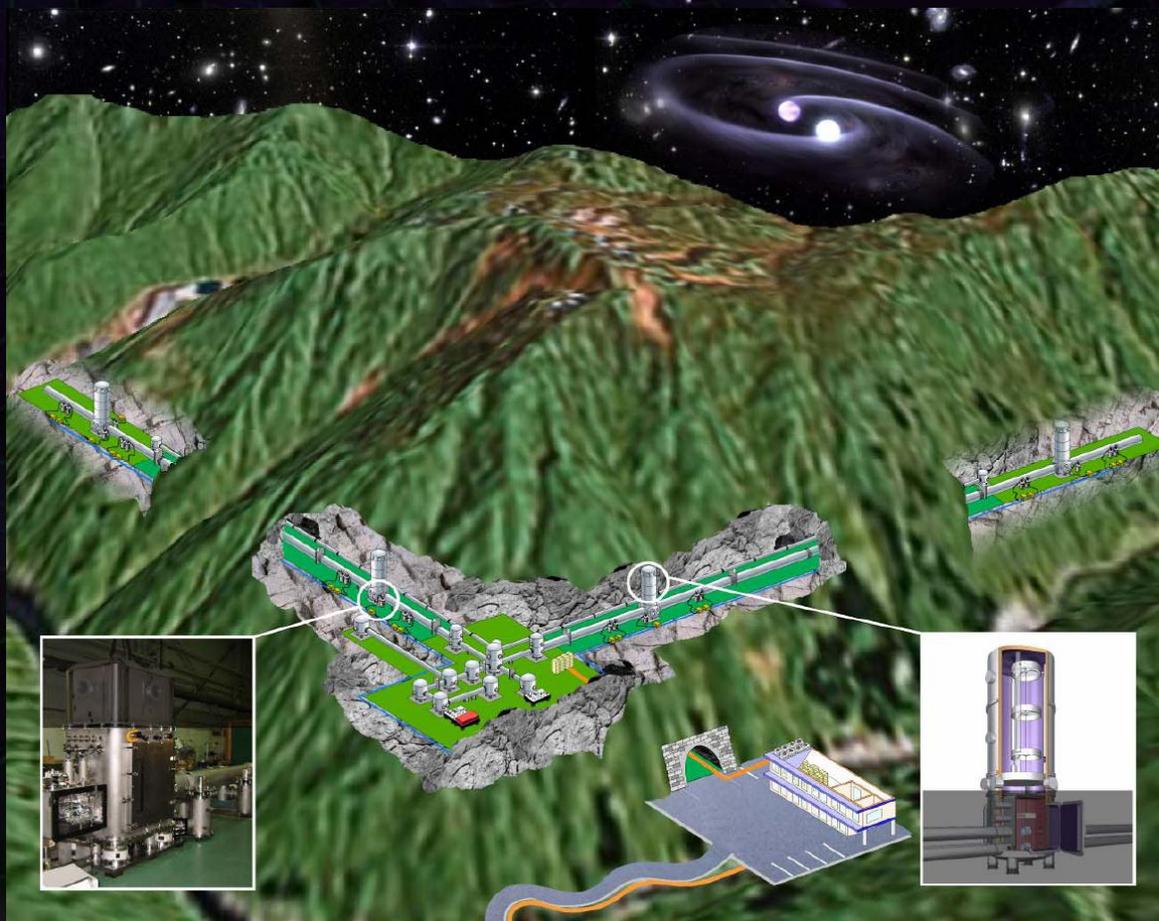


# 大型低温重力波望遠鏡LCGT かぐら (KAGRA)



**安東 正樹**  
(京都大学 理学系研究科)

On behalf of  
the KAGRA Collaboration

# お知らせ

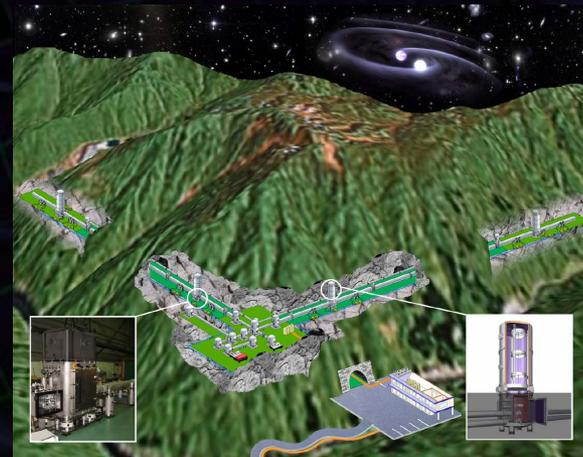
## ・大型低温重力波望遠鏡 LCGT

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

に愛称がつけました。

## かぐら KAGRA

- 一般公募された候補の中から  
有識者による選定委員会で決定
- かぐら (神楽) : 神に奉げる歌や踊り。
- Acronymではないが、  
KA (Kamioka) + GRA (Gravitational Wave Antenna)  
の意味合いもある。



# 大型低温重力波望遠鏡

## かぐら (KAGRA)

(LCGT: Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

日本の次世代重力波検出器 (本格観測 2017年 - )

海外の望遠鏡 (Ad. LIGOなど) と同等の感度 → 国際観測網.



### 大規模な重力波天文台

- Baseline length: 3km
- High-power Interferometer

### 低温干渉計

- Mirror temperature: 20K

### 地下の安定・静寂な環境

- Kamioka mine,  
1000m underground

# 地上重力波望遠鏡のターゲット

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz – 1kHz の観測周波数帯

⇒ コンパクト天体, 高エネルギー天体现象

中性子星

ブラックホール

初期宇宙

パルサー

超新星爆発

連星合体

背景重力波

軟ガンマ線リピーター

EMRI

電磁波  
ニュートリノ  
高エネルギー宇宙線

星の  
振動  
モード

長ガンマ線  
バースト

短ガンマ線  
バースト

準固有  
振動

同時観測  
数値相対論

高エネルギー天体  
現象の総合的理解

高密度天体の状態方程式  
原子核物理

相対性理論の検証  
強い重力場での物理法則

# 本格的な天文学

現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

ただ... そのような重力波イベントは稀 ( $10^{-4}$ - $10^{-2}$  event/yr)

⇒ 約1桁感度を向上した 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$

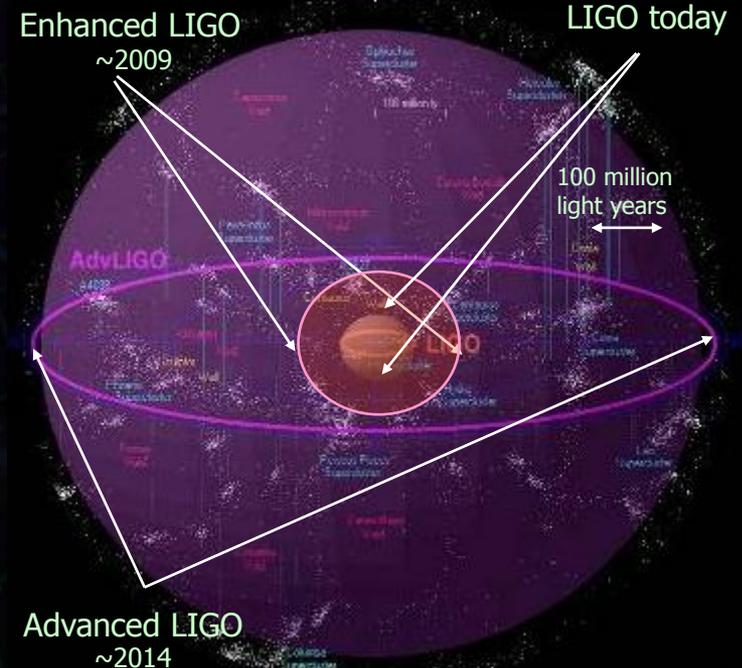


感度が10倍向上 → イベントレートは  $10^3$ 倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

~ Advanced LIGO 9時間の観測

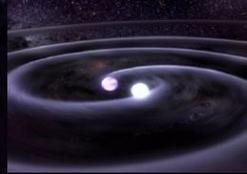


第2世代望遠鏡では、検出頻度  $\sim 10$  event/year

# 重力波望遠鏡の高感度化

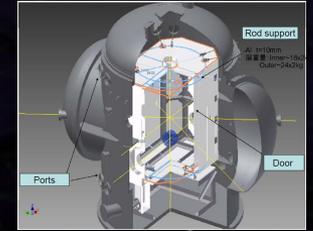
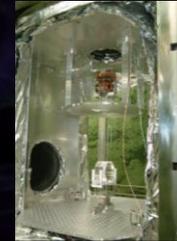
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



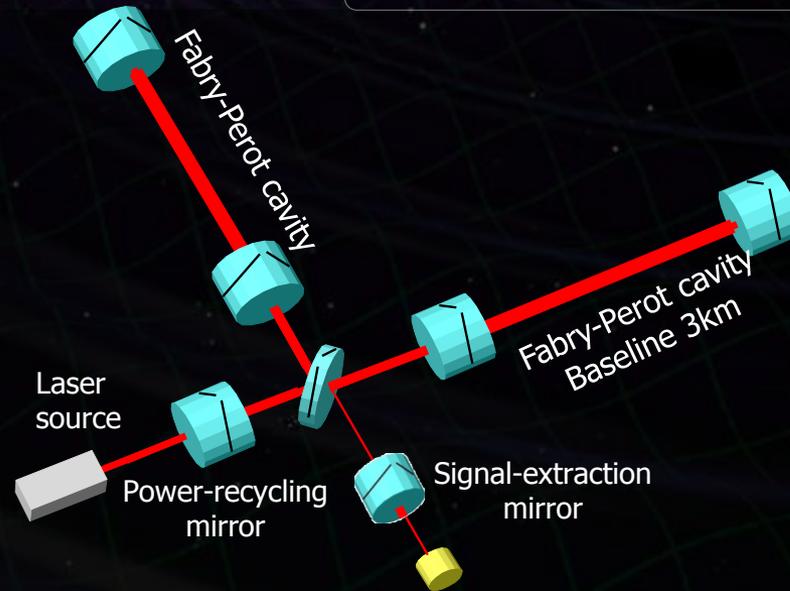
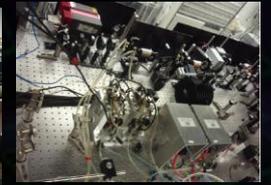
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



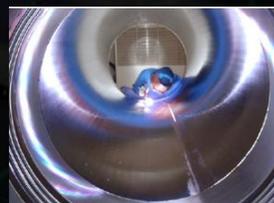
## ・光の量子雑音

大型干渉計  
干渉計方式の工夫  
高出力レーザー光源  
高性能鏡



## ・真空システム

光路長の揺らぎ  
音響雑音などの低減



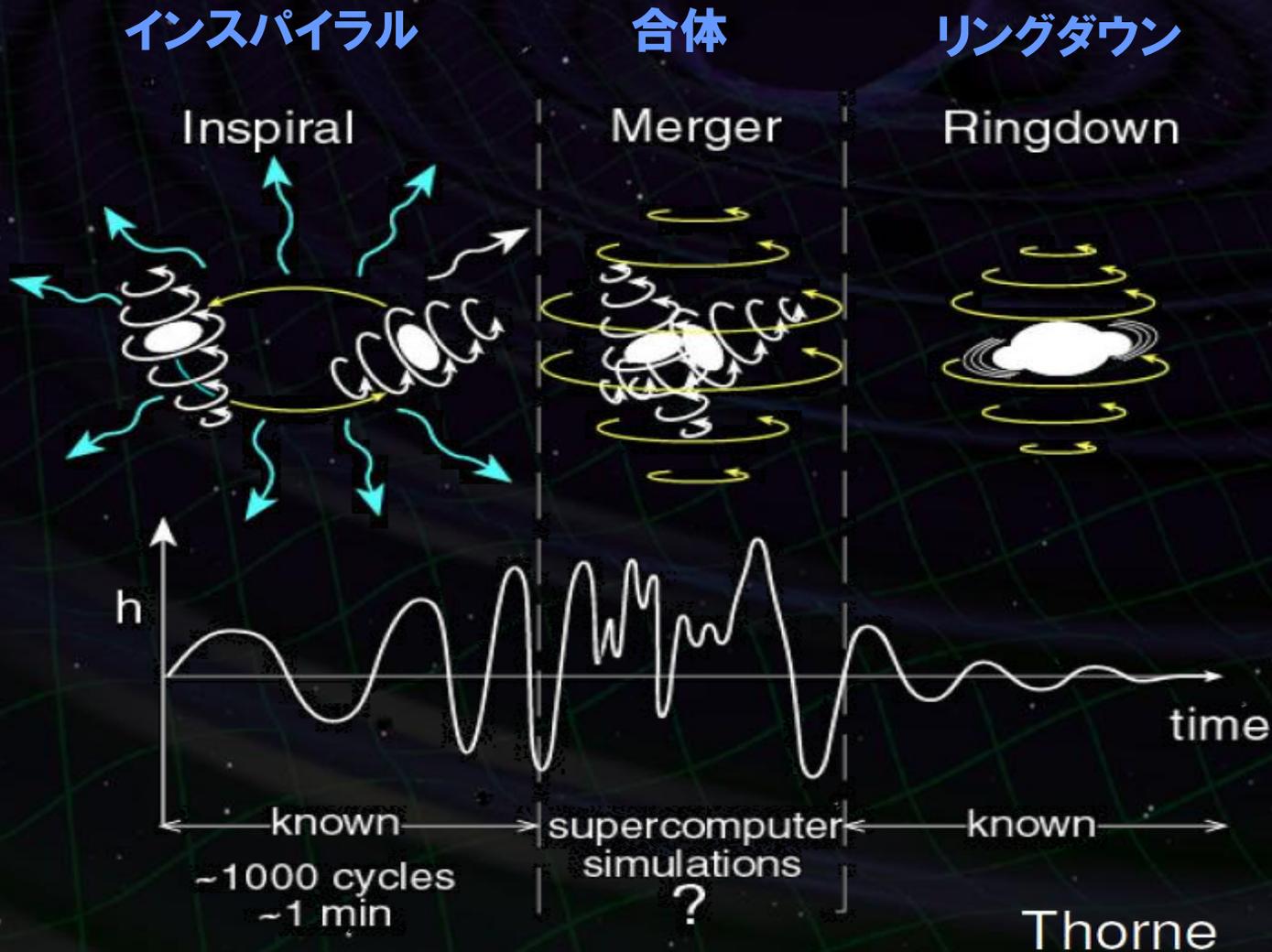
## ・長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系  
環境モニタ, データ保管・分配



# 連星合体現象からの重力波

・観測の第一ターゲット：連星中性子星合体現象



# 連星合体観測による知見

## • 重力波の初検出

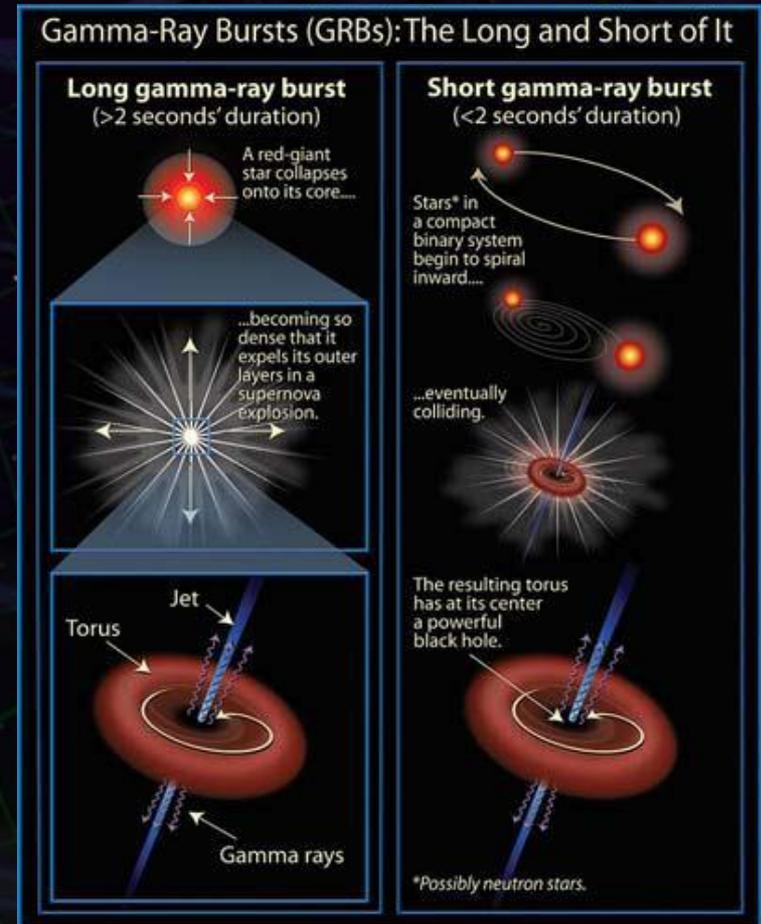
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

## • 高密度核物質の直接探査

- 中性子星の状態方程式の情報。
- 潮汐変形/破壊，HMNSの形成など。

## • 宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 宇宙論パラメータへの制限。
- 超巨大ブラックホールの形成過程
- 連星の進化や分布の情報。



From encyclopedia of science

# KAGRAの観測確率

第一目標: **連星中性子星合体**からの重力波の検出



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度:

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,  
ApJ. 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,  
ApJ, 601 L179 (2004)



KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

※感度設計は変更  
される可能性があります。

# KAGRA サイト

## 岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



Neutrino

Super Kamiokande, Kamland

Dark matter

XMASS

Gravitational wave

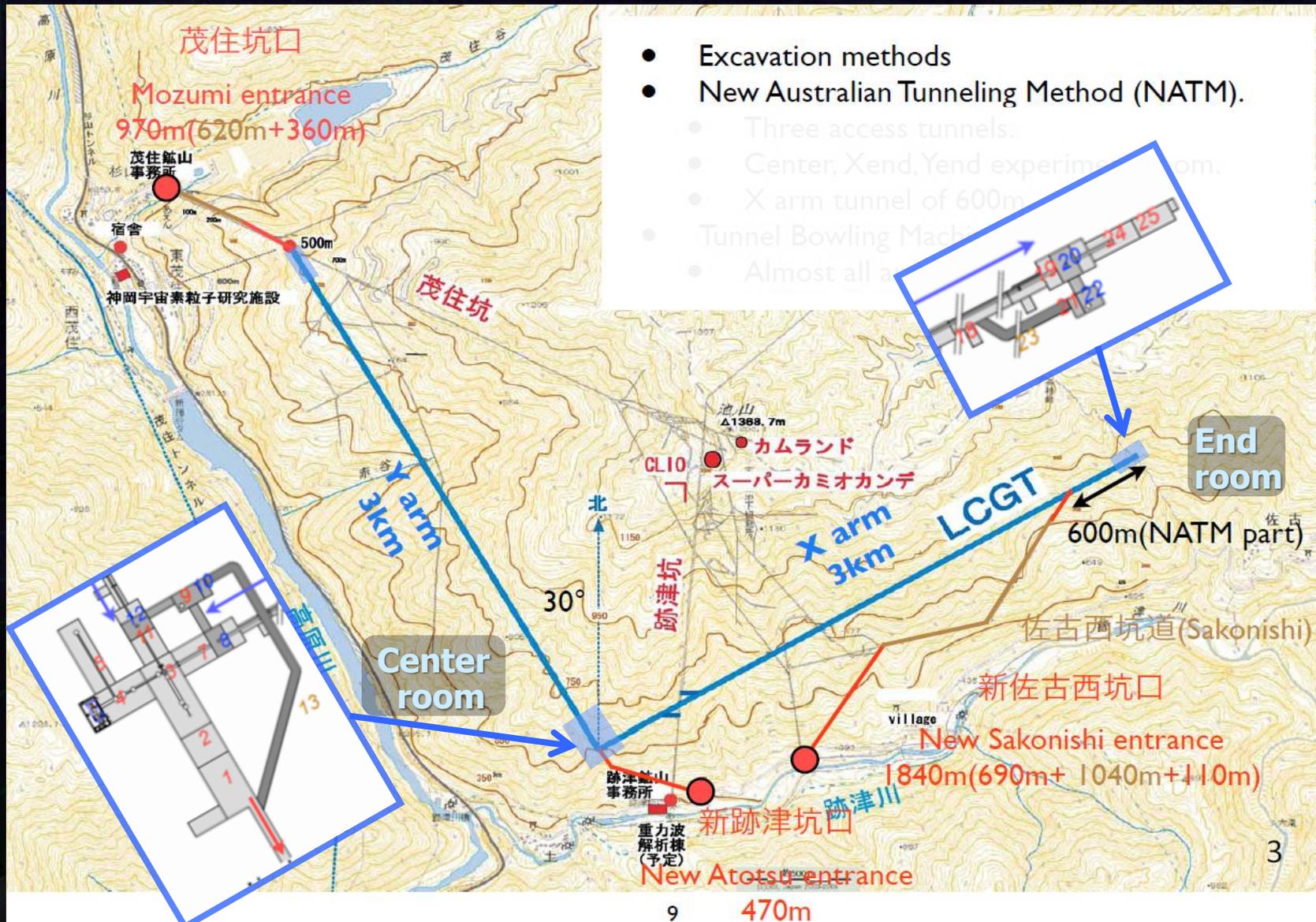
CLIO, **KAGRA**

Geophysics

Strain meter

- 220km away from Tokyo
- 1000m underground from the top of the mountain. (Near Super Kamiokande)
- 360m altitude
- Hard rock of Hida gneiss (5 [km/sec] sound speed)

# KAGRAトンネル設計



- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).
  - Three access tunnels.
  - Center, Xend, Yend experimental room.
  - X arm tunnel of 600m.
  - Tunnel Boring Machine
  - Almost all a

# 安全祈願祭・着工式



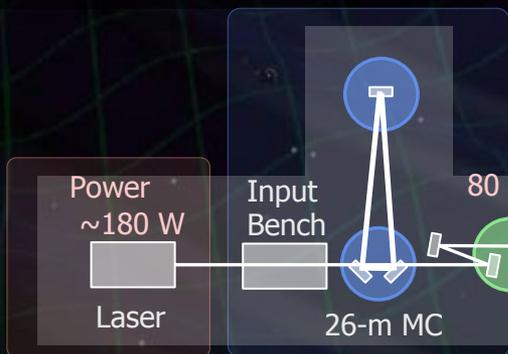
KAGRA安全祈願祭・着工式・祝賀会  
岐阜県・神岡 (2012年1月20日)



# KAGRA 干渉計構成

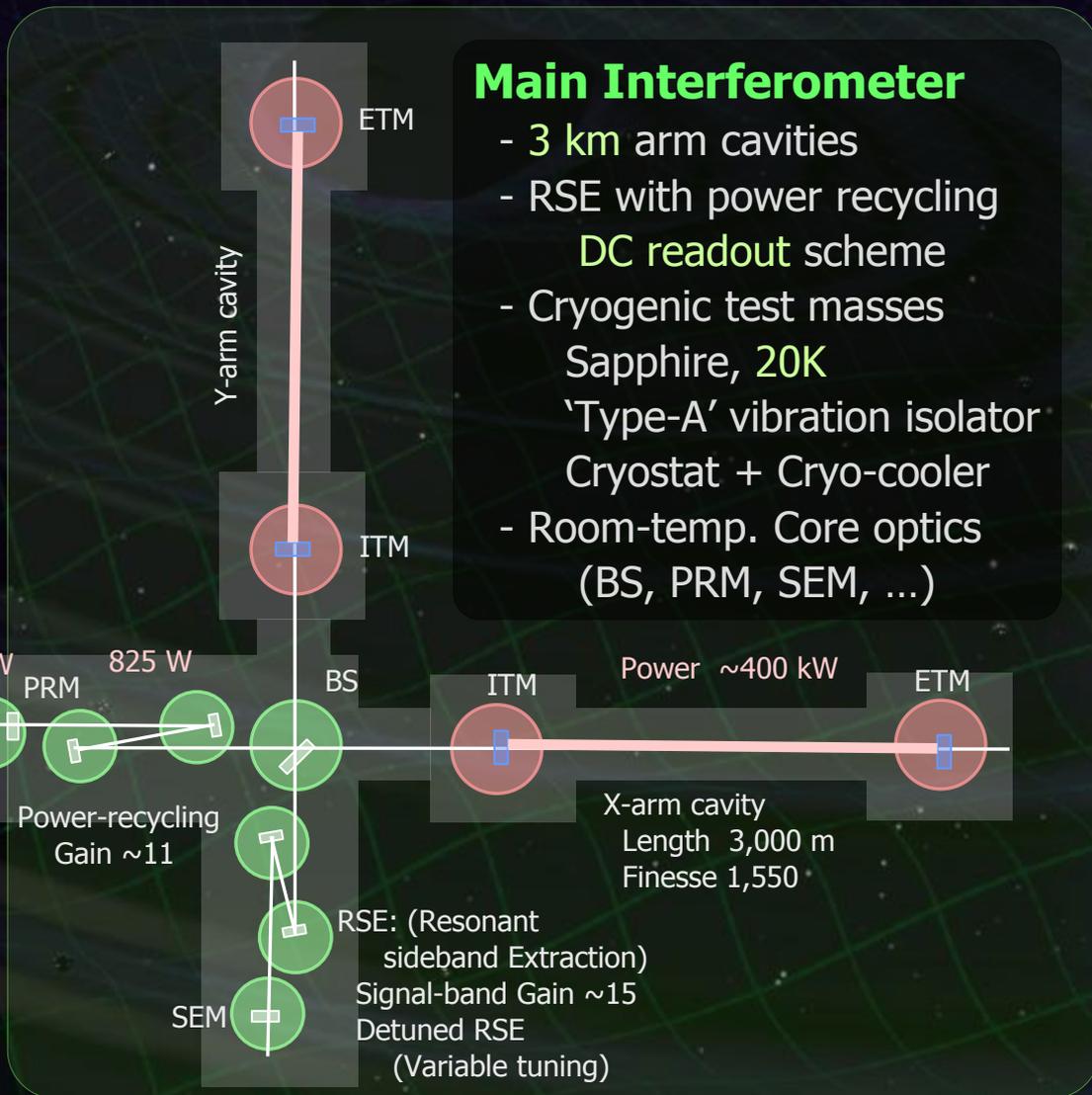
## Input/Output Optics

- 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  
DC readout scheme
- Cryogenic test masses  
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator  
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics  
(BS, PRM, SEM, ...)

# KAGRA鏡懸架・冷却系

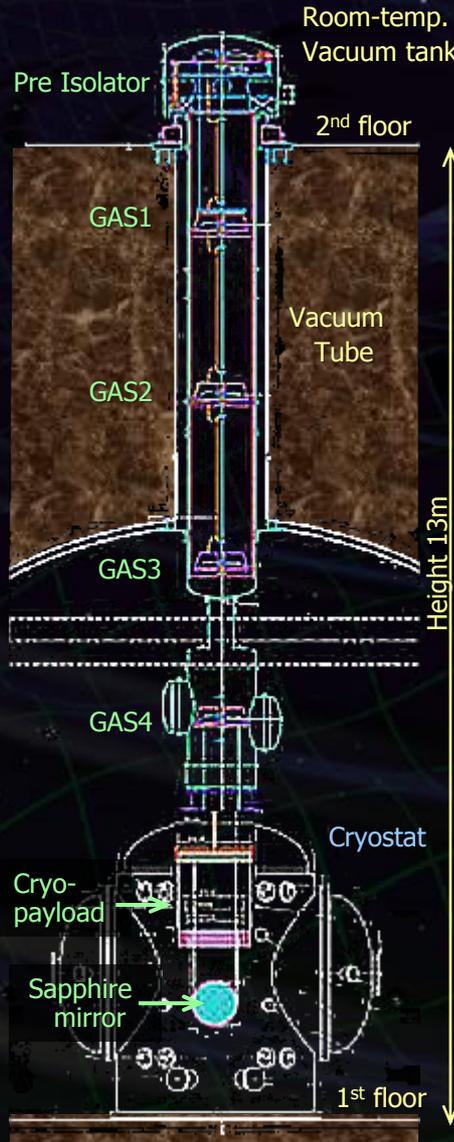
## 高性能防振装置 (Type-A SAS)

- 上層部の岩盤より懸架された多段の受動防振装置.
- 常温の真空槽内に収められる.
- ローカル制御とダンピング機構.
- 最下段に低温ペイロード,  
サファイヤ鏡を懸架.



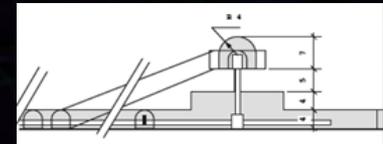
## 低温ペイロード

- サファイヤ鏡を懸架する2段振り子.
- サファイヤ鏡 20K
- 振り子部 16K
- 鏡の変位・角度用アクチュエータ.
- 低温シールド部とヒートリンク接続.



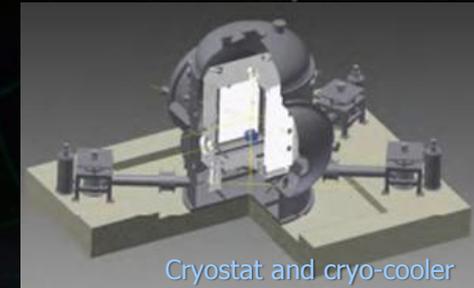
## トンネル : 2層構造

- 上部 高さ 7m
- 中間岩盤 厚さ 5m
- 下部 高さ 8m



## クライオスタット・冷却系

- 外形 :  $\Phi 2.4\text{m}$ , 高さ 3.8m
- 二重の輻射シールド (80K, 8K)
- 4台の低雑音PT冷凍機
- 1st stage 36 W at 50K
- 2nd stage 0.9 W at 4K



# KAGRA 真空ダクト

12-m ducts are being delivered: ~100 of 500 ducts

111017 VAC (YS)

## LCGT Vacuum System

千原野田車庫運送のこと

本ダクトは 12m 両端支持にて中央で 10mm 程度の微小変位のポインティングを生ずること。

ダクト取付台本  
両手方向に 3~4ヶ所設置

\* storage (one year, or more, before installation)

Transportation and storage of vac. duct

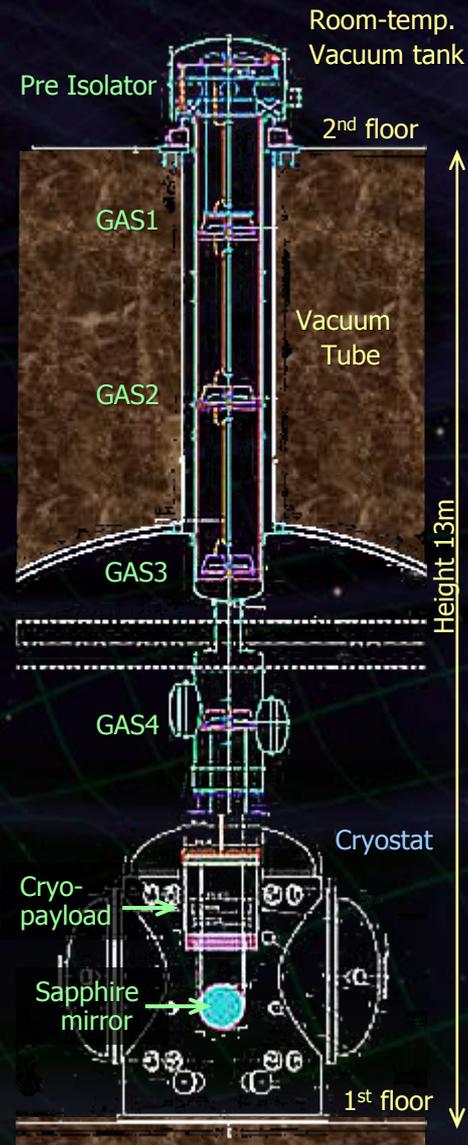
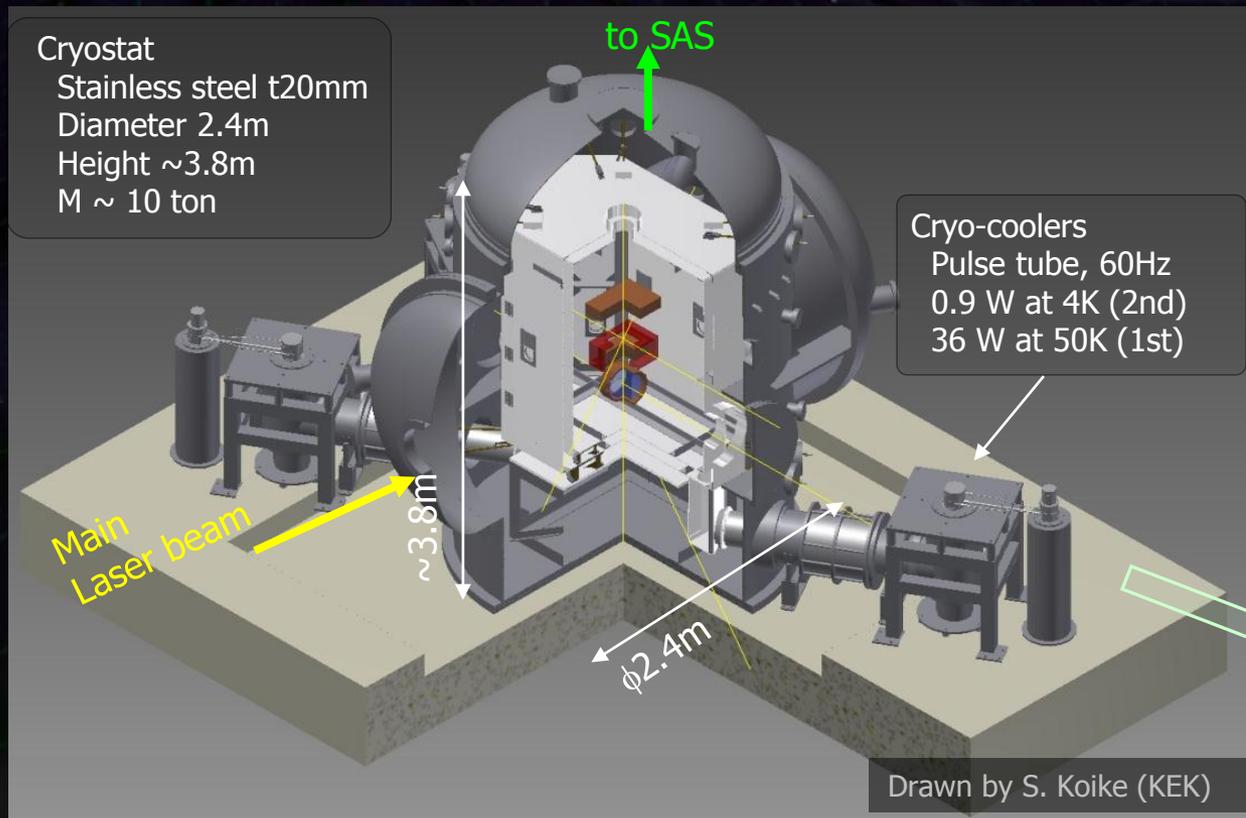
Presentation  
By Y.Saito (KEK)

# 防振装置



# クライオスタット

- CLIO等の経験を生かして設計 (構造解析, 熱解析)  
→ 2012年度中頃に1台目評価試験.



# クライオスタット

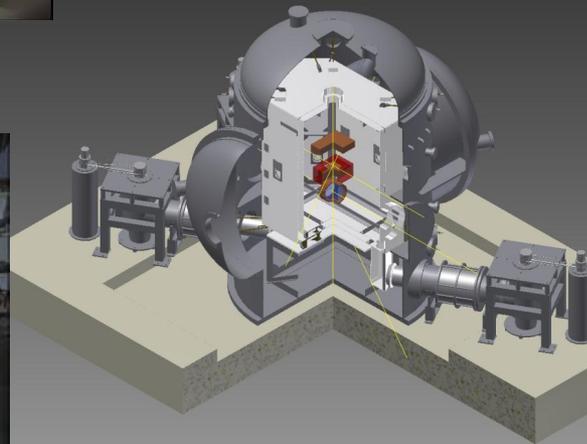
Ribs inside cryostat



Welding on the connection port



Connection port  
to cry-cooler unit



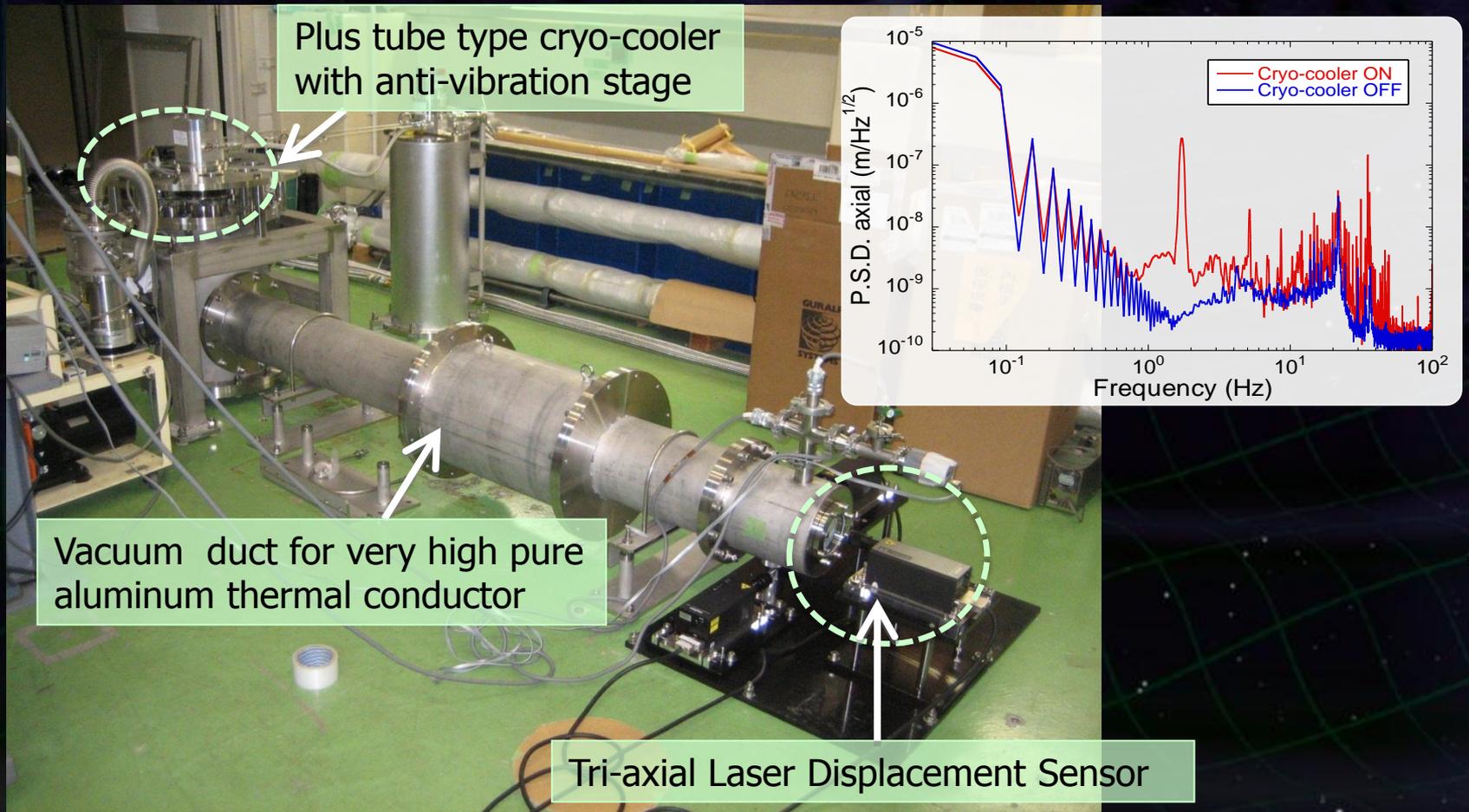
Pipes



at Toshiba Keihin Factory

# 低振動冷凍機

- CLIOなどの経験・実績を生かして製作。
  - プロトタイプを用いた評価試験進行中 (KEK)
  - 冷却能力, 伝熱系を含めた振動など.



# KAGRA全体スケジュール

**iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

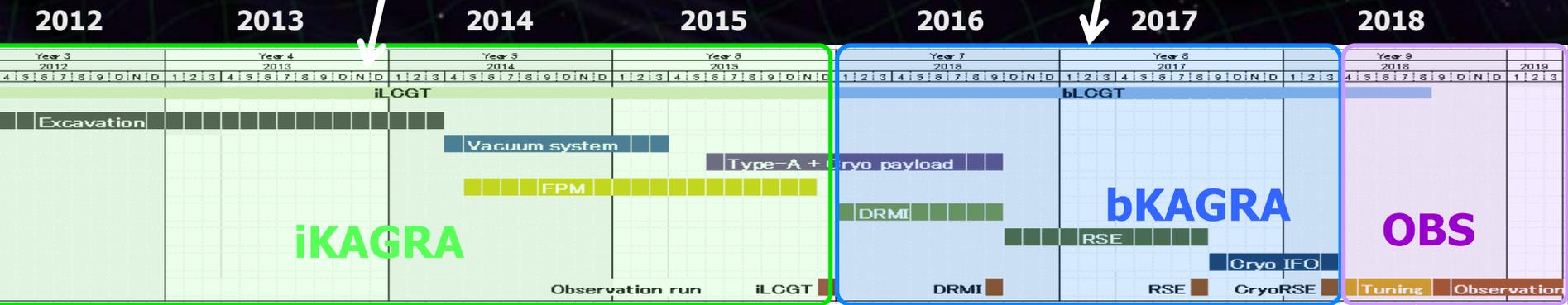
大型干渉計の安定動作を実現

- 基線長3kmの常温干渉計を動作.
- 比較的シンプルな光学系・防振系構成で総合システムとしての動作.

**bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

最終構成での動作

- 干渉計構成, 防振系最終形
- 低温干渉計としての動作.



**OBS** (2018.4 -)

長期間観測運転と干渉計チューニング.

# まとめ

## KAGRA：プロジェクト進行中

- 観測可能距離 200Mpc以上 → 年間1回以上の重力波検出.
- 海外の望遠鏡とともに 第2世代の観測ネットワークを形成

⇨ 重力波天文学の分野を切り開く.

- KAGRAでは, 世界に先駆けて第3世代の技術も実証.  
低温干渉計技術, 地下サイト

## 設計と開発

- TAMA と CLIO などの経験・実績を生かして設計.
- 実機プロトタイプ試験, シミュレーションによる詳細設計・検討が進行中.

2010年代後半には、  
重力波天文学が幕を開けているだろう!

終わり