 10 \text{ kHz}$ ならば観測帯域 100 ~ 1000 Hz に対する影響は無視しうる。また干渉計を構成する 4 枚の鏡に同時に粒子が入射し、かつ干渉計の作動出力にその影響が現れるというこの起こる頻度はきわめて小さい。

NAUTILUS 実験の結果について

共鳴型重力波検出器を用いた NAUTILUS 実験において、宇宙線イベントに同期した、大きな重力波検出器信号の存在が報告されている [9] [10]。これによると、最大で ~ 3000 個の宇宙線粒子が検出器に入射し、 $E = 87 \text{ TeV}$ のエネルギーが落とされ、有効温度上昇 $T_{\text{eff}} = 58 \text{ K}$ が励起されたとなっている。彼らも認めている通り、これは一般的な宇宙線粒子と検出器の場合においては考えにくく、全く未知の宇宙線現象、もしくは「超伝導状態 ($T = 140 \text{ mK}$) にある共鳴型検出器は宇宙線粒子に対して異常な振る舞いをする」としか説明のしようがないようである。また、最近の NAUTILUS 実験においては、 $T = 1.5 \text{ K}$ で測定を行ったところ、以前のような宇宙線同期イベントは見られず、やはり「共鳴型検出器が宇宙線に対して大きな出力を示すのは、超伝導状態特有の現象」との結論を出している [11]。

彼らの実験結果の評価、干渉計実験との比較は難しいが、このような実験結果がある以上は、地上において低温鏡を用いた実験をする場合、なんらかの宇宙線の影響が起こりうることは、完全には排除し切れない。ただし、それは通常の (e, γ, μ を成分とする) 宇宙線・シャワー現象ではなく、実験施設のごく近傍で発生したハドロンを多く含むシャワー、もしくは全く未知の高エネルギー粒子相互作用によって引き起こされるものであろう。地下深くで行われる LCGT 実験においては、そのような現象が起こることは考えにくく、宇宙線・未知の粒子及び相互作用による影響は無視しうる。また LCGT 実験においては、鏡は超伝導状態にはないため、やはり宇宙線異常イベントの心配はなさそうである。

参考文献

- [1] M. Rao and B. Sreekantan, *Extensive Air Showers*, World Scientific (1998)
- [2] 桜井他編, 「宇宙線物理学」, 朝倉書店 (1980)
- [3] T.K. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press (1990)
- [4] M. Yamada *et al.*, Phys.Rev.D, **44**, 617 (1991)
- [5] K. Munakata *et al.*, Phys.Rev.D, **56**, 23 (1997)
- [6] M.S. Longair, *High Energy Astrophysics Vol. I*, Cambridge University Press (1992)

- [7] 沼田健司, 修士論文、東京大学 (2000)
- [8] 中村・三尾・大橋編、「重力波をとらえる」、京都大学学術出版会 (1998)
- [9] P. Astone *et al.*, Phys.Rev.Lett., **84**, 14 (2000)
- [10] P. Astone *et al.*, Phys.Lett. B, **499**, 16 (2001)
- [11] P. Astone *et al.*, gr-qc/0206079, (2002)