

# 大型低温重力波望遠鏡に関する研究(IV)

宇宙線研究所  
黒田和明

# Objective of GW detection

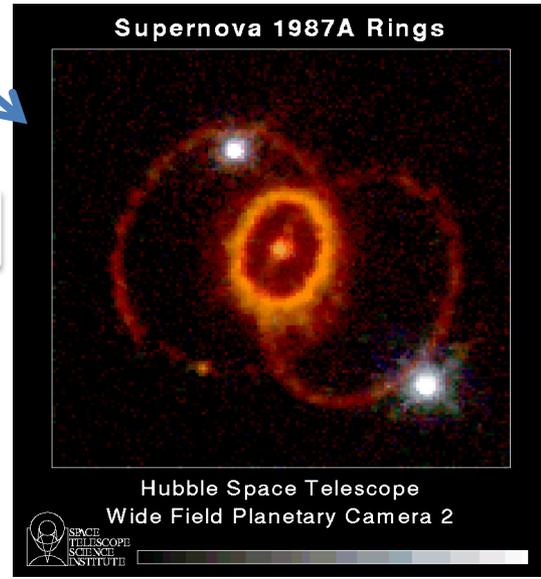
- Direct detection of gravity wave is the test of Einstein's general relativity in the strong gravity field
  - Classical tests of GR in weak field also satisfy other metric theories
  - Any replacement of Brans-Dicke's theory?
- Gravity wave becomes the observation tool of astrophysics and astronomy
  - Distribution search of compact stars, merger rate, etc.
  - Spin behaviors of compact stars
  - Standard light for measuring astronomical distances
- Signal of gravity wave in time places conditions of the equation of high density state of nuclear objects
  - Clearer determination of the radius of neutron star in merger at the coalescence

- Coalescence of neutron star
- Supernova explosion
- Coalescence of BH
- Star falling into BH
- Spinning pulsars
- Binary pulsar in orbital motion
- Instant of Birth of Universe
- Unknown GW
- etc.....

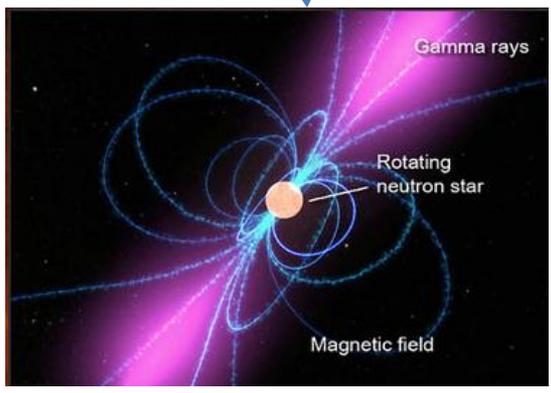
Binary neutron stars coalesce after losing kinetic energy of orbital motion due to releasing GW



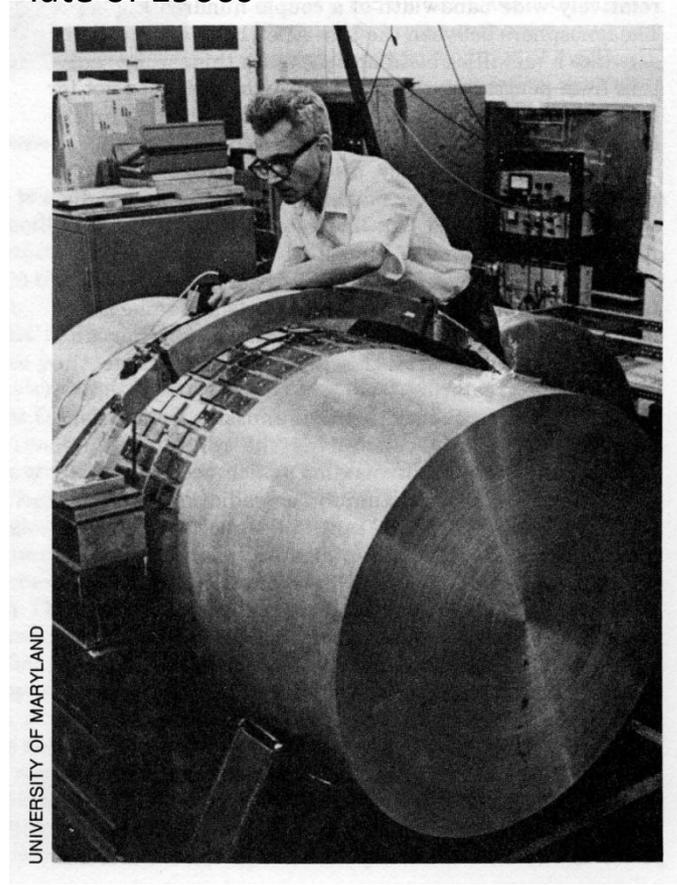
Burst GW produced by explosion



Sinusoidal GW emitted

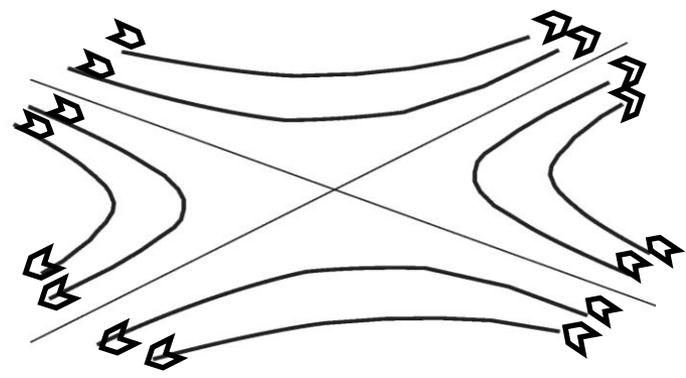


Pioneering work by J. Weber who started to develop a bar detector in late of 1960s



UNIVERSITY OF MARYLAND

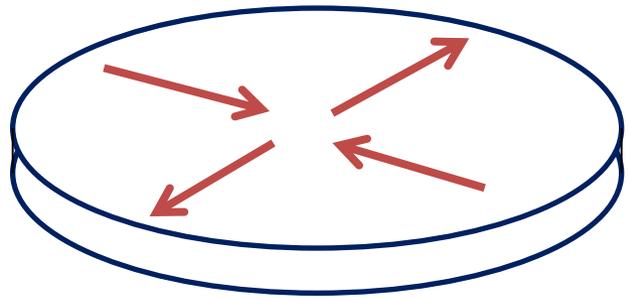
## How to detect?



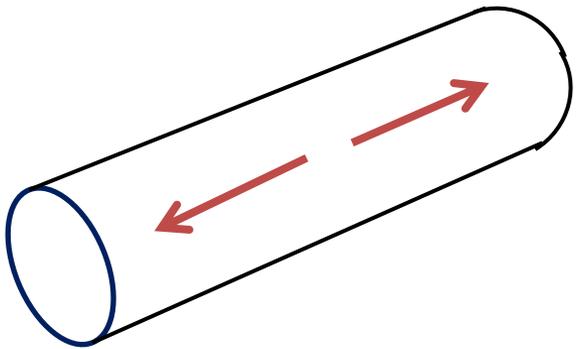
Gravity plane wave

$$h_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{11} & h_{12} & 0 \\ 0 & h_{21} & h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

GR is being tested as in Angela's talk



Disk type: Resonant frequency could be changed by making slits



Bar type: Resonant frequency was determined by the length of the bar

Tidal force of gravity wave causes elastic modal oscillation, which can be detected by sensitive transducer. Thermal noise of vibration is reduced by lowering the temperature.

# Laser Interferometer

Metric perturbation  
 $g_{ij} = \eta_{ij} + h_{ij}$

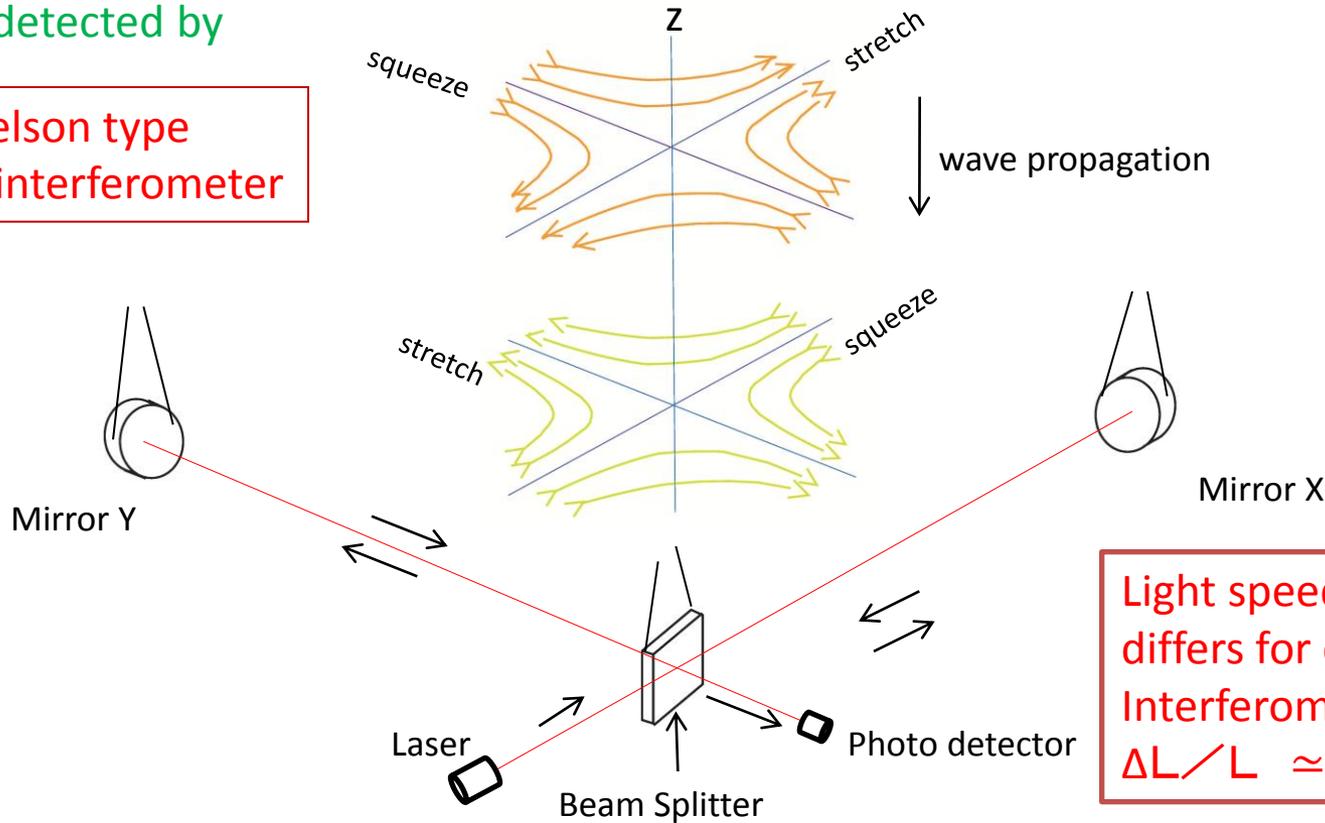
is detected by

Michelson type  
 laser interferometer

Gravity plane wave

$$h_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{11} & h_{12} & 0 \\ 0 & h_{21} & h_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

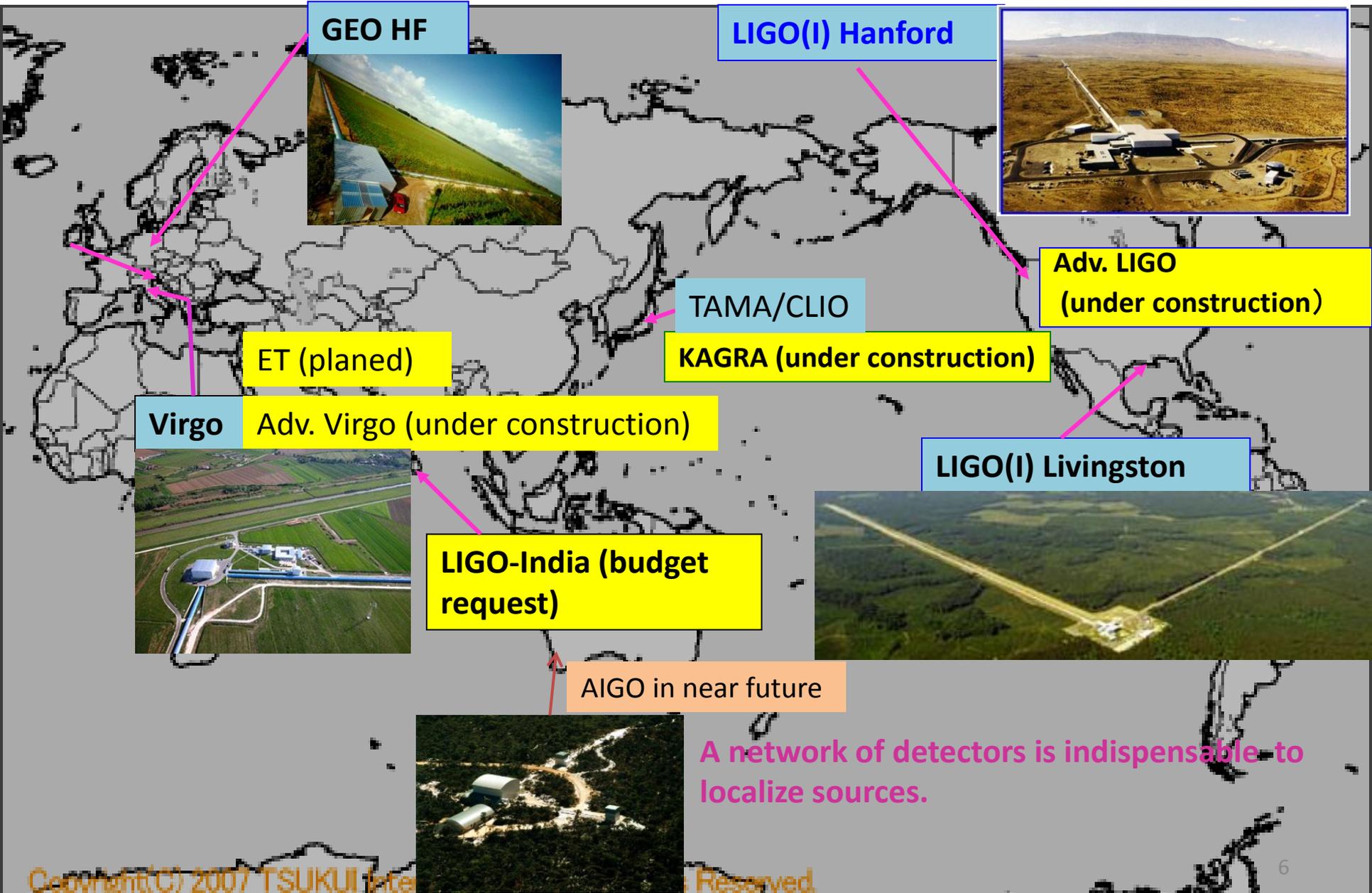
Typical amplitude  
 $h \sim 10^{-22}$



Light speed of propagation  
 differs for each arms of  
 Interferometer  
 $\Delta L/L \approx h/2$

Phase difference at BS is detected by power change of the photodiode

## Current detectors in the World



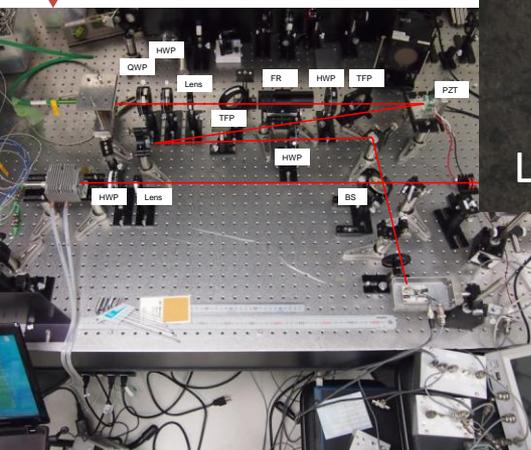
## Overview of KAGRA

Double floors  
SAS system

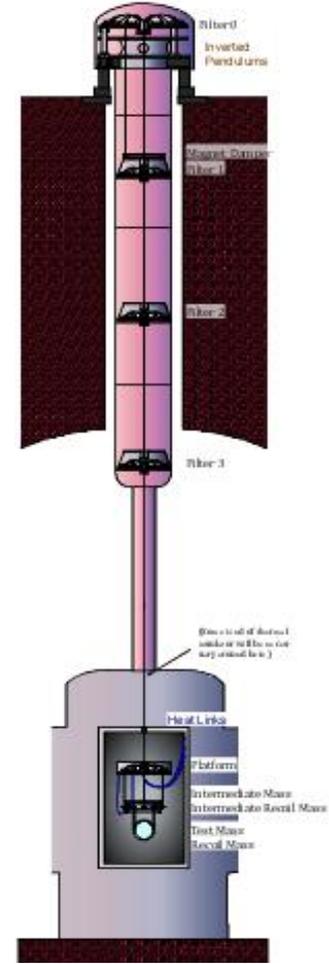
Laser sawed optical baffle



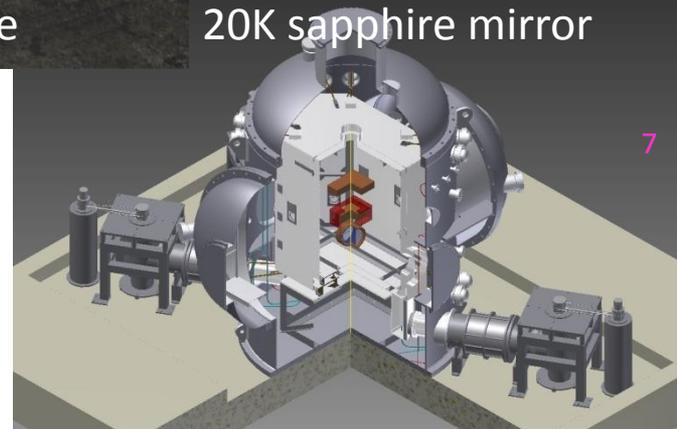
High power laser:  
Coherent addition



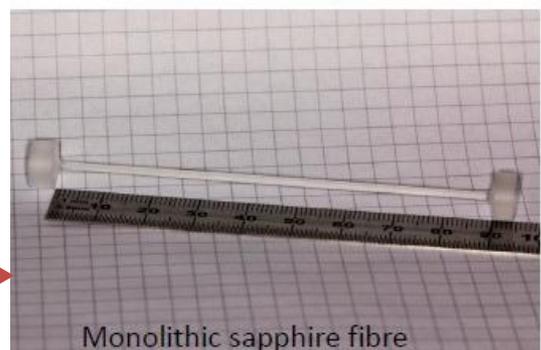
Pathfinder  
Highest quality  
Sapphire substrate



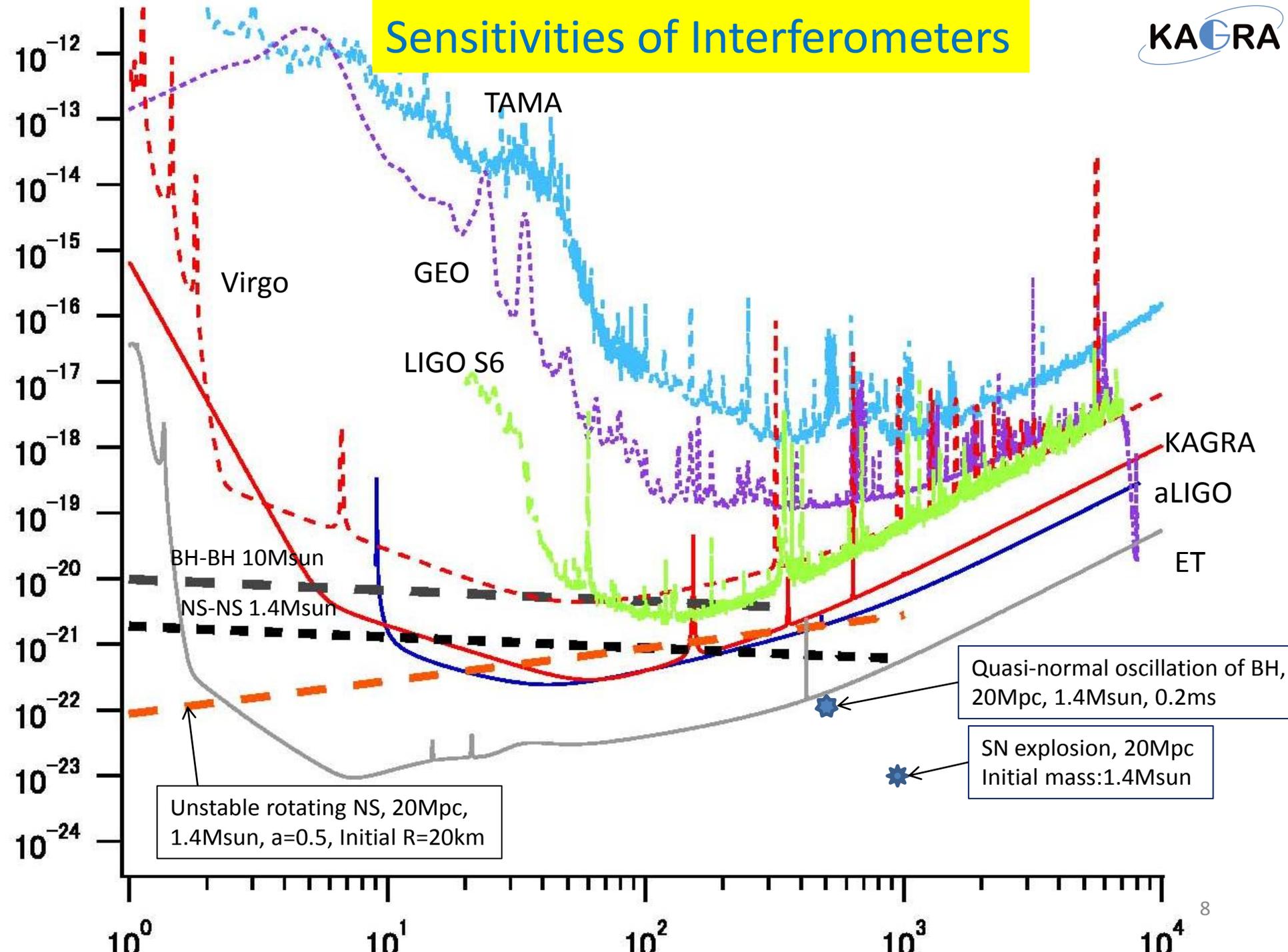
20K sapphire mirror



Suspension sapphire fiber



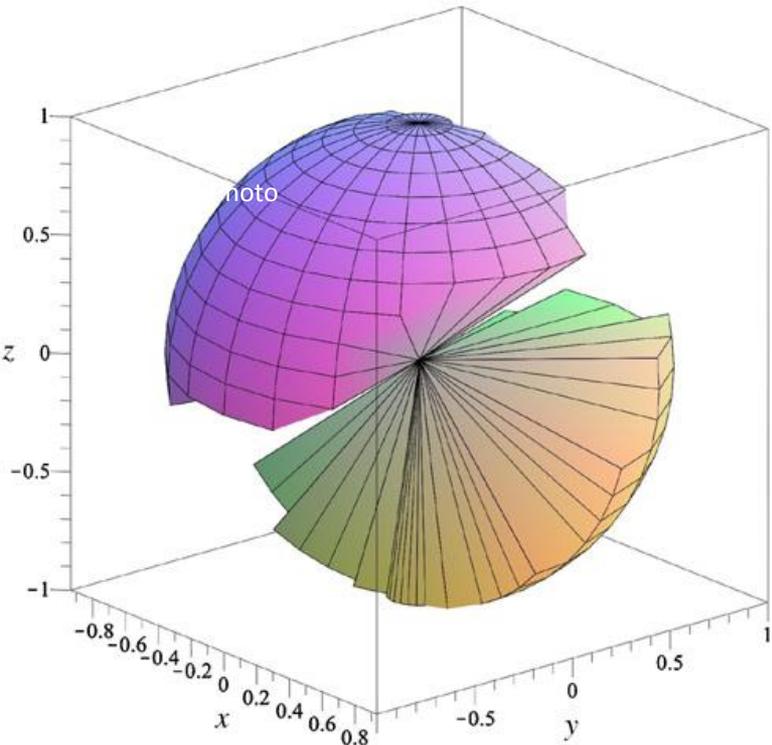
# Sensitivities of Interferometers



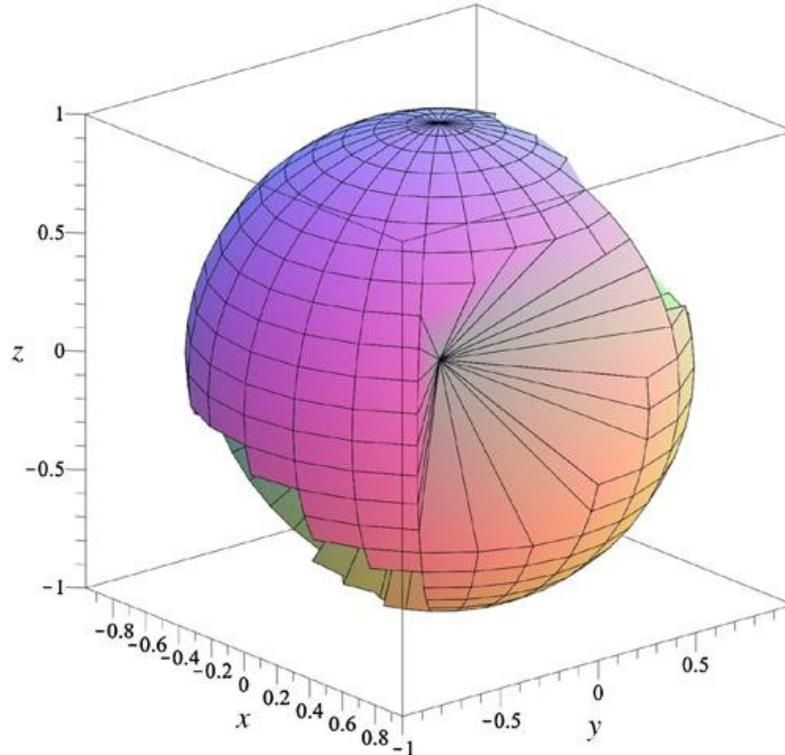
# Observation Network in the world

- Plural detectors with similar sensitivities are required for localization
- Indispensable for GW astronomy

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



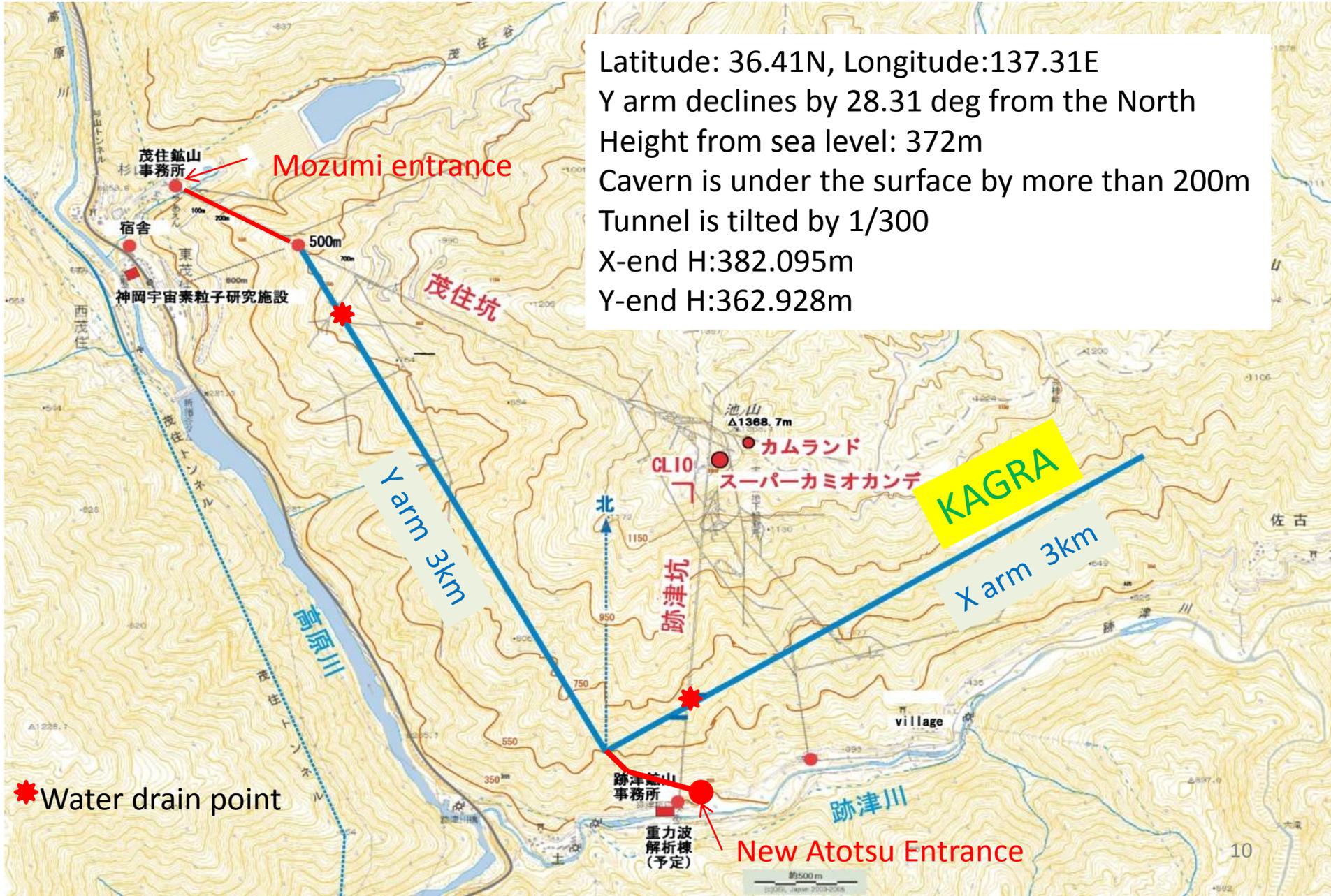
CQG 28 (2011) 125023 B.F.Schutz

**KAGRA enhances sky coverage !**



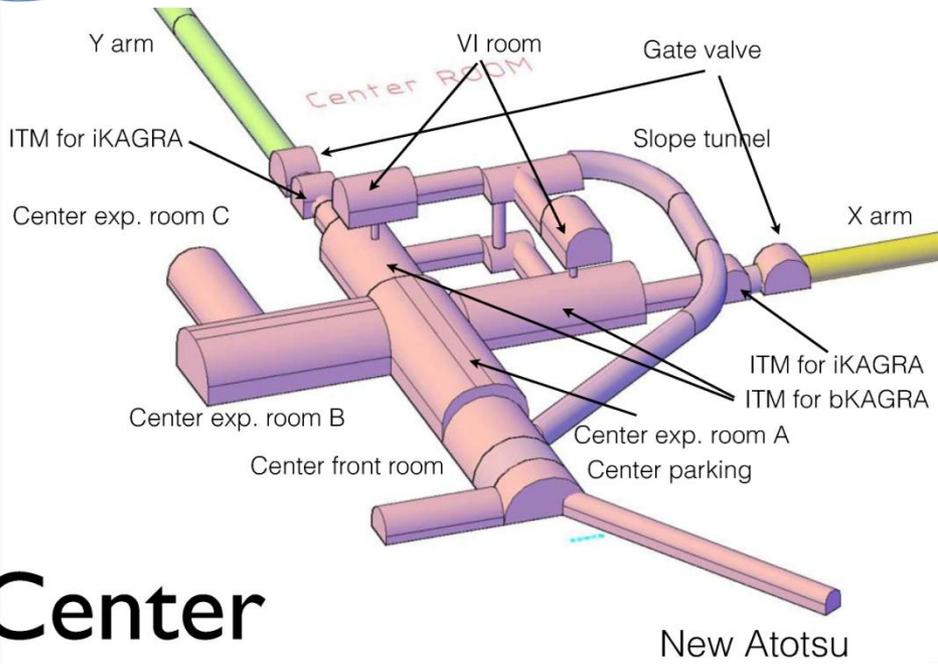
**Higher sensitive GW detectors are needed to catch events occurring in more than 100Mpc.**

Latitude: 36.41N, Longitude:137.31E  
 Y arm declines by 28.31 deg from the North  
 Height from sea level: 372m  
 Cavern is under the surface by more than 200m  
 Tunnel is tilted by 1/300  
 X-end H:382.095m  
 Y-end H:362.928m

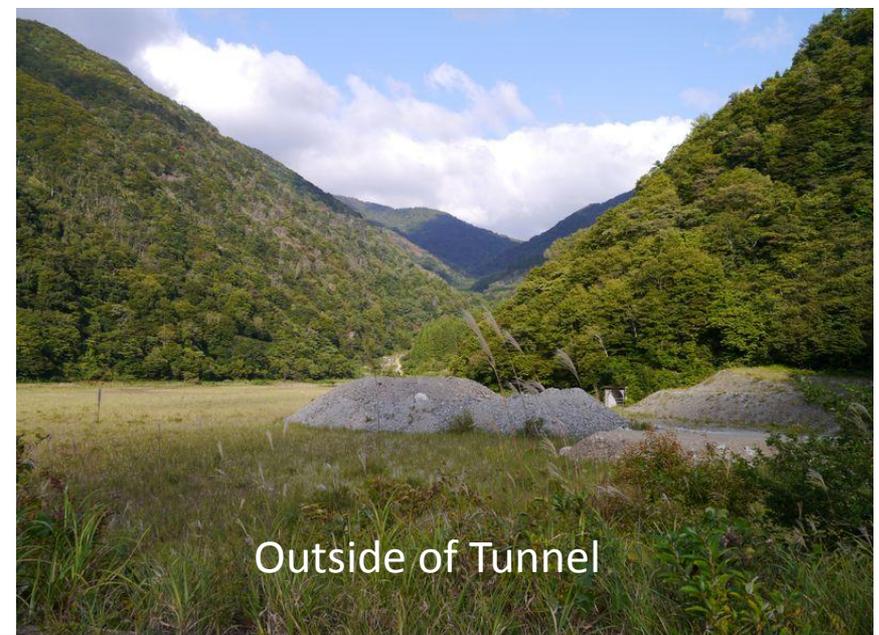


\* Water drain point

# Cavern design and Opening ceremony



## Center

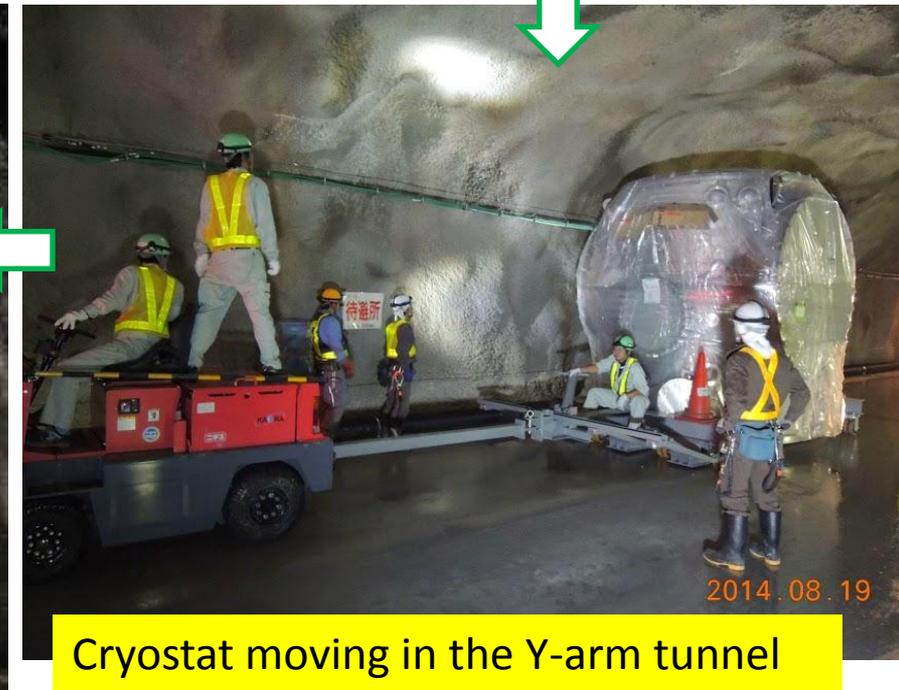


Peopel visited inside at Opening ceremony in 4<sup>th</sup> July, 2014



Leveled floor inside Tunnel

# Cryostats installed first



# 最近の作業状況(1)

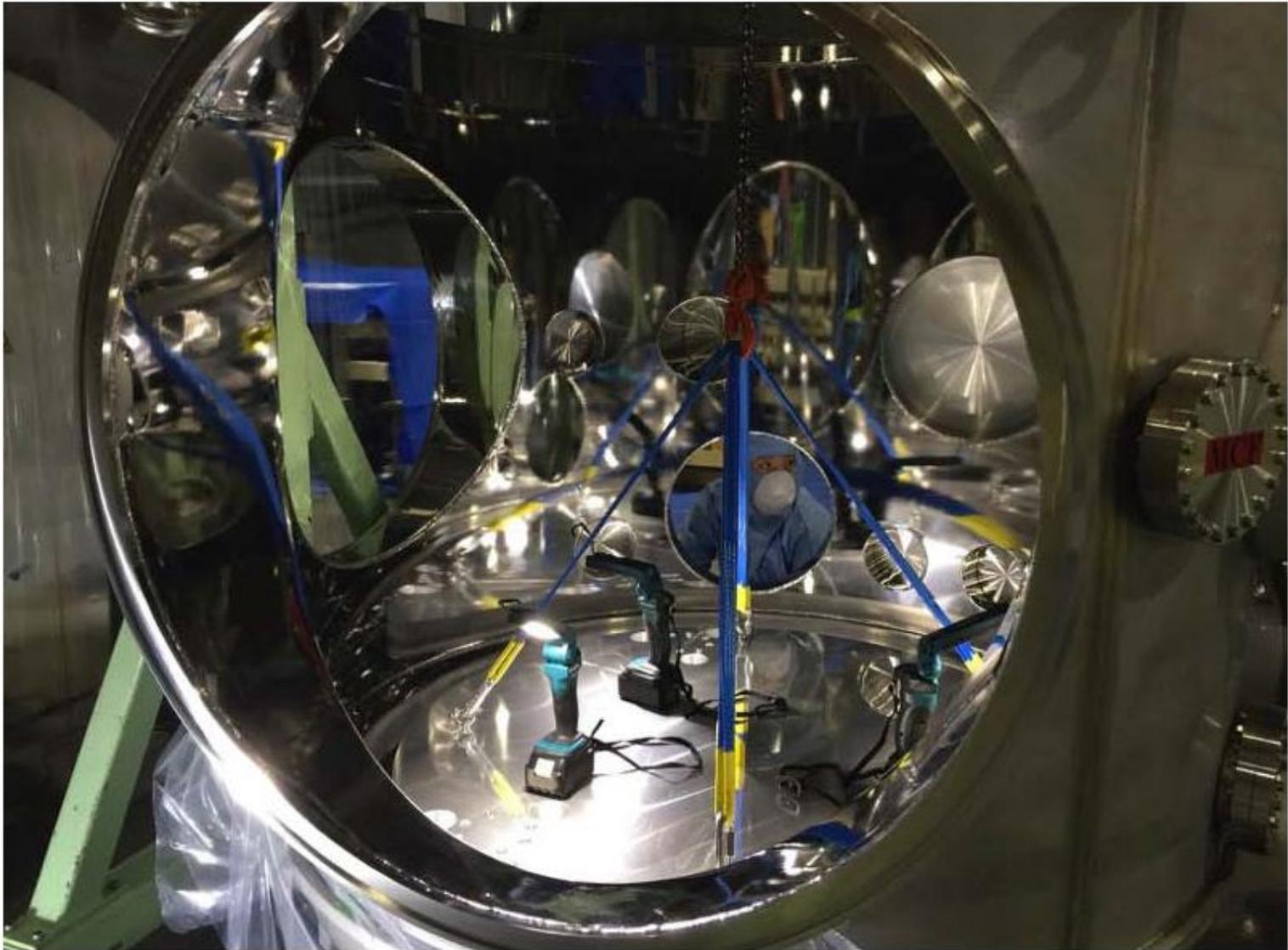


Work at the MCE vacuum chamber



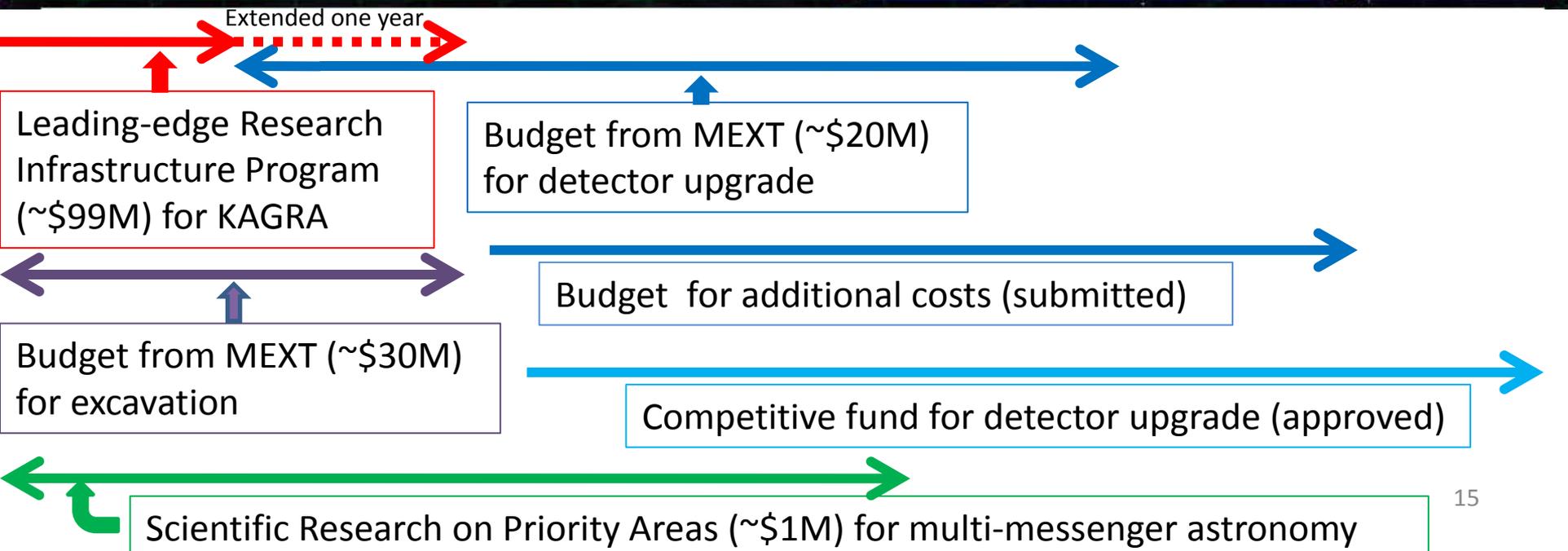
Opened MCE vacuum chamber

## 最近の作業状況(2)



Base plate installation work at MCF with a shift.

# Schedule & budget



## 関連する研究課題と研究代表者

1. 三代木伸二 重力波望遠鏡における電磁波散乱・伝播シミュレーションII
2. 高橋竜太郎 KAGRAのための低周波防振装置の開発
3. 山元一広 大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)の低温懸架系の開発
4. 木村誠宏 超低振動冷凍機の開発
5. 都丸隆行 KAGRA用5N高純度タングステンサスペンションワイヤーの実現
6. 三尾典克 KAGRA用レーザー光源の安定化装置の開発
7. 松島房和 KAGRAにおけるレーザー強度安定化のためのR&D
8. 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(II)
9. 小野行徳 電子スピン共鳴を用いたKAGRA用サファイヤミラーの不純物同定
10. 鈴木敏一 KAGRA(LCGT)のための単結晶サファイヤ鏡懸架の開発(X)
11. 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4
12. 宗宮健太郎 KAGRAのためのアウトプットモードクリーナーの開発
13. 神田展行 KAGRAデータ解析の研究およびシステム検討(IV)
14. Micheletto Ruggero 重力波光学検出のため多重反射を用いた超高感度シャドウセンサーの開発
15. 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II

# 查定結果

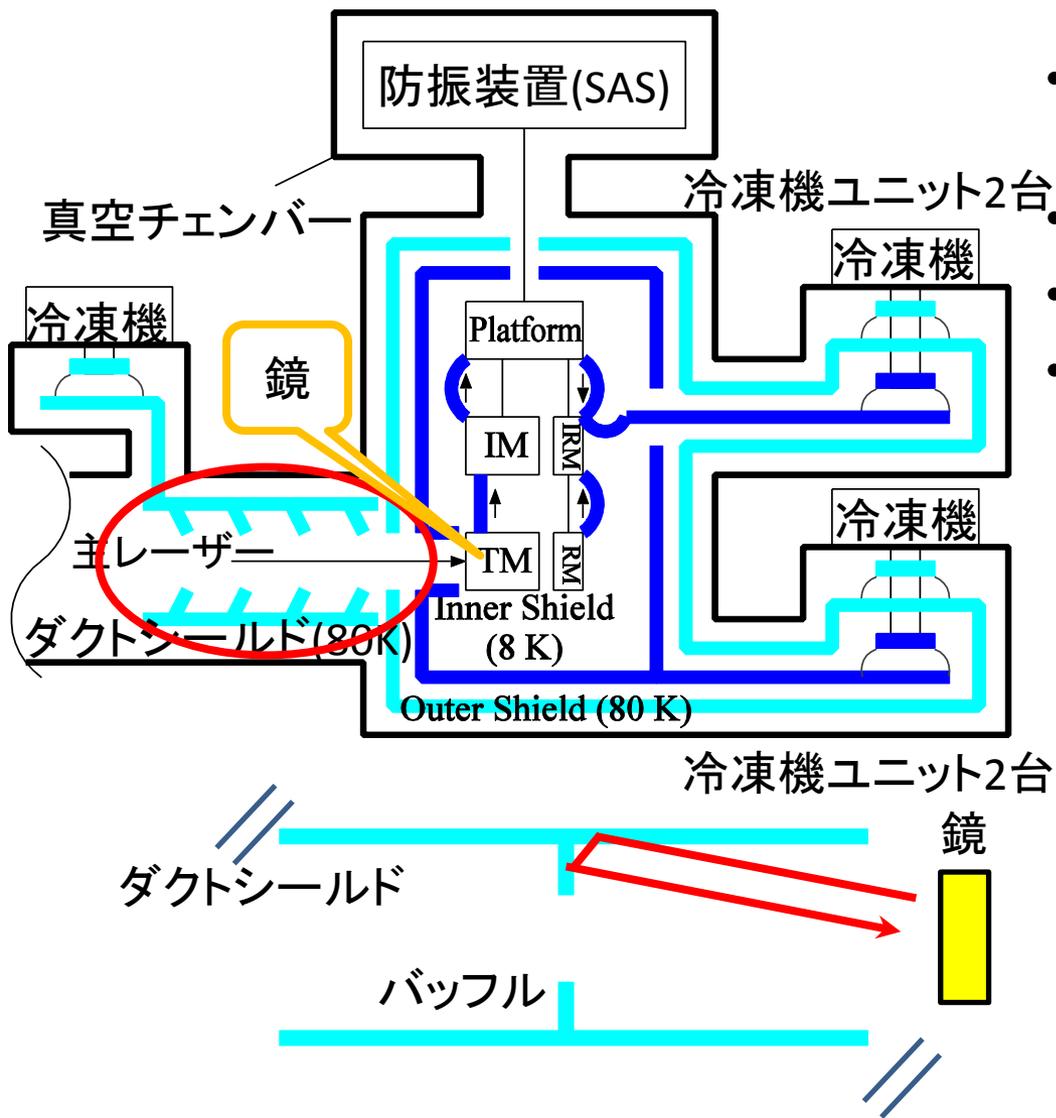
| 課題# | 物品費  | 旅費   | 計    |
|-----|------|------|------|
| 0   |      | 300  | 300  |
| 1   | 200  | 100  | 300  |
| 2   | 250  | 300  | 550  |
| 3   | 350  | 150  | 500  |
| 4   | 150  | 50   | 200  |
| 5   | 360  | 100  | 460  |
| 6   | 300  | 30   | 330  |
| 7   | 400  |      | 400  |
| 8   | 250  | 200  | 450  |
| 9   | 400  | 50   | 450  |
| 10  | 500  | 200  | 700  |
| 11  | 400  | 20   | 420  |
| 12  | 200  | 200  | 400  |
| 13  |      | 350  | 350  |
| 14  | 350  | 20   | 370  |
| 15  | 0    | 200  | 200  |
| 計   | 4110 | 2270 | 6380 |

単位：千円

## 0. 大型低温重力波望遠鏡に関する研究(IV)

- 国内KAGRA Collaboration meeting
  - 4月16日と10月15日に開催
- 海外KAGRA Collaboration meeting
  - 6月12日と12月9日に開催
- face-to-face KAGRA Collaboration meeting
  - 7月31日—8月2日(富山)、2月5日—7日(東京)
- 以上の旅費、会議の諸費用に充てさせてもらいました。

# 1. 重力波望遠鏡における電磁波散乱・伝播シミュレーションII (三代木伸二)

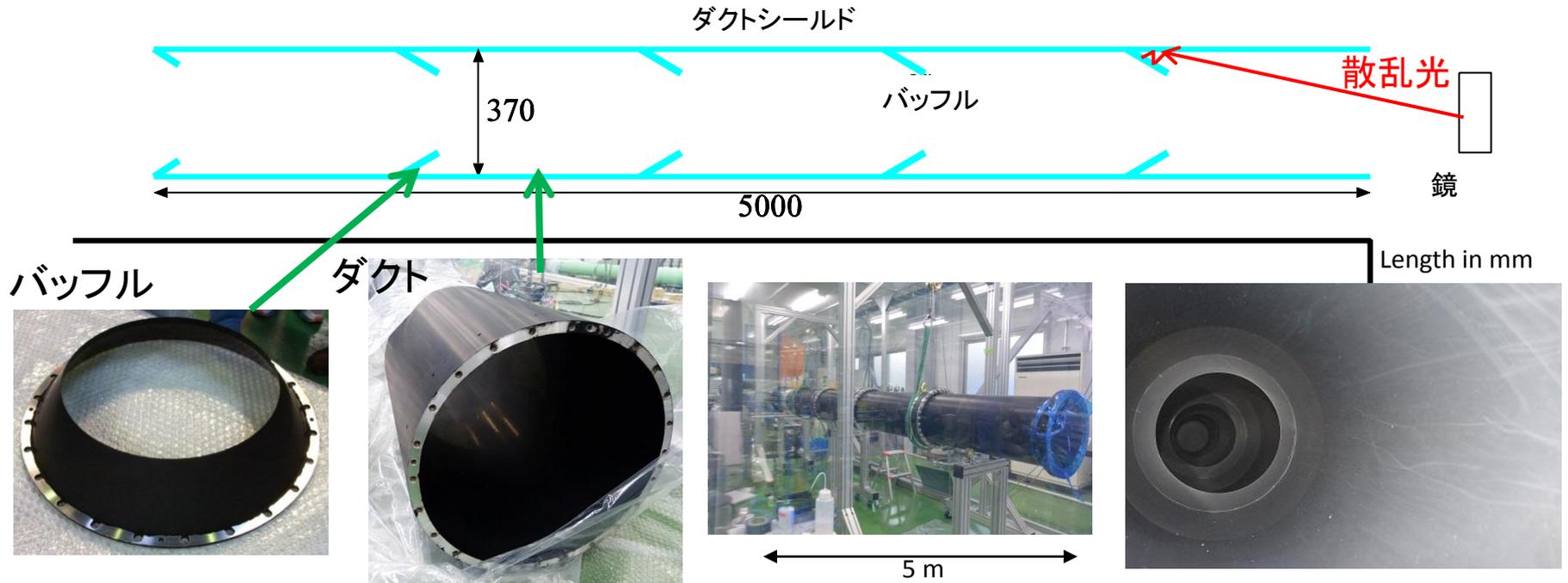


- 3kmビームダクト、防振装置は常温のまま、鏡・懸架系のみを冷却
- 鏡は輻射シールドで囲まれる
- 主レーザーのための穴が必要
- ダクトシールド
  - 熱放射の低減
    - 300 K領域を見込む立体角を減らす
    - 熱放射がダクトを反射して伝搬し入熱
    - バッフルで熱放射を低減
  - 散乱光雑音を小さくする
    - 支持を強化し、低振動化が必要

# ダクトシールドの設計

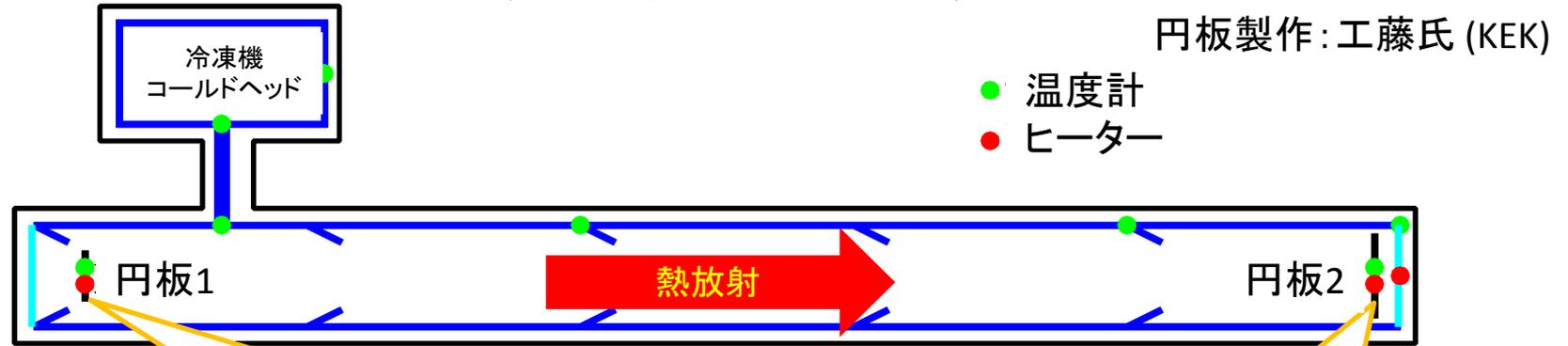
真空チェンバー

クライオスタット

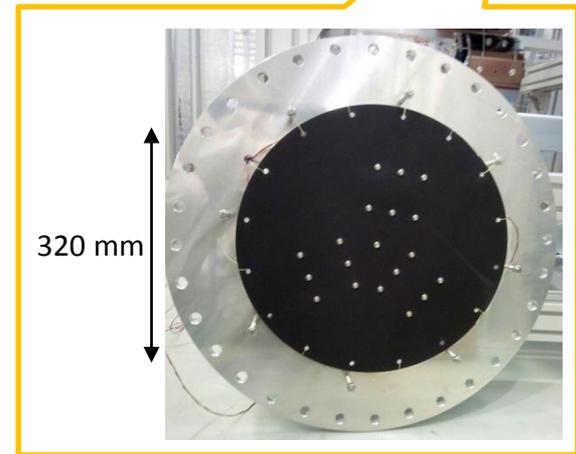
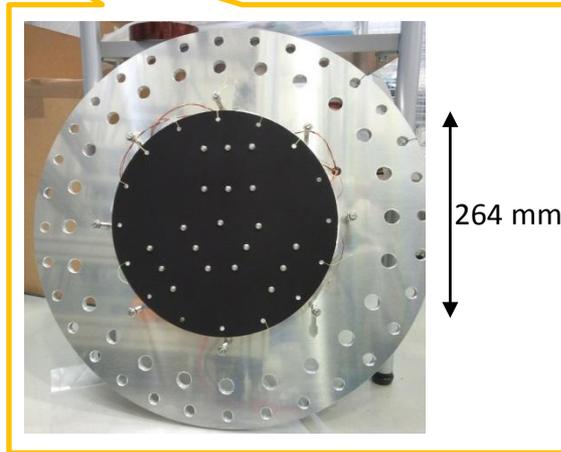


- ダクト、バッフルは熱放射、散乱光を吸収するよう黒化処理（ソルブラック）
  - 熱放射の計算値：最大0.38 W (< KAGRA要求値: 0.5 W)
- バッフルは、鏡からの散乱光をとらえるよう傾ける
- 観測時は冷凍機ユニットによって冷却
  - 今回は性能試験のため、冷凍機を直接接続

# 熱放射の測定

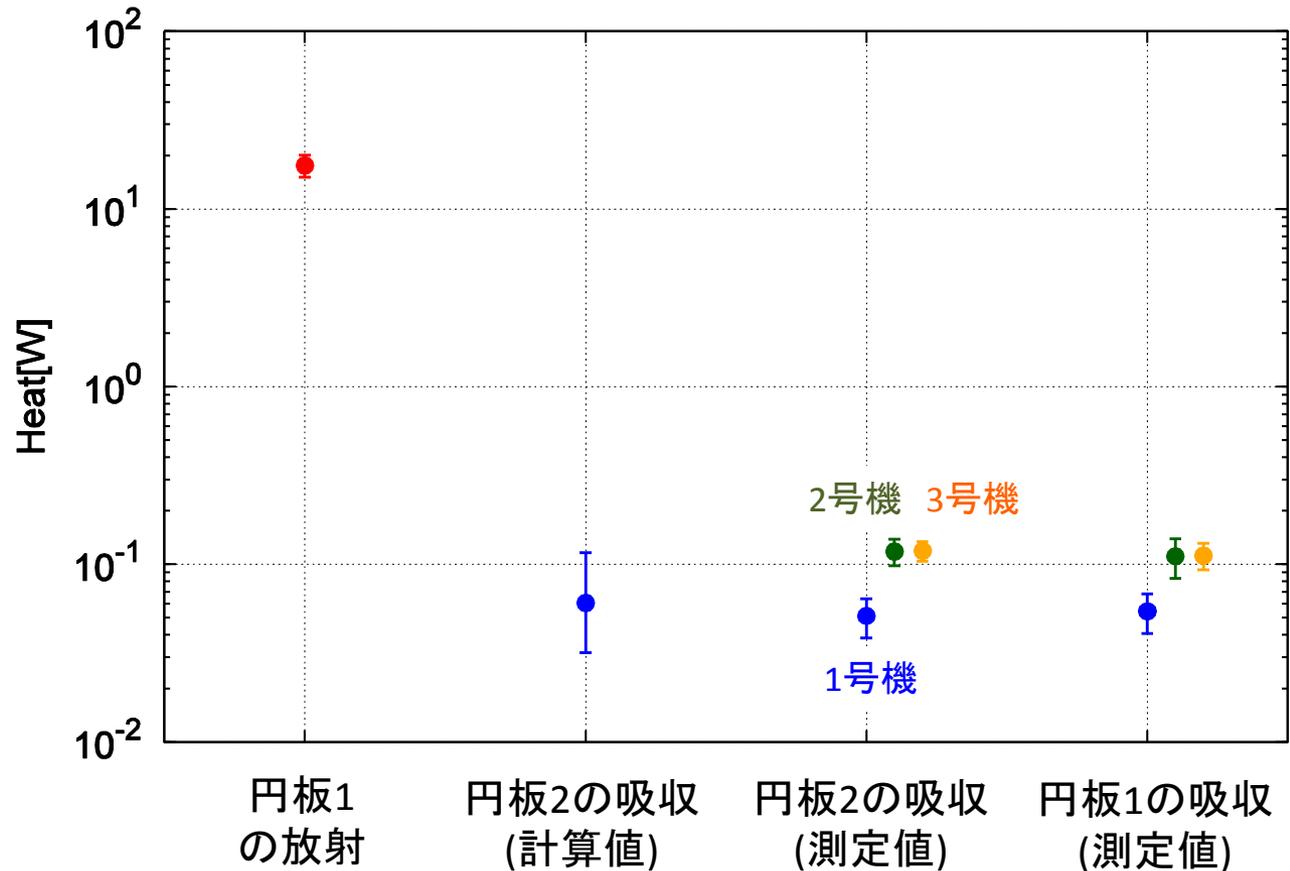


円板製作:工藤氏 (KEK)



- 2枚のアルミ円板を吊るす
  - 両円板は、熱放射率、吸収率を上げるため黒化处理(ソルブラック)
  - 円板1を300 Kまで昇温、円板1が熱放射を放出
  - 円板2は、熱放射を吸収し、温度が上昇
  - 円板2に取り付けたヒーターを用いて校正

# 結果(ダクトシールド1-3号機)



- 測定値にばらつきがある
  - 計算の中央値付近(1号機)、計算の上限値付近(2号機)
  - ソルブラックの反射率の差
- 測定値は計算値と一致

# 2. KAGRAのための低周波防振装置の開発

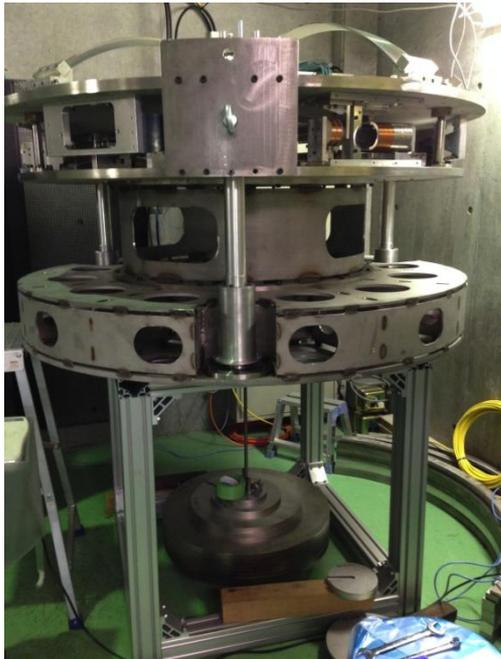
研究代表: 高橋竜太郎

## 研究目的

KAGRAで使用され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

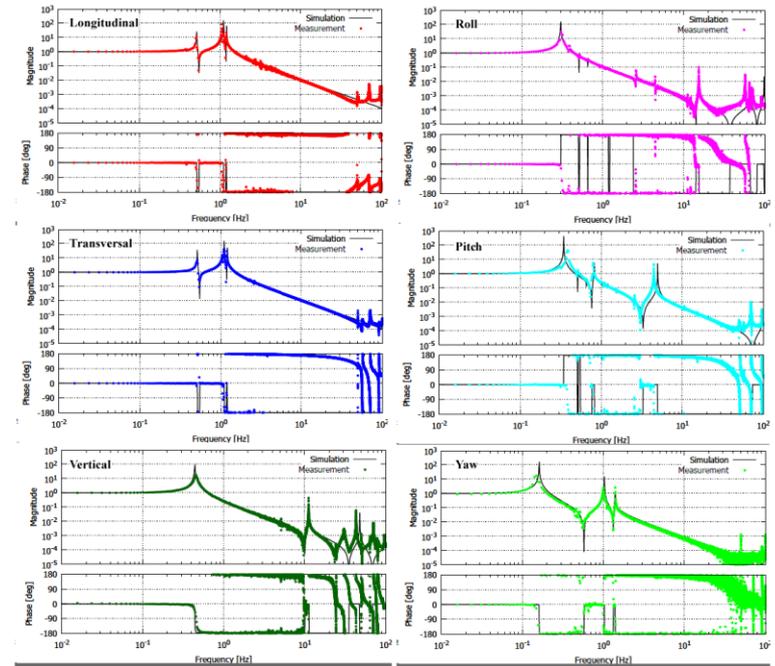
- Top filterの実機用ブレードの特性を評価した。最適荷重と共振周波数(0.2Hz)を確認した。
- Bottom filterも含めたPayloadプロトタイプのアセンブリを行った。OSEMを用いて伝達関数を測定し、モデルとの良い一致を見た。



Top filterの特性評価試験。



Payloadプロトタイプの特製評価試験。

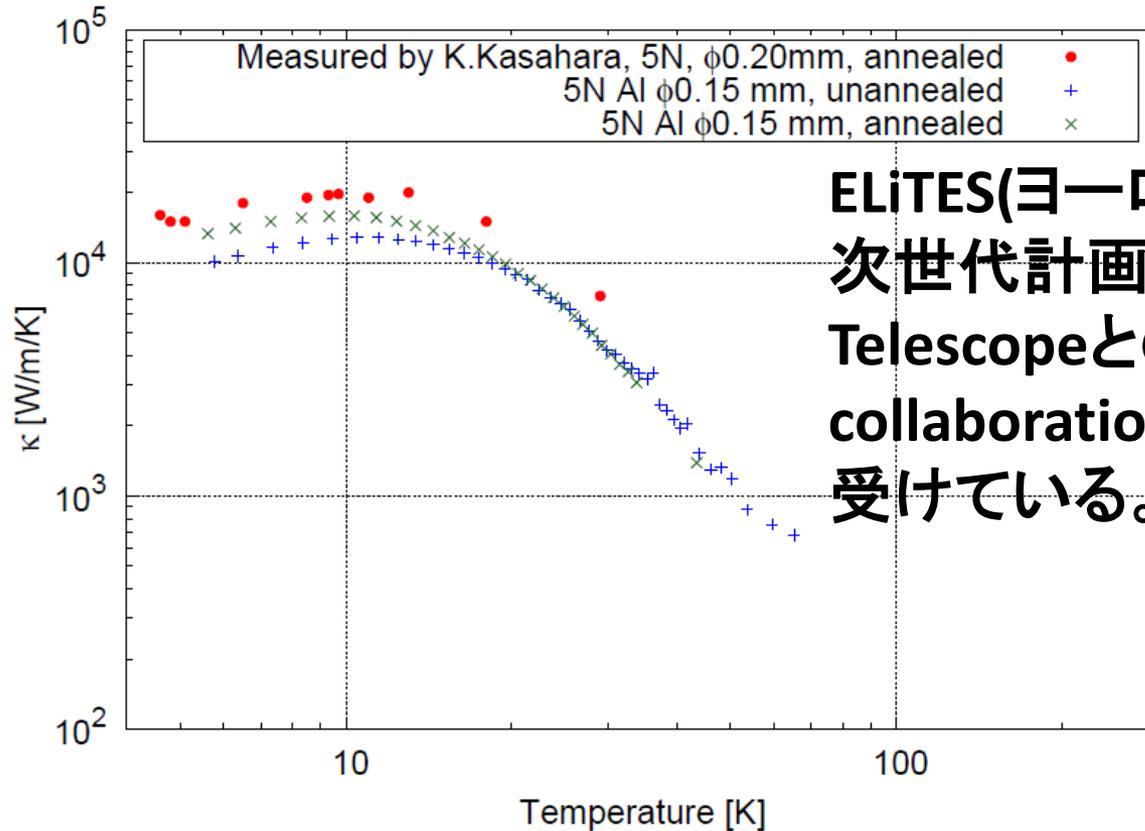


Payloadプロトタイプの測定された伝達関数。モデル計算とよく一致している。

### 3. 大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)の低温懸架系の研究(山元一広)

#### 低温懸架系を冷却するためのヒートリンクの研究

#### ヒートリンクの材料(アルミ)の熱伝導率測定



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。

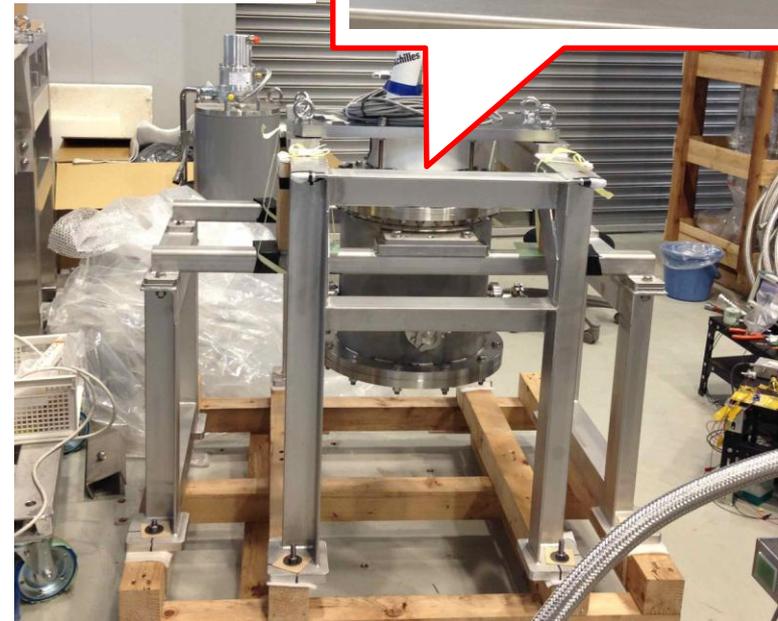
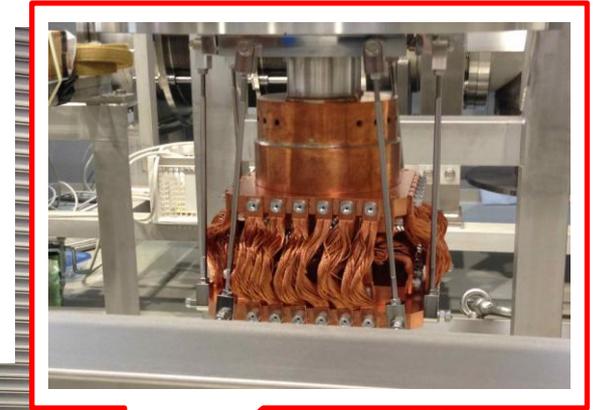
この結果をもとにしたヒートリンクの設計(熱をなるべく通し、振動をなるべく通さない): 詳細は以下を参照

Y. Sakakibara *et al.*, Classical and Quantum Gravity 31(2014) 224003.

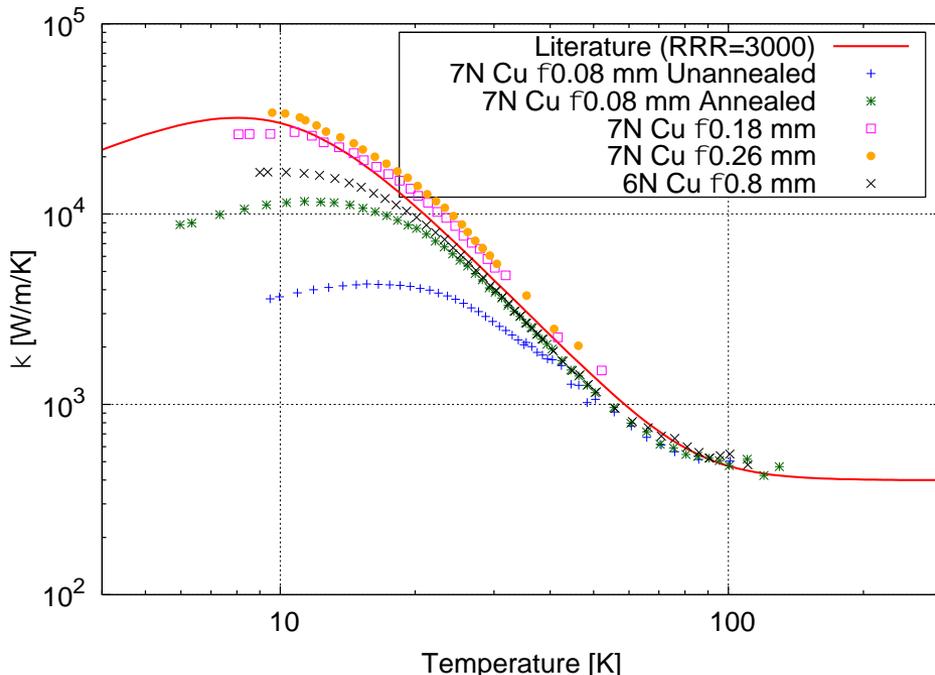
D. Chen *et al.*, Classical and Quantum Gravity 31(2014) 224001.

## 4. 超低振動冷凍機の開発 (木村誠宏)

- 2014年度の計画
  - ダクトシールド用単段冷凍機ユニットの設計・製作
  - 超高純度銅7N(99.9999%)を使用した熱リンクの評価
- 7N(99.9999%)銅の熱伝導を測定し、サイズ効果の有無を確認。熱リンクのサイズでは問題無し
- 試作冷凍機ユニットを元にダクトシールド用単段冷凍機ユニットの設計を行い、必要数(8台)の製作を開始。
- 初号機が2015年1月に納入予定



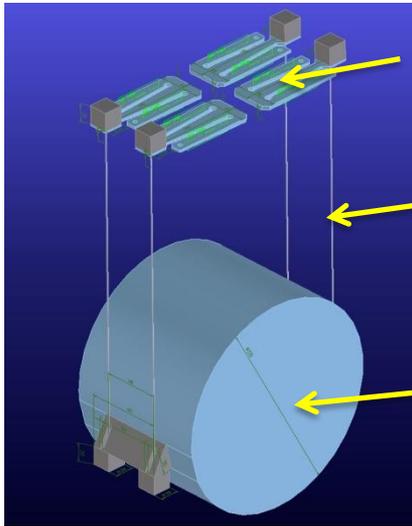
超高純度銅を使用した試作防振ステージと冷凍機ユニット



測定された超高純度銅の熱伝導度の例

# 5. KAGRA用5N高純度タングステンサスペンションワイヤーの実現

高エネ研 都丸 他7名



サファイア  
ブレードスプリング

サファイア  
懸架ファイバー

サファイア  
ミラー

KAGRAでは、懸架ワイヤーの熱雑音対策として、サファイアファイバーを用いた懸架を予定している。このファイバーへの要求は、

- 小さな機械的エネルギー散逸 ( $\Phi \sim 10^{-7}$ )
- 大きな熱伝導率 ( $> 10,000 \text{ W}/(\text{m K})@10\text{K}$ )

課題:

- サファイアファイバーでの懸架は交換が容易でない

➡ 高純度(5Nクラス)タングステンワイヤーの使用を模索



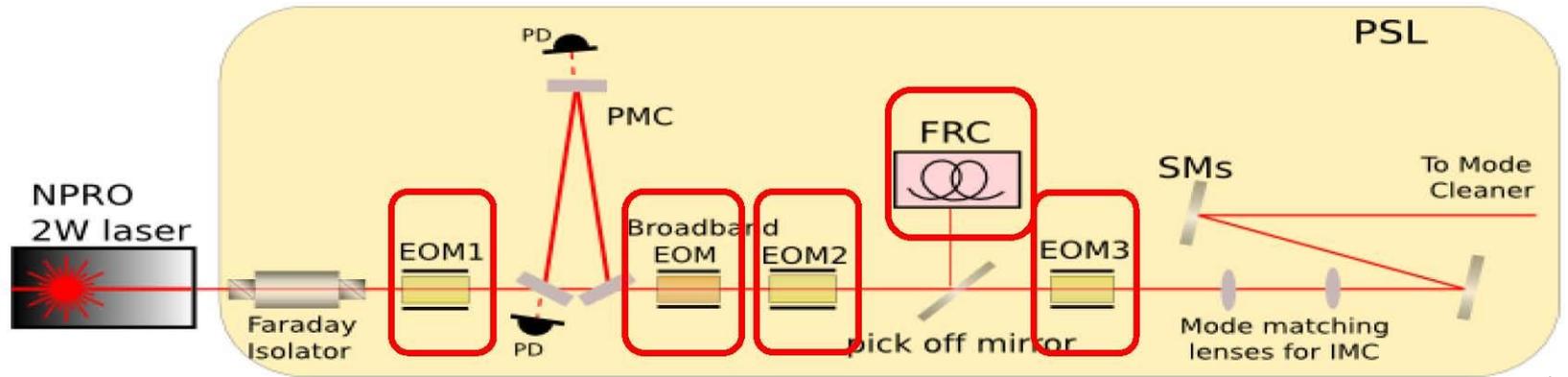
蒸着炉を改造し、 $1800^{\circ}\text{C}$   
での高温サンプル超熱処理を実施

残留電気抵抗比(RRR)測定結果

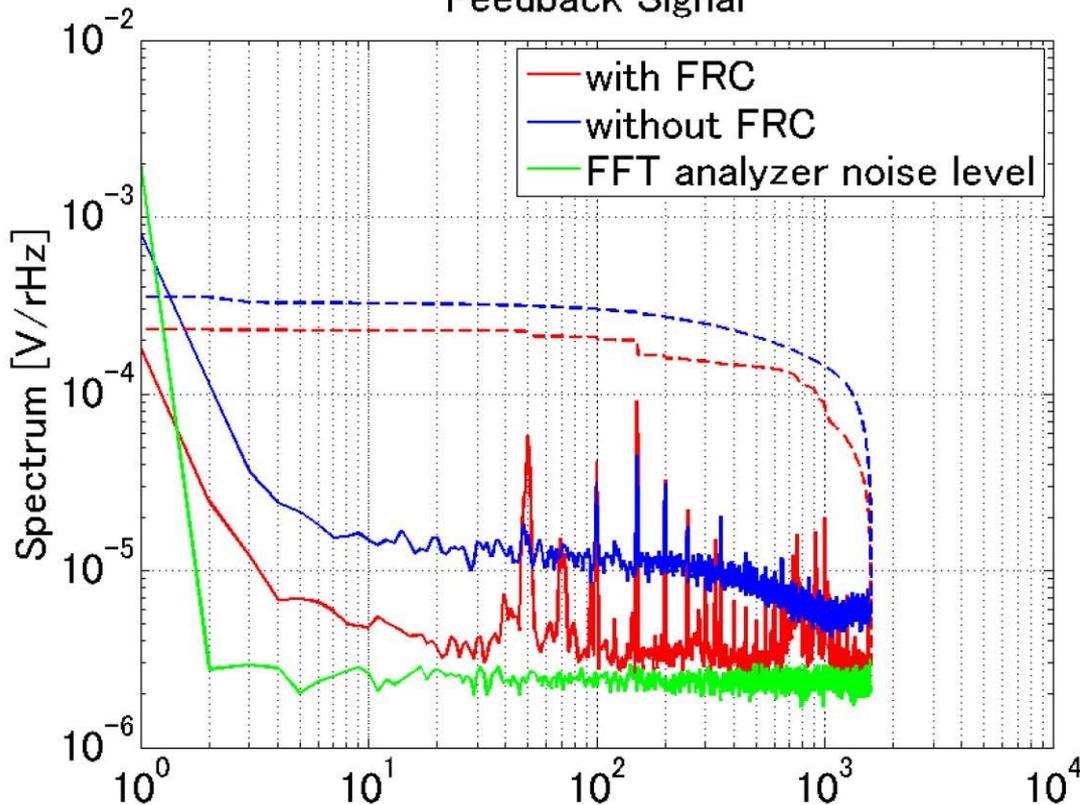
|      | RRR  | 換算熱伝導率 $\text{W}/(\text{m K})$ |
|------|------|--------------------------------|
| 熱処理前 | 37   | 200                            |
| 熱処理後 | 1800 | 10,000                         |

- 大きな熱伝導率は実現出来る事が分かった。
- 機械的散逸計測はこれから。
- 脆性が酷いという問題が分かった。

# 6. KAGRA用レーザー光源の安定化装置の開発



Feedback Signal



iKAGRA用の入出射光学系

## 1. Pre-stabilized Laserの開発

EOM1: Control of PMC

EOM2: Control of FRC, IMC

EOM3: Control of main Interferometer

BB-EOM: Fast control of frequency

## 2. Fiber ring Cavityによる周波数安定化実験

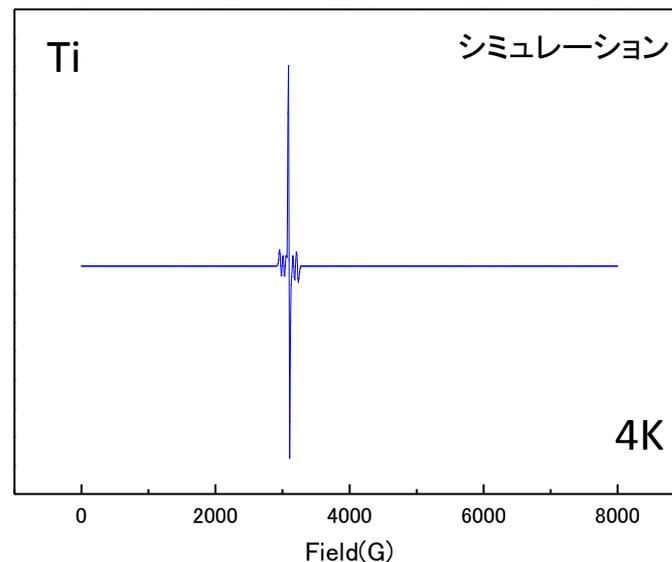
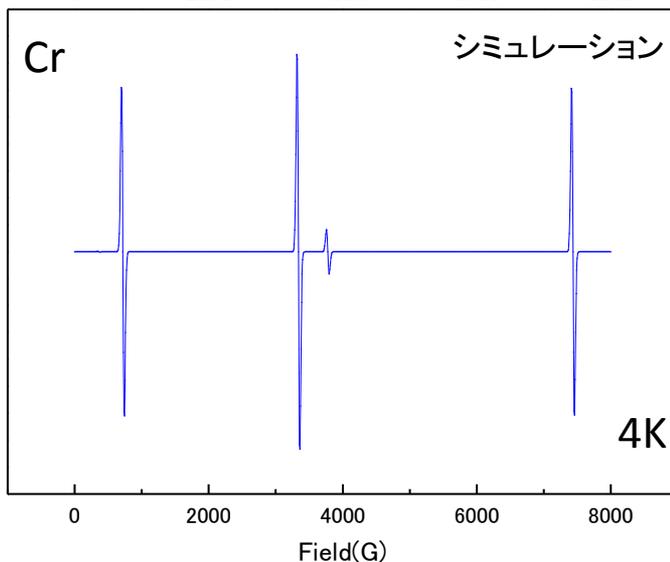
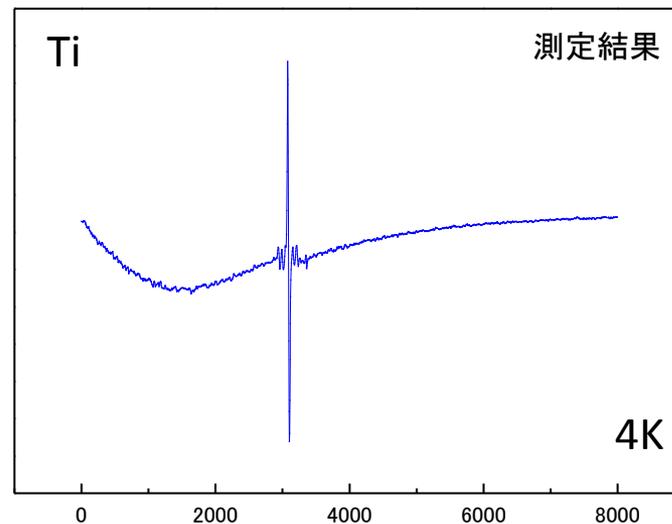
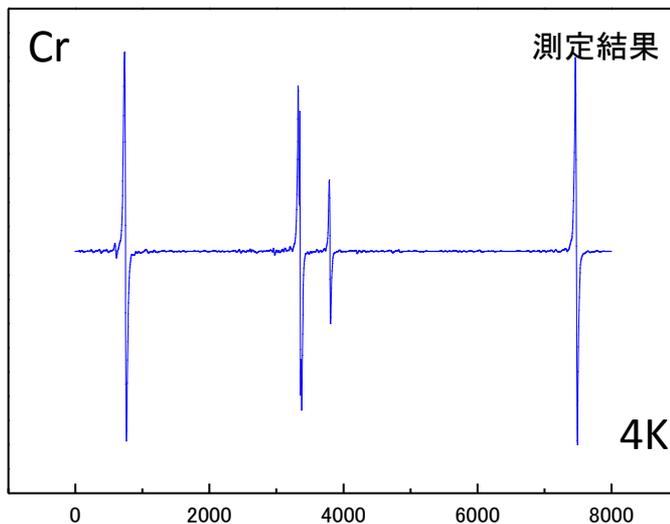
# 9. 電子スピン共鳴を用いたKAGRA用サファイアミラーの不純物同定

- ・低温(4K)での測定系を確立
- ・シミュレーションツール(EasySpin,ver.4.5.4)の立ち上げ

研究代表者 小野行徳(富山大学)

サファイア中の  
クロム(左)と  
チタン(右)の  
電子スピン共鳴信号

上:実験結果(4K)  
下:シミュレーション



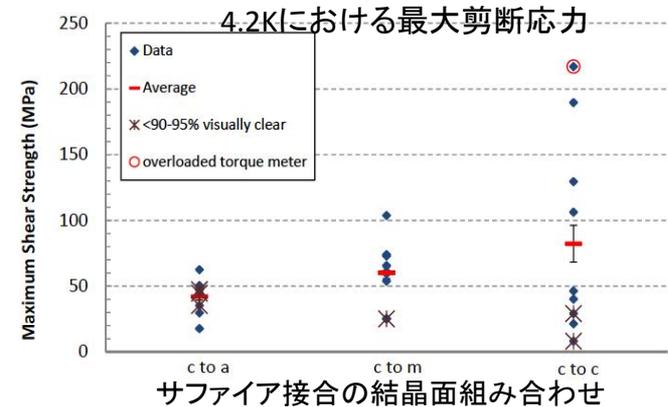
測定結果とシミュレーションの一致を確認 今後KAGRA用ミラーに適用

# 10. KAGRA(LCGT)のための単結晶サファイヤ鏡懸架の開発(X)

KEK 鈴木敏一、他13名

- 結晶面が異なるサファイヤ接合の4.2Kにおける剪断強度を測定して、KAGRAのサファイヤ鏡懸架で要求される応力に対して十分な余裕があることを見出した。

Karen Hauhian et al., The effect of crystal orientation on the cryogenic strength of hydroxide-catalysis bonded sapphire, submitted to CQG.

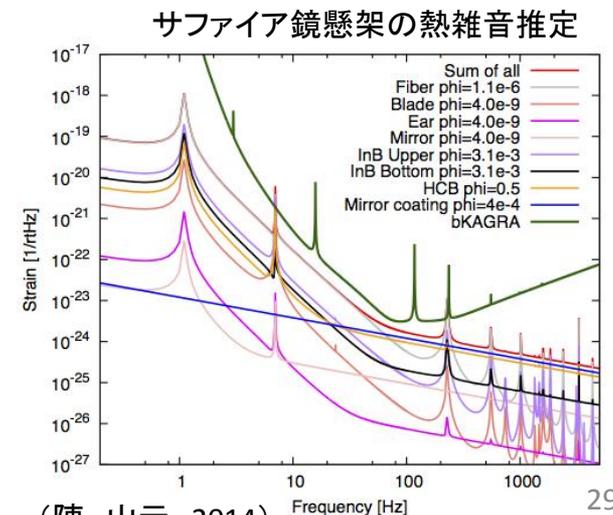
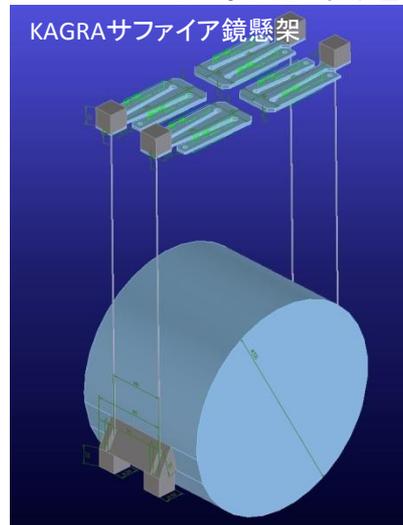


- サファイヤ鏡懸架の要素試験を行い、鏡の等価荷重に耐えることを示した。



(陳、山元 2014)

- サファイヤ鏡懸架の基本設計を行い、推定熱雑音がKAGRA目標感度を害さないことを示した。



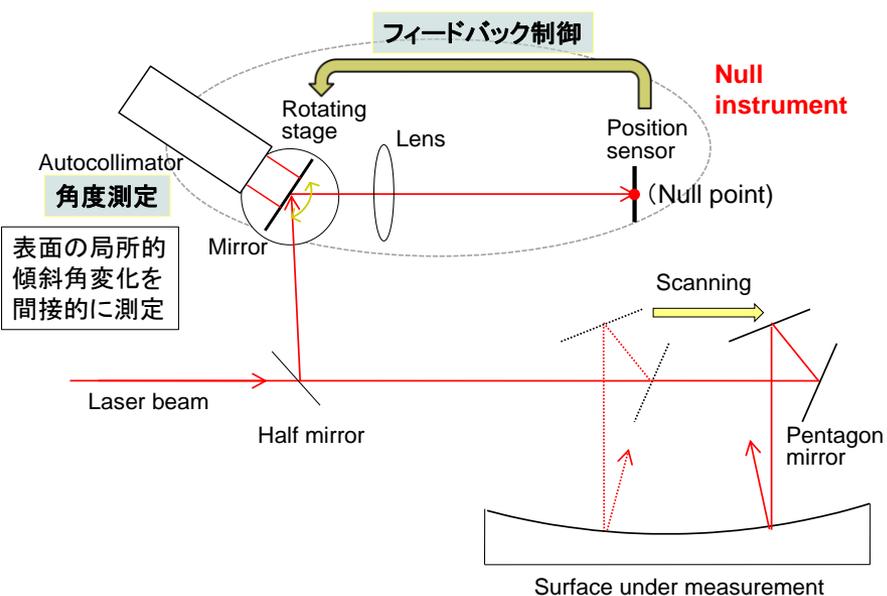
(陳、山元 2014)

# 11. 重力波検出器用大型鏡の絶対形状計測に関する研究

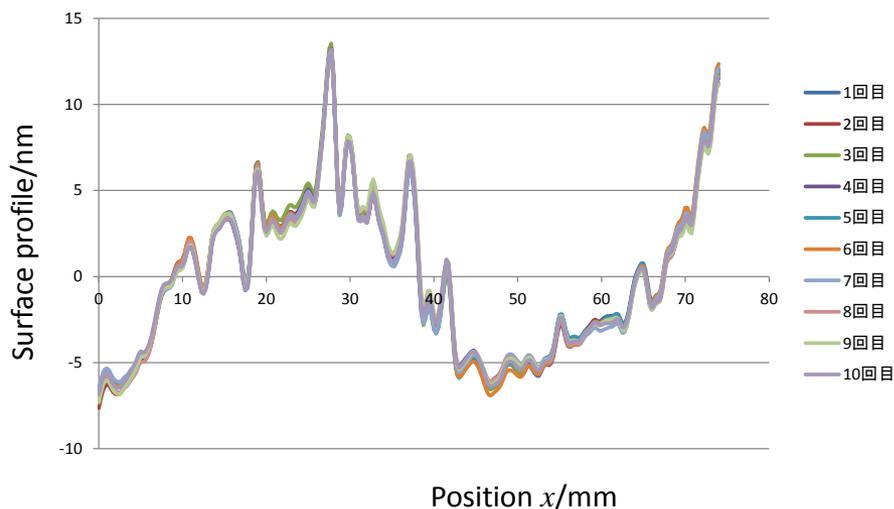
【成果】 角度測定を利用した絶対形状測定装置の横分解能の向上  
⇒ 平面から球面（曲面）計測への展開

これまでの測定装置：オートコリメータからの角度測定ビームをそのまま用いていた為に、横分解能に制限（約5mm程度）

レーザービーム（ビーム径約1mm）を用いたNull instrumentを導入することにより横分解能を向上（約5倍）



Null instrument（レーザービーム）を用いた  
局部傾斜角測定に基づく絶対形状測定装置



細かな凹凸のあるガラス表面形状の測定例（10回測定）

➡ ±0.6 nm以下の繰り返し性！

# 13. KAGRAデータ解析の研究およびシステム検討 (IV) (代表：神田展行（大阪市大）ほか、計26名)

## iKAGRAデータ転送・保管システム

- 神岡（坑外解析棟、坑内）、  
柏にハードウェアインストール完了
  - データ転送試験は成功  
(要求速度 20MB/s <  
神岡ー柏間実測 50MB/s)
    - 現状：ソフトウェアを構築中



iKAGRAデータ転送・保管システム(@神岡)

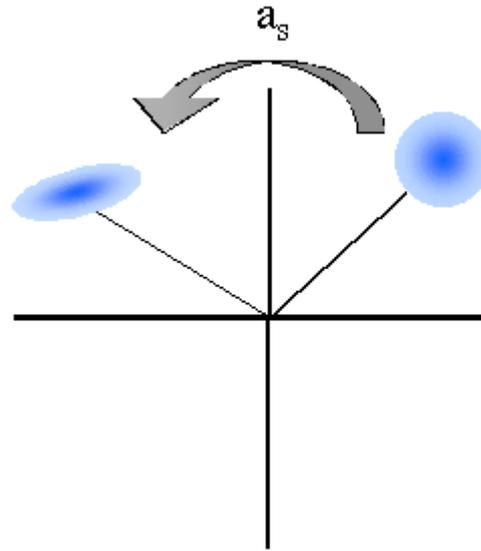
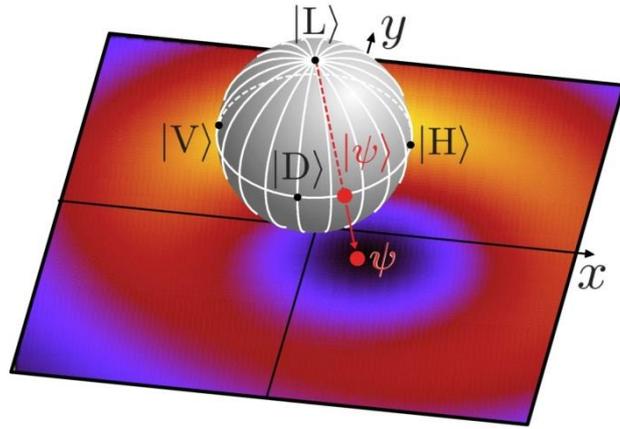
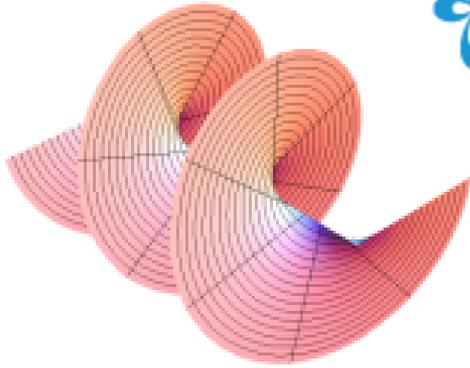
## KAGRA解析ソフトウェア

- 共通ライブラリ KAGALI の整備が進んだ。
  - コンパクト連星合体、バースト、連続波についての解析パイプライン開発が進んでいる。CBCについては12月中にend-to-endテストへ進む。
- iKAGRA(2015年12月)にはこれらのパイプラインが実働する。

# 15. KAGRAにおける次世代高精度量子干渉計のための研究開発 II



研究代表者: 鹿野 豊 (分子科学研究所)



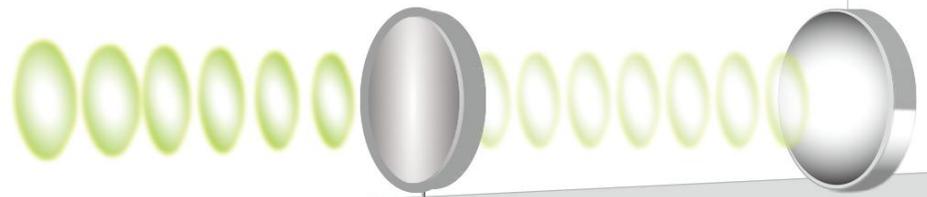
Kerr効果を用いたスクイーズド光生成に関する理論提案

arXiv:1410.8046

光渦ビーム(ラゲール・ガウスビーム)の生成と応用に関する実験および理論研究

arXiv:1410.3189

Phys. Rev. A 89, 053816 (2014)



量子振動状態観測のための懸架鏡の冷却限界の理論的研究

# まとめ

- 重力波の直接検出は相対論の検証のためだけでなく、重力波天文学に必要不可欠である。
- これまで第一世代と呼ばれるレーザー干渉計で20Mpcまでを1年半近く観測したが、重力波の検出はなされていない。
- 重力波観測は世界的ネットワークの中で行われる。
- その一翼を担うKAGRAの建設が進んでおり、この春までにトンネルの掘削・整備が終了し、真空ダクトの設置、真空クライオスタットの導入設置が始まった。
- 今秋から入出力光学系のインストールが開始された。
- 2015年初冬に初稼働を目指している。
- 本格観測は2017年。
- 予算が逼迫している中で宇宙線研究所の共同利用研究費は極めて貴重な財源の一つであり、今後も支援を。