

大型低温重力波望遠鏡に関する研究

東京大学宇宙線研究所

黒田和明

LCGTの目的と概要



検出装置の特徴:

大型検出器

基線長: 3km、高出力 レーザー180W

低温干渉計

鏡温度: 20K

地下設置

神岡鉱山地下: 深さ
200m

目的:

長基線レーザー干渉計による重力波直接検出と重力波天文学の推進

期待される成果:

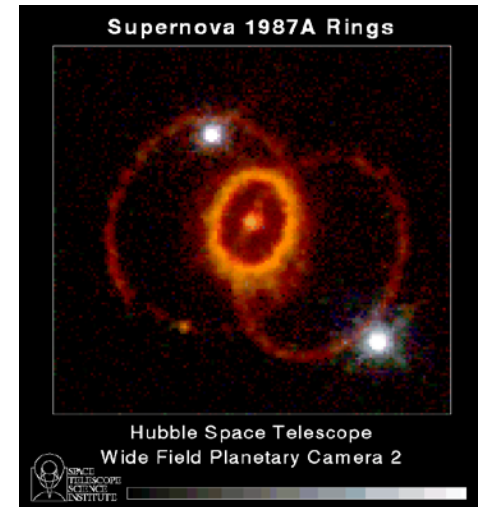
- * 重力波の直接検出により、Einsteinの一般相対性理論の実験的検証がなされる
- * 光や電波で観測不能な宇宙深部のダイナミックな物質の動きが捉えられる
- * 原子核密度と同程度の密度をもつ物質の状態方程式が明らかになる
- * 宇宙初期の物質揺らぎに関する情報が得られる

LCGTが狙いを定める重力波の源

優先度大

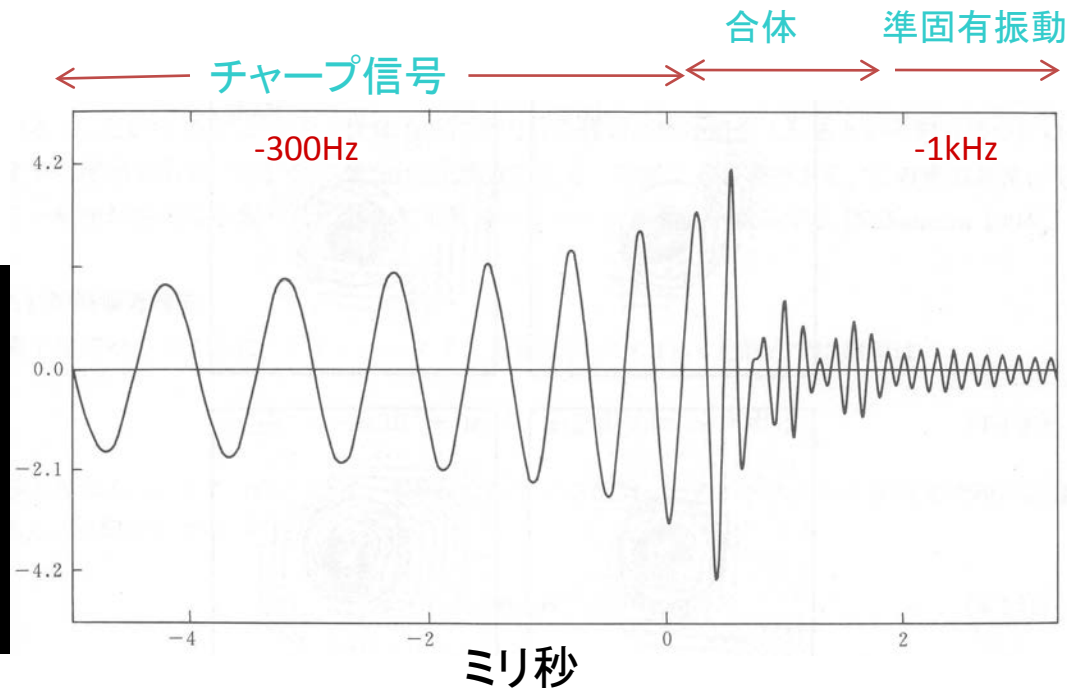
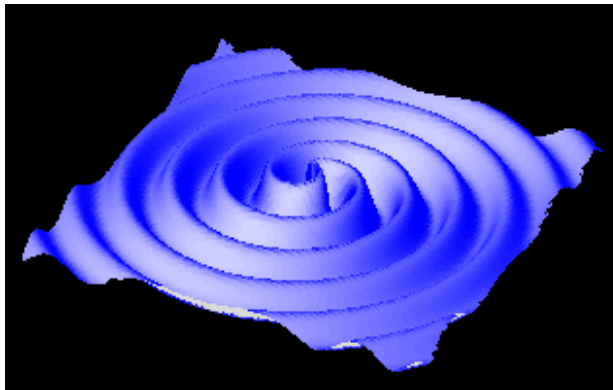


1. 中性子連星の合体
2. ブラックホール連星の合体
3. 超新星爆発
4. 自転するパルサー



我々の銀河系にある連星パルサー

- PSR B1913+16
- PSR B1534+12
- PSR J0737-3039
- PSR J1756-2251
- PSR J1906+0746



世界の重力波観測施設

GEO HF



LIGO(I) Hanford



LCGT

TAMA/CLIO

LCGT, construction starts in 2010

Adv. LIGO

(under construction since 2008)

Virgo

Adv. Virgo (under construction)



ET (planned)

AIGO (budget request)

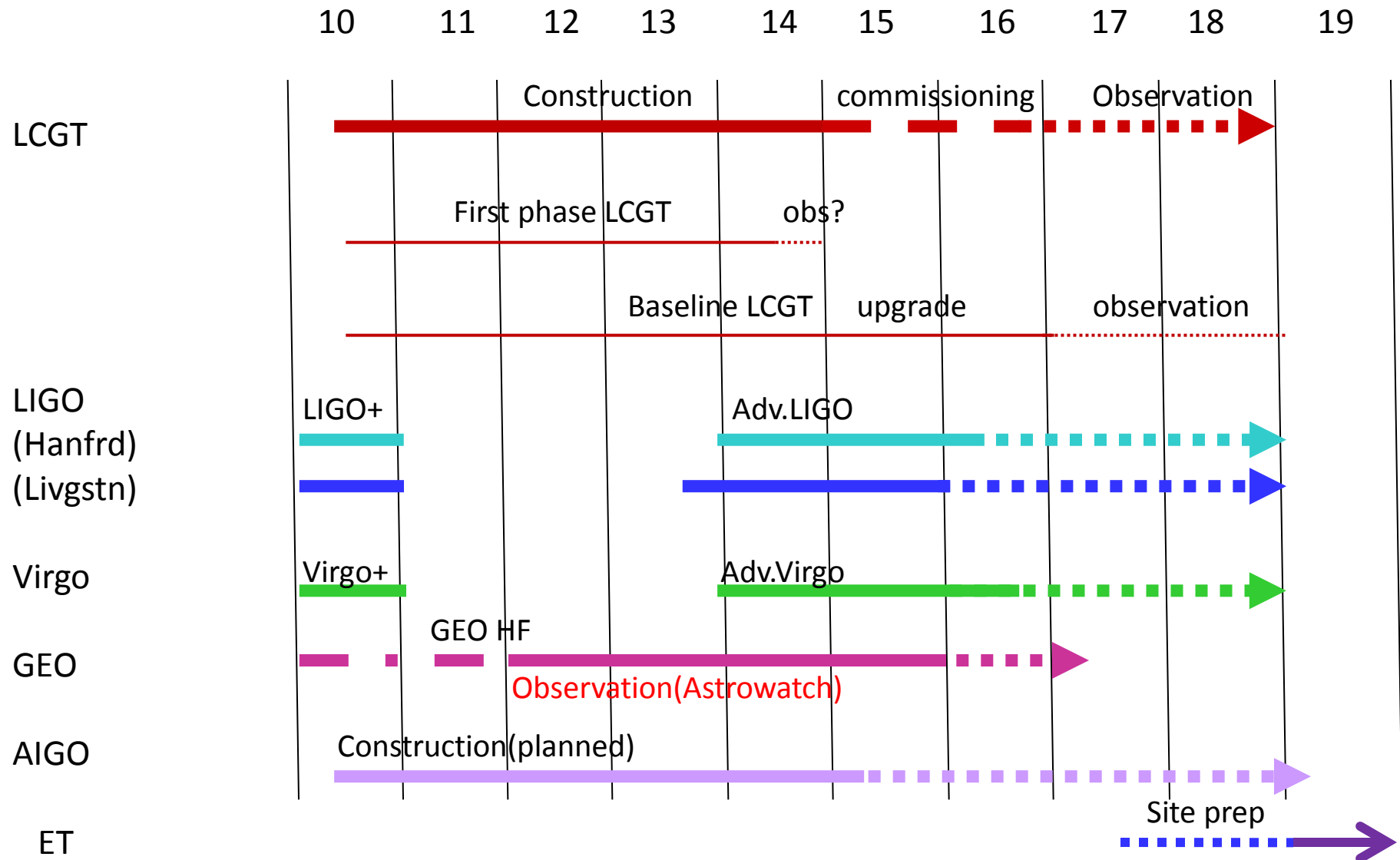


LIGO(I) Livingston



A network of detectors is indispensable to position the source.

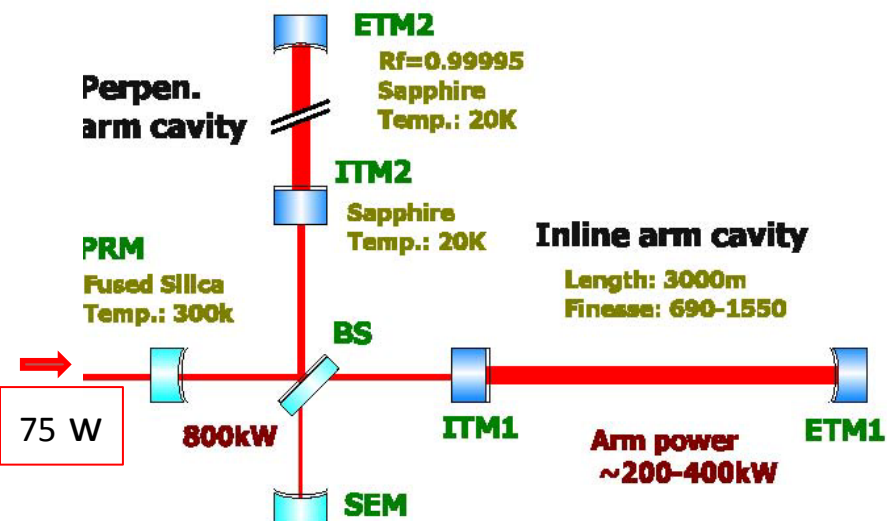
LCGTプロジェクトの建設・観測スケジュール



プロジェクト推進の態勢

- KEK、国立天文台、宇宙線研の3機関研究覚書のもとで、KEK、国立天文台からの支援
- 東京大学本部の支援
- LCGT共同研究者の貢献
- 海外の関連する大学・研究機関からの支援
- 科学研究補助金
- etc.

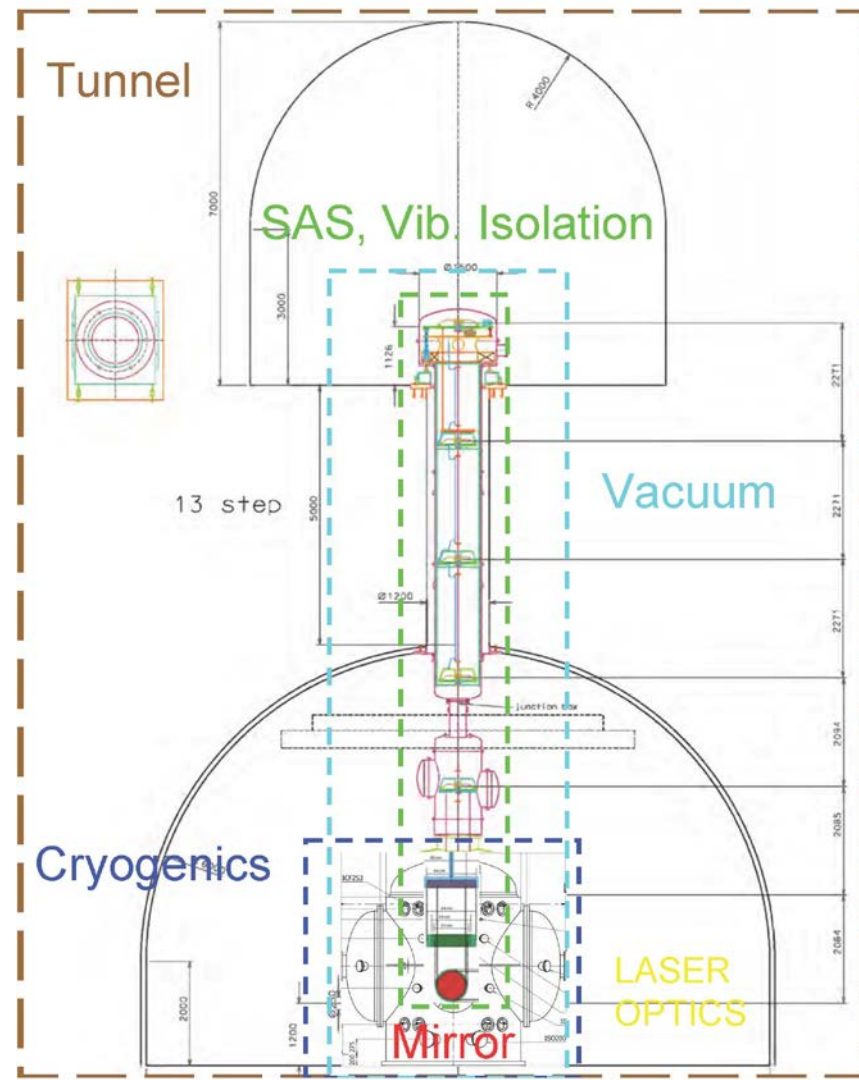
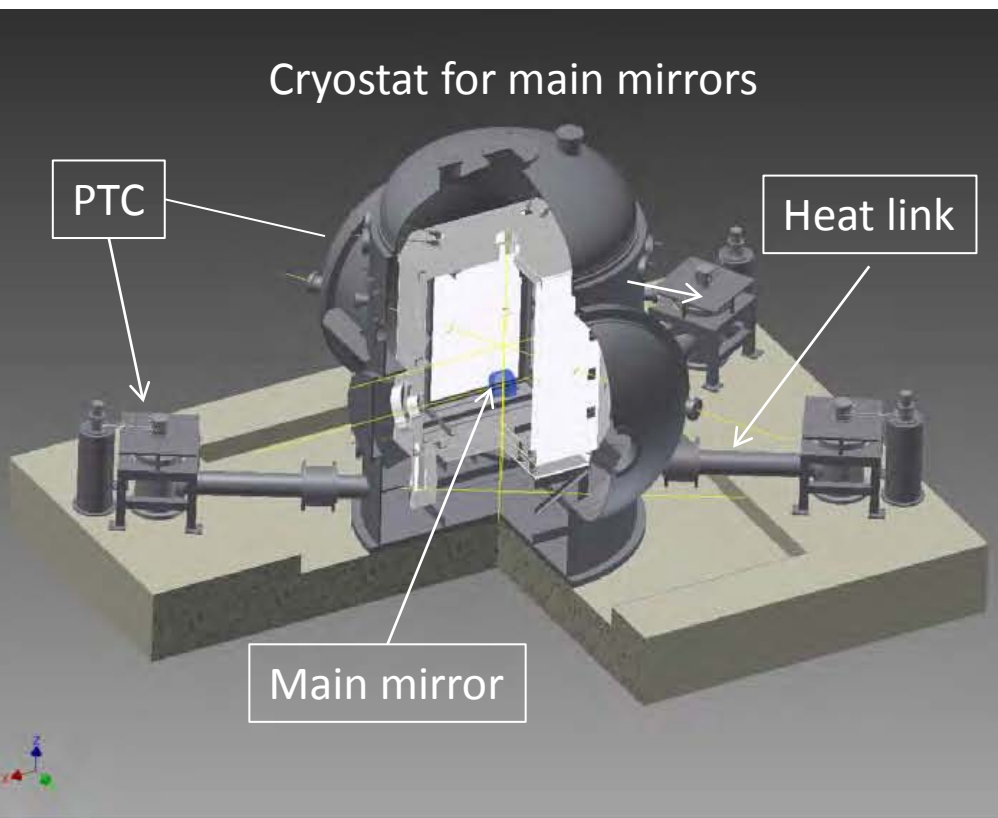
LCGT設計の特徴



レーザー干渉計の方式:

RSE適用のパワーリサイクリング付き
ファブリーペローマイケルソン干渉計

Double floor isolation system Mounted above cryostat



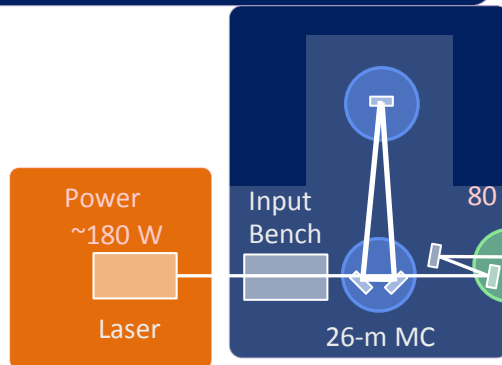
LCGT光学系の配置

Input/Output Optics

- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner

Length 26 m, Finesse 500

- Output MC
- Photo detector

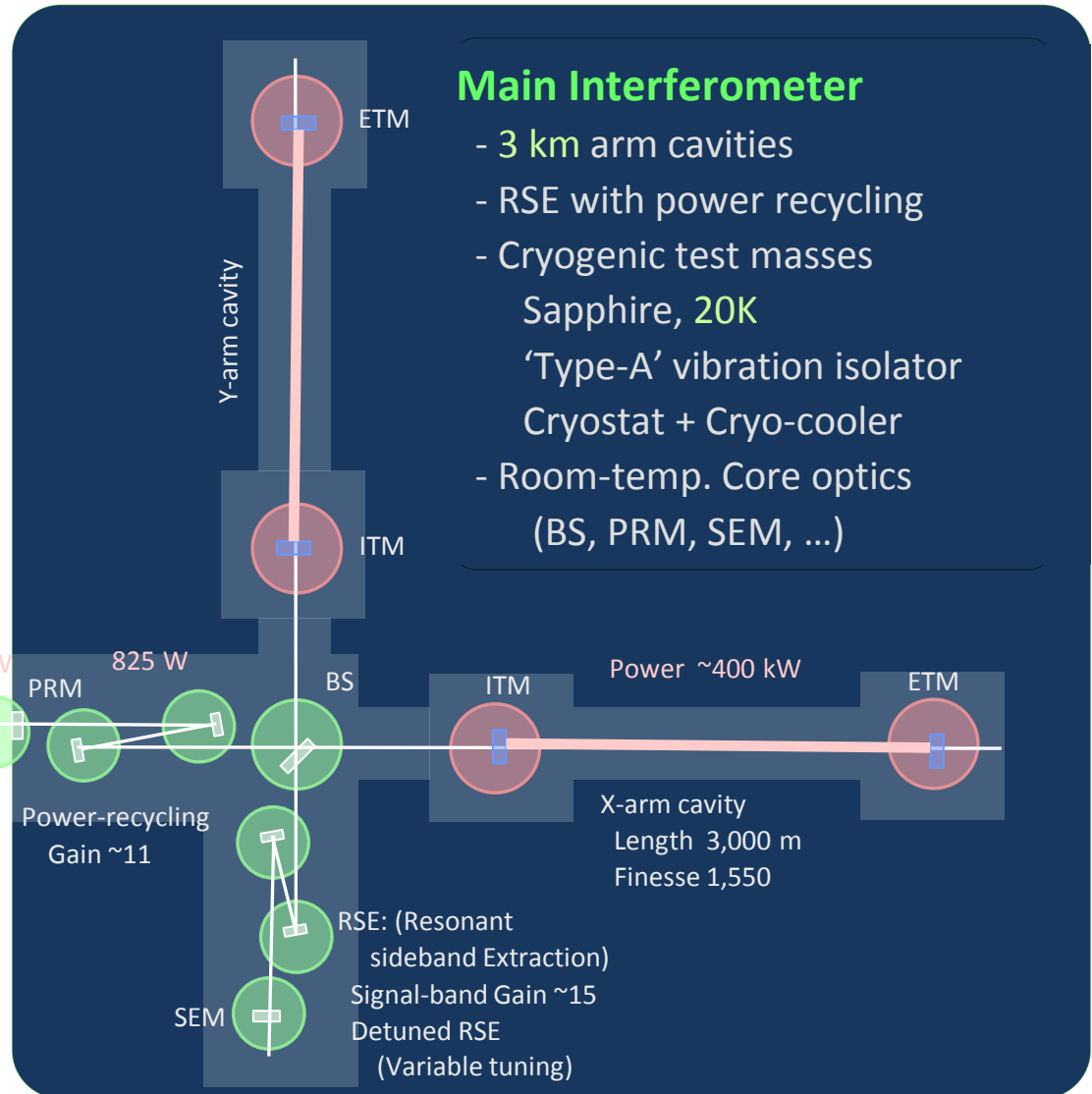


Laser Source

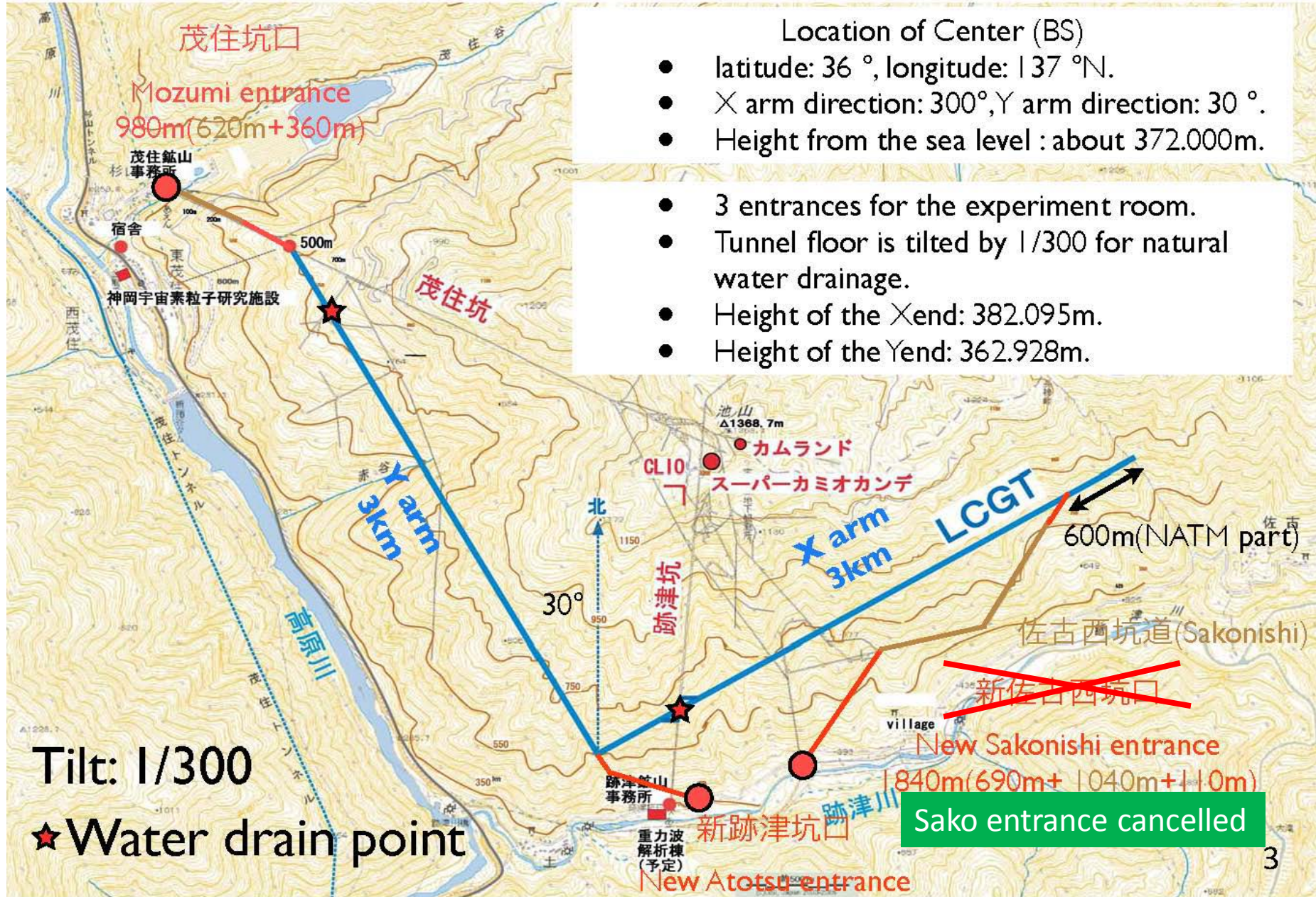
- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
- High-power MOPA

Main Interferometer

- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling
- Cryogenic test masses
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator
- Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics
(BS, PRM, SEM, ...)

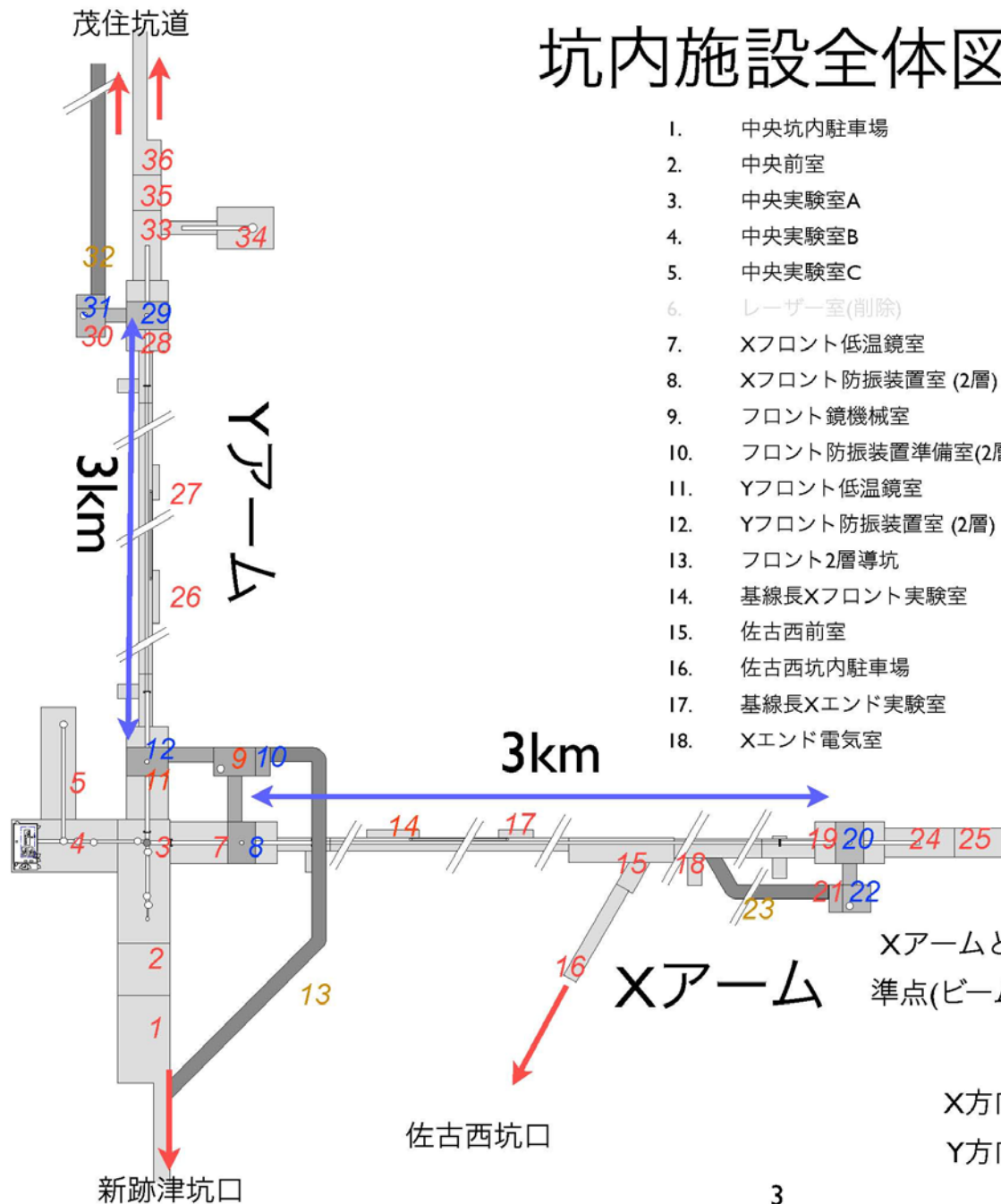


LCGT 設置場所(設計時)



坑内施設全体図

- | | | | |
|-----|-----------------|-----|------------------|
| 1. | 中央坑内駐車場 | 19. | Xエンド低温鏡室 |
| 2. | 中央前室 | 20. | Xエンド防振装置室 (2層) |
| 3. | 中央実験室A | 21. | Xエンド機械室 |
| 4. | 中央実験室B | 22. | Xエンド防振装置準備室 (2層) |
| 5. | 中央実験室C | 23. | Xエンド2層導坑 |
| 6. | レーザー室(削除) | 24. | Xエンド実験室 |
| 7. | Xフロント低温鏡室 | 25. | Xエンド居室 |
| 8. | Xフロント防振装置室 (2層) | 26. | 基線長Yフロント実験室 |
| 9. | フロント鏡機械室 | 27. | 基線長Yエンド実験室 |
| 10. | フロント防振装置準備室(2層) | 28. | Yエンド低温鏡室 |
| 11. | Yフロント低温鏡室 | 29. | Yエンド防振装置室 (2層) |
| 12. | Yフロント防振装置室 (2層) | 30. | Yエンド機械室 |
| 13. | フロント2層導坑 | 31. | Yエンド防振装置準備室 (2層) |
| 14. | 基線長Xフロント実験室 | 32. | Yエンド2層導坑 |
| 15. | 佐古西前室 | 33. | Yエンド実験室 |
| 16. | 佐古西坑内駐車場 | 34. | 冷却実験室 |
| 17. | 基線長Xエンド実験室 | 35. | Yエンド居室 |
| 18. | Xエンド電気室 | 36. | Yエンド坑内駐車場 |



XアームとYアームは中央実験室Aに置かれる中央基準点(ビームスプリッタータンク中央)にて直行する。

3km:

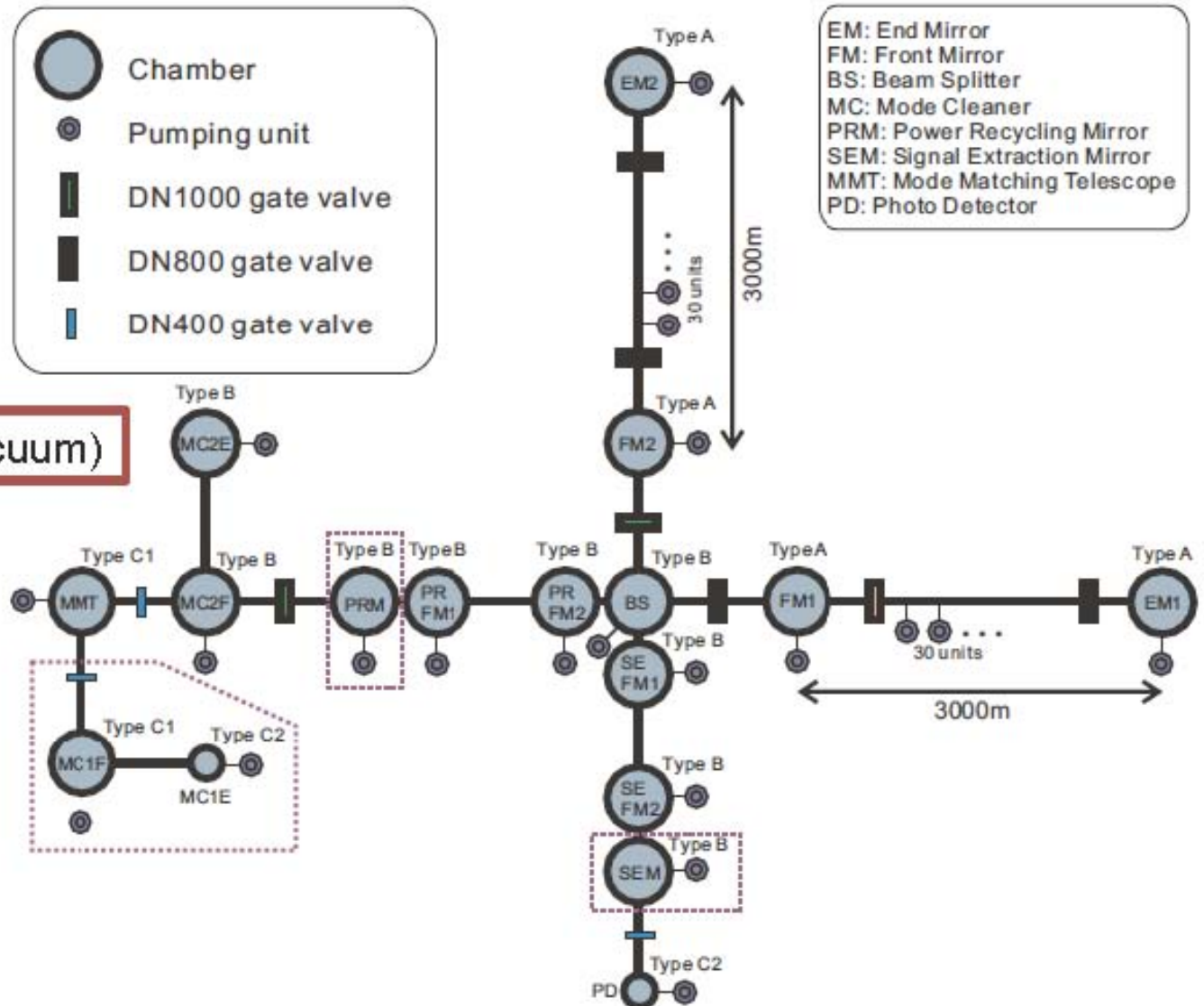
X方向: BSから(25+2m)ーXエンド鏡室中央.

Y方向: BSから(25-2m)ーYエンド鏡室中央.

LCGT Vacuum System

** for reducing noise due to a residual gas effect

** for maintenance minimizing



UHV (ultra high vacuum)

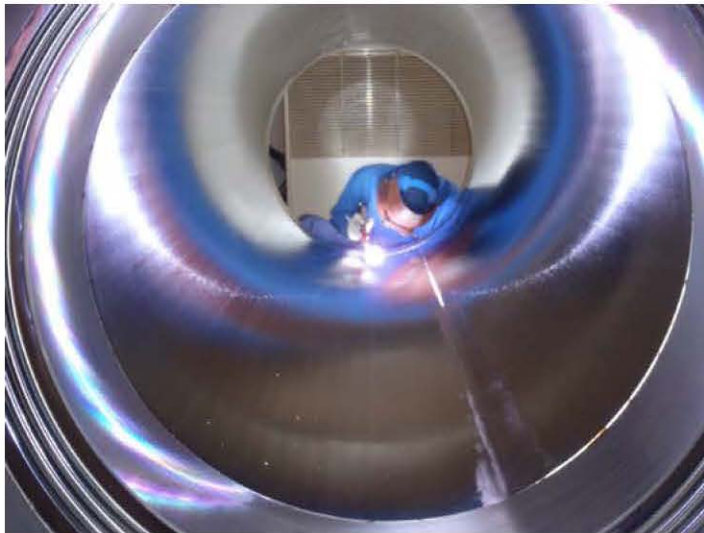
真空ダクトの製作状況

** test product of the tube

* A 4-m long tube was manufactured and a half of the inner surface was electro polished.



* A flange with a bellows (one convolution) was manufactured.



大型低温重力波望遠鏡に関する研究

研究代表者：宇宙線研 黒田和明

査定予算額：旅費のみ 36万円

共同研究者リスト

宇宙線研宇宙基礎物理:客員教授・中谷一郎、准教授・大橋正健、特任准教授・川村静児、特任助教・高橋竜太郎、助教・三代木伸二、特任助教・辰巳大輔、特任助教・大石奈緒子、助教・内山 隆、特任助教・宮川 治、技術職員・石塚秀喜、学術研究員・潮見幸江、D3・斎藤陽紀、M2・榊原祐介、M2・関口貴令、宇宙線研究所ニュートリノセンター:教授・梶田隆章、東大工光量子科学センター:教授・三尾典克、東大新領域。助教・森脇成典、D3・森 匠、M2・高山圭吾、M2・渡辺恭平、東大理:教授・坪野公夫、助教・麻生洋一、D3・穀山渉、D2・岡田健志、D1・松本伸之、M2・道村唯太、M2・正田亜八香、D3・和泉 究、M2・陳 タン、東大地震研:准教授・新谷昌人、助教・高森昭光、国立天文台:教授・藤本眞克、助教・上田暁俊、助教・阿久津智忠、研究技師・石崎秀晴、研究技師・鳥居泰男、研究員・端山和大、研究員・我妻一博、高エネ研:教授・山本 明、教授・春山富義、教授・齊藤芳男、講師・鈴木敏一、准教授・木村誠宏、助教・都丸隆行、法政大システム制御工:准教授・佐藤修一、M2・田嶋茂樹、M2・本間 彰、お茶大理:D3・西田恵里奈、M1・権藤里奈、日大総合科学:教授・新富孝和、山梨英和大人間文化:講師・高橋弘毅、産総研計測標準:主任研究員・高辻利之、主任研究員・尾藤洋一、研究員・寺田聡一、大阪市立大:教授・神田展行、M2・岡田雄太、M1・山本尚弘、M1・譲原 浩貴、M1・李炯渉、教授・中尾憲一、D3・阿部博之、D2・寺川達哉、D1・西川隆介、D1・速水真裕、M2・宇野竜也、電通大新世代レーザー研究センター:教授・植田憲一、教授・米田仁紀、教授・中川賢一、准教授・武者 満、電通大フォトニクスイノベーション研究センター:特任助教・阪田紫帆里、早大学高等研:助教・宗宮健太郎、情報通信研:主任研究員・長野重夫、京大理:教授・中村卓史、特定准教授・安東正樹、助教・瀬戸直樹、D3・八木絢外、京大基研:教授・佐々木節、教授・柴田 大、教授・田中貴浩、研究員・佐合紀親、研究員・西澤篤志、阪大理:助教・田越秀行、群馬天文台:台長・古在由秀、弘前大理工:准教授・浅田秀樹、東北大理:助教・伊藤洋介、教授・二間瀬敏史、新潟大理:教授・大原謙一、立教大理:助教・西條統之、准教授・原田知広、早稲田大理工:教授・山田章一、日大生産工:助教・姫本宣朗、広島大理:教授・小嶋康史、琉球大理:准教授・瓜生康史、AEI:研究員・川添史子、Caltech :准教授・Yanbei Chen、研究員・新井宏二、LIGO laboratory :研究員・河邊怪太、University of Western Australia:教授・David Blair、教授・M. E. Tober、講師・Ju Li、研究員・Chunnong Zhao、准教授・Linqing Wen:Louisiana State University:教授・Warren Johnson、Rochester Institute of Technology:研究員・中野寛之、Glasgow University:研究員・Stuart Reid、Columbia University:教授・Szabolca Marka、Birmingham University:研究員・苔山圭以子、北京師範大天文 :教授・Zong-Hong Zhu、IUCAA :教授・S. Dhurandhar、S. Mitra、Moscow University :教授・Vadim Milyukov、LATMOS :研究員・Lucio Baggio、中国科学技術大:教授・Yang Zhang、北京清華大:教授・Junwei Cao、中国高能研 :教授・Chao-Guang Huang、上海師範大学/台湾清華大:教授・Wei-Tou Ni、台湾清華大 :研究員・Hsien-Hao Mei、台湾計量研 :研究員・Sheau-Shi Pan、研究員・Sheng-Jui Chen、Maryland University:研究員・沼田健司

LCGT Collaborationの会議

会議名	目的	出席メンバー	開催頻度	言語	備考
executive committee meeting	政策的 & 技術的な決定	executive committee members	1/週	日本語	
executive committee + support group meeting	executive committee メンバーとsupport group メンバーの情報交換	executive committee members + support group	1/週	日本語	
f2f meeting	国際的な協力の顔を合わせた議論	全LCGTメンバー	1/6カ月	英語	
LCGT 国内協力者会議	国内的な協力の議論	日本の全LCGTメンバー	1/3カ月	日本語	
チーフ会議	各サブシステム間の情報共有	各サブシステムのリーダー	1/週	英語	LCGTメンバーは誰でも参加・発言可能

LCGTデータ解析の研究 および システム検討

研究代表者：大阪市立大 神田展行

査定予算： 旅費のみ40万円

メンバー

神田展行(代表), 岡田雄太(大阪市大)

田越秀行(大阪大)

高橋弘毅(山梨英和大)

大原謙一, 平沼悠太(新潟大)

端山和大(NAOJ)

伊藤洋介(東北大)

Wei-Tou Ni, Ping Xi(上海師範大学)

研究内容

(1) 主要な重力波源からの重力波イベントについてのデータ解析(検出方法、得られる物理、検出ソフトウェアの作成と実装)の研究

(2) ソフトウェアとハードウェア両面について解析システム検討

重力波イベントについてのデータ解析関連

重力波ラジオメトリ

田越、岡田、神田、高橋

- “Cross-correlation search for a hot spot of gravitational waves”, Phys.Rev. D 84, 083007 (2011)
- 9th Amaldi plenary session, [arXiv:1112.3090](https://arxiv.org/abs/1112.3090)
- 物理学会発表

Hilbert-Huang変換を用いた重力波探査法の検討

平沼、大原、高橋

- 物理学会発表
- 投稿論文2編準備中

LCGT と Super-K を用いたマルチメッセンジャー観測の検討(超新星探索)

端山

- 重力波の探索可能距離を2倍に改善しうる
- 投稿論文準備中

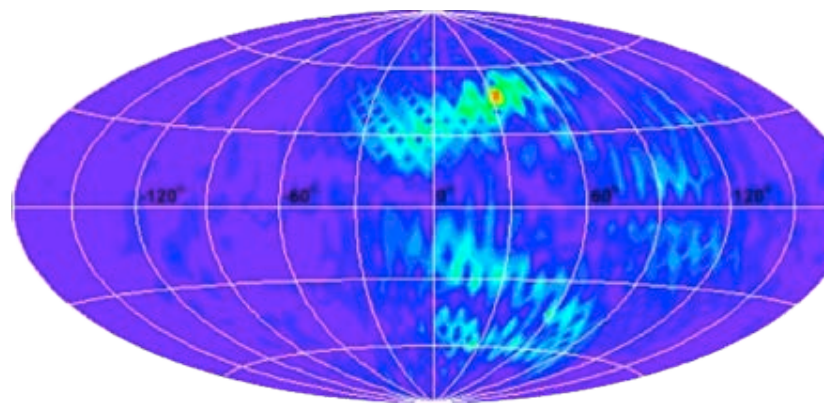
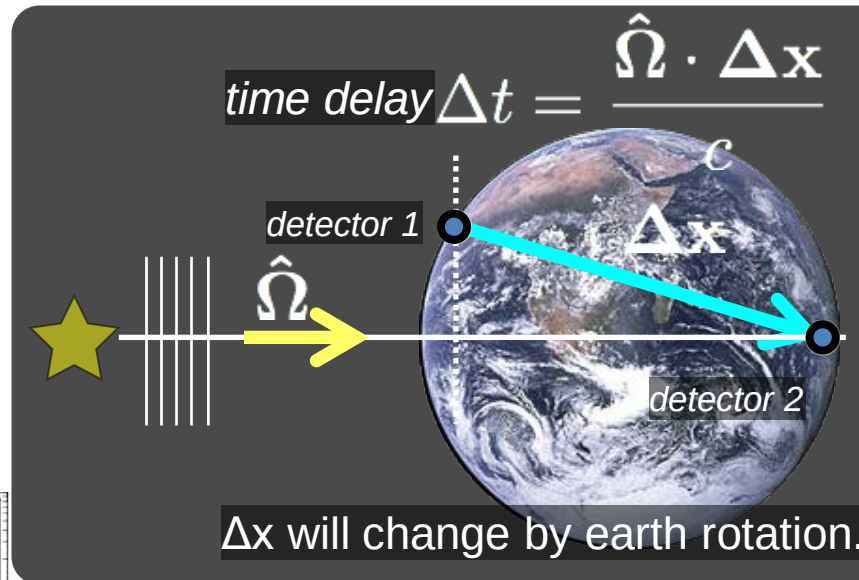
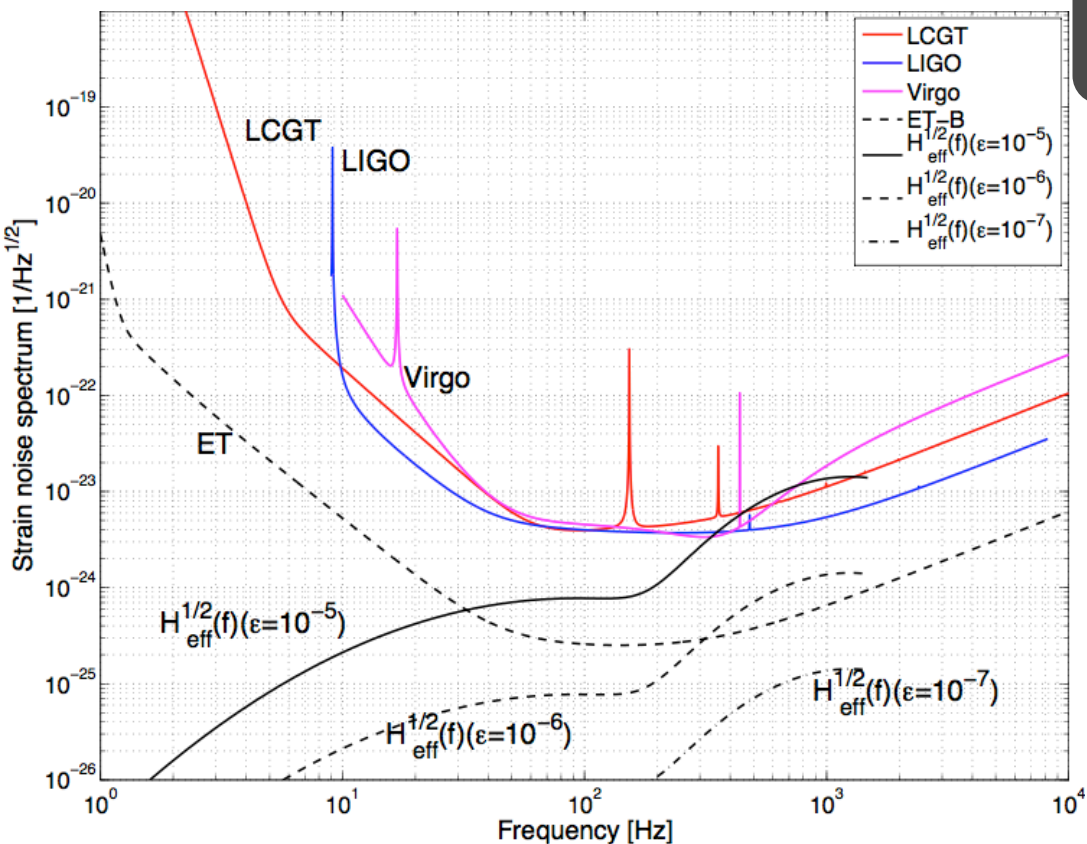
検出器雑音のリアルタイム評価 (Detector Characterization)

端山

- 神岡にてテスト、国立天文台にテストベンチ立ち上げ。

ラジオメトリ探査

- ・2台以上 (LCGT+海外のどれか) を用いてのコヒーレント探索
- ・方向を特定しての全天探索 (= マップ化) が可能
- ・おとめ座銀河団ホットスポット検出可能性を評価



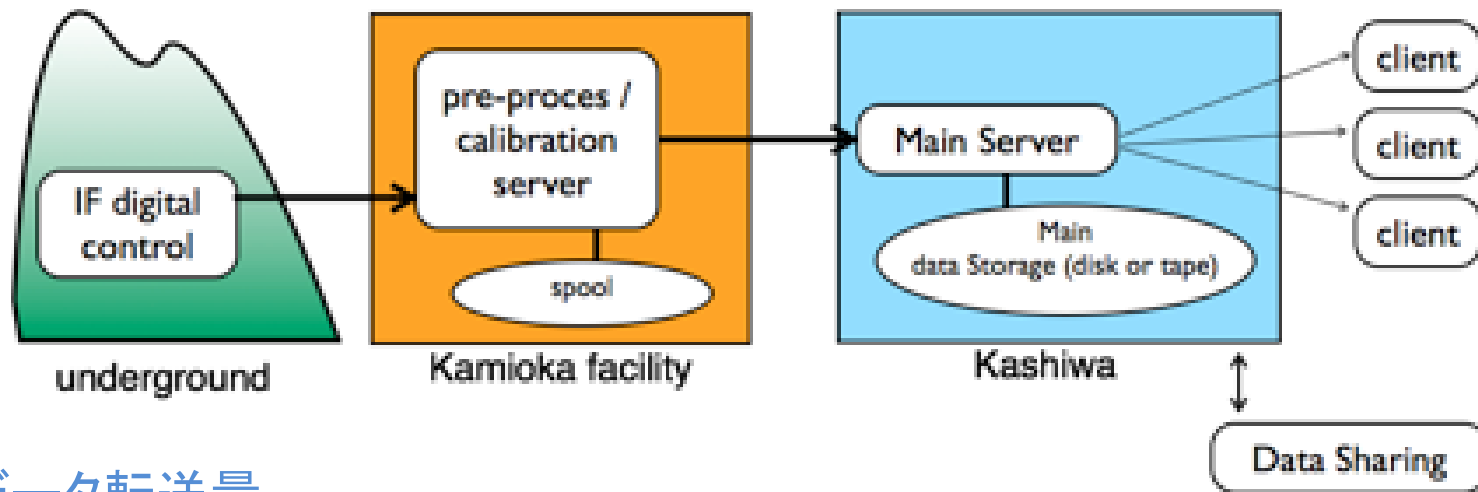
LCGT解析システム検討

データ転送・保管ハードウェアの構成、検討
解析用計算機ハードウェア能力の検討

主要重力波源それぞれについて検討：

連星合体(田越)、バースト(端山)、連続波(伊藤)、
背景重力波(神田)

LCGTの データ転送・蓄積系ハードウェアの構成



rawデータ転送量

データレート～70GByte/hour.

神岡の中間ストレージ> 500TByte

検出器の性能評価や雑音ハンティングの解析にも用いるので。

主記憶装置容量

柏に必要

LCGT単体分のみで、年間～1PB (raw + calibrated data)

観測5年間、LIGO等との共有データを導入する場合、総計～30 PBが必要

オフライン探索解析に(最低限)必要な計算機能力

コンパクト連星合体探索: ~1TFlops ないしそれ以上
(探索質量範囲に依存)

連続波、バースト: それぞれ ~1TFlops

連星合体: 上記に比較すると少ない

全体では数Tflops の演算が最低限必要

noise model	$m_{\min}[M_{\odot}]$	$m_{\max}[M_{\odot}]$	N_{tamp}	$P_{\text{comp}}(\text{no } \chi^2)[\text{Hops}]$	$P_{\text{comp}}(\text{with } \chi^2)[\text{Hops}]$
VRSE-B	1	3	1.4×10^5	2.3×10^{10}	1.8×10^{11}
VRSE-B	1	100	7.0×10^5	1.1×10^{11}	8.8×10^{11}
VRSE-B	0.2	3	1.8×10^7	3.4×10^{12}	2.7×10^{13}
VRSE-B	0.2	100	3.1×10^7	5.8×10^{12}	4.6×10^{13}
VRSE-D	1	3	1.2×10^5	1.9×10^{10}	1.5×10^{11}
VRSE-D	1	100	5.9×10^5	1.0×10^{11}	8.0×10^{11}
VRSE-D	0.2	3	1.6×10^7	3.0×10^{12}	2.4×10^{13}
VRSE-D	0.2	100	2.7×10^7	5.0×10^{12}	4.0×10^{13}

コンパクト連星合体探索に必要な計算量 (田越による)

LCGTのための低周波防振装置の研究

研究代表者： 宇宙線研 高橋竜太郎

査定予算金額： 物品費50万円、旅費5万円

平成23年度共同利用研究

LCGTのための低周波防振装置の研究

高橋竜太郎、黒田和明、内山隆、関口貴令(宇宙線研究所)

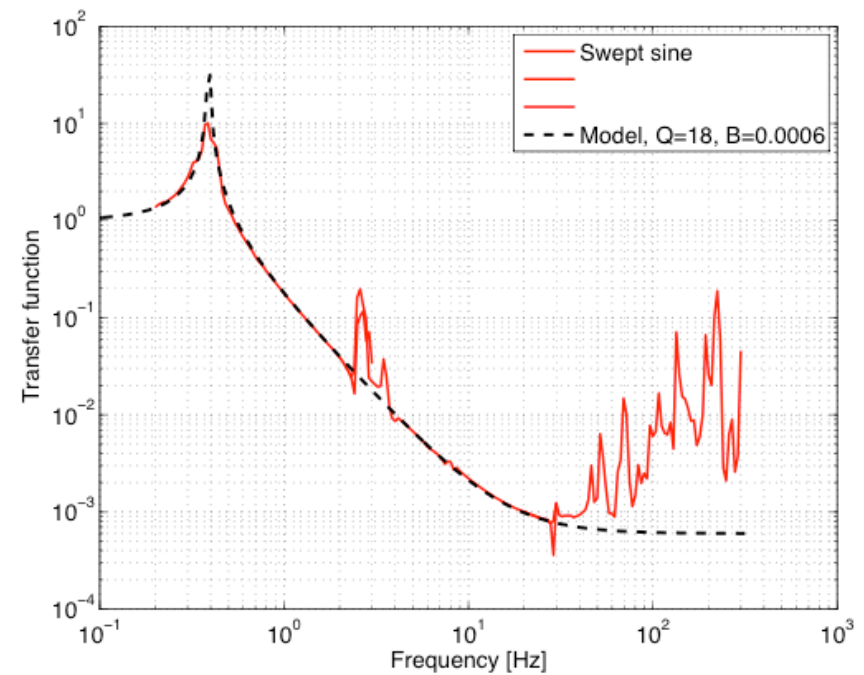
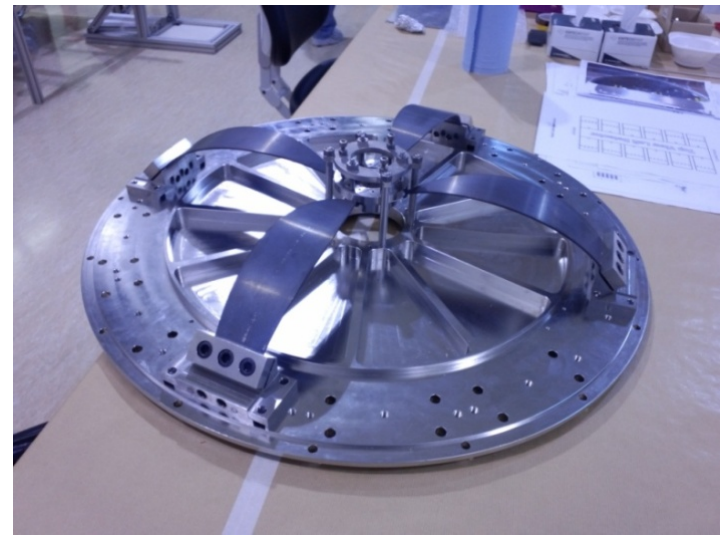
高森昭光(地震研究所)、石崎秀晴(国立天文台)、

R. DeSalvo(サニオ大学)、E. Majorana(ローマ大学)、

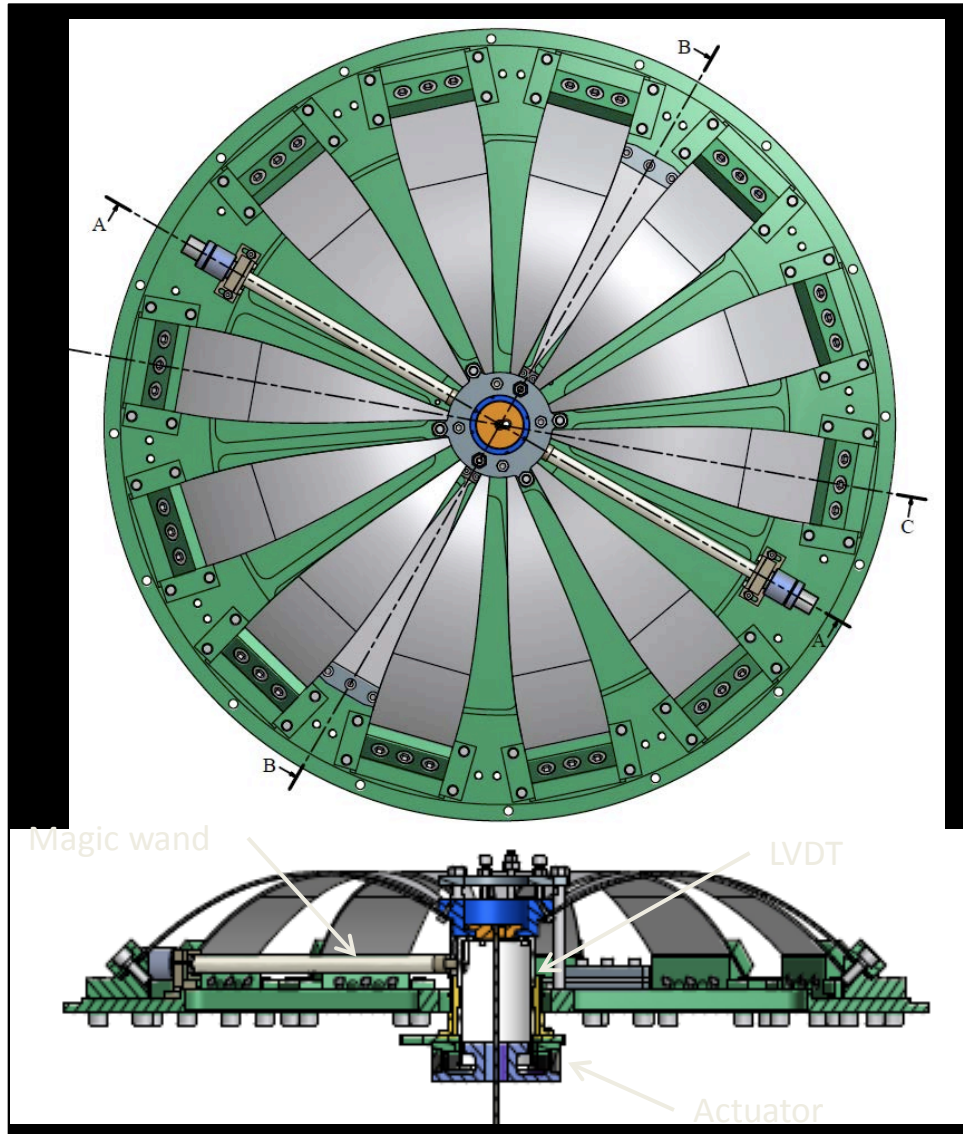
J. van den Brand、D. Rabeling、M. Beker(アムステルダム大学)

干渉計を構成する反射鏡は地面振動の影響を避けるため多段振り子によって防振されるが、特に低周波(<10Hz)の防振を担うのがInverted Pendulum (IP)とGeometric Anti-Spring Filter (GASF)である。IPとGASFを組み合わせた防振装置を特にPre-isolatorと呼んでいる。これらは平成26年度より順次LCGTのサイトである神岡鉱山内に設置される。これら低周波防振装置は国内外の研究機関と共同で開発されており、今後もより密接な共同作業が必要である。本研究ではGASFとPre-isolatorの特性を評価し、設計通りの性能を確認した。

GASFの特性評価



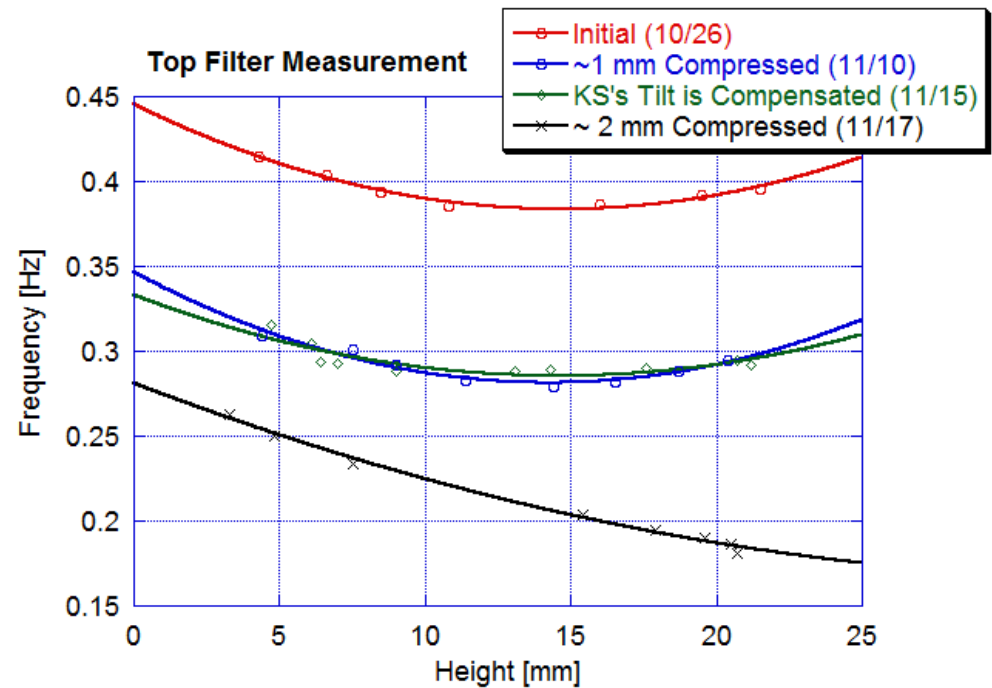
測定された伝達関数。60dB以上を実現。



Pre-isolatorの特性評価



宇宙線研究所(柏)で試験中の
Pre-isolator。



Top filterのチューニング。0.2Hz以下を実現。

LCGTのための単結晶サファイヤ鏡懸架の 開発(VII)

研究代表者： KEK低温センター(東大客員教授)
鈴木敏一

査定金額： 物品費70万円 旅費5万円

研究課題：LCGTのための単結晶サファイア鏡懸架の開発(VII)

KEK 鈴木敏一、木村誠宏、春山富義、山本 明

日大総合 新富孝和

ICRR 内山 隆、三代木伸二、大橋正健、黒田和明

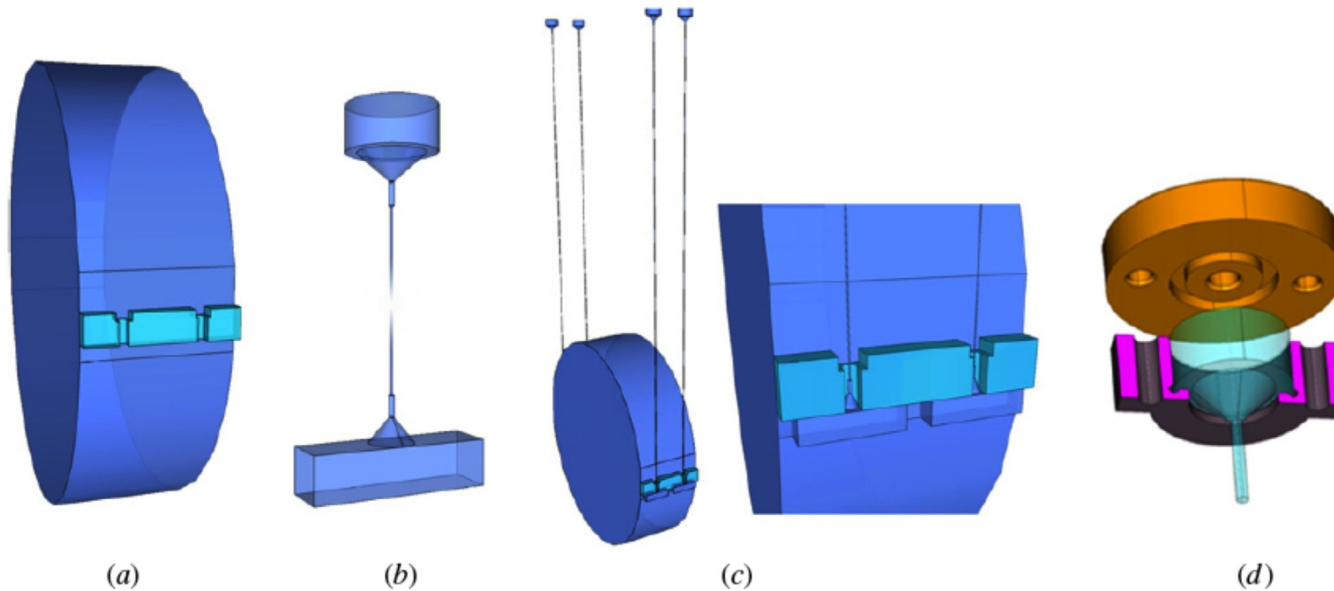
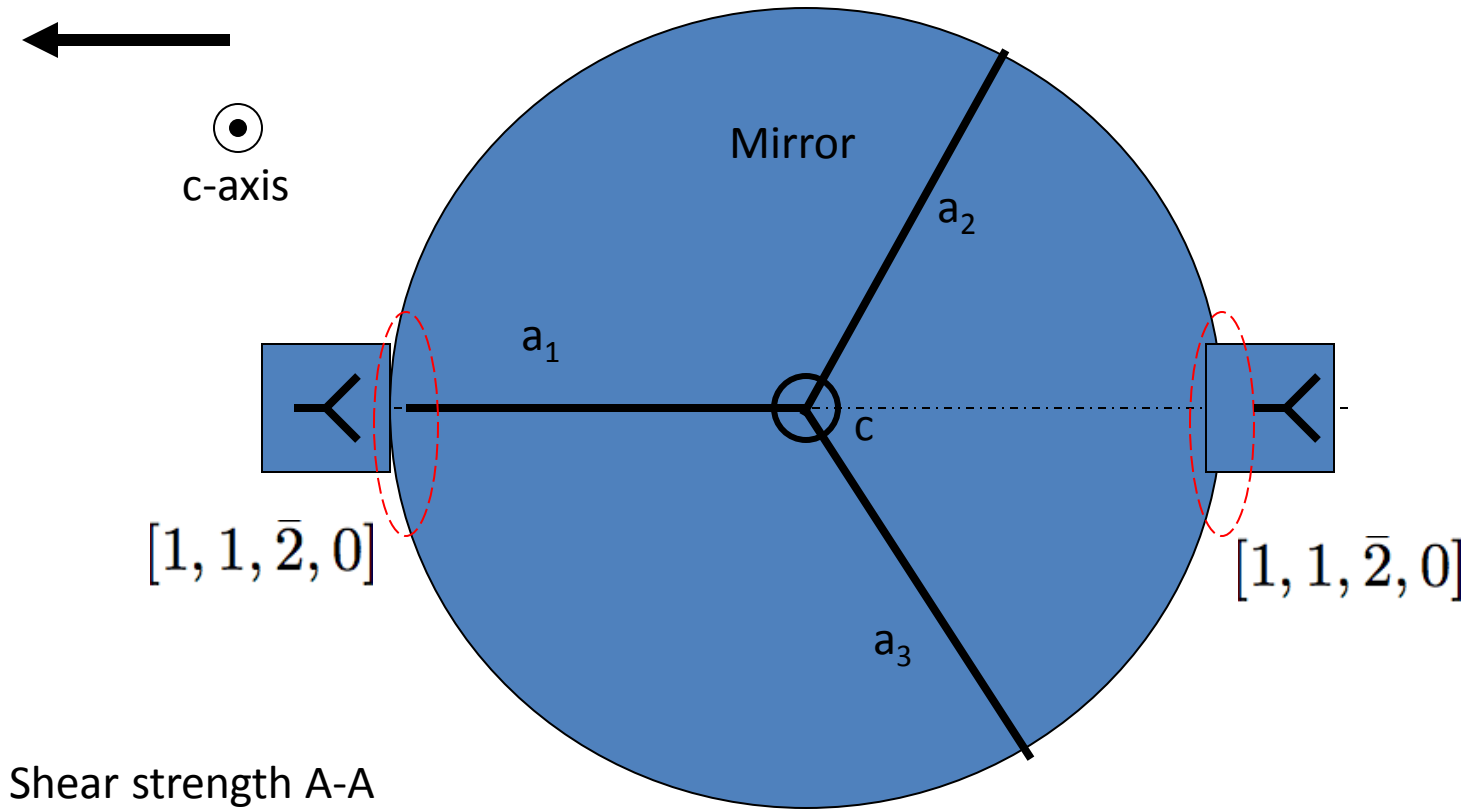


Figure 2. Sketch of the steps followed to realize a monolithic suspension, as detailed in the text.

CQG 27(2010)084021

Candidate of bonding direction A-A

Sapphire mirror $\phi 250\text{mm}$ L150mm M=30 kg



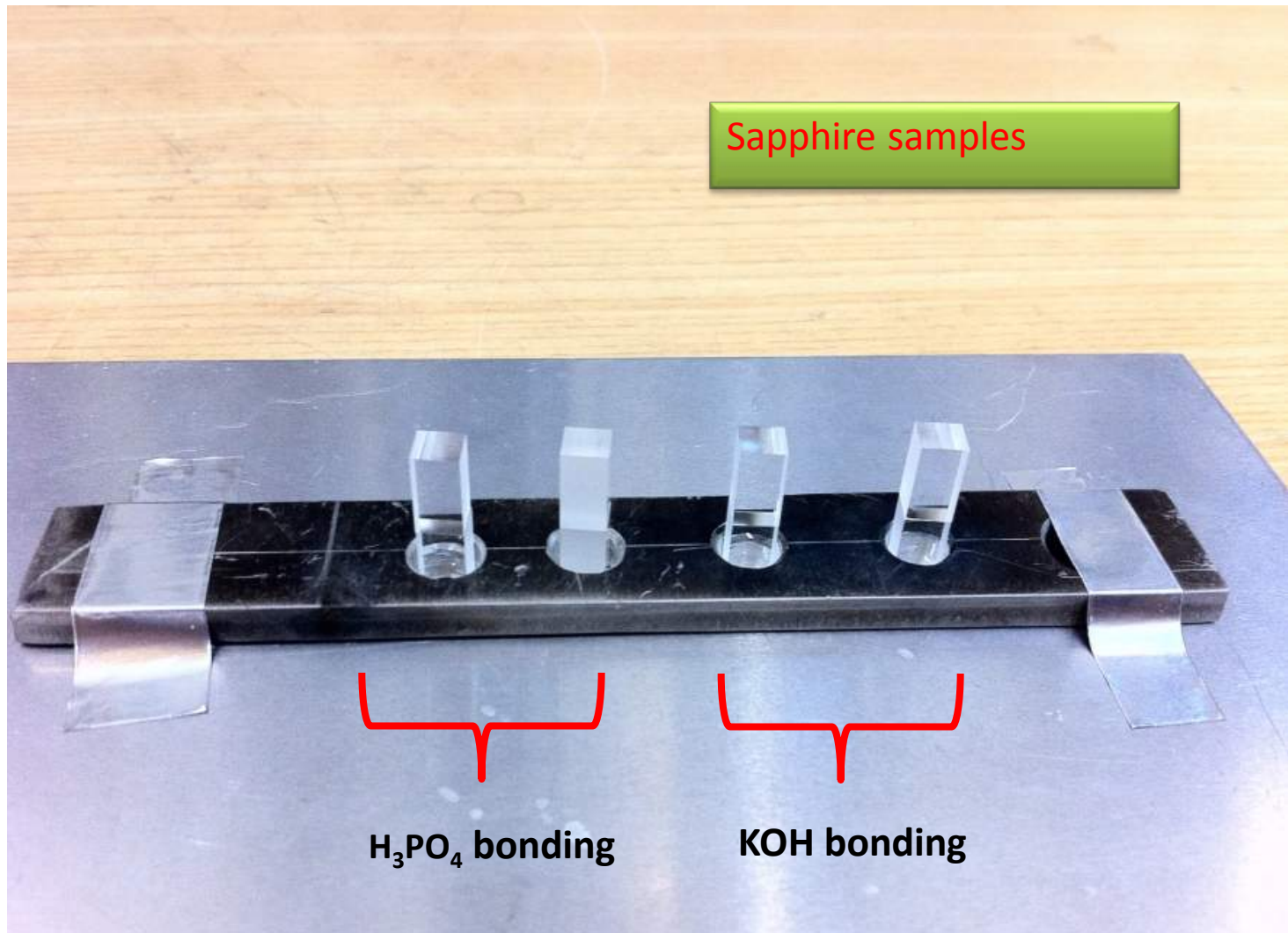
Shear strength A-A

$$\tau_{bond} = \begin{cases} 28 [MPa] \rightarrow A \approx 10 [mm^2] \\ 7 [MPa] \rightarrow A \approx 40 [mm^2] \end{cases}$$

Diffusion Bond

Hydroxy-catalysis, silicate

Cryogenic Test of Silicate Bonding



Sapphire block: $5 \times 5 \times 10$ (mm³) 5x5 A-plane, polished by CeO, roughness~20nm

液体窒素による熱応力試験で外れた

常温接合 Surface Activation Bonding

平滑に研磨した接合面に、アルゴンビームを照射して清浄化と活性化を行った後、高真空中で圧着する。ウェハーの接合技術として発達してきた。接合工程を常温で行い、比較的低温度の熱処理で拡散接合並みの強度を期待できる。現在サファイアブロックの接合面を $R_a < 0.5 \text{ nm}$ で研磨して、常温接合サンプルの製作準備中。

H. Takagi, R. Maeda / Journal of Crystal Growth 292 (2006) 429–432

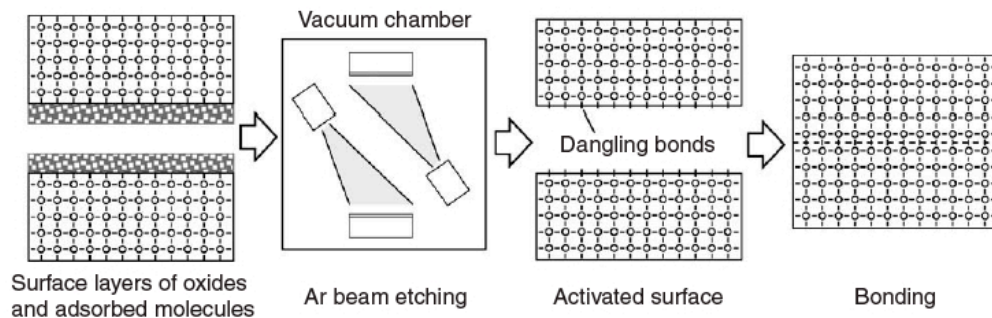


Fig. 1. Principle of the surface-activated bonding (SAB).

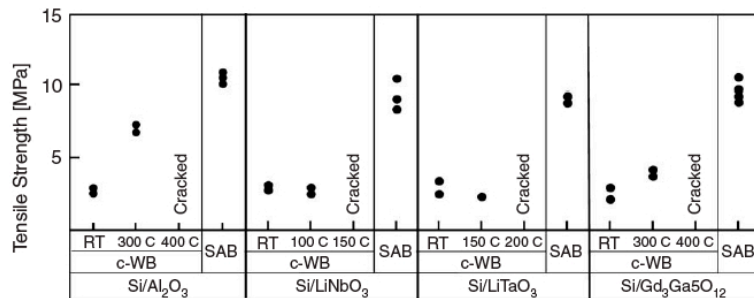


Fig. 5. Strength of the bonding between Si and various oxides by c-WB and SAB.

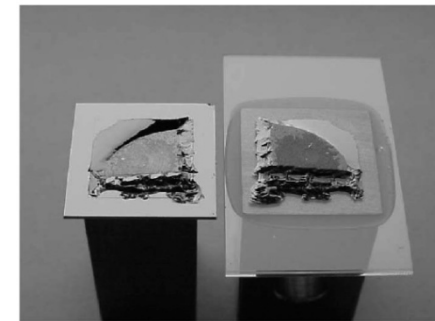


Fig. 6. Fracture surface of Si-sapphire bonding by SAB.

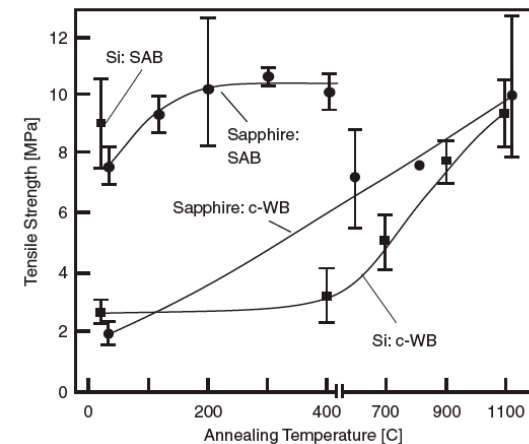


Fig. 4. Strength of Si-Si and sapphire-sapphire bonding by SAB and conventional wafer bonding (c-WB).

まとめ

- 拡散接合並の強度を期待できるサファイアの接合法として常温接合SABの応用を検討している
- 現在サンプル製作の準備中

今後の課題

- サンプルによる常温接合SABの特性評価
- 懸架ファイバーのデザインと試作
- サファイア鏡懸架構造の試作と性能評価

研究課題：超低振動冷凍機の開発

研究代表者：木村 誠宏

高エネルギー加速器研究機構

/超伝導低温工学センター

(東京大学客員准教授)

査定金額：物品費のみ54万円

LCGTクライオスタットの構造

直方体

冷却機の検討

防振懸架装置

Drawn by S. KOIKE (KEK)

- 冷却機への要求

伝導冷却体接続部先端にて

- ✓ 振動特性

X,Y,Z軸方向とも $< 100 \text{ nm}$

- ✓ 冷凍能力(要求値)

- ✓ 2.5 W/9 K at 2nd stage

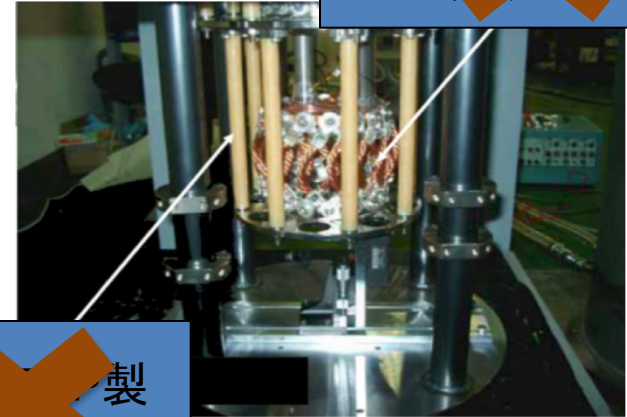
- ✓ 35 W/70 K at 1st stage



低振動ハルヘ直方体冷凍機
4台

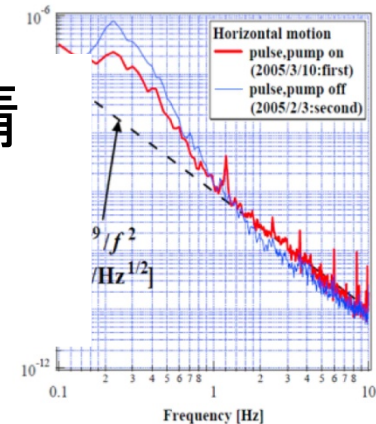
冷却機の検討

決定: CLIO式防振ステージ付
冷凍機ユニットの構造を採用



冷凍機変更による更なる振動対策の要請
CLIO ~ 0.5 W at 4K (特注品)
LCGT ~ 0.9 W at 4 K (カタログ品)

Cold
Stage VRS



超低振動冷凍機試作機の性能試験

防振ステージ付パルス管冷凍機

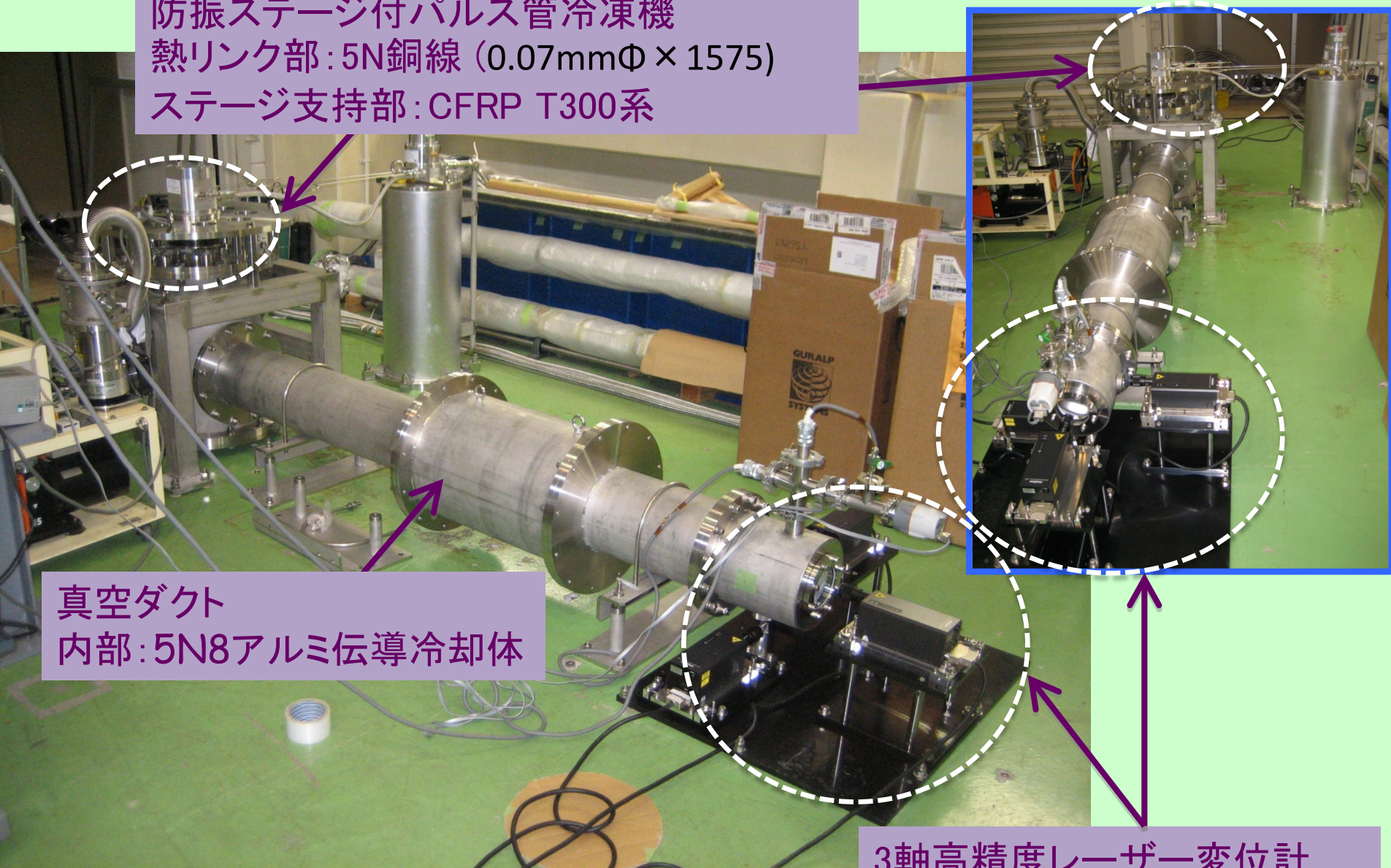
熱リンク部: 5N銅線 ($0.07\text{mm}\Phi \times 1575$)

ステージ支持部: CFRP T300系

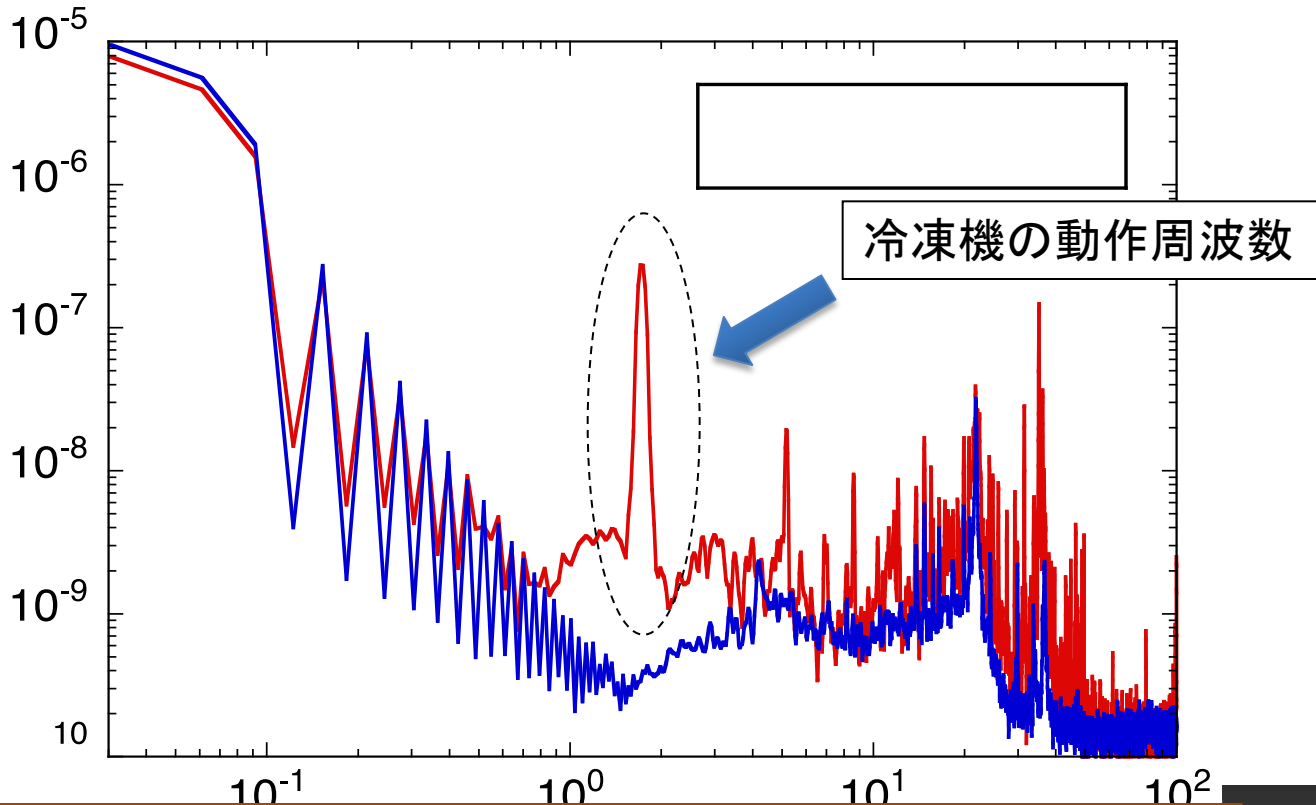
真空ダクト

内部: 5N8アルミ伝導冷却体

3軸高精度レーザー変位計



F.F.T. 解析結果の例 (軸方向)



主に真空容器表面上を伝搬する振動が原因
振動源は冷凍機ヘッドの振動

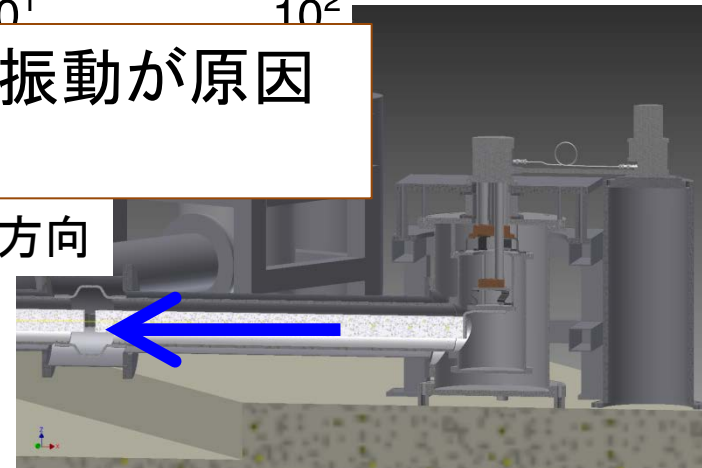
Results of displacement at connection point

軸方向 < 200 nm × ←改善が必要

垂直方向 < 50 nm ○

水平方向 < 10 nm ○

軸方向



まとめと今後の予定

- 超低振動試作冷凍機の性能試験を行い、次の結果を得た.

振動性能: 軸方向 ~ 200 nm (他は < 100 nm)

(主に真空容器表面上を伝搬する冷凍機ヘッドの振動による影響←真空容器の固定を強固にすることで対応が可能であることを確認済み)

冷凍能力: 2 W at 8 K / 25 W at 95 K

(SIの施工不足による熱侵入の増加)

以上の結果から、要求された仕様値を満足するために改良点があることを確認した.

- 2012年1月初旬には改良した量産1号機の性能試験を行い、性能を確認する予定である.

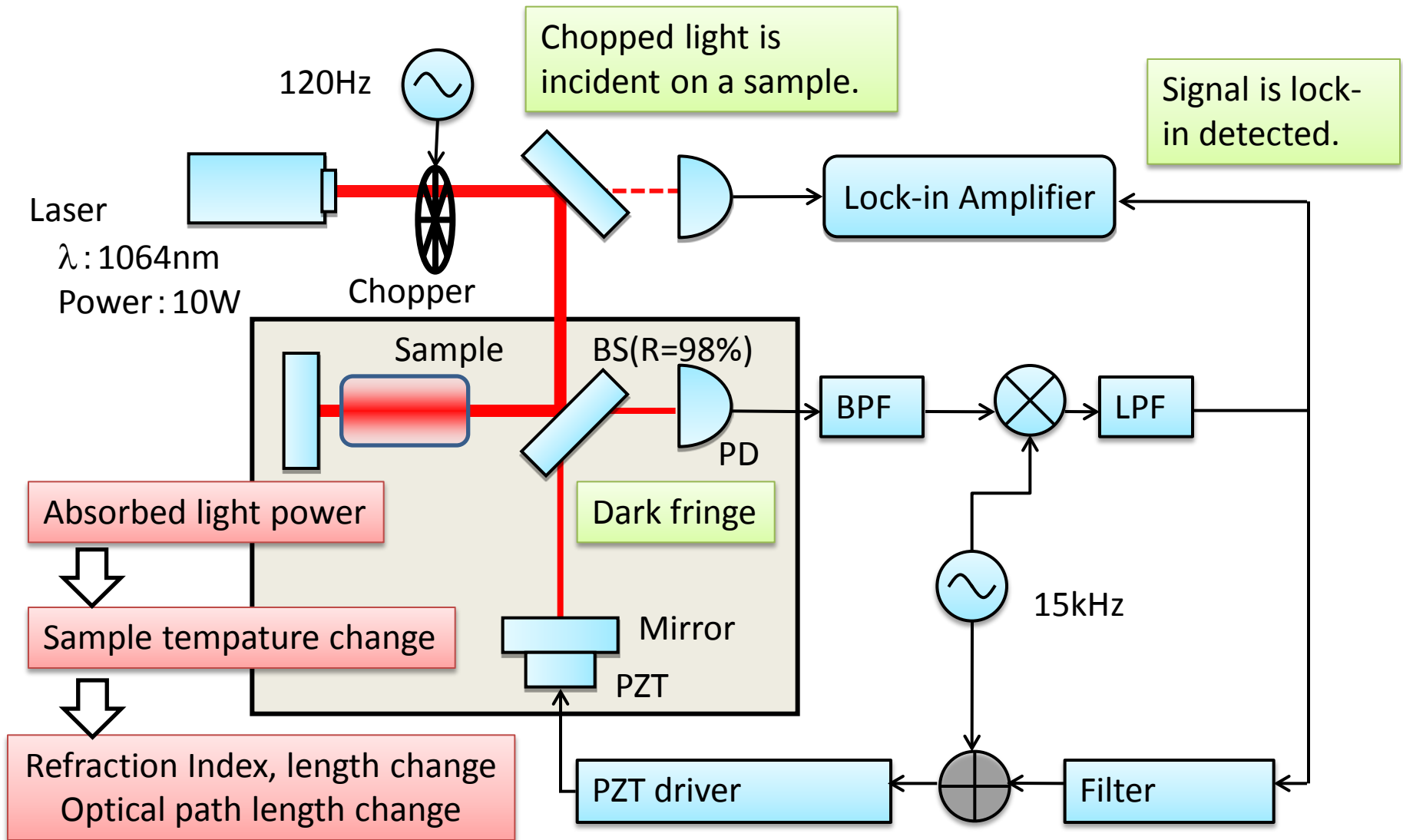
最終的な性能確認はCLIOの環境を利用予定

LCGT用高品質サファイア結晶の 評価装置の開発

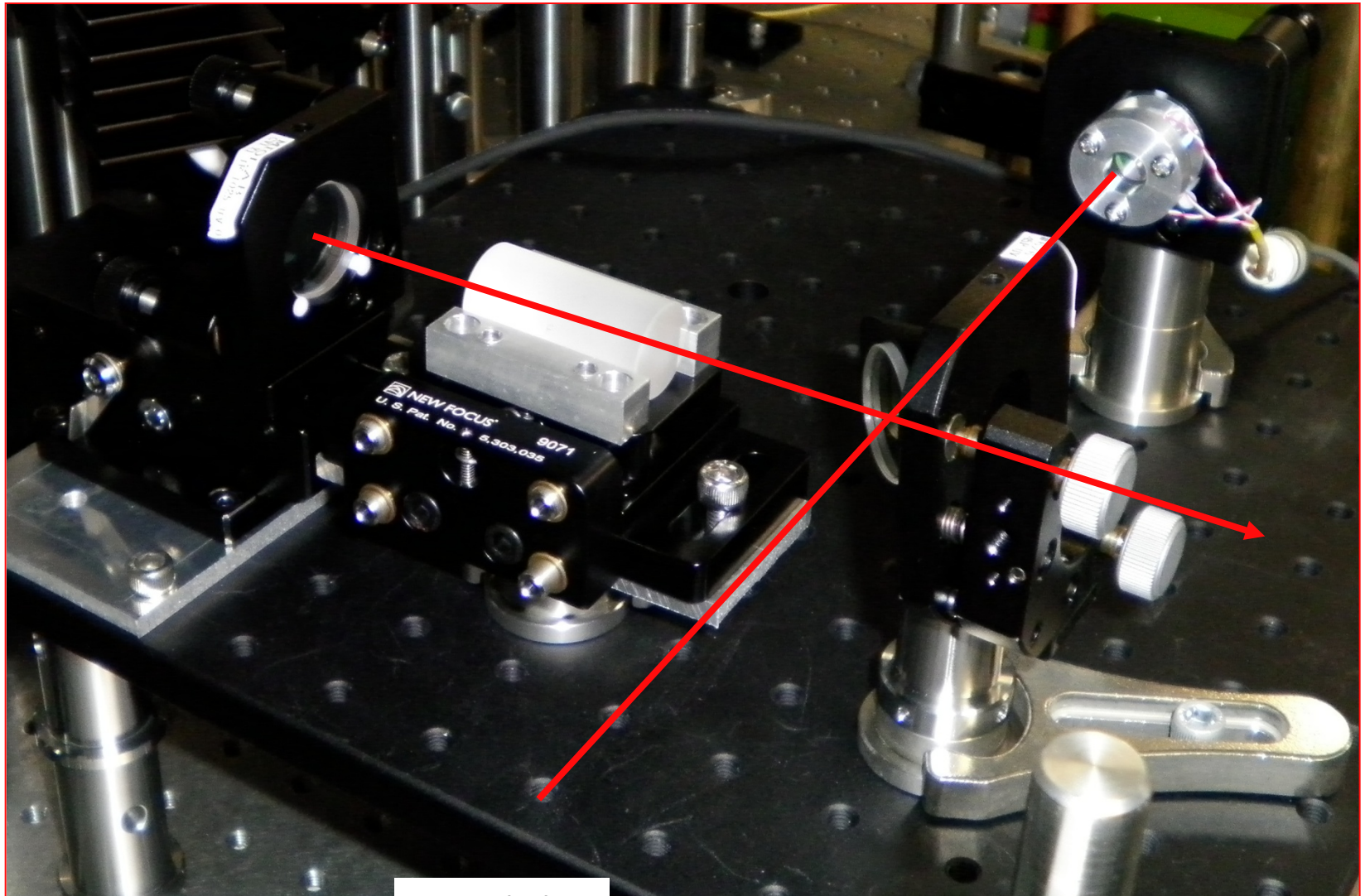
研究代表者：東大工 三尾典克

査定金額： 物品費のみ30万円

Absorption measurement@UT



Interferometer



Laser light

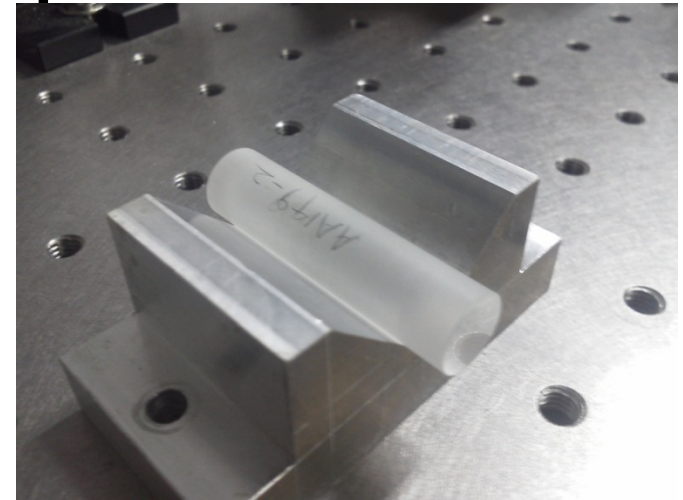
Sapphire sample

C-axis rod (diameter: 10mm, length: 40mm)



CRYSTAL SYSTEMS

27 CONGRESS STREET
SALEM, MA 01970
978.745.0088 FX 978.744.5059
www.crystalsystems.com



PRICE QUOTATION

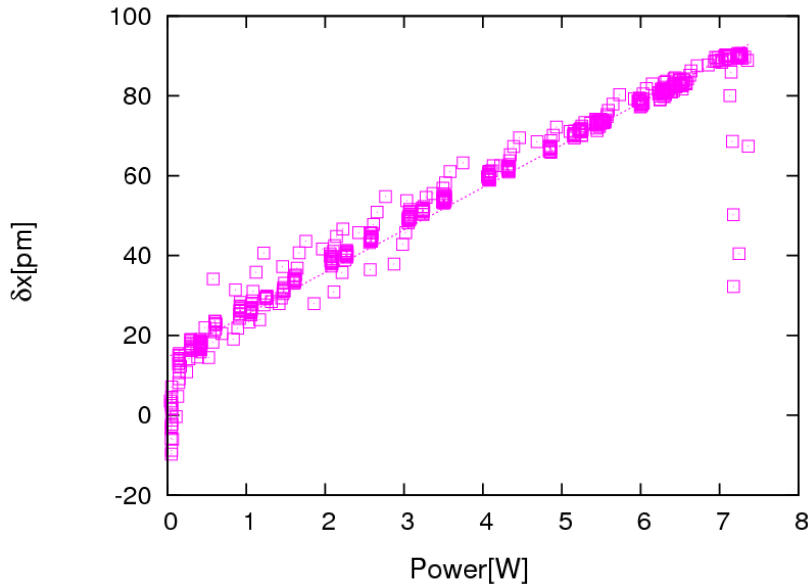
TO: University of Tokyo
ATTN: Norikatsu Mio

DATE: 11/25/09
QUOTE #: 11-10-107-1
RFQ #: LCGT
NO. PAGES: 1

QUANTITY	DESCRIPTION	UNIT PRICE
	HEM CSI White Premium Optical Grade Sapphire Test Rods (0001)±1° 10.00 mm ± .1mm Ø x 40.00 mm ± .1mm Long 10-50 polish ends, fine grind OD Ends flat to λ/4 within an 80% C.A. Ends parallel to < 1 arc minute	US Dollars

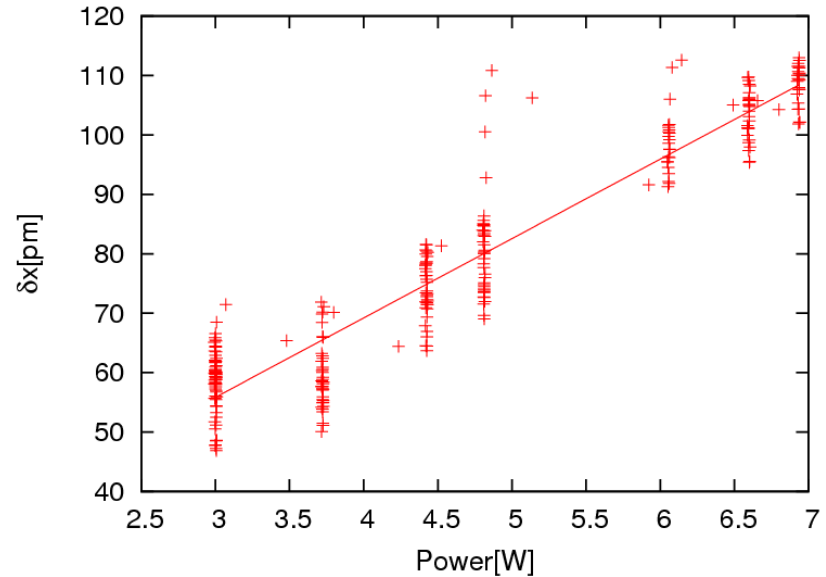
Results of Sapphire

Measurement in last year



80ppm/cm

Measurement in this year



87ppm/cm

The result was reproduced but the noise level of the interferometer became worse; the origin of the noise has not been identified.

Calibration for sapphire has not been done



Absolute values may contain large uncertainty!

Preliminary results

10 Samples

Name	Absorption [ppm/cm]			
AA149	48	47		
AC150	229	138	682	687
P401	34	32	65	67

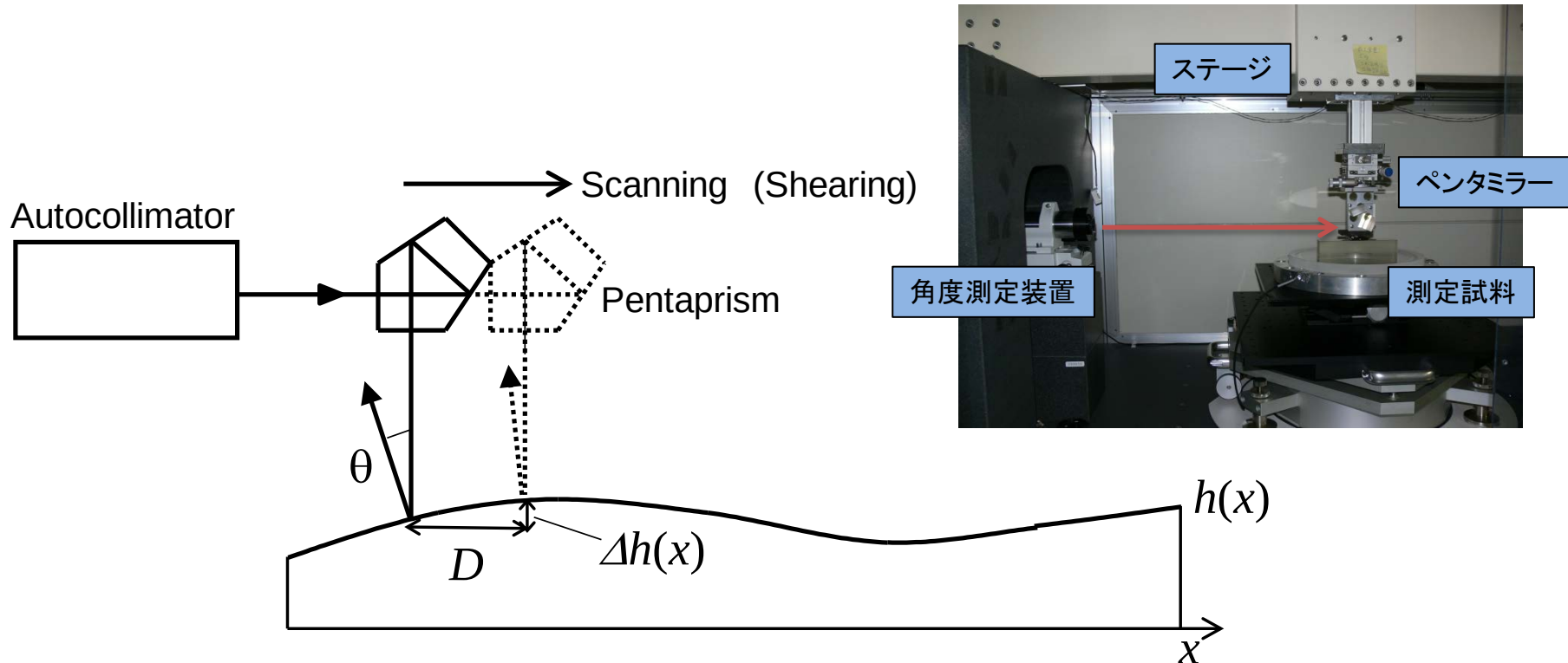
- AA149 and P401 show better performance compared with the last year sample.
- AC150 shows quite high absorption; why ?
- P401 contains lower and high absorption pairs. what is the difference?
- Information has been fed back to CSI.

重力波検出器用大型鏡の絶対形状 計測に関する研究

研究代表者：産総研・計測標準 高辻利之

査定金額： 物品費40万円 旅費2万円

角度測定を利用した超高精度形状測定装置の開発

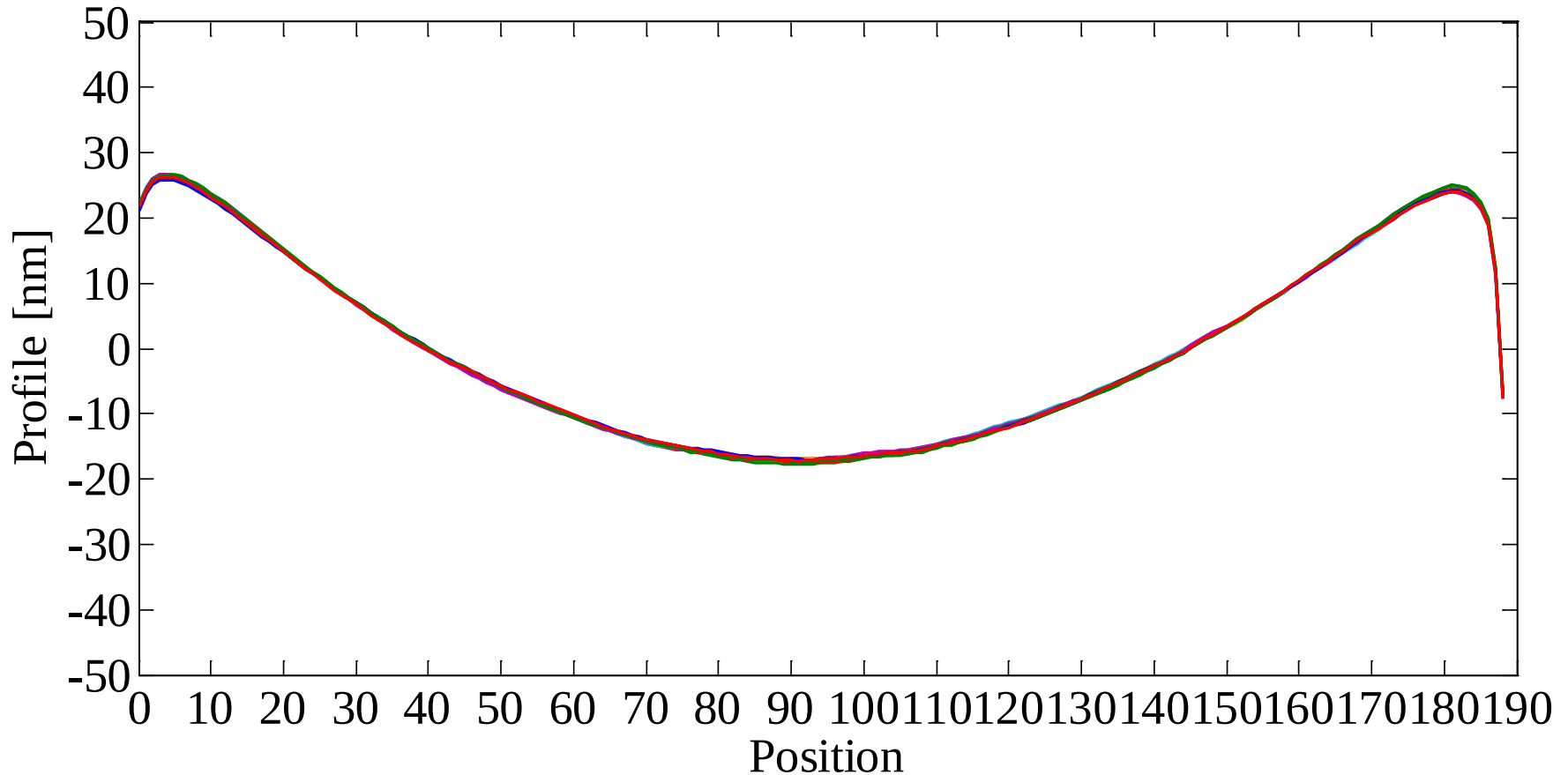


- ・オートコリメータと走査機構により試料表面の角度分布を測定
- ・ペンタゴンプリズムにより走査機構のエラーをキャンセル
- ・角度分布を積分することにより表面形状を算出

繰り返し測定結果

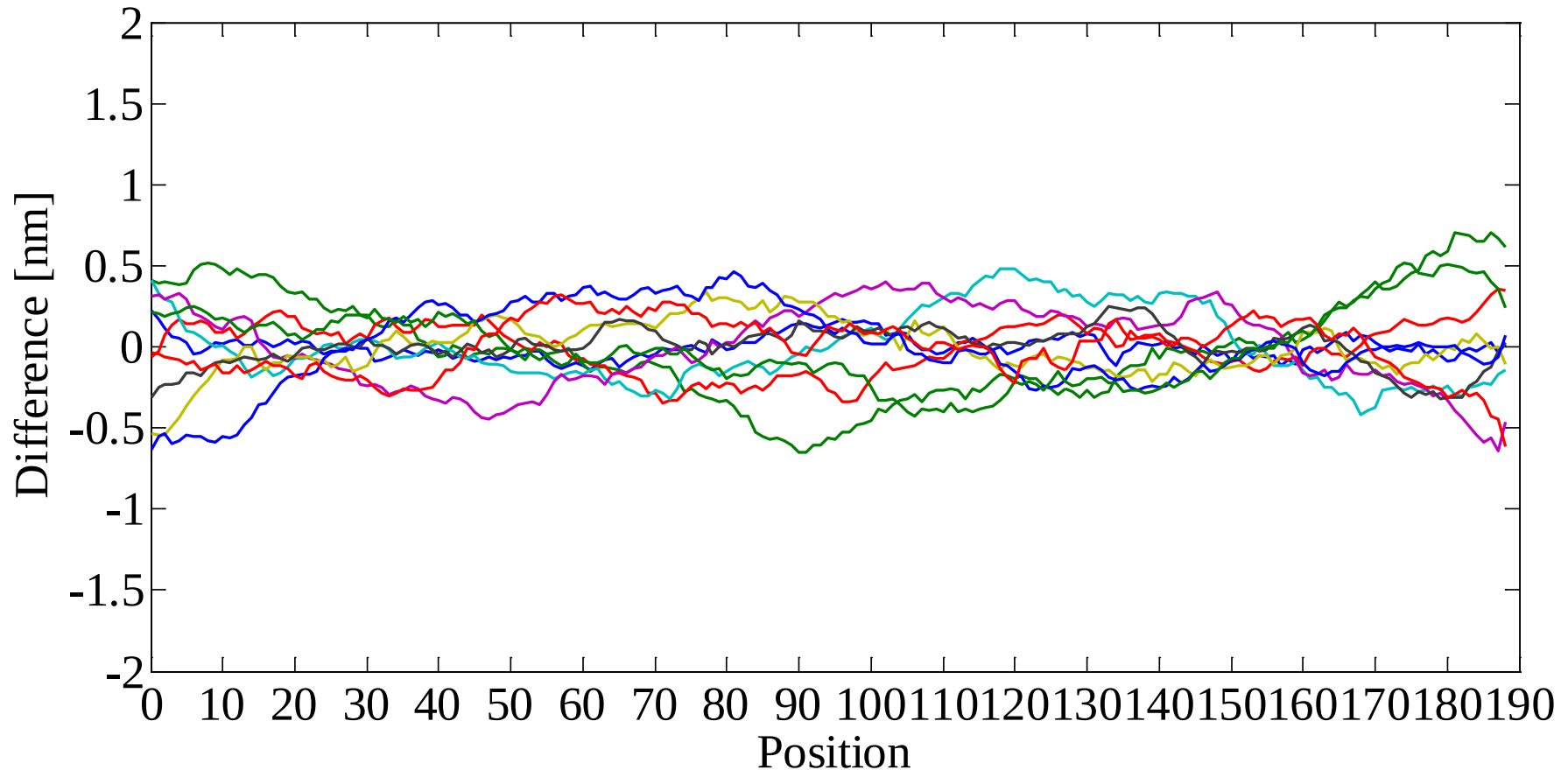
測定対象: バーミラー

寸法 : 30 mm × 30 mm × 190 mm



全10回の測定曲線の平均曲線のPV値: 43.5 nm

繰り返し測定のばらつき



繰り返し性: 0.7 nm以下(PV値)

LCGTにおける量子雑音と量子非破壊 計測に関する研究

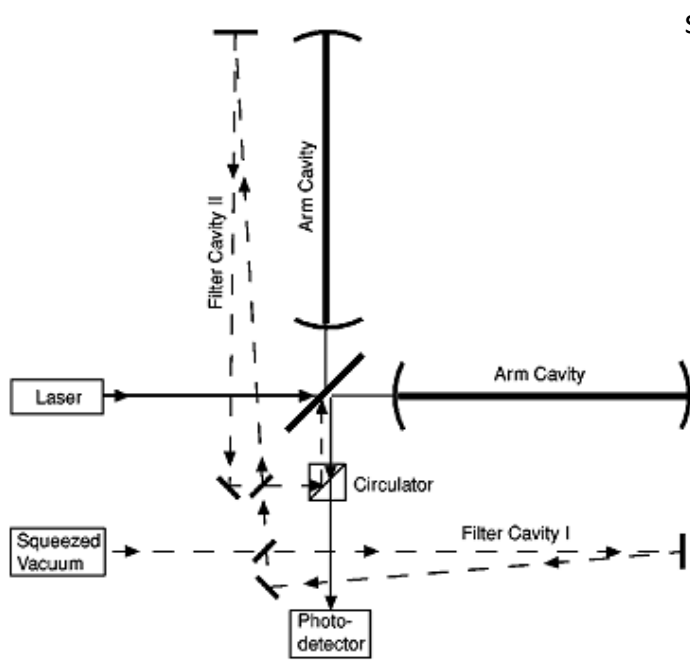
研究代表者：東工大（申請時、早稲田大）

宗宮健太郎

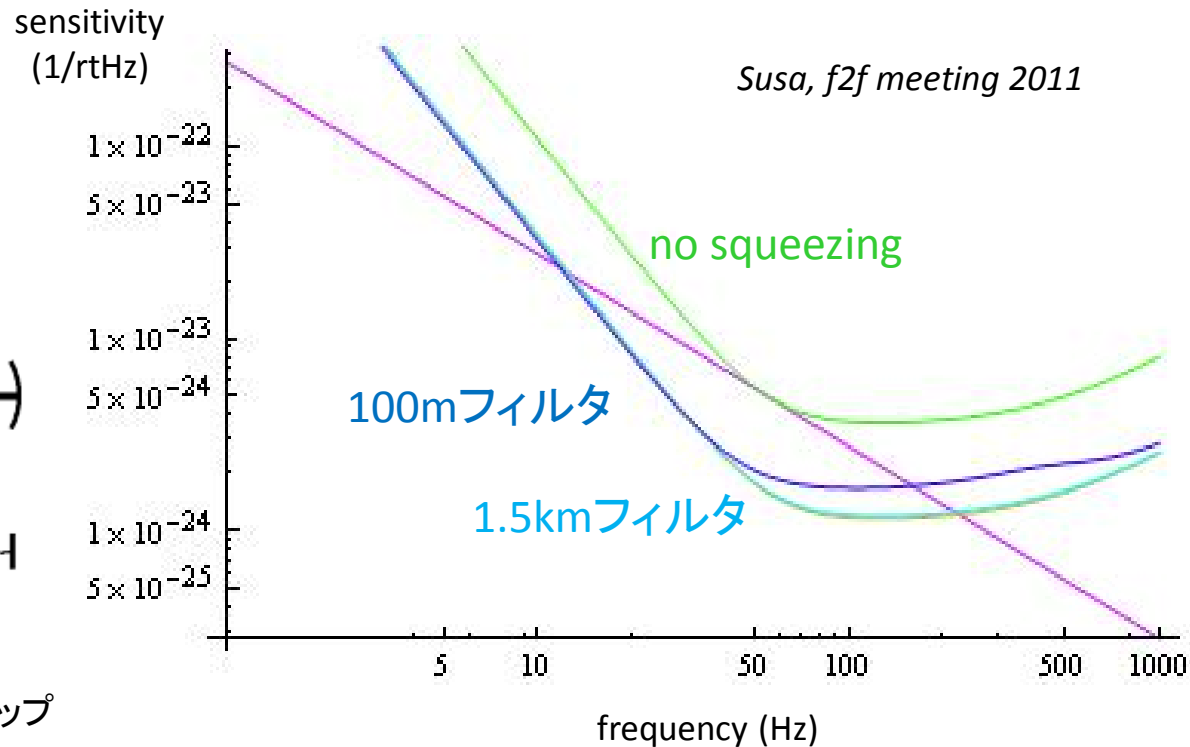
査定金額： 旅費のみ20万円

LCGTの量子雑音研究(1)

~周波数依存型スクイーミング~



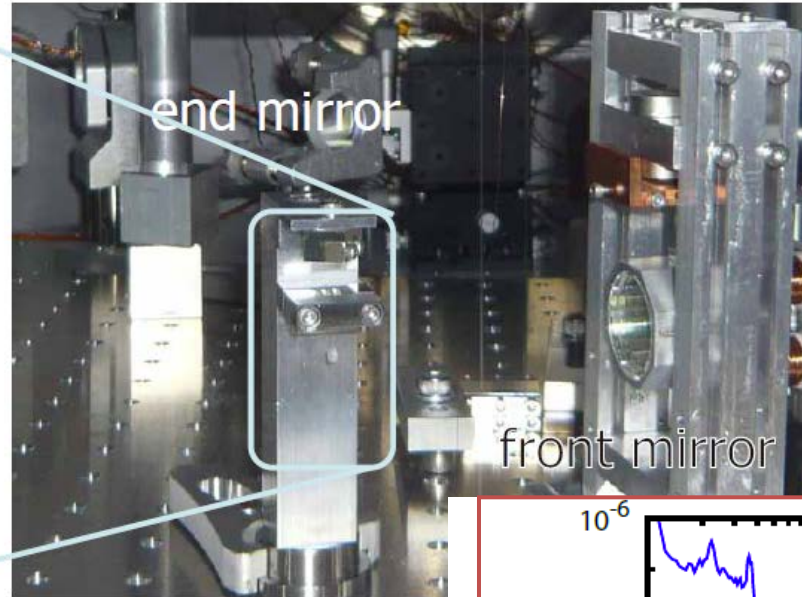
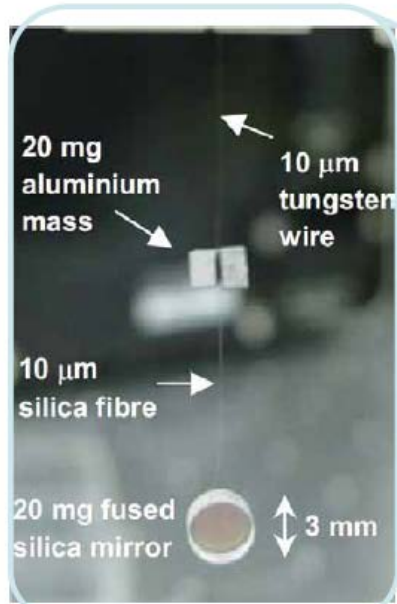
周波数依存型スクイーミング用セットアップ
(Kimble 2002)



- LCGTへの周波数依存型スクイーミング導入を検討
- 40ppmの光学ロスを含めたモデルで感度を計算

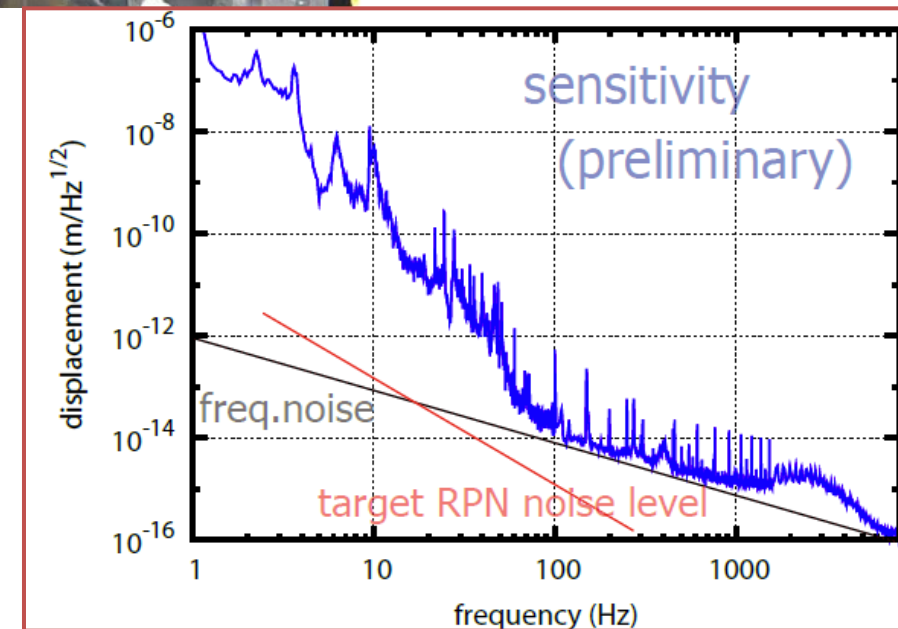
LCGTの量子雑音研究(2)

~輻射圧雑音測定実験~



Mori, Amaldi9

- 国立天文台で実験
- 20mg鏡
- 1kHzのポンデロモーティブスキーズ検証を目指す



まとめ

- 建設は遅れ気味ながら進み、空洞掘削の業者が決まった
- 現在措置されている最先端研究基盤事業では、開発研究費や研究打合せ旅費など運営にかかる経費が0
- 共同利用研究費の配分でしのいでいる状況
- 大型科研費や国際交流のための基金に申請中だが予断を許さない