

電気情報工学特別講義 第2回

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

講義スケジュール

- 10月3日(月)
 - 3限 第1回 重力波の初検出について
 - 4限 第2回 重力波望遠鏡KAGRAの紹介
- 10月4日(火)
 - 2限 第3回 干渉計と共振器の原理
 - 3限 第4回 パワースペクトルと伝達関数
 - 4限 第5回 様々な雑音とその低減方法
- 10月5日(水)
 - 2限 第6回 重力波望遠鏡のこれから
 - 3限 第7回 精密測定技術の応用
 - 4限 第8回 「重力波天文学の夜明けとKAGRA」

世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中

Advanced LIGO
(O2へ準備中)



Advanced LIGO



GEO-HF
(稼働中)



Advanced Virgo
(建設中)



KAGRA
(建設中)



LIGO-India (原則承認)



KAGRA建設中

- 大型**低温**重力波望遠鏡 (愛称: かぐら)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設中
- 日本を中心に国内外60以上の大学・研究機関、200人以上の研究者
- **地下建設と低温が大きな特徴**



プロジェクト代表:
梶田隆章



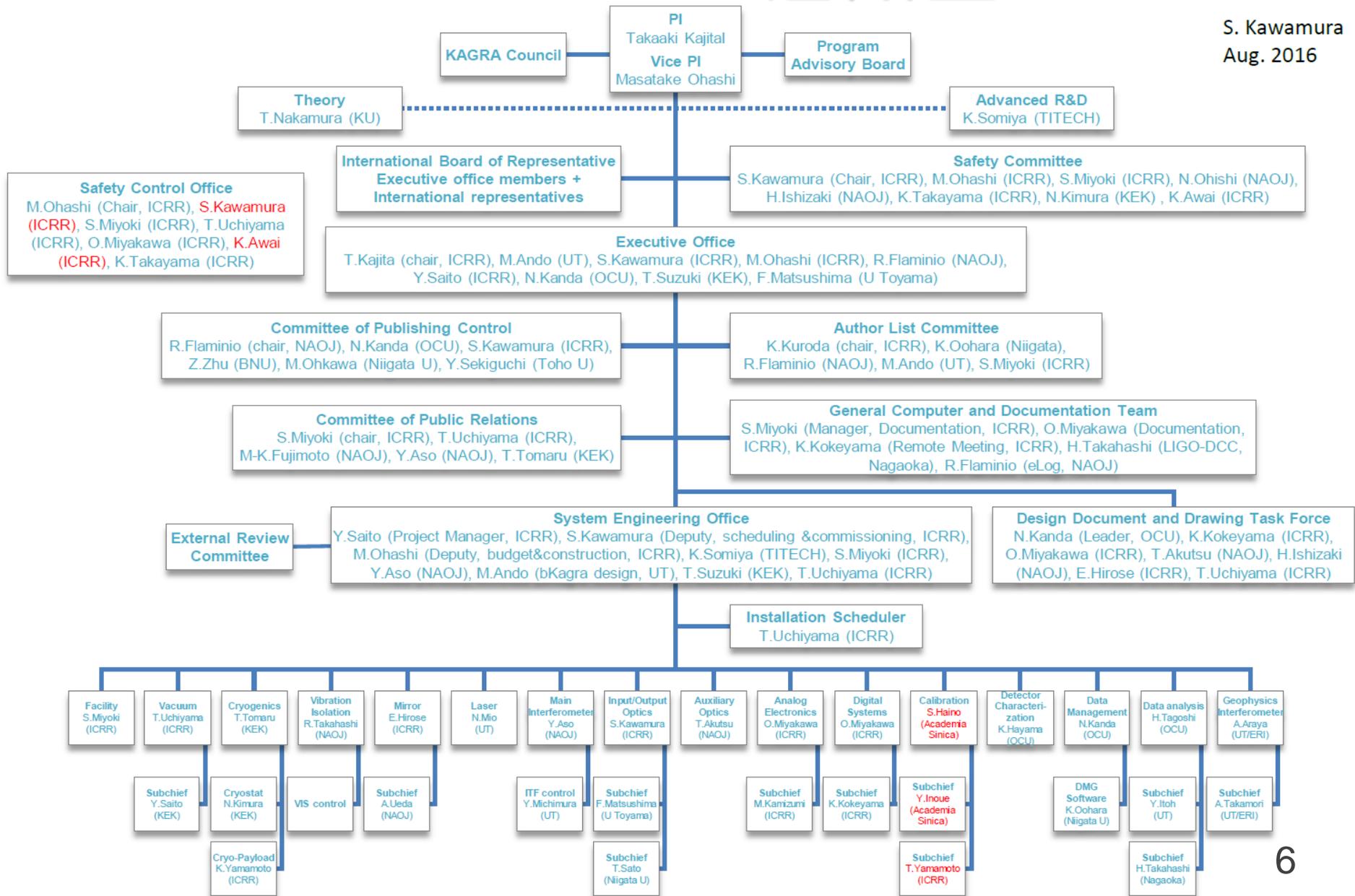
新潟大学もKAGRAに参加

- 新潟大学 工学部 電気電子工学科
佐藤孝 研究室
鈴木孝昌 研究室
- 新潟大学 工学部 福祉人間工学科
大河正志 研究室
- 新潟大学 理学部 物理学科
宇宙物理学研究室 (大原謙一先生)



KAGRAの組織図

S. Kawamura
Aug. 2016

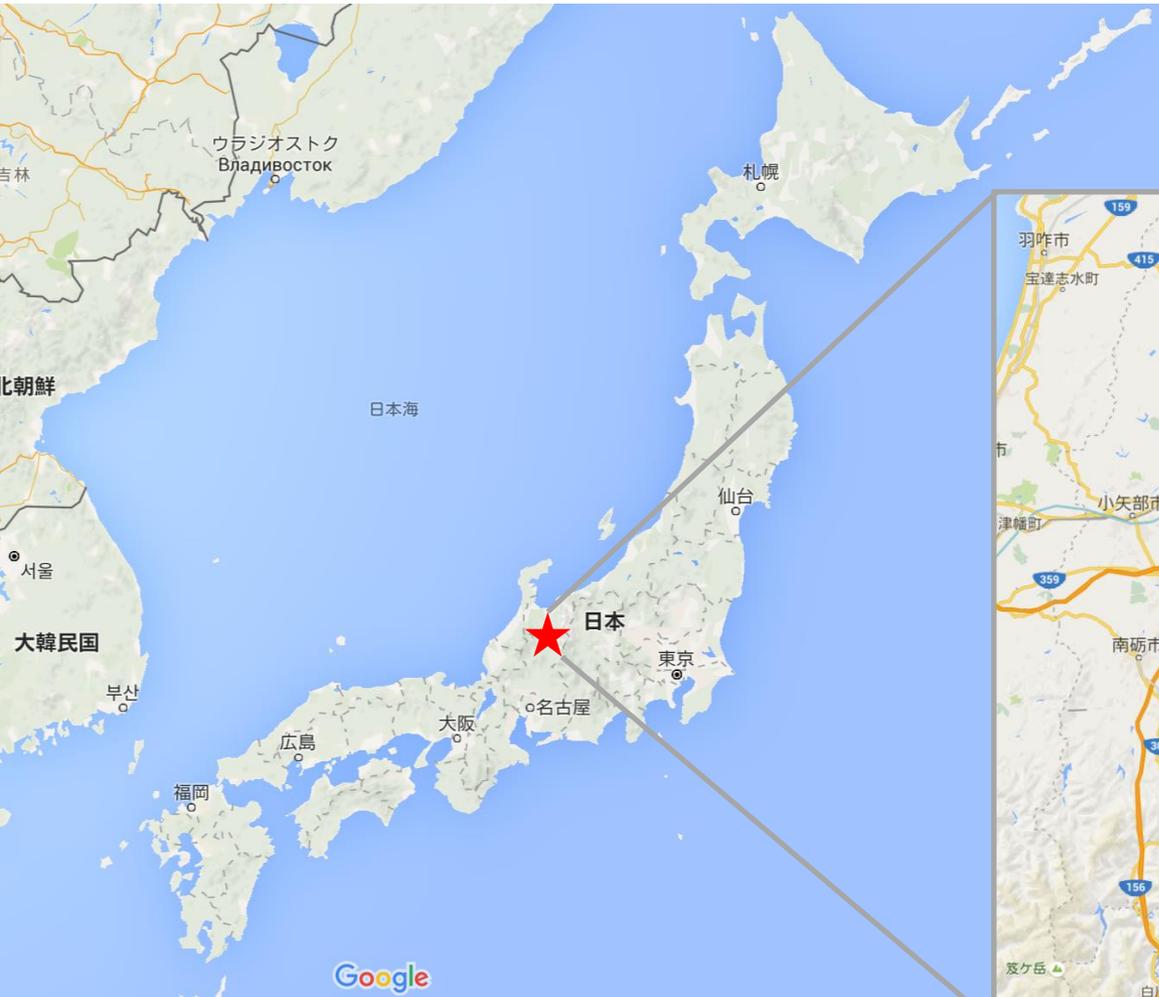


KAGRAの場所

- 大型低温重力波望遠鏡
- 岐阜県の神岡鉱山地下に建設中



東京から新幹線で2時間半



富山駅から
車で1時間

神岡の風景



重力波オフィスの近く(茂住)

2015年6月



2016年2月



神岡の研究施設

- 池ノ山に片腕3 kmのL字型トンネル



KAGRAトンネル

- トンネル内にレーザー光が通るための片腕3 kmの真空パイプ



新跡津坑口
(2016.2.8)

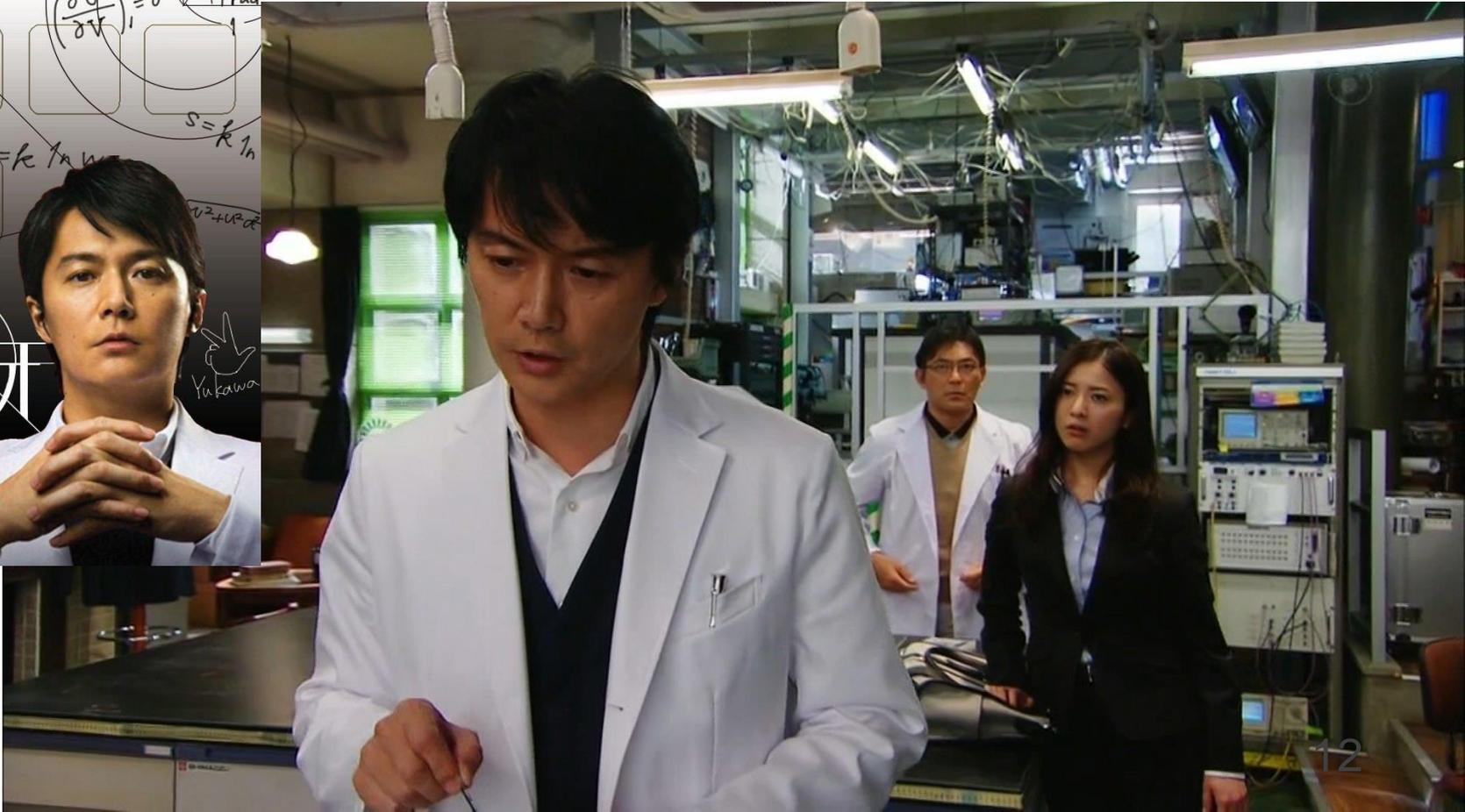
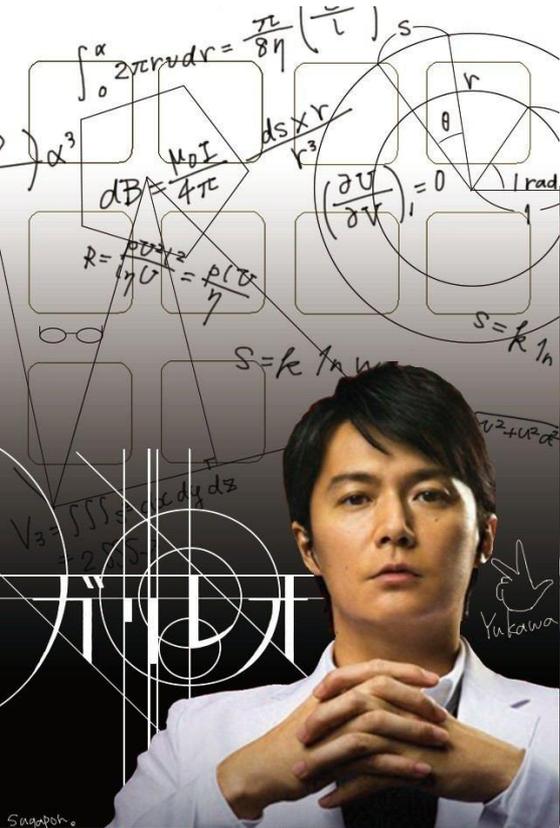
地下での作業

- ヘルメット、作業服、長靴、酸素濃度計、電動アシスト自転車



地下での作業

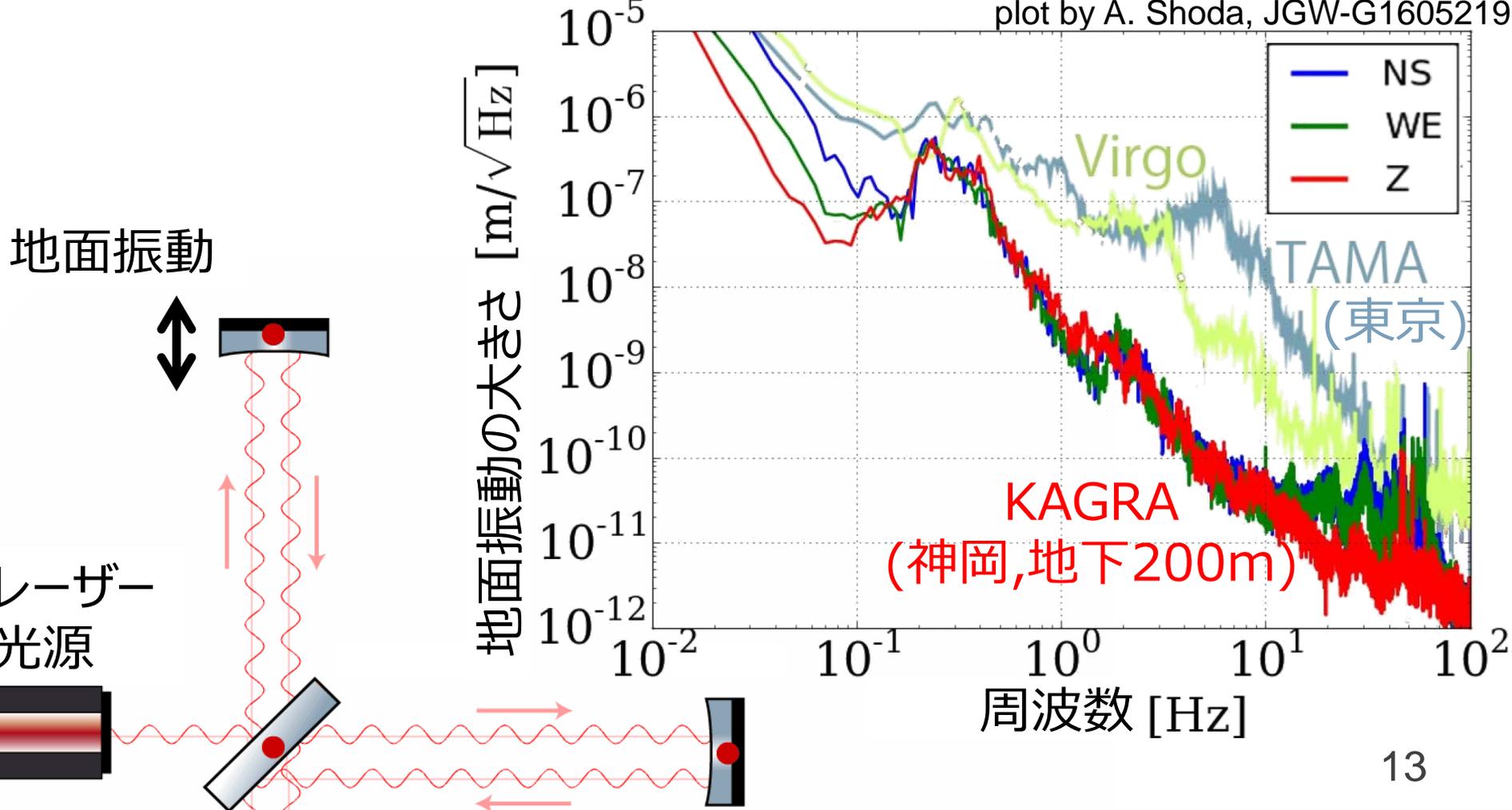
- 思ったのと違う！



なぜ地下なののか？

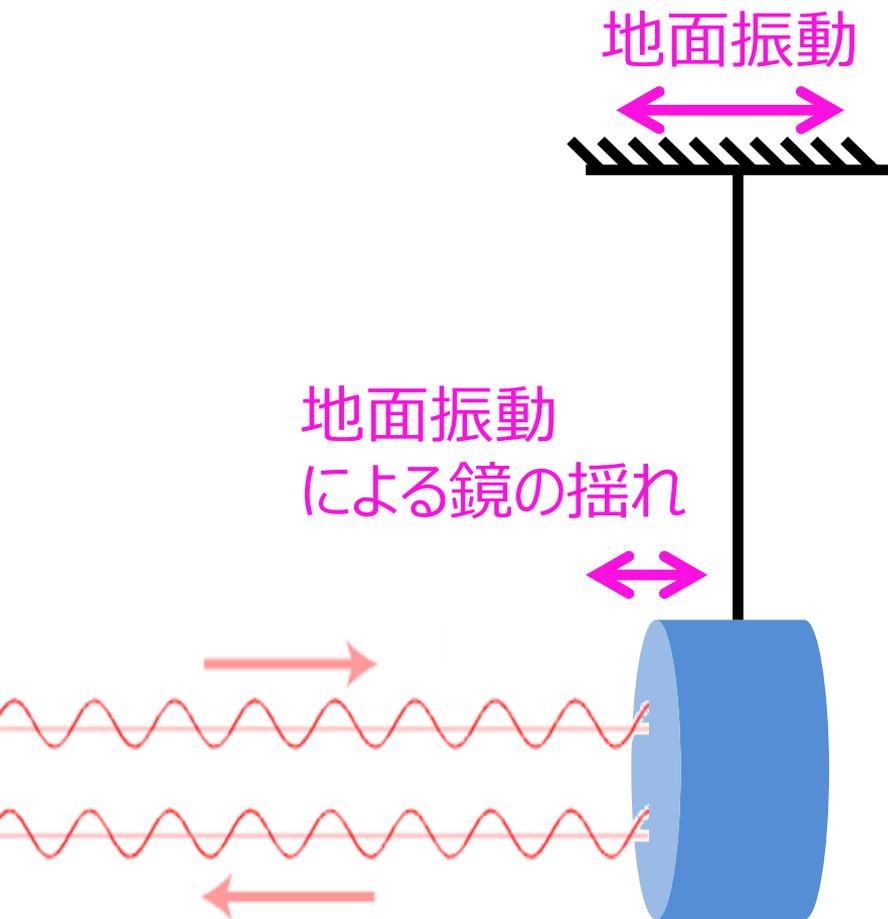
- 地面振動で鏡が揺れると雑音になる
- 地下は地表に比べて地面振動が100分の1程度

plot by A. Shoda, JGW-G1605219



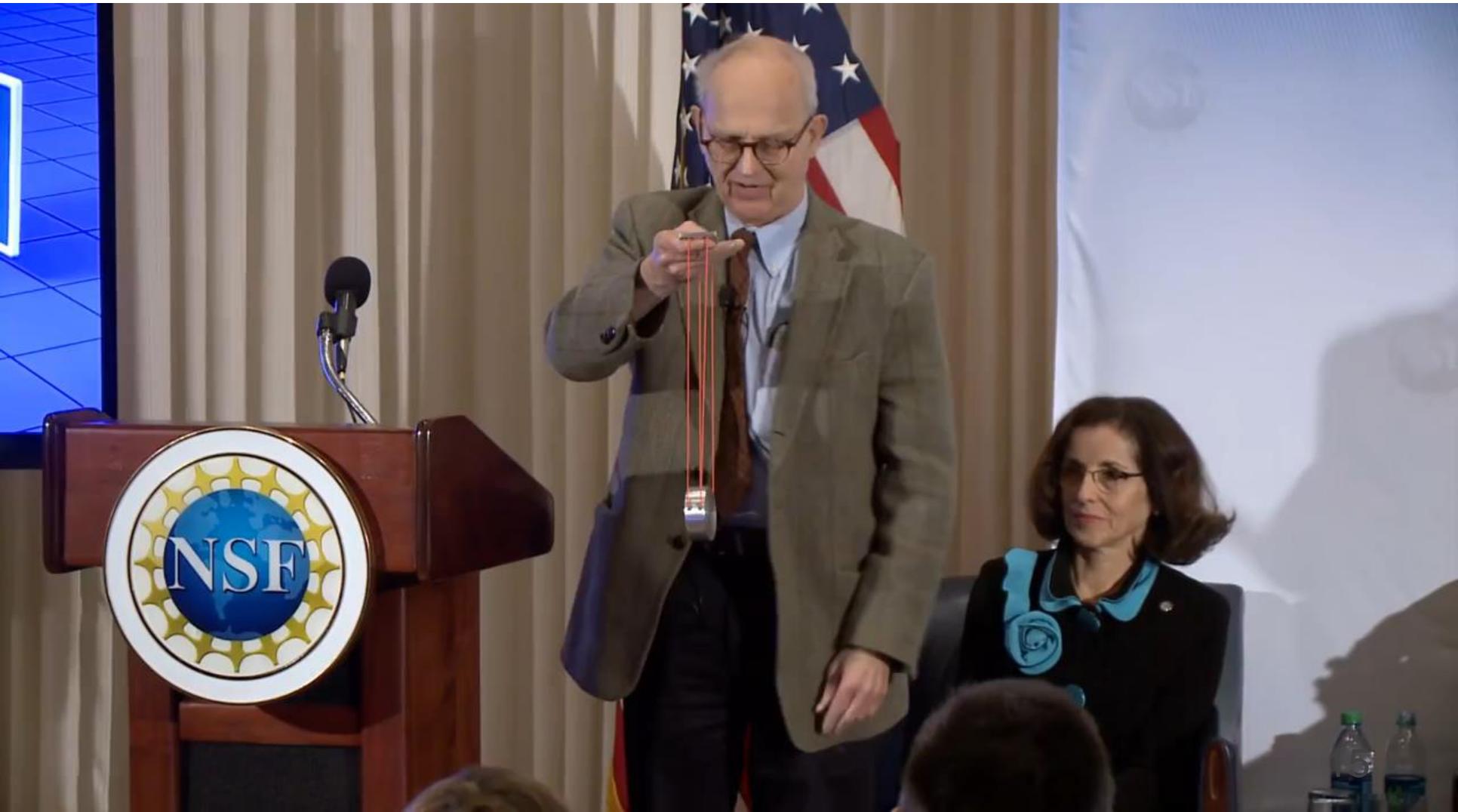
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)



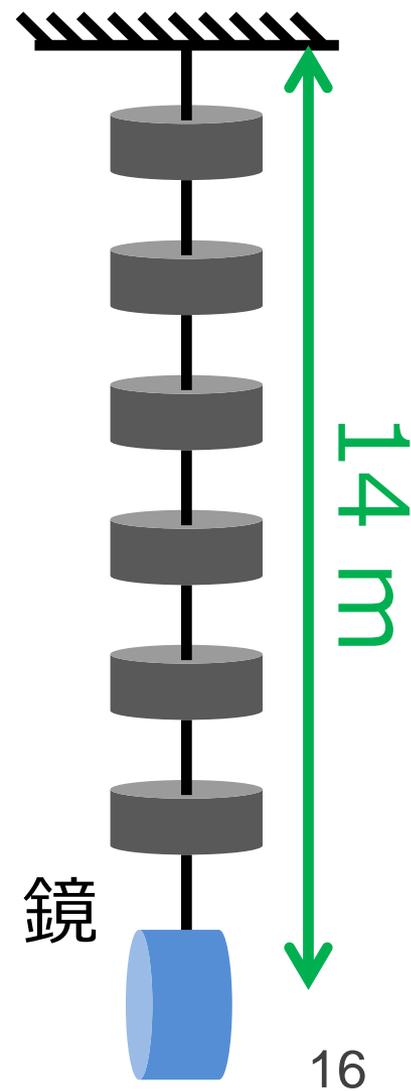
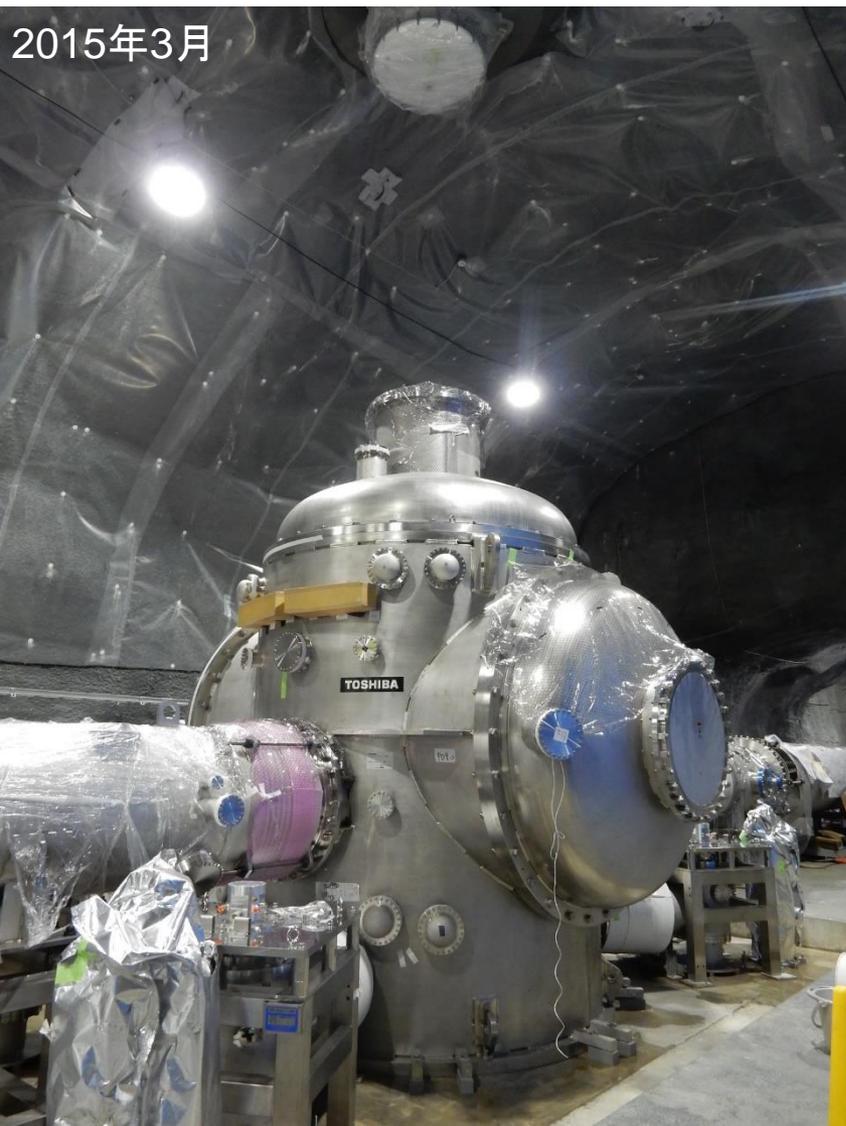
鏡を吊るすことで振動を減らす

- 鏡を吊るすと地面振動が伝わりにくい(防振)

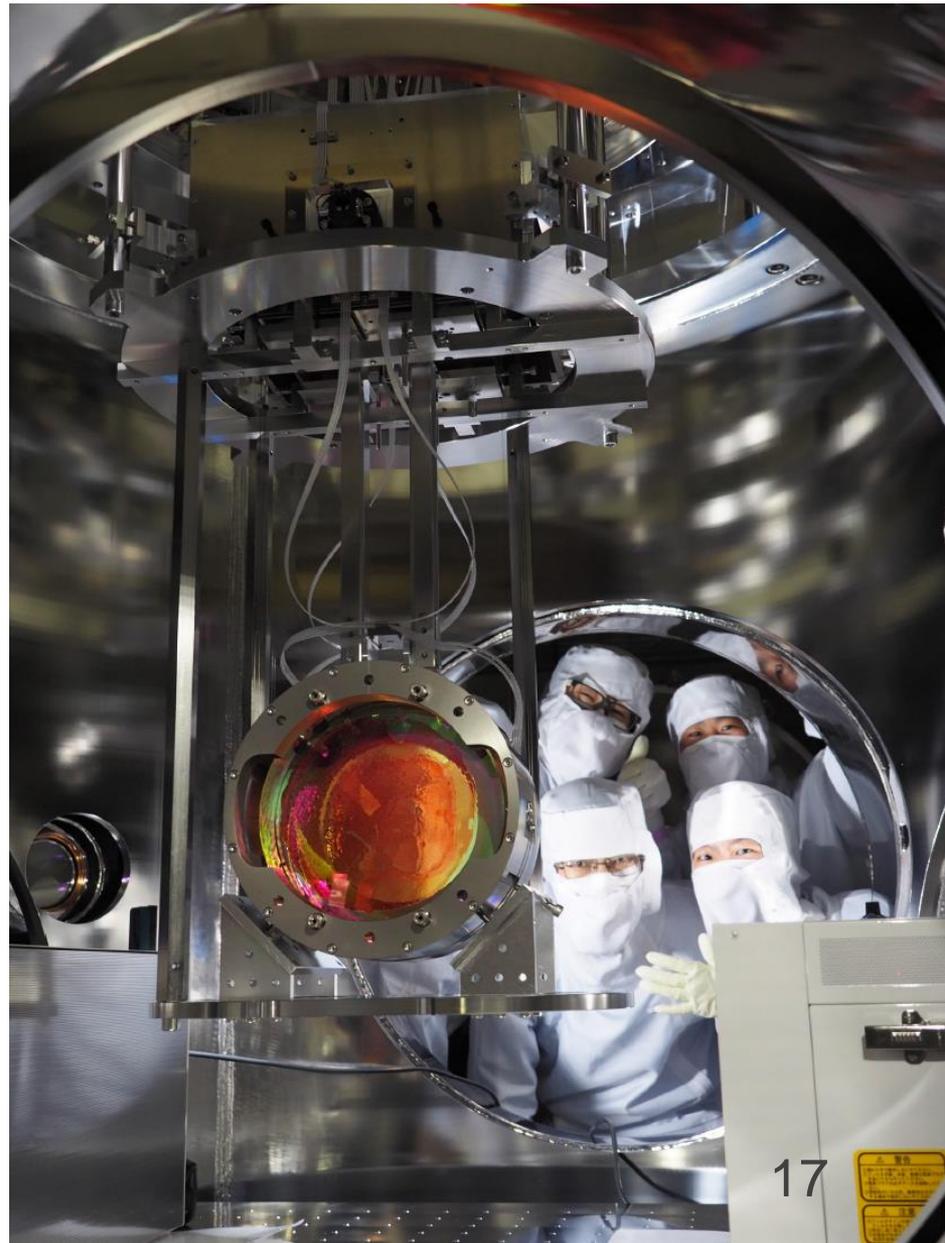
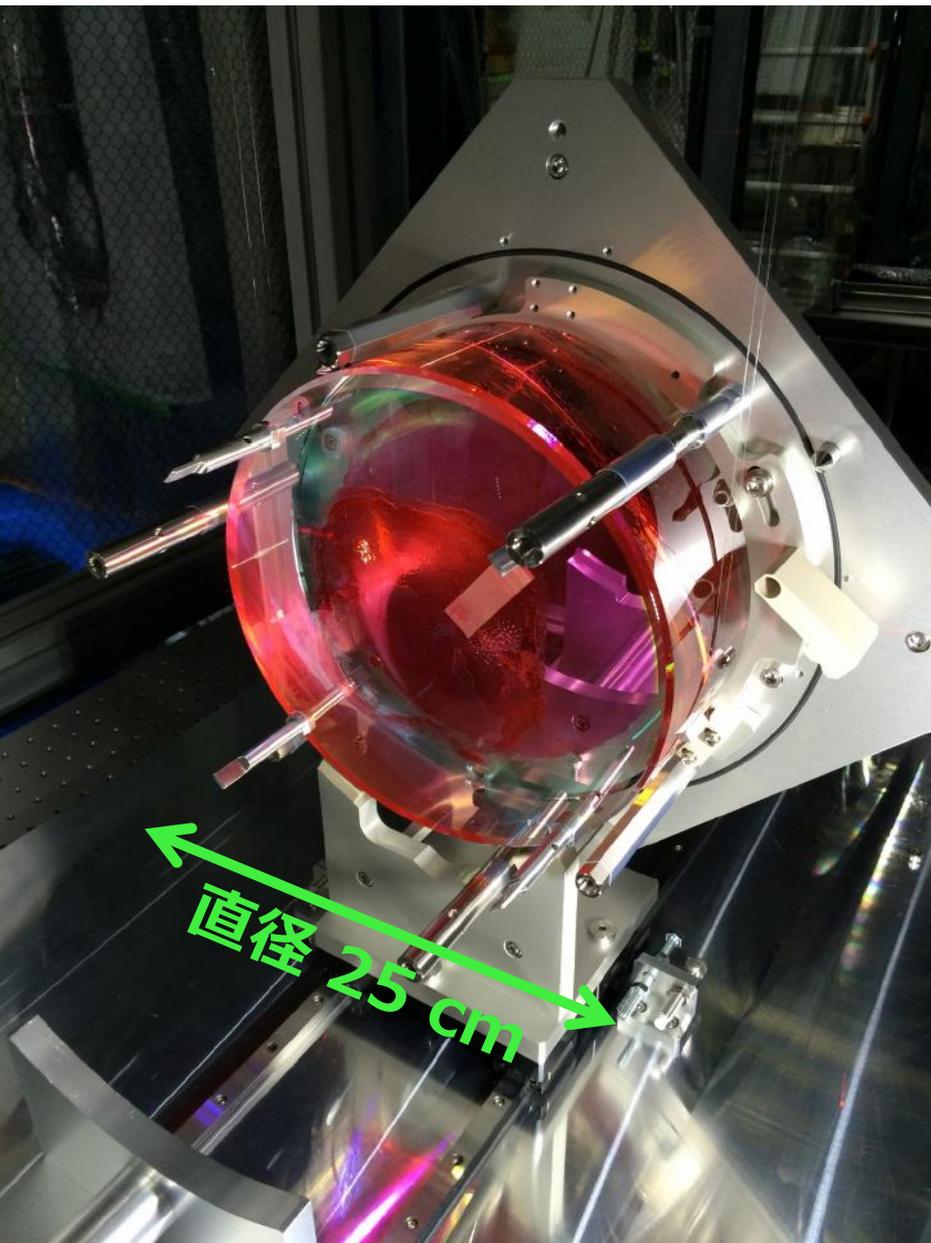


KAGRAの鏡の防振装置

- 7段振り子を用いた超高性能防振

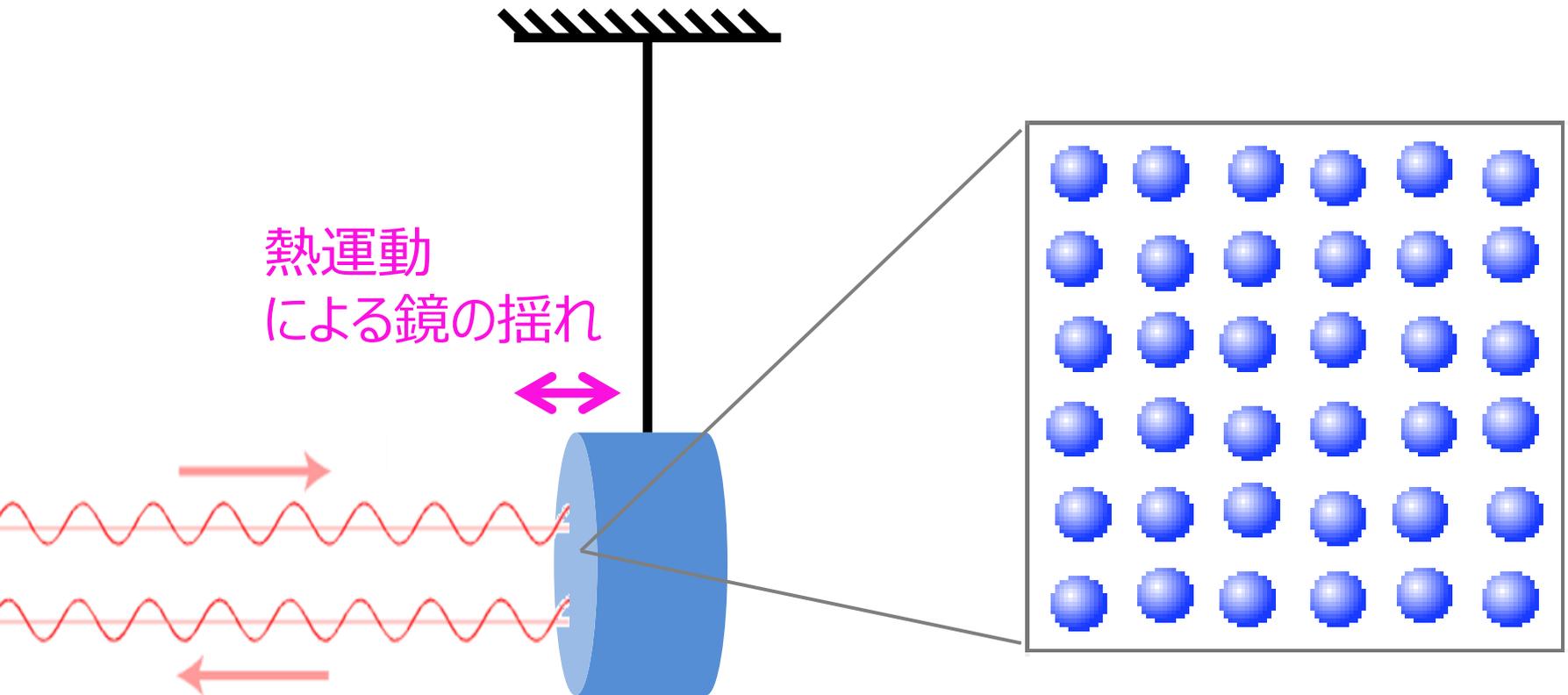


KAGRAの鏡の防振装置



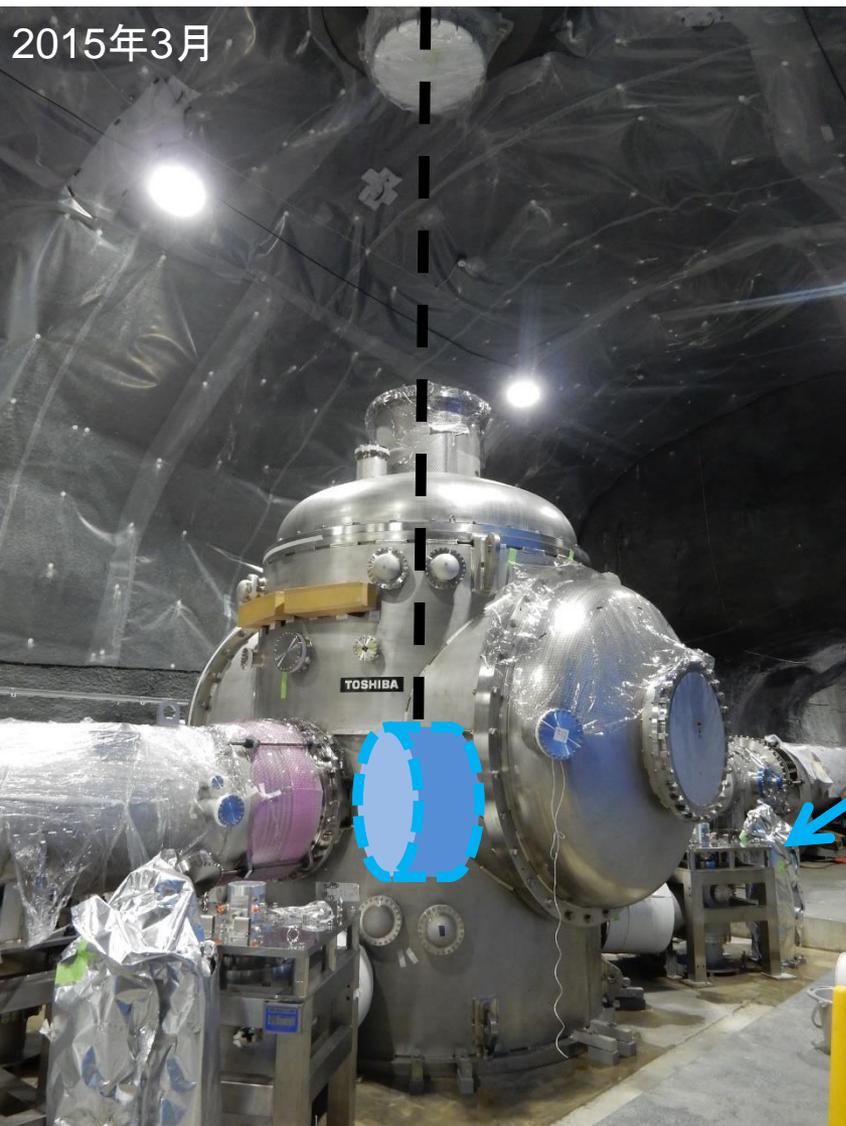
鏡を冷やすことで熱雑音低減

- 鏡を作る原子の熱運動で鏡の表面が揺れると、雑音になる
- 20 Kまで冷やすことで熱運動を小さくする

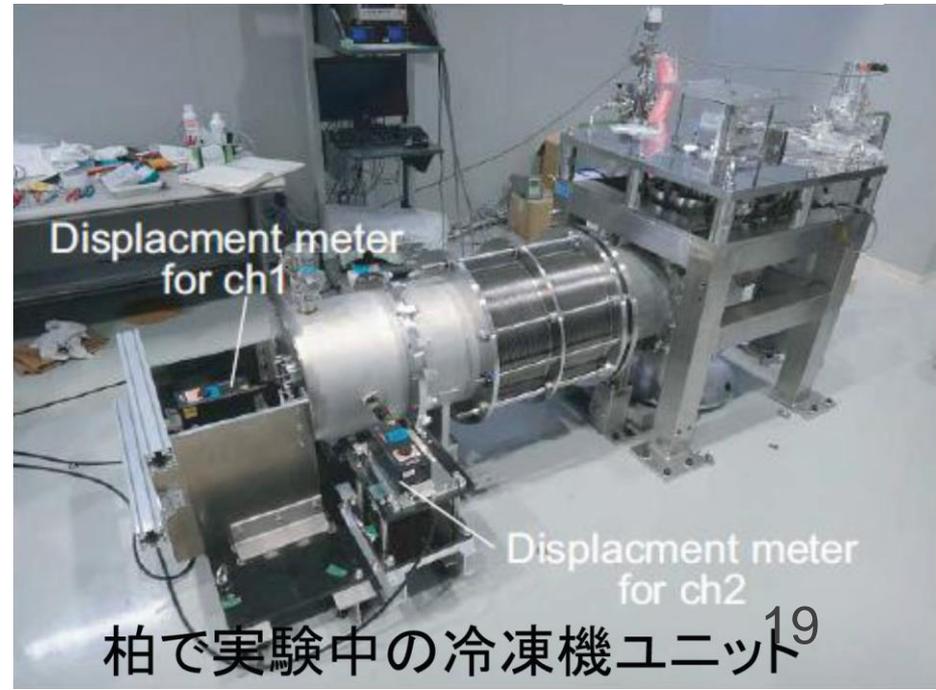


KAGRAの低温装置

- 最低振動の冷凍機を開発

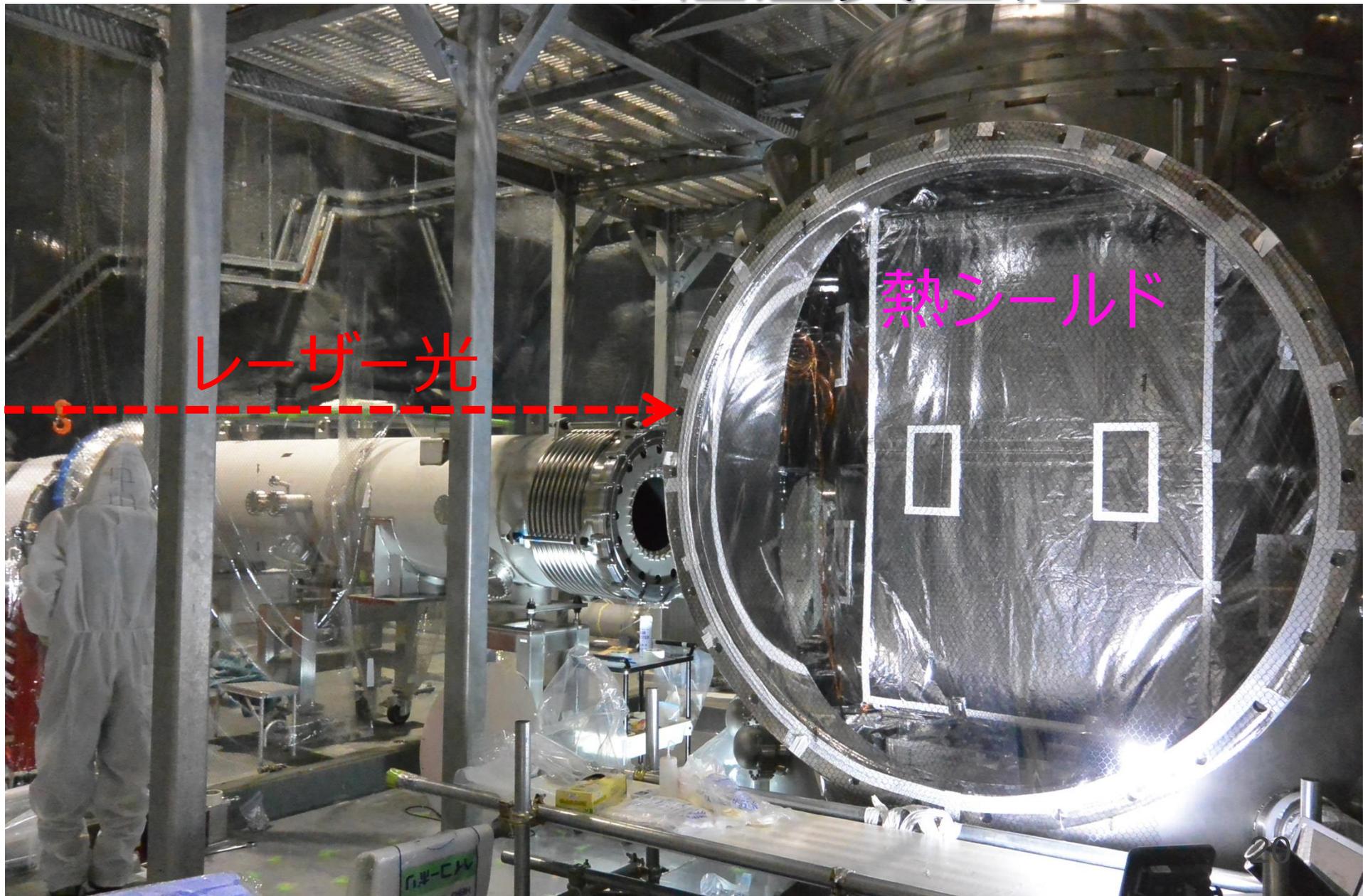


冷凍機



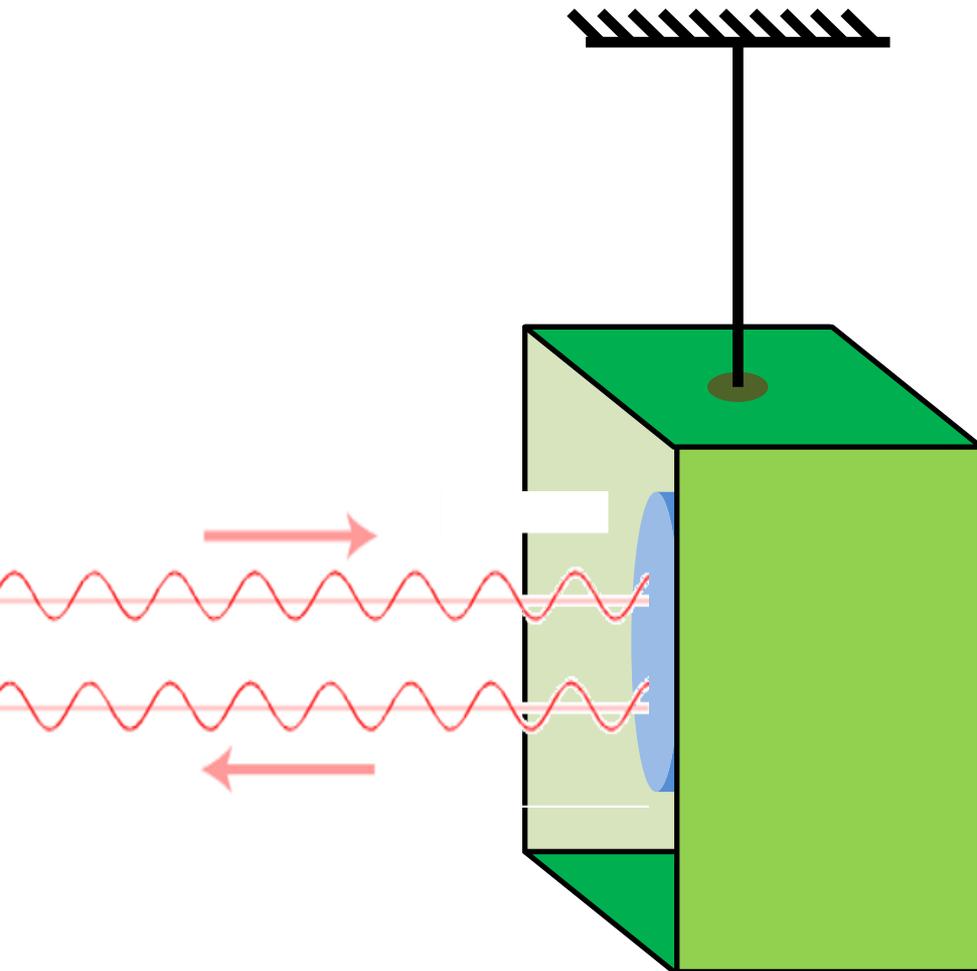
柏で実験中の冷凍機ユニット¹⁹

KAGRAの低温真空槽



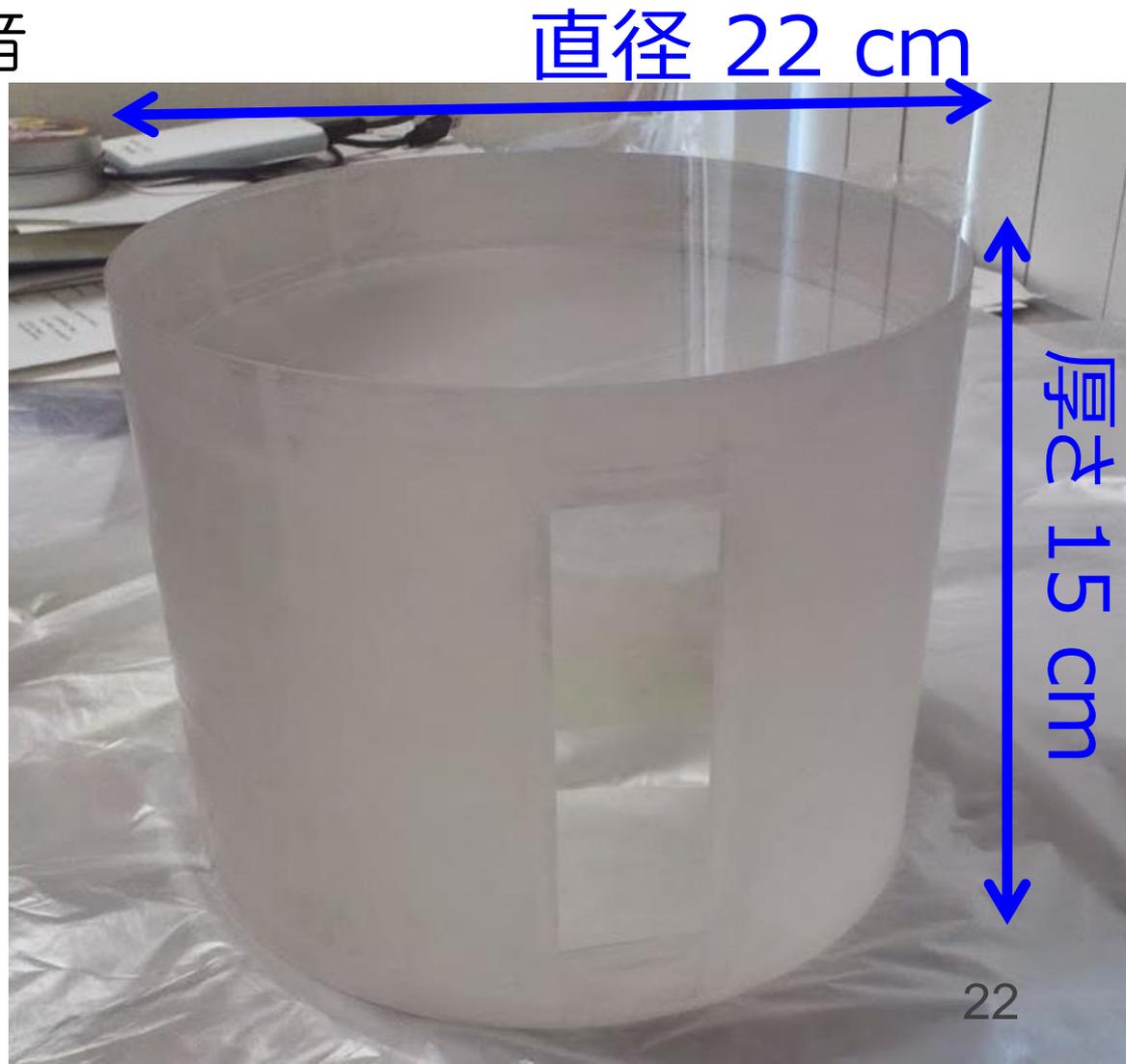
KAGRAの低温真空槽

- レーザー光を反射させるために穴が必要
- 「冷蔵庫を開けながら冷やし続ける」技術



KAGRAの鏡

- 人工サファイア
- 低散逸→低熱雑音
- 超高反射率
(99.99 %以上)
- 超低損失
- ものすごく
なめらか



KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない
スーパークリーンブース



KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない
スーパークリーンブース



内閣総理大臣表彰

ものづくり日本大賞



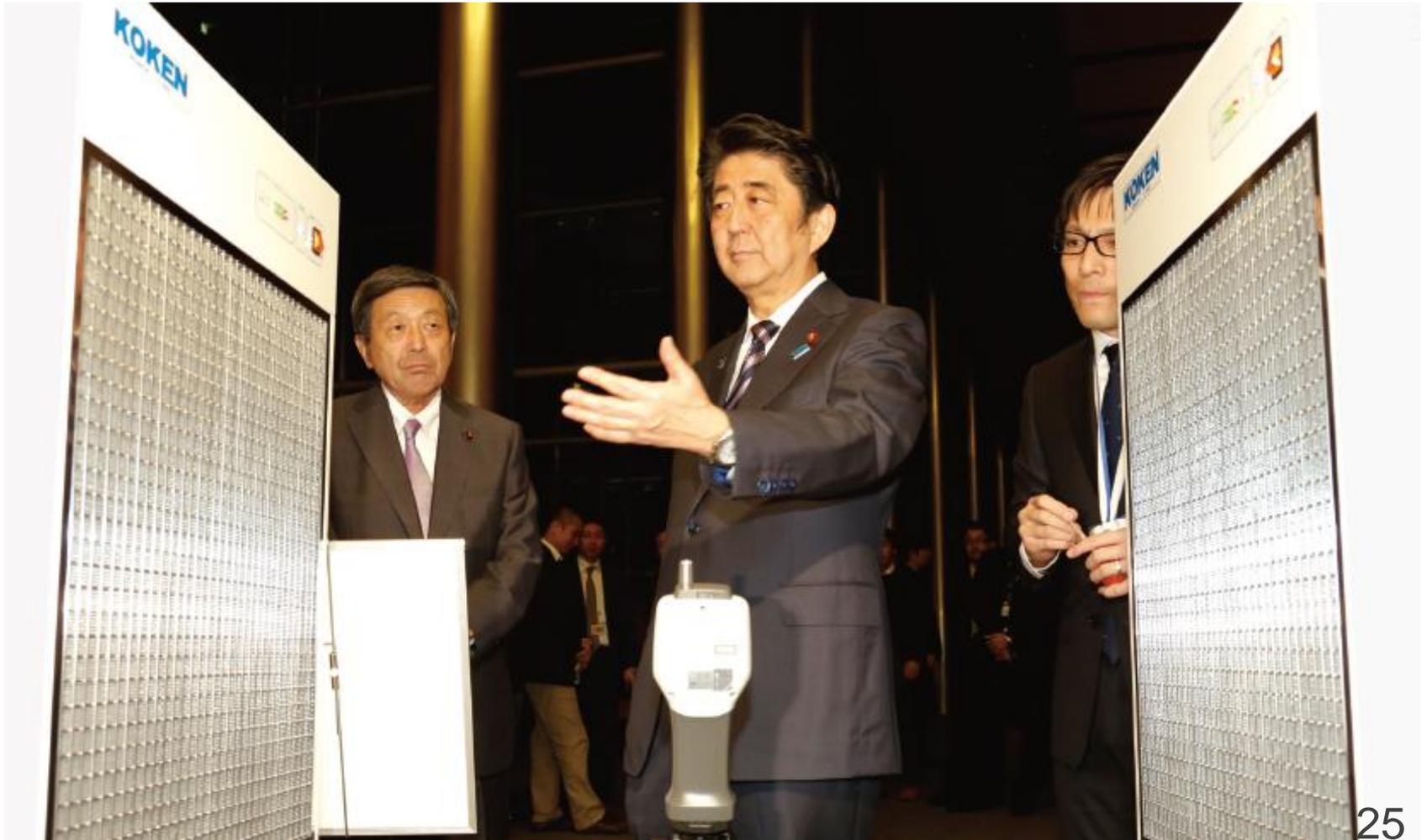
第6回ものづくり日本大賞
内閣総理大臣賞 受賞

ありがとうございました

中小・中堅企業から東大宇宙線研究所まで、**KOACH**は活躍しています

KAGRAのクリーン環境

- 鏡にほこり一つ付けない
スーパークリーンブース



企業との協力関係

- KAGRAは最先端技術に支えられている

100年をつくる会社
鹿島



トンネル掘削
(国内最速)

クリーン、ヘルス、セーフティで社会に
興研株式会社



クリーン環境



KAGRA

TOSHIBA
Leading Innovation >>>



極低温技術



JECC TORISHA Co.,Ltd.

超高真空装置



MPC 真空機器設計製造
株式会社 **ミラプロ**



低振動
冷凍機



住友重機械

計算機システム



FUJITSU

……などなど

地元との協力関係



神岡の重力波オフィス
(元々は保育園)



飛騨市の倉庫

サイエンスカフェ
岐阜新聞



KAGRAに与えられた予算は？

A. 150億円

B. 1500億円

C. 15兆円

- ちなみに.....

新国立競技場: 約1490億円

リニア中央新幹線: 5兆円 (トンネル246 km)

<http://www.jpnsport.go.jp/newstadium/>

<http://www.linear-chuo-shinkansen-cpf.gr.jp/>



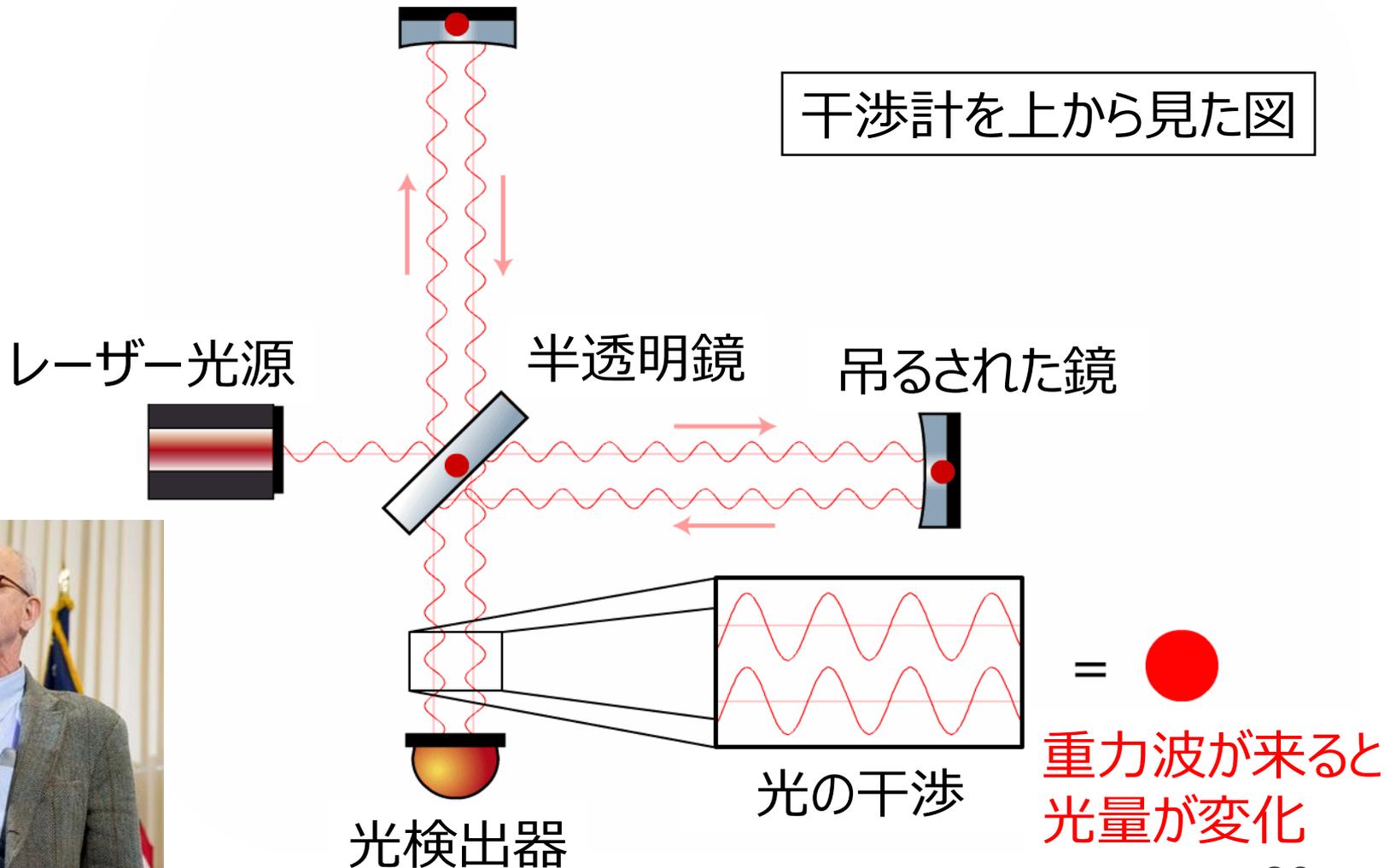
KAGRAの現在の状況

- 2016年3-4月に**単純な構成**での常温試験運転
- 2018年3月の低温試験運転に向けて装置開発中
- 本格観測運転は2020年見込み



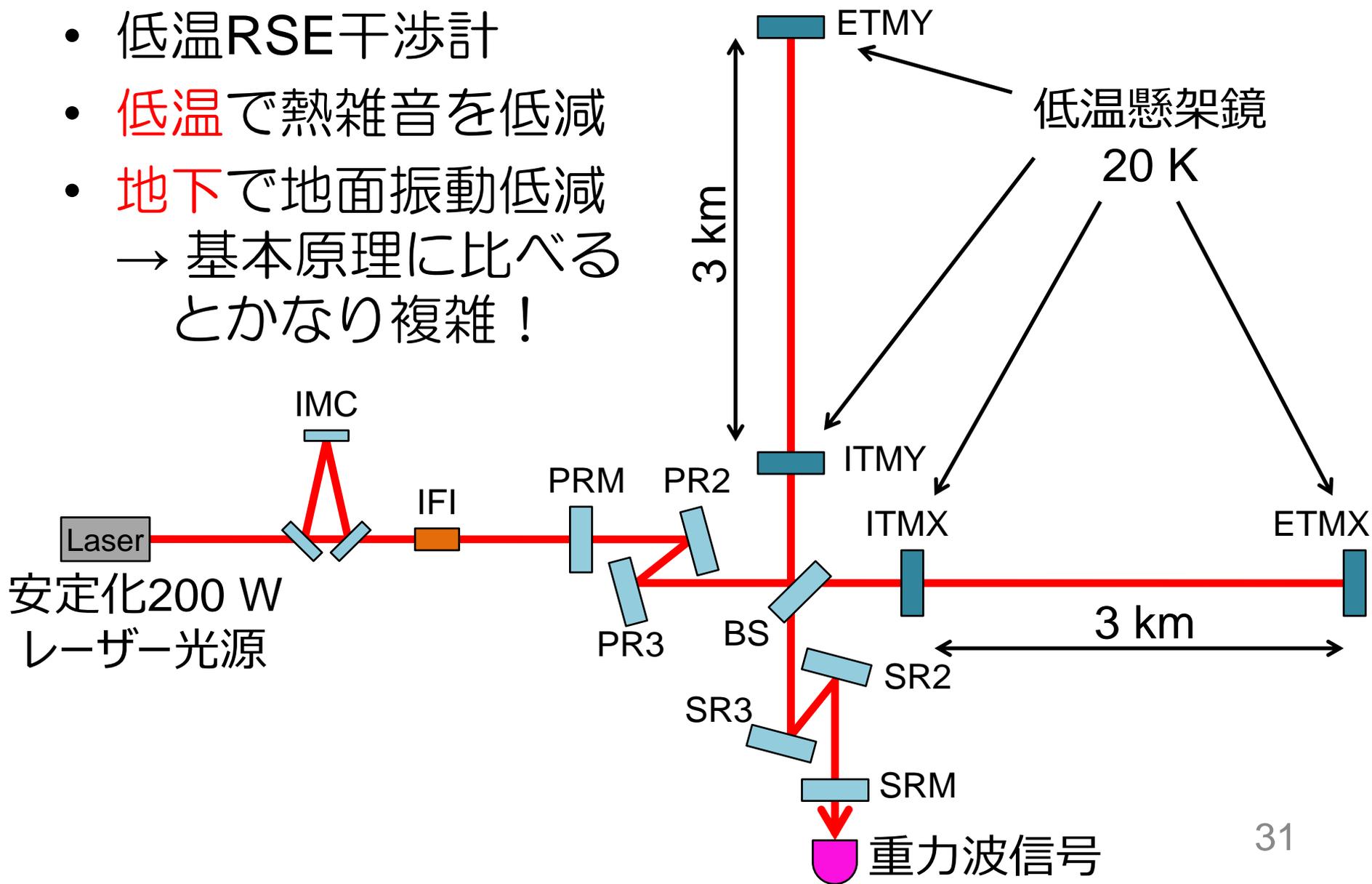
重力波検出器の基本原理

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



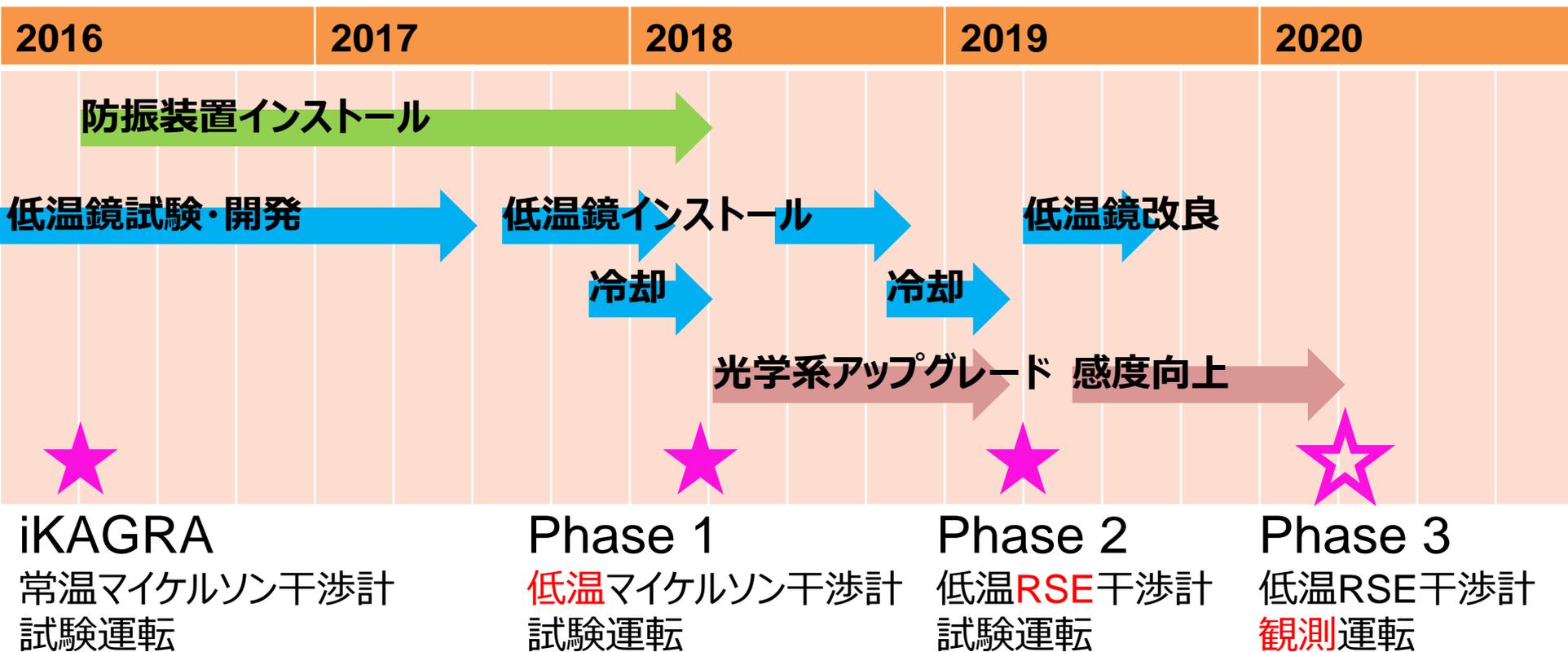
KAGRAの干渉計構成

- 低温RSE干渉計
- 低温で熱雑音を低減
- 地下で地面振動低減
→ 基本原理に比べるとかなり複雑！



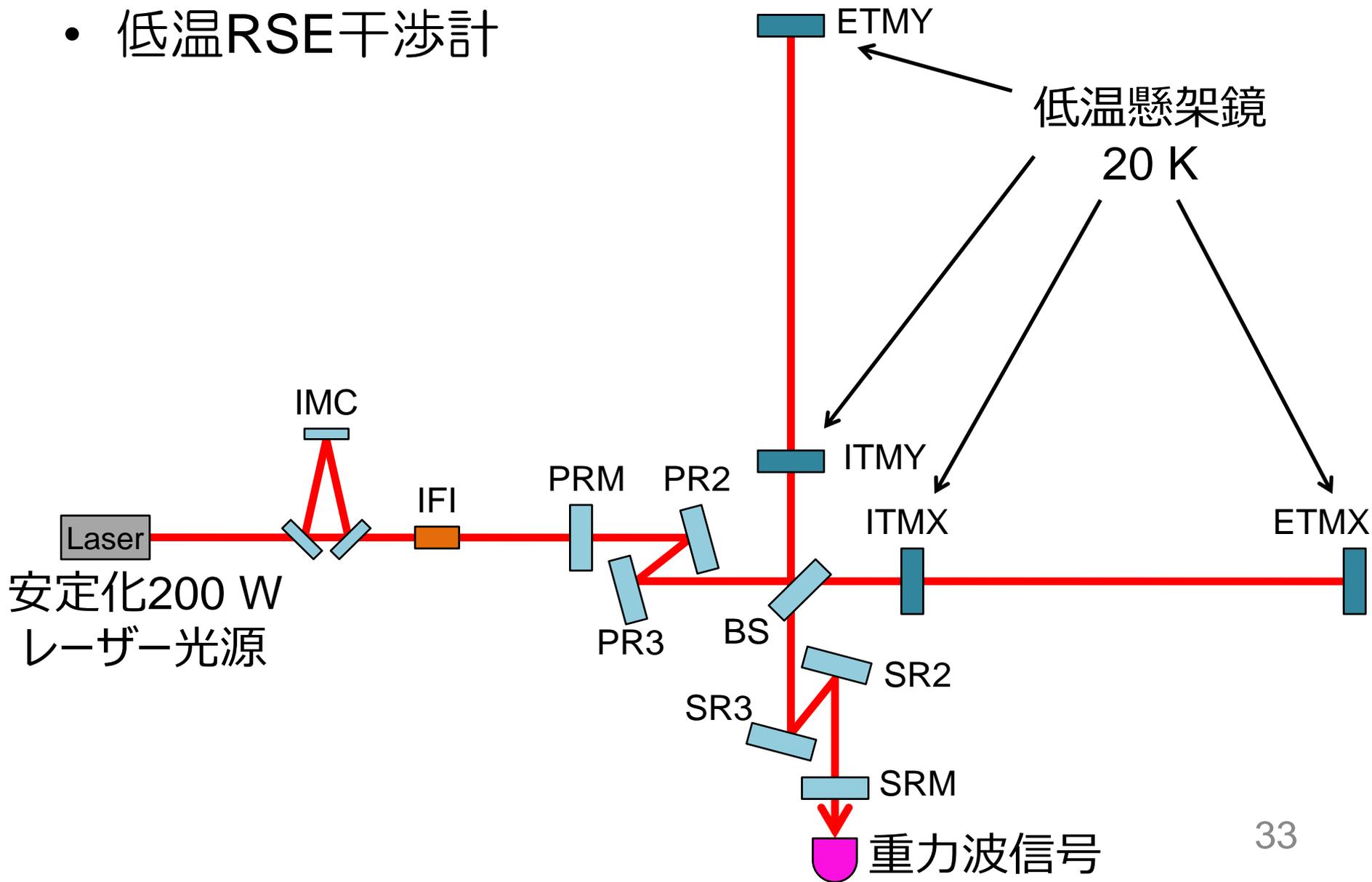
KAGRAのロードマップ

- 段階的な開発
- 現状: 常温試験運転を終了
低温運転に向けて開発中



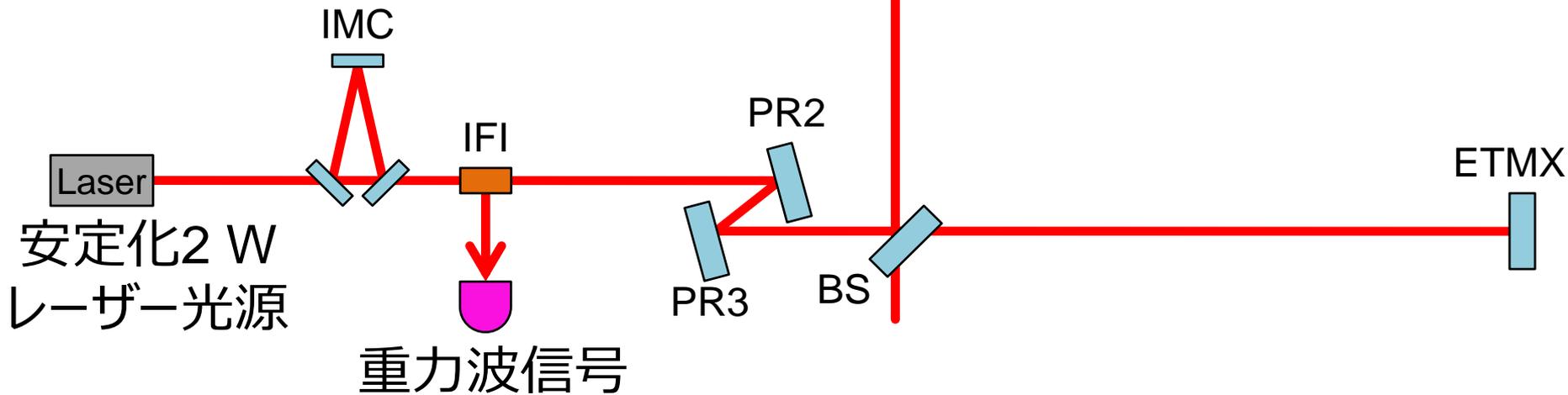
KAGRAの干渉計構成

- 低温RSE干渉計



iKAGRAの干渉計構成

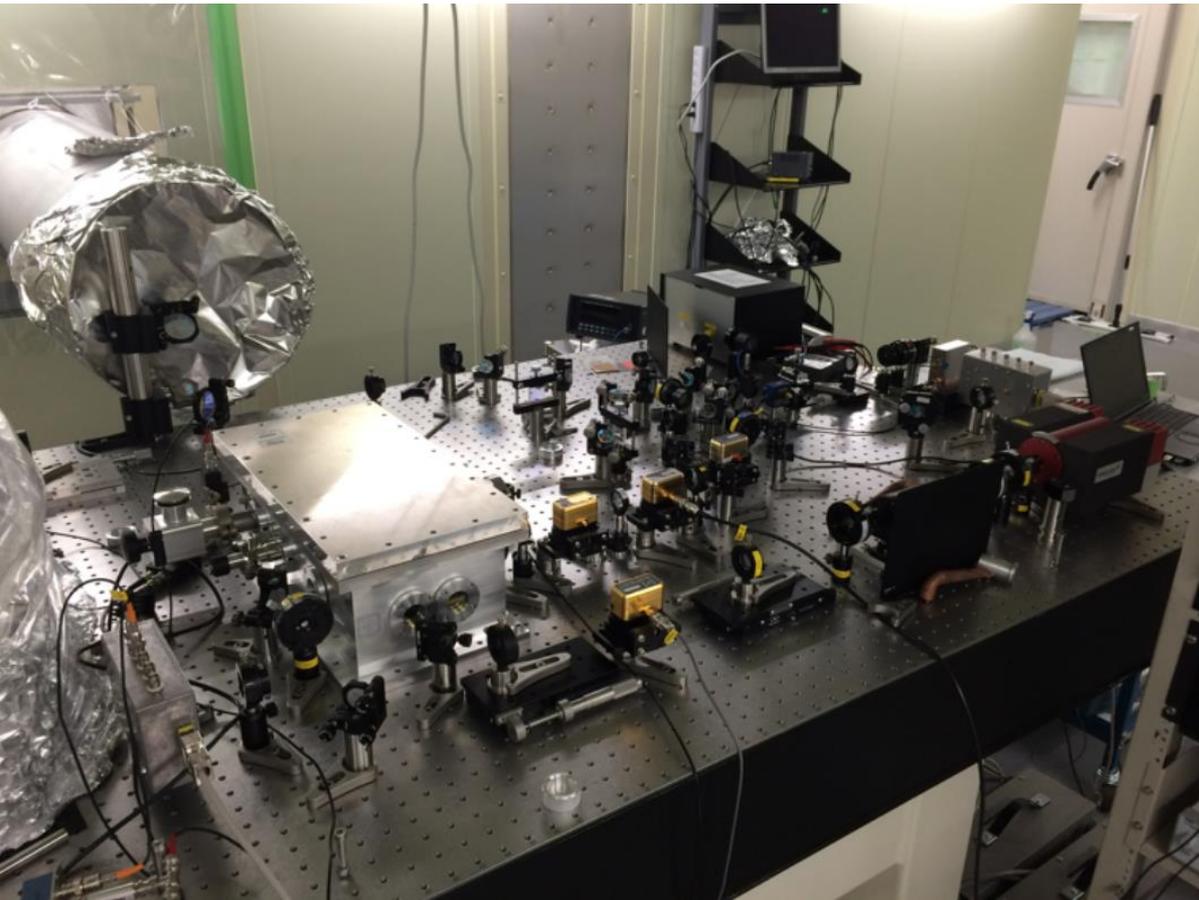
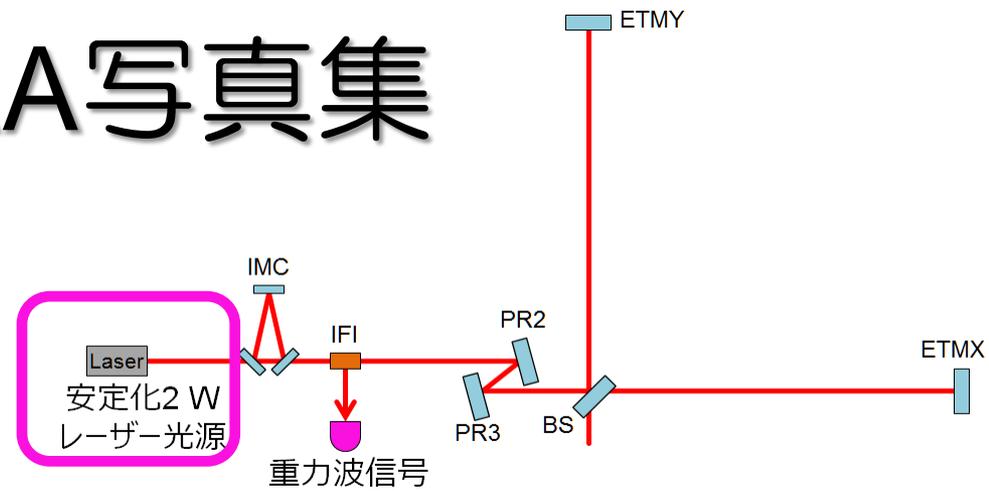
- 常温マイケルソン干渉計
- 低パワー光源
- 簡易な光学系
- 簡易な防振系



iKAGRA試験運転

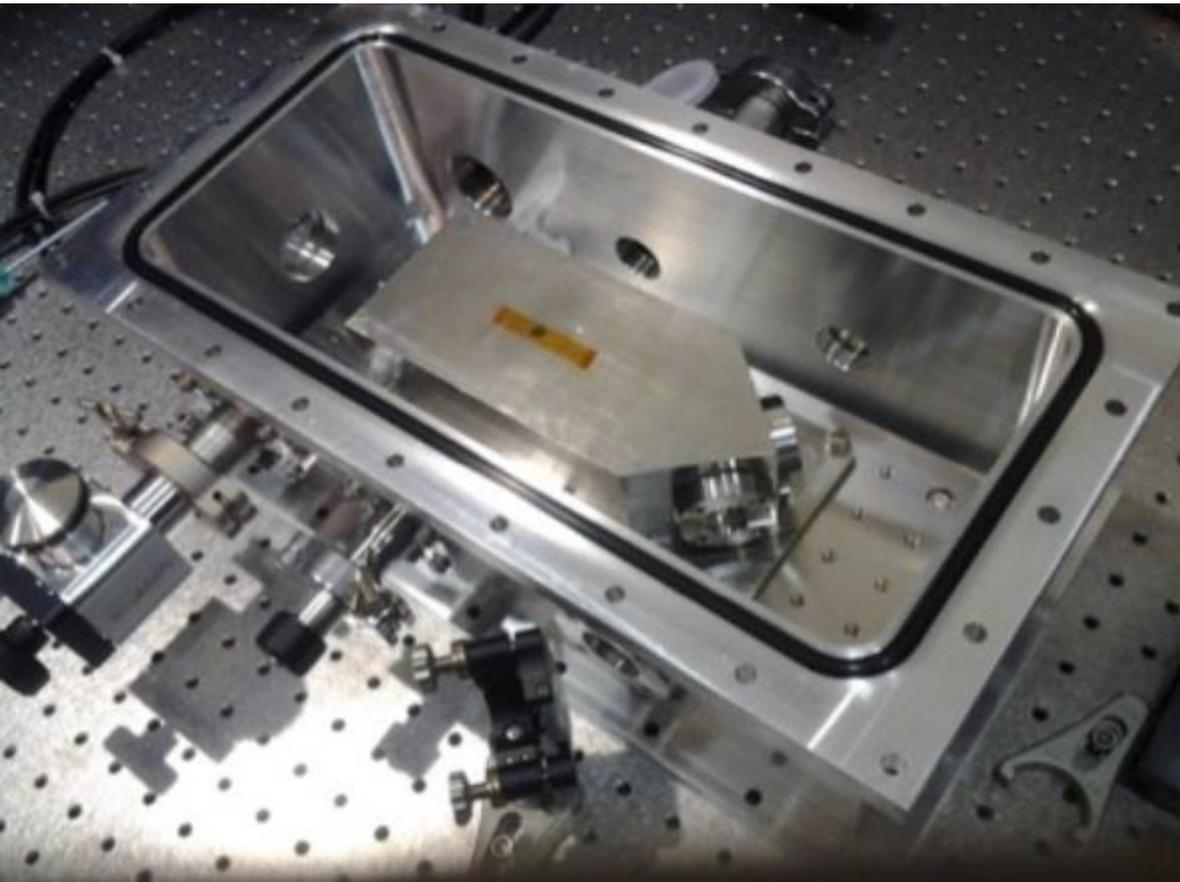
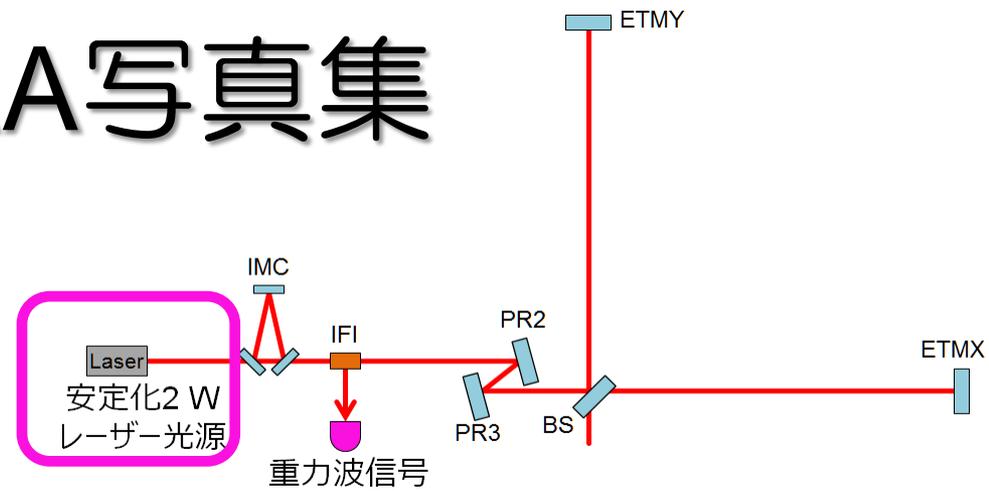
- 2016年3月25日9:00 から 3月31日17:00
2016年4月11日9:00 から 4月25日17:00 の2期間
- 目的:
 - 片腕3kmに及ぶ真空槽・ダクトのレイアウト確認
 - 制御系、データ取得・転送・解析系の試験
 - 観測体制の確立
 - 地下の環境データの取得
 - km級干渉計運転の感覚をつかむ

iKAGRA写真集



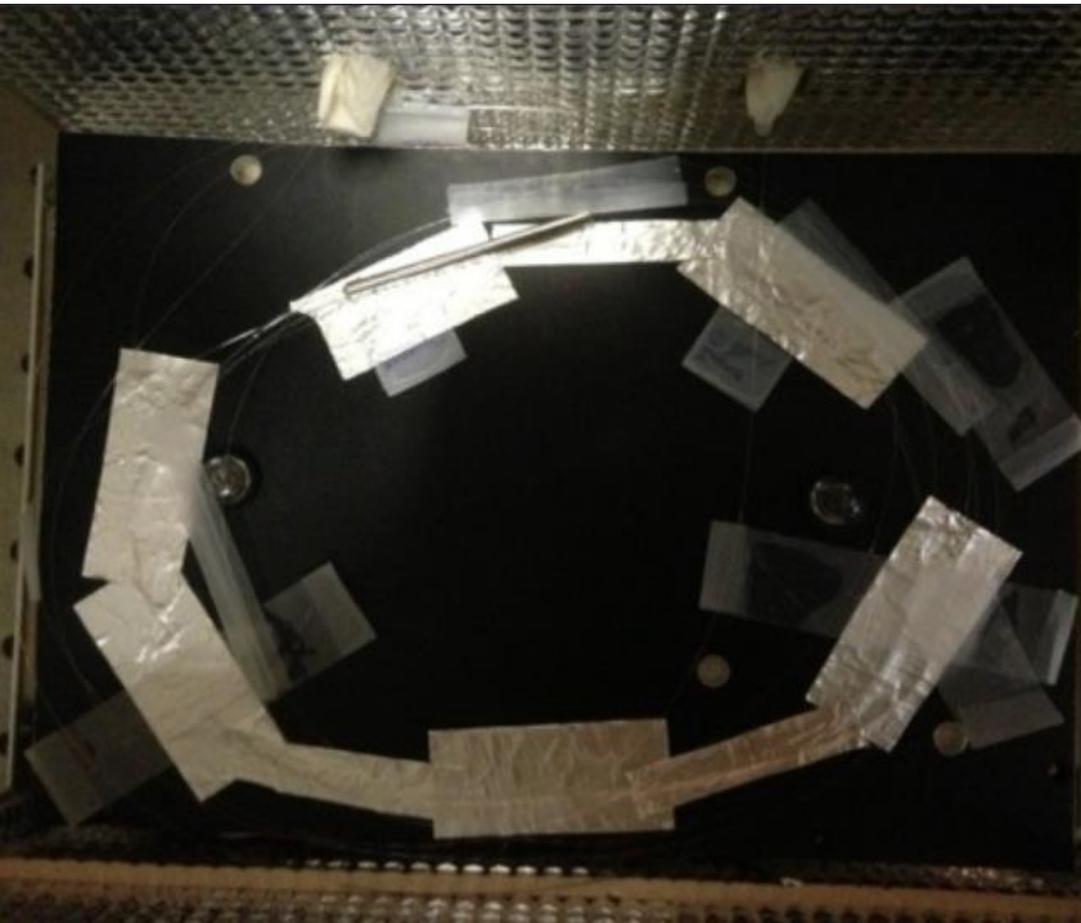
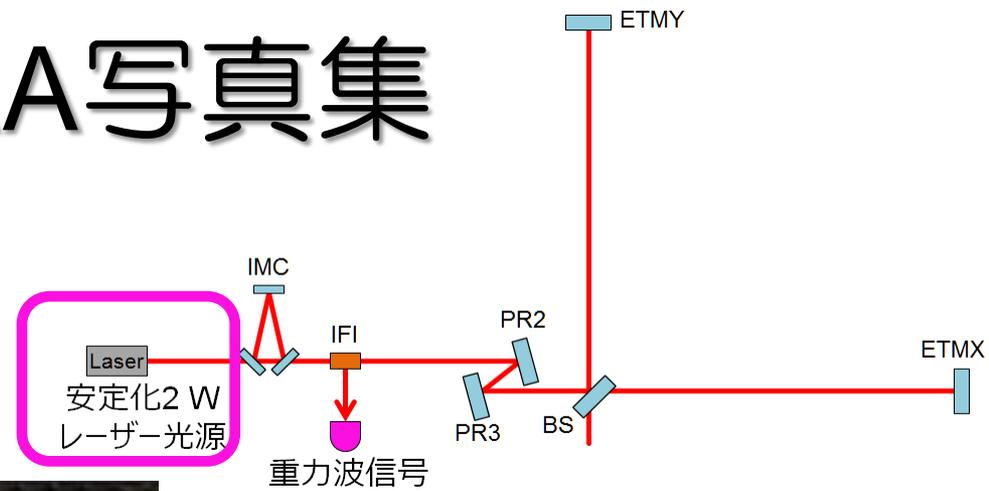
安定化レーザー光源
2 W NPRO
1064 nm
周波数安定化

iKAGRA写真集



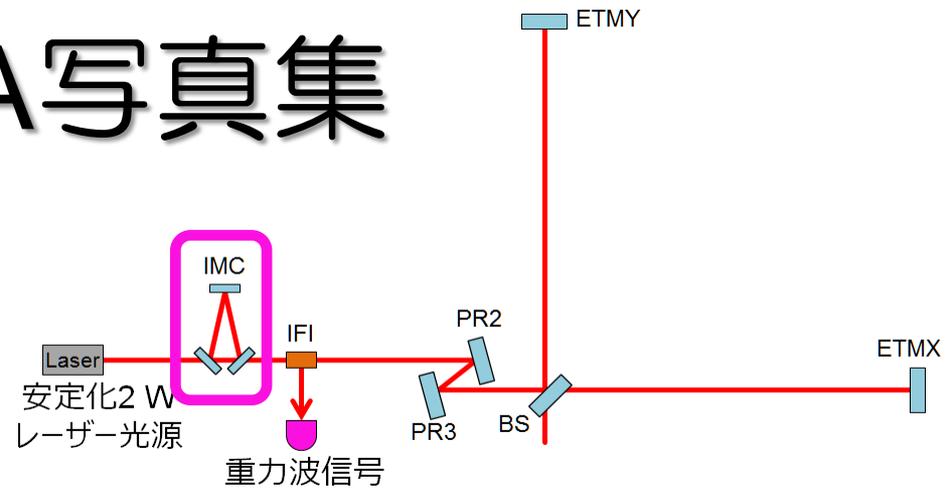
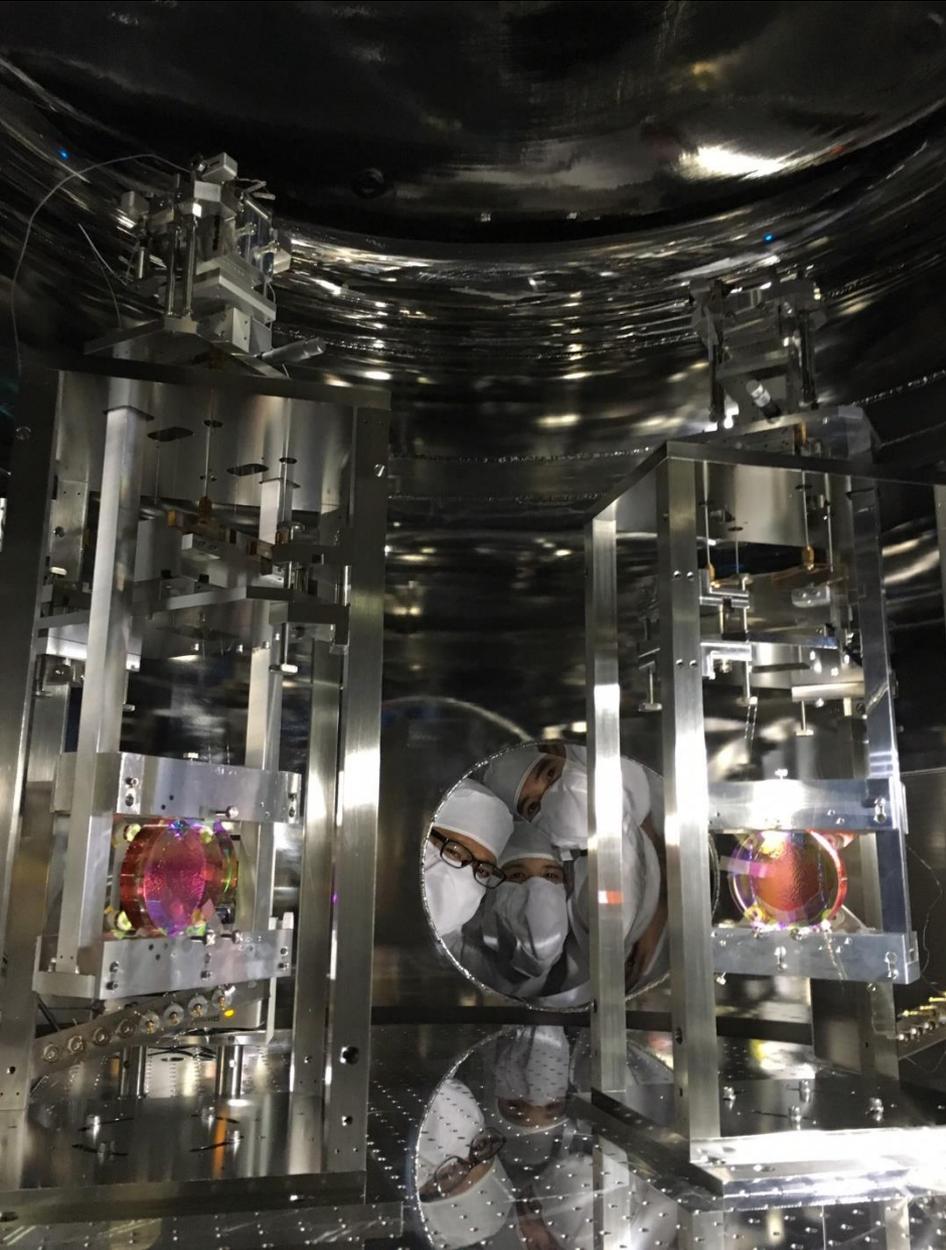
Pre Mode Cleaner
レーザーの空間モード
をきれいにする

iKAGRA写真集



Fiber Ring Cavity
レーザーの周波数を
安定化する

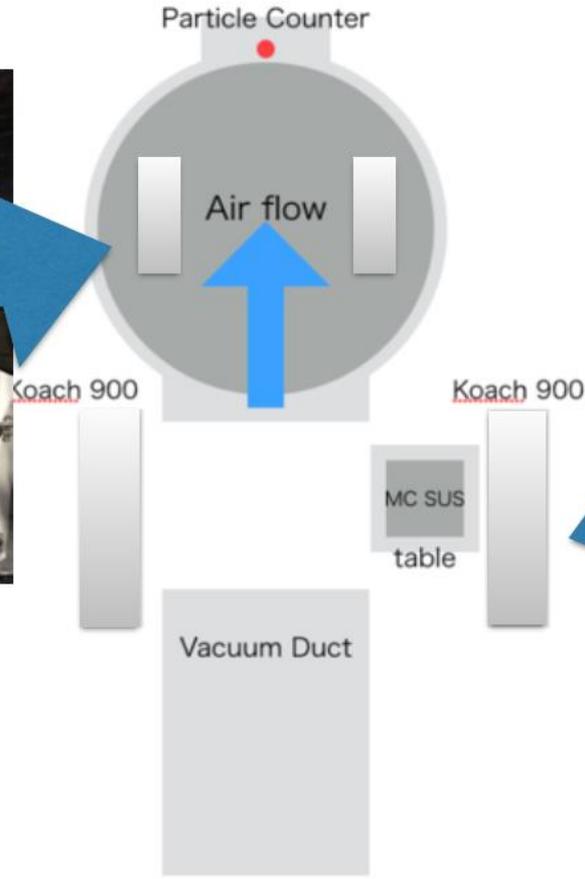
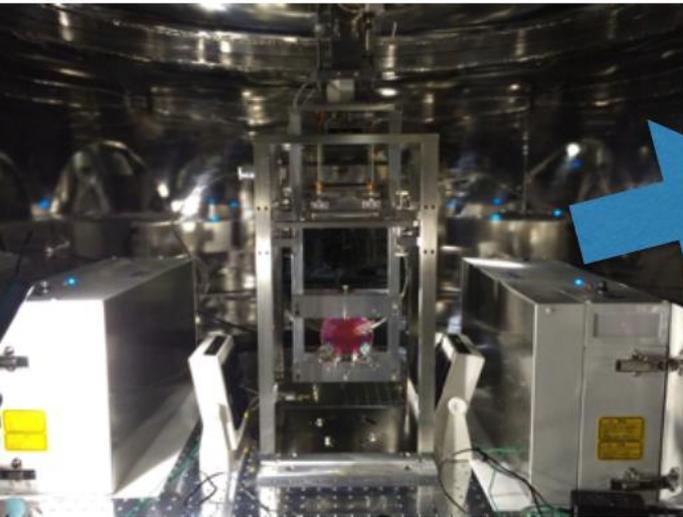
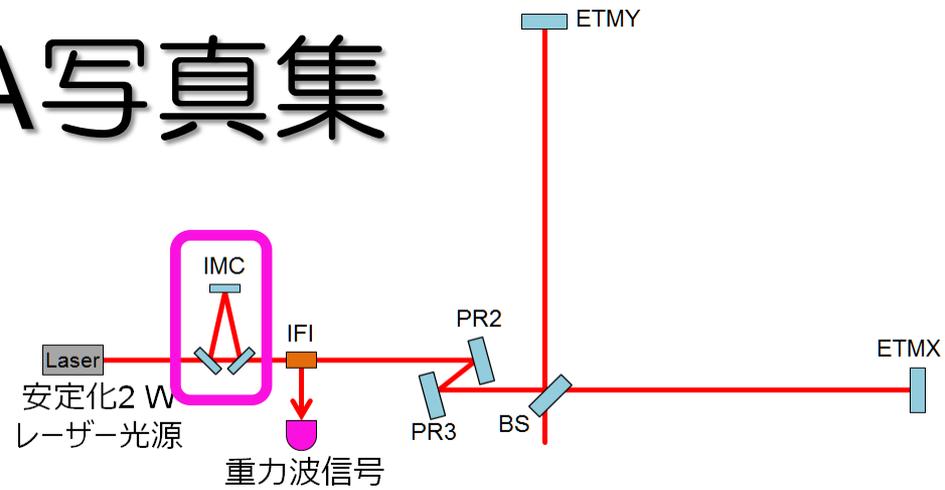
iKAGRA写真集



Input Mode Cleaner
レーザーの空間モードを
きれいにする
レーザーの周波数安定化

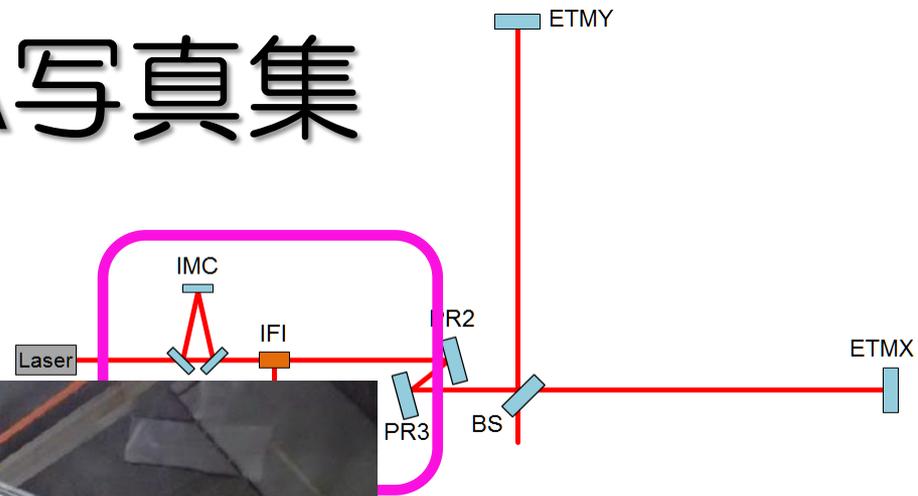
iKAGRA写真集

鏡のインストールには
クリーン環境が必須



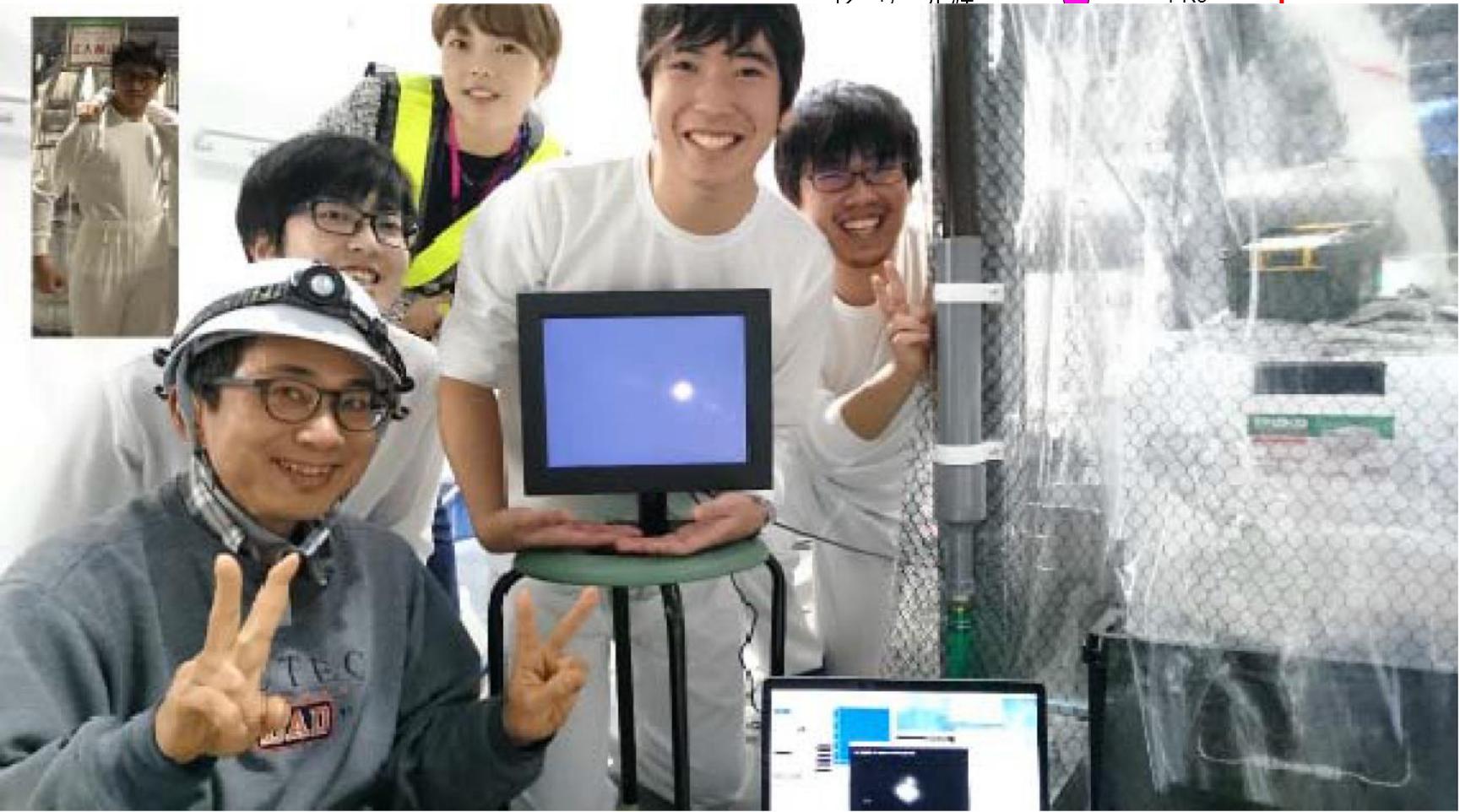
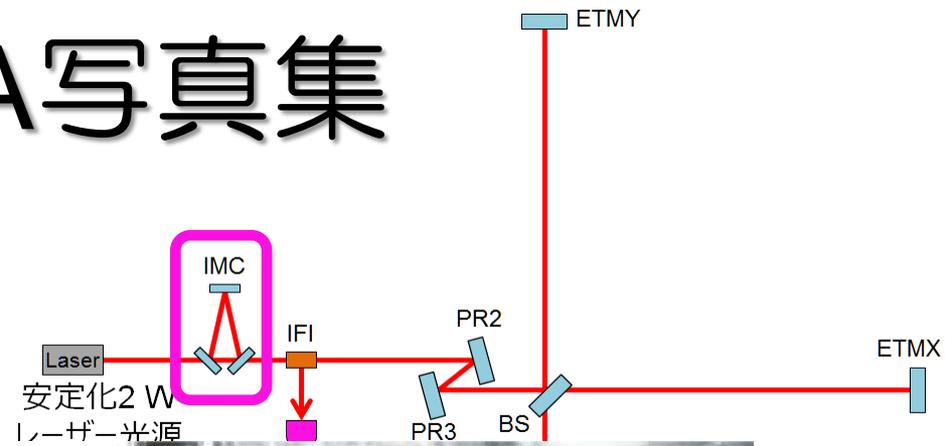
iKAGRA写真集

鏡のインストールには
クリーン環境が必須



iKAGRA写真集

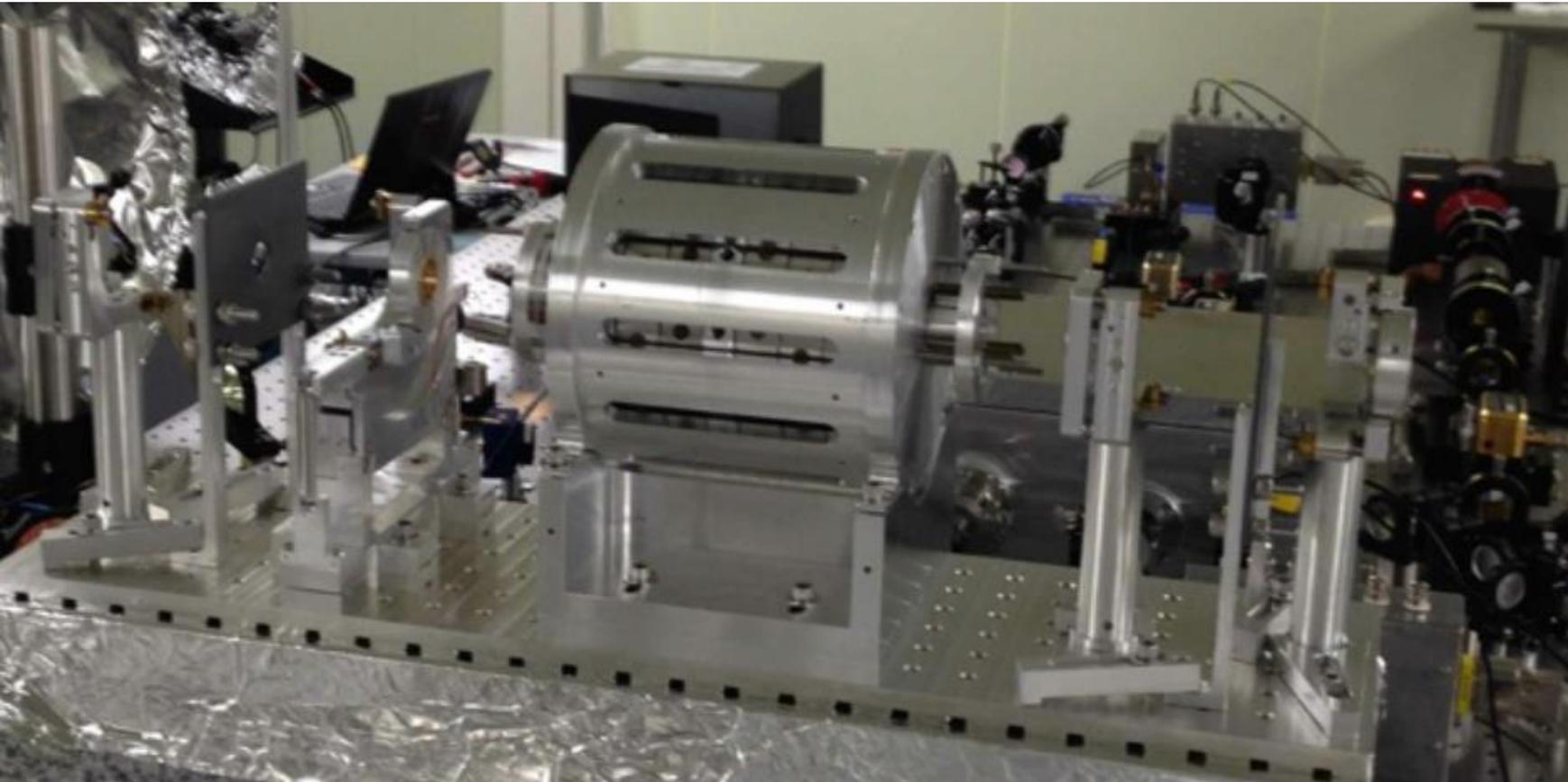
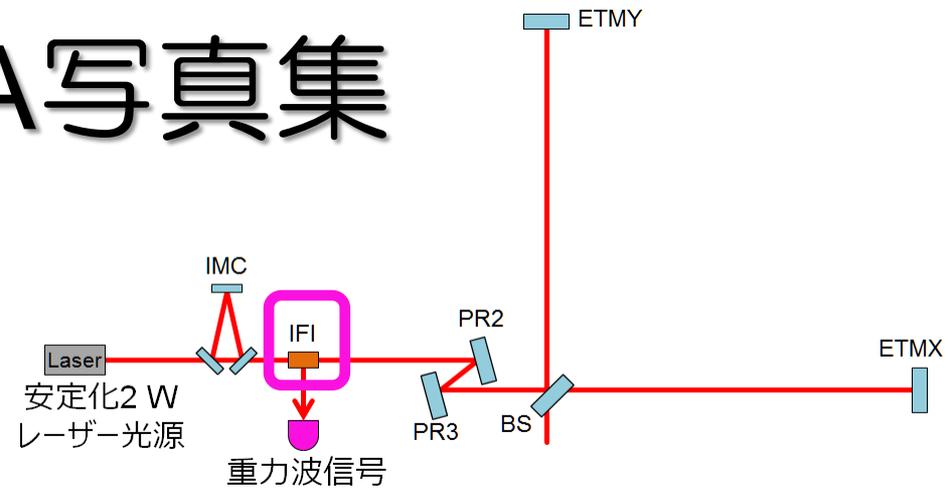
Input Mode Cleanerの 初ロック！



iKAGRA写真集

光アイソレータ

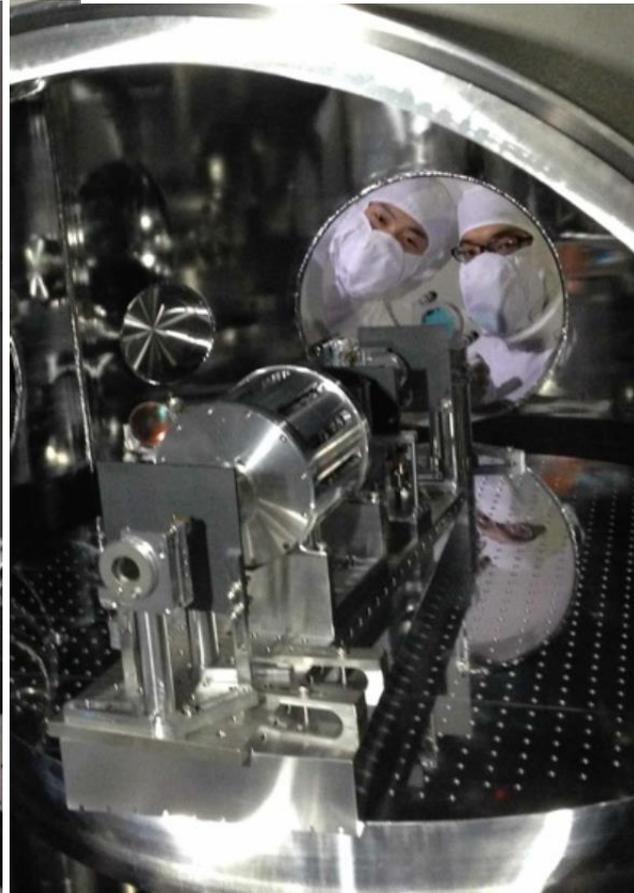
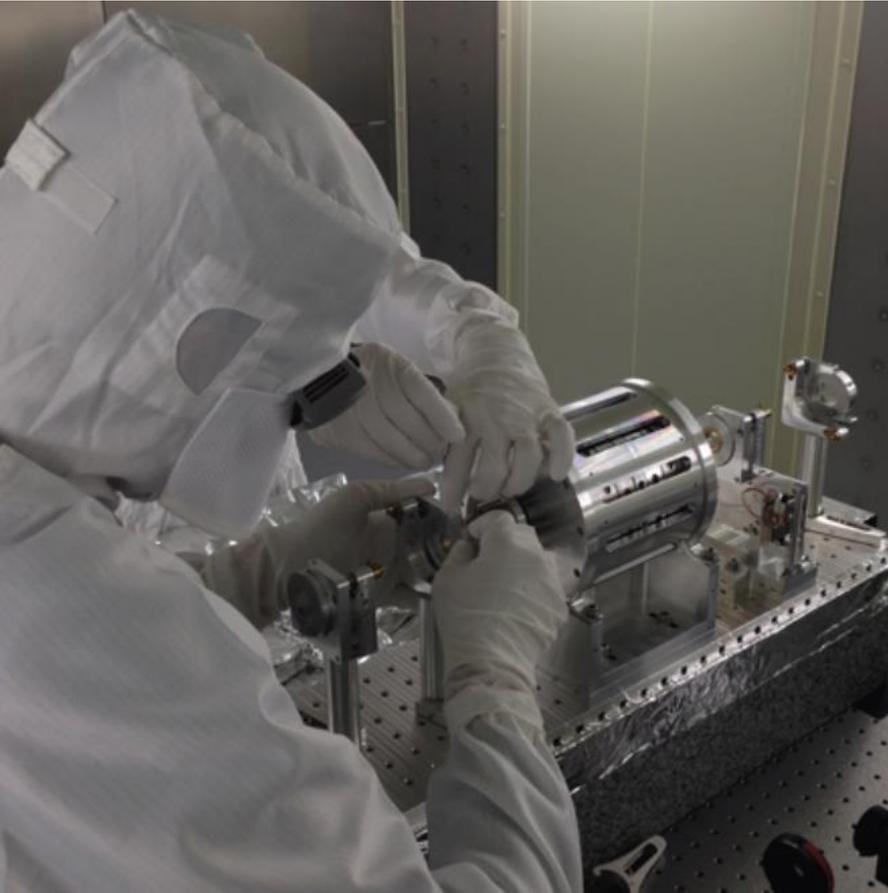
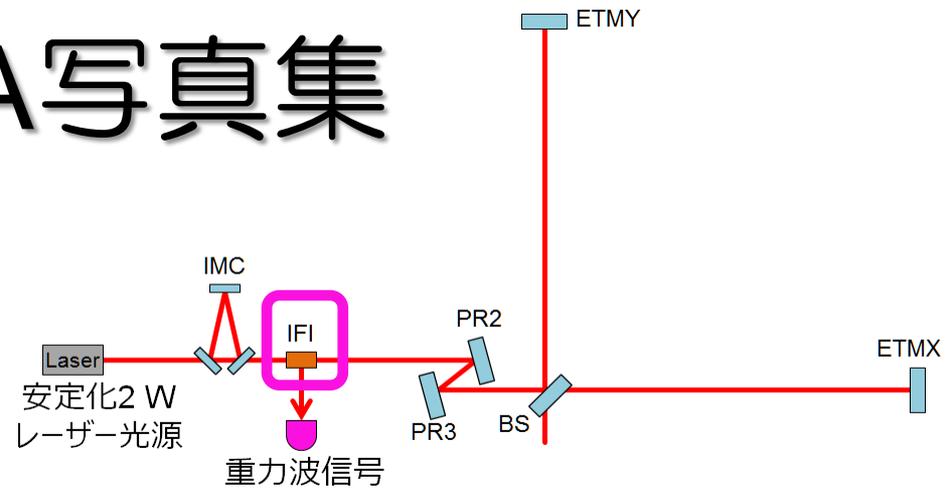
光を1方向にしか通さない
逆方向は反射させる



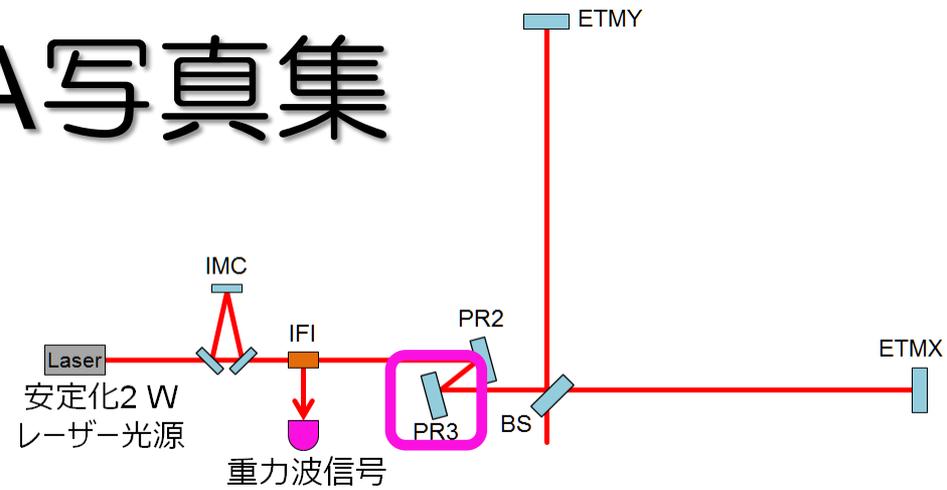
iKAGRA写真集

光アイソレータ

光を1方向にしか通さない
逆方向は反射させる

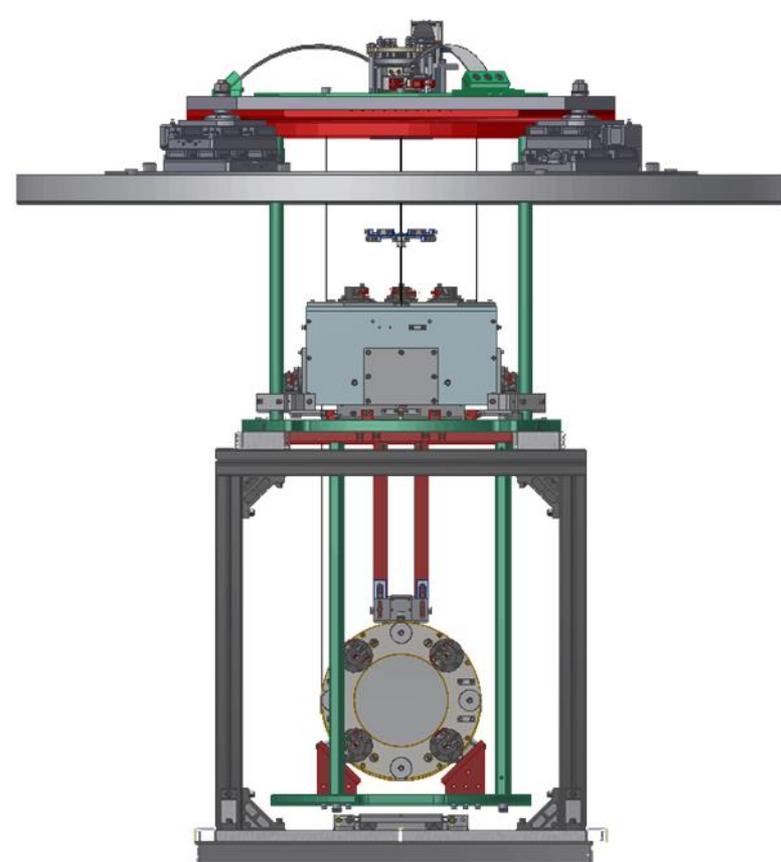


iKAGRA写真集



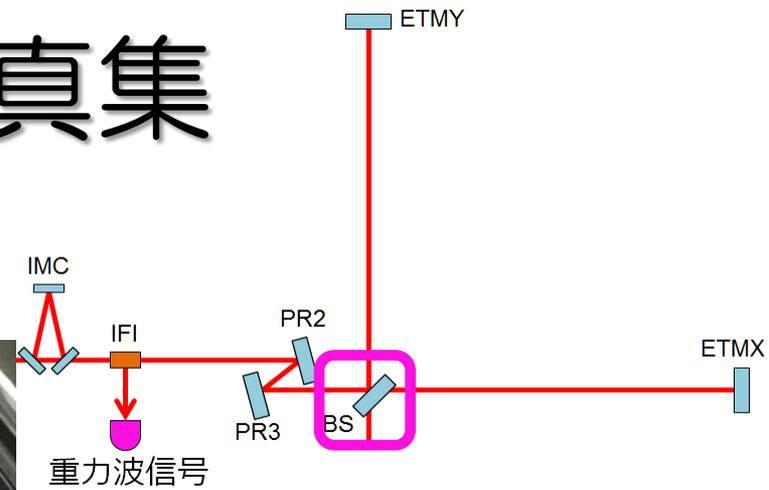
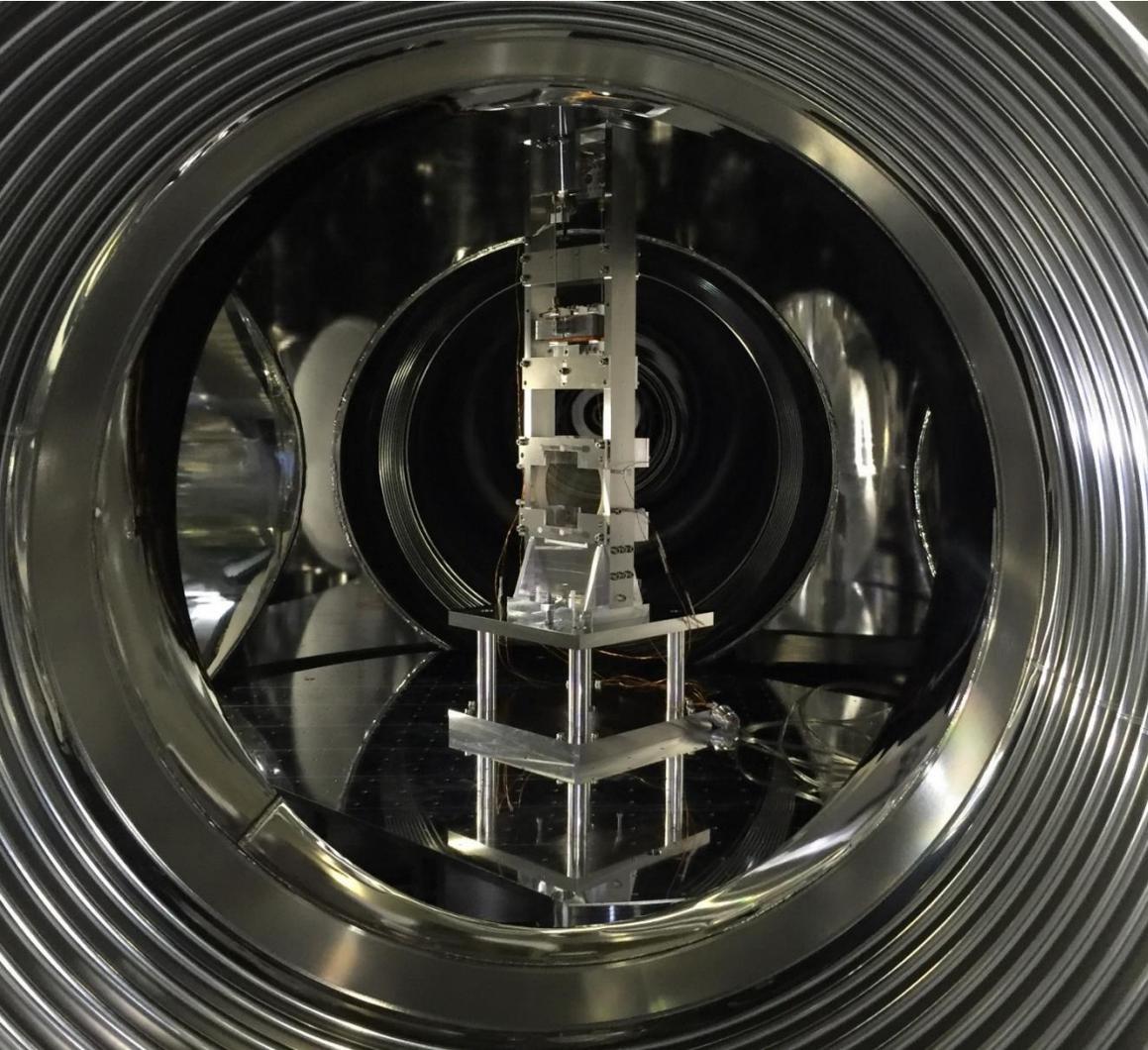
PR3

光を広げ、3km先まで送る
方向を決める



組み立て試験に3ヶ月
本番に1ヶ月

iKAGRA写真集



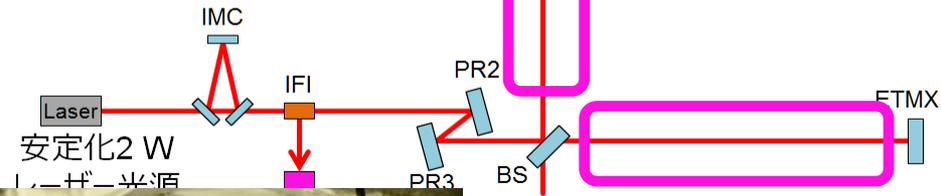
BS

X方向とY方向に
ビームを分ける

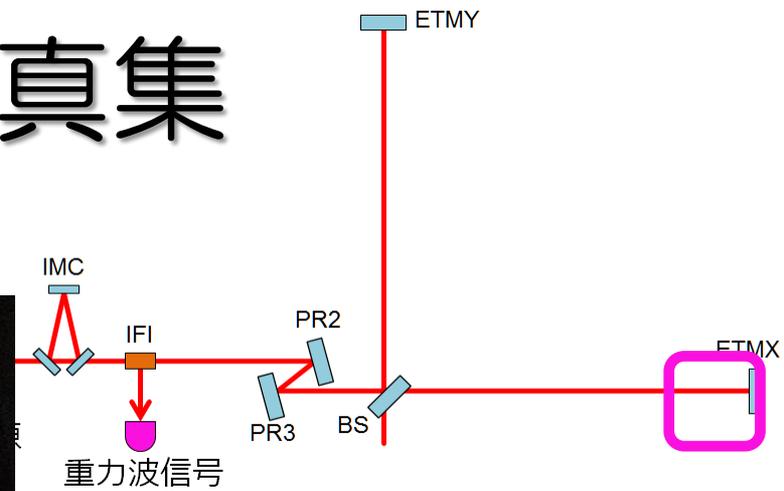
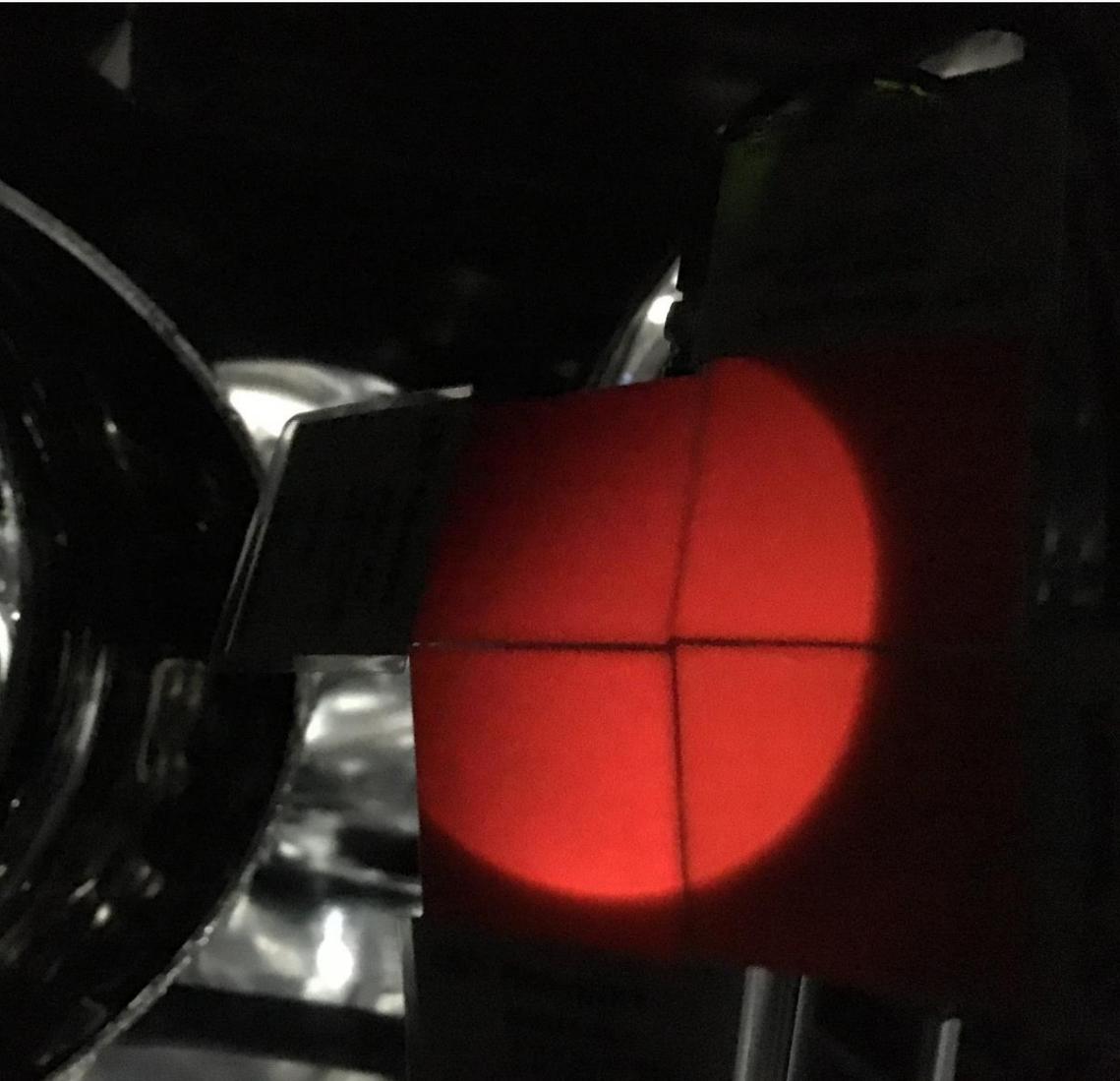
昔の干渉計(CLIO)の
BSで代用

iKAGRA写真集

3 km 真空ダクト
空気の揺らぎをなくす



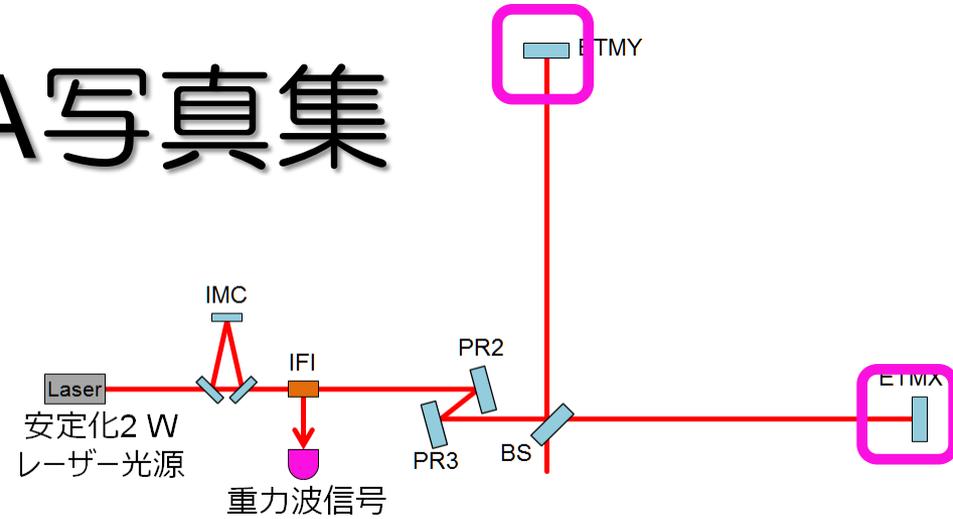
iKAGRA写真集



3 km先に初めて
到達した光

赤外光(1064 nm)
なのでセンサーカード
を用いる

iKAGRA写真集

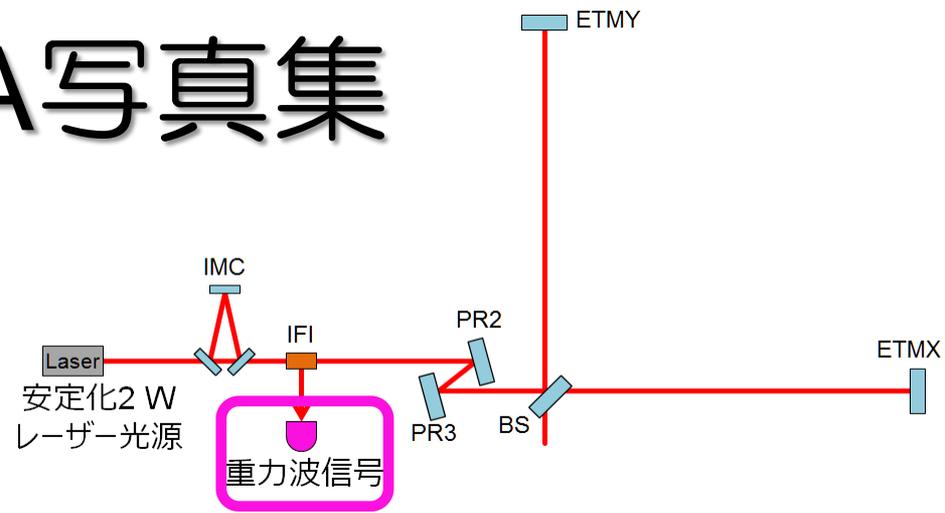


ETMX/Y

光を打ち返す

古い干渉計(TAMA)の鏡で
代用

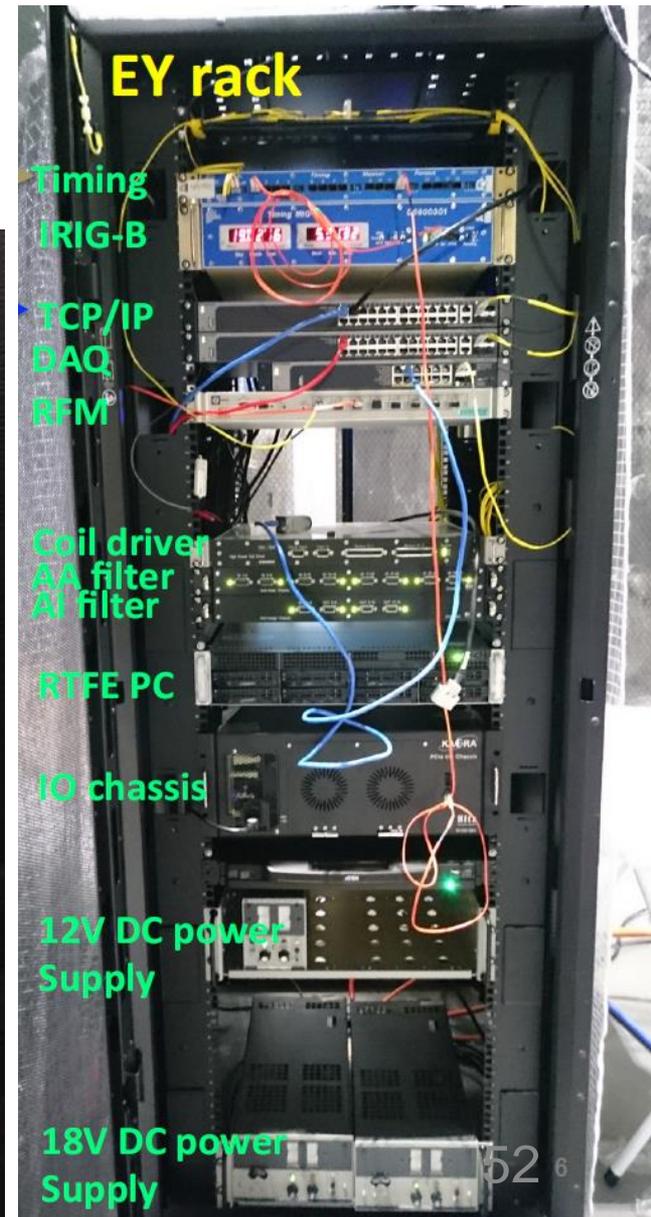
iKAGRA写真集



KAGRA初の干渉縞

iKAGRA写真集

干渉計の動作には計算機制御を用いる



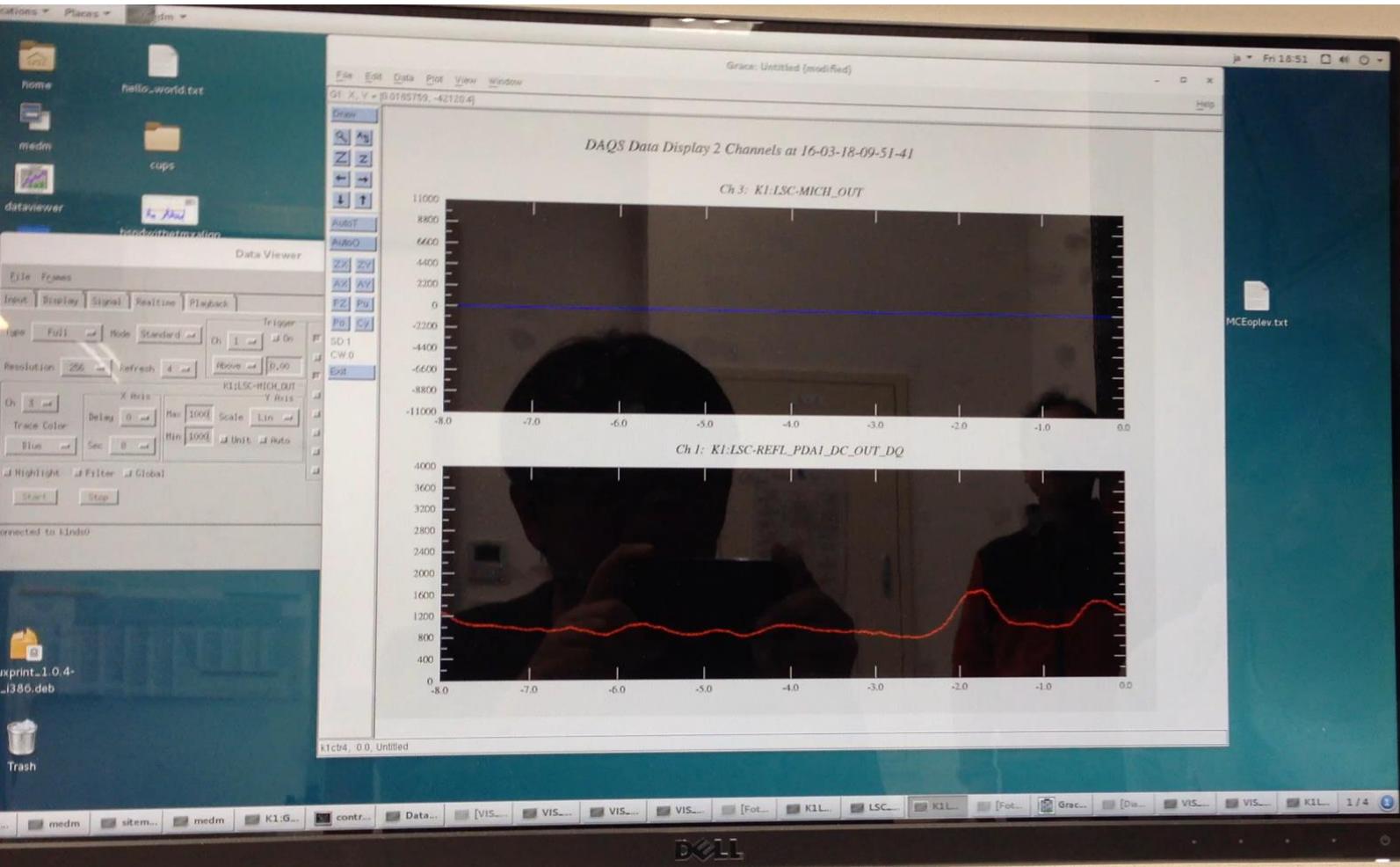
iKAGRA写真集

トンネルから5km離れた制御室で干渉計を制御



iKAGRA写真集

iKAGRAの初ロック！



iKAGRA写真集

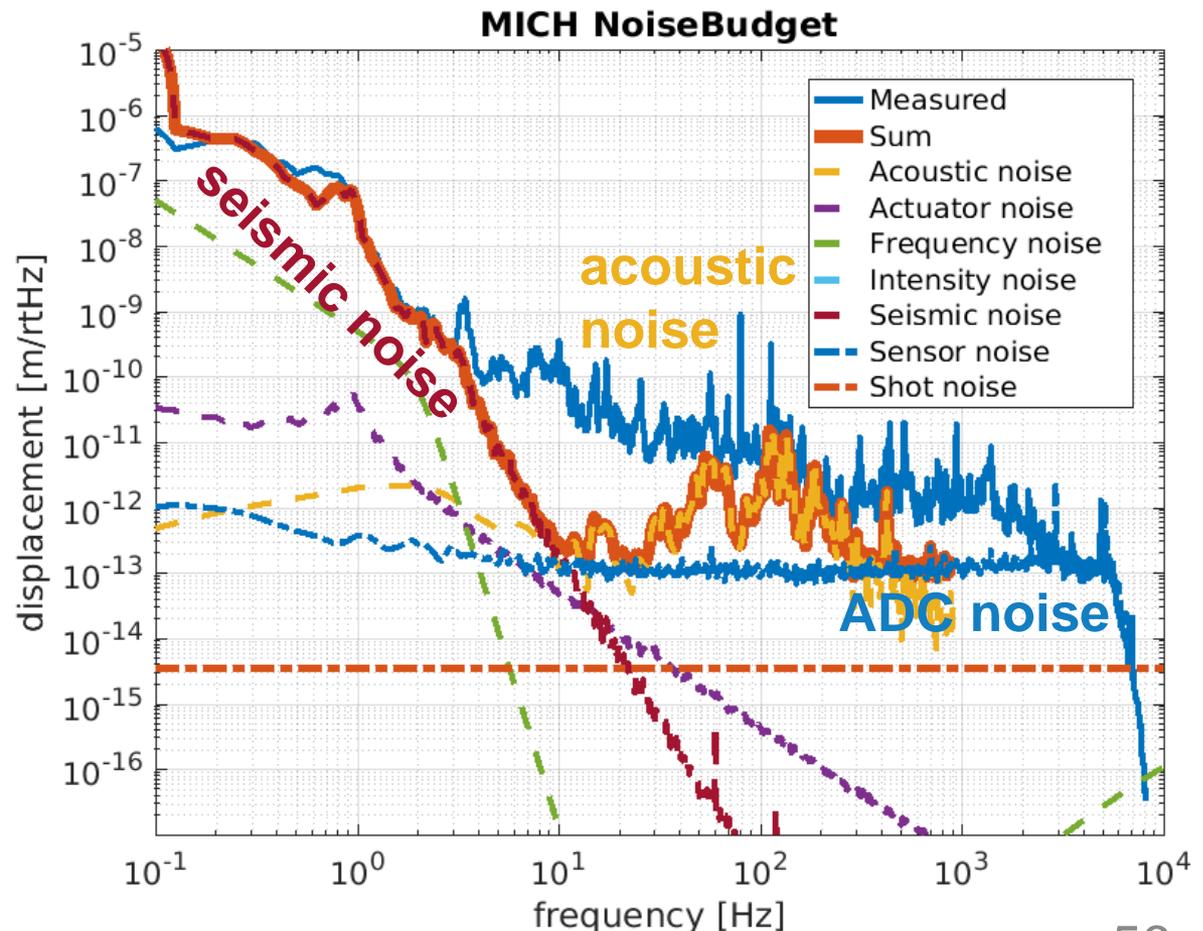
報道もたくさん
やってきた



iKAGRAの感度

- $\sim 3e-15$ /rtHz @ 100 Hz
- 地面振動、音響雑音、ADC雑音で制限

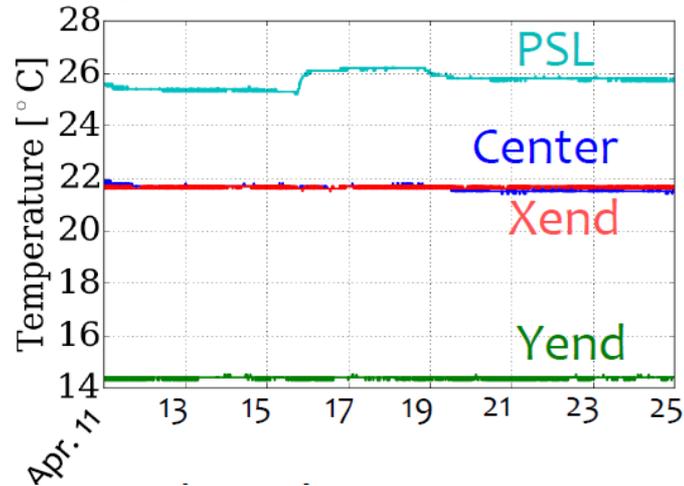
- 雑音源の特定に成功
- 極めて悪いが将来的には全て低減可能



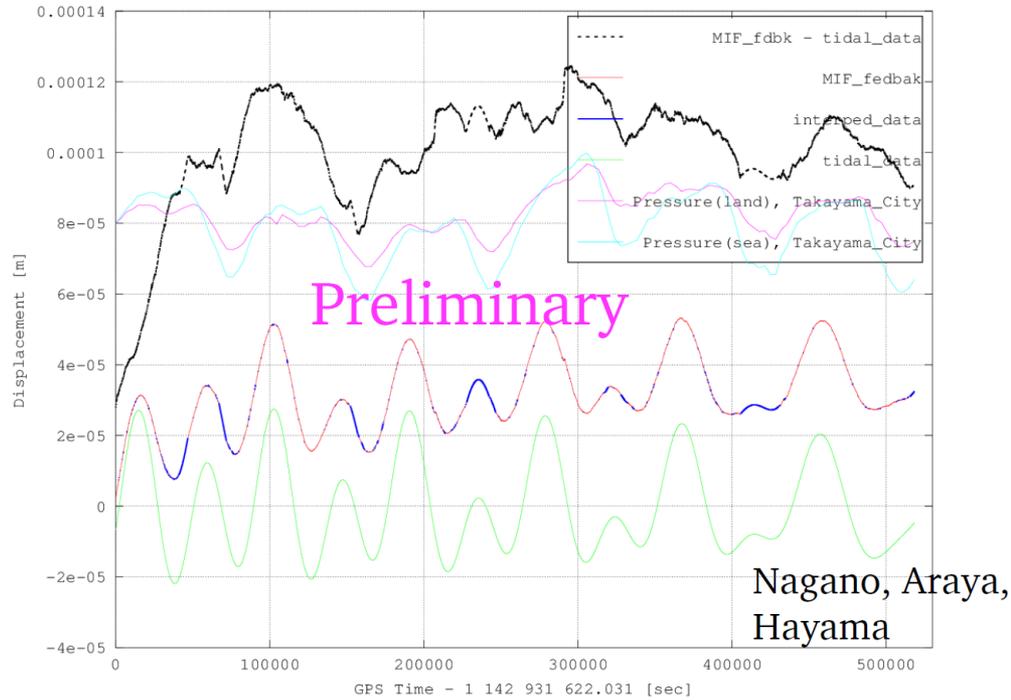
環境データ

- KAGRAの特殊な環境の評価

Temperature



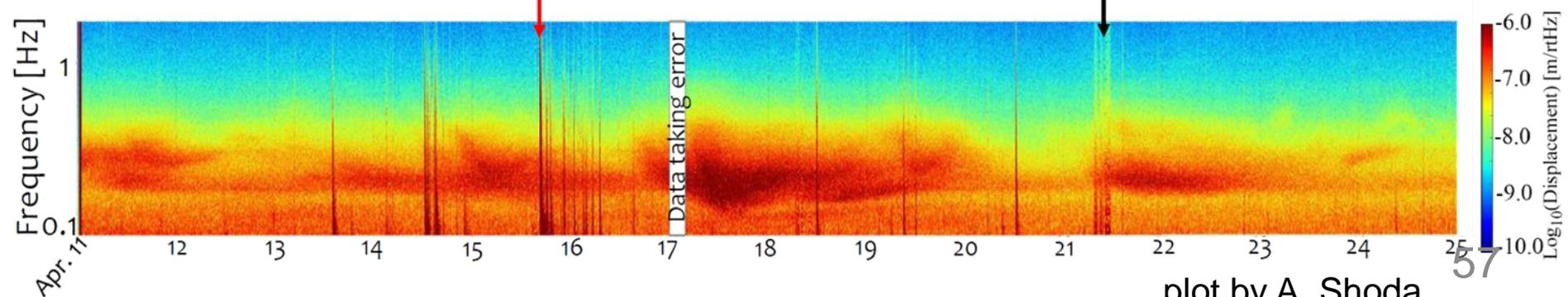
Tidal distortion



Seismic noise

Kumamoto earthquake (M5.7)

Data taking error



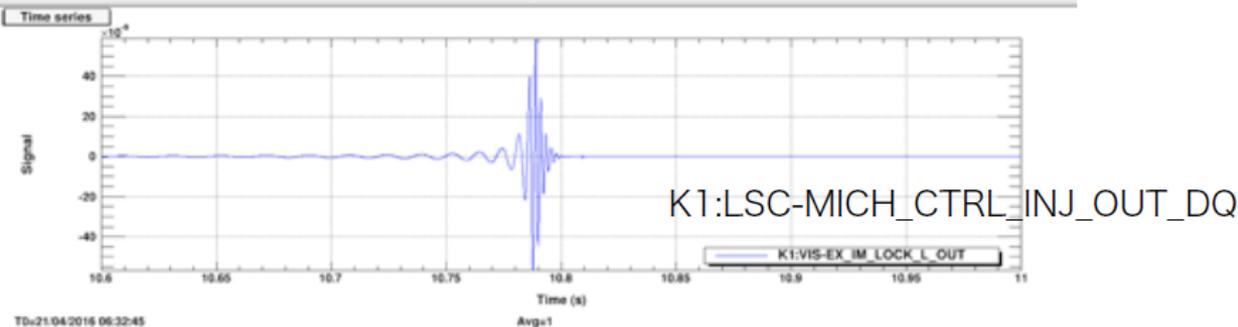
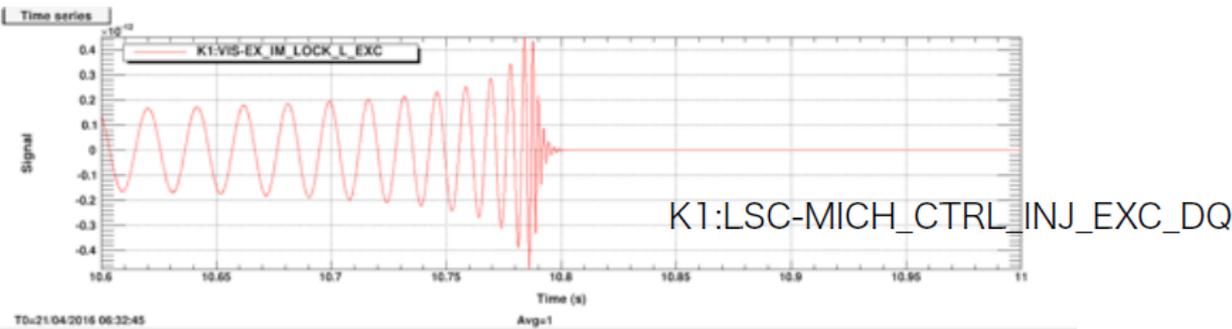
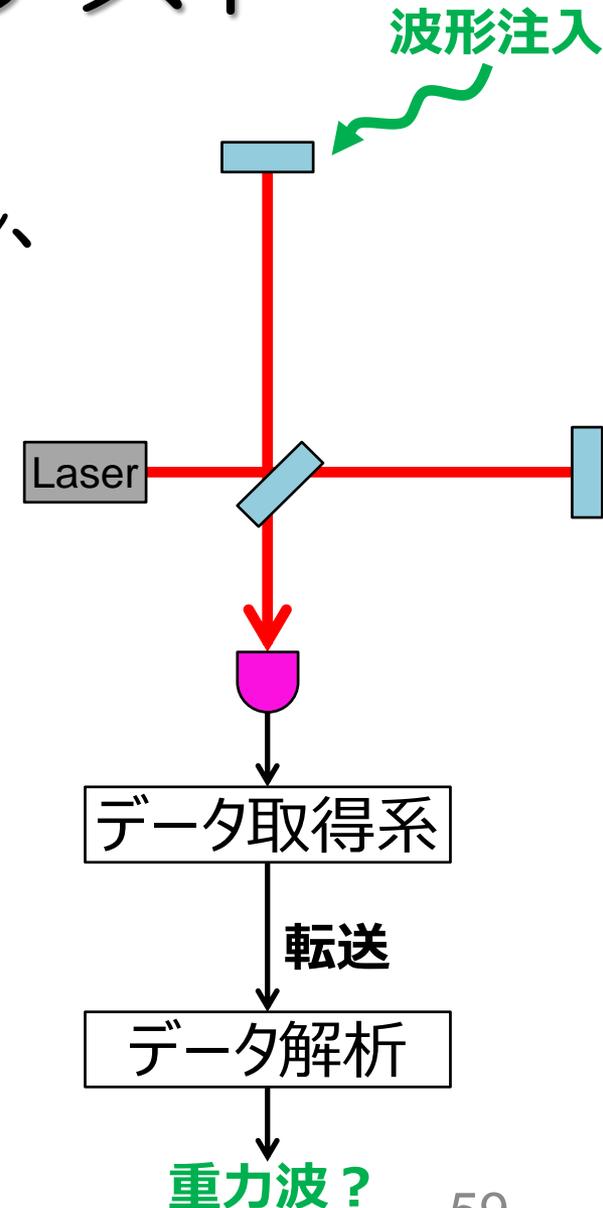
データ転送・解析

- リアルタイム転送 (遅延時間~3秒、~200 MB/sec)
東大宇宙線研(柏)
大阪市大
- オフライン転送
Academia Sinica
(台湾)
KISTI (韓国)
- 合計7.5 TBのデータ
重力波信号
環境信号
各種モニタ信号



重力波信号の注入テスト

- 試験運転終了直後
- 生成した重力波波形で鏡を揺らし、信号を注入
- 干渉計から解析系までの重要な end-to-end test



試験運転まとめと現状

- 2016年3月 iKAGRA試験運転に成功
常温マイケルソン干渉計
- レイアウトの確認、環境データの取得、観測体制の確認ができた
- 制御系やデータ取得・転送系もうまく行った
- bKAGRAに役立つデータ・経験が得られた
- 重力波データ解析、環境データ解析が進行中
- 現在、低温運転に向けた開発を進めている

第2回まとめ

- 大型低温重力波望遠鏡**KAGRA**
岐阜県神岡鉱山地下に建設中
- **地下**建設で地面振動を低減
- **低温**で熱雑音を低減
- 2016年3月に初の試験運転
常温マイケルソン干渉計という簡単な構成
- 2020年頃に本格的な**観測**運転開始予定

1日目のレポート

- 重力波初検出の意義と、初検出後のKAGRAの重要性について簡単にまとめてください
- 名前と学籍番号、実施日を必ず書くこと！