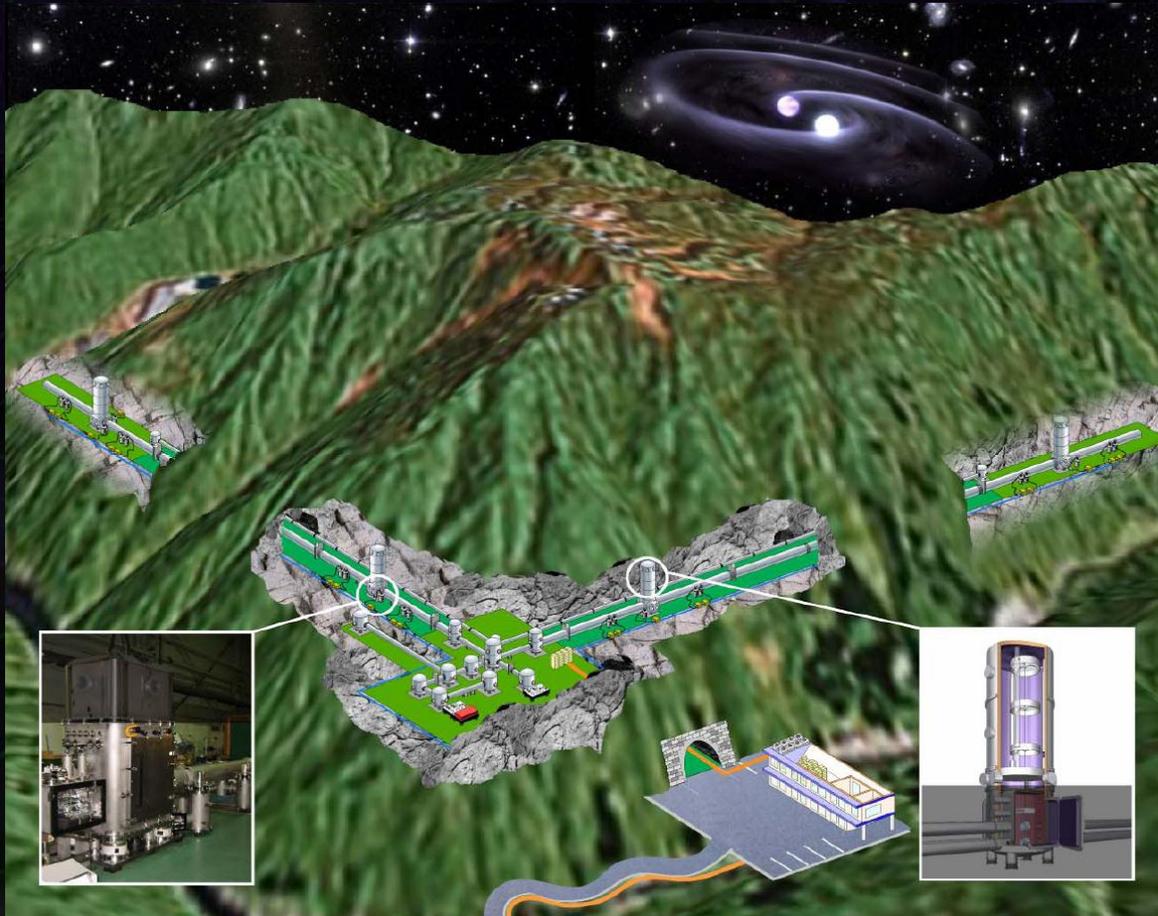


# LCGT計画の概要



**安東 正樹**

(京都大学 理学系研究科)

On behalf of  
the LCGT Collaboration

# LCGT

## 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

# LCGT 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, LCGT

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)

- **背景とLCGTの意義**
- **LCGTの概要**
- **LCGTスケジュール**
- **LCGTの設計と現状**
- **まとめ**

# 背景とLCGTの意義

# 高エネルギー天体现象と重力波

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz – 1kHz の観測周波数帯

波源より放射される重力波

(周波数)  $\sim 1 /$  (波源変動の時間スケール)

(振幅)  $\propto$  (波源の四重極運動エネルギー)

コンパクト天体起因の  
高エネルギー天体现象

中性子星

パルサー

超新星爆発

連星合体

軟ガンマ線リピーター

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

EMRI

準固有  
振動

初期宇宙

背景重力波

電磁波  
ニュートリノ  
高エネルギー宇宙線

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

# TAMA300 と CLIO

## TAMA300 (1995~)

基線長300mの 重力波検出器

銀河系内を見渡せる感度

(世界最高感度 2000-2002年)

他の干渉計に先駆けた観測運転

(3000時間を超える観測データ)



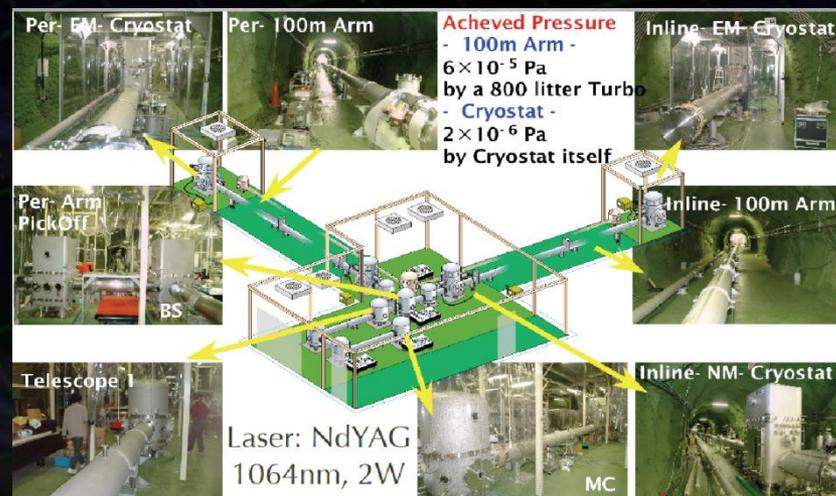
## CLIO (2002~)

基線長100mの  
低温・地下レーザー干渉計

地下環境を生かした安定な動作

20K以下の低温での動作

→ 冷却による感度向上を確認



# 第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：5台, 共振型検出器：3台



⇒ 国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ  
→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpcの観測レンジ  
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

# 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

# 第2世代 重力波望遠鏡

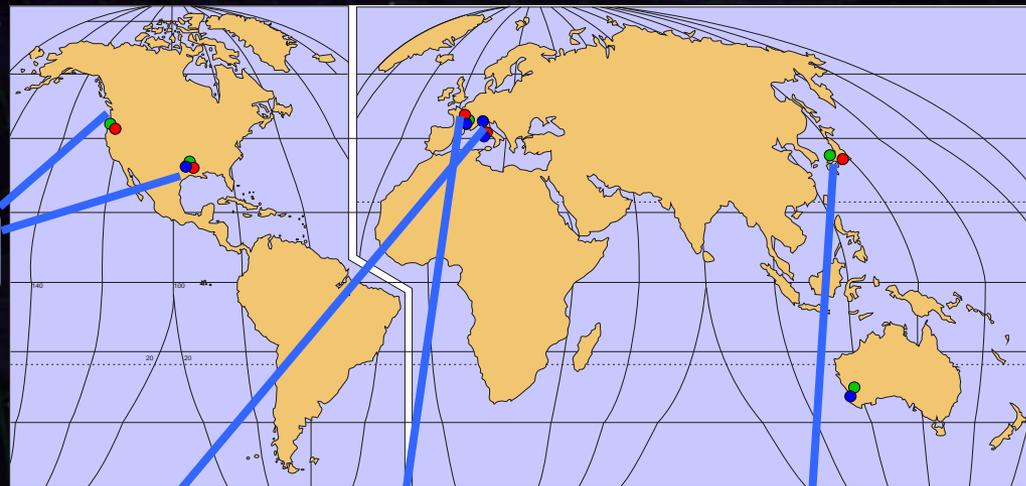
国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学

(重力波の検出, 波源位置の特定, 波源の物理情報, ...)



aLIGO (USA)  
4km x 2 (or3)



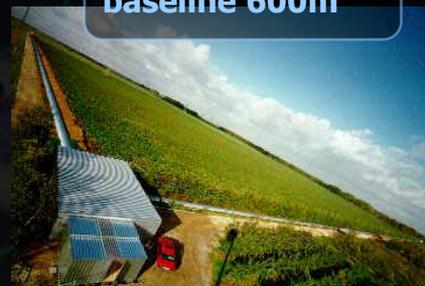
LIGO-Australia  
in proposal



LIGO-India  
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)  
baseline 3km



GEO-HF (GER-UK)  
baseline 600m

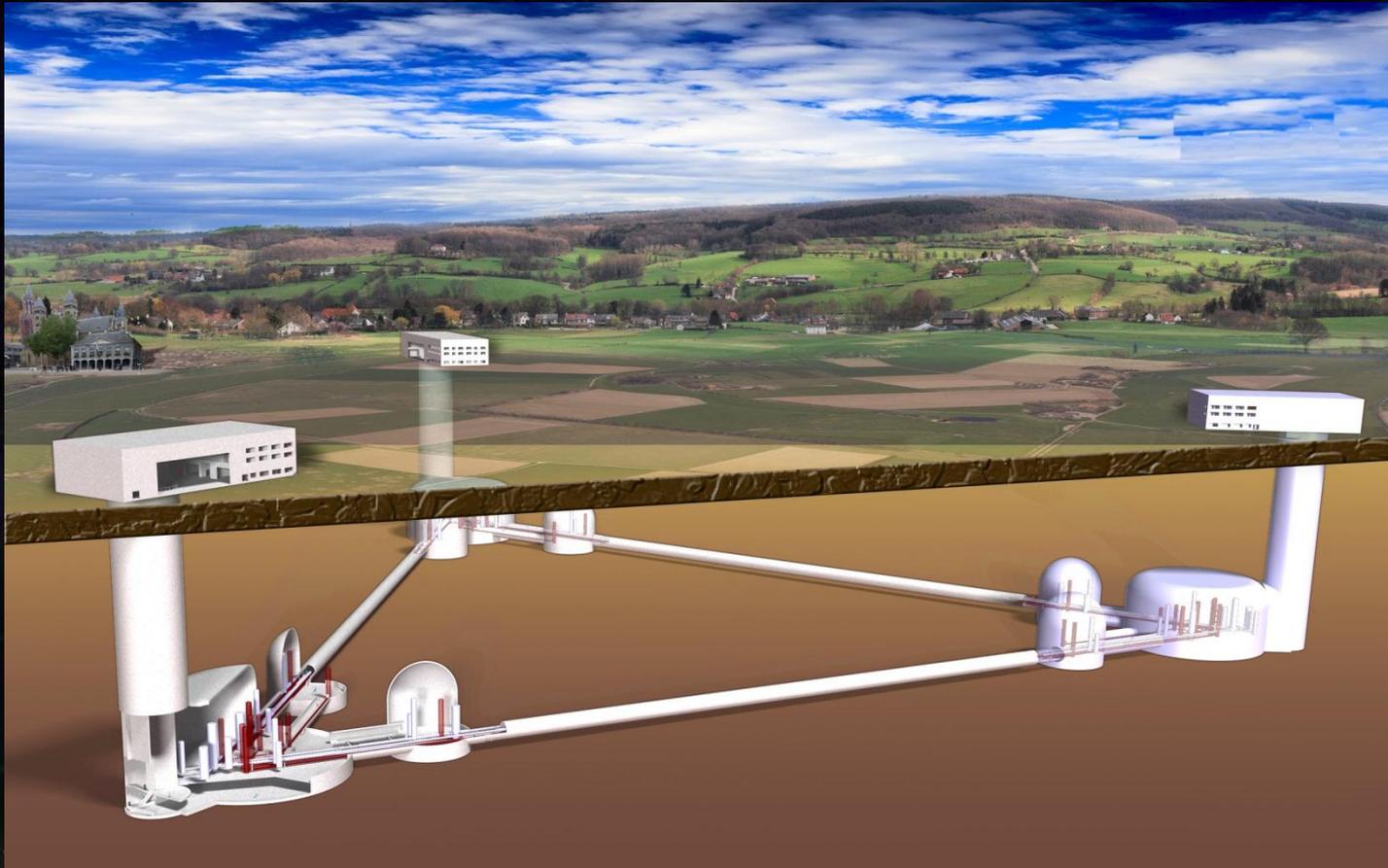


LCGT (JPN)  
baseline 3km

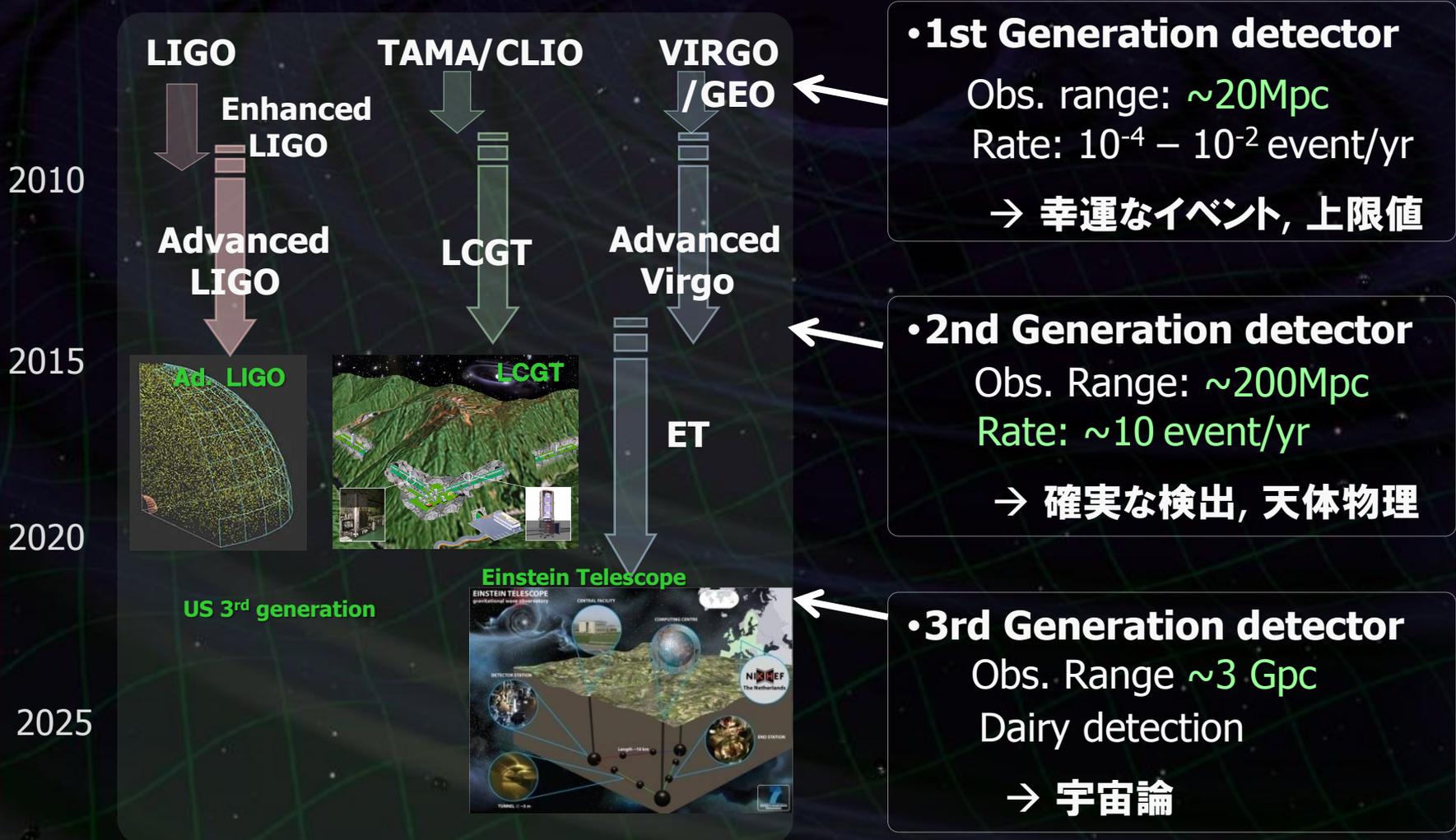
# 第3世代 重力波望遠鏡

3<sup>rd</sup>-generation detector : **ET (Einstein Telescope)**

感度：さらに一桁の改善, 2026年頃観測開始.  
長基線長 ~10km, 地下サイトに建設, 低温干渉計



# 地上重力波望遠鏡のロードマップ



# LCGTの意義

## ・重力波の検出と重力波天文学の創生

- 1年間の観測で複数回の重力波信号の検出が期待できる。  
→ 重力波天文学の幕開け, 相対性理論の検証.
- 国際観測網における重要な拠点  
検出効率, 信頼度, 天球カバー率の向上.  
波形, 偏波などの情報 → 天体现象の情報.  
波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

## ・先進的な干渉計技術の実証

- LCGTの特徴: 低温干渉計, 地下サイトに設置.  
→ 第3世代望遠鏡 (Einstein Telescope) に必須の技術.  
⇒ LCGTには、第2.5世代の望遠鏡としての役割もある.

# LCGTの概要

# 重力波の効果

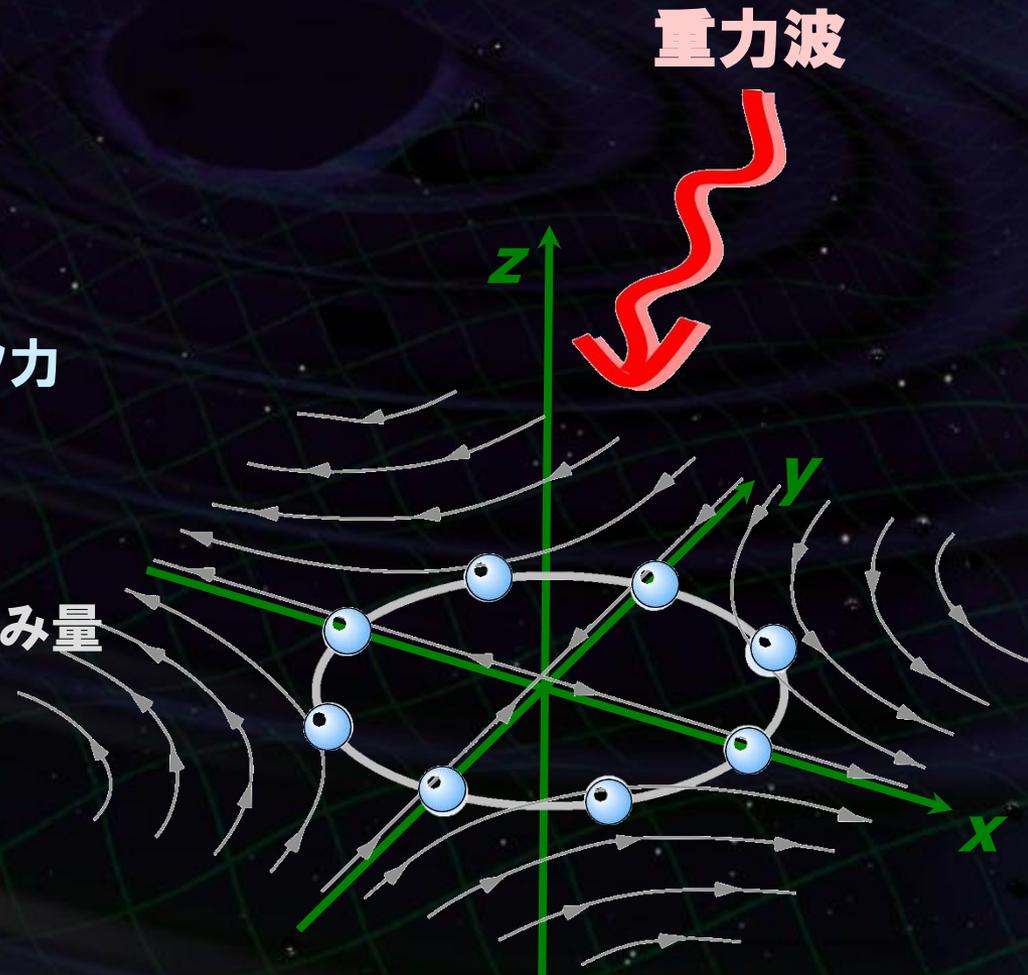
## 重力波の効果

自由質点間の距離の変化  
大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅  $h$  : 無次元の歪み量

$$h = 10^{-21}$$

→ 1mの距離が  
 $10^{-21}$ m 伸縮する



# レーザー干渉計型重力波検出器

マイケルソン干渉計が基本  
レーザー光源からの光を  
直交する2方向に分岐

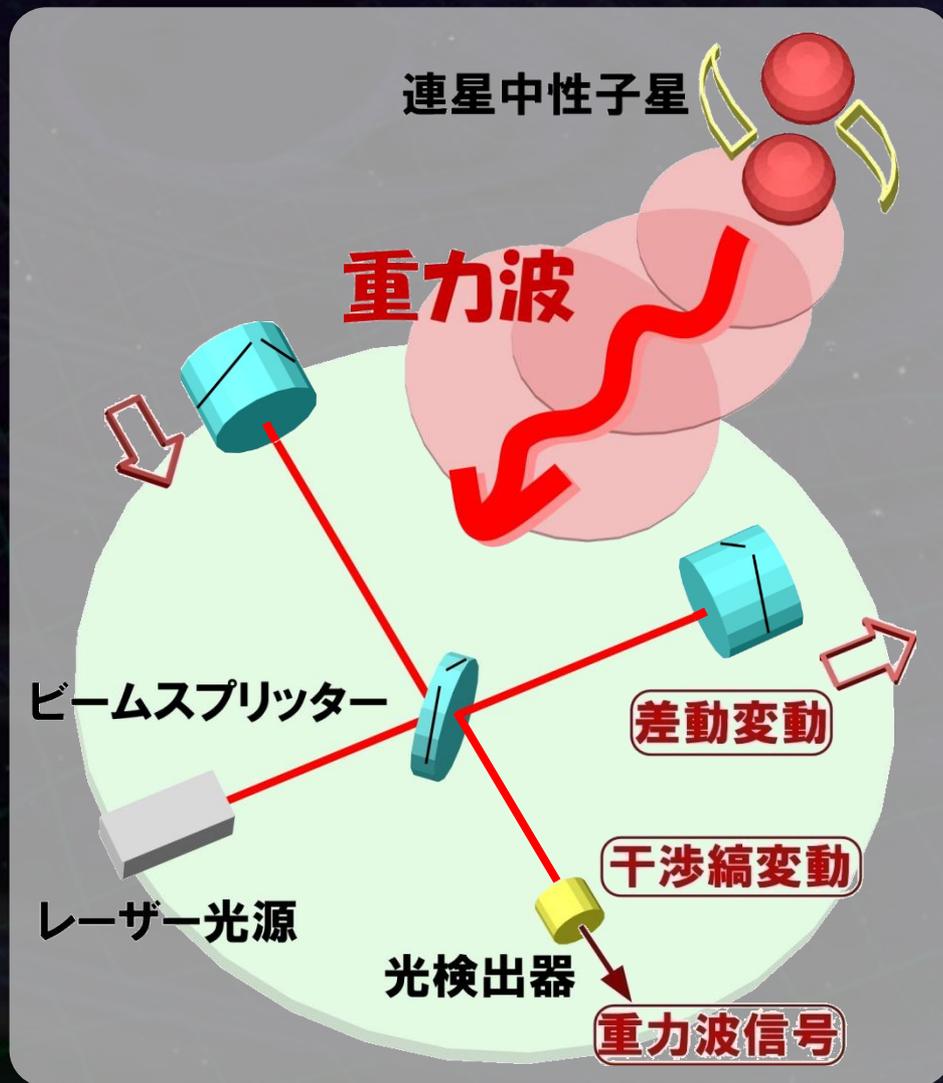


それぞれ、懸架された鏡で打ち返し  
干渉させる → 光検出器で観測.

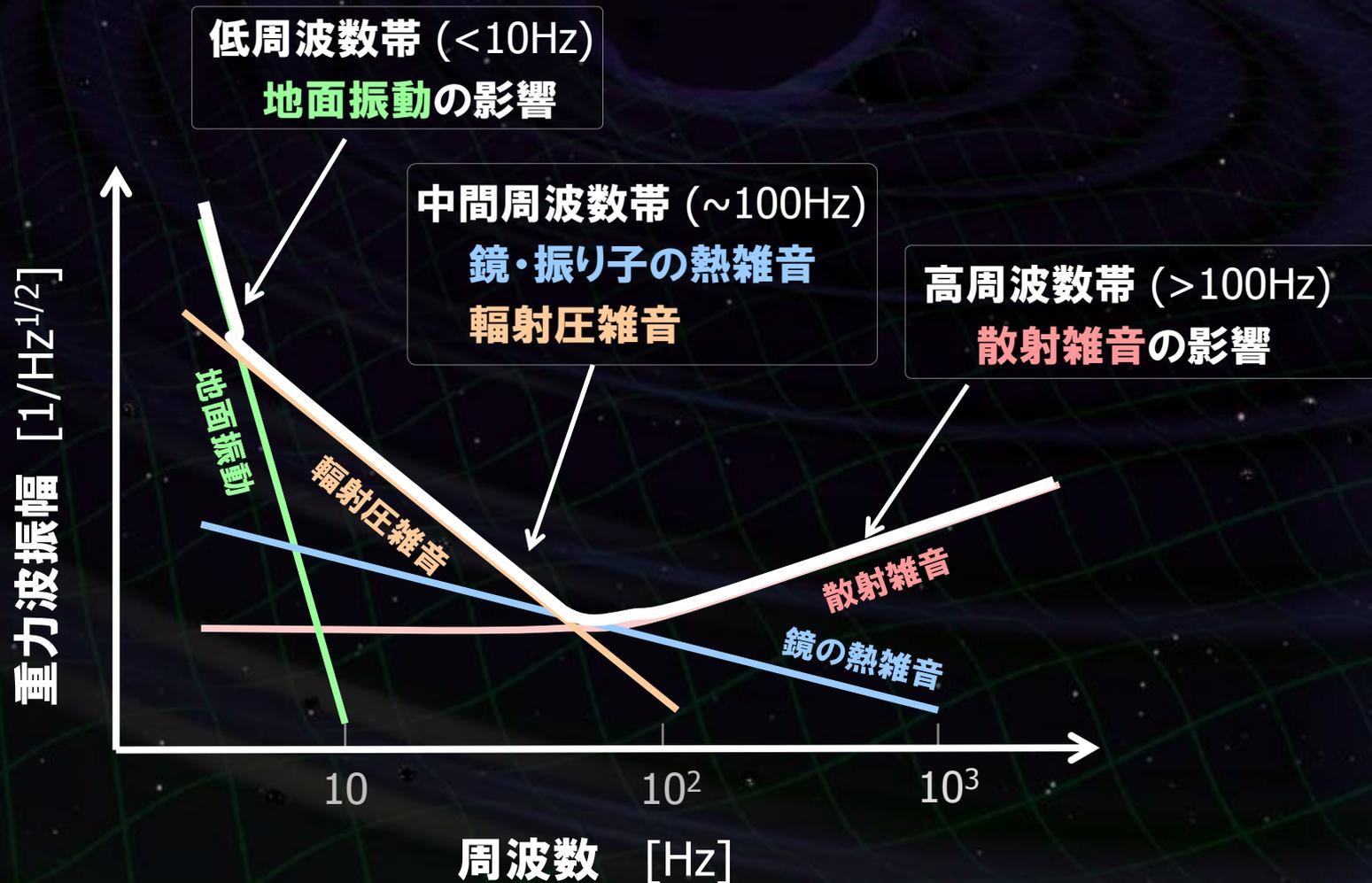
重力波が入射



腕の長さの差動変動を  
干渉光量の変動として検出



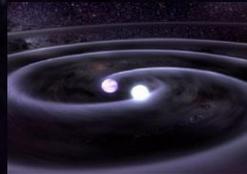
# 重力波検出器の感度



# 重力波望遠鏡の高感度化

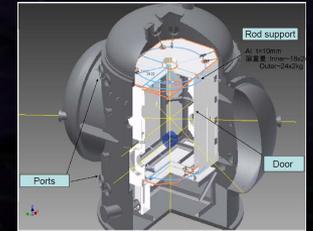
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



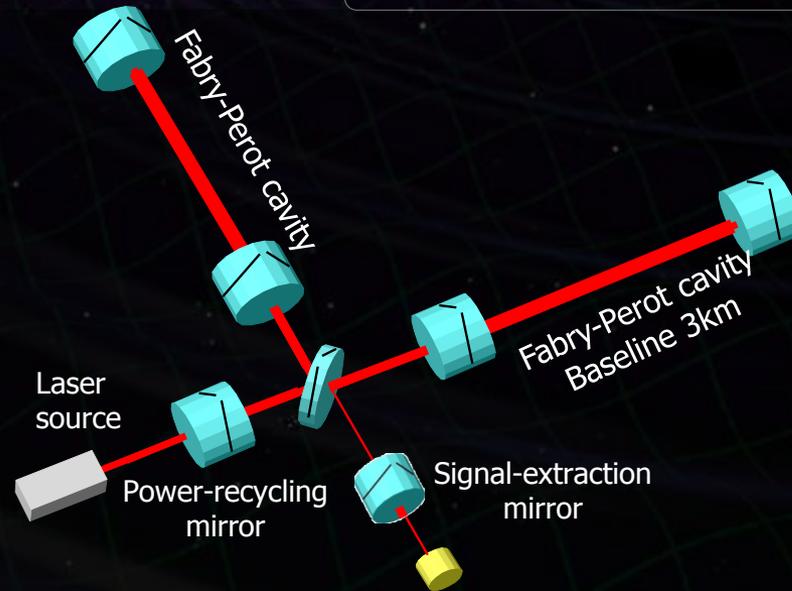
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



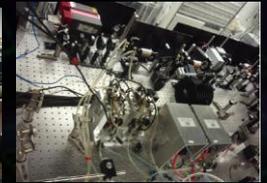
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



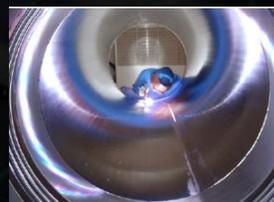
## ・光の量子雑音

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

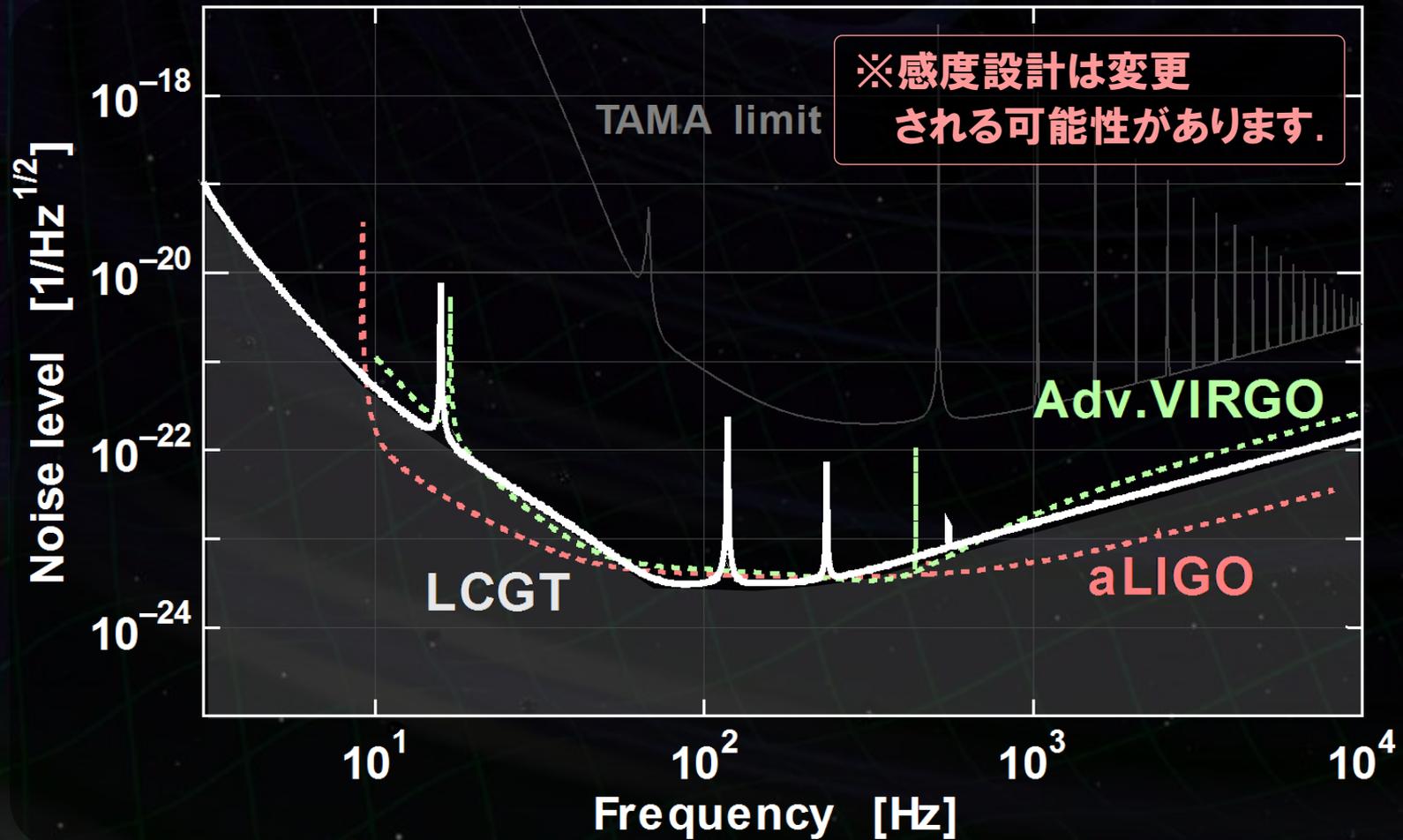


# LCGTの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度  
aLIGO や Ad.VIRGOと同等

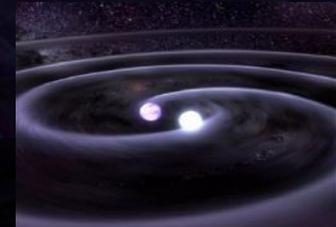


国際観測網を形成  
年間数回以上の重力波信号検出



# LCGT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)



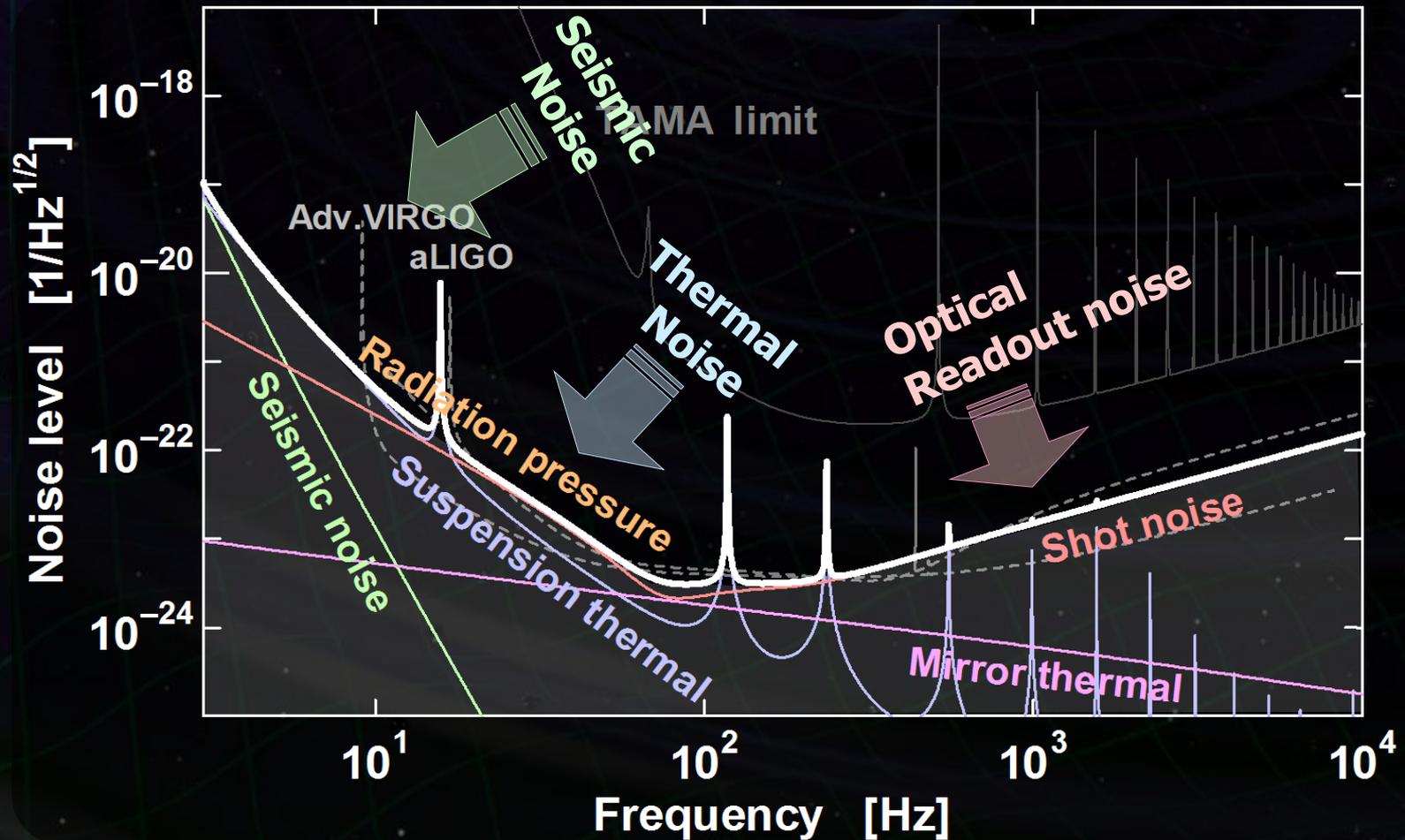
LCGTの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

詳細は田越氏  
講演にて.

# 感度の向上

本格的な天文学を目指す → 原理的な雑音源を低減する必要.



# 光の量子雑音

## ・光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音

- 散射雑音 (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- 輻射圧雑音 (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[  $P$  : 干渉計入射光パワー ]

標準量子限界 (Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M L^2}} \left[ \begin{array}{l} M : \text{鏡の質量} \\ L : \text{基線長} \end{array} \right]$$



長い干渉計基線長  
大質量鏡

LCGT : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~800kW

# 熱雑音の低減

## ・熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントに 機械損失 → 揺動力 (揺動散逸定理)

- 鏡の熱雑音 : 鏡基材, コーティング面などでの損失.
- 振り子の熱雑音 : 鏡の懸架ワイヤ等での損失.

### 熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

$T$  : 温度 [K]  
 $Q$  : 機械損失の逆数

温度を下げる  
良い材質を選ぶ  
低減する干渉計構成

LCGT : 低温干渉計 → 熱雑音を低減するクリアな方法.

- 鏡 ~20K, 振り子 ~16K
- 付加的な効果 : 機械損失の低減, 熱レンズ効果の低減, パラメトリック不安定性の低減.

# 地面振動の影響低減

## ・地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

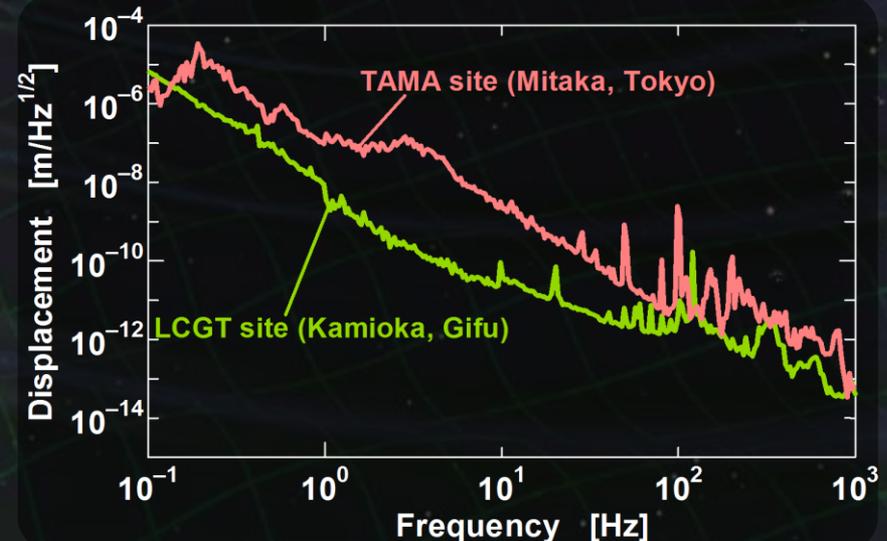
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.  
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

### 地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減.

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \text{ [m/sqrtHz]}$$

(神岡サイトでの値,  $f$ : 周波数, )

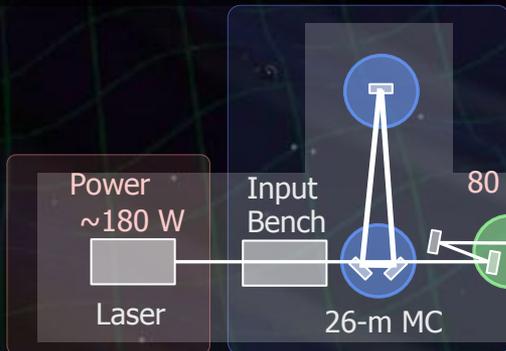


LCGT : **地下サイトに建設** → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.  
**高性能防振装置 SAS** : 多段・低周波の防振装置.

# LCGT 干渉計構成

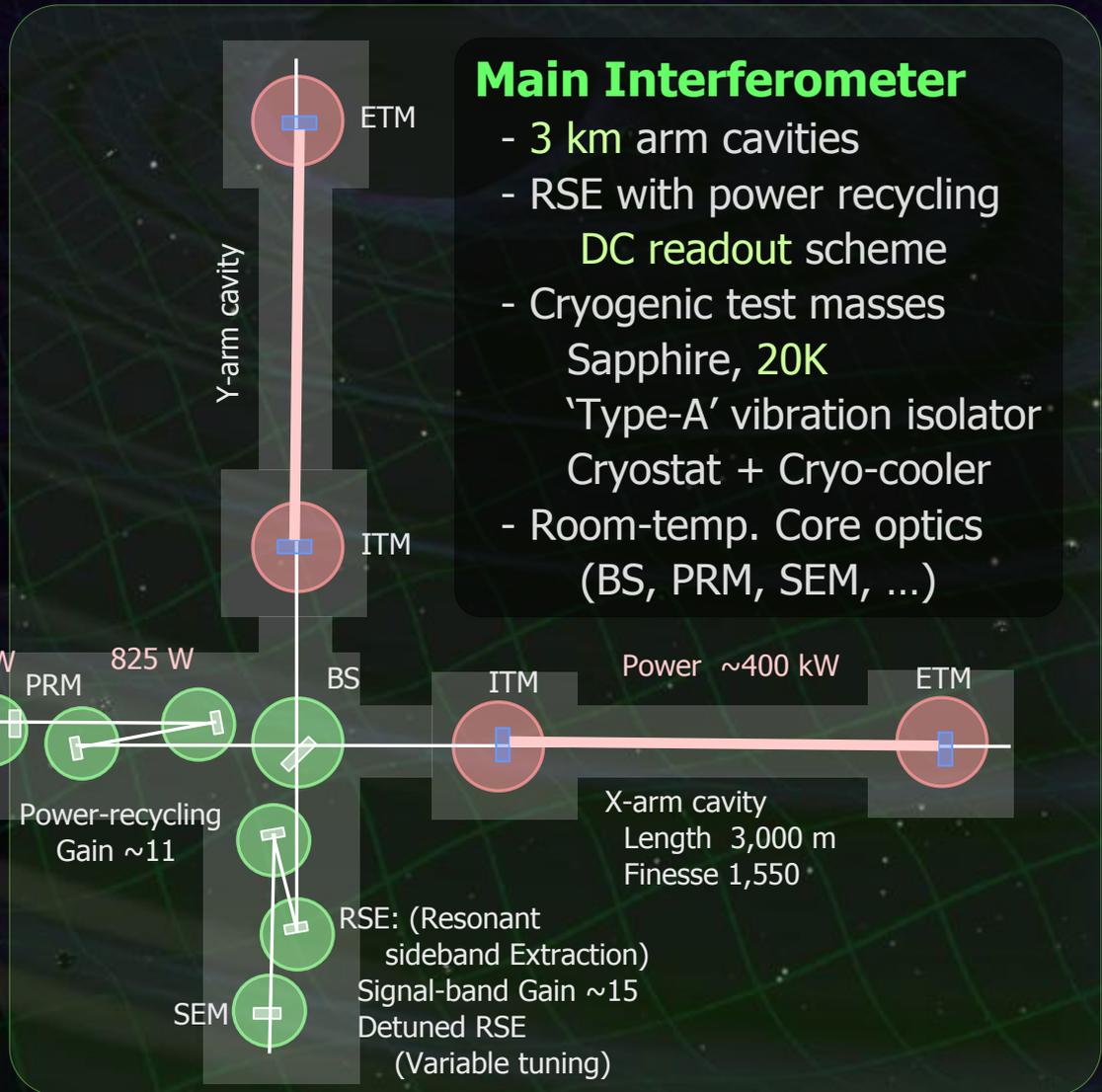
## Input/Output Optics

- 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, ...)

# LCGT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.



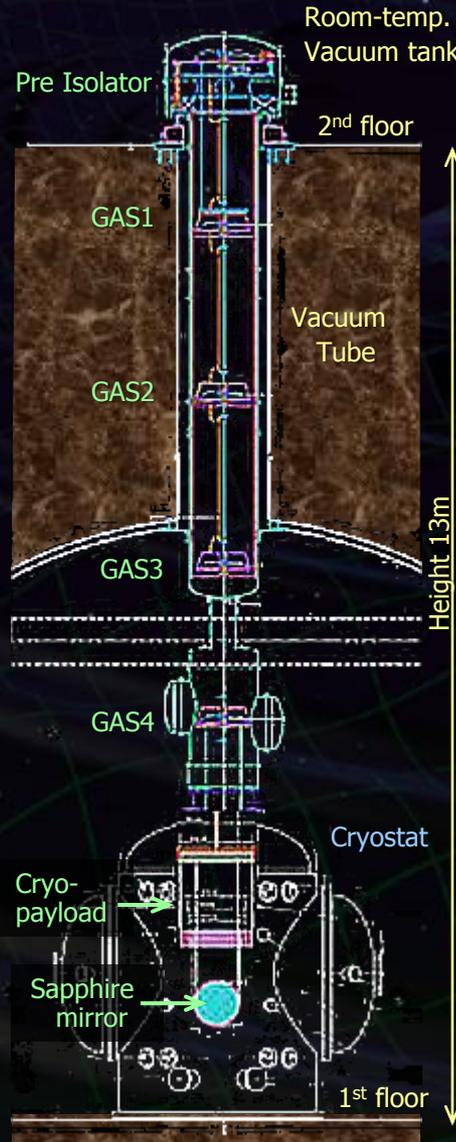
Pre Isolator



GAS filter

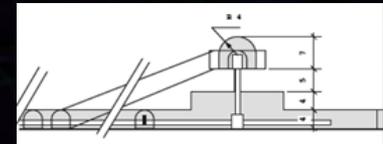
## 低温ペイロード

- 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.



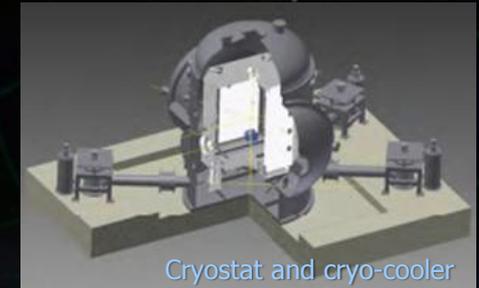
## トンネル : 2層構造

- 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



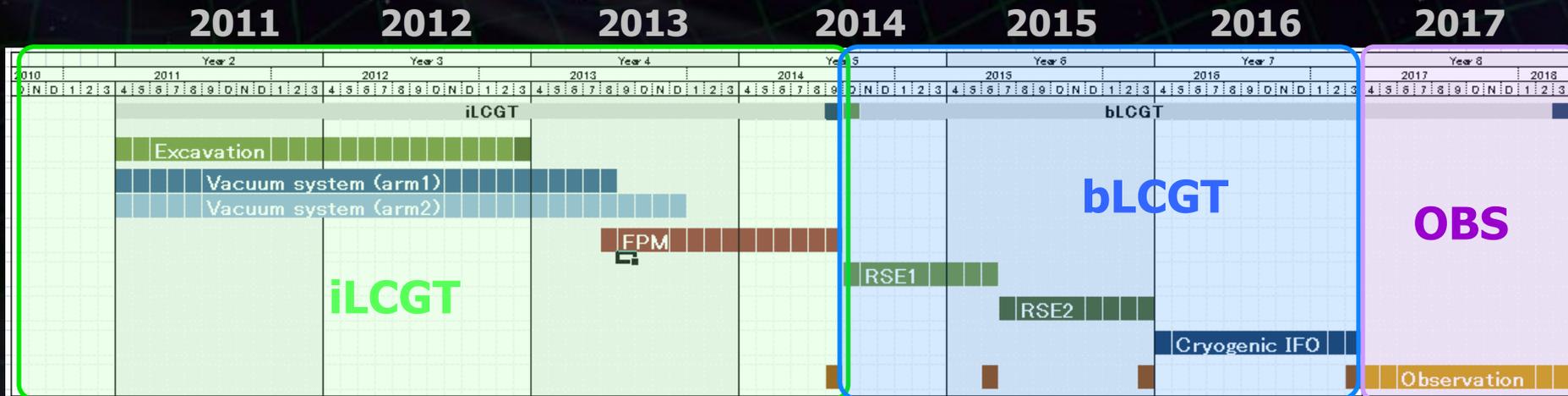
Cryostat and cryo-cooler

# LCGTスケジュール

# LCGT全体スケジュール

- **iLCGT** : 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
  - 1ヶ月程度の観測運転 → 総合システムとしての動作.
- **bLCGT** : 最終構成での動作
  - RSE, 防振系アップグレード
  - 低温干渉計としての動作.
- **OBS** : 長期間観測運転と干渉計チューニング

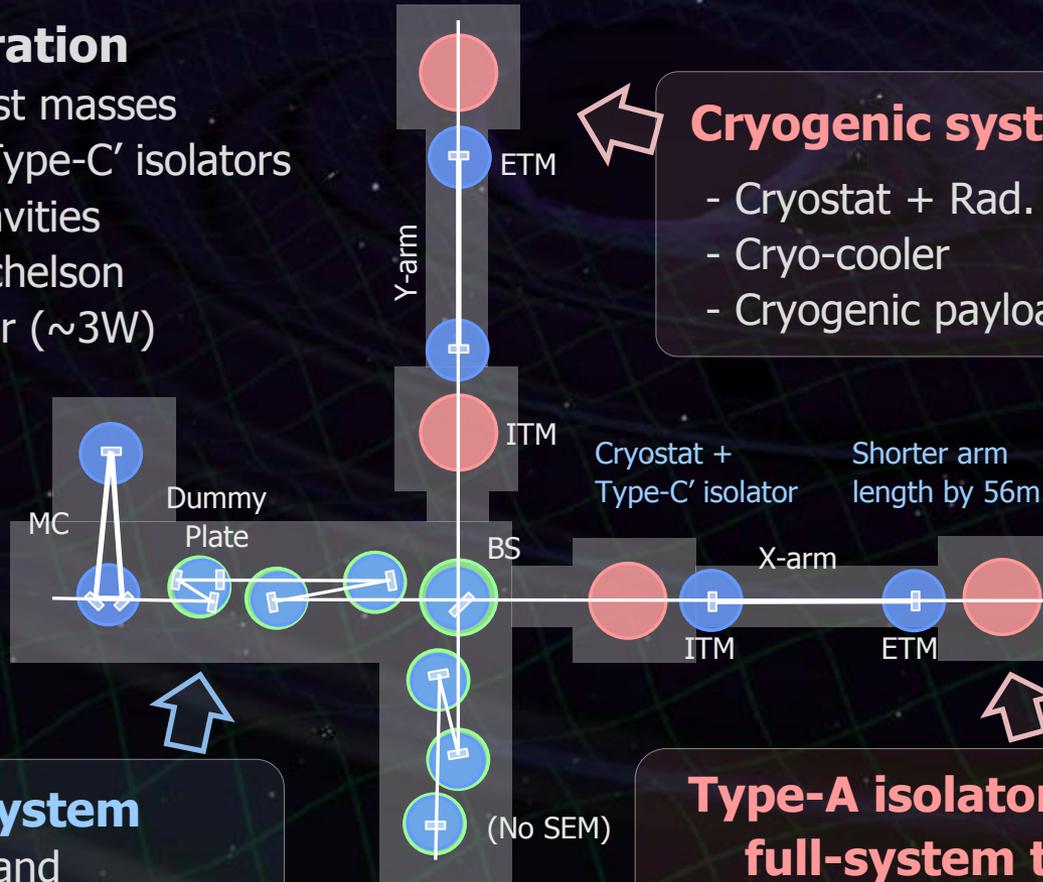
※スケジュールは変更  
される可能性があります。



# iLCGT コミッショニング

## iLCGT configuration

- Room-temp. test masses suspended by Type-C' isolators
- 2.94 km arm cavities
- Fabry-Perot Michelson
- Low laser power (~3W)



## Cryogenic system test

- Cryostat + Rad. shield duct
- Cryo-cooler
- Cryogenic payload (optional)

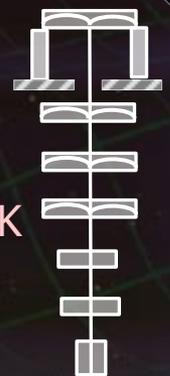
## Type-C' system

- Test mass and Core optics (BS, FM,..) Silica, 10kg, 290K
- Seismic isolator Stack + Type-B Payload



## Type-A isolator full-system test

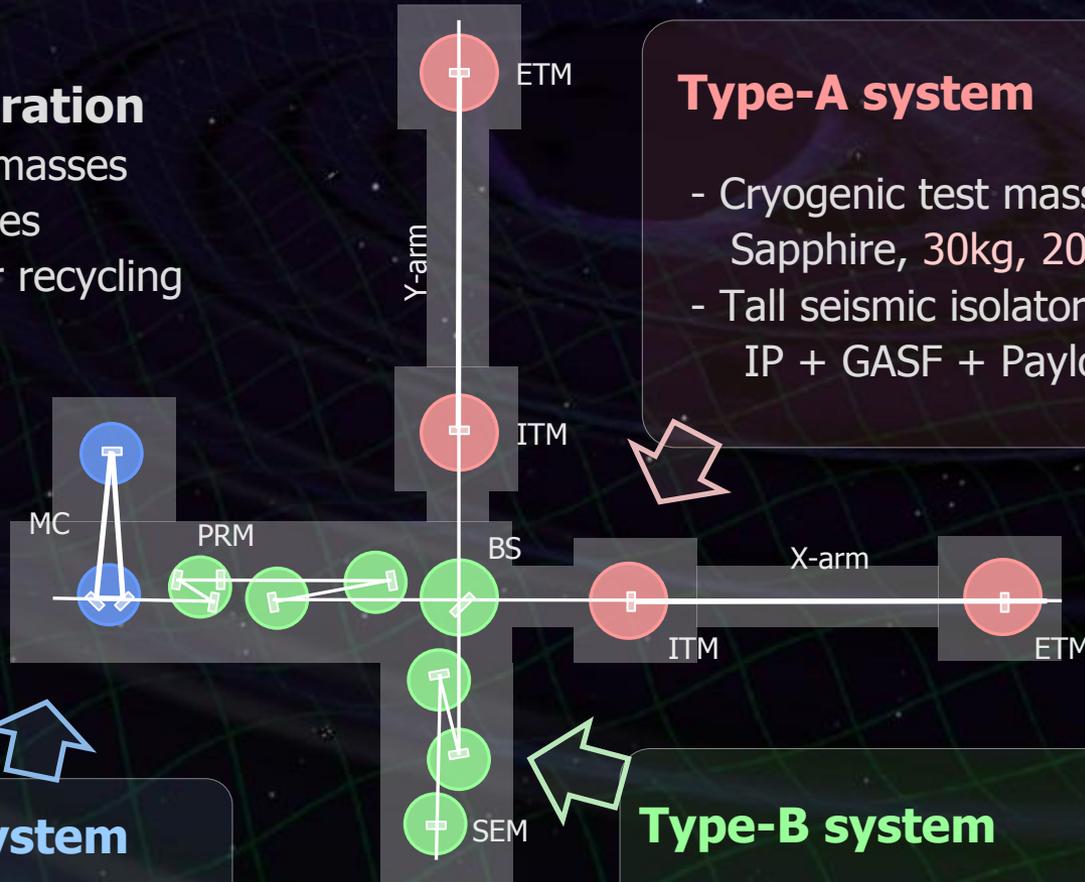
- Room-temp. test Sapphire (?), 30kg, 290K
- Tall seismic isolator IP + GASF + Payload



# bLCGT 干渉計構成

## bLCGT configuration

- Cryogenic test masses
- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling



### Type-A system

- Cryogenic test mass  
Sapphire, 30kg, 20K
- Tall seismic isolator  
IP + GASF + Payload



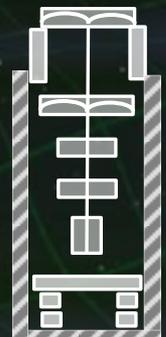
### Type-C system

- Mode cleaner  
Silica, 1kg, 290K
- Stack + Payload



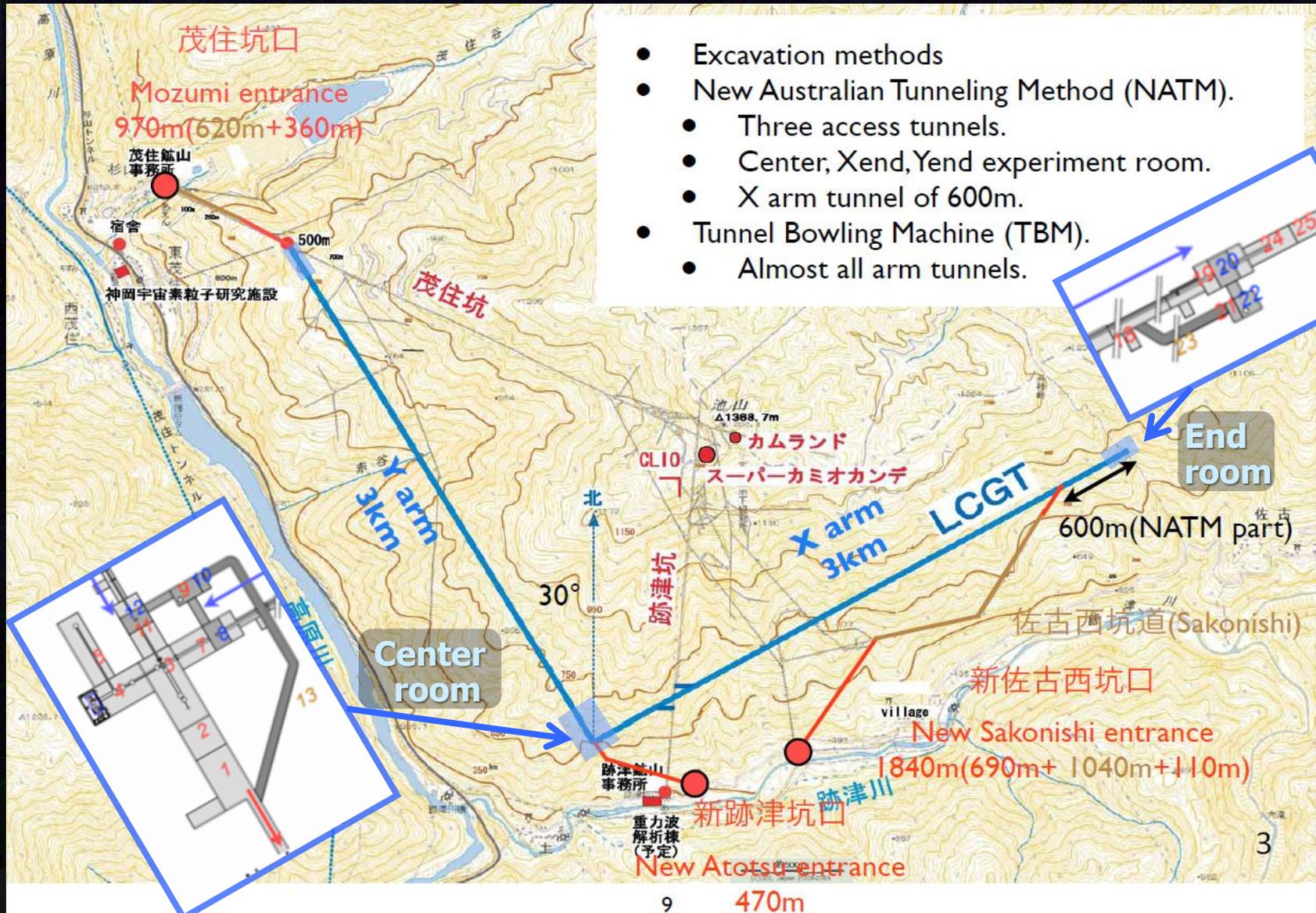
### Type-B system

- Core optics (BS, RM, ...)  
Silica, 10kg, 290K
- IP + GASF + Payload
- Stack for aux. optics



# LCGTの設計と現状

# LCGTトンネル設計



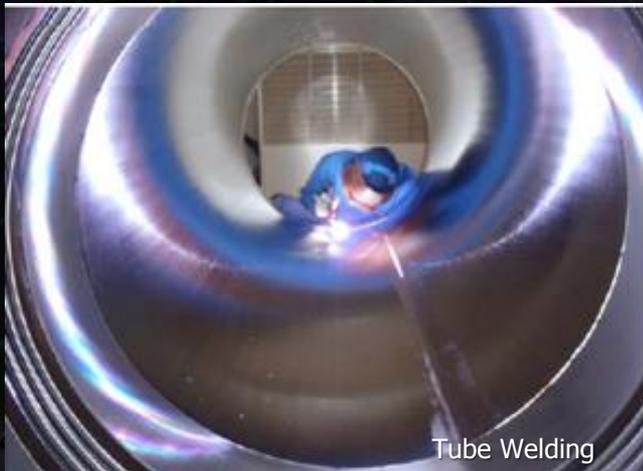
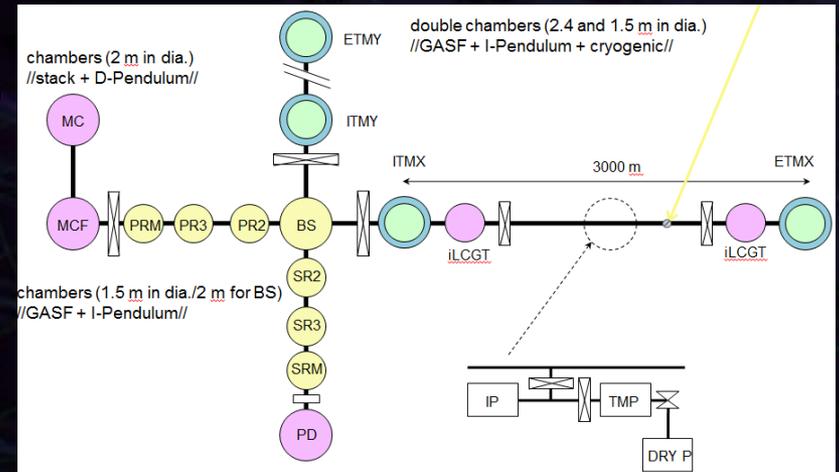
- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).
  - Three access tunnels.
  - Center, Xend, Yend experiment room.
  - X arm tunnel of 600m.
- Tunnel Bowling Machine (TBM).
- Almost all arm tunnels.

# 真空系

## ・真空ダクト

長さ 12m,  $\Phi 80\text{cm}$ のダクトを500本接続.

- 最初の120本を製作開始.  
24か月ですべてを製作予定.
- 乾燥空気を密封  
→ 廃線になった鉄道トンネルに保管.



# 干渉計方式

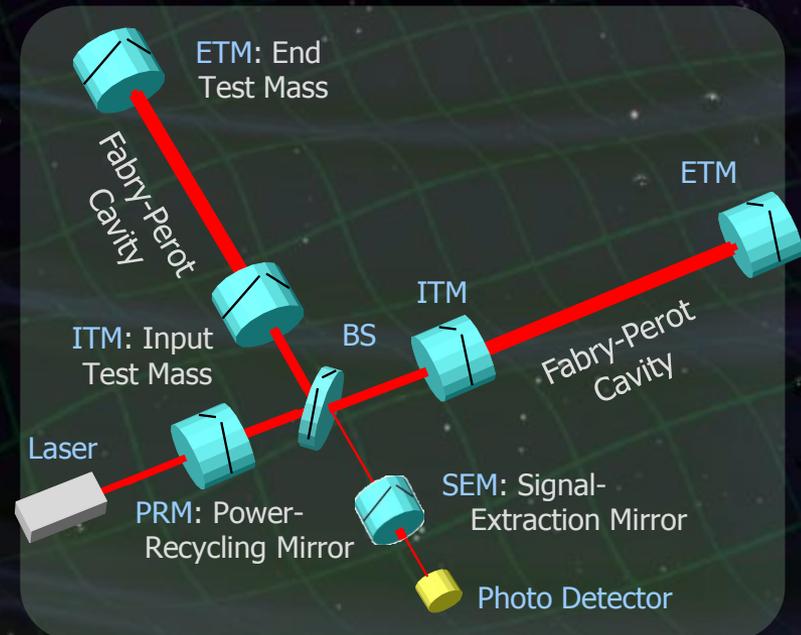
## •RSE干渉計方式 (Resonant-Sideband Extraction)

### マイケルソン干渉計に鏡を追加

- 腕に ITM : 基線長3kmの Fabry-Perot共振器を構成.
- 入射部に PRM : 干渉計内の光量を増大させる.
- 出射部に SEM : 干渉計ないから信号成分を取り出す.

## •RSE方式の利点

- 信号のキャンセルを避けつつ、**大光量**を腕共振器に蓄えることが可能.
- 鏡基材を透過する光量を相対的に低減.  
→ **鏡の冷却にとって必須.**
- 観測周波数帯が変更可能.  
→ **観測対象に応じて最適化が可能.**



# 干渉計の開発研究

TAMA300および プロトタイプ干渉計による豊富な経験と実績.

- TAMA300の動作・長時間観測運転

- PRFPMI方式での動作.

- **第1世代干渉計としての実績.**

- 2000-2002年 世界最高感度

- 3000時間を超える観測データの蓄積

TAMA300



- プロトタイプ干渉計によるRSE方式の研究

- NAOJ 4m干渉計, Caltech 40m干渉計

- ⇒ **RSE干渉計の安定動作の実現.**

- RSEの原理を実証.

- (信号成分の取り出し, 観測帯域の調整)

- ⇒ **RSE干渉計技術は確立されている.**

- シミュレーション等を用い, 光学設計・制御性設計進行中.

4m RSE prototype at NAOJ

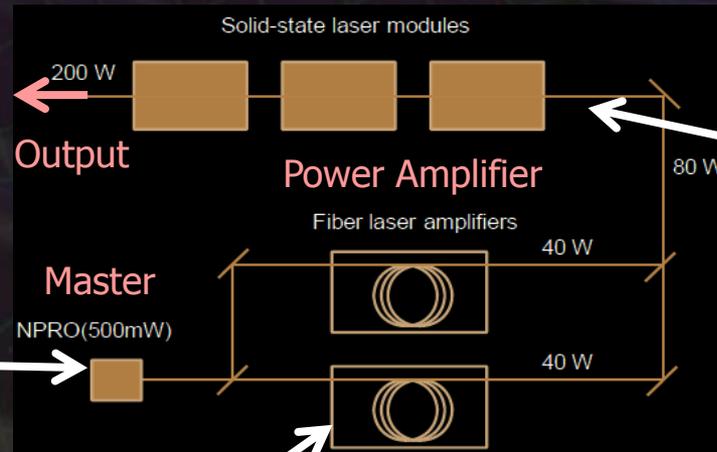


# レーザー光源

干渉計内の光量を増加させるためには、  
高出力レーザー光源と低光損失鏡が必要。

- LCGT用の光源：出力180WのNd:YAGレーザー  
MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 方式

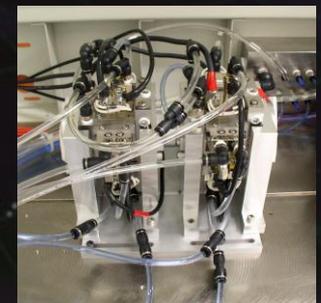
マスターレーザー  
Nd:YAG, 500mW  
NPRO方式固体レーザー



ファイバーアンプ  
市販モジュール 40W  
単モード, 偏波面保存



固体レーザーアンプ  
市販モジュール 50W  
側面励起方式



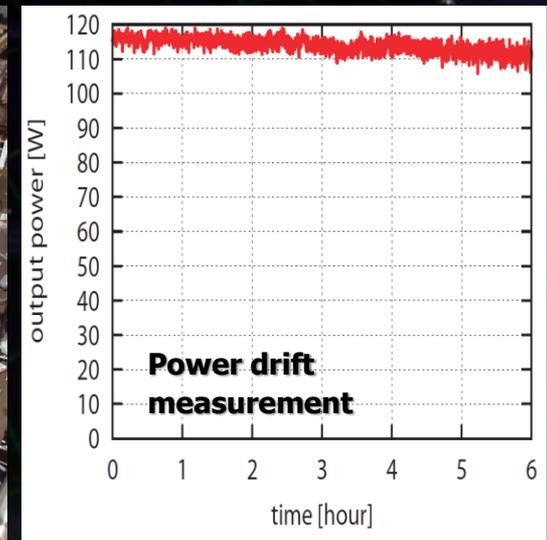
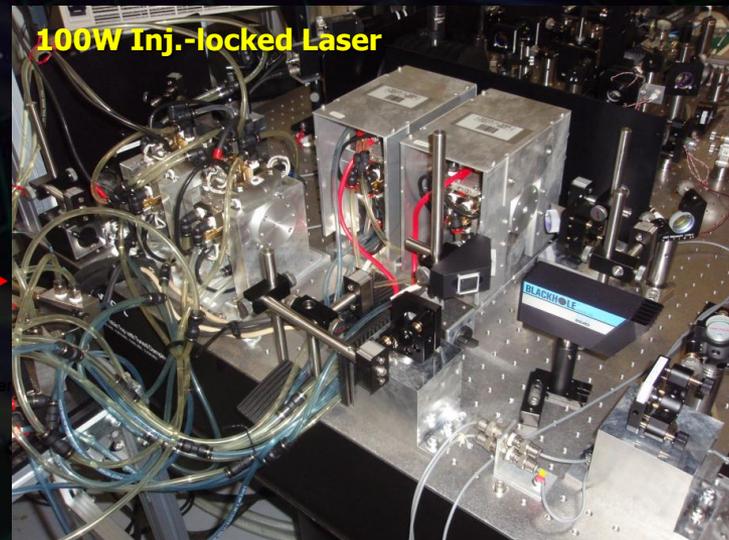
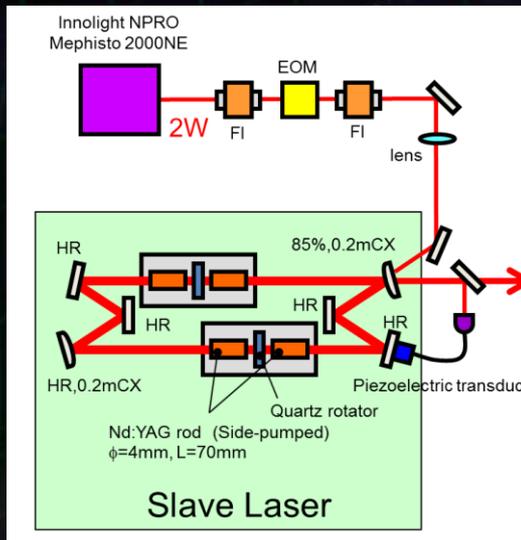
# 高出力光源の開発

## 100Wレーザープロトタイプの開発・試験 (東京大・新領域)

### ・固体レーザーモジュール 2台により注入同期レーザー

- 長時間安定動作を確認, 出力光の品質評価.
- 外部共振器レファレンスを用いた周波数安定化 → 要求値を満たす.
- 強度安定化実験 → 制御性を確認.

⇒ 基本特性を確認. 実機の手配進行中.



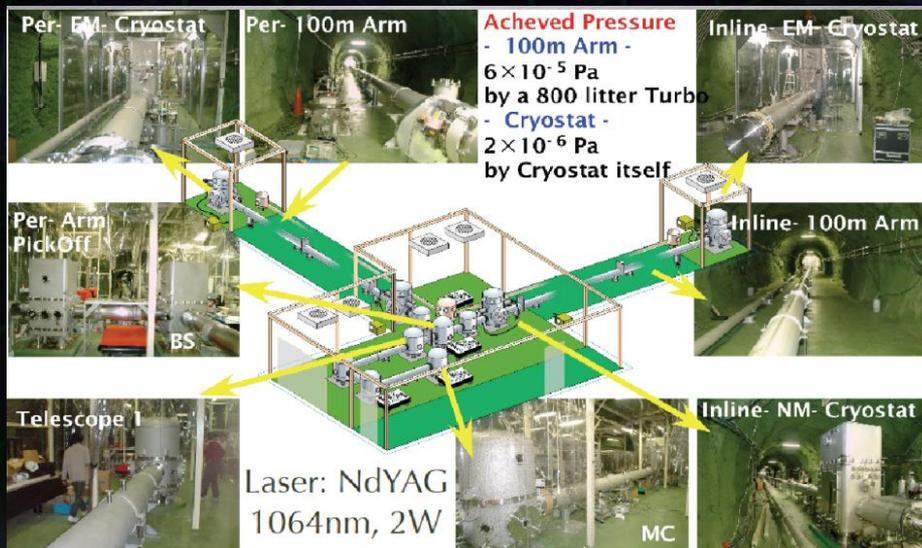
# 低温干渉計の動作実証

- CLIO --- 基線長100mの低温干渉計
  - 神岡の地下サイトに設置されている
  - 鏡・振り子を約16Kまで冷却した状態で動作。  
サファイヤ鏡, 低温懸架装置, 低雑音冷凍機など。

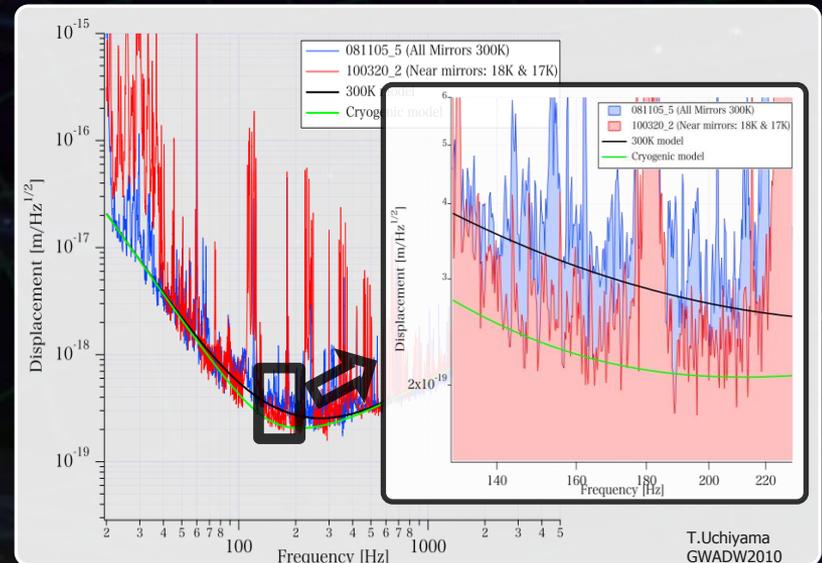
低温工学・超電導学会誌  
「低温工学」7月号でLCGT特集

⇨ 冷却運転時に感度の向上を確認。  
低温干渉計の動作実証を達成。

詳細は宮川氏講演にて。



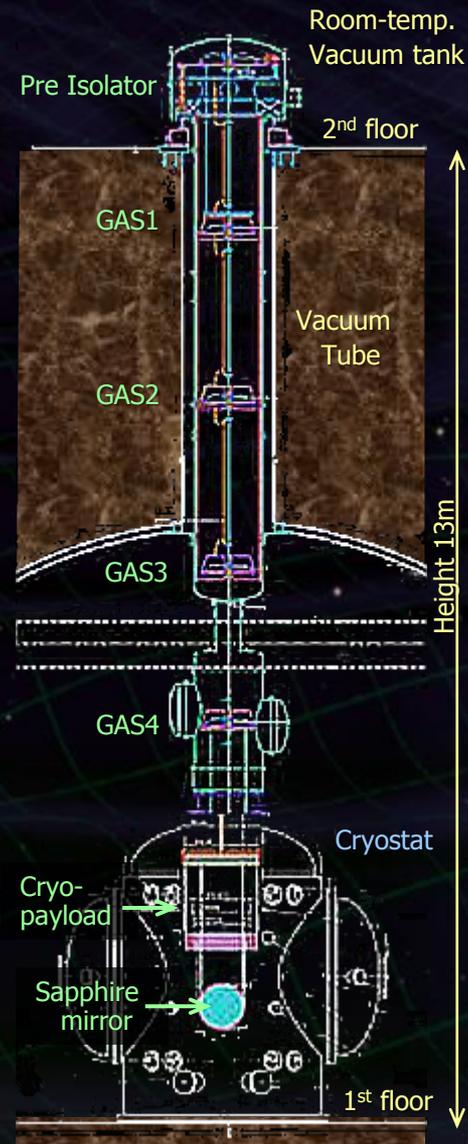
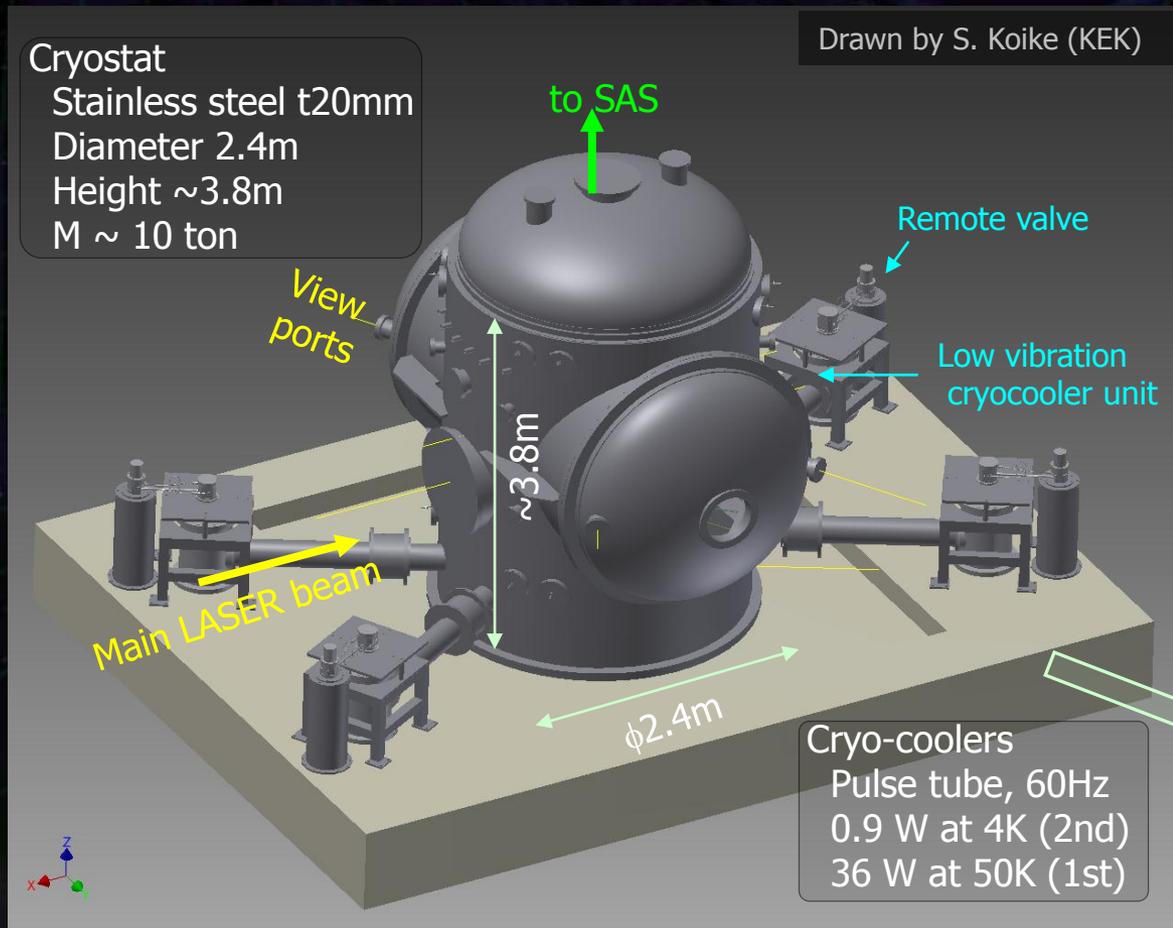
CLIO : 100-m cryogenic interferometer



T.Uchiyama  
GWADW2010

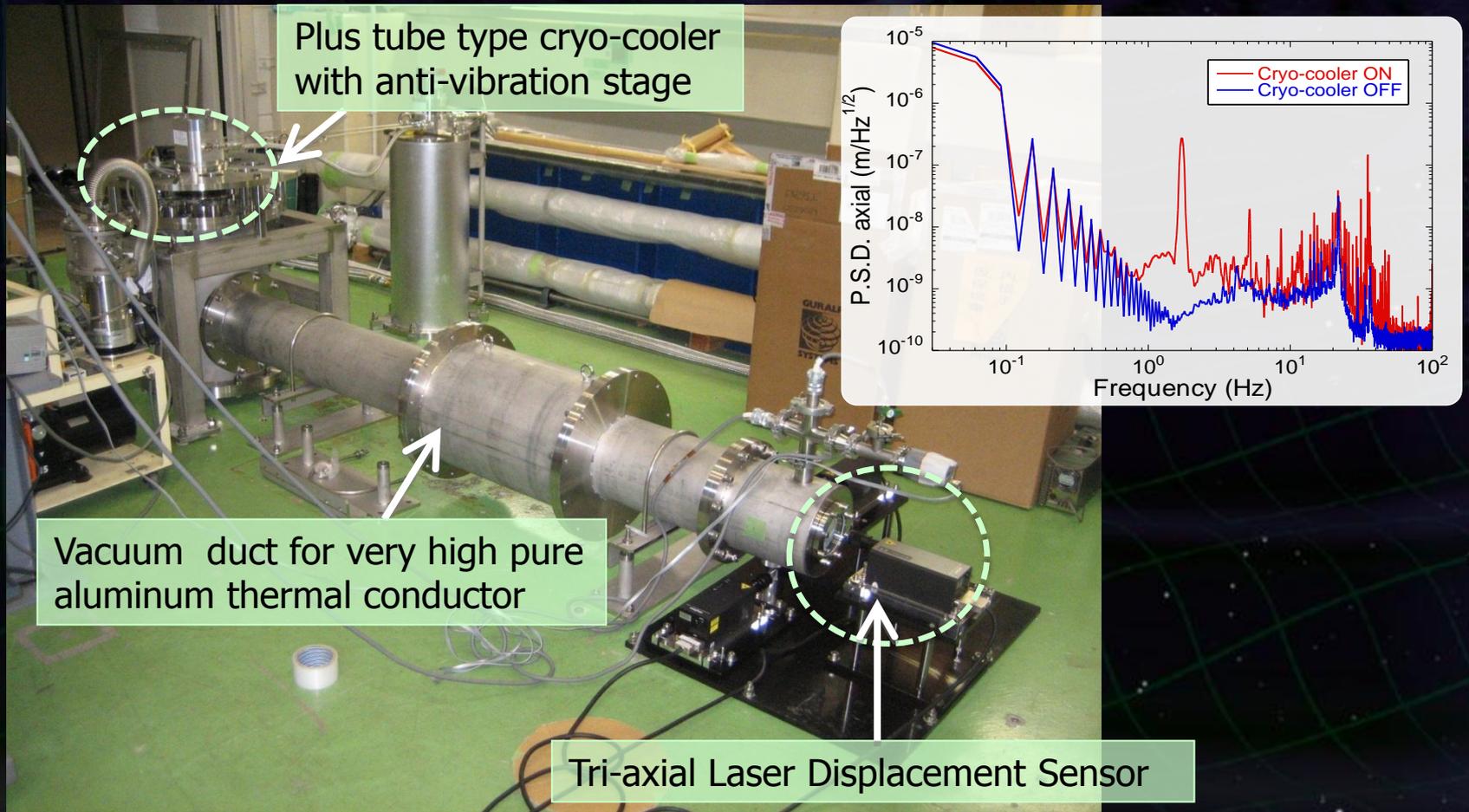
# クライオスタット

- 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.



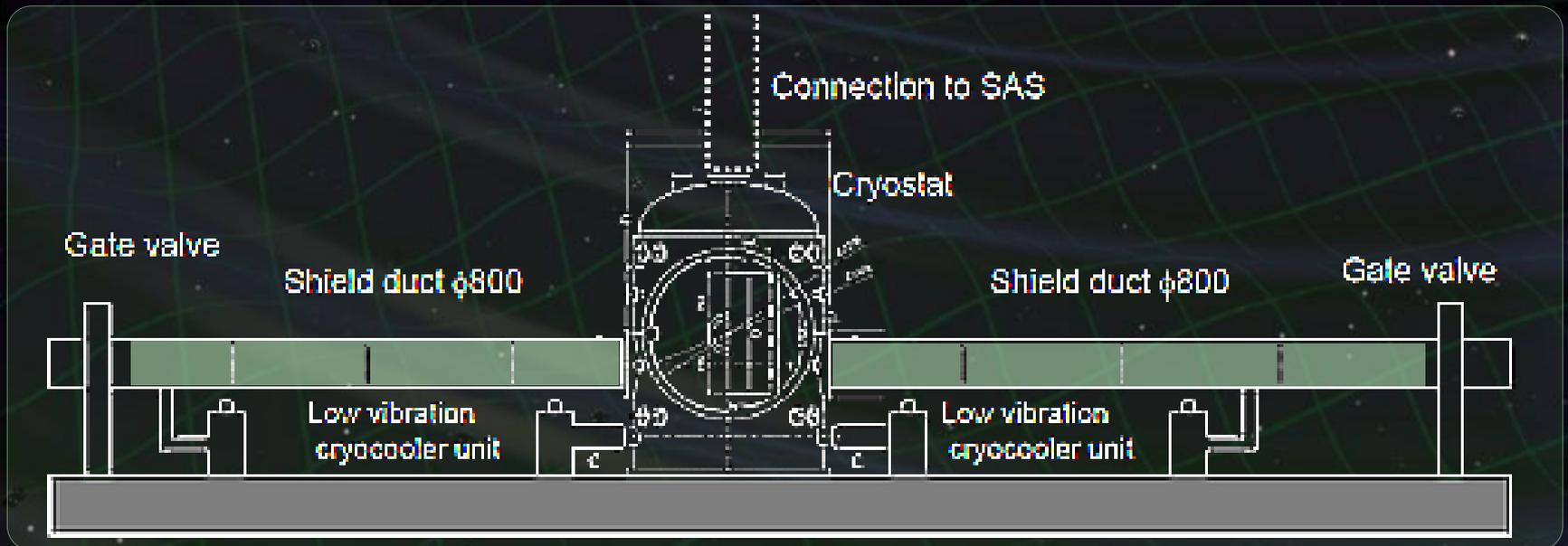
# 低振動冷凍機

- 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.



# シールドダクト

- 光軸方向 (3kmダクト部) からの熱流入を低減するための輻射シールド.
  - CLIOを用いた評価結果をもとに設計.
    - バッフル・シールド内面処理などの詳細検討進行中.
    - シミュレーション等による評価 (ICRR).
- ⇨ 2012年度より実機試験.



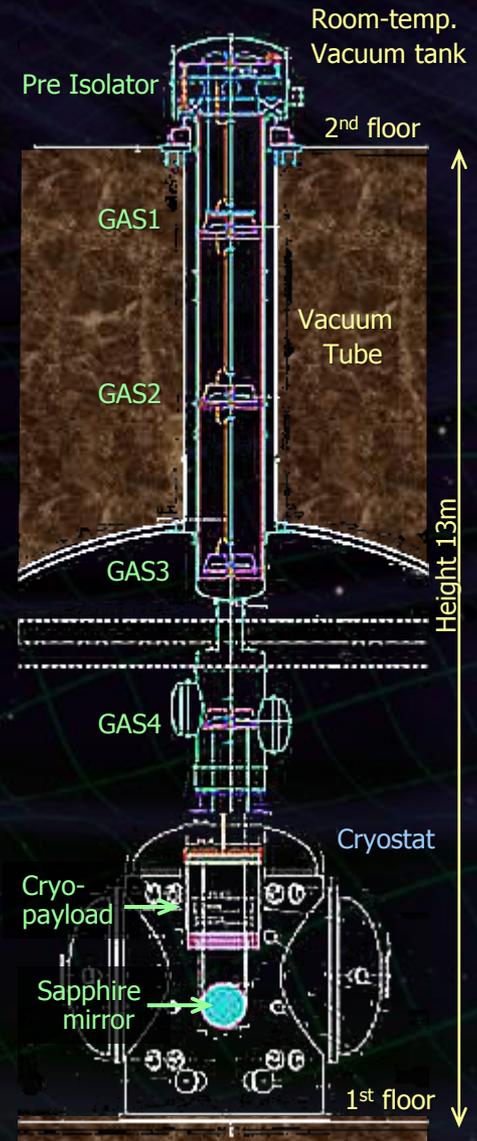
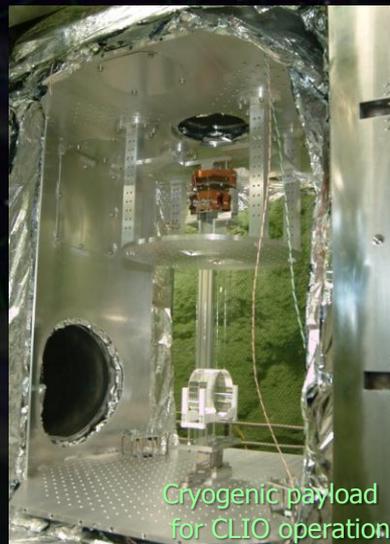
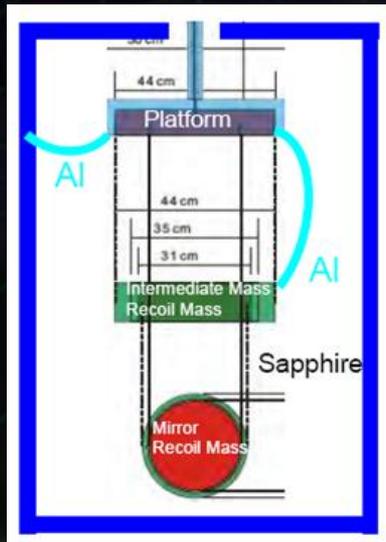
# 低温ペイロード

## •これまでの干渉計での実績を用いて設計.

- CLIO : サファイヤ鏡, 熱伝導系の設計.
- TAMA300 : 防振特性, 制御用アクチュエータ構成.

## •設計と評価試験.

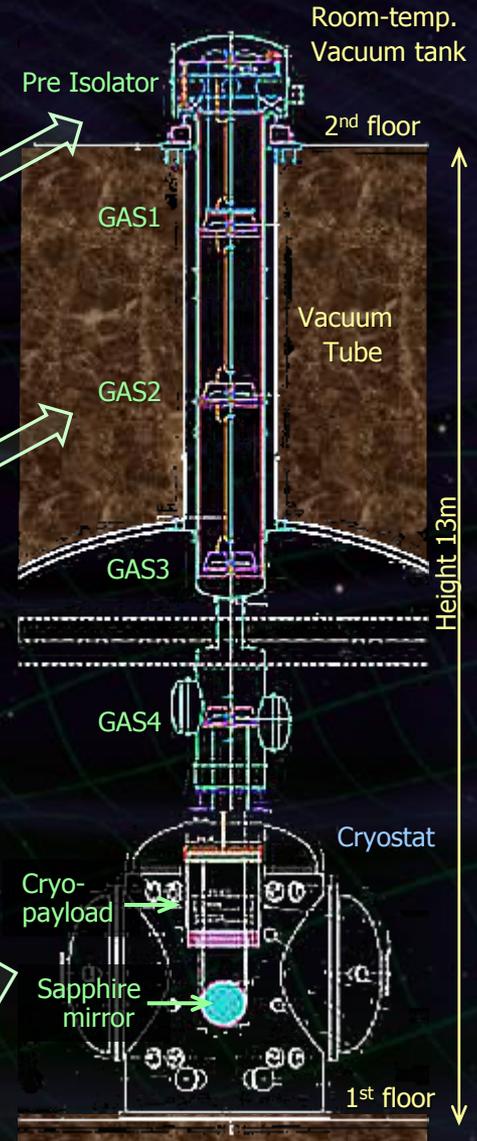
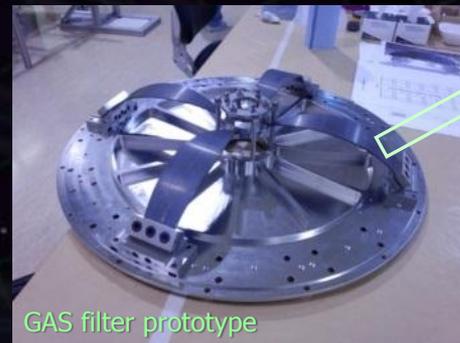
- 熱設計 – 有限要素法シミュレーション (KEK, ICRR)
- サファイヤファイバー懸架 (KEK, U-Tokyo)
- コーティングの熱雑音 (ICRR, KEK)



# 試験マス防振系

- TAMA300に導入された TAMA-SASをもとに設計.  
→ シミュレーションにより防振性能・低周波安定性など評価.

- 構成要素のプロトタイプ試験進行中.
  - Pre-isolator (ICRR)
  - 常温ペイロード (NAOJ)



• 2012年度よりTAMAサイトで Type-B SAS 防振系 (常温用) の総合プロトタイプ試験.

# 干渉計制御・データ取得系

## ・デジタルシステム

- 干渉計の制御とデータの取得・記録.

ADC/DAC, アナログフロントエンドを備えたデジタル制御系をネットワーク接続.

Fast loop : 16 kHz, 64channel

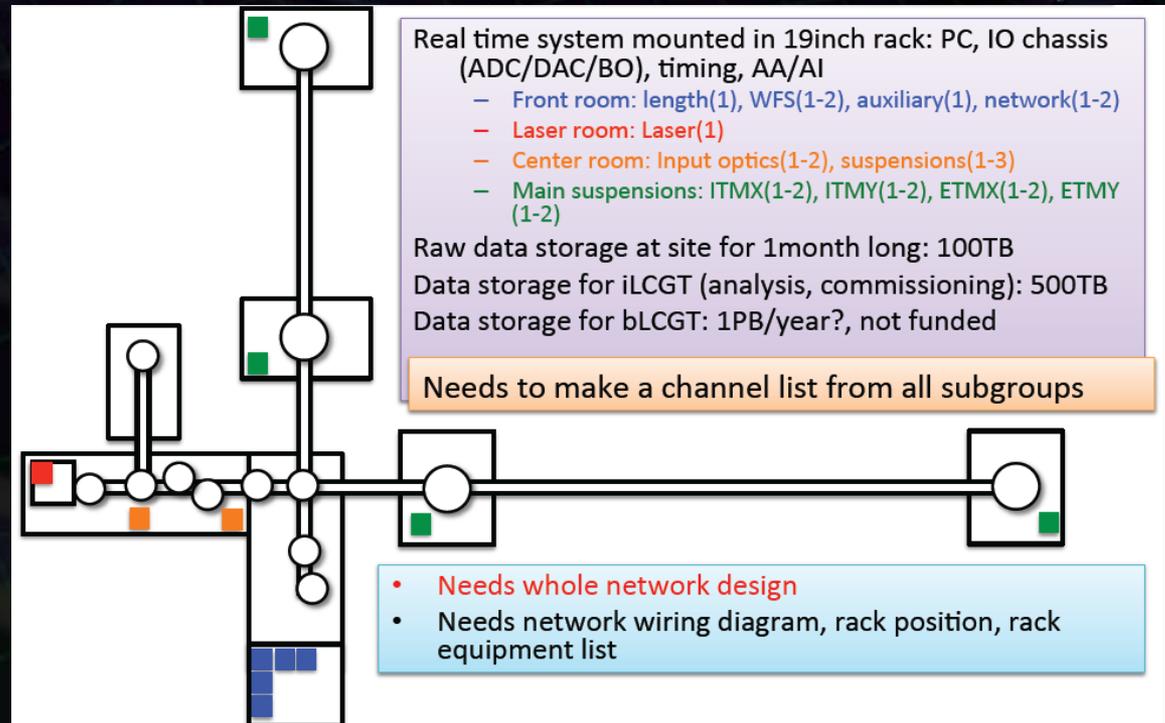
- aLIGOと同等のシステム

→ LIGOの協力のもとCLIOで実証試験.

今年度中に5セットを調達.



Digital system installed to CLIO

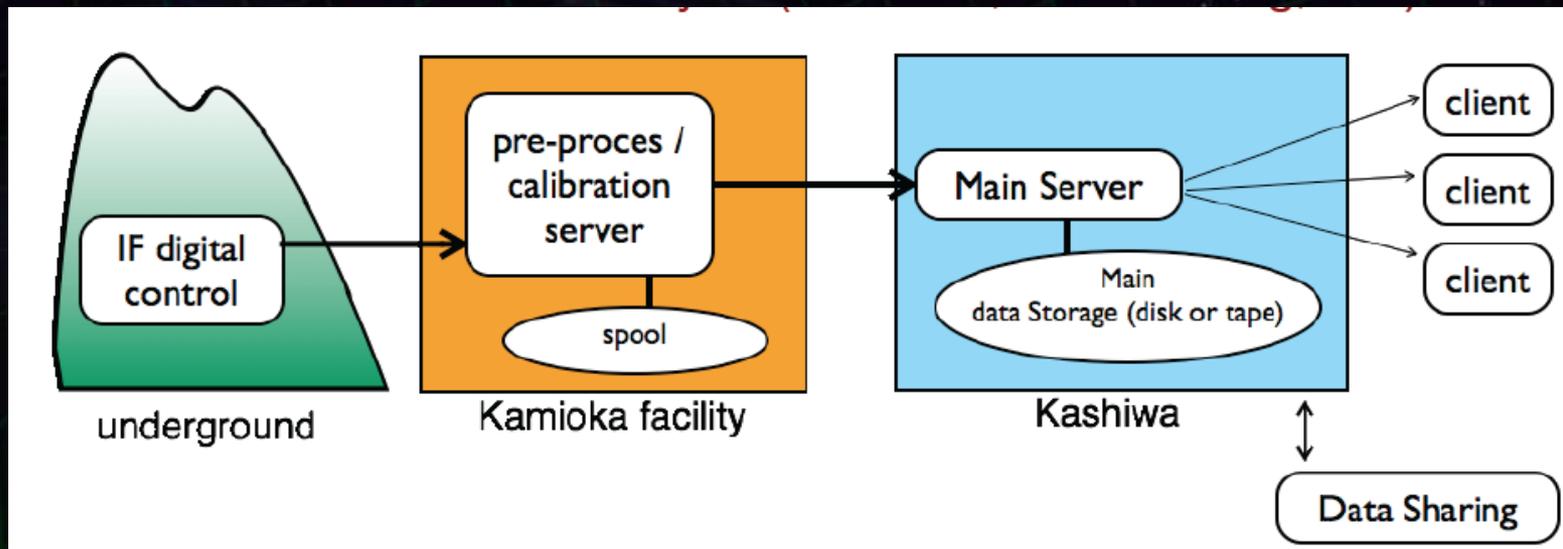


# データ処理・解析

## •データの記録と分配

- データ取得系：干渉計制御システムと統合.
- 神岡施設で、前処理とスプール.
- 宇宙線研究所でデータの保管と解析.
- 国際協力体制については、議論中.

データレート : 70 GByte/hour  
計算処理能力 : 数 TFlops.  
記録容量 : 30 PByte

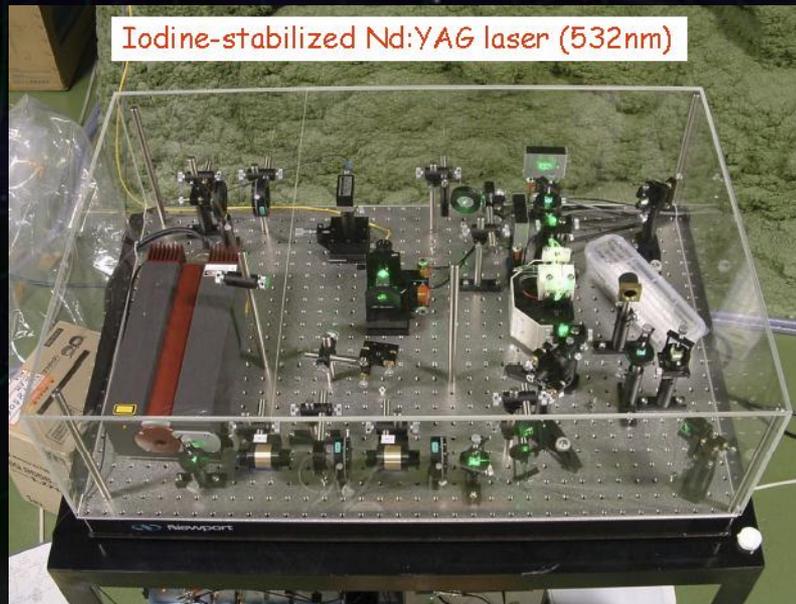


Computing platform and Network

# 地殻歪み干渉計

## ・地殻歪み観測用の干渉計型.

- LCGTの腕に沿って設置, 基線長 1.5 km
- 光源 : ヨウ素吸収線を用いて周波数安定化.
- 歪み感度 :  $10^{-13}$



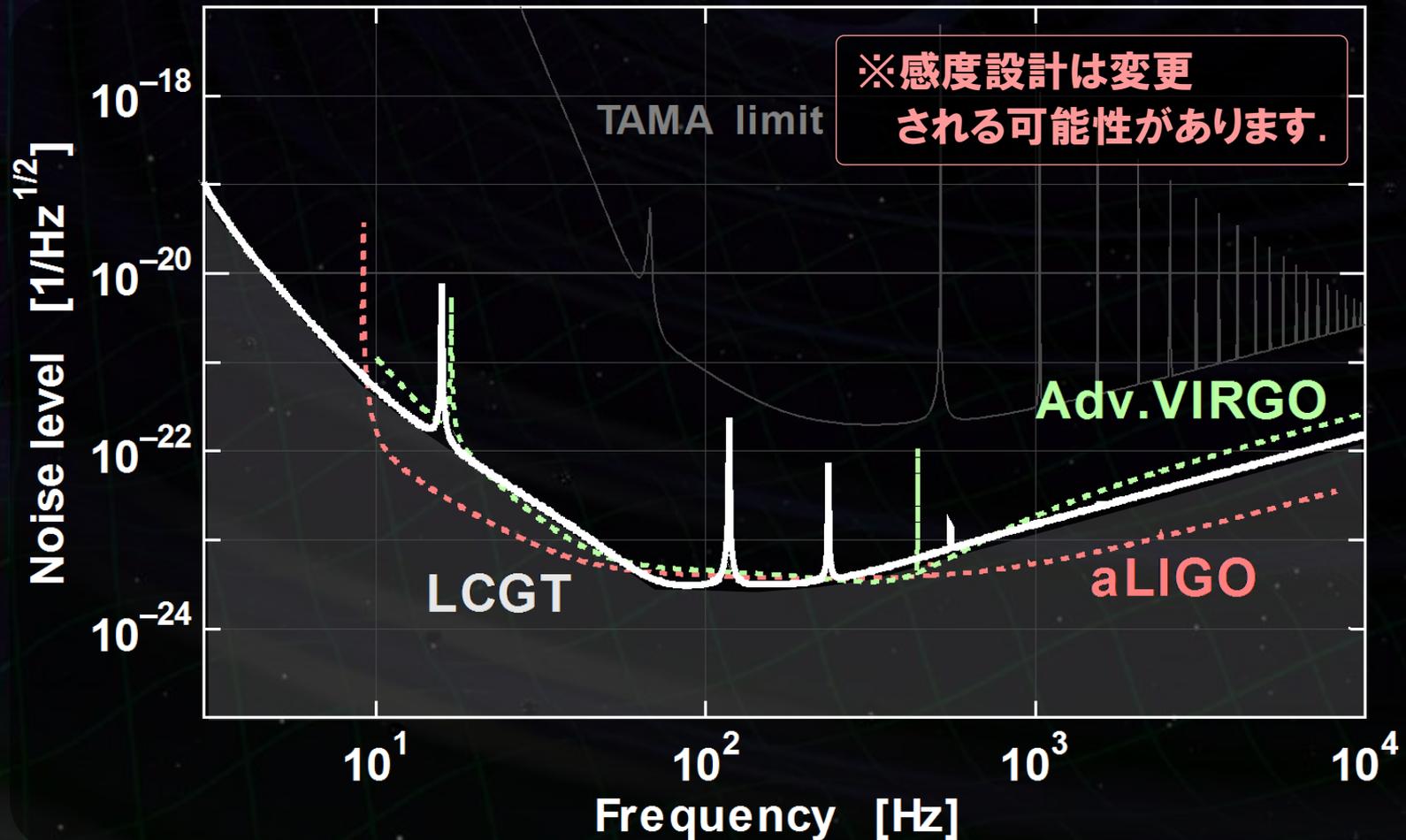
# まとめ

# LCGTの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度  
aLIGO や Ad.VIRGOと同等



国際観測網を形成  
年間数回以上の重力波信号検出



# 海外望遠鏡との比較

	2 <sup>nd</sup> -generation detectors		3 <sup>rd</sup> generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	LCGT	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2017	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 Kamioka 1台	地下 3台
基線長	4 km	3 km	3 km	10 km
観測レンジ (*1)	306 Mpc	243 Mpc	273 Mpc (*2)	3 Gpc
干渉計方式	RSE広帯域	RSE狭帯域	RSE可変帯域	RSE Xylophone
熱雑音の低減	大ビーム径, 低機械損失鏡 熱レンズ効果の補正		低温化	低温化
防振系	能動防振系	受動防振系	受動防振系	受動防振系

(\*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

(\*2) 現在、設計の更新作業が進められており, 変更の可能性はある。

# まとめ

## LCGT : プロジェクトが始まった

- 観測可能距離 200Mpc以上 → 年間数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

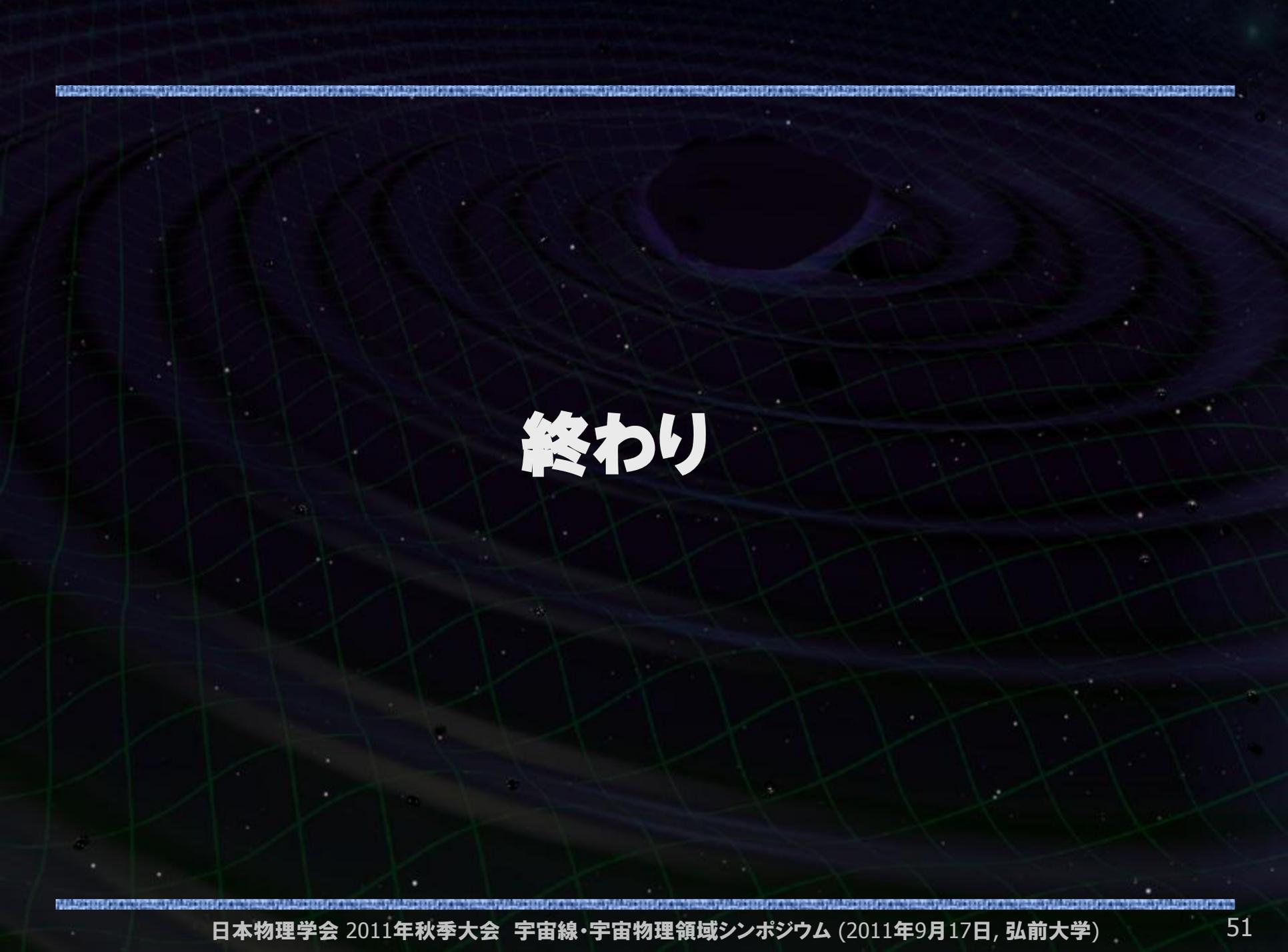
⇒ 重力波天文学の分野を切り開く.

- LCGT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**