

大型低温重力波望遠鏡に関する研究(III)

Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (III)

ICRR, Utokyo

Kazuaki Kuroda

今年度の課題一覧(除:神岡での研究)

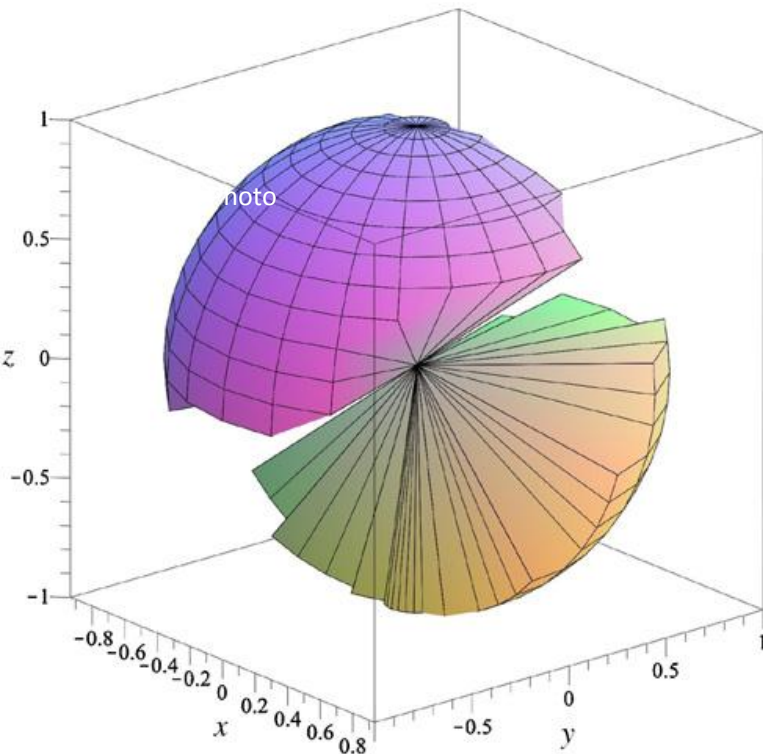
Research subject list in FY 2013

所 属	研究代表者	研 究 課 題 名		物品費	旅費	合計
自然科学研究機構 分子科学研究 所理論・計算分子科学研究領域・ 特任准教授	鹿野 豊	KAGRAにおける次世代高精度量子干渉計のための研究 開発	継続	0	200	200
東京工業大学理工学研究科・准教	宗宮 健太郎	KAGRAのためのアウトプットモードクリーナー 開発	新規	300	100	400
東京大学宇宙線 研究所・准教授	三代木 伸二	重力波望遠鏡における、電磁波散乱・伝搬シミュレー	新規	100	200	300
東京大学宇宙線 研究所・特任助教	高橋 竜太郎	KAGRAのための低周波防振装置の研究	継続	200	400	600
新潟大学工学部電気電子工学科・ 教授	佐藤 孝	KAGRA用レーザービーム位置検出器及びレーザー ビーム位置制御器の開発	新規	150	300	450
高エネルギー加速器研究機構超伝 導低温工学センター・教授	鈴木 敏一	KAGRA(LCGT)のための単結晶サファイア鏡懸架の開 発(VIII)	継続	600	100	700
大阪市立大学大学院理学研究科・ 教授	神田 展行	KAGRAデータ解析の研究およびシステム検討(Ⅲ)	継続	0	250	250
産業技術総合研究所計測標準研 究部門・研究副部門長	高辻 利之	重力波検出器用大型鏡の絶対形状計測に関する研究 3	継続	400	20	420
高エネルギー加速器研究機構共通 基盤研究施設・超伝導低温工学セ ンター・准教授	木村 誠宏	超低振動冷凍機の開発	継続	150	100	250
東京大学宇宙線 研究所・特任助教	山元 一広	大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)の低温懸架系の研究	継続	400	100	500
東京大学宇宙線 研究所・教授	黒田 和明	大型低温重力波望遠鏡に関する研究(Ⅲ)	継続	0	300	300
横浜市立大学生命ナノシステム科 学研究科・教授	ミケレット・ル ジェロ	重力波光学検出のため超 高感度シャドウセンサーの開 発	新規	600	30	630
富山大学大学院 理工学研究部・教	廣林 茂樹	NHAを用いた重力波の検出に関する研究	新規	0	200	200
富山大学大学院 理工学研究部・教 授	小野 行徳	電子スピン共鳴を用いたKAGRA用サファイアミラーの キャラクタリゼーション	新規	350	100	450
東京大学大学院工学系 研究科・特 任教授	三尾 典克	KAGRA用レーザー光源の安定化装置の開発	新規	300	30	330
富山大学大学院 理工学研究部・教	松島 房和	KAGRAにおけるレーザー強度安定化のためのR&D	新規	400	200	600

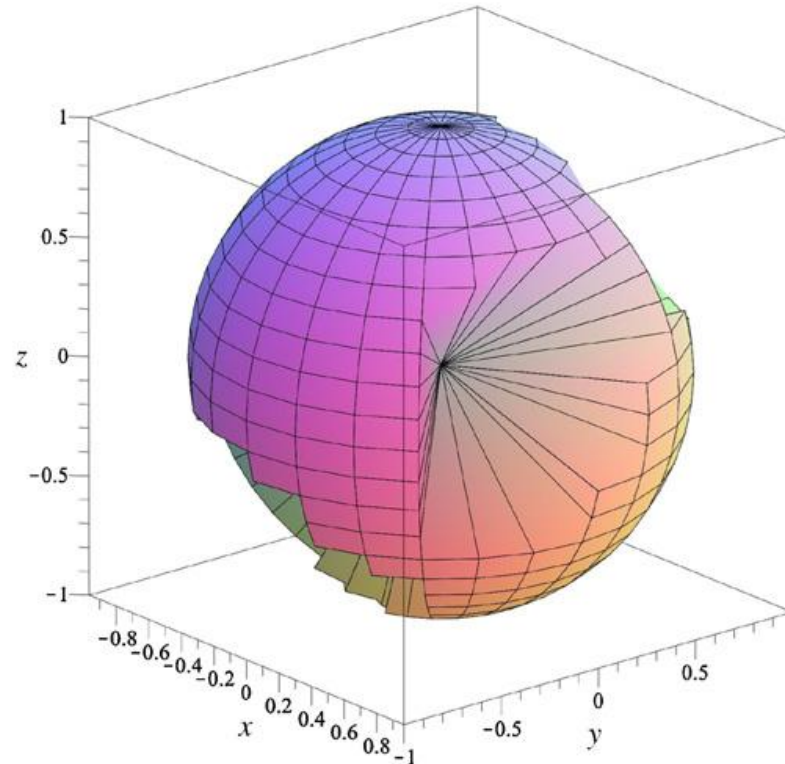
KAGRA の目的

- 1年間の観測で確実に重力波を検出 (平均感度100Mpcが必要)
- 重力波天文学の創生
 - 世界観測網の構築

Hanford (double) + Livingston + VIRGO isotropy coverage at 0.707 of maximum range



Hanford (double) + Livingston + VIRGO + LCGT isotropy coverage at 0.707 of maximum range



CQG 28 (2011) 125023 B.F.Schutz

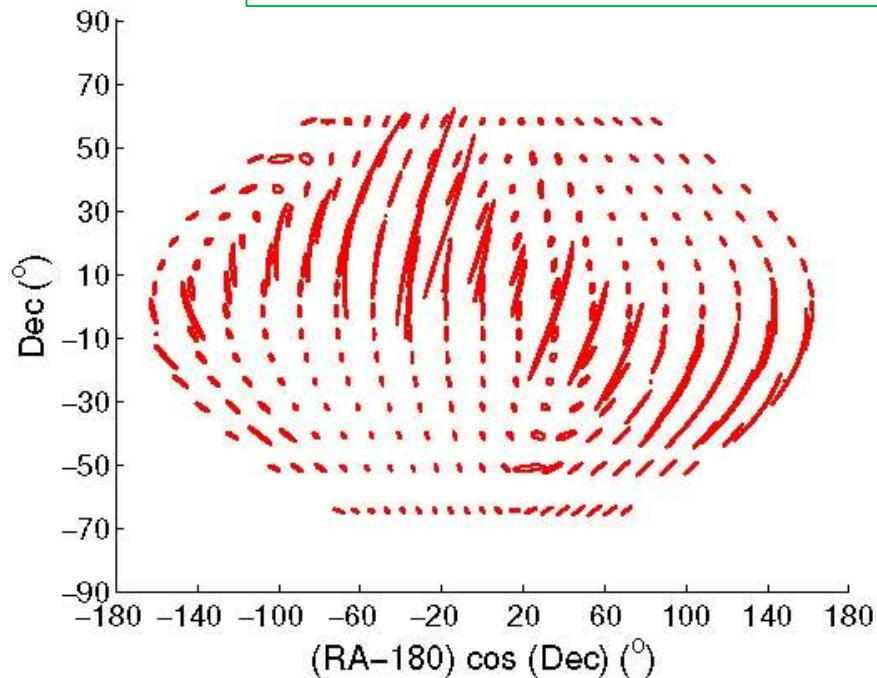
KAGRA enhances sky coverage !



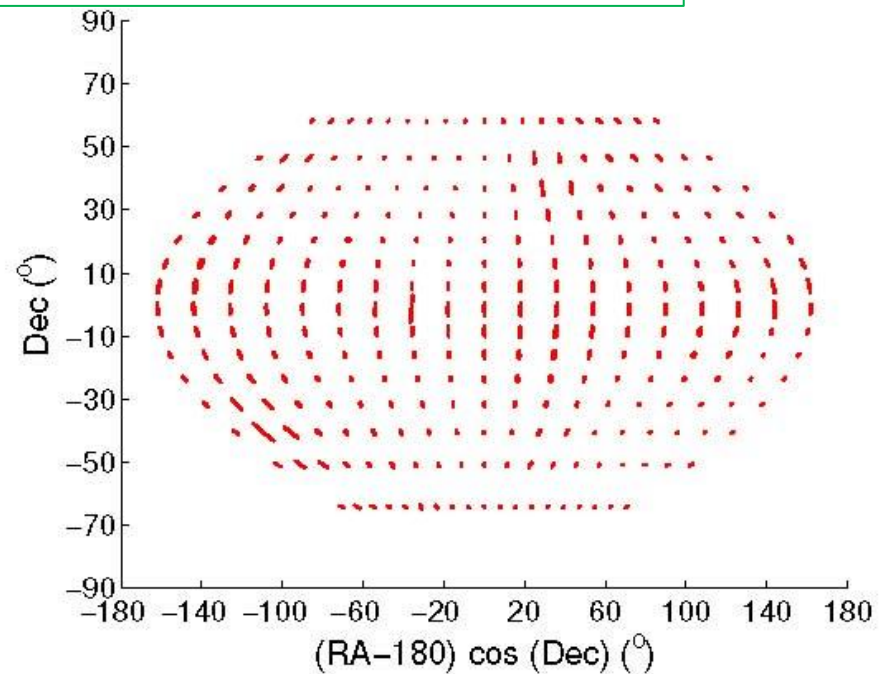
Higher sensitive GW detectors are needed to catch events occurring in more than 100Mpc.

KAGRA による位置決定精度の向上

KAGRA improves localizing capability of GW sources by 3-5 folds (India-LIGO and AIGO will make 11)



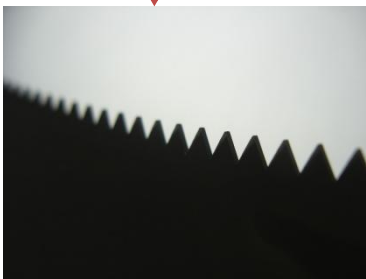
(b) LHV best case



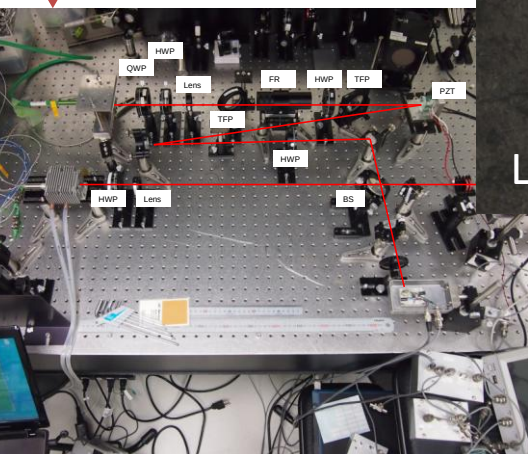
(f) LHVJ best case

Qi Chu, Linqing Wen, David Blair, J. Physics Conf. Series 363 (2012) 01203

Laser sawed optical baffle



High power laser:
Coherent addition



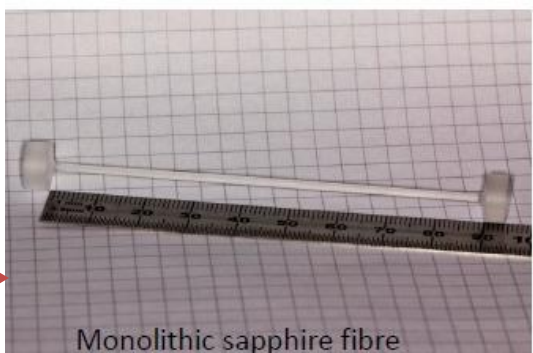
Suspension sapphire fiber



Pathfinder
Highest quality
Sapphire substrate

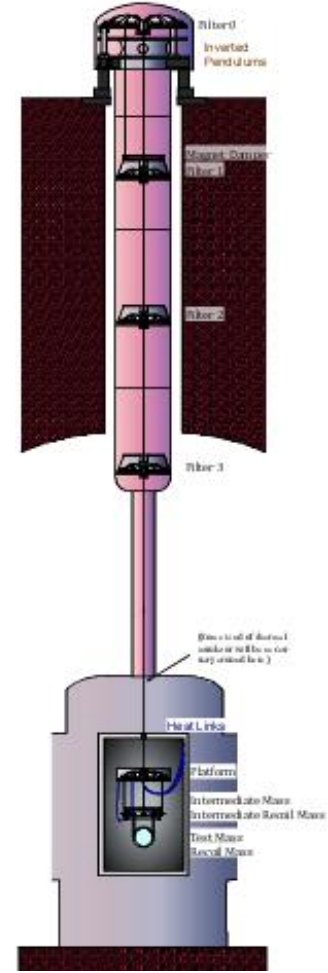


Located underground at Kamioka mine

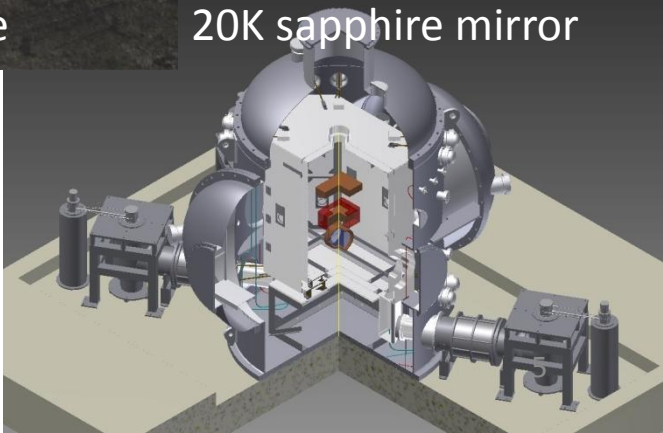


Monolithic sapphire fibre

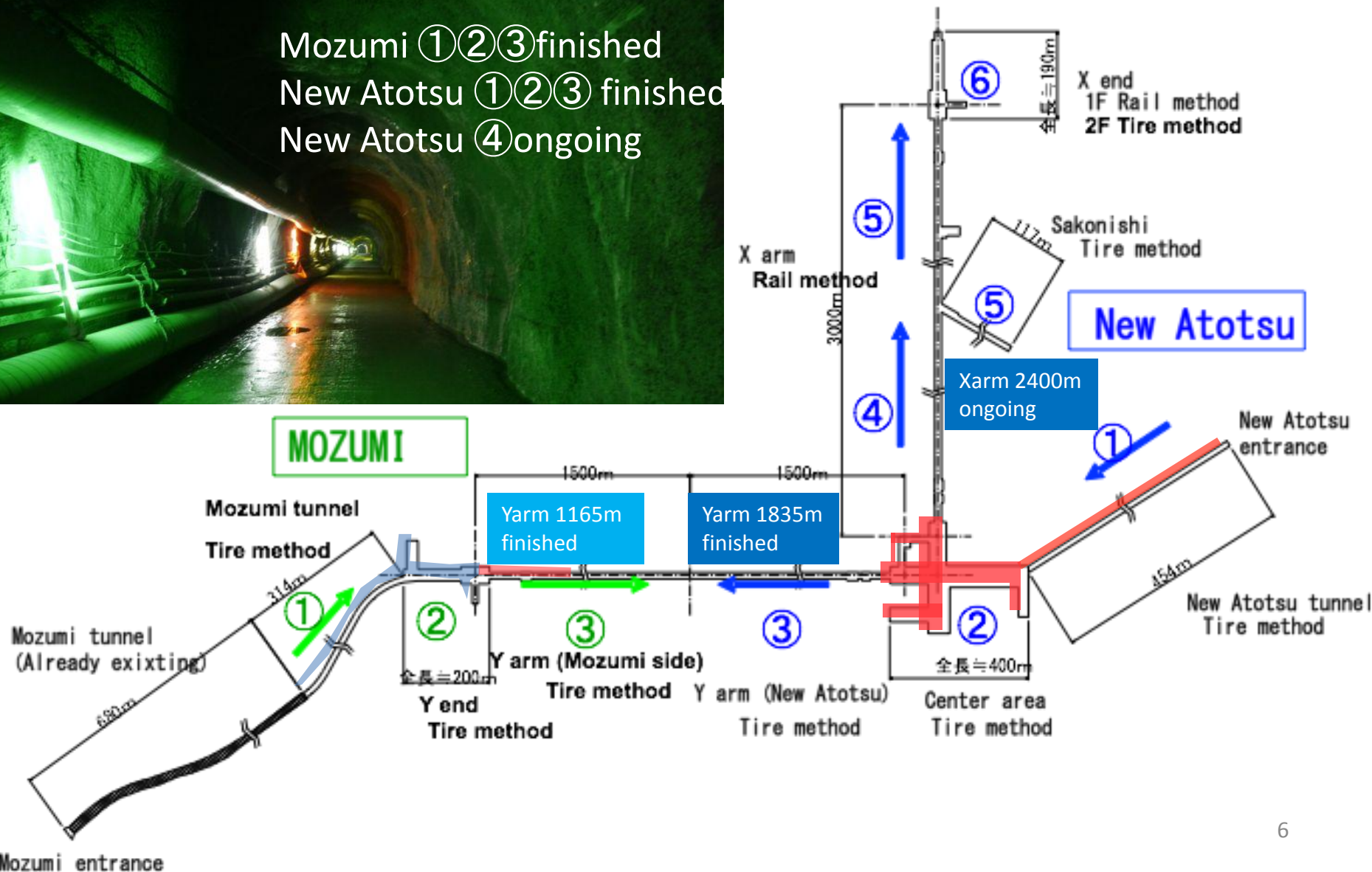
Double floors
SAS system



20K sapphire mirror



空洞掘削状況(9th, December)



Surface building

- Office space available in refurbished kindergarten
- New building for data storage and computing under construction



(reburbished in August, 2012)



(will be finished this month, 2013)

研究代表: 高橋竜太郎

研究目的

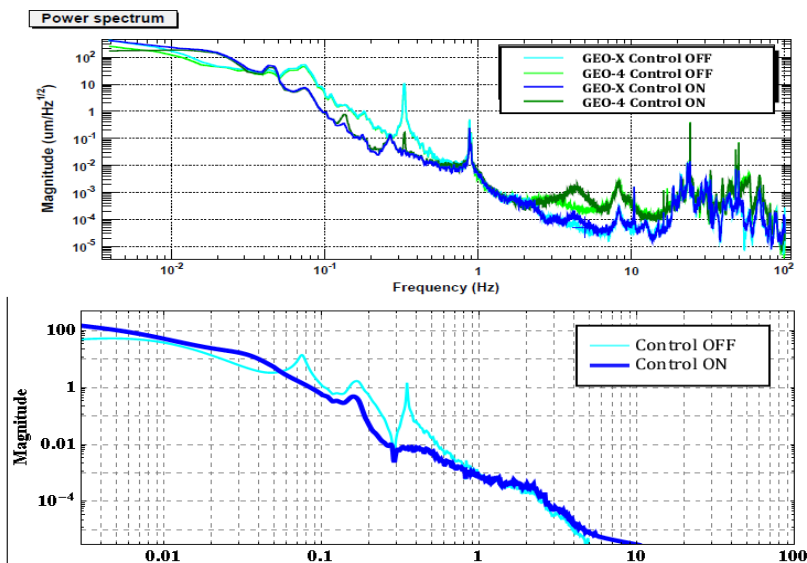
KAGRAで使用する低周波防振装置の性能を確認・評価し、そのハンドリングや制御を確立する。

成果

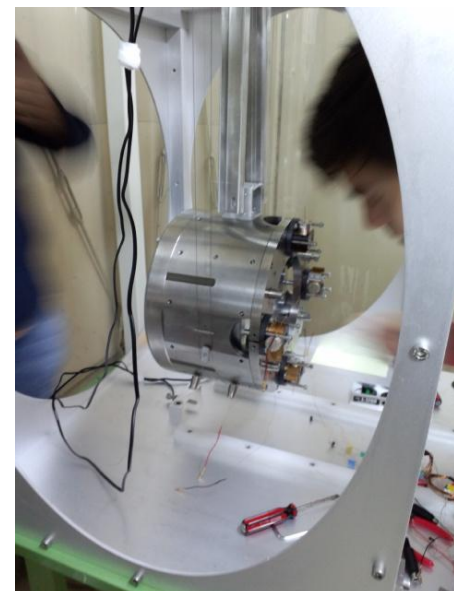
- Top filterの実機を明野観測所に設置されたクリーンブース内で最終確認。
- Pre-isolatorプロトタイプに慣性センサ(geophone)を取り付け、デジタルシステムを用いて制御の試験を行い、倒立振り子の慣性ダンピングに成功。
- Payloadプロトタイプのアセンブリを行い、ローカルセンサを用いた特製評価を実施。



柏キャンパスにおけるPre-isolatorのプロトタイプ試験



Geophoneとvoice coilを用いた倒立振り子の3自由度制御の結果



Payloadプロトタイプの特
性評価試験

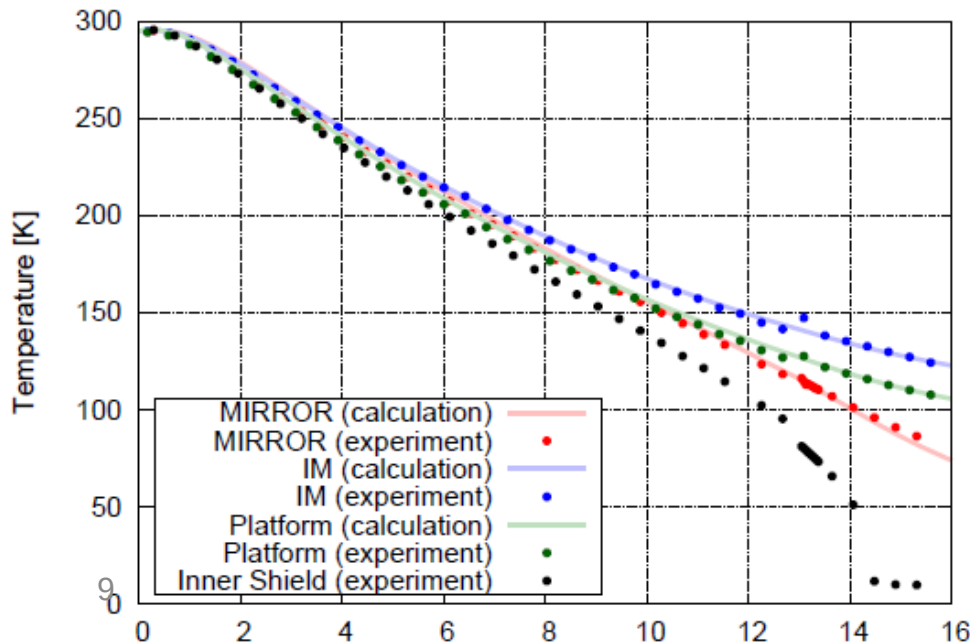
大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)の低温懸架系の研究

研究代表: 山元一広

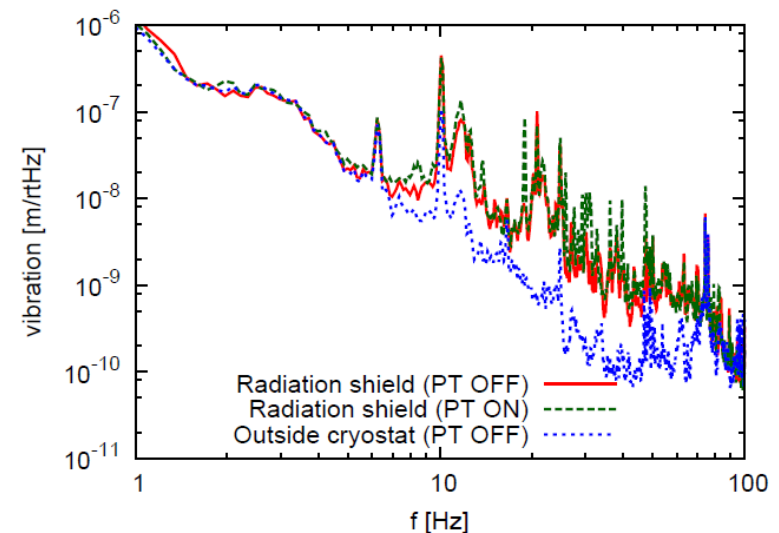


KAGRA cryostat冷却試験を利用した実験

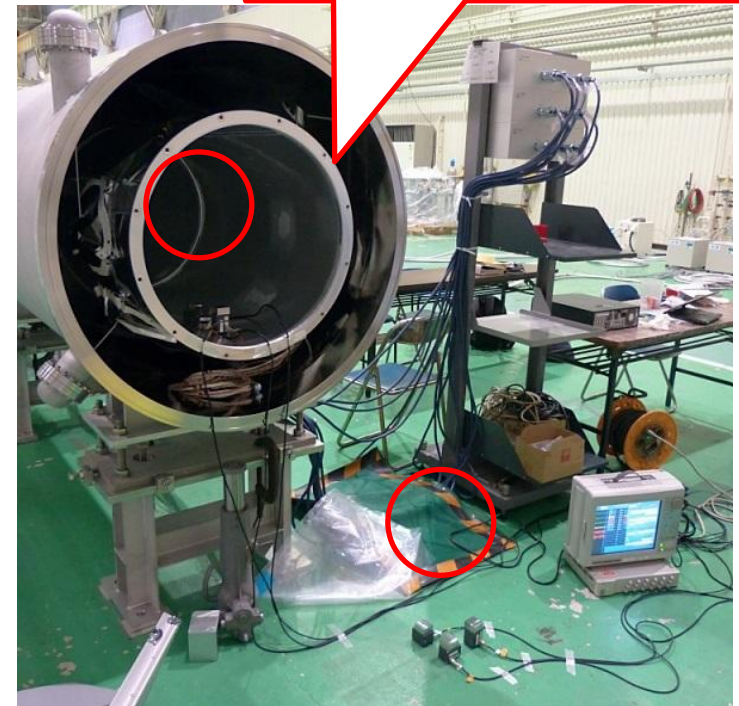
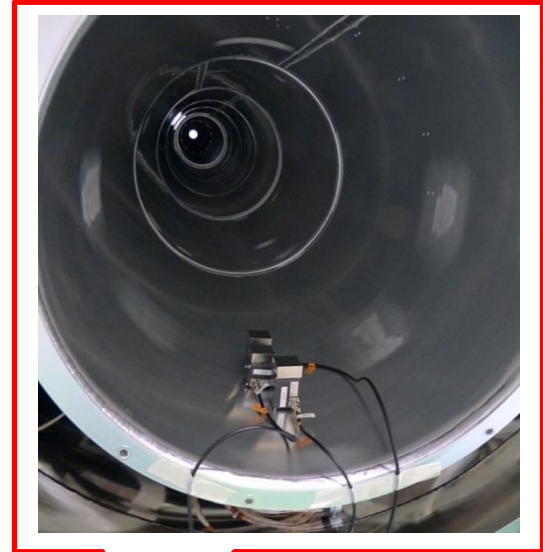
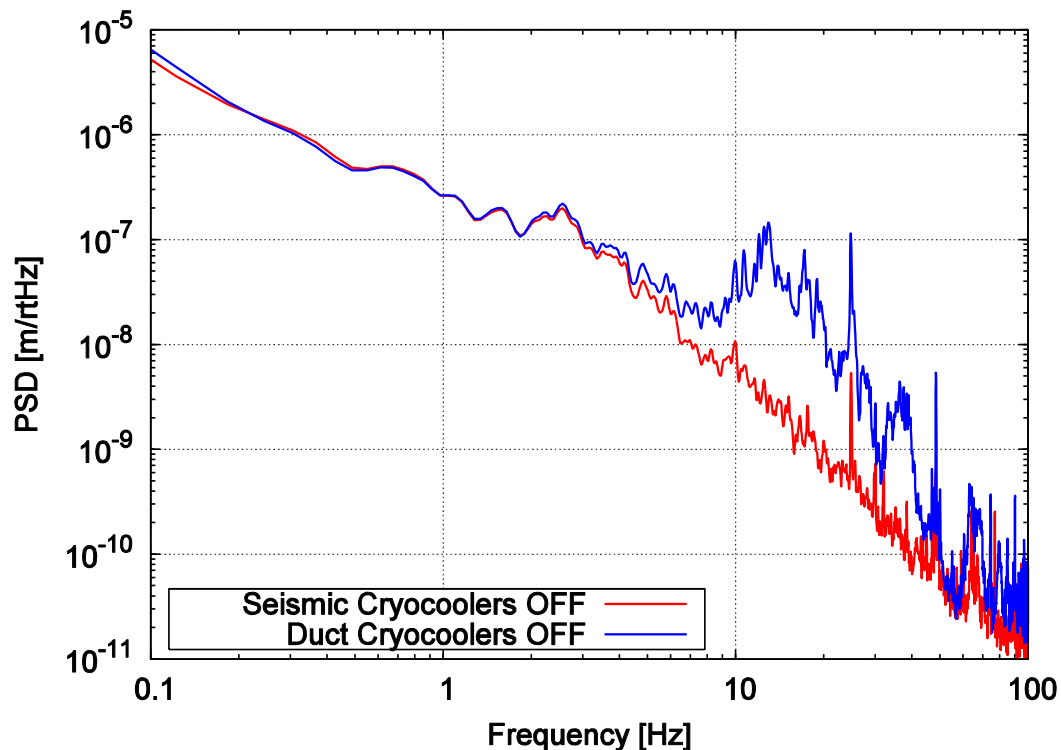
初期冷却に関する実験:
Black coatingが冷却時間を短縮することを確認。



輻射シールド振動測定: 無事測定終了。
懸架系の設計に活かす。
ELiTES(ヨーロッパの次世代計画Einstein Telescopeとのcollaboration)の支援を受けている。



- 2013年度の計画
 - ダクトシールド用単段冷凍機の防振R&D
 - 試作ダクトシールドを使用した冷凍機の振動に起因する散乱光雑音の評価
- 加速度計によって3軸方向を測定
- 結果: 冷凍機防振構造の更なる改善が必要
→ 実機で改善

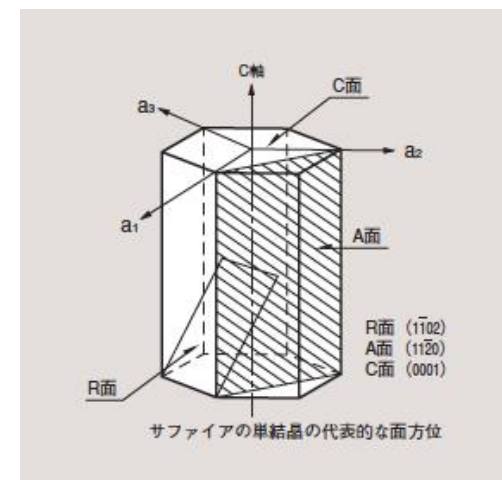
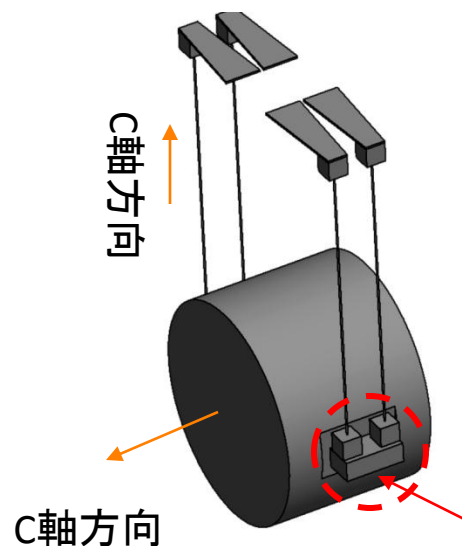
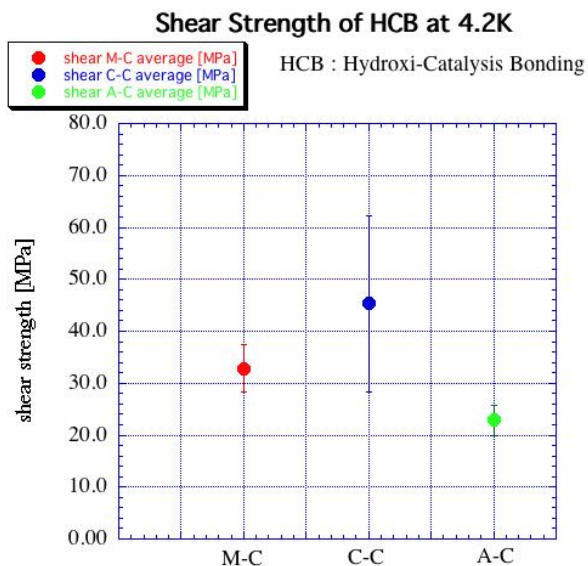


課題名: LCGTのための単結晶サファイア鏡懸架の開発(VIII)

- サファイアの接合技術 -

代表: 鈴木敏一

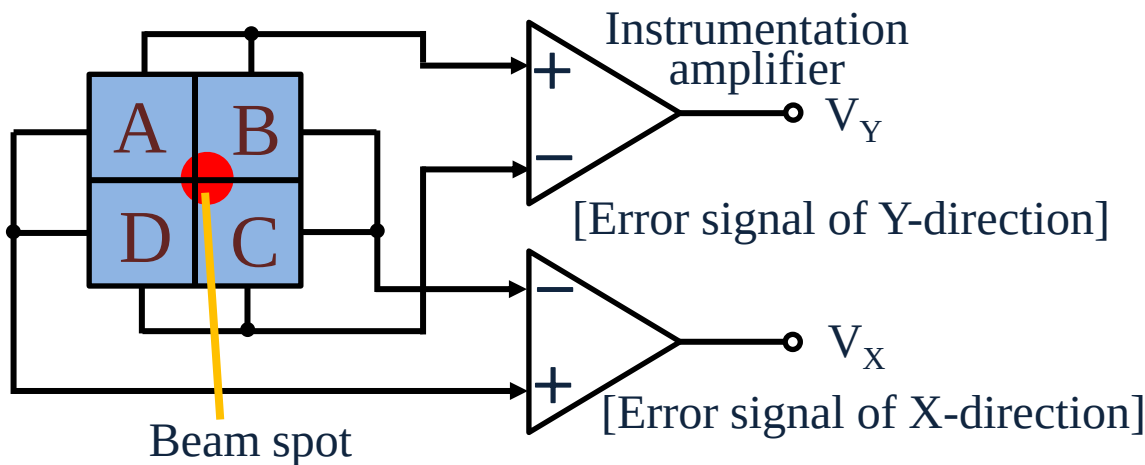
- サファイアのM-C, C-C, A-C接合サンプルを作成し4.2Kでの剪断強度を測定した。
 - 接合サンプルサイズ 5mm x 5mm x 10mm
 - 接合法 Hydroxi-Catalysis Bonding法
 - サンプル数は各接合10組
- 4.2Kにおける剪断強度
 - M-C接合 38.2 ± 4.6 MPa、C-C接合 45.3 ± 16.9 MPa、A-C接合 22.9 ± 5.9 MPa
- Summary
 - 異なる結晶面間でもKAGRA鏡の支持に必要な強度が得られた
 - ダスト管理などから強度のバラツキを小さくする課題は残っている。



この部分で結晶方位の異なる面の接合が必要

Beam Position Monitor/Control (QPD)

新潟大学工学部: 佐藤 孝 大河正志 清水直弥 飯島音浩
防衛大学校: 上原知幸



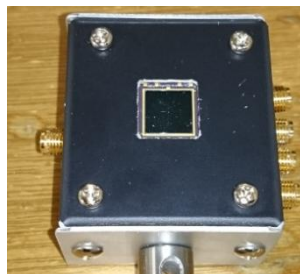
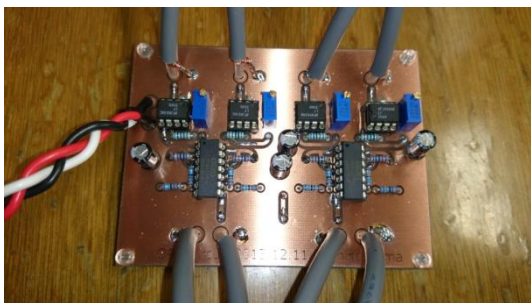
At the case of left figure:
 $V_X > 0$
 (output of A,D < output of B,C)
 $V_Y < 0$
 (output of A,B < output of D,C)

Feedback to piezo
for beam spot alignment

●今回使用するQPD(浜松ホトニクス社製 4分割フォトダイオード)

型番	受光面サイズ	遮断周波数	感度波長範囲	感度波長(1063nm)
	(mm)	(MHz)	(nm)	(A/W)
S5980	5 × 5	25	320 ~ 1100	約0.68
S5981	10 × 10	20		

●試作したQPD用回路(左: T-Z回路、右: QPD)



新潟大学工学部: 佐藤 孝 大河正志 清水直弥 飯島音浩
防衛大学校: 上原知幸

PSD (Position Sensitive Detector: 位置検出素子)

特徴: 1個の検出器で光の入射位置を検出

利点: 連続した電気信号が得られ, 位置分解能・応答性・信頼性に優れている

●今回使用するPSD(浜松ホトニクス 2次元PSD)

型番	受光面 サイズ	抵抗長	感度波長範囲	1064nm 感度	位置分解能
	(mm)	(mm)	(nm)	(A/W)	(mm)
S5990-01	4 × 4	4.5 × 4.5	320 ~ 1100	約0.58	0.7
S5991-01	9 × 9	10 × 10			1.5

●今回使用するPSD用信号処理回路

信号処理回路(浜松ホトニクス)型番: C4674-01

- ・DC(直流)光専用
- ・出力電圧値=PSD中心からの位置
(1 V = x軸・y軸 1 mm)



レーザー干渉計のミラー用単結晶サファイアの評価



研究代表: 小野行徳

目的:
単結晶サファイア中に意図せず混入する不純物の素性を明らかにするため、電子スピン共鳴法を用いてそのスペクトルを評価する。

実験方法:
電子スピン共鳴法 (ESR: Electron Spin Resonance) を用いて、
① 単結晶サファイアと(比較のため)市販サファイアに含まれる不純物(スピン)密度を評価。
② 不純物の分布を調べるため、結晶のロット間及び、ロット内の位置での不純物密度の依存性を評価。



図: 電子スピン共鳴装置

結果1:
不純物の混入に起因するESR信号が観察された(単結晶、市販サファイアの両方とも)

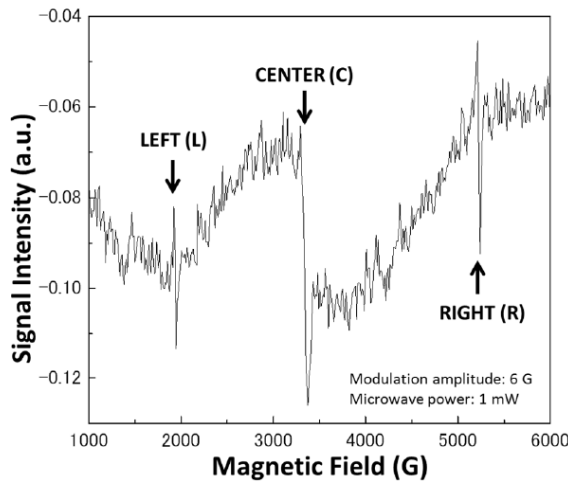


図: 市販サファイアのESRスペクトル
強度の大きい3つの信号(スピン密度: 高)

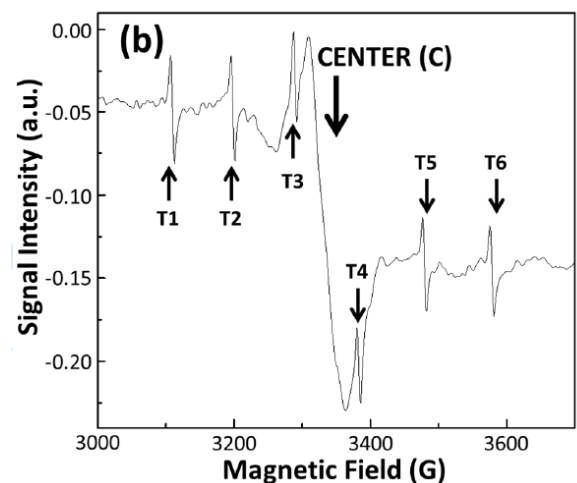


図: 左図の中心付近の拡大図
新たに6つの信号を観察。

結果2:
どのサンプルの信号も不純物密度は、 10^{13} spins/cm³以上の顕著な値を示した。
(単結晶サファイアの密度は市販サファイアのそれよりも小さく、不純物の混入はわずかに抑制されている)
不純物密度は、ロット間でもロット内でもばらついており、分布を有している。



表: 単結晶サファイア、市販サファイアの
信号強度のまとめ

	Spin Density [spins/cm ³]			
	LEFT (L)	CENTER (C)	RIGHT (R)	T
Commercially Available Sapphire	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$
Lot A (Pure Sapphire)	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{14}$	—	—
Lot B (Pure Sapphire)	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{14}$	$\sim 10^{14}$	—

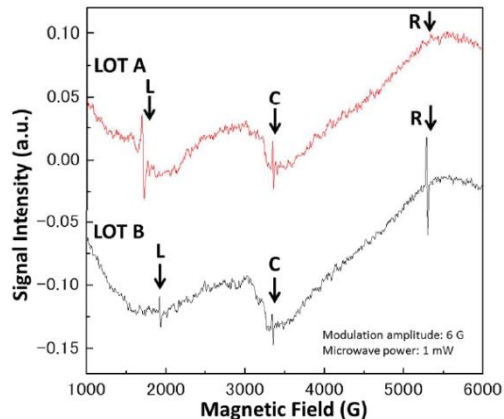


図: ロットの異なる単結晶サファイアのESRスペクトル
右側の信号の有無は、ロットに依存している。

結論
ESR法を用いて単結晶サファイアのスペクトルを初めて明らかにした。(不純物の素性は不明)
1. 市販サファイアでも単結晶サファイアでも意図せず不純物が混入していることが分かった。
2. ロット間、ロット内において、不純物は分布を有していることが分かった。
(単結晶の製造過程で不純物をコントロールできていない可能性がある。)
ロット間ばらつきの原因: サファイア原材料の純度のばらつき(未確定)
ロット内ばらつきの原因: 作製時の温度揺らぎ、温度勾配によるるつぼからの不純物の浸み出し(未確定)

今後の課題
混入している不純物の種類を特定する。(本研究で得たESRスペクトルだけでは特定できない。)
手法: 素性の分かる不純物を意図的に導入したサファイアを作製し、これと比較する。

角度計測に基づく形状測定機の開発

【開発装置の特徴】

- 表面の微小な角度変化を測定し平面形状を算出
- 干渉計測と異なり，参照面を必要としない絶対形状測定装置

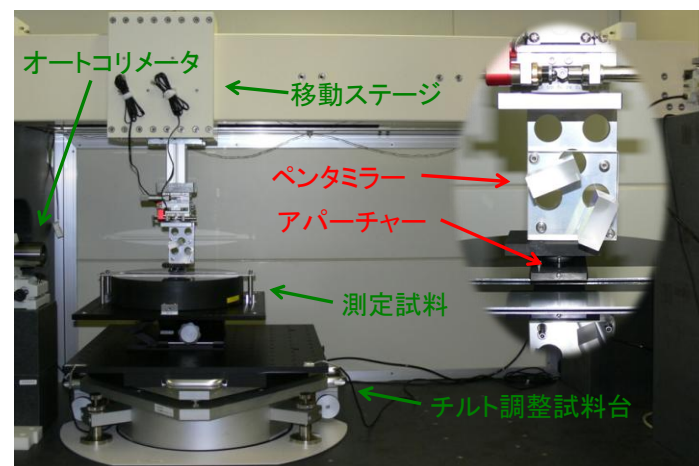
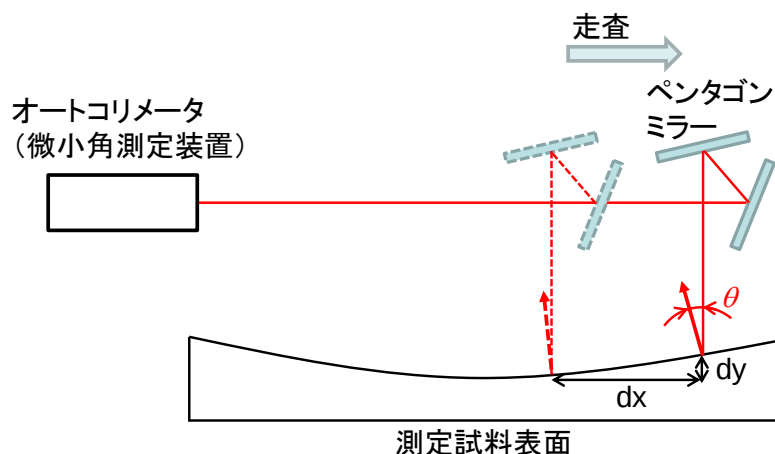
【課題】

絶対形状精度の保証方法の確立

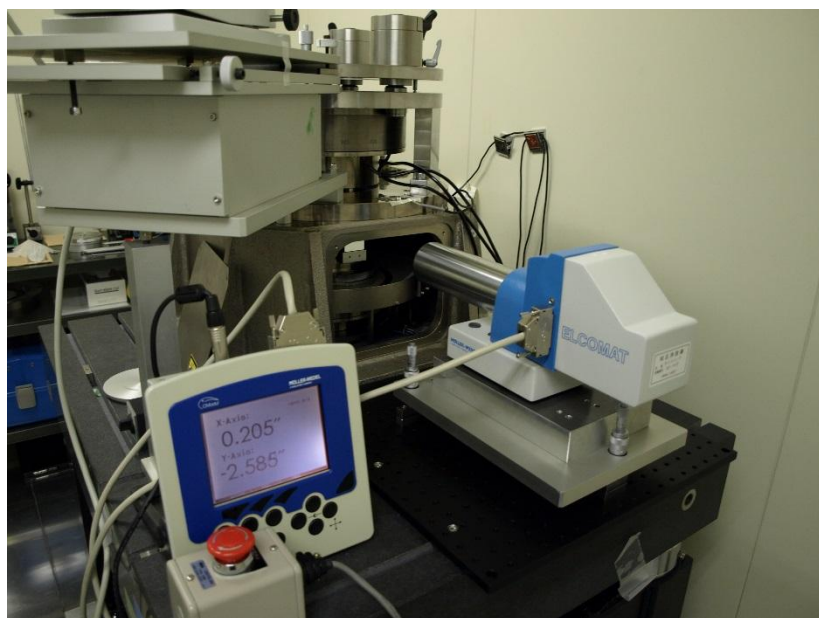
① 不確かさの算出

➤ 特にオートコリメータの測定精度が支配的である(H25年度課題)

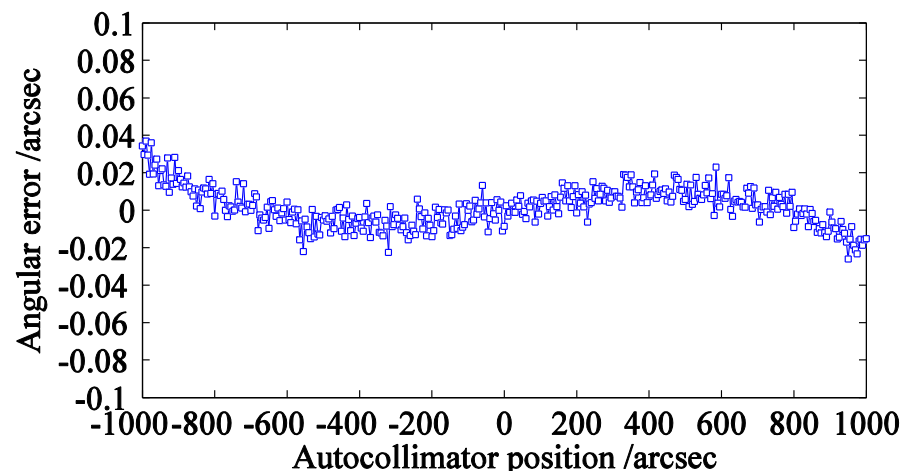
② 比較測定（異なる測定原理）



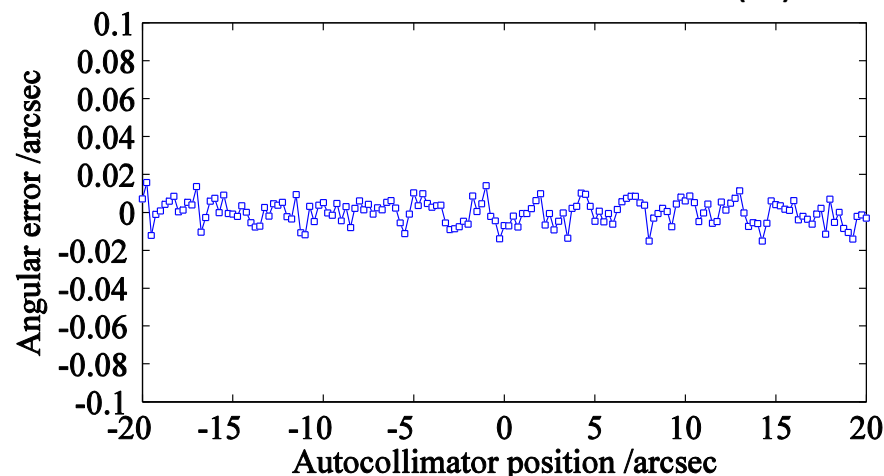
微小角度校正装置による オートコリメータの評価システムの構築



自己校正型ロータリエンコーダに基づく
微小角度校正システム



オートコリメータの校正結果例(1)



オートコリメータの校正結果例(2)

KAGRA 絶対形状測定的主要因素誤差(オートコリメータ)に関する解析

絶対形状測定に関するオートコリメータの系統誤差 e_a の寄与
標準不確かさ u_{sys}

$$u_{\text{sys}} = \frac{e_a}{2\sqrt{3}} \sqrt{N} dx$$

N : 測定点数, dx : 測定ピッチ

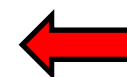
【絶対形状測定の角度測定に伴う不確かさ解析】

解析条件

- ・測定対象ミラー径: $\Phi 100$ mm
- ・測定ピッチ 1mm
- ・オートコリメータ測定範囲: ± 20 秒 (約 R500 m), ± 1000 秒 (約 R10 m)

R: 測定対象ミラー曲率半径

標準不確かさ $u_{\text{sys}} = 0.88$ nm (約 R10 m)
 0.43 nm (約 R500 m)



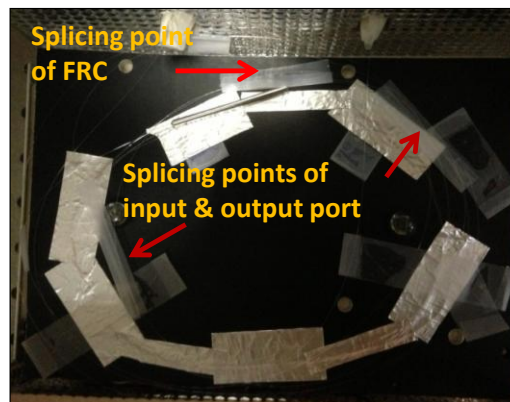
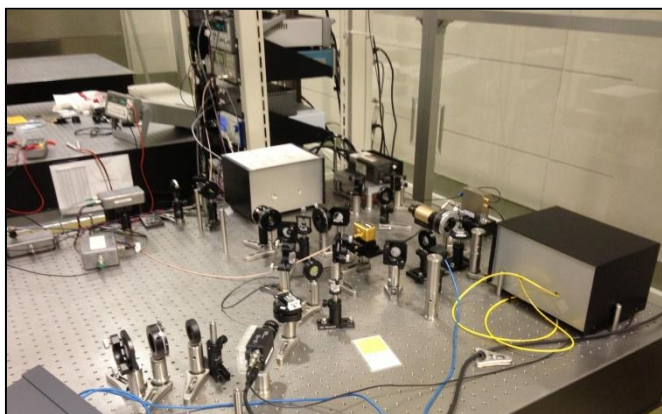
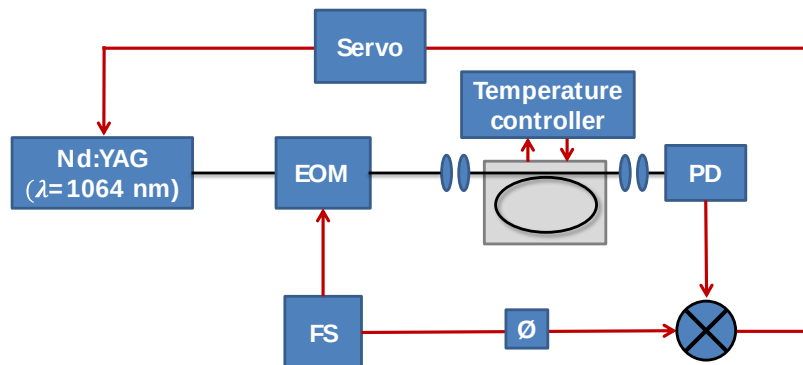
1 nm 以下 !

KAGRA用レーザー光源の安定化装置の開発

高麗大物理 Tai Hyun Yoon, Byunghyuck Moon

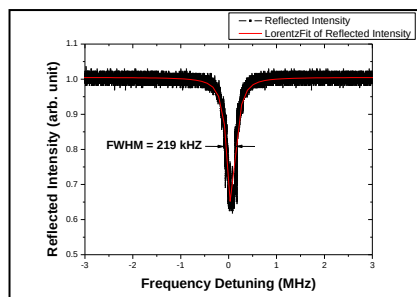
東大工 三尾典克、鈴木健一郎

The KAGRA light source requires extremely high stability ; stabilization systems should be developed.
In this study, we have developed a frequency stabilization system, where we used the fiber ring cavity which has been developed in Korea University as the frequency reference.

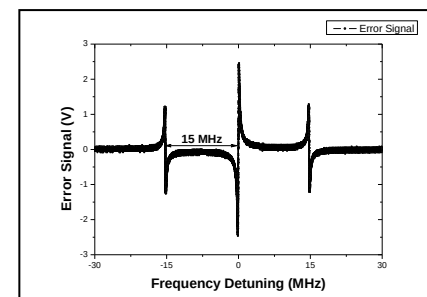


1st Fiber Ring Cavity

Splicing Loss :
0.01 dB,
 $\alpha \cong 0.0023$

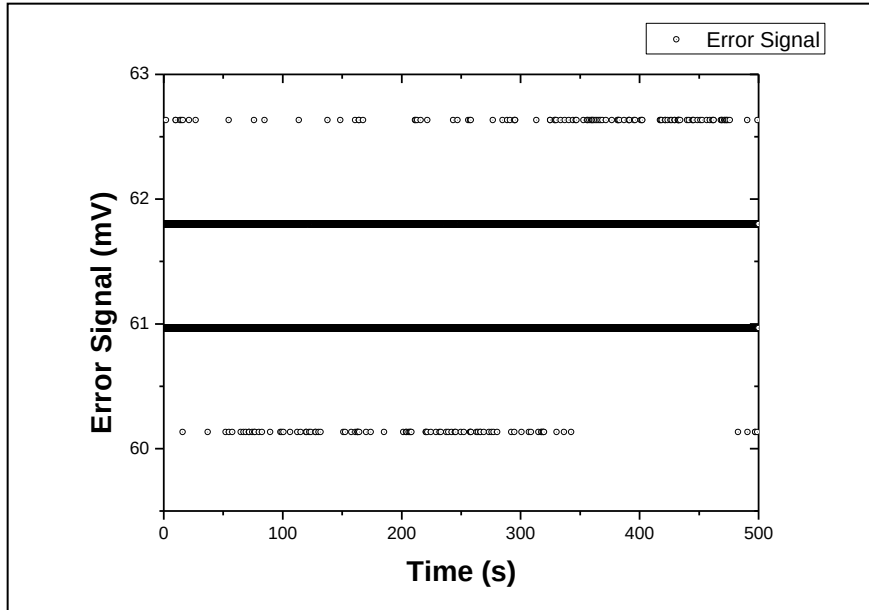


Finesse = 480

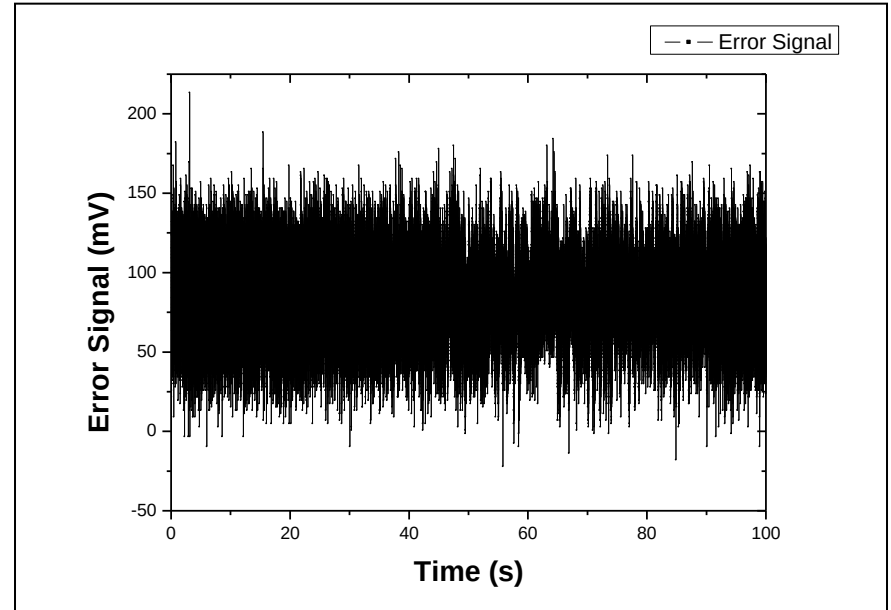


PDH error signal 19

Stabilized in-loop error signal



160 Hz with 1 Hz LFP



5.4 kHz without LFP

課題名 : KAGRAにおけるレーザー強度安定化のためのR&D

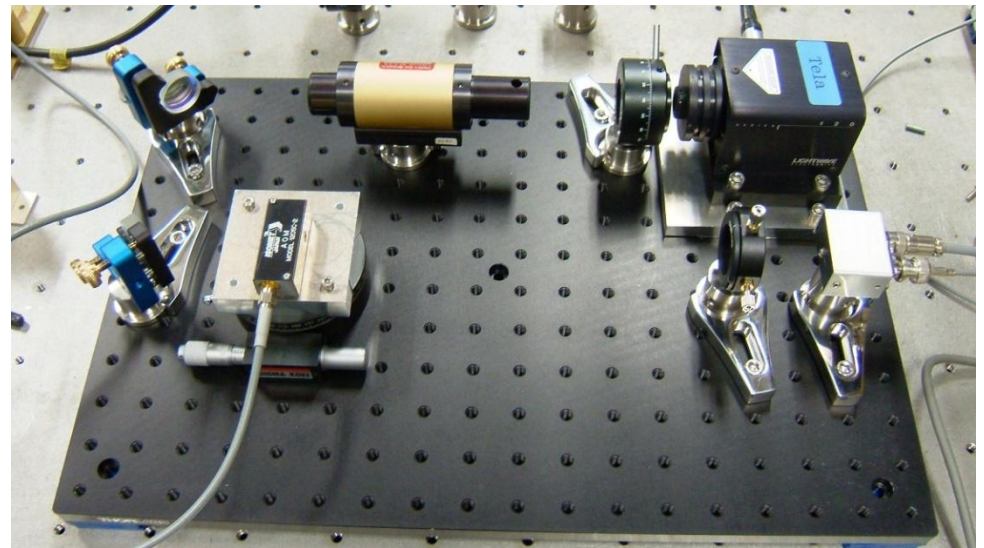
富山大学理学部 松島房和 森脇喜紀 小林かおり 榎本勝成
米山直弥 宮本達也 帆ノ下陽哉 大石諒 加川智大
東大宇宙線研 川村静児

目的

laser安定化のR&Dをすすめ、
bKAGRAでの実装に備えて
問題点の洗い出しと解決法を
準備する。

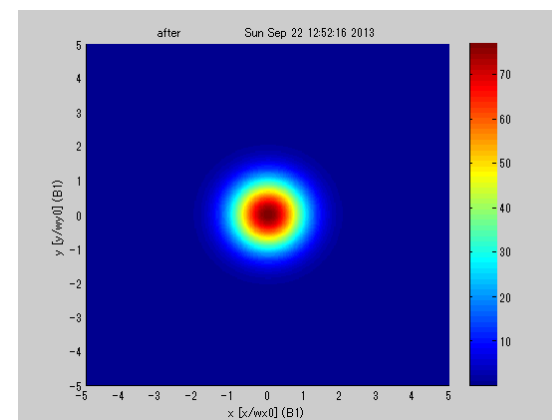
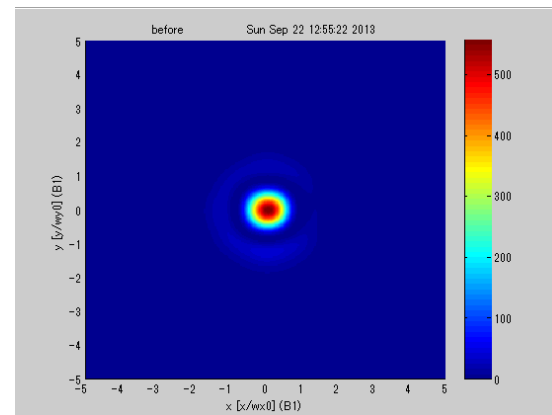
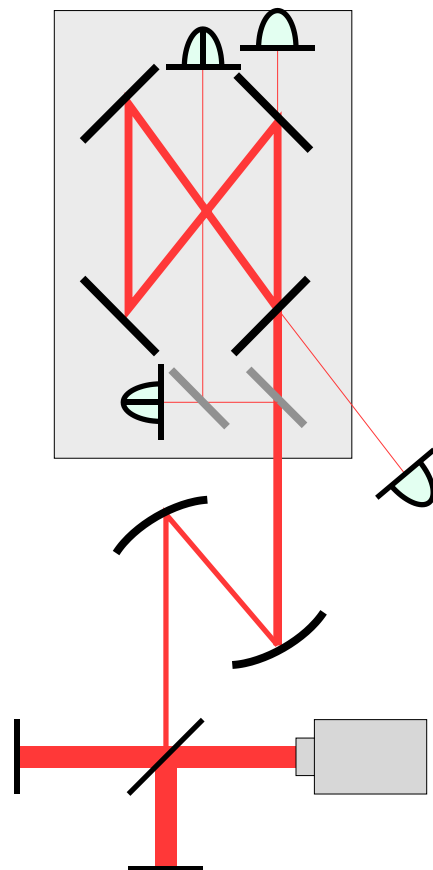
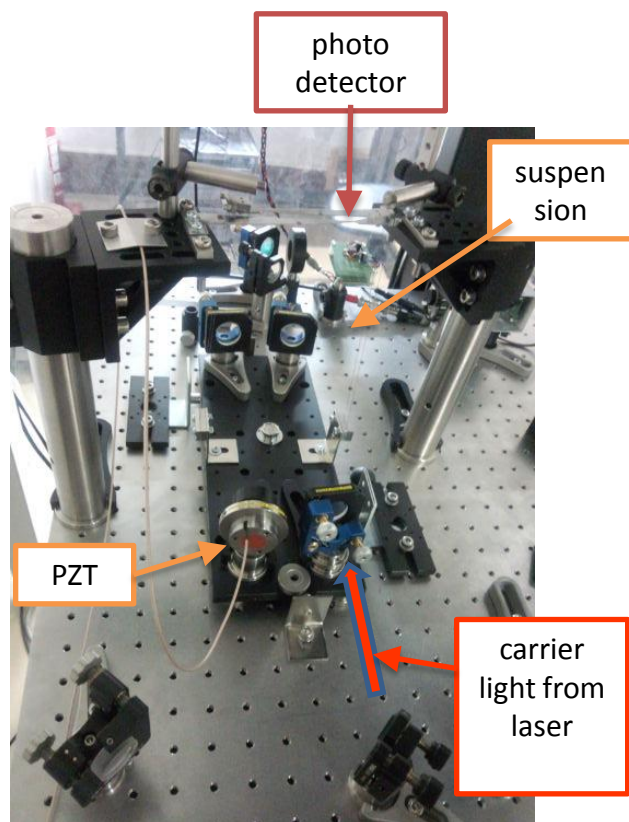
経過

10月に産総研寺田氏から実験用の
YAG laser, isolator, AOM等を貸し
ていただき、準備をはじめた(写真)。
本来ならスペアナが必要なところだが、
ネットワークアナライザーで代用しているため、きちんとした測定は始まっていないが、
2月頃には安定化の初期的な実験を始めてデータをとってゆく予定である。



KAGRAのためのアウトプットモードクリーナー開発

代表: 宗宮健太郎(東工大)

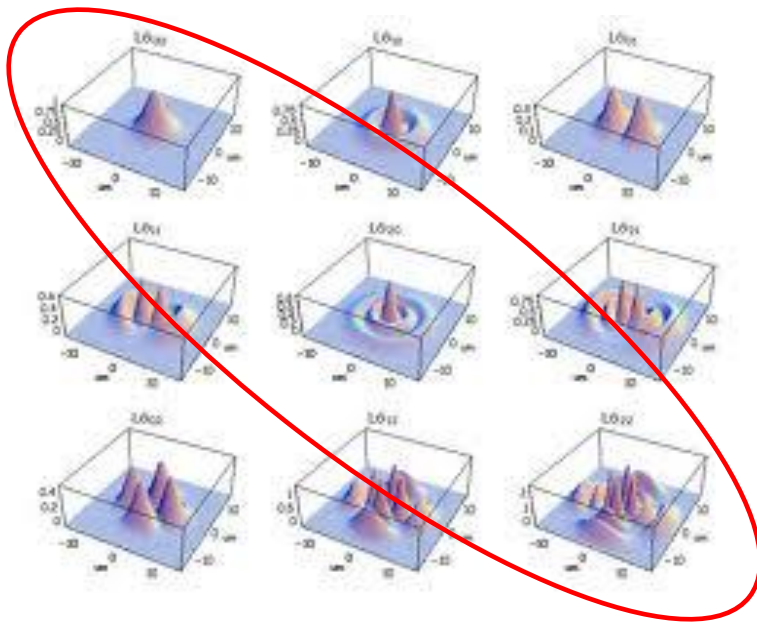


- FINESSEを用いた高次モードの数値シミュレーション
- プロトタイプ干渉計を用いた制御実験

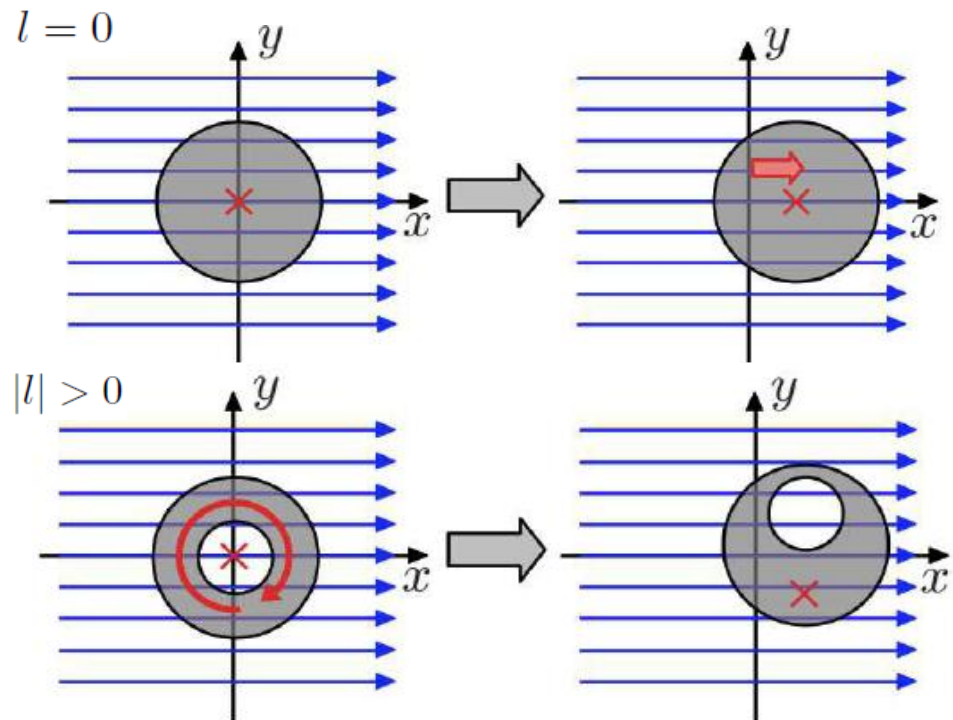
Aim: To construct the beam shift w/ post-selection in quantum measurement scheme.

研究代表: 鹿野 豊

Laguerre-Gauss mode

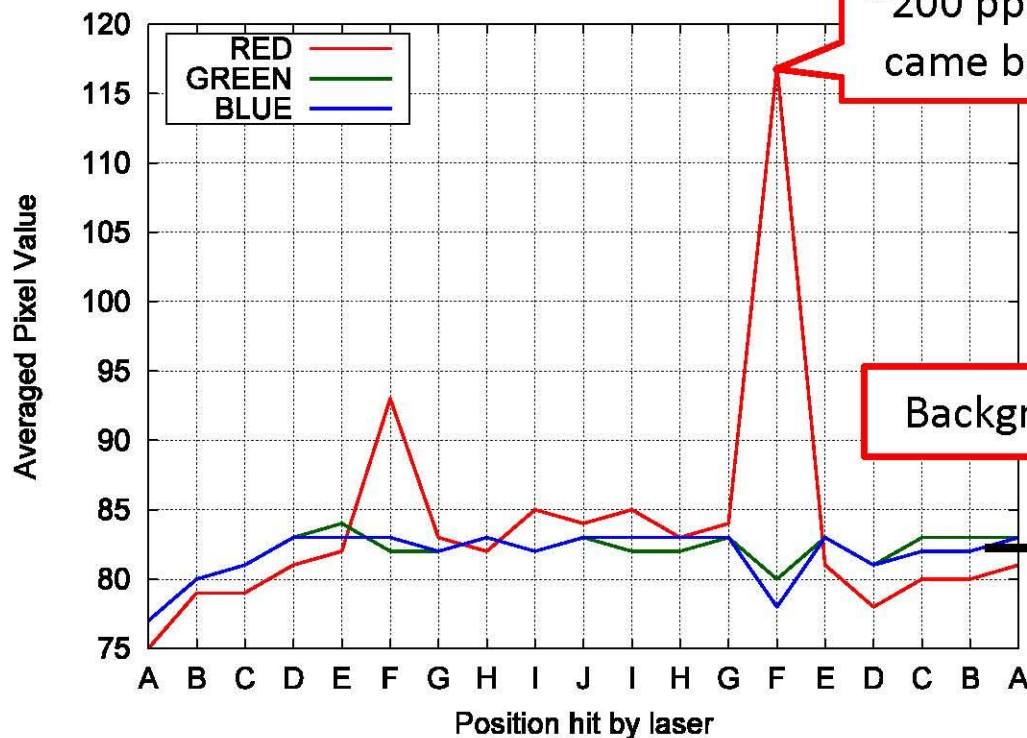
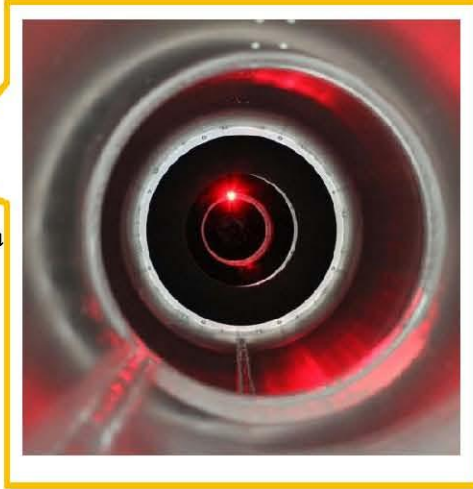
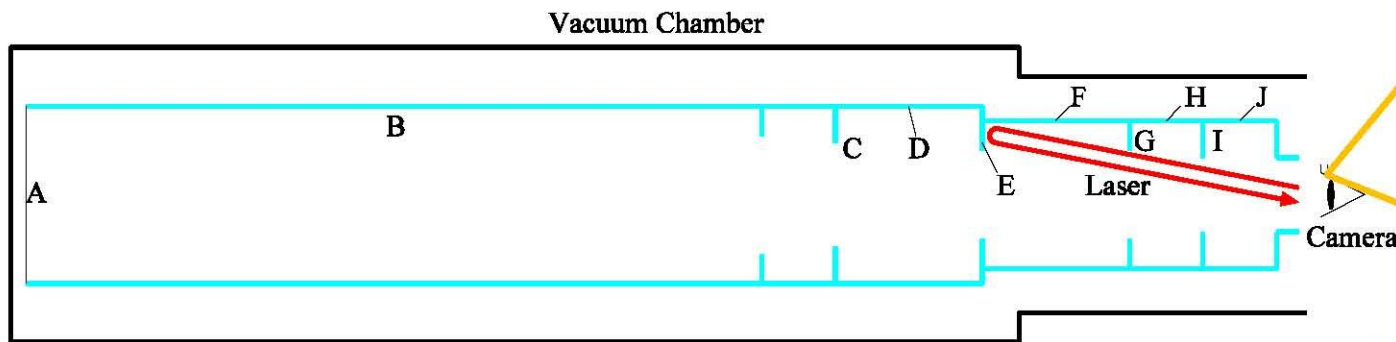


Beam Shift w/ post-selection



We found the amplification scheme using the Laguerre-Gauss mode (arXiv:1311.3357) and under the general condition (Phys. Rev. A **87**, 046102 (2013)).

Rough estimation of scattered light



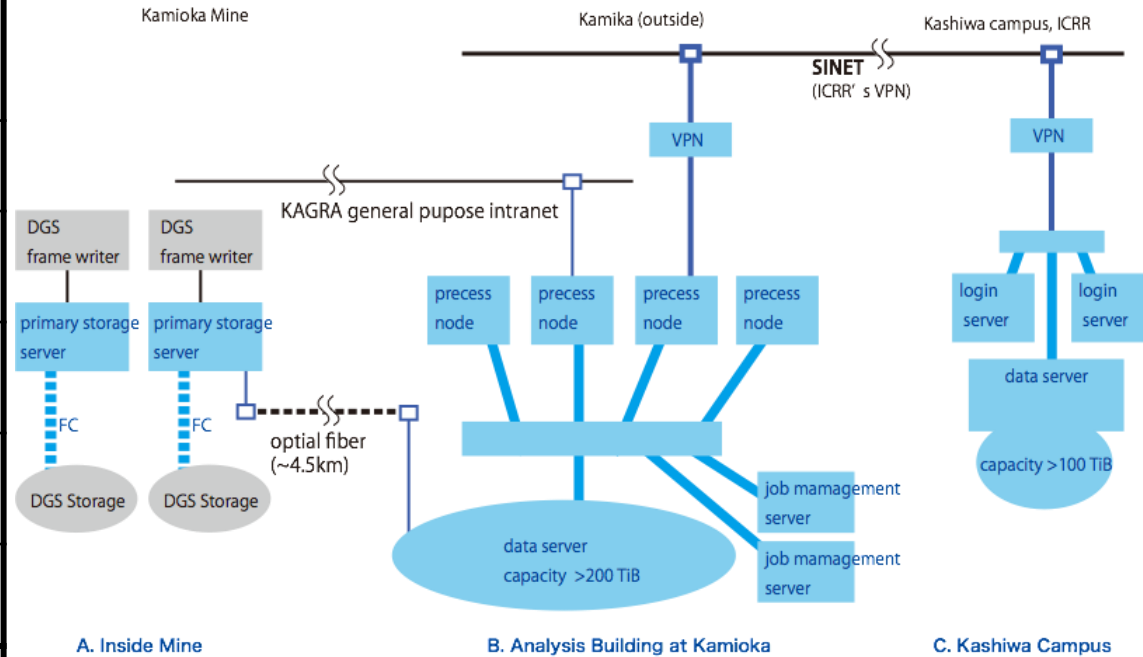
- 200 ppm of laser light came back to camera sensitive area
- If we assume intensity of reflected laser to be uniform, reflected laser is 2 %
- Cf. ray-trace calculation 6 %
- Same order of magnitude

KAGRAデータ解析の研究およびシステム検討 (III) (代表: 神田展行(大阪市大)、ほか17名)

- iKAGRAデータ転送・保管システムの構築
 - 仕様設計完了、入札
 - 現在(2013年12月)調達メーカーでシステム構築中。
 - 2014年1月に、柏、神岡(北部会館)に機器設置予定
 - KAGRA制御システム(神岡坑内)→解析棟→柏 でデータ転送、保管
 - データ容量: 解析棟 200TiB, 柏 100TiB
 - (註: iKAGRAデータ観測用。bKAGRA時には~5PB/5年観測が必要)

KAGRAデータ量

phase	duration	data rate / duty	total expected amount	from -> to
iKAGRA	about 2~3 months at <u>end of 2015</u>	20MB/s / 100%	100 TiB	Kamioka -> Kashiwa
		1MB/s / 100%	5TiB	Kamioka -> Osaka City U./Osaka U.
commissioning	2016-2017	20MB/s / ?(5~10%)	?	Kamioka -> Kashiwa
		1MB/s / ?(5~10%)	?	Kamioka -> Osaka City U./Osaka U.
bKAGRA	2017 - (end of KAGRA)	20MB/s / 100%	3PB / 5yrs	Kamioka -> Kashiwa
		1MB/s / 100%	150 TiB / 5yrs	Kamioka -> Osaka City U./Osaka U.



データ解析関連

- ソフトウェア開発
 - Specification and coding style guide, C and C++
 - Data Analysis White Paper (now being prepared)
 - Development of the common data analysis package for KAGRA



KAGRA Data Analysis Library

"KAGALI": KAGRA Algorithmic Library

We can use KAGALI to discover something which no one has never seen before...⁶

籌

KAGALI, KAGALI-Apps and others

KAGALI Apps layer	LVApps
KAGALI (Lib. layer)	LAL, VIRGO
LAL, VIRGO (+KAGALI) tools	
KAGALI I/O	LAL, VIRGO I/O

Policy : Co-exists with existing software.
Easy to use for us.

viewgraph by H.Tagoshi

Shigeki Hirobayashi, Hideyuki Tagoshi and Seiji Kawamura

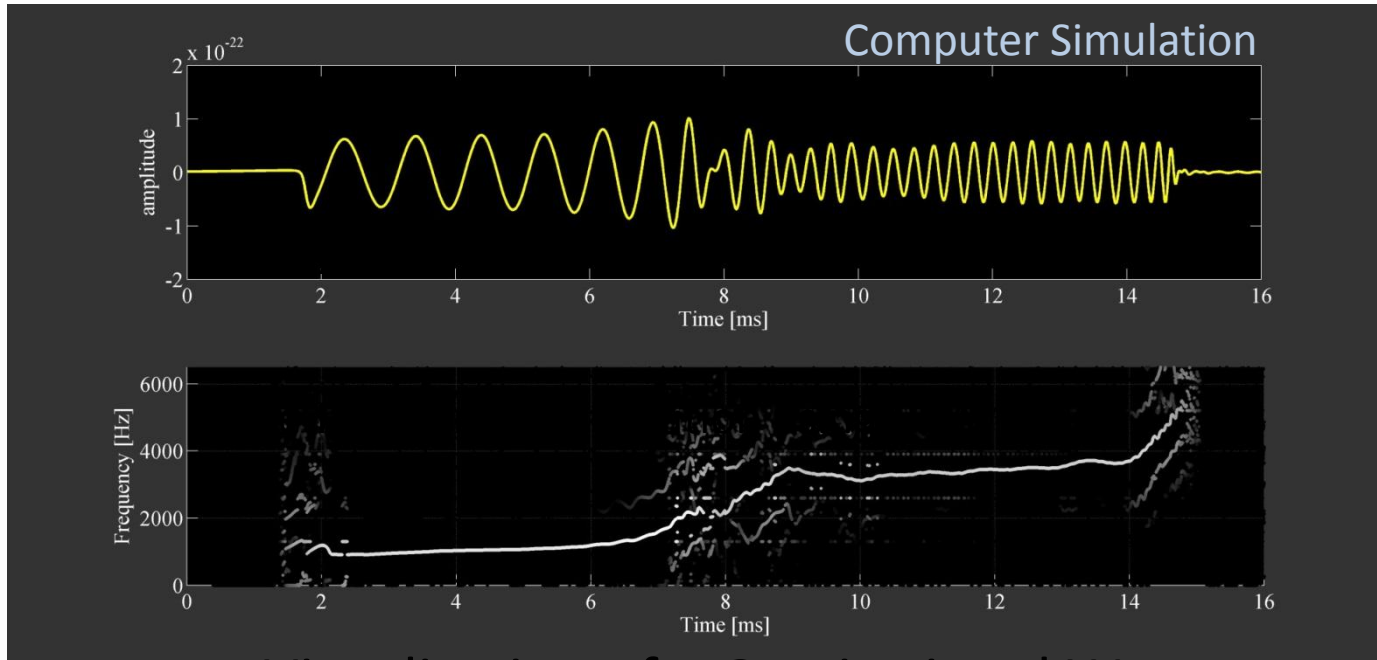
New frequency analysis method

Non-Harmonic Analysis (NHA)

is a high-resolution frequency analysis method. It is not strongly influenced by the size of the analysis window, and it is known to determine periods with an accuracy that is at least 10^4 to 10^{10} times higher than in conventional analytical methods.

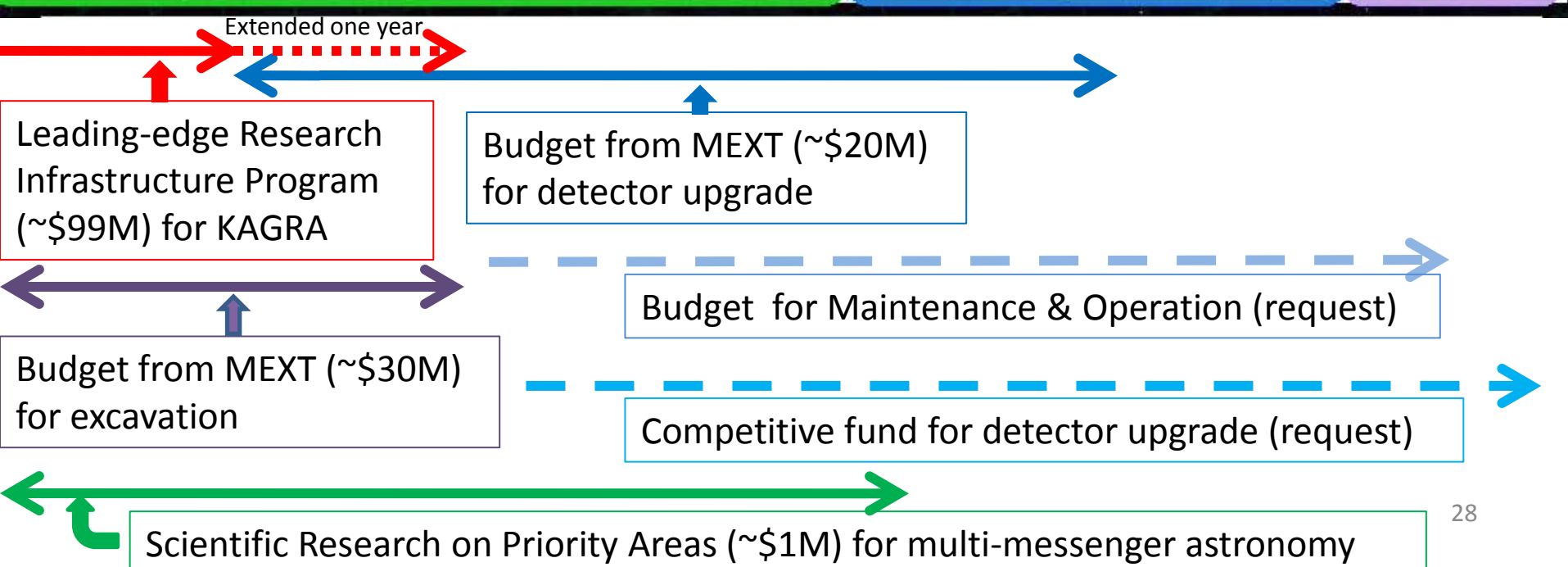


We observed the small frequency changes due to various physical phenomena and, extracted gravitational waves from the observation signals under noisy conditions.



Visualization of a Gravitational Wave

Schedule & budget



まとめ

- KAGRAは先進的技術で世界初の重力波検出を目指す
- KAGRA はKEKとNAOJの協力のもとでICRRがホスト機関として推進
- 宇宙線研究所の共同利用研究で実践的なR&Dが進められ、KAGRA の建設が進んでいる
- KAGRA は海外のLIGO/LSC や EGO/Virgo とも協力
- KAGRAの一里塚は2015年のレーザ干渉計の稼働
- 最終感度をもつKAGRAは2017年完成し、本格観測は2018年